

複製禁止

「生活支援ロボット実用化プロジェクト」

事業原簿

公開部

担当部	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 ロボット・機械システム部
-----	---

目次

I 事業の位置づけ・必要性について	I-1
1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性	I-1
1.1 NEDO が関与することの意義	I-1
1.2 実施の効果(費用対効果)	I-2
2. 事業の背景・目的・位置づけ	I-2
2.1 事業の背景	I-2
2.2 政策への適合性	I-4
2.3 国のプログラムとの関連性	I-4
2.4 研究開発の目的	I-5
II 研究開発マネジメントについて	II-1
1. 事業の目的	II-1
1.1 最終目標(平成 25 年度)	II-1
1.2 中間目標(平成 23 年度)	II-1
2. 事業の計画内容	II-1
2.1 研究開発の内容	II-1
2.2 研究開発の実施体制	II-15
2.3 研究開発の運営管理	II-20
2.4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性	II-21
3. 情勢変化への対応	II-21
4. 中間評価結果への対応	II-23
5. 評価に関する事項	II-27
III 研究開発成果について	
1. 事業全体の成果	III-0
2. 研究開発項目毎の成果	
2.1 研究開発項目① 生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発 【(一財)日本自動車研究所、(独)産業技術総合研究所、(独)労働安全衛生総合研究所、 名古屋大学、(一財)日本品質保証機構、日本認証(株)、(一社)日本ロボット工業会、 (一財)製造科学技術センター】	III-1
2.2 研究開発項目② 安全技術を導入した移乗・移動支援ロボットシステムの開発 【パナソニック(株)、国立障害者リハビリテーションセンター】	III-2
2.3 研究開発項目③ 安全技術を導入した配送センター内高速ビークルシステムの開発 【(株)ダイフク】	III-3-1
2.4 研究開発項目③ 安全技術を導入した配送センター内のフォーク型物流支援ロボットの開発 【(株)日立産機システム、(株)日立製作所】	III-3-2
2.5 研究開発項目④ 安全技術を導入した人間装着型生活支援ロボットスーツ HAL の開発 【CYBERDYNE(株)、筑波大学】	III-4-1
2.6 研究開発項目④ 安全技術を導入した歩行アシストの開発 【(株)本田技術研究所】	III-4-2
2.7 研究開発項目⑤ 搭乗型生活支援ロボットにおけるリスクアセスメントと安全機構の開発 【トヨタ自動車株式会社】	III-5-1
2.8 研究開発項目⑤ 搭乗型生活支援ロボットにおけるリスクアセスメントと安全機構の開発 【独立行政法人国立長寿医療研究センター】	III-5-2
2.9 研究開発項目⑤ 安全要素部品群と安全設計に基づく搭乗型移動ロボットの開発 【アイシン精機株式会社、日本信号株式会社、オプテックス株式会社、株式会社ヴィッツ、 学校法人千葉工業大学】	III-5-3
2.10 研究開発項目⑤ 屋外移動支援機器における安全エンジニアリング技術の研究開発 【IDEC株式会社(共同実施先:大阪大学)】	III-5-4

IV 実用化の見通しについて.....(非公開部)
別に作成

添付資料

- ・添付資料1 ロボット新機械イノベーションプログラム基本計画
- ・添付資料2 生活支援ロボット実用化プロジェクト基本計画
- ・添付資料3 事前評価書
- ・添付資料4 特許論文リスト

概要

最終更新日

平成26年8月25日

プログラム（又は施策）名	ロボット・新機械イノベーションプログラム						
プロジェクト名	生活支援ロボット実用化プロジェクト	プロジェクト番号	P09009				
担当推進部/担当者	ロボット・機械システム部 菅原 淳（平成25年4月～平成26年9月現在） 機械システム部 貞本敦史（平成23年1月～平成25年3月） 機械システム部 宮川豊美（平成21年8月～平成22年12月）						
0. 事業の概要	我が国では、少子高齢化が急速に進展しており、このままでは我が国の社会を支える人材が不足することが懸念されている。一方、我が国は、産業用ロボットをはじめ、国際的にもトップレベルのロボット技術を蓄積してきた。これらのロボット技術を活用して、製造業の生産工程やサービス業の作業工程における一層の効率化・自動化の促進が必要となっている。また、ロボット技術は産業分野のみならず、介護・福祉、家事、安全・安心等の生活分野においても、社会的課題の解決策の一つとして活用することが期待されており、生活支援ロボットの活用により、生活の質や利便性向上が可能となる。しかしながら、不特定多数の人が関与する等、条件や状況が変化する実際の使用環境下で稼働する生活支援ロボットは、対人安全技術が確立されておらず残留リスクの高いものが多く、民間企業の独自の取組のみに委ねては本格的な産業化が期待できない。このため、国等の一定の関与により、安全性検証を行う認証機関・試験機関、安全性基準に関する国際標準等を整備することが求められている。本プロジェクトは、生活支援ロボットとして産業化が期待されるロボットを対象に関係者が密接に連携しながら安全に係る試験を行い、安全性等のデータを取得・蓄積・分析し、具体的な安全性検証手法の研究開発を実施することを目的とする。						
I. 事業の位置付け・必要性について	不特定多数の人が関与する等、条件や状況が変化する実際の使用環境下で稼働する生活支援ロボットは、対人安全技術が確立されておらず残留リスクの高いものが多く、民間企業の独自の取組のみに委ねては本格的な産業化が期待できない。このため、国等の一定の関与により、安全性検証を行う認証機関・試験機関、安全性基準に関する国際標準等を整備することが求められている。						
II. 研究開発マネジメントについて							
事業の目標	生活支援ロボットのリスクアセスメント手法を確立し、生活支援ロボットの開発者に提供可能となること。対人安全性に関する指標、機械・電気安全、機能安全の試験・評価方法や手順について、国際標準提案を行えること。生活支援ロボットに関する安全性基準適合性評価手法を確立すること。研究開発の対象とした生活支援ロボットに関して、安全性検証のための安全性試験を完了し、ロボット安全性試験項目の評価基準値がすべて示され、実証試験が完了していること。						
事業の計画内容	主な実施事項	H21fy	H22fy	H23fy	H24fy	H25fy	
	生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発	→					
	安全技術を導入した生活支援ロボットの研究開発	→					
	安全技術を導入した生活支援ロボットの研究開発（グループⅡ）			→			

開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載)(単位:百万円) 契約種類: ○をつける	会計・勘定	H21fy	H22fy	H23fy	H24fy	H25fy	総額
	一般会計	1600	1525	1150	1350	940	6565
	特別会計 (電源・需給の別)						
	加速予算 (成果普及費を含む)		840				
	総予算額	1600	2365	1150	1350	940	7405
開発体制	経産省担当原課	製造産業局産業機械課					
	プロジェクトリーダー	独立行政法人 産業技術総合研究所 知能システム研究部門 研究部門長 比留川 博久					
	委託先(*委託先が管理法人の場合は参加企業数および参加企業名も記載)	<p>【H21~H25】 (独)日本自動車研究所、(独)産業技術総合研究所、(独)労働安全衛生総合研究所、名古屋大学、(一財)日本品質保証機構、日本認証(株)、(社)日本ロボット工業会、(財)製造科学技術センター、パナソニック(株)、国立障害者リハビリテーションセンター、CYBERDYNE(株)、筑波大学、トヨタ自動車(株)、(独)国立長寿医療研究センター</p> <p>【H21~H23】 富士重工業(株)、総合警備保障(株)、北陽電機(株)、三菱電機特機システム(株)、(株)フォー・リンク・システムズ</p> <p>【H23~H25】 (株)ダイフク、(株)日立産機システム、(株)日立製作所、(株)本田技術研究所、アイシン精機(株)、日本信号(株)、オプテックス(株)、(株)ヴィッツ、千葉工業大学、IDEC(株)</p>					

<p>情勢変化への対応</p>	<p>■平成23年度末、総合警備保障(株)、北陽電機(株)、三菱電機特記システム(株)のコンソ、及び(株)フォーリンクシステムが、本プロジェクトを卒業。警備ロボットや安全回路に関し、技術開発の目処がたったため。</p> <p>■平成23年度末、富士重工業(株)の掃除ロボットについては研究開発に目処がつきプロジェクトを卒業した。</p> <p>■行政公開プロセス(仕分け)</p> <p>【平成24年】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・研究開発項目①～⑤の中で、より公共性の高い①に対し予算を重点的に割り振ると。 ・研究開発項目②～⑤に関しては、各タイプのロボットについて、パイロットスディーを行いリスクアセスメントを完成させ、①が行う各タイプの認証スキーム開発に協力すること。これに関して予算を重点的に使い、企業固有の問題については、各企業の負担で開発すること。 <p>⇒平成25年度予算の割り振りで、上記意向を反映。</p> <p>【平成25年】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・安全標準については幅広い知見を募るため、オープンに議論していくこと ・国内試験機関が海外のロボットの安全試験を請け負える環境を整備すること ⇒講演会、セミナー、国際学会での発表で、国内外にアピール。海外案件も検討中。 	
<p>中間評価結果への対応</p>	<p>Ⅱ-4に記載</p>	
<p>評価に関する事項</p>	<p>事前評価</p>	<p>平成21年度 2月実施</p>
	<p>中間評価</p>	<p>平成23年度 8月実施</p>
	<p>事後評価</p>	<p>平成26年度 9月実施</p>

<p>Ⅲ. 研究開発成果について</p>	<p>(1) 研究開発の概要 生活支援ロボットとして産業化が期待されるロボットを対象に関係者が密接に連携しながら安全に係る試験を行い、安全性等のデータを取得・蓄積・分析し、具体的な安全性検証手法の研究開発を実施することを目的とする。 生活支援ロボットの安全性検証手法の開発と安全技術を導入した生活支援ロボットの開発を行う。</p> <p>(2) 研究開発目標 (最終目標) 平成25年度 生活支援ロボットのリスクアセスメント手法を確立し、生活支援ロボットの開発者に提供可能となること。対人安全性に関する指標、機械・電気安全、機能安全の試験・評価方法や手順について、国際標準提案を行えること。生活支援ロボットに関する安全性基準適合性評価手法を確立すること。 研究開発の対象とした生活支援ロボットに関して、安全性検証のための安全性試験を完了し、ロボット安全性試験項目の評価基準値がすべて示され、実証試験が完了していること。</p> <p>(中間目標) 平成23年度 生活支援ロボットのリスクアセスメント手法を開発するとともに、人間工学実験等による対人安全性に関するデータをロボット開発実施者に提供すること。研究開発の対象とした生活支援ロボットの機械・電気安全、機能安全等に必要な試験装置を開発し、ロボット安全性試験項目、各タイプのロボットの試験・評価方法や手順の策定を行うこと。これらに基づき、対象としたロボットの安全性検証を完了していること。</p> <p>(3) 研究開発成果(中間目標に対する成果) 生活支援ロボットのリスクアセスメント手法を開発し、ロボット開発実施者に提供した。開発対象ロボットの試験装置を開発し、ロボット安全性試験項目、各タイプのロボットの試験・評価方法や手順の策定を行った。これらに基づきロボットの安全性検証を完了させる見込みである。</p> <table border="1" data-bbox="422 1097 1401 1254"> <tr> <td>投稿論文</td> <td>「査読付き」141件、「その他」53件</td> </tr> <tr> <td>特許</td> <td>「出願済」40件</td> </tr> <tr> <td>その他の外部発表 (プレス発表等)</td> <td>1687件</td> </tr> </table>	投稿論文	「査読付き」141件、「その他」53件	特許	「出願済」40件	その他の外部発表 (プレス発表等)	1687件
投稿論文	「査読付き」141件、「その他」53件						
特許	「出願済」40件						
その他の外部発表 (プレス発表等)	1687件						
<p>Ⅳ. 実用化の見通しについて</p>	<p>1. 安全性検証手法の開発(開発項目①) 1) リスクアセスメント手法を確立 2) 機械・電気安全、機能安全等ロボットの安全性試験評価方法を確立 3) 生活支援ロボットの安全性基準に関する適合性評価手法を確立 4) 生活支援ロボットの安全性に関する情報の蓄積・提供手法を作成 5) 国際標準化</p> <hr/> <p>→・国際標準 ISO13482 を2014年2月に正式発行。 ・ロボット開発者へ手法の提供を開始 ・認証事業を開始 ・安全検証センターの「受託試験・研究」を開始</p> <p>2. 安全技術を搭載した生活支援ロボットの開発(開発項目②～⑤) →・提供された安全性検証手法を元に、安全性検証と安全技術の改良を行った。 ・すべてのロボットに関し安全性の実証試験を実施 ・第三者認証を取得 ISO13482: パナソニック(株)「リショーネ」、 (株)ダイフク「エリア管理システム」 ISO/DIS13482: CYBERDYNE(株) ロボットスーツ HAL ・安全技術を導入し、安全性検証を実施したロボットを市場に供給開始。 パナソニック(株)「リショーネ」、CYBERDYNE(株) ロボットスーツ HAL など ・本田の歩行アシストに関しては、有償の実証試験を開始(50セット100台を配布) ・富士重工の掃除ロボットは、CYBERDYNEで事業化検討中。</p>						

	<ul style="list-style-type: none"> ・ダイフクの「エリア管理システム」については、JIS への提言を行っている。 ・日立産機は、安全技術を導入した搬送システム「Lavi」を事業化。 	
V. 基本計画に関する事項	作成時期	平成 21 年 3 月 作成
	変更履歴	平成 22 年 12 月、平成 22 年補正予算（第 1 号）に伴い、研究開発の実施方式の一部内容を改訂。

I 事業の位置づけ・必要性について

1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性

1.1 NEDOが関与することの意義

不特定多数の人が関与する等、条件や状況が変化する実際の使用環境下で稼働する生活支援ロボットは、対人安全技術が確立されておらず残留リスクの高いものが多く、民間企業の独自の取組のみに委ねては本格的な産業化が期待できない。このため、国等の一定の関与により、安全性検証を行う認証機関・試験機関、安全性基準に関する国際標準等を整備することが求められている。

高齢者、要介護者、身体障害者等から、介護者支援、移動支援等の生活支援分野で役立つロボットの活用に強い要請がある。しかし、生活支援分野は人との接触度が高く、より一層の安全性が求められるため、安全の技術や基準・ルールを世界に先んじて整備する必要がある。

生活支援ロボットの実用化については、具体的な対人安全技術や安全性検証手法の確立、ロボット導入に適した規制など、安全に関する技術や社会システムが整理されていないことがボトルネックとなっている。また、過度な安全基準や規制は、ロボットの有効性が極端に損なわれたり、ロボットの開発コストが著しく増加するなど実用化の阻害要因となる。

このため、ニーズの高い具体的な生活支援ロボットを、中立的機関が実証試験において安全データを収集・分析し、メーカー・ユーザー・サービスプロバイダーが協力しながら適切な安全基準・検証手法を開発、さらに関係省庁と連携し、制度検討の必要がある。

このように、ユーザー、サービスプロバイダー、安全検証の専門家、関係省庁も一体となった体制は、個別企業では構築できず、関係者とのネットワークを有する経済産業省が実施する必要がある。

また、欧州のロボット工学プラットフォーム（EUROP）や欧州各国による産学協同の研究開発体制づくり、米国の国防総省国防高等研究事業局によるトップダウンの産学連携、韓国のロボットに関する品質保証機関やロボット産業振興院の設置など、各国で生活支援ロボットの実証データの蓄積、安全規格、社会ルール等の環境整備が加速されている。さらに、ISOにおいては安全基準についての議論も進展している。

また、欧州の認証機関やその関連企業では、基準策定の段階からメーカーと検討をすすめ、結果的に構築した基準や認証制度が市場での自国の優位性が確保される形になっている。また、他国から製品の認証を依頼する場合、製品の技術情報を含む設計情報を認証機関に提出する必要があることから、技術ノウハウの流出につながることを懸念されている。

さらに対人安全性に比較的問題が無いと考えられている福祉用ロボット（知能システム「パロ」等）が、デンマークの医療・福祉現場で実証試験を行う事例が出始めており、他国への技術流出が懸念され、国内に同様のロボットの実証試験の場が求められている。

したがって、我が国における生活支援ロボットの実用化を早め、我が国の強みであるロボット産業の国際競争力強化・海外市場開拓のため、安全性の確保されたロボットの実証試験の拡充及び事業の早期実施が必要である。

技術戦略マップ 2010（ロボット分野）においては、「介護者支援や移動支援等の人との接触度が高

い生活支援ロボットの実用化のため、対人安全性技術の開発・実証と、安全基準設定等に向けた安全性・有効性データの集約・分析」を行うことと位置づけている。

1.2 実施の効果(費用対効果)

ロボットによる生活支援サービスの付加価値や生産性の向上が関係者で共有されることで、有効性と安全性を両立するようなロボットの活用方策と、そのために必要な制度改革の検討が促される。

また、これまで安全の基準やルールが未整備なために実施困難であった民間企業等による生活支援ロボットの技術開発が加速される。また、ロボットのハードウェアのみだけでなくサービスと複合した産業の発展が波及効果として期待される。

ロボットの市場は、2015年には1.6兆円、2035年には9.7兆円にまでに拡大すると予想される(図I-1)が、実現には本事業により安全の技術や基準・ルールが整備されることが前提となる。

本事業で蓄積される実証データにより国際標準化活動の強化が期待される。

中立的機関が機密情報の管理をしながら実証データの集約・分析を行うことで、民間企業の知見が集約される。

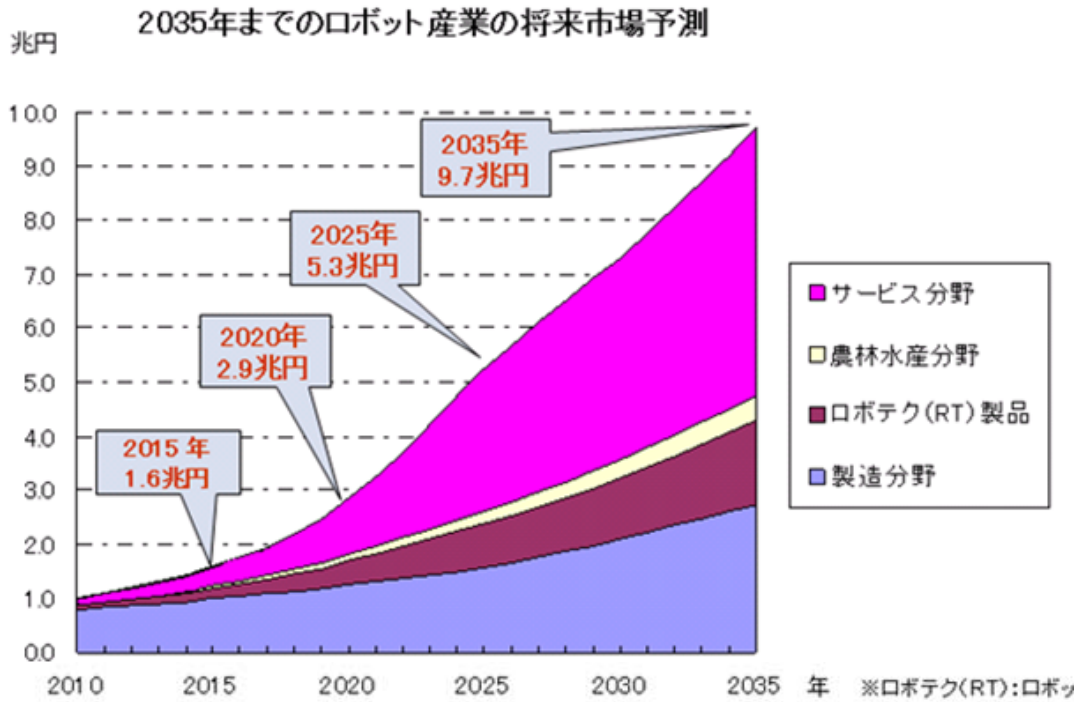
2. 事業の背景・目的・位置づけ

2.1 事業の背景

我が国では、1980年代以降、自動車や電機・電子産業の成長や人手不足を背景に、産業用ロボットの本格的な導入ができた。現在、我が国は、国際的にもトップレベルのロボット技術を有するとともに、生産現場においても、全世界で稼働している産業用ロボットの約4割が日本で稼働している等、自他ともに認める「ロボット大国」といえる。ただし、1990年代以降リーマンショックまで、産業用ロボットの市場規模は緩やかな成長にとどまり、用途も特定の産業分野に限られていた(図I-2)。

しかし、ロボットを巡る状況は、着実に変わりつつある。製造業においては、ロボット・セルのように、さらに高度化した産業用ロボットが生産現場に投入されつつある。また、サービス業の分野においても、2005年の愛知万博では、サービスロボットの実用化に向けた実証実験が行われるとともに、実際のビジネスにおいても、清掃ロボットや食事支援ロボット、災害復旧作業を行う遠隔操作型ロボット等の導入が進んでいる。このように、我が国のロボット産業・技術は、次の成長段階に踏みだしている。

他方、我が国は、少子高齢化・人口減少、アジア諸国の台頭等を背景とした国際競争の激化や、地震や水害等大規模災害に対する不安といった社会的課題に直面している。我が国に蓄積された基盤的なロボット技術(RT)を活用・高度化することにより、これらの諸課題を解決することが期待されている。



出典:平成 21 年度NEDO機械部調査報告書(委託先:三菱総研)

図 I - 1 2035年までのロボット産業の将来市場予測

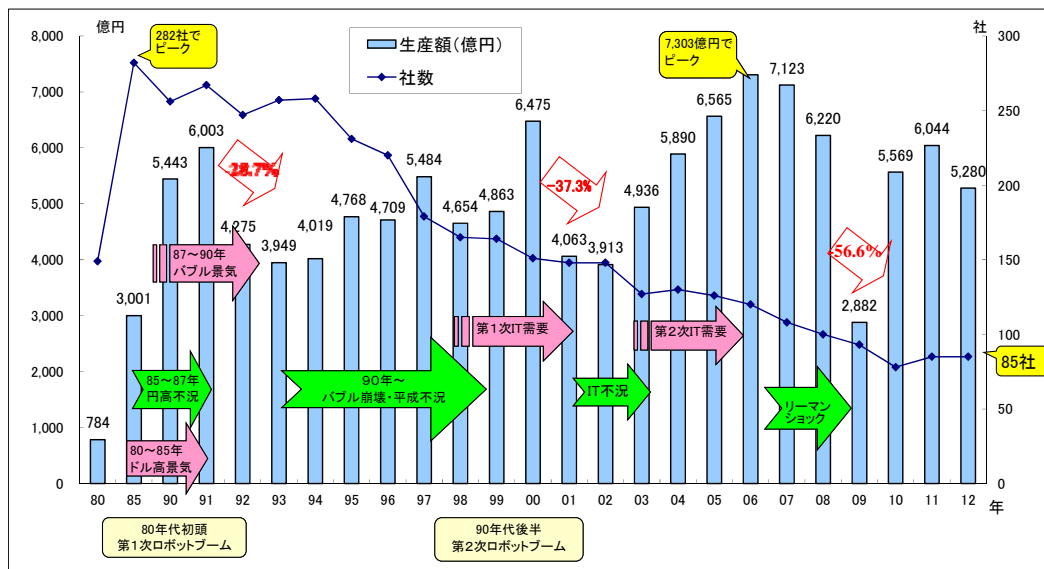


図 I - 2 ロボット出荷台数の推移 (出展:ロボット工業会)

2.2 政策への適合性

「科学技術基本計画」（2006年3月閣議決定）では、ロボット・新機械技術は、特に重点的に研究開発を推進すべき分野（重点推進4分野）の一つである情報通信分野や、推進分野であるものづくり技術分野、社会基盤分野に位置づけられている。

「経済成長戦略大綱」（2006年7月財政・経済一体改革会議。2007年6月改訂版を経済財政諮問会議に報告）の中で、ロボット技術は産学官連携による世界をリードする新産業群の一つとして位置づけられ、次世代ロボットの市場の拡大に向けて、サービスロボット市場の整備、ロボットの認識技術の開発等必要な取組を継続することとしている。

「イノベーション25」（2007年6月閣議決定）では、ロボット・新機械技術は、生涯健康な社会生活や多様な人生を送れる社会の実現に向け、中長期的に取り組むべき課題として、新たな走行車等の普及促進のための環境整備、高度みまもり技術導入のためのルール作りなどの安全・安心な社会形成、また、ユビキタスネットワークや民生用ロボットの本格普及に向けた環境整備、低侵襲診断・治療技術の実現、安全・安心な社会のための将来デバイスの実現、さらに世界的課題解決に貢献する社会のための新しいものづくり技術など、今後の研究開発の進展等によって、その成果を社会に適用していく施策が必要であるとともに、随時見直しをし、その取組を加速・拡充していくことが必要とされている。

「経済財政改革の基本方針2008」（2008年6月閣議決定）では、経済成長戦略の3本の柱、革新的技術創造戦略のうち、革新的技術戦略のひとつとしてロボット技術が位置付けられた。

「ロボット産業政策研究会」報告書（2009年3月とりまとめ）

近い将来に、次世代ロボットが実際に役立つものになるよう、特に技術開発・事業開発、安全確保、社会ルールの整理・策定のための取組等についてまとめられている。

2.3 国のプログラムとの関連性

このような状況を踏まえ「ロボット・新機械イノベーションプログラム」では、我が国の製造業を支えてきたロボット技術・機械技術を基盤とし、IT技術・知能化技術など先端的要素技術との融合を促進することにより、家庭、医療・福祉、災害対応など幅広い分野で活躍する次世代ロボットや新機械技術の開発・実用化を促進し、生産性の向上と人間生活の質の向上を実現するとともに、我が国経済社会の基盤である製造業の競争力の維持・強化を目指している。

このロボット・新機械イノベーションプログラムの中で、「生活支援ロボット実用化プロジェクト」は生活支援分野のロボットを開発し、対人安全技術と安全検証手法の確立を行うと共に、安全性、有効性検証のための実証試験を行う。さらに得られた安全性や有効性に関するデータを集約・分析し、ロボット活用のための具体的安全基準、社会ルール等の環境整備や国際標準化の強化へとつなげる手

法を確立する。

2.4 研究開発の目的

我が国では、少子高齢化が急速に進展しており、このままでは我が国の社会を支える人材が不足することが懸念されている。

一方、我が国は、産業用ロボットをはじめ、国際的にもトップレベルのロボット技術を蓄積してきた。これらのロボット技術を活用して、製造業の生産工程やサービス業の作業工程における一層の効率化・自動化の促進が必要となっている。

また、ロボット技術は産業分野のみならず、介護・福祉、家事、安全・安心等の生活分野においても、社会的課題の解決策の一つとして活用することが期待されており、生活支援ロボットの活用により、生活の質や利便性向上が可能となる。

しかしながら、不特定多数の人が関与する等、条件や状況が変化する実際の使用環境下で稼働する生活支援ロボットは、対人安全技術が確立されておらず残留リスクの高いものが多く、民間企業の独自の取組のみに委ねては本格的な産業化が期待できない。このため、国等の一定の関与により、安全性検証を行う認証機関・試験機関、安全性基準に関する国際標準等を整備することが求められている。

本プロジェクトは、生活支援ロボットとして産業化が期待されるロボットを対象に関係者が密接に連携しながら安全に係る試験を行い、安全性等のデータを取得・蓄積・分析し、具体的な安全性検証手法の研究開発を実施することを目的とする。

また、これらの試験においてはロボット研究開発実施者と安全性検証手法の研究開発実施者が連携し、リスクアセスメント技術、危険予防技術の検討や実際の使用環境下で幅広い参加者による実証試験を集中的に実施する。さらに、生活支援ロボットの安全性基準等の国際標準化を念頭に置きつつ研究開発を進める。

Ⅱ 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

「生活支援ロボット実用化プロジェクト」基本計画で以下のように定めている。

1. 1 最終目標(平成25年度)

生活支援ロボットのリスクアセスメント手法を確立し、生活支援ロボットの開発者に提供可能となること。対人安全性に関する指標、機械・電気安全、機能安全の試験・評価方法や手順について、国際標準提案を行えること。生活支援ロボットに関する安全性基準適合性評価手法を確立すること。研究開発の対象とした生活支援ロボットに関して、安全性検証のための安全性試験を完了し、ロボット安全性試験項目の評価基準値がすべて示され、実証試験が完了していること。

1. 2 中間目標(平成23年度)

生活支援ロボットのリスクアセスメント手法を開発するとともに、人間工学実験等による対人安全性に関するデータをロボット開発実施者に提供すること。研究開発の対象とした生活支援ロボットの機械・電気安全、機能安全等に必要な試験装置を開発し、ロボット安全性試験項目、各タイプのロボットの試験・評価方法や手順の策定を行うこと。これらに基づき、対象としたロボットの安全性検証を完了していること。

2. 事業の計画内容

2. 1 研究開発の内容

上記目標を達成するために、次の5つの研究開発項目について研究開発を実施する。

[委託事業]

研究開発項目① 生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発

研究開発項目② 安全技術を導入した移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットの開発

研究開発項目③ 安全技術を導入した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの開発

研究開発項目④ 安全技術を導入した人間装着（密着）型生活支援ロボットの開発

研究開発項目⑤ 安全技術を導入した搭乗型生活支援ロボットの開発

以下に研究開発項目ごとの研究開発目標を示す。

2. 1. 1 研究開発項目①：生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発

2. 1. 1. 1 研究開発の必要性

生活支援ロボットは少子高齢化の課題に対して大きな支援力になると期待されている。しかし、生活支援ロボットは不特定多数の人が関与する使用環境で稼働することが考えられ、安全を保證する方式が確定していない。特に、対人安全技術が確立されていないため残留リスクの高いものが多く、早急にリスクを低減し安全性を保證する方式を策定することが求められている。このため、本研究開発

項目では生活支援ロボットの安全性や信頼性等のデータの取得・蓄積・分析を行い、具体的な安全性基準を含む実務的な安全性検証手法の策定に必要な技術を開発する。

2. 1. 1. 2 研究開発の具体的内容

(1) 生活支援ロボットの安全性検証方法の開発

生活支援ロボットの安全性を検証するには、まずロボット開発実施者が自らリスクアセスメントを行った後、これに基づいて安全性検証を行う認証機関及び試験機関により客観的に安全性を検証する手順となる。リスクアセスメントに関しては、我が国でいち早く策定された「次世代ロボットのための安全確保ガイドライン」に則り、ISO-12100 に規定されているリスクアセスメントを実行する方針とする。しかし、生活支援ロボットのリスクアセスメントに関しては、本質安全設計のための定量指標等がほとんどなく、社会的にも方法論が確立していない。このため、生活支援ロボットに関するリスクアセスメント手法を開発する。

他方、生活支援ロボットにおける安全性の評価試験方法については、生活支援ロボットの普及のためにはその枠組みを早急に設定する必要がある。機械・電気・機能安全の側面からの試験は既存の関連規格が存在するため、これらを参考に安全性・信頼性等に関するデータを取得・蓄積・分析することにより定める。

① リスクアセスメント手法の開発

生活支援ロボットに関する各応用分野、あるいは使用されるフィールドにおいて標準となるリスクアセスメント手法を開発する。具体的には、まず自動車等の機械安全分野を広く調査し、また必要に応じて適切な装置の開発及び試験体による耐性試験・人間工学実験等を行って、安全性に係わる耐性値をはじめとした対人安全性に関するデータを取得・蓄積・分析する。次に、これらのデータや類似機械の事故やトラブル履歴等の情報の効率的フィードバックが可能なリスクアセスメント手法を開発する。

② 機械・電気安全、機能安全等ロボットの安全性試験評価方法の開発

耐環境試験、電磁環境試験等、生活支援ロボットの機械・電気安全、機能安全の観点における安全性試験評価方法を開発する。そのため、産業用ロボット等の類似機械装置・コンポーネントに関する安全規格等を調査し、それらの試験基準や方法に関して、既存の試験装置を利用、あるいは必要に応じて新規に試験装置を開発して、安全性・信頼性等に関する試験データを取得・蓄積・分析する。なお、対人安全に関する各種試験・評価手順に関しては、現状では参照すべき規格等が確立されていないため、その試験装置の開発を含めた安全度水準の定量化等に関する研究開発を行う。

これらの結果に基づいて、安全性能の定量化、評価指標等についての研究を行い、試験・評価方法を開発する。

以下に、安全性試験項目の例を挙げる。

- a) ロボット運動性能試験（制御安定性、加速・減速、変動負荷安定性及び各項目における耐久性・信頼性）
- b) ロボット動作性能試験（動作安定性、操作性、及び各項目における耐久性・信頼性）
- c) ロボット耐環境性試験（EMC 特性、低・高温環境信頼性、防滴特性、防塵特性、振動耐久性、感電防止、及び各項目における耐久性・信頼性）
- d) 安全停止特性（非常停止、故障検出時の安全停止）及び予期せぬ再起動防止

（２）生活支援ロボットの安全性基準に関する適合性評価手法の研究開発

安全技術を導入して開発された生活支援ロボットを対象として、コンセプト段階から製品段階までについて、安全性基準に関する適合性評価手法の研究開発を実施する。

2. 1. 1. 3 達成目標

（１）最終目標（平成25年度）

- ①各タイプのロボットのリスクアセスメント手法を確立すること。並びに、それを各タイプのロボット開発実施者に対して提供する。さらに対人安全性に関して取得したデータに基づき、耐性指標等の国際標準提案を行えること。
- ②各タイプの生活支援ロボットの機械・電気安全、機能安全等に関し安全性試験評価方法を確立すること。さらに策定した試験・評価方法や手順について、国際標準化提案を行えること。
- ③各タイプの生活支援ロボットに関する安全性基準適合性評価手法を確立する。

（２）中間目標（平成23年度）

- ①リスクアセスメント手法を開発すること。さらに人間工学実験等による対人安全性に関するデータをロボット開発実施者に提供すること。
- ②各タイプの生活支援ロボットの機械・電気安全、機能安全等に必要な試験装置を開発し、ロボット安全性試験項目、各タイプのロボット毎の試験・評価方法や手順の策定を行うこと。

2. 1. 1. 4 特記事項

（１）試験・認証方法については国際標準化の推進のため、必要な情報を提供しつつ、関係機関と連携し、安全規格の確立に向け努力すること。特に、生活支援ロボットに関する安全性・信頼性等のデータ取得・蓄積・分析に際しては、（社）日本ロボット工業会にて審議中の ISO/TC 184/SC 2/WG 7 Robots in personal care (Robots and robotic devices - safety requirements - Non-medical personal care robot)の議論と連携して進めること。

（２）国際的な評価が得られる安全認証拠点が我が国に形成されるように、その中核をなすべく、ISO/IEC Guide 65（JIS Q 0065）「製品認証機関に関する一般要求事項」に、準拠した認証機関、ISO/IEC 17025（JIS Q 17025）「試験所及び校正機関の能力に関する一般要求事項」に準拠した試験機関が、本研究開発の実施期間終了後に設立・継続できるような体制の構築を実施期間中から目指すこと。さらに、PL法を見据えた法的責任の確認も行うこと。

(3) 制度設計の観点から、安全認証拠点基盤がより強固かつ広範に発展するように、例えば事故情報の提供に関し保険機関の関与が、さらに、規格提案に向けて学会の関与が、それぞれ提案に含まれることを目指すこと。また、様々な使用者の協力を得ることが可能な地域に根ざした施設を整備することを目指すこと。

(4) 各種試験装置は、プロジェクトの中間目標年度（平成23年度）までに試験機関候補場所に可能な限り集約することを目指す。

2. 1. 2 研究開発項目②：安全技術を導入した移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットの開発

2. 1. 2. 1 研究開発の必要性

少子高齢化が急速に進展しており、介護を必要とする高齢者・障害者が増え、その人たちを支える体制の整備が急務となっている。そのため、この分野への新しい技術であるロボット技術による支援の強化が求められている。しかし、このような介護・福祉分野へのロボット技術の活用は、利用者に加えて家族等の人との共存が必須となるため安全性の確保が必要なこと、作業内容が多様であること等から困難となっている。

このため、本研究開発項目では、人とロボットを積極的に連携させることで、これらの課題を克服するための要求仕様や運用ルールを明確にし、多様な作業を、安全に行うことができる移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットの安全技術を開発する。

2. 1. 2. 2 研究開発の具体的内容

(1) 移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットにおける安全技術の開発

安全技術を導入した移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットを開発する。移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットとは、人の生活環境下で、ユーザーの指示によって、安全かつ効率よく生活に必要な作業を行う機能を実現するロボットである。

ロボットの使用目的、使用環境及び運用シナリオ等を考慮してリスクアセスメントを行い、その結果に基づき、リスク低減に必要な安全技術を開発する。リスクアセスメントは研究開発項目①と連携して、安全性試験方法や検証手順を開発しながら進めるものとする。

以下に安全な移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットを実現するための安全技術の例を挙げる。

a) 移動・作業技術

生活環境下において、ユーザーの指示より、移動や作業（マニピュレーション等）を効率よく安全に行うための技術。

b) ユーザーインタフェース技術

直感的に操作可能で、利用者の負担の少ないユーザーインタフェース技術により操縦動作の安全性の確保、ユーザーに適切な情報を提示することによりロボットが周囲の人を含む作業環

境に対して安全性を確保する技術。

c) ユーザーへの適用(フィッティング)技術

利用方法が簡便であり、様々な身体状況のユーザーが、安全に利用できる適用技術。

d) 安全な退避技術

ロボットへの供給電源(バッテリー等)が、突然遮断された場合でも、ロボット本体が安全に停止、退避がなされる技術。

e) ユーザー拘束時の安全開放技術

ロボットが故障等によって、ユーザーや第三者の身体を拘束するような状態に陥った場合でも、安全かつ容易に開放できる技術。

(2) 移動作業型(操縦が中心)生活支援ロボットの安全性検証

①安全性試験

上記2. 1. 2. 2 (1)に該当する安全技術をその用途、使用シーンに応じて一部、またはすべてを搭載した移動作業型(操縦が中心)生活支援ロボットの安全性試験を、研究開発項目①において開発する安全性検証手法を用いて行う。この安全性試験の結果は、研究開発項目①の開発に対してフィードバックしつつ実施する。

②実証試験

想定ユーザーによる、実環境あるいは模擬した環境において、上記2. 1. 2. 2 (1)で開発されたロボットの実証試験を行い、各安全性試験項目について検証を行う。

2. 1. 2. 3 達成目標

(1) 最終目標(平成25年度)

①上記2. 1. 2. 2 (1)に該当する安全技術を一部またはすべてを搭載した移動作業型(操縦が中心)生活支援ロボットが2. 1. 2. 2 (2)項の安全性検証のための安全性試験を完了していること。

②上記2. 1. 2. 2 (1)で開発されたロボットの安全性試験項目の評価基準値がすべて示されていること。

③2. 1. 2. 2 (2) ②項の実証試験が完了していること。

(2) 中間目標(平成23年度)

①上記2. 1. 2. 2 (1)で開発されたロボットのリスクアセスメントを終了し、安全性試験項目がすべて示されていること。

②実施計画に予定されている安全技術の開発が終了し、その一部またはすべてが上記2. 1. 2. 2 (1)項で開発されたロボットに搭載されていること。

③上記2. 1. 2. 2 (2) ①に該当する安全性試験のうち、研究開発項目①で策定済みの安全性検証手法を用いて試験を完了していること。

2. 1. 2. 4 特記事項

(1) 安全技術として、共有可能なロボット安全要素部品の開発を含めることを推奨する。これら要素部品は、生活支援ロボットに使用される構成部品であり、安全度水準（SIL）等の標準規格に適合するものの取得を目指して開発されるものであり、本プロジェクト内外に提供することが望ましい。

(2) 安全性検証に用いるロボットは、安全技術も含め開発済みのロボットを用いても良い。

(3) 実証試験を実施できる施設を有する機関を、協力機関として確保すること。

(4) 実証試験は、倫理問題に配慮して行うこと。

2. 1. 3 研究開発項目③：安全技術を導入した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの開発

2. 1. 3. 1 研究開発の必要性

次世代ロボットの大きな特徴の一つは、自ら環境を認識してその情報に基づき、物理的移動を伴う作業を行う「自律性」であり、これによって複雑な環境下においても人に代わって様々な作業を行うことができる。我が国の社会が直面している少子高齢化社会に伴う労働力不足や、家庭における高齢者の生活支援等の大きな問題を解決する鍵を握る。しかし、この自律性を有する移動作業型のロボットは、従来の安全規格、概念への適合が難しく、また技術的にも確立されていない部分がある。

このため、本研究開発項目では、自律性を有する移動作業型ロボットの安全に関する課題を洗い出し、安全を実現するための要求仕様や運用ルールを明確にし、その課題を解決する安全技術を開発する。

2. 1. 3. 2 研究開発の具体的内容

(1) 移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットにおける安全技術の開発

安全技術を導入した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットを開発する。移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットとは、周囲の環境を認識し、自律的な判断に基づいて安全かつ効率よく生活に必要な作業を行う機能を実現するロボットである。

ロボットの使用目的、使用シーン及び運用シナリオ等を考慮してリスクアセスメントを行い、その結果に基づき、リスク低減に必要な安全技術を開発する。リスクアセスメントは、研究開発項目①と連携して、安全性試験方法や検証手順を開発しながら進めるものとする。

以下に安全な移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットを実現するための安全技術の例を挙げる。

①リスク低減技術

a) 安定走行技術

自律での走行速度指令による駆動力制御に加え、走行加減速や外力、凹凸や斜面等がある路面環境に対して自律的に姿勢を安定化し、安全に走行する技術。

b) 人・障害物回避技術

静止障害物の位置及び人等の移動障害物の位置・動きを検知する機能、またこれらとの衝突リスクを見積もり回避する等安全に走行する技術。

c) 自律走行技術

自己位置認識技術や地図情報生成技術、動的経路計画技術等の安全性要素技術を使い安全に自律走行する技術。

d) 自己診断技術

ロボットの各機能が正常に動作していることを常時確認して、故障や異常を自動的に検出して通報又は修復することにより、安全に運用する技術。

e) 危険予防技術

ロボットの動作や行動を人に事前に認識させることや人の行動を予測することにより安全に運用する技術。

②安全要素技術

a) 自己位置認識技術

周囲環境のセンシングによる環境地図情報や、ロボットの移動及び動作の履歴情報を活用し、正確な自己位置を推定する機能を持つことで安全な移動や作業動作を確保するためのセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

b) 安全環境認識技術

ロボットやその作業環境に配置された各種センサを用い、人の移動、及び作業の障害となる環境変化を検出する機能を持つことで、環境地図生成と動的動作計画機能を成立させ、安全な移動や作業動作を確保するためのセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

c) 環境地図生成技術

ロボットやその作業環境に配置された各種センサを用い、移動や作業に必要な地図等の環境記述を生成する機能を持つことで、自己位置認識と動的動作計画機能を成立させ、安全な移動や作業動作を確保するためのセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

d) 動的動作計画技術

目的地への移動や目的作業を実現するための動作を計画する技術において、人の移動、及び作業の障害となる環境変化による動作変更の必要性があっても、補正、再計画を自律的に行うことで安全な移動や作業動作を確保するためのセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

(2) 移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの安全性検証

①安全性試験

上記2. 1. 3. 2 (1) に該当する安全技術をその用途、使用シーンに応じて一部、またはすべてを搭載した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの安全性試験を、研究開発項目①において

開発する安全性検証手法を用いて行う。この安全性試験の結果は、研究開発項目①の開発に対してフィードバックしつつ実施する。

②実証試験

想定運営先を模擬した環境において、上記2. 1. 3. 2 (1) で開発されたロボットの安全性の実証試験を行い、各安全性試験項目について検証を行うこと。

2. 1. 3. 3 達成目標

(1) 最終目標 (平成25年度)

- ①上記2. 1. 3. 2 (1) に該当する①リスク低減技術及び②安全要素技術を一部またはすべて搭載した移動作業型 (自律が中心) 生活支援ロボットが2. 1. 3. 2 (2) 項の安全性検証のための安全性試験を完了していること。
- ②上記2. 1. 3. 2 (1) で開発されたロボット安全性試験項目の評価基準値がすべて示されていること。
- ③2. 1. 3. 2 (2) ②項の実証試験が完了していること。

(2) 中間目標 (平成23年度)

- ①上記2. 1. 3. 2 (1) で開発されたロボットのリスクアセスメントを終了し、安全性試験項目がすべて示されていること。
- ②実施計画に予定されている安全技術の開発が終了し、その一部またはすべてが上記2. 1. 3. 2 (1) 項で開発されたロボットに搭載されていること。
- ③上記2. 1. 3. 2 (2) ①に該当する安全性試験のうち、研究開発項目①で策定済みの安全性検証手法を用いて試験を完了していること。

2. 1. 3. 4 特記事項

(1) 安全技術として、共有可能なロボット安全要素部品の開発を含めることを推奨する。これら要素部品は、生活支援ロボットに使用される構成部品であり、安全度水準 (SIL) 等の標準規格に適合するものの取得を目指して開発されるものであり、本プロジェクト内外に提供することが望ましい。

(2) 安全性検証に用いるロボットは、安全技術も含め開発済みのロボットを用いても良い。(3) 実証試験を実施できる施設を有する機関を、協力機関として確保すること。

(4) 実証試験は、倫理問題に配慮して行うこと。

2. 1. 4 研究開発項目④：安全技術を導入した人間装着 (密着) 型生活支援ロボットの開発

2. 1. 4. 1 研究開発の必要性

少子高齢化社会では、高齢者・障害者の自立と生き甲斐が重要な点であり、生活支援、活動の質の

向上が課題である。高齢者・障害者においては、身体機能が低下する傾向にあり、それが高齢者・障害者の自立を制限している。さらに、一層の身体機能低下への悪循環を加速している。また、要介護者の急増は介護者不足、介護労働負担を増加させている。これらの課題を解決するために人間の身体機能を拡張・増幅・支援する技術の開発が必要である。

このため、本研究開発項目では、人に装着して人間の身体機能を拡張・増幅・支援する人間装着（密着）型生活支援ロボットの安全に関する課題を洗い出し、安全を実現するための要求仕様や運用ルールを明確にし、その課題を解決する安全技術を開発する。

2. 1. 4. 2 研究開発の具体的内容

(1) 人間装着（密着）型生活支援ロボットにおける安全技術の開発

安全技術を導入した人間装着（密着）型生活支援ロボットを開発する。人間装着（密着）型生活支援ロボットとは、人間に装着し、装着者の意思を反映した随機的、自律的機能によって制御される実用的なロボットである。

ロボットの使用目的、使用環境及び運用シナリオ等を考慮してリスクアセスメントを行い、その結果に基づき、リスク低減に必要な安全技術を開発する。リスクアセスメントは研究開発項目①と連携して、安全性試験方法や認証手順を開発しながら進めるものとする。

以下に安全な人間装着（密着型）型生活支援ロボットを実現するための安全技術の例を挙げる。

a) 装着時機能安定技術

人に装着して人間の身体機能を拡張・増幅・支援するための駆動力制御に加え、歩行や作業に付随して生じる負荷変動、外力、障害物衝突などに対して自律的に対処し安全に人の動作を支援する技術。

b) 制御技術

装着者の意思を反映し、随機的、自律的機能によって制御する技術。

c) 安全管理技術

動作支援中の環境情報を取得し、この情報を用いて安全確保を行うための管理技術。

d) 自己診断技術

ロボットの各機能が正常に動作していることを常時確認して、故障や異常を自動的に検出して通報または対処することにより安全に運用する技術。

e) 安全要素技術

モータ、バッテリー、センサ等の人間装着（密着型）型生活支援ロボットを構成する基盤部品に関する安全技術・リスク低減技術。

(2) 人間装着（密着）型生活支援ロボットの安全性検証

①安全性試験

上記2. 1. 4. 2 (1)に該当する安全技術をその用途、使用シーンに応じて一部、またはすべてを搭載した人間装着（密着）型生活支援ロボットの安全性試験を、研究開発項目①において開発する安全性検証手法を用いて行う。この安全性試験の結果は、研究開発項目①の開発に対してフィードバックしつつ実施する。

②実証試験

想定ユーザーによる、実環境あるいは模擬した環境において、上記2. 1. 4. 2 (1)で開発されたロボットの実証試験を行い、各安全性試験項目について検証を行う。

2. 1. 4. 3 達成目標

(1) 最終目標（平成25年度）

- ①上記2. 1. 4. 2 (1)に該当する安全技術を一部またはすべてを搭載した人間装着（密着）型生活支援ロボットが2. 1. 4. 2 (2)項の安全性検証のための安全性試験を完了していること。
- ②上記2. 1. 4. 2 (1)で開発されたロボット安全性試験項目の評価基準値がすべて示されていること。
- ③2. 1. 4. 2 (2) ②項の実証試験が完了していること。

(2) 中間目標（平成23年度）

- ①上記2. 1. 4. 2 (1)で開発されたロボットのリスクアセスメントを終了し、安全性試験項目がすべて示されていること。
- ②実施計画に予定されている安全技術の開発が終了し、その一部またはすべてが上記2. 1. 4. 2 (1)項で開発されたロボットに搭載されていること。
- ③上記2. 1. 4. 2 (2) ①に該当する安全性試験のうち、研究開発項目①で策定済みの安全性検証手法を用いて試験を完了していること。

2. 1. 4. 4 特記事項

(1) 安全技術として、共有可能なロボット安全要素部品の開発を含めることを推奨する。これら要素部品は、生活支援ロボットに使用される構成部品であり、安全度水準（SIL）等の標準規格に適合するものの取得を目指して開発されるものであり、本プロジェクト内外に提供することが望ましい。

(2) 安全性検証に用いるロボットは、安全技術も含め開発済みのロボットを用いても良い。

(3) 実証試験を実施できる施設を有する機関を、協力機関として確保すること。

(4) 実証試験は、倫理問題に配慮して行うこと。

2. 1. 5 研究開発項目⑤：安全技術を導入した搭乗型生活支援ロボットの開発

2. 1. 5. 1 研究開発の必要性

人間の行動の範囲及び自由度を拡大する移動手段として、現在、自動車から自転車まで各種移動体が存在するが、少子高齢化の進展や CO2 ガス発生削減等の社会的課題を解決していくため、今後、高齢者や環境に配慮した移動体が求められてくる。具体的には、商業施設、駅・空港等の交通施設、オフィス、家庭に至るまで、不特定多数の歩行者や家族、他の移動体や障害物と同一空間内に共存し、搭乗者による操作または自律走行が可能な搭乗型生活支援ロボットが必要となる。

このため、本研究開発項目では、人や障害物が混在する状況において、人を乗せて移動する機能を備えた搭乗型生活支援ロボットの安全に関する課題を洗い出し、安全を実現するための要求仕様や運用ルールを明確にし、その課題を解決する安全技術を開発する。

2. 1. 5. 2 研究開発の具体的内容

(1) 搭乗型生活支援ロボットにおける安全技術の開発

安全技術を導入した搭乗型生活支援ロボットを開発する。搭乗型生活支援ロボットとは、人を乗せて、操縦者の指令により、または自律的に安全かつ自在に移動する機能を実現するロボットである。ロボットの使用目的、使用環境及び運用シナリオ等を考慮してリスクアセスメントを行い、その結果に基づき、リスク低減に必要な安全技術を開発する。リスクアセスメントは研究開発項目①と連携して、安全性試験方法や認証手順を開発しながら進めるものとする。

以下に安全な搭乗型生活支援ロボットを実現するための安全技術の例を挙げる。

①リスク低減技術

a) 安定走行技術

搭乗者または、自律での走行速度指令による駆動力制御に加え、走行加減速や外力、凹凸や斜面等がある路面環境に対して自律的に姿勢を安定化し、安全に走行する技術。

b) 人・障害物回避技術

静止障害物の位置及び人等の移動障害物の位置・動きを検知する機能、またこれらとの衝突リスクを見積もり回避する等安全に走行する技術。

c) 自律走行技術

操縦者不在時の自律走行及び操縦アシストを含めた半自律走行時、②に記述する自己位置認識技術や地図情報生成技術、動的経路計画技術等の安全要素技術を使い安全に自律・半自律走行する技術。

d) 操縦者の意図推定、操縦支援技術

広範囲な利用者にとって簡便に操縦できるものとするために、短時間での習熟により操作できるような操縦者の意図推定、操縦支援技術を備え、安全に走行する技術。

e) 協調走行技術

ロボット間及びロボットと使用者間の相対位置・方位検出機能に基づき、追従制御等による協調走行を安全に実施する技術。

f) 自己診断技術

ロボットの各機能が正常に動作していることを常時確認して、故障や異常を自動的に検出して通報または修復することにより安全に運用する技術。

②安全要素技術

a) 自己位置認識技術

周囲環境のセンシングによる環境地図情報や移動履歴情報を活用することで自己位置を認識し安全な走行を確保するセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

b) 地図情報生成技術

ロボットに搭載されたセンサを用い、移動に必要な地図等の環境記述を生成する機能を持つことで、自己位置認識と動的経路計画機能を成立させ、安全な走行を確保するセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

c) 動的経路計画技術

目的地に到達するための経路を計画する技術において、動的障害物による経路変更等があっても、補正、再計画を自律的に行い、安全な走行を確保するセンサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

d) 姿勢安定化技術

ロボット自身の姿勢を検出し、外部環境から影響を受けても常に安定を保持し、安全な走行を確保する機構、センサ、制御アルゴリズム・ソフトウェア等を含む要素技術。

(2) 搭乗型生活支援ロボットの安全性検証

①安全性試験

上記2. 1. 5. 2 (1) に該当する安全技術をその用途、使用シーンに応じて一部、またはすべてを搭載した搭乗型生活支援ロボットの安全性試験を、研究開発項目①において開発する安全性検証手法を用いて行う。この安全性試験の結果は、研究開発項目①の開発に対してフィードバックしつつ実施する。

②実証試験

想定運営先を模擬した環境において、上記2. 1. 5. 2 (1) で開発されたロボットの安全性実証試験を行い、各安全性試験項目について検証を行うこと。

2. 1. 5. 3 達成目標

(1) 最終目標 (平成25年度)

- ①上記2. 1. 5. 2 (1) に該当する安全技術を一部またはすべてを搭載した搭乗型生活支援ロボットが2. 1. 5. 2 (2) 項の安全性検証のための安全性試験を完了していること。
- ②上記2. 1. 5. 2 (1) で開発されたロボット安全性試験項目の評価基準値がすべて示されていること。
- ③2. 1. 5. 2 (2) ②項の実証試験が完了していること。

(2) 中間目標（平成23年度）

- ①上記2. 1. 5. 2 (1) で開発されたロボットのリスクアセスメントを終了し、安全性試験項目がすべて示されていること。
- ②実施計画に予定されている安全技術の開発が終了し、その一部またはすべてが上記2. 1. 5. 2 (1) 項で開発されたロボットに搭載されていること。
- ③上記2. 1. 5. 2 (2) ①に該当する安全性試験のうち、研究開発項目①で策定済みの安全性検証手法を用いて試験を完了していること。

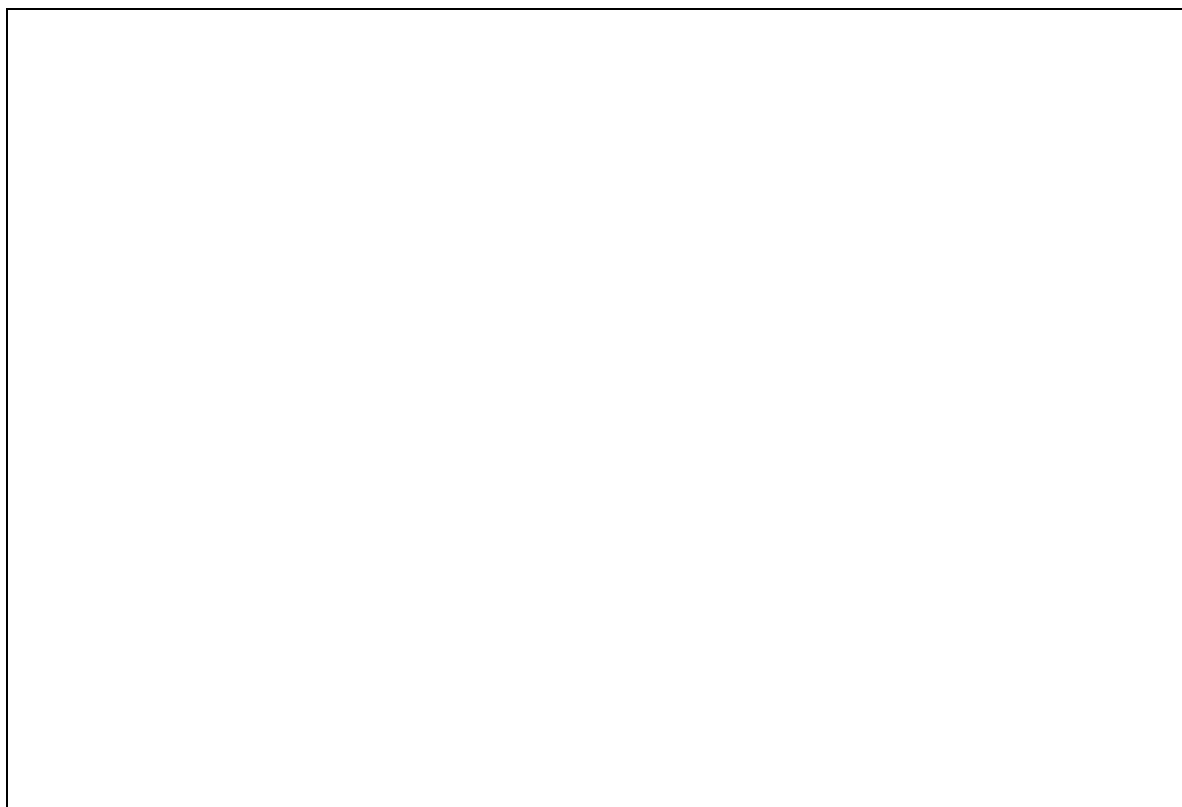
2. 1. 5. 4 特記事項

- (1) 安全技術として、共有可能なロボット安全要素部品の開発を含めることを推奨する。これら要素部品は、生活支援ロボットに使用される構成部品であり、安全度水準（SIL）等の標準規格に適合するものの取得を目指して開発されるものであり、本プロジェクト内外に提供することが望ましい。
- (2) 安全性検証に用いるロボットは、安全技術も含め開発済みのロボットを用いても良い。
- (3) 実証試験を実施できる施設を有する機関を、協力機関として確保すること。
- (4) 実証試験は、倫理問題に配慮して行うこと。

研究開発マイルストーンを図Ⅱ－１に、開発予算を表Ⅱ－１に示す。

安全検証手法の研究開発（研究開発項目①）と安全技術を搭載したロボット開発（研究開発項目②～⑤）を並行して行う計画である。２年度目からは検討された試験方法をもとに整備される生活支援ロボット安全検証センターでロボットの評価試験を実施した。得られた試験結果を安全性検証手法の検討へフィードバックし、試験方法の改良、認証手法の構築を行った。また、初期の段階から生活支援ロボットの安全基準の国際標準化を目指す活動をISO/TC184/SC2/WG7を通して行った。2012年（予定）にISO13482の発行と、その後の改訂作業において、日本発の安全性基準を構築すべく研究開発成果をもとにした提案を行った。

なお、２年度目の末にロボットをグループⅡとして追加した。グループⅡの実施者は１年度目からプロジェクトで検討された安全性検証手法を用いて評価試験とロボットの改良に比較的早い段階からとりかかる。



図Ⅱ－１ 研究開発マイルストーン

表Ⅱ－1 開発予算

(単位：百万円)

	1年目 H21(20 09)	2年目 H22(20 10)	3年目 H23(20 11)	4年目 H24(20 12)	5年目 H25(20 13)
一般会 計	1600	1525	1150	1350	940
補正予 算	—	840	—		

2.2 研究開発の実施体制

本研究開発は、NEDOが実施者を公募により選定し、委託により実施した。本研究開発の推進にあたって、NEDOが研究開発責任者（プロジェクトリーダー）として独立行政法人産業技術総合研究所 知能システム研究部門 研究部門長 比留川 博久氏を任命した。

安全性検証手法を開発する実施者とロボットメーカーの実施者が連携してプロジェクトを実施する体制として、図Ⅱ－2に示すように安全性検証手法を開発する開発項目①と、安全技術を導入したロボットを開発する開発項目②が、各々の研究開発を進めながら、リスクアセスメント、安全性試験および適合性評価の手法検討や試行において連携することとした。

なお、研究開発項目①を実施する体制は国際標準化を推進できるものとし、研究開発項目②～⑤を実施する体制は、ロボットのハードウェアまたはソフトウェアの開発者、及び実証試験施設提供者の参加を得ることとした。

図Ⅱ－２ プロジェクトの実施体制（概念図）

各研究開発項目の実施者は以下の通りである。図Ⅱ－３(1)に平成 23 年度末と、図Ⅱ－３(2)に平成 25 年度末のプロジェクト実施体制を示す。また、図Ⅱ－４に当プロジェクトで開発するロボットの外観イメージを示す。

なお、研究開発の段階的推進として研究開発項目②～⑤の実施は、安全性に係る試験方法の検討段階であるプロジェクトの初年度から参加する「グループⅠ」と、開発された安全性に係る試験手法を用いて２年度目から試験を行う「グループⅡ」に分けて段階的に推進する。「グループⅡ」については、各タイプのロボットの試験・評価方法や手順が策定される２年度目に公募により実施者を選定する。「グループⅡ」の実施者には中間目標の達成は求めていないため、プロジェクトの中間評価の評価対象に含めないこととした。

研究開発項目① 生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発：

財団法人日本自動車研究所

独立行政法人産業技術総合研究所

独立行政法人労働安全衛生総合研究所

国立大学法人名古屋大学

一般財団法人日本品質保証機構

日本認証株式会社

社団法人日本ロボット工業会

財団法人製造科学技術センター

研究開発項目② 安全技術を導入した移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットの開発

(A) 安全技術を導入した移乗・移動支援ロボットシステムの開発：

パナソニック株式会社

国立障害者リハビリテーションセンター

研究開発項目③ 安全技術を導入した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの開発

(A) 安全技術を導入した生活公共空間及びビルの移動作業型ロボットシステムの開発：

富士重工業株式会社（平成23年度で終了）

(B) 安全技術を導入した警備ロボットシステムの開発：

総合警備保障株式会社（平成23年度で終了）

北陽電機株式会社（同上）

三菱電機特機システム株式会社（同上）

(C) 安全技術を導入した配送センター内高速ビークルシステムの開発： [グループⅡ]

株式会社ダイフク（平成22年度末から）

(D) 安全技術を導入した配送センター内のフォーク型物流支援ロボットの開発： [グループⅡ]

株式会社日立産機システム（平成22年度末から）

株式会社日立プラントテクノロジー（平成22年度末から）

研究開発項目④ 安全技術を導入した人間装着（密着）型生活支援ロボットの開発

(A) 安全技術を導入した人間装着型生活支援ロボットスーツ HAL の開発：

CYBERDYNE株式会社

国立大学法人筑波大学

(B) 安全技術を導入したリズム歩行アシストの開発： [グループⅡ]

株式会社本田技術研究所（平成22年度末から）

研究開発項目⑤ 安全技術を導入した搭乗型生活支援ロボットの開発

(A) 搭乗型生活支援ロボットにおけるリスクアセスメントと安全機構の開発：

トヨタ自動車株式会社

独立行政法人国立長寿医療研究センター

株式会社フォー・リンク・システムズ（平成23年度で終了）

(B) 安全要素部品群と安全設計に基づく搭乗型移動ロボットの開発：[グループⅡ]

アイシン精機株式会社（平成22年度末から）

日本信号株式会社（同上）

オプテックス株式会社（同上）

株式会社ヴィッツ（同上）

学校法人千葉工業大学（同上）

(C) 屋外移動支援機器における安全エンジニアリング技術の研究開発：[グループⅡ]

I D E C株式会社（同上）

図Ⅱ-3（1） プロジェクト実施体制（平成23年度）

図Ⅱ-3(2) プロジェクト実施体制(平成25年度)



図Ⅱ-4 プロジェクトで開発するロボット

2.3 研究開発の運営管理

研究開発の進捗管理を行うため、実施者が一堂に会す連絡会や半期に一度の進捗報告会の実施また、4半期に一度の進捗確認シートの作成を行っている。その概要は以下の通り。

2.3.1 安全性検証全体連絡会

実施者が一堂に会しプロジェクト全体のスケジュールおよび課題の確認、安全性検証手法の開発状況や開発した手法の紹介、またロボット開発事業者からの情報提供依頼などを行っている。

主催：NEDO、PL、 運営協力：開発項目①ステアリングコミッティー

開催頻度：1年に3回

2.3.2 進捗報告会と研究進捗確認シート

各実施者から半年間の研究進捗の説明、課題と今後のスケジュールを確認。

出席者：PL、NEDO、METI

報告者：各研究開発実施者

開催頻度：進捗報告会は1年に3回。進捗報告会を行わない四半期に研究進捗確認シートを提出。

2.3.3 安全検証手法開発実施者が主催する各種WG

安全検証手法の開発では、開発分野毎にWGを設け定期的に打ち合わせを行っている。その場には議題に応じてロボット開発実施者が参加している。また、安全性や制度に関連する専門家を外部委員として招き助言をいただいている。NEDOおよびMETIはオブザーバーとして参加。

2.3.4 アウトリーチ活動

2013年11月に東京ビックサイトで行われた国際ロボット展において、生活支援ロボット実用化プロジェクト参画企業のロボットを展示。併せて講演会でこれらロボットを紹介。2014年2月17日には、機械振興会館において、生活支援実用化プロジェクトの成果報告会を行い、同時に記者発表会を行った。ここで、IS013482を世界で初めて取得したパナソニック（株）の「リショーネ」および（株）ダイフクの「エリア管理システム」の紹介を行った。さらに、2014年6月18日には、つくば市役所において、プロジェクト外の一般者を対象に、生活支援実用化プロジェクトの成果発表会を行った。この際、生活支援ロボット安全検証センターの見学会も行った。

2.3.5 秘密情報の管理について

研究開発を行っている複数の企業がプロジェクトに参加しており、技術情報を扱うにあたり、秘密

保持に関するルールを定めている。

(1) 安全性検証全体連絡会における秘密保持誓約について

2 か月に 1 回実施している安全性検証全体連絡会は、その議題が各実施者において秘密情報として扱いたい技術情報や営利活動に必要な情報が含まれる場合があるため、これらの秘密情報を安全性検証全体連絡会の出席者のみにその開示範囲を限定するため、各参加者から秘密保持誓約書を提出してもらっている。

作成元：安全性検証全体連絡会に出席する各実施者

提出先：NEDO

(2) 安全性検証手法の開発者とロボット開発者間の秘密保持契約（NDA）について

安全性検証手法の開発では、各ロボット開発者から、ロボットの設計情報などの技術情報を入手する場合があります、その情報が他のロボット開発者に開示されると、情報の発信元の開発者の不利益になることが予想される。そのため、安全性検証手法開発者とロボット開発者の間で秘密保持契約を締結している。なお、安全性検証手法の開発者側に各ロボット開発者と連絡を取り合う窓口担当者を個別に設けている。これにより、他のロボット開発者の秘密情報が漏えいすることを防いでいる。

秘密保持契約の契約当事者： 安全性検証手法開発実施者（日本自動車研究所等）およびプロジェクト内ロボット開発実施者のうち 1 コンソ。

2. 4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

本プロジェクト参画企業のロボットには、移動型、装着型、搭乗型等のタイプがあり、それぞれのタイプに対して各社がリスクアセスメントを行うとともに、認証機関が認証スキームを作成した。これをもとに Personal care robot の国際安全規格 IS013428 の策定に大きく貢献。NEDO は、参画企業のロボットに対し、認証取得を促し、各ロボットの安全性を担保していく仕組みを作った。これにより、実際に実用化・事業化を後押しすることができ、サイバーダインの「ロボットスーツ HAL」、パナソニック（株）の「リショーン」の事業化につながったと考える。

3. 情勢変化への対応

■平成 23 年度末、総合警備保障(株)、北陽電機(株)、三菱電機特記システム(株)のコンソ、及び(株)フォーリンクシステムが、本プロジェクトを卒業。警備ロボットや安全回路に関し、技術開発の目処がたったため。

■平成 23 年度末、富士重工業(株)の掃除ロボットについては研究開発に目処が付きプロジェクトを卒業したが、その後、公的資金の不正利用が判明した。NEDOは同社から資金を回収済み（平成 2

5年1月)。

■行政公開プロセス(仕分け)

【平成24年】

- ・研究開発項目①～⑤の中で、より公共性の高い①に対し、予算を重点的に割り振ること。
- ・研究開発項目②～⑤に関しては、各タイプのロボットについて、パイロットスタディーを行いリスクアセスメントを完成させ、①が行う各タイプの認証スキーム開発に協力すること。これに関して予算を重点的に使い、企業固有の問題については、各企業の負担で開発すること。

⇒ 平成25年度予算の割り振りで、上記意向を反映。

【平成25年】

- ・安全標準については幅広い知見を募るため、オープンに議論していくこと
- ・国内試験機関が海外のロボットの安全試験を請け負える環境を整備すること

⇒ 講演会、セミナー、国際学会での発表で、国内外にアピール。海外案件も検討中。

4. 中間評価結果への対応

	肯定的な指摘点	問題点・改善すべき指摘点	対処方針・計画等への反映
総合評価	<p>高齢化社会を迎えている状況下、生活支援ロボット実用化プロジェクトは経済産業省が推進する「ロボット・新機械イノベーションプログラム」および内閣府が推進する「社会還元加速プロジェクト」の目的達成に貢献する非常に時宜に適ったものである。生活支援ロボットを実用化するためには、対人安全基準、基準適合性評価法を確立する必要があり、本プロジェクトは重要な意味を持つ。また、基準作成、適合性評価法の確立は、その性質上、特定の企業が担当できないため、NEDOの支援で実施することは妥当である。NEDO、産業技術総合研究所、委託先機関（JARI など）の三者の協力によって、効率よく運営されている。多少の温度差はあるが、各個別テーマはそれぞれこの目標に向かって努力をしており、中間時点の評価は概ね順調と判断される。</p>	<p>【1】本プロジェクトの成否は、安全性検証手法の確立と認証制度の整備にかかっていると見てよいだろう。今後この点に関して、今一步の方向性の明確化とこのことを各個別テーマが統一的に理解すること、更に、プロジェクト全体としての纏まりが必要である。</p> <p>【2】個別の安全基準の注目項目が、やや独善的であるので、担当研究者の視点での安全性の研究のみならず、一般人が安心感を持てるような項目の検討する必要がある。また、本プロジェクトの内容・成果についてユーザーに向けて、ロボット安全設計の新しい考え方（リスクアセスメントと限界、想定外の対応等）の啓蒙活動に努めていただきたい。</p> <p>【3】国際標準化への取り組みには基準認証と機能標準の二本柱に基づく戦略性を持った活動が求められる。</p>	<p>【1】安全検証手法の開発実施者とロボット開発実施者が連携して取り組んでいる「パイロットスタディ※」通じて方向性の明確化と統一的な理解を深めた。 ※認証制度の構築を目的として安全性認証の一連のプロセスを試行的に行うもの。</p> <p>【2】安全検証手法の開発実施者が開発するリスクアセスメント手法と試験方法を用いて客観的な安全性検証に努めた。またロボット安全設計の考え方については学会やセミナー等を通じて啓蒙活動を行い、一般使用者にも安心を与えられるように努めた。</p> <p>【3】国際標準化への取り組みについては戦略的な検討を進め、ISO13482 発行に至った。</p>
事業の位置付け・必要性	<p>生活支援ロボットは日本が世界的に最も進んでいる分野であるが、いまだ、本格的産業・実用化に結びついていない。少子高齢化が進む日本においての生活支援ロボットの必要性はいうまでもなく、社会的重要性は極めて大きい。安全性の基準作りとその評価法は、生活支援ロボットの市場化に際して、必須である。また、安全規格やその認証構造の構築は民間だけでは、その実現が困難で有り、公共性が高く、NEDOの関与が必要とされる事業である。経済産業省が推進する「ロボット・新機械イノベーションプログラム」および内閣府が推進する「社会還元加速プロジェクト」にも本プロジェクトは大きく寄与している。</p>		

	肯定的な指摘点	問題点・改善すべき指摘点	対処方針・計画等への反映
研究開発マネジメント	<p>生活支援ロボットが、いまだ市場が立ち上がっていない現段階で、世界に先駆けてその対人安全性に関する指標や試験・評価方法に関する研究開発を行うことの意義は大きい。研究開発計画、事業体制はおおむね妥当で、プロジェクトリーダーは全体をよく統括し、妥当な研究開発目標が設定されている。定量目標の設定、質の判断、達成度判断という点で不明確な部分もあるが、テーマの性質上やむをえないと考える。</p>	<p>【4】安全基準を総合的に構築する方針の個別テーマ①のチームと個別の先進的なロボットを中心に安全基準を検討する個別テーマ②～⑤とのチームの整合性を取るべきである。また、各個別テーマは個別性が強いので、自分のテーマのみに目を向けがちであるが、各チームは、安全設計技術、安全検証や認証制度に関して、交流を盛んにすべきである。</p> <p>【5】個別テーマ②～⑤チームの対象とするロボットがなくとも、個別テーマ①のチームは、生活支援ロボットの主だった対象に関する安全技術とその評価方法を確立することが必要となる。この点を考慮したマネジメントが望まれる。</p> <p>【6】目的としている、「ロボットの安全に関する国際標準規格」、「関連する試験機関」、「規格認証機関の整備」は、妥当であるが、作っただけで終わる可能性を否定できない。すなわち、それらが、真に国際的にも認知され、実現するための戦略が欠けている。そのために、何が必要で、どのように実現していくかが明示されていない。</p> <p>【7】国際標準化については、会議開催日程や会議開催頻度など、その進捗が国際標準化機関のルールで縛られているので、安全関係技術の国際標準化タイムスケジュールを明確に決めて、その計画どおりに実行することを心がけてほしい。その際、日本として国際競争力を強化する領域と、実用化・普及のための国際規格整備や社会情勢づくりで国際協調する領域との切り分けや戦略を明確にすべきである。</p>	<p>【4】生活支援ロボット安全検証センターでの安全性検証試験とパイロットスタディを通じて方針の整合性を取った。また安全性検証全体連絡会において方向性についての議論を深めるとともに、②～⑤チームが開発した安全要素技術の他コンソへの展開を図るなど技術的な交流を促進した。但し、交流は秘密情報の管理を前提として行った。</p> <p>【5】直近に実用化が有望な生活支援ロボットが網羅されていると考えているが、実施者に入っていない例えばマニピュレータタイプのロボットについては、ニーズが高いものと認識しており、安全検証手法の開発実施者による主体的な検討を行った。</p> <p>【6】策定する国際標準規格が、実用的なロボットの安全性基準をとして有用なものとなることはもちろんのこと、試験機関および認証機関の整備については持続的な運営が可能となるよう体制した。具体的には、安全検証センターの受託試験事業、JQAによる認証事業等がある。</p> <p>【7】国際標準化については、国際協調と国際競争力強化策とを整理して戦略的に進め、ISO13482発行に貢献した。</p>

	肯定的な指摘点	問題点・改善すべき指摘点	対処方針・計画等への反映
研究開発成果	<p>広範で多様な生活支援ロボットに関し、実用化・事業化が近いと思われる分野が抽出され、その中心課題の成果が得られつつあり、一般的に目標はほぼ達成している。チームによっては、当初の予定よりも早く成果が出ているところも散見される。また、生活支援ロボット安全検証センターがオープンし、個別の安全認証のための基礎実験が積み重ねられており、着実な成果が期待できる。今回のプロジェクトでは、物理的接触における安全規格が中心であり、その意味では成果の汎用性は高い。</p>	<p>【8】今後、リスク分析からリスク因子を抽出するところを、再検討する必要がある。また、市場規模は余り大きくないため、ビジネスモデルの戦略化の強化が必要なテーマもある。</p> <p>【9】本プロジェクトの内容・成果については、一般国民はもとより、ロボットに関する学会の専門家にも十分理解されているとはいえない。情報発信を強化することが望まれる。</p> <p>【10】国際的な基準作りは、プロジェクトの後半に集中的に活動することが予想されるが、より戦略的な国際標準化の実現が期待される。</p>	<p>【8】個別テーマ①が開発するコンセプト検証とリスクアセスメント手法を活用して客観的な安全性検証を行い、一般使用者にも安心を与えられるように努めた。</p> <p>【9】学会発表やセミナー等を通じてプロジェクト活動・成果の紹介や安全技術の啓蒙に努めた。</p> <p>【10】ISOの改訂作業を見据えて戦略を練りながら進めた。</p>

	肯定的な指摘点	問題点・改善すべき指摘点	対処方針・計画等への反映
実用化の見通し	<p>全体として概ね開発している安全性検証手法はその目的に則した妥当な内容となっており、また、安全検証センターにおいて、着実に実験が進められているので、成果の実用化は期待できる。また、第三者認証にむけた体制案も具体的にできており、国際規格化も本研究開発の成果を反映しうる体制で活動がなされている。安全関連データの収集・蓄積ならびに再利用法に関する研究開発も行われている。</p>	<p>【11】安全に関する認証制度の未整備と認証技術の未経験が、我が国で芽の出ている生活支援ロボットが世界に出るチャンスを失っているという事実に基づく本プロジェクトの目的を各個別チームがそれぞれ理解して、研究開発を進めて欲しい。そして、現実実用化・市場化に耐えうる安全標準化作りを本プロジェクトに期待する。その意味で、これまで得られた成果を、より一層実用的な視点、一般人の安心感での視点等から精査することが重要である。</p> <p>【12】安全関連データの収集・蓄積については、プロジェクト途中であってもデータを公表し、再利用法の研究開発も進捗を明らかにして、進行中の関連研究開発で活用できるようにするとともに、プロジェクト内外のフィードバックをいれることが望ましい。</p>	<p>【11】本プロジェクトの目的を全体連絡会等を通じて改めて周知させた。安全技術の開発と安全標準化作りにおいては、より実用的な視点を意識して進め、安全についての啓蒙活動と併せて一般利用者の安心感が得られるよう努めた。</p> <p>【12】学会やセミナー等を通じてプロジェクトの進捗および途中の成果を公開した。データの公開方法については、安全検証手法の実施計画にも含まれている研究内容の一つである。但し公表する内容については国際標準化の戦略に基づいたものである。</p>

中間審査時の今後に対する提言	対応
<p>【13】人間の多様性、ロボットの多様性、利用環境の多様性のために、生活支援ロボットの安全基準作成は極めて多様な項目を対象とせざるを得ない。しかし、細かく数多くの基準が増え続ける方向の研究には、基準としての意味がない。そこで、専門家のみならず一般人が安心できる安全基準の骨格を作ることが重要である。</p> <p>【14】また、本プロジェクトに参加している全員が性能基準や機能安全に基づく安全認証に対する理解を深める必要がある。更に、安全性の検証、認証に関する能力、及び、安全設計に関する基礎知識を持つ人材の育成は喫緊の課題である。我が国に適した認証制度のあり方を、個別のテーマの成果を踏まえつつ、早急に検討し、実施して行く必要がある。</p> <p>【15】生活支援ロボット特有の安全規格を発見するうえで、実際の社会の現場での実証実験も必要である。並行して、そのための法整備（特区構想など）を積極的に提案していくべくではなからうか？本プロジェクトで得られたデータの体系的保管、公開方法について、今から対応を講じ、せっきくのデータがPJ終了後、散逸しないよう努力してほしい。</p> <p>【16】国際標準化に関しては、ISO/TC184/SC2/WG7 関係だけでなく国際標準化の世界を ISO/IEC/ITU を含めて、広い視野で捉えて対応してほしい。また、欧米諸国の標準化動向にも、今以上に注意するべきだろう。</p>	<p>【13】指摘のように、生活支援ロボットの安全基準は自動車等とは異なり、用途や対象者によって異なるタイプのロボットに対応した多様なものとなるが、一般利用者が理解しやすく、さらにサービスロボット市場の成長を促進するような骨格作りを行った。</p> <p>【14】認証制度の整備のため安全検証手法の開発実施者とロボット開発実施者が連携して進める「パイロットスタディ」の取り組みを通じて理解を深めた。</p> <p>【15】本プロジェクトでは、実環境での実証試験を行った。データの公開についても、学会発表や Web (RT-SIC) を通じて可能な範囲で行った。</p> <p>【16】国際標準化については、WG7 が他の規格を参考・引用して構築が進められているため、他の標準化活動（例えば医療機器、物流機械、光学式センサ）を視野に入れて進めた。</p>

中間審査時の研究評価委員会コメント	対応
<p>国際標準規格を作成することは重要であるが、規格とか認証機関をつくっても市場での実績がなければ全く役にたたなくなってしまう。今後、どのように運用していくのかも考慮しながら安全規格、試験機関および認証機関を構築していただきたい。</p>	<p>【1】安全検証手法の開発実施者とロボット開発実施者が連携して取り組んでいる「パイロットスタディ※」を通じて方向性の明確化と統一的な理解を深めた。 ※認証制度の構築を目的として安全性認証の一連のプロセスを試行的に行うもの。</p> <p>【2】安全検証手法の開発実施者が開発するリスクアセスメント手法と試験方法を用いて客観的な安全性検証に努めた。またロボット安全設計の考え方については学会やセミナー等を通じて啓蒙活動を行い、一般使用者にも安心を与えられるように努めた。</p> <p>【3】国際標準化は戦略的に進め、ISO134821 発行に至った。</p>

5. 評価に関する事項

① 評価の実施時期

プロジェクト期間（2009年7月～2014年2月）

中間評価2011年8月25日

② 評価手法

外部評価

③ 評価事務局

NEDO 評価部

④ 評価基準

NEDO「標準的評価項目・基準」

⑤ 評価委員

立場	氏名	所属	役職
分科会長	川村 貞夫	立命館大学 理工学部 ロボティクス学科	教授
分科会長代理	大道 武生	名城大学 理工学部 機械システム工学科	教授
委員	浅田 稔	大阪大学大学院 工学研究科 知能・機能創成工学専攻	教授
委員	来海 雅俊	オムロン(株)技術本部 テクノロジーコラボレーションセンター	参事
委員	小菅 一弘	東北大学 大学院 工学研究科 バイオロボティクス専攻	教授
委員	長谷川 勉	九州大学 システム情報科学研究所 知能システム学部門	教授
委員	原田 節雄	(財)日本規格協会 国際標準化支援センター	技術顧問
委員	向殿 政男	明治大学 理工学部 情報科学科	教授

Ⅲ 研究開発成果について

1.事業全体の成果

最終目標に対する研究開発成果は以下の表のとおりである。

最終目標(平成25年度末)	研究開発成果	達成度
<p>プロジェクト全体の目標 生活支援ロボットのリスクアセスメント手法を確立し、生活支援ロボットの開発者に提供可能となること。対人安全性に関する指標、機械・電気安全、機能安全の試験・評価方法や手順について、国際標準提案を行えること。生活支援ロボットに関する安全性基準適合性評価手法を確立すること。 研究開発の対象とした生活支援ロボットに関して、安全性検証のための安全性試験を完了し、ロボット安全性試験項目の評価基準値がすべて示され、実証試験が完了していること。</p>	<p>生活支援ロボットのリスクアセスメント手法を開発し、ロボット開発実施者に提供した。 開発対象ロボットの試験装置を開発し、ロボット安全性試験項目、各タイプのロボットの試験・評価方法や手続の策定を行った。 Personal Care Robot の国際安全規格 ISO13482 の策定に貢献し、2014年2月に正式発行となった。 研究開発の対象とした生活支援ロボットに関して、安全性検証のための安全性試験を完了した。 安全性試験項目に関し、リスクアセスメントに基づいた評価基準を示し、各タイプのロボットに関し実証試験が完了した。</p>	○
<p>研究開発項目①：生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発 ①各タイプのロボットのリスクアセスメント手法を確立すること。並びに、それを各タイプのロボット開発実施者に対して提供する。さらに対人安全性に関して取得したデータに基づき、耐性指標等の国際標準提案を行えること。 ②各タイプの生活支援ロボットの機械・電気安全、機能安全等に関し安全性試験評価方法を確立すること。さらに策定した試験・評価方法や手順について、国際標準化提案を行えること。 ③各タイプの生活支援ロボットに関する安全性基準適合性評価手法を確立する。</p>	<p>①各タイプのリスクアセスメントシート雛形を完成し、それらを開発者に提供した。また耐性指標等の国際標準化案を、ISO/TC199 に新規作業項目として提案した。 Personal Care Robot の国際安全規格 ISO13482 の策定に貢献し、2014年2月に正式発行となった。 ②各タイプの生活支援ロボットの機械・電気安全、機能安全等に関し安全性試験評価方法を確立した。ISO/TC184/SC2/WG7 に試験方法案を提案し、標準化作業を行った。 ③各タイプの生活支援ロボットに関して認証スキームを確立し、3件の認証を発行した</p>	◎
<p>研究開発項目②～⑤：安全技術を導入した生活支援ロボットの開発 ①安全技術を一部またはすべて搭載した各種生活支援ロボットが安全性検証のための安全性試験を完了していること。 ②開発されたロボット安全性試験項目の評価基準値がすべて示されていること。 ③各種タイプの生活支援ロボットについて、実証試験が完了していること。</p>	<p>①各タイプ生活支援ロボットに関し、安全性確保のための必要技術を開発し、それを搭載したロボットのリスクアセスメントを終了した。また各タイプの生活支援ロボットに関し、安全性検証試験を行った。 ②リスクアセスメントに基づき、各タイプの安全基準を設定した。 パナソニック(株)の「リショナー」、(株)ダイフクの「エリア管理システム」については、ISO13482 の認証を取得し、サイバーダインのロボットスーツ HAL については、ISO/DIS13482 の認証を取得した。 ③各タイプのロボットについて、用途、使用シーン、想定ユーザーを考慮し、安全試験項目に関する実証試験を行った。</p>	○

◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

2.1 研究開発項目① 生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発

(一財) 日本自動車研究所、(独) 産業技術総合研究所、(独) 労働安全衛生総合研究所、名古屋大学、(一財) 日本品質保証機構、日本認証(株)、(一社) 日本ロボット工業会、(一財) 製造科学技術センター

1. 生活支援ロボットの安全に関する総説

報告書の構成に沿って、生活支援ロボットの安全について総説する。

2. 生活支援ロボットの認証スキームの研究開発

生活支援ロボットの安全性を定めた国際規格にもとづき、第三者の立場で客観的かつ公平に適合性評価活動を行うための認証スキームを検討し、併せてそのスキームが国際的に通用するよう適合性評価の国際規格 ISO/IEC 17067 のシステム 5 に従って設計した。この認証スキームは、フェーズ I 評価プロセス（設計段階の評価）とフェーズ II 評価プロセス（製品の評価）で構成され、評価に必要となる資料の例を検討してロボット開発者の参考となるように整理した。さらに、この認証スキームによる 3 件の認証書を発行した。

3. 生活支援ロボットの安全設計支援ツールの研究開発

機械安全の思想を生活支援ロボットに適用するために、ロボットタイプごとの設計コンセプト自己チェックシートおよびリスクアセスメントシートの雛形を開発した。さらに、安全方策配置方法の例を検討してロボット開発者の参考となるように整理した。また、安全設計の際に用いる機能安全設計支援ツールとして、ハードウェアの部品データから安全整合性水準（SIL）を計算するソフトウェアを開発した。さらに、コンピュータシミュレーションで仮想的に事故を起こして可視化できるシミュレータの技術を開発した。

4. 生活支援ロボットの安全性検証試験方法の研究開発

4.1 試験項目の検討結果

機械安全の国際規格 ISO13849 の危険源リストから、生活支援ロボットに関連しそうな危険源を選択して開発項目とした。

4.2 人体への危険に関する安全性検証試験

既存の試験規格を参考にして、生活支援ロボットの感電試験、騒音試験、表面温度試験の方法を開発した。また、生活支援ロボットの衝突を再現する試験方法を開発するとともに、自動車分野のデータを整理することで、試験結果から危害を算定するための指標を提案した。生活支援ロボットのマニピュレータが人体を挟圧した場合の危害については、保護方策の有効性を検証するための狭圧安全性試験の方法を開発し、文献の痛覚耐性値データに基づく判定指標を提案した。また、装着型ロボットによる装着箇所の創傷を対象とする接触安全性試験の方法を開発し、垂直荷重およびせん断力に基づく評価指標を検討した。

4.3 ロボットの耐久性に関する検証試験

生活支援ロボットの悪環境下での使用や長時間使用を想定した場合、ロボット本体構造や内蔵された制御装置、保護装置等が何らかのダメージを受けることが危惧される。その

ため、温湿度および振動環境耐久性、走行耐久性、耐荷重性、耐衝撃性を検証するための試験装置を開発し、開発実施者から提供されたロボットによる各種試験の試行結果をフィードバックすることにより、試験方法を開発した。

4.4 ロボットの安定性に関する検証試験

ロボットの移動も含めた使用中の安定性の欠如によるリスクへの保護法策を検証するため、静的安定性試験および動的安定性試験の方法を開発した。

4.5 安全関連機能の検証試験

生活支援ロボットには、本質安全では対処しきれないリスクに対する防護方策として、安全関連機能が実装されていることが多い。これらの機能検証のため、安全関連光学センサの機能試験、障害物検知対応性能試験、操作・情報提示機能検証試験、EMC 試験に関する各種試験装置開発や設備導入を行い、開発実施者から提供されたロボットによる各種試験の試行結果をフィードバックすることにより、試験方法を開発した。国際規格として制定されている IEC 61508 等の機能安全規格に準拠した機能安全文書テンプレートを作成した。電氣的な故障注入試験装置を用いて、ロボットの統合状態での故障注入試験を試行し、妥当性確認計画に沿った機能安全の妥当性確認の事例を示した。

5. 国際標準化活動

プロジェクトで得られた知見を生活支援ロボットの安全に関する国際規格 ISO13482 策定活動に提供し、同規格の発行に貢献した。また、開発した安全性検証試験方法を基に安全性試験に関する国際標準化原案が我が国から提案された。

6. 生活支援ロボットの安全に関する法規制等の調査

生活支援ロボットを実用化するために考慮すべき法律と社会制度を、欧州と日本を中心に国内外の公開情報を基に調査、検討した。その詳細を付属書に整理した。

7. 生活支援ロボットの安全に関する情報データベースの開発

プロジェクト成果の普及と安全関連データの蓄積・再利用のために、インターネットサイト「生活支援ロボット安全情報センター (RT safety Information Center)」を開発した。

8. 第三者認証および第三者試験体制の構築

生活支援ロボットという新たな製品分野の第三者認証を実現にあたっては、安全評価に特化した試験方法、試験設備の開発、評価者育成を進めている第三者の試験機関や研究機関等の相互協力ならびに運営体制が不可欠であることが明らかになった。

9. ディペンダブルロボティックカートを使った ISO 13482 評価の実例

本事業で開発した認証スキームにそって、安全検証と認証手順を実施することで、今後のロボット開発者が ISO13482 適合認証を取得する場合に参考となる事例を提供する。

事業全体の成果

目 標	研究開発成果	達成度	課題と解決方針 ※未達の場合のみ
各タイプのロボットのリスクアセスメント手法の確立	リスクアセスメントシート雛形を完成	100%	
	リスクアセスメントシート雛形を開発者に提供	100%	
リスクアセスメント手法をロボット開発実施者に提供	ISO/TC199 に新規作業項目として提案	100%	
	試験法を確立した	100%	
耐性指標等の国際標準提案を行える	ISO/TC184/SC2/WG7 に試験方法案を提案し、標準化作業を開始した	100%	
安全性試験評価方法の確立	認証スキームを確立し、3件の認証を発行した	100%	
試験方法等について国際標準提案を行える			
安全性基準適合性評価手法の確立			

特許、論文、外部発表等の件数（内訳）

区分 年度	特許出願			論文・記事		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学会発 表・講演	報道（新聞・ 雑誌等への 掲載）	その他展 示会等
H21FY	0件	0件	0件	0件	2件	0件	0件	0件
H22FY	0件	0件	0件	0件	0件	8件	7件	0件
H23FY	1件	0件	0件	0件	3件	16件	3件	1件
H24FY	0件	0件	0件	1件	3件	30件	1件	1件
H25FY	0件	0件	0件	1件	3件	19件	0件	2件

目次

1. 生活支援ロボットの安全に関する総説	1
1.1 生活支援ロボットの安全性をいかに保証するか	1
1.2 リスクアセスメントに基づく安全設計の原則と支援ツール	1
1.3 試験とこれに基づく認証スキーム	2
1.4 国際安全規格策定への主導的参加の効果と成果	3
1.5 本報告書の構成	4
2. 生活支援ロボットの認証スキームの研究開発	5
2.1 認証スキーム設計	5
2.2 ISO 13482 の要求事項の解釈	14
3. 生活支援ロボットの安全設計支援ツールの研究開発	17
3.1 設計コンセプト自己チェックシート	17
3.2 リスクアセスメントシートと保護方策配置方法	100
3.3 機能安全設計支援ツール	119
3.3.1 ハードウェア支援ツールの開発	119
3.3.2 ソフトウェアのひな形（決定論的原因故障）	120
3.3.3 状態遷移図による SIL 計算	120
3.4 物理演算による事故シミュレーションツール	122
4. 生活支援ロボットの安全性検証試験方法の研究開発	132
4.1 試験項目の検討結果	132
4.2 人体への危険に関する安全性検証試験	134
4.2.1 感電試験	134
4.2.2 騒音試験	138
4.2.3 表面温度試験	143
4.2.4 衝突安全性試験	147
4.2.5 挟圧安全性試験	165
4.2.6 接触安全性試験	175
4.3 ロボットの耐久性に関する検証試験	186
4.3.1 温湿度および振動環境耐久性試験	186
4.3.2 走行耐久性試験	193
4.3.3 耐荷重試験	201
4.3.4 耐衝撃試験	203

4.4 ロボットの安定性に関する検証試験	205
4.4.1 静的安定性試験	205
4.4.2 動的安定性試験	207
4.5 安全関連機能の検証試験	217
4.5.1 安全関連光学センサの機能試験	217
4.5.2 障害物検知対応性能試験	219
4.5.3 操作・情報提示機能検証試験	230
4.5.4 EMC 試験	233
4.5.5 機能安全文書テンプレート	247
4.5.6 故障注入による機能安全の確認試験実施例	248
4.6 試験の実績	252
5. 国際標準化活動	253
6. 生活支援ロボットの安全に関する法律と制度の調査	257
7. 生活支援ロボットの安全に関する情報データベースの開発	261
8. 第三者認証および第三者試験体制の構築	265
9. ディペンダブルロボティックカートを使った ISO 13482 評価の実例	270
10. 研究開発成果の発信実績	272

1. 生活支援ロボットの安全に関する総説

1.1 生活支援ロボットの安全性をいかに保証するか

製品が安全であるということを立証するためには、当該製品に係る規格が存在し、これに適合していることが第三者によって認証されなければならない。根拠をもたずして、自ら開発した製品を傍らに、「わが社のロボットは、安全です」と自慢しても、ビジネス上は意味をもつことができないのである。たとえば、自社開発した産業用ロボットを欧州に向けて輸出し、彼らに使ってもらおうと思えば、CEマーキングを取得しなければならない。そのためには、機械指令のモジュール Aa の適合性手順に従う必要があるとされている。これは具体的には、国際規格 ISO10218 に沿って外部認証機関により必要に応じ試験を実施してもらい、その適合証明をもって自己宣言書を作成してはじめて、マーキング取得申請が可能となるのである。つまり、安全性を保証するには、第三者の関与と公に定められた手順に従う立証が必要になる、ということである。

では、わが国の事情はどうであろうか。上記の産業用ロボットを例にとると、労働安全事情が欧州とは異なっていることから、国内では労働安全衛生法にしたがって労使ともに、リスクアセスメントを実施し、許容できないリスクに対するリスク低減方策を実施する必要がある。その際、労働安全衛生規則や産業用ロボットの使用等の安全基準に関する技術上の指針の当該条項各項への準拠が求められる。近年は、ISO10218 のたとえば Part1 に対応する JISB8433-1 が、キーワードとして指針の中に掲げられていることもあって、これらがたとえ任意規格としての位置付けであっても、これに準拠しようとするコンプライアンス意識が関与する企業の間で醸成されつつあるというのが実態である。

では、開発製品が歩道において歩行速度で搭乗できるロボットであったらどうであろうか？本事業がスタートした 2009 年の時点において、国内には、電動車いすの JIS 規格がある程度で、搭乗型ロボットを対象とした生活支援ロボットのための国際安全規格 ISO13482 の策定が始まったばかりで、JIS 規格もなかった。これは、搭乗型を含む人間共存型の移動ロボット全般について言えることであり、さらに、実用化に向けて開発機運が高まり、注目を集め始めている装着型ロボットについても、同様であった。

当時は、わが国を含め世界が、次世代指向の、すなわち人間共存型の生活支援ロボットの製造や使用に対し、適合性手順が存在しない状態に置かれていたのである。加えて、わが国には、ロボットの安全性について妥当性を確認するための試験方法も認証スキームもなく、そもそも第三者認証制度を支える社会構造が存在してこなかった。

1.2 リスクアセスメントに基づく安全設計の原則と支援ツール

その後、ISO13482 は FDIS が 2013 年 9 月に出版されるまでに至った。つまり、過去の 4 年余が、生活支援ロボットのための国際安全規格策定に費やされてきたことになる。これはちょうど、本事業期間と重なるものであり、本事業では、予めこの機会に合わせて、先

に述べた安全性を立証するための試験方法や認証スキームの確立をはじめとする国内の社会的な責任分担構造を構築することを目標に計画立案がなされてきた。

ISO13482 は、他の安全規格と同様で、リスクアセスメントをベースにして、ハザードの抽出からリスク低減方策まで、「パーソナルケア・ロボット」と呼ぶ移動ロボットおよび人間装着型ロボットをとくに対象とした設計原則を論じている。その詳細は、あとの第3章で明らかにされるが、生活支援ロボットに特有の典型的なリスクシナリオが取り上げられ、これに対処するための手順とプロセスが、本事業を通じて掲げられた。

さらに、本事業でとくに参画企業にとり主要な論点であるリスク低減方策については、「機能安全」と呼ばれる概念に基づく安全技術が、近年体系化されてきている。電気電子プログラマブル電子系のデバイスを対象とするこの技術体系は、デバイスの故障を、ハードウェアに起因する偶発的故障と、主にソフトウェアやアーキテクチャに起因する系統的故障とに分類した上で、それぞれについて詳細に方策論を展開するものである。しかしながら、その実践には一般に多労が伴い、ときに技術的な理解ですら困難が付きまとうことから、その概念的な本質さから適用分野も広いと期待されているにもかかわらず、社会的な浸透に時間がかかっている現状にある。

そこで本事業では、機能安全のための設計支援ツールの開発を行うことにした。これは、安全技術構築のコンセプトづくりにはじまり、機能的な安全性を達成するために要求される SIL (Safety Integrity Level) と呼ばれる安全性の基準を満たすための具体的な安全技術の構築までを支援するものである。これにより、従来、膨大な時間とコストを所要する懸念がもたれた機能安全技術構築が高効率にできるようになった。

1.3 試験とこれに基づく認証スキーム

同時に本事業では、ここまで ISO13482 の適用範囲では詳細に取り上げられることのなかった、パーソナルケア・ロボットに関わる技術の安全性立証のための試験方法を考案してきた。老人子供を含めた移動ロボットによる衝突時の傷害耐性値の集積に始まり、複合環境下での同ロボットの耐環境試験や移動ロボットに固有な安全機能の試験、さらに装着型ロボットの耐久性や接触安全性が試験の対象であるとして、試験装置を含む方法の構築を行ってきた。のみならず、必要と想定される試験項目については、むしろ、国際規格の中にこれに対応する安全要求事項を整備する旨、国際標準化の会合の場で提案も行った。

安全に関わる試験の目的は、一般には V&V、すなわち Verification & Validation と呼ばれる2つの側面がある。前者 Verification は、安全検証と日本語に訳されるもので、安全性を達成するために満たさなければならない数値目標を試験的あるいは論理的に見出す行為である。これに対し、後者 Validation は、妥当性確認と訳され、検証された安全数値目標が、実際に技術によって達成されているか否かを確認・判断するものである。

他方、ロボットを対象とした認証スキームに関する技術も、これまでわが国では蓄積がなされてきていなかったことを先に述べた。一言で認証スキームの開発と言っても、サンプル

リングに始まり特性の確定からレビュー，さらに認証可否の判断およびライセンス授与までの一連のプロセスを確定する必要がある．ここで，サンプリングとは，評価の対象と適用すべき規格の選択を行う行為である．また，特性の確定とは，正味の認証スキームのことで，評価手法と基準の確定，および評価活動の規定を指す．

欧米と同じスタートラインに立つということは，開発競争に関する時間的・歴史的なハンディがないというメリットがあるが，模倣すべき先事例がないので，開発活動には困難が多く伴う．生活支援ロボットの場合は，サンプリング対象がすでに定まっているとはいえ，評価手法の骨子をなす評価項目やそれぞれの項目に対する安全基準をいかに定めるかは，先事例が存在しないゆえに，独自の判断基準を持たなくてはならないが，評価値はアプリケーションに依存する．本事業では，パイロットスタディという形で，メーカーの開発品を具体的な対象とした認証スタディが実施された．その結果，ISO 13482 の委員会原案（CD）をベースとして，同業界で世界発の認証マークを装着型ロボットに対して与える活動を成功裏に導いた．

1.4 国際安全規格策定への主導的参加の効果と成果

ここまでの議論で，本事業において，生活支援ロボットの安全要求事項を議論する上で，好都合に ISO 13482 の規格が利用できる準備ができていたことは，特筆すべきことと判断される．すなわち，2009年の時点で，パーソナルケア・ロボットの安全規格策定を開始した当初に，わが国でその後市場創出・展開を見るであろう重点ロボット分野を特定し，これらをパーソナルケア・ロボットの具体的な製品として安全要求事項を規定して行くように，標準化会議で求めたのは，チームジャパンの功績であった．その結果，次世代型人間共存型の生活支援ロボットの事業化を推進する企業が，彼らの高い関心の下に，数多く本事業に参加し，あるいはさらに，JARA がオーガナイズするサービスロボットの安全性に関する標準化ワーキングやビジネス協議会に出席して議論に加わった結果，国際的にも大きな力をもつ結果となった．

のみならず，1.3 で述べた数々の生活支援ロボットのための主要な安全試験方法の開発と並行して，これまで，ISO13482 の策定後のパーソナルケア・ロボットに関する標準化動向として，試験方法を標準化する方向性を国際会議で提案し，主導しつつある．この活動に対しても，本事業でコンソーシアム # 1 を構成する研究機関や大学が積極的に国際会議に足を運んで，実績を残してきた．過去 20 年余にわたる審議団体主導の国際標準化活動においても，このように国家的な事業と連携して戦略的に標準化を進めた実績はなく，まさに本事業の，そしてこれに参加する各組織の尽力の賜物と位置づけられ，今後ますます，その成果の国際的な影響に期待がもたれる．

1.5 本報告書の構成

本報告書では、以下まず2章を「生活支援ロボットの認証スキームの研究開発」と題して、「認証スキームの設計」プロセスの構築および「ISO 13482 の要求事項の解釈」の仕方について成果を報告する。

第3章は、「生活支援ロボットの安全設計支援ツールの研究開発」であり、コンセプト設計上重要な役割を担う「設計コンセプト自己チェックシート」や、具体的な事例に基づいてリスクアセスメントへの導入に貢献した「リスクアセスメントシートと安全方策配置方法」の開発成果について報告する。さらに、本事業に参画する企業向けに機能安全技術の効率的導入を趣旨として開発された「機能安全設計支援ツール」を紹介し、最後に、種々の産活支援ロボットのリスクアセスメントを実施する上で高い有用性の期待できる「物理演算による事故シミュレーションツール」について報告する。

第4章は、「生活支援ロボットの安全性検証試験方法の研究開発」について開発成果を述べる。はじめに、本事業で検討した試験項目を掲げ、「人体への危険に関する安全性検証試験」「ロボットの耐久性に関する検証試験」「ロボットの安定性に関する検証試験」「安全関連機能の検証試験」に大分類して、それぞれ開発した試験方法につき詳述した後、「試験の実績」を概述する。

第5章では、コンソーシアムの成果のひとつと位置づけ、戦略的に取り組んだこれまでの「国際標準化活動」を国際会議への参加報告の形でまとめる。

第6章では、「生活支援ロボットの安全に関する法規制等の調査」として、生活支援ロボット関連の国内法制度の調査を皮切りに、欧米と日本における安全の考え方の違いを考察し、アジアと欧米の安全認証制度の差異を分析して、わが国主導の安全認証制度のアジア展開に言及する。

第7章では「生活支援ロボットの安全に関する情報データベースの開発」として、これまでの事業の諸活動によって蓄積されてきた成果物をデータ活用の観点で整備してきたデータベースシステム RT-SIC の概要について報告する。

第8章では、「第三者認証および第三者試験体制の構築」と題して、ここまでの事業活動で何が達成でき、さらに、今後のわが国においてロボット安全を支えるための準備について報告する。そしてに、本事業のコンソーシアム#1の到達目標に対して、その趣旨を汲んで詳細技術開発に注力した CYBERDYNE 株式会社の装着型ロボットの第三者認証の実例を紹介する。

第9章では、特定の搭乗型生活支援ロボットを例にとり、本事業で開発した認証スキーム（第2章）にそって、安全検証と認証手順を実施することで、今後のロボット開発者が ISO13482 適合認証を取得する場合に参考となる事例を提供する。

2. 生活支援ロボットの認証スキームの研究開発 [JQA]

2.1 認証スキーム設計

2.1.1 背景

(1) 国際規格における適合性評価と適合性評価機関の位置付け

国際規格 ISO/IEC 17000:2004 (JIS Q 17000:2005)「適合性評価—用語及び一般原則」では、適合性評価機関の認定を含めて、適合性評価に関する一般用語及び定義、並びに貿易を容易にする目的での適合性評価の利用に関する一般用語及び定義を規定しており、適合性評価 (Conformity assessment) とは、「製品、プロセス、システム、要員又は機関に関する規定要求事項が満たされていることの実証」であると規定し、適合性評価機関 (Conformity Assessment Body) は「適合性評価サービスを実施する機関」と規定している。適合性評価サービスを実施する機関には「認証機関」、「試験・校正機関」及び「検査機関」などがあり、とくに「認証機関」には、製品、プロセス、サービスに関わる規定要求事項への適合性を評価する「製品認証機関」、組織などの品質や環境などのマネジメントシステムへの適合性を評価する「マネジメントシステム認証機関 (登録機関と呼ぶ場合がある)」及び溶接技能者などの要員の力量に関する適格性を評価する「要員認証機関」に大別される。この場合の認証 (Certification) とは「製品、プロセス、システム又は要員に関する第三者証明」であると規定している。

(2) 第三者適合性評価の概念と認証の意義

適合性評価の社会的役割は、適合性評価の力量をもつ実施者が客観的な方法で評価活動を行い、その結果を「証明 (Attestation) : レビューに従った決定に基づく、規定要求事項の充足が実証されたと言う表明の発行」として提供することにある。適合性評価の実施主体については、適合性評価の対象の性質などに応じて、第一者、第二者及び第三者があり、実施した適合性評価はそれぞれ、第一者証明、第二者証明及び第三者証明と呼ばれている。これらの中で、特に社会的懸念 (安全、健康、環境の保護など) に係る場合やその客観性を求められる場合は、供給者や購入者とは無関係で中立的な立場にある第三者によって行われることが多い。また、製品認証システムに関する指針である国際規格 ISO/IEC 17067 では「製品 (プロセス及びサービスを含む) が規定要求事項を満たしていることの書面による保証を第三者が与える活動」と定義されており、その目的は、消費者や使用者に対しては「製品の規定要求事項を満たしていることの信頼性の提供」や「よりよい購入判断のため」であり、供給者・市場管理者に対しては「製品が市場に受け入れ易くするため」とされている。このように製品、プロセス又はサービスなどが規定要求事項を満足しているかを確認することが適合性評価と定義されている。

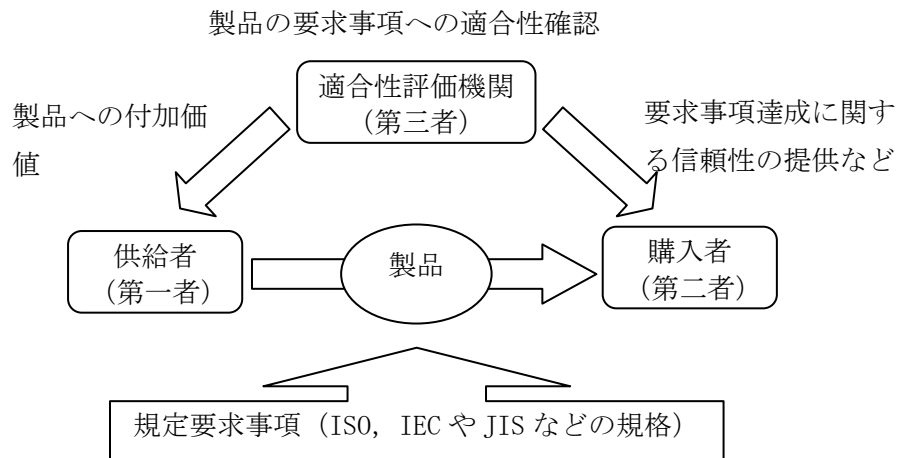


図 2.1.1-1 適合性評価の概要

(3) 国際的に通用する制度設計

1995年に発効したWTO/TBT協定では、各国に対し強制規格や適合性評価手続きの作成等を行う際には、原則として国際規格を基礎とすることが義務付けられている。このことにより、各国の適合性評価を国際的に調和させることによって貿易の技術的障害を低減させることができるとされている。CASCOは(Committee on Conformity Assessment)は、適合性評価委員会と呼ばれており、ISOの中に3つある政策開発委員会のうちの一つであり、適合性評価の原則と実施に関する問題を扱っている機関である。1970年に発足し、現在、Pメンバー(Participating countries)として73カ国、Oメンバー(Observing countries)として47カ国が参加しており、規制当局、規格開発機関、認定機関及び認証機関など幅広い規格ユーザの専門家が参加している。CASCOの委任事項は、次に示したとおりであり、その使命は、適合性評価のための整合的なガイド、規格の維持・開発、そのグローバルな普及並びに、それらを使った適合性評価結果のグローバルな受入れの促進である。

<CASCOの委任事項>

- ・製品、プロセス、サービス及びマネジメントシステムの適合性を評価する方法についての検討
- ・製品、プロセス、サービスの試験、検査、認証の実施並びに管理システムの認証機関、認定機関の評価及びそれらの運用と採用に関する国際的な規格及び指針の作成
- ・国及び地域レベルの適合性評価システムの相互承認、並びに試験、検査、認証、評価及び関連目的のための国際規格の適切な使用の促進

認証スキームの開発に当たって、CASCO で作成された国際規格に準拠させることで、WTO/TBT 協定の要件を満たし、国際的に通用し得る認証スキームが構築されることになる。

具体的には、CASCO において、製品認証システムを設計するための手法に関して規定した ISO/IEC 17067（製品認証の基礎）が作成されていることから、ISO/IEC 17067 に準拠させることで国際的に通用する認証スキームを構築することができる。ISO/IEC 17067 では、認証スキームは適合性評価の該当する各機能について具体的な活動を規定することで構築されるとされており、表 2.1.1-1 において ISO/IEC 17067 で規定されている、製品認証が採用されている様々な分野において用いられている活動の組合せと認証スキームのタイプについて示す。

表 2.1.1-1 製品認証スキームの構築

製品認証スキームにおける適合性評価の機能及び活動		製品認証スキームのタイプ							
		1a	1b	2	3	4	5	6	N
I	選択 該当する場合、計画及び準備の活動、基準文書などの要求事項の特定、ならびにサンプリングを含む	X	X	X	X	X	X	X	X
II	特性の確定 該当する場合、次による a) 試験 b) 検査 c) 設計評価 d) サービス又はプロセスの評価 e) その他の特定活動（例えば、検査）	X	X	X	X	X	X	X	X
III	レビュー 規定要求事項が満たされたかどうかを実証するための、確定段階で得た適合性の証拠の調査	X	X	X	X	X	X	X	X
IV	認証の決定 認証の授与、維持、拡大、縮小、一時停止又は取消し	X	X	X	X	X	X	X	X
V	証明、ライセンスの授与								
	a) 認証書又はその他の適合の表明の発行（証明）	X	X	X	X	X	X	X	X
	b) 証明書又はその他の適合の表明の使用権の授与	X	X	X	X	X	X	X	
	c) 製品のパッチに対する認証書の発行		X						
	d) サーベイランス（VI参照）又はパッチの認証に基づく適合マークの使用権の授与（ライセンスの授与）		X	X	X	X	X	X	
VI	サーベイランス 適用可能な場合、次による								
	a) 市場からのサンプルの試験又は検査			X		X	X		
	b) 工場からのサンプルの試験又は検査				X	X	X		
	c) 製品の生産、サービスの提供又はプロセスの運用の評価				X	X	X	X	
	d) 無作為試験又は無作為検査と組み合わせたマネジメントシステム監査						X	X	

（出典：JIS Q17067）

2.1.2 国際ガイドを適用した国内の製品認証スキームの事例

(1) JIS マーク表示制度の事例

JIS マーク表示制度は、工業標準化に基づいた制度であり、製品が該当する日本工業規格の基準を満たしていることを示すものであり、適合していることの証明として JIS

マークを表示することができる任意の認証制度である。JIS マーク表示制度自体は工業標準化法制定（昭和 24 年）以来の歴史があるが，適合性評価制度の国際統合化などを図るため，平成 16 年に工業標準化法が改正され，新しい JIS マーク表示制度が開始された。この国際統合化に対応するため，JIS マーク表示制度にも国際規格が導入されている。JIS マーク表示制度における適合性評価の機能及び活動を図 2.1.2-1 に示す。なお，システム 5 について，ISO/IEC 17067 では「よく使用されている実証済みの認証システム」として例示されており，JIS マーク表示制度においてもシステム 5 が活用されている。

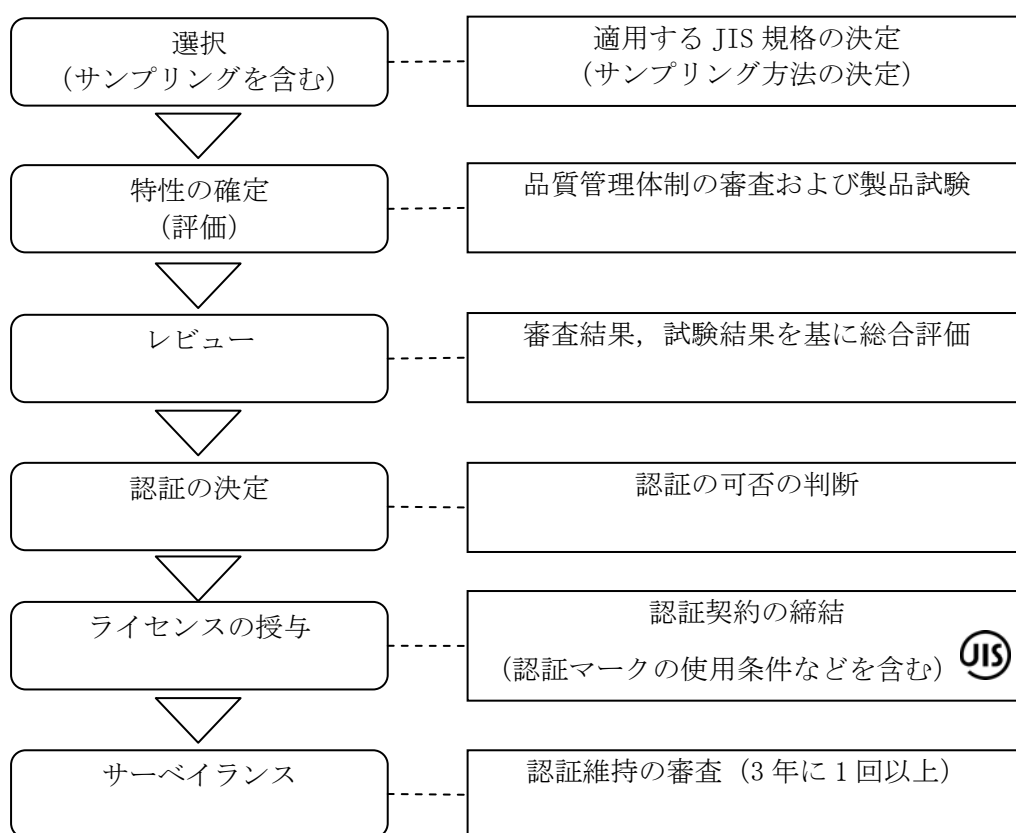


図 2.1.2-1 JIS マーク表示制度の認証スキームの例

(2) 電気用品安全法の事例

電気用品安全法は，電気用品の製造，輸入，販売等を規制するとともに，電気用品の安全性の確保につき民間事業者の自主的な活動を促進することにより，電気用品により危険及び障害の発生を防止するものであり，適合性の確認は，品目により，製造者など自身が自ら確認する製品（特定電気用品以外の電気用品）と，経済産業大臣の

登録を受けた登録検査機関と呼ばれる機関による確認が必要な製品（特定電気用品）の2通りがあるが、図2.1.2-2では、特定電気用品の適合性評価の機能及び活動を示す。なお、特定電気用品及び特定電気用品以外の電気用品ともに技術基準への適合性の証明としてマーク表示を付さないと販売することはできない。サーベイランスについては、JISマーク表示制度のように定期的な審査ではないが、必要に応じて経済産業大臣が製造者などから報告を徴取や立ち入り検査を実施することができ、本制度についても国際規格（ISO/IEC 17067）に準拠したスキームであると言える。このように国際規格（ISO/IEC 17067）に準拠したスキームを構築していることの最大のメリットとして、電気用品安全法（含む改正）と電気機器に関する欧州理事会指令73/23/EEC（含む改正）並びに電磁両立性に関する欧州理事会指令89/336/EECに関して、2001年4月に「日・欧州共同体と相互承認協定（相互承認に関する日本国と欧州共同体との間の協定）」に署名し、2002年1月に同協定が発効している。

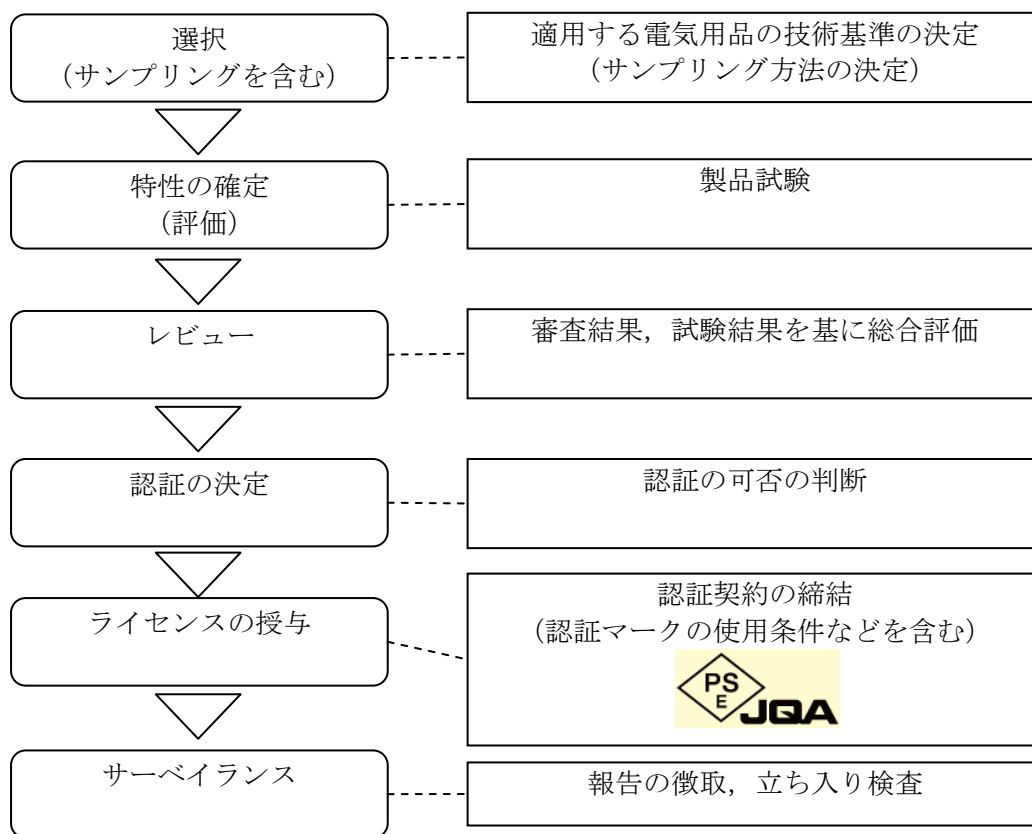


図2.1.2-2 電気用品安全法の認証スキームの例

(3) S マークの事例など

S マークとは、電気用品安全法を補完し、電気製品の安全のための任意の第三者認証制度であり、この制度を協議している団体は電気製品認証協議会で、製造者団体、流通団体、消費者団体、認証機関等 48 団体及び学識経験者により構成される。同協議会は平成 6 年 12 月に発足し、翌平成 7 年から認証機関による業務が開始されている。S マークの適合性評価の機能及び活動を図 2.1.2-3 に示す。S マークの認証スキームも前述の JIS マーク表示制度及び電気用品安全法の認証スキームと同様、国際規格 (ISO/IEC 17065) に準拠したスキームとすることができる。

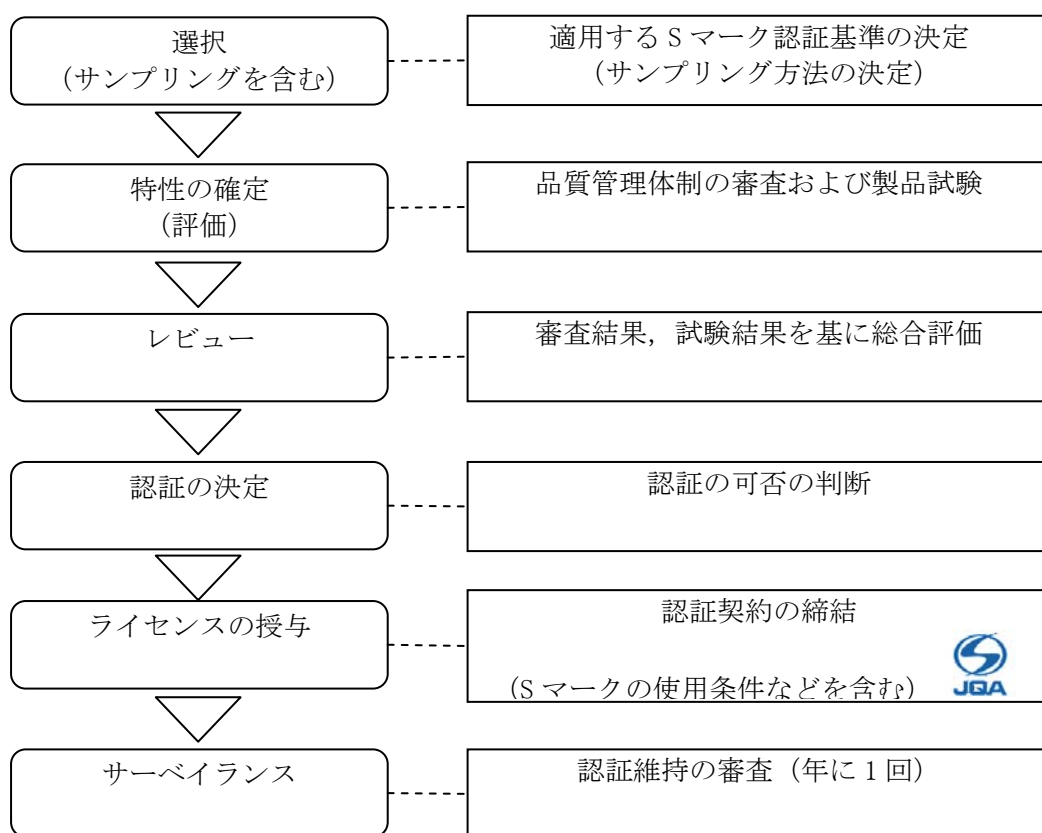


図 2.1.2-3 S マークの認証スキームの例

2.1.3 生活支援ロボットの認証スキームの解説

(1) ISO/IEC 17067 の製品認証スキーム (システム 5) の適用

製品認証スキームには多くの一般的共通要素があり、表 2.1.1-1 で示したようなマトリクスとして形態が示されている。このマトリクスでは、特定の製品認証スキームを確立するためにこれらの要素をどのように組み合わせることができるかを提示

してある。今回の生活支援ロボットの認証スキームを構築するにあたっては、システム5を採用した。この理由は、ISO/IEC 17067では「システム5が、よく使用されている実証済みの認証システム」として例示されていることは既に説明したが、この他の要素として、新しい製品分野の認証スキームであることから、未知数も多く、様々な状況にも対応できるようにするためである。構築した生活支援ロボットの認証スキームを図2.1.3-1に示す。

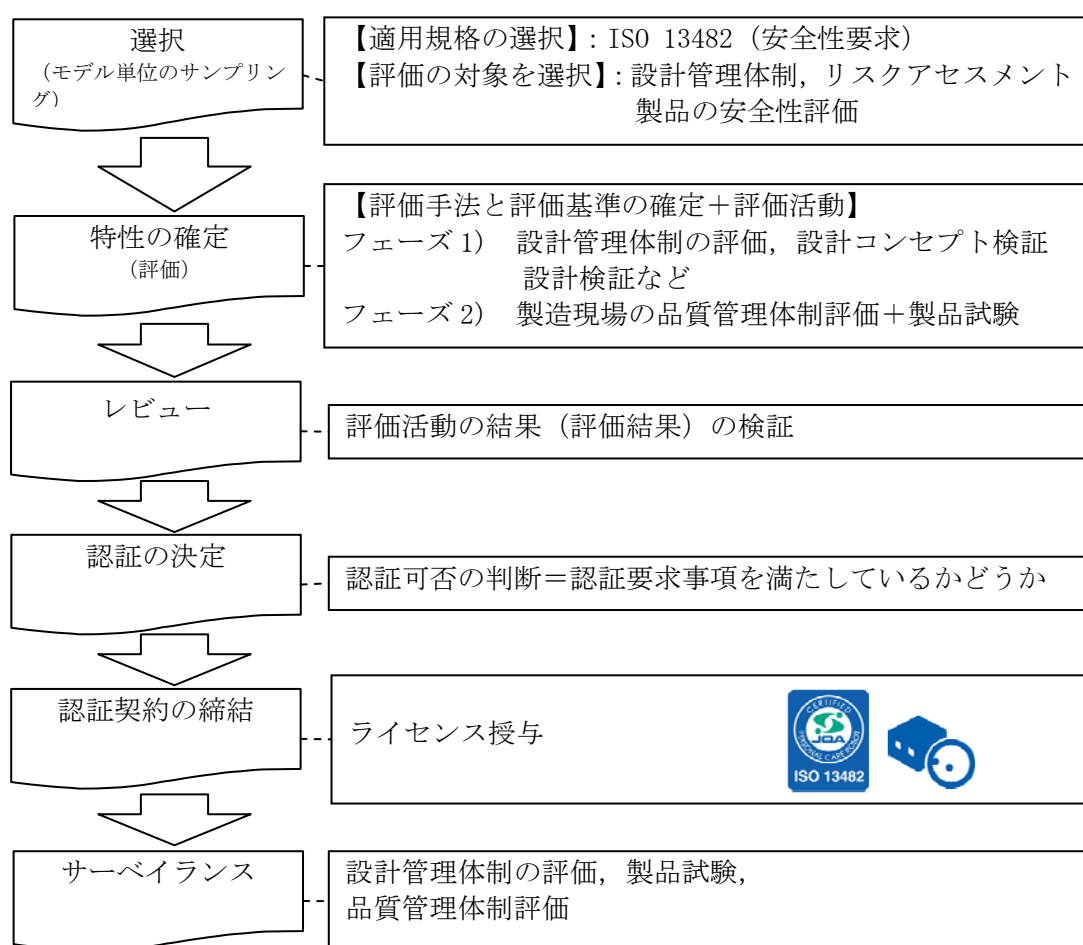


図 2.1.3-1 生活支援ロボットの認証スキーム

(2) 認証までの各プロセスの解説

認証までには、図2.1.3-1で示した「選択(モデル単位のサンプリング)」から「サーベイランス」までの6つのステップがある。「サンプリング(選択)」では認証のために適用する規格を選択し、評価の対象を選択する。生活支援ロボットの場合、適用

規格は ISO 13482 が選択され、評価の対象には設計管理体制、リスクアセスメント及び製品の安全性評価が選択されることになる。次のステップである「特性の確定」では「サンプリング（選択）」で選択された評価対象に関する評価手法と評価基準の確定を行い、実際の評価を実施する。生活支援ロボットの場合、フェーズ1とフェーズ2に区分し、フェーズ1では設計管理体制の評価、設計コンセプト検証及び設計検証など、製品になる前の段階について評価を実施し、フェーズ2では製造現場の品質管理体制の評価と製品試験を実施することになる。「レビュー」では、それまでに行ってきた評価活動について検証が行われる。そして、「認証に関する決定」において、「レビュー」の結果などを基に認証可否の判断が行われることとなる。この後、認証マークのライセンス授与のため、「認証契約の締結」が行われる。さらに、認証には有効期限が設けられており、この間、認証要求事項が維持されているかどうかを確認するために「サーベイランス」が行われる。「サーベイランス」では、設計管理体制の評価、製品試験及び製造現場の品質管理体制の評価を行う。

2.1.4 課題

(1) 特性の確定の重要さと難しさ

「特性の確定」においては、評価手法と評価基準の確定を行い、実際の評価を実施することは既に説明したところではあるが、例えば家電製品などは長い歴史の中で事故や危険事象などの蓄積情報を基に、製品ごとに要求事項における評価基準が作成されている。このため、適用する製品安全規格には具体的な数値などによる評価基準が明示されている。しかし、生活支援ロボットの場合、新しい製品分野であるため、事故や危険事象などの蓄積情報が少ないことや、使用環境や使用条件などが一律でないことから、要求事項と評価基準の設定に際しては、製造者によるリスクアセスメントに依存しなければならない。この結果、リスクアセスメントをベースに求められた基準がリスクを許容レベル内にするものとなっているか、許容レベルが安易に引き下げられていないか、また、製造者によるばらつきが大きくなってしまいう可能性もある。今後は具体的な数値基準を適用できるよう、試行評価や、事故・危険事象事例などのデータベースを充実させていくことが重要になる。

(2) 認証取得におけるメリット

製造者が自ら製品の安全性を確認することは当然のことであるが、更に中立的立場にある第三者による確認により認証を取得することで、製造者（供給者）には製品への付加価値などを付与し、購入者には要求事項達成に関する信頼性を提供するなどのアピールをすることができると考えられる。また、購入者にとっては、安全な製品を選択する際の目安となり、安心して製品を使用することができると考えられる。更に、

製造者にとっては、賠償責任保険などへの加入審査において、一定の評価を得ることができることが期待される。

第三者機関（認証機関）に対しても、守るべき要求事項を規定した国際規格（ISO/IEC 17065：製品認証とプロセス認証を提供する機関のための要求事項）が存在する。この規格では、認証機関の独立性、公平性及び力量など、認証機関が中立的な第三者として活動するための要求事項が定められている。認証機関がこの国際規格（ISO/IEC 17065）に準拠することで、中立的な立場で活動できる根拠となる。

2.2 ISO 13482 の要求事項の解釈

2.2.1 背景

(1) 標準化委員会の組織概要と活動

ISO 13482 の正式名称は、「Robots and robotic devices - Safety requirements for personal care robots」であり、ISO/TC184/SC2/WG7 において検討されてきた規格である。ISO/TC/184 の組織は図 2.2.1-1 に示すとおりである。ISO/TC184 は主に産業用の自動化システムについて取り扱う委員会であることから、ISO 13482 は産業用ロボットの安全性規格である ISO 10218 がベースとなって作成されている。

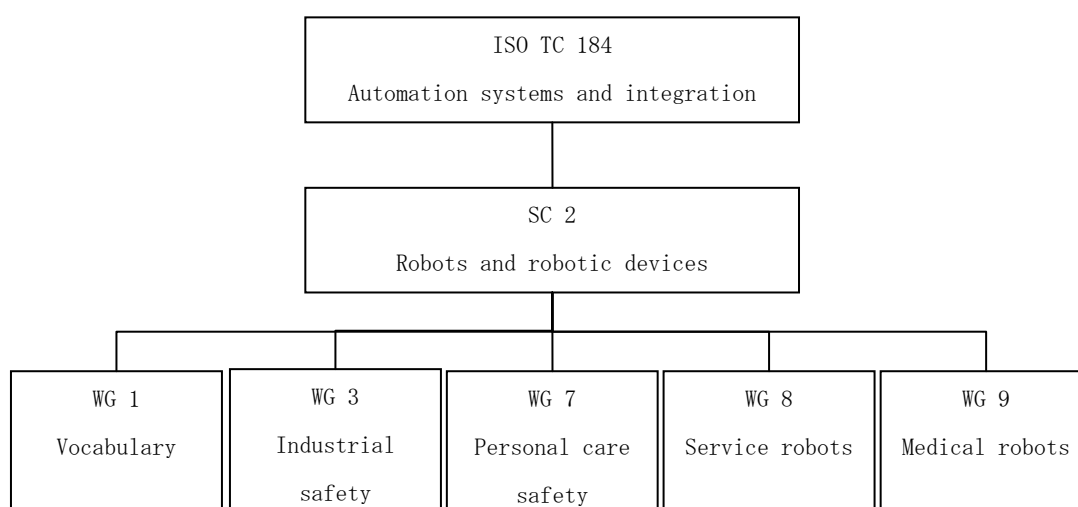


図 2.2.1-1 標準化委員会の組織概要

2.2.2 ISO 13482 要求事項の概要と解釈

(1) スコープや構成内容

ISO 13482 の適用範囲は、年齢や能力に関係なく、意図した機能を利用者の生活の質の向上のためタスクを実行するロボットであり、代表的なタイプとして、mobile servant robot（移動作業型）、physical assistant robot（装着型）及び person carrier

robot（搭乗型）の3タイプがフューチャーされている。ただし、20 km/hr より速い速度で移動することができるロボット，おもちゃのロボット，海自又は飛行するロボット，産業用ロボット，医療用ロボット及び軍事・治安に供されるようなロボットは適用外とされている。

規格は，主に，リスクアセスメントの手法，安全要求事項，安全関連制御システムに関する要求事項，検証と妥当性確認及び使用上の情報の5項目から構成されている。規格の構成概要については図2.2.2-1で示した通りである。

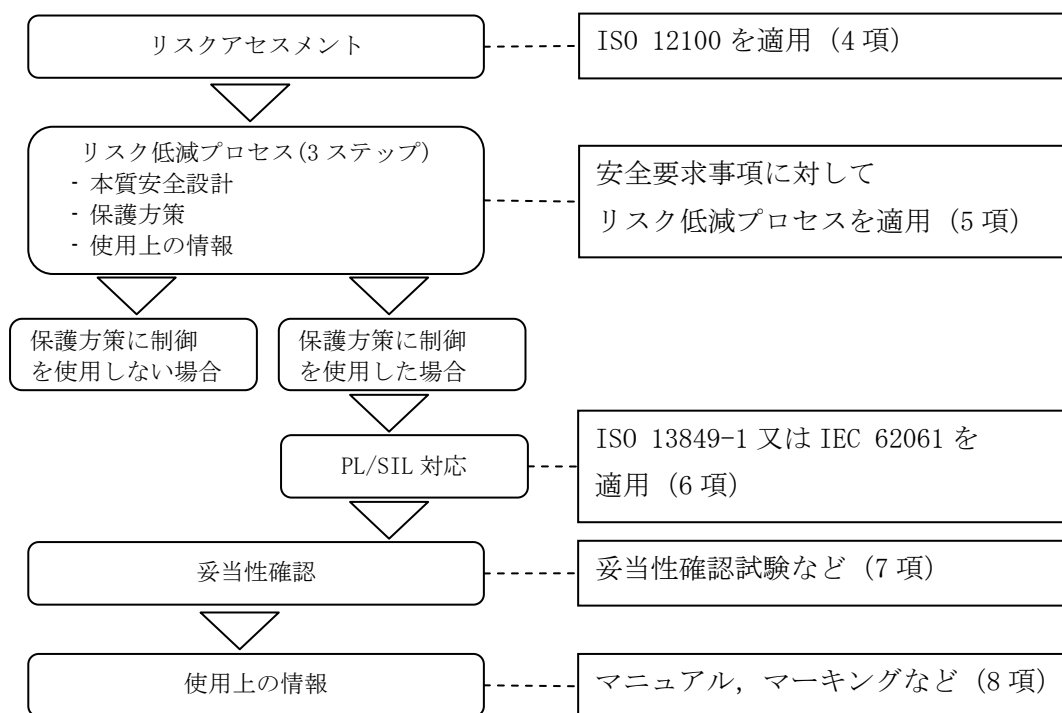


図 2.2.2-1 ISO 13482 要求事項の概要

(2) リスクアセスメントの重要性とリスクアセスメントシートの活用

2.1.4 の課題の項でも触れたように，ISO 13482 では様々なタイプの生活支援ロボットを取り扱っているため，要求事項と評価基準については，具体的に数値化されたものはほとんどなく，製造者によるリスクアセスメントをベースに基準を定めるよう規定されているため，それぞれの製造者が行うリスクアセスメントの手法や基準については，各社独自のものが使用されることになり，ばらつきが生じてしまうこととなる。そのため，リスクアセスメントは，この規格においては最も重要な項目と言える。そこで，これらの課題の対策として，(独)労働安全衛生総合研究所において，生活支援ロボットに使用できる標準的なリスクアセスメントシートを開発した。各社がこのシートを活用してリスクアセスメントを実施することで，ばらつきが少なくなり，リス

クアセスメントをベースに求められた基準がリスクを許容レベル内にするものとなる
と考えられる。

2.2.3 課題

ISO 13482 は様々なタイプの生活支援ロボットを取り扱っているため、要求事項と評価基準については具体的な数値化をされているものはほとんどない。より具体的な要求事項と評価基準を作成していくためには、家電製品の規格のようにロボットのタイプごとに検討していく必要があると考えられる。これにより、ロボットのタイプに応じた適切な基準を策定することができ、製造者にとっては設計・製造し易くなると共に、利用者にとっては、どの製造者が作ったロボットも一定水準以上の安全性を持って設計・製造されたことによる安心感につながると考えられる。さらに、ロボットに認証マークを付与することで、利用者には、使用するロボットの選択する際の基準とすることができるとともに、より安心感を与えることにつながると考えられる。

3. 生活支援ロボットの安全設計支援ツールの研究開発

3.1 設計コンセプト自己チェックシート [安衛研]

3.1.1 目的

人間にサービスを提供するような人間共存型ロボットには、従来の産業用ロボットで適用される「人間とロボットの隔離」による安全防護を適用することは難しい。また、人間共存型ロボットの目的のタスクを実行するためには、そのロボットが発する力や速度を本質的に抑えることには限界があるので、安全制御ベースの保護方策を導入せざるを得ない。ロボットがE/E/PE（電気/電子/プログラマブル電子）安全制御系を構成する場合、機能安全規格（IEC 61508[1]等）で規定される安全要求事項に適合することが求められる。

機能安全の考え方が導入された安全制御系を含むロボットの開発プロセスは、基本的にライフサイクルプロセスとして考えられる。これは、設計から運用、保全に至るまでの開発フェーズ毎に、計画、仕様、試験、検証に関連する文書を準備して、それらに従って開発を進めるという形態である。図3.1.1は、機能安全に基づくロボット開発フェーズと各フェーズに必要な関連文書との対応を示している。前半の設計フェーズでは、設計コンセプトを分析、検証するタスクとして、開発計画立案後、安全に関する基本的・詳細仕様を決定する（検証第1段階）。後半のフェーズでは、製作されたロボットに対する試験の結果に基づき、安全妥当性を評価して認証する（検証第2段階）。

以上の開発プロセスは、機能安全による安全関連部の設計において求められる過程であるが、機能安全を導入しなくとも前半の設計コンセプトに関わる過程は必須である。特に、安全の仕様を決定する上で必要な文書や開発体制の整備は対象ロボットの品質を確保する点からも重要な要素である。

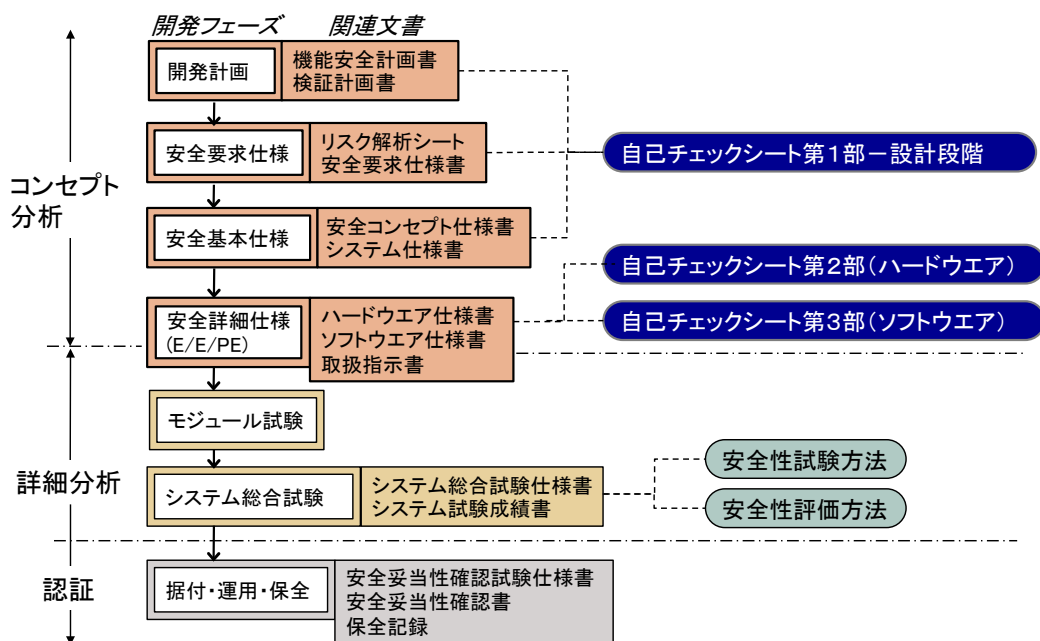


図 3.1-1 機能安全設計のフェーズ/関連文書とチェックシート

図 3.1.1 では前半の検証第 1 段階をコンセプト分析と呼び、ロボット設計者は、対象ロボットに対する安全要求事項を明確にし、それらを満足するために実施する保護方策とその実施体制、及びプロセスを準備、文書化しておかねばならない。特に、検証第 2 段階の認証を想定した場合に、以下の関連文書は重要となるため、十分な内容と品質が求められる。

- a. 機能安全計画書：関連する人・組織・技術の管理
- b. 安全コンセプト仕様書：安全設計概念，設計方針
- c. 安全要求仕様書：必要な安全要求仕様

なお、安全性の管理や文書管理については、品質管理規格（ISO 9001[2]等）に準拠していれば、従来の通常開発プロセスで準備する文書内容や様式等を利用することができる。

さらに、一部詳細分析にも含まれるが、安全詳細仕様を述べる次の仕様書についても、過不足ない安全要求事項の選択と十分な記述が必要である。

- d. ハードウェア仕様書：IEC61508-2[3]に基づく安全要求事項（本質的安全設計要件を含む）
- e. ソフトウェア仕様書：IEC61508-3[4]に基づく安全要求事項





以上の 5 つの重要文書をロボット設計者が作成するためには、機能安全規格を始めとした規格内容を理解し、必要とされる文書の記載項目を網羅しなければならない。

3.1.2 シートの構成と位置付け

ロボットの設計開発において必要な上述の 5 つの重要関連文書について、これらの必要事項の過不足と内容記述の適正さを設計者が自己確認するためのツールとして、3 部構成のチェックシートを作成した。図 3.1.1 では、これらのチェックシートと重要関連文書との対応付けを示している。これらのチェックシートの位置付けは、安全コンセプト認証を念頭に置いたコンセプト分析内容と必要文書の確認、及び機能安全規格で規定されている安全インテグリティレベル SIL2 または SIL3 を満足するハードウェア及びソフトウェアの安全要求事項を確認することである。

各チェックシートは MS エクセル上で作成し、設計段階と実現段階で確認すべき項目を設問として記述する形態であり、各設問はジャンル別に分類されている。各シートのチェック方法は、共通ルールとして各設問に対する達成度を表 3.1.1 のように定義し、該当するチェック記号を選択入力すると、表 3.1.1 の採点ルールに従ってジャンル別に得点が自動集計される仕組みである。基本的に、設問の配点（最大 3 点）に対して、チェック記号 A は 1 倍、B は 0.5 倍、C は 0 倍の計算を行った結果が得点欄に自動挿入される。なお、チェ

表 3.1-1 チェックシートのチェック方法

チェック入力		チェック欄の配点ルール	
記号	意味	色分け	意味
A	取り組み完了(設問をほぼ満足している)		同 No. 項, 又は他 No. 項目の点数に影響する
B	取り組み中(設問を一部満足している)		同 No. 項内の項目の点数に影響する
C	未取り組み(設問はほとんど実現されていない)		- (関係なし) をいれても良い
-	関係なし		A の数によって他の項目の点数に影響する

ック記号-はロボットタイプや機能により設問自体が該当しない場合であり，採点から除外するようにしている。

各シートの最終得点結果は，ジャンル毎の達成度を比較できるように得点を結んだレーダーチャートで示される。得点結果に対する判定は，ジャンル毎に配点満点の8割以上の得点を合格の目安とした。なお，各ジャンル間の判定相関はないため，ジャンル毎に完成度（進捗度）の目安として，あるいは弱点項目の把握に利用することができる。

表 3.1-2 チェックシート第1部の主要項目

No	大項目	主要な小項目	趣旨(抜粋)
I	安全確保の方針	ロボットの形態, 安全設計方針, 人とロボットの役割	安全に配慮した設計準備の確認
II	リスクアセスメント	使用環境・条件の設定, 実施体制, 再リスク評価	想定使用条件の確認, リスク軽減効果を考慮した再リスク評価の確認
III	リスク低減	本質的安全化, 保護装置(停止, 制御, 人体検出), 機能安全の導入, 付加保護方策, 残留リスク対応, 管理方策	設計図面上の危険源抑制の確認, 保護方策とその機能の確認, ユーザへの使用上の情報提供の確認
IV	安全性の管理	組織の校正・運営, 責任体制, 文書化, 管理, 監督	組織・要員の位置付けと責任の明確化, 業務・情報の管理の確認
V	文書管理	一般文書作成管理計画	全ての文書共通の基本要件の確認
VI	安全関連業務に関わる文書	必要情報, 安全要求に関わる計画書・仕様書, ハードウェア/ソフトウェアの試験に関する計画書・仕様書	情報の文書化の確認, 必要文書の確認

3.1.3 第1部の概要

第1部のチェックシートは，表 3.1.2 に示すように，主に設計コンセプトに関する6ジャンルについて，合計59項目の設問が記述されている。本シートの設問の一部抜粋を図 3.1.2 に示すが，チェック欄が色つきの場合は他の設問配点に影響する（例えば，チェック記号に応じて他の設問配点が変わる）。なお，ジャンルII，IIIの設問は，主に基本機械安全規格 ISO 12100[5]，IEC 60204[6]及び産業用ロボット安全規格 ISO 10218-1[7]の要求事項を参照しており，ジャンルIV，VIの設問は，主に IEC 61508 の規定から引用している。

第1部の最終得点結果は，6ジャンルのレーダーチャートで判定され，8割以上の得点をA判定，4割以上の得点をB判定としてA判定を合格の目安としている。実際のロボット設計時に本シートを試用した結果を図 3.1.3 に示すが，リスク低減方策が十分施されていないことと，安全性の管理が十分満足していないことが分かる。

Ⅲ. リスク低減

No	項目	主旨	設問	チェック	点数	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点	
9	リスク低減手法	リスク低減の方法について準拠している規格・基準の確認	1	リスク低減はJIS B9700-1 (ISO12100-1)の3ステップ方式に従って実施している。	A	3		3
			2	他の規格(社内基準も含む)を参照している。規格名を備考に記載するか、別紙で示してその文書番号を記載してください。	-	1		

A, B, C, -

(重み付けされた点数)
×
(チェック記号に対応する割合)

18	保護装置(停止)	停止により安全確保するために適用される保護方策の確認	1	人が操作する緊急停止装置を装備している。	A	2		2
			2	保護停止(インタロックによる停止)機能を有している。	B	2		1
			3	停止後意図しない起動を考慮している	C	2		0

図 3.1-2 チェックシート第1部の記入例

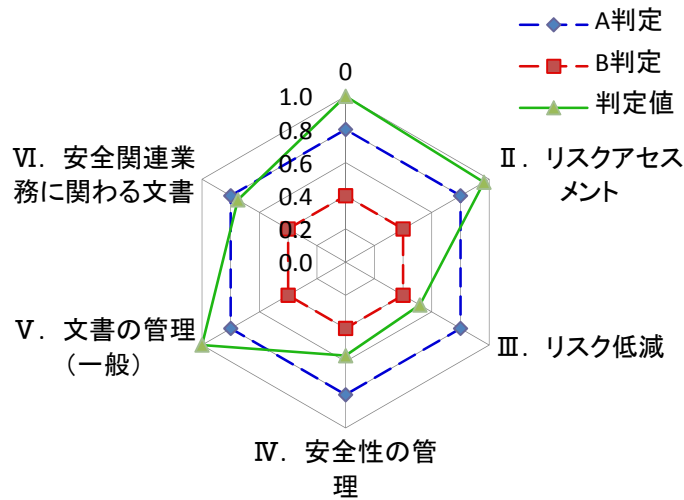


図 3.1-3 チェックシート第1部の判定結果例

3.1.4 第2部の概要

第2部のシートは、IEC61508-2に従ってロボットの安全制御関連部のハードウェアを対象とし、単一〜2重化アーキテクチャを想定する。そのため、これら以外のアーキテクチャやそもそも機能安全を導入していない場合は該当しない。安全インテグリティレベル SIL2

表 3.1-3 チェックシート第2部の安全性能想定範囲（タイプBサブシステムの場合）

安全側故障率比 (SFF)	ハードウェアのフォールトトレランス (N)		
	0	1	2
SFF < 60%	許されない	SIL1	SIL2
60% ≤ SFF < 90%	SIL1	SIL2	SIL3
90% ≤ SFF < 99%	SIL2	SIL3	SIL4
99% ≤ SFF	SIL3	SIL4	SIL4

～3のレベルを実現しているかを設問によりチェックされる。ただし、制御システムにより必要な安全要求事項は異なるため、設問の全てが SIL3 の必須要件ではない。実際、産業用ロボットの安全規格 IS010218-1 では、安全関連部の目標安全性能はリスクアセスメント結果に基づいて決定することを求めており、対象ロボット毎に異なってよい。ただ、本規格では標準レベルとして SIL2 程度を設定しているため、チェックシート第2部もこのあたりのレベルを設定した。本シートで想定しているハードウェアの障害/故障に対する処置は表 3.1.3 の色付きセルの部分である。なお、想定 SIL に非該当な設問は、ロボットの構造や機能に関する関連設問により無効化して採点しないよう配慮した。

表 3.1-4 チェックシート第2部の主要チェック対象

項目番号	構成要素	主な要求事項の対象障害/故障
1	電気機械式装置	非通電状態にする接点溶着
2.1	デジタル I/O, アナログ I/O	ドリフト, 発振
2.2	電源	ドリフト, 発振
2.3	電源電圧監視回路	ドリフト, 発振
3	バス	タイムアウト故障, アービトレーション故障
4	CPU	データ/アドレスの直流化障害
5,6	不変メモリ/可変メモリ	データ/アドレスの直流化障害, セル干渉
7	クロック	低調波, 超高調波
8	通信バス及び大容量記憶	データ/アドレス誤り, 伝送時間誤り
9	センサの障害/故障	ドリフト, 発振
10	最終要素	ドリフト, 発振

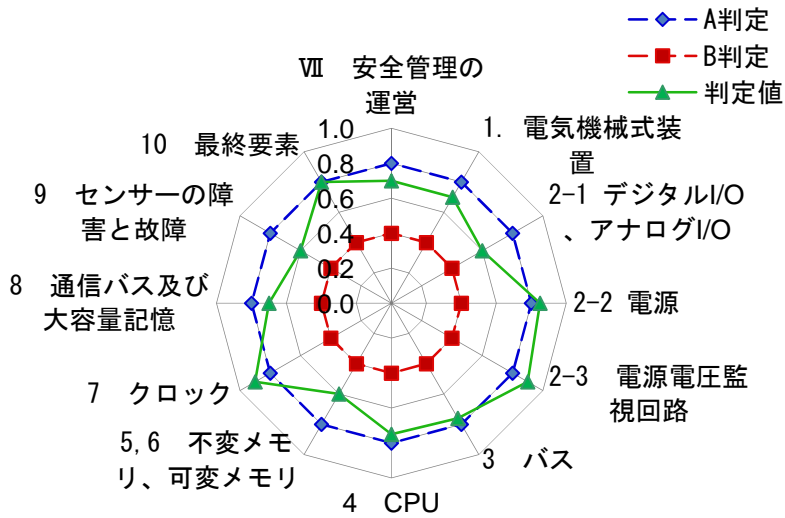


図 3.1-4 チェックシート第2部の判定結果例

本シートは、表 3.1.4 に示すように、ハードウェアの9ジャンルについて設問を設定しており、最終結果はサブジャンルと管理関連を含めて12項目のレーダーチャートで判定される。実際のロボット設計時に本シートを試用した結果を図 3.1.4 に示すが、全体的にA判定までもう一步といった実現度になっている。

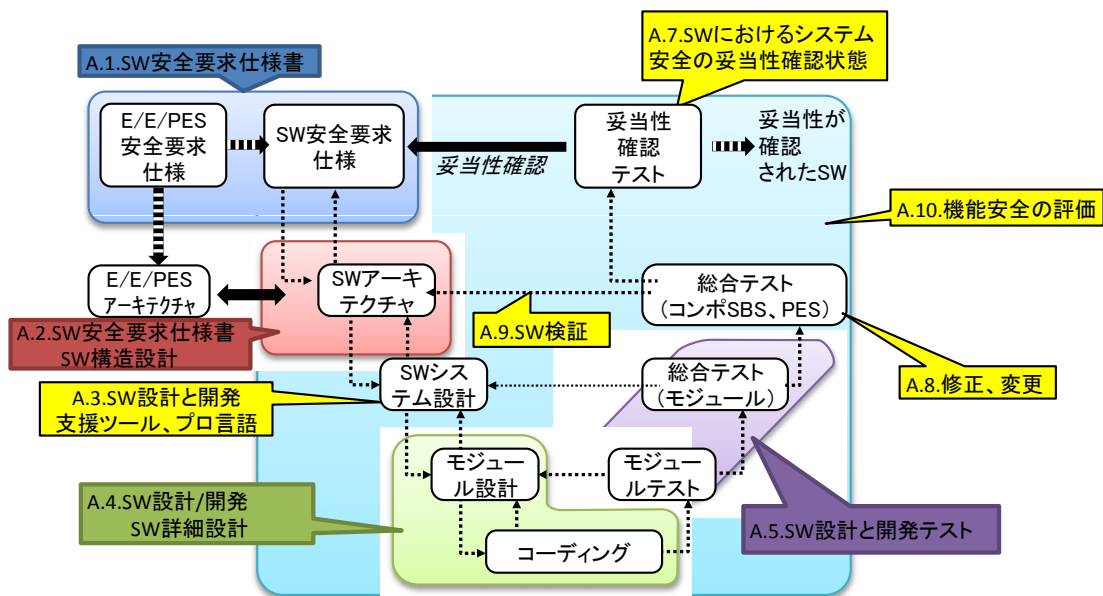


図 3.1-5 ソフトウェア開発におけるライフサイクルモデル (Vモデル)

3.1.5 第3部の概要

第3部のシートは、ソフトウェアに関する安全要求事項を網羅しており、安全制御に関わるソフトウェアの仕様決定から始まり詳細設計、その後続くテスト（設計目標が達成されたかの妥当性を確認）までのいわゆる「Vモデル」（図3.1.5参照）に従っている。IEC 61508-7[8]で規定される技法に関してはSIL2～3のレベルにおいて「強く推奨」とされる項目を設問としている。本シートは第1, 2部のシートとは異なり、先ずハードウェアと関連して目標設定されるソフトウェアのSILを最初に選択すると、選択したSIL(2または3)に対応して各設問の配点が変わり、該当するセルのみが有効となって採点するように計算される。

ソフトウェアの要求事項は多岐にわたるが、チェックのポイントは整理して回答しやすい設問として記述している。例えば、ソフトウェアの構造設計の大項目では、次の8項目に整理して設問化した。

- ① 故障診断
- ② 故障とその処理の優先順位
- ③ 信頼性のあるSW要素の使用
- ④ 安全要求仕様からSW構造への論理的関連
- ⑤ 4の逆方向の関連
- ⑥ 図を使った分かり易い説明
- ⑦ コンピュータ支援ツールの使用
- ⑧ 処理時間

本シートではソフトウェアの10ジャンルについて採点し、レーダーチャートにより各ジャンルの実現度合いが示される。本シートを試用した結果を図3.1.6に示すが、ソフトウェア開発テストがやや規格に適合していないことが分かる。

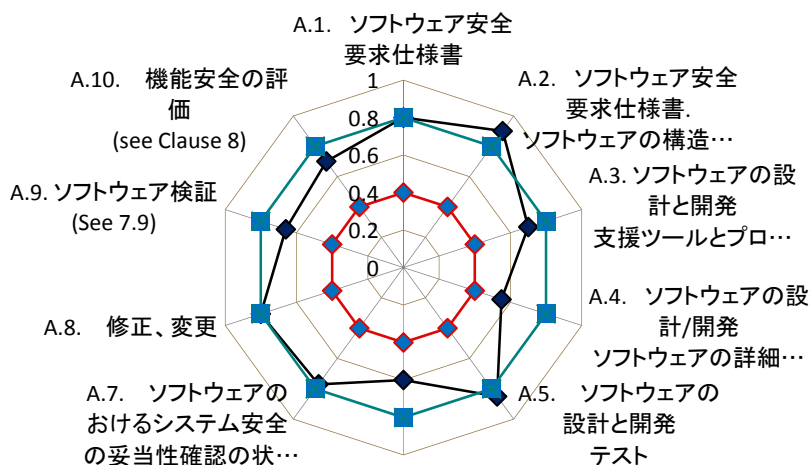


図 3.1-6 チェックシート第3部の判定結果例

3.1.6 レビュー結果

作成した第1部自己チェックシートを3タイプ（自律移動型、搭乗型、装着型）5機種の生活支援ロボットの設計者に提供し、その時点での安全コンセプトの達成度合いを自己チェックいただいた。ロボット開発体制の準備具合により最終判定結果はばらついたが、設計者自身がコンセプト検証をクリアするために、どのジャンルが弱点かを把握してもらうことができた。また、生活支援ロボットの安全性を事前検証するために、模擬コンセプト検証の形態をとり、本シートの判定結果からロボット開発者に有用なアドバイスを提供した。

第2部、第3部のチェックシートもロボット開発者に提供したが、機能安全を導入した安全制御系を構築した事例が少なかったためか、これらのシート活用した事例は報告されず、有益なフィードバック情報は得られなかった。ただし、膨大なページ数の該当規格を読みこなして運用するのに時間がかかるところを、本シートの使用により容易に達成度合いを確認できることはメリットとして理解されたようである。

公表しているチェックシート第1部、第2部、第3部を各々図3.1.7、図3.1.8、図3.1.9として示す。第1部と第2部のシートは各設問の配点を記載済みであり、第3部のシートはSIL選択前の初期状態のため、配点は表れていない。

参考文献

- [1] IEC 61508-1 Ed. 2.0 : 2010 (b), Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems - Part 1: General requirements.
- [2] JIS Q 9000:2006, Quality management systems - Fundamentals and vocabulary.
- [3] IEC 61508-2 Ed. 2.0 : 2010 (b), Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems - Part 2: Requirements for electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems.
- [4] IEC 61508-3 Ed. 2.0 : 2010 (b), Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems - Part 3: Software requirements.
- [5] ISO 12100 : 2010, Safety of machinery -- General principles for design - Risk assessment and risk reduction.
- [6] IEC 60204-1 Ed. 5.1 : 2009 (b), Safety of machinery - Electrical equipment of machines - Part 1: General requirements.
- [7] ISO 10218-1:2011, Robots and robotic devices -- Safety requirements for industrial robots - Part 1: Robots.
- [8] IEC 61508-7 Ed. 2.0 : 2010 (b), Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems - Part 7: Overview of techniques and measures.

設計段階におけるコンセプト検証自己チェックシート第1部

ロボットの名称		製作者	
型式		シート記入者	
		シート記入日	





【回答方法】

各設問毎に、主観にてA、B、C、-をチェック欄に記入して下さい(プルダウンメニューから選択)。自己チェックの判断基準は次の通りです。

- A: 取り組み完了(設問をほぼ満足している)
- B: 取り組み中(設問を一部満足している)
- C: 未取り組み(設問はほとんど実現されていない)
- : 関係なし(ただし、No.1, 3のみ該当する場合に✓を記入)

なお、備考欄への記入指定の項目は、記載がないと得点加算がありません。補足説明や特記事項がある場合は、適時備考欄を拡張して記入して下さい。別途、補足資料や該当文書を添付される場合は、その資料(文書)に番号付けして備考欄に番号のみ記入して下さい。

【チェック欄の色分けの意味】

- : 同No.項、又は他No.項目の点数に影響するチェック
- : 同No.項内の項目の点数に影響するチェック
- : - (関係なし)をいれても良いチェック
- : Aの数によって他の項目の点数が影響する

【大項目毎の判定基準】

- S判定: 取り組み状況が満足である。(得点率100%)
- A判定: 取り組みがほぼ満足である。(得点率80%以上100%未満)
- B判定: 取り組みを更に進める必要がある。(得点率40%以上80%未満)
- C判定: 取り組みが不十分である。(得点率40%未満)

I. 安全確保の方針

No	項目	主旨	設問	チェック	点数	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
1	ロボットの形態	ロボットの型別の確認	ロボットの型は以下のどれですか		3		
			1 移動作業型(自律中心)				
			2 移動作業型(操縦中心)				
			3 搭乗型				
			4 人間装着型				
5 その他(ロボット型を記載してください)							
2	安全設計方針	安全に配慮した設計準備の確認	1 安全設計コンセプト又は方針を策定している。		3		
			2 安全仕様を決定している。				
3	人とロボットの役割	安全確保の主体の確認(安全設計方針として人とロボットの役割分担の考え方)	1 ロボット主体 危険事象への対応(検知、回避を含む)は、多くはロボット側で対応する。		3		
			2 人主体 危険事象への対応(検知、回避を含む)は、主に人で対応し、ロボット側は補足的である。				
				判定	合計(009点満点)		

図 3.1.7 チェックシート第1部 (第2版)

II. リスクアセスメント

No	項目	主旨	設問	チェック	点数	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
4	リスクアセスメントの基準	準拠している規格・基準の確認	1	リスクアセスメントは関連国際規格または国内規格に準拠して実施している(規格名を備考欄に記入)。		3	
			2	他の規格(社内基準も含む)を参照している(規格名を備考欄に記入)。		1	
5	使用環境・使用条件の設定	ロボットの適切な使用制限が考慮されているかの確認	1	ロボットの仕様(動作機能、運用を含む)が決定している。		2	
			2	ロボットの想定使用環境が明確である。		2	
			3	ロボットのライフサイクル(寿命)が考慮されている。		2	
			4	ロボットの想定使用条件(対象となる人など)が明確である。		3	
6	実施体制	チームとして実施しているか、又レビュー後、承認しているかの確認	1	設計者を中心として複数人で実施している。		3	
			2	結果についてレビューを行っている。		3	
			3	責任者(チームの管理者など)が最終承認している。		2	
7	重大な危険源	人に対して重篤となり得る危険源の有無と対応	1	抽出又は同定され危険源は、軽微な陰源だけである。		3	
			2	危害が致命的(重傷以上)となり得る危険源に対して、何らかのリスク低減方策をリストアップしている。		3	
8	リスク低減後の再リスク評価	初期リスク評価後、リスク低減方策を考慮した再リスク評価まで実施しているかの確認	1	初期リスク評価の結果、リスク低減の必要性がないと判断される。		3	
			2	リスク低減方策の導入によるリスク低減効果を考慮した再リスク評価を行っている。		3	
				判定		合計(027点満点)	

Ⅲ. リスク低減

No	項目	主旨	設問	チェック	点数	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
9	リスク低減手法	リスク低減の方法について準拠している規格・基準の確認	1	リスク低減はJIS B9700-1 (ISO12100-1)の3ステップ方式に従って実施している。		3	
			2	他の規格(社内基準も含む)を参照している(規格名を備考欄に記入)。		1	
10	本質的安全性(ロボット自体の設計)	設計図面上で改善したロボットの仕様や機能の変更の確認	1	ロボットの形状に鋭利部、突出部、挟圧部等がない。		2	
			2	ロボット部品の材質等が人や環境に影響を与えないよう配慮している。(RoHS対応、ハロゲンフリー等)		2	
			3	パワー、速度等の性能を必要最小限に制限している。		2	
			4	その他(防爆構造等、設計上配慮した項目がありましたら備考欄に記載して下さい。(記入がないと得点0です。))		1	
11	本質的安全性(人間工学原則の遵守)	人に対する精神的・肉体的ストレスや誤操作の防止が配慮されているかの確認	1	ロボットの色、形状などの外観、大きさ、質量(装着型の場合)、構造が人に対して肉体的、精神的ストレスを与えないよう配慮されている。		2	
			2	マン・マシンインタフェースは、人が誤操作や誤解しないよう配慮されている。		2	
			3	保守保全作業を含め、無理な姿勢でのロボット操作(重量物の人による交換、移載や人の動作を極端に規制する装置など)や搭乗姿勢などが無い。		2	
12	本質的安全性(制御システムの安全原則の適用)	安全関連部の安全制御のための基本技術が適用されているかの確認	1	制御システムにおいて安全に関連する部分を定義(仕様書などに記載など)している。(安全部と非安全部が明確に区別されている。)		2	
			2	制御システムの安全関連部に高信頼化技術(冗長化、多様化を含む)を適用している。		2	
			3	制御システムの安全関連部には、自動監視(自己診断)技術を適用している。		2	
13	本質的安全性(電氣的危険源の防止)	感電や静電気による影響に対して設計上配慮されているかの確認	1	保護特別低電圧(AC25V(実効値)、DC60V以上)以上になる露出部がない。		3	
			2	金属露出部の絶縁性、耐環境性を配慮している。		2	
			3	帯電者からの静電気放電による誤動作のないよう配慮されている。		2	
14	本質的安全性(熱的危険源の防止)	高・低温部が人に及ぼす影響や火災に対して設計上配慮されているかの確認	1	人が触れる可能性のあるロボット部位には、極端な高温部又は低温部はない。		2	
			2	ロボット部品は、想定使用条件下で発火等を起こさないよう選定されている。		2	

図 3.1.7 チェックシート第1部(第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	点数	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
15	本質的安全化(放射による危険源の防止)	音や光等が人に及ぼす影響に対して設計上配慮されているかの確認	1	発生する騒音又は振動は、想定使用条件下で規定されるレベル以下である。		2	
			2	ロボット周囲へ発光されるレーザー光等は、人に対して危害を与えない出力である。		2	
			3	ロボットが発生する電磁気の放射は、想定使用条件下で周囲の人及び電気・電子機器に影響を与えない。		2	
16	本質的安全化(安定性の確保)	走行・停止・乗降・脱着時の安定性に配慮しているかの確認	1	仕様上の走行条件下(最高速度、最高登坂角度、最短転回半径、最大段差等)で転倒しない。		2	
			2	停止時に転倒しない、又は安定した状態に移行できる。		2	
			3	ロボットへの乗降時やロボット脱着時には、ロボットは安定してこれらの動作に支障はない。		2	
17	本質的安全化(その他)	その他の設計上の配慮の確認	1	人体に接触可能性のある機器表面の材質や塗料に対して、衛生上の配慮をしている。		2	
			2	他の本質的な安全設計を実施している(具体的な項目を備考欄に記入)。		1	
18	保護装置(停止)	停止により安全確保するために適用される保護方策の確認	1	人が操作する緊急停止装置を装備している。		2	
			2	保護停止(インタロックによる停止)機能を有している。		2	
			3	停止後意図しない起動を考慮している		2	
			4	停止以外の方法で安全な状態に移行する。(具体的な項目を記載してください。)		1	
19	保護装置(停止方法)	緊急停止の実現方法の確認	1	アクチュエータの動力を遮断して停止する。		3	
			2	制動して停止後にアクチュエータの動力を遮断する。		3	
		緊急停止でない場合の停止方法	3	アクチュエータの動力を遮断して停止する。		3	
			4	制動して停止後にアクチュエータの動力を遮断する。		3	
			5	制御により停止し、アクチュエータの動力は遮断しない。		3	
20	保護装置(停止の制御方法)	停止に至るまでの制動の実現方法の確認	1	機械的制動装置により制動する。(機械的ブレーキ、ロック機構等)		3	
			2	電氣的制動機能により制動する。(サーボロック等)		2	
			3	制動装置・機能は持たずに、制御により減速させる。(速度0制御等)		1	

No	項目	主旨	設問	チェック	点数	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
21	保護装置 (動力供給)	動力遮断と蓄積エネルギーの消散のために適用される保護方策の確認	1 アクチュエータの動力遮断後、ロボットの動作を伴わずにエネルギーがゼロとなる。 (油空圧の残圧、蓄電等の消散)		2		
22	人体検出時の制御方法 (装着型等設問に該当しない場合は“-”を記入)	衝突回避の実現方法の確認	1 障害物(人を含む)の非接触検知後、制動、停止する。(装着型は“-”記入)		3		
			2 障害物(人を含む)の非接触検知後、回避動作をする。		3		
			3 その他(別の方法を備考欄に記入が必要。)		3		
		接触に対する安全確保方法の確認	4 障害物(人を含む)の接触検知後、制動、停止する。(装着型は“-”記入)		3		
			5 障害物(人を含む)の接触検知後、回避動作をする。		2		
			6 接触状態のまま、一定の条件下で動作を継続する。		1		
			7 その他(別の方法を備考欄に記入が必要。)		2		
		検出情報の通報方法の確認	8 安全状態をアクティブに通報する。		3		
			9 危険状態をアクティブに通報する。		2		
			10 対象機器の正常状態を監視・通報できる。		3		
23	機能安全の配慮	機能安全制御の導入の確認	1 制御システムの安全関連部に安全認証取得済プログラマブル機器を使用している。		2		
			2 制御システムの安全関連部には機能安全を配慮した設計をしている。		3		
24	付加保護方策	動力源異常時の対応の確認	1 主動力源異常時は、直ちに停止又は安全な状態へ移行する。		3		
			2 主動力源異常時は、予備電源に切り替えて一定の条件下で機能を維持する。		3		
		停止により人が捕捉された時の対応の確認	3 停止時に人が捕捉された場合、手動で脱出又は救助できる。		2		
			4 停止時に人が捕捉された場合、別動力源により脱出のための動作を行う。		1		
25	残留リスク対応	使用上の情報の呈示方法の確認	1 ロボットに警報や表示をして、危険情報を人に伝達できる。		2		
			2 ロボットに警告ラベルを貼付している。		2		
			3 取扱説明書に残留リスクに関する情報を記載している。		3		
			4 残留リスクをユーザが低減する場合、その低減効果の条件(保護具、資格、運用管理等)を定めている。		2		

図 3.1.7 チェックシート第1部(第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	点数	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
26	管理	ロボットの想定する保守方法の確認	1	ユーザが行うべき保守項目を取扱説明書に記載している。		3	
			2	ユーザができない保守作業等への対応策が示されている。		2	
		ユーザへの教育、資格の確認	3	ユーザへ運用に関する教育を行っているか、資格制度を設けている。		3	
		廃棄対応の確認	4	廃棄方法がユーザに指示されている。		2	
			5	廃棄は、メーカーが引き取って、メーカー責任で行う。		2	
			判定		合計(134点満点)		

IV. 安全性の管理

No	項目	主旨	設問	チェック	点数	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
27	組織構成	開発組織の位置付けの明確化、開発フェーズの流れと担当部門間の相互関係の明確化	1	業務全体の中で、開発フェーズと担当部門が明確になっている。		2	
			2	業務全体における各フェーズの責任者が規定されている。		3	
			3	業務全体における各フェーズの入力と出力が明確になっている。		3	
28	組織の責任および権限	各フェーズに関わる要員の責任と権限の明確化	1	関連する部門や要員の責任と権限が全て規定されている。		3	
29	構成メンバー	組織にとって必要な力量の明確化	1	要員に必要な力量が明確に規定されている。		3	
30	安全性達成の方針と戦略	安全性に関する方針を示すことと、その実行意思の伝達の確認	1	安全性の方針が達成されたことを評価・確認することが明確に規定されている。		3	
			2	安全性の方針は文書化して管理している。		3	
			3	安全性の方針は関係する要員全てに周知されている。		3	
31	組織の運営の仕組み	情報が組織内で滞りなく交換されることの確認	1	下部組織の意見・意向などを吸い上げ、活用している。		2	
			2	業務の有効性について情報交換を行っている。		2	
32	文書の範囲	必要な情報の文書化の確認	1	安全性の遂行に必要な業務について、文書化する情報の範囲が明確に規定されている。		3	
33	各フェーズごとに使用する技術と方策	安全性のレベルを確保する方策の確認	1	業務全体における各フェーズに必要な技術と方策が明確に規定されている。		3	

図 3.1.7 チェックシート第1部(第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	点数	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
34	以前の勧告、指摘事項	経験の活用と改善対応の確認	1 過去に開発した安全機能の監査時の勧告、指摘事項の対応を考慮している。		2		
35	責任ある活動の訓練の手順書	要員が業務遂行に必要な力量を持つこと	1 要員に必要な力量が備わるような教育・訓練計画が作成されている。		2		
36	部品管理 (部品の識別、未認可部品の識別)	必要な部品等の調達間違いの防止	1 部品等の調達についての手順が明確に規定されている。		2		
37	安全性に関する監査の仕組み	内部監査により、業務のPDCAサイクルと適合性及び有効性を評価	1 監査の計画及び実施、結果の報告、記録の維持に関する手順が明確に規定されている。		3		
38	監査員の選定(独立性)	(研究段階等で組織化されていないため、内部監査が行えない場合は、37-1項に“-”を記入)	1 監査員の(独立性も含めた)資格基準が明確に規定されている。		2		
39	勧告書の形式		1 監査の計画、実施、結果の報告、対応措置、記録の維持に関する責任並びに要求事項について明確に規定されている。		2		
40	変更・変更許可の仕組み	不適合に対する管理の詳細や責任の所在の明確化	1 不適合を、どのように識別、評価、処置し、関係会社、関係部門へ連絡するかの手順が明確に規定されている。		2		
			2 不適合が修正された場合、要求事項に適合するかを再検証している。		2		
41	情報管理の仕組み	情報管理の確認	1 設計・開発時における危険源や安全関連情報を管理する仕組みがある。		3		
42	進行状況の管理	責任者による業務進行管理の確認	1 業務の経過を監視・測定する手順が明確に規定されている。		2		
43	見直しの仕組み・デザインレビュー	変更に対する検証と妥当性確認	1 設計・開発の変更の手順が明確に規定されている。		3		
			2 使用する文書を常に現在有効な版に保つための更新時の手順が明確に規定されている。		2		
44	担当者の責任担当者への役割、責任の通知	要員の責任と権限の決定と各要員による理解	1 規定された運用に関連する部門や要員の責任と権限(体制)を、関連する全ての要員に周知している。		2		
				判定	合計(062点満点)		

V. 文書の管理(一般)

No	項目	主旨	設問	チェック	点数	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
45	文書の見易さ	業務全体において、作成、運用される全ての文書に共通の基本要件の確認	1	文書は見易い構成になっている。		1	
			2	文書は、正確、簡潔である。		1	
			3	文書は目的に沿っており、理解し易い。		1	
			4	文書は保全し易い。		1	
46	文書のタイトル、見出し		1	文書には内容の範囲が分かるような表題や見易いタイトル、小見出しがつけられている。		1	
			2	経時変化、変遷に対応している。		1	
47	文書作成のルール		1	文書作成手順、保管手順(保管場所、保管責任者、保管期限、持ち出し、閲覧)がある。		1	
			2	文書が改訂された際、関連する全ての部門への配付管理に関する手順がある。		1	
48	版管理		1	文書の変更の識別及び現在有効な版の識別が確実にできるようになっている。		1	
49	情報の検索		1	文書は関連情報の検索ができるように構成されている。		1	
50	改訂、修正、見直し承認		1	文書の改訂、修正及び見直し手順がある。		1	
51	適切な文書管理計画		1	業務において関連する全文書を明確にして、文書の改訂、承認などの手順に従って適切に管理している。		1	
				判定		合計(012点満点)	

VI. 安全関連業務に関わる文書

No	項目	主旨	設問	チェック	点数	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
52	次フェーズに必要な情報	安全関連業務において、必要な情報の文書化の確認	1 安全性の遂行に必要な業務の各フェーズにおいて、次のフェーズへ引き渡す情報を文書化している。(No27-3が3点であることが条件)		3		
53	管理情報		1 安全性の管理に必要な情報を文書化している。(No27~44の得点により点数重み付け)		X		
54	安全性検証に必要な情報		1 安全性の遂行に必要な業務の各フェーズにおいて、設定目標未達成時の処理後に行う検証に必要な情報を文書化している。			3	
55	安全性評価に必要な情報		1 安全性の仕様を定性的、定量的に表現して文書化している。			2	
56	安全性評価結果		1 安全性の評価から得られる情報と結果について文書化している。			3	
57	安全性の遂行に必要な業務に関わる文書	安全設計一般として必要な基本関連文書の確認 (1-8はNo.23-2が該当する場合、機能安全設計で必要)	1 概念に関する説明書		1		
			2 全ての適用範囲の定義に関する説明書		1		
			3 危険源及びリスク解析に関する説明書		1		
			4 全ての安全要求事項(安全機能、安全度水準を含む)に関する仕様書		1		
			5 安全要求事項の割り当てに関する説明書		1		
			6 全フェーズの安全性に関する計画書		1		
			7 全フェーズの検証に関する計画書		1		
			8 全フェーズの機能安全評価に関する計画書		1		
58	電気・電子プログラマブル電子系の安全性の遂行に必要な業務に関わる文書	機能安全設計ベースで要求される詳細関連文書の確認 (No.23-2が該当する場合、機能安全設計で必要)	1 全ての安全要求事項(安全機能、安全度水準を含む)に関する仕様書		1		
			2 妥当性確認に関する計画書		1		
			3 ハードウェア及びソフトウェアアーキテクチャ設計に関する計画書		1		
			4 ハードウェアアーキテクチャ設計に関する説明書		1		
			5 ハードウェアアーキテクチャ統合テストに関する仕様書		1		
			6 ハードウェアモジュール計画に関する仕様書		1		
			7 ハードウェアモジュールテストに関する仕様書		1		

図 3.1.7 チェックシート第1部(第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	点数	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
59	ソフトウェアの安全性の遂行に必要な業務	機能安全設計ベースで要求される詳細関連文書の確認 (No.23-2が該当する場合、機能安全設計で必要)	1	ソフトウェア安全要求事項(安全機能、安全度水準を含む)に関する仕様書		1	
			2	妥当性確認に関する計画書		1	
			3	ソフトウェアアーキテクチャ設計に関する説明書		1	
			4	ソフトウェアシステム設計に関する説明書		1	
			5	ソフトウェアシステム統合テストに関する仕様書		1	
			6	ソフトウェアモジュール設計に関する仕様書		1	
			7	ソフトウェアモジュールテストに関する仕様書		1	
			判定		合計(036点満点)		

判定結果のまとめ

	A判定	B判定	判定値	A判定境界値	B判定境界値	満点
I. 安全確保の方針	0.8	0.4	0.0	7.2	3.6	009
II. リスクアセスメント	0.8	0.4	0.0	21.6	11	027
III. リスク低減	0.8	0.4	0.0	107	54	134
IV. 安全性の管理	0.8	0.4	0.0	49.6	25	062
V. 文書の管理(一般)	0.8	0.4	0.0	9.6	4.8	012
VI. 安全関連業務に関わる文書	0.8	0.4	0.0	28.8	14	036

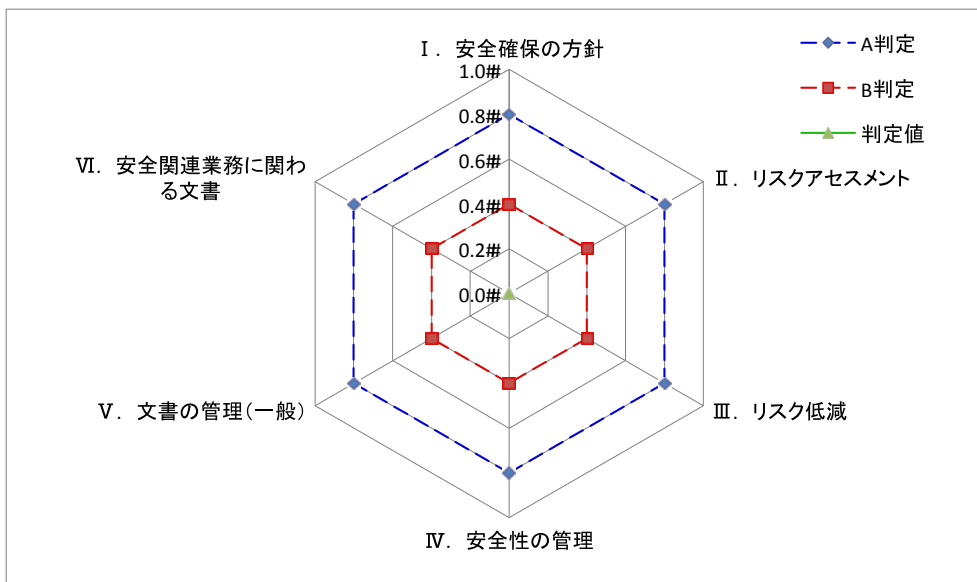






図 3.1.7 チェックシート第1部(第2版) 続き

実現段階におけるコンセプト検証自己チェックシート第2部(HW編)第3版

ロボットの名称		製作者	
型式		シート記入者	
		シート記入日	

【回答方法】

各設問毎に、主観にてA、B、C、Nをチェック欄に記入して下さい。設問毎にチェック欄に記入できる記号の種類はプルダウンメニューで例示されますので、選択して下さい。入力ルールは一部メッセージとして表示されますので参考にして下さい。尚、備考欄への記入指定の項目は、記載がないと得点加算がありません。補足説明や特記事項がある場合は、適時備考欄を拡張して記入して下さい。別途、補足資料や該当文書を添付される場合は、その資料(文書)に番号付けして備考欄に番号のみ記入して下さい。

-  : 同No.項、又は他No.項目の点数に影響するチェック。
-  : 同No.項内の項目の点数に影響するチェック。
-  : N(関係なし)をいれても良いチェック
-  : Aの数によって他の項目の点数が影響する

自己チェック

- A : 取り組み完了(設問をほぼ満足している)
- B : 取り組み中(設問を一部満足している)
- C : 未取り組み(設問はほとんど実現されていない)
- N : 関係なし

VII 安全管理の運営(チェックシート第1部の補足)

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
1	安全性の評価活動	達成された安全性を調査し、判定する	1 達成された安全性を評価する担当者が任命されている		3		
			2 安全性を評価する担当者が業務全体の各フェーズの活動と出力事項を検討し、要求が満たされている度合を判定している		2		
			3 安全性を評価する計画が作成され承認されている		2		
			4 安全性を評価する担当者の資格基準が明確にされている		3		
			5 安全性評価終了時に合格、条件付合格又は不合格について指示している		3		
2	フォローアップ体制	要求事項に適合しない製品の誤使用等の防止や不適合の是正及び予防処置	1 不適合処置及び是正処置における責任と権限が明確に規定されている		3		
			2 フォローアップが迅速に活動できる		2		
3	不適合管理	不適合の根本原因の除去	1 不適合を除去するための処置手順が明確に規定されている		3		
			2 誰が不適合の判定を行うか明確に規定されている		3		
			3 不適合の基準が明確に規定されている		3		

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版)

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
4	妥当性確認	是正処置の有効性確認	1	誰が是正処置の結果について判断を行うか明確に規定されている		3	
			2	是正処置の有効性を確認し、その結果を記録している		3	
5	業務構成管理	不適合の原因追跡	1	構成管理に関する手順が明確に規定されている		3	
6	責任ある活動の訓練の実施	要員が業務遂行に必要な力量を持つこと	1	要員に必要な力量が備わるような教育・訓練計画に基づき教育・訓練を実施及び評価し、記録している		2	
7	故障検出の仕組み	要求事項が満たされていることの評価	1	レビューする組織体やメンバーが予め決められている		2	
			2	レビューする項目が決められている		2	
8	監査の実施周期	内部監査による業務のPDCAサイクルと適合性及び有効性を評価	1	予め定められた間隔で監査を行っている		3	
9	見直しの仕組みとデザインレビュー	変更に対する検証と妥当性確認	1	変更が製品を構成する要素に及ぼす影響の評価結果を記録している		2	
			2	関連部署に影響がある場合、検証、妥当性確認を行った後に権限者から承認を受けたことを記録している		2	
			3	変更に伴う情報を関連部門に伝えている		2	
10	供給者の管理	供給者の評価、選定	1	供給者の技術レベルや製品の重要度に応じた管理方法が明確に規定されている		2	
			2	選定・評価者、その方法及び基準が明確に規定されている		3	
11	故障の検知、修理、試験の訓練	要員が故障等に対する必要な力量を持つこと	1	故障対応に必要な力量が備わるような教育・訓練計画が作成されている		3	
			2	故障対応に必要な力量が備わるような教育・訓練計画に基づき教育・訓練を実施及び評価し、記録している		2	
12	運転の訓練	要員が運転に対する必要な力量を持つこと	1	運転に必要な力量が備わるような教育・訓練計画が作成されている		2	
			2	運転に必要な力量が備わるような教育・訓練計画に基づき教育・訓練を実施及び評価し、記録している		2	
				判定		合計(065)点満点	

図 3.1.8 チェックシート第2部 (第3版) 続き

以降の章は、IEC61508-2 表A.1(運転中に検出されるか、安全故障率の導出の際に解析される障害又は故障)を参照

1. 電気機械式装置(原則:電流が流れない状態になった時、安全状態に移行する。)

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点	
1	リレー	安全機能部に使用しているリレーの使い方	1	安全機能部のリレーに直接開路動作機構(強制開離機構)方式の安全リレーを使用している。		3		
				イ 安全リレーのコイルの電流が切れた時、リレー接点は開放される。		3		
			2	イ	安全リレーの正常状態を監視するため常時閉(B)接点のON/OFFを監視している。(図1-1)		3	
					常時閉(B)接点の監視をソフトウェアで行っている。		3	
				① 監視は常時または定期的に行っている		2		
				② 監視は、常時閉(A)接点がONする時、行っている。		2		
				ロ	常時閉(B)接点の監視をハードウェアで行っている。		2	
					① 監視を常時、又は定期的に行っている		3	
			② 監視は、常時閉(A)接点がON/OFFする時、監視している。		2			
			3	イ	その他 安全リレーの正常を監視するため、他の方法を使っている。 その方法を簡潔に備考に記述ください。		3	
					監視は、安全関連部のソフトウェア、又はハードウェアで行っている。		3	
				① 監視は常時または定期的に(1時間以内)行っている		2		
				② 監視は、常時閉(A)接点がONする時、行っている。		2		
			4	イ	安全機能部のリレーに一般方式のリレーを使用している。(安全リレーを使用していない)		1	
					リレーのコイルの電流が切れた時、リレー接点は開放される。		1	
			5	イ	一般リレーの正常状態を監視するため、接点の溶着を電氣的に監視している。(例えば、接点電流、接点間の電位測定など)(図1-2)		3	
接点の動作の監視をソフトウェアで行っている。		3						
① 監視を常時または定期的に(1時間以内)行っている		3						
② 監視は、常時閉(A)接点がON/OFFする時、行っている。		3						

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文書 の番号)	得点			
2	ブレーキ	安全機能に使用しているブレーキの使い方	1	ブレーキ機構は、電源遮断でブレーキが利くようになっている。 モータ、油圧、空圧などの動力源の電源遮断と連動し、これら動力源で可動する駆動部に対してブレーキを掛けている。		3				
				イ	ブレーキは、電源遮断と同時にバネ機構などの機械的機構によって動作する。		3			
				ロ	ブレーキは、駆動部の動作タイミング制御が必要のため、ソフトウェアで制御している。		2			
				ハ	その他の方法でブレーキをかけている		2			
		ブレーキの監視方法	2	ブレーキの動作を監視している。	イ	始業時と電源投入している時も含め、定期的(一定の時間間隔、又は一定の使用回数ごと)にブレーキテストをしている。		3		
					ロ	電源投入をした始業時、ブレーキテストしている。		1.5		
					ハ	保守点検の時、ブレーキの動作点検をしている。点検の間隔は、決めている。		1.5		
					ニ	その他別の方法でブレーキテストしている。		3		
					ブレーキの動作監視の方法					
					イ	ブレーキを掛け、駆動部をONし、動かないことを監視する。		3		
					ロ	ブレーキの動作範囲をスイッチやポテンシオメータで検出している。		2		
					ハ	ブレーキの動作力を歪ゲージや圧力センサーで検出している。		1		
		ニ	その他他の方法で動作監視している。		3					
					判定	合計(043)点満点				

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

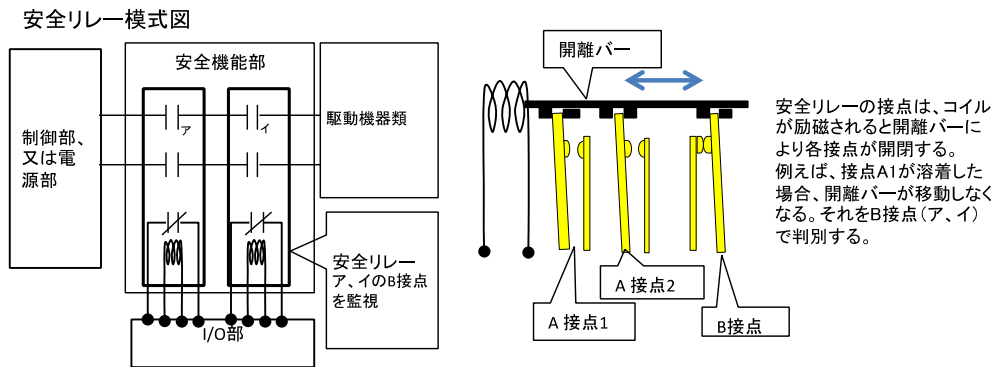


図1-1

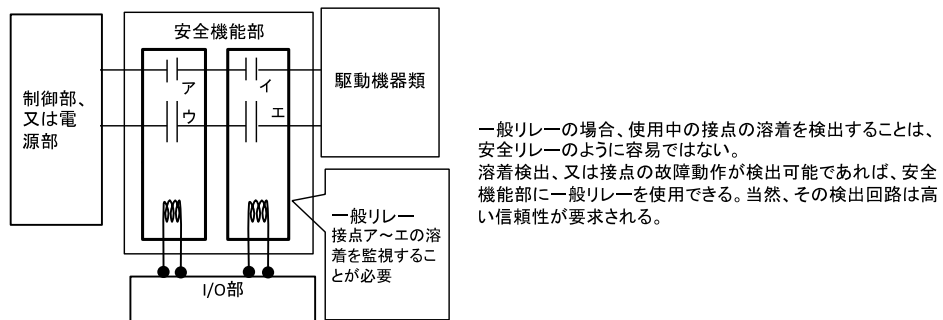


図1-2

2 個別のハードウェア
2-1 デジタルI/O、アナログI/O

障害、故障ケースは、回路のオープン、ショート、ドリフト、発振を想定。その場合でも安全状態を損なわない。

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点		
1	入出力回路	安全回路方式	1 安全に関する信号の入力回路は2重化、冗長化している。		3				
2	入力回路 (入力回路が正常であることを定期的に監視する。 検証はソフトウェアで実行)	デジタル回路	1	デジタル入力の場合					
			イ	2系統で入力し、データ比較し入力回路の正常を検証している。		3			
			ロ	入力データにチェックビットを設け、データの正しさを検証している。		3			
			ハ	各入力回路ごとに各部品が故障がわかる仕組み(例えば、冗長化または2重化回路の値比較)により回路が正常であることを検証している。		3			
			ニ	その他の方法で故障を検出している。		3			
		アナログ回路	2	アナログ入力の場合(A/D変換回路)					
			イ	リファレンス入力信号、又は基準信号を入力し、変換値の妥当性を確認している。妥当性確認用入力信号は、定期的に変動させている。(妥当性確認用のリファレンス入力アナログ信号は、自装置の安全関連部のアナログ出力を使用し、出力値と入力値の比較を定期的に行う方法もある。この時、出力値は変化させる。安全関連部が2重化されている場合、入力部と出力部の系統を入れ替えるとよい。)		3			
			ロ	急激な入力値の変化等を監視し、入力信号の正常さを監視している		3			
			ハ	各入力回路(アナログ入力部からA/D変換部周り)ごとに各部品が故障がわかる仕組みにより回路が正常であることを検証している。		3			
			ニ	その他の方法で故障を検出している。		3			

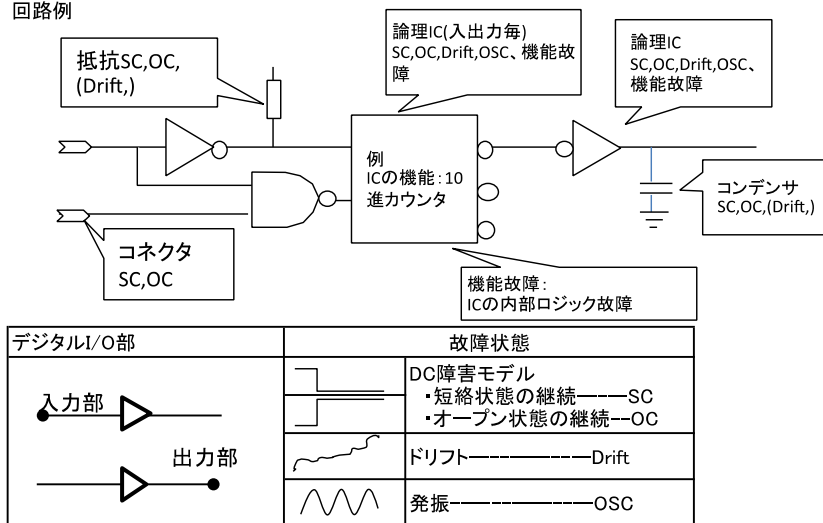
No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点	
3	出力回路 (出力回路が正常であることを定期的に監視している。)	デジタル回路	デジタル出力					
			イ	出力データを最終段の出力回路を経由して入力し、そのデータと比較し、出力回路のデータが正しいことを検証している。		3		
			ロ	出力データの出力経路と出力値監視のため読み取った入力データの経路、データ形式が異なっていて、出力データに関わらないマイコンで検証している。(注:下記2項の図参照)		3		
			ハ	出力データには、パリティ、CRCなどのコード化データが付いている。		3		
			ニ	各出力回路ごとに各部品の故障がわかる仕組み(例えば、正常時の回路内の信号パターンを読み取る)により回路が正常であることを検証している。		3		
			ホ	その他の方法で故障を検出している。		3		
		アナログ回路	アナログ出力					
			イ	アナログ出力値をフィードバックし、入力回路に入れ、A/D変換し、そのデータと出力データと比較し、出力回路の値が正しいことを検証している。		3		
			ロ	検証は、出力データの通った経路と異なった経路、出力に関係しなかったマイコンで行っている。		3		
		ハ	その他の方法で故障を検出している。		3			
4	出力機器用電源の遮断	安全関連のアクチュエータ部の電流遮断の処置	1	アクチュエータの駆動電流は、リレーやコンタクタ等の接点を介して遮断している。		3		
			2	駆動用のトランジスタをOFFすることにより駆動電流を遮断している。トランジスタが短絡した時でも、アクチュエータは動作しない。		2		
			3	アクチュエータの駆動電流は、制御部がOFFしなくても別の異常処置制御回路が優先的にOFFにしている。電源遮断手段が2つ以上ある。		2		
			4	その他の方法で駆動用電源を遮断している。		3		

図 3.1.8 チェックシート第2部 (第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
5	安全状態	出力回路の電源遮断	1	異常が発生した時、出力信号は、ソフトウェアでOFFにする。		1	
			2	異常が発生した時、出力部の信号は、ハードウェアで電源供給部を遮断し、信号出力を無効化する。ソフトウェアでも信号出力をOFFする。		3	
6	診断部分の故障	診断回路、診断方式の正常の判別	1	2重化、冗長化した回路の信号のチェック回路の故障を判別できる。 例えば、同じ信号を2重化、又は冗長化した回路で読み取り比較する。不一致の場合、診断の経路に異常があることがわかる。		3	
7	安全係数	出力容量	1	出力回路の許容電流、電圧の安全係数は、0.67(2/3)より優位な安全係数を持っている。(IEC61508-2,7.4.2.13)又は、最大定格の状態のままで十分動作することができる。		3	
					判定	合計(56)点満点	

1.安全回路部の部品について故障解析を行う。

回路例



2. データの流れ経路について

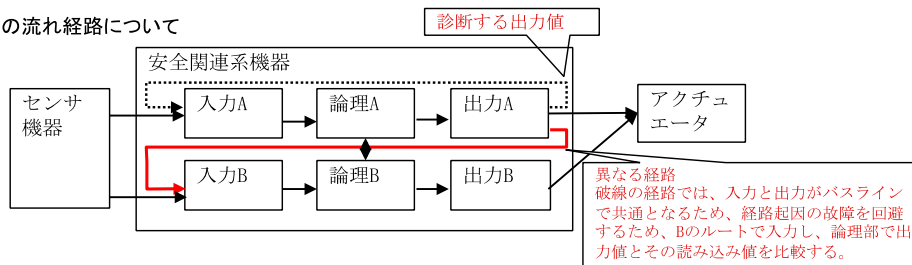


図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

2 個別のハードウェア

2-2 電源

安全機能を制御する装置へ供給される電源。
 安全装置が駆動するアクチュエータや信号入力するセンサーなどのI/O機器を駆動する電源(I/O電源)。
 電源の故障や障害時、安全機能を安全状態へ移行することが必要。

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点	
1	装置へ供給する電源	感電の危険のない電源電圧の使用	1	使用している電源電圧は、保護特別低電圧(AC25V(実効値)、DC60V以上)以下である。		3		
			1	供給電源が単一の場合 (図2-2-1.2の左端の“電源2”のない場合:この場合は“電源切り替え回路”は不要となる。)				
				イ 過電圧を検出すると装置への電源供給を遮断する。		3		
			2	過電圧を検出し、電源遮断を行うまでの間に過電圧となった電源電圧が、装置内の耐許容電圧(最大定格)を超えない。 ロ この切り替え時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。最大定格とは部品が破損しない上限の定格である。電源異常が除去された時、正常な動作を保障する。		3		
				供給電源を別電源(第2電源)に切り替える場合。 (図2-2-1.2の左端“電源”を“電源2”に切り替える)				
			イ 過電圧を検出すると装置への電源供給を第2電源に切り替える。		2			
			2	過電圧を検出し、第2電源への切り替えを行うまでの間に過電圧となった電源電圧が、装置内の耐許容電圧(最大定格)を超えない。 ロ この切り替え時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。最大定格とは部品が破損しない上限の定格である。電源異常が除去された時、正常な動作を保障する。		1		
				ハ 切り替えた第2電源の過電圧を監視している。		1		
			ニ 第2電源も過電圧であった場合は、電源供給を遮断している。		1			

No	項目	主旨	設問		チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点	
1		過電圧によって安全機能が保護されていること	2	ホ	第2電源の過電圧であった場合は、電源供給を遮断するまでの時間で過電圧となった第2電源電圧が、装置内の耐許容電圧(最大定格)を超えない。この切り替え時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。最大定格とは部品が破損しない上限の定格である。電源異常が除去された時、正常な動作を保障する。		1		
			3	イ	その他 過電圧を検出した時、1項,2項の方法とは別の方式を取っている。		3		
2	装置へ供給する電源	電圧低下によって安全機能が保護されていること			供給電源が単一の場合。 (図2-2-1.2の左端の第2電源のない場合:この場合は"電源切り替え回路"は不要となる。)				
			1	イ	電圧低下を検出すると装置内へ報知し、処理途中のタスクを終了し、出力をOFFにし、必要があれば、データを保存して、装置を安全状態に移行する。		3		
				ロ	電圧低下を検出し、電源OFFに備える処理をしている間に電源電圧が各部品の正常動作を保障する定格値より低下しない。電源OFFに備える処理の時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。		3		
					供給電源を別電源(第2電源)に切り替える場合。 (図2-2-1.2の左端電源部の電源より電源2に切り替える)				
			2	イ	電圧低下を検出すると装置への電源供給を第2電源に切り替える。		2		
				ロ	電圧低下を検出し、第2電源への切り替えを行うまでの間に電圧低下となった電源電圧が、装置内の部品が正常動作を行う最電圧低下定格以下にならない。この切り替え時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。		1		
				ハ	切り替えた第2電源の電圧低下を監視している。		1		
				ニ	第2電源も電圧低下になった場合、電圧低下を装置内へ報知し、処理途中のタスクを終了し、出力をOFFにし、必要があれば、データを保存して、装置を安全状態に移行する。		1		

No	項目	主旨	設問		チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
2	装置へ供給する電源	電圧低下によって安全機能が保護されていること	2	ホ	第2電源が電圧低下であった場合は、電源OFFに備える処理をしている間に電源電圧が各部品の正常動作を保障する定格値より低下しない。電源OFFに備える処理の時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。		1	
			3	イ	その他 電圧低下を検出した時、1項,2項の方法とは別の方式を取っている。		3	
3	装置内の論理部の電源電圧	正常電源電圧の検出	1		電源ON時、論理部の電源電圧の正常値を検出し、その値に達するまで、または達した以後一定時間、装置内にリセットを掛け、初期状態にしている。		3	
			2		論理部電源ON時の論理部回路のリセットの時間は、システム全体が運動して正常に動作を開始するに十分な時間である。		3	
			3		初期状態では、すべての出力はOFFの状態である。		3	
			4		電源投入から正常電圧の検出し、リセットが終わるまでの間、いかなる出力信号も出ずことはない。		3	
			5		論理部電源が複数ある場合、電源間の同期がとれていること。 ・電源オン時、遅い立ち上がりの遅い電源に合わせて、システムが動作を開始すること。 ・電源オフ時、電源断の早い電源に合わせて、電源シャットダウン処理を完了すること。		3	
			6		電源相互間で電源の正常状態が把握できること。どれかが異常の場合は、決められた処置を行い、安全状態を損なわないこと。		3	
			7		その他 電源電圧の正常範囲を検出には、1項から6項の方法とは別の方式を取っている。		3	

図 3.1.8 チェックシート第2部 (第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文書 の番号)	得点	
4	装置内の論 理部の電源 電圧	論理部の電源の 過電圧の検出	論理部電源が単一の場合。 (図2-2-1の左側中央寄りの“論理部電源 2”のない場合:この場合は“電源切り替え 回路”は不要となる。)					
			イ 過電圧を検出すると論理部への電源 供給を遮断する。		3			
			1	過電圧を検出し、電源遮断を行うまで の間に過電圧となった電源電圧が、 論理部内の耐許容電圧(最大定格) を超えない。 この切り替え時間は、部品のばらつき を考慮し、最長時間で考える。最大定 格とは部品が破損しない上限の定格 である。電源異常が除去された時、正 常な動作を保障する。		3		
			2	論理部の電源を別電源に切り替る場合。 (図2-2-1の左側の中央寄りの“論理部電 源1”から“論理部電源2”に切り替える)				
			イ 過電圧を検出すると論理部への電源 供給を第2電源に切り替える。		2			
			2	過電圧を検出し、第2電源への切り替 えを行うまでの間に過電圧となった電 源電圧が、論理部内の耐許容電圧 (最大定格)を超えない。 この切り替え時間は、部品のばらつき を考慮し、最長時間で考える。最大定 格とは部品が破損しない上限の定格 である。電源異常が除去された時、正 常な動作を保障する。		1		
			ハ 切り替えた第2電源の過電圧を監視し ている。		1			
			ニ 第2電源も過電圧であった場合は、電 源供給を遮断している。		1			
			ホ 第2電源の過電圧であった場合は、電 源供給を遮断するまでの時間で過電 圧となった第2電源電圧が、論理部内 の耐許容電圧(最大定格)を超えな い。 この切り替え時間は、部品のばらつき を考慮し、最長時間で考える。最大定 格とは部品が破損しない上限の定格 である。電源異常が除去された時、正 常な動作を保障する。		1			

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
4	装置内の論理部の電源電圧	論理部の電源の過電圧の検出		論理部の電源がチャンネルごとに別々になっている場合。			
			イ	1つの電源で過電圧を検出すると他の電源供給先の各チャンネルの論理部へ過電圧を知らせる。		3	
			ロ	過電圧を検出された電源は、その電源を供給する論理部の部品破損に至る電圧(絶対定格)になる前に遮断され、その論理部は電源遮断前に安全状態を損なわない処置を行う。		2	
			ハ	過電圧検出から電源シャットダウンまでの時間は、最悪条件を考慮してできるだけ短時間とする。例えば、部品の絶対最大定格のばらつき(最も低い絶対定格電圧に合わせる)、電源の電圧上昇のバラツキ、電源の負荷状態(電源の出力電流値、容量負荷等で電源の上昇時間が変わる)を考慮する。 電源異常が除去された時、正常な動作を保障する。		1	
			4	その他 電源電圧の過電圧検出には、1項から3項の方法とは別の方式を取っている。		3	
5	論理部の電源の電圧低下の検出		論理部電源が単一の場合。 (図2-2-1.2の左側中央寄りの“論理部電源2”のない場合:この場合は“電源切り替え回路”は不要となる。)				
		イ	電圧低下を検出すると論理部内の中央制御部へ報知し、処理途中のタスクを終了し、出力をOFFにし、必要があれば、データを保存して、装置を安全状態に移行する。		3		
		ロ	電圧低下を検出し、電源OFFに備える処理をしている間に電源電圧が各部品の正常動作を保障する定格値より低下しない。電源OFFに備える処理の時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。		3		
		2	論理部への電源を別電源に切り替える場合。 (図2-2-1.2の左側の中央寄りの“論理部電源1”から“論理部電源2”に切り替える)				

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点	
5	装置内の論理部の電源電圧	論理部の電源の電圧低下の検出	イ	電圧低下を検出すると論理部への電源供給を第2電源に切り替える。		2		
			ロ	電圧低下を検出し、第2電源への切り替えを行うまでの間に電圧低下となった電源電圧が、論理部内の部品が正常動作を行える最電圧低下定格以下にならない。 この切り替え時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。		1		
			ハ	切り替えた第2電源の電圧低下を監視している。		1		
			ニ	第2電源も電圧低下になった場合、電圧低下を論理部内の中央部へ報知し、処理途中のタスクを終了し、出力をOFFにし、必要があれば、データを保存して、装置を安全状態に移行する。		1		
			ホ	第2電源の電圧低下でなかった場合は、電源OFFに備える処理をしている間に電源電圧が各部品の正常動作を保障する定格値より低下しない。電源OFFに備える処理の時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。		1		
			3	論理部の電源がチャンネルごとに別々になっている場合。				
			イ	1つの電源で電圧低下を検出すると他の電源供給先の各チャンネルの論理部へ電圧低下を知らせる。		3		
			ロ	電圧低下を検出された電源は、その電源を供給する論理部の部品の電圧低下定格電圧になる前に、電源シャットダウン処理にて、安全状態を損なわない。		2		
			ハ	電圧低下検出から電源シャットダウンまでの時間は、最悪条件を考慮してできるだけ短時間とする。例えば、部品の絶対最大定格のばらつき(最も低い絶対定格電圧に合わせる)、電源の電圧下降のバラツキ、電源の負荷状態(電源の出力電流値、容量負荷等で電源の下降時間が変わる)を考慮する。 電源電圧が正常値に戻った時、正常な動作を保障する。		1		
			3	その他 論理部の電源電圧の電圧低下の検出には、1項から3項の方法とは別の方式を取っている。		3		

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文書 の番号)	得点		
6	I/O電源(機能安全部につながる入出力機器用電源)	過電圧になっても安全機能が保護されていること	1	使用している電源電圧は、保護特別低電圧(AC25V(実効値)、DC60V以上)以下である。		3			
			1	I/O部への供給電源が単一の場合。					
				イ	過電圧を検出すると検出した電源が供給されている入力部または出力部の電源供給を遮断する。		3		
			ロ	過電圧を検出し、電源遮断を行うまでの間に過電圧となった電源電圧が、入力部または出力部内の耐許容電圧(最大定格)を超えない。 この切り替え時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。最大定格とは部品が破損しない上限の定格である。電源異常が除去された時、正常な動作を保障する。		3			
			2	I/O部への供給電源を別電源に切り替る場合。					
				イ	過電圧を検出すると装置への検出した入力部または出力部へ供給している電源を第2電源に切り替える。		2		
				ロ	過電圧を検出し、第2電源への切り替えを行うまでの間に過電圧となった電源電圧が、入力部または出力部内の耐許容電圧(最大定格)を超えない。 この切り替え時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。最大定格とは部品が破損しない上限の定格である。電源異常が除去された時、正常な動作を保障する。		1		
				ハ	切り替えた第2電源の過電圧を監視している。		1		
				ニ	第2電源も過電圧であった場合は、電源供給を遮断している。		1		
			ホ	第2電源の過電圧であった場合は、電源供給を遮断するまでの時間で過電圧となった第2電源電圧が、入力部または出力部内の耐許容電圧(最大定格)を超えない。 この切り替え時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。最大定格とは部品が破損しない上限の定格である。電源異常が除去された時、正常な動作を保障する。		1			
3	その他 I/O部の電源電圧の過電圧の検出には、1項から3項の方法とは別の方式を取っている。		3						

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文書 の番号)	得点		
6	I/O電源(機能安全部につながる入出力機器用電源)	電圧低下になっても安全機能が保護されていること	I/O部への供給電源が単一の場合。						
			イ	電圧低下を検出すると装置内へ報知し、I/O関係の処理が電圧低下時の安全状態移行処理に移り、出力をOFFにして、装置を安全状態に移行する。		3			
			ロ	電圧低下を検出し、電源OFFに備える処理をしている間に電源電圧が各 부품の正常動作を保障する定格値より低下しない。電源OFFに備える処理の時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。		3			
			I/O部への供給電源を別電源に切り替える場合。						
			イ	電圧低下を検出すると検出した入力部または出力部への電源供給を第2電源に切り替える。		2			
			ロ	電圧低下を検出し、第2電源への切り替えを行うまでの間に電圧低下となった電源電圧が、入力部または出力部内の部品が正常動作を行う最電圧低下定格以下にならない。この切り替え時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。		1			
			2	ハ	切り替えた第2電源の電圧低下を監視している。		1		
			ニ	第2電源も電圧低下になった場合、電圧低下を装置内へ報知し、I/O関係の処理が電圧低下時の安全状態移行処理に移り、出力をOFFにして、装置を安全状態に移行する。		1			
			ホ	第2電源の電圧低下であった場合は、電源OFFに備える処理をしている間に電源電圧が各 부품の正常動作を保障する定格値より低下しない。電源OFFに備える処理の時間は、部品のばらつきを考慮し、最長時間で考える。		1			
			3	その他	I/O部の電圧の電圧低下の検出には、1項、2項の方法とは別の方式を取っている。		3		

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文書 の番号)	得点	
7	過電流検出	過電流によって起 きる事象から安全 機能が保護されて いること	供給電源が単一の場合 (図2-2-1.2の左端の“電源2”のない場合: この場合は“電源切り替え回路”は不要と なる。)					
			1	イ 過電流を検出すると論理部への電源 供給を遮断する。		3		
			ロ 過電流を検出し、電源遮断を行うま での間に過電流による部品損傷や発 火、発煙などの事象にならない。 遮断までの時間は、部品のばらつき を考慮し、最長時間で考える。最大定 格とは部品が破損しない上限の定格 である。最大定格を超える前に、電源 遮断を行う。過電流の原因が除去さ れた時、正常な動作を保障する。		3			
			2	供給電源を別電源(第2電源)に切り替 る場合。 (図2-2-1.2の左端“電源”を“電源2”に切 り替える)				
			イ 過電流を検出すると装置への電源 供給を第2電源に切り替える。		2			
			ロ 過電流を検出し、第2電源への切り 替えを行うまでの間に過電流とな った装置内の耐許容電流(最大定 格)を超えない。 この切り替え時間は、部品のばら つきを考慮し、最長時間で考 える。最大定格とは部品が破損 しない上限の定格である。最大 定格を超える前に、電源遮断 を行う。過電流の原因が除去 された時、正常な動作を保障 する。		1			
			ハ 切り替えた第2電源の過電流を監視 している。		1			
			ニ 第2電源も過電流検出した場合は、 電源供給を遮断している。		1			
			ホ 第2電源も過電流であった場合、電 源供給を遮断するまでの時間 で過電流となった第2電源が、 装置内の耐許容電流(最大定 格)を超えない。 この切り替え時間は、部品のば らつきを考慮し、最長時間で考 える。最大定格とは部品が破 損しない上限の定格である。 最大定格を超える前に、電 源遮断を行う。過電流の原 因が除去された時、正常な動 作を保障する。		1			
			3	その他 I/O部の電圧の過電流の検出には、1項、2 項の方法とは別の方式を取っている。		3		
			判定		合計(117)点満点			

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

論理部が単一電源の場合

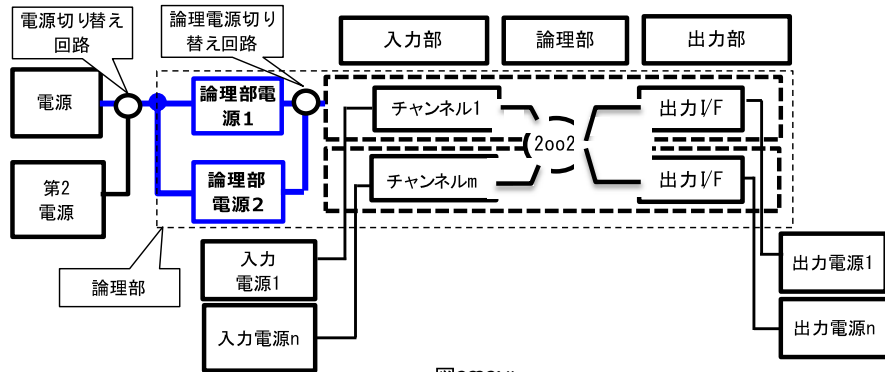


図23231#

論理部が複数電源の場合

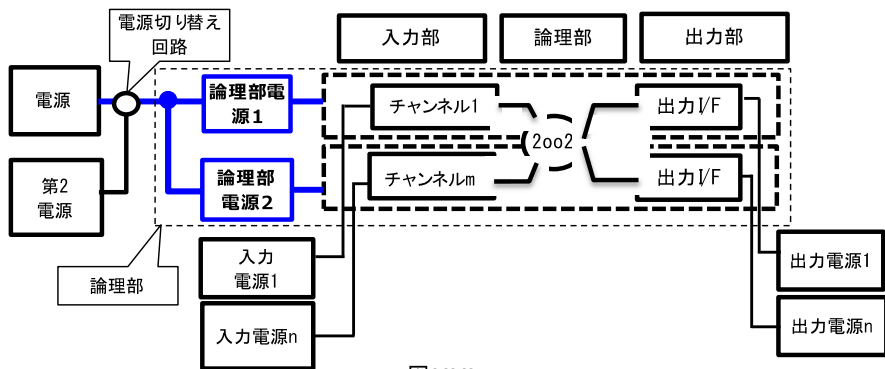


図23232#

2 個別のハードウェア

2-3 電源電圧監視回路

- * 1 供給電源や論理部の電源の過電圧、電圧低下の監視回路がランダム故障で機能しなくなった時、安全機能が働かず危険状態になることが考えられる。これを防止するため、電源電圧の監視回路を2重化、または冗長化することが求められる。
- * 2 供給電源とは、AC100VからDC24へ変換する電源ユニットのDC24V出力、DC24V,12V出力のバッテリーなどが相当する。
- * 3 論理部電源は、論理部への電源供給を行う。例えば、論理部がDC3.3Vであれば、供給電源DC24VからDC3.3Vに変換するDC/DC電源装置が相当する。

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点	
1	安全機能制御部本体の電圧監視回路	供給電源電圧監視回路(図1参照) 過電圧監視 電圧低下が、論理部のみに影響する場合は、論理部の電源出力で監視する方法もある。	1	電源監視回路を2重化している。	■	3		
				イ 過電圧監視回路を2重化している		3		
				ロ 電圧低下監視回路を2重化している		3		
			2	別の方法で過電圧、電圧低下を監視している		3		
				監視回路の2重化の方式	/	/	/	
			図1の場合 供給電源は1つ。監視回路が2重化され、監視状態をチャンネル_1,2の論理部へ送っている。		3			
			片側の供給電源監視回路の故障の場合	/	/	/		
			イ 他方は、回路方式が異なるため、正常に働いている。共通原因故障による故障にならない。	■	3			
			3	ロ 1つ目の監視回路の監視信号はチャンネル_1側へ入力、2つ目はチャンネル_2へ入力している。同じチャンネルに入れていない。 監視回路異常でも、監視信号が不一致となるので、異常判定できる。 過電圧になった時、1つ目がOFF故障していても、2つ目がONすれば、2oo2の判定で不一致になるので異常として処理する。また、一方の応答が遅くなくても、早く入力した信号で不一致処理がされ、結果的に異常として処理される。		3		
				ハ 他方は、回路方式が同じであるため、故障原因によっては、他方も故障している。共通原因故障により両方も故障になる。	■	1		
ニ 論理部電源監視は2重化しているが、同じ回路で構成している。監視信号は、それぞれチャンネル_1,2に入力している。 監視回路が同じである共通原因での故障(ノイズ、部品のロット不良など)により、2つの回路が同時に故障し、正常に回路監視できない可能性が排除できない。		1						

図 3.1.8 チェックシート第2部 (第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
1		供給電源電圧監視回路(図1参照) 過電圧監視 電圧低下が、論理部のみに影響する場合は、論理部の電源出力で監視する方法もある。	監視回路の動作				
			監視回路で異常を検出したら論理回路電源からの供給ラインを直ちに遮断する。		3		
			イ ソフトウェアを介さず、ハードウェアで行う。監視信号はチャンネル_1,2に送っている。この信号で、異常処理を行い、供給電源のシャットダウンを行う。ソフトウェアは補助であり、供給電源の異常時は、ハードウェアで供給電源が論理部電源に投入する間で遮断する。論理部電源がシャットダウンされるので、シャットダウンされたチャンネルでは、電圧低下検出が働き、電圧低下(電源オフ)処理が行われる。		3		
ロ 監視信号を受け、ソフトウェアで供給電源遮断処理を行う。供給電源の過電圧によって論理部電源が破損する絶対定格に至る前に遮断を行う。		2					
2	安全機能制御部本体の電圧監視回路	論理部電源電圧監視回路	電源監視回路を2重化している。		3		
			1 イ 過電圧監視回路を2重化している		3		
			ロ 電圧低下監視回路を2重化している		3		
			2 別の方法で過電圧、電圧低下を監視している		3		
			監視回路の2重化の方式				
			図2の場合、論理部電源は1つ。監視回路が2重化され、監視状態をチャンネル_1,2の論理部へ送っている。		3		
			片側の電源の監視回路の故障の場合				
			イ 他方は、回路方式が異なるため、正常に働いている。共通原因故障による故障にならない。		3		
3 ロ 1つ目の監視回路の監視信号はチャンネル_1側へ入力、2つ目はチャンネル_2へ入力している。同じチャンネルに入れていない。監視回路異常でも、監視信号が不一致となるので、異常判定できる。過電圧になった時、1つ目がOFF故障していても、2つ目がONすれば、2oo2の判定で不一致になるので異常として処理する。また、一方の応答が遅くなくても、早く入力した信号で不一致処理がされ、結果的に異常として処理される。		3					
ハ 他方は、回路方式が同じであるため、故障原因によっては、他方も故障している可能性がある。監視回路が同じであると共通原因での故障(ノイズ、部品のロット不良など)により、2つの回路が同時に故障し、正常に回路監視できない可能性が排除できない。		1					

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点	
2	安全機能制御部本体の電圧監視回路	論理部電源電圧監視回路	監視回路の動作					
			イ	①	監視回路で異常を検出したら論理回路電源からの供給ラインを直ちに遮断する。		3	
				②	ソフトウェアを介さず、ハードウェアで行う。ソフトウェアは電圧低下監視回路からの信号を受け、電圧低下処理を行い、安全状態に移行する。		3	
			ロ	①	監視信号を受け、ソフトウェアで電源遮断処理を行う。		1	
				②	監視回路で異常を検出したら供給電源からの供給ラインを直ちに遮断する。		3	
			③	ソフトウェアを介さず、ハードウェアで行う。		3		
④	監視信号を受け、ソフトウェアで電源遮断処理を行う。		1					
3		2重化によらない論理部電源監視	イ	その他電圧低下、過電圧電源監視を2重化以外の方法で行い、その回路の部品のどれが故障しても安全関連系を安全状態に移行できる。		3		
4	I/O部電源電圧電流監視	入力信号の電源監視(I/O用電源)	1	過電圧監視を行っている。		3		
			2	過電圧が検出されると入力部信号の電源供給を遮断する。		3		
			3	過電圧検出し、電源を遮断するまでに過電圧によって入力部回路が破損しないようになっている。		3		
			4	電圧低下監視を行っている		3		
			5	電圧低下になると信号信頼性が落ちるので、電源を遮断するか、異常を報知し、システムまたは設備を停止する。		3		
			6	電圧低下を報知し、停止するまで、電圧低下で偽信号となった信号の影響を受けない仕組みができています。		3		
		7	入力信号用電源の過電流監視	過電流検出を行っている。			3	
				イ	ヒューズで過電流保護をおこなっている。		0	
				ロ	半導体ヒューズを使用している。		0	
				ハ	半導体組み合わせの過電流検出回路により電流を遮断している。		0	

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
4	I/O部電源 電圧電流監視	出力信号の電源監視	1	過電圧検出を行っている。		3	
			2	過電圧が監視されると出力部信号の電源を遮断する。		3	
			3	過電圧検出し、電源を遮断するまでの間に過電圧によって出力部回路が破損しないようになっている。		3	
			4	電圧低下監視を行っている		3	
			5	電圧低下になると信号信頼性が落ち、また電流が減少するので、安全機能用アクチュエータが駆動できなくなるため、電源を遮断するか、異常を報知し、システムまたは設備を停止する。		3	
			6	電圧低下を報知し、停止するまで、電圧低下で安全機能を損なわない仕組みができています。		3	
		出力信号用電源の過電流監視	7	過電流検出を行っている。		3	
			イ	ヒューズで過電流保護をおこなっている。		3	
			ロ	半導体ヒューズを使用している。		3	
			ハ	半導体組み合わせの過電流検出回路により電流を遮断している。		3	
				判定	合計(060)点満点		

注1: 出力部の電源を落とすことで安全機能用のアクチュエータの動作を停止することができる。この時、同時に入力信号用の電源を遮断する必要はない。

図1. 電源系統図

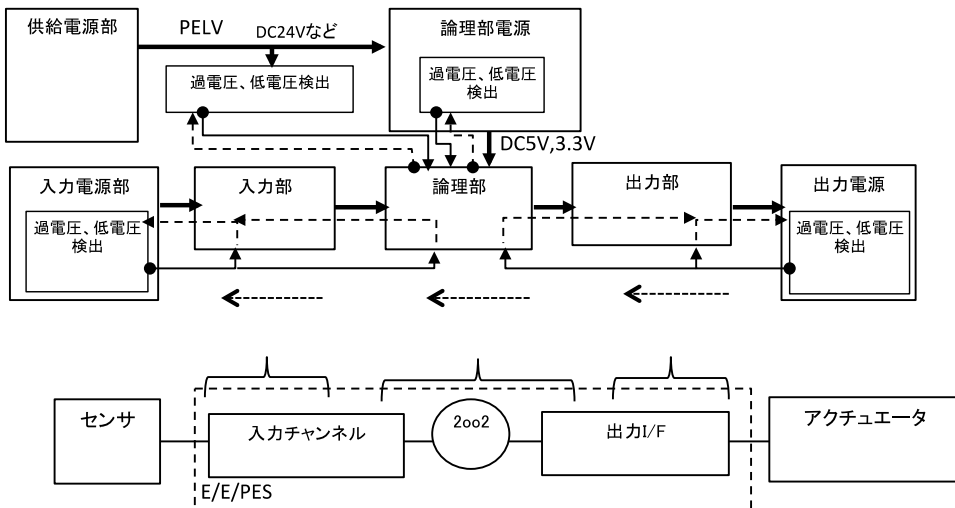


図 3.1.8 チェックシート第2部 (第3版) 続き

図2. 電源異常検出を2重化した論理部電源供給:論理部電源は単一

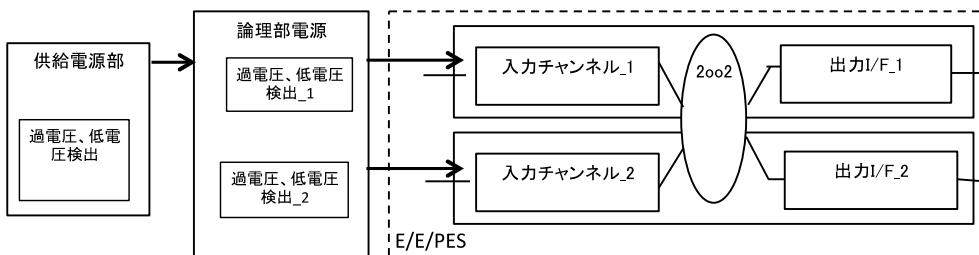
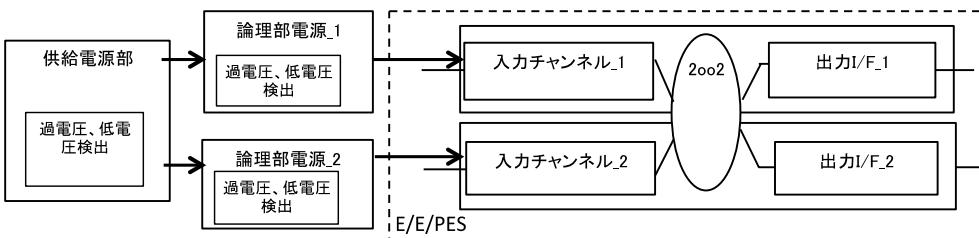


図3. 2重化した論理部電源供給:それぞれの電源に電源異常検出部を持つ



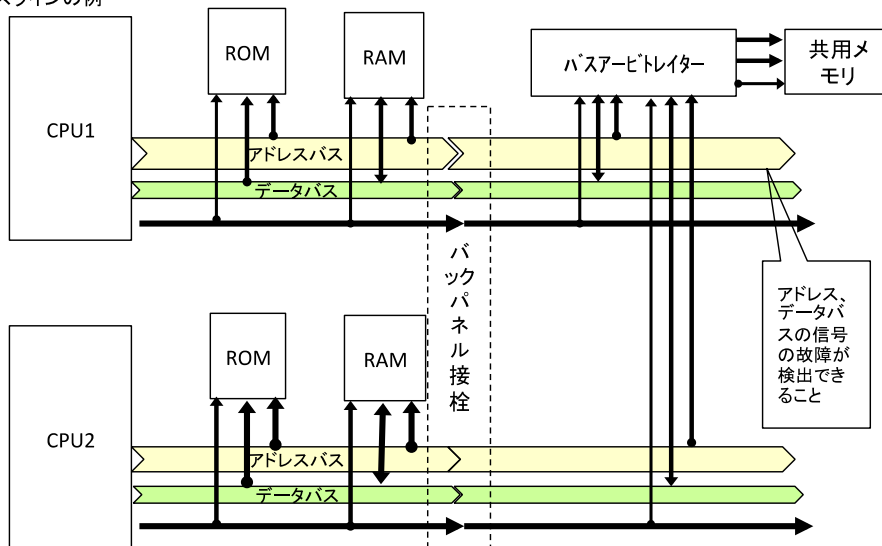
3 バス

3-1 一般、メモリ管理ユニット、直接メモリアクセス、バスアービトレーション

バスラインのデータ、バスアービトレーション(調停管理)回路、メモリのデータ、アドレスなどの障害、故障が検出でき、安全状態に移行できる/安全機能に使用しているメモリ領域

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
1	バスライン	アドレスバスラインの故障がないこと	1	マイコンのアドレスバスの欠損(あるアドレスラインが"1"のままになっている状態)を検出することができる。		3	
			2	マイコンのアドレスバスの欠損(あるアドレスラインが、"0"のままになっている状態)を検出することができる。		3	
		データバスラインの故障がないこと	1	マイコンへ入出力するバスライン上のデータの欠損(あるデータラインが"1"のままになっている状態)を検出することができる。		3	
			2	マイコンへ入出力するバスライン上のデータの欠損(あるデータラインが"0"のままになっている状態)を検出することができる。		3	
	バスアービレーターが正しくバスラインの調停を行っていること	1	バスアービレーターのバス切り替え等の制御状態を監視、または試験により故障が検出できる。		3		
2	メモリアクセス	安全機能の実行プログラム領域又は安全関連データの存在する領域メモリに正しくアクセスできている。	1	メモリのアドレスライン、データラインが"0"のままになり、目的のデータを読み出せない状態が検出できる。		3	
			2	メモリのアドレスライン、データラインが"1"のままになり、目的のデータを読み出せない状態が検出できる。		3	
				判定		合計(021)点満点	

図3 バスラインの例



4 CPU

4-1 マイコンの故障検出

同一のマイコンで安全機能と一般機能を行う場合は、原則的に安全機能と一般機能を実行する制御プログラムもメモリエリアも混在してはならない。例えば、マイコン内部のメモリエリアで安全機能を実行した場合は、一般制御のメモリエリアは外部メモリを使用するような工夫が必要となる。

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
1	マイコンの採用	マイコンの採用	安全機能の実現にマイコンを使用している。		3		
2	マイコンの不具合と内部故障の検出	マイコンの不具合の確認	1	マイコンのバグリストをメーカーから入手している。		3	
			イ	不具合のあるマイコンの命令はバグを回避して使用している。		3	
			ロ	コンパイラにもこの不具合が反映されていることを事前に評価している。		3	
			ハ	コンパイラのバージョンをばらばらでなく、プログラム開発中も変更時と同じものを使用している。(新バージョンに切り替えていない)		3	
			ニ	マイコンの不具合の解消は、または、新バージョンへの切り替えは常にメーカーと連絡を取り、安全機能が損なわれないことを確認している。これらは、文書で残している。(メーカーよりの変更通知、変更後の妥当性確認計画書、確認結果等)		3	
2	マイコンの不具合を上記方法以外で入手し、対策を行って、使用している。		3				

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点	
2	マイコンの不具合と内部故障の検出	内部が破損し、演算関係が正しく行われない故障の検出	内部のデータ、アドレスの故障を検出している		3			
			イ	安全機能に使用しているメモリエリアの読み出し/書き込み試験し、メモリの故障がないことを検証している。		3		
				① RAM 特定パターンを書き込み、それを読み出し、書き込んだ値が変化していないことを確認している(セルチェック)		3		
				② RAM 特定パターンを書き込み、それを読み出し、書き込んだエリア以外が変化していないことを確認している。(アドレスチェック)		3		
				③ ROM 安全機能に使用しているエリアの内容を読み出し、チェックパターンを計算し、予め計算済の値と比較している。(セルチェック)		3		
			ロ	マイコンの演算命令を定期的に試験し、マイコンが正しい演算をしていることを確認している。		3		
			ハ	マイコン内部のスタックポインタの試験を行っている。		3		
			ニ	マイコン内部のプログラムカウンタの試験を行っている。		3		
			ホ	マイコン内部のレジスタ、フラグの試験を行っている。		3		
			ヘ	マイコンに付属の演算器(浮動小数点演算、高速専用機能演算器)の機能試験を定期的に行い、演算機能の正しさを検証している。		3		

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
3	暴走検出	暴走検出の方法	1 マイコンの暴走はマイコン外部のハードウェアのタイマーでチェックしている。例えば、マイコンのクロックと異なる発振器を使用し、カウンターでタイマーを設定する。タイムアップで暴走と検知する。マイコンは、タイムアップ前にカウンター値を再セットする。又は、リトリガーICによりCRで時間設定する。リトリガーICがタイムアップする前にリセットする。		3		
			2 マイコンは、2重化、又は冗長化しており、マイコンのタイマーで相互監視している。例えば、決められた時間に相互確認をし、返事がなければ、暴走とし、検出した側のマイコンでシステムを安全状態へ移行する。		3		
			3 2つ以上のマイコンをネットワークで結合し、定期的に情報交換を行い、定期的な情報交換が途絶えた時、暴走と見なし、異常処置を行う。		2		
			4 その他の方法で暴走検知している。		3		
4	入出力ポート	入出力ポートのデータの異常の検出	マイコンにI/Oポートがあり、使用している。		/		
			1 マイコンの入力ポートが"0"になりっ放し(0縮退故障)がわかる。		3		
			2 マイコンの入力ポートが"1"になりっ放し(1縮退故障)がわかる。		3		
			3 マイコンの出力ポートが"0"になりっ放し(0縮退故障)がわかる。		3		
			4 マイコンの出力ポートが"1"になりっ放し(1縮退故障)がわかる。		3		
	通信ポート	通信ポート	マイコンに通信ポートがあり、使用している。		/		
			1 マイコンのシリアル通信ポートの受信部が"0"になりっ放し(0縮退故障)がわかる。		3		
			2 マイコンのシリアル通信ポートの受信部が"1"になりっ放し(1縮退故障)がわかる。		3		
			3 マイコンのシリアル通信ポートの送信部が"0"になりっ放し(0縮退故障)がわかる。		3		
			4 マイコンのシリアル通信ポートの送信部が"1"になりっ放し(1縮退故障)がわかる。		3		

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
5	割り込み	割り込み信号の状態検査	マイコンに割り込みポートがあり、使用している。				
			1 マイコンの割り込み信号入力部が“0”になりっ放し(0縮退故障)がわかる。		3		
			2 マイコンの割り込み信号入力部が“1”になりっ放し(1縮退故障)がわかる。		3		
			3 マイコンの割り込み優先順位が正しいことがわかる		3		
				判定	合計(084)点満点		

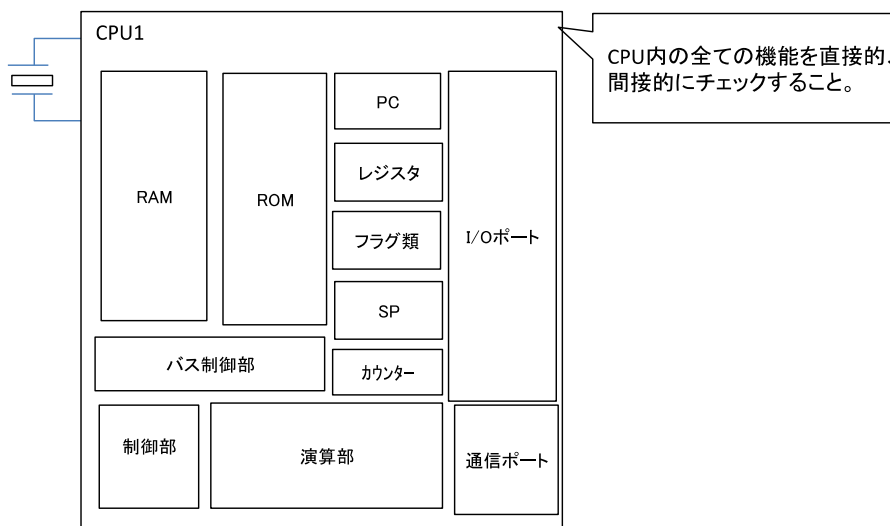


図 3.1.8 チェックシート第2部 (第3版) 続き

5.6 不変メモリ、可変メモリ

メモリ領域のビットデータ、バイト/ワードデータが意図しない事象で破損、故障していないことを試験する。
メモリノバスライン、アドレスラインの故障により正しいデータが読み出し/書き込みできなくなる。これらの故障を検出する試験を行う。

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点	
1	RAMエリア	RAMのビット故障の検出	1	RAMのメモリセル単位(1ビット)で故障を検出している。		3		
			2	RAMの記憶ビットをアクセスするアドレスラインの故障の検出をしている。 (データを書き込み、読み出し時、書き込みデータが指定以外のエリアに書き込まれていないことを確認する。)		3		
		RAMのデータバスの故障検出	1	データの欠損が無いことを確認している。		3		
			2	データのビットが混線していないことを確認している。		3		
		データバックアップ	1	イ	安全関連データの最新データ(カレントデータ)をRAM領域でバックアップしている。(安全関連データは、バックアップしないほうがよい。)		3	
				ロ	電源投入時システムがスタートする前にRAM内容の確認を行っている。バックアップ用の電池の不具合によって内容が破損した場合の対策を決めている。		2	
			2	イ	安全関連データの最新データ(カレントデータ)を書き換え可能なROM領域でバックアップしている。(安全関連データは、バックアップしないほうがよい。)		3	
				ロ	電源断時、書き換え可能ROMへの書き込み時間を十分確保できる回路を採用している。		3	
				ハ	電源投入時システムがスタートする前にROM内容の確認を行っている。バックアップ時の不具合によって内容が破損した場合の対策を決める。		3	
				ニ				
2	ROMエリア	ROMのビット故障の検出	イ	ROMに書き込まれたデータが変化していることを検出している。(ROMは電荷で記憶している。絶縁膜が破損すると電荷リークする。それがメモリ消えになる。)		3		
			ロ	ROMの記憶ビットをアクセスするアドレスラインの故障の検出をしている。(データの読み出し時、指定以外のエリアから読み出されていないことを確認する。)		3		
		ROMのデータバスの故障検出	イ	データの欠損が無いことを確認している。		3		
			ロ	データのビットが混線していないことを確認している。		3		
					判定	合計(030)点満点		

ROM/RAMの故障について、IEC61508-2では、「メモリに影響を及ぼす全て故障」考慮するとある。故障として、ハードウェアの故障(内部素子の破損、配線の断線、クロストーク、外乱等)以外にソフトウェアの発生がある。これも考慮に入れる必要がある。ソフトウェアは、宇宙線や地球上の微量な放射性原子によるアルファ線や中性子線、陽子線、重イオン線などの粒子線が半導体チップに突入することで引き起こされる。粒子線の突入によって電荷および電流が発生するため、データが書き換えられてしまう現象である。

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

7 クロック

回路が1や0に固定されたり、中途半端な状態や発振状態(クロック関連を除く)になった時、安全状態に移行する。

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
1	クロック部	ウォッチドッグタイマー	1	マイコンの動作周波数及びプログラムシーケンスを監視するため、マイコンの外にマイコンと異なる発振源でカウントされるWDT回路、またはリトリガー回路を設けている。		3	
			2	ウォッチドッグタイマーはマイコンによって、制御プログラムの適切な箇所周期的に起動、又はクリアされる。		3	
			3	起動、又はクリアを掛けるマイコンの周期は正確である。		3	
			4	タイマーの時間設定は、温度など周囲の環境条件の影響を考慮している。		3	
			5	ウォッチドッグタイマーの設定時間は、安全機能を損なわないように十分短い時間である。 例えば、マイコンの制御周期が10msとすれば、11msであるように。(11ms-10ms=1msの1msは制御周期、及びアクチュエータが動作する時間よりより十分小さく、誤出力をださない)また、時間設定は、設定理由が明確に明確になっている。		3	
			6	ウォッチドッグタイマーに下限が設定されている。 下限を7msとすると下限より前の6ms後にウォッチドッグを再設定すると異常となる。		3	
			ウォッチドッグタイマーが不正にクリアされるようなマイコンの暴走モードに対し対策を考慮している。例えば、マイコンが冗長化されていれば、相手側のマイコンがウォッチドッグ部を制御する、ノンマスク割り込みを使用しているなど。		3		
2	マイコン間の相互監視	2重化、冗長化されたマイコン間での時間監視	1	2つのマイコンプログラム間で時間監視ポイントを決め、そのポイントごとに相互チェックを行い、相互に正しく動いていることを確認する。 チェックポイントで相互連絡できなくなれば異常になる。		3	
			2	チェックポイントがずれない仕組みを持っている。		3	
3	その他		1	その他の方法で、マイコンのクロックの正確さ、動作状態を監視している。		3	
				判定	合計(027)点満点		

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

8 通信バス及び大容量記憶

通信バスで、安全情報を1つでも送っている場合、下記チェックをしてください。
 安全情報とは、その情報が正しく伝わらないと機械、設備、装置が危険な状態になる信号類です。(例えば、非常停止信号を通信バスで送っている場合は、安全情報を通信バスしていることに該当します。)
 短い距離(30cm程度)で、プリント基板上で安全情報を通信バスする場合は、バスラインチェックに該当します。内部での通信バスチェックは設問2のチェックを行ってください。

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
1	通信バスにより安全信号を送受信している。	安全信号の通信バスによる送受信	安全信号を通信バスで送受信している。				
			イ すでに安全通信バスとして認証を得られたものを利用している。		3		
			ロ 独自の通信バス方式である。		2		
			ハ 一般的な国際規格になっている通信バス方式(USB、イーサネット、等)を採用している。安全に関する認証は取得していない。		2		
2	通信データの故障の検出(バスラインでの通信、大容量メモリとのやり取りも含む)	外部機器とのデータ交換	1 テストパターンを定期的に挿入し、入力/出力値の比較を行い、故障を検出する。テストパターンは、予め決めた値を入れる。外部の接続機器、その他に影響を与えないこと。		3		
			2 入出力データを2重化して、監視することによって、そのデータを送信、受信する入出力回路の故障を検出する。この方式は、ハードウェアのランダム故障と決定論的故障に有効。		3		
			3 多チャンネル並列出力の中に制御に依存しない出力を行い、この出力結果を比較することで、故障を検出する。		3		
			4 出力値を別の入力でモニターし、決められた値であるか比較することで故障を検出する。外部の装置や環境によってデータが影響を受けたことをしるのによい。		3		
			5 入力値の故障を検出するため、入力回路を冗長化(1oo2、2oo2、2oo3など)し、比較している。		3		

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点	
2	通信データの故障の検出(バスラインでの通信、大容量メモリとのやり取りも含む)	内部のデータ交換(パソコンと安全関連機器へプログラムやパラメータを書き込むときも含む;この時はケーブル長は1m以内、これ以上長い時は、ケーブルのノイズテストが必要)	1	8ビット単位の通信の場合、パリティビットを使用している。データの50%の間違い検出率がある。		3		
			2	バスラインなどに2bit以上のbitを追加し、ハミングコード技法でbitの故障検出を行う。		3		
			3	ハードウェアの2重化による故障の検出。2つのバスラインで通信を行い、一方のバスラインは故障検出のために使用する。		3		
			4	テストパターンを定期的挿入し、入力/出力値の比較を行い、故障を検出する。テストパターンは、予め決めた値を入れる。外部の接続機器、その他に影響を与えないこと。		3		
			5	送信されたデータを送信側に送り返し、データが正しいことを確認する方法。これは、データを何度かに分けて送ったり、何回かデータ送受信を繰り返す時に有効な技法。		3		
			6	通信情報をブロックに分け、各ブロックごとにCRCやチェックサムを生産して付ける。受信側は、データ比較とともにCRCやチェックサムを再計算して、比較する。		3		
3	通信時間の監視(バスラインでの通信、大容量メモリとのやり取りも含む)	通信時間を監視しているか	1	一定時間で返信が無いと送信側または通信バス監視部で受信側が故障、又は障害が発生したとし、安全状態に移行する。		3		
			2	一定時間で通信バスが完了しない時、受信側又は通信バス監視部は、送信部が故障、又は障害が発生したとし、安全状態に移行する。		3		
			3	送信権を持つ通信バス局より一定時間後に通信バスが開始されない時、受信権を持つ局、または通信バス監視部は、その局が故障または、障害が発生したとし、安全状態に移行する。		3		
4	誤情報の送信、受信	情報伝達の誤情報送信を考慮しているか?	1	通信情報は、発信元が相手に正しく届いたことを相手から再送信させて確認している。この時、送信データと受信データの形式を変えている。(データの反転、ブロック数、チェックサム方式など)		3		
			2	1つのデバイスに2局持たせ、同じ情報を形式を変えて送り、受信デバイス側で受信情報を照合し、正しい情報が送られてきたことを確認している。(2-2に準拠)		3		
			3	オール0、オール1の情報が続いた時、CRCもパリティも変化しない。受信側は通信情報の正常/異常の判定ができなくなる。判定できる方策を使用している。		3		

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点		
5	通信情報の信頼性が確保されているか(妥当性の確認)	外乱(電氣的ノイズ)による影響の考慮(メモリの内容に影響を与える要因の1つ)	1	外乱による誤動作のない通信方法を採用している。誤動作のないことは、自らEMC,EMS等の信頼性試験で妥当性確認している。		3			
			イ	通信ケーブルを接続して、通信をしながら、電源供給ラインに外乱ノイズ(EMC,EMS等)を入れた試験を行っている。		3			
				① 試験仕様書があり、試験方法、試験機器が決められている。		3			
			② パースト試験、伝導性イミュニティ、放射電磁界イミュニティ、静電気試験、サージ試験、電源変動試験を実施		3				
			ロ	通信ケーブルを接続して、通信をしながら、I/Oの信号を変化させながら、I/Oの電源ライン、信号線に外乱ノイズ(EMC,EMS等)を入れた試験を行っている。		3			
				① 試験仕様書があり、試験方法、試験機器が決められている。		3			
			② パースト試験、伝導性イミュニティ、放射電磁界イミュニティ、静電気試験、電源変動試験を実施		3				
			ハ	温度(高温、低温、温度変化サイクル)や湿度試験によって、これらの影響がないことを確認している。		3			
				① 試験仕様書があり、試験方法、試験機器が決められている。		3			
			2	EMC,EMS等の妥当性確認をしていない理由				Max:-3点;設問1のチェック結果によりマイナス点が配分される。	
				イ 外乱の影響試験はやっていないが、今までトラブルがないので大丈夫と思っている。			-1		
				ロ 市販のセットを組み込んだもので信頼性試験は行っていない。供給側のメーカーが信頼性を確保していると思っている。			-1		
				ハ 通信媒体が異なるが、ハードもソフトも実績のある通信方法であり、信頼性試験の必要はないと思っている。			-1		
				ニ 今まで使用してきた通信バス方式で試験も行われ、信頼性が確保されている。このシステムでは、過去と同じであり、信頼性試験は必要ないと思っている。			-1		

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問		チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
5	通信情報の信頼性が確保されているか(妥当性の確認)	外乱(電氣的ノイズ)による影響の考慮(メモリの内容に影響を与える要因の1つ)	ホ	通信情報はリトライを行うようにしているので、データの信頼性は十分であると思っている。		-1		
			ヘ	このシステムは、金属箱(制御盤)に入り、オフィスや病院で使用される仕様である。外乱のある環境では使用しない。そのため、外乱の考慮は必要ないと思っている。		-1		
			ト	その他		-1		
					判定	合計(083)点満点		

9 センサーの障害と故障

センサー信号の出力、又はセンサー信号の入力部が1または0のままになる。または、センサーの働きとは無関係に0,1の間を振れたり、中途半端な出力状態、入力状態になっても安全状態に移行できる。

No	項目	主旨	設問		チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
1	センサーの仕様と種類	安全機能部に使用しているセンサーの安全レベル 安全機能部:リスク低減のための安全機能を有している部分。 逆に言えば、その機能部が故障すると危険な状態になる部分。	1	安全機能に使用しているセンサーはすべて安全仕様である。		3		
			2	センサーの安全仕様は、第3者機関(TUV、BGマークなど)がついており、認証されている		3		
			3	又は、メーカーの自己宣言の製品である。自己宣言の書類がある。		2		
			3	そのセンサーの安全仕様レベルは、以下のどれですか？			複数個のセンサーの場合は原則最悪評価とする	
			イ	カテゴリ4、又はSIL3		3		
			ロ	カテゴリ3、またはSIL2		2		
			ハ	レベル仕様が明示されていない		1		
ニ	第3者認証はないがメーカーの自己宣言		1					

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点		
1	センサーの仕様と種類	安全機能部に使用しているセンサーの安全レベル 安全機能部:リスク低減のための安全機能を有している部分。 逆に言えば、その機能部が故障すると危険な状態になる部分。	安全機能に使用しているセンサーの種類 イ～ネ項のチェック欄にセンサー用途の各記号を記入してください。 センサーの用途 A:人、B:障害物、C:人又は障害物、D:速度、E:加速度、F:回転角、G距離、H:移動量、I:可動領域又は可動不可領域、J:境界、K:段差、L:凸凹、M:荷重、N:体重、O:体温、P:気温、Q:高温、R:火事、S:空間の明暗、T:ガス、U:塵埃、V:音、W:騒音、X:物体(人)識別、Y:色、Z:その他 *得点には無関係						
			4	イ	接触検知スイッチ(バンパースイッチ)		-		-
			ロ	マットスイッチ		-		-	
			ハ	タッチセンサー		-		-	
			ニ	ロードセル		-		-	
			ホ	ストレインゲージ		-		-	
			ヘ	加速度センサー		-		-	
			ト	ライトカーテン		-		-	
			チ	人感センサー		-		-	
			リ	距離センサー(超音波)		-		-	
			ヌ	距離センサー(レーザ、赤外線)		-		-	
			ル	距離センサー(電波)		-		-	
			ヲ	磁気センサー		-		-	
			ワ	温度センサー		-		-	
			カ	火災検知センサー		-		-	
			ヨ	ロータリエンコーダ		-		-	
			タ	煙センサー		-		-	
			レ	ポテンシオメータ		-		-	
			ソ	タコジェネレータ		-		-	
			ツ	カメラ		-		-	
			ネ	その他		-		-	
5	センサーは、安全仕様を守って使用している。		3						
6	安全機能に使用したセンサーが安全仕様の場合								
	センサー出力は、2本とも使用している。			3					
	イ	センサーの2つ出力を直列にし、入力部は1チャンネルとしている		2					
ロ	センサー出力の2本を別々の入力チャンネルに接続している。		3						
2	センサーの使い方	安全機能用のセンサーの2重化について(1つの安全機能に使用したセンサーの数について:冗長化)	1	同じセンサーを2個使用している(共通原因で故障する可能性がある。Ex./サイズ、部品のロット不良等)		2			
			2	同じ機能のセンサーをメーカーを別々にして使用している。(センサーの共通原因故障での故障はない。ただし、入力後の回路、ソフトが同じになるので、信号入力後の処理系の共通原因故障が考えられる。)		2			

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点		
2	センサーの使い方	安全機能用のセンサーの2重化について (1つの安全機能に使用したセンサーの数について:冗長化)	3	目的機能のため異なった方式のセンサーを2個使用している。(距離センサーとして赤外線と超音波等→共通原因故障はない)		3			
			4	安全機能を制御するセンサーの2重化、冗長化の割合					
				イ	安全機能部分のセンサーの100%が安全用センサー		3		
				ロ	安全機能を制御するセンサーの約50%以上が安全用センサー		2		
				ハ	安全機能部分を制御するセンサーの約50%以下が安全用センサー		1		
ニ	安全機能を制御するセンサーに安全用センサーを使用していない		0						
3	センサーの故障モニタ	センサーの故障の監視	使用しているセンサーの故障が検知可能						
			1	イ	入力信号をオンラインで監視している。		3		
				ロ	アナログ信号の監視をしている。		3		
				ハ	テストパターンを発生させている。診断期間に行っている。		3		
				ニ	センサーを冗長化し、入力と比較している。		3		
				ホ	センサーの出力、あるいは入力値を定期的に参照センサ値と比較する。		2		
				ヘ	ポジティブ機構のスイッチを使用している。		3		
			2	具体的方法(故障検出)					
				イ	内部制御回路のマイコンでセンサー活性の信号を常時チェックしている		3		
				ロ	短いテスト信号を入れてセンサーの動作を確認している		3		
				ハ	始業時に動作確認をし、正常でないと通常動作にならないようにしている。		3		
				ニ	取扱説明書、又は、教育訓練時、作業者に決められた間隔で動作確認するように指示している		3		
				ホ	何もしていない。		0		

図 3.1.8 チェックシート第2部(第3版) 続き

No	項目	主旨	設問		チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
3	センサーの故障モニタ	故障時の対応	1	イ	故障発見時、故障ログを取っている。		3	
				ロ	エラーコードをセンサ毎に付け、どのセンサーが壊れたかわかる。		3	
				ハ	故障時刻も記録している		3	
				ニ	故障記録は、複数個記録/記憶でき、後からでも追跡できる。		3	
				ホ	エラーコードを見れば、故障発見したソフトウェアが特定できる。		3	
				ト	エラーコードを取り扱説明説で見れば、故障原因と対策がわかる。		3	
					判定	合計(077)点満点		

10 最終要素

2-1の出力回路部と重複する部分は省く。出力値は、正しい値だけが出力される。途中で情報が間違った場合は、出力値はシステムが安全状態に移行できるように安全機能によって制御される。

No	項目	主旨	設問		チェック	配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
1	アクチュエータの監視	動作の診断	1	出力値のオンライン監視。		1		
			2	安全リレー接点の監視。		3		
			3	テストパターンを発生させ、それを読み取り、診断を行っている。		3		
			4	冗長化した回路で出力を監視している。		3		
			5	動作しているアクチュエータの動作時を示す信号を2つ以上の別々の入力回路に入れ、クロスチェックを行っている。		3		
2	論理回路	論理動作のチェック	1	結果を比較することで論理回路を診断する。論理回路の入力部に値を入れ、その出力値と期待値を比較することで論理回路の動作をチェックする。		3		
			2	論理回路を2重化し、同入力時の結果を相互比較して同じことをチェックする。		3		
3	部品チェック	受動部品のチェック	1	回路内使用の部品の故障がわかる。診断プログラムや実動作中の演算結果の比較、チェックによって部品故障がわかる。		3		
			2	部品の故障による装置、システムの挙動はFMEAですべて把握している。危険な挙動は対策をしている。		3		
		能動部品のチェック	1	回路内使用の部品の故障がわかる。診断プログラムや実動作中の演算結果の比較、チェックによって部品故障がわかる。		3		
			2	部品の故障による装置、システムの挙動はFMEAですべて把握している。危険な挙動は対策をしている。		3		
					判定	合計(031)点満点		

図 3.1.8 チェックシート第2部 (第3版) 続き

判定結果のまとめ

	A判:B判:	判定値	A境界	B境界値
1. 電気機械式装置(原則:電流が流れない状態になった時、安全状態に移行する。)	0.8 0.4		52	26
2-1 デジタルI/O、アナログI/O	0.8 0.4		34.4	17
2-2 電源	0.8 0.4		X	X
2-3 電源電圧監視回路	0.8 0.4		93.6	47
3 バス	0.8 0.4		48	24
4 CPU	0.8 0.4		16.8	8.4
5, 6 不変メモリ、可変メモリ	0.8 0.4		67.2	34
7 クロック	0.8 0.4		24	12
8 通信バス及び大容量記憶	0.8 0.4		21.6	11
9 センサーの障害と故障	0.8 0.4		66.4	33
10 最終要素	0.8 0.4		61.6	31
			24.8	12

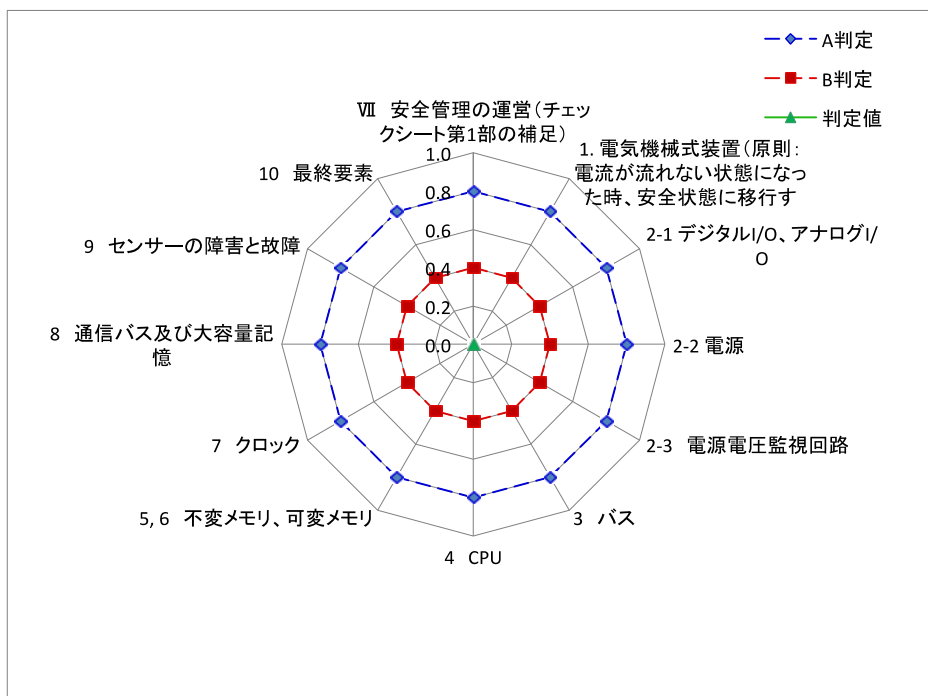





図 3.1.8 チェックシート第2部 (第3版) 続き

実現段階におけるコンセプト検証自己チェックシート第3部(SW編)第2版

ロボットの名称		製作者			
型式		シート記入者			
		シート記入日			

【回答方法】

本チェックシートは、IEC61508におけるソフトウェアに関する安全要件として、SIL2及びSIL3でHR(強く推奨)とされる項目を対象としたものです。
 最初に目標とする安全性能を選択するため、どちらのSILを対象とするかチェックを入れてください。選択したSILに応じて配点が変わり、その列のみチェックは有効となります。
 各設問毎に、主観にてA、B、C、Nをチェック欄に記入して下さい。得点は、基本的にAは配点満点、Bは配点の1/2、Cはゼロです。尚、備考欄への記入指定の項目は、記載がないと得点加算がありません。
 補足説明や特記事項がある場合は、適時備考欄を拡張して記入して下さい。
 別途、補足資料や該当文書を添付される場合は、その資料(文書)に番号付けて備考欄に番号のみ記入して下さい。

-  : 選択SILにより同No.項、又は他No.項目の点数に影響するチェック。
-  : 選択SILで要求される項目 (HR項目を意味し、該当しないSILでは入力不要)
-  : 選択SILで要求される言語 (該当言語にチェックA又はBを入力)

自己チェック

- A : 取り組み完了(設問をほぼ満足している)
- B : 取り組み中(設問を一部満足している)
- C : 未取り組み(設問はほとんど実現されていない)
- N : 関係なし
- ✓ : チェック













A.1. ソフトウェア安全要求仕様書								
No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
				SIL2	SIL3			
1	ソフトウェアのライフサイクル適応について	ソフトウェアの開発/設計工程が決められている。(例えば、IEC61508-3、7.1.2.4項のVモデル) その工程の中でソフトウェア仕様書が作成されている。	1	ソフトウェアの設計及び開発工程が規定され、文書化されている。				
			2	ソフトウェアの設計及び開発工程における、入力情報、出力情報が規定され、それらは文書化されている。				
			3	工程ごとに入力情報、出力情報と文書化が決められている。ソフトウェア仕様書は、工程に定められた入力情報によって作成されている。				
			4	ソフトウェア仕様書は、手順どおり作成され、定められた形式になっている。				
			5	このソフトウェア仕様書は、定められた関係者を入れ、デザインレビューが行われ、責任者が承認している。				
			6	ソフトウェアライフサイクルで文書化される文書には、すべて作成方法の規定、変更方法の規定がある。				

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版)

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
				SIL2	SIL3			
1	ソフトウェア安全要求事項仕様書の記載内容	設計の目標、設計方法は仕様書に記載されている。 (仕様書記載内容が後のソフトウェア設計の成否を左右する)	1	仕様書の要件管理 安全要求事項がもれなくソフトウェア仕様書に反映されているか？ (SIL3では、安全要求事項から安全機能を行うソフトウェアへのトレーサビリティ(要件から個別安全機能へ、また、個別安全機能から安全要件への相互行き来)が必要)				
				仕様書に記載された内容は、「安全設計方針」(第1部 I-2項)に合致しているか。				
				① 安全設計方針を分析し、ハード要求事項、ソフトウェア要求事項に分類し、ソフトウェア仕様書に関連付けを行っている				
				② 安全機能の要件をリストアップし、その要件ごとにソフトウェア仕様書に関連付けている。				
				③ 要件のまとめには、要件管理ソフトを使用し、ソフトウェア仕様書との関連付けを要件管理ソフトで行っている。				
				④ 要件のまとめには、専門の要件管理ソフトを使用せず、エクセルを使用し、要求事項を網羅し、それに関連するソフトウェア仕様書の管理番号を関連付けて、管理している。				
				⑤ 要件のまとめには、専門の要件管理ソフトを使用し、要求事項を網羅し、それに関連するソフトウェア仕様書の関連付けを定義し、管理している。				
				⑥ ソフトウェアの設計基準は、決められているか？(コーディングルール、モジュールのコーディング量、設計者の技量レベル)				A.2で再質問
			ロ	ソフトウェアによって処理される安全要求事項は、適応するシステム、又は装置に対し、それらに関連する専門家が使用する方法や表記によってその実現方法や適応方法、仕様が明確になっているか。				

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点		
				SIL2	SIL3					
1	ソフトウェア安全要求事項仕様書の記載内容	設計の目標、設計方法は仕様書に記載されている。(仕様書記載内容が後のソフトウェア設計の成否を左右する)	1	ソフトウェアによって処理される安全要求事項の正しさ						
				ハ	① 適応するシステム、又は装置に対し、それらに関連する専門家が使用する方法や表記によってその実現方法や適応方法、仕様が記述されるが、それは、正しいか。					
				二	仕様のあいまいさをなくす方法が取られている。					
					① 仕様書の表記は、仕様書内で仕様の矛盾(一方の仕様書では、OKで他の仕様書ではNGになっているような。)を避ける工夫(2重表現、表現の分散などしない)をしているか。					
					② ある仕様が何らかの原因で働かない状況になった時、その処置について明確にしている。					
					③ 仕様書の表記は、数学的(公式や制御関数など)矛盾を避ける工夫(2重表現、表現の分散などしない)をしているか。					
				ホ	安全機能の要件は、わかりやすくまとめられているか?例えば、要件ごとにグループ化されているか?					
				ヘ	要件の変更、追加のルールは明確にされ、追加、変更は、要件管理とソフトウェア仕様書と連動しているか?					
				ト	安全設計要件の仕様書への関連付けは、責任者の承認が行われている。追加、変更も同様に責任者の承認が行われている。					

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
				SIL2	SIL3			
1	ソフトウェア 安全要求 事項仕様 書の記載 内容	仕様書内容がブ レークダウンされ ている	ソフトウェア仕様書の内容					
			イ 仕様記述の誤解を防ぎ、わかりやす くするため、ソフトウェアの仕様者 には、この仕様を対象とする安全関 連系での用語、動作などの定義が されている。					
			ロ 仕様書には、ソフトウェアのアプリ ケーションの複雑さを避けるため、 仕様書作成の規定がある。					
			ハ 機能ごとに仕様がまとめられ、機能 の構成単位ごとに仕様が分けられ ている。(ここでいう構成単位は、ある 機能を実行するために必要となる 単一の機能を持ったソフトウェア要 素である。機能仕様が単一機能を 記述していれば、構成単位はその 機能仕様に一致する。)					
			ニ 機能の構成単位ごとに仕様書があ る。					
			ホ 安全要求事項によって要求される 安全度(SIL)に対し、安全機能を実 現するソフトウェアは、適切な方策、 構成を持っているか？例えば、安全 要求事項がSIL3を要求していれば、 個々の安全機能は、すべてSIL3 の要求に従って設計方策、検証、妥 当性確認が計画されねばならない。					
			ヘ 仕様書で情報(その機能体に入力 する情報、出力される情報、機能体 内で処理される情報)の流れを明確 に記述している。					
			ト 各機能仕様ごとに関連する別の仕 様、構成単位について実行順序、実 行時間が明確になっている。これら は、関係する各仕様書に明記され ている。					
			チ 各機能ごとにその機能の実行に制 約がある場合は、その条件が関連 の仕様書に明記されている。					
			リ 各機能、各構成単位に必要な情報 の形式が明確にされている。					
ヌ 各機能、各構成単位に必要な情報 の形式が明確にされている。構成 単位は、要求される安全機能の中 の位置づけ、関連付けが明確に なっているか？								

図 3.1.9 チェックシート第3部(第2版) 続き

No	項目	主旨	設問		チェック		配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点	
					SIL2	SIL3				
1	ソフトウェア安全要求事項仕様書の記載内容	ソフトウェアの仕様 の検証と妥当性確認	3	イ	ソフトウェア仕様ごとにの入力情報、出力情報の下限、上限が明記されている。					
				ロ	ソフトウェアで実現する安全機能の検証、妥当性確認方法が明確化されている。(測定装置、確認ツール、安全機能をインストールしたシステムやサブシステムの振る舞いが明確であり、客観的に評価、判定できる)					
				ハ	この安全関連系のシステム、又は装置がカバーする範囲に適した妥当性確認であるか。					
	安全機能と非安全機能との分離			4		安全機能を処理するソフトウェアと非安全機能を処理するソフトウェアは、物理的(ハードウェア構成上)に分離されている。仕様書に明確に記述してある。				
						安全機能と非安全機能を処理するマイコンは同一である。				
					イ	安全機能を実行するソフトウェアと非安全機能を実行するソフトウェアは、独立しており、非安全機能を処理するソフトウェアや関連ハードウェアが故障しても安全機能に影響を与えないことが客観的に証明できる。				
					ロ	安全機能のソフトウェアが使用するメモリ領域は、非安全機能のソフトウェアが使用する領域と物理的に異なったメモリ素子を使用し、アドレス空間も重複がない仕様である。				
2	ソフトウェア仕様書(モジュール仕様書)	仕様内容について(曖昧な記述になっていないか。動作はすべて定義されているか、異常検出に漏れはないか、異常の処理は適切か、システム特有の安全機能は定義されているかなど。)		ソフトウェアの仕様書設計、開発工程が規定されている。						
			1	社内ルール(規定)に従った用紙、形式を使用している。						
			2	ソフトウェア作成工程はVモデルに従っている。						
			3	ソフトウェア作成工程ごとに作成する文書が決まっている。						
			4	文書には、保存、変更ルール規定されている。						
	5	文書の最新版管理のため、管理表又はそれに類するものがあり、最新版は常にわかるようになっている。								
	モジュール仕様の図式化			1	フローチャートは社内ルールに従う。					
2				一般に良く使われるPADを使用する。						
						判定	満点			

図 3.1.9 チェックシート第3部(第2版) 続き

A.2. ソフトウェア安全要求仕様書 ソフトウェアの構造設計								
No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
				SIL2	SIL3			
1	故障検出	故障検出/診断	故障検出はソフトウェアの最小単位、又は、単一機能単位で行っている。					
			1 故障検出のため、自己診断手法を使用している。					
			2 故障検出のため、冗長化方法を使用している。 (冗長化はハードウェア故障の検出のためである)					
			3 故障検出のため、多様化(ダイバーシティ)方法を使用している。 (多様化はソフトウェアのエラー検出のためである)					
			サブシステムが組み合わさった複雑なシステムの場合、故障検出は、最小のサブシステム単位(安全機能の単一機能レベル)で行っている。					
			発生した故障は文書化され、同じ故障、類似故障の時、この情報が活用できるシステムがある。					
2	低機能性能維持方法	エラーログソフトは、故障が起きてもロギングを続ける。	安全機能の故障が検出された時、事前の優先順位に従い、下位の動作は、運転を続ける。					
3	ソフトウェアの規定	ソフトウェアの品質を高めるため、ソフトウェア作成ルールがある。	1 ソフトウェアモジュールの大きさが決まっている。(例えば、コーディング400行以内/モジュール、またはA4で2から4枚程度など)					
			2 ソフトウェアモジュールの複雑度が決まっている。分岐プログラムの数、ジャンプするプログラム数、間接データの使用方法など					
		情報の隠蔽/カプセル化しているか	1 偶然、または、誤って修正されることがないように、オブジェクト内部のデータを隠蔽(データ隠蔽)、オブジェクトの振る舞いを隠蔽(オブジェクトの実際の型を隠蔽)している。					
			1 ソフトウェアモジュール/関数は、必ず入口が1つ、出口が1つになっている。					

図 3.1.9 チェックシート第3部(第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点	
				SIL2	SIL3				
3	ソフトウェア の規定	インターフェイス仕 様が定義されてい る。	1	ソフトウェアモジュールは、その機能を すべて定義しなければならない。					
				イ	モジュールの全体説明がある。関連 するモジュールの状態遷移図、構成 関連全体図など。				
				ロ	関連する個々のモジュールの説明 がある。				
				ハ	入力データが定義されている。どこ から情報が来るのか、データ長、 データの形式、入力タイミング、入力 条件など				
				ニ	出力データが定義されている。どこ へデータを出力するのか、データ 長、データ形式、出力タイミング、出 力条件など。				
				ホ	入力データごとの説明と処理方法 が記載されている。				
				ヘ	入力データの異常検出がされている。 (あり得ない組み合わせの検出、 ビット落ち、あり得ない数値、急激な 変化、パリティ異常、通信異常、設 計装置での固有な異常検出など)				
				ト	達成されるべき安全機能に必要な モジュールの組み合わせが明確に 示され、文書化されている。				
				チ	異常処理が決められている。 異常のランク付け、異常コード付 け、処理プログラムなど。				
				リ	検出した異常は、すべて処理方法 が定義されている。				
				ヌ	モジュールで実行する事象の処理 時間が定義されている。(通信制御 モジュールであれば、通信時間： データブロック単位の送信時間、受 信待ち時間、データ受信時間、通信 中断検出時間、リトライ時間など)				
				ル	仕様書の変更履歴がわかるように なっている。いつ、誰が、何のため に、どんな理由で、どこを追記、変 更したかがわかるようになっている。				
				ロ	その他、安全機能実現に必要な仕 様が、明確になっており、文書化さ れている。				

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点	
				SIL2	SIL3				
4	実績あるソフトウェアを流用	ソフトウェアの信頼性を高めるため、実績あるソフトウェアを流用している	1	流用したソフトウェア要素が使用実績があり「proven-in-use」、正しく動作することを証明する証拠がある。 システムに組み込まれていても動作を伴わないことがあるので、その動作の正しさを証明するのに十分な注意が必要である。(エラー検出プログラム:エラーが出なければ動作しない)					
			2	イ	ソフトウェア仕様が不変。				
				ロ	別のシステムでも使用されている。(10以上の異なったシステムで使用されている)				
				ハ	ソフトウェアの使用は1年以上になる。(10万回/時間動作し、1年以上は動作し続けた実績)				
				ニ	使用実績の経歴の全ては、ソフトウェア要素の機能が正しい動作要求によって動作していなければならない。この実績が多ければ多いほど、流用しようとしているソフトウェアの信頼性が向上する。				
			2	流用の経歴の明確化					
				イ	使用実績のあるシステムとそこで使用しているソフトウェア要素とそれが組み込まれているハードウェアの正確なバージョン番号。				
				ロ	使用実績のあるシステムのユーザとそこで使用されている時間				
				ハ	システムでの動作時間				
				ニ	いくつかのユーザーでのシステムで応用されている実例の説明				
				ホ	故障が発見されて、それが認識され、記録(記憶)され、故障が取り除かれるまでの手順				
5	図表を使用した方法(基本的には図表使用方法は、系統的に考えるための道具である)	論理的思考:管理しやすくするため、大項目から細項目に分ける方法	1	システム要求する環境を含んだシステムのトータルな解析とその記述					
			2	システムの要求する情報や機能の分析					
			3	解析に必要な項目を書いたチェックリスト					
			4	誰でもわかる見出し的項目:簡単で、直観的で、実践的な表現					
			5	強調的に書かれた意図するシステムの開発に関するモデル図と全般的に使用するCASEツール					

図 3.1.9 チェックシート第3部(第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
				SIL2	SIL3			
6	半公式手 法	よく知られた方法 を使用して仕様を 記述する。	1	論理/機能ブロックダイアグラムによる記 述がある				
			2	シーケンス回路による記述がある				
			3	機械の限られた状態記述/状態遷移図 の使用して使用条件を明確にしている。				
			4	時間ベトリネットで遷移を数学的に明確 にしている。				
			5	真値表を使用している				
7	コンピュ ータ支援ツ ール	CAD	1	コンピュータ支援ツールを使用し、仕様 書作成、設計を行い、精度の高い作業を 行っている。				
	動作状態 の定義	サイクリック(ス キャン)方法	1	最大サイクル(スキャン)時間を明確にし ている。(最大とは最悪と考えても良い)				
			イ	サイクリック(スキャン)時間は、時計 によって管理されている。				
		ロ	ソフトウェアの機能は、内部時計に 関連付けられ、スケジュールが決め られている。					
		タイムトリガードシ ステム	1	内部の時計によってスケジュール化され た機能が起動される方式。				
		イベントドリブン方 式	1	ソフトウェア機能の起動は、ある事象の 発生によって予測できない時間で行われ る。応答の最大値を保障することが必要 である。				
8	静的なメモ リ割り付け		1	静的な状態でメモリエリアが他のプログ ラムと重複していないことを確実にする。 仕様で範囲を明確にする。他のプログラ ムと同じ変数名を使用しないなど。ソフト ウェア検証にても確認が必要。				
					判 定	満 点		

図 3.1.9 チェックシート第3部(第2版) 続き

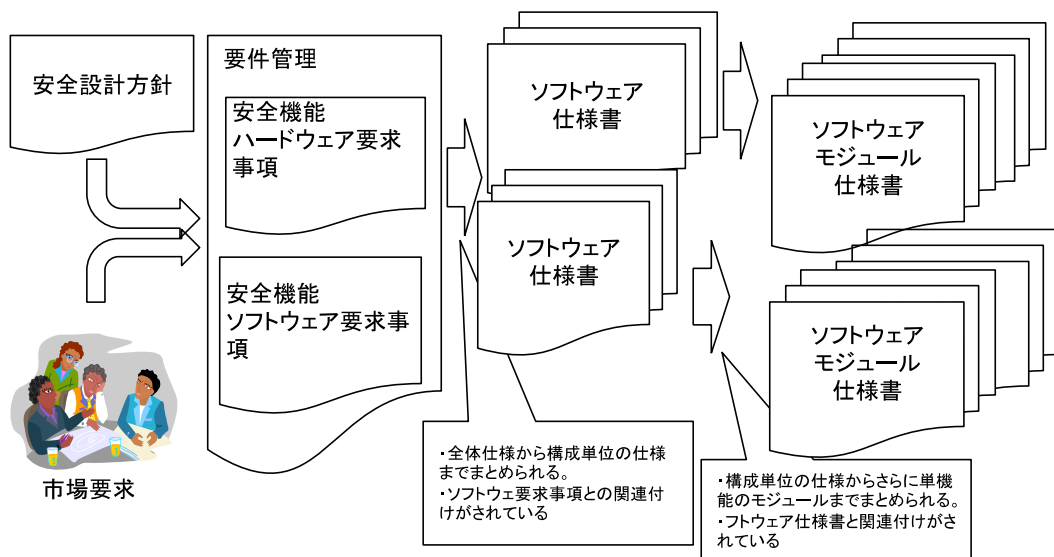


図 3.1.9 チェックシート第3部（第2版）続き

A.3. ソフトウェアの設計と開発 支援ツールとプログラミング言語								
No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
				SIL2	SIL3			
1	開発言語	安全機能に適した 開発言語の選択	1	プログラムは構造化言語である。又は、 構造化記述のできる言語である。				
			2	開発する安全機能アプリケーションに適 した言語である。 開発/設計に対し、不要な機能のないプ ログラム言語のサブセットである。				
		1	ADA					
		2	ADA with subset					
		3	Java					
		4	Java with subset (including either no garbage collection or garbage collection which will not cause the application code to stop for a significant period of time). See Annex G for guidance on use of object oriented facilities.					
		5	PASCAL (see Note 1)					
		6	PASCAL with subset					
		7	FORTRAN 77					
		8	FORTRAN 77 with subset					
		9	C	-				
		10	C with subset and coding standard, and use of static analysis tools					
		11	C++ (see Annex G for guidance on use of object oriented facilities)	-				
		12	C++ with subset and coding standard, and use of static analysis tools (see Annex G for guidance on use of object oriented facilities)					
		13	Assembler		-			
		14	Assembler with subset and coding standard					
15	Ladder diagrams							
16	Ladder diagram with defined subset of language							

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点	
				SIL2	SIL3				
2	コンパイラ (トランス レータ)	コンパイラ(トラン スレータ)	1	認証されたツールやコンパイラを使用している。 例えば、Adaやパスカルは国際規格になっている。この規格に準拠しているツールであることを国や認証機関で認証している。					
			2	使用するコンパイラはよく普及している。					
			3	コンパイラのバグは、公開され、それを入手してプログラミングの時、バグに影響されないようにプログラミングの規定をしている。					
			4	使用するコンパイラはエラー検出機能は強力であるか。					
			5	コンパイラのバージョンは固定して使用している。(新しいバージョンが出ても採用していない。コンパイル出力に差異が発生することを避ける。)					
			6	コンパイラのバージョンは、仕様書、又はプログラムのコメント欄に記載し、文書化している。					
			7	複数安全機能のプログラム設計及び開発に際し、コンパイラのバージョンは、統一している。					
				判定		満点			

A.4. ソフトウェアの設計/開発 ソフトウェアの詳細設計 ソフトウェアの構造設計										
No	項目	主旨	設問		チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点	
					SIL2	SIL3				
1	プログラム 構成方法	構造化方式	1	プログラム構成は構造化方式である。						
			2	プログラム構成はわかりやすく説明している。				A2.6項参照		
2	コンピュ ータ支援設計 ツール		1	コンピュータ支援(CAD)ツールをハードウェア、ソフトウェア設計に使用している。これらのツールは広く使用され、その出力の妥当性確認がすでに行われている。						
			2	支援ツールは、安全度レベル(SIL)に合わせて選択されている。設計/開発に使用する他の支援ツールとの関連付けされ、情報移植、取り出し等で間違いが行いことが確認されている。						
3	防御手段 のプログラ ミング	変数の誤使用の 防止	1	プログラム内で使用する変数は、その有効範囲をチェックしてからプログラムで使用している。						
			2	変数は、最もふさわしい場所(プログラムの実行工程)でチェックされている。						
			3	実行変数は、その変数が実行される時に、形式、次元、範囲等がチェックされている。						
		1	ソフトウェアの間違 いの予防方法	イ	不用意なミスを避ける方策を取っている。 読み出し専用変数と読み書きできる変数は、領域を分けて格納している。					
				ロ	関数の変数は、すべて読み出し専用で使用している。					
				ハ	文字常数は読み出し専用である。					
	2	ソフトウェアの間違 いの予防方法	イ	故障に強いソフトの方策 入力変数と中間変数は、その有用性が最もふさわしいところでチェックされている。						
			ロ	出力された変数の影響は、その出力に関連する状態の変化を直接観察することによってチェックする						
			ハ	ソフトウェアによって必要とされるハードウェアの構成、ソフトウェアの構成をチェックしている。(保守等で必要なハードウェアが取り除かれることはないか、ハードウェア/ソフトウェアのバージョンの組み合わせは良いか)						

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点		
				SIL2	SIL3					
4	モジュール 構成の確 認	モジュールのルー ル		仕様書、ソフトウェアの機能単位はモ ジュールごとになっている。						
			1	イ	モジュールに対し、「ローカル」関数 のサイズと複雑さ基準の仕様を決 めている。					
				ロ	モジュールの全体構成に対し、「グ ローバル」関数のサイズと複雑さ基 準の仕様を決めている。					
				ハ	変数の数字制限/サブプログラム変 数の固定数値化					
		2		情報の隠蔽/カプセル化 例えば、特定の言語仕様を使用促進、 全インターフェース仕様定義						
5	プログラ ム、変数名 称	誤解しない名称	1		曖昧な又は間違えやすい記号を使用し ていない。(例えば、IO.10の様 な)					
				イ	数値にはシンボリック名をつける					
					ソースコードでの実施事項					
			2	イ	何をするのかばかりでなく、なぜ行 うのか、その意味は、などを説明す る。					
				ロ	利害関係を記述する。関連するプロ グラムへの波及効果や、他から受 ける影響。					
				ハ	副効果を記述する。					
			ニ	どこに使用されるのか						
			管理情報と外部仕 様	1		ソースコードに記載する項目				
				イ	責任者、責任部署、などの記載					
				ロ	仕様概要説明					
	ハ	入力情報と出力情報								
			ニ	管理履歴が記入できるようにしてい る。						

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
				SIL2	SIL3			
6	プログラミング/コーディングのルール	コーディングルール	1	コーディングでは、今までのコーディング慣行をルール化し、規定している。 例えば、今までの不具合、ケアレスミスなどの事例からルール化をしている。				
				イ ダイナミックオブジェクトを使用しない				
				ロ ダイナミック変数を使用しない				
				ハ ダイナミック変数が入れ込まれる場合、そのメモリアreaは、変数が入られる前、後でチェックをし、他に影響がないことを確認する。				
				ニ 割り込み制御の制限 割り込み処理は、詳細に仕様書に記述している。 重要な処理中は、割り込み禁止。最長割り込み待ち、処理時間の管理。				
				ホ ポインタ使用の制限 ポインタでデータ交換や伝達を行う場合、タスク間で直接アドレス指定が行われない。予期しないエリアをアクセスする可能性がある。				
				ヘ プログラムループの制限 ループによって実行時間が変動する。永久ループの恐れがある。				
				ト より上位の言語レベルのプログラムの制御フローも構造化されていること				
チ データ形式変換が自動でないこと。 変換の仕方がわかること。								

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
				SIL2	SIL3			
6	プログラミング/コーディングのルール	追加のルール、規定	1	更に、一般則として、コーディングの規則を決めている。例えば、Cであれば、MISRA-C、C++であれば、MISRA-C++などに準拠、またはその規定。				
			2	プログラムの複雑さを避けるため、1つのモジュールのコーディング長は、例えば、200行以内と決めている。				
			3	MISRA-C++に規定があるが、モジュール内に「go to」文、JUMPがない。				
			4	コメントは、各行に必ず記述することに規定している。				
			5	コーディング後、フローチャート、PAD化し、仕様書の論理と同じであることをチェック確認している。				
			6	仕様書が間違っている場合、仕様書に記述がない項目があった場合は、責任者の承認のもと、仕様書の追加/変更を行っている。この変更手順は、規定化されている。				
			7	変更の際し、変更理由、日付、担当者、承認者が明確にされ、文書は、バージョン管理されている。管理とは、例えば、文書一覧表があり、変更実施に伴い、一覧表の該当文書の項目が更新され、責任者承認があるということである。				
7	プログラムの構造	構造化プログラミング	1	プログラムを適切に小さいモジュールにわけること。それらは、できるだけバラバラにし、その相互関係を明確にする。				
			2	組み合わせられたソフトウェアモジュールのフローは、構造化された構造(順序制御、繰り返しと選択)を使用する。				
			3	小さなソフトウェアモジュールの可能な経路と入出力パラメータの関係の数をできるだけ単純にしておく。				
			4	複雑に分岐することを避け、特に、より上位レベルの言語への無条件ジャンプ(goto)を避ける。				
			5	可能な所で、パラメータを入力することでループの制約と分岐を関連付けする。				
			6	分岐やループのため、複雑な計算しないこと。				
				判定		満点		

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

A.5. ソフトウェアの設計と開発 テスト								
No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
				SIL2	SIL3			
1	テスト条件	ダイナミック解析と テスト	1	テスト対象をモデル化し、自動的にブラックボックステストを行う。テストケースはソースコードから自動的発生するテストプログラムを使用する。				
				テストの方法 -モデルはシステムの要求事項から作る。 入力期待値を作る -出力の期待値を作る -プログラム実行 -実際の出力値と出力期待値を比較する -更にモデルやテスト条件を変更したりして、ソフトウェアの信頼性を確認する。 この経過や解析、結果を文書化する。				
			2	ターゲットシステムにソフトウェアを組み込み、実際に動作させ、ハードウェアと組み合わせ、ソフトウェアの検証を実施する。				
				イ 試験機器類、使用する各種ソフトウェアの名称、バージョン、メーカーがテスト仕様書に明記している。				
				ロ テスト機器類の配置配線を明記している。				
				ハ ダイナミックテストを行うソフトウェアのバージョンを明記している。				
ニ	ダイナミックテスト後発見された不具合や機能不足などを修正、追加する変更手順が決まっている。また、それら手順は、社内規定があり、変更は責任者の承認が必要となっている。							

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点	
				SIL2	SIL3				
1	テスト条件	プログラム一行ごとの全ての検証	1	モジュール内の全てのプログラムが検証されている。 これは、ソフトウェア検証時、コーディングされたソフトウェアの全ての行、コンパイルされた場合は、すべての機械語が実行されことを意味する。					
				イ	テストするプログラムのなかのサブルーチンや関数は最低限一度はアクセスされなければならない。				
				ロ	安全関連系の全ての命令文(ソースコードレベル)は、最低1回は実行しなければならない。				
				ハ	全ての分岐命令は実行しなければならない。				
				ニ	安全機能ソフトウェア内の全てのプログラムが検証されている。 これは、ソフトウェア検証時、コーディングされたソフトウェアの全ての行、コンパイルされた場合は、すべての機械語が実行されことを意味する。				
				ホ	ソフトウェアモジュール検証試験でプログラムを実行したソフトウェアカバレッジは明確である。				
			ヘ	実行されない部分がある場合は、その理由を明確にし、文書化している。					
		再検査が同じ条件で出来ること	1	検証に用いる機器、ソフトウェアの名称、バージョン、機器の場合は校正データが明確にされ、それらが文書化されている。					
		入力する変数値	1	テストの入力は、テストされるプログラムに対し、適切な値が選ばれている。					
	イ			入力値は、テスト対象プログラムに対し、適切にいくつかに分けて、入力している。例えば、入力の時間タイミングや入力値の範囲。					
	ロ			入力値は、入力制限値の近傍の値を与えるテストもしている。					
		2	ハ	以下の特殊データテストが行われている。 ・ゼロでの割り算 ・ASCII文字の空白 ・空白やALLゼロの入力処理 ・表入力などの空白処理 ・全組み合わせ(配列) ・表が全部ゼロの処理					

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点	
				SIL2	SIL3				
1	テスト条件	具体的には	1	安全機能ソフトウェアの入力変数(パラメータ)が明確になっている。(モジュール仕様書⇒ソースプログラム)					
			2	入力変数の最大値、最小値、中間値を検証値として正常に動作することを確認している。					
			3	入力変数の最大値を超えたデータ、最小値より小さいデータを検証値とし、エラー、または異常処理がされることを確認している。					
			4	安全機能ソフトウェア特有の特異な変数を入力して検証している。変数は、正常動作、異常動作とも確認されている。特異な変数とは、例えば、キー入力されるASCIIコードの組み合わせや暗号データなど、モジュールに固有な値。					
			5	イ	キー入力信号は、キー入力シーケンスから外れた組み合わせを検証している。				
				ロ	暗号化されたデータは、セキュリティとの関連を検証している。				
2	テストの内容	性能、型式試験	1	仕様に基づいた入力値、変数を入れ、仕様通りの出力値、タイミング、処理することを確認する。					
			2	異常処理についても仕様通りであることを確認する。					
			3	重負荷試験の実施をしている					
			4	イ	入力値の変化(時間当たり変化)を通常の条件より厳しくする。				
				ロ	ソフトウェアへの動作要求指令の頻度(時間当たり頻度)を通常の条件より厳しくする。				
			4	ハ	データベースや内部テーブルを参照するプログラムに対し、そのアドレスを超えるような値を入力する。				
				ニ	テスト対象プログラムに影響を与える要因を可能な限り極端な状態にし、境界値近傍の入力データを与える。				
				ホ	テスト対象プログラムに影響を与える機器の応答を最大限速くしたり、遅くしたりする。				
			5	仕様で決めたそれぞれの安全機能の応答時間の確認を行う。テストの解析、結果はすべて文書化する。					
			6	応答時間の平均値と最悪値を求める。					

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
				SIL2	SIL3			
2	テストの内容	インターフェーステスト	1	仕様の基づく入力値に対し、処理、出力値が正しい。また、インターフェースしている側の処理も仕様通りである。				
				イ 極端な値を入力してその処理の正しさを確認している。				
				ロ 極端な値を入れた時、他のインターフェースや処理に影響がないことを確認している。				
				ハ 他のインターフェースは通常値とし、変数を入れること。				
				ニ 小さなインターフェースであれば、全変数の組み合わせをテストする。				
				ホ インターフェースに特殊データを入力するとサブルーチン呼び出しを行うものは、それに関する条件をテストする。				
	テストのための管理と自動化ツール	1	テストの効率向上、テスト者の負荷軽減、間違いやテストし残しの抑制のため、テストの自動化を図り、進捗を管理できるツールを使用している。					
				判定		満点		

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

A.6. ソフトウェアをプログラム可能な電子装置にセット(ハードウェアとソフトウェア)									
No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点	
				SIL2	SIL3				
1	実機テスト	機能確認テスト	1 仕様で決めた機能をすべてテストし、仕様と食い違っていないことを確認する。						
		ブラックボックステスト	1	テスト対象をダイナミックに試験するため、仕様から入力条件、出力期待値を決め、通電動作させ、確認する。					
				イ 許容範囲データで動作確認する。					
				ロ 仕様通り異常処理をするかも含めて、許容範囲外のデータで動作確認する。					
				ハ 許容範囲の限界データで動作確認する。					
				ニ 極端な値を与える。オール0やオール1、データ順序の入れ替え、タイミングを無視した入力など。					
				ホ 上記イからニを組み合わせたテスト					
		性能、型式試験	3	1 仕様に基づいた入力値、変数を入れ、仕様通りの出力値、タイミング、処理することを確認する。					
				2 異常処理についても仕様通りであることを確認する。					
				重負荷試験の実施をしている					
				イ 入力値の変化(時間当たり変化)を通常の条件より厳しくする。					
				ロ ソフトウェアへの動作要求指令の頻度(時間当たり頻度)を通常の条件より厳しくする。					
				ハ データベースや内部テーブルを参照するプログラムに対し、そのアドレスを超えるような値を入力する。					
				ニ テスト対象プログラムに影響を与える要因を可能な限り極端にして、境界値近傍の入力データを与える。					
				ホ テスト対象プログラムに影響を与える機器の応答を最大限速くしたり、遅くしたりする。					
				4 仕様で決めたそれぞれの安全機能の応答時間の確認を行う。テストの解析、結果はすべて文書化する。					
				イ 応答時間の平均/最悪値を求める。					
2	要求仕様の出所の関連付け(トレーサビリティ)	システムと統合化されたハード/ソフトウェアの間で安全要求事項の関連付けの追跡	1 安全要求事項の仕様項目が、ハードウェアとソフトウェアのテスト要素又はモジュールからこれらの上位レベルのハード/ソフトウェア機能まで関連付けが明確になっている。						
				判定	満点				

図 3.1.9 チェックシート第3部(第2版) 続き

A.7. ソフトウェアにおけるシステム安全の妥当性確認の状態 (See 7.7)								
No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
				SIL2	SIL3			
1	ソフトウェア の安全妥 当性確認	統合試験 (実機試験)	1	妥当性確認は、ソフトウェアの安全要求事項、それから作成されたソフトウェア安全要求仕様書に基づいて計画されているか？				
			2	統合試験に使用する試験設備が明確に仕様書に記述され、文書化されている。				
			3	統合試験の試験方法、手順が仕様書に記述され、文書化されている。 実機の完成度合いに応じ、統合試験内容の順序付けを規定しても良い。				
			4	統合試験を行う安全機能が明確にされている。				
				統合試験の試験順序や対応できる設備に応じて、試験する安全機能を組み込んだソフトウェアは、管理(試験単位、変更対応、機能実行のしやすさ、試験優先順位など)を考慮して分割されている。				
			5	統合試験にシミュレータを使用する場合、そのハードウェアには入力と出力があることが望ましい。				
			6	統合試験に使用した、または使用する設備、試験装置、ソフトウェアの名称、型(形)式、バージョン、校正データを記載し、文書化している。後で同じ設備、機器で試験ができる。				
7	統合試験を行った開発ソフトウェアのバージョンは、明確にされ、文書化されている。							

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点			
				SIL2	SIL3						
1	ソフトウェア の安全妥 当性確認	統合試験 (実機試験)		統合試験における入力変数、出力変数が仕様書で規定されている。							
			イ	入力変数の最大値、最小値、中間値を検証値として正常に動作することを確認している。							
			ロ	入力変数の最大値を超えたデータ、最小値より小さいデータを検証値とし、エラー、または異常処理がされることを確認している。							
			ハ	モジュール特有の特異な変数を入力して検証している。変数は、正常動作、異常動作とも確認されている。特異な変数とは、例えば、キー入力されるASCIIコードの組み合わせや暗号データなど、モジュールに固有な値。							
			9	統合試験を行ったソフトウェアのカバレッジは明確である。							
			10		試験を行っている時、または、行う時、被試験体は状態が変化する。この状態変化を事前に明確にする。						
				イ	有限状態機械(ゆうげんじょうたいきかい、finite state machine、FSM)手法で状態遷移を記述する。						
				ロ	時間ペトリネットで状態遷移を記述する。						
			機能確認テスト	機能確認テスト	ブラックボックステスト	1	仕様で決めた機能をすべてテストし、仕様と食い違っていないことを確認する。				
							テスト対象を動的に試験するため、仕様から入力条件、出力期待値を決め、通電動作させ、確認する。				
イ	許容範囲のデータで動作確認する。										
ロ	仕様通り異常処理をするかも含めて、許容範囲外のデータで動作確認する。										
ハ	許容範囲の限界データで動作確認する。										
ニ	極端な値を与える。オール0やオール1、データ順序の入れ替え、タイミングを無視した入力など。										
ホ	上記イからニを組み合わせたテスト										

図 3.1.9 チェックシート第3部(第2版) 続き

No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
				SIL2	SIL3			
1	機能確認テスト	システムと統合化されたハード/ソフトウェアの間で安全要求事項の関連付けの追跡	1	安全要求事項の仕様項目が、ハードウェアとソフトウェアのテスト要素又はモジュールからこれらの上位レベルのハード/ソフトウェア機能まで関連付けが明確になっている。				
		システムと統合化されたハード/ソフトウェアの間で安全要求事項の関連付けの逆方向追跡	1	安全要求事項の仕様項目が、上位レベルのハード/ソフトウェアで実施されている安全機能から個別要素のハードウェアとソフトウェアまで逆方向の関連付けが明確になっている。				
					判定	満点		

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

A.8. 修正、変更											
No	項目	主旨	設問		チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点		
					SIL2	SIL3					
1	影響の確認	影響確認試験	1	ソフトウェアを変更した時、変更したソフトウェアの及ぼす影響を確認する。							
				イ	影響を及ぼすソフトウェアモジュール、システムを明確にする。						
				ロ	変更されたソフトウェアは、再度テストをする。						
				ハ	影響を受けるソフトウェア、再度テストをする。						
				2	ニ	システム全体を再度テストする。					
					ホ	システム全体ととして再度完全に妥当性確認を行う。(A.7参照)					
					ヘ	妥当性確認は、システムの状況を考慮し、影響する部分に関係するところ限定することができる。					
					ト	これらは、文書化する。					
2	管理	ソフトウェア管理	1	ソフトウェアの構成管理として、文書化、バージョンごとのプログラム、製作日、製作者などが管理されている。規定とおり文書化され、保管されている。							
		システムと統合化されたハード/ソフトウェアの間で安全要求事項の関連付けの追跡	1	安全要求事項の仕様項目が、ハードウェアとソフトウェアのテスト要素又はモジュールからこれらの上位レベルのハード/ソフトウェア機能まで関連付けが明確になっている。							
		システムと統合化されたハード/ソフトウェアの間で安全要求事項の関連付けの逆方向追跡	1	安全要求事項の仕様項目が、上位レベルのハード/ソフトウェアで実施されている安全機能から個別要素のハードウェアとソフトウェアまで逆方向の関連付けが明確になっている。							
					判定		満点				

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

A.9. ソフトウェア検証 (See 7.9)								
No	項目	主旨	設問	チェック		配点	備考 (補足説明又は該当文書、関連文書の番号)	得点
				SIL2	SIL3			
1	ソフトウェアの検証	静的な解析	1	境界値付近の変数の解析				
				データフロー解析				
			イ	変数は値が割り付けられる前に読まれているか				
			ロ	変数は読み出される前に一回以上書かれていないか。				
			ハ	変数は読み出されずに書き込まれていないか。				
			ニ	データフローに曖昧、未定義なところはないか。				
2	監査	公式(社内の特定の閉鎖された関係者だけでない組織)の調査	1	検査官によってソフトウェア要素を調査する。この検査は、ソフトウェア工程のどの工程でもよい。検査の範囲とやり方は予め決めておく。発見された不適合は、検査官とその修正手順を合意すること。				
3	デザインレビュー	デザインレビュー	1	関係者を交えて仕様の合意、試験方法、試験結果をレビューし、相互に専門家の立場で内容を協議し、不適合な項目は適宜修正、変更を合意して加える。				
4		ダイナミック解析とテスト	1	試作品(プロトタイプ)かそれ以上のもので実動に近い動作の確認を行って、故障の調査を行っている。				
5	管理	システムと統合化されたハード/ソフトウェアの間で安全要求事項の関連付けの追跡	1	安全要求事項の仕様項目が、ハードウェアとソフトウェアのテスト要素又はモジュールからこれらの上位レベルのハード/ソフトウェア機能まで関連付けが明確になっている。				
		システムと統合化されたハード/ソフトウェアの間で安全要求事項の関連付けの逆方向追跡	1	安全要求事項の仕様項目が、上位レベルのハード/ソフトウェアで実施されている安全機能から個別要素のハードウェアとソフトウェアまで逆方向の関連付けが明確になっている。				
6	数値処理の検証	オフラインによる数値確認	1	曖昧な数値はエラーの元になる。数字の丸め、浮動小数点計算などがある場合、その検証をオフラインでおこなう。				
					判定		満点	

図 3.1.9 チェックシート第3部(第2版) 続き

A.10. 機能安全の評価 (see Clause 8)									
No	項目	主旨	設問		チェック		配点	備考 (補足説明又は該 当文書、関連文 書の番号)	得点
					SIL2	SIL3			
1	評価方法	故障解析	1	規格に従った機能安全の完全な評価					
				イ 原因と結果の関係図					
				ロ 事象によるツリー解析					
				ハ 故障の木による解析					
				ニ ソフトウェア機能の故障解析					
			2	設計仕様に従った機能安全の正しさの評価					
				イ 原因と結果の関係図					
				ロ 事象によるツリー解析					
				ハ 故障の木による解析					
				ニ ソフトウェア機能の故障解析					
2	共通原因故障の対応	多様性ソフトウェアの共通原因故障解析	1	冗長化されていることで共通の原因で完全な故障にならない。					
3	要求仕様の出所の関連付け (トレーサビリティ)	システムと統合化されたハード/ソフトウェアの間で安全要求事項の関連付けの追跡	1	安全要求事項の仕様項目が、ハードウェアとソフトウェアのテスト要素又はモジュールからこれらの上位レベルのハード/ソフトウェア機能まで関連付けが明確になっている。					
					判定		満点		

図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

	得点率	80%	40%	判定	得点	満点
1 A.1. ソフトウェア安全要求仕様書	1	0.8	0.4	0	0	0.0
2 A.2. ソフトウェア安全要求仕様書.	1	0.8	0.4	0	0	0.0
3 A.3. ソフトウェアの設計と開発	1	0.8	0.4	0	0	0.0
4 A.4. ソフトウェアの設計/開発	1	0.8	0.4	0	0	0
5 A.5. ソフトウェアの設計と開発	1	0.8	0.4	0	0	0
6 A.6. ソフトウェアをプログラム可能な電子	1	0.8	0.4	0	0	0.0
7 A.7. ソフトウェアにおけるシステム安全	1	0.8	0.4	0	0	0.0
8 A.8. 修正、変更	1	0.8	0.4	0	0	0.0
9 A.9. ソフトウェア検証	1	0.8	0.4	0	0	0.0
10 A.10. 機能安全の評価	1	0.8	0.4	0	0	0.0

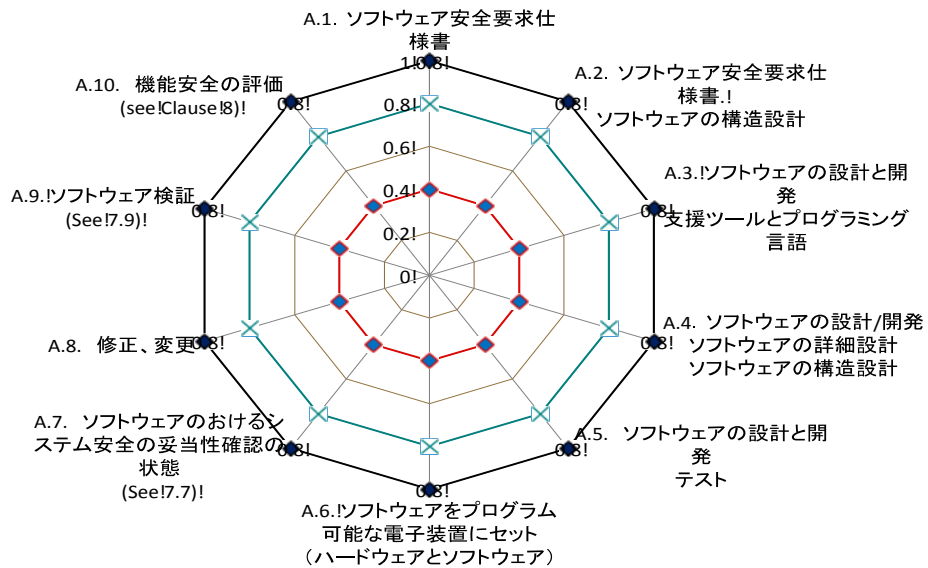


図 3.1.9 チェックシート第3部 (第2版) 続き

3.2 リスクアセスメントシートと保護方策配置方法 [安衛研]

3.2.1 目的

産業用機械設備においては、機械の安全性はリスクという言葉を用いて定義される。結局、安全性はリスクがほとんどない状態で本来の機能（仕事）を実行できることと解釈される。一般にこのような安全（状態）を合目的的安全（状態）と呼ぶ。それに対して、機械が本来の機能ができない（一般には停止）状態だが人に対して安全を確保することを無条件安全（状態）と呼ぶ。

機械の安全化は以上の2つの安全を実現することであり、リスクアセスメントはそのための手段とその手段の安全性能を求めるためのツールである。リスクアセスメントを実施することにより、対象機械の安全仕様書が作成できる。また、前節3.1で説明したチェックシート第1部でも、リスクアセスメントは実施すべき必須項目として挙げられている。

ここでは、生活支援ロボット開発者が容易にリスクアセスメントを実施できるようにロボットタイプ別にひな形シートを開発して提供する。特に、リスク低減のための保護方策のリスク低減効果まで検証できるように、再リスク評価まで実施、記録できる形式とする。

3.2.2 リスクアセスメントに基づく安全設計手順

機械の基本安全規格（JIS B 9700[1]）によれば、リスクは基本的に4つのリスク要素（危害の酷さ、暴露頻度/時間、危険事象発生確率、危害回避可能性）の組み合わせとして定義し、定性的あるいは定量的に評価する。この組み合わせの方法（関数）は様々であり、指定された方法はない。なお、「人が危険源に晒される頻度及び時間」、「人が危害回避又は制限できる可能性」、「危険事象の発生確率」の3つをまとめて、「危害の起こりやすさ（発生確率）」と言い換えることもでき、実際に「危害の酷さ」と「危害の起こりやすさ」の2要素のみでリスクを評価している例もある。ちなみに、国内の労働災害統計では強度率（危害の酷さ）と度数率（危害の発生頻度）が用いられている。

最終的にリスクとして評価するには、原則4つのリスク要素毎の見積もり結果を統合的に判断することになり、個々のリスク要素は時系列的に独立した関数として扱う。各リスク要素の定義や解釈によってはリスク要素間の従属関係を考慮するかもしれないが、独立して扱うことが定量的な評価を容易にする。

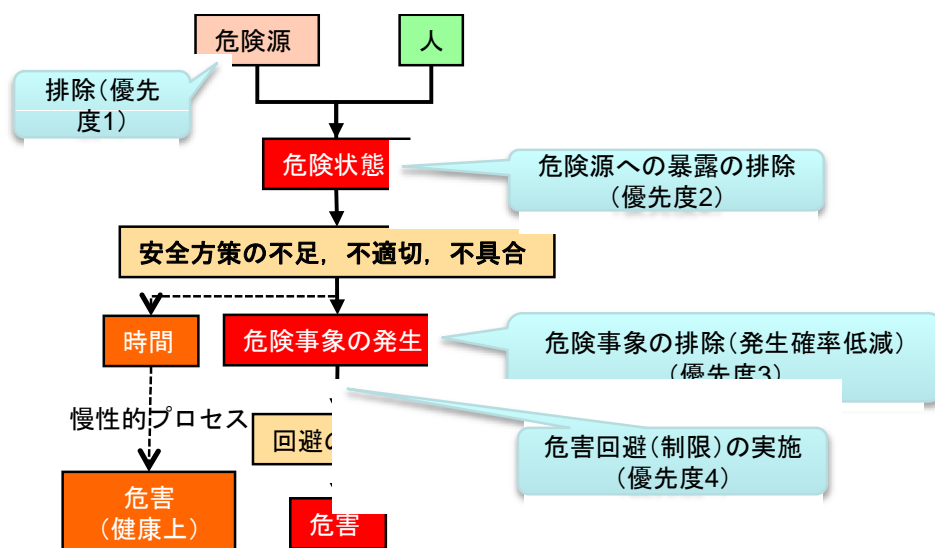


図 3.2.1 危険源から危害に至るプロセス

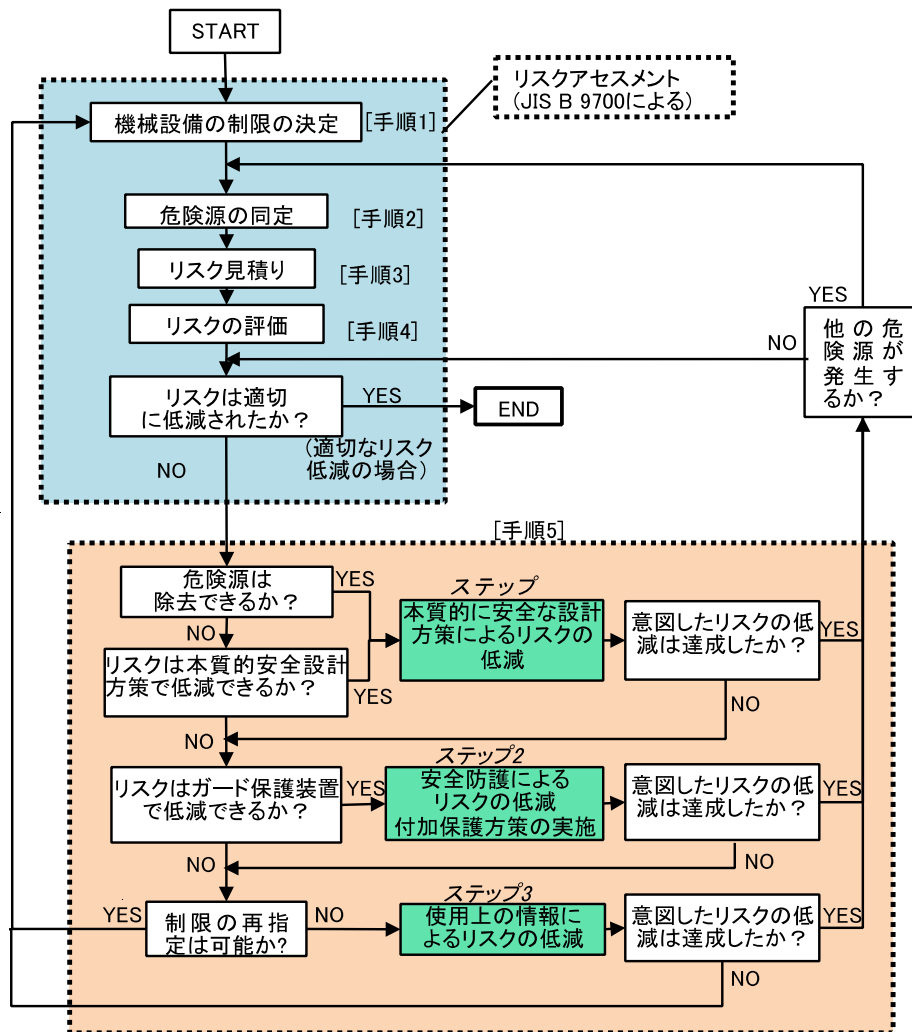


図 3.2.2 リスクアセスメントとリスク低減のフロー

4つのリスク要素は前出の危険源から危害に至るプロセス(図3.2.1)で示すように、各々の要素に主に対応するリスク低減の手段と関連付けられる。これは個々のリスク要素への各手段の効果を考慮したものであり、例えば、本質的安全設計により過度な速度や力を抑制したり、突起や鋭利部をなくすことにより、想定される危害を小さくすることが可能となる。同様に、ガードによる人と危険源との隔離は曝される頻度を減らし、保護装置による機械のインタロック(近接時に停止等)は人への機械の危険なエネルギー伝達をなくすることができる。各リスク要素に対して主なリスク低減効果をもたらす方策は、関連安全規格でその要件が規定されている。

設計者が行うべきリスクアセスメントの手順は、図3.2.2に示すように対象機械の条件(制限)を決めた上で、危険源一つ一つに対して分析とリスクの評価を行い、目標に到達(適切な低減の実施)したかを判断する。JIS B 9700で説明されるリスクアセスメントは破線内の手順1~4であるが、この規格ではこのリスクアセスメント後に続くリスク低減プロセス(手順5)を含めて安全設計手順として示されている。手順4の最後の判断がYESであれば、それまでの分析・評価過程を文書化して終了するが、判断がNOならばリスク低減を施して、その結果(リスク低減効果)が目標に到達したかを再度評価することを繰り返

す。このような回帰的なプロセスを行うことがリスクアセスメントに基づく安全設計の特徴である。

なお、手順5は「3ステップメソッド」と呼ばれ、ステップ1→2→3の順に実施しなければならない。すなわち、本質的方策や保護装置が講じられるにもかかわらず、ユーザに委ねる方策（警告表示や管理訓練等）を優先してはならない。また、手順4における最後の判断「リスクは適切に低減されたか？」とは、この3ステップを正直に実施して破綻なく成立し、ユーザへの残留リスク通知が十分行われている場合とされる。加えて、対象機械と類似する機械とのリスク比較が可能であれば、その比較結果により容易にリスク評価を行える。例えば、搭乗型移動ロボットの場合、電動車いすの安全規格を参照比較可能である。

3.2.3 リスクアセスメントひな形シートの概要と記入方法

3.2.3.1 ひな形作成の目的

リスクアセスメントはあくまでも事前評価であり、リスクアセスメントシートは設計者が安全の仕様を決めることを支援する。ひな形シートは4シートから構成され、対象機器の基本仕様書、使用条件や環境等の制限の規定事項や評価ルールを記載する表紙、初期分析結果とリスク評価書、リスク低減方策とその低減効果の再評価書となる。このうち、最後の再評価書は図3.2.2の手順5を含んでいる。

なお、リスクアセスメントシートはあくまでも安全の事前評価書であるため、基本的に設計時に安全仕様を確立する段階で用いる。そのため、対象ロボットの基本機能（動作、構造等）の仕様が決まっておき、安全機能がない（基本機能のみ装備された）状態でひな形シートを使用することが前提である。特に、本質的安全設計を施す場合、基本機能と安全機能は相反する場合が多くなるため、基本機能の確定は必須である。また、ひな形シートに記載の分析手法や見積もり・評価のルール、さらにシート構成や記述方法については、あくまでも一例であるのでこの書式に限定する必要はない。

3.2.3.2 リスク見積ルール

ひな形シートは基本の4リスク要素を用いて、加算と積算を組み合わせたハイブリッド方式を採用し、次式によりリスクRを数値として算出する。

$$R = S \times (F + A + Ps)$$

ここで、積算は「危害の酷さS」と「危害の発生確率Ph」で行い、後者を分解した「暴露頻度F」、「危険事象の発生確率Ps」、「回避可能性A」の3要素は加算で見積もっている。「危害の酷さS」を単一の積算項としたのは、本質的安全方策の適用を重要と考えてその効果を反映しやすくする意図がある。反面、後者の3つのリスク要素パラメータは、顕著な重み付けをしない限り、各々の差異が最終的なリスクの点数に反映しにくい傾向がある。

なお、算出ルールの厳密さは重要ではなく、各リスク要素のパラメータも数値で表しているが、あくまでも定性的表現を数字の目盛りに当てはめただけである。したがって、3リスク要素をまとめた危害の発生確率の点数は、あくまでも危害の起こりやすさのランク付けの意味しかない。結局、このランクによって安全機能（特に保護装置の安全性能）が決められることになるため、リスクアセッサでもある設計者が、このランクをどのような方針で扱うかによって製品のロボットの安全性が決まる。すなわち、リスクアセスメントにより得られた結果（リスク点数）は、設計者が安全の責任の重さを宣言した結果と見なせる。

表 3.2-1 危害の発生確率に関わるリスク要素の見積もりパラメータ

晒される頻度又は時間: F		危険事象の発生確率: P_s		危害を回避又は制限できる可能性: A	
連続的/常時	4	高い	4	困難	3
頻繁/長時間	3	起こり得る	3	可能	1
時々/短時間	2	起こり難い	2		
まれ/瞬時的	1	低い(まれ)	1		

ハイブリッド法による各リスク要素のパラメータは、表 3.2.1 と表 3.2.2 に示すように基

表 3.2-2 危害の酷さの見積もりパラメータとリスクマトリクス表現

危害の酷さ: S		危害の発生確率: $F + P_s + A$								
		3	4	5	6	7	8	9	10	11
重大傷害(長期間治療)	4	12	16	20	24	28	32	36	40	44
医療措置(短期間治療)	3	9	12	15	18	21	24	27	30	33
応急手当で回復	2	6	8	10	12	14	16	18	20	22
無傷/一時的痛み	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11

本的に 4 段階の目盛りに比例配分の点数を割り付けている（回避可能性のみ 2 段階重み付け）。数値計算法を採用する利点の一つは目盛りを細かく設定することが可能なことだが、初心者向けのひな形として最大 4 段階に抑えた。また、基本的な事例としたため、点数の重み付けは行っておらず、必要に応じて点数の重み付けを検討してもよい。

この計算ルールにより、リスク見積値 R は表 3.2.2 に示すように 3~44 点の範囲をとる（各リスク要素の配点、リスク見積値ともに数が多い方が高リスクを意味する）。同表ではマトリクス表としてリスク見積値を表しているが、これは点数分布を明示するためのもので、マトリクス法を採用しているわけではない。表のセルの色分けの意味は後述する。

3.2.3.3 リスク要素の見積基準例

「危害の酷さ」の見積もり目盛りは表 3.2.3 に示す 4 段階であるが、一般産業機械設備のリスクアセスメントで使用される多くの目盛りよりは厳しくしている。すなわち、産業用機械では $S=1$ は通常設定せずに $S=2$ から始まる例が多いが、このひな形シートでは対象ロボットが家庭用途、介護福祉用途であることを踏まえ、 $S=1$ を新たに設定した。 $S=1$ の場合、実際怪我として記録されない場合もあるかもしれないが、人との接触を求めるサービスロボットでは必要な目盛りとして設定した。逆に、重大傷害には産業用機械では中程度の傷害とされていた骨折も含んでおり、一般用途の目盛りの高い側を圧縮して低い側を伸ばした形となっている。ただし、高齢者や身体障がい者など、危害の対象者によっては傷害耐性が大きく異なるため、目盛りを変える、あるいは重み付け等の考慮が必要となるか

もしれない。複数の対象者の場合も、重み付けか副要素としての追加見積もりを検討する必要がある。

表 3.2-3 危害の酷さ基準例

S	酷さ	例
4	重大傷害(長期間治療)	死亡, 手足切断, 骨折, 永久傷害, 入院が必要, 全治 1 週間以上
3	医療措置(短期間治療)	要診察, 縫合伴う切傷, 完治可能, 通院, 全治 1 週間未満
2	応急手当で回復	通院不要, 赤チン(切傷・打撲)
1	無傷／一時的痛み	痣の残らない圧迫・打撲

表 3.2-4 暴露頻度基準例

F	頻度／時間	例
4	連続的／常時	1 回超/時の頻度で晒される, 1 回に晒される時間が 60 分超
3	頻繁／長時間	1 回以下/時の頻度で晒される, 1 回に晒される時間が 60 分以下
2	時々／短時間	10 回以下/日の頻度で晒される, 1 回に晒される時間が 30 分以下
1	まれ／瞬時的	1 回以下/日の頻度で晒される, 1 回に晒される時間が 10 分以下

なお、表の危害の酷さの具体症例はあくまでもひな形の設定例である。

「危険源への暴露頻度/時間」は、定性的表現で表 3.2.4 に示す 4 段階に目盛りを設定した。頻繁、時々、まれなどはよく用いられる定義であるが、このような定性的表現は頻度や時間の判断が曖昧となる傾向にあるため、可能な限り具体的な数値で示した方が理解しやすい。ただし、そのためには、対象ロボットの基本仕様（使用条件）が明確となっているという前提である。この表では、人が危険源に晒される頻度は具体的な時間を例示したが、これらはあくまでも一例である。暴露時間も同様である。なお、暴露頻度/時間は個々の危険源に対して設定される。例えば、危険源が対象ロボットの機械的危険源（押しつぶし等）の場合は、一般に想定タスクの 1 サイクル（あるいは 1 日当たりのタスク）における対象ロボットの使用回数や使用時間から設定する。装着型ロボットの場合は、例えば危険源が装着時常時存在するならば装着時間で、動作時のみ存在するならば稼働時間で考える。

「危険事象の発生確率」も定性的に表 3.2.5 に示す高いから低いまでの 4 段階で目盛りを振っているが、危険事象の要因となるのはロボット側と人（ユーザ）側の両面が考えられる。ロボット側の技術的要因とは機器の不具合や故障（危険側）によるもので、具体的に危険側故障発生率等で見積もることは可能である。ただし、危険側故障発生率は単に信頼性ではなく、故障の内容により異なり、具体的な数値で単純に表現することは難しい。安全関連部のシステム規模が大きくなればなるほど、それは現実的ではなくなる。そこで、

一般的な認識として、安全関連部の独立性が高く、その構成要素が安全関連規格へ準拠しているほど危険側の故障は発生しにくいと考えられるため、定性的表現ではあるが具体的

表 3.2-5 危険事象の発生確率基準例

Ps	発生確率	技術的要因の例	人的要因の例
4	高い	安全関連部が非安全関連部から明確に分離していない	類似ロボットや類似機械で事故がある／ヒヤリハットが度々ある
3	有り得る	安全関連部に非安全関連部要素が混じっている	類似ロボットや類似機械でヒヤリハットの報告がある
2	起こりにくい	安全関連部は非安全関連部から分離して、多くは関連安全規格に準拠している	非定常な作業や複雑な作業において、注意が行き渡らない／散漫になりやすい
1	低い(まれ)	安全関連部は全て関連安全規格に準拠して構成される	日常ではミスはほとんど起こりにくい

表 3.2-6 回避可能性の基準例

A	回避又は制限の可能性	例	加味条件
3	困難	動作速度が高速 死角が多い	非常停止装置が設置されていない又は操作できない 保護具が装備されていない
1	可能	可動部が十分な低速度 以下で動作し、かつ、可動部を認識でき、回避のための十分な空間がある	非常停止装置が操作可能位置に設置されている 指定された保護具の着用が遵守される

目盛りの例として示した。一方、人が要因となる危険事象は、その発生確率（例えばヒューマンエラーの生起確率）を定量的に見積もることは難しい。プラント等で一定タスクの条件下で大まかに数字を見積もった例はあるが、多様なロボットにはそのまま適用できない。そこで、人が携わるタスクの内容（複雑、煩雑さ）や過去の類似事故件数あるいは類似のヒヤリハット件数を目安として判断するとした。類似機器の使用実績に基づくデータがあれば、見積もりの参考になるが、人の属性により変わる場合もあり、使用には注意が必要である。

「危害の回避可能性」はできるかできないかの2択とし、確率的評価とはしていない。すなわち、ユーザが危害から回避できるかを設計者が説明できるか否かで判定し、曖昧な根拠は排除している。また、一般に人による危害の回避あるいは制限は、その人の能力や知識、経験、リスク認知度などの人側の主要因と、対象ロボットの動作速度などのロボッ

ト側の副要因の両面から影響を受ける。これらの要因は多岐にわたり、人の関与も様々であるため、定量的な目盛りを設定することは難しい。産業用ロボットでは、ロボット側の回避可能性の目安として 250mm/s が規定されているが、これはあくまでも熟練教示者がロボットアームを動作を認識したという限定条件である。この数値の他用途への引用には注意を要する。なお、加味条件はあくまでも副次的な見積もり要素と見なしており、この条件の合致のみで A=1 と見積もることはできない（非常停止装置と保護具の直接のリスク低減効果は、各々、危険事象の発生確率を下げることでと危害の程度を緩和することである）。

3.2.3.4 リスク評価基準と解釈

ひな形シートのリスク見積値 R は最終的に 3 段階でランク付けした（表 3.2.7 参照）。原則、R が 7 点以上ではリスク低減を必要とし、リスク低減目標は 6 点以下とした。ただし、R が 7～14 点の場合は ALARP（合理的に実行可能な低さ）[2]の考え方を取り入れ、適用すべきとされた方策が技術的に実現困難、機器本来の機能を喪失、コストの過大な突出等の合理的な理由があれば、メーカーによるさらなるリスク低減を求めないという条件付き許容とした。ただし、条件付き許容の場合は、ユーザの運用上のリスク低減を支援することが必要である。

3 段階のランクしきい値の設定は、産業用機械に比較するとかなり厳しめに設定したが、救済措置として表 3.2.2 のマトリクスで分かるように、危害の酷さが重大（S=4）であれば危害の発生確率を最低（Ph=3）まで下げれば条件付きで許容できるとした。同様に、S=3 ならば Ph=3 または 4 が許容の限界である。一方、危害の発生確率が高い（Ph=8 以上）場合は危害の程度は最低（S=1）でなければならない。

表 3.2-7 リスク評価基準

見積値 R	評価	リスク低減の必要性
15 以上	リスクは高く、受入れられない。	必須、技術的方策が不可欠
7～14	リスクの低減が必要。ただし、条件付(他に方策がない、低減が現実的でない)で許容可能。	必要、技術的方策が困難な場合は警告表示及び管理的方策を講じる * ALARP として考慮もありえる
6 以下	リスクは十分低い。	不要

3.2.3.5 ひな形シートの記入方法

3.2.3.5.1 基本仕様シート

ひな形シートの基本仕様シートのページ（図 3.2.3）は、対象ロボットの名称と型式、外観図又は写真、基本仕様を記述することにより、アセスメント対象のロボットの基本仕様や機能を把握する目的で作成される。基本仕様の項目は例示であるが、通常取説書に記載される基本仕様の項目をそのまま記載すればよい。特に留意すべき項目は、リスクアセスメントの最初の段階である使用上の制限の決定に関連する仕様であり、動作機能、構造、想定使用環境（最悪条件）、想定使用者（属性、操作形態等）はもれなく抽出して記述する。なお、安全機能は本来リスクアセスメントの結果としてその仕様（安全性能等）が決定さ

れるべきものであるが、例えば、ナビゲーションのための障害物検知センサが周囲の人検知も兼用する場合、詳細仕様は記入せずに機能の目的を追記する。

対象ロボット名称	型式	基本仕様
車いす型ロボット	XXX-XXXX	ロボットタイプ:高齢者及び身体障がい者向け搭乗型移動ロボット(自律移動機能有り) 外寸:700W×800D×1200H、質量:90kg(バッテリー含む) 駆動源:DC24Vバッテリー(プラグイン充電又は充電済みバッテリーと交換) 走行機構:2輪駆動輪(独立駆動200WACサーボモータ×2、専用ドライバ)+2輪自由輪、保持用メカブレーキ有り 走行機能:前後進、左右旋回、速度調整 走行能力:最高速度6km/h、登坂最大5度、段差乗り越え最大20mm、旋回半径最小0.5m 走行モード:搭乗者による操縦/自律走行の自動切り替え、ブレーキ解除 自律走行機能:限定通路のみプログラム走行+超音波ビーコンによる位置補正 他のアクチュエータ:シートクライニング用100WACサーボモータ アクチュエータ駆動方式:専用ドライバ 操縦インターフェース:ジョイスティックによる操舵と速度調整(ホールドトゥラン操作)、ホールドトゥボタンによるリクライニング調整、緊急停止ボタン、電源ボタン 安全機能:レーザースキャナセンサ(前後)で障害物検出後減速、全周囲/バンパセンサで接触検知後停止、赤外線センサ(前後)で走行路段差検出後停止 表示機能:走行モード、速度、バッテリー残量、緊急停止、異常、後退時警報 その他の機能:跳ね上げ式肘掛け(手動) 想定使用者:自力歩行に支障のある高齢者及び身体障がい者
		

図 3.2-3 基本仕様シート記入例 (車いす型ロボット)

3.2.3.5.2 表紙シート

ひな形シートの表紙(図 3.2.4)には、先ず左段落に対象ロボットのライフサイクル(リスクアセスメントの範囲)を宣言した上で、使用上の制限(意図した使用、予見できる誤使用、意図した空間/時間制限)を簡潔に記入する。対象ロボットの基本仕様が固まっている

対象ロボット名称	実施者	実施日																																																																															
車いす型ロボット	(担当者の所属) 立案者、チーム参加者、リーダー、承認者等	初回: 第1回改訂:																																																																															
ライフサイクル該当段階	設定、運転、保守	分析方法(ツール) 積算法(一部加算法を適用)																																																																															
意図した使用	①ロボットは搭乗した特定操作者の片手操縦により動作する(少なくとも片腕と視力の機能は正常の人が対象)。 ②施設内特定通路内のみ、ロボットは自動的に自律走行に切り替わる(操縦は停止以外無効)。 ③ロボットのバッテリー充電/交換・保守等は、訓練された成人(介護者/メーカ要員)のみ行う。 ④ロボット搭乗者は、ベッドやトイレ等への移乗を自力又は補助により行う。 ⑤ロボット搭乗者は運転中身体を拘束されない。	リスクの見積/評価基準 $R = S \times (F + P_s + A)$ リスク見積値: $R = S \times (F + P_s + A)$																																																																															
使用上の制限	①ロボット走行中に、第三者(介護者)がジョイスティックに触れる。 ②ロボット背面の第三者に気付かず後退させる。 ③第三者が特定搭乗者に成り代わって、ロボット操縦を行う。 ④ロボットを走行領域外へ操縦してしまう。 ⑤自律走行路上に物を落とす/他の障害物が存在している。 ⑥エレベータ搭乗に時間がかかり、ドアに挟まれる。 ⑦ロボットへ移乗時の着座位置不完全のまま操縦/自律移動する。 ⑧移乗時に身体の一部がジョイスティックに触れる。	<table border="1"> <thead> <tr> <th>晒される頻度又は時間:F</th> <th>危険事象の発生確率:P_s</th> <th>危害を回避又は制限できる可能性:A</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>連続的/常時</td> <td>高い</td> <td>困難</td> </tr> <tr> <td>頻繁/長時間</td> <td>起こり得る</td> <td>可能</td> </tr> <tr> <td>時々/短時間</td> <td>起こり難い</td> <td></td> </tr> <tr> <td>まれ/瞬間的</td> <td>低い(まれ)</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th>危害の酷さ:S</th> <th colspan="11">危害の発生確率:F + P_s + A</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>回復に長期治療(1月以上)を要す</td> <td>4</td><td>12</td><td>16</td><td>20</td><td>24</td><td>28</td><td>32</td><td>36</td><td>40</td><td>44</td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>回復に医療措置を要す</td> <td>3</td><td>9</td><td>12</td><td>15</td><td>18</td><td>21</td><td>24</td><td>27</td><td>30</td><td>33</td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>応急手当て回復可能</td> <td>2</td><td>6</td><td>8</td><td>10</td><td>12</td><td>14</td><td>16</td><td>18</td><td>20</td><td>22</td><td></td><td></td> </tr> <tr> <td>対処不要(一時的な痛み等)</td> <td>1</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td></td><td></td> </tr> </tbody> </table>	晒される頻度又は時間:F	危険事象の発生確率:P _s	危害を回避又は制限できる可能性:A	連続的/常時	高い	困難	頻繁/長時間	起こり得る	可能	時々/短時間	起こり難い		まれ/瞬間的	低い(まれ)		危害の酷さ:S	危害の発生確率:F + P _s + A											回復に長期治療(1月以上)を要す	4	12	16	20	24	28	32	36	40	44			回復に医療措置を要す	3	9	12	15	18	21	24	27	30	33			応急手当て回復可能	2	6	8	10	12	14	16	18	20	22			対処不要(一時的な痛み等)	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
晒される頻度又は時間:F	危険事象の発生確率:P _s	危害を回避又は制限できる可能性:A																																																																															
連続的/常時	高い	困難																																																																															
頻繁/長時間	起こり得る	可能																																																																															
時々/短時間	起こり難い																																																																																
まれ/瞬間的	低い(まれ)																																																																																
危害の酷さ:S	危害の発生確率:F + P _s + A																																																																																
回復に長期治療(1月以上)を要す	4	12	16	20	24	28	32	36	40	44																																																																							
回復に医療措置を要す	3	9	12	15	18	21	24	27	30	33																																																																							
応急手当て回復可能	2	6	8	10	12	14	16	18	20	22																																																																							
対処不要(一時的な痛み等)	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11																																																																							
意図制限した空間/	①ロボットは病室内及び特定通路の屋内平坦路のみ移動する(トイ4回/日、浴室1回/日、リハビリ回/日)が、エレベータにも2回/日搭乗する(特定通路以外は操縦運転)。 ②病室や通路には介護者、見舞客(第三者)が存在する可能性がある。 ③ロボットはトイレや浴室等にも移動するが、直接に水がかかることはない。 ④バッテリー充電は特定場所で行うが、バッテリー交換は任意の場所で停止時に実行可能。 ⑤ロボットの運転寿命は20,000時間とし、ブレーキは1週間毎に点検する。																																																																																

図 3.2-4 表紙記入例 (車いす型ロボット)

れば、この項目は多く埋めることができるはずであり、ここの内容を充実させれば危険源の抽出（同定）が容易となる。右段落には、アセスメント実施者（複数名）、作成日と改訂履歴、分析方法とリスク見積のルール（該当するリスク要素とパラメータ及びその目盛り、総合リスク評価基準）を記入する。このページの内容が以降のアセスメントの出来を左右するため、ページ分量にこだわらずに丁寧に作成することが望ましい。なお、スタイルはこの書式に基づく必要はないが、記入項目はもれなく挙げるようにする。

使用上の制限の内、「意図した使用」については、基本仕様の記載内容を参考にして、誰がどのように使用するのかという観点で宣言したライフサイクルで想定されるタスク（主として人が関わる動作、機能）を記述する。タスクに応じて、対象ロボットのユーザが操作者、単なる搭乗者、操作しない被介護者、バッテリー交換やトラブル処理をするユーザ管理者、点検保全をするメーカ SE、周囲の第三者など様々な属性が考えられるため、もれなく抽出しておく。特に、トラブル処理等の非定常のタスクは見落としがちである。

「合理的に予見できる誤使用」は、前述したようにユーザにメリットがあるために行う、容易に予測しうる人の挙動であり、明確な違反行為を除いて抽出しておく必要がある。特にサービスロボットの場合は、第三者の関与も忘れてはならない。また、直接のユーザ以外は誤使用の想定は難しいと思われ、可能であればアセッサには設計者以外の様々な立場の方の参加が望ましい。一般的に、ロボットのユーザビリティの配慮が不足すると、誤使用する可能性が高くなると言われ、マン・マシンインタフェースの仕様が重要となる。また、ユーザビリティへの影響は、ロボットの自動化が高度であるほど非定常時の人の関与への配慮が不足して起こる恐れがあり、注意を要する。

「意図した空間/時間制限」には、対象ロボットの動作環境や稼働時間（寿命、メンテナンス期間）を記述する。動作環境は設計者が想定する条件であるが、最悪の動作環境も想定しておく必要がある。また、時間制限は意外と見落とされがちな項目であり、アセスメントの有効期間を宣言しておかないと、メーカの責任範囲が拡大することになり、現実的ではない。例えば、部品の劣化や消耗に伴う危険源を限定するためにも、寿命あるいはメーカが介入してリセットできる稼働時間を決定しておく（リセット後の改めてのリスクアセスメントは必要）。

3.2.3.5.3 初期リスクアセスメントシート

ひな形シートの初期リスクアセスメントのページ（図 3.2.5）は、表紙で記入した分析方法とリスク見積のルールに従って、宣言したライフサイクル毎に危険源一つ一つに対して分析と評価を行ってゆく。危険状態/危険事象の項目は、危険源が危害に至るまでのシナリオを記述するが、危険状態と危険事象が明確に分離して記述しなくとも、危害に至る理由と経緯が説明できればよい。また、危害の程度の見積もり対象と危害の起因物を明確化するために、危険区域と対象者を記述しておく。なお、危害の酷さの見積もり根拠のために、上記シナリオの最後に危害を記入しておく（別欄記入でもよい）。

リスクの見積もりには、ひな形のルールであるハイブリッド法の計算が迎れるように全てのリスク要素の点数と加算結果（Ph）も記入する。例として No. 1, 5, 12 の危険源について初期見積もり結果例を示しているが、No. 1 は無条件にリスク低減が必要（目標は 6 点以下）、No. 5, 12 は原則 6 点以下に下げるが、条件付き許容可とするレベルとなっている。

なお、この事例の車いす型ロボットにおける見積もりの解釈は以下の通りとした。

- ・危害の酷さは基準例に同じ
- ・暴露頻度は、使用上の条件により、通常運転時（8 回/日あるいは 30 分/回）F=2、設定、故障（1 回/日以下）F=1

危険源同定					リスク見積						
段階	No.	危険源	危険状態/危険事象	危険区域	対象者	危害の酷さ S	危害の発生確率 Ph 頻度 F 確率 Ps	回避 A	リスク 点数 R	備考	
設定	1	経路設定ミス	自律走行路の設定誤りに より、スロープ上で急旋回 をして、搭乗者が転落して 腕を骨折	周辺・ 乗車部	搭乗者	4	6	1	2	3	24
	2		自律走行路の設定誤りに より、屋外の路上へ経路を 逸脱し、自動車と衝突して死亡	周辺・乗車部	搭乗者						
運転 (手動 操縦)	5	本体と壁間 での身体押し つぶし	誤操作または脇見により、 壁の前にいる人を押しつぶ し打撲	周辺	第三者	2	5	2	2	1	10
	6	障害物乗り上げによる 転倒(ロボットの重心)	障害物乗り上げによる転倒で周囲の人を押しつぶし 骨折	周辺	第三者						
	7	車輪に挟まれる、踏ま れる	旋回時の内輪差により、旋回内側にいる人の足を踏 過し骨折	周辺	第三者						
	8	車輪に衣服が巻き込ま れる	回転する車輪に搭乗者または周囲にいる人または搭 乗者の衣服が巻き込まれ窒息	周辺・乗車部	搭乗者 第三者						
	9	スイッチ類の非人間工 学的設計	介護者が誤ってジョイスティックに触れて、急加速した ため衝突して打撲	周辺	第三者						
運転 (自律 走行)	12	制御システ ムの故障に より暴走	障害物を検知せず、減速し ないまま周囲の人へ衝突 し打撲	周辺 (経路 上)	第三者	2	6	1	2	3	12
	13	制御システムの故障に より不意起動	位置補正に失敗し、自律走行路外で急発進して周囲 の人の足を踏過し骨折	周辺(経路上)	第三者						
	14	外部からの電磁波等に よるセンサの誤動作	電磁ノイズによる段差検出の失敗で、階段から転落し て搭乗者および階下の人が骨折	周辺・乗車部	搭乗者 第三者						
	15	ソフトウェアのバグによ る暴走	ソフトウェアのバグによる暴走で、走行経路から逸脱 し、階段から転落し、搭乗者および階下の人が骨折	周辺	第三者						

図 3.2-5 初期リスクアセスメント記入例 (車いす型ロボット)

- ・危険事象の発生確率は、非常常又は散漫な作業 Ps=2、安全関連部の独立設計 (内部はチェック不完全として) Ps=2
- ・回避可能性は、衝突と転落はその過程で回避不可能として A=3、押しつぶしは極低速度のため回避可能 A=1

図 3.2.6 は初期リスクアセスメントの続きであるが、No. 18 の危険源を図示してある。このように、危険状態/危険事象のシナリオが分かりにくい場合は図や写真が有効である。


運転 (乗降・ 移乗)	18	搭乗者の落 下	ベッドへの移乗時に搭乗者 が浅く腰掛けて滑り、落下 して骨折 	乗車部	搭乗者	4	7	2	2	3	28
	19	アーム/ステップの破損	搭乗者が荷重を掛けた際、アームおよびステップが破 損により転倒して骨折	乗車部	搭乗者						
	20	転倒	移乗時保持能力不足でロボット本体が動き、搭乗者 が足を払われて転倒し打撲	乗車部	搭乗者						
保守等	23	充電部分へ の直接接触	充電器の通電部分へ直接 接触し、感電	周辺ま たは内 部	搭乗者 第三者 要員	4	6	1	2	3	24
	24	内部回転部品への巻き 込み	動作確認時に、ギヤ部に手指を巻き込み骨折	内部	保守要員						
	25	内部熱源への接触	モータドライバ筐体へ接触して火傷	内部	保守要員						
	26	突起部による突き刺し	制御部筐体のバリによる手指の裂傷	内部	保守要員						

図 3.2-6 初期リスクアセスメント記入例続き (車いす型ロボット)

No. 18, 23 の事例は共にリスク低減が必須と評価されたが、基本的にリスク要素毎の見積もり根拠は前述の通りである。ただし、No. 23 の感電による危害の程度は充電器が昇圧して大電流を急速充電するタイプとして、感電により入院したと想定して S=4 とした。

3.2.3.5.4 再リスクアセスメントシート

ひな形シートの再リスクアセスメントシート（図 3.2.7）には、初期リスクアセスメントシートで原則リスク低減が必要と判定された危険源に対して、工学的手段による保護方策の適用とそのリスク低減効果を記述する。左の列から、初期リスクアセスメント結果のコピー、リスク低減のための方策と適用の優先順位、方策適用後の再リスクアセスメント（見積もりと評価結果）、残留リスク方策、備考の項目を記述する。

保護方策の適用順位は前出スライドで説明したとおり、1 番目は危険源除去又は酷さの低減、2 番目は暴露排除又は頻度低減、3 番目は事象発生確率低減、4 番目は回避又は危害の制限を行う。また、リスク低減効果の再見積りに当たっては、原則、適用の優先順位に対応したリスク要素のパラメータに作用するが、複数の方策の適用時はそれらの方策が同時に（重複して）機能するとして、各リスク要素の最低値をとっている（図 3.2.7 の太線枠）。例えば、No. 1 では再リスク評価で 20 点と 16 点となるが、経路自己診断機能の効果で Ps を 2→1、警告音の効果で A を 3→1 を採用すると、R=12 となる。同様に、No. 18 は 14 点止まりなところを R=8 に、No. 24 は 6 点止まりのところを R=5 とする。ただし、同一リスク低減効果の複数手段によるシナジー効果は原則表現されないため、別途検討する必要がある。

再リスク評価の結果、条件付き許容（R=7~12）の場合は残留リスク方策としてユーザによるリスク低減に委ねるための準備（情報提供等）を記入する。リスクアセスメント事例では、この残留リスク分までメーカー側に見積もる場合も多いが、このひな形ではユーザ依存の効果とは一線を引き、あくまでもメーカーの努力を求めている。

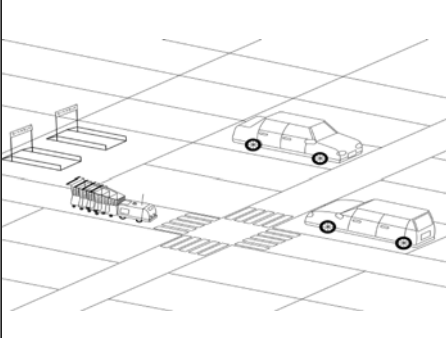
なお、安全機能の安全性能については、別紙で安全性能目標と妥当性確認を記述する。

初期リスク分析結果			リスク低減			再リスク見積								
段階	No.	危険源	リスク 点数 R	優先 順位	保護方策（メーカーによる工学的手段）	危害の 酷さ S	危害の発生確率 Ph			リスク 点数 R	保護方策 組合せ時 の R	残留リスク 方策（ユー ザに依存）	備考（参照規格等）	
							頻度 F	確率 Ps	回避 A					
設定	1	経路設定ミス	24	3	経路自己診断機能の付加	4	5	1	1	3	20	12	取説書教育	診断の安全性能は別途検討 経路確認運転時の注意喚起
				4	傾斜センサによる警告音・表示	4	4	1	2	1	16			
運転	18	搭乗者の落下	28	1	ロボット本体又はベッドにスライド式補助板の装備	2	7	2	2	3	14	8	取説書教育	補助板の仕様説明 着座確認機能の安全性能は別途検討
				3	ロボット本体又はベッドに着座確認機能を付加	3	6	2	1	3	18			
				4	ロボット本体とベッド間隔監視による警告	3	5	2	2	1	15			
保守	23	充電部分への直接接触	24	1	充電可能性部位の内蔵/カバーの付加	1	6	1	2	3	6	5	取説書	カバー仕様の説明
				3	充電ケーブル接続確認による通電	4	5	1	1	3	20			

図 3.2-7 再リスクアセスメント記入例（車いす型ロボット）

3.2.3.5.5 ロボットタイプ別リスクアセスメントひな形シート

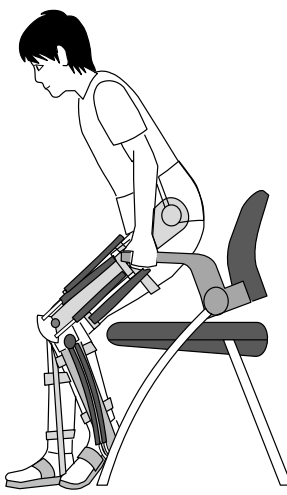
搭乗型移動ロボット(車いす型ロボット)のひな形シートを図3.2.3~図3.2.7に示した。他のロボットタイプ用として、非搭乗型自律移動ロボット(ショッピングカートロボット)用ひな形シートを図3.2.8に、装着型ロボット(立ち上がり動作支援スーツ)用ひな形シートを図3.2.9に示す。これらのひな形シートは、ロボット開発者をはじめロボットビジネス協議会のWGメンバーへ提供された。

対象ロボット名称	型式	基本仕様
ショッピングカート運搬ロボット	XX-XXX	ロボットタイプ:ショッピングカート自動回収用自律移動型ロボット
		外形:800W×1000D×900H、質量:120kg(バッテリー含む) 駆動源:DC24V/バッテリー(充電ステーションで4h自動充電) 走行機構:4輪の内2輪駆動輪(400Wサーボモータ)、メカブレーキあり 走行機能:前後進、左右旋回、速度可変 走行能力:最高速度6km/h、登坂最大5度、連続走行6時間 けん引機能:専用カート(前後連結器あり)10台まで、押し込みによる自動連結、ロボットによる一斉連結解除 走行モード:マップデータと磁気マーカ(床面埋め込み)補正による自律走行、手動低速走行 通信機能:内蔵カメラ画像・連結情報・走行位置情報の通知 安全機能:超音波センサ(前後)で障害物検出後減速、全周囲バンパセンサで接触検出後停止、遠隔緊急停止 表示器等:走行時メロディとランプ点滅、旋回・後退時のアラーム、緊急停止アラーム、異常アラーム

(a) 基本仕様シート

対象ロボット名称	実施者	実施日																																																																																																							
ショッピングカート運搬ロボット	(担当者の所属) 立案者、チーム参加者、リーダー、承認者等	初回: 第1回改訂:																																																																																																							
ライフサイクル該当段階	設定、運転、清掃、トラブル処理・修理、保守、処分	分析方法(ツール) 積算法(一部加算法を適用)																																																																																																							
意図した使用 合理的に予想できる誤使用 時間制限した空間/	①ロボットは回収場所からカート回収・連結して、所定の集積場所へ自動的に運搬する。 ②ロボットの手动操作・経路設定・保守等は、訓練された成人要員(店員)のみ行う。 ③ロボットの電源投入は訓練された要員が持つキー解除により行う。 ④ロボットは所定のカートのみ専用治具で連結できる。 ⑤要員はロボット運転中にカートの整理をする場合がある。	リスクの見積/評価基準 算出式:リスク点数(R)=危害の酷さ(S)×危害の発生確率(Ph) 判定基準:3≦R≦6 十分低い/無視できる(リスク低減は不要) 7≦R≦14 低い~中程度/条件付き受容/検討を要する(リスク低減を推奨) 15≦R≦44 高い/受容できない(リスク低減が必要)																																																																																																							
	①駐車場に残った客又は他の店員が、ロボット上に乗る/経路上に存在する/ロボット直前に飛び出す。 ②他の店員がキーを持ち出してロボット操作を行う。 ③要員の経路設定間違え/設定確認の未実施。 ④所定外のカートの混在。 ⑤要員が非常停止ボタンを押さずにバンパを蹴飛ばして停止させる。	<table border="1"> <tr><th colspan="2">危害の酷さ(S)</th></tr> <tr><td>4</td><td>重大障害(長期間治療)</td></tr> <tr><td>3</td><td>医療措置(短期回復)</td></tr> <tr><td>2</td><td>応急手当て回復</td></tr> <tr><td>1</td><td>無傷/一時的な痛み</td></tr> </table> <p>注:晒される頻度とは、一般的にロボットと人の接近する度合いとなる。晒される時間は、ロボットのアクティブ状態(通電時)に対して見積もる。</p> <table border="1"> <tr><th colspan="3">危害の発生確率(Ph=F+Ps+A)</th></tr> <tr><th>晒される頻度/時間(F)</th><th>危険事象の発生確率(Ps)</th><th>回避可能性(A)</th></tr> <tr><td>4 連続的/常時</td><td>4 高い(起こりやすい)</td><td></td></tr> <tr><td>3 動作中頻繁/長時間</td><td>3 ありえる</td><td>3 不可能</td></tr> <tr><td>2 動作中数回/短時間</td><td>2 可能性あり</td><td></td></tr> <tr><td>1 まれ/瞬間的</td><td>1 低い(まれ)</td><td>1 条件付きで可能性あり</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><th colspan="2"></th><th colspan="11">危害の発生確率(Ph)</th></tr> <tr><th colspan="2"></th><th>3</th><th>4</th><th>5</th><th>6</th><th>7</th><th>8</th><th>9</th><th>10</th><th>11</th><th colspan="2"></th></tr> <tr><th rowspan="4">危害の酷さ(S)</th><th>1</th><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td></td><td></td></tr> <tr><th>2</th><td>6</td><td>8</td><td>10</td><td>12</td><td>14</td><td>16</td><td>18</td><td>20</td><td>22</td><td></td><td>← リスク低減推奨</td></tr> <tr><th>3</th><td>9</td><td>12</td><td>15</td><td>18</td><td>21</td><td>24</td><td>27</td><td>30</td><td>33</td><td></td><td></td></tr> <tr><th>4</th><td>12</td><td>16</td><td>20</td><td>24</td><td>28</td><td>32</td><td>36</td><td>40</td><td>44</td><td></td><td>← リスク低減必要</td></tr> </table>	危害の酷さ(S)		4	重大障害(長期間治療)	3	医療措置(短期回復)	2	応急手当て回復	1	無傷/一時的な痛み	危害の発生確率(Ph=F+Ps+A)			晒される頻度/時間(F)	危険事象の発生確率(Ps)	回避可能性(A)	4 連続的/常時	4 高い(起こりやすい)		3 動作中頻繁/長時間	3 ありえる	3 不可能	2 動作中数回/短時間	2 可能性あり		1 まれ/瞬間的	1 低い(まれ)	1 条件付きで可能性あり			危害の発生確率(Ph)													3	4	5	6	7	8	9	10	11			危害の酷さ(S)	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11			2	6	8	10	12	14	16	18	20	22		← リスク低減推奨	3	9	12	15	18	21	24	27	30	33			4	12	16	20	24	28	32	36	40	44		← リスク低減必要
	危害の酷さ(S)																																																																																																								
4	重大障害(長期間治療)																																																																																																								
3	医療措置(短期回復)																																																																																																								
2	応急手当て回復																																																																																																								
1	無傷/一時的な痛み																																																																																																								
危害の発生確率(Ph=F+Ps+A)																																																																																																									
晒される頻度/時間(F)	危険事象の発生確率(Ps)	回避可能性(A)																																																																																																							
4 連続的/常時	4 高い(起こりやすい)																																																																																																								
3 動作中頻繁/長時間	3 ありえる	3 不可能																																																																																																							
2 動作中数回/短時間	2 可能性あり																																																																																																								
1 まれ/瞬間的	1 低い(まれ)	1 条件付きで可能性あり																																																																																																							
		危害の発生確率(Ph)																																																																																																							
		3	4	5	6	7	8	9	10	11																																																																																															
危害の酷さ(S)	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11																																																																																															
	2	6	8	10	12	14	16	18	20	22		← リスク低減推奨																																																																																													
	3	9	12	15	18	21	24	27	30	33																																																																																															
	4	12	16	20	24	28	32	36	40	44		← リスク低減必要																																																																																													
①ロボットは店舗入り口と屋内駐車場内回収場所間の平坦な通路を移動する。 ②駐車場は施設されないため、客(乳児は除く)又は店員が経路上に存在する可能性がある。 ③ロボットは閉店後駐車場の車が退出後に経路を1周する。 ④ロボットは経路へ出発前に所定の充電場所へ移動する。 ⑤ロボットの運転寿命は20,000時間とし、ブレーキは1週間毎に点検する。																																																																																																									

(b) 表紙シート

対象ロボット名称	型式	基本仕様
立ち上がり動作支援スーツ	XXX-XXXX	<p>ロボットタイプ:高齢者及び身体障がい者向け下肢装着型ロボット(立ち上がりアシスト)</p> <p>外寸:500W×350D×1000H、質量:30kg(空気圧源除く)</p> <p>駆動源:0.5MPaコンプレッサ(別置き)又は圧縮タンク(椅子に付帯)、DC24Vバッテリー(電磁弁、制御用)</p> <p>関節機構:股関節屈伸、膝関節屈伸、足首屈曲(各々左右下肢)</p> <p>アクチュエータ:ゴム人工筋(マッキベン型)の拮抗配置(股、膝)、単独配置(足首)</p> <p>アクチュエータ駆動:小型電磁弁によるPWM駆動</p> <p>アシスト能力:股関節30Nm,90deg、膝関節20Nm,90deg</p> <p>アシストモード:立ち上がりパターン自動再生/マニュアル再生の切り替え、姿勢固定時のアシスト量可変</p> <p>制御方式:力制御モード、ハイブリッド制御モード</p> <p>装着方法:ベルト(腰部、大腿部、膝下、足首、足甲)、人工筋と関節部にはカバー</p> <p>安全機能:トルクセンサ+エンコーダによる関節角度とトルク監視(股、膝)、エンコーダによる関節角度監視(足首)、接触センサによる足裏接地確認</p>
		

(a) 基本仕様シート

対象ロボット名称		実施者	実施日																																																																											
立ち上がり動作支援スーツ		(担当者の所属) 立案者、チーム参加者、リーダー、承認者等	初回: 第1回改訂:																																																																											
ライフサイクル該当段階	装着、運転、保守	分析方法(ツール)	積算法(一部加算法を適用)																																																																											
使用上の制限	意図した使用	<p>①高齢者や身体障がい者が、椅子やベッドに腰掛けた状態から立ち上がり動作を訓練するために使用する。歩行は空気ホースの届く範囲で最小限可能。</p> <p>②立ち上がりパターンの設定、装着は介護者が行い、運転時も介護者が立ち会う。介護者は緊急停止(位置保持またはアシスト停止)が可能。</p> <p>③バッテリー充電/交換・保守等は、介護者が習得して行う。</p> <p>④装着者の立ち上がり訓練は有資格者による指導のもとに実施される。</p>																																																																												
	合理的に予見できる誤使用	<p>①装着不完全のままの運転。</p> <p>②介護者が誤った立ち上がりパターンを設定して運転する。</p> <p>③運転中に空気ホースが抜けてアシストがオフとなる。</p> <p>④介護者以外の第三者が装着あるいは停止させる。</p> <p>⑤立ち上がりパターン以外の動作や姿勢をとる。</p> <p>⑥歩行アシスト時の片足状態でバランスを失う。</p> <p>⑦アシスト力に抵抗して身体に負荷がかかる。</p> <p>⑧アシストがない状態で立ち上がり動作を行う。</p>																																																																												
	時意図制した空間/	<p>①屋内の病室内またはリハビリ用室内で、最大30分/日使用する。</p> <p>②使用場所には介護者以外の第三者が存在する可能性がある。</p> <p>③空気圧源は施設内配管口からホースで接続するが、小型独立コンプレッサまたは圧縮タンクから供給することもある。使用した空気は電磁弁からサイレンサを通して排出される。</p> <p>④バッテリー充電は特定場所で行い、充電済みバッテリーを交換する。</p> <p>⑤使用期間は20,000時間とし、人工筋と電磁弁は1ヶ月毎に点検する。</p>																																																																												
		<p>リスクの見積/評価基準</p> <p>算出式:リスク点数(R)=危害の酷さ(S)×危害の発生確率(Ph)</p> <p>判定基準:3≤R≤6 十分低い/無視できる(リスク低減は不要) 7≤R≤14 低い~中程度/条件付き受容/検討を要する(リスク低減を推奨) 15≤R≤44 高い/受容できない(リスク低減が必要)</p>																																																																												
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">危害の酷さ(S)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>4</td><td>重大障害(長期間治療)</td></tr> <tr><td>3</td><td>医療措置(短期回復)</td></tr> <tr><td>2</td><td>応急手当て回復</td></tr> <tr><td>1</td><td>無傷/一時的な痛み</td></tr> </tbody> </table>	危害の酷さ(S)		4	重大障害(長期間治療)	3	医療措置(短期回復)	2	応急手当て回復	1	無傷/一時的な痛み	<p>注:晒される頻度は、危険源の性質と経過時間を考慮する。装着時に発生する危険源に対しては、装着時間に対する運用時間に対して見積もる。</p>																																																																	
危害の酷さ(S)																																																																														
4	重大障害(長期間治療)																																																																													
3	医療措置(短期回復)																																																																													
2	応急手当て回復																																																																													
1	無傷/一時的な痛み																																																																													
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">危害の発生確率(Ph=F+Ps+A)</th> </tr> <tr> <th>晒される頻度/時間(F)</th> <th>危険事象の発生確率(Ps)</th> <th colspan="2">回避可能性(A)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>4 連続的/常時</td><td>4 高い(起こりやすい)</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3 動作中頻繁/長時間</td><td>3 ありえる</td><td>3</td><td>不可能</td></tr> <tr><td>2 動作中数回/短時間</td><td>2 可能性あり</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1 まれ/瞬間的</td><td>1 低い(まれ)</td><td>1</td><td>条件付きで可能性あり</td></tr> </tbody> </table>	危害の発生確率(Ph=F+Ps+A)				晒される頻度/時間(F)	危険事象の発生確率(Ps)	回避可能性(A)		4 連続的/常時	4 高い(起こりやすい)			3 動作中頻繁/長時間	3 ありえる	3	不可能	2 動作中数回/短時間	2 可能性あり			1 まれ/瞬間的	1 低い(まれ)	1	条件付きで可能性あり																																																				
危害の発生確率(Ph=F+Ps+A)																																																																														
晒される頻度/時間(F)	危険事象の発生確率(Ps)	回避可能性(A)																																																																												
4 連続的/常時	4 高い(起こりやすい)																																																																													
3 動作中頻繁/長時間	3 ありえる	3	不可能																																																																											
2 動作中数回/短時間	2 可能性あり																																																																													
1 まれ/瞬間的	1 低い(まれ)	1	条件付きで可能性あり																																																																											
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="11">危害の発生確率(Ph)</th> </tr> <tr> <th colspan="2"></th> <th>3</th><th>4</th><th>5</th><th>6</th><th>7</th><th>8</th><th>9</th><th>10</th><th>11</th> <th colspan="2"></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th rowspan="4">危害の酷さ(S)</th> <th>1</th> <td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td> <td colspan="2">← リスク低減推奨</td> </tr> <tr> <th>2</th> <td>6</td><td>8</td><td>10</td><td>12</td><td>14</td><td>16</td><td>18</td><td>20</td><td>22</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <th>3</th> <td>9</td><td>12</td><td>15</td><td>18</td><td>21</td><td>24</td><td>27</td><td>30</td><td>33</td> <td colspan="2">← リスク低減必要</td> </tr> <tr> <th>4</th> <td>12</td><td>16</td><td>20</td><td>24</td><td>28</td><td>32</td><td>36</td><td>40</td><td>44</td> <td colspan="2"></td> </tr> </tbody> </table>			危害の発生確率(Ph)													3	4	5	6	7	8	9	10	11			危害の酷さ(S)	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	← リスク低減推奨		2	6	8	10	12	14	16	18	20	22			3	9	12	15	18	21	24	27	30	33	← リスク低減必要		4	12	16	20	24	28	32	36	40	44			
		危害の発生確率(Ph)																																																																												
		3	4	5	6	7	8	9	10	11																																																																				
危害の酷さ(S)	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	← リスク低減推奨																																																																			
	2	6	8	10	12	14	16	18	20	22																																																																				
	3	9	12	15	18	21	24	27	30	33	← リスク低減必要																																																																			
	4	12	16	20	24	28	32	36	40	44																																																																				

(b) 表紙シート

危険源同定					リスク見積							
段階	No.	危険源	危険状態/危険事象	想定危害	対象者	危害の 酷さ S	危害の発生確率 Ph			リスク点 数 R	備考	
							頻度 F	確率 Ps	回避 A			
装着	1	本体の落下	固定用ベルトが緩くて、動作確認中に本体がずり落ちて足に衝突	足部の打撲	装着者	2	9	4	2	3	18	
	2	不適切な長さで装着	人体寸法にフィットせずに装着して、動作確認中に関節に過負荷がかかる	膝のねん挫	装着者	3	9	4	2	3	27	
	3	アシスト量の誤入力	介護者がアシスト量を過大設定して、動作確認中に急に立ち上がり転倒して手を着く	手首の骨折	装着者	4	9	4	2	3	36	
運転	4	本体フレームのこすれ	立ち上がり繰り返し動作中にベルトがずれて、本体ステータ部が膝部にこすれる	膝の擦過傷	装着者	2	7	4	2	1	14	
	5	空気ホースに引っかかり転倒	空気ホースに足が引っかかり、転倒して手を着く	手首の骨折	装着者	4	6	2	3	1	24	
	6	制御システムの故障により過大アシスト	制御装置の異常により、アシスト力が過大となり、関節に過負荷がかかる	膝のねん挫	装着者	3	7	2	2	3	21	
	7											装着により絶えず危険源に晒されるとした
保守	8	空気ホースによる衝撃	空気ホースコネクタ点検中に、加圧状態のホースが外れて目に当たる	眼球打撲	介護者、装着者	3	6	1	2	3	18	
	9	残留空気圧力の放出	残留圧力により膝下の不意の振り上げにより、顔を蹴り上げられる	顔面打撲	介護者	2	6	1	2	3	12	
	10	関節機構部への巻き込まれ	カバーを外して関節角度調整中、指を巻き込まれる	指の骨折	介護者	4	6	1	2	3	24	
	11											

(c) 初期リスクアセスメントシート

初期リスク分析結果				リスク低減			再リスク見積						
段階	No.	危険源	リスク点数 R	優先順位	保護方策(メーカーによる工学的手段)	危害の 酷さ S	危害の発生確率 Ph			リスク点 数 R	保護方策 組み合わせ時のR	残留リスク 方策(ユーザに依存)	備考(参照規格類等)
							頻度 F	確率 Ps	回避 A				
装着	1	本体の落下	18	1	テンションベルトの併用	1	9	4	2	3	9	4	過大なテンションに対する制限が必要
				4	落下防止帯の併用	2	4	1	2	1	8		
運転	4	本体フレームのこすれ	14	1	テンションベルトの使用	1	7	4	2	1	7	4	過大なテンションに対する制限が必要 トルク監視の安全性能は要検討
				3	適切な安全制御性能を持つ関節のトルク監視	2	4	2	1	1	8		
					安全制御性能はPsを1ランク下げるとして、危険側故障率を10-6未満にするという前提。 ただし、解説案のこの故障率の値とSIL PLとの関係は改めて検討。また、人的要因の含め方(重み付け)も必要に応じて考慮。								
保守	8	空気ホースによる衝撃	18	1	逆止弁の付加	1	5	1	1	3	5	3	(保護眼鏡の着用)
				4	ホースの結束	3	4	1	2	1	12		

(d) 再リスクアセスメントシート

図 3.2-9 装着型ロボット(立ち上がり動作支援スーツ)用ひな形シート

参考文献

- [1] JIS B 9700:2013, 機械類の安全性—設計のための一般原則—リスクアセスメント及びリスク低減, 日本規格協会
- [2] JIS T 14971:2012, 医療機器—リスクマネジメントの医療機器への適用, 日本規格協会

3.2.4 保護方策配置方法の概要

初期リスクアセスメント結果からリスク低減の必要が生じた場合, 図 3.2.2 の手順 5 の順序に従ったリスク低減方策の適用を行い, 適用するリスク低減手段のリスク低減効果はリスクアセスメントシートの再リスク評価により確認する. リスクを低減させる各種保護方策の適用順位は, 図 3.2.1 の優先度によることが合理的な戦略[1]とされており, 産業用ロボットを含めた一般産業用機械設備では, 図 3.2.10 に示すような保護方策の分類がされている.

同図において, ロボットメーカーが施すべき保護方策 (A~D) のうち, A, B, C は主に工学的的手段として実現する手段であり, メーカーは必要な方策を選定しなければならない. 既に機械安全規格[1]では標準方策が網羅されており, 主に B に属する安全防護物が規格適合品として市販されている. これらの安全防護物は, 図 3.2.10 に示すように人と機械の「隔離」と, 人が機械に近接したら「停止」するという安全原則に則っている. B に属する主要な装置類は図 3.2.11 のように分類され, 防護の目的別に選択される. このうち, 隔離目的のガード類は, 移動ロボットのように設けることが困難 (走行エリア全体をカバーできる場合を除く) であるため, 停止による安全防護 (主に人の接近を検知するセンサ類) に委ねざるを得ない. 一方, 作業者固定による安全防護は, 機械を手動操作する場合に適用され, 意図しない操作や無意識の誤操作による機械への動作指令を減らすための装置を使用する.

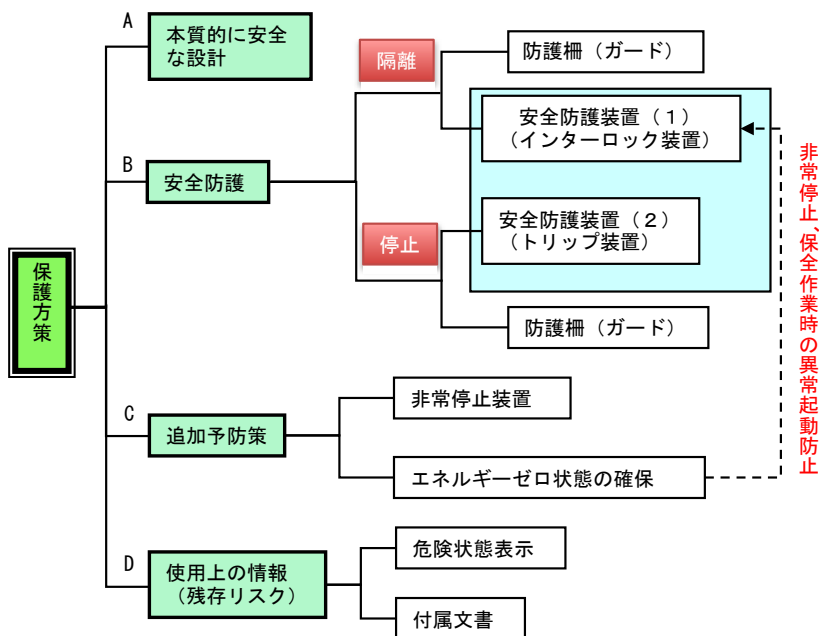


図 3.2-10 保護方策の種類と分類

これらはロボットの教示作業や手動操縦用に使用されている。

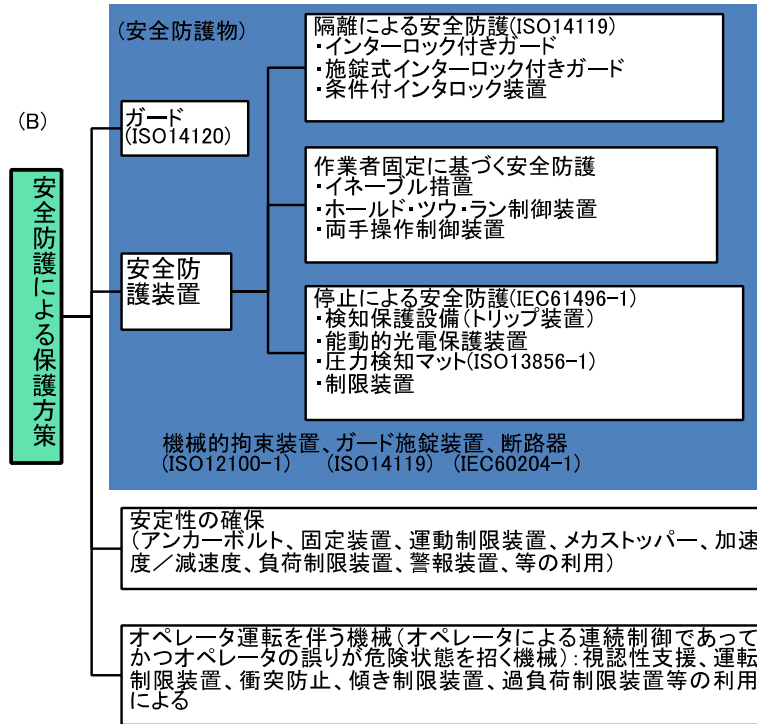


図 3.2-11 安全防護物の種類と分類

なお、以上の安全防護のための装置（保護装置という）については、電気的安全要件[2]，電気機械システム安全要件[3]，電気/電子/プログラマブル電子システム要件[4]などに該当する場合，これらの安全要求事項を満足する構造や安全性能が規定されている．対象機械に適用すべき保護装置類の構造や安全性能は，基本的にリスクアセスメント結果により目標が決定され選択する．

次に，本質的安全方策をふくめたリスク低減方策の系統的な分類を行い，各種方策，汎用基準値，適用例を包括的に把握するために一覧表を作成した．これは，対象危険源が危険事象，危害へと遷移する条件を FTA（故障樹解析）等を用いて要素に分解し，それらの要素の成立条件を明らかにすることにより，一般的方策の位置付けと分類を行う手法[5]を利用した．そして，規格や文献等から成立条件となる汎用基準値を求め，その値を満足する方策として本質的安全設計方策と安全防護物（保護装置類等）を挙げていくものである．

ここでは，人体に対して直接物理的作用を生じる一般的機械的危険源を対象にして作成した保護方策の一覧表を表 3.2.8 に示す．構成要件は全ての要素が成立しなければ危害に至らないという AND 条件で結びつけられる．したがって，各構成要件に対する一般的保護方策は，いずれか 1 つでも成立すれば（OR 条件）危害には至らないことになる．リスク低減方策の例はロボットに適用可能な手段のみリストアップした．なお，汎用基準値はロボット以外の機械設備も想定して記載したが，対象対象とする機械や人の属性により幅があり，全てのロボットに参考となるわけではないことに注意が必要である．また，この一覧表では保護方策を分類して当てはめただけであるので，該当する保護方策がない場合は使用条件の変更か運用段階での対応に委ねることになる．

表 3.2-8 主な機械的危険源に対する保護方策一覧表

No.	危険源	定義	構成要件 (AND関係)	一般的な保護方策	汎用基準値	リスク低減方策例			
						本質的安全設計方策	安全防護および補完的保護方策		
1	押しつぶし	人体を間において、2つの可動部が向き合って動く。または、1つの可動部が固定部に向かつて動くことにより、その最小間隔が、挟んだ人体より小さくなること	押し力	押し力排除					
				押し力軽減	1)可動ガードの基準値(保護有)150N 2)可動ガードの基準値(保護無)75N 3)電車のドア開め力50~500N以下 4)エレベータードア開め力150N 5)自動回転ドア残留閉じ力80N 6)アシストロボック225N 7)人体痛覚耐性値97.5N(上腕)	(過剰な)力出力抑制 バラッサ機構 逃げ機構(クラッチ等)	力出力制御(監視)		
				対抗力	対抗力排除 対抗力軽減	(押し力と同様)	(押し力と同様)		
				間隔が人体より小さくなる	間隔を確保する	最小隙間(指25mm~胴体500mm) 通路の安全隙間(幅0.5m以上、高さ2.1m以上)	可動部との間隔確保 移動体通路間隔確保 アクチュエータのストローク抑制	可動部カバー メカストップ ロックピン 相対位置監視	
				人体が間にある	押しつぶしの区域に、人体を間に入れない	機械プレス安全金型8mm シュレッター開口部4mm以下(刃先距離2mm) 安全距離(最小隙間と関連)	形状効果(隙間と距離関係)	可動部カバー ガード、フェンス オブスタクル	
	人存在との相互インタロック(押し力、対抗力、間隔)	安全性能(カテゴリ、PL、SIL)	多重化、診断機能	ガードインタロック トリップ装置(センサ) 力・位置制御(停止・回避)					
2	せん断	互いに逆向きで平行な2つの力(せん断力)が作用し、人体を挟むこと	せん断力	せん断力排除 せん断軽減	自動回転ドア残留閉じ力80N	(過剰な)力出力抑制 逃げ機構(クラッチ等)	力出力制御(監視)		
			2つの力の間隔	力の間隔を十分に広げる	25mm以上(指)				
			挟み開口間隔が人体より小さくなる	開口間隔を確保する	最小隙間(指25mm~胴体500mm)	可動部との間隔確保	可動部カバー メカストップ ロックピン 相対位置監視		
			人体が間にある	人体を間に入れない	安全距離(最小隙間と関連)		可動部カバー ガード、フェンス オブスタクル		
	人存在との相互インタロック(せん断力、2つの力間隔、開口間隔)	安全性能(カテゴリ、PL、SIL)	多重化、診断機能	ガードインタロック トリップ装置(センサ) 力・位置制御(停止・回避)					
3	切断	鋭利なエッジまたはエッジ状のものがあ る 人体と接触	エッジを丸める		R加工、面取り				
			エッジ高さを削減		面取り	スリーブ			
			エッジを動かさない 人体と接触させない 人体を動かさない	安全距離(最小隙間と関連)	内蔵化	カバー、ガード			
	人存在との相互インタロック(エッジの存在)	安全性能(カテゴリ、PL、SIL)	多重化、診断機能	ガードインタロック 力・位置制御(停止・回避)					
4	引き込み	回転部と固定部、または引き込み部と固定部の摩擦効果や形状効果により、人体や衣服を掴み、引込むこと	1つの回転力あるいは直進運動力	接線力軽減:回転トルクを軽減 接線力軽減:回転半径を拡大 直進力軽減		(過剰な)力出力抑制 (過剰な)力出力抑制	力出力制御(監視)		
			移動側(回転部、直進運動部)の拘束点	摩擦軽減 凹凸排除	ローラ溝(8mm幅、4mm深さ)	スライド可動部フラット化			
			十分小さい隙間	印刷機ローラ6mm		カバー、ガード			
			十分大きい隙間	最小隙間(指25mm~胴体500mm) 印刷機ローラ120mm	可動部の配置				
			固定部排除						
			固定力軽減						
			人体または衣服の端の接触	人体、衣服を接触させない	安全距離(最小隙間と関連) IPコード	可動部の配置	カバー、ガード、オブスタクル		
	人(衣服)存在との相互インタロック(2つの移動力、拘束点、固定部の存在)	安全性能(カテゴリ、PL、SIL)	多重化、診断機能	ガードインタロック トリップ装置(センサ) 力・位置制御(停止・回避)					
	運動する物体が人体に衝突し、物体の運動エ	物体の運動エネルギー(含む位置エネルギー)	運動エネルギー低減:速度低減	1)可動ガードの閉運動エネルギー(保護有:10J以下) 2)可動ガードの閉運動エネルギー(保護無:4J以下) 3)安全帯:5kN以下 4)人体転落5kN(1m高さ) 5)自動車衝突AIS、HIC	(過剰な)速度抑制	減速制御(監視)			
			運動エネルギー低減:質量低減		軽量化 飛散物の細粒化(安全ガラス等)	カバー ガード			

表 3.2-8 の続き

5	衝撃	エネルギーにより人体等に傷害や損傷を与えること(ここでは人の方から物体に衝突する場合は含まない)	人への衝突	立	衝突回避	総合システム停止性能		落下防止チェーン、ネット、止め具 ガイド機構
				常時成立	エネルギー伝達の遮断	頭蓋骨損傷: 6kN以上(保護帽衝撃伝達: 5kN以下)	クラッシュアブルシャーシ トルクリミッタ、クラッチ	パンパ、保護帽、緩衝材
6	突き刺し	固定または可動する尖った部位で、人体を突き刺すこと	尖り部位	常時成立	尖りを丸める 断面積を拡大する 尖り点数増加 押し力軽減	(エッジと同様に考えられるが、具体的な数字なし)		
				常時成立	押し力軽減			
			人体との接触	常時成立	人体との接触排除 対抗力軽減	安全距離(最小隙間と関連) 安全靴の踏抜き強度: 1.1kN以上		カバー、ガード、フェンス
				常時成立	対抗力軽減			
7	こすれまたは擦りむき	人体が擦られ、熱的または物理的に損傷を受けること(エッジは切断に含む)	擦る物体	常時成立	摩擦係数を軽減 表面粗さ軽減			
				常時成立	運動軽減 押し力軽減			
			人体の一部の接触	常時成立	人体との接触排除	安全距離(最小隙間と関連)		カバー、ガード、フェンス
				常時成立	人存在(運動)との相互インタロック(擦る物体の存在・運動)	安全性能(カテゴリ、PL、SIL)	多重化、診断機能	ガードインタロック トリップ装置(センサ) 力制御

参考文献

- [1] JIS B 9700:2013, 機械類の安全性—設計のための一般原則—リスクアセスメント及びリスク低減, 日本規格協会
- [2] JIS B 9960-1:2008, 機械類の安全性—機械の電気装置—第1部: 一般要求事項, 日本規格協会
- [3] JIS B 9705-1:2011, 機械類の安全性—制御システムの安全関連部—第1部: 設計のための一般原則, 日本規格協会
- [4] IEC 61508 series:2010, Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related system.
- [5] 機械・リスク低減方策技術, 安全技術応用研究会, 2012

3.3 機能安全設計支援ツール [JC]

3.3.1 ハードウェア支援ツールの開発

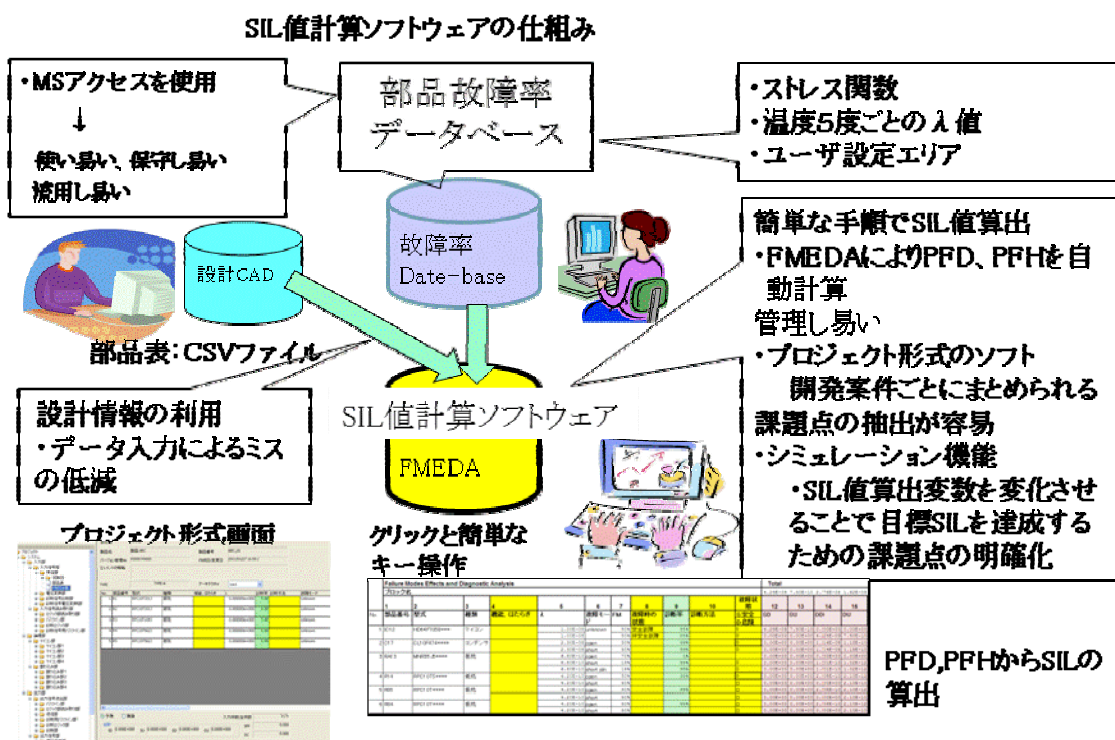
3.3.1.1 目的

生活支援ロボット実用化プロジェクトにおいて、安全関連系に組み込まれるハードウェアの安全度水準（SIL； Safety Integrity Level）が要求される安全度水準を満たしていることを、確率論的に故障確率の評価を行って検証する必要があるが、この作業は、煩雑な検証評価作業でもある。この作業の省力化を支援し、安全度水準(SIL)の算出の標準化を行うため、ソフトウェア「PROH-SIL」の研究開発を行った。

3.3.1.2 概要

本ツールでは、電子部品等の1つ1つの故障率データのデータベースを作成し、故障率データを共通化フォーマットに標準化した。

本ツールは、本データベースと電子回路設計CADの部品リストとをリンクし、自動的にFMECA表を作成し、FMECA作業を行うことで生活支援ロボットの安全部の危険側故障率を自動的に計算できるソフトウェア構成とした。この結果、安全度(SIL値)の計算の信頼性が上がり、その精度の向上を図ることができた。



安全度(SIL値)の計算には、いくつかのパラメータが関連している。計算の過程で、これらパラメータの値を決定すると、安全度水準(SIL値)が算出されてくる。本ソフトウェアの付加機能として、SIL計算に関連するパラメータを変化させることで、安全度(SIL値)の変化をシミュレートする機能を設けた。これを利用し、各種パラメータの変化と安全度(SIL値)の関係付けを行い、それらを図表等で表示することで、安全度(SIL値)のシミュレーションを行うことができる。

3.3.2 ソフトウェアのひな形（決定論的原因故障）

3.3.2.1 目的

本研究開発は、ソフトウェアの SIL 対応の技術と方法のひな形を示し、ソフトウェアの信頼性を確保するための決定論的原因故障の低減策のひな形を研究開発することを目的とする。

3.3.2.2 特長

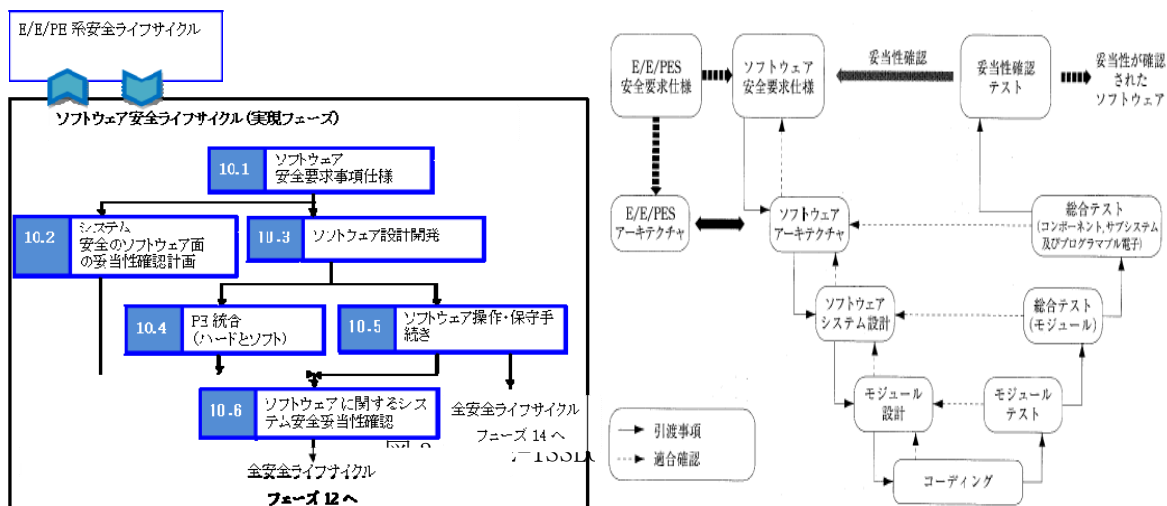
ソフトウェアの目標安全度を達成するため、その安全度レベルに応じた技術や方法を選択することを IEC61508 は求めている。ここでは、SIL2 レベルを達成するため必要な技術や方法のひな形を提示する。また、一部 SIL3 レベルの技術や方法も提示する。本ひな形は、パソコンを使用した事例である。

3.3.2.3 ドキュメントのひな形

(1) 文書(ドキュメント)の解説

a) ソフトウェア安全ライフサイクル

各ソフトウェア安全ライフサイクルで要求される文書をひな形として作成し、提示する。



左上の図がソフトウェア SSLC である。

b) Vモデル

ソフトウェアの開発工程は、右上図のようなV字型のブロック図で表される。これは、Vモデルと呼ばれる。IEC61508-3 では、この工程でソフトウェアを開発することが推奨されている。文書は、ソフトウェア開発時における決定論的原因故障の対策の証拠である。その文書の内容は、規格で要件として規定されている。ひな形では、その要件に従った文書を作成している。

3.3.3 状態遷移図による SIL 計算

3.3.3.1 目的

ハードウェアの危険側故障率は、IEC61508-6 に提示されるモデル式に従って計算する。このモデルは、冗長チャンネルが同じ危険側故障率であることが前提になっている。状態遷移図による SIL 計算は、多様化冗長系に使用するためのものである。状態遷移図によるマ

マルコフモデルでの PFD, PFH の算出の研究開発を行い, そのソフトウェアの実用化を行った.

3.3.3.2 特長

状態遷移図による SIL 計算は, IEC61508-6 で提示されるハードウェア構成モデルの冗長化チャンネルにおいて, チャンネルごとに危険側故障率が異なるとして, 指定時間経過後の危険側故障率を状態遷移図を用いてマルコフモデルで計算する.

マルコフモデルは以下の 6 つのモデルについて作成した.

- ①. 1oo1 ②. 1oo2 ③. 2oo2 ④. 2oo3 ⑤. 1oo3 ⑥. 1oo2D

3.3.3.3 状態遷移図 1oo2 の例

1oo2 は, IEC61508 の信頼性ブロック図モデルを基に作成すると左した図になる.

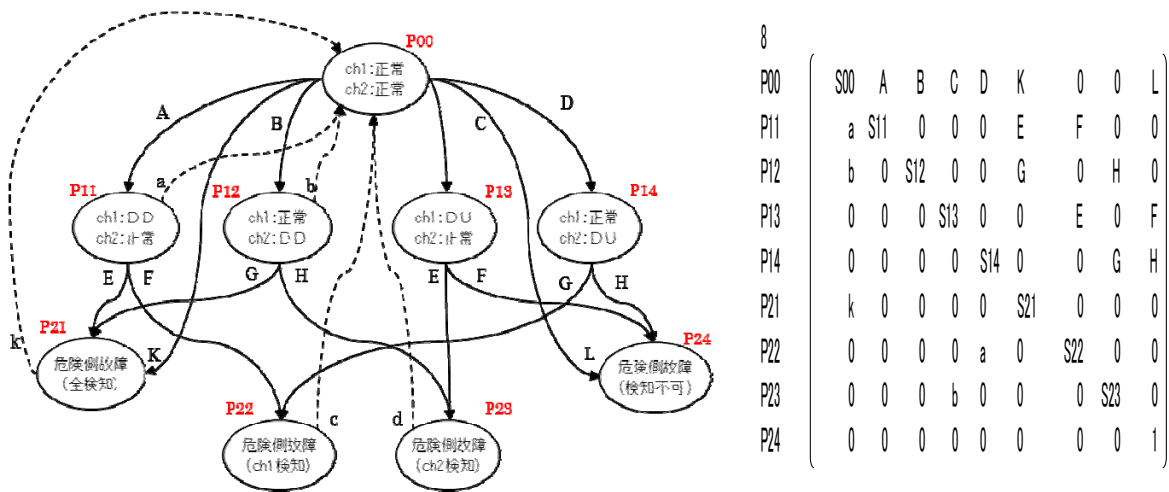


図 3.3.3.3-1 1oo2 状態遷移図とその行列式

P00 の正常状態から, チャンネル 1 が正常でチャンネル 2 が故障になる場合とチャンネル 2 が正常でチャンネル 1 が故障になる場合に分けて状態遷移図を作成する. この時, チャンネル 1 とチャンネル 2 の危険側故障率は異なるとして遷移を展開する. この状態遷移図より 1oo2 の行列式が求められる. この式を解いて PFD, PFH を算出する.

詳細は付属書 E.1 から E.3 及び E.3.1 を参照のこと.

3.4 物理演算による事故シミュレーションツール [産総研]

3.4.1 目的

生活支援ロボットは萌芽段階にあるロボット分野であり、その事故については知見が十分に得られていないので、事故のリスクを評価することに特有の困難さがあると考えられる。この問題を解決するために、コンピュータシミュレーション上で仮想的に事故を起こしてみることができるシミュレータ（以下「インタラクティブ事故シミュレータ」）を構築して、今後起こり得る事故を可視化できるようにする。この研究開発の成果物はプロジェクトで整備するデータベースに入力されデータベースの公開条件の範囲で利用可能になる。

3.4.2 仕様概要

商用のゲームシミュレータ「Unity」上でロボット使用環境などのモデルを統合して「インタラクティブ事故シミュレータ」を構築する。Unityに内蔵されているシミュレーションエンジンは仮想世界ゲーム「SecondLife」のバックエンドに使われているもので、機構解析系シミュレータやFEM強度シミュレータよりもシミュレーション精度に劣る反面、リスク評価者に高いインタラクティブ性と直感的な事故の体験を提供できる。データとして、6パタンの想定使用環境、3パタンの属性のユーザモデルと4タイプのロボット、11種の事故発生のイベントと200種の物品のデータを用意した。シミュレータ上で自律動作するロボットはそれぞれの想定環境内で一定の繰り返し動作をし、人が操作するロボットはリスク評価者が操作するアバターとの間の拘束条件に従って動作する。全てのオブジェクトは運動時に周囲との接触判定をしており、接触時には反力で挙動が変わるか、あるいは接触物の組み合わせに対応付けられた事故のイベントが発生する。搭乗型のスリップ転倒時の挙動モデルは自動車事故シミュレータ「PC-Crash」で物理シミュレーションを行った結果を読み込んでシミュレーション精度を向上している。

シミュレータ上ではユーザが仮想空間でロボットを操作する事ができ、その結果はリアルタイムで計算されて仮想世界とのインタラクションが可視化される。その中で以下のような事故が起こり得る。

- (1) 生活安全ロボットが、住宅の内装（カーペット・カーテン等）を巻き込み身動きが取れなくなる。
- (2) 生活安全ロボットが、室内の階段昇降時にバランスを崩して転倒する
- (3) 生活安全ロボットが、暖房器具と接触・転倒し、倒れた暖房器具から出火する
- (4) 生活安全ロボットが、棚と衝突して、落ちてきた棚上の置物（本・花瓶など）で怪我をする
- (5) 生活安全ロボットが、人が着座中の椅子をひっかけ、椅子に着座中の人物を巻き込んで転倒する
- (6) 生活安全ロボットが、高速で柔らかい路面に侵入したとき、スタックして身動きが取れなくなる
- (7) 生活安全ロボットが屋外で水たまり等の路面に差し掛かったとき、スリップして転倒する
- (8) 生活安全ロボットが、公園の側道を走行中に飛び出してきた子供と衝突して転倒する
- (9) 生活安全ロボットが、公園の建造物に引っ掛かって転倒する
- (10) 生活安全ロボットが、柔らかい路面（土、砂場など）に侵入時、足を取られてバランスを崩して転倒する
- (11) 生活安全ロボットが、縁石を乗り越えようとしてバランスを崩して転倒する

- (12)生活安全ロボットが、坂道を下るとき、自重による加速が制動能力を超えてしまい、暴走する
- (13)生活安全ロボットが、バスへの搭乗時にバランスを崩して転倒する
- (14)生活安全ロボットが、急勾配の坂道に侵入したとき、パワー不足でバランスを崩して転倒する
- (15)生活安全ロボットが、小さな足場（脚立などの上）に立ったときにバランスを崩して落下・転倒する
- (16)生活安全ロボットが、オフィス内の配線に引っかかって転倒する
- (17)生活安全ロボットが、街角の人混みの中で通行人と接触して転倒する
- (18)生活安全ロボットが、エレベータ搭乗時に床との溝に引っ掛かり転倒する
- (19)視覚障害者が、障害物を認識できずに足を取られて転倒する

3.4.3 実装

実装の詳細は以下である.

- **プラットフォーム**:米ユニティ・テクノロジーズ社製 3D ゲームエンジン「Unity」ver. 4.0.1 (図 3.4.3-1)
- **ロボット使用環境モデル**: 6 パタン (図 3.4.3-2)
和風住居, 洋風住居, オフィス, 病院, 公園, 市街地 (バス, 電車含む)
- **ロボットユーザモデル**: 3 パタン (図 3.4.3-3)
成人男性, 成人女性, 老人男性, ただし関節障害と歩行障害のバリエーションとして腰関節不自由, 下半身片麻痺, 肘関節不自由のパラメータ調整を含む
- **タイプ別のロボットモデル**: 4 パタン (図 3.4.3-4)
搭乗型, 装着型, 移動作業型 (操縦中心), 移動作業型 (自律中心)
- **事故発生イベント**: 11 種
 - ▶ 搭乗型
 - 走行時に自分から重量物にぶつかる
 - 走行時にバスマットなど, μ が低い物体を轆いてスリップする
 - 走行時に 10 c m以上の高さから落ちて転倒する
 - 走行時に横からぶつけられる
 - 走行時に他人を撥ね飛ばす
 - ▶ 装着型
 - 歩行時に自己, 他者の影響で転倒する
 - 歩行時に自分から重量物にぶつかって転倒する
 - 歩行時に μ の低い物体に載って転倒する
 - 歩行時に段差を踏み外して転倒する
 - ▶ 移動作業型 (操縦中心)
 - 人や物と衝突して跳ね飛ばす
 - ▶ 移動作業型 (自律中心)
 - 人や物と衝突して跳ね飛ばす

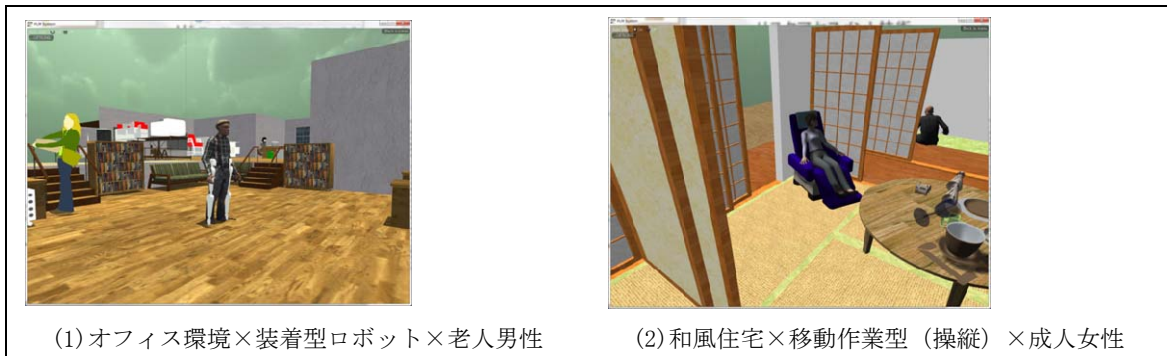


図 3.4.3-1 インタラクティブ事故シミュレータ実行例



図 3.4.3-2 ロボット使用環境モデル



図 3.4.3-3 ロボットユーザモデル



搭乗型



装着型



移動作業型（操縦中心）



移動作業型（自律中心）

図 3.4.3-4 生活支援ロボットのロボットタイプ（4タイプ）

3.4.4 メーカー評価結果

3.4.4.1 中間技術評価

2012年にプロジェクト参加全開発メーカーに対してアンケートによる中間技術評価を依頼し、表3.4.4.1-1、表3.4.4.1-2、表3.4.4.1-3に示すような回答を得た。この結果、ロボット使用環境モデル、ロボットユーザモデル、事故イベント数の3項目の評価について相対的に得点が低いことが分かった。また自由記述からはパラメトリックなシミュレーションのニーズやより多様な事故シナリオの作り込みのニーズがあることが伺える。この後の改修により評価の得点が低い3項目について拡充を行った。自由記述の指摘事項については今回の開発計画で対応できない物もあるが、一部は改修で対応した。

表 3.4.4.1-1 中間技術評価アンケート調査の回答の概要

属性	値
実施日	2012/12/10
有効回答数	8
回答者の開発経験年数（平均）	7.1年（1名無回答）
回答者の安元開発経験	全員有り

表 3.4.4.1-2 中間技術評価アンケート調査の結果

質問番号	質問文	結果
質問項目1 (5段階評価)	将来の生活支援ロボットのリスクを評価するに当たって、シミュレーション環境が整備されていると役に立つと考えられるでしょうか？	3.625
質問項目2 (記述)	シミュレーションを用いたリスク評価について改善点やコメントがありましたら教えて下さい	別記 次表項目2
質問項目3 (5段階評価)	物体の質感のシミュレーション精度は3Dゲームのレベルで十分でしょうか？	3.375
質問項目4 (5段階評価)	挙動のシミュレーションの精度は3Dゲームのレベルで十分でしょうか？	3.125
質問項目5 (記述)	ゲームシミュレーションの計算について、改善点やコメントがありましたら教えて下さい	別記 次表項目5
質問項目6 (5段階評価)	用意している想定使用環境（5場面）は十分でしょうか？	2.375
質問項目6 (記述)	十分ではない場合、どのような想定使用環境の追加が考えられるでしょうか？	別記 次表項目6
質問項目7 (5段階評価)	用意しているロボットユーザ属性（3パターン）は十分でしょうか？	2.125
質問項目7 (記述)	十分ではない場合、どのようなユーザ属性の追加が考えられるでしょうか？	別記 次表項目7
質問項目8 (5段階評価)	用意している事故発生のイベント（11イベント）は十分でしょうか？	2.375
質問項目8 (記述)	十分ではない場合、どのようなイベントの追加が考えられるでしょうか？（ご示唆を頂けますと幸いです）	別記 次表項目8
質問項目9 (5段階評価)	用意しているロボット以外の物品の種類（約200種）は十分でしょうか？	3.625
質問項目9	十分ではない場合、どのような種類の物品の追加が考えられるでしょうか？	別記

(記述)	か？ (リスクアセスメントの経験などを踏まえましてご示唆を頂けますと幸いです)	次表項目 9
質問項目 10 (記述)	シミュレーションに使われているデータについて、改善点やコメントがありましたら教えてください	別記 次表項目 10
質問項目 11 (記述)	要望やご提案、コメントなどありましたらお聞かせ下さい	別記 次表項目 11

表 3.4.4.1-3 中間技術評価アンケート自由記述欄のコメント

項目	記述
2	<ul style="list-style-type: none"> ● 車輪型で環境を移動するロボットの場合：リスク評価よりもリスク教育に利用できないか。 装着型で脚移動するロボットの場合：このシミュレータは移動時のシミュレーションを意図しているが、装着型ロボットは人の四肢の動きと一緒に動くため、移動にまつわるリスクは装着型ロボットが無い状態と大きく変わらない。ただし装着型ロボットの総重量が体重を大きく上回る場合などは、他者や障害物との衝突力の見積りがシミュレーションできた方が良い。(現状ではそのようなロボットは無い) 肉骨筋とその動的な特性が含まれた人体の力学シミュレータと、傷害に至る可能性のある負荷のデータベースがあれば、装着型ロボットの意図する動きをしたときのシミュレーションができて有用と思える。 ● シミュレーションと現実の相関が取れない限りは、危害の酷さに関してでも、指標に用いることもできません ● 実際発生するリスクと同程度であるという相関関係をはっきりしていれば役に立つと思われる ● 使用していないので分からない ● ロボットのモデルを反映させる手間が非常にかかるようであれば、使用しにくい物になると思われる。CAD からシミュレーション環境へ簡易にモデルを反映できると良い。 ● 高齢者や身体障害者の身体/認知特性(皮膚、運動能力、判断能力等)を考慮したリスク評価 ● 操縦でも自律でもない自動ロボットがありません ● 装着型については、対環境の要因以外に装着者そのものの要因があり、シミュレーション可能なか疑問である。
5	<ul style="list-style-type: none"> ● 精度がどのくらいか見積もられていれば良いと思える。スケールが合っていれば、シミュレーションを利用して当たりを付けることができる(衝突やスピン、空転、脱輪の程度が分かるというレベル)。実際の安全性評価のために利用するならば、ボーダーに近いロボットをゲーム用のもので評価して良いかは課題。また表面に弾性体を貼った場合の挙動や、接触による制御やストップを正しく模擬できるかも課題があるとおもわれる。 ● 目的がわからない。例えば転倒にしる、倒れ方を再現したいのか、転倒時の頭部などの加速度を再現したいのか。どちらにしても、現実と相関が取れない以上はイメージ絵と大差がない。 ● リスク評価の方法が各種選択できればよい。(リスクグラフ法、加算法、積算法・・・) ● ゲームとかではなく、きちんとシミュレーションできていることが大事 ● 上記ユーザ特性に加え、ロボットの動作や変形に伴う挟み込みや生活パターンを考慮した計算が望ましい ● 衝突された歩行者の、地形による挙動、危害について計算されているのでしょうか。
6	<ul style="list-style-type: none"> ● 斜面、凹凸のある路面など、屋外を意図したものが少ない。 子供が駆けまわる、寄ってくる、触ってくる、タックルしてくるなど、子供の動作パターンが含まれたエージェントが複数いる場合を模擬できないか。

	<ul style="list-style-type: none"> ● 各ロボットの適用範囲によるので、生活支援ロボットが広いため不足かと ● 屋外であれば、道路や歩道、踏み切りなど多様な環境がある。 ● 想定環境は、多い方が良い（シミュレーションで作れるだけ） ● 上記ユーザ特性に加え、ロボットの動作や変形に伴う挟み込みや生活パターンの考慮が必要 ● 都心、公共機関へのアクセスや、乗降
7	<ul style="list-style-type: none"> ● 外見だけが異なるのであれば、特に3パターンもいらぬ。装着型で言えば、複数の歩容を再現できるエージェントが入れば良い。 ● 実際の環境では、障害者や子供、ペットなども必要。 ● 想定環境は、多い方が良い（シミュレーションで作れるだけ） ● 高齢者や障害者を想定した場合に、拘縮や、円背等により、リスクが増加する可能性がある。左記のようなユーザを選択できるとよい ● 高齢者や身体障害者の身体／認知特性を考慮したモデル（高齢者の場合要介護度別のモデルなど） ● 年齢性別の他に、耳が遠い、何かに熱中している、といった付加的な状態 ● 高齢者の特性には幅があり、細分化が必要
8	<ul style="list-style-type: none"> ● 運動にばかり指向しすぎているように思える。例えばコンロに衝突したらコンロ側のハザードを起こし得る。あるいは挟み込み、低EMC性能、発熱、漏電するロボットを使った場合に、どういう事象が起こるかをシミュレートできないか。（おそらく既知のパターンを作りこむことになるので、シミュレーションというよりは教材としての意味合いが強くなると思われる。それはそれで重要と思う） ● リスク評価のどこに用いるのかわからないのでコメントできません ● 事故発生イベントが ● 想定環境は、多い方が良い（シミュレーションで作れるだけ） ● ロボティックベッドの場合、移動だけではなく、車いすが変形する可能性がある。こういった場合のシミュレーションも出来ると良い。 ● ロボット変形に伴う挟み込みなど ● 衝突以外で、例えば乗降時、または急減速時といったイベント ● 装着型では、対環境の要因ではないが、ロボットの許容動作以外の動作を装着者が行った場合なども事故の要因になると思う
9	<ul style="list-style-type: none"> ● 物品数でなくて、角があるか、重量はどのくらいか、等の属性がリスク評価には重要なのではないでしょうか ● 想定環境は、多い方が良い（シミュレーションで作れるだけ） ● 実際に使用してみないと分からない。 ● わかりません
10	<ul style="list-style-type: none"> ● ロボット側の制御の影響をどう入れ込むか？実際のロボットのソフトウェアやファームウェア、センサ、電気回路をそのまま入れ込むことは難しいように思える。 ● きちんとシミュレーションできていることが大事 ● 同上 ● 少なくとも数例については具体的な商品で当てはめてツールの有用性・妥当性を確認し、実用視点で必要な改善・フィードバックを行うことが望ましい。
11	<ul style="list-style-type: none"> ● 既知のハザードのデータベースを環境中にすべて詰め込めると、ロボットにかぎらず教育用のシミュレータとして良いと考える。このようなシミュレータで学習した人材がリスクアセスメントをすると効果が高いのではないか。 ● 下記をどのように算出するのかをしっかりと考えて開発することが必要である。・リスクをどのよ

<p>うに算出するのか？（例：リスク＝危害の大きさ×発生頻度×暴露頻度）・危害の大きさや発生頻度、暴露頻度等をどのように算出するのか？</p> <ul style="list-style-type: none"> ● きちんとシミュレーションできていることが大事です ● 最終的に、危害のひどさや、発生頻度までシミュレーションである程度出せるようになると良いと思う。 ● 類似のカテゴリ商品の過去のヒヤハット・事件事例およびそれらの統計データが簡単に参照できると良い ● 生活支援分野でのロボット開発に関わる者としては、このようシミュレータが開発されることに非常に期待しています。将来発生する可能性のある現象を可視化することでより危害を実感でき、安全対策のモチベーションを上げるとともに、必然的にその精度も向上するものと考えます。できればシミュレータが安全防護の過不足を指摘したり、危険事象発生確率やSILレベルに基づいたリスクを可視化することで、より具体的な開発支援ツールとなれば良いかと思います。 ● シミュレーションはロボットを活用するのに適した環境をわかり易く提示するのには有用であると思う。

3.4.4.2 最終技術評価

2013年にプロジェクト参加全開発メーカーに対してアンケートによる最終技術評価を依頼し、表3.4.4.2-1、表3.4.4.2-2、表3.4.4.2-3に示すような回答を得た。定量的評価については平均ですべて肯定的な値(>3)となった。今後の課題として生活支援ロボットの具体的な使用状況を具体的に実装する必要性を挙げることができる。

表 3.4.4.2-1 最終技術評価アンケート調査の回答の概要

属性	値
実施日	2013/11/20
有効回答数	4
回答者の開発経験年数（平均）	14.25
回答者の安元開発経験	全員有り

表 3.4.4.2-2 最終技術評価アンケート調査の結果

質問番号	質問文	結果
1. シミュレーションを用いた危険源の同定について:	【質問】将来の生活支援ロボットの危険源を同定するに当たって、シミュレーション環境が整備されていると役に立つと考えられるでしょうか？	3.750
	【コメントのお願い】シミュレーションを用いた危険源の同定についてコメントがありましたら教えて下さい	別記 次表項目 1
2. シミュレーションを用いた事故の重篤度の評価について:	【質問】将来の生活支援ロボットの事故の重篤度を評価するに当たって、シミュレーション環境が整備されていると役に立つと考えられるでしょうか？	4.000
	【コメントのお願い】シミュレーションを用いた重篤度の評価についてコメントがありましたら教えて下さい	別記 次表項目 2
3. シミュレーションを用いた事故の頻度の評価について:	【質問】将来の生活支援ロボットの事故の頻度を評価するに当たって、シミュレーション環境が整備されていると役に立つと考えられるでしょうか？	3.250
	【コメントのお願い】シミュレーションを用いた頻度の評価についてコメントがありましたら教えて下さい	別記 次表項目 3
4. シミュレーションを用いたリスク低減方策の検討について:	【質問】将来の生活支援ロボットのリスク低減方策を検討するに当たって、シミュレーション環境が整備されていると役に立つと考えられるでしょうか？	3.000
	【コメントのお願い】シミュレーションを用いたリスク低減方策の検討についてコメントがありましたら教えて下さい	別記 次表項目 4
5. (全般)シミュレーションを用いたリスクアセスメントの実施について:	【質問】将来の生活支援ロボットのリスクアセスメントをするに当たって、シミュレーション環境が整備されていると役に立つと考えられるでしょうか？	3.750
	【コメントのお願い】シミュレーションを用いたリスクアセスメントについてコメントがありましたら教えて下さい	別記 次表項目 5
6. その他、自由記述:	【コメントのお願い】要望やご提案、コメントなどありましたらお聞かせ下さい	別記 次表項目 6

表 3.4.4.2-3 最終技術評価アンケート自由記述欄のコメント

項目	記述
1	<ul style="list-style-type: none"> ● 直感的な気づきのためであれば、リアルでなければならず、状況を提供するだけなら写真でよいと思います。また、いずれにしても皆が共通の映像を見れば、RAの個人差は幾分か減るのかなと思いました。 ● 結局、転倒と衝突のハザード以外に無いように見える。動画では、様々な転倒と衝突のシチュエーションが出てきたが、その多くはメーカーが技術的に制御できない部分が多く、ロボットの有無に関わらず、生活空間におけるリスクを3Dグラフィクスによって提示しているだけに見える。
2	<ul style="list-style-type: none"> ● 衝突時や転倒時のHICのシミュレータとしては使えるかもしれない。その他、特に圧力が問題になるケースなどの事故の重篤度は評価できないのではないかな？
3	<ul style="list-style-type: none"> ● シミュレーションだと、既知の頻度を事前に組み込まねばならず、頻度の評価にはならない。障害物の密度なども同様のことが言えると思う。
4	<ul style="list-style-type: none"> ● ただし、受け身になって画一的に対策しようとする、状況や環境が異なる場合に対策が新しい危険源を生み出すことに気づかないケースがあるかもしれない。 ● シミュレータにリスク低減方法を組み込め、かつ、そのリスク低減方法のfailure modeをうまく組み込めるだろうか？例えば障害物センサから、ブレーキ始動、静止まで考えたとき、それぞれにかかる時間を設定したり、どれかがfailするモードを設定することになるだろう。これらが

	設定できるのであれば、そのリスク低減が有効かは、シンプルなモデルを使って手計算で解けるレベルではないのか？
5	<ul style="list-style-type: none"> ● 問2, 3とほぼ同じ質問だと思います。 ● このシミュレーションはロボットの有無にかかわらず、生活空間にあるリスクを理解するには役立つと思う。なので、生活支援ロボット特有のリスクアセスメントには役に立たない可能性がある。
6	<ul style="list-style-type: none"> ● リスクアセスメントを全くしらない初心者向けには良いかもしれません。対策されたものが新しい危険源を生み出す事例も表現し、そのようなことがあることを知らせる方が良いと思います。 ● 開発 ご苦労様です。シミュレーションは、ご存知の通り条件をどの様に設定するかです。画像を見る限り回りの条件（道路の現実の写真を取り込み等）が出来れば何が危険を発生させているかを社会に問うことが出来ます。日本の歩行者が歩く所は、ゴミ箱、自転車、車等が置かれ危険を増長しています。建屋内は、条件設定が明確に出来ますが、外は条件設定が明確に出来ませんのでこの様な事を申し上げております。当方が開発しているのは、配送センター、工場内ですので確実に条件が設定可能です。頑張ってください。 ● シミュレーションは将来役立つレベルになるかもしれないが、ロボット毎に使用環境や使用者の身体・認知状況がまちまちであるため、こうしたものがモデルとして実装できるかがポイントになると感じる。シミュレータの守備範囲を明確にし、人によるアセスメントの役割分担が必要になるのでは無いか？シミュレータ構築には、信頼できる事故事例などのハザードのデータベース構築が肝要と思われるが、これまでの状況からするとこうしたデータの収集が難しいのではないかと感じるので、ここの道筋がつき、データベースが提供されれば、これだけでもかなり役に立つように思う。

3.4.5 研究成果

研究成果に関しては、シミュレーションの結果得られた事故動画のアーカイブをDVDへ記録し、さらに同DVDフォーマットのデータを当研究プロジェクトで整備するデータベースに入力して公開した。これらは今後のロボット開発で行うリスクアセスメントのための資源として利用できる。

シミュレーションの結果得られた事故動画は、ロボットの使用環境モデル別、ユーザモデル別、ロボットタイプ別のシミュレーションに事故発生イベントを挿入して起こした事故の全155シーンを撮影した物である。これらは階層化して整理された。大項目はロボットの使用環境モデルの分類、中項目はユーザモデル及びロボットタイプの分類、小項目は事故発生イベントである。

データを入力したデータベースは当研究プロジェクトで整備する「生活支援ロボットの安全に関する情報データベース」である。

4. 生活支援ロボットの安全性検証試験方法の研究開発

4.1 試験項目の検討結果 [JARI]

4.1.1 計画時の開発項目の選定

生活支援ロボットは、市場導入実績がないために、そのリスクが明確になっていない、このため、どのような危険源に対して安全検証試験を実施すべきかが明確でない。そこで、本研究の計画にあたっては、機械安全の国際規格 ISO13849 の危険源リストから、生活支援ロボットに関連しそうな危険源を選択して開発項目とした。開発項目には、すでに類似機器の試験法が存在するが試験法の改良が必要な項目と全く新たな試験法開発に必要な項目が見られた。前者については、類似機器の試験規格を詳細に検討して、改良を加えることとした。後者については、機械安全、電気安全、機能安全の考え方をベースに試験法を開発することとした（表 4.1-1）。

表 4.1-1 当初計画した項目

	類似機器の試験法または手順の改良が必要な項目	新たな試験法開発が必要な項目
感電試験	レ	
騒音試験	レ	
表面温度試験	レ	
衝突安全性試験	レ	
接触安全性試験		レ
温湿度および振動環境耐久性試験	レ	
走行耐久性試験	レ	
耐荷重試験	レ	
耐衝撃試験	レ	
静的安定性試験	レ	
動的安定性試験	レ	
安全関連光学センサの機能試験 (環境認識性能試験)		レ
障害物検知対応性能試験		レ
軌道追従性試験		レ
操作・情報提示機能試験	レ	
EMC試験	レ	
故障注入試験 (機能安全確認試験)		レ
緊急停止試験		レ

4.1.2 研究開発過程での試験項目追加・変更・削除

研究開発過程で、本プロジェクトに参加するロボット開発者の試作ロボットの試験および類似機器等の試験を実施しすることで、実際の生活支援ロボットに必要な試験項目に関する情報を得た。また、本プロジェクトのメンバーが ISO/TC184/SC2/WG7 におけるパーソ

ナルケアロボットの安全規格 ISO13482 の策定作業に参画することで、生活支援ロボット安全要求事項について議論し、安全検証試験に関する国際的な認識について情報を収集した。これらの情報（表 4.1-2）を参考にして、初期に計画した開発項目の取捨選択および追加を行った。

表 4.1-2 試験項目検討に資する情報

	試作ロボットおよび類似機器等の試験による情報	ISO/TC184/SC2/WG7 での議論による情報
感電試験		法規上必要となる場合がある
騒音試験		欧州の規格では重視されている
表面温度試験		火傷のリスクについて試験が必要
衝突安全性試験	一部の類似機器で酷い危害が予想される	試験結果から危害の酷さを算定するデータの国際的検討が必要
接触安全性試験	ロボットの設計によっては、危害が予想される	
温湿度および振動環境耐久性試験	ロボットの使用環境によっては、危害が予想される	
走行耐久性試験	ロボットの使用環境によっては、危害が予想される	
耐荷重試験	ロボットの設計によっては、危害が予想される	
耐衝撃試験	試験条件として実際にロボットが受ける衝撃を想定することが困難（ロボットの仕様が様々なため）	
静的安定性試験	ロボットの使用環境によっては、危害が予想される	
動的安定性試験	ロボットの使用環境によっては、危害が予想される	床（路面）の摩擦係数を規定する必要がある
安全関連光学センサの機能試験（環境認識性能試験）	ロボットの使用環境によっては、危害が予想される	
障害物検知対応性能試験		安全距離、安全速度について議論された
軌道追従性試験	障害物検知対応試験の際に軌道追従性を評価できる	
操作・情報提示機能試験		使用者にとって重要な項目
EMC試験	ロボットの使用環境によっては、危害が予想される	
故障注入試験（機能安全確認試験）	モジュールでの試験が必要	試験以外の方法による確認も必要
緊急停止試験	環境耐久性試験およびEMC試験において検証することが適切	安全要求として重要
挟圧試験		マニピュレータに挟まれることによる危害が予想される

(1) 他の試験法と統合した開発項目

軌道追従安定性については、それ単独で実施する必要はなく、走行安定性試験および障害物検知・対応試験の結果から安全性を評価できると判断した。

(2) 追加した開発項目

生活支援ロボットがマニピュレータを装備する場合には、人体が挟み込まれるリスクが想定される。そこで、挟圧試験を開発項目として追加した。

4.2 人体への危険に関する安全性検証試験

4.2.1 感電試験 [安衛研]

4.2.1.1 目的

生活支援ロボットの通常使用時及び保守・点検時に、人がロボットの接触可能部分に接触した際に感電の恐れがないことを確認する。そのための試験は、接触可能部分の調査、接触可能と判定された部分が充電部であるかの調査の順に実施する。また、装着型ロボットのように人体に常時ロボットの一部（外装等）が接触している場合に、人体に影響のある電流が発生していないかを確認する。この試験は漏れ電流試験として行う。移動型の生活支援ロボットでは保護接地が確実に確保できない場合が多く、ロボット外装等を経由して人体へ漏れ電流が流れてしまう恐れがないことの確認は重要である。

いずれの試験も電気を使用する機器では一般的に実施される項目であり、生活支援ロボットにおいても既存規格、基準に従って行う。

4.2.1.2 研究開発の経緯

4.2.1.2.1 適用規格

一般に機械設備の電气的安全要求事項は、JIS B 9960-1:2008（機械類の安全性-機械の電気装置-第1部：一般要求事項）に直接接触及び間接接触に対する感電保護が規定されており、さらに本質的に安全とされる電圧レベルが規定されている。本試験では安全性の判定基準にこの規格の規定を用いる。一方、試験方法はJIS C 1010-1:2014（測定用、制御用及び試験室用電気機器の安全性-第1部：一般要求事項）とJIS T 0601-1:2012（医用電気機器-第1部：基礎安全及び基本性能に関する一般要求事項）に規定があり、生活支援ロボットに対する試験方法はこれらの規定を適用する。

4.2.1.2.2 参考規格で用いる試験装置と試験基準

JIS C 1010-1では、接触可能性部位の探索に標準テストフィンガの使用を求めており、関節を持つ接合型テストフィンガと関節のない一体型テストフィンガが規格適合品として市販されている。また、一体型は力を加えて部位へ押し込むことが可能で、本規格では10Nの押し力が規定されている。この押し力は荷重計等でモニタしながら加減することは可能であるが、規定値を超えないように手動で調整することは困難であるため、10Nで力の逃げ機構が機能してそれ以上の力を伝達しないような装置を開発した（後述）。

一方、充電部の電位測定は一般的な電位計（DMM テスタ等）が使用できるが、漏れ電流測定は医用機器における患者漏れ電流として測定回路ネットワークが指定されるため、専用試験装置を用いる。

感電保護のための規定値は、AC 実効値 33 V、AC ピーク値 46.7 V、DC 70 V であるが、湿った場所での使用を意図する機器に対しては、AC 実効値 16 V、AC ピーク値 22.6 V、DC 35 V となる（JIS C 1010-1）。医用機器では乾燥状態での許容値がこれらの数値より若干低い。なお、許容電流値は商用 AC 実効値 0.5 mA、DC 2mA である（測定回路に依存）。また、機器からの漏れ電流（接触電流）の許容値は 100 μ A である（JIS T 0601-1）。

4.2.1.3 成果

4.2.1.3.1 試験装置

(1) 充電部の調査と充電電圧の測定用



図 4.2.1.1 テストフィンガ

- テストフィンガ（プローブコードは IEC61032:1997 に準拠，図 4.2.1.1）
接合型（関節付，プローブコード B），一体型（関節なし，プローブコード 11），小児の場合必要に応じて細径接合型（関節付，プローブコード 18 又は 19）
 - 荷重計又は専用治具
20N までの圧縮力測定可能な荷重計，もしくは 10N±1N の圧縮力印加で外れるリミッタ等の治具（図 4.2.1.1 の標準径フィンガ根元に装着した黒グリップが今回開発した装置であり，溝に嵌まっている球体が 10N 印加で外れてフリーとなる）
 - 電圧計又は電流計（DMM 等）
- (2) 接触電流(漏れ電流)測定用
- 漏れ電流試験器 ST5540(日置電機) (図 4.2.1.2)

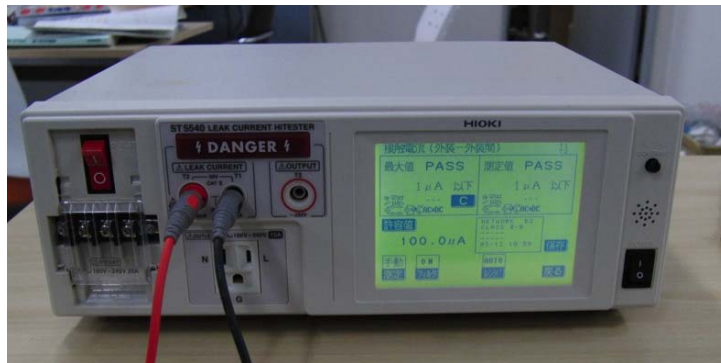


図 4.2.1.2 漏れ電流試験器 (ST5540)

4.2.1.3.2 試験条件

- 試験対象ロボットの想定使用環境の湿度を仕様書等により把握しておく。湿気のある環境を想定する場合は試験時の湿度設定が必要となる。
- ロボットに接触可能な小児を想定する場合は細径テストフィンガを使用する。
- ロボットユーザがロボットにアプローチする作業範囲はメーカー説明及び取説書記載

内容に基づく。

- 漏れ電流試験において、ロボット外装部に貼る金属箔（電極）は最大 100×200mm（手のひら想定）である。

4.2.1.3.3 試験方法

(1)接触可能部位の調査（ロボットの電源オフ）

対象ロボットのユーザが通常使用時及び保守・点検等で行う作業時に、ユーザが接触可能な金属等の導電部の範囲を以下の順序で特定する。

- a ユーザが工具や鍵等を用いずに開閉できるカバーやドアを開放する。
- b 接触できることが目視で明白な金属露出部範囲を特定する（位置をマークしておく）。
- c 接触可能かの判断を要する場合は、接合型テストフィンガを用いて関節角度を変えながら到達する部位がないかを判定する。金属部への到達判定には電源ライン（標準試験接地）との導通をテスタ等により導通確認してもよい。力を加えれば接触可能となり得る個所では、一体型テストフィンガに荷重計あるいは治具を装着した状態で 10N±1N で押しつけて判定する。接触と判定された箇所にマークする。

(2)接触可能部位の充電電位測定（ロボットの電源オン、制御下で停止状態）

調査で接触可能性ありと特定又は判定された部位について、対象ロボットの電源をオンにした正常状態（必要に応じて稼働状態）で電圧を測定する。電位を生じた個所については、標準 2kΩ、高湿下の稼働が想定される場合は 500Ω の抵抗を接続して、抵抗に流れる電流又は抵抗間電圧を測定する。

(3)接触電流の測定（ロボットの電源オン）

漏れ電流試験器内蔵のネットワークと対象ロボットの外装に金属箔を貼った箇所を接続する（AC 電源の場合のみ試験機の AC アウトレットからロボットに給電）。試験器を外装-大地間測定モードにして、漏れ電流を測定、記録する。

4.2.1.3.4 評価基準

- 接触可能部位が充電部でないこと。
- 充電部の電位が許容値（DC70V、湿った環境では DC35V）を超えないこと。
- 充電部で計測された電流が DC2mA を超えないこと。
- 接触電流は 100μA を超えないこと。

4.2.1.4 試験結果の例

市販のハンドル型電動車いすを対象として、接触可能性部位のテストフィンガによる探索の様子と接触電流の測定の様子を各々図 4.2.1.3 と図 4.2.1.4 に示す。



図 4.2.1.3 接合型標準テストフィンガを用いた接触可能性部位の探索

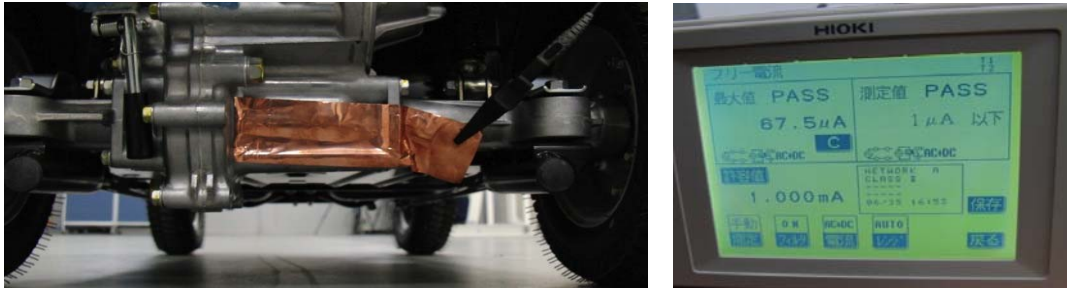


図 4.2.1.4 ギアケース外装の接触電流試験
(左は金属箔電極の貼り付け状況, 右は測定電流結果 $67.5 \mu\text{A}$ でパスしている)

4.2.2 騒音試験 [安衛研]

4.2.2.1 目的

生活支援ロボットから放射される危険源として騒音があり、関連規格 ISO13482 では「特別な保護具の装着を必要としない十分低い騒音レベル」が要求されている。しかし、この規格では騒音に晒される人の条件や騒音の測り方が規定されておらず、試験方法の標準化が求められている。そこで、自動車の騒音試験を参考にして、人がロボット動作時に晒される騒音を簡便に測定する方法を提案する。

4.2.2.2 研究開発の経緯

4.2.2.2.1 参考規格

- JIS D 1024:1999 (自動車の加速時車外騒音試験方法)
- 環境省自動車騒音測定方法及び自動車単体騒音規制値
- JIS Z 8731:1999 (環境騒音の表示・測定方法)
- JIS C 1010-1:2014 (測定用、制御用及び試験室用電気機器の安全性—第1部：一般要求事項)

4.2.2.2.2 試験装置と試験基準の開発

ロボットに関する騒音の測定方法は規定がなく、産業用ロボットの安全規格でも危険源の1つとして騒音が挙げられているが、測定に関する関連規格を参照するという記述のみである。工場内の産業用ロボットの騒音は、他の騒音の大きな機械(鍛圧機械等)に準じて工場内外騒音規制により制限されることになるが、ロボット単体の騒音測定は無響室内での音圧レベル測定方法に準じて行うしかない。ただし、移動ロボットのように固定できないロボットでは測定できず、実稼働環境下での測定がされてこなかった。

そこで、移動体の騒音測定として実績のある自動車騒音測定方法を参考に、移動するロボットの近傍の人が暴露される通過時の騒音とロボット搭乗者自身が暴露される騒音を同時に、なおかつ簡易に測定する方法を提案する。

なお、騒音基準は既存の自動車、二輪車の定常走行騒音規制値(65~83dB)は電気式移動ロボットには数値が高すぎると思われるが、環境騒音基準値(例えば施設内昼間で50dB以下)は長時間暴露の等価騒音であるため、1台のロボットの発生する騒音基準にはそぐわない。JIS C 1010-1では24時間暴露で80dBを超えないこととしており(医用機器も同様)、これを越える場合は防音手段の追加を求めている。

4.2.2.3 成果

4.2.2.3.1 試験装置

(1) 走行路

10m直線路に加減速区間を加えた屋内走行路はトンネル上の遮音テントで覆い、走行路両側面は吸音材を設置する。図4.2.2.1は生活支援ロボット安全検証センタ内に設置した走行路環境であり、可動式の遮音テント2張の中に可動式自立吸音パネルを10枚ずつテント内側面に沿わせて設置している。吸音パネルはフェルトーン(東京ブラインド)を用い、パネル面表裏で特性を変えている(反射特性に優れた面と吸音特性に優れた面)。ロボットの想定使用環境に合わせて、路面にはPタイル(標準)、カーペット、ウッドフロア、点字パネルなどを敷く。



図 4.2.2.1 走行路設置状況

(左面吸音パネル前は4マイクロホン, 右面吸音パネル前に通過速度計測用レーザセンサを設置)

(2) マイクロホン

測定する騒音はロボット本体の音響パワーレベルでなく, 実環境下で動作中のロボットから人(1名)が晒される騒音を想定するため, 自動車の定常走行騒音の測定方法及び加速時車外騒音試験方法を参考にマイクロホンをロボット走行路に対して直角に向けて設置する. 通過騒音測定用マイクロホン(解析周波数:20Hz~20kHz)は, 地上高1.2mで間隔1mに2個(マイク1, 2), 地上高0.2mで間隔1mに2個(マイク3, 4)の計4個を, 直線走行路中央で, 移動するロボット側面から1m離れた位置に設置する(図4.2.2.2). 走行するロボットとマイクロホンとの位置関係を図4.2.2.3に示す. ただし, マイクロホンの高さ(0.2m)や間隔, 片側面のみを設置など, 屋外での自動車用試験とは異なる条件としている.

一方, 暴露騒音用マイクロホンは, ロボット搭乗者(装着者)が装着するヘルメットの左耳の位置に, 風防付きマイクロホンを1個設置する(図4.2.2.2).

(3) 騒音計

通過騒音測定用マイクロホンはプリアンプを介して, 4チャンネル分がFFT解析可能な騒音計(小野測器データステーションDS-3000計測システム)に入力される. 暴露騒音測定用マイクロホンは携帯型の精密騒音計(小野測器精密騒音計LA-5560, 図4.2.2.2)に接続する. いずれの騒音計も, A特性(当ラウドネス曲線に従った周波数重み付け), FAST特性(耳の時間応答に近似した時間重み付け)の音圧レベルを測定する.

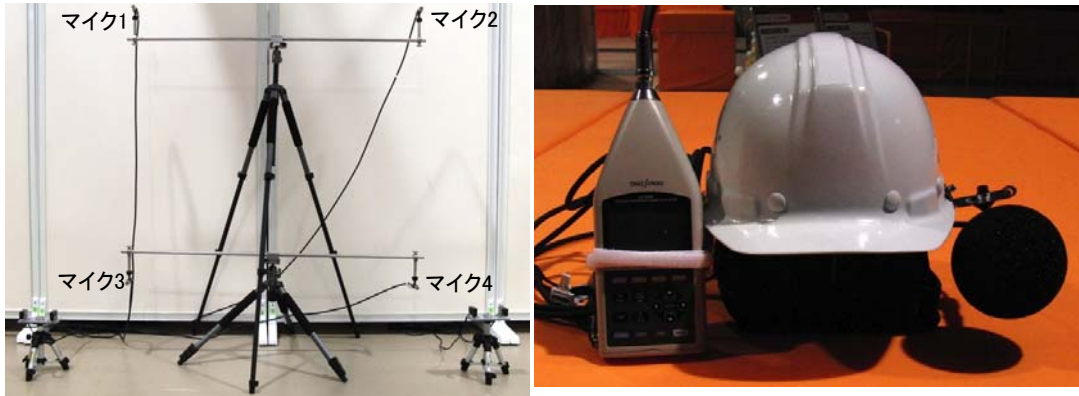


図 4.2.2.2 騒音測定用マイクロホン
(左は通過騒音測定用, 右は暴露騒音測定用)

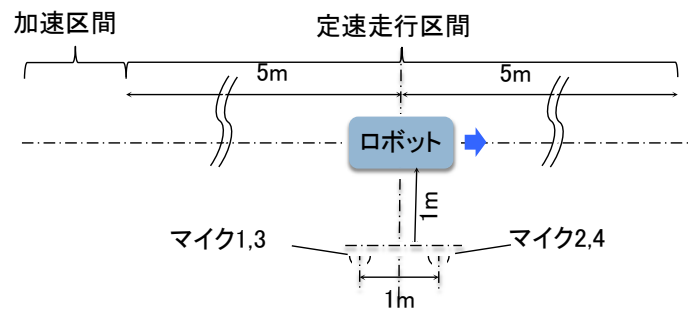


図 4.2.2.3 通過騒音測定用マイクロホンの設置条件

データステーションはPCに接続され、測定データの記録とFFT解析ソフトウェア（小野測器 Oscope2）がPC上で実行可能である。

4.2.2.3.2 試験条件

騒音試験は、屋内環境下で動作するロボットを対象に、図 4.2.2.1 の走行路環境下で次の2通りの騒音を対象とする。

通過騒音：自律移動型、搭乗型、装着型ロボットが静止している人の傍らを通る際に、人が受ける騒音レベルを測定する。

搭乗者(装着者)暴露騒音：ロボットに搭乗またはロボットを装着している人自身が晒される動作時の騒音レベルを測定する。

ロボットの通過騒音に周囲の人が晒される状況は対象ロボットや使用環境により様々であるが、標準条件として、ロボットが10m直線走行路を定速移動する間の騒音レベルを直線路の中間地点で計測する。走行路面はロボットの最悪想定路面とし、ロボット移動速度も想定最高速度とする。

搭乗者(装着者)が晒される騒音は左耳の位置で計測し、他の条件は通過騒音時と同様とする。ヘルメット装着者が携帯型騒音計を持つ。

なお、計測される騒音は走行路面からの反射音を含んで評価する。ただし、ロボットの警報等は無効にしておく。走行路上の暗騒音は計測騒音レベルより、少なくとも 10dB 以上低いことを確認する。

4.2.2.3.3 試験方法

(1) 通過騒音測定

自律移動型、搭乗型ロボットは、走行路上を最高一定速度パターンで 3 回（側面毎）、続いて走行路中間地点で急停止して約 1s 後に急加速するパターンで 3 回（側面毎）移動させ、各々走行路上にロボットが存在する間（10m 走行時間分）騒音計（データステーションのスループットディスク機能）で記録する。急停止・急加速パターンは自動車騒音の測定項目にはないが、生活支援ロボットでは頻繁に起こりえると想定して追加したものである。

各記録波形に通過速度をリンクさせて記録する。参考として、FFT 機能でも各パターンで 1 回リアルタイム分析をして、音圧と周波数分布を確認する。記録した騒音データは、パワースペクトルのオーバーオール値を算出し、同一高さのマイクロホンの 3 回平均値として騒音レベルを決定する。

なお、騒音データの FFT 分析結果は騒音レベルとしては反映しないが、騒音対策が必要な場合は活用可能である。

(2) 搭乗者（装着者）暴露騒音測定

通過騒音測定と同様の速度パターンで同じ測定時間分記録（携帯型騒音計のメモリカードへ）し、3 回記録値の平均値で騒音レベルを決定する。なお、通過騒音測定に支障がなければ、暴露騒音と通過騒音を同時に測定してよい。

4.2.2.3.4 評価基準

前述の通り、直接該当する判定の基準値は存在しないが、少なくとも 80dB を超えないことを最低条件とする。この値よりも低い騒音レベル（例えば、自動車騒音の最低レベル、類似機器の騒音レベル等）を用いる場合は、暴露環境と暴露時間に留意して設定しなければならない。

4.2.2.4 試験結果の例

対象ロボット（類似機器）として、市販のハンドル型電動車いすと電動立ち乗り二輪車で通過騒音と搭乗者暴露騒音を同時に測定した。図 4.2.2.4 に示すように、前者はドット点



図 4.2.2.4 模擬ロボットによる騒音試験の様子
（左がハンドル型電動車いす、右が電動立ち乗り二輪車）

表 4.2.2.1 ハンドル型電動車いすの騒音測定結果例

走行路	走行モード	通過騒音オーバーオール値	マイクNo		マイク1&2の平均	マイクNo		マイク3&4の平均	搭乗騒音	
			1	2		3	4			
Pタイル	高速一定	マイクの高さ 0.2m, 1.2m	1回目	42.10	42.99	42.5	45.11	45.00	45.1	43.69
			2回目	43.09	43.00	43.0	45.40	44.43	44.9	42.69
			3回目	43.44	45.88	44.7	43.56	44.56	44.1	43.67
				3回の平均		43.4			44.7	43.4
	停止後急加速	マイクの高さ 0.2m, 1.2m	1回目	44.45	43.79	44.1	46.78	45.43	46.1	45.64
			2回目	44.67	45.20	44.9	46.99	46.78	46.9	46.78
3回目			43.89	45.33	44.6	47.78	47.11	47.4	45.44	
			3回の平均		44.5			46.8	46.0	
点字パネル	高速一定	マイクの高さ 0.2m, 1.2m	1回目	51.45	53.78	52.6	56.79	56.45	56.6	52.55
			2回目	52.76	51.77	52.3	54.99	56.44	55.7	52.77
			3回目	51.79	53.31	52.6	56.99	56.98	57.0	54.76
				3回の平均		52.5			56.4	53.4
	停止後急加速	マイクの高さ 0.2m, 1.2m	1回目	53.77	53.66	53.7	56.92	56.78	56.9	57.78
			2回目	53.99	53.90	53.9	57.45	56.34	56.9	57.98
3回目			53.66	52.44	53.1	56.77	56.98	56.9	56.98	
			3回の平均		53.6			56.9	57.6	

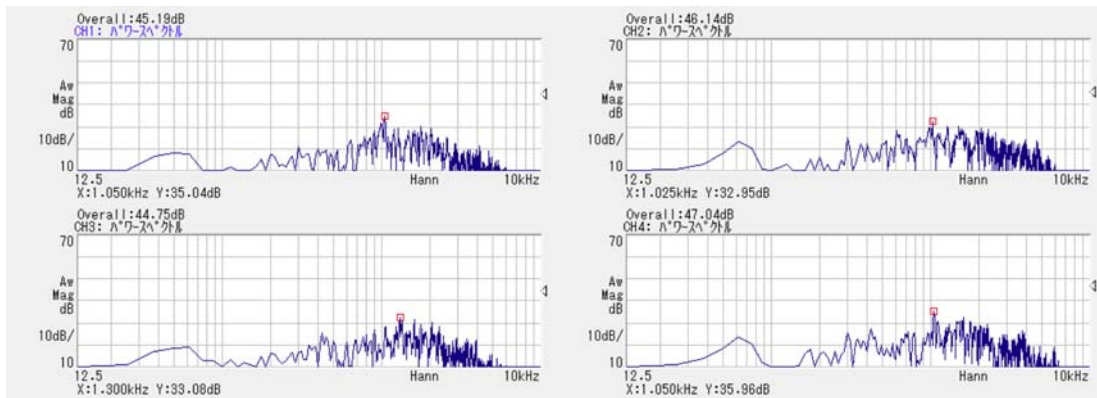


図 4.2.2.5 ハンドル型電動車いすの通過騒音スペクトラム例

字パネル走行路を、後者はPタイル走行路での測定の様子である。点字パネルはシート上になっており、Pタイル上に敷くことができる。

前者の騒音測定結果の1例を表4.2.2.1に示す。測定データはこのようなエクセルシートで集計されて平均値を算出する。なお、通過騒音測定用マイクロホンのFFT解析結果は図4.2.2.5のように表され、音圧レベルの高い周波数成分を把握することが可能である。

4.2.3 表面温度試験 [安衛研]

4.2.3.1 目的

生活支援ロボットの通常使用時及び保守・点検時に、人がロボットの接触可能部分に接触した際に火傷あるいは凍傷の恐れがないことを確認する。そのため、ロボットの表面や内部の接触可能部分の過度な温度上昇あるいは下降を調べるために、ロボットの通常使用時およびユーザによるメンテナンス（バッテリー交換，トラブル処理，清掃等を含む）時に，接触可能性部位の表面温度分布をサーモグラフィ等により測定する。

4.2.3.2 研究開発の経緯

4.2.3.2.1 参考規格

- JIS C 1010-1:2014（測定用，制御用及び試験室用電気機器の安全性—第1部：一般要求事項）
- 電気用品安全法
- ISO 13732 (all parts), Ergonomics of the thermal environment — Methods for the assessment of human responses to contact with surfaces.

4.2.3.2.2 試験装置と試験基準の開発

本試験は，ロボット外装表面などの接触可能性が高く，なおかつ高温または低温の部位を同定した上でその部位の表面温度を測定するものである。そのため，高/低温のピーク値とその位置を同時に測定するために，非接触のサーモグラフィにより画像で温度分布を一括取得する方法が効率が良い。もし，ピーク温度位置が同定できていれば，接触式の温度センサ（サーモカップル等）も使用可能である（ただし，センサ接触による温度変化の影響は考慮しておく）。

JIS C 1010-1 では，容易に触れることができる表面温度として，
外装部及び内部：金属で 65℃，非金属で 80℃を超えるか，
操作部：金属で 55℃，非金属で 70℃を超えるか，
を限界として規定している（ただし，周囲温度 40℃）。さらに，接触時間による影響も考慮する場合もあり，人間の皮膚は 45℃以上の温度が 1 時間継続すると熱傷になり（ISO13732-1 では 1 分間で 51℃を超えない），接触部の温度が 44℃では約 6～10 時間で受傷（低温熱傷）するとされる。上記規格の限界温度は，機器の操作器や外装への接触は長時間継続されないという前提であり，操作機器の目安としては妥当と考えられる。

4.2.3.3 成果

4.2.3.3.1 試験装置

(1)サーモグラフィ（Apiste FSV-1100 シリーズ）（図 4.2.3.1）

測定温度レンジ：-40～500℃，有効画素 320（H）×240（V），レンズ交換式，コントローラ別体

(2)同上用制御ソフトウェア IR Manager，解析ソフトウェア FSV-S330

その他，測定範囲が狭くて特定できる場合は，スポット温度計あるいはサーモカップル等も使用できる。

4.2.3.3.2 試験条件



図 4.2.3.1 FSV-1100 と専用ソフトウェアをインストールしたノート PC の接続状態

本試験は、予め接触可能部位の調査を実施後、規定動作時間あるいは満充電されたバッテリー容量が空になるまで負荷連続運転した直後に、電源オフ状態でこれらの部位の表面温度を非接触で測定する。試験環境は通常の最高使用温度である 40℃が望ましいが、負荷連続運転中に高温環境を維持することは困難であるため、標準で 20～25℃の室温とする。

バッテリー搭載のロボットでは、充電あるいはバッテリー交換時には温度上昇は抑えられるため、バッテリー容量分の駆動時間後の状態を最高温度到達状態と見なす。

4.2.3.3.3 試験方法

(1)接触可能部位の調査

対象ロボットのユーザが通常使用時及び保守・点検等で行う作業時に、ユーザが接触可能な外装表面、底面、ユーザが工具や鍵等を用いずに開閉できるカバーやドアを目視確認する。(ユーザの作業範囲はメーカー説明及び取説書記載内容に基づく。)

(2)対象ロボットの負荷連続運転

対象ロボットのタイプに応じて、次のように設定・動作させる。

・自律型、搭乗型移動ロボット：想定される高負荷状態で、以下の条件いずれかを満たすまで連続運転する。

規定の連続運転時間に到達するまで、
温度が上昇して平衡状態に至るまで、
満充電された搭載バッテリーが空になるまで。

・装着型ロボット：装着者が通常使用時にメーカーが規定する動作を、非装着状態で再現して、温度が上昇して平衡状態に至るまでまたは満充電された搭載バッテリーが空になるまで連続運転する。

(3)表面温度測定

まず、対象ロボットの表面素材及び色に応じて放射率を設定しておく。素材等が同定できれば放射率表から決定できるが、不明あるいは表面処理されている場合は、別途黒色テープ等の標準検体を用いて校正取得しておく。

次に、対象ロボットの電源を切り、ロボットの各側面をサーモグラフィの赤外線カメラに向け、各面毎に温度分布画像を5秒間程度連続記録する。カバー等を開けて内部が暴露される場合は、同様に内部暴露面について記録する。対象ロボットの底面が接触可能部位と判定された場合、ロボットを吊り上げた状態で測定記録する。記録された各側面の連続温度分布画像のうち、中間の記録順の画像をオフラインで分析し、最高温度(必要に応じて最低温度)とその位置を求めて、温度分布画像にインポーズする。なお、この画像分析はMSエクセルのアドイン専用ソフトウェア FSV-S330 を用いて容易に実施できる。

4.2.3.3.4 評価基準

装着型以外のロボットでは、上記 JIS C 1010-1 の限界値に準じるとする。ただし、長時間の連続接触があり得る装着型の場合は、表面素材、接触時間、人の属性により異なるが、8時間の接触で43℃を越えないことが望ましい。

4.2.3.4 試験結果の例

対象ロボット(類似機器)として、市販のハンドル型電動車いすを用いて表面温度分布測定を行った。満充電のバッテリーを空にするまで連続負荷運転ができなかったため、室温21.7℃の環境で車輪を浮かせて、最高速度(6km/h)で前進空転を3時間実施した直後に測定した。予め、表面外装の温度上昇は僅かであることを把握していたため、底面(シャーシーカバー)のみサーモグラフィで測定記録した。図4.2.3.2は、電動車いすをクレーンで吊って、底面を撮影している状況である。なお、底面のモータハウジングの放射率は0.96(実測値)であった。

撮影後に FSV-S330 を用いて画像分析し、最高温度とその位置を特定した結果を図4.2.3.3に示す。



図 4.2.3.2 電動車いす底面の温度測定の様子
(床面上の三脚先端部がサーモグラフィのカメラ部)

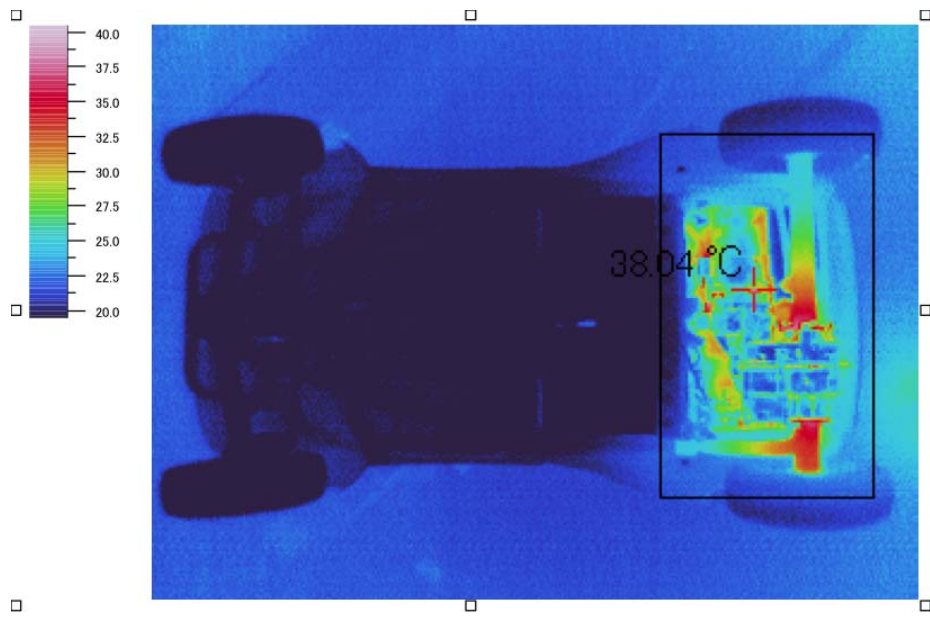


図 4.2.3.3 電動車いす底面の表面温度分布分析結果

4.2.4 衝突安全性試験 [JARI]

4.2.4.1 目的

この試験は、ロボットが障害物と衝突したときの対人リスクを評価することを目的として、ロボットを障害物や人体ダミーに衝突させた時に、ロボットの搭乗者または歩行者を模擬した人体ダミーに及ぼす力、モーメント、変位、速度、加速度を測定する。この試験は、ロボットが移動する能力を有して、周囲の障害物や人と衝突することによって人の被害が予想される場合に適用できる。

4.2.4.2 研究開発の経緯

4.2.4.2.1 参考にした規格

- Japan Safety regulations for Road Vehicles Addendum 23,
- Federal Motor Vehicle Safety Standards (FMVSS) 208, FMVSS 213,
- Code of Federal Regulation, Title 49, Part 582, Subpart E
- ECE-R94

4.2.4.2.2 試験装置の開発

(1) 試験装置の仕様の検討

自動車に比べて、生活支援ロボットの使用目的、移動速度は多様であるため、試験時に設定すべき衝突速度、重量などの値も多様である。そこで、本プロジェクトに参加するロボット開発者ならびにロボットビジネス協議会会員のロボットメーカーに対して、自社で開発する可能性のある生活支援ロボットの仕様について調査した。その結果から、試験装置の仕様を検討した。

人体の傷害に関する物理量（衝突時の外力、モーメント、変形量、速度、加速度等）を測定するには、人体を再現した人体ダミーが必要である。国際的に標準化されているまたは公的な試験に広く使われている人体ダミーとして、自動車の衝突試験用の人体ダミーの中から、以下の3種を用いることとした。

• HYBRIDIII/AM50

米国の標準的成人男性の体格を再現したダミーで、国際的に標準化されており、自動車の認証試験に用いられている。傷害評価のためのデータが豊富に報告されている。生活支援ロボットに関わる成人男性の代表として選択した。

• HYBRIDIII/AF05

米国の小柄な女性の体格を再現したダミーで、国際的に標準化されており、自動車の認証試験に用いられている。生活支援ロボットに関わる成人の中で、傷害を受けやすい人の代表として選択した。

• Q6

欧州の標準的6歳児の体格を再現したダミーで、欧州で広く使用されている。生活支援ロボットが子供と共存する場合のリスク評価の対象として選択した。Qシリーズダミーには、6歳児の他に3歳児等を再現したモデルも存在するが、親の監視を離れて生活支援ロボットと接触する可能性の高い年齢として、6歳児を選択した。

(2) 試験の試行による検討

始めに、自動車の衝突試験法を参考に、自動車試験設備で試験を試行した。搭乗型生活支援ロボットのと壁の衝突を再現するために、車いすに自動車衝突試験用人体ダミーを搭乗させて、壁（衝突用バリア）に衝突させた。目標衝突速度は、上記(1)の検討結果を参考に、2 km/h, 6 km/h, 10 km/hとした。その結果、以下の課題が明らかになった。

- 速度 100 km/h を想定した自動車用の装置では、低速での速度設定の精度が得られない。
- 牽引ワイヤーを収納するための溝がロボットの幅方向中央にあるため、3輪のロボットのように車輪が中央にあるロボットを試験できない。

- ・現在の自動車衝突試験用人体ダミーには腕の傷害を評価するためのセンサーが装着されていない。
- ・以上の課題を解決するために、以下の方策を講じた。
- ・最高速を、上記(1)の検討結果を参考に、20km/hに制限することで、低速での速度精度を向上させた。
- ・牽引装置をロボットの全幅より外側に配する設計で、ロボットの多様な走行機構に対応した。
- ・必要に応じて腕の傷害を評価するための外力を測定するために、荷重形内蔵の腕を、ダミーに追加した。

4.2.4.2.3 自動車の衝突安全に関する研究にもとづく傷害基準の開発

4.2.4.2.3.1 自動車の衝突安全基準に関する調査

(1) 調査結果

生活支援ロボットは、市場への導入実績がないために、衝突時の傷害データが取得されていない。このため、傷害に関する基準は各国で開発途上にある(例えばHaddad等[1], [2])。そこで、本研究では、傷害に関するデータが充実している自動車分野の安全基準を参考にすることを想定して、調査を行った。表4.2.4.2.3-1に、代表例を示す。頭部、頸部、胸部、腰部、大腿部、下腿部などの安全基準が設定されている。

なお、表4.2.4.2.3-1において、頭部と頸部の傷害指標は、以下の様に定義されている。

a) 頭部：Head Injury Criteria (HIC)

$$HIC_{15} = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1)$$

ここに、 $a(t)$ は頭部加速度(単位は重力加速度g)、 t_1 および t_2 は15 msの間隔の加速度パルス積分範囲。

b) 頸部：頸部傷害指標 N_{ij} を次式により計算する

$$N_{ij} = F_z / F_{zc} + M_{ocy} / M_{yc}$$

ここに、 F_z は頸部軸力、 F_{zc} は頸部軸力を基準化するための臨界値。 M_{ocy} は頸部曲げモーメント、 M_{yc} は頸部曲げモーメントを基準化するための臨界値。

表 4.2.4.2.3-1 自動車の傷害基準の例

部位	傷害指標		基準		試験用 人体ダミー	出典
			標準的男性 米国男性 50パーセンタイル	小柄な女性 米国女性 5パーセンタイル		
頭部	Head Injury Criterion	HIC15	700	700	Hybrid III	FMVSS 208 前面衝突
頸部	Neck Injury Criterion	N_{ij}	1.0	1.0		
胸部	胸部加速度	a_{3ms}	60 g	60 g		
	胸部変位	s_{max}	63 mm	52 mm		
腰部	腰部横力		5.525 kN	-	SID IIs	FMVSS 214 側面衝突
大腿部	大腿部軸力	F_{max}	10 kN	6.805 kN	Hybrid III	FMVSS 208 前面衝突

(2) 課題

上記の基準を生活支援ロボットに適用するには、以下の課題がある。

- ・自動車分野の安全基準は、おもに重症以上（AIS3+）の発生を抑えることを目的としている。生活支援ロボットにおいて受容可能なリスクとして、より軽度の傷害の確率を評価する必要がある場合には、これらの基準は引用できない。
- ・上肢に関する基準は、自動車分野でも検討中であり、完成していない。
- ・大腿部および下腿部の基準は、骨の軸方向圧縮に関するものである。これは、自動車乗員の下肢が前方に伸ばされている場合に衝突によって軸方向に圧縮されるという傷害モードに対応した基準であるが、生活支援ロボットの場合には、傷害モードが異なると考えられ、曲げモーメントによる傷害を評価する必要がある。
- ・自動車の安全基準には、自動車と障害物の衝突による乗員の傷害に関する基準および自動車と歩行者の衝突による歩行者の傷害に関する基準がある。歩行者との衝突までは至らないが、自動車が歩行者の足を踏んでしまうという事故については、基準がない。生活支援ロボットが、人と接近した環境で使われることを想定すれば、足を踏むことによる傷害の評価も必要である。

これらの課題を解決するために、本研究では、2つの検討を行った。

- ・自動車の衝突安全に関する研究データの調査：自動車の衝突安全の安全基準を作成した際の研究データを調査することにより、安全基準にはなっていないが、生活支援ロボットの安全検証の参考となるデータをまとめる。
- ・自動車の衝突安全に関する研究データの調査：生活支援ロボットが人の足を踏んだ場合の傷害リスクについて、研究を行う。

4.2.4.2.3.2 自動車の衝突安全に関する研究データの調査

自動車基準を策定にあたっては、基準となる障害レベル以外の様々なデータが研究されている。これらのデータの中から生活支援ロボットに適用可能なデータを抽出するために、自動車の衝突安全に関する研究データの調査を実施した。

人体実験データ、動物実験データ、交通事故の実態データの取得の機会が限られているために、1970年代から蓄積されてきた研究データを、最新の手法で分析することで事故時に人体に加わる様々な物理指標（変位、速度、加速度、軸力、曲げモーメント等）と傷害レベルの関係の分析研究が実施されている。これらの研究の関係を調査整理した。その結果は、付属書C.1に掲載する。

4.2.4.2.4 自動車の衝突安全では研究されていない傷害基準の開発

自動車分野の傷害研究は、衝突による傷害に関するものが主である。このため、傷害部位は前項で検討した部位に限られており、足部の傷害についての研究は見られない。しかし、生活支援ロボットを人の近くで移動させた場合には、衝突のリスクに加えて、ロボットが人の足を踏むというリスクが想定される。そこで、以下のように、足を踏まれた場合の傷害を評価する指標を求める研究を実施した。その詳細は、付属書C.1に掲載する。

4.2.4.3 成果

前述の課題を解決した試験装置を設計、導入し、試験方法を確立した。また、4.2.4.2.3節および4.2.4.2.4節の検討の結果から、試験結果の評価基準を導出した。

4.2.4.3.1 試験装置

(1) 牽引装置および障害物（衝突用バリア）

牽引装置は、ロボットを牽引することで衝突速度を与える装置である。ロボットを支持する牽引台車をタイミングベルトを介してACサーボモータで駆動する。

衝突用バリアは、ロボットが障害物に衝突した場合にロボットおよび搭乗者に加わる衝撃を再現するための壁である。ロボットの衝突に耐えられる構造を有する壁で、ロボットの進路に対して直角な平面を持つ。衝突面は、衝突時の変形が無視できる剛性を持ち、衝突時の移動量が無視できるほど強固に床面に固定されている。

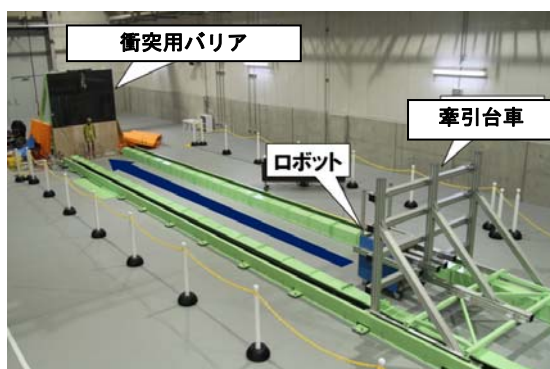


図 4. 2. 4. 3-1 牽引装置および障害物（衝突用バリア）

表 4. 2. 4. 3-1 牽引装置および障害物（衝突用バリア）の仕様

牽引装置	レール全長22000 mm, 有効牽引長 19000 mm
牽引台車	幅 1950 mm, 長さ 2350 mm, 高さ 1800 mm ロボットおよび人体ダミーの姿勢保持機構を装着
駆動方式	AC サーボモータ(7 kW)によるタイミングベルト駆動
牽引速度	1~20 km/h(0.1 km/hステップで設定可能)
衝突用バリア	平坦な面構造, 全体を34分割して, 衝撃力の分布を測定可能

(3) 人体ダミー

ロボットと衝突する第三者および搭乗型ロボットの搭乗者を再現するために、3種の人体ダミーを用いる。人体ダミーには靴を着用する。また、綿製のシャツ及びズボンを着用させてもよい。人体ダミーの手足の関節の硬さは、手足を水平にしたとき、それらの自重を支える程度に調整する。

これらの人体ダミーは、人体の各部位の寸法や重量が模擬されており、衝突による傷害のリスクが高い部位の障害を推定するために必要な力、モーメント、変位、速度、加速度を測定できる。

- ・ Code of Federal Regulation, Title 49, Part 582, Subpart Eに規定された Hybrid III ダミーで、成人男子の 50 パーセントの体型ものに、腕部の荷重計を付加したもの。
- ・ Code of Federal Regulation, Title 49, Part 582, Subpart Eに規定された Hybrid III ダミーで、成人女子の 5 パーセントの体型ものに、腕部の荷重計を付加したもの。
- ・ ISO/TS1349:2014 に記載された Q6 ダミー。
- ・ 上肢の障害を評価する必要がある場合には、人体ダミーの腕をロードセル内蔵の物に交換する。

4. 2. 4. 3. 2 試験条件

リスクアセスメントにおいて最も高いリスクが想定される条件で試験を行う。

- ・ 衝突速度：リスクアセスメントで想定される最高速度で試験を実施する。
- ・ ダミータイプ（搭乗者）：搭乗者の傷害を評価する場合には、設計仕様で想定する搭乗者の内で最もリスクの高いタイプの搭乗者を模擬した人体ダミーを用いる。例えば、成人を

対象とした搭乗型生活支援ロボットで、一般の女性が搭乗することを想定している場合には、AF05 人体ダミーを用いる。

・ダミータイプ（第三者）：第三者の傷害を評価する場合には、リスクアセスメントにおいて、ロボットと共存する可能性のある第三者の中で最もリスクの高いタイプの第三者を模擬した人体ダミーを用いる。例えば、子供のいる環境で使用する生活支援ロボットの場合には、Q6 人体ダミーを用いる。

・衝突形態：床面とロボット以外に衝突後の人体ダミーの挙動を拘束する障害物がない場合と、人体ダミーが障害物にあらかじめ接触している場合の両方について試験を行う。人が搭乗するロボットの場合は、障害物との衝突試験も行う。障害物には、リスクアセスメントで指定がない限り、衝突試験装置の衝突用バリアを用いる。

4.2.4.3.3 試験方法

(1) 試験

a) 試験室の温湿度環境は温度 $20 \pm 4^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $50 \pm 20\%$ とする。人体ダミーは、試験開始の 2 時間以上前から試験室の温湿度環境に曝露する。

b) ロボットは通電された状態で試験を行う。ただし、通電した状態で試験を行うことが困難な場合は、電源を遮断した状態で試験を行ってもよい。

c) ロボットの積載状態は、最大積載状態とする。搭乗型ロボットの場合は、製造者が定める搭乗方法に基づいて、人体ダミーを搭載する。荷物を搭載するロボットの場合は、製造者が定める方法で積載する。

d) 助走路を用いて所定の速度まで加速し、歩行者を模擬した人体ダミーに衝突させる。衝突条件は次の通りとする。

・床面とロボット以外に衝突後の人体ダミーの挙動を拘束する障害物がない場合と、人体ダミーが障害物にあらかじめ接触している場合の両方について試験を行う。

・歩行者を模擬した人体ダミーは、ロボットの走行軌道の中央に直立させ、ロボットが衝突する直前まで直立姿勢を保持する。衝突時の人体ダミーの向きは、ロボットに対して前向き、後ろ向き、横向きのそれぞれについて試験を行う。衝突後の人体ダミーの挙動は、障害物、床面、およびロボット以外によって拘束されない。

・ロボットの走行方向は、原則として前進方向とする。ただし、前進方向以外にも走行可能なロボットについては、ロボットの構造や形状、走行速度、および搭乗者の搭乗状態を考慮して、歩行者への負荷が前進方向と同等以上と考えられる衝突方向がある場合、その方向についても試験を行う。

e) 人が搭乗するロボットの場合は、障害物との衝突試験も行う。助走路を用いて、ロボットが衝突時に出し得る最高所定の速度まで加速し、障害物に衝突させる。ロボットの走行方向は、原則として前進方向とする。ただし、前進方向以外にも走行可能なロボットについては、ロボットの構造や形状、走行速度、および搭乗者の搭乗状態を考慮して、搭乗者への負荷が前進方向と同等以上と考えられる衝突方向がある場合、その方向についても試験を行う。

f) SAE 211 に従って、衝突時の人体ダミーの各部位に対する負荷を測定する。測定する負荷は次の通り：

- ・頭部加速度（前後方向、左右方向、上下方向）、
- ・頭部の回転角速度（重心まわり）、
- ・頸部の軸力、
- ・頸部のモーメント、
- ・胸部の変位（前後方向）、
- ・脚部荷重

(2) データ処理

測定したデータから各部位（頭部、頸部、胸部、脚部）の評価パラメータを算出する[8].

a) 頭部：Head Injury Criteria (HIC) を次式により計算する.

$$HIC_{15} = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \quad (4.2.4.3-1)$$

ここに、 $a(t)$ は頭部加速度（単位は重力加速度 g ）， t_1 および t_2 は 15 ms の間隔の加速度パルス積分範囲.

b) 頸部：頸部傷害指標 N_{ij} を次式により計算する

$$N_{ij} = F_z / F_{zc} + M_{ocy} / M_{yc} \quad (4.2.4.3-2)$$

ここに、 F_z は頸部軸力、 F_{zc} は頸部軸力を基準化するための臨界値、 M_{ocy} は頸部曲げモーメント、 M_{yc} は頸部曲げモーメントを基準化するための臨界値.

c) 胸部および脚部：胸部変位および脚部曲げモーメントの最大値を求める.

4.2.4.3.4 評価基準

生活支援ロボットは、社会への導入実績がほとんど無いために、受容可能な傷害リスクに関するコンセンサスが形成されていない。このため、現時点では、受容可能な傷害リスクは製造者が設定する必要がある。ことで本研究では、衝突による傷害の評価基準を、「試験結果が、リスクアセスメントで設定した傷害レベル以下となること」とした。計測された評価パラメータから傷害レベルを推定する方法を、人体各部分について、以下に示す。

4.2.4.3.4.1 頭部傷害

(1) 頭部傷害レベル

自動車分野では、重症以上 (AIS3+) の頭部傷害について議論されることが多いが、生活支援ロボットにおいて受容可能なリスクとして、より軽度の傷害の確率を評価する必要がある場合に対応するために、以下のデータを利用することを提案する。なお、頭部傷害に関する AIS の大まかな定義は以下のとおりである。

- ・ AIS 1：頭部打撲，10 cm 以下の頭皮裂創
- ・ AIS 2：10 cm を超える頭皮裂創，閉鎖性の頭蓋骨骨折，脳震盪，脳神経損傷
- ・ AIS 3：開放性の頭蓋骨骨折，小さな脳挫傷など

(2) 大人の頭部傷害

表 4.2.4.3-2 に示す様に、米国 NHTSA は、過去の死体実験、動物実験、人体ダミーによる再現実験などのデータから、頭部傷害の発生確率の関数（リスクカーブ）を提案している[9]。軽症（AIS 1）および中傷（AIS 2）の発生確率は、AIS 3 等のデータから推測した確率であるが、軽症の発生確率に関する今後の研究成果が得られるまでの暫定値として使用することを提案する。

表 4. 3. 4. 3-2 NHTSA による大人の頭部傷害の発生確率[9]

HIC	MAIS 1	MAIS 2	MAIS 3
50	0.3%	0.1%	0.1%
150	8.7%	2.8%	1.2%
250	21.8%	7.4%	2.9%
350	33.8%	13.7%	5.1%
450	40.1%	21.5%	8.1%
550	39.1%	29.7%	11.9%
650	33.0%	36.7%	16.7%
750	25.2%	40.8%	22.2%
850	17.8%	41.3%	28.2%
950	12.0%	38.5%	33.9%
1050	7.8%	33.5%	38.4%

(3) 子供の頭部傷害

表 4. 2. 4. 3-3 ～表 4. 2. 4. 3-5 に示す様に、米国 NHTSA は、大人の頭部傷害発生確率の関数から頭部の寸法を基にした換算（スケーリング）により、子供の頭部傷害の発生確率の関数（リスクカーブ）を提案している[8]。軽症（AIS 1）の確率は、AIS 3 等のデータから推測した確率であるが、軽症の発生確率に関する今後の研究成果が得られるまでの暫定値として使用することを提案する。

表 4. 2. 4. 3-3 NHTSA による 12 ヶ月児の頭部傷害の発生確率[8]

HIC	MAIS 1	MAIS 2	MAIS 3
50	30.27%	0.62%	0.02%
100	52.75%	4.22%	0.47%
150	60.62%	9.49%	1.88%
200	61.28%	14.57%	4.09%
250	58.63%	18.66%	6.60%
300	54.56%	21.57%	8.99%
350	50.03%	23.44%	10.98%
400	45.52%	24.42%	12.47%
450	41.24%	24.73%	13.44%
500	37.27%	24.55%	13.95%
550	33.66%	24.00%	14.06%
600	30.42%	23.21%	13.85%
650	27.51%	22.26%	13.40%
700	24.89%	21.21%	12.79%
750	22.55%	20.12%	12.06%
800	20.47%	19.01%	11.25%

表 4.2.4.3-4 NHTSA による 3 歳児の頭部傷害の発生確率[8]

HIC	MAIS 1	MAIS 2	MAIS 3
50	18.94%	0.16%	0.00%
100	40.86%	1.60%	0.10%
150	53.44%	4.48%	0.52%
200	59.48%	8.06%	1.42%
250	61.49%	11.72%	2.74%
300	61.11%	15.06%	4.34%
350	59.34%	17.90%	6.07%
400	56.80%	20.18%	7.77%
450	53.86%	21.94%	9.33%
500	50.75%	23.21%	10.69%
550	47.64%	24.04%	11.83%
600	44.60%	24.53%	12.72%
650	41.67%	24.72%	13.37%
700	38.90%	24.67%	13.79%
750	36.29%	24.43%	14.01%
800	33.85%	24.03%	14.06%

表 4.2.4.3-5 NHTSA による 6 歳児の頭部傷害の発生確率[8]

HIC	MAIS 1	MAIS 2	MAIS 3
50	13.99%	0.07%	0.00%
100	33.88%	0.86%	0.04%
150	47.45%	2.73%	0.23%
200	55.51%	5.35%	0.71%
250	59.73%	8.33%	1.50%
300	61.40%	11.31%	2.57%
350	61.41%	14.10%	3.84%
400	60.33%	16.59%	5.22%
450	58.57%	18.71%	6.64%
500	56.39%	20.47%	8.00%
550	53.99%	21.87%	9.27%
600	51.47%	22.96%	10.40%
650	48.93%	23.74%	11.39%
700	46.41%	24.28%	12.21%
750	43.95%	24.60%	12.87%
800	41.59%	24.72%	13.38%

4.2.4.3.4.2 頸部傷害

(1) 頸部傷害レベル

頸部傷害に関する AIS の大まかな定義は以下のとおりである。

- ・ AIS 1：頸椎捻挫など
- ・ AIS 2：頸椎骨折，亜脱臼など
- ・ AIS 3：一過性の頸髄損傷など

(2) 大人および子供の頸部傷害

米国 NHTSA は，過去の動物実験 (Mertz 等[10]，Prasad 等[11]) のデータから，頸部傷害の発生確率の関数 (リスクカーブ) を，式 4.2.4.3-2 の様に提案している[12]．軽症 (AIS 1) の確率は，整備されていないが，AIS 2 のデータは，頭部傷害と異なり，重傷データのから推測ではなく，動物実験データから求めた値である．

$$p(\text{AIS} \geq 2) = \frac{1}{1 + e^{2.054 - 1.195N_{ij}}}$$

$$p(\text{AIS} \geq 3) = \frac{1}{1 + e^{3.227 - 1.969N_{ij}}}$$

$$p(\text{AIS} \geq 4) = \frac{1}{1 + e^{2.693 - 1.195N_{ij}}}$$

$$p(\text{AIS} \geq 5) = \frac{1}{1 + e^{3.817 - 1.195N_{ij}}}$$

(4.2.4.3-3)

ここに、 $p(\text{AIS} \geq n)$ は AIS n 以上の傷害が発生する確率、また、

$$N_{ij} = F_z / F_{zc} + M_{ocy} / M_{yc}$$

(4.2.4.3-4)

F_z は頸部軸力、 F_{zc} は頸部軸力を基準化するための臨界値。 M_{ocy} は頸部曲げモーメント、 M_{yc} は頸部曲げモーメントを基準化するための臨界値で、表 4.2.4.3-6 に定義される。

表 4.2.4.3-6 式 4.2.4.3-3 における頸部軸力および頸部曲げモーメントの臨界値[12]

ダミー	サイズ	F_{zc} Tension (N)	F_{zc} Compressions (N)	M_{yc} Flexion (Nm)	M_{yc} Extension (Nm)
CRABI	12ヶ月児	1465	1465	43	17
Hybrid III	3歳児	2120	2120	68	27
Hybrid III	6歳児	2800	2800	93	39
Hybrid III	小柄な女性	3370	3370	155	62
Hybrid III	中寸法の男性	4500	4500	310	125
Hybrid III	大柄な男性	5440	5440	415	166

NHTSA[8] は、上記とほぼ同一だが、軸力とトルクの臨界値が異なるデータも公表している（表 4.2.4.3-7）。

表 4.2.4.3-7 式 4.2.4.3-3 における頸部軸力および頸部曲げモーメントの臨界値
(NHTSA の異なる報告) [8]

ダミー	サイズ	F_{zc} Tension (N)	F_{zc} Compressions (N)	M_{yc} Flexion (Nm)	M_{yc} Extension (Nm)
CRABI	12ヶ月児	1460	1460	43	17
Hybrid III	3歳児	2340	2120	68	30
Hybrid III	6歳児	3096	2800	93	42

(3) 子供の頸部傷害に関する補完データ

NHTSAによる式(4.2.4.3-3)は、統計処理により導出されているために、頸部軸力と頸部曲げモーメントが零の場合にも傷害の発生確率は零とならないが、Palisson等[13]は、3歳児について、頸部軸力1450 N未滿または曲げモーメント13 Nm未滿では、子供の頸部傷害は確認されなかったことを、報告している。これは、欧州のCHILD projectの40例の子供の事故データからデータを3歳児に換算した結果によるものである。

4.2.4.3.4.3 胸部傷害

(1) 胸部傷害レベル

頭部傷害に関するAISの大まかな定義は以下のとおりである。

- ・ AIS 1：胸壁の創挫傷，肋骨1本の骨折
- ・ AIS 2：穿通創挫傷，肋骨2～3本の骨折など
- ・ AIS 3：肋骨4本以上の骨折など

(2) 大人の胸部傷害

Eppinger等[12]は、エアバッグとベルトによる胸部傷害について、過去のデータを再解析した結果、Hybrid III 50th percentile male dummyの胸の最大変位 D_{max} の関数として傷害発生確率を求めている

$$\begin{aligned}
 p(\text{AIS} \geq 2) &= \frac{1}{1 + e^{(1.8706 - 0.04439D_{max})}} \\
 p(\text{AIS} \geq 3) &= \frac{1}{1 + e^{(3.7124 - 0.0475D_{max})}} \\
 p(\text{AIS} \geq 4) &= \frac{1}{1 + e^{(5.0952 - 0.0475D_{max})}} \\
 p(\text{AIS} \geq 5) &= \frac{1}{1 + e^{(8.8274 - 0.0459D_{max})}}
 \end{aligned}
 \tag{4.2.4.3-5}$$

$p(\text{AIS} \geq n)$ はAIS n 以上の傷害が発生する確率。

(3) 大人の胸部傷害に関する補完データ

Eppinger等[12]の報告には、軽症(AIS 1)の確率が記載されていないが、ISO 13232-5:200のAnnex G (informative)には、胸骨の最大変位と傷害確立の関係が参考値として掲載されている(図4.2.4.3-4)。このデータの根拠であるKroell等[14]の報告には、AIS 1のデータは含まれておらず、傷害確率は推測値であると考えられるが、軽症の発生確率に関する今後の研究成果が得られるまでの暫定値として使用することを提案する。

表 4.2.4.3-8 大人の胸部最大変位と胸部傷害確率の推測値
(ISO 13232-5: 2005 Annex G informative の掲載図より読み取った概略値)

胸変形量	発生確率		
	AIS 1以上	AIS 2以上	AIS 3以上
10%	0%	0%	0%
20%	18%	2%	0%
30%	95%	50%	12%
40%	100%	100%	88%
50%	100%	100%	100%

(4) 子供の胸部傷害

米国 NHTSA は、大人の胸部傷害発生確率の関数から胸部の寸法を基にした換算（スケールリング）により、子供の胸部傷害の発生確率の関数（リスクカーブ）を提案している [8].

- ・ 12 ヶ月児 (12-month-old CRABI ダミー) の胸の傷害確率

$$\begin{aligned} p(\text{AIS} \geq 2) &= [1 / (1 + \exp(1.8706 - 0.09322 d))] \times 100\% \\ p(\text{AIS} \geq 3) &= [1 / (1 + \exp(3.7124 - 0.09975 d))] \times 100\% \\ p(\text{AIS} \geq 4) &= [1 / (1 + \exp(5.0952 - 0.09975 d))] \times 100\% \\ p(\text{AIS} \geq 5) &= [1 / (1 + \exp(8.8274 - 0.09639 d))] \times 100\% \end{aligned} \quad (4.2.4.3-6)$$

- ・ 3 歳児 (3-year-old ダミー) の胸の傷害確率

$$\begin{aligned} p(\text{AIS} \geq 2) &= [1 / (1 + \exp(1.8706 - 0.08225 d))] \times 100\% \\ p(\text{AIS} \geq 3) &= [1 / (1 + \exp(3.7124 - 0.08802 d))] \times 100\% \\ p(\text{AIS} \geq 4) &= [1 / (1 + \exp(5.0952 - 0.08802 d))] \times 100\% \\ p(\text{AIS} \geq 5) &= [1 / (1 + \exp(8.8274 - 0.08505 d))] \times 100\% \end{aligned} \quad (4.2.4.3-7)$$

- ・ 6 歳児 (6-year-old ダミー) の胸の傷害確率

$$\begin{aligned} p(\text{AIS} \geq 2) &= [1 / (1 + \exp(1.8706 - 0.06991 d))] \times 100\% \\ p(\text{AIS} \geq 3) &= [1 / (1 + \exp(3.7124 - 0.07481 d))] \times 100\% \\ p(\text{AIS} \geq 4) &= [1 / (1 + \exp(5.0952 - 0.07481 d))] \times 100\% \\ p(\text{AIS} \geq 5) &= [1 / (1 + \exp(8.8274 - 0.07229 d))] \times 100\% \end{aligned} \quad (4.2.4.3-8)$$

ここに、 $p(\text{AIS} \geq n)$ は AIS n 以上の傷害が発生する確率、 d は胸の最大変位(mm).

(5) 胸部傷害に関する統合的な指標 CTI

衝突時に胸が高速で変形する自動車事故の場合には、胸部加速度も、傷害発生確率の重要な指標とした扱われている。NHTSA (Eppinger 等[12]) は、胸部傷害に関する統合的な指標 CTI を用いることにより、胸の最大変位と加速度の影響を同時に評価するとともに、子供から大人までの傷害発生確率を統合的に評価する方法を報告している (式 4.2.4.3-8).

$$\begin{aligned} p(\text{AIS} \geq 2) &= \frac{1}{1 + e^{(4.847 - 6.036\text{CTI})}} \\ p(\text{AIS} \geq 3) &= \frac{1}{1 + e^{(8.224 - 7.125\text{CTI})}} \\ p(\text{AIS} \geq 4) &= \frac{1}{1 + e^{(9.872 - 7.125\text{CTI})}} \\ p(\text{AIS} \geq 5) &= \frac{1}{1 + e^{(14.242 - 6.589\text{CTI})}} \\ \\ \text{CTI} &= \frac{A_{\max}}{A_{\text{int}}} + \frac{D_{\max}}{D_{\text{int}}} \end{aligned} \quad (4.2.4.3-9)$$

ここに、 $p(\text{AIS} \geq n)$ は AIS n 以上の傷害が発生する確率、 A_{\max} は脊椎の 3 ms 間の最大加速度、 D_{\max} は、胸部最大変位、 A_{int} および D_{int} は、表 4.2.4.3-9 に示す臨界値。

表 4.2.4.3-9 式(4.2.4.3-8)における胸部変位および脊椎加速度の臨界値[12]

ダミー	サイズ	D_{int}	A_{Cnt}
CRABI	12 ヶ月児	50 mm	57
Hybrid III	3歳児	57 mm	74
Hybrid III	6歳児	64 mm	90
Hybrid III	小柄な女性(5th %ile Female)	84 mm	90
Hybrid III	中寸法の男性(50th %ile Male)	103 mm	90
Hybrid III	大柄な男性(95th %ile Male)	114 mm	83

4.2.4.3.4.4 腹部傷害

(1) 腹部傷害レベル

腹部傷害に関する AIS の大まかな定義は以下のとおりである。

- ・ AIS 1 : 挫傷, 20 cm 以下の裂創, 表面的刺創, 腰椎捻挫
- ・ AIS 2 : 20 cm を超える裂創, 皮下組織までの刺創, 椎体骨折, 胃・腸の非穿通の傷害など
- ・ AIS 3 : 腰椎骨折, 胃・腸の穿通傷害など

(2) 大人の腹部傷害

Newman 等[15]は, 大人の腹部傷害に関する Rouhana 等のデータ[16]から仮定により求めたリスクカーブを提案しており, ISO 13232-5 2005 の Annex G (informative) にも引用されている(表 4.2.4.3-10)。ただし, その導出過程が不明確であり, 生活支援ロボットに適用する場合ためには, さらなる調査が必要である。

表 4.2.4.3-10 シートベルトの進入量と腹部傷害確率の関係
(ISO 13232-5 2005 Annex G, informative の掲載図より読み取った概略値)

胸変形量 (インチ)	発生確率		
	AIS 1 以上	AIS 2 以上	AIS 3 以上
1	21%	17%	3%
2	41%	32%	10%
3	62%	47%	22%
4	80%	63%	41%

(3) 子供の腹部傷害

欧州のプロジェクト CREST (Child Restraint System for Cars) [17]は, 子供の腹部傷害に関するデータを 3 歳児にスケーリングすることにより, 3 歳児の腹部傷害の発生確率を分析している(表 4.2.4.3-11)。ただし, この分析は, 特殊な人体ダミーを用いた結果であり, 一般に用いられる子供の人体ダミー(Q シリーズ)では, 腹部の圧縮力が測定できないために, この分析結果が利用できないとしている。本研究では, 今後, 生活支援ロボッ

トの安全評価に腹部の圧縮力が測定できる子供の人体ダミーが導入された場合に備えて、この分析結果を掲載しておく。

表 4.2.4.3-11 3歳児の腹部傷害の発生確率
(文献[17]の掲載図より読み取った概略値)

腹部荷重 (kN)	AIS 2 以上の傷害発生確率
0.5	24%
1.0	55%
1.5	82%

4.2.4.3.4.5 腰部傷害

(1) 腰部傷害レベル

腰部傷害に関する AIS の大まかな定義は以下のとおりである。

- ・ AIS 2：単純閉鎖性骨折
- ・ AIS 3：開放性骨折，仙腸骨骨折，恥骨結合離解

(2) 大人の腰部傷害

米国 NHTSA [18]は，Kuppa [19]のデータを再整理することにより，側面衝突時の骨盤に AIS2 以上の障害が発生する確率を，小柄な女性（5%タイルの米国女性，AF05）について，次式で表している。

$$p(\text{AIS} \geq 2) = [1 / (1 + \exp(6.3055 - 0.00094 F))] \times 100\% \quad (4.2.4.3-10)$$

ここに， $p(\text{AIS} \geq 2)$ は AIS 2 以上の傷害が発生する確率， F は，側面衝突用人体ダミー SID-II 人体ダミーに加わる骨盤横力（単位は N）である。

(3) 子供の腰部傷害

本研究の調査範囲では，子供の腰部傷害の発生確率に関するデータは見出されなかった。

4.2.4.3.4.6 上肢の傷害

(1) 上肢の傷害レベル

上肢の傷害に関する AIS の大まかな定義は以下のとおりである。

- ・ AIS 1：上肢捻挫，指骨骨折
- ・ AIS 2：手・上肢・肩・鎖骨骨折，上肢筋・腱断裂など
- ・ AIS 3：上肢の変位のある骨折・切断・クラッシュなど

(2) 大人の腕の傷害

上肢に関する傷害データは，自動車分野でも十分に研究されておらず，他の部位のような傷害発生確率の情報は提供されていない。本研究では，Duma 等[20]が死体の前腕と上腕の動的曲げ試験から求めた小柄な女性（5%タイル米国女性，AF05）の骨折限界 58.12 Nm_uを参照することを提案する。

Duma は，腕の骨の衝撃骨折試験（手のひらを下向きにした状態で上方から衝撃を与えた）における最大曲げモーメント 70.13 Nm Eppinger et al. (1984) の手法に従って 5 パーセントタイルの小柄な女性の腕の値 58.12 Nm に換算した。

(3) 子供の腕の傷害

本研究の調査範囲では、子供の上肢の傷害の発生確率に関するデータは見出されなかった。また、これまでのところ子供の上肢に加わる外力やモーメントを測定するための人体ダミーは普及しておらず、今後の課題となっている。

4.2.4.3.4.7 下肢の傷害

(1) 下肢の傷害レベル

下肢の傷害に関する AIS の大まかな定義は以下のとおりである。

- ・ AIS 1：足趾骨折・脱臼など
- ・ AIS 2：足・膝蓋骨・下腿骨骨折・脱臼など
- ・ AIS 3：大腿骨骨折，下肢切断（膝下）など

(2) 大人の下肢の障害

自動車分野では大腿部および下腿部の軸方向圧縮による傷害に関する基準が施行されてきたが、生活支援ロボットの場合には、曲げモーメントによる傷害を評価する必要がある。そこで、近年検討されている歩行者の下腿部障害に関するデータを用いることを提案する。Takahashi 等[21]は、過去の死体実験のデータを解析することで、下腿部の曲げモーメントによる骨折の発生確率を求めた。

$$p = 1 - \exp[-\exp\{5.77458 \cdot \ln(M) - 34.51175\}] \quad (4.2.4.3-11)$$

ここに、 p は骨折の発生確率、 M は曲げモーメント(Nm)。

(3) 子供の下肢の傷害

本研究の調査範囲では、子供の上肢の傷害の発生確率に関するデータは見出されなかった。また、これまでのところ子供の上肢に加わる外力やモーメントを測定するための人体ダミーは普及しておらず、今後の課題となっている。

4.2.4.3.4.8 足の傷害

ロボットが人の足を踏んだ場合の傷害について、本研究における熊の足を用いた検討結果（付属書 C.1）を引用する。同検討結果によれば、小柄な女性（5 percentile female）の足で最も骨折しやすいと考えられる中足骨の寸法換算因子は、3.20 であった。この値を用いて、熊足の骨折確率と寸法因子の関係を、人足の骨折確率と荷重の関係に換算すると、図 4.2.4.3-2 が求められる。この図は、より多くの実験データによる補強を要するが、当面、ロボットが人の足を踏んだ場合の足の傷害の発生確率として用いることを提案する。

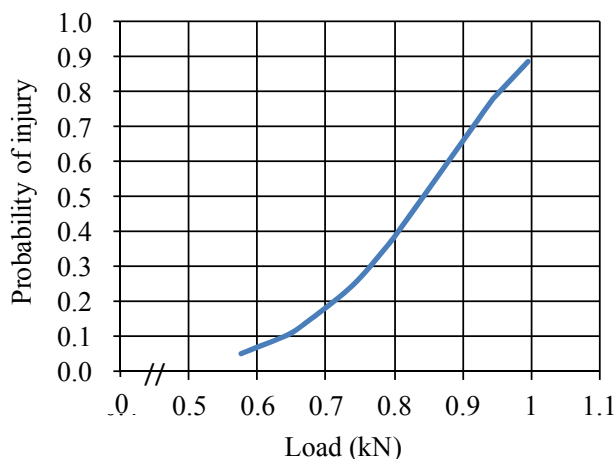


図 4.2.4.3-2 ロボットが人の足を踏んだ場合の足の傷害の発生確率（小柄な女性の骨折）

4.2.4.4 試験結果の例

生活支援ロボットの事故事例がないために、リスク算定の根拠となるデータが不足している。そこで、典型的な移動作業型ロボットを模した移動体を供試体とした衝突試験を実施して、データを取得した。

(1) 想定ケース

壁に面して倒立している6歳児に、移動作業型ロボットが正面から衝突するケースを想定した。予備試験の結果によると、壁に面して倒立したケースは、壁のない状態で衝突したケースよりも、頭部の加速度および胸の変形が大きかった。このため、最悪のケースを想定したリスクアセスメントに用いるデータとしては、壁に面して倒立したケースを想定することが適切であると考えた。

(2) 人体ダミー

子供は、大人に比べて危害が酷くなる傾向がある。その内、大人の監視を離れてロボットと接する可能性のある6歳児を対象とした。欧州で標準化が検討されているQ6ダミーを用いた。

(3) ロボット

移動作業型ロボットを模した移動体を用いた。外板に覆われた軟鋼製構造に4輪を差装着した物で、外板には、量産品に多く使われているポリスチレンを用いた。

(4) 試験条件

移動体（ロボット）の質量は、移動作業型ロボットに想定される範囲、20～200 kgとした。衝突速度は、電動車いすと同等の最高速度を含む2～6 km/hとした。



図 4.2.4.4-1 移動作業型ロボットを模した移動体

(5) 頭部傷害に関する試験結果

頭部加速度の時系列データと同時に撮影した高速度ビデオの比較から、以下の様に、頭部と壁（衝突用バリア）の衝突が、頭部傷害の主要な原因であることがわかった。図 4.2.4.4-2 の時間 = 0 s にいて、ロボットと頭部が最初に接触した際には、僅かな加速度変動が記録されたのみである。時間 = 0.09 s に頭部が壁と接触した際には、 1000 m/s^2 を超える加速度が発生している。その後、頭部とロボットは振動的な動きを呈するために、0.11 s 付近で再び加速度の上昇が見られるが、頭部の障害指標である HIC_{15} は、最大ピークの周辺 15 ms のみから算出されるために、この上昇は、傷害推定値には影響を及ぼさない。

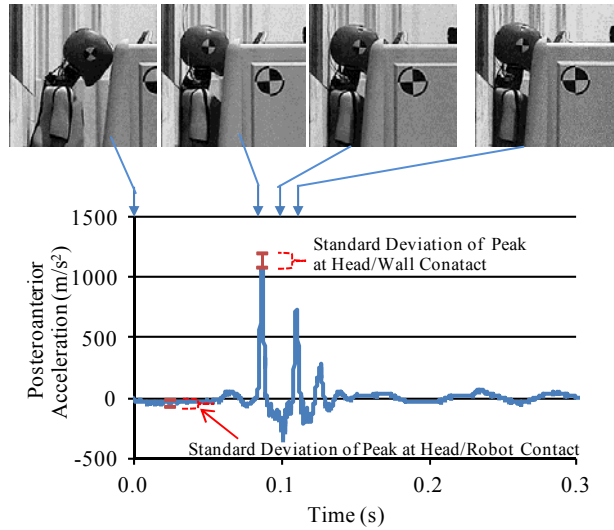


図 4.2.4.4-2 頭部加速度の測定結果

Haddadin 等は、ロボットのマニピュレータの質量と衝突速度が、人体傷害の重要なパラメータであると報告している [22, 23]. 図 4.2.4.4-3 は、本実験においてロボットの質量と衝突速度を変化させた場合の HIC_{15} の測定結果を示す. 質量 200 kg , 速度 6 km/h の場合には, HIC_{15} は 217 の値を示している. この値を, 前節の 6 歳児の頭部傷害確率のデータに当てはめると, 45% の確率で AIS 1 以上の傷害が発生することに相当する. また, 図 4.2.4.4-3 は, ロボット質量または衝突速度を減少させることで, HIC_{15} が低下できることを示している.

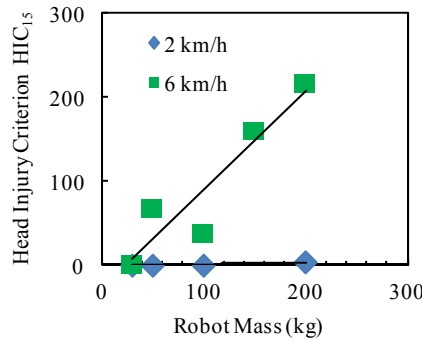


図 4.2.4.4-3 ロボットの質量および速度と HIC の関係

(6) 頸部傷害に関する試験結果

図 4.2.4.4-4 は、本実験においてロボットの質量と衝突速度を変化させた場合の N_{ij} の測定結果を示す. いずれの測定条件においても, N_{ij} は 0.32 以下である. これを前節の 6 歳児の頸部傷害確率データに当てはめると, AIS 2 以上の傷害発生確率は 20%未満であることがわかる. 前節のデータは, 統計処理の結果であるために, N_{ij} が零の場合にもにおいても, 傷害発生確率は零にならない. しかし, Palisson 等[13]は, 頸部張力 1450 N 未満または曲げモーメント 13 Nm 未満では, 子供の頸部傷害は確認されなかったことを, 3 歳児に換算した 40 例の子供の事故データから報告している. これらの力, 曲げモーメントを 6 歳児に換算すると, $N_{ij} < 0.34$ for に相当する. このことから, 今回実験した, 質量 200 kg 以下, 衝突速度 6 km/h 以下の条件では, 6 歳児の頸部傷害が発生する確率は, 僅かであると推定される.

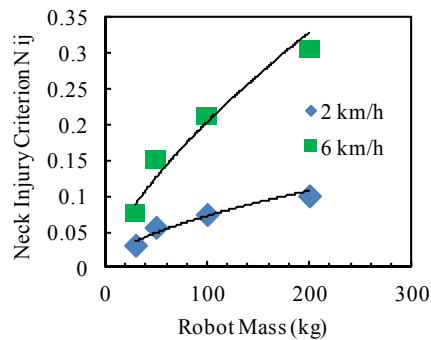


図 4.2.4.4-4 ロボットの質量および速度と N_{ij} の関係

(7) 胸部傷害に関する試験結果

図 4.2.4.4-5 は、本実験においてロボットの質量と衝突速度を変化させた場合胸部最大変位の測定結果を示す。いずれの測定条件においても、最大変位は 9 mm 未満である。これを前節の 6 歳児の胸部傷害確率データに当てはめると、AIS 2 以上の傷害発生確率は 20% 未満であることがわかる。前節のデータは、統計処理の結果であるために、胸部最大変位が零の場合にも、傷害発生確率は零にならない。しかし、Palisson 等は、胸部最大変位 20 mm 未満では、子供の胸部傷害は確認されなかったことを、3 歳児に換算した 24 例の子供の事故データから報告している [13]。このことから、今回実験した質量 200 kg 以下、衝突速度 6 km/h 以下の条件では、6 歳児の頸部傷害が発生する確率は僅かであると推定される。

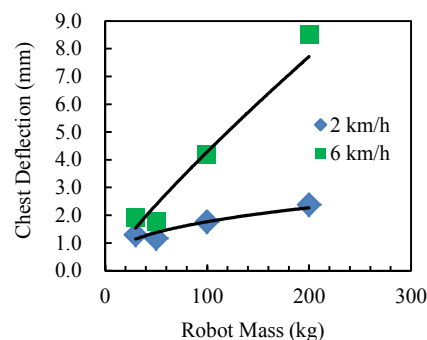


図 4.2.4.4-5 ロボットの質量および速度と胸部最大変位の関係

参考文献

- [1] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, and G. Hirzinger “Safety evaluation of physical human-robot interaction via crash-testing,” Robotics: Science and Systems Conference (RSS2007), Atlanta, USA, pp. 217-224, 2007.
- [2] S. Haddadin, A. Haddadin, S. Khoury, T. Rokahr, S. Parusel, R. Burgkart, A. Bicchi, and A. Albu-Schäffer, “On making robots understand safety: Embedding injury knowledge into control,” Int. J. of Robotics Research, 2012
- [3] David J. Gutekunst, Tarpit K. Patel, Kirk E. Smith, Paul K. Commean, Matthew J. Silva, David R. Sinacore : Predicting ex vivo failure loads in human metatarsals using bone strength indices derived from volumetric quantitative computed tomography, Journal of Biomechanics, (2012)

- [4] H. J. Mertz et. al., Injury risk curve for children and adults in frontal and rear collisions, SAE973318, 1997.
- [5] M. Kleinberger et. al., Development of improved injury criteria for the assessment of advanced automotive restraint systems, NHTSA, 1998.
- [6] ISO20501:2003
- [7] JIS R1625:2010
- [8] National Highway Traffic Safety Administration, Proposed Amendment to FMVSS No 213 Frontal Test Procedure, U.S. Department of Transportation, 2002.
- [9] National Highway Traffic Safety Administration, www.nhtsa.gov.
- [10] H. J. Mertz et. al., Response of animals exposed to deployment of various passenger inflatable restraint system concepts for a variety of collision severities and animal positions, SAE826047, PT31, 1982.
- [11] P. Prasad et. al., A biomechanical analysis of head, neck and torso acceleration, SAE841656, 1984.
- [12] R. Eppinger et. al., Development of improved injury criteria for the assessment of advanced automotive restraint systems -2, NHTSA Docket No 1999-6407-5, 1999.
- [13] Palisson et. al., Estimating Q3 dummy injury criteria for frontal impact using the child project results and scaling reference values, IRCOBI conference pp 263-276. Maastricht, 2007.
- [14] Kroel et. al., Impact tolerance and response of the human thorax II, SAE741187, 1974.
- [15] J. A. Newman et. al., Toward a comprehensive biomechanical injury cost model, 36th Ann. Proc. of AAAM Conf., 1992.
- [16] S.W. Rouhana et. al., Assessing submarining and abdominal injury risk in the Hybrid II family of dummies: part II - development of the small female frangible abdomen, SAE902317, 1990.
- [17] Child Restraint System for Cars.
- [18] National Highway Traffic Safety Administration, Consumer Information; New Car Assessment Program, Federal Register / Vol. 73, No. 134 / Friday, July 11, 2008 / Notices, Docket No. NHTSA-2006-26555.
- [19] S. Kuppa, Injury criteria for side impact dummies, NHTSA Biomechanics research center, 2004.
- [20] Duma et. al., Dynamic injury tolerances for long bones of the female upper extremity, J. Anat., 1999.
- [21] Takahashi et. al., Development of injury probability functions for the flexible pedestrian legform impactor, SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst. 5(1):2012, doi:10.4271/2012-01-0277.
- [22] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, A. De Luca, and G. Hirzinger,, "Collision Detection and Reaction: A Contribution to safe physical human-robot interaction," in IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS2008), Nice, France, 2008, pp. 22-26.
- [23] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, M. Frommberger, J. Roßmann, and G. Hirzinger, "The DLR Crash Report: Towards a standard crash-testing protocol for robot safety - part I: Results," in IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA2009), Kobe, Japan, 2009, pp. 272-279.

4.2.5 挟圧安全性試験 [安衛研]

4.2.5.1 目的

本試験では、生活支援ロボットのマニピュレータが人体を挟圧する状態に対して、危害の発生を防止するために講じられる保護方策の有効性（挟圧安全性）を検証する。主としてマニピュレータを具備した生活支援ロボットを対象にするが、4.2.5.3.1に述べる試験条件の範囲で、頭部もしくは上腕の挿入が予見されるロボット内部の挟圧部にも適用することが可能である。

4.2.5.2 研究開発の経緯（挟圧状態での安全を判定する指標）

現在、人との協働作業を意図した産業用ロボットの安全基準としてISOの技術仕様ISO/TS 15066[1]が策定されつつあり、その中で、静的に挟圧された場合での人体の特定部位ごとの疼痛発現レベルとして押し付け面圧の値と、傷害発現レベルとして押し付け力の値が提案されている。ただし、これらの値は、数年前からドイツで開始された研究[2, 3]に基づいたもので、現在もなお研究は継続されており、今後の改訂での変更が示唆されているといった位置付けの値であるうえ、測定結果の5パーセンタイル値/算術平均/中央値のいずれか明示されていないなどの問題もあることから、国際的な合意を得る見通しは必ずしも立っていない。

このため、試験方法の開発にあたり、本研究では、筆者らが過去に行った機械的刺激に対する体性感覚の限界（痛覚耐性値）の測定結果[4, 5]を、挟圧安全性の判定指標として仮定することとした。これは、健常な成人男性9名を被験者として、マニピュレータと接触する可能性が比較的高いと予測される図4.2.5-1に示す13部位を先端が球形の金属製プローブを押し込んだ際に、痛みを受容できる限界でのプローブ押し付け力を痛覚耐性値として、また、接触から痛みの限界までのプローブの押し込み量を許容最大変位量として測定したものである。各測定部位における痛覚耐性値と許容最大変位量の平均値、標準偏差及び測定値が正規分布に従うとしたときの5パーセンタイル値を各々表4.2.5-1と表4.2.5-2に示す。判定指標には、マニピュレータの形状や構造といった個別の理由から挟圧が特定の人体部位に限定される場合を除き、全身のうち最も小さい5パーセンタイル値を参照することとなるが、測定した範囲では上腕（肩峰点と橈骨点の間高さにある上腕内側の点）の値が最も小さく57.7 Nであった。

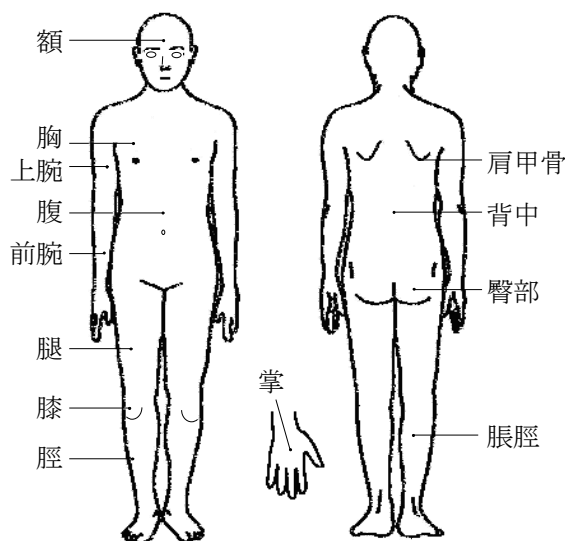


図 4.2.5-1 痛覚耐性値の測定部位 [4]

表 4.2.5-1 痛覚耐性値

単位：N

測定部位	平均	標準偏差	5パーセント値
額	150.7	32.2	97.6
胸	131.1	29.2	83.0
腹	130.5	37.4	68.8
肩甲骨	248.7	47.9	169.7
上腕	112.6	33.3	57.7
前腕	157.3	54.9	66.7
掌	200.8	47.4	122.5
背中	294.1	47.5	215.7
臀部	276.0	67.2	165.2
腿	226.6	33.4	171.6
膝	217.7	56.2	125.1
脛	185.1	67.0	74.5
脛脛	199.5	54.6	109.4

表 4.2.5-2 許容最大変位量

単位：mm

測定部位	平均	標準偏差	5パーセント値
額	3.1	0.7	2.1
胸	28.9	6.2	18.7
腹	52.2	18.8	21.1
肩甲骨	29.9	8.1	16.6
上腕	26.8	4.5	19.5
前腕	19.0	3.2	13.6
掌	7.2	1.4	4.9
背中	28.3	8.8	13.7
臀部	75.7	13.7	53.0
腿	39.0	4.4	31.7
膝	18.6	3.2	13.3
脛	8.6	3.3	3.2
脛脛	32.2	5.1	23.8

4.2.5.3 成果

4.2.5.3.1 試験条件（本試験の対象となる挟圧状態の明確化）

痛覚耐性値は、測定対象の各部位をそれよりも広い金属製の板の上に置いた状態で、先端が直径 10 mm の球形をしたステンレス製プローブを体表面から骨に向う一方向から直線的に押し込む方法で測定された値であり[4, 5]、この測定条件と同等と見做される挟圧状態についてのみ安全の指標として適用できる。実際のマニピュレータと人との間で起こり得る人体の挟圧には様々な形態のものが考えられるが、これらを次の四つの観点から分類し、痛覚耐性値を判定指標とする本試験で対象になる挟圧の形態を明確にしておく。

なお、本 NEDO 生活支援プロジェクトでは、人と同じ環境にロボットが複数存在するとしても、同時に複数のロボットが危険事象をもたらす場合までは想定していない。このため、本試験も、人を挟圧するマニピュレータは一つであるとの仮定に立つ。

①発現する危害による分類：

人体の一部が挟まれた結果として被る危害を大別すると、図 4.2.5-2 に示す圧迫（押しつぶし）、せん断、曲げ、突き刺し、切傷、摘みが考えられる。このうち、せん断と曲げについては、人体に加わる荷重及びその結果生じる人体の変形の形態が静的な圧迫と明らかに異なるので、痛覚耐性値に基づいて安全を判定することは適切ではない。同様に、摘みも、皮膚表面に平行な方向での皮膚の挟み込みであることから痛覚耐性値を判定の指標とはできない。切傷と突き刺しは、これらが人体に接触するマニピュレータ部位の形状に依存して起こるものであるため、球面と平面との挟圧で得られた痛覚耐性値を適用は適切ではない。以上のことから、本試験では、その結果が人体部位の圧迫となる形態の挟圧状態のみが対象となる。特に、エンドエフェクタについては、それによる危害が突き刺しや切傷ではなく圧迫となる先端が直径 10 mm の球形をした金属製プローブと同等の面として扱える場合を対象とする。

②挟圧面の数による分類：

痛覚耐性値は二つの面の間での圧迫について測定されたものであり、三方向以上から複数の面が人体部位を圧迫（圧縮）するような状況には適用することはできない。

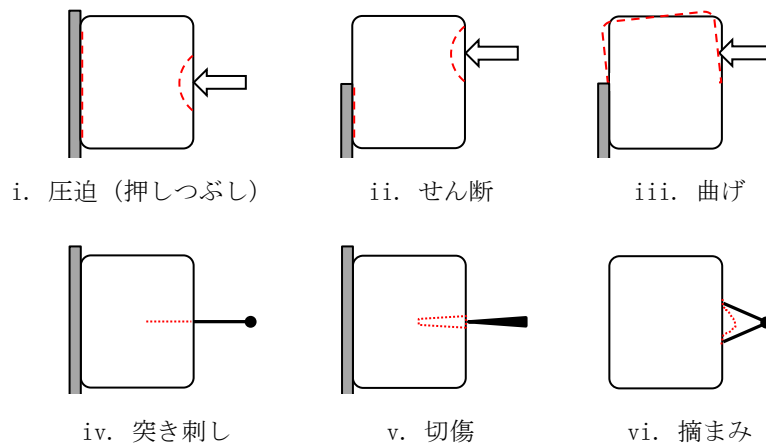


図 4.2.5-2 発現する危害による挟圧の分類

③挟圧面の移動速度による分類：

二つの面の間での圧迫について、各々の面の移動速度の組合せを考えると、両方の面が挟圧される人の立つ基準面に対して相対速度をもつ移動面である場合と、一方が移動面、他方が相対速度をもたない固定面である場合の二通りが考えられる。移動面にはマニピュレータの可動部分のみが該当するが、固定面にはマニピュレータ本体の一部である場合と壁や床などの周囲の障害物である場合とがある。なお、移動面の速度は、測定対象となるマニピュレータの仕様もしくはリスクアセスメントの結果から定めることになる。

④移動面の運動方向による分類：

すべてのマニピュレータは直線動作か回転動作を行う軸の組合せで構成されるので、移動面の動作は直線運動か円弧運動のいずれかで生成されることになる。ただし、痛覚耐性値はプローブを直線的に押し込む方法で測定された値であるため、後者の円弧運動の場合については、その曲率の大きさから圧迫がほぼ直線的であると見做せる場合のみが対象となる。具体的には、実際の痛覚耐性値の測定では、プローブに加わる人体の反力は三分力計によって計測されたが、プローブの移動方向に対して直角方向の成分（プローブと対峙する被験者から見て上下方向の成分と左右方向の成分の合力）がプローブの移動方向の成分よりも大きかった場合には、プローブが人体と正しく接触しなかったとして改めて再測定が行われることとされており[4, 5]、両成分の比をプローブの移動方向を 0°とする角度で表すと、採用された計測結果のうち、50%が 25°未満、90%が 37°未満であった。これに従い、移動面の動作が円弧運動である場合、力センサの主軸の方向が移動面に対して鉛直となるよう力センサを配置した上で、測定の開始から終了までの間、主軸方向の力成分と主軸方向以外の移動面に平行な力成分とがなす角度が 37°を超えない挟圧状態は、本試験の対象に含まれる。

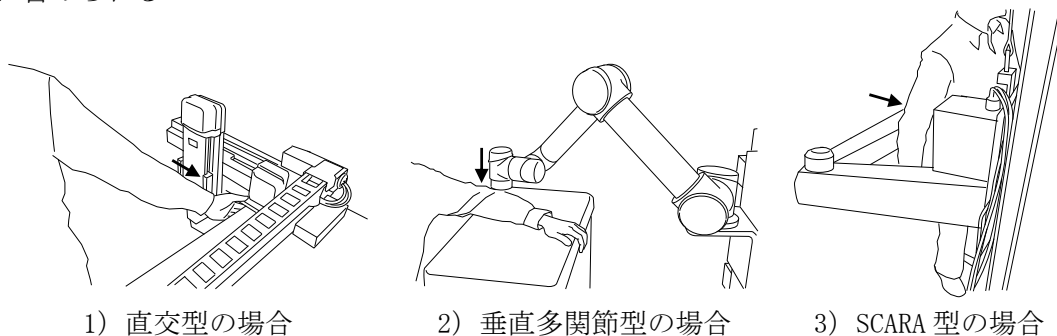


図 4.2.5-3 本試験の対象となる挟圧状態の例

4.2.5.3.2 試験装置

生活支援ロボットの一連の安全性検証では、挟圧防止のために採用された保護方策について、意図する機能が実行される確実性の高さは、方策の原理や構造の妥当性としてコンセプト検証など他の検証プロセスで評価されることとなっており、本試験では、あくまでも保護方策の有効性を評価する。ただし、マニピュレータの保護方策が、力センサや接触式スイッチなどのセンシング手段によって外部との干渉で生じる反力の情報を直接的に得て、あるいは、マニピュレータの動作に伴って発生した制御偏差の量あるいは駆動アクチュエータの消費エネルギー量などの情報から外部に及ぼしている力を推定して、マニピュレータの力出力を停止・調節するいわゆる制御による方策の場合には、単に生じる挟圧力を測定するだけでなく、現実の接触においてマニピュレータが人体部位を変形させていく過程で、どのように接触を検知し、そして挟圧力を抑えるか、講じられた保護方策の一連の挙動を抽出し、痛覚耐性値を超える可能性を検証する必要がある。

この点に関して、接触検知に基づいて可動部の動作を変更（典型的には反転又は停止）することで深刻な圧迫を回避する方策の採用が一般的に行われている機械の安全性試験においては、特定の弾性係数をもつ弾性体を介して力を測定するという方法を採用しているものがいくつかある。例えば、自動車のパワーウィンドウ及び電動ルーフパネルに対する米国自動車安全基準[6]では、それらの閉じ力が100 Nを超えてはならないと規定されているが、その検証試験では、ひずみゲージ式力センサをばね定数が65 N/mm（指の挟圧を模擬）又は20 N/mm（頭や腕などの人体部位の挟圧を模擬）のばねで支えた構造の基準計測器が使用されている（図4.2.5-4参照）。



図4.2.5-4 パワーウィンドウの挟圧安全性試験の例
（図は Sensor Developments, Model 10293）

また、自動回転ドアの安全性要求事項と試験方法を規定した JIS A 4721[7]では、ドア羽根回転力の測定方法として、圧縮形ロードセルで力を直接測定する方法ではなく、係数500 N/mm（±50 N/mm）の弾性（この値は指の剛性率の平均値から導かれたと説明されている[8]）をもつばね性受座を介して測定する方法を規定しており、図4.2.5-5に示すような基準計測器が使用されている。

以上のことから、ここで開発する挟圧安全性試験においても、人体部位との接触から挟圧に至る過程での挟圧防止機能の挙動を抽出し、痛覚耐性値を超える挟圧力が発生する可能性を検証するために、何らかの弾性要素を用いてマニピュレータが人体部位を変形させていく過程を模擬しつつ挟圧力を測定する方法で試験を行うこととした。

ただし、パワーウィンドウや自動回転ドアの試験では、挟圧力の測定に特定の一定の弾性係数をもつ弾性体（すなわち、線形ばね要素）を用いていたが、人体部位が実際に示す反



図 4.2.5-5 自動回転ドアの安全性評価で使用される基準計測器の例
(図は GTE Industrieelektronik, KMG-2000G)

力-変位特性は非線形なものである。例として、額（側頭点を通る頭部外縁と眉間点を通る顔の中心線との交点）、上腕（肩峰点と橈骨点の中間高さにある上腕内側の点）、背中（腰椎の上で最小腹部周と同じ高さの点）、臀部（右側臀部で側方から見て最も後ろに突出した点）について、痛覚耐性値が最小であった被験者と最大であった被験者について、プローブの押し込みに対して増加する反力の様子を図 4.2.5-6 に示す。痛覚耐性値と許容最大変位量自体は被験者ごとに異なるが、いずれの部位でも、プローブが進んでいく（内骨格に近づく）のに従ってプローブ変位に対する反力増加の比（見かけのばね定数）が増すという非線形な反力-変位特性が示されている。

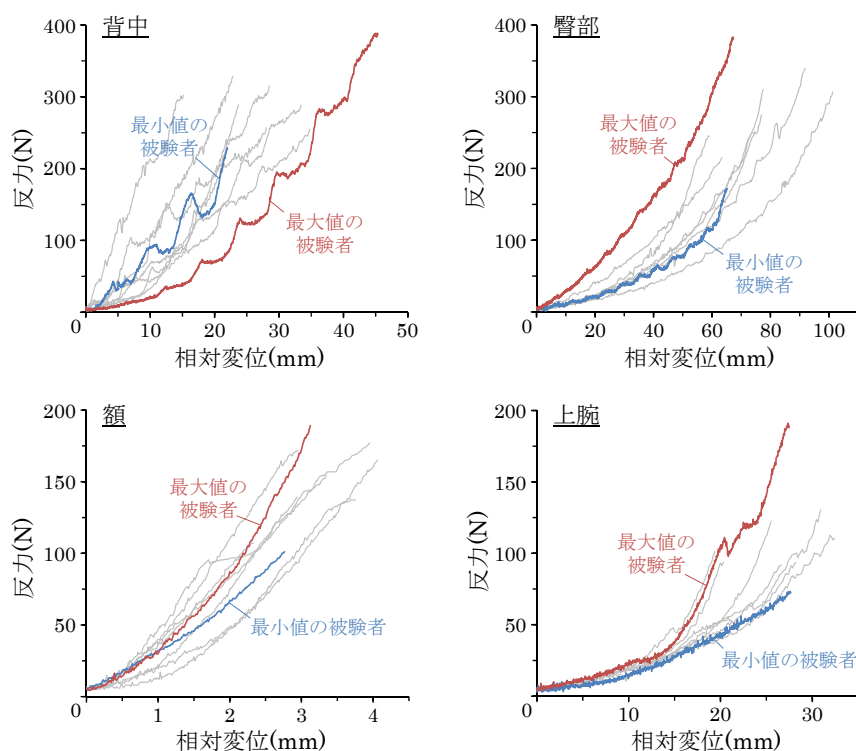


図 4.2.5-6 額、上腕、背中、臀部でのプローブ変位と挟圧部位が示す反力との関係

パワーウィンドウや自動回転ドアと異なり、生活支援ロボットが人間と接触中にマニピュレータがとる動作は直線的な軌道のものばかりではなく、また、仮に人体を挟圧した場合、人体部位を圧迫する力が複数のアクチュエータの駆動力の組合せの結果として発生する場合もある。このため、パワーウィンドウや自動回転ドアの安全性試験で使用される計測器のように人体部位の見掛けの弾性特性を一つのばね定数の弾性要素で代表するのではなく、ここで開発する挟圧安全性試験では、実際に人体が示す非線形な反力-変位特性を反映した条件で保護方策の一連の挙動を計測する必要があると考えられる。

以上のことから、挟圧安全性を評価するための試験装置には、挟圧力の計測に関して以下の機能が必要と言える。

仕様 1) 痛覚耐性値の測定では、人体の反力は三分力計で計測され、各成分の合力として評価された。このため、マニピュレータの挟圧部が人体に及ぼす力についても、移動面に対して鉛直方向の成分だけでなく、移動面に平行な鉛直方向以外の成分も計測し、それらの合力として評価できることが必要である。

仕様 2) 痛覚耐性値の測定では、人体への機械刺激の印加は先端が直径 10 mm の球形をしたステンレス製プローブを接触させることで行われた。このため、マニピュレータの試験対象部位と試験装置の力計測要素とは、直径 10 mm のステンレス球と同等の面積・硬度の条件で接触することが必要である。

さらに、人体の深厚な圧迫を回避するためにマニピュレータに実装される多様な保護方策に対して共通に使用できる試験装置とするために、

仕様 3) 人体部位が示す非線形な反力-変位特性を反映した条件で保護方策の一連の挙動を検証できるよう、挟圧力の測定中、接触開始から移動面の位置変化（押し込み）に応じてその増加率が増していく特性で大きくなる反力を移動面に加えられることが必要である。なお、このことを後のデータ解析において検証できるよう、挟圧力と併せて移動面の押し込み量が計測・記録できることが望ましい。

これらの要求仕様を満たす試験装置の構造として、図 4.2.5-7 に示す小型三分力計（テック技販、USL06-H5-200N）を先端に備えた可動部をばね定数もしくは自然長の異なる複数のコイルばねで支えた構造を提案する。三分力計の荷重受座は、仕様 2) を満たすよう、直径 10mm のステンレス製の突起としている。また、仕様 3) を満たすよう、コイルばねを、模擬しようとする人体部位の非線形な反力-変位特性に応じて異なるタイミングで可動部と接触して圧縮が開始するように前後の位置を設計し、同心軸上に配置している。なお、三分力計のデータと併せて、可動部の移動量を上部のリニアエンコーダ（ムトーエンジニアリング、DX-025 及び CNT-3921）で計測・記録できる。

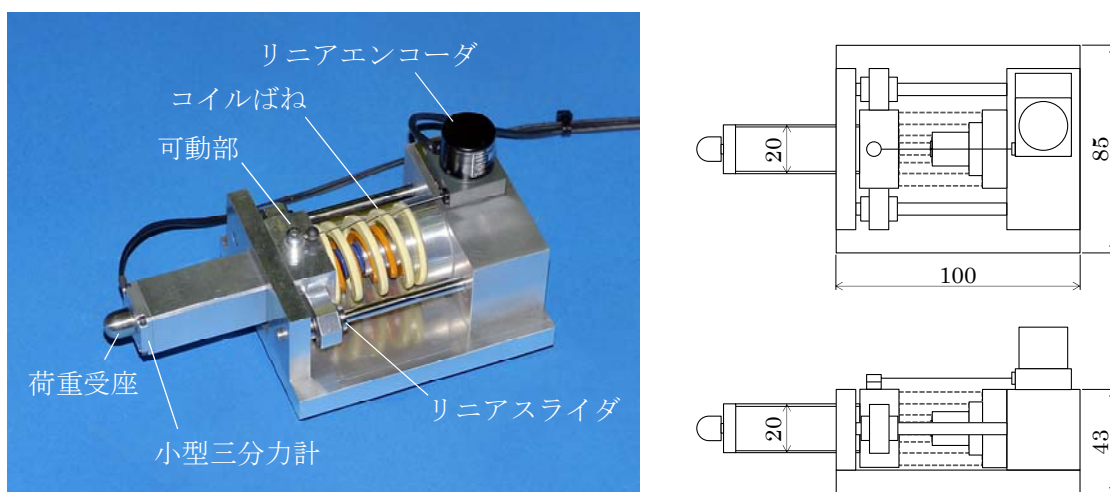


図 4.2.5-7 提案する試験装置の外観

4.2.5.3.1の④で述べたように、実際の痛覚耐性値の測定では、人体の変形はプローブの押し込み方向だけでなく、プローブと対峙する被験者から見て上下・左右の方向にも起こっていた。このため、ここで提案する一方向にのみ可動する三分力計を同軸上に配した複数のコイルばねで支える構造の試験装置は、必ずしも、痛覚耐性値測定時の人体の変形を忠実に再現するものではない。しかし、挟圧力と押し込み量を計測するという要求の下、工学的に比較的容易に任意の反力特性を実現でき、かつ、測定データ解析の際に装置の挙動の理解が容易であること、温度や湿度による特性の変動が少なく繰返し性の高い測定が行えることなどの利点から、挟圧安全性試験の基準測定器の基本モデルとして提案するものである。

なお、人体の特定部位の示す材料力学的特性については現在多くの研究が進められており、今後、挟圧安全性を判定する指標が押し付け力という形で国際的に合意されれば、該当する部位が変形する際に示す反力の特性を本測定装置で模擬することは可能であると考えている。その例として、痛覚耐性値を測定した13部位のうち、痛覚耐性値の5パーセント値が最も小さかった上腕と許容最大変位量の5パーセント値が最も小さかった額（側頭点を通る頭部外縁と眉間点を通る顔の中心線との交点）を対象に、痛覚耐性値の測定データから非線形な反力-変位特性を導き、これらを複数のコイルばねで模擬した結果を付属書C.2に示す。

4.2.5.3.3 評価基準

本試験では、挟圧による危害の発生を防止するために生活支援ロボットのマニピュレータに講じられた保護方策の妥当性を、「事前のリスクアセスメントの結果に基づき、挟圧が予見される人体部位の非線形な反力-変位特性を模擬できる試験装置によって測定した力の値が、当該部位の痛覚耐性値の5パーセント値を超えないこと」をもって判定する。

4.2.5.3.4 試験結果の例

付属書C.2に述べたように、本研究で試作した試験装置では、上腕と額の痛覚耐性値測定データ各々について、反力-変位特性を回帰式として同定し、その95%予測区間の上限と下限で与えられる二つの特性（すなわち、柔らかい特性と硬い特性）を複数のコイルばねの組み合わせで模擬することとした（便宜的に、以下では、上腕の回帰モデルの95%予測区間の上限/下限の特性を模擬したものを、各々、上腕(柔)タイプ/上腕(硬)タイプと、ま

た、額の回帰モデルの 95%予測区間の上限/下限の特性を模擬したものを、各々、額(柔)タイプ/額(硬)タイプと呼ぶ。これらを用いて、三自由度直交型マニピュレータ (IAI 社製 ICSPA3 シリーズ、以下では単に直交型マニピュレータという) を対象に試作した試験装置を用いて挟圧安全性試験を試行した。直交型マニピュレータは、リニアガイド、ボールネジ、AC サーボモータが一体となったリニアサーボアクチュエータを三台組み合わせた構成のもので、汎用多軸サーボコントローラ (IAI 社製 XSEL-K シリーズ) で制御される。主な諸元を表 4.2.5-3 に示す。ここでは、図 4.2.5-8 に示すように、第一軸が動作した時に第二軸の中央部分と周囲の障害物との間で挟圧が生じると想定し、第一軸が動作すると第二軸の中央に荷重受座が押し付けられる位置に、高さ調整のための台座を介して試験装置を固定した。

ただし、使用する直交型マニピュレータはあくまでも汎用のものであって、挟圧を防止するため特別な保護方策 (安全機能) は備えられていない。このため、図 4.2.5-9 に示すように、記録用の三分力計のデータを別途トリガ回路で処理し、力の測定値が設定した値に達したら、遮断回路によってロボットコントローラに擬似的に非常停止信号を入力するシステムを追加した。非常停止時、第一軸のリニアサーボアクチュエータは動力が遮断されてフリーの状態となり、このため、過大な押し付け力の発生が回避される。

表 4.2.5-3 直交型マニピュレータの主な諸元

	第一軸	第二軸	第三軸
型 式	ISA-LXM-I-400	ISA-MYM-I-200	ISA-MXM-I-200
ストローク	1000 mm	200 mm	100 mm
モータ出力	400 W	200 W	200 W
リード	20 mm	20 mm	10 mm
速度	1~1000 mm/s	1~1000 mm/s	1~500 mm/s
定格推力	340.1 N	169.5 N	340.1 N
可搬重量	80 kg (水平)	40 kg (水平)	19 kg (垂直)
コントローラ	プログラム運転多軸コントローラ汎用タイプ 型式: XSEL-K-3-400I-200I-200I B-N1		

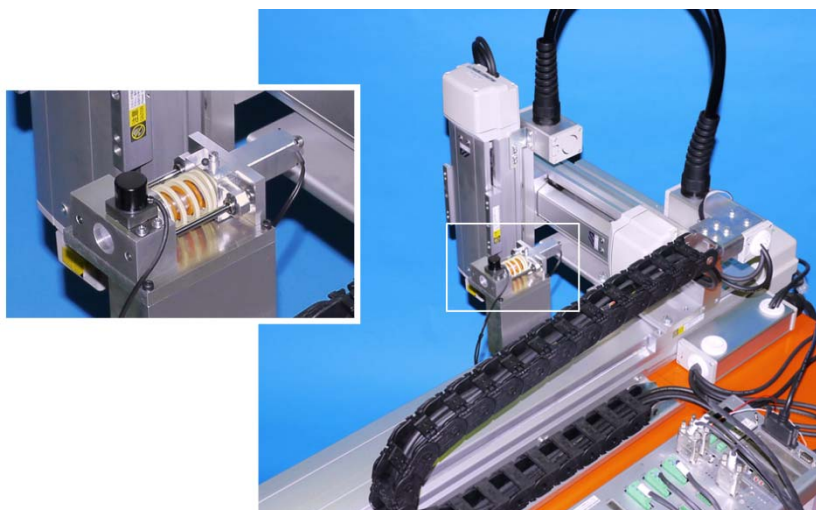


図 4.2.5-8 直交型マニピュレータに対する試験装置の固定位置

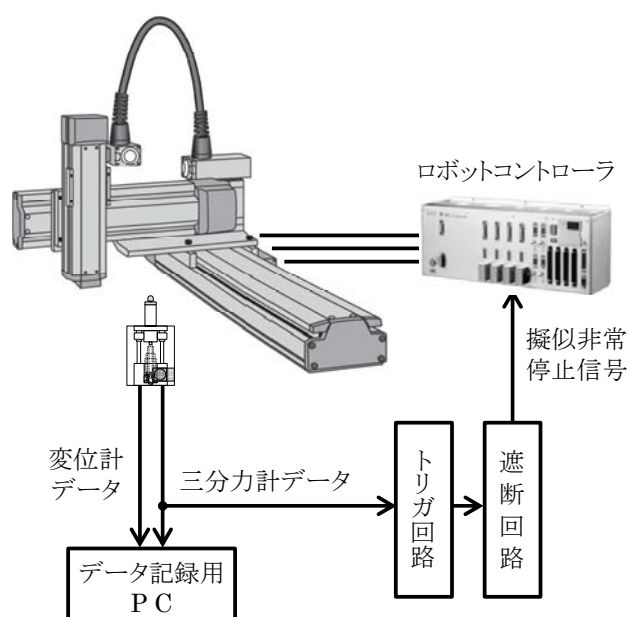


図 4.2.5-9 挟圧防止を模擬的に実行する機能を加えた試験システムの構成

まず、上腕(硬)(柔)タイプの試験装置に押し付ける試験を、三分力計のデータが 55.2 N を超えたときに擬似非常停止信号が入力されるようトリガ回路を設定し、第一軸の速度を 5 mm/s と設定して行った。三分力計からの計測データ及びリニアエンコーダからの変位データは、カットオフ周波数 750 Hz のローパスフィルタで処理し、サンプリング周期 1 msec で記録した。得られた結果として、測定された挟圧力のピーク値及び擬似非常停止信号が発せられてから第一軸が試験装置を圧縮した量(行き過ぎ)を表 4.2.5-4 に示す。上記のトリガ回路の設定で、(硬)と(柔)いずれのタイプでも評価基準を超える挟圧力は測定されなかった。また、擬似非常停止信号入力後、どちらもほぼ同じ行き過ぎを生じており、ばね定数の違いから、上腕(硬)タイプの場合により大きい挟圧力のピーク値が測定された。

表 4.2.5-4 上腕(硬)(柔)タイプの試験装置を使用した試験結果の例

想定挟圧部位	評価基準 (痛覚耐性値)	コイルばね の設定	試験結果(試験回数:5回)	
			挟圧力のピーク	行き過ぎ
上腕	57.7 N	上腕(硬)タイプ	最大 56.7 N (平均 56.65 N)	最大 0.17 mm (平均 0.166 mm)
		上腕(柔)タイプ	最大 55.7 N (平均 55.66 N)	最大 0.17 mm (平均 0.165 mm)

同様に、三分力計のデータが 81.2 N を超えたときに擬似非常停止信号が入力されるようトリガ回路を設定し、第一軸の速度を 5 mm/s と設定して、額(硬)(柔)タイプの試験装置に押し付ける試験を 5 回行った。得られた結果として、測定された挟圧力のピーク値及び行き過ぎ量を表 4.2.5-5 に示す。擬似非常停止信号入力後、どちらもほぼ同じ行き過ぎを生じており、ばね定数の違いから、このトリガ回路の設定では額(硬)タイプの場合に痛覚耐性値を超える挟圧力が測定される結果となった。

表 4.2.5-5 額(硬)(柔)タイプの試験装置を使用した試験結果の例

想定挟圧部位	評価基準 (痛覚耐性値)	コイルばね の設定	試験結果 (試験回数: 5回)	
			挟圧力のピーク	行き過ぎ
額	97.6 N	額(硬)タイプ	最大 100.7 N (平均 100.60 N)	最大 0.17 mm (平均 0.167 mm)
		額(柔)タイプ	最大 86.6 N (平均 86.60 N)	最大 0.17 mm (平均 0.166 mm)

4.2.5.3.5 まとめ

挟圧安全性の試験方法として、文献[4, 5]で報告した痛覚耐性値の5パーセンタイル値を判定指標と仮定した試験を提案し、対象とできる挟圧状態の条件について考察した。本試験で対象とできる挟圧状態は、痛覚耐性値の測定条件の制約を受けたもので、種々の構造をもつマニピュレータで予見される挟圧状態のすべてではない。ただし、このような制約が課せられることについては、今後、ISOなどで挟圧安全性の判定指標が国際的な合意を受けて別途確立したとしても同様のことが言える。すなわち、仮に新たな指標が公表されても、それを測定した際の測定方法や測定条件、計測装置の詳細が明示されなければ、挟圧安全性試験で活用することは極めて困難になると考えられる。

また、マニピュレータに講じられる多様な挟圧防止のための保護方策の有効性を検証するうえでは、挟圧力の測定において、人体部位が示す非線形な反力-変位特性を反映した条件で保護方策の一連の挙動を計測する必要があることを述べ、必要な仕様を満たす試験装置の実現例として、異なるばね定数をもつ複数のコイルばねを組み合わせて使用する構成を提案した。試作した試験装置を用いて汎用の直交型マニピュレータを対象に挟圧安全性試験を試行し、本試験の結果の例として示した。

参考文献

- [1] ISO TC184/SC2: “ISO/CDTS 15066 - Robots and robotic devices - Collaborative robots”, 2010
- [2] Institute for Occupational, Social and Environmental Medicine at the Johannes Gutenberg University of Mainz (Germany): Research project No. FP-0317, Collaborative robots - Investigation of pain sensibility at the Man-Machine-Interface, Interim report June 2013
- [3] DGUV (German Social Accident Insurance): BG/BGIA risk assessment recommendations according to machinery directive (Design of workplaces with collaborative robots), 2011
- [4] H. Ikeda and T. Saito: Proposal of pain tolerance index for the safe design of human-collaborative robots, Proceedings of 4th International Conference Safety of Industrial Automated Systems, Section 1, 2005
- [5] 齋藤剛, 池田博康: 人間協調型ロボットの機械的刺激に対する人体痛覚耐性値限界の測定, 労働安全衛生総合研究所特別研究報告, SRR-No33, pp.15-23, 2005
- [6] 米国運輸省道路交通安全局 FMVSS No.118, 2006
- [7] JIS A 4721:2005 - 自動回転ドア-安全性, 2006
- [8] D. Mewes, F. Mauser: Safeguarding crushing points by limitation forces, International journal of occupational safety and ergonomics, Vol.9, No.2, pp.177-191, 2003

4.2.6 接触安全性試験 [名古屋大]

4.2.6.1 目的

本試験は、装着型パワーアシストロボット(以下装着型ロボット)による装着箇所の創傷を対象とする。

免荷状態あるいは外部からの支持を使用上の制限条件とし、リスクアセスメントを実施した結果(付属書F3の表1および表2)の中で、ロボット装着の際の、カフ接触部位の皮膚に対する繰り返し荷重に伴い発生する可能性のある創傷を具体的な危害と定めた。

4.2.6.2 研究開発の経緯

4.2.6.2.1 参照規格

ISO 13482:2014 “Robots and robotic devices — Safety requirements for personal care robots”

その他関連する参考規格は、付属書F.3に掲載する。

4.2.6.2.2 試験装置の構成

目的に述べた創傷リスクを試験対象とする装置を以下のとおり構成した。すなわちまず、装着型ロボット使用時の皮膚、および装着カフの基準座標系に対する位置を計測するために、モーションキャプチャシステムを使用した。つぎに、カフ装着部位の皮膚に対する相対変位、およびカフと皮膚の間の接触力の両者の検出に装着部接触状態検出装置を用いた。さらに、これらの接触状態を人工皮膚上で再現するためのカフ動作再現装置を開発した。

4.2.6.3 成果

(1) 試験装置の仕様

a) 装着部接触状態検出装置

滑りセンサおよび相互作用力センサは、装置をカフーロボットリンク間に組み込むために十分に小型であることが望まれる。本研究開発で用いた装着型ロボットについて設定した要求仕様を一例とし表4.2.6-1に示す。

表 4.2.6 - 1 センサ要求仕様

項目	要求値	
	滑りセンサ	相互作用力センサ
空間分解能	0.1 mm 以下	0.1 N 以下
計測レンジ	30 mm 以上	100N 以上
時間的分解能	100 Hz 以上 (対象動作による)	100 Hz 以上 (対象動作による)
形状(滑り覚センサ)	30×30 mm (底面) 20 mm (高さ)	30×25 mm (底面) 15 mm (高さ)
備考		4 軸($F_{x/y/z}$, M_z)以上の力覚センサ

また、この要求事項を満たす滑り覚センサの一例として、滑り覚センサの概要図を図4.2.6-2に示す。このセンサはイメージセンサと集光レンズ(Avago technologies 製, ADNS-9500, ADNS-6190-002)を使用している。

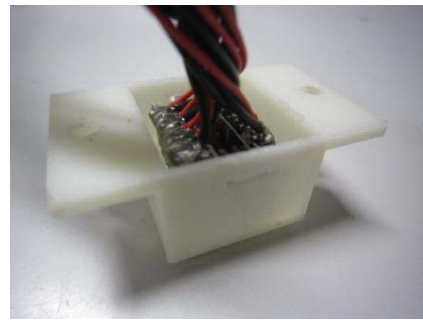
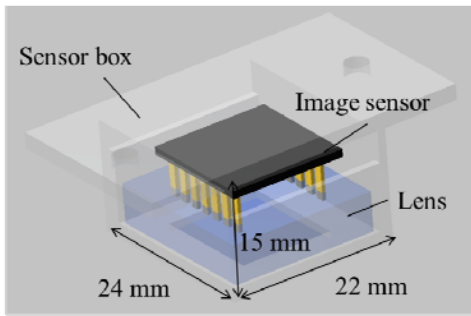


図 4.2.6 - 2 滑り覚センサ概観

次に、相互作用力計測センサを構成する力覚センサを図 4.2.6-3 に示す。本装置においては、3 軸力覚センサ(テック技販社製, USL06-H5-500N)を並列に固定することで 4 軸の計測を行った。



図 4.2.6 - 3 相互作用力センサ配置

上記のセンサを実際に装着型ロボット装着部に適用した際の様子を図 4.2.6-4 に、また、人体皮膚に対する装着部接触状態検出の様子を図 4.2.6-5 に示す。

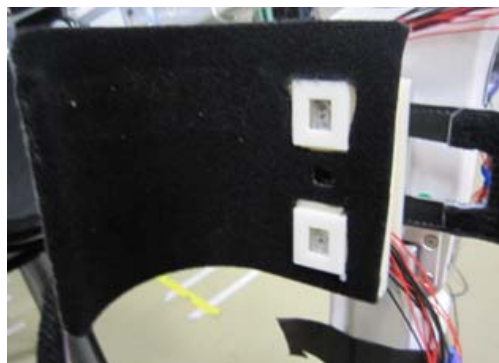
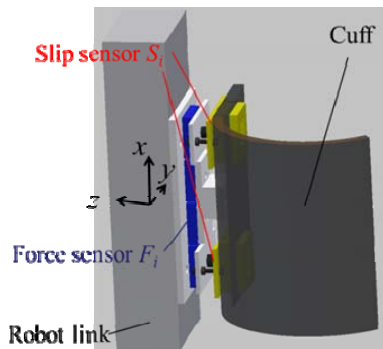


図 4.2.6 - 4 滑り覚センサ配置

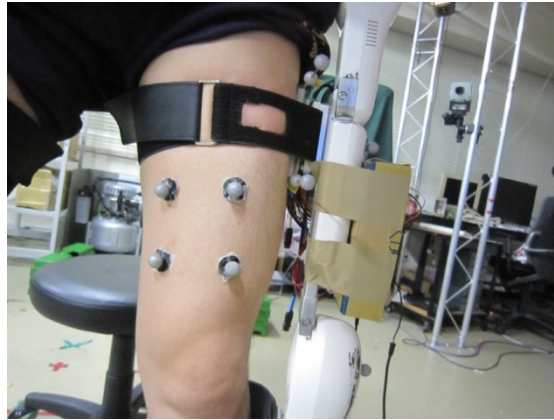


図 4.2.6 - 5 計測装置概観

b) 皮膚特性計測装置

人工皮膚の特性取得には、レオメータを用いる。また、使用者の皮膚特性が明らかでない場合、同様にレオメータを用いて計測する。使用する機器は下記の仕様を満たすことが望ましい。

周波数	0.1 - 10 [Hz]
変位	10^{-2} [rad]
垂直力	5 [N]

また、一例として本研究開発で用いた機器(TA instruments 社製, Discovery Hybrid Rheometer)を示す。



図 4.2.6 - 6 レオメータおよび人体皮膚特性計測実験配置

c) 人工皮膚

人工皮膚は代表的使用者に合致した粘弾性特性および摩擦係数を有することが必要である。研究開発においては 20 代前半の成人男性を対象とした皮膚特性計測を行ったが、その際の代表的特性を下記に示す。

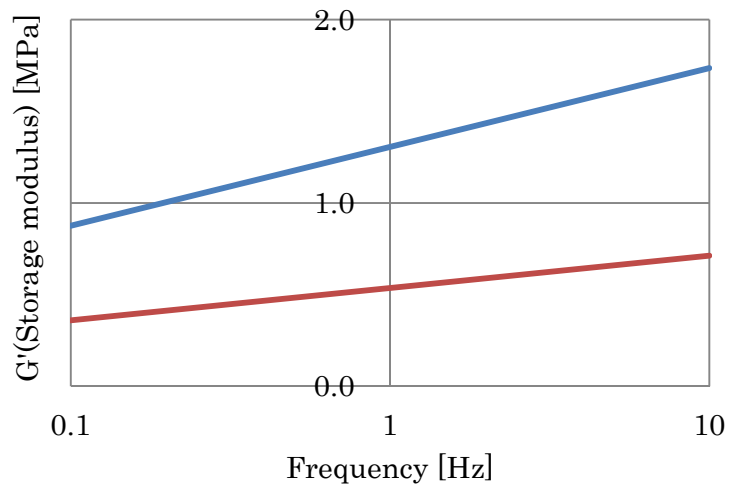


图 4.2.6 - 7 要求貯蔵弾性率

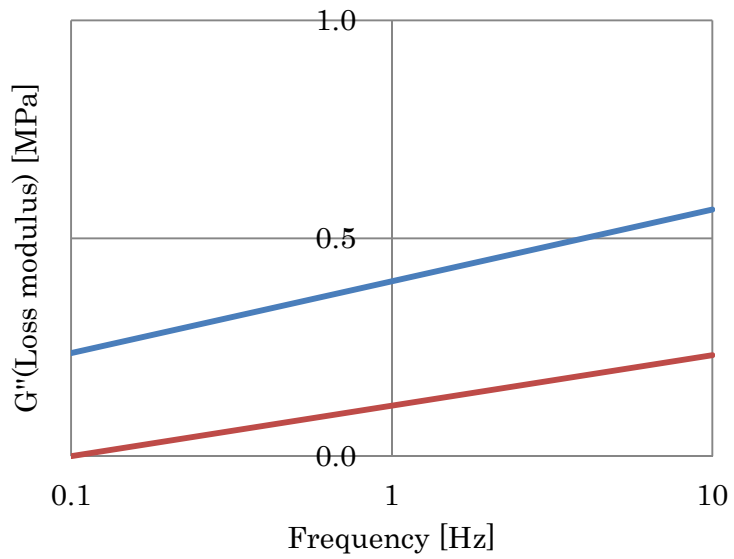


图 4.2.6 - 8 要求損失弾性率

表 4.2.6 - 3 要求摩擦係数

静摩擦係数	0.93
動摩擦係数	0.84

また、開発した人工皮膚を下記に示す。

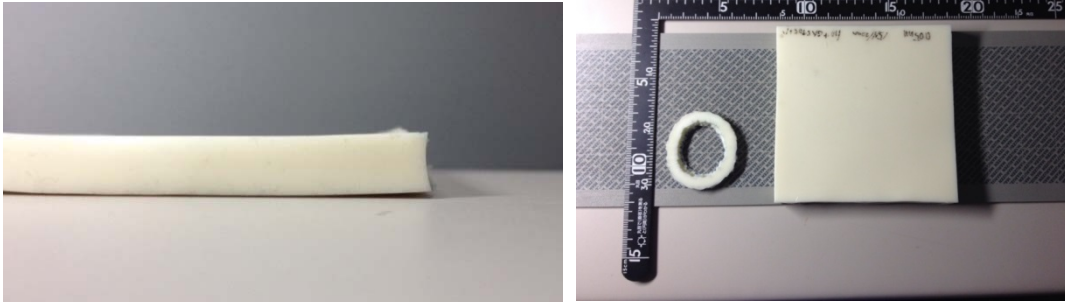


図 4.2.6 - 9 人工皮膚サンプル

d) カフ動作再現装置

本試験で用いるロボットマニピュレータ、力覚センサは、人体上で計測されるカフ運動（最大作用力：約 40N，最大変位：約 50[mm]）に冗長性を加味したカフ運動を再現せねばならない。したがって、本試験におけるロボットマニピュレータは作用力 60[N]、最大変位 80[mm]を十分満たす仕様、可動範囲である必要がある。以下にそれぞれに対する仕様条件と本研究開発で用いたロボットマニピュレータ、力覚センサを示す。

- ・ロボットマニピュレータ
- ・仕様条件

6 自由度

人体上のカフ変位を再現できる可動範囲
カフに生じる作用力によるトルクを十分許容する

- ・本試験に使用したロボットマニピュレータの仕様
名称：安川電機製・MOTOMAN-HP3J
外形・各軸名称：

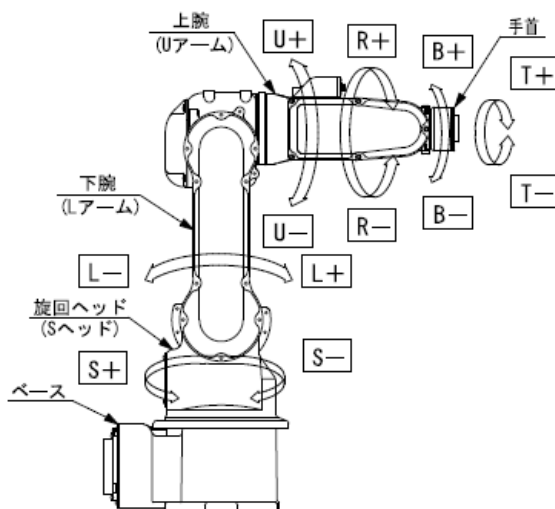


図 4.2.6 - 10 MOTOMAN-HP3J

- ・力覚センサ
 - ・仕様条件
 - 6 軸
 - 許容荷重 60N 以上
- ・本試験に使用した力覚センサー仕様
 - 名称：ニッタ製：6 軸力覚センサー・IFS シリーズ
 - 外形：



図 4.2.6 - 11 力覚センサ

(2) 試験条件

対象とする被験者の属性、動作は、試験対象の装着型ロボットの使用条件に準ずる。装着部位の位置、締め付けの調整についても同様とする。

ダミーの外形は代表的被験者に準じた形状とする。ダミーに取り付ける人工皮膚は、粘弾性、表面摩擦係数、垂直方向の応力-ひずみ特性が代表的被験者に近似したものを使用する。また、ダミーに対してロボットマニピュレータを用いた動作試験を行う際には、実際の使用における動作のばらつきを考慮し、被験者試験で計測された動作、作用力に対し安全率を適用して増幅した値を使用する。

(3) 試験方法

IS013482 に準拠し、本試験は対象となる装着型ロボットが有する不整合を以下の項目のいずれかもしくは複数を用いて試験する。

- ・文書
- ・外観検査
- ・ダミーを用いた動作試験

そのため、文書、外観の検査によって機構、構造等により十分に不整合を吸収可能であると考えられる場合、以降の試験を行わずに試験を終了できる。

次に、そうした不整合吸収が不十分であると考えられる機器のうち、前述の試験装置および試験条件に適合する機器については、ダミーを用いた試験を行う。試験に際しては、対象機器が想定する使用方法、使用者に対応する代表的条件を選定し、被験者、対象動作を決定する。また、滑り、作用力測定センサを内蔵する治具を製作し、使用する。その後、選定した代表的被験者、代表的動作について、安全に十分配慮したうえで相対変位、滑り、作用力の計測を行う。ただし、同様のロボット、動作条件に基づく既存の動作モデルが利用できる場合、新たに計測を行わず、既存動作モデルに基づいて想定変位、作用力パター

ンを定めることができる。最後に、被験者を対象とした動作計測結果をロボットマニピュレータによって再現し、装着部ダミー内部に作用する応力を計測する。計測された応力が想定する創傷リスク以下であれば、本試験に適合したと判断できる。創傷リスクの評価規範については後述する。

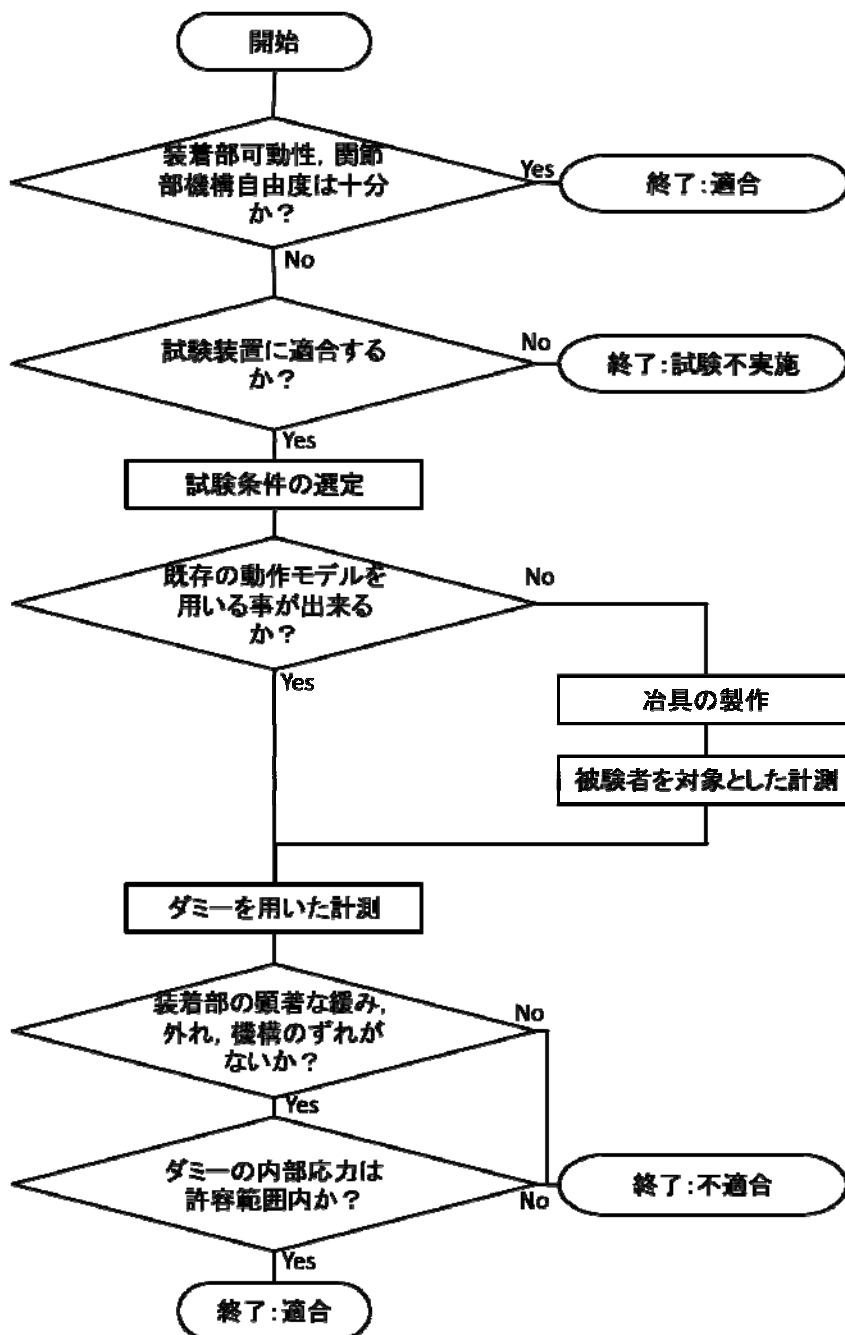


図 4.2.6 - 12 接触安全性試験流れ図

最後に、図 4.2.6 - 13 に、固定された人工皮膚付き下肢ダミーに対するカフ運動の再現の様子を示す。



図 4.2.6 - 13 接触安全性試験概観

i) 書面・外観検査

創傷の原因となる不整合が機構的に抑制、吸収される場合、以下の創傷リスクの詳細な評価は不要である。対象とされる機構の例を以下に挙げる。

- ・ 関節回転中心位置の初期調整
- ・ 膝関節屈曲時の関節回転中心位置の追従
- ・ 固定部位の柔軟性、遊び
- ・ 固定部位の摩擦低減

ii) 試験装置への適合

カフ、ベルト、靴等を用いて装着者の下肢に密着させて取り付けられ、関節部をその両端部を支持して他動的に駆動することで、装着者の動作を補助する機能を有する装着型ロボットが対象となる。

iii) 試験条件の選定

対象とする装着型ロボットの使用条件(使用者、動作)に沿って、試験条件を決定する。試験条件は、使用条件の中で最も創傷リスクが高い条件の組み合わせ(年齢、疾病、動作範囲、動作速度等)を抽出するが、起立と歩行等の大きく異なる使用条件を想定する装着型ロボットでは、それら各条件について代表的ケースで試験を行う。

iv) 既存動作モデルの利用

創傷につながる不整合の発生要因は、膝関節屈曲時の瞬間回転中心移動、回転中心の初期位置合わせ不良であり、それらに、腰部、足部等も含めた装着部位による拘束が作用することで装着部位の不整合が発生する。それらの要因は解析的な予想がある程度可能である^[1]。また、作用力は不整合量に加え、装着部の締め付け力、装着型ロボットおよび使用者の体重および姿勢等によって定まる。そのため、皮膚特性、装着方法、動作方法等の特性が近似した条件における被験者計測データが入手可能であれば、それらを基に動作モデルを構築することで、被験者を対象とした計測を省略することが可能である。

v) 治具の製作

被験者の相対変位，滑り，作用力を計測するため，滑り，作用力測定センサを内蔵する治具を製作する．治具は，本来の装着型ロボットの動作，機構へ与える影響を最小限に抑えるよう，特に接触面の形状，表面特性の変化に注意する．

vi) 被験者を対象とした計測

代表的使用者の条件に合致する被験者を選定し，代表的動作条件について下記の手順で計測を行う．

被験者に，滑り，作用力計測用治具を取り付けた装着型ロボットを装着する．被験者および装着型ロボットに，相対位置計測用の位置計測マーカを取り付ける．装着型ロボットを起動し，繰り返し動作を行う．(2)–(3)を必要な条件について行う．

vii) ダミーの製作

代表的被験者の特性を模擬した装着部ダミーを製作する．外形は，被験者の物を 3D スキャナ等により計測したものまたは適切なデータベースより抽出したものをを用いる．ダミー基部は剛体で製作し，表面に適切な人工皮膚を取り付ける．人工皮膚の特性は想定される被験者の属性に合わせて選定し，使用する．適切な人工皮膚が存在しない場合，合致する特性を実現できる人工皮膚を製作する．また，内部応力を計測するため，人工皮膚の基部上に小型 3 軸センサを挿入する．

viii) ダミーを用いた計測

固定された人工皮膚付き下肢ダミーに対して，人体で計測されたカフ運動，すなわち，カフの運動軌跡と，作用力の再現を行う．カフ運動再現のために，ロボットマニピュレータは変位，速度，作用力を入力とする．各入力パラメータは，上述の代表使用者に対する計測により得たものを使用する．

- a) 試験装置に力覚センサ，対象とする装着型ロボットのカフを取り付け，マニピュレータの可動範囲内に下肢ダミーを固定する．
- b) ロボットマニピュレータを起動し，カフを固定された下肢ダミーに接触させ，カフの固定を行う．この際，ダミーに対するカフの取り付け位置，姿勢，カフの押しつけによる作用力，カフベルトの締め付け力は，人体に対する計測の際の初期条件と同等にする．
- c) ロボットマニピュレータに対し，目標とするカフの運動情報，すなわち相対変位，相対速度，作用力の入力を行う．また，カフ運動の繰り返し回数も合わせて設定し，入力を行う．
- d) 入力したカフ運動を実行する．
- e) カフ運動により得られたダミーに対する作用力より，カフ運動の再現性を評価し，十分な再現が行っていた場合，ダミーに加わった内部応力の結果により，安全性の評価を行う．
- f) a～e を必要な条件について行う．

ix) 結果の評価

ロボットマニピュレータによる動作時のダミー内部応力を，後述の評価基準に基づいて評価する．

(4) 評価基準

人間の創傷に対する網羅的な指針は存在せず，倫理的問題から今後取得，公開される見込みも立たない．そのため，下記の文献調査により創傷リスクの評価を行うことが適当と考えられる．

装着型ロボットとの接触により生じる装着部の創傷は、初期には水泡および擦過傷として生じる。擦過傷は装着部が鋭利な形状および粗い表面を有する際に発生する創傷であり、検出は容易である。そのため、ここでは水泡の発生を創傷リスクとして扱う。摩擦による水泡は段階的に発生し、最初期には皮膚の角質層と顆粒層のせん断力により空隙を生じる。その後、時間経過に従って周辺組織よりの液体で空隙が満たされる。一般に、水泡の発生は下記の要因に支配される。

i) 皮膚の状態

ii) 皮膚表面に負荷される作用力

皮膚表面の作用力の影響については実験的に知見が得られている。

Naylor の研究^[2]では、脛骨の前方より 1/3 の点を一定速度で摩擦する実験を行っている。この実験では、皮膚と摩擦素材の摩擦力を、皮膚に水泡を生じ崩壊するまで計測した。実験は被験者あたり二回行い、それぞれの脚の一つずつの水泡を生じた。被験者は 19 人の 18-33 歳の男性で、摩擦部位の体毛の内、長いものをはさみで除去した。また、さらに 11 人の被験者について、摩擦部位にチョークの粉をまぶしたうえで同様の実験を行った。使用した摩擦体はポリエチレン製で、530g の垂直荷重をかけた状態で一往復 3 秒を要した。

その結果、図 4.2.6 - に示す水泡を生じるまでの摩擦回数と摩擦力の関係が明らかになった。摩擦力が増加するにつれ、少ない摩擦回数で水泡を生じ、低摩擦力では摩擦回数が増加する傾向が明らかにされた。

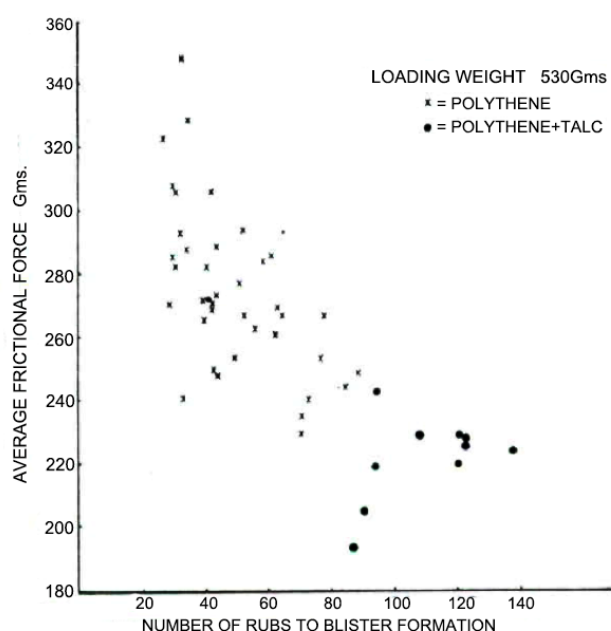


図 4.2.6 - 14 水泡形成に寄与する摩擦回数と摩擦力の関係

つぎに、人工皮膚の表面にさらに豚の皮膚を貼りつけ、これに摩擦力を加える目的で、屠殺直後の豚の皮膚に対して Naylor の報告した実験と同等の条件下において、繰り返し荷重する実験を行い、水泡が形成されるか否かを調べた。結果の一例を図 4.2.6 - 15 に示す。これは、2.4N のせん断力を 1200s の間継続的に加えたときに発生したマイクロ水泡を染色しスライスされた皮膚断面の顕微鏡観察によって得られた図である。このように、豚の皮膚に対しても、生体の場合と同等の機械刺激を加えることにより、水泡が発生することが本研究により初めて示された。

附属書 F3 の図 47 に、死豚の皮膚の場合で、創傷発生過程に寄与する摩擦力と摩擦回数との関係を示した。

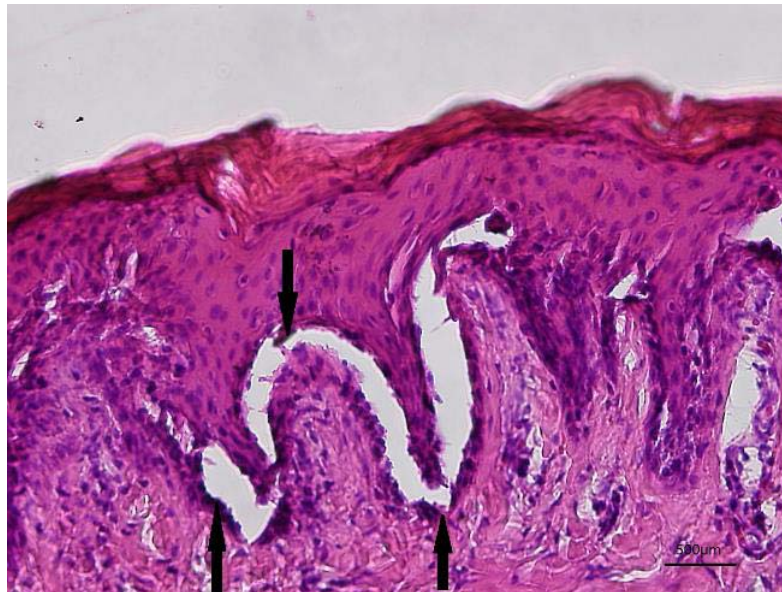


図 4.2.6 - 15 豚肉の皮膚に発生した水泡

最後に、カフ動作再現装置における人工皮膚表面に豚の皮膚を貼りつけ、これにロボットマニピュレータを用いて繰り返し荷重を加えることにより、創傷の発生リスクのうち、危害の程度を見積もることができる。

参考文献

- [1] P. F. D. NAYLOR, "The skin surface and friction", The British Journal of Dermatology, Vol. 67, No. 7, pp. 239-248, 1955.

4.3 ロボットの耐久性に関する検証試験

4.3.1 温湿度および振動環境耐久性試験 [安衛研]

4.3.1.1 目的

移動型、搭乗型ロボットの開発者が想定した最悪使用環境下（高温・高湿、あるいは低温）で、想定した最悪の走行路環境（段差、凹凸路面等）を走行した場合、ロボット本体構造や内蔵された制御装置、保護装置等が何らかのダメージを受けることが危惧される。ロボット開発者は、このような複合した最悪条件に対しても危険とならないように、十分な耐性を有するよう対象ロボットを設計、製作しなければならない。

提案する温湿度および振動環境耐久性試験は、上記の耐性に関する安全要件が実際の対象ロボットで実現されているかを検証するために行う。

4.3.1.2 研究開発の経緯

4.3.1.2.1 参考規格

- JIS C 60068-2-30:2011（環境試験方法—電気・電子—第2—30部：温湿度サイクル（12+12時間サイクル）試験方法）
- JIS C 60068-2-53:1997（環境試験方法—電気・電子—発熱供試品及び非発熱供試品に対する低温・高温／振動（正弦波）複合試験の指針）
- JIS C 1010-1:2014（測定用、制御用及び試験室用電気機器の安全性—第1部：一般要求事項）
- JIS Z 0232:2004（包装貨物—振動試験方法）

4.3.1.2.2 試験装置と試験基準の開発

本試験は、温湿度サイクル試験と振動試験、そしてこれらの複合試験であるが、全てに該当する規格類の対象はJIS（IEC）規定の電気・電子部品しかない。ロボットのようにシステム製品を対象とする類似試験は、輸送時の振動試験や自動車関連試験が規定されている程度である。

そこで、部品ではなくロボット本体を試験対象とした耐環境安全性試験を提案する。この試験は、品質・信頼性試験とは異なり、最悪想定使用環境下における機能の正常性及び安全性能への影響を評価するものである。したがって、基本的には電機・電子部品用規格のJIS C 60068-2シリーズの試験方法・手順を踏襲して、ロボット本体まで適用できるような試験設備を準備する。すなわち、ロボット本体を搭載して加振できる大型の振動試験機とこの振動試験機の加振テーブルごと調音・調湿できる大型の恒温恒湿槽が必要となる。このような大型の複合試験設備は自動車用としてラインアップされている程度で、特注仕様として準備する。

一方、電気・電子部品の温湿度及び振動の複合試験規格における結果の判断は、主に耐久信頼性の観点によるものであり、耐環境ストレスに対して安全性の判定基準を規定していない。ロボットのようなシステム製品に対しての同様の基準も存在せず、どの程度の温湿度ストレス、振動のストレスを与えて安全機能への影響を判定するかは新たに検討する必要がある。

4.3.1.3 成果

4.3.1.3.1 試験装置

(1) 大型恒温恒湿槽(室)

試験対象ロボットが格納できる容積を有し、少なくとも-10～60℃、30～95%RHの温湿度可変範囲と1℃/minの温度勾配を持つ。

(2) 大型加振機(振動試験装置)

大型恒温恒湿槽内に加振テーブルを持ち、垂直及び水平振動を生成できる(同時生成では

なく切り替え式)。試験対象ロボットの実走行振動波形を再現して繰り返し加振できるプログラミングが可能。

(3) 加速度計とデータロガー

試験対象ロボットの実走行時の振動波形を記録し、大型加振機の加振プログラムに取り込める。

(4) 瞬断検出システム

試験対象ロボットのコネクタ等の電気接合部の瞬間的な断線状態（イベント）を検出できること。このシステムは必要に応じて接続して使用する。

以上の装置をまとめて複合環境試験設備と呼び、その主要仕様を表 4.3.1.1 に、構成装置外観を図 4.3.1.1 に示す。

表 4.3.1.1 複合環境試験設備の主仕様

装置名称	型式（メーカー）	主要仕様
大型恒温恒湿室	AR24-412Y-DP2 B0-S-VM（アイテック）	室内寸法：4000W×2500H×2000D 温度範囲：-40～+120℃ 湿度範囲：30～95%RH 温度変化：1℃/min(-20～+80℃)
動電式振動試験装置	i260/SA7M (IMV)	垂直・水平テーブル(寸法:1500×1500, 最大搭載 600kg)を並列設置 垂直振動：5～100Hz(最大加速度 118m/s ²) 水平振動：5～300Hz(最大加速度 118m/s ²) 振動制御：SINE, RANDOM, SHOCK
瞬断検出システム	AES-200N(エスペック)	計測チャンネル：最大 200 定電流源：1～100mA 瞬断検出：10mΩ～2kΩ 最小検出時間：100ns
振動計	NP3574(小野測器) TMS868E(タスコ)	汎用 3 軸加速度センサ 加速度：～400 m/s ² 周波数：1～8000Hz(Z 軸) 1 軸ハンディ振動計 加速度：0.1～199.9 m/s ² 周波数：5～5000Hz
データロガー	DS-3000(小野測器) 8870(日置電機)	NP3574 用データステーション TMS868E 用メモリハイコーダ



図 4. 3. 1. 1 複合環境試験設備の構成装置

4. 3. 1. 3. 1 試験条件

本試験は、温湿度サイクル試験と振動環境耐久性試験およびそれらの複合試験を含み、いずれの試験も独立して実施できるが、複合試験が全ての試験内容を網羅するため、以降の試験条件と試験方法(手順)はこの複合試験を対象に説明する。

加振機の使用は、走行機能を有する自律型ロボットや搭乗操縦型ロボットの想定走行路が、石畳や点字ブロックのように連続的に走行時の振動が生じる場合、もしくは歩道や室内ドアの段差等の乗り越え時に単発的な走行振動が生じる場合を対象とする。また、対象ロボットの使用環境は温湿度のみを試験のパラメータとし、降雨や照度は考慮しない。なお、試験対象のロボットは大型恒温恒湿室内の加振テーブル上に設置するため、ロボットのサイズや重量により実施が困難となるか、試験条件の一部に制約を受ける場合がある。

また、試験対象ロボットの実際の走行時の振動は最悪路面状態とその路面を走行する頻度または走行時間に依存するため、加振機の加振目標生成のためには、ロボット設計時のリスクアセスメントにより条件設定しなければならない。この加振目標波形の設定のよう

にロボット毎に試験条件を設定する必要もあるが、生活支援ロボット安全検証センターでは本複合試験の標準条件として次の設定をした。

- A) 試験温湿度サイクルの上下限値は、試験対象ロボットの指定のないとき高温 40 または 55℃、低温-10℃、高湿 95%RH を標準値とする。
- B) 走行路面の指定のないとき、点字ドットパネル (5mm 高) の連続路面を最高速度で 10s 間走行した走行波形を記録するか、点字ライン (5mm 高) 2 本分を最高速度で乗り越えて通過した走行波形を記録する。
- C) 試験対象ロボットは、加振テーブル上に動輪が空転または駆動部が無負荷状態で連続駆動できる状態で固定し、連続外部給電が可能な場合、試験中は常時電源オンとする。連続外部給電ができない場合は、バッテリー電圧が動作不可電圧または充電の警告となるまで電源オンを維持した後、加振サイクル以外の期間内にバッテリー交換する。

4.3.1.3.2 試験方法

複合試験の実施は、試験対象ロボットの実走行波形の取得後、その波形を温湿度可変環境下のロボットに与え、試験前後の各機能の変化を調べるという手順で進める。図 4.3.1.2 に本試験全体の手順を示し、以降、各項目を説明する。

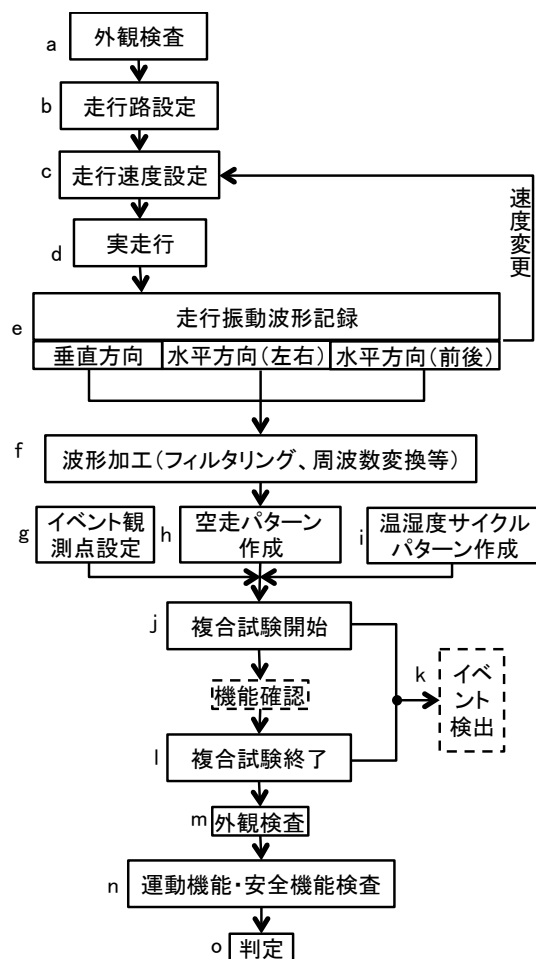


図 4.3.1.2 温湿度・振動複合試験のフロー

- a 外観検査：対象ロボットの機械的点検（目視確認）と必要に応じて電氣的測定（重要部位の抵抗値，絶縁抵抗値）を事前に実施する。運動機能や安全機能が健全であることが前提である。
- b 走行路設定：対象ロボットの想定する最悪走行路面（凸凹や段差等，なければ前節の標準路面）を準備する。
- c 走行速度設定：最高速以外の速度の走行で大きな振動が見込まれる場合は，その速度も設定する。
- d 実走行：対象ロボットフレームに振動計を装着して，連続走行または段差乗り越えを行う。
- e 走行振動波形記録：加速度計により振動波形（加速度）をデータロガーに記録する。
- f 波形加工：振動波形を振動試験装置用制御プログラム（SHOCK 振動制御システム）で使用できるように加工する。
- g イベント観測点設定：瞬断測定点（コネクタ，重要接点・部品端子）に監視ケーブルを接続し，監視測定ポイントと監視プログラムを設定する。
- h 空走パターン作成：f で加工した振動波形を基に繰り返しパターンを生成する。外部給電可能で連続走行を想定の場合，振動と休止のサイクルを繰り返す。
- i 温湿度サイクルパターン作成：電気・電子部品の複合環境試験方法を参考に，高温・高湿と低温の組み合わせパターンを生成する。また，h のパターンにおけるサイクル開始・終了ポイントや異常処理ルーチン等とリンクさせる。
- j 複合試験開始：対象ロボットを加振方向別のテーブル上に固定し，イベント観測と加振，温湿度サイクルを開始する。ロボットの空走は温湿度サイクルの定常状態時に有効にする。
- k イベント検出：瞬断イベント（断線/復帰事象とそれらの発生期間）および抵抗トレンドは試験期間中自動的に記録される。
- l 複合試験終了：m，n の結果で異常がなければ，加振方向を切り替えて j から再開する。
- m 外観検査：結露による影響等を調べるとともに，a の結果と比較する。
- n 運動機能・安全機能検査：対象ロボットを加振テーブルから下ろして，通常走行や障害物検知による停止性能等に異常がないかを調べる。必要に応じて，温湿度サイクルの切替静定時（25℃，50%RH の1h 維持中）にも実施する。
- o 判定：試験開始前の状態と試験後の状態を比較して，主に安全機能の喪失がないか確認する。表 4.3.1.2 に示すような機能確認シートを利用する。なお，安全機能の確認項目としては，障害物検知センサ（非接触式，接触式）の検知エリア・感度・応答性，保護停止・非常停止回路の応答性，制動性能（応答性，停止距離），走行速度の変動（速度超

表 4.3.1.2 機能確認シート例

確認項目 確認時期	機構部	電源部	動作機能	安全機能	備考
サイクル試験前	健全	バッテリー電圧正常、電源-フレーム間絶縁正常	走行機能正常（許容差内）	全センサ正常、停止性能正常	
サイクル試験途中	健全				
サイクル試験後	健全	バッテリー電圧正常（想定消費）、電源-フレーム間絶縁正常	走行機能正常（許容差内）	全センサ正常、停止性能正常	目立った結露なし

過）等が考えられる。瞬断イベントが発生した場合は，加振，温湿度サイクルとの関連を調べる。

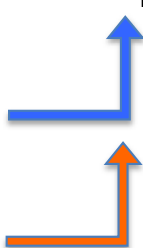
なお、温湿度サイクル試験、加振試験は該当ステップのみ実施すればよい。

4.3.1.3.3 評価基準

複数の判定ランクを設定して、ランク毎に要求されるロボットの各機能の挙動を、表 4.3.1.3 に定義する。ここで、機能の許容差とは、例えば、障害物検知用センサ（AOPD）の検出領域のずれが想定人体部位幅以内である場合が考えられる。また、安全状態とは移動ロボットではほとんどが停止状態と見なせる。なお、前提条件として、試験前の機構部や全機能は全て健全で正常であることが必要である。

安全機能に関しては、判定ランク A で自動診断や修復機能の効果を勘案しており、ランク B ではインタロック構造を求めている。したがって、一般的に、移動ロボットの安全機能は最低限ランク B 以上で合格と判定される。ただし、ランク B は移動ロボット本来の合目的性を損なうので、ランク A 以上が望ましい。なお、運動機能の判定については、別途性能試験で再評価する必要が生じる場合がある。

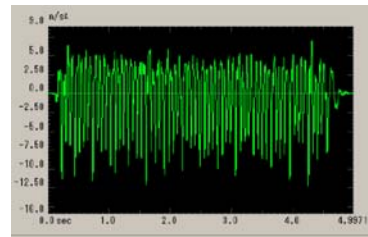
表 4.3.1.3 試験判定基準案



判定 ランク	試験中または試験後の要求動作	備考(許容差の例)
S	全て試験前の状態から不変	
A	試験中は一時的に許容差以内で変動するが、試験後は自動復帰 → 自動診断・修復	開口部のずれ・ひずみが想定IPコードに影響しない
B	試験中は一時的に許容差を超えて、継続される場合は安全状態(停止状態)を試験後まで維持する。 → インタロック	AOPD検出領域のずれが200mm以内(人体の場合)
C	試験中に許容差を超えて、それが検出されずに安全状態に遷移しない。	総合停止性能が10%以内

4.3.1.4 試験結果の例

搭乗型移動ロボットを模擬して、ハンドル型電動車いすを用いて複合環境振動試験を実施した。上述の標準試験条件から変更した項目は、高温 35℃、高湿 85%RH、低温 5℃、ライン点字パネル上を 4km/h で連続走行(図 4.3.1.3)の 4 点である。垂直加振テーブル上で空走状態の電動車いすを図 4.3.1.4 に示すが、前輪はテーブル上に接地して後輪のみ浮かせている。また、搭乗者の代わりに 60kg の重りをシート上に固定している。なお、全温湿度サイクル 37h 中、1h の加振パターン(図 4.3.1.5)は高温と低温の静定時に合計 3 回実施した。この試験結果は、表 4.3.1.2 と同様に 3 回の検査結果を記述して試験前後の内容を比較することで得られ、機構部、運動機能、安全機能の全てが異常ないことが確認できた。



実走行振動波形(4km/h走行時)

図 4. 3. 1. 3 電動車いすの実走行波形取得の様子



図 4. 3. 1. 4 加振テーブル上で空走する
電動車いす

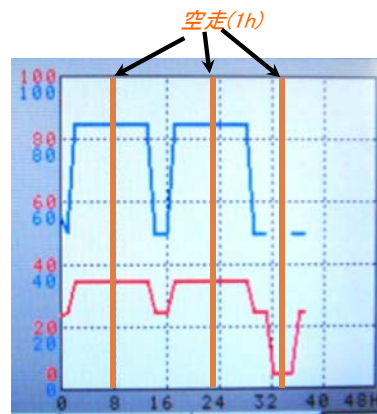


図 4. 3. 1. 5 温湿度サイクルと
加振タイミング

4.3.2 走行耐久性試験 [産総研]

4.3.2.1 目的

この試験はロボットが、人を乗せて移動する能力、あるいは人に装着した状態でその歩行を補助して移動する能力を持っていて、移動中の損壊によって使用者に危害を与える可能性がある場合に適用され、搭乗型、移動型および装着型ロボットの想定使用環境における長時間連続走行が、故障等により設計仕様と異なってしまうことがないことを確認する。

4.3.2.2 研究開発の経緯

4.3.2.2.1 参考にした規格

移動型ロボットの走行に関する試験として、図 4.3.2-1 に示した日本工業規格 JIS T 9203-2010 電動車椅子の強度・耐久性性能規格と、図 4.3.2-2 に示した日本工業規格 JIS-D 6805-1994 の無人搬送車—特性・機能試験方法の中の定格速度試験を参考とし、試験装置の設計を行った。

装着型ロボットについては、負荷レベルの設定に関して JIS T 0111（義肢—義足の構造強度試験）を参考にした。

項目	性能	
	低速用 (LS)	中速用 (MS)
最高速度	4.5km/h以下	6.0km/h以下
登坂性能	10° の斜面を直進で登れること	
降坂性能	最高速度(実測値)の115%以内であること	
制動性能	平坦路制動性能1.5m以内で停止できること	
	降坂制動性能3m以内で停止できること	
	停止時の基準線からの変位量は0.5m以内であること	
機能	傾斜停止力	10° の斜面で静止できること
	静的安定性	前方・後方各20°、側方15° の傾斜に対して安定であること
	段差乗り越え	前進または後進により、助走なしで25mm、及び助走ありで40mmの段差乗り越えができること
	溝踏破走行性	幅100mmの溝を踏破できること
	坂道走行性	6° の傾斜面のS走路を逸脱及び異常なく登降できること
	斜面直進走行性	3° の傾斜面での幅1.2mの走路を逸脱しないこと
	回転性能	自操用標準型は幅0.9m、それ以外は1.2mの直角路を曲がれること
	強制停止	車体、駆動システム、電気回路などに異常がないこと
	連続走行距離	表示された連続走行距離以上走れる
	強度・耐久性	垂直静荷重
走行耐久性		各部に破損、外れ及び使用上支障のある変形がないこと

図 4.3.2-1 日本工業規格 JIS-T 9203-1999 電動車椅子—強度・耐久性性能規格

D 6805-1994

付表 2 走行性能試験成績簿

試験日 年 月 日

試験車

形式 _____

目録 _____

許容重量 _____kg

定格速度 _____m/min

製造年月 年 月

製造番号 _____

製造業者名 _____

(1) 定格速度試験

測定項目	測定回数	測定結果		備考
		速度 (m/min)	所要時間 (s)	
無負荷時	前進	1		
		2		
		平均		
	後進	1		
		2		
		平均		
定常荷重時	前進	1		
		2		
		平均		
	後進	1		
		2		
		平均		

図 4.3.2-2 日本工業規格 JIS-D 6805-1994 無人搬送車—特性・機能試験方法 定格速度試験

4.3.2.2.2 試験方法の開発

試験目的に則した試験装置の設計と試験方法の設計を行い、各種移動型ロボットへの対応方法、試験装置の適応等の研究開発を実施した。

4.3.2.3 成果

4.3.2.3.1 試験装置

(1) ドラム式走行耐久性試験装置

車輪を用いて移動するタイプの移動型および搭乗型ロボットは、自動車や車椅子の試験装置と同様、ドラム上に車輪を乗せるタイプの試験装置が適している。

図 4.3.2-3 に実際のドラム式走行耐久試験装置の全景を示す。図 4.3.2-4 に示す通り、前後輪を有する車椅子や移動ロボットのために2本のドラムを備えている。ドラムには付

加を印加することが可能なパウダブレーキと、非駆動輪のためのモーターが装備されている。ドラムには付加を印加することが可能なパウダブレーキと、非駆動輪のためのモーターが装備されている。搭乗型ロボットをドラム式走行耐久試験装置に固定する際は、図 4.3.2-5 のように 1 本のドラム上に固定し、ハンドルと傾きも固定する。

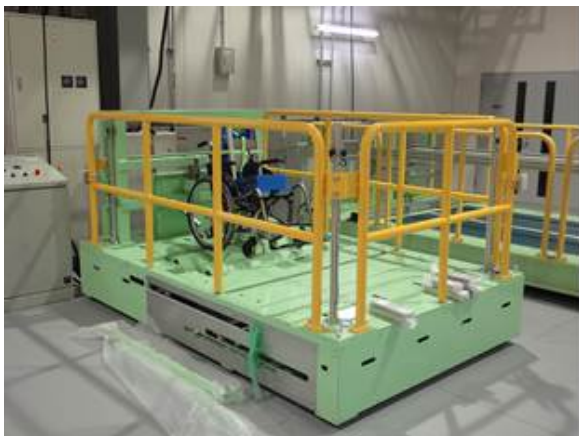


図 4.3.2-3 ドラム式走行耐久試験装置



図 4.3.2-4 車輪移動型ロボットの固定例



図 4.3.2-5 試験装置の搭乗型移動ロボット固定治具とレイアウト

(2) ベルト式走行耐久試験装置

歩行型、クローラー型、オムニホイールを用いた全方向移動型のロボットの場合、ドラム式試験装置は使用できない。このため、これらのタイプの移動ロボット用に図 4.3.2-6 のようなベルト式走行耐久試験装置が必要となる。実際に製作したベルト式走行耐久試験装置を図 4.3.2-7 に示す。全方向移動型の試験の場合は、ガイドを用いて直進性を確保する。ベルト式走行耐久試験装置では、ドラム式走行耐久試験装置のように、固定治具により固定することが困難なため、試験対象ロボットがベルト式走行耐久試験装置の中央付近の設定された位置に留まるようにベルトの速度を制御する。このため、ベルト式走行耐久試験装置には、図 4.3.2-7 の赤丸の箇所に、レーザー距離センサが搭載されており、必要に応じて試験対象ロボットとの距離を一定に保持する制御が行われる。このフィードバック制御により、電源電圧変動などによるロボット走行速度の変化や、停止時の減速にも装置からロボットが逸脱することなく安全に試験が実施できるようになっている。

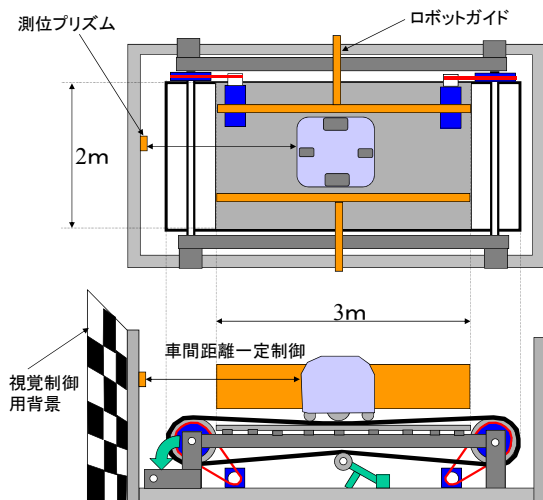


図 4.3.2-6 ベルト式走行耐久性試験装置初期案

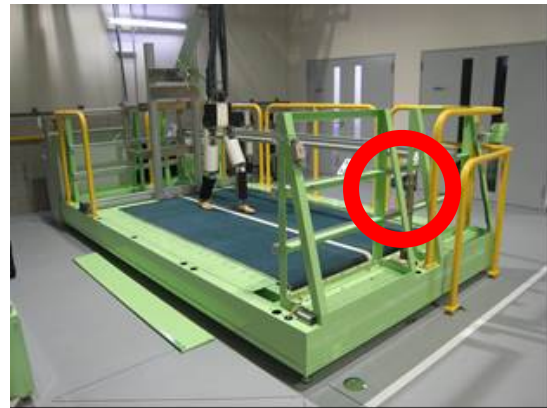


図 4.3.2-7 ベルト式走行耐久性試験装置



図 4.3.2-8 位置制御装置の応答特性試験

表 4.3.2-1 ロボット走行速度と位置制御誤差

	Start	Cruise	Stop
0.4km/h	150mm	±5mm	100mm
2.0km/h	250mm	±5mm	200mm
4.0km/h	380mm	±5mm	300mm

このとき問題となるのは、制御応答時間に係る制御遅れである。このベルト式走行耐久性試験装置が試験する生活支援ロボットは、人の近傍を移動し生活の支援を行うロボットを想定しているため、想定移動速度は人の歩行速度程度の時速 4km 以下である。このことから、時速 4km での制御応答時間の遅れによる発進、制動の影響を図 4.3.2-8 に示す実験により調査した。その結果を表 4.3.2-1 と図 4.3.2-9 に示した。試験装置のベルト部分のロボット走行可能範囲が 2500mm であることから、最も位置ずれの大きかった時速 4km 発進時でも走行可能範囲の 15.2% にすぎず、この速度域であれば安全に試験が可能であることがわかる。また図 4.3.2-9 に示す通り比例関係にあることから、最大試験速度が想定可能であることがわかる。

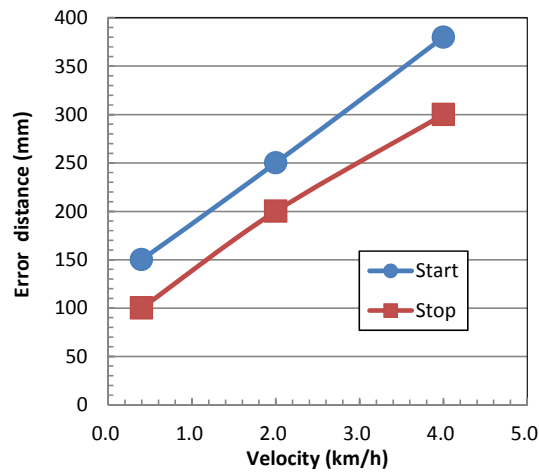


図 4.3.2-9 発進時と停止時における制御応答時間とロボット走行速度の関係

(3) 倒立振り子ロボット走行耐久性試験装置

倒立振り子ロボット走行耐久性試験装置は、倒立振り子型の搭乗型生活支援ロボットにおける走行系の機能と耐久性をシステムも含めた形で評価できる回転ドラム式走行耐久試験装置である。基本構成は倒立振り子ロボットを疑似走行させる試験装置であり、回転ドラム上に被評価ロボットの車輪が乗るようにして評価を行うものである。ドラムは受動的にロボットによって回転させられるのみならず、モーターで能動的に回転する機構が備えられている。また、倒立振り子ロボットの速度制御による前後方向移動量が個体差により大きいため、走行ドラム外径をφ500に拡大し、ドラム上移動時の姿勢変化を軽減するために走行ドラムの変更及び本体の改造を行った。これまでの実験の結果、図4.3.2-10のように、250mmのドラム径では径が足りず、試験可能速度が4km毎時以上増速不能となることが判明し、ドラム径を2倍の500mmのものに入れ替える改造を実施した。

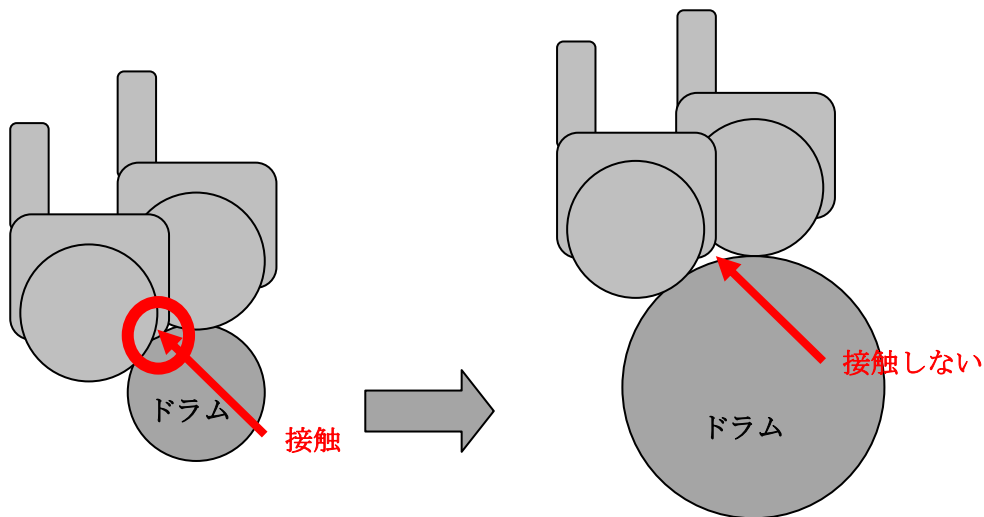


図 4.3.2-10 倒立振り子式ロボット試験のドラム径依存性

搭乗型倒立振り子ロボット用の走行耐久試験装置の基本構成は、図 1 1 に示す。基本構成図 4.3.2-11 に含まれている「①試験装置本体、②被評価ロボット、⑤制御盤、⑥データ表示・処理部」など装置各部の詳細は、以下の通りである。

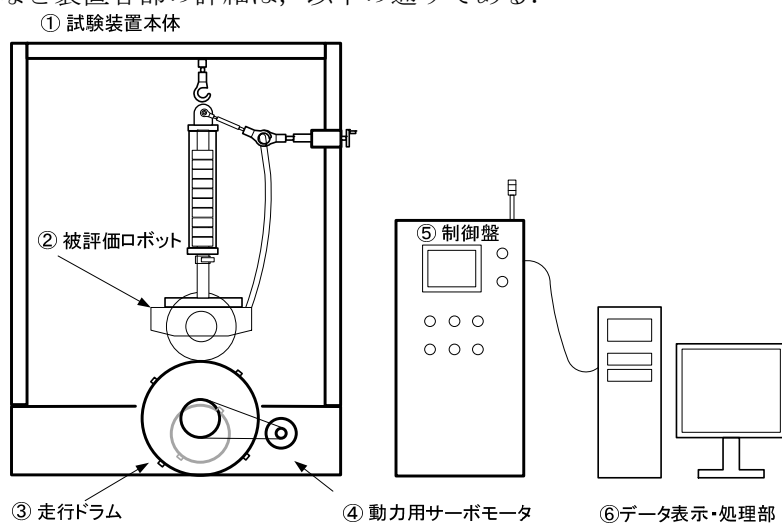


図 4.3.2-11 搭乗型倒立振り子ロボット用の走行耐久試験装置の基本構成図

搭乗型倒立振り子ロボット用の走行耐久試験装置各部の説明

- ① 試験装置本体：倒立振り子ロボットの評価を行うための試験装置で、現在は受動回転の可変負荷制御ができる状態となっている。この試験装置本体の中にドラム回転用モーターを設置し、現行 250mm のドラムを 500mm のドラムに交換し各部拡張工事を実施した。
- ② 被評価ロボット：評価対象となるロボット。（本装置および本件に含まれない）
- ③ 走行ドラム：ロボットのタイヤと接触して負荷を与える回転ドラムで、回転ドラム外径を $\phi 500$ に拡大し、動力用サーボモーターを接続して自発動作できるようにする。本件においてモーターからの動力を伝達するベルトを受ける部分も追加し、現行 250mm のドラムを 500mm のドラムに交換。
- ④ 動力用サーボモーター：本件において動力伝達装置等と共に追加を行う装置、
- ⑤ 制御盤：試験器の動作に対して次の機能が装置には含まれるが、本件において、制御盤に追加される機能と項目は以下の下線の部分。
 - 5-1 運転、停止、緊急停止、の各制御
 - 5-2 速度制御・設定・表示、（モーター制御であり、本件での主な追加項目）
 - 5-3 加減速・設定・表示（運転・停止時のドラム回転数制御）
 - 5-4 制動制御・設定・表示、
 - 5-5 積算回転数制御・設定・表示、
 - 5-6 制動・速度制御の切り替え表示、
 - 5-7 外部 LAN 接続
- ⑥ データ表示処理部：制御盤から LAN 接続された端末で、制御盤で表示する内容と同等の表示と操作が行えるようになっている。

（4）ドラム式走行耐久性試験装置用傾斜制御機構

倒立 2 輪搭乗型ロボットは、駆動輪 2 輪からなる構成となっているため、図 4.3.2-5 のようにドラム上に 2 輪が乗る状態で治具により固定する必要があるため、本体を傾けることにより前後に移動するために、図 4.3.2-12、図 4.3.2-13 のように傾斜を変化させる機構が必要となる。このことから、図 4.3.2-14 のように傾斜を変化させる機構を開発した。

図 4.3.2-14 に示す通り、ドラム上に 2 輪を乗せ、倒立 2 輪搭載型ロボットの後方にリンク機構により固定することで、倒立 2 輪搭載型ロボットは、ドラム上において、傾斜し、その傾斜角を車輪の出力により制御可能な状態を再現することができる。この固定方法により、固定された倒立 2 輪搭載型ロボットは、図 4.3.2-14 に示す通り、ハンドルを傾斜させる機構により、試験装置からの傾斜角の入力が可能となった。

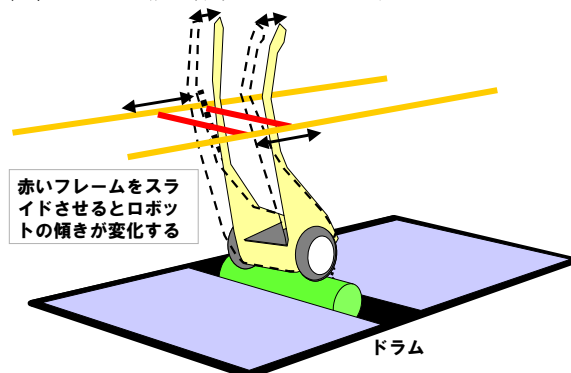


図 4.3.2-12 搭載型移動ロボットの試験方法

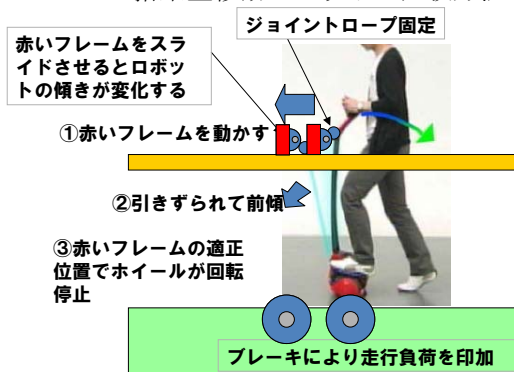


図 4.3.2-13 搭載型ロボットの傾き固定のレイアウト

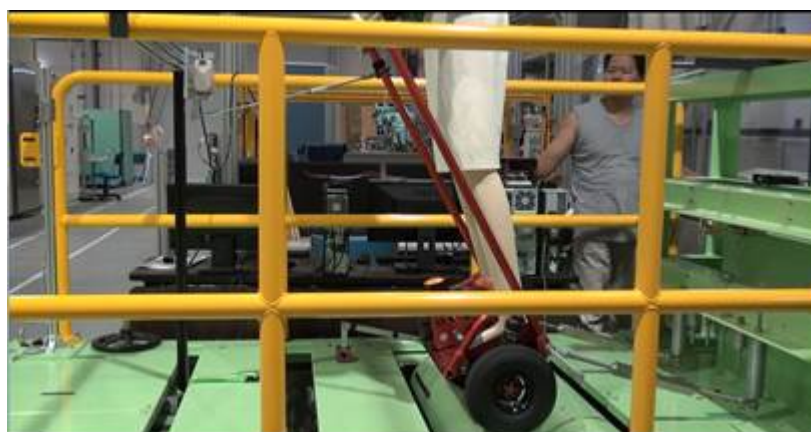


図 4.3.2-14 ドラム式走行耐久試験機の傾斜制御機構

(4) 装着型生活支援ロボット耐久性試験装置

装着型生活支援ロボット耐久性試験装置は、人に装着する生活支援ロボットの耐久性を試験するための装置である。この装置は図 4.3.2-15 に示すように、人の下肢を模した形状をしている。この装置にロボットを装着して一定時間ロボットを動かし、耐久性を確認する。この装置自体はアクチュエータを持たず、上に述べたベルト式走行耐久試験装置と併用する (図 4.3.2-7 を参照)。



図 4.3.2-15 装着型生活支援ロボット耐久性試験装置

4.3.2.3.2 試験条件

a) 試験体として、製品を代表する標本を一つサンプルする。

b) 試験路面は、無限長の平坦な路面、または想定する使用環境を模擬した路面とする。

「無限長の平坦な路面」は、(ア) テストドラム、(イ) トレッドミルのいずれかで模擬する：

(ア) テストドラム (ロボットが車輪で地面に接触するもので、ドラム表面のカーブが無視できる場合)

テストドラムの構成は、リスクアセスメントに基づいて製造者が規定するか、ISO 7176-8:1998 に規定された走行耐久性試験装置の構成を参照する。屋外での使用を想定するロボットに対しては、テストドラムに高さ $3\text{mm} \pm 1\text{mm}$ の段差を付けた状態で試験を行う。屋内のみでの使用を想定するロボットについては、段差のない状態で試験を行う。

(イ) トレッドミル (それ以外)

c) 人体ダミーはロボットの使用者の体重を模擬するウェイトである。人体ダミーの総重量は次の値とし、誤差は 10%以内とする。

(ア) 想定ユーザの最大体重、または

(イ) 次の 3 つの値のうち想定ユーザの体格から適切であると推定されるもの

i. 60kg.

ii. 80kg.

iii. 100kg.

なお、ロボットの移動のメカニズムによっては使用者のバイオメカニクスも模擬する必要がある。

d) 外骨格型ロボットや二輪走行型ロボットのようにそれ自体で姿勢を保てないロボットの場合は姿勢を保持するための支持装置を使用する。装置は、ロボット、あるいはロボットに結合した人体ダミーを支持し、耐久性に影響するロボットの動作および負荷を妨げないものとする。支持装置の使用は任意である。

4.3.2.3.3 試験方法

(1) ドラム式走行耐久性試験装置

ドラム式走行耐久性試験機上でロボットの実際の稼働時の総重量に合わせたバラストを搭載し時速 6km でバッテリーの持続時間分連続走行させる。平坦な路面上で人が搭乗し、時速 6km での消費電流を測定 (予備電流計測)。ドラム型走行耐久試験装置上にロボットを搭載し、予備電流値と同じになるまで走行負荷を印加する。

平坦な路面上でロボットを走行させて、時速 6km での消費電流を測定 (予備電流計測)。ドラム型走行耐久試験装置上にロボットを搭載し、予備電流値と同じになるまで走行負荷

を印加する。ドラム型走行耐久試験装置の印加走行負荷と消費電流値は比例関係を示すため、図 4.3.2-16 のように予備電流値から印加走行負荷が決定される。予備電流値から導出した走行負荷%を印加した状態で、バッテリー切れが発生するまで長時間走行試験を行う。長時間走行試験中は、電流値を計測し電流値の変動を評価する。(図 4.3.2-17)

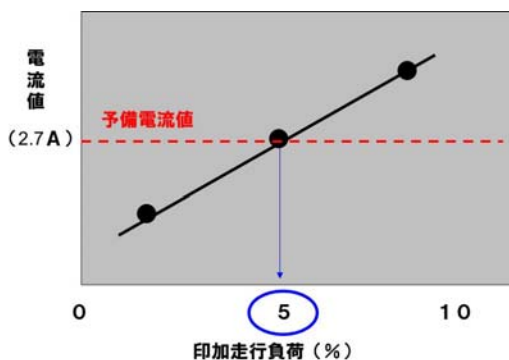


図 4.3.2-16 予備電流計測による印加走行負荷の決定例

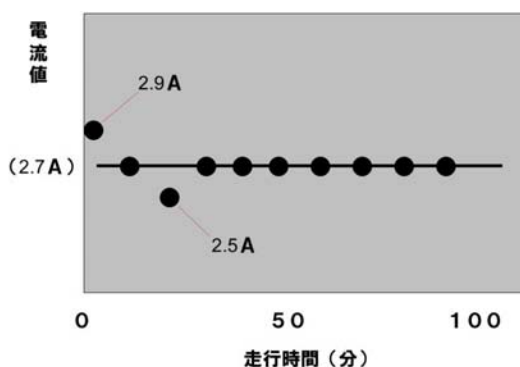


図 4.3.2-17 長時間走行試験の結果例

(2) ベルト式走行耐久性試験装置 (装着型生活支援ロボット耐久性試験)

- a) 想定使用条件を再現して移動動作をするように、ロボットと人体ダミーを結合して、支持装置でホールドして試験路面に載せる。
- b) ロボットを試験路面の上で、製造者の定める速度で、製造者の定める時間または距離に達するまで移動動作をさせる。駆動のための電源は外部電源を用いてもよい。
- c) 破損や変形やガタつき、部品のゆるみや脱落の有無、およびロボットの機能の動作を記録する。

4.3.2.3.4 評価基準

(1) ドラム式走行耐久性試験装置

評価基準としては、動力伝達系、駆動系の温度分布、破損の有無、ロボットの想定使用環境における長時間連続走行が、故障等により設計仕様と異なってしまうことがないことを確認する。ドラム型走行耐久試験装置上の走行負荷は、予備電流値と同じになるまで走行負荷を印加する。

(2) ベルト式走行耐久性試験装置 (装着型生活支援ロボット耐久性試験)

- a) 破損や変形、ガタつき、部品のゆるみや脱落がないこと。
- b) ロボットの機能に異常がないこと。

4.3.3 耐荷重試験 [JARI]

4.3.3.1 目的

この試験はロボットの搭乗者や積み荷を想定した試験荷重を負荷した後に、外観および機能の変化を記録する。この試験はロボットが搭乗者や積み荷を乗せる能力を持っていて、荷重によるロボットの破損や機能の変化が人に危害を与えると予想される場合に適用できる。

4.3.3.2 研究開発の経緯

4.3.3.2.1 参考にした規格

JIS T9201:2006 手動車いす, JIS T9203:2010 電動車いす, JIS T9208:2009 ハンドル型電動車いす, ISO 7176-8:1998 Wheelchairs-Part 8.

4.3.3.2.2 試験方法の開発

(1) 試験装置の仕様の決定と導入

車いすに比べて、生活支援ロボットの使用目的、形状は多様であるため、試験時に荷重を負荷すべき箇所や荷重の値も多様である。そこで、本プロジェクトに参加するロボット開発者ならびにロボットビジネス協議会会員のロボットメーカーに対して、自社で開発する可能性のある生活支援ロボットの仕様について調査した。その結果から、試験装置の最大ストロークおよび最大荷重を決定した。決定した仕様に基づいて、試験装置を導入した。

(2) 試験の試行による検討

本プロジェクトに参加するロボット開発者の試作ロボットの試験を試行し、以下の結果を得た。

- a) 立位で搭乗するタイプ等、車いすとは異なる箇所への荷重の負荷が必要な場合でも、導入した装置で試験可能である。ただし、倒立2輪型ロボットを試験中に倒立させておくジグなど、各々のロボットに適合した試験ジグの制作が必要な場合がある。
- b) 車いすの試験規格には試験荷重が定められているが、生活支援ロボットの場合には、使用時に負荷される荷重は多様であるため、試験荷重は、ロボットの設計仕様から個々に決定する必要がある。

4.3.3.3 成果

上記の検討の結果、装置を完成して、以下の試験法を確立した。

4.3.3.3.1 試験装置

導入した試験装置は、定盤に置かれたロボットの各部に、荷重子を押し付けることで、耐荷重性を試験する。荷重子は、インバータモータにより駆動され、荷重は荷重子に接続されたロードセルで測定する。本装置は、車いす用の装置と同様の機構を有するが、多様なロボットの試験を可能にするために、荷重子および定盤の可動範囲を大きく設計した。



図 4.3.3-1 耐荷重試験装置

表 4.3.3-1 耐荷重試験装置の仕様

試験装置寸法	幅約 4200 mm, 奥行約 2100 mm, 高さ約 3830 mm
負荷方式	インバータモータによるパワージャッキ方式(2軸独立)
負荷荷重	最大 10 kN(1軸につき)
負荷速度	0~60 mm/min
荷重子可動範囲	上下 2500 mm, 左右 ±600 mm, 回転 ±45°
定盤可動範囲	前後 ±1000 mm, 上下軸まわり回転角 ±180°

4.3.3.3.2 試験条件

リスクアセスメントにおいて最も高いリスクが想定される条件で試験を行うため、負荷条件を仕様上の最大荷重（搭乗者の体重および積載物の質量から決定する）とする。

4.3.3.3.3 試験方法

- 1) ロボットを水平面上に通常の使用状態と同様にして設置する。
- 2) 搭乗者または積み荷の重さを受ける部位に、仕様上の最大荷重を鉛直下方向に 10 分間連続して負荷する。
注：荷重によりロボットの姿勢が変化する設計である場合には、荷重に降伏した姿勢で試験する。
- 3) 荷重を除いた後にロボットを観察して、破損、変形、ガタつき、部品のゆるみや脱落の有無を記録する。
- 4) ロボットの機能の動作を観測し、荷重を付加する前からの変化を記録する。

4.3.3.3.4 評価基準

観察の結果、安全に関わる部位が破損していないこと。

4.3.4 耐衝撃試験 [JARI]

4.3.4.1 目的

この試験は、ロボットが衝突の衝撃にさらされた後に、外観および機能の変化を記録する。この試験は、衝突によるロボットの破損や機能の変化が、搭乗者や周囲の歩行者に危害を及ぼすと予想される場合に適用できる。

4.3.4.2 研究開発の経緯

4.3.4.3 参考にした規格

JIS T9201:2006 手動車いす, JIS T9203:2010 電動車いす, JIS T9208:2009 ハンドル型電動車いす, ISO 7176-8:1998 Wheelchairs-Part 8.

4.3.4.4 試験方法の開発

(1) 試験装置の仕様の決定と導入

始めに、車いすの規格を参考に、図 4.3.4-1 の装置を導入した。この装置は、振り構造で支えられた球状の衝撃子を車いすの所定の部位に衝突させることで、耐衝撃性を評価する。衝撃の強さは、振子の振り上げ角度で設定される。車いすの規格では、振り上げ角度を規定している。



図 4.3.4-1 衝撃耐久試験装置

表 4.3.4-1 衝撃耐久試験装置の仕様

試験装置寸法	幅約 4200 mm, 奥行約 2100 mm, 高さ約 4600 mm
加速方式	振りによる自由落下(空圧チャックによる切り離し)
振り上げ角度	0~90°
衝撃子	球状錘, 質量: 25±0.5 kg, 芯金: 鉄, 表皮: ポリウレタン
衝撃子可動範囲	上下 1300 mm, 左右 ±500 mm
定盤可動範囲	前後 ±1000 mm, 上下軸まわり回転角 ±180°

(2) 試験の試行による検討

本プロジェクトに参加するロボット開発者の試作ロボットの試験を試行し、以下の結果を得た。

車いす試験規格では、試験条件即ち衝撃の入力方向、入力位置、衝撃の大きさ(振り子の角度)が指定されている。車いすの場合には、その形状と使用方法がある程度限定されているため、外部からの衝撃の入力方向、入力位置、衝撃の大きさが、過去の不具合情報から推定され、その結果から、規格の試験条件を設定したものと考えられる。しかし、生

活支援ロボットの場合には、その形状と使用方法は千差万別であり、試験条件を画一的に決定することができない。

そこで、本研究では、実際の使用においてロボットに衝撃が加わる状況を再現する方法を採ることとした。使用者または第三者が故意にロボットに衝撃を加えない限り、ロボットに加わる最も大きな衝撃は、ロボットが障害物と衝突した際に発生すると考えられるため、衝突試験と同様の方法で衝撃を再現することで試験を実施することとした。

4.3.4.5 成果

上記の検討の結果、以下の試験法を確立した。

4.3.4.5.1 試験装置

衝突耐久試験装置を用いる。

4.3.4.2.5 試験条件

リスクアセスメントにおいて最も高いリスクが想定される条件で試験を行う。

- ・衝突速度：リスクアセスメントで想定される最高速度で試験を実施する。
- ・積載条件：搭乗者の体重および積載物の質量は、ロボットの仕様における最大値を用いる。
- ・衝突形態：・リスクアセスメントで指定がない限り、衝突試験装置の衝突用バリアにロボットを衝突させる。

4.3.4.5.3 試験方法

a) ロボットは通電された状態で試験を行う。ただし、通電した状態で試験を行うことが困難な場合は、電源を遮断した状態で試験を行ってもよい。

b) ロボットの積載状態は、最大積載状態とする。搭乗型ロボットの場合は、製造者が定める搭乗方法に基づいて、人体ダミーを搭載する。荷物を搭載するロボットの場合は、製造者が定める方法で積載する。

c) 助走路を用いて所定の速度まで加速し、歩行者を模擬した人体ダミーに衝突させる。ロボットの走行方向は、原則として前進方向とする。ただし、前進方向以外にも走行可能なロボットについては、ロボットの構造や形状、走行速度、および搭乗者の搭乗状態を考慮して、前進方向と同等以上のリスクがあると考えられる衝突方向がある場合、その方向についても試験を行う。

d) 衝撃を負荷した後のロボットを観察して、破損、変形、ガタつき、部品のゆるみや脱落の有無を記録する。

e) ロボットの機能の動作を観測し、衝突する前からの変化を記録する。

4.3.4.5.4 評価基準

観察の結果、安全に関わる部位が破損していないこと。

4.4 ロボットの安定性に関する検証試験

4.4.1 静的安定性試験 [産総研]

4.4.1.1 目的

この試験は、ロボットの移動・使用中、もしくは外部からの力などにより静的安定性が失われることで、搭乗者や周囲の歩行者等に危害を及ぼすと予想される場合に適用される。ロボットを傾斜台上に載せて傾斜台を傾けることで、転倒、積載物の落下がないことを観測する。

4.4.1.2 研究開発の経緯

主に人間共存環境における生活支援用途で使用される移動ロボットや搭乗型ロボットに近い移動体である電動車いすの JIS 規格 (JIS T 9203 電動車いす) の静的安定性試験を参考に、試験装置開発、試験方法開発を実施した。上記規格で定義されている静的安定性試験が実施可能な仕様の試験装置を開発し、開発した試験装置を用いて既存の電動車いすや研究開発実施者から持ち込まれたロボットを用いて試験を実施した。その過程において、ロボットの移動機構に応じた固定方向や滑り止め方法など、試験手順に関する検討を行い、手順書としてまとめた。

4.4.1.3 参考にした規格

JIS T 9203 電動車いす

4.4.1.4 試験方法の開発

(1) 試験装置の仕様の決定と導入

電動車いすの JIS 規格を参考に、図 4.1.1-1 の装置を導入した。この装置は、オペレータの操作により傾斜角度を変えられる傾斜台である。試験装置の仕様としては、上記 JIS 規格における規定値は、標準形電動車いすの場合、上向き、下向きが 20° 、側方が 15° 、簡易形電動車いすの場合、上向き、下向き、側方とも 10° の傾斜角度となっており、それらを満たす必要がある。さらに、上記 JIS 規格では、調整可能で最も不安定な位置に設定して最大傾斜角度を求めて開示することとなっており、上記規定値以上の傾斜角度が必要となる。以上の検討結果により、最大傾斜角度を 30° の仕様の電動傾斜台を開発した。仕様を表 4.4.1-1 に示す。



図 4.1.1-1 静的安定性試験装置

表 4.4.1-1 静的安定性試験装置の仕様

試験装置寸法	幅 2,670mm×奥行 3,410mm×高さ 1,874mm
最大積載重量	250kg
最大傾斜角度	30deg
傾斜分解能	0.1deg
傾斜駆動方式	電動式

(2) 試験の試行による検討

既存の電動車いすや研究開発実施者から持ち込まれたロボットの試験を試行し、以下の結果を得た。電動車いすの JIS 規格では、設置する方向が上向き、下向き、側方と指示されている。電動車いすの場合には、車輪の配置がある程度限定されているため、この 4 方向で良い。しかし、生活支援ロボットの場合には、例えば車輪の配置が複雑であり、上記の 4 方向以外の方向が転倒危険性が一番高い方向であるケースが考えられる。そのため、設置方向を画一的に決定することができない。

そこで、本研究では、ロボットの移動機構によっては上記 4 方向以外の設置条件において傾斜台を傾斜させることとし、転倒危険性が高い方向に漏れないようにロボット設置することとした。

4.4.1.5 成果

4.4.1.5.1 試験装置

静的安定性試験装置を用いる。

4.4.1.5.2 試験条件

ロボットの想定使用環境において、最も高い転倒リスクが想定される条件で試験を行う。

- ・傾斜角度：ロボットの想定使用環境における最大傾斜角度を考慮した設定角度で試験を実施する。
- ・積載・搭乗条件：搭乗者の体重および積載物の質量は、ロボットの仕様における最大値を用いる。

4.4.1.5.3 試験方法

- a) 傾斜台上にロボットを設置し、滑り止めやロープ等により転倒時の安全方策を施す。
- b) ロボットの積載条件は最大積載状態とし、ロボットの荷物積載部に荷物を積載する場合は、ロボットの製造者が指定する方法で積載する。搭乗型ロボットの場合、搭乗者はロボットの製造者が指定する方法で搭乗し、搭乗者は製造者が指定する最大重量とする。座乗型の場合は、ISO 7176-11 で規定するようなダミーを使用してもよい。
- c) 傾斜台を設定した最大角度まで傾斜させ、接地部分が傾斜台から離れることがないこと、ロボットの積載物の転落がないことを確認する。傾斜台から接地部分が離れた場合は、その角度を記録する。
- d) 前後左右など、ロボットの移動機構等を考慮して設置方向を変え、a), c) の手順を繰り返す。

4.4.1.5.4 評価基準

試験の結果、設定した最大角度において、接地部分が傾斜台から離れることがないことを確認。

なお、想定環境における最大角度で設定すると、例えば外力や加速・制動時の慣性力などによる転倒を考慮すると不十分である。走行環境を例えば施設内、屋外などに分類し、基準値を決めることが必要と思われる。

4.4.2 動的安定性試験 [JARI]

4.4.2.1 目的

この試験は、生活支援ロボットの走行中の不安定性を評価することを目的としている。ロボットが想定される走行環境を模擬した試験路を走行したときに、転倒、走路逸脱、積載物の落下の有無を観測する。この試験はロボットがタイヤを用いて走行する機能を有して、転倒、走路逸脱、積載物の落下が、搭乗者や周囲の人に危害を与えると予想される場合に適用できる。その他の走行機構を有するロボットについては、リスクアセスメントの結果により、想定される最も厳しい条件で試験を行う。

4.4.2.2 研究開発の経緯

4.4.2.2.1 参考にした規格

JIS T9201:2006 手動車いす, JIS T9203:2010 電動車いす, JIS T9208:2009 ハンドル型電動車いす, ISO 7176-2:2001 Wheelchairs-Part 2, ISO 7176-13: 1989 Wheelchairs-Part 13.

4.4.2.2.2 試験方法の開発

(1) 試験装置の仕様の決定と導入

車いすに比べて、生活支援ロボットの使用目的、形状は多様であるため、走行すべき環境や試験に必要な走路の寸法も多様である。そこで、本プロジェクトに参加するロボット開発者ならびにロボットビジネス協議会会員のロボットメーカーに対して、自社で開発する可能性のある生活支援ロボットの仕様について調査した。その結果から、試験装置の走行可能寸法、最大傾斜角、路面材料、耐荷重を決定した。決定した仕様に基づいて、試験装置を導入した。

(2) 試験の試行による検討

本プロジェクトに参加するロボット開発者の試作ロボットの試験を試行し、以下の結果を得た。

- a) 人を乗せない移動作業型、立位で搭乗する搭乗型、また、自律走行するロボット等、車いすとは異なるタイプの生活支援ロボットも、導入した装置で試験可能である。
- b) 走行装置に速度制御やトルク制御を用いる生活支援ロボットにおいては、走路の摩擦係数が低い場合に制御が不安定となる場合がある。このようなリスクについては、車いすの試験法にはない、低摩擦係数の走路での試験を検討する必要がある。
- c) 姿勢制御を用いる生活支援ロボットにおいては、傾斜路で自転した際に制御が不安定となる場合がある。このようなリスクについては、車いすの試験法における旋回試験を、自転でも実施する必要がある。
- d) 車いすの試験規格には走行すべき路面条件が定められているが、生活支援ロボットの場合には、想定される使用環境は多様であるため、走行条件は、ロボットの設計仕様から個々に決定する必要がある。また、その参考となる共通基準を提供する必要がある。

4.4.2.2.3 フィールド調査による試験条件の検討

ロボットの走行安定性を試験で検証するにあたって、傾斜角度、段差高さ、溝幅などといった、走行環境に関する試験条件の設定方法を検討する必要がある。現時点では、個々のロボットの開発者がリスクアセスメントで想定した範囲内で、最も厳しい条件を用いるという考え方で試験を実施するが、今後、モビリティロボットが幅広いユーザに様々な用途や場所で利用されていくことを想定すると、ロボットが具備すべき走行安定性の環境条件として、何らかの共通基準があることが望ましい。そこで、ロボットが実際に走行する環境を調査し、その結果と、類似機器の試験法や道路および建築物の施工基準を比較検討しながら、試験条件を導出することを検討している。以下に、ロボット実走行環境を調査した事例を示す。詳細は、付属書 C.4 に掲載する。

(1) 対象とする走行場面

ロボットが走行すると考えられる様々な環境の中でも、傾斜や段差といった路面形状の変化が比較的大きく、転倒した際に人へのリスクが大きい場面として、車いす型や倒立二輪型のようなモビリティロボットが道路脇の歩道を走行する状況を選択した。

(2) 調査地域

調査地域は茨城県つくば市、土浦市および我孫子市の市街地であり、いずれも交通バリアフリー法が施行される以前に道路や歩道が整備された地域である。

調査地点は、ユーザがロボットを利用して移動する機会が多くなると考えられる、公共施設や店舗の周辺、および集落間の移動経路の中から、以下に述べる横断勾配および段差が発生するマウンドアップ方式の歩道を抽出した。

(3) 調査した路面形状

ロボットが歩道を走行する際に転倒の要因となりやすい路面形状として、車両が車道から駐車場に乗り入れるために設けられた歩道の切り下げ部（図 4.4.2.4-1）を、ロボットが通過する際の横断勾配に着目した。

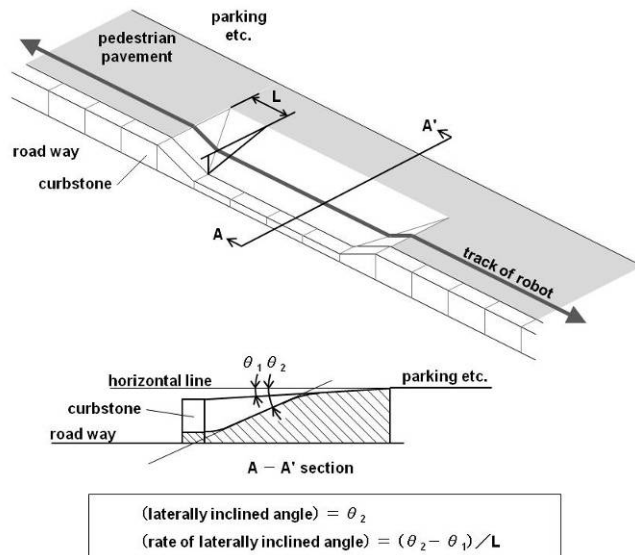


図 4.4.2.4-1 歩道切り下げ部の横断勾配

(5) 調査結果

今回調査した地点の歩道切り下げ部の最大横断勾配の分布を図 4.4.2.4-3 に示す。ここで最大横断勾配とは、図 4.4.2.4-1 に示す θ_2 に相当する。交通バリアフリー法では、切り下げ部の擦り付け角度を原則として 15%（約 8.5 度）以下と定めているが、今回の調査地点は同法施行以前に施工されているため、10 度を上回る角度まで分布が見られる。一方、本研究で走行安定性試験方法を開発する際に参考とした電動車いすの試験法では、試験項目によって異なる傾斜角度条件が定められており、最も角度が大きい条件では、10 度の斜面で安定性を確認する。今回の調査結果では、10 度以下の勾配が全体の約 85% を占めている。

したがって、今回の調査結果からは、屋外型モビリティロボットの横断勾配上での安定性について、10 度程度の角度を要件とすることが妥当と考えられる。

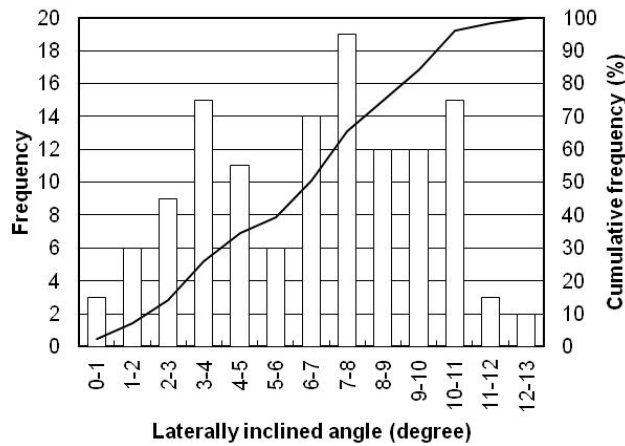


図 4. 4. 2. 4-3 歩道切り下げ部の最大横断勾配の分布

4. 4. 2. 5 成果

以上の検討の結果、試験装置と試験方法を確立した。

4. 4. 2. 5. 1 試験装置

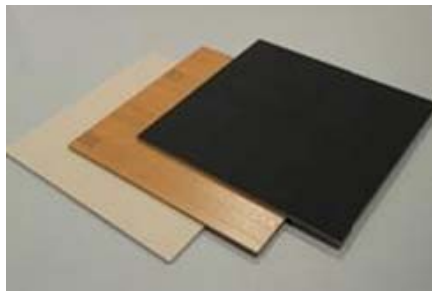
動的安定性試験用の設備として、平坦路走行試験設備と傾斜路走行試験設備を導入した。平坦路走行試験設備は、20 m の長さを有する直線走路であり、最高速度および制動距離の測定に用いる。傾斜路走行試験設備は、傾斜角度を最大 10° まで調整可能な走路であり、降坂時、登坂時および傾斜路横断時の動的安定性の評価に用いる。いずれの設備も、車いすの試験設備を参考に仕様を決定したが、ロボットの多様な使用条件を満たすために、路面の材料を交換できるよう、路面セグメントを用意した。



(a) 平坦路走行試験設備



(b) 傾斜路走行試験設備



(c) 路面セグメント

図 4. 4. 2. 5-1 動的安定性試験用試験設備

表 4.4.2.5-1 動的安定性試験用試験設備の仕様

平坦路走行試験設備	面積：160m ² 直線部最大長さ：20m 路面：プラスチックタイル，フローリング，カーペット 付加機能：プラスチックタイル湿潤路面機能
傾斜路走行試験設備	面積：94m ² 最大傾斜角度：10度 最大荷重：250kg 路面：プラスチックタイル，フローリング，カーペット，セイフティウオーク

4.4.2.5.2 試験条件

- ・ 走行路の傾斜：ロボットの使用環境における最大値を用いる。
- ・ 路面の段差および溝は：ロボットの仕様における想定環境の最大値を用いる。段差について仕様に規定がない場合，屋外を走行するロボットについては高さ 50mm とすることができる。
- ・ 走行路の摩擦係数：ISO 7176-13 による（0.75 から 1.0 の範囲に設定する）。ISO 7176-13 の規定よりも低い摩擦係数の路面を想定した試験を行う場合は，ISO 7176-13 に規定された方法で摩擦係数を測定する。
- ・ 積載条件：搭乗者の体重および積載物の質量は，ロボットの仕様における最大値を用いる。
- ・ 走行速度：走行速度は，ロボットの仕様における最高値を用いる。

4.4.2.5.3 試験方法

4.4.2.5.3.1 平坦路および降坂路最高速度試験

- 図 4.4.2.5-2 のように，ロボットを走行路の中心線に沿って走行させ，助走区間で最高速度まで加速する。
- 最高速度を維持した状態で測定区間を通過し，停止する。測定区間の長さは，通過時間が 1s 以上になるように設定する。
- 測定区間の通過時間を測定する。
- 3 回測定して，平均通過時間 (T) を求める。
- 最高速度 (V) は，次の式によって算出する。

$$V = \frac{L}{T}$$

ここに， V は最高速度 (m/s)， L は測定区間の長さ (m)， T は平均通過時間 (s)

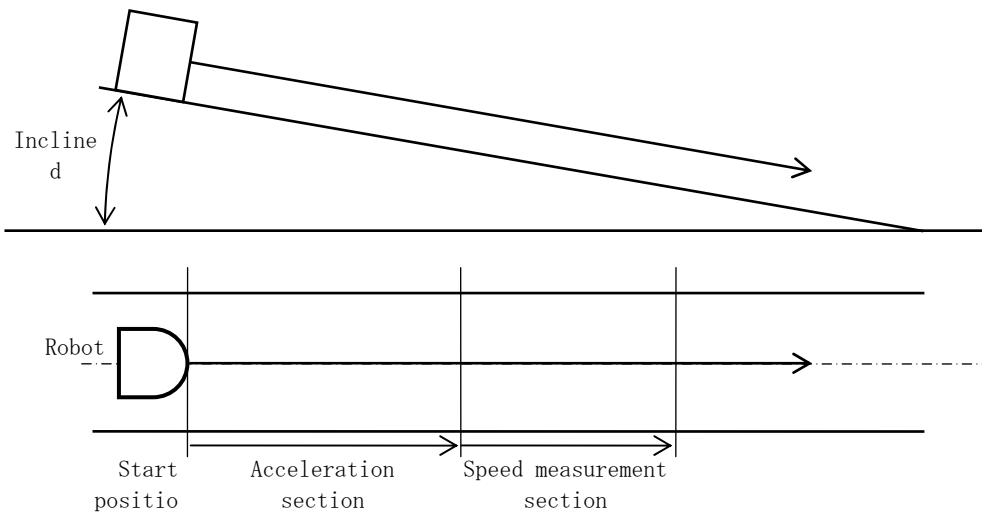


図 4.4.2.5-2 最高速度試験

4.4.2.5.3.2 平坦路および降坂路制動試験

- 図 4.4.2.5-3 のように、ロボットを傾斜路上のスタート位置に設置する。
 - ロボットを、降坂方向に向かって最大加速で発進させる。
 - 走行路の中心線に沿って走行させ、助走区間で最高速度まで加速する。
 - 最高速度を維持したまま、制動開始位置から最大制動力で制動し、停止する。このとき、ロボットの制動方法が複数ある場合は、それぞれの制動方法について試験を行う。
- NOTE: 例えば、通常の制動、障害物検知などのセンサ入力による制動、緊急停止による制動などが考えられる。
- ロボットの仕様上の停止距離に対して、ロボットの一部の逸脱の有無を記録する。
 - 制動開始から停止までについて、仕様上の許容走路幅に対するロボットの一部の逸脱の有無を記録する。
 - 発進から停止までにおけるロボットの転倒、および搭乗者や積載物の落下の有無を記録する。

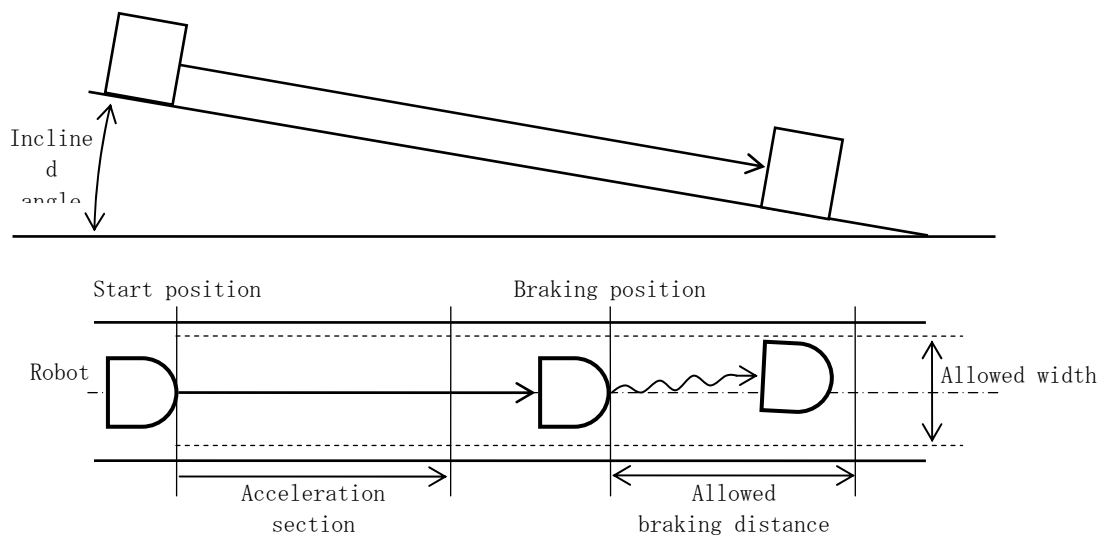


図 4.4.2.5-3 平坦路および降坂路加速制動試験

4.4.2.5.3.3 登坂路加速制動試験

- a) 図 4.4.2.5-4 のように、ロボットを傾斜路上のスタート位置に設置する。
- b) ロボットを、登坂方向に向かって最大加速で発進させる。
- c) 走行路の中心線に沿って走行させ、助走区間で最高速度まで加速する。
- d) 最高速度を維持したまま、制動開始位置から最大制動力で制動し、停止する。このとき、ロボットの制動方法が複数ある場合は、それぞれの制動方法について試験を行う。
注：例えば、通常の制動、障害物検知などのセンサ入力による制動、緊急停止による制動などが考えられる。
- e) 発進から停止までの間について、仕様上の許容走路幅に対するロボットの一部の逸脱の有無を記録する。
- f) 発進から停止までにおけるロボットの転倒、および搭乗者や積載物の落下の有無を記録する。

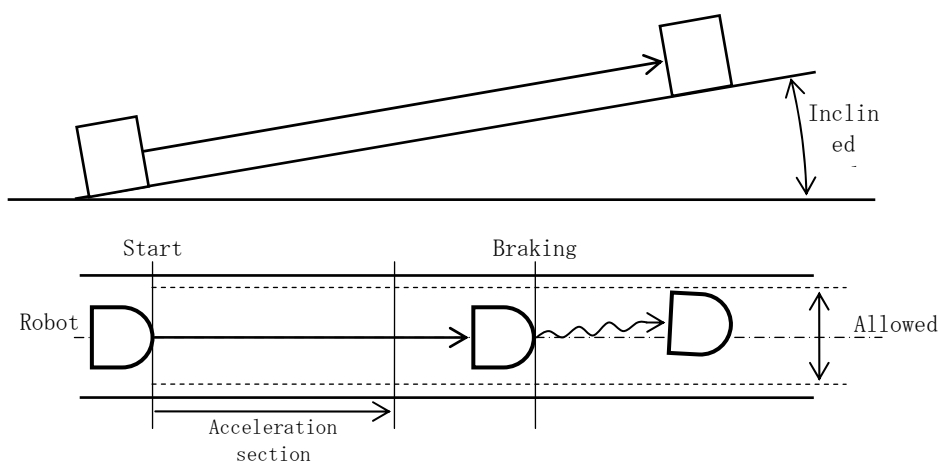


図 4.4.2.5-4 登坂路加速制動試験

4.4.2.5.3.4 降坂路急旋回試験

この試験は、走行しながら方向転換する機能を有するロボットに適用する。

- 1) 図 4.4.2.5-5 のように、ロボットを傾斜路上で降坂方向に走行させ、助走区間で最高速度まで加速する。
- 2) 最高速度を維持したまま、旋回開始位置を通過したら直ちに急旋回をし、半円程度旋回したら停止する。
- 3) 旋回中におけるロボットの転倒、および搭乗者や積載物の落下の有無を記録する。
- 4) 左右それぞれの旋回方向について試験を行う。

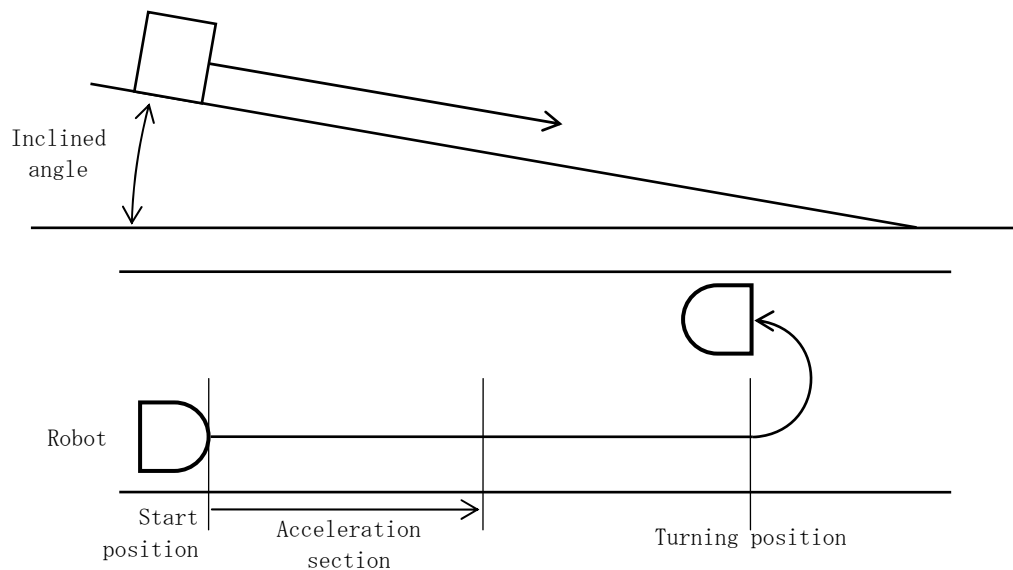


図 4.4.2.5-5 降坂路急旋回試験

4.4.2.5.3.5 傾斜路横断試験

- 1) 図 4.4.2.5-6 のように、傾斜路上でロボットを走行路の中心線に沿って走行させ、助走区間で最高速度まで加速する。
- 2) 最高速度を維持したまま、長さ 5m の観察区間を通過し、停止する。
- 3) 観察区間において、仕様上の許容走路幅に対するロボットの一部の逸脱の有無を記録する。
- 4) 発進から停止までにおけるロボットの転倒、および搭乗者や積載物の落下の有無を記録する。
- 6) 同一の走路を用いて反対方向についても試験を行う。

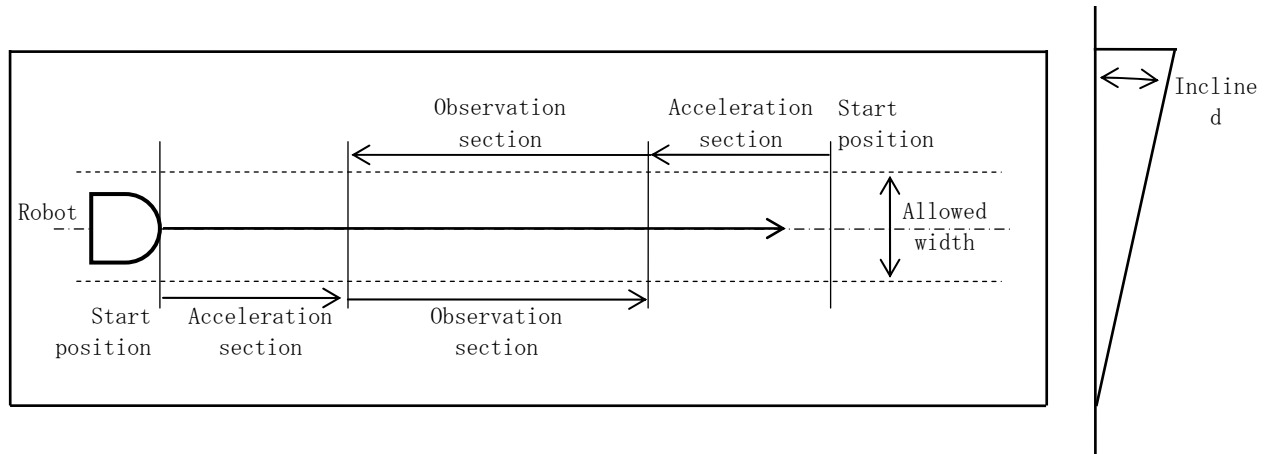


図 4.4.2.5-6 傾斜横断試験

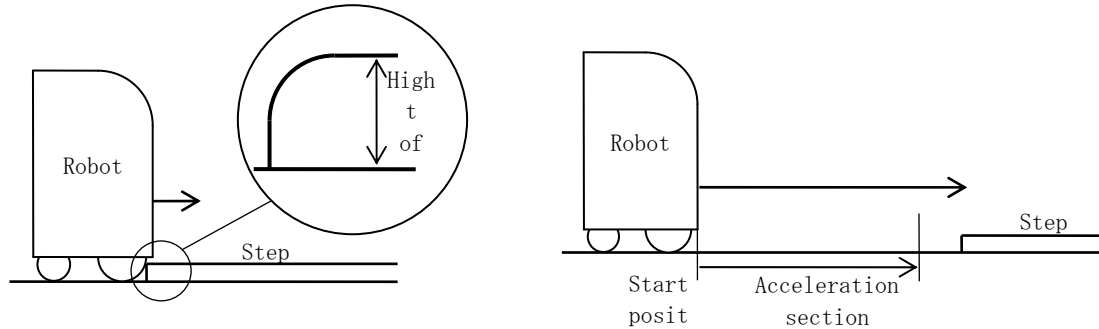
4.4.2.5.3.6 段差および溝走行時の安定性試験

この試験は、ロボットの使用環境に段差および溝が想定される場合に行うことができる。段差の高さは、上り、降りのそれぞれについて、ロボットの仕様で走行可能な最大高さとする。仕様に規定がない場合、屋外を走行するロボットについては高さ 50mm とすることができる。

溝の幅と深さは、ロボットの仕様で走行可能な最大幅および最大深さとする。

4.4.2.5.3.7 段差上り試験

- 1) 図 4.4.2.5-7 (a)のように、ロボットを前輪が段差に接した状態で設置する。このとき、ロボットの進行方向と段差の角度は、ロボットの仕様で走行可能な角度のうち、安定性に最も影響の大きい角度とする。ロボットの仕様に段差との角度が規定されていない場合は、 $90^\circ \pm 5^\circ$ とすることができる。ロボットの車輪は進行方向に向いていること。
- 2) ロボットを最大出力で発進させて段差を上り、停止する。
- 3) 段差を通過するときの、ロボットの転倒、および搭乗者や積載物の落下の有無を記録する。
- 4) 図 4.4.2.5-7 (b)のように、ロボットをスタート位置から走行させ、助走区間で最高速度まで加速する。
- 5) 最高速度を維持したまま段差を上り、停止する。このとき、段差への進入角度は、ロボットの仕様で走行可能な進入角度のうち、安定性に最も影響の大きい角度とする。ロボットの仕様に進入角度が規定されていない場合は、 $90^\circ \pm 5^\circ$ 、および $10^\circ \pm 5^\circ$ とすることができる。
- 6) 段差を通過するときの、ロボットの転倒、および搭乗者や積載物の落下の有無を記録する。



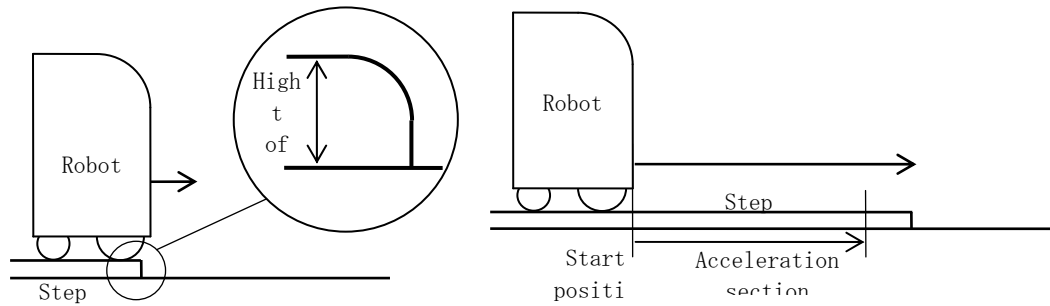
(a) 停止状態から上る場合

(b) 最高速度で上る場合

図 4.4.2.5-7 段差上り試験

4.4.2.5.3.8 段差降り試験

- 1) 図 4.4.2.5-8 (a)のように、ロボットの前輪が段差の端部にある状態で設置する。このとき、ロボットの進行方向と段差の角度は、ロボットの仕様で走行可能な角度のうち、安定性に最も影響の大きい角度とする。ロボットの仕様に段差との角度が規定されていない場合は、 $90^\circ \pm 5^\circ$ とすることができる。ロボットの車輪は進行方向に向いていること。
- 2) ロボットを微小な速度で走行させて段差を降り、停止する。
- 3) 段差を通過するときの、ロボットの転倒、および搭乗者や積載物の落下の有無を記録する。
- 4) 図 4.4.2.5-8 (b)のように、ロボットをスタート位置から走行させ、助走区間で最高速度まで加速する。
- 5) 最高速度を維持したまま段差を降り、停止する。このとき、段差への進入角度は、ロボットの仕様で走行可能な進入角度のうち、安定性に最も影響の大きい角度とする。ロボットの仕様に進入角度が規定されていない場合は、 $90^\circ \pm 5^\circ$ 、および $10^\circ \pm 5^\circ$ とすることができる。
- 6) 段差を通過するときの、ロボットの転倒、および搭乗者や積載物の落下の有無を記録する。



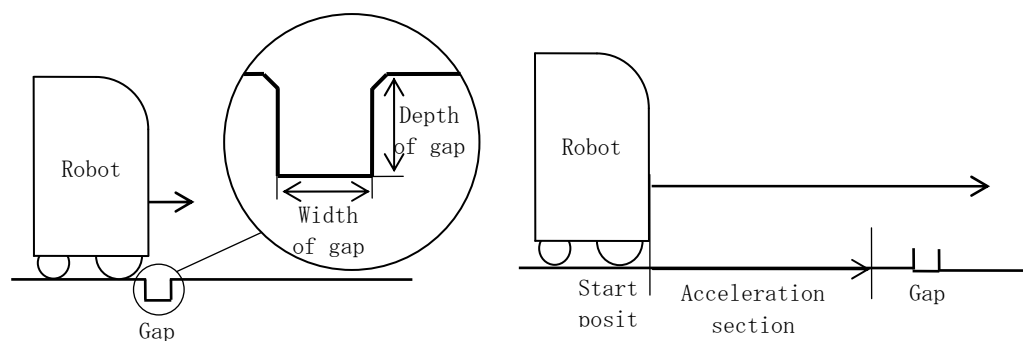
(a) 停止状態から降りる場合

(b) 最高速度で降りる場合

図 4.4.2.5-8 段差降り試験の試験方法

4.4.2.5.3.9 溝踏破試験

- 1) 図 4.4.2.5-9 (a) のように、ロボットを溝の近傍に設置する。このとき、ロボットの進行方向と溝の角度は、ロボットの仕様で走行可能な角度のうち、安定性に最も影響の大きい角度とする。ロボットの仕様に溝との角度が規定されていない場合は、 $90^\circ \pm 5^\circ$ とすることができる。ロボットの車輪は進行方向に向いていること。
- 2) ロボットを微小な速度で走行させて溝を踏破し、停止する。
- 3) 段差を踏破するときの、ロボットの転倒、および搭乗者や積載物の落下の有無を記録する。
- 4) 図 4.4.2.5-9 (b) のように、ロボットをスタート位置から走行させ、助走区間で最高速度まで加速する。
- 5) 最高速度を維持したまま溝を踏破し、停止する。このとき、溝への進入角度は、ロボットの仕様で走行可能な進入角度のうち、安定性に最も影響の大きい角度とする。ロボットの仕様に進入角度が規定されていない場合は、 $90^\circ \pm 5^\circ$ 、および $10^\circ \pm 5^\circ$ とすることができる。
- 6) 段差を踏破するときの、ロボットの転倒、および搭乗者や積載物の落下の有無を記録する。



(a) 停止状態から踏破する場合

(b) 最高速度で踏破する場合

図 4.4.2.5-9 溝踏破試験の試験方法

4.4.2.5.4 評価基準

試験の結果以下のことを満足することを評価基準とする。

- ・平坦路および降坂路最高速度試験で測定された最高速度が、設計仕様における最高速度を超えないこと。

- ロボットが転倒しないこと.
- ロボットの安全に関わる部品, 搭乗者および積載物が落下しないこと.

4.5 安全関連機能の検証試験

4.5.1 安全関連光学センサの機能試験 [産総研]

4.5.1.1 目的

この試験は、ロボットまたはその周囲環境に様々な外乱光を照射し、ロボットの環境認識性能を評価するものである。この試験は、光学的原理に基づく安全関連センサを備えたロボットが、直射日光を含む様々な外乱光に曝されることによって安全関連センサによる環境認識性能（特に人検知性能）が低下し、搭乗者や周囲の歩行者に危害を及ぼすと予想される場合に適用できる。

4.5.1.2 研究開発の経緯

4.5.1.2.1 参考にした規格

IEC 61496-1

IEC 61496-3

IEC/TR 61496-4

IEC/TS 61496-4-2 (2014 年公開予定)

IEC/TS 61496-4-3 (2014 年公開予定)

4.5.1.2.2 研究開発の流れ

研究開発の流れを付属書 C.5 に掲載する。

4.5.1.3 成果

4.5.1.3.1 試験装置

- ・ 環境認識性能試験装置の外乱光源（人工太陽灯、白熱電球、蛍光灯、ストロボ光）を用いる。
- ・ 照度計、データロガは校正有効期限内であること。

4.5.1.3.2 試験条件

- ・ リスクアセスメントにおいて最も高いリスクが想定される外乱光条件で試験を行う。
- ・ センサコンポーネントは、ロボットから取り外した状態でも、ロボットに装着した状態でもよい。
- ・ 開発試験においては、メーカーとの打合せ結果（試験項目・試験条件の表）に記載された条件による。

4.5.1.3.3 試験準備

- (1) センサコンポーネントの検出区域を、IEC 61496-3 または IEC/TS 61496-4-2, IEC/TS 61496-4-3 に準拠あるいは参照して設定する。
- (2) 検出区域の境界と交差するように自動 X ステージなどの移動プラットフォームを設置し、試験片を設置する。
- (3) 試験の様態を動画として記録するようビデオカメラを準備する。
- (4) センサコンポーネントの出力 (ON 状態・OFF 状態)、照度計の出力、(可能な場合は) 移動プラットフォームの位置出力、ビデオカメラの動画出力及びをデータロガ入力に接続する。

4.5.1.3.4 試験の実施

IEC 61496-3 または IEC/TS 61496-4-2, IEC/TS 61496-4-3 に準拠あるいは参照した光干渉試験を実施する。

以下、外乱光源としては人工太陽灯・白熱電球・蛍光灯・ストロボ光を、試験片と背景としては IEC 61496-3 または IEC/TS 61496-4-2, IEC/TS 61496-4-3 に準拠あるいは参照した試験片を使用して同様に実施する。

試験手順は、目的に応じて IEC 61496-3 または IEC/TS 61496-4-2, IEC/TS 61496-4-3 に準拠して実施すること。以下に基本となる手順例を示す。

- (1) センサコンポーネント（以下センサ）と照度計を三脚に設置し、背景板、自動 X ステージ等の試験片移動プラットフォームとの位置を調整する
- (2) 外乱光源を三脚に設置し、高さ調節する
- (3) 外乱光源をセンサから上記規格に準拠もしくは同規格を参照した位置に設置
- (4) 外乱光源がセンサの視野内にあることを確認
- (5) データログを起動し、データ（センサ出力、照度、ビデオ動画）の記録開始
- (6) 外乱光源を点灯
- (7) センサを起動し、侵入物が存在しない状態で正常動作（オン状態）であることを確認
- (8) 外乱光源を点灯
- (9) センサが正常動作（オン状態）であることを確認
- (10) 移動プラットフォームにより試験片を検出区域内に侵入させ、センサの正常動作（オフ状態）を確認
- (11) 移動プラットフォームにより試験片を検出区域内で IEC 61496-3 に準拠した速度で移動させ、センサの正常動作（オフ状態）を確認
- (12) 移動プラットフォームにより試験片を検出区域外に退去させ、センサの正常動作（オン状態）を確認
- (13) 外乱光源を消灯し、センサの正常動作（オン状態）を確認
- (14) データログを停止し、データの記録終了

なお、環境によっては暗所から明所への移動（またはその逆）時の明順応（暗順応）が最も過酷な光干渉条件となることがある。そのような場合には、上記試験手順において、外乱光源の灯体前方に遮光板を挿入するなどして、条件を再現することが可能である。

以上述べた試験のセットアップ例を図 4.5.1.9 に示す。

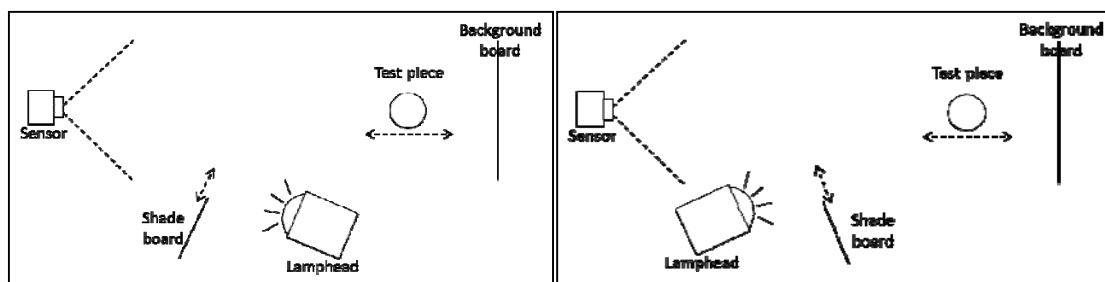


図 4.5.1.9 試験のセットアップ例

左：センサへの直接光，右：オブジェクトおよび背景への照射光

4.5.1.3.5 評価基準

試験の実施手順中の確認項目 4)7)9)10)11)12)13) すべてが確認されること。

4.5.2 障害物検知対応性能試験 [産総研]

(軌道追従安定性能の確認を含む)

4.5.2.1 目的

本試験では、走行型および搭乗型の生活支援ロボットが、想定される使用環境下で走行する際に、人や設備を含めた周辺の障害物（静止障害物、移動障害物）を検知し、それらに対応（減速、停止）する能力を検証する。また、試験対象ロボットと障害物との相対距離、相対速度、速度軌跡から、安全距離の維持、姿勢の安定性等の評価を行う。なお、本プロジェクトの当初計画では、軌道追従安定性試験法の開発を含んでいたが、直接安全性に関わらないことから独立した試験を行わず、本試験（障害物検知対応性能試験）で軌道追従安定性能の確認を行うこととした。

4.5.2.2 研究開発の経緯

本試験に対して、参考にした規格は、ISO13482:2014 “Robots and robotic devices – Safety requirements for personal care robots”であり、関連規格は、JISD6805, JIVASA05, JISB9707, JISB9708, JISZ9711 である。

研究開発の流れとしては、まず、対象となるロボットにおいて、想定される障害物や環境構造などを抽出し、それらに対するロボットの挙動を詳細に計測することで、適正な対応をとっているかの判断を行うものとした。そのため、想定する障害物や移動障害物の挙動の再現などを行う装置を開発し、さらに、移動軌跡や速度の解析による安全性の検証を行うものとした。また、実際に本プロジェクトに参加するロボット開発者からロボットの提供を受け、模擬的に試験を行い、試験方法の実検証を行った。これらに基づき、試験装置の改良や試験方法の見直しなどを行い、最終的に評価基準を策定した。

4.5.2.3 成果

①試験装置

この試験で使用する装置は次の表 4.5.1 に示す通りである。

表 4.5.2-1 使用する試験装置の一覧

試験装置	
走行路	走行路面用のゴムシートおよび各種タイル
障害物接近再現装置	障害物接近再現装置制御用 PC
三次元動作解析用カメラ	三次元動作解析用ビデオカメラ
三次元動作解析用 PC	三次元動作解析用マーカー
自動追尾動作解析用ビデオカメラ	自動追尾動作解析用 PC
搭乗者防具および機械転倒防止用吊具	防護用クッション
各種障害物（壁、円筒、人体ダミー）	ジブクレーン
ロボット走行状態模擬装置	ロボット走行状態模擬装置制御用 PC



図 4.5.2-1 障害物接近再現装置画面



図 4.5.2-2 三次元動作解析カメラ他、解析 PC



図 4.5.2-3 各種障害物（壁，円筒，人体ダミー）の例



図 4.5.2-4 ロボット走行状態模擬装置

②試験条件

試験対象ロボットの想定される走行条件，環境条件を，メーカーとの打合せによって抽出し，試験条件を選定する．試験条件の選定にあたり，主要な試験条件を以下に示す．ただし，試験対象ロボットの開発過程における試験では，メーカーとの協議により変更してもよい．

a. 試験対象ロボットの走行条件

(1) 走行速度

想定される使用条件での，試験対象ロボットの代表的な速度を使用する．

(2) 走行方向

前進，後退，横方向への移動のうち，走行可能な方向を対象とする．

(3) 加重

試験対象ロボットが搭乗型ロボットの場合，想定される使用条件での代表的な加重をかけるものとする．

b. 環境条件

(1) 走行路面の種類

フローリング，カーペット，セーフティーウォーク，およびコンクリートの中で，想定される使用環境に最も近い路面を使用する．なお，想定される路面が複数ある場合には，最も制動距離が

延びる路面を使用する．

(2) 静止障害物

壁（木、布、鏡面、透明、柵状）、円筒（金属、樹脂）、人体ダミーの中で、想定される使用環境

のもとで試験対象ロボットが遭遇する可能性があるものを検知対象の障害物とする。

(3) 移動障害物

障害物が移動することが想定される場合には、試験対象ロボットが遭遇する可能性がある移動障

害物（円筒、人体ダミー）を検知対象の障害物に追加する。

(4) 凹凸段差

想定される使用環境に凹凸段差が存在する場合には、凹凸段差を検知対象の障害物に追加する。

c. 制限事項

- ・試験対象ロボットの大きさは、2mの立方体（縦横高さ）以内であること。
- ・試験対象ロボットの制動距離は、4m以下であること。
- ・相対距離、相対速度、速度軌跡の測定範囲が、試験検証機器の想定範囲内であること。
- ・用意できる走行可能エリアの広さ、形は、使用する路面の種類により異なるため、路面の種類を

選定する際に合わせて検討しておくこと。

・走行状態模擬装置を使用する場合は、試験対象ロボットの大きさは2m³の立方体（縦横高さ）以内、

重量 250kg 以下であること。

③ 試験方法

a. 試験項目の決定

障害物検知対応性能試験は次の3種類に分けられる。

- ・静止障害物検知対応性能試験
- ・移動障害物検知対応性能試験（障害物が移動することが想定される場合に実施）
- ・凹凸段差検知対応性能試験（使用環境に凹凸段差があることが想定される場合に実施）

上記3種類の試験と試験対象ロボットの設計仕様、想定される使用環境等をもとに選定した試験条件から、実施すべき試験項目を決定する。表 4.5.2 に基本的な試験項目を、図 4.5.5 に障害物との対峙方法を示す。なお、試験対象ロボットの開発過程における試験では、メーカーとの協議により、試験項目、対峙方法を変更してもよい。

表 4.5.2-2 基本的な試験項目

試験の種類	検知対象障害物 (表中の大きさは目安)		対峙方法
静止障害物 検知対応 性能試験	壁面 (90cm 四方)	木	<ul style="list-style-type: none"> ・壁正面 ・壁斜め 45 度前方
		黒フェルト布 (反射率 10%以下)	
		鏡 (反射率 90%以上)	
		透明ガラス (透光率 95%以上)	
		柵 (柵棒:直径 10mm, 間隔 100mm, 縦目方向)	
	円筒 (長さ 90cm)	PV13 (外径 20mm 水道管) 直径 200mm (バケツ)	<ul style="list-style-type: none"> ・円筒正面(円筒とロボット中央を結ぶ線上) ・円筒正面(円筒とロボット右端を結ぶ線上)
直径 350mm (ごみ箱)		<ul style="list-style-type: none"> ・円筒正面(円筒とロボット左端を結ぶ線上) 	
人マネキン		<ul style="list-style-type: none"> ・マネキン正面(マネキン中央とロボット中央を結ぶ線上) ・マネキン正面(マネキン左端とロボット右端を結ぶ線上) ・マネキン正面(マネキン右端とロボット左端を結ぶ線上) ・マネキン斜め 45 度前方(マネキン中央とロボット中央を結ぶ線上) ・マネキン斜め 45 度前方(マネキン左端とロボット右端を結ぶ線上) ・マネキン斜め 45 度前方(マネキン右端とロボット左端を結ぶ線上) ・マネキン真横(マネキン中央とロボット中央を結ぶ線上) ・マネキン真横(マネキン左端とロボット右端を結ぶ線上) ・マネキン真横(マネキン右端とロボット左端を結ぶ線上) 	
成人 子供(7 歳)			
移動障害物 検知対応 性能試験	円筒 (長さ 90cm)	PV13 (外径 20mm 水道管) 直径 200mm (バケツ)	<ul style="list-style-type: none"> ・直進するロボットに, 障害物が正面から接近. ・直進するロボットに, 障害物が斜め 45 度前方から接近.
		直径 350mm (ごみ箱)	<ul style="list-style-type: none"> ・直進するロボットに, 障害物が真横から接近.
		人マネキン	<ul style="list-style-type: none"> ・直進する障害物に, ロボットが斜め 45 度後方から接近.
	成人 子供(7 歳)	<ul style="list-style-type: none"> ・直進する障害物に, ロボットが真後ろから接近. ・直進(急停止)する障害物に, ロボットが斜め 45 度後方から接近. ・直進(急停止)する障害物に, ロボットが真後ろから接近. 	
凹凸段差 検知対応 性能試験	凹段差 (幅はロボット 全幅以上)	ロボットが乗り越えることが 可能な深さよりもわずかに 深い段差	<ul style="list-style-type: none"> ・凹凸段差正面(凹凸段差中央とロボット中央を結ぶ線上) ・凹凸段差正面(凹凸段差左端とロボット右端を結ぶ線上) ・凹凸段差正面(凹凸段差右端とロボット左端を結ぶ線上)
	凸段差 (幅はロボット 全幅以上)	ロボットが乗り越えることが 可能な高さよりもわずかに 高い段差	<ul style="list-style-type: none"> ・凹凸段差左右斜め 45 度, 左右斜め 10 度 <p>※凹凸の高さ(深さ)を満たしていれば, 段差の作成方法は特に規定しない.</p>

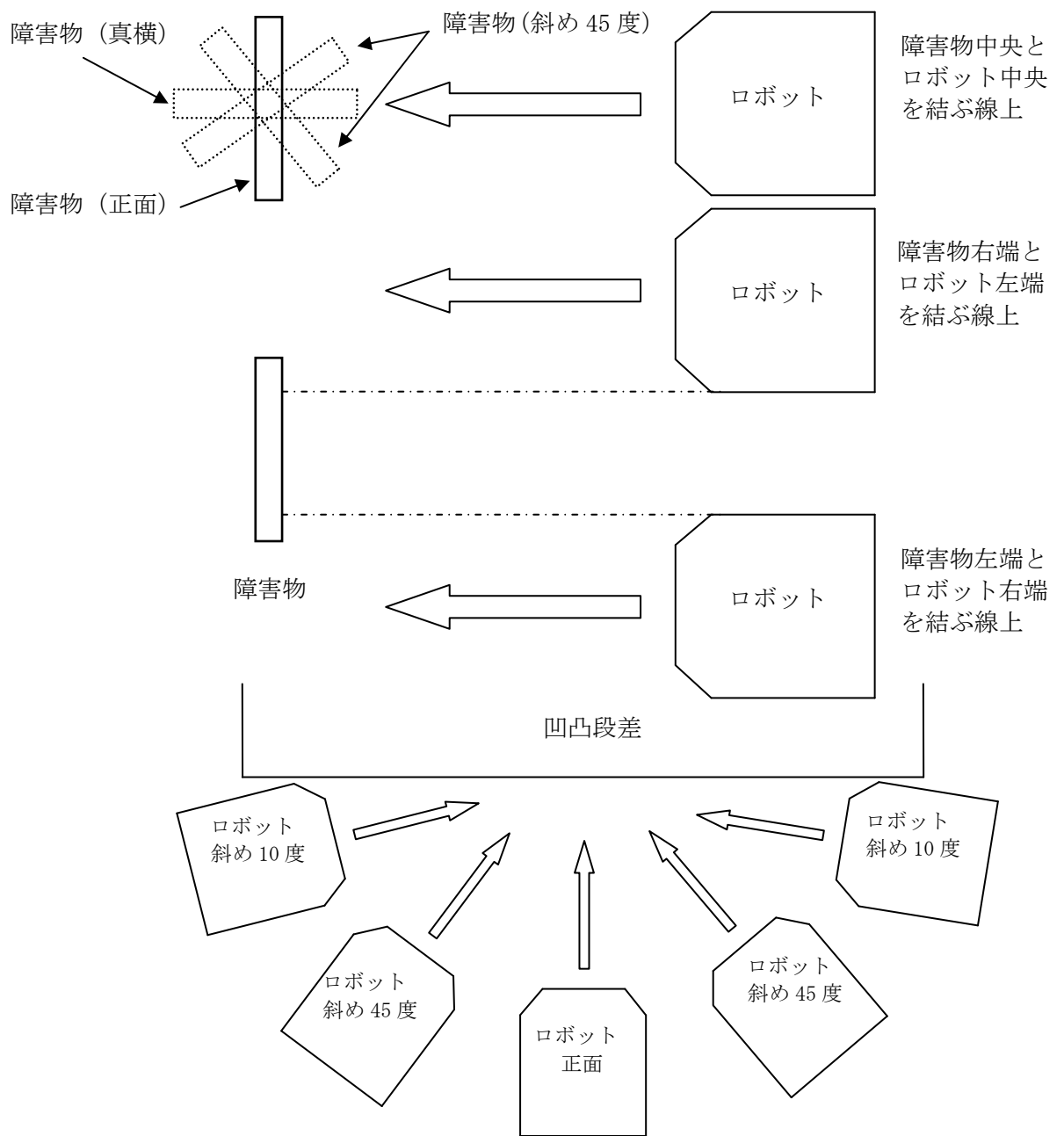


図 4.5.2-5 障害物との対峙方法

b. 試験準備

(1) 試験エリアの清掃

- ・試験エリア外周に置かれている物で、光を反射する物は覆い隠すか排除する。
- ・試験エリアが室内の場合は掃除機を、室外の場合は箒等を使用し、試験エリア内を掃除する。

(2) 計測装置の準備

計測装置の準備については以下を参照。

三次元動作解析を使用する場合：

「三次元動作解析装置 計測手順書 (モーションキャプチャー手順書)」

3章 計測範囲・カメラ配置決め

4章 カメラの設置と調整

5章 各装置の立上げ、終了

6章 キャリブレーション

自動追尾動作解析を使用する場合：

「ジブクレーン 取扱い手順書」(注) 試験エリアが室外の場合

「自動追尾動作解析装置 計測手順書」

(3) 試験対象ロボットの準備

- ・試験対象ロボットの電源を確認する。電源がバッテリーである場合には残量を確認し、必要に

応じ充電しておく。予備バッテリーがある場合は、予備バッテリーにも充電しておく。

- ・タイヤの空気圧をメーカーの指定圧力に調整する。
- ・外観を観察し、損傷がないことを確認する。
- ・走行機能に異常がないことを確認する。
- ・計測用のマーカールを取り付ける。取り付け方法については以下を参照。

三次元動作解析を使用する場合：

「三次元動作解析装置 計測手順書 (モーションキャプチャー手順書)」

7章 ロボット等へのマーカール貼付け

8章 マーカールセットの作成

自動追尾動作解析を使用する場合：

「自動追尾動作解析装置 計測手順書」

- ・試験対象ロボットの状態を記録するため、前後左右などからデジタルカメラで撮影をしておく。

(4) 走行路、凹凸段差の準備

試験の内容に応じ、必要な走行路、凹凸段差を準備する。

(5) 障害物接近再現装置の準備

- ・装置に障害物(マネキン等)を取り付ける。
- ・試験時間(障害物接近再現装置の稼働時間)に応じてバッテリーを準備し、充電しておく。

- ・遠隔操作(リモートデスクトップによる操作)を行う場合は、障害物接近再現装置制御用PC

のバッテリー残量を確認し、必要に応じ充電しておく。また、屋外での試験の場合には、遠隔

操作可能範囲を確認しておく。

(注) 障害物接近再現装置は、移動障害物を使用する場合に準備する。

(6) ロボット走行状態模擬装置の準備

- ・接近再現装置との連携ソフトを構築中につき、準備作業内容は現在未確定。
- ・非常停止スイッチのバッテリーをあらかじめ充電しておく。

(7) 安全の確保

- ・試験対象ロボットの走路逸脱や転倒に備えて、試験エリアの周囲にクッション材を設置する。
- ・搭乗型ロボットの試験を行う場合、搭乗者は保護具（頭用，肘用，膝用，手用）を装着する。
- ・各装置の非常停止スイッチを試験担当者の手元に用意し，すぐに停止できる状態にする。
- ・試験対象ロボットの設置および操作調整時以外，試験中にはエリア内に立ち入らないこと。
- ・各種配線が絡まないように注意する。

c. 試験の実施

試験では，各項目3回以上試行を繰り返し，有効データを3つ以上取得する。

試験実施手順を以下に示す。

①実施する試験項目に応じた準備を行う。以下は主な準備作業の例。

- ・試験対象ロボットをスタート地点へ移動。
- ・障害物（壁，円筒，人体ダミー，凹凸段差）を所定の位置へセット。
- ・安全確保（走行路の清掃，クッション材の再配置，転倒防止用のワイヤ確認など）。

②試験データの記録開始。

③試験対象ロボットの走行開始。（移動障害物試験の場合は，障害物の走行開始。）

④試験データの記録停止。

※①から④を3回以上繰り返した後，次の項目へ。

(注) 試験データの記録開始および停止の操作については以下を参照。

三次元動作解析を使用する場合：

「三次元動作解析装置 計測手順書（モーションキャプチャー手順書）」

8.2章 Cortex3による録画撮影

自動追尾動作解析を使用する場合：

「自動追尾動作解析装置 計測手順書」

d. 試験後の作業

- ・試験対象ロボットの取扱要領に沿って，外装の損傷確認，および充電等を行う。
- ・計測用のマーカーを外し，メーカーの定めた手順に基づいて元の状態に戻す。
- ・装置類，障害物等を撤収する。

e. データ処理

試験結果（試験データ）は，試験対象ロボットごとに，ノイズ除去などのデータ処理前のRAWデータ，処理後の加工データ，および，加工データから生成した試験成績書に分けてメディア（DVD等）に書き込み，生活支援ロボット安全検証センター内の規定にしたがって保存管理する。

(注) ノイズ除去などのデータ処理については以下を参照。

三次元動作解析を使用する場合：

「三次元動作解析装置 計測手順書（モーションキャプチャー手順書）」

11章 ポスト処理（計測データ補間）

自動追尾動作解析を使用する場合：

「自動追尾動作解析装置 計測手順書」

④評価基準

障害物検知対応性能試験において、評価の基準は、実施した全ての試験項目で、衝突（接触）や脱輪がないことを基本とする。

また、試験対象ロボットの動作（減速、停止）に対して、障害物との相対距離、相対速度、速度軌跡などがメーカーの設計仕様を外れていないことを、三次元解析装置により、定量的に評価する。

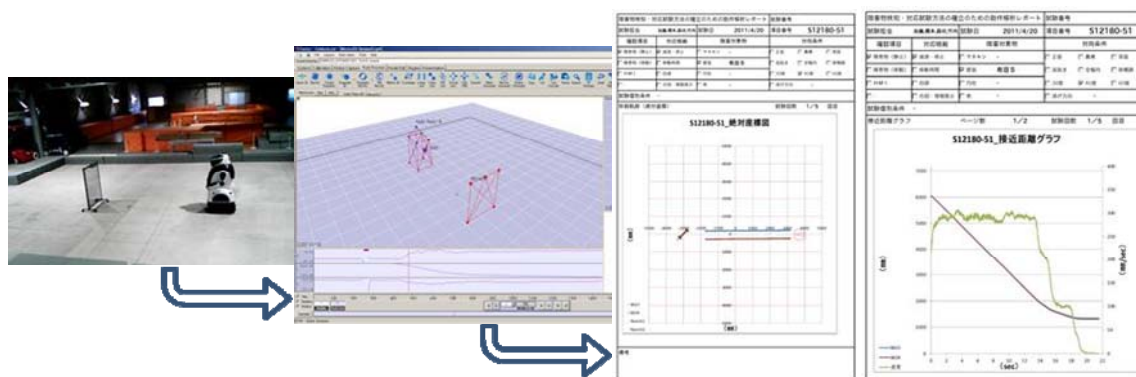


図 4.5.2-6 三次元動作解析装置を用いた操作解析の例（障害物に対する距離と減速度）

4.5.2.4 試験結果の例

- ・産総研のロボティックカートに対する試験の様子と試験結果を試験例として掲載する。



図 4.5.2-7 障害物（円筒 黒 φ600）の試験の様子



図 4.5.2-8 障害物（円筒 白 φ100）の試験の様子



図 4.5.2-9 障害物（壁 青布）の試験の様子



図 4.5.2-10 障害物（壁 透明プラスチック）の試験の様子

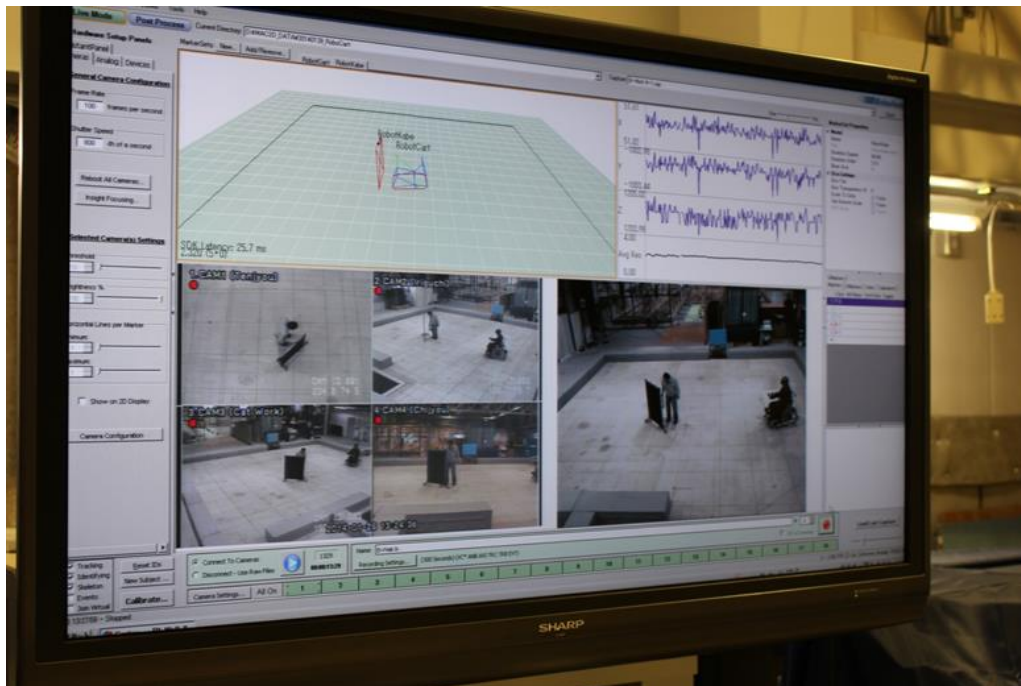


図 4.5.2-11 三次元動作解析装置による移動軌跡の記録の様子

表 4.5.2-3 試験成績書

試験日	2013年01月28日	試験者	加藤・石川	被試験品	ロボティックカート
試験場	検証センター走行エリア				

No	障害物 (ロボットとの位置)	回数	接触/衝突 の有無	障害物までの距離(cm) 減速度(m/s ²)			可否	備考
				警戒領域検知	危険領域検知	停止		
1	障害物③ (円筒黒φ600) 円筒中心とロボット中心 を結んだ線上	1	無し	61.4 (-0.83)	30.3 (-1.16)	25.2	合格	前進/前方障害
		2	無し	60.0 (-0.80)	30.7 (-1.34)	25.1	合格	前進/前方障害
		3	無し	60.3 (-0.73)	32.6 (-1.02)	26.6	合格	前進/前方障害
2	障害物③ (円筒黒φ600) 円筒右とロボット左を結 んだ線上	1	無し	48.3 (-1.18)	---	34.3	合格	前進/側方障害
		2	無し	47.7 (-0.86)	---	33.8	合格	前進/側方障害
		3	無し	49.2 (-0.78)	35.2 (-0.93)	32.4	合格	前進/側方障害
3	障害物③ (円筒黒φ600) 円筒左とロボット右を結 んだ線上	1	無し	47.8 (-1.22)	30.7 (-1.77)	29.1	合格	前進/側方障害
		2	無し	68.6 (-0.35)	31.6 (-1.05)	29.8	合格	前進/側方障害
		3	無し	46.3 (-0.95)	31.3 (-1.10)	28.5	合格	前進/側方障害
4	障害物④ (円筒白φ100) 円筒中心とロボット中心 を結んだ線上	1	無し	60.0 (-0.78)	32.0 (-0.85)	27.3	合格	前進/前方障害
		2	無し	61.0 (-0.81)	31.7 (-1.10)	25.4	合格	前進/前方障害
		3	無し	60.4 (-0.98)	30.3 (-1.04)	24.8	合格	前進/前方障害
5	障害物④ (円筒白φ100) 円筒右とロボット左を結 んだ線上	1	無し	41.6 (-1.41)	---	28.9	合格	前進/側方障害
		2	無し	41.1 (-1.16)	---	29.1	合格	前進/側方障害
		3	無し	47.5 (-0.93)	---	29.1	合格	前進/側方障害
6	障害物④ (円筒白φ100) 円筒左とロボット右を結 んだ線上	1	無し	53.0 (-0.73)	30.2 (-1.04)	26.7	合格	前進/側方障害
		2	無し	48.6 (-0.80)	30.4 (-0.98)	27.9	合格	前進/側方障害
		3	無し	50.6 (-0.83)	30.2 (-0.88)	26.1	合格	前進/側方障害
7	障害物⑤ (壁 青の布) 壁とロボットの角度が 90度	1	無し	63.3 (-0.74)	37.3 (-0.78)	31.0	合格	前進/前方障害
		2	無し	62.4 (-0.54)	36.7 (-1.05)	30.7	合格	前進/前方障害
		3	無し	65.9 (-0.60)	36.5 (-0.80)	30.7	合格	前進/前方障害
8	障害物⑤ (壁 青の布) 壁とロボットの角度が 左45度	1	無し	62.8 (-0.74)	36.5 (-0.91)	30.3	合格	前進/前方障害
		2	無し	64.4 (-0.77)	34.6 (-0.79)	27.9	合格	前進/前方障害
		3	無し	61.1 (-0.75)	35.4 (-0.93)	30.2	合格	前進/前方障害
9	障害物⑤ (壁 青の布) 壁とロボットの角度が 右45度	1	無し	63.3 (-0.65)	33.3 (-0.81)	27.1	合格	前進/前方障害
		2	無し	60.4 (-0.67)	31.5 (-1.16)	27.0	合格	前進/前方障害
		3	無し	60.0 (-0.71)	31.7 (-1.01)	25.9	合格	前進/前方障害
10	障害物⑥ (壁 黒のフェルト) 壁とロボットの角度が 90度	1	無し	71.4 (-0.59)	41.8 (-0.79)	34.4	合格	前進/前方障害
		2	無し	68.2 (-0.75)	39.1 (-0.88)	33.3	合格	前進/前方障害
		3	無し	71.0 (-0.70)	39.6 (-1.03)	33.3	合格	前進/前方障害
11	障害物⑥ (壁 黒のフェルト) 壁とロボットの角度が 左45度	1	無し	65.2 (-0.76)	37.6 (-0.96)	33.0	合格	前進/前方障害
		2	無し	63.1 (-0.79)	39.3 (-0.92)	34.7	合格	前進/前方障害
		3	無し	61.4 (-0.71)	37.6 (-1.07)	33.9	合格	前進/前方障害
12	障害物⑥ (壁 黒のフェルト) 壁とロボットの角度が 右45度	1	無し	65.2 (-0.85)	38.3 (-0.77)	32.8	合格	前進/前方障害
		2	無し	65.0 (-0.62)	38.7 (-0.93)	33.3	合格	前進/前方障害
		3	無し	65.9 (-0.49)	38.3 (-0.88)	32.1	合格	前進/前方障害
13	障害物⑦(壁透明ﾌﾞﾗ) 壁とロボットの角度が 90度	1	無し	62.6 (-0.76)	32.6 (-0.89)	25.5	合格	前進/前方障害
		2	無し	61.3 (-0.60)	30.3 (-1.12)	25.5	合格	前進/前方障害
		3	無し	60.5 (-0.84)	31.4 (-1.00)	25.6	合格	前進/前方障害
14	障害物⑦(壁透明ﾌﾞﾗ)	1	無し	68.9 (-0.60)	36.0 (-1.23)	31.5	合格	前進/前方障害

	壁とロボットの角度が左45度	2	無し	66.9 (-0.84)	37.7 (-1.09)	31.9	合格	前進/前方障害
		3	無し	65.2 (-0.84)	36.6 (-1.17)	31.6	合格	前進/前方障害
15	障害物⑦(壁透明 ^ア テ) 壁とロボットの角度が右45度	1	無し	60.5 (-0.66)	34.5 (-1.17)	30.2	合格	前進/前方障害
		2	無し	64.6 (-0.67)	34.4 (-1.02)	28.9	合格	前進/前方障害
		3	無し	63.2 (-0.77)	35.8 (-0.92)	30.0	合格	前進/前方障害
16	障害物③(円筒黒φ600) 円筒中心とロボット中心を結んだ線上	1	無し	60.0 (-0.72)	30.9 (-1.23)	26.6	合格	後退/後方障害
		2	無し	64.0 (-0.49)	33.9 (-0.85)	28.7	合格	後退/後方障害
		3	無し	60.0 (-0.58)	33.2 (-1.03)	27.3	合格	後退/後方障害
17	障害物④(円筒白φ100) 円筒中心とロボット中心を結んだ線上	1	無し	60.4 (-0.60)	38.2 (-1.03)	23.0	合格	後退/後方障害
		2	無し	60.5 (-0.82)	30.1 (-1.00)	22.8	合格	後退/後方障害
		3	無し	60.2 (-0.69)	30.2 (-0.88)	21.3	合格	後退/後方障害
18	障害物⑤(壁青の布) 壁とロボットの角度が90度	1	無し	87.0 (-0.39)	34.4 (-0.89)	27.6	合格	後退/後方障害
		2	無し	61.1 (-0.83)	33.0 (-1.01)	27.8	合格	後退/後方障害
		3	無し	63.6 (-0.70)	30.4 (-1.13)	25.0	合格	後退/後方障害
19	障害物⑥(壁黒のフェルト) 壁とロボットの角度が90度	1	無し	63.1 (-0.91)	38.4 (-0.85)	32.2	合格	後退/後方障害
		2	無し	68.9 (-0.72)	35.3 (-1.26)	29.9	合格	後退/後方障害
		3	無し	78.6 (-0.53)	36.2 (-0.86)	31.0	合格	後退/後方障害
20	障害物⑦(壁透明 ^ア テ) 壁とロボットの角度が90度	1	無し	60.2 (-0.54)	32.8 (-0.95)	26.9	合格	後退/後方障害
		2	無し	73.5 (-0.48)	30.3 (-0.94)	23.4	合格	後退/後方障害
		3	無し	86.8 (-0.26)	31.3 (-1.08)	25.0	合格	後退/後方障害

(注) 危険領域検知欄が“---”の試験は、警戒領域検知による減速から直接停止に至ったもの。

4.5.3 操作・情報提示機能検証試験 [産総研]

(1) 目的

本試験では、生活支援ロボットの想定使用環境における操作安全性と情報提示機能を検証する。

操作安全性検証としては、HMI（ヒューマンマシンインターフェース）による移動等の制御操作における、試験対象ロボットと操作者および試験対象ロボットと周辺との相対距離、軌跡から、安全距離の維持、姿勢の安定性等の評価を行う。

情報提示機能検証としては、試験対象ロボットが情報提示機能を有している場合に、ロボットの動作と事前の動作提示のタイミングや提示方法が妥当であるかを、試験対象ロボットと周辺との相対距離、軌跡と共に周辺者の視線データ等から評価する。

(2) 研究開発の経緯

参考にした規格は、ISO13482:2014 “Robots and robotic devices – Safety requirements for personal care robots” であり、関連規格は JISD6805, JIVASA05, JISB9707, JISB9708, JISZ9711, JISZ8500, JISC0447 等である。

研究開発の流れとしては、まず、対象となるロボットにおいて、操作時の安全性については、障害物検知対応性能試験と同様に、操作時のロボットの挙動を詳細に計測することで、安全であるかの判断をするものとした。また、ロボットの動作に合わせた動作提示のタイミングや提示方法などを計測記録し、妥当性を判断するものとした。この試験方法に合わせた試験装置としては、挙動やタイミングの計測装置として、障害物検知対応性能試験とほぼ、同様のものを用いることとした。当初、本プロジェクトに参加するロボット開発者からロボットの提供を受けて、模擬試験を行う予定であったが、対象となる機能をもったロボットが無く、実検証までは行わなかった。

(3) 成果

① 試験装置

この試験で使用する装置は、以下の表 4.5.3-1 の通りである。

表 4.5.3-1 使用する試験装置の一覧

試験装置	
走行路	走行路面用のゴムシートおよび各種タイル
障害物接近再現装置	障害物接近再現装置制御用 PC
三次元動作解析用カメラ	三次元動作解析用ビデオカメラ
三次元動作解析用 PC	三次元動作解析用マーカー
自動追尾動作解析用ビデオカメラ	自動追尾動作解析用 PC
搭乗者防具および機械転倒防止用吊具	防護用クッション
各種障害物（壁、円筒、人体ダミー）	ジブクレーン
アイマークカメラ	アイマークカメラ視線記録装置
ロボット走行状態模擬装置	ロボット走行状態模擬装置制御用 PC

② 試験条件

試験対象ロボットの想定される走行条件、環境条件、および情報提示トリガーとなるものを、メーカーとの打合せによって抽出し、試験条件を選定する。試験条件の選定にあたり、主要な試験条件を以下に示す。ただし、試験対象ロボットの開発過程における試験では、メーカーとの協議により変更してもよい。

a. 試験対象ロボットの走行条件

(1) 走行速度

想定される使用条件での、試験対象ロボットの通常使用する速度範囲内で走行させる。

(2) 走行方向

前進、後退、横方向への移動のうち、走行可能な方向を対象とする。

b. 環境条件

(1) 走行路面の種類

フローリング、カーペット、セーフティーウォーク、およびコンクリートの中で、想定される使用環境に最も近い路面を使用する。なお、想定される路面が複数ある場合には、最も制動距離が延びる路面を使用する。

(2) 障害物

壁（木、布、鏡面、透明、柵状）、円筒（金属、樹脂）、人体ダミーの中で、想定される使用環境のもとで試験対象ロボットが遭遇する可能性があるものを障害物とする。

c. 制限事項

- ・試験対象ロボットの大きさは、2mの立方体（縦横高さ）以内であること。
- ・試験対象ロボットの制動距離は、4m以下であること。
- ・相対距離、相対速度、速度軌跡の測定範囲が、試験検証機器の想定範囲内であること。
- ・用意できる走行可能エリアの広さ、形は、使用する路面の種類により異なるため、路面の種類を

選定する際に合わせて検討しておくこと。

- ・走行状態模擬装置を使用する場合は、試験対象ロボットの大きさは2m³の立方体（縦横高さ）以内、重量250kg以下であること。）

③試験方法

a. 試験項目の決定

操作・情報提示機能検証試験は次の2種類に分けられる。

- ・操作機能試験
- ・情報提示機能試験

上記2種類の試験と試験対象ロボットの設計仕様、想定される使用環境等をもとに選定した試験条件から、実施すべき試験項目を決定する。表4.5.3-2、表4.5.3-3に基本的な試験項目を示す。なお、試験対象ロボットの開発過程における試験では、メーカーとの協議により、試験項目等を変更してもよい。

表 4.5.3-2 操作機能検証試験の基本的な試験項目

試験の種類	障害物	制御対象	HMI 操作
操作機能試験	壁面	—	・直進、右左折、後退後の障害物に対して 停止操作を行う。 ・直進、右左折、後退後の障害物に対して 回避操作を行う。
	円筒	—	
	人マネキン	—	
	—	自動充電	・制御対象の動作を行うためのボタン など の操作を行う。
	—	合体・分離(ロボットの一部)	
	—	変形(ロボット自身の形状変化)	

表 4.5.3-3 情報提示機能検証試験の基本的な試験項目

試験の種類	情報提示内容	情報提示方法	情報確認位置
情報提示機能試験	通常走行	音, 音声, 表示灯, 間面等	正面, 真横, 後方
	減速時 (制動灯)		
	停止時 (制動灯)		
	発進時		
	右左折時 (方向指示器)		
	回避時		
	緊急停止 (警告灯など)		
	自動動作 (自動充電, 合体・分離など)		

b. 試験準備

- (1) 試験エリアの清掃
障害物検知対応性能試験と同様. (4.5.2章 参照)
- (2) 計測装置の準備
障害物検知対応性能試験と同様. (4.5.2章 参照)
- (3) 試験対象ロボットの準備
障害物検知対応性能試験と同様. (4.5.2章 参照)
- (4) アイマークカメラの準備
被験者毎にキャリブレーションを行う. 事前にバッテリーを充電しておく.
- (5) ロボット走行状態模擬装置の準備
障害物検知対応性能試験と同様. (4.5.2章 参照)
- (6) 安全の確保
障害物検知対応性能試験と同様. (4.5.2章 参照)

c. 試験の実施

障害物検知対応性能試験と同様. (4.5.2章 参照)
 なお, アイマークカメラは目に赤外線を照射する為に, VDT 作業に準ずる取り扱いが必要である.
 試験担当者は, アイマークカメラ使用時は 30 分毎に休憩時間 (カメラを外す) を設けること.

d. 試験後の作業

障害物検知対応性能試験と同様. (4.5.2章 参照)

e. データ処理

障害物検知対応性能試験と同様. (4.5.2章 参照)

④評価基準

実施した全ての試験項目で, 評価の基準は, 衝突 (接触), 脱輪, 挟み込みなどを生じることなく (これらの発生要因となる死角などが操作者に生じることなく), 移動等の操作を完了できることとする. また, 試験対象ロボットと操作者および試験対象ロボットと周辺との相対距離, 軌跡などが, メーカーの設計仕様を外れていないこととする.

情報提示機能の評価基準は, 試験対象ロボットの動作と情報提示のタイミング, 位置, 内容が, メーカーの設計仕様を外れていないこととする. また, 周辺者から判断しやすく, 認識後に, 次の動作に円滑に移行できるための余裕時間があることとする.

4.5.4 EMC 試験（電磁妨害に対する生活支援ロボットの安全の確保） [安衛研]

4.5.4.1 目的

活支援ロボットは、使用される環境で想定される電磁妨害（静電気，無線電磁波，等）が印加された場合でも安全が確保される必要がある。この電磁妨害印加時においても，安全が確保されているかどうかの検証方法を明確化し，検証を行うための設備・環境の構築を行う。

特に，安全を確保するために生活支援ロボットに防護方策として使用される，障害物検知による停止，等の機能安全の機能（以下安全機能）に対する試験方法は明確化されておらず，この試験方法の構築が必要とされている。

さらに，ロボットに無線通信が組み込まれ動作する機能に対しても，安全性の確保が必要となる。この場合の安全性の検証方法の明確化と検証のための設備・環境構築を行う。

4.5.4.2 研究開発の経緯

現行の EMC 規格に対応する，電磁界印加設備，電磁界放射測定設備を生活支援ロボット検証センター内に構築した。さらに，プロジェクトの各ロボットに対応した治具・設備を整えることで，ロボットの電磁妨害印加の評価を可能とした。

安全を確保している安全機能の電磁妨害耐性の試験内容を明確化した。この試験内容を放射 RF 電磁界印加に対して適用し実施することは，従来の設備のままでは難しい。このため，この試験を行うための，治具・装置を導入し，生活支援ロボットの安全性の，電磁妨害に対する耐性の実用的な試験を可能とした。

無線通信を利用した機能の安全性検証の試験内容を明確化し，検証を可能な環境を構築した。

将来的に問題となると考えられる，ロボット自身の発生する雑音が，搭載された無線通信機能を劣化させる問題に対して，妨害を引き起こす雑音源を特定する方法を開発した。

4.5.4.3 成果

(1) 現行 EMC 規格対応の設備構築

現行の EMC 規格（IEC 61000 シリーズ），機械類の安全性規格－安全関連の電気・電子・プログラマブル電子制御システムの機能安全（IEC 62061），個別規格（車いす：ISO 7176-21，等）に対する測定が可能な 10 m 法電波暗室（TDK-EPC 社製）と測定機等の設備の導入を行った。

これらの設備・機器により上記規格の電磁妨害のロボットへの印加が可能となった。また，ロボットの放射する電磁雑音の評価も可能となった。

特徴としては，車いすの規格（ISO 7176-21）に対応した 26MHz~80MHz の周波数の放射 RF 電磁界印加が可能（IEC61000 シリーズでは，80MHz~）な設備となっている。また，電源周波数磁界印加試験のループの形状も 3×3 m の大型のものを導入し，ロボット全体への印加を可能としている。

車いすの規格（ISO 7176-21）で要求されている静電気試験である，帯電フレーム試験をロボットに対して適用するための，ロボット支持台，等の試験条件に付いても検討し，学会報告を行った。[1]

表 4.5.4-1 導入設備リスト

試験器名	対応規格	機種	仕様
静電気試験器	IEC61000-4-2	(メーカー名:ノイズ研, 型名:ESS-2000AX)	30 kV
放射免疫ノイズ試験器	IEC61000-4-3	信号発生器 (メーカー名:Agilent, 型名: N5181A) アンプ (メーカー名: BONNE Elektronik, 型名: BLWA0210-1800) アンプ (メーカー名: TESEQ, 型名: CBA1G-1000) アンプ (メーカー名: MILMEGA, 型名: AS0102-100, AS1860-100) バイコニカルアンテナ (メーカー名: Schwarzbeck, 型名: BBA9106) ログペリアンテナ (メーカー名: Schwarzbeck, 型名: UHALP9108A) ホーンアンテナ (メーカー名: Schwarzbeck, 型名: BBHA9120B)	26~100MHz, 1800W (20 V/m) 80~1000MHz, 1000W (30 V/m) 1~2GHz, 100W (30 V/m) 2~5GHz, 100W (30 V/m) ※1GHz超は独立ウィンドウ法で実施
バースト試験器	IEC61000-4-4	メーカー名:ノイズ研, 型名:FNS-AX3	4800V
雷サージ試験器	IEC61000-4-5	メーカー名:ノイズ研, 型名:LSS-F02	15kV, 7500A
伝導免疫ノイズ試験器	IEC61000-4-6	メーカー名:TESEQ, 型名:CBA230M-080	0.15~230MHz: 20V
電源周波数磁界試験器	IEC61000-4-8	協立電子工業特注品	100A/m, コイル寸法: 3×3m
電源電圧変動試験器	IEC61000-4-11	電源 (メーカー名: 菊水電子工業, 型名: PCR4000LA) ソフトウェア (メーカー名: 菊水電子工業, 型名: SD003-PCR-LA)	
放射エミッション試験器	CISPR 16-2-1	レシーバ (メーカー名: ROHDE&SCHWARZ, 型名: ESU8) バイコニカルアンテナ (メーカー名: Schwarzbeck, 型名: BBA9106) ログペリアンテナ (メーカー名: Schwarzbeck, 型名: UHALP9108A) ホーンアンテナ (メーカー名: Schwarzbeck, 型名: BBHA9120B)	20Hz~8GHz 30~300MHz 300MHz~1GHz 1~5GHz
伝導エミッション試験器	CISPR 16-2-1	LISN (メーカー名: METZNACHBILDUNG, 型名: ESH2-Z2) レシーバ (メーカー名: ROHDE&SCHWARZ, 型名: ESU8)	20Hz~8GHz

(2) ロボット測定のための治具・設備の構築

生活支援ロボットの EMC 評価のために必要な治具や専用設備を新たに作製・導入することで、これらの評価を行えるようにした。これらを使用して安全機能の検証手法の検討を行った。それらの治具の事例を以下に示す。

・樹脂製測定テーブル (ロボット用高耐荷重)

高さ 70 cm, 耐荷重 100 kg の, 樹脂製測定テーブル

・木製・樹脂製, 装着用ロボット動作治具

人体装着型ロボットを試験するための, 人体下半身を模し関節部が可動する樹脂製の治具。この治具にロボットを装着し, 動作させた状態で EMC 試験を行うことが可能となる。

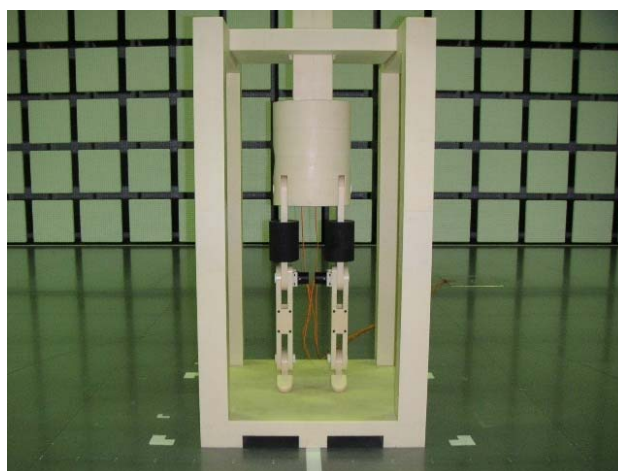


図 4.5.4-1 樹脂製ロボット装着治具

- ・人体ファントム（全体，胸部）

人体の誘電率に近い値を持つゴムを用いた人型のファントム。これを用いることで，人と共存する介護支援ロボットの EMC 試験における，人体の影響についての検討を行った。



図 4.5.4-2 人体ファントム

- ・カート型ロボット支持台

車輪で動作するカートを持ち上げ，車輪を空転させた状態で動作させる樹脂製の治具



図 4.5.4-3 ロボット支持台

(3) 電磁妨害に対する安全機能の検証手法

従来の EMC のイミュニティ試験は，定常状態で動作している機器に電磁妨害を加えて，その定常状態を保持するかどうかを確認する方法が行われている。しかしながら，この試験では安全機能の動作を妨害印加時に行っていないため，電磁妨害印加において安全機能が維持されているかどうかの確認とはなっていない。このため，電磁妨害印加時に安全機能を動作させ，その機能が維持されていることを確認する試験が必要となる。

- ・検証装置

(1) で述べた電磁妨害印加装置と環境を用い電磁妨害を印加する。

検証に使用する，ロボットの支持治具，安全性機能を動作させる治具，安全性機能が働いたかの動作監視装置は，電磁界への影響を与えない様に，なるべく金属および導電体を使用しない構成とする．さらに，なるべくロボットに接触させないことが望ましい．必要であれば，安全機能動作，動作監視，電磁妨害印加，を制御し，自動測定を行うソフトウェアを使用する．特に，放射 RF 電磁界印加試験は，印加する妨害の数が非常に多いため，実用的な試験とするためには，自動化は必須となる．

・検証方法

印加する電磁妨害毎に，以下の手順で安全機能の動作を確認する．「」内に，障害物センサによる停止という安全機能を持つロボティクチェアの場合の具体例を示す．これにより，電磁妨害印加時においても，安全機能が正常に動作する．正常に動作しない場合でも，安全方向への誤動作であることを検証する．

- 1) ロボットを定常状態とする．「走行状態にする」
- 2) ロボットに電磁妨害を印加する．「放射 RF 電磁界，電源周波数磁界の場合は，3) ～ 7) の間，継続して印加する．」
- 3) ロボットの安全性機能を動作させる．「例えば，障害物センサに障害物を感知させる．」
- 4) 安全機能が正常に動作したかを確認する．「走行状態から停止状態になることを確認する．」
- 5) 電磁妨害印加を停止する．「障害物を，センサ感知域から取り除く．」
- 6) 定常状態に戻す．「例えば，安全確認ボタンを押す」
- 7) ロボットの定常状態を確認する．「停止状態から走行状態になることを確認する．」

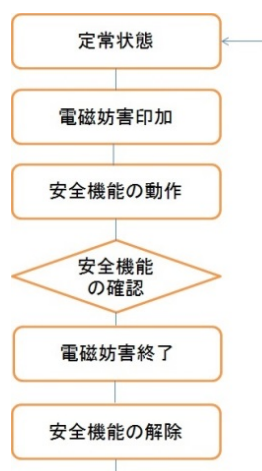


図 4.5.4-4 安全機能の検証フロー

・安全機能動作・ロボット操作を行う治具

電波暗室内で試験を行う場合，暗室の外からロボットの操作を行うことで，測定・評価の効率が向上する．また，測定の自動化を行うためには，このような治具が必須となる．具体的には，暗室内に引かれた圧縮空気を電磁弁で切り替えて，ピストンを動かすことで，操作ボタン・レバーを操作したり，障害物を動作させたりする．電磁弁は，PC 等からの命令の電気信号で動作する．圧縮空気のホースやピストンは，すべて樹脂製となっており，印加電磁界への影響をなるべく小さくしている．

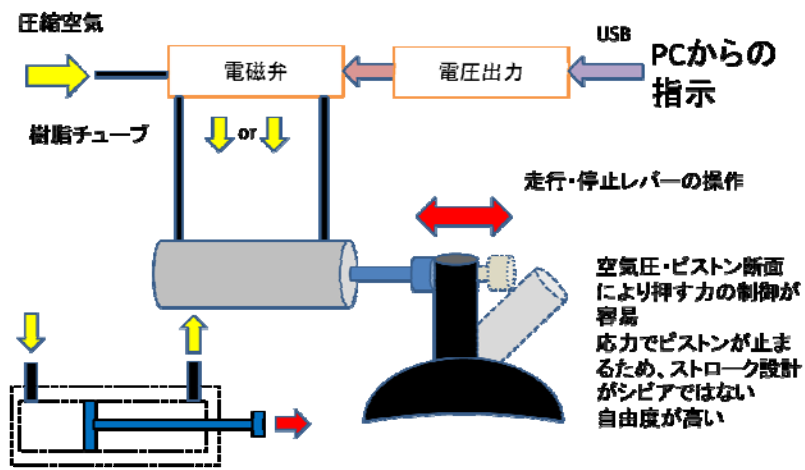


図 4.5.4-5 ロボット操作を行う治具（レバー操作）

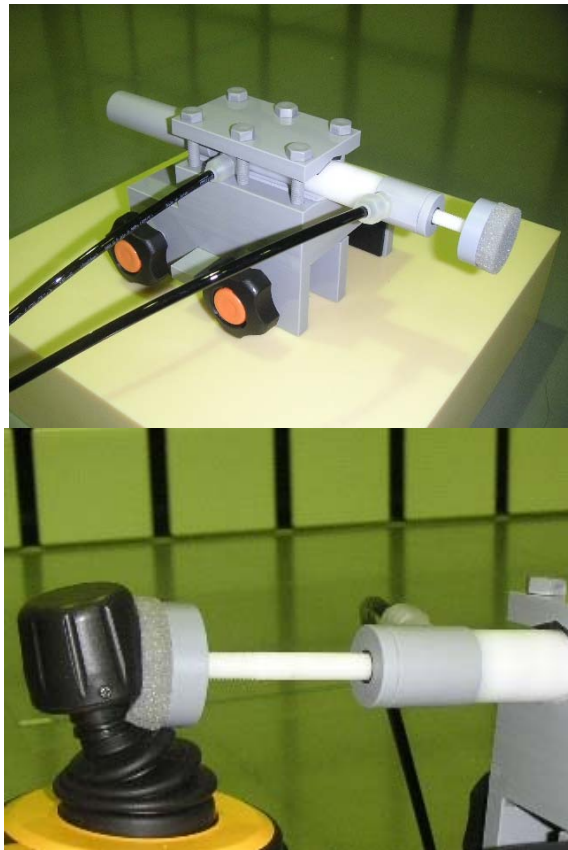


図 4.5.4-6 レバー操作の治具例

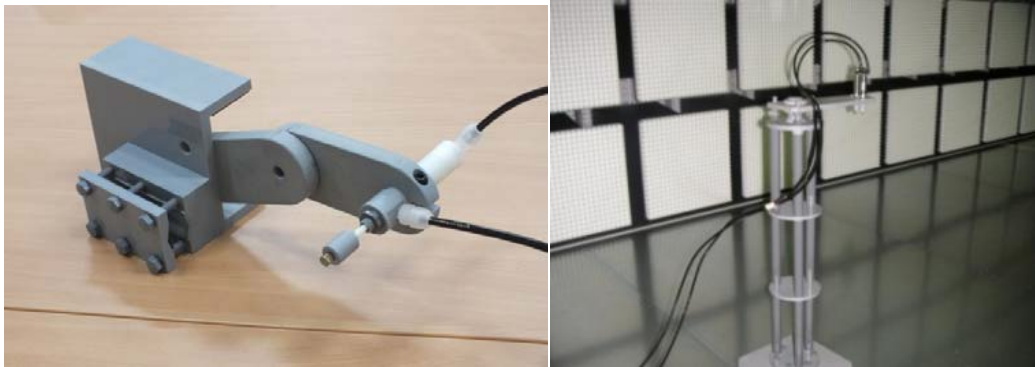


図 4.5.4-7 ボタン操作治具例

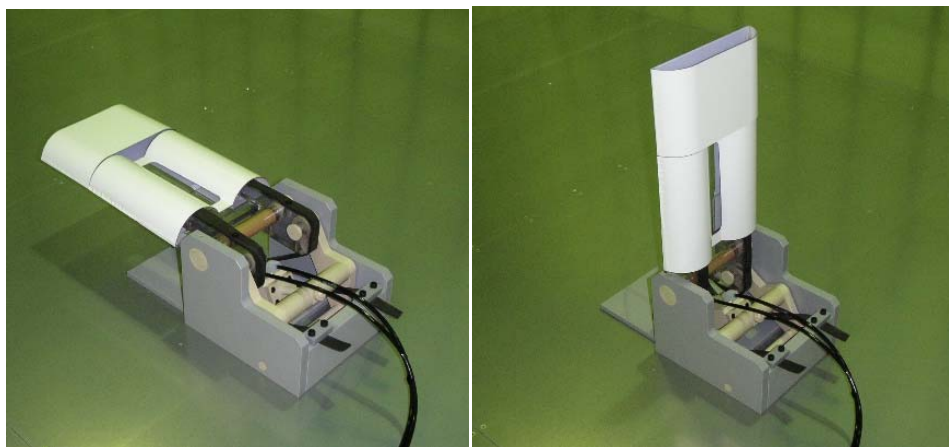


図 4.5.4-8 障害物センサ動作用障害物（左：感知域外位置，右：感知域位置）

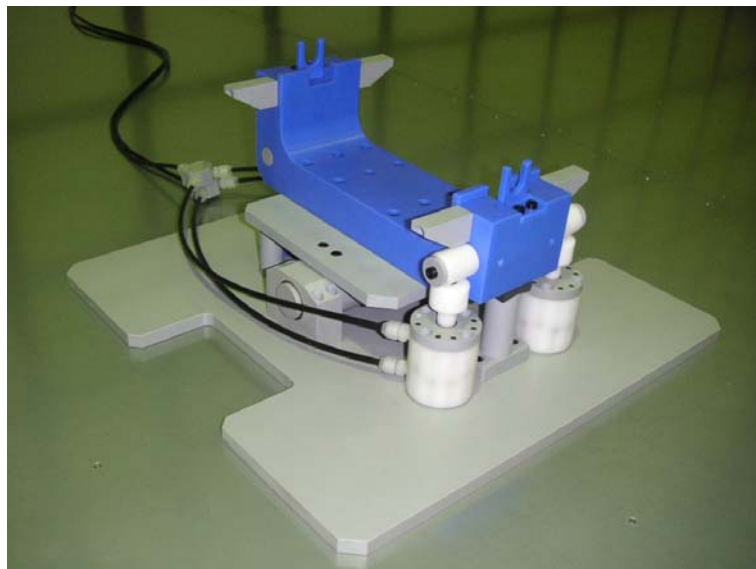


図 4.5.4-9 倒立振り子型ロボット動作治具（上に乗せたロボットを前後に傾けることで、走行・停止を行う）

・安全機能の動作を確認する装置

安全機能が正しく動作したかどうかを自動判定する装置は、目視による判定と比較すると、正確性も効率も格段に向上する。また、測定の自動化の官邸からも必要な装置である。

この自動判定には、画像認識を用いた動作検出機能を使用した。この機能は、ロボットの車輪等の動作箇所にマーカーを付け、そのマーカーを含む範囲をカメラで撮影し、マーカーの速度を画像認識により求めるものである。このマーカー速度が、動作時や停止時に定められた範囲に入っているかどうかで、安全機能が動作したかどうかを判定する。カメラは、被測定物と離れた場所に設置されるため、妨害として印加される電磁界への影響は少ない。また、妨害として印加される電磁界によるカメラ等の誤動作が無いことは事前に確認している。この、画像認識機能、動作判定機能はPC上のソフトウェアとして動作している。

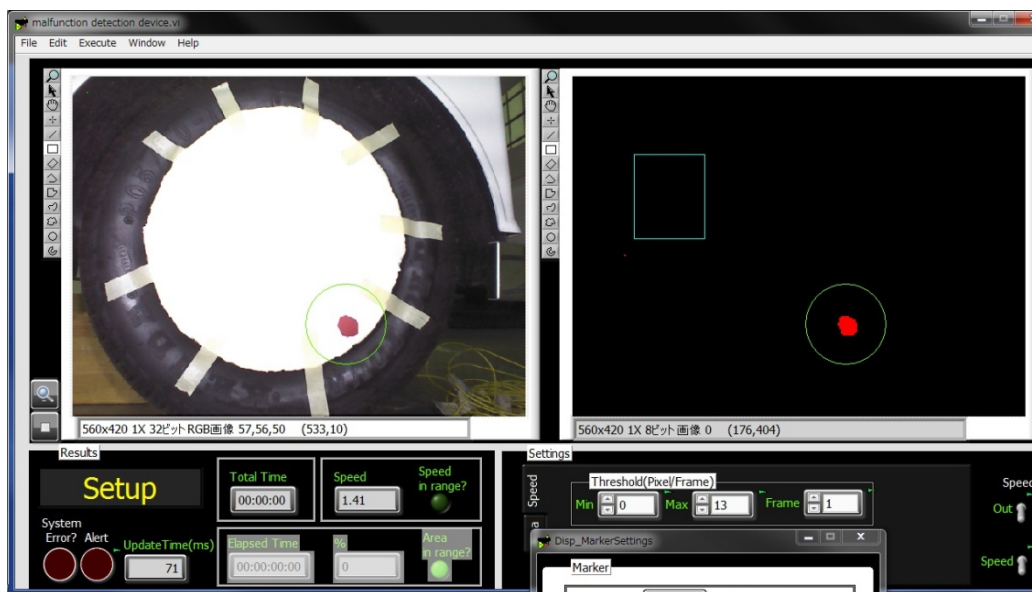


図 4.5.4-10 動作判定ソフトウェア

これらの動作検出は、測定されるロボットに応じて、最適なものを使用する。例えば、車輪がカバーされており画像検出による動作確認が難しいロボットの場合には、金属を用いない光ロータリーエンコーダーとローラーを用い作成された車輪速度センサを用いて測定された、速度情報を使用して動作判定を行う。

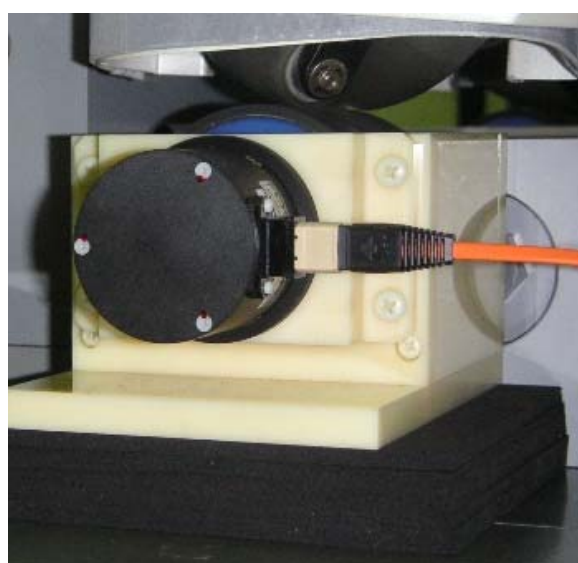


図 4.5.4-11 光ロータリーエンコーダーによる、車輪速度検出

・放射 RF 電磁界印加の試験の自動化

放射 RF 電磁界印加試験以外においては、印加する電磁妨害の数が多くないため、安全機能の動作・確認は、測定者により、その都度行っても、実用的には大きな問題は無い。しかしながら、放射 RF 電磁界印加試験は、印加する電磁妨害の数が非常に多いため、自動化を行わない場合、測定時間・測定者の関与が膨大となるため、実用的な評価ではない。このため、この評価の自動化を行った。

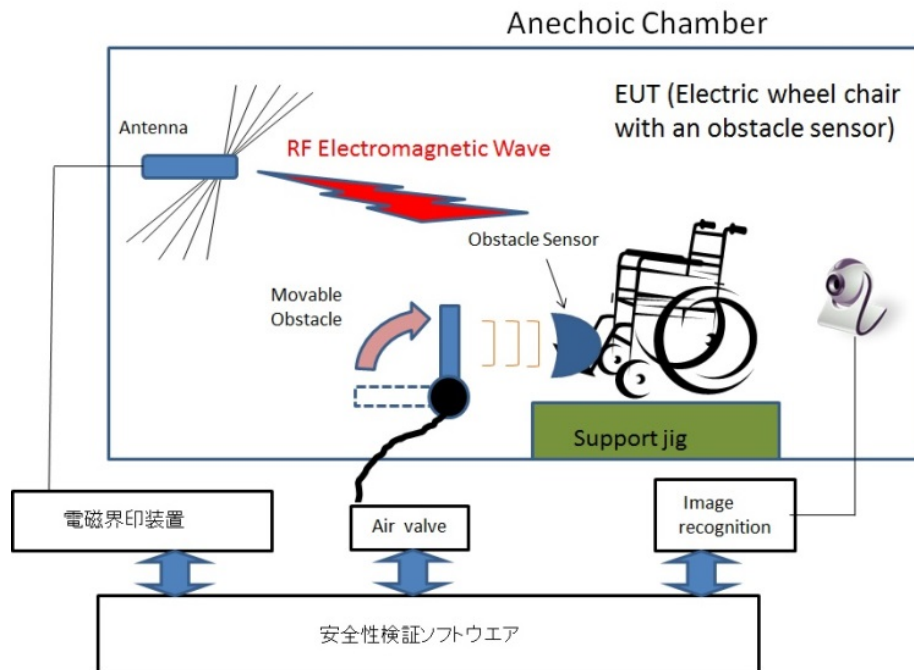


図 4.5.4-12 放射 RF 電磁界印加時の安全機能の検証測定の自動化

従来の放射 RF 電磁界印加試験は、PC ソフトウェア（東陽テクニカ製）を用いて、自動的に周波数を変え電磁妨害を印加するものが使用されている。このソフトウェアを、ロボット操作・安全機能動作確認と組み合わせて、自動化装置を構成する。

放射 RF 電磁界印加試験 PC ソフトウェアを、外部 PC からの制御を受け連動する機能を追加する改造を行った。これは、RS-232C により、放射 RF 電磁界の印加するタイミング・次の周波数の印加に進むタイミングを、外部 PC と共有・使用するものである。

この追加された機能を用い、放射 RF 電磁界印加試験装置、障害物センサを作動させるための可動障害物、ロボットの動作検出機能を、新たに作成した安全機能検証ソフトウェアで制御することで、放射 RF 電磁界印加試験において安全機能の検証フローを実現した。安全性機能の動作に問題が無ければ、印加する放射 RF 電磁界の周波数を次々に変化させ、安全機能の動作を確認する。もし、安全機能の動作に異常があった場合は、発生した周波数で測定を中断する。その時点で、異常の状況、発生周波数、等を確認・記録できる。その後、確認の継続または終了を行うことができる。

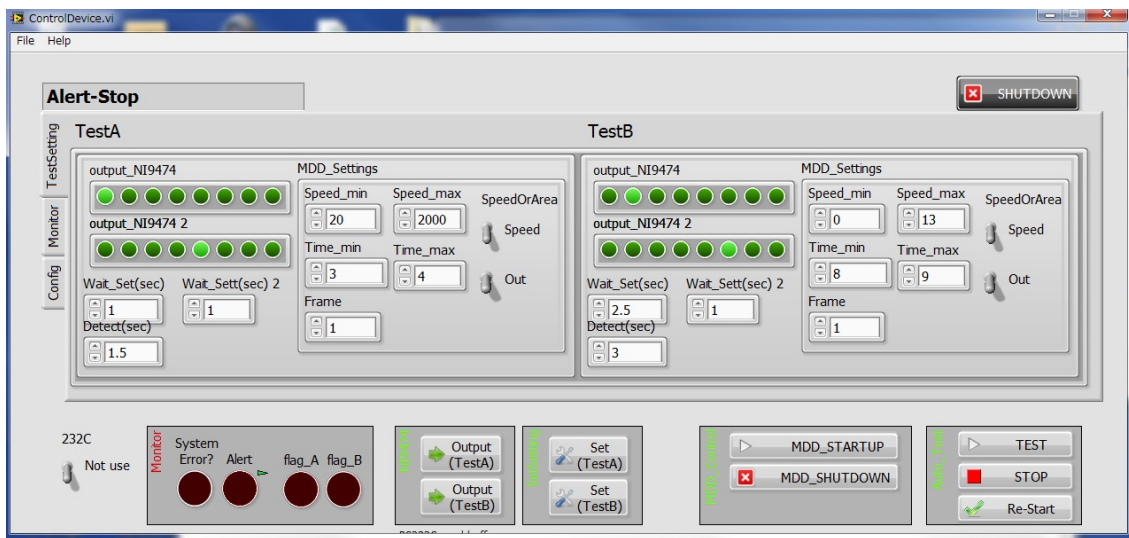


図 4.5.4-13 安全機能検証ソフトウェア

この自動化設備の構築により，放射 RF 電磁界印加の安全機能の検証が，実用的なものとして行う事が可能となった。

これらの安全機能の検証方法については，国内学会研究報告 3 件[2]-[4]，雑誌投稿 1 件[5]を行っている。

上述の様に構築した，測定手法・環境を用い，プロジェクトで開発したロボッテックチェアを用いた，安全機能の対電磁妨害耐性の検証事例を下記に示す。検証事例は，検証試験計画，検証試験結果の校正としてとしてまとめた。

4.5.4.4 無線通信を利用した機能の安全性検証

無線通信を利用した機能の安全性検証に関して、電磁妨害を主とするハザードに対する機能安全を評価する方法の検討を行った。基本的には、4.5.4.3 (2)で述べた方法を用い、安全機能の確認を行う。しかしながら無線通信を利用した場合、無線通信の機能停止・低下を新たなリスクとして考慮する必要がある。その原因として、無線通信に使用している周波数帯域の雑音による妨害、無線通信に使用している電波が距離や障害物により弱くなることによる通信停止、電池等の電圧低下による無線通信の機能停止がある。これらによって、無線通信の機能停止・低下の現象が起きた場合においても、安全性が保たれていることを検証する方法の検討と構築をおこなった。

・無線通信を用いた安全機能の検証方法

無線通信を用いた機器においては、無線通信に特有なリスク要因が存在する。それは、

1. 親機と子機の移動による相互の通信環境の変化
2. 周辺の機器から発生する電磁雑音等の通信妨害源の存在
3. 電源の電圧低下の影響

である。これらのリスク要因に対して、この装置の警報機能が維持されることを確認する。

(1) 親機と子機の移動による通信感度の変化

親機・子機の位置関係等により通信感度が変化して、通信できなくなり警報が動作しないリスクが想定される。

このため、

- ・既定の使用条件内では必ず通信が可能である
- ・あるいは通信できなくなった場合でも危険な状態にならない

ことの確認が必要である。

近接警報装置の親機から子機への30kHz帯の通信は、警報装置が使用される距離の範囲において、安定して機能することを電波暗室における30kHz帯の磁界強度の測定により検証できた。しかし、子機から親機への300MHz帯の通信では、壁や地面の反射波による干渉（フェージング）が存在し、警報の範囲（距離5m）においても、親機に近接感知の信号が通信できず距離が5m以下に近づき子機において近接警報が動作している場合においても、親機においては近接警報が動作しない場合がきわめて稀ではあるが存在した。

(2) 電磁雑音による通信妨害

無線通信を用いた機器では外来の電磁波による妨害によって、通信感度が低下して通信できなくなり、警報が動作しない危険性が想定される。このため、機器が使用される環境に存在する可能性のある電磁波に対して、近接警報装置の機能の喪失が無いことの確認が必要である。

この近接警報装置を使用が想定される環境で動作させたところ、子機が電力線やスイッチング電源の極めて近くにある場合では近接警報の範囲（5m）内でも近接警報が動作しない場合があった。これらの電力線やスイッチング電源の近くにおいては、親機から子機の通信に使用している30kHz帯の近傍の周波数の磁界が測定される。つまり、電力線やスイッチング電源からの電磁波が雑音となり、子機の受信感度が劣化し親機からの信号を受信できなくなるためである。雑音の無い電波暗室においてこの近接警報装置を動作させ、30kHz帯の電磁波を加えることによっても、警報が動作しない現象が起こることが実験で確認されている。（図4.5.4-2）

このように、実際の使用環境で存在する雑音により、近接警報が動作しない場合が存在する。

(3) 電源電圧低下による影響

電池で動作する無線通信を用いた機器では、使用により電池の残量が少なくなると電池の電圧低下によって通信機能が停止して、警報が動作しないリスクが想定される。

近接警報装置においては、動作をモニターするLEDが設けられており、電圧低下による機能停止の場合はそのLEDが消えるだけとなっている。このためこの近接警報機能の停止に気付かずにいる状態のまま使用して、近接時に警報が動作しない可能性がある。

以上の3種のリスク要因に対する検証の結果、実際に使用される環境においては、警報機能が損なわれる状況は稀であるにしても存在し、機能維持性能は十分ではないことが判明した。このため、これらの無線通信に特有なリスク要因に対しての機能維持能力を装置に組み込むことで、安全支援機能を向上させる必要がある。

(4) 安全支援機能の向上

一般に安全機能の維持のため、機能の正常性の確認が求められる。同様な考えで、以下のような機能を近接警報装置に組み込むことで、ロボット等の近接を確実に検出・通報し、安全支援機能を確保することが可能となる。

a) リスク要因の存在、あるいはリスク要因による無線通信の影響の状況を常時モニタリングする。

b) もし影響を受けていることを感知した場合“現在は警報が適切に動作しない状況である”ことを装置が警告する。

この近接警報装置において、具体的に考えられる安全支援機能の向上の案としては以下のものがある。

- ・近接警報装置が持っている300MHz帯の通信機能を用いて、親機と子機の間で相互に定期的な通信を、通信機能の維持の確認のために行う。この定期的な通信が確認できなくなった場合、警報が動作しない状況であることの警告を行う。

- ・子機が受信する30KHz帯の信号が、親機から送られてくるものと同じ特徴かどうかをモニタリングする。異なる特徴の信号であった場合それは雑音と考えられ、雑音が存在し警報が動作しない可能性があることの警告を行う。

- ・電池の電圧のモニタリングを行い、ある電圧以下になった場合に、電圧低下のため機能停止するとの警告を行う。

(5) 無線通信に関する安全性・信頼性試験方法の開発

将来的に無線通信が安全機能に使用されることを想定して、電磁妨害と無線通信感度の検討を行った。これにより、無線通信の感度に関わる測定装置の開発を行い、ロボット内の電磁雑音のなかで、無線通信に影響を及ぼす雑音の特定手法を構築した。

・無線通信の感度に関わる測定装置の開発と雑音源の特定方法

近年、無線通信を利用した制御機能が、生活支援ロボット等に組み込まれ実現されようとしている。このような機能は、組み込まれるロボット自身からの雑音の妨害を受け、制御機能の劣化やロボットの暴走等の問題を引き起こす恐れがある。これらの問題の対策を講じるためには、まず無線通信の妨害を引き起こす雑音源を特定する必要がある。

ロボット内に存在する雑音は、モーター等の大きな時間変動を伴う雑音源が存在し、無線で使用される周波数帯域には、複数の妨害源がある。この特定のため、無線通信に影響を与えている雑音信号と妨害源の信号を比較する方法を提案する。この比較のために雑音の大きさ・位相の時間変動を評価可能な2入力の測定装置を使用する。

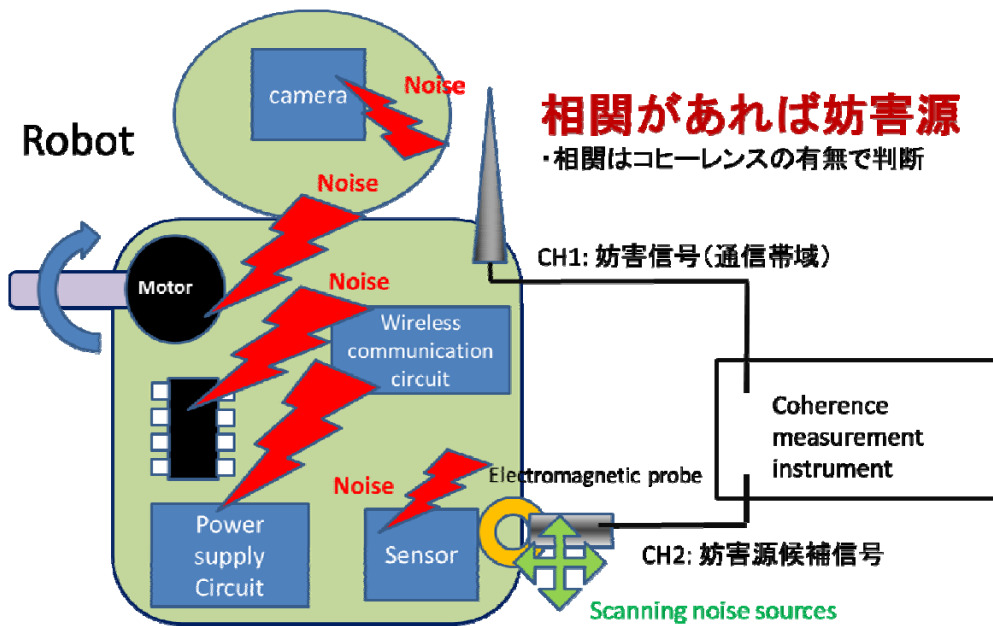


図 4.5.4-14 ロボットに組み込まれた無線通信機器が受ける妨害推定方法の概念図

具体的には、ロボットに搭載された無線通信機のアンテナに回り込んだ妨害信号と妨害源候補からの直接の信号を比較する。コヒーレンスを示せば、妨害源であることがわかる。コヒーレンスを示さなければ、妨害源候補のレベルが大きくても妨害源ではない。

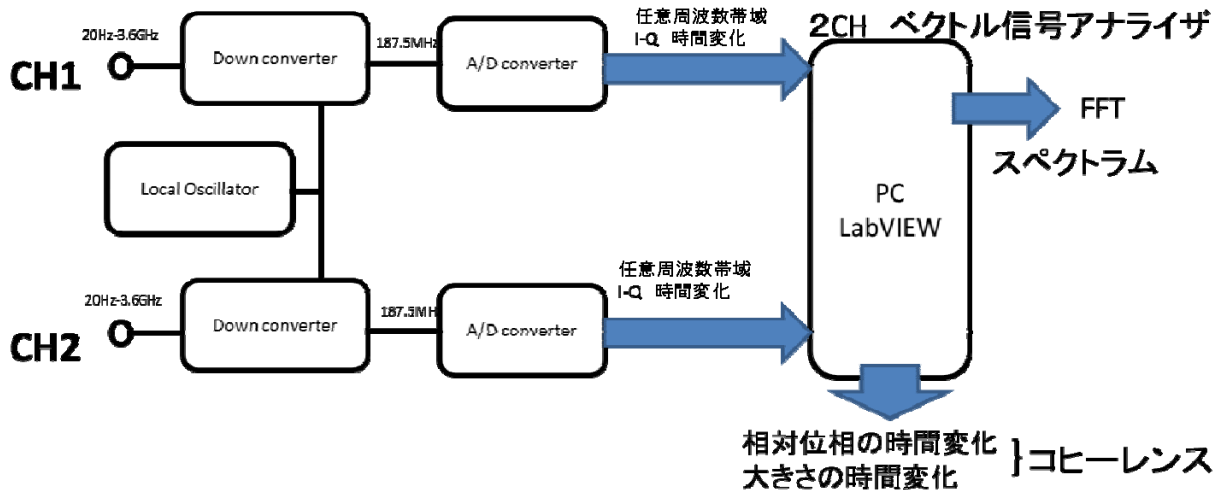


図 4.5.4-15 コヒーレンスを測定する装置の構成

コヒーレンスを測定する装置の構成は、2チャンネルのRF信号入力を、共通のローカル信号でダウンコンバートした後A/Dコンバータでデジタル化し、デジタル化されたデータを演算して、入力された信号の、大きさとその時間変化、位相とその時間変化、スペクトラム、等の信号の解析を行うものである。本研究のために開発した装置は、3.6GHzまでの周波数において、任意の最大25MHzの帯域幅の信号解析が可能である。ローカル発信器を共通とし、A/Dコンバータを並列に動作させることで、2チャンネルの入力(CH1.CH2)信号の位相差の測定と、大きさの時間変動比較が可能な測定装置となっている。

コヒーレンスの有無を確認する方法として、ある任意期間のサンプリング期間における、CH1 と CH2 の位相差のヒストグラムを用いる方法がある。コヒーレンスが無い場合、位相の相関が無い場合ヒストグラムは、 -180° ～ $+180^{\circ}$ の間で一様な分布となる。コヒーレンスが有る場合、位相相関があるため、位相差のヒストグラムはある値を中心とした最大値を持ち、すそ野が広がる分布を示す。(ある一定の値のみの分布にならないのは、熱雑音等の影響があるためである。) このヒストグラムの形状で、信号相関の大きさを定義することができる。たとえば、ヒストグラムの平均値と最大の比を相関係数として用いれば、この値が大きければ相関が高いと言える。

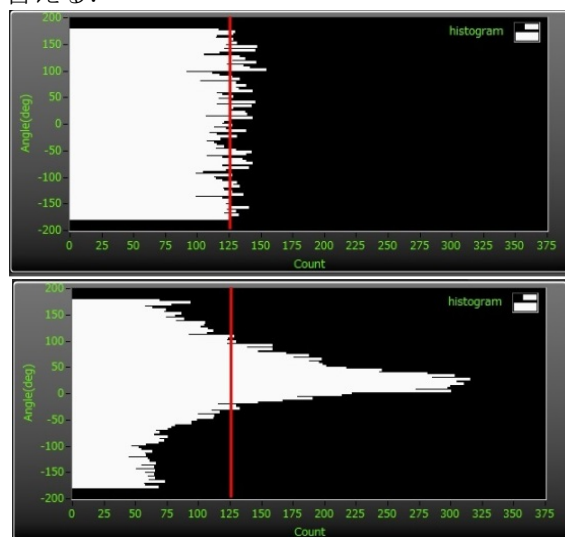


図 4.5.4-16 信号相関がない場合の位相差ヒストグラム 信号相関がある場合の位相差ヒストグラム

また、信号の大きさに時間変動がある場合、この時間変動の比較によっても信号相関の有無の推定が可能である。具体的には、CH1 と CH2 の大きさの時間変化を統計的にしらべて、変化の方向がランダムではない場合、コヒーレンスがあると推定できる。

この様にして、妨害源を推定することで、無線通信の通信感度劣化の問題対策を効果的に行う事が可能になる。

この件については、国際学会 1 件[6]、国内学会研究報告 1 件[7]、の報告を行っている。

参考文献

- [1] 村上 真之, 池田 博康, “生活支援ロボットにおける帯電フレームモデルの ESD イミュニティ試験法の検討 ～ロボット支持台の関する要件～”, 信学技報 vol. 112, no. 372, pp. 105-110, (EMCJ2012-120), 2013 年 1 月
- [2] 村上 真之, 池田 博康, “移動ロボットのイミュニティ評価用試験治具の作製”, 信学技報 vol. 111, no. 205, pp. 43-48, (EMCJ2011-79), 2012 年 9 月
- [3] 村上 真之, 池田 博康, “機能安全を導入した生活支援ロボットのための放射 RF 電磁界イミュニティ試験システムの開発”, 信学技報 vol. 112, no. 372, pp. 111-116, (EMCJ2012-121), 2013 年 1 月
- [4] 風間 智, 池田 博康, 村上 真之, “放射 RF 電磁界印加時のロボットの安全機能の検証”, 信学技報 vol. 113, no. 368, pp. 27-30, (EMCJ2013-105), 2013 年 12 月
- [5] 村上 真之, 池田 博康, “生活支援ロボットの安全とイミュニティ評価”, 月刊 EMC 第 26 巻 第 5 号, pp. 89-106, 2013 年 9 月
- [6] 風間 智, 池田 博康, “コヒーレンスを用いた無線通信に影響を与える雑音源の特定”, 信学技報 vol. 113, no. 218, pp. 31-34, (EMCJ2013-54), 2013 年 9 月

[7] Satoshi KAZAMA, Hiroyasu IKEDA, “Determination of Noise Sources Affecting Wireless Communications” , The IEEE Electrical Design of Advanced Packaging & Systems symposium (EDAPS) , IEEE Part Number: CFP13EDP-USB, ISBN: 978-1-4799-2312-0, pp. 209 - 212., 2013-12

4.5.5 機能安全文書テンプレート [産総研]

4.5.5.1 背景

生活支援ロボットの制御系に対してリスク低減のために機能安全への対応が求められる場合がある。制御系の誤作動が利用者および周囲にとってハザードとなる場合であり、制御系が生活支援ロボットの本来機能の一部を構成している場合、または、生活支援ロボットの安全状態の維持および達成のために設けられた機能である場合がある。

機能安全への対応には、国際規格として制定されている IEC 61508 等の機能安全規格に準拠した開発を行う必要となる。機能安全規格は、安全に配慮した開発プロセスを予め計画した上で、計画に則って設計および検証を行い、開発文書を作成していくことを求めている。しかしながら、規格の要求事項は膨大であったり、作成すべき文書が大量であったりして、機能安全規格への準拠は必ずしも容易ではない。

4.5.5.2 目的

機能安全文書テンプレートは、機能安全開発において必要となる主な 3 つの文書について、記述すべき内容を示すことで、作業の効率化を図るものである。

機能安全規格では通常的设计・開発に加えて特に、以下の作業を要求している：

- a) 安全ライフサイクルに従った計画的かつ段階的作業、
- b) 各ライフサイクルフェーズに対する検証および最終的な安全妥当性確認、
- c) 必要な安全要求および安全機構の設計における実装。

開発者はこれらのエビデンスとして、以下の文書を整備する必要がある：

- a) 機能安全管理計画
- b) システム検証および安全妥当性確認計画
- c) 機能安全コンセプト

機能安全テンプレートの目的は、

- a) これらの 3 つの文書において記載を検討すべき項目を示す。
- b) 記載例を示す。
- c) 個々のプロジェクトにおける開発文書のベースを与える。

なお、開発および規格準拠のために必要な記載項目は、開発プロジェクトの範囲によって異なるため、プロジェクトに合わせて見直す必要があることに留意されたい。

4.5.5.3 成果

上記に沿った機能安全文書テンプレートを作成した（付属書 D 参照）

4.5.6 故障注入による機能安全の確認試験実施例 [JARI]

4.5.6.1 目的

ロボットを構成するハードウェア及びソフトウェアを含む全ての要素が統合された状態において、妥当性確認計画に沿った機能安全の妥当性をハードウェアへの故障注入によって確認する。すなわち、部品の故障が発生した場合であっても、設計者が意図した動作を行うことを確認するものである。

4.5.6.2 研究開発の経緯

ソフトウェアまたはコンポーネント単体における故障注試験に加えて、両者を統合した状態での試験が必要となる。実際の生活支援ロボットの安全機能は多様であるために、試験の詳細な内容は製品ごとに異なるが、共通な手順は開発しておく必要がある。そこで、模擬ロボットを例にとり、統合状態での故障注入試験を試行して、その手順を整理した。

4.5.6.3 試験装置

図 4.5.5-1 に試験装置を示す。電圧/電流発生器は、ロボットへの電源や、回路や配線への電圧または電流の故障注入に用いる。また、多チャンネル DMM は、回路や配線のショート/オープンを行う。これらの装置を作動させるタイミングを制御する装置として制御 PC を備える。

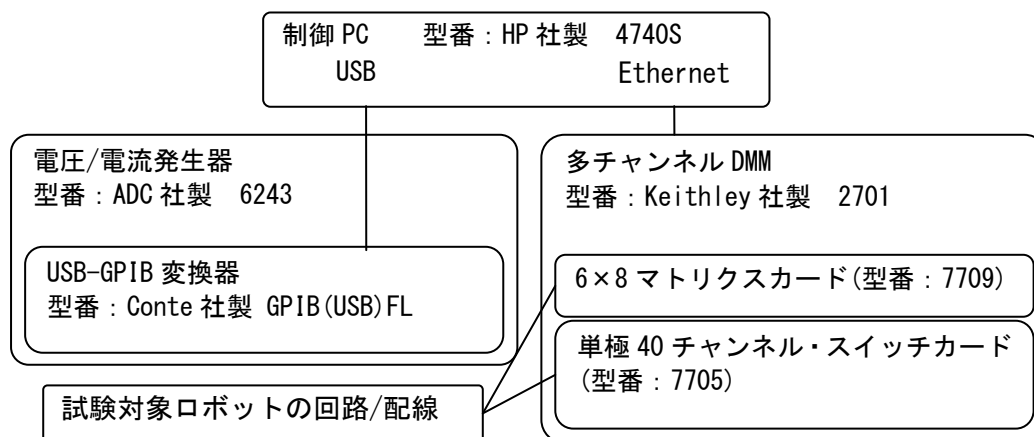


図 4.5.6-1 試験装置

4.5.6.3 試験方法

模擬ロボットを用いた試験の例示を交え、試験方法を説明する。なお、模擬ロボットの基本動作および回路は図 4.5.5-2 に示すとおりである。

ラインコース上を走るライトレースを行う際、
ロボットには4つの状況があります。

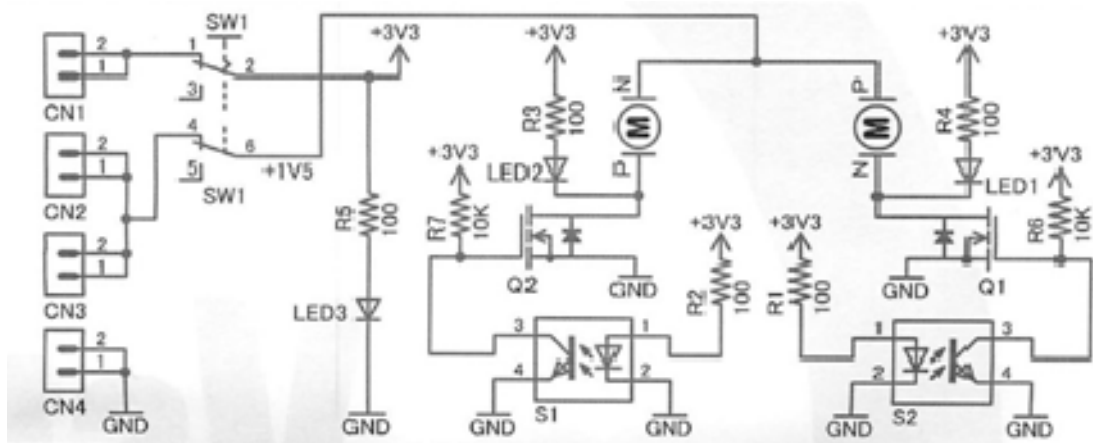
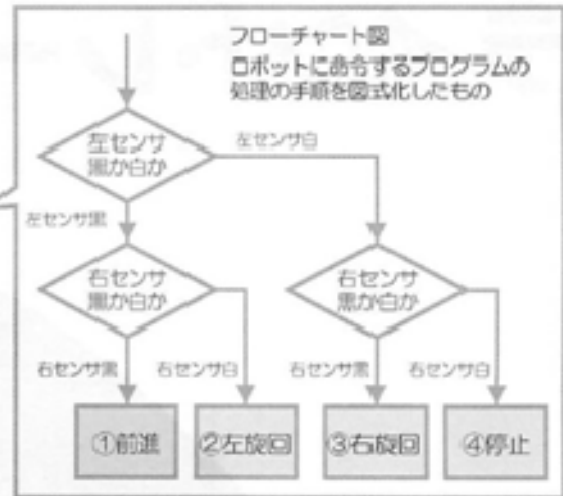


図 4.5.6-2 模擬ロボットの基本動作および回路図

①故障注入箇所の決定

FMEA による故障モードから故障注入箇所を決定する。表 4.5.5-1 に模擬ロボットの FMEA を例示する。赤外線センサによるライン検知から、左右モータの駆動までを安全関連系と考え、赤外線センサ(S1, S2), N型 FET(Q1, Q2)に関する FMEA を実施した。故障注入箇所は、FMEA において、安全側故障となる故障とした。

表 4.5.6-1 模擬ロボットの FMEA 例

部品	端子	故障	モータ電圧	ロボット動作	安全/危険側故障
S1	1	オープン	電圧1.5V固定	右カーブにおいて、左方に逸脱 M2駆動固定→S2左方逸脱(M1停止)	危険
	2	同上	同上	同上	危険
	3	同上	同上	同上	危険
	4	同上	同上	同上	危険
	1-2	ショート	同上	右方に逸脱した後、ラインに復帰 ①M2駆動低下→②S2右方逸脱(M1停止)→③S2ライン復帰(M1駆動) ②, ③の繰返し	危険
	3-4	同上	電圧ゼロV	右方に逸脱した後、停止 M2駆動停止→S2右方逸脱(M1停止)	安全
	1-3	同上	同上	同上	安全
	2-4	同上	影響なし	影響なし	安全
	1-4	同上	1-2ショートに同じ	1-2ショートに同じ	危険
	2-3	同上	3-4ショートに同じ	3-4ショートに同じ	安全

部品	端子	故障	モータ電圧	ロボット動作	
Q2	D	オープン	電圧ゼロV	右方に逸脱した後、停止 M2駆動停止→S2右方逸脱(M1停止)	安全
	G	同上	オープン前の状態を維持	オープン前の状態が、駆動中の場合、右カーブにおいて、左方に逸脱 M2駆動固定→S2左方逸脱(M1停止)	危険
	S	同上	電圧ゼロV	Dオープンに同じ	安全
	D-S	ショート	電圧1.5V固定	右カーブにおいて、左方に逸脱 M2駆動固定→S2左方逸脱(M1停止)	危険
	D-G	同上	電圧ゼロV	Dオープンに同じ	安全
	G-S	同上	電圧ゼロV	Dオープンに同じ	安全

②試験の実施

FMEA を元に、部品への故障注入と安全関連系の出力値の計測を行う。例として、模擬ロボットの部品 S1 の端子 3-4 間のショートの場合、単極 40 チャンネル・スイッチカードの IN 端子と OUT 端子をそれぞれ部品 S1 の端子 3 と端子 4 に接続し、制御 PC によってショート故障を模擬する。なお、モータの出力端子を 6×8 マトリクスカードの 1 行目の Hi および Low に接続し、出力電圧値を計測する。

試験は、路面の色を黒と白の二種類について行った。路面色が黒の条件は、ライン上に赤外線センサがある状況を想定し、通常状態では両輪のモータが駆動する。一方、路面色が白の条件は、ラインから赤外線センサが逸脱した状況を想定し、通常は逸脱したセンサと左右反対側のモータが減速しラインに復帰する動作を行う。

③結果の解析および判定

ロボットへの配線または回路への故障注入および出力値の計測を行ったのち、計測結果が FMEA による設計者の意図した動作であるか、を確認する。

模擬ロボットの例では、部品 S1 の端子 3-4 間のショートの場合、右側のモータ (M2) が停止し、ラインを逸脱した直後に左側のモータ (M1) も停止するため、ロボットとしては停止するとある。

図 4.5.5-3 にモータ出力電圧の計測結果を示す。2 秒時点で部品をショートさせた結果、路面色が黒の場合において、モータ出力電圧がゼロとなった。また、路面色が白の場合は、試験の開始時点から出力電圧がゼロであった。すなわち、実際のラインレースによる走行場面において、部品 S1 の端子 1-3 間がショートしても、ラインから逸脱すると同時にロボットが停止することを意味し、設計者の意図に沿ってロボットが動作することを確認した。

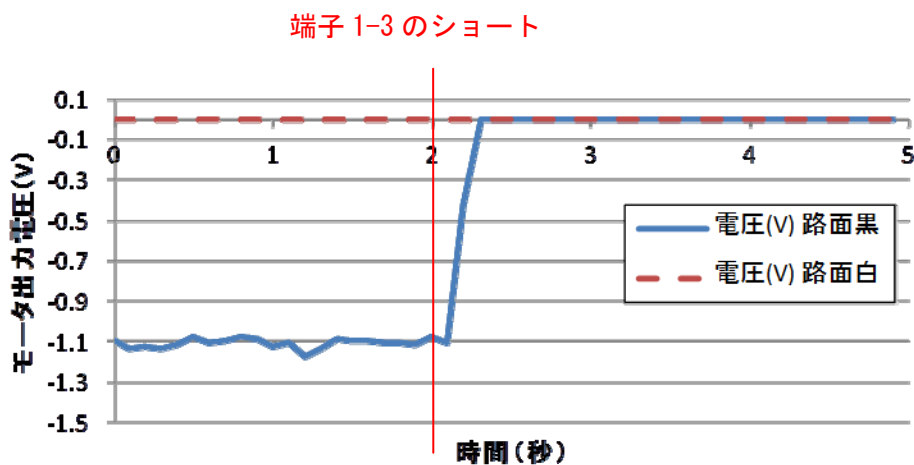


図 4.5.6-3 模擬ロボットの基本動作および回路図

4.6 試験の実績

プロジェクトに参加するロボット開発者のロボットについて、安全検証試験を実施した。その主な実績を、表 4.6-1 に示す。

表 4.6-1 安全検証試験の実績

	移動作業型	搭乗型	装着型
	5 機種	4 機種	2 機種
感電試験		✓	✓
騒音試験		✓	
表面温度試験	✓	✓	✓
衝突安全性試験	✓	✓	
接触安全性試験			✓
温湿度および振動環境耐久性試験	✓	✓	✓
走行耐久性試験	✓	✓	✓
耐荷重試験		✓	✓
耐衝撃試験	✓	✓	
静的安定性試験	✓	✓	
動的安定性試験	✓	✓	
安全関連光学センサの機能試験 (環境認識性能試験)	✓		
障害物検知対応性能試験	✓	✓	
EMC試験	✓	✓	✓
故障注入試験 (機能安全確認試験)	✓		

5. 国際標準化活動 [JARA・産総研]

5.1 国際標準化の目的

生活支援ロボットの安全性検証手法の国際標準化は、今後整備される安全性認証制度に我が国のロボット技術を最も効果的に反映させることを目的とする。このために国際標準化検討WGを設置して活動を行った。

標準規格は「ものの形状・寸法・性能・品質・試験法などを統一して、生産・使用の便を図るために公的に定められる規格」(大辞林 第二版)と定義される。「標準」、「規格」、「標準規格」の3つは同義であり、英語では standard である。標準規格を定める主な意義は以下であるとされる。

- (1) (取引での基準の統一による) 相互関係の促進
- (2) 互換性の確保やインタフェースの整合
- (3) (量産効果を期待した) 多様性の調整
- (4) 適切な品質の確保

特に(4)に関しては規格で規定される水準の品質が達成されているか否かが商取引上重要になるため、規格が定める品質は客観的に検証可能でなければならない。ここでいう品質には安全性が含まれる。品質が客観的に検証可能であるためには具体的な要件とその要件をテストする試験方法の両方が規格化されていなければならない。一般に安全認証と呼ばれるものは安全規格への適合性認証のことであり、従って安全認証システム確立のために安全性検証手法を開発する場合にはその基準や手順を形式的に明文化した安全認証規格を整備しなくてはならない。

標準規格には様々な種類があるが、これらの関係には構造がある。国際規格には他の規格に優先する国際条約があるので、我が国による生活支援ロボットの標準規格化は国際規格に対して行うことができれば最も効果が高い。国際規格とは通常、ISO規格とIEC規格、ITU規格の3つであると解釈されており、それぞれ国際標準化機構 (ISO)、国際電気標準会議 (IEC)、国際電気通信連合 (ITU) が策定団体である。

1995年にWTO(世界貿易機関)の加盟国間でWTO/TBT協定(貿易の技術的障壁に関する協定)が発効した。WTO/TBT協定は「強制規格は、気候上の理由など正当な理由が無い限り、国際規格を基礎として作成しなければならない」ことなどを定めている。WTOは貿易の自由化を推進する国際機関であり、日本を含め153カ国が加盟している。この結果、国際規格は非常に強い影響力を持つようになり、逆に国際規格に明らかに矛盾しているような各種規格は存在意義がほとんどなくなった。これを受けて日本では同年に閣議決定された「規制緩和推進計画」でJIS規格の国際標準への整合化が盛り込まれた。例えばロボットの安全規格をJIS規格として整備したとしても、ISO規格で同様の規格が制定された場合、速やかに修正して整合させることが求められる。従って国家間の技術競争があり得る分野で安全の認証規格を整備する場合は国際標準を目標とする事が有意義である。安全規格には安全要件と試験方法を一つの規格票にまとめる場合と、それぞれ別個の規格にまとめる場合があるが、本プロジェクトではISO 13482を安全要件の規格と位置づけ、試験方法はここに提案せずに別規格「NEDO試験方法TS」としてISOに国際標準化提案をした。

5.2 ISO 13482

ISO13482:2014 "Robots and robotic devices - Safety requirements for personal care robots" は生活支援ロボットの安全性に関するISO規格であり、NEDO生活支援ロボット実用化プロジェクトの研究開発成果を反映したものである。最終原案の段階で本文8章と5つの付属書からなり、英語版は全82ページからなる。

同規格でスコープに入っているものは以下の3タイプのロボットである。

- ・モバイルサーバントロボット
- ・搭乗型ロボット
- ・身体アシストロボット

この規格は機械安全の ISO 規格体系の中でタイプ C 規格に分類されるものである。タイプ C 規格は原則として上位のタイプ A 規格, B 規格に整合する形で, ある特定の種類の機械に関する全ての危険源について必要な保護方策を記述することを目的とする規格である。ただし生活支援ロボットの危険源は不確定要素が多く他の機械類と同じように全てを列挙する事はできないため, 本規格の構成はまず 4 章でリスクアセスメントに基づくスリーステップメソッドを要求して, 続く 5 章で典型的な危険源に対する適切な保護方策の要件を提示している。6 章では安全関連の制御系の安全要件を独立して記述している。

本規格案は 2006 年 6 月の SC2 総会でアドバイザリーグループの推奨に基づき規格策定作業開始が決議された。翌 2007 年 6 月に日本は目次案を提出し, これを基礎として英国を議長とするプロジェクトチーム ISO/TC184/SC2/PT2 にて検討が行われた。2009 年 2 月 19 日に新規作業項目提案 (NP) が承認され, ISO/TC184/SC2/WG7 での扱いとなった。2010 年 2 月 4 日に委員会原案 (CD) が承認され, 2012 年 9 月 26 日に 2 度目の規格原案 (DIS) が承認された。2013/12/03 に最終原案 (FDIS) が承認され, 2014 年に国際規格となる。同委員会に対応する国内の審議団体としては (社) 日本ロボット工業会が指定されている。

5.3 NEDO 試験方法 TS 原案

現在は ISO/TC 184/SC 2/WG 7 で NP 提案準備中のためまだ正式な規格番号が発行されておらず, 便宜的に「NEDO 試験方法 TS 原案」または単に“test methods”と呼ばれている。本プロジェクトで開発された安全性試験方法のうち新しい試験規格が必要だと判断された 18 の試験について, 原案を本プロジェクトで開発し 2013/06/25 の ISO/TC184/SC2/WG7 ブリストル会議において, 同 WG の次期作業項目として承認された。今後 ISO/TC 184/SC 2 から新規作業項目提案承認を受けて技術仕様書, 規格の順に発行される見込みである。

NEDO 試験方法 TS 原案は 2012/10/01 に第 1 版が完成し, 2012/12/17 に本プロジェクトの全体連絡会で提案が承認された。翌年 2013/01/08 に WG7 国内対策委員会で日本提案として提出する事が承認され, 2013/01/31 に WG7 サンフランシスコ会議にて WG7 に提出された。提出時の原案は全 14 章 34 ページ, タイトルは“Robots and robotic devices -- Safety-related test methods for personal care robots”である。

5.4 国際標準化の活動

本プロジェクトの国際標準化活動では安全性検証手法の開発について, 内容を安全性基準と安全性試験方法とに区別し, 前者を ISO13482 として, 後者を新規の安全性試験規格として標準化をしている。ISO13482 の審議はプロジェクト開始当時に進行中であったので, 進行中の議論の中で提案活動を行った。安全性試験規格は国内で合意形成をした上で 2013/01/31 の WG7 サンフランシスコ会議で日本提案として原案を提出した。いずれも今後国際標準として発行されて日本と世界のロボット技術の発展に貢献する見込である。

本プロジェクトの主な国際標準化活動を表 5.4-1 に示す。

表 5.4-1 本プロジェクトの主な国際標準化活動

日時	活動	内容
2010/02/15-17	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#11 (オランダ)	NEDO プロ全コンソよりコメントをとりまとめて提出
2010/02/24	NEDO プロ 国際標準化検討 WG	NEDO プロジェクトで機能安全技術への対応強化

	(機械振興会館)	することを検討
2010/06/01	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	WG7 国内対策委員会
2010/06/21-23	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#12 (パリ)	研究開発中の安全性検証手法との整合性を確認 してコンソ1より修正コメントを提出
2010/08/30-31	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#13 (名古屋)	研究開発中の安全性検証手法との整合性を確認 してコンソ1より修正コメントを提出
2010/09/13	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	WG7 国内対策委員会
2010/10/25-26	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#14 (ブダペスト)	研究開発中の安全性検証手法との整合性を確認 してコンソ1より修正コメントを提出
2010/12/21	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	WG7 国内対策委員会
2011/01/24-26	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#15 (ウェリントン)	研究開発中の安全性検証手法との整合性を確認 してコンソ1より修正コメントを提出
2011/02/25	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	WG7 国内対策委員会
2011/06/02	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	WG7 国内対策委員会
2011/06/20-21	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#16 (ロサンゼルス)	研究開発中の安全性検証手法との整合性を確認 してコンソ1より修正コメントを提出
2011/08/03	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	WG7 国内対策委員会
2011/09/26-28	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#17 (ベルリン)	研究開発中の安全性検証手法との整合性を確認 してコンソ1より修正コメントを提出
2011/12/16	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	WG7 国内対策委員会
2012/02/6-10	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#18 (オランダ)	研究開発中の安全性検証手法との整合性を確認 してコンソ1より修正コメントを提出 各国の ISO 委員に日本での NEDO プロ活動を紹介
2012/02/10	ISO/TC184/SC2/WG8 MEETING#17 (オランダ)	安全性試験方法を提案するために調査
2012/02/21	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	WG7 国内対策委員会
2012/04/23-27	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#19 (東京)	各国の ISO 委員の安全検証センター見学会を実施 見学会で WG7 (安全性), WG8 (試験方法) の両 議長に規格提案を打診
2012/6/7	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	WG7 国内対策委員会
2012/07/09-13	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#20 (ミラノ)	WG7 で日本と独がそれぞれ安全性試験方法の提 案をすることを宣言
2012/07/11-12	ISO/TC184/SC2/WG8 MEETING#18 (ミラノ)	WG8 では安全関連の議題を扱わないことを確認
2012/08/30	試験方法検討 WG (つくば)	試験方法の規格化作業開始に関する内部向け説 明会を開催
2012/09/05	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	WG7 国内対策委員会
2012/10/15-19	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#21 (ソウル)	FDIS 審議 研究開発中の安全性検証手法との整合性を確認 してコンソ1より修正コメントを提出 ISO13482 以降の新規作業項目提案 (NP) が募集さ れる 日本は試験方法を独と共同提案することを確認
2012/10/22-23	ISO/TC184/SC2/WG8 MEETING#19	提案する安全性試験方法と WG8 で策定する性能

	(ソウル)	試験方法規格との整合性を調査
2012/10/31	(国際標準化検討 WG 活動)	試験方法 TS 草案第 1 版 (NEDO コンソ 1 草案) 完成
2012/11/20	国際標準化検討 WG ISO 国際標準化セミナー	試験方法研究開発担当者を対象とした規格執筆要領の勉強会
2012/11/22	(国際標準化検討 WG 活動)	試験方法 TS 草案第 2 版完成 WG7 独委員に共同提案原案として送付
2012/11/28	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	試験方法 TS と 傷害耐性基準 TR の日独共同提案準備作業を動議して承認
2012/12/10	(国際標準化検討 WG 活動)	試験方法 TS 草案第 3 版完成 試験方法 TS 草案を NEDO プロ全体連絡会メンバーに回付 独委員に共同提案原案の更新版として送付
2012/12/18	NEDO プロ 全体連絡会	試験方法 TS 草案について全コンソから提出されたコメント 250 を処理 試験方法 TS 草案を NEDO プロ試験方法 TS 原案として国内対策委員会に提出する事を承認
2012/12/26		NEDO プロ試験方法 TS 原案の 250 コメントを解決 NEDO プロ試験方法 TS 原案を国内対策委員会に提出
2013/01/08	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	NEDO プロ試験方法 TS 原案のコメントを処理 試験方法 TS 日本原案として ISO 国際会議に提出する事を承認
2013/01/24	(国際標準化検討 WG 活動)	日本草案として WG7 事務局へ送付 独委員に共同提案原案の更新版として送付
2013/01/29-30	ISO/TC184/SC2/WG8 MEETING#20 (サンフランシスコ)	提案する安全性試験方法と WG8 で策定する性能試験方法規格との整合性を調査
2013/01/31-02/01	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#22 (サンフランシスコ)	試験方法 TS 日本原案プレゼン 5 つの新規作業項目提案 (NP) の提案が行われる
2013/06/25-26	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#23 (ブリストル)	試験方法 TS 日本原案プレゼン 5 つの新規作業項目提案のうち日本提案と英国提案の選択となり両者並行作業が議決される
2013/06/27	ISO/TC184/SC2/WG8 MEETING#21 (ブリストル)	提案する安全性試験方法と WG8 で策定する性能試験方法規格との整合性を調査
2013/10/08	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	WG7 国内対策委員会
2013/10/18-19	ISO/TC184/SC2/WG8 MEETING#22 (北京)	提案する安全性試験方法と WG8 で策定する性能試験方法規格との整合性を調査
2013/10/21-23	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#24 (北京)	日本提案と英国提案の今後の進め方について協議 試験方法 TS 原案のコメント処理
2014/02/03	サービスロボット安全性検討 WG (機械振興会館)	WG7 国内対策委員会
2014/02/17-19	ISO/TC184/SC2/WG7 MEETING#25 (サンセバスチャン)	(予定)

6. 生活支援ロボットの安全に関する法律と制度の調査 [MSTC]

6.1 調査研究の背景と目的

生活支援ロボットを実用化するために考慮すべき法律と社会制度を、欧州と日本を中心に国内外の公開情報を基に調査し、この調査の結果に基づいて法制度の検討を行った。本調査研究の詳細を付属書に整理した。付属書は下記の4分冊から構成される。

付属書F.1 生活支援ロボットのための法律制度に関する需用調査

付属書F.2 生活支援ロボットのための日本の法律制度の調査

付属書F.3 生活支援ロボットのための海外の法律制度の調査

付属書F.4 生活支援ロボットのための安全認証に要求される要件の調査

前期（H21～H23）は、生活支援ロボットの安全性検証手法をグローバル展開する上で考慮しなければならない法律や社会制度の課題について、欧州と日本を中心に国内外の情報を基に調査した。欧米の安全の考え方と、そこから作り出された法制度を整理して、生活支援ロボットの安全認証制度が欧米やアジア諸国に与える意義を探った。その結果、世界は、”Tested Once Accepted Everywhere”に向けて動いており、日本のロボット技術に対する期待も大きいことから、当該分野においても相互認証協定に基づく認証手続きの合理化が望まれている事が分かって来た。

後期（H24～H25）は、日本発で日本が先導していくべき生活支援ロボットの安全認証機関の運営に資すると共に、安全認証事業のグローバル展開を可能とする為には、果たして何が求められるかについて調査研究した。具体的には、生活支援ロボットの適用が期待されるサービス分野を対象として、我が国の安全認証制度が真に国際的にも認知され、デファクトスタンダードとなるための戦略を示した。その為には何が必要で、どのように実現していくかを示した。

6.2 各年度の成果

6.2.1 H21年度

H21年度は、調査研究委員会を設置すると共に、シンクタンクを活用して法制度に関する需用調査を行った。

(1) 調査研究委員会の設置と運営

当該分野の有識者で構成される調査研究委員会を設置して年6回の定例会議を開催し、調査研究に関する審議を行った。プロジェクト・コンソーシアムのメンバをオブザーバに加えて、コンソーシアムと一体化した運営を行った。また、ロボットビジネス推進協議会とも協力関係を持ちながら調査研究を実施した。

(2) 調査研究活動

調査研究委員会では、図6.2.1-1に示す調査研究の方法と、その成果を公開データベースで情報発信することを決定した。また、図6.2.1-2に示す調査研究の範囲を決めた。本調査研究の範囲は、図6.2.1-2に示す様に、保険制度、民事法、安全技術、安全規格、機能と安全性のトレードオフ、行政法、公的給付制度、社会的責任にまで及ぶ。そこで、本調査研究では、技術と社会制度の両面から、社会、官、メーカ、ユーザ各々の立場を配慮した多角的な検討を行うことが要求される。そこで、生活支援ロボットのメーカとユーザを対象として、実用化に向けた法律、制度、安全規格に対する需用を調査した。本調査の結果を付属書F.1に整理した。また、国内法制度の調査も開始した。

障害者や高齢者向け福祉制度の貸与種目に認定される条件を設定するなど、様々な方法で安全を確保することが行われている。しかしながら、将来実用化される生活支援ロボットは、自動車の様に道路交通法施行規則で仕様や基準等を具体的な数値で示されたり、車いすのように告示により福祉用具貸与種目としての仕様を定めたりされていない。そこで、現行の法施行規則や告示等が、将来実用化される生活支援ロボットに与える影響を想定した前述の法令集を作成することにより、現行の法律や制度を活用し易くした。生活支援ロボットに関する国内の法律と制度を、付属書 F.2 に整理した。

表 6.2.2-1 付属書 F.2 に収録した生活支援ロボット関連法と制度

所轄省庁	種類	法律や制度の名称
経済産業省	民法	製造物責任法
	行政法	電気用品安全法と消費生活用製品安全法
厚生労働省	制度	玩具の安全基準と ST マーク
	行政法	労働安全衛生法
		薬事法
		介護保険法
		福祉用具の研究開発及び普及の促進に関する法律 障害者の日常生活及び社会生活を総合的に支援する為の法律
国土交通省	行政法	道路運送車両法
		高齢者、障害者等の移動等の円滑化の促進に関する法律
警察庁	行政法	道路交通法
		不正アクセス行為の禁止等に関する法律
消費者庁	行政法	個人情報保護法
総務省	行政法	電波法
	制度	電波法が定める無線局開局の免許制度

6.2.3 H23 年度

H23 年度は、日本と米国や欧州の法制度の比較調査を行った。現行の法律や制度の多くは、生活支援ロボットを想定されていない。想定されていない場合でも、一番近い現行法で規制された場合に、規制の対象となる生活支援ロボットが出てくる。このような法制度との関係が深いロボット分野について海外（EU 諸国、米国、アジア諸国）の状況を調査した。EU 諸国の調査は、国策として生活支援ロボットの実用化に取り組んでいるデンマーク王国、生活支援ロボットの法制度を研究しているドイツの法科大学、UL DEMKO、ドイツ Oldenburg リハビリセンタなどの訪問調査を行った。米国の調査は、日本に先行して生活支援ロボットを事業化している Segway Inc., Gecko Systems Inc., UL（認証機関）、RIA（ロボット業界団体）、2013 年から生活支援ロボットの展示を企画していたシカゴ科学博物館などの訪問調査を行った。さらに、欧米アジア諸国における安全の考え方を明らかにするために、調査機関を利用して、ドイツ、フランス、アメリカ、カナダ、韓国、中国、台湾、インドのヒアリング調査を行った。これらの海外調査の詳細を付属書 F.3 に整理した。

6.2.4 H24 年度

H24 年度は、アジア新興国における生活支援ロボットの潜在市場を分析した上で、世界各国の安全認証制度のポテンシャルを総合的に比較検討することを目的として、EU が実施した安全認証制度に関する調査レポート、企業の開発現場における安全設計事例、米国と EU の安全に関する法制度の比較論文などに基づく欧米と日本の比較調査を行った。調査結果から、日本と欧米の考え方の違いがある程度明確化できた。我が国の安全認証制度は、欧

米社会と比べると普及が遅れている。この遅れを如何にして取り戻すか、その対策を考えることが本調査の目的である。そこで、今、仮に、日本人、もしくは日本社会の安全認証制度への受容性を考えるとき、不確定因子となる文化的な違いの影響度が小さく、時間的な遅れの影響度が大きいと仮定できるならば、欧米の現状を見極めた後は、それを日本と比較して、良い点、悪い点を明確化した上で、良い点を伸ばし、悪い点を無くす施策を考えれば良い。それで、日本社会の安全認証制度への受容性を高めて、普及を加速できるはずである。そこで、付属書F.4の第1部をこの方針で整理した。

6.2.5 H25年度

欧米人と比べて日本人は、PLに縛られずに果敢にチャレンジするメンタリティが不足していると指摘される。これは、生活支援ロボットの産業振興を阻害する要因の一つだと考えられる。法制度の観点から、この問題を解決する方策は二つある。

一つ目の方策（以下では「方策A」と記載）は、H24年度に提案した方策であり、日本人を啓発して欧米的な考え方を身につけた上で、欧米の法体系に倣うことである。二つ目の方策「方策B」は、現在の日本人向けに現行の法体系を変えることである。

もしも、日本人の安全の考え方が、欧米人と比べて遅れていることが、メンタリティの違いを生み出す主要原因であり、欧米人のメンタリティに向かっているなら、方策Aを選択することができる。

一方、欧米人と日本人のメンタリティに、越え難い隔たりがあるとすれば、啓発は困難なので方策Bでなければならない。

欧米人のメンタリティには、安全に関する事前責任が果たされていれば、例え事故が発生したとしても、免責されるべきであるという「State of the artの信念」がある。すなわち欧米人は、その時代において十分に責任を果たしたと見なされるレベルの技術的配慮が行われていても、リスクが残留することを認めている。リスクが残留していれば、一定の確率で事前には想定不可能な事故が発生することになるが、その責任を問う事はできないという考え方が一般的通念となっている。これは法律専門用語で公正な手続きを取ることを優先し、その結果に問題があっても、それを認めて受け入れるという意味で、「手続き的正義」と呼ばれる。

前述の欧米人の通念は、日本人にも良く理解できる。日本のPL法第四条の免責事由にも「当該製造物をその製造者等が引き渡した時における科学又は技術に関する知見によっては、当該製造物にその欠陥があることを認識できなかったこと。」と記載されている。世界的にも、日本製品の品質と安全性は、安全認証を受けた欧米製品よりも信頼されている。それでも、日本人は、とにかく事故を防止しなければならないと考える。これは「結果的正義」と呼ばれる。「手続き的正義」を行動規範とするか、「結果的正義」を行動規範とするかにより、リスクがある製品との向き合い方が違ってくる。付属書F.4の第2部では、方策Bについて詳細に述べ、第3部では、方策Bを実践する際に、承認審査に対する社会的因子の影響を数理統計的に評価する方法論について述べた。

6.3 今後の課題と発展

我が国において、安全認証を取り巻く環境が整備され、適切な教育が行われ、欧米型のState of the artの信念が育まれるまでは、方策Aで指摘した問題が発生することもやむをえないと考える。粘り強く安全認証の意義を伝え続けなければならない。欧米人と日本人の考え方の違いを説明し、世界は、簡潔で低コストな認証制度の構築に向けて一歩ずつ前進し、認証スキームが目標とする“Tested Once, Accepted Everywhere”に向けて動いているという現実を伝え続けなければならない。

7. 生活支援ロボットの安全に関する情報データベースの開発 [JARA]

7.1 目的と目標

7.1.1 実施計画

実施計画書（平成 25 年度版）では、本項目は「生活支援ロボットの安全認証，評価基準策定につながる安全関連データの収集・蓄積ならびに再利用手法に関する研究開発を行う」ことをミッションとし、「4 タイプの生活支援ロボットについて 5 つの試験項目の基礎試験データの収集を行い，再利用性の観点から分析しデータベースを構築して，ロボット研究開発実施者に提供する。」ことを目標としている。

7.1.2 背景

課題設定の背景として，ロボット研究者間での以下のような要請ないし問題意識の存在が考えられる。

- ・ ロボットの使用による傷害発生状況を分析しロボットの安全設計に利用するために，ロボットに係る事故やインシデント（ヒヤリハット事例）の収集とデータベース化が必要である。
- ・ 過去の反省から，プロジェクト中に産出される安全に関する事項も含む種々の知見の散逸を防ぎ，その再利用を可能にするため，データベース化が必要である。

7.1.3 目標設定

7.1.3.1 開始時の問題点

プロジェクト開始時は，以下の問題があった。

- ・ 試験データのような開発されるロボットに直接かかわるデータは企業機密に属し，共有データベースへの蓄積に適さない。
- ・ 開発段階のロボットの事故・インシデント情報も，機密漏洩や風評被害への懸念から企業から提供を受けることが難しい。
- ・ 生活支援ロボットは新しい分野なので利用可能な既存データが少なく，データ蓄積はプロジェクトの他の研究開発活動の結果を待たざるを得ない。

7.1.3.2 現状に対応した目標設定

前節で示した問題点をふまえ，当初の計画設定を広く捉え，支援の重点をプロジェクト期間中の研究開発支援から今後生活支援ロボットの安全に関する情報を必要とする人々（特に，新規参入する中小企業の技術者等）の支援へと移し，安全な生活支援ロボットの普及に繋がるような安全関連情報提供サイトを開発することを最終的な目標とした。

7.2 開発コンセプトと利用法

システムの開発にあたっては，単にプロジェクトの成果物を掲載するだけでなく，多様な利用のされ方を想定して複数の機能を取り込むこととし，表 7.2-1 に示すような「知る，探す，繋がる」の 3 つのキーワードで提供する機能とコンテンツを整理した。

- ・ 「知る」としてまとめた部分は，情報の提供を行うもので，特に入門者，初級技術者を対象として生活支援ロボットの安全設計から製品認証にいたる事項について基本的知識を提供する。プロジェクトの成果発信もここで行う。
- ・ 「探す」の中核機能は，事故事例等の検索機能であり，事故シナリオの分析やリスクアセスメントの参考にするために中，上級技術者が使用することを想定している。ただし，現状では生活支援ロボットに特化した事故事例収集が困難なことから，生活支援ロボットの安全問題を考える上で参考となり得る既存関連機器，機械の安全関連の公開データベースを検索出来るようにした。

- ・ 「繋がる」の部分では、このサイトを介して生活支援ロボットの安全問題に関心のある人々（上級技術者や研究者など）の間の意見交換やネットワーク形成を支援することを意図している。

表 7.2-1 データ提供システムの基本構成

	知る	探す	繋がる
狙い	ロボットの安全を学ぶ	ロボットの危険を類推する	ロボットの安全を語る
用途	<ul style="list-style-type: none"> ・ 基礎的知識を学ぶ ・ 情報を手に入れる 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 検索する ・ 詳しく調べる ・ 事故の因果を類推する 	<ul style="list-style-type: none"> ・ SNS 機能 ・ エキスパートが語る ・ エキスパートに尋ねる
コンテンツ	<ul style="list-style-type: none"> ・ プロジェクト成果 ・ 生活支援ロボット及びその安全に関する情報 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 総合検索機能 ・ 事故事例集 ・ リンク 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 掲示板 ・ 利用分析 ・ ブログ（登録者）
対象者	入門者	中級，上級者	全員（上級者がけん引）
全体比重	大	中	小

7.3 システムの実装

システムの構築にあたっては、以下の理由から市販の ECM（エンタープライズ・コンテンツ・マネジメント）ソフト^(注1)を基盤として利用し、不足する機能についてのみ付加的な開発を行った。

- ・ 市販ソフトの機能を利用することで、迅速なシステム立ち上げが可能となる。
- ・ 信頼性、保守性の点で個別開発ソフトよりも優れ、全体コストでも有利である。

（注1）機能面とサポート体制を考慮してマイクロソフト社の SharePoint システムを採用した。

7.4 成果

7.4.1 全体的な目標達成状況

7.2 で述べたコンセプトに基づくシステムを開発し、生活支援ロボットの安全に関する情報提供サイト「生活支援ロボット安全情報センター」（略称 RT-SIC [Rotobt Technology Safety Information Center]）と命名して平成 26 年 2 月末までにインターネット上での公開を実現し^(注2)目標を達成した。

（注2）サイトの URL：<https://www.rtsic.jp/jpn/pcr>

7.4.2 プロジェクト成果の掲載

コンソーシアム 1 で行われた「生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発」の成果物の提供を受け、解説記事とともにそれらをサイトで閲覧できるようにした。また、資料をダウンロードできるようにした。表 7.4.2-1 に研究開発項目「生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発」関係の成果物の概要を示す。なお、サイトではプロジェクトの成果物以外にも、独自に収集した生活支援ロボット関連の情報を掲載している。

表 7.4.2-1 掲載成果物（「生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発」関係）

研究開発／活動内容	掲載主要成果物
認証スキーム	概説，認証パイロットスタディ概要
安全設計支援ツール	設計コンセプト自己チェックシート，ロボットタイプ別リスクアセスメントひな形，機能安全対応ソフト事例（PROH-SIL），および関連解説書類
安全検証試験方法	生活支援ロボット安全検証センターで実施する試験の概要
国際標準化活動	国際標準化動向の概説
関連法規制等の調査	（一財）製造科学技術センターが実施した調査研究報告書

7.4.3 その他の開発事項

検索機能に関して、予め登録した外部データベースと本サイトの内の情報を同時一斉検索する機能を付加し（総合検索と命名）、作業効率の向上を図るとともに、検索対象を限定することにより規格や法規の検索も可能とした。

データマイニング手法の検討については、現時点ではデータマイニングを必要とする固有データの蓄積が十分でないことを勘案し、固有手法の開発あるいは既存手法を用いた分析は行わず、文の形態素解析ツール^(注3)を用いて総合検索（S-Search）の検索キーワード文字列を解析し、同義語、類義語を自動蓄積する機能を開発した。十分なデータが蓄積されればユーザの関心の分析を行うことが可能になり、将来データマイニング応用に繋がることが期待される。

（注3）オープンソース形態素解析エンジン MeCab を使用。

7.5 今後の課題

当初目標は達成されたが、このようなシステムの開発と維持に関して重要と考える点を以下に示す。

7.5.1 システム構築の方法

近年、クラウド技術にも見られるように、データ蓄積あるいは各種データ処理に関してネットワークを経由してサービスを提供する技術が発展し、自前のシステムを保持することなく必要な機能を必要な分だけ比較的安価に利用できる環境が出現している。また、CMS（コンテンツ・マネジメント・システム）構築用のオープンソフトも充実し、それらを使用した実績も増え、有力な情報サイト構築手段となっている。今後同様のシステムを開発する場合には、経済性、開発効率の観点からこれらの利用も検討する必要がある。

7.5.2 データ収集体制

本システムのコンテンツで「生活ロボットの安全性検証手法の研究開発」テーマに関わるものは、コンソーシアム1参加メンバーより成果物の提供を受けることができた。しかし、プロジェクトの研究開発項目を超えたより広範なデータの収集は、その労力に見合うインセンティブが働かないので、自発的協力にたよるだけでは限界がある。インシデント情報の収集に関しては、ロボット特区等における実証実験との連携も検討したが、制度が異なることもあり具体的実施までには至らなかった。継続的にコンテンツを充実させ、またデータ更新を行って行くためには、異なるプロジェクト間での横断的協力や、業界団体、関連学会との連携も可能にする、体制構築が必要と考えられる。

7.5.3 システムの管理と維持

セキュリティ対策を含め質の高いデータサイトを維持するには、種々のランニングコストが発生する。また、データシステムが存在価値を保持するには、データの強化・更新が不可欠であり、データを収集し、収集したデータを分析・整理できる専門的知識を持つ要員の確保が必要となる。プロジェクト期間中は、要員を含めプロジェクトリソースの利用

が可能であったが、本データベースのように分野・業界を超える内容を扱うシステムの管理運営は、国等の公的機関あるいは業界横断的機関が行うことが期待される。あるいは、生活支援ロボットの市場が拡大し業界独自の対応が可能になるまでは、各種プロジェクト等を利用した国の支援が必要であろう。

7.5.4 活用のための検証

本システムの開発は、今後生活支援ロボットが普及・発展して行く流の中で、このような安全情報提供サイトが必ず必要とされるという、安全思想、安全技術を先導する側の理念に発している。日本ロボット工業会では、ロボットビジネス推進協議会の協力を得て、このようなサイトの必要性についてアンケート調査を行った。その結果によれば、安全情報提供サイトへの一般的な期待は示されたが、具体的あるいは逼迫した要求は十分には読み取れなかった。その理由としては、生活支援ロボットの市場がまだ広がっておらず、参入企業も少ないことが考えられる。我々は、想定されるニーズに幅広く対応できるようなシステムを構築したが、その有効性を判断するには十分な時間が必要である。そのためにも、先に述べたような支援体制の存在が不可欠であると考ええる。

8. 第三者認証および第三者試験体制の構築 [JQA・JARI]

プロジェクト後の事業化に向けた認証機関と試験機関のあり方について検討した。

8.1 認証機関

8.1.1 役割を果たすための開発と成果

製品の適合性評価を行う認証機関に求められる国際規格である ISO/IEC 17065 に準拠したマニュアルと運用体制を構築し、ISO 13482 の第三者認証機関として運用を開始している。また、ISO 13482 発行の約1年前の2013年2月27日に、同規格のドラフト版である ISO/DIS 13482 に基づいて CYBERDYNE 株式会社の装着型ロボットである「ロボットスーツ HAL®福祉用」を認証した。更に、2014年2月17日にパナソニック株式会社の移動作業型ロボットである「リショナー®」及び株式会社ダイフクの「エリア管理システム」については、生活支援ロボットに应用でき得る技術であることから、ロボティックデバイスとして、それぞれ ISO 13482 に基づいて認証した。

8.1.2 プロジェクト後の運用体制

2014年2月1日付けで ISO 13482 が発行し、認証機関としてのマニュアル整備及び体制構築はでき、ISO 13482 に基づいた認証体制の構築はできたが、まだ緒に就いたばかりである。パーソナルケアロボットについては、今後も様々なタイプのロボットが出てくると考えられ、それらに応じた妥当性試験の開発や基準作り等も不可欠になってくる。このため、今後も、研究機関等の関係機関との相互協力による運営体制を維持していく必要がある。

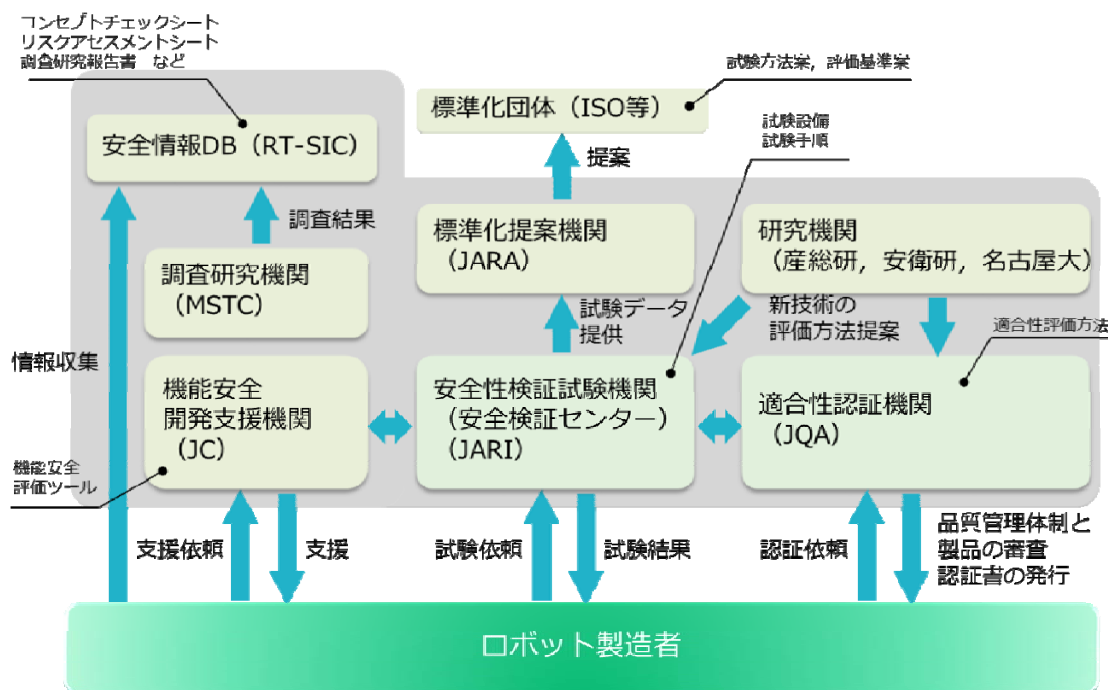


図 8.1.2-1 プロジェクト成果の運用体制

8.2 試験機関

8.2.1 役割

第三者認証における試験機関の役割は、以下の2点である。

- ・ 国際的に通用する試験結果取得を可能にする。
- ・ 複数のロボットを共通に試験できる設備を保有することで、メーカーが個別に設備投資するより、コストを削減する。

これらの役割を果たすための準備を、以下の様に実施した。

8.2.2 役割を果たすための開発と成果

(1) 国際的に通用する試験結果取得を可能にするための開発

生活支援ロボット安全検証センターでの試験結果によって第三者認証を得るには、試験結果が国際的に通用することが必要がある。そこで、試験所および校正機関の能力に関する規格である ISO17025 に同センターを適合させるための体制案を策定して構築を開始した(図 8.2.2-1)。

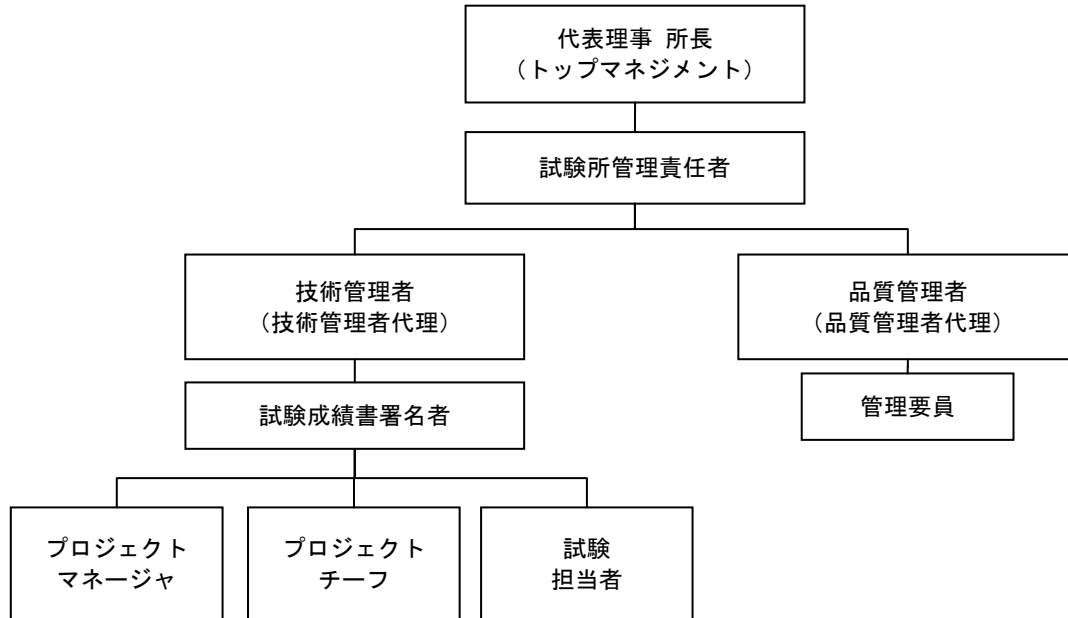


図 8.2.2-1 ISO17025 適合を目指した体制案

また、上記体制を維持するためおよび ISO17025 に適合したトレーダビリティを確保するために必要文書を表 8.2.2-1 の様に抽出し、作成を開始した。図 8.2.2-2 に、作成した文書の例を示す。

表 8.2.2-1 必要文書一覧

文書名
品質マニュアル
組織図
職員リスト
内部監査の記録
マネジメント・レビューの記録
測定の不確かさ推定手順及び算定結果
主要な試験設備のリスト及び配置図
校正証明書, リスト, 社内校正のトレーサビリティ一貫系図
ナンプリング手順書
技能試験結果報告書
試験報告書(又は、校正証明書)の様式
試験方法手順書一覧
所内試験手順書


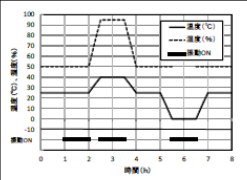
環境試験装置による耐久試験方法(高低温・振動複合試験) 詳細版	
<p>1. 目的</p> <p>槽内に入り得る大きさの、移動型構造体、静止型構造体、人体装着装置、及び、それらの構成部品など(以下、試験体と呼ぶ)の、使用環境(温度)下において、使用時に想定される振動を与えた場合の、性能及び、安全機能の正常性確認、安全性への影響を調べる。</p> <p>2. 適用範囲</p> <p>この規格は、試験体の耐環境安全性を検証するにあたり、温度ストレスと振動を同時に与えた時の、影響を調べる場合に適用する。</p> <ul style="list-style-type: none"> 引用規格 <ul style="list-style-type: none"> 直接はなし。13482の要求事項に対する試験法規格。 関連規格 <ul style="list-style-type: none"> JIS C 60068-2-53、JIS C 60068-2-59 <p>3. 試験条件</p> <p>3.1 試験体</p> <p>試験体は原則電源オン状態で、槽内加振テーブル上に置く、又は吊り具で吊る。試験体が車輪等を有する場合、車輪が空転又は、駆動部が無負荷状態で連続運転できる状態とする。</p> <p>3.2 加振条件</p> <p>試験体を与える振動は、想定される最悪の使用環境において、最高速度で動作した場合に加わる振動波形とする。最悪の使用環境とは、特に指定がない限り、点字パネル(5mm高)を最高速度で定常走行した場合の振動波形とする。</p> <p>使用環境の指定がある場合、振動波形、周波数、振幅、加速度、について確認する。また、振動波形は、垂直、前後、左右方向に分け、加振テーブル上で、試験体の位置や向きを変えて与える。また、1サイクルにおいて、加振・休止のタイミングも決定する。</p> <p>3.3 環境条件</p> <p>温度、湿度の設定は委託元の指定をもとに、温度、湿度の変化速度、持続時間、許容範囲について決定する。指定の無い場合は、高温40又は35℃、低温-10℃、湿度95%を標準値とする。</p> <p>3.4 計測項目</p> <p>電気回路の漏洩や、絶縁性を知りたい場合は、イベントデテクタ又は、絶縁抵抗計を接続する。</p> <p>4. 試験準備</p> <p>4.1 事前準備</p> <ul style="list-style-type: none"> 恒温恒湿槽は多大な電力を消費するため、電力使用届けを関係部署へ提出する。 試験体の外観写真撮影する(図1)。 	<ul style="list-style-type: none"> 温度度のステップごとに、指定の温度、湿度、持続時間を入力する。 加振機の運転設定(フラグ処理)を行うため、タイムシグナル(図7、○部)に「1」と入力すると、その期間、加振機が作動する。 温度勾配設定は1.0℃/minが最大なので、それ以上で設定しないこと。 温度設定機を、試験上限温度の+15~20℃に設定すること(図8)。 <div style="text-align: center;">  <p>図8 温度設定機</p> </div> <p>指定された温度プログラムがない場合、次を標準プログラムとする(図8)。</p> <p>高低温・振動複合試験(最高温度40℃、最低温度0℃、最高湿度95%の場合)</p> <p>①25℃、50%で晒す(1h)、②25℃、50%、③40℃、95%まで上昇(0.5h)、④40℃、95%(1h)、⑤25℃、50%まで下降(0.5h)、⑥25℃、50%で晒す(1h)、⑦0℃へ下降(0.5h)、⑧0℃(1h)、⑨25℃、50%まで上昇、晒し(1h)</p> <p>必要に応じて、各温度パターン間には後処理1h(25℃)を行う。</p> <p>上記②、④、⑥では振動パターンを再現するために、加振機プログラムとリンクするようにフラグ処理を行う。</p> <div style="text-align: center;">  <p>図8 温度プログラム例</p> </div> <p>4.4 試験体</p> <p>a) 試験体の事前機能確認</p> <ul style="list-style-type: none"> 試験体の外観に損傷がなく、動作機能、安全機能が正常であることを確認する。必要場合は、パッ

図 8.2.2-2 作成した文書の例(試験手順書の抜粋)

(2) メーカーが個別に設備投資するより、コストを削減するための開発

a) ロボットメーカーとの協力による設備の選定

ロボットビジネス協議会会員のロボットメーカーに対して、自社のロボットに必要と考えられる試験装置を調査した。結果を表 8.2.2-2 に示す。また、プロジェクト期間中に、メーカーの試作ロボットの試験実施し、各々のロボットに必要な試験項目を検討した。これらの結果を参考に、複数のロボットを共通に試験できる設備を選定した。さらに、本プロジェクトに参加するロボット開発者のロボットの試験を試行することにより、試験に必要なジグなどの開発を行った。

表 8.2.2-2 ロボットメーカーが必要と考える試験装置の調査結果

	必要と考える試験項目（対象ロボットの型別・項目別件数）				
	移動作業型 （操縦）	移動作業型 （自律）	搭乗型	装着型	その他（マニ ピュレータ）
	回答3件	回答4件	回答1件	回答1件	回答1件
感電試験	調査対象外				
騒音試験					
表面温度試験					
衝突安全性試験	3	4		1	1
接触安全性試験	2	2	1	1	1
温湿度および振動環境耐久性試験	3	4	1	1	
耐久性試験	3	3	1	1	
耐荷重試験	1	4	1	1	
耐衝撃試験	1	4	1	1	
走行安定性試験 （静的安定性・動的安定性試験）	2	4	1		
安全関連光学センサの機能試験 （環境認識性能試験）	2	4	1	1	
障害物検知対応性能試験	2	4			
軌道追従性試験	1	3			
操作・情報提示機能試験	3	3	1	1	1
EMC試験	3	4		1	
故障注入試験 （機能安全確認試験）	2	4	1	1	1
緊急停止試験	2	4	1	1	1
挟圧試験	調査対象外				

b) ISO13482 への対応

生活支援ロボットの第三者認証では、パーソナルケアロボットの安全規格 ISO13482 への適合を確認するための試験が結果必要となる。このため本研究では、ISO/TC184/SC2/WG7 における ISO13482 の策定作業に参画することで、同規格の要求事項の決定と試験方法開発、試験装置の整備を同期させて遂行した。これにより、国際的に通用する試験データを得るために共通して必要な試験装置について検討した。

以上の検討から、事業化に必要な試験装置の候補を以下のように選定した。

- ・ 感電試験のためのプローブ
- ・ 騒音試験のための騒音測定系および測定ジグ
- ・ 表面温度測定のための表面温度測定器
- ・ 衝突安全性試験のための牽引装置，衝突用バリア，人体ダミー
- ・ 接触安全性試験のための接触力測定系
- ・ 温湿度および振動環境耐久性試験のための複合環境試験装置

- 走行耐久性試験装置およびロボット固定用ジグ
- 耐荷重試験装置
- 耐衝撃試験装置
- 静的安定性試験装置
- 動的安定性試験設備（平坦路走行試験設備，傾斜路走行試験設備）および走行速度等の測定系
- 安全関連光学センサの機能試験のための人工太陽および測定ジグ
- 障害物検知対応性能試験と装置および障害物
- EMC 試験のための電波暗室，測定装置および試験ジグ

9. ディペンダブルロボティックカートを使った ISO 13482 評価の実例

本事業で開発した認証スキーム（本報告書の第2章）にそって、安全検証と認証手順を実施することで、今後のロボット開発者が ISO13482 適合認証を取得する場合に参考となる事例を提供する。対象として、産業技術総合研究所が開発した搭乗型生活支援ロボットであるディペンダブルロボティックカートを選定した。

9.1 ディペンダブルロボティックカートの概要

ディペンダブルロボティックカート（図 9.1-1）は、研究所建屋内において歩行が不自由な外来者に対して本館内の移動を助けるための電動車いすとして貸し出されることを想定している。

以下の3つの走行モードを有する。

- a) 通常操縦モード：搭乗者が操縦し電動で駆動する、障害物の接近を検知した場合最高速が限定される。障害物に接触したことを検知すると自動で停車しブレーキを作動する
- b) 低速移動モード：障害物に接触しているときに低速で離脱できる。
- c) 手押しモード：動力を切断してブレーキのみ解除し、後ろから手で押して動かす。



図 9.1-1 ディペンダブルロボティックカート

9.2 ISO13482 認証に必要な文書の（リスト付属書 B.1）

安全ライフサイクルごとに、分析や確認などの作業を実施して、それを文書化する必要がある。付属書 B.1 に、作成すべき文書のリストを示す。以下では、ディペンダブルロボティックカートについて作業を実施して、代表的な文書を付属書に例示する。

9.3 安全ライフサイクル「コンセプト」「全体の範囲決定」- 製品企画書の例（付属書 B.2）

始めに、開発する製品のコンセプトを明確にして、製品がカバーする範囲を規定する。ディペンダブルロボティックカートについて、これを実施し、製品企画書の例（付属書 B.2）を作成した。なお、この段階では、事業で開発した設計コンセプト自己チェックシート（本報告書の 3.1 節）による確認が有効である。

9.4. 安全ライフサイクル「危害と危険の分析」- リスクアセスメントレポートの例

製品のコンセプトにしたがって、リスクアセスメントを実施して、その結果をリスクアセスメントレポートとして文書化する必要がある。

(1) 危険源分析書の例（付属書 B. 3. 1）

製品の危険源を抜け漏れなく同定するために、危険源分析を行った。製品企画書と機械安全規格 JIS B 9700 の「危険状態になり得るタスクのリスト」を付き合わせてディペンダブルロボティックカートのライフサイクルの各フェーズにおける人のタスクのリストを分析した。次に JIS B 9700 と生活支援ロボット安全規格 ISO13482 それぞれの危険源チェックリストを利用して DRC の原始的な危険源を網羅的に同定し、タスクと危険源を付き合わせてライフサイクルフェーズごとの危険源リスト（付属書 B. 3. 1）を作成した。

(2) リスクアセスメント書（付属書 B. 3. 2）

ディペンダブルロボットカート製品企画書およびディペンダブルロボティックカート危険源分析書をインプットとして、リスクアセスメントを行ない、その結果を記録した。具体的には危険源全てについてリスクを見積り、必要なリスク低減方策を決定し、リスクが許容水準以下にあるかどうかの評価をした記録である。例として、ライフサイクルフェーズのうち「使用」フェーズを抜粋して分析した結果を、付属書 B. 3. 2 にとしてまとめた。なお、この段階では、本事業で開発したリスクアセスメントシートの雛形（本報告書の 3. 2 節）が活用可能である。

9.5 安全ライフサイクル「全体の安全配置」「E/E/PE 系安全要求仕様」

ディペンダブルロボットカートについて、安全要求の配置を、例えば、「どの入力部分にどんな機能を割り当てるか」について決定した。また、コントローラ、センサやソフトウェアなど E/E/PE 安全関連系についても、システムの安全機能や安全要求を規定した。付属書には、文書例は掲載しないが、本事業で開発した機能安全設計支援ツール（本報告書の 3. 3 節）および機能安全文書テンプレート（本報告書の 4. 5. 5 節および付属書 D）が活用可能である。

9.6 安全ライフサイクル「全体の安全妥当性確認計画」-妥当性確認計画書の例（付属書 B. 4～B. 9）

安全要求仕様書への適合を確認するための妥当性確認では、その実施に先立って、いつどのような試験や評価を行うかなどを具体的に記載した妥当性確認計画を策定する必要がある。ISO13482 では、文書による確認など複数の確認手段を示しているが、その中から、試験を実施する項目について、本事業で開発した安全検証試験方法（本報告書の第 4 章）を参考に、以下の文書の例を作成した。

- a) 妥当性確認計画書の例 推進力の低減（付属書 B. 4）
- b) 妥当性確認計画書の例 障害物接触センサ（付属書 B. 5）
- c) 妥当性確認計画書の例 光学センサ（付属書 B. 6）
- d) 妥当性確認計画書の例 障害物回避（付属書 B. 7）
- e) 妥当性確認計画書の例 安全機能の電磁妨害耐性（付属書 B. 8）

9.8 安全ライフサイクル「全体の安全妥当性確認」-安全妥当性確認報告書の例（付属書 B. 9）

前節で作成した計画書にしたがって実際にディペンダブルロボティックカートの試験を実施して、その結果を、安全妥当性確認報告書の例として文書化した（付属書 B. 9）。

10. 研究開発成果の発信実績

研究発表、講演（2010年度）

発表年月日	発表先	発表タイトル	発表者
2010.9.22	日本ロボット学会学術講演会	NEDO 生活支援ロボット実用化プロジェクト	比留川博久(産業技術総合研究所), 宮川豊美(NEDO)
2010.9.22	日本ロボット学会学術講演会	生活支援ロボットの安全性に関する国際標準化活動	尾暮拓也(産業技術総合研究所), 山田陽滋(名古屋大学)
2010.9.22	日本ロボット学会学術講演会	生活支援ロボットの安全設計コンセプト検証の試み	池田博康(労働安全衛生総合研究所), 丹羽邦幸(日本認証), 清水雄一郎(日本品質保証機構)
2010.9.22	日本ロボット学会学術講演会	生活支援ロボットの機能安全対応について	水口大知(産業技術総合研究所)
2010.9.22	日本ロボット学会学術講演会	生活支援ロボットの安全性検証試験方法の開発	藤川達夫(日本自動車研究所), 松本治(産業技術総合研究所), 山田陽滋(名古屋大学), 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2010.9.22	日本ロボット学会学術講演会	製品の適合性評価の概要	清水雄一郎, 浅田純男, 榎山哲郎, 神賀誠(日本品質保証機構)
2010.9.22	日本ロボット学会学術講演会	生活支援ロボット関連の法律と制度の調査	加藤雅弘, 間野隆久, 宮下朋子(製造科学技術センター), 松下俊夫(日本ロボット工業会)
2010.11.26	計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会	人間共存型ロボットにおける安全設計課題の論理解析	岡部康平, 池田博康(労働安全衛生総合研究所)

研究発表、講演（2011年度）

発表年月日	発表先	発表タイトル	発表者
2011.5.28	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011	下肢人間装着型ロボットの安全性評価試験方法に関する研究 第1報: 膝ジョイント連動並進機構を有するダミーの提案	伊藤浩治, 山田陽滋, 大西惟史, 小田士朗, 原 進, 岡本正吾(名古屋大学)
2011.7.7	日本機械学会安全工学シンポジウム 2011	FMEDA によるハードウェア機能安全の SIL 評価支援ソフトウェアの研究開発	丹羽邦幸(日本認証), 山田陽滋(名古屋大学)

2011.7.7	日本機械学会安全工学シンポジウム 2011	生活支援ロボットの開発におけるマネジメントシステムの構築と第三者評価の意義と有効性	清水雄一郎, 浅田純男, 榎山哲郎, 神賀誠(日本品質保証機構)
2011.7.7	日本機械学会安全工学シンポジウム 2011	リスクアセスメントに基づく生活支援ロボットの安全設計に関する考察	岡部康平, 池田博康, 齋藤剛, 村上真之(労働安全衛生総合研究所)
2011.7.15	標準化と品質管理 2011年8月号	サービスロボットの安全設計の基本的考え方と手順	池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2011.7.15	標準化と品質管理 2011年8月号	サービスロボットの国際安全規格 ISO 13482「パーソナルケアロボット」概要紹介	山田陽滋(名古屋大学)
2011.9.8	第29回 日本ロボット学会学術講演会	生活支援ロボットのリスクアセスメント雛形シートの作成	池田博康, 岡部康平, 齋藤剛, 村上真之, 芳司俊郎(労働安全衛生総合研究所)
2011.9.8	第29回 日本ロボット学会学術講演会	安全機能ハードウェアの SIL 評価支援ソフトウェア	丹羽邦幸(日本認証), 山田陽滋(名古屋大学)
2011.9.8	第29回 日本ロボット学会学術講演会	生活支援ロボットの安全性試験方法の開発	藤川達夫, 小口誠(日本自動車研究所), 大場光太郎, 松本治, 加藤晋(産業技術総合研究所), 池田博康, 村上真之(労働安全衛生総合研究所)
2011.9.8	第29回 日本ロボット学会学術講演会	装着型ロボットの安全性評価試験方法の開発	山田陽滋(名古屋大学), 本間敬子(産業技術総合研究所), 秋山靖博, 岡本正吾, 原進(名古屋大学)
2011.9.8	第29回 日本ロボット学会学術講演会	生活支援ロボット関連の法律と制度の調査	加藤雅弘, 間野隆久, 宮下朋子(製造科学技術センター), 濱田彰一, 松下俊夫, 三浦敏道(日本ロボット工業会)
2011.9.12	電子情報通信学会 環境電磁工学研究会	移動ロボットのイミュニティ評価用試験治具の作製	村上真之, 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2011.9.16	SICE Annual Conference 2011	A basis of safety design for cooperative human-machine system	岡部康平, 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2011.11.10	2011 国際ロボット展「生活支援ロボット実用化プロジェクト～プロジェクト活動説明会～」	ロボットの安全とリスクアセスメント	池田博康(労働安全衛生総合研究所)

2011.11.10	2011 国際ロボット展 「生活支援ロボット実 用化プロジェクト～プ ロジェクト活動説明会 ～」	ロボットの安全に関す る海外と日本の視点	加藤雅弘(製造科学技術センタ ー)
2011.11.10	2011 国際ロボット展 「生活支援ロボット実 用化プロジェクト～プ ロジェクト活動説明会 ～」	安全検証試験の紹介	藤川達夫(日本自動車研究所)
2011.11.15	日本ロボット学会誌, Vol.29 No.09, pp.12-13	ロボットの障害物検知 技術と安全コンポーネ ント	加藤晋 (産業技術総合研究所)
2012.3.15	自動計測制御学会 第 39 回知能システムシ ンポジウム「コミュニ ケーション場のメカニ ズムデザイン」	サービスロボットの安 全設計を支援するデー タベースのシステム開 発	岡部康平(労働安全衛生総合研 究所), 松下 俊夫, 濱田 彰 一(日本ロボット工業会)
2012.3.15	第 17 回ロボティクス シンポジア	装着型ロボットの接触 安全性評価試験方法の 研究-膝関節部の不整 合についての下肢ダミ ーによる検討-	秋山靖博(名古屋大学), 山田陽 滋(名古屋大学), 伊藤浩治 (豊 田自動織機), 小田志朗 (トヨ タ自動車), 岡本正吾(名古屋大 学), 原 進(名古屋大学)

研究発表, 講演 (2012 年度)

発表年月日	発表先	発表タイトル	発表者
2012.5.27	ロボティクス・メカト ロニクス講演会 2012	下肢人間装着型ロボ ットの安全性評価試験 方法に関する研究” - 第 2 報: 人体形状の再 現を目的としたダミー 皮膚の提案-	石黒健次(名古屋大学), 秋山靖 博(名古屋大学), 山田陽滋(名 古屋大学), 原進(名古屋大学), 岡 本正吾(名古屋大学), 大西惟史 (名古屋大学), 伊藤浩治(名古屋 大学)
2012.7.6	安全工学シンポジウム 2012	サービスロボットのため の機能安全規格に基 づく安全コンセプト検 証用ツールの作成	池田博康(労働安全衛生総合研 究所), 丹羽邦幸(日本認証), 清 水雄一郎(日本品質保証機構)
2012.9.9	21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)	A Test Method for Contact Safety Assessment of the Wearable Robot -An Analysis of Load Caused by the Misalignment of the Knee Joint-	Yasuhiro Akiyama, Yoji Yamada(Nagoya Univ.), Koji Ito(Toyota Industries), Shiro Oda(Toyota Motor), Shogo Okamoto, Susumu Hara(Nagoya Univ.)
2012.9.19	日本ロボット学会第 30 回学術講演会	生活支援ロボット関連 の法律と制度の調査	加藤雅弘(製造科学技術センタ ー)
2012.9.19	日本ロボット学会第 30 回学術講演会	生活支援ロボットのリス クアセスメントにお ける保護方策実施後の リスク再見積に関する 考察	齋藤剛, 池田博康, 岡部康平(労 働安全衛生総合研究所)

2012.9.19	日本ロボット学会第30回学術講演会	SIL2,3の要求事項に対応したPROH-SILソフトウェアの事例	丹羽邦幸(日本認証), 山田陽滋(名古屋大学), 橋本慎也(エスクリエイト)
2012.9.19	日本ロボット学会第30回学術講演会	生活支援ロボット安全情報センター(RTSIC)の開発	松下俊夫(日本ロボット工業会), 岡部康平(労働安全衛生総合研究所), 濱田彰一(日本ロボット工業会)
2012.9.19	日本ロボット学会第30回学術講演会	移動ロボットの障害物検知・対応能力試験のための接近再現装置と走行状態模擬装置の開発	加藤晋, 竹内厚司, 児玉将人, 橋本尚久(産業技術総合研究所)
2012.9.19	日本ロボット学会第30回学術講演会	生活支援ロボットのセンサのための人工太陽灯による光干渉試験	角保志, 堀内英一, 松本治, 大場光太郎(産業技術総合研究所)
2012.9.19	日本ロボット学会第30回学術講演会	生活支援ロボットの走行安定性試験方法	小口誠, 神保浩之, 小林隆, 藤川達夫(日本自動車研究所)
2012.9.20	日本ロボット学会第30回学術講演会	搭乗型ロボット走行安定性基準策定のための重心移動制御装置の開発	松本治(産業技術総合研究所)
2012.9.20	日本ロボット学会第30回学術講演会	生活支援ロボットの温湿度・振動複合試験方法の提案	池田博康, 芳司俊郎(労働安全衛生総合研究所)
2012.9.20	日本ロボット学会第30回学術講演会	走行耐久性試験装置におけるロボットの位置および速度制御	岩田拓也, 松本治(産業技術総合研究所)
2012.10.11	The 7th International Conference on the Safety of Industrial Automated Systems (SIAS 2012)	Development of a Self-Check Sheet for Safety Design of Human-Collaborative Robots	Hiroyasu Ikeda (JNIOOSH), Kuniyuki Niwa (JC), Yuichiro Shimizu (JQA)
2012.10.11	The 7th International Conference on the Safety of Industrial Automated Systems (SIAS 2012)	Study on Law and Social Systems for the Safety of Social-care Robots	Masahiro Kato (MSTC)
2012.10.11	The 7th International Conference on the Safety of Industrial Automated Systems (SIAS 2012)	Empirical Approach to Assessing Foot Injury Level Resulting from being Run Over by a Mobile Robot	Masami Kubota, Tatsuo Fujikawa (JARI)
2012.10.12	The 7th International Conference on the Safety of Industrial Automated Systems (SIAS 2012)	Evaluation of Injury Level and Probability for Risk Assessment of Mobile Robots	Tatsuo Fujikawa, Masami Kubota (JARI), Yoji Yamada (Nagoya Univ.), Hiroyasu Ikeda (JNIOOSH)
2012.10.19	Japan Robot Week 2012 つくば国際戦略総合特区フォーラム	生活支援ロボット安全検証センターの紹介	小口誠(日本自動車研究所)
2012.11.2	生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会(LIFE2012)	装着型ロボットの接触安全性評価試験にむけた下肢ダミーの開発	秋山靖博, 伊藤安海, 山田陽滋(名古屋大学), 伊藤浩治(豊田自動織機), 小田史朗(トヨタ自動車), 岡本正吾, 原進(名古屋大学)

2012.11.4	生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 (LIFE2012)	生活支援モビリティの衝突時安全性の評価例	藤川達夫, 久保田正美(日本自動車研究所), 山田陽滋(名古屋大学), 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2012.11.4	生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 (LIFE2012)	生活支援モビリティロボットの走行安定性試験方法	小口誠, 神保浩之, 小林隆, 藤川達夫(日本自動車研究所)
2012.11.4	生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 (LIFE2012)	生活支援モビリティの走行耐久性試験装置の開発	岩田拓也, 松本治(産業技術総合研究所)
2012.11.4	生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 (LIFE2012)	生活支援ロボットの複合環境振動試験による安全性評価方法	池田博康, 芳司俊郎(労働安全衛生総合研究所)
2012.11.12	日本ロボット学会第74回ロボット工学セミナー 安全規格と開発プロセス	パーソナルケアロボットのための安全規格 ISO 13482 の動向	藤川達夫(日本自動車研究所)
2012.12.14	電子情報通信学会 環境電磁工学研究会 (EMCJ)	生活支援ロボットにおける帯電フレームモデルの ESD イミュニティ試験法の検討 ～電動車いすの製品規格で規定された試験法に関する考察～	村上真之(東京都立産業技術研究センター), 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2013.1.11	電子情報通信学会 環境電磁工学研究会 (EMCJ)	生活支援ロボットにおける帯電フレームモデルの ESD イミュニティ試験法の検討 ～ロボット支持台に関する要件～	村上真之(東京都立産業技術研究センター), 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2013.1.11	電子情報通信学会 環境電磁工学研究会 (EMCJ)	機能安全を導入した生活支援ロボットのための放射 RF 電磁界イミュニティ試験システムの開発	村上真之(東京都立産業技術研究センター), 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2013.1.22	第44回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム	モーションキャプチャを用いた人体部位の3次元動作解析のための皮膚揺動誤差評価	石黒健次, 山田陽滋, 秋山靖博, 原進, 岡本正吾(名古屋大学)
2013.3	ロボット工業会誌, No. 211	サービスロボットの国際安全規格 (ISO13482 パーソナルケアロボット) 紹介	山田陽滋(名古屋大)
2013.3	ロボット工業会誌, No. 211	リスクアセスメントに基づくロボットの安全設計手順	池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2013.3	ロボット工業会誌, No. 211	生活支援ロボットの安全性検証	藤川達夫(日本自動車研究所)
2013.3.8	電子情報通信学会 環境電磁工学研究会 (EMCJ)	生活支援ロボットにおける帯電フレームモデルの ESD イミュニティ試験法の検討 ～ロボット使用者からの放電の模擬～	村上真之(東京都立産業技術研究センター), 池田博康(労働安全衛生総合研究所)

2013.3.12	日本機械学会生産システム部門研究発表講演会 2013	無線式近接警報装置の性能評価	風間智, 岡部康平, 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2013.3.14	第 18 回ロボティクスシンポジウム	装着型ロボットの接触安全性評価試験方法の研究 - 下肢ダミーを用いたロボット装着者への負担の再現方法に関する検討 -	秋山 靖博, 山田 陽滋(名古屋大学), 伊藤 浩治(豊田自動織機), 小田 志朗(トヨタ自動車), 岡本 正吾(名古屋大学)

研究発表, 講演 (2013 年度)

発表年月日	発表先	発表タイトル	発表者
2013.5.23	ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013	生活支援ロボット関連の法律と制度の調査	加藤雅弘 (製造科学技術センター)
2013.5.23	ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013	生活支援ロボットに関する安全情報データベース	岡部康平(労働安全衛生総合研究所), 松下俊夫(日本ロボット工業会), 濱田彰一(日本ロボット工業会)
2013.5.23	ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013	ロボットの車輪の轢過による中足骨損傷に関する検討	久保田正美, 藤川達夫(日本自動車研究所), 西本哲也(日本大学)
2013.5.23	ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013	マニピュレータの挟圧安全性とその試験方法について	齋藤剛, 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2013.5.23	ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013	装着型ロボットの接触安全性試験方法	秋山靖博(名古屋大), 山田陽滋(名古屋大), 伊藤浩治(豊田自動織機), 小田志朗(トヨタ自動車), 岡本 正吾(名古屋大)
2013.5.24	ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013	装着型ロボットが装着者の転倒現象に与える影響に関する検討	秋山靖博(名古屋大), 山田陽滋(名古屋大)
2013.7.3	平成 25 年度国際標準推進戦略シンポジウム	安全認証のプロセス	浅田純男 (日本品質保証機構)
2013.8.22	生活支援ロボット安全技術研究会 (第 3 回)	生活支援ロボット関連の法律と制度	加藤雅弘 (製造科学技術センター)
2013.9.4	日本ロボット学会第 31 回学術講演会	生活支援ロボット関連の法律と制度の調査	加藤雅弘 (製造科学技術センター)
2013.9.4	第 31 回 日本ロボット学会学術講演会	装着型ロボットのための創傷リスクに対する安全性評価試験方法の開発	山田 陽滋(名古屋大), 吉田 剣吾(名古屋大), 石黒 健次(名古屋大), 秋山 靖博(名古屋大), 原 進(名古屋大), 岡本 正吾(名古屋大学)
2013.9.4	第 31 回 日本ロボット学会学術講演会	生活支援ロボットの騒音試験方法の提案	池田博康(労働安全衛生総合研究所)
2013.9.4	第 31 回 日本ロボット学会学術講演会	屋外環境シミュレータによる ビジョン安全センサの性能評価	角保志, 金奉根, 松本吉央(産業技術総合研究所)
2013.7.30	生活支援ロボット実用化促進セミナー	生活支援ロボットの安全規格と試験方法について	藤川達夫(日本自動車研究所)
2013.9	電磁環境工学情報, Vol. 26, No. 5	生活支援ロボットの安全とイミュニティ評価	村上真之, 池田博康(労働安全衛生総合研究所)

2013.9.13	電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 113, No. 218	コヒーレンスを用いた無線通信に影響を与える雑音源の特定	風間 智, 池田博康(労働安全衛生総合研究所)
3013.11.3	IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2013) RAS-IARP Joint Workshop	Outdoor Environment Simulators for Evaluating Safety Sensors of Personal Care Robots — Artificial Sunlight Lampheads and Simulated-Snow Chamber —	Yasushi Sumi, Bong Keun Kim, Yoshio Matsumoto, Eiichi Horiuchi, Osamu Matsumoto, Kohtaro Ohba (AIST)
3013.11.3	IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2013) RAS-IARP Joint Workshop	Outdoor Environment Simulators for Evaluating Safety Sensors of Personal Care Robots — Artificial Sunlight Lampheads and Simulated-Snow Chamber —	Yasushi Sumi, Bong Keun Kim, Yoshio Matsumoto, Eiichi Horiuchi, Osamu Matsumoto, Kohtaro Ohba (AIST)
3013.11.3	IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2013) RAS-IARP Joint Workshopp	Study on Laws and Systems for Life-supporting Robots	Masahiro Kato (MSTC)
3013.11.5	IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2013)	Estimating Child Collision Injury Based on Automotive Accident Data for Risk Assessment of Mobile Robots	Tatsuo Fujikawa, Masami Kubota (JARI), Yoji Yamada (Nagoya Univ.), Hiroyasu Ikeda (JNIO SH)
2013.11.7	国際ロボット展 NEDO フォーラム	日本から始まるサービスロボットの普及と安全認証ビジネス	菅原淳 (NEDO) 藤川達夫 (日本自動車研究所), 浅田純男, 清水雄一郎 (日本品質保証機構)
2013.11.7	2013 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (IRSO2013)	Outdoor Environment Simulators for Vision-Based Safety Sensors - Artificial Sunlight Lampheads and Simulated-Snow Chamber	Yasushi Sumi, Bong Keun Kim, Yoshio Matsumoto, Eiichi Horiuchi, Osamu Matsumoto, Kohtaro Ohba (AIST)
2013.12.	日本赤外線学会誌, 第23巻第2号	生活支援ロボットのための赤外線ビジョン安全センサの性能評価について	角保志, 金奉根, 松本吉央(産業技術総合研究所)
2014.2.19	ロボットと法—ロボットと共生する社会に向けて—中央大学イタリア大使館共催シンポジウム	生活支援ロボット関連の法律と制度の調査	加藤雅弘 (製造科学技術センター)

展示会等

出展年月日	出展先	内容
2011.11.9～12	2011 国際ロボット展	NEDO 展示ブースにて生活支援ロボット安全検証センターを紹介
2012.10.17～19	Japan Robot Week 2012	つくば国際戦略総合特区展示ブースにて、生活支援ロボット安全検証センターを紹介
2013.11.6～9	2013 国際ロボット展	NEDO 展示ブースにて生活支援ロボット安全検証センターを紹介
2013.11.8	IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS2013)	IROS2013 のテクニカルツアーを生活支援ロボット安全検証センターに招待

報道

年月日	媒体	内容
2010.12.27	時事ドットコム	生活支援ロボの安全確保＝検証センターがオープン
2010.12.27	NHK ニュース	生活支援ロボットの実験施設
2010.12.28	朝日新聞	介護・家事支援ロボの安全性試験 茨城に検証センター
2010.12.28	毎日新聞	家庭用ロボット：安全の「お墨付き」 検証センターが開所
2010.12.28	東京新聞	生活支援ロボ 安全性を認証
2011.1.4	ロボナブル（日刊工業新聞）	特集 生活支援ロボット安全検証センター始動！ 設立の背景と課題を探る
2011.2.11	ワールドビジネスサテライト（テレビ東京）	新ロボット大国へ 「サービスロボットが拓く」
2011.4.21	日本経済新聞 夕刊	「介護ロボット、実用化へ動き出す」の中で生活支援ロボット安全検証センターの一部が紹介された
2011.4.	日本経済新聞	「ロボットが拓く～柵を超えて～」の中で生活支援ロボット安全検証センターの一部が紹介された
2012.1.30	NHK ワールド NEWSLINE	「HIGH-TECH HELPERS」にて生活支援ロボット安全検証センターの一部が紹介された
2013.2.27	NHK 首都圏ニュース, 日本経済新聞ほか	日本品質保証機構が CYBERDYNE 株式会社の「ロボットスーツ HAL 福祉用」に対して ISO/DIS 13482 に基づく認証を発行したことを紹介

特許等

出願年月日	出願番号	名称	出願者
2011.7.1	特願 2011-147706	安全度水準評価支援装置	日本認証, 山田陽滋

2.2 研究開発項目② 安全技術を導入した移乗・移動支援ロボットシステムの開発 パナソニック(株)、国立障害者リハビリテーションセンター

目次

1.	はじめに	2
1.1.	研究開発の背景と目的	2
1.2.	事業概要	3
1.3.	研究開発体制	4
2.	研究開発の成果と達成状況	5
2.1.	研究開発の成果（要約）	5
2.1.1.	和文要約	5
2.1.2.	英文要約	6
2.2.	本文	7
2.2.1.	リスクアセスメントに関する研究開発（パナソニック株式会社）	7
2.2.2.	操作 I F / 操縦支援技術、動的動作経路生成技術の研究開発（パナソニック株式会社）	8
2.2.3.	安全変形 / 動作技術の研究開発（パナソニック株式会社）	9
2.2.4.	ロボットシステム自己診断技術の研究開発（パナソニック株式会社）	10
2.2.5.	機能 / システムユーザビリティの研究開発（国立障害者リハビリテーションセンター / パナソニック株式会社）	13
2.2.6.	安全環境センシング技術の研究開発（パナソニック株式会社）	16
2.3.	目的に照らした達成状況	18

1. はじめに

1.1. 研究開発の背景と目的

少子高齢化の急速な進展に伴い、医療や介護を必要とする高齢者が増加する一方、これらを担う若年者の比率が年々低下しており、労働力不足が懸念されている。介護の分野においては、こうした問題に加え、介護者自身の高齢化による老老介護の問題など、在宅介護／施設介護いずれにおいても、ますます介護の負担が増える傾向にあり、高齢者介護における大きな課題となっている。こうした背景のもと、弊社では、現在、高齢者や障害者の自立をサポートする移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）（図 1 (a)）、介護者が行う移乗介助をサポートする移乗・移動支援ロボットシステム（介助支援型）（図 1 (b)）の開発を進めている。

しかしながら一般家庭で使用される生活支援ロボットは、これまでの産業用ロボット、メカトロニクス機器とは異なり、不特定多数の人がロボットと直接接するなど同じ空間で活動を共に行うことを前提としているため、これまでとは異なる次元の安全性が求められ、より高いレベルの安全技術や新たな安全概念を必要とする。従って、これらの生活支援ロボットをはじめとする次世代のロボット産業を創出するためには、新たな安全技術と共に安全基準や安全関連の法律等の整備を進めることが急務となる。

そこで、本事業において、開発中の移乗・移動支援ロボットシステムについて、安全性検証手法研究開発実施者と一体となって安全技術開発および安全規格整備を推進することにより、早期実用化を実現することを目指す。



(a) 自立支援型

(b) 介助支援型

図 1：移乗・移動支援ロボットシステム

1.2. 事業概要

現在実用化を目指して開発している移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型、介助支援型）を対象として、実用化に必要な安全技術開発および安全規格整備を推進する。具体的には、総合的に安全な上記ロボットシステムを実現するために必要な次の項目を安全技術開発課題として設定する。

- 1) リスクアセスメントに関する研究開発
- 2) 操縦 I F / 操縦支援技術、動的動作経路生成技術の研究開発
- 3) 安全変形 / 動作技術の研究開発
- 4) ロボットシステム自己診断技術の研究開発
- 5) 機能 / システムユーザビリティの研究開発
- 6) 安全環境センシング技術の研究開発

各安全技術の位置づけ / 役割を図 2 に示す。安全に関する要因を外部（環境）要因、搭乗者（利用者）要因、内部（ロボット）要因に大別し、以下に説明する各安全技術の対応領域を明確化するとともに、各安全技術により全領域を漏れなくカバーできる位置づけとしている。

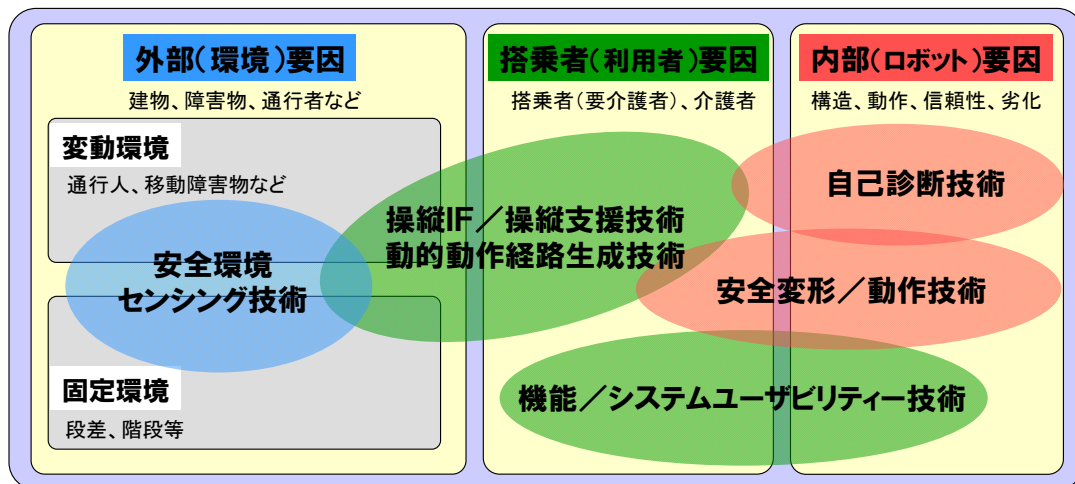


図 2 : 各安全技術の位置づけ / 役割

1.3. 研究開発体制

本事業は、図3に示す研究開発体制にて実施する。

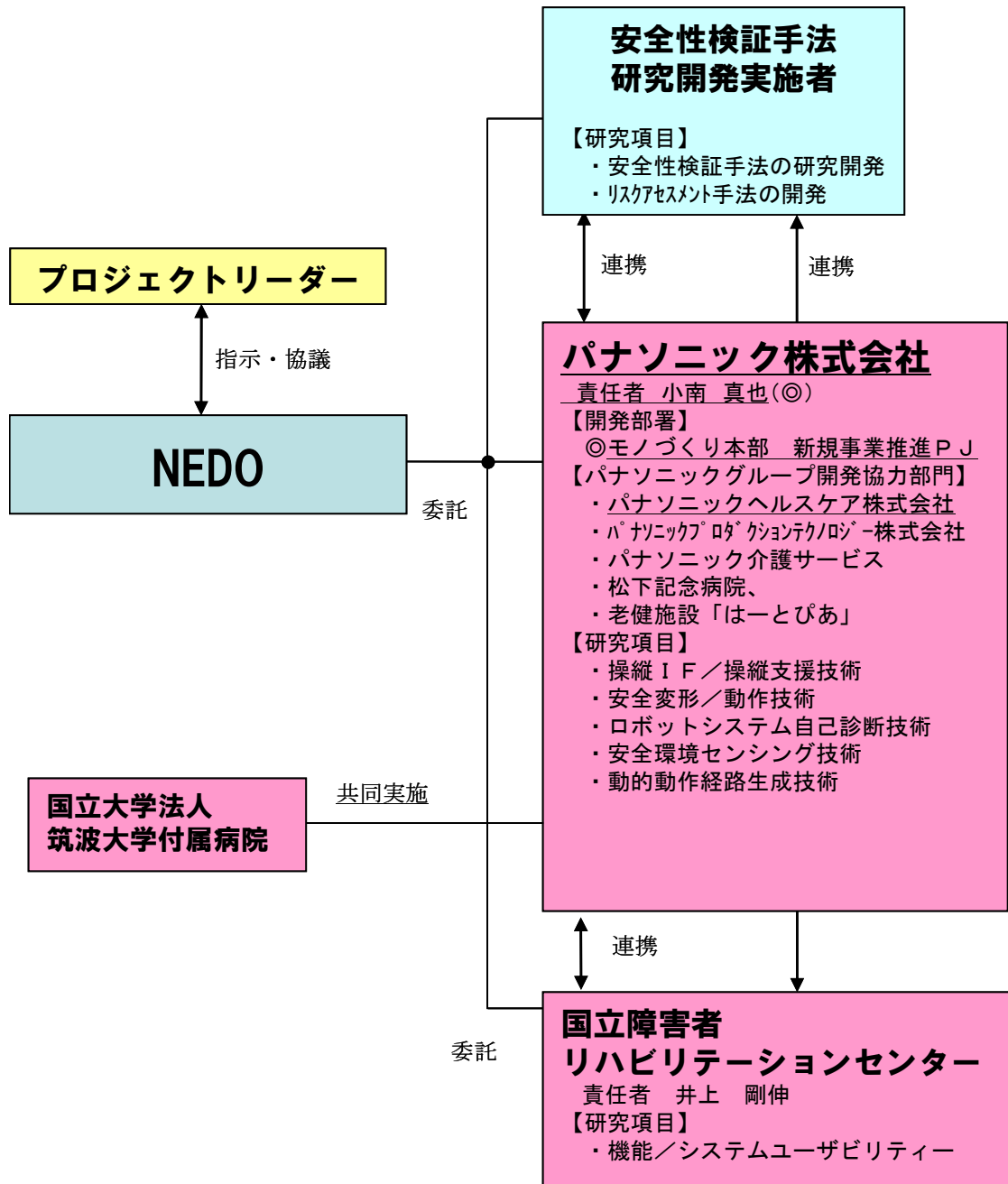


図3：研究開発体制

2. 研究開発の成果と達成状況

2.1. 研究開発の成果（要約）

2.1.1. 和文要約

電動ケアベッドと電動車いすを融合した移乗・移動支援ロボットシステムを対象として、実用化に必要な安全技術開発及び安全規格整備を推進した。安全技術開発に関しては、設定した安全技術開発項目の当初予定をすべて達成し、その取組み成果をベースに、介助支援型の移乗・移動支援ロボットシステムで、世界初の生活支援ロボット国際安全規格 ISO13482 の認証を取得した。安全規格整備に関しては、生活支援ロボット安全検証センターへのロボットシステムの貸し出し、試験実施協力等により、「移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボット」類型の安全基準策定及び試験ノウハウ構築に貢献した。以下に、安全技術開発に関する具体的な取組み成果を報告する。

1) リスクアセスメントに関する研究開発：

電動ケアベッドと電動車いすのリスクアセスメントをベースにリスクアセスメント（①機械類の制限の決定、②危険源の同定、③リスク見積り、④リスク評価）を行った。リスク評価の結果、リスク低減が必要な危険源に対しては、3ステップメソッドによるリスク低減方策（①本質的安全設計方策、②安全防护及び付加保護方策、③使用上の情報）を実施し、許容可能なレベルまでリスク低減を行った。

2) 操縦 I F / 操縦支援技術の研究開発：

誤操作を防止するわかりやすい操作インターフェースやユーザの操作を支援する操縦支援技術を開発した。

3) 安全変形 / 動作技術の研究開発：

柔軟導電体とメッシュ状の絶縁体からなる形状柔軟性を備えた挟み込みセンサを開発した。性能評価を実施した結果、人体等の柔軟体に対して高感度の特性を有し、指等の挟み込み検知や人体との接触検知に有効性が高いことが確認できた。

4) ロボットシステム自己診断技術の研究開発：

機能安全規格に基づき、安全操作を実現するホールドツーラン機能（安全関連制御システム）を開発した。V字モデル開発プロセスに基づくハードウェア及びソフトウェアの設計・検証・妥当性確認、FMEDAに基づく安全性能レベル評価により、ホールドツーラン機能が安全要求仕様を満たしていることを確認した。

5) 機能 / システムユーザビリティの研究開発：

ロボットシステムを用いて、想定ユーザに対する模擬環境実用性評価を行った。各評価結果から抽出された要改良点をロボットシステム改良仕様に反映し、実用性向上を図った。

6) 安全環境センシング技術の研究開発：

ロボット移動時にロボットの死角等から現れる人や障害物を事前に検知することで、ロボット単体では困難な出会い頭衝突等の防止を支援するシステムを開発した。

2.1.2. 英文要約

We have promoted the Research and development of safety technologies required for the practical use and the establishment of safety standards, targeting transfer/movement assist robotic systems integrating an electric care bed and an electric wheelchair. We have achieved all targets set for the safety technology development. Based on these achievements, our care support type robotic system became the world's first equipment certified according to ISO 13482, an international safety standard for personal care robots. As for the initiatives for establishing safety standards, we have contributed to the establishment of safety standards and test methods for manually operated mobile servant robots by cooperating with the Robot Safety Center, including lending of our robot system and providing assistance with test implementation. The following descriptions report on the specific achievements of our safety technology development.

1) **Risk assessment:**

We conducted a risk assessment based on the risk assessment for electric care beds and electric wheelchairs. We followed the three-step method for the hazards to be reduced.

2) **Control IF, control assist technologies:**

We developed an error-proofing user-friendly control interface and some control assist technologies.

3) **Safe transformation/motion technologies:**

We developed a flexible anti-pinch sensor comprising a flexible conductor and a mesh insulator, and evaluated its performance. The evaluation results showed that the sensor has high sensitivity to flexible objects, such as the human body, and is highly effective in detecting the possible pinching of fingers and other body parts and contact with the human body.

4) **Robot system self-diagnosis technologies:**

We developed a hold-to-run function (safety-related control system) that ensures the safe operation of the robotic systems based on the functional safety standards. We confirmed that the function meets all safety requirements by designing, verifying, and validating hardware and software based on the V-model development process, and evaluating the safety performance level based on FMEDA.

5) **Function/system usability:**

We conducted simulated environmental practicality evaluations with target users using transfer/movement assist robotic systems. We identified the points to be improved from each evaluation result, and incorporated them into the robotic system improvement specifications to enhance the product's practicality.

6) **Safety environment sensing technologies:**

We have developed a system to detect people and obstacles in the blind spots of moving robots in advance in order to prevent collisions at intersections, which cannot be avoided by robots alone.

2.2. 本文

以下、各安全技術開発に関する具体的な取組み成果を報告する。

2.2.1. リスクアセスメントに関する研究開発（パナソニック株式会社）

(1) リスクアセスメント及びリスク低減方策

GAMAB 原則（既存の類似製品と比較して「全体として少なくとも同様（Globalement Au Moin Aussi Bon）」のレベルまでリスクを下げる）（木村哲也：“サービスロボットのリスクアセスメントとその課題”，日本ロボット学会誌，vol.25, No.8, pp.1151-1154, 2007.）の考え方を参考に、電動ケアベッドと電動車いすのリスクアセスメントをベースに、リスクアセスメント（①機械類の制限の決定、②ハザードの同定、③リスク見積り、④リスク評価）を行った。自立支援型のリスクアセスメントの一例を図4に示す。

本ロボットシステムは、電動ケアベッドと電動車いすを融合したロボットシステムである。そこで、電動ケアベッド機能と電動車いす機能に関しては、既存商品のヒヤリハット事例や事故事例を参考にして、ハザードの同定を行った。また、その他の本ロボットシステム特有機能（例：合体・分離機能）に関しては、参考にできる事例がないため、想定される使用シナリオとハザードチェックリスト（ISO12100 等）を用いて、ハザードの同定を行った。

リスク評価の結果、リスク低減が必要な危険源に対しては、3ステップメソッドによるリスク低減方策（①本質的安全設計方策、②安全防護及び付加保護方策、③使用上の情報）を実施し、許容可能なレベルまでリスク低減を行った。

(2) 安全性評価

生活支援ロボット安全検証センター及び社内外の安全試験施設にてロボットシステムの安全性試験を実施し、それらの結果をリスクアセスメントにフィードバックすると共に、

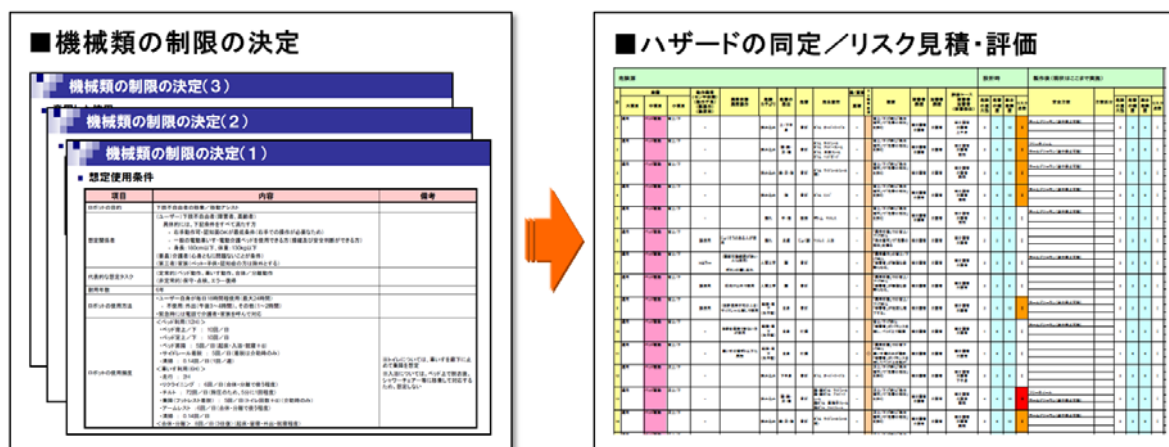
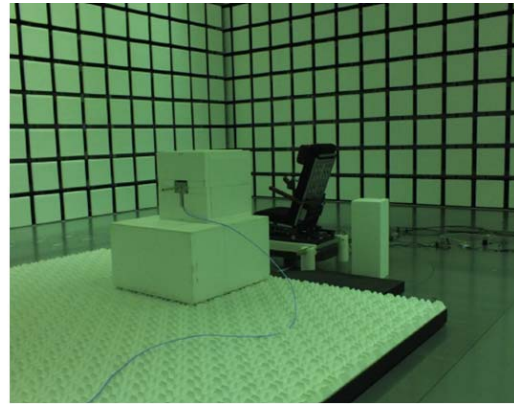


図4：移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）のリスクアセスメントの一例



(a) アームレスト荷重試験



(b) EMC 試験

図 5：移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）の安全性試験の様子

改良すべき項目に関しては、改良仕様に盛り込み、ロボットシステムの改良を行った。移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）の安全性試験の様子を図5に示す。

2.2.2. 操作 I F / 操縦支援技術、動的動作経路生成技術の研究開発 (パナソニック株式会社)

(1) 操作 I F の開発

誤操作を防止する分かりやすいインターフェースを備え、ユーザの好みに応じて9種類のジョイスティックハンドルを自由に選択可能な操作 I F（移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）向け）を開発した。開発においては、試作機開発⇒模擬環境評価⇒課題抽出⇒改良仕様策定⇒改良機開発を繰り返し、ターゲットユーザニーズに基づく改良を実施した。開発した操作 I F の外観を図6に示す。

(2) 操縦支援技術及び動的動作経路生成技術の開発

以下に示す障害物回避支援技術・操縦支援技術を開発／評価し、有効性を確認した。

- ① 操作した方向と実際に動作する方向の差異を小さくして、ユーザ操作の違和感や不安感を軽減する障害物回避制御技術
- ② 操作した方向に細長く伸び、操作力の大きさに比例した長さのサーチ領域を生成し、この領域に存在する障害物だけを回避すべき障害物と判断して回避動作を行うことにより、細い通路等も動作可能な障害物回避制御技術
- ③ 旋回動作時に回転中心を移動方向にずらし、曲がり角での旋回動作をしやすくすると共に、曲がり角と車いす内側との接触を回避する動作を行う旋回動作操縦支援技術

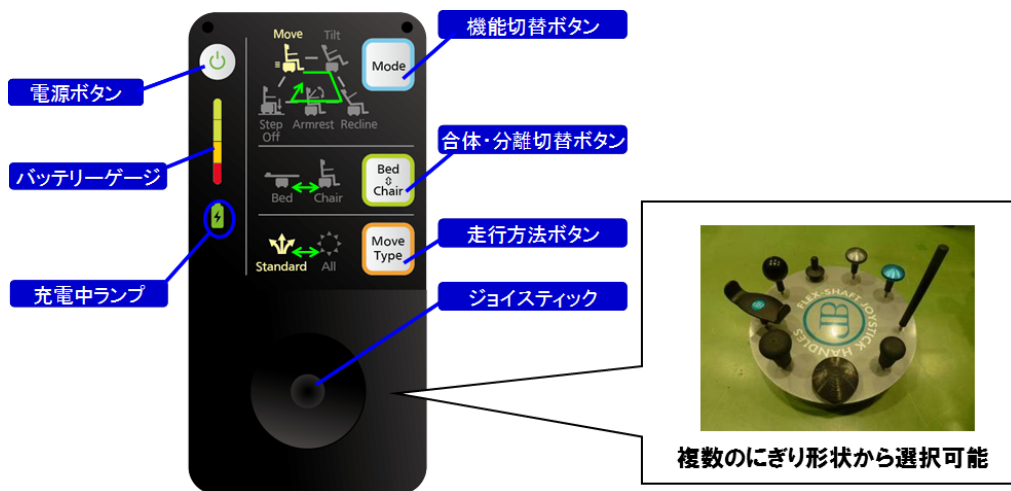


図 6：開発した操作 IF（移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）向け）

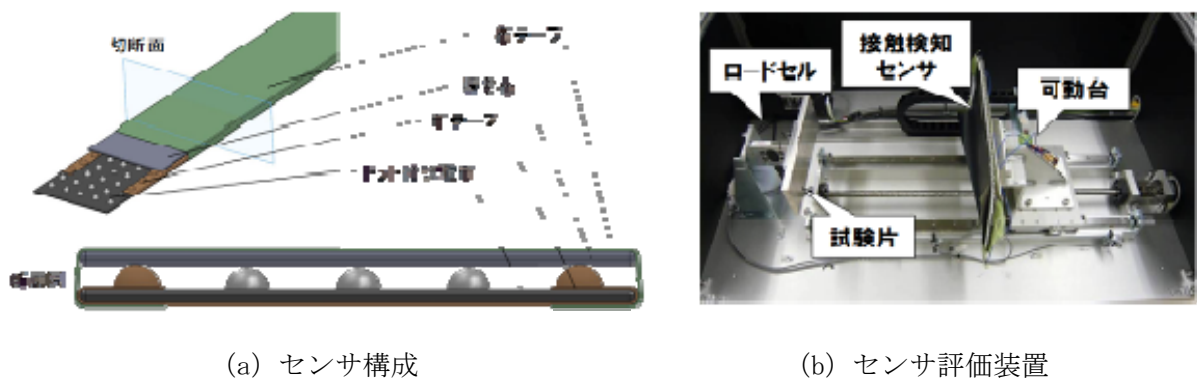


図 7：開発した接触検知センサ（移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）向け）

また、移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）のベッドー車いす間の合体・分離動作時に発生する可能性のある衝突・挟まれ等の危害発生確率を低減させるために、ユーザの操作意思（ホールドツーラン操作）に基づき合体・分離動作を安全に行うための合体・分離動作誘導制御技術を開発した。

2.2.3. 安全変形／動作技術の研究開発（パナソニック株式会社）

(1) 接触検知センサの開発／評価

柔軟導電体とメッシュ状の絶縁体からなる形状柔軟性を備えた接触検知センサを開発し

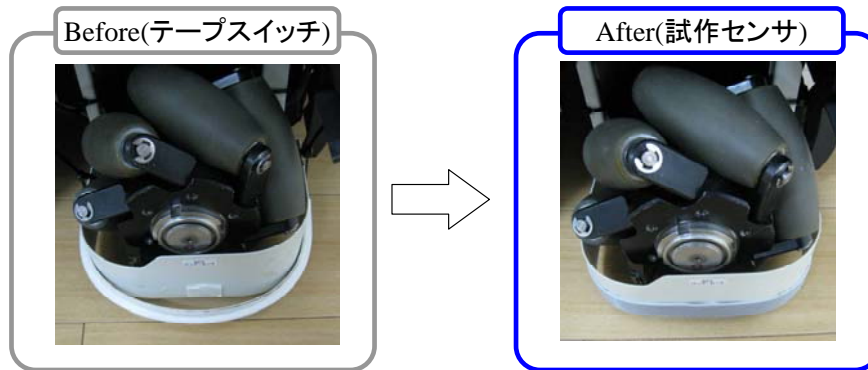


図 8：接触検知センサのロボットシステムへの搭載

た。開発したセンサは、導電布（導電耐を持たせた布）と、ドット付導電布から構成され、センサに対して外力が加わると、ドット付導電の導電部分と導電布とが接触し、導通することにより、接触を検知するものである。開発した接触検知センサの構成図を図 7 (a) に示す。

図 7 (b) に示す性能評価装置を用いて、試作したセンサの性能評価を実施した結果、人体等の柔軟体に対して高感度の特性を有し、指等の挟み込み検知や人体との接触検知に有効性が高いことが確認できた。

(2) 接触検知センサのロボットシステムへの搭載

試作した接触検知センサを、移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）の電動車いす部の車輪轆断防止用バンパーセンサとして搭載した。曲げ半径 40mm の車輪カバーに市販テープスイッチを貼り付けた場合、曲げ半径が仕様範囲外になってしまうが、試作したセンサは柔軟性が高いため、取付けでき、正常に機能することが確認できた（図 8）。

2.2.4. ロボットシステム自己診断技術の研究開発（パナソニック株式会社）

(1) 移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）の機能安全設計・評価

機能安全規格 ISO13849-1:2006 に基づき、移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）の安全操作を実現する合体・分離動作ホールドツーラン機能（安全関連制御システム）を開発した。基本機能として、操作入力があるときのみ、合体・分離動作を許可し、操作入力がないときは、合体・分離動作を禁止する機能を実装した。また、診断機能として、操作部・論理部・出力部における危険側故障を適切に自己診断する機能を実装した。

図 9 に示すように開発したホールドツーラン機能は、移乗・移動支援ロボットシステム

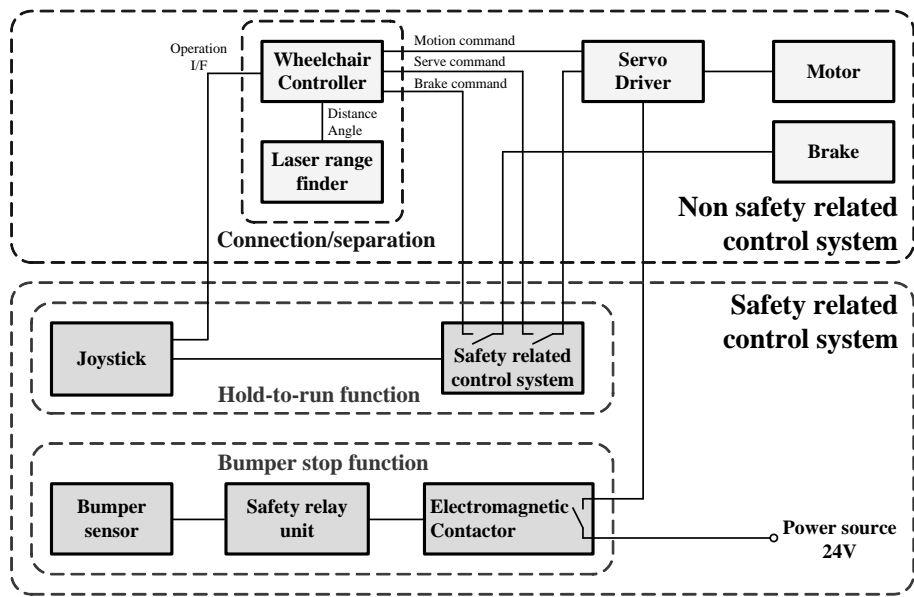


図 9：移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型／車いす部）の制御システム構成

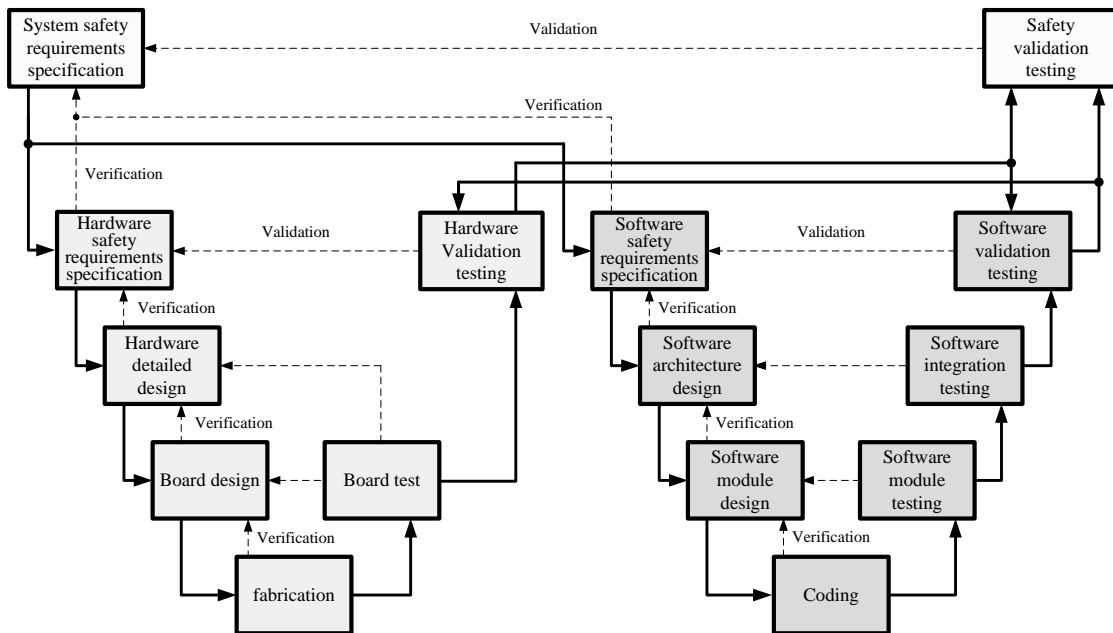


図 10：移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）のホールドツーラン機能に適用したハードウェア／ソフトウェア開発のV字モデル

最後に、ハードウェアの全コンポーネントに対するFMEDA (Failure Modes, Effects and Diagnostic Analysis) を行い、開発したホールドツーラン機能の安全性能レベルを評価した。その結果、ハードウェア及びソフトウェアとも、パフォーマンスレベルd ($10^{-7} \leq PFHd < 10^{-6}$ 、PFHd: 単位時間当たりの危険側故障発生の平均確率[1/h]) (IEC62061:2005のSIL2相当) の要求事項を満足することを確認した。

(2) 移乗・移動支援ロボットシステム (介助支援型) の機能安全設計・評価

機能安全規格 ISO 13849-1:2006 に基づき、移乗・移動支援ロボットシステム (介助支援型) の安全操作を実現する「ホールドツーラン機能 (押しボタンスイッチを押している間だけ動作を許可し、押しボタンスイッチを離すと確実に動作を停止させる安全機能)」と「減速機能 (挟み込みの可能性のある高さからベッド下降動作を減速させる安全機能)」の2つの安全機能 (安全関連制御システム) を開発した。

開発した2つの安全機能は、移乗・移動支援ロボットシステム (介助支援型) の非安全関連制御システムと一体の構成となっている。移乗・移動支援ロボットシステム (介助支援型) の制御システムブロックを図11に示す。

開発においては、安全要求仕様が抜け漏れなく実現できるように、図12に示すV字モデル開発プロセスに基づくソフトウェアの設計・検証・妥当性確認を行い、安全要求仕様を実現した。ハードウェアに関しては、医用電気規格 IEC60601-1:2005 に基づき開発されたものを使用し、検証・妥当性確認を行い、安全要求仕様の実現を確認した。

最後に、ハードウェアの全コンポーネントに対するFMEDAを行い、開発した2つの安全機能の安全性能レベルを評価した。その結果、ハードウェア及びソフトウェアとも、パフォーマンスレベルd ($10^{-7} \leq PFHd < 10^{-6}$ 、PFHd: 単位時間当たりの危険側故障発生の平均確率[1/h]) (IEC62061:2005のSIL2相当) の要求事項を満足することを確認した。

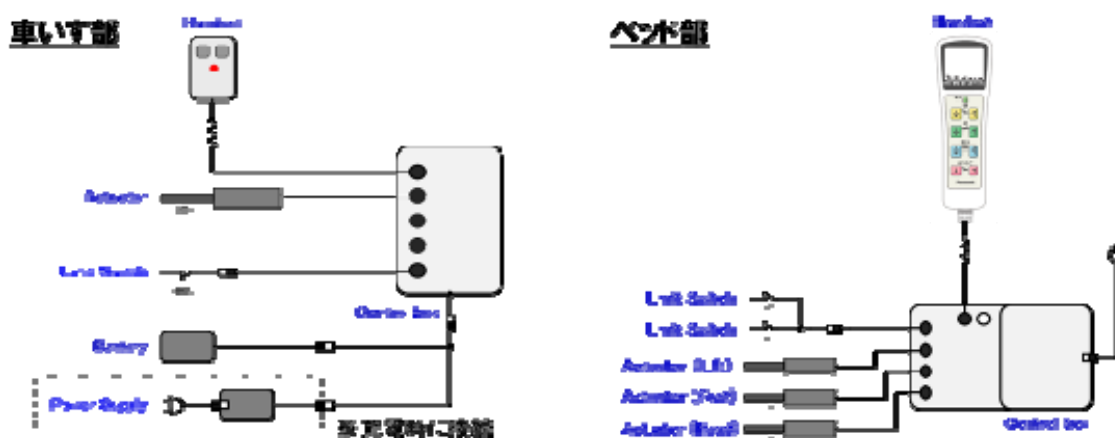


図 11 : 移乗・移動支援ロボットシステム (介助支援型) の制御システム構成

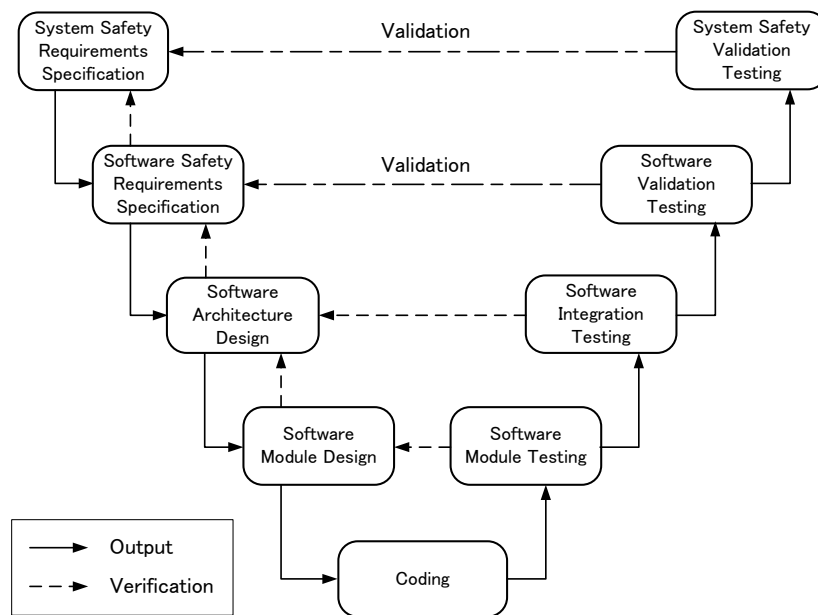


図 12：移乗・移動支援ロボットシステム（介助支援型）の安全機能に適用したソフトウェア開発のV字モデル

2.2.5. 機能／システムユーザビリティの研究開発（国立障害者リハビリテーションセンター／パナソニック株式会社）

(1) 障害当事者を対象としたシステム評価（国立障害者リハビリテーションセンター）

① 専門職と障害当事者への質的調査

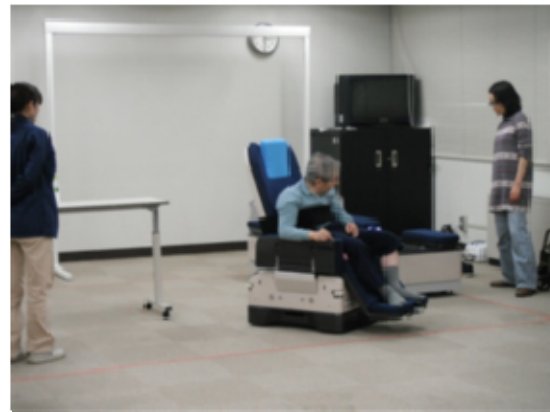
ターゲットユーザを確定するために、医療／リハ専門職を対象として、ロボティックベッド（プロト機）を用いた試用評価実験及びインタビューを行った。エスノグラフィを基にした質的分析を行い、ターゲットユーザ像と機能要件を抽出し、安全評価機の仕様に反映した。試用評価実験の様子を図 (a) に示す。さらに、抽出されたユーザ像に基づいてロボティックベッドのターゲットとなりうる障害当事者を選定し、試用とインタビューから成る評価実験を実施した。試用時の行動解析とインタビュー分析から、利用者の身体状況や実生活場面での利用に関する問題点を抽出し、追加／改善すべき機能要件として整理した。試用評価実験の様子を図 (b) に示す。

② 模擬環境評価

障害当事者の質的調査結果から抽出された使用場面を基に模擬環境を構築し、そ



(a) 専門職評価実験



(b) ターゲットユーザ評価実験

図 13：試用評価実験の様子

の環境内でロボティックベッド@プロト機（6名）、安全評価機（10名）、安全実証機（11名）を用いた模擬環境評価を行った。その結果、生活自立度や姿勢修正回数が向上し、自立生活に向けた改良効果が示された。

③ リスクアセスメントの実施

模擬環境評価時の安全評価機と安全実証機の課題遂行結果から想定される危険源を抽出し、リスクアセスメントを行った。その結果、31項目の想定危険源を抽出し、身体のはみ出し・衝突・姿勢のずれ・操作不可・その他の5項目に整理した。安全評価機と安全実証機の想定危険源を比較すると、危険源項目数は変化しなかったが、発生件数が減少しており、試用改善の効果が確認された。

④ 居宅環境評価

1名の障害当事者（神経性ミオパチー、男性、64歳）を対象に安全実証機の実環境評価（日中6時間、モデルハウス）を実施した。その結果、6時間通して身体の挟み込みや臀部の発赤等は見られずに機器を使用することができ、日常生活動作は問題なく遂行可能であった（図14(a)）。リフトとロボティックベッド@の移乗動作を比較したところ、リフトに比べ移乗にかかる時間と介助数が減少した（図14(b)）。障害当事者の質的調査結果から抽出された使用場面を基に模擬環境を構築し、その環境内でロボティックベッド@プロト機（6名）、安全評価機（10名）、安全実証機（11名）を用いた模擬環境評価を行った。その結果、生活自立度や姿勢修正回数が向上し、自立生活に向けた改良効果が示された。



(a) 机上作業



(b) 移乗動作

図 14：実環境評価の様子

(2) ユーザビリティ向上のための要素技術開発（国立障害者リハビリテーションセンター）

① ベッド上での姿勢安定性に関する研究

低摩擦シートにより姿勢変換時の身体再配置を促進することで、接触圧の上昇や姿勢ずれを防止する手法を開発し、その有用性を検証した。健常成人9名を被験者とした仰臥位→ファーラー位への姿勢変換実験では、接触圧の上昇が低摩擦シートによって有意に抑制されていることが示された。また、同様の手法が、車いす上での姿勢変換時にも有用であることを確認した。

② 車いす上での体温調節のための冷却システムの開発

ペルチェ素子を車いすバックレストに搭載することで、接触面からの体温調節を実現する体温調節システムを開発した。特に、バッテリー・制御回路を実装したスタンドアロン駆動可能なシステムを試作し、一般的な試験走行路面の安定走行が可能であることを確認した。また、冷却効率を向上させるために、接触圧分布の測定結果から身体形状に沿った接触面を造形する手法を提案した。接触圧分布を接触面の形状に数値変換することで、圧分散性の高い接触面を製作できる。同手法で作成した形状データから、三次元積層造形機及び切削加工機を用いて背面サポートを試作した結果、体圧分散に有効であり、身体と冷却システムとの真実接触面積を増加させることで、高い熱伝達効率を実現し得ることを確認できた。

(3) 病院内安全性／実用性評価（パナソニック株式会社）

筑波大学附属病院と連携して、病院内における介助支援型ロボットシステムの安全性／実用性評価を実施した。安全性に関しては、マットレスの体圧分布試験を行い、褥瘡リス

クへの評価を行うと共に、危険源の抽出（分離時のベッド柵への身体の挟み込み、車いすリクライニング時の滑り落ち、車いす時の前方足元の視界不良など）を行った。実用性に関しては、車椅子移乗時の脳血流変化を計測し、ロボティックベッド使用時は病棟ベッド・車椅子使用時に比べて、脳血流の低下、副交感神経活動の変化が軽減されることを確認した。また、これらの得られた結果をロボットシステムの改良にフィードバックした。

2.2.6. 安全環境センシング技術の研究開発（パナソニック株式会社）

(1) 基本実験システムによる評価実験

システム構築に向け、基本実験システムを病院内に設置し、現場でのセンサ性能評価と歩行者の行動特性調査を行なった。この結果、センサは環境変化等に影響されず確実に人体を検出できることが確認できた。また、人の行動特性については、約 25%が出会い頭事故のリスクがある可能性が知見として得られた。

(2) 安全環境センサシステムの開発

ロボット移動時にロボットの死角等から現れる人や障害物を事前に検知することで、ロボット単体では困難な出会い頭衝突等の防止を支援するシステムを開発した。開発した環

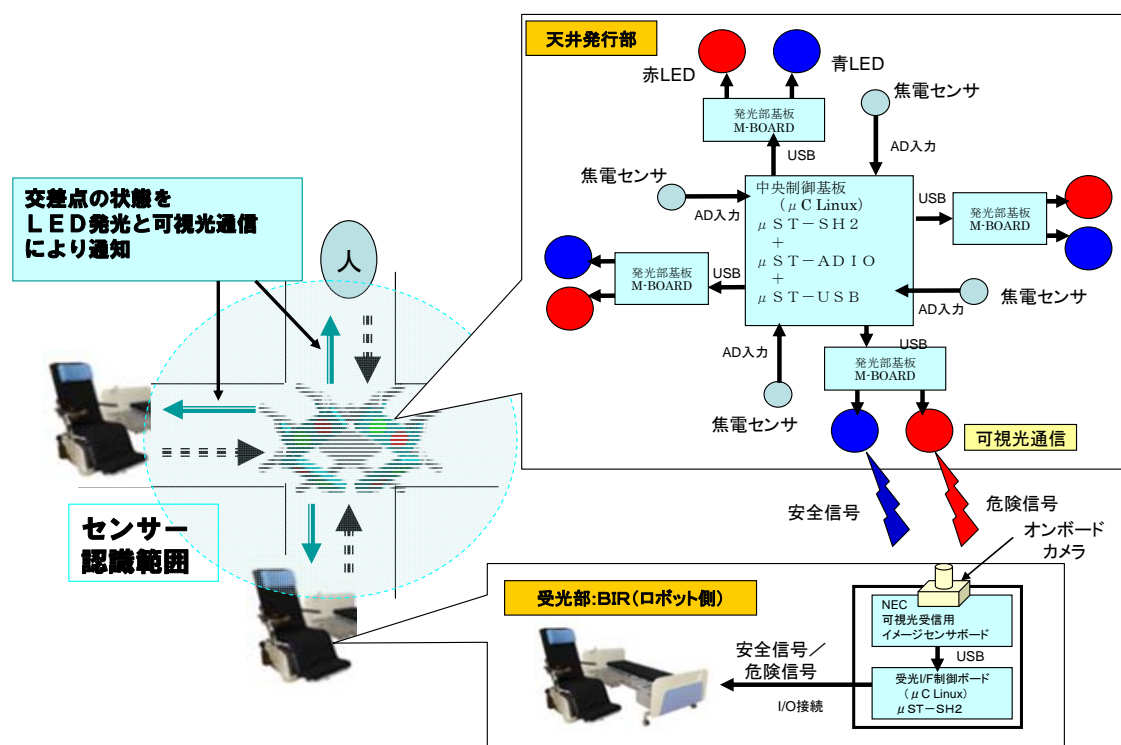


図 15：環境センサシステムの全体構成

境センサシステムの全体構成図を図 15 に示す。また、試作した安全環境センサシステム（出会い頭衝突等の防止支援システム）を用いて、ロボットシステム（プロト機）による模擬環境動作評価を実施した。交差点を模擬した環境において、ユーザと第三者が出会い頭で衝突しそうな状況になると、信号機による警告（青色から赤色に変化）及び移動速度制限が行われ、衝突回避支援が可能であることを確認した。

2.3. 目的に照らした達成状況

本事業の目標・成果・達成度を表 1に示す（◎：大幅達成、○：達成、△：未達、×：大幅未達）。

表 1：本事業に関する目標・成果・達成度

研究課題	研究開発の目標	成果	達成度
ロボットシステム開発	<p>■ 移乗／移動支援ロボットシステムの実用開発</p>		
	<p>安全技術を導入した移乗／移動支援ロボットシステムの実証試験を実施し、安全性および実用性評価を行い、この試験結果に基づき抽出された課題について、安全技術の改善／改良を図り、各技術および、ロボットシステムの実用化に目処をつける。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・移乗・移動支援ロボットシステムのプロトタイプを開発し、実証性評価及び安全性評価を実施 ・試験結果から抽出した課題に基づき、安全技術及びロボットシステムの改良仕様に反映 ・移乗・移動支援ロボットシステム（自立支援型）に関しては、ISO13482 適合設計完了、移乗・移動支援ロボットシステム（介助支援型）に関しては、ISO13482 認証取得 	◎
安全技術開発	<p>■ リスクアセスメントに関する研究開発（パナソニック株式会社）</p>		
	<p>安全性検証手法研究開発実施者と連携して、ロボットシステムの安全性試験／評価を実施すると共に、リスクアセスメント及び3ステップメソッドに基づくリスク低減方策を実施し、安全性の実現に目途をつける。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・安全性検証手法研究開発実施者と連携し、ロボットシステムの安全性試験を実施（「移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボット」類型の安全基準策定及び試験ノウハウ構築に貢献） ・リスクアセスメント（①機械類の制限の決定、②危険源の同定、③リスク見積、④リスク評価）を実施すると共に、リスク低減が必要な危険源に対しては、3ステップメソッド（①本質的安全設計方 	◎

		策、②安全防護及び付加保護方策、③使用上の情報) に基づくリスク低減方策を実施し、許容可能なレベルまでリスク低減を実施	
<p>■ 操縦 I F / 操縦支援技術、動的動作経路生成技術の研究開発 (パナソニック株式会社)</p>			
	<p>不特定多数の利用者を対象として殆ど訓練や管理することを前提とすることなく、直感的に操作方法や機能を理解でき、安全にロボットを操縦することができる操縦 I F / 操作支援技術を開発する。また、その中で必要となる動的動作経路生成技術を開発する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・誤操作を防止する分かりやすいインターフェースを備え、ユーザの好みに応じて9種類のジョイスティックハンドルを自由に選択可能な操作 IF を開発 ・ユーザ操作を支援する操縦支援技術及びユーザの操作意思に基づき合体 / 分離動作を安全に行うための合体 / 分離動作誘導制御技術を開発 	○
<p>■ 安全変形 / 動作技術の研究開発 (パナソニック株式会社)</p>			
	<p>利用者の身体に直接作用し、変形・移動等を行なうロボットの動作における、人体の挟み込み等による被害を低減させる技術を開発する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・柔軟導電体とメッシュ状の絶縁体からなる形状柔軟性を備えた挟み込みセンサを開発 ・性能評価実験により、人体等の柔軟体に対して高感度の特性を有し、指等の挟み込み検知や人体との接触検知に有効性が高いことを確認 	○
<p>■ ロボットシステム自己診断技術の研究開発 (パナソニック株式会社)</p>			
	<p>ロボットのハード / ソフトの機能安全性を高めると共に、各機能が正常に動作していることを、ハード、ソフトの各階層を含めて複数のチェック機構で相互 / 多重に常時確認し、故障や異常を早期かつ自動的に検知して、</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・機能安全規格に基づき、ロボティックベッドの安全操作を実現するホールドツーラン機能 (安全関連制御システム) を開発 ・機能安全規格 ISO 13849-1 に基づく安全性能評価の結果、PLd (IEC62061 : SIL2 相当) となり、高い安全性でホールドツーラン 	◎

	<p>安全に修復／停止する安全ロボットコントローラシステム技術を開発する。</p>	<p>機能が実現できていることを確認</p>	
<p>■ 機能／システムユーザビリティの研究開発（国立障害者リハビリテーションセンター／パナソニック株式会社）</p>			
	<p>移乗・移動支援ロボットシステムの実用上の課題を、臨床評価を通じて調査／研究し、各安全技術、ロボットシステム設計にフィードバックすることで、想定される利用者の特性に適合した、実用的な安全技術を導く。</p>	<p>・移乗・移動支援ロボットシステムのプロトタイプを用いた模擬環境評価を行い、各安全技術やロボットシステムの改良仕様へのフィードバックを実施 ・接触圧の上昇／姿勢ずれを防止する手法や接触面からの体温調整を実現する冷却システムの開発を行い、その有効性を確認</p>	<p>◎</p>
<p>■ 安全環境センシング技術の研究開発（パナソニック株式会社）</p>			
	<p>移乗・移動支援ロボットの周囲の環境（人や物、構造物など）の状態を動的に認識／推定し、ロボットの安全な動作を環境側から支援する安全環境センシングシステム技術の開発を行なう。</p>	<p>・ロボット移動時にロボットの死角等から現れる人や障害物を事前に検知することで、ロボット単体では困難な出会い頭衝突等の防止を支援するシステムを開発 ・模擬環境動作評価を実施し、信号機による警告及び移動速度制限により、衝突回避支援が可能であることを確認</p>	<p>○</p>

表 2：特許・論文・外部発表等の件数

区分 年度	特許出願（意匠含む）			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT 出願	査読付 き	その他	学会発 表・講演	新聞・雑 誌等へ の掲載	その他
H21FY	0	0	0	0	0	6	10	1
H22FY	7	0	0	0	2	6	7	2
H23FY	4	2	0	0	0	4	3	3
H24FY	4	0	0	1	0	5	0	2
H25FY	0	0	0	3	0	6	7	3

2.3 研究開発項目③ 安全技術を導入した配送センター内高速ビークルシステムの開発（株）ダイフク

本報告書は、経済産業省および独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、NEDO）が実施する「生活支援ロボット実用化プロジェクト」の一環として、株式会社ダイフクが実施した、「安全技術を導入した配送センター内高速ビークルシステムの開発(平成 23 年度-平成 25 年度)」の最終報告書である。

本件の始まりは、24 時間稼働の配送センターでフォーク運転手が集まらないといった状況や、海外でビークル(AGV : Automated Guided Vehicle)の案件の際、欧州勢が走行速度を日本メーカーの 2 倍程度 (120m/min) で走らせるといった日本メーカーに非常に不利な状況が多々発生してきたことに起因する。しかも、欧州勢のビークルの安全を確保しているのは、走行方向を見ているレーザセンサのみで、横からの人、フォークリフト等の飛び出しに対する配慮があまりなされていない状態である。

そこで本プロジェクトはこの状況を打開すべく、従来の AGV に比べ約 3 倍の最高速度 200m/min にて走行する高速 AGV を開発し、その安全防護システム・デバイスの開発を行った。さらに、開発品に対して安全テストを実行することで問題がないことを実証した。その結果、搬送処理能力が高く、作業者の安全を確保できる AGV システムの開発に成功した。

安全の中核技術である「エリア管理システム」の開発を行い、一般財団法人日本品質保証機構より ISO13482:2014 認証を取得し、その安全性能を示した。

本プロジェクトにより得られた知見から、JIS D 6802:1997 「無人搬送システム-安全通則」の追加防護策を一般社団法人日本産業車両協会に提言した。結果として、AGV を高速化した際の、日本国内における安全への考え方の確立に貢献し、今後の JIS、ISO に関する提言も、この知見を基に行われることになる。

本プロジェクトの成果が、日本国内における AGV システムの搬送高効率化、それに携わる作業者の安全性の向上、そして様々な産業・分野の物流効率化に貢献できれば幸いである。

最後に 味の素株式会社様、味の素物流株式会社様はじめ多くの企業、団体のご協力のもと今回のプロジェクトが完成いたしました。皆様の多大なるご協力、ご援助に対してプロジェクト一同、心より感謝申し上げます。

平成 26 年 4 月
株式会社 ダイフク

目次

内容

1. はじめに	14
1.1. 事業の背景	14
1.2. 事業目的	19
1.2.1. 本プロジェクトが取り組む技術的課題	19
1.3. 事業概要	19
1.4. 本報告書の構成	20
2. AGV 高速化による主要なリスク	21
2.1. リスク評価について	21
2.2. 高速 AGV システムでの主要な危険事象に対して	23
2.2.1. AGV との衝突	23
2.2.2. AGV との側面からの衝突	23
2.2.3. バッテリー充電時の漏電・火災	23
2.3. 安全への考え方	24
2.3.1. 3D 障害物センサ（安全防護技術）	24
2.3.2. エリア管理システム（安全防護技術）	24
2.3.3. ローカルエリアセンサ（安全サポート技術）	24
2.3.4. AGV 給電の非接触化（安全サポート技術）	24
3. 開発概要	25
3.1. 高速 AGV システムの概要	25
3.2. 高速 AGV	28
3.2.1. コンベヤタイプ	28
3.2.2. リアフォークタイプ	30
3.2.3. 高速 AGV の基本性能評価試験	32
3.3. 3D 障害物センサ	38
3.3.1. 仕様	38
3.3.2. 性能評価試験結果	43
3.4. エリア管理システム	49
3.4.1. 仕様	49
3.4.2. UWB 測位システム基本性能評価試験	58

3.4.3.	システム連動試験	65
3.5.	ローカルエリアシステム	69
3.5.1.	仕様	69
3.5.2.	性能評価試験結果	73
3.6.	非接触充電システム	78
3.6.1.	概要	78
3.6.2.	仕様	79
3.6.3.	基本性能評価試験	81
4.	検証試験	86
4.1.	物流センターにおける安全性検証テスト（協力：味の素株式会社、味の素物流株式会社、関東エース物流株式会社、株式会社オールユニール）	86
4.1.1.	まえがき	86
4.1.2.	テスト内容	86
4.1.3.	テスト結果	88
4.1.4.	まとめ	96
4.2.	AGV 衝突時の衝撃値（協力・執筆：JARI）	97
4.2.1.	試験概要	97
4.2.2.	試験結果	100
4.3.	UWB 性能評価試験（協力：生活支援ロボット安全検証センター）	105
4.3.1.	概要	105
4.3.2.	試験内容および試験方法	105
4.3.3.	性能評価試験結果	107
4.3.4.	考察	110
5.	成果	112
5.1.	エリア管理システムの安全認証取得	112
5.1.1.	目標とする安全要求性能	112
5.1.2.	評価規格（JQA より抜粋）	113
5.1.3.	文章一覧	114
5.1.4.	評価対象	116
5.1.5.	周辺機器に対する要求事項	116
5.1.6.	安全性能	117
5.2.	JIS D 6802 : 1997 追加防護策の改定案	118
5.2.1.	方針	118
5.2.2.	改定骨子案	118

5.3.	電波法 無線設備規則第 49 条の 27 の改正	120
5.3.1.	UWB 無線システム作業班の概要	120
5.3.2.	作業班でのダイフクの活動	120
6.	まとめ	122
7.	開発体制	123
7.1.	プロジェクトメンバー	123
7.2.	ご協力頂いた方々	123
8.	その他	125
8.1.	発表・講演・展示会	125
8.1.1.	発表	125
8.1.2.	講演	125
8.1.3.	展示会	125
8.2.	特許	126
8.3.	メディアへの掲載	126
9.	参考文献	127

図表目次

－図目次－

図 1-1	平置，パレットラック，フォークリフトの例.....	14
図 1-2	自動倉庫（左）とソーター（右）	14
図 1-3	現状の自動化の例（自動倉庫，ソーター以外は人が作業）	15
図 1-4	フォークリフトによる作業の様子	16
図 1-5	現状の配送センターの例（写真：人が AGV 前面を横断する様子）	18
図 3-1	高速 AGV システム概要.....	27
図 3-2	コンベヤタイプ AGV.....	29
図 3-3	リアフォークタイプ AGV.....	30
図 3-4	障害物センサの配置及び目的	31
図 3-5	測定機器設置時の全体風景	32
図 3-6	各測定箇所.....	34
図 3-7	引張圧縮	35
図 3-8	曲げ	36
図 3-9	非常停止時の AGV 走行位置と速度.....	36
図 3-10	測定ポイント	37
図 3-11	3D 障害物センサの概略図.....	38
図 3-12	機器の構成	41
図 3-13	AGV とテストピースの位置関係.....	44
図 3-14	白黒各テストピースのテスト風景	44
図 3-15	AGV とテストピースの位置関係.....	45
図 3-16	テスト風景	45
図 3-17	AGV とテストピースの位置関係.....	46
図 3-18	3D 障害物センサの取付位置の変更.....	47
図 3-19	3D 障害物センサ取付位置変更後の AGV 外観.....	48
図 3-20	エージェントの位置と進行方向	51
図 3-21	乗り状態と降り状態	51
図 3-22	安全判定	52
図 3-23	安全判定の二重化	52
図 3-24	危険判定エリア内にいるエージェントに対する音声警告.....	53
図 3-25	安全信号の二重化	53
図 3-26	リファレンスタグによる UWB センサ状態の監視	54
図 3-27	セル定員のチェック	54

図 3-28	AGV の位置情報の比較.....	55
図 3-29	エージェント数の比較	55
図 3-30	タグ間距離を監視	56
図 3-31	ゲートによる入退場者の管理	56
図 3-32	カメラによる画像認識を用いて許可のないエージェントの侵入を検知.....	57
図 3-33	電光掲示板に入退場時のエラーの原因を表示.....	57
図 3-34	タグを充電している様子	58
図 3-35	測定エリア	59
図 3-36	各格子点での測位の平均誤差	60
図 3-37	各歩行ラインからの平均誤差, 最大誤差, 誤差の標準偏差.....	60
図 3-38	走行ラインからの誤差の平均, 最大, 標準偏差.....	60
図 3-39	歩いた軌跡	62
図 3-40	各格子点での測位成功率	62
図 3-41	センサ数が測位精度に与える影響	64
図 3-42	テスト環境	66
図 3-43	安全距離の計算結果	67
図 3-44	すれ違いテストの環境	68
図 3-45	すれ違いテストの結果	68
図 3-46	ローカルエリアセンサの概略図	69
図 3-47	機器の構成	70
図 3-48	センサの構成	72
図 3-49	システムの構成	73
図 3-50	ローカルエリアセンサの測定位置	74
図 3-51	人体検出評価風景	76
図 3-52	ローカルエリアセンサ 1 の検出結果	76
図 3-53	ローカルエリアセンサ 2 の検出結果	76
図 3-54	ローカルエリアセンサの検出範囲	77
図 3-55	無接触充電の概略図	78
図 3-56	充電システムの基本構成	79
図 3-57	機器構成	82
図 3-58	充電時の電圧と電流	82
図 3-59	充電時の温度	83
図 3-60	Y・Z 軸に対する距離と磁束密度の関係.....	84
図 3-61	Z・X 軸に対する距離と磁束密度の関係.....	84
図 3-62	Y・X 軸に対する距離と磁束密度の関係.....	85
図 4-1	テストエリア	87

図 4-2	作業者への UWB タグの取り付け	88
図 4-3	判定領域	89
図 4-4	AGV とフォークリフトとの接触	95
図 4-5	AGV とフォークリフトとの接触 (AGV 前方方向)	95
図 4-6	台車とダミーの衝突	97
図 4-7	衝突方向 (正面、後面、頭部、尻部)	98
図 4-8	AGV を模擬した台車の外観	98
図 4-9	人体模型 (男性) とその仕様	99
図 4-10	人体模型 (女性) とその仕様	99
図 4-11	頸部の荷重及びトルクの感度方向	100
図 4-12	男性型ダミーを使用した速度別・衝突方向別の HIC 値	101
図 4-13	女性型ダミーを使用した速度別・衝突方向別の HIC 値	102
図 4-14	男性型ダミーを使用した速度別の頭部打撃時の HIC 値	102
図 4-15	男性型ダミーを使用した速度別の腰部打撃時の加速度	102
図 4-16	試験風景	106
図 4-17	発信機 (タグ) の設置角度	106
図 4-18	各角度の距離による電界強度の総計の推移	109
図 4-19	STD と HUR の距離による電界強度の総計の推移	110
図 4-20	センサまでの最大距離	111
図 5-1	IEC61508-5 に基づく要求 SIL	112
図 5-2	IEC62061 に基づく要求 SIL	113
図 5-3	ISO 13482-6:2014 認証スキーム	114
図 5-4	エリア管理システムブロック図	116
図 5-5	認証書	117

— 表目次 —

表 1-1	自動化搬送機器の速度と走行場所の比較	17
表 2-1	リスクの大きさを決める 4 つのパラメータ	22
表 2-2	RI の定義	22
表 3-1	高速 AGV システムの各機器の説明	27
表 3-2	コンベヤタイプ AGV の仕様	28
表 3-3	リアフォークタイプ AGV の仕様	30
表 3-4	AGV の評価内容	32
表 3-5	応力測定値	35
表 3-6	無負荷時の停止精度	37
表 3-7	負荷時の停止精度	37
表 3-8	3D 障害物センサの仕様値	40
表 3-9	各 AGV でのテストピース検出停止距離	44
表 3-10	各 AGV でのテストピース検出停止距離	46
表 3-11	高さ方向の検出可否	47
表 3-12	エリア管理システムの機能とその説明	50
表 3-13	各タイムスロット間隔における測位間隔	63
表 3-14	各タイムスロット間隔における測位遅れ	63
表 3-15	試験結果のまとめ	65
表 3-16	テスト結果	66
表 3-17	安全距離の計算条件	66
表 3-18	ローカルエリアセンサの仕様値	70
表 3-19	ローカルエリアセンサの検出精度評価	75
表 3-20	インバータ仕様	80
表 3-21	送電・受電パッド仕様	80
表 3-22	充電コントローラ仕様	81
表 4-1	テスト結果一覧	101
表 4-2	速度 200m/min で衝突した時の各衝撃値と衝突安全基準値	103
表 4-3	試験条件	107
表 4-4	UWB 測位システム（周波数帯：7.25～10.25GHz）のスペアナ測定結果	108
表 4-5	UWB 測位システム（周波数帯：6～8GHz）のスペアナ測定結果	108
表 4-6	電界強度の最大値 I_p と総計 I_t	109
表 4-7	タグからの距離による電界強度（推定値含む）	111
表 5-1	文章一覧	115

添付資料一覧

- 添付 1 平成 23 年度中間年報
- 添付 2 平成 24 年度中間年報
- 添付 3 リスクアセスメント v7.0
- 添付 4 AGV 衝突試験 結果（執筆：JARI）
- 添付 5 UWB 審議内容
- 添付 6 JIS 追加防護策 骨子＋詳細内容
- 添付 7 エリア管理システム プレスリリース
- 添付 8 エリア管理システム ISO13482 認証書
- 添付 9 作業記録写真

和文要旨

配送センター内で人・フォークリフトと共存できる高速ビークル（AGV）システムの安全技術を開発した。この高速 AGV システムは、従来の最高速度 60m/min の約 3 倍にあたる最高速度 200m/min で走行可能である。これにより、配送センターにおいて高速 AGV の安全運行が可能になるとともに、生産性の向上が期待できる。

プロジェクトの初年度にあたる平成 23 年度は、コンベヤタイプの高速度 AGV の開発、リスクアセスメントの実施、安全に関するデバイスおよびシステムの開発を行った。具体的にはリスクアセスメントの結果から、以下の 3 つの安全に関するデバイスおよびシステムを開発した。1 つ目は 3D 障害物センサ（安全デバイス）の開発。このセンサは、AGV の進行方向前方にある障害物を 3 次元的に検知し、走行経路上に障害物がある場合は AGV を安全に停止させる。2 つ目は、エリア管理システム（安全サポートシステム）の開発。このシステムは、人・フォークリフト・AGV の位置をリアルタイムに計測することで、ラックなどの物陰から AGV 進行方向前方への人・フォークリフトの飛び出しを検知し、AGV を減速・停止させる。最後に、エリア管理システムでは検知しにくいブラインドコーナー・交差点で人・フォークリフトを検知し、AGV を減速させるローカルエリアシステム（安全サポートシステム）を開発した。

プロジェクトの中年度にあたる平成 24 年度は、リアフォークタイプの高速度 AGV（最高走行速度 200m/min）の開発、前年度開発システムのブラッシュアップ、非接触充電システム（安全サポートシステム）の開発、安全検証試験を行った。初年度に開発した AGV と合わせて 2 台の AGV での走行試験が可能になり、2 台同時走行時の安全性評価を実施した。また、安全検証試験として、一般財団法人 日本自動車研究所（JARI）の全面協力のもと AGV の衝突試験を実施した。AGV とダミー人形を衝突させ、衝突時の衝撃値を計測する試験である。その結果、AGV が 60m/min で走行している際の人との衝突は、軽傷程度で済むと考えられる結論が得られた。2 つ目は生活支援ロボット安全検証センターの電波暗室にて実施した UWB 性能評価試験である。結果として、UWB タグから発信される電波の距離ごとの電界強度を推定できるようになったことで、UWB センサ受入電界強度やノイズによる UWB センサ受信限界距離について推定を行うことができるようになった。

プロジェクトの最終年度にあたる平成 25 年度は、実際の配送センターでの運用テスト、エリア管理システムの安全認証取得、JIS D 6802 の追加防護策の提言を行った。実際の配送センターでの運用テストとして、味の素株式会社・味の素物流株式会社・関東エース物流株式会社・株式会社オールユニールの協力のもと、高速 AGV システムの安全性を検証した。結果として、AGV に人・フォークリフトが近づいた際、AGV が安全速度 60m/min まで速度を十分に落としきれることがわかり、提案システムにより高速 AGV の安全性が確保できることを確認した。また、一般財団法人 日本品質保証機構（JQA）の協力のもとドキュメント作成を進め、エリア管理システムに対して ISO13482:2014 の認証を取得した。そして最後

に、この3年間のプロジェクトにて得た知見を基に、JIS D 6802:1997「無人搬送システムー安全規則」の追加防護策を一般社団法人 日本産業車両協会に提言し、AGVを高速化した際の、日本国内における安全への考え方の確立に貢献した。同協会では、当社の提案に基づき、業界内の意見をまとめた上で、JISの改定に向けて動く見込みである。

Abstract

This project developed safety technologies regarding High Speed AGV system which enable co-existence with AGVs, workers and forklifts at distribution centers (DCs). The maximum speed of developed AGVs is 200m/min which is about 3 times as much as the one of conventional AGVs. High productivity at DCs is expected by introducing these technologies.

In FY 2011, the initial year, risk assessments, development of a conveyor type AGV (Max speed = 200m/min), and development of safety related devices/systems were conducted. The risk assessments show that the following three safe related devices and system can realize the AGV safety. The first device is 3D obstacle sensor as a safety device. This sensor detects three-dimensionally obstacles which is located in the direction of forward AGV movement and stops AGVs when obstacles are detected. The second development item is Area Management System as a safety support system. This system locates workers, forklifts and AGVs on real time, so can detect workers and/or forklifts rapidly moving in front of AGV from the shadow and stops AGVs or controls the speed of AGVs to prevent such crash. The third development item is Local Area Sensor as a safety support device which detects workers and forklifts on cross points where Area Management System may have difficulties to detect them. These devices were developed and safety confirmation tests were conducted. The test results imply that our considering method can realize the safety.

In FY2012, development of a rear-forklift type AGV (Max speed = 200m/min), the modification of devices/system which were developed in the previous year, development of wireless power supply system and safety evaluation tests were conducted. A risk assessment was reviewed in the initial of this year and electrification in power supply was found as a new risk. A wireless power supply style was developed as a counterplan against this new risk. AGV crash tests and UWB performance tests were also done in this year. The crash tests measure the impact value of dummy dolls by working with JARI. The results imply that crash at 60m/min causes just mild injury and the justification that 60m/min is a safe speed. The radio strength of each distance between a sensor and a UWB tag could be estimated by UWB performance tests. The results estimated the limit of length from each noise level of sensor and made a construction rule of Area Management System.

In FY 2013, AGV performance tests in an operating DC, safety certification of Area Management System and proposals of JIS D 6802:1997 additional protection method were done. Tests at an operating DC (Tatebayashi distribution center of Ajinomoto

Logistics Corporation) show that the developed system decreases an AGV speed to 60m/min when workers or forklifts are near AGV, and our system can ensure the safety. Area Management System was modified to meet safety standard and ISO13482 was certified to this system by JQA. Finally, we proposed JIS 6802:1997 additional safety method to Japan Industrial Veicles Association based on our knowledge by this project. We are considering that this proposal contributes to establish Japanese safety starategy against high speed AGV. This association will surmarize the industry's opinion based on our proposal and amend the standard.

1. はじめに

1.1. 事業の背景

現状の配送センターの多くは、平置、パレットラック、フォークリフトの組み合わせにより運用されている（図 1-1 参照）。配送センターの中でも、倉庫業あるいは 3PL とされている業界では、ごく一部が自動化設備を導入して対応している。しかしながら、それ以外の多くの配送センターでは図 1-1 のようにまだまだ人手により作業を行っている。また、一部自動化（自動倉庫、ソーターなど：図 1-2 参照）ができている配送センター（図 1-3 参照）でも荷揃え場あるいは荷捌き場では多くの人が働き、フォークリフトが走り回っている（図 1-4 参照）。



図 1-1 平置、パレットラック、フォークリフトの例



図 1-2 自動倉庫（左）とソーター（右）

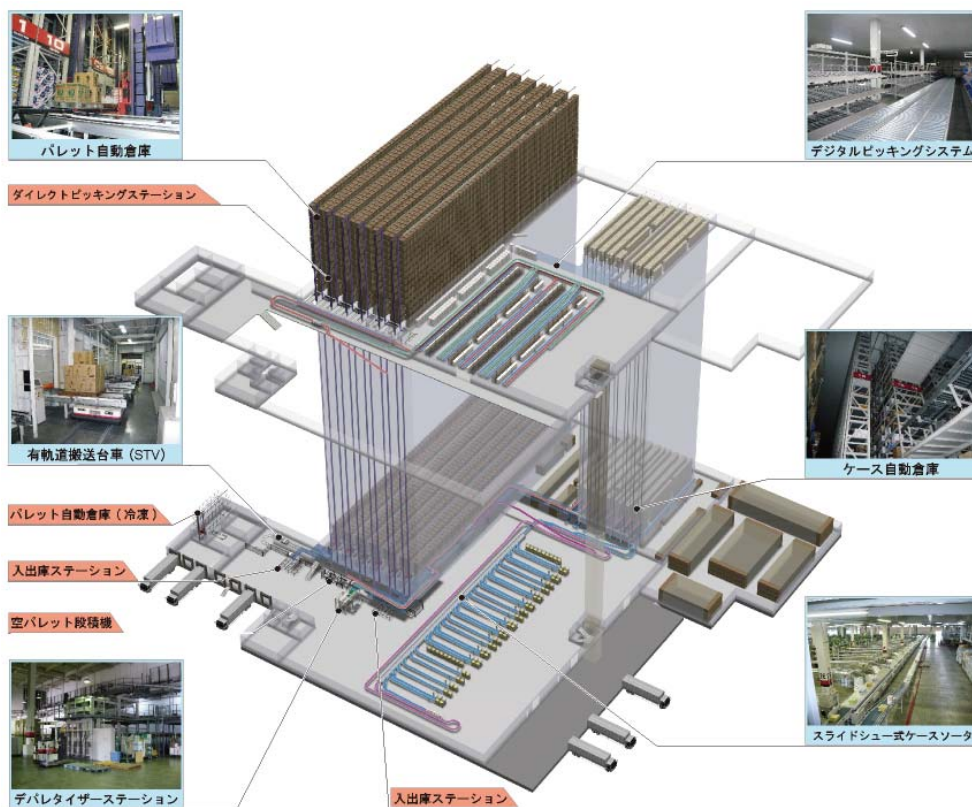
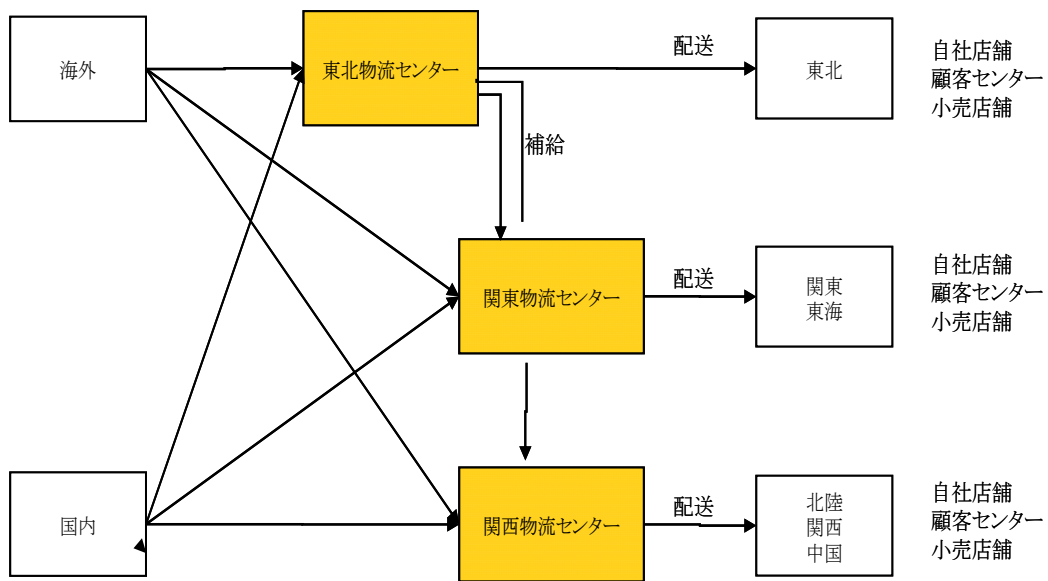


図 1-3 現状の自動化の例（自動倉庫，ソーター以外は人が作業）



a) 人手作業（トラックからの荷下ろし）



b) 人手作業（平置き）



c) トラックからの荷下ろし



d) 一時仮置き




e) 自動倉庫に入庫

図 1-4 フォークリフトによる作業の様子

配送センターの作業の大半はフォークリフトを利用した人手により行っているため、生産性があがらない。配送センターの生産性が低いと製造の生産性をあげても日本全体の生産性はあがらず、国際競争力が劣ることになる。これらを解決する有力な方法として、既存の AGV（Automated Guided Vehicle：レールガイド無しビークル）を大きく進化させ、新しい荷揃え場あるいは荷捌き場に対応することが挙げられる。ここで、なぜ AGV に対応するかというと、RGV（レール付ビークル）、コンベアでシステムを構築すると固定設備がスペースを占拠し、変化に対して自由度が効かなくなるからである。処理能力は低い、自由度の高い AGV は、荷揃え場あるいは荷捌き場に対して非常に有効である。以前荷捌き場に納入した AGV は流量の変化（平均流量とピーク流量が 2 倍）に対応できず現存していない。そのため、流量の変化にも耐えうる能力を有し、安全を確保しつつ、自由度の高い新しい高速 AGV が必要である。参考に自動化搬送機器の速度と走行場所の比較を表 1-1 にまとめる。

表 1-1 自動化搬送機器の速度と走行場所の比較

項目	高速AGV	RGV	コンベア	現状AGV
イメージ図	(将来) 			
速度(m/分)	最高速200	空荷200、実荷160	20~30	最高速60
走行場所	フローを移動: 荷揃え場、荷捌き場 を安全を守り自由に 移動可能。将来は ラック内に入り入出 庫可能	レール上を移動: 荷揃え場、荷捌き場へ はフォークリフトが必 要	コンベア上面を移動 荷揃え場、荷捌き場へ はフォークリフトが必 要	フローを移動 荷揃え場、荷捌き場を 安全を守り自由に移 動可能。ただし能力 が不足する時がある

配送センターの荷揃え場あるいは荷捌き場は、AGV、人、フォークリフトが混在しているため、現存のAGVの最高走行速度を60m/minに制限することで安全を守っている。現状の配送センターでAGVが利用されている例を図1-5に、AGVと同じフロア上を人が横断している様子もあわせて示す。

近年の動向として、全体の在庫を圧縮する目的で配送センターを集約し、配送センターは大型化に向かっている。図1-5は多数のセンターを集約したことにより、建物の規模が幅350m×奥行200mにもなった例である。そこでは現状の最高走行速度60m/minのAGVでは能力的に不足し、リードタイムが長くなり、手待ちが発生している。この解決方法として、最高走行速度を200m/minとする対応方法があるが、AGVの総重量は約2t(本体約1t、荷約1t)であり、これに対する安全の確立が急務となる。AGVの移載装置は運ぶ対象物により異なり、移載形態によらない高速走行時の安全のためのシステムが特に必要となる。

リスク低減の現状の対策として、一般社団法人日本産業車両協会で作成したJISの追加防護策を基準とするが、これらはテストをもとに確立されたものではない。実機を用いたテストにより高速AGV本体とシステムの両方で安全方法の確立が必要となる。JIS、ISOの現状については別紙に記載するが、平成26年度よりJISの審議が開始される見込みである。そのため、平成26年度までに、審議団体 日本産業車両協会を通じて反映する必要がある。また、リスクアセスメントについても一般社団法人産業機械工業連合会(ロボット工業会も参加)にて本システムのリスクアセスメントシートを既に作成しており、そこから出された安全技術課題をこのプロジェクトで解決する。そしてAGVを高速化した際の安全

指針に関して検討する。

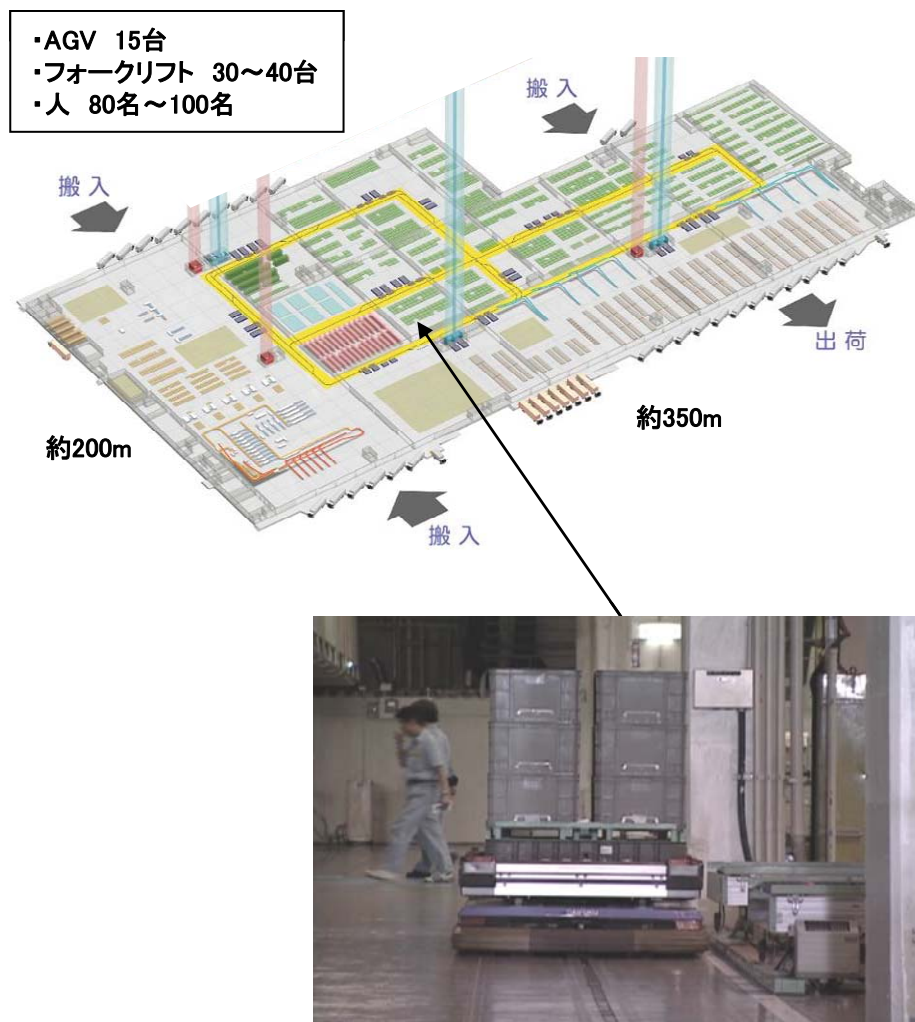


図 1-5 現状の配送センターの例（写真：人が AGV 前面を横断する様子）

1.2. 事業目的

上述の背景に基づき、本プロジェクトでは以下の2つを目的とする。

- 最高速度 200m/min の高速 AGV の開発と、そのリスク低減技術と安全要素技術の開発
- AGV を高速化した際の安全について、JIS D6802:1997（無人搬送台車—安全通則）の追加防護策の提言

1.2.1. 本プロジェクトが取り組む技術的課題

配送センター内で高速 AGV を活用するにあたっての技術的問題点として次の5つが挙げられる。

- 作業員、フォークリフトが働いているエリア（特定の場所）で AGV を 200m/min で走行させる安全方策が確立されていない。
- 総重量約 2t の AGV を 200m/min の走行状態から常に安全に停止状態に持っていくには AGV 本体の障害物検出だけでは限界がある。
- 現状の安全センサは単体では障害物を面で検出せず、線（2 次元的）でしか検出できない。
- ブラインドコーナーまたは物陰からの飛び出しに対して、安全方策が確立されていない。（システムによる安全確保ができない）
- 現状の JIS などには、安全規格に対して定量的な数字がない。

開発を通してこれらの問題点を解決していくことで、日本全体の生産性を上げるとともに新しい市場を想像していく。

1.3. 事業概要

平成 23 年度において、高速 AGV システムのリスクアセスメントを実施し、危険事象とその対策を明確化した。その上で、高速 AGV（コンベヤタイプ：最高速度 200m/min）を 1 台開発し、安全に関する 3 つのデバイス・システム：3D 障害物センサ（安全防護）・エリア管理システム（安全サポート）・ローカルエリアセンサ（安全サポート）の開発を実施した。

平成 24 年度では、2 台目の AGV（リアフォークタイプ：最高速度 200m/min）を開発し、AGV が 2 台走行した際の安全性を検証した。さらに、平成 23 年度開発した技術を検証・改造し、性能強化を行った。また、新たな技術として、AGV への給電を非接触化し、接触式充電によって起こりうる火災等の危険事象に対応した。

平成 25 年度は、実際に稼働中の配送センターにおいて、高速 AGV を走行させ、高速 AGV システムの安全性を検証した。また、開発技術のうち、エリア管理システムを安全化し、ISO13482:2014 を取得した。また、プロジェクトにおいて得られた AGV を高速化した際の安全の考え方を基に作成した JIS D 6802:1997 の追加防護策を、一般社団法人日本産業車両

協会に提出した。同協会では、この提言を基に同 JIS の改定に向けて進む予定である。

1.4. 本報告書の構成

本報告書では、第 1 章にプロジェクトの背景と目的をまとめた。第 2 章では、AGV システムを高速化した際のリスクアセスメントの手法とその結果の主要な危険事象をまとめた。第 3 章に開発した AGV、安全防护技術（3D 障害物センサ・エリア管理システム）、安全サポートシステム（ローカルエリアセンサ、非接触給電システム）の概要と試験結果をまとめた。第 4 章では、稼働中の物流センターでの検証試験、AGV 衝突時の衝撃値計測試験、UWB 電波強度計測試験の結果をまとめ、開発システムの妥当性を検証した。第五章では、本プロジェクトの成果として、エリア管理システムの ISO13482:2014 の認証、JIS 追加防護策の骨子、電波法 無線設備規則の改正について述べた。

2. AGV 高速化による主要なリスク

別紙 添付3に高速AGVシステムのリスクアセスメントを示す。リスクアセスメントは、プロジェクト開始時の2011年度から始まり、プロジェクト終了時までの間に7回の見直しを行った。このリスクアセスメントシートは、一般社団法人日本機械工業連合会が作成したガイドライン「メーカーのための 機械工業界リスクアセスメントガイドライン」にもとづいている（平成22年3月31日発行）。このシートの表の見方を以下に示す。

- ライフサイクル：搬入、据付、調整、運転、トラブル処理・修理、保守、処分に分類する。
- タスク／人：タスク名とリスクに関係する人物
- 危険区域：危険源の位置
- 危険源：危険を発生させる事象・原因・症状
- 危険状態：危険が発生する状態
- 危険事象：具体的な危険な状況
- リスク評価について：2.1節にて説明
- 方策：リスク低減のための保護方策
- 保護方策の分類：方策を、本質的安全設計による対策、安全防護及び付加保護による対策、使用上の情報による対策に分類した。
- 低減後リスク評価：保護方策にてリスクの低減を行った後のリスクの評価結果
- さらなる低減の要・不要：追加の低減策が必要か不要かの判断

2.1. リスク評価について

各危険事象のリスクの大きさは、表（「メーカーのための 機械工業界リスクアセスメントガイドライン」より抜粋）の4つのパラメータ（表 2-1 参照）から、表 2-2 のRI（リスクインデックス）によって定義される。このリスクアセスメントでは、RIが2以下を許容範囲内のリスクと考える。また、各リスクに対する、安全制御機構への要求PL（パフォーマンスレベル）も表 2-2によって決定される。なお、PLr（要求パフォーマンスレベル）に関しては、対象のRIが3以上であり、方策が制御的な手法を用いた時のみ記載した。

リスクアセスメントシートでは、まず、危険事象に対して、何も追加防護策を持たない状況からリスクの見積を開始する。防護策を用いた後の状態に対して、再度リスクの評価を行い、その結果、RI値が3以上であれば、更なる追加防護策を実施する。

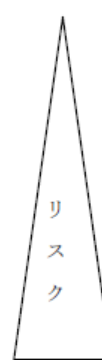
表 2-1 リスクの大きさを決める 4つのパラメータ

S	S1	軽微な傷害（通常は回復可能）、例えば、こすり傷、裂傷、挫傷、応急処置を要する軽い傷
	S2	深刻な障害（通常は回復不可能。致命傷を含む）、例えば、肢の粉碎又は引き裂かれる若しくは押しつぶされる、骨折、縫合を必要とする深刻な傷害、筋骨格障害（MST）、致命傷
F	F1	作業シフト（サイクル）あたり 2 回以下又は 15 分以下の暴露
	F2	作業シフト（サイクル）あたり 2 回超又は 15 分超の暴露
* 暴露頻度については、主に「機械的危険源」を対象としている		
A	A1	いくつかの条件下で可能 ー 可動部分が 0.25m/s 以下の速度で動く場合、及び被暴露者がリスクに気づいており、また危険状態又は危険事象が迫っていることを認識している。 ー 特定の条件による（温度、騒音、人間工学等）
	A2	不可能
O	O1	安全分野で証明され、承認されている成熟した技術（ISO13849-2:2003 参照）
	O2	過去 2 年間で技術的故障が発見されている ー リスクに気づき、また作業場で 6 ヶ月以上の経験を持つ十分に訓練を受けた人による不適切な人の挙動（人に依存する場合） ー 過去 10 年以上発生していない類似の事故（類似事故の有無の場合）
	O3	定期的に見られる技術的な故障（6 ヶ月以下毎） ー 作業場で 6 ヶ月未満の経験を持つ十分に訓練を受けていない人による不適切な人の挙動（人に依存する場合） ー 過去 10 年間に工場で見られた類似の事故（類似事故の有無の場合）

表 2-2 RI の定義

ISO14121/ISO13849-1 リスクパラメータ			危険事象の発生確率* ^{注1}			優先順位	ISO13849-1
危害の程度	暴露頻度	回避の可能性	O1	O2	O3		PL _r 又は PL
S1 軽度	F1 稀	A1 可	1	1	2	3	a
		A2 不可	1	1	2		b
	F2 頻繁	A1 可	1	1	2	3	b
		A2 不可	1	1	2		c
S2 重度	F1 稀	A1 可	2	2	3	2	c
		A2 不可	2	3	4		d
	F2 頻繁	A1 可	3	4	5	1	d
		A2 不可	4	5	6		e

RI=リスクインデクス



2.2. 高速 AGV システムでの主要な危険事象に対して

リスクアセスメントから、60m/min から 200m/min へ高速化することによって発生する危険源が特定された。それぞれを以下にまとめる。

2.2.1. AGV との衝突

AGV 進行方向正面に作業員やフォークリフトが存在し、AGV が高速で衝突する場合は挙げられる。高速化に伴い、衝突時の衝撃値も上がるため、作業員との衝突を避けるための手法を考える必要がある。今回の開発において、次のようにリスクを低減する。まず、AGV に搭載する走行メロディ、ウィンカー、通路の区分け等を用いて、作業員に気づかれやすく、また通路上で作業する頻度などを落とし RI を 5 から 3 まで低減させる。ただし、この状況でも RI は 3 以上であるため、更なる追加防護策が必要となる。次に、AGV 正面につける障害物センサを用いて、進行方向に存在する作業員を検出し、停止させる安全センサを取り付ける。これにより、RI は 1 まで低下する。この時、PLr=d である。なお要求 SIL は、ISO13849-1:2006 に基づき、IEC61508-1:2010 や、IEC62061-1:2005 における SIL2 と考える。

2.2.2. AGV との側面からの衝突

高速化に伴い、最高速から停止するまでの制動距離が大幅に増加する。そのため、物陰から急に AGV の正面に飛出すような危険事象(例: 十字交差点に横から作業員が出てくる。)に対して何らかの防護策を考える必要がある。今までの 60m/min では受け入れ可能な危険事象であったが、高速化により、リスクが増大し、受入れることが出来ない危険事象となった。見積の結果、イニシャルの RI は 5 と評価される。正面からの衝突と同様に、走行メロディ、ウィンカー、通行区分や退避可能なスペースの確保によって、RI を 3 まで下げる。その上で、作業員やフォークリフトと AGV の位置をリアルタイムに検出し、AGV 付近に作業員・フォークリフトが近づいた場合には AGV の速度を減速させ、側面からの衝突を防護するシステム (エリア管理システム) を開発する。この結果、RI は 1 まで減少し、許容可能なリスクまで低減させることが出来た。エリア管理システムに求められる要求 PL は、d である。なお要求 SIL は、IEC61508-1:2010 や、IEC62061-1:2005 での評価を検討し、SIL2 とした (5.1 章を参照)。

2.2.3. バッテリー充電時の漏電・火災

AGV はバッテリーによる電力供給が行われる。高速化に伴い、走行モータの消費電力アップなどによりバッテリーは容量が大きくなる。それにともない、充電頻度も多くなる。充電はソケットによる接触型の充電になるため、年に数軒程度、火災の原因になる場合や火傷の事例も報告されている。そこで、充電部を非接触化し、火災や火傷を本質的に起こさないようにする。

2.3. 安全への考え方

リスクアセスメントの結果、以下の安全に関わる技術開発を実施した。AGV の高速化自体に対してのリスクの増大については、2.3.1, 2.3.2, 2.3.3 に記載する 3 つの安全技術を用いる。これら 3 つの防護技術が全て安全であると判定した時のみ、AGV は高速運行が可能とする。

2.3.1. 3D 障害物センサ (安全防護技術)

AGV の正面に付け、進行方向の障害物を発見するセンサを開発する。制動距離の増加に伴い、従来のセンサよりも障害物検出距離を伸ばし 20m とした。防護距離は 8m とする。要求安全性能は、リスクアセスメントの結果から、IEC61508-1:2010 の SIL2 とする。

2.3.2. エリア管理システム (安全防護技術)

作業員やフォークリフトの横からの飛出しに対応するためのシステムを作成する。UWB (Ultra Wide Band) の発信タグを作業員・フォークリフト・AGV に取り付け、リアルタイムにそれぞれの位置を計測する。位置情報を用いて、許容可能な AGV の最高速度を算出し、AGV 制御系に対してその最高速度を指示する。このシステムは、従来にはないシステムであるため、開発当初は安全サポート技術として開発を行った。最終年度には安全技術として確立させ、リスクアセスメントの結果から、要求安全性能は SIL2 とした。

2.3.3. ローカルエリアセンサ (安全サポート技術)

ブラインドコーナー部の横からの作業員・フォークリフトの飛出しに対応するため、ブラインドコーナー部天井に反射板を検知できるレーザーセンサを設置する。前提条件として、フォークリフト天井と作業員のヘルメットには反射板がついている。センサが反射板を検知し、かつ、AGV がコーナー部に侵入する際には、AGV に減速指示を出すようにする。このセンサに関しては、安全系をサポートする技術と考え、開発を実施する。

2.3.4. AGV 給電の非接触化 (安全サポート技術)

AGV への充電部を、通常のソケットによる接触方式から、電磁誘導を利用した非接触方式に変更する。

3. 開発概要

3.1. 高速 AGV システムの概要

最高速度 200m/min のコンベヤタイプ・フォークタイプの 2 種類の AGV を製作した。AGV への速度指示は VSM と呼ばれる地上制御コントローラから 2.4GHz の無線を介して送信される。VSM はプライマリーPC・セカンダリーPC の二台から構成されており、通常はプライマリーPC が動作している。プライマリーPC 側に異常が生じた時には、自動的にセカンダリーPC が動作し AGV の制御を行う。VSM は後述するエリア管理サーバーから定期的に速度指示信号を受信している。この信号が一定時間以上受信できない場合には、VSM は AGV に対して 60m/min にて運行するよう制御する。また、この速度指示信号以下の速度にて VSM は AGV が走行するよう制御している。また、作業エリアには安全柵が設置されており、このエリアに入場するためには、専用のゲートを通る必要がある。

AGV 前面には AGV 前方方向の障害物を検知するための 3D 障害物センサがつけられている。進行方向に障害物を検知した場合には、この 3D 障害物センサが AGV を停止（停止カテゴリ：0）させる。この 3D 障害物センサに対しても 5GHz の無線を介して停止指示が送信できるようにしてある。そのため、エリア管理サーバーからも非常停止指示が送れるようになっている。

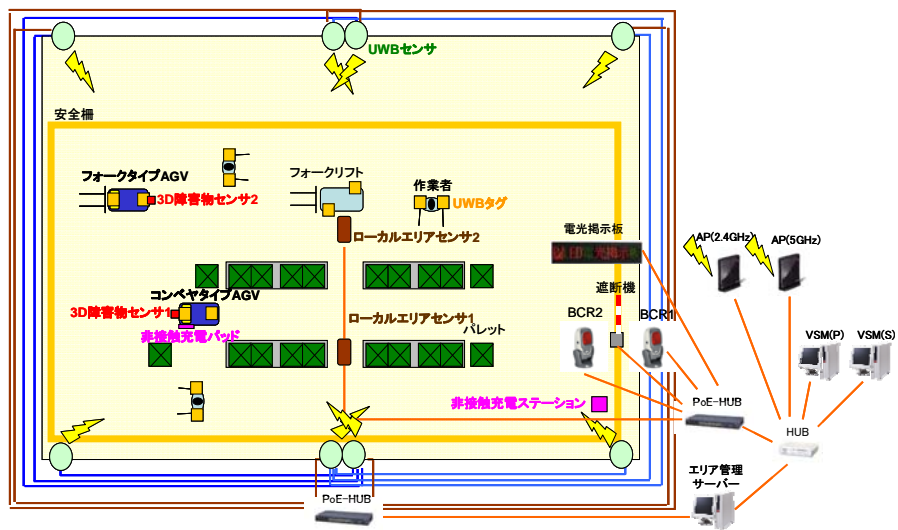
エリアに入る作業員・フォークリフト・AGV は UWB タグを 2 個ずつ所有しており、この UWB タグの位置を UWB センサにより計測することで作業員・フォークリフト・AGV の位置をリアルタイムに把握することができる。エリア管理サーバーではそれらの位置情報をもとに、AGV と作業員・フォークリフトの位置関係から VSM に対して減速指示を送信する。また、エリアに入場する際には、BCR に読み込ませたバーコード ID と入場者の UWB タグ ID とが一致する必要がある（事前に登録済み）。これにより、許可のない作業員・フォークリフトはエリアの中に入ることができない。なお、バーコード ID とタグ ID とが一致しないなどの入退場時のエラーが発生した場合は電光掲示板にエラー内容が表示される。エリア管理システムには各種の故障診断モジュールがあり、故障が検知された場合には、VSM に対して 60m/min の速度指示をあたえる。

ローカルエリアセンサは UWB では計測しにくいブラインドコーナーの天井部に設置されている。作業員のヘルメット・フォークリフトの天井部には反射板が取り付けられており、これらの位置を計測することができる。この位置データはエリア管理サーバーに送られ、AGV と作業員・フォークリフトの位置関係に応じて AGV の速度をエリア管理サーバーが VSM に指示する。

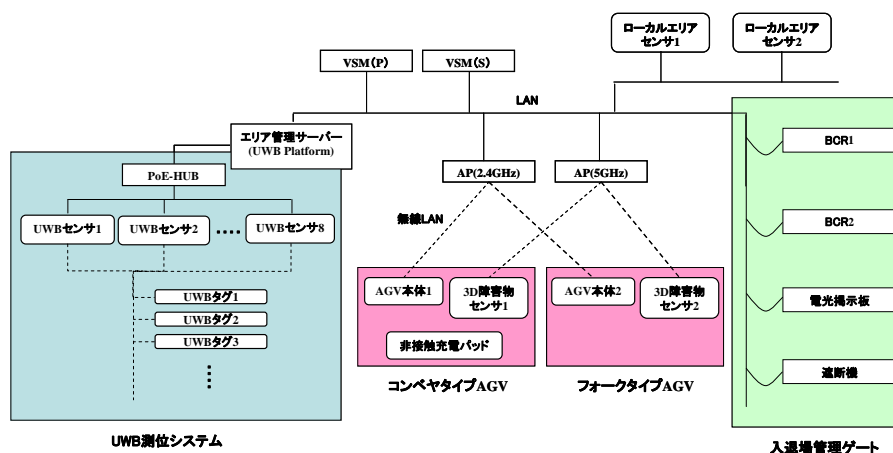
コンベヤタイプには非接触充電用のパッドが側面に取り付けられており、ステーションに停まることで自動的に充電が可能となる。



(a)テストエリア風景



(b)機器レイアウト



(c)機器構成

図 3-1 高速 AGV システム概要

表 3-1 高速 AGV システムの各機器の説明

	機器名	説明
AGV本体関係	コンベヤタイプAGV	コンベヤタイプの高速AGV 最高速度200m/minで走行する。
	フォークタイプAGV	フォークタイプの高速AGV 最高速度200m/minで走行する。
	VSM	AGVの地上制御コントローラ AGVに対して速度を指示する。
	3D障害物センサ	AGV前面に取り付けられたAGV進行方向前方の障害物を3次元的に検知するセンサ 障害物を検知するとAGVを停止させる。
	AP	2.4GHzあるいは5GHzの無線アクセスポイント VSMからの速度指示をAGV本体に送信する。
	非接触充電パッド	AGV側面に取り付けられた非接触充電用のパッド 非接触充電ステーションにAGVが止まることで、パッドを通してAGV本体に充電が行われる。
	非接触充電ステーション	非接触充電用のステーション
エリア管理関係	エリア管理サーバー	UWBセンサからの位置情報を用いて、作業員・フォークリフトとAGVとの位置関係からVSMに速度指示を送信する。
	UWBセンサ	UWBタグから電波を受信するセンサ 作業員・フォークリフト・AGVの位置を計測する。
	UWBタグ	UWB電波を発信するタグ 作業員・フォークリフト・AGVに対してそれぞれ2個ずつ取り付けられる。
	ローカルエリアセンサ	レーザー式のセンサで、作業員・フォークリフト・AGVに反射板をつけることで、それらの位置を計測する。
入退場ゲート関係	安全柵	許可のない作業員・フォークリフトとAGVとを物理的に分離し、安全を確保するための柵
	遮断機	許可のある作業員・フォークリフト以外を入れないための遮断機
	BCR	作業員が持つバーコードを読み込ませることで、バーコードIDを認識するバーコードリーダー
	電光掲示板	入退場時のエラー内容を表示する電光掲示板

3.2. 高速 AGV

本プロジェクトでは、高速 AGV としてコンベヤタイプのものと同タイプのものを開発した。以下に各タイプの仕様および安全回路の説明を行い、基本性能評価試験の結果についてもあわせて説明を行う。

3.2.1. コンベヤタイプ

3.2.1.1. 仕様

表 3-2 にコンベヤタイプ AGV の仕様を、図 3-2 にその外観を示す。

表 3-2 コンベヤタイプ AGV の仕様

コンベヤタイプ		
走行部	車体長	2740mm
	車体幅	1354mm
	車体高さ	1950mm
	フロアバンパ間	30mm
	ホイールベース	1455mm
	トレッド	906mm
	自重	1500kg
	直進速度	200m/min
	カーブ速度	60m/min
	クリープ速度	5m/min
	加速度	0.07G
	減速度	0.07G
	駆動方式	FF (Single Drive),
	ガイド方式	Laser guidance
停止精度	±10mm	
バッテリー	250AH,48V	
移載部	許容荷重	1050kg
	移載レベル	600mm
	搬送物	1100W x 1100L
	移載速度	12m/min
安全デバイス	3D障害物センサ	
	全周ソフトバンパ	
	方向指示器	
	非常停止 x 4pc	
	メロディ	



図 3-2 コンベヤタイプ AGV

3.2.1.2. 安全回路

AGV はセーフティコントローラを搭載しており、AGV 本体に搭載している 2 個の CPU を持ったコントローラの生存確認を含め、下記 5 つのデバイスがシリーズに接続された回路を 2 重で構成している。

<デバイス>

- 3D 障害物センサ
- 全周ソフトバンパ
- 非常停止ボタン (4 箇所)
- AGV コントローラ (CPU)
- AGV ナビゲーションコントローラ (CPU)

上記のデバイスのどれか 1 つでもダウンした場合、動力切断リレーを動作させる事で AGV に搭載している全てのモータ動力ライン (走行モータ・ステアリングモータ・移載機コンベヤモータ) である DC48V を切断する。

3.2.2. リアフォークタイプ

3.2.2.1. 仕様

表 3-3 にリアフォークタイプ AGV の仕様を、図 3-3 にその外観を示す。

表 3-3 リアフォークタイプ AGV の仕様

リアフォークタイプ		
走行部	車体長	3744mm
	車体幅	1299mm
	車体高さ	2417mm
	フロアバンパ間	30mm
	ホイールベース	1524mm
	トレッド	1018mm
	自重	4500kg
	直進速度	200m/min(前進)・60m/min(後退)
	カーブ速度	60m/min
	クリーブ速度	5m/min
	加速度	0.07G
	減速度	0.07G
	駆動方式	FR (Twin Drive)
	ガイド方式	Laser guidance
	停止精度	±10mm
移載部	バッテリー	600AH,48V
	許容荷重	1050kg
	移載レベル	Max 2566mm
	搬送物	1100W x 1100L
安全デバイス	昇降速度	30m/min
	3D障害物センサ + 2D障害物センサ x 3pc	
	全周ソフトバンパ	
	方向指示器	
	非常停止 x 4pc	
		メロディ



図 3-3 リアフォークタイプ AGV

3.2.2.2. 安全回路

AGV はセーフティコントローラを搭載しており、AGV 本体に搭載している 2 個の CPU を持ったコントローラの生存確認を含め、下記 6 つのデバイスがシリーズに接続された回路を 2 重で構成している。

<デバイス>

- 3D 障害物センサ
- 2D 障害物センサ 3PC
- 全周ソフトバンパ
- 非常停止ボタン (4 箇所)
- AGV コントローラ (CPU)
- AGV ナビゲーションコントローラ (CPU)

上記のデバイスのどれか 1 つでもダウンした場合、動力切断リレーを動作させる事で AGV に搭載している全てのモータ動力ライン (走行モータ・ステアリングモータ・移載機モータ) である DC48V を切断する。

リアフォークタイプ AGV は、前方向 (200m/min) に加え、後方 (60m/min) への走行、及び旋回 (60m/min) も出来るため、安全障害物センサ配置を追加している。また、フォーク昇降部分での動作も新たに加わり昇降中に於ける障害物センサでの監視も安全対策として行っている。

リアフォークタイプに設置した 3D 障害物センサ及び 2D 障害物センサの配置及び目的を図 3-4 に示す。

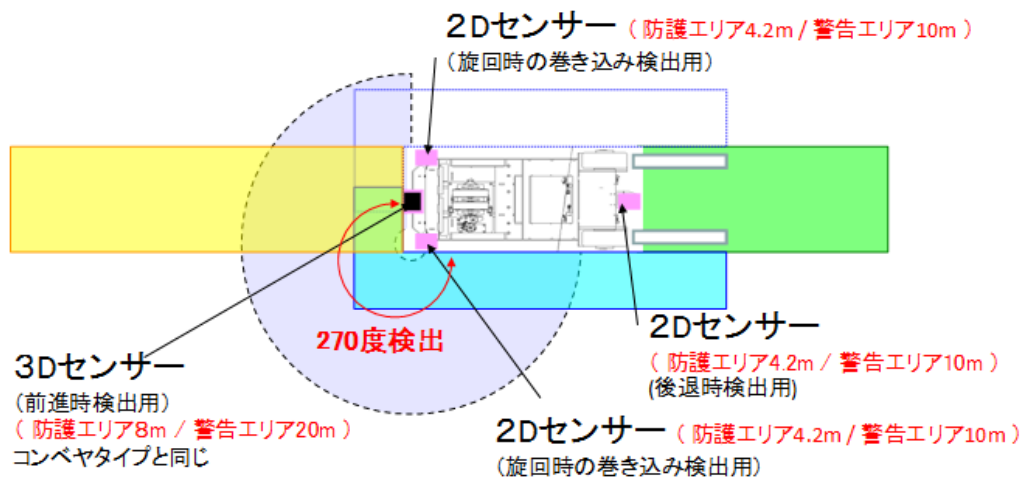


図 3-4 障害物センサの配置及び目的

3.2.3. 高速 AGV の基本性能評価試験

高速 AGV の安全技術を検証する上で、AGV 本体の基本評価及び寿命・耐久評価を実施した。表 3-4 に示す各評価項目を実施し設計基準値内にある事を確認した。

表 3-4 AGV の評価内容

項目		内容	詳細	
AGV 本体	基本評価	機械評価	強度(応力)	実機応力測定
			輪重	車体重量&輪重バランス評価
			トルク	電流測定にて評価
		電気評価	非常停止時の台車挙動(直線)	非常停止G&停止距離&ステアロック
			非常停止時の台車挙動(カーブ)	直線と併せて評価
	能力評価	各部電圧・電流	電流測定による稼働率の確認	
		速度特性	走行速度、加減速Gの確認	
	安全評価	バッテリー	走行可能時間の確認	
		バンパ	入力時動力切断の確認	
		3Dセンサ	開発製品の為、別途評価	
		非常停止	入力時動力切断の確認	
		音量	10m離れた位置でメロディ音が認識	
		ウインカ	10m離れた位置での視認性確認	
	操舵性評価	脱線	脱線検出距離	
直進性		50mm以内の振れ量で走行		
直線復帰距離		カーブ軌跡評価(R1200,R1000)		
停止精度評価	走行停止精度	STでの前後方向&傾きの精度		
寿命・耐久	振動	許容段差評価テスト	うねり・段差等の条件下での稼働	
		各制御パーツの振動評価	振動測定を行う	
耐久性	車輪	駆動&従動車輪の磨耗、磨耗測定方法		
		連続走行テスト	ルーブリインの連続走行テスト	

3.2.3.1. 強度の測定

3.2.3.1.1. 測定方法

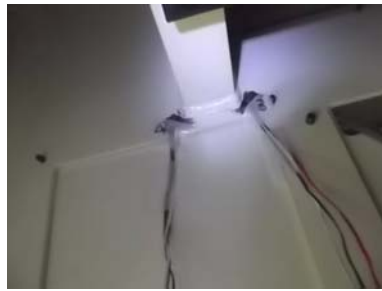
応力が集中しそうな部分 24 か所に歪ゲージを貼付け (図 3-6 参照)、停止状態 (静的応力) 及び走行時 (動的応力) での応力を測定した (図 3-5 参照)。



図 3-5 測定機器設置時の全体風景



a)測定箇所 1,2



b)測定箇所 3,4



c)測定箇所 5,6



d)測定箇所 7,8



e)測定箇所 9,10



f)測定箇所 11,12



g)測定箇所 13,14



h)測定箇所 15,16



i)測定箇所 17



j)測定箇所 18



k)測定箇所 19



l)測定箇所 20



m)測定箇所 21



n)測定箇所 22



o)測定箇所 23



p)測定箇所 24

図 3-6 各測定箇所

3.2.3.1.2. 測定結果

表 3-5 (a)に停止状態（静的応力）に於ける 24 か所の応力測定値を、表 3-5(b)に走行時（動的応力）に於ける 24 か所の応力測定値を示す。

測定結果より図 3-7～図 3-8 に示すように、鉄（SS400）の引張圧縮及び曲げの許容限界値内である事を確認した。

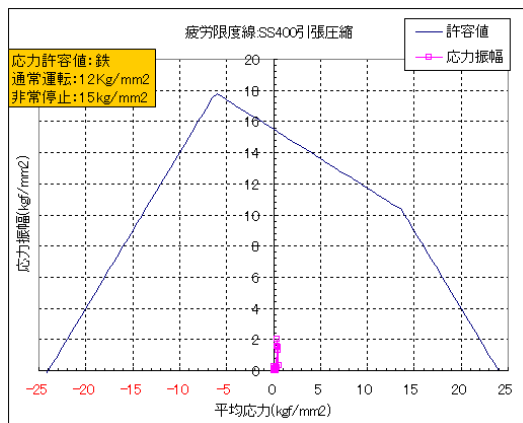
表 3-5 応力測定値

(a) 静的

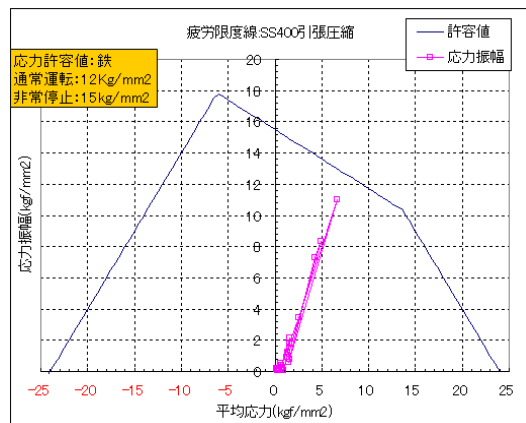
ゲージ No	発生応力(kgf/mm ²)		評価応力(kgf/mm ²)		許容値 (kgf/mm ²)	対許容 値比 (%)
	最大応力	最小応力	応力振幅	平均応力		
1	-0.10	-0.20	0.1	-0.1	15.5	0.3%
2	-0.27	-0.56	0.1	-0.4	15.5	0.9%
3	-0.19	-0.22	0.0	-0.2	15.5	0.1%
4	-0.19	-0.31	0.1	-0.2	15.5	0.4%
5	-0.26	-0.47	0.1	-0.4	15.5	0.7%
6	-0.26	-0.32	0.0	-0.3	15.5	0.2%
7	0.10	-0.21	0.2	-0.1	15.6	1.0%
8	0.27	0.07	0.1	0.2	15.6	0.6%
9	0.02	-0.06	0.0	-0.0	15.7	0.2%
10	0.12	-0.05	0.1	0.0	15.7	0.6%
11	0.30	-0.80	0.5	-0.3	15.6	3.5%
12	0.09	0.06	0.0	0.1	15.8	0.1%
13	0.06	-0.59	0.3	-0.3	15.4	2.1%
14	0.20	-0.45	0.3	-0.1	15.5	2.1%
15	-0.27	-0.63	0.2	-0.5	15.6	1.2%
16	-0.02	-0.52	0.2	-0.3	15.3	1.6%
17	-0.24	-1.23	0.5	-0.7	15.6	3.2%
18	1.51	0.61	0.4	1.1	15.1	3.0%
19	2.03	1.19	0.4	1.6	13.9	3.0%
20	0.18	-0.63	0.4	-0.2	15.8	2.6%
21	0.19	-0.52	0.4	-0.2	15.8	2.2%
22	1.30	0.41	0.4	0.9	14.3	3.1%
23	1.57	0.81	0.4	1.2	14.2	2.7%
24	0.20	-0.35	0.3	-0.1	15.7	1.7%

(b) 動的

ゲージ No	発生応力(kgf/mm ²)		評価応力(kgf/mm ²)		許容値 (kgf/mm ²)	対許容 値比 (%)
	最大応力	最小応力	応力振幅	平均応力		
1	0.19	-0.09	0.1	0.0	15.5	0.9%
2	0.15	-0.13	0.1	0.0	15.5	0.9%
3	0.19	-0.16	0.2	0.0	15.5	1.1%
4	0.10	-0.21	0.2	-0.1	15.5	1.0%
5	0.53	-0.56	0.5	-0.0	15.5	3.5%
6	0.18	-0.16	0.2	0.0	15.5	1.1%
7	0.07	-0.47	0.3	-0.2	15.6	1.7%
8	0.04	-0.51	0.3	-0.2	15.6	1.8%
9	0.12	-1.25	0.7	-0.6	15.7	4.4%
10	0.24	-1.37	0.8	-0.6	15.7	5.1%
11	0.13	-0.57	0.4	-0.2	15.6	2.3%
12	0.09	-1.64	0.9	-0.8	15.8	5.5%
13	1.77	-1.40	1.6	0.2	15.4	10.3%
14	1.25	-1.48	1.4	-0.1	15.5	8.8%
15	0.91	-1.65	1.3	-0.4	15.6	8.2%
16	2.15	-1.03	1.6	0.6	15.3	10.4%
17	0.40	-1.00	0.7	-0.3	15.6	4.5%
18	3.46	-1.57	2.5	0.9	15.1	16.6%
19	11.01	-2.35	6.7	4.3	13.9	48.2%
20	0.75	-2.47	1.6	-0.9	15.8	10.2%
21	0.57	-2.37	1.5	-0.9	15.8	9.3%
22	7.30	-1.20	4.3	3.0	14.3	29.6%
23	8.36	-1.55	5.0	3.4	14.2	34.9%
24	0.91	-1.76	1.3	-0.4	15.7	8.5%



a) 静的



b) 動的

図 3-7 引張圧縮

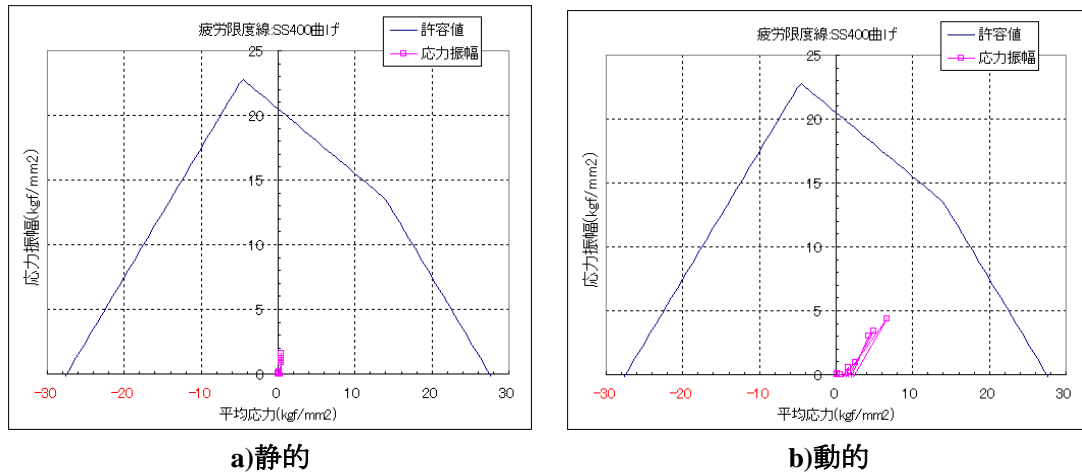


図 3-8 曲げ

3.2.3.2. 非常停止時における停止距離

AGV が最高速度 200m/min にて走行中に非常停止を動作させた時の AGV の走行位置（距離）と速度の関係を図 3-9 に示す。

AGV が 200m/min から非常停止するまでに必要な距離は 2323mm 必要である事が分かった。
 (減速 G : 0.244G ・ 減速時間 : 1.385 秒)

上記の結果から、200m/min で走行中は、障害物センサの防護エリアは、2500mm 以上に設定する必要がある。

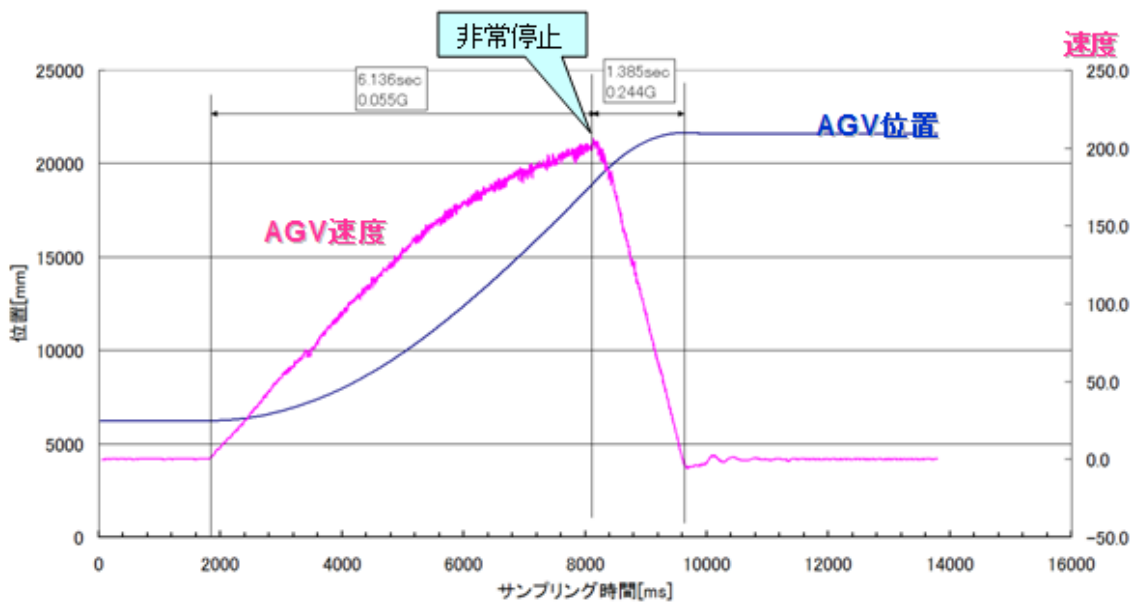


図 3-9 非常停止時の AGV 走行位置と速度

3.2.3.3. 停止精度

図 3-10 に AGV が自動で目標位置に停止した時の測定位置を示す。

表 3-6 に AGV が無負荷状態時の測定値を表 3-7 に負荷（1000Kg）状態時の測定値を記す。結果目標値である±10mm の停止精度は大きくクリアしている事が分かった。

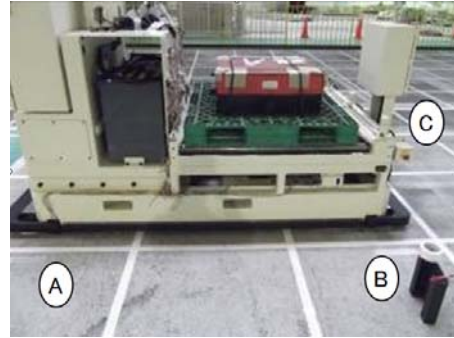
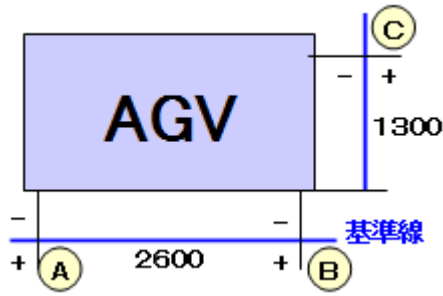


図 3-10 測定ポイント

表 3-6 無負荷時の停止精度

無負荷時				単位[mm]
回数	1	2	3	平均
A	0.0	3.0	0.0	1.0
B	0.0	1.5	0.0	0.5
C	0.0	3.0	2.0	1.7

表 3-7 負荷時の停止精度

負荷時(1000Kg)				単位[mm]
回数	1	2	3	平均
A	0.0	0.0	0.0	0.0
B	0.0	0.0	0.0	0.0
C	0.0	3.0	2.0	1.7

3.3. 3D 障害物センサ

3.3.1. 仕様

3.3.1.1. 概要

高速 AGV が自律走行する時の障害物センサである。距離 20m 先で上下方向 2m の検出エリアがあり、床に倒れている人の検出や、フォークリフトのフォークに積まれた障害物を、3 次的に検出し、AGV の走行の安全性を確保する。図 3-11 に 3D 障害物センサの概略図を示す。

安全性性能は IEC61496-1-3（レーザセンサの安全基準）の Type3、機能安全は IEC61508 の SIL2 に準拠された設計を行う。

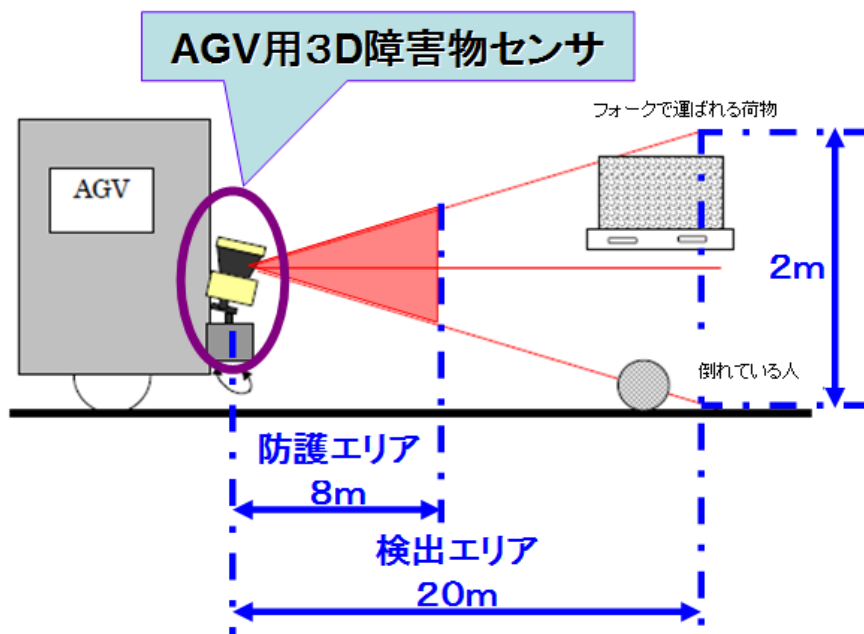


図 3-11 3D 障害物センサの概略図

3D 障害物センサは、水平検出角度 190 度・検出分解能 0.125 度の 2 次元のレーザレンジファインダと、垂直検出角度 7 度検出分解能 0.9 度のジンバル構造を持ったパルスモータにより、3 次元空間の距離画像を所得するセンサである。

パルスモータは フォトインタラプタで検出した原点板の位置を角度 0 として、1.8 度ピッチで送られてきたパルスに同期して回転する。各ポイントの垂直走査角 ξ は、パルスの数より演算して求める。パルスモータの軸に直結されたジンバル構造の垂直走査機構によりレーザセンサ全体を垂直走査する。

距離演算コントローラは、レーザセンサから USB で送られてきた水平走査角度 (θ) と距離データ (R) とパルスモータコントローラから USB 送られてきたパルス信号 (ξ) から、3 次元演算を行なう。

電源立ち上げ時、コントローラは CF のプログラムデータを内部 RAM に展開し、RAM に書かれたプログラムデータにより動作する。

CF に書かれたエリアデータも上記と同様に RAM に展開される。外部エリア信号により検出エリアの設定されたデータと、演算された 3 次元空間の検出ポイントを比較し、エリア内に上記検出ポイントがある場合障害物有信号を出力する。エリアは防護エリア（安全）と警報エリア 1 及び 2 がある。

レーザセンサは、半導体レーザの飛行時間から距離を計測するセンサである。半導体レーザから射出した 5ns のパルス幅のレーザ光は、DC モータに取り付けられたミラーにより水平方向に折り曲げられ、検出物に照射される。物体に当たって反射されたレーザ光は上記ミラーにより垂直方向に曲げられ、APD（アバランシェ・フォトダイオード）に導かれる。フォトダイオードで電気信号に変換された信号（アナログ信号）を AD コンバータでデジタル信号に変換し、距離演算回路(ASIC)に送られる。ASIC は信号の立ち上がり部をデジタル演算で求め、レーザ発光信号と検出信号の立ち上がり部の遅延時間をもとめ、遅延時間と光の速度から距離を演算する。DC モータに取り付けられたミラーは 360 度回転し、光を円周状に走査する。ミラノ走査角度はモータの回転軸に取り付けられたエンコード板から角度を求め、角度 (θ) と検出下距離 (R) から 2 次元平面の距離画像データを取得する。この距離画像データはリアルタイムに USB 通信で外部に送られる。

3.3.1.2. 仕様値

表 3-8 に 3D 障害物センサの仕様値をまとめる。

3.3.1.3. 機器の構成

図 3-12 に 3D 障害物センサの機器の構成を示す。

図 3-12 の中で青線は制御回路の信号の流れを表し、橙線はモニタ回路の信号の流れを表している。電源回路は 3 個持っており、1 つは ASIC1, CPU1, 出力回路 1 の電源供給を行い、1 つは ASIC2, CPU2, 出力回路 2 の電源供給を行い、1 つはその他の回路に電源供給を行う構成である。

項目	仕様値
検出距離（安全）	8m 黒1.8%（防護エリア）
検出距離（非安全）	20m 黒10%（警報エリア）
検出距離（モニタ）	30m
水平走査角	190度
水平分解能	0.125度（20m分解能 44mm）
垂直走査角	6度
垂直分解能	0.75度
水平走査方法	回転ミラー（1200rpm） DCモータ
垂直走査方法	ジンバル（150rpm） パルスモータ
垂直方向検出エリア	距離20m 2000mm 距離8m 800mm 距離1m 100mm
検出物の大きさ	横方向 φ100mm(8mまで) φ150mm(20m)
応答速度	450ms
大きさ	200×160×160
重量	5.5kg以下
検出エリア	16パターン
電源	24V -30%/+20%
電流	0.8A(定常時)、起動時 2A
入力	エリア切り替え入力 その他制御入力
出力	OSSD（防護エリア内出力）
	WF1/2（警報エリア内出力）、その他 制御出力
外部通信	イーサネット 100BaseTX
使用環境	-10度～50度 湿度85%以下（結露しないこと）

表 3-8 3D 障害物センサの仕様値

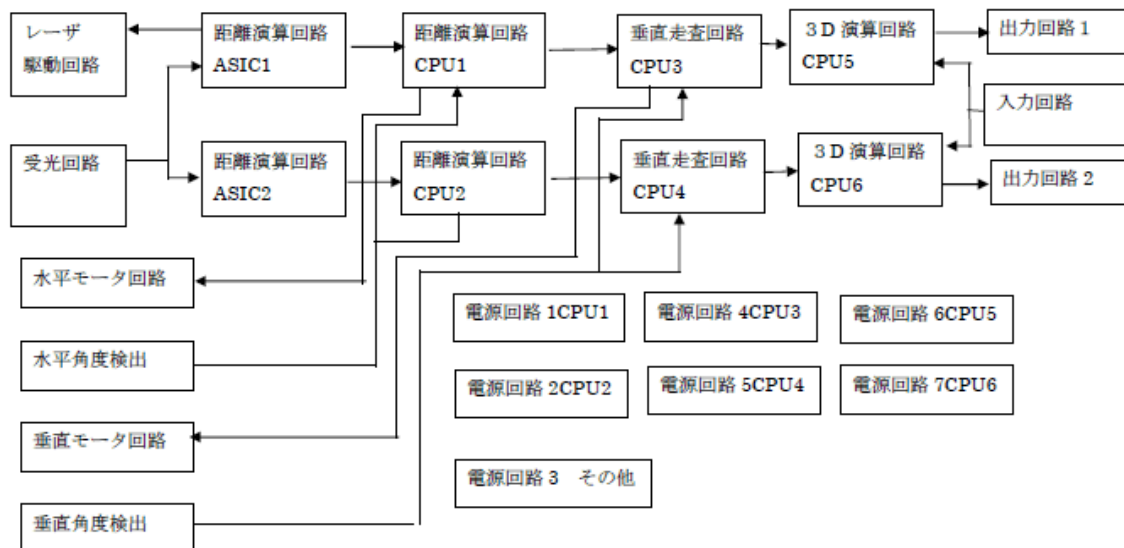


図 3-12 機器の構成

3.3.1.4. 各モジュールの機能及び安全設計

3.3.1.4.1. システム

複雑な構成の部品、及び安全に最も重要な出力回路は 2 重化する。
 また、2 重化された部品に供給する電源も 2 重化する。
 単純な部品で構成されたモジュールは 1 重化であるが、監視モニタは 2 重化する。
 エリアを切りかえる入力回路は回路的に 2 重化し、モニタは CPU 間のクロスチェックで行う。

3.3.1.4.2. レーザ駆動回路

レーザー発光のドライブ回路に於いて、レーザー異常は 2 重化されたレーザーモニタ回路 (ASIC+CPU) で監視する。異常時は各 CPU がレーザー発光を停止する (レーザー制御信号、レーザー電源回路を遮断)。また、異常時は出力回路を OFF する。

3.3.1.4.3. 受光回路

レーザーの受光信号の増幅回路に於いて、受光回路異常は 2 重化されたレーザーモニタ回路 (ASIC+CPU) で監視する。
 異常時は出力回路を OFF する。

3.3.1.4.4. 水平モータ回路

1200rpm で回転する DC モータを使用し、モータの制御は水平角度検出のゼロ信号の間隔 (50ms) になるように行う。また、モータの監視は CPU1 及び 2 両方で監視する。異常時は出力回路を OFF する。

3.3.1.4.5. 垂直モータ

150rpm で回転するパルスモータを使用し、モータ制御は CPU1 のパルス発振回路で制御する。また、脱調等のモータ異常は CPU1 及び 2 両方で監視する。異常時は出力回路を OFF する。

3.3.1.4.6. 水平角度検出

0.25 度ピッチで出力するエンコーダとゼロ信号 (原点位置) を出力する回路で構成し、エンコーダ信号と同期してレーザを発光する。

従ってモータ回転停止の場合レーザ発光はしない (フェイルセーフ設計)。また、エンコーダ異常は 2 重化されたレーザモニタ回路 (ASIC+CPU) で監視する。異常時は出力回路を OFF する。

3.3.1.4.7. 垂直角度検出

モータのゼロ信号 (基準位置) を出力する事により垂直角を検出し、信号異常は CPU1 及び 2 両方で監視する。異常時は出力回路を OFF する。

3.3.1.4.8. ASIC1 及び 2

距離を演算する回路であり、回路の異常は内部のテストパターンで行う。(テストパターンは CPU にて書き込みチェックで行う)。また、監視は CPU1 及び 2 両方で行う。

異常時は出力回路を OFF する。

3.3.1.4.9. CPU1 及び 2

センサの距離演算回路であり、回路異常は SIL の定められた自己診断を行なう。

3.3.1.4.10. CPU3 及び 4

センサの垂直走査回路であり、回路異常は SIL の定められた自己診断を行なう。

3.3.1.4.11. CPU5 及び 6

3D の演算回路であり、回路異常は SIL の定められた自己診断を行なう。

3.3.1.4.12. 出力回路 1 及び 2

モニタは出力 ON 時に CPU5 及び 6 で出力 OFF チェックを行なう。

3.3.1.4.13. 入力回路

エリア切り替え入力は CPU5 には ActivH、CPU6 には ActivL 信号を入力する。

3.3.1.4.14. 電源回路 1, 2, 4, 5, 6, 及び 7

2 重化されたそれぞれの回路に電源を供給し、電源異常はそれぞれの CPU 間で監視する。

3.3.1.4.15. 電源回路 3

2 重化されていないモータやレーザ回路などに電源を供給する回路であり、入力電圧及び出力電圧監視は CPU1 及び 2 両方で行う。

異常時は出力回路を OFF する。

3.3.2. 性能評価試験結果

3.3.2.1. ISO3691-4.2(DIS)を参考にテストピースを検出できる事の確認

3.3.2.1.1. Φ70mmx400mm (足を想定) のテストピース

足を想定した大きさΦ70mmx400mm で反射率の違う白色・黒色のテストピースを図 3-13 に示す 3 か所の位置に設置して、コンベヤタイプ AGV とフォークタイプ AGV の両方で安全距離内の停止ができるか検証を行った。

200m/min の走行速度から、テストピースを検出して停止した時の距離を表 3-9 に示す。センサの応答速度は、450msec である事から 200m/min で走行している状態での検出精度は、約 1500mm の誤差が発生する事になる。今回の検証結果では最短距離でも 850mm という結果になり、安全性は十分確保できていると考えられる。

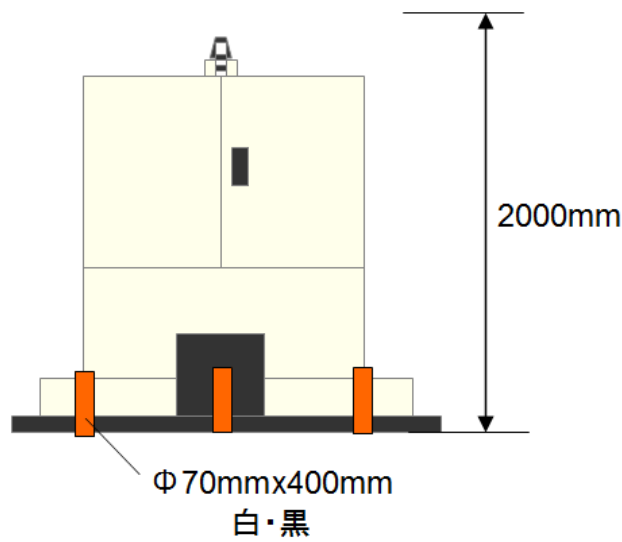


図 3-13 AGV とテストピースの位置関係

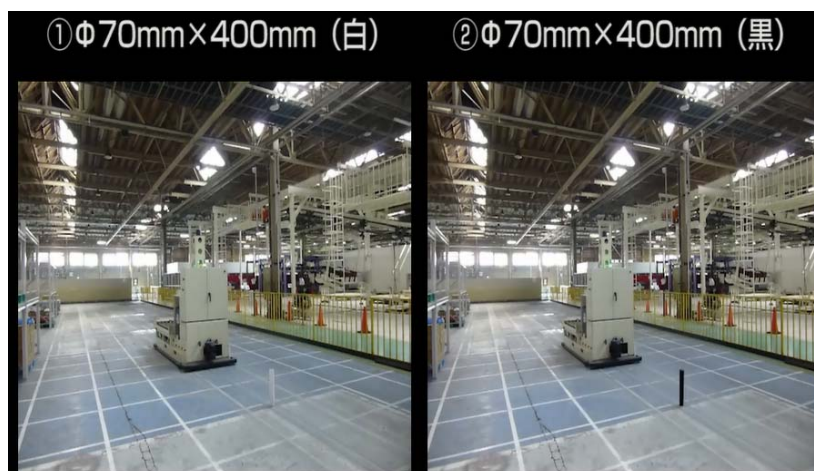


図 3-14 白黒各テストピースのテスト風景

表 3-9 各 AGV でのテストピース検出停止距離

単位:mm

AGVタイプ	黒(φ70)			白(φ70)		
	左	中	右	左	中	右
コンベヤ	2600	2100	2200	1350	1250	2550
	1900	2750	1950	2800	1800	2150
	2900	2000	1100	2400	1500	2750
フォーク	左	中	右	左	中	右
	850	2200	1450	1450	2300	2250
	850	2200	2100	1400	2250	2200
	850	2300	2000	1850	2300	2300

3.3.2.1.2. Φ200mmx600mm（胴体を想定）のテストピース

人が倒れている状態を想定した大きさΦ200mmx600mmで反射率の違う白色・黒色のテストピースを図 3-15 に示す 2 か所の位置に設置して、コンベヤタイプ AGV とフォークタイプ AGV の両方で安全距離内の停止ができるか検証を行った。

200m/min の走行速度から、テストピースを検出して停止した時の距離を表 3-10 に示す。

センサの応答速度は、450msec である事から 200m/min で走行している状態での検出精度は、約 1500mm の誤差が発生する事になる。今回の検証結果では最短距離でも 2200mm という結果になり、安全性は十分確保できていると考えられる。

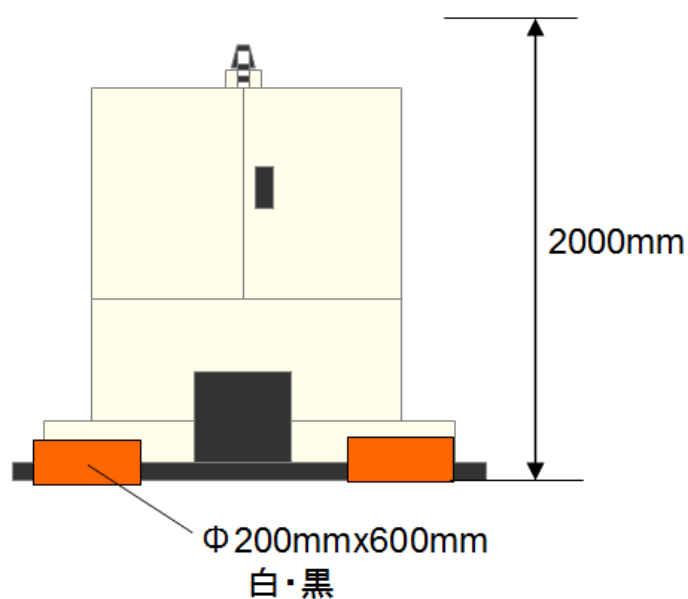


図 3-15 AGV とテストピースの位置関係



図 3-16 テスト風景

表 3-10 各 AGV でのテストピース検出停止距離

単位:mm

AGVタイプ	黒(φ200)		白(φ200)	
	左	右	左	右
コンベヤ	2500	2200	2850	2850
	2700	2500	2350	2200
	2400	2200	2600	2600
フォーク	左	右	左	右
	3150	3100	3400	2600
	2600	3000	3100	3500
	2800	2900	3100	3000

3.3.2.2. 高さ方向における障害物の検知・AGVの停止を確認

大きさΦ200mmx300mmで反射率の違う白色・黒色のテストピースを図3-17に示す2か所の位置に設置して、コンベヤタイプAGVで安全距離内の停止ができるか検証を行った。

200m/minの走行速度から、テストピースを検出しAGVと衝突する前に減速停止し、且つ、検出の安定性評価として5分間以上連続継続検出する事を判定基準とした。

全ての場合に於いてテストピースを検出して停止出来る事確認した。評価結果を表3-11に示す。

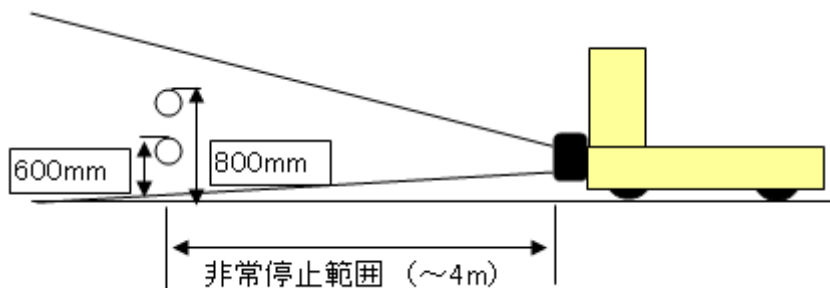


図 3-17 AGV とテストピースの位置関係

表 3-11 高さ方向の検出可否

設置高さ	テストピース	テスト結果	
		測定回数	停止可否判定
800mm	Φ200×300 白	1	○
		2	○
		3	○
	Φ200×300 黒	1	○
		2	○
		3	○
600mm	Φ200×300 白	1	○
		2	○
		3	○
	Φ200×300 黒	1	○
		2	○
		3	○

3.3.2.3. まとめ

AGV の走行速度 200m/min に於いて、テストピースを検出し安全に停止出来る事が確認出来た。

評価に於いては、3D 障害物センサは、水平に取り付ける事が必要である事が分かり、センサの取り付け位置を 230mm から 130mm に変更した (図 3-18、図 3-19 参照)。

この設置位置で物流センターにおける安全性検証テストを実施し、問題が発生しない事を確認しました。

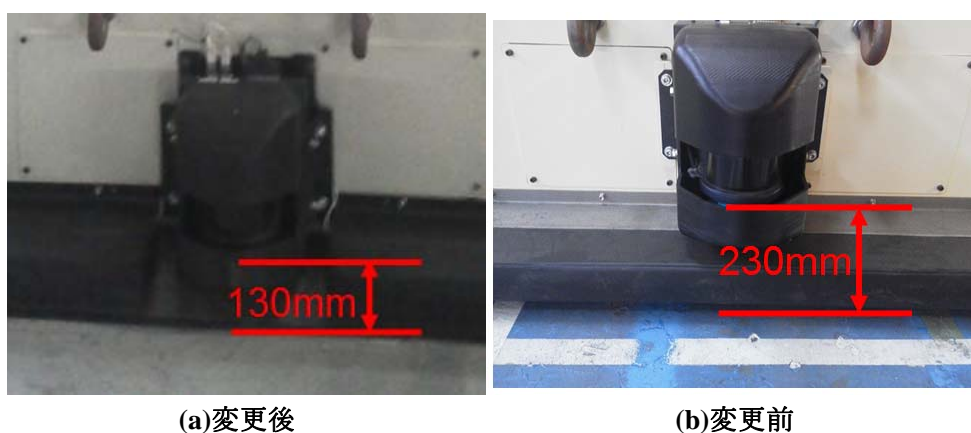


図 3-18 3D 障害物センサの取付位置の変更



(a)変更後

(b)変更前

図 3-19 3D 障害物センサ取付位置変更後の AGV 外観

3.4. エリア管理システム

本節ではエリア管理システムの開発概要について述べる。なお、エリア管理システムの認証については本節では述べずに、後の 5.1 節で述べることとする。本節の構成としては、3.4.1 項でエリア管理システムの仕様、3.4.2 項でエリア管理システムに用いられている UWB 測位システムの基本性能評価試験、3.4.3 項でエリア管理システムと他のシステムとの連動試験について述べる。

3.4.1. 仕様

3.4.1.1. 概要

エリア管理システムの主な役割は、作業員やフォークリフトが横から飛び出し AGV と衝突する状況を回避することである。特に、AGV に搭載されている障害物センサなどでは検知することが大変むずかしい、ブラインドコーナーなど、物陰からの飛び出し対策である。

そのため、作業員・フォークリフト・AGV をリアルタイムに位置計測し、それらの位置関係から AGV の速度コントロールを行えるようにした。位置を計測する手法として、UWB (Ultra Wide Band) を使用した。位置を計測する手法には、その他にも WiFi・超音波などを利用する方法も存在するが、測位精度や環境変化への頑健性などから UWB が今回最も適切であると判断したためである。ちなみに、一般的に UWB による測位システムの測位精度は平均 30cm 程度とされており WiFi に比べて測位精度が高く、超音波のように布程度の遮蔽物で波形が届かなくなるようなことがないと言われている。

エリア管理システムの主な機能は、前述のとおり、それぞれの位置関係に応じて AGV の速度制御を行うことであるが、もう 1 つの大きな特徴は、各システムにて正常に動作していることが確認できない場合には、AGV の最高速度を 60m/min にまで落とすことにある。また、AGV 側も、エリア管理システムからの信号が一定時間以上こない場合には、60m/min 以上の速度が出ないようにしている。つまり、エリア管理システムがシステムが正常に動作することを確認し、その信号が AGV にまで届いた時のみ AGV は 200m/min で走行することが可能となる。

そのため、エリア管理システムを構成する各デバイスの故障診断の手法が豊富であれば、信頼性の高い安全なシステムとなる。それを実現するため、以下に述べる機能を実装した。なお、プロジェクトでは、平成 24 年度まではエリア管理システムを安全サポート系（制御系）と位置づけ基本的な機能を開発し、平成 25 年度では安全システムに適合させた（安全化については、5.1 を参照のこと）。この章では、主に安全サポートシステムとして位置づけた機能の開発について紹介する。

3.4.1.2. 機能説明

表 3-12 にエリア管理システムの機能の一覧とその説明をまとめる。また、さらに詳しい

説明が必要なものについては説明を行う。

表 3-12 エリア管理システムの機能とその説明

機能	機能説明
位置計測	測位情報から各エージェントの位置および進行方向を特定
	作業によるフォークリフトの乗り降りを判定
	VSMから定期的にAGVの情報(位置、進行方向、速度)を取得
	ローカルエリアの情報を取得
AGV速度指示/警告	AGVの適正速度を算出・送信
	ローカルエリアとの安全判定を実施
	安全判定を二重化
	危険判定エリア内のエージェントに対して音声警告
	安全信号を二重化
ウォッチドックタイマー	各デバイスから定期的に信号を受信し、デバイスの接続を診断
	リファレンスタグを用いてセンサの状態を監視
	セル定員のチェック
	UWBとVSMによるAGVの位置情報を比較
	実際のエージェント数と登録されたエージェント数を比較
	同一エージェントのタグ間距離を監視
	各タグの測位間隔をチェック
入退場管理	ゲートを通過するエージェントを記録し、エリア内に存在するタグ・エージェントを管理
	エージェントが適切なタグを保持しているのかを判定し、入退場の許可・拒否を決定
	カメラによる画像認識を用いて許可のないエージェントの侵入を検知
	電光掲示板に入退場エラーの原因を表示
	退場する作業者が入場していたかを確認し、退場処理を実施
ログ管理	メモリ内の情報を定期的に外部ファイルへ移動
データ監視	定期的にメモリ上の情報をチェックし、全ての情報が適正に取得できているのかをチェック
画面表示	定期的にエージェントの位置を取得し画面に表示
	定期的に各デバイスの接続状態を表示
	タグのバッテリー情報やセンサ情報などを管理端末に表示
	センサの配置を自動で表示

3.4.1.2.1. エージェントの位置および進行方向の特定

各エージェントにタグを 2 個ずつ取り付け、それらの測位情報をもとにエージェントの位置と進行方向を特定する（図 3-20 参照）。

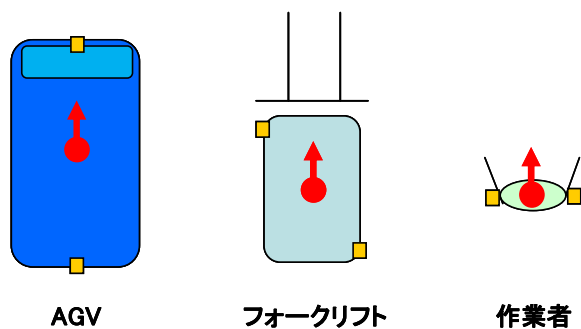


図 3-20 エージェントの位置と進行方向

3.4.1.2.2. フォークリフトの乗り降り判定

作業によるフォークリフトの乗り降りを判定する。具体的には、作業者とフォークリフトの位置関係から乗っている状態か降りている状態かを判定する（図 3-21 参照）。

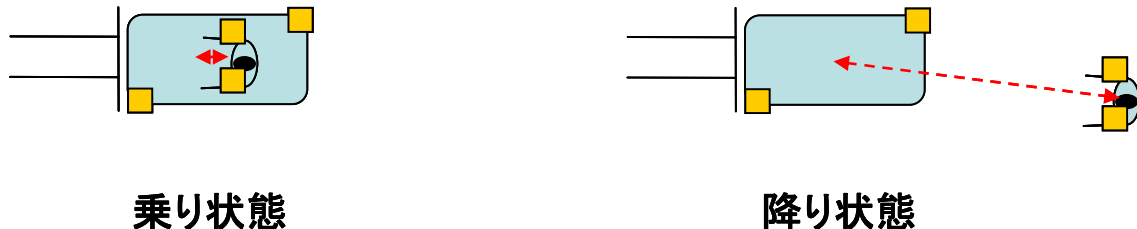


図 3-21 乗り状態と降り状態

3.4.1.2.3. AGV の適正速度を算出・送信

AGV の適正速度を算出する際のアルゴリズムについて説明する。まずは、楕円状の判定エリアをいくつか作成する。例えば図 3-22 を見ると、130m/min への減速指示を出す判定エリアが 1 個、60m/min への減速指示を出す判定エリアが 2 個となっている。なお、この判定エリアの大きさはパラメータ a , b , α , β で決まる。作業者あるいはフォークリフトが判定エリア内に入ったかどうかをそれぞれのエリアにて図中の式を用いて判定する。判定エリアに作業者あるいはフォークリフトが入ったと判定されると、その判定エリアに紐付けされた速度が指示速度として VSM に送信される。

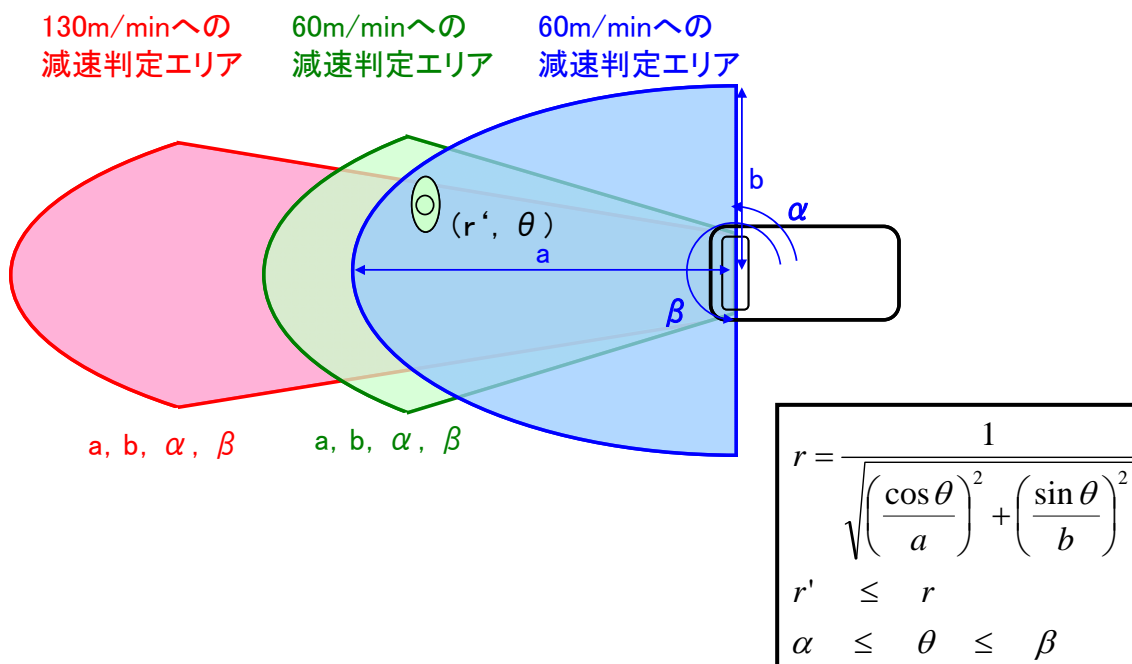


図 3-22 安全判定

3.4.1.2.4. 安全判定の二重化

2種類の安全判定を行い、それぞれの判定結果をクロスチェックし、安全な方の判定結果を出力する（図 3-23 参照）。

[安全判定1]

- ①VSMとUWB (AGV)との判定
- ②VSMと作業員、FLとの安全判定
- ③一番遅い速度を判定結果とする。

[安全判定2]

- ①UWB (AGV)とUWB (作業員)、UWB (FL)との安全判定
- ②一番遅い速度を判定結果とする。

安全判定1と安全判定2の結果で速度が遅い方を指示速度とする。

図 3-23 安全判定の二重化

3.4.1.2.5. 危険判定エリア内のエージェントに対して音声警告

危険判定エリア内にいるエージェントに対して携帯端末などを用いて音声警告を出す（図 3-24 参照）。

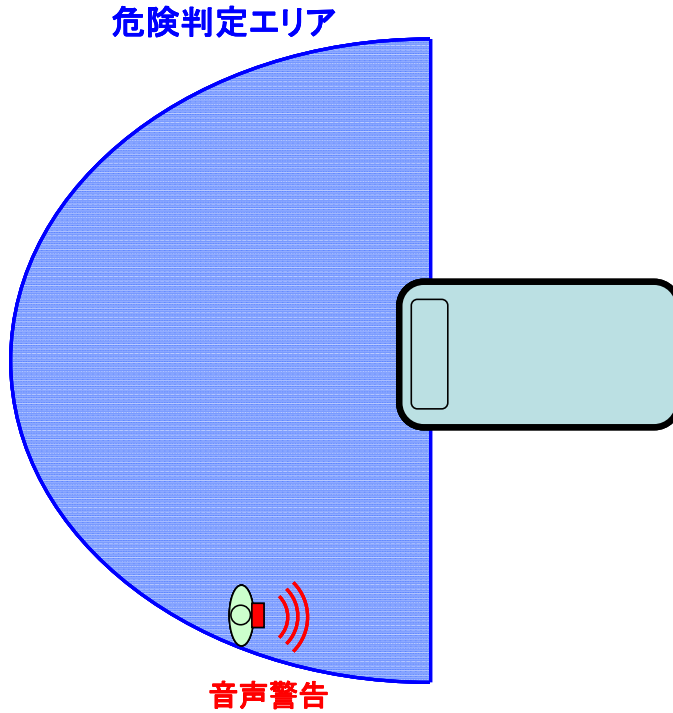


図 3-24 危険判定エリア内にいるエージェントに対する音声警告

3.4.1.2.6. 安全信号の二重化

VSM 経由と 3D 障害物センサ経由の 2 種類の方法で AGV に対して安全信号を送る（図 3-25 参照）。

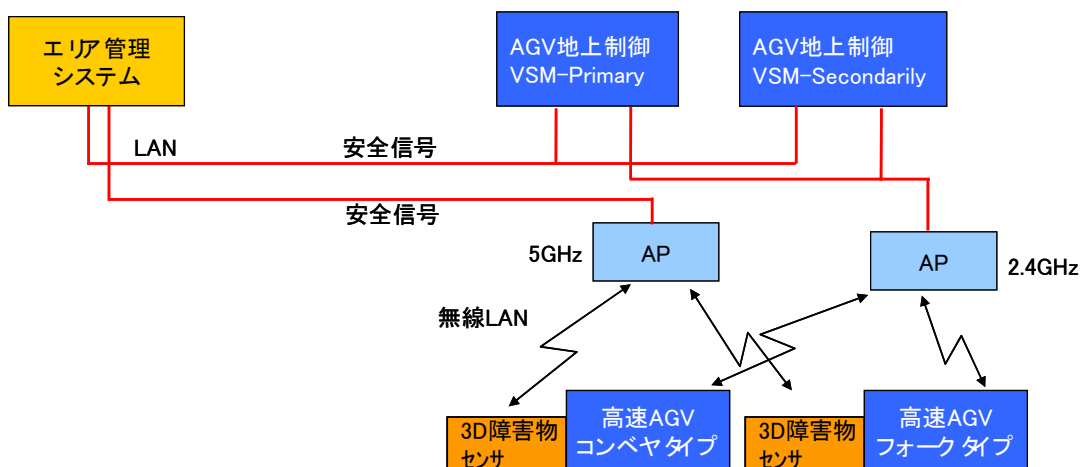


図 3-25 安全信号の二重化

3.4.1.2.7. リファレンスタグを用いて UWB センサの状態を監視

ある決められた座標に置かれたタグ（リファレンスタグ）の測位情報を監視することで、UWB センサが正常に動作しているかどうかを確認することができる（図 3-26 参照）。

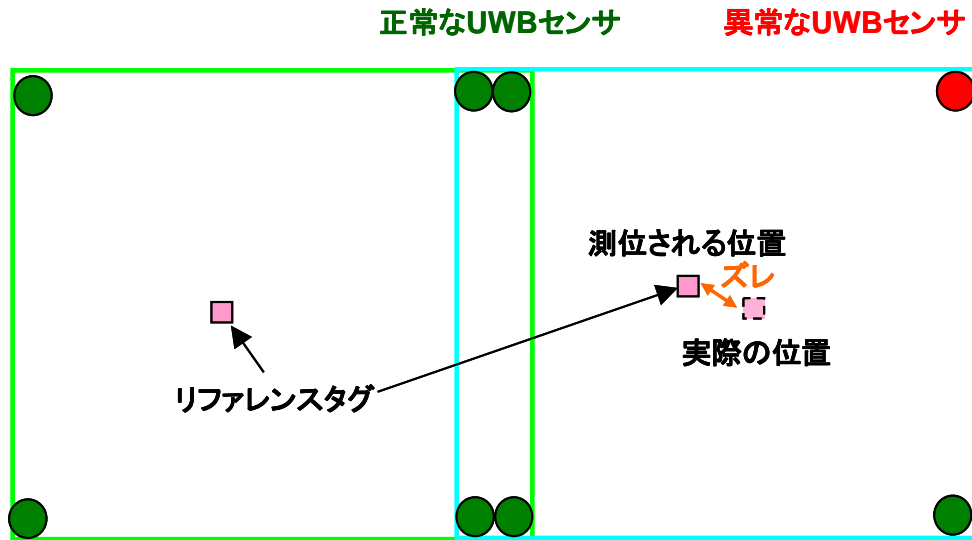


図 3-26 リファレンスタグによる UWB センサ状態の監視

3.4.1.2.8. セル定員のチェック

セルの定員をあらかじめ決めておいて、定周期でその定員を超えていないかチェックする（図 3-27 参照）。定員を超えていた場合は、VSM に低速走行指示が送信される。

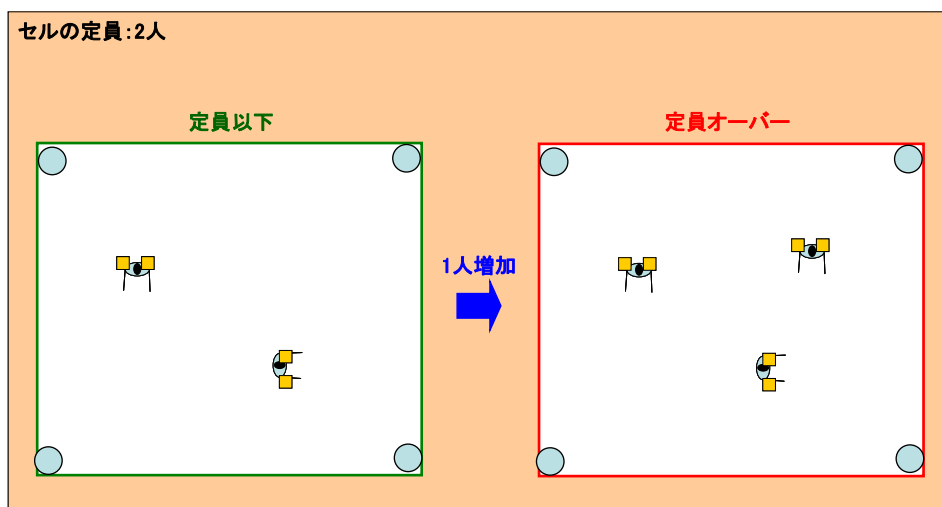


図 3-27 セル定員のチェック

3.4.1.2.9. UWB と VSM による AGV の位置情報を比較

UWB 測位システムから得られる AGV の位置情報と VSM から得られる AGV の位置情報を比較し、2つの位置情報にズレが発生している場合は VSM に低速走行指示が送信される (図 3-28 参照)。

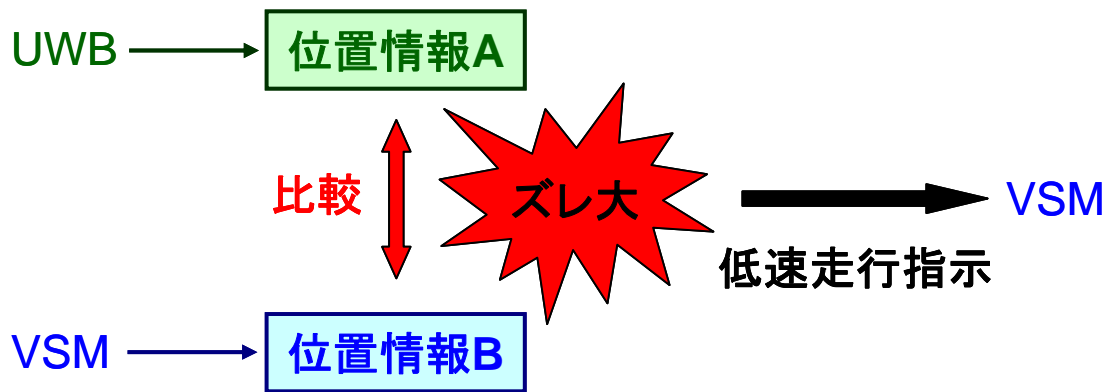


図 3-28 AGV の位置情報の比較

3.4.1.2.10. 実際のエージェント数と登録されているエージェント数を比較

実際にエリアにいるエージェントの数と登録されているエージェントの数を比較し、その数が一致しない場合は VSM に低速走行指示が送信される (図 3-29 参照)。

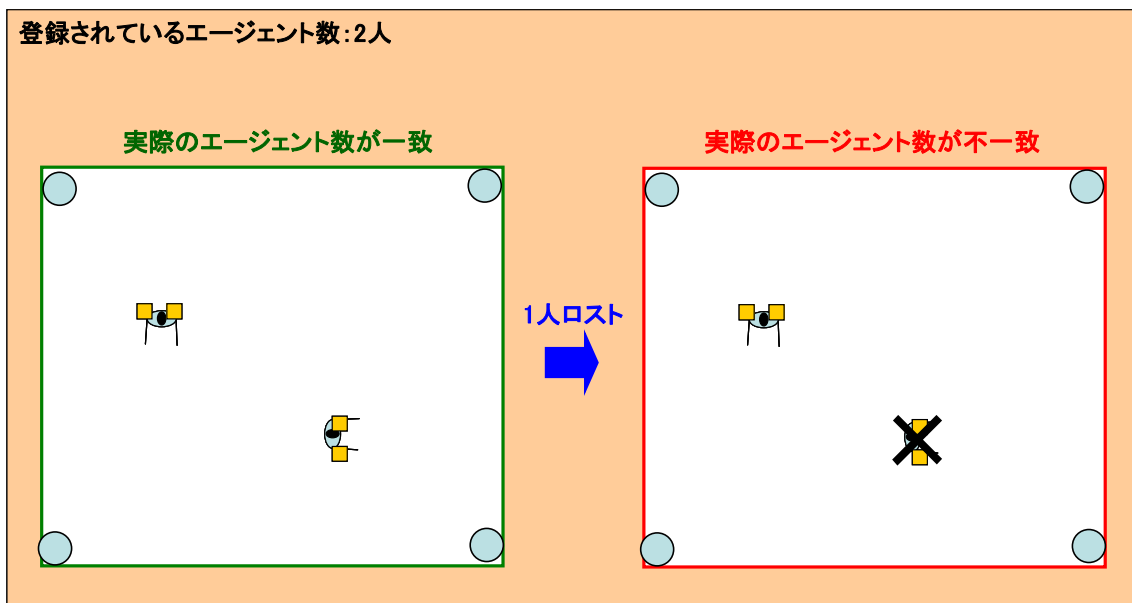


図 3-29 エージェント数の比較

3.4.1.2.11. 同一エージェントのタグ間距離を比較

同 1 エージェントのタグ間の距離を定期的に監視し、その距離が大きくなった場合はVSMに低速走行指示が送信される（図 3-30 参照）。

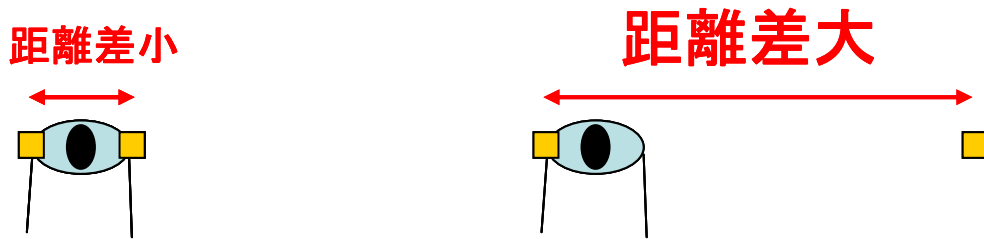


図 3-30 タグ間距離を監視

3.4.1.2.12. ゲートによる入退場者の管理

ゲートを通過するエージェントを記録し、エリア内に存在するタグ・エージェントを管理するとともに、エージェントが適切なタグを保持しているのかを判定し、入退場の許可・拒否を決定する（図 3-31 参照）。

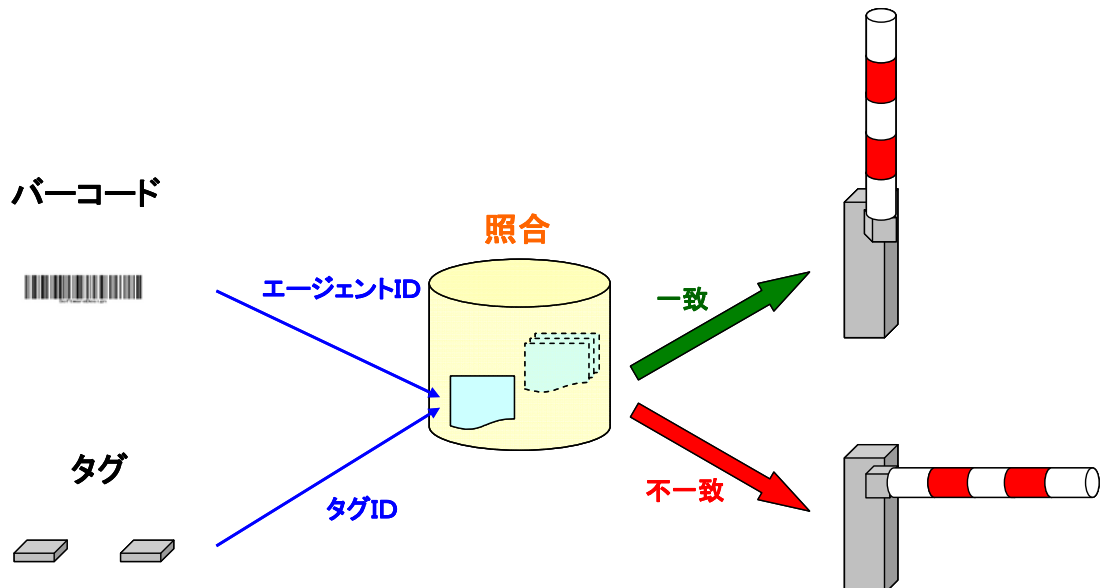


図 3-31 ゲートによる入退場者の管理

3.4.1.2.13. カメラによる画像認識を用いて許可のないエージェントの侵入を検知

カメラによる画像認識を用いて、タグ未所持者などの許可のないエージェントの侵入を検知し、VSM に低速走行指示を送信する。検知方法としては、入場処理が正常に終わったエージェントの数と画像認識により得られるエージェントの数を比較し、両者が一致しているかどうかを確認する（図 3-32 参照）。

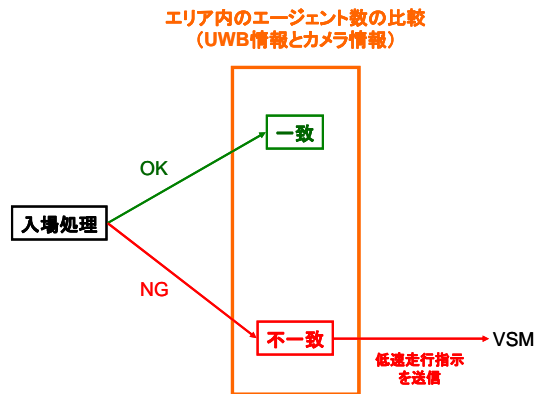


図 3-32 カメラによる画像認識を用いて許可のないエージェントの侵入を検知

3.4.1.2.14. 電光掲示板に入退場エラーの原因を表示

入退場時に何かしらのエラーがでてゲートがあがらない時、何もない状態ではなぜゲートがあがらないのか分からない。そこで、電光掲示板を用いてエラーの原因を表示することで、ゲートがあがらない理由を分かるようにする（図 3-33 参照）。

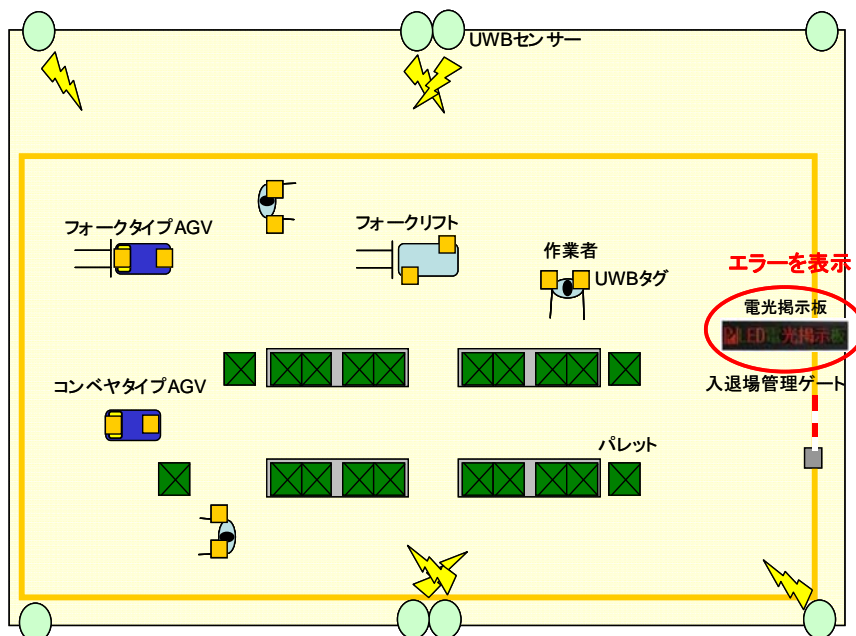


図 3-33 電光掲示板に入退場時のエラーの原因を表示

3.4.1.2.15. タグの非接触充電

UWB タグを非接触で充電するユニットを開発した。これにより、タグの電池交換の煩わしさを解消するとともに、タグの電池切れによる測位失敗の可能性を少なくすることができる。図 3-34 に実際にタグを充電している様子を示す。



図 3-34 タグを充電している様子

3.4.2. UWB 測位システム基本性能評価試験

以下に、UWB 測位システム（STD モード）の基本性能試験結果を述べる。

3.4.2.1. 測位精度の測定

3.4.2.1.1. 測定方法

図 3-35 の斜線で示されたエリアの 1m 格子ごとに測位精度を測定した。なお、各格子点の測位精度は、その格子点上で 250 回測位を行い、その格子点と測位点との平均誤差、X 方向の最大誤差、Y 方向の最大誤差、X 方向の標準偏差、Y 方向の標準偏差を求めた。

また、移動する人にタグをつけた時にどれくらい測位が乱れるかを見るために、タグを人の頭上に乗せて Y=3, 10m のラインを 15 往復し、各歩行ラインからの平均誤差、最大誤差、誤差の標準偏差を求めた。また、移動する AGV にタグをつけた時にどれくらい測位が乱れるかを見るために、AGV の前後 2 箇所タグをつけて AGV を周回させた。AGV の周回ルートの直線部分（X=10~30m の区間）のデータを用いて、走行ラインからの誤差の平均、最大、標準偏差を求めた。

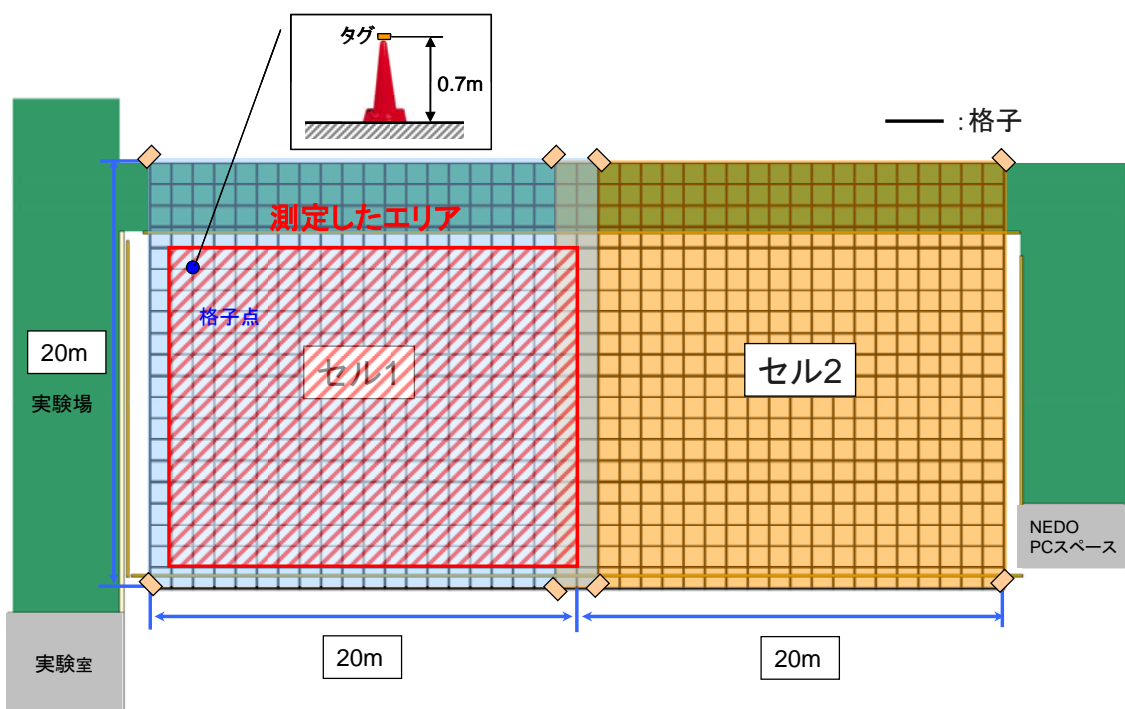


図 3-35 測定エリア

3.4.2.1.2. 測定結果

まず、図 3-36 に各格子点での測位の平均誤差を示す。平均誤差が 0.2m 以上 0.3m 未満のものをピンク色、0.3m 以上のものを赤色で示す。全格子点の平均誤差を平均したものは 0.11m となった。

次に、図 3-37 に移動する人にタグをつけた時の各歩行ラインからの平均誤差、最大誤差、誤差の標準偏差を示す。Y=3m のラインで平均誤差が 200mm、最大誤差が 1000mm、誤差の標準偏差が 160mm、Y=10m のラインで平均誤差が 180mm、最大誤差が 710mm、誤差の標準偏差が 160mm、Y=15m のラインで平均誤差が 230mm、最大誤差が 840mm、誤差の標準偏差が 190mm となった。

次に、図 3-38 に移動する AGV にタグをつけた時の走行ラインからの誤差の平均、最大、標準偏差を示す。水色のラインが AGV の左方に取り付けたタグの軌跡で、紫色のラインが AGV の右方に取り付けたタグの軌跡となる。上の走行ラインにて AGV の左方に取り付けたタグの走行ラインからの誤差の平均が 133mm、最大が 572mm、標準偏差が 86mm、AGV の右方に取り付けたタグの走行ラインからの誤差の平均が 115mm、最大が 680mm、標準偏差が 70mm となった。下の走行ラインにて AGV の左方に取り付けたタグの走行ラインからの誤差の平均が 128mm、最大が 858mm、標準偏差が 75mm、AGV の右方に取り付けたタグの走行ラインからの誤差の平均が 156mm、最大が 1000mm、標準偏差が 111mm となった。

16	0.23	0.19	0.11	0.08	0.17	0.07	0.10	0.10	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07	0.11	0.12	0.14	0.15	0.12	
15	0.08	0.06	0.13	0.10	0.05	0.06	0.05	0.07	0.08	0.07	0.06	0.06	0.07	0.06	0.10	0.09	0.05	0.15	0.17	
14	0.20	0.12	0.26	0.27	0.06	0.07	0.07	0.06	0.05	0.07	0.05	0.05	0.05	0.02	0.05	0.08	0.06	0.07	0.08	
13	0.15	0.19	0.03	0.07	0.10	0.09	0.07	0.06	0.06	0.05	0.07	0.07	0.06	0.06	0.07	0.14	0.11	0.07	0.17	
12	0.08	0.08	0.06	0.06	0.10	0.08	0.05	0.06	0.05	0.05	0.07	0.05	0.06	0.05	0.05	0.11	0.12	0.13	0.11	
11	0.04	0.04	0.06	0.16	0.05	0.03	0.05	0.05	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.10	0.10	0.12	0.20	0.12	
10	0.08	0.07	0.11	0.25	0.02	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.06	0.05	0.04	0.05	0.06	0.09	0.11	0.22	0.26	0.23
9	0.24	0.17	0.03	0.05	0.21	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06	0.05	0.06	0.04	0.13	0.13	0.13	0.23	0.23
8	0.10	0.07	0.05	0.04	0.21	0.08	0.03	0.03	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.08	0.12	0.12	0.13	0.14	0.18
7	0.29	0.26	0.23	0.04	0.05	0.07	0.02	0.03	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.09	0.12	0.15	0.18	0.09
6	0.17	0.08	0.03	0.12	0.04	0.06	0.07	0.06	0.07	0.06	0.07	0.06	0.08	0.06	0.07	0.06	0.08	0.24	0.24	0.26
5	0.25	0.20	0.21	0.04	0.18	0.06	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04	0.06	0.07	0.06	0.03	0.14	0.13	0.13	0.13	0.11
4	0.27	0.14	0.11	0.08	0.08	0.06	0.07	0.03	0.07	0.04	0.06	0.05	0.06	0.07	0.07	0.14	0.14	0.17	0.20	0.16
3	0.43	0.28	0.27	0.10	0.10	0.07	0.06	0.04	0.04	0.05	0.06	0.04	0.05	0.06	0.03	0.08	0.08	0.12	0.11	0.18
2	0.31	0.37	0.12	0.20	0.02	0.06	0.07	0.07	0.09	0.08	0.09	0.07	0.05	0.06	0.04	0.04	0.08	0.26	0.16	0.24
1	0.47	0.40	0.31	0.09	0.23	0.37	0.33	0.39	0.33	0.16	0.06	0.05	0.09	0.23	0.08	0.27	0.30	0.22	0.33	0.39
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

図 3-36 各格子点での測位の平均誤差

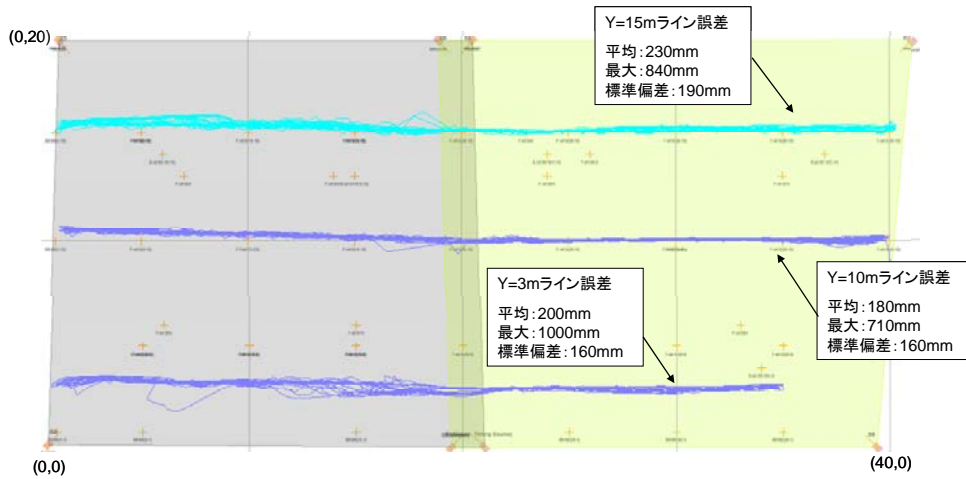


図 3-37 各歩行ラインからの平均誤差, 最大誤差, 誤差の標準偏差

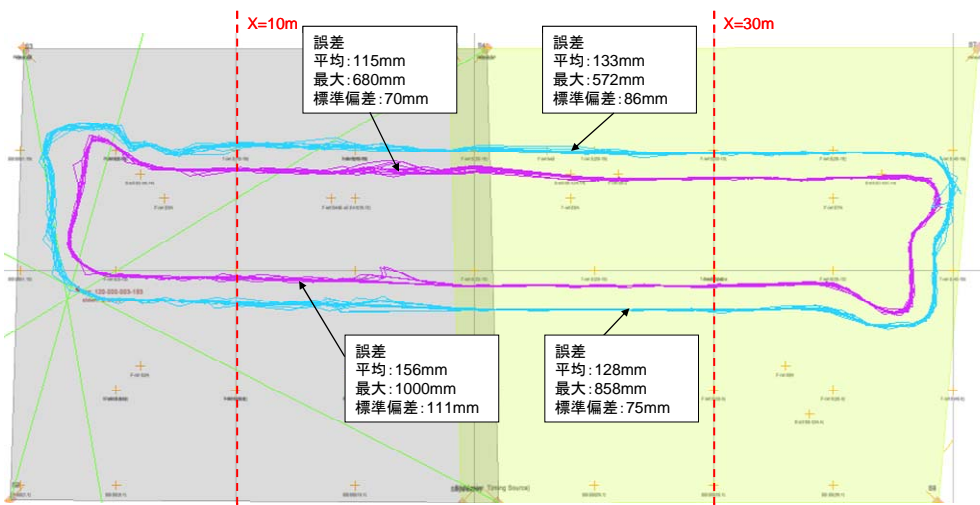


図 3-38 走行ラインからの誤差の平均, 最大, 標準偏差

3.4.2.2. 測位成功率の測定

3.4.2.2.1. 測定方法

図 3-35 の斜線で示されたエリアの 1m 格子ごとに測位成功率を測定した。なお、各格子点の測位成功率は、その格子点上で 250 回測位を行い、どれだけ測位が成功したかを求めた。

人の左肩右肩にタグを 1 個ずつ付け、図 3-39 のようにセル 1 の格子上を歩いて、それぞれのタグにおける測位の失敗確率と 2 つのタグを併せて考えた時の測位の失敗確率を求めた。

3.4.2.2.2. 測定結果

まずは、図 3-40 に各格子点における測位の成功率を示す。測位成功率が 99%以下 95%以上のものをピンク色、95%未満のものを赤色で示す。全格子点の測位成功率を平均したものは 99.7%となった。

次に、セル 1 の格子上を歩いた際の個々のタグにおける測位の失敗確率と 2 つのタグを併せて考えた時の測位の失敗確率を示す。個々のタグにおける測位の失敗確率について、左肩のタグにおける測位の失敗確率が 4.9% (494 回測定)、右肩のタグにおける測位の失敗確率が 3.2% (504 回測定) となった。そして、2 つのタグを併せて考えた時の測位の失敗確率は 0%となった。

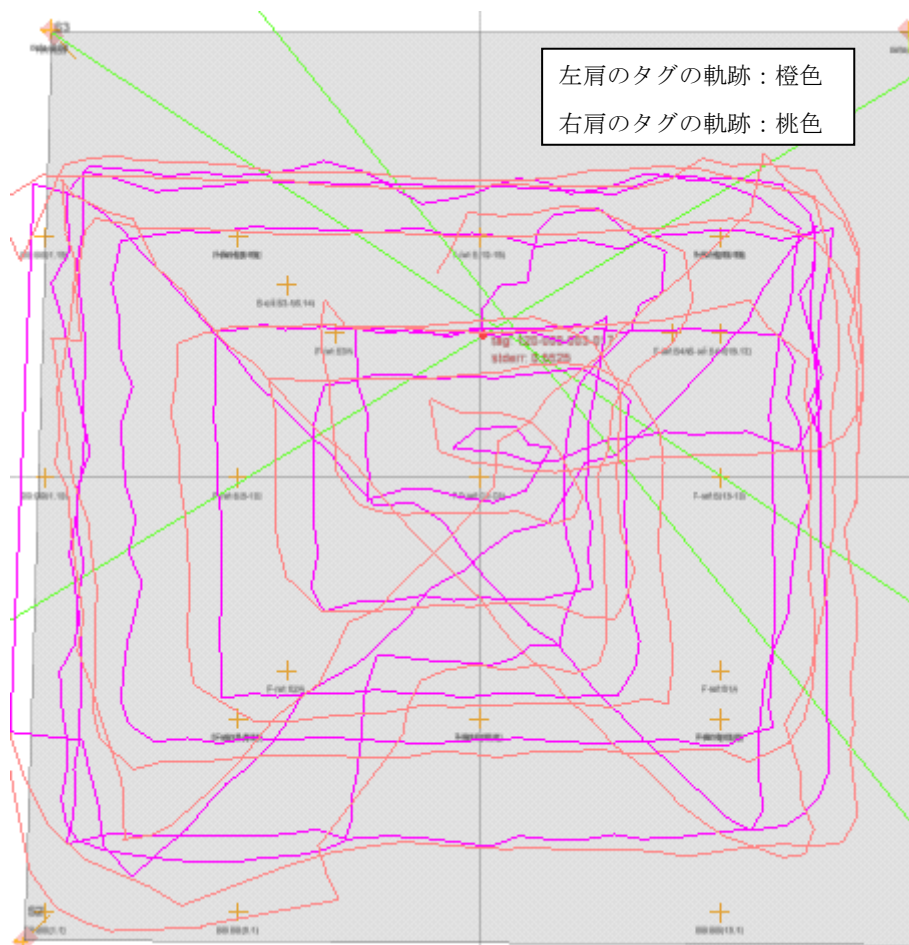


図 3-39 歩いた軌跡

16	100%	100%	100%	100%	100%	100%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	88%	
15	100%	100%	100%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
14	96%	100%	100%	100%	100%	97%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
13	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	99%	100%	100%	100%	100%	100%
12	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	99%	100%	100%	100%	97%	100%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	99%
11	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
10	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	98%	96%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
9	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	97%	100%	100%	100%	100%	99%	100%
8	97%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
7	100%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
6	100%	100%	96%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
5	99%	100%	100%	100%	100%	100%	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	97%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
4	100%	100%	100%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
3	94%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	97%
2	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
1	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	97%	97%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	

図 3-40 各格子点での測位成功率

3.4.2.3. 測位間隔の測定

3.4.2.3.1. 測定方法

8, 16, 32 の各タイムスロット間隔における測位間隔を計測し、測位間隔の平均, 最大, 標準偏差を求めた。

3.4.2.3.2. 測定結果

表 3-13 に各タイムスロット間隔における測位間隔の平均, 最大, 標準偏差を示す。仕様で決まっている標準測位間隔と実際に計測した測位間隔の平均値を比較するとほぼ一致する結果となり、仕様通りの性能がでていることを確認できた。

表 3-13 各タイムスロット間隔における測位間隔

タイムスロット間隔	標準測位間隔[ms]	実測測位間隔平均[ms]	最大[ms]	標準偏差[ms]
4	108	108	125	10
8	216	216	219	5
16	432	432	499	9
32	864	865	874	8

3.4.2.4. 測位遅れの測定

3.4.2.4.1. 測定方法

8, 16, 32 の各タイムスロット間隔における測位遅れを計測し、測位遅れの平均, 最大, 標準偏差を求めた。なお、測位遅れとして、センサによる位置取得時刻とサーバーでの位置取得時間との差を計測した。

3.4.2.4.2. 測定結果

表 3-14 に各タイムスロット間隔における測位遅れの平均, 最大, 標準偏差を示す。

表 3-14 各タイムスロット間隔における測位遅れ

タイムスロット間隔	測位間隔[ms]	平均[ms]	最大[ms]	標準偏差[ms]
4	108	272	285	8
8	216	272	300	5
16	432	272	336	7
32	864	273	301	7

3.4.2.5. センサ数の影響

3.4.2.5.1. 測定方法

測位に用いるセンサの数を変えて、センサの数が測位精度に与える影響を求める。

3.4.2.5.2. 測定結果

図 3-41 に測位に用いるセンサの数を 2 個～4 個にした場合の 5 つの地点における測位の結果を示す。測位結果を見ると、センサ数が少なくとも 2 個あればある程度の測位精度で測位ができることがわかる。従って、この測位システムは 2o04 を満たす。

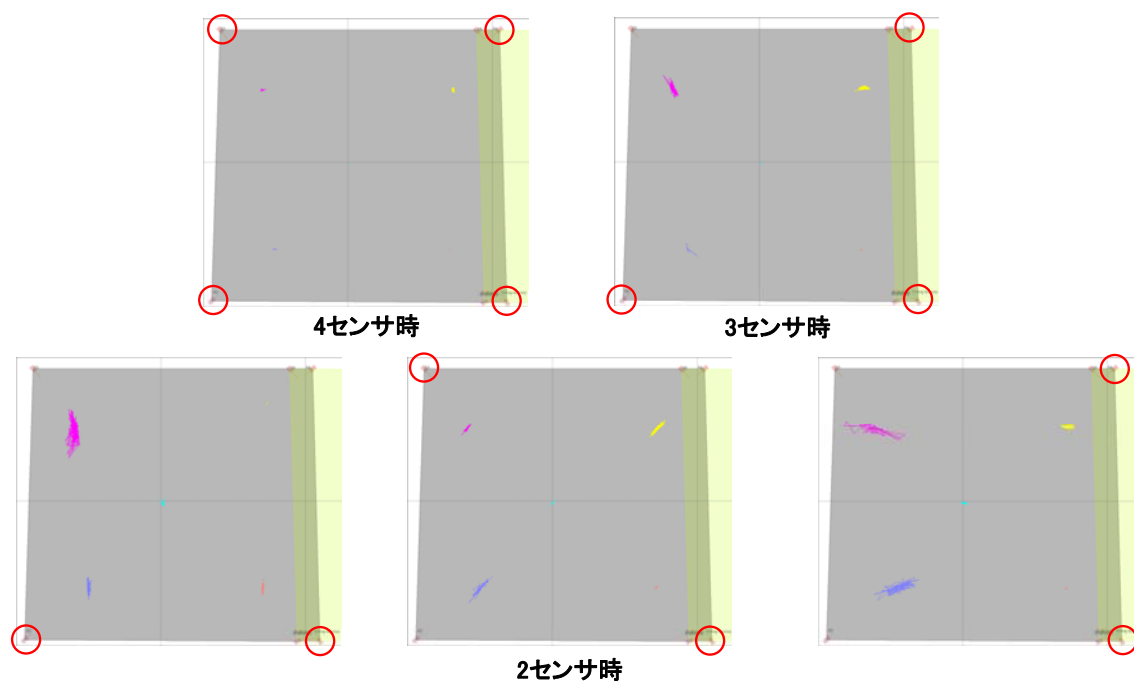


図 3-41 センサ数が測位精度に与える影響

3.4.2.6. 試験結果まとめ

上述した試験の結果を表 3-15 にまとめる。

表 3-15 試験結果のまとめ

測位精度	
静止時	平均 110mm
移動体取り付け時	平均200mm、最大1000mm
測位取得率(同一セル内)	
静止時	平均 99.7%
移動体取り付け時*(2タグ)	平均 100%
測位間隔 : 平均(最大)	AGV:216ms (219ms) フォークリフト:216ms (219ms) 作業者:432ms (499ms)
測位遅れ: 平均(最大)	272ms (336ms)

3.4.3. システム連動試験

システム連動試験として、AGV への指示遅れ時間を出すための停止テスト、安全距離の計算とそれに基づき AGV が減速しているのを確認するためのすれちがいテストを行った。

3.4.3.1. 停止テスト

AGV への指示遅れ時間を出すために停止テストを行った。まず、タグを 2 個 AGV の走行経路に対して対称に並べて、擬似的にエージェントが AGV の走行経路上にいるようにした (図 3-42 参照)。次に AGV の前後にタグを 1 個ずつつけた。AGV と擬似エージェントとの判定距離を 12m に設定し、AGV と擬似エージェントの距離が 12m 付近になった時点で、エリア管理システムから AGV へ停止指示を出すようにした。なお、停止開始時の AGV の速度として 200m/min と 130m/min の 2 種類を用いた。

表 3-16 にテスト結果として、停止開始速度ごとの停止距離を示す。なお、停止距離とは距離判定してから AGV が実際に停止するまでに進む距離のことである。また、その停止距離を用いて求めた停止指示遅れ時間も示す。なお、停止指示遅れ時間は距離判定してから AGV が停止を開始し始めるまでの時間のことである。

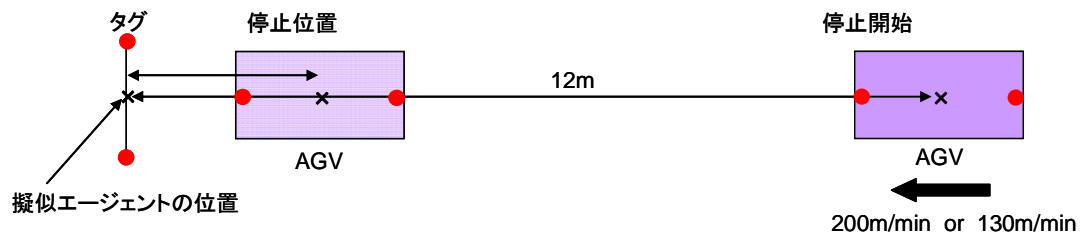


図 3-42 テスト環境

表 3-16 テスト結果

停止開始速度	停止距離※ 平均(最大)	停止指示遅れ時間※※ 平均±標準偏差 (最大)
200m/min	10.57m (11.6m)	843±138ms (1139ms)
130m/min	4.96m (5.24m)	775±82ms (906ms)

※:AGVが停止開始してから停止するまでに進む距離

※※:12mの距離判定してからAGVへ速度指示を出すまでの時間

3.4.3.2. 安全距離の計算

表 3-17 に安全距離の計算条件を示し、図 3-43 に安全距離の計算結果を示す。

表 3-17 安全距離の計算条件

速度	AGV	最高速度	200m/min
		中速度	130m/min
		低速度	60m/min
	フォークリフト最高速度		300m/min
	人最高速度		96m/min
応答遅れ	AGV		1.14s
	UWB(人)		0.83s
	UWB(フォーク)		0.56s
人・フォークリフト侵入角度			15度
UWB測位誤差			1m

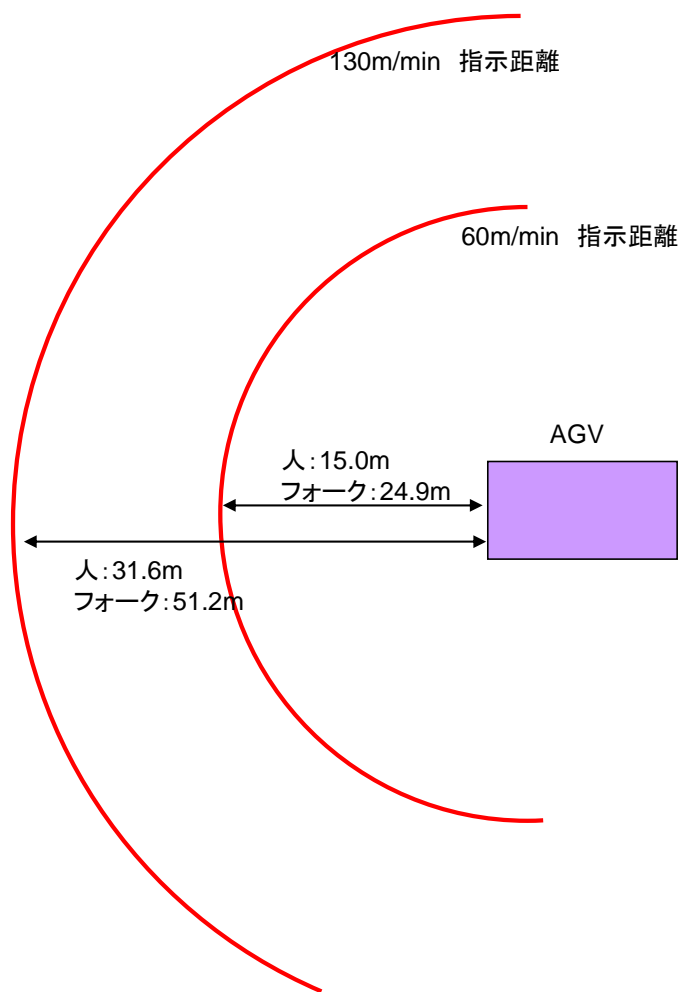


図 3-43 安全距離の計算結果

3.4.3.3. すれちがいテスト

3.4.3.2 の安全距離の計算に基づき、AGV が想定どおり減速しているかを確認するためにすれちがいテストを行った。以下にテスト条件を示す。また、図 3-45 にテスト結果を示す。テスト結果によれば、安全判定が行われ、AGV が適切に速度制御されていることがわかる。

- 中速（130m/min）の判定距離を 25m とし、タグをつけた人と AGV の距離が 25m 付近になると、中速の指示を開始した。
- 低速（60m/min）の判定距離を 15m とし、タグをつけた人と AGV の距離が 15m 付近になると、低速の指示を開始した。
- 図 3-44 のように AGV が 200m/min まで加速しきれるように人は十分に離れたところから歩行を始めた。

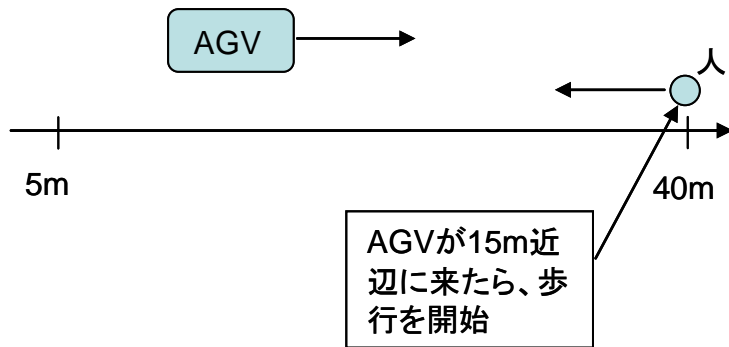


図 3-44 すれ違いテストの環境

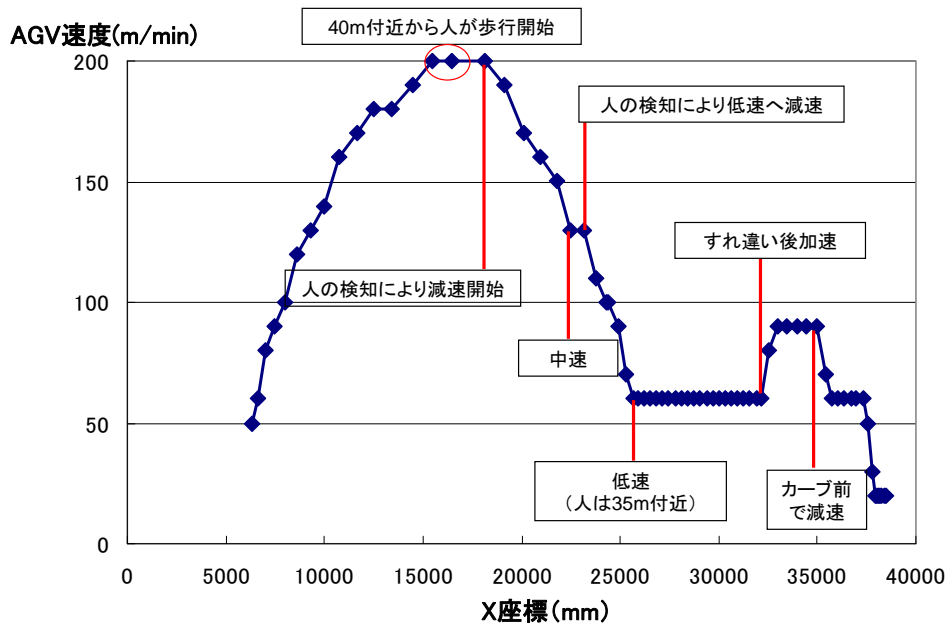


図 3-45 すれ違いテストの結果

3.4.3.4. 試験結果まとめ

まず、停止テストを行い、距離判定してから AGV が実際に停止するまでの時間を計測した。次に、その計測した時間を用いて安全距離の計算を行った。最後に、その計算した安全距離を用いてすれ違いテストを行ったところ、AGV の速度が適切に減速され、AGV と作業者がすれ違う際には AGV の速度が低速度 60m/min になっていることがわかった。このように理論的な計算により安全距離を求めることで、AGV と作業者・フォークリフトが接近する際に AGV の速度を低速度に落とした状態を作り出すことがある程度可能になる。ただし、ここで注意しないといけないのは、安全距離の計算をミスすると AGV と作業者・フォークリフトが接近する際に AGV の速度を低速に落とすきれないといった状況が考えられる。従って、計算した値が有効かどうか安全距離の設定後必ず検証する必要がある。

3.5. ローカルエリアシステム

3.5.1. 仕様

3.5.1.1. 概要

高速 AGV が稼働するエリア内で、人やフォークリフト等の共存しなければならない例えば交差点などのローカルエリアの安全を確認するための環境設置型の安全サポートセンサである。交差点の天井に取り付け、障害物が AGV の走行エリア内を移動している場合、接近する AGV に危険を知らせ、安全に停止する指示を与える。1 個のセンサがカバーするエリアは max10m 走行角 90 度×90 度である。

検出するフォークリフトの天井及び作業者のヘルメットに反射テープを貼り、センサは反射テープを検出して人かフォークリフトかを判断する。検出エリアは人用とフォークリフト用個別に設定可能である。図 3-46 にローカルエリアセンサの概略図を示す。

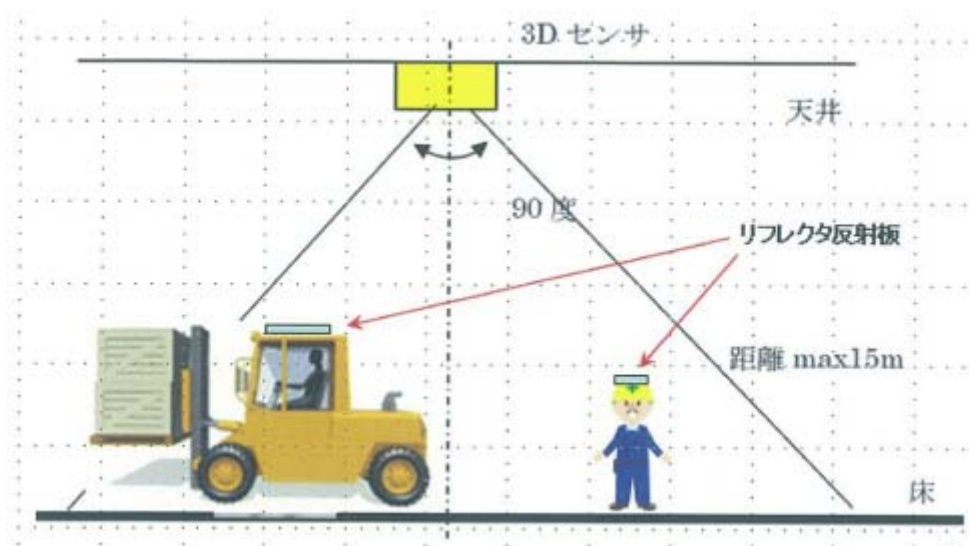


図 3-46 ローカルエリアセンサの概略図

3.5.1.2. 仕様値

表 3-18 にローカルエリアセンサの仕様値をまとめる。

表 3-18 ローカルエリアセンサの仕様値

項目	仕様値
検出距離 (安全)	16m (直線距離)
検出物	20×100mm (再帰反射板 3Mダイヤモンドグレード)
検出エリア	90度×158度 (150×88) ポイント
応答速度	700msec
電源	24V±10% 0.5A以下 (起動時2A以下)
形状	240L×80W×112Hmm
重量	3kg
出力	故障出力 (オープンコレクタ pnp max100mA/24V)
外部通信	イーサネット 100BaseTX
使用環境	屋内・天井
使用湿度/温度	-10度～50度 湿度85%以下 (結露しないこと)

3.5.1.3. 機器の構成

図 3-47 にローカルエリアセンサの機器の構成を示す。

図 3-47 の中で青線は制御回路の信号の流れを表している。また、入出力信号はイーサネットで行い、出力回路は故障出力のみである。

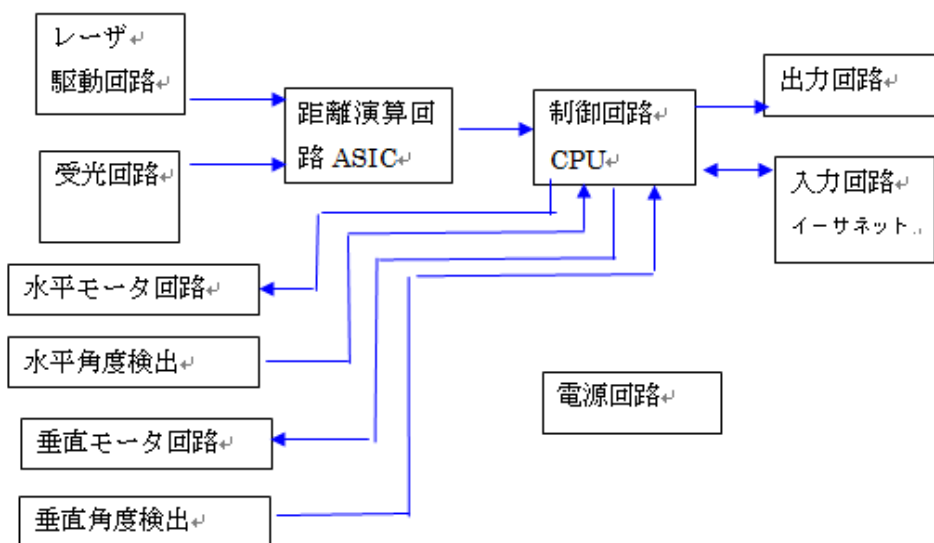


図 3-47 機器の構成

3.5.1.4. 各モジュールの機能

3.5.1.4.1. システム

全ての入出力、エリア設定などはイーサネットで行う。

検出物はヘルメットに貼られた再帰反射板、フォークリフト等に貼られた再帰反射板とし、再帰反射板が汚れる、はがれる等の事故があれば、人やフォークリフトを検出できない。故障出力は以下のエラーを検出した時に発生する。

- レーザレベルダウンエラー
- 水平モータ回転異常
- 垂直モータ回転異常

3.5.1.4.2. レーザ駆動回路

レーザ発光のドライブ回路を構成し、レーザ異常はレーザモニタ回路（ASIC+CPU）で監視する。また、異常時は故障出力をする。

3.5.1.4.3. 受光回路

レーザの受光信号の増幅回路を有する。

3.5.1.4.4. 水平モータ回路

5555rpm で回転する DC モータを使用し、モータの制御は水平角度検出のゼロ信号の間隔（10.8ms）になるように行う。

3.5.1.4.5. 垂直モータ

360ms で 158 度を往復回転するパルスモータを使用し、モータ制御は CPU のパルス発振回路で制御する。

3.5.1.4.6. 水平角度検出

0.25 度ピッチで出力するエンコーダとゼロ信号（原点位置）を出力する回路で構成し、エンコーダ信号と同期してレーザは発光する。

従ってモータ回転停止の場合レーザ発光はしない（フェイルセーフ設計）

ゼロ信号の間隔が 10.8ms 内に無い場合、異常と判断し故障出力する。

3.5.1.4.7. 垂直角度検出

モータのゼロ信号（基準位置）を出力する回路で構成し、ゼロ信号の間隔が 360ms 内に無い場合、異常と判断し故障出力する。

3.5.1.4.8. ASIC

距離を演算する回路である。

3.5.1.4.9. CPU

センサの制御回路である。

3.5.1.4.10. 出力回路

故障時に出力する。出力は PNP である。

3.5.1.4.11. 入力回路

イーサネットで出力し、エリア内の全ての検出物のアドレス「位置」と高さをデータで出力する。

また、パソコンに接続し生データのモニタ及び異常時のログ機能としても使用する。

3.5.1.4.12. 電源回路

24V 入力で回路に電源を供給する。

3.5.1.5. システム構成

3.5.1.5.1. ローカルエリアセンサ単体の構成

ローカルエリアセンサは、図 3-48 に示すように、90 度の 3 面ポリゴンセンサをパルスモータにより 158 度走査させ、3 次元空間の距離画像信号を入手する。

床から 2m (Z 軸) までにある検出物を人と判断し、2m 以上 3.5m 以下 (Z 軸) にある検出物はフォークリフトと判断して出力する。

人とフォークリフトを、個々に検出位置 (XY 軸平面アドレス) をつけて、イーサネットで出力する。

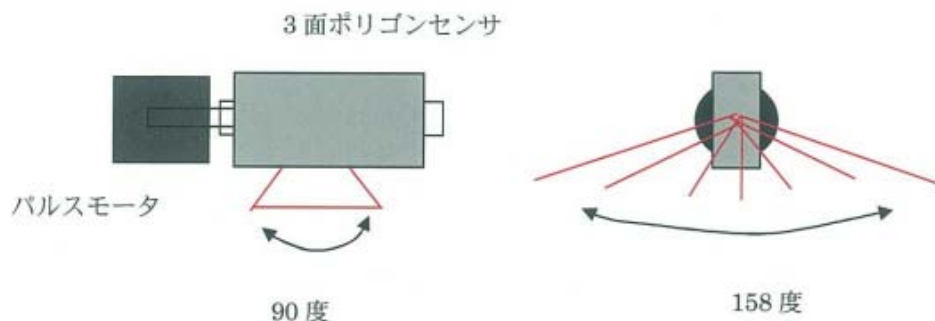


図 3-48 センサの構成

3.5.1.5.2. システムとしての構成

ローカルエリアセンサを天井高さ 6.5m に設置した場合、検出できるエリアは 30m×8m のエリアとなる。このセンサを 1 台で使用する場合は、通路幅が 8m 以下の細長いエリアを想定できる。また、交差点など広いエリアが必要な場合は、図 3-49 に示すようにセンサ複数台を 8m 以下の間隔で設置する必要がある。

センサ 1 台の検出エリア

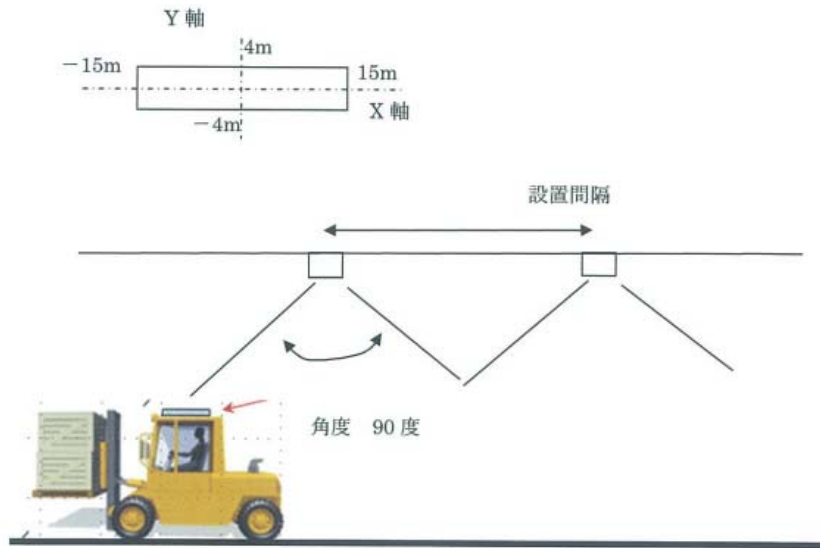


図 3-49 システムの構成

3.5.2. 性能評価試験結果

3.5.2.1. 位置認識性能評価

ローカルエリアセンサの検出位置精度を評価する為、図 3-50 に示す 8m×19m のエリア内 21 か所に於いて測定を実施した。

図中に於いて○印が測定位置であり、□又は△印がローカルエリアセンサの出力結果の位置を示している。

測定結果の詳細を表 3-19 に示す。評価結果よりセンサ中心部の精度は高く、エリアの端では精度が落ちることが分かる。

評価結果としては最大値±350mm の精度があり、この寸法は人の肩幅よりも小さい事から十分な精度で検出できている。

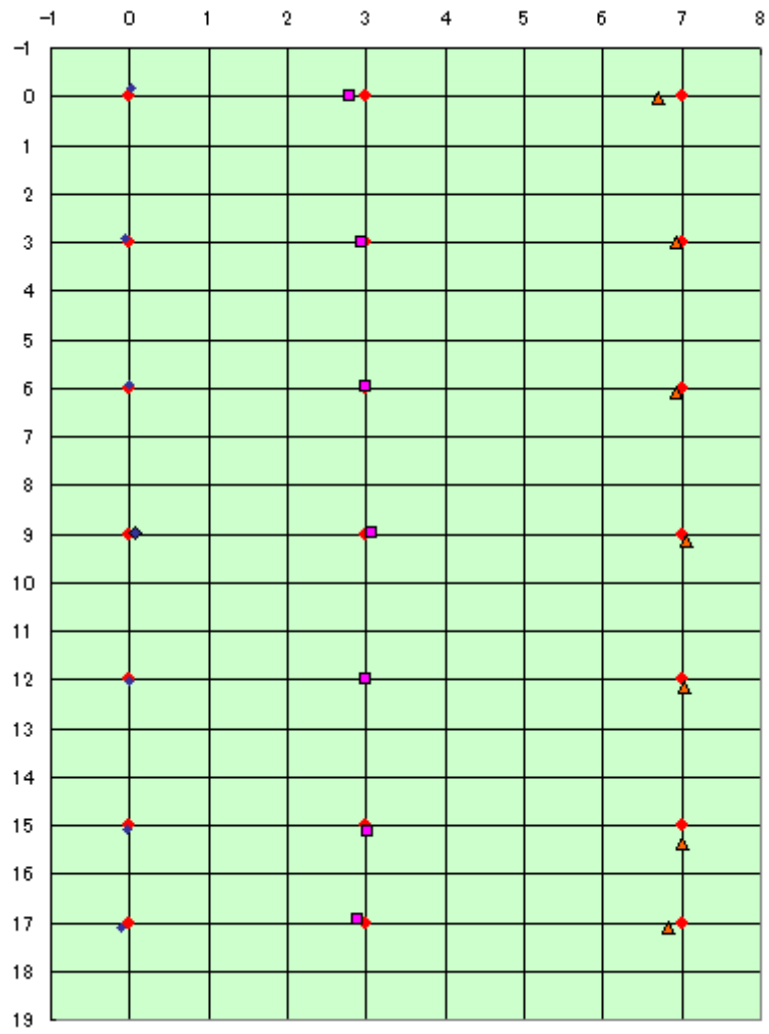


図 3-50 ローカルエリアセンサの測定位置

表 3-19 ローカルエリアセンサの検出精度評価

実座標(単位:m) (反射板を置いた位置)		ピクセル座標 (センサの戻値ave)		ピクセル座標を一次式で補正して 実座標値に近似(単位:m)		実座標との誤差 (単位:m)	
x	y	x	y	x'	y'	x	y
0	0	3.71	19.29	0.02	-0.17	-0.02	0.17
0	3	2.95	50.31	-0.05	2.93	0.05	0.07
0	6	3.49	80.33	0.00	5.93	0.00	0.07
0	9	4.19	110.90	0.07	8.99	-0.07	0.01
0	12	3.39	141.19	-0.01	12.02	0.01	-0.02
0	15	3.19	171.81	-0.03	15.08	0.03	-0.08
0	17	2.35	191.87	-0.11	17.09	0.11	-0.09
3	0	31.49	20.72	2.80	-0.03	0.20	0.03
3	3	32.90	50.98	2.94	3.00	0.06	0.00
3	6	33.35	80.66	2.99	5.97	0.01	0.03
3	9	34.15	110.91	3.06	8.99	-0.06	0.01
3	12	33.49	141.09	3.00	12.01	0.00	-0.01
3	15	33.79	172.13	3.03	15.11	-0.03	-0.11
3	17	32.43	190.37	2.89	16.94	0.11	0.06
7	0	70.49	21.41	6.70	0.04	0.30	-0.04
7	3	72.87	51.15	6.94	3.01	0.06	-0.01
7	6	72.90	81.98	6.94	6.10	0.06	-0.10
7	9	74.15	112.26	7.06	9.13	-0.06	-0.13
7	12	73.97	142.67	7.05	12.17	-0.05	-0.17
7	15	73.61	174.55	7.01	15.35	-0.01	-0.35
7	17	71.75	192.16	6.83	17.12	0.17	-0.12

3.5.2.2. 人検知性能評価

図 3-51 で示す反射テープ付きヘルメットを被った歩行者が、天井高さ 6.5m に設置された 2 個のローカルエリアセンサの検出エリアを、5 分間歩行した時の検知状態を評価した。

図 3-52 は、ローカルエリアセンサ 1 の検出結果を示したグラフである。

グラフの横軸は、5 分間歩行した時の時間を示し、その時にローカルエリアセンサが歩行者を検出した X 座標を左のグラフに Y 座標を右のグラフにプロットしたものである。

ローカルエリアセンサ 1 では歩行開始後、2490 秒と 2510 秒の 2 度未検出な状態が発生した。

また、図 3-53 は、図 3-52 と同様に設置場所が違うローカルエリアセンサ 2 の検出結果を示したグラフである。

ローカルエリアセンサ 2 では歩行開始後、20 秒・34 秒・124 秒・1700 秒・2080 秒・2090 秒と 2950 秒の 7 度未検出な状態が発生した。

ローカルエリアセンサ 1 及び 2 とともに、2 スキャン (1 スキャン : 700msec) 以上連続しての未検出状態は発生しなかった。

また、未検出の発生位置はエリア端に集中している事も分かった。



図 3-51 人体検出評価風景

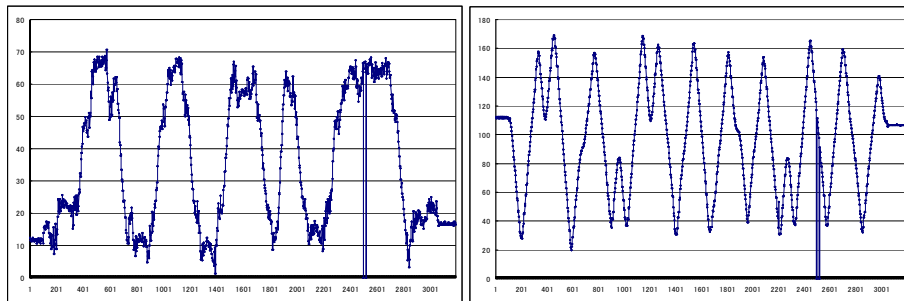


図 3-52 ローカルエリアセンサ 1 の検出結果

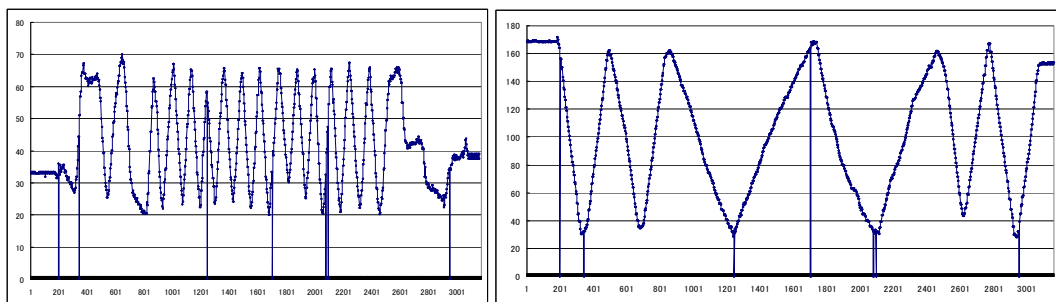


図 3-53 ローカルエリアセンサ 2 の検出結果

3.5.2.3. まとめ

ローカルエリアセンサは、エリア端に行くほど検知しにくくなる特性が見られた。

しかし、図 3-54 に示すように、1m 内側に入れば 100% 検出することも分かった。

99%以上検出可能な検知可能領域でも機能としては満足するが、100%検知を保証できる検知保証領域のエリアも考慮に入れたシステム構築が理想である。

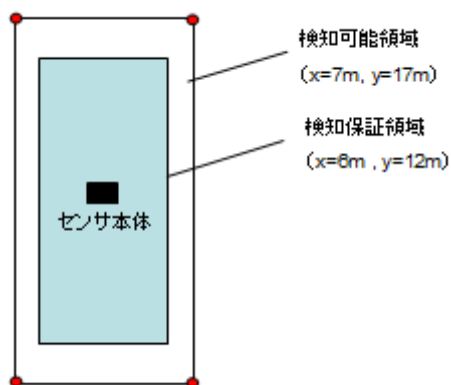


図 3-54 ローカルエリアセンサの検出範囲

3.6. 非接触充電システム

3.6.1. 概要

AGV のバッテリー充電の方式として、従来、人手によるコネクタ接続もしくは、コンタクタ（接触子）を用いた自動充電が主に採用されている。現行の充電システムでは、充電部に接続端子が露出されている為、感電の危険が存在する。また、充電電流が大きい急速充電の場合、接続端子部の接触不良等により、スパークが発生し火災が発生する危険も存在する。

今回、図 3-55 に示すように、無接触給電技術を用いた自動充電を開発することにより、以下の効果が見込まれる。

- 感電防止（充電部の露出がない。）
- 火災防止（機械的接触のないためスパークの発生がない。）
- メンテナンスフリー（非接点のため、接点部の磨耗や部品交換がない。）

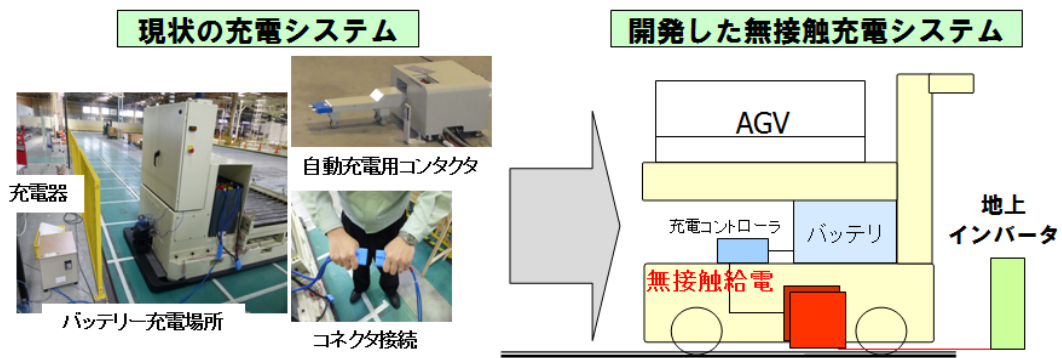


図 3-55 無接触充電の概略図

3.6.2. 仕様

3.6.2.1. 安全仕様

無接触給電技術を用いた充電システムをかいはずするにあたり、感電防止対策・電波防護指針・人体防護指針・バッテリー保護及び発熱対策を行わなければならない。

3.6.2.1.1. 感電防止対策

現状の接触式と比べ端子むき出しが存在しない為、本質的に感電の要因がなくなる。また、AGV とインターロック信号を有する為、AGV が在席している時のみ充電を行う。

3.6.2.1.2. 電波防護指針・人体防護指針

ICNIRP(国際非電離放射線防護委員会)が発行しているガイドラインを遵守する。

3.6.2.1.3. バッテリー保護

充電電圧を監視する事による過充電防止回路を内蔵する。

3.6.2.1.4. 発熱対策

感熱線及びサーモスタットにより異常発熱を検知する停止機能を内蔵する。

3.6.2.2. 充電システム仕様

充電システムは、図 3-56 に示すようにインバータ・送電パッド・受電パッド・充電コントローラの 4 種類の製品で構成される。以下の表 3-20～表 3-22 にそれぞれの仕様を記す。

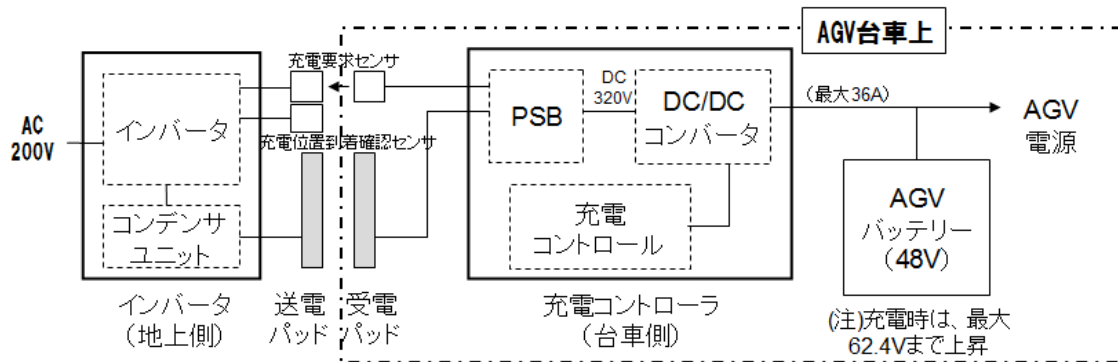


図 3-56 充電システムの基本構成

表 3-20 インバータ仕様

項目		内容
入力	定格入力(主回路)	AC三相180~240V (50/60Hz ±2%) 3.5KVA
	定格入力(制御回路)	AC 単相100~200V(DC85~264V 50/60Hz ±2%) 40VA
	接地種別	D種接地(100Ω以下)
出力	最大出力	3kW
	出力電圧	250Vrms以下
	出力電流	最大25Arms
	周波数	9.74KHz
保護回路、安全対策		過電流保護(商用電源側)、突入電流防止回路(商用電源側)、温度監視(IPM、トランス、出力用端子台、送電コイル)、過電流保護(スイッチング回路、送電コイル)、DCリアクトル接続監視、冷却ファン停止監視、ソフトスタート機能
入出力信号		外部入出力方式:フオトカプラ絶縁式シンク (停止命令・エラー出力・ワーニング出力のみB接点) 入力信号:停止命令、給電命令、エラー解除命令 出力信号:電源状態、給電中、エラー、ワーニング、エラーステータス 入力電流:24V 5mA (MAX) 出力電流:24V 100mA (MAX)
LED表示		電源、給電中、ワーニングステータス、エラーステータス
ネジ端子台(電力用)		ネジ式端子台(端子間ピッチ16mm) 推奨圧着端子:R8-5(絶縁被覆付)
コネクタ端子台(信号用)		2ピースコネクタ端子台(端子間ピッチ3.5mm 16ピン) 使用コネクタ: MC 1,5/16-STF-3,5(フェニックスコンタクト製) 推奨電線:AWG28~16、電線被覆剥き代:9~10mm
冷却方式		強制冷却(8cmファン2機搭載)
筐体寸法		W250mm×D130mm×H350mm(ファン、突起部を除く)
質量		約6.1kg

表 3-21 送電・受電パッド仕様

項目		内容
送受電コイル共通	設置環境	屋内
	使用周囲温度	0~40℃
	使用周囲湿度	90%RH以下(結露なき事)
	雰囲気	塵埃、腐食性ガス、可燃性ガス、オイルミスト、蒸気、水滴なき事。また塩分が含まれない事。
	冷却方式	自然空冷

表 3-22 充電コントローラ仕様

項目	内容
充電対象電池電圧	48V
適合バッテリー	鉛バッテリー
充電電圧上限(CV電圧)	デフォルト:64V
充電開始電圧下限	デフォルト:10V
充電電流(CC電流)	最大40A
充電方式	定電流・定電圧充電(CC・CV方式)
入力電圧範囲	DC260V~350V
保護回路、安全対策	出力過電流保護(監視・制御回路+ヒューズ)、出力過電圧保護、 バッテリー逆接続保護、無負荷運転保護、充電時間監視タイマー、 過放電保護、突入電流制限(バッテリー接続時)、冷却ファン回転数監視、 入力側スイッチング電流抑制回路、過熱保護(端子台、パワー半導体等)、CV充電時「へ」の字型「垂下」特性、制御電源回路異常監視
入出力信号	外部入出力方式:フォトカプラ絶縁式シンク 入力信号:充電停止指令、制御電源起動指令 出力信号:充電要求、充電中、エラー、
動作選択	制御電源の起動を外部機器から制御するか、常時起動とするかスイッチで選択可能
LED表示	電源、充電中、エラー、バッテリー電圧、エラーステータス
コネクタ(電力用)	ネジ式端子台(端子間ピッチ13mm 4ピン) 推奨圧着端子:R5.5-4(絶縁被覆付)
コネクタ(信号用)	ネジ式端子台(端子間ピッチ2.54mm 12ピン) 推奨電線:AWG28~22、電線被覆剥き代:8~9mm
冷却方式	強制空冷(8cmファン×1)、充電時のみ回転
筐体寸法	W120mm×D250mm×H100mm(突起部を除く)
動作環境	-10°C~50°C
質量	約2500g

3.6.3. 基本性能評価試験

3.6.3.1. 機器構成

図 3-57 で示すように、コンベヤタイプの高速度 AGV に受電パッドと充電コントローラを取り付け、地上側に送電パッドとインバータを設置し、AGV が電力供給可能範囲に停止した時、自動的にバッテリーに充電を開始し、AGV が走行を開始し離れると自動的に充電を停止する。

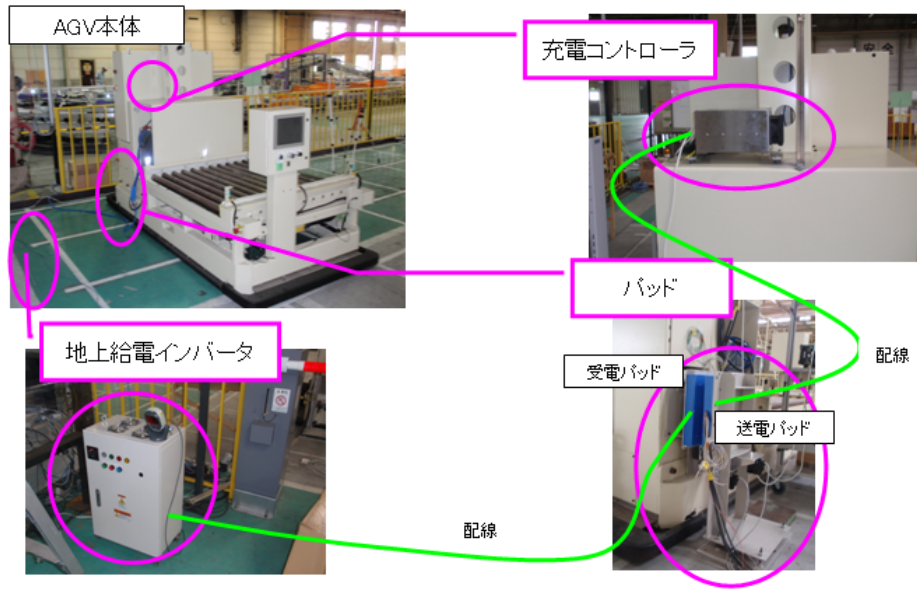


図 3-57 機器構成

3.6.3.2. 鉛バッテリーへの充電

AGV に搭載している鉛バッテリーへの充電は、充電開始時は CC (定電流) 充電を行い、バッテリーの電圧が 60V に達した時点で CV (定電圧) 充電に切り替わる事を確認した。また、総充電量 (230Ah) が総放电量 (206Ah) を上回る事を確認出来たので今回の充電シーケンスを行う事でバッテリーが満了状態になる事も確認出来た。

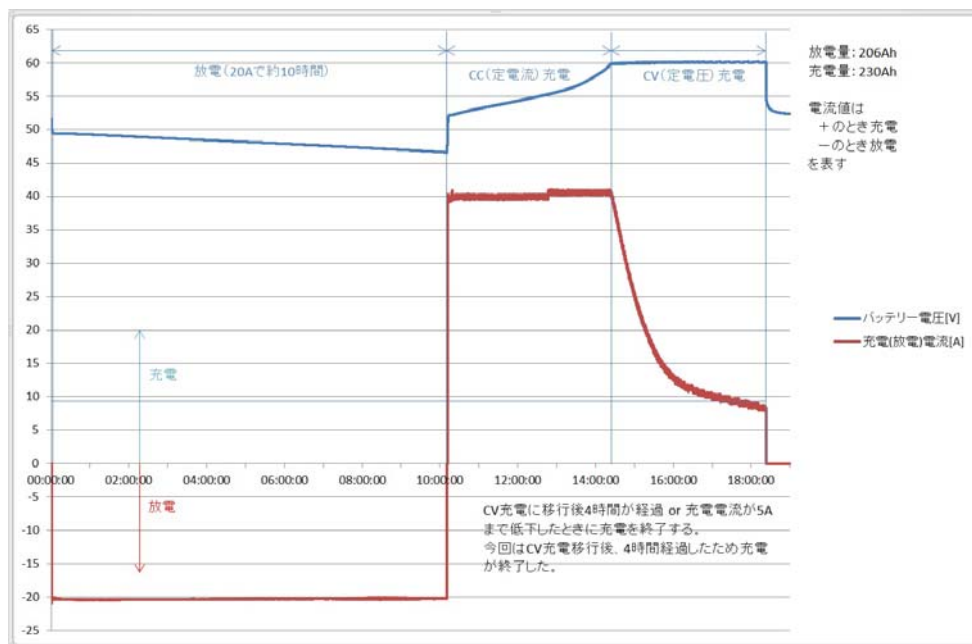


図 3-58 充電時の電圧と電流

3.6.3.3. 温度測定

AGV に搭載したバッテリー充電中に於ける送信・受信パッド内の温度上昇を測定した結果、温度上昇は最大で 30deg 以下である事が分かった。この結果より周囲温度 40°C まで使用可能である事が分かった。

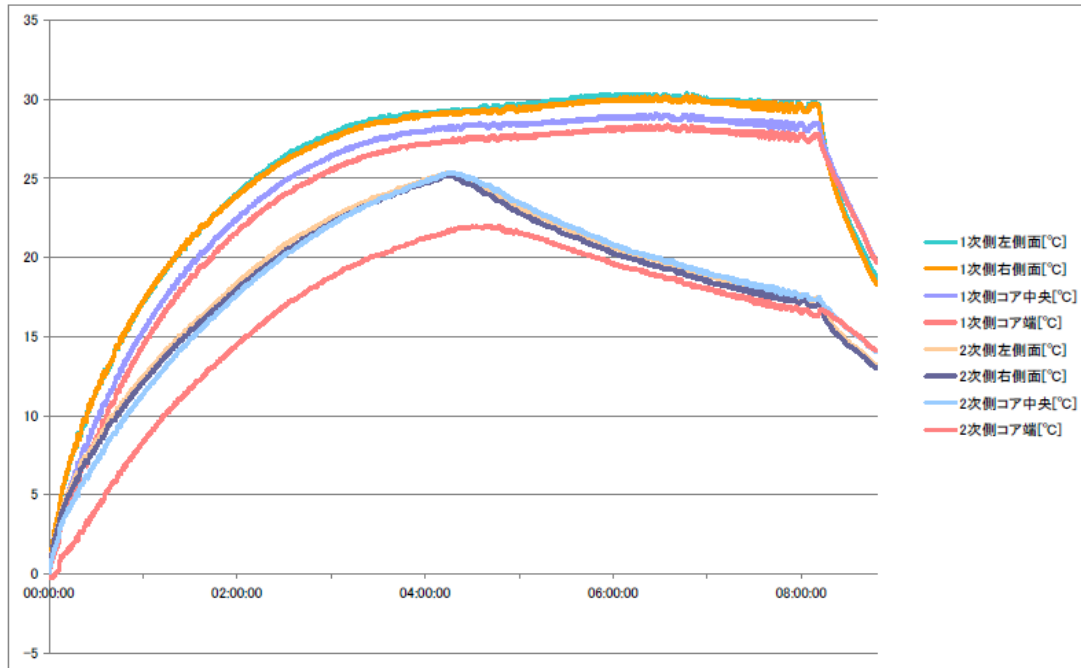


図 3-59 充電時の温度

3.6.3.4. 磁界測定

AGV のバッテリーを自動充電するに於いて、今回開発した送信・受信パッドの各軸のずれ量の許容範囲が AGV の停止精度より大きくなってはならない。

受信パッドの位置を固定し、送信パッドを各軸 10mm ピッチで移動させ磁束密度を測定する事により、暴露基準（職業）を計算し ICNRP 磁界許容範囲であるずれ量を測定した。

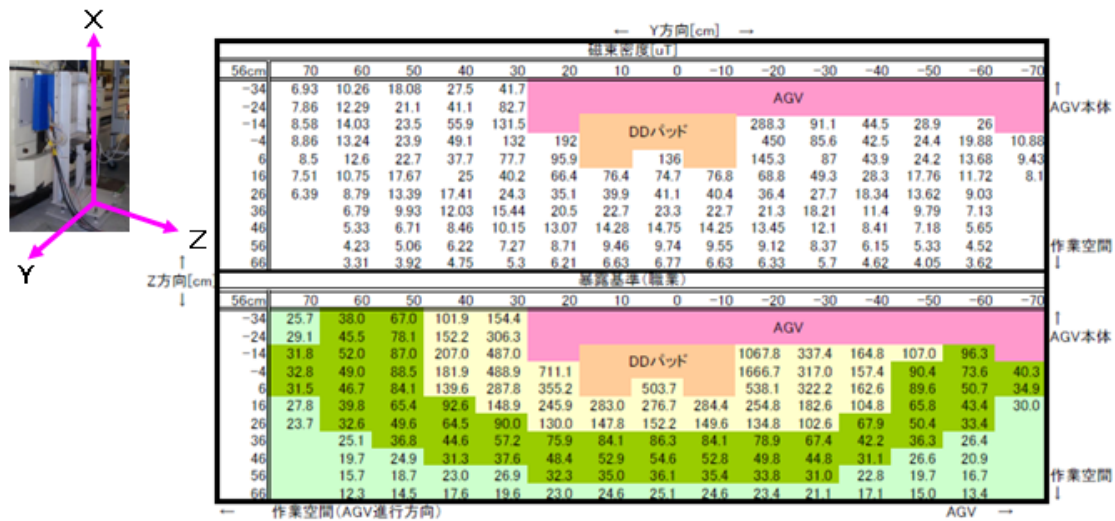
図 3-60 では受信パッドに対して Y 方向±50mm 以内、Z 方向+26mm 以内が許容範囲である事が分かった。

図 3-61 では受信パッドに対して Z 方向+26mm 以内、X 方向+126mm 以内が許容範囲である事が分かった。

図 3-62 では受信パッドに対して Y 方向±60mm 以内、X 方向+126mm 以内が許容範囲である事が分かった。

以上の事から、AGV の停止許容範囲は進行方向 (Y) に±60mm 以内・AGV 幅方向に (Z) に+26mm 以内である事が分かる。

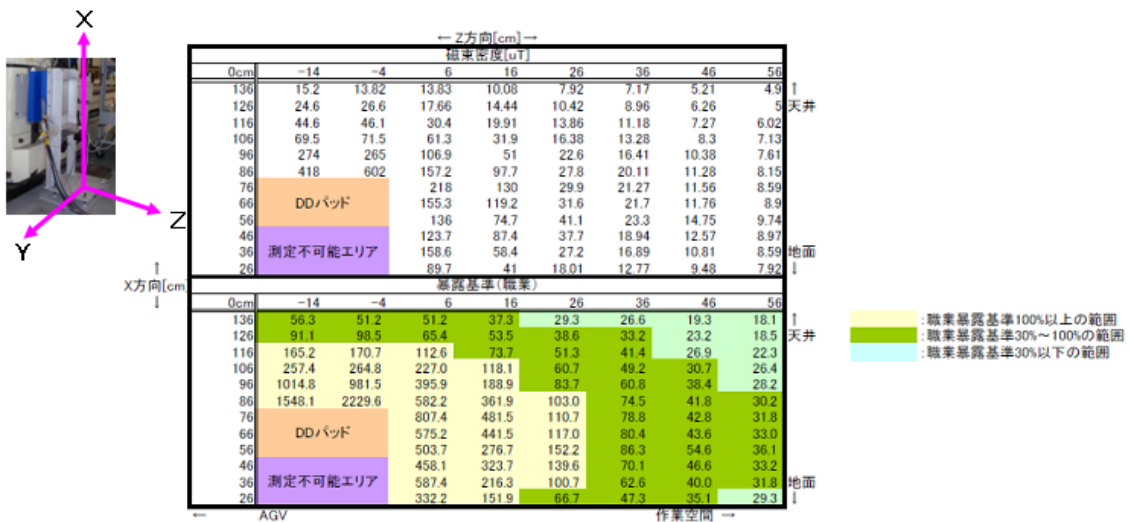
よって、今回開発した高速 AGV は±10mm の停止精度があるので問題ない事が分かった。



※:AGVの進行方向をY軸、パッドの対向方向をZ軸とする。
 ※:Y軸方向の距離はパッドの中心を原点(0cm)とする。Z軸方向は送電側パッドのアルミ面を原点とする。
 ※:一般暴露基準は職業暴露基準の約5倍(職業暴露基準で100%(磁束密度が約30uT)の場合、一般暴露基準では500%となる)

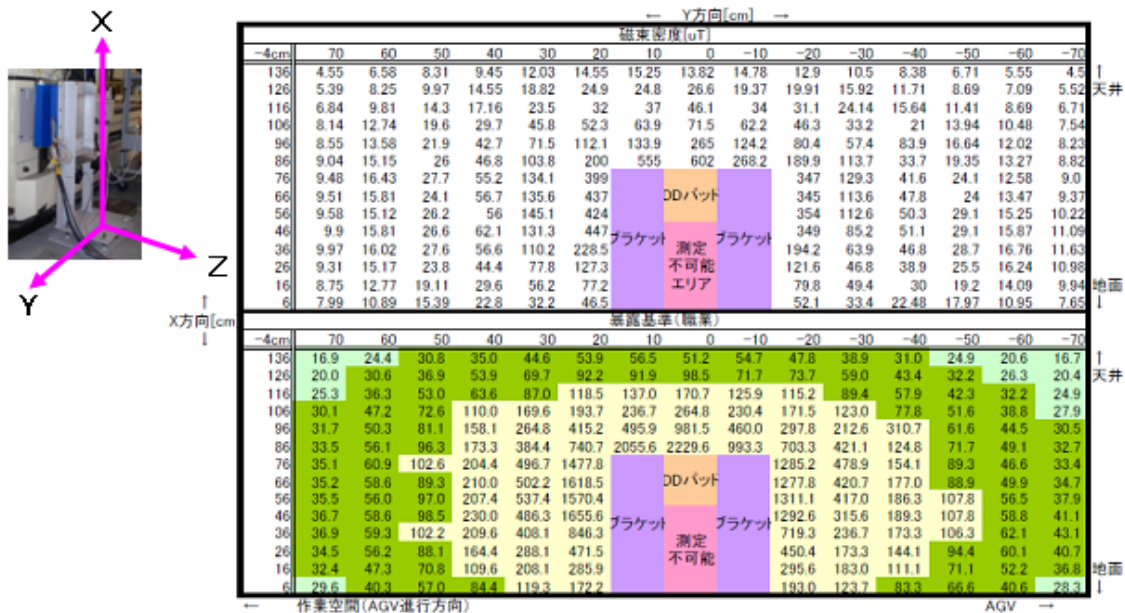
黄色:職業暴露基準100%以上の範囲
 緑色:職業暴露基準30%~100%の範囲
 青色:職業暴露基準30%以下の範囲

図 3-60 Y・Z軸に対する距離と磁束密度の関係



※:AGVの進行方向をY軸、垂直方向をX軸とする。
 ※:X軸方向は地面(設置面)を原点(0cm)とする。Z軸方向は送電側パッドのアルミ面を原点とする
 ※:一般暴露基準は職業暴露基準の約5倍(職業暴露基準で100%(磁束密度が約30uT)の場合、一般暴露基準では500%となる)
 ※:距離は原点からアンテナの中心位置までの長さ(アンテナの外径から中心まで約60mmのため、原点とアンテナを密着させても6cmは離れてしまう)

図 3-61 Z・X軸に対する距離と磁束密度の関係



※: AGVの進行方向をY軸、垂直方向をX軸とする。
 ※: Y軸方向の距離はバットの中心を原点(0cm)とする。X軸方向は地面を原点とする。
 ※: 一般暴露基準は職業暴露基準の約5倍(職業暴露基準で100%(磁束密度が約30uT)の場合、一般暴露基準では500%となる)

- : 職業暴露基準100%以上の範囲
- : 職業暴露基準30%~100%の範囲
- : 職業暴露基準30%以下の範囲

図 3-62 Y・X軸に対する距離と磁束密度の関係

4. 検証試験

4.1. 物流センターにおける安全性検証テスト（協力：味の素株式会社、味の素物流株式会社、関東エース物流株式会社、株式会社オールユニール）

4.1.1. まえがき

本プロジェクトの最終年度にあたる平成 25 年度は、味の素株式会社の協力のもと実際の配送センターにて 10 月 21 日～25 日の 5 日間実運用テストを実施し、本システムの安全性の検証などを行った。まず、4.1.2 でテスト内容について説明し、次に 4.1.3 でテスト結果を示す。そして最後に 4.1.4 で本テストのまとめを行う。

4.1.2. テスト内容

テスト中、AGV は図 4-1 の走行路上を最高速度 130m/min で一定方向に常に自動巡回した。巡回ルートにはショートのものと同ロングのものがあり、センターの負荷状況にあわせて 2 つのルートを切り替えた。ここで AGV の最高速度を 130m/min にしたのは、センターで定められているフォークリフトの制限速度の規則に準拠したためである。なお、走行路上に作業員・フォークリフト・パレットなどの障害物がある場合は、3D 障害物センサ（3.2 節参照）などの安全装置にて AGV を停止させた。そして、危険源がなくなったことを確認した後、AGV が自動走行を開始するようにした。

本テストでは主に以下の 3 つの評価を行った。

- UWB センサ（配置は図 4-1 参照）・タグを用いて、作業員（UWB タグのついたジャケットを着用：図 4-2 参照）、フォークリフト、AGV の位置をリアルタイムに計測した。その位置計測情報をもとに AGV と作業員・フォークリフトとが接触の恐れがある場合は、AGV を減速・停止させ、安全を確保した。エリア管理システムのログを解析することで、その安全確保技術の性能を評価した。また、AGV の最高速度を 60m/min から 130m/min にあげた効果もあわせて評価した。
- エリア管理システムのログとカメラ（配置は図 4-1 参照）での撮影画像から、作業中の危険な状況の有無を評価した。
- 作業後、本テストエリアで実際に作業した作業員に本安全システムが有効に機能していたかどうかをアンケート調査にて評価した。

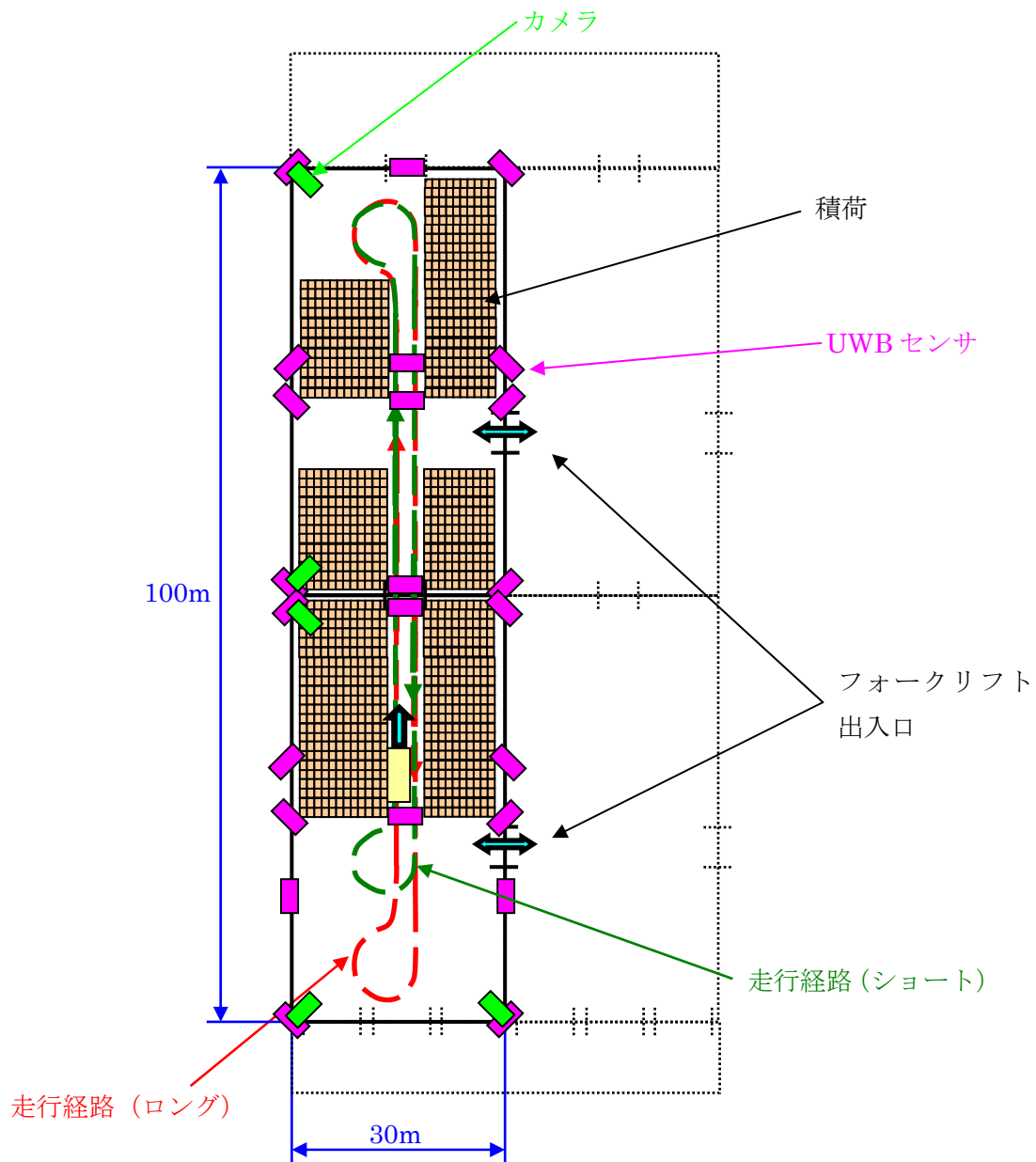


図 4-1 テストエリア

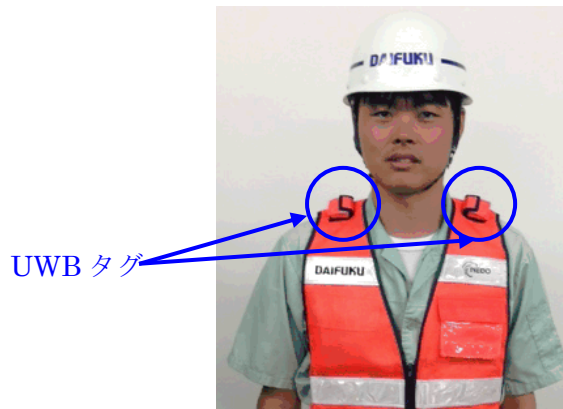


図 4-2 作業者への UWB タグの取り付け

4.1.3. テスト結果

以下に、4.1.2 の a)に関する集計結果、b)に関する解析結果、c)に関するアンケート結果を示す。

4.1.3.1. 集計結果

4.1.3.1.1. 安全速度への減速成功確率

AGV 進行方向前方の半径 a の半円状エリアに人・フォークリフトがいる時 (図 4-3 参照) に、AGV の速度が安全速度 60m/min になっている確率を求めた。その結果、半径が 3m 以内になった時、AGV の速度が 100%安全速度になっていることがわかった。

4.1.3.1.2. 走行時間の割合

AGV の各走行速度 (0m/min, 0~60m/min, 60m/min, 60m/min~130m/min, 130m/min) において、全体に占める走行時間の割合を求めた。走行経路 (ショート) または走行経路 (ロング) を理想的な条件で走った際のデータと 5 日間のデータとを比較すると、5 日間のデータの方が 60m/min と 0m/min の割合が増えて、130m/min の割合が減っていることがわかった。これはエリア管理システムによる減速・停止と 3D 障害物センサによる停止とが起こった結果であると推測される。また、0~60m/min で時間が多くかかっていることがわかったが、これは AGV の旋回時に時間がかかっているためである。従って、旋回速度をあげればもっと効率をあげることができると考えられる。

4.1.3.1.3. 走行距離の割合

AGV の各走行速度 (130m/min, 130~60m/min, 60m/min, 60m/min~0m/min, 0m/min) において、全体に占める走行距離の割合を求めた。その結果、130m/min での走行距離の割合が 55~60%にもものぼっていることがわかり、130m/min で走行距離を多く稼いでいることが分かった。また、AGV の最高速度が 130m/min の時と 60m/min の時の効率を比較すると、AGV の最高速度が 130m/min の時の走行距離は 60m/min の時の走行距離の約 2 倍になっており、効率が約 2 倍にあがったことがわかった。なお、効率は AGV が 60m/min より速い速度で走行した際の走行距離の総和を AGV が 60m/min で走行した際の走行距離の総和で割ることによって求めた。

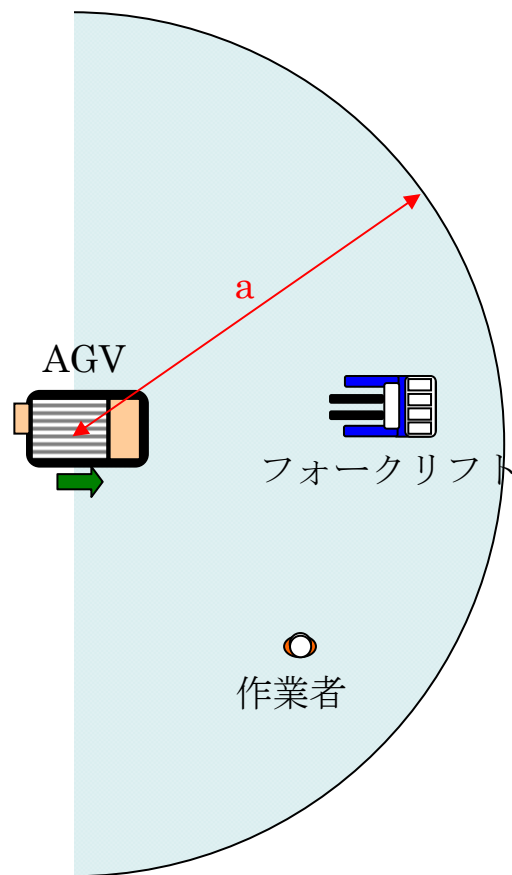


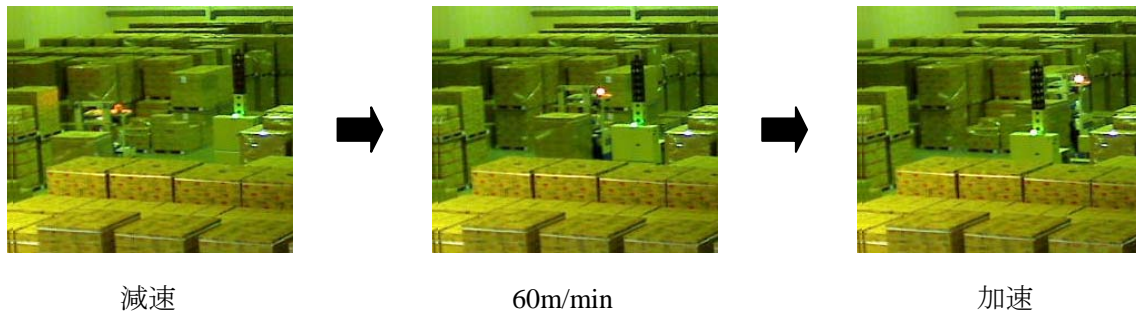
図 4-3 判定領域

4.1.3.2. 解析結果

エリア管理システムのログおよびカメラによる撮影画像を解析した結果、以下の 7 つの代表的なシーンが導出された。それぞれのシーンについてカメラ画像を示し、どういったシーンか説明を行う。

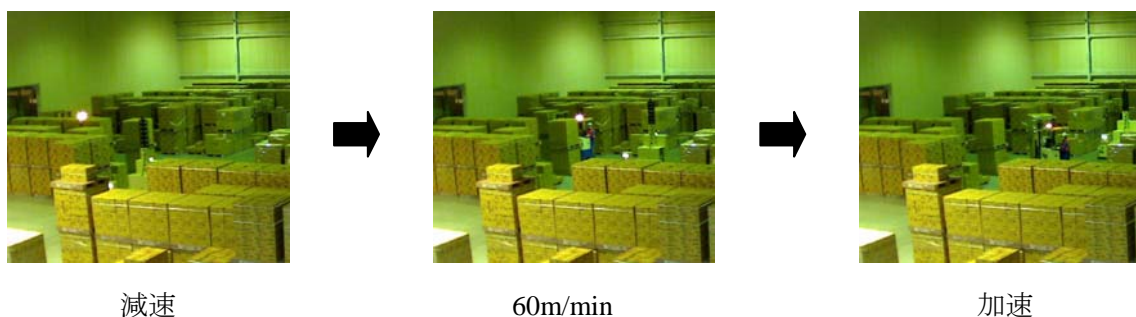
a) フォークリフトと AGV のすれ違い

フォークリフトがエリア管理システムの安全判定領域に入ると、AGV は減速を始め、60m/min まで速度を落とす。そして、すれ違いが終わると、AGV は 60m/min から加速を始める。



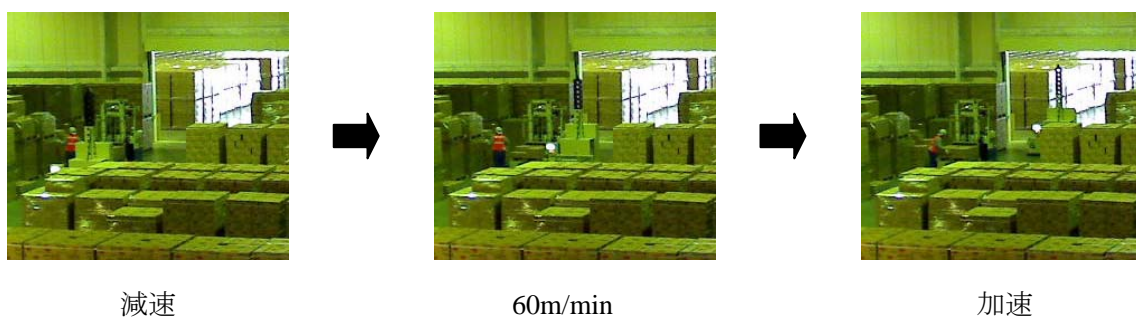
b) AGV の横からフォークリフトが進入

フォークリフトが AGV に対して横から近づく場合も、a)の時と同様の速度制御を行う。



c) フォークリフトあるいは作業者が作業中に AGV がその横を通過

フォークリフトあるいは作業者が作業している横を AGV が通過する場合も、a)の時と同様の速度制御を行う。



d) AGV 前方をフォークリフトが通過

フォークリフトが AGV に対して横から近づいて AGV の前に飛び出す場合、飛び出す直前までにエリア管理システムにより AGV は 60m/min まで速度が落ちた状態になり、飛び出した瞬間 3D 障害物センサが検知して AGV を停止させる。停止後、フォークリフトが AGV の前方にいないことを確認した後、AGV は加速を始める。



60m/min

3D 障害物センサ検知

停止

e) フォークリフトによる AGV の追い越し

フォークリフトが AGV の後方から追い越しをかける場合、フォークリフトが AGV の前方にでた段階で、AGV は減速を開始し、その速度を 60m/min まで落とす。



130m/min

追い越し

60m/min

f) AGV 後方をフォークリフトが走行

AGV 後方をフォークリフトが走行する場合、エリア管理システムの安全判定が行われないため、AGV に対してエリア管理システムによる速度制御は行われない。



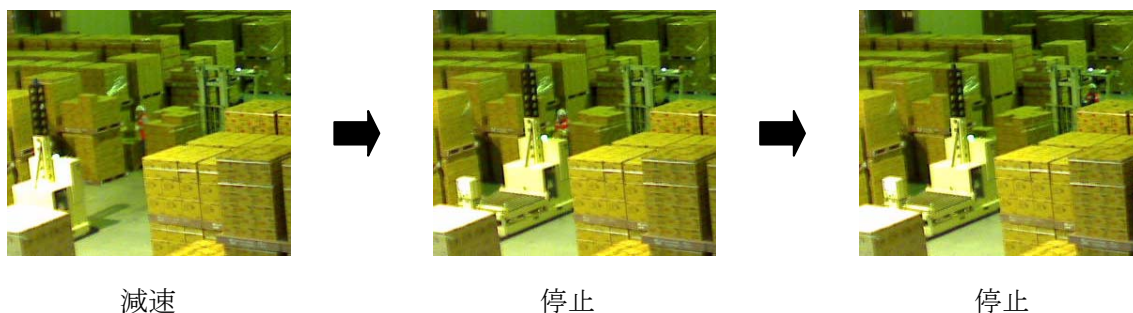
速度制御なし

速度制御なし

速度制御なし

g) フォークリフトあるいは作業者が AGV の走行路上で作業していて減速・停止

フォークリフトあるいは作業者が AGV の走行路上で作業している場合、エリア管理システムによりまず AGV の速度を 60m/min まで落とす。次に、3D 障害物センサの検知エリアにフォークリフトあるいは作業者が入ると、AGV はさらに減速を開始し、最終的にはフォークリフトあるいは作業者に AGV がぶつかる前に AGV を停止させる。フォークリフトあるいは作業者が走行路上にいなくなるまで AGV は停止を続け、いなくなったことを確認した後、加速を始める。



4.1.3.3. アンケート結果

以下にアンケートの内容とその集計結果を示す。アンケート結果を見るとわかるように概ね良い結果が得られた。ただし、AGV とフォークリフトが接触するような場面が 1 回あった。これは AGV 旋回時の 3D 障害物センサのエリア設定があまくて AGV を止めることができなかったためである。今一度 3D 障害物センサのエリア設定を見直す必要がある。また、ジャケットが作業の邪魔になったという意見やタグの音が気になったという意見もあり、タグの作業への取り付けも見直す必要がある。

設問1(複数回答)
作業内容について

計 33回答

	入庫作業	出庫作業	ピッキング	無回答
行った作業内容について教えてください。	12	14	13	4

設問2
AGVについて

	速い	適当	遅い	無回答
AGVとすれ違う時の印象を教えてください。	0	25	4	4
AGVと並走する時の印象を教えてください。	0	26	2	5
AGVの後ろからついていく時の印象を教えてください。	0	25	4	4
フォークリフトから降りて作業している時の印象を教えてください。	4	21	2	6

	よくあった	あった	なかった	無回答
AGVに恐怖感はありましたか？	0	5	26	2
その時の状況 (あると答えた方)	<ul style="list-style-type: none"> ・必ず止まるのか疑問。 ・止まるか進むか分からない。 ・AGVが大きいため少し威圧感を感じた。 ・AGVが旋回中センサーの反応が悪いのか基本止まってくれず、恐怖感があった。 ・ぎりぎりの幅ですれ違う状況があった。 			

	よくあった	あった	なかった	無回答
AGVと接触しましたか？	0	1	30	2
その時の状況 (あると答えた方)	<ul style="list-style-type: none"> ・AGVが旋回する所でピッキング中、AGVが旋回してきて、死角があるのか、停止しているリーチフォークリフトにぶつかった。 			

	よくあった	あった	なかった	無回答
AGVが邪魔だと感じましたか？	5	3	23	2
その時の状況 (あると答えた方)	<ul style="list-style-type: none"> ・ピッキング作業中、通路をひたすら走ってるので邪魔だと感じた。 ・作業に時間がかかる。 ・荷揃えする所にAGVが通るため。 ・午後の時間帯でどうしても商品仮置の場面で感じた。 ・スピードが落ちてから立ち上がるまでが遅かったため。 ・通路が狭かったからだが、ピッキング中、停止しているリーチに反応して、真横で止まってしまう、リーチを旋回して避けなければいけないことがよくあった。 ・ピッキングの際、進行方向に停止している。 			

	すぐ気付く	たまに気付く	気付かない	無回答
AGVを遠くから見て気づきましたか？	24	4	2	3

	うるさい	適切	小さい	無回答
AGVの走行メロディはどうでしたか？	3	25	0	5

	良好	分からない	無回答
AGVの表示灯はどうでしたか？	13	16	4

設問3
ジャケットについて

	よくなった	なった	なかった	無回答
ジャケットが作業の邪魔になりましたか？	4	14	13	2

	大きい	許容範囲	小さい	無回答
ジャケットに取り付けたタグの大きさはどうでしたか？	1	28	1	3

設問4(自由記述)
意見・感想

<ul style="list-style-type: none"> ・AGVの稼働エリアでの作業が無かったので速度等については、よく分からない。 ・近くで作業してないので分からない。 ・X・Zエリアに作業を行っていないため特に無い。 ・当センターの業務内容では、AGVを使用出来ないと感じた。生産工場等の保管型倉庫では、大変便利な搬送車ではないかと感じた。 ・ジャケットのセンサーで服がすれた。 ・AGVの走行進路上に障害物(ノレット)等がある時、AGV自体は避けて通過できるのか？ ・センサーがシャカシャカ音になって気持ち悪くなった。 ・ジャケットがフォークのノブに少し、ひっかかる時があった。 ・荷物を乗せてのスタート、ストップ搬送などテストしてもよかったのではないか？ ・実用的に見えなかったのなるべく近づかないようにした。 ・場所によっては作業効率が悪くなると思った。
--

4.1.3.4. AGV とフォークリフトの接触

4.1.3.4.1. 経緯

テスト中に AGV とフォークリフトの接触が起こった。以下にその時の経緯を説明する。AGV が旋回しようとしていた際に、フォークリフトが旋回経路の終端付近に停車していた。AGV は旋回を開始し、図 4-4 のように旋回の終端付近に停車していたフォークリフトに巻き込みのような形で接触した。図 4-5 は接触後 AGV 前方方向から撮ったものである。図 4-5 を見てもらうとわかるが、3D 障害物センサの検知範囲が車体幅のみであったため、フォークリフトを検出せず、ソフトバンパにて停止したことがわかる。また、図 4-5 ではわかりにくいですが、接触の際、フォークリフト下部のカバー下にバンパーが潜り込み、引っかくようにしてソフトバンパのカバーが破れた。



図 4-4 AGV とフォークリフトとの接触



図 4-5 AGV とフォークリフトとの接触 (AGV 前方方向)

4.1.3.4.2. 考察

今回接触が起こった原因として、AGV 旋回時の巻き込みを考慮した 3D 障害物センサの検知エリアの設定になっていなかったことが考えられる。また、AGV のバンパーが低い位置にあったためにフォークリフト下部にもぐりこんでしまった。

対策としては、AGV 旋回時の巻き込みを考慮した 3D 障害物センサの検知エリアを適切に設定するとともに、AGV のバンパーの高さを上げる必要がある。

4.1.4. まとめ

本プロジェクトの最終年度にあたる平成 25 年度は、味の素株式会社の協力のもと実際の配送センターにて実運用テストを実施し、本システムの安全性の検証などを行った。検証結果から、AGV に人・フォークリフトが近づいた際、AGV が安全速度 60m/min まで速度を十分に落としきれることがわかり、高速 AGV の安全性を確認できた。ただ、テストエリアの出入り口から人・フォークリフトが入った際に測位遅れが 1%未満の確率で発生し、安全速度に落ちるまで時間がかかる場面があった。この対策としては、ゲートを出入り口に設けることによって、測位がきちんとできたものしかテストエリアに入れないといった方法が考えられる。また、最高速度 60m/min で走行した時と最高速度 130m/min で走行した時では効率が 2 倍近く違うことがわかり、高速 AGV の有効性を確認できた。

4.2. AGV 衝突時の衝撃値（協力・執筆：JARI）

人が AGV に衝突したときに人が受ける危害の大きさを測定することを目的に、JARI の協力のもと、JARI の衝突実験場にて AGV と人（試験用ダミー）との衝突実験を行った。本項は、衝突実験についての JARI の報告書「フォークリフト型ロボットの対人安全性能評価試験 ―試験結果の報告―」（添付資料）を元に作成している。

4.2.1. 試験概要

4.2.1.1. 試験目的

今回開発したコンベヤタイプの AGV を模擬した台車（以下、台車）が、高速走行した状態で人と衝突した場合の人に与える影響を調査する。また、衝突される人の衝突方向の違いにおける頭部が受ける衝撃量についても比較する。

4.2.1.2. 試験条件

図 4-6 で示すように台車を 60、130、200 m/min の速度で、ダミーへ衝突させた。ダミーは、衝突直前にサポートワイヤを切り離し自立状態で衝突させた。

また、図 4-7 で示すようにダミーは、正面、後面、側面、頭部、尻部からの衝突試験を行った。頭部のみを衝突させる場合は、台座を用いて姿勢を保持させた。

また、路面へ転倒した際のダミーの損傷を考慮して、ダミーの転倒地点にウレタン製のマットを敷いて行った。

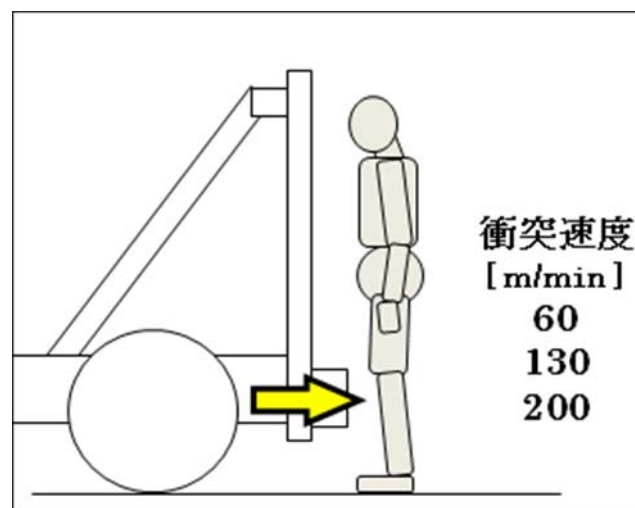


図 4-6 台車とダミーの衝突

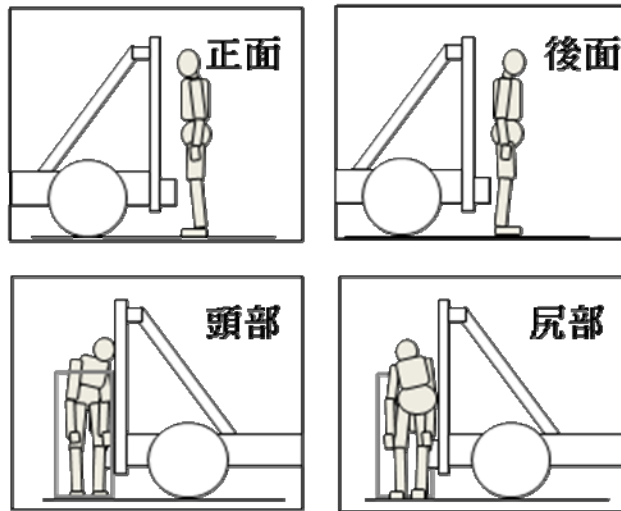


図 4-7 衝突方向（正面、後面、頭部、尻部）

4.2.1.3. 試験台車の外観

台車の正面は、コンベヤタイプの AGV と同じ大きさ・同じ材質のものを設置し、ダミーと衝突する部分は同等になるよう配慮した。

また、台車下部のバンパー部にテープスイッチを設置しダミーの脚部が接触後、0.5 ～ 1 秒後にブレーキが作動するようにした。

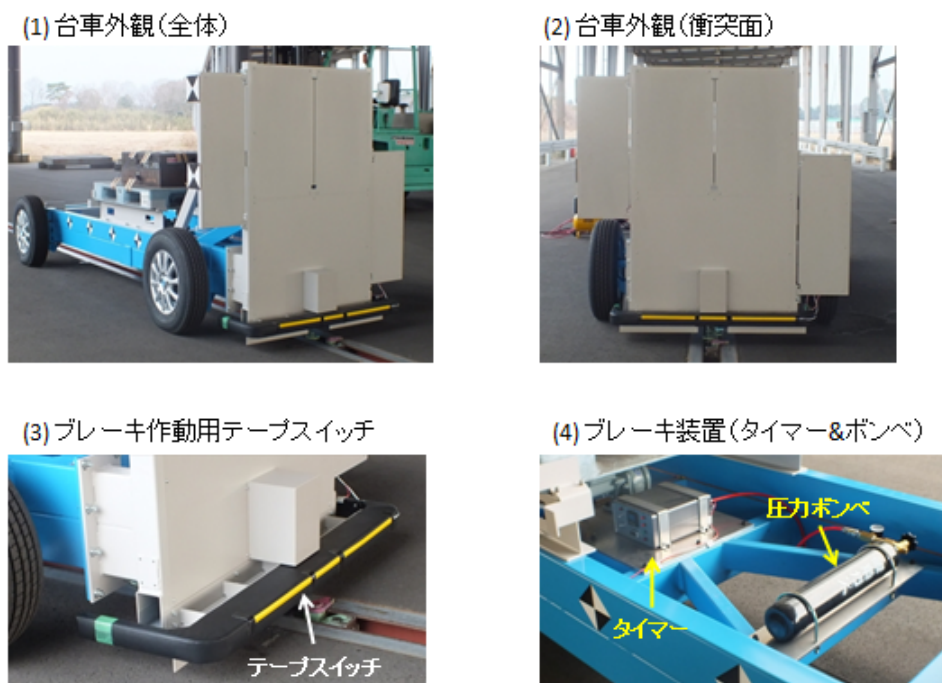


図 4-8 AGV を模擬した台車の外観

4.2.1.4. 試験に用いたダミー（人体模型）とその仕様

実験に使用するダミーは、図 4-9 に示す男性を対象にしたものと図 4-10 に示す女性を対象にした 2 種類で行った。

<名称&体格>

AM50: Hybrid III 50th Percentile Male
体格: 身長175cm、体重78kg

<計測部位と種別>

加速度: 頭部、胸部、腰部
荷重: 頸部、大腿部、下肢(上部、下部)
変位: 胸部

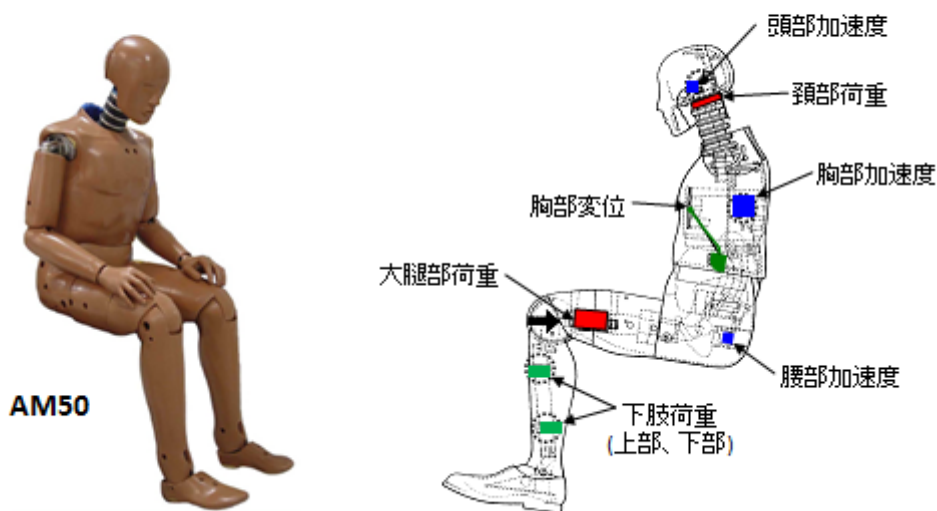


図 4-9 人体模型（男性）とその仕様

<名称&体格>

AF05: Hybrid III 5th Percentile Female
体格: 身長150cm、体重48kg

<計測部位と種別>

加速度: 頭部、胸部、腰部
荷重: 頸部上部、大腿部
変位: 胸部

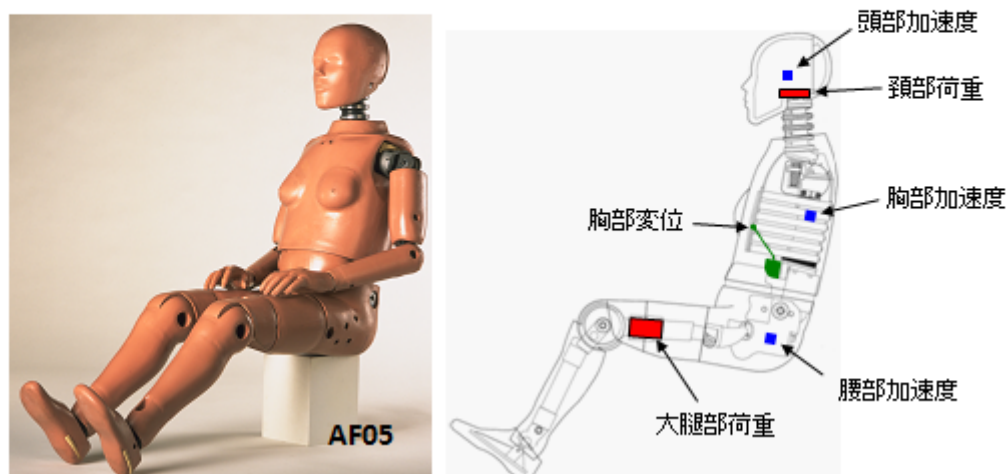


図 4-10 人体模型（女性）とその仕様

4.2.1.5. ダミーの頭部傷害基準値（HIC）と頸部の感度方向

HIC (Head Injury Criteria)とは頭部の傷害値基準であり、次式より算出する。

$$HIC = \left[\frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} \frac{a(t)}{9.8} dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1)$$

ここで a は、頭部重心位置の合成加速度（m/s²）であり、次式より算出する。

なお、a_x は、頭部前後方向加速度、a_y は左右方向加速度、a_z は上下方向加速度である。

$$a(t) = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

また、頸部の荷重及びトルクの感度方向を図 4-11 に示す。

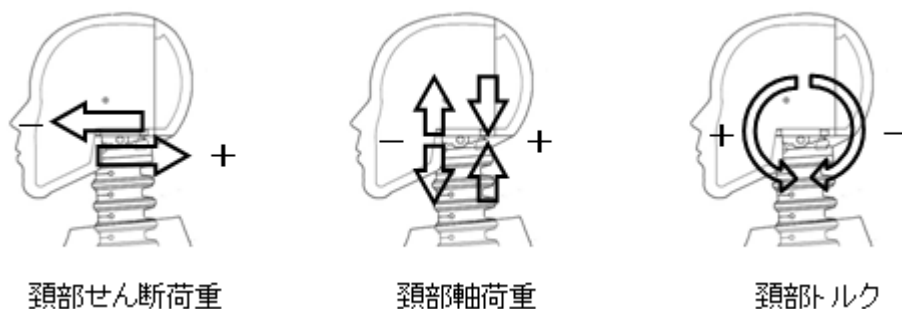


図 4-11 頸部の荷重及びトルクの感度方向

4.2.2. 試験結果

4.2.2.1. 試験結果の一覧

表 4-1 にテスト結果一覧を示す。

テスト 1～5 は 60m/min で男性型ダミーに色々な角度から衝突したデータである。

テスト 6～11 は 200m/min で男性型ダミーに色々な角度から衝突したデータである。

テスト 12～16 は 130m/min で男性型ダミーに色々な角度から衝突したデータである。

テスト 17 はテスト 2 との比較データで、ダミー損傷回避用のマットが無い状態で挙動が同じである事を確かめる為のデータである。

テスト 18・19 は、AGV 衝突後、路面等で発生する 2 次衝突時のデータを取る為にヘルメットが有る状態と無い状態での違いを見る為のデータである。

テスト 20～22 は、頭のみが衝突した場合の衝撃を 60・130・200m/min の各速度で行ったデータである。

テスト 23～25 は、尻のみが衝突した場合の衝撃を 60・130・200m/min の各速度で行ったデータである。

テスト 26～31 は男性型ダミーと女性型ダミーの違いを見る為に行ったデータである。

表 4-1 テスト結果一覧

	衝突速度 [m/min]		ダミーの種類	ダミー向き	HIC (頭部傷害値)	ダミー保護用 マットの有無	二次衝突の 有無(対路面)	備考	
	目標	実測							
Test 1	60	58.3	AM50	正面	12	マット有	有	マットから外れて路面へ転倒	
Test 2		53.3		後	1	マット有	無	フォークにもたれかかる	
Test 3		55.0		横	1	マット有	無	マット上へ転倒	
Test 4		55.0		後	1	マット有	無	フォークにもたれかかる	
Test 5		58.3		横	1	マット有	無	マット上へ転倒	
Test 6	200	201.7	AM50	正面	455	マット有	無	マット上へ転倒	
Test 7		200.0		後	260	マット有	無	マット上へ転倒	
Test 8		195.0		横	5	マット有	無	マット上へ転倒	
Test 9		195.0		後	157	マット有	無	マット上へ転倒	
Test 10		196.7		横	7	マット有	無	マット上へ転倒	
Test 11	195.0	後	251	無	無	有			
Test 12	130	131.7	AM50	後	313	マット有	無	マット上へ転倒	
Test 13		130.0		横	2	マット有	無	無	マット上へ転倒
Test 14		128.3		正面	156	マット有	無	無	マット上へ転倒
Test 15		128.3		後	397	マット有	有	有	マットから外れて路面へ転倒
Test 16		130.0		横	3	マット有	無	無	マット上へ転倒
Test 17	60	51.7	AM50	後	54	無	無	フォークにもたれかかる	
Test 18	自然転倒	—	AM50	後	313	無	有	ヘルメット着帽	
Test 19	自然転倒	—		後	5075	無	有	ヘルメット無し	
Test 20	60	58.3	AM50	頭	2	/	/	/	
Test 21	130	133.3			13				
Test 22	200	201.7			110				
Test 23	60	56.7	AM50	尻	/	/	/	腰部加速度: 52m/s ²	
Test 24	130	130.0			/	/	/	腰部加速度: 124m/s ²	
Test 25	200	196.7			/	/	/	腰部加速度: 209m/s ²	
Test 26	60	73.3	AF05	後	1	マット有	無	フォークにもたれかかる	
Test 27		70.0		横	1	マット有	無	無	マット上へ転倒
Test 28	130	131.7		後	14	マット有	無	無	マット上へ転倒
Test 29		133.3		横	3	マット有	無	無	マット上へ転倒
Test 30	200	191.7		後	59	マット有	無	無	マット上へ転倒
Test 31		193.3	横	8	マット有	無	無	マット上へ転倒	

4.2.2.2. 速度による衝撃値の比較

図 4-12～図 4-15 に各速度における HIC 値又は、加速度値の結果を示す。

何れも最高速度時に於いても、衝突安全基準（欧州規格男性）である HIC 値 1000 以下を示した。

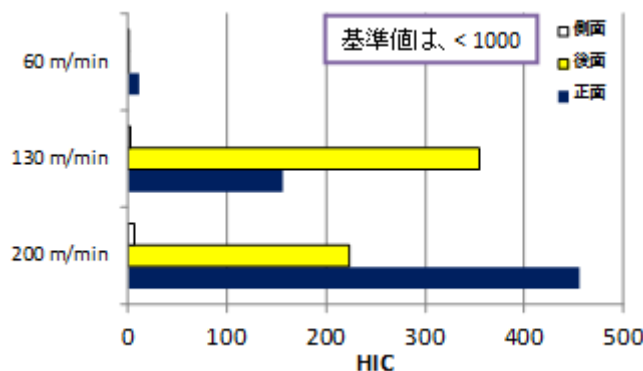


図 4-12 男性型ダミーを使用した速度別・衝突方向別の HIC 値

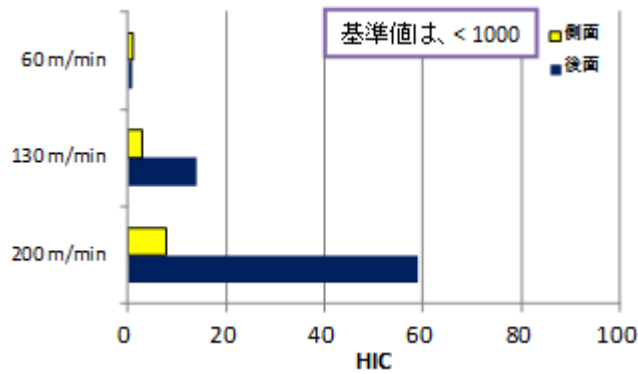


図 4-13 女性型ダミーを使用した速度別・衝突方向別の HIC 値

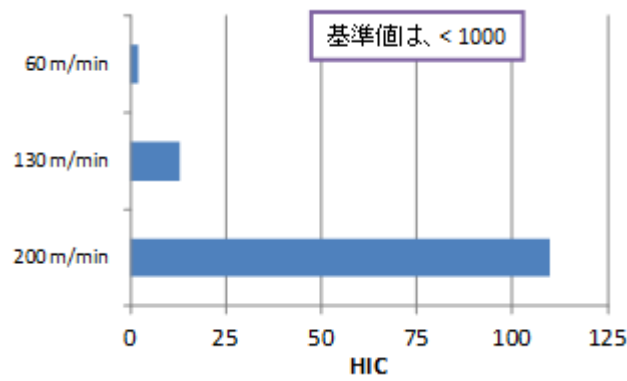


図 4-14 男性型ダミーを使用した速度別の頭部打撃時の HIC 値

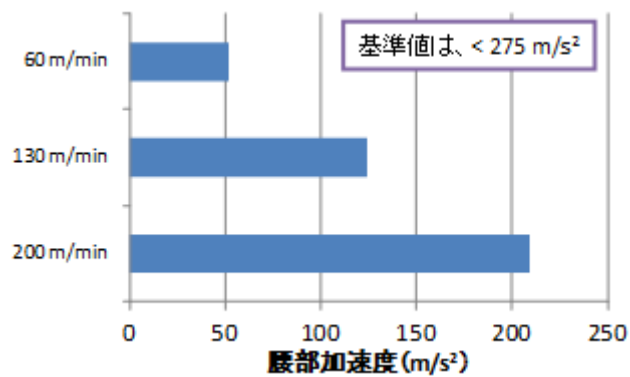


図 4-15 男性型ダミーを使用した速度別の腰部打撃時の加速度

4.2.2.3. 速度 200m/min での衝撃値

表 4-2 に速度 200m/min で衝突した時の各衝撃値と衝突安全基準値の比較表を示す。

テスト結果より、自動車の衝突時の乗員保護で定義されている傷害基準で比較すると、台車外板との衝突ではすべての項目で基準値よりも低い値となった。

台車がダミーに衝突した段階を一次衝突、ダミーが台車から飛ばされて路面へ転倒する段階を二次衝突と定義すると、自然転倒の結果よりヘルメットを着帽することで、路面への二次衝突時の HIC 値を低減できる事が分かった。

表 4-2 速度 200m/min で衝突した時の各衝撃値と衝突安全基準値

試験番号	試験条件 (ダミー、衝突方向)	HIC	頸部せん断荷重(N)	頸部軸荷重(N)	頸部トルク(Nm)	胸部加速度(m/s ²)	胸部変位(mm)
Test 6	AM50、正面衝突	455	-1722	-2022	-8	103	13
Test 7	AM50、後面衝突	260	381	1788	-26	93	2
Test 8	AM50、側面衝突	5	127	-395	-6	88	6
Test 9	AM50、後面衝突	157	410	1634	-34	142	3
Test 10	AM50、側面衝突	7	-77	321	-6	101	5
Test 11	AM50、後面衝突 (路面への二次衝突時点)	251 (18636)	517 (-7510)	1760 (-4305)	-40 (-40)	118 (225)	3 (26)
Test 18	自然転倒、ヘルメット有	313	-240	649	-16	111	1
Test 19	自然転倒、ヘルメット無	5075	5887	-1885	-11	634	1
Test 30	AF05、後面衝突	59	-220	-1923	-18	570	5
Test 31	AF05、側面衝突	8	125	433	-7	294	9
衝突安全基準 欧州法規(男性)		1000	3100	3300	-57		
衝突安全基準 米国法規(女性)		700		2520		588	52

4.2.2.4. 試験結果のまとめ

衝突中の挙動は、台車のバンパー部がダミーの足部に衝突、次いで胸部（肩）、頭部が外板に衝突する。また、ダミーの足首は、バンパー下部に巻き込まれる状態が見られた。衝突速度は速いほど、ダミーの飛ばされる距離は増加する。

ダミーの実測値は、衝突速度が速いほど頭部傷害値（HIC）も高くなるが、衝突時の姿勢によっても頭部と台車外板の衝突状況が異なり、正面と後面は外板との衝突が発生し易いが、側面衝突は、頭部と外板の距離が長い（肩幅）ため、衝突しないケースがあった。これにより HIC は他の衝突方向に比べ、低い値を示していた。

台車がダミーに衝突した段階を一次衝突、ダミーが台車から飛ばされて路面へ転倒する段階を二次衝突と定義すると、頭部、頸部、胸部のいずれも、二次衝突での衝撃が大きい。

一次衝突では、自動車の衝突時の乗員保護で定義されている傷害基準と比較すると、すべての項目で基準値よりも低い値となる。

また、二次衝突は、自然転倒の結果から、ヘルメットを着帽することで、路面への二次衝突時の HIC 値を低減できる事が分かった。

4.3. UWB 性能評価試験（協力：生活支援ロボット安全検証センター）

4.3.1. 概要

エリア管理システムにて使用している UWB 測位システム（周波数帯：7.25～10.25GHz）の基礎性能評価試験を生活支援ロボット安全検証センターにて実施した。また、国内では使用できない UWB 測位システム（周波数帯：6～8GHz）の基礎性能評価試験もあわせて行った。

4.3.2. 試験内容および試験方法

上述した UWB 測位システム（周波数帯：7.25～10.25GHz）基礎性能評価試験と UWB 測位システム（周波数帯：6～8GHz）基礎性能評価試験の試験内容および試験方法を以下に示す。なお、この 2 つのシステムには標準測位モード（STD）と高頻度測位モード（HUR）があり、両方のモードで試験を行った。

4.3.2.1. UWB 測位システム（周波数帯：7.25～10.25GHz）

この試験の前段階で行った弊社テストエリアでの試験により、定性的には電波の空中減衰率や発信機（タグ）の角度による電波特性はわかっていたが、定量的にはわかっていなかった。そこでスペクトラムアナライザ（略称：スペアナ）を用いて定量的な試験を実施した。具体的な試験方法としては、受信機（スペアナ付属アンテナ）から直近、5m、10m、15m の 4 つの地点（図 4-16 参照）のいずれかに、発信機（タグ）を床に対して 0 度、45 度、90 度と傾けた 3 種類の状況（図 4-17 参照）のいずれかを作って周波数特性を調べた（表 4-3 参照）。

4.3.2.2. UWB 測位システム（周波数帯：6～8GHz）

この周波数帯は、国内では電波暗室以外で使うことを禁止されているため、今回が初めての計測試験となる。3.3.1.4.1 と同様に電波の空中減衰率を調べた。具体的な試験方法としては、受信機（スペアナ付属アンテナ）から直近、5m、10m の 3 つの地点のいずれかに、発信機（タグ）を床に対して 0 度、90 度と傾けた 2 種類の状況のいずれかを作って周波数特性を調べた（表 4-3 参照）。

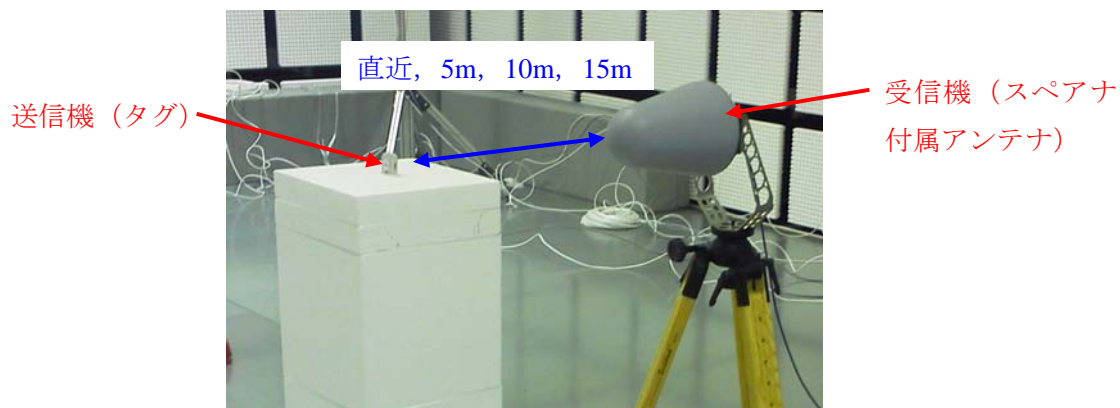


図 4-16 試験風景



0 度



45 度



90 度

図 4-17 発信機 (タグ) の設置角度

表 4-3 試験条件

周波数帯	モード	地点 (m)	タグの傾き(度)
7.25~10.25GHz	STD	0	0
			45
			90
		5	0
			45
			90
		10	0
			45
			90
		15	0
			45
			90
	HUR	0	90
		10	
6~8GHz	STD	0	0
		5	
		10	
	HUR	0	0
		0	0
		5	90
		0	0
		10	90

4.3.3. 性能評価試験結果

表 4-4 に UWB 測位システム（周波数帯：7.25~10.25GHz）でのスペアナによる測定結果を、表 4-5 に UWB 測位システム（周波数帯：6~8GHz）でのスペアナによる測定結果を示す。また、表 4-6 にそれぞれの場合の計測範囲内の電界強度の最大値 I_p と総計 I_t をまとめる。図 4-18 に各角度の距離による電界強度の総計の推移を示す。このグラフを見ると角度による減少傾向には大きな差がないことがわかる。また、図 4-19 に STD と HUR の距離による電界強度の総計の推移を示す。このグラフを見ると STD と HUR の減少傾向には大きな差がないことがわかる。

表 4-4 UWB 測位システム（周波数帯：7.25～10.25GHz）のスペアナ測定結果

	直近	5m	10m	15m
0度 (STD)				
45度 (STD)				
90度 (STD)				
90度 (HUR)				

表 4-5 UWB 測位システム（周波数帯：6～8GHz）のスペアナ測定結果

	直近	5m	10m
0度 (STD)			
0度 (HUR)			
90度 (HUR)			

表 4-6 電界強度の最大値 I_p と総計 I_t

周波数帯	モード	地点 (m)	タグの傾き(度)	I_p (dBm)	I_t (dBm)
7.25~10.25GHz	STD	0	0	-81.4	-14.3
			45	-80.7	-14.1
			90	-83.8	-20.9
		5	0	-102.6	-37.9
			45	-107.1	-41.1
			90	-110.7	-44.2
		10	0	-113.6	-45
			45	-110.2	-44.3
			90	-111.1	-46.9
	15	0	-111	-44.9	
		45	-116.7	-51	
		90	-121.2	-55	
HUR	0	-86.6	-22.4		
	10	90	-114.4	-50.6	
6~8GHz	STD	0	-85.7	—	
		5	-100.7	—	
		10	-111.7	—	
	HUR	0	0	-83.8	—
		5	0	-108.7	—
			90	-108.1	—
		10	0	-115.9	—
			90	-115.9	—

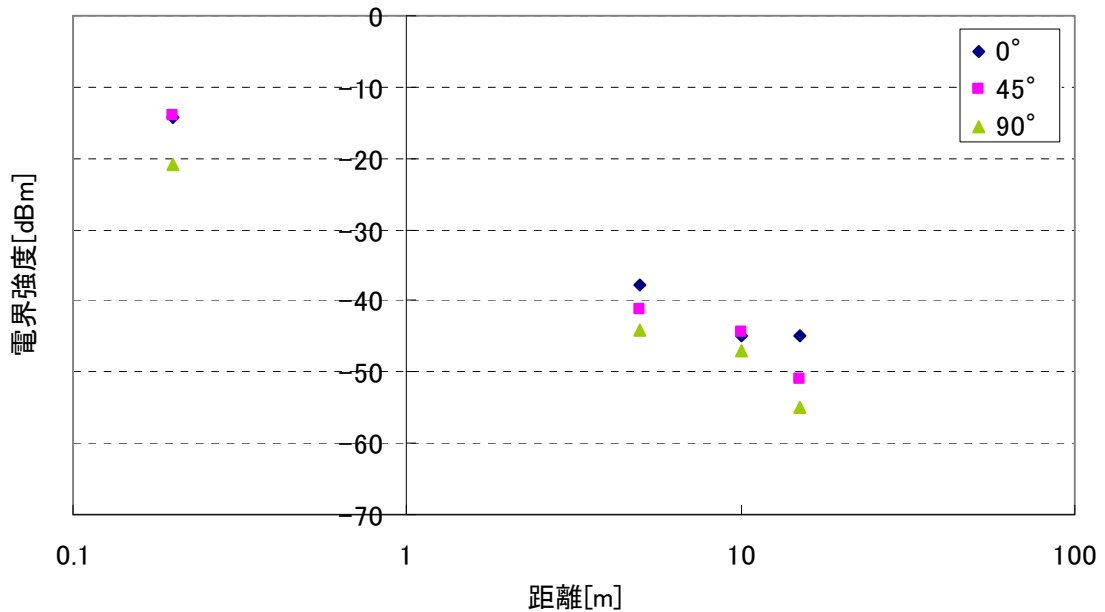


図 4-18 各角度の距離による電界強度の総計の推移

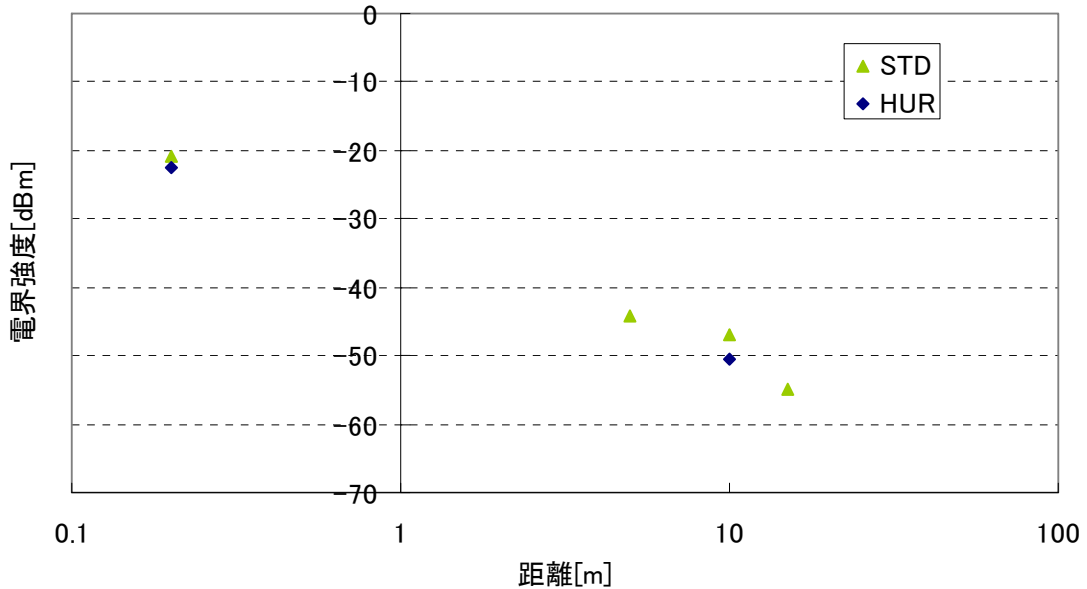


図 4-19 STD と HUR の距離による電界強度の総計の推移

4.3.4. 考察

4.3.4.1. センサの受入電界強度について

図 4-20 のように 20m×20m と 30m×30m のエリアでは、センサまでの最大距離はそれぞれ約 29m と 43m になる。今回の試験により得られた表 4-7 の電界強度の推定値を参照すると、センサの受入電界強度はアライアンスを含めると 20m×20m で-55dBm～-59dBm, 30m×30m で-60dBm～-65dBm 程度必要になると考えられる。

4.3.4.2. ノイズによるセンサ受信限界距離について

タグが発信した電波をセンサがきちんと受け取るためには、タグが発信した電波の電界強度がノイズ以上となる必要がある。例えば表 4-7 を使って考えると、計測する周波数帯と同じ周波数帯のノイズが-50dBm であった場合、センサがタグからの電波を受信できる距離は 20m 未満になると推測できる。

4.3.4.3. STD と HUR の差について

本試験では、STD と HUR に明確な差は見受けられなかったが、これはスペアナの特性上各周波数のピーク値を測定するため、差がでなかったと考えられる。

4.3.4.4. まとめ

今回の試験により、タグから発信される電波の距離ごとの電界強度を推定することができるようになった。これにより、センサの受入電界強度やノイズによるセンサ受信限界距離について推定を行うことができる。

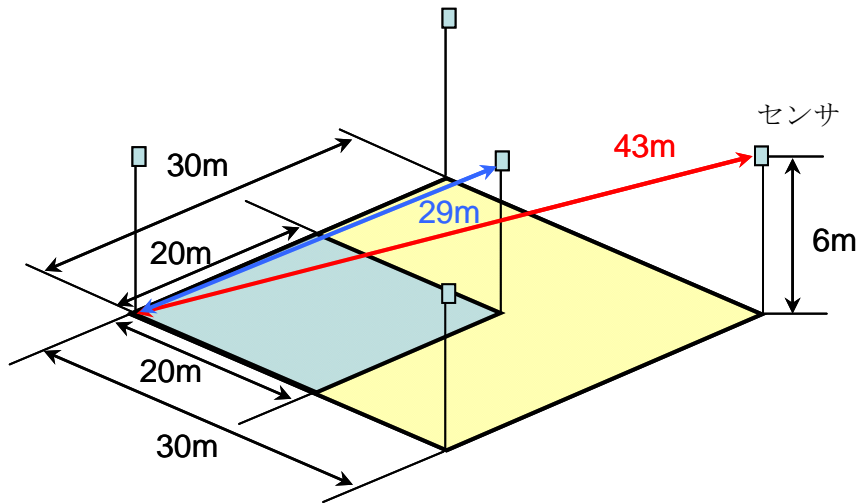


図 4-20 センサまでの最大距離

表 4-7 タグからの距離による電界強度 (推定値含む)

距離[m]	電界強度[dBm]
0.2	-14.2359
1	-27.301
10	-45.993
20	-51.6199
30	-54.9114
40	-57.2467
45	-58.2028
50	-59.0581

5. 成果

5.1. エリア管理システムの安全認証取得

5.1.1. 目標とする安全要求性能

エリア管理システムに求められる機能要求性能は、リスクアセスメントにより定義される。安全性能が最も要求される危険事象から、ISO 13849 -1:2006 $PLr = D$ の安全性能が要求されることが導き出される。

また、IEC61508-5:2010 に基づき、同危険事象に対して SIL に基づいた安全性の評価を行った場合、 $C = C_2, F = F_2, P = P_2, W = W_2$ と評価され、結果 SIL2 が必要となる (図 5-1 参照)。

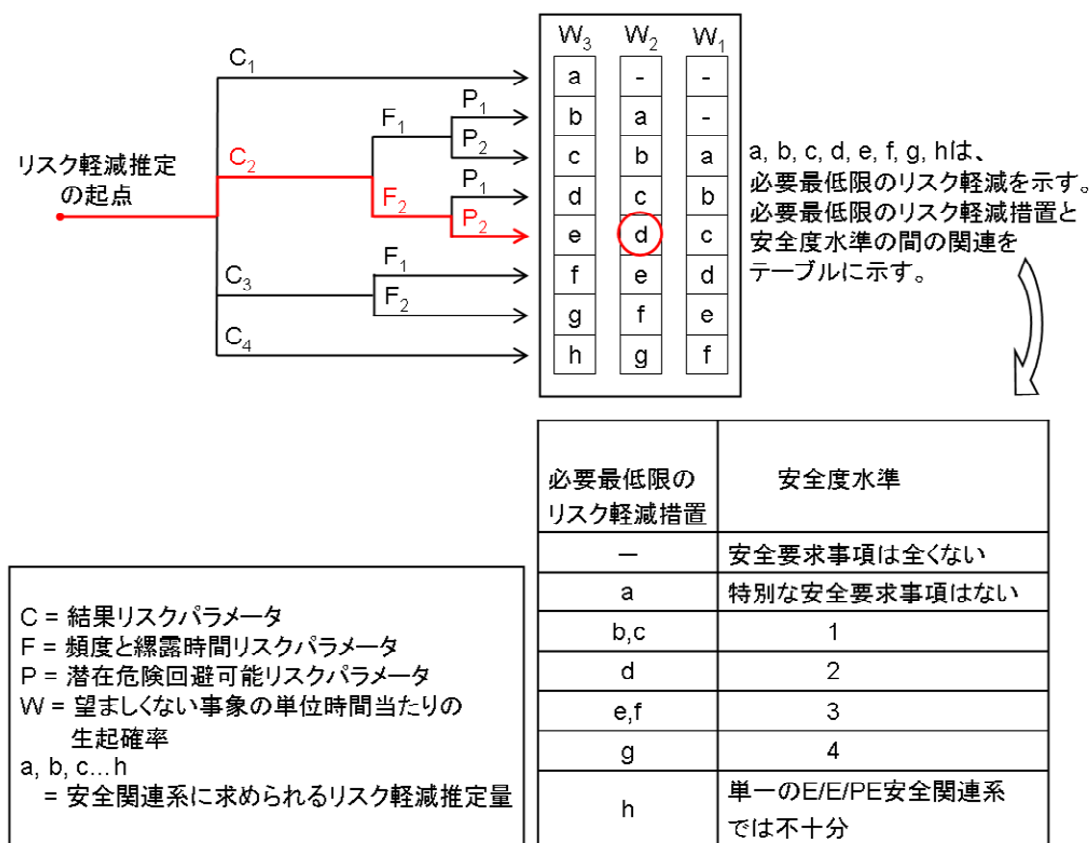


図 5-1 IEC61508-5 に基づく要求 SIL

また、IEC62061:2005 に基づき、同危険事象の要求 SIL を計算すると、過酷度 (Se) は 4、暴露レベル (Fr) は 5、発生確率 (Pr) は 2、危険を回避できる可能性 (Av) を 3 と評価する。クラスは 10 となり、SIL2 となる。

苛酷度	クラス				
	3 - 4	5 - 7	8 - 10	11 - 13	14 - 15
4	SIL2	SIL2	SIL2	SIL3	SIL3
3		B(OM)	SIL1	SIL2	SIL3
2			B(OM)	SIL2	SIL2
1				B(OM)	SIL1

図 5-2 IEC62061 に基づく要求 SIL

よって、エリア管理システムに求められる安全性能は、SIL2 または、PL=D となる。

5.1.2. 評価規格 (JQA より抜粋)

エリア管理システムの評価規格として、生活支援ロボットの安全に関する国際規格の ISO 13482-6:2014 がある。また、機械産業系の機能安全に関する規格として IEC62021 がある。ISO 13482-6:2014 は、ISO の認証スキーム (図 5-3 参照) を元に日本品質保証機構により製品が評価され、認証を受けることができる。認証を受けることにより、製品の安全性・信頼性が保証されることになる。



図 5-3 ISO 13482-6:2014 認証スキーム

5.1.3. 文章一覧

ISO 13482-6:2014 により評価を受けるために、設計管理体制、リスクアセスメント、製品の安全性評価が記載されている文書を用意した。表 5-1 は用意した文章の一覧である。

表 5-1 文章一覧

No.	文書名	文書番号	日付版
1	エリア管理システムの安全システム化開発企画書	DS-HE-AAMS-001	2013/08/01
2	エリア管理システム安全要求仕様書・安全要求配置仕様書	DS-HE-AAMS-002	2014/02/03
3	設計 FMEA	DS-HE-AAMS-003	2014/02/03
4	2013 年度版エリア管理システム安全性能計算書	DS-HE-AAMS-004	2014/02/04
5	エリア管理システム妥当性確認計画書	DS-HE-AAMS-005	2014/02/05
6	エリア管理システムシステム設計書	DS-HE-AAMS-006	2014/02/03
7	エリア管理システムの安全システム化外注発注依頼書	DS-HE-AAMS-007	2013/09/13
8	エリア管理システムソフトウェアモジュール設計書	DS-HE-AAMS-008	V 1.0
9	2013 年度版エリア管理システム妥当性確認報告書	DS-HE-AAMS-009	2014/02/04
10	エリア管理システムクラス図	DS-HE-AAMS-010	2013/01/01
11	安全 PLC モジュール設計図	DS-HE-AAMS-011	2013/12/01
12	高速ビークルシステムリスクアセスメント V.7	--	2013/03/25
13	2013 年度版エリア管理システムテスト要領書	---	2014/01/09

5.1.4. 評価対象

エリア管理システムの安全認証の範囲は図 5-4 のようになる。エージェントに取り付けられ位置を計測する UWB タグ、UWB センサ、UWB センサへの電力供給とエリア管理サーバとの通信に使用される POE ハブ、AGV システムに速度指示を行うエリア管理サーバが今回の認証の範囲となる。

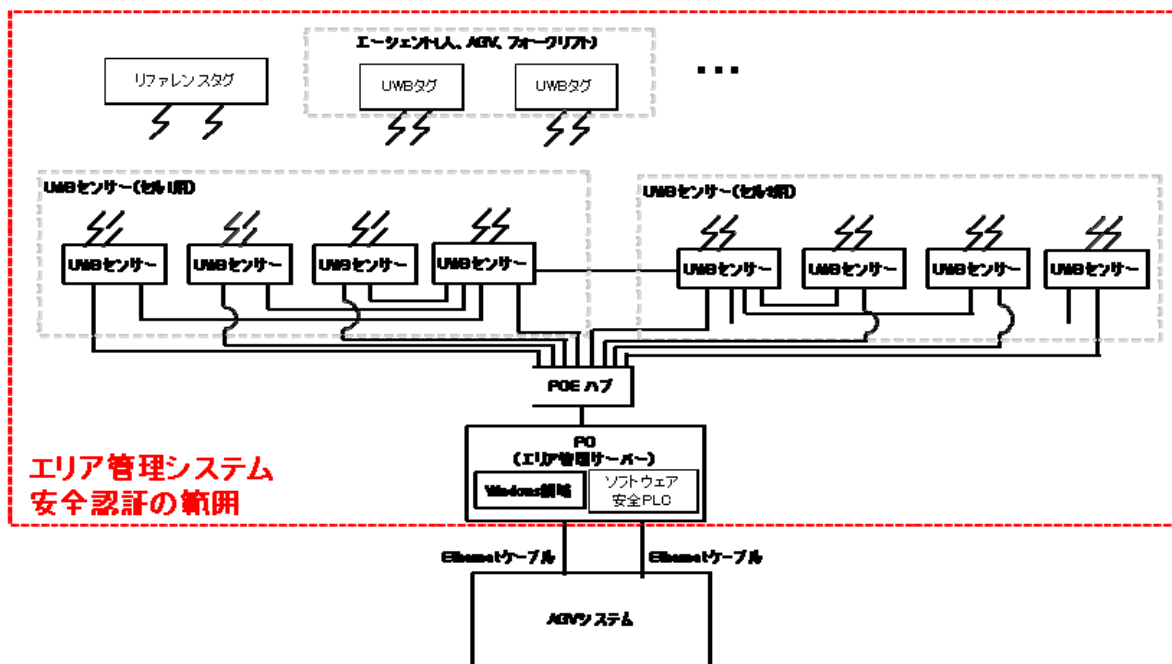


図 5-4 エリア管理システムブロック図

5.1.5. 周辺機器に対する要求事項

エリア管理システムには、周辺機器として AGV 制御機器と 3D 障害物センサがある。エリア管理システムは、PC 部イーサネットカードから、AGV 制御機器・3D 障害物センサへ指示速度を出力する。それぞれの要求性能は以下のとおりである。

A) AGV 制御機器

- エリア管理システムからの指示速度を、その時点の最高速度とする。
- エリア管理システムから通信が一定時間間隔以上ない場合は、60m/min 以下にて走行させる。
- エリア管理システムからの通信フォーマットに誤りがないか確認する。

B) 3D 障害物センサ

- 3D 障害物センサ自体は PL=d、または SIL2 以上の安全機能を持つ。
- 3D 障害物センサがエリア管理システムと通信が行えるようにする。
- エリア管理システムからの指示に基づき、本来の減速・停止信号を AGV へ働きかける。

- エリア管理システムから通信が一定時間間隔以上ない場合は、60m/min 以下にて走行させる。
- エリア管理システムからの通信フォーマットに誤りがないか確認する。
- エリア管理システムへの送信は、詳細仕様書のとおり行う。
- TCP/IP 以外のプロトコルを使用する場合には、必要に応じて CRC コードを追記する。

5.1.6. 安全性能

入力部・ロジック部の SFF を求め、各 SIL を求める。SFF は、検出不可能な危険側故障確率が占めない割合として求める。結果として、入力部・ロジック部・出力部共に SFF は 99% となり、SIL2 となる。なお、ソフトウェア安全 PLC (WinAC-RTX-F) は第三者認証により SIL3 と認められている。上記より、構成は SIL2 を満たすことが示された。

続いて、危険側ランダムハードウェア故障確率の観点から評価する。高頻度作動要求モード・プルーフ試験間隔 1 年・MTTR8 時間と仮定し PFH_d の値を求めた。この結果、システム全体 (入力部・ロジック部・出力部の合計) の PFH_d が 5.72E-07 となり、エリア管理システムが SIL2 であることが示された。なお、PFH_d の計算方法は IEC61508-5:2010 に基づく。これらのことから、システムの構成・ランダムハードウェア故障確率の双方の観点から、エリア管理システムが SIL2 を満たすことが示した。

以上の論拠を示した上で、エリア管理システムの安全性能や開発プロセスが ISO 13482:2014 の認証スキームを元に日本品質保証機構により評価が行われ、安全認証を取得するに至った。図 5-5 は、エリア管理システムの認証書である。



図 5-5 認証書

5.2. JIS D 6802 : 1997 追加防護策の改定案

JIS D 6802:1997「無人搬送車システムー安全通則」が現在国内にて用いられている AGV の安全に関する JIS 規格である。同規格では AGV を高速化した際の安全に関しては特に記載しておらず、各社が独自にリスクアセスメントを実施し、メーカー各社の責任において安全対策を実施しているのが現状である。

そこで、本プロジェクトにて得られた知見を元に、AGV を高速化した際の危険事象と、安全に関する考え方をまとめ、同規格の改定に関して以下の改定骨子案を一般社団法人日本産業車両協会に提言した。本提言をもとに同協会にて JIS の改定を検討する。

5.2.1. 方針

改定の方針は以下のとおりである。

- 当社追加防護策案を日本産業車両協会委員会で検討し、同協会の業界基準とする。
- 来期から現状 JIS に追加し、当社追加防護策案とリスクアセスメントを行うことで AGV 速度は各社が決定し責任を持つ方式とする。
- この基準は、次の JIS のベースとする。これを基本に、新しい ISO を提言する。
- 最高速度 60m/min 以下の簡易 AGV は、現在の JIS に基づき安全を守る。
- 上記は、運用しながら半年に 1 回見直しする。

5.2.2. 改定骨子案

改定の骨子案は以下のとおりである。

1. AGV 走行エリアには、制限事項として教育を受けた人の侵入のみを可能とする。一般の人や教育を受けていない人は侵入してはいけない。また、エリアの安全管理者を置くことが望ましい。
2. 走行エリアに侵入する際には、ヘルメットを着用すること。さらに、安全靴を着用することが望ましい。
3. AGV と人が衝突した際に、危険の大きさが軽症以下にてすむ AGV の速度を「安全速度」と考える。
4. 現 JIS の知見に基づき、「安全速度」は 60m/min 以下（仮）とする。
5. AGV が安全速度以下にて走行する場合には、現 JIS で考える制御的・機械的な手法を用いて安全性を確保してもかまわない。
6. AGV が安全速度より速く走行し、その安全を確保する場合には、非接触障害物検知センサーを使用すること。
7. 「6」非接触障害物検知センサーの安全要求レベルは、SIL（Safety Integrity Level）は SIL2, CAT（Category）は CAT.3 および PL（Performance Level）は PL d のい

ずれかとする。

8. 「6」の非接触障害物検知センサは、車体の幅と高さ方向の障害物も検知できることが望ましい。また、カーブを含む走行軌道上の障害物を検知することが望ましい。
9. 「6」の非接触障害物検知センサは、システムとして構成しても構わない。
10. 非接触障害物検知センサの試験方法は、検出体の寸法、位置などをISO要求事項(案)と整合させ、本規格にて別途規定する。システムとして構成した時は、別途試験方法を定める。
11. AGVが安全速度より速く走行し、人とAGVが交差するような場所については、なんらかの安全防護策を実施すること。
12. 「8」の実施例として、「エリア管理システム：人とAGVの位置を計測し、衝突する前にAGVを減速させるシステムの導入」、「ローカルエリアセンサ」によるAGV制御、「遮断機」などを紹介する。

本案は、ダイフクが案を作成し、ニチュ三菱フォークリフト株式会社（一般社団法人 日本産業車両協会 会員）殿にご意見修正を頂き作成しました。

5.3. 電波法 無線設備規則第 49 条の 27 の改正

今回の開発のポイントの1つである UWB 無線システム(エリア管理システムに利用)は、使用に制限があり、これを取り除くべく近畿総合通信局から総務省に働きかけて委員会の再開をお願いし、室内での利用が緩和された。その経緯は下記である。NEDO での事例も報告の中に入れた。

ダイフクは、委員会に参加し対応してきた。(出席：松村克彦 (株)ダイフク研究・研修センター 常務取締役：当時)

5.3.1. UWB 無線システム作業班の概要

以前(数年前)あった UWB 無線システム作業班の再開であり、今回の作業班の作業内容は以下のとおりである。

- 従来の「通信用途 UWB 無線システム」に加え、測位を中心とする「センサ用途 UWB 無線システム」カテゴリーの新規設置
- センサ用途 UWB 無線システムに対する干渉検討(共用条件)および、通信用途 UWB 無線システムの共用条件の見直し
- センサ用途 UWB 無線システム利用に適した技術的条件(法令)の検討
- 第4世代携帯電話との干渉検討と干渉軽減機能の創案(Low Band)

以上、1年半程度の作業班審議をへて、陸上無線通信委員会、電波監理審議会に上程、平成26年1月より以下のとおり技術的条件が変更された。(屋内 RTLS の解禁)

- 通信速度制限撤廃
- 交流電源接続規定撤廃

現在は、干渉軽減機能、実機測定、準天頂衛星など積残し分の検討が日立への委託の形で進行中である。屋外利用の審議は来期以降行う。

5.3.2. 作業班でのダイフクの活動

作業班でのダイフクの活動内容は以下のとおりである。

5.3.2.1. 審議導入

ユーザーの立場で、センサ UWB 無線システムの紹介、概要説明、技術的条件変更の提案を行った。

5.3.2.2. 利用シーンのとりまとめ・提示

工場・物流倉庫での RTLS 利用シーンの提示および説明を行った。

5.3.2.3. 普及予測

センサ UWB 無線システムの需要予測、普及密度の試算（総務省協力）を行った。

5.3.2.4. 干渉検討

利用シーンごとのタグの利用形態、構内での分布、システムを利用する業界による特性などの情報を提示した。RF の物理条件の検討、シミュレーションはベンダー（日立、ユビセンス、GIT）、被干渉側団体が担当した。なお、干渉検討資料は公開不可とする。

5.3.2.5. 交流電源接続規定撤廃

撤廃後の利用シーンを例示した。

6. まとめ

本事業では、配送センター内で作業員・フォークリフトと共存できる安全な高速 AGV システム（従来 AGV の最高速度の約 3 倍）を開発した。高速 AGV システムの安全防護策として、主に 3 つの技術；3D 障害物センサ（安全技術）、エリア管理システム（安全技術）、ローカルエリアシステム（安全サポート技術）を開発した。これら 3 つの安全技術の性能を評価するとともに、実運用テストを含めた安全検証試験を行うことで、本システムの安全性を確認することができた。また、3 つの技術の 1 つであるエリア管理システムについては、世界初となる ISO13482:2014 の JQA による認証を取得した。

本事業により得られた知見から、JIS D 6802:1997 「無人搬送システムー安全通則」の追加防護策を一般社団法人 日本産業車両協会に提言し、AGV を高速化した際の、日本国内における安全への考え方の確立に貢献した。

7. 開発体制

7.1. プロジェクトメンバー

本プロジェクトのメンバーを下記表に示す。

プロジェクトメンバー
辻本 方則
原 義正
高川 夏生
嵯山 利貞
窪田 耕児
渡邊 義孝
辻本 和史
田中 宏明
吉永 和治
小出 浩之
尾上 慶太
水野 芳樹
加門 和司
森川 雅司
甲斐 信行
坪田 朋也
正田 和哉

7.2. ご協力頂いた方々

本プロジェクトを進めるにあたり、ご協力頂いた方々を以下に示す。この場をお借りして御礼申し上げます。

- ◆ 味の素株式会社様、味の素物流株式会社様、関東エース物流株式会社様、株式会社オールユニール様
・・・実運用テストを行う場所の提供およびテストへの協力をして頂いた。
- ◆ 一般財団法人 日本自動車研究所（JARI）様
・・・AGV 衝突試験の場所の提供、試験の実施および試験結果の解析をして頂いた。

- ◆ **一般財団法人 日本品質保証機構（JQA）様**
 - ・・・エリア管理システムの ISO13482 認証取得にあたり、ドキュメント作成の指導をして頂いた。

- ◆ **生活支援ロボット安全検証センター様**
 - ・・・UWB 性能評価試験の際にセンター内の電波暗室をお貸し頂いた。

- ◆ **一般社団法人 日本産業車両協会様**
 - ・・・JIS D6802 の改定案を提出について協力をして頂いた。

- ◆ **北陽電機株式会社**
 - ・・・3D 障害物センサ、ローカルエリアセンサの開発について協力して頂いた。

- ◆ **日立マクセル株式会社**
 - ・・・UWB タグの非接触システムの開発について協力して頂いた。

- ◆ **Daifuku Webb Holding Company**
 - ・・・高速 AGV の開発について協力して頂いた。

- ◆ **株式会社 コンテック**
 - ・・・AGV 非接触給電システムの開発について協力して頂いた。

- ◆ **株式会社 日に新た館**
 - ・・・2013 国際ロボット展でのデモンストレーションに協力して頂いた。

8. その他

8.1. 発表・講演・展示会

8.1.1. 発表

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2011年9月8日	第29回日本ロボット学会学術講演会	配送センター内高速ビークルシステムの安全技術開発	辻本方則、原義正、辻本和史、高川夏生、渡邊義孝、○嵯山利貞、窪田耕児
2012年9月20日	第30回日本ロボット学会学術講演会	配送センター内高速ビークルシステムの安全技術開発(第二報)	辻本方則、原義正、高川夏生、渡邊義孝、○嵯山利貞、窪田耕児
2013年3月12日	生産システム部門研究発表講演会2013	NEDO:生活支援ロボット実用化プロジェクト配送センター内高速ビークルの安全技術開発のご紹介	○嵯山利貞、辻本方則、原義正、高川夏生、渡邊義孝、窪田耕児
2013年5月23日	ロボティクス・メカトロニクス講演会2013	配送センター内高速ビークルの安全技術開発のご紹介	○嵯山利貞、辻本方則、原義正、高川夏生、渡邊義孝、窪田耕児
2013年9月4日	第31回日本ロボット学会学術講演会	配送センターにおける高速AGVの安全技術開発	○窪田耕児、辻本方則、原義正、高川夏生、渡邊義孝、嵯山利貞

8.1.2. 講演

講演年月日	講演媒体	講演タイトル	講演者
2012年9月11日	国際物流総合展2012プレゼンテーションセミナー	無人搬送車システムの新たな可能性	辻本方則
2013年12月12日	第22回交通・物流部門大会 (TRANSLOG2013)	特別企画③:物流を勉強するシンポジウム	辻本方則

8.1.3. 展示会

展示会名	場所	出展期間
2011国際ロボット展	東京ビックサイト	2011年11月9日～12日
2013国際ロボット展	東京ビックサイト	2013年11月6日～9日

8.2. 特許

No.	発明の名称	出願番号	出願日	発明者	外国出願
1	物品搬送設備における位置計測システム	2012-090592	2012/4/11	辻本 方則 原 義正 高川 夏生 穂山 利貞 窪田 耕児	
2	位置計測システム及びそれを備えた物品保管設備	2012-211551	2012/9/25		
3	位置計測システム及びそれを備えた物品保管設備	2012-211552	2012/9/25		
4	移動体の姿勢判別システム	2012-211553	2012/9/25		
5	移動体の姿勢判別システム	2012-211554	2012/9/25		
6	物品搬送設備	2013-047060	2013/3/8		米国(特願13/859233号)および中国(特願201310122369.5号)
7	搬送台車制御システム	2013-079873	2013/4/5		
8	走行車制御システム	2013-088631	2013/4/19		米国および中国に出願書類作成中。
9	移動体管理システム	2013-088632	2013/4/19		

8.3. メディアへの掲載

メディア名	掲載および放送日	見出し
日刊工業新聞社robonable	2011年9月12日掲載	ダイフク、無人搬送車の高速運行に向け安全技術を開発、13年に現地試験
日刊工業新聞朝刊	2012年9月12日付	無人搬送車システム、毎分200m走行を管理、産業車両協会、来年度めど実証実験
DAIFUKUNEWSS203	2013年1月発行	安全技術を導入した配送センター内高速ビークルシステムの開発
日本経済新聞朝刊	2014年2月18日付	パナソニックとダイフク、生活支援ロボで国際安全規格
日経産業新聞朝刊	2014年2月18日付	パナソニックとダイフク、生活支援ロボ、国際認証、介護や物流拠点向け
日刊工業新聞朝刊	2014年2月18日付	パナソニック・ダイフクのロボ、国際安全認証を取得、JQA
日経産業新聞朝刊	2014年3月13日付	日本発 国際規格の重い責任

9. 参考文献

- 1 ISO9001 : 2008 Quality management systems
- 2 IEC61508 JIS D 6802:1997 無人搬送車システム 安全通則
- 3 ANSI/ITSDF B56.5-2012 Safety Standard for Driverless, Automatic Guided Industrial Vehicles and Automated Functions of Manned Industrial Vehicles.
- 4 ISO 12100:2010 Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction.
- 5 The Japan Machinery Federation (2010) Mechanical risk assessment guide line for makers.
- 6 ISO13849:2006 Safety of machinery - Safety-related parts of control systems.
- 7 IEC61508:2010 Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems.
- 8 IEC62061:2005 Safety of Machinery Functional Safety of Safety-Related Electrical, Electronic and Programmable Electronic Control Systems.
- 9 IEC60204 Safety of Machinery - Electrical equipment of machines -
- 10 IEC61784-3:2010 Industrial communication networks.
- 11 ISO13482:2014 Robots and robotic devices -- Safety requirements for personal care robot.
- 12 ダイフクニュース 203号(2013) 安全技術を導入した配送センター内高速ビークルシステムの開発

事業全体の成果

目 標	研究開発成果	達成度
<p>プロジェクト全体の目標: 下記の3項目に分類される。</p> <p>(委託業務実施計画書 別表から抜粋)</p> <p>(1) 高速ビークルのリスク提言技術と安全要素技術の開発</p> <p>A) リスクアセスメントの実施</p> <p>B) 高速ビークルの開発(コンベヤタイプ・リアフォークタイプ)</p> <p>C) 安全に関するデバイス・システムの開発</p> <p>① 3D 障害物センサー</p> <p>② エリア管理システム</p> <p>③ ローカルエリアシステム</p> <p>④ AGV 非接触充電技術</p> <p>D) 安全検証試験</p> <p>① AGV 衝突時のエネルギー計測</p> <p>② UWB 性能評価試験</p> <p>(2) AGV 安全規格への提言</p> <p>(3) 想定ユーザーによる実現場実証試験</p>	<p>(記載例)</p> <p>目標に対する成果</p> <p>(出典:最終成果報告書)</p> <p>(1)全項目達成。</p> <p>A)各年度の期初と期末に実施</p> <p>B)平成23年度にコンベヤタイプ、平成24年度にリアフォークタイプを製作・運行試験の実施。いづれの最高速度も200m/min</p> <p>C)全項目開発し検証試験を実施。特に②エリア管理システムはISO13482を取得</p> <p>D)平成24年度に60m/min～200m/minにおける衝突時のエネルギーを計測。また、同年度にUWBの基本特性の試験も実施。</p> <p>(2)JIS6802 追加防護策の提案を産業車両協会に提出。</p> <p>(3)平成25年度に、味の素物流株式会社にて実施</p>	<p>(1) 全項目達成</p> <p>(2) 達成</p> <p>(3) 達成</p>

特許、論文、外部発表等の件数（内訳）

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学 会 発 表・講演	新聞・雑誌等 への掲載	その他
H23FY	0件	0件	0件	0件	0件	2件	1件	0件
H24FY	6件	1件	0件	0件	0件	3件	2件	1件
H25FY	3件	1件	0件	0件	0件	4件	4件	2件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

2.4 研究開発項目③ 安全技術を導入した配送センター内のフォーク型物流支援 ロットの開発 (株) 日立産機システム、(株) 日立製作所

目次

要 約.....	4
ABSTRACT.....	5
1. 緒言	6
2. 目的	8
2.1 事業目的	8
2.2 事業概要	9
3. 研究体制	10
3.1 研究体制	10
3.2 研究の推進方法	10
3.2.1 推進方法	10
3.2.2 工程	11
4. 開発対象	12
4.1 開発対象	12
4.2 適用規格	14
5. 研究方法	16
5.1 リスクアセスメント	16
5.1.1 フォークリフト型無人搬送車について	16
5.2 本体設計	29
5.2.1 設計コンセプト	29
5.2.2 機構シミュレーション	35
5.2.3 運用シミュレーション	38

5.3	安全サポート系の設計	41
5.3.1	安全サポート系の機能の概要	41
5.3.2	自動走行に利用するセンサーの比較	41
5.3.3	安全サポート系センサーの開発目標仕様	44
5.3.4	安全サポート系の構成	46
5.3.5	安全サポート系のハードウェア	50
5.3.6	安全サポート系のソフトウェア	61
5.3.7	安全サポート系のインターフェース	63
5.3.8	安全サポート系センサーのハードウェアの改良	68
5.3.9	安全サポート系の3Dシミュレーションソフト（PCのソフト）	80
5.4	安全系の設計	92
5.4.1	非常停止回路	92
5.4.2	制御装置の相互監視	95
5.4.3	安全センサーによる停止	95
5.5	車両設計	102
5.5.1	ハードウェア設計	102
5.5.2	車体制御ソフトウェア設計	105
5.5.3	3D位置認識装置との連携ソフトウェア設計	106
5.5.4	ドキュメンテーション	107
5.6	付帯設備の検討	110
5.6.1	インドアGPSシステム	112
5.6.2	無線LAN	112
5.6.3	レーザーレーダビジョンシステム	113
5.6.4	その他の方法	114
6	評価試験	116
6.1	機能試験	116
6.1.1	動力性能	117
6.1.2	3次元位置認識の評価	119
6.1.3	安全系・安全サポート系の評価	121
6.1.4	安全サポート系センサーの単体試験	123
6.1.5	3次元障害物センサー単体試験の評価	134
6.2	模擬環境での試験	136

6.2.1 見直し事項	137
6.2.2 不具合事項	138
6.3 安全検証センターでの評価	138
6.3.1 衝突時の挙動	140
6.3.2 頭部傷害基準値（HIC）での評価	145
6.3.3 衝突試験に対する考察	147
7. 結果	149
7.1 安全サポート系	149
7.2 安全系	149
7.3 コスト	149
8. 総括	150
8.1 成果の達成状況	150

要 約

独立行政法人新エネルギー・産業総合開発機構では、生活支援ロボットとして産業化が期待されるロボットを対象に関係者が密接に連携しながら本質安全・機能安全に係る試験を行い、安全性等のデータを取得・蓄積・分析し、安全性検証手法の研究開発を平成 21 年度～平成 25 年度に生活支援ロボット実用化プロジェクトを実施した。

(株)日立産機システムと(株)日立製作所は平成 23 年度より自律運転を行う移動作業型ロボットの分野で、配送センターで使用するフォークリフト型物流支援ロボットの開発で参画した。(株)日立産機システムは 3 次元位置認識装置による安全サポート系を開発し、(株)日立製作所はフォークリフト型ロボットの設計製作、安全系の開発を担当した。

3 次元位置認識装置は 2 次元レーザー距離計をジンバル構造で支持し、縦方向走査を追加することで 3 次元にデータを拡張し、走査したデータから床と天井部分に相当する部分を排除したデータをリアルタイムに出力する。3 次元で障害物を検出することで遠方から近方までシームレスな障害物の検出ができ、自己位置推定による誘導制御の電子地図との照合を併用することで、狭小場所での高速搬送を行うことができる。安全系は 3 次元位置認識装置の死角を含む車体の周囲 360 度の対人接触を防護し、フォークリフトの走行中だけでなく、パレットの積み下ろしを含む荷扱い作業中の対人接触を防護する。安全サポート系と安全系を併用することで、通常制御の異常時にも動作する機能安全を実現することができ、その効果を検証することができた。

また安全機能を停止した条件下で衝突試験を実施し、対人接触におけるダメージを定量化した。車体とダミーとの一次衝突では従来から安全とされてきた 60m/分を高速化した 180m/分の速度での衝突でも直ちに重篤な結果には至らないことが確認された。一方、一次衝突の約 1 秒後に発生するダミーと床面との二次衝突はその衝撃が大きく、高速化は車体の設計だけでなく、運用面でのヘルメット着用、衝突後の人の挙動でダメージを受けるリスクを低減する車体形状などの対策が必要なことが判明した。

本プロジェクトの成果は(株)日立産機システムと(株)日立製作所でそれぞれ製品化すると共に、プロジェクトで得られた知見は無人搬送車の JIS 規格改定に反映する。

Abstract

In NEDO, industry of Personal care robot carried out personal care robot practical use project for the fields where it was expected becoming it for from 2009 to 2013.

Perform validation affecting functional safety and inherent safety, and the acquisition, storage analyzes safety data; of the safety verified methodology carried it out

Hitachi Industrial Equipment Systems Co.,Ltd. and Hitachi, Ltd. participated in it by development of the fork-lift typed AGV to use in a delivery center in autonomic mobile servant robots from 2011. Hitachi Industrial Equipment Systems Co.,Ltd. developed safe support system by 3D obstacle sensor, and Hitachi, Ltd. was in charge of development pro-design and manufacture, security of the fork lift type anthropomorphic dummy.

3D obstacle sensor supported 2D laser range finder by gimbal construction and expanded the data in the three dimensions by adding longitudinal scanning. It output the data that removed a part equivalent to a floor and a ceiling part from the data that scanned in real time. It can detect the seamless obstacle from a long distance to the short distance by detecting an obstacle in three dimensions and can convey the high speed at the narrowness place by using the check with the electron map of the guidance and control by the self-position estimate together. The safety system protects the interpersonal contact of all people of the car body including the blind spot of 3D obstacle sensor and, among the travel of the fork lift, protects handling freight work interpersonal contact including the loading and unloading of the pallet. We could realize functional safety to usually work at the time of abnormality of the control by using safety support system and a safety system together and was able to inspect the effect.

In addition, we performed the impact-test and quantified damage at the time of the impact with the human body. The primary impact with AGV and the dummy, it was confirmed conventionally that even the impact that speeded up 60m/min said to be safety in a rate of 180mm/min did not reach the effect serious promptly. On the other hand, as for the secondary impact with the dummy and the floor occurring approximately one second after primary impact, the bombardment is big. Speedup was not only a design of the AGV, and it became clear that measures such as the AGV body shape which reduced a risk to receive helmet wearing, damage at the time of the use were necessary.

The result of this project manufactures it in Hitachi Industrial Equipment Systems Co.,Ltd. and Hitachi, Ltd. In addition, the knowledge provided by a project reflects it for a JIS standards revision of the AGV.

1. 緒言

日本では急速に少子高齢化が進行し、国立社会保障・人口問題研究所「日本の将来推計人口によると、総人口は、2030年の1億1,662万人を経て、2048年には1億人を割って9,913万人となり、2060年には8,674万人になるものと見込まれている。生産年齢人口（15～64歳の人口）は2010年の63.8%から減少を続け、2017年には60%台を割った後、2060年年には50.9%になるとなるのに対し、高齢人口（65歳以上の人口）は、2010年の2,948万人から、2042年に3,878万人とピークを迎え、その後は一貫して減少に転じ、2060年には3,464万人に減少し労働力の不足が懸念されている。このような社会情勢の下に、産業分野だけではなく、介護・福祉、家事、安全・安心等の生活分野へのロボット適用が期待されている。しかしながら背イカル支援ロボットの安全技術に関しては国内外の規格が未整備で、民間企業の独自の取組では技術開発も産業化も加速されないことから、国が一定の関与を行い、安全性基準に関する国際標準等の整備が求められている。

独立行政法人新エネルギー・産業総合開発機構（以下NEDOと略す）では、生活支援ロボットとして産業化が期待されるロボットを対象に関係者が密接に連携しながら本質安全・機能安全に係る試験を行い、安全性等のデータを取得・蓄積・分析し、安全性検証手法の研究開発を平成2009年度～平成2013年度に生活支援ロボット実用化プロジェクトを実施した。研究開発内容は以下の研究開発より構成される。

(1) 生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発

生活支援ロボットに対するリスクアセスメントについて、特に機能安全に関して方法論を確立するために、リスクアセスメント手法の具体的計画を定める。また、生活支援ロボットにおける安全性検証方法や判断基準の定量化について検討する。また安全技術を導入して開発された生活支援ロボットにおけるコンセプト段階から製品段階までの安全性基準に関する適合性評価手法に係る研究開発計画を検討する。併行して、ロボット開発実施者が開発する安全管理技術と適合性評価結果を踏まえた生活支援ロボットの実証試験計画について検討する。

(2) 安全技術導入ロボットの開発

- 1.安全技術を導入した移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットの開発
- 2.安全技術を導入した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの開発
- 3.安全技術を導入した人間装着（密着）型生活支援ロボットの開発
- 4.安全技術を導入した搭乗型生活支援ロボットの開発

(株)日立産機システムと(株)日立プラントテクノロジー（現：(株)日立製作所インフラシステム社）は日立産機グループコンソとして2011年度から3年間、「安全技術を導入した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの開発」において、安全技術を導入した配送センター内

のフォーク型物流支援ロボットの開発に係るロボットの安全技術開発でプロジェクトに参画した。



図 1-1 生活支援ロボット実用化の概要 (出典：NEDO 資料)

日立産機システムは高速で走行するフォークリフト型ロボットの周囲を走査する 3 次元位置認識装置の開発を担当し、(株)日立プラントテクノロジー (現：日立製作所インフラシステム社) はフォークリフト型ロボットの開発を担当する、2 社の協力体制でプロジェクトを推進した。図 1-2 にプロジェクト全体の推進体制 (平成 23 年度時点) を示す。

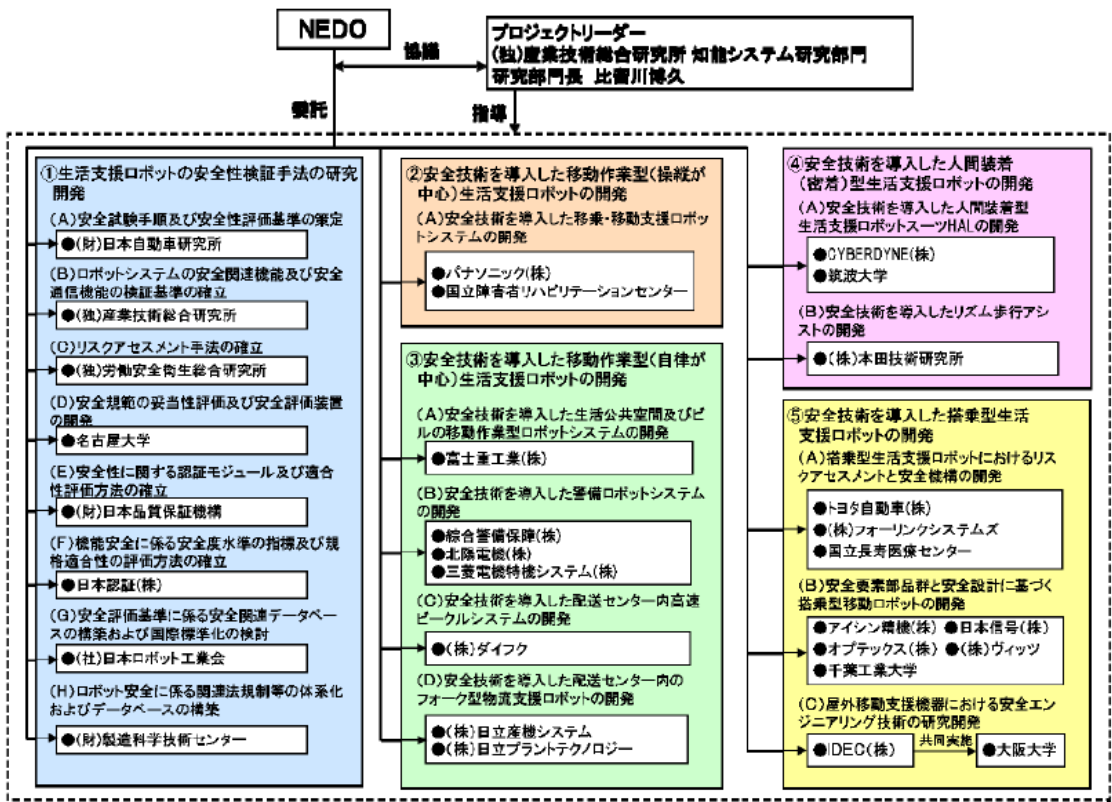


図 1-2 プロジェクト全体の実施体制 (出典：NEDO 資料)

2. 目的

2.1 事業目的

近年、製造業における国内空洞化や、今後の少子高齢化に伴う単純労働力の低下への懸念が高まってきている。その解決策の一つとして、労働者の最適配置を目指した物流センターや生産工場の物流の自動化が注目を浴びている。物流センターや生産工場には、製品を保管する倉庫や部品組立てを行う製造現場、また、生産に必要な素材や部品の入荷、製品出荷を行うための物流・配送センターが存在する。

図 2.1-1 に、倉庫・製造現場と物流・配送センターにおける自動搬送手段の現状と導入課題を示す。一般産業の倉庫や製造現場には、安全教育を受講した特定作業員しか存在しないため、AGV (Automatic Guided Vehicles) や物流支援ロボットの導入による物流の自動化が進んでいる。一方、物流・配送センターは、倉庫や製造現場に比べて、外部に開かれた環境があるため、特定作業員の他に安全教育を受けていない搬送業者や部外関係者が立ち入る可能性が高い。従って、対人安全の確保が難しいため自動化が遅れている。一部には自動フォークリフトが導入されているが、特定作業員しかいない環境や、完全に人と分離した環境にしか導入されていない。また、制御の信頼性不足と安全確保のために低速で運用されている事例が多い。物流・配送センターは、倉庫や製造現場に比べて搬送物が多く、要求される搬送速度や頻度が高いため、搬送作業の自動化が強く望まれている。

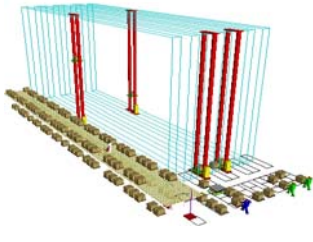
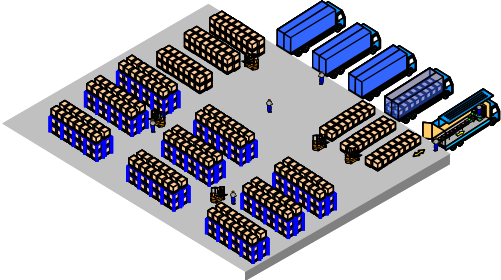


場所	倉庫や製造現場	物流・配送センター
イメージ		
人	特定作業員(安全教育受講者)	特定作業員(安全教育受講者) 搬送業者や部外関係者(安全教育未受講者)
搬送手段	AGVや物流支援ロボットの導入 	特定環境にのみ自動フォークの導入 
導入課題	・低コスト化 ・使い勝手向上	・搬送速度の向上 ・対人安全性能の向上

図 2.1-1 物流・配送センターの自動搬送手段の現状と導入課題

以上より、物流分野の自動化の進展を図るためには、物流・配送センターで作業する、搬送能力と対人安全性の高いフォーク型物流支援ロボットの実用化が重要であり、このための技術開発を本プロジェクト事業にて実施する。

2.2 事業概要

本事業にて開発する技術の概要を説明する。図 2.2-1 は、フォーク型物流支援ロボット（以下フォーク型ロボットと略す）の走行時と荷扱い時の対人安全の課題と対策（開発すべき技術）と、それらの開発分担を表している。

走行時の対人安全に対する課題は、走行時の人との接触である。安全対策としては、「3次元障害物検出」と「対人安全制御」との2つがある。

「3次元障害物検出」では、フォーク型ロボットの車体上部に設けた3次元障害物検出センサーで、フォーク型ロボット近傍の障害物を検出する。

「対人安全制御」では、3次元障害物検出によって検出された障害物の位置情報に基づき、ロボットと障害物との相対位置関係や車体速度とに応じて減速及び停止制御を行う。

荷扱い時の対人安全に対する課題は、フォークリフト作動時の人との接触である。「3次元障害物検出」では、3次元障害物検出センサーで荷物とロボットのフォーク部付近の障害物を検出する。「対人安全制御」では、検出された障害物の位置情報等に応じてフォークリフト部の停止制御を行う。

「3次元障害物検出」の開発は、日立産機システムが担当し、「対人安全制御」の開発は、日立製作所が担当する。

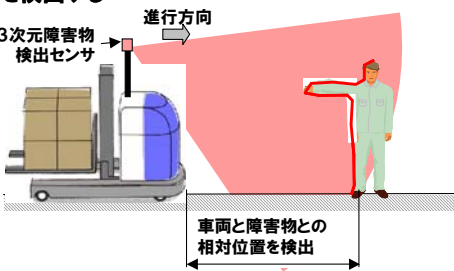
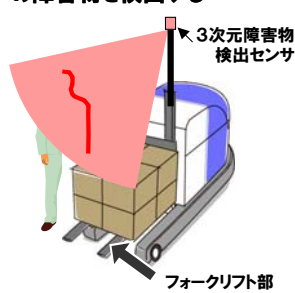
項目	走行時	荷扱い時	開発分担
課題	走行時の人の接触	フォークリフト作動時の人との接触	—
対策	<p>3次元障害物検出センサーで進行方向の障害物を検出する</p> 	<p>3次元障害物検出センサーで荷扱いエリアの障害物を検出する</p> 	株式会社 日立産機 システム
	対人安全制御	<p>障害物候補からの制御対象の切り出しと、相対位置/車体速度とに応じて減速及び停止を行う</p>	

図 2.2-1 フォーク型物流支援ロボットの対人安全への課題と対策

3. 研究体制

3.1 研究体制

研究体制は、(株)日立産機システムと(株)日立製作所で、それぞれ以下の体制で実施した。プロジェクト参画時点では(株)日立産機システムと(株)日立プラントテクノロジーであったが、(株)日立プラントテクノロジーは2013年4月1日に(株)日立製作所と経営統合し、実施場所も千葉県松戸市から茨城県土浦市に移転した。図3.1-1に日立産機システム・グループ・コンソシアムの研究体制を示す。

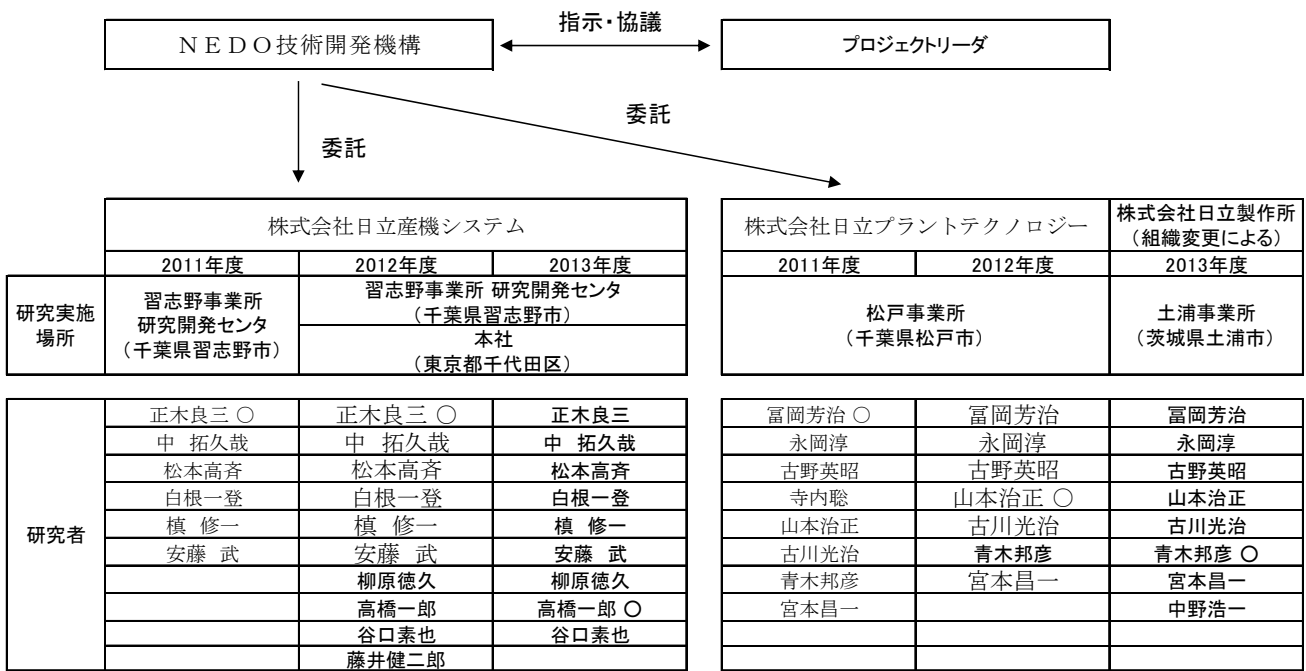


図 3.1-1 研究体制

3.2 研究の推進方法

3.2.1 推進方法

研究の推進方法は、リスクアセスメント等の両者が合同で実施する事項については合同で検討する。(株)日立産機システムは高速で走行するフォークリフトの周囲の障害物を検出する3次元位置認識技術を主として担当し、この設計と製作を行った。(株)日立製作所はフォークリフト型物流ロボットの設計、製作、安全系の設計製作と、評価試験を担当する。フォークリフト型ロボットは、既に実用化しているレーザー距離計により位置認識を行い電子地図に基づいた誘導制御を行う無人搬送車(製品名:インテリジェントキャリア)をベースモデルとし、走行速度180m/分の高速化と、3次元位置認識装置の実装、安全系の追加を実装する方法をとった。

3.2.2 工程

本プロジェクトは平成 22 年度の補正予算による一部期間と平成 23 年度、24 年度、25 年度の実質 3 年間で実施した。

H23 年度はリスクアセスメント、3 次元位置認識装置、安全系の開発を主として行い、H24 年度は開発した装置の動作確認、単体での評価を実施。H25 年度は実使用環境での総合的な評価を行う計画とした。その概略工程を表 3.2.2-1、表 3.2.2-2 に示す。

表 3.2.2-1 H22 年度、H23 年度概略工程

事業項目	22年度				23年度			
	第1 匹半期	第2 匹半期	第3 匹半期	第4 匹半期	第1 匹半期	第2 匹半期	第3 匹半期	第4 匹半期
①安全性検証手法に基づいたリスクアセスメントと 具体的検証方法の策定 a) リスクアセスメント b) 検証方法の策定					リスクアセスメント			
②自律走行時の3次元障害物検出技術の開発 a) 検出方式の検討 b) 揺動機構の開発 c) コントロール回路の開発 d) 検出アルゴリズムの開発 e) 動作検証					方式検討	各種設計	ハードウェア	動作検証
③走行・荷扱い時の対人安全制御技術の開発 a) 方式の検討 b) アルゴリズムの開発 c) 動作検証					方式検討	各種設計	実装	動作検証
④安全検証センタおよび自社模擬現場での安全評価 a) 安全評価実験								選定
⑤安全技術を実装したロボットの流通サービス業の現場での実証試験 a) 実証試験場所の調査					現場環境調査と実証試験場所候補選定 実証場所の交渉			

表 3.2.2-2 H24 年度、H25 年度概略工程

事業項目	24年度				25年度			
	第1 匹半期	第2 匹半期	第3 匹半期	第4 匹半期	第1 匹半期	第2 匹半期	第3 匹半期	第4 匹半期
①安全性検証手法に基づいたリスクアセスメントと 具体的検証方法の策定 a) リスクアセスメント b) 検証方法の策定	パイロット スタディ							
②自律走行時の3次元障害物検出技術の開発 a) 検出方式の検討 b) 揺動機構の開発 c) コントロール回路の開発 d) 検出アルゴリズムの開発 e) 動作検証 f) システム検証 g) 実運用からのフィードバック	動作検証	統合試験・検証				対策		
③走行・荷扱い時の対人安全制御技術の開発 a) 方式の検討 b) アルゴリズムの開発 c) 動作検証 d) システム検証 e) 実運用からのフィードバック	動作検証	システム検証				対策		
④安全検証センタおよび自社模擬現場での安全評価 a) 安全評価実験 b) 動作検証-対策	設置準備	日立プラントテクノロジーで実施 動作検証-対策						
⑤安全技術を実装したロボットの流通サービス業の現場での実証試験 a) 実証試験場所の調査 b) 設置・検証評価 c) まとめ			実証試験 場所選定		設置	検証評価		まとめ

4. 開発対象

4.1 開発対象

開発対象のフォーク型ロボットは、配送センターでの使用を前提に、リーチ式電動フォークリフトを使用し、小物搬送で使用頻度の多い一貫輸送用平パレットとして JIS 規格化されている T11 型(1,100×1,100×144mm)パレットを運搬し、高速搬送のため最大 180m/分の走行速度をもつ可搬質量 1,000kg の機種をベースモデルとして安全系を開発する。

フォーク型物流支援ロボットのフォークリフトの形状と主要寸法を図 4.1-1 に、仕様を表 4.1-1 に示す。

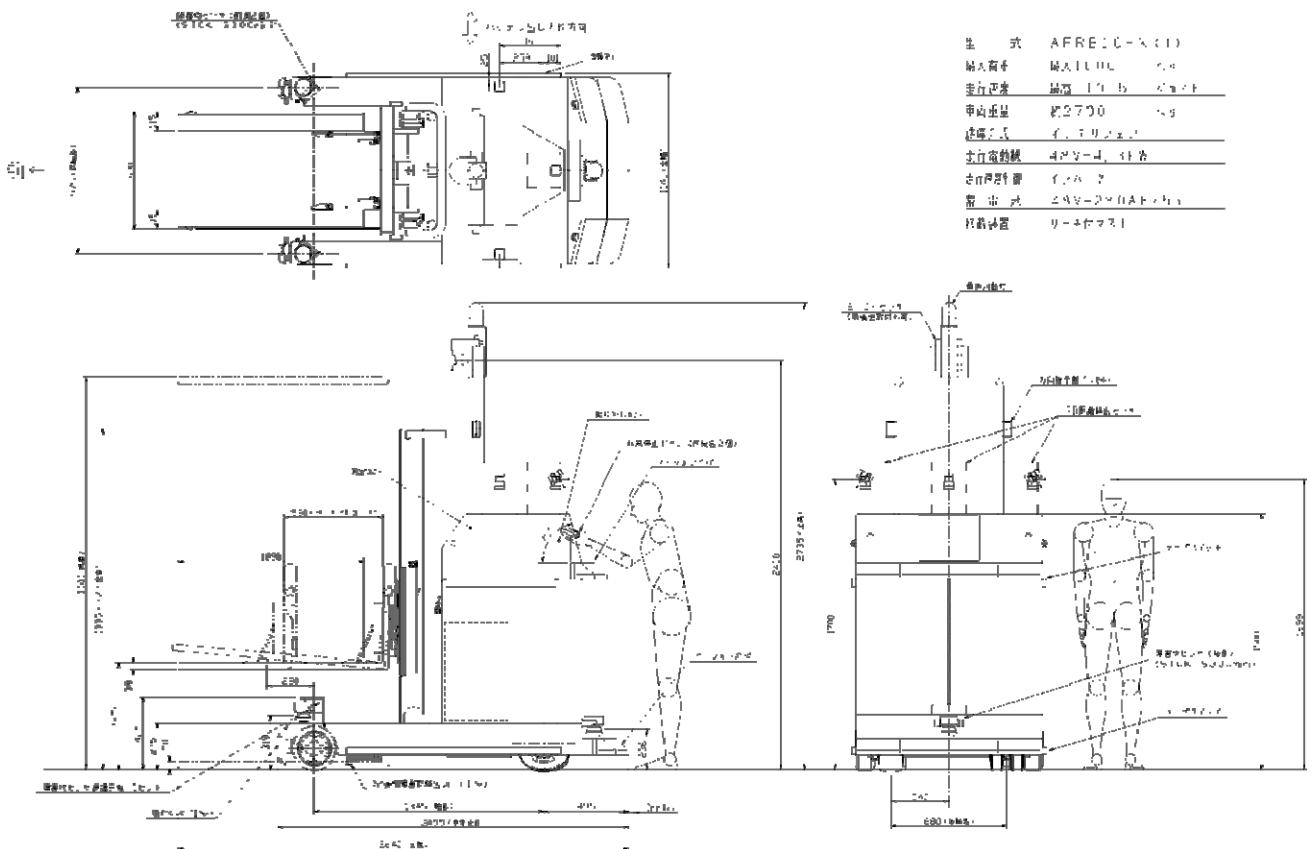


図 4.1-1 車体の主要寸法

表 4.1-1 フォーク型物流支援ロボットのフォークリフト仕様

項目		機械の制限仕様等	
機械の名称		安全技術を導入した移動作業型(自律が中心)生活支援ロボット	
機械の主な仕様	製品型式		
	設計寿命		
	構成部品の交換間隔	バッテリー 2~3年、油圧ホース1~2年、リフトチェーン2~4年	
	原動機出力(kW)		
	運転方式(モード)	無人運転(自動走行, 自動移載, レーザセンサによる位置検出), 有人運転, 保守運転	
	加工能力	---	
	送りスピードまたは回転数	最高走行速度 11km/h (180m/min)	
製品寸法	W1130×L2920×H2735(mm)		
製品重量	車体重量 約2600kg, 積載荷重 最大1000kg		
機械の使用目的と用途(使用上の制限)			
・意図する使用, 予見可能な誤使用		過去の災害事例, リスクアセスメントにより抽出する	
・予期しない起動			
機械の可動範囲等(空間上の制限)			
・動作範囲		リフト上限は仕様用途の範囲から逸脱する1m以上の動作範囲を制限する	
・インターフェース			
・作業環境			
機械の設置条件		屋内, 走行路面は平坦なコンクリートとする。	
・屋内/外		温度 0~40℃, 湿度 45~85%	
・温度, 湿度			
・保安管理物件			
機械のライフサイクル		通常の製品と同一	
危害の対象者	オペレータ	資格の要否	有人運転時は運転特別教育または技能講習の運転資格が必要
	周囲の作業員		床上に人通路とロボット通路を表示し, 通路を分離する。
	サービスマン(補給, 保全)	資格の要否	有人運転時は運転特別教育または技能講習の運転資格が必要
	第三者		床上に人通路とロボット通路を表示し, 通路を分離する。
その他			
通信機能		地上の搬送コントローラとの通信は無線LAN(802.11b)通信	
安全機能		バンパスイッチ, サイドバンパ, 非常停止スイッチ, アウトリガ下センサ, 3D位置認識	
表示器等		警報音, ナライト	

基本仕様として重要部品であるブレーキ性能を図 4.1-3 に示す。ブレーキはモーター軸に直結し、制動トルク 80N・m 以上のトルクを持つ電磁ブレーキを使用している。モーターの回生制動、モーター動力を遮断し、無負荷状態でブレーキ停止した場合、定格負荷状態でブレーキ停止した場合を示す。モーターでの減速では 10.6m の減速距離を要し、障害物の認識はこの距離に検出処理と制御系の遅延時間に走行する空走距離、停止したときに障害物との距離余裕を加算した点から減速開始する必要がある。非常停止は無負荷運転において 3.3m、定格負荷運転において 4.0m で停止するため、安全系の検出点はこの値に空走距離、距離余裕を加算した位置で検出を行う。

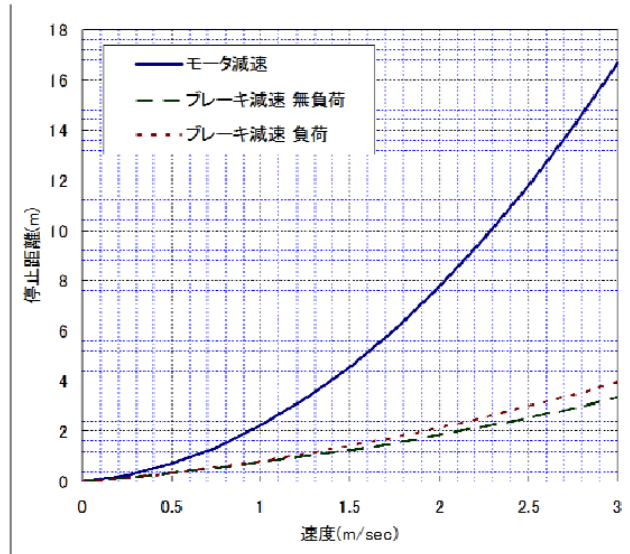
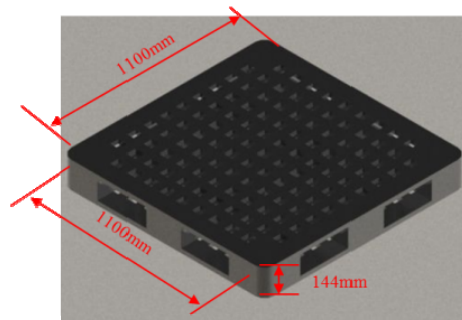
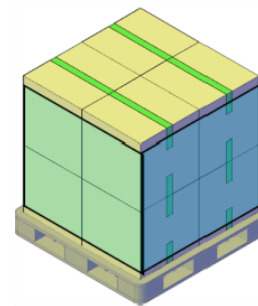


図 4.1-2 減速特性

搬送物は T11 と呼ばれる 1 辺が 1,100mm の正方形、厚みが 114mm、2 カ所のフォーク挿入口をもつパレットを想定する。パレットおよび搬送物の主要寸法を図 4.1-3 に示す。搬送物質量は最大 1,000kg とする。



T11型パレット



複数の段ボール箱を1つのパレットに積み場合は、
フォークの位置などに注意し、より滑りやすいように
しておく。

図 4.1-3 搬送物の主要寸法

4.2 適用規格

フォーク型ロボットは産業車両の扱いで、これをベースとして機能安全を組み込む。その適用規格を示す。一般的な無人搬送車の規格は JIS D6802 : 1997 無人搬送車システム-安全通則で規定される。日本産業車両協会では、中央労働災害防止協会のガイドライン³⁾で示された最大速度 60m/min では市場の拡大が見込めないことから、JIS D6802 の追加防護策を策定した。追加防護策の実施、リスクアセスメントの実施と残留リスクの開示等により、必要能力を出

し、より安全に運用できる信頼性の高い無人搬送車を目指し活動している。本プロジェクトではベースとなるフォークリフト型無人搬送車はこれらの規格、ガイドラインに従う。安全系の部分に関しては本プロジェクトの要求事項である ISO13482 を部分適用する。

表 4.2-1 フォークリフト型無人搬送車の適用規格

No.	項目	タイトル	ISO/IEC規格	対応するJIS規格	備考
1	基本安全規格 (A規格)	機械類の安全性-基本概念, 一般設計原則規格)	ISO12100 Ed1:2010	JIS B 9700:2013	ISO12100-1,-2とISO14121-1を2010年に統合。
2		リスクアセスメント規格	ISO14121	JIS B 9702	廃止
3	グループ安全規格 (B規格)	インタロック規格	ISO 14119 Amd1:2007	JIS B 9710:2006	
4		ガードシステム規格	ISO 14120 Ed1:2002	JIS B 9716:2006	
5		制御システム安全/設計	ISO13849-1 Ed2:2006	JIS B 9705-1:2011	
6		機械類の安全性/設計のための一般原則	ISO 13849-1 Ed2:2006	JIS B 9705-1:2011	
7		制御システム安全/妥当性	ISO13849-2 Ed1:2003		JIS原案作成予定
8		安全距離規格	ISO 13857 Ed1:2008	JIS B 9718:2013	IS B 9707とJIS B 9708を統合しJIS B 9718
9		予期しない起動防止規格	ISO 14118 Ed1:2000	JIS B 9714:2006	
10		非常停止規格	ISO13850 Ed2:2006	JIS B 9703:2011	
11		両手操作制御装置規格	ISO13851 Ed1:1996	JIS B 9712:2006	
12		圧力検知保護装置規格	ISO 13856-2 Ed2:2013	未発行	
13		常設接近手段の規格	ISO14122 Amd1:2010	JIS B 9713-1,2,3,4:2004	
14		電気設備安全規格	IEC60204 Ed5.1:2009	JIS B 9960:2008	
15		電氣的検知保護設備(センサ)	IEC 61496-1 Ed3:2012-04	JIS B 9704:2006	JIS原案作成中
16		人検知用保護設備(センサ応用)	IEC/TS 62046 Ed2:2008-02	未発行	2013-05廃止
17		電氣的機能安全規格	IEC61508	JIS C 0508	
18		スイッチ類規格	IEC60947	JIS C 8201	
19		EMC規格	IEC61000-4	JIS C 61000-4	
20	トランス規格	IEC60076	未発行		
21	防爆安全規格	IEC60079	JIS C 60079		
22	個別機械安全規格 (C規格)	無人搬送車システム-用語		JIS D 6801:1994	
23		無人搬送車システム-安全通則		JIS D 6802:1997	
24		無人搬送車-設計通則		JIS D 6803:1994	
25		無人搬送車システム-設計通則		JIS D 6804:1994	
26		無人搬送車システム-特性・機能試験方法		JIS D 6805:1994	
27		動力付産業車両に関する安全規格	ISO3691-4		2013年2月25日 ISO TC110 SC2によるISO 3691-4改訂作業はキャンセルされた
28		SAFETY STANDARD FOR DRIVERLESS, AUTOMATIC GUIDED INDUSTRIAL VEHICLES AND AUTOMATED FUNCTIONS OF MANNED INDUSTRIAL VEHICLES	ANSI/ITSDF B56.5-2012		

表 4.2-2 その他のガイドライン

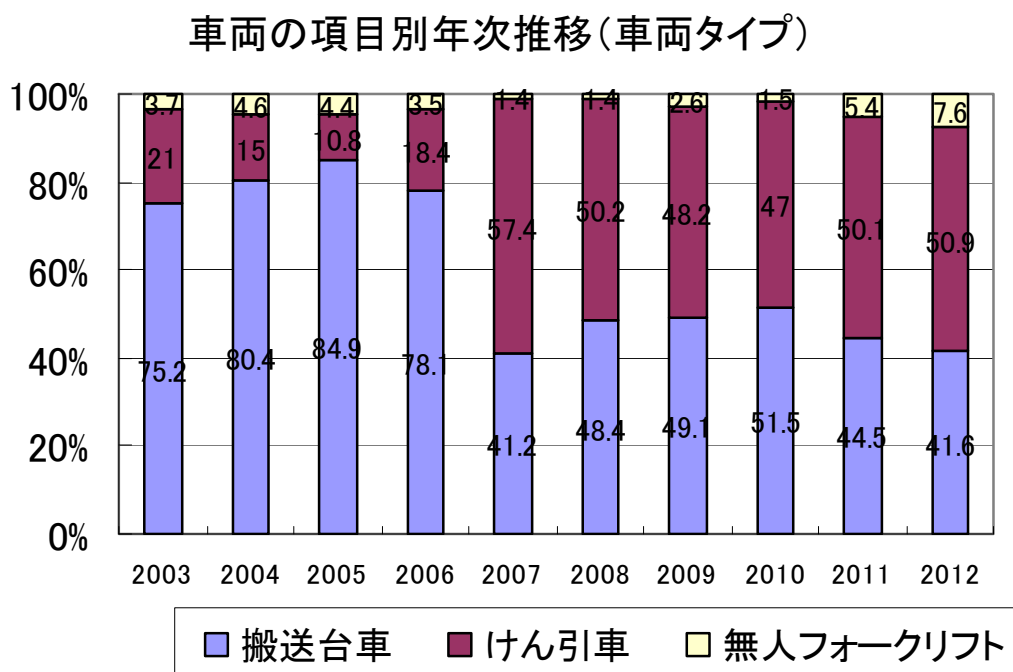
No.	項目	タイトル	備考
1	日本産業車両協会規格	無人搬送車の安全確保のための表示に関するガイドライン	JIVAS A05, H9年5月制定
2	日本産業車両協会 無人搬送車システム委員会	JIS D6802(無人搬送車システム-安全通則) 解説補足(無人フォークリフト安全対策実施例)	2002年12月18日
3	日本産業車両協会 無人搬送車システム委員会	速度制限の変更に対する変更案 (JIS D6802に追加防護方策)	2008年以降AGV最大速度の制限を変更するためのガイドライン
5	中央労働災害防止協会	無人搬送車の安全 - 安全対策ガイドラインと解説 - (ISBN4-8059-0351-1 C3060 P1300E 1990年4月25日 発行)	2007年以前のAGV最大速度60m/minを規定したガイドラインで、現在は適用外

5. 研究方法

5.1 リスクアセスメント

5.1.1 フォークリフト型無人搬送車について

フォークリフト型無人搬送車は年間約 1,300 台強の無人搬送車の業界において、一般的な AGV である搬送台車、けん引車タイプと比較し台数が少なく 100 台強の生産台数で、近年、その台数は増加傾向にある。これは、従来は手動運転でしか扱えなかったフォークリフト搬送の分野で制御技術の向上により自動化が進んでいることを示している。無人フォークリフトは主として製造業での材料・原料搬送の重量物の分野で使用されている。図 5.1.1-1 に無人搬送車の車両タイプ別出荷数の推移を示す。



出典：日本産業車協会統計資料

図 5.1.1-1 無人フォークリフト出荷統計

(1) リスクの事前調査

リスクアセスメントを実施する上で、想定される事象以外に過去の事例を参考にすることは重要である。リスクアセスメントの実施に先立ち、過去のフォークリフト事故、ヒヤリハットの事例を収集した。当社社内、当社納入先でのフォークリフト型無人搬送車での事故が無事故で、有効な事例はなかった。無人搬送車自体が事故率の低い設備で、無人搬送車の業界団体である一般社団法人日本産業車両協会での事例もない。このため有人運転のフォークリフトの事例を参考にした。調査した主な団体を表 5.1.1-1 に示す。表

中の団体以外にフォークリフトのレンタル事業者等も調査した。しかしながら結果は事例が少なく、他の団体の事例と重複していたため省略する。

表 5.1.1-1 事例を参考した事故・ヒヤリハットの公開団体

No.	団体	URL	代表的な事例
1	一般財団法人 東京都産業廃棄物協会	http://tosankvo.or.jp/hivari/hivari_index.htm	<ul style="list-style-type: none"> ・パレット上の荷物の荷崩れ ・死角のある場所での人(自転車)との接触 ・リフトアップ時の転倒 ・歩行者の車両直近での横断 ・バック、方向転換時の周囲の歩行者との接触 ・他の設備(建屋)との接触
2	社団法人 建設荷役車両安全協会	http://www.sacl.or.jp/	<ul style="list-style-type: none"> ・車両転倒
3	厚生労働省 職場のあんぜんサイト	http://anzeninfo.mhlw.go.jp/hivari/anrd/h00.htm	ヒヤリハットの事例と多数の死亡災害DBが公開されている
4	中央労働災害防止協会 安全衛生情報センター	https://www.jaish.gr.jp/	<ul style="list-style-type: none"> ・旋回状態での歩行者との接触 ・点検整備不備車両による走行中の転倒 ・荷と一緒にパレットに乗った作業者の事故(禁止行為) ・無資格者の運転による事故
5	日本財団 図書館	http://nippon.zaidan.info/index.html	<ul style="list-style-type: none"> ・荷崩れ ・不正な運転操作による制動不足

これらは有人運転と無人運転で異なる安全上の要求事項、運転状況、制約事項もあるが、人と共存する場合に、十分な訓練・教育を受けていない人が自動運転する設備との共存を考える上での予見可能な災害ポテンシャルとみなせる。

中央労働災害防止協会が運営する厚生労働省の「職場のあんぜんサイト」はヒヤリハット事例(事故に至る前段階の危険事象の事例)だけでなく、多数の労働災害の死亡事例を公開しておりデータが充実している。フォークリフトの関係した事例だけを選択すると、死亡災害は平成 17～20 年の調査期間で 5,612 件の事例に対し 2.7%の 154 件にフォークリフトが関係している。死傷災害では調査期間平成 19～20 年の事例数 37,432 件に対しフォークリフトは 1.8%の 673 件が報告されている。尚、産業車両としての一般の無人搬送車、フォークリフト型無人搬送車の事故事例は報告されておらず、フォークリフト型ロボットのリスクの抽出に際しては、有人運転の固有の問題点、周囲の人が巻き込まれる災害の相違点を考慮の上リスク抽出を行った。

ヒヤリハット事例は事故に至る前段階の潜在的な事故要因であり、死亡事例・障害事例は実際に発生した事例である。ヒヤリハット事例が死亡事例・障害事例に含まれている例もあったが、その両方の事例を参考にした。事例は運転者の運転に起因する事象、フォークリフト自体に起因する事象、歩行者や他の作業者との関係に起因するものの他に、フォークリフト固有の運動特性に起因するもの、荷を乗せるパレットに起因するもの等多岐に渡る事例が公開されている。

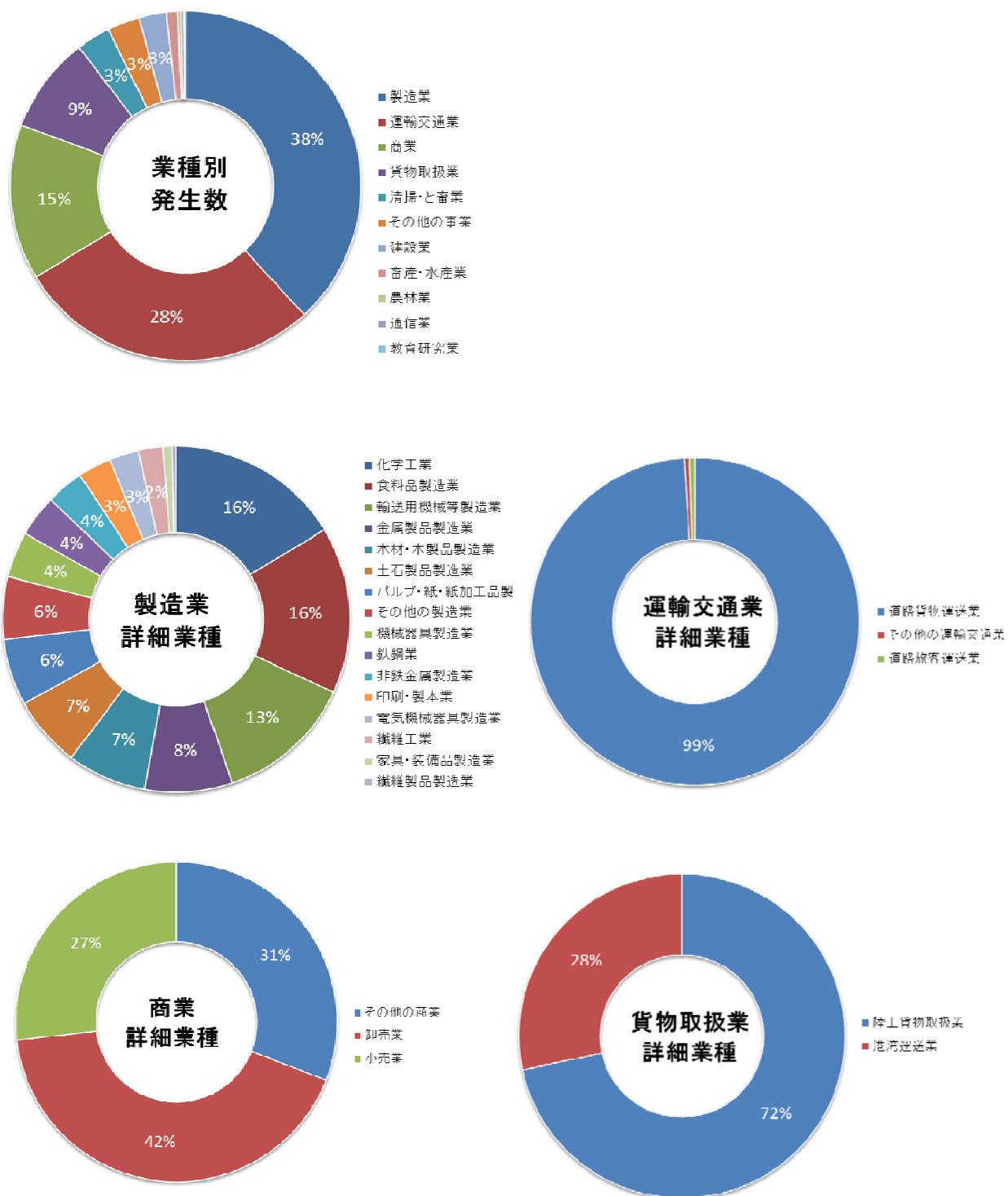


図 5.1.1-2 有人フォークリフトの業種別死傷件数の割合

発生件数として最も多いのが製造業で、運輸交通業、商業、貨物取扱い業がこれに続く。製造業では資材の荷受業務から製造現場での材料、部品、半製品の重量物運搬から製品の発送までの様々な職場で使用されており、事故も多く発生している。

一方、事故の型に着目すると、業種に関係なく事故の型として「はさまれ・巻き込まれ」が圧倒的に多く、次いで「激突され」が多く、この2つの要因で全体の発生件数の

70%を占める。さらに「飛来・落下」「激突」を含めると 86%となり主要な事故の要因を網羅している。図 5.1.1-2、図 5.1.1-3 に事故の要因別集計を示す。

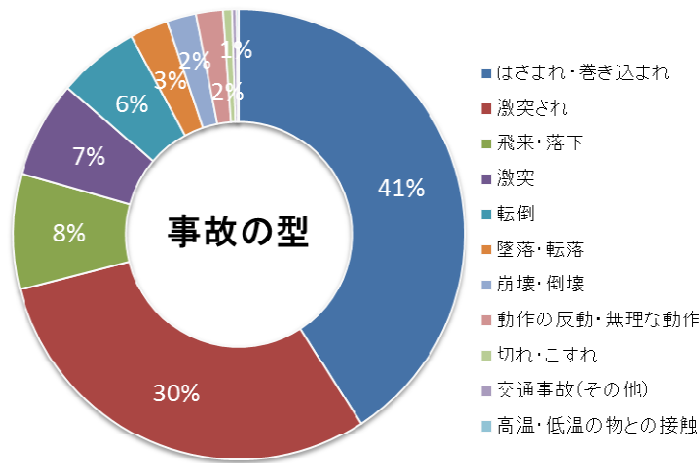


図 5.1.1-3 有人フォークリフトの事故の型

リスクアセスメントの事前調査として、H17年からH20年の有人フォークリフト災害事例を参考に、自動運転を行うフォークリフト型ロボットと人との関係を精査した。

表 5.1.1-2 に死傷データベースの中から起因物（小分類）をフォークリフトに限定した一部抜粋を示す。また巻末の付表-2 にフォークリフトのみを抽出した事故事例集を示す。

表 5.1.1-2 死傷事故データベース（H19年12月、フォークリフト関連）の一部抜粋

ID	年	月	発生時間	災害状況	業種(大分類)			業種(中分類)			事業場規模	起因物(大分類)			起因物(中分類)			事故の型			
					分類名	コード	分類名	分類名	コード	分類名		分類名	コード	分類名	分類名	分類名	年	月			
71	平成	20	12	13~14	鋼鉄製長尺物をフォークリフトの爪に載せて荷降ろし作業中、鋼材がずれた為、もとに戻そうとリフトから降り鋼材を動かした時、爪及び鋼材が面で滑っていた為、鋼材が床に落下し、手動になったフォークリフトでトラックに荷物を積み込み中、フォークリフト運転手の携帯電話が鳴った。電話に出るためフォークリフトを止めたが、電話を取り出そうとした時に、誤って足が動き、クラッチが入って前進してしまっただけで、トラックの前で作業していた被災者の右足首が、トラックとバレットの間に挟まれた。	4	運輸交通業	403	道路貨物運送業	40301	一般貨物自動車運送業	100~299	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	4	飛来・落下	32
175	平成	20	12	9~10	フォークリフトでトラックに荷物を積み込み中、フォークリフト運転手の携帯電話が鳴った。電話に出るためフォークリフトを止めたが、電話を取り出そうとした時に、誤って足が動き、クラッチが入って前進してしまっただけで、トラックの前で作業していた被災者の右足首が、トラックとバレットの間に挟まれた。	8	商業	801	卸売業	80109	その他の卸売業	1~9	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	7	はさまれ・巻き込まれ	36
430	平成	20	12	11~12	倉庫内でフォークリフト作業中、リフトが転倒しそうになった為飛び降りたところ、乗っていたリフトに右足を踏かれた。	5	貨物取扱業	501	陸上貨物取扱業	50101	陸上貨物取扱業	10~29	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	7	はさまれ・巻き込まれ	34
461	平成	20	12	15~16	工場内で、材料を投入リフト通路を横断中、リフトが荷物運搬の為前進し、接触して転倒し、リフト後部に高さなげられた。	1	製造業	108	化学工業	10805	プラスチック製品製造業	300~499	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	7	はさまれ・巻き込まれ	61
656	平成	20	12	16~17	フォークリフトの点検作業中、右後ろ足回りのグリスアップをする為、しゃがんで作業をしていた。その際、フォークリフトが後方にいる被災者に気付かず後進し、後輪に右足を踏かれ、右足首を骨折した。	8	商業	804	その他の商業	80409	その他の商業	10~29	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	7	はさまれ・巻き込まれ	56
779	平成	20	12	13~14	フォークリフトを使用し、ダンボールを手積み作業中、下に降りる際に誤って足を滑らせ、右脚をフォークリフトと屋根部に強くぶつけてしまった。	1	製造業	101	食料品製造業	10102	水産食料品製造業	10~29	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	1	墜落・転落	28
790	平成	20	12	14~15	リフト運転手に作業指示を出すのに夢中で周囲の安全確認をせずに動いていた為、後方で作業していたフォークリフトの後輪に左足を踏かれた。	8	商業	804	その他の商業	80401	倉庫業	50~99	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	6	激突され	43
800	平成	20	12	11~12	選別機へ原料を投入していたところ、後ろでフォークリフトにより選別中のバレットに積まれた魚缶が滑り落ち、右足首に当たった。	1	製造業	101	食料品製造業	10102	水産食料品製造業	300~499	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	4	飛来・落下	43
814	平成	20	12	18~19	商品にシートを掛けようとして、商品とフォークリフトバレットに足を掛けていた際、リフトが動き出した為バランスを崩し、フォークリフトバレットにしがみ付いた手が外れ、フロアに落下し後頭部を強打した。	5	貨物取扱業	501	陸上貨物取扱業	50101	陸上貨物取扱業	100~299	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	1	墜落・転落	58
833	平成	20	12	13~14	フォークリフトで荷物の取り降ろし作業中、BOX内の荷物が落ちてきた為、マストの間から手を入れ荷物を置こうとした際、上着がレバーに引っ掛かり、レバーが作動し、マストに右腕を挟まれた。	4	運輸交通業	403	道路貨物運送業	40301	一般貨物自動車運送業	30~49	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	7	はさまれ・巻き込まれ	37
956	平成	20	12	13~14	倉庫内にてフォークリフトで荷物の箱出し中、荷物に掛けた採遣けのビニールシートを、リフトの上にとり、マストに足を掛けて持ち上げた。荷物を出した後、リフト運転手がリフトを下降させた為、マストに足を挟まれた。	17	その他の事業	1702	その他の事業	170209	その他の事業	1000~9999	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	7	はさまれ・巻き込まれ	74
958	平成	20	12	15~16	集塵機の清掃のため蓋をリフトの爪で上げようとした際、蓋が爪に上手に掛らないまま持ち上げた為、蓋が滑り落ち、蓋と集塵機の間で清掃員(被災者)の指が挟まれた。	1	製造業	117	その他の製造業	11709	その他の製造業	30~49	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	4	飛来・落下	67
979	平成	20	12	11~12	倉庫にて、リフトを使用し、コンテナから荷物を降ろしている際、リフトのホック部に積載されていた荷物が不安定な状態だった為、手で押さえてリフトを後退させたところ、荷崩れをおこし、落下した荷物と地面に足を挟まれ、負傷した。	1	製造業	113	機械器具製造業	11301	機械(精密機械を除く)器具製造業	10~29	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	4	飛来・落下	45
1039	平成	20	12	13~14	フォークリフトでトラックにパイプを積み込み中、載せたパイプのバランスが悪く、転がってフォークリフトに当たった。危険を感じてトラックの荷台から飛び降りようとしたところ、足が引っ掛かり、転落して負傷した。	8	商業	801	卸売業	80109	その他の卸売業	10~29	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	2	転倒	34
1190	平成	20	12	1~2	ドライバーがバレットへ荷降した商品を手動リフトで移動したが、段輪が滑ってバレットが傾き、トラックと押し戻したところ、入荷機作業中の被災者の右腕部にバレットが接触した。	4	運輸交通業	403	道路貨物運送業	40301	一般貨物自動車運送業	50~99	2	物上げ装置、運搬機械	22	動力運搬機	222	フォークリフト	6	激突され	35

出典：中央労働災害防止協会安全衛生情報センター・死傷事故 DB

(2) リスクアセスメントの実施

本プロジェクトは生活支援ロボットを対象としており、対象者は成人男性に限定されることはなく、その中には高齢者や子供、女性といった体格、運動能力のことなる対象者が含まれている。リスクアセスメントの実施にあたっては全てを対象とすることは現実的でなく、フォークリフト型ロボットの使用環境に即したものとした。当初は本プロジェクトの基準で実施したが、自重 2,600kg の産業車両であり運動特性にも限界があり有効なリスク低減ができない状況となった。図 5.1.1-4 に示すように障害の酷さ S は、本プロジェクトでは軽症領域をフォーカスした内容になっているが、稼動する空間も教育を受けた作業員であることから機会工業会のガイドライン¹⁾に準拠し、回復可能な障害を細分化することで機能安全を実現する方法を得た。

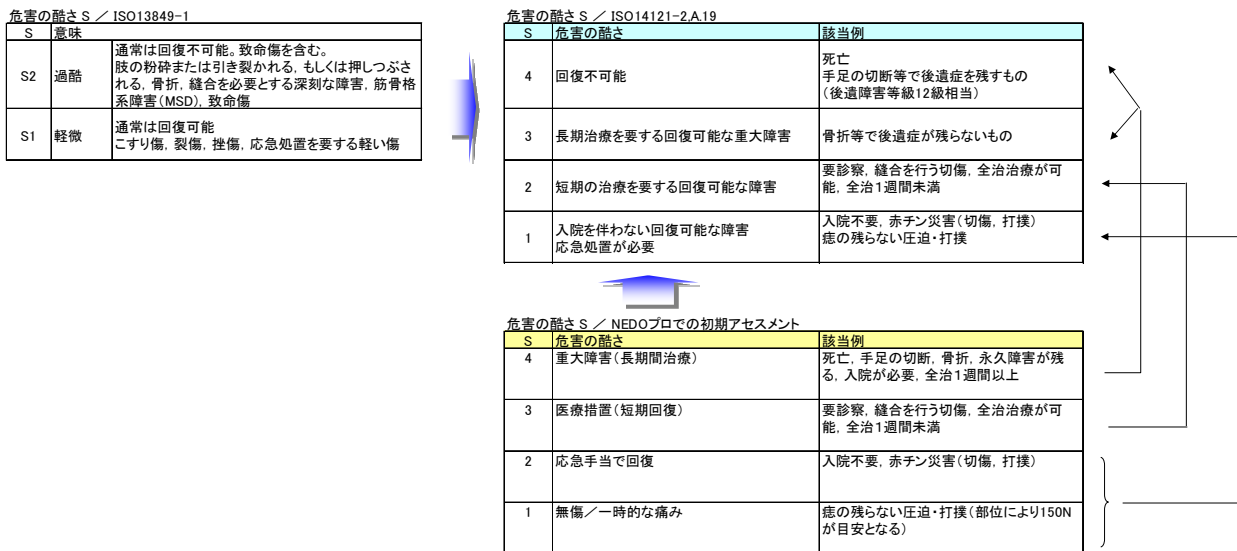


図 5.1.1-4 障害の酷さ S の見直し

フォーク型ロボットのベースモデルとなる無人搬送車の規格は国内では JIS D6802 があるが制定されてから相当期間が経過しており業界団体である一般社団法人日本産業車両協会では当該 JIS に対する追加防護策を策定している。リスクアセスメントとの関連を図 5.1.1-5 に示す。基本的な考え方は AGV と人が同一の通路を共有するか、あるいは分離しているが交差する場合を想定し、リスクアセスメントを実施する。完全に通路が分離されている環境、あるいは柵で囲われている環境は本質安全措置がとられている運用空間で、対人接触のリスクは少なく、人と混在する環境に包含されるためリスクアセスメント対象から除外する。また想定する環境は安全教育を受けた特定作業員の作業する場所で、不特定多数の一般来場者は想定しない。

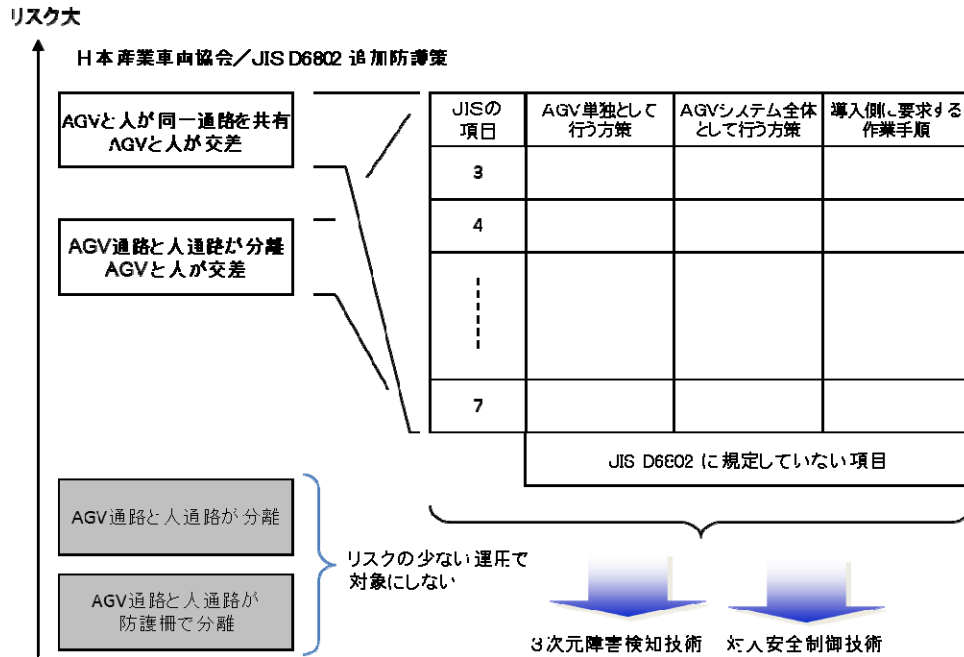


図 5.1.1-5 JIS 追加防護策との関連

使用上の制約事項として表 5.1.1-3 に示す条件を設定した。一般的な無人搬送車では上位 CPU からのオンラインの自動運転であるが、起動処理は人が操作する。またバッテリーは1日の作業終了後に有人操作で充電を行う。使用環境では物流センターのプラットフォームでの運用も考慮し屋内であるが路面の汚損と悪化は範囲に含める。また本来なら禁止されている運用上の誤使用も想定する。

表 5.1.1-3 使用上の制限

意図した使用	<ul style="list-style-type: none"> (1) フォークリフト型ロボットは初期設定された走行路に従って走行する。 (2) 人の通行するエリアとフォークリフト型ロボットの通行するエリアは分離されている。 (3) フォークリフト型ロボットは自律的に走行し、運転中に人と接近することはない。 (4) 運転時間は1日8時間とし、運転終了後は電源を自動で切って停止する。 (5) 充電は人がプラグを接続して行う。 (6) 充電中はPC, PLCなどの電源はOFFする。 (7) 起動は人がスイッチを入れ、操作パネルを操作する。
誤合理的に見ることができる	<ul style="list-style-type: none"> (1) フォークリフト型ロボットの走行路に人が侵入する。 (2) 移載場所に人が侵入する。 (3) 充電のし忘れによる走行中のバッテリー切れ。 (4) 立ち上げ時の経路設定ミスによる意図しない動作。 (5) 立ち上げ、保守中の操作ミスによる衝突。 (6) ロボットに人が載った状態で操作、起動する。 (7) ゴミ、雨水の浸入などによる路面状態の悪化。 (8) パレット上に不安定な荷の置き方をする。

リスクパラメータの危険源に晒される頻度、危害の発生確率、障害の酷さについては表 5.1.1-4～表 5.1.1-6 に従う。

表 5.1.1-4 危険源に晒される頻度

危険源に晒される頻度 F

F	危険源に晒される頻度／継続時間	基準例
4	連続的／常時	動作中ほとんど晒される又は1の晒される時間が5分以上継続
3	動作中頻繁／長時間	1動作中に5回以上晒される又は1回の晒される時間が5分未満継続
2	動作中数回／短時間	1動作中に1回以上晒される又は1回の晒される時間が1分未満継続
1	まれ／瞬時的	晒される頻度が5回動作で1回以内又は1回の晒される時間が3秒未満

表 5.1.1-5 危険事象の発生確率

危険事象の発生確率 Ps

Ps	危険事象の発生確率	技術的要因の基準例	人的要因の基準例
4	高い(起こりやすい)	危険側故障率 10^{-4} 以上 類似ロボットや類似機械で事故があった 又はヒヤリハットが度々あった 安全関連部が非安全関連部から明確に分離していない	類似ロボットや類似機械でヒヤリハットが度々あった
3	あり得る	危険側故障 10^{-4} 未満 類似ロボットや類似機械でヒヤリハットの報告がある 安全関連部に非安全関連部要素が混じっている	類似ロボットや類似機械でヒヤリハットがある 連続運転時間が長い又は身体的・心理的ストレスを受けやすい作業である
2	可能性あり	危険側故障 10^{-5} 未満 安全関連部は非安全関連部から分離して、多くは関連安全規格に準拠している	非定常な作業や複雑な作業において、注意が行き渡らない又は散漫になりやすい
1	低い(まれ)	危険側故障 10^{-6} 未満 安全関連部は全て関連安全規格に準拠して構成している	日常ではミスはほとんど起こりにくい

表 5.1.1-6 障害の酷さ

危害の酷さ S / 見直し

S	危害の酷さ	該当例
4	回復不可能	死亡 手足の切断等で後遺症を残すもの (後遺障害等級12級相当)
3	長期治療を要する回復可能な重大障害	骨折等で後遺症が残らないもの
2	短期の治療を要する回復可能な障害	要診察, 縫合を行う切傷, 全治治療が可能, 全治1週間未満
1	入院を伴わない回復可能な障害 応急処置が必要	入院不要, 赤チン災害(切傷, 打撲) 痣の残らない圧迫・打撲

リスクの算出は積算法（一部加算法を適用）を適用し、次式により算出する。

算出式：リスク点数（R）＝危害の酷さ（S）×危害の発生確率（Ph）

算定したリスクに対する対策は下記の判定により、リスクの大きいものに対して対策を実施する。

判定基準：3 ≤ R ≤ 6 十分低い/無視できる（リスク低減は不要）

7 ≤ R ≤ 14 低い～中程度/条件付き受容/検討を要する（リスク低減を推奨）

15 ≤ R ≤ 44 高い/受容できない（リスク低減が必要）

表 5.1.1-7 判定マトリックス

		危害の発生確率 (Ph)								
		3	4	5	6	7	8	9	10	11
危害の酷さ(S)	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	2	6	8	10	12	14	16	18	20	22
	3	9	12	15	18	21	24	27	30	33
	4	12	16	20	24	28	32	36	40	44

危険源の同定は立ち上げ中、自動運転中、チョコ停復旧中、メンテ中の4つのフェーズで機械的危険源、電気的危険源、ソフトウェアエラー、材質から起こる危険源を中心に初期分析段階で126ケースを想定した。しかしながら、今回のフォーク型ロボットでは安全サポート系として後述する3次元位置認識装置を搭載することで、初期リスクの範囲が大幅に減少する。見直しの結果は53ケースが残り、その内50ケース（94%）が機械的危険源の作業者が「作業者がはねられる」に、1ケースが「作業者が押しつぶされる」として残った。こ

の中には通常の QA 活動、製品の保全活動で低減可能なリスクを含んでいる。表 5.1.1-8 に主として作業者に起因するリスクアセスメントの結果のうち、リスクの大きいものを示す。この中には作業者が原因になっていない製品の故障で重篤な結果を及ぼす項目も一部含まれる。本ロボットの誘導制御は 2 次元レーザー距離計を使用した電子地図とリアルタイムに計測した位置情報の照合により自己位置推定を行う誘導制御を採用しており、位置推定系の故障も重大な結果を招く。今回、開発する技術は、安全サポート系の 3 次元位置推定では床面よりも 200mm 以上の障害物を対象物が静止状態、移動状態に関わりなく検出する。また制御装置間の相互監視、自己監視も行う。安全系では通常の無人搬送車の安全対策の他に、胸部位置のバンパー、サイドバンパー、アウトリガー下への足の侵入検知に加え、非接触の安全センサーにより車体の全周囲を監視することでリスクを低減する。

表 5.1.1-8 リスクアセスメント (1/2)

初期リスク分析結果				リスク低減				再リスク見積				
段階	No.	危険源	リスク 点数 R	優先 順位	保護方策(メーによる工学的手段)	危害の 酷さ S	危害の発生確率 Ph			リスク 点数 R	保護方策 組み合わせ 時のR	
							頻度 F	確率 Ps	回避 A			
自動 運転中	1	作業者がはねられる。 /機械的危険源	14	1	カーブでは速度を20m/minまで下げる。 2 後方のバンパのストロークを長くし、足元だけでなく胸部の高さにもバンパをつける。	1	6	2	1	3	6	6
自動 運転中	2	作業者がはねられる。 /機械的危険源	14	1	定格速度を出すのは確実に人と分離できるエリアのみとする。人が接近する場合には速度を下げる。 2 後方のバンパのストロークを長くし、足元だけでなく胸部の高さにもバンパをつける。 3 3D距離検出センサ 3個と障害物センサ 3個とし、十分な検出範囲が得られるようにした。	1	6	2	1	3	6	6
自動 運転中	3	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	路面の状況(油、水溜り)により操縦制御の追従性が悪くなった。操縦が効かず、コースから外れ、作業者に衝突する。	2	7	2	2	3	14	14
自動 運転中	4	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	異物を踏みつけた。操縦、ブレーキが効かず、コースから外れ、作業者に衝突する。	2	7	2	2	3	14	14
自動 運転中	5	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	経路管理系(SLAM)のセンサが汚れた。自己位置が検出できずコースから外れ、作業者に衝突する。	2	7	2	2	3	14	6
自動 運転中	6	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	経路管理系(SLAM)のセンサに、日光、他の装置のレーザなどの外乱光が入射した。自己位置が検出できずコースから外れ、作業者に衝突する。	3	6	2	1	3	18	5
自動 運転中	7	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	経路管理系(SLAM)のセンサにフタが研磨された板、他の装置のミラーなどの反射光が入射した。自己位置が検出できずコースから外れ、作業者に衝突する。	3	6	2	1	3	18	6
自動 運転中	8	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	障害物を踏みつけた。日光、他の装置のレーザなどの外乱光が入射した。作業者を検出できず衝突する。	3	6	2	1	3	18	6
自動 運転中	9	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	壁などがあり先が見えないカーブを曲がる。カーブの先にいる作業者に衝突する。	1	6	2	1	3	6	6
自動 運転中	10	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	1日1回、電源のON/OFFを行う。 2 車体制御系でプロセスが動いていることを監視し、プロセスが停止したら非常停止する。 3 3D距離検出センサにより検出して停止する。	3	6	2	1	3	18	6
自動 運転中	11	作業者がはねられる。 /機械的危険源	28	1	ロボット通路に人が倒れている。ロボット通路内に人が倒れこんで近くにいたロボットに撞かれる。	1	7	2	2	3	7	6
自動 運転中	12	作業者がはねられる。 /機械的危険源	28	1	バンパスイッチの配置されていない場所が人に当たった。作業者を検出できず衝突する。	2	6	2	1	3	12	6
自動 運転中	13	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	運用上の都合で障害物センサを無効化しているエリアに入ってきた。作業者を検出できず衝突する。	2	7	2	2	3	14	8
自動 運転中	14	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	検出困難だが巻き込む位置に人がいる。カーブ近傍にいる作業者を巻き込む。	1	6	2	1	3	6	6
自動 運転中	15	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	検出対象が動いている。作業者の位置を正しく検出できず衝突する。	2	6	2	1	3	12	6
自動 運転中	16	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	障害物センサの死角に入ってしまった。作業者を検出できず衝突する。	3	6	2	1	3	18	6
自動 運転中	17	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	積みに行く荷の近くに人がいた。移動先にいる作業者に衝突する。	2	7	2	2	3	14	8
自動 運転中	18	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	積みこんでいる荷による死角に入ってしまった。移動先にいる作業者に衝突する。	3	6	2	1	3	18	8
自動 運転中	19	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	物陰から人が飛び出してきた。ロボットと人が衝突する。	2	7	2	2	3	14	12
自動 運転中	20	作業者がはねられる。 /機械的危険源	14	1	腕、脚など体の一部だけが走行範囲内に入っている。作業者の腕、脚などがロボットに巻き込まれる。	3	6	2	1	3	18	6
自動 運転中	21	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	DC-DCコンバータが故障した。(一部の機器は停電、一部の機器は正常)自己位置が検出できずコースから外れ、作業者に衝突する。	1	6	2	1	3	6	6
自動 運転中	22	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	PCが熱暴走した。作業者を検出できず衝突する。	1	6	2	1	3	6	6
自動 運転中	23	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	PCの温度監視プログラムで定期的に監視し、温度異常の際には停止する。 2 車体制御系でプロセスが動いていることを監視し、プロセスが停止したら非常停止する。 3 PCの温度監視プログラムで定期的に監視し、温度異常の際には停止する。	1	6	2	1	3	6	6
自動 運転中	25	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	コンタクトフラッシュが故障した。ロボットが起動時に暴走する。	3	6	2	1	3	18	5

表 5.1.1-8 リスクアセスメント (2/2)

初期リスク分析結果				リスク低減				再リスク見積				
段階	No.	危険源	リスク 点数 R	優先 順位	保護方策(メーカによる工学的手段)	危害の 脆さ S	危害の 発生確率 頻度 F	Ph 値 Ps	回避 A	リスク 点数 R	保護方策 組み合わせ 時のR	
自動 運転中	26	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	プログラム起動時にタスク、プロセスの状態確認を行う。	3	6	2	1	3	18	5
				2	OFの異常による影響を受けるのは、起動時の読み込みの時だけなので頻度は1日1回と考える。	3	6	1	2	3	18	
				3	起動直後は低速でしか動作せず、大事故には至らない。	1	7	2	2	3	7	
自動 運転中	27	発火する。 /材質から起こる危険源	21	1	図面および実機から、ネジが緩みそうな箇所がないか確認する。 車体組立後に最終検証する。	1	7	2	2	3	7	
自動 運転中	28	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	車体制御系でプロセスが動いていることを監視しているため、通信が出来なければ非常停止する。	1	7	2	2	3	7	6
				2	障害物検知系で障害物を検出して停止する。	1	6	2	1	3	6	
				2	障害物センサで障害物を検出して停止する。	1	6	2	1	3	6	
自動 運転中	29	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	経路管理系(SLAM)と障害物検知系の間でイーサネットが断線した。行き先を指示することができず暴走する。	1	7	2	2	3	7	6
自動 運転中	30	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	経路管理系(SLAM)のセンサが断線した。自己位置が検出できずコースから外れ、作業者に衝突する。	1	7	2	2	3	7	6
				2	障害物検知系で障害物を検出して停止する。	1	6	2	1	3	6	
自動 運転中	31	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	パンパスイッチが接触不良になった。作業者を検出できず衝突する。	1	7	2	2	3	7	6
				2	上と下の2箇所にパンパスイッチを配置し、1方が接触不良でももう1方は動作する。	3	6	2	1	3	18	
自動 運転中	32	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	操舵ドライバのアナログ指令値にノイズが乗った。誤った操舵角でカーブを曲がってコースから外れ、作業者に衝突する。	3	6	2	1	3	18	6
				2	エンコーダの断線検知機能、指令値に対する偏差拡大時の停止機能などの有無を確認する。	2	7	2	2	3	14	
				3	後方のパンパのストロークを長くし、足元だけでなく胸部の高さにもパンパをつける。	2	7	2	2	3	14	
				4	障害物センサおよび障害物検知系で障害物を検出して非常停止する。	1	6	2	1	3	6	
				5	経路管理系(SLAM)で断線を検出して非常停止する。	1	6	2	1	3	6	
自動 運転中	33	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	操舵ドライバのエンコーダ信号にノイズが乗った。誤った操舵角でカーブを曲がってコースから外れ、作業者に衝突する。	3	6	2	1	3	18	6
				2	エンコーダの断線検知機能、指令値に対する偏差拡大時の停止機能などの有無を確認する。	2	7	2	2	3	14	
				3	後方のパンパのストロークを長くし、足元だけでなく胸部の高さにもパンパをつける。	2	7	2	2	3	14	
				4	障害物センサおよび障害物検知系で障害物を検出して非常停止する。	1	6	2	1	3	6	
				5	経路管理系(SLAM)で断線を検出して非常停止する。	1	6	2	1	3	6	
自動 運転中	34	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	操舵時に走行のエンコーダケーブルが断線した。定格以上の速度で走行し、カーブを曲がれずコースから外れ、作業者に衝突する。	1	6	2	1	3	6	6
自動 運転中	35	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	操舵時に走行の動力線が断線した。定格以上の速度で走行し、カーブを曲がれずコースから外れ、作業者に衝突する。	1	6	2	1	3	6	6
				2	経路管理系(SLAM)で断線を検出して非常停止する。	1	6	2	1	3	6	
自動 運転中	36	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	走行ドライバのアナログ指令値にノイズが乗った。定格以上の速度で走行し、カーブを曲がれずコースから外れ、作業者に衝突する。	3	6	2	1	3	18	6
				2	エンコーダの断線検知機能、指令値に対する偏差拡大時の停止機能などの有無を確認する。	2	7	2	2	3	14	
				3	後方のパンパのストロークを長くし、足元だけでなく胸部の高さにもパンパをつける。	2	7	2	2	3	14	
				4	障害物センサおよび障害物検知系で障害物を検出して非常停止する。	1	6	2	1	3	6	
				5	経路管理系(SLAM)で断線を検出して非常停止する。	1	6	2	1	3	6	
自動 運転中	37	作業者がはねられる。 /機械的危険源	21	1	走行ドライバのエンコーダ信号にノイズが乗った。定格以上の速度で走行し、カーブを曲がれずコースから外れ、作業者に衝突する。	3	6	2	1	3	18	6
				2	エンコーダの断線検知機能、指令値に対する偏差拡大時の停止機能などの有無を確認する。	2	7	2	2	3	14	
				3	後方のパンパのストロークを長くし、足元だけでなく胸部の高さにもパンパをつける。	2	7	2	2	3	14	
				4	障害物センサおよび障害物検知系で障害物を検出して非常停止する。	1	6	2	1	3	6	
				5	経路管理系(SLAM)で断線を検出して非常停止する。	1	6	2	1	3	6	
自動 運転中	38	作業者がはねられる。 /機械的危険源	14	1	電池切れにより停止した。急ブレーキがかかり、コースから外れ、作業者に衝突する。	1	7	2	2	3	7	6
				2	車体制御系、経路管理系(SLAM)、障害物検知系でそれぞれ相互監視しており、いずれかが停止したら非常停止する。	1	6	2	1	3	6	
立上げ 中	40	作業者がはねられる。 /機械的危険源	18	1	立上げ中に立上げ員以外の走行エリア内への立ち入りは禁止する。	3	6	1	2	3	18	6
				2	初期設定を間違えたと考え、安全な位置から動作を監視する。	3	4	1	2	1	12	
				3	障害物センサを完全に無効化して動作は出来ないようにする。	3	5	1	1	3	15	
				4	後方のパンパのストロークを長くし、足元だけでなく胸部の高さにもパンパをつける。	2	6	1	2	3	12	
立上げ 中	41	作業者がはねられる。 /機械的危険源	18	1	障害物センサが誤って無効化された。作業者を検出できず衝突する。	3	5	1	1	3	15	6
				2	立上げ中は立上げ員以外の走行エリア内への立ち入りは禁止する。	3	6	1	2	3	18	
				3	初期設定を間違えたと考え、安全な位置から動作を監視する。	3	4	1	2	1	12	
				4	後方のパンパのストロークを長くし、足元だけでなく胸部の高さにもパンパをつける。	2	6	1	2	3	12	
チョコ 停復旧 中	47	作業者がはねられる。 /機械的危険源	18	1	自動運転に移る際は、ボタン押し後、作業者が離れられるだけの停止時間を設ける。	3	4	1	2	1	12	3
				2	3D距離検出センサで検知して停止する。	1	5	1	1	3	5	
チョコ 停復旧 中	48	作業者がはねられる。 /機械的危険源	18	1	手動操作の際にも車体近傍を障害物センサで監視する。	3	5	1	1	3	15	9
				2	接触スイッチ、障害物検出レーザが足を検出できる高さになっている。	3	5	1	1	3	15	
				3	手動操作の際には低速で動作するので回避できる可能性がある。	3	4	1	2	1	12	
チョコ 停復旧 中	49	作業者がはねられる。 /機械的危険源	18	1	手動操作の際にも車体近傍を障害物センサで監視する。	3	5	1	1	3	15	9
				2	接触スイッチ、障害物検出レーザが足を検出できる高さになっている。	3	5	1	1	3	15	
				3	手動操作の際には低速で動作するので回避できる可能性がある。	3	4	1	2	1	12	
チョコ 停復旧 中	50	作業者がはねられる。 /機械的危険源	18	1	手動操作の際にも車体近傍を障害物センサで監視する。	3	5	1	1	3	15	9
				2	接触スイッチ、障害物検出レーザが足を検出できる高さになっている。	3	5	1	1	3	15	
				3	手動操作の際には低速で動作するので回避できる可能性がある。	3	4	1	2	1	12	
チョコ 停復旧 中	51	作業者がはねられる。 /機械的危険源	18	1	手動操作の際にも車体近傍を障害物センサで監視する。	3	5	1	1	3	15	9
				2	接触スイッチ、障害物検出レーザが足を検出できる高さになっている。	3	5	1	1	3	15	
				3	手動操作の際には低速で動作するので回避できる可能性がある。	3	4	1	2	1	12	
チョコ 停復旧 中	52	作業者がはねられる。 /機械的危険源	18	1	手動操作の際にも車体近傍を障害物センサで監視する。	3	5	1	1	3	15	5
				2	前方には接触スイッチ、後方にはパンパスイッチを取り付ける。	1	5	1	1	3	5	
チョコ 停復旧 中	53	作業者が押しつぶされる。 /機械的危険源	18	1	フォークはタッチパネルから操作する。タッチパネルはフォークと逆側にあるため、覗き込む事はできない。	1	5	1	1	3	5	---
				2	手動操作の際にも車体近傍を障害物センサで監視する。	3	5	1	1	3	15	

ブレーキに関しては、操舵を兼用した動輪の1輪だけで制動するため、ブレーキは重要な部品であり、この部分だけに焦点をあてたりリスクアセスメントを実施した。結果は最も大きいリスクがバネの折損であった。しかしながらブレーキディスクを加圧するバネは複数存在し、毎日の始業点検、定期点検の間隔の中で発生する一本のバネの折損は致命的な結果には至らないため、対策は不要である。

表 5.1.1-9 ブレーキのリスクアセスメント

段階	No.	危険源	危険状態/危険事象	危険区域	対象者	危害の 酷さ S	危害の発生確率 Ph			リスク 点数 R	備考	
							頻度 F	確率 Ps	回避 A			
自動 運転中	1	作業者がはねられる。 機械的危険源	バネの一部が折損し、ブレーキトルクが低下する。非常停止の際に制動距離が延び、作業者と衝突する。	走行路付近 走行中	周辺の作 業者	1	5	1	1	3	5	バネが複数存在するので、ブレーキトルクは低下するが衝突までに大幅に減速できる。

リスクアセスメントは第1コンソシアム/コンセプト検証WGで審議いただいた。主な指摘内容を表5.1.1-10に示す。

表 5.1.1-10 リスクアセスメントの主な指摘事項

No.	コメント	対応
1	想定される利用条件が明確 (どこで、どういう状況で使用されるのか(屋内とか)、作業者は教育された人だけなのか等)	安全仕様書に追記
2	危険の程度が「軽度」と「重度」の2種類しかなく、それぞれが具体的にどれくらいのレベルなのかが不明。また許容できるリスクがどれくらいなのかが不明。	当初、RAは機械工業会の指針で実施した。NEDOプロのフォーマットで再実施。
3	リスク評価のために使用しているリスクグラフと、制御による要求 PL の算出のためのリスクグラフを混同。	
4	低速にすることで危険の程度が重度から軽度になっているが、押しつぶしによる危険の程度は変わらない。 ⇒変わるの、回避の可能性と危険事象の発生確立	速度を下げ運動エネルギーを下げ危険の程度を下げる。 ウレタンバンパのクッションで被害低減。
5	危険状態・危険事象に対応する方策に矛盾。	設計段階で潰す問題や、検討したが実際にはリスクではなかった事項も入っている
6	最高速で走行中に、機械ブレーキによる非常停止をかけた場合、その制動距離 4m 未満で飛び出された場合の安全性。	最高速度で走行するのは人と接触リスクの少ない限定した領域。検出できない所は安全柵や踏み切り等の地上設備で実施。(プロジェクト範囲外)
7	ソフトウェアが安全関連系に含まれている。これらの方策を実現するためには、「判断」を行っていると思われる PC の信頼性保証が必要。	3D障害物検知は通常制御系とする。 安全系の範囲、ソフトウェアの介在の有無を明確する
8	チョコ停の際の復旧が最も人身事故につながりやすい。チョコ停の要因を洗い出す必要がある。	
9	ブレーキが故障した場合をリスクアセスメントの項目に含んでいない。ブレーキもバネやワイヤーの断裂などにより故障する可能性がある。	ブレーキだけに着目した RA を別途実施する。

最後に図 5.1.1-6 にリスクアセスメントでフォーカスしている生活支援ロボットと機械工業会のガイドラインの主要な相違点を示す。障害の酷さの細分化と危険に晒される頻度が細分化され重症に至る前の軽症段階のリスクまでをフォーカスしていることが読み取れる。

(1) 危害の酷さ (S)

危害の酷さは下表の基準で見積もる。成人のプロが扱うという前提の一般機械設備に対して、対象者の範囲が広いと想定されるため、見積りの目盛りはより厳しい側（軽傷を細分化）としている。ただし、危害を被る被災者は1名という前提であるため、複数人が同時に被災する場合は、例えば等級を1つ繰り上げる等の重み付けを検討する。

S	危害の酷さ	該当例
4	重大傷害（長期間治療）	死亡、手足の切断、骨折、永久傷害が残る、入院が必要、全治1週間以上
3	医療措置（短期回復）	要診察、縫合を伴う切傷、完全治癒が可能、全治1週間未満
2	応急手当て回復	入院不要、赤チン災害（切傷、打撲）
1	無傷/一時的な痛み	痣の残らない圧迫・打撲（部位により150Nが目安とできる）

新設

表4-3 危害のひどさ及び発生確率、並びにその要件

(1)考慮下の危険源に存在する危害のひどさ	考慮すべき要件
	①保護対象の性質（人、財産、環境）、②傷害又は健康障害の強度（軽い、重い、死亡）、③危害の範囲（個別 機械の場合、一人、複数）
(2)危害の発生確率	考慮すべき要件
1)危険源への暴露頻度及び時間	①危険区域への接近の必要性、②接近の性質、③危険区域内での経過時間、④接近者の数、⑤接近の頻度
2)危険事象の発生確率	①信頼性及び他の統計データ、②事故履歴、③健康障害履歴、④リスク比較
3)危害回避又は制限の可能性	①誰が機械を運転するか、②危険事象の発生速度、③リスクの認知、④危害回避又は制限の人的可能性、⑤実際の体験及び知識による

点数UP

(2) 危険源に晒される頻度 (F)

危険源に晒される頻度は下表の基準で見積もる。ただし、ロボットが完全に隔離されている場合を除き、晒される頻度はロボットが人へ接近する頻度あるいは近接してのロボットのタスク頻度と見なすことができる。搭乗型ロボットの搭乗者が対象の場合、ロボットのタスクと想定危険源から判断する。（例えば、車いす型ロボットを操縦してトイレへ1往復（又は5分）する際、走行通路横の階段から落下するという危険源を想定する場合、階段付近を2回（又は合計1分）走行するとします。）

F	危険源に晒される頻度/継続時間	基準例
4	連続的/常時	動作中ほとんど晒される又は1回の晒される時間が5分以上継続
3	動作中頻繁/長時間	1動作中に5回以上晒される又は1回の晒される時間が5分未満継続
2	動作中数回/短時間	1動作中に1回以上晒される又は1回の晒される時間が1分未満継続
1	まれ/瞬間的	晒される頻度が5回動作で1回以内又は1回の晒される時間が3秒未満

ISO13849-1 S 傷害のひどさ

ISO13849-1 S 傷害のひどさ	ISO14121-2,A.19 S 傷害のひどさ	傷害の程度
S2	4	回復不可能：死亡、目や脳の喪失
	3	回復不可能：手足骨折、指の喪失
S1	2	回復可能：医師の手当てが必要
	1	回復可能：応急処置が必要

図 5-2 リスクパラメータ S の改良

細分化

表 5-1 リスクパラメータの意味

S	S1	S2
F	軽微な傷害（通常は回復可能）。例えば、こすり傷、裂傷、挫傷、応急処置を要する軽い傷	深刻な障害（通常は回復不可能。致命傷を含む）。例えば、肢の粉砕又は引き裂かれる若しくは押しつぶされる、骨折、縫合を必要とする深刻な傷害、筋骨格障害（MST）、致命傷
A	F1 作業ソフト（サイクル）あたり2回以下又は15分以下の暴露 F2 作業ソフト（サイクル）あたり2回超又は15分超の暴露 *暴露頻度については、主に「機械的危険源」を対象としている	A1 いくつかの条件下で可能 — 可動部分が 0.25m/s 以下の速度で動く場合、及び被暴露者がリスクに気づいており、また危険状態又は危険事象が迫っていることを認識している。 — 特定の条件による（温度、騒音、人間工学等） A2 不可能
O	O1 安全分野で証明され、承認されている成熟した技術（ISO13849-2:2003 参照） O2 過去2年間で技術的故障が発見されている — リスクに気づき、また作業場で6ヶ月以上の経験を持つ十分に訓練を受けた人による不適切な人の挙動（人に依存する場合） — 過去10年以上発生していない類似の事故（類似事故の有無の場合） O3 定期的に見られる技術的な故障（6ヶ月以下毎） — 作業場で6ヶ月未満の経験を持つ十分に訓練を受けていない人による不適切な人の挙動（人に依存する場合） — 過去10年間に工場で見られた類似の事故（類似事故の有無の場合）	

生活支援ロボットのリスクアセスメントと
コンセプト検証に関する検討会

メーカーのための機械工業界
リスクアセスメントガイドライン

図 5.1.1-6 リスクアセスメントガイドラインの相違点

5.2 本体設計

5.2.1 設計コンセプト

(1) コンセプト

フォーク型ロボットのベースモデルは T11 パレット搬送を行う有人運転リーチ形フォークリフトを自動化したもので、走行モーター、走行モーター駆動インバータ、フォークを駆動する油圧ポンプ、バッテリーは有人運転のフォークリフトからの転用している。自動化する際に 2 次元レーザー距離計を使用した自己位置推定の制御装置、電動ブレーキ、その他の安全装置を装備し自動化した無人搬送車である。

ベースとなった無人搬送車は 2 次元レーザー距離系で周囲の構造物との距離測定結果と電子地図の照合により自己位置を推定する、いわゆる SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)技術を使用している。SLAM 技術で障害物を認識することも一般的には行われているが、フォークリフトで荷物の搬送を行った場合、搬送した荷物の移動により地図データが更新され、これが 20~30 台の多大数運用になった場合に、他の搬送車が搬送した結果による周囲状況の変化が大きく地図照合の信頼性が低下するため、自己位置推定の 2 次元距離計は歩行者と荷物よりも高い位置に設置する。このため自己位置推定の計測データを対人の障害物回避には使えない。

リスクアセスメントの結果、本体に装備する安全装置を決定した。通常の後進走行動作に対しては 3 次元位置認識による障害物の検知で対応する。無人搬送車の車体の上面に設置するため、同装置では図 5.2.1-1 に示すように車体の陰になる死角が存在する。また 3 次元位置認識の制御系に工業用 PC コントローラを使用する関係で安全系よりも信頼度の低い安全サポートとする。このため 3 次元位置認識の死角での安全の担保のため IEC61508 の安全規格で規定した SIL(Safety Integrity Level) 認証を受けた障害物センサーと併用する。3 次元位置認識では空間を面として障害物を検知し、安全系の障害物センサーでは空間の特定高さにおける障害物を線として検出する。

バンパーやサイドバンパーは通常でも装備する。これらの装備する安全装置を、装置の配置や数量追加、形状変更で対応する。

表 5.2.1-1 実施マトリックス

区分	項目	1 2 3 4 5 6 7 8								実現手段	制御系の区分		
		車体に接触したことを検知	固定距離で検知	走行速度・進行方向に応じた検知	特定方向での死角を減らす	作業者と搬送車の分離	作業者に警告・警報を与える	作業者に停止	制御の破綻・制御の故障を検知				
車体装備	非常停止ボタン	後面								△	非常停止押しボタン	通常制御系	
		側面								△	車体後面×2ヶ所、車体側面×2ヶ所		
	接触スイッチ	前面下部(アウトリガー先端)	△									バンパースイッチ	通常制御系
		前面下部(アウトリガー下部)	○									排障機能+接触検知スイッチ	
		後面上部	○								△	ウレタンバンパ+テープスイッチ	
		後面下部	○								△		
		側面上部	○								△	テープスイッチ	
	障害物センサ	前方			○	○					○	セーフティレーザスキャナ	安全系
		後方			○	○					○	前方：SICK S300 mini Remote x2	
		側方			○	○					○	後方：SICK S3000 x1	
	SLAM	前方									△	レーザ距離計 + データ処理	通常制御系
		後方			○						△	走行路近傍の地図にない障害物検知	
		側方			△						△		
	3D距離検出	前方			○						○	レーザ距離計 北陽 UTM-30LX	安全サポート系
		後方			○						○	+ 3D揺動機構 + データ処理	
側方				○						○			
警告音	警告音									△	メロデー	通常制御系	
	動作の音声ガイダンス									△	音声合成		
	動作モードの表示									△	バトライト		
	動作方向の表示									△	ウインカ(表示灯)		
地上設備	安全策の開検知	歩行者横断部								△	柵の開検知+無線	安全サポート系	
	安全策のロック	歩行者横断部								△	柵区間の閉塞区間通過中の電磁ロック		
通常制御系の処理	SLAM	脱線検知								△		通常制御系	
	CPU間通信	周期データ更新								△			
	ウオッチドックタイマ	リンケージ異常								△			
		タイムアウト								△			

【凡例】

○	本PJで実施する事項
△	製品として機能は既に存在する。本PJでの追加の安全策は実施しない事項

また制御に複数の制御装置を使用するために、制御装置の自己診断と相互の生存確認も行うことで通常制御系の制御装置は単体としては検知できない危険側故障を複数のいずれかで検知し装置停止させる。

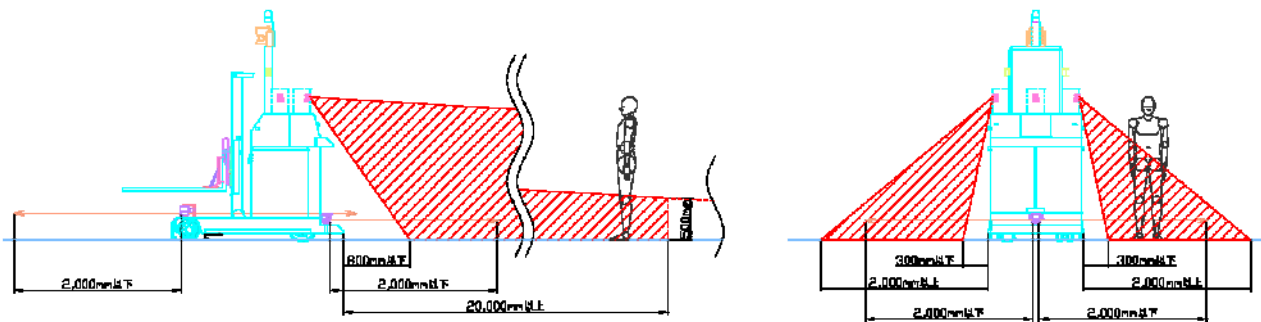


図 5.2.1-1 3次元位置認識装置の走査範囲

床面に倒れている人の検出に関しては、4.2 節にも示した規格で求めている検出の床上高は 200mm よりも上方にある障害物の検出が求められる。日本建築学会標準仕様書(JASS5)によれば、コンクリートの精度は 3m につき 7mm 以下の凹凸とする。この凹凸とセンサーの精度を考慮すると、20m 先では±57mm の高さの検出誤差が発生しうる。このため、固定の角度範囲で閾値を設ける床レベルと障害物の判別では地面から 120mm 以下の高さにあるものは床と区別できない。また無人搬送車はスロープになった床面での運用も想定される。一方、人間の頭幅は 160mm 程度であるので、20m 先の倒れている人を検出するためには、3次元位置認識の床面認識は距離データの連続性に着目し、水平の床だけでなく、傾斜のついたスロープでも判別するアルゴリズムで床レベルを同定し、床レベルからの偏差で障害物を判別する。天井に関しても同様に車体よりも上側は天井として排除する。

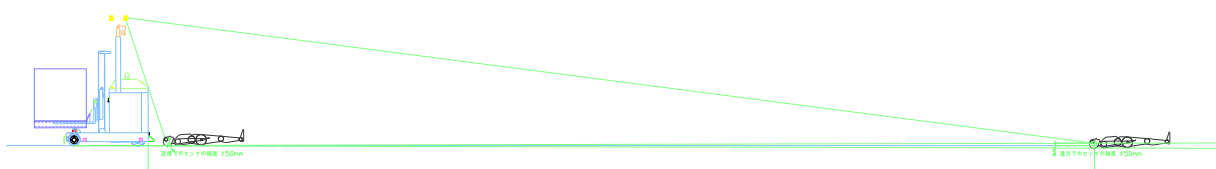


図 5.2.1-2 床上物体の認識

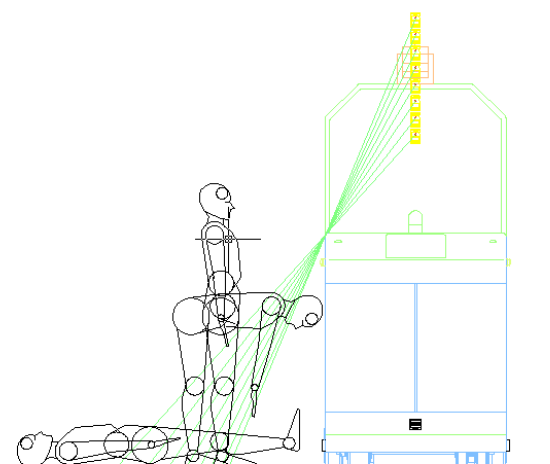


図 5.2.1-3 3D 位置検出センサーが 1 個の場合の検知範囲

図 5.2.1-1 は 3D 位置検出センサーを 3 個使用した場合の検出範囲を示している。中央に 1 つだけ配置した場合には図 5.2.1-3 に示すように車体側面の不感領域は大きくなり、取り付け高さに不感領域の大きさが依存する。この場合は側面検出よりも車体後方の進行方向の検出を専ら行うことになる。

3次元位置認識装置のデータの扱いは、3次元位置認識装置では静止物体、移動物体に関係なく、距離データの集合体として検出し、それが人であるか、物であるかは区別がつかない。一方、自己位置推定の誘導制御では地図情報を持っており、誘導制御側では地図上に登録された物体かどうかは、3次元位置認識のデータと、誘導制御の車体の方向を考慮した地図データの矩形領域を選択し、選択された領域と3次元位置認識データを2次元に高さ方向で圧縮したデータとを照合することで、地図上に登録されたものかを判別することができる。地図に登録されたものと見なされれば障害物として扱わない。地図に無いものであれば障害物と見なし減速なり停止の処理を行う。この照合の処理は3次元位置認識装置ではなく、車体の誘導制御の側で行う。3次元位置認識装置が完全な独立装置として対人安全の処理を行うのではなく、通常の制御系とのソフトウェア上の制御連携が必要なことも、これが安全サポート系となる一因である。3次元位置認識のデータの関連性を図5.2.1-4に示す。

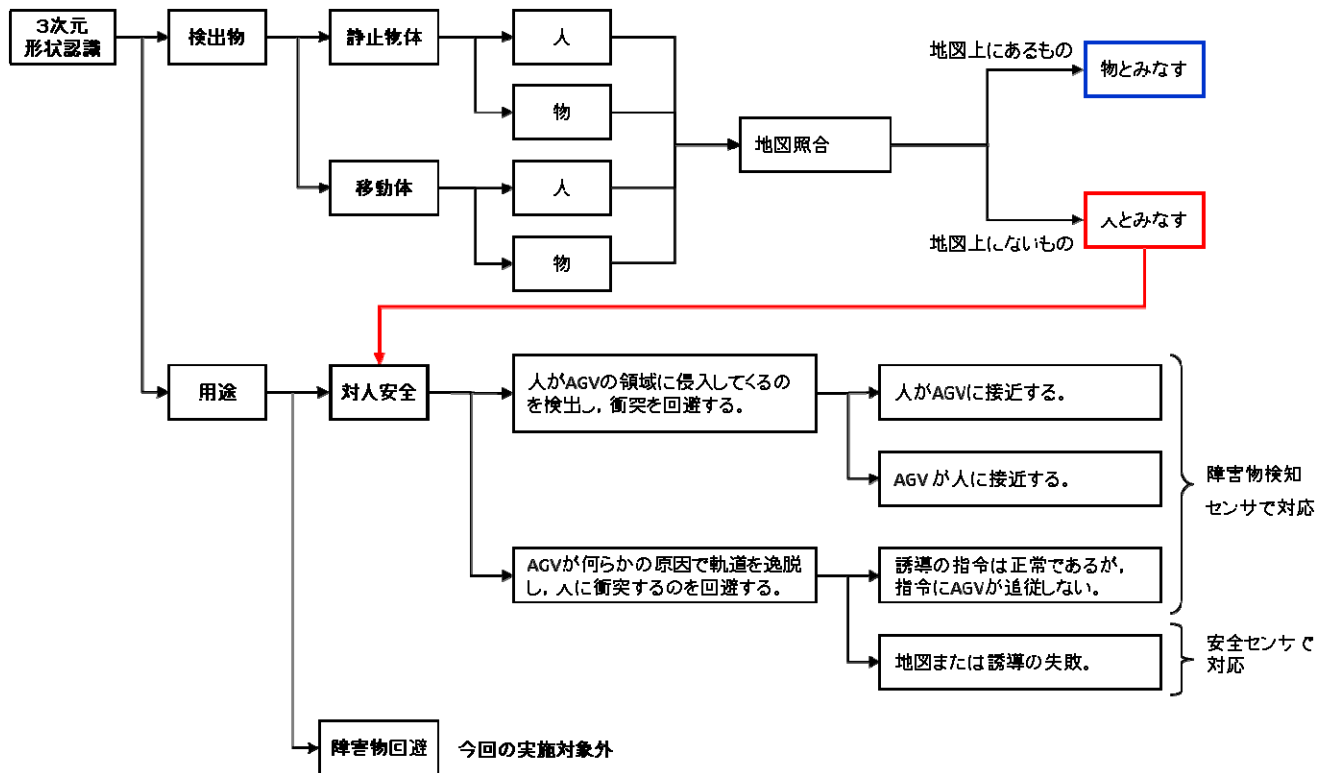


図 5.2.1-4 3次元位置認識装置のデータ

(2) 安全設計の原則

走行中、移載中の安全設計についての原則を表 5.2.1-2、表 5.2.1-3 に示す。この設計原則に従い開発を行った。

表 5.2.1-2 走行中の対人安全

状況	状況に対する安全策
(1)後進走行中の後方に対する障害物検知と減速・停止	後進走行中は車体の後面の車体投影面積内に障害物を検出した場合、障害物を回避できる距離で減速し、障害物と衝突することが予想される場合は、その手前で停止する。減速を始める障害物との距離は走行モーターで減速する減速度と走行速度に依存する。
(2)後進走行中の後方に対する障害物検知と非常停止	後進走行中は、車体の後面の車体投影面積内に障害物検知した場合は、障害物を回避できる距離で減速する。既に衝突回避のための減速を開始する距離の余裕がない距離で障害物を検出した場合には、障害物を検出した時点で機械ブレーキにより非常停止をする。
(3)後進走行中の車体側面に対する障害物検知と減速・停止	<p>(a) 車体の後方での軌道側面</p> <p>後方走行中の車体投影面積よりも広い範囲で障害物の検知を行い、自己位置推定の地図に登録されていない物体が走行軌道の近傍に検出した場合は車体後面の障害物検知と同様に、衝突を回避できる距離で減速し、その手前で停止する。</p> <p>(b) 旋回中の車体側面</p> <p>最小旋回半径、あるいは最小旋回半径の近傍で低速で旋回中に車体側面近傍で障害物を検出した場合は減速停止する。車体近傍の走行軌道近傍で、旋回中に軌道に立ち入っている人を巻き込むことを想定し、減速停止する。</p>
(4)前進走行中の前方に対する障害物検知と減速・停止	<p>前進走行中は車体前面の車体投影面積内に障害物を検出した場合、障害物を回避できる距離で減速し、障害物と衝突することが予想される場合は、その手前で停止する。減速を始める障害物との距離は走行モーターで減速する減速度と走行速度に依存する。</p> <p>前進は車体姿勢の制御安定性が後進方向よりも劣り、3D 位置認識による障害物検知の範囲も限定されるため、減速度による減速距離以外に、センサー類の検出できる範囲で減速距離が決ることがある</p>
(5)前進走行中の車体側面での障害物検知と減速・停止	最小旋回半径、あるいは最小旋回半径の近傍で低速で旋回中に車体側面近傍で障害物を検出した場合は減速停止する。車体近傍の走行軌道近傍で、旋回中に軌道に立ち入っている人を巻き込むことを想定し、減速停止する。

表 5.2.1-3 移載中の対人安全

状況	状況に対する安全策
(1)車体前面	<p>移載中は車体の車体前部で障害物を検出した場合、移載シーケンスを中断し、障害要因が排除された前に移載シーケンスを再開する。</p> <p>車体前面は移載シーケンスの途中でフォークや積載物の陰になるシーケンスが存在する。センサーの視界が陰らないシーケンスだけセンサーによる監視を有効にする。</p>
(2)車体側面	<p>移載中は車体側面で障害物を検出した場合、移載シーケンスを中断し、障害要因が排除された後に移載シーケンスを再開する。</p> <p>車体側面は車体側面に設けた距離センサーと3D位置認識センサーを併用しても死角をなくすることに限界がある。検出可能な範囲で行う。</p>

走行中、移載中の両方で3D位置認識センサーを使用するためには複数個の設置が必須となり、安全系と安全サポート系の分担範囲を見直し、安全系で行う範囲を拡大し、安全サポート系は専ら進行方向での監視を行うこととした。

5.2.2 機構シミュレーション

本プロジェクトのフォーク型ロボットは運搬能力の向上策として、従来の製品で実用化している走行速度 80m/分を 180m/分まで従来比 2.3 倍と大幅に速度を上げている。フォーク型ロボットの設計検討として誘導制御の位置制御系が安定動作するかの事前評価を実施した。シミュレーションは MATLAB で行う。

AGV モデルは重心周りの遠心力と舵の操舵による操舵輪と従動輪の操舵角に対する滑り角で発生するコーナリングフォースの釣合い、走行の慣性力、モーメントバランスの運動方程式でモデリングする²⁾。自己位置推定の自車の位置と誘導の仮想目標点を設定し、応答を評価する。

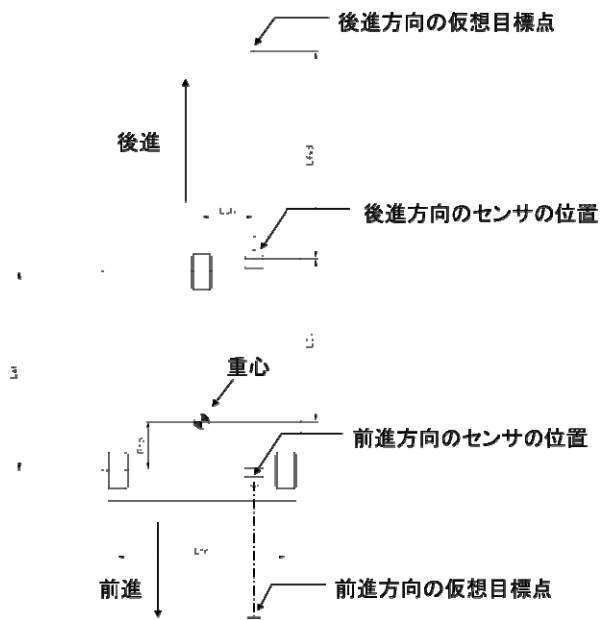


図 5.2.2-1 制御モデル

図 5.2.2-2 にシミュレーションモデルのモデルを示す。このモデルは本プロジェクトのフォーク型ロボットに限定せず、他の無人搬送車製品でも使用しているモデルを流用し、自己位置推定による操舵評価を追加している。

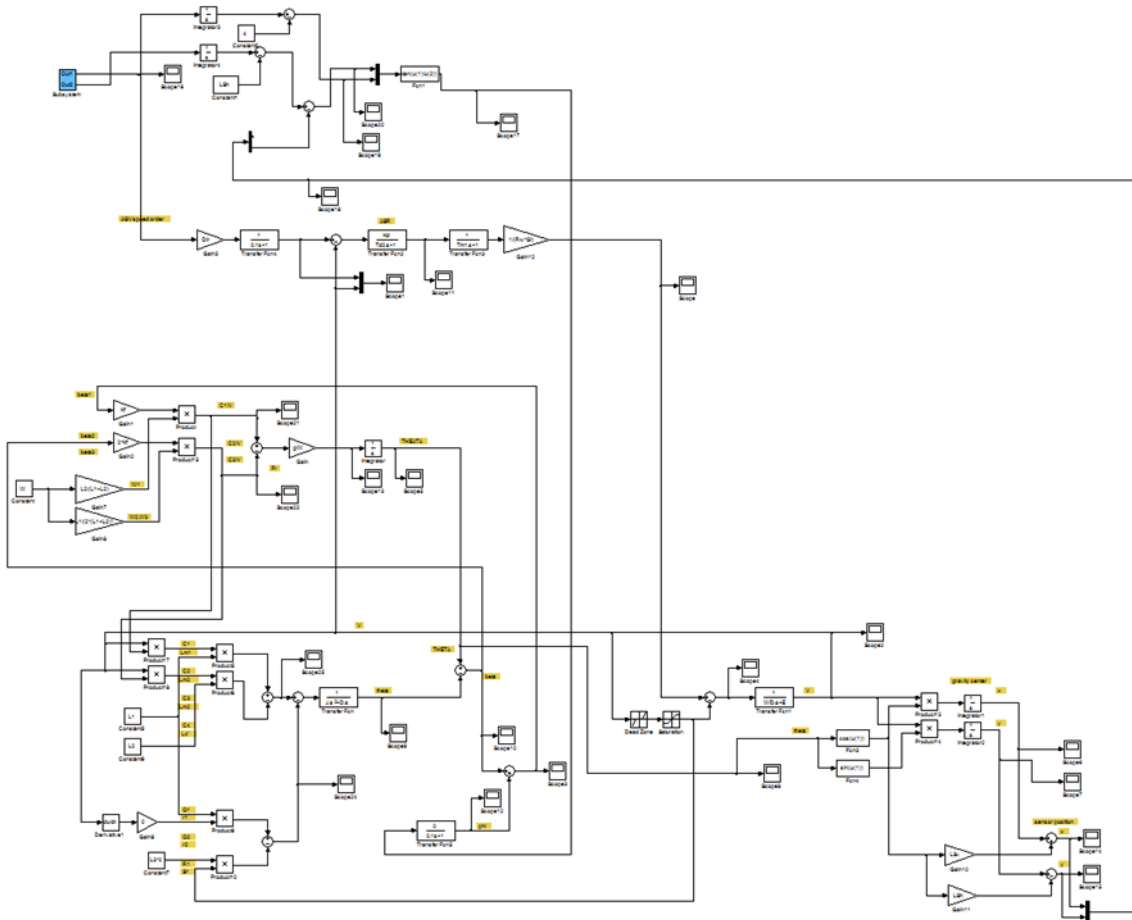


図 5.2.2-2 シミュレーションモデル

図 5.2.2-3 に評価項目を示す。評価としては操舵の指令が変化したときの収束時間と位置のオーバーシュートで評価する。

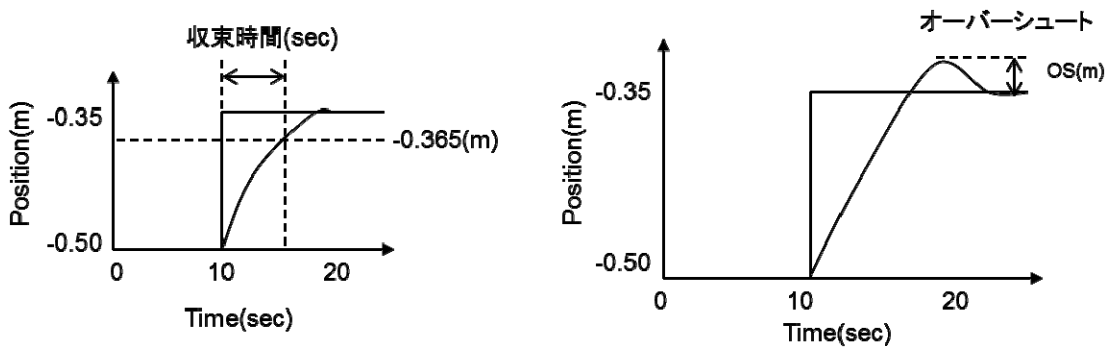


図 5.2.2-3 評価項目

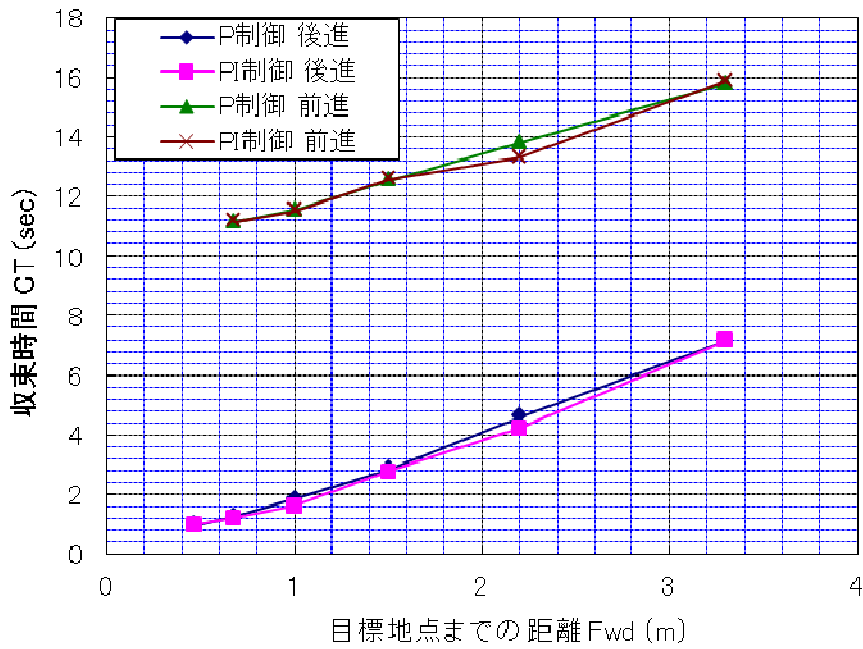


図 5.2.2-4 制御の収束

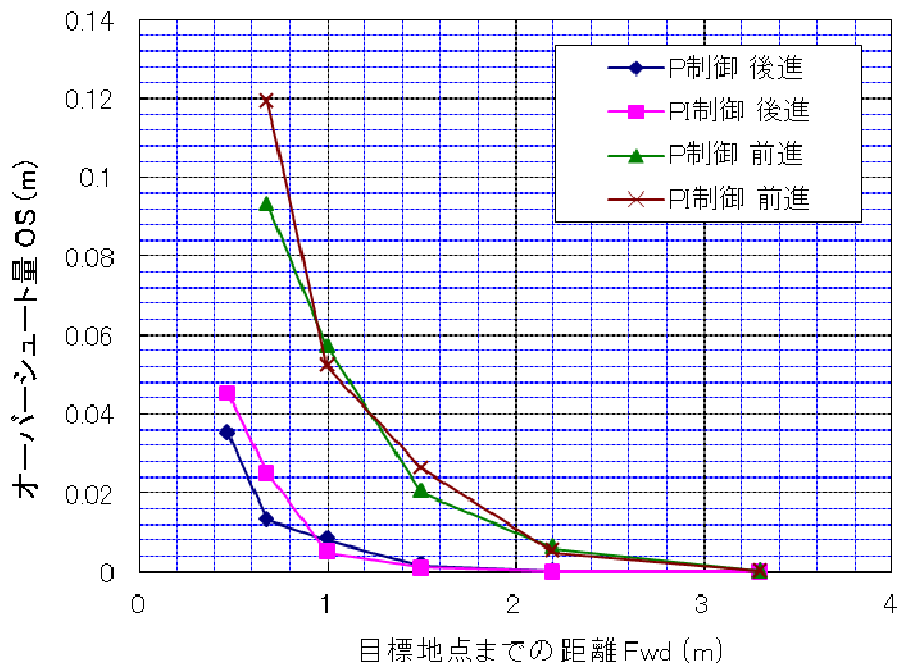


図 5.2.2-5 オーバーシュート

走行の軌道の指令値に外乱となるステップ状の指令変化を与えたときの位置制御系の応答は、車体の進行方向と直交する方向の位置の収束で評価する。結果は図 5.2.2-4、5.2.2-5 に示す。従来製品化している機種に比較し、後進では約 1 m 目標点を車体よりも遠方に移動し

、制御ゲインを調整することで高速走行でも制御が安定する。前進方向では反進行方向の操舵のため制御は非対称となり、同一速度に対し安定性が大幅に低下する。制御の安定する条件は従来よりも範囲が狭くなり、調整時に適切な制御パラメータを設定していない、制御が発散し事故を起こすリスクが高くなる。前進方向（移載するときの方向）では低速走行しか行わないため問題にはならない。収束時間は目標位置を遠方にずらすことで収束時間がながくなるが、これは目標点までの移動時間を含むため、移動時間を相殺した収束時間はほぼ一定になり運用上の問題は生じない。

非量産の産業機器の生産では、調整ミスによる事故リスクを低減するために、低速運転で調整し、不安定な現象が発生した場合、早期にそれを見つけ出し対策することが調整段階で重要になる。またこれらのシミュレーションによる特性推定と試作評価での試験データは試験調整員に対する教育データとして整備することが高速化には必須となる。

この結果は従来から知られていた経験則とも一致する。またこのシミュレーションは前進と後進の制御特性の差を示しているが、本来、高速搬送を行うためには高速走行は欠かせない要素であるが、制御が安定している後進方向で目的位置まで走行し、切返しの方向転換を行った後に前進方向で積み下ろし作業を行うのは、搬送能力としては非常に無駄が多い。目指すべき姿としては、荷を持ったフォークのある前進方向で高速にかつ安全に走行できるのが目指すべきフォークリフトの姿となる。

本シミュレーションは走行制御の安定性についてであるが、実際の運用においては車体や荷の振動も重要な要素で、これは床面の平坦度や状態に大きく依存する。これについてはシミュレーションではなく実機で確認し、シミュレーションは行わない。

5.2.3 運用シミュレーション

運用シミュレーションはフォーク型ロボットを安全性向上のため、AGV と歩行者がすれ違うときに歩行者が危険を感じない程度の速度まで減速することで、搬送能力にどの程度影響するかをシミュレーションで検証する。無人搬送車の走行速度を大幅に速度アップしても衝突回避のために最高速度で走ることができず、最高速度と平均速度の乖離が大きくなったシステムでは最高速度を上げるメリットが活かせないために事前検証を行う。シミュレーションソフトは AutoMod (Applied Materials 社) を使用した。AutoMod は工場の搬送システムや配送センターなどの物流システムをモデリングし、動作状況などの定量評価を行う 3D 物流シミュレーションソフトウェアで、物流機器メーカーで広く使われている。

軌道を走行する AGV と AGV の軌道と並行する通路を歩行、あるいは AGV 通路を横断する箇所を複数箇所設け、歩行者の有無での搬送能力を比較する。搬送能力シミュレーションはレイアウトとジョブの発生頻度に依存する案件対応のシミュレーションで一般化は困難であるが、傾向を把握する一助になる。AGV の走行経路 136m に対し、歩行者の通行する経路を 36m (AGV 走行路の 22%)、横断箇所を 5 箇所として計算した。減速は、従来より安全

といわれている歩行者と同程度の 60m/分まで減速する。交差点では人がいる場合には停止し、歩行者の横断後に AGV は走行を再開する。歩行者と AGV の優先順位は対等とし、先に交差点に進出した方が優先する。

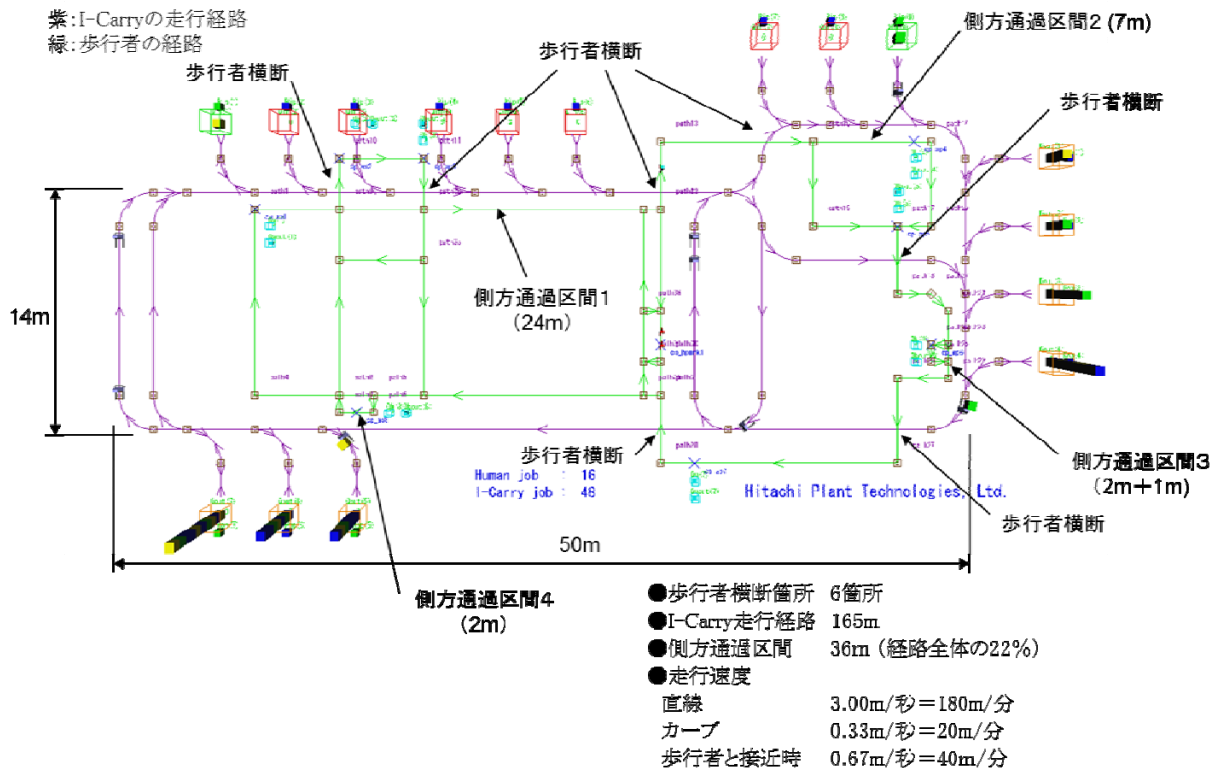


図 5.2.3-1 運用シミュレーションに使用した物流センターモデル

8 台の AGV 運行では各 AGV の特性値の平均値で比較すると、歩行者接近時の減速制御をすることで迎車時間、搬送時間が若干増加する。AGV の平均速度は 1.1% 低下する。マクロ的な搬送能力は AGV の速度にほぼ比例するので、速度から類推すると能力の低下は 1% 程度で大勢には影響ない。元々、5 分に 1 回しか歩行者との接近が発生しないシステムでは、安全のために歩行者の横を通過するときには走行速度を一時的に下げる処理をいれても、能力の低下は僅かである。本モデルでの安定時間は 1 時間程度である。表 5.2.3-1 に 5 時間運転の運用シミュレーションの結果のサマリーを示す。

表 5.2.3-1 運用シミュレーション結果

差異			歩行者減速 あり	歩行者減速 なし	差	備考
Delivering	percent total time	%	26.2	25.9	0.3	微増
	number of trips made	times	37.3	37.3	0.0	
	average time per trip	s	126.4	125.0	1.4	
Retrieving	percent total time	%	25.3	24.7	0.6	微増
	number of trips made	times	37.6	37.6	0.0	
	average time per trip	s	108.5	118.2	-9.7	
Going to Park	percent total time	%	29.2	29.6	-0.4	微減
	number of trips made	times	38.0	38.0	0.0	
	average time per trip	s	126.3	140.4	-14.1	
Parking	percent total time	%	19.3	19.8	-0.5	微減
Motion	Total time	s	18000.0	18000.0	0.0	
	percent time in motion	%	55.7	55.2	0.5	
	total distance traveled	m	5229.0	5241.1	-12.1	
	Average velocity in motion	m/s	0.521	0.527	-0.006	1.1%

評価指標として、荷を搬送している Delivering、荷を積むために荷のあるステーションに走行する Retrieve、ジョブの割り当てがなく停車している Parking の時間比率、回数、平均の移動時間を示し、歩行者近傍での減速の有無を比較した。

5.3 安全サポート系の設計

5.3.1 安全サポート系の機能の概要

(1) 安全サポート系と安全系のセンサー

フォーク型物流支援ロボットが自動で走行するために、安全に関するセンサーとして安全サポート系センサーと安全系のセンサーを利用した。安全サポート系のセンサーは、フォーク型物流支援ロボットが効率良く走行するように、通路上の遠くにある障害物を発見して、経路を変更、あるいは速度を減速されるように利用する。これに対して、安全系のセンサーは、フォーク型物流支援ロボットが障害物に接触する前に非常停止させる非接触の検出デバイスとして使用する。

安全サポート系センサーと安全系のセンサーは両方の機能を合わせて、自動走行する物流支援ロボットの効率を向上させる走行を実現するようにするものである。この章では、そのうちの安全サポート系センサーの設計について述べる。

安全サポート系センサーと安全系センサーの両方の機能により自動走行は効率化されるが、センサーのコスト低減のため、また、走行の効率を向上するため、センサー単体のコストの低減とセンサーの応答の高速化が求められる。本開発においてもセンサー単体のコスト低減と応答の高速化を課題として開発を進めた。

(2) 安全サポート系センサーの機能

フォーク型物流支援ロボットに使用する安全サポート系のセンサーとして、3次元障害物検出装置を開発した。3次元障害物検出装置はフォーク型ロボットに取り付け、走行通路上およびその近傍に3次元的に障害物を検出し、フォーク型ロボットの走行をサポートする。従来より市販されているレーザースキャナは、レーザ光をスキャンするスキャン面（距離を測定する測定面）が2次元の平面に限定されているため、レーザースキャナ単体をフォーク型物流ロボットに取付けて使用する場合には、床面から一定の高さの平面内だけの障害物検出装置として使用する。一方、本プロジェクトで開発した3次元障害物検出装置は、フォーク型ロボットの通路を3次元的に測定し、その3次元内に存在する障害物を検出する。3次元センサーを利用すると、通路内に手だけをだしたような2次元だけの障害物検出では不十分な検出も可能になる。このため、人と自動走行装置が共存するような様々なパターンで障害物が置かれる、または、通路上に移動するような環境の生活支援を実践する場で安全サポート系のセンサーとして、使用することが可能になる。

5.3.2 自動走行に利用するセンサーの比較

(1) レーザーセンサーと画像処理センサーの比較



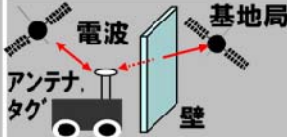
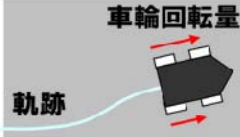
レーザーセンサーと画像処理センサー、および他の方式のセンサーを比較し表 5-3-1 にまとめた。自動走行システムでは、その性能とコストからレーザー距離センサーを使う方式

とカメラを利用する画像センサーが主要な方式である。それ以外に、自動走行するルートを判別する方式として、電波やロボット本体の動きを利用するものがある。しかしながら、電波やロボット本体の動きを利用するものは、大学等の研究機関では研究が継続されているが、生活の場や物流のような様々な動作が存在する中では、実用化には遠い。

表 5.3.2-1 ではレーザーセンサーとカメラを比較している。レーザーセンサーは、数 10m の距離測定のレンジを持ち、その距離の中で数 cm の位置精度を達成することが可能である。カメラの場合は、位置精度は 10 数 cm 程度に限られ、また立体視する原理から、遠くになればあるほど、位置精度が劣化する。また、走行路上の照明が変化すると、位置の測定が困難になる場合が多い。

一方、レーザーセンサーは、位置精度が高く、照明の変化に強いという利点がある。ただし、現状ではレーザーセンサーのコストが高いという課題がある。今後の技術改良や、レーザーセンサー単体のコストを低減するだけでなく、レーザーセンサーを利用したシステム全体の運用コストを低減するなどして、レーザーセンサーを利用したシステムのコスト低減を図ることが重要である。

表 5.3.2-1 レーザーセンサーと各種センサーの比較

	光の利用		電波の利用	動きの利用
	レーザ距離センサ	カメラ	GPS*1), UWB*2) など	ジャイロ, 加速度, 車輪
代表例				
方法	地図比較など		三角測量	動き量の時間積分
位置精度	◎ (数cm)	○ (十数cm)	△ (数十cm~数十m)	× (数十cm@100m)
検出安定性	○	△ (照明変化)	× (電波の遮蔽)	○
コスト	△	○	△	○

(2) 自動走行用3次元センサー

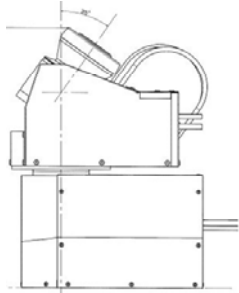
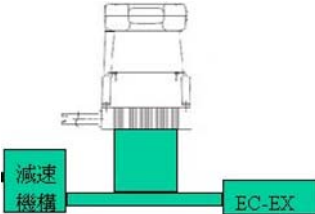

これまで、大学などのアカデミックな分野や市場の製品において発表されているレーザー スキャナ（レーザーセンサーのこと。この後は、本開発で使用するレーザーセンサーの スキャンの方式から、レーザー スキャナという言葉を用いる。）を使用した 3 次元センサーの仕様を比較する。

表 5.3.2-2 に 3 種類の 3 次元センサーを比較した。自動走行用のロボットに使用するために、センサーに要求される仕様には、小型、軽量で、バッテリーで動作することにより、移

動体で使用することが可能であること、また、高速で障害物を検出することにより、高速でロボットが走行可能とすること、さらに、3次元の計測の精度が高いことが挙げられる。

現状では、自動走行用のロボットに搭載して動作可能で、高速に3次元の計測が可能なタイプは2リンク揺動方式と1リンク揺動方式である。測量用に使用されている3次元のレーザーセンサーは、長距離の3次元測定が可能で精度も高い。しかし、表5-3-2に示す測量用の3次元センサーは、1回の3次元スキャンを完了するのに1,700秒という長時間がかかるとともに、移動体への取り付けする場合には、測定精度が保障されない。このため、本開発では、2リンク揺動式、および1リンク揺動式のセンサーを開発して、フォーク型物流支援ロボットに搭載することとした。

表 5.3.2-2 3次元センサーの仕様比較

No.	項目	方式		
		2リンク揺動機構	1リンク揺動機構	測量用3次元センサ
1	センサ方式	2リンク揺動機構	1リンク揺動機構	測量用3次元センサ
2	外観			
3	製作元・提供元	日立産機システム	日立産機システム	リーグルジャパン
4	寸法	H363mm × W285mm × D239mm	H263mm × W102mm × D250mm	H308+アンテナ長mm × W200mm × D200mm
5	用途	走行ロボット用3次元センサ	走行ロボット用3次元センサ	測量用3次元センサ
6	測定範囲	H2.0m × W1.2m × D20m	H2.0m × W1.2m × D20m	測定長: 1200m (100kHz測定時) 水平レンジ: 360° 垂直レンジ: 100°
7	測定精度	100mm	100mm	8mm
8	測定周期 (水平スキャン)	14400° /sec	14400° /sec	最大60° /SEC
9	測定周期 (3次元)	500msec/測定	200msec/測定	1700秒/測定
10	移動体への 取り付け	精度: 移動体で確保 電源: バッテリ	精度: 移動体で確保 電源: バッテリ	精度: 床面固定が必要 電源: バッテリ可能

5.3.3 安全サポート系センサーの開発目標仕様

(1) 安全サポート系センサーの利用方法

安全サポート系センサーは、自動で走行するフォーク型物流支援ロボットに搭載され、走行通路の障害物を検出して、自動走行に必要なデータをロボットの制御装置に提供する。この利用方法を満足させるために、以下に示すような開発の目標仕様を定めた。

(2) 安全サポート系センサーの開発目標仕様

フォーク型物流支援ロボットの安全サポート系センサーとして利用するために、障害物の検出範囲、測定精度、フォーク型ロボットの最大走行速度に適用するための障害物検出性能を目的として開発目標機能を設定した。表 5-3-3 にその仕様を示す。

2リンク揺動機構では、X軸周りにレーザースキャナを揺動させる機構となる（図 5-3-2 参照）。この方式では、レーザースキャナの揺動の中央点付近でレーザースキャナが床面に水平になる位置がある。このレーザースキャナが水平になる位置では、レーザースキャナが計測するデータを2次元の平面内で2次元の地図とマッチングさせられるため、フォーク型ロボットが2次元内（たとえば、部屋の平面図の中）で現在どの位置にいるかを推定することが可能となる。このような特長を利用するため、表 5.3.3-1 に示す2リンク揺動機構を持つ3次元センサーの開発を実施した。

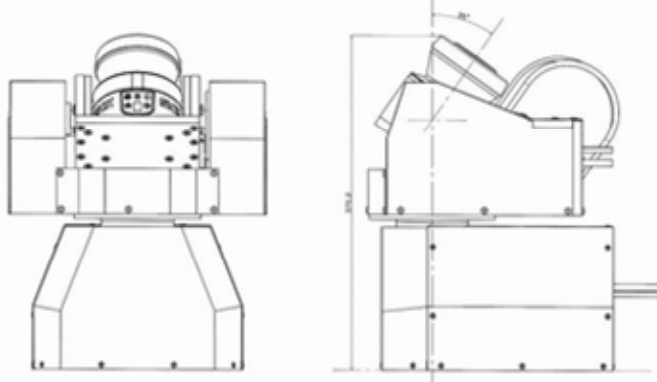
ここで、寸法は走行するロボットにとって小型であることが有利なため、なるべく小さいほうが良い。また寸法を小さくすることにより重量を低減することができる。

測定範囲は、フォーク型物流支援ロボットが高速で走行する場合は、遠くにある障害物を検出して速度を低下させ、低速で走行する場合には、近くの障害物に反応するようにする。ロボットの応答性と速度を考慮し、測定長を最大で20mとした、

障害物検出の条件によっては、最大の測定長20mで障害物を検知できるか、性能を確認することとする。測定精度は、走行の精度と人や物流の現場にある物品を検出できる100mmの精度を目標とした。

測定時間は、1秒間にロボット周辺全体の認識を更新する仕様とした。移動式でロボットに搭載され走行する条件で3次元の計測ができるものとした。

表 5.3.3-1 3次元センサーの開発目標仕様

No.	項目	方式
1	センサ方式	2リンク揺動機構
2	外観	
4	寸法	H363mm × W285mm × D239mm
5	用途	フォーク型物流ロボット用3次元センサ
6	測定範囲	H2.0m × W1.2m × D20m
7	測定精度	100mm
8	測定周期 (水平スキャン)	14400° /sec (25msec/スキャン)
9	測定周期 (3次元)	500msec/測定(1秒間に2回測定)
10	フォーク型 ロボット走行速度	最大 175m/分
11	停止指令出力位置	フォーク型ロボットより指定可能とする
12	移動体への 取り付け	精度: 移動体で確保 電源: バッテリ

(3) 2次元の平面を計測するレーザースキャナの揺動について

今回の開発では、2次元の平面をレーザー光でスキャンするレーザースキャナを揺動させ、3次元的に測長することによって、3次元の障害物検知センサーとする。レーザースキャナをどのように揺動させるかを図 5.3.3-1 に図示した。ロボットが走行する平面を $x-y$ 平面、高さ方向を Z 軸とすると、図 5.3.3-1 のようにレーザースキャナの方向を合わせると x 軸まわりにレーザースキャナを揺動させる方式とした。これは、モーターの回転でなく広く広い範囲の立体の測定をしようとした場合に、このような構成となった。

サーボモーターを利用して、レーザースキャナの位置をリアルタイムで検出しつつ、リアルタイムで3次元測定をする。

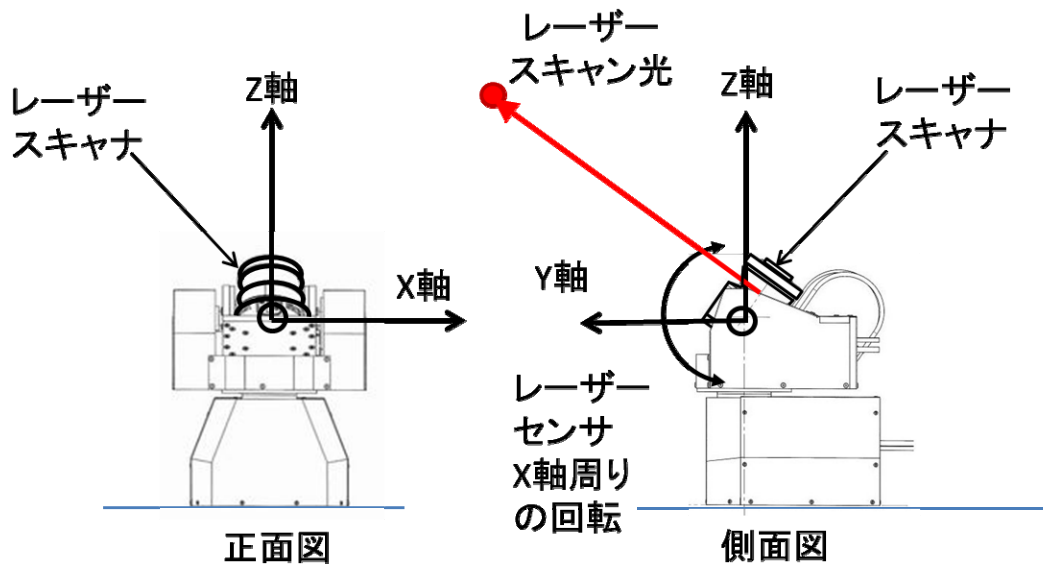


図 5.3.3-1 2リンク揺動機構の回転軸

5.3.4 安全サポート系の構成

図 5.3.4-1 に開発した安全サポート系の構成図を示す。この図には、どのような部品をどのように組み合わせて3次元測定器としたかを示している。

安全サポート系はフォーク型物流支援ロボットの制御装置とイーサネット、入出力信号線（I/O ケーブル）により接続される。安全サポート系を提供するメーカーとフォーク型ロボットを製造するメーカーが異なる場合は、安全サポート系を製造するメーカーから、ここに示す接続方式を提示して、フォーク型物流支援ロボットを製造するメーカーとインターフェースを調整する必要がある。今回は、日立産機システムが製作する3次元センサーと日立製作所が製作するフォーク型物流支援ロボットを両メーカーの製作する装置の仕様に合わせて両者が対応するインターフェースを決めた。このインターフェースの基本は、他社のメーカーと接続する場合でもその原理は共通で利用できる方式である。

安全サポート系は、図 5-3-2 の右側に点線で示される範囲の部品から構成される。2次元のレーザースキャナを使用し、これをX軸周りに揺動させて、レーザー光を3次的にスキャンし、3次元の距離測定を行う。フォーク型物流支援ロボットが走行する通路上に障害物があればそれを検出する。

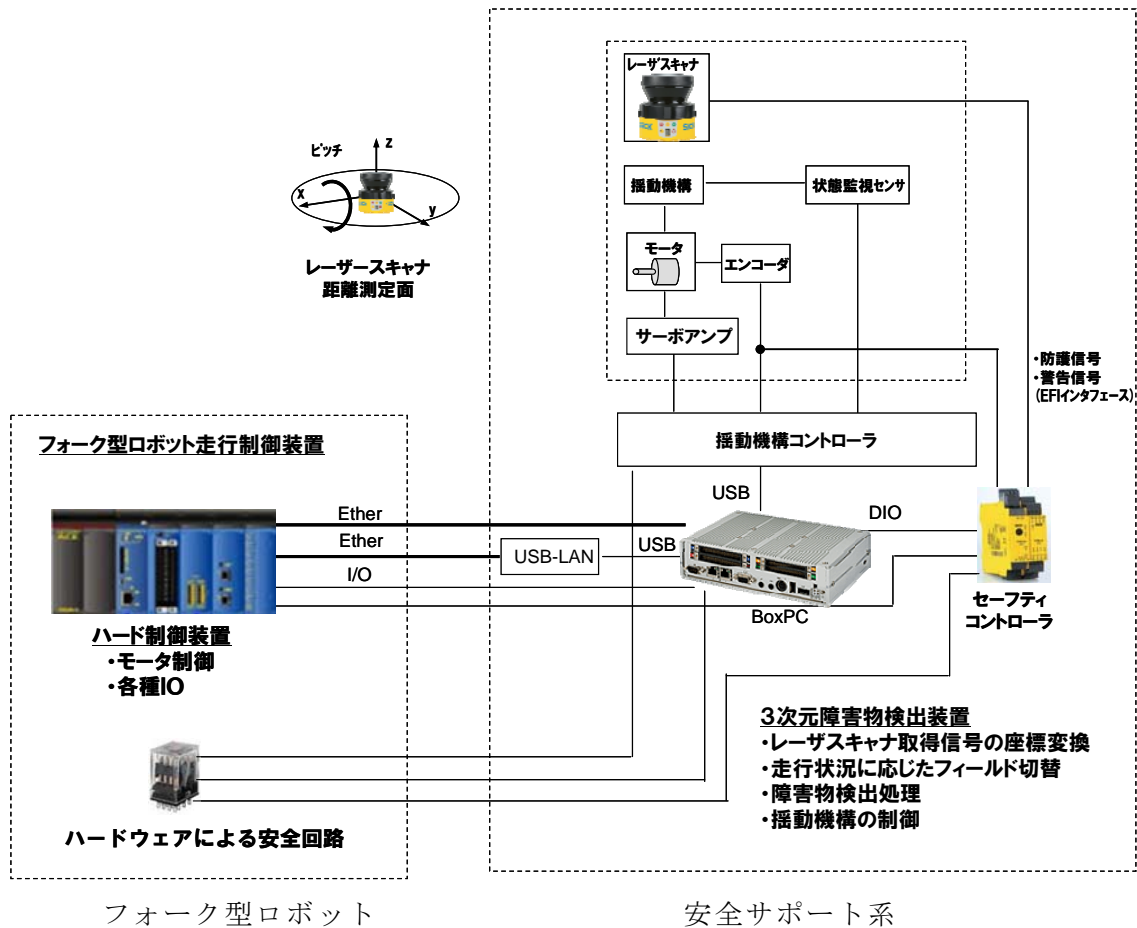


図 5.3.4-1 安全サポート系の構成

図で示すように、x 軸周りにモーターでレーザーキャナを回転させる、ピッチ回転動作をする。この動作により、3 次的に周囲の環境への距離を測定し、その距離データを元にして、ソフトウェアによって、3 次元の空間内に障害物が存在すること、および、3 次元空間のマップを作成することが可能となる。そのソフトウェアを今回開発し、図の Box PC 内で動作させる。

図 5.3.4-2 に完成した安全サポート系センサーの外観を示す。また、図 5.3.4-3 に安全サポート系センサーをフォーク型物流支援ロボットに取り付けた状態を示す。安全サポート系センサーは、フォーク型物流支援ロボットが走行中に走行路上の障害物をリアルタイムで検出して、フォーク型物流支援ロボットの走行制御装置にリアルタイムで情報を提供する。このため、3 次元の座標変換の計算の高速化が必要となる。



図 5.3.4-2 安全サポート系の外観



図 5.3.4-3 安全サポート系の取り付け

図 5.3.4-4 にフォーク型物流支援ロボットのシステム全体の要素をまとめる。

フォーク型物流支援ロボットは、その前方にあらかじめ計画されて走行する通路を持つ。遠方では、通路上に人などの障害物を検出した場合は、安全サポート系センサーから徐行の指令をロボット用の制御装置に送信する。障害物がさらに遠方にある場合は、徐行信号を出さない。

ロボットの近傍では、障害物の検出範囲を通路に対して広げ、通路上ではなく通路の近くに障害物があればこの場合も徐行信号を送信する。ロボットの近傍でかつ、走行路上に障害物があれば、安全サポート系センサーからロボットのコントローラに停止信号を送信する。

一方、安全系センサーは、より接近した障害物を検出して車体を非常停止する機能を構成するために利用する。

【3次元障害物センサ:安全サポート系】
 3次元障害物検出装置を用いて、歩行者近傍の徐行あるいは停止を行う。
 走行路遠方の歩行者検出時は、徐行。

【安全系】
 走行速度、制動距離を考慮して、障害物を検出し、車体を停止する機能を有する。

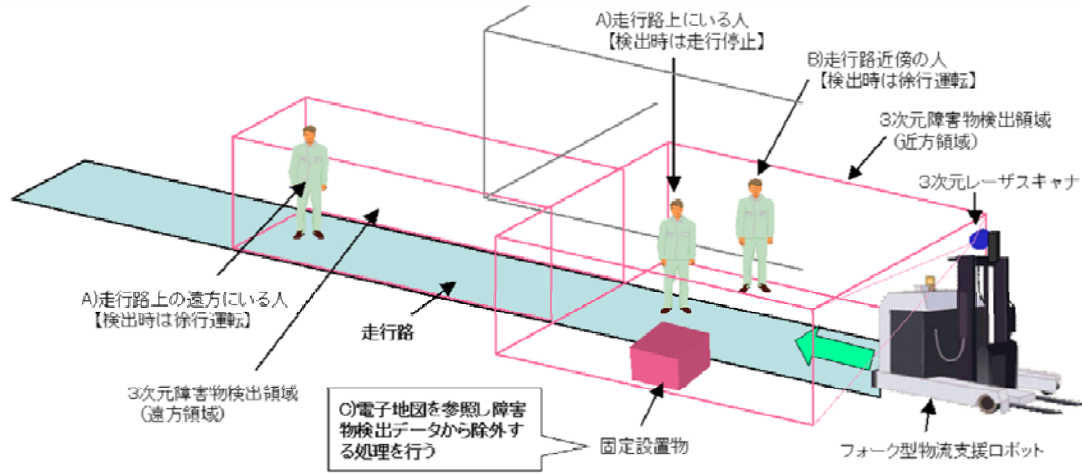


図 5.3.4-4 安全サポート系を使用するフォーク型物流支援ロボット

表 5.3.4-1 安全サポート系センサーと安全系センサーの役割分担

分類	内容	安全サポート系センサ	安全系センサ
センサの利用目的	走行経路生成	○	-
	減速・停止データ生成	○	-
	非常停止	-	○
提供するデータ	障害物の有無	○	○
	3次元空間内の位置	○	-
	3次元空間内の地図	○	-
出力信号	位置データ	○	-
	減速信号(高速走行時)	○	-
	減速信号(低速走行時)	○	-
	停止信号	○	-
	非常停止信号	-	○

表 5.3.4-1 には、安全サポート系センサーと安全系センサーの利用目的、提供するデータの種類、出力信号の種類でその役割を整理した。安全サポート系センサーは、走行経路生成、減速停止のデータ生成に用いるが非常停止のためには安全系センサーを使用する。

安全サポート系センサーの提供するデータは、障害物の有無を伝えることが主目的であるが、その構成上、3次元空間内のどこにセンサーが位置するか、また3次元空間の地図データを提供することが可能である。

出力する信号には、位置データ、高速走行時の減速信号、低速走行時の減速信号、停止信号がある。

5.3.5 安全サポート系のハードウェア

この節では、安全サポート系センサーで利用しているハードウェアの仕様について述べる。

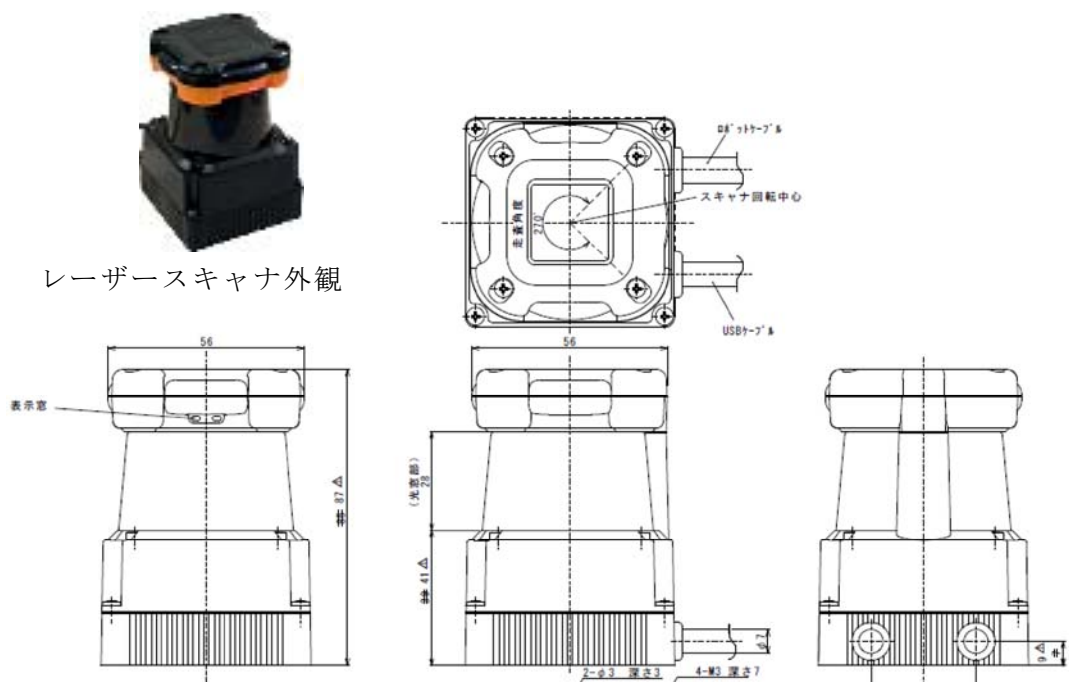


図 5.3.5-1 レーザースキャナの外觀、寸法

表 5.3.5-1 レーザースキャナの仕様

品名 型式	測域センサ	
	UTM-30LX	UTM-30LN
光源	半導体レーザー $\lambda=870nm$ 905nm 3、FDA レーザ安全クラス1	
電源電圧	DC 12V $\pm 10\%$	
電源電流	パワーON時 max 1A 定常時 0.7A以下	
消費電力	8W以下	
検出距離及び 検出体	検出保障値 0.1~30m (白ケント紙) * ² : 最大検出距離 60m(出力限界値) 最小検出物 130mm (10m) : 距離により変動する	
測距精度	0.1~10m : $\pm 30mm$, 10~30m : $\pm 50mm$ (白ケント紙) * ² 周囲照度 3000lx以下 白ケント紙 0.1~10m : $\pm 30mm$ * ¹ 周囲照度 100000lx以下 白ケント紙 0.1~10m : $\pm 50mm$ * ¹	
測距分解能及 び繰返し精度	1mm 単位 0.1~10m : $\sigma < 10mm$, 10~30m : $\sigma < 30mm$ (白ケント紙) * ² 周囲照度 3000lx以下 : $\sigma < 10mm$ (白ケント紙 10mまで) 周囲照度 100000lx以下 : $\sigma < 30mm$ (白ケント紙 10mまで)	
走査角度	270度	
角度分解能	約 0.25度 (360° / 1440 分割)	
走査時間	25ms (モータ回転数 2400rpm)	
インターフェース	USB Ver2.0 FS モード (12Mbps)	
出力	OUTPUT 1点 同期出力、	OUTPUT 1点 警報出力
使用周囲 温度、湿度	-10°C~+50°C 85%RH以下 (但し、結露、凍結がない事)	
保存温度	-25~75°C	
耐候性	雨や雪や太陽光により検出距離が短くなる* ²	
耐振動	10~55Hz 複振幅 1.5mm X、Y、Z方向 各2時間 55Hz~200Hz 49m/s ² スイープ2分 X、Y、Z方向 各1時間	
耐衝撃	196m/s ² X、Y、Z方向 各10回	
保護構造	IP64	
絶縁抵抗	10M Ω DC500V メガー	
重量	210g (ケーブルを除く)	
材質	ポリカーボネート	
外形寸法 (W×D×H)	60mm×60mm×85mm MC-40-3127	

(1) レーザースキャナ

① レーザースキャナの原理

レーザースキャナの外觀を図 5.3.5-1 に示す。また、レーザースキャナの仕様を表 5-3-5 に示す。安全サポート系は、レーザースキャナが重要な構成要素であり、安全サポート系センサーの主要な仕様は、レーザースキャナの仕様が根底にあって決まっている。

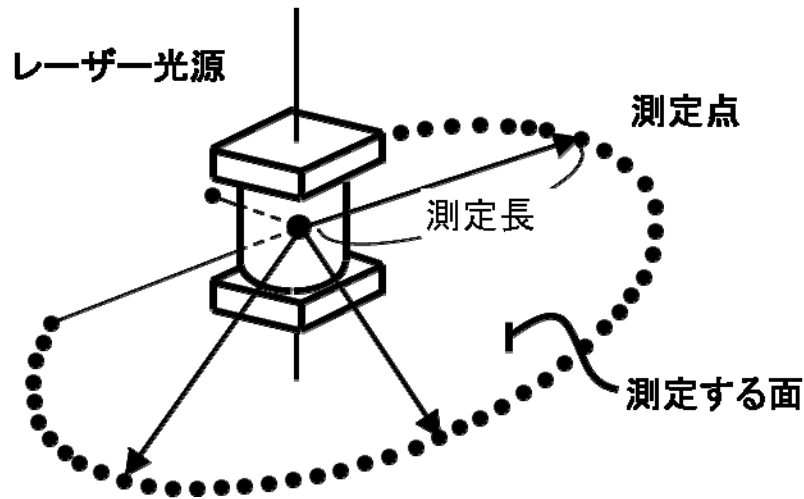


図 5.3.5-1 レーザースキャナの測定点

以下にレーザースキャナの原理と 3 次元の測長方法について示す。

図 5-3-7 にレーザースキャナの測定点と測定する面の原理図を示す。ここで使用したレーザースキャナは、スキャン面に 1,024 個の測定点があり、測定点は 270° の範囲になり、後方方向の 90° は測定しない範囲になっている。これらの測定点を 1 回スキャンするのに 25ms の時間を要する。

このレーザースキャナを 3 次元の測定に用いる原理を図 5.3.5-2 に示す。

この図は、3 次元センサーが廊下状の通路を走行している様子を示す。レーザースキャナを揺動させることにより、この図のスキャナ面がピッチ回転して上下動する。この際に、3 次元センサーは、廊下とレーザー光が交わる 3 次元位置測定点までの距離データを測定する。この距離データとレーザースキャナの姿勢データから、座標計算を行い、廊下の 3 次元形状を計測する。計測されたデータは、廊下の壁と床面状にある測定点のポイントデータの集合体となる。すなわち、廊下の形状は、3 次元的に測定された細かいピッチのポイントのデータからなる。

廊下に円柱状の障害物があれば、円柱の表面がスキャナ面と交差した点の測長データが取得され、廊下の空間内に、円柱状の障害物があることがわかる。

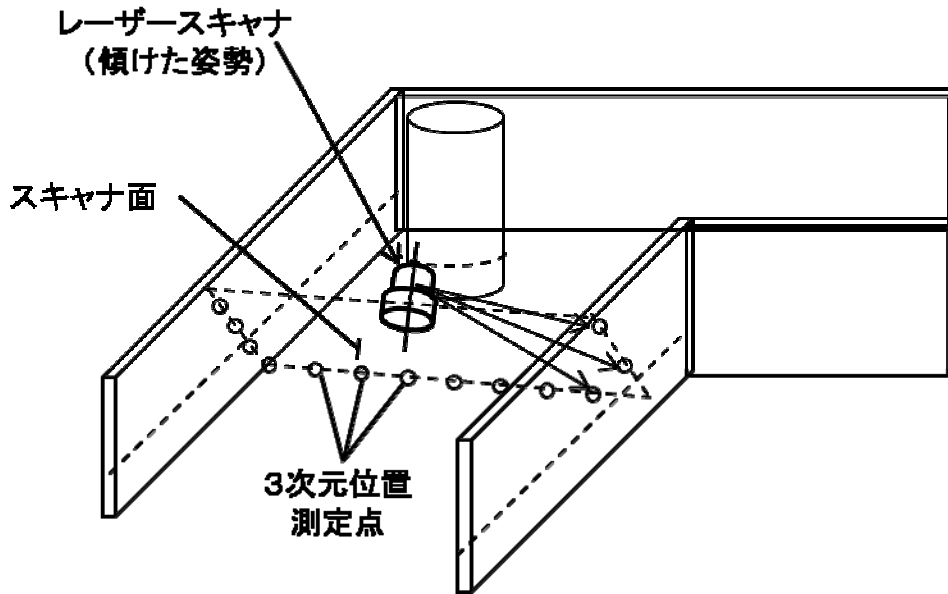


図 5.3.5-2 レーザーキャナを回転させて 3 次元計測

② 3次元センシングの回転速度と距離測定の分解能について

レーザーキャナのピッチ方向の回転速度を上げると、3次元の測定の1回の周期を速めることができ、高速に空間のデータを測定することが可能となる。ただし、1秒間に測定するポイント数が決まっているため、高速でピッチ回転させると、測定面と測定面の角度の間隔が広がって、上下方向の測定の分解能が低下する。

フォーク型物流支援ロボットが移動している場合、レーザーキャナも移動して行くが、走行方向には 25ms 後に、同一方向の水平面の測定が実施される。すなわち、25ms の間にロボットが移動するため、走行方向の測定の分解能もロボットの走行速度に影響される。

レーザーキャナと安全サポート系のコントローラの通信と3次元の計測、計算の処理時間を考慮すると、25ms の時間内にレーザーキャナの 1024 ポイントの測定点の計算処理を完了する必要があり、高速で座標変換するソフトウェアを開発した。

③ レーザーキャナの比較

レーザーキャナには、ドイツの Sick が製造するセンサーと国産の北陽電機が製造するセンサーとがある。今回の開発では、当初 Sick 製のレーザーキャナを採用する設計を進めていたが、安全サポート系全体を小型化するために、北陽電機製の UTM-30LX を採用した。これにより、レーザーキャナが体積比で 4 分の 1 になり、安全サポート系センサー全体の小型化に寄与した。

後の章で安全サポート系センサーの評価試験の結果を報告するが、レーザーキャナの単体の仕様としては、Sick、北陽電機ともセンサーの基本性能は同等で、開発当初の

期待に十分に答えたと考える。

④ 3次元センシングの方式

今回の開発では、フォーク型物流支援ロボットの最大の走行速度を 175m/分と設定して開発した。将来これ以上の走行速度に対して満足する安全サポート系センサーを構築する場合、レーザースキャナの1スキャンの測定ポイント数（現状では 1024 点）とスキャン時間（現状では 25ms）をセンサーの性能向上のために高速化して行く必要がある。

ただし、25ms は短時間であるため、その間にレーザースキャナとコントローラが通信を完了させ、3次元の演算を完了させるためには、コントローラの通信速度の向上と計算速度の向上とが必要になるため、安全サポート系のハードウェアの根本的な性能向上が必要となる。現時点では、レーザースキャナと安全サポート系のコントローラの性能のバランスが良く取れていると考える。すなわち現在利用している標準的な FA コントローラで、25ms 周期で座標変換を完了することができた。

⑤ レーザースキャナの振動試験について

自動走行するフォーク型物流支援ロボットに3次元センサーを搭載するために、耐振動の性能が必要になる。今回採用したコントローラは車載用の製作された、耐振動性能のあるコントローラとした。中心の部品となるレーザースキャナについては、単体での評価のため、振動試験を実施した。

ここに振動試験の内容について、記載する。振動試験は次のような仕様で実施した。

(i) 振動試験機に位置同定コンポーネント一式を接続状態で設置する。

(ii) 通電状態とする。（+12V 給電）

(iii) 振動条件 JIS D1601 1種 B種 準拠

振幅幅：0.5mm(全振幅)、 加速度：45m/s² 、 周波数：67Hz

（共振点がある場合はその共振周波数を用いる。）

試験時間：上下 4h、左右 2h、前後 2h

(iv) 試験中、正常に動作することを確認する。

(v) 試験終了後に外観検査を行う。

図 5-3-9 に振動試験の状況を示す。振動試験の結果、「異常なし」と判定した。



図 5.3.5-3 レーザースキャナの振動試験

(2) Box PC の仕様

Box PC は、3次元障害物センサーのデータを収集して3次元の座標計算をし、障害物を検知したら、フォーク型物流支援ロボットの走行スピード、検知エリアと照らし合わせて、減速指令や停止指令を出力する。すなわち3次元障害物センサーのソフト処理をする中心の装置である。

OSには、組み込み装置に使用される Windows Embedded を使用し、Box PC のハードウェアは、振動や温度に対して耐環境性のある車載用の Box PC を採用している。

図 5.3.5-4 にその外観を示す。この装置は、内部のボードから国産で製作しており、汎用の PC に比較してハードウェアの信頼性が高い点を考慮して選定した。また、車載用として移動体に搭載して使用することを前提としており、電源も DC 電源を使用している、このために 24V バッテリー搭載の AGV と組み合わせて使用しやすい。



図 5.3.5-4 Box PC の外観

表 5.3.5-1 には、その仕様を示す。車載用のため、ハードディスクは内蔵せず、CF(Compact Flash)カードを使い、システム用の CF とアプリケーション用の CF を別に設定することができる。また、Windows 動作中に突然電源を遮断してもシステムにダメージを受けない構成になっている。電源 ON によりプログラムが自動で始動し、電源断によりシステムを終了することができ、PC 用画面がなくとも使いやすい仕様となっている。

表 5.3.5-1 Box PC の仕様

メーカー		InterFace
型式	車載 II モデル ETC-A913 http://www.interface.co.jp/sfc_etc/sfc_etc2.asp	
CPU	Intel Atom Processor Z520PT (FSB533MHz)	
CPU FAN	無し	
チップセット	Intel US15WPT	
メモリ	1GB	
カレンダー時計	電池搭載 BR-1/2AA(パナソニック) (10年程度保持)	
OS 対応OS	Windows Embedded Standard 2009 Interface Linux System	
動作確認OS	Android MeeGo INtime RedHawk	
ストレージ	起動デバイス	SSD 4GB: ※3
	補助デバイス1	CFスロット
	補助デバイス2	SDカードスロット×1
グラフィック	出力形式	アナログRGB
	コントローラ	チップセット内蔵
インタフェース	ディスプレイ	1ポート(15ピンD-subコネクタ), アナログRGB
	PS/2	1ポート(6ピン丸形ミニDINコネクタ) ※別売スプリッタケーブルによりキーボードとマウスが併用できます。
	LAN	2ポート(RJ-45コネクタ), Intel WG82574ITコントローラ 1000BASE-T, Wake On LAN対応
	USB	3ポート(Series A) USB2.0準拠
	RS-232C	2ポート(9ピンD-subコネクタ) 16550互換 通信速度: ~115.2kbps
	RS-485	1ポート(15ピンD-subコネクタ), TIA/EIA-485, 通信 速度: 8bps~2Mbps
	CAN	1ポート(9ピンD-subコネクタ) 高速CAN 通信速度: 60kbps~1Mbps
	HDLC	カスタム対応
	IEEE1394	無し
	外部入出力	4ピンコネクタ(e-CON) 電源ON/OFF×1点 RAS出力×1点
	デジタル入出力	16ピンフラットケーブルコネクタ 絶縁型デジタル入力×4点(割り込み機能付き)・リ レー接点(1a接点)出力×4点
	Express Card/54	無し
	光拡張コネクタ	無し
	スイッチ	電源スイッチ
	RAS	ウォッチドッグタイマ
ハードウェアモニタ		基板温度 CPU温度 電源電圧
RAS出力		出力形式: リレー1a接点出力×1 出力条件はソフトウェアで選択(ウォッチドッグタイマ 基板温度 CPU温度 電源電圧)
	筐体FAN	無し
電源	定格入力電圧	DC+7V~DC+27V
	最大定格電圧	DC+6V~DC+36V
	消費電力	DC+12V時: 13.6W(TYP) DC+24V時: 15.2W(TYP) ※DC+27V時
	外部機器供給電源容量	CFカードスロット: 3.3V 500mA, USB I/F: 5V 最大供給電流1A(1ポートあたり)
	セキュリティスロット	有り
外形寸法[mm] (突起部含まず)	211.2(W) × 151.6(D) × 48(H)	
設置方向	横置き・縦置き	
重量	1.5kg	
使用周囲温度/湿度	温度: -30°C~+80°C(始動時) -30°C~+70°C(連続動作時) 湿度: 10%~90%(非結露)	
保存周囲温度/湿度	温度: -40°C~+85°C 湿度: 10%~90%(非結露)	
耐ノイズ性	静電気→接触: ±6kV, 気中: ±8kV, 放射電磁界 10V/m, 伝導→10V/m, FTB→信号: 1kV, 電源: 2kV	
耐振動性	耐振動性: ~5.0G 振動周波数 10Hz~150Hz 変位振幅 0.35mm(片振幅) 加速度振幅 50m/s ² (5G) 時間 40min	
耐衝撃性	耐衝撃性: ~100G 作用時間6ms(非動作時)	

(3) サーボモーター・アンプの仕様

サーボモーターは、軽量のレーザースキャナを揺動させるために使用する。そのために小型で軽量のサーボモーターから選定した。小型であればあるほど、3次元障害物センサー全体が小型軽量化されるためにメリットがある。

国産のモーターに最適なモーターが見つからなかったため、海外製の MAXON の 250W と 150W のモーターを採用した。250W のモーターは、レーザースキャナを X 軸周りに揺動させて、3次元の Z 軸（縦方向）の計測をするために使用する。150W モーターは試作の意味で Z 軸周りの揺動をするように構成した。ただし、開発の段階で Z 軸周りの揺動はなくともレーザースキャナ自体のスキャン速度でフォーク型物流支援ロボットの走行速度に対応できることがわかったため、最終段階では、Z 軸周りの回転は使用していない。



図 5.3.5-5 サーボモーターの外観

サーボアンプは、Box PC からの高速な制御やエンコーダの信号を Box PC に高速で送信できる性能が要求される。このため、サーボアンプ自体の通信性能が要求される。図 5.3.5-6 に示すサーボアンプは MAXON のモーターとセットで使用するものであるが、そのような通信性能の要求を満足するものである。



図 5.3.5-6 サーボアンプの外観

表 5.3.5-2 サーボモーターの仕様

項目		仕様	
モーター出力		250Wモーター	150Wモーター
データ (公称電圧時)	公称電圧	18 V	12 V
	無負荷回転数	3420 rpm	7500 rpm
	無負荷電流	721 mA	250 mA
	最大連続トルク時の回転数	3150 rpm	6370 rpm
	最大連続トルク	442 mNm	94.9 mNm
	最大連続電流	10 A	6 A
	停動トルク	14000 mNm	1680 mNm
	起動電流	296 A	102 A
	最大効率	80%	88%
モータ固有値	端子間抵抗	0.0609 Ω	0.117 Ω
	端子間インダクタンス	0.023 mH	0.025 mH
	トルク定数	47.5 mNm/A	16.4 mNm/A
	回転数定数	201 rpm/V	581 rpm/V
	回転数/トルク勾配	0.258 rpm/mNm	4.15 rpm/mNm
	機械的時定数	3.74 ms	6.03 ms
	ロータ慣性モーメント	1380 gcm ²	140 gcm ²
熱特性	熱抵抗(ハウジング/周囲間)	1.3 K/W	4.65 K/W
	熱抵抗(巻線/ハウジング間)	1.85 K/W	1.93 K/W
	巻線熱時定数	127 s	42.3 s
	モータ熱時定数	960 s	736 s
	使用温度範囲	-30...+100 ° C	-30...+100 ° C
	最高巻線許容温度	+125 ° C	+155 ° C
機械的特性	ベアリング・タイプ	ボールベアリング	ボールベアリング
	最大許容回転数	5500 rpm	12000 rpm
	スラストがた	0 - 0.1 mm	0.05 - 0.15 mm
	ラジアルがた	0.03 mm	0.025 mm
	最大スラスト荷重(ダイナミック)	70 N	5.6 N
	最大挿入力(スタティック)	420 N	110 N
	(スタティック、シャフト支持)	12000 N	1200 N
	最大ラジアル荷重	350 N、フランジから 15 mm	28 N、フランジから 5 mm
その他の仕様	永久磁石磁極ペア数		2
	コミュテータ・セグメント数		26
	回転方向	時計回り(CW)	時計回り(CW)
	オートクレーブ・サイクル数		0
	質量	2100 g	480 g

表 5-3-7 と表 5-3-8 にサーボモーターとサーボアンプの仕様をまとめた。モーターは小型で高速回転が可能なタイプである。サーボアンプは、USB 通信が高速タイプのバージョン 2.0 の規格で動作するとともにさらなる同期制御用の EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology)通信も可能である。今回は Box PC との通信では、USB 通信を主に利用した。

表 5.3.5-3 サーボアンプの仕様

項目	仕様
電源電圧	VCC 11…70 VDC
最小入力電圧	VCC 10 VDC
最大入力電圧	VCC 75 VDC
最大出力電圧	0.9・VCC
最大出力電流 I _{max} (<1 sec)	25 A
最大連続電流 I _{cont}	10 A
スイッチング周波数	50 kHz
最大効率	94%
PI 電流制御・サンプリングレート	10 kHz
PI 回転数制御・サンプリングレート	1 kHz
PID 位置制御・サンプリングレート	1 kHz
最大回転数 (1 磁極ペアモータ、正弦波整流時)	25 000 rpm
最大回転数 (1 磁極ペアモータ、矩形波整流時)	100 000 rpm
ホールセンサ信号	Hall sensor 1, Hall sensor 2, Hall sensor 3
エンコーダ信号	A, A \bar{V} , B, B \bar{V} , I, I \bar{V} (max. 5 MHz)
内蔵ラインレシーバEIA	RS422 Standard
デジタル入力1 (“汎用”)	フォトカプラ \pm 9…24 VDC
デジタル入力2 (“汎用”)	フォトカプラ \pm 9…24 VDC
デジタル入力3 (“汎用”)	フォトカプラ \pm 9…24 VDC
デジタル入力4 (“原点スイッチ”)	フォトカプラ \pm 9…24 VDC
デジタル入力5 (“正リミット・スイッチ”)	フォトカプラ \pm 9…24 VDC
デジタル入力6 (“負リミット・スイッチ”)	フォトカプラ \pm 9…24 VDC
デジタル入力7	(“High Speed Command”)
内蔵ラインレシーバEIA	RS422 Standard
又は (“Sin/Cos 入力”), 分解能	12-bit, \pm 1.8 V(differential)
デジタル入力8	(“High Speed Command”)
内蔵ラインレシーバEIA	RS422 Standard
又は (“Sin/Cos 入力”), 分解能	12-bit, \pm 1.8 V(differential)
デジタル入力9	RS422 Standard
デジタル入力10	RS422 Standard
デジタル入力11	フォトカプラ+9…+24 VDC
アナログ入力1 分解能	12-bit 12-bit \pm 10 V (differential)
アナログ入力2 分解能	12-bit \pm 10 V (differential)
デジタル出力1 (“汎用”),	フォトカプラmax. 24 VDC
デジタル出力2 (“汎用”)	フォトカプラmax. 24 VDC
デジタル出力3 (“汎用”)	フォトカプラmax. 24 VDC
デジタル出力4 (“ブレーキ”),	フォトカプラmax. 24 VDC
デジタル出力5	RS422 Standard
アナログ出力	周波数20 kHz, 分解能 12-bit 0…10 V (I _L = <1 mA)
エンコーダ電源	+5 VDC (I _L <100 mA)
ホールセンサ電源	+5 VDC (I _L <30 mA)
補助電源	+5 VDC (I _L <150 mA)
インターフェイス	USB 2.0(full speed)
Data+, Data-	max.12 Mbit/s
EtherCAT (2 x RJ45)	100 Mbit/s (100 Base Tx)
質量	約 442 g
寸法 (L x W x H)	150 x 120 x 29 mm
温度範囲(使用時/ 保存時)	-10…+45° C / -40…+85° C
湿度範囲	20…80% (結露しないこと)

5.3.6 安全サポート系のソフトウェア

(1) 安全サポート系ソフトウェアの概要

図 5.3.6-1 に安全サポート系のソフトウェア構成について示す。

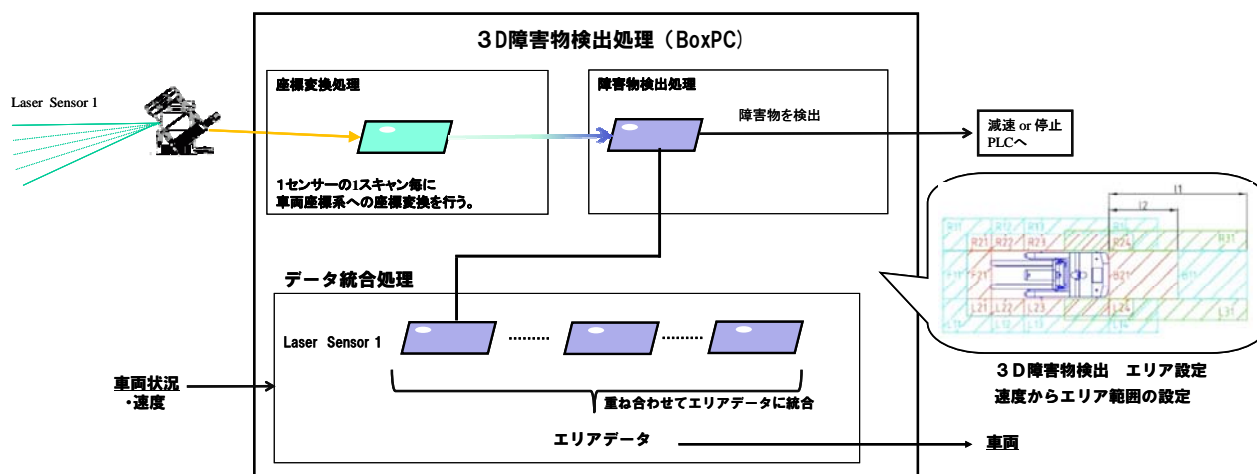


図 5.3.6-1 安全サポート系のソフトウェア構成

安全サポート系のソフトウェアは、3D 障害物検出装置の中の Box PC（組み込み用のコンピュータ）の中で動作する。また、安全サポート系全体の中での Box PC の位置付けは 5.3.4 節の図 5.3.6-1 の安全サポート系の構成図で示した。

(2) 安全サポート系ソフトウェアの機能

3次元障害物検出装置は、次の働きをする。

①座標変換

レーザースキャナから取得する距離データを座標変換して、3D データとする。

座標変換のソフトウェアは、レーザースキャナと通信して得られる、1 スキャンで 1,024 ポイントの距離の計測データをレーザースキャナの揺動によってなす角度を使用して、座標変換する。この処理は、レーザースキャナの 25m のスキャンタイム以内に実施する必要がある。

このために、座標変換の高速化を考慮したソフトウェアとしている。座標変換を実施するためには、レーザースキャナの水平面となす角度をリアルタイムで取得する必要がある。このために、揺動機構のコントローラと Box PC が通信し、揺動の角度を常に取得する構成としている。本機構では、揺動機構コントローラにサーボモーター用のアンプを使用し、サーボアンプから信号を取得できるようにしている。

②フォーク型物流支援ロボットの走行状況取得

走行状況をフォーク型物流支援ロボット走行制御装置から取得し、障害物を検出するエリアを切り替える。

フォーク型物流支援ロボットの走行状況（走行速度）はイーサネットを利用して、フォーク型物流支援ロボットの走行制御装置から通信で得る。走行速度により、障害物を検出する範囲をフォーク型物流支援ロボットの仕様に従って変化させ、そのエリアの長さを伸ばしたり、縮めたりしている。

また、フォーク型物流支援ロボットの速度により、障害物の検出範囲の設定値は、フォーク型ロボット走行制御装置からイーサネット経由で初期設定時に取得する。

③障害物の検出

障害物を検出するために、Box PC は 3 次元の計測データから物体のデータを認識し、走行経路上の立方体の中に物体が存在するかどうかを検出する。検出した結果、走行通路上のフォーク型物流支援ロボットの近くに障害物がある場合、Box PC からフォーク型物流支援ロボットの制御装置に信号を送信する。

減速する範囲に障害物が存在する場合は、イーサネット通信で Box PC からフォーク型物流支援ロボットの制御装置に減速指令データを送信する。

停止が必要な範囲に障害物が存在する場合は、Box PC から I/O 信号（入出力信号）で停止指令を出力する。

④揺動機構を制御する。

揺動機構の動作開始と終了、および、揺動機構の揺動速度を Box PC から揺動機構コントローラを経由してサーボアンプに送信して制御する。また、揺動の角度データをサーボアンプから入手する。これらの制御は走行中常時行い、走行速度により揺動速度を変化させることの可能である。すなわち、フォーク型物流支援ロボットが低速走行時には、揺動速度を低速にすると、周囲の 3 次元の形状データを細かい精度で収集するようなアプリケーションを作ることも可能である。

以上のような安全サポート系のソフトウェアにより、図 5-3-14 のようなフォーク型物流支援ロボットのエリア設定に対して、減速の指令や停止の信号を出力することができる。

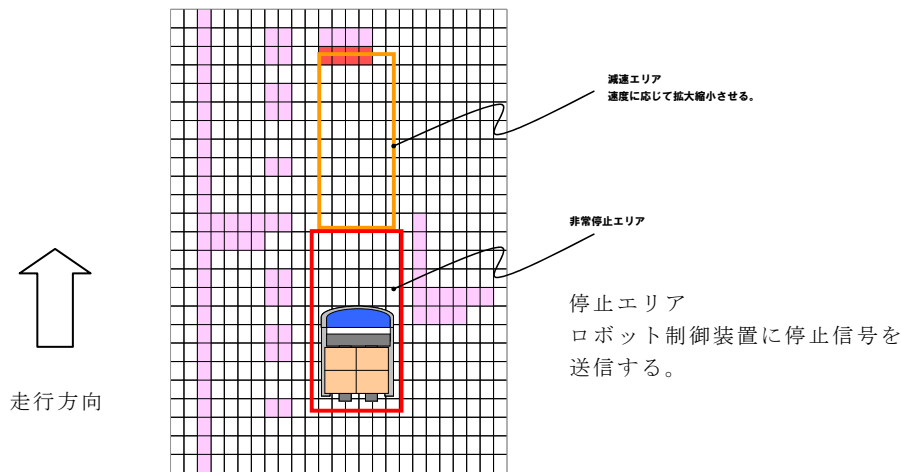


図 5.3.6-2 安全サポート系のエリア設定

5.3.7 安全サポート系のインターフェース

(1) 通信の方式

5.3.4 節の図 5-3-2 に安全サポート系の構成について示した。安全サポート系の Box PC は、フォーク型物流支援ロボット制御装置とイーサネットと I/O を利用して通信する。本節ではその仕様について述べる。

安全サポート系とフォーク型物流支援ロボット間の通信時のコマンドの種類を表 5-3-9 に示す。これらのコマンドでフォーク型物流支援ロボットのコントローラから 3次元障害物センサーに対して、動作の指令を出すことができる。走行型物流支援ロボット全体の状態の把握、起動、停止のタイミングの生成などフォーク型物流支援ロボットのシステム全体のモードの設定は、フォーク型物流支援ロボットが実施し、3次元障害物センサーはその指令で動作をするようにする。

初期化コマンドをフォーク型物流支援ロボットから 3次元障害物センサーに送信すると揺動装置の機構部の初期化、原点合わせを 3次元障害物センサーの Box PC が実施する。

計測開始コマンドをフォーク型物流支援ロボットから 3次元障害物センサーに送信すると、3次元の計測を開始する。この動作によって、計測がロボットの制御の元で正常に実施されているかどうか、コマンド、レスポンスの形で確認することが可能となる。

フォーク型物流支援ロボットが走行動作を終了する際に、3次元障害物センサーに計測終了を指令することにより、システムを停止する。

シャットダウン指令は、PC や通信に何らかの異常が発生し、初期状態からリスタートしたい場合に使用する。PC と制御装置が複数台で全体の制御システムを形成する時にはこのようなりカバリーの指令による動作が必要になる場合がある。

3次元障害物センサーの動作パラメータをパラメータ設定コマンドでフォーク型物流支援ロボットからも実施できる。3次元障害物センサー単体の機能によっても動作パラメータ

を設定することは可能であるが、システムの実運用段階になった時には、設定が常に一か所からできることが望ましい。

表 5.3.7-1 通信コマンド一覧

No	送信メッセージ タイトル	概要	コマンド コード	送信メッセージ	応答メッセージ
				データ部	データ部
1	初期化	振動装置を初期位置に移動させ、 角度の原点調整を実行する。	‘P’	時間 (*1)	・時間 (*1) ・ステータス ・結果
2	計画開始	振動装置待機状態にて本コマンド 受付時に、計画動作を開始し、割 定状態に移す。	‘MS’	・時間 (*1) ・動作モード	・時間 (*2) ・ステータス ・測定データ
3	計画終了	割定状態にて本コマンド受付時に、 計画動作を停止し、振動装置待機 状態に移す。	‘ME’	時間 (*1)	・時間 (*1) ・ステータス
4	シャットダウン	装置の終了、再点動の指示	‘SD’	動作モード	
5	状態通知	振動装置の状態通知の指示	‘ST’	時間 (*1)	・時間 (*1) ・ステータス ・バージョン情報
6	パラメータ設定	振動装置の各種パラメータ設定	‘PS’	・時間 (*1) ・設定パラメータ	・時間 (*1) ・設定されたパラメータ
7	パラメータ輸出	振動装置のパラメータ輸出	‘PG’	・時間 (*1)	・時間 (*1) ・各種パラメータ
8	位置推定データ	車両制御装置で推定した位置 ・姿勢の通知用。	‘PE’	・時間 (*2) ・位置推定データ (x, y, θ)	—
9	時刻同期	車両制御装置とBOXPCとの 時刻を同期させる。	‘CS’	時刻 (*1)	時間 (*1)
10	PLC制御指令	PLCに対する制御指令	‘PC’	—	・時間 (*1) ・制御指示内容
11	異常通知	BOXPCにて異常が生じた場合に通 知する	‘EM’	—	・時間 (*1) ・ステータス

パラメータ読み出しコマンドは、パラメータ設定コマンドと対をなすものである。

位置推定データ通知用のコマンドは、3次元障害物センサーの初期の位置合わせや、特殊な走行環境において、フォーク型物流支援ロボットが位置データをより詳しく認識している場合が生じ、3次元障害物センサーにその情報がない場合に使用する。この位置推定データを受信後に、3次元障害物センサーは、そのデータを元にして内部の地図データと現在地をマッチングさせる。マッチング後は、3次元障害物センサー側が位置を推定し、フォーク型物流支援ロボットに位置情報を提供する側になる。

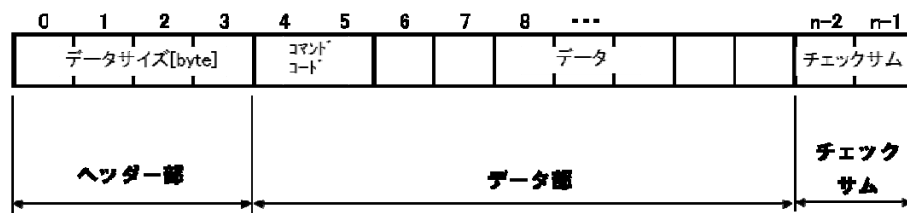
複数のコンピュータシステムで動作の同期を取るために、時刻データを合わせる事が重要である。このため、より人間に近い側で操作されるフォーク型物流支援ロボットから3次元障害物センサー側へ時刻データを送信して、時刻合わせをする。コンピュータ間の時刻が正確にあっていると、動作ログを解析する場合に、フォーク型物流支援ロボットがどのような走行を行った時に、3次元障害物センサーの動作はどうだったのか、2つのCPUの関連の動作を調べることが可能になる。

異常通知コマンドは、Box PC側で異常があった場合にその状態を通知するものである。

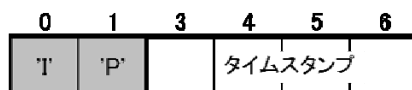
これにより、3次元障害物センサーに異常が発生した場合に、ロボットを操作するオペレータにその状態を表示することが可能となる。

(2) 通信伝文の送受信

以上のようなコマンドを通信するためのデータ形式の構造を図 5.3.7-3 に示す。この形式は、コンピュータ間のデータ通信などに良く使われる形式である。



(1) データ構造



(2) 時刻設定コマンド

図 5.3.7-3 通信伝文の形式

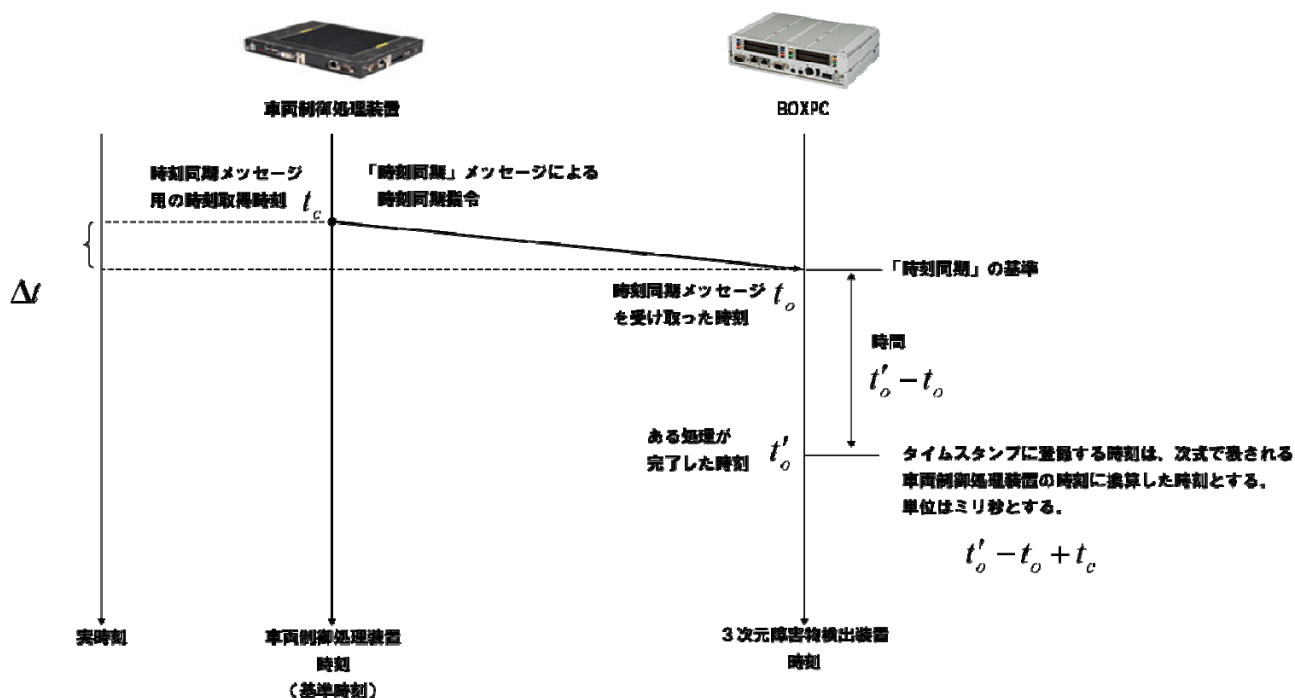


図 5.3.7-4 通信の手順

フォーク型物流支援ロボットと3次元障害物センサー間での通信は、コマンド・レスポンス型の通信を行う。図 5-3-16 はその通信の動作を示す。フォーク型物流支援ロボットがコマンドを送信すると、その通信時間がかかり、通信時間 Δt 後に、3次元障害物センサーの Box PC にコマンドが届く。そのコマンドを受け取った後、 $t'0 - t0$ 時間後に Box PC が処理を実行して、そのログをタイムスタンプ（いつどんな処理を実行したかを記録する時の時刻）と共に記録する。

通信により、Box PC がどのように状態遷移するかを図 5.3.7-5 に示す。Box PC は起動した後に、フォーク型物流支援ロボットの初期化コマンドを受け取った後、初期化動作を実施して揺動装置を原点の位置へ移動させる。初期化完了後に待機状態で停止し、フォーク型物流支援ロボットの計測開始コマンドを受け取った後、計測を開始する。計測を開始すると揺動装置が動作し、障害物の検出を実行し、3D 形状の距離データを連続して出力する。この状態が動作中の状態になる。

安全サポート系に異常が発生した場合は、いずれの状態においても、異常の種類を特定してその原因をフォーク型物流支援ロボット側へ送信する。フォーク型物流支援ロボットは、安全サポート系センサーが異常の場合は、動作停止状態（サーボがオフで走行するパワーが出力されない状態ではあるが、知能部分である制御ソフトが動作している状態）になる。

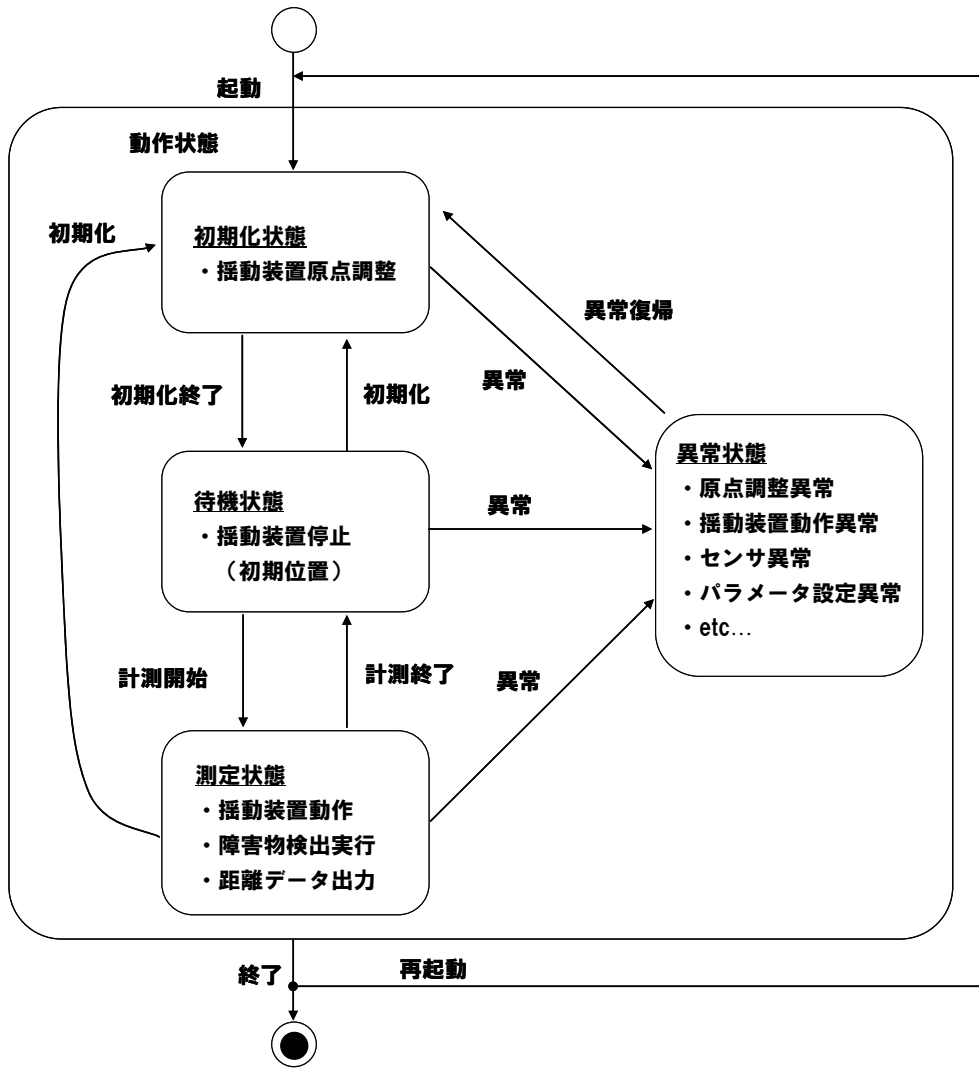


図 5.3.7-5 安全サポート系とフォーク型ロボット間の通信の方式

5.3.8 安全サポート系センサーのハードウェアの改良

安全サポート系センサーのハードウェア改良について以下に説明する。

(1) 安全サポート系センサーハードウェア改良の経緯

これまで述べたように、2リンク揺動機構を採用した3次元障害物センサーを開発することにより、安全サポート系センサーとしてフォーク型物流支援ロボットから要求される3次元障害物センサーを提供した。安全サポート系センサーの開発は2リンク揺動機構により、当初に目的とした性能を達成し、フォーク型物流支援ロボットの安全サポート系として動作した。一方、3次元障害物センサーの実用化、事業化を進めるためにコストを低減するとともに、3次元計測の速度を向上させ、フォーク型物流支援ロボットが高速で走行中にも高精度な障害物検出を提供する課題があった。このために、1個のモーターとリンク機構でレーザースキャナを揺動させて高速に3次元計測するセンサーを開発した。

2リンク揺動機構の場合は、制御や座標計算がしやすいという特長があるが、揺動にストロークエンドで動作を折り返す運動をするため、回転動作の高速化には制約がある、また、その機構系の寸法もベアリング構造を両持ちにするため不利な面がある。

(2) 安全サポート系センサーハードウェア改良の目的

安全サポート系センサーハードウェア改良の経緯で述べたように3次元障害物センサーには次の課題があった。

- ① 小型の物流支援ロボットに採用できる小型の安全サポート系センサーを提供する。
- ② 3次元の計測の高速化を図るために、安全サポート系センサーの3次元の動作を連続回転動作とするとともに、制御の動作時間を高速化する。

以上の課題に対応するために、1リンク揺動機構の構造をした3次元障害物センサーの開発を行った。1リンク揺動機構はすでに他の研究機関の研究、開発においても採用されている構造である。本開発では、1リンク揺動機構の構造を高速化する構造とするとともに、物流の現場環境で長期間の使用に耐える耐久性を持つ構造を開発する。

(3) 安全サポート系センサーハードウェア開発の仕様

表 5.3.8-1 に1リンク揺動機構を使った3次元センサーの開発仕様を示す。

寸法は、2リンク揺動機構より、体積比で3.5分の1以下を目指し、測定周期は、200msとして、2リンク機構より、2.5倍高速にする機構とする。また、リンクを支持するために使用するベアリングを従来の1リンク機構で使用されていたすべり軸受けから、ボールベアリングに変更して、物流の現場環境での長寿命化を図った。

さらに、2リンク機構と比べて駆動機構のモーターの数を1個に減らし、コストの低減を図った。

表 5.3.8-1 1リンク揺動機構 3次元センサー開発仕様

No.	項目	方式
1	センサ方式	1リンク揺動機構
2	外観	
4	寸法	H263mm × W102mm × D250mm 従来比の体積:3.5分の1以下
5	用途	フォーク型物流ロボット用3次元センサ
6	測定範囲	H2.0m × W1.2m × D20m
7	測定精度	100mm
8	測定周期 (水平スキャン)	14400° /sec (25msec/スキャン)
9	測定周期 (3次元)	200msec/測定(1秒間に5回測定) 従来比:2.5倍の速度
10	フォーク型 ロボット走行速度	最大 175m/分以上
11	停止指令出力位置	フォーク型ロボットより指定可能とする
12	移動体への 取り付け	精度:移動体で確保 電源:バッテリー

(4) 安全サポート系センサーハードウェアの構造

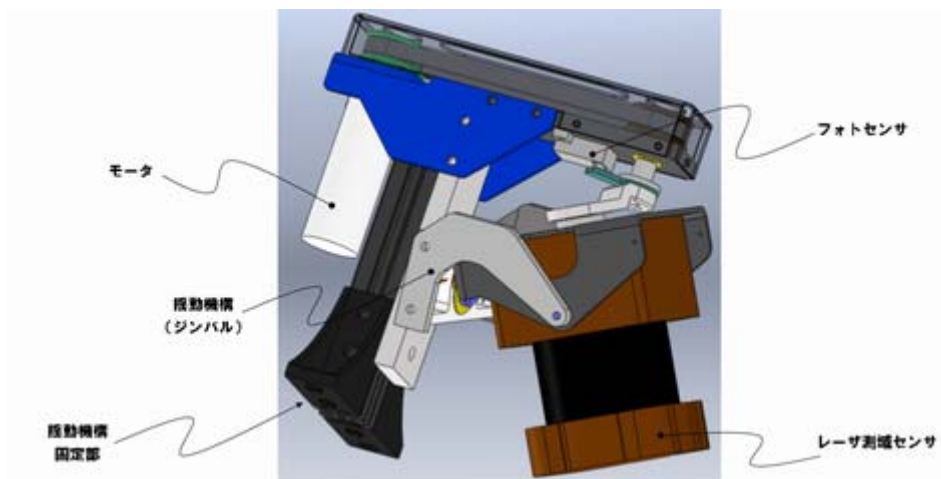


図 5.3.8-1 1リンク揺動機構 3次元センサーの構造

図 5.3.8-1 に1リンク揺動機構の構造を示す。1個のモーターでジンバル構造の揺動機構を回転させることにより、レーザースキャナのスキャン面が上下に揺動する。これにより、3次元のレーザー測長が可能になる。

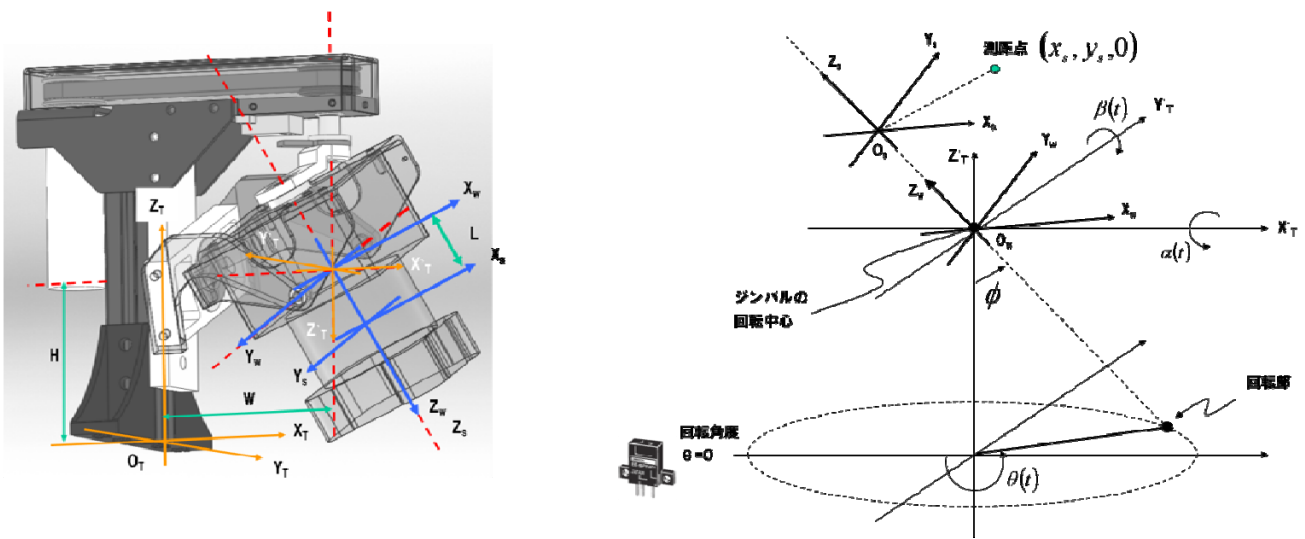


図 5.3.8-2 1 リンク揺動機構 3次元センサーの座標

(5) 安全サポート系センサー座標系

図 5.3.8-2 に 1 リンク揺動機構の回転と揺動角の説明を示す。モーターの回転により、ジンバルの中心を回転の中心としてレーザースキャナを回転させる。図で回転部が θ だけ回転すると、 ϕ の角度だけ傾いたレーザースキャナの中心軸の回りにレーザースキャナが回転する。これにより、 $\pm\phi$ の角度だけ、レーザースキャナのスキャン面の角度が揺動することになる。この間、モーターの回転は一定速で折り返しの回転により停止時間がないため、レーザースキャナを高速で揺動させることが可能になる。本開発の 1 リンク揺動機構では、 $\pm\phi$ の角度を 60° とするように、機構部品を設計した。

(6) 揺動機構とレーザースキャナの時刻同期

1 リンク揺動機構では、時間とともに、回転角度 $\theta(t)$ が変化する。これと同期して、レーザースキャナによる測長が実施される。このため、時刻 t における回転角度 θ とレーザースキャナのスキャンの周期の開始時刻を両方とも同時に検出することが必要になる。回転角度 θ とレーザースキャナの測定長のデータは、別々の測定ルートから 3次元障害物センサーの Box PC に入力されて来る。これらのデータを時刻で同期データを使って同期する精度が 3次元の測定精度に非常に重要になる。

図 5.3.8-3 にこの時刻同期によるデータの取り扱いの方式を示す。レーザースキャナは 25ms 周期で 1 回転し、1 回転のタイミングを示すために 1ms 幅の同期信号を出力する。この同期信号により、レーザースキャナのスキャンの初期位置のタイミングが分かる。一方、揺動機構では、揺動機構が 1 回転するごとに機構内に取り付けたフォトセンサーが信号を出力して、揺動機構の初期位置を伝える。これらの 2 つの信号により、レーザースキャナと揺動機構の 3 次元的位置と姿勢が特定される。これによりレーザースキャナの測定長が 3 次

元上のどの方向の距離であるかが判定される。この距離データを座標変換計算することにより、3次元の形状データを取得することが可能となる。

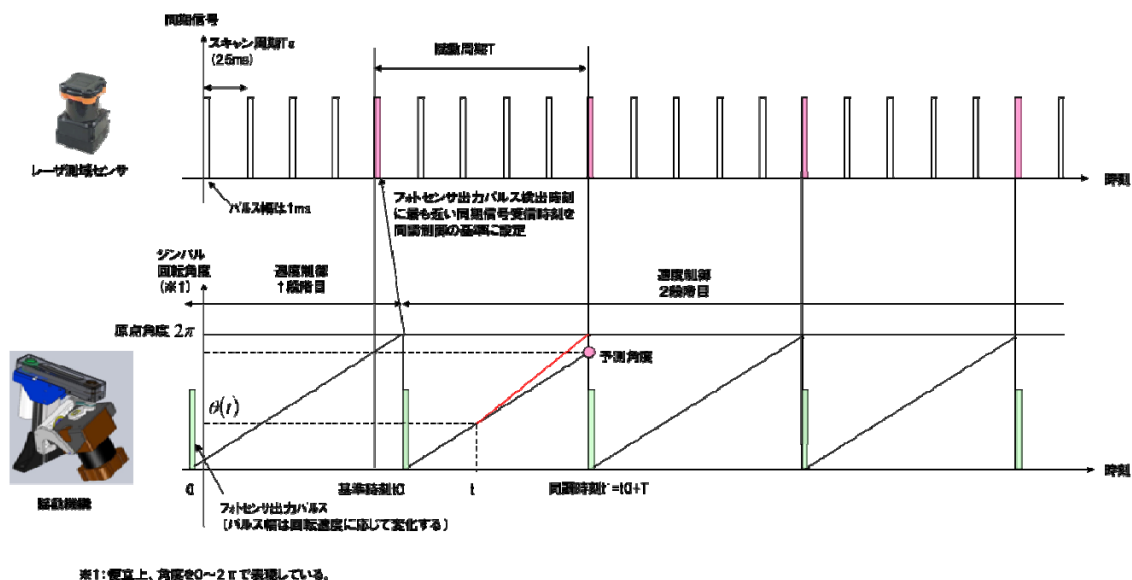


図 5.3.8-3 1リンク揺動機構 同期タイミング

図 5.3.8-4 は、レーザースキャナ単体の仕様書からの抜粋である。レーザースキャナは、連続的に回転しながら、スキャン光の測長データを出力する。360°の1回転中、270°のエリア内で測長データを出力し、残りの90°は測長しないエリアである。レーザースキャナが出力する同期信号により、レーザースキャナが初期位置にあることが分かる。同期信号は25msに1回出力される。また、25msに270°の計測を実施した結果、1,024ポイントの測長データを出力する。

(1) 同期出力 UTM-30LX

スキニングに同期して、1 スキャンに 1 パルス=約 1msec の信号を出力する、出力タイミングはスキニングに対して、下図タイミングで出力されています。

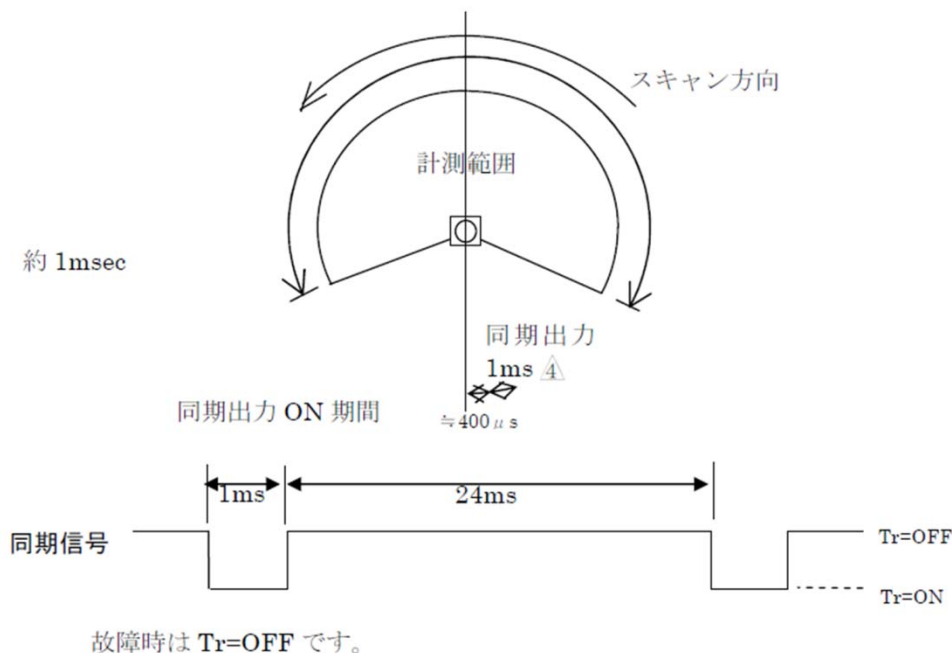


図 5.3.8-4 レーザースキャナ同期出力の仕様

図 5.3.8-5 にこの 2 個の同期信号の時刻の測定が精度良く取れない場合の 3 次元スキャンデータのイメージ画を示す。2 個の同期信号の時刻が正確に測定されると、3 次元の計測精度が向上し、3 次元画像を取得すると、ピントが合って、クリアなデータになる。一方 2 個の同期信号の時刻測定の精度が悪い場合は、ピントが合わない画像になる。図 5.3.8-5 は左側にピントの合った画像、右側にピントの合わない画像のイメージ画を示した。



同期タイミングずれがない場合

同期タイミングのずれがある場合

図 5.3.8-5 同期タイミングによる 3 次元データのブレ

(7) システム構成

図 5.3.8-6 に 1 リンク揺動機構の制御ユニットのシステム構成を示すブロック図を示す。フォーク型物流支援ロボットの制御装置から安全サポート系の Box PC に動作指令を送信するのは、2 リンク揺動機構の場合と同じである。Box PC から制御基板に動作指令を送信する。制御基板は、レーザースキャナの同期信号、レーザースキャナの測定データ、揺動機

構のフォトセンサーの信号（揺動機構の同期信号）を取り込み、これらのデータの同期を取る。制御基板から揺動機構のモーターを回転するサーボアンプに動作指令を送信する。サーボアンプからは、モーターの角度、状態データが戻り、そのデータを Box PC へと送信する。Box PC は 3 次元の座標変換の計算を実施して、フォーク型物流支援ロボットに必要なデータを送信する。

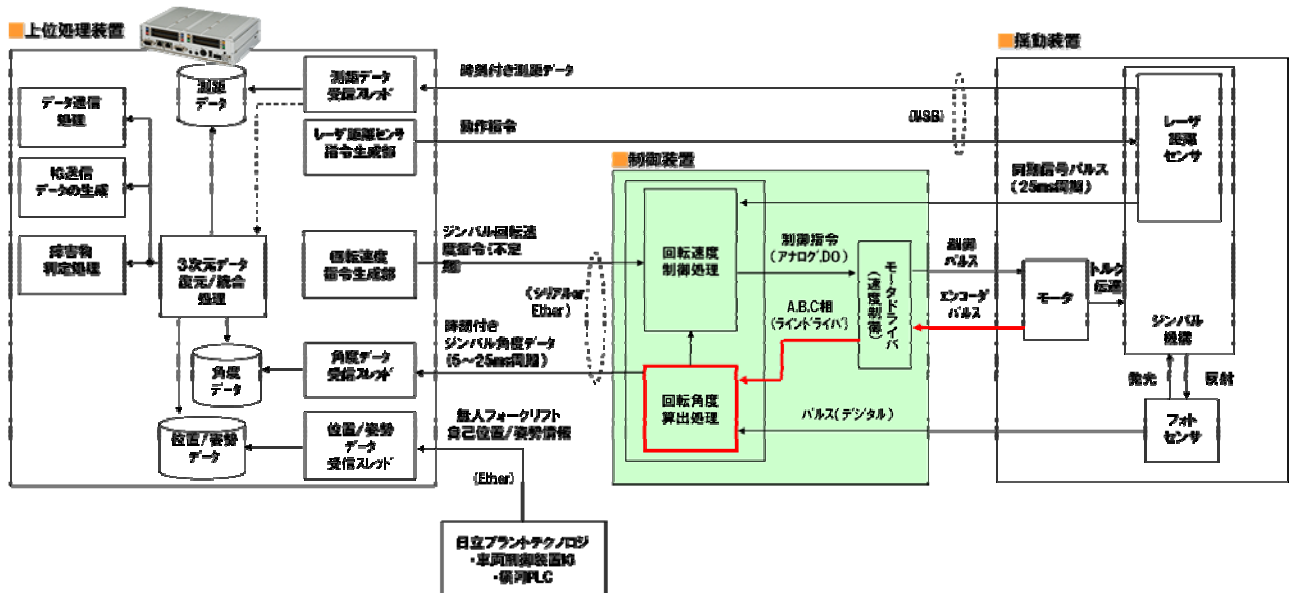


図 5.3.8-6 レーザースキャナ同期出力の仕様

図 5.3.8-7 は、1 リンク揺動機構に使用されるコンピュータの間のデータの流れを示す。一番左側がフォーク型物流支援ロボットの制御コントローラ、次に、3次元障害物センサーの Box PC、その次に、今回時刻同期を取るために利用した制御基板、最後にサーボアンプがある。

右から左へのデータの流れでは、サーボアンプの角度、状態データが制御基板により、角度、状態通知のデータになり、3次元障害物センサーの Box PC がフォーク型物流支援ロボットの制御コントローラへ最終のデータを送信する。

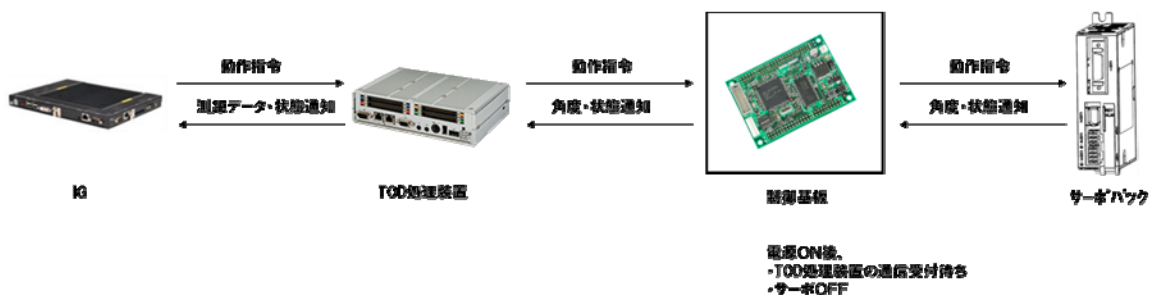


図 5.3.8-7 1 リンク揺動機構 制御信号の流れ

(8) レーザースキャナの仕様

レーザースキャナは、2リンク揺動機構と1リンク揺動機構で同じ型式のレーザースキャナを使用した。そのため、ここではその仕様についての記載を省略する。

(9) Box PC の仕様

Box PC は、2リンク揺動機構と1リンク揺動機構で同じ型式の Box PC を使用した。そのため、ここではその仕様についての記載を省略する。

(10) サーボモーター・アンプの仕様

サーボモーターには、次の要求事項がある。これらの要求事項から、サーボモーターを選定した。

- ①小型軽量であること。レーザースキャナを揺動させるために必要で十分出力があればよい。
- ②通信によりモーターのエンコーダのデータを Box PC で高速に取得できること。
- ③DC 電源駆動できること。これにより自動走行に使用するバッテリーと整合する。



図 5.3.8-8 サーボモーターの外観

図 5.3.8-9 サーボアンプの外観

表 5.3.8-2 にサーボモーターの仕様を示す。DC24V で駆動でき、24V バッテリー使用の AGV ではロボットのバッテリーで電源を供給できる。20W の小型モーターがシリーズ中にあり、軽量のレーザースキャナを揺動させるのに十分な出力がある。このモーターは、3次元レーザースキャナの上部に取り付けるため、このモーターがセンサー本体の外形寸法に影響する。このため、揺動に余裕のあり過ぎるモーター出力とならず、最適な設計が可能となった。

表 5.3.8-3 にサーボアンプの仕様を示す。13ビットのインクリメンタルシリアルエンコーダの出力を通信で Box PC が取得でき、このデータを座標計算に使用する。このアンプは最大で 50W まで出力できるため、20W 出力のモーターの制御に使用する。

表 5.3.8-2 サーボモーターの仕様

項目		仕様
時間定格		連続
振動階級		V15
絶縁抵抗		DC500 V、10 MΩ 以上
周囲温度		0~40°C
励磁方式		永久磁石形
取付け方式		フランジ形
耐熱クラス		B
絶縁耐圧		AC1000 V 1分間
保護方式		全閉・自冷
周囲湿度		20~80%(結露しないこと)
連結方式		直結
電源電圧		DC 24 V
サーボモータ形式 SGMMJ-		A2C
定格出力	W	20
定格トルク*	N・m	0.0638
瞬時最大トルク	N・m	0.191
定格電流	A(rms)	2
瞬時最大電流	A(rms)	5.7
定格回転速度	min ⁻¹	3000
最高回転速度	min ⁻¹	5000
トルク定数	N・m/A(rms)	0.0358
回転子慣性モーメント	× 10 ⁻⁴ kg・m ²	0.00548
インクリメンタル(絶対値)		-0.00466
定格パワーレート	kW/s	7.41
定格角加速度	rad/s ²	116000

表 5.3.8-3 サーボアンプの仕様

項目	仕様
入力電源	DC24 V \pm 15%
制御方式	MOSFET-PWM方式
フィードバック	13 ビット インクリメンタルシリアルエンコーダ
使用/周囲温度	0 \sim 40 $^{\circ}$ C(盤内使用も含む)
保存温度	-20 \sim +85 $^{\circ}$ C
使用保存湿度	90%RH以下(結露なきこと)
耐振動/耐衝撃	周波数 : 10 \sim 55 Hz 振幅 : 0.075 mm
電源電圧	DC24 V
最大適用モータ容量 W	50
定格/最高回転速度	SGMMJ形3000/5000 min $^{-1}$
適用エンコーダ	インクリメンタルエンコーダ(13 ビット)
許容負荷慣性モーメント	各回転子慣性モーメントの30 倍以内 ^{*3}
負荷変動率	0 \sim 100% : 0.01%以下(定格回転速度で運転した場合)
電圧変動率	0%
温度変動率	25 \pm 25 $^{\circ}$ C : \pm 0.1%以下(定格回転速度で運転した場合)
周波数特性	400 Hz($J_L=J_M$ の場合)
トルク制御(再現性)	\pm 2.0%
加減速時間設定	0 \sim 10 s
速度定格指令電圧	DC \pm 6 V(プラス指令でモータ正転)
	可変設定範囲 : DC \pm 2 \sim \pm 10 V \pm 12 Vmax
速度入力インピーダンス	約14 k Ω
トルク定格指令電圧	DC \pm 3 V(プラス指令でモータ正転)
	可変設定範囲 : DC \pm 1 \sim \pm 10 V \pm 12 Vmax
トルク入力インピーダンス	約14 k Ω
トルク回路時定数	約47 μ s
位置出力形態	A相、B相、C相ラインドライバ出力
	S相 : ラインドライバ出力(絶対値エンコーダ使用時のみ)
位置分周比	任意分周

(11) 開発した1リンク揺動機構



図 5.3.8-10 1リンク揺動機構 機構部

図 5.3.8-9 は、開発した 1 リンク揺動機構の機構部である。1 個のモーターの回転を使って、レーザースキャナを 60° 揺動させることが可能になった。

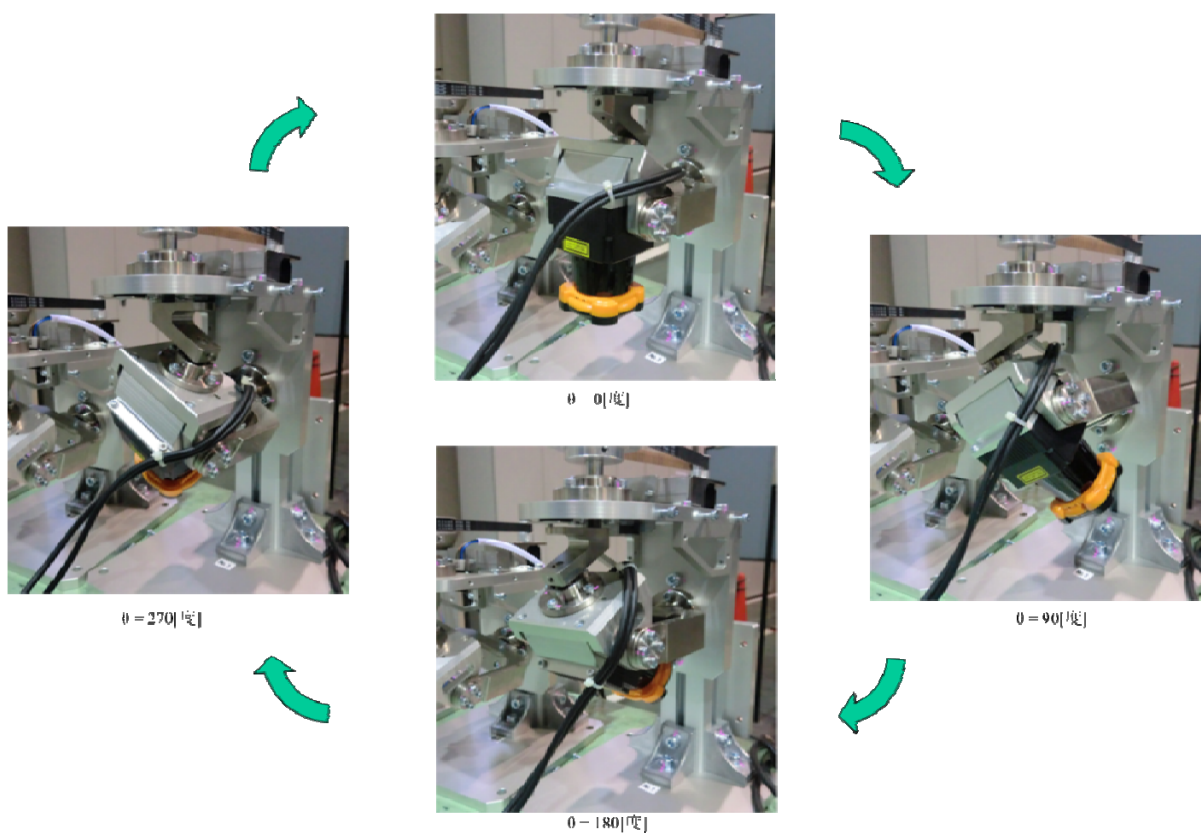


図 5.3.8-11 1リンク揺動機構 機構部の動作

図 5.3.8-11 に 1 リンク揺動機構の機構部の動作を動画で表示している画面である。揺動機構のモーターは一定速度で一定方向に回転するため、2 リンク揺動機構のように動作の折り返しがなく、高速で回転することが可能になった。

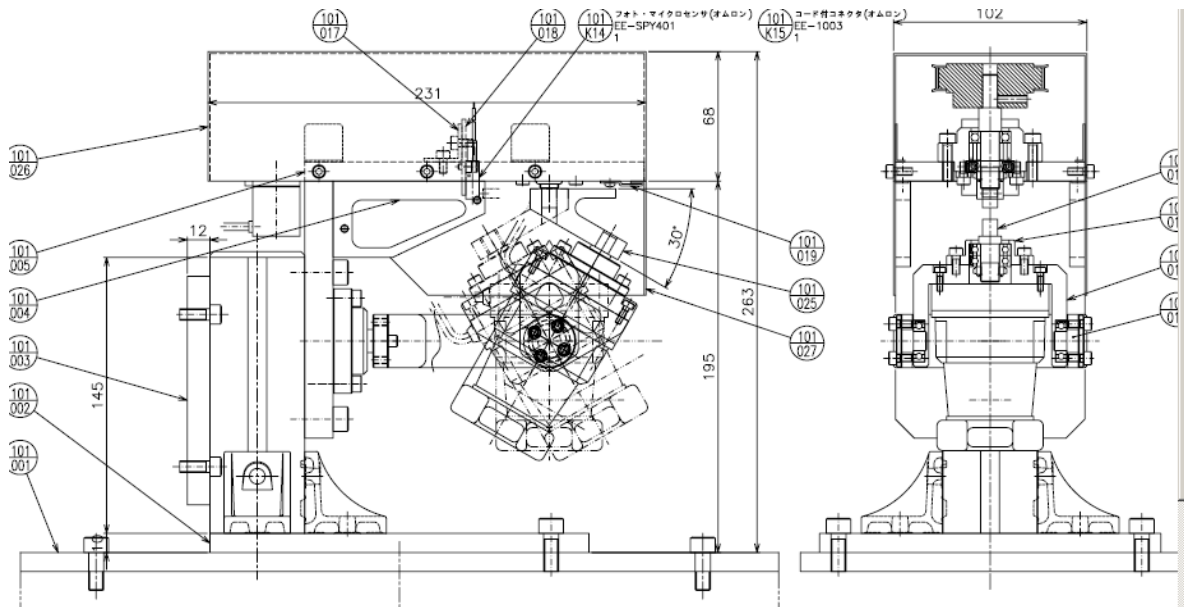
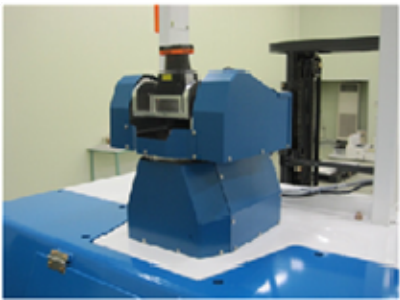


図 5.3.8-12 1 リンク揺動機構 機構部完成図

図 5.3.8-12 は 1 リンク揺動機構の完成組立図である。揺動機構のレーザースキャナの支持とリンク機構の支持にボールベアリングを採用する寸法にして、物流の人と共存する環境下での長寿命化を図っている。

(12) 開発結果


3次元障害物検出装置の小型化



寸法: H363mm × W245mm × D239mm

2リンク揺動機構

➔



寸法: H263mm × W162mm × D290mm

1リンク揺動機構

図 5-3-30 2 リンク揺動機構と 1 リンク揺動機構の比較

図 5-3-30 に 2 リンク揺動機構と 1 リンク揺動機構の比較を示す。外形寸法が小型し H363×W285×D239mm の機構を、H263×W102×D250mm と小型化することができた。

表 5.3.8-4 に 2 リンク揺動機構と 1 リンク揺動機構の開発品の比較を示す。4 項に示すように体積比で 3.9 分の 1 に小型化することができた。測定範囲、測定精度の仕様は同等としている。水平方向のスキャン速度は、レーザースキャナの仕様から決まるため、同等である。揺動の結果、周囲の 3 次元データを 1 回測長するために要する時間は、500ms に 1 回の速度だったのが 200ms に 1 回の測定となり、測定的高速化を図ることができた。

表 5.3.8-4 2 リンク揺動機構と 1 リンク揺動機構の比較

No.	項目	仕様	
1	センサ方式	2リンク揺動機構	1リンク揺動機構
2	製作元・提供元	日立産機システム 開発内容	日立産機システム 改良版の開発内容
4	寸法	H363mm × W285mm × D239mm	H263mm × W102mm × D250mm
4	体積比	3.9	1 【小型化】
6	測定範囲	断面積：H2.0m × W1.2m の矩形 測定長：20m	断面積：H2.0m × W1.2m の矩形 測定長：20m 【測定範囲は同等】
7	測定精度	100mm以内	100mm以内
8	測定周期 (水平スキャン)	14400° /sec	14400° /sec
9	測定周期 (3次元)	500msecに1回、3次元データ測定	200msecに1回、3次元データ測定 【高速】

5.3.9 安全サポート系の3Dシミュレーションソフト（PCのソフト）

(1) 3Dシミュレーションソフト ソフトウェアの構成

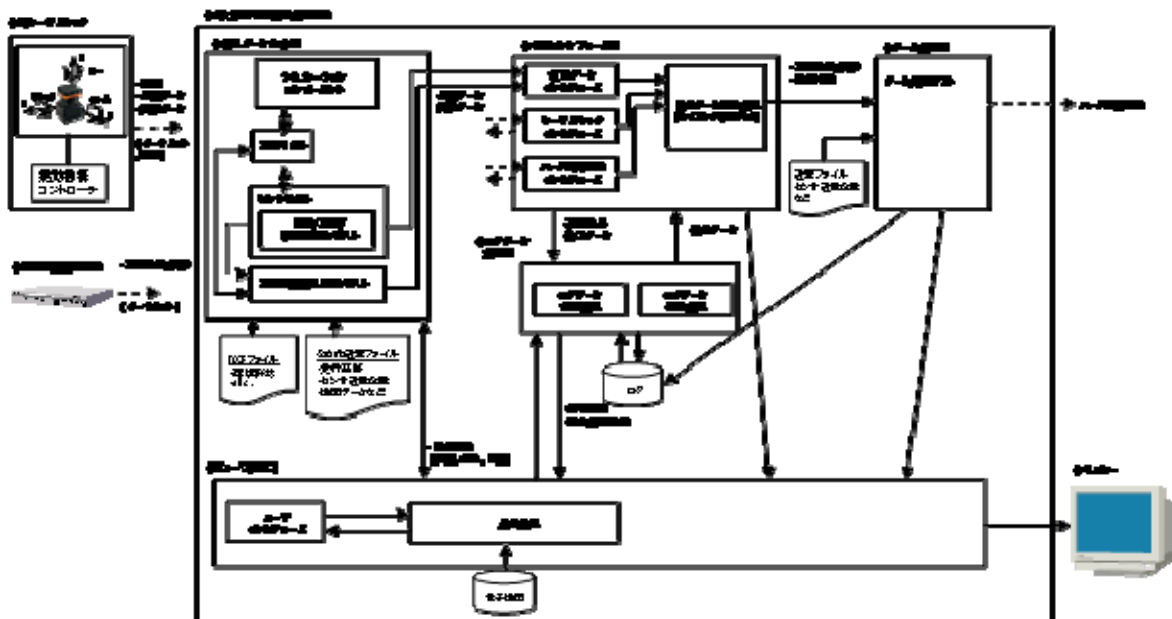


図 5.3.9-1 安全サポート系 PC 側のソフトウェアの構成

安全サポート系を利用するためには、3次元障害物センサーのユーザーインタフェースとなる PC 側のソフトウェアが必要になる。図 5.3.9-1 に安全サポート系を利用するために使用する PC 側（パソコン側）のソフトウェアの構成を示す。レーザースキャナデータを無線 LAN または、イーサネットに取り込み、3次元障害物センサーに使用している Box PC のデータを PC に無線 LAN またはイーサネットに取り込み、PC 内でログを解析、あるいは事前のシミュレーションをしてモニター画面上の図形で表示するソフトウェアとなる。

図 5.3.9-1 の中央の大きな四角い枠で囲まれた部分が PC 内のソフトウェア部分を示す。PC 内のソフトウェアには、3次元障害物センサーの Box PC 内で動作するソフトと同一のソフトウェアを同じプログラムソースの形で取り込んでおり、これにより、PC の仮想空間の中で3次元障害物センサーと同一の動きをすることができる。これにより3次元障害物センサーのログの解析、あるいは事前に3次元障害物センサーの動作をシミュレーションをすることができる。

この開発では、2リンク揺動機構と1リンク揺動機構の2種類を開発したが、機構の違いの部分だけを PC 内に記述することにより、両方の揺動機構ともこのソフトウェアで同等にログ解析とシミュレーションをすることが可能である。

(2) 3D シミュレーションソフトの目標とする最終形

図 5.3.9-2 には、本ソフトウェアのシミュレータの最終形のイメージ画を示す。3次元でフォーク型物流支援ロボットの動作をシミュレーションし、作業者が危険エリアに入り込んだ場合に、どのような動作をするか、実際にロボット内で動作するソフトウェアをシミュレーションし、その動作を作業者の位置、形状も含めて3次元表示することを目指している。このためには、3D シミュレーションソフトの中に、ロボットの走行ソフトウェアの取り込みが今後の課題となる。また、動作のログを本ソフトウェアで操作しログを使ったシミュレーションすることにより、過去の動作の中から、作業者が障害物検出エリアに入った時の動作を3次元画面で再現することができる。



図 5.3.9-2 安全サポート系 PC 側のソフトウェアの構想

表 5.3.9-1 には、3D シミュレーションソフトをどのような人がどのような段階で利用するのかをまとめた。このシミュレーションソフトでは、計画段階でのシミュレーションから、実際にフォーク型物流支援ロボットの走行用に地図を作成し、走行経路を設定し、走行するプログラムを作成し、さらに走行ログを解析するまでの走行ロボットの各段階で共通に使用することが可能となる。

その原理は、3D シミュレータ内に、3D 障害物センサーや走行ロボットのソフトそのものを取り込み、実物が動作するのと同じの入出力を与えることにある。このように利用することで、計画段階で作成したデータがその後の運用、保守の段階でも共通に利用できるようになり物流システム全体の構築運用コストの低減を図ることを目標とする。

表 5.3.9-1 3D 障害物センサ用 シミュレーションソフトの利用形態

No.	分類	ソフトウェア利用者	内容
1	計画段階	<ul style="list-style-type: none"> ・(ユーザー)計画立案者 ・(メーカー)ロボットの提案者 	<ul style="list-style-type: none"> ・通路の寸法確認(通行の可否) ・運用効率のシミュレーション (走行時間検討、待ち時間検討)
2	地図作成	<ul style="list-style-type: none"> ・(ユーザー)生産技術担当 ・(メーカー)システム構築担当 技術者 	<ul style="list-style-type: none"> ・走行経路の3次元地図を生成
4	走行経路設定		<ul style="list-style-type: none"> ・PC画面上で走行経路を指定
4	走行プログラム作成		<ul style="list-style-type: none"> ・走行プログラムを作成 (信号待ちの設定、データ入出力のプログラミング)
5	走行ログの解析	<ul style="list-style-type: none"> ・(ユーザー)管理運用担当者 	<ul style="list-style-type: none"> ・物流の効率を確認 (無駄時間、停止時間の原因分析)

図 5.3.9-3 で示す 3D シミュレーションソフトウェアには大きく 4 つのブロックがある。

- ① レーザースキャナのデータを取り込み、座標変換するブロック
- ② ロボットの動作をシミュレーションするブロック
- ③ シミュレーションした結果を 3 次元表示するブロック
- ④ これらのデータを保存、参照するブロック

からなる。これらのブロックから本ソフトは構成される。

(3) パソコンに必要とされる仕様

表 5.3.9-2 に本ソフトウェアを動作させるために必要なパソコンの仕様を示す。ハードウェアは一般的な仕様のパソコンを使用し、ソフトウェア上はオープンソースの OpenGL を動作させ、開発環境は Microsoft 社の Visual Studio を使用する。

表 5.3.9-2 PC 側ソフト動作のための PC ハードウェア要求仕様

No.	項目	内容
1	OS	Windows XP SP3 以上
2	種類	PC/AT 互換機
3	メモリ	2GB 以上
4	ビデオカード	OpenGL1.4 以上をサポートしていること
5	開発環境	Visual Studio 2008 Professional

(4) 障害物検出のシミュレーション機能

図 5.3.9-3 に PC 側ソフトウェア内にフォーク型物流支援ロボットの周囲に持たせる防護エリア、警告 1 エリア、警告 2 エリアを示す。フォーク型物流支援ロボットの動作をシミュレーションするために、本体と同じく、これらのエリアを PC 内に持たせてシミュレーションする。

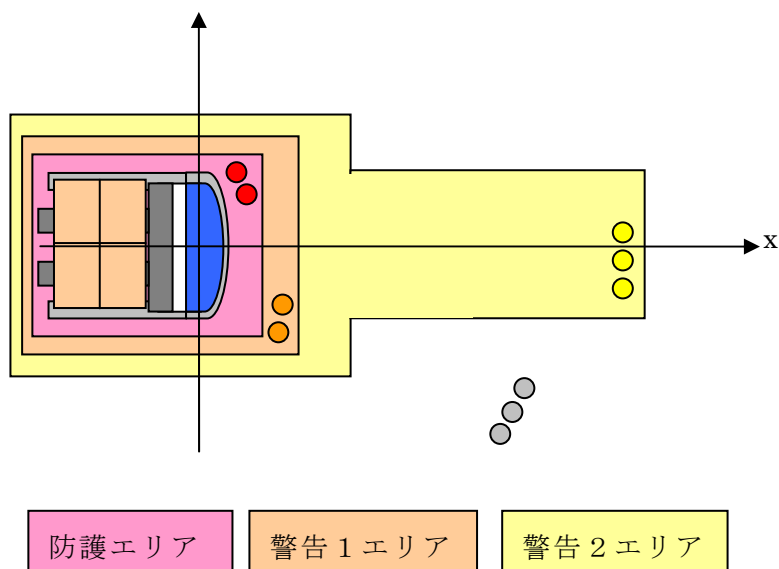


図 5.3.9-3 安全サポート系 PC 側ソフトウェアの管理エリア

図 5.3.9-4 にこれらの管理エリアの構成を示す。これらのエリアを小さなエリアの合成から構成して、ロボット本体と同じくなるように、柔軟にエリア設定ができるように複数のサブエリアの組合せでエリアを表現する。

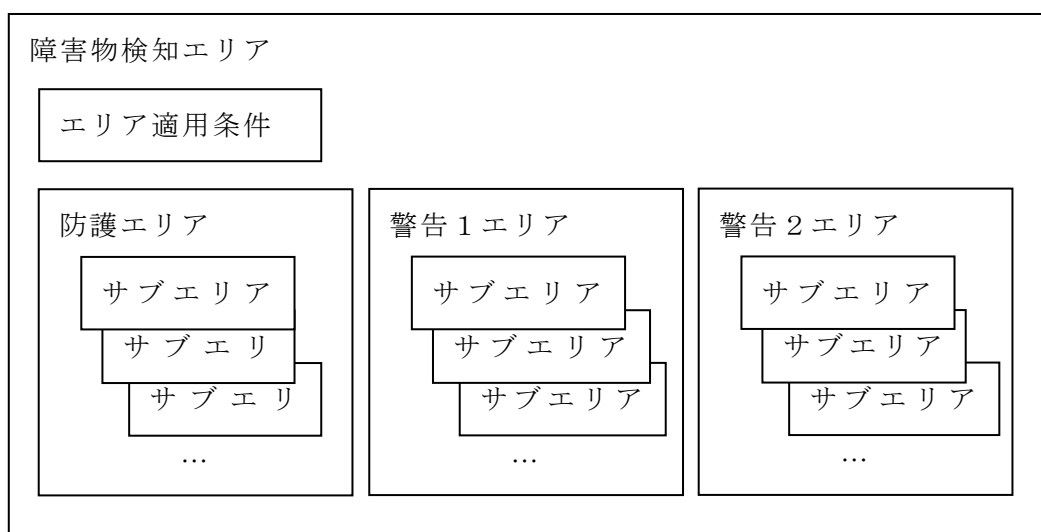


図 5.3.9-4 安全サポート系 PC 側ソフトウェアの管理エリアの構成

(5) 障害物のモデリング

図 5.3.9-5 には、本 PC ソフトウェア内で障害物をモデリングして、シミュレーションする 3次元空間内に設置する方式を示す。障害物の形状を入力するために頂点の座標を入力し、障害物の大きさ、位置を設定する。この障害物を本ソフトウェアの 3D 空間内に設置すると、シミュレーション内のレーザーセンサーがこの障害物を検出して、管理エリア内に入ると、シミュレーション上の安全サポート系センサーが防護動作、警告 1 動作、警告 2 動作を実施することが分かる。

安全サポート系センサーのソフトウェアは、実物と本ソフトで同一のソフトを利用しているため、障害物のモデリングが現物に忠実であれば、現物と同じシミュレーションを本ソフト内で実施することが可能となる。

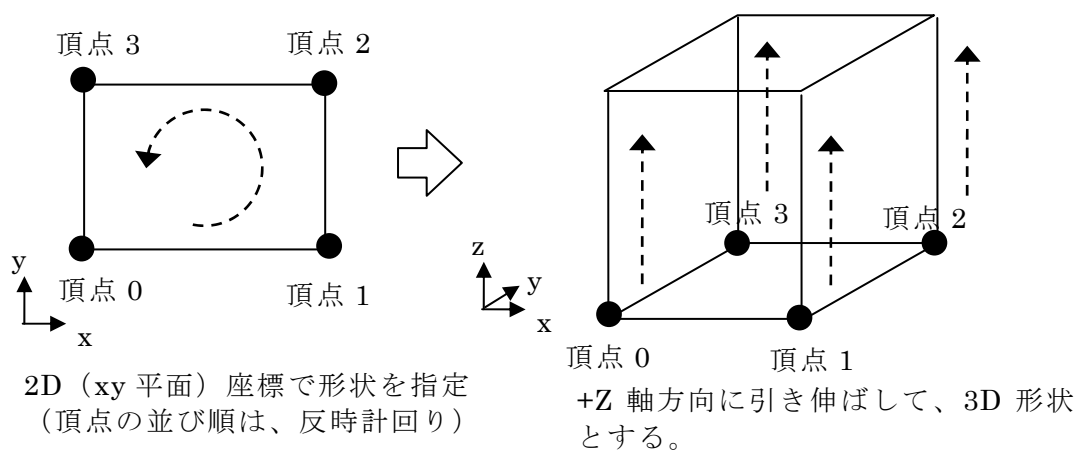


図 5.3.9-5 安全サポート系 PC 側ソフトウェア 物体のモデリング

(6) シミュレーションの例

図 5.3.9-6～図 5.3.9-9 に完成した本ソフトのパソコン画面上での表示した例を示す。図 5.3.9-6 は、平面図でフォーク型物流支援ロボットとその周りの障害物検出のための管理エリアを描いた例である。実際のフォーク型物流支援ロボットで設定する管理エリアに合わせて、これらのエリアを設定する。

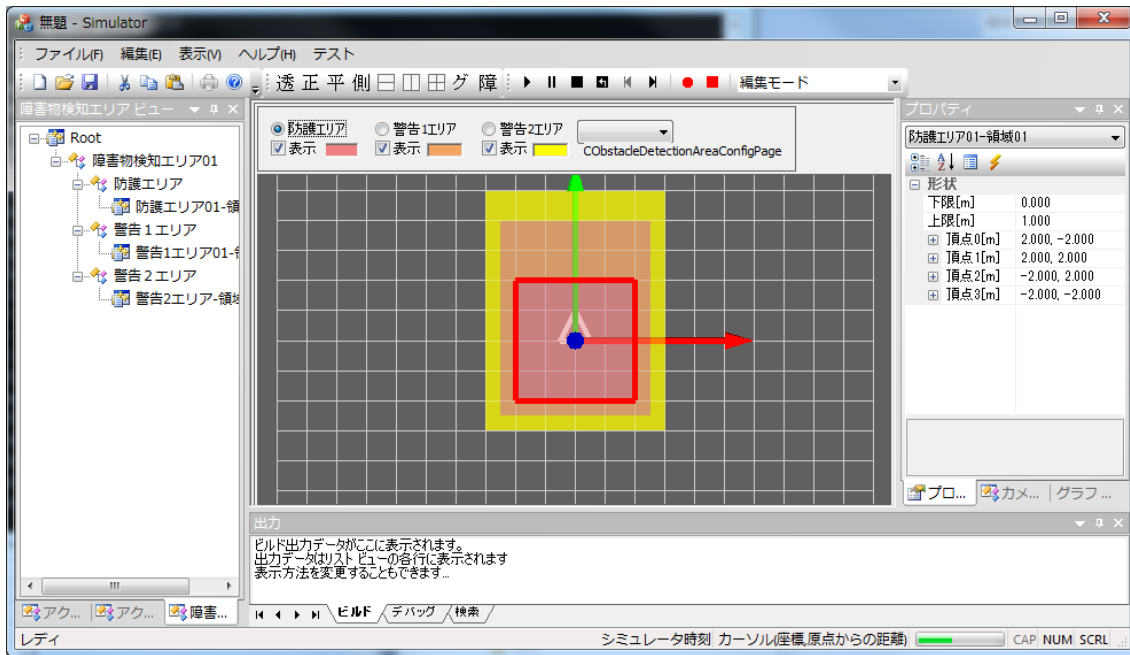


図 5.3.9-6 安全サポート系 PC 側ソフトウェア シミュレーション画面 1
(管理エリア (減速エリア、停止エリア) の設定)

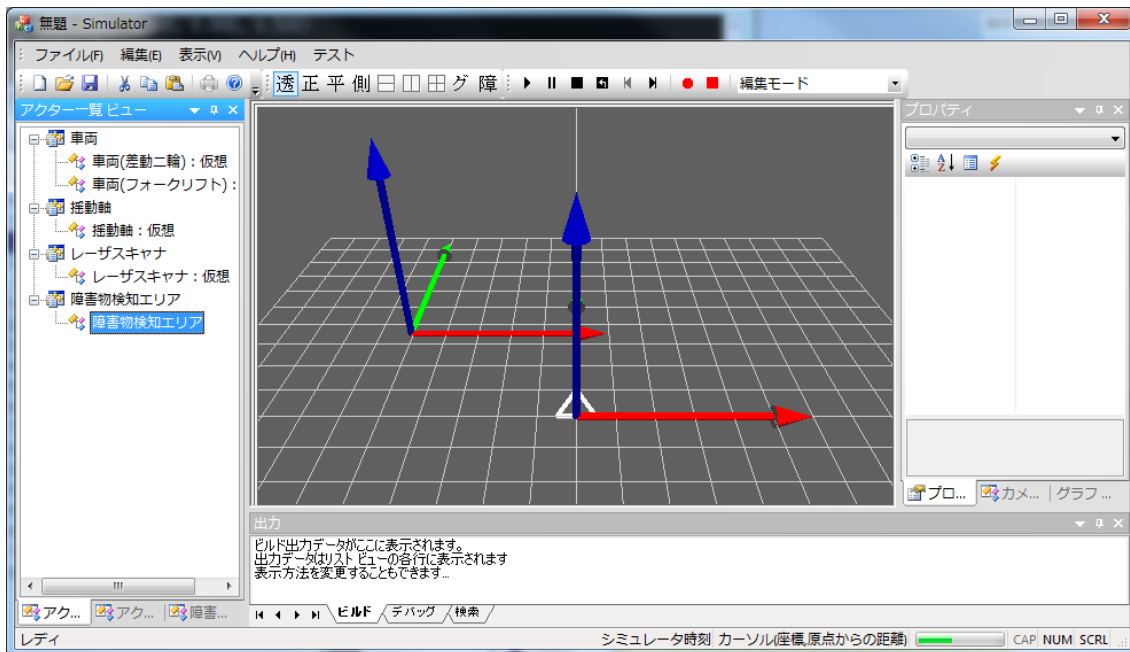


図 5.3.9-7 安全サポート系 PC 側ソフトウェア シミュレーション画面 2
(フォーク型物流支援ロボットの位置の設定、障害物位置の設定)

図 5.3.9-7 はロボットと障害物を画面内に設定する作業の様子を示す。ロボットと障害物の位置を縦の矢印状の直線で示す。この後、ロボットの形状、障害物の形状を入力すると画面内にそれらが表示され、シミュレーションすることが可能となる。

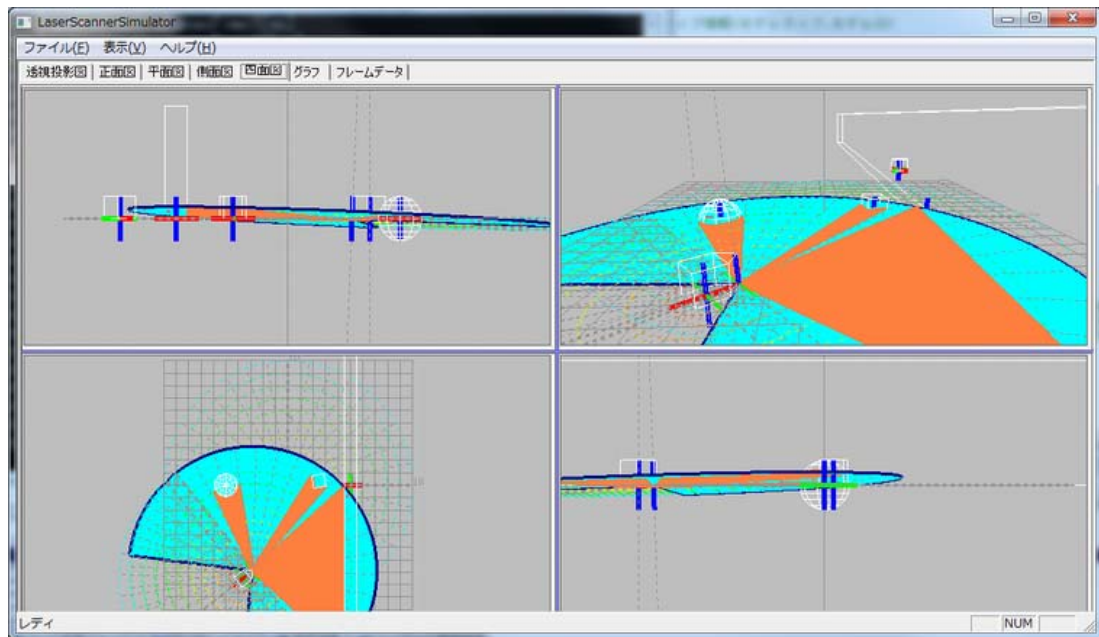


図 5.3.9-8 安全サポート系 PC 側ソフトウェア シミュレーション画面 3
(走行中のロボットを4方向の視点からの表示)

図 5.3.9-8 はシミュレーションを実施してロボットを動作させる画面を示す。3次元モデリングした結果の画面であるため、同じ状態を表示する方向から4種類の画像としている。これらの図は同じ状態を異なる視点から表示したもので、同じ内容の位置関係を示している。

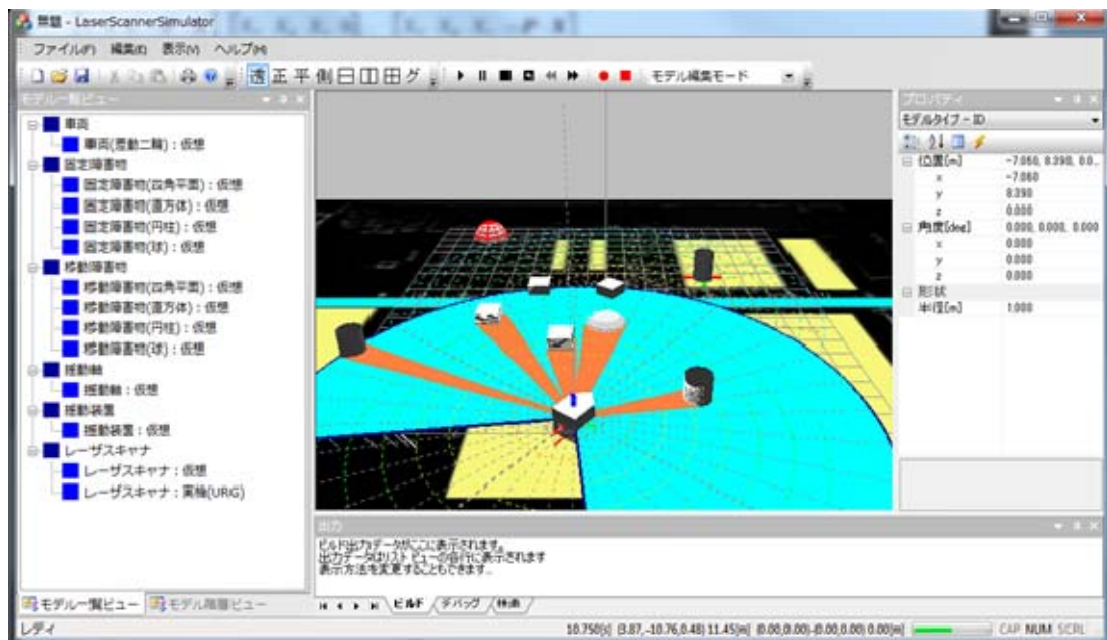


図 5.3.9-9 安全サポート系 PC 側ソフトウェア シミュレーション画面 4
(総合のシミュレーション画面)

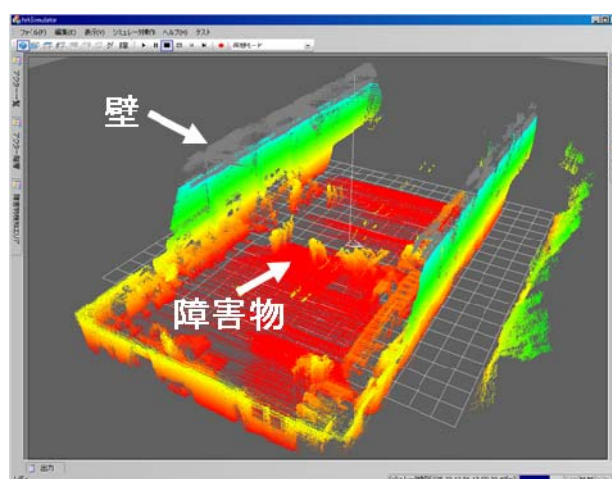
図 5.3.9-9 は、ロボット動作のシミュレーションを実施中の画面を操作画面とともに表示している。安全サポート系センサーのシミュレーション結果を図示している。すなわち、画面内の障害物を検出してその障害物までの距離を認識している。

(7) 走行ログの解析



図 5.3.9-10 安全サポート系 PC 側ソフトウェア 走行ログ解析

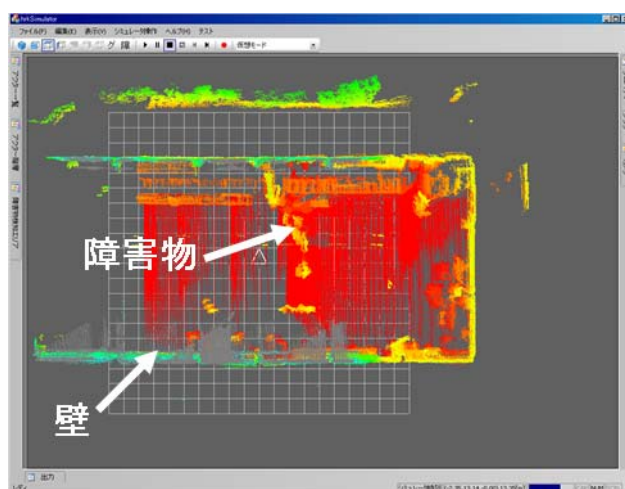
安全サポート系 PC 側のソフトウェアは、走行動作中にとった安全サポート系の動作ログを解析して、その結果を PC 画面に表示できる。図 5.3.9-11 はその表示内容を示す。



検出データ:障害物立体表示 (高さを色分けして表示)

図 5.3.9-11 安全サポート系 PC 側ソフトウェア 3次元計測ログ解析結果 1
(走行ルートの屋内形状の表示 (実測データ))

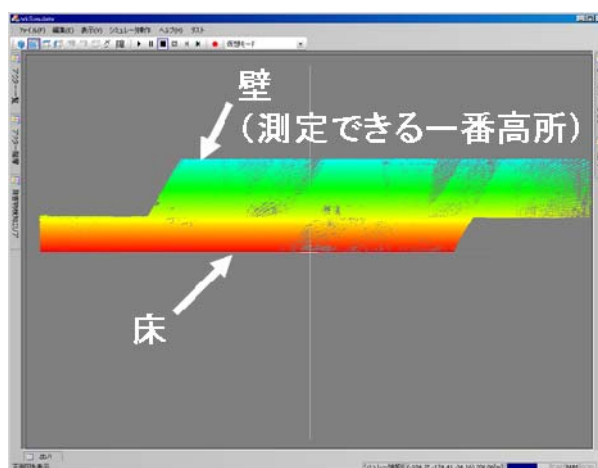
図 5.3.9-11 は安全サポート系センサーのログを解析して 3 次元表示した時の画面である。フォーク型物流支援ロボットの周囲に存在した、壁は障害物の形状が 3 次元で表示されている。



検出データ:平面図

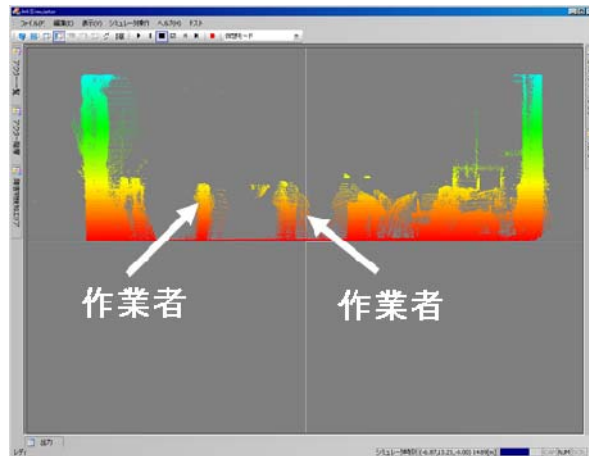
図 5.3.9-12 安全サポート系 PC 側ソフトウェア 3 次元計測ログ解析結果 2
(走行ルートの屋内形状の表示 (平面図))

図 5.3.9-12 は 3 次元計測ログの解析結果を平面図で表示したものである。壁の形状が四角の部屋を示している。障害物も検出されていることが分かる。また、フォーク型ロボットの走行通路外の物体の形状も記録されていることが分かる。



**検出データ:側面図
(試験場の壁面)**

図 5.3.9-13 安全サポート系 PC 側ソフトウェア 3 次元計測ログ解析結果 3
(走行ルートの屋内形状の表示 (側面図、壁側))



検出データ:平面図(作業者など)

図 5.3.9-14 安全サポート系 PC 側ソフトウェア 3次元計測ログ解析結果 4
(走行ルートの屋内形状の表示(側面図、部屋の中央))

図 5.3.9-15 は、3次元計測ログの解析結果である。作業者の形状がわかるように表示されているのが分かる。

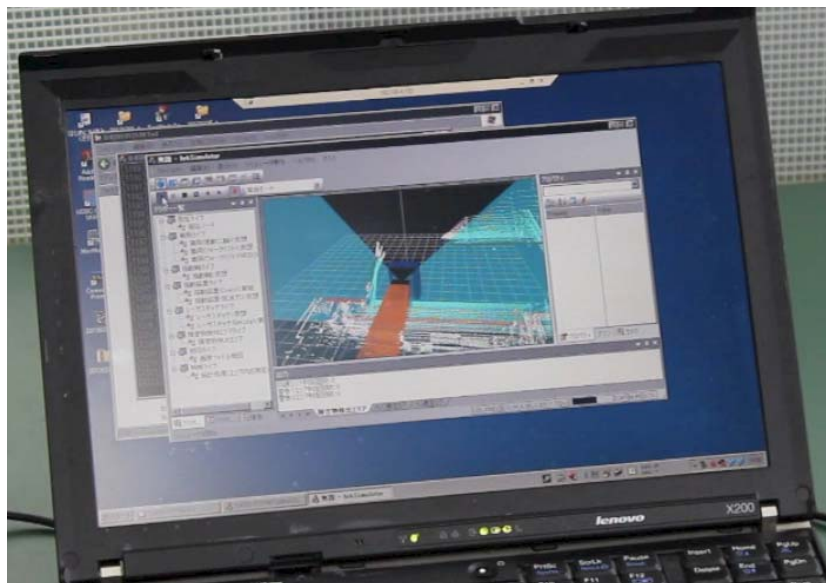


図 5.3.9-15 安全サポート系 PC 側ソフトウェア パソコン表示

図 5.3.9-15 は安全サポート系の PC 側ソフトウェアをノートパソコンにインストールし、走行中のフォーク型物流支援ロボット上に搭載されている安全サポート系のセンターとノートパソコンを無線 LAN で接続して時の画面である。

3次元の計測結果は、動作ログだけでなく、このようにリアルタイムで3次元表示することが可能である。

(8) シミュレーション

図 5.3.9-16 と図 5.3.9-17 は PC 画面上でロボット動作をシミュレーションしアニメーションで表示した画面の例である。シミュレーション画面内で、走行地図データを入力し、ロボットの形状と通路を指定し、通路上に障害物を設置して走行させる。その結果、ロボットの走行動作がシミュレーションされるとともに、障害物が安全サポート系センサーにどのように検出されるかをシミュレーションできる。

障害物は、PC 上でモデリングする。実測のログデータから障害物のモデルを抽出してシミュレーション画面で使用することが今後の課題となる。

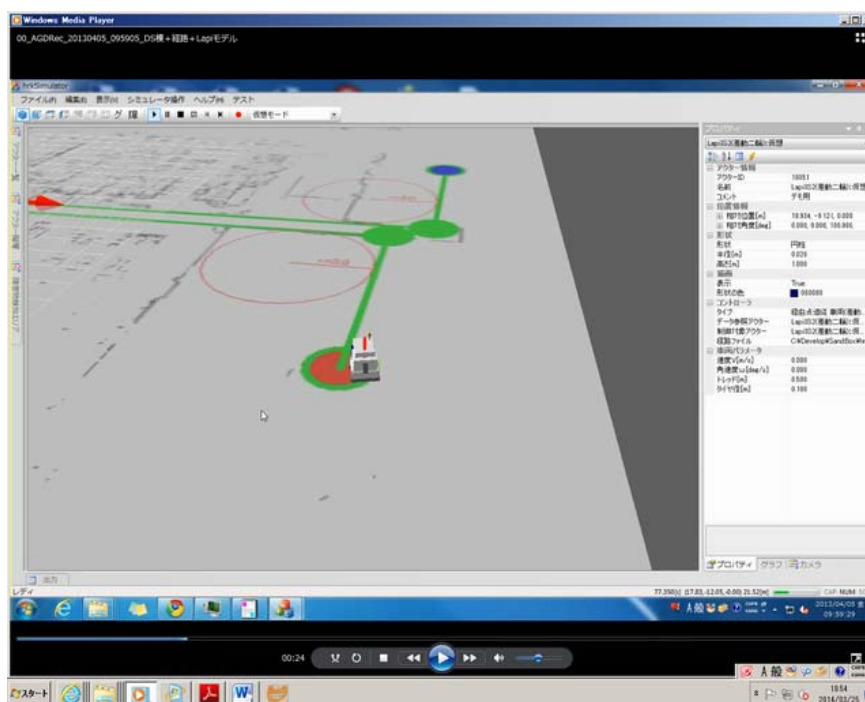


図 5.3.9-16 安全サポート系 PC 側ソフトウェア シミュレーション機能
(走行開始地点 (サークル) から走行開始動作)

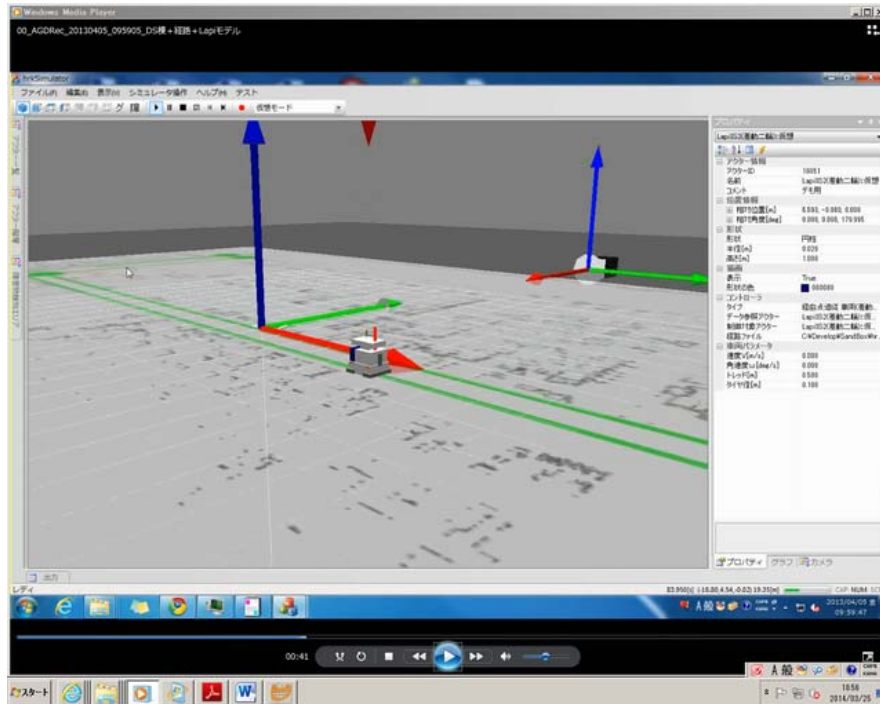


図 5.3.9-17 安全サポート系 PC 側ソフトウェア シミュレーション機能
(コーナーを回った後の走行動作)

5.4 安全系の設計

5.4.1 非常停止回路

非常停止回路は入力源として非常停止スイッチ、バンパー、サイドバンパー、安全 PLC からの出力回路、通常制御系の動作可否信号の直列回路で、非常停止信号で走行モーター、油圧ポンプ駆動モーターの駆動インバータの電源供給を遮断するとともに、電磁ブレーキの励磁を遮断し、走行の動力遮断をしたうえでブレーキ停止する。後面バンパーとサイドバンパーには検出素子としてテープスイッチを使用している。テープスイッチは 2 端子接続ではノーマリーオフ（A 接点）の感圧スイッチ素子であるが、4 端子接続で使用し常時微弱な電流を流し、通常状態の循環電流の減少でテープスイッチ内の断線を検知し、循環電流の増加で接触検知の両方が行えるインターフェース回路でノーマリーオン化（B 接点化）して対人接触を検知する。

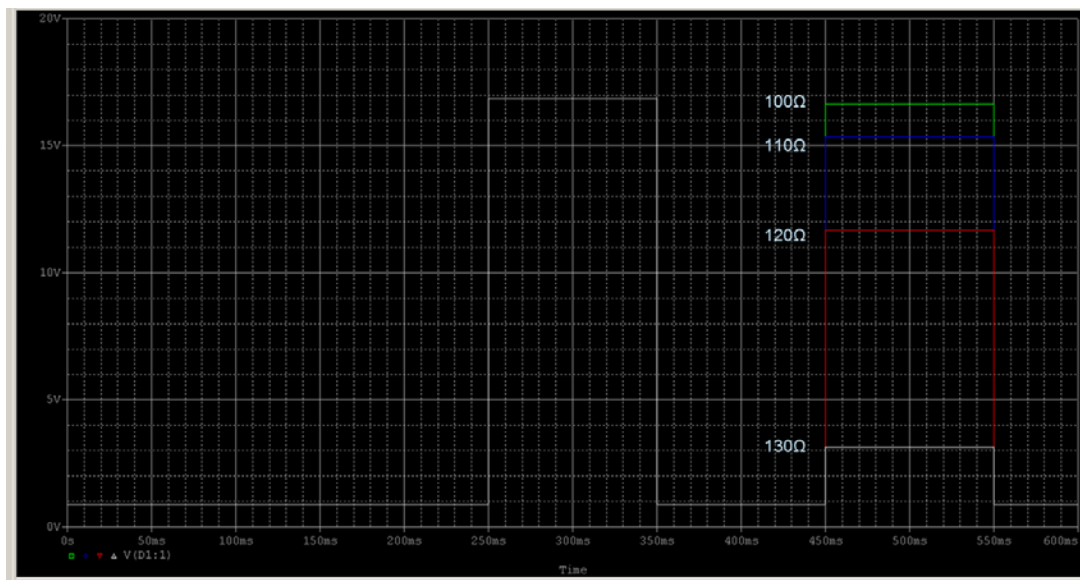


図 5.4.1-1 テープスイッチのオン時の挙動

テープスイッチのオン時の 4 端子接続回路の挙動は、閾値は 100Ω 強の点にあり、電源電圧やインターフェース回路の回路常数を変動したパラメトリック解析でも 100Ω 以下の接触抵抗でオンを認識し、安定に動作する。

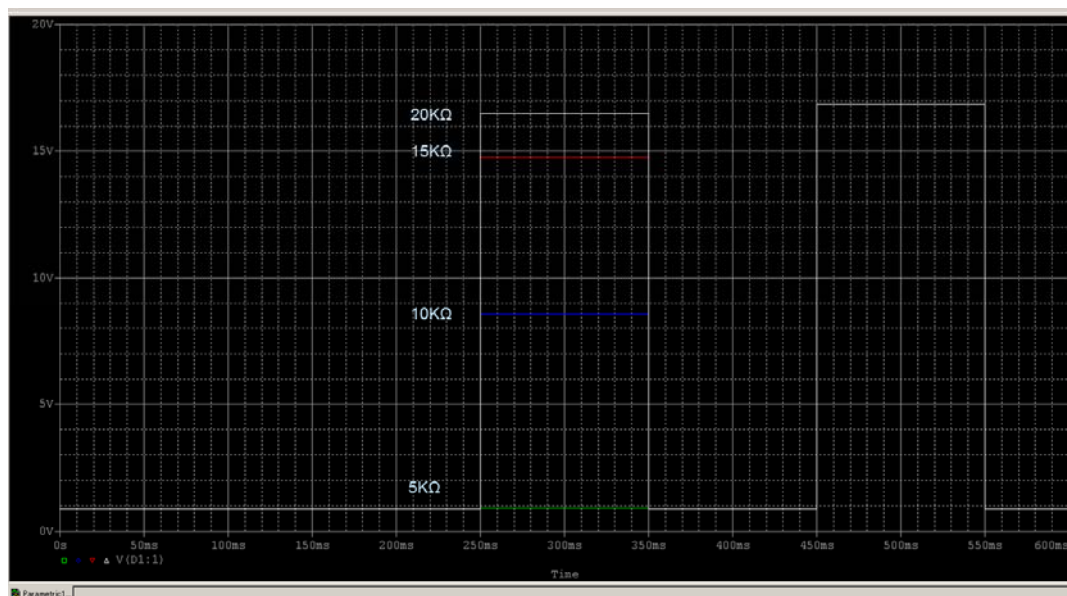


図 5.4.1-2 テープスイッチの断線時の挙動

一方、テープスイッチは実フィールドの運用では運転中あるいは停車中に様々な理由によりバンパーやテープスイッチが接触し、バンパーやテープスイッチの外装が破れ破損した状態をガムテープ等で応急補修しただけで運用することは往々にしてある。生産と止められない顧客サイドの事情や修理部品が届くまでの応急処置などであろうが重要な安全の機器となるバンパーやテープスイッチの危険側故障である断線は検出する必要がある。テープスイッチ断線やコネクタの接触不良に対しては、検出の閾値は数 $k\Omega$ にあり、 $10k\Omega$ 以上の抵抗で安定して断線を検知する。この技術は、無人搬送車の分野では従来から使用されている4端子接続の技術であり、従来からの評価試験結果に加え、今回、改めて解析しなおすことでその有効性を再確認した。

非常停止スイッチは車体の側面の左右、後面の左右、車体後面の操作コンソールに1ヶ所の合計5ヶ所に設置する。バンパーは車体後面の車体下部と車体後面の成人男性の胸部位置の合計2ヶ所に設置する。車体側面は、車体後面のバンパーのように厚みのあるものは車体幅を増やしてしまうために、センサーの厚みが少ないテープスイッチにラバークロスタを被せたサイドバンパーを、車体側面の左右の下部と胸部位置で合計4ヶ所に設置する。車体側面は車体後面の走行速度と異なり、万一接触することがあってもその側面方向の速度は小さく、ストロークの小さいセンサーでもストローク範囲内で車体を停止することができる。

表 5.4.1-1 テープスイッチの仕様

接点寿命	300 万回	耐電圧	DC250V 1 分間
定格電圧	5～24V	使用温度範囲	0 ～ 50℃
定格電流	10mA～300mA	保存温度湿度	0 ～ 60℃
絶縁抵抗	100MΩ 以上		90%RH 以下

テープスイッチは無人搬送車では一般的に使用されているセンサーで、先に示した4端子接続をすることで信頼性の高い接触検出を行えるデバイスである。(株)東京センサ製のテープスイッチの仕様を表 5.4.1-1 に示す。表 5.4.1-2 に非常停止要因となる安全関係のセンサーの一覧を示す。また図 5.4.1-1 に非常停止要因となるセンサー類、スイッチ類の設置場所を示す。

表 5.4.1-2 非常停止要因

No.	非常停止の要因	数量
1	コンソール脇非常停止スイッチ	1
2	車体後面非常停止スイッチ	2 (左右各 1)
3	車体側面非常停止スイッチ	2 (左右各 1)
4	車体後面下部バンパー	1
5	車体後面上部バンパー	1
6	アウトリガー先端バンパー	2 (左右各 1)
7	アウトリガー下足背検出	2 (左右各 1)
8	車体側面下部サイドバンパー	2 (左右各 1)
9	車体側面上部サイドバンパー	2 (左右各 1)
10	障害物検出	複数要因
11	制御装置異常	1

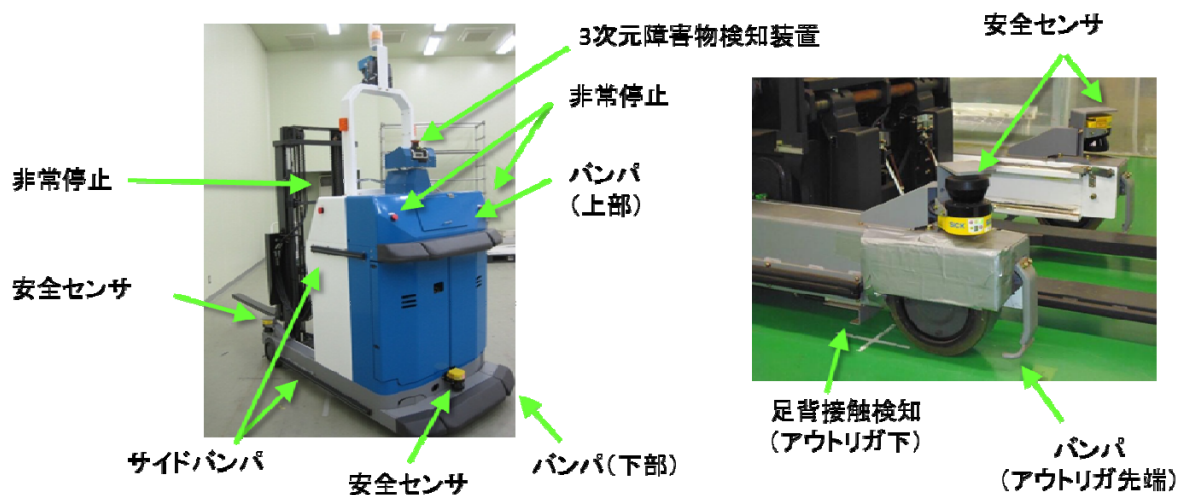


図 5.4.1-1 非常停止要因

5.4.2 制御装置の相互監視

通常制御系の制御装置、3次元位置認識の制御装置が、特定の内部 I/O について周期的に ON/OFF を繰り返し、この状態変化を制御装置間で相互監視する。更に通常制御系の信号を安全系の安全 PLC に入力する。

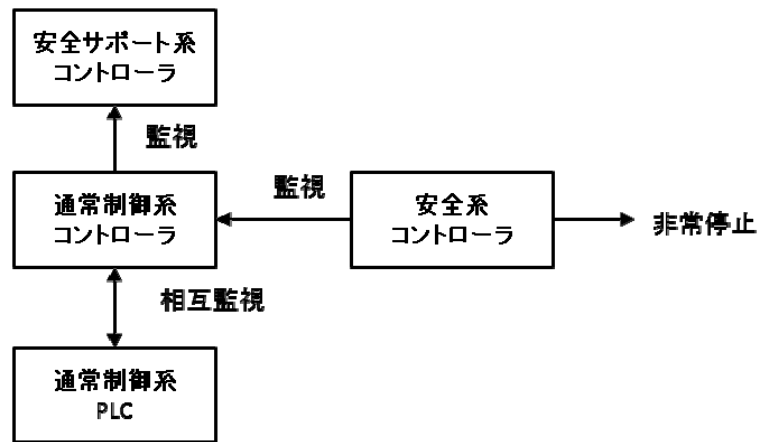


図 5.4.2-1 制御の相互監視

5.4.3 安全センサーによる停止

(1) 動作シーケンスの分解

安全センサーによる防護の前提となるフォークリフト型ロボットの動作シーケンスは以下のようなになる。

- ① 荷降ろしを行う位置の手前まで走行し停止する。フォークリフトは後方走行が基本のため、この前段階で後方走行から一旦停止し、90度の旋回あるいは据え切りに近い操舵を行うスピターンで前進に切り返しをこの直前に行い方向転換を行う。
- ② 荷降ろしを行う位置に物が置かれていないかあるいは障害物（人あるいは物）が無いことを確認の上、荷降ろしを行う位置まで前進する。
実運用では①②は途切れなく行うこともある。
- ③ リーチ機構を前進し、荷をアウトリガーよりも外に出す。
- ④ チルト機構を操作し、荷（フォーク）を水平にする。
- ⑤ リフト機構を操作しフォークを下げ、パレットを着床する。
- ⑥ リーチ機構を操作し、フォークをリーチ後端まで戻しパレットから引き抜く。
- ⑦ 後進する。
- ⑧ リフト機構を操作し、フォークを上げる。

一連のシーケンスを図 5.4.3-1 に示す。このシーケンスは降ろし作業のシーケンスであり、積み作業は上記シーケンスを逆にしたものとなる。積み作業の場合、走行中のパレット上の荷の移動を防止するため、チルト機構を操作し、フォーク先端を持ち上げる操作が最後に入る。

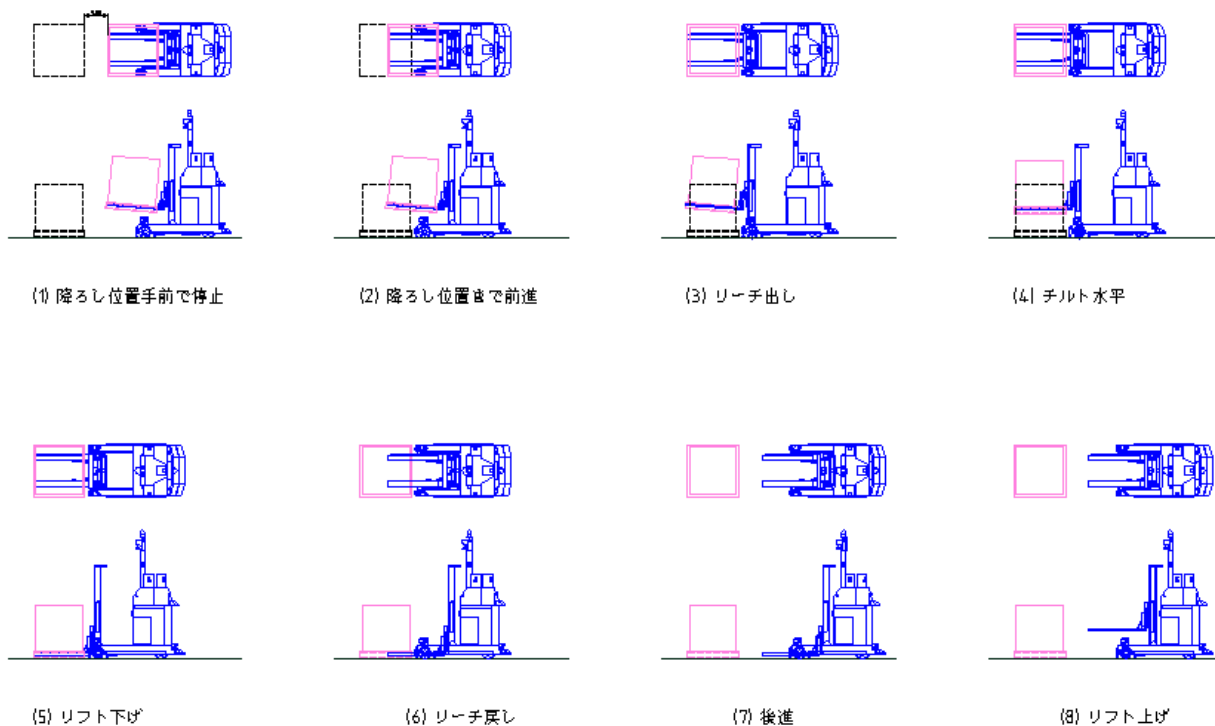


図 5.4.3-1 動作シーケンスの分解

(2) 基本シーケンス防護

非接触の安全センサーは SICK 社製の SIL2 認証を受けている S3000 型と S300mini 型の 2 種類のセンサーを使用し、速度と運転モードにより検出する領域を切り替える。速度に対応した設定距離範囲の例を図 5.4.3-1 に示す。

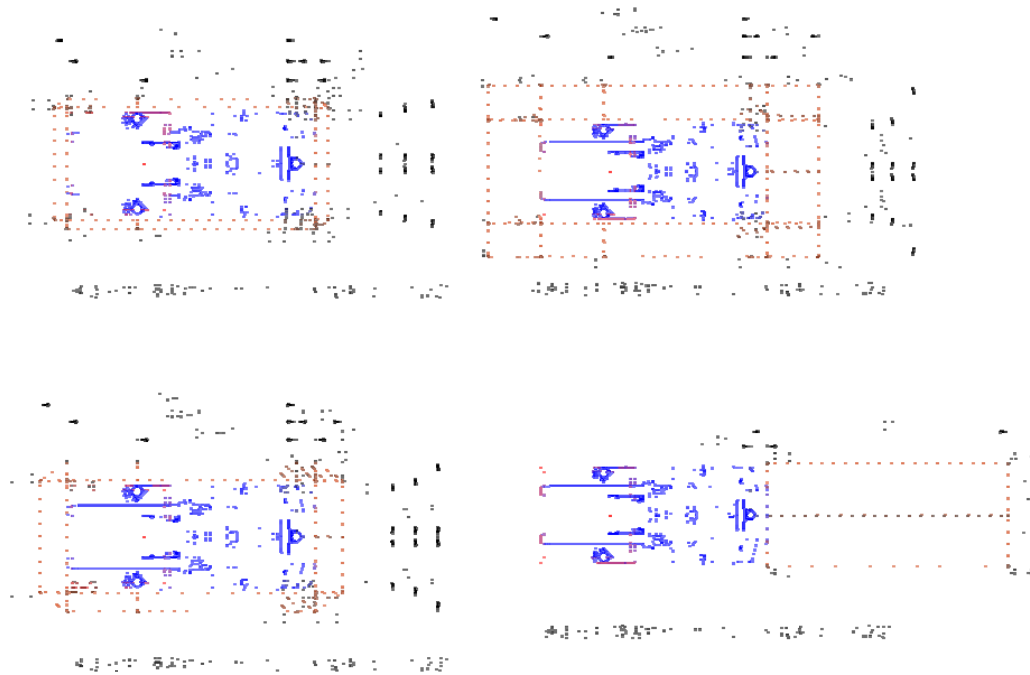
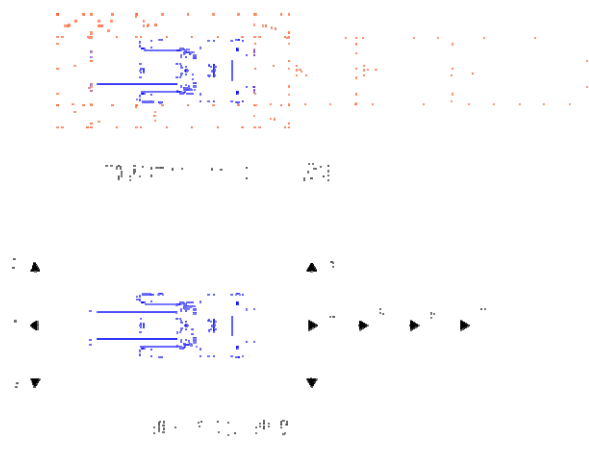


図 5.4.3-2 速度に対応した車体周囲の検出距離設定範囲

ノッチ速度に対応した停止領域はブレーキ性能と運用上の作業性、対人接触リスクから決定した。後方の高速走行では広い範囲をカバーする。低速では車体幅と運搬物であるパレットの幅に対して僅かな余裕のところに整列して荷の積み下ろしを行う空隙と、移載あるいは移載動作に入る前の方向転換動作での人の巻き込みに対しても停止できる距離範囲を設計値に対し、現場で試行錯誤的に調整し検出範囲を決定した。このようにして決定した物理寸法に対応した検出範囲と検出範囲を代表する論理的な領域を運転状況のマトリックスからセンサーの使用可否、使用パターンを決定する。決定マトリックスを図 5.4.3-3 に示す。

安全系の判断の中に通常制御系からの運転状況を示す速度信号、操舵信号が入るが、機能安全を実現する上で代替手段のない不可避な信号であり、安全系の入力信号として使用する。この対策としていかなる条件でも防護範囲がゼロにならない組み合わせを条件設定に入れている。

尚、ここで示す後進右折、後進左折とは当該の進行方向（この場合後進）に対する左右ではなく、車体の前進方向に対する左右の方向を示す。産業機械では安全のため車体への表示として前後方向、左右方向を車体に表示することがあり、この表示内容との整合性のため車体の対する方向で説明する。



		F1	R1	R2	R3	R4	L1	L2	L3	L4	B1	B2	B3	B4
(1)	前進 1速	有効	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効
(2)	前進 1速 右折	有効	有効	有効	無効	無効	無効	無効	有効	無効	無効	無効	無効	無効
(3)	前進 1速 左折	有効	無効	無効	有効	無効	有効	有効	無効	無効	無効	無効	無効	無効
(4)	後進 1速 (1.2km/h)	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効	有効	無効	無効	無効
(5)	後進 2速 (2.4km/h)	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効	有効	無効	無効
(6)	後進 3速 (3.6km/h)	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効	有効	有効	有効	無効
(7)	後進 4速 (10.5km/h)	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効	無効	有効	有効	有効	有効
(8)	後進 1速 右折	無効	無効	無効	有効	有効	無効	有効	無効	無効	有効	無効	無効	無効
(9)	後進 1速 左折	無効	無効	有効	無効	無効	無効	無効	有効	有効	有効	無効	無効	無効

	F1	R1	R2	R3	R4	L1	L2	L3	L4	B1	B2	B3	B4
右前方 障害物センサ	○	○	○	○	x	x	x	x	x	x	x	x	x
左前方 障害物センサ	○	x	x	x	x	x	○	○	x	x	x	x	x
後方 障害物センサ	x	x	x	x	○	○	x	x	○	○	○	○	○

図 5.4.3-3 センサー使用決定マトリックス

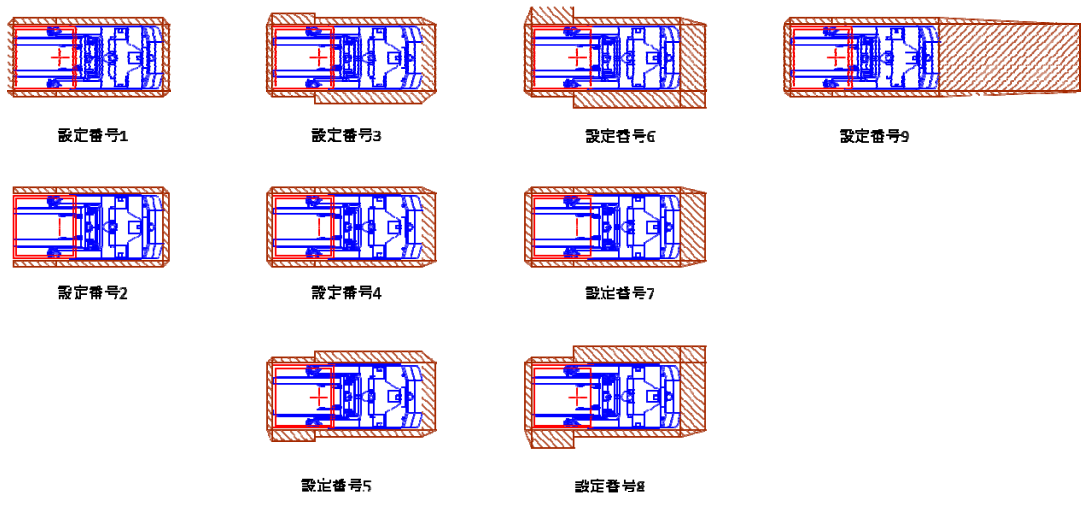


図 5.4.3-4 防護エリアの一覧

図 5.4.3-4 に基本的な防護エリアの一覧を示す。これらの防護エリアの設定をセンサー使用決定マトリックスに従い選択する。

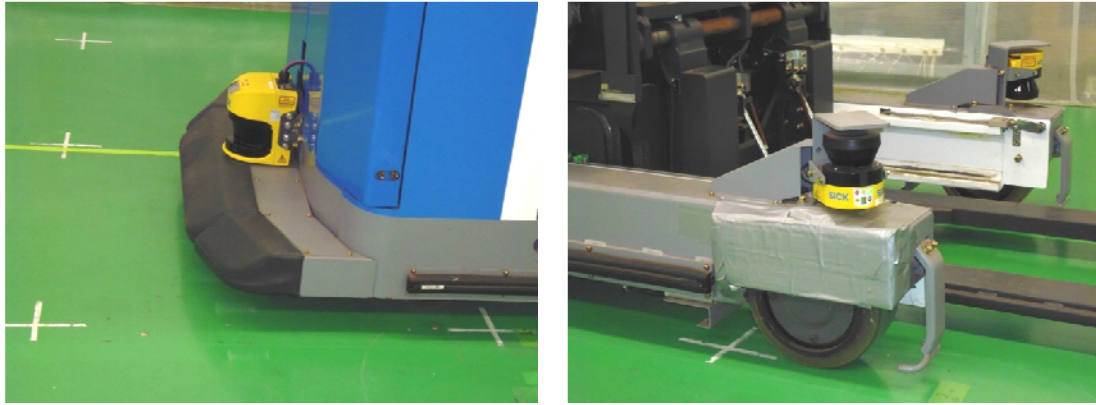


図 5.4.3-5 車体下部の安全センサー

S3000 型と S300mini 型の 2 種類のセンサーの取り付け状態を図 5.4.3-5 に示す。当初の計画では 3 箇所とも S300mini 型であったが、評価段階で安全サポート系とのサポート範囲の拡大から、後方側は S3000 型に変更した。

(3) 防護シーケンスの拡張

今回の評価は荷の形状、運用は自動運転がしやすいパレット上の単一形状の荷で評価をした。しかし一般的には複数形状を扱い、また荷をパレット上に置いたとき、前方側のセンサーに搬送するかしないか、運用する場所の制約、荷を並べて置くピッチが異なるため、防護エリアは更に多くのバリエーションを持つ。図 5.4.3-6 にそのバリエーションを示す。

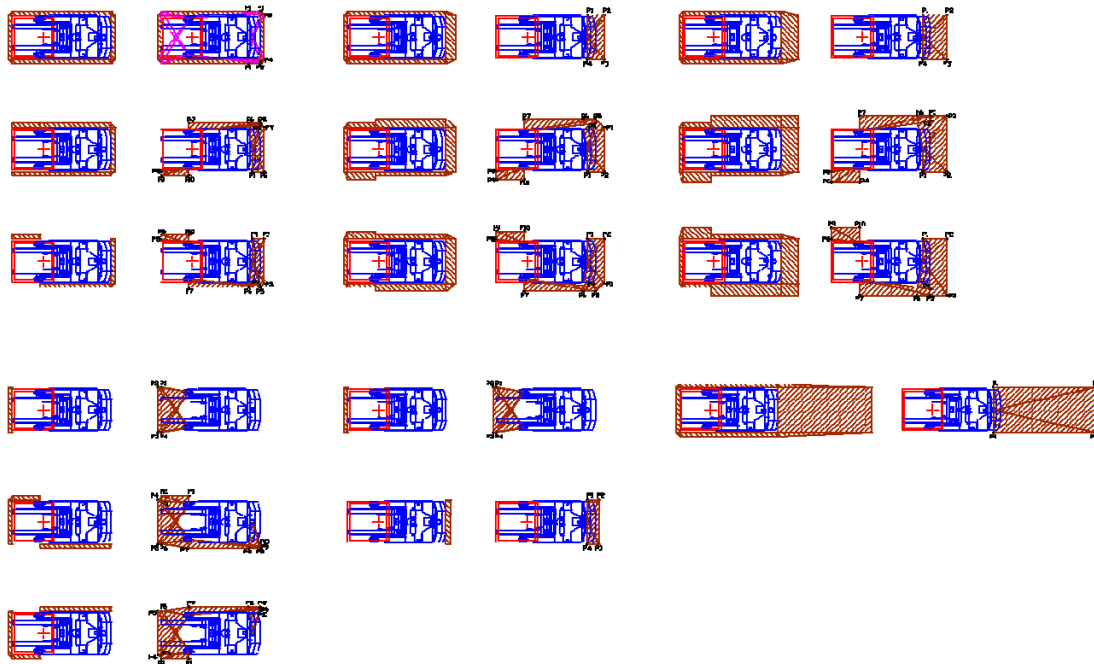


図 5.4.3-6 防護エリアのバリエーション

運用としては走行から停止、切返しによる方向転換、移載動作を連続して行う。誘導制御を行う地図上に無人搬送車が通過、速度変更、停止、移載を行う点を番地として登録し、その番地か次の番地までの区間に対する修飾情報として設定する速度情報と、制御の結果として得られる操舵角度のような情報が存在し、走行中の防護エリア決定は速度に関しては区間の修飾データとして設定されている設定値と実際の制御の結果として得られる制御データの両方を使用する。移載に関しては区間データとして積みや降ろしの作業内容と防護エリアの選択を登録する。表 5.4.3-1 にセンサーの仕様を示す。

表 5.4.3-1 SICK 社製安全センサー S3000 の仕様

項目	仕様
スキャニング角度	190° (-5°~185°)
フィールドセット数	1~8
防護フィールド(半径)	ミディウム/ロングレンジ 最大 5.5m/7.0m
警告フィールド(半径)	反射率 20%の検出物体 : 約 20m
供給電源	24V(16.8~28.8V)
残留リップル	最大: ±5%
安全カテゴリー	IEC61496 : Type3
	IEC61508 : SIL2
使用周囲温度	-10 °C~55°C
保管周囲温度	-25°C~70°C
周囲湿度	IEC61496-1:5.1.2 と 5.4.2 章、IEC61496-3, 5.4.2 章による
保護構造	IEC60529
保護クラス	DIN VDE0106,DIN , EN 50178 II
対衝撃	IEC60068-2-27 単一衝撃: 15g,11ms
	IEC61496-1:5.1.2 と 5.4.4.2 章/IEC61496-3:5.4.4.2 章による連続衝撃: 10g,16ms
重量	S3000:3.3kg
投光 / 測定データ	
レーザー保護クラス	21 CFR 1040.10 と 1040.11,DIN EN 606825:2001(パルス,レーザー・ダイオード)
波長	905 nm
光軸径	フロントスクリーンから投光時 φ12mm
	検出距離 5.5m/7.0m φ27nm・φ32nm
反射率	1.8%~数 1000%
測定距離範囲	49m

表 5.4.3-2 SICK 社製安全センサーS300 Mini Remote の仕様

項目	仕様
スキャン角度	270°
防護フィールドレンジ	半径 2m (最大)
フィールドセットの数	16
フィールドの種類	3 フィールド(1防護フィールドと 2 警告フィールド)
モニタリングケース数	32
検出対象物反射率	1.8 % ... > 1.000 %, リフレクター
レスポンスタイム	80 ms
分解能	30 mm, 40 mm, 50 mm, 70 mm, 設定可能
角度分解能	0.5°
防護フィールドの追加の距離	100mm
警告フィールドレンジ	半径 8m (最大)
距離測定レンジ	30m
マルチプルサンプルの数	2,,16 設定可能
自動リセットのディレイ	2 s,,60 秒 設定可能

図 5.4.3-7 は走行から停止し切返しを行った後に積み作業を行い、積み作業後に本線に入るまでの一連のシーケンスのモードを示す。この一連のシーケンスを基本シーケンスに分解し、シーケンス毎に防護エリアを切り替える。

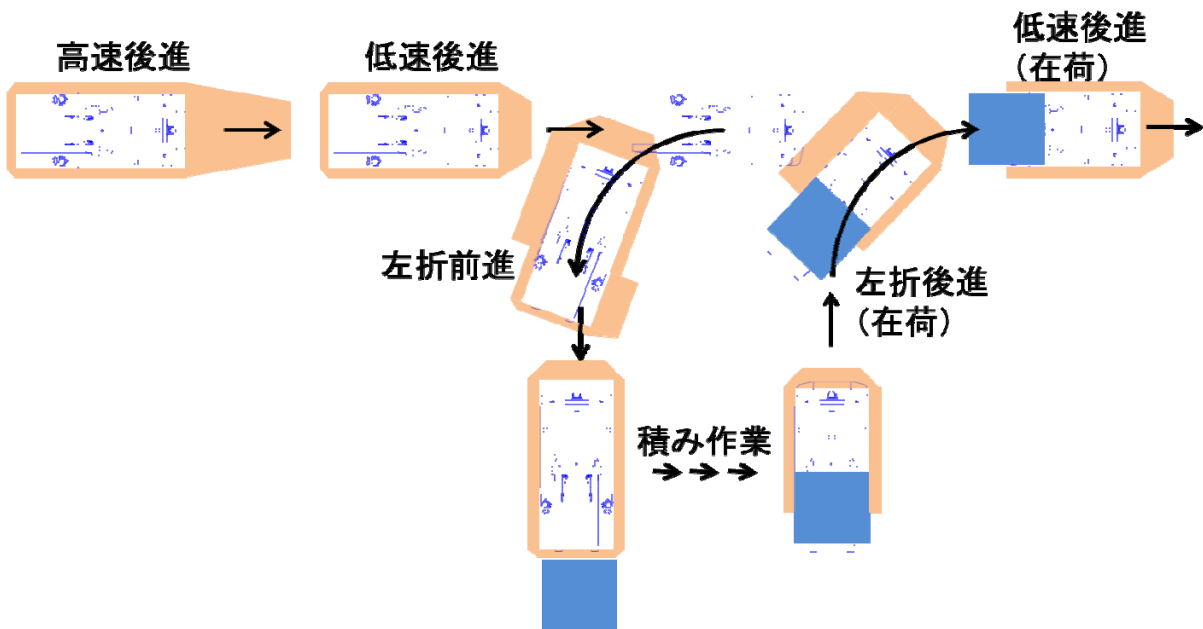


図 5.4.3-7 防護エリアの切替えイメージ

5.5 車両設計

5.5.1 ハードウェア設計

車両本体はT11パレットを搬送する運搬質量1,000kgタイプの車体をベースに主として安全系、安全サポート系を追加装備する設計とした。バッテリーは従来通り鉛バッテリーとした。フォークリフトでは高性能なリチウムイオンやニッケル水素電池で急速充電も可能であるが、鉛バッテリーはカウンタウェイトを兼用しており高性能バッテリー使用時にはカウンタウェイトが別途必要になり車体全体の軽量化には寄与しないため、8時間運転可能な鉛バッテリーを搭載し、コンベンショナルなオフライン充電の電源構成とした。この構成での車体重心位置は、空車状態では水平位置は前輪から1,016mm、垂直位置はFLから568mmになる。1,000kg積載状態ではリーチ機構が前端で最も条件の悪くなる状態で、水平位置は前輪から764mm、垂直位置はFLから667mmになり、転倒に対しては問題ない。

また自動運転で段積みのない床面平置き用途に限定する。このため、フォーク昇降の揚程は原設計機種では3,000mmであるが、本プロジェクトでは900mmに制限し、通常では人がフォークの下(荷の下)に入れない高さに制限し、リスク要因を減らした。制御系の概略構成を図5.5.5-1、図5.5.5-2に示す。制御装置、制御機器は走行駆動のモーターやインバータ、昇降の油圧ポンプなどフォークリフト固有の機能を有する特殊な電機品は専用品を使用している。コントローラ関係については特殊仕様のもものは使用せずに汎用品を使用して構成している。

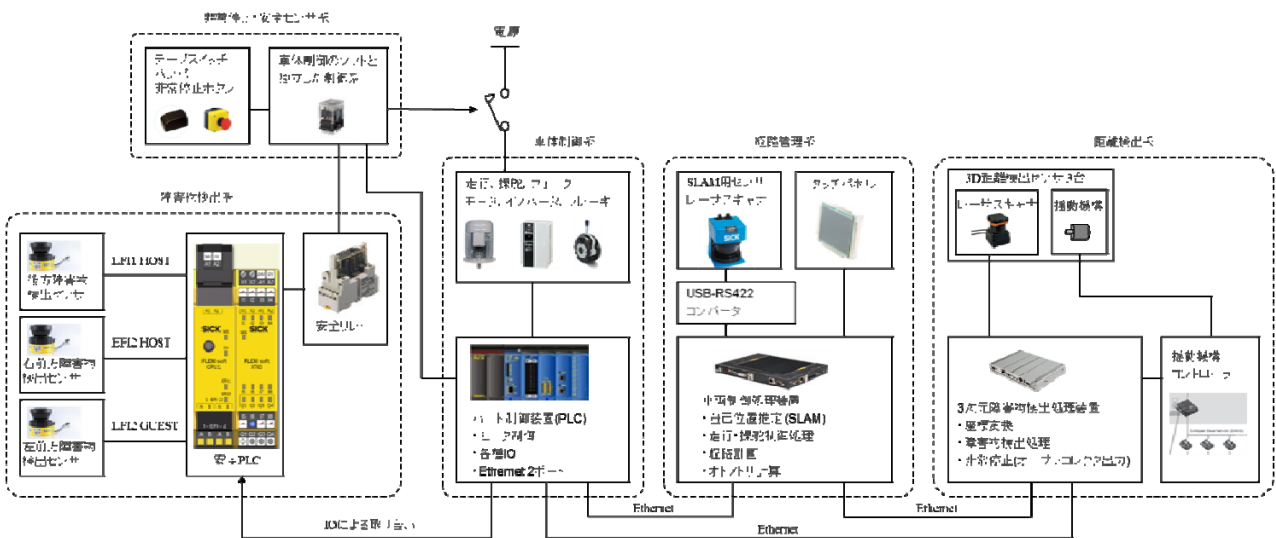


図 5.5.1-1 制御系の概略構成

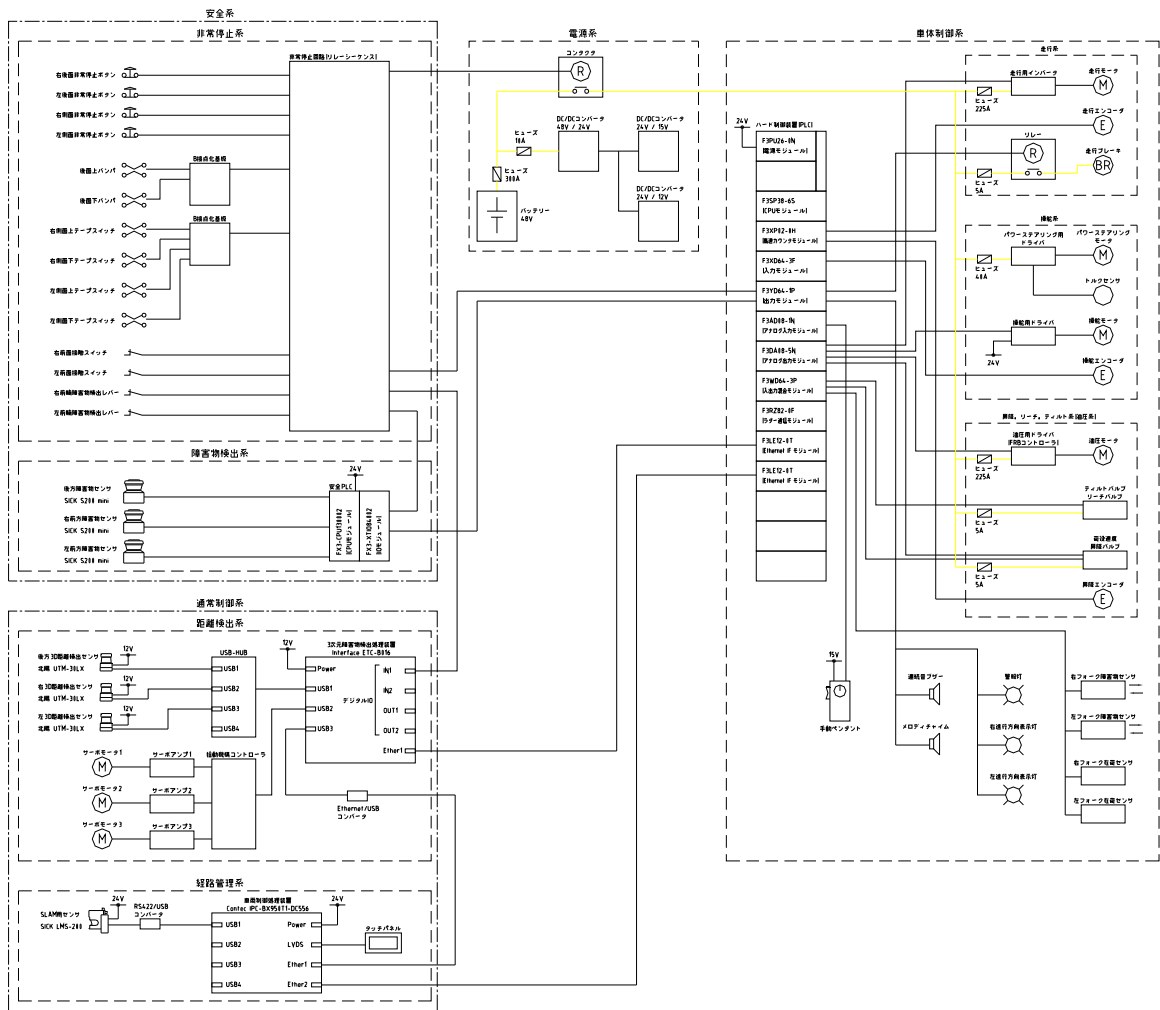


図 5.5.1-2 制御系の構成



図 5.5.1-3 車体の前方（フォーク側）外観



図 5.5.1-4 車体の後方（走行方向）外観

図 5.5.1-3、図 5.5.1-4 に完成したフォーク型ロボットの外観を示す。

安全にかかわる重要な寸法関係として、人が足先を車輪に巻き込まれるリスクがある。その位置関係を図 5.5.1-5、図 5.5.1-6 に示す。後輪に関しては成人男性の体格であれば側面からは足は後輪に届かない。後面からはバンパースイッチが先に動作する位置関係になる。前輪は前バンパーとアウトリガー下のレバーで足を接触検知し非常停止する。

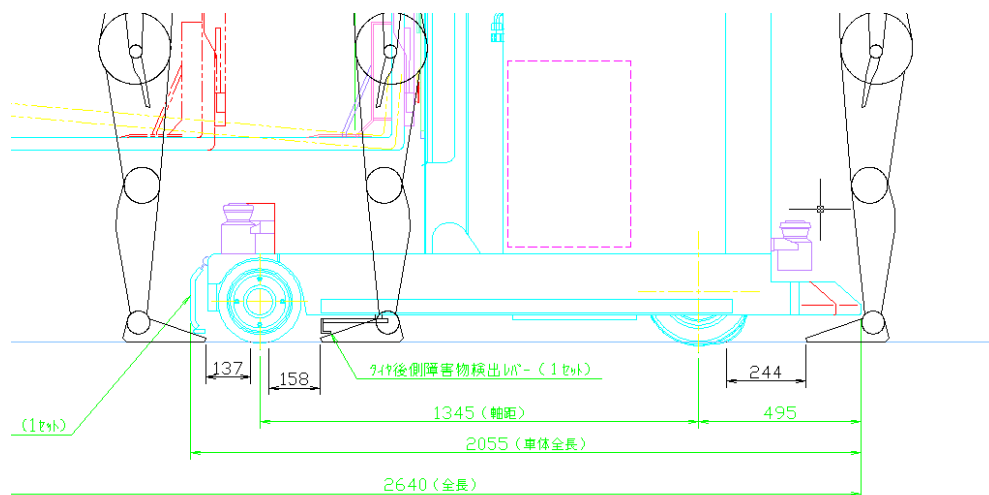


図 5.5.1-5 車輪と人が接近した場合の位置関係 1 (側面視)

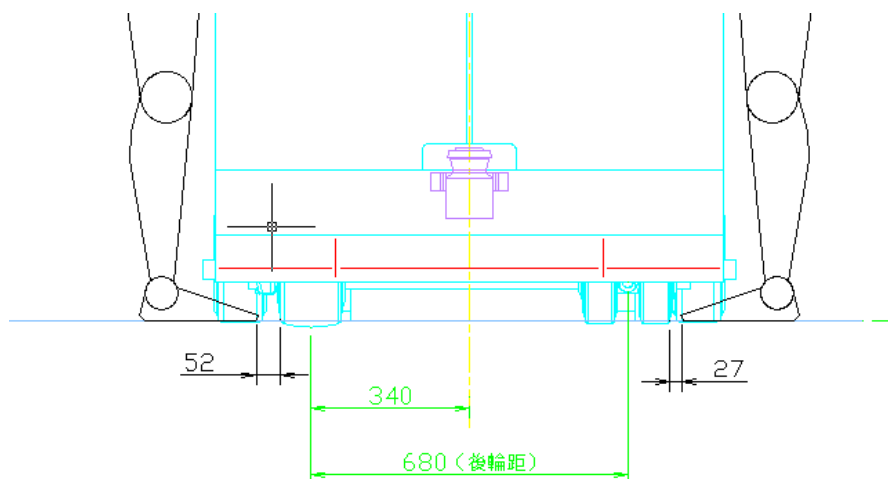


図 5.5.1-6 車輪と人が接近した場合の位置関係 2 (後面視)

5.5.2 車体制御ソフトウェア設計

車体制御ソフトウェアは従来から運用している自己位置認識誘導制御を今回のプロジェクトに使用する。

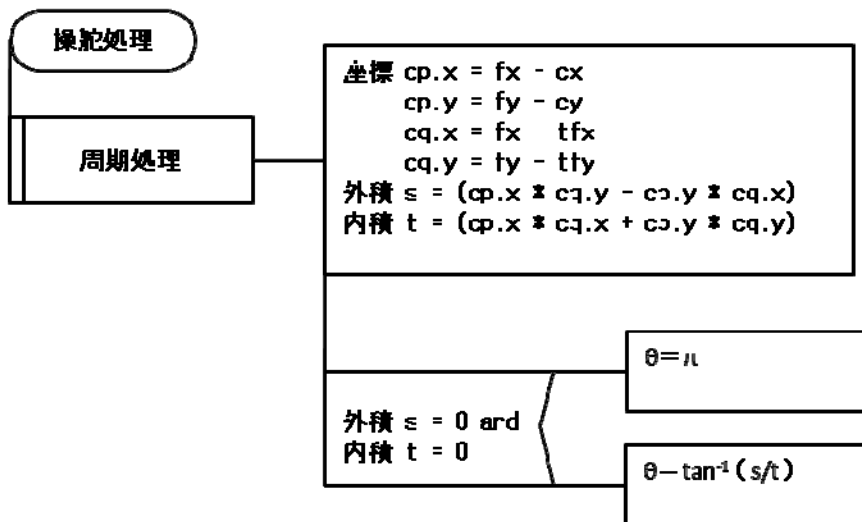
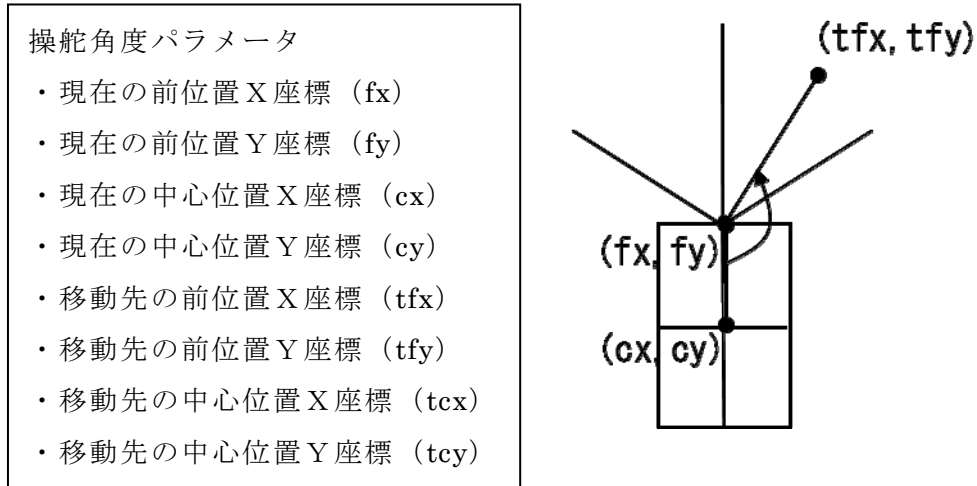


図 5.5.2-1 目標位置に対する搬送車の操舵

2次元レーザー距離計でスキャンした電子地図と、走行中の現在位置から周囲を走査した距離データをパターンマッチング処理することで得られる現在位置の座標情報に対して、操舵は目標座標に対するベクトルの内積と外積から操舵角度を決定する。図 5.5.2-1 に操舵決定の概略を示す。

5.5.3 3D 位置認識装置との連携ソフトウェア設計

3次元位置認識の測定データは車体の自己位置認識によるSLAM制御データの地図データと互換性を持たせ、3次元位置認識の障害物と地図データの比較を行う。3次元位置認識の測定データは、2値画像の左上から右下に向かって順にデータありの画素位置を並べたデータとする。測定データは、走行路面に平行の2次元平面をグリッドマップで分割し、グリッド内に測定データが含まれる場合1、含まれない場合0とする2値の画像データとして扱う。測定データが存在する画素の座標値のみ送信することでデータ量を減らすことにする。SLAMのプロセスと障害物処理のプロセスは別プロセスで実行し、障害物処理では走行速度を考慮した3次元位置認識の1スキャンデータの重ね合わせ合成処理を行い、1スキャン毎に障害物座標と地図座標の照合を行う。障害物が地図データの同じ座標に出現する場合には当該の障害物をマスクして減速・停止の判定を行う。3次元位置認識による減速処理は減速要因が排除されたあとは元の速度に復帰する処理となっているため、突発的な障害物の場合、車体の加速・減速の時定数が長いためこれがローパスフィルタとなり、制御ソフトでのフィルタリング処理は最低限の移動平均だけに留める。フィルタ処理が極端に少ない場合には細かい加速・減速の繰り返しになり走行駆動のモーター電流が不安定になる。一方フィルタ時定数が長いと検出の定常的な遅れを発生する。データの重ね合わせを行う前の距離データの段階でスキャンの仰角データとレーザー距離計のデータの位相遅れを最小にし、同期の取れたデータで床面と天井面のデータのリジェクトを行った後のデータを3次元位置認識装置からイーサネット経由で受信するソフトウェア構成を実装した。

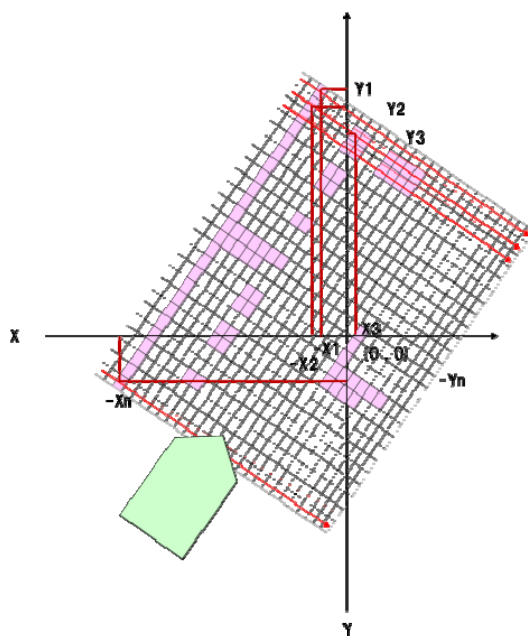


図 5.5.3-1 座標系

5.5.4 ドキュメンテーション

ドキュメンテーションについては、本プロジェクトでの特別な管理はせずに、通常の社内規定に従った。表 5.4.1-1 にドキュメント体系の本プロジェクトに関連した部分の抜粋を示す。尚、日立産機システムと日立製作所では業態が異なり、一部のドキュメント体系で異なっている部分がある。

表 5.4.1-1 ドキュメント体系

区分	フェーズ	ドキュメント	関連する社内基準等	文書のレベル
I. プロジェクト管理	1. 目的と方針			
	1.1. 本書の目的と位置付け			
	1.2. 記述の方法			
	1.3. Ver1.1での変更点			
	5. 作番の監視と制御		ドキュメント・ファイル管理要領 作番ファイル管理要領 DR実施規程 製品安全管理規程	部規程 部規程 事業所規程 事業所規程
	5.1. 概要			
	5.2. 工程管理			
	5.3. 視える化			
	5.4. 懸案管理			
	5.5. リスク管理			
5.6. 進捗管理				
5.7. 機密情報管理				
5.8. 作業成果物				
5.9. 重要作番におけるプロセス検査の実施				
5.10. 作番完了				
5.11. 改善情報の公開				
6. 構成管理と変更点管理				
6.1. 概要				
6.2. 構成管理と変更点管理の手順	B票、変更仕様書			
6.3. ドキュメント管理				
6.4. リリースしたプログラムの管理	開発実績書、メディア一覧表			
6.5. 構成管理変更点管理の監視				
6.6. 作業成果物				
II-I. ハードウェア制御	1. 要求分析	機能仕様書	製品安全規則 製品業務システム設計標準(ハード)	事業部門 事業部門
	1.1. 要求分析と定義			
	1.2. 作番計画策定			
	1.3. 作番管理留意点			
	2. 設計	システム機能仕様書、ハード基本構成図、概略機器配置図、ハードウェア仕様書、I/O割付表、各種インターフェース仕様書、制御機器配置図、取り扱い説明書、変更仕様書	製品安全性評価実施基準 電気設計一般 リレー寿命基準 電気品選定基準 電子部品	事業所規程 部規程 部規程 部規程 部規程
	2.1. システム設計			
	2.2. 詳細設計			
	2.3. 設計完了	回路図(単線結線図、展開接続図、回路図、ネットリスト、部品表)	コネクタ選定基準 インターロック運用基準 配線設計手順 遮断器の協調基準 電気品選定基準	部規程 部規程 部規程 部規程 部規程
	3. 検査			
	3.1. 製品検査			
3.2. プロセス検査				
3.3. QAによる作番監視				
II-II. ソフトウェア制御	1. 要求分析		製品業務システム設計標準	事業所規程
	1.1. 要求分析と定義		ソフトウェア設計要領	部規程
	1.2. 作番計画策定		ドキュメント作成要領	部規程
	1.3. 作番管理留意点		ソフト外注注文仕様書	部規程
	2. システム設計	システム機能仕様書、ソフト基本構成図、画面操作仕様書、操作仕様書、帳票仕様書、テーブルフォーマット、タイマー一覧表、アラーム一覧表	メディア管理要領 元図管理要領 ドキュメント体系 ソフト作業分析	部規程 部規程 部規程 部規程
	2.1. 基本設計			
	2.2. データ設計			
	3. ソフトウェア方式設計	サブシステム機能仕様書、モジュール構成図、モジュール仕様書、各種インターフェース仕様書、インターロック仕様書、通信仕様書、伝文フォーマット、異常処理仕様書、起動/停止処理仕様書、処理仕様書(処理フロー)、取り扱い説明書、変更仕様書	開発工数分析 FAST連絡書 設計助成員の業務 制御システム構築	部規程 部規程 部規程 部規程
	3.1. 詳細方式設計			
	3.2. 機能設計			
	4. ソフトウェア詳細設計	シミュレーション環境仕様書、インストール手順書、プログラム(ソースコード、ロードモジュール、開発環境)、シミュレータ(シミュレーション仕様書、シミュレーション環境)		
	4.1. 開発環境構築			
	4.2. 構造設計			
	5. プログラミング&単体テスト	テスト計画書、B票		
6. 組合せテスト	組合せテスト仕様書・兼報告書、B票			
7. システムテスト/運用テスト	総合テスト仕様書・兼報告書、B票	現地DailyReport 現地改造要領	部規程 部規程	
8. 検査				
8.1. 製品検査				
8.2. プロセス検査				
8.3. QAによる作番監視	実機テスト仕様書・件報告書、現地テスト仕様書・兼報告書、B票			
9. 保守・運用				

(1) ハードウェア

ハードウェア関係の主なドキュメントには以下のものがある。

システム機能仕様書、ハード基本構成図、概略機器配置図、ハードウェア仕様書、I/O 割付表、各種インターフェース仕様書、制御機器配置図、取り扱い説明書、変更仕様書、回路図（単線結線図、展開接続図、回路図、ネットリスト、部品表）などがある。

ドキュメントの一例として I/O 割付表を図 5.5.4-1 に示す。

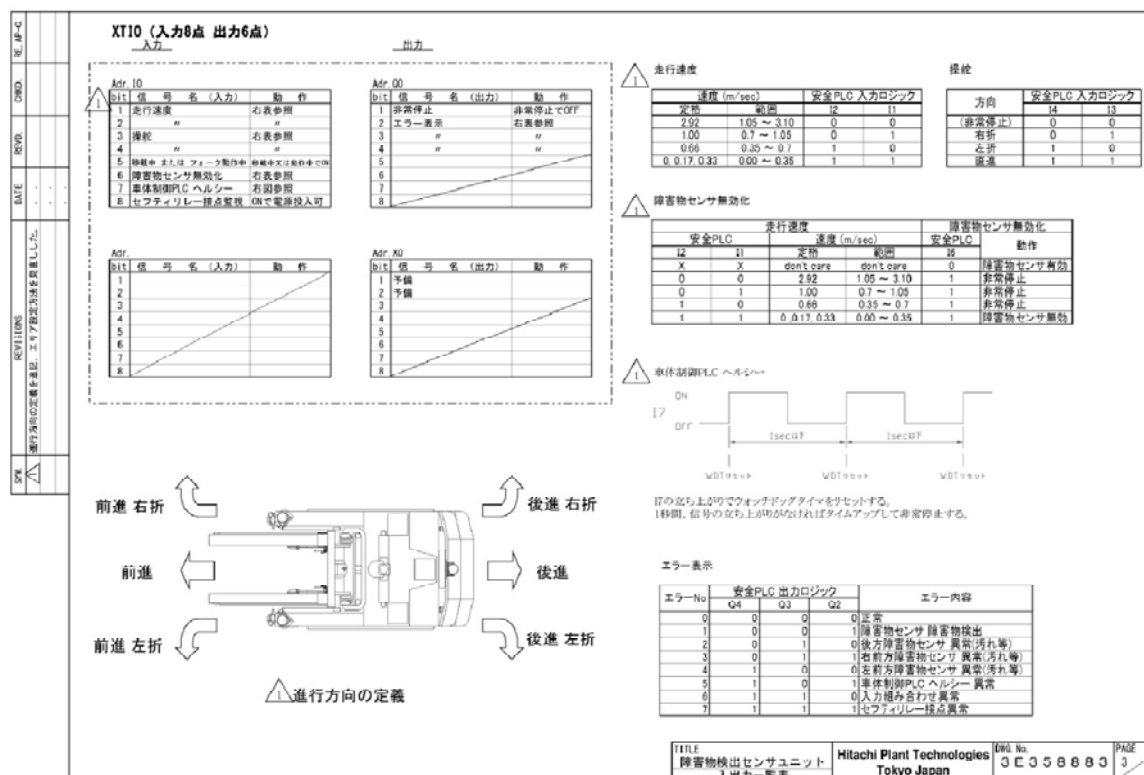


図 5.5.4-1 I/O 割付表

(2) ソフトウェア

ハードウェア関係の主なドキュメントには以下のものがある。

システム機能仕様書、ソフト基本構成図、画面操作仕様書、操作仕様書、帳票仕様書、テーブルフォーマット、タイマー一覧表、アラーム一覧表、サブシステム機能仕様書、モジュール

構成図、モジュール仕様書、各種インターフェース仕様書、インターロック仕様書、通信仕様書、伝文フォーマット、異常処理仕様書、起動／停止処理仕様書、処理仕様書（処理フロー）、取り扱い説明書、変更仕様書、シミュレーション環境仕様書、インストール手順書、プログラム（ソースコード、ロードモジュール、開発環境）、シミュレータ（シミュレーション仕様書、シミュレーション環境）、テスト計画書、B票、組合テスト仕様書・兼報告書、総合テスト仕様書・兼報告書、実機テスト仕様書・兼報告書などがある。

ドキュメントの一例としてモジュール仕様書を図 5.5.4-2 に示す。

モジュール仕様書				クラス名	クラス名	クラス名	クラス名	
モジュール名	エリア固有番号	モジュール名	モジュール名	モジュール名	モジュール名	モジュール名	モジュール名	
入力信号の組み合わせから障害物センサの設定にデコードする。				コーディング シーケンス				モジュール仕様書
項目	番号	型	内容	状態および動作事項				
走行速度 1		Boolean	同期化した速度情報 1	【動作】 下記の表に従った値を送す。				
走行速度 2		Boolean	同期化した速度情報 2					
操縦 1 X10[1].3		Boolean	上位 PLC からの操縦情報 1					
操縦 2 X10[1].4		Boolean	上位 PLC からの操縦情報 2					
フォーク動作中 X10[1].5		Boolean	上位 PLC からの操縦またはフォーク動作中情報					
障害物センサ無効化 X10[1].6		Boolean	上位 PLC からの障害物センサ無効化情報					
解除		Boolean	障害物センサ無効化					
設定 No1		Boolean	障害物センサエリア設定 No1					
設定 No2		Boolean	障害物センサエリア設定 No2					
設定 No3		Boolean	障害物センサエリア設定 No3					
設定 No4		Boolean	障害物センサエリア設定 No4					
設定 No5		Boolean	障害物センサエリア設定 No5					
設定 No6		Boolean	障害物センサエリア設定 No6					
設定 No7		Boolean	障害物センサエリア設定 No7					
設定 No8		Boolean	障害物センサエリア設定 No8					
設定 No9		Boolean	障害物センサエリア設定 No9					
入力組み合わせ異常		Boolean	入力の組み合わせが不正					

障害物センサ無効化 (フォーク動作中)		操縦				走行速度				設定エリア	備考
解除	設定 No1	設定 No2	設定 No3	設定 No4	設定 No5	設定 No6	設定 No7	設定 No8	設定 No9		
0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	設定No1	2速
0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	設定No1	2速
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	設定No1	2速
0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	設定No2	2速フォーク動作
0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	設定No2	2速フォーク動作
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	設定No2	2速フォーク動作
0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	設定No3	3速右折
0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	設定No4	3速左折
0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	設定No5	3速直進
0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	設定No6	4速右折
0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	設定No7	4速左折
0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	設定No8	4速直進
0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	設定No9	8速直進
1	0	0	1	1	1	1	1	1	1		無効
1	0	1	0	1	1	1	1	1	1		無効
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1		無効
1	1	0	1	1	1	1	1	1	1		無効
1	1	1	0	1	1	1	1	1	1		無効
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		無効

上記に存在しない組み合わせに対しては、設定異常を送す。

図 5.5.4-2 ドキュメント例（モジュール仕様書）

表 5.6-1 地上サポート系の適用範囲

フォークリフト型ロボットの運転状態		現状	計画変更
走行状態	前進	○	○
	後進	○	○
	横行	対応不要	対応不要
	スピントーン	対応不要	対応不要
	ピボットターン	○	○
車両側での人の検出	走行中/遠距離	○(3D位置認識)	○(3D位置認識)
	走行中/近距離	○(安全センサ)	○(安全センサ)
	カーブ/進行方向の近傍	○(安全センサ)	○(安全センサ)
	走行中/車体近傍	○(安全センサ)	○(安全センサ)
	移載中/車体近傍	○(安全センサ)	○(安全センサ)
地上システムでの歩行者検知	入退室管理		不要
	検出手段を具備した歩行者の検出		○
	検出手段を具備しない歩行者の検出		検出不可

対応する事象			
歩行者の飛び出しの検知	遠距離	○	○
	近距離	不完全	○
安全な速度での運行	遠距離	○	○
	近距離	不完全	○
移載時の安全	移載時	不完全	○
	移載のための走行時	不完全	○

これらの運用イメージを図 5.6-2 に示す。表 5.6-1 にも示すように最も顕著に効果を発揮するのは枠で囲った部分の建物の影からの出会い頭の接触、物陰からの歩行者飛び出しである。

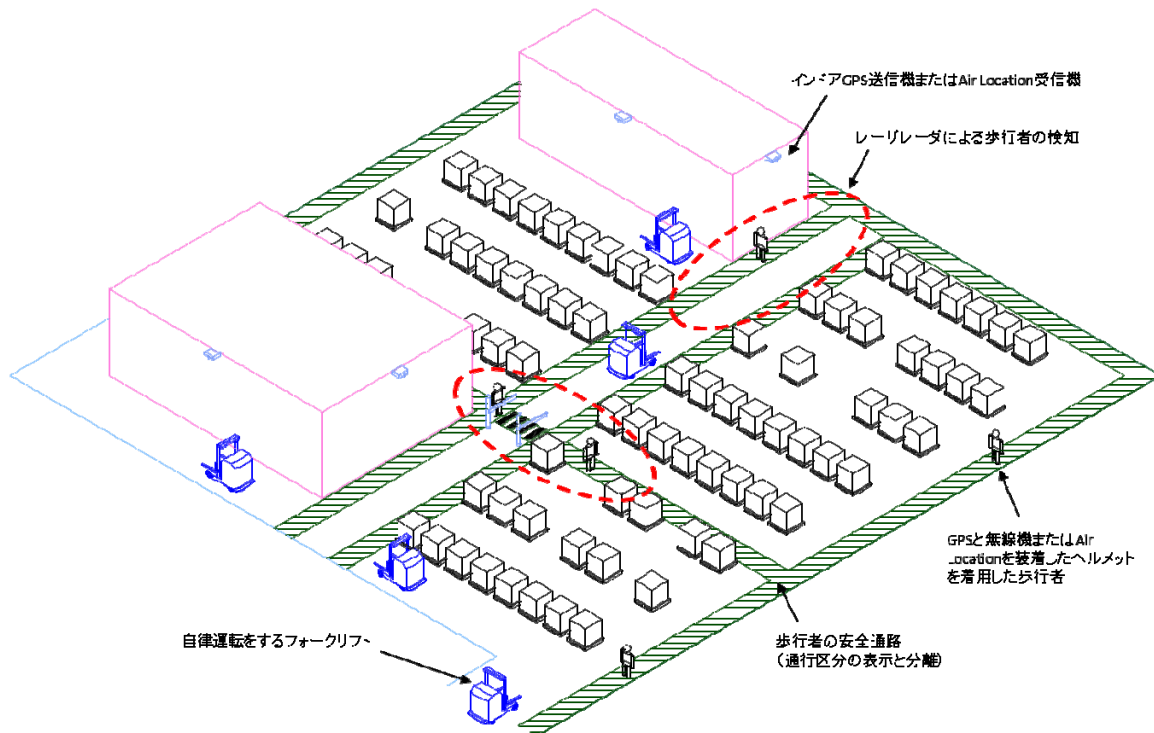


図 5.6-2 地上サポート系の運用イメージ

以下、検討内容について述べる。

5.6.1 インドア GPS システム

屋内から屋外にシームレスに位置計測を行う方法として、独立行政法人宇宙航空研究開発機構によって仕様提案されている屋内 GPS 測位（Indoor Messaging System 方式）である。屋内 GPS 測位では、屋内 に設置する送信機に位置情報を登録し、GPS 互換信号に乗せて位置情報を送信する。他の屋内測位方式では、専用の端末が必要であるのに対し、屋内 GPS 測位では、GPS 互換信号を使用しているため、GPS 受信機のソフトウェアの軽微な変更によって測位が可能である。日立グループでは経済産業省「平成 21 年度 IT とサービスの融合による新市場創出促進事業（異種測位技術間における共通処理基盤構築事業）」に参画し、屋内 GPS 測位に対応した GPS 携帯電話（試作機）に歩行者ナビゲーションのアプリケーションをダウンロードすることで、屋外では GPS 測位、屋内では屋内 GPS 測位によるシームレスな測位の実証実験を行った。インドア GPS システムは日立産機システムのより製品化し、数m以下の誤差で人の位置を測位することが可能な汎用技術である。港湾でのコンテナ位置の管理、や地下街や大型商業施設での位置の案内などで使用されている。

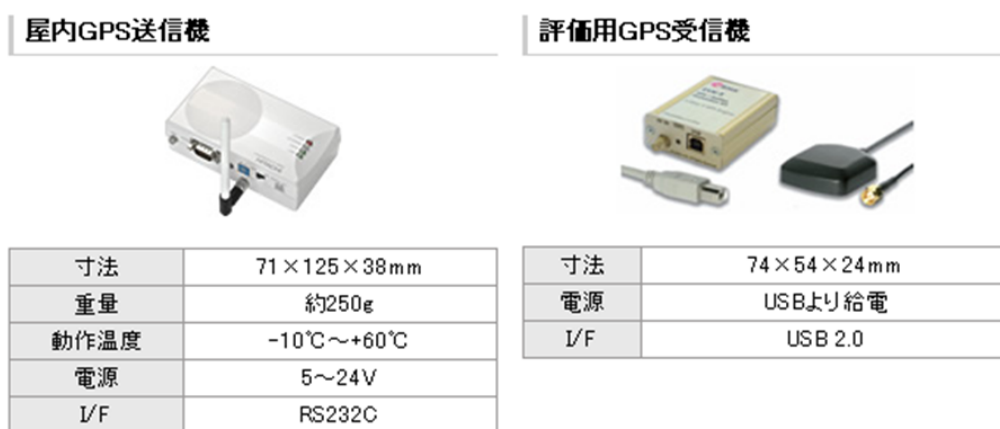


図 5.6.1-1 日立産機システム製インドア GPS

5.6.2 無線 LAN

IEEE 規格に準拠の無線 LAN（Local Area Network）を活用した位置検出技術。複数の基地局により、対象者と紐（ひも）付けられた無線タグを検知することで、対象者の位置を検出する。建築構造や歩行者の動線を勘案し、検知エリアの特性に合わせて、（a）無線タグから発信される電波を複数の基地局で受信して電波の到着時間の時間差に基づく三辺計測にて無線タグの位置を算出する「二次元測位方式」、（b）この原理を応用した一辺計測にて位置を算出する「一次元測位方式」、（c）無線タグの接続情報や電界強度に基づき当該ゾーン内の所在検

知を行う「信号強度測位方式」の3方式の使い分けが可能である。200回/秒の測位をおこなうため、フォークリフトのリアルタイムトラッキングも可能である。検出精度は屋内・屋外ともに平均1～3m程度である。日立製作所では Air Location-II の製品名で製品化している。本システムの一例としては2007年4月から美祿社会復帰促進センターで運用している。最近ではショッピングセンターや大型商業施設内の案内や位置表示にも応用されている。この方式でも無線タグのあることを検出することはできるが、あるべきところに無線タグがないことを検出することはできない。

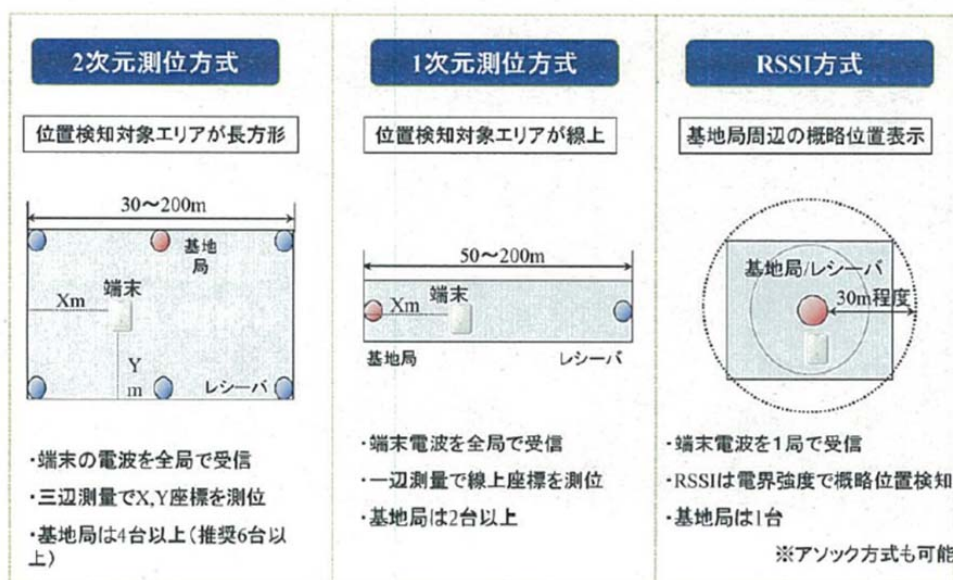


図 5.6.2-1 Air Location II 測位方式

5.6.3 レーザーレーダビジョンシステム

Laser Radarvision II は日立情報通信エンジニアリング（株）により製品化した測位システムで、床面近傍にセンサー（2次元レーザー距離計）を設置し、水平方向にスキャンする。主な用途は、セキュリティー関係、歩行者の移動軌跡を検知し追跡することでの人の流れを動的に調査するシステム、危険場所・進入禁止エリアへの人の進入検知システムである。

クラス1のレーザーを使用し誤差30cmの高精度で検出する。屋内・屋外の両方で使用可能。1つのセンサーの守備範囲は半径30mの領域を270度の範囲でカバーする。歩行者の飛び出しが想定される場所や接触のリスクの大きい領域に設置する。複数のセンサーで広範囲な領域を検出する。間仕切りで区切られた空間や、設備の陰でセンサーの死角が発生する場合にはセンサーの設置数が多くなりコストが増加する。検討した3つの方式の中では信頼性の高い検出となっているが、対人安全のために開発された装置でないため SIL 認証には対応していない。

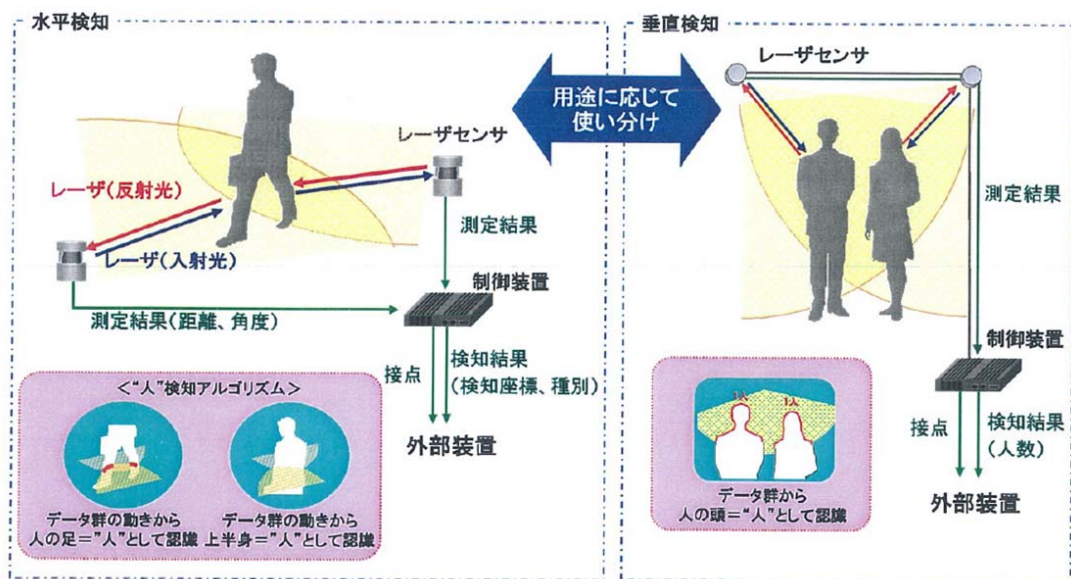


図 5.6.3-1 レーザーレーダビジョンシステムによる歩行者検知

地上サポート系はこれらを適宜組み合わせる構成とする。従来から行われている遮断器や信号灯、入退場扉開閉によるインターロック、フラッパーゲートでの人の入退場の制限や管理を行うこととの組み合わせも有効である。

5.6.4 その他の方法

日立グループではないがユニキャリア（株）ではフォークリフトに接近する人を検出する無線タグシステムを市販している。



図 5.6.4-1 ユニキャリア製接近警報装置

トヨタ L&F では超音波を使用し、後方への指向性を持たせた後方作業者の検知装置を市販している。他のフォークリフトメーカ、重機メーカーでも同様の装置を市販している。

これらの方法に共通するのはタグを持たない人を検出できないこと、動作範囲内に他のフォークや重機が入った場合の干渉や検知もれなどの信頼性に関する検討を要する事項がある。



図 5.6.4-2 トヨタ L&F 製後方作業者検知装置

6. 評価試験

6.1 機能試験

機能試験は一般的な性能試験の他に安全系、安全サポート系について実施した。試験項目の概要を表 6.1-1 に示す。

表 6.1-1 試験項目の概要

分類	試験項目	概略内容	回数, 時間 etc.	所要時間
A 検出と挙動	(1) 揺動機構	電源ONからの起動時間	回数	2 時間
	(2)	電源電圧が変動時の挙動	1回	4 時間
	(3)	車体振動の揺動への影響 ・車体振動で揺動機構のぶれ, 共振 ・性能, 精度への影響	これは単独では実施しない	
	(4)	経時変化 ・基準方向の安定性 ・メカ的な消耗, 寿命	これは単独では実施しない	
	(5) 3D位置認識	認識精度 ・対象物までの距離依存 ・対象物までの速度依存 ・移動方向(縦移動, 横移動, 斜め移動) ・形状依存(平面, 柱状, 分解能近傍の物体) ・表面の性状(反射率, 色 etc)	距離, 速度の組合せ, 各組合せでN=5以上	24 時間
	(6)	床面認識 ・床の認識 ・床でない異物の認識 ・床と壁の境界	N=5以上	24 時間
	(7)	応答時間 ・応答時間の距離依存性 ・応答時間の速度依存性 ・応答時間のその他の要因の依存性	N=5以上	24 時間
	(8)	シチュエーションに対する挙動の妥当性(移載シーケンスを含む) ・走行→減速 ・走行→停止 ・走行→非常停止 ・減速→再加速 ・停止中の要因発生 ・要因の解除	各状況に対して N=10以上	40 時間
	(9)	SLAM地図とのマッチング ・SLAMで認識している位置と3Dでの位置認識の形状の相違 ・マッチングができるか ・精度	指定コース3周以上	8 時間
	(10) 安全系	対象物までの距離と認識精度	N=5以上	8 時間
	(11)	応答時間	N=5以上	8 時間
	(12)	状況に対する挙動の妥当性(移載シーケンスを含む) ・走行→非常停止 ・停止中の要因発生 ・要因の解除	各状況に対して N=10以上	24 時間
	(13)	外乱 ・変調のかからない光(太陽光) ・低周波の輝度変調のかかった光 (高圧水銀灯, ナトリウムランプ, 蛍光灯, HF蛍光灯) ・高周波の変調のかかった光(LED, レーザ光, 光電スイッチ)	各要因に対して N=1以上	8 時間
	(14) バンパ、	応答する変形圧力, ストローク	N=1以上	4 時間
	(15) テープSW	非感知部分の存在の有無	N=1以上	4 時間
	(16)	挙動	N=1以上	4 時間
	(17) 非常停止SW	挙動	N=1以上	4 時間
	(18) 装置間I/F	3D距離認識からSLAM側の制御状態変化までの応答時間	N=1以上	4 時間
	(19)	SLAM側の状態変化から車両制御までの応答 (PLC系の応答時間)	N=1以上	4 時間
	(20)	作為的に発生させた通信エラーに対する挙動	N=1以上	8 時間
B 一般性能	(1) 走行速度		N=1以上	4 時間
	(2) 走行加速度		N=1以上	4 時間
	(3) 走行停止精度		N=1以上	4 時間
	(4) ブレーキ性能	非常停止距離	N=5以上	4 時間
	(5)	非常停止をかけた後の挙動, 姿勢変化 ・直線 ・カーブ ・前進/後進	N=5以上	8 時間
	(6) 昇降速度		N=1以上	4 時間
	(7) 昇降停止精度	・精度 ・バラツキ ・床面との関連	N=5以上	16 時間
C 実環境試験	(1) 走行中	走行中のランダムな障害発生による3D位置認識による減速, 停止で危険な状態にならないこと		4hr × 14day
	(2) 移載中	移載中のランダムな障害発生による安全計での非常停止で危険な状態にならないこと		

動作中の挙動を確認するものは、挙動を目視で確認する項目、内部ログで動作を確認する方法、外部から速度や位置を計測する方法を適宜組み合わせる。外部から挙動を観測するのは図 6.1.1 の方法で行う。個々の機能確認が取れた後の総合的な組合せ試験段階ではもっぱら目視で危険状態の確認を行い、問題となる事象が発生したあとで、ログなどによって詳細の解析を行い、その対応を検討する。また図 6.1-2 のように車体に 3 軸の加速度センサーを設置し、車体振動等の走行時の挙動も観測する。これは従来よりも最大速度 180m/分と大幅に速度を増速しているが、動力性能は高速化を達成しても車体振動が許容できるレベルを超え、実用に適するかを判断する基礎データとする。

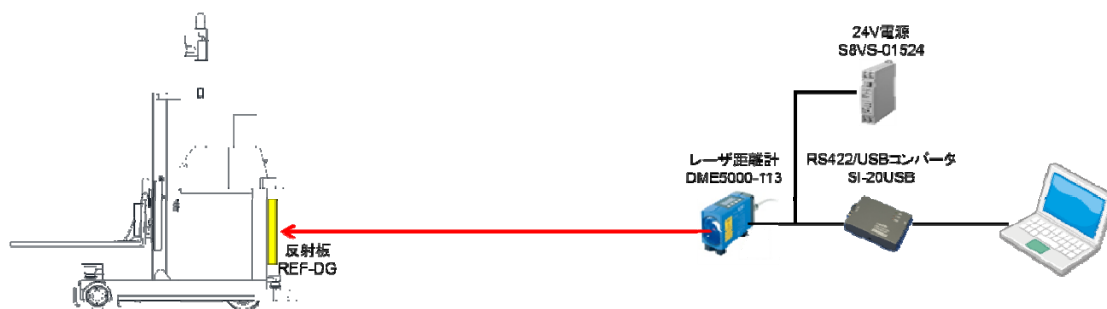


図 6.1-1 挙動の観測

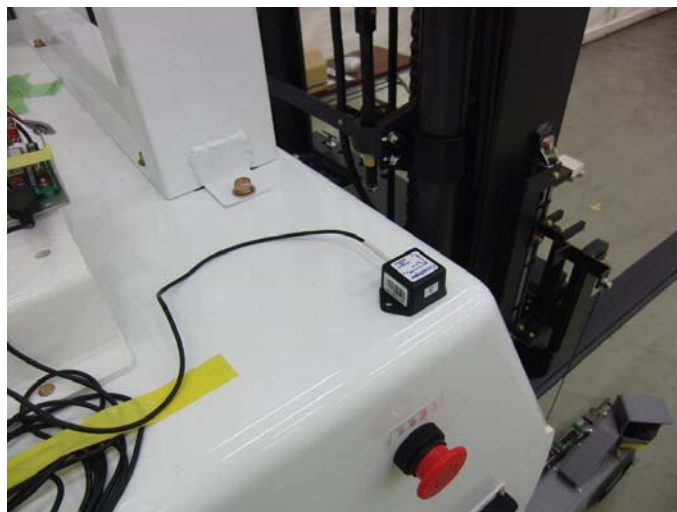


図 6.1-2 加速度センサーによる挙動の確認

6.1.1 動力性能

フォーク型ロボットの静的な動力性能特性を示す。

(1) 加速特性

代表的な設定速度 60m/分 (秒速 1.0m/s)、117m/分 (秒速 1.94m/s)、150m/分(秒速 2.5m/s)、180m/分(秒速 3.0m/s)における加速特性を示す。速度が秒速 2.5m/s までは設定

した一定加速度 0.3m/s^2 で直線的に加速することができる。それ以上の速度領域では徐々に加速度が下がり 2.8m/s 以上の速度では 0.05m/s^2 まで低下する。設定速度 180m/分 については評価試験場所の関係で、狭小場所で加速距離を短縮するため、加速度を通常の使用条件よりも大きくして計測している。

減速についても同様に、設定速度 180m/分 については減速距離を短縮するために -1.4m/s^2 で減速している。他の速度については加速と同じ一定加速度 -0.3m/s^2 で直線的に減速する。減速はインバータの回生制動で行い、回生電力はバッテリーに戻している。

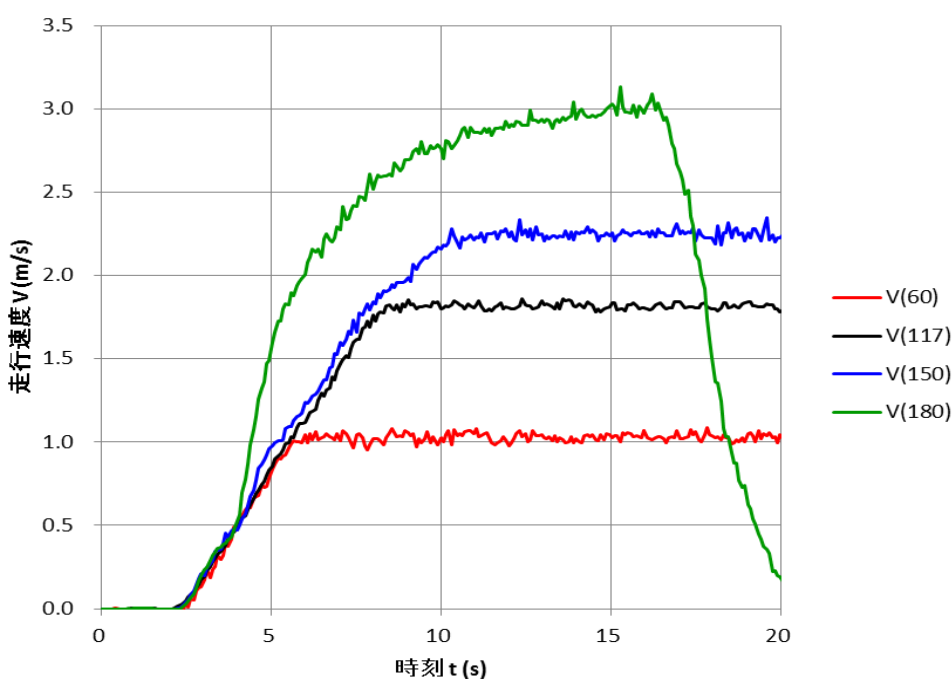


図 6.1.1-1 加速特性

(2) 減速特性

非常停止でモーターの動力を遮断しブレーキで停止した場合の減速特性を示す。ブレーキの減速は車輪と床面との摩擦に依存する部分が多く、摩擦係数の安定した状態で定格速度 (180m/分) から停止した場合は約 1.4m で停止するが、何回かの繰り返しではその値がばらつく。

プロジェクトの初期段階では走行速度 190m/分 で計画したが、動力性能の評価と振動試験の結果、 190m/分 の運用は安定したデータが得られず、実用上好ましくないと判断し、最高速度は 180m/分 とした。

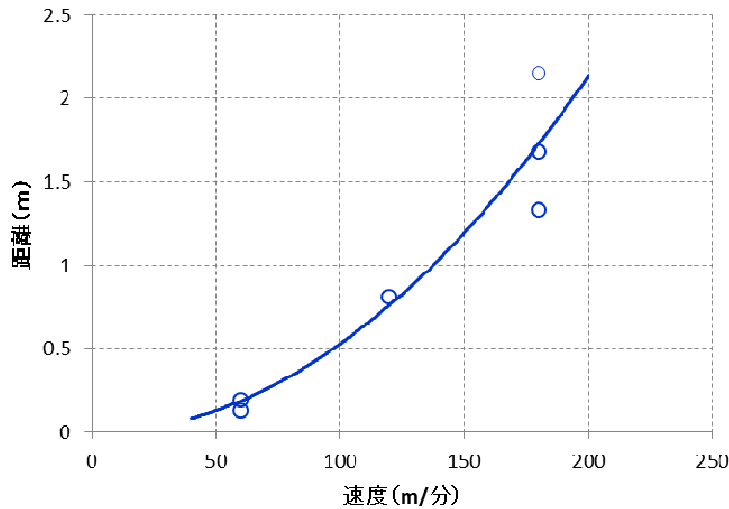


図 6.1.1-2 非常停止距離

6.1.2 3次元位置認識の評価

(1) 安全サポート系の評価基準

安全サポート系の評価は、障害物検出の評価については複数の規格が存在するが、現在の JIS 規格である JIS D6802:1997 は非接触の障害物センサーが実用化される以前に制定された規格であり、これらの事項が規定されていないこともあり、次期 JIS 改定のベース規格案となる ISO3691-4 のテストピースで試験を行っている。尚、非接触障害物検出のテストピースの B 規格としては JIS B9704-3:2011 (IEC61496-3:2008) があるが、これを反映した C 規格が個別製品の規格となっている。

表 6.1.2-1 各種規格のテストピース

ISO/FDIS 3691-4(2011)	(1)縦置き円柱ピース 直径 70mm、高さ 400mm (2)横置き円柱ピース 直径 200mm、長さ 600mm
ANSI B56.5-2012 (2012)	(1)縦置き円柱ピース 直径 70mm、高さ 400mm (2)横置き円柱ピース 直径 200mm、長さ 600mm (3)平板ピース 500mm×500mm
JIS D6802 : 1997	規定なし
JIS D6802 改定(案) (2014/産業車両協会)	(1)縦置き円柱ピース 直径 70mm、高さ 400mm (2)横置き円柱ピース 直径 200mm、長さ 600mm

(2) 認識精度

安全サポート系の評価はフォーク型ロボットに搭載しての機能確認と並行して3次元位置認識装置の性能評価を行った。代表的な結果を示す。位置認識装置は2次元の2次元レーザー距離計を揺動するその揺動速度で対象物の位置認識精度が変化する。x方向（車体の進行方向）とy方向（車体の横方向）ではオフセット値が異なるが最大でも0.15mの範囲に入り、認識性能は満足した。

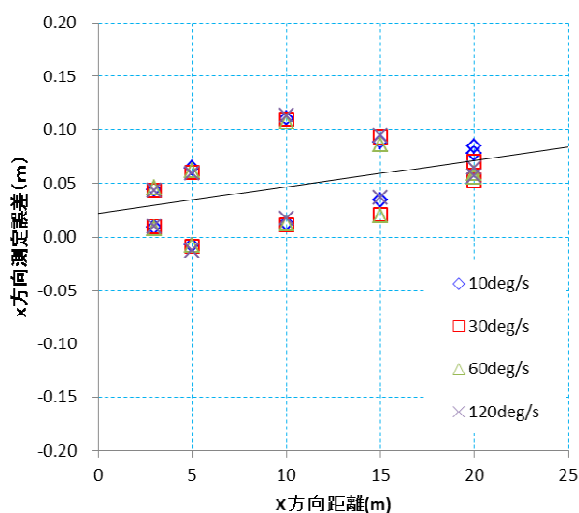


図 6.1.2-1 x 方向認識精度

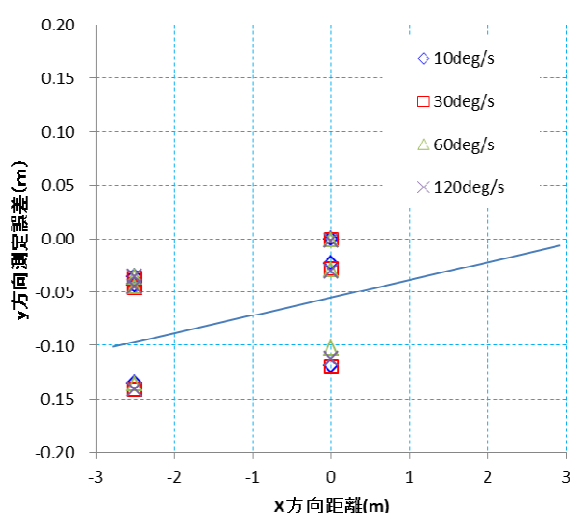


図 6.1.2-2 y 軸方向認識精度

(3) 検出距離

認識距離については物体の反射率で大きく異なる。概略反射率は白ケント紙 70~80%、ケント紙 5~10%（いずれも参考値）では、黒ケント紙では直径 50mm、直径 100mm の円柱物体は 10m の距離までが検出距離となった。これは概ね成人の腕 1 本に相当する。各規格では衝突する前に停止することを求めており、フォーク型ロボットではインバータで減速停止する停止距離 10.6m に余裕を持たせた値として 16m とする。結果 20m 以上まで検出可能で、フォーク型の減速距離を十分に満足する。規格参考にダミー人形（表面は肌色の布地）では 20m 以下で検出可能である。規格の中では ANSI B56.5-2012 では 6% 以下の反射率での試験を規定しているため白と黒の検出体を使用している。

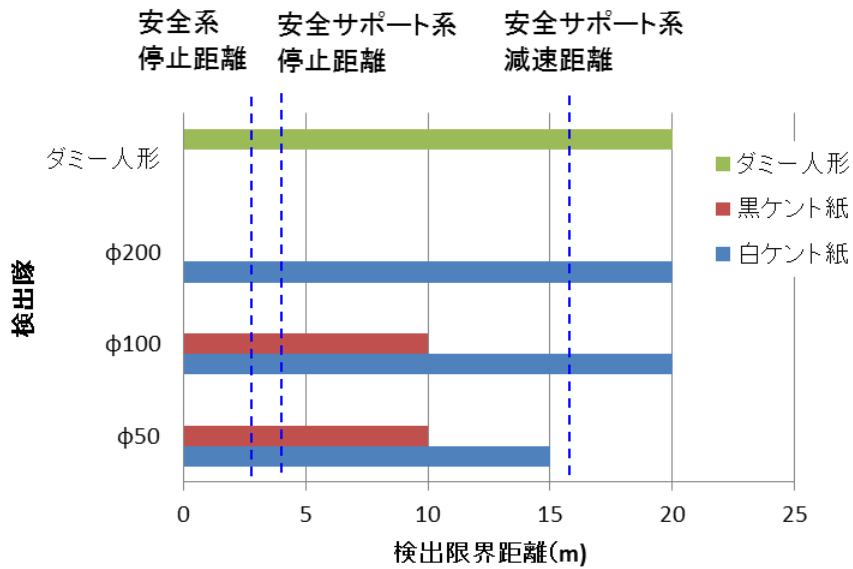


図 6.1.2-3 検出限界距離

6.1.3 安全系・安全サポート系の評価

試験場所は当初は図 6.1.3-1 に示すように、一般工場レベルの環境で実施した。評価試験の過程で安全センサーの動作上の問題が発生し、試験場所を変更した。試験項目を表 6-1-2 に示す。

表 6.1.3-1 試験場所

実施期間	実施場所	実施内容	備考
2012年1月 ～2013年6月	15m×28m エリア 床面他に砂塵の多い一般工場レベルの環境	各種機能の検証	安全センサーが空気中の塵や浮遊粒子を誤検知
2013年7月 ～2014年1月	15m×15m エリア 屋内のクリーンな工場環境	実環境を想定した動作検証	空気中の塵や浮遊粒子を誤検知するため場所を変更



(1)外観



(2)床面の状態

図 6.1.3-1 試験場所

機能試験は安全系、安全サポート系は各種の想定したシナリオ通りに動作するかを中心に試験を行った。従来から使用している車体のため、個々のパーツや機能を網羅的に評価するのではなく、本プロジェクトで新規に開発した機能を評価した。シナリオ自体の妥当性については実稼動を想定した試験の中で修正を行った。

表 6.1.3-2 機能試験

試験項目		概略内容
安全サポート系	3D位置認識	認識精度 <ul style="list-style-type: none"> ・対象物までの距離依存 ・対象物までの速度依存 ・移動方向(縦移動, 横移動, 斜め移動) ・形状依存(平面, 柱状, 分解能近傍の物体) ・表面の性状(反射率, 色etc)
		床面認識 <ul style="list-style-type: none"> ・床の認識 ・床でない異物の認識 ・床と壁の境界
		応答時間 <ul style="list-style-type: none"> ・応答時間の距離依存性 ・応答時間の速度依存性 ・応答時間のその他の要因の依存性
		各種シナリオに対する挙動の妥当性 <ul style="list-style-type: none"> ・走行-->減速 ・走行-->停止 ・走行-->非常停止 ・減速-->再加速 ・停止中の要因発生 ・要因の解除
安全系	安全センサ	状況に対する挙動の妥当性(移載シーケンスを含む) <ul style="list-style-type: none"> ・走行-->非常停止 ・停止中の要因発生 ・要因の解除
ブレーキ	非常停止	<ul style="list-style-type: none"> ・非常停止をかけた後の挙動, 姿勢変化 ・停止距離

6.1.4 安全サポート系センサーの単体試験

(1) 安全サポート系センサー(3次元障害物センサー)の単体試験の項目

表 6.1.4-1 に 3 次元障害物センサーを単体で試験する上で実施する試験項目を挙げる。本稿では、この表の項目中、今回の開発の課題に関連する No.6 の最小検出サイズ検査と No.7 の障害物検出エリア検査について報告する。

最小検出サイズ検査では、直径 50mm から 200mm の試験片を 3 次元障害物センサーから何段階かの距離に置き、直径何 mm まで検出できるかを確認する。障害物検出エリア検査では、障害物検出エリアの境界で障害物を検出するかを確認する。

表 6.1.4-1 3次元障害物センサー 単体試験項目

No	分類	評価項目	内容
1	一般試験	外観検査	設計図面通りに組立てられているか確認する
2		重量測定	各装置の重量を測定する。
3		基本動作確認	揺動装置、制御装置、電源装置の全ての装置が正常動作することを確認。
4		揺動速度測定	指定揺動速度への到達時間を測定する。
5		同調制御動作確認	揺動角度原点にてスキャンが正常に開始されているか確認する。
6	精度試験	最小検出サイズ検査	障害物の最小検出サイズと距離との確認
7		障害物検出エリア検査	<ul style="list-style-type: none"> ・揺動装置が停止した状態での評価。 ・高さ1.5m程度の人サイズの障害物の検出。 ・防護エリア、警告エリア1、警告エリア2の各検出エリアでの検出機能動作を確認する。
8	信頼性試験	異常処理機能確認	<ul style="list-style-type: none"> ・通信遮断、レーザ距離センサ異常、モータドライバ異常、etcなどの異常発生時に揺動装置が正常に停止することを確認する。
9		連続動作試験	<ul style="list-style-type: none"> ・5日24時間連続での稼働試験。 ・揺動装置の動作部に不具合が生じないか確認。
10		突入電流測定	揺動装置、制御装置の突入電流を測定する。
11		消費電流測定	揺動装置、制御装置の各動作での消費電流を測定する。
12		振動試験	揺動装置、制御装置の振動耐久試験

(2) 3次元障害物センサー単体 精度試験(最小検出サイズ、障害物検出エリアの試験)

① 3次元障害物センサー単体の試験時の座標系

最小検出サイズと障害物検出エリアを試験するための試験仕様について以下に記載する。図 6.1.4-1 は安全サポート系センサー単体の座標系である。

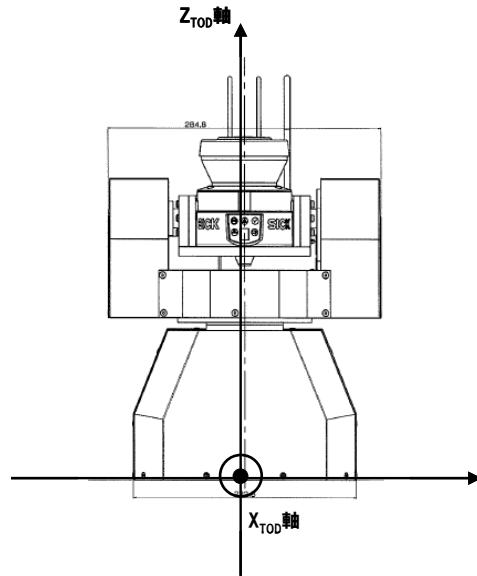


図 6.1.4-1 3次元障害物センサー 単体試験時の座標系

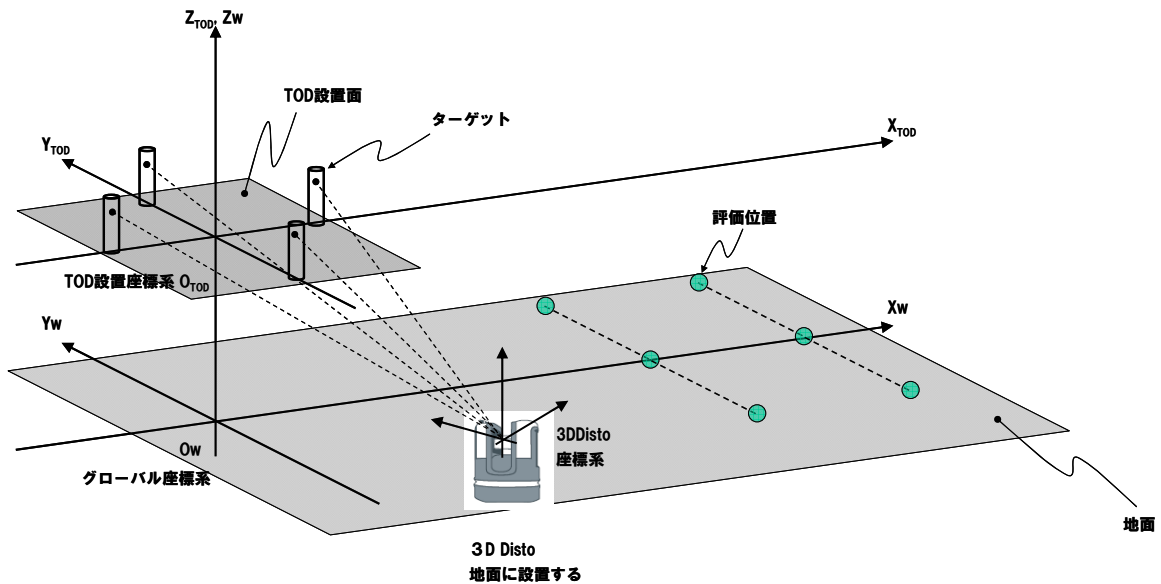


図 6.1.4-2 3次元障害物センサー 試験時の座標系

図 6.1.4-2 には、試験環境の座標系を示す。この試験場での安全サポート系センサーの最小検出サイズの評価試験、障害物検出エリア検査の試験を実施する。3次元障害物セ

センサーの障害物検出の長手方向（フォーク型物流支援ロボットの走行方向）を X 軸にとる。X 軸に直行する平面のもう 1 軸を Y 軸、高さ方向を Z 軸とする。

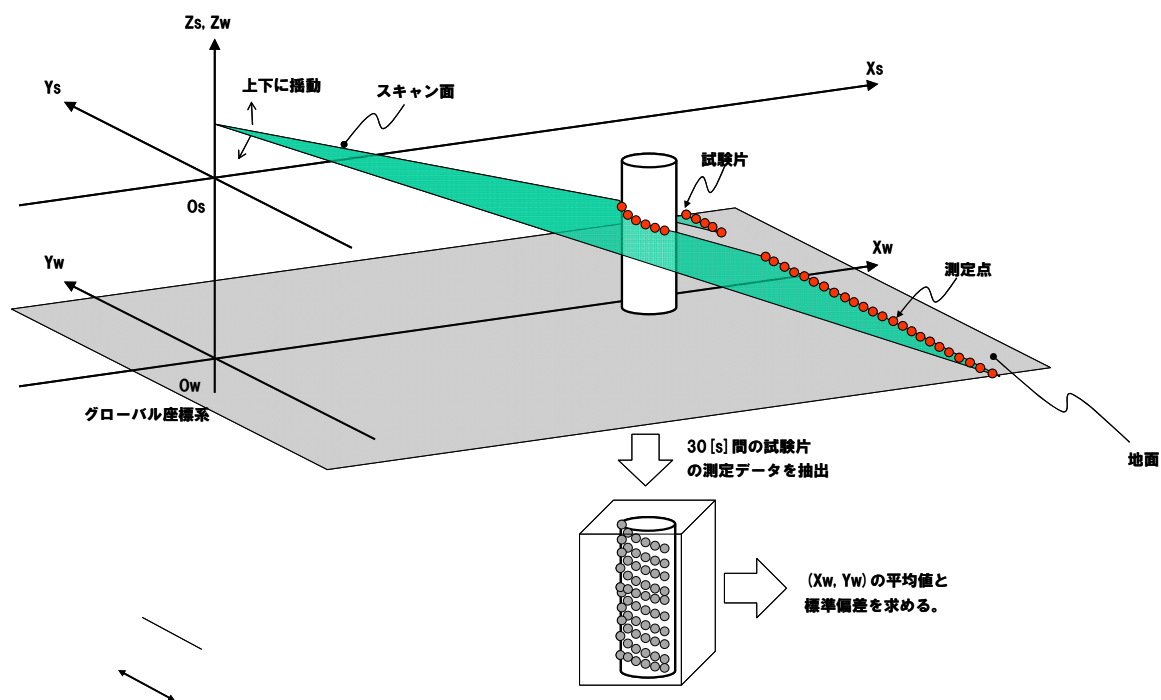


図 6.1.4-3 3次元障害物センサー 試験片上のレーザーセンサー測定点

図 6.1.4-3 に、試験片にレーザーสキャン光がどのように当たるかを示した。3次元障害物センサーは、レーザーสキャナをこの座標系では、Y 軸周りに揺動しているため、この図のようにスキャン面は上下に揺動し、レーザーสキャン光は床面に対して斜めに交差する。また、試験片に当たるレーザー光は、試験片上で斜めにあたるスキャンポイントとなる。試験片に当たらなかったレーザー光は、床面に当たる。床面は障害物として検出せず、試験片だけを障害物とする。

図に示すように、スキャン面が揺動すると試験片に対して、何回か距離を測定することになる。本試験の測定では、30 秒間に試験片までの距離を複数回測定し、その距離の値と、その距離測定値の変動を見るために、測定値の標準偏差を求め。

② 試験片の仕様

図 6.1.4-4 には 3次元障害物センサーの単体試験に使用する試験片の仕様についてまとめた。試験片は、直径 50mm～200mm で、長さを 2m とし、表面に白色のケント紙、または、黒色紙を貼りつけ、異なる反射率の物体の検出性能を確認する。

表 6.1.4-2 に本試験で使用した試験片の形状仕様をまとめた。

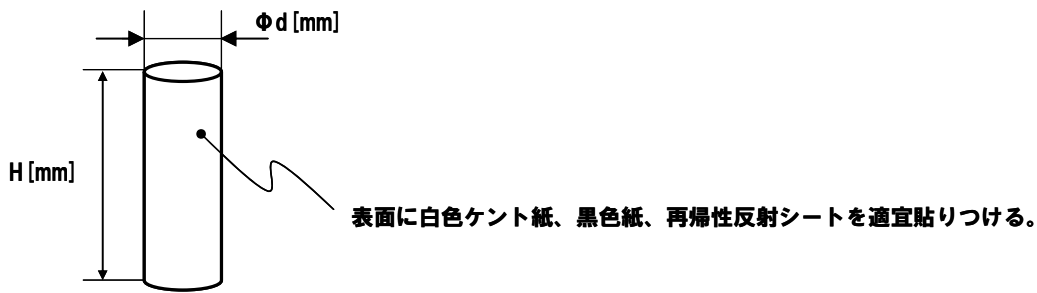


図3.1.1 試験片

図 6.1.4-4 安全サポート系センサー 単体試験片の仕様

表 6.1.4-2 安全サポート系センサー 単体試験片の仕様

品番	品名	仕様
1	発泡スチロール試験片	(1)直径 50 mm 長さ 2m (1 m + 1 m で OK) × 4 個 (2)直径 100mm 長さ 2m (同上) × 4 個 (3)直径 150mm 長さ 2m (同上) × 4 個 (4)直径 200mm 長さ 2m (同上) × 4 個 (注 1)加工時にできる溝などの傷があっても良い (1mm 程度まで)。 (注 2)材質は、標準的な発泡スチロール。

図 6.1.4-6 に安全サポート系センサーの単体試験時の試験片の状態を写真で撮影した結果を示す。発泡スチロール製の試験片を試験場に設置して、検出精度や最小検出サイズを試験した。



試験片
 ϕ 50、100、200
 長さ:2000mm
 白ケント紙
 黒紙

反射率 (参考値)
 白ケント紙 : 70~80%
 黒ケント紙 : 5~10%

図 6.1.4-5 3次元障害物センサー単体試験 (位置精度試験)

図 6.1.4-6 に試験中の 3 次元シミュレータの PC の画面を示す。3 次元シミュレータには、3 次元障害物センサーの動作状況をリアルタイムで表示するために、試験中に 3 次元障害物センサーを操作するために使用する。画面中の赤色の直方体が障害物検知エリアである。この直方体の内部に障害物が入ると、障害物を検出するとともにその位置を検出する。

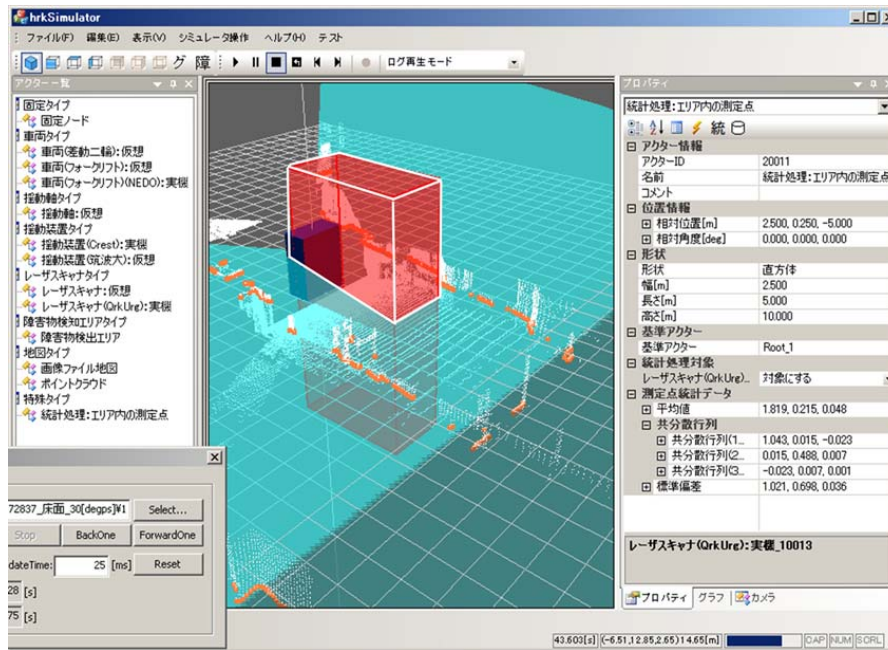


図 6.1.4-6 3次元障害物センサー 試験中のシミュレータ画面

③ 位置検出精度の試験

図 6.1.4-7 に試験片を置く位置を示す。3次元障害物センサーの最大の検出距離は20m、検知エリア幅の標準は±1.2m であるのに対して、検知エリア内の精度を評価するのに必要な図 6.1.4-7 で示す試験位置とした。試験位置に直径の異なる試験片を置き、障害物として検出するかどうかを確認した。

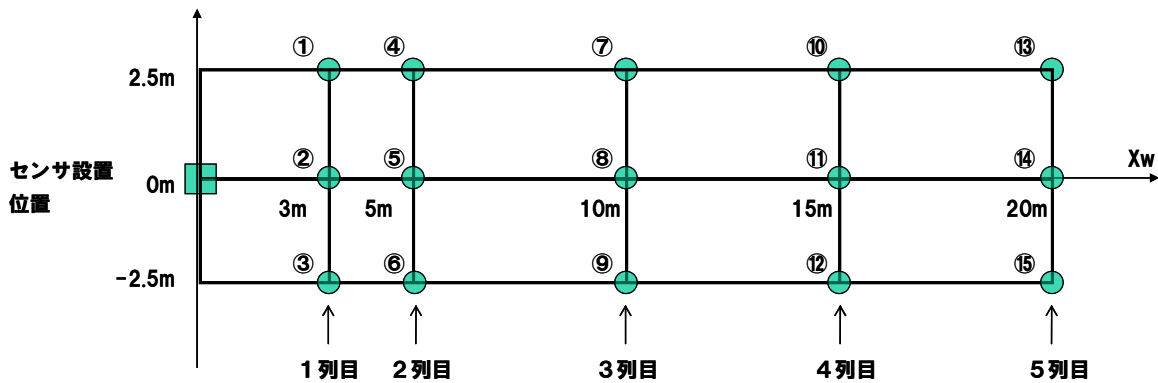


図 6.1.4-7 3次元障害物センサー 試験片の設置位置

表 6.1.4-3 に位置精度試験の結果を示す。揺動速度は低速の $10^{\circ}/s$ 、中速の $60^{\circ}/s$ 、高速の $120^{\circ}/s$ の3種類の速度で測定している。測定精度の誤差は、 $10^{\circ}/s$ の時で、X軸方向の誤差が $0.05m \sim 0.085m$ 、Y軸方向の誤差が $0.00m \sim 0.27m$ だった。高速で測定して場合でも精度は悪化せず、 $120^{\circ}/s$ で X軸方向の誤差が $0.04m \sim 0.06m$ 、Y軸方向の誤差が $0.002m \sim 0.27m$ だった。揺動速度にかかわらず、X軸方向の距離精度は、目標の $100mm$ を達成した。Y軸方向では誤差が大きい場合があるが、これは、レーザースキャナのスキャン方向に対する誤差になっている。

試験前には、揺動速度によって測定誤差が悪化すると想定していたが、揺動速度に関わらず、ほぼ一定の位置精度が出るのがわかった。また X座標の値が大きい時に、Y軸方向に誤差が大きくなる傾向がある。これはレーザースキャナの水平スキャン方向の角度測定誤差が X軸に長くなることにより、図形的に拡大されているためと考える。一方、X軸の距離が短い、フォーク型物流支援ロボットと障害物の距離が短い場合は、 $100mm$ 以内の誤差という目標をクリアしている。

表 6.1.4-3 3次元障害物センサー 位置精度試験の結果

No.	測定位置 (m)		位置測定値(m)											
			揺動速度 10° /s (低速)				揺動速度 60° /s (中速)				揺動速度 120° /s (高速)			
	X	Y	平均値		標準偏差		平均値		標準偏差		平均値		標準偏差	
			X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	3	0	2.956	0	0.03	0.042	2.954	0.001	0.026	0.043	2.957	0.002	0.027	0.043
2	3	-2.5	2.991	-2.464	0.038	0.026	2.992	-2.464	0.037	0.028	2.99	-2.464	0.042	0.025
3	5	0	4.936	0.023	0.021	0.047	4.938	0.029	0.022	0.049	4.941	0.031	0.024	0.05
4	5	-2.5	5.008	-2.457	0.036	0.046	5.008	-2.455	0.038	0.051	5.013	-2.455	0.034	0.05
5	10	0	9.889	0.119	0.013	0.063	9.893	0.102	0.013	0.069	9.887	0.112	0.022	0.052
6	10	-2.5	9.988	-2.365	0.021	0.061	9.988	-2.364	0.018	0.065	9.983	-2.359	0.031	0.06
7	15	0	14.911	0.222	0.012	0.078	14.914	0.225	0.013	0.08	14.905	0.219	0.017	0.076
8	15	-2.5	14.966	-2.271	0.009	0.033	14.98	-2.274	0.017	0.033	14.963	-2.271	0.024	0.033
9	20	0	19.922	0.225	0.049	0.075	19.941	0.206	0.017	0.056	19.936	0.217	0.007	0.043
10	20	-2.5	19.915	-2.226	0.079	0.044	19.944	-2.229	0.019	0.044	19.943	-2.228	0.007	0.044
平均値			-	-	0.0308	0.0515	-	-	0.022	0.0518	-	-	0.0235	0.0476

床面の測定精度を表 6.1.4-4 に示す。揺動速度が小さい場合には、目標の測定精度 100mm を達成している。揺動速度が大きい場合に、X 軸の距離が 10m 以上になった場合は、Z 軸の誤差が 100mm を超える場合がある。この条件は、揺動が高速で下端に近づいた位置で Z 軸方向の測定データを出力した場合に相当する。揺動が上から下に切り替わる位置での測定データであり揺動軸の速度やタイミングを取りにくい条件であるとする。

表 6.1.4-4 安全サポート系センサー 位置精度試験 (Z 方向精度) の結果

No.	測定位置 (m)	揺動速度(° /s)					
		10° /S		60° /s		120° /s	
	距離	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
		Z(m)	Z(m)	Z(m)	Z(m)	Z(m)	Z(m)
1	5	0.053	0.017	0.066	0.026	0.085	0.038
2	10	-0.034	0.022	0.077	0.159	0.113	0.014
3	15	-0.084	0	0	0	0	0
4	20	0.083	0.222	0.33	0.155	0.98	0.082
平均		0.0045	0.06525	0.11825	0.085	0.2945	0.0335

④ 最少検出サイズの試験

図 6.1.4-8 に最小検出サイズの試験の状態を撮影した写真を示す。3次元障害物センサーの X 軸上に直径が異なり、白と黒のケント紙を貼った試験片移動させて設置し、検出する距離を測定する。図 6.1.4-9 に試験片を設置する方式を示す。

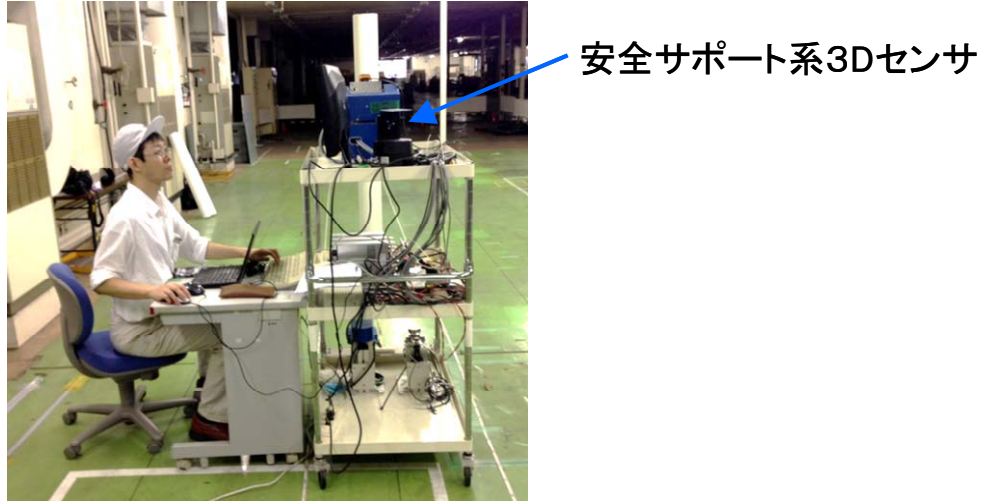


図 6.1.4-8 3次元障害物センサー単体試験の方式（最少検出サイズ試験）

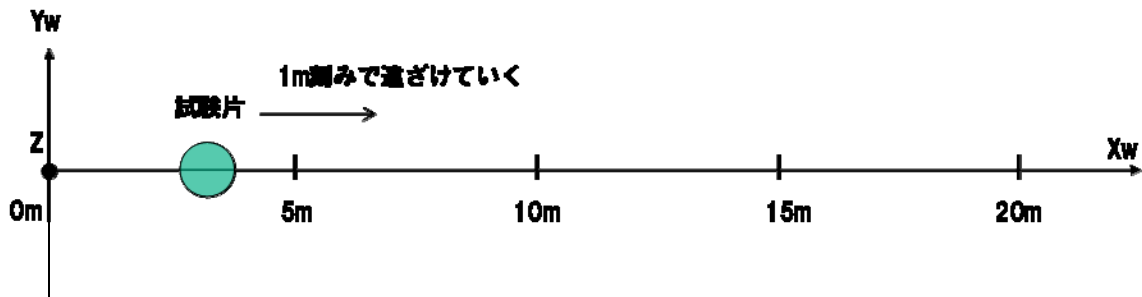


図 6.1.4-9 3次元障害物センサー単体試験の方式（最少検出サイズ試験）

表 6.1.4-5 に白ケント紙を使用した時の最少検出サイズの結果を示す。揺動速度が低速の場合も、高速の場合も試験片の直径 $\phi 50\text{mm}$ ～ $\phi 200\text{mm}$ において、 3m ～ 15m で 100% 障害物の検出が可能だった。距離が 20m の場合、試験片 $\phi 50\text{mm}$ では障害物を検出できなかったが、試験片 $\phi 100\text{mm}$ と $\phi 200\text{mm}$ では 100% 障害物を検出することができた。

表 6.1.4-5 3次元障害物センサー 最少検出サイズ試験（白ケント紙）の結果

距離(m)	検出割合(%) (白ケント紙)					
	揺動速度 10° /s			揺動速度 120° /s		
	試験片 φ 50mm	試験片 φ 100mm	試験片 φ 200mm	試験片 φ 50mm	試験片 φ 100mm	試験片 φ 200mm
3	100	100	100	100	100	100
5	100	100	100	100	100	100
10	100	100	100	100	100	100
15	100	100	100	100	100	100
20	0	100	100	0	100	100

表 6.1.4-6 には黒ケント紙を使用した時の最少検出サイズの結果を示す。3m～10mの距離では、揺動速度が低速の場合も高速の場合も試験片 φ50mm～φ200mm で障害物を検出できた。距離が 15m以上では、試験片の直径が φ50mm～φ200mm の範囲で障害物を検出しなかった。

表 6.1.4-6 安全サポート系センサー 最少検出サイズ試験（黒ケント紙）の結果

距離(m)	検出割合(%) (黒ケント紙)					
	揺動速度 10° /s			揺動速度 120° /s		
	試験片 φ 50mm	試験片 φ 100mm	試験片 φ 200mm	試験片 φ 50mm	試験片 φ 100mm	試験片 φ 200mm
3	100	100	100	100	100	100
5	100	100	100	100	100	100
10	100	100	100	100	100	100
15	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0

⑤ 障害物検知エリアの試験

図 6-1-4 - 10 に障害物検知エリアの試験方法を示す。3次元障害物センサーの位置を基準として、X軸方向に走行方向の長さを設定し、Y軸方向に検知エリアの幅方向を設定する。試験片を検知エリアの境界に設置して障害物を検知するかどうかを試験する。

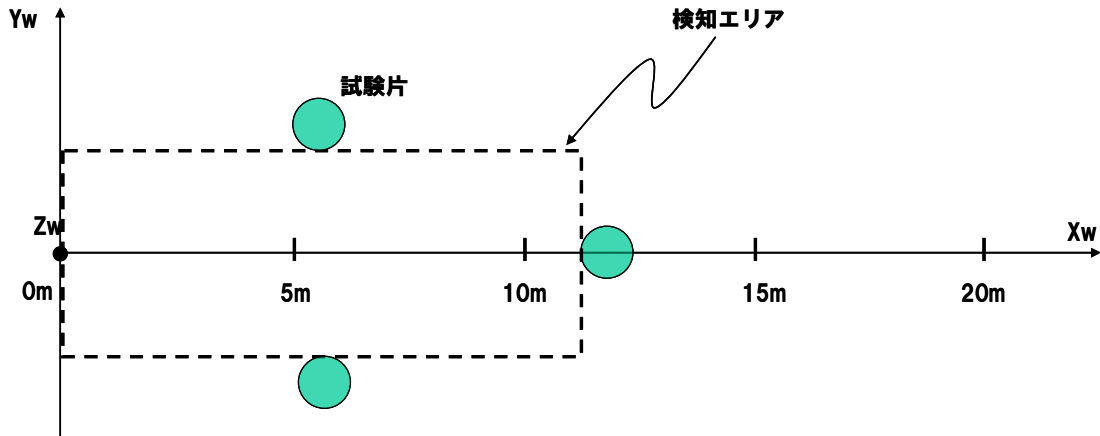


図 6.1.4-10 3次元障害物センサー 障害物検知エリアの試験

図 6.1.4 - 11 にフォーク型物流支援ロボットの障害物検知エリアの設定を示す。本試験は、フォーク型物流支援ロボットの障害物検知エリアと同等に範囲を設定して、3次元障害物センサー単体でどのような性能があるかを確認するものである。

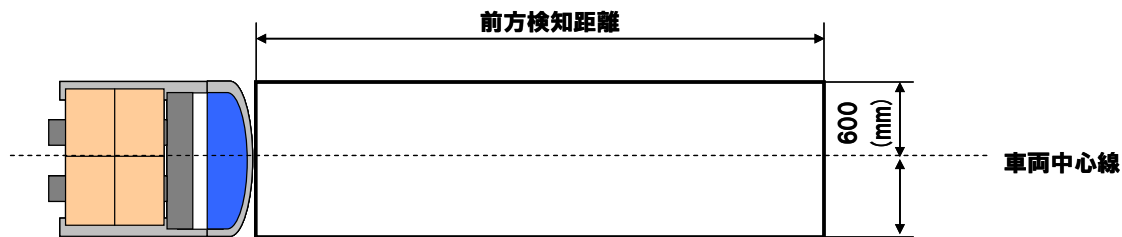


図3.3.3 検知エリアの定義

図 6.1.4-11 3次元障害物センサー 障害物検知エリア

図 6.1.4-12 には、障害物検知エリアに人間が近づいてくる場合の状態を示す。障害物検知エリアに人間の移動速度 v (m/min) で近づくとする。このような場合に障害物検知エリアはどうなるかを試験する。

図 6.1.4-13 には障害物検知エリアの試験の様子を撮影した写真を示す。ダミー人形を台車に載せて、台車をロープでけん引することにより、人の移動に対応する動きとした。

。

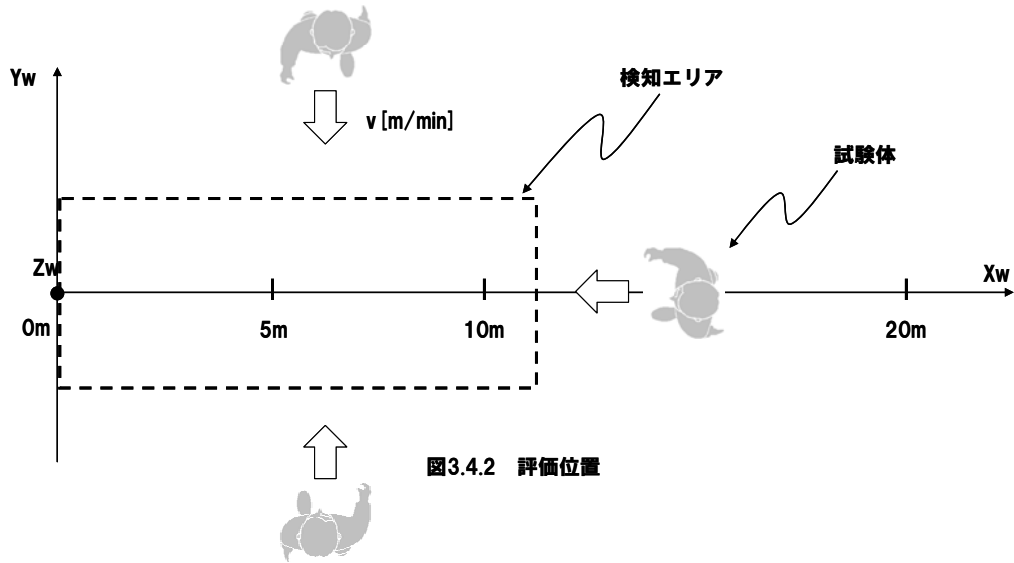


図3.4.2 評価位置

図 6.1.4-12 3次元障害物センサー 障害物検知エリアへのダミー人形の接近

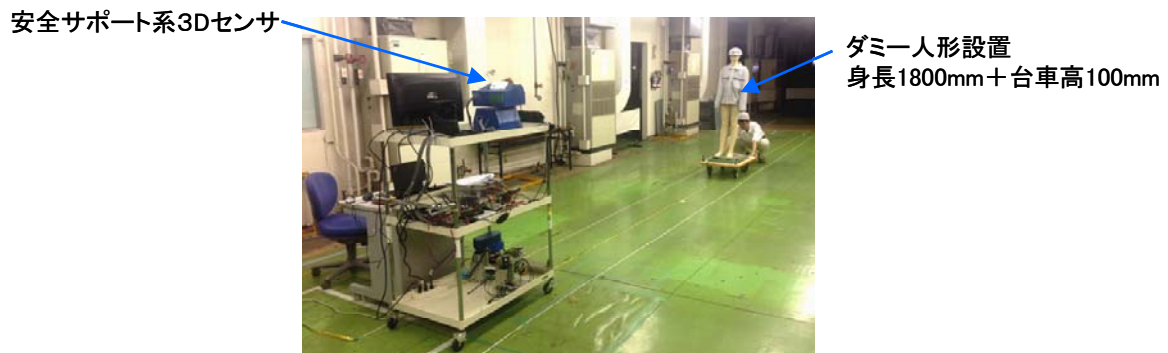


図 6.1.4-13 3次元障害物センサー単体試験（障害物検出エリア検査）

表 6.1.4-7 に障害物検知エリア試験の結果（静止時）を示す。検出距離 10mまでは安定して障害物を検出した。検出距離 15m以上では、障害物を検出はするが、検出までにかかる時間が不安定になる場合があった。

表 6.1.4-8 に障害物検知エリア試験（障害物が移動する場合）の結果を示す。検出距離 5mまでは安定しているが、10m以上の距離の場合、左右の境界での障害物検出が不安定になる場合があった。

表 6.1.4-7 3次元障害物センサー 障害物検知エリア試験（静止時）の結果

	障害物検知エリア境界での検出 (障害物、静止時)		
検出距離 (m)	前方	右側	左側
3	OK	OK	OK
5	OK	OK	OK
10	OK	OK	OK
15	検出不安定	OK	検出不安定
20	検出不安定	検出不安定	検出不安定

表 6.1.4-8 3次元障害物センサー 障害物検知エリア試験（移動時）の結果

	障害物検知エリア境界での検出 (障害物、移動時)		
検出距離 (m)	前方	右側	左側
3	OK	OK	OK
5	OK	OK	OK
10	OK	検出不安定	検出不安定
15	OK	検出不安定	検出不安定
20	OK	検出不安定	検出不安定

6.1.5 3次元障害物センサー 単体試験の評価

3次元障害物センサーの単体試験の結果を表 6.1.5-1 にまとめる。

測定範囲内で障害物の検出は、試験片の直径がφ100mmの試験片では、長さ20mまでの距離で試験片を検出した。試験片の直径がφ50mmの場合は、長さ15mまでの距離で試験片を検出した。

水平のスキャン周期は、14400°/sec、測定周期は500msに1回と設計値通りだった。

測定精度は長さ方向（X軸方向）の測定精度は目標の100mmの精度を達成することができた。幅方向（Y軸方向）と高さ方向（Z軸方向）では、長さが5mまでは測定精度は100mmだった。長さが20mでは、測定精度が100mmに達しない場合があった。

最少検出サイズは、白ケント紙で15mの距離までφ50mm、黒ケント紙では距離10mまでφ50mmを検出した。

障害物検知エリアは、静止している障害物では、10mまでの距離で障害物を検出し、移動する物体では、10mまでの距離で障害物を検出し、左右方向で10mの場合により検出が不安定なばあいがあった。

測定誤差の原因としてレーザースキャナの揺動タイミングとレーザースキャナのスキヤンタ

イメージの同期精度の問題が原因と考えられる。画像がぶれるように精度が出ないため、3次元画像の精度に制約が出ていると考える。今後のタイミングの同期回路の精度向上によりこれらの精度は改善ができると考えている。

表 6.1.5-1 3次元障害物センサー単体試験 単体試験の結果

No.	項目	目標性能	測定結果
1	測定範囲	H 2.0m × W 1.2m X D 20m	<ul style="list-style-type: none"> ・試験片φ100mm: 長さ20mまで障害物検出 ・試験片φ50mm: 長さ15mまで障害物検出
2	測定周期 (水平スキャン)	14400° /sec (25msec/スキャン)	14400° /sec (25msec/スキャン)
3	測定周期 (3次元)	500msec/測定 (1秒間に2回測定)	500msec/測定 (1秒間に2回測定)
4	測定精度	100mm	<ul style="list-style-type: none"> ・X軸方向 100mm ・Y軸方向 長さ5mの位置で、100mm 長さ20mの位置で、目標範囲外 ・Z軸方向 長さ5mの位置で、100mm 長さ20mで、目標範囲外
5	最少検出サイズ	φ50mm	<ul style="list-style-type: none"> ・白ケント紙 15mまでφ50mm ・黒ケント紙 10mまでφ50mm
6	障害物検知エリア	1.2m × 10m	<ul style="list-style-type: none"> ・静止時 10mまで障害物検出 ・移動時 10m前方方向で障害物検出 10m左右で障害物検出で 場合により不安定な場合あり。

6.2 模擬環境での試験

実環境を想定した使用環境での稼動試験を社内で行った。実施場所は15m×28mエリア、床面はコンパネ貼り（コンクリート床の凹凸対応）で一般的な機械加工工場の一画で行った。実施内容は、安全サポート系（3次元位置センサー）との連携による衝突回避の挙動、安全系の挙動を確認した。試験の過程で安全センサーの誤検知が見つかり、その後、図6.2-1に示す屋内の清浄な環境で試験を実施した。結果は走行中、荷扱い中のその他の動作に関して、当初の計画通りに安全系、安全サポート系が機能し、動作を停止することを確認した。一部の見直し事項、不具合事項が発生した。



図 6.2-1 試験の実施状況

また社内行事の際にデモ運転を行い一般の方の意見も聴取した。約200名が参加した社内行事でデモ運転を行い、普段、このような機器に接していない方の意見から問題点の抽出を行った。



図 6.2-2 社内でのデモ運転

6.2.1 見直し事項

評価試験の結果、設計見直しを行った事項について説明する。

障害物の近傍を高速で通過する際に、地図上に設定された構造物を障害物と誤認識することが発生した。実際の運用ではフォーク型ロボットの走行路を設定したあとで、一時的に物を置いた場合などは減速すべきであるが、設備や構造物で永続的かつ局所的に障害物との間隔が狭くなる場合、この部分は地図として認識できるのであればそのまま通過する。搬送能力対策として人を含む一時的な障害物でない場合に対人安全機能が本来機能を阻害することがないように、安全サイドで減速する方向に誤動作する事例であるが、仕様と異なる挙動であり、搬送能力は低下するため修正をした。

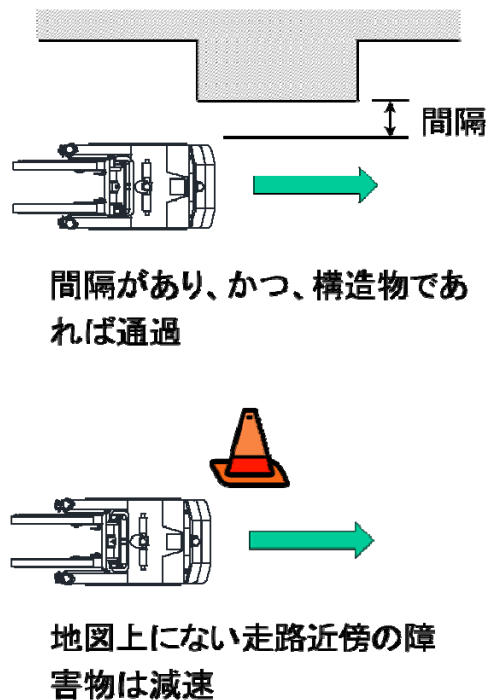
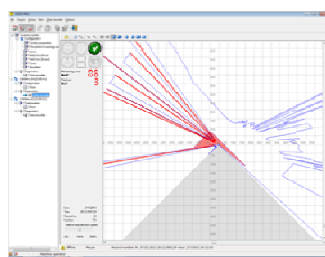


図 6.2.1-1 地図情報と 3 次元位置認識の認識不一致

6.2.2 不具合事項

障害物の車体下部に取り付けた安全センサー（SICK 社製）が空気中に舞う埃（微粒子）で誤動作し、予期しない非常停止をすることがある。試験環境が埃の多い場所であったために見つかった事象である。原因は走行で生じる乱流による埃の舞い上がり、床に敷いたコンパネ（合板）の上を車体が通過する際に、車体重量によりコンパネが変形し、コンパネ（合板）と床面の間に堆積した微粒子が隙間から噴出し、その微粒子を安全センサーが誤認識したことであった。原因の確定に時間を要した。



センサの直近に障害物を誤認識

図 6.2.2-1 安全センサーの誤認識

コンパネの隙間



図 6.2.2-2 床面の状態

この事象については取り付け位置を走行による乱流の影響の少ない 800mm 以上に移動すれば発生頻度は大幅に減少する。それでは当初の安全仕様を満たさなくなり、試験場所の清掃等の対応だけでは解決できず、試験環境を埃の少ない場所に変更し評価を継続した。

6.3 安全検証センターでの評価

フォーク型物流支援ロボットの車体が大きく安全検証センターの設備能力を逸脱し、安全検証センターで行えないため(一財)日本自動車研究所（JARI）で衝突安全の衝突試験を実施した。フォーク型物流支援ロボットを走行させ、ロボットとの衝突（一次衝突）と衝突後の床面との衝突（二次衝突）において走行速度、ヘルメットの有無によって衝突時の衝撃を評価した。評価は自動車分野で使用されている指標であるダミーの頭部傷害基準値（HIC：Head Injury Criteria）で行った。また衝突時の挙動を高速度ビデオ撮影し、その挙動、衝突後のダミーの状態から車体形状等の課題を検討した。尚、試験は安全バンパー、非常停止スイッチ以外の安全系、安全サポート系による衝突回避機能は停止し、衝突した後の挙動を評価した。試験の方法としては図 6.3-1 に示すように直立状態のロボットをダミーに衝突させ、そのときの挙動を観測する。

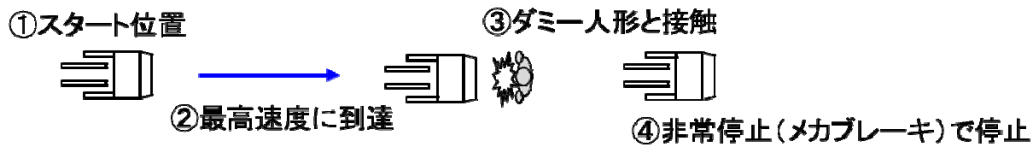


図 6.3-1 衝突試験要領

試験場所は図 6.3-2 に示す（一財）日本自動車研究所の自動車用の衝突試験場所（屋内）の一部をお借りして約 40m の走行距離で実施した。

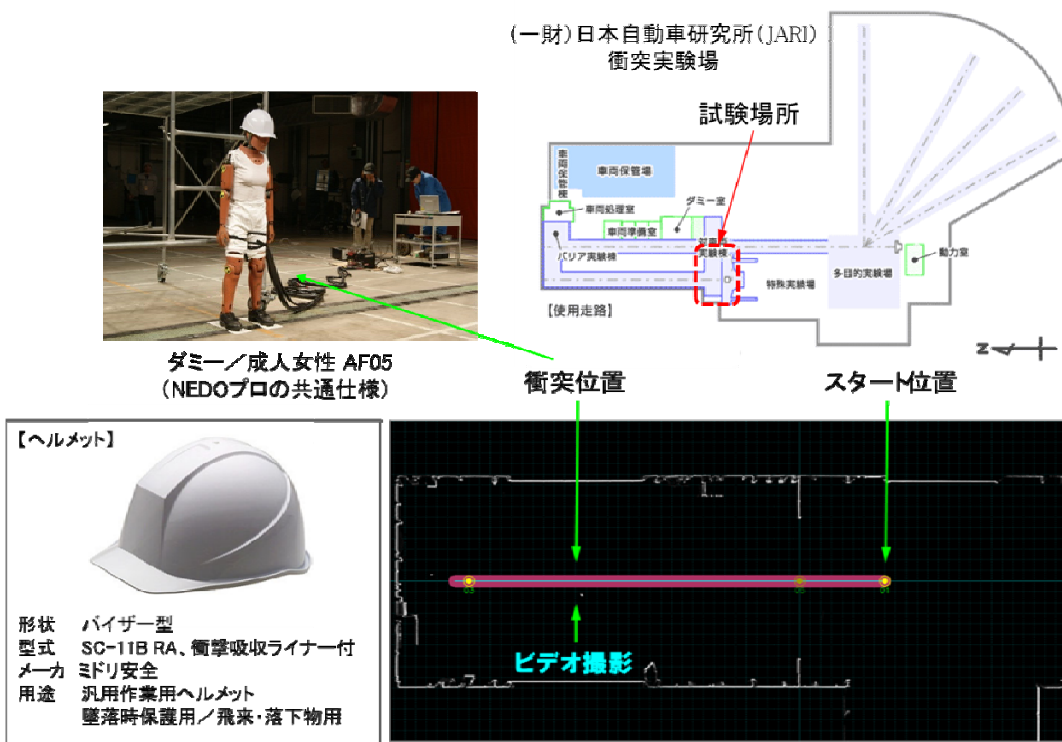


図 6.3-2 衝突試験要領

試験としては表 6.3-1 に示す条件で行った。試験は衝突したダミーの応力を開放する休止時間が必要で、1日の作業では当初計画していた側面衝突は行うことができなかった。

表 6.3-1 衝突試験

試験番号	試験条件（衝突速度、ヘルメット有無）
Test 1	180m/min、ヘルメット有
Test 2	180m/min、ヘルメット無
Test 3	180m/min、ヘルメット無
Test 4	60m/min、ヘルメット有
Test 5	120m/min、ヘルメット有
Test 6	60m/min、ヘルメット無

6.3.1 衝突時の挙動

衝突試験でダミーと車体を衝突させた結果、以下のような挙動となった。衝突時の挙動は、合計6回の衝突において一定の傾向が見られた。

- ① ロボットは車体下部に設置したバンパースイッチでダミーとの衝突を検知し、走行モーターの電力を遮断し、電磁ブレーキにより停止する。
- ② ダミーは車体上部のバンパーで後ろに押され、転倒する。このとき頭部はロボットの車体に額部分が衝突する。
- ③ 足は床面との摩擦が大きく、車体下部バンパーで押されながら減速し、頭部は一次衝突時の速度で車体から離れ、後頭部から床面に衝突する。後頭部の床面衝突に遅れて背中、臀部が床に衝突する。
- ④ 一次衝突から約1秒で2次衝突に至る。
- ⑤ 走行速度が120m/分、180m/分と高速で衝突したとき、足首に近い下腿部分でダミーを押し、停止に足首から下腿の一部が車体の下に挟まれることがある。ダミーが車体に押されて移動する距離は、移動速度180m/分時に最大1.86m引きずられ、0.29mが車体の下に巻き込まれた。
- ⑥ 低速でのダミーの移動は、移動速度60m/分時は0.11m引きずられ、180m/分の高速走行よりも短距離である。

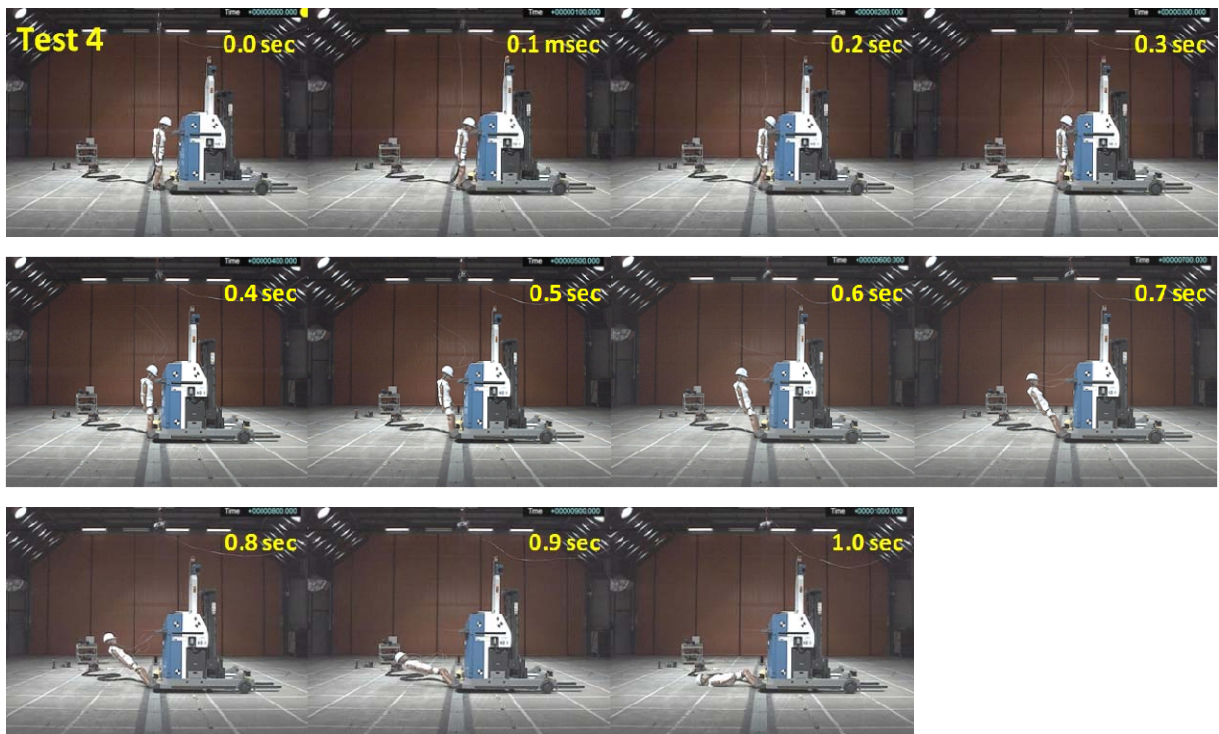


図 6.3.1-1 衝突時の挙動 1 (条件：衝突速度：60 m/min、ヘルメット着用)

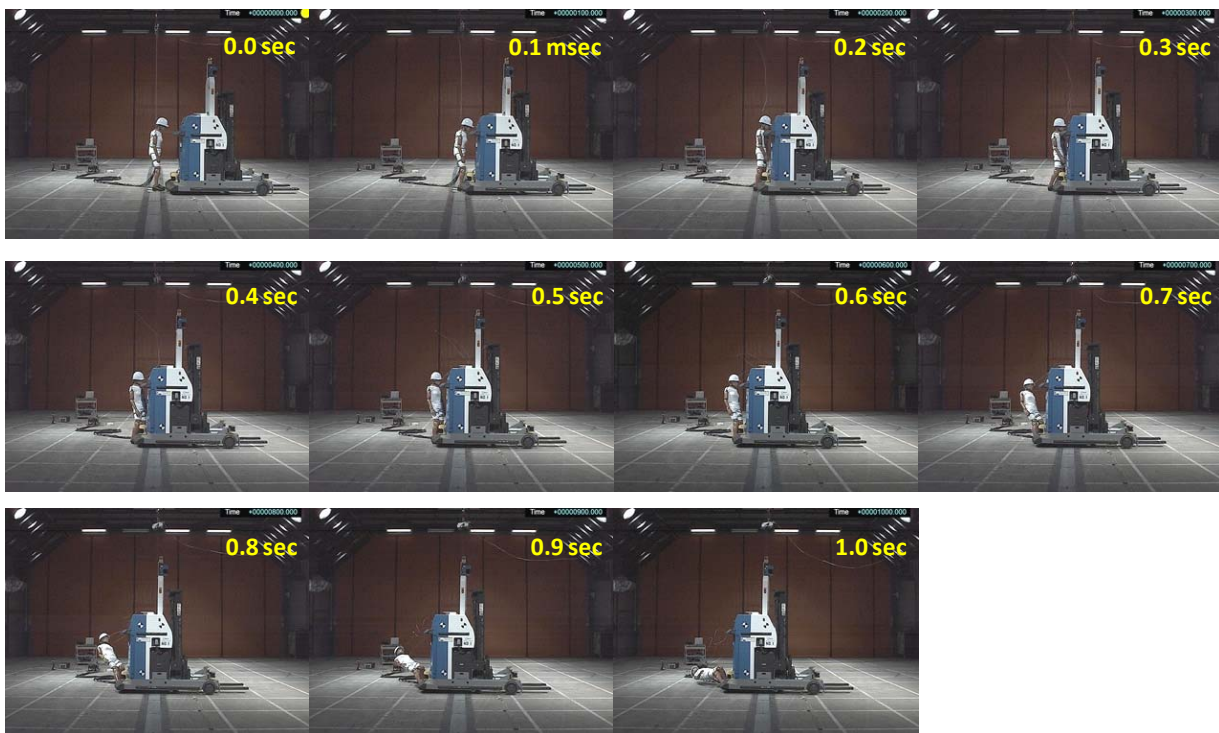


図 6.3.1-2 衝突時の挙動 2 (条件：衝突速度：120 m/min、ヘルメット着用)

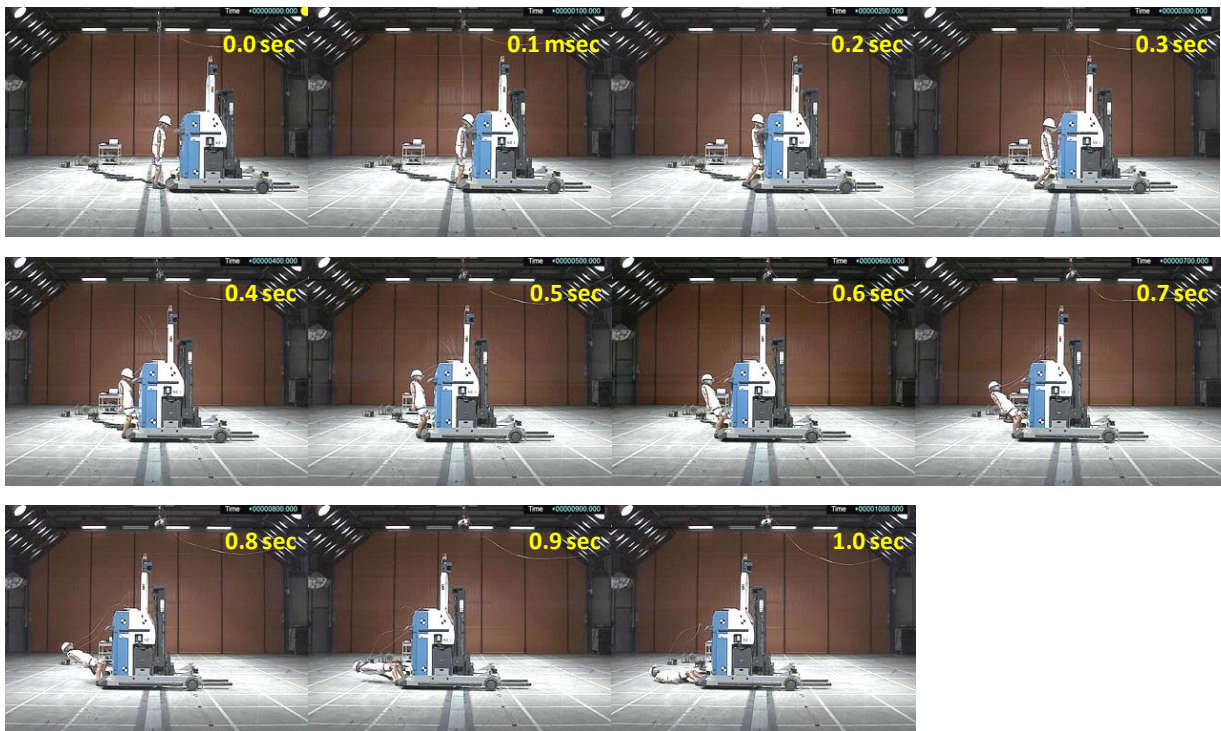


図 6.3.1-3 衝突時の挙動 3 (条件：衝突速度：180 m/min、ヘルメット着用)



図 6.3.1-4 180m/分での衝突時の挙動



図 6.3.1-5 衝突後のヘルメットの変形

試験に使用したヘルメットは、内部に発泡スチロールの衝撃吸収ライナーを装着した汎用作業用ヘルメット（バイザー型ヘルメット、型式 SC-11B RA、衝撃吸収ライナー付、メーカー：ミドリ安全）を使用した。衝突試験時の1回の二次衝突衝撃で後頭部が変形し、内部の衝撃吸収ライナーまで変形した。ヘルメットは試験ごとに新品を使用した。ヘルメットが車体に接触した箇所に塗装表面に傷は発生したが、車体のへこみや変形は見られなかった。また試験中にダミーが非常停止スイッチに衝突したことがあったこのときはスイッチのプラスチックの押しボタンが破損した。車体には図 6.3.1-6 に示すように金属製の取っ手もあり、この構造に関しては見直しが必要である。



図 6.3.1-6 衝突後のヘルメットによる車体の塗装傷

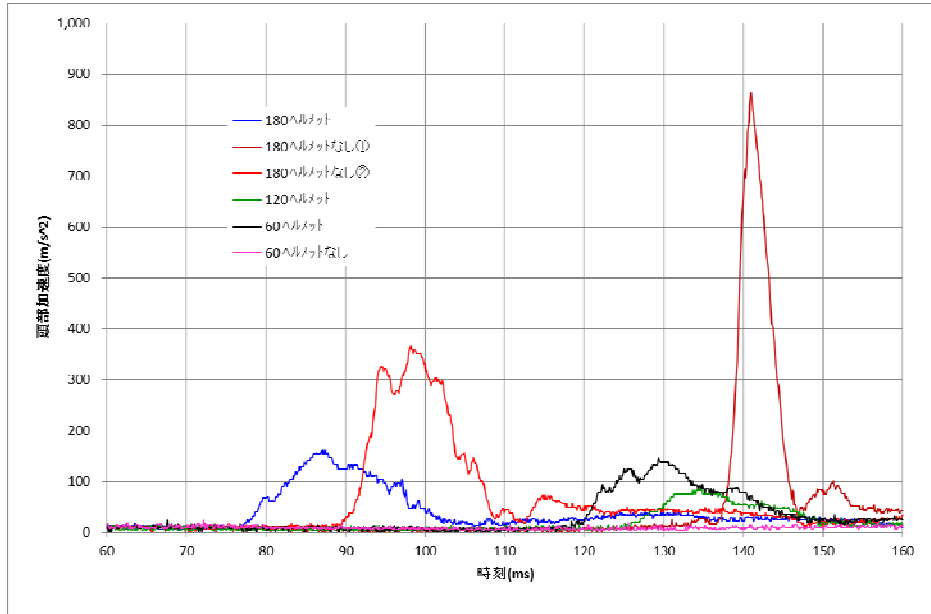


図 6.3.1-7 一次衝突時の加速度

車体とダミーの衝突した一次衝突は速度 180m/分（赤線）において 362m/s^2 、180m/分（茶色線）で 962m/s^2 とヘルメットを着用していない場合が最も高い加速度を示している。ヘルメットを着用した場合は、速度 180m/分（青線）の場合に 155m/s^2 と非着用と比較して $1/2\sim 1/5$ に低減されている。

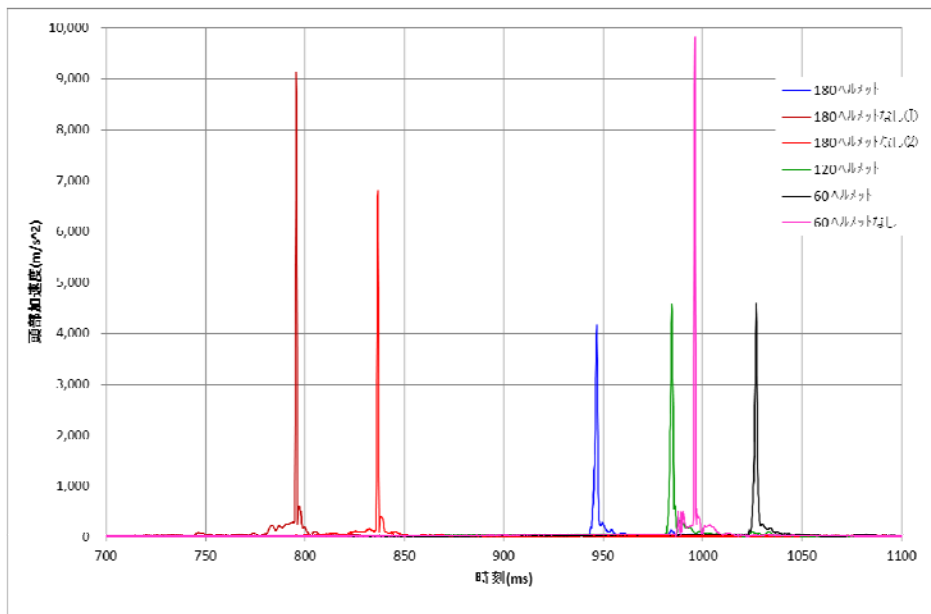


図 6.3.1-8 二次衝突時の加速度

一方、ダミーが床面と衝突する二次衝突では、ヘルメット着用では衝突速度に関わらず加速度が $4,200\sim 4,600\text{m/s}^2$ であるのに対し、ヘルメット非着用では $6,800\sim 9,800\text{m/s}^2$ と大きな値

を示し、短時間で大きな衝撃が発生する。2次衝突部分の拡大チャートを図 6.3.1-9 に示す。

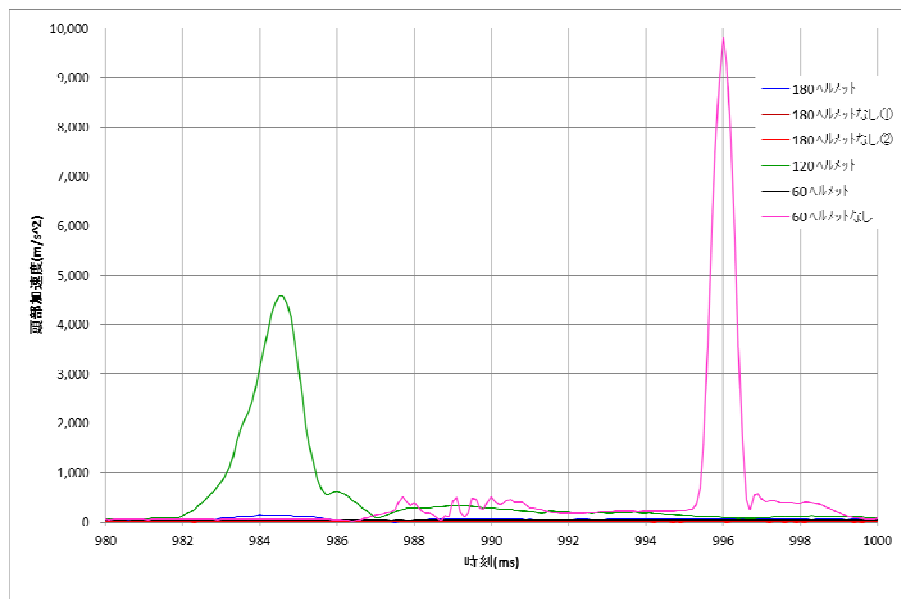


図 6.3.1-9 二次衝突部分の拡大

6.3.2 頭部傷害基準値（HIC）での評価

車体とダミーが衝突した一次衝突のときの衝撃は走行速度が 180m/分でヘルメットを着用しない場合が最も高い値を示す。米国法規（自動車衝突時の乗員保護）における小柄な女性ダミーの傷害基準値である HIC=700、体格が異なるが参考として、欧州における成人男性ダミーの傷害基準値である HIC=1,000 と比較しても十分に低い値であり、一次衝突は重篤な結果を生じるものではない。最も HIC の大きいケースはヘルメット非着用での高速走行 180m/分での衝突で約 40%の確率で AIS1（軽症）の負傷が発生する。ヘルメット着用はこれをさらに低減するのに有効で安全に寄与する。

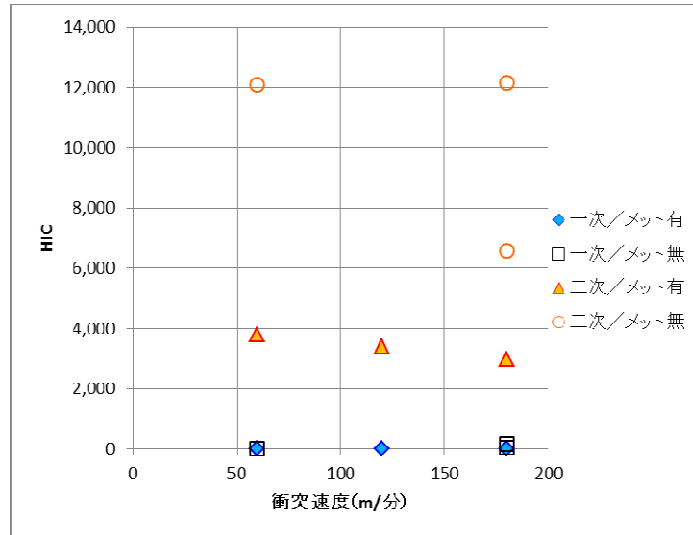


図 6.3.1-10 HIC に比較

表 6.3.2-1 車体衝突時（一次衝突）の衝撃度

試験番号	試験条件 (衝突速度、ヘルメット有無)	HIC	頸部せん断荷重(N)	頸部軸荷重(N)	頸部トルク(Nm)	胸部加速度(m/s ²)	胸部変位(mm)
Test 1	180m/min、ヘルメット有	9	-318	-217	-22	39	0
Test 2	180m/min、ヘルメット無	161	-732	-1479	-26	91	0
Test 3	180m/min、ヘルメット無	54	-817	-713	-24	89	1
Test 4	60m/min、ヘルメット有	2	-227	-176	-3	20	0
Test 5	120m/min、ヘルメット有	6	-307	-258	-4	34	0
Test 6	60m/min、ヘルメット無	1	-198	-239	-3	24	0

一方、床面に衝突する二次衝突のときの衝撃はヘルメット装着状態で HIC=3,000 前後、ヘルメット装着なしで HIC=6,600~12,000 と非常に大きな値を示す。走行速度が 60m/分でも大きい値を示す。

表 6.3.2-2 対床面衝突時（二次衝突）の衝撃度

試験番号	試験条件 (衝突速度、ヘルメット有無)	HIC	頸部せん断荷重(N)	頸部軸荷重(N)	頸部トルク(Nm)	胸部加速度(m/s ²)	胸部変位(mm)
Test 1	180m/min、ヘルメット有	2989	1695	1356	-23	394	5
Test 2	180m/min、ヘルメット無	12174	3063	1025	-68	433	2
Test 3	180m/min、ヘルメット無	6594	1953	433	-29	261	0
Test 4	60m/min、ヘルメット有	3790	1912	-1010	-46	273	7
Test 5	120m/min、ヘルメット有	3397	2055	1004	-29	381	6
Test 6	60m/min、ヘルメット無	12113	2570	-1579	-23	475	10

6.3.3 衝突試験に対する考察

衝突試験では、ヘルメットの選定は運用する対象が配送センターでの運用であることを考慮し、一般に入手可能な墜落時保護用／飛来・落下物用の作業用ヘルメット SC-11B RA 衝撃吸収ライナー付（ミドリ安全製）を使用した。これらを整理すると下記となる。

- ① 一次衝突は重篤な結果をもたらす衝撃のレベルではない。
- ② 頭部、頸部、胸部のいずれも、二次衝突での衝撃が大きい。
- ③ ヘルメット着用は衝撃緩和に効果はある。
- ④ 二次衝突ではヘルメット着用は HIC=1000 を下回るまでの衝撃緩和には不十分である。

産業用ヘルメットでは飛来や落下物からの防護を目的としているため、自転車やバイク用の転倒保護用ヘルメットに比較し、衝撃吸収性能は低い。構造、クッション部分の厚み、衝撃力の分散性能が大きくことなる。

尚、二次衝突はフォーク型ロボット以外でも大きな値になり、今後、これをどのように評価するか、あるいは評価の有無を含めて試験コンソシアムで検討中である。

車体形状に関しては、今回はダミーと車体が正対する正面からの衝突試験を行った。その結果バンパーで足背（つま先）を押さえるとダメージが大きくなる。足背を拘束して状態を押すことで、足の接地面（足の裏）を中心とした回転運動で後頭部から床面に衝突する。従来は安全とされていたガイドライン³⁾で示された走行速度 60m/分においてもこの状況は発生する。

速度 180m/分で衝突した場合、車体の停止までの移動距離が 1.38m あり、ダミーは車体に押されて踵をコンクリート床に擦り擦過痕を残しながら 1.2m 移動し、靴の踵は擦過により破損していた。これは踵、足首にも大きな力がかかることを示している。ダミーは AF05 を使用し膝や足首にはセンサーが無いため下肢の衝撃の定量評価はできていない。

この結果から分かる望ましい車体形状は、足背を車体下に巻き込まないようにするためには、バンパー位置を床面ギリギリまで下げることが求められる。また従来はスポンジや発泡ウレタンのような柔らかい素材のバンパーが使用されてきたが、バンパーで足を押せる硬い材質の使用の検討も今後の検討課題となる。バンパーの直下の空間を塞ぐための、排障器の使用も有効である。更にバンパーの接触と上体（胸部）接触のタイムラグがあれば低速での押し倒しは回避可能であり、これらは今後の車体形状設計に反映する。現状のバンパーと床面との間隔を図 6.3.1-12 に示す。



図 6.3.1-11 ダミー移動時の踵の擦過痕と破損した靴の踵

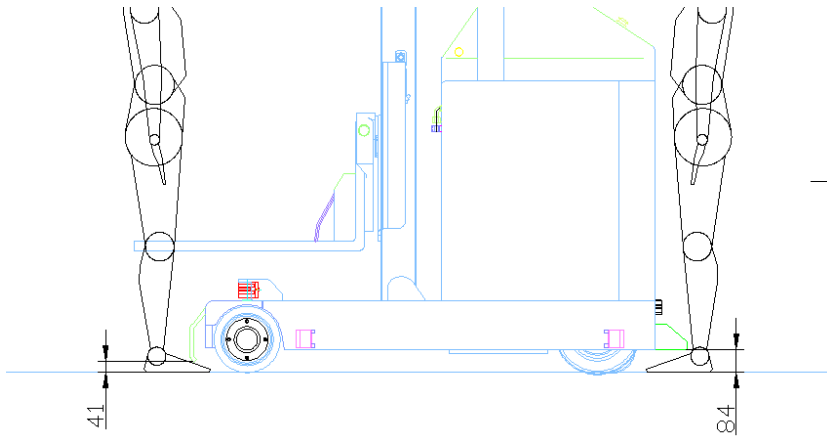


図 6.3.1-12 車体と床面との間隔

7. 結果

7.1 安全サポート系

(1) 対人衝突回避

フォーク型ロボットで行う、3次元位置認識装置と通常制御系を組み合わせた安全サポートは、不安全な事象に至る前にフォーク型ロボットを減速あるいは停止し、対人接触あるいは対人衝突事故リスクを減らすことに有効である。

3次元で位置認識をする範囲は車体後方（走行方向）の床上 200mm から 1,200mm の正面から側面を含む 270 度の空間での障害物を認識する。

(2) 安全サポート系としての地上システム

地上システムで行う歩行者検知等の方法は有効性が期待される。検出に使用するセンサー類は日立グループ内で製品化されたものも多く、技術開発要素が少なく、本プロジェクトの委託事業範囲内から外れるため、検討だけに留めたが、有効性は期待できる。

7.2 安全系

非接触の安全センサーを使用した安全系は機能安全として有効である。

市販の安全センサーは使用環境により安定して動作しないこともあり、取り付け方法、運用する環境により設置方法を適切に選択する必要がある。

7.3 コスト

安全系、安全サポート系の両方について、機能安全の実現には大きなコストが発生する。状態のセンシングに使用する2次元レーザー距離計や走査機構、データ処理の制御装置を信頼性確保のため2重化を行うためのコストを製品コストに転嫁することは、価格競争の激しい産業車両のカテゴリーでは、全車装備には無理がある。JIS規格他の安全に対する取り組みに対して、使用環境の拡大や顧客要求で更に追加の安全対策を行う場合には、有償オプション扱いとして製品適用する。

8. 総括

8.1 成果の達成状況

本プロジェクトにおける成果の達成状況を表 8.1-1 に示す。

表 8.1-1 成果の達成状況

No.	目標	成果	達成度	
1. 安全性検証手法に基づいたリスクアセスメントと具体的検証方法の策定				
(1)	安全性検証手法に基づき、リスクアセスメントを実施する	過去の手動フォークリフトの事故事例を調査の上、リスク抽出しアセスメントを実施。	◎	
2. 自律走行時の3次元障害物検出技術の開発				
(1)	走行時と荷扱い時におけるロボット周辺の障害物を検出する技術仕様を策定する	(i)3次元位置認識装置の設計において、複数のデバイス、コントローラが IEC61508 に適合できず、安全サポート系として仕様を策定した。 (ii)荷扱い時の障害物検出は装置コストが大幅に増加するため対象から外し、安全系で処理する仕様に変更した。	○	
(2)	仕様に基づいた開発を行う			
	(a)	距離データをロボット座標へ変換する処理を行う	ロボットの持つ地図の座標系に座標変換したデータを受け渡した。	○
	(b)	3次元データクラウドを生成する	3次元データから車体の誘導制御系で処理可能な2次元データの圧縮を行った。	○
	(c)	車両制御処理装置に障害物の位置を出力する	周期的にデータ転送し、データ欠落についても処理を追加した。	○
	(d)	揺動モーターの制御状態を変更するための制御指令値を生成する	揺動制御を行った。	○
	(e)	3次元障害物検出処理装置の動作状況を診断する処理を行う	動作開始時の自己診断を行った。	○
3. 走行・荷扱い時の対人安全制御技術の開発				
(1)	ロボット走行時の対人安全技術			
	(a)	制動距離に適合した走行路上の障害物(人または人の手など)を検出して停止する	(i)安全サポート系と安全系の2つの系で停止する制御系とした (ii)直線だけでなくフォークリフト固有のカーブ運転、切替し運転にも防護範囲を拡大した。	○

	(b)	走行路近傍に人がいる場合は徐行運転もしくは停止する	安全サポート系で減速・停止処理を行った。	○
	(c)	対人安全と作業効率を低下させない運用の両立	障害物検出データと電子地図を照合し地図登録されている障害物は除外した。	○
(2)	荷扱い時の対人安全技術			
	(a)	荷扱い時は荷扱い領域に障害物(人、または人の手など)がないことを検出する	車体周囲 360 度を移載シーケンスに応じて監視し接触前に停止する。	○
	(b)	荷扱い作業で占有される空間を認識して障害物検出を適正に行う	荷の占有空間の認識を3次元位置認識装置から外し、安全系の防護範囲を移載シーケンスに応じて監視した。	○
4. 安全評価				
(1)	安全検証センターおよび自社模擬現場での安全評価		(i)安全検証センターでは車体重量、サイズの制約から、衝突試験のみを日本自動車研究所(JARI)で実施した。 (ii)その他の試験については社内環境で行える試験を実施した。	○
(2)	流通サービス業の現場での実証試験		物流センターの了解が得られず、社内模擬環境での検証を実施した。	△

◎：大幅達成 ○：達成 △：概ね達成 ×：未達成

(1) 安全設計について

対人安全についてのリスクの抽出、リスクアセスメントに基づいた評価とリスクの低減を実施し、リスクを許容できる範囲まで低減し、当初の目標を達成した。

安全サポート系は3次元位置認識装置が既に製品に使用している制御装置の転用から ICE61508 に適合することができず、安全系から外し、安全サポート系とした。安全系を既に SIL2 認証を受けたセンサーで構成したことで、安全性については要求を満たすがコスト的には高い構成となった。AGV は顧客毎の個別仕様対応の製品が量産には向かない製品であるが、今後、機種間の標準化を進めた上でコスト低減が必要である。

(2) 製品化・製品適用

① フォーク型ロボットの安全システム

日立製作所ではフォーク型ロボットのベースモデルとなったリーチ型フォークリフトの AGV を製品化している。今回のプロジェクトで開発した安全システムは、従来モデルに対し、高速化と安全強化対応機種のオプション扱いとし、2014 年度から受注拡販を行う。

② 3次元位置認識装置

日立産機システムの3次元位置認識装置は、小型化、外観デザイン、他社メーカーの制御装置とのインターフェースを見直した上で製品化し、AGVメーカー向けに供給する。また日立産機システムで製品化している電子地図マッチング方式の誘導制御装置 Ichdas との連携機能も装備した上で2015年度に製品化する。

(3) 成果の普及

① プロジェクトで得られた知見の活用

本プロジェクトで得られた知見、特に衝突試験の結果は、無人搬送車の業界内でも前例がなく非常に貴重な資料である。本結果は日本産業車両協会内で共有する。また、JIS規格（JIS D6802）改定にも反映する。高速走行時の衝突時の挙動、ヘルメットの効果、衝撃の定量評価の知見を活かし、JIS規格改定案では人の転倒を誘発しにくい車体下部の形状の提案、作業者のヘルメットの着用義務、安全速度の規定などに反映し、日本産業車両協会内で予備審議中である。表 8.1-2 にその案の骨子の一部抜粋を示す。

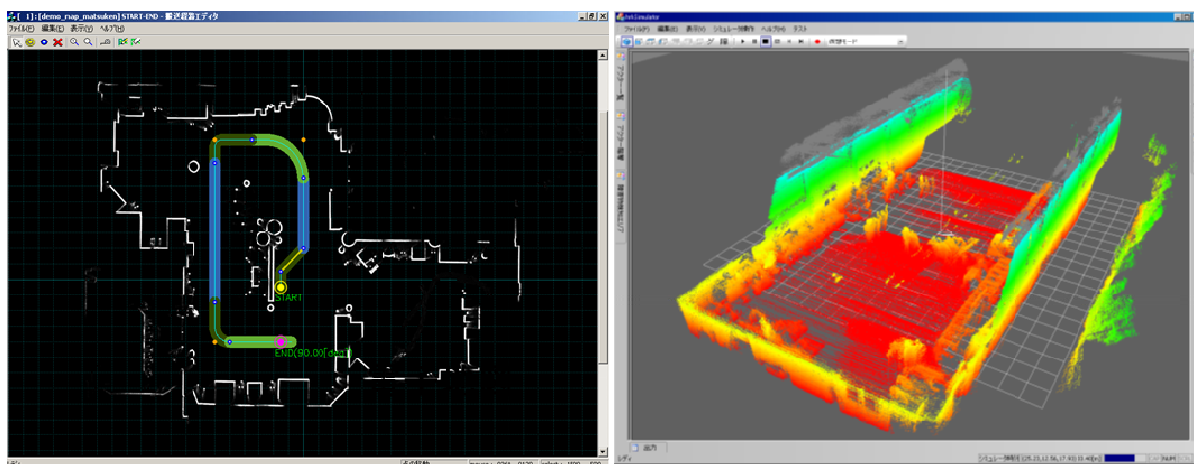
表 8.1-2 JIS 改定案の骨子（一部抜粋）

- | |
|---|
| <p>1. AGV 走行エリアには、制限事項として教育を受けた人の侵入のみを可能とする。
一般の人や教育を受けていない人は侵入してはいけない。また、エリアの安全管理者を置くことが望ましい。</p> <p>2. 走行エリアに侵入する際には、ヘルメットを着用すること。さらに、安全靴を着用することが望ましい。</p> <p>(中略)</p> <p>6. AGV が安全速度より速く走行し、その安全を確保する場合には、非接触障害物検知センサーを使用すること。</p> <p>7. 「6」非接触障害物検知センサーの安全要求レベルは、SIL は SIL2, CAT は CAT.3 および PLPL-d のいずれかとする。</p> <p>(以下、省略)</p> |
|---|

② 3次元位置認識技術の誘導制御への展開

日立グループ内での無人搬送車等のレーザー誘導制御は既に日立製作所インフラシステム社のインテリジェントキャリアー、日立産機システムの Lapi に搭載している。これらの製品は2次元の距離データで周囲環境の位置認識を行っている。3次元位置認識による誘導に関しては、つくばチャレンジ（主催：つくばチャレンジ実行委員会、つくば市）に日立製作所機械研究所から Sofara-T でエントリーし、その後、日立搭乗型移動支援ロボットを開発し、つくばモビリティロボット実験特区(搭乗型移動支援ロボット公道実証実験)で走行実験を行っている。

今回開発した 3 次元位置認識は産業車両の誘導にも応用可能であり、低コストで 3 次元位置認識することにより一般産業用の無人搬送車を含む自律移動作業を行うロボットの利用シーンの拡大に繋がる。これは安全面だけでなく、二次元データでは地図とリアルタイムで計測した距離データの相関が低い凹凸の多い壁面や装置が存在する工場環境や配送センターで、安定した誘導を行うことに寄与する。日本産業車両協会が無人搬送車のユーザに実施したアンケートで、無人搬送車の改善を要する事項の上位にある信頼性向上のためにも有効な手段となる。



2次元位置認識

3次元位置認識

図 8.1-1 2次元位置認識マップと3次元位置認識マップの相違

(4) その他

コンセプト認証のためリスクアセスメントの結果を第1コンソシアムに提出し、その内容についてレビューしていただいた。

Draft		Report No. _____
JQA JAPANESE QUALITY ASSURANCE ORGANIZATION		
評価報告書		
ISO/DIS 13482		
Robots and robotic devices – Safety requirements for non-industrial robots		
– Non-medical personal care robot		
評価報告書		
報告書 No.:		
作成(+署名):		
作成(+署名):		
作成(+署名):		
承認(+署名):		
発行日:	2013年XX月XX日	
頁数:	27	
評価基準		
基準:	ISO/DIS 13482:2011	
報告書作成者:	一般財団法人日本品質保証機構 認証制度開発普及室	
製造者:		

図 8.1-2 品質評価レポート (Draft)

日立産機システム G コンソシアムとしては設計コンセプト認証を取得した。Phase1/Phase2 を含めた本認証は、今後必要に応じて取得を検討する。

9. 特許、論文、外部発表等の件数

特許、論文、外部発表等の件数（内訳）

区分 年度	特許出願			論文・記事		その他外部発表		
	国内	外国	PCT ※ 出願	査読 付き	その他	学会発表 ・講演	報道（新聞 ・雑誌等へ の掲載）	その他展 示会等
H23FY	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件
H24FY	1 件	0 件	0 件	0 件	3 件	3 件	2 件	1 件
H25FY	1 件	0 件	0 件	1 件	0 件	0 件	1 件	0 件