

3.2 サービスロボット分野

3.2.1 片付け作業用マニピュレーションRTシステム

3.2.1.1 乱雑に積層された洗濯物ハンドリングシステムの研究開発

【(財)四国産業・技術振興センター、香川大学、(株)プレックス、
宝田電産(株)、香川県産業技術センター】

1) 研究概要

1)-1 背景と目的

リネンサプライ業などで必要となる業務用洗濯ラインの工程は、図 2. 1-1 に示すように大きく一括処理される洗濯ラインと単葉処理される仕上げラインから成っているが、その多くの工程が自動化されてきている。

しかし、ラインの入り口である投入作業は、布製品故の不定形のため、図 2. 1-2 のように人手作業となっており、未だに自動化出来ていない。

このため、本洗濯物ハンドリングシステムを研究開発する事により、以下の目標を達成する。

(1) システムとしての目標

[投入ロボットの導入による洗濯ラインの全自動化]

- ・ラインの全自動化による作業者の過酷な作業からの解放
- ・今後の労働力減少による作業者不足への対策
- ・医療機関、危険作業現場からの危険を内在する洗濯物の無人ハンドリング

(2) 技術的目標

[布製品のハンドリング技術の確立]

- ・柔軟な布形状の計測と端点検出可能な視覚技術の確立
- ・広い動作範囲を持ち力制御が可能なロボットハンドリング技術の開発
- ・洗濯物の把持、整形を行うための補助システムの整備

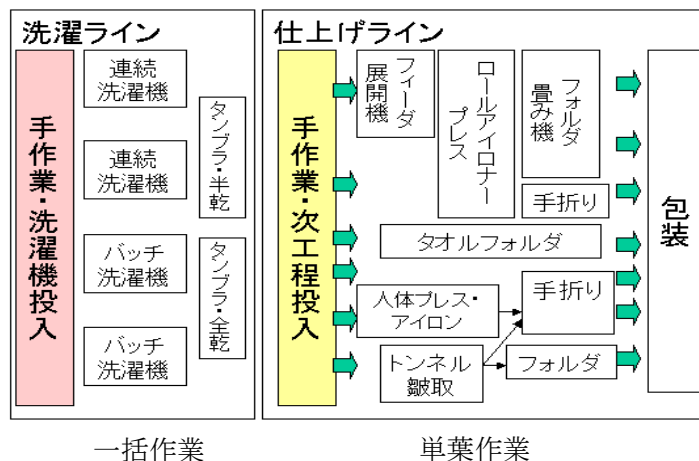


図 2. 1-1 業務用洗濯ライン



図 2. 1-2 仕上げラインへの洗濯物投入

1)-2 開発するシステムの概要

本研究開発は、大きく2フェーズに分けて、実用的なシステム開発を行うことにより、柔軟物である布製品のハンドリング技術を確立する。開発するシステムは、第1フェーズ（平成18-20年度）の定型ライン投入システムと、第2フェーズ（平成21-22年度）の定型ライン投入システムのプロトタイプ機および混流洗濯物分類システムである。

平成20年度までの定型ライン投入システムでは、図2.1-3に示す、タオルやシーツなど四角形の布製品の定型洗濯物の仕上げラインへの、洗濯物の投入を行う。

本開発により、布製品ハンドリングのための基本技術を開発、定型ラインで検証した。

本開発成果をもとに、平成21、22年度、実用展開のためのコンパクトシステム、および混流ラインでの洗濯物分類システムへ展開する。

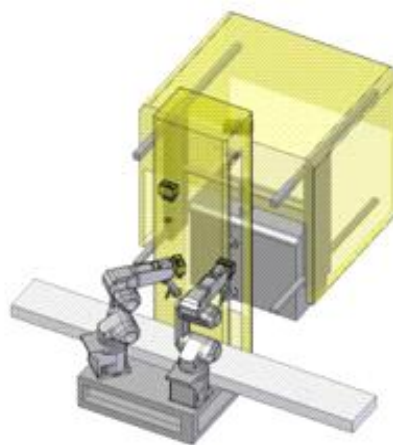


図 2.1-3 定型ライン投入システム

1)-3 開発成果の概要

第1フェーズ（平成18-20年度）の定型ライン投入システムで開発した要素技術は、大きく以下の項目である。

[項目1] 布を迅速・確実にハンドリングできるマニピュレーション技術の開発（全体）

積層された洗濯物の山から布を一枚一枚取り出し、一辺を把持して位置を合わせて仕上げラインに投入するまでの工程を分析、布をハンドリングするための要素機能を分析、布ハンドリング技術の体系化を行った。

[項目2] 対象物の位置姿勢を識別し、ハンドリングするための3次元視覚センサ（香川大学、香川県産業技術センター）

不定形状を持ち、表面にテクスチャが無い布の形を計測するための視覚センサとそれを使って布の把持位置を決定する画像処理アルゴリズムを開発した。

[項目3] 器用なハンドおよび補助装置の開発（プレックス、宝田電産）

一枚の布をつまみ上げる、また、把持した布をたぐって辺を出すハンドを開発した。

[項目4] 布ハンドリング制御技術の開発（全体）

平成21、22年度開発準備として、ハンド引き上げ中の把持枚数検出、絡み検出技術、およびタオルのマーク認識のための基礎技術を開発した。

以上の要素技術をまとめて定型ライン投入ロボットシステムを開発、総合動作を実現、次期プロトタイプ機での実用性能実現の見通しを得た。（全体）

また、第2フェーズ（平成21-22年度）の定型ライン投入システムのプロトタイプ機

および混流洗濯物分類システムで開発した要素技術は、大きく以下の項目である。

[項目5] 視覚センサおよび洗濯物分類アルゴリズムの開発（香川大学、プレックス、香川県産業技術センター）

実用化の為の視覚センサの高輝度化、洗濯物のマーク認識技術、力センサを組み合わせた洗濯物分類技術を開発した。

[項目6] 整形把持ハンド及びハンドリング操作方法開発（プレックス、宝田電産）

第1フェーズでのハンドで開発した柔軟物の辺把持ハンドをベースに、(a)2つのコーナを把持して姿勢を整えるたぐり機構、およびその操作アルゴリズムを開発した。

そして、第1フェーズの開発成果に、さらに項目5、項目6で開発するセンサやハンドを組み込んで、定型物分類投入システムプロトタイプ機と、洗濯前投入分類システムを開発し、性能確認を行った。最終的に定型物分類投入システムプロトタイプ機においては、目標値である投入速度 800 枚/時間、分類成功率 97%に対し、速度 400 枚/時間、分類成功率 98%を実現した。また、洗濯前投入分類システムでは、目標値である分類速度 2000 枚、目標分類成功率 80%に対し、速度 800 枚/時間、分類成功率 90%を実現した。（全体）

以下、開発内容を説明する。

2) 成果詳細

[第1フェーズ(平成18-20年度)における成果]

2)-1 布を迅速・確実にハンドリングできるマニピュレーション技術の開発

(1) 布ハンドリング作業の分析

これまで布ハンドリングに対しては、ハンドリングの原則が与えられておらず、それが自動化を妨げていた。ここでは、作業者の布ハンドリング作業を分析、図 2.1-4 に示すように、布ハンドリングの要点は、(c)のように布の1辺の両方のコーナを把持し、広げて持つことで、こうすれば布の位置制御が可能になること、このためには、作業工程が(a)積層された布の山から1枚を分離・取り出すこと、(b)布の1つのコーナを認識、把持すること、(c)布の1辺を認識し、辺として把持すること、の3要素からなることを見いだした。



(a) 布の分離・取り出し



(b) 第1コーナ把持



(c) 1辺の把持

図 2.1-4 布ハンドリング作業の分析

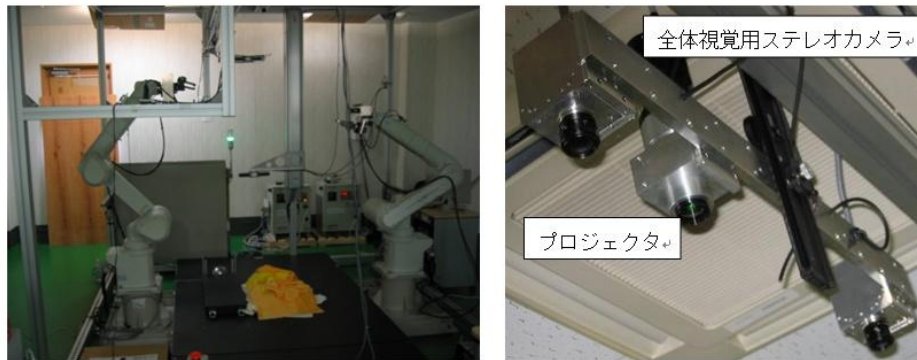


図 2.1-5 全体視覚センサとロボットが協調した最上位布取り出し

(2) 布の自由度制御技術の体系化

ハンドリング作業の分析から、布ハンドリングの要素機能は、(a)積層された布の山から1枚を分離・取り出すこと、(b)布の1つのコーナを認識、把持すること、(c)布の一边を認識し、辺として把持すること、が分かった。しかし、これを実用的なシステムとして、迅速・確実で、実現可能なコストで構築するためには、置き方や形状の定まらない柔軟な布を1枚分離して取り出し、自由度を拘束、把持する技術の体系化が必要である。

ここでは、布のマニピュレーション技術として、自然な状態、補助的な自由度拘束、強制把持の枠組みを考え、要素技術の抽出を行った。このうち、積層された山からの分離取り出し技術については、図 2.1-5 に示す、全体視覚センサ (2.1.5にて説明) とロボットが協調した最上位布取り出し技術を開発したことで、実用化可能なレベルを達成できた。ここでは、(b)第1コーナ把持、(c)布の一边把持について、詳細な検討を行った。

① 第1コーナの把持

コーナは、自然に、もしくは強制して、確実に抽出する必要がある。手法には図 2.1-6 に示す構成例のように、単に自然に垂れ下がらせて、真下に来るコーナをねらう方法、補助的に姿勢を拘束して、コーナが期待位置に出てくる確率を高める方法、強制的にコーナを繰り出す方法がある。“自然に垂れ下がらせてコーナを把持する方法、姿勢を拘束してコーナを把持する方法”については、およその端点らしき部位をまず把持して持ち上げると、下端に、ほぼ各実にコーナが現れる性質を利用する物であり、自動化の可能性が大きい。

この中から、確実性・迅速性とコストをもとに、実現可能なシステムを構築する。左側の図ほどロボットの自由度に頼り、右側ほど確実だが補助システムの構築が必要で、専用の・高コストになる。

自由端把持	姿勢補正 自由コーナ把持(1)	姿勢補正 自由コーナ把持(2)	強制コーナ把持

図 2.1-6 第1コーナ把持

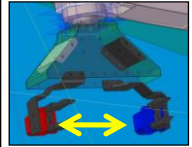
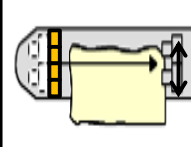
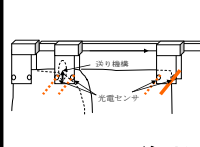
たぐり	補正たぐり	強制たぐり
		
(指先形状)	(センサ+補正)	(センサ+送り)

図 2.1-7 布の一边

② 布一边の把持

布のコーナの確実な把持後、平行度を確保しながら、一边の確実な把持を行う必要がある。手法には、図 2.1-7 に示すように基本的には現在把持しているコーナを頼りに、布のマチなどを利用してたぐって広げていく方法、センサで位置確認、補正動作により平行度を得るたぐり方法、強制的に送りをかけながらたぐって行って、もう一つのコーナを把持する方法、がある。確実性やコストは、①と同様である。

以下、本検討体系を利用したシステム構成法を示す。

(3) 一枚の布の分離・取り出し機構

まず一枚一枚布を分離・取り出すことは、布ハンドリングの基本である。図 2.1-8 に示すように、2)-2 で述べる全体視覚 3D センサを適用、山積タオルの最上部把持位置を認識するアルゴリズムにより、まず把持位置を決定して取り上げ、2)-3 で述べるピンハンド付き把持ロボットを操作して、補助コンベアと協調してタオル一枚の一つのコーナ近辺を確実に把持し、取り上げることが出来た。

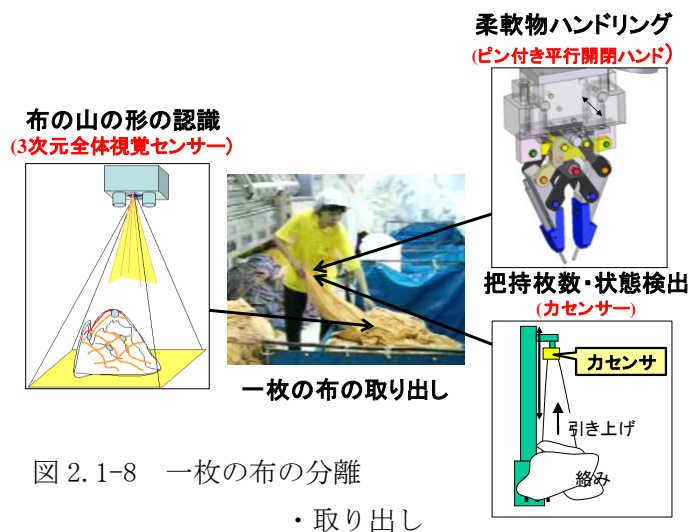


図 2.1-8 一枚の布の分離

・取り出し

なお、この引き上げ動作時に、布の把持枚数や絡み状態をチェックするための力制御技術についても基礎検討を終了した。この内容は、2)-4 に述べる。

(4) 第1コーナ把持

布の第1番目のコーナを把持する為には、図 2.1-6 に示す、単に自然に下に来るコーナを得る方法、補助的に姿勢を制限してコーナを出す方法、強制的にコーナを繰り出す方法がある。このそれぞれに対し、図 2.1-9 に示すように、必要な要素技術を検討、開発を行い、評価した。

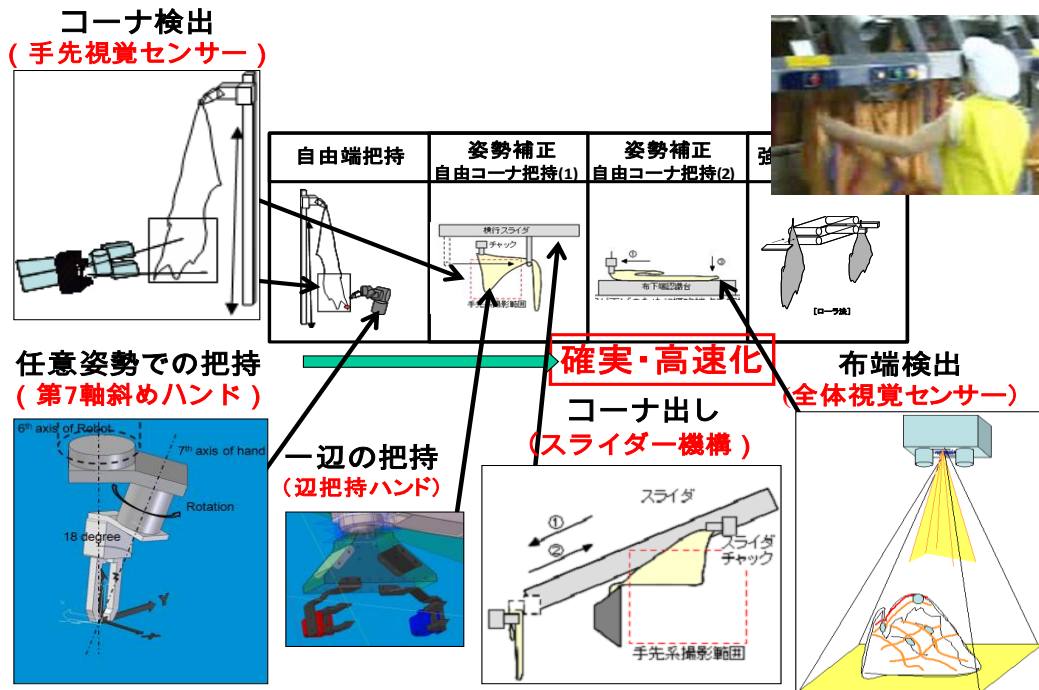


図 2.1-9 第1 コーナの把持

自由端把持では、手先視覚センサによるコーナの3次元位置・方向を測定、ロボットの姿勢自由度を高める第7軸斜めハンドを開発、システムを纏めた。

姿勢拘束が有る方式では、斜めスライダと姿勢補正機構の組み合わせによりコーナの出現位置と方向を規制、確実なコーナ把持を行った。

最終的には、信頼度の点から、姿勢拘束方式を採用した。

また、コーナ近傍の把持では、コーナ抽出補助コンベア上で、視覚センサでコーナ位置検出、ピン付き平行リンクフィンガーハンドを装着したロボットでコーナ近辺を確実に把持した。

(5) 一辺の把持

図 2.1-10 の各分類に応じて、辺把持ハンドの開発、補正たぐり機構の開発を行い、それを利用した辺把持のためのマニピュレーションシステムを開発した。2)-3 にハンドの開発内容を示す。辺把持ハンドでは、図 2.1-9 の各システムで検出されたコーナを把持、第1フェーズでは、部分的たぐりを行う2フィンガーのハンドを開発した。そして、辺把持ハンドでつかんだ布を、補正たぐり機構上で仕上げ装置に対する平行度を補正しながらロボットで引き回し、プレスおよび折りたたみ装置に接続される排出用コンベアに、整列して載せる技術を開発した。なお、正確な姿勢を確保してプレスおよび折りたたみ装置に搭載するためには、より確実な方式が望まれる。そのため、図 2.1-10 で分類された強制たぐり方式についても第2フェーズでより詳しく検討を加えていく事とした。

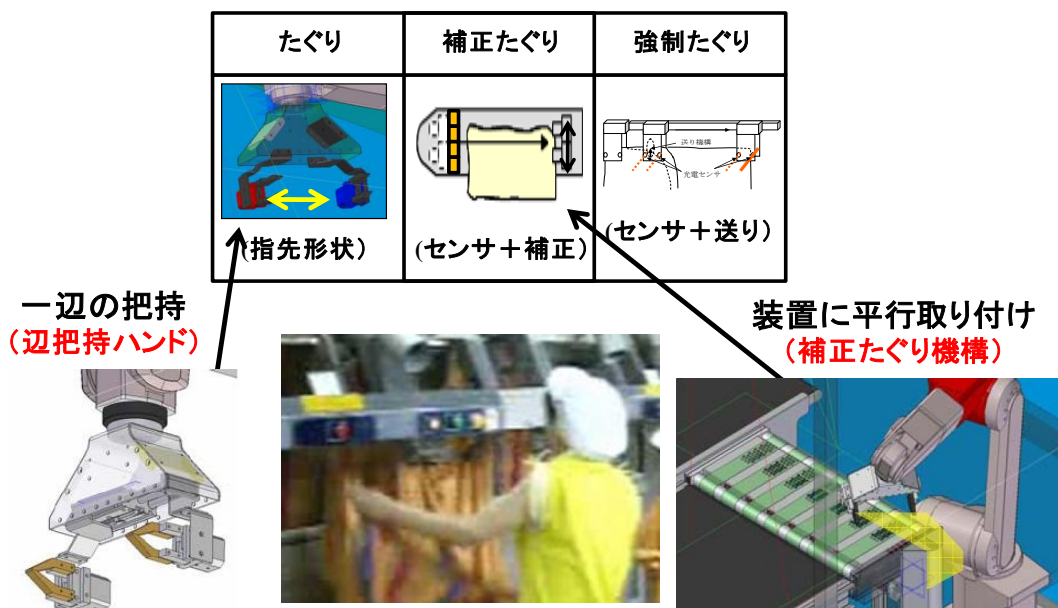


図 2.1-10 一辺の把持

2)-2 対象物の位置姿勢を識別し、ハンドリングするための3次元視覚センサ

布のような、高度に柔軟で不定形で、位置・姿勢も定まらない物体を取り扱うためには、ロボットの把持位置や布の置かれている形状を測定する3次元視覚センサが不可欠である。リネンサプライ業で扱う布の多くは、模様が無く一様な色であるため、ステレオ方式での視覚センサでは計測困難だが、個々の布表面の連続性は保たれている。そこで投影パターン対応付けによるステレオ視覚センサを開発、積層洗濯物の全体形状を計測する全体視覚センサと、コーナ付近の把持位置、姿勢を正確に計測する手先視覚センサを開発した。

(1) 視覚センサの光学的特徴

本視覚センサの光学的特徴は、図 2.1-11 のあおり光学系の採用である。2台のステレオカメラの撮像面、対物レンズの平行度を保ちながら、レンズ中心を中央にシフトして、視差を得ながら同一エリアを撮像するように工夫した光学系である。このような光学系とすることにより、対象物とカメラ間の距離が近くても、一般のステレオカメラでカメラを傾けたことによって起きる、左右カメラでの遠近ひずみを防止し、近傍物体計測の際のステレオマッチングの精度・安定度を向上した。

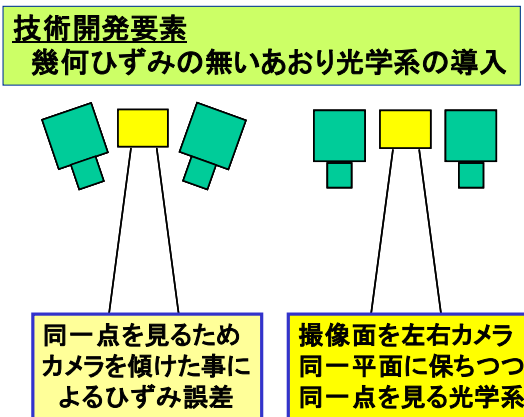


図 2.1-11 あおり光学系

また、ステレオ対応を取るための投影パターンとしては、図 2.1.12 の調密な格子パターン

ンに、素位置決め用のドットを配置した。投影パターンの光源には図 2.1-13 に示す高輝度 LED を採用、作業者が普通に作業できる照明環境下での、安定な投影パターン検出を可能にしている。簡便に使用できるように、LED の点灯回路も一体化し、パソコンなどに接続するのみで簡単に使用できるセンサとして纏めた。

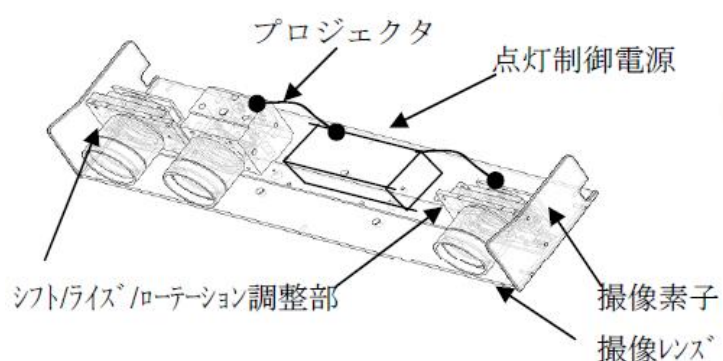


図 2.1-13 高輝度 LED によるパターン投影

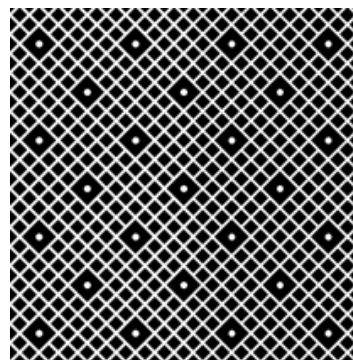


図 2.1-12 投影パターン



(2) 認識アルゴリズム

洗濯物の置かれた形状やぶら下がった状態を計測する認識アルゴリズムには、全体視覚アルゴリズムと手先視覚アルゴリズムがある。全体視覚アルゴリズムは、1.5x1.5m の広さを 2mm の精度で計測する。手先視覚は、200x200mm の広さを 0.5mm の精度で計測する。認識アルゴリズムを以下に説明する。

[全体視覚の洗濯物形状抽出アルゴリズム]

図 2.1-8 に有るように、積層された布にパターン光を当てステレオ画像を撮像、ドットパターンで概略 3 次元測定し、そのあと格子パターンで精密測定する。図 2.1-14 にパターン光を当てて撮像した画像を示す。この画像から図 2.1-15 に示すように、投影パターンを抽出、左右のカメラ間でステレオマッチングを行い、格子パターンの 3 次元位置を計測、一番高い位置を決定、ロボットの把持位置とする。

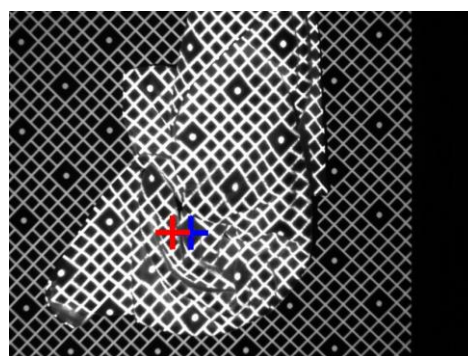


図 2.1-14 全体視覚の画像

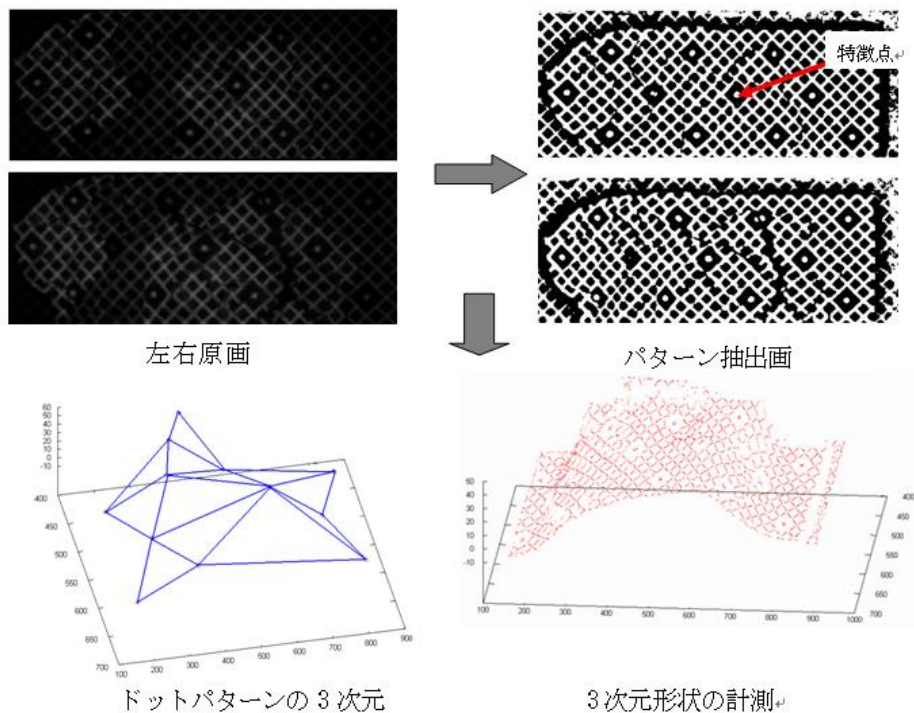


図 2.1-15 全体視覚アルゴリズム

[手先視覚によるコーナ計測]

図 2.1-9 のスライダ機構などにより垂れ下がったコーナ部に、横からパターンを投影、全体視覚に述べたアルゴリズムにより、図 2.1-16 のように、コーナ部近傍の 3 次元形状を計測する。2 次元画像による精密コーナ抽出と組み合わせると、コーナ部の正確な位置・方向を計測、ロボットの把持位置、姿勢を決定する。

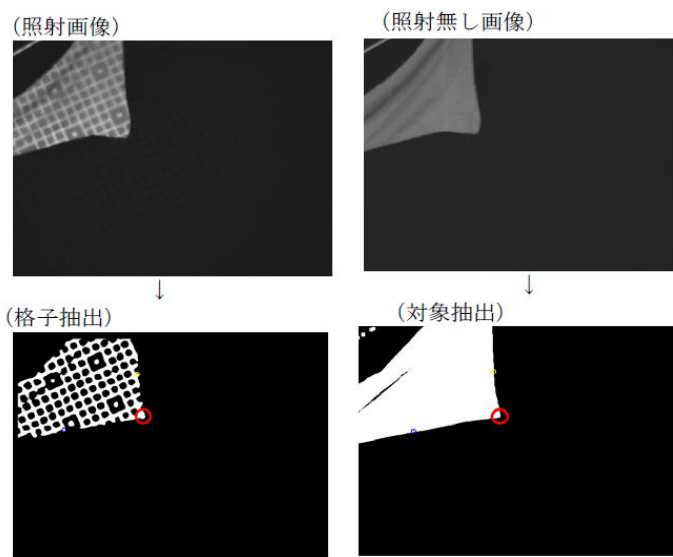


図 2.1-16 手先視覚アルゴリズム

2)-3 器用なハンドおよび補助装置の開発

布の高度な柔軟さは、把持の点でも課題が大きい。視覚センサが把持位置決定を行い、ロボットが把持位置に正確に制御されても、10%程度の把持ミス、2-3%の布の不離れなどが起こる。また、コーナ抽出後の布ハンドリングの為には、基本的に辺把持でなければならない。このため、ピン付き平行リンクフィンガーハンド、辺把持ハンドを開発した。また、布の平行度を補正する装置として、たぐり補正機構を開発した。

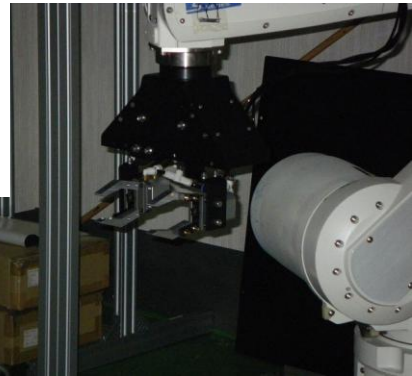
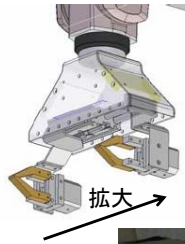
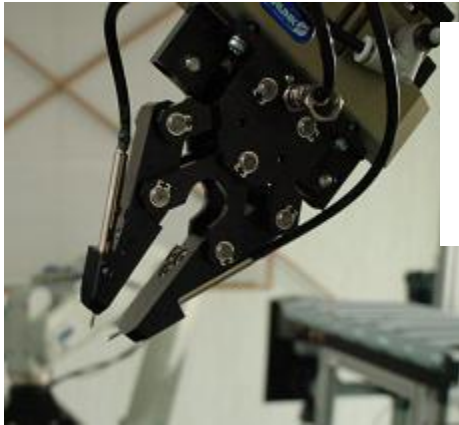


図 2.1-17 ピン付きフィンガーハンド

図 2.1-18 たぐり機能付加辺保持ハンド

(1) ピン付き平行リンクフィンガーハンド

布の把持ミスをなくすため、図 2.1-17 のように、フィンガー先端にピンの伸縮機構を付加、つまみ操作による確実な布把持を可能にした。本方式では、ピンを出して布を寄せてつまみ、そのあとピンを格納することで、布の離れを良くする。平行リンクフィンガー機構の採用は、布との干渉領域の少ない動作を可能にした。

(2) たぐり機能付加辺把持ハンド

布ハンドリングのためには、コーナ、辺の確実な把持と、状態の保持が必要である。たぐりによる辺の抽出と、状態保持を行う平行グリップを持つ辺把持ハンドを開発した。動作原理と外観を、図 2.1-18 に示す。ここでは、2本の指の一方で布のコーナを把持し、もう一方を、布の辺の折り目に合わせて、機械的に滑らせていくことで、たぐり動作を実現している。

2)-4 布ハンドリング制御技術の開発

布ハンドリング中の力制御については、2. 1. 4 (3) 一枚の布の分離・取り出し機構の中で必要性を述べた。また、洗濯物が混ざって投入される洗濯ラインでは、洗濯物の分類が必要である。第2フェーズで開発する、混流して置かれた洗濯物の分類システムの開発に組み込むために、第1フェーズの期間中に先行開発した、ハンドの力制御技術、布の表裏や種別判定技術について、以下に開発成果を述べる。

(1) 布ハンドリングのための力センサ技術

図 2.1-19 に示す実験装置のように、ハンドに力センサを付加、上昇中に布の把持枚数の判定や絡みなどによる異常引き上げ力検出する基礎的確認を行った。この装置では、布を昇降するためのモータの制御を行っているコントローラが、力センサの計測も行っており、モータの加速、減速などのモードも把握した判断が行える。



図 2.1-19 力センサ実験

力計測の結果は図 2.1-20 の通りである。黒線は引き上げ高さを表す。最初の山状の力センサ出力は加速期間中、谷状の区間は定速運転中である。この結果から、あらかじめ布の重さが分かっていたら、枚数確認は十分可能であることが分かった。また、布を破ってしまうような重大な絡みの検出も可能であることが分かった。引き上げ途中に布が絡まって、2枚引き上げた場合の絡み次期も、検出が可能である。

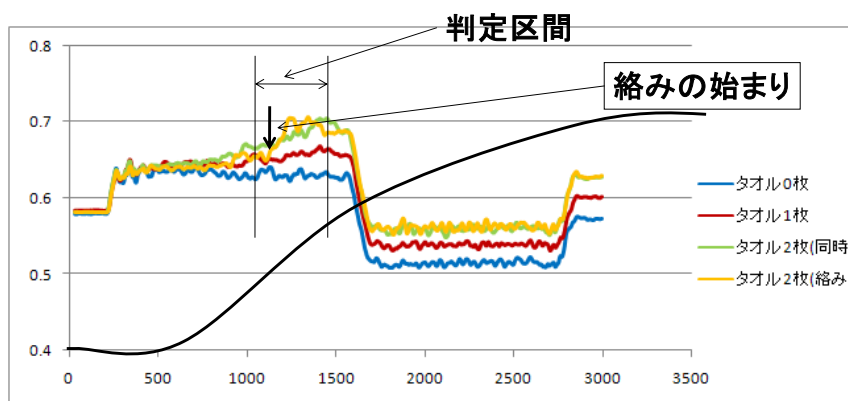


図 2.1-20 カセンサによる把持枚数と絡みの検出

(2) 布の種別・表裏判定技術の開発

バスタオルでは、ユーザーがホテル名やマークを、布に凹凸を織り込んで付加していることが多い。この場合、仕上げ時のタオルを折りたたむときに、タオル表面のマークが上に来るようにしなければならない。このため、第 1 フェーズでは、タオル

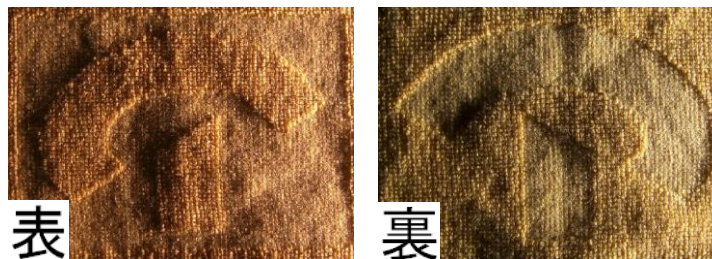


図 2.1-21 影付けによりマークを浮き上がらせた例

に付けられたホテル名やマークを、タオルの凹凸による影付けで浮きだたせる方法を開発した。斜方から照明を照射、陰のある像を得て、マークを明確に撮像する。図 2.1-21 のように、表裏で陰の付き方が全く異なる像が得られている。

マークの表裏・種別の判定には、テンプレート画像で規定範囲内を走査、正規化相関値が最大となる点での相関値により判定する方法を検討した。しかし、相関値そのものでは十分な分離度が得られていない。これは、図 2.1-21 に見られる、布特有の画面全体に現れる布の折り目によるテクスチャのためである。このため、マーク認識方法については、第 2 フェーズでの主要の開発課題となった。

2)-5 定型ライン投入システムの開発

(1) システム構成

これまで述べてきた布ハンドリングのための布の自由度の扱い方や、それに基づく要素技術開発を組み合わせ、第1フェーズでの総合性かとして、図 2.1-22 の構成をもつ定型ライン投入システムを開発した。構成したシステムの外観を、図 2.1-23 に示す。また、このラインの運転方法として、図 2.1-24 の6ステップからなる動作を実現した

構成図、および運転ステップで、(工程1)まず認識台の上に積層して置かれた洗濯物は、上部に付けられた全体視覚センサで形状を抽出し、その一番高い位置が把持位置として決定される。そして、ロボット

Aにより取り上げられ、(工程2-1)コーナ抽出補助コンベアの上に引きずりながら置かれる。再度、全体視覚センサにより布のコーナ近傍が抽出され、ロボットAによりつかみ直され、(工程2-2)横行スライダのハンドに渡される。スライダは、斜めに布を引き上げる。(工程3)引き上げ動作により、布は姿勢補正バーに懸かり、布のコーナ部が抽出される。抽出されたコーナ部を、手先視覚センサで位置と姿勢を計測、ロボットによる把持位置と方向を決定する。(工程4)抽出された布のコーナをロボットBがたぐり機能付加辺保持ハンドで把持、辺だしを行い、(工程5)そのまま布たぐり補助装置の上を通過させる。そして、補助装置により布を平行にして、排出コンベアで送り出し、仕上げラインに送る。

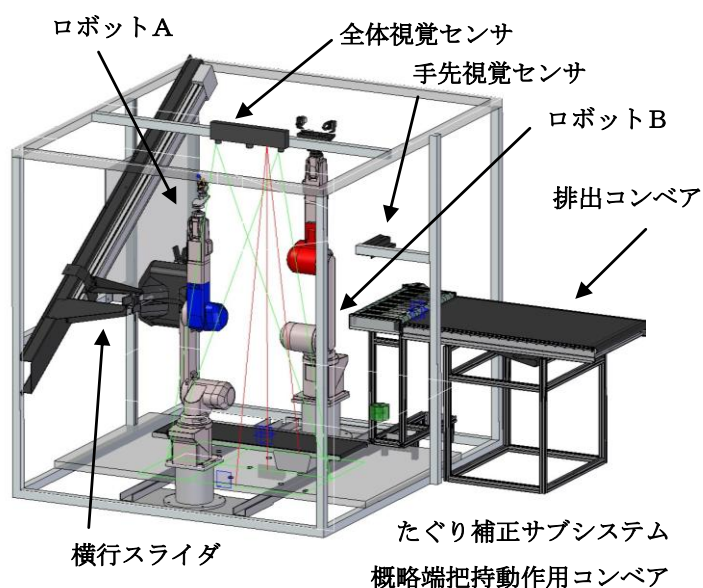


図 2.1-22 定型ライン投入システムの構成



図 2.1-23 定型ライン投入システムの外観

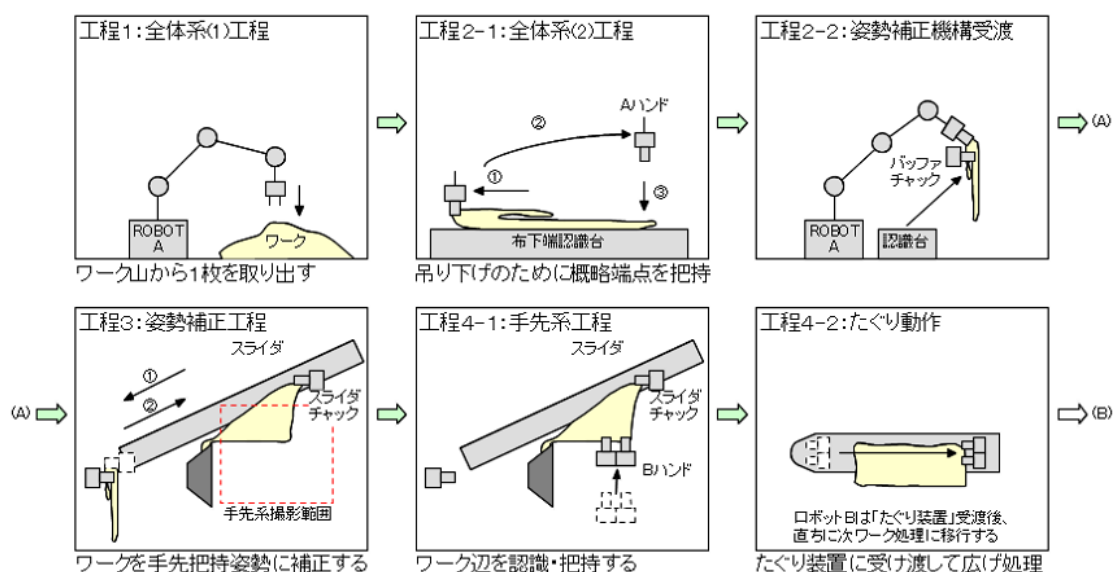


図 2.1-24 定型ライン投入システムの運転方法

(2) 開発結果

本システムについて、投入実験を繰り返して改良、調整を行い、性能を確認、平成 21 年 3 月末時点で総合投入成功率 75% (千枚あたり) を得、第 2 フェーズで目標成功率 90%以上を得られる見通しを得た。なお、成功率を構成する要素としては、表 2.1-1 に示すプロセスとして、(a)の工程 1 での 1 枚の布の取り出し、(b)の工程 2-1 の概略端点取りだし、(c-1)の工程 3 のコーナ提示、および(c-2)工程 4-1 でのコーナ把持、がある。この殆どが 98%を超えなければ、目標成功率 90%とはならない。

表 2.1-1 各ステップの成功率

プロセス	成功率
(a) ピックアップ	99%
(b) 概略端把持	98%
(c-1) コーナー提示	84%
(c-2) コーナー把持	94%

第 1 フェーズでのピックアップから排出までの各工程のタクトは最速時で 10 秒であるが、タクトを規定しているロボット B 側の後半工程では、調整により 8 秒/枚を実現できる見通しを得ている。以上を総合し、前半部のタクトを含めて改良することで、目標の実用化可能な成功率 90%、タクトタイム 8 秒をトータルで実現する見込みを得た。

[第2フェーズ(平成21-22年度)における成果]

第 1 フェーズ開発に続いて平成 21 年度から実施した第 2 フェーズの開発では、第 1 フェーズの成果をベースに、定型ライン投入システムのプロトタイプ機の開発と、混流洗濯物分類システムの開発を行った。大きく下記の 3 項目からなる。

- ・ 視覚センサおよび洗濯物分類アルゴリズムの開発
- ・ 整形把持ハンド及びハンドリング操作方法の開発
- ・ 投入ロボットシステムの開発

2)-6 視覚センサおよび洗濯物分類アルゴリズムの開発

第1フェーズのセンサ開発では、詳細視覚センサ、全体視覚センサ、およびその画像処理アルゴリズムを開発し、定型物分類投入システムへ応用した。また、力センサ技術の基礎開発を行った。

第2フェーズの開発では、実用化の為の視覚センサの高輝度化、洗濯物のマーク認識技術、力センサを組み合わせた洗濯物分類技術を開発、定型ライン投入システムに組み込んだ。以下、開発の内容を示す。

(1) 視覚センサの高輝度化

第1フェーズでパターンプロジェクタを装着、遠近収差を解消するあおり光学系を用いた相対ステレオ視覚センサを開発した。第2フェーズでは、さらに高輝度化を進め、視覚センサを室内照明下で使用出来るようにする事を目標として、新たに図2.1-25の高輝度LEDを採用、効率的な配置を行う事で、工場での室内照明としては明るい、300ルクスで使用可能な視覚センサを開発した。

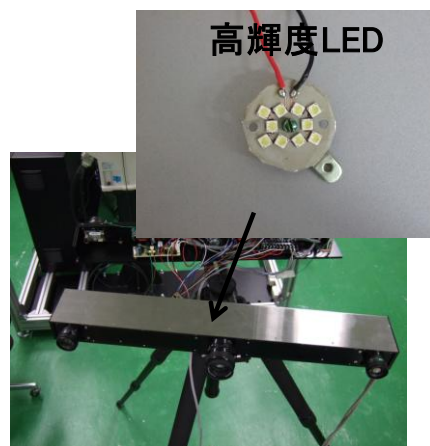


図 2.1-25 高輝度視覚センサ

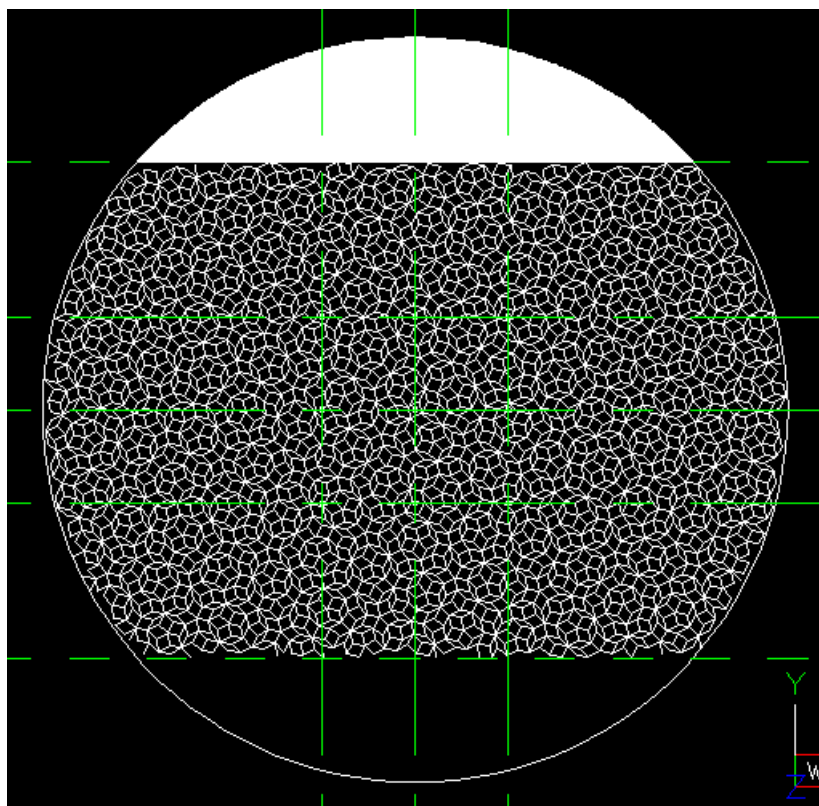


図 2.1-25a 非周期性をもつペンローズタイルング投影用パターン

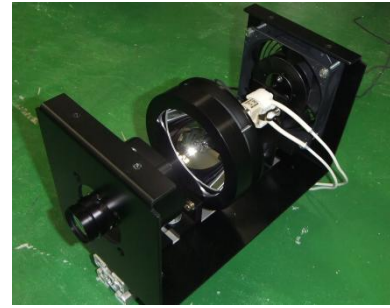


図 2.1-25b パターン投影装置

さらに分類投入システムで高速移動する洗濯物の形状をステレオ計測するための新しい投光装置を開発した。ここでは、洗濯物の長さや体積を計測して総合判定するとき、新しく微細非周期パターン（図 2.1-25a）を対象物に投光する装置を試作し（例：図 2.1-25b）パターン投影装置、高速にステレオ撮像し解析した。このパターンを投影することで通常環境のなかで、表面が滑らかな形状であっても、ワークの表面にユニークさがある程度保証されたパターンを投影してステレオ計測する。パターンマスクは微細レベルを換えて最適な緻密さの選定可能にした。さらに光源として多様な光源をテストして、要素技術として多様な設置環境や撮影速度などの要求に応じられるようになった。計測したいポイントの基準画像周辺の領域を切り出してテンプレート化して参照画像との視差を計測し高さを測る。実際の計測では一定の条件下で高速計測における有効性が確認された。

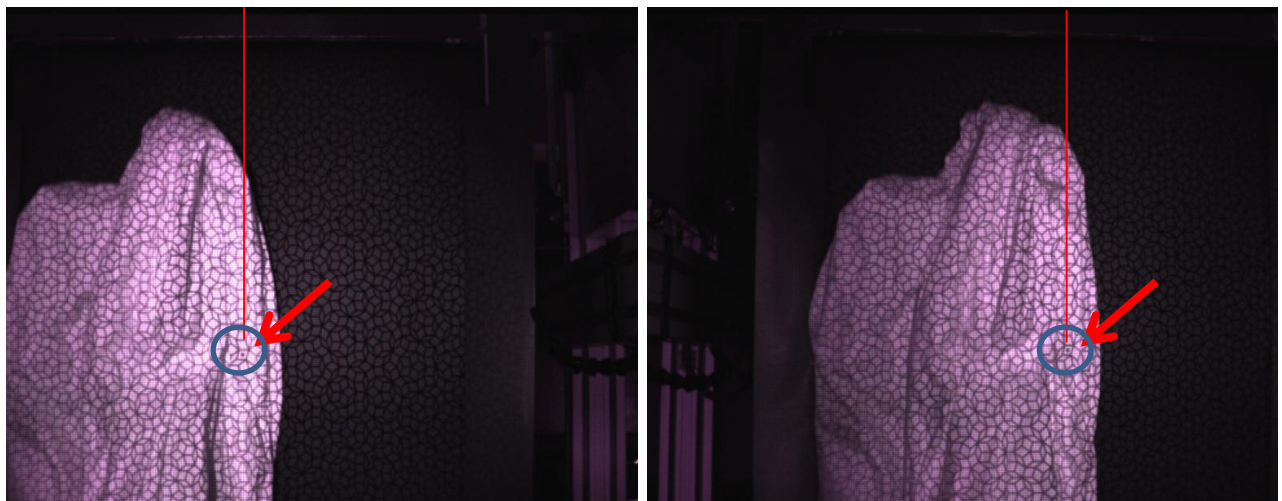


図 2.1-25c サンプル画像

高速移動 CV 上でもステレオ計測可能にすべく滑らかな表面にユニークな特徴付けがされている。

(2) 洗濯物のマーク認識技術

第1フェーズでは、布に織り込まれたマークを斜方照明により浮き上がらせ（図 2.1-21）、相関マッチングにより表裏・種別認識するシステムを開発したが、細かい凹凸のテクスチャが画像全体に分布するため、認識アルゴリズムの検討が課題であった。

第2フェーズでは、ロバストでテクスチャ雑音に強い認識アルゴリズムの開発に向けて開発を行った。定型物分類投入システムプロトタイプ機のカテゴリ対象は、図 2.1-26 に示す様なバスタオル、フェースタオルである。



図 2.1-26 定型洗濯物

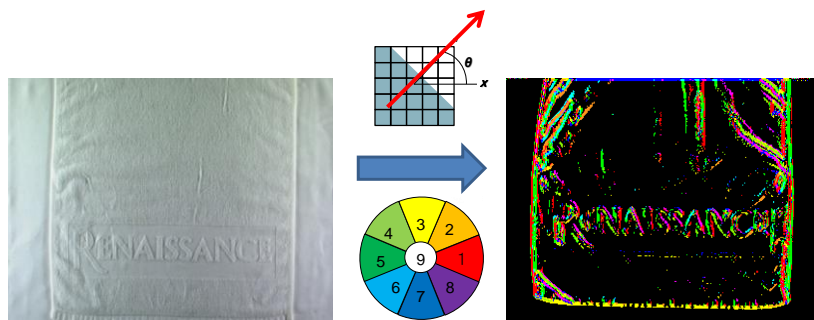


図 2.1-27 5x5 画素ウィンドウの明るさ方向のコード化

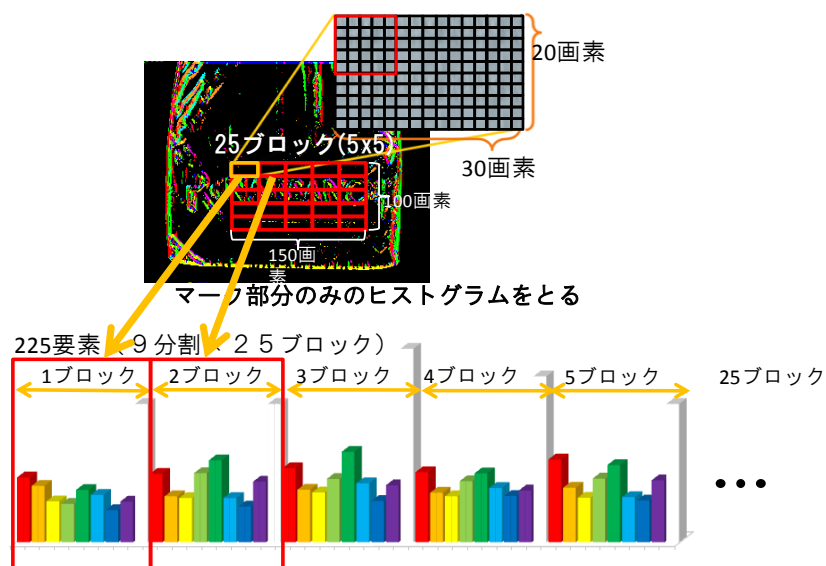


図 2.1-28 HOG 特徴

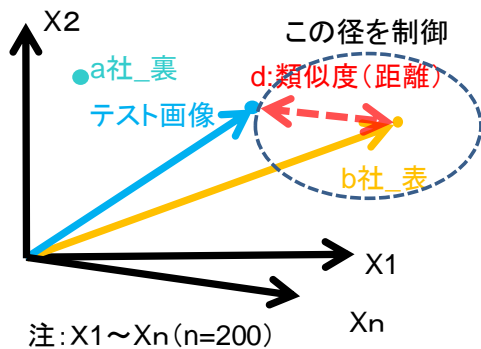


図 2.1-29 ベクトル空間距離による認識

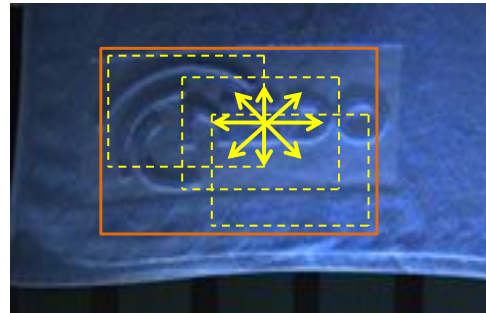


図 2.1-30 認識ウィンドウの摂動

ロバストでテクスチャ雑音に強い特徴パラメタとして、明るさ変化方向を用いることにした。まずタオル画像の各画素を 2×2 のウィンドウで平均化して微小テクスチャを軽減、 $1/2$ 画像に圧縮した。マーク部に 150×100 画素のマーク検出ウィンドウをおき、その中の各画素について、図 2.1-27 のように 5×5 画素の方向コード検出フィルタを走査、1-8 の明るさ方向コードを割り振った。このとき、規定の明るさ変化が無い場合には、コード 9 とした。図に示すようにマークの輪郭部に方向コードが付いた。

次に、図 2.1-28 の様に、マーク検出ウィンドウの中を 5×5 のブロックに分け、各ブロックで、1-9 の方向コード別にそのコード値を持つ画素数の出現数をヒストグラム化した。これを 25 ブロック分並べて、特徴ベクトルとした。この特徴ベクトルを、HOG(Histogram of Gradient)特徴ベクトルとよぶ。

マークの認識には、図 2.1-29 のように HOG 特徴ベクトル空間でのベクトル間距離を用いた。あらかじめ 5-6 枚の同一マークの画像を撮って、HOG 特徴ベクトルを計算、その値を平均化して、マーク毎の標準 HOG 特徴ベクトルを作成しておく。読み取り画像が入力されたとき、その HOG 特徴ベクトルを求め、標準 HOG 特徴ベクトルとの特徴空間での距離を計算、規定の範囲内にあるかどうかでマーク認識した。

なお、マーク検出ウィンドウの画面内での位置は、まず画像内にあるタオルコーナ部を検出、そこからの相対位置で設定したが、多少のマーク位置のばらつきがあった。そこで、図 2.1-30 に示す様に、やや大きめの枠を取り、その中でマーク検出ウィンドウを前後左右に摂動させてベクトル間距離を計算、その最小値が規定値より小さいかどうかでマーク認識した。

10 種の教示パターンに対し、50 枚の画像について、実験室環境下で 100%のマーク・表裏認識を実現した。これをベースに実機用のマーク認識システムを開発、搭載した。

(3) 洗濯物分類アルゴリズム

混流洗濯物分類システムでは、図 2.1-31 に示す病院標準アイテムについて、洗濯ラインに投入するための荒仕分けを行う分類システムを開発する。

ここでは、色物は取り除き、シーツ、布団カバー（包布）、枕カバー（ピロー）に分類、

それぞれの洗濯ラインに送る。

色物の検出には、視覚認識によって行うが、3種の白物の分類は、装置のタクトなどを考えると、布をきちんと広げて視覚機能で認識することは難しいため、布の引き上げ動作時にカセンサにより分類した。



図 2.1-31 病院標準アイテム

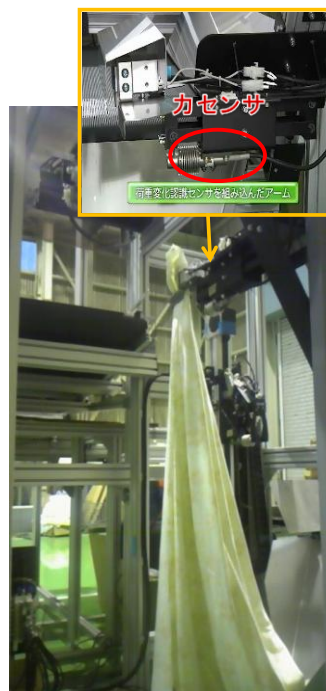


図 2.1-32 カセンサ装着(引上部)

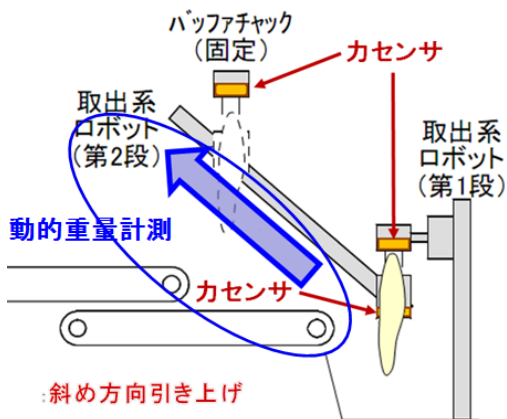


図 2.1-33 引き上げ力計測

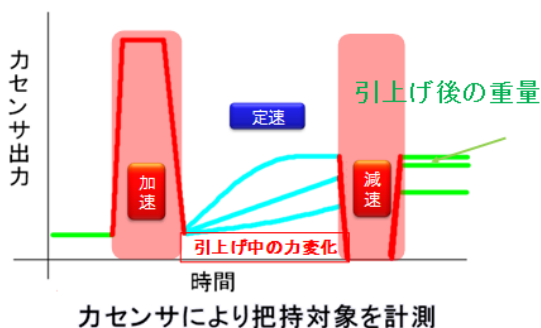


図 2.1-34 計測タイミング

①カセンサによる分類

混流洗濯物分類システムでは、最初にロボットが布を把持、斜め方向に引き上げる。この引き上げ動作中の把持力の計測を行い、力の変化パターンを解析して、シーツ、布団カバー、枕カバーの種別を判別するアルゴリズムを開発する。

図 2.1-32 に、布の引き上げ状況と、チャックへのカセンサの装着状況を示す。また、図 2.1-33 に、垂直に引き上げる 1 段目と、斜め方向に引き上げる 2 段目のロボットの構成を示す。今回、1 段目の引き上げ距離が短かったため、2 段目引き上げ時の力変化により、種類の分類を行う事にした。

2 段目引き上げ時のカセンサ出力のモード図を示す。引き上げは高速に行われ、台形速度制御による 1 軸のみの動作なので、加速、定速、減速モードがある。この加速、減速モード

では、加減速のための力が加わるので、力センサの出力が不安定となり、引き上げによる布引き上げ力変化を捉えることは出来ない。このため、定速モード時のみを分類に用いることにした。

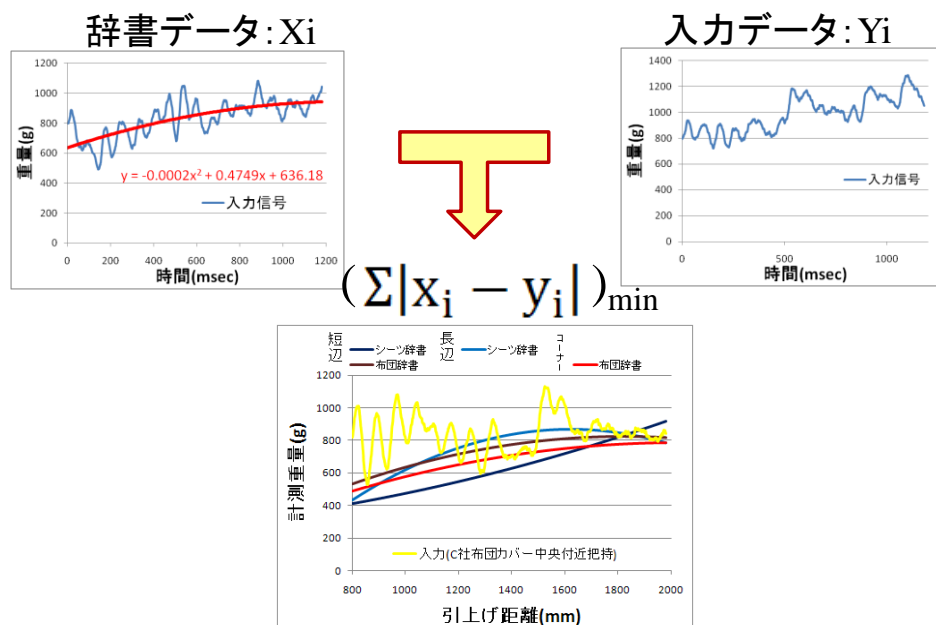


図 2.1-35 引き上げ中の力変化による分類

分類アルゴリズムを図 2.1-35 に示す。色物については、引き上げ動作後の画像処理で見つかるので、力変化解析では、シーツ、包布（布団カバー）、枕カバーの分類を行う事にした。あらかじめ辞書データとして、洗濯物が運び込まれる病院のシーツ、包布（布団カバー）、枕カバーのセットでそれぞれを引き上げた場合の力変化をシステムに教示する。この場合、布の把持位置でも力の変化の仕方が変わるため、布の短辺側把持、コーナ把持、長辺側把持の 3 パターンについて、辞書データを準備する。したがって、1つの病院辺り、3種×3パターン、計 9 パターンを記憶する。

辞書データは、図 2.1-35 の様に、引き上げ時の定速モード時の力変化を検出、その変化を 2 次式に最小自乗近似し、曲線として覚える。これは、比較時の振動などによるノイズの影響を低減するためである。評価時は、入力データと 2 次曲線の各値の差の絶対値をとり、その差が最小となるパターンを選択、分類する。

本システムの分類性能を、実機により検証した。制御部に認識アルゴリズムを搭載、目標 80% に対し、3 つの病院の洗濯物セットで検証した結果、平均で 89% 以上の分類性能を得た。

② 視覚センサの画像特徴抽出による分類

図 2.1-36 のように、引き上げ後、コンベア上におかれた洗濯物を、3 次元視覚センサで、布の色、面積や幅・長さ、体積計測を行う特徴抽出システムを開発した。力センサの結果と組み合わせる総合判定を行うシステムである。ここでは、特に色



図 2.1-36 視覚センサ

物抽出を重点的に行う事とした。実験の結果、全ての色つきの洗濯物を判定出来た。

2)-7 整形把持ハンド及びハンドリング操作方法の開発

第1フェーズでのハンドで開発した定型ライン投入システムのハンドリングアルゴリズム、および柔軟物の辺把持ハンドをベースに、(a)2つのコーナを把持して姿勢を整えるたぐり機構、およびその操作アルゴリズムの開発、(b)力センサや視覚センサなどを組み合わせた分類機構の開発を行った。以下、詳細を示す。

(1) 辺把持たぐり機構、および操作アルゴリズムの開発

第1フェーズで開発した、タオルの縁に沿った伸展動作を行うたぐり機能付き辺保持ハンドから、第2フェーズでは補助装置なく展開するようにロボットハンドとグripperを新規開発して大小様々の洗濯物のコーナを把持して一边をたぐり両端を把持する、700mmロングストロークたぐり展開ロボットハンドを搭載し、その操作アルゴリズムを開発、フェイスタオル、バスタオルの両方を混在させてのハンドリング機能を実現した。

ポースリエの直線運動機構と平行四節リンク機構を組み合わせた閉構造のリンク機構にて、ロボットアーム端から把持制御点までの距離を短く(205mm)して、ロボットハンド制御点の高い可操作度と700mmの全域たぐりストロークを持たせた。(図2.1-37a, 2.1-38b) 新開発リンク機構はストローク350mmの直線運動リンク機構をロボットアーム端面からの距離を短く(150mm, 奥行200mm)し、直線運動する。(図2.1-38a)

直動することを利用しつつバスタオル一辺の展開ストロークに対応するためこれを対向配置してコンパクト化しサーボ駆動とオーバーラップ領域を持たせ

ることで制御点や把持時のグripper間隔を自由に選択可能にした。(図2.1-38a)

把持時はタオル辺の端部周辺を短い間隔で把持する。ロングストロークながら把持するときはコンパクトに変形させる。(図2.1-38c左図)直線移動ではリンク機構の逆運動学の計算アルゴリズムを組み込み駆動部の回転角を制御した。さらに吊り下げた布が揺れても把持するようフィンガー間隔を広げるように新しいグripperを開発した。(図2.1-38d)布用としてフィンガー先端は滑らないような形状と滑らせながら把持する形状にして、作業者が両手で行うようにたぐり方向軸線軸線を下に傾け、(図2.1-38c右図)コーナを固定保持するグripperと辺を滑らせて保持するグripperの間隔を広げ1秒以下で展開した。コーナ把持からたぐり展開しコンベアに排出するまで4秒であった。

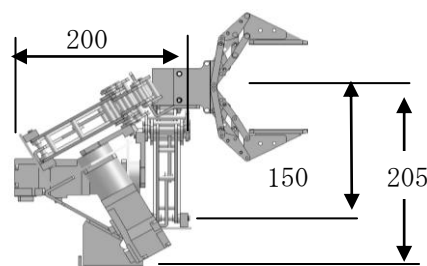


図 2.1-37a ハンド側面図

傾斜対向配置でオーバーラップ 100mm 確保

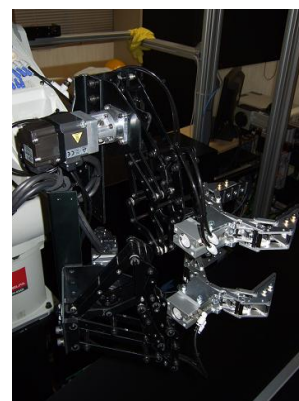


図 2.1-37b 辺把持たぐりハンド

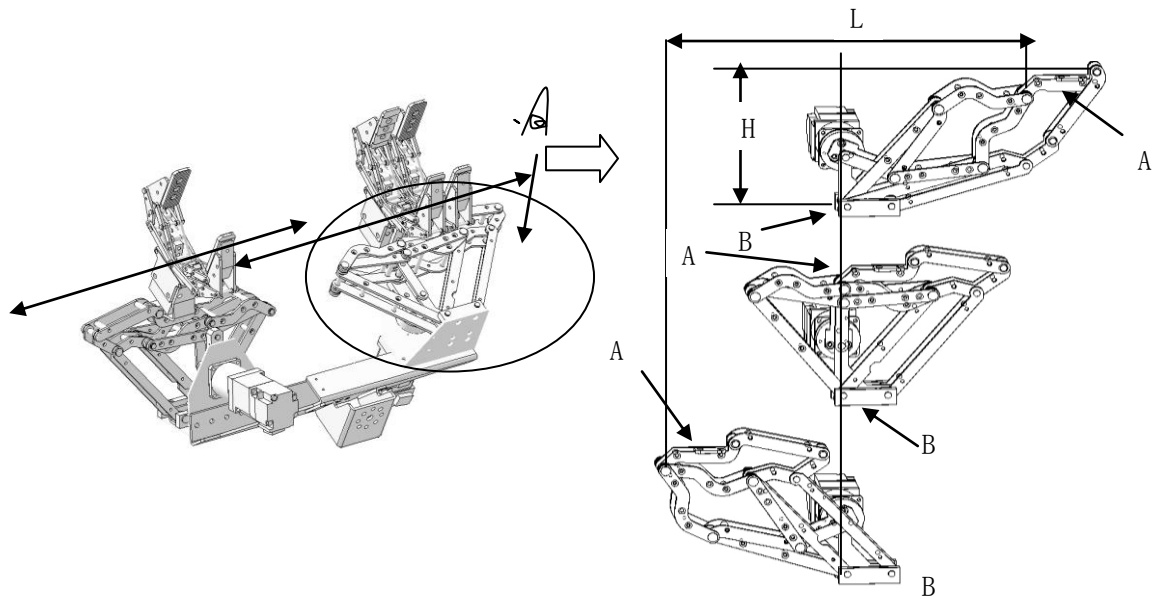


図 2.1-38a ホースリニア直線リンク機構外観および動作図

グリッパ 取付面 A はアクチュエータの回転運動を厳正な直線運動に変換する。ベース B からの高さ H は不変である。
 $L:H \doteq 3:1$ であり $L=350$ 、 $H=120$ 、質量 3.8kg (サーボモータ、グリッパ - 2 個含む)

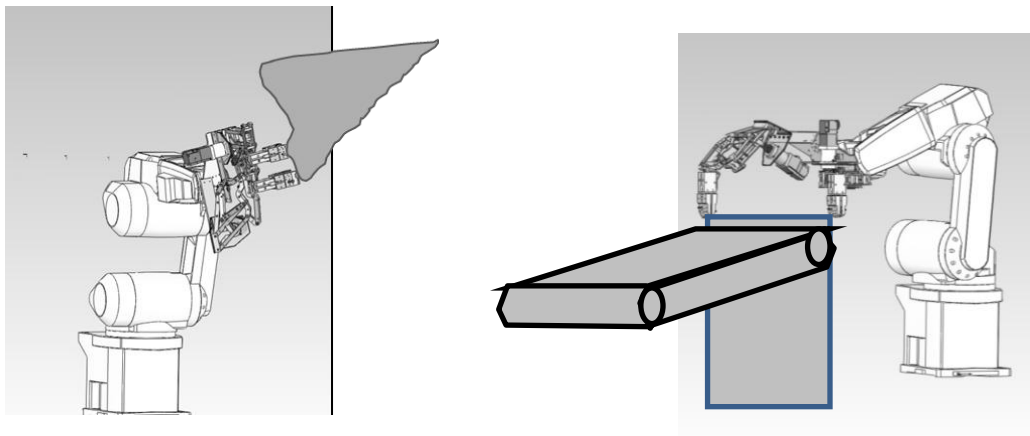


図 2.1-38b たぐり展開動作図

把持はハンドをコンパクトに変形しグリッパ間隔を小さくすることでコーナー近くの辺部を把持する。たぐり動作は干渉しないロボットベースで広げる。

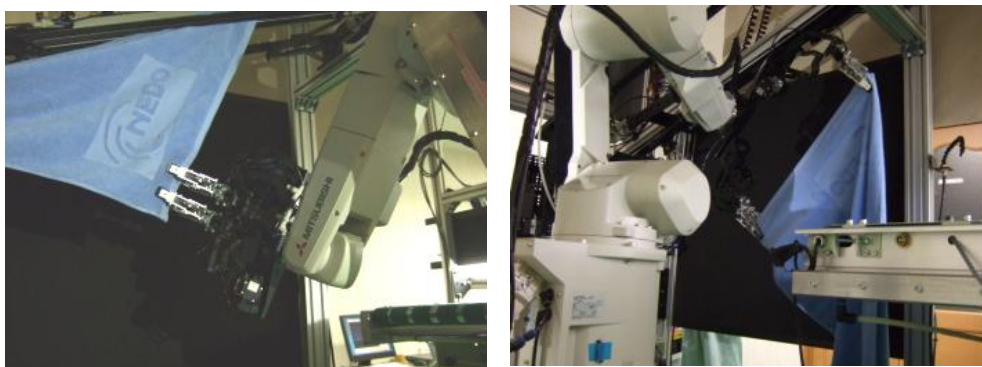


図 2.1-38c 辺把持たぐりハンドの実動作

リンク機構であるためスライド部材は不要。把持 (左図) 時の間隔縮小時にハンドがコンパクトになるため成功率が増す。たぐり展開時には十分なストロークを持つためバスタルの展開できた。

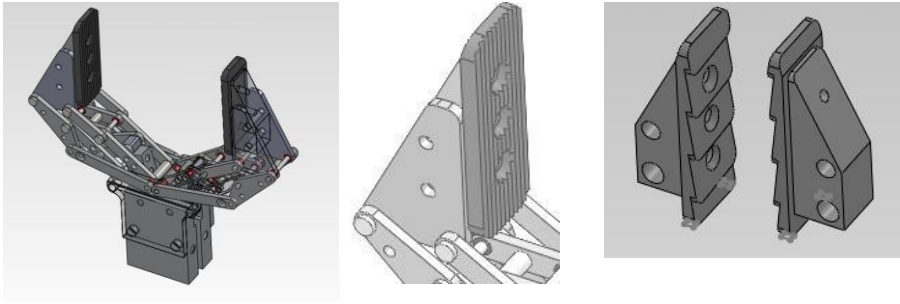


図 2.1-38d 布たぐり展開に適合設計した平行リンク式グリッパー

フィンガーの解放幅を 100mm、並進移動させることで把持成功率を向上した。先端の布接触部の形状を工夫し固定機能や滑り保持機能を持たせた

上記のたぐり展開作業では双腕型ロボットでも行えるが、本技術は費用対効果と動作の高速性の点で優位である。2つのエンドエフェクタの間隔を制御しつつアームロボットひとつで操作することで得られる技術応用範囲は布のたぐりのみに応用するのではなく、双腕ロボット作業の一部に適用できる可能性がある。

(2) カセンサや視覚センサなどと組み合わせる分類機構の開発

① 定型ライン投入システムプロトタイプ機のための分類機構

定型ライン投入システムでは、2)-6(2)の HOG 特徴を用いたマーク認識技術を用いて、バスタオルやフェ

ースタオルの種類や表裏を判定する。そして、その結果に基づき、もしタオル類が指定タオルでなければ、ラインから排除する。また、裏向きに送られてくれば、コンベアを組み合わせ、表裏を反転させ、表側を上にして、仕上げ工程に投入する。

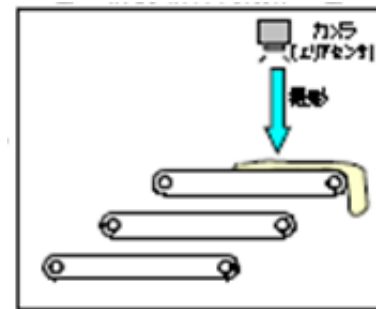


図 2.1-39 3段コンベアによる表裏反転・排除

この表裏反転・排除部の外観、およびその 3 段コンベアの構成を図 2.1-39 に示す。検出されたタオルが正しく表を向いていれば、中段と下段のコンベアを送り出し方向に対し反転し前端を吊り下げた後に、方向転換して投入する。また、裏向きなら、下段のコンベアを正転させてタオルの表裏を反転させて次ラインに投入する。種類が異なっていた場合、中段コンベアを反転させて、そのまま投入側と反対側に落とす。

②混流洗濯物分類システムのための分類機構

混流洗濯物分類システムでは、図 2.1-31 の力センサや視覚認識機能を組み合わせ、洗濯物の種類を認識した後、メカニカルな機構により分類を行う。病院からの洗濯物の構成を調査、適用対象を選定し、分類する洗濯物の組み合わせを図 2.1-31 の様に決定した。そして、それに基づいて、図 2.1-35 の力センシングによる総合判定アルゴリズムを開発、種類を判定した。その結果に基づいて、図 2.1-40 の様にコンベアを組み合わせ、分類動作を行う。

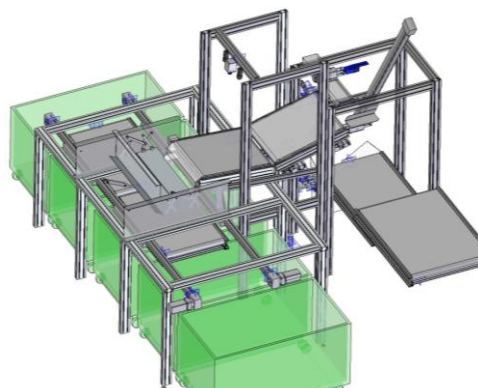


図 2.1-40 混流洗濯物分類機構

開発システムでは、分類された洗濯物を、図 2.1-40 の中に書かれた緑の数個の分類かごに投入する。そのため、視覚認識後、1台の送りコンベア、2段の移動コンベアによって、分類かごに落とし込む。2段の移動コンベアを直列にならべて右、又は左に回転させると、両脇のかごに洗濯物を投入できる。また、1段のみ使用と、1つ内側のかごに投入できる。2段コンベアを左右に開けると、真ん中のかごに投入される。これにより、洗濯物が種類別にかごに分けられる。

2)-8 投入ロボットシステムの開発

第1フェーズの開発成果を展開し、さらに2)-6,7で開発するセンサやハンド、分類を組み込んで、定型物分類投入システムプロトタイプ機と、洗濯投入分類システムを開発、その性能を確認した。

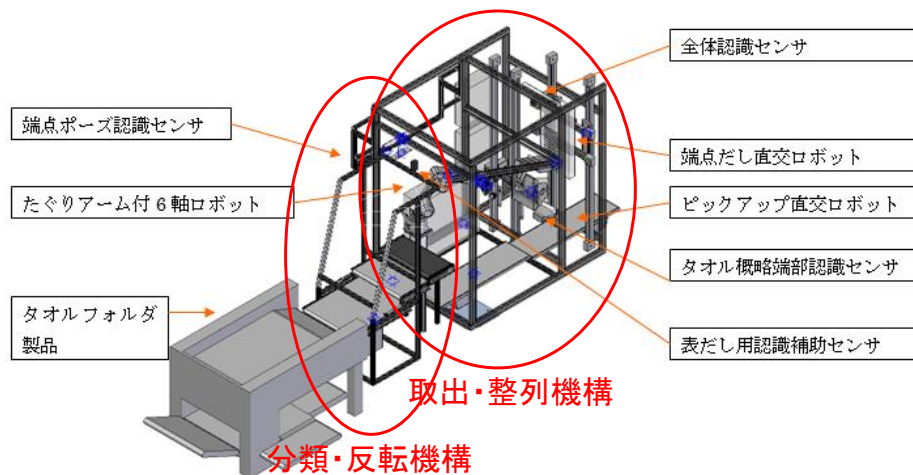


図 2.1-41 定型物分類投入システムプロトタイプ機

(1) 定型物分類投入システムプロトタイプ機の開発

第1フェーズの開発で、布のハンドリング手順を確立、視覚センサや柔軟物ハンドを開発して、図 2.1-22 の定型ライン投入システムを構築、実用化の可能性を示した。これに基づき、高速動作実証機を開発するのが、本課題である。現場で使用可能な装置とするため、現場に置ける装置サイズ、ラインのスピードに合わせたタクトタイム、他社品の混入や表裏

を見分けられるマーク認識技術の組み込み、製品としてのコストの実現が必要である。

図 2.1-41 に開発装置の構成をしめす。装置の小型化、実用コストの実現のために、第 1 フェーズでは 2 台使用した 6 自由度ロボットの 1 台を直交ロボットにした。また、図 2.1-24 工程 2 で行っていたベルトコンベア上での端点検出を、図 2.1-42 のように縦型にし、布を垂れ下げて検出する、などの機構の改良により、実際の工場のタオル投入場所のサイズで実現した。積層タオルの取出・整列機構部と、タオルの分類・表裏反転機構と組み合わせた定型ライン投入システムプロトタイプの外観を図 2.1-43 に示す。

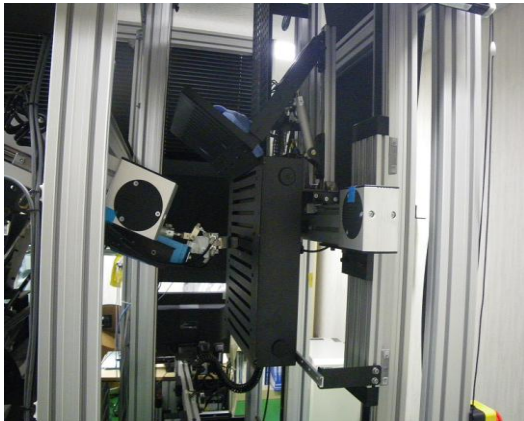


図 2.1-42 概略端点把持



図 2.1-43 定型ライン投入システムプロトタイプ

総合性能としては、成功処理排出枚数で目標数 800 枚に対して 400 枚/時間、分類ミス 2%以下を実現した。

今後、製品化開発へ移行するためにはこの目標達成の見通しが前提である。

特に、未達原因としては設計上のシステム動作速度でのマシンタクトにすると布の変形が想定外になり把持するコーナーが出現せず失敗率が上がり、取り出し枚数が上がらない点がある。作業者は早期の段階で例外处理的な動きを入れて対応しているが、この点の打破が製品化への条件の一つであるため各研究機関で協力して今後に繋げる。

(2) 混流洗濯物投入分類システムの開発

混流洗濯物投入分類システムの構成図を図 2.1-44 に示す。客先から、混合されて搬入されたシーツ、浴衣、枕カバーを、図 2.1-35 で開発する洗濯物分類アルゴリズムと、図 2.1-40 で開発する分類機構を応用、周辺システム

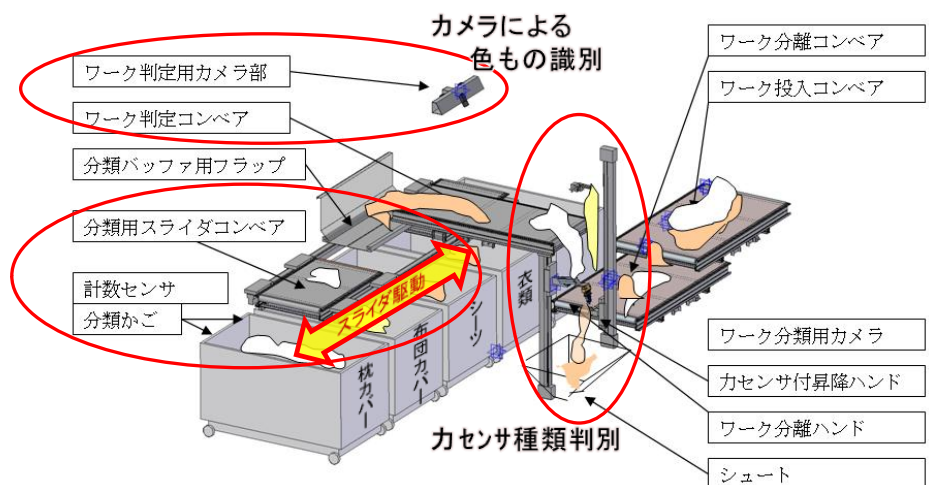


図 2.1-44 混流洗濯物投入分類システム構成図

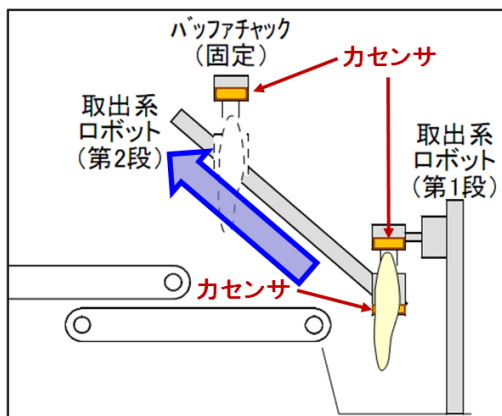


図 2.1-45 布引き上げ機構部



図 2.1-46 混流洗濯物投入分類システム

を開発して組み合わせた、搬入洗濯物の種類や色による分類システムを開発した。システム構成を図 2.1-44 に示す。実験により、顧客から搬入された混合洗濯物の分類の自動化が可能であることを示した。

図 2.1-45 に示すように、コンベアで送られ、シュートに落ちてきた布を力センサ付きハンドで 2 段階で引き上げる。力センサ出力の変化と、視覚センサ認識と組み合わせて、洗濯物をシーツ、浴衣、枕カバーと色物に分類、コンベアの組み合わせにより分類かごに落とす。

システムの外観を、図 2.1-46 に示す。実験の結果、成功処理枚数で目標値 2000 枚に対して速度 800 枚/時間、分類成功率 90% (目標 80%) を実現した。

今後、製品化開発へ移行するための課題については、処理タクトタイムの短縮、特に大きな布を引き出し分離させることの高速確実動作である。また変形するワークであるため視覚 (体積) 等での分類には限界があり、例えばワークのイナーシャ変化パターンでの識別のみで分類するなどの必要技術の整理と、搬送過程でワークのひっかかりがない安定したシステムにすることが重要である。

3) 「乱雑に積層された洗濯物ハンドリングシステムの研究開発」の纏め

第 1 フェーズの平成 18-20 年度においては、定型ライン投入システムをターゲットとして開発を進め、システム構成の考え方を纏め、3次元視覚センサとその認識アルゴリズム、たぐり機能を中心とした布ハンドリングのための柔軟物ハンド、など要素技術を開発した。また、それらを纏めて、定型ライン投入システムを構成することができた。

第 2 フェーズの 21-22 年度においても、視覚センサのプロジェクタ部の高輝度化により、3次元形状計測を室内環境レベルで実行可能にした。また、HOG 特徴を利用したテキスチャノイズがあるなかでのタオル折り込みマークの認識技術や、引き上げ動作中の力センサの力変化パターンを用いた洗濯物分類技術を開発した。メカニズム的にも、小型のフェースタオルにも、大型のバスタオルにも適用可能なロングストロークたぐり機構による辺の両端コーナ把持機能や、タオルの表裏反転、分類機構などを開発した。

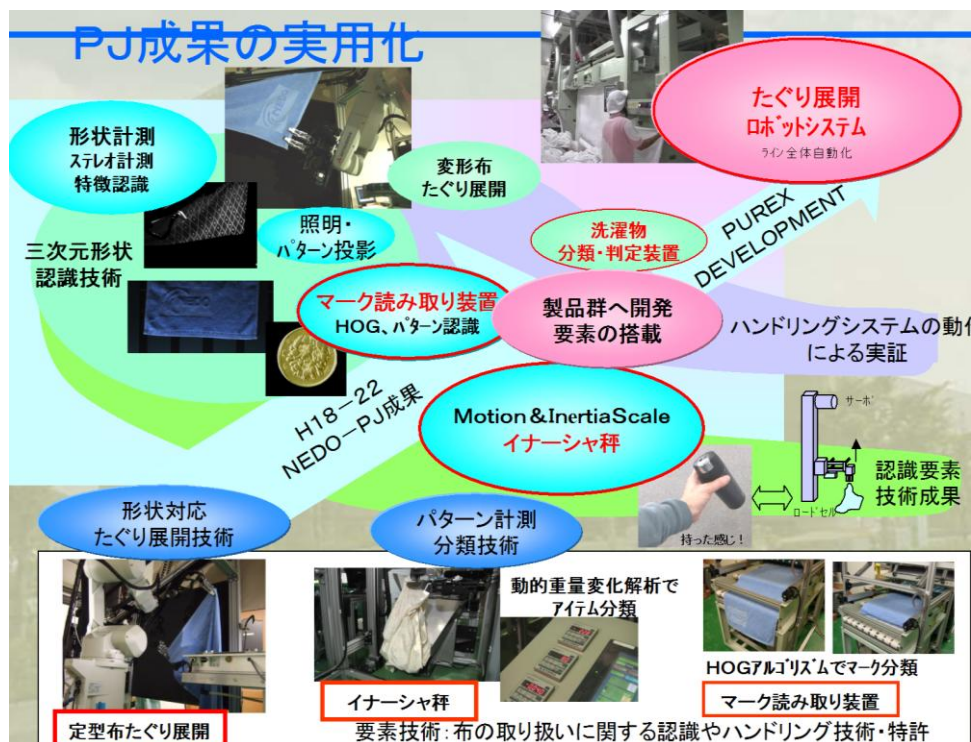
そして、それらの要素技術を組み込んで、定型物仕上げ投入システムプロトタイプ機と、定型洗濯物投入分類システムを開発し、これらの試作機が目指した要求作業自動化を概ね実現し、実用化に開発移行するための課題を明確化した。

4) 成果の意義

リネンサプライ工場のような産業サービス工場ともいえる分野で、生産ラインでの評価ではないものの、実験室での性能は、目標とした表裏判定と表だしも含まれるタオル仕上げ機への作業にと洗濯前の分類作業を自動化できた。残念ながら生産性においては作業者の能力の半分であったが、開発した要素技術群の中には今後の実用化に期待がもてるものがあり、これらを継続して開発しブラッシュアップすることで、既存製品への搭載や新製品としていく。なおこの技術は展示会出展、プレス公開や論文発表、特許出願された。

開発目標の達成については、このPJのような産業サービスの代換えロボットではシステムと比較よりも、人の作業を如何に置き換えられるかにかかっている。現在、最高水準の能力を発揮しているのは作業者だからである。リネンサプライ業界のなかで本開発に類似した製品開発については、国内メーカーでの動きは見られない。海外の業界展示会では、既存自動機をベースにしたバスタオル専用の自動投入機の提案が見られ、投入サイクルタイムは短いが入力成功率が不十分であると投入前に分類作業が必要である点で作業者に追いついていない。

本開発ではセンサ応用、ロボット応用の点で世界初で計画投入成功率、投入タクト、バスターフェース両対応や表だしを実現したが処理能力としては作業者の半分であった。



新たな技術領域の開拓への期待については高度作業を低価格で行うサービス業に入るとは、これまでロボットが入っていた溶接や塗装、組立等の既存ロボット応用分野以外への開拓につながる。ロボット業界以外の企業で行ったことで、開発された技術は現在のロボット技術がなぜサービス産業に導入されないのかという問いに対して、リネンサプライ

サービス業界からの問題解決方法の一つを示した。

また新しい要素技術（高速三次元計測や直線リンク機構、たぐり展開ロボットハンド、凹凸表面形状のHOG特徴識別による分類認識、あるいはイナーシャ計測による分類等）は、作業者の知覚を自動化するセンサ技術と、これをベースに取り出しや展開、分類を行うマニピュレーション技術であり、新しい技術領域を開拓するものである。今後これら技術のうち、とくにたぐり展開ハンドリングやHOGを利用したマーク読み取りなどの要素技術は、長期間のPJを実施して獲得することができたものであり、新製品への搭載が期待できるため時間がかかってもブラッシュアップしていく所存である。

このような有望な要素技術が荒削りながらも動作したことは今後に期待ができる。

成果の汎用性については、図のように個々には視覚センサ、布製品のためのハンド、周辺補助装置の開発など、それだけでも布などの柔軟物ハンドリングの基本的技術と言えるものを開発したが、根本的には布ハンドリングシステムの構築技法に一定の考え方を構築できつつ有ることが最大の成果と考える。考え方を纏め、これまでの開発成果を国内学会（精密工学会、ロボット学会、電気学会）、国際学会（SICE, IEEE 関連の国際学会）等に発表した。これらの発表は、学会で評価され、2010年8月にはIEEE ICMA2010国際会議でBest Paper Award, 2010年9月には、精密工学会技術賞、同月、精密工学会知能メカトロニクスワークショップで優秀発表賞を受賞した。そして2011年6月には技術賞についての技術紹介として、精密工学会誌に論文を掲載、広く関連研究者、技術者に成果を報告した。

投入予算と成果の整合性については、以下の点で妥当と考える。

- ・ 企業単独では行えなかったこと
- ・ 社会インフラ的なリネンサプライサービス事業を継続するのに必要な、人手不足に対応するための開発であること
- ・ 上記新製品の事業化したときの継続需要市場規模予測との比較から。
- ・ 成果公開が適切になされ、広い方面での技術応用の基礎に成り得ること

具体的には、これらの開発はリスクの高い物であり企業単独では行っていなかったこと、リネンサプライサービスは病院やホテルでのサービスを担う物であり事業継続が使命とされ、社会インフラ的な産業での課題解決の為の開発であるため妥当性がある。

製品化へのつながりで考えると、ステージゲート以降の21, 22年度の開発で、生産性、サイズ等について性能をアップした。現在、製品開発につなげられるか評価検討中である。また、混流洗濯物についても、視覚センサ、力センサなどの要素開発を進め洗濯ライン投入システムの試作システムを開発した。製品開発は元来、企業でおこなうため、そこに、移行するためのブラッシュアップの基になる要素技術や製品搭載への評価検討できる動作検証ができたことは、研究開発事業としては妥当な成果と考える。

また上記のように主要な開発技術については学会発表や特許出願、プレス発表や国際ロボット展等へのデモ出展等による成果公開が十分にされており、注目を集めた。

5) 特許の取得状況

表 片付け作業用マニピュレーションRTシステム

特許の名称	特徴・強み・新規性
3次元形状の計測方法および装置 1件	粗密2種パターン投光とステレオカメラの組合せが特徴。エッジ成分がない対象物を高速に計測、布の端部形状を識別する強みと新規性あり。
ワークの把持方法および装置 1件	傾斜軸を組合せたハンド、把持方法。それとロボットの組合せに特徴。特異点对応、外部センサによるポーズ情報から布の特徴部を把持する新規性と強みあり。
布物の自動展開投入装置 1件	大きさが異なる布物の自動展開装置。混在布物の1台対応に特徴。山積みまたは各工程でセットした布を、カメラの形状情報からハンドが把持または端部把持して移動し仕上げ機に送ることに新規性と強みあり。
マーク読み取り装置、および方法 1件	HOG特徴の計測、照明のあてかたによりタオル表面の凹凸形状のマーク分類を行う。同色のものであっても分類が可能。
微細非周期パターン投影装置及び方法とそれを用いた三次元計測装置 1件	ペンローズタイルと呼ばれる2種の基本セルの組合せで生成した微細非周期パターン光を計測対象物に投影する手段とステレオカメラを用いて所望の点の高さ計測を高速高密度に行う。
直線運動リンク機構とこれを用いた布物のたぐり展開装置 1件	ポースリエ機構と平行リンク機構を組合せて厳正直線運動を行う。コンパクトになるリンク長さの選定。およびこれを組み合わせた布辺を把持したぐりだし一辺を把持する。

6) 成果の普及

表 片付け作業用マニピュレーションRTシステム

論文等紙上発表(論文誌、学会誌、国際会議)		口頭発表		特許		報道(新聞、雑誌等)
国内	国外	国内	国外	国内	国外	
3	16	7	16*	6	0	0

*) 国際会議論文は、口頭発表も実施。

以上

3. 2. 2 高齢者対応コミュニケーション RT システム

「戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト、高齢者対応コミュニケーション RT システム（サービスロボット分野）、コミュニケーション RT による高齢者の在宅健康管理・支援システムの開発と実用化」

【積水ハウス株式会社、千葉工業大学】

プロジェクト用語集

① RT マスコット

在宅健康管理・支援システムにおいて対話のインターフェースとなるコミュニケーションロボット。システムと連動してジェスチャーをすることによりシステムに対する抵抗感を和らげる。

② 問診エキスパートシステム

あらかじめ用意された「問い（問診シナリオ）」への回答の選択肢を連鎖的にたどることで、疾患名や病的状態、もしくはそれに対するアドバイスなどの結論に到達するシステム。基本バイタルデータとなる収縮期血圧、脈拍、体温、体重を、医学的根拠に基づき 9 段階に分類し、それぞれに対応する問診シナリオを用意することで、測定値に応じた問診を実施する。

③ カットオフ値

問診エキスパートシステムでバイタルデータを 9 段階に分類する際に用いる閾値

④ 音声バイタル

音声の意味上ではなく、韻律情報から健康状態を推定する新技術。1 ヶ月間分のバイタルデータに紐づけられた音声データを解析することにより、一定の相関が認められた。

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

介護者不足問題が深刻化する中、従来は医療施設における介護や看護の対象であった高齢者が自宅での療養を余儀なくされている。本事業では、高齢者対応コミュニケーション RT の実現形として「在宅健康管理・支援システム」の開発を行う。構築するシステムは、音声コミュニケーションによって在宅高齢者のバイタルデータ（生体情報）、および問診結果を取得し、これらのデータを自動で解析することで、健康維持のためのアドバイスを提供する。特に高齢者にとって緊急性の高い高血圧症や糖尿病による重篤な合併症を予知し、それらを未然に防止するための警告を提示、担当医などへその危険を適切に通知し、高齢者の安心な自宅生活をサポートする。さらにバイタルデータの個人履歴を記録し、各人特有の変動値を含めた対象者固有の標準値を設定することで、担当医への診断支援を行う。

すなわち、本事業では RT を用いた高齢者と担当医師とのコミュニケーション支援システムを構築する。

効果的な在宅健康管理を行うためにはシステムの日々の利用が不可欠となる。これまでも様々な在宅健康管理システムが提案されてきたが、高齢者にとって操作が難しく「使えない」あるいは操作が面倒で「使い続けられない」ということが大きな障壁となっており、これを解決する必要がある。サービスの事業化へ向けにはコミュニケーション RT を活用して健康管理に意識の高い想定ユーザが毎日使い続けられるシステムを開発することが理想である。そこで、本事業で開発するプロトタイプシステムにおいては想定ユーザが 1 ヶ月間継続して朝昼晩の利用ができることを達成目標として設定する。1 ヶ月間継続可能なシステムを構築することにより、システム利用の習慣化が期待できる。

また、1 ヶ月間の継続利用が可能なシステムによりプロジェクト終了後も実現場となる一般在宅において想定ユーザによる長期在宅実証実験を継続的に実施することが可能となり、3 年後の事業化を目標としてユーザからのフィードバックを取り込みながらシステムを改善していく事が可能となる。

システムの開発にあたり、以下の中間目標を設定する。(計画変更後の最終版)

・原理試作システムの開発 (2009 年 12 月)

システムを構成する要素技術の基盤構築、仕様洗い出し

医師による実証実験・医師向けの情報解析・提示手法の構築

・1 次モニタ試験用システムの開発 (2010 年 3 月)

原理試作システムを改良し、一般住宅に設置可能な 1 次モニタ試験機の構築

一般高齢者を対象とした 1 次モニタ試験によるシステム検証および課題の抽出

・2 次モニタ試験用システムの開発 (2010 年 9 月)

1 次モニタ試験用システムの課題への対応、UI 改良、システム運用基板の構築

想定ユーザを対象とした 2 次モニタ試験の実施、課題の抽出

・事業化プロトタイプの開発 (2010 年 12 月)

統合インフィル空間としてのセンシングチェア構築

想定ユーザを対象とした UI アンケートの実施、課題の抽出

上記のように、システム開発にあたり初年度に音声コミュニケーション、バイタル測定、医療現場にて診察に必要な情報の解析・提示手法をはじめとする要素技術の課題を検証するための「原理試作システム」を構築する。またこのシステムを利用して医師による実証試験を行う。続いて、原理試作システムをベースとし、一般高齢者による在宅モニタ試験を実施するために改良を加えた「1 次モニタ試験用システム」を開発する。このシステムを用いて 1 次モニタ試験を実施し、得られる基本機能評価と課題の抽出を行う。「2 次モニタ

試験用システム」では1次モニタ試験の結果をフィードバックするとともにシステム運用基盤の開発を行う。このシステムにより、想定ユーザを対象とした2次モニタ試験を実施し、運用体制を含めた検証を行う。並行して住宅内のインフィル空間と統合した「事業化プロトタイプ」を開発し、同じく想定ユーザを対象にユーザビリティに関するアンケート調査を行う。

以上の中間目標を経て、最終的に想定ユーザが1ヶ月間使い続けられるシステムを構築し、プロジェクト終了後に事業化へ向けた改良・評価を行っていくための基盤システムとする。

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

本事業では、図1に示すように音声認識インターフェースを中心に、問診エキスパートシステム（推論エンジン）、対話のフロントエンドとなるRTマスコットおよびタッチパネルディスプレイ上のGUIからなるコミュニケーションRTと各種バイタルセンシング機器をインテグレーションすることにより、音声コミュニケーションRTの応用システムとして在宅健康管理システムを開発する。

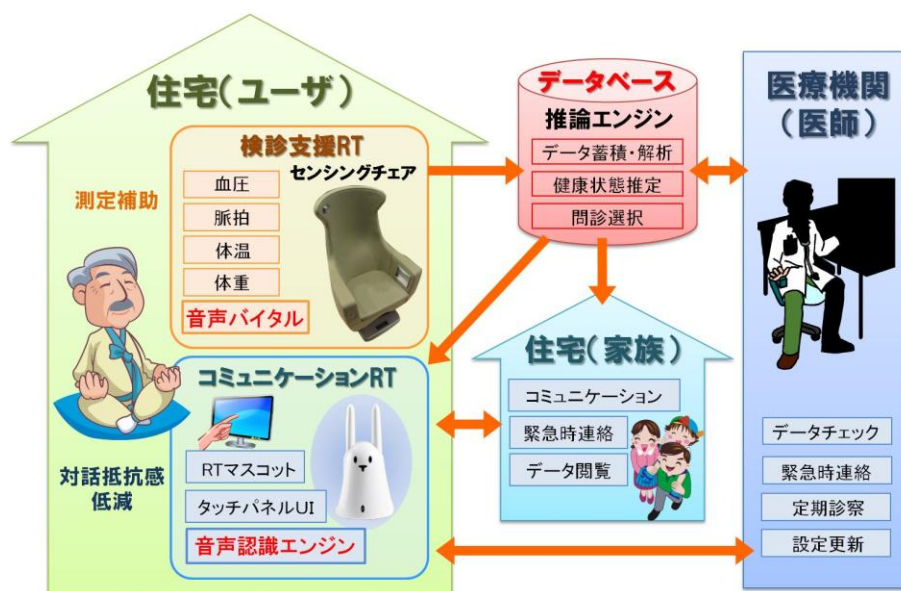


図1：コミュニケーションRTによる在宅健康管理・支援システム

【実現するサービス： 高齢者の健康管理・維持、医師の検診支援】

在宅健康管理RTシステムでは、積水ハウスのオーナーズWebサイトおよび健康管理医師ネットワークと連携することで、下記のサービスの実用化を目指し、必要な技術の開発

および事業化検討を行う。

コミュニケーション RT を用いて必要なバイタルデータの取得を行い、そのデータを自動解析し医師が利用しやすい情報へと変換する。そのデータを利用した担当医の検診支援、高齢者をはじめとする住まい手の健康管理支援を行うシステムとサービスの実現・事業化を行う。

以上のようなシステムとサービスを連携させることで、医療現場からの強い要望であり社会問題にもなっている『介護者不足問題』を緩和させまた高齢者の在宅での健康管理（時には高血圧症等による死亡事故等の防止）を可能とする。このようなシステムの実現には次のような技術の開発が必要となる。

① 在宅健康管理 RT システムの要素技術開発および統合システム開発

1) コミュニケーション RT 基礎技術開発

- a) 音声認識インターフェースおよび音声からのバイタル情報抽出技術
- b) RT マスコット駆動制御

2) センシング RT 基礎技術開発

- a) バイタルデータセンシング機器の開発

3) 健康バイタルデータ解析に基づく健康状態推定、アドバイスプログラム

- a) 健康状態推定／アドバイスプログラム

4) 健康情報履歴蓄積要約技術

- a) バイタルデータ解析システム
- b) 医療診断支援システム

(医師へのバイタルデータ解析結果提示・および患者健康情報・管理システム)

5) 高齢者健康状態問診システム

- a) 問診エキスパートシステム

② 在宅健康管理・支援システムの実装・評価

6) 高齢者対応 UI 開発（センシングチェアを含む UI の使い勝手改良等）

7) 医療ネットワークとの連携システム・サービス、ネットワークコンテンツ事業化検討

本事業では以下に述べる実施計画に基づき、これらの要素技術の開発、および開発された要素のインテグレーションを行い、高齢者支援コミュニケーション RT としての在宅健康管理システムを構築し、実用化する。

【平成 21 年度の研究開発内容】

本事業では医師からの実際の要望に基づく、コミュニケーション RT の実用的なアプリケーションの実現とその事業化が第一の目標である。特に初年度は住空間に埋め込むべき

RT の基幹システムの開発に注力する。具体的には、在宅健康管理・支援システムのうち、特に医師らが現場で使用する機能である健康情報履歴蓄積要約技術の開発に注力し、その完成と早期の1次実証・検証試験を目指す。

即ち下記の4項目を重点開発する。

- 1) 医師が「使える」問診／センサ情報解析・結果提示システムの要素技術の基礎開発
(センシング機器、問診シナリオ、健康情報履歴蓄積要約技術、医療診断支援)
- 2) 音声認識インターフェースおよび音声からのバイタル情報抽出技術
- 3) 原理試作システムの開発、医師を中心とした1次検証試験
- 4) 1次モニタ試験用システム(クライアントーサーバ)の開発

なお、研究開発を進めるにあたっては、一般高齢者を対象とした在宅実証実験期間を延長するため、加速予算を投入して22年度を計画していた、上記4)1次モニタシステム(3セット)の開発を前倒しするとともに、2次モニタ試験を含む開発スケジュールの組み直しを行った。

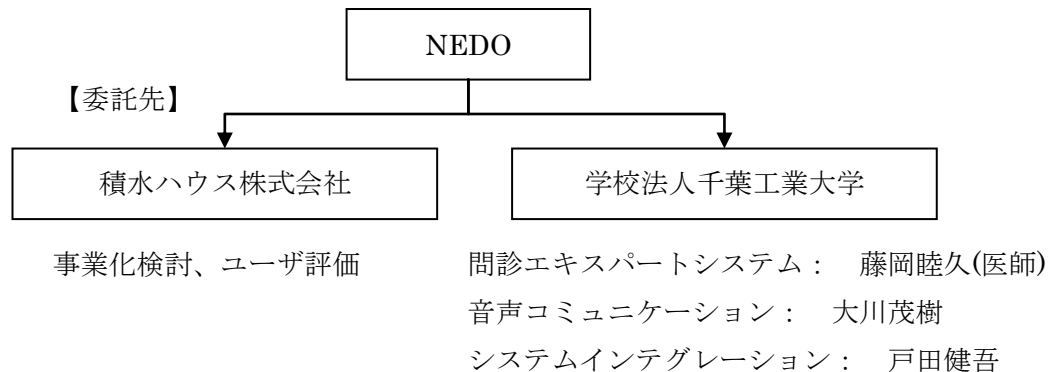
【平成22年度の研究開発内容】

各要素技術および1次試作システムの改良と、その統合による在宅健康管理・支援システムの基幹技術の開発を完了させる。さらに、一般高齢者を対象とした長期在宅検証試験を2回にわたって実施してシステム評価と改良を繰り返し、システムの完成度を高める。

- 1) 1次モニタ試験の実施(医師夫妻および一般高齢者夫妻2組、計6名、1ヶ月間)
- 2) 1次モニタ試験後のアンケート調査結果に基づくユーザビリティの改良
- 3) コンティニュー対応血圧計・体重計の導入
- 4) 2次モニタ試験用システムの開発(GUI刷新、応答性と音声認識率の向上)
- 5) 2次モニタ試験の実施(医師夫妻および一般高齢者夫妻2組、計6名、1ヶ月間)
- 6) 事業化プロトタイプの開発および想定ユーザによるユーザビリティ評価試験の実施

なお、1次・2次モニタ試験では加速予算を投入して、被験者を増やすとともに実施期間の延長を行った。(上記は延長後の期間)

2.2 研究開発の実施体制



2.3 研究開発の運営管理

開発メンバーに医師（藤岡睦久：獨協医科大学名誉教授）を加え、遠隔医療学会にて積極的な活動を行うとともに、現場の協力医師らによる協議内容や参考意見を集約してシステムに取り込みながらシステム開発を行う。

積水ハウスの顧客を対象に既存のオーナーズサイト等を活用して市場調査、ユーザーアンケート調査を随時実施しながら、ユーザビリティ評価や事業化検討を進める。

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

本システムのコア技術となる問診エキスパートシステムについては、問診システム（整理番号 C0091021）として、発明者を医師の藤岡睦久を加えたメンバー、出願者を千葉工業大学として特許申請中。

ここで、問診エキスパートシステムとは、あらかじめ用意された「問い（問診シナリオ）」への回答の選択肢を連鎖的たどることで、疾患名や病的状態、もしくはそれに対するアドバイスなどの結論に到達するシステムのことである。

今回開発する問診エキスパートシステムの特徴は、基本バイタルデータとなる収縮期血圧、脈拍、体温、体重を、医学的根拠に基づき「要緊急連絡高」「要受診高」「要警戒」「心配なし高」「正常」「心配なし低」「要警戒低」「要受診低」「要緊急連絡低」の9段階に分類し、それぞれに対応する問診シナリオを用意することで、測定値に応じた問診を実施することにある。また、各測定値を分類する際に用いる閾値と問診内容を個々人の健康状況に応じてカスタマイズすることにより、医療側の要求に十分応えうる問診エキスパートシステムの構築が可能となる。

実用化に向けた課題と検証方針として以下の通り進める。

①ユーザーニーズの検証

本提案のユーザーは、医師と一般の高齢者である。医師のニーズに関しては、医師たち

の協力のもとで診察に必要なバイタル情報の解析&提示手法の開発、および健康情報履歴蓄積データベース基本構造の構築を行っている。

一般高齢者のニーズに関しては 21 年度に

- ・健康不安の実態調査とターゲット仮説の検証、ボリューム推定
- ・グループインタビューによる健康コンテンツの親しみやすさ評価

などを実施して検証を行う。22 年度は、実環境に健康支援高齢者コミュニケーション RT システムの技術（バイタルセンシング、音声認識、問診システム等）を実装して高齢者による検証評価を実施し、システムの有効性ならびに高齢者ユーザーのニーズを検証する。

②医療機関とのネットワークとビジネスモデルの構築

本システムは、医師と繋がる安心感がポイントであり、実用化にあたっては医師のネットワークをいかに構築してそこに繋げるかが課題となる。医師法、薬事法など関連する法律や運用制度との整合性(各種許認可の取得、制度の適合性、安全性の確認、等)の問題をクリアすることが必要となる。研究メンバーである医師らとこれらの問題について検討し、ビジネスモデルの構築を目指す。

3. 情勢変化への対応

2009 年以降、コンティニュー設計ガイドラインに対応した健康関連機器が数多く発表されたのをうけ、2010 年の 2 次モニタ試験システムの開発に合わせて血圧計、体重計をコンティニュー対応の機器へと切り替えるとともに、ソフトウェア側もこれに対応した。これにより、コンティニュー対応の機器であれば他社製の測定器であっても本システムで利用可能となった。

1 次モニタ試験システム以降、システムをクラウド化し、問診エキスパートシステムのコア部分をサーバ上に移した。メンテナンス性が大幅に向上し、実証試験の効率的な運用が可能となった。同時に、事業化時に近い形での実証実験を行う事が可能となったため、事業化時の運用体制等に関しても、現場でのシステム設置条件や設置に要する時間、システムトラブル時の対応方法などの知見の収集を行うとともに、課題の洗い出しを行った。

4. 中間評価結果への対応

5. 評価に関する事項

Ⅲ. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果

表1 目標と研究開発成果及び達成度

目 標	研究開発成果	達成度
プロジェクト全体の目標(基本計画 p.11) RT システムを用いて高齢者の声を認識しコミュニケーションを取りながら、情報提供、情報伝達、体調確認、行動把握など的高齢者向けのサービスを提供する。最終的にはプロジェクト終了後 3 年をめぐりにプロジェクトの成果を活用し事業化を行う。	高齢者対応コミュニケーション RT システムとして「在宅健康管理・支援システム」を構築	
(1) コミュニケーションRT基礎技術開発 【音声認識インタフェース】 ・認識性能の安定と選択肢拡張(5 択) ・誤認識時のフェイルセーフ機能の実装 ・パラ言語情報からのバイタル情報抽出 【RTマスコット駆動制御】 ・駆動制御アルゴリズムの構築とユーザ評価	(1) コミュニケーションRT基礎技術開発 ・2~5 択の選択肢を実装(認識率 99%超) ・フェイルセーフ機能としてタッチパネルを導入 ・バイタル情報とパラ言語情報の相関 ・シナリオに対応した RT マスコットの駆動制御 ・アンケートによる RT マスコットの評価	(1) 達成
(2) センシングRT基礎技術開発 【バイタルデータセンシング機器の開発】 ・実証試験用機器の開発と改良	(2) センシングRT基礎技術開発 ・バイタル測定機器の無線化 ・体重計/血圧計のコンティニュー対応	(2) 達成
(3) 健康状態推定/アドバイスシステム ・問診エキスパートシステム(5)として統合	(3) 健康状態推定/アドバイスシステム ・カットオフ値/問診内容設定ソフトウェア	(3) 達成
(4) 健康情報履歴蓄積要約技術 【バイタルデータ解析システム】 ・健康異常検出、情報要約技術の開発 【医療診断支援システム】 ・解析結果提示/患者情報管理システムの構築	(4) 健康情報履歴蓄積要約技術 ・カットオフ値に基づく健康状態判定アルゴリズム ・DB サーバ構築 ・医師用 WebUI/管理者用 WebUI の構築 ・健康情報解析・要約ソフト	(4) 達成
(5) 高齢者健康状態問診システム ・問診シナリオの実装 ・問診エキスパートシステムの構築	(5) 高齢者健康状態問診システム ・問診シナリオプロトタイプの実装 ・問診エキスパートシステムプロトタイプの実装	(5) 達成
(6) 一般高齢者を対象としたモニタ試験システム ・モニタ試験用システムの開発(1次/2次)	(6) 一般高齢者を対象としたモニタ試験システム ・1次モニタ試験用システム/在宅モニタ試験実施 ・2次モニタ試験用システム/在宅モニタ試験実施	(6) 達成
(7) 高齢者対応UI開発 ・事業化プロトタイプによるユーザビリティ評価	(7) 高齢者対応UI開発 ・事業化プロトタイプシステム ・事業化へ向けた課題の抽出	(7) 達成
(8) 医療ネットワーク構築と事業化検討 ・オーナー向け web サイトのコンテンツ構築 ・実証用サービス体制の構築	(8) 医療ネットワーク構築と事業化検討 ・サンプル Web コンテンツ/実証用システム構築	(8) 達成

上記の通り、プロジェクト開始当初の目標値をクリアするとともに、一部については目標を上回る成果が得られた。開発した「在宅健康管理・支援システム」の外観を図2に示す。



図2 在宅健康管理・支援システム（左：モニタ試験用／右：事業化プロトタイプ）

開発した「在宅健康管理・支援システム」を高齢者の住む一般住宅内に設置し、2度にわたる長期在宅モニタ実験を実施した。それぞれのモニタ試験の目的は以下のとおりである。

- 【1次モニタ試験】 基本機能評価と各種データ収集、および改善課題の洗い出し
- 【2次モニタ試験】 システムを高齢者が継続して利用することが出来るかの検証と事業化へ向けた課題の洗い出し

1ヶ月間にわたるモニタ試験期間中は、原則として1日3回、朝昼晩の測定を推奨するかたちでシステムを利用してもらった。ただし、外出等をする事が多い日中の測定は、自宅にいるときのみ利用してもらった。モニタ試験期間と被験者は表2の通りである。

表2 1次・2次モニタ試験の実施期間および被験者一覧

1次モニタ試験（6月28日～7月28日）	2次モニタ試験（10月22日～12月10日）
被験者1： 69歳男性（医師） PC利用：有／携帯利用：有／測定習慣：無	被験者1： 69歳男性（医師） PC利用：有／携帯利用：有／測定習慣：無
被験者2： 62歳女性 PC利用：有／携帯利用：有／測定習慣：無	被験者2： 62歳女性（1週間実施） PC利用：無／携帯利用：有／測定習慣：無
被験者3： 61歳男性 PC利用：有／携帯利用：有／測定習慣：無	被験者3： 61歳男性（1週間実施） PC利用：有／携帯利用：有／測定習慣：無
被験者4： 58歳女性 PC利用：有／携帯利用：有／測定習慣：無	被験者4： 58歳女性 PC利用：無／携帯利用：有／測定習慣：無
被験者5： 72歳男性	被験者7： 62歳男性

P C利用：有／携帯利用：有／測定習慣：有	P C利用：有／携帯利用：有／測定習慣：無
被験者 6： 6 2 歳女性 P C利用：無／携帯利用：有／測定習慣：無	被験者 8： 6 2 歳女性 P C利用：無／携帯利用：有／測定習慣：無
	被験者 9： 7 6 歳男性 P C利用：有／携帯利用：有／測定習慣：無
	被験者 1 0： 7 2 歳女性 P C利用：無／携帯利用：無／測定習慣：無

上記の通り、IT リテラシーや測定習慣や年齢等、被験者のユーザ特性にばらつきがあったが、結果的に 1 次モニタ試験の被験者は自身の健康に関して意識の高い人が多く、2 次モニタ試験では、測定習慣がない、自宅に血圧計を持たないなど、健康意識の希薄な被験者が多かった。

表 3、表 4 に 1 次モニタ試験、2 次モニタ試験におけるシステム利用率を示す。

表 3 1 次モニタ試験のシステム利用率（健康意識の高いユーザ主体）

	朝	昼	夜	Total（昼を除く）
被験者 1	72% (23/32)	0% (0/32)	88% (28/32)	53% (80%)
被験者 2	6% (2/32)	16% (5/32)	56% (18/32)	26% (31%)
被験者 3	100% (32/32)	97% (31/32)	100% (32/32)	99% (100%)
被験者 4	100% (32/32)	72% (23/32)	97% (31/32)	90% (98%)
被験者 5	94% (30/32)	84% (27/32)	94% (30/32)	91% (94%)
被験者 6	94% (30/32)	78% (25/32)	94% (30/32)	89% (94%)

表 4 2 次モニタ試験でのシステム利用率（健康意識の希薄なユーザ主体）

	朝	昼	夜	Total（昼を除く）
被験者 1	68% (21/31)	6% (2/31)	87% (27/31)	54% (77%)
被験者 2	42% (13/31)	23% (23/31)	61% (19/31)	42% (52%)
被験者 3	100% (6/6)	100% (7/7)	100% (6/6)	100% (100%)
被験者 4	100% (6/6)	86% (6/7)	100% (7/7)	95% (100%)
被験者 7	58% (18/31)	48% (31/32)	68% (32/32)	58% (63%)
被験者 8	48% (15/31)	32% (23/32)	42% (31/32)	41% (45%)
被験者 9	77% (24/31)	80% (24/30)	97% (29/30)	85% (87%)
被験者 1 0	74% (20/27)	81% (22/27)	81% (21/26)	79% (77%)

被験者1～4は1次、2次ともにモニタ試験に参加したユーザであるが、1次モニタ試験での利用率よりも、2次モニタ試験での利用率が向上した。一方、全体では2次モニタ試験の利用率が低くなる結果となった。これは、利用者の「健康に対する意識」がシステムの利用率に大きく影響しているためと考えられる。以下に健康意識の高いユーザと健康意識の希薄なユーザについての継続利用に関する結論を示す。

【健康意識の高いユーザ】

本システムにより、少なくとも1ヶ月間、健康状態の推定に十分な利用率を達成可能。

【健康意識の希薄なユーザ】

健康状態の推定を行うにあたり必ずしも十分な利用率は得られない。

ただし、本システムによるバイタル測定の継続促進効果が見受けられる。

以上のとおり、初期ターゲットユーザ層である健康意識の高いユーザは、システムを1ヶ月間以上継続可能であるとの結果が示された。モニタ試験後のアンケート調査においても改善課題はあるものの、総じて継続した利用が可能であるとの結果が得られた。これにより、事業化へ向け、プロジェクト終了後も一般高齢者を対象としたモニタ試験／開発サイクルを実施可能なプロトタイプシステムが完成したといえる。

【事業化へ向けた技術課題】

構築したシステムがコミュニケーションRTシステムとしての当初の目標達成に至った結果、事業化へ向けた次のステップとして想定ユーザによる実証実験を繰り返しながら圧倒的に不足する実データを蓄積し、システムへと反映させる必要がある。問診エキスパートシステムを成熟させるためには、今後もデータ収集とシステム改善が必須となるため、医師団を結成してシステム改良を進め、3年後の事業化を目指す。

一方ハードウェア面では、薬事法への抵触を避けるために測定機器の改造を行わなかった結果、体重測定時に、立ち座りが必要となるなど、既成の測定機器をそのまま組み込んだことに依存する扱いにくさが発生し、これを問題視する意見が多く見られた。またチェアが大きく、設置場所が限られるとの意見も多かった。事業化へ向けには、医療機器メーカーと連携し、薬事法をクリアできるシステムハードウェアの開発などすすめるとともに、より安価かつコンパクトで扱いやすいUIへと改良を行う必要がある。

2. 研究開発項目毎の成果

① 在宅健康管理 RT システムの要素技術開発および統合システム開発

1) コミュニケーション RT 基礎技術開発

a) 音声認識インターフェースおよび音声からのバイタル情報抽出技術

IT リテラシに乏しい高齢者であっても音声による直感的な操作を実現する音声認識インターフェースを実現する。

健康管理というアプリケーションでは、医療としての実用に耐える高い音声認識率が大前提となる一方、一般住宅での音響環境や、口とマイクの位置関係、声の大きさ、発話タイミングなどには制約条件を与えられず、また高齢者には“ろれつ”の回らない利用者も想定される。これらの不確定要素を前提としてもなお、高い認識率を達成するために、本システムの音声認識インターフェースでは、以下のような実装を行った。

- ① 問診アプリケーションがシステム主導でシナリオをコントロールできることを利用して誤認識が起こりにくい認識単語セットを用意する
- ② この単語セットに合わせて認識候補の辞書を設問毎に動的に切り替える

以上により、一般家庭を想定した音響環境下にて問診中の単語認識率 99%以上を達成する音声認識インターフェースを実現した。さらに、フェイルセーフ機能として、音声インターフェースと併用可能なタッチパネル入力にも対応し、万が一誤認識が発生してしまった場合にも対応可能とした。

以上の音声認識技術をモニタ試験システムに実装して行ったアンケート調査において、音声認識の利用に支障はなく、日常的に利用可能な完成度に到達しているとの結果が得られた。

一方、音声のパラ言語情報（声色）から健康状態を推定するために、バイタルデータと同時に解析用の音声データを収集し、その相関を調べた。音声データには定型文 3 種と自由形式の音声日記を利用し、音声の長時間特徴変化 (Δ -ケプストラム特徴量) を利用して、音声の明瞭度、速度の安定性、滑舌の良さの指標をスコア化した。

モニタ試験で得られたバイタル測定値と音声特徴量の相関関係を調べた解析結果を図 3 に示す。なお実験用データには 1 次モニタ試験においてバイタル測定直後に被験者が発話した「あらゆる現実をすべて自分の方へねじ曲げたのだ」という音声 (16kHz、16bit、無圧縮 PCM、モノラル) を使用している。被験者は 1 次モニタ試験被験者夫婦 3 組、計測と録音は 1 日 3 回、朝昼晩行い、これを 1 ヶ月間継続した。

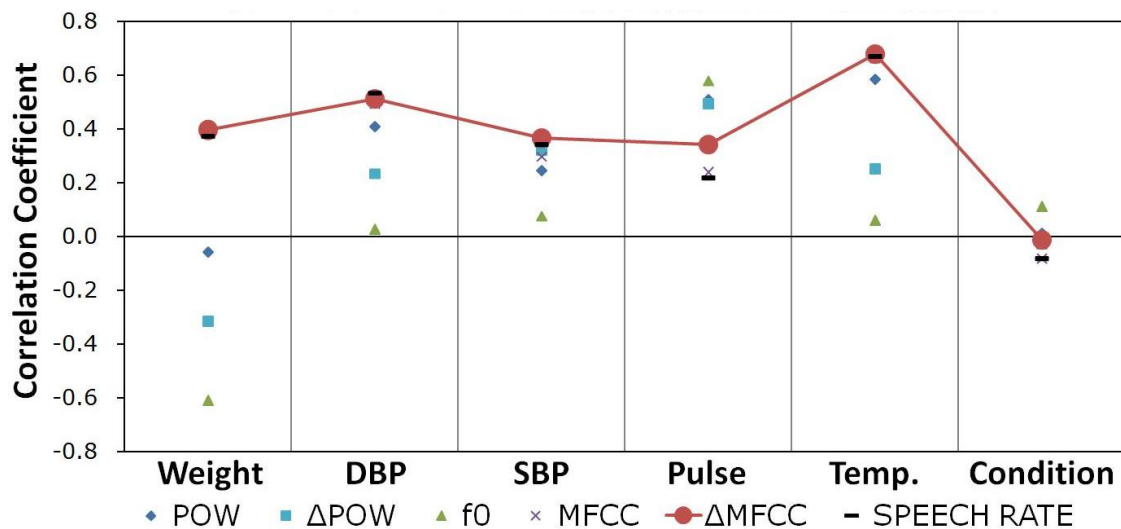


図3. バイタルデータと音声特徴量の相関係数

Weight: 体重, DBP: 拡張期血圧, SBP: 収縮期血圧, Pulse: 脈拍, Temp.: 体温, Condition: 体調, POW: パワー, ΔPOW: Δパワー, f0: 基本周波数, MFCC: メルケプストラム, ΔMFCC: Δメルケプストラム, SPEECH RATE: 発話速度

図3の結果の通り、ΔMFCCと各バイタル測定値に正の相関があり、特に体温について相関係数が大きい結果となった。この結果より音声データから健康状態を推定できる可能性が示唆された。実用化にあたっては、より多くのデータを収集し音声解析エンジンを改良する必要があるが、音声を利用することにより非接触・非拘束で健康状態を推定できる可能性を示す、新学術領域を開拓したといえる。また、1ヶ月間にわたる健康状態と紐づいた音声データは世界的にも極めて貴重であり、医療分野を含む他分野の研究開発への展開も考えられる。

b) RT マスコット駆動制御

RT マスコットの意義は、IT リテラシに乏しい高齢者がシステムを利用する際の障壁となる「難しそう」「面倒そう」という印象を和らげる事である。在宅健康管理・支援システムは継続利用してはじめて本来の効果やメリットが得られるものであり、抵抗感なく利用を始めてもらい、なおかつ日々継続して利用してもらうことが極めて重要なテーマとなる。対話のインターフェースとなる RT マスコットには、利用者に興味を持ってもらい、「使ってみよう」という“自発的な測定”を誘発させる役割がある。また、システムの実用化にあたっては通信プロトコルを公開し、オープンアーキテクチャの形式をとることで、コミュニケーションロボット分野市場の開拓を見込んでいる。なお、本システムで構築した在宅健康管理・支援システムの RT マスコットには、サンプルロボットとして violet 社製の nabaztag を改造したものを採用し、下記の機能を実装した。

- ① システム音声、GUI と同期したアクション

② LED によるシステム状態の表現

③ バイタル測定結果に応じた仕草

④ 測定忘れを防止するための「呼びかけ」機能

モニタ試験におけるアンケート調査の結果、特に利用開始当初に RT マスコットに興味を持つ傾向があり、“自発的測定の誘発”に一定の効果が見られた。また、RT マスコットに対しては男性よりも女性が興味を持つ傾向が強かった。システムの利用に慣れてくると RT マスコットへの興味が薄らぐ傾向がみられ、モニタ試験後のアンケートでは RT マスコットの必要性に関しては意見が分かれた。一方、RT マスコットに望む機能として「マスコットに表情が欲しい」「動きの意味を知りたい」「種類があれば選択したい」などの意見が得られ、事業化へ向けてオープンアーキテクチャを活かして、様々なコミュニケーションロボットを巻き込んでいくことが求められる。

2) センシング RT 基礎技術開発

a) バイタルデータセンシング機器の開発

図 2 に示すバイタルセンシングチェアを開発した。専用のチェアを用意することにより、毎回同じ姿勢かつリラックスした状態での測定が可能となり、測定条件を制御しにくい一般住宅内における測定精度を向上させる効果がある。

バイタルセンシングチェアにはいづれも A&D 社製の血圧計 (UA772PBT-C)、体温計 (TM2564GP、TM2560G-10、TM-2560-11)、体重計 (UC321PBT-C) と Audio-Technica 社製のマイク (AT9904) を使用し、測定機器をワイヤレス化することにより、使い勝手を向上させた。2 次モニタ試験用システムには、国際的な標準規格であるコンティニューア設計ガイドラインに準拠した血圧計と体重計を採用しているため、コンティニューア対応の他社製の測定機器を利用することも可能となっている。

3) 健康バイタルデータ解析に基づく健康状態推定、アドバイスパログラム

問診エキスパートシステム (5) として統合。

4) 健康情報履歴蓄積要約技術

a) バイタルデータ解析システム および b) 医療診断支援システム (医師へのデータ解析結果提示/健康情報管理システム)

測定されたデータは各家庭に設置する在宅健康管理・支援システムからネットワーク上のデータベースサーバにアップロードされ蓄積される。データベース内に蓄積されたデータは健康情報解析要約ソフトによって医師が診断やカットオフ値の設定に利用できる形に要約される。リレーショナルデータベースソフト Filemaker Pro 10 Advanced を使用して構築した健康情報解析要約ソフトのスクリーンショットを図 4 に示す。

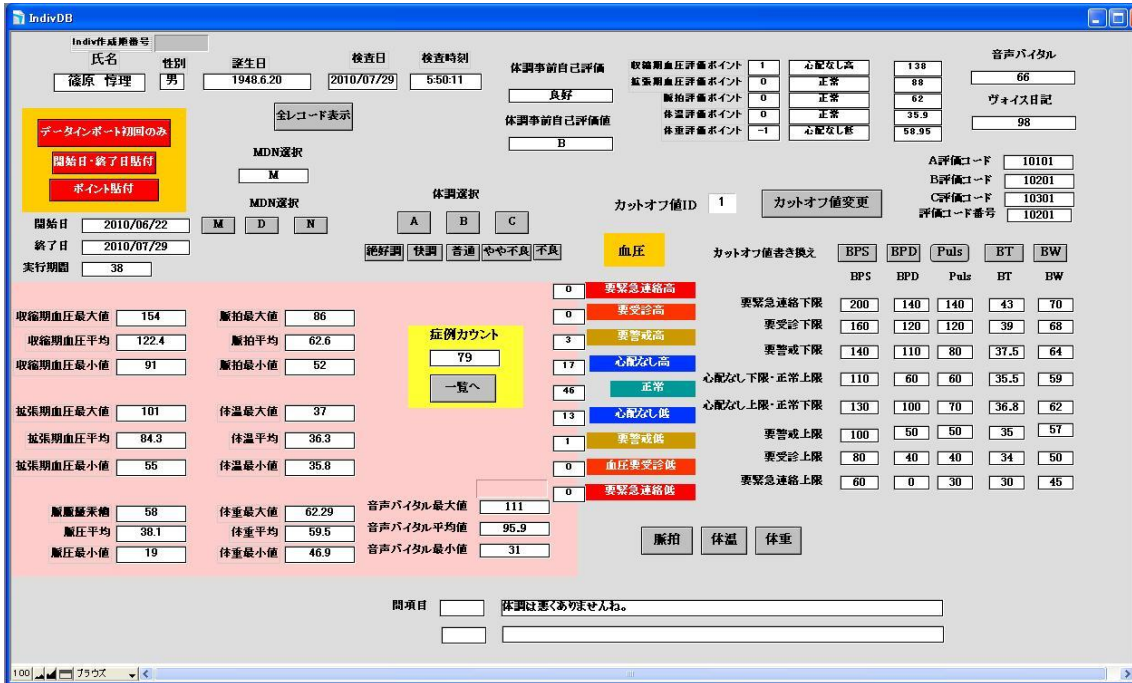


図4 健康状態解析要約ソフトのスクリーンショット

5) 高齢者健康状態問診システム (問診エキスパートシステム)

音声コミュニケーションとタッチパネルディスプレイを利用した高齢者向け GUI により問診形式で進むシステムシナリオチャートを構築した。シナリオは問診とバイタル測定ガイダンスを経て、測定・診断結果を提示するとともに、必要に応じて健康アドバイスや指示、医師へのEメール送信を行う機能を持つ。

問診内容やカットオフ値は別途構築した医師用 WebUI・管理用 WebUI (図5) よりオンラインで変更可能な仕組みとなっており、医師は図4に示した健康状態解析要約ソフトを使いながら、いつでも問診内容とカットオフ値を更新可能である。これにより利用者が使えば使うほどシステムと医師が健康状態を理解していく運用体制をとることができる。



図5 医師用・管理用 WebUI (カットオフ値と問診内容の個人カスタマイズが可能)

次に、高齢者向け GUI のコンセプトは以下のとおりである。

【GUI 設計コンセプト】

- ・ 初心者も熟練者も自分のテンポで利用できる “次へ” ボタンの導入
- ・ 音声アイコン表現による認識可能単語の提示
- ・ 機能を絞りシナリオをステップ化することで扱いやすさを向上
- ・ 文字サイズを大きく、コントラストを強く、フラットでシンプルな構成
- ・ タッチパネルの“押せる”ボタンに立体感を持たせる
- ・ アニメーション表現によるユーザビリティの向上 (過剰なアニメーションは行わない)

上記のコンセプトに基づいて Adobe Flash ベースで構築した GUI のスクリーンショットを図6、図7に示す。Flash は移植性が高くブラウザ上でも動作するため、事業化に向けて様々なプラットフォームに対応する必要が出た際にも移植のオーバーヘッドを削減できる。



図6 血圧測定ガイダンス画面



図7 高齢者健康状態問診システム GUI スクリーンショット

なお、シナリオには音声からのバイタル情報抽出のために定型文の読み上げと自由形式の音声日記機能が含まれており、これがシステムを利用する楽しみの一つとしても機能することがアンケート調査により示された。音声からのバイタル情報抽出技術の精度を向上させていくためには、今後も実証試験を通じて無理なくバイタル情報と結びついた音声データを蓄積していけることが重要であるため、音声データの収集に対して肯定的な意見が得られたことの意義は大きい。

② 在宅健康管理・支援システムの実装・評価

6) 高齢者対応 UI 開発

事業化プロトタイプハードウェアとして住宅のインフィル空間と図8に示すバイタルセンシングチェアを構築した。図2に示したモニタ試験用のチェアではテーブル上に置いていた血圧計と体温計をチェアに内蔵し、チェアに各測定機器の測定開始/終了ボタンを配置した。

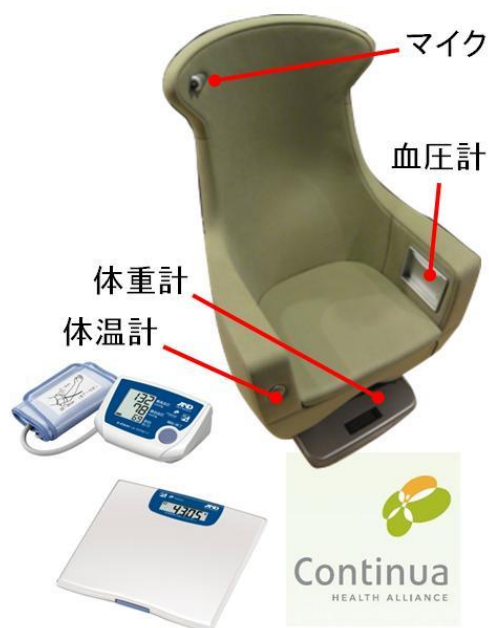


図8 バイタルセンシングチェア（事業化プロトタイプ）

上記の事業化プロトタイプを実験住宅に設置して、高齢被験者 50 名（男 38 名、女 12 名、65 才～81 才（平均 69 才））による評価実験を実施した。「健康管理システムの空間イメージ」、「音声や画面での動作説明や表示デザイン」、「計測チェアの色、大きさ、形状などのデザイン」、「マスコットロボット」に親しみを感じ、会話しやすいなどの評価を得た。一方、「計測の所要時間」、「体重計のボタン押し液晶を見る動作」、「体温計測時のスイッチやランプの点滅」、「体重計測時の立ち座り、ステップへの足をのせる動作」については評価が低く、事業化にあたって改善を要するポイントを把握することができた。

7) 医療ネットワークとの連携システム・サービス、ネットワークコンテンツ事業化検討

医療ネットワークと連携する家族向けサービスとして、システムの利用者と離れて暮らす家族が積水ハウスのオーナーズサイトを通じてバイタル測定値の確認や音声日記の確認が行えるサービスサイトを構築した。構築した Web サービスのスクリーンショットを図9に示す。



図9 贅沢健康管理・支援システム 家族向け Web サイト

高齢被験者50名に対して、生活ストーリーを活用した対面式アンケート調査を実施したところ、全体の9割以上が「認識度」・「利便性」・「魅力度」のそれぞれにおいて肯定的な評価を示し、高年齢者層に高いニーズが潜在することが確認できた。

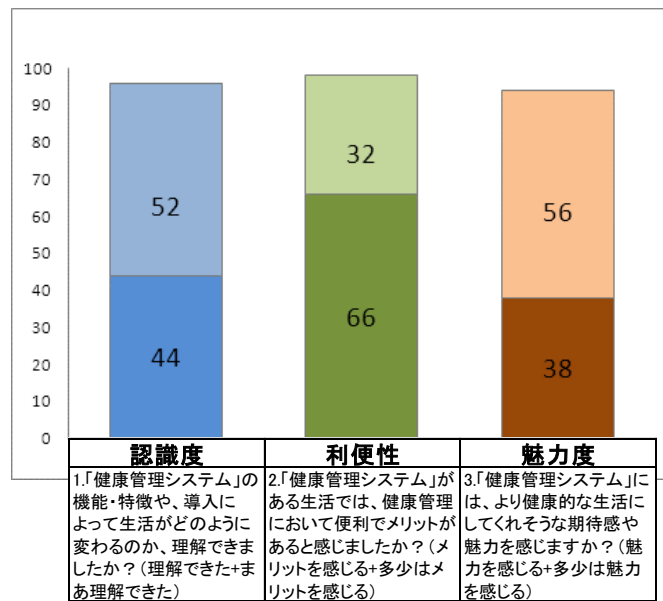


図10 事業化に向けた市場性検証

年度毎の特許、論文、外部発表等の件数

21年度はプロジェクトの立ち上げに伴い積水ハウス社よりプレスリリースを行ったのち、要素技術の開発に注力した。22年度は、システムのコア技術となる問診エキスパートシステムについての特許出願を行うとともに、開発した技術の学会発表を積極的に行った。論文に関してはロボット分野に限らず、音響学会や遠隔医療学会への発表を行い情報発信するとともに、音声解析と医療分野、ロボット技術と遠隔医療など、新領域を開拓した。

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 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT [※] 出願	査読付き	その他	
H21FY	0件	0件	0件	0件	0件	1件
H22FY	1件	0件	0件	0件	4件	1件

IV. 実用化、事業化の見通しについて

1. 実用化、事業化の見通し

本システムが想定するメインユーザーである高齢者層に潜在する2方向のニーズに応えるかたちで商品&サービスを開発し、事業化を展開していく。ニーズの一つは、「平常時から、継続して健康状態のチェックや管理をおこないたい。」というものであり、これに対しては、本システムを組み込んだ空間インフィル（住宅・建築の室内空間を構成するパッケージシステム）の販売として対応していく。住宅・建築事業における分譲事業やリフォーム事業、新築戸建事業へと発展・拡大させていく（図11）。

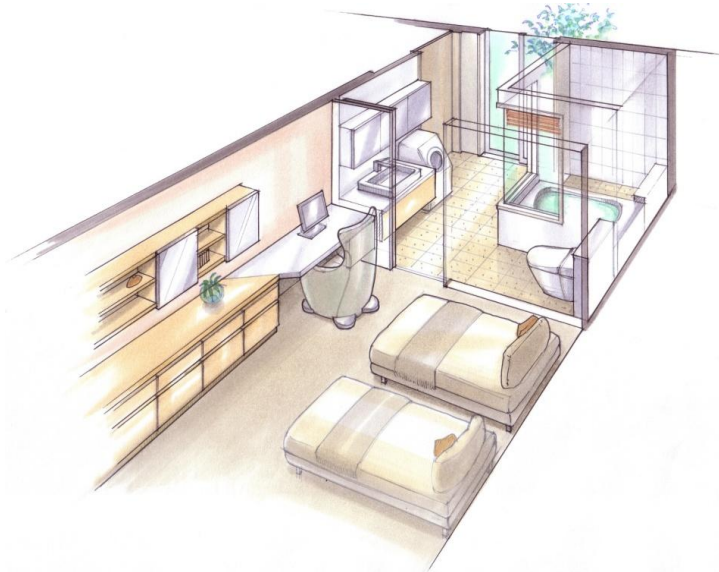


図11 空間インフィルのイメージ

もう一つのニーズは「病院にいかなくて自宅で医師による見守りサービスが欲しい」というものであり、これに対しては、医師の見守りネットワークを核とした健康見守りサービスの提供により応える。本PJに参加した医師を核とする医療ネットワークによる遠隔健康支援サービスを展開していく。

これら2つのニーズへの対応を、積水ハウスネットオーナーズクラブを基盤とした健康コンシェルジュサービス体制の構築により実現を図る。

課題としては、システムのコストが市場性を満たすものとなるか、という問題はもちろんだが、本システムによる健康見守りサービスが、医療行為（遠隔医療）にあたるのかかといった医師法の問題、本システムは医療機器にあたるのかといった薬事法の問題、さらに、見守り医とかかりつけ医となる開業医や地域病院とのスムーズな連携体制を築くための普及策など、ビジネスモデル上の課題が大きい。これらに対しては正攻法で一つ一つクリアしていく方法をとる一方で、自治体などの協力を仰いで上記法規制が緩和される特区など

において実現の可能性を検討するなどの方策を講じることとする。

今回開発する健康支援高齢者コミュニケーション RT システムは、もともと関連産業が多岐にわたり波及効果の大きい住宅産業と、医療・健康産業とを結びつけるインターフェースであると言え、サービスロボットとしては非常に大きな波及効果が期待される。

本システムの事業化を通して、コミュニケーション RT によって、高齢者に対する健康維持という付加価値を提供する新たな住宅が生まれることになる。この高付加価値住宅が他住宅メーカーからも提供されるようになることで、従来なかった新たな製品カテゴリーに成長していくことが考えられる。住宅産業にとっては、RT という新たな技術手段と高齢者の健康維持・管理という RT のアプリケーションを組み込んだ新たな製品による売上げと利益が上乘せされることになる。加えて、本提案の事業化により、住宅メーカーが居住者に対して、健康管理・診断という新たな生活支援サービスの提供も行うことになる。これは、従来、住宅というハードウェアの販売を行ってきた住宅産業にとって、サービスという全く異なる製品を販売することになり、住宅産業の事業構造の変革にもつながることになると考えられる。

また本システムにおいては、コミュニケーション RT としての RT マスコットを組み込むことによって、ロボットを販売する新たなチャネルならびに対象市場として、住宅市場が加わることになる。住宅ならびに住宅関連機器は、販売価格が一般ユーザ向けの製品の中では極めて高価であるため、それに組み込まれるロボットも、ロボットが単体で販売される場合に比べ、価格設定の自由度が高くなり、利益を確保しやすくなり、RT 市場の拡大に大きく寄与するものと期待される。

実用化・事業化までのシナリオとして以下のとおり想定している。

①積水ハウス「ネットオーナーズクラブ」などでの健康コンテンツ展開（2011年）

日常的なバイタルチェックによる健康管理の重要性など健康に関連するコンテンツを積水ハウス顧客のネットサービス「ネットオーナーズクラブ」などで展開し、健康支援高齢者コミュニケーション RT システムへのニーズの確認、RT への期待感の醸成などを図る。同時に、健康支援高齢者コミュニケーション RT システムの量産化を進める。また医師とのネットワーク構築をすすめる。

②健康支援高齢者コミュニケーション RT システム導入インフィルの商品化(2013年)

健康支援高齢者コミュニケーション RT システムによる健康管理データ蓄積、健康維持アドバイス機能をもつ空間インフィルを商品化し販売する。新築住宅だけでなく、既存住宅のリフォームでも使えるようなハンドリングの良い商品とすることを目指す。

特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	学校法人 千葉工業大学	特願 2010-113458	国内	2010/5/17	出願	問診システム	藤岡睦久 他
2							

論文一覧

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年
1	戸田健吾	千葉工大	コミュニケーションRTによる高齢者の在宅健康管理・支援システム—システム概要とプロトタイプの開発	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010 予稿集, (CDROM) 1P1-D08	無	2010
2	藤岡睦久	千葉工大	コミュニケーション RT(ロボット技術)を用いた高齢者在宅遠隔健康管理・支援システムの開発 (第一報)—遠隔健康管理ネットワークによる地域医療支援の提案—	日本遠隔医療学会雑誌 Vol. 6(2), pp. 199-202	有	2010
3	戸田健吾	千葉工大	コミュニケーションRTによる高齢者の在宅健康管理支援システム—試作システムの改良と評価—	第 11 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (CDROM) 3D3-4	無	2010
4	藤井敦啓	千葉工大	在宅健康管理 RT システムにおける 高齢者音声からの健康状態の推定	日本音響学会 2011 年春季研究発表会, 2-P-9(a)	無	2011
5	戸田健吾	千葉工大	コミュニケーション RT による高齢者の在宅健康管理・支援システム—2次試作システムの開発および高齢者を対象とした在宅実証実験—	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011 予稿集, (CDROM)	無	2011

3. 2. 3 ロボット搬送システム

全方向移動自律搬送ロボット開発

【実施者:村田機械(株)、慶應義塾大学、(独)産業技術総合研究所】

1) 研究概要

少子高齢化を迎え、「安心・安全」「便利・ゆとり」の確保といったことが重要なテーマとなるわが国において、家庭や事業所、公共の場で普及が進むと予測される次世代ロボットの市場規模は2035年時点で約5兆円と試算されている。(NEDO、経済産業省によるロボット産業の将来市場推計／H22.4発表分より)

ロボットの新しいマーケットは、生産プロセスにおける産業用ロボットから人が併存するオープンな環境における様々な移動作業ロボットへと広がるものと考えられる。なかでも、搬送ロボットは社会的なニーズも多くあり、実用性の高い技術であれば、ロボットの実用化に大きなブレークスルーとなる可能性を有している。

本事業では、病院内でのロボット搬送システムをターゲットとして、人が併存する環境下で円滑に移動可能な自律移動ロボットを開発し、今後様々な公共空間でも運用可能なロボットの基盤となる移動技術を構築し、次世代ロボット市場形成の一翼を担うことを目的とするものである。

本事業では、病院施設で医療資材や薬剤等を確実にかつ安全に搬送するロボットの要素技術開発ならびにその実用化を目指し開発を行ってきた。本目的達成に向け、全方向移動機構を有した実証機を製作し、京都第二赤十字病院、大阪大学歯学部附属病院、京都大学医学部附属病院にて実証実験を実施した。(図 1)また、医療現場における搬送業務の調査分析を行い、搬送ニーズの具現化及び運用上の課題抽出を行った。

本プロジェクトの特徴は、全方向移動機構の採用による機構的安全性確保に加えて、IF-THENルール制御やシナリオ制御だけに頼らない多次元時間スケール制御による動的障害物回避、ヒューマンインターフェースとアクティブセーフティなど、複層的な自律的安全制御を提案することにより、限定した環境における確実な搬送からオープンな環境における安全性、親和性を考慮した搬送ロボットの開発にある。



図 1 院内走行実験の様子

2) 成果詳細

本プロジェクトにおける【最終目標】を下記に示す。

【最終目標】

人間や障害物が多く存在する可変環境において、屋内を周囲の状況に応じた速度で移動でき、指定場所での搬送物の受け取り、受け渡しを円滑に行うユーザーインターフェイスを備え、ロボットが自律走行しながら指定された搬送先へ安全かつ信頼性高く搬送する。

本システムの有効性を確認するために、2ヶ所以上の病院で実証試験を行う。

(凹凸・段差 1cm、隙間 3cm に対応。エレベータを利用した上下移動を含む屋内環境下を人の歩行速度程度で搬送) 最終的にはプロジェクト終了後 3 年を目処にプロジェクトの成果を活用し、事業化を行う。

表 1. 目標の達成度

研究項目	目的	本開発の目標	成果	達成度
人や物、環境の状況を把握し、自律移動する技術	(1)全方向移動可能な自律搬送ロボットの安定・安全移動機構の技術開発 ①全方向へ移動可能とする機構技術の開発 ②エレベータへの乗り降り可能機構技術の開発 ③搬送物を安全に搬送する技術の開発	(1)-① ・段差 1cm、隙間 3cm 対応 ・人並みの走行速度 (1.1m/sec) ・製品プロトタイプ台車製作・実証実験実施 (1)-② ・ロボットがエレベータに乗降可能なシステムの構築 ・実際の病院にて連続稼働可能なシステム構築 (1)-③ ・必要とされるセキュリティレベルを備えた搬送形態の具現化 ・ロボットの現在走行位置の確認システム構築 ・到着通知機能等、実運用可能なシステム構築	(1)-① ・サスペンション付き全方向移動機構を搭載した製品プロトタイプを開発した。 (1)-② ・村田機械株式会社 R&D センター及び京都第二赤十字病院エレベータに通信装置を設置し、ロボットが乗降可能なシステムを構築した。 (1)-③ ・必要とされるセキュリティレベルを備えた搬送スペースを持つ搬送ロボットを開発した。 ・現在位置表示及び到着通知可能なシステムを構築した。 ・院内物品管理データと連携する搬送管理システムを構築した。	(1)-① 目標達成 ・段差 1cm、隙間 3cm 対応 ・最高速度 1.1m/sec ・製品プロトタイプ台車製作し、京都第二赤十字病院、大阪大学歯学部附属病院にて実証実験を実施した。 (1)-② 目標達成 ・複数フロアをエレベータを用いて移動可能な搬送システムを構築した。 (1)-③ 目標達成 ・搬送物スペースを持つ搬送ロボット及び運行管理システム、搬送管理システム等、ロボット搬送システムとして実運用可能なシステムを開発した。

<p>人や物、環境の状況を把握し、自律移動する技術</p>	<p>(2) 自律搬送ロボットのための高度な安全性を確保した RT 分散情報処理システムの開発</p> <p>① RT 分散処理技術の研究開発</p> <p>② 自動環境地図生成技術の開発</p> <p>③ 自己位置同定技術の開発</p> <p>④ 障害物回避技術の開発</p>	<p>(2)-①</p> <ul style="list-style-type: none"> ・モータドライバ及びモーションコントローラの内製化 ・内製モータドライバによる人並みの走行速度の実現 <p>(2)-②</p> <ul style="list-style-type: none"> ・2次元地図自動生成システム構築 ・誤差±3cm以内 ・複数センサを用いた自動環境地図生成アルゴリズムの開発 <p>(2)-③</p> <ul style="list-style-type: none"> ・自己位置同定アルゴリズム構築 ・誤差±3cm以内 ・複数センサを用いた自動環境地図生成アルゴリズムの開発 <p>(2)-④</p> <ul style="list-style-type: none"> ・人並みの走行速度(1.1m/sec)で移動しながら、同速度で対向移動する障害物を安全に回避 	<p>(2)-①</p> <ul style="list-style-type: none"> ・要求仕様に応じたモータドライバ及びモーションコントローラを製作した。 ・人並みの走行歩行速度(1.1m/s)を実現した。 <p>(2)-②</p> <ul style="list-style-type: none"> ・レーザーレンジセンサを用いた2次元地図自動生成システムを構築した。 ・ランドマーク自動抽出アルゴリズムを開発した。 <p>(2)-③</p> <ul style="list-style-type: none"> ・レーザーレンジセンサを用いた自己位置同定アルゴリズムを構築した。 ・画像センサによるモーションステレオ測距システムを実装した。 <p>(2)-④</p> <ul style="list-style-type: none"> ・障害物回避技術を取得した。 ・周囲環境に応じた障害物回避モードの切替アルゴリズムを開発した。 	<p>(2)-① 目標達成</p> <ul style="list-style-type: none"> ・内製モータドライバ及びモーションコントローラをロボットに搭載し、人並みの走行速度(1.1m/s)を実現した。 <p>(2)-② 目標達成</p> <ul style="list-style-type: none"> ・誤差±3cm以内 ・ナビゲーションに利用可能なランドマーク抽出アルゴリズムを検証。 <p>(2)-③ 目標達成</p> <ul style="list-style-type: none"> ・誤差±3cm以内。 ・充電ステーション近傍では誤差±3mm以内、±0.5deg以内。 ・モーションステレオ測距システムを実機で検証。 <p>(2)-④ 目標一部未達成</p> <ul style="list-style-type: none"> ・人並みの走行速度(0.7m/sec)で移動しながら、同速度で対向移動する障害物を安全に回避するアルゴリズム開発 ・ロボットの走行速度の7割の速度で対向移動する障害物の回避を実機で検証
-------------------------------	---	---	---	--

<p>人や物、環境の状況を把握し、自律移動する技術</p>	<p>(3)屋内環境自律移動ロボットの自己位置計測のためのセンサ・ネットワークの研究開発</p> <p>①超音波タグを用いた位置計測技術の高度化</p> <p>②大規模センサ・ネットワークの開発</p> <p>③大規模センサ・ネットワークにおけるタグ追跡のハンドオーバ技術の開発</p>	<p>(3)-①</p> <ul style="list-style-type: none"> 位置計測技術の精度向上 誤差 2-3cm 加速度センサ内蔵型超音波タグシステムの開発（低消費電力機能実現） <p>(3)-②</p> <ul style="list-style-type: none"> 超音波受信機 100 個以上の規模を持つ複数の大規模センサ・ネットワークの構築 <p>(3)-③</p> <ul style="list-style-type: none"> 大規模センサ・ネットワークにおけるタグのハンドオーバーアルゴリズムの開発検証 	<p>(3)-①</p> <ul style="list-style-type: none"> GPGPU を用いて、パーティクルフィルタを利用した位置推定アルゴリズムを実装した。 加速度センサを内蔵した低消費電力型超音波タグを開発した。 無指向性超音波タグを開発した。 <p>(3)-②</p> <ul style="list-style-type: none"> 超音波受信器 270 個超の大規模センサ・ネットワークを開発した。 <p>(3)-③</p> <ul style="list-style-type: none"> 上記大規模センサ・ネットワークにおけるタグ追跡のハンドオーバ技術を確立した。 	<p>(3)-① 目標達成</p> <ul style="list-style-type: none"> 位置計測技術の精度向上 誤差 2-3cm / 演算時間 2ms 加速度センサ内蔵型超音波タグシステムの開発（低消費電力機能実現） 無指向性超音波タグの開発（受信器の設置位置の自由度向上） <p>(3)-② 目標達成</p> <ul style="list-style-type: none"> 超音波受信機 270 個超の規模を持つ複数の大規模センサ・ネットワークの構築 <p>(3)-③ 目標達成</p> <ul style="list-style-type: none"> 大規模センサ・ネットワークにおけるタグのハンドオーバ・アルゴリズムの開発検証実施
-------------------------------	---	---	---	--

<p>人とロボットが共存する環境下での安全（事故防止）技術</p>	<p>(2) 自律搬送ロボットのための高度な安全性を確保したRT分散情報処理システムの開発</p> <p>④RT分散処理技術の研究開発</p> <p>⑤転倒防止技術の開発</p> <p>⑥安全・異常検知技術の開発</p> <p>1.力センサレス衝突検出</p> <p>2.車椅子等搬送のための移動支援技術</p> <p>3.接触に関連した安全技術の開発</p> <p>4.情報表現とアクティブセイフティ技術</p> <p>⑦安全性・耐故障性技術の開発</p>	<p>(2)-④</p> <ul style="list-style-type: none"> 各機能モジュール・分散制御基板の設計・実装 <p>(2)-⑤</p> <ul style="list-style-type: none"> 瞬間最大加速度0.5Gの衝撃にも転倒しない転倒防止技術の開発 人並みの走行速度(1.1m/sec)での急発進、急停止する場合の転倒防止の実現 <p>(2)-⑥-1</p> <ul style="list-style-type: none"> 反作用力推定アルゴリズムの構築 100msecでの衝突検出 環境・人との衝突の識別アルゴリズム構築 制御精度±10N以内の作用力検出 <p>(2)-⑥-2</p> <ul style="list-style-type: none"> 非ホロミック拘束の影響度に基づいた電動車椅子の誘導制御アルゴリズムの確立 車椅子型移動ロボットの試作 制御精度±10cm以内の支援軌道追従確認 障害物検出情報と移動ロボットの受動性に基づく、軌道再計画アルゴリズムの検証 シミュレーションによるアルゴリズムの検証 <p>(2)-⑥-3</p> <ul style="list-style-type: none"> ロボットの指先に装着可能な弾性触覚センサの設計 接触検出確認(指先で10g程度) ロボットへの実装検討 	<p>(2)-④</p> <ul style="list-style-type: none"> 院内障害物(車椅子、ストレッチャー)を検出可能な超音波測距センサモジュール及び分散制御基板を開発した。 <p>(2)-⑤</p> <ul style="list-style-type: none"> 急発進、急停止に転倒しない搬送ロボットを開発した。 <p>(2)-⑥-1</p> <ul style="list-style-type: none"> 反作用力推定アルゴリズムの構築を完了した。 <p>(2)-⑥-2</p> <ul style="list-style-type: none"> 非ホロミック拘束を考慮したアルゴリズムの構築を完了した。 軌道追従制御アルゴリズムを構築し、シミュレーションによる検証を完了した。 障害物検出は考慮せず、ロボットに作用する推定反力に基づいた軌道再計画アルゴリズムを構築完了 <p>(2)-⑥-3</p> <ul style="list-style-type: none"> 指先に装着可能な弾性触覚センサ技術を取得 	<p>(2)-④ 目標達成</p> <ul style="list-style-type: none"> 超音波センサ統合基板製作 4ch、測距時間42msec 16ch、測距時間100msec <p>(2)-⑤ 目標達成</p> <ul style="list-style-type: none"> 機構的転倒対策を実施し、ロボット本体を10度傾けた状態でも転倒しないことを確認した。 人並みの走行速度(1.1m/sec)での急発進、急停止する場合の転倒防止の実現 <p>(2)-⑥-1 目標達成</p> <ul style="list-style-type: none"> 推定速度100msec以内を達成。 人との衝突検出に関しては検証が不十分。 精度±10N以内の力検出を達成。 <p>(2)-⑥-2 目標達成</p> <ul style="list-style-type: none"> 既存システムを改良し、車椅子型移動ロボットを試作。 制御精度±10cm以内の支援軌道追従確認 障害物検出情報と移動ロボットの受動性に基づく、軌道再計画アルゴリズムの検証 シミュレーションによるアルゴリズムの検証 <p>(2)-⑥-3 目標達成</p> <ul style="list-style-type: none"> ロボットの指先に装着可能な弾性触覚センサを設計し、接触検出確認(指先で10g程度)実施。
-----------------------------------	---	---	---	---

<p>人とロボットが共存する環境下での安全（事故防止）技術</p>		<p>(2)-⑥-4</p> <ul style="list-style-type: none"> ・平常時に人間の活動を妨げない7段階の情報提示で、7割の人がタスクを遂行しながらロボットからの情報を取得できることを達成する ・人間へのアクティブな情報提示についてシステムの周囲 3m 四方の環境情報を、環境情報の評価結果で絞り込む機構を実現し、情報提示を選択する際の環境情報の参照を無くす ・人とロボットの位置関係に依存して、提示ジェスチャを変更する手法を開発する ・人の位置関係を考慮したジェスチャ生成を用いて、ロボットの移動意図が有意に伝わることを達成する <p>(2)-⑦</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コンピュータの暴走の検知を行うと共に、それぞれのセンサおよびアクチュエータの異常による暴走および誤動作を防ぐシステムの開発 ・コンピュータ、センサおよびアクチュエータの異常による暴走および誤動作を防ぐ基本システムの開発 ・人並みの半分の程度の移動速度領域におけるコンピュータ、センサおよびアクチュエータの異常による暴走および誤動作を防ぐ基本システムの実現 	<p>(2)-⑥-4</p> <ul style="list-style-type: none"> ・人を避ける際の発話・ジェスチャ生成を可能にするために認識機構を構築した。 ・画像データより選択的に人の顔画像領域を発見する手法を開発した。 ・ロボットの通過する意図を伝えるモジュールを開発した。 ・人に道を空けてもらうことを頼む発話および、ロボットが避ける方向を示すジェスチャを生成する機構を構築した。 <p>(2)-⑦</p> <ul style="list-style-type: none"> ・腕にかかる過負荷に対する安全制御を確認した。 	<p>(2)-⑥-4 目標達成</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ロボットの避けてほしいという意図が伝わること ($p < 0.05$)、およびジェスチャがある場合、ロボットが左右のどちらへ避けようとしているか伝わりやすいこと ($p < 0.1$)を確認。 <p>(2)-⑦ 目標達成</p> <ul style="list-style-type: none"> ・腕に過負荷が生じた際、脱力する安全制御を確認。
-----------------------------------	--	---	---	--

<p>実証ロボットの開発及び実証試験</p>	<p>(4)実証実験の実施 ①搬送デモンストレーションを一定期間実施 ②2箇所以上の実証試験場所の確保 ③院内搬送デモンストレーション用ロボット製作 ④国内外マーケティングの実施</p>	<p>(4)-① ・搬送デモンストレーションを実施し、その有効性を確認する。 (4)-② ・複数個所で実証実験を実施し、汎用性の高いシステムを構築する。 (4)-③ ・院内搬送デモンストレーション実施の円滑化 (4)-④ ・本システム実用化に向け、ニーズを探索する。</p>	<p>(4)-① ・一定期間実施し、本システムの有効性を確認した。 (4)-② ・京都第二席十字病院及び大阪大学歯学部付属病院で定期的な実証試験を実施した。 (4)-③ ・ロボットを追加1台製作した。 (4)-④ ・潜在ニーズの掘り起こしを行うことができた。</p>	<p>(4)-① 目標達成 ・一定期間デモンストレーションを実施し、運用上での課題を抽出できた。 (4)-② 目標達成 ・各病院個別課題と共通課題の抽出ができた。 (4)-③ 目標達成 ・ソフトウェアの開発効率の向上が図られた。 (4)-④ 目標達成 ・ライトハウスカスタマーの獲得に寄与した。</p>
------------------------	---	--	--	--

下記に成果詳細を示す。

<人や物、環境の状況を把握し、自律移動する技術>

(1)- ① 全方向へ移動可能とする機構技術の開発

全方向移動を可能とする機構として、段差 1 cm、隙間 3cm まで対応可能なオムニホイール機構を開発し、プロトタイプロボットを用いた実験によりその効果を確認した。

具体的には独立懸架サスペンション機構を設けたオムニホイールを図 2 のように配置することにより、段差乗り越え時の車輪の浮き上がりを抑制する一方、車輪前後にホイールカバーを装着することにより、側面方向からの段差乗り越えにも対応可能な構造とした。

(図 3)

また、製品プロトタイプロボットを用いて、最終目標である走行速度 1.17m/sec で全方向に移動可能であることを確認した。

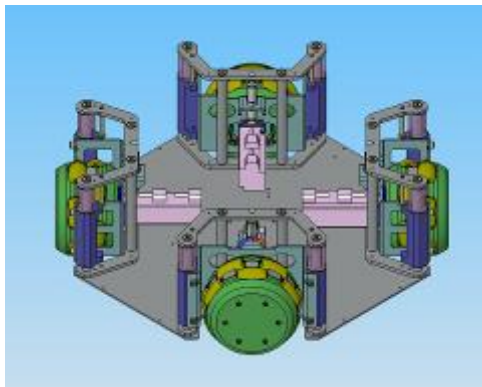


図 2 車輪配置



図 3 段差乗り越えの様子

走行経路の周囲環境によっては、ロボットの走行音を極力小さくすることも求められる。本プロジェクトでは、自社開発した段差対応オムニホイールに対してフリーローラ支持部の構造を改良し、車輪単体評価実験において、約 5dB の騒音レベル低減を実現した。(図 4、図 4)



図 4 車輪単体評価装置

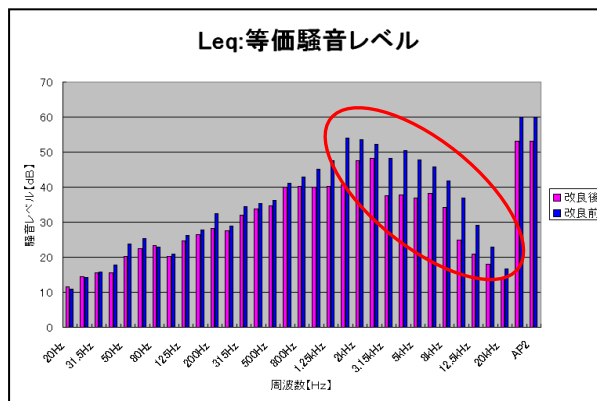


図 5 騒音レベル測定値

(1) - ② エレベータへの乗り降り可能機構技術の開発

エレベータを利用することで複数フロア間の移動を可能とするシステムを構築した。本システムでは、「エレベータかごには、サービスロボットと一般利用者は同乗させない」運用を前提とし、一般利用者とロボットを排他的に扱うシステムとしている。ロボットーエレベータ間の通信には院内インフラに影響を与えないよう PHS 回線を採用した。

なお、使用する PHS 回線はロボットの現在位置に応じて外線（公衆回線）と内線（1対1通信）を使い分けている。エレベータのかごの外では外線を利用するが、かご内では公衆回線網の電波が弱く、外線での通信が確立できないことから、かご内では内線を利用している。

ロボットーエレベータ間の情報の流れは以下のとおりである。

1. ロボットから発せられたエレベータ制御情報は、PHS 網経由でシリアル通信によりロボット用中継制御盤へと送られる。
2. ロボット用中継制御盤はエレベータ制御情報を受信すると、それをパラレル I/O の情報へと変換し、エレベータ側機器（EV 制御盤）へと送信する。
3. エレベータ側機器は制御情報に基づいてエレベータを動作させ、現在のエレベータの状態をパラレル I/O の情報として出力する。
4. 現在のエレベータの状態を表す情報は 1～3 とは逆の経路をとおしてロボットへと返信される。

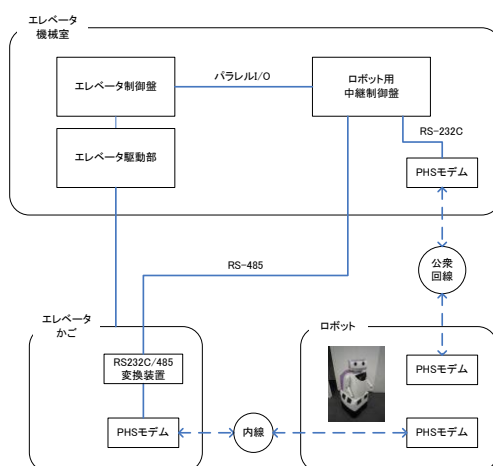


図 6 エレベータ乗降システム構成図

なお、ロボットーエレベータ間の通信では、各階へのかごの呼寄せや乗車後の各階への移動等、人間がボタンを押してエレベータを操作する場合と同等の情報を与える形式をとっている。こうして、人間が操作する場合と同等の安全性を確保しながら、ロボットがエレベータを制御することを可能にした。

また、一般利用者の同乗を防ぐために、ロボット乗降中はかご内部の照明を消灯する機能を搭載した。ただし、かご内の照明が消灯している時であっても、かごの中では「開」ボタンは点灯し、ボタンが有効となるように設定されている。こうすることによって、万が一、一般利用者がかごの中に閉じ込められた場合であっても、エレベータがいずれかの階に停止した時に「開」ボタンを押して扉を開け、脱出することができる。

実際に村田機械本社 R&D センター及び京都第二赤十字病院様内エレベータに通信装置を設置し、ロボットがエレベータを利用して、複数フロア間を移動可能であることを実験により確認した。

また、複数フロア間の移動を実現するにあたり、まず、2 点間移動が同一フロア内での移動かフロア間を跨ぐ移動かを判断する必要がある。本ロボットは環境地図を分割管理する方式を採用しており異なるフロアでは環境地図も異なるため、出発地と目的地が異なるフロアにある場合に経路を生成すると、フロア間の境界ではサブゴールが属する環境地図のマップ ID が変化する。そのため、生成した経路情報を検索して、マップ ID の変化点を発見した場合には、その点がエレベータ室内のポイントであることを確認した上で、エレベータ呼寄せ時の停止位置（EV 手前）等の中継点を経路情報に付加する機能を追加した。（図 7）

加えて、同一フロア内での移動の代わりに以下のような 2 つの機能を実現することによって、エレベータを利用した複数フロア間の移動経路にも対応した行動制御アルゴリズムを構築した。

1. フロア間移動判断機能

経路計画アルゴリズムに対して経路計画の実行を指示し、生成された経路情報を解析して、フロア間移動かそうでないかを判断する機能を付加した。（図 7）

2. フロア間移動に対応した行動生成機能

移動経路がフロア間移動を含む場合、同一フロア内における 2 点間移動動作の代わりに以下の 5 つの動作を生成し、実行する機能を追加した。（図 7）

移動①：出発地から EV 手前まで移動し、PHS 通信（外線）を介してエレベータをロボットがいるフロアへ呼び寄せる

移動②：エレベータが到着したら、EV 室内へと移動する

移動③：PHS 通信（内線）を介してエレベータを目的地のフロアへと移動させる

移動④：エレベータが目的地のフロアへと到着したら、EV 手前へと移動し、PHS 通信（外線）を介してエレベータに対して連携運転終了を通知する

移動⑤：目的地へと移動する

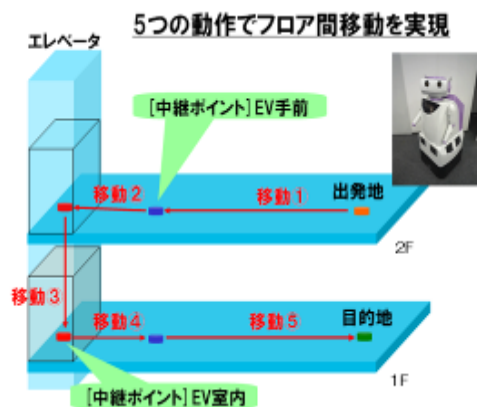


図 7 複数フロア移動時の動作

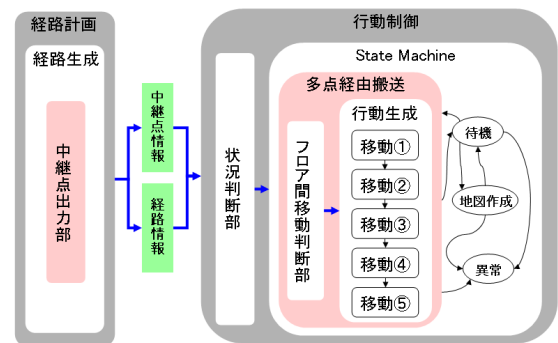


図 8 複数フロアに対応した行動制御
および経路計画アルゴリズム

以上のアルゴリズムを実機に搭載し、動作の確認を行った。

(1) - ③ 搬送物を安全に搬送する技術の開発

搬送物のセキュリティを考慮し、腹部に搬送物を搭載可能な筐体格納方式を採用した。荷物スペースの仕様を以下に示す。

荷室寸法：W320 ×L420 ×H250 (mm)

可搬重量：15kg 以下



図 9 荷物スペース

また、搬送ロボットの運行スケジュールの設定及びロボットの現在位置をモニタリング可能な運行管理システムを構築した。本システムは、ロボット本体及び院内に設置した複数 PC (ターミナル PC 及びクライアント PC) とそれらを結ぶ院内 LAN または PHS 等ネットワーク網から構成されるものである。本プロジェクトでは、PHS テレメタリングサービスを採用することで、既設の病院にも容易に導入可能なシステム構成とした。また、運行管理情報として、巡回搬送スケジュール、ロボット現在位置、到着予想時刻及びロボットの異常状態を表示させる運用とした。

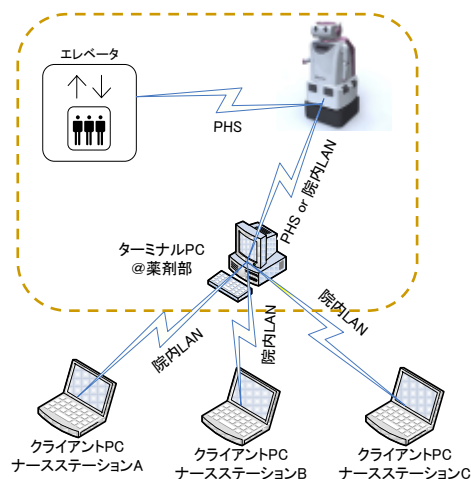


図 10 院内ネットワーク



図 11 運行管理表示画面

搬送物の受け取り、受け渡しを記録するとともに、既存の院内物流システムデータベースと連携可能なシステムを構築した。

本システムでは各搬送過程において、担当者情報及び搬送物情報を、通信機能を持つバーコードリーダーで読み取り、院内 Web サーバ上の搬送情報管理データベースを更新することにより、物品の搬送履歴を記録するとともに、物品の搬送状況を院内の端末上でモニタリングすることが可能となる。

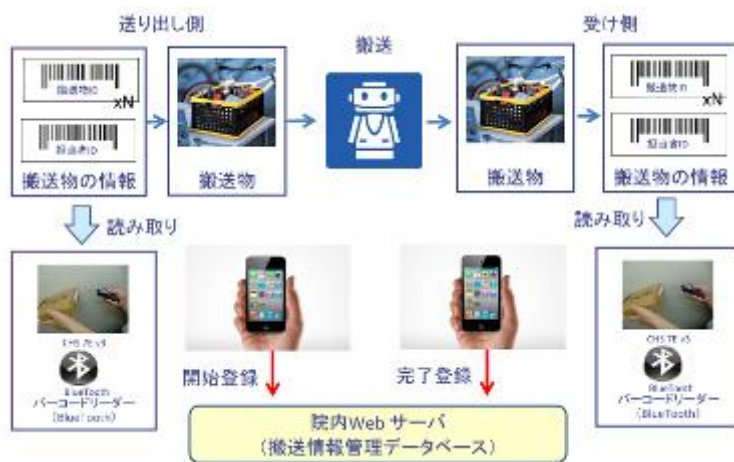


図 12 搬送情報システムフロー図

(2) - ① 分散化リアルタイム処理システムの開発

RT分散型処理システムにおいて、要求機能、仕様を満たすハードウェア構成部分について、最適化を行った。内製化した各ボードは以下である。

○ モータドライバボード



図 13 モータドライバボード

表 2 モータドライバボード仕様

対象モータ	永久磁石同期モータ
最大モータ容量[W]	100
主電源[V]	DC24~30
Ethernet コントローラ	1ch (100/10 BASE-T)
外形寸法	95mmX85mm

○ 入出力拡張ボード



図 14 入出力拡張ボード

表 3 入出力拡張ボード仕様

CPU バスインターフェース	16bit
絶縁型入出力ポート	入力:24ch 出力:24ch
シリアルインターフェース	4ch (RS-232C 対応)
Ethernet コントローラ	1ch (100/10 BASE-T)
外形寸法	178mmX127mm

○ A/D インターフェースボード



図 15 A/D インターフェースボード

表 4 A/D インターフェースボード仕様

SPI インターフェース	2ch
A/D コンバータ	8ch×2 (12bit)
電源出力	3ch (+12V/max.3.1A)
外形寸法	140mmX100mm

○DC/DC コンバータボード



図 16 DC/DC コンバータ

表 5 DC/DC コンバータボード仕様

出力容量	200W (24V 8.4A)
入力電圧	DC18~36V
バッテリー制御	1 回路
外形寸法	100mmX97mm

○充電制御ボード



図 17 充電制御ボード

表 6 充電制御ボード仕様

充電電流制御	1 回路
出力電圧制御	1 回路
外形寸法	110mmX102.5mm

(2) - ② 自動環境地図生成技術の開発

環状経路の地図を作成することは、SLAM 技術を用いて地図を作成する場合の大きな課題の一つである。本課題に対して、『分割地図方式』という独自の方式を提案し、環状経路に対応可能な自動環境地図生成、走行経路計画及び自己位置同定アルゴリズムを開発した。分割地図における走行経路計画フローを図 19に示す。

本アルゴリズムの有効性を検証するため村田機械 R&D センター8F (25m×12m、周回距離 65mの回廊) を用い、ターゲット (自律搬送デモ) システム上で自動環境地図生成アルゴリズムを動作させ、分割地図方式により搬送システム実現に十分な精度で環境地図が生成でき、自律移動中にその環境地図をもとにした自己位置推定ができていることを確認した。また、実際の病院環境 (京都第二赤十字病院) での環境地図作成実験を行い、準スタッフ専用エリア (50m×10m) 及び一般病棟 (50m×15m) で巡回搬送ができる環境地図が生成でき、自律移動中にその環境地図をもとにした自己位置推定ができていることを確認した。

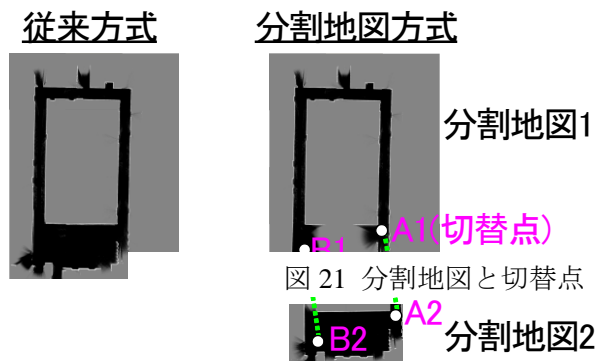


図 18 分割地図方式

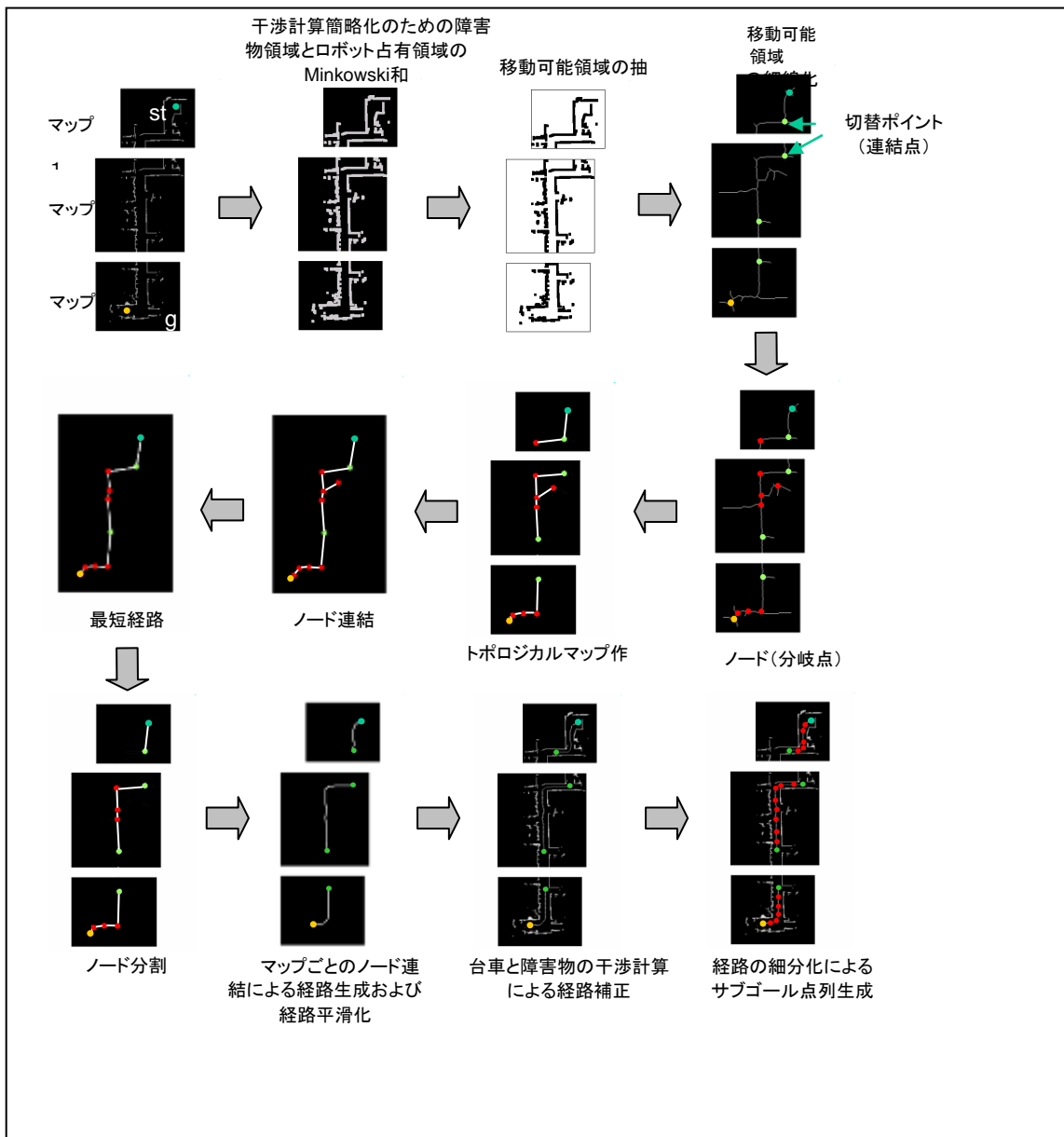


図 19 分割地図における走行経路計画フロー

実運用に向けて、平成 20 年度までに開発した自動環境地図生成・自己位置同定技術（SLAM）により作成した環境地図に属性を付加する機能を開発した。具体的には、

- ・ エレベータ（EV）乗降可能の判断（図 20）
- ・ 進入禁止領域の設定

を可能とする機能の開発を行った。

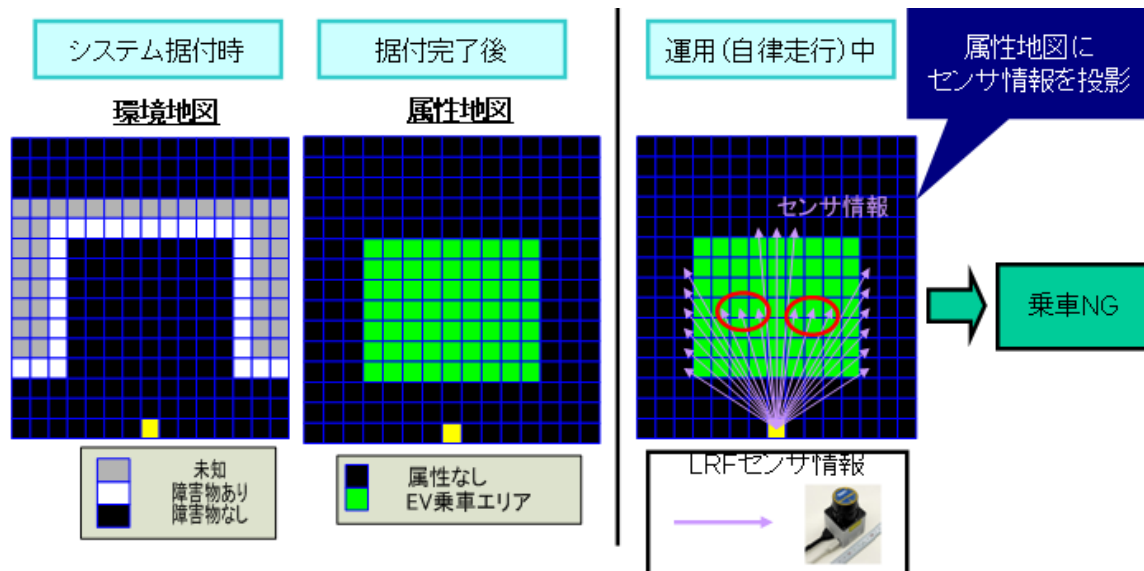


図 20 エレベータ乗降可能判断のフロー

本機能により、進入禁止領域属性を属性地図上に埋め込むことで、属性地図からロボットの現在位置周辺にある進入禁止領域の相対位置情報を割り出し、進入禁止領域を加味したロボットの回避行動が実現できることを実験により確認した。

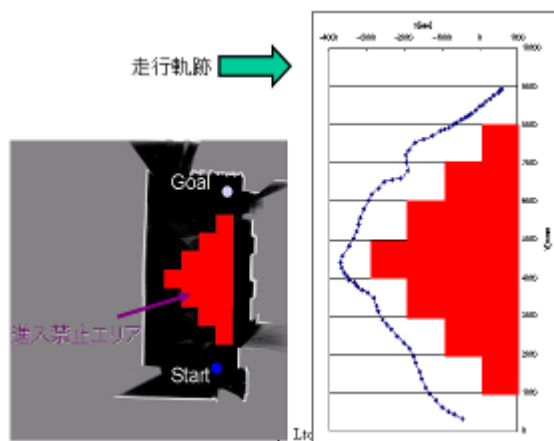


図 21 進入禁止領域(左)と領域設置時のロボットの走行軌跡(右)

(2) - ③ 自己位置同定技術の開発

本プロジェクトにて開発した環状経路にも対応可能な自動環境地図生成技術に対応した自己位置推定技術を開発した。環状経路への対応可能を検証する環境として、村田機械 R&D センター8F (25m×12m、周回距離 65mの回廊) を用い、24 時間の連続走行実験を実施し、周回経路において一度も自己位置を見失うことなく完走(周回数 142 周、走行距離約 9.2km) することを確認した。また、充電ステーション近傍では、充電ステーション形状をランドマークとした自己位置同定アルゴリズムを開発し、±3mm 以内、±0.5deg 以内の繰り返し精度を確認した。

(2) - ④ 障害物回避技術の開発

本研究課題で想定している病院などの施設内では、狭小な通路が存在し、さらに、給仕搬送台車や車椅子、歩行者など様々な障害物が存在する。ロボットはこのような環境において、より安全かつ効率的な移動を実現する必要がある、動的環境を考慮した回避方向の迅速な判断が求められる。一般的に、狭小な通路において障害物を回避する行動制御手法を開発する場合、安全性と効率性を考慮した回避距離を保つように設計する。しかし、同じような方法で人間に対して回避を行った場合、人間との急接近が生じることや、人間の進行を妨げるような問題が生じる可能性がある。また狭小な通路では、対向者と対峙するような状況が生じやすい。特に病院内では、患者や高齢者など、歩行速度が遅く進行先の障害物に対して機敏に反応できない人が多く存在する。このような状況では、自律移動ロボットは、他の障害物に対する行動よりも早い段階から行動を開始し、人間が避け始める前に自らの回避方向を行動によって示す必要がある。このような行動は、ロボットの人間に対する安全な移動にもつながり、また、結果として人間の歩行を阻害しないことが期待される。

歩行者や動的環境を考慮したものとして従来の回避手法では、歩行者の相対速度を考慮した予測型の障害物回避や、予測型強化学習を用いた障害物回避が提案されている。しかし、対向者と正面で対面する状況における際の回避方向を考慮した障害物回避手法は提案されていない。

本研究課題では、狭小な通路における効率性、特に人間に対する安全性を向上させる回避手法の提案を行う。提案手法では、ステレオカメラを用いた上半身検出により人物認識を行い、レーザレンジファインダ(LRF)より得られる環境、人間の回避方向の歩行特性から判断した右回り、もしくは左回りを助長する回転力を状況に応じて発動させる。状況に応じた回転力の発動により、回避対象と環境を考慮した回避行動が実現される。提案手法を全方位移動機構を有するロボット MKR-003 に適用し、実機実験によりその有効性を検証した。

【提案手法】

対向者と対峙する場合における、対向者とロボットとの位置関係の対称性に注目した行動制御手法の提案を行う。提案手法は、ロボットに搭載されているステレオカメラ、レーザレンジファインダ(LRF)から得られる環境情報、人間の回避方向の歩行特性から回避方向を判断し、右回り、もしくは左回りを助長する回転力を新たに付加する。提案手法により、従来の障害物回避手法の安全性の向上が期待できる。提案手法のアーキテクチャを図 1 に示す。本手法は大きく、人物認識、環境認識、障害物回避の 3 つに分かれる。

人物認識では、ステレオカメラを用いて環境から人間とその他の障害物とを分類する。人間と認識された場合に、環境認識で、その人間がロボットの進行方向に対して正面にいるか否かを判断した後、LRF 情報を用いてロボット周辺の領域を測定し回避方向の決定を行う。障害物回避で

は、従来の仮想ポテンシャル法に前過程にて決定した回避方向を助長する回転力を付加する。

【人物認識】

人物認識では、Viola と Jones によるカスケード型分類器をベースとした、ステレオカメラを用いた人間の上半身検出による人物認識アルゴリズムを用いて人物認識を行う。上半身検出を行うことで顔検出では認識できない後ろ向きや横向きの人物を認識することが可能となる。

本手法ではロボットから 1.0 m ごとに区域を設定し、距離に応じた検出窓サイズの変化に着目する。それぞれの区域に検出窓の最大・最小サイズを定め、検出された人物認識の評価を行う。区域内の検出窓が予め定めた最小サイズより小さい、または最大サイズより大きい場合に除外することで、誤認識を減少させ人物認識の精度を高める目的がある。

【環境認識】

環境認識では、対向者の位置がロボットの正面にいるか否かを判断し、LRF 情報を用いて、ロボットの左右の領域を考慮した回避方向を判断する。図 22 に各領域の概略図を示す。

ロボットの正面に設計パラメータである角度 θ の Front Area を設け、ステレオカメラを用いて Front Area 内に人物が認識された場合、対向者と対峙状況であると見なし回転力を付加する。遠方に対して広がりを持たせることで、遠方の人間に対する回転力が発生しやすくなり、ロボットは早い段階から回避方向を示すことが可能となる。さらにロボットの正面に対して Left Area と Right Area に分け、両領域の面積 S_{left} 、 S_{right} を LRF 情報より算出する。

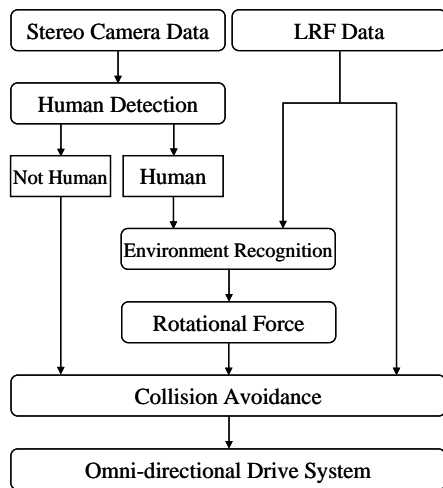


図 22 処理フロー

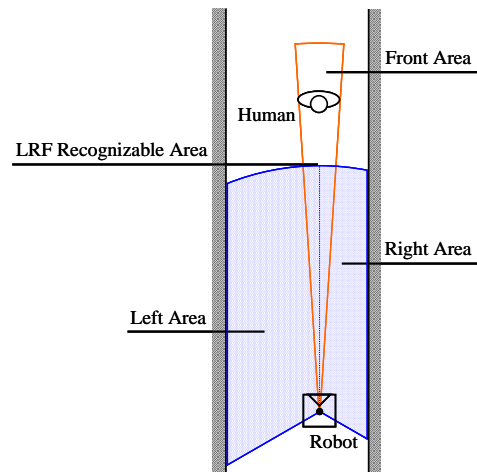


図 23 各領域の概略図

【障害物回避】

障害物回避では、仮想ポテンシャル法から求まる目的地までの引力 \mathbf{F}_{x_g} 、障害物からの斥力 \mathbf{F}_o に新たに左右に回避する回転力 \mathbf{F}_r を付加する。これらの合力 \mathbf{F} から速度指令を決定する。

$$\mathbf{F} = \begin{cases} \mathbf{F}_{x_g} + \mathbf{F}_o + \mathbf{F}_r \\ \mathbf{F}_{x_g} + \mathbf{F}_o \end{cases} \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_{x_g} = -k_a (\mathbf{x} - \mathbf{x}_g) \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_o = \begin{cases} \eta \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{\rho^2} \nabla \rho, & \rho \leq \rho_0 \\ 0, & \rho > \rho_0 \end{cases} \quad (3)$$

ここで k_a 、 η は定数、 \mathbf{x} はロボットの位置ベクトル、 \mathbf{x}_g は目標位置ベクトル、 ρ は障害物までの再接近距離、 ρ_0 は斥力の影響を受ける最大距離を表す。

環境認識において算出した S_{left} 、 S_{right} を用いて回転力 \mathbf{F}_r を以下の式(4)より与える。

$$\mathbf{F}_r = \begin{cases} \mathbf{F}_o \times \mathbf{n} & \text{if } \frac{S_{left}}{S_{right}} \geq \alpha \\ -\mathbf{F}_o \times \mathbf{n} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

ここで \mathbf{n} は鉛直上向きの単位ベクトル、 α は 1 以上の定数を表す。

式(4)では、右の領域に対する左の領域の面積比を求め、左右の移動可能範囲の評価を行い、移動可能範囲の大きい方へ移動するような回転力の付加を行う。設計パラメータである α 以上の場合には左側に、それ以外の場合は右側に回避するような回転力を、障害物からの斥力と鉛直上向きの単位ベクトルの外積をとることで求める。右の領域に対する左の領域の面積比が α 未満の場合、または左右の領域の大きさがほぼ等しい場合などに右回りの回転力を付加するのは、人間の歩行特性を考慮したからである。人間の対向者とのすれ違い時の回避方向は、進行方向と対向者の位置関係から自然の流れにより決定しているが、進行方向と対向者が対峙した場合には、右側に避ける傾向が左側に避ける傾向の約 2 倍であると報告している。これにより、左右の領域がほぼ等しい場合には右側の回避を優先している。

【実験環境・条件】

提案手法の有効性を実機実験を行い検証する。従来手法として、Khatib の仮想ポテンシャル法を用いる。実験環境は図 25、図 26に示すように、両側の壁幅が 2.3 m の廊下において、目標地点を 5.0 m 前方として最大速度 0.5 m/s で自律移動させる。Situation 1 では廊下の中央をロボットが、中央から 0.5 m 右側を人間が移動する。Situation 2 では中央をロボットと人間が移動する。Situation 3 では中央から 0.3 m 右側をロボットと人間が移動する。Situation 4 では、(0 m、3.0 m) の位置に直径 0.2 m、高さ 0.9 m の障害物を配置し、中央をロボットと人間が移動する。

Front Area 角 θ は 4.0 m 先でロボット幅と等しい約 0.55 m になり、LRF の測域範囲の 2 倍の 8 m 先で約 1 m となる 8 deg とした。 α は 1.2 とし、これは本実験環境において、中央から約 0.15 m 以上右側にロボットが存在する場合に左側に回避する回転力が付加される値である。

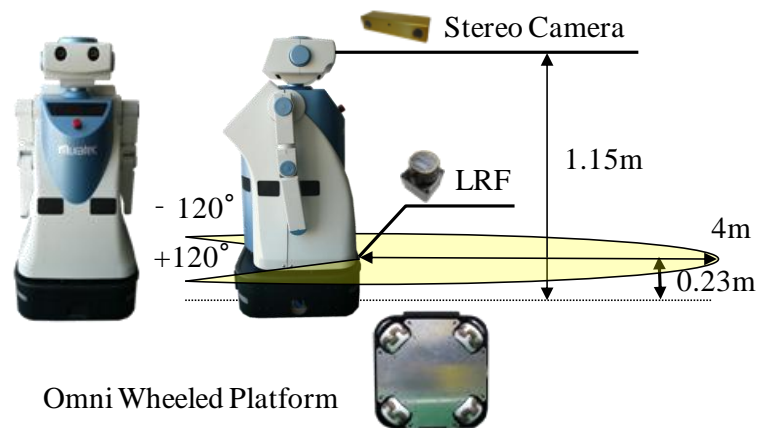


図 24 ロボットの外観(MKR-003)

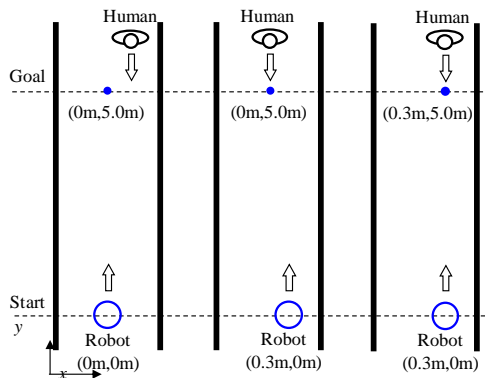


図 25 実験条件
(Situation 1、 Situation 2 and Situation 3)

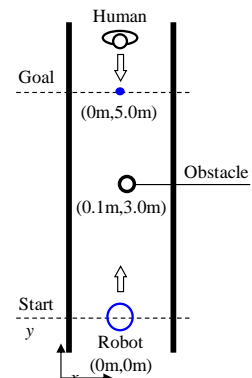
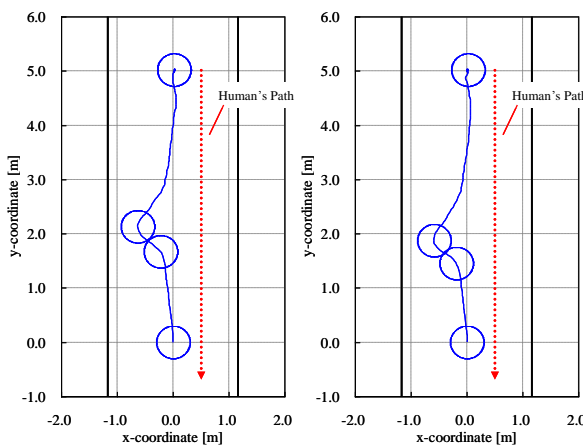


図 26 実験条件 (Situation 4)

【実験結果・考察】

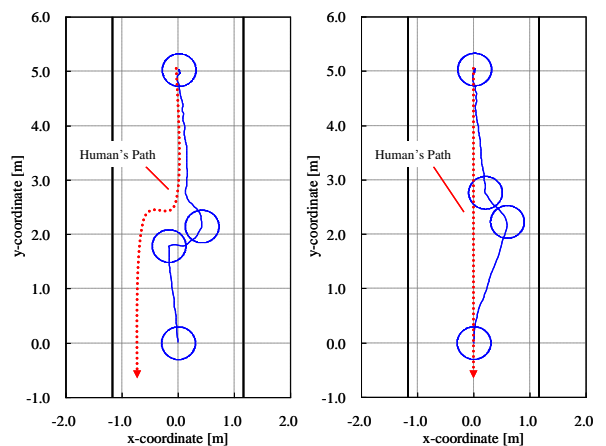
図 27から図 30に自律移動ロボットの回避行動の軌跡を示す。また、人間の移動軌跡の様子を重ねて示す。図 27では、人間が **Front Area** で検出されないため、(b)の提案手法では回転力は生成されず、(a)の従来手法と同様な経路を移動している。両手法において衝突のない回避が実現されていることが確認できる。図 28(a)、図 29(a)に示すように従来手法では、対峙する人間に対して左右に回避するような斥力が生成されず、人間が経路を変更する結果となり、人間の歩行を阻害した移動となっている。一方、提案手法では、人間を認識し、図 28(b)では左右の移動可能範囲が等しくなる場所にロボットが位置するため右回りに、図 29(b)では左側の方が移動可能範囲が大きいと左回りに回転力が生成され、人間が経路を変更することなく円滑な移動が実現されている。

通路に障害物が存在する図 30は、**LRF** のみでは障害物に遮られた人間の情報は取得できない状況である。(a)の従来手法では、人間を認識せず障害物との位置関係により左側に進む。その結果、進行してきた人間と急接近し、人間の進行により一度後退し、目的地方向に移動している。(b)の提案手法では、ステレオカメラにより遠方の人間を認識し、図 28 (b)と同様に右回りの回転力が発生し、人間に接近することなく、従来手法よりも移動経路が短い効率的な安全な回避が実現されている。以上より、従来の障害物回避手法に人物を認識し、状況に応じた回転力を付加することで、従来手法と比較しより安全で効率的な回避が実現されたことが確認できる。回避方向を考慮した行動の有効性が示された。



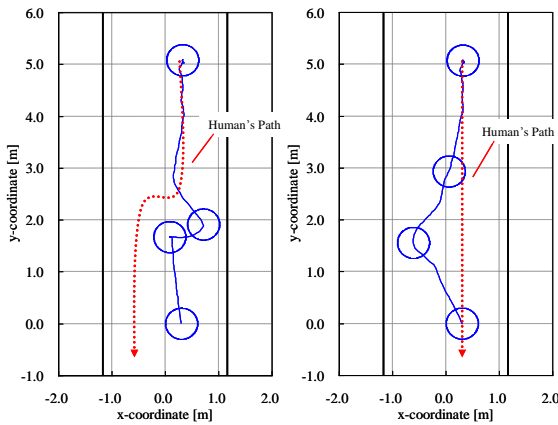
(a) Khatib's method (b) Proposed method

図 27 実験結果(Situation 1)



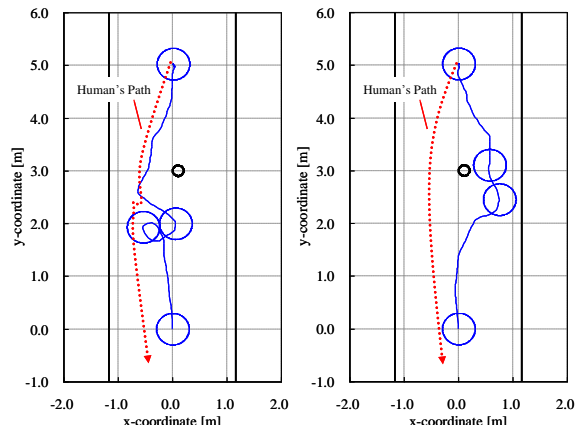
(a) Khatib's method (b) Proposed method

図 28 実験結果(Situation 2)



(a) Khatib's method (b) Proposed method

図 29 実験結果(Situation 3)



(a) Khatib's method (b) Proposed method

図 30 実験結果(Situation 4)

【障害物回避モード選択アルゴリズムの開発】

公共空間で移動型サービスロボットを運用するにあたり、障害物に対峙した際、周囲環境に応じて臨機応変に対応することが求められる。具体的には、障害物に対する回避行動もしくは一旦停止等、周囲環境に応じて行動を選択することにより、効率だけでなく安全面への配慮も考慮することが求められる。本プロジェクトでは、周囲環境に応じた障害物回避モード選択アルゴリズムを提案し、回避モードが適切に選択できていることをシミュレーションにより確認した。(図 31及び図 31)

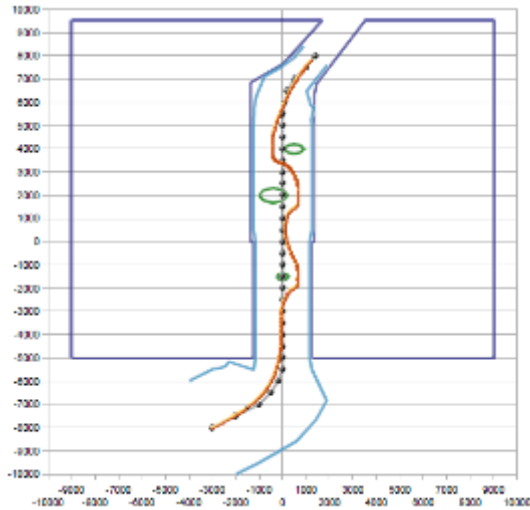


図 31 回避モード

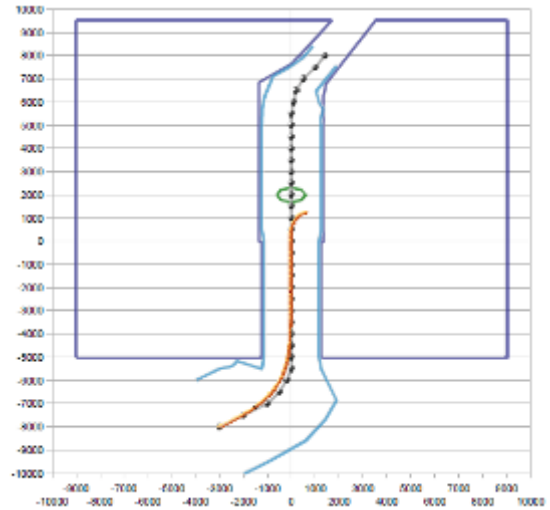


図 32 一旦停止モード

(3) - ① 超音波タグを用いた位置計測技術の高度化

・超音波受信器の設置間隔に関する検討

本研究で利用する超音波タグシステムでは、環境側(天井)に設置したすべての超音波受信器の位置は既知であるという前提の下、理論的には直線上に無い3個の受信器でタグと発信器との間の距離を計測できれば三角測量の原理でタグの三次元位置を求めることができる。さらに4個以上の受信器で距離が計測できればその冗長性を利用して誤差を低減できる。

一般に、超音波発信器・受信器はともに指向性を持っている。そのため、発信器が十分な強度の超音波を放射する方向および受信器が十分な強度の超音波を受信する空間は図 33に示す円錐形の内側領域となり、この円錐内に3個以上の受信器が存在していなければならない。ここで図 33に示すように発信器と天井(受信器が存在する平面)との距離を d 、発信器および受信器の半減全角(超音波の強度が正対する方向の強度から半減する角度)を 2θ とすると、超音波が十分な強度で受信されるためには半径 $r=d \times \tan \theta$ の円内に3個以上の受信器が存在する必要がある。さらに、受信器が格子状に設置されている場合、半径 r の円内に3点以上の受信器(格子点)が存在するための格子間隔 D の必要十分条件は、簡単な幾何学により $D \leq (2/\sqrt{5})r$ である。

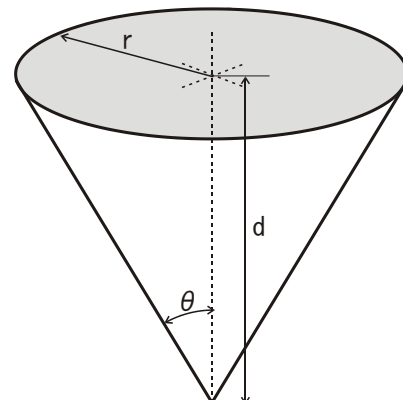


図 33 超音波発/受信器の指向性

例として具体的な数値を用いて D を求めてみる。現在使用している超音波発信器と受信器は予備実験の結果 $2\theta \approx 100$ (度)である。一方、実際にシステムを設置する環境とロボットの寸法は未知のため、ここでは仮に天井の高さを 2.5m、ロボットの高さを 1.2m として、ロボットの最高部に鉛直上向きで発信器を設置するとすれば $d=1.3$ m となる。このとき $r=1.3 \times \tan 50^\circ (\approx 1.55$ m)と求まり、したがってこのときの最大格子間隔 D は $D \approx 1.38$ (m)となる。

ただし、これはあくまでも理論的な最大値であり、実際の設置にあたっては壁面付近での反射や計測誤差の影響、要求される計測精度、設置する環境の問題などを考慮して間隔を決定する必要がある。

・位置推定アルゴリズムの検討・検証

超音波タグの位置推定は、既知の位置に設置された大量の超音波受信器と超音波発振器との間の距離を計測し、三角測量の原理で発振器の三次元位置を推定する問題である。ただし、計測した距離データは様々な要因による誤差を必ず含むため、実際の演算では誤差の影響を考慮して位置を「推定」することになる。一方、この推定はリアルタイム性が求められるため、誤差を完全に除去できるとしても長時間の演算が必要となる方法は採用できない。つまり、たとえば移動するロボットの現在位置を 20 ミリ秒ごとに知りたい時、10 秒かけて誤差を完全に除去できる推定方法を採用して 10 秒前の正確な位置を知っても意味がなく、誤差を含んでいたとしても 20 ミリ秒以内に確実に演算結果を返す方法を採用する必要がある。

このような要求に対応できる推定手法としては

- ・最小二乗推定(LMS)
- ・M 推定

- ・最小メジアン法(LMedS)
- ・ランダムサンプル法(RANSAC)

などが広く用いられている。これらを計測データの外れ値に対する頑健性と計算速度の点で比較すると、以下のようになる。

手法	LMS	M 推定	LMedS	RANSAC
頑健性	××	×	◎	◎
計算速度	◎	◎	×	○

なお、RANSAC の計算速度はサンプリング回数に比例し、演算結果が含む推定誤差はサンプリング回数に反比例する。そのため、RANSAC は頑健性と計算速度とのバランスに優れており、超音波タグの位置推定を数値解析的な問題として捉えると RANSAC が有効である。

実際にシステムに RANSAC を実装して動作確認したところ、産総研内に設置した実験環境では、演算時間 17 ミリ秒で平均誤差 50mm の位置推定精度が得られた。

一方、近年、移動ロボットの自己位置推定などでは、従来のように推定位置が真値を中心とした正規分布するのではなく、複数の推定位置の候補で構成される複数の正規分布モデルを加算した多峰性の確率分布で表現されるモデルが用いられるようになってきた。そして、このようなモデルを表現する仕組みとしてパーティクルフィルタが広く用いられている。

一般にパーティクルフィルタは個々に尤度を持つ多数の粒子(パーティクル)を探索空間にランダムに散布し、個々のパーティクルの保持する状態とセンサから得られた情報との整合性によってそのパーティクルの尤度を再計算する。そして、パーティクル集合の中から尤度の高いパーティクルを選択的に抽出して新しいパーティクル集合を構成することで、探索空間内の真値にパーティクル集合が収斂する性質を利用する。

そこで、超音波タグの位置推定について、パーティクルフィルタの有効性を確認するため、MATLAB を用いたシミュレーションを行なった。

0) 前提条件

シミュレーションを実施する上で、以下の前提条件を仮定した。

仮想環境(探索空間)：縦 3000mm×横 4000mm×高さ 3000mm の仮想環境とする

超音波受信器の配置：上記の環境の天井面に、300mm 間隔および 600mm 間隔で超音波受信器を配置する

有効な受信器：超音波発信器には指向性があるため、すべての受信器で超音波を検出できるわけではない。そこで、発信器は鉛直上方を向いて設置され、発信器を頂点として頂角 60 度(鉛

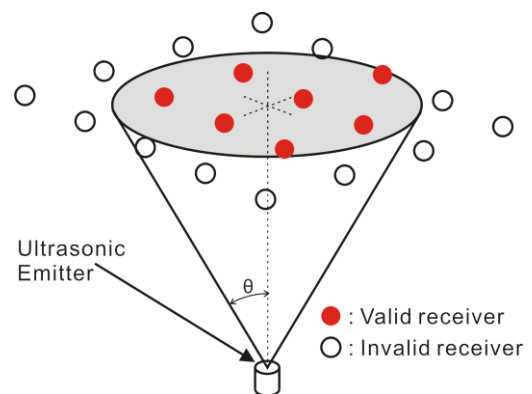


図 34 有効/無効な受信器

直軸±30 度)の円錐内に存在する受信器のみに超音波が到達するものとする(図 34参照)。なお、前述の通り、実際に使用している発振器は頂角が約 100 度であることがわかっており、今回のシミュレーションは実際より厳しい条件を設定していることに注意が必要である。

計測誤差：超音波受信器で計測する発信器—受信器間の距離には、平均 0, 標準偏差 5mm の正規分布に従う計測誤差が含まれるものとする

繰り返し計算の回数：パーティクル集合を真値に収斂させるため、一度の位置計測あたり 10 回の繰り返し計算を実施する

尤度の決定：パーティクルから上に示した個々の「有効な受信器」 i までの距離 $d_{p,i}$ と、その受信器の出力値 d_i (発信器までの距離で計測誤差を含む値)との差の二乗和 $\sum(d_i - d_{p,i})^2$ を求め、その逆数を疑似的尤度 P_p とする。ただし、 $\sum(d_i - d_{p,i})^2 \leq 1$ の場合には P_p が過大な値となるため、上限を 1.0 としている。すべてのパーティクルで疑似的尤度 P_p を求めた後、 $\sum P_p = 1.0$ となるように正規化する

推定位置の決定：繰り返し計算の結果得られたパーティクル集合のすべてのパーティクルを用いて、パーティクルの位置 v の尤度による重み付け平均 $\sum P_p v$ を推定位置 V とする

1) 誤差評価実験

パーティクルフィルタの位置推定誤差を評価するため、仮想環境内にランダムに配置した発信器の位置を 100, 200, 300, 400, 500 個のパーティクル集合で推定するシミュレーションを行なった。推定する発信器の位置は 100 通り用意し、パーティクルの初期位置もパーティクル数(100~500 個)毎にランダムに 100 通りずつ生成した。すなわち、パーティクル集合の各パーティクル数に対して 10000 回の位置推定シミュレーションを実施し、真の位置と推定位置とのユークリッド距離を誤差とした。

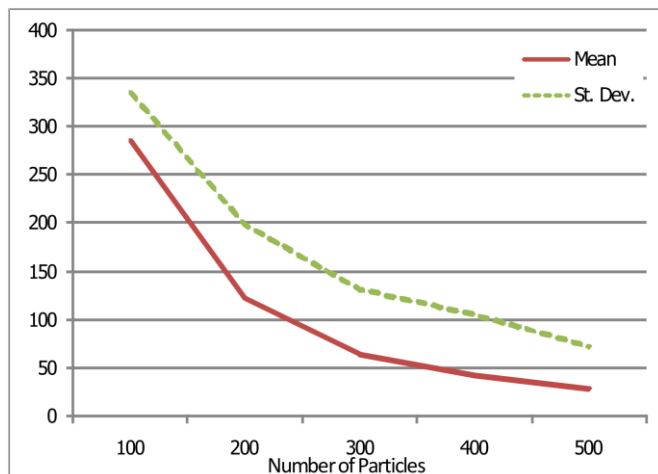
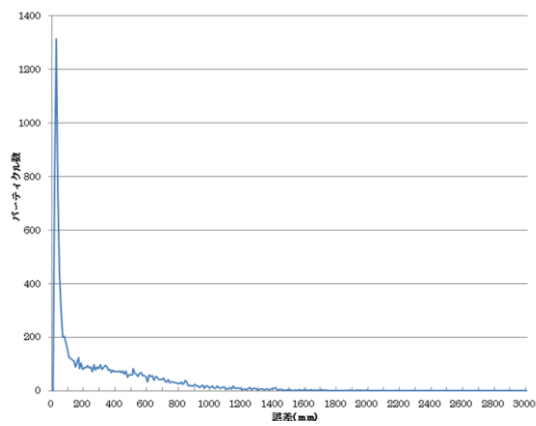


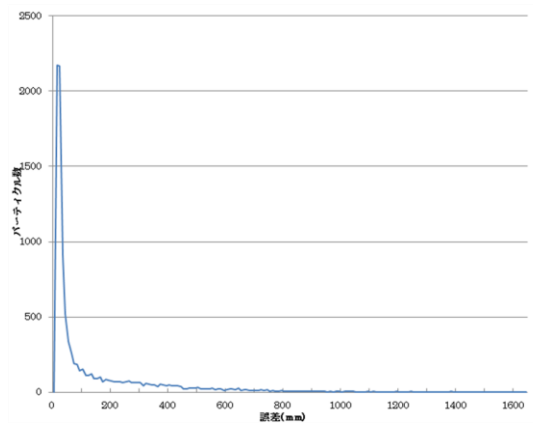
図 35 パーティクル数と位置推定誤差の平均値および標準偏差との関係

図 35にパーティクル数ごとの誤差の平均値と標準偏差を示す。この図から、誤差の平均値はパーティクル数が 400 個と 500 個の場合に RANSAC の平均誤差 50mm よりも良い結果となっていることがわかる。

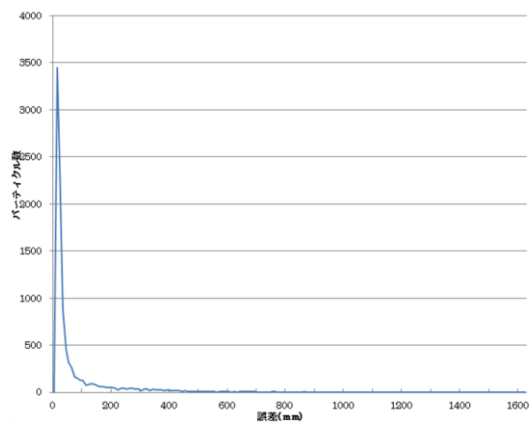
次に、横軸に誤差を、縦軸にパーティクル数を取ったヒストグラムを図 36に示す。使用したパーティクルの個数によらず、使用したパーティクルの多くは非常に小さな誤差で真値を推定できていることがわかる。また、図 36より、すべてのパーティクルを用いず尤度の高いパーティクルの情報のみを用いれば、図 35に示したより誤差が低減する可能性が非常に高いことも明らかであるが、今回そのような選択操作は行なわず、すべてのパーティクルの情報を使用している。



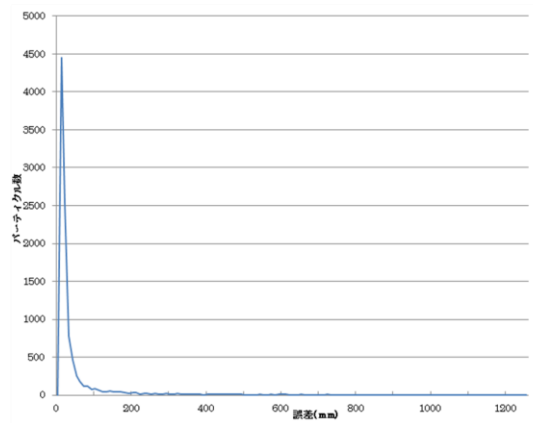
(a) パーティクル数 100 個の場合



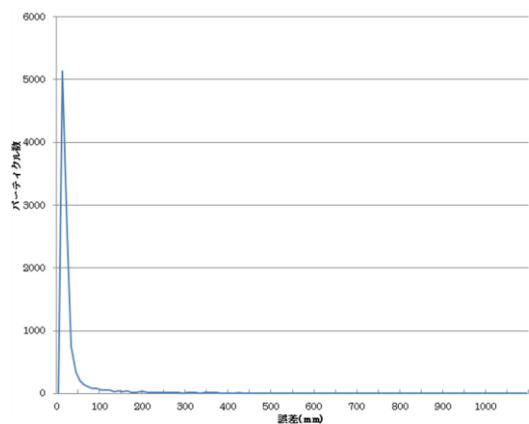
(b) パーティクル数 200 個の場合



(c) パーティクル数 300 個の場合



(d) パーティクル数 400 個の場合



(e) パーティクル数 500 個の場合

図 36 誤差とパーティクル数との関係

2) 移動目標の追跡実験

仮想環境内で超音波発信器をランダムに移動させ、その位置をパーティクルフィルタで追跡するシミュレーションを実施した。パーティクル数を 500 個としたところ、上記誤差評価実験と同様に、全行程に渡って誤差 50mm 以下、およそ 20~30mm 程度で発信器の位置を追跡可能であることが確認できた。

上記のシミュレーション結果より、パーティクルフィルタの有効性および RANSAC に対する優位性が確認できたため、実際のタグシステムに対して同アルゴリズムの実装を開始した。

・GPGPUによるパーティクルフィルタの実装

前述の通りパーティクルフィルタによる位置推定は RANSAC による位置推定より精度が向上できる可能性を示したが、これを RANSAC と同じ計算機上で実装すると演算時間が 25 ミリ秒程度かかることがわかった(なお演算時間は処理するデータ数および使用するパーティクルの個数等に依存する。上記はパーティクルを 500 個使用した場合である)。RANSAC の演算時間は約 17 ミリ秒であったから、およそ 1.5 倍となっている。

一方、GPU(Graphics Processing Unit)を用いた GPGPU(General Purpose computing on GPU; GPU を用いた汎目的計算)が最近様々な分野で使われるようになってきた。GPU は内部に大量の演算器を有しており、複雑な条件分岐等がない単純な数値演算であれば CPU よりも高速に並列実行できる。また、ミニ ITX 規格等の小型計算機でも GPU を搭載した製品が市販されているため、GPGPU が活用できれば位置推定用の計算機を非常に小型かつ安価に実現できる可能性がある。

本研究で実装するパーティクルフィルタでは、各パーティクルについて、図 37に示すように、①個々の超音波受信器との距離計算、②各受信器で計測された距離データとの比較(ベクトルの差分計算)、③差分結果に基づく尤度計算をリアルタイムに実行するが、いずれの処理でも条件分岐は発生しないため GPGPU に適しているものと考えられる。

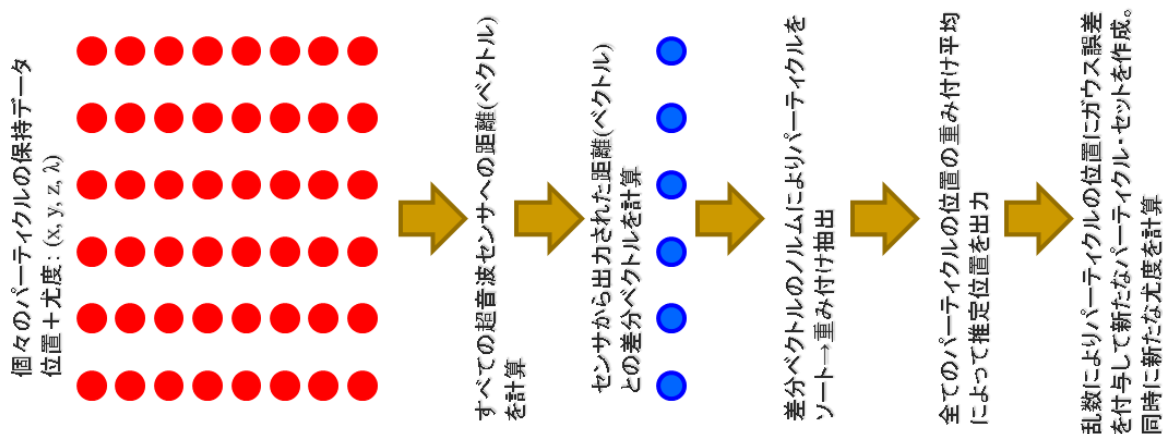


図 37 GPGPUによるパーティクルフィルタ・アルゴリズムの実装

そこで、平成 21 年度に FS を行なって GPGPU の適用可能性を検討した後、平成 22 年度に実装を行なった。具体的には Nvidia 社製の GPU を搭載した計算機で同社製 GPU 用の GPGPU プログラミング環境 CUDA を利用し、個々のパーティクルにおける距離計算・尤度計算および差分ベクトル計算等を GPGPU 上のスレッドに割りつけて並列演算として実装した。その結果、パーティクル個数を 512 個とした場合での演算時間は約 2 ミリ秒と 10 倍以上の高速化が実現できた。平均誤差は 20mm 程度であり、CPU 上で演算した場合と変化はなかった。

・省電力型超音波タグの開発

共同研究先である慶應義塾大学からの依頼により、省電力型の超音波タグを開発した。従来型の超音波タグは、たとえ自己位置が変化していない場合でも外部から指示を受ける度に超音波を発射する仕様となっている。この場合、前回超音波を発射した時点から自己位置が変化しなくても超音波発信器を駆動することになり、このような挙動は電源容量に制約がある移動ロボッ

トではあまり望ましくない。

そこで、従来の超音波タグに3軸の加速度センサを新たに内蔵し、加速度の変化が検出されない場合には自己位置が変化していないものとして、省電力モードに移行する仕組みの導入を検討した。省電力モードにある超音波タグは外部からの指示があっても超音波を発射しないようにすることで、内蔵電池の寿命を延ばせる可能性がある。この仕組みを導入した超音波タグを試作した。これにより、タグが動いていない状態の場合、内蔵電池の消耗を約70%程度削減することが可能となり、電池交換間隔を飛躍的に延ばす効果(約3倍)が期待できる。

図 38に開発した省電力型超音波タグを示す。



図 38 省電力型加速度センサ内蔵超音波タグ

・無指向性超音波タグの開発

市販の超音波発振器を利用した従来の超音波タグの欠点は、発振器が一般に図 39に示すような指向性を持つために発信した超音波の到達可能な範囲が制限されることにある。例えば、図 39に示す発振器では、正面から60°をなす方向の信号強度は-20dBとなるため、この方向に設置された超音波受信器では信号を検出できない可能性が高い。この結果、環境内の受信器の設置場所はタグ(発振器)の設置方向に大きく影響を受けることとなり、仮にタグを鉛直上向きに設置するとすれば、受信器の設置箇所は自ずと天井に制限されることになる。

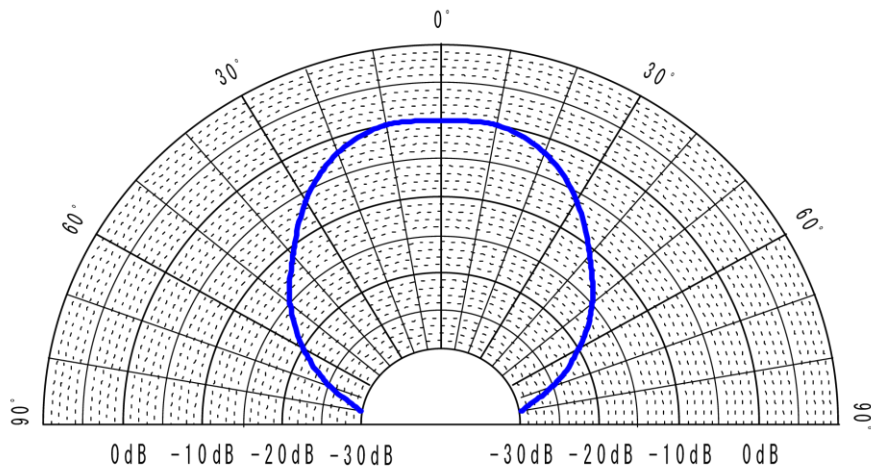


図 39 市販の超音波発振器(日本セラミック社製 T4016A2)の指向性

逆に、あらゆる方向に十分な強度で超音波を届けられる、すなわち指向性の影響が非常に低い超音波タグが実現できれば、受信器の設置箇所は非常に高い自由度が得られ、本プロジェクトで想定しているような病院でも、壁面等空いているスペースに受信器を容易に設置可能となる。ここではこのような超音波タグを無指向性超音波タグと呼ぶことにする。

一般に、単一周波数の波に対してその進路に穴の開いた壁（障害物）を置くと壁の背後に波が回り込む現象（回折）が生じる。この時、回折による広がり角 θ [rad]と、波長 λ 、穴の口径 D との間には以下の近似が成り立つ：

$$\theta \cong 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

現在使用している超音波発振器の周波数は 40[kHz]なので、仮に空気中の音速を 340[m/s]とすると波長 λ は 8.5[mm]である。上式より λ が一定の時、口径 D と広がり角 θ とは反比例することがわかるが、一方で、口径を絞りすぎると壁面での反射により壁の背後に発射される超音波の総エネルギーが低減する可能性があることに注意が必要である。

上記の検討により試作した無指向性超音波タグの外観を図 40に示す。

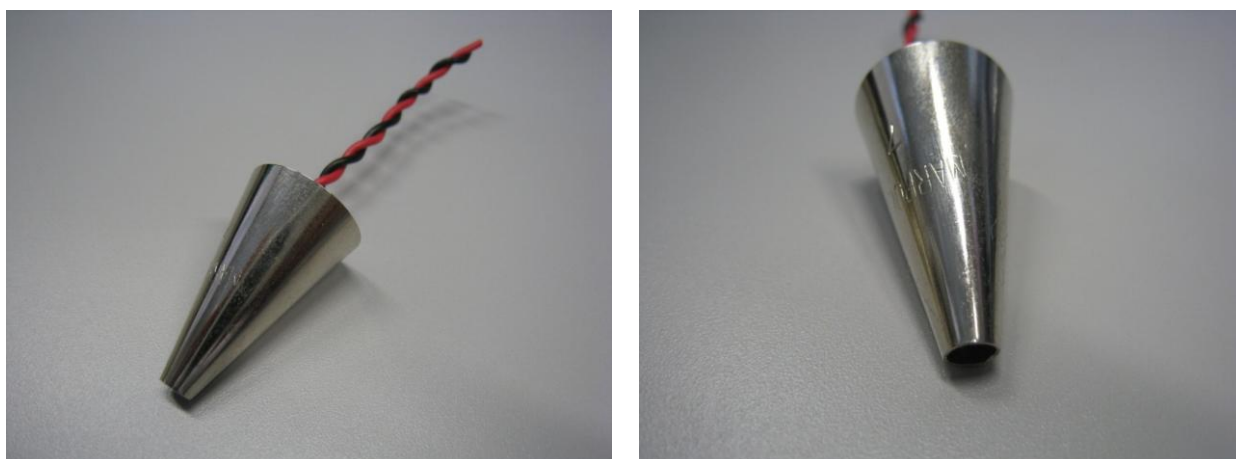


図 40 無指向性超音波タグ

開口部の口径 $D=4$ [mm]であり、前ページの式を用いると回折による広がり角 θ の理論値は $\theta \cong 2.59$ [rad] $\cong 149^\circ$ すなわち、およそ 150° となり、市販の発信器と比較しても広範囲に超音波を放射できることがわかる。

指向性（正面からの角度に対する信号強度）について、旧型のタグと今回試作したタグとを比較した結果を図 41に示す。

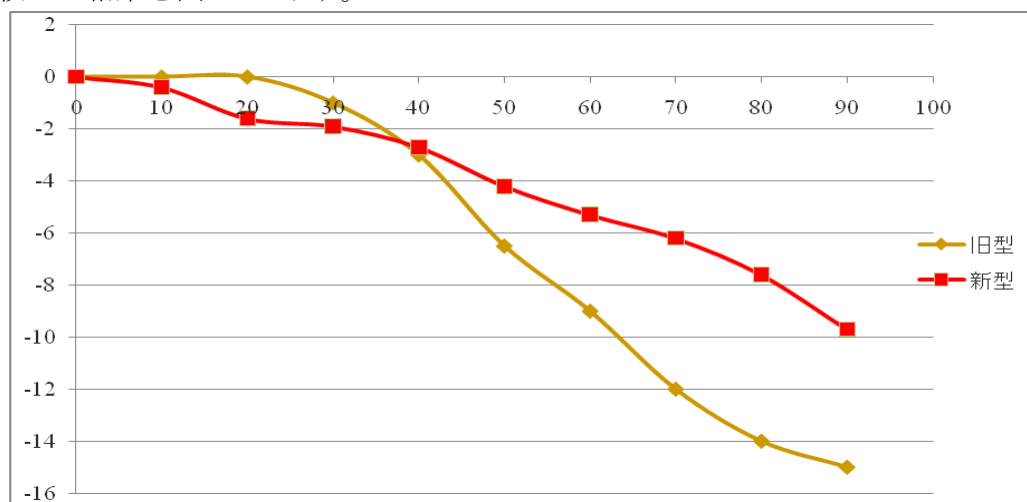


図 41 新旧タグの指向性

試作した無指向性超音波タグでは発振器より発射される超音波の全エネルギーが空間的に広範囲に放射されるため、前述のように正面に近い方向における信号強度は市販の発振器を使用した旧型タグより低い、市販の発振器の指向性限界に近い40°近辺でグラフが逆転し、およそ正面から60°の方向では5dB程度利得の向上が得られている。

以上、試作した無指向性超音波タグの利用により、超音波タグシステムの受信器の設置箇所の自由度を増せる可能性を示せた。

(3) - ② 大規模センサ・ネットワークの開発

・ 計算機環境の整備

産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センターに設けられたセンサ化環境は、リビングルーム、子供部屋、寝室およびそれらを結ぶ廊下で構成されており、これらの構成要素ごとに超音波タグシステムが設置されている。そこで個々のシステムに対応する形で制御用 PC を一台ずつ配置し、さらに制御用 PC からの情報を中継する中継サーバを一台、収集した位置データを蓄積するデータベースサーバを一台、それぞれ設置した。

使用するデータベースのサーバ・ソフトウェアには、幾何学データ型(点・線分・経路等)を直接扱うことのできる PostgreSQL を利用することとした。

・ ソフトウェア開発・整備

これまでの超音波タグシステム用制御プログラムは Microsoft Windows 上で GUI を利用するアプリケーションとして開発されてきた。一方、本研究のように病院等の建物内にシステムを埋め込む場合、複数のタグシステムを統合する形で全体のシステムを構成する必要がある、個々のタグシステムに GUI を設けて個別に管理する方法は適切ではない。また、Windows を利用する場合、遠隔地からの動作チェックが困難であるという問題がある。そのため、前述の制御用 PC や中継サーバは OS として Linux を採用した。さらに、従来 Windows 上で開発されてきたプログラムの Linux への移植を行なった。

・ 省電力型超音波タグ用コントローラの開発・交換

産総研で構築した既存の大規模センサ・ネットワーク(センサ受信器 272 個が 3LDK サイズの家に埋め込まれているセンサ・ネットワーク)を利用して、開発した省電力型超音波タグが動作する大規模センサ・ネットワークを構築した。具体的には、省電力型超音波タグが動作するコントローラを開発した。これを従来のユニットと置き換えた。このタグコントロールユニットは、センサ・ネットワーク内で複数個使うことができる仕様となっている。

(3) - ③ 大規模センサ・ネットワークにおけるタグ追跡のハンドオーバー技術の開発

大規模センサ・ネットワークの場合、タグをコントロールするユニットの電波到達範囲の限界により、電波が到達できない範囲が存在する。これを補うためには、コントロールユニットを複数配置し、互いに干渉することなく、タグをハンドオーバーするアルゴリズムが不可欠となる。本研究では、そのためのコントロールユニットと、タグ探索アルゴリズムを開発することで、タグハンドオーバー機能を実現した。前述した大規模センサ・ネットワーク(センサ受信機 272 個が 3LDK

サイズの家に埋め込まれているセンサ・ネットワーク) によって、開発したコントローラとハンドオーバ機能の有効性を検証した。

開発したタグコントローラとハンドオーバ機能を利用した広範囲タグ追跡の様子を図 42に示す。

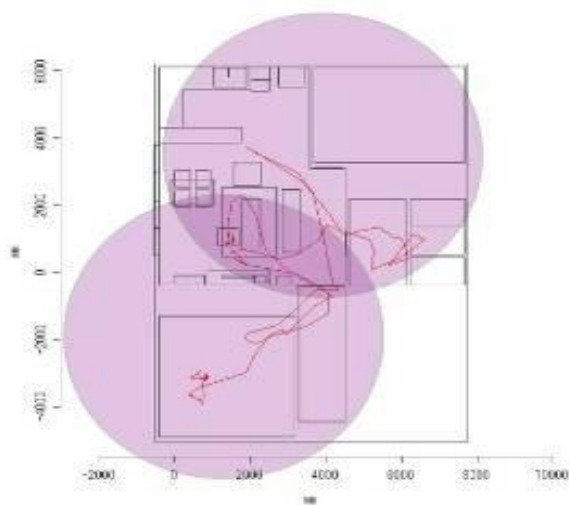


図 42 大規模センサネットワーク構築可能なタグコントローラとハンドオーバ機能を利用した広範囲タグ追跡

<人とロボットが共存する環境下での安全（事故防止）技術>

(2) - ⑤ 転倒防止技術の開発

ロボット構成要素における重量物の配置を検討し、ロボット本体の低重心化を図ると共に、駆動車輪を支持するサスペンションにバネ・ダンパ要素を付加することにより、より安定した倒れにくい機構を開発した。これにより、ロボット本体を 10 度傾けた状態で手を離しても転倒しないことを確認した。

また、非常停止時における急激なモータ停止に伴うロボットの転倒防止に対して、走行モータの減速停止を制御した上で電源供給をカットするよう電気回路を設計した。これにより、最高速度 0.7m/sec で走行時に非常停止ボタンを押された場合にも、転倒することなく制動距離約 30cm 以下で停止することを確認した。

(2) - ⑥ 安全・異常検知技術の開発

(2) - ⑥ - 1. カセンサレス衝突検出

本研究課題では、車椅子の安全な搬送を実現するにあたり双腕型移動ロボット(案内ロボット)を利用したカセンサレスの押し動作を実現する。提案アルゴリズムでは、案内ロボットの腕に取り付けられたアクチュエータの電流指令及び加速度応答からロボットが搬送物体より受ける反力を推定している。アルゴリズムの検証を行うためエラー! 参照元が見つかりません。に示すロボットを用いた実験を行った。図 44にその実験結果を示す。図 44において、青線はカセンサによる力検出結果、赤線は推定アルゴリズムによる推定反力結果を示している。この結果より、誤差 10N 以内での反力推定が行えていることがわかる。



図 43 実験用ロボット

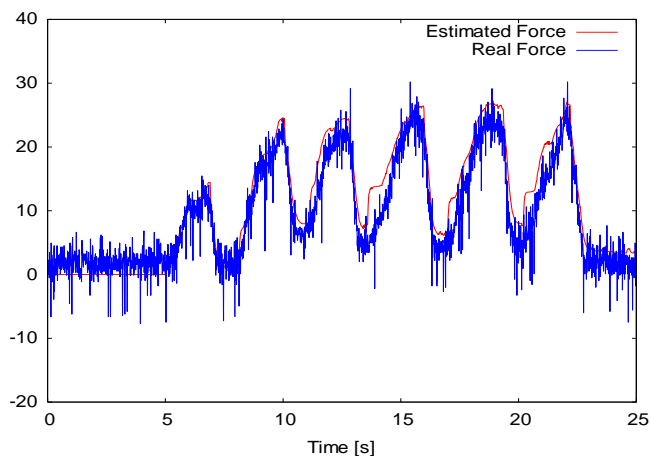


図 44 反力推定結果

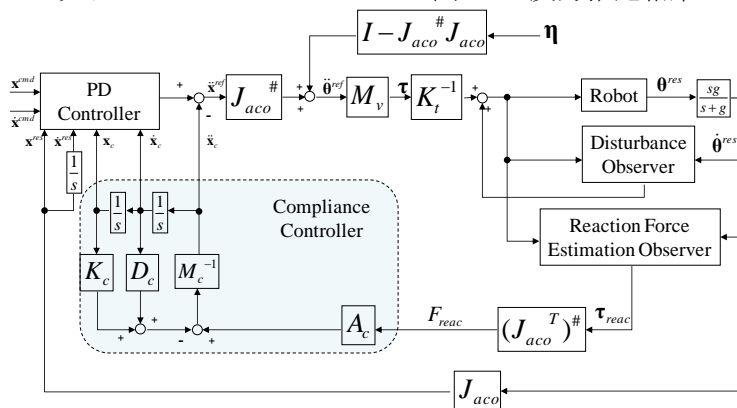


図 45 コンプライアンス制御器を含む反力推定に基づいた制振制御系

提案アルゴリズムでは、図 44に示す推定反力をコンプライアンス制御器(図 45の水色部分)を通してフィードバックすることで搬送物体から受ける振動の抑制を実現している。ここで、コンプライアンス制御器における仮想パラメータ(仮想質量: M_c 、仮想ダンピング係数: D_c 、仮想ばね係数: K_c)を適切に設定することで、車椅子の振動を効果的に抑える制振制御が実現できる。図 45に示す制御系の有用性を検証するため、車椅子の押し動作を図 46に示す姿勢で行った。その際得られた車椅子の加速度応答を図 47に示す。実験では、車椅子の座面に設置された加速度センサにより車椅子に発生する加速度を測定している。ここで、赤色が反力フィードバックを行わなかった場合、青色が反力フィードバックを行った場合の応答を示している。これらの結果より、提案する反力推定に基づいたコンプライアンス制御により加速度の振動ピークが抑えられていることがわかる。

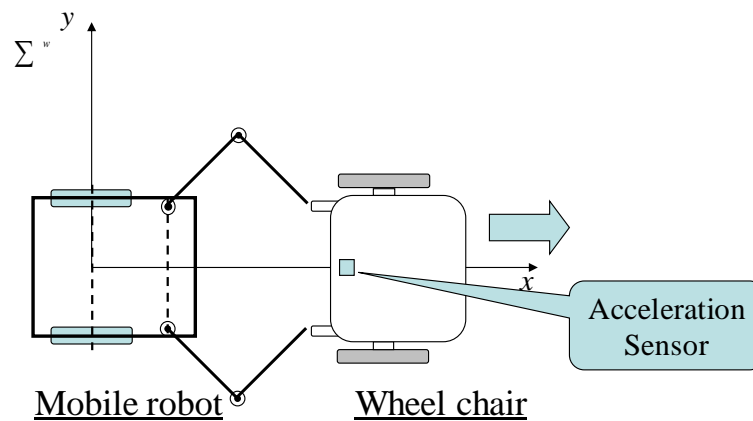


図 46 案内ロボットによる車椅子の押し動作

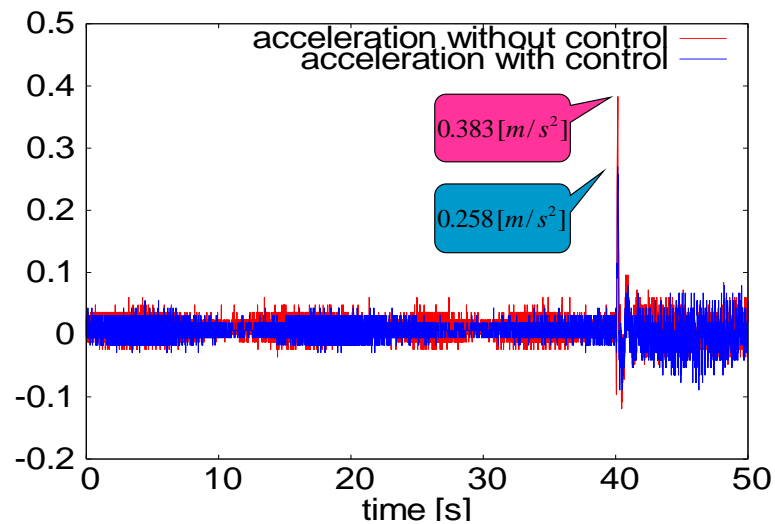


図 47 押し動作における車椅子の加速度応答

(2) - ⑥ - 2. 車椅子等搬送のための移動支援技術

図 47の実験検証では、直線軌道における安定性（振動抑制性能）について検証を行ったが、任意の軌道での安定性向上は必ずしも保証されない。そこで、安定性を保証した軌道追従制御を実現するため、エネルギー関数（リアプノフ関数）を用いた軌道追従制御法を実現している。さらに、車椅子搭乗者の乗り心地を加味した軌跡追従制御を実現するにあたって、搬送ロボットに作用する反作用力を用いた振動抑制アルゴリズムを確立した。提案手法の有効性を検証するため、従来から多くの研究で用いられているコンプライアンス制御との比較も行った。比較検証では図 48に示すような車椅子押し動作を想定し、車椅子搭乗者の動作応答をばね、マス、ダンパモデルで近似している（図 49）。したがって、搭乗者モデルの振動が最小に抑えられた際に搭乗者の乗り心地が改善されているとして検証を行った。図 50に提案手法全体のブロック線図を示している。詳細な説明は略すが、提案手法では反力推定オブザーバ(RTOB)により推定された搬送ロボットへの反力情報（反作用力もしくは反作用力の時間微分値）を用いて、軌道追従制御器に設定されている許容誤差を修正し、振動が発生した際には軌道追従制御よりも振動抑制制御を優先する制御器構成としている。まず、図 51に提案手法とコンプライアンス制御のシミュレーション結果（直線軌道）を示す。図 51 (a)より、追従特性の向上のみに着目したリアプノフ関数に基づいた軌跡追従制御と比較すると、両手法とも同等の振動抑制効果があることが分かる。しかしながら、図 51(b)に示すようにコンプライアンス制御では位置応答に定常偏差が生じており、位置偏差の生じていない提案手法の方がより高性能であると言える。

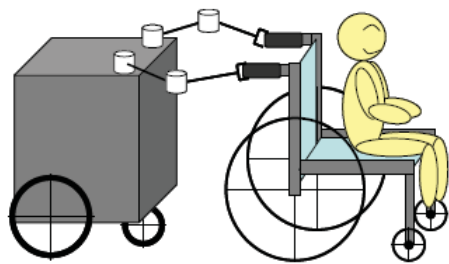


図 48 搬送ロボットによる車椅子の押し動作

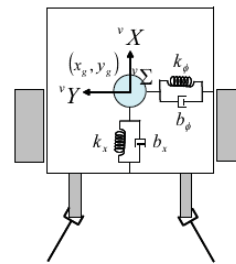


図 49 車椅子搭乗者のモデル

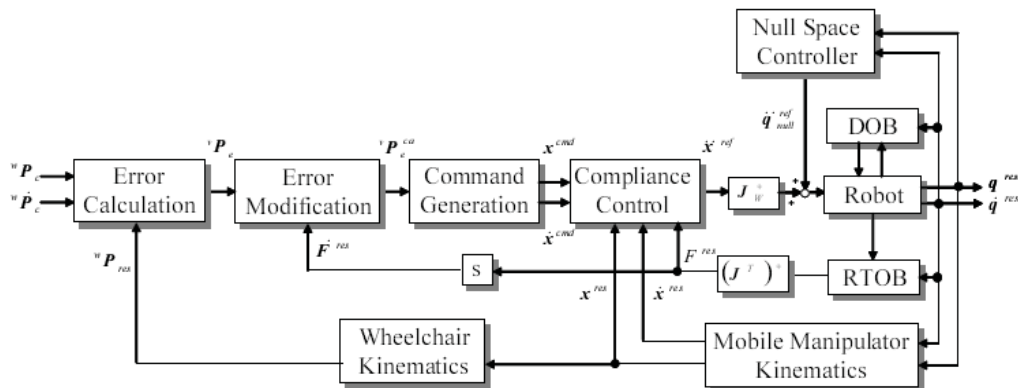


図 50 制御系全体のブロック線図

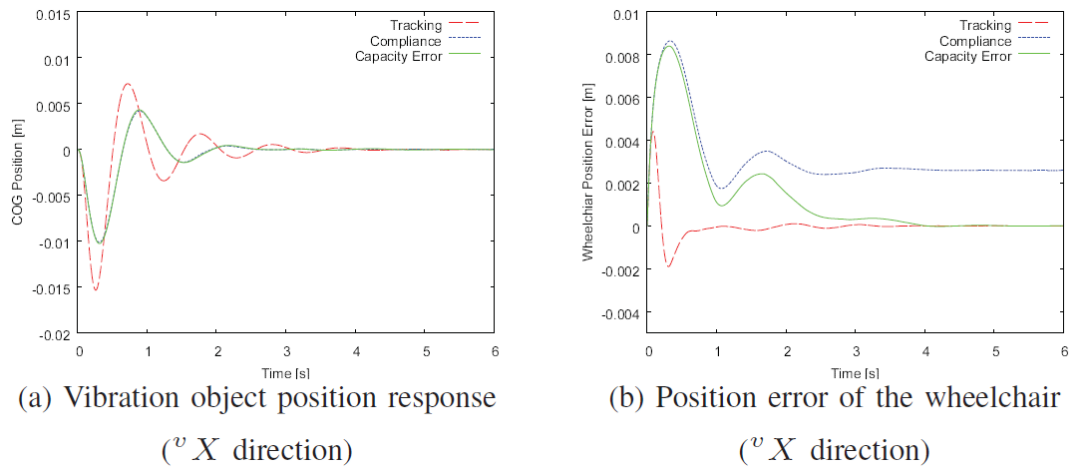


図 51 提案手法とコンプライアンス制御の比較

図 52では次に示す各手法による応答の比較を示している。図より、手法 4 が最も安定でかつ軌跡追従特性が良いことがわかる。

手法1:リアプノフ関数に基づいた軌跡追従制御(Tracking)

手法2:リアプノフ関数に基づいた軌跡追従制御+コンプライアンス制御
(許容誤差無し:No Capacity Error)

手法3:リアプノフ関数に基づいた軌跡追従制御+コンプライアンス制御
(許容誤差を反作用力に基づいて生成:Capacity Error(F))

手法4:リアプノフ関数に基づいた軌跡追従制御+コンプライアンス制御
(許容誤差を反作用力の時間微分値に基づいて生成:Capacity Error(dF))

図 53に他の位置指令(曲線軌道)を仮定した場合のシミュレーション結果を示している。図より、曲線軌道においても提案手法の有効性が確認できる。

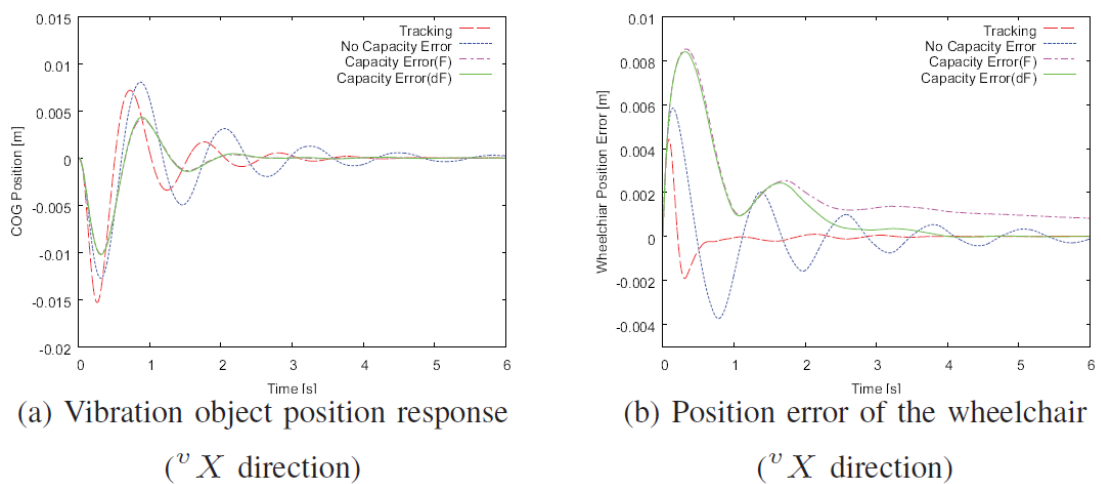
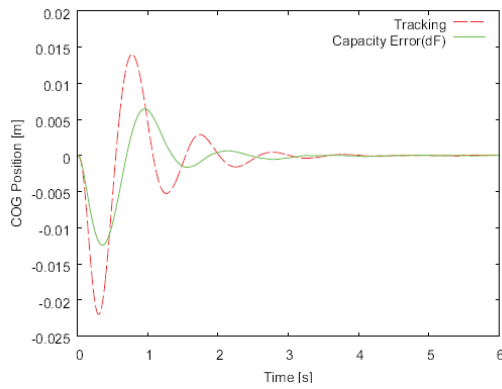
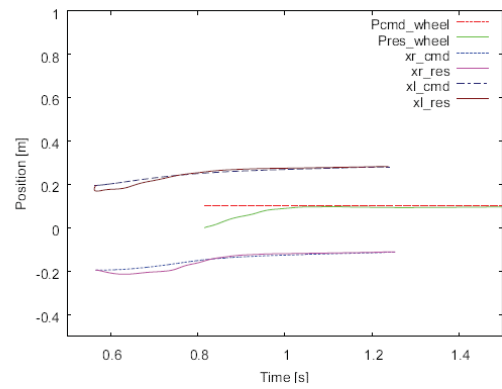


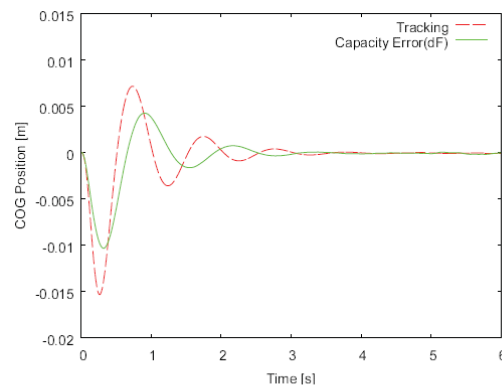
図 52 各手法の応答比較(直線軌道)



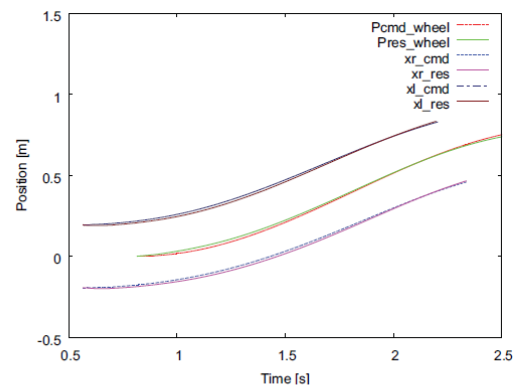
(a) Vibration object position response
(v X direction)



(b) Position response



(c) Vibration object position response
(v X direction)



(d) Position response

図 53 各手法の応答比較(曲線軌道)

次に、実験結果を示す。実験では、水の入ったポリタンクが乗せてある車椅子を双腕型移動ロボット(案内ロボット)が押し動作を行っている(図 54)。実験結果を図 55に示す。図 55より提案手法では、軌道の追従特性を損なうことなく車椅子上の振動物体の振動抑制が達成できており、安定した押し動作が実現できていることがわかる。

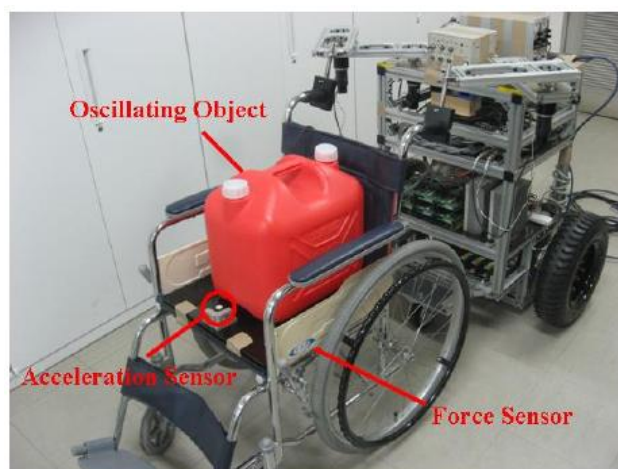
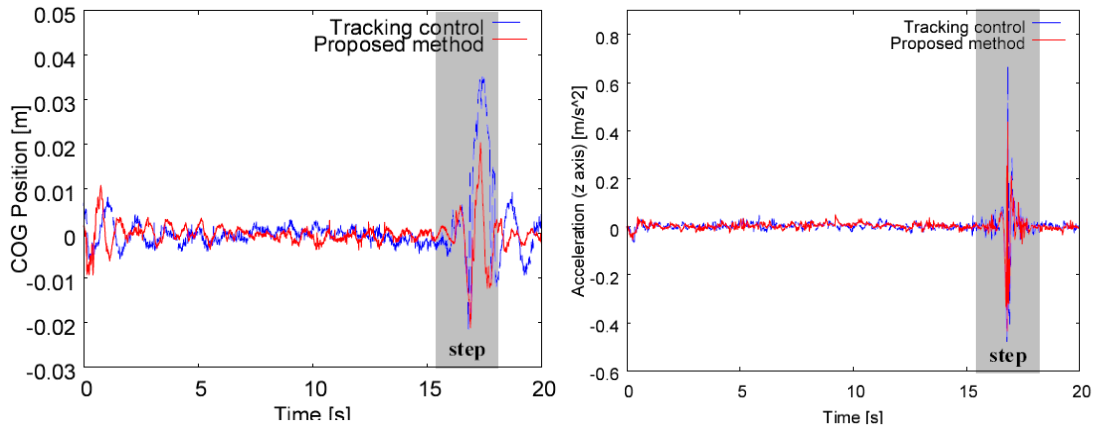
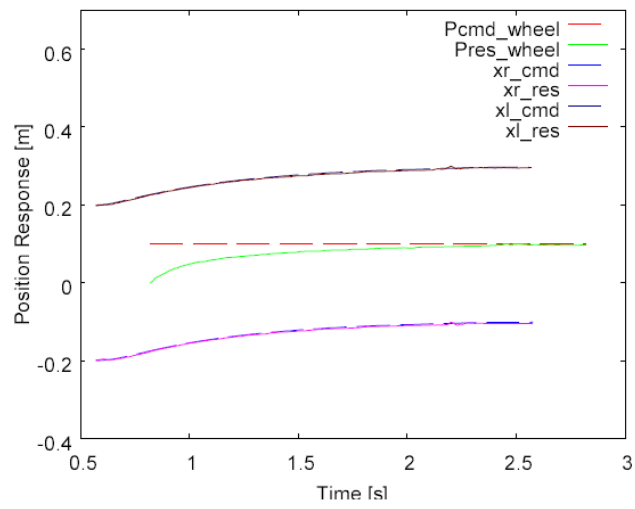


図 54 実験システム条件



(a) COG response

(b) Acceleration response



(c) Trajectory response

図 55 車椅子上の重心位置変動、加速度応答、軌道応答

本研究課題では、任意の軌道での押し作業の実現に加えて、押し作業時の段差乗り越えアルゴリズムも構築している。そこで、提案アルゴリズムにおける対象物段差乗り越えのフェイズを定義する。段差乗り越えの各フェイズを図 56に示す。ここでは、段差乗り越えにあたって 5 つのフェイズが定義されている。最初の 3 フェイズが対象物前輪の段差乗り越えを、最後の 2 フェイズが対象物後輪の段差乗り越えを表している。以下、各フェイズについて詳しく説明していく。まず第 1 フェイズは、通常の押し作業を行っている状態であり、この段階で段差を認識し、段差乗り越えのための準備を行う。ここで、通常の押し作業とは既に前述した提案手法による押し作業のことである。このフェイズで、段差の位置や高さから、後述する方法によって段差を乗り越えるための位置指令値を算出する。第 2 フェイズでは、対象物の前輪を上げることで、段差を乗り越える。前輪が段差を乗り越える時、当然のことながら段差より高く対象物の前輪を上げなければならない。そして第 3 フェイズにおいて、対象物の前輪を地面に着地させる。この時、段差を乗り越えた地点へ正確に前輪を着地させなければならない。

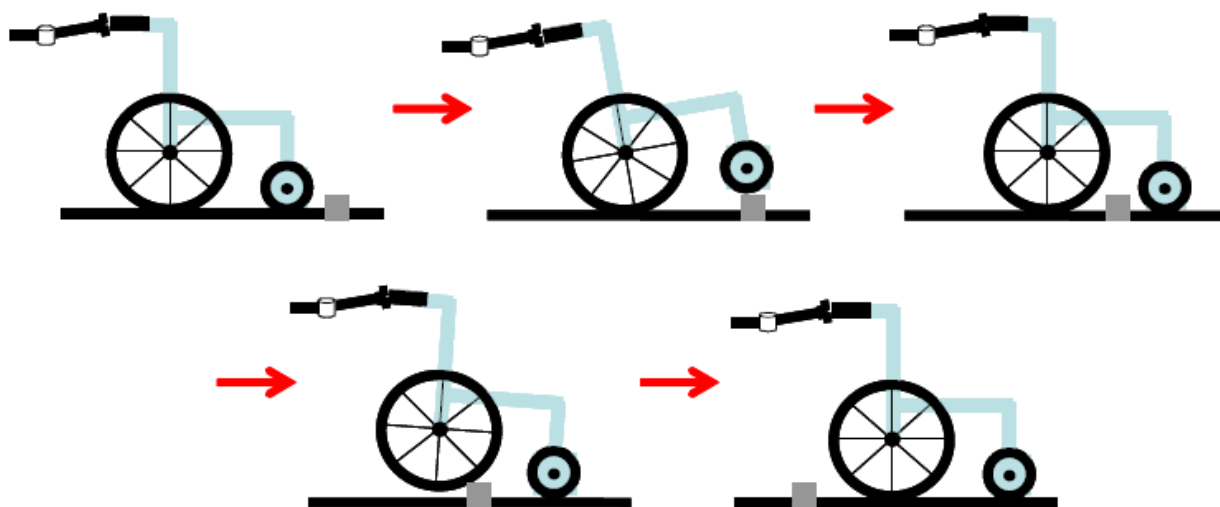


図 56 段差乗り越えアルゴリズムにおける 5 つのフェイズ

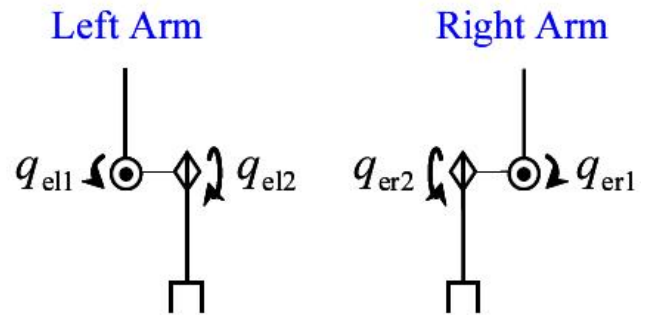
次に、対象物後輪の段差乗り越えについて説明する。第 4 フェイズでは、対象物の後輪が段差に衝突する。段差との衝突に合わせて対象物を押すことで、後輪の乗り越えを達成する。最後の第 5 フェイズは、後輪の段差乗り越えが完了し、通常の押し作業に戻った状態である。この後、通常の押し作業を行って、目的地を目指して対象物を押していく。本提案手法では、以上説明したような段差乗り越えの 5 つのフェイズの実現を行っている。これによって、搬送の妨げとなる段差を乗り越えて、対象物を目的地まで到達させる。

図 56の5つのフェイズによる段差乗り越えを達成するため、本研究課題で新たに導入した段差乗り越えのための双腕型移動ロボット(案内ロボット)の新しい手先機構について述べる。本研究における段差乗り越え制御では、車椅子をピッチ方向へ操作しなければならない。これを実現するためには、移動マニピュレータの手先位置と手先姿勢を制御する必要がある。しかしながら、車椅子の厳密な幾何学モデルを得ることができなければ、位置と姿勢を同時に制御することはできない。車椅子の機構的な拘束のため、手先の鉛直位置が決まると、とるべき手先姿勢が一意に決まってしまうためである。つまり、手先鉛直位置と姿勢の関係を車椅子のモデルから正確に求めなければ、手先位置と姿勢の制御目標値を正確に決めることができない。そこで、本研究では図 57の新しい機構を用いることで、上記問題を解決する。図 57の機構は、双腕型移動ロボット(案内ロボット)における各腕の第三リンクの先に取り付ける。図 57に示

すように、三次元動作型双腕移動マニピュレータは各々の腕に二つの受動関節とシリンダを有する。各シリンダには、二つのネジ穴を開け、シリンダを取手に通してネジによって移動マニピュレータと車椅子を固定する。この機構を用いることで、移動マニピュレータの手先姿勢が柔軟に動作を行うことができる。したがって、移動マニピュレータの手先が車椅子の姿勢変動に応じて柔軟に動くため、手先位置制御のみで車椅子をピッチ方向に操作することが可能となる。また、本研究では簡単化のためにシリンダを用いたが、実際には人間の手のような把持機構をシリンダの代わりに用いることが望ましい。



(a) 手先機構



(b) 手先モデル

図 57 双腕型移動ロボット(案内ロボット)の手先機構

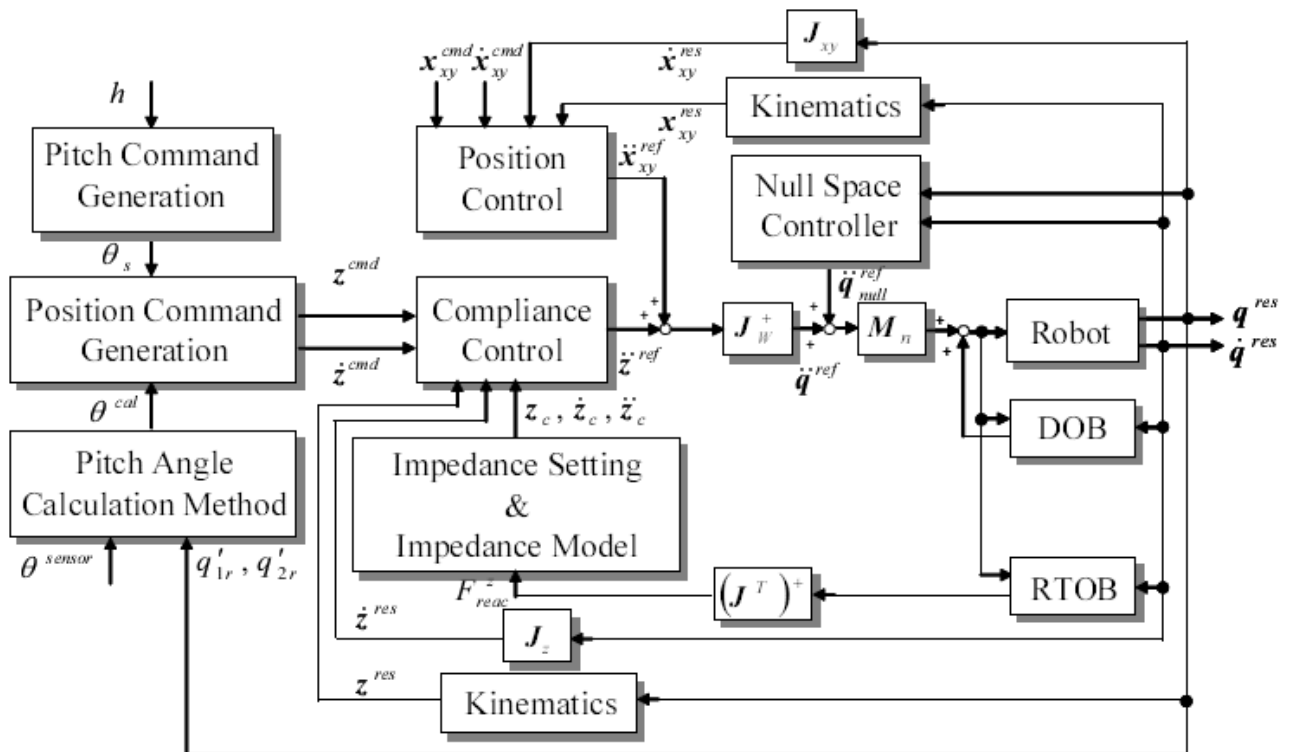


図 58 全体の制御系ブロック線図

図 58に段差乗り越えアルゴリズムを含めた制御系全体のブロック線図を示す。提案アルゴリズムでは、段差の高さ h は既知としている。手先位置の角度情報から段差乗り越えのための手先位置指令が生成され段差乗り越えを達成する流れとなっている。提案アルゴリズムによって得られた実験の様子を 図 59 にまとめる。

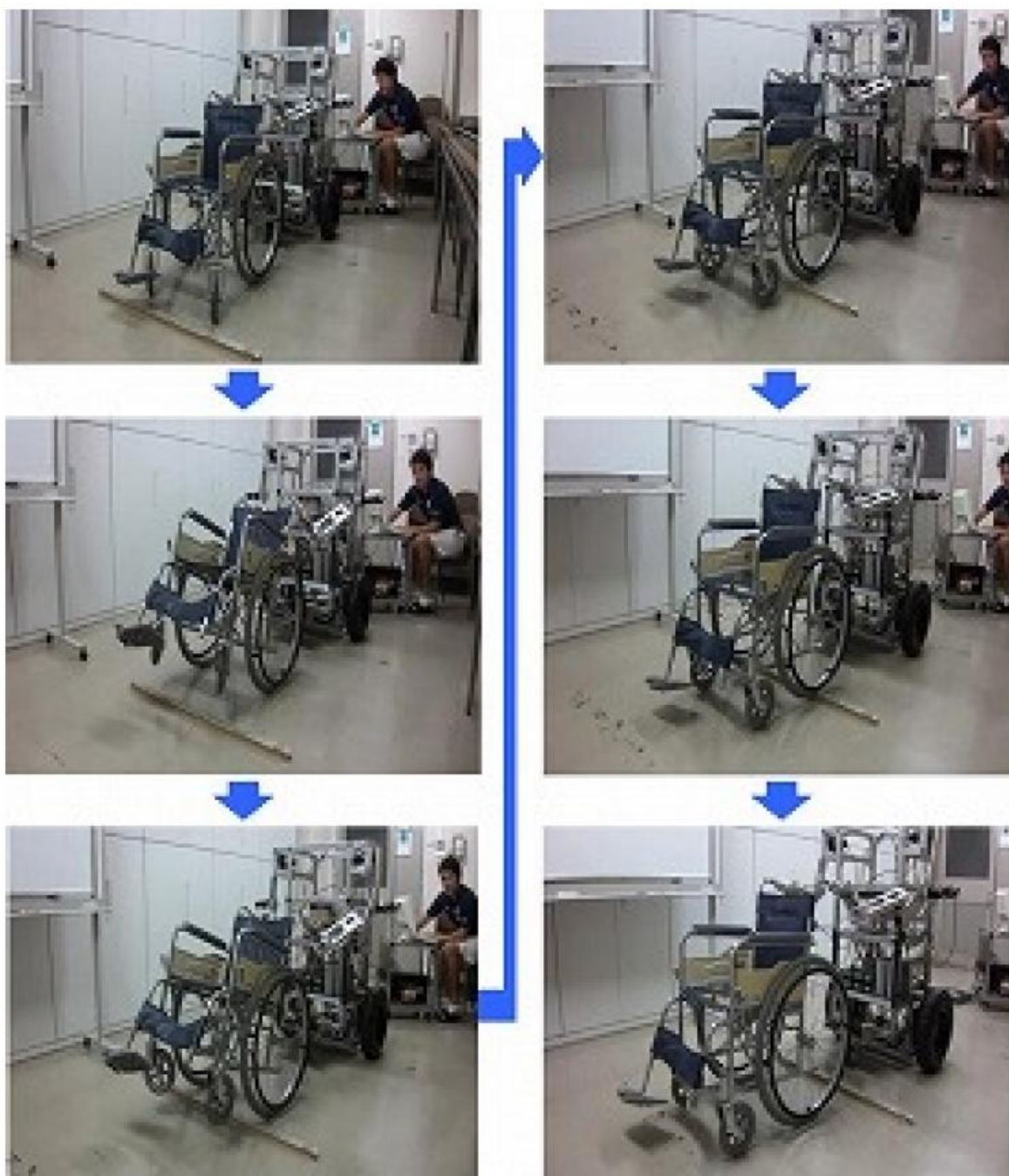
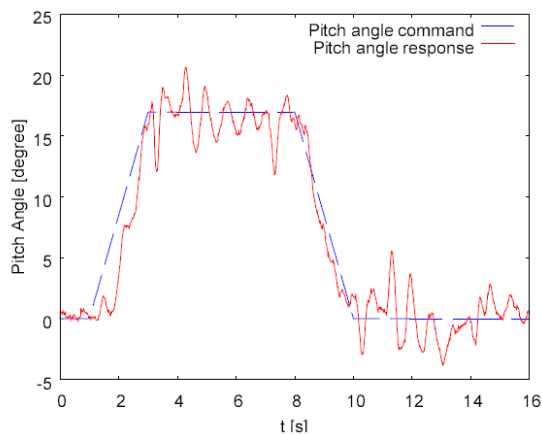


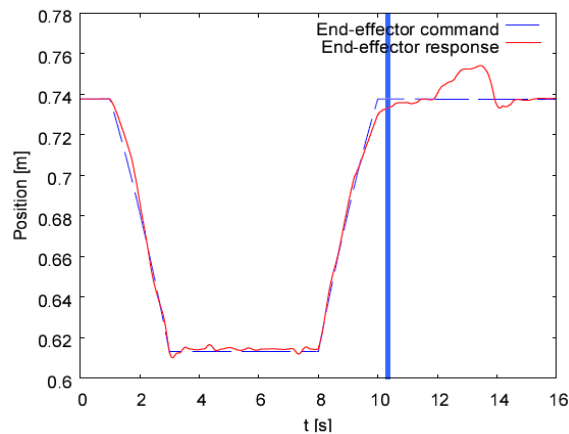
図 59 段差乗り越え実験の様子

図 59より、提案アルゴリズムによって段差乗り越え動作が滑らかに実現できていることがわかる。このときのピッチ角度応答、手先位置応答、手先値力応答を図 60に示す。図 60(a)のピッチ角応答を見ると、青い線は必要ピッチ角 θ_s を、赤い線は傾斜センサによって測定したピッチ角応答値を、緑の線はピッチ角計算値 θ_{est} を表している。まず、ピッチ角応答値が必要ピッチ角に達していることから、車椅子ピッチ

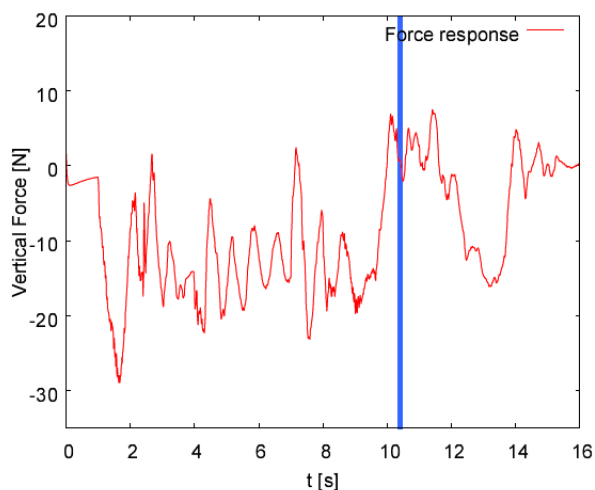
角が所望の値に正確に制御されていると言える。また、ピッチ角応答値とピッチ角計算値を比較することで、ピッチ角が正確に計算されていることがわかる。ピッチ角が正確に計算されているため、ピッチ角応答値が必要ピッチ角となっているのである。ピッチ角計算値が必要ピッチ角に達すると、移動マニピュレータ手先が静止し、ピッチ角が所望の値に制御されている。この結果、図 60(b)において、車椅子前輪高さが段差より高くなり、段差に衝突せずに正確に段差を乗り越えることができている。



(a) 車椅子ピッチ角応答



(b) 鉛直方向における手先位置応答



(c) 鉛直方向の力応答

図 60 段差乗り越え動作の実験応答結果

(2) - ⑥ - 3. 接触に関連した安全技術の開発

全方向移動台車では、接触及び衝突の検知を全周にわたって行う必要がある。市販のテープスイッチ（帯状のもの）をバンパースイッチとする場合、テープスイッチ部以外の部位への接触を感知することができない。そこで、より広範囲に接触を検知することを目的として、フロート式バンパーを採用した。フロート式バンパーでは、バンパー外装をコイルバネまたはインシュレータによってフロートさせることにより、バンパーのどの部分に接触してもバンパー全体が動き、その変位量に応じて接触力を検出することが可能となる。その際、異なる変位量を計測するようにセンサを複数設置することにより、接触力を多段階に検出することを可能とした。本プロジェクトでは、バンパーへの接触力を2段階に検出し、その大きさに応じて、「非常停止」もしくは「走行停止」を行う構成とした。



図 61 ロボット外観

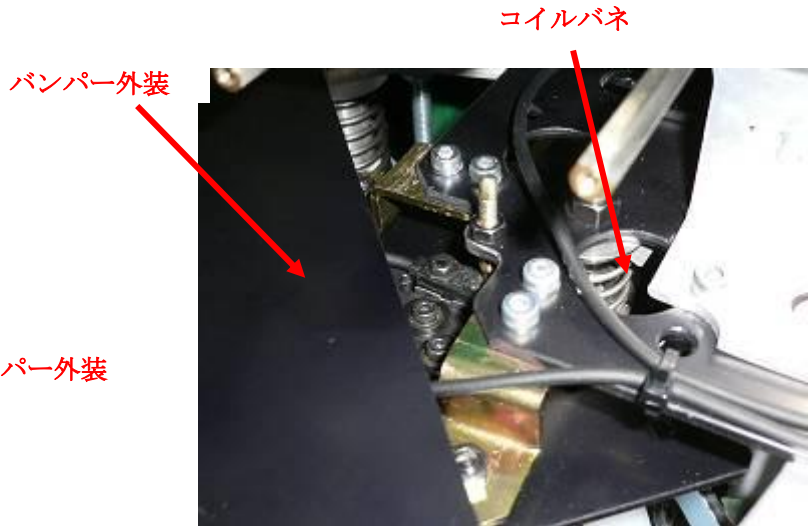


図 62 コイルバネによるフロート機構

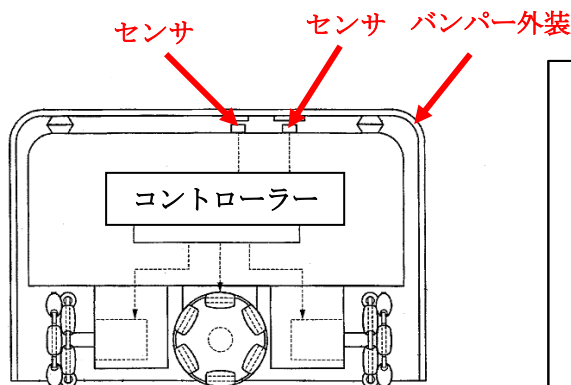


図 63 多段スイッチの構成図

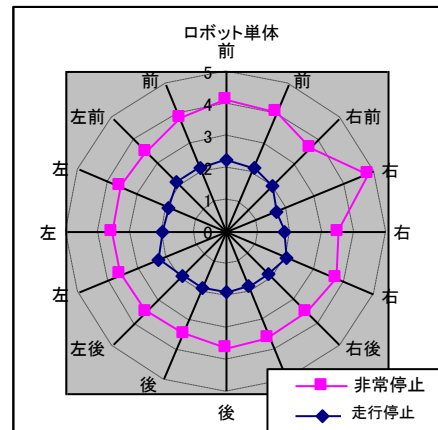


図 64. バンパーの感度特性

(2) - ⑥ - 4. 情報表現とアクティブセーフティ技術

人のいる環境で搬送用ロボットが安全に搬送タスクを遂行するためには、搬送ロボットが通路で人とすれ違う際のロボットの走行動作について検討し、走行動作におけるアクティブセーフティ技術を確立する必要がある。ロボットの移動に関しては、障害物回避アルゴリズムの研究は多いものの、ヒューマンロボットインタラクション (HRI) の観点から安全性を論じた研究はまだ少ない。実際にロボットが人間社会で移動する場合、人間との共生という点で全てを障害物回避アルゴリズムだけで処理することは不可能である。人間に経路を塞がれて回避スペースがなく立往生したり、ロボットのジグザグの動きで人間に不安や恐怖をあたえるといった問題に対処するには、ロボットの移動走行に対してもやはり HRI を考慮する必要がある。

アクティブセーフティ技術の研究では、ロボットが移動時、人間に自らの進行方向を知らせ、人に動きを予測させることで人間と安全にすれ違えることを目指す。ロボットの動きを人間に予測させるため、ジェスチャと発話を使ったロボットの走行に関する情報提示(意図表示) と、人間が予測しやすい走行軌跡を設計する。本研究では、人間の主観的評価により発話とジェスチャを使ったロボットからの意図表示が人間とのすれ違いに有効であることを確かめる。予測しやすい軌跡に関しては、人間とすれ違うときにロボットがそのまま回避する場合と人間が通り過ぎるまで停止している場合の2つの軌跡を実験での主観的評価により比較した。

実験の結果、すれ違い時に発話とジェスチャを用いてロボットが自分の走行に関しての意図表示を行うことで、人間はロボットの走行軌跡を予測しやすくなり、主観的評価も高くなることが示された。意図表示のタイミングが遅すぎる(人間との距離が3m以内) と、意図表示の効果は薄れる。また、ロボットは人間とすれ違うときには一方に寄って停止する軌跡の方が人間に好印象を与える。よって、ロボットが人間とすれ違うときには一方に寄って停止し、3m 以上開けて意図表示で“通ってもよい” ということ伝えればよいということが分かった。

【すれ違い実験 実験環境および条件】

実験は図 65の慶應義塾大学理工学部14 棟6 階廊下で行った。実験環境の略図を図 65の左に示す。ロボットはMKR003 を用いた。MKR003の走行速度は最高時速0.7m/sec である。

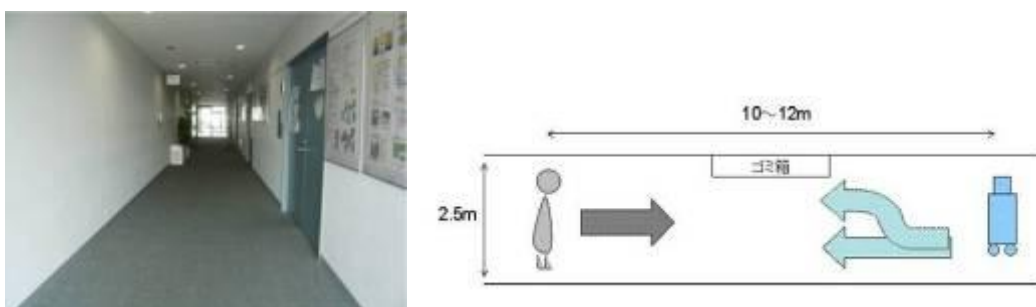


図 65 実験環境

実験参加者は20 代の学生と一般人13 人で男性が7 人、女性が6 人である。参加者にはロボットとすれ違う時の人間の振る舞いを見る実験であると事前に説明しておいた。

この環境で以下の実験条件にしたがって MKR003 は行動する。

条件1 MKR003 は意図表示を行い、障害物回避によりすれ違う

条件2 MKR003 は意図表示をせず、障害物回避によりすれ違う

条件3 MKR003 は意図表示を行い、すれ違い時に停止する

条件4 MKR003 は意図表示をせず、すれ違い時に停止する



図 66 人とロボットのすれ違いシーン

実験条件に置ける意図表示は、図 66の右写真の通り、ロボットが進行方向に腕を差し出す形で行う。また、すれ違いの際にロボットの頭は、人の方向へ向けジェスチャが移動の意図を表している事を明示的に伝える。

また、すれ違い実験終了後にロボットの印象をアンケートによって調査した。

【すれ違い実験 実験結果】

意図表示ありの条件で有意差のある評価項目が確認されたことから、すれ違い時の意図表示が有効であると言える。また意図表示がある場合に、有意差は見られなかったものの驚きの評価項目の平均値が他の項目より高く、意図表示により人間を驚かせてしまうことがあることがわかった。驚き以外の項目では“意図表示なし・回避”条件の次に評価が悪いのは“意図表示なし・停止”条件であったのが、驚きの項目では“意図表示あり・停止”であったことから意図表示が人間を驚かせることがあるといえ、我々には想定外の結果であった。ただ、驚きの平均値が高くても他の危険や不安といった項目の平均値が低いことから、驚いてもロボットに対する悪い印象には繋がらないといえる。

すれ違い時に停止する条件において不快さ・怖さ・不安の評価項目で有意差が確認されたことから、ロボットはすれ違い時には停止する方が人間は安心することがわかった。

4条件の中で最も評価が悪い条件は意図表示なし・回避の条件であった。回避条件の評価が悪かったことについては、ロボットのセンサーの反応が悪く回避がギリギリになってしまったり他の障害物に反応して逆に人間に近づくような動作になってしまったことが影響していると考えられる。

また、意図表示ありと意図表示なしの平均値の差が停止条件よりも回避条件の方が高かった、つまり人間にとってより危険・不安な走行軌跡の方が意図表示による評価の改善幅が大きかったことから、人間にとって不安や危険の大きい動きでも意図表示があればかなり改善されるものと言える。このことから意図表示の効果の大きさがわかる。

【アクティブセーフティ技術のまとめ】

本研究では、ロボットの安全システムデザインの一環として、人とロボットのすれ違いにおけるアクティブセーフティについて検討を行い、以下のロボットの情報表現の重要性が明らかになった。

I. 発話とジェスチャーによる意図表示で、人間はロボットとすれ違いやすくなる

- ロボットに対する主観的評価が高くなる
- ロボットの経路が予測しやすくなる
- 意図表示のタイミングは人間との距離が3m 以上がよい

II. 人間とすれ違うときには、ロボットは通路の一方に寄って停止する軌跡がよい

以上のロボットの身体による情報表現は、搬送用ロボットが人と共存する環境で作業を行うさいに重要な機能である。今回の研究では、人とロボットのすれ違いにおけるアクティブセーフティを検討したが、他の状況においても情報表現によって達成されるアクティブセーフティ技術があると考えられ、今後取り組むべき重要な課題だと思われる。

(2) - ⑦安全性・耐故障性技術の開発

電流指令値をモニタリングすることで、腕に過負荷が生じた場合に腕のモータへの供給電力を遮断し、腕が脱力する安全制御を導入した。

＜実証ロボットの開発及び実証試験＞

(4) 実証実験の実施

(4) - ① 搬送デモンストレーションを一定期間実施

2008年4月より、京都第二赤十字病院様（京都市上京区）にて毎月1回、定期的に院内走行実験を実施し、医師、看護師、病院職員及び患者の声をフィードバックした開発を進めてきた。

【2008年度実証試験内容】

- 院内特有の障害物に対するセンサ類の検知性能の検証
- 安全な障害物回避のための実証試験



図 67 院内走行実験の様子（京都第二赤十字病院様）

【2009年度実証試験内容】

- エレベータを利用した複数フロア間の上下移動の確認
- 研究員による薬剤搬送デモ及びロボットによる代替搬送に対する利便性向上についてのアンケートの実施



図 68 エレベータ乗降実験の様子（京都第二赤十字病院様）

(4) - ② 2箇所以上の実証試験場所の確保

2010年度からは京都第二赤十字病院様以外にも複数病院（大阪大学歯学部附属病院様、京都大学医学部附属病院様他）でも実証実験を実施した。

【2010年度実証試験内容】

- ロボットによる薬剤搬送（夜間）
- 複数病院での院内走行実験及び運用方法検討



図 69 薬剤搬送実験
（京都第二赤十字病院様）



図 70 院内走行実験
（大阪大学歯学部附属病院様）



図 71 院内走行実験
（京都大学医学部附属病院様）

(4) - ③ 院内搬送デモンストレーション用ロボット製作

院内搬送デモンストレーションを実施するため、腹部に搬送物を搭載可能な筐体格納方式搬送ロボットを開発した。



(a) 正面



(b) 側面



(c) 背面

図 72 ロボット外観



図 73 荷物スペース

主な仕様

ロボット形状	550mm×550mm×1200mm、重量 約 85Kg
走行速度	最高速度 1.1m/s、運用時 0.5m/sec 以下
荷室寸法	320 mm×420mm×250mm
可搬重量	15kg 以下
走行車輪	独立懸架サスペンション付オムニホイールによる 4 輪駆動方式 (段差対応 1cm 以下、隙間対応 3cm 以下)
腕自由度	各腕 3 自由度、頭部 2 自由度 (パン・チルト)
連続稼働時間	2 時間 (充電時間 2 時間)

自律搬送デモシステムのシステム構成図およびソフトウェア構成図を図 74、図 75に示す。

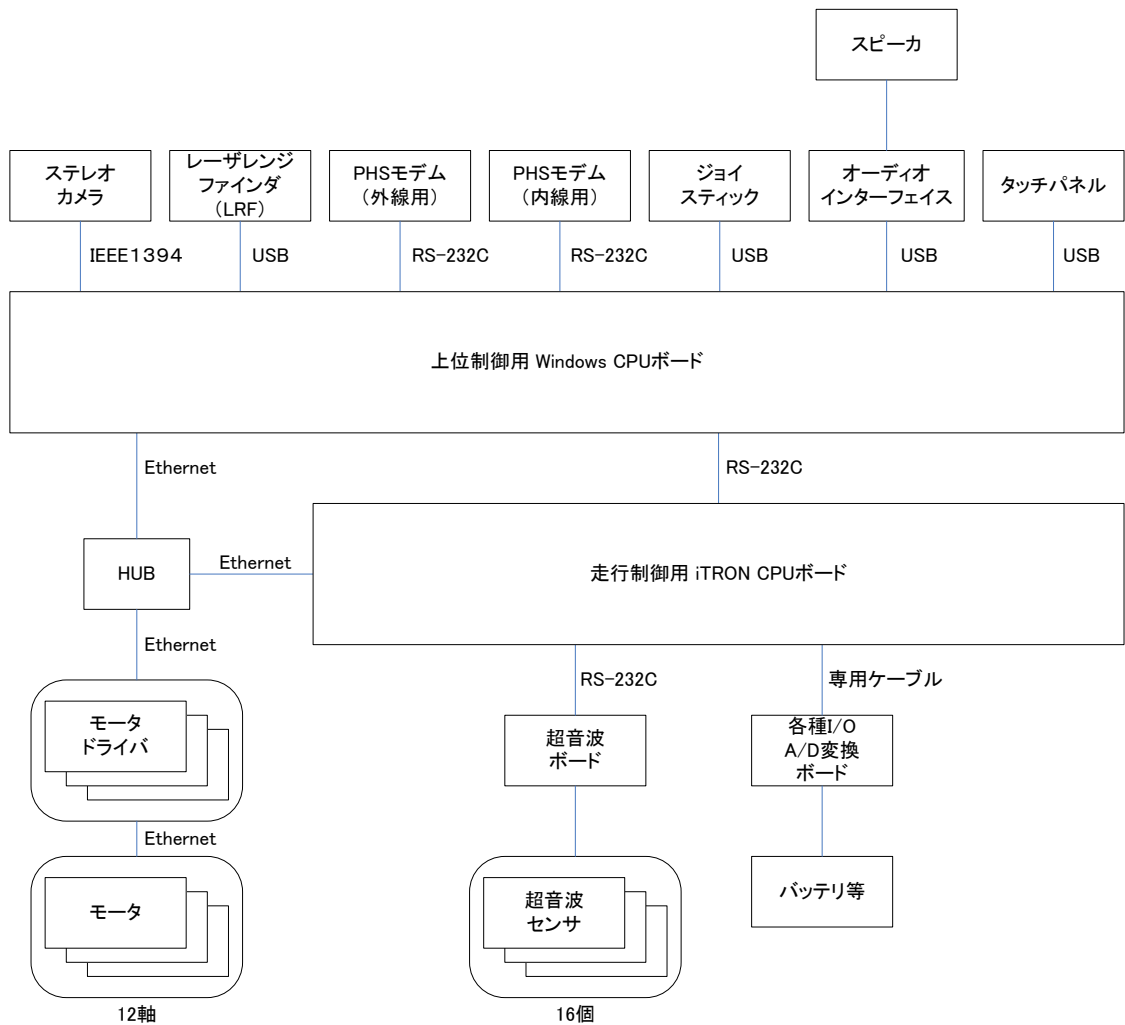


図 74 自律搬送デモシステム システム構成図

モータ等のハードウェア制御（走行制御等）に関連するソフトウェアは、リアルタイム性が要求されるため、リアルタイム OS である iTRON を搭載した CPU ボード上において実装する一方、その他のソフトウェアは、デバイスドライバや GUI 用ライブラリ等のソフトウェアコンポーネントが充実している Windows 搭載 CPU ボード上で実装する構成とした。

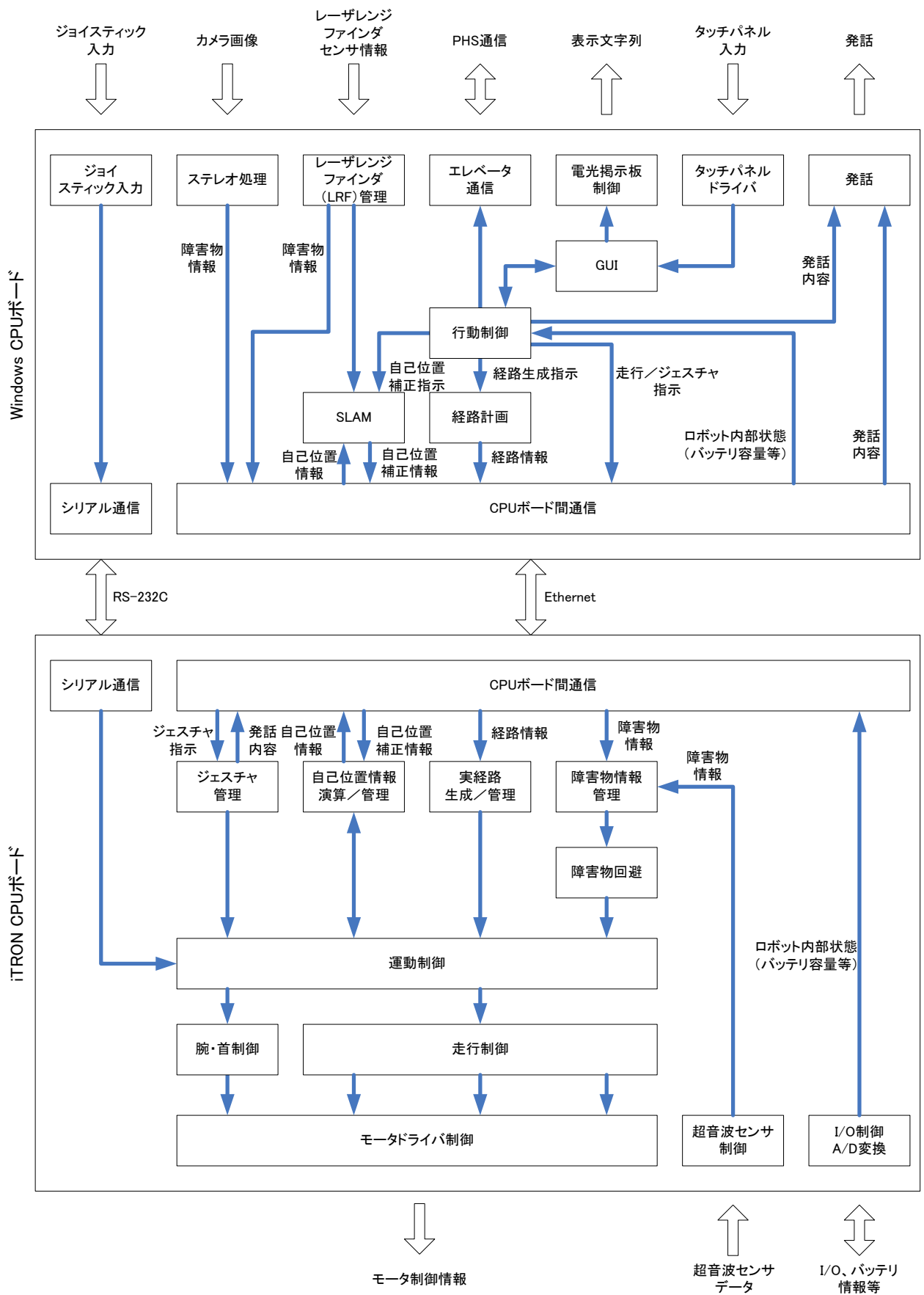


図 75 自律搬送デモシステム ソフトウェア構成

(4) - ④国内外マーケティングの実施

国内外マーケティングを実施し、実用化及び事業化に向けた検討を実施した。

表 7 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳)

年度	特許出願			論文		その他外部 発表 (プレス 発表等)
	国内	外国	PCT 出願	査読付	その他	
H18FY	3	1	0	0	3	0
H19FY	1	0	0	0	6	0
H20FY	13	9	0	3	2	3
H21FY	4	9	4	5	5	1
H22FY	4	0	4	5	5	4

3) 成果の意義

本プロジェクトにより開発したロボット搬送システムの適用先である病院においては、IT化の流れによりペーパーレス化が進む一方で、医薬品、検体、医療資材等、物の流れは依然として残り、それら物流の効率化が大きな課題となっている。また、これまでの院内物流の担い手として看護師が主であった施設においても、近年、看護師の人材確保が難しく、看護師本来の業務以外の付帯業務を如何に軽減するかが課題であり、搬送設備導入、搬送の効率化に対する要望が強い。一方で病院経営は保険料見直し等により、年々厳しくなっており、病院設備の建替え等には大規模な投資ができるものの、既設病院への大型投資は減少している状況にあり、本プロジェクトで開発されたロボット搬送システムに寄せる期待は大きい。

従来、院内の搬送方式として、気送管による病院内搬送方式があるが、気送子に入れて搬送できる搬送物の容量、重量に制約があり、大きなもの、重たいものの搬送はレール等の施工を必要とする中型搬送システムや磁気テープ誘導方式の無人搬送車を用いたシステムでしか対応できなかった。これら中型搬送システムは施設側に大きな施工を必要とし、既設病院への導入は大変困難であるというのが現状であった。したがって、設備側への施工負担を最小限に、低いコストで既設病院へも導入可能な中型搬送システムは市場からも大いに期待されている状況である。

今回開発を進めているロボットに搭載されているナビゲーションシステムは、設備側に特別な誘導ガイドを設置することなく、自律移動を実現するもので、これまでの方式では導入が難しかった施設へも自律移動台車を展開することが可能となる。また、設置コストの抑制やレイアウト変更への柔軟な対応など、新しいナビゲーションシステムとして、病院以外の施設へも広く製品展開が期待できるものである。

4) 成果の普及

オフィスや施設等の人との併存環境下において、自由に動き回れるロボットを実現する自律移動技術が構築されることにより、様々な場所へのサービスロボット導入が期待される。特に病院においては、IT化の流れによりペーパーレス化が進む一方で、医薬品、検体、医療資材等、物の流れは依然として残り、それら物流の効率化が大きな課題となっている。また、これまでの院内物流の担い手として看護師が主であった施設においても、近年、看護師の人材確保が難しく、看護師本来の業務以外の付帯業務を如何に軽減するかが課題であり、搬送設備導入、搬送の効率化に対する要望が強い。本プロジェクトでは、このような病院内での搬送ニーズをターゲットに、医療品（薬剤・点滴等）／医療資材／事務用品等、多様な搬送物に柔軟に対応可能、かつ、人と同程度の搬送速度を実現する病院内搬送システムを提供するものである。

本システムでは、ワゴンへの搬送物の積み下ろしは自動化せず、人によるものとしているが、従来、人が物品を搬送する際においても、受け渡し側及び受け取り側には必ず人が居り、基本的には手渡しにて物品の受け渡しが行われており、本ロボットシステム導入により、看護師及び病院職員の手間が増えるというものではない。引き続き、ユーザーヒアリングを重ね、使いやすい搬送ロボットの形態について、更に検討を進めていく予定である。

5) 実用化・事業化の見通し

事業化に向けての背景

<市場>

オフィスや施設等の人との併存環境下において、自由に動き回れるロボットを実現する自律移動技術が構築されることにより、様々な場所へのサービスロボット導入が期待される。特に病院においては、IT化の流れによりペーパーレス化が進む一方で、医薬品、検体、医療資材等、物の流れは依然として残り、それら物流の効率化が大きな課題となっている。また、これまでの院内物流の担い手として看護師が主であった施設においても、近年、看護師の人材確保が難しく、看護師本来の業務以外の付帯業務を如何に軽減するかが課題であり、搬送設備導入、搬送の効率化に対する要望が強い。一方で病院経営は保険料見直し等により、年々厳しくなっており、病院設備の建替え等には大規模な投資ができるものの、既設病院への大型投資は減少している状況にある。

<搬送システムに対する市場の要望>

従来、院内の搬送方式として、気送管による病院内搬送方式があるが、気送子に入れて搬送できる搬送物の容量、重量に制約があり、大きなもの、重たいものの搬送はレール等の施工を必要とする中型搬送システムや磁気テープ誘導方式の無人搬送車を用いたシステムでしか対応できなかった。これら中型搬送システムは施設側に大きな施工を必要とし、既設病院への導入は大変困難であるというのが現状であった。したがって、設備側への施工負担を最小限に、低いコストで既設病院へも導入可能な中型搬送システムは市場からも大いに期待されている状況である。

<市場に対する既存搬送ロボットの状況>

病院という環境で活動する上で、人との親和性が大変重要であることもユーザーヒヤリング(複数病院関係者)から明らかになってきた。

<搬送ロボットに対する市場の懸念>

病院内における搬送ニーズは多岐に渡り、搬送対象物が個人情報を含む場合や医薬品等、高いセキュリティを確保する必要がある。また、衛生面でも特段の配慮が必要といった病院内搬送特有の課題があり、人が現在行っている搬送作業をそのままロボットに置き換えることは大変難しい。また、ロボットの活動範囲を患者や老人、子供を含む不特定多数の通行人が行き来する空間に広げた場合、受容できるリスクは低いレベルに抑えることが必須であり、通行人とロボットの動線交錯が大きな課題となる。その結果、安全性確保と効率(搬送スピード)のトレードオフが搬送ロボット導入の高いハードルとなっている。

事業化シナリオ

<提供するサービス内容>

本プロジェクトでは、病院内での搬送ニーズをターゲットに、医療品（薬剤・点滴等）／医療資材／事務用品等、多様な搬送物に柔軟に対応可能、かつ、人と同程度の搬送速度を実現する病院内搬送システムを提供するものである。本システムでは、緊急性が低いものの、搬送頻度が多いもの、重量や嵩が大きく、一度の大量搬送が困難なものを搬送物として想定し、定期的に巡回搬送することにより、院内における新しい搬送システムを提案するものである。

本システムでは搬送ロボットの走行エリアとして、院内スタッフ専用エリア、もしくは患者や見舞客の通行が少ない準スタッフエリアを想定している。また、搬送形態としては定時巡回搬送方式とし、病院内にあらかじめ設定した搬送ポイントを一定時間ごとに巡回するものである。

本システムでは搬送ロボットがワゴンを牽引する方式を採用することにより、ロボット本体を変更することなく、適切にワゴンを設計することにより、多様な搬送物に対して柔軟に対応が可能である。

本システムでは、ワゴンへの搬送物の積み下ろしは自動化せず、人によるものとしているが、従来、人が物品を搬送する際においても、受け渡し側及び受け取り側には必ず人が居り、基本的には手渡しにて物品の受け渡しが行われており、本ロボットシステム導入により、看護師及び病院職員の手間が増えるというものではない。更にユーザーヒアリングを重ね、使いやすい搬送ロボットの形態について、検討を進めていく。

また、院内スタッフエリアにおいては、医師、看護師、職員との動線交錯が必然であり、円滑な障害物回避を実現すると共に、同じ職場で働く人間のパートナーとして、愛着を持って接せられる外観、しぐさを備え、職場の雰囲気づくりにも寄与するものを本システムに望む声も多い。したがって、搬送システムとしての機能に加えて、病院という特殊な環境の中で受け入れられるヒューマン・ロボット・インタフェースを備えているところに本システムの特徴がある。

また、本システムでは、導入時の設備側への施工負担を最小限に抑える自己位置認識システムを搭載するとともに、搬送ロボットを動産として扱うことにより、従来の搬送設備では困難であったリース及びレンタル販売を可能とし、導入にかかる初期コストを低く抑えることの出来る搬送システムを実現するものである。

<実施への適用シミュレーション>

ロボット巡回搬送システムの有用性を検証するため、現在検討中の運用シナリオに基づき、実際の病院への適用シミュレーションを実施し、当初想定していた搬送能力を実現できることを確認した。

<本システム拡販に向けて>

当初は管理された空間である院内スタッフ専用エリアに走行範囲を限定し、本システムの稼働実績を積み上げていくことにより、人とロボットの動線交錯を含む搬送システムに対する市場の懸念の払拭を図る。次ステップとして、院内スタッフ専用エリアでの稼働実績を元に、準スタッフエリアへと適用範囲の拡大を図り、最終的には、一般患者、見舞客の行きかうエリアへの導入も目指していきたい。

【研究発表・講演】

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2006年12月14日	第7回計測自動制御学会 システムインテグレーション 部門講演会講演論文集	Development of Elastic Tactile Sensor for Underlying Hard Tissue Detection	Zhang、Yuhua、 Maeno、Takashi
2007年 1月 11-13日	10th International Workshop on Innovative Architecture for Future Generation High- Performance Processors and Systems (IWIA'07)	Responsive Link for Distributed Real-Time Processing	N.Yamasaki
2007年 3月6日	情報処理学会第69回全国大会 CD-ROM(2R-2)	映像を投影可能な案内ロボット	長谷川高輔、 石井健太郎、今井倫 太
2007年 9月13日	第25回日本ロボット学会 学術講演会	行動の時間スケールを考慮した 自律移動ロボットの階層型行動制 御手法	高橋正樹、 多田欣雅、吉田和 夫
2008年 3月11日	電気学会 産業計測制御研究会	冗長移動マニピュレータを用い た車椅子押し作業のための制御法	渡辺勇人、村上俊 之
2008年 3月15日	情報処理学会第70回全国大会 CD-ROM	スムーズに人間と擦れ違うため のロボットインタラクション	鮫島萌、石井健太郎、 今井倫太
2008年 3月27日	電子情報通信学会技術研究報告 ：組込技術とネットワークに関する ワークショップ	高精度なロボット制御のための 時間管理機構の設計と実装	上山真生、水頭一壽、 山崎信行
2008年 3月27日	電子情報通信学会技術研究報告 ：組込技術とネットワークに関する ワークショップ	チップマルチプロセッサ用の優 先度付きNon-Uniformキャッシュア ーキテクチャ	坂本伸昭、山崎信行
2008年 3月27日	電子情報通信学会技術研究報告 ：組込技術とネットワークに関する ワークショップ	RTミドルウェア用の優先度によ るオブジェクト管理機構	千代浩之、武田瑛、 上山真生、加藤真平 、山崎信行
2008年 4月21日	第21回 回路とシステム軽井沢 ワークショップ	分散リアルタイム制御用 SoC: Responsive Multithreaded Processor	山崎信行(招待講演)
2008年 8月3日	Proceedings of the IEEE Intern ational Symposium on RO-MAN 2008	Improvement of Position Estim ation of the Ultrasonic 3D Tag S ystem	Toshio Hori and Yoshifumi Nishida
2008年10月	Proceedings of ISR 2008 (the 39th International Symposium on Robotics)	K-TAVO: A Robot Behaviour Management Module to Urge a Human to avoid	Moe Sameshima、 Kentaro Ishii、 Ren Ohmura、 Michita Imai
2008年11月	日本機械学会論文集C編、 074巻747号	自律全方位移動ロボットのマル チ時間スケール型行動制御手法	高橋正樹、多田欣雅、 鈴木崇文、吉田和夫

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2008年 9月13日	第26回日本ロボット学会 学術講演会	自律全方位移動ロボットのマルチ時間スケール型行動制御手法の実験的検証	鈴木崇文、 高橋正樹、吉田和夫
2009年 7月2-5日	6th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO2009)	Multi Scale Moving Control Method for Autonomous Omnidirectional Mobile Robot	Masaki Takahashi and Takafumi Suzuki
2009年 8月 24-26日	In Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications	Periodic and Aperiodic Communication Techniques for Responsive Link	Shinpei Kato、 Yuji Fujita、 Nobuyuki Yamasaki
2009年10月	日本ロボット学会誌 Vol27、 No.8	自律全方位牽引式 搬送ロボットの開発	鈴木崇文、 高橋正樹、吉田和夫
2009年11月	日本ロボット学会誌 Vol28、 No.10	病院内ロボット搬送システムの開発	今井倫太、高橋正樹 森口智規、岡田卓也 湊雄一朗、中野剛、 田中昌司、下本英生 堀俊夫
2009年11月 21-22日	第52回自動制御連合講演会	自律全方位移動ロボットの並進と回転の同時制御によるロボットサイズを考慮した障害物回避	鈴木崇文、高橋正樹
2009年12月 18-22日	IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (Robio2009)	A Mobile Robot for Transport Applications in Hospital Domain with Safe Human Detection Algorithm	Masaki Takahashi、 Takafumi Suzuki、 Francesco Cinquegrani Rosario Sorbello and Enrico Pagello
2009年12月26日	第10回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会SI2009	案内ロボットにおける自己位置を用いた発話コンテンツに関する研究	門田 圭至郎、 鮫島 萌、今井 倫太
2010年 3月8日	電気学会産業計測制御研究会	高追従性と安定性を考慮した移動マニピュレータによる押し作業のための一制御法	藤本祐介、村上俊之
2010年 3月11日	情報処理学会創立50周年記念 (第72回) 全国大会	文脈を考慮したロボットとの対話に関する研究	松元 崇裕、大村廉 今井 倫太
2010年 3月24日	IEEE 11 th International Workshop on Advanced Motion Control	A Realization of Wheelchair Pushing Operation Considering High Tracking Performance and Ride Quality Improvement by Mobile Manipulator	Yusuke Fujimoto and Toshiyuki Murakami

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2010年 6月 13-16日	ロボティクス・メカトロニクス 講演会2010	機能別モジュールロボットの重心位置制御のための腰モジュールの設計と実装	井上貴公、新原諒子、 今村元、小島佑太、 山崎信行
2010年 6月 13-16日	ロボティクス・メカトロニクス 講演会2010	レーザレンジファインダと超音波センサを用いたFastSLAM	今村元、小島佑太、 山崎信行
2010年 6月 13-16日	ロボティクス・メカトロニクス 講演会2010	移動障害物を回避するための軌道生成アルゴリズム	新原諒子、井上貴公、 今村元、小島佑太、 山崎信行
2010年 7月	Journal of Robotics and Autonomous Systems Vol.58、 Issue 7	Developing a mobile robot for transport applications in the hospital domain	Masaki Takahashi、 Takafumi Suzuki、 Toshiki Moriguchi、 Hideo Shitamoto and Kazuo Yoshida
2010年 9月 22-24日	第28回日本ロボット学会 学術講演会	自律全方位移動ロボットの回避方向を考慮した行動制御手法の実験的検証	松村哲哉、鈴木崇文、 高橋正樹
2010年 9月 22-24日	第28回日本ロボット学会 学術講演会	自律全方位移動ロボットの並進と回転の同時制御によるロボットサイズを考慮した障害物回避の実験的検証	鈴木崇文、高橋正樹
2010年11月	The 36th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON2010)	An Improvement Method of Compliance Control in Pushing Operation by Mobile Manipulator	Yusuke Fujimoto and Toshiyuki Murakami
2010年11月	The 8th edition of France-Japan Congress on Mechatronics (Mecatronics2010-Yokohama)	Step Climbing Control in Pushing Operation by Mobile Manipulator	Yusuke Fujimoto and Toshiyuki Murakami
2010年12月	日本機械学会論文集C編 Vol. 76、 No. 772	自律全方位移動ロボットの並進と回転の同時制御によるロボットサイズを考慮した障害物回避	鈴木崇文、高橋正樹

【特許】

○国内出願

出願日	出願番号	出願に係る特許等の標題	出願人
2007年 9月26日	2007-249523	指示区画検知装置	学校法人 慶應義塾
2008年 5月28日	2008-139234	自律移動体及びその移動制御方法	村田機械株式会社 学校法人 慶應義塾
2008年 4月23日	2008-139236	自律移動体及びその移動制御方法	村田機械株式会社 学校法人 慶應義塾
2008年 8月22日	2008-214636	自律移動装置	村田機械株式会社
2008年 8月28日	2008-220489	自律移動装置	村田機械株式会社
2008年 9月 4日	2008-227008	自律移動装置	村田機械株式会社
2008年 9月 3日	2008-225881	経路計画方法、経路計画装置、及び自律移動装置	村田機械株式会社
2008年 9月 9日	2008-231519	経路計画装置及び自律移動装置	村田機械株式会社
2008年 9月16日	2008-237196	環境地区修正装置及び自律移動装置	村田機械株式会社
2008年10月 1日	2008-256663	自律移動装置	村田機械株式会社
2008年10月 6日	2008-259402	自律移動装置	村田機械株式会社
2008年10月 8日	2008-261821	自律移動体及び自律移動体の移動制御方法	村田機械株式会社 学校法人 慶應義塾
2008年11月18日	2008-294895	自律移動装置	村田機械株式会社
2008年11月19日	2008-296131	自律移動装置	村田機械株式会社
2009年11月20日	2009-264574	自律移動体とその制御方法	村田機械株式会社 学校法人 慶應義塾
2009年11月20日	2009-264575	自律移動体とその制御方法	村田機械株式会社 学校法人 慶應義塾
2009年12月 2日	2009-274519	自律移動装置	村田機械株式会社
2009年12月17日	2009-286846	自律移動装置	村田機械株式会社
2010年 7月 9日	2010-157231	自律走行移動システム	村田機械株式会社
2010年 7月 9日	2010-157232	自律走行移動システム	村田機械株式会社
2010年 7月13日	2010-159100	自律移動体	村田機械株式会社
2010年 7月13日	2010-159103	自律移動体	村田機械株式会社

○韓国出願

出願日	出願番号	出願に係る特許等の標題	出願人
2008年 9月18日	2008-7022761	移動体位置の推定装置と推定方法及び推定プログラム	村田機械株式会社
2008年12月 3日	2008-7029595	自走機器の走行装置	村田機械株式会社
2008年12月 4日	2008-7029710	ロボット	村田機械株式会社
2009年 1月30日	2009-7417	自律移動装置	村田機械株式会社
2009年 2月 4日	2009-9032	自律移動装置	村田機械株式会社
2009年 5月28日	2009-45153	自律移動体及びその制御方法	村田機械株式会社

○米国出願

出願日	出願番号	出願に係る特許等の標題	出願人
2008年 9月29日	12/295、088	移動体位置の推定装置と推定方法及び推定プログラム	村田機械株式会社
2008年11月 7日	12/299、916	自走機器の走行装置	村田機械株式会社
2008年11月14日	12/300、954	ロボット	村田機械株式会社
2009年 5月26日	12/471、689	AUTONOMOUS MOVING BODY AND METHOD FOR CONTROLLING MOVEMENT THEREOF	村田機械株式会社 学校法人 慶應義塾
2009年 5月29日	12/474、362	AUTONOMOUS MOVING APPARATUS	村田機械株式会社
2009年 7月21日	12/506、366	AUTONOMOUS MOVING APPARATUS	村田機械株式会社

○欧州出願

出願日	出願番号	出願に係る特許等の標題	出願人
2008年 9月10日	07737500.4	移動体位置の推定装置と推定方法及び推定プログラム	村田機械株式会社
2008年11月13日	07706896.3	自走機器の走行装置	村田機械株式会社
2008年11月25日	07713623.2	ロボット	村田機械株式会社
2009年 5月27日	09161194.7	AUTONOMOUS MOVING BODY AND METHOD FOR CONTROLLING MOVEMENT THEREOF	村田機械株式会社 学校法人 慶應義塾
2009年 6月12日	09007790.0	AUTONOMOUS MOVING APPARATUS	村田機械株式会社
2009年 6月19日	09008090.4	AUTONOMOUS MOVING APPARATUS	村田機械株式会社

○PCT 出願

出願日	出願番号	出願に係る特許等の標題	出願人
2009年 8月19日	PCT/JP2009/003957	自律移動装置	村田機械株式会社
2009年 8月24日	PCT/JP2009/004052	経路計画方法、経路計画装置、及び自律移動装置	村田機械株式会社
2009年 8月25日	PCT/JP2009/004084	自律移動装置	村田機械株式会社
2009年 8月25日	PCT/JP2009/004079	環境地図修正装置及び自律移動装置	村田機械株式会社
2010年10月22日	PCT/JP2010/006259	自律移動装置	村田機械株式会社
2010年10月22日	PCT/JP2010/006265	自律移動装置	村田機械株式会社
2010年11月10日	PCT/JP2010/002374	自律移動体とその制御方法	村田機械株式会社 学校法人 慶應義塾
2010年11月10日	PCT/JP2010/002375	自律移動体とその制御方法	村田機械株式会社 学校法人 慶應義塾

○台湾出願

出願日	出願番号	出願に係る特許等の標題	出願人
2007年 2月12日	TW/96105098	自走機器の走行装置	村田機械株式会社

【外部発表等】

見本市名	場所	出展期間
ROBOJAPAN	パシフィコ横浜	2008年10月11日～13日
国際次世代ロボットフェア	インテックス大阪	2008年11月26日～28日
国際ロボット展	東京ビックサイト	2009年11月25日～28日
ヨコハマ・ヒューマン&テクノランド2010	パシフィコ横浜	2010年 7月30日～31日
国際物流総合展	東京ビックサイト	2010年 9月14日～17日



図 76 ROBOJAPAN



図 77 国際次世代ロボットフェア



図 24 国際ロボット展 NEDO ブース



図 25 ヨコハマ・ヒューマン&テクノランド 2010



図 26 国際物流総合展

	メディア名	掲載及び放送日
新聞掲載	京都新聞夕刊	2008年 9月2日付
	日経新聞夕刊	2008年10月13日付
	共同通信社	2008年11月20日配信
	朝日新聞（大阪）、読売新聞（大阪）、京都新聞	2008年12月20日付
	産経新聞、読売新聞、フジサンケイビジネスアイ	2009年 2月14日付
	日刊工業新聞、北海道新聞	2009年 2月16日付
	化学工業日報	2009年 2月24日付
	産経新聞	2009年 8月6日付
	京都新聞、中日新聞、東京新聞、毎日新聞(京都版) 朝日新聞(京都版)	2009年12月19日付
	共同通信社（全国22紙掲載）	2010年 1月1日配信
	京都新聞	2010年12月18日付
	日本経済新聞、京都新聞	2011年 3月11日付
	日刊工業新聞	2011年 3月15日付
	雑誌・ フリーペーパ ー	メトロガイド11月号（東京メトロ）
日本工作機械工業会『工作機械』No.186（3月号）		2010年 3月発行
京都商工会議所『京Business Review』3・4月号		2010年 3月発行
テレビ	KATケーブルテレビ	2008年10月6日 『KANSAIニュース』放送
	フジテレビ	2008年11月25日 『FNNスピークニュース』放送
	読売テレビ	2009年 1月11日 『大阪ほんわかテレビ』放送
	九州朝日放送	2009年 2月14日『ロボロボ王国 日本 夢のロボット大集合』放送
	KBS京都	2009年12月19日『京biz』放送
	NHK京都	2011年 2月18日『ニュース610 京いちにち』放送
WEB	Yahoo！ニュース	2008年 9月 1日掲載
	Tech!On	2009年 2月13日掲載
	Robonable(ロボナブル)、Robot Watch	2009年 2月16日掲載
	Robonable(ロボナブル)	2009年 4月23日掲載
	@niftyニュース、Yahoo！ニュース	2009年12月18日掲載
	Robonable(ロボナブル)	2010年 9月18日掲載
	Robonable(ロボナブル)	2010年12月16日掲載
	Yahoo！ニュース他	2010年12月20日掲載