

3.3.1 被災建造物内移動 RT システム

Ⅲ. 研究開発成果について

2. 研究開発項目毎の成果

2.3 被災建造物内移動 RT システム（特殊環境用ロボット分野）

2.3.1 閉鎖空間内高速走行探査群ロボット【特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構，国立大学法人東北大学，独立行政法人産業技術総合研究所，独立行政法人情報通信研究機構，バンドー化学株式会社，株式会社シンクチューブ，ビー・エル・オートテック株式会社，株式会社ハイパーウェブ】

(1) 研究の概要

（最終目標）

複数の遠隔操縦型ロボットが、階段やドアのある建物内でオリエンテーリングを行い、決められたエリアを人間よりも速く、迅速に移動する。場面としては、地下鉄駅、地下街、空港、高層ビル（オフィス、大規模店舗、劇場）で、非常に混雑しておらず、通常の営業時間としては比較的散らかった程度に障害物が散在し、人間が歩行している状況で、ドア（施錠していない丸型またはレバー型ノブ付きドア）を通り抜け、照明条件がミッション遂行まで不明であるケースを想定する。既存インフラの使用を前提とせず、必要な環境は自分で構築する。建物のGISマップをもとにして、決められた地点とそこに至るまでの映像情報等を迅速に取得できることを実証する。また、訓練所・地下街・建物内などで3回以上の実証試験を行い、最終的にはプロジェクト終了後1年以内に受注生産が可能な体制を構築する。

（成果）

上記目標は100%達成された。

閉鎖災害空間における移動技術の開発，に関しては，下記の成果を上げた。

- ・高速移動が可能で，瓦礫環境での走破性が高く，階段途中での旋回すら可能な，重量 30kg 以下の小型軽量ロボット：Quince（クインス），Kenaf（ケナフ）
- ・ドア開けが可能で，階段等がある屋内環境で探索可能な，重量 30kg 以下の小型軽量作業用ロボット：UMRS（ユーエムアールエス）
- ・知能やヒューマンインタフェースの共同開発を行いやすいアーキテクチャ
- ・耐衝撃性・高効率の伝動変速機構：平ベルトアクチュエータ
- ・机上訓練のためのダイナミクスシミュレータ

遠隔操作のための知能とヒューマンインタフェース，に関しては，下記の成果を上げた。

- ・瓦礫を注意深く迅速に移動するに適したマニュアル遠隔操縦インタフェース
- ・オペレータの操縦を楽にするための不整地半自律走破技術を開発した
- ・複雑な場所の状況確認のための，3D環境計測・地図構築を実現した。
- ・半自律行動を実現するための，高精度3Dオドメトリの開発
- ・Disaster City，兵庫県広域防災センター，E-defense 木造倒壊建物，神戸市地下街さんちか，仙台市地下鉄，RoboCupRescue 他で有効性を検証した

- ・ロボカップ世界大会 2007 Atlanta, 2009 Graz 運動性能部門で世界優勝

遠隔操作複数映像の地下街等における 700m 通信技術, に関しては, 下記の成果を上げた.

- ・地下街実証試験, 消防訓練塔実験, 等により, 683mを, ほとんど遅れなしにカバーできることを実証した。

地下街等の測位と GIS マッピング, に関しては, 下記の成果を上げた.

- ・情報のマッピングができることを実証した。
- ・データベース上の 3次元データに対して SLAM を行い, データの位置情報を修正し, 3次元地図を構築し, 登録できることを実証した。

実用化については, 次の成果を上げた.

- ・数多くの実証試験, 消防への試験配備により, 実用化を図った。
- ・プロジェクト終了後に, 福島第一原子力発電所での調査・軽作業に使用され, 実績を上げるにより, その実用性と, 受注生産可能であることが実証された。

以上により, 目標は達成された. 図 1 に, 本プロジェクトの成果イメージを示す.



図 1 閉鎖空間内高速移動探査群ロボットの成果イメージ

(2) 成果の詳細

表 1 に基本計画に挙げられた研究開発項目毎の, 研究項目, 目的, 目標, 成果, 達成度, および, 自己評価を示す.

表 1 研究開発項目毎の達成度

課題	研究項目	目的	目標	成果	達成度	評価

① 移動技術の開発	高速不整地走破機構 Kenaf の開発	障害物の回避・乗り越え・軽量物の排除を行いながら、高速走行できる、移動技術の開発.	移動速度は迅速に歩く人間と同程度. ロボットの重量は人間が一人で運搬可能であることとし、実証試験の稼働状態にてバッテリーが連続1時間以上もつことを条件とする.	左記の目標をすべて実現した. 特に、不整地において高い走破性を実現し、 RoboCup 2007 Atlanta 大会、2009年 Graz 大会運動性能部門優勝、 Disaster City のコンクリート瓦礫の走破、などの実績を上げた.	目標を高いレベルで達成した.	◎
	ドア開け用台車 UMRS (UMRS-2007), および、マニピュレータの開発	地下街・ビルなどのドア開けが可能なシステムの開発	押し開きが可能な軽量ドアを開け、他のロボットを閉鎖空間の内部に安全に導き入れることができる.	ステージゲートデモで設けられたドアなどを押し開けることができた.	目標をほぼ達成した.	○
	耐衝撃平ベルトアクチュエータの開発	外部からの衝撃に対してロバストな2段変速伝達機構の開発	台上試験により、実用上十分な耐衝撃性を実証する.	実験により耐衝撃性を実証するとともに、高い伝達効率を実現した.	目標をほぼ達成した.	○
	実用化高速不整地走破ロボット Quince の開発	ミッションに応じたモジュール交換、走破性・防塵防水・耐久性などの高い実用性を持った高速不整地走破ロボットの開発	実証試験を繰り返し行い、消防等への試験配備により実用性を高める.	Disaster City の木材瓦礫の走破などの実績を上げ、千葉市消防局に半年間試験配備を行い、実用化を達成した. なお、本プロジェクト終了後に福島第一原発の原子炉建屋内調査に使用され、実用性が現場実証された.	目標を高いレベルで達成した.	◎
	実用化ドア開けロボット UMRS-2009 の開発	軽量化して機動性を高め、防塵防水・耐久性などの高い実用性を持ったドア開	実証試験を繰り返し行い、消防等への試験配備により実用性を高める.	消防訓練施設の防火扉を開けられることを実証し、Disaster City における NIST/ASTM 評価試験で高	目標を達成した.	◎

		けロボットの開発		い性能を示し、神戸市消防局に試験配備を行い、実用化を達成した。		
	UMRS-2009用耐衝撃平ベルトアクチュエータ	小型軽量の耐衝撃性の高い伝達機構の開発	減速比固定化により小型軽量化を図り、ロボット搭載を容易にする。	台上試験およびロボット搭載による実機評価で適合性および耐久性を確認	目標を達成した	◎
② 遠隔操作技術	Kenafのジョイスティックによる遠隔操作	瓦礫上や狭い場所でスムーズに遠隔操作を行う	操縦が困難な場所でも、機構の性能を十分に活かした走行を可能にする。	RoboCup 2007 Atlanta 大会, 2009 Graz 大会運動性能部門優勝, Disaster City の瓦礫走破などの実績を挙げた。	目標を達成した。	◎
	通過ポイント方式によるKenafの遠隔操作	オペレータの介在を最小限に抑え、複数のロボットの操縦を可能にし、通信遅れに対するロバスト性を確保する。	オペレータの介在を少なくし、長距離の遠隔操縦ができるようにする。	ステージゲートデモで地下街を走行し、その有効性を示した。その後、精度の向上、携帯型操縦端末への適用を行った。	目標をほぼ達成した。	○
	UMRS-2009のポータブル遠隔操縦卓	携帯可能で操作性が高い、実用型遠隔操作卓の開発	電源・耐衝撃性・防塵防水性能などの向上。操作性の高いヒューマンインタフェース、マップナビゲーションの実現。	様々な実証試験にて、その使いやすさと実用性を示した。	目標を達成した	◎
	3次元操縦インタフェース	狭隘箇所における遠隔操作を容易にする	狭隘箇所の形状とその中のロボットの位置形状を操縦者が十分に認識できるようにする	Disaster City で操縦における有効性を実証した。本プロジェクト終了後に、東北大学の被災建物の調査で有効性を示した。	十分に目標を達成した	◎
	半自律不整地踏破	階段や不整地における遠隔操作	階段や不整地において、操縦者の詳	オプション搭載なしの Quince で 30deg	目標を達成し	◎

		の支援	細な運動指令なしで、走破することを可能にする。	程度の階段を半自律走破でき、オプション測域センサ搭載でコンクリート不整地を半自律走破できることを、Disaster City 等で示した。	た	
	ロボットシミュレータの開発	(半)自律機能の開発、及び、ファーストレスポンスの訓練を仮想的に行う	シミュレータを開発し、計算機内でKenafが不整地走行できる環境を整える。	ステージゲートデモで、計算機内で実機とほぼ同じように仮想的な遠隔操縦ができることを示した。	目標を達成した。	◎
③	有線・無線ハイブリッドアドホックネットワーク	地下街やビル内にインフラを使わないでネットワークによる遠隔操作を可能にする。	距離 700 m、面的な広がり、遠隔操作に支障を来さないレイテンシー、複数台のロボットからの映像情報。	複数台のロボットからの映像や3次元計測データを収集し、遠隔操縦が可能であることを距離 683m の地下街で検証。10階建てビルの階段を1階から10階まで同様に走行検証をおこなった。ローミング時の遅延短縮も実現し遠隔操縦に障害を生じない通信性能を実現。	ほぼ目標を達成した	○
	ケーブル敷設ロボット	有線・無線ハイブリッドアドホックネットワークのためのケーブルおよびアクセスポイントを敷設する	距離 700 m、50 m 毎にアクセスポイントを設置できることを示す。	神戸市地下街での実験で、敷設が技術的に可能であることを確認した。ケーブル敷設ロボットを開発し動作検証を行った。簡易ケーブル敷設サブシステムを開発し、2台体制での遠隔通信システムを実現した。	ほぼ目標を達成した。	○
	閉鎖空間内で	シミュレーション	地下街における複	シミュレーションに	ほぼ目	○

	の電波伝搬シミュレーション	ンにより，有線・無線ハイブリッドアドホックネットワークの配置計画を行う．	数台のロボットからの電波伝搬状況の推定を行う．	より伝搬状況の推定が可能であることを確認した．これを元に指向性可変アンテナを試作し有効性を検証した。	標を達成した	
④ GIS 技術	DaRuMa と MISP の改良	誤差の大きい複数台のロボットからの収集情報を統合する	複数座標系を許容するためにプロトコルの拡張を行う	ステージゲートデモで，情報の統合が可能であることを示した．	目標を達成した．	◎
	曖昧さ・複数座標系を許容する位置表現	誤差の大きい複数台のロボットからの収集情報を統合する	座標系の修正が可能なシステムを開発する	ステージゲートデモで，統合データによるマップ生成と，座標系の修正が可能であることを示した．	目標を達成した．	◎
	高精度2次元・3次元オドメトリ	GISおよび半自律機能に十分なオドメトリ精度を実現	スリップ推定によるクローラ機構のオドメトリの精度の工場	瓦礫地図作成，消防訓練棟での3次元地図構築などにより，その精度を示した．	目標を達成した．	◎
	3次元地図の構築と自己位置推定	ファーストレスポンスの判断に資するための3次元地図の構築とロボットの自己位置の推定	3次元情報の計測，ICPアルゴリズムによる地図構築，複数の計測地図の半自動マッチング	仙台市地下鉄や Disaster City で，3次元地図を構築できることを示した．プロジェクト終了後，東北大学の全壊建物内の3次元地図を作成し，有効性を示した．	目標を達成した．	◎
⑤ 実用性 能・試験 配備	Quince の耐久性・防塵・防水	現場実用性のための耐久性・防塵防水性能の実現	2m 落下可能，IP66.	試験の結果，性能を確認した．	ほぼ目標を達成した．	○
	Quince の試験配備	実用化のためのユーザへの試験配備	千葉県消防局への半年間の試験配備	訓練評価に基づき，改良を繰り返し，実用性を高めた．プロジェクト終了後，福島第一原発内での使用によって成果が実証された．	高いレベルで目標を達成した．	◎

UMRS-2009の 耐久性・防塵・ 防水	現場実用性のた めの耐久性・防 塵防水性能の実 現	1m 落下可能, IP64.	試験の結果, 性能を 確認した.	ほぼ目 標を達 成した.	○
UMRS-2009の 試験配備	実用化のための ユーザへの試験 配備	神戸市消防局への 試験配備と訓練使 用	評価に基づき改良を 行い, 実用性を高め た.	目標を 達成し た.	◎
その他特筆す べき項目	プロジェクト終 了後, 福島第一 原子力発電所原 子炉建屋内の調 査および軽作業 に使用.	5回にわたり (6/24, 7/8, 7/26, 9/22, 9/24), 原子 炉建屋内の調査, 軽作業のために投 入された.	線量率測定, ダスト サンプリング, 配管 工事用映像データの 収集他の実績を上げ た.	本研究 成果の 有効性 を高い レベル で示し た.	◎

①移動技術の開発

本研究では, プラント事故, NBCテロ, ガス漏れ等の災害現場において, 迅速な情報収集を可能とする複数移動体RTシステム(レスキューロボット)のプロトタイプ機の新規開発を行った。災害現場における情報収集を行う際, ロボットには, 高速に移動する機能, 不整地を踏破する機能, 被災状況の地図を構築する機能, マニピュレータによりドアノブを操作する機能など, 複数の異なる機能を搭載する必要がある。ロボットの重量と各機能との間には, トレードオフが存在する。そこで, 本研究では, 高速走行が可能な小型の「Kenaf」とマニピュレータを搭載可能な大型の「UMRS」, そしてそれらの実用版である「Quince」と「UMRS-2009」という4種類のプロトタイプ機を新規開発した。

(顕著な成果)

1) 高速不整地走破機構 Kenaf の開発

- Kenaf は FEMA 訓練所 Disaster City のコンクリート・木材瓦礫を踏破し(それまで踏破できた地上移動ロボットは世界中で皆無), 階段途中で方向転換が可能であるなど(様々なミッション遂行には必須), 災害現場で必要な高い運動性能・操縦性能・耐障害物能力を実現した(図2)。
- Kenaf は 6 km/h 以上で走行でき, 重量は約 20 kg, バッテリーは通常使用状態で約 2 時間もつ。最大 20 kg 程度の牽引が可能で, 押しにより軽量物排除が可能。半自律機能として, 移動障害物回避(歩く人間など), 静止障害物回避, 瓦礫・階段乗り越え機能を実現(詳細は②で説明)。
- Kenaf の外観上の特徴は, ボディ全体を覆うように装備されているメインローラと先端部の直径が大きい2対のサブローラである。Kenaf は, 走行中でもサブローラの位置制御が可能であり, 狭隘環境から平坦地, 階段, 瓦礫上, 急傾斜地までも高速で移動することができる(図3)。

- Kenaf の構造はラダー型フレームである。密度の高いモータ、バッテリーは低い位置に配置し、バンク角 80[deg]以上を実現している。モータはブラシレス DC タイプであり、Kenaf のために小型大電流制御のものを開発した。一方で、本研究目的に適合するための高速移動、低速移動それぞれに求められる特性と、ロボットに求められる機能を丁寧に解析。その結果、ロボット自身がとにかく高速で走行するタイプ、サブクローラのクローラ部分のみ高速駆動するタイプ、サブクローラの先端部分のみ高速回転するタイプをそれぞれ開発した。これは、一般の自動車雪道ではスタッドレスタイヤに交換するのと同じように、走行環境に応じサブクローラアームを交換することにより対地適応能力を改善している。
- Kenaf のハードウェアアーキテクチャを図4に示す。標準的なインタフェースを採用することにより、統合容易性、拡張性を確保している。



(a) 鉄筋コンクリート瓦礫 1 (b) 鉄筋コンクリート瓦礫 2 (c) 木造瓦礫 (10m のみ)



(d) 鉄筋コンクリート瓦礫 1 (e) 鉄筋コンクリート瓦礫 1 (f) 木造瓦礫 (10m のみ)

図2 Kenaf が踏破した瓦礫



(a) 高速走行の姿勢 (b) 瓦礫上走行の姿勢 (c) 階段途上での信地旋回

図3 Kenaf の構成

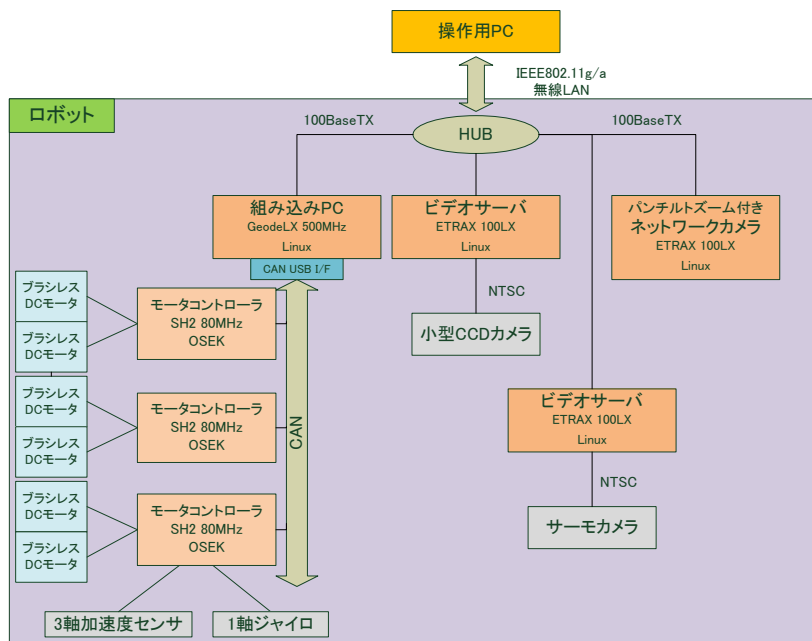


図4 Kenaf のハードウェアアーキテクチャ

- Kenaf のソフトウェアアーキテクチャを図5に示す. 統合制御は Gentoo Linux を採用し, 各研究メンバーが分散で開発することを念頭に置いたワークフローを構築した. モータコントロールは専用 CPU で行い, 統合制御 CPU との間を CAN バスで結合する構成とした. 複数プログラムでのセンサ利用のため, センサ情報管理ソフトウェア Sensor Sharing Manager (SSM) を開発し, 各種機能の統合と分散開発を容易にした.

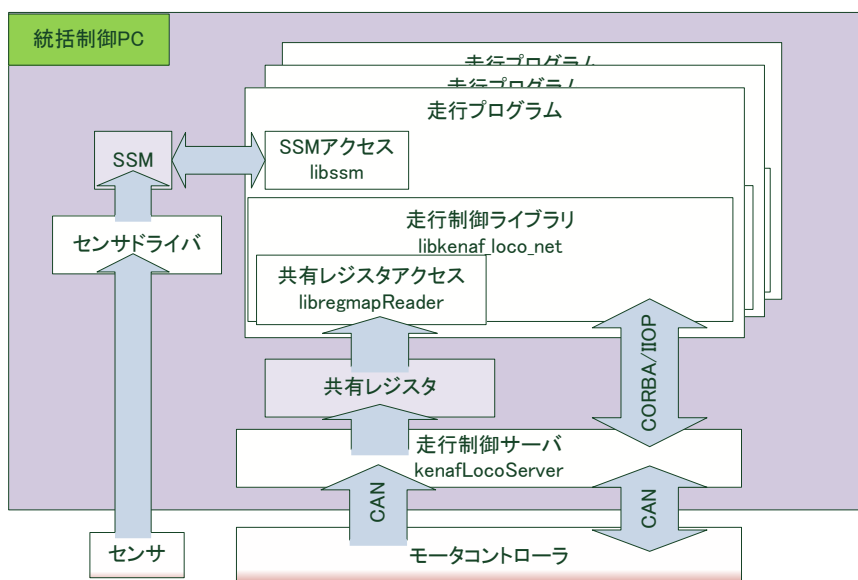


図5 Kenaf のソフトウェアアーキテクチャ

2) ドア開けロボット UMRS (UMRS-2007)

- UMRS 台車は, サブクローラ付のクローラ型ロボットであり, 押し動作による軽量物排除が可能. 低速ギアで 3 km/h, 高速ギアでは 5 km/h で走行でき, 重量は約 51kg, バッテリーは 1

時間以上もつ。

- ・ドアノブ開放のためのマニピュレータは、カメラ内蔵型軽量ハンドにより遠隔操作による調芯機能をもたせ、ノブの取り付け位置のばらつきに対応できる軸構成、台車への収納性を高めた3段収納式アームの構成とした。
- ・UMRS は、ステージゲートデモにおいて、丸型のノブを回し、軽量ドアを押し開けすることが可能であることを示した (図6)。
- ・UMRS 台車を活用して、要救助者の位置と状態を示す発光式のトリアージタグを投下できるロボットを開発した (図7)。

3) 耐衝撃平ベルトアクチュエータ

- ・ロボットの落下・衝突等による外部衝撃負荷時の駆動系の破損を防止し、走行機能は自動復帰で維持が可能となる平ベルトアクチュエータの開発を行った (図8)。
- ・急発進・急停止にはスリップせずに起動伝動を行なう。モータ定格出力以上の過剰負荷の場合には slip することにより回避。回避後、動力伝達は自動復帰する。

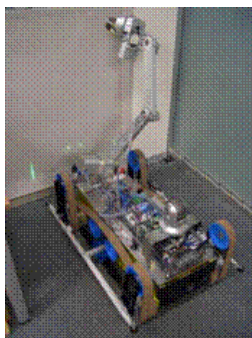


図6 UMRS によるドア開け

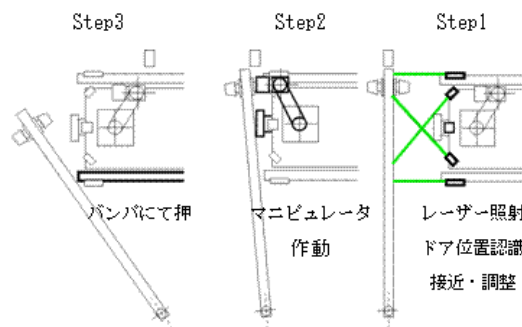


図7 UMRS-Triage



(a) 内部構造



(b) 繰り返し衝撃負荷によるロバスト性評価試験

図8 平ベルトアクチュエータ

4) 実用化高速不整地走破ロボット Quince の開発

Kenaf で培った運動性能や機能を継承すること、実証実験で見受けられた諸問題点を解決するため Quince を開発した。消防隊員から Kenaf に対する要望の中に「頼りなさの解消」という抽象的な表現がある。これは、本体上部の透明なコントロールボックスがあり、中身が見えすぎることから不安である。このため、Quince では、ハードウェアの全てを筐体内部へと隠蔽する構

造とした。図9に Kenaf と Quince の外観上の違いを示す。

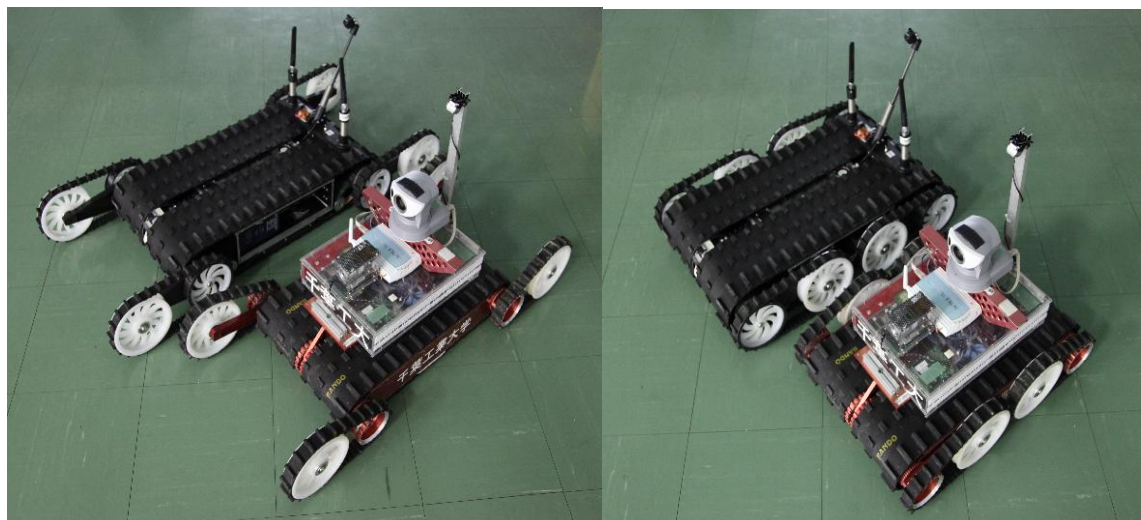


図9 Quince(黒)と Kenaf (赤) の違い

Quince では、実用化のための案件として、下記の研究開発を行った。

- ・ IP66 相当の防水・防塵機能の実装する。

ハードウェアを筐体内部に実装すると、コントローラの CPU，通信ユニットのデバイス，電源の DC/DC コンバータ，モータドライバ，モータなど多くのパーツからの発熱が問題となる。一般に，CPU の放熱には冷却ファン，冷却フィン，ヒートパイプによる冷却がある。移動ロボットで，防水/防塵となると，冷却ファンは実装不可，ヒートパイプは冷媒漏洩の恐れ，このため，筐体全体に冷却フィン加工を施した。この方式では，ロボットが走行することにより，クローラが発生する空気の流れを利用している。図10に筐体全体に施工された冷却フィンを示す。



図10 冷却フィン加工が施された筐体表面部品

一方，発熱量の大きいモータは，ホイールインタイプに変更して実装した。これにより，筐体内の発熱源の除去とハードウェア実装容積を確保した。図11にホイールインモータの構造を示す。

非公開

図 1 1 ホールインモータの構成と断面図

- ・高さ 2 m からの滑落，落下に対応可能な耐衝撃機能

Kenaf で実証されたラダーフレームを継承し，さらに数百回に及ぶ転落実験を繰り返した．この結果，サブクローラアーム部分にダンパーを装備すれば，大きな衝撃吸収作用が得られることが判明した．この結果を基に，サブクローラ駆動モータ出力プーリ内に角形ダンパーを開発し実装した．また，メインクローラの材質をクロロプレンゴムに，形状リング状に変更した．この結果，走行中に正面衝突するような衝撃力を緩衝できる構造とした．図 1 2 に落下実験のようすを，図 1 3 にプーリ内衝撃緩衝ダンパーを，図 1 4 に衝撃吸収機能を持つゴム製メインプーリの構造を示す．



図 1 2 Quince の落下試験

非公開

図 1 3 プーリ内角形ダンパーの構造

- ・走行軸保護ダンパー

走行用モータは 200W の出力があり，出力軸には大きなトルクが発生する．また，ロボットが階段などで滑落すると，その反力によりモータの出力軸には多くの衝撃力が発生する．これらが頻繁に発生するとギアヘッドの金属疲労を招き，寿命を一日しく低下させる．走行軸保護ダンパーは，プーリ軸用角形ダンパーと同様の原理で動作する．図 1 5 に走行軸保護ダンパーの形状を示す．

非公開

図 1 4 ゴム製メインプーリの構造と配置

図 1 5 走行軸保護角形ダンパーの構造

- ・サブクローラ咬み込み防止

瓦礫上や砂利，砂地を走行すると，サブクローラやメインクローラに異物が咬み込む．異物の混入を防ぐためカバーリングすると，クローラとの間で不要な摩擦が発生する．また侵入した異物の排出が困難になる．Quince では，駆動側のプーリをスポークタイプに，従動側の先端プーリには排出溝を設け，異物の咬み込み除去と排出機能を両立している．また，リング形状のゴム製メインプーリにも同様の加工が施され，瓦礫上や砂地などで旋回しても問題はない．図 1 6 にサブクローラの構造と蛇行防止ガイドを示す．

- ・サブクローラ蛇行防止ガイド

瓦礫上を走行中，大きく方向転換するとサブクローラには捻れる方向に応力が作用し，ゴム製のサブクローラが蛇行しさらに脱落することがある．これを防止するため，蛇行防止ガイドを開発した

非公開

図 1 6 先端プーリ，駆動プーリ，蛇行防止ガイドの構成

- ・底板ローラ

Kenaf では、メインローラは底板に常に触れ大きな摩擦損失が発生していた。このため、高速走行には不適であった。Kenaf も Quince もローラは、H 型タイミングベルトを特別に幅広く厚みを 12mm として製作し、それに必要なパターン研削している。この形状に対し、Quince では本来の「歯」の部分も平面に研削しその部分に小径ローラを当てている。この結果、摩擦の低減と蛇行防止機能、さらに小径ローラを台形に配置することにより、ロボットの旋回特性を著しく向上させている。図 1 7 に底板ローラと平面研削加工したメインローラを示す。



図 1 7 底板ローラの構造と平面加工したメインローラの関係

・メンテナンスフリーの実現

ロボットが不整地を走行すると筐体には大きな変形を受ける。これを防ぐため、メインフレームをはじめに、構造材の接合部分は組継ぎや印籠継ぎにより固定されている。また、緩みやすいボルト/ナットの組み合わせは一切用いず、立込によるねじ締結を行っている。また、段差踏破や階段走行で受ける衝撃は全てダンパーで受けることにより、コントローラや配線資材、センサなど総合的に保護する構造としている。これらの対策により、バッテリー交換以外のメンテナンスを極力少なくしている。図 1 8 にメンテナンスフリーのためのダンパー組み込み状態を示す。



図 1 8 メインローラ用ダンパーとサブローラ用ダンパーの配置

5) 実用化ドア開けロボット UMRS-2009 の開発

探索用のみならずドア開けやトリアージタグ投下等多くの作業も可能となるように開発されたロボットの共通車体が UMRS（以下では、混乱を避けるために UMRS-2007 と呼ぶ）であり、ステージゲート等の実証実験にて、これらの作業が行えることを示したが、より実用性を高めるためには、ドア開け等の作業性も向上させるとともに、車体の軽量化をはかり機動性を高めたロボット車体の製作が必要不可欠となった。そこで UMRS-2007 で培った技術や知見をベースとして、UMRS-2009 を開発した。基本方針として動力性能等は維持または向上させつつ車体重量を半分以下にすること、ドア開け用マニピュレータの軽量化開発をすること、超ロバスト耐衝撃平ベルトアクチュエータの機構改善と軽量化をすること、これらにより高い運動性能も併せ持つドア開けロボットの開発を目指した。UMRS-2007 と比較も含めてその特徴を示すと次のとおりである。

（車体）

- ・緒元： 全幅：495mm，全高：250mm，全長：590mm（アーム収納時），950mm（アーム進展時）重量：206N(21kgf)にて UMRS-2007 と比較して、全幅で 55 mm，全高で 50mm，全長で 230 mm小さくなるとともに、重量比で 45%と大幅にスリム化した。

- ・走行用アクチュエータユニット：本質的に安全な平ベルトアクチュエータ駆動（①-8「UMRS に搭載する平ベルトアクチュエータの開発」を参照）機構をもち、車体の軽量化により広いトルク - 速度レンジをカバーすることができる変速機構のない改良型高機能アクチュエータを搭載した。これにより次の（4）項に示すようにスタックしやすい路面でも駆動伝達系が壊れる等の走行不能に陥らず、高いロバスト性を保つことができる。

- ・電装系システム構成： 図 1 9 にロボットの基本システム構成を示す。機械的機構と同様に UMRS2007 に比し軽量小型化をはかった。まず走行系モータは 150W×2 個とフリップ系モータとして 90W を前後各 1 個，合計 4 個の DC モータを搭載することとした。さらに車体前後に取り付けた合計 4 個の高輝度 LED 照明制御，ロボットの姿勢や環境検知の各種センサデータの取り込みや 3 台のカメラ画像の処理という制御用として TPiP2 ボードを用いて集約・高密度化をはかった。また DC モータドライバも高出力（24V にて連続 25A，瞬時 50A 通電可能）・小型化をはかるとともに、エネルギー源である車載バッテリーも、Li-ion バッテリーからエネルギー密度的には少し劣るが、より安全性が高い Li-Fe バッテリー（公称 23.1V，容量 9.2Ah）を搭載するシステムとし、ロボットが安定して 1 時間以上の連続探索活動が可能となるようにした。

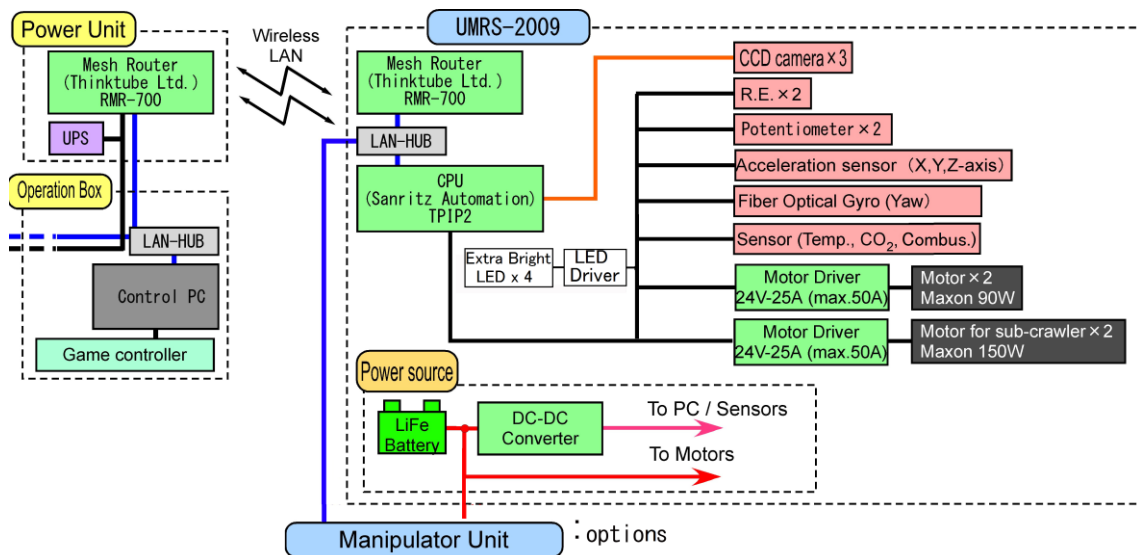


図 1 9 UMRS2009 の通信制御電装系の基本構成



(a) 背負って搬送



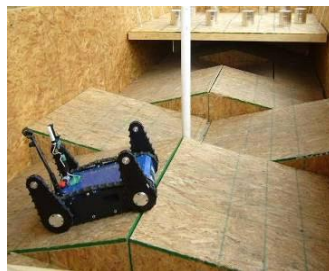
(b) 45度階段昇降



(c) 暗闇迷路走行



(d) 傾斜面走行



(e) 組合せ斜面走行



(f) ランダムステップ走行



(g) ガレキ&草むら走行



(h) 鉄道レール周辺走行



(i) 砂&ジャリ路面旋回走行

図 2 0 UMRS2009 の機動性と走行走破性

・機動性と車体走行性能： UMRS2007 に比し、高い動力性能を保ちつつ車体重量を 23kgf と軽量化をはかったことで、機動性と走行走破性が増した。図 20 にこれらの状況を示す。(a)；必要時には救助隊員が背負って運ぶことも可能。(b)；最大斜度 45[deg.]の急階段まで登攀可能。(c)；定格 3.6W 超高輝度 LED パックを車体前後に各 2 セットヘッドランプとして装着することにより、探索域が暗闇でも活動可能。(d)～(f)；2010 年 3 月にアメリカ、テキサス州ディザスターシティで行われた National Institute of Standards and Technology (NIST)による評価会において各種規定障害を走破、高性能を示した。(g)～(i)；特にスプロケットホイールに草や石、砂が絡まっても排出されやすい機構を採用するとともに、(2)項で示した本質的に安全なアクチュエータを採用することにより、従来では走行が困難となりやすい路面での走行でもロボット台車にとって負荷のかからない、高機動の移動性能を示すことができた。

(ドア開け機構)

・エンドレス回転式電動ハンド

遠隔操作により、丸型、レバー型のドアノブをハンド中心部に取付けられたカメラ(照明付き)で位置を確認～把持し、どの角度からでも自由にノブを回転させてドアのラッチを解除をする事が出来る。他の用途として、床面に置かれた危険物等を把持する事も可能。

【特長】

- －小型軽量、重量800 g，大人の手首並みのコンパクトサイズ
- －把持と回転の2軸の過負荷保護機能を有した駆動機構
- －把持駆動部のケーブルがねじれる心配が無いエンドレス回転仕様
- －ハンド中心部に CCD カメラと LED 照明を内蔵し、対象物の把持操作が容易
- －ドアノブ把持とドア開放時の芯ズレを吸収する調芯機能

【主な仕様】 電動ハンド

外形寸法	φ86 x L176 mm
質量	0.8 kg
軸数	2軸(把持、旋回) 過負荷保護機能付
把持力	40N
把持速度	最大7mm/s
把持ストローク	最大60mm
回転力	1.3Nm
回転数	最大12rpm
回転角度	エンドレス
対象ドアノブ	丸型、レバー型
付帯機器	CCDカメラ、LED照明 (ハンド中心に取付)
電源	DC24V



図 21 電動ハンドの構成



●丸ノブ対応時

●レバー型ノブ対応時

図 2 2 電動ハンドの各種ノブへの対応

・マニピュレータ

引きドア機能を付加し（別ユニットの吸着機構併用），関節軸にシンクロベルトを用いた新駆動機構により，スリムな構造で剛性向上と動作エリアの拡大を可能とした。

【特長】

- －押し引きドア対応，スリムでコンパクト（持ち運び可能）な構造
- －シンクロベルトを出力軸側に用い，直線運動を回転運動に変換した新駆動機構
- －駆動部 2 軸分を 1 つのアームフレーム内に収めた出張りの少ないアーム構造
- －広い可動範囲を有しつつも，アーム折りたたみ時に収納性に優れた構造

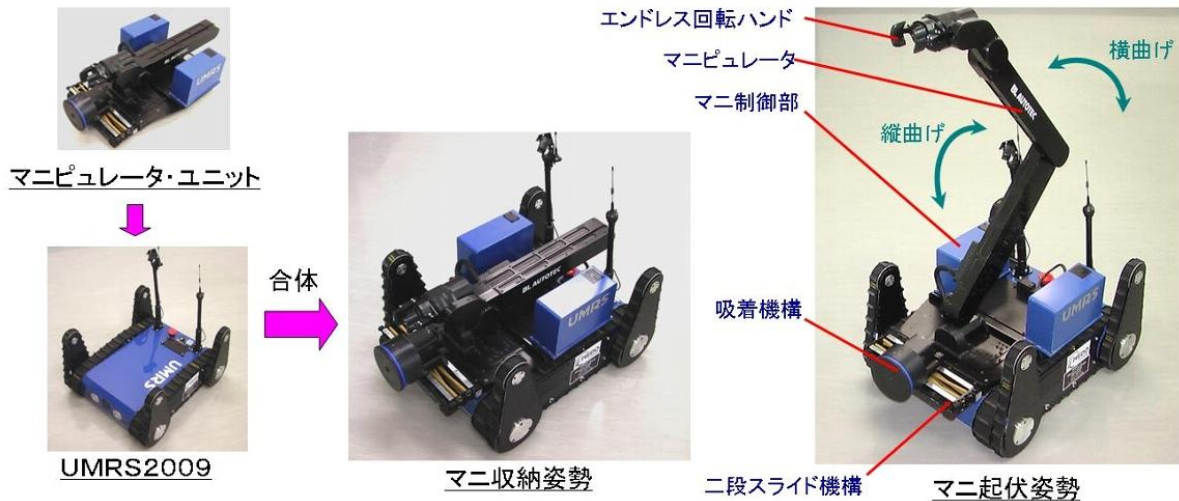


図 2 3 UMRS-2009本体へのマニピュレータ搭載

【主な仕様】 マニピュレータ

外形寸法	W120×L605×H170 mm (起伏時最大：H1000mm)
質量	7 kg (制御部含まず)
軸数	4軸
可搬質量	1.3 kg (ハンド質量含まず)
先端速度	最大100mm/s
操作方法	マニュアル式
外部通信 インターフェイス	LANポート×1
電源	DC24V

※吸着機構については別項参照

【オプション】 危険物取扱い仕様モデル

ドア開放用標準仕様モデルでも、図 2 4 の様に、台車動作を利用して危険物を把持する事は可能であるが、本モデルは、UMRS2009の機能向上の為に、1 軸部に専用ユニットを取付けるだけで旋回動作が可能となり、救助活動時の操作性を向上させた。



図 2 4 台車動作による危険物把持

・吸着機構とドア開け操作

【吸着機構】

図 2 5 に示すようにUMRS2009のボデー前先端部にドアを吸着するための吸着パッドと、ドア引き動作時、ドアとロボットの相対位置や引っ張る方向が変わってくるのを吸収するためのコンプライアンスをもった吸着機構を開発した。電動式吸着パッドはこの円形パッドをドアにぴったり押し付けた後、円形パッドの中心部をモータにて引く込むことによりパッドとドア表面の間に真空層ができようとする力で吸引力を発生させる。またこの吸着パッドを水平面にて左右に回転させる首振り機構と、力がかかればガイドケース内でパッド首振り機構自体がスライドして水平に動くとともに、そのガイドケースも車体に対して全体が水平に平行に移動する二段式伸縮ガイドにてコンプライアンスをもたせてある。

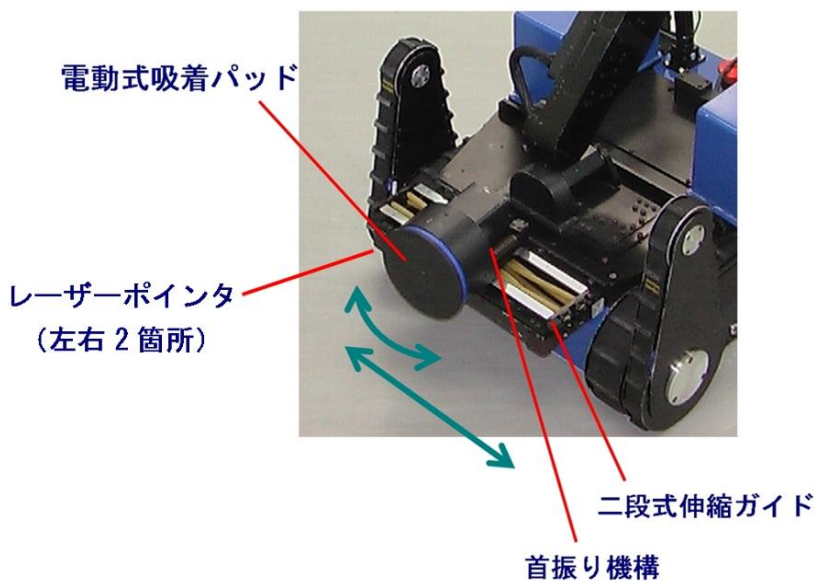


図 2 5 UMRS-2009 のドア吸着機構

・ドア開け操作

ロボット車体の軽量コンパクト化のために UMRS-2007 にて取り付けていたドアとクローラ駆動部との直接接触を防ぐバンパを取り去るとともに、ドア押し開きだけでなく、ドア引き開きにも対応するためにドア吸着機構を取り付けた。基本のドア開放の手法はすでに UMRS2007 にて示した。すなわち、ドアノブのラッチ開錠用マニピュレータはドアノブを回してラッチを外し、ドアマニピュレータのコンプライアンスを生かしてわずかにロボット車体を動かしてラッチが再びかからない位置まで移動、ドアマニピュレータを畳む。そのあとドアを押すまたは引く作業はロボット車体本体の動きを用いて行う、という手順と役割分担は **UMRS2009** にても同じである。そのドアラッチ解錠後のドアとロボットの相対運動関係を図 2 6 に、またその実際の作業をしている写真を図 2 7 に示す。

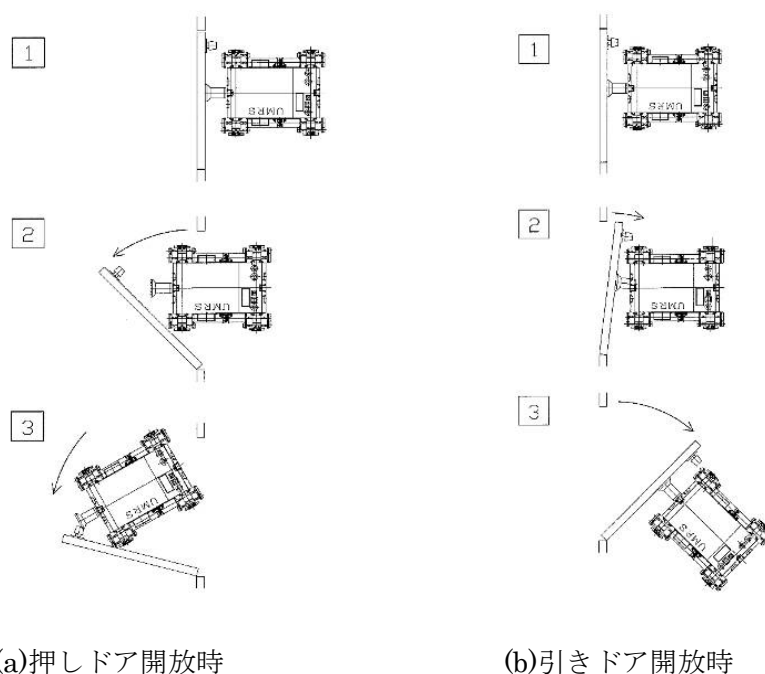


図 2 6 UMRS-2009 のドアラッチ解錠後のドアとロボットの相対運動関係



図 2 7 UMRS-2009 によるドア開放動作

吸着機構の動きがよくわかるように、ドアノブ開錠用のマニピュレータを取り払った UMRS-2009 によるドア引き時の手順を追った動きを図 28 に示す。Step1 にてドア吸着機構をドアに押し当てドアをロボット車体本体に固定する。そのうえでマニピュレータを操作しドアノブのラッチを開錠する。Step2 にてロボット本体を使ってアラッチが再施錠しない位置まで、マニピュレータのコンプライアンスを用いてドアをわずかに引き動かし、マニピュレータを収納する。Step3～Step8 に示すように車体の旋回と後退を交互に行い、吸着機構のコンプライアンスを使いながらドアを開放する。



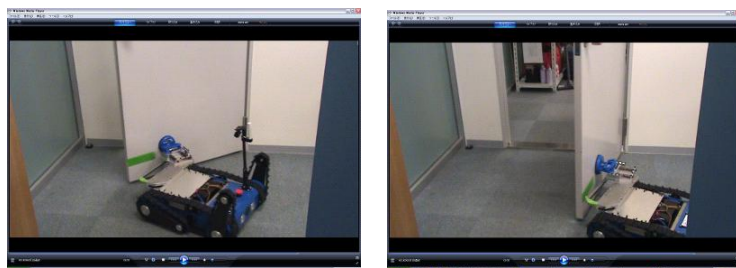
<Step1>吸着&マニでドアラッチ解除 < Step 2>後進-1, マニ収納 < Step 3>台車旋回-1



< Step 4>後進-2

< Step 5>台車旋回-2

< Step 6>後進-3



< Step 7>台車旋回-3

< Step 8>後進-4, ドア開放完了

図 28 UMRS-2009 によるドア引き時の手順を追った吸着機構とロボットの動き

6) UMRS-2009 用耐衝撃平ベルトアクチュエータ

開発当初はアクチュエータの機能として速度の変速機構を取り入れたものとし、磁性体ベルトを使用した 2 段変速が可能な平ベルトアクチュエータを開発し、一定の目標を達成し目標に対する完成度は十分満足するものとなったが、2008 年度終盤より実用化想定ロボット (UMRS

2009)の要求仕様にマッチさせるべき改良設計を進め、

・「1速(速比固定)」にし「小型・軽量化」を行った。実用化想定ロボット(UMRS2009)要求仕様から、アクチュエータは1次試作品に対し半分以下(750g)の「小型・軽量化」が目標となり、「UMRS2009:総重量30kg以下」をベースに牽引力を計算した結果、UMRS2007で要求された1速(パワーモード)を持たなくても目標牽引力を確保できるとの結論を得た。

◆改良設計方針 → 速比固定・軽量化・カバーレス

・2次試作品(速比固定)はUMRS2009同等条件における台上評価及び、ロボット搭載による実機評価によって適合性及び耐久性を確認したので、その結果を次に示す。



図29 1次試作品(2006年) 図30 2次試作品(2009年)

表3 1次試作品と2次試作品の比較

	1次試作品(2段変速)		2次試作品 (速比固定)
	1速	2速	
入力軸: 駆動プーリピッチ径 mm	φ5.7	φ9.5	φ6.4
出力軸: 従動プーリピッチ径 mm	φ50.1	φ50.1	φ51.2
速比	8.8	5.3	8.0
回転方向	正転・逆転		正転・逆転
概略寸法 mm	縦73×横234×奥行100		縦65×横100×奥行42
重量 g	約1500(モータ含まず)		約350(モータ含まず)
その他オプション	変速機構(サーボモータ付き)		無し



図31

図32

繰り返しロバスト台上試験結果(出力軸)

ロボット搭載ロバスト試験結果(入力軸)

表4 機能性能評価結果

評価内容		結果概要	備考
台上評価	伝達力	設計伝達力OK	定常 0.29N・m 最大 0.43N・m
	ロバスト性	駆動伝達トルク約 1 N・m で全 Slip	モータ許容瞬間最大トルクの半分になった時に全 Slip が発生
ロボット走行評価		台上評価との整合性確認OK	—
		約 3 0 0 hrs 走行OK	目標耐久性OK

【現状での完成度】

コンパクト・軽量化を実施した2次試作品において、台上及びロボット搭載試験の結果は、搭載するロボットに必要な伝動能力・ロバスト性については満足のいく結果が得られた。ロボットによる走行実績として現時点において十分な耐久性が得られており、当初目標としたアクチュエータの機能としては十分なものであると考える。

現時点において本ロボット適用化としては、品質的に目処がついたものと考えている。

②遠隔操作技術

消防隊員が目視できない閉鎖空間内における情報収集を効率よく行うためには、ヒューマンインタフェースが重要である。その実現のためには、環境情報や運動情報の計測・測位、隊員が周囲環境を認知しやすい情報提示、隊員にとって楽な操縦操作が重要である。また、これを実際に近い使用環境で繰り返し実証試験や訓練を行って改良すること、隊員が容易に訓練を行える環境を整えることが必要である。

(顕著な成果)

1) Kenaf のジョイスティックによる遠隔操作

- ・瓦礫上や狭い場所の操縦に適した、ジョイスティックによる遠隔操作機能を実現した。
- ・ロボカップ 2007 アトランタ大会で運動性能部門世界優勝を果たし (図 3 3), Disaster City の瓦礫を踏破するなど (ただし, Disaster City ではロボットを直視しながらの操縦), 操縦しやすさを実証した。



(a) スタート



(b) スロープ



(c) 遠隔操縦の様子



(d) 不整地突入



(e) 斜め段差 (f) 平行段差 (g) 崩れる不整地 (h) 高速走行
 (i) 斜め段差旋回 (j) 摩擦がない転がり段差 (k) 階段 (l) 操縦ミスで時間ロス

図 3.3 RoboCup 2007 Atlanta における Kenaf の走破の様子

2) 通過ポイント指定方式による操縦機能

(1) 通過ポイント指定方式によるロボットの遠隔操作

操縦方式: ロボット視点と鳥瞰視点で地面位置をポインティングし、移動目標位置を送ることで、従来のジョイスティックやゲームパッドと比較し、操作者の負担が少なく、時間遅れに頑強な遠隔操縦方式を実現した。

画面デザイン: 三次元CG内の遠方に仮想スクリーンを2枚設置して3眼カメラ台の左右2枚のカメラ画像を投影し、測域センサによる距離情報と合成することで、視野が広く、かつ、障害物との距離も確認しやすいロボット視点画像を生成することに成功した。

走行方式: 指示された目標位置に従って経路走行するモードと自律的に人避けを行うモードを切り替えることによる半自律走行を実現した。

(2) 不整地環境におけるポインティング操縦の目標到達精度の向上

ロボット視点画像をポインティングする操縦方式を、凹凸のある路面でも適用可能とするように改良を行った。画像上では奥行き情報が欠落しているため、画像をポインティングしただけでは、到達目標が一意に決定されない問題がある。そこで、目標をベクトルで表現し、到達判定を面で行う方法を提案した。さらに、天井計測とオドメトリ情報を融合することで、目標位置への到達精度を改善した。

(3) タッチ操作で操縦可能な携帯型遠隔操縦インターフェース

机上設置式の大型の操縦装置の場合、その場を移動することができないため、ロボットとの通信環境を遠距離に渡って確保する必要が生じる。一方、携帯が可能な操縦端末であれば、安全が確認された場所までは近づけるため、長距離の通信環境の確保が難しい場合に有利である。そこで、提案している通過ポイント指定方式によるロボットの遠隔操作手法を携帯可能な操縦端末に実装した。開発した操縦端末は、タッチ操作のみで操縦可能になっており、厚手のグローブを着用時に有用であると考えられる。

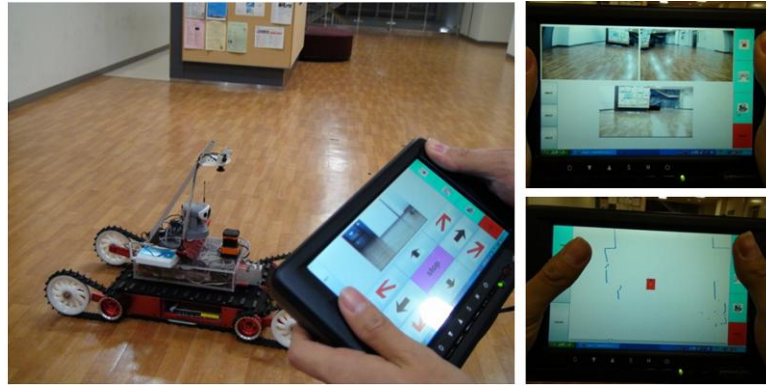


図 3 4 操縦対象の移動ロボットと携帯端末（左図）と操縦画面の例（右図）

3) ポータブル遠隔操縦卓

図 3 5 に UMRS-2009 の操縦卓のイメージを示す。



図 3 5 ポータブル遠隔操縦卓の概要図

（仕様）

- ・災害現場に運搬し、10 分以内にロボットを操縦できること。

電源投入のみで、ロボットの操縦プログラムや周辺機器が立ち上がるように内部構成を考えると対応する。

- ・消防隊員一人で運搬できるように重量は 20kg 以内とする。

操縦卓に納める機能を必要最低限にとどめた。

操縦卓に納める機能は、LAN ハブ、USB ハブ、ダウンスキャンコンバータとした。

- ・使用する際の災害現場を考慮し、防滴・防塵構造とする。

操作部を除いて電気回路周辺は、すべてケース内に収め、防滴・防塵機能を持たせた。

電源部および LAN 周辺のコネクタには、防水・防塵コネクタを採用した。

少々の振動や、衝撃にも耐えうるような構造にする。

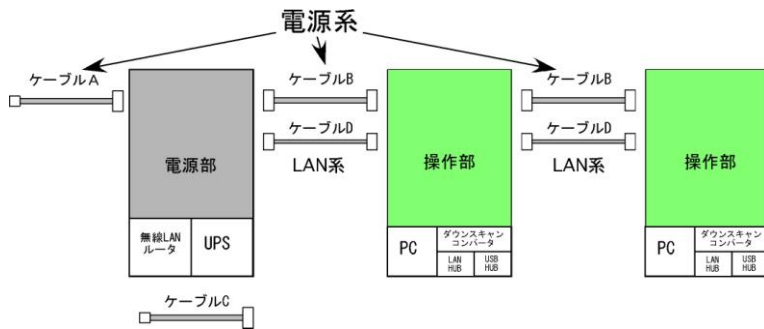


図 3 6 ポータブル遠隔操作卓の使用時のイメージ

各機器は、周囲をウレタン樹脂で多い、少々振動や衝撃にも耐えるように設計を行った。

- ・瞬間停電などにも耐えうようにする。

使用する環境においては、安定した電源が確保できるとは限らない。そのため、無停電電源装置(UPS)を操縦卓に組み込むことを検討した。しかし、操縦卓の重量が 20kg を超えてしまうため、操縦卓を電源部と操縦部と 2 つの機能を持った構成とした。図 3 6 に操縦卓の使用時のイメージ図を示す。操縦卓で使用する PC には、内部バッテリーで 2 時間程度稼働が可能である。電源部は内蔵の UPS を用いて、操縦部の無線 LAN の機能と USB ハブの機能をバックアップさせる。

(操縦プログラム)

【UMRS-2007 版】

操作卓に内蔵されている操縦プログラムは、現在以下の機能を有している。

- ・カメラ画像表示・・・前・後カメラおよび指揮官カメラの映像をブラウザ内に表示することが可能である。
- ・距離表示機能・・・カメラ画像内に距離情報の目安となる“メジャー”を表示することが可能である。
- ・カメラ画像切り替え・・・ロボットが前進しているときは、前カメラのみの映像が表示され、後進するときは後カメラのみの映像が表示される。これにより、ネットワークに掛かる負荷を軽減することができる。ただし、指揮官カメラは画像切り替えの対象とはしていない。
- ・指揮官カメラのパン・チルト動作・・・より広い範囲を探索するために指揮官カメラは独立して操作が可能である。そのため、カメラの向いている方向を表すためにブラウザ内にパン角・チルト角を表示することとした。



図 3 7 操縦卓の表示例（ドア開放時）

- ・ロボットの操縦・センサーデータ取得・・・ロボットに搭載している加速度センサ、光ファイバジャイロ、内界センサ（ロータリエンコーダ、ポテンシオメータ）のデータを取得することが可能である。
- ・マップ上でのロボットの位置表示機能・・・ロボットから送られてくるオドメトリの情報およびロボットの姿勢センサからのデータを用いて、災害現場のマップ上でロボットの位置を表示することができる。

【UMRS-2009 版】

図 3 8 に開発を行った操縦インターフェースの写真を示す。まず、同図(a)に示したロボットベースコントロールモードの機能について紹介する。画面に表示されているスイッチ類のアイコンは、画面がタッチパネルを兼ねており画面上を触れることによってもスイッチ機能を果たすように設定されている。

- ・ **Mode select switch** 左から順番にベースロボットコントロールモード、マニピュレータユニット制御モード、センサーデータ取得モード、センサのオフセット値調整モードへの切替を行う。後述するマニピュレータコントロールモードへもこのスイッチを押すことによって切替が可能である。

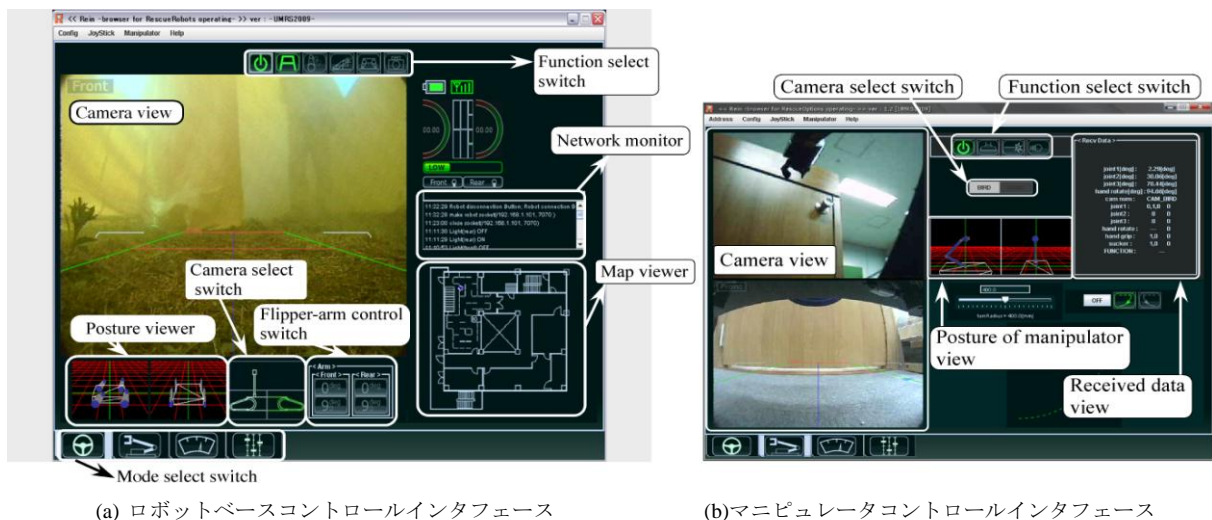


図 3.8 UMRS-2009 のインタフェース

- **Posture viewer** ロボットの姿勢および、フリッパーアームの位置を3D表示する。
- **Camera select switch** 前/後カメラおよび鳥瞰カメラの切替を行う。
- **Flipper-arm control switch** フリッパーアームの角度を水平位置(0[deg.])、もしくは上方位置(90[deg.])に切り替える際に使用する。
- **Map viewer** 予め建築図面などから地図情報を読み込み、その地図上へヘッドレコニングによってロボットの現在を示すことが可能である。また、被災者の位置をアイコン化して地図上に設置することも可能である。
- **Network monitor** 現在のネットワークの遅延状況、リンク先、送信/受信データなどをモニタする画面である。これにより、現在のネットワークの状況等を把握することが可能である。
- **Function select switch** 左から順に操縦プログラムのON/OFF機能、メジャーライン（画面上の緑・赤のライン）の表示/非表示機能、フリッパーアームの位置制御ON/OFF機能、半自律階段・ステップ昇降モードON/OFF機能、タカアシガニモード（フリッパーアームの先だけで接地し走行するモード）ON/OFF機能、スナップショット機能の各種切替を行う。
- **Camera view** 「Camera select switch」で選んだカメラからの映像が表示される。カメラの映像が表示されるのは、通信容量を確保するため、常時1台のカメラのみとしている。また、どのカメラ画像を見ているかすぐに判断できるように画面左上にカメラのIDを表示している。現在の画面上では、「前方」カメラの映像をビューワに映している。

次に、図 3.8 (b) を元に、マニピュレータユニット制御モードの機能について紹介する。

- **Camera view** ロボットベースコントロールモードとは、異なり常時2台のカメラからの映像を表示することが可能である。画面下部のエリアには、ロボットベースの前方カメラからの映像を表示する。また、画面の上部エリアはマニピュレータとドアノブとの相対位置を確認するための鳥瞰カメラおよびドアノブを把持する際に使用するハンド内カメラからの映像を切り替えて表示することが可能である。なお、ロボットベースカメラの映像は常時表示し、鳥瞰カメラとハンド内カメラの切替を「Camera select switch」により行う。

- ・ **Posture of manipulator view** マニピュレータ内のエンコーダ/ポテンシオメータの値からマニピュレータの姿勢を表示することが可能である。
- ・ **Received data view** マニピュレータから送信されるすべての情報を画面に表示する。
- ・ **Camera select switch** マニピュレータの姿勢を確認するためのカメラおよびハンド内カメラとの切替を行う。
- ・ **Function select switch** 左から順に、操縦プログラムのON/OFF、ドア吸着用の吸盤ON/OFF 機能、位置決め用レーザーポインタON/OFF 機能、ハンド内照明のON/OFF機能が並んでいる。

これらの操縦インタフェースは、すべてJAVA でプログラミングを行い、100ms 程度のサンプリングタイムでロボットの制御を行っている。UMRS-2009 の操縦インタフェースの開発には、神戸市消防局の協力を得て、ともに開発を行った経緯がある。ここで紹介したいいくつかの機能については、消防隊員からの依頼があり、実装したものがある。

平成22年9月～平成23年2月までUMRS-2009を神戸市消防隊に貸与し、その間、約30回の訓練に使用していただいた。その使用した感想を調査し、さらに使いやすいインタフェースの改良・開発を行っていく予定である。

(現状での完成度)

ステージゲートまでは、音声通信の実装への不満や、階段昇降を行う半自律のプログラムが未実装であるといった課題が残っており、完成度は 85%であった。

ステージゲート後は、消防隊員の意見を集約し、機能の簡素化、排除を行い、UMRS-2009 版の Rein の開発を行った。主に、TCP/IP から UDP 通信へのプロトコルの変更、通信容量を圧迫しないインタフェースの開発および半自律階段・段差昇降機能を実装した。UMRS-2009 版のインタフェースの完成度は、90%である。

平成 22 年 9 月～平成 23 年 2 月まで UMRS-2009 を神戸市消防隊に貸与し、訓練に使用した隊員の感想や要望として、音声通信を望む声が大きかった。この機能の実装を行うことで、より実用化に近づけるものと思われる。

4) 3次元環境計測表示による遠隔操縦

ステージゲート前には次の実績を上げた。

- ・ 3次元環境計測表示と高精度の三次元オドメトリ、カメラ映像、センサデータとの併用により、複雑に障害物が存在する災害現場での遠隔操作を可能にした。
- ・ 2次元測域センサとパンチルト台によって、小型の3次元スキャナ (TKScanner) を開発した。
- ・ 計測した3次元地形の中に、ロボットの位置姿勢とサブクローラ角に同期してロボットの3次元モデルを描画することで、環境とロボットの位置関係を把握しやすいインタフェースを構築した。

- ・ 図 3 9 に段差 (左), 廊下 (中央), 米国の NIST が提案する迷路の中を, 3 次元操縦インタフェースを用いて操縦している操縦画面のスナップショットを示す. 映像では周辺環境を把握出来ない場合でも, 遠隔地からロボットを安全に操縦出来ることを確認した.
- ・ Disaster City 操作体験会で, 狭い暗闇でも周囲の状況がよくわかり, 操縦がしやすいと, 多くの FEMA 隊員から高い評価を得た (図 4 0).

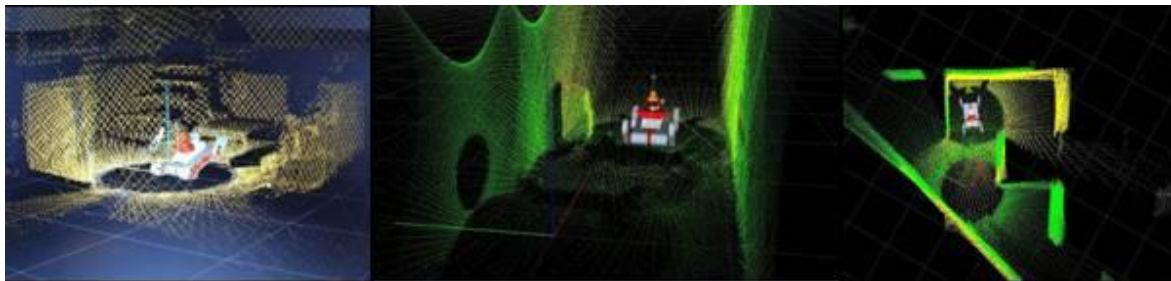


図 3 9 俯瞰視点の 3 次元スキャン図を用いた, 狭い場所における遠隔操縦



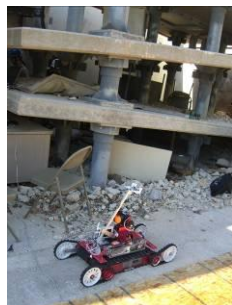
(a) 列車入口



(b) 列車内を操縦する FEMA 隊員



(c) 列車の三次元地図



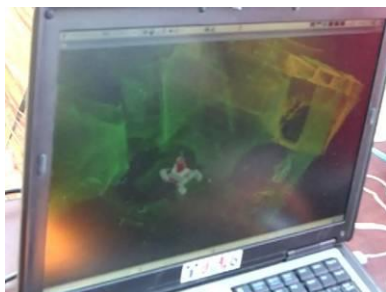
(d) 倒壊建物



(e) 倒壊建物内の Kenaf



(f) 遠隔操縦を見守る FEMA 隊員



(g) 倒壊建物内の 3 次元地図



(h) 遠隔操縦中のカメラ映像



(i) 煙充滿環境での地図計測

(g) 倒壊建物内の 3 次元地図 (h) 遠隔操縦中のカメラ映像 (i) 煙充滿環境での地図計測

図 4 0 3 次元データを用いた倒壊建物内, 衝突電車内の探索

ステージゲート後には次の実績を上げた.

- ・ 密な 3 次元環境計測と高精度の 3 次元オドメトリを用いて Quince を俯瞰視点で操縦する 3 次

元操縦インタフェースを開発した。照明で周囲を照らしてロボット搭載カメラで撮影した映像と三次元操縦インタフェースを併用することで、複雑に障害物が存在する災害現場や、狭い場所での遠隔操作を可能にした。

- 2次元測域センサとパンチルト台を組み合わせて防塵・防滴の小型3次元スキャナ(HDScanner)を開発した。Quinceに搭載し、米国のDisaster Cityや東日本大震災で倒壊した東北大学青葉山キャンパス内の全壊被災建物で3次元計測と3次元操縦インタフェースの実証試験を行った。
- 計測した3次元地形の中に、ロボットの位置姿勢とサブクローラ角に同期してロボットの3次元モデルを描画することで、環境とロボットの位置関係を把握しやすい俯瞰視点を合成した。また、俯瞰視点をロボットの動きに合わせて自動的に追尾する機能を開発し、ロボットを操縦しながら俯瞰視点を利用することが出来ることを確認した。
- 図4-2に米国のFEMA隊員の訓練施設Disaster Cityで3次元操縦インタフェースを用いて操縦している操縦画面のスナップショットを示す。カメラ映像に加えて、3次元地図と3次元操縦インタフェースを用いることで周辺環境を把握しつつ、遠隔地からロボットを安全に操縦出来ることを確認した。
- 本プロジェクト期間終了後の成果であるが、参考データとして、図4-3に東日本大震災で被災した東北大学青葉山キャンパスの建物を探査した様子を示す。被災して物体が散乱した空間をカメラと3次元操縦インタフェースを併用して探査することで、狭い場所を通り抜けるたり、探査していない空間を確認しながら探査が可能なることを確認した。

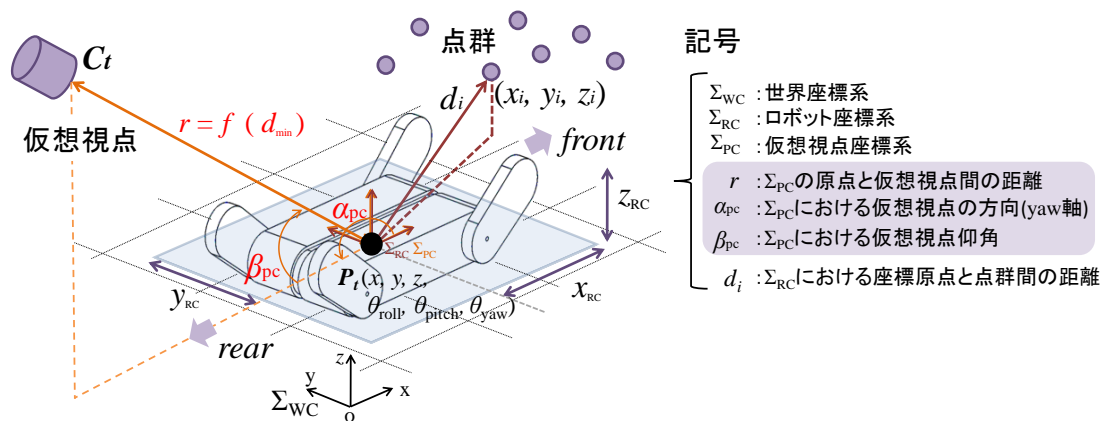


図4-1 俯瞰視点映像を合成するためのモデル



(a) 建物の外観 (b) カメラ映像 (c) 俯瞰視点映像

図4 2 Disaster City の倒壊建物内の狭い場所をカメラと俯瞰視点の映像を用いて探査

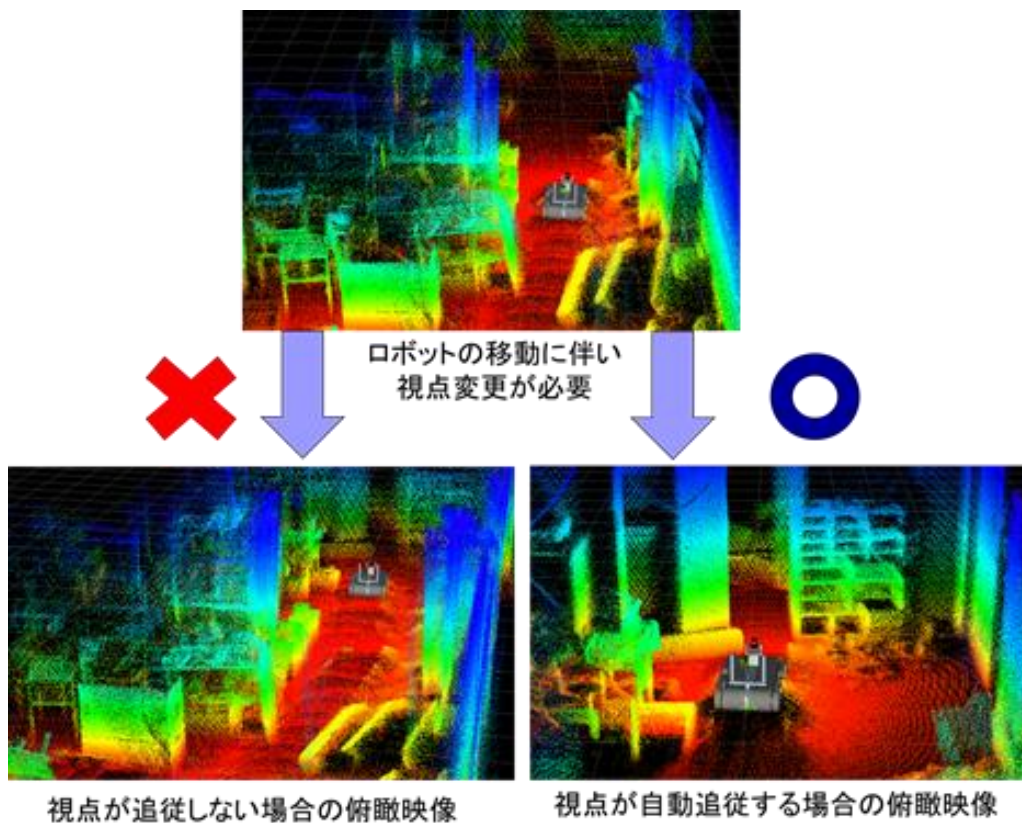


図4 3 3次元操縦インターフェースを用いた東日本大震災で被災した東北大学の建物内の探査：ロボットの動きに合わせて俯瞰視点を自動的に変更する機能の有効性を検証

5) 半自律不整地踏破機能
ステージゲート前の成果として、

- 不慣れなオペレータでも遠隔操作による不整地走行を可能とするため、半自律不整地踏破機能を構築した。
- PSD センサによる前後 6 点の距離計測と、サブクローラの段差との衝突判定に基づき、自動的にサブクローラの上下動作を行い、不整地を踏破できる機能を実現した。Disaster City の倒壊建物内では、15cm 程度の凹凸を隊員が気遣うことなく遠隔操縦できることを実証した (図 4 4)。
- 2 台の測域センサにより、サブクローラを含むクローラ面の前方形状を計測し、それに基づいて自動的にサブクローラ角を制御する機能を実現した (図 4 5)。



図 4 4 衝突判定に基づく半自律での階段、ランダムステップ踏破

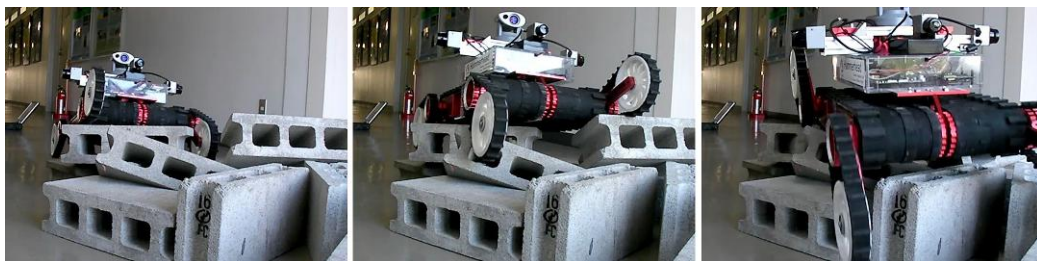
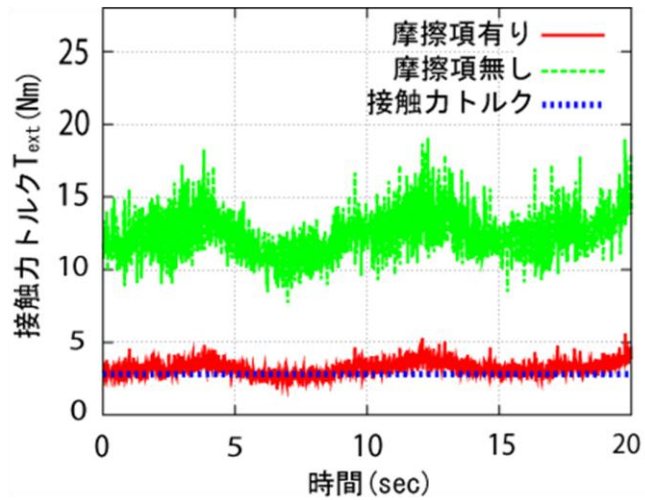
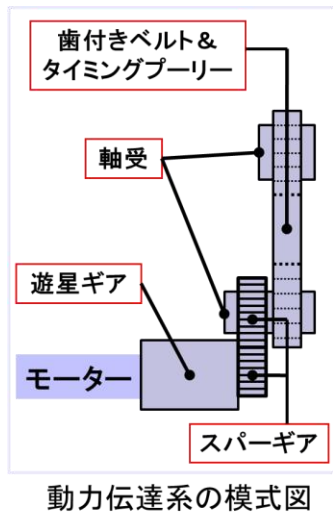


図 4 5 測域センサに基づく半自律での不整地踏破

ステージゲート後の成果として、

- 遠隔操縦で Quince が不整地を楽に踏破するための、半自律不整地踏破機能を構築した。
- サブクローラに加わる弱い外力をトルクとして計測する方法を開発。ギアの摩擦、慣性、サブクローラの重量を考慮して、数 Nm の誤差で接触力を検出できるようになった (図 4 6)。
- PSD センサによる前後 2 点の地面との距離計測と、サブクローラの段差との衝突判定に基づき、自動的にサブクローラの上下動作を行い、不整地を踏破できる機能を Quince に搭載した。Disaster City の倒壊建物が木材瓦礫を進行方向を指示するだけで踏破できることを実証した (図 4 7)。



(a) サブローラのギアの模式図

(b) 接触判定の結果

図 4 6 ギアの摩擦、慣性、サブローラの重さを考慮した外力判定



(a) 倒壊建物の屋根を半自律操縦支援システムを用いて踏破



(b) 木材瓦礫を半自律操縦支援システムを用いて踏破

図 4 7 地面との接触判定に基づく半自律での倒壊建物瓦礫や木材瓦礫の踏破 (米国 DisasterCity)

- ロボットの左右に設置した 2 台の測域センサにより、サブローラを含むクローラ面の前方形状ならびに真下の路面の凹凸を計測し、それに基づいて自動的にサブローラ角を制御する機能を実現した。この機能は、ステージゲート後に Quince に搭載され、階段走行ならびに、図 4 8 に示す非常に困難な不整地における半自律走行を実現した。



図 4 8 Quince の半自律走行（兵庫県三木市消防学校における不整地走行）

- ・上記の半自律走行機能は、消防隊員による機能検証が行われた。図 4 9 中の消防隊員は、それまで一度もロボットを触ったことがなかったのだが、この機能を搭載したロボットを用いて、図中の不整地を走破することができた。この例からも、本機能の有用性が見て取れる。



図 4 9 消防隊員による Quince の不整地走行試験

- ・上記の半自律走行機能は、サブローラを折り畳んだコンフィギュレーションに対しても、実装が行われた。これにより、図 5 0 に示す通り、凹凸が存在する環境における旋回動作も可能となった。



図 5 0 サブローラを折り畳んだ場合の半自律走行（ステップフィールドでの旋回動作）

6) 災害環境 Kenaf シミュレータ

- ・USARSim を用いて、ロボットなしに隊員が操縦の訓練をできるための、ゲームエンジンによる災害環境 Kenaf シミュレータを開発した（図 5 1）。
- ・実機とシミュレータの制御ライブラリ規格を共通化することによって、シミュレータを実機の代わりにプラグインすることが可能になり、実機の制御アルゴリズムの検証をシミュレーション場で行うことを可能にした（図 5 2）。

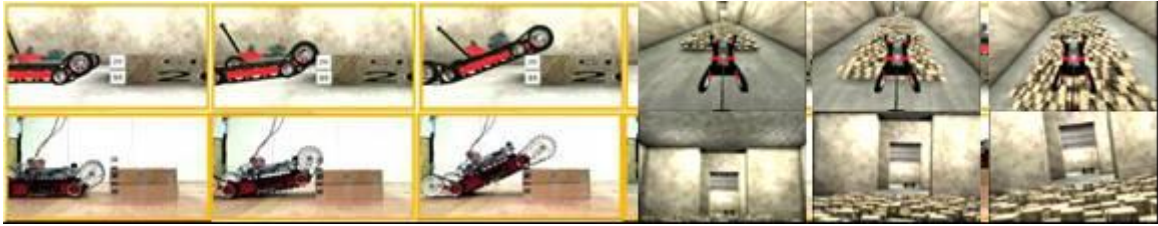


図 5.1 シミュレータによる操作（実機との動作比較）

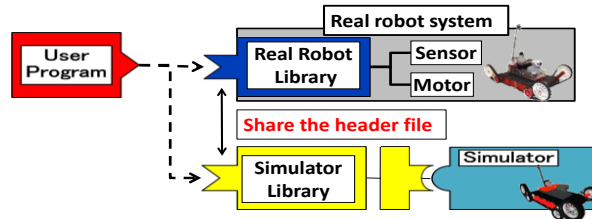


図 5.2 実機とシミュレーションとのプラグイン

③通信技術

本課題では、建物内のロボット群から 700 m 以上離れたオペレータステーション（操作卓）に、複数の遠隔操作映像を含むセンシング情報をリアルタイムに安定して伝送できる通信技術の開発を行った。有線・無線ハイブリッドアドホックネットワーク（図 5.3）技術などを用いることでローミング時に発生する遅延の軽減を実現し、この課題を解決した。

（顕著な実績）

1) 有線・無線ハイブリッドアドホックネットワーク

- ・既存の無線アドホック通信には次のような問題点があった。

多数の映像伝送における無線帯域の不足（スケーラビリティの不足）、
遠隔操縦を困難にするレイテンシー（通信遅延）の増加、
移動によるハンドオーバー（通信局の切替え）時の通信の切断、

- ・有線・無線ハイブリッドアドホックネットワークは、次の方法によりこれらの問題を解決した。

ロボットが敷設する有線ネットワークによって基幹の帯域を確保

基幹有線網から離れた場所では無線アドホック通信機能を用いて探索範囲を拡大

2.4GHz に加えて 5GHz 無線を同時に使用可能な多重無線機能により伝送容量を増加

常時複数の経路を確保することによって経路切替え時の通信切断時間短縮を実現

有線と無線との並行リンクを活用することで有線切断時には無線リンクが自動的にバックアップ機能を果たす

電波伝搬が不安定となり無線通信では対応が困難な領域（狭い階段など）に対しては、有線網敷設によって安定通信を実現

- ・平成 20 年度までに仙台市地下鉄，神戸市地下街さんちか等において実証実験を行い，約 683m の長距離遠隔操縦を実現した（図 5.4）。平成 21 年度には兵庫県立広域防災センターにおいては

10階建てビルの10階までのロボット登攀走行を当通信技術を用いて繰り返し検証をおこなった。

・平成22年度には上記検証試験に加えて東京消防庁立川訓練所で、ローミング性能に関わる比較検証を実施した。(図55) ローミング時における通信切断は、ロボット操縦者にとっては深刻な問題であり操縦不能となることもある。有線・無線ハイブリッド・メッシュネットワーク・システムでは当結果が示すようにローミング(経路変更を含む)時の遅延抑制を実現できていることを確認した。

・加えて平成22年度には、諸外国、特に米国におけるレスキューロボットが使用している無線システムに関する調査を行い、災害救助ロボットシステムにおける無線電波利用に関する課題を総務省へ報告し日本国内では使用が認められていない米国FCC認可無線LANカード(高出力600mW)実験試験局申請を行い、比較検証を実施した。概算レベルでは米国FCC認可無線LANカードは日本国内で使用可能な無線LANカードに比べて通信可能距離で約2倍になると考える。(図56)

・このハイブリッドネットワークを経由して音声通話システム(VoIP)を利用可能とし、市販のVoIP端末、及びカメラ・谷沢製作所製Uメット(音声通話機能搭載ヘルメット)を利用可能とした。これによりロボットのみならず、連携する消防隊員も音声通話、映像転送、安全確認等が可能となった。(図57)

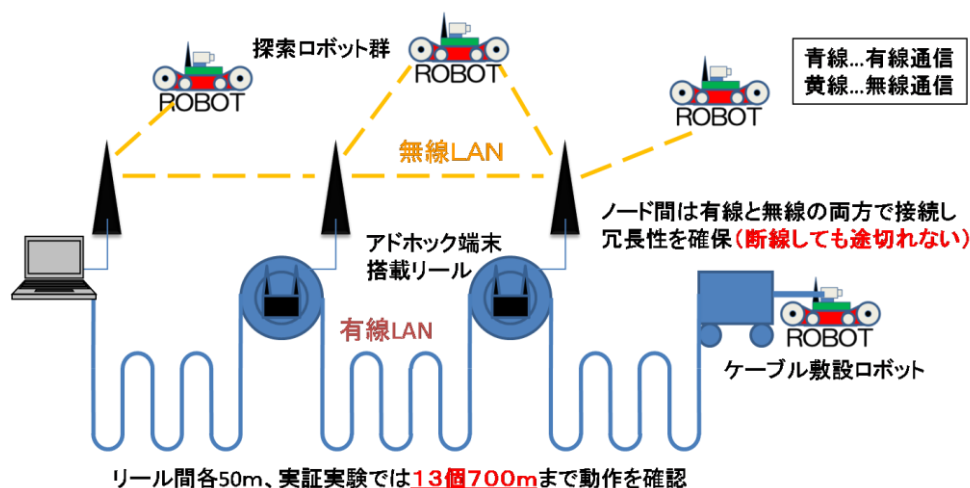


図53 有線・無線ハイブリッドアドホックネットワーク

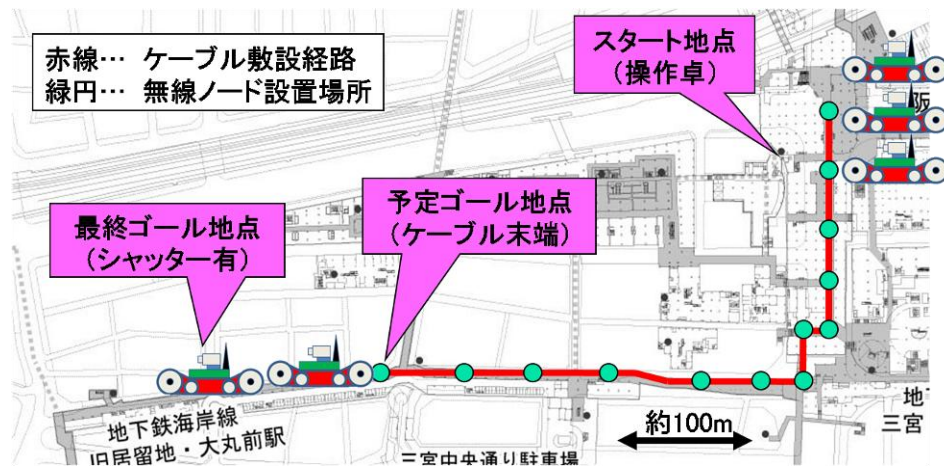


図 5 4 神戸三宮地下街での 683 m 遠隔操縦

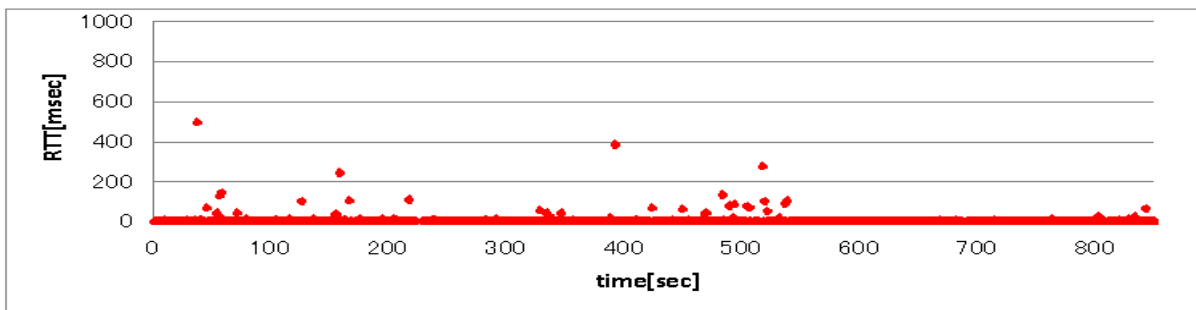


図 5 5 遠隔ロボットによるローミング時の伝送遅延測定結果

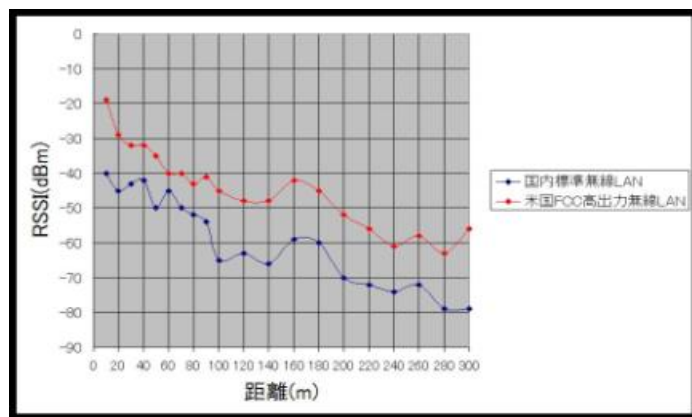


図 5 6 国内無線 LAN カードと米国 FCC 高出力無線 LAN カードの比較 (距離と電波強度)

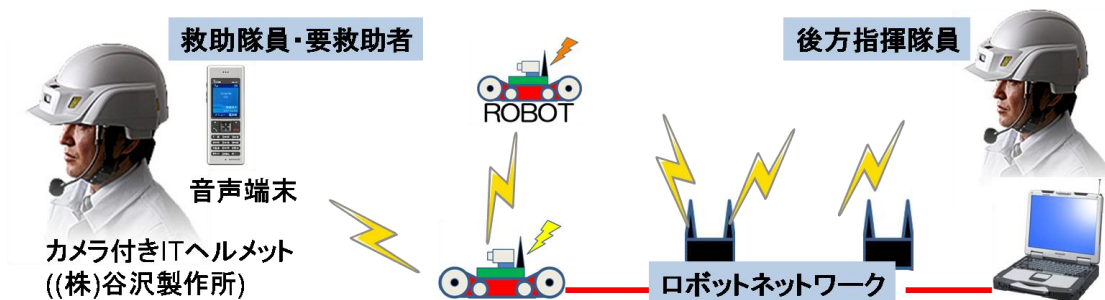


図 5 7 ロボットネットワークと連携する救助隊員用の通信資機材

2) ケーブル敷設ハードウェア

- ・ケーブル敷設が可能なロボットのハードウェアを試作し、仙台市地下街、神戸市さんちかにおいて実証試験を行い、階段等の踏破能力の改良を行った。(図58) ケーブルは50mのリール及びアドホック通信端末からなり、ケーブル敷設ロボットはこれを16台搭載し敷設することにより最大800mの無線通信可能エリアを提供することが可能である。(図59, 60)
- ・消防隊員との実用検討を行い、より簡易な構成の有線・無線統合通信サブシステムを開発した。(図61) このシステムは1台のQuinceに光ファイバリールと無線アクセスポイント機能を持つ有線Quinceと、その有線Quinceに無線接続することで遠隔操縦される無線Quinceで構成される。簡易システムは元システムと比較して通信可能範囲は狭いがより軽量で、複数台ロボットを密集させて遠隔操縦させる場合は十分な性能を持つ。(図62)

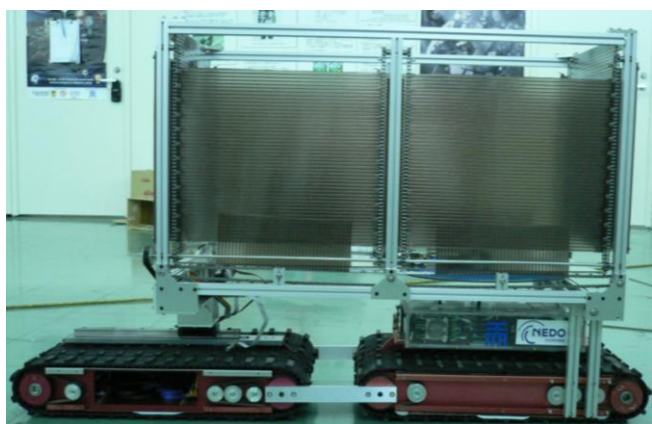


図58 登坂能力を改良したケーブル敷設ロボット

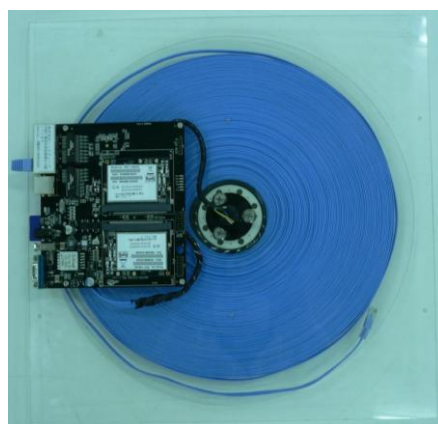


図59 ケーブルリール



図60 無線基地局敷設のシーケンス

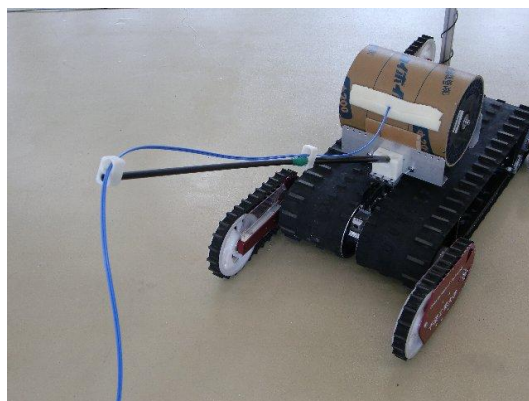


図61 光ファイバを用いた簡易システム

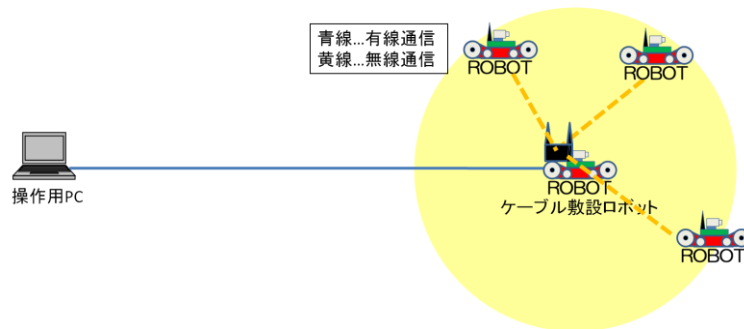


図 6 2 簡易システムを用いた無線通信の範囲

3) 閉鎖空間内での電波伝搬シミュレーション

- ・シミュレーションにより閉鎖空間の伝搬特性に関する確認を行った (図 6 3)。
- ・Kenaf 搭載アンテナの電波シミュレーションによりアンテナ種類、高さ等の妥当性検証を行い、必要に応じてアンテナ高を調整可能なアンテナ台を開発した。
- ・階段や不整地環境等の傾斜面における電波受信状況を改善するため、指向性可変アンテナを開発し、シミュレーションと実機開発によりその有効性を検証した。(図 6 4, 6 5)

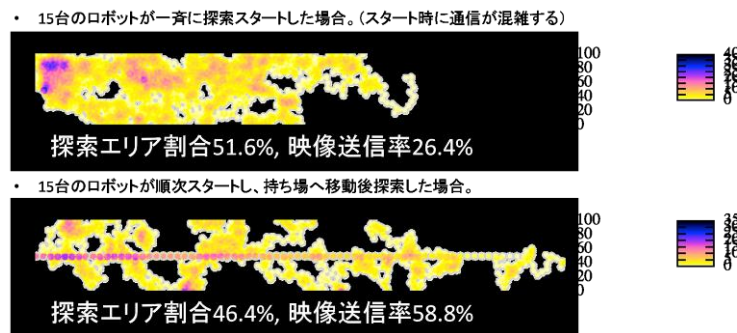


図 6 3 複数ロボットの電波伝搬シミュレーション

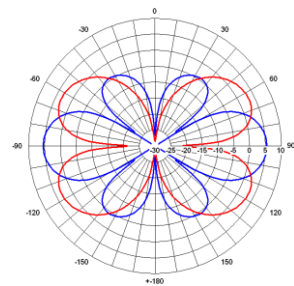


図 6 4 指向性可変アンテナの電波特性シミュレーション 図 6 5 開発したアンテナの外観

④GIS技術

ロボットの移動の迅速性を保ったまま、複数台のロボットにより収集されたカメラ画像・レーザスキャンなどのセンシングデータを既存の地図情報に統合することをめざし、ロボットの測位で用いる複数の座標系の不確定性や取得データの位置情報の誤差を許容しつつ、事後にその不確定性や誤差を解消できる機能を GIS に組み込み、実証実験によりその機能・性能を確認した。ま

た、GISの開発と並行して、そこで採用した通信プロトコルや概念設計を、ロボットによる位置情報サービスの国際標準策定に反映した。

(顕著な実績)

1) 複数座標系を許容するためのプロトコル拡張

開発を進めてきた位置情報サービスプロトコル MISP とデータベースシステム DaRuMa を拡張し、複数の座標系による位置情報を扱いつつ、同時に座標系の関係を事後に修正できる機能を追加した。ロボットでは位置情報のもととなる座標系が流動的で曖昧さを含まざるを得ないため、通常の GIS で用いられる統一された座標系による位置表現では情報を表現しきれない。これを解消するため、座標系を任意に定義でき、その原点情報を事後に変更してもデータの整合性をとれる枠組みを設計し、MISP および DaRuMa に実装した。

2) 座標系の修正可能な統合地図生成システム

本プロジェクトの最終目標は、複数台のロボットによる 3 次元スキャンデータおよび画像データを統合したマップを提供することである。このために、多数の 3 次元スキャンデータの位置合わせを手動あるいは自動で行いつつ、修正されたロボットの位置から、画像データなどの情報を求め、地図上にマップするシステムを構築した。実装した機能及びツール群は以下のとおりである。

- (1) 複数の座標系変換情報を動的に更新する機能
- (2) ロボットごとのローカル座標系、統合座標系の双方に対応したデータ表示システム
- (3) 位置合わせソフトウェアと連動するための通信プロトコルと通信ライブラリ
- (4) 3 次元形状データを効率的に扱うためのデータ設計とデータ表示システム

作成した統合地図生成システムの概要を図 6 6 に、また、得られた統合地図を図 6 7, 6 8 に示す。

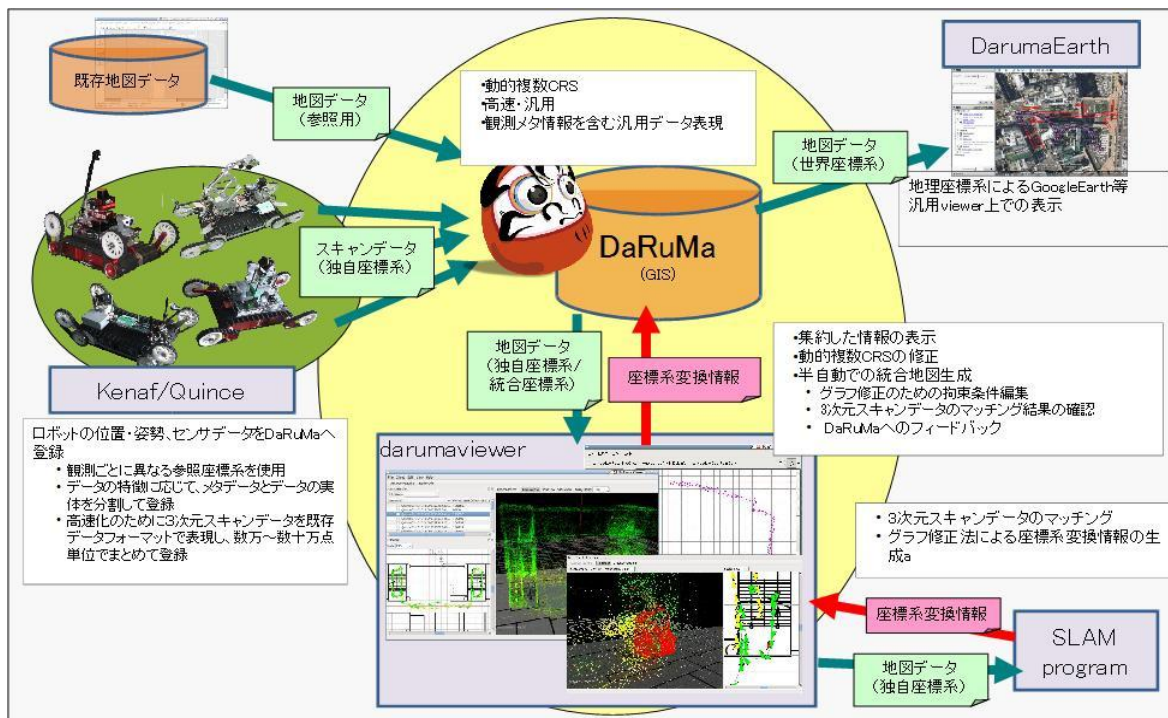


図 6 6 減災情報共有データベース DaRuMa を中核としたセンシング情報集約システム

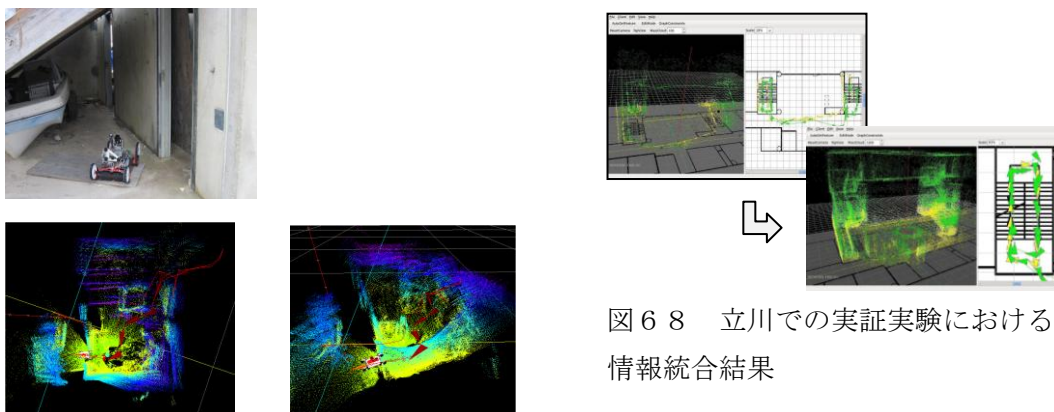


図 6 8 立川での実証実験におけるセンサー情報統合結果

図 6 7 Disaster City における 3 次元地図生成

3) 高精度 2 次元・3 次元オドメトリ

- ・ジャイロスコープの情報を用いたスリップ推定により、クローラ型ロボットの高精度 2 次元オドメトリによる位置推定を可能とした (図 6 9)。これにより、特に、スリップが大きく発生するクローラロボットの旋回時におけるオドメトリに生ずる誤差を、大きく低減することができた。
- ・3 軸ジャイロスコープにより姿勢を推定することによって、スリップ推定による 2 次元オドメトリを、3 次元オドメトリに拡張した。これにより、階段移動を含む 3 次元的なロボットの移動に対する位置推定が可能となった。図 7 0 は、兵庫県三木市の消防学校にある消防訓練棟をロボットが移動探査した際、三次元オドメトリをベースとして三次元地図情報を獲得した例で

あるが、ロボットの、長距離上下方向の移動を、精度良く推定できていることが見て取れる。

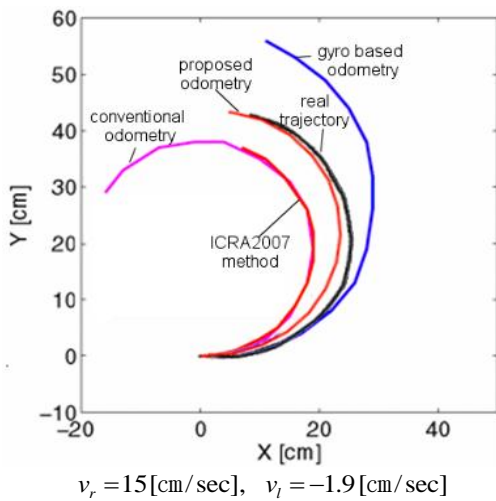


図 69 2次元オドメトリ



図 70 3次元オドメトリによる地図構築

4) 3次元環境地図の構築

- ・ロボットに搭載した三次元環境情報取得センサを利用し、ロボットの移動と共に、三次元オドメトリを利用し、三次元環境を逐次構築する手法を実装した。これにより、ロボットは、停止することなく、三次元環境情報を逐次取得することが可能となった。図 7 1 は、ロボットが不整地（ブロック）上を走行中に、三次元距離センサより獲得した距離情報から、環境情報を取得した例である。右図を見ると分かる通り、ロボット左前方に位置する四角いボードが正しく認識できていることが見て取れる。

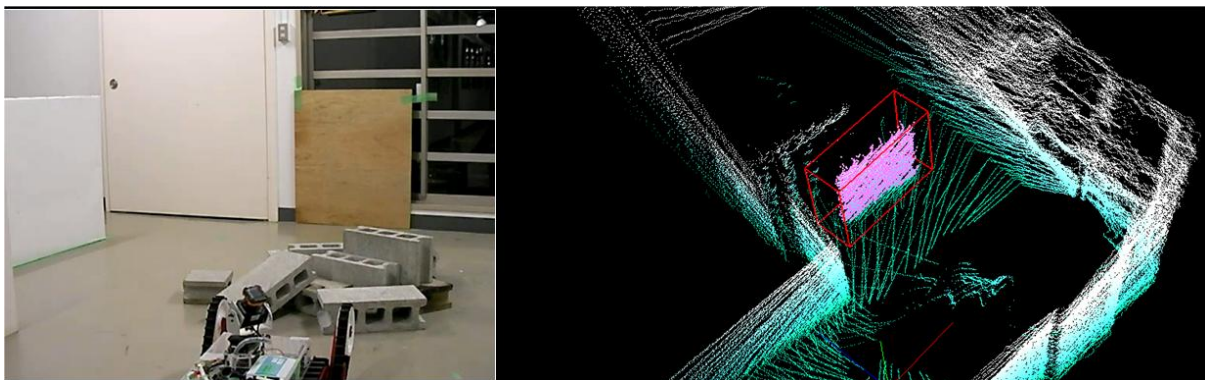


図 7 1 ロボットが不整地上を走行中(左), センサを利用して逐次三次元情報を取得した結果(右)

- ・上記の手法で獲得した三次元環境情報に ICP アルゴリズムを適用することで、オドメトリに生じた誤差を低減することができ、さらに高精度な地図を構築することが可能となった。図 7 2 は、2009 年ロボカップレスキュー世界大会（Graz）で獲得した、模擬被災地の地図情報であるが、三次元オドメトリに生じた誤差を含む地図（左）に対し、誤差を修正して、正しく環境情報を獲得できていることが見て取れる。

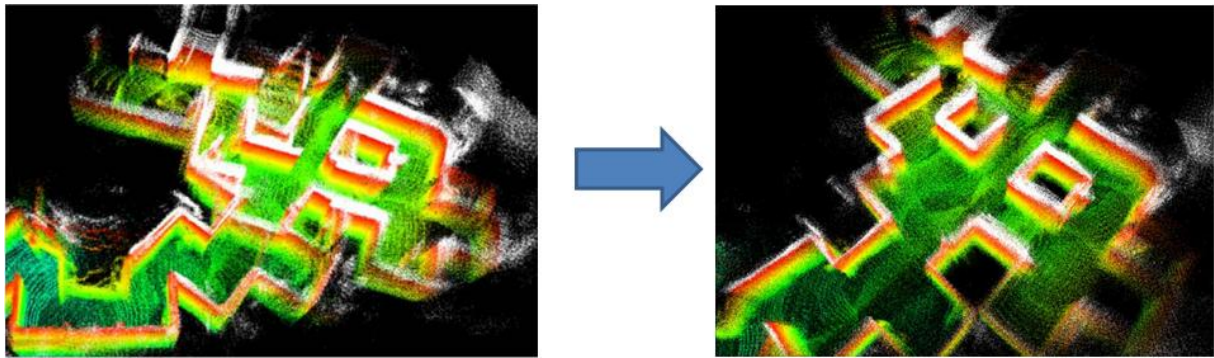


図 7 2 ICP アルゴリズムによる高精度三次元環境情報の獲得

- ・上記の手法（三次元逐次環境取得手法と ICP アルゴリズムによる位置修正手法）を利用し，2009 年ロボカップレスキュー世界大会（Graz）の模擬被災地を取得した例を図 7 3 に示す．この図より，広域の模擬被災環境において，非常に高い精度で環境情報を獲得できていることが分かる．

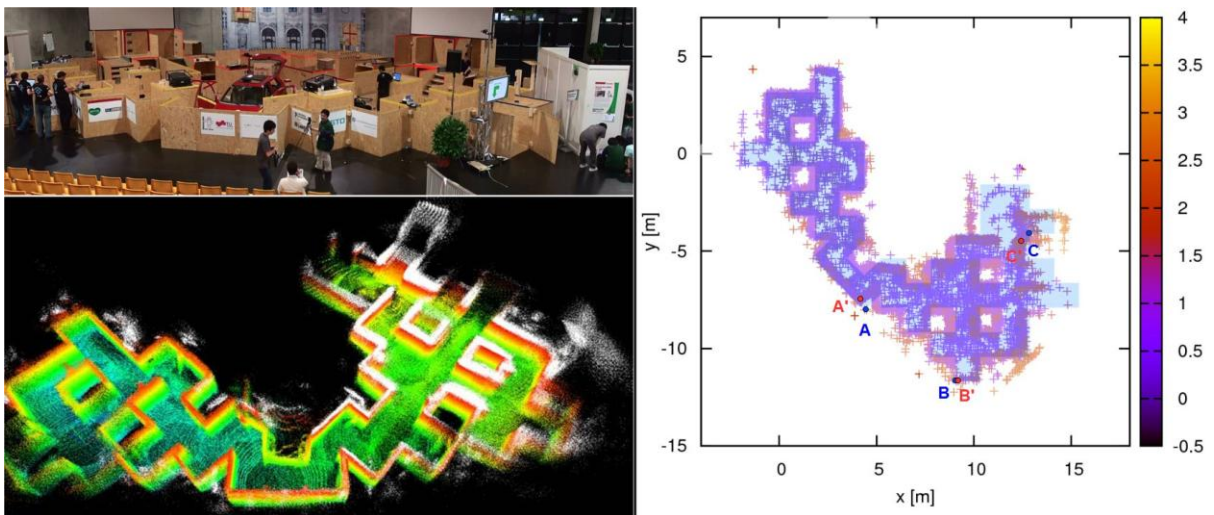
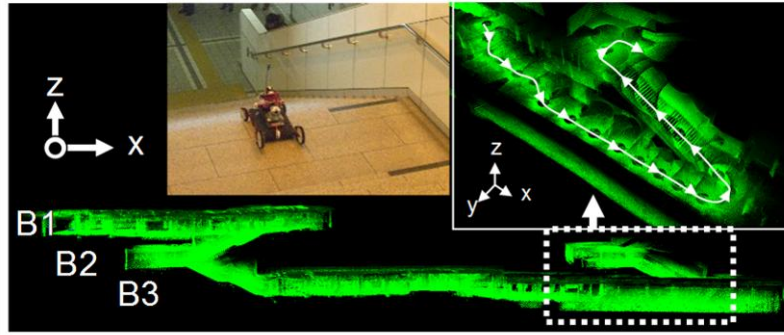
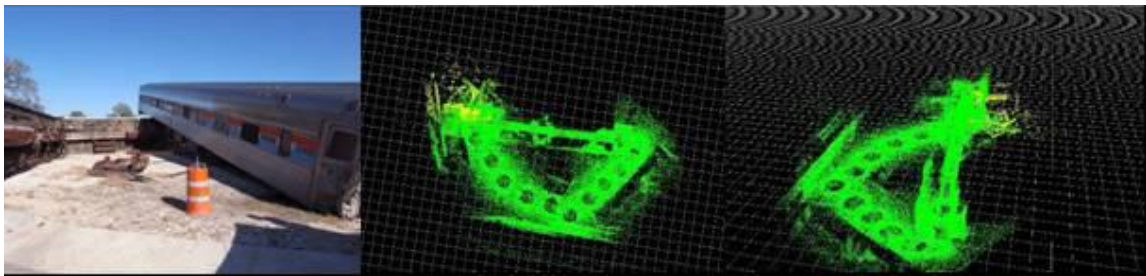


図 7 3 ロボカップレスキュー2009 年世界大会（Graz）の模擬被災地環境（左上）と取得した大域三次元環境地図（左下）ならびに，大域に次元環境地図（右）．右図中の A 点，B 点，C 点の誤差は，ICP アルゴリズムにより，それぞれ，2.72m→0.60m，5.20m→0.14m，2.76m→0.57m となり，誤差が大きく低減されたことが分かる．

- ・実証試験において 3 次元地図を構築できることを示した．（図 7 4）．



(a) 仙台市地下街



(b) 列車事故の模擬現場

図 7.4 構築した三次元地図

- リアルタイムに 3 次元形状を計測するため、Kenaf に測域センサを上向きに固定し、オドメトリとの併用により 3 次元環境情報を取得する方法を開発した (図 7.5)。

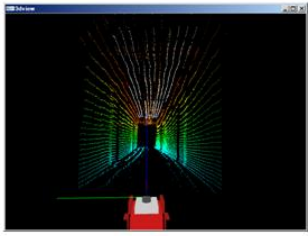
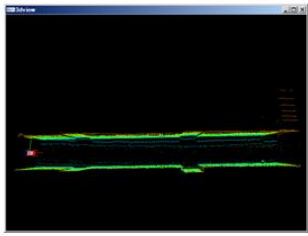

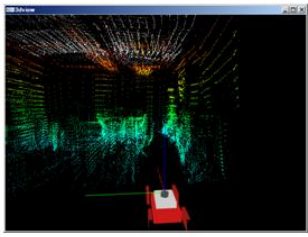
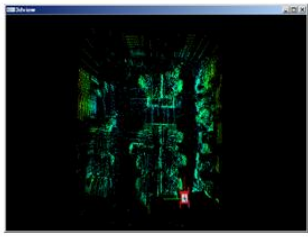

	ロボット視点	上空の視点	対象環境
廊下環境			
乱雑な環境			

図 7.5 上向き測域センサによる 3 次元環境情報取得結果

- 広範囲の密な 3 次元形状が計測可能なレーザスキャナー (HDScanner) を開発. Quince に搭載して移動しながら密な 3 次元の地図を構築することが可能になった。
- 本プロジェクト終了後の実験成果であるが、参考のために、図 7.6 に、東日本大震災で被災し

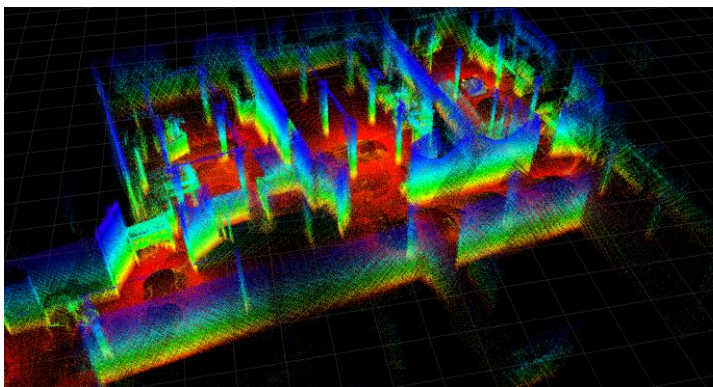
た東北大学の建物内部の3次元地図を示す。被災した建物内を遠隔操作の Quince で探査し、3次元地図を構築可能なことを実証した。3次元地図を上から見ることで部屋の中にある小部屋や、隣の部屋に通じる扉など探査していない空間を発見することができる。



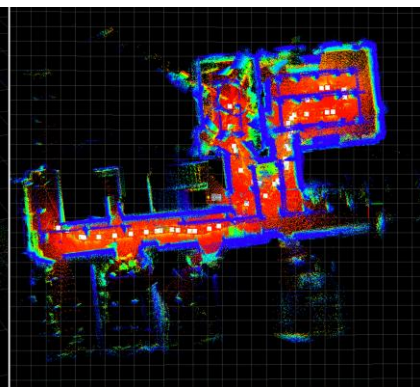
(a)被災した建物内部



(b)建物内を探索する Quince



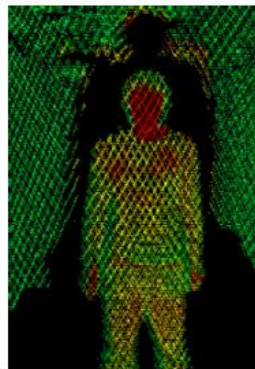
(c)リアルタイムに構築した3次元地図



(d)上から見下ろした3次元地図

図76 被災した東北大学の建物内の3次元地図

- ・三次元環境情報に付加価値を持たせるため、測域センサにより取得した三次元距離情報と赤外線カメラから得た温度情報を組み合わせることで、三次元温度分布マップを構築する手法を提案した。図77は、この手法の適用例である。(a)は三次元距離取得センサから得た三次元情報、(b)は赤外線カメラから得た温度情報、(c)はこれらを融合したもので、三次元距離情報に、温度情報が付加されていること（赤色が温度が高い）が見て取れる。



(a)Range data (b)Temperature image (c)Integration data

図77 三次元温度分布マッピングシステムによる三次元温度分布の提示例

⑤実用性能・試験配備

1) Quince の耐久性・防塵・防水

・Quince の耐久性については長期的な運用に対する耐久性と、過酷な環境下における短時間の耐久性について検討した。長期的な運用では、いわゆるメンテナンスフリーを実現した。これらは、不整地を走行するときの筐体のひずみ防ぎ、メインフレームをはじめに、構造材の接合部分は組継ぎや印籠継ぎにより固定した。緩みやすいボルト/ナットの組み合わせは一切用いず、立込によるねじ締結を行っている。また過酷環境下として、高熱源下での対応はできないが、火山灰、雪上、軟弱地盤では問題なく走行できる。また、段差踏破や階段走行で受ける衝撃は全てダンパーで受けることにより、2m からの転落後の走行も可能とした。このように、コントローラや配線資材、センサなど総合的に保護する構造としている。

Quince では IP66 相当の防水・防塵機能の実装した。コントローラなど、ハードウェアを筐体内部に実装すると、発熱が問題となる。このため、筐体全てに冷却フィン加工を施した。この方式では、ロボットが走行することにより、クローラが発生する空気の流れを利用している。

2) Quince の試験配備

Quince は 2010 年 8 月末より 3 月末までのおよそ 6 ヶ月、千葉市消防局の協力を得て「消防資機材」として登録後、ハイパーレスキュー部隊を持つ、4 つの消防署において試験的に配備された。なおこの試験配備により、およそ 40 名ほどの隊員が Quince の操作・運用を担当した。以下は、終了後の反省会でも出されたレスキュー部隊員の意見である。

レスキューロボットを取り扱っての試験

- 1 どのような取扱い訓練を行ったか。(訓練時間等)
 - ・基本操作習熟訓練
 - ・煙道 (暗所及び狭隘空間)、材木等を活用した障害物走破訓練
 - ・九都県市合同防災訓練での展示
 - ・危険区域を想定した負傷者の確認
 - ・サブクローラによる負傷者の意識確認
 - ・カメラによる危険区域の状況確認
 - ・目視不可位置での走行
 - ・想定訓練 (災害現場を想定しての訓練)
- 2 実災害の使用は。
 - ・災害使用 0 件
- 3 操作性について。
 - ・市販のゲーム機器のコントローラを使用しているため、比較的容易に操作出来る。
 - ・サブクローラの操作は、カメラで視認できないため困難。
 - ・無線通信が不能になった場合の復旧が困難

- ・前後左右のサブローラーを別々に動かす時に戸惑いがあった。
- 4 機能性について。
- ・階段、角材等の障害物の走破について、障害物に対して直角又は斜めに入ることが想定されることから、転倒した場合の対応も必要と思われる。
 - ・現在のタイプは、耐衝撃性、防水性、防塵性があるものの、夏場において作動しなかったことがあることから、熱対策も必要と考えます。
 - ・平坦地での走行性は良いと思う。
 - ・遠隔及び遮蔽されている空間での操作には限界があった。
 - ・モニターのみを見て操作をした時に、ロボット自体の進む方向が分かれ ば操作しやすいが、ロボットが反転した時など操作に戸惑いが生じた。(災害現場においては、モニターでの操作となる。)
- 5 改良点について。
- ・煙道内等の暗所では照明（ライト）がなければ操作が難しい。
 - ・ロボット本体が熱に弱く外気温の高い場所で動かなくなってしまう。
 - ・操作距離が遠くなるとカメラ映像に時間差（遅れ）が生じ操作しづらい。
 - ・左右のサブローラーのキャタピラがはずれやすく、修正が困難。
- 6 実用化を目指すには（課題等）
- ・電波（無線）の弱点（操作可能距離、階層が違う場合届きづらい）
 - ・熱対策が必要
 - ・カメラのみでは難しい
 - ・照明、音声通信、温度測定等の機能が必要
 - ・負傷者のバイタル測定（脈拍・体温・呼吸・血圧）ができるとうい。
 - ・現場ではドア等が閉鎖されていることが想定されることから、ドアの開閉ができればと思います。(押し戸、引き戸、横開き等)
 - ・モニターのみを見ての操作時、ロボット自体がどのような方向になっても操作しやすい機能が必要
- 7 その他意見
- ・測定器具を積載し、検知活動等ができれば、その検証も必要だと思う。
 - ・測定結果を音、映像で確認することが可能か。
 - ・マニピュレーター取り付け時の強度。
 - ・マニピュレーター取り付け時、他の測定器をどの程度装備できるか。
 - ・電源を入れる順番によっては、起動までに時間差がある。

図 7 8 に九都県市合同防災訓練のようすを示す。



図 7 8 九都県市合同防災訓練の様子

3) UMRS-2009 の耐久性・防塵・防水

・落下試験評価

ロボットは場合によっては不整地路面を走行し、またある程度の落下や衝突も想定される。

UMRS2009 は、ゴムベルトに覆われ耐衝撃性を考慮したサブローラアームが本体フレームを保護する様に 4 隅に取付けられ、落下や衝突時の衝撃を第一番目に吸収する構造としている。実際、走行評価実験中に高さ 1.5m 程度の階段から転落したが、その後も問題なく走行可能であることを確認した。もっと高い場所からの転落時のロボットの挙動を確認する為、図 7 9 に示す様な、2m 高さからの落下試験（床面にクッション材付設）を行った。試験結果として、車体正面方向（条件：0 度、45 度）へ転落した場合、落下中に前方方向に回転、壁にも接触し、本体が反転した状態で着地した。どの落下条件でも着地時、サブローラアームが第一番目に床面と接触しており、上述の衝突時の衝撃を和らげる構造であることを確認した。



〈1〉スタンバイ

〈2〉落下開始

〈3〉反転

〈4〉着地

図79 ロボット落下試験

・ 防塵・防水性

これについては、詳細な実験等は実施していないため客観的なデータはないが、設計段階から車体についての防塵・防水のためのパッキン・ガスケット等の対策を施しているため少なくとも見積もって、IP64以上と推定できる。

4) UMRS-2009 の試験配備

・ 神戸市消防局への貸与とこうべスーパーイーグルによる実践に向けての活動

2010.9.1～2 011.2.末日 UMRS2009 一式を「こうべスーパーイーグル」に貸与し、試験配備がなされ、種々の試行訓練に供与された。

図80は、「こうべスーパーイーグル」から寄せられた結果の評価である。

ア 操作卓

ノートパソコンで本体動作を設定し、ゲーム機等に使用されているものと同様のコントローラにより、ロボット本体を操作するのだが、実戦配備を想定するならば、もう少しコンパクトな操作機が望まれる。たとえば携帯用ゲーム機やタブレット型コンピュータ、またスマートフォンに近い形状ならば携帯性・収納性も良く、より実戦向きである。



操作卓ディスプレイ

また本体に設置されている、可燃性ガス・CO2・温度センサーの測定数値をパソコンのディスプレイを介して確認できるが、一定の数値に達したときに警報音で知らせる機能があればさらに良い。

図80 神戸スーパーイーグルからの意見 (1 / 3)

イ 操作性

ロボット本体を視認できる有視界状態では、初めて操作する者でも数時間の訓練でロボットを操れるようになるが、ロボット本体に装着されている、カメラの映像のみを頼りに操作できるようになるまでには、かなりの習熟が求められる。

ロボット本体が視認できない無視界状態では、ディスプレイに表示されるグリッドラインを確認することで、要救助者に近づいても衝突を回避することができるが（このグリッドラインは本体からの距離で色分けされている。）現在研究が進められているヒューマンインターフェースによる人避け動作、ハザードを判別して避ける機能がさらに充実し、半自立走行が可能となれば、より安全に操作することができる。

ウ カメラ

本体に前後、及び鳥瞰カメラが装着されており、コントローラボタンの操作で切り替えて、操作卓のディスプレイに映像を映し出す。前後、鳥瞰同時に映像を映し出すことができれば、進入空間内部の状況が瞬時に確認できるので、改善の余地があると思われる。また、現在救助隊の装備である、熱画像直視装置のような機能があれば、遮蔽物の裏側に居る要救助者の捜索や、熱源の特定など、さらに活動の幅が広がる。

エ 通信

本体の遠隔操作は無線通信であるが、送信出力が不足しており、本体と操作卓が離れ過ぎた場合や（20m～30m）、遮蔽物等の障害物があると、通信が途絶して操作不能となってしまう。有線LAN敷設ロボットや、無線中継器などを活用すれば解消できるが、実戦配備するためには、できる限りシンプルな通信システムにより、活動までのレスポンスを向上させるべきであるので、無線通信にかかる法令上の規制緩和を国等に求め、無線通信出力を上げることが是非とも望まれる。



階段を走行する UMRS2009

オ 機能

本体に設置される前後、鳥瞰の3基のカメラにより、閉鎖空間や建物内部を映像として

図80 神戸スーパーイーグルからの意見（2/3）

確認でき、ハザードや要救助者の状態を知ることができる。しかしさらに高い機能を求めるのであれば、ロボットが走行した空間の三次元地図化である。この地図を元に、空間へ進入する救助隊員が、より具体的な活動のプランニングをすることが可能となる。また本体には可燃性ガス・CO2・温度センサーが装備されているが、NBCR 災害において使用する各種の測定機材をマウントし、汚染物質をサンプリングすることが可能となれば、より安全な活動を実施することができる。

カ 本体の走行性

瓦礫上や砂利上の走行では若干の不安を感じたが、平坦なアスファルト、コンクリート上では特に問題はなく、本機に搭載された階段等の段差を踏破する為の半自律昇降機能については、かなり有効であった。不整地の凹凸を走行する場合には、自己判断し、踏破する半自律操縦支援システム（フリッパーの接触判定・レーザー距離計による地形計測）が確立できれば操縦者の負担が軽減され、よりスムーズなアプローチが可能となる。さらに、閉鎖空間の走行を想定するならば、鳥瞰カメラを格納できるように改善するなど、本体そのものの小型化が望まれる。



閉鎖空間を走行する UMRS2009

図 8 0 神戸スーパーイーグルからの意見 (3 / 3)

5) その他特筆すべき項目

本プロジェクトで開発した **Quince** は、プロジェクト終了後に福島第一原子力発電所事故の対応のために改造され、原子炉建屋内の調査と軽作業のために使用された。2011年6月24日に始まり、7月8日、7月26日、9月22日、9月24日と、第2号炉、第3号炉に投入され、線量率の計測、ダストサンプリング、配管の状態検査などに、東京電力関係者によって使用された。7月26日のミッションの成果を図81に示す。6月24日には水位計設置、汚染水サンプリングも試行されたが、建屋図面と現場とのサイズの相違、現場での水位計ケーブルの交換による不具合により、ミッションは失敗に終わった。以上のように、失敗の原因は **Quince** の問題ではない。また、一部メディアで作業員が動かないロボットを救出したように書かれていたそうであるが、これは全くの事実誤認である。

東京電力ウェブページ参照のこと

図 8 1 福島原発における 2011 年 7 月 26 日の Quince の成果（東京電力ウェブページより）

(3) 成果の意義

実証試験やデモンストレーションを精力的に行った結果、消防・警察・自治体・FEMA 等のユーザの中に、ロボットの活用に関する認知が高まり、理解が深まり、ロボットの活用法を積極的に考えていこうという気運が高まってきたことは、非常に重要なことである。特に、自治省令第 22 号、消防庁告示第 3 号の改正が行われ、高度救助用器具の一つとして、検知型遠隔探査装置を、地域の実情に応じて備えるものとする、との項目追加が行われたことは、本研究開発と呼応した変更として特筆すべきことである。

自然災害や人為災害において、人間にとって危険な作業をロボットで代行することの必要性は論を待たない。特に、このようなロボットの必要性は東日本大震災、特に福島第一原子力発電所の事故によって深く認識されることとなった。諸外国ではこの種のロボットの配備が進みつつあり、我が国は立ち後れている。本プロジェクトは、日本においてこの種のロボットの研究開発を進めている数少ない事例であり、技術成果として世界的に高いレベルにあることから、その成果は貴重であると考えている。

本プロジェクトで開発した技術および研究に関連して、下記の賞を受賞した。

- ・ 2008 年 9 月 24 日、黒瀬, IEEE Robotics and Automation Society Japan Chapter Young Award, 「Designing of online simulation environment for the development support of

control algorithms on rough terrains vehicles," Kensuke Kurose, Satoshi Saga, Shogo Okamoto, Kazunori Ohno, Satoshi Tadokoro, Proc. 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2008), pp. 2091-2096, 2008 に対して」

- 2008 年 1 月 15 日, 大野, 競基弘賞 学術業績賞, 受賞タイトル「レスキューロボットの遠隔操縦および地図構築の技術開発」
- 2009 年 1 月 1 日, 田所, IEEE Fellow, 受賞タイトル「for leadership in the development and deployment of rescue robotics」
- 2010 年 12 月, 宮原, SI2010 優秀講演賞, 「動力伝達系の摩擦モデルに基づくサブクローラ機構への接触力の推定」宮原 直紀, 大野和則, 竹内 栄二郎, 田所論 SI2010. に対して.
- RoboCupRescue Robot League Mobility Challenge 世界優勝 (2007.7)
- RoboCup Rescue Robot League 総合世界 2 位 (2009.7)
- RoboCup Rescue Robot League Mobility Challenge 世界優勝 (2009.7)
- RoboCup Rescue Robot League Manipulation Challenge 世界優勝 (2009.7)
- RoboCup Rescue Robot League Autonomous Challenge 世界 2 位 (2009.7)

また, 下記論文 4 題が, ベストペーパー賞のファイナリスト (最終候補者) に選ばれた.

- Daisuke Inoue, Kazunori Ohno, Shinsuke Nakamura, Satoshi Tadokoro, Eiji Koyanagi, Whole-Body Touch Sensors for Tracked Mobile Robots Using Force-sensitive Chain Guides, Proc. 2008 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, (SSRR2008), pp. 71-76, 2008.
- Keiji Nagatani, Naoki Tokunaga, Yoshito Okada, Kazuya Yoshida, Continuous Acquisition of Three-Dimensional Environment Information for Tracked Vehicles on Uneven Terrain, Proc. of 2009 IEEE/RSJ International Conference on Robots and Systems, 2009.
- Kazunori OHNO, Valerie CHUN, Tomotake YUZAWA, Eijiro TAKEUCHI, Satoshi TADOKORO, Tomoaki YOSHIDA, Eiji KOYANAGI, "Rollover Avoidance Using a Stability Margin for a Tracked Vehicle with Sub-tracks," Proc. of 2009 IEEE International Workshop on Safety, Security, and Rescue Robotics, 2009.
- Ken SAKURADA, Shihoko SUZUKI, Kazunori OHNO, Eijiro TAKEUCHI, Satoshi TADOKORO, Akihiko HATA, Naoki MIYAHARA, Kazuyuki HIGASHI, "Real-Time Prediction of Fall and Collision of Tracked Vehicle for Remote-Control Support," Proc. of 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, A2-2, 2010.

(4) 特許の出願・公開・取得

下記の特許を出願した.

特願 2011 - 106909 無人走行用移動体

特開 2011 - 105137 クローラ型走行装置

(5) 成果の普及

表5に示すような論文発表（査読あり）を行うことにより，成果の技術的学術的な普及を行った．また，表6に示すように，展示・デモ，一般講演会，メディア等での発表を精力的に行い，本研究成果が，技術者・研究者だけでなく，国内外のユーザや一般市民にも広く知られるようになった．

表5 発表論文（査読あり）

年月日	発表誌	タイトル	発表者
2007.4.11	Proc. 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2752-2757	Improvement of the Odometry Accuracy of a Crawler Vehicle with Consideration of Slippage	Keiji Nagatani, Daisuke Endo, Kazuya Yoshida
2007.7.9	RoboCup International Symposium 2007	Multi-Agent Positioning Mechanism in the Dynamic Environment	Hidehisa Akiyama, Itsuki Noda
2007.9.20	SICE Annual Conference 2007	Performance Analysis of the Network Model and Scenarios for the Search Robot Rescue System	Gyoda, Hada, Takizawa
2007.9.29	IEEE International Workshop on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR2007)	Performance Analysis of the Network Models for the Search Robot Rescue System in the Closed Spaces	Gyoda, Hada, Takizawa
2007.11.1	Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems	Semi-autonomous Control System of Rescue Crawler Robot Having Flippers for Getting Over Unknown-Steps	Kazunori Ohno, Shouich Morimura, Satoshi Tadokoro, Eiji Koyanagi and Tomoaki Yoshida
2007.11.1	Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2559-2560	Semi-autonomous Control of 6-DOF Crawler Robot Having Flippers for Getting Over Unknown-Steps (Video)	Kazunori Ohno, Shouich Morimura, Satoshi Tadokoro, Eiji Koyanagi and Tomoaki Yoshida
2007.11.1	Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2871-2876	Path Following Control for Tracked Vehicles Based on Slip-Compensating Odometry	Daisuke Endo, Yoshito Okada, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida
2008	Workshop in National Chung Hsing University	Rescue Robotics, Invited Speech,	Satoshi Tadokoro
2008	Special RT Symposium	Rescue Robotics, Invited Speech,	Satoshi Tadokoro
2008	Workshop with FBI	Rescue Robotics in Japan, Invited Speech,	Satoshi Tadokoro
2008	Annual DHS University Network Summit	Rescue Robotics in Japan, Invited Speech,	Satoshi Tadokoro
2008	Workshop in Texas A&M University	Rescue Robotics in Japan, Invited Speech,	Satoshi Tadokoro
2008.2.1	日本機械学会論文集(C編)74巻738号, pp.353-358	レーザ光の軌跡を用いた移動ロボットのナビゲーション	原圭吾, 前山祥一, 田中豊
2008.3.15	第13 回ロボティクスシンポジウム予稿集, 3C2	二次元測域センサを用いた動的環境下における静止物体の密な三次元計測	河原豊和, 大野和則, 田所諭

2008.3.15	第13 回ロボティクスシンポジウム予稿集, 5A1	実時間3次元地形計測に基づくフリックの引っかけ回避を含むクローラロボットのための半自律3次元未知不整地踏破	湯沢友豪, 大野和則, 田所諭, 小柳栄次, 吉田智章
2008.3.15	第13 回ロボティクスシンポジウム予稿集	不整地走行機構を有する移動ロボットの自律走行の実現	山崎 文仁, 永谷 圭司, 吉田 和哉
2008.3.15	第13回ロボティクスシンポジウム予稿集, 4A1	クローラロボットの履板の傾斜を利用した段差接触位置の検出	井上大輔, 大野和則, 昆陽雅司, 田所諭
2008.4.1	人工知能学会論文誌 vol23, no.4	エージェント配置問題における三角形分割を利用した近似モデル	秋山英久, 野田五十樹
2008.7.1	人工知能学会誌, Vol. 23, No. 4. pp. 480-485, 2008	災害時の情報収集に資するユビキタスネットワーク技術の研究	羽田靖史, 滝澤修, 行田弘一, 柴山明寛, 鈴木剛, 川端邦明, 嘉悦早人, 浅間一
2008.7.2	Proc. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2008), WA-3	Contact points detection for tracked mobile robots using inclination of track chain	Daisuke Inoue, Masashi Konyo, Kazunori Ohno, Satoshi Tadokoro
2008.07	ADVANCES IN SERVICE ROBOTICS, Ho Seok Ahn (Ed.), pp.315-328, ISBN 978-953-7619-02-2	Deployment of Wireless Sensor Network using Mobile Robots to Construct an Intelligent Environment in a Multi-Robot Sensor Network,	Tsuyoshi Suzuki, Kuniaki Kawabata, Yasushi Hada, Yoshito Tobe
2008.8.20	SICE Annual Conference 2008	Flexible Framework to Maintain Multiple and Floating Coordinate Systems	Itsuki Noda, Hiroki Shimora, Hidehisa Akiyama
2008.8.21	Proceedings of The Society of Instrument and Control Engineers Annual Conference, pp.2062-2065, 2008	Development of a Door Opening System on Rescue Robot for Search UMRS-2007	S. Kobayashi, Y. Kobayashi, Y. Yamamoto, T. Watasue, Y. Ohtsubo, T. Inoue, M. Yasuda, and T. Takamori
2008.8.30	Third Asia International Symposium on Mechatronics (AISM2008), Plenary Lecture	Challenge of Rescue Robotics	Satoshi Tadokoro
2008.9.24	Proc. 2008 IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2008), pp. 2097-2102, 2008.	Development of On-line Simulation System for Multi Camera based Wide Field of View Display	Naoki Midorikawa, Kazunori Ohno, Satoshi Saga, Satoshi Tadokoro
2008.9.24	Proc. 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2008), pp. 2091-2096, 2008	Designing of online simulation environment for the development support of control algorithms on rough terrains vehicles	Kensuke Kurose, Satoshi Saga, Shogo Okamoto, Kazunori Ohno, Satoshi Tadokoro
2008.9.24	Proc. 2008 IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2667-2672	Semi-Autonomous Traversal on Uneven Terrain for a Tracked Vehicle Using Autonomous Control of Active Flippers	Keiji Nagatani, Ayato Yamasaki, Kazuya Yoshida, Tomoaki Yoshida,
2008.9.24	Proc. 2008 IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2717-2718	Improvement of the Operability of a Tracked Vehicle on Uneven Terrain Using Autonomous Control of Active Flippers	Keiji Nagatani, Ayato Yamasaki, Kazuya Yoshida, Tomoaki Yoshida
2008.10.21	Proceedings of the 2008 IEEE International Workshop on Safety,	Continuous Acquisition of Three-Dimensional Environment Information	Keiji Nagatani, Naoki Tokunaga, Yoshito Okada, Kazuya Yoshida

2008.10.22	Proc. 2008 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR2008), pp.71-76	Whole-Body Touch Sensors for Tracked Mobile Robots Using Force-sensitive Chain Guides	Daisuke Inoue, Kazunori Ohno, Shinsuke Nakamura, Satoshi Tadokoro, Eiji Koyanagi
2008.10.22	Proc. 2008 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR2008), pp. 77-82, 2008.	Validation of Simulated Robots with Realistically Modeled Dimensions and Mass in USARSim	Shogo Okamoto, Kensuke Kurose, Satoshi Saga, Kazunori Ohno, Satoshi Tadokoro
2008.11.6	Prpc.of SIMPAR 2008, pp. 328—339, Springer	Conceptual Framework to Maintain Multiple and Floating Relationship among Coordinate Reference Systems for Robotics	Itsuki Noda, Hiroki Shimora, Hidehisa Akiyama
2008.12.25	Proc. 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2008	Development of 3D laser scanner for measuring uniform and dense 3D shapes of static objects in dynamic environment	Kazunori Ohno, Toyokazu Kawahara, Satoshi Tadokoro
2009	神戸市立工業高等専門学校研究紀要, 第 47, pp.43-48	レスキューロボット用ドア開放システムについての研究	井上卓菜, 小林滋, 小林泰弘, 山本祥弘, 大坪義一, 高森年
2009	Proc. of 2009 IEEE International Workshop on Safety, Security, and Rescue Robotics	Rollover Avoidance Using a Stability Margin for a Tracked Vehicle with Sub-tracks	Kazunori OHNO, Valerie CHUN, Tomotake YUZAWA, Eijiro TAKEUCHI, Satoshi TADOKORO, Tomoaki YOSHIDA, Eiji KOYANAGI,
2009	Proc. of 2009 IEEE International Workshop on Safety, Security, and Rescue Robotics	3-D Mapping of an Underground Mall Using a Tracked Vehicle with Four Sub-tracks	Kazunori Ohno, Satoshi Tadokoro, Keiji Nagatani, Eiji Koyanagi and Tomoaki Yoshida
2009	Proc. of 2009 IEEE International Workshop on Safety, Security, and Rescue Robotics	Multi-Robot Exploration for Search and Rescue Missions. -A Report of Map Building in RoboCupRescue 2009-	Keiji Nagatani, Yoshito Okada, Naoki Tokunaga, Kazuya Yoshida, Seiga Kiribayashi, Kazunori Ohno, Eijiro Takeuchi, Satoshi Tadokoro, Hidehisa Akiyama, Itsuki Noda, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi
2009	Proc. of The 7th International Conf. on Field and Service Robotics	Field Experiment on Multiple Mobile Robots conducted in an Underground Mall	Tomoaki Yoshida, Keiji Nagatani, Eiji Koyanagi, Yasushi Hada, Kazunori Ohno, Shoichi Maeyama, Hidehisa Akiyama, and Satoshi Tadokoro
2009	Proc. of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 2161-2167	Development of 3D Laser Scanner for Measuring Uniform and Dense 3D Shapes of Static Objects in Dynamic Environment	Kazunori Ohno, Toyokazu Kawahara, Satoshi Tadokoro
2009	第 14 回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp. 540-546	フリッパーを有するクローラロボットのロール方向の転倒回避動作を含む不整地踏破手法の開発	湯沢友豪, 大野和則, 竹内栄二郎, 小柳栄次, 吉田智章, 田所諭
2009	Proc. the 7th International Conference on Field and Service	Field Experiment on Multiple Mobile Robots conducted in an	Tomoaki Yoshida, Keiji Nagatani, Shoichi

	Robots (FSR2009)	Underground Mall	Maeyama, Kazunori Ohno, Satoshi Tadokoro, Eiji Koyanagi, Yasushi Hada, Hidehisa Akiyama
2009	Proc. 2009 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR2009)	Multi-Robot Exploration for Search and Rescue Missions - A Report of Map Building in RoboCupRescue 2009 -	Keiji Nagatani, Yoshito Okada, Naoki Tokunaga, Kazuya Yoshida, Seiga Kiribayashi, Kazunori Ohno, Eijiro Takeuchi, Satoshi Tadokoro, Hidehisa Akiyama, Itsuki Noda, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi
2009	Proc. 2009 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR2009)	Rollover Avoidance Using a Stability Margin for a Tracked Vehicle with Sub-Tracks	Kazunori Ohno, Valerie Chun, Tomotake Yuzawa, Eijiro Takeuchi, Satoshi Tadokoro, Tomoaki Yoshida, Eiji Koyanagi
2009	2009 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR2009)	3-D Mapping of an Underground Mall Using a Tracked Vehicle with Four Sub-tracks	Kazunori Ohno, Satoshi Tadokoro, Keiji Nagatani, Eiji Koyanagi, Tomoaki Yoshida
2009	Fourth International Workshop on Synthetic Simulation and Robotics to Mitigate Earthquake Disaster (SRMED 2009), 2009 (invited speech)	Active Scope Camera and a High Mobility UGV, Kenaf	Satoshi Tadokoro
2009	ICCAS-SICE 2009 Introductory Lecture, 2009 (invited speech)	Rescue Robotics and Its Application	Satoshi Tadokoro
2009	Cerebrating 50 Years of Robotics, 2009 (invited speech)	Rescue Robotics Challenge	Satoshi Tadokoro
2009	2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2009), Workshop on Robotics for Disaster Response	High-mobility Rescue Robot: Kenaf	Eiji Koyanagi, Satoshi Tadokoro
2009.3	計測自動制御学会論文集 Vol.45 No.3	画像ポインティングによる不整地移動ロボットの遠隔操縦における目標ベクトルを用いた経路誘導と到達判定法の提案	田村 祥, 前山 祥一
2009.3.17	第 14 回ロボティクスシンポジウム, 5C3, Mar.16-17, 2009	アドホックメッシュネットワークを用いた移動ロボット群の長距離遠隔操縦	羽田靖史, 海藻敬之, 松山健太郎, 行田弘一, 滝澤修
2009.5	Proc. Of ICRA2009 Workshop on Robotics for Disaster Response,	An Implemenation of GIS for Dynamic Coordinate Reference Systems,	Hidehisa Akiyama, Hiroki Shimora, Itsuki Noda
2010	Proc. of 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, A2-2	Real-Time Prediction of Fall and Collision of Tracked Vehicle for Remote-Control Support	Ken SAKURADA, Shihoko SUZUKI, Kazunori OHNO, Eijiro TAKEUCHI, Satoshi TADOKORO, Akihiko HATA, Naoki MIYAHARA, Kazuyuki HIGASHI
2010	Proc. of 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, D3-1	Development of a Laser Scan Method to Decrease Hidden Areas Caused by Objects Like Pole at Whole 3-D Shape Measurement	Akihiko HATA, Kazunori OHNO, Eijiro TAKEUCHI, Satoshi TADOKORO, Ken SAKURADA,

			Naoki MIYAHARA, Kazuyuki HIGASHI
2010	Proc. of 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, A3-4	Integration of a Sub-Crawlers' Autonomous Control in Quince Highly Mobile Rescue Robot	Eric Rohmer, Kazunori Ohno, Tomoaki Yoshida, Keiji Nagatani, Eiji Konayagi, Satoshi Tadokoro
2010	Proc. of IEEE/RSJ Inc. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.370-376	Development of Motion Model and Position Correction Method using Terrain Information for Tracked Vehicles with Sub-Tracks	Ken Sakurada, Eijiro Takeuchi, Kazunori Ohno and Satoshi Tadokoro
2010	Proc. of International Conference on Advanced Mechatronics, pp. 225-230	Quince: A Collaborative Mobile Robotic Platform for Rescue Robots Research and Development	Eric Rohmer, Tomoaki Yoshida, Kazunori Ohno, Keiji Nagatani, Satoshi Tadokoro, Eiji Koyanagi
2010	Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2864-2870	Trials of 3-D Map Construction Using the Tele-operated Tracked Vehicle Kenaf at Disaster City	Kazunori Ohno, Satoshi Tadokoro, Keiji Nagatani, Eiji Koyanagi, Tomoaki Yoshida
2010	第 15 回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp. 264-269	ブクローラを有するクローラロボットのモーションモデルと地形情報を利用した位置修正	櫻田健, 竹内栄二郎, 大野和則, 田所諭
2010	Jornal of Robotics and Mechatronics, Vol. 22, No. 3, pp. 293-300	Tracked-Vehicle Clutching Position Detectability of Bumps by Distributed Inclination Sensors	Daisuke Inoue, Kazunori Ohno, Masashi Konyo, Satoshi Tadokoro
2010	The 5th International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM2010)	Quince: A collaborative mobile robotic platform for rescue robotw reseaqrch and development	Eric Rohmer, Tomoaki Yoshida, Kazunori Ohno, Keiji Nagatani, Satoshi Tadokoro, Eiji Koyanagi
2010	Proc. 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 370-376	Development of motion model and position correction method using terrain information for tracked vehicles with sub-tracks	Ken Sakurada, Eijiro Takeuchi, Kazunori Ohno, Satoshi Tadokoro
2010	Proc. 2010 IEEE international Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2010)	Robust localization method based on free-space observation model using 3D-map	Eijiro Takeuchi, Kazunori Ohno, Satoshi Tadokoro
2010	Proc. 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2010), A2-2	Real-time prediction of fall and collision of tracked vehicle for remote-control support	Ken Sakurada, Shihoko Suzuki, Kazunori Ohno, Eijiro Takeuchi, Satoshi Tadokoro, Akihiko Hata, Naoki Miyahara, Kazuyuki Higashi
2010	Proc. 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2010), D3-1	Development of a laser scan method to decrease hidden areas caused by objects like pole at whole 3-D shape measurement	Akihiko Hata, Kazunori Ohno, Eijiro Takeuchi, Satoshi Tadokoro, Ken Sakurada, Naoki Miyahara, Kazuyuki Higashi

2010	Proc. 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2010), A3-4	Integration of a sub-crawlers' autonomous control in Quince highly mobile rescue robot	Eric Rohmer, Kazunori Ohno, Tomoaki Yoshida, Keiji Nagatani, Eiji Koyanagi, Satoshi Tadokoro
2010	第15回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp. 257-263	3次元環境地図を用いた自由空間観測モデルによる未知物体にロボастな自己位置推定	竹内栄二郎, 大野和則, 田所諭
2010	Proc. 2010 IEEE International Workshop on Advanced Robotics and Its Social Impacts (ARSO2010), 2010 (invited speech)	Rescue Robotics Challenge	Satoshi Tadokoro
2010	The 7th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI2010), 2010 (plenary speech)	Rescue Robotics and Its Applications	Satoshi Tadokoro
2010	TSWG Meeting	Rescue Robotics in Japan	Satoshi Tadokoro
2010	Texas A&M University Seminar	Robotics Challenge to Heterogeneous Problem of Search and Rescue	Satoshi Tadokoro
2010	Italy-Japan Business Group Meeting	Italy-Japan Cooperation in Disaster Response Robotics	Daniele Nardi, Satoshi Tadokoro
2010	Sapienza Rome University Seminar	Robotic Systems for Urban Search and Rescue	Satoshi Tadokoro
2010.04	情報処理学会論文誌, Vol.51, No.4, pp.1204-1214	災害対応探索ロボット群の長距離遠隔操縦のための有線・無線統合型アドホックネットワーク	羽田靖史, 海藻敬之, 松山健太郎, 行田弘一, 滝澤修
2010.04	情報処理学会論文誌, Vol.51, No.4, pp.1163-1174	移動ロボットによる無線センサネットワークの構築と管理および環境情報の収集	鈴木剛, 杉崎隆二, 川端邦明, 羽田靖史, 戸辺義人,
2010.01	日本設計工学会, 45-1, pp.13-19	投射配置による落下衝撃を考慮した無線センサ端末の耐衝撃機構の開発	澤井圭, 河野仁, 鈴木剛, 羽田靖史, 川端邦明
2010.08	13th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR2010), pp. 1113-1120,	Arrival accuracy improvement for teleoperated mobile robots on uneven ground by image pointing,	Shoichi Maeyama, Sho Tamura, Keigo Watanabe, Yoshito Okada, Keiji Nagatani, and Tomoaki Yoshida
2010.10	Proc. of ROSIN-2010,	Integrated Map Generation using Multi-robot Sensory Data in RoboCup Rescue,	Hidehisa Akiyama, Hiroki Shimora, Eijiro Takeuchi, ItsukiNoda
2010.11	Proc. of Int. Workshop on Standards and Common Platform for Robotics 2010,	Mathematical Framework for Localization Information Coordinate Reference System for Robotics	Itsuki Noda, Shuichi Nishio, Takashi Tsubouchi, Takeshi Sakamoto, Satoshi Tadokoro

2010.11	地域安全学会論文集, No. 13, pp. 265-274	US&R 訓練施設の整備と運用に関する研究－テキサス Disaster City(R)の調査を通じて－	吉村明子, 清水秀丸, 佐藤史明, 加古嘉信, 田所諭
2011	Journal of FIELD ROBOTICS, Vol. 28, Issue 2, pp. 373-387	Multirobot Exploration for Search and Rescue Missions: A Report on Map Building in RoboCupRescue 2009	K. Nagatani, Y. Okada, N. Tokunaga, S. Kiribayashi, K. Yoshida, K. Ohno et al.

表6 成果の発表（展示・デモ，一般講演会，メディア記事）

	展示・デモ	一般講演会	メディア記事
平成18年度	0	2	0
平成19年度	8	3	6
平成20年度	20	17	26
平成21年度	14	32	52
平成22年度	11	45	64

（参考：平成21年度と22年度のメディア掲載）

平成21年度メディア掲載情報（52件）

2009/5SCOPE NET VOL.51 2009 SPRING この人の仕事場 Vol.9：認識の溝を埋め、救助を考える

2009/5FOCUS NEDO No.32 2009 特集－NEDO プロジェクトから生まれた人に役立つロボットたち

2009/5/11MSN 産経ニュース 次世代レスキューマシン初披露 兵庫

2009/5/12 日刊工業新聞 災害現場で情報収集：国際レスキューシステム研究機構 遠隔操縦ロボを実験

2009/5/12 神戸新聞 がれき走行 世界最高水準 探査ロボ

2009/5/12 日本経済新聞 救命ロボ 2年後現場に：神戸企業やNPO 公開で性能実験

2009/5/12 産経新聞 チャイム（レスキューロボット公開）

2009/5/12 神戸新聞 NEWS がれき走行、世界最高水準 探査ロボット公開

2009/5/12 日刊工業新聞 Business Line 国際レスキューシステム研究機構、遠隔操作ロボの実証実験を公開

2009/5/12 毎日 jp レスキューロボット：高い技術と性能 NPO、三木で実証実験／兵庫

2009/5/14YOMIURI ON LINE 災害現場で威力 探査ロボ

2009/7/15 毎日新聞（夕刊）階段上り被災者探索：レスキューロボ公開実験

2009/7/15 毎日 jp レスキューロボット：新型の公開実験 神戸で実施

2009/7/15 朝日新聞（夕刊）救助ロボ進化中：神戸で実験

2009/7/15asahi.com 救助ロボ、実用へ小型化 神戸市で公開実証実験

2009/7/15NHK ニュース「レスキューロボットの性能試験」

2009/7/15 毎日放送 ニュース「レスキューロボット公開」

2009/7/15 サンテレビ ニュース「最新型レスキューロボット公開実験」

2009/7/16 神戸新聞 災害救助で活躍期待：ロボット、実証実験公開

2009/7/16 読売新聞 最新救助ロボ高性能を披露：北区で公開実験
2009/7/16 YOMIURI ON LINE 地域兵庫：最新救助ロボ高性能を披露 北区で公開実験
2009/7/16 日刊工業新聞 35度の階段を高速走行：国際レスキューシステム研 無線救助ロボ実証
2009/7/16 バンドー化学 ニュースリリース 「平ベルト駆動型超ロボ高速走行アクチュエータ」の開発
2009/7/16 ビー・エル・オートテック ニュースリリース 小型・軽量化を実現した「最新型レスキューロボット：UMRS2009」の実証実験モデルを完成
2009/7/22 日本経済新聞 軽く小さい救助ロボ：NPOとビー・エル・オートテック 背負って運べる21キロ
2009/8/2 毎日新聞 防災 明日に備える：ロボット実働の日間近
2009/8/9 TBS 「夢の扉」 災害現場で活躍する夢のレスキューロボットを開発したい
2009/9/4 読売新聞 最新技術 241 団体が紹介：中央区で産業見本市 ヘビ型救助ロボなど
2009/10/1 東北大学工学部だより あおば萌ゆ Vol.11 2009 Autumn" Campus Now: レスキューロボット「ケナフ」、国際舞台へ出動。
2009/11/23 日刊工業新聞 引き式ドアに対応：救助支援ロボットに新機能
2009/12/2 神戸新聞 災害救助ロボ機能アップ：軽量化、遠隔操作でドアも開放
2009/12/12 技術総合誌 OHM 実用化研究進む「レスキューロボット」の世界：第1回レスキューロボットとは何か
2009/12/14 週刊ゴム報知新聞 国際ロボット展開催：レスキューロボ用「マニピュレータ」披露
2010/1/1 日工フォーラム vol.31No.1 ドアノブ開放用マニピュレータ
2010/1/1 新製品情報 ドアノブ開放用マニピュレータ
2010/2/12 技術総合誌 OHM 実用化研究進む「レスキューロボット」の世界：第3回クローラ型レスキューロボット「Kenaf」
2010/3/4 日本経済新聞 災害用電動ハンド：バンドー化学子会社 現場でドアノブ回転
2010/3/4 日経産業新聞 電動ハンドドアノブ、器用に回す：ビー・エル・オートテック ロボと合体、災害現場へ
2010/3/4 化学工業日報 レスキューロボ搭載用のマニピュレータと電動ハンド：ビー・エル・オートテックが開発
2010/3/5 日刊工業新聞 エンドレスに回転：レスキューロボ向け電動ハンド
平成 22 年度メディア掲載情報 (64 件)
2010/4/6 Response 先端技術館@TEPIA、新規展示を開始 パーソナルモビリティも
2010/4/6 ロボコンマガジン 先端技術館@TEPIA リニューアルオープン
2010/4/7 PCWatch 森山和道の「ヒトと機械の境界面」：先端技術館 TEPIA、展示をリニューアルオープン
2010/4/28 毎日 jp レスキューロボット：化学テロ対策ロボット「Quince」を公開
2010/4/29 朝日新聞 タフな救助ロボ登場：千葉工大など開発
2010/4/29 日本経済新聞 千葉工大など、災害救助ロボの年度内実用化目指す

2010/4/29KOL NET 河北新報 階段スイスイ レスキューロボ進化 東北大など開発
2010/4/29asahi.com 悪路へつちやら、声かけ救出 新型レスキューロボ公開
2010/4/29aspara (apital blog) レスキューロボに花の名を
2010/6/4北海道新聞 旭川最新ロボ大集合：13日に市科学館操作体験も
2010/6/5教育家庭新聞 世界のロボット事情：IEEEセミナー
2010/6/8東京 IT 新聞 ロボット開発で生かされる日本の高い技術力：世界の老人介護や災害の現場でも活躍
2010/6/11河北新聞 災害救助ロボット 実用化向け着々
2010/6/12技術総合誌 OHM 災害対応支援ロボット「Quince」を公開： IRS、千葉工大、東北大が共同開発
2010/7/1ロボコンマガジン IRS、千葉工大、東北大、新型災害対応支援ロボット「Quince」を開発
2010/7/1ロボコンマガジン 東京消防庁以外での消防ロボットの配備状況は？
2010/7/1ロボコンマガジン あのロボットを作った人に会いたい！：第12回災害対応支援ロボット Quince の開発秘話
2010/7/2日刊工業新聞 安全を築く：救助活動、二次災害リスク低減
2010/7/8日経産業新聞 2010年度技術トレンド調査（第2回）
2010/7/10Ohm Bulltein 災害対応支援ロボット「Quince（クインス）」
2010/8/1マナビゲート 2010 研究がすすむ災害救助ロボット
2010/8/29中日新聞 わくわく探検：災害救助に活躍期待 レスキューロボット
2010/9/1神戸新聞(夕刊) 多くの命守りたい 救助支援ロボ 神戸市消防局に貸与
2010/9/1サンテレビ ニュースシグナル
2010/9/1読売テレビ NNNストレイトニュース「ロボット救助活動」
2010/9/2読売新聞 救助ロボ無償貸与 神戸市消防局に来年2月まで
2010/9/2朝日新聞 探査ロボもっと電波を NPO 開発、実用化に思わぬ壁
2010/9/2日刊工業新聞 レスキューロボを神戸消防局に貸与 国際レスキューシステム研究機構
2010/9/5毎日新聞 レスキューロボット「UMRS2009」 隊員、市民に安全を 神戸市消防局が検証訓練
2011/1/6ロボナブル IRS、第6回競基弘賞に中西氏ら決定、14日に授賞式
2011/1/11朝日新聞 中西弘明氏ら競基弘賞受賞
2011/1/15apital 無人ヘリと鉄人28号：震災の遺志を受け継ぐ賞（1）
2011/1/15神戸新聞 防災技術開発3氏表彰：震災死神大院生遺志継ぐ
2011/1/17ロボナブル IRS、レスキューロボの標準評価試験法を公開、将来的には調達基準に
2011/1/17ロボナブル 方位角制御に着目した独自性を評価、京大・中西氏の自律ヘリ研究、競基弘賞
2011/1/17ロボナブル 残席わずか！IRSなど、28日よりサービスロボ安全技術者認定講座を開催
2011/2/8関西ウォーカー 23年2/22号 22524 - 2/22 使える！無料&格安スポット！お得なパスや見学無料のロボット工房まで、どれに行く？

2011/2/28 テレビ東京 ワールドビジネスサテライト NEDO 戦略報告会
2011/3/4 ロボナブル 【加筆】神戸市、レスキューロボットを実配備、産業振興局が購入
2011/3/4 ロボナブル IRS など、閉鎖空間で活動できるレスキューロボ公開、複数ロボが連携作業
2011/3/4 サンテレビ ニュースシグナル
2011/3/5 神戸新聞 救助ロボット実用化目指し導入へ 神戸市
2011/3/9 The Eagle Robotic Rescuers
2011/3/10 神戸新聞 ロボット技術、福祉への活用模索 神戸でセミナー
2011/3/10 日刊工業新聞 ロボットテクノロジーセミナー/ロボット研究会 第5回地域討論会 in 神戸
2011/3/13 IEEE Spectrum Japan Earthquake: Robots Help Search For Survivors
2011/3/14 ロボナブル 被災された方々へのお見舞い、ならびに情報提供のお願い
2011/3/14 ロボナブル サービスロボ安全技術講座更新、安全性確保のためのメカトロ技術を解説
2011/3/15 cnet Jaoan 被災地入りの準備を進める救助ロボットの数々.
2011/3/18 産経ニュース 【放射能漏れ】最先端のレスキューロボ、活躍できずにいまだ待機・・・受け入れ態勢整わず
2011/3/18 IEEE Spectrum Japan Earthquake: More Robots to the Rescue
2011/3/19 ロボナブル 京大の松野教授、八戸工大でレスキューロボによる調査活動へ
2011/3/21 日刊工業新聞 レスキューロボ 東日本大震災 フル稼働に課題 人材育成や訓練必要 導入コストの問題も
2011/3/22 IEEE Spectrum Can Japan Send In Robots To Fix Troubled Nuclear Reactors?
2011/3/24 ロボナブル 神戸市産業振興財団、産ロボを応用展開できる人材育成に着手
2011/3/25 IEEE Spectrum Japanese Robot Surveys Damaged Gymnasium Too Dangerous for Rescue Workers
2011/3/27 ロボナブル 長岡技科大の木村准教授、レスキューロボで貴重品を探索するボランティア開始
2011/3/27 ロボナブル レスキューロボの操作系の標準化に向け提案、長岡技科大の木村准教授
2011/3/28 ロボナブル 復旧に向け探索ロボのニーズがある、松野京大教授、東北での調査を振り返る
2011/3/28 ロボナブル 第24回 災害時におけるロボットの実用化に向けた課題
2011/3/29 神戸新聞 レスキューロボ出動 「阪神・淡路」機に開発 被災現場で初出動 京大工学部松野教授
2011/3/29 日刊工業新聞 福島原発に監視ロボ 空中・不整地 放射線測定で投入 無線や電源課題解決へ 東日本大震災
2011/3/29 ロボナブル 放射性物質のモニタリングに探索ロボを活用へ、検討が具体化
2011/3/30 ロボナブル 【第2報】原発の調査・放射能の計測に探索ロボ活用へ、近く試験を実施

IV. 実用化，事業化の見通しについて

2. 研究開発項目毎の見通し

2.3 被災建造物内移動RTシステム（特殊環境用ロボット分野）

2.3.1 閉鎖空間内高速走行探査群ロボット【特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構，国立大学法人東北大学，独立行政法人産業技術総合研究所，独立行政法人情報通信研究機構，バンドー化学株式会社，株式会社シンクチューブ，ビー・エル・オートテック株式会社，株式会社ハイパーウェブ】

(1) 実用化の見通しの概要

本研究では、「実証試験を繰り返して行わなければ，問題点が明らかにならず，研究成果が実用に至ることはあり得ない．極端ないい方をすれば，実証試験を経ない研究は，研究を開始したとすら言えない」という基本的考え方に基づき，積極的に実証試験を繰り返し，実用化を目指した研究を推進してきた．ステージゲートまでに開発した **Kenaf** および **UMRS** は，それぞれプロトタイプ機そのものであり，これらに必要なセンサや機能を搭載して開発してきた．当グループでは，実験室環境でどんなに機能が発揮できても，想定環境である地下街あるいは地下鉄駅において発揮できなくては意味がないことを前提に，できるだけ想定環境そのもので実証実験を行い，想定環境においてロボットの動作が実現できるように実証実験を行ってきた．また，開発したロボットは可搬性があることが第一であり，また運搬に対して堅牢でなくてはならない．他機関との共同により国内外で実証実験を積極的に行い，可搬性や運搬による堅牢性も実証しながら，開発したロボットの外部評価も積極的に得るように努力してきた．さらに，展示会などにも出展し，開発してきたロボットに関する情報公開も行ってきた．その結果，国内外の研究期間やユーザに広く研究成果が知られることとなった．**Kenaf** については，国内外のいくつかの機関から購入希望が寄せられた．品質保証やメンテナンス等の体制に関する検討を行った結果，広く販売することは時期尚早と判断し，東京電機大学に1台のみを販売することとした．

ステージゲート後においては，改良実用機である **Quince** と **UMRS-2009** を開発した．上記と同様に国内外における実証試験を繰り返し，成果を上げてきた．それに加えて，千葉市消防局，および，神戸市消防局に対する試験配備を行い，隊員による訓練使用によって実用性を高めてきた．その結果，両者とも研究機材のレベルを脱し，試験配備に耐えうるレベルの実用性を確保することができた．

プロジェクト終了後に，**Quince** が福島第一原子力発電所の原子炉建屋内での作業に実際に適用され，実績を上げていることによって，その実用性と，受注が可能なレベルに至る，という点については実証されたと考えている．

安全性はロボットの適用において重要な問題であるが，生活支援ロボットと災害対応ロボットでは使用者や使用環境が全く異なるため，別途検討が必要である．本研究では研究成果の実用化を図るために，災害対応ロボットの安全性に関する検討を行った．

本研究においては，事業化の成否はユーザである消防や自衛隊等の導入計画に依存するため，プロジェクトの目的とはされていない．現状における事業化の検討を行ったところ，ユーザサイドの受け入れが整った場合には事業化が可能であるが，現状では導入計画が不明であり，もう少し時間がかかると考えられる．

(2) 実証試験

本プロジェクトでは、下記に示すように、頻繁に実証試験を行った。なお、ここには要素技術個別に行った試験や、展示会でのデモなどは含んでおらず、研究グループが共同で行った比較的大きな試験のみをリストアップしてある。

(ステージゲート前の主な実証試験)

2007年6月30日～7月10日 於、RoboCupRescue 2007 Atlanta

2007年9月22日～27日 於、イタリア高等消防大学校

2007年10月7日 於、電気通信大学

2008年2月26日 於、神奈川県産業会館

2008年5月27日 於、神戸市中央区港島南町ムービングウォーク内

2008年6月17日深夜～18日未明 於、三宮地下街さんちか

2008年7月1日～8日 於、RoboCupRescue 2008 蘇州

2008年8月29日深夜～30日未明 於、三宮地下街さんちか

2008年9月13日深夜～14日未明 於、三宮地下街さんちか

2008年11月5日深夜～6日未明 於、三宮地下街さんちか (ステージゲートデモ)

(ステージゲート後の主な実証試験)

2008年11月17日～21日 於、Disaster City

Kenaf の性能試験を行った。

2009年5月10日～11日 於、兵庫県消防学校

Kenaf および UMRS の瓦礫環境及び訓練塔環境における試験を行った。

2009年6月29日～7月5日 於、RoboCupRescue 2009 Graz

Kenaf の試験を行い、運動性能競技他で世界優勝した。

2009年9月1日 於、東扇島東公園

Kenaf および UMRS の消防訓練を行った。

2009年10月27日～28日 於、E-defense 大規模振動台

木造家屋を倒壊させ、そこで Kenaf および UMRS による探索試験を行った。

2009年12月5日～7日、 於、兵庫県消防学校

Kenaf および UMRS の瓦礫環境及び訓練塔環境における試験を行った。

2010年2月19日～20日、 於、蔵王

雪上環境における走行試験を行った。

2010年3月8日～12日、 於、Disaster City

Quince および UMRS-2009 の性能試験を行った。

2010年5月1日～6日、 於、大阪工業大学

Quince および Kenaf の試験を行った。

2010年6月19日～25日、 於、シンガポール

Quince および Kenaf の試験を行った。

2010年9月10日～12日， 於，東京消防庁立川訓練所

Quince および UMRS-2009 の性能試験を行った。

2010年11月19日～21日， 於，神戸人材支援センター

NIST/ASTM 評価フィールドで Quince および UMRS-2009 の性能試験を行った。

2010年1月13日～16日， 於，神戸人材支援センター

NIST/ASTM 評価フィールドで Quince および UMRS-2009 の性能試験を行った。

2010年3月8日～10日， 於， Disaster City

Quince の走行， 3次元地図作成の試験を行った。

(3) 試験配備

Ⅲで述べたように， 実用ロボットを消防への試験配備を行った。

Quince について， 2010年8月末より3月末までのおよそ6ヶ月， 千葉市消防局の協力を得て「消防資機材」として登録後， ハイパーレスキュー部隊を持つ， 4つの消防署において試験的に配備された。 なおこの試験配備により， およそ40名の隊員が Quince の操作・運用を担当した。 詳細はⅢを参照のこと。

UMRS2009 について， 2010年9月末より， 神戸市消防局へ貸与され， こうべスーパーイーグルによる実践に向けての活動が行われた。

(活動実績) 2010.9～

9/1 UMRS2009 一式 貸与

<救助ロボット取扱訓練>

9/27 神戸市水上消防署

10/14 神戸市民総合防災センター

10/16 同上

10/29 神戸市水上消防署

<救助ロボットによる啓発啓蒙>

10/9 神戸市民夏季防災大学

11/6 神戸市須磨区デパート

12/11 神戸市北区



図 8 2 神戸市消防局への説明



図 8 3 神戸市消防局の訓練使用

(4) 安全性に関する検討

これまでに、下記のような検討を行った。

1) レスキューロボットの安全性に関する基本原則と安全化のプロセス

(安全性の基本原則)

レスキューロボットは消防・警察・自衛隊の特殊装備品であるため、その安全性については、ISO MIL-STD-882D (システム安全の定義) の基本原則「システム (レスキューロボット) の性能を著しく損ねる安全技術は意味がない」を適用することが適切である。すなわち、一定のリスクのあるレスキューロボットをいかに社会問題を引き起こさずに実用化していくかが重要なポイントであり、技術+マネジメントのシステム安全の考え方を適用することが必要である。

また、安全のための技術だけを追求することによりこの問題を解決しようとするのは片手落ちであり、JIS-T-14971 の付属書 E に説明のある ALARP 原則「合理的に達成可能なできるだけ低い(As Least As Reasonably Practicable)」領域までリスクを下げる。合理的に達成可能かどうかは、技術的な実現可能性と経済的な実現可能性を考慮して判断する。」に従うことが必要である。

(安全化のプロセス)

安全化のプロセスは、一般に次の手順を踏む。

リスクアセスメント ⇒ リスク防護 ⇒ 残留リスクと安全運用管理

このプロセス自身は、「次世代ロボット安全性確保ガイドライン (案)」(経産省 2007.4) などに準拠するものであるが、レスキューロボットに対してこのプロセスを進める場合、上記の安全性の基本原則に基づき、

- ・レスキューロボットの性能を著しく損ねないこと
- ・レスキュー隊員によって管理可能な残留リスクの範囲
- ・特殊環境下での使用を前提としたリスクアセスメントとリスク防護

などについて十分配慮した安全化を確立しなくてはならない。

2) リスクアセスメント

(Kenaf のリスクアセスメント)

リスクアセスメントを実施した。その要点は次の通り。

・ISO14121 (リスクアセスメント) と ISO12100 (機械類の安全性—設計のための基本用語、方法論) に従って一般の機械と同等のリスクアセスメントを実施し設計段階でのリスクの除去または低減を可能な限り実施する。

・災害現場という特殊な環境下で使用されるが故に除去し得ないリスクに関してはシステムの運用方法の確立とインターロック、フェールセーフを的確に組み込む事で最小限に抑える。

・更にオペレータの訓練プログラムを確立し訓練を含むシステム全体の安全性を確立する。Kenaf は完全自律のロボットではなく、現場の状況を的確にオペレータに伝えオペレータが正しい判断で正確な操作を行う事が出来るインタフェースの開発に重点を置き、あくまでも常にオペレータの支配下に置かれていることを前提とする。

・今後は上記リスクアセスメントと訓練プログラムの確立を並行して実施するため、より実際の災害現場に近い環境下での消防・レスキュー隊員による実証実験を重ねる。

・Kenaf は階段を上り下りできる能力を持つが、操作ミスや油、埃などの外的要因による落下 (階

段を転げ落ち下の人間に衝突)するリスクの低減策に対しての具体的方策は見いだせていない、リスクアセスメントの実施、訓練の積み重ねでも転げ落ちる危険性は許容以下にはならない。今後の実証実験にて階段落下に対する具体的方策を検討する。

(UMRS のリスクアセスメント)

リスクアセスメントを実施した。その要点は次の通り。

- ・ ISO MIL-STD-882D (システム安全の定義) の基本原則に基づき、ALARP 原則に従うこととする。すなわち、次の3点に配慮するものとする。1) 性能を著しく損ねないこと、2) 隊員によって管理可能な残留リスクの範囲、3) 特殊環境下での使用を前提としたリスクアセスメントとリスク防護。

- ・ 電気安全上、機能安全上、機械安全上の危険源を検討した結果、挟み込みと衝突に関する危険源を特定した。

- ・ 残留リスクを管理可能なレベルまで低下させる方策として、マニュアル緊急停止ボタン、独立無線系による緊急停止システムを検討し、これまでの研究開発で実装および検証を行った。

- ・ そのほかの危険源、および、追加の防護方策に関しては、ステージゲート後の課題である。

3) リスク防護

(基本的考え方)

レスキューロボットが対応し得るリスク防護については、次のように考えている。

- 1) 電気安全 (感電対策等。IEC 60204, JIS-B-9960), EMC 対策, 耐環境基準 (IP 保護等級)
これら現行規格は技術的にはほぼ踏襲できるものと判断している。これらについてはステージゲート後に対応する計画である。

- 2) 機能安全 (コンピュータ安全)

現状では技術的に無理であり、長期的課題と見なし、本研究開発で対応する計画はない。

- 3) 機械安全

衝突防止、挟み込み、落下などに対するリスク防護が対象となるが、能力への影響が大きく技術的対応は難しい点については、MIL-STD-882D の基本原則にしたがって、運用でカバーされる残留リスクに含められる対象である。

(Kenaf のリスク防護)

本質安全：

- ・ 軽量化 (20kg)、即時急停止性能の向上により、衝突時の安全性を高めた。
- ・ サブローラアーム駆動モータの電流変化により、前後進時の衝突検出を行う技術を開発した。

衝突防止：

- ・ 自律人よけ (移動障害物回避)、静止障害物回避 (別紙②参照)

衝突の可能性を低下させた。

- ・ 三次元環境形状計測結果のオペレータへの提示 (別紙②参照)

隊員が狭い場所を操縦する際のリスク回避を可能にした。

- ・ 遅延の最小化による、障害物等のリアルタイム提示 (別紙③参照)

レイテンシーを最小化することによって、操縦時の遅延による危険性を低減した。

- ・通信途絶時に安全に停止する機能（別紙①参照）

通信途絶により制御不能になった際、自動的に停止する機能を実現し、運動エネルギーを小さくすることにより危険性を低下させることとした。

（UMRS のリスク防護）

衝突防止：

- ・マニュアル緊急停止ボタン

ロボットがまだ人の手の届く範囲にて動作時の緊急停止用として、ロボット上部の最も見やすくまたロボットが動いている場合でも手が届きやすい前後 2 箇所に、大型の赤色緊急停止ボタンを配置、このボタンを押すとロボットの動力系、制御系とも全システムを停止させることができる。

- ・独立無線系による緊急停止システム

ロボットが遠隔操作中のときの停止用として、通常のロボットの制御用に用いている無線 LAN システムとはまったく独立したアナログモデムを用い、緊急停止システムを開発している。ただし、現在のところその使用可能範囲は条件の良いところで 20 m 程度であり、制御可能範囲を延ばす必要がある。

4) 残留リスクとレスキュー隊員による安全運用管理

（ロボットの共存の原則に基づく残留リスクの管理）

残留リスクを現場指揮官が正しく理解し、コントロールできる（と現場指揮官が判断できる）レスキューロボットのみを実用化することを前提とする。このような判定基準に基づいて実用化するためには、レスキューロボットに対する合理的予見可能な誤使用、合理的予見可能な非想定環境のデータ収集と解析が重要である。このデータ収集と解析については、ステージゲート後の研究開発の中心課題の一つであり、実用化試作ロボットの各製作フェーズごとにデータ収集を行い、真に役立つリスクアセスメントをそのつど実施して改善していくことが必要である。

（具体的対応）

本研究開発では以下のような具体的対応を行った。ステージゲート後に充実を図る計画である。

- ・ロボットの操作法、表示の標準化による管理機能の向上
ポータブル遠隔操縦卓
- ・遠隔操縦訓練シミュレータによる残留リスク推定および安全運用管理の訓練
Kenaf シミュレータの開発

5) レスキューロボットの認証・検定について

レスキューロボットの認証、検定をどうするかについては、調べた範囲内では、現在のところ我が国では検討されていない。ロボットの検定には従来の高度資機材とは異なる観点と高い技術が必要であり、これを実施できる団体の育成が重要である。

たとえば、消防の装備品に関しては、下記のような既存検定団体が存在し、安全基準の策定や検定等を行っている。調達配備のためには、これらの団体との協力を今後進めていくことが必要である。

日本消防検定協会（消防ホース等の検定、安全基準の策定など）

日本消防設備安全センター（PL法への対応など）

米国では、商務省の標準技術研究所 (NIST) がホームランドセキュリティ省からの委託により、災害対応ロボットの調達基準の策定を進めている。これは、ASTM International の国際標準として評価方法を定めることによって行われており、2010 年より標準が実際に認められ、最終的に 20 程度の項目からなる標準として標準化される予定である。その目的は調達基準の策定だけでなく、隊員のロボット使用に関する訓練効果の評価、ロボット開発の指針を与えること、にもある。そのプロセスは下記の通りである。

- 1) レスポンダー (FEMA Technical Search, etc.) からの要求事項 (13 カテゴリ, 100 項目以上) の整理
- 2) くり返して試験が可能で、再現が可能な「標準試験方法」の開発
- 3) レスポンダーによる訓練施設を活用した試験法の検証と、ロボットの評価
- 4) 国際競技会 (RoboCup) を活用した評価法の改良
- 5) ASTM での国際標準化

その評価対象は主として地上走行ロボットであり、図 8 4 のようなものが含まれている。



図 8 4 NIST/ASTM 評価標準化の対象ロボット (UGV)

評価項目は、個別要素試験と実地試験からなり、個別要素項目の結果によってロボットの特徴を明らかにすることができる。具体的な項目は下記の通りであり、米国でのニーズが大きい爆発物処理に重点を置いた内容となっている。

- 0) オントロロジー
 - 1) セットアップ, 重量, サイズ (ASTM E2592-07 として既に成立)
 - 2) エネルギー源, 持続時間
 - 3) 運動性能
 - ・平坦舗装面
 - ・ピッチロール連続傾斜面

- ・ピッチロール斜面横断
 - ・対称段差フィールド
 - ・傾斜面，ギャップ
 - ・滑りやすい段差
 - ・階段と踊り場
 - ・牽引
- 4) 無線通信
- ・見通し環境，見通せない環境
- 5) 物体操作
- ・棚中の物体認識
 - ・棚中の器用な物体操作
 - ・棚中の重量物操作
 - ・ドア開け，進入
- 6) 操縦しやすさ
- ・複雑路面でのランダム迷路操縦
 - ・複雑路面でのランダム迷路探査
 - ・車両ボディ下での探査
- 7) センシング
- ・映像の視力，視野(ASTM E2566-08)
 - ・詳細探査
 - ・音声聞き取り
- 8) 除染

Response Robot Exercise においては，図 8 5 のような評価法説明書による説明が行われ，試験結果を各評価シートに記入することによって評価がなされている。

NIST ウェブページ参照のこと

(a) 評価法説明書

NIST ウェブページ参照のこと

(b) 評価シート

図 8 5 NIST/ASTM による災害対応ロボットの評価標準化

本プロジェクトでは、この標準に対して日本からの意見を反映するため、委員としての参加を続けてきている。標準化委員会に参加するほか、このための意見聴取の場である **Response Robot Exercise** に毎年参加し、本プロジェクトで開発したロボットなどを評価方法の試験の場に提供してきた。その結果、標準として提案されようとしている内容は、日本のロボットにとって決して不利な内容ではなく、フェアな性能評価がなされる内容となっていると考えている。

以下、事業計画は非公開