

表 「半自律高機能移動ロボット群による被災建造物内の情報インフラ構築と  
情報収集システムの開発」 目標と達成度のまとめ

研究項目(基本計画内容)	目的	本開発の目標	成果	達成度
複数のロボットが地下鉄(含改札), 地下街, 高層ビルなどの閉鎖空間(階段, ドアを含む)において, 障害物の回避・乗り越え・軽量物の排除を行いながら, 迅速に歩く人間と同程度の平均速度で, 半自律走行できる, 迅速な移動技術の開発. ただし, 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	軽量で半自律走行が可能な移動プラットフォームの開発	(1) 被災建造物内で歩いている人の回避および自動, または, 押せば開くドアの開閉・障害物の回避・乗り越え・軽量物の排除 (2) 迅速に人が歩く速度と同程度の速度で複数台の半自律走行 (3) 重量は1台 50Kg程度でバッテリーにて1時間連続稼働	(1) 開発した兄弟型ロボットプラットフォームは自律移動アルゴリズムによる障害物の回避機能, ドアなどの障害物を押し退ける機動性を備え, 階段の昇降も可能である。 (2) の最高速度は1.0[m/s]であり, 複数の自律移動アルゴリズムにより, 複数台の同時制御が可能である。 (3) 大型の兄ロボットの重量は重量54.5[kg], 兄弟ロボットともバッテリーによる1時間以上の連続稼働が可能である。	(1) 十分な機能を備えている。 (2) 十分な機能を備えている。 (3) 仕様を十分に満たしている。
1台の会議机に15分以内に設置可能な軽量簡易型のインターフェイスで, オペレータが複数ロボッ	複数台ロボットの同時遠隔制御を可能とするインターフェイスの開発	(1) 1台の机に15分以内に設置可能な軽量簡易	(1) 2分程度の準備時間でロボットの遠隔操作を可能とする軽量簡易型インターフェ	(1) 仕様を十分に満たしている。

<p>トの周囲環境を認識でき、複数ロボットの同時遠隔操作（移動行動司令）ができる、ヒューマンインターフェイス技術の開発</p>		<p>型インターフェイス  (2) オペレータが複数ロボットの周辺環境を認識可能  (3) 複数ロボットの同時遠隔制御</p>	<p>イス（約10kg）を製作した。  (2) 各ロボットの姿勢や、周辺情報、通信状態などを同時に把握可能なインターフェイスを開発した。  (3) 自律移動アルゴリズムによって複数台のロボットを同時に操作可能である。</p>	<p>(2) 十分な機能を備えている。  (3) 十分な機能を備えている。</p>
<p>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</p>	<p>ロバストなマルチホップ無線ネットワーク技術の開発</p>	<p>(1) ロボットが設置した 10 台程度のプロトタイプ中継基地局を用いた、情報インフラストラクチャの構築  (2) 構成したインフラストラクチャを利用してロボットの遠隔操作を実現</p>	<p>(1) 環境に配置することで拡張可能なマルチホップ無線ネットワークを構築可能なネットワーク構成ノードを開発した。  (2) 複数台のロボットを制御可能な情報インフラストラクチャを実現した。</p>	<p>(1) 十分な機能を備えている。  (2) 十分な機能を備えている。</p>

<p>複数ロボットの走行経路をモニタリングし、複数の映像を含むセンシング情報をGIS上にマッピングできる測位技術とGIS技術の開発</p>	<p>情報の管理と利活用を柔軟に行えるGISの開発</p>	<p>(1) 複数ロボットの走行経路をモニタリング (2) センシング情報をマッピングできる測位技術とGIS (Geographical Information System) 技術 (3) 無線ノード配置計画アプリケーション</p>	<p>(1) ロボットから送られてくるオドメトリ情報により複数台のロボットの軌跡を表示可能である。 (2) ロボットの測域センサによる地形情報の記録やSLAMによる地図作成、カメラ映像のGIS上へのマッピングや、発見物の情報をアイコンとして登録する機能を実現した。 (3) 事前の無線ノード配置計画を、美術館問題として定式化することで、必要とされる無線ノードの数と配置位置を計算できる機能を実装した。</p>	<p>(1) 十分な機能を備えている。 (2) 十分な機能を備えている。</p>
---	-------------------------------	---	--	--

以下の各基本計画項目①～④と⑤実証実験の詳細について、以下で説明する。

**① 高機能兄弟型移動プラットフォーム・動的障害物回避と伝送遅れを考慮したロボット群の半自律制御系の開発**

本サブテーマでは、ミッションを遂行するための高い走破性と高い機動性を両立するロボット移動体として、高機能兄弟型移動プラットフォームを開発する。ここで、兄弟

型の移動プラットフォームにおいて兄ロボットと弟ロボットのそれぞれの機能と役割は以下のとおりである。

- ・兄ロボット：未知環境である被災建造物内において、既存の情報インフラを前提とせず、ロボットが移動し広範囲の環境情報を収集するためには、ロボットには軽量障害物の排除やドアの開放や無線ネットワーク通信範囲の拡張を行う機能が要求される。そのため、兄ロボットは未知環境を開拓するためのツールとしてコンピュータやネットワーク構成ノードの配置機構を装備し、基本的にオペレータの遠隔操縦により建物内を移動して主に通信基盤の構築作業を行う。
- ・弟ロボット：兄ロボットによりロボットのための移動基盤と通信基盤が確保され、ある程度既知となった被災建造物内において、機動性の高いロボット群が半自律的に効率よく行動してより詳細な建造物内の情報を収集する。そのため、弟ロボットは比較的小型・軽量で、機動性がよく、半自律で建造物内を移動する。

#### ・兄弟型移動ロボットプラットフォームの開発

本プロジェクトでは、与えられたミッションを遂行するための高い走破性と高い機動性を両立するロボット移動体として、高機能兄弟型移動プラットフォームを新たに開発した(図1)。ロボットに採用されている軽量で剛性の高いクローラベルトの製作はトピー工業が事前に保有している技術であり、ロボットのモータを駆動するマイコンの制御プログラムの技術は電気通信大学・岡山大学が事前に保有している技術であるが、本プロジェクトのミッションを遂行するために、ロボットのハードウェア設計やシステム設計は一から行われた。ここで、兄弟型の移動プラットフォームにおけるそれぞれの機能と役割は以下のとおりである。

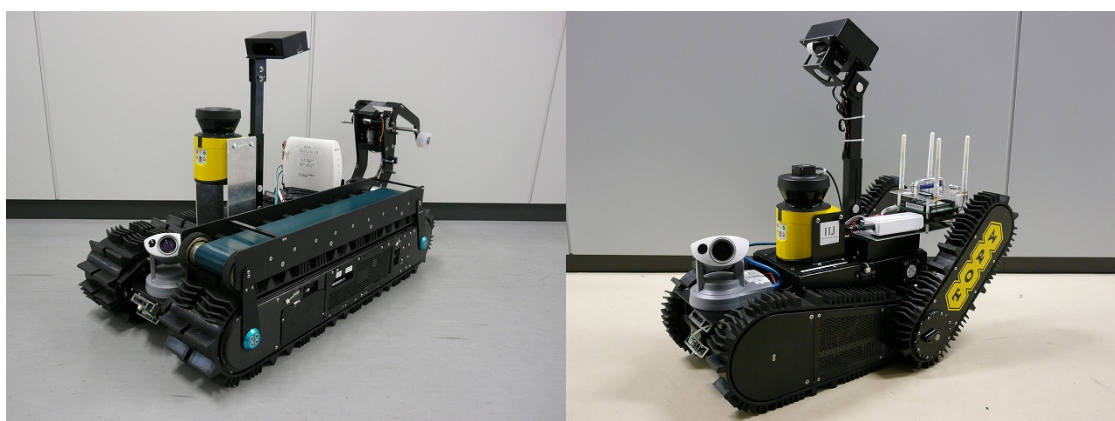


図1: 兄ロボット(左)と弟ロボット(右)の概観

兄ロボット：

未知環境である被災建造物内においてロボット群が行動できるようにするために、まず兄ロボットに搭載したコンピュータやネットワーク構成ノードの配置機構によって、軽量障害物の排除やドアの開放、無線ネットワークの通信範囲の拡張を行う。そのため、兄ロ

ボットは基本的にオペレータの遠隔操縦により建物内を移動して作業を行う。

弟ロボット：

兄ロボットにより移動基盤と通信基盤が確保され、ある程度既知となった被災建造物内において、機動性のより高い弟ロボット群が半自律的に効率よく移動してより詳細な建造物内の情報を収集する。

以下にそれぞれの詳細を述べる。

### 兄ロボットのハードウェアスペック

開発した兄ロボットを図1（左）に示す。兄ロボットは、弟ロボットが半自律的に建物内を移動するための環境整備をその役割とする。そのため、兄ロボットは障害物を排除したり、階段昇降時のきっかけを作ったり、ネットワーク構成ノードを設置したりするための多目的アームと、無線ネットワークインフラを構築するためのネットワーク構成ノード数個を搭載するスペースとネットワーク構成ノードの送り装置（特許取得済み）を持つ。特に本プロジェクトで提案するアドホック無線通信網を構築するために、ネットワーク構成ノードを環境に設置することは兄ロボットの重要な役目となっている。これらの装備を搭載するため、兄ロボットは比較的大きめのサイズ(L:876 × W:466 × H:595[mm<sup>3</sup>], 重量 54.5 [kg])となっている。ロボットの電源としては、連続稼働要求（1時間以上）を満たすために大容量バッテリー（Ni-MH, 24V 10Ah）を搭載している。兄ロボットの足回りには、既存の技術として開発済みの、軽量かつ剛性の高いトピー製のクローラベルトを採用した。さらに、兄ロボット自体が単独である程度の不整地や階段昇降などを実現し、さらに高速な移動を実現するために、兄ロボットの駆動系に逆入力遮断クラッチ（特許取得済み）によるトルク伝達切り替え機構を採用した。逆入力遮断クラッチにより、高速移動時と高トルク移動時において、それぞれの特性にあった DC モータ（高速時：Maxon150W モータ・ギヤヘッド 1/15, 高トルク時：Maxon150W モータ・ギヤヘッド 1/74）に切り替えて運用する（厳密には、高速移動時にのみ高トルク駆動モータを切り離す）ことにより、異なる2つの要求を満たす設計となっている。また、兄ロボットが階段を昇降する際に使用したり、ネットワーク構成ノードを配置したりするための多目的アームを搭載している。兄ロボットはオペレータにより遠隔操縦されることを想定しており、センサとしては、前方確認用の Web カメラ（Axis:PTZ213）、俯瞰視点と後方確認用の広角カメラ（OPT:NM30）計2個、測域 LRF センサ（SICK:S300）、姿勢センサ（INTERSENSE:InertiaCube3）、近接センサ（シャープ:GP2D120）計8個、モータ回転検出用エンコーダ、多目的アーム角度検出用ポテンシオメータが搭載されている。開発した兄ロボットにより、高速移動時には1.0[m/sec]で平面上を移動し、また、高トルク走行時には少なくとも蹴上げ180[mm]、踏み面280[mm]の階段を昇降できることを確認した。

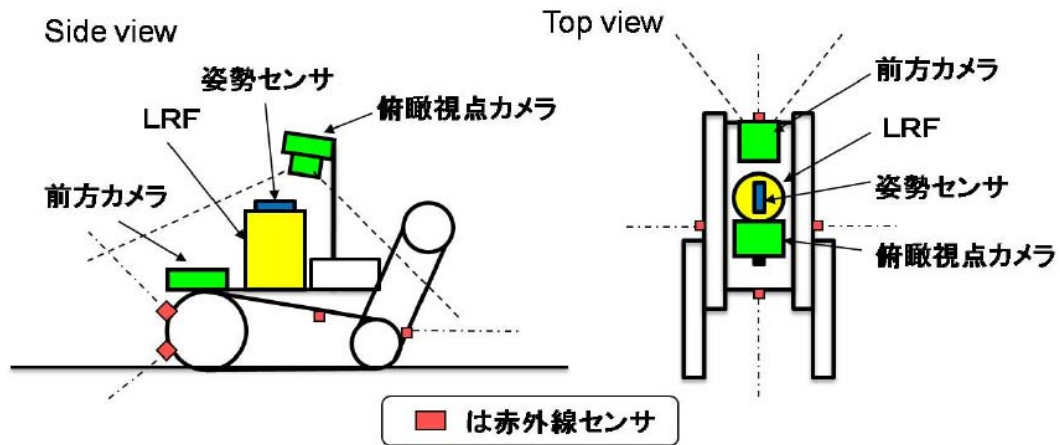


図 2: ロボットのシステム配置図

### 弟ロボットのハードウェアスペック

次に開発した弟ロボットの詳細を述べる。開発した弟ロボットを図 1 (右) に示す。弟ロボットは、兄ロボットが整備した環境内を半自律的に移動して内部の情報を収集することがその役割となっている。弟ロボットは比較的小さめのサイズ (L:460 (フリッパー展開時 L:701) × W:590 × H:516[mm<sup>3</sup>], 重量 24.0 [kg]) となっている。ロボットの電源として、兄ロボットと同様の大容量バッテリー (Ni-MH, 24V 10Ah) を搭載している。弟ロボットの足回りにも既存技術として開発済みであったトピー製のクローラベルトを採用している。また、主に階段昇降時において弟ロボットの全長を延ばすためのフリッパーアームが左右に取り付けられている。また、弟ロボットも高速かつ高トルクな移動を実現しなくてはならないが、省スペース性を考慮して、弟ロボットではクローラは出力軸に対して 2 つの DC モータ (Maxon150W モータ・ギヤヘッド 1/15) をとりつけたダブルモータ構造を採用している。なお、クローラ車両の旋回時の効率の悪さを解消するために、フリッパーアームの角度によってオムニホイールが接地して効率の良い旋回を実現することが検討されたが、オムニホイールを使用すると走行の安定性が低くなり、また車両の幅が増大するなどの理由から、オムニホイールの採用は見送られている。弟ロボットのセンサ系は兄ロボットのそれとほとんど同様である。ただ、近接センサが 5 個、フリッパーアーム角度検出用センサがエンコーダという違いがあるだけである (図 2)。開発した弟ロボットにより、1.0[m/sec] で平面上を移動し、また、兄ロボット同様に少なくとも蹴上げ 180[mm]、踏み面 280[mm] の階段を昇降できることが確認されている。

### ロボットのシステム構成

ロボットの電装系については、兄ロボット、弟ロボットともに同じ構成になっている。システムの概要を図 3 に示す。ロボット内部にはロボット制御用組み込み PC (ADVANTEC:PCM-9375 あるいは COMMELL:LS-372, OS:Linux(Debian4.0)) を搭載し、それぞ

れのDC モータは、モータドライバ (Hibot:1-Axis DC Servo 10A) を介して SH2 マイコン (HiBot:TITechSH2Tiny) によりローカルに制御される。エンコーダのカウントや近接センサの AD 変換などは SH2 マイコンにて行われ、LRF や姿勢センサのデータは直接組み込み PC のシリアル通信にて読み込まれる。

LRF と姿勢センサのデータは直接組み込み PC にシリアル通信により読み込まれる。また、広角カメラ (OPT:NW30) は RS232 で接続し、シリアル通信により組み込み PC から制御を行い、広角カメラのカメラ画像は USB キャプチャボード介して画像を圧縮したのちに組み込み PC に送られる。LRF は RS422 で組み込み PC と接続しデータの受信を行う。組み込み PC はそれぞれのセンサより受け取ったデータを処理し操作 PC に送信する。ネットワークカメラ (Axis:PTZ213) はロボット側ネットワーク制御ノードと直接 LAN で接続し操作 PC とデータの送受信を行う。

ロボット制御に関しては、一定時間データが届かなかった場合に緊急停止するなどの措置を講じて、通信層の影響がアプリケーションに伝播しないようなシステム構成を実現している。

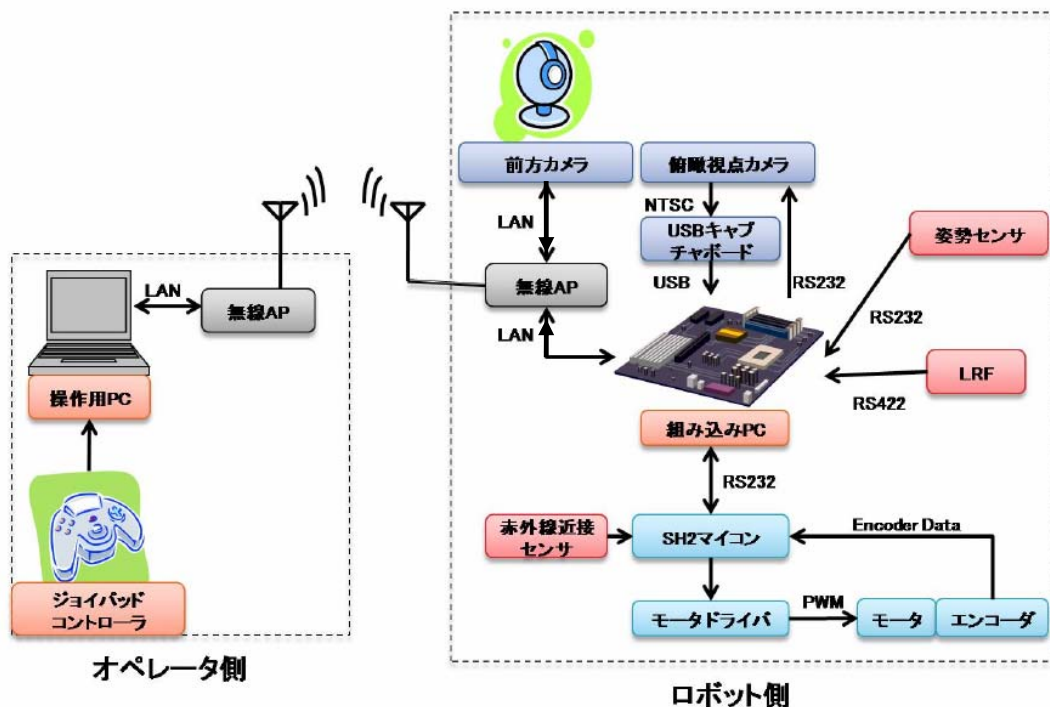


図3: ロボットのシステム構成

### ロボットの電源構成

試作した移動ロボットプラットフォームのバッテリーは 24[V] ニッケル水素充電池を使用する。バッテリー容量は 10[Ah]、重量は 3.5[kg] である。バッテリーによるロボットの連続稼

働時間は約1 時間を目標として容量を設定した. ロボットの電源ブロック図を図4に示す. 24[V] バッテリから各スイッチ, ヒューズ, DCDC コンバータを通して搭載される各機器に電力を供給する. また, モータへの電力供給はモータ系スイッチに加えて, ロボットの後方上部に設置された非常停止スイッチを介している.

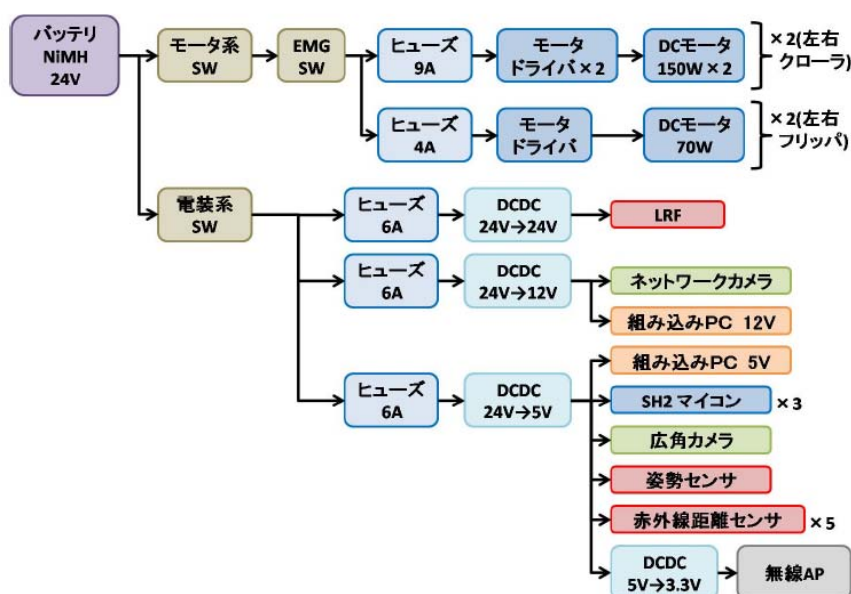


図4: 開発した移動ロボットプラットフォームの電源ブロック図

## ロボット制御プログラム

### ・組み込み PC プログラム

ロボットの駆動系や搭載機器を制御するために, ロボットには組み込み式の PC が搭載されている. OS には Debian GNU/Linux 4.0 が採用されている. 組み込み PC 内のロボット制御プロセスにはプログラムには以下のような機能が実装してある.

- ・UDP 通信
- ・TCP 通信
- ・シリアル通信
- ・キーボード読み取り
- ・タイマー割り込み
- ・データ表示
- ・ファイルの書き出し組み込み

これらの機能は本プロジェクトのために新たに Linux に移植された. この PC プログラムのフローチャートを図5に示す.



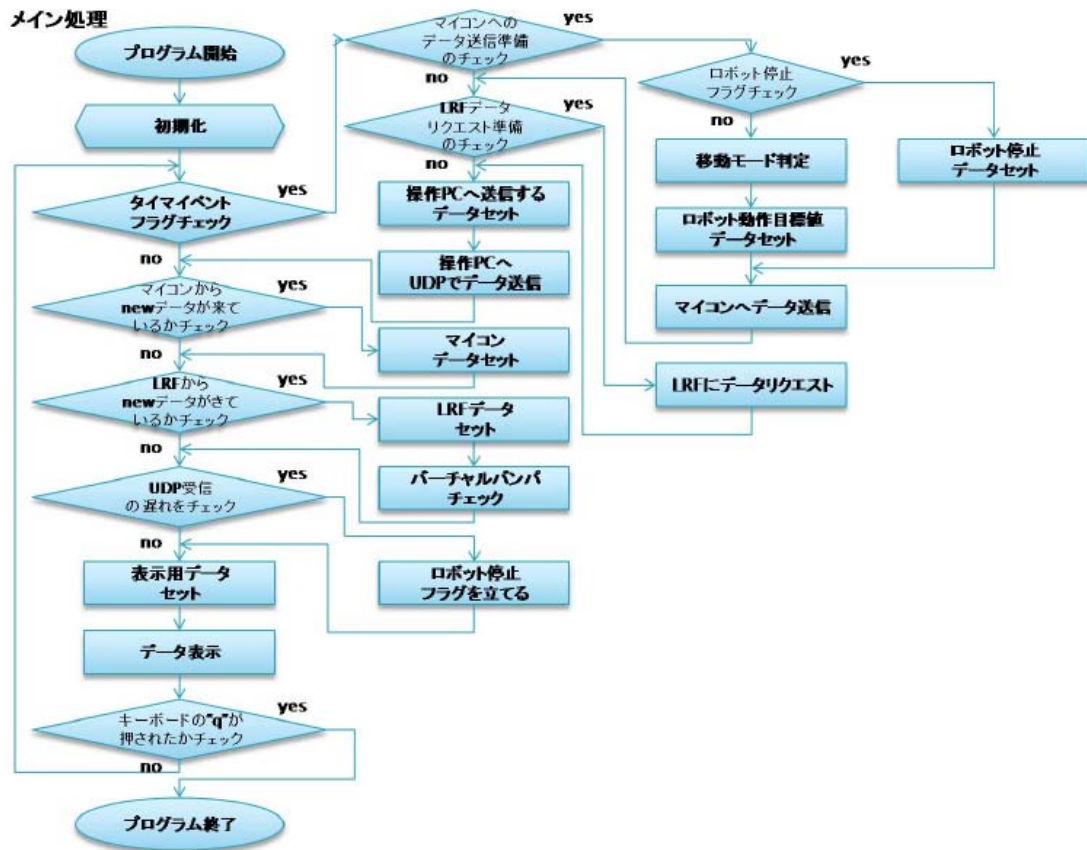


図 5: ロボット制御プログラムのフローチャート

・マイコンプログラム

モータを制御したりセンサ情報を取得したりするマイコンには HiBot 社製の TiTech SH2 Tiny Controller(SH2 SH7047F) を使用している. マイコンプログラムには以下のような機能が実装してある.

- ・LED 点灯
- ・シリアル通信(with リングバッファ)
- ・タイマー割り込み
- ・モータ駆動用の PWM 出力×2ch
- ・エンコーダ値のカウント×2ch
- ・16bit AD 変換×16ch
- ・CAN 通信マイコンプログラム

このプログラムのフローチャートを図 6 に示す.

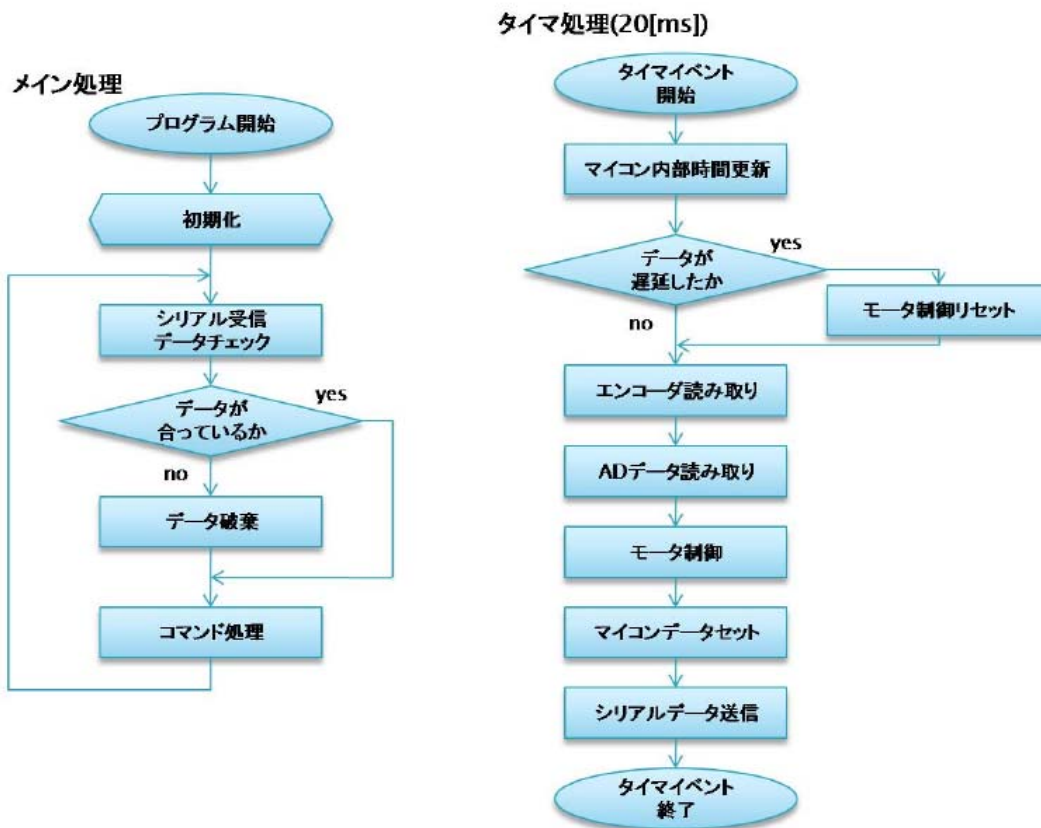


図 6: マイコン内プログラムのフローチャート

### ・ネットワーク構成ノード据置機構の開発

既存のインフラを必要としない前提で、ロボットが稼動するための情報インフラを構築するために、兄ロボットがネットワーク構成ノードを複数個搭載し、環境に設置するメカニズムの開発を新たに行った。ネットワーク構成ノード設置機構は大きく分けてアーム部と送り機構部の2つの部分からなる。アーム部は全部で3自由度（設置に使うのは2自由度）あり、ネットワーク構成ノードのケースに設けられたフックにスライダバーを引っ掛けて送り装置からネットワーク構成ノードを取り出すことにより環境に敷設する。送り装置はロボットの左右のクローラの上に配置されており、ワンウェイクラッチによりアーム部の方のみにネットワーク構成ノードが送られる仕組みになっている。送り出し機構の動力源はクローラベルトの動力を伝達する機構であり、送り装置にはワンウェイクラッチを採用している。このワンウェイクラッチの外周が、クローラベルトに接触するようになっており、これにより、ロボットが図7中の矢印A方向に回ってロボットが前進している時に、ワンウェイクラッチが噛み合い、このワンウェイクラッチを介して送り装置に回転トルクが伝達されネットワーク構成ノードを搬送できるようになっている。ロボット

が後退している時には、ワンウェイクラッチは空転しクローラから原動ローラに回転トルクは伝達されず、コンベアに上記搬送方向と逆の方向に駆動されることはない。さらに、アームや送り装置にはポテンシオメータやリミットスイッチなどのセンサが取り付けられており、遠隔操作によるネットワーク構成ノードの配置時のオペレータの操作を支援する仕組みが実装されている。

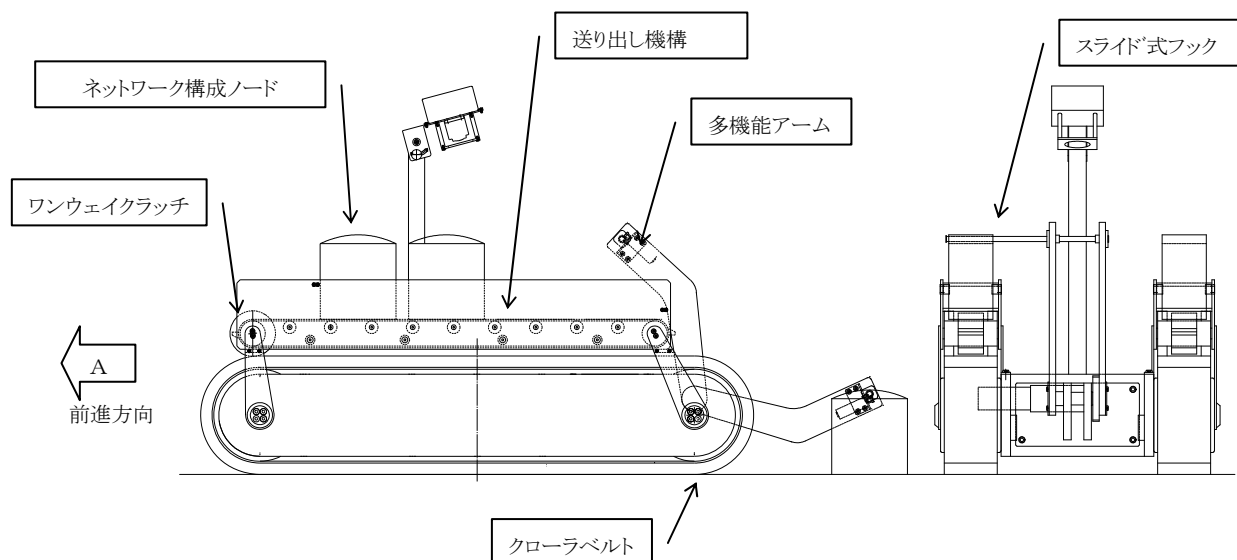


図 7: ネットワーク構成ノード配置機構

### ・オペレータのロボット遠隔操縦を支援するバーチャルバンパー

オペレータがロボットを遠隔操縦する際に、ロボットが障害物に衝突しないためのバーチャルバンパーを本プロジェクトで新たに実装した。バーチャルバンパーとはオペレータによる手動操縦にバーチャルバンパーというセンサ情報をもとに障害物を自動検出する安全走行機能である。ロボットの周囲の障害物を自動検出することで、ロボットが障害物に衝突することを防ぎかつオペレータ自身が障害物を認識する負荷が軽減され探査のスピードを上げる狙いがある。この移動モードは、主に被災建物内の障害物の乗り越え、階段の昇降、確実な探査を行いたい際に使用する。

ロボットの移動速度に応じてバーチャルバンパーの有効範囲が変わる仕組みになっている。バーチャルバンパーの範囲概要を図 8 に示す。ロボットの前水平面の障害物検出は LRF により半径 0.5 ～1.0[m] の扇型の範囲で行い、扇型の半径の長さはロボットの並進速度に比例して大きくなる。ロボットの前斜め上下の障害物検出は赤外線近接センサによ

り行う。ロボットが前方に障害物または段差を検出すると前進方向には移動は制限され、その場旋回と後退のみ可能となる。また、ロボットの後方は赤外線近接センサにより障害物検出を行い、検出された場合後方への移動は制限され、その場旋回と前進のみ可能となる。加えて、バーチャルバンパーに障害物が当たると検出した箇所(前方、前方斜め上下、後方)を操作インターフェイスに警告として表示し、オペレータに報せるようになっている。

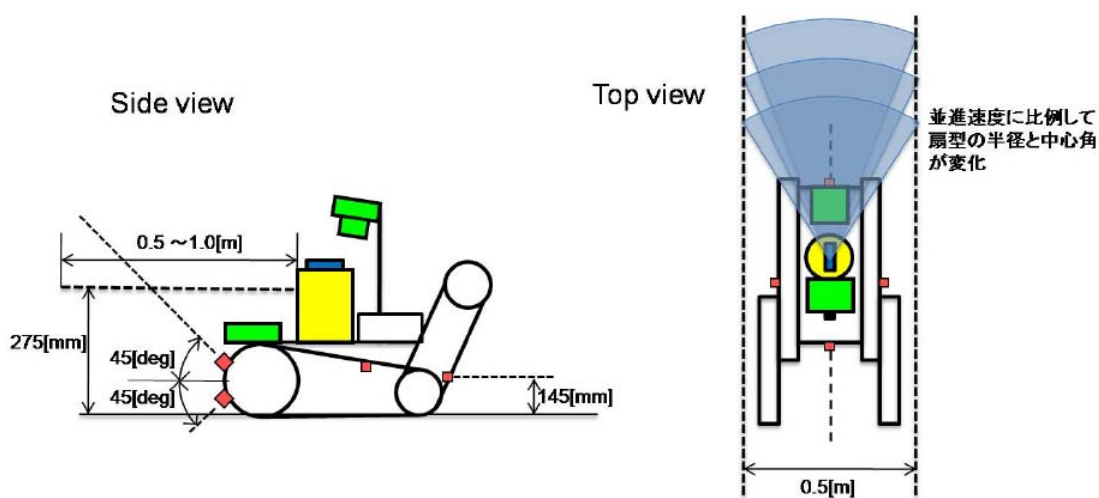


図 8: バーチャルバンパーの有効範囲

#### ・ ネットワーク構成ノードの形状設計と兄ロボットによる自動配置

通信インフラ構築を目的として、兄ロボットはネットワーク構成ノードを搭載し、環境に配備していく。ネットワーク構成ノードは環境に複数台設置することでマルチホップなネットワークの構築を行うものである。そのためネットワーク構成ノードのケースの形状は兄ロボットに大量に搭載できるようにコンパクトで軽量であることが望ましい。また無線電波のフェージングを防ぐために空間ダイバーシティ法をとり入れ、アンテナの距離を波長分(125[mm])ずらすようにした。以上の事を考慮にいれ、3次元CADで外形を設計し、ABS樹脂を素材として3次元プリンターで製作したネットワーク構成ノードを図9に示す。重量は1055[g]、サイズはL:197 × W:150 × H:109[mm]である。



図9： 製作したネットワーク構成ノードの外形

作製したネットワーク構成ノードは、ケースのフックに兄ロボットのアームを引っ掛け、兄ロボット上の積載スペースからネットワーク構成ノードを吊り下げて環境に設置する。この操作を遠隔操縦によって行う場合、兄ロボットに搭載された俯瞰視点カメラの限られた視点・視野では設置操作が困難である。そこでネットワーク構成ノードの一連の動作を自動化した。その様子を図10に示す。図中の①でフリッパーアームをネットワーク構成ノードの位置まで動かし、②でネットワーク構成ノードを取り出して吊り上げている。③でネットワーク構成ノードの一部が床に接し、④で設置完了である。

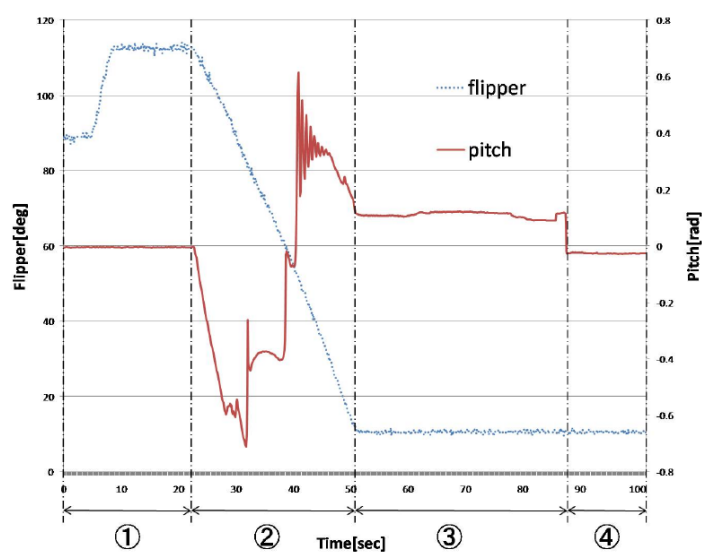


図10： ネットワーク構成ノードを自動配置中の機器の傾きの様子

### ・複数台移動ロボットの編隊制御

被災建築物内の探索において、複数のレスキューロボットの利用は効率的かつ迅速な情報収集が期待できる。これを実現するには、オペレーター一人で複数のロボットを操作可能

にする制御法が必要となる。本研究では、複数台ロボットの制御法の一つである編隊制御を実現した。開発した制御系では、特定した1台のロボット（リーダーロボット）のみを遠隔で操作し、残りのロボット（フォロワーロボット）はある定められたフォーメーションを保ちつつ、リーダーロボットを自律的に追従する動作を行うようにした。フォーメーションを形成するためには、ロボット間の相対位置が必要となる。本研究では、測域センサから得られた距離情報に基づいて、ロボット間の相対位置を推定した。測域センサの距離データをクラスタリングし、環境形状をいくつかのまとまりとして捉える。フォロワーロボットはリーダーロボットの形状を覚えて相対位置を推定する。このようにして、相対位置を推定し、指定されたフォーメーションを形成しつつ、リーダーロボットに追従させる。図 11 に本手法を実装した場合の実験結果を示す。

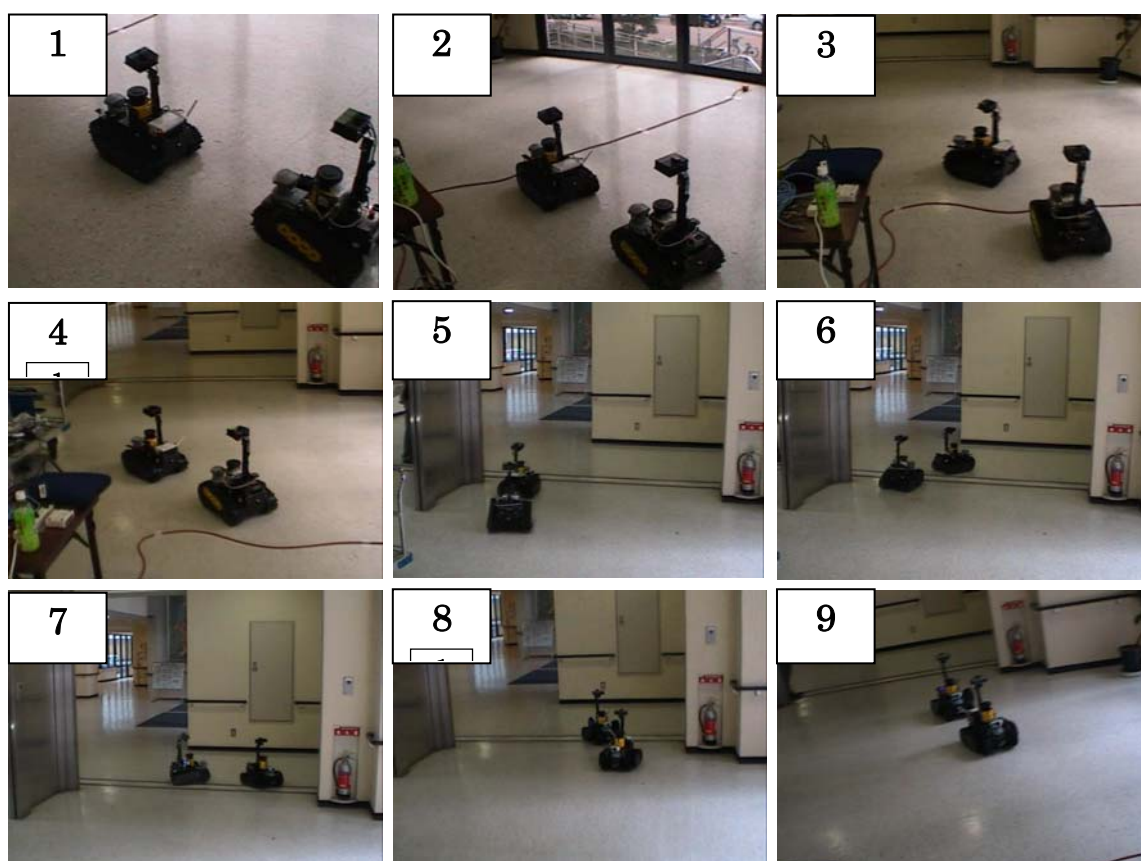


図 11： 開発ロボットによる編隊制御

図 16 では、本手法を実装した場合の実験結果である。オペレータは先頭のロボット（リーダーロボット）を手動で動作させている。その間、後方ロボット（フォロワーロボット）は一定距離を保ちつつ、リーダーロボットに追従している。

・自己位置推定を必要としない複数台移動ロボットの半自律制御システムの開発

オペレーター一人で複数台の移動ロボットの同時操作を可能にする編隊制御を実現するには、ロボット自己位置あるいはロボット間の相対位置を推定する必要がある。SLAM などロボットの自己位置推定に関する研究は盛んに行われているが、計算量が大きいなど実用的な問題がある。このため正確なロボットを自己位置推定し、それを元にして編隊制御を実現するのは困難である。

そこで本研究では自己位置推定を必要としない半自律制御システムを開発した。

開発したシステムでは、以下のようなアルゴリズムを実装した。

1. オペレータはロボットの進行方向（角度）と速度をロボットに与える。
2. ロボットは与えられた角度に指定された速度で進む。
3. ロボットの進行方向にセンサで障害物が検出されたとき、ロボットは障害物を壁とみなして、壁沿い走行して障害物を避ける。
4. ロボットの前方に障害物がなくなれば、指定された進行方向に向けて前進する。

本研究では、複数台のロボットに上記アルゴリズムを実装した。ロボットはお互いを障害物とみなすため、ロボット間の衝突も避けられる。

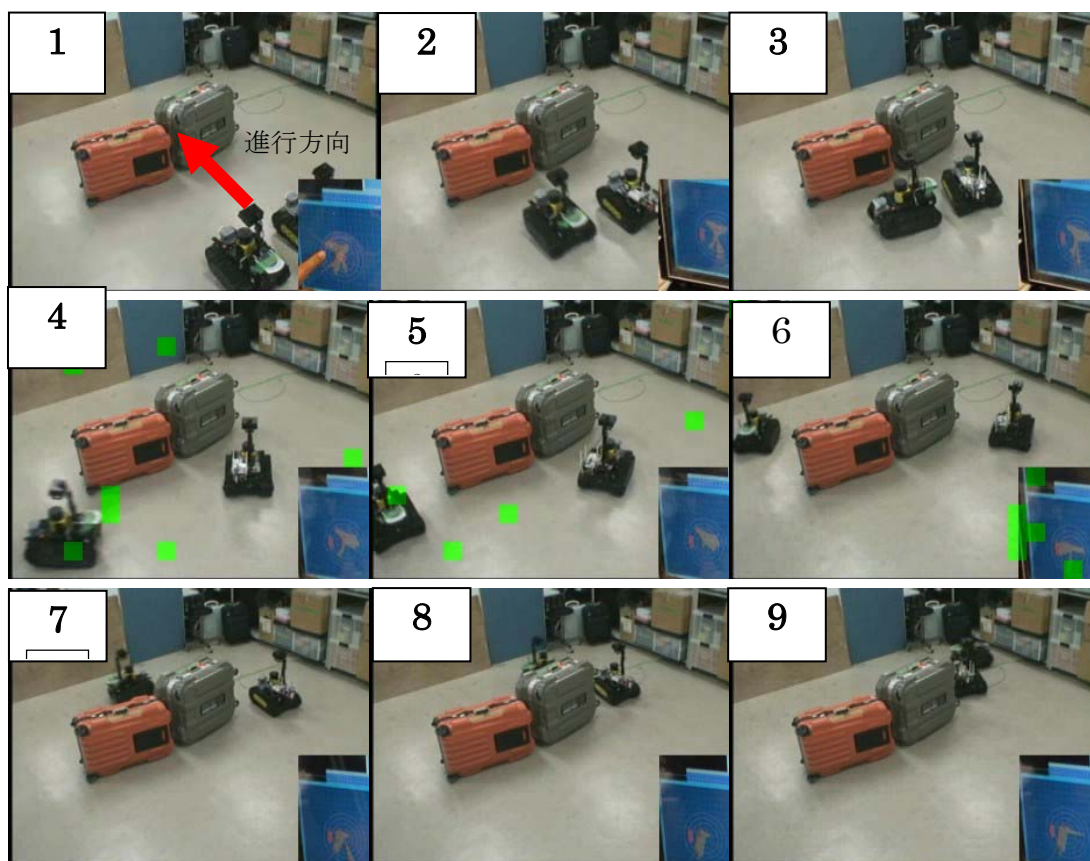


図 12： 実験結果

オペレータは2台のロボットの進行方向と速度を指定する（図 12 の 1）。次にロボットは指定された方向に進む（図 12 の 2）。進行方向に障害物を検出したため、ロボットは障害物を

回避するため壁沿い走行を始める (図 12 の 3 から 4). 進行方向に障害物が無くなれば, 進行方向に向けて進み(図 12 の 5), 障害物が検出されたので壁沿い走行を始めている (図 12 の 6 から 9).

### ・左手法・右手法による自律巡回移動の実現

本プロジェクトでは, 開発ロボットに対して左手法および右手法による自律移動制御を実装した.

左手法とは左, 前, 右の優先順位でロボットの左にある障害物を沿いながら走行する基本的な探索アルゴリズムである. 実装した左手法では, ロボットの周辺に障害物が無い場合, ロボットは図 13 の 1 のように左手方向に旋回する. つぎに左側に障害物がある場合, ロボットは前進をする. 左側と前方に障害物がある場合, および左側, 前方, 右側に障害物がある場合, ロボットは右手方向に旋回する (図 13 の 3 と 4).

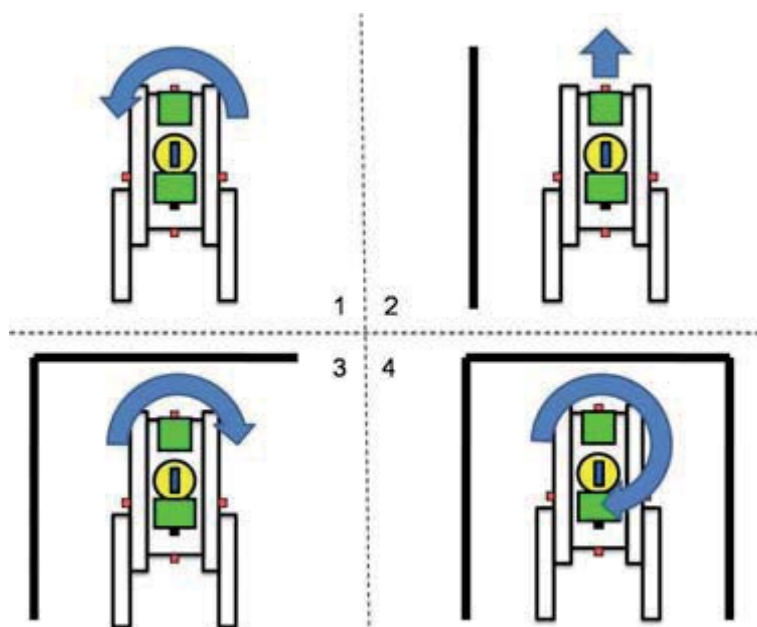


図 13 : 左手法でのロボットの動作

右手法の場合は右, 前, 左の優先順位でロボットの右側にある障害物に沿いながら走行する.

障害物の検出は LRF の距離データにより行い, その識別範囲は調整の結果, 図 14 に設定した. Left area に障害物がある場合, ロボットは左側に障害物があると識別し, 同様に Front area に障害物が検出されたときは前方に, Right area に障害物が検出されたときは右側に障害物があると識別する.



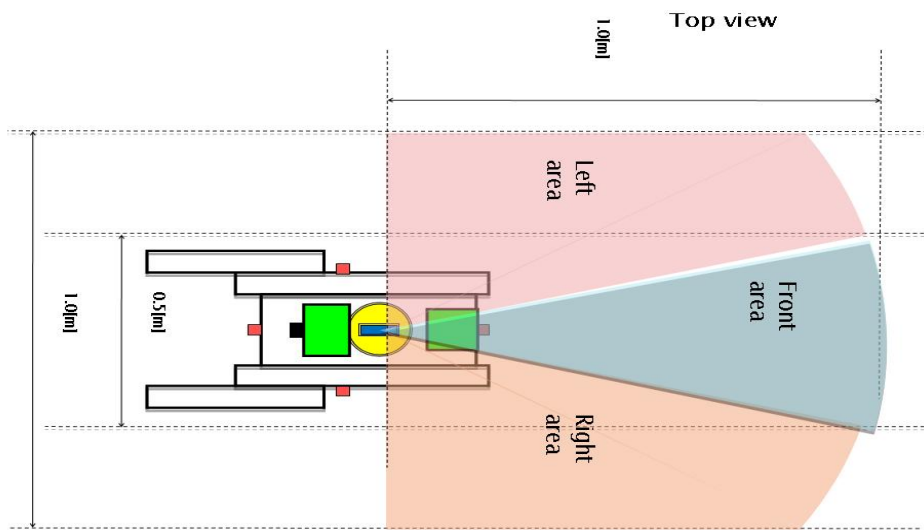


図 14： 障害物位置識別範囲

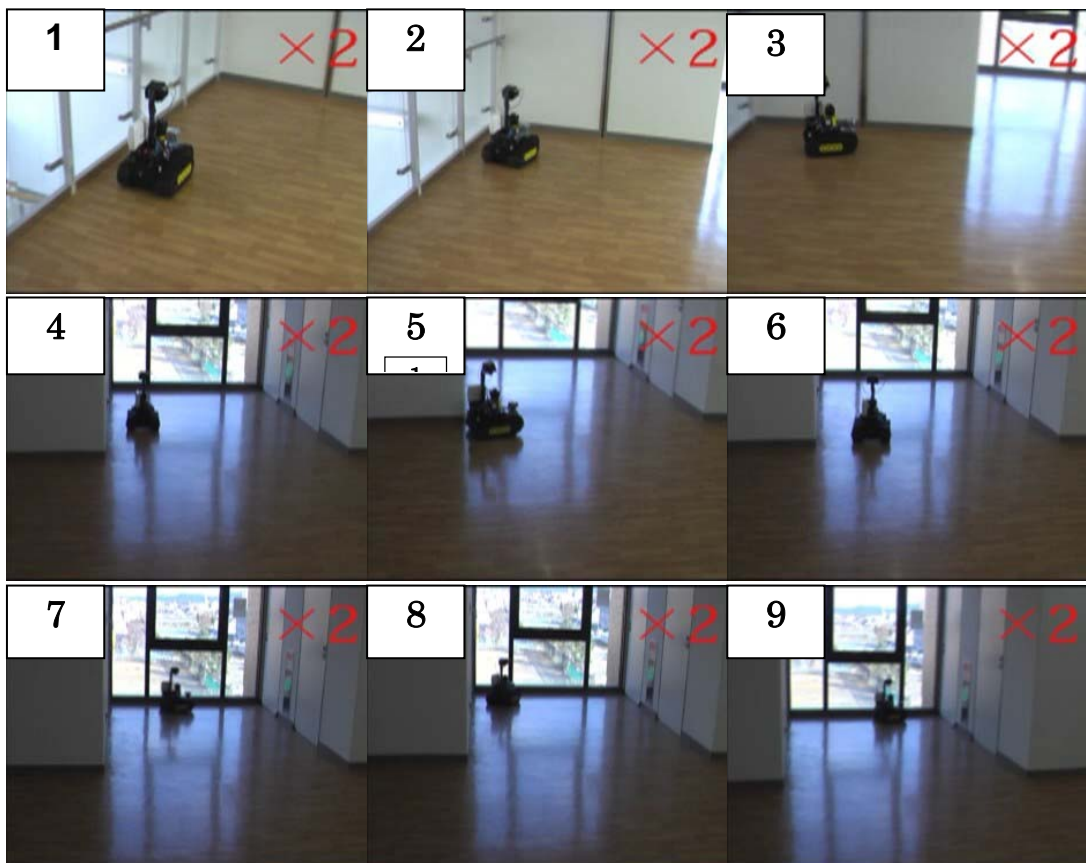


図 15： 左手法による動作

図 15 に左手法によるロボットの動作を示す。ロボットが左側にある壁に沿って走行しているのがわかる。

## ② 環境変化にロバストでオペレータや通信回線への負担軽減を考慮した遠隔操作システムの開発

本サブテーマでは、カメラのみではなく様々なセンサ情報を融合することにより、環境変化に対して頑強で、ロボット操作を行うオペレータのストレスの少ない遠隔情報提示システムの開発を行う。本システムで収集する情報は遠隔操作ロボットのみでなく、自律ロボットにも利用できるものであり、また、遠隔ロボットの状況把握モニタとしてのみでも使用可能なものである。遠隔操作されるロボットは、通常その機動性を重視して無線操作される場合が多いが、その場合、カメラなどのセンサ情報の送受信においては、センサの数が増えるほど通信容量も大きくなってしまふ。ここでは、送受信データを高頻度で送受信すべきもと低頻度での送受信でも支障をきたさないものとに階層的にカテゴライズし、優先度を考慮したデータの送受信を可能とするシステムの実現を図る。それにより通信回線への負担を軽減させることが可能である。さらに、半自律ロボット群を簡易に遠隔操作するためのユーザインタフェースを開発する。

### ・弟ロボットを用いた環境地図上ナビゲーション

タッチペン型インターフェイスによる単体弟ロボットの直観的操作を実現した。また、測域センサで取得された環境形状地図上でのロボット移動軌跡指令によるロボット操作を実現した。さらに、地図上に表示されない障害物（階段・ランダムステップフィールド）を自律的に踏破するアルゴリズムを開発・実装した。詳細を以下に述べる。

従来のレスキューロボットシステムでは、ラジコンプロポやゲームのコントローラによってロボットを遠隔操縦するものが多かった。しかし、消防隊員はミッション中に厚手の手袋を着用しているため、それらのように小さいボタンやスティックを有するデバイスでは、操作が困難であった。この意見は、実際にレスキューロボットの操作を行っていた消防隊員から上がっており、重要な開発項目となっていた。消防隊員と議論を重ねた結果、ペン型インターフェイス（タッチペン）を用いれば操作の困難さが改善されることがわかった。そこで、我々はタッチペンによるロボット操作インターフェイスを開発した。

開発インターフェイスの基本アイデアを図 16 に示す。PC のディスプレイ上にはロボットの走行環境の地図が表示されている。操作者はタッチペンを用いて地図上に目標地点をタッチしたり、目標軌跡を描いたりする。これらの操作入力に従って、ロボットは自律的に目標地点へ移動あるいは目標軌跡に追従する。また、ロボットが複数存在するときは、移動対象となるロボットのアイコンをペンで囲む。その後目標地点あるいは目標軌跡を与えることで、複数台のロボットを操作者の意思を反映させて半自律的に移動させることができる。このようなインターフェイスを目標として開発を行った。

開発初期はまずは単体のロボットについて開発を行った。開発したインターフェイスを図 17 に示す。図 17 のインターフェイスでは、ディスプレイに表示する地図は測域センサによる点群を用い、ロボットの位置姿勢はオドメトリによって求めた。操作者は表示され

た地図上にロボットの目標軌跡を描く。フリーハンドで描かれた曲線にロボットを追従させることは困難であるため、描かれた軌跡は10本の直線に分割・近似し、ロボットは各直線に追従しながら、入力された軌跡に沿うように移動する。

開発したインターフェイスは、本プロジェクトで開発した兄弟型ロボットシステムに実装され、2008年2月に神奈川県産業振興会館にて行われたデモンストレーションにおいても用いられている。LRFデータのみを用いるため暗闇での走行にも適用できる。

また、提案インターフェイスでは操作者は2次元の地図上で軌跡を入力するのみであるため、障害物の踏破においては、自律的な障害物踏破が必要となる。そこで、階段の簡易的な自律踏破(図18(a):ピッチ角のみの制御)やRoboCup Rescueで採用されているランダムステップフィールドの半自律踏破(図18(b):前進のみの入力で障害物踏破)を実現している。このように、実用化を視野に入れた単体ロボットのタッチペンを用いた地図上ナビゲーションインタフェースの開発を行った。

次に、複数台のレスキューロボットのタッチペンを用いた操作インターフェイスについて述べる。開発したインターフェイスを図19に示す。複数台のロボットでは、目標軌跡や目標地点を各ロボットに与えるのは煩雑である。そこで、複数台ロボット用に開発したインターフェイスでは、モデル予測制御に基づく編隊制御との連携により、ロボット同士の衝突を回避しながら、移動対象のロボットが目標地点に移動できるようにした。また、基本アイデアにて述べたとおり、複数ロボットの中から移動対象となるロボットの選択方法としては、対象となるロボットを囲むという直感的な方法を採用した。単体ロボットのとくと同様に地図は各ロボットの測域センサデータを用い、ロボット位置はオドメトリによって計測した。

ここで用いた編隊制御システムは、リーダーフォロワ型の制御を行っており、各ロボットの属性(L:リーダー or F:フォロワ or N:メンバー外)、リーダーロボットの速度・各速度を外部から受信する必要がある。これらのデータを受信すると、ロボット同士の衝突を考慮しながら編隊形状を維持するための各フォロワーロボットの速度・各速度を算出する。

タッチペンを用いた複数台ロボットの操作方法の流れを図20に示す。まず、インタフェースシステムが自動的に地図とロボットアイコンを表示する。操作者は移動させたいロボットを囲み、それらの目標地点をタッチする。インタフェースシステムは、入力された目標地点に一番近いロボットをリーダーロボットと決定し、リーダーロボットが目標地点に向かうためのリーダーロボットの速度と角速度を算出する。インタフェースシステムは、このリーダーロボットの速度・角速度と各ロボットの属性(リーダー or フォロワ or メンバー外)を編隊制御システムに送信する。編隊制御システムは受信したデータからフォロワーロボットの速度を算出し、ロボットの制御を行う。移動中は各ロボットからインタフェースシステムへ位置姿勢と測域センサデータが送られており、移動の様子をモニタリングできる。モニタリングの結果、ロボット群の移動が操作者の想像と異なる場合には、操作者は随時目標地点や移動対象を変更することができる。

このように、ロボット操作のための大部分は、システムが自動的に計算を行うため、操作者は、「これらのロボットたちはここに行け」という単純な入力を地図上でタッチペンで描くだけで、簡単に複数台のロボットの操作を行うことができる。

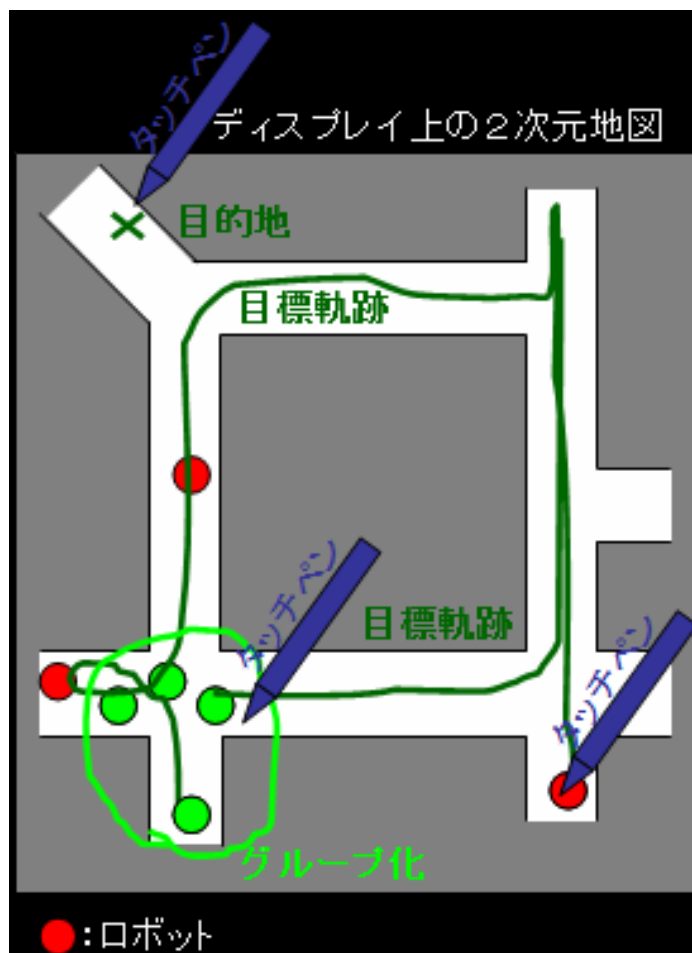


図 16： タッチペンインタフェースの基本アイデア

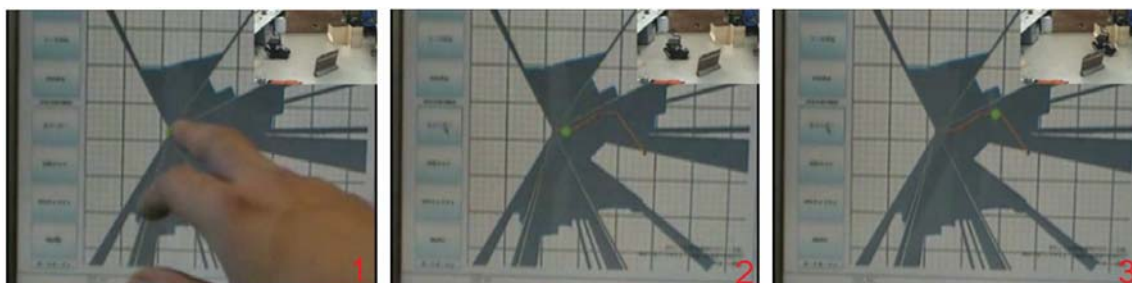
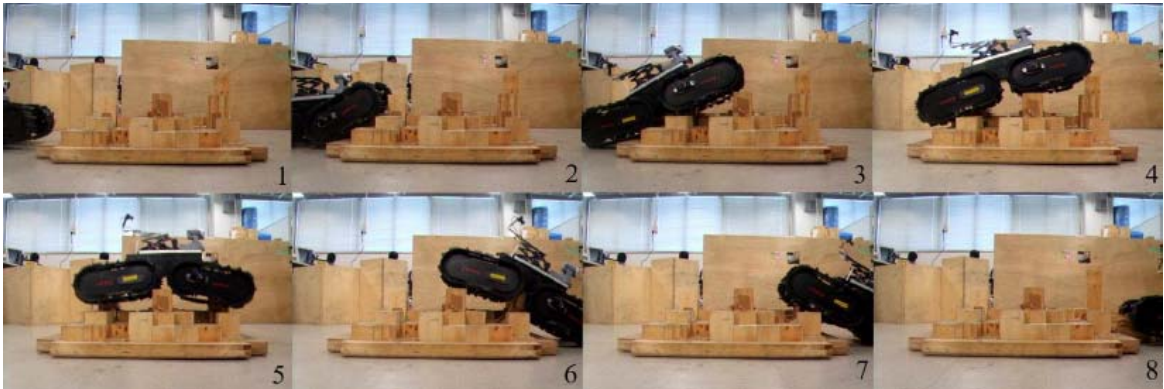


図 17： 単体第1ロボットの地図上ナビゲーション



(a) 自動階段踏破



(b) ランダムステップフィールドの半自律踏破

図 18： 障害物の自律・半自律踏破

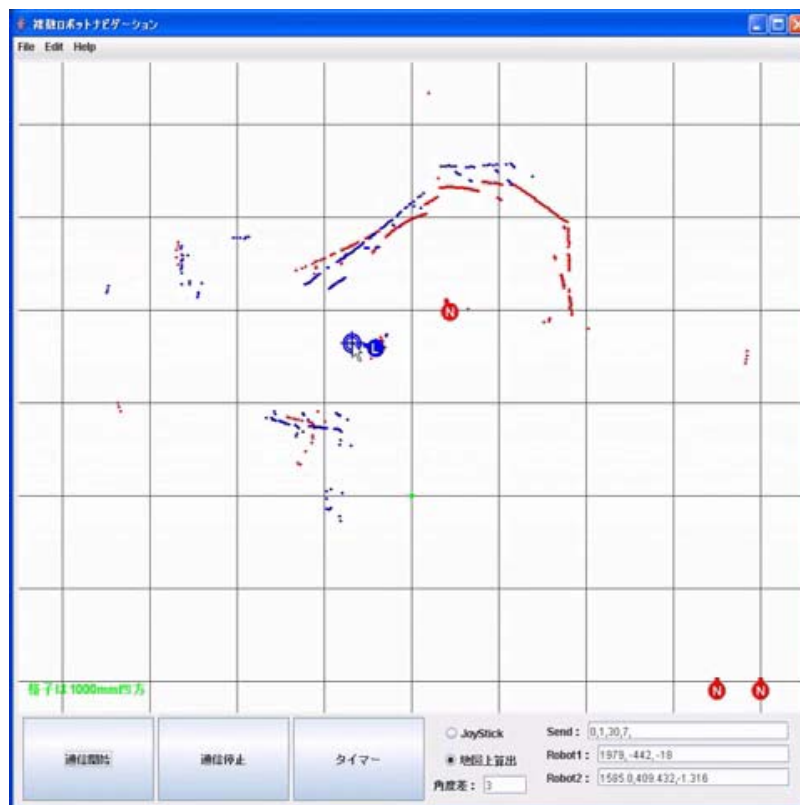


図 19： 複数台ロボットのタッチペンを用いた操作インターフェイス

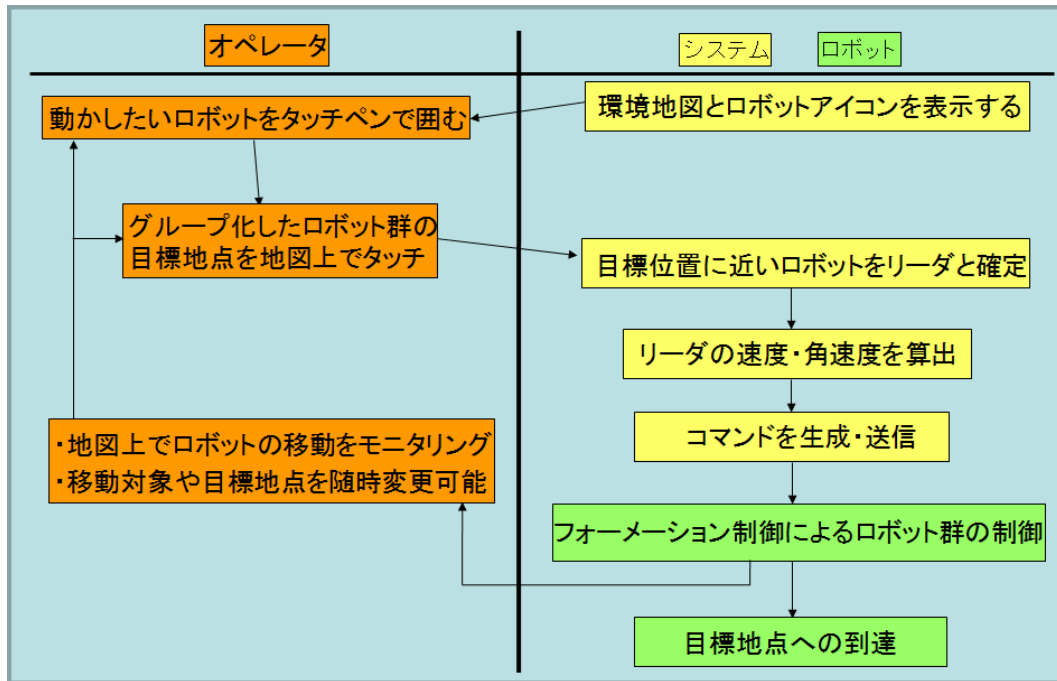


図 20： 複数台ロボットのタッチペンを用いた操作方法

### ・カメラシステムの開発

通信路に負荷をかけないデータ形式への変換と対応する以下のカメラシステムの開発を行った。

- カメラ画像のデジタル変換およびネットワーク配信の実現
  - カメラ画像のハードウェア圧縮による CPU 負荷および通信負荷の低減
  - CPU 負荷を低減させ、伝送遅延による影響を考慮したカメラ画像安定化システムの実現
- 詳細を以下に述べる。

従来カメラ画像は、NTSC のアナログ信号として 2.4GHz 無線電波にてその送受信を行っていた。この場合、送信機、受信機間のみに限られたカメラ画像の転送となる。カメラ画像をデジタルデータとして扱えることにより、カメラ画像データがネットワークを介して配信することが可能となり、ネットワークが繋がっているところであればその帯域が許す限りどこへでもカメラ画像の転送が可能となる。また、カメラ画像をデジタル化することにより、そのサイズなどのデータ自体の加工やネットワーク上を行きかう画像データの制御も容易となる。そこで、NTSC のアナログ信号であるカメラ画像データを PC でキャプチャし、PC 内で jpeg 画像へと圧縮変換後、変換した jpeg カメラ画像データを UDP 通信によりネットワークを介して遠隔地へ配信するシステムを実現した。この jpeg 画像へのデータ圧縮は、ロボット搭載 PC で行うものであり、上記のような利点もあるが、圧縮処理により CPU への負荷は増してしまう。そこで、圧縮処理による CPU 負荷を低減するため、CPU ではなく専用

のハードウェア) による圧縮処理を行うようシステムを改良した。図 21 は、カメラ画像の圧縮・配信の流れを示している。図 21 中(a)のカメラにより撮像された NTSC のアナログカメラ画像データは、(b)のハードウェアエンコーダによりキャプチャされ jpeg 画像へ圧縮されて(c)の PC1 へ送られる。PC1 では遠隔地の PC2 へ圧縮 jpeg 画像を配信し、PC2 ではその画像を受信し表示を行う。図 22 は、ロボットを俯瞰的にみるためにロボットに搭載されたカメラ画像 (主にロボットの遠隔操作時の提示画像) をこの流れで圧縮および遠隔地のオペレータ PC へ配信を行った例である。

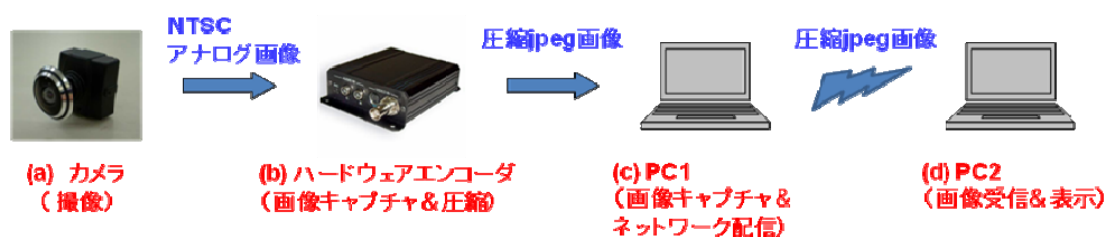


図 21： カメラ画像の圧縮・配信の流れ

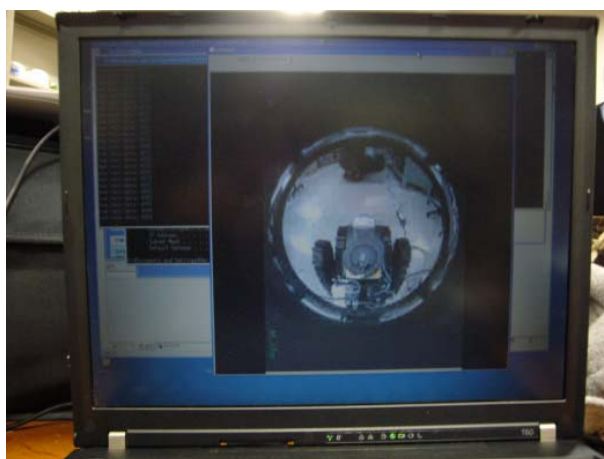


図 22： 圧縮・配信されたロボット搭載カメラ画像例

### ・持ち運び可能な簡易型インターフェースの開発

ロボット操作に必要なデバイス一式をキャリーケースに封入し、2分程度の準備時間でロボットの遠隔操作を可能とする軽量簡易型インタフェース (約 10kg) を製作した。本装置はレスキューロボットの国際大会である RoboCup Rescue において使用され、その有効性は確認済みである。詳細を以下に述べる。

ロボットの操作に必要な操作用 PC, 無線 LAN アクセスポイント, コントローラ, スピーカ等を一人の人間でも持ち運び可能なサイズのキャリーケースに封入した。重量は約 10kg である。これにより、現場への持ち運びも容易となり、現場到着後も数分間でロボットを駆動させることが可能である。本装置は 2008 年中国蘇州で行われたレスキューロボットの国際大会 RoboCup Rescue において実際に運用を行い、問題点を適宜改良し、最短で 1 分、

遅くとも 2 分程度でロボットを駆動させることが可能であった (図 23)。

また、ステージゲート実証実験の際には拡張性を向上させるため、操作用、GIS 用、ネットワーク監視用の各ノート PC 以外の必要デバイスは新たに小型のケース (操作卓必要デバイス BOX) に封入し、セットアップ時間の短縮化を行った (図 24 左)。ステージゲート実証実験の際の操作卓上のセットアップは 1 台の会議机上に必要なものを 5 分程度で設置可能であった (図 24 右)。

以上のように、本プロジェクトの基本計画の目標である「1 台の会議机に 15 分以内に設置可能な軽量簡易型のインターフェイス」の開発に関して、より短時間での設置・運用が可能なシステムの開発に成功している。



図 23： 開発した軽量簡易型のインターフェイス  
(左：全体写真，右：RoboCup での使用の様子)



図 24： 操作卓必要デバイス BOX (左：全体写真，右：実証実験使用時)

### ・複数ロボット操縦用 GUI

#### ・GUI の概要

本研究で開発した複数ロボット操作用 GUI を図 25 に示し、各要素の名称とその機能を以下に述べる。



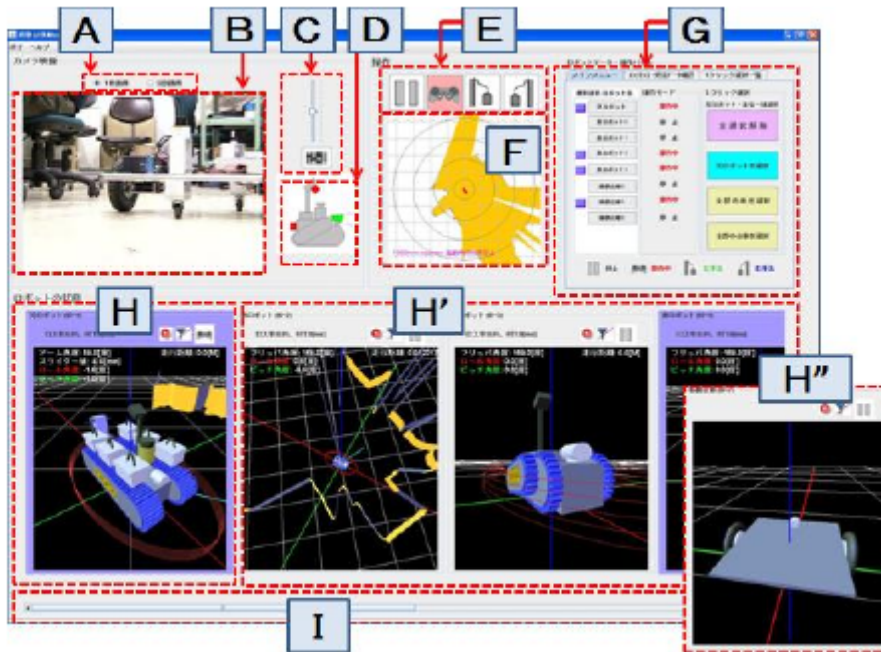


図 25： 複数ロボット操作インターフェイス

A：画像配信方法選択パネル：ロボットがカメラ映像を 1 枚の画像として送信するか、1 枚の画像を分割したデータとして送信するかを選択する。

B：カメラ映像パネル：ロボットから送られてきた前方カメラ及び俯瞰視点カメラの映像を表示する。

C：カメラクオリティ変更ボタン：ロボットから送信されるカメラ映像の圧縮率とフレームレートを変える。切替ボタンでどちらを変えるか選択し、スライダーバーで調節を行う。

D：カメラ選択パネル：ロボットのどのカメラの映像を送信するかを選択する。

E：走行モード選択ボタン：操縦者が選択したロボットに 4 種類の走行モードの指示を出す。各ボタンの機能は左から順に「停止」「手動操作」「左手法」「右手法」の指示を出す。

F：LRF データ表示パネル：選択されたロボットの LRF のデータがロボットを中心に表示される。また、このパネル上をクリックする事により、指示した方向にロボットが自律走行するモードになる。

G：複数ロボット操作・情報表示インターフェイス：GUI を改良するにあたり新たに実装したインターフェイス。3 枚のタブパネルから構成されており、複数ロボットの走行モード表示や一括選択が可能である。

H, H', H''：ロボットパネル：H はロボットの状況（操作モード・通信状況・OpenGL による 3D モデル）を表示するパネルである。パネル上をクリックする事でロボットの選択または選択の解除が行える。選択されている時はパネル回りが青色に変化し、選択されたロボットに GUI からのコマンドを送る事が出来る。H, H', H''はそれぞれ兄ロボット用、弟ロボ

ット用，移動台車用であり，設定したロボットの数だけパネルの増減が可能である。

I：スクロールバー：ロボットパネルは画面右方向に追加されていくため，画面外のロボットの状況を知るためにはこのスクロールバーをドラッグしてロボットパネルを表示する。

#### ・ ロボットパネル内 3 次元 CG の構築と評価

レスキューロボットを遠隔操縦するにあたり，ロボットに搭載された各種センサの状態やロボットの状態を図 25 の H, H', H'' のロボットパネル内で視覚的に描画する事でロボットの遠隔操作性の向上を図っている．無線通信の帯域が保証されない環境において，俯瞰カメラ映像以外の通信帯域を圧迫しないデータを用いて客観的なイメージを操作者に提示することは，非常に重要である．図 26 に 3 次元 CG モデルを示す．左側が兄ロボット，右側が弟ロボットの 3 次元 CG である．ロボットの 3 次元 CG モデルは OpenGL を用いて作成し，必要な部分以外を省略する事で描画にかかる負担を極力減らしている．作成した 3 次元 CG モデルでは，ロボットの姿勢描画，多目的アーム等の可動部の動き，壁を描画する事による障害物までの距離表示，速度に合わせたクローラの動き，クローラの色を変える事によるロボットの走行モードの表示等の機能を搭載している．

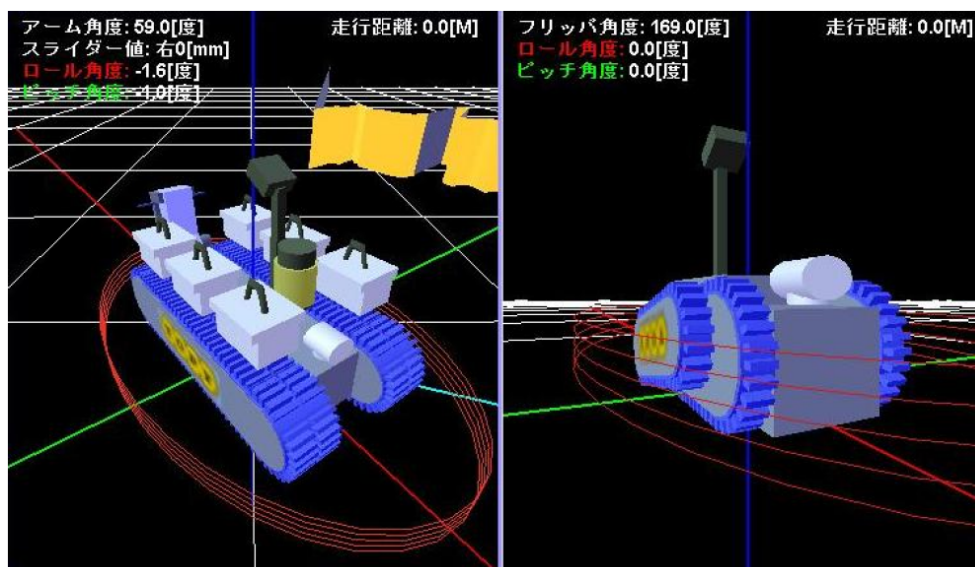


図 26： 3次元 CG モデル

#### ・ 画像配信プログラムの開発

ロボットから送られてくる画像データがネットワーク帯域を圧迫することが無いように画像データの配信を外部から起動／停止可能にした．また，画像データを分割配信することで一部の画像データが欠落しても再送することなく補間によって画像を再生可能にした．詳細を以下に述べる．

ロボットから送られてくるデータにおいて、もっとも通信帯域を圧迫するのはデータサイズの大きい画像データである。したがって我々は通信負荷を考慮し、画像の伝送方法に様々な工夫・改良を行った。

第一に、各カメラの画像配信について外部からでも起動/停止を可能とし、常に大量の画像データがネットワークに乗ることのないように制御をかけている。ステージゲート用実証システムでは、全ロボットシステム上の全カメラのうち、1台のカメラ画像のみを配信し、それ以外のカメラからの画像は配信しないような排他的なカメラの ON/OFF 制御を行った。表示させるカメラの選択は図 25 中 D の部分のイラストのカメラをクリックすることで容易に変更することが可能である。

第二に、1枚の画像を大きなデータサイズのままネットワークに乗せると、一部が欠落する可能性があるため、画像データを分割配信することで一部の画像データが欠落しても再送することなく補完し、通信への負荷を軽減化している(図 27)。図 27 は、擬似的にパケット損失を模擬して画像配信を行った例である。1枚の画像を配信する従来の方法では、画像を構成するパケットが一部でも損失するとその画像全体の配信ができなくなってしまうが、分割画像配信を行うことによりパケット損失の影響を最小限にとどめることができかつ継続的に人間にとって視認可能な画像を提示し続けることが可能となる。図 27 の例では、縦方向 4 分割、横方向 4 分割と 1枚の画像をマトリクス状に 16 個の小画像要素に分割して配信したものであり、画像中では指の付け根付近の複数の小画像要素が欠落しているが、その部分を以前の小画像要素で置き換えかつ配信が行えた他の小画像要素はそのまま表示することで人間にとって状況を継続的に視認可能な画像の提示が行えていることがわかる。

第三に、インターフェイス上には、画像配信中のカメラのフレームレートや解像度を変更するためのスライダーを用意している(図 25 中 C の部分)。カメラのフレームレートや解像度はネットワーク上を行き交う画像のデータサイズに大きく依存する。そこで、ネットワークの通信状況を考慮し、通信における応答時間の分散と遅れから算出した Q 値に基づいて上限を設定し、操作者が状況に応じてこのスライダーを変更することでよりネットワークの状態を考慮した情報の伝送が可能となるシステムを実現した。

以上のように、我々のプロジェクトでは、基本計画の目標には含まれていない通信負荷にも着目し、それを軽減化するために画像の伝送について様々な工夫・改良を行い、より実用的なインターフェイスの開発を行った。

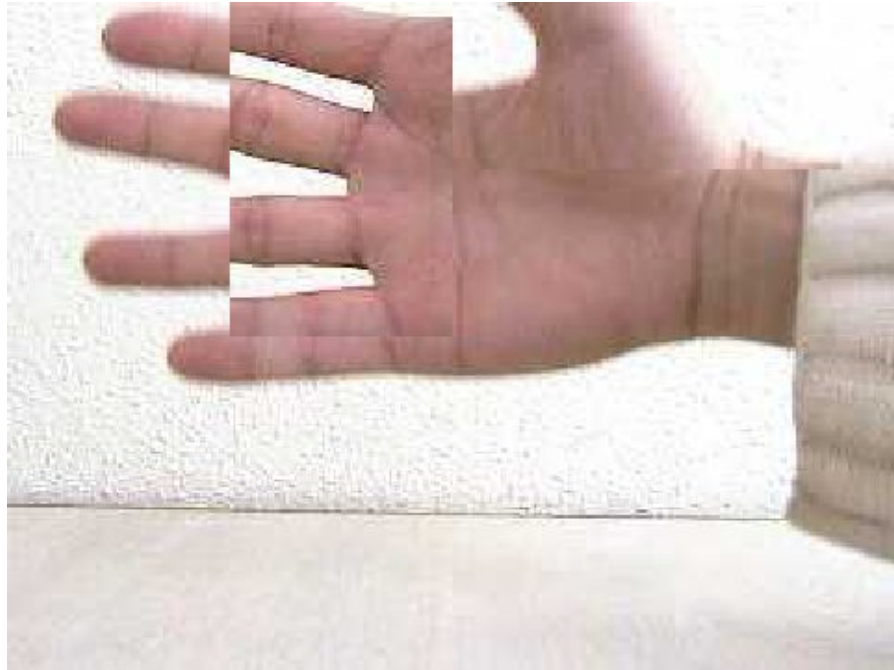


図 27： 分割画像の一例

### ③IP ベースマルチホップ無線ネットワークの構築技術の開発

本サブテーマでは、探索対象空間の環境が仮定できない条件化で、遠隔操縦もしくは半自律で動作するロボットによる遠隔探査を行うために必要な、情報インフラストラクチャを構築する。データ通信で広く利用されている標準的なインターネット技術を採用し、マルチホップ・アドホックな無線通信網を構築する。また、環境変化(電波状態など)への適応性および広さ(ネットワーク構成ノード数)の拡張性が高い非常にロバストな通信ネットワーク構築手法を実現することを目標としている。

#### ・被災建造物内の情報化インフラの開発

まず『半自律高機能移動ロボット群による被災建造物内の情報インフラ構築と情報収集システムの開発』における各要素技術を統合するネットワークの要件を整理する。我々は与えられた『建物内のロボット群から 700m 以上離れたオペレータステーションに、複数の遠隔操作用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』という要件を以下のように解釈・分割した。

(要件 1) 700m 以上の経路を含む空間をネットワーク化できる

(要件 2) そのネットワークは建物外のオペレータステーションから迅速に設置できる

(要件 3) そのネットワークは複数の操作用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

要件 1 は、ネットワークの被覆領域に関するものである。「空間をネットワーク化」とはその空間全体でネットワークを利用可能にすることを表す。与えられた要件を文字通り解釈すれば「オペレータとロボットが 700m 以上離れられるかどうか」が最小の要件になるが、本プロジェクトでは最小の要件は被災建造物内の情報収集には不十分であると判断した。詳しくは後述する。要件 2 は、要件 1 で規定したネットワークの設置に関するものである。もちろんオペレータなどの人員は建物内部に入ることは出来ないため、ネットワークはロボットのみによって迅速に設置できる必要がある。また、元々建物に設置されているネットワークは使用不可能であり、反対に電波干渉など問題を引き起こす可能性があるかと仮定している。要件 3 は、要件 1 で規定したネットワークの性能に関するものである。ロボットに搭載されるセンシング情報には高解像度のビデオストリームなどが含まれる。これらのビデオストリームが低遅延で伝送される必要がある。本プロジェクトで挙げた 3 つの要件の組み合わせは与えられた要件を包含していることに注意されたい。すなわち、3 つの要件を全て満たすシステムを構築できれば与えられた要件も満たすことになる。

次に以上の要件を踏まえて我々はさらにシナリオの分析を行い、プロジェクト初期に以下の設計指針を設定した。

**(指針 1) TCP/IP を利用する**

**(指針 2) 無線通信を中心に構成する**

**(指針 2-1) 長距離無線ではなく、短距離無線(IEEE802.11)を組み合わせる**

**(指針 2-2) 指向性アンテナではなく、無指向性アンテナを使う**

指針 1 によって被災建造物のネットワーク化に IP を採用すると本プロジェクトでのネットワークシステムをインターネットに相互接続することが容易になる。これにより、1)被災建造物からインターネット中に存在する膨大な量のリソース（地図情報・天気情報・災害速報など）にアクセスしレスキュー活動への利用ができるようになる。また逆に 2)遠隔から被災建造物内へインターネットを介してアクセスすることができるようになる。さらに 3) IP ネットワークをサポートする膨大な既存のアプリケーション資産を転用することができる。

指針 2 は我々の開発するネットワークを特徴付けるものである。すなわち、無指向性アンテナで比較的小さな領域をカバーする無線中継機を配置しネットワークを構成する。無線中継機は隣接する無線中継器とお互いが通信可能に入るように設置され、ロボットがオペレータステーションから離れた場合には複数の無線中継機を経由して通信が確立される。利用する無線通信技術は LAN を構築するために広く用いられている IEEE802.11 を採用する。まず有線リンクを引き回した場合と無線中継器を利用した場合について比較・検討する。

図 28 は有線リンクを引き回しながらロボットが活動した場合のネットワークカバー範囲を表している。

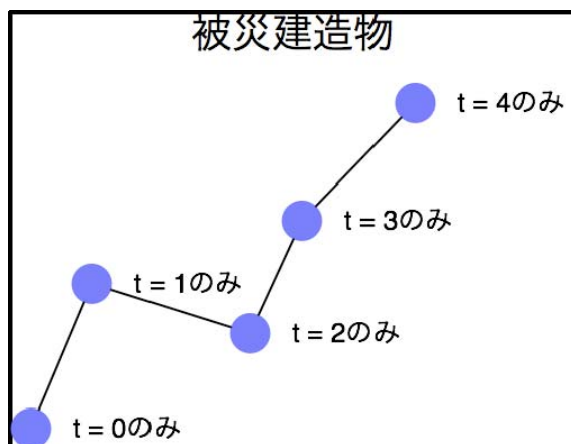


図 28: 有線リンクの被覆領域

有線メディアは一般に安価なケーブルを利用した場合にも 100M~1Gbps の帯域をサポートすることができ、環境の影響を受けにくいため遅延も小さい。しかし一方で、有線メディアは本質的に2点間を結ぶものである。ロボットが移動すると通信可能な有線メディアの先端は一緒に移動するため、ロボットは  $t = 0$  から  $t = 4$  と移動しても通信可能な領域は図 28 のように常にロボットの周辺のみである。前述の与えられた要件は満たし得るが、本プロジェクトで設定した要件 1 を満たすことが出来ない。

しかし、図 29 は無線中継機を設置しながらロボットが活動した場合のネットワークカバー範囲である。

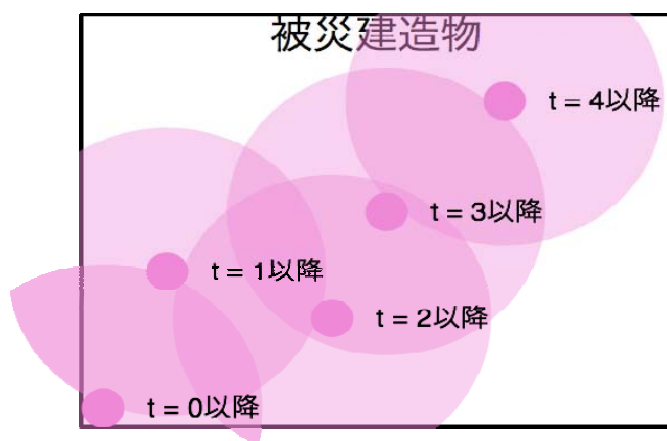


図 29: 無線リンクの被覆領域

無線メディアは比較的広帯域な IEEE802.11 を使った場合でも 30Mbps と低速であり、また周りの電波などの影響を受けるために不安定である。一方、無線メディアは、有線メディアのように 2 点を結ぶだけでなく、広い領域をネットワーク化できるという柔軟性を持つ。またロボットは無線中継機器を残したまま進んで行くので図 29 のようにロボットが進む度にネットワークの被覆領域は増えて行く。

長距離無線ではなく短距離無線を利用しているのは、以下に述べる無線特有の問題を軽減するためである。まず第一に、無線メディアは通信距離が長くなれば長くなるほど減衰しノイズの影響を受けやすくなる。第二に、無線はそれを利用するネットワーク構成ノード全体で共有されるメディアである。長距離無線を使って単一の無線中継局を多数のネットワーク構成ノードが利用することになると、無線チャネルを奪いあい利用可能な帯域が狭くなってしまふ「競合」や、複数の無線フレームが同時に送信されてしまふ電波が混ざって複合できなくなる「干渉」などが起きやすくなる。特に、我々は数十、数百大規模のロボットを同時に運用できることをプロジェクトの最終ゴールに挙げているため問題はより深刻である。第三に、無線中継局の間隔が広くなれば間に障害物が入り込む可能性が高くなる。無線中継局が密に設置されていれば、仮にある無線中継局が故障した場合にも迂回路を準備できる可能性が高い。

本プロジェクトでは以上の要件・指針を設定した上で、被災地用マルチホップ無線ネットワークシステムを構築した。以下ではまずマルチホップ無線ネットワークシステムの技術要素について詳しく述べる。その後、マルチホップ無線ネットワークシステム向けに開発された、広い被覆領域を活用するセンサ/アクチュエータネットワークのサンプルアプリケーションについて述べる。

### ・被災地用マルチホップ無線ネットワークシステム（ロボホックネットワーク）

前述の指針を基にした被災地用マルチホップ無線ネットワークシステムが要件を満たすために、1) 2つの周波数帯と多数のチャネルを同時に用いる（マルチチャネル）、2) 単一のネットワーク構成ノードとロボット搭載ネットワークノードに複数の物理インターフェイスを備えて同時に通信を行う（マルチインターフェイス）、3) 仮想インターフェイスによるオーバーレイネットワークを構築する、という3つの先端的な研究領域に踏み込み、被災地用マルチホップ無線ネットワークシステムを開発した。本プロジェクトではこのネットワークをロボホックネットワークと呼ぶ。

#### (1) バッテリー駆動可能かつロボットによる設置可能な小型のネットワーク構成ノードの実現

本プロジェクトでは、いくつかの汎用の小型 PC を用いてネットワーク構成ノードを開発

してきた (図 30, 31). ネットワーク構成ノードの小型化とバッテリーによる長時間駆動の必要性から, ステージゲートにおいては現在も開発中である小型 PC (ALIX.3 LX800) に 4 つの無指向性アンテナと小型のバッテリー, そして後述する高輝度 LED と USB カメラを組み合わせた筐体を用いた (第三世代ネットワーク構成ノード). このネットワーク構成ノードのハードウェアスペックは以下の表 1 に示した. ネットワーク構成ノードの電力供給には, 市販のリチウムイオンバッテリーを用い(MyBattery DC12V), 1 度の充電でおよそ 5 時間から 8 時間継続して動作する事を確認した. また, バッテリーを PC のケース上面に装着する事で小型可を実現している.



図 30: 第一世代と第三世代ネットワーク構成ノード (左),  
第二世代ネットワーク構成ノード (右)



図 31: 第三世代ネットワーク構成ノードの外観 (左), バッテリー装着時 (右)



表1 第三世代ネットワーク構成ノードに用いた小型PCのスペック

筐体 (アンテナ, バッテリーを除く)	幅 110mm, 高さ 30mm, 奥行き 162mm, 重量 400g
CPU	AMD Geode LX 500MHz
メモリ	256 MB DDR SDRAM
記憶媒体	コンパクトフラッシュカード 2GB
WLAN インターフェイス	silex miniPCI SX-10WAG
チップセット	Atheros Communications AR5414A-001
アンテナ	無指向性アンテナ
バッテリー	MyBattery DC12V, 容量 6600mAh, 91.5mm×59mm×24mm, 重量 180g

## (2) マルチチャネル・マルチインターフェースを用いた通信帯域の拡大

本プロジェクトではロボホックネットワークにおいて複数のロボットすべての通信帯域を拡大するため、マルチチャネル・マルチインターフェースを用いることは前述した通りである。これらを実現する手法として、

- (1) 複数の周波数帯域における、複数の周波数チャネルの効率的な割り当て
- (2) 2つの物理インターフェイスにそれぞれ2本のアンテナを利用

を行った。

ネットワーク構成ノードがロボットから送信されるビデオストリームなどの通信データを隣接するネットワーク構成ノードに中継させる際、あるネットワーク構成ノードが有する2つの物理インターフェイスは同一のフローに所属している。そのため、お互いのインターフェイスから発する電波の干渉（フロー内干渉）を回避する必要がある。本プロジェクトでは同一ネットワーク構成ノードにおいては異なる周波数帯（IEEE802.11b/gで使用される2.4GHzとIEEE802.11aで使用される5GHz）から周波数チャネルを割り当てることで干渉の低減を実現した。

さらに、ロボットは探索活動中、断続的な移動を伴うことが予想される。無線電波の特性によりアンテナの微小な位置の差が受信信号強度の大小に大きく影響する。我々はロボットが移動時にも安定した通信品質を保つために、すべての物理インターフェイスにおいて2本の無指向性アンテナを使用し、ダイバーシティ技術を利用した。

## (3) 構築されたマルチホップ無線ネットワーク内を移動するロボット等に対するシームレスなハンドオーバー技術の実現

ロボットがロボホックネットワーク内を移動すると、あるロボットがそれまでに接続していたネットワーク構成ノードから次のネットワーク構成ノードに再接続（ハンドオーバー）をする必要が生じる。その際にロボットは、（１）周辺の利用可能なネットワーク構成ノードを探索し、（２）探索したネットワーク構成ノードの中から最適なネットワーク構成ノードを選択し、（３）実際に最適なネットワーク構成ノードに接続しなおす、という３つのプロセスを継続的に実行する必要がある（図 32）。また、システムの要件として、ロボットオペレーターがロボットの制御が不能となる時間を最低限に抑える必要がある。無線の性質が短時間で大きく変化することは前述の通りであるが、通信品質の分散を抑えるよう測定した上で、我々は数秒（１～５秒）のうちに上記の３つのプロセスが完了するようにシステム設計を行い、ハンドオーバーを実現した。また、上記のモニタリングによる監視システムにおいてロボットが移動に伴い、最適なネットワーク構成ノードを選択していることが確認できた。

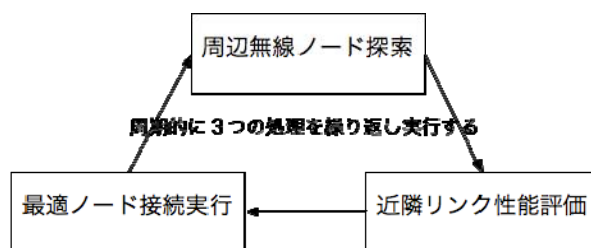


図 32: ハンドオーバー処理のプロセス

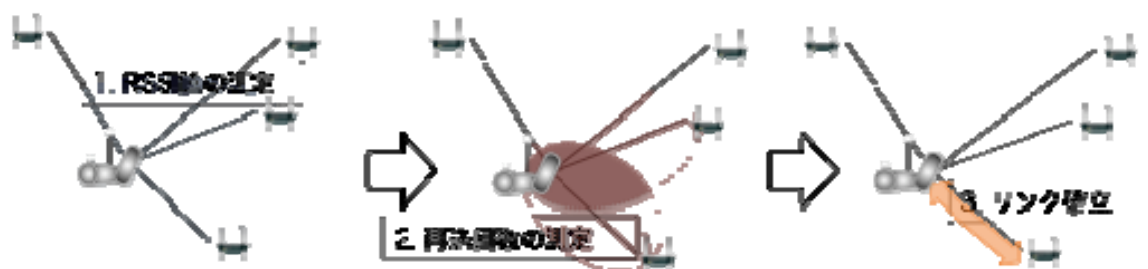


図 33: 最適なネットワーク構成ノードの選択アルゴリズム

また図 33 に示す通り、ハンドオーバー処理における最適な無線リンクの選択は以下のようなアルゴリズムによって行われる。

(1) 周囲のネットワーク構成ノードにおいてブロードキャストされるビーコンフレームを取得し、そのネットワーク構成ノードから発せられる電波の受信信号強度 (Received Signal Strength Indication, RSSI) を測定する。

(2) RSSI があるしきい値を超えたネットワーク構成ノードに対してのみ、ロボットに搭載されたネットワークノードがプローブパケットを用いることで、その無線リンクにおける往復遅延時間(RTT)とパケット損失率を測定する。

(3) 測定された2つの値から、ネットワーク構成ノード選択のための無線リンク性能評価値を算出して比較する事で最適なネットワーク構成ノードにハンドオーバーを行う。

以上のアルゴリズムを用いれば、ロボホックネットワークを構成するネットワーク構成ノードが数十、数百程度に増えた場合でもロボットは近隣のネットワーク構成ノードのみを探索し、その中で最適な無線リンクが確立可能なネットワーク構成ノードを選択して接続する事が可能となると考えられるが、大規模ネットワークでの実証実験は今後行う必要がある。

#### (4) ロボットによる設置を前提とした拡張可能なネットワークの実現

半自律制御されたロボットが無線ノードを配置することでロボホックネットワークを拡張するためには、新たに配置された無線ノードが既に配置された無線ノードと自律的に無線リンクを確立する必要がある。無線リンクの確立に関係する設定パラメータとしては、送信パワー、周波数チャンネル、通信レートが挙げられる。送信パワーは最大値に設定、周波数チャンネルは静的に設定、通信レートはデバイスドライバの自動設定機構に委譲している。動的な設定については未着手であるが、周波数チャンネルの再設定は前述のハンドオーバー手法を応用できると見込んでいる。

また我々はこのように構成されたリンク上に L2 VPN を展開している。この L2 VPN はネットワークの構成変更に合わせて自動的に転送経路を決定し、またロボットからネットワークの内部の複雑性を隠蔽する。つまり、ロボットからはロボホックネットワーク全体が単純なイーサネットの LAN セグメントとして見えるため、今後我々がネットワーク構成手法を拡張し内部仕様を変更した場合にもそれがロボットの開発に影響を与えることはない。

#### (5) 構築されたマルチホップ無線ネットワークのリアルタイムなモニタ技術の実現

我々は、無線の性質上、ネットワーク構成ノードの状態や周囲の環境によってその性能が大きく左右されることを考慮して、ロボホックネットワークを構成する無線リンクすべての状態を定期的を取得しその性能を監視するアプリケーションを開発した。本アプリケーションは、(1) ロボホックネットワークを構成する無線リンクの状態を表示し、(2) システム内に存在するロボットとオペレータ間のネットワークの状態をリアルタイムに表

示することができる。図 34 は実際にステージゲートで使用したトポロジーへの適用例である。それぞれの通信状態を示す情報は、(1) では各ネットワーク構成ノードが隣接するネットワーク構成ノードに、(2) では各ロボットがオペレータセグメント内のノードに定期的にプローブパケットを交換しその応答から往復遅延時間(RTT)とパケット損失率を測定し、その結果をオペレータに伝達することでモニタ上に表示されている。また後述するが、図内のロボットの写真はそのロボットが接続しているネットワーク構成ノード近くに表示されていることを示す。

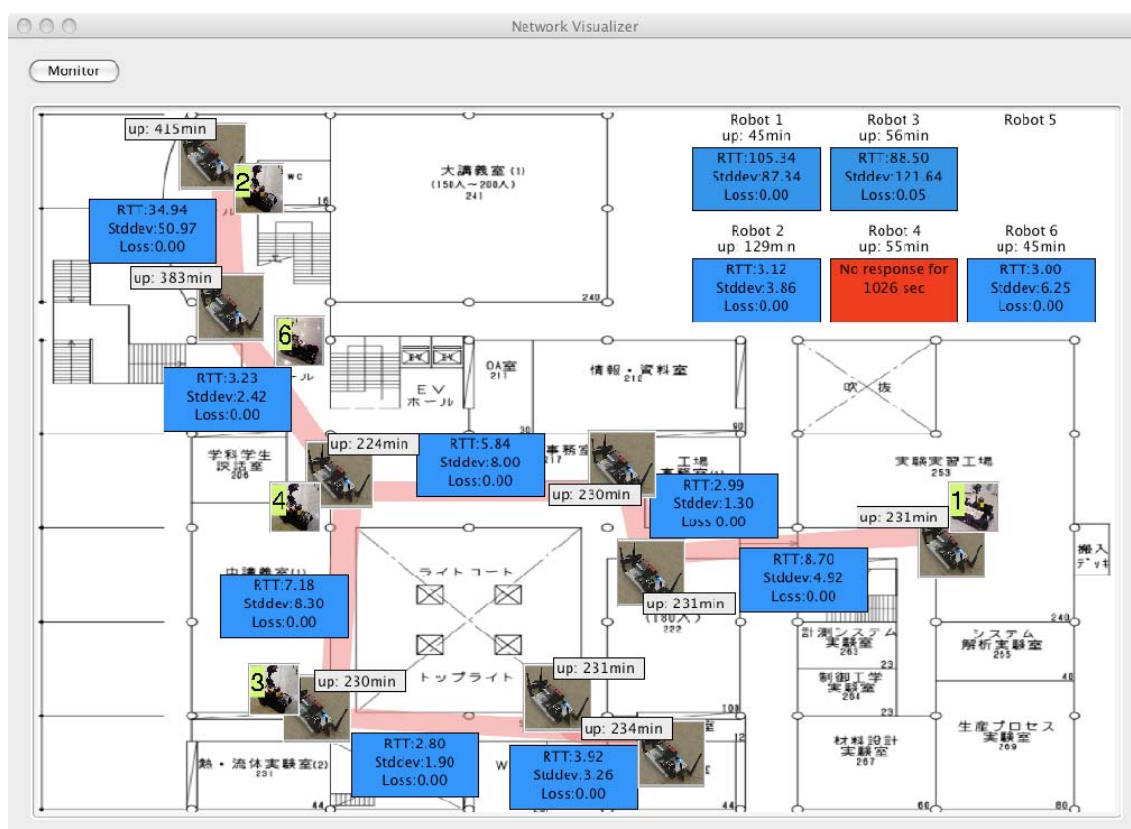


図 34: ロボットネットワークの監視システム

#### (6) ロボットに搭載することで構築されたネットワークに対する様々な処理を行うロボット搭載ネットワークノードの実現

ロボット搭載ネットワークノードは、ロボットが本プロジェクトで開発したロボットネットワークに参加する際に、ロボットに搭載されているロボット制御のシステムがネットワーク上のあらゆる環境の変化(例えば、新たなネットワーク構成ノードの配置によるネットワークの拡大、周囲の電波状況の変化に伴うネットワークの性能変化)を意識せずにシームレスにネットワークに接続を可能にする中継局として機能する(図 35)。具体的に

は、上述のハンドオーバー制御や仮想インターフェイスにより構成されたオーバーレイネットワークへの参加機能がこのロボット搭載ネットワークノード上に実装されている。このように、ロボット上にロボット制御部とネットワーク制御部を分離して実装することで、本プロジェクトで開発したロボホックネットワークはあらゆるロボット制御システムと組み合わせて利用する事が可能となる。

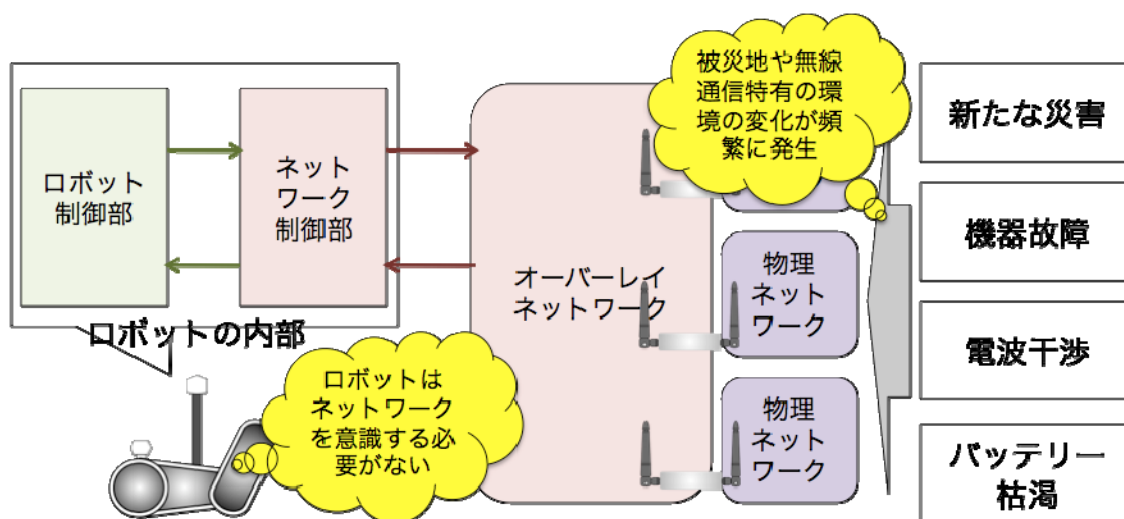


図 35: ロボット制御部とネットワーク制御部を分離

### ・ロボホックネットワーク上のセンサ/アクチュエータ展開

本節では前節で説明されたロボホックネットワークの広い被覆領域を生かしたセンサ/アクチュエータ展開について述べる。まず、動画カメラ付きネットワーク構成ノードを建造物内に配置し定期的に状態を監視するセンサネットワークについて述べ、次に LED でネットワークの状態を通知するアクチュエータネットワークについて述べる。最後に無線の通信特性を考慮し、悪条件下においてもロバストな動画配送プロトコルについて述べる。

#### (1) 配置されるネットワーク構成ノードにおける情報収集手段（動画カメラ）の搭載および定期的な情報伝達の実現

被災地環境では、迅速な現地情報の収集が不可欠である。今回、前述の仕組みを用いてネットワーク構成ノードによる情報インフラを構築したことにより、それを活用した現場情報の収集の仕組みとして、情報インフラ全体をカバーする映像情報の収集機構を実装した。

各ネットワーク構成ノードには小型のカメラが搭載されている(図 36)。ネットワーク構成ノードは、定期的(ステージゲート時には 1 秒単位)に周辺の映像を撮影し、前述のオーバーレイネットワーク、および後述のマルチホップ無線ネットワークに適した通信プロトコルを用いてオペレータステーションに伝送している(図 37)。本技術により、いったん構築された情報インフラ内部であれば、ロボットによる能動的な情報収集に加えて、ネットワーク構成ノードによる受動的な情報収集が可能になり、短期間に変化する被災現場の状況の把握、要救助者の早期発見などの効果が見込まれる。



図 36: ネットワーク構成ノードに搭載されたカメラ

なお、情報収集に利用したカメラは、市販の USB 接続によるいわゆるウェブカメラと呼ばれているものであり、コスト的な負担もほとんど生じない。また、情報伝送プロトコル自体は共通化されているため、将来的にコストとの折り合いがつけば、より高機能なカメラ、(例えば、ティルト、パンなどの機能を持つカメラ)への置き換えも可能となり、その場合はより広範囲、詳細な情報収集の可能性が見込まれる。

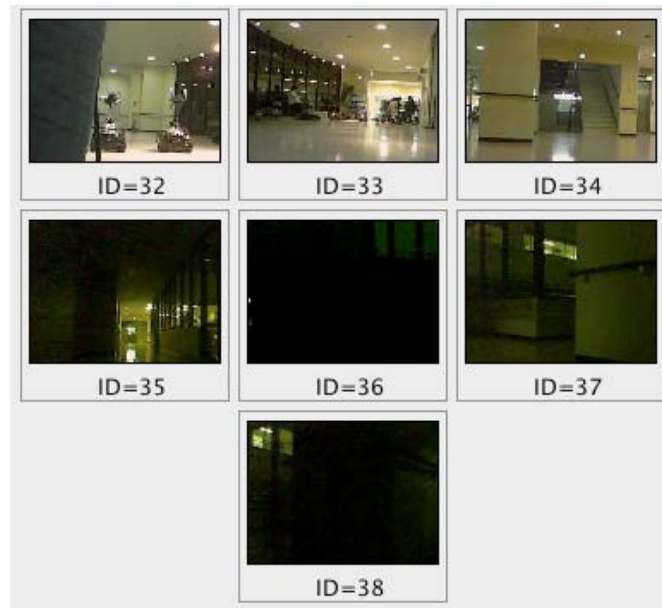


図 38: 分散配置されたウェブカメラによる建造物内の監視

## (2) 配置されるネットワーク構成ノードにおける情報提示手段（フルカラー高輝度 LED）の搭載および情報提示の実現

本システムで構築した情報インフラは、ロボット制御のための制御ネットワーク基盤、および、被災地情報の受動的収集のために利用するのはもちろんであるが、構築された情報インフラが被災地内部の人間（救助者および要救助者など）にも活用できる仕組みを実装している。

今回構築したネットワーク構成ノードは、フルカラーの高輝度 LED を搭載しており、プログラム制御により発光色を変更させることができる(図 38)。ステージゲート時点では、ネットワーク構成ノードの通信が確立していない場合に赤色で明滅、通信経路が確立している場合（すなわち、情報インフラの一部として機能している場合）に赤色で点灯するように設定されている。さらに、ネットワーク構成ノードをデータパケットが通過するごとに青色で点滅するよう設定されているため、ネットワーク構成ノードの通信状態を外部から観測できた。これは、例えばネットワークの状態が不安定になっている場合、遠方からロボットに搭載されたカメラを用いて不安定領域のネットワーク通信状態を観測することを可能にし、不用意に制御不能領域へロボットが侵入することを未然に防ぐ手段として利用可能である。

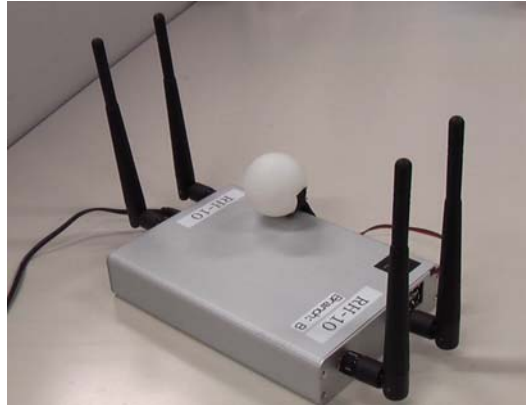


図 38: 高輝度 LED と USB カメラを接続されたネットワーク構成ノード

本 LED は、将来的には被災地内部の人への情報伝達の手段として利用することを前提としている。この場合、例えばロボットによる調査で、危険な場所があらかじめ判明している場合、周辺のネットワーク構成ノードの LED を赤色で点滅させることで注意を促したり、あるいは要救助者に避難経路を指示したりするために、安全な経路上のネットワーク構成ノードの LED を緑色に点灯させるなどの応用を予定している。

### (3) マルチホップ無線ネットワークに特有な遅延およびパケット消失に対応した、ロバストなロボット制御プロトコルの開発

無線によるネットワークは外部の環境の影響を受けやすく、有線で構成されたネットワークと比較して通信状態が不安定になる場合が多い。また、安定状態で運用できている場合も、環境変化によって一時的あるいは恒久的に不安定になる場合や、その逆も考えられる。この不安定性は、一般的には無線リンク上のパケットロスという現象で現れるため、このような環境に対応できる通信の仕組みが必要となる。

本マルチホップ無線ネットワークシステムは、基本技術としてインターネット技術を用いている。インターネットプロトコルは元々分散環境でのコンピュータ通信用の技術として設計されているため、基本的な通信路確保には問題は発生しない。しかしながら、現在コンピュータ間の通信プロトコルとして広く使われている TCP は、信頼性の高い通信が可能な反面、パケット消失率の高いネットワーク環境では性能がでないという問題を抱えている。これは、TCP が通信端点間で定期的な送達確認を行う必要があるためである。そこで、本システムでは、送達確認を行わない UDP を使い、その上にアプリケーションデータ転送プロトコルを実装している。送達確認がないため、いったん送ったデータが相手に届いたかどうかはアプリケーションレベルで判断する必要がある。本システムでは、上位アプリ



ケーションが下位データの到達確率に依存しないように設計することで、この問題を解決している。アプリケーションが利用するデータは、基本的に定期的に生成されており、ある特定のデータが消失しても、次のデータを受信することでアプリケーションの動作を回復できるようになっている。また、本稿の I. 高機能兄弟型移動プラットフォームの開発において報告している通り、ロボット制御に関しては、一定時間データが届かなかった場合に緊急停止するなどの措置を講じており、通信層の影響がアプリケーションに伝播しない設計となっている。

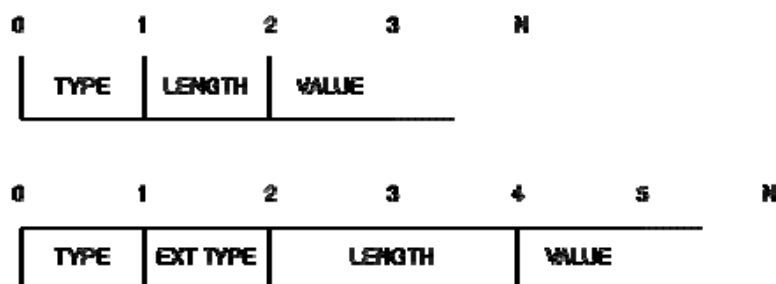


図 39: アプリケーションデータ転送プロトコル

図 39 に、本システムで設計実装したアプリケーションデータ転送プロトコルを示す。UDP パケットのデータ部に、本アプリケーションデータ転送プロトコルを埋めて通信する。データの最小単位は型(TYPE)、データ長(LENGTH, 0 の場合もある)、データ値(VALUE, 可変長)で構成され 255 バイトまでのデータを伝送できる。これよりも大きなデータを伝送する必要がある場合は、図 39 の下に示している拡張形式を用いることで、最長 65535 バイトまでのデータを伝送できるが、無線リンクのようなパケット損失率の高い環境では、なるべく利用しないのが望ましい。なぜならば、ひとつの UDP パケットの長さが増大するとともに、その伝送途中で発生するエラーに遭遇する確率が上がるため、結果的に大きなパケットは損失率が高くなるためである。

表 2 データタイプの例

TYPE	LENGTH	用途
0	N/A	パディング (1 バイト)
1	0~255	パディング (2~257 バイト)
4	0	ネットワーク構成ノードの生存確認

TYPE	LENGTH	用途
5	1	ネットワーク品質情報
7	4	データの生成時間
8	4	ラウンドトリップタイム平均値
9	4	ラウンドトリップタイム標準偏差
10	4	パケットロス率
11	0~255	拡張 TYPE0 と併用する画像データのファイル名
12	1	マルチホップ無線ネットワークのリンク識別子
13	4	ネットワーク構成ノードが起動してからの経過時間
20	1	ロボットがハンドオーバーする際の移動元構成ノード識別子
21	1	ロボットがハンドオーバーする際の移動先構成ノード識別子
22	4	ロボットがハンドオーバーする際の移動元リンクの品質
23	4	ロボットがハンドオーバーする際の移動先リンクの品質
100	5	ロボットの識別子
255	N/A	以降のデータは拡張 TYPE
拡張 TYPE	VALUE	用途
0	0~65535	TYPE11 と併用する JPEG 符号化された画像データ

表 2 に本システムで利用しているデータタイプの一部を示す。これらのデータを組み合わせ、各ネットワーク構成ノード間、およびネットワーク構成ノードとロボット間、およびオペレータステーション間でやりとりする。なお、ここに示した値のほかに、ロボット制御用に別途 TYPE が割り当てられているが、数が多いので本稿では掲載しない。

#### (4) マルチホップ無線ネットワークに特有な遅延およびパケット消失に対応した、ロバストな動画像伝送機構の開発

前述の通り、無線技術によって構成されたネットワークはパケットの消失率が高まる傾向がある。この中で、連続データの伝送が必要な動画伝送を行うためには、有線ネットワーク上での設計とは異なるアプローチが必要となる。本システムでは、以下の場面で動画像を伝送している。

- (1) ロボットに搭載されている俯瞰カメラ映像の伝送
- (2) ネットワーク構成ノードに搭載されたカメラからの定期映像伝送
- (3) ロボットに搭載されている前方確認用カメラ映像の伝送

今回、第3項目に関しては未着手であるが、他の二つの項目に関しては対応を完了した。まず、第1項目に関しては分割伝送の仕組みを実装することでマルチホップ無線ネットワーク環境に対応した。具体的には、画像の圧縮形式としてはモーション JPEG を採用した。モーション JPEG はフレーム相関を用いた圧縮をせずに各動画フレームを JPEG 形式で圧縮する動画圧縮形式である。我々はモーション JPEG の各フレームの大きな JPEG 画像をそのまま伝送するのではなく、縦横4列で16個の JPEG 画像に分割して伝送している。まず、カメラから入手した映像を16分割し、それぞれを個別に JPEG 符号化を使って圧縮する。圧縮されたデータは位置情報（元の大きな画像内で、何列何行に位置するかの情報）とともに、個別に伝送される。ひとつひとつの画像データが小さくなることで、伝送中のエラー発生率を押さえることができるため、到達確率が高くなる。また、1枚の画像が細かく分割された16枚の画像で構成されているため、いくつかの画像が伝送途中で失われても、フレーム全体を失うことがなく、伝送エラーが発生する状態にネットワークが陥った際にも部分的な動画情報の伝送が可能である。また、画像表示系において擬似的にフレーム相関補完を行い、失われたフレーム断片の過去画像を利用した表示をすることで、パケットロス率が数十パーセントに達した場合にも十分な情報伝達が可能であることを実証した。本技術に関しては、本稿の II. 環境変化にロバストでオペレータや通信回線への負担軽減を考慮した遠隔操作システムにおいても記載されている。第2項目に関しては前述のアプリケーションデータ伝送プロトコルを用いた。画像データのサイズの上限を32Kバイトに制限することで、消失の可能性を下げている。俯瞰カメラのデータ伝送と同様、画像データが伝送途中で消失した場合は、それまでに受信できていたデータで最新のものを継続表示することで、違和感のない表示を実現している(図37)。

#### ④ 情報収集基盤としての GIS (Geographical Information System) の開発

被災建造物内の地図上にロボットの現在地やロボットによって発見された要調査対象, 危険な場所などを表示するための GIS を開発した。GIS で扱う地理情報はロボットによって動的に生成されたものと事前に入手可能なものがある。事前に地理情報が入手可能であればネットワーク構成ノードの配置計画や進入経路の計画を支援できる。本プロジェクトではロボットを操作し情報を収集することを任務とするロボット操作オペレータと収集された情報を管理することを任務とする情報管理オペレータを配置することを想定している。

ミッション遂行に関わるロボット, インターフェイス (GUI), ネットワークグループとの統合化の過程において, GIS に求められる機能は, 移動ロボット群が収集した情報の管理, 無線環境情報の管理, ネットワーク構成ノードやロボットのリソース管理, 情報管理オペレータへの負荷軽減, ロボット操作オペレータの操作支援と分析された (図 38)。

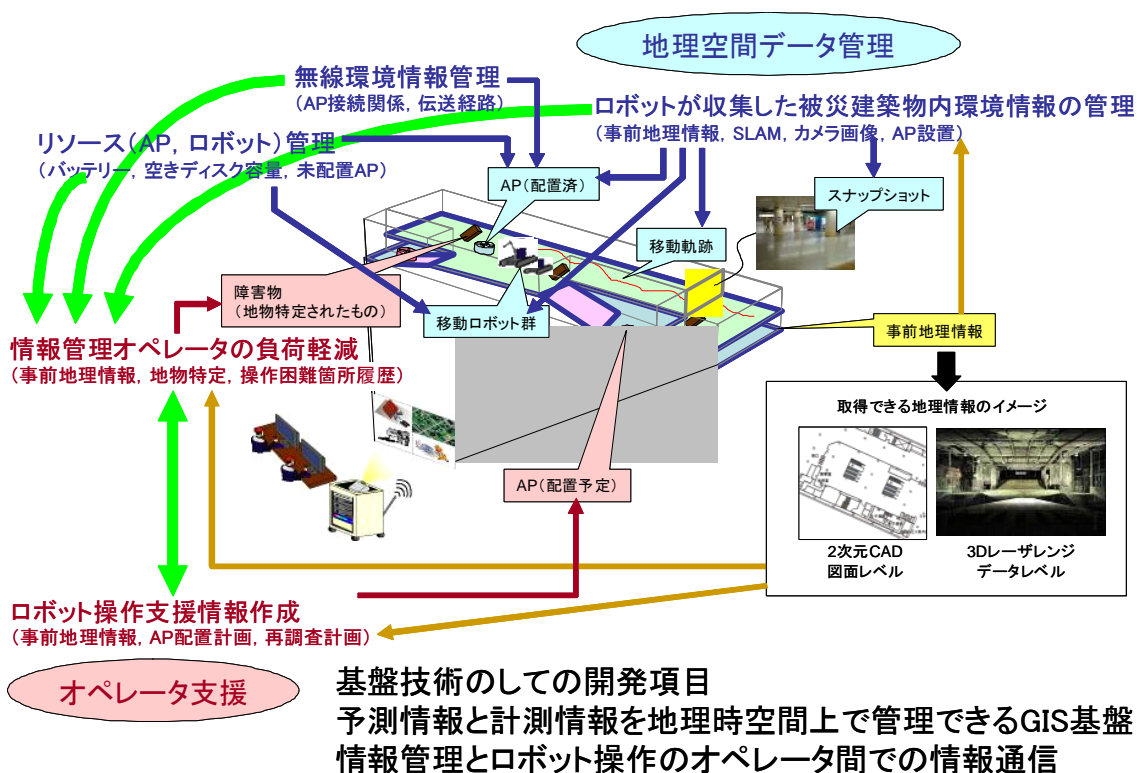


図 38: 被災建物内情報収集システムにおける GIS の役割

これらの要求を満たすため本項目では, 以下の項目の研究開発を行った (これらの技術は, 本プロジェクト以前から研究開発を進めてきた公開型時空間データベーススキーマ KIWI+ と時空間情報基盤 DiMSIS 上に実装した)。

## ○ 情報基盤技術の開発

### 予定情報と計測情報を同時管理できる多重仮想時間軸を持つ時空間情報基盤の開発

ミッション遂行時には、現実世界で発見された地物の蓄積管理のみならず、通信用アクセスポイントの配置計画情報（事前に得られる予定情報）も同時に扱う必要がある。GISのレイヤ構造は、空間軸上に存在する多層に渡る情報は管理できるが、予定情報は空間軸ではなく時間軸の多層性を表すものであるため、従来の枠組みでは表現することが困難であった。そこで時間軸のレイヤ構造とも解釈できる多重仮想時間軸を提案し、KIWI+とDiMSISへの実装を行うことで予定情報と計測情報を体系的に取り扱えるようにした。

多重仮想時間軸を用いた時空間情報の管理は、以下のように説明される（図 32）。

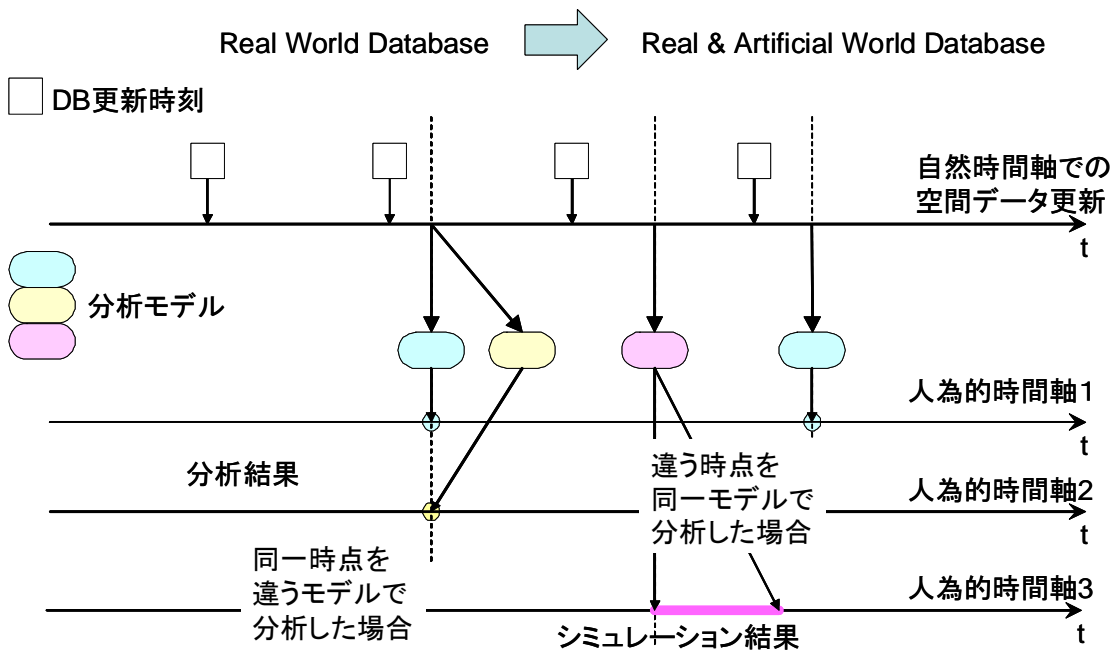


図 39: 多重仮想時間軸を用いた情報管理

自然時間軸上のある時点に対し、確定しない未来情報を入力したり、シナリオ分析、仮説・推論のためのシミュレーションを行ったりする必要がある。これらの情報は現実世界の情報ではないため自然時間軸上に記述することは望ましくない。そこで、人為的時間軸上に記述される。時空間データベースでは、指定される時点は無限にあるため、多種多様なパラレルワールドを作成可能であるため、人為的時間軸は1つとは限らない。これらを分類する概念がステージ番号となる。つまり、多重仮想時間軸とは、複数的人為的時間軸に相当することになる（図 39）。自然時間軸と人為的時間軸を重ね合わせて表示することで、仮想的な空間の情報を復元することが可能となる。

### ロボット走行経路（軌跡）を表現するための時空間スキーマの開発

ロボットの走行経路である軌跡情報は、(X, Y, Z, T) の線分列で表現される。GISでは、空

間情報と時間情報に関してのスキーマ定義はなされているものの、その組み合わせでは軌跡情報は表現できない。そこで、オリジナルな時空間スキーマの概念を設計し、KIWI+, DiMSIS での実装を行った。開発した時空間スキーマの詳細は以下のようになる。

地理情報は、地物の位置を幾何的に示す幾何要素と地物間の関係を示す位相要素から構成される。この考えをベースに時空間情報のモデル化を行う。まず、時空間情報を構成する幾何要素を、空間幾何要素と時間幾何要素の組み合わせにより定義することを考える。空間要素は単体では、0次元、1次元、2次元、3次元の要素である点・線・面・体を基本要素とし、これらの組み合わせで定義される。時間情報は単体では、0次元、1次元の要素である瞬間、期間を基本要素とし、これらの組み合わせで定義される。これら2種類の基本要素の組み合わせで考えられる時空間幾何要素は、瞬間の要素を持つ点・線・面・体（瞬間空間幾何要素）と、期間の要素を持つ点・線・面・体（期間空間幾何要素）が考えられる。しかし、このように定義された期間空間要素では、期間内（生成時間から消滅時間まで）での位置的な変化があるデータを取り扱うことはできない。これは、静的なオブジェクトを取り扱う地図の世界での考え方を拡張したこと起因していると考えられるが、時空間データの特徴を十分に表現しているとは考えられない（図40）。そこで、期間空間幾何要素を図41のように位置の変化のある点、線、面、体に拡張することを考える。これにより、人や車の移動など移動する点の軌跡、寒冷・温暖前線などの移動する線の軌跡、雲などの移動する面の軌跡を示すことが可能となり、時空間データの特徴である動的なオブジェクトの記述までが可能となる。つまり、瞬間空間幾何要素と軌跡の記述にまで定義を拡張した期間空間幾何要素が時空間データの基本幾何要素となる。

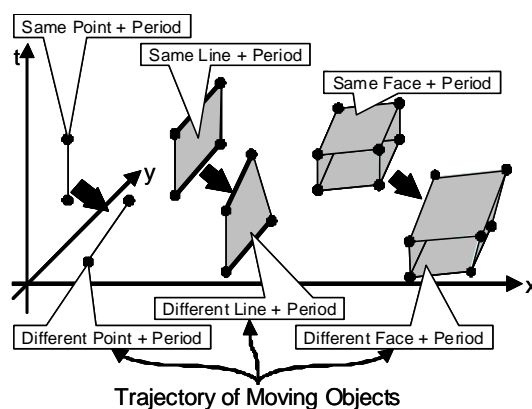
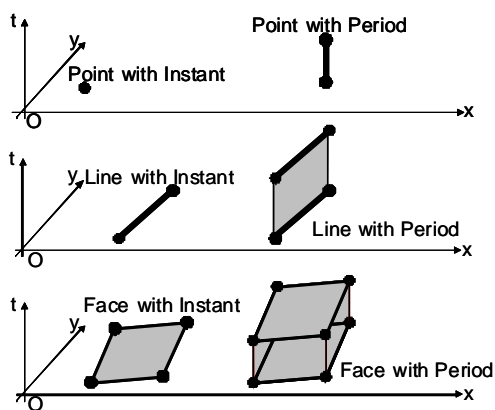


図 40: 静的な地物の時空間基本幾何要素 図 41: 動オブジェクトの時空間基本幾何要素

次に、データ操作と処理で重要な地物間の接続関係（位相要素）について考察する。時空間的な接続関係、つまり、2時点における要素間の関係については、どちらか1つの要素が空であることも考慮すると、以下の5つの関係の組み合わせで説明可能となる（図42）。つまり、これらが時空間データにおける基本位相要素となる。これらの関係のうち、(1)発生、(2)消滅に関しては、2時点間の要素のうち1つが空である場合である。それ以外

の関係は、2 時点間における要素の継承関係として捉えることができる。

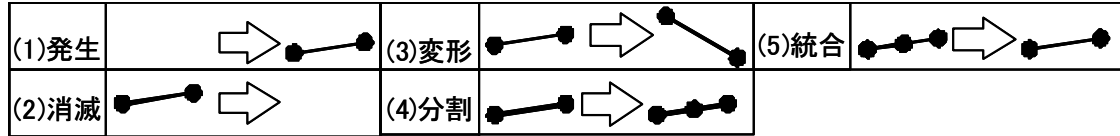


図 42: 時空間基本位相要素

### ロボットと GIS 間の通信規約の開発

ロボットと GIS 間の通信規約は走行経路をリアルタイムにモニタリングするために必要である。ロボットのステータスを示す情報、ロボット ID、時空間情報、属性情報を包含する情報を TCP/IP で通信するためのプロトコルを開発した。プロトコルの概要を以下に示す。

クライアントプログラムは、サーバに接続し、まず、自分のレスキューロボット ID を送信し、その後データファイル名で指定されるファイルからデータを読み込み、1 件ずつサーバに送信する。一件の情報を送信後、サーバからの応答を待ってから、次の情報を送信する。また、サーバからレスキューロボットが活動中かの問い合わせがあれば、応答する。サーバ接続に失敗した場合は、サーバからサーバ起動が通知されるのを待つ。情報を送信する際には、情報の種類を示すヘッダと情報本体を続けて送信する。ヘッダは、2 バイトの unsigned short とする。情報本体のフォーマットはヘッダにより異なる。なお、2 バイト値、4 バイト値はネットバイトオーダーに変換して送信する。8 バイト値は、ホストがビッグエンディアンであればそのまま、リトルエンディアンであれば下位バイトから上位バイトに並べ替えて送信する。ビッグエンディアン・リトルエンディアン以外には対応していない。

送受信するメッセージのヘッダの一覧を表 3 に示す。

表 3 ヘッダ一覧

クライアント送信ヘッダ	意味	値	サーバ送信ヘッダ	意味	値
			GR_CONNECT_OK	接続 OK	0x11
			GR_GIS_OK	サーバ起動 OK	0x21
RG_RR_OK	レスキューロボット活動中	0x30	GR_RR_ACTIVE	レスキューロボット活動確認	0x31
RG_RRID	レスキューロボット ID 送信	0x40	GR_RRID_OK	レスキューロボット ID 受信	0x41
RG_RRDATA	レスキューロボットデータ送信	0x50	GR_RRDATA_OK	レスキューロボットデータ受信	0x51
			GR_RRDATA_NG	レスキューロボットデータ受信失敗	0x52

#### (1) サーバへの接続の仕様

クライアント : connect () の呼び出し

サーバ：GR\_CONNECT\_OK を送信

(2) サーバ起動待ちの仕様

サーバ：各クライアントに対し、connect() の呼び出し  
成功したらそれぞれに、GR\_GIS\_OK 送信

(3) レスキューロボット活動確認の仕様

サーバ：一定時間以上通信のない各クライアントに対し、GR\_RR\_ACTIVE を送信  
クライアント：RG\_RR\_OK を送信

(4) レスキューロボット ID 送信の仕様

クライアント：下記の情報を送信

ヘッダ：RG\_RRID

情報本体：設定ファイルに記述されたレスキューロボット ID を表す 2 バイトの unsigned short

サーバ：GR\_RRID\_OK を送信

(5) レスキューロボットデータ 送信の仕様

クライアント：下記の情報を送信

ヘッダ：RG\_RRDATA

情報本体：図 43 参照

サーバ：GR\_RRDATA\_OK を送信. 受信に失敗した場合 GR\_RRDATA\_NG を送信

クライアント：GR\_RRDATA\_OK を受信した場合、次のデータ(ヘッダ RGRRDATA と情報本体)を送信する. GR\_RRDATA\_NG を受信した場合、同じデータ(ヘッダ RGRRDATA と情報本体)を送信する.



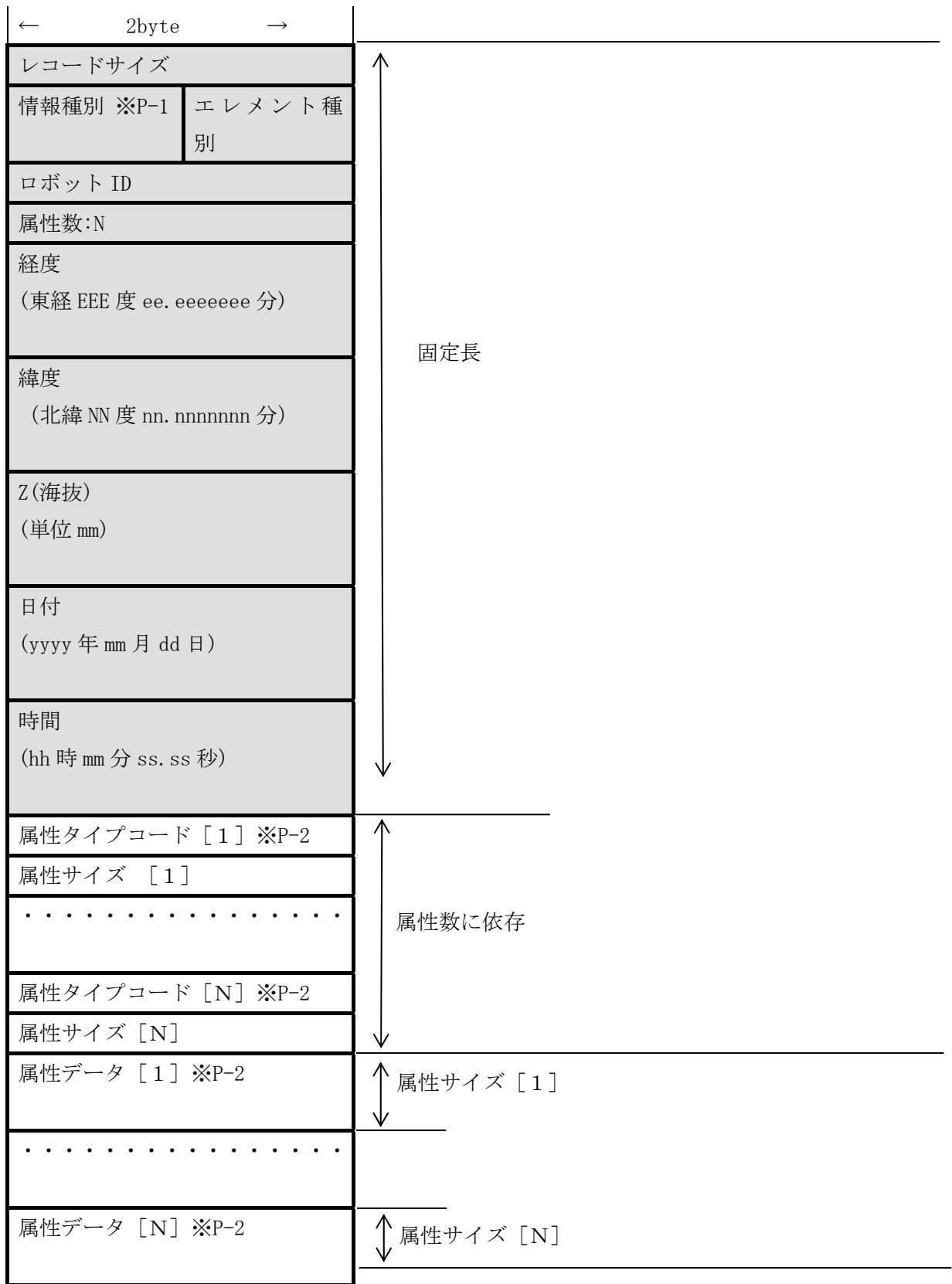
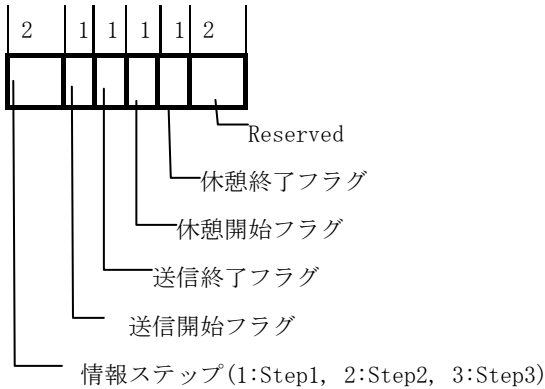


図 43: レスキューロボットデータのフォーマット

図 66 の補足

※P-1 情報種別



各ステップで、ベクトルデータを送信する際、1点目のデータ送信時には、送信開始フラグを ON にし、最終点のデータ送信時には送信終了フラグを ON にする。

つまり、Step1 の場合、レスキューロボットの活動開始時に送信開始フラグを ON にしてデータを送信し、活動終了時に送信終了フラグを ON にしてデータを送信する。

※P-2 属性タイプコード、属性データ

対応する属性タイプは、テキスト(文字列のみ記述)、画像(ファイル名のみを記述)、バイナリ値(short, long, double)とする。

属性データ本体のデータ形式と属性タイプコードは、属性タイプにより次の通りとする。

- (1) テキストタイプ：任意長の文字列，属性タイプコード 3100～3199
- (2) 画像タイプ：ファイル名(任意長の文字列)，属性タイプコード 3200～3299
- (3) short タイプ：2バイト値，属性タイプコード 3300～3399
- (4) long タイプ：4バイト値，属性タイプコード 3400～3499
- (5) double タイプ：8バイト値，属性タイプコード 3500～3599

また、属性タイプコードが奇数であれば、地図 DB に登録する際に、ノード属性とし、偶数であればリンク属性とする。

事前に準備する環境地図データ作成に関する方法論の開発

ミッション遂行に必要な環境地図を作成する技術について開発を行った。環境地図には 2 次元 CAD 図面レベルと 3D レーザレンジデータレベルを想定し、それぞれの手法での地図データの準備手法について考察した。特に、3D レーザレンジデータレベルでは、実際にデー

タを作成することで、そのデータの加工過程を明示的に示した。図 44 に 3D レーザレンジデータからのデータ作成イメージを示す。

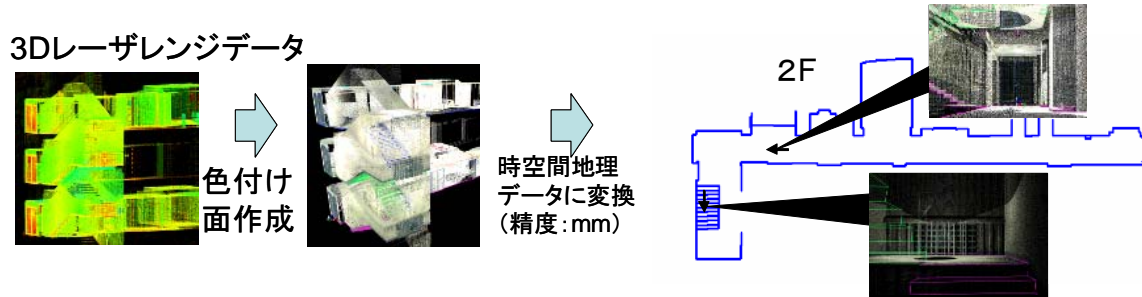


図 44： 3D レーザレンジデータからの地図情報の作成

○ 地理空間データ管理技術の開発

環境情報管理用のアプリケーションスキーマの開発

RA: Remaining Amount

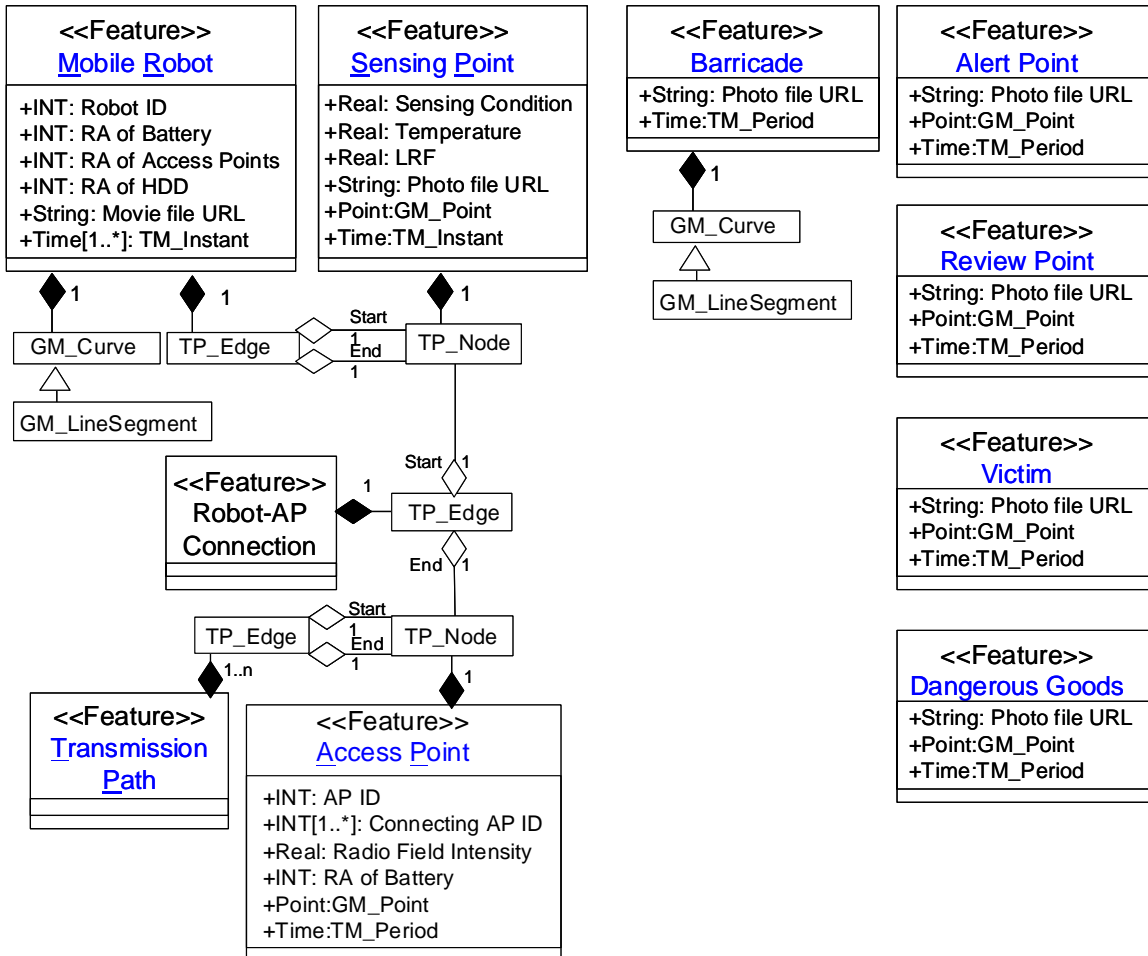


図 45： アプリケーションスキーマ

地理情報を取り扱う際にはデータカタログにあたるアプリケーションスキーマが不可欠である。GIS に求められた機能を実現するために必要な 9 つのフィーチャ（移動ロボット、走行経路、センシングポイント、アクセスポイント、要援護者、危険物、障害物、移動困難地点、再調査地点）について、空間スキーマ、時間スキーマ、時空間スキーマの概念を用いて、アプリケーションスキーマを定義した（図 45）。またこれらの KIWI+での実装方法を提案し、DiMSIS で実装を行った。

### 移動ロボット群から得られる時空間位置情報のリアルタイム表示とデータ蓄積技術の開発

移動ロボット群から指定した通信プロトコルを通して得られる時空間情報は、時々刻々と変化するセンシングポイント情報である。これをロボットステイタス、ロボット ID を用いて走行経路（軌跡）情報として再構成し、ロボットごとにレイヤを設定した GIS データとして格納する機能を実装した（図 46）。

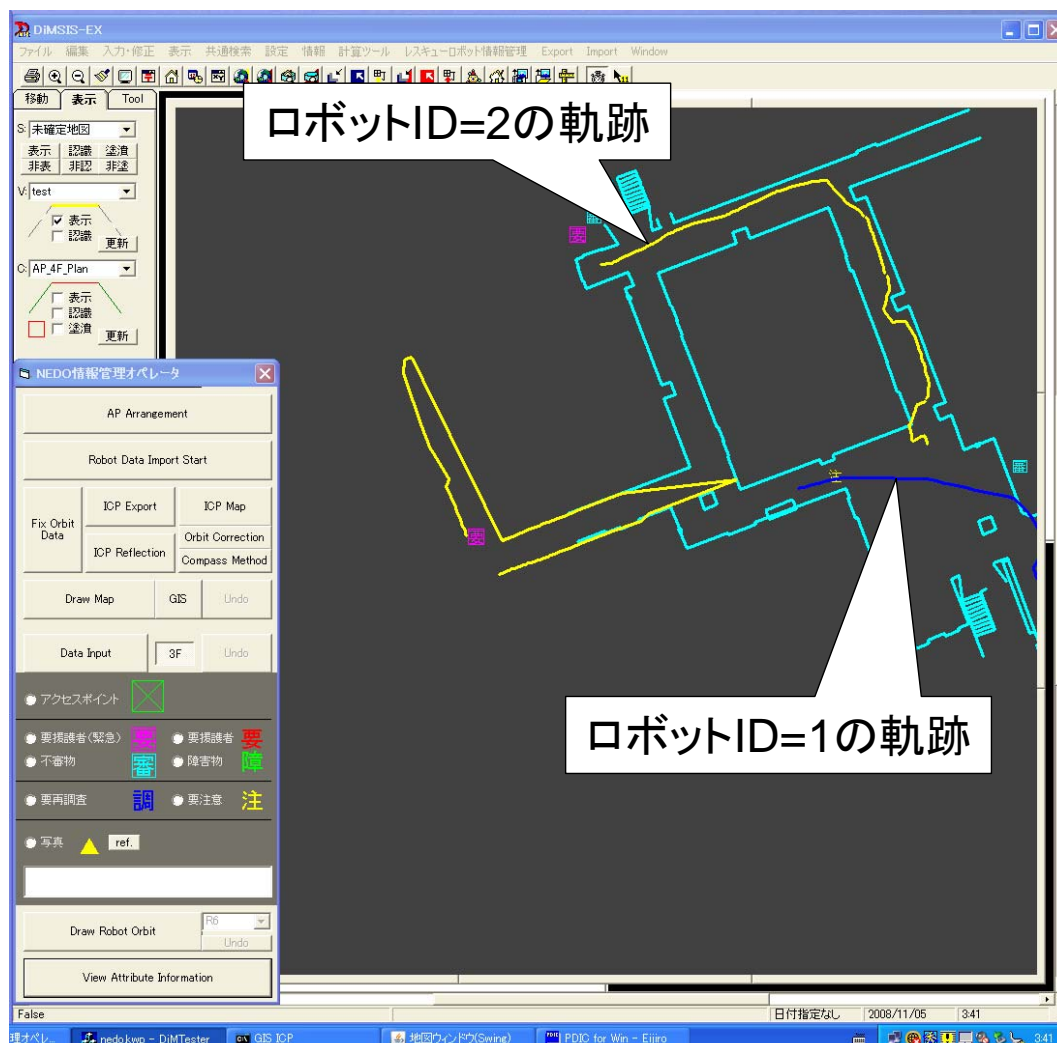


図 46: 複数ロボットの走行経路の可視化機能

また、この情報を、ロボット別に表示する機能を、レイヤ表示機能を用いて実装した。表示の手法として、全ての時間での情報の重ね合わせ、指定時間に存在する情報のみの可視化手法を実装し、走行経路の多様なモニタリングを実現した。さらに、取得した情報を含む空間情報を、VRML形式で出力することでVRMLビューアを用いた3次元表示も可能とした。

### 移動ロボット群、ネットワーク構成ノードから得られる環境情報の管理と可視化技術の開発

移動ロボットからはロボットに搭載されているセンサやカメラからの情報が得られる。また、ネットワーク構成ノードもUSBカメラが搭載されており、設置後は定点観測カメラとして情報を取得する。通信プロトコルに従ってGISに送信されるこれらの情報を蓄積管理する手法を開発した。特に、ロボットの位置と姿勢を基準とした相対的な極座標で示されている情報(LRF情報など)は、環境地図の座標系での点列情報に変換し、蓄積することで、情報管理オペレータのモニタリングに利用可能な可視化を、上述の可視化手法を用いて実現した(図47)。

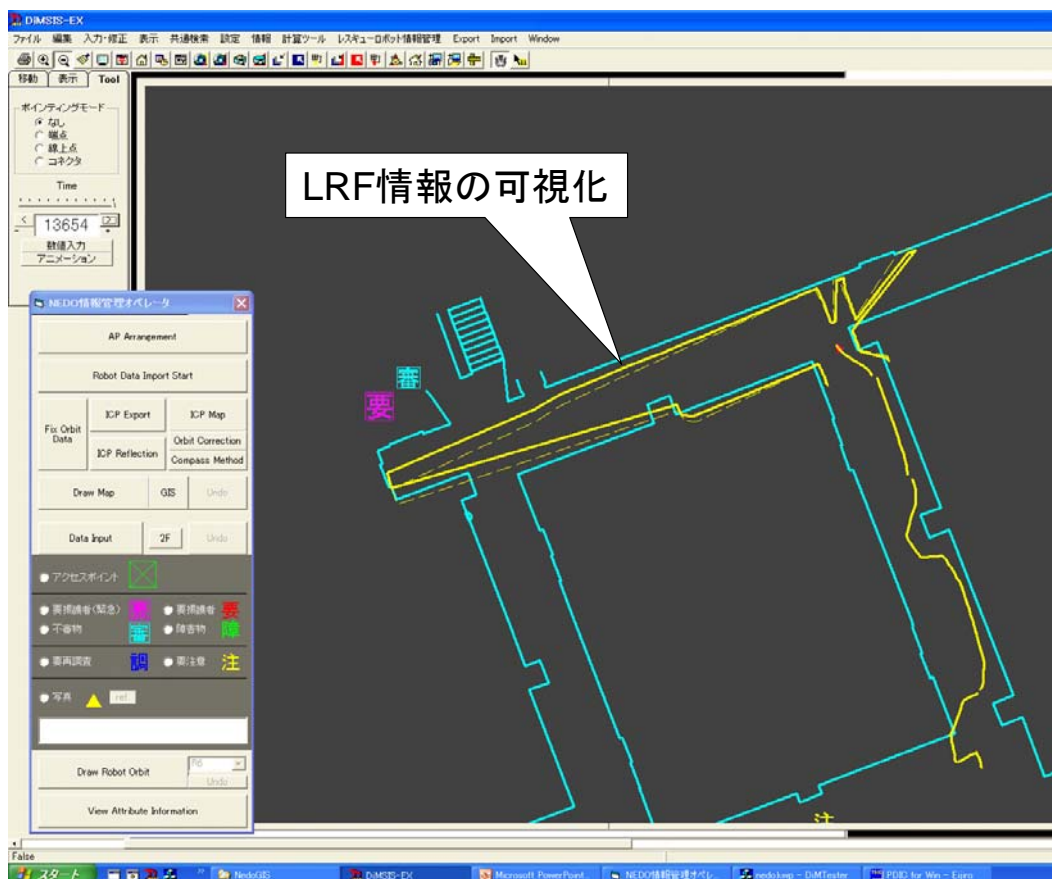


図 47: LRF 情報の可視化

## ○ 情報管理オペレータ支援技術の開発

### ネットワーク構成ノード配置計画アプリケーションの開発

通信用アクセスポイントは、ロボットへの積載量の制限から効率のよい配置が求められる。事前の配置計画を、美術館問題として定式化することで、事前に環境地図情報が得られている場合は、最低限必要なネットワーク構成ノード数をその配置位置とともに計算できる機能を実装した（図 48）。この機能は、全体統括者の探査戦略作成の基礎資料として、アクセスポイントを配置する兄ロボットの行動計画作成のために利用される。

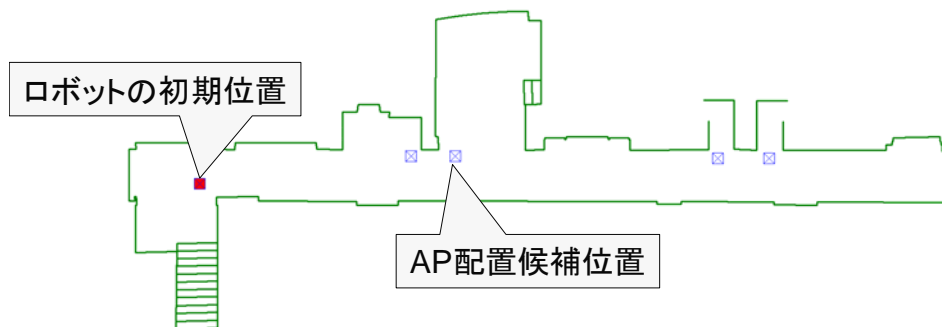


図 48: AP 配置計画計算結果のイメージ

### 移動ロボット群が発見した情報の登録管理アプリケーションの開発

移動ロボット群が発見した障害物、要援護者、危険物の情報、またロボット移動時の状況により得られた移動困難地点、再調査が必要な地点の情報をロボットの走行経路に付随して簡易に入力し、参照できるアプリケーションを開発した（図 49）。

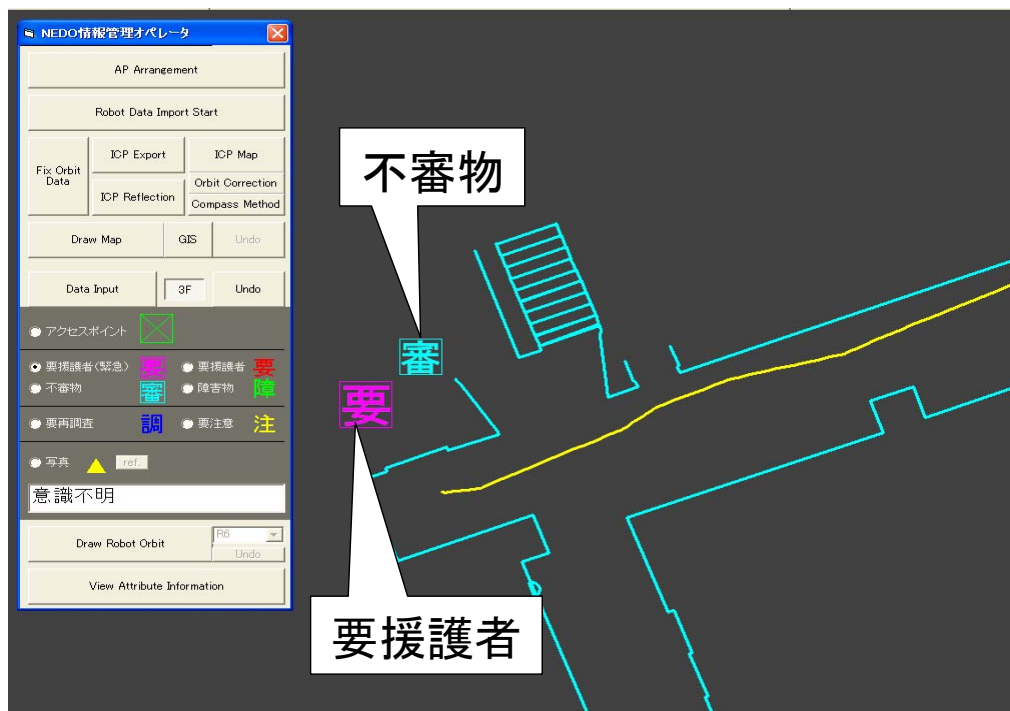


図 49: 発見した情報の登録

## ロボットの位置誤差修正アプリケーションの開発

ロボットの走行経路は、オドメトリ情報に依存した自己位置情報を連結することで得られる。しかし、オドメトリを利用した自己位置同定は走行距離に依存して誤差が蓄積されるため、これを補正する必要がある。本開発では、SLAM の技術を用いてこの誤差を解消する手法を開発した (図 50)。このアプリケーションは、環境地図情報と LRF 情報、または 2 時点間の LRF 情報の重ね合わせにより誤差量を推定することで自己位置補正を行う方式をとる。完全な自動での照合は環境情報の複雑さ、LRF の性質にもとづく情報欠損などの理由から難しいため、半手動による方法を実装している。誤差量の推定の頻度を上げれば、自己位置の連結である走行経路の精度は高くなるため、重ね合わせ処理については、情報管理者の意見をもとにユーザインターフェイス(後述)を改良し、短時間に簡易に行えるように開発した。しかしながら、複数のロボットから 0.5ms 間隔で送られる情報をリアルタイムに自己位置補正することは不可能であり、時間と精度のトレードオフ(時間をかけて精度の高い補正をするか、時間をかけずに粗い精度の補正を行うか)を考慮する必要がある。ミッション遂行中は粗い精度でもリアルタイムに近い速度の方が重要であると考え、地理的な特徴を含む場所を選択し、その地点でのみ補正を行う方法を提案している。この際、それ以外の点については、測量技術(トラバース測量におけるコンパスの法則)を用いて誤差分散することで対応できるようにソフトウェアを開発した。

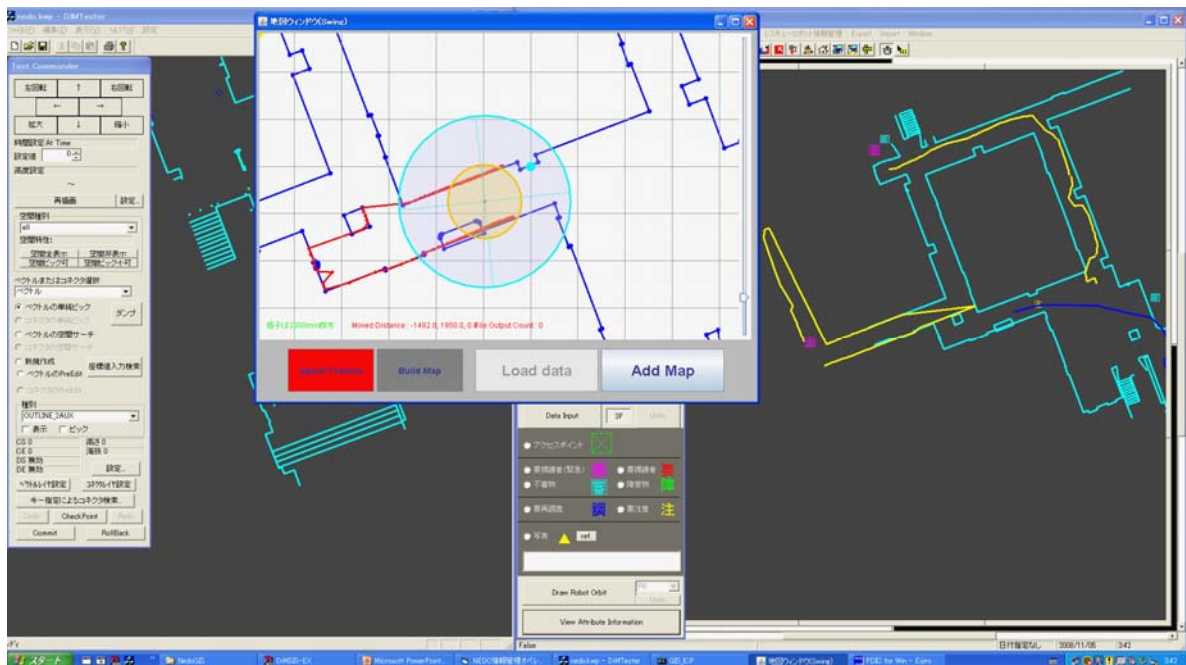


図 50: 環境地図情報と LRF の重ね合わせによる位置補正

## 環境地図が存在しない領域の地図作成機能の開発

環境地図が存在しない領域では、LRF 情報を同士の重ね合わせにより、地図情報のアウトラインを作図するアプリケーションを開発した (図 51)。

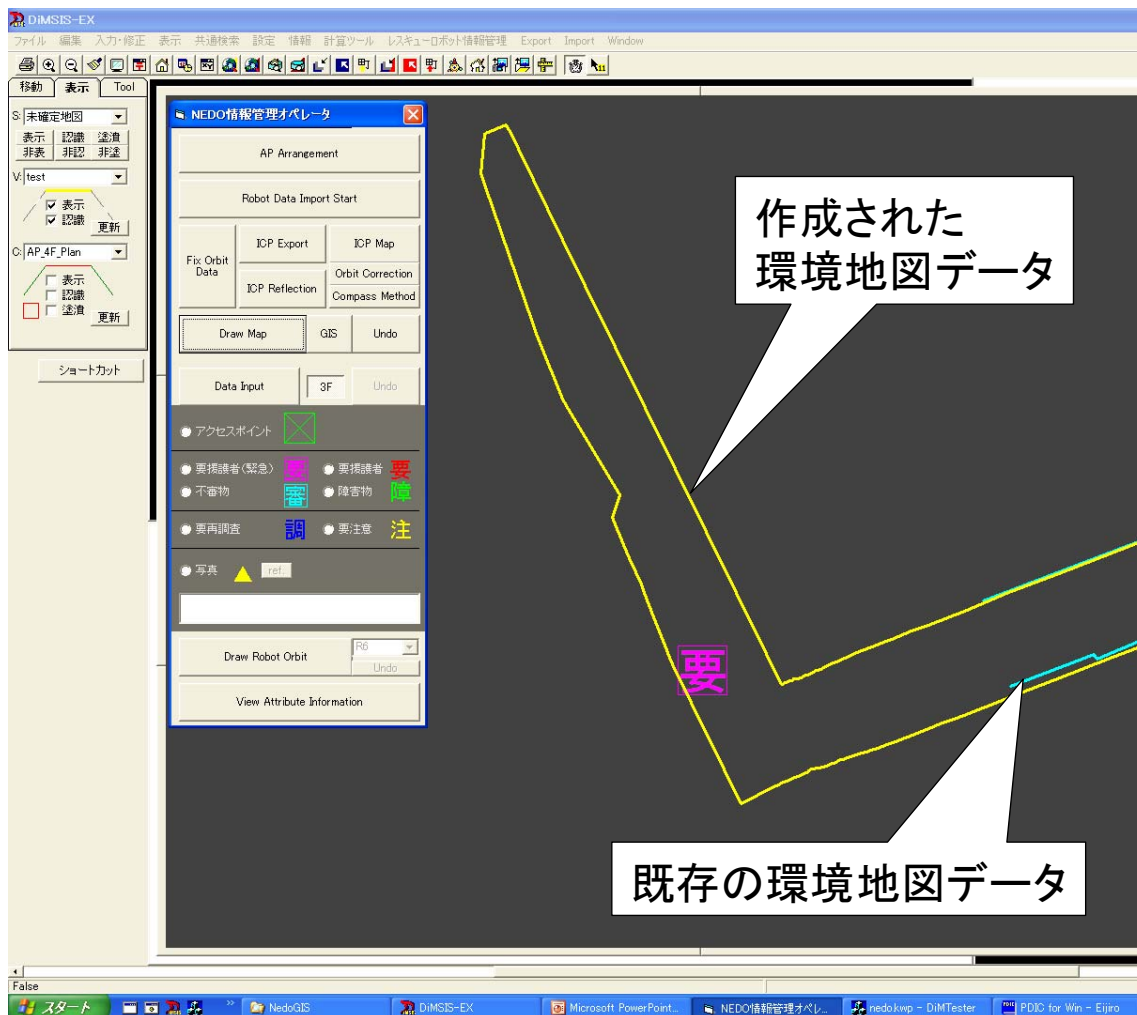


図 51： 作成された地図データのイメージ

## SLAM 用インターフェイスの開発

GIS と連携し、GIS 上のデータに対しても位置誤差の修正と未探査領域での地図作成を行うことができるインターフェイスを開発した (図 52)。

インターフェイスの画面中央には 2 重の同心円上のスクロールホイールが描画されており、内側の円を上下左右にドラッグすることで LRF のデータを並進移動、外側の円を円周方向に沿ってドラッグすることで LRF のデータを回転移動することができる。

このようにして LRF データを並進・回転移動させ、周囲の地図の形状に対して手動で正しくマッチングさせることにより、地図を正しく構築すると同時にロボットの正しい位置



を求めることができる。

“Load data” ボタンを押すと現在推定されるロボット位置に基づいて LRF データが地図上にプロットされる。次にスクロールホイールを用いて LRF データを並進・回転移動させる。LRF データが地図に正しくマッチングした地点で “Add Map” ボタンを押すことにより、正しいロボット位置座標と LRF データが出力され、地図にも新しい LRF データの点が追加される。地図修正の際にはこれらのステップを 1 度ずつ実行するが、事前地図がない環境において地図を構築する際にはこのステップを繰り返すことにより、地図を新たに追加していくことができる。

また、画面右側にある縦のカーソルを上下することにより、地図全体の縮尺を変更することができるため、より細かいマッチングを行う際には縮尺を小さくし、LRF データの繊細な移動をすることができる。このカーソル操作はマウスのスクロールホイールを用いて操作することもできる。

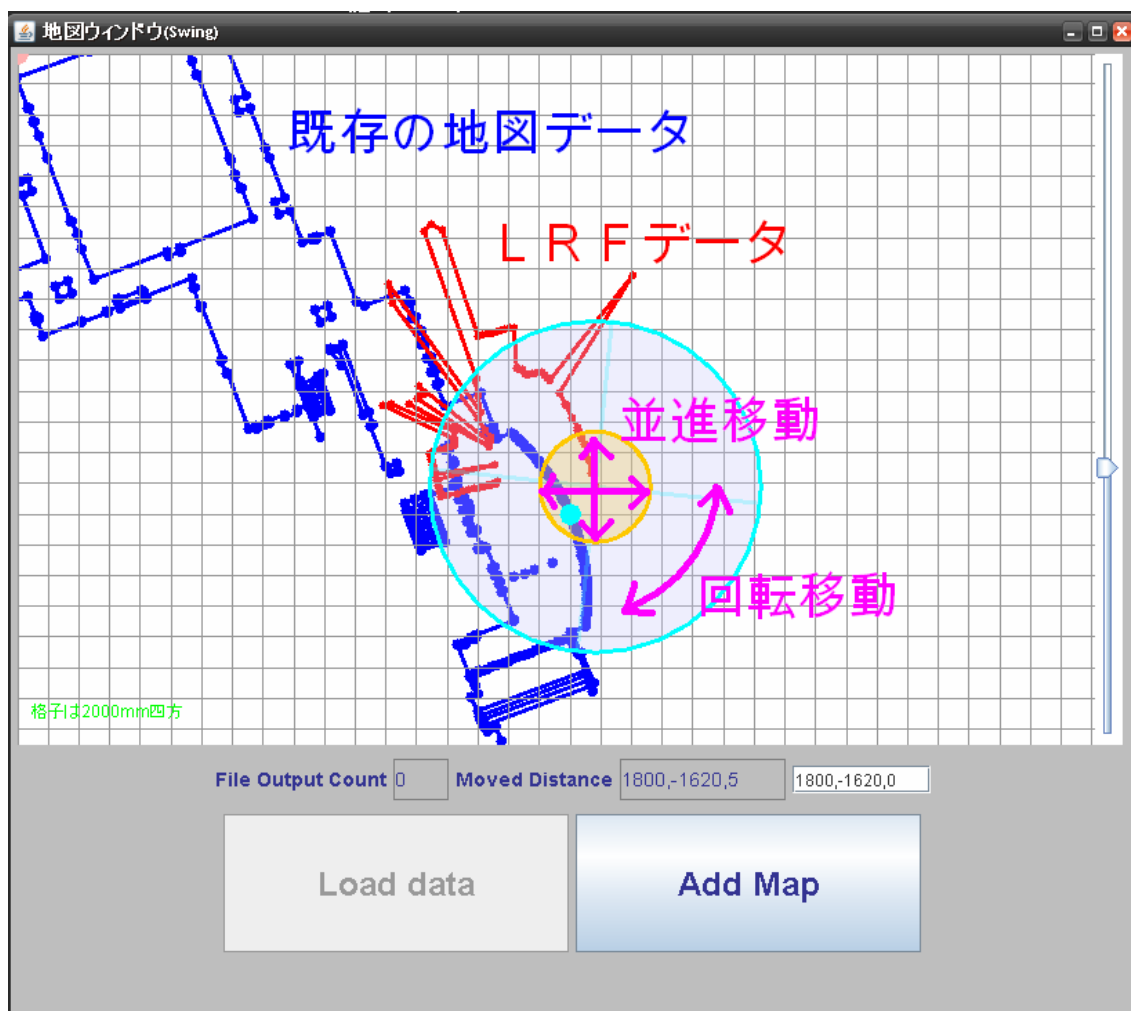


図 52: SLAM 用インターフェイスの外観

## ⑤ 実証実験

### ○想定訓練

- ・ 2006年11月5日 JR川崎駅地下街アゼリアでの総合訓練(川崎市消防局川崎消防署, IRS-Uとの合同総合訓練) (写真1)
- ・ 2007年6月7日 第59回全国消防長会総会 (IRS-Uとの合同訓練) (写真2)
- ・ 2007年8月22日 全国消防救助技術大会 (IRS-Uとの合同訓練および展示)
- ・ 2007年9月2日 三鷹市防災訓練 (東京消防庁, 三鷹市消防との合同訓練) (写真3)
- ・ 2007年10月7日 全国消防救助救急研究会 (IRS-Uと東京消防庁第3消防方面本部ハイパーレスキューとの合同訓練) (写真4)
- ・ 2007年11月28日 国際ロボット展 (IRS-Uとの合同訓練および展示) (写真5)
- ・ 2008年8月21日 SICE Annual Conference 2008 Special Event (IRS-Uとの合同訓練) (写真6)



写真1：JR川崎駅地下街アゼリアでの総合訓練



写真2：第59回全国消防長会総会



写真3：三鷹市防災訓練



写真4：全国消防救助救急研究会



写真 5 : 国際ロボット展



写真 6 : SICE Annual Conference 2008 Special Event

### ○招待デモ

- ・ 2006 年 8 月 19-21 日 RREE(Response Robot Evaluation Exercise) 2006 Montgomery County Fire Rescue Training Academy (FEMA Task Force 1) (写真 7)
- ・ 2006 年 8 月 22-24 日 IEEE International Workshop on Safety, Security, and Rescue Robotics 2006 (写真 8)
- ・ 2008 年 8 月 20 日 SICE2008 オーガナイズドセッション(インタラクティブセッション)



写真 7: 我々のロボットを操作する FEMA 隊員 (RREE2006)



写真 8: デモの様子 (SSRR2006)

### 3) 成果の意義

本プロジェクトでは、スタンダードな技術を巧みに融合することにより、デペンダブルでユーザフレンドリーなシステムを構築した。これにより、非常に拡張性に優れ、他のシステムとの親和性に優れたシステムを実現した。特に、無線環境が仮定できない条件化で、遠隔操縦もしくは半自律で動作するロボットによる遠隔探査を行うために必要な、マルチホップ・アドホックな無線通信網を構築できるとことは、複数台ロボットを広域展開するこ

とを可能とし、今後のロボットの可能性を大きく広げたことになり、非常に意義が大きい。さらに、本プロジェクトで開発されたシステムは、現職のレスキュー隊員による数々の想定訓練で使われたほか、種々のデモンストレーションで多くの消防防災関係の方々に見ていただき、ご意見をフィードバックし改良を重ねたものであり、現場のニーズに合致している。

#### 4)特許の取得状況

表 特許の取得状況

特許の名称	特徴・強み・新規性
特願 2007-251989 「クラッチ装置」	トルク伝達効率が高く、耐久性があり、しかも小径にすることができる逆入力遮断クラッチ装置を提供する。
特願 2008-036859 「運搬用遠隔制御ロボット」	複数の荷物を複数の目的地まで運搬して降ろすのに適した運搬用遠隔制御ロボットにおいて、荷降ろし機構の構成を簡略化できるようにした。

国内出願・国外出願

番号	出願日	出願番号	名称	発明者
1	平成 19 年 9 月 27 日	P2007-251989	クラッチ装置	非公開
2	平成 20 年 2 月 19 日	P2008-036859	運搬用遠隔制御ロボット	非公開

#### 5)成果の普及

本プロジェクトによる研究開発成果を以下のように外部に発表した。

学会発表（国際会議を含む）	49 件
投稿論文	10 件
招待講演	23 件
解説記事	8 件
プレス発表	44 件

## 6) 実用化・事業化の見通し

### ・波及効果

本プロジェクトで開発したマルチホップ無線ネットワーク技術は、環境変化(電波状態など)への適応性および広さ(ネットワーク構成ノード数)の拡張性が高い非常にロバストな通信ネットワークの構築を可能とし、レスキュー分野のみならず、ロボット全般に適用できる基盤技術である。さらに、テンポラリーにネットワークを構築する技術は、展示会やイベントなどでの日常生活分野、ロボットによる無人化施工や測量などの建築土木分野、惑星探査などの宇宙分野などと応用分野は広く、技術的波及効果は計り知れない。また、情報収集だけでなく、収集した情報を利活用するための、データハンドリングに優れた地理情報システムを、ISOで標準化が検討されているデータベース構造KIWI+に準拠して構築したことはシステムを世界へ波及させる上で大きなアドバンテージである。

### 3.3.1.3 閉鎖空間内高速走行探査群ロボット

【実施者：国際レスキューシステム研究機構，東北大学，(独)産業技術総合研究所，(独)情報通信研究機構，バンドー化学(株)，(株)シンクチューブ，ビー・エル・オートテック(株)，(株)ハイパーウェブ】

#### 1) 研究概要

(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，地下鉄駅，地下街でオリエンテーリングを行うことを実現し，現場での実証試験を行う．地下街300mのエリアを人間よりも速く，迅速に移動する機能を実現する．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，NBCR型の災害現場として想定される障害物が散在した不整地で，人間が歩行している状況で，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し，GISにマッピングできることを実証する．災害地環境を迅速に移動・情報収集できるため，運動性能の高いロボットハードウェア，3次元環境計測・提示，不整地の半自律移動，高精度オドメトリ等を実現する．情報収集する環境と場面に応じたヒューマンインタフェースにより，高い性能の遠隔操縦，あるいは，複数台の遠隔操縦を行える技術を開発する．地下街エリアの無線をカバーするための有線無線ハイブリッドアドホックネットワーク，マッピングを行うための実時間GISを開発する．さらには，隊員の訓練使用を念頭に置いた災害環境ロボット操縦シミュレータを開発する．これらを仙台市地下鉄，神戸市地下街，Disaster Cityの複数回にわたる実証試験，RoboCup競技会，災害やロボットに関する展示会にて，実証試験，実験，展示等を行い，ユーザの声を聴取，実用化に資する．以上の目標のイメージを図1に示す．

(成果)

上記目標をほぼ100%達成した．有線無線ハイブリッドアドホックネットワークについては，5台のロボット同時に，伝送容量・遅延・ハンドオーバーに関する要求を満足し，地下街683mで実証した．開発ロボットKenafは，Disaster Cityのコンクリート・木材瓦礫を世界で初めて踏破し，RoboCup 2007 アトランタ世界大会運動性能の部で世界優勝するなど，高い運動性能と操縦性を実証した．3次元計測提示・不整地半自律走行は，Disaster Cityにて多くのロボット操縦経験をもつ複数のFEMA隊員が試験した結果，高い評価を受けた．一方，ドア開けは簡単に押し開けできるドアに限定した．



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 高速不整地走破機構 Kenaf の開発 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 大会運動性能部門優勝、Disaster City の瓦礫の走破、などの実績を挙げた。	目標を120%、非常に高いレベルで達成した。	◎
	ドア開け用台車 UMRS, および、マニ	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	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。	○

	ピュレータの開発		入れることができる.			
	耐衝撃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.	○
② 遠隔操作技術	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縦を行う	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.	◎
	ポインティングデバイスによる遠隔操作	人間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製を確保する.	長距離を人間の介在を少なくし, 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.	目標をほぼ達成した.	○
	半自律不整地踏破	階段や不整地の半自律踏破	緩やかな階段や不整地を半自律送稿する	ある程度の階段やある程度の不整地を走破できる	目標を達成した	◎
	3次元操縦インタフェース	狭隘箇所の遠隔操作	狭隘箇所の形状を操縦者が十分に認識できる	Disaster City で操縦における有効性を実証した.	十分に目標を達成した	◎
	人避け	歩いてくる人を自動的に避ける	ゆっくりと歩く人を避けられる	方向の予測が容易な人の動きに対して, 避けることができる	ほぼ目標を達成した	○
	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.	◎
	マップナビゲーションシステム	マップに基づくナビゲーション	マップを表示し, それに従って遠隔操縦ができる	ステージゲートデモで, 地下街における有効性を示した.	ほぼ目標を達成した	○



③ 通 信 技 術	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.	ステージゲートデモ で, 距離 683 m を遅 れが小さく, 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 可能であることを示 した.	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 ルおよびおアク セスポイントを 敷設する	距離 700 m, 50~ 100 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.	ほぼ目 標を達 成した.	○
	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, 有線・ 無線ハイブリッ ッドアドホックネ ットワークの配 置計画を行う.	地下街における複数 台のロボットからの 電波伝搬状況の推定 を行う.	シミュレーションに より伝搬状況の推定 が可能であることを 確認した.	ほぼ目 標を達 成した	○
④ G I S 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.	ほぼ目 標を達 成した.	○
	曖昧さ・複 数座標計 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	座標計の修正が可能 な位置表現を開発す る	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.	ほぼ目 標を達 成した.	○
	3次元オ ドメトリ ー	G I Sおよび半 自律機能に十分 なオドメトリー を実現	クローラ機構のオド メトリーの精度を向上 させる	スリップ推定による 平地でのオドメトリ ーの精度向上. 階段等 でのジャイロオドメ トリーの実現	目標を 達成し た.	◎
	3次元地 図の構築	ファーストレス ポonderの判断 に資するための	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, オ フラインで3次元地	目標を 達成し た	◎

		3次元地図の構築		図を構築できることを示した		
	自己位置推定	ロボットの自己位置の推定	閉鎖空間内で、ファーストレスポンスの判断に十分な精度の自己位置推定	フィールドテストで自己位置推定が可能であることを示した.	ほぼ目標を達成した	○

### 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」という2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（こ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、サブローラのクローラ部分のみ高速駆動するタイプ、サブ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、一般の自動車が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



(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

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

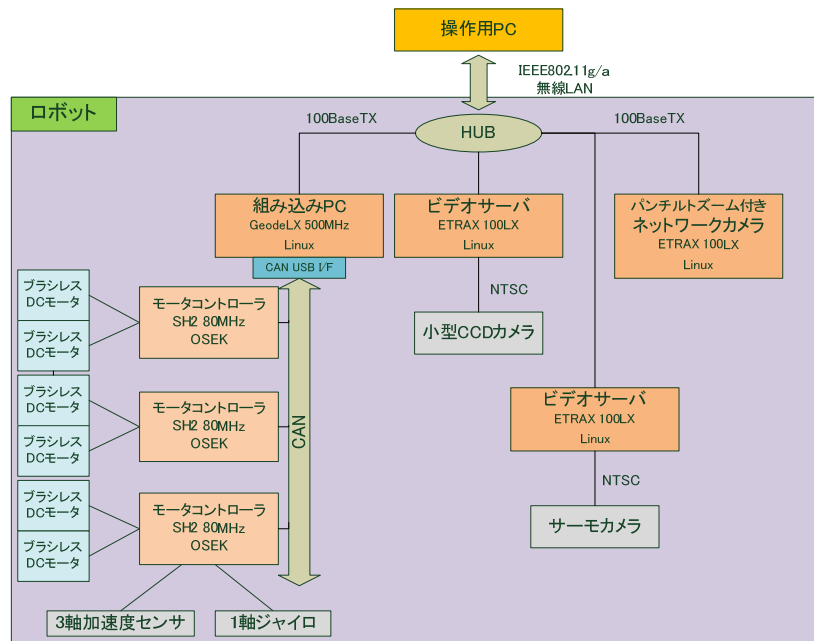


図4 Kenaf のハードウェアアーキテクチャ

- 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。

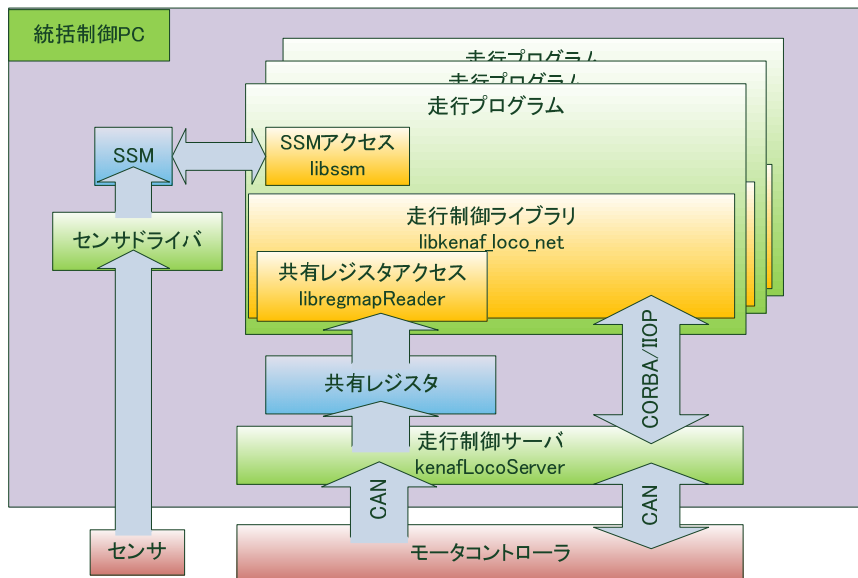


図 5 Kenaf のソフトウェアアーキテクチャ

## 2) ドア開けロボット UMRS

- UMRS 台車は、フリッパー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。

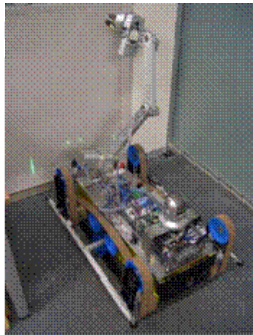


図6 UMRSによるドア開け

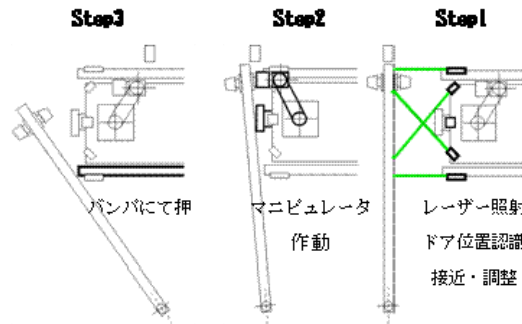
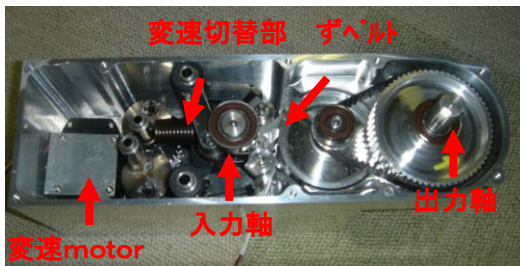
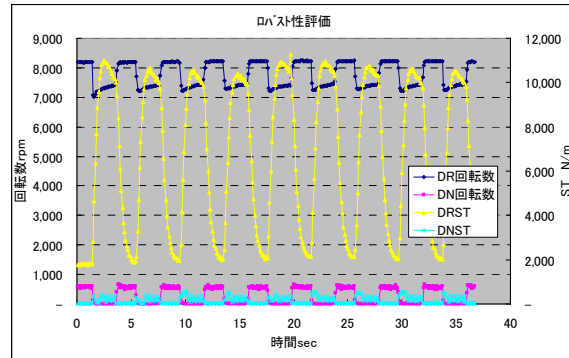


図7 UMRS-Triage



(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

## 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操縦機能

- ・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9), 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) (図2), 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



図9 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

- ・オペレータの介在を最小限に抑えて複数の Kenaf の同時操縦を可能にするために、半自律経路追従と自動移動障害物回避機能を持った操縦インタフェースを開発した (図 10)。ロボット視点、あるいは、鳥瞰視点で移動経路となる地面の位置をポインティングする。ロボットは指定された経路に従って自律移動する。
- ・自律移動時に障害物を避ける機能を実現した。移動する人間を避ける機能を有する (図 11)。現状では、ポインティングモードと障害物回避モードを切り替えることとしている。
- ・ステージゲートデモなどで、人間を避けながら、地下街の通路などを操縦できることを示した。



図 10 通過ポイントの指定画面

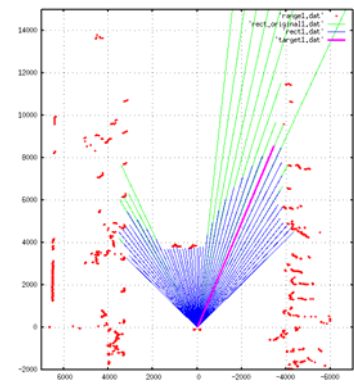


図 11 進行方向の評価

### 3) ポータブル遠隔操縦卓

- ・UMRS のナビゲーションのための操作卓を開発した (図 12)。
- ・操縦システムは軽量可搬型 (20 kg 以内) で、搬入後 10 分以内にロボットを含む全システムが可動。防滴・防塵構造。
- ・カメラ映像、距離、マップ上でのロボットの位置、各種センサデータ等の表示。
- ・ゲーム用ジョイスティックによる、台車の走行、マニピュレータ操作、カメラのパンチルト操作の指示。



図 1 2 UMRS のポータブル遠隔操作卓

#### 4) 3次元環境計測表示による遠隔操縦

- ・三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フリッパ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 1 3 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 1 4).

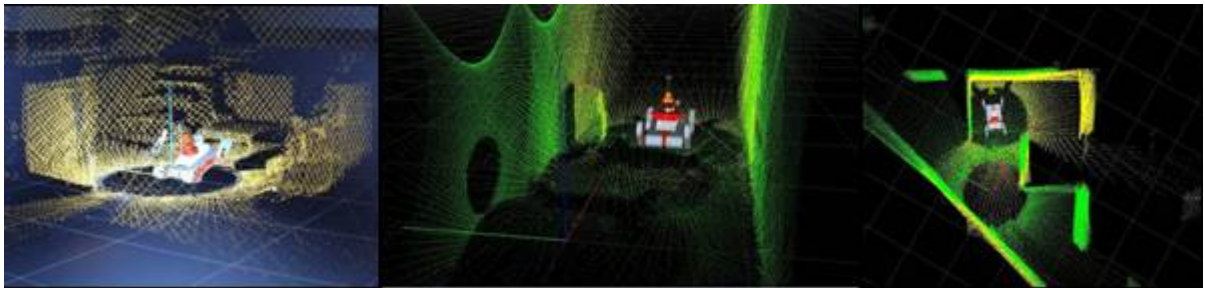


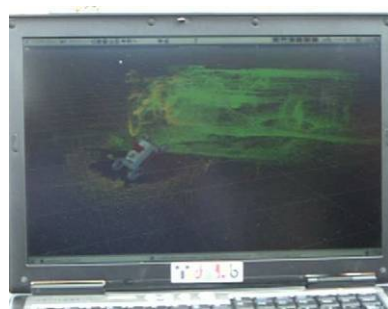
図 1 3 俯瞰視点の3次元スキャン図を用いた, 狭い場所における遠隔操縦



(a) 列車入口



(b) 列車内を操縦する FEMA 隊員



(c) 列車の3次元地図



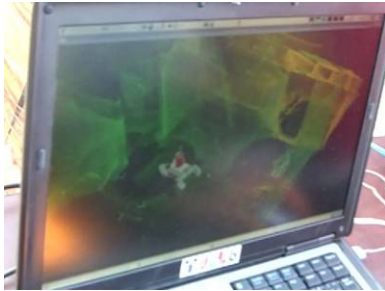
(d) 倒壊建物



(e) 倒壊建物内の Kenaf



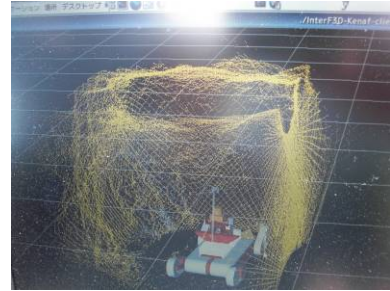
(f) 遠隔操縦を見守る FEMA 隊員



(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) 煙充满環境での地図計測

図 1 4 3次元データを用いた倒壊建物内，衝突電車内の探索

### 5) 半自律不整地踏破機能

- ・不整地を楽に踏破できるために，半自律不整地踏破機能を構築した。
- ・PSD センサによる 3 点の距離計測と，フリッパの段差との衝突判定に基づき，自動的にフリッパの上下動作を行い，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 1 5)。
- ・2 台の測域センサにより，フリッパを含むクローラ面の前形状を計測し，それに基づいて自動的にフリッパ角を制御する機能を実現した (図 1 6)。



図 1 5 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



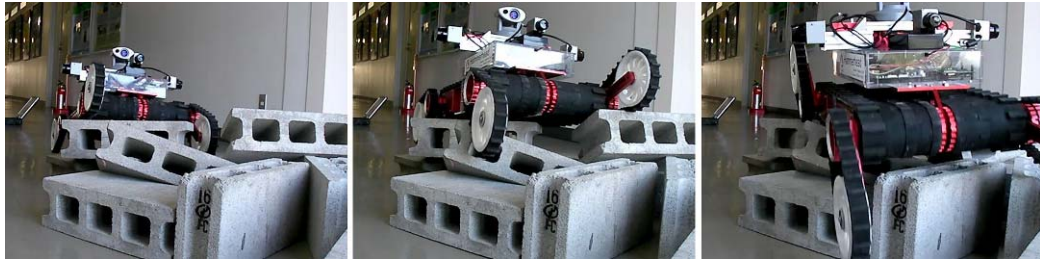


図 1 6 測域センサに基づく半自律での不整地踏破

### 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 1 7)。
- ・ 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 1 8)。



図 1 7 シミュレータによる操作 (実機との動作比較)

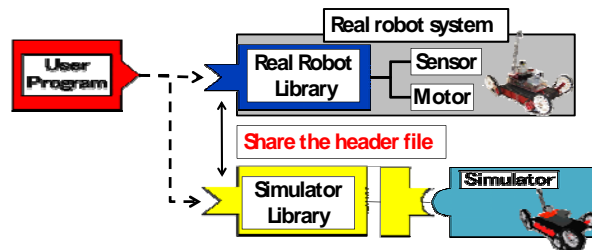


図 1 8 実機とシミュレーションとのプラグイン

### ③通信技術

本課題では、700 m の地下街・地下鉄・高層ビルなどの空間において、多数のロボットからの遅れのない映像データを伝送し、同時に遠隔操縦を可能にすることがもとめられている。本研究では、有線・無線ハイブリッドアドホックネットワーク (図 1 9) を開発することによって、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る。  
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,  
 通信端末位置の制約（特に、階段など複雑形状の閉鎖空間で）、  
 信頼性低下、等

- 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する。  
 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（図 2 0）  
 ケーブルの近隣では複数のアクセスポイントにより広帯域通信  
 ケーブルから離れた場所ではアドホックネットワークによって無線マルチホップ通信  
 常時複数のアクセスポイントと接続することによって通信切断を防止  
 有線によってホップ数を最小限にすることによりレイテンシーの最小化  
 有線と無線との同時接続によりケーブル切断時でも通信可能  
 不安定になりやすい狭い階段などでも、有線セグメントの設置によって安定に通信  
 ロボットの台数に対するスケーラビリティが高い
- 電波環境が厳しい大型船舶内の一時設置無線等実績がある Rokko Mesh Router をベースとし、  
 通信エリアの局所化と、ミドルウェアを移動するロボット向けに改良を行うことにより、単一  
 チャンネルで 10 台以上のロボット（各ロボットに 3 台程度のカメラを有する）を同時に遠隔  
 操縦可能とした。
- 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 2 1）。
- 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 2 2）。
- ネットワークを活用した通話機能などを実現した。

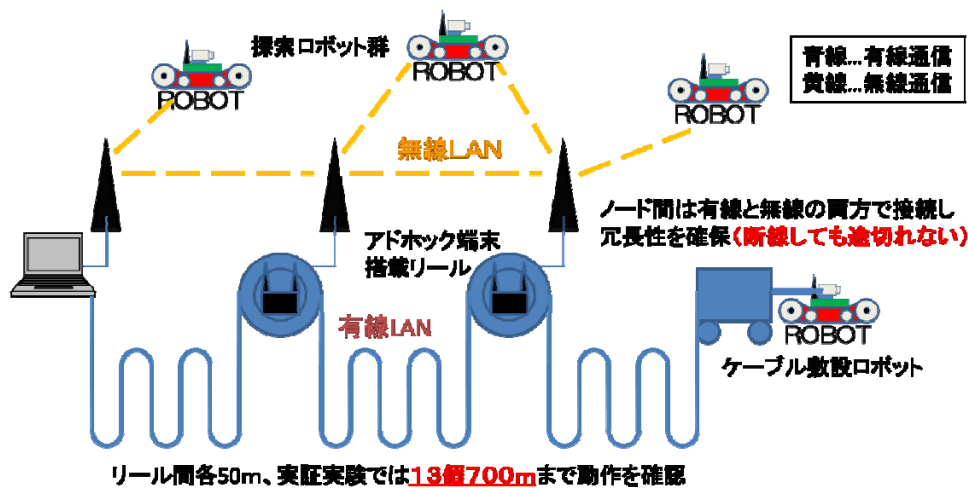


図 1 9 有線・無線ハイブリッドアドホックネットワーク



図 2 0 投下型アクセスポイント

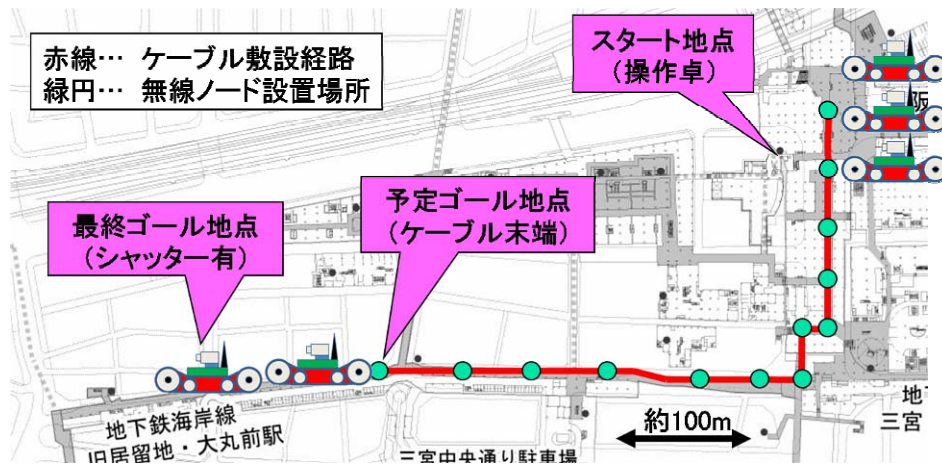


図 2 1 神戸三宮地下街での 683 m 遠隔操縦

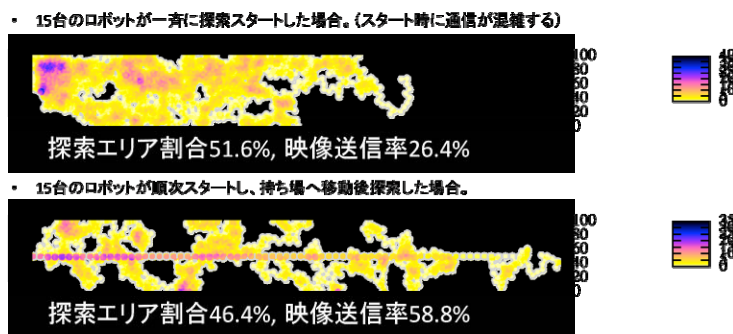


図 2 2 複数ロボットの電波伝搬シミュレーション

#### ④GIS技術

複数台のロボットにより収集されたカメラ画像およびレーザスキャンデータを位置情報と共に集約し、要救護者情報など人による付加情報を統合するための GIS の改良を行い、また、曖昧さや複数の座標系が混在する位置表現法を設計した。さらに、GPS が使えない地下街においてオドメトリ・スキャンデータ・画像等を用いてロボット自身で位置情報を計測・補正する手法の開発を進めた。

(顕著な実績)

##### 1) DaRuMa と MISP

- 災害情報 GIS である DaRuMa の改良と、曖昧さ・複数座標系を許容する位置表現を設計した (図 2 3)。
- 災害情報通信プロトコル MISP の改良・拡張をおこない、OMG への世界標準提案を行った。

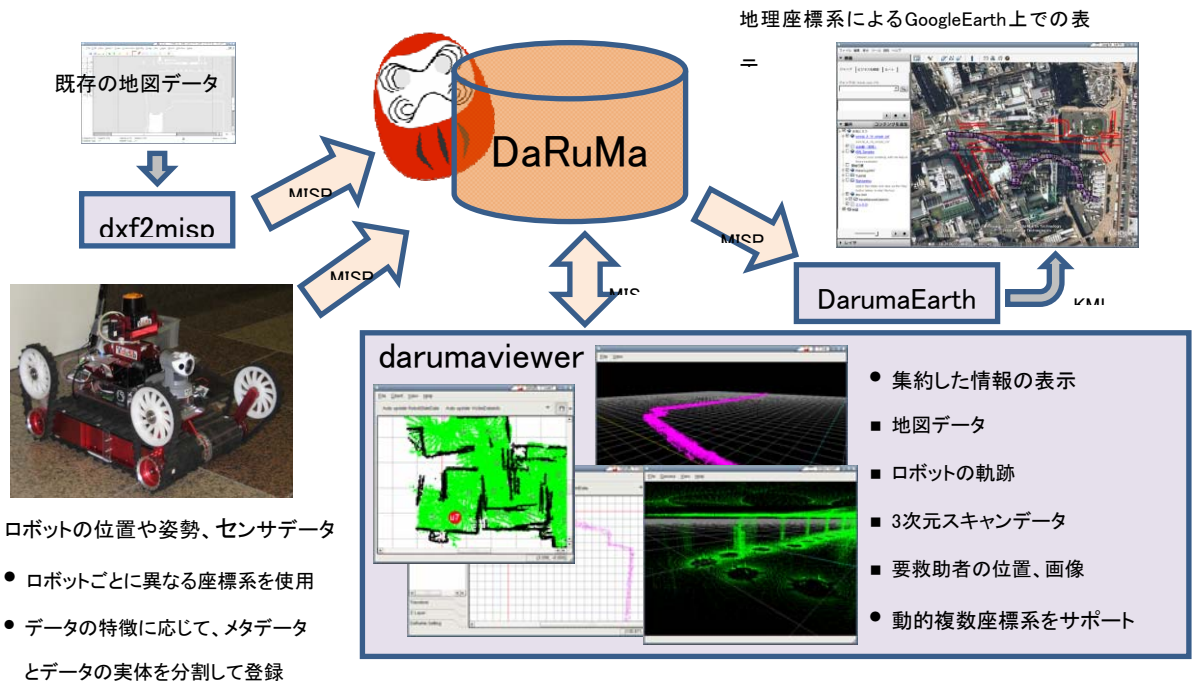


図 2 3 減災情報共有データベース DaRuMa を中核としたセンシング情報集約

## 2) 高精度 3 次元オドメトリ

- ・ ジャイロ스코ープの情報を用いたスリップ推定により、高精度に 2 次元オドメトリによる位置推定を可能にした (図 2 4)。
- ・ 3 軸ジャイロ스코ープにより姿勢を推定することによって、3 次元オドメトリに拡張した (図 2 5)。

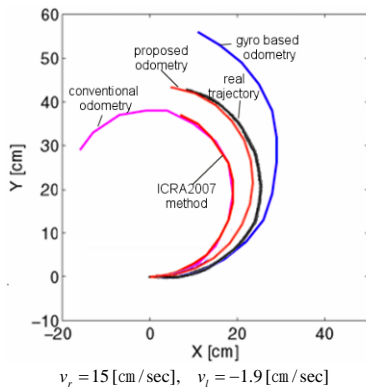


図 2 4 2 次元オドメトリ

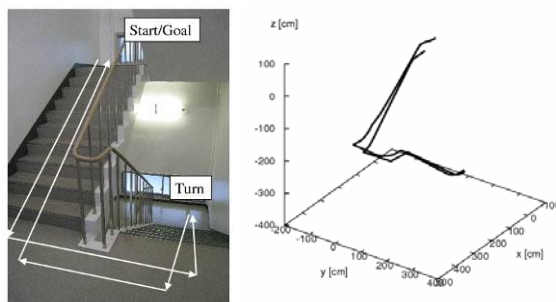


図 2 5 3 次元オドメトリ

## 3) 2 次元環境地図の構築

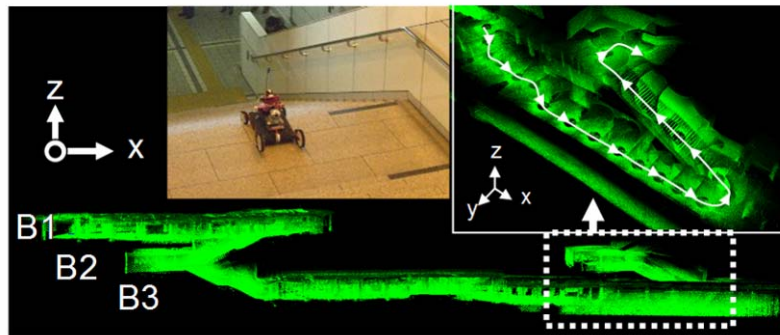
- ・ 3 次元環境情報を ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズムによって結合することにより、2 次元の大域地図を構築した (図 2 6)。



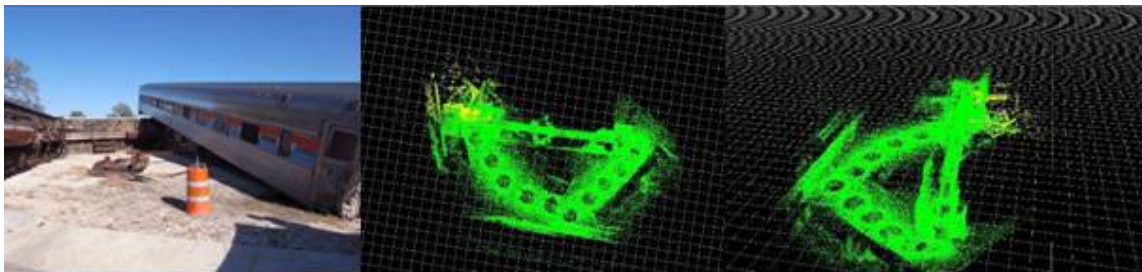
図 2 6 構築した 2 次元大域地図と対象環境 (RoboCup 2008 Suzhou)

#### 4) 3 次元環境情報の構築

- ・ 3 次元環境情報を重力制約条件付 ICP アルゴリズムによって結合することによって, 3 次元地図を構築した. (図 2 7).



(a) 仙台市地下街



(b) 列車事故の模擬現場

図 2 7 構築した三次元地図

#### 5) リアルタイム 3 次元環境情報計測

- ・ 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 2 8).

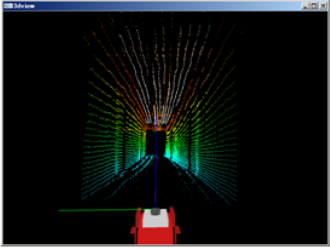
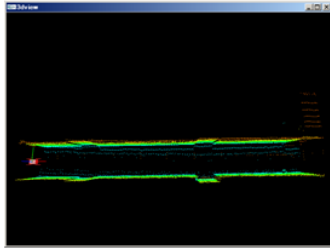

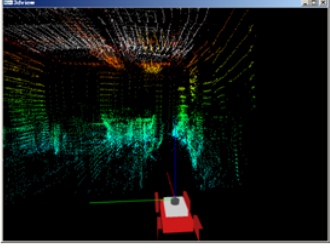
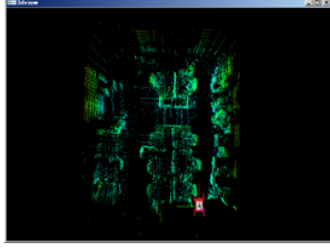

	ロボット視点	上空の視点	対象環境
廊下環境			
乱雑な環境			

図 2 8 上向き測域センサによる 3 次元環境情報取得結果

### 3) 成果の意義

実証試験やデモンストレーション（詳細は「IV実用化，事業化の見通しについて」を参照のこと）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。

たとえば，自治体消防制度 60 周年記念事業「消防防災ロボット・高度な資機材等」の審査会の表彰式における消防庁長官の談話では，「最近の消防用資機材の開発は，科学的に，スマートになってきた」という感想が述べられた。その点に関して，本プロジェクトが果たした役割は小さくないのではないかと考えられる。

また，全世界のレスキューロボット研究者（含，US Army Research Center, NIST）から，Kenaf を販売して欲しいとの要望を受けており，レスキューロボットの技術向上はもとより，実用化・事業化に近づけた役割についても，小さくないと考えている。

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」

また、2008 IEEE International Workshop on Security, Safety and Rescue Robotics において講演された下記論文2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
- Keiji Nagatani, Naoki Tokunaga, Yoshito Okada, Kazuya Yoshida, Continuous Acquisition of Three-Dimensional Environment Information for Tracked Vehicles on Uneven Terrain

#### 4) 特許の取得

現在、特許取得については検討中である。ハードウェアに関しては、発展途上国による模造品製造の問題もあり、知的財産を守る上で特許化が有効であるかどうか、現在、多くの企業により疑問視されてきている。ソフトウェアに関しては、RT Middleware を初めとするオープン化、標準化が進められている上、著作権で守られている。以上から、特許化が望ましいか否かについての判断がまだできていない。

#### 5) 成果の普及

表2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3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2 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	Path Following Control for Tracked	Daisuke Endo, Yoshito

	International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2871-2876	Vehicles Based on Slip-Compensating Odometry	Okada, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida
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	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	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	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
2008.4.1	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
2008.8.20	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)	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	SIMPAR 2008	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
2009.3.17	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
2009.3	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

表3 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

## 6) 実用化, 事業化の見通しについて

### (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。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。(詳細は(2)を参照のこと)

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。

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い、今後の進め方に関する指針を得た。(詳細は(3)を参照のこと)

本研究の事業化に関する検討を行った。(詳細は(4)を参照のこと)

### (2) 実証試験

以下にその概要を示す。

#### 1) ステージゲート時点における実証システム

図29に、ステージゲート時点における実証システムとしてデモンストレーションを行った想定シナリオを示す。本シナリオは、現役消防隊員である真壁賢一（**IRS-U** 隊長／小田原市消防）が作成した、災害現場におけるロボット活用想定シナリオを元に、隊員の動きを削除するなどの修正を加えたものである。

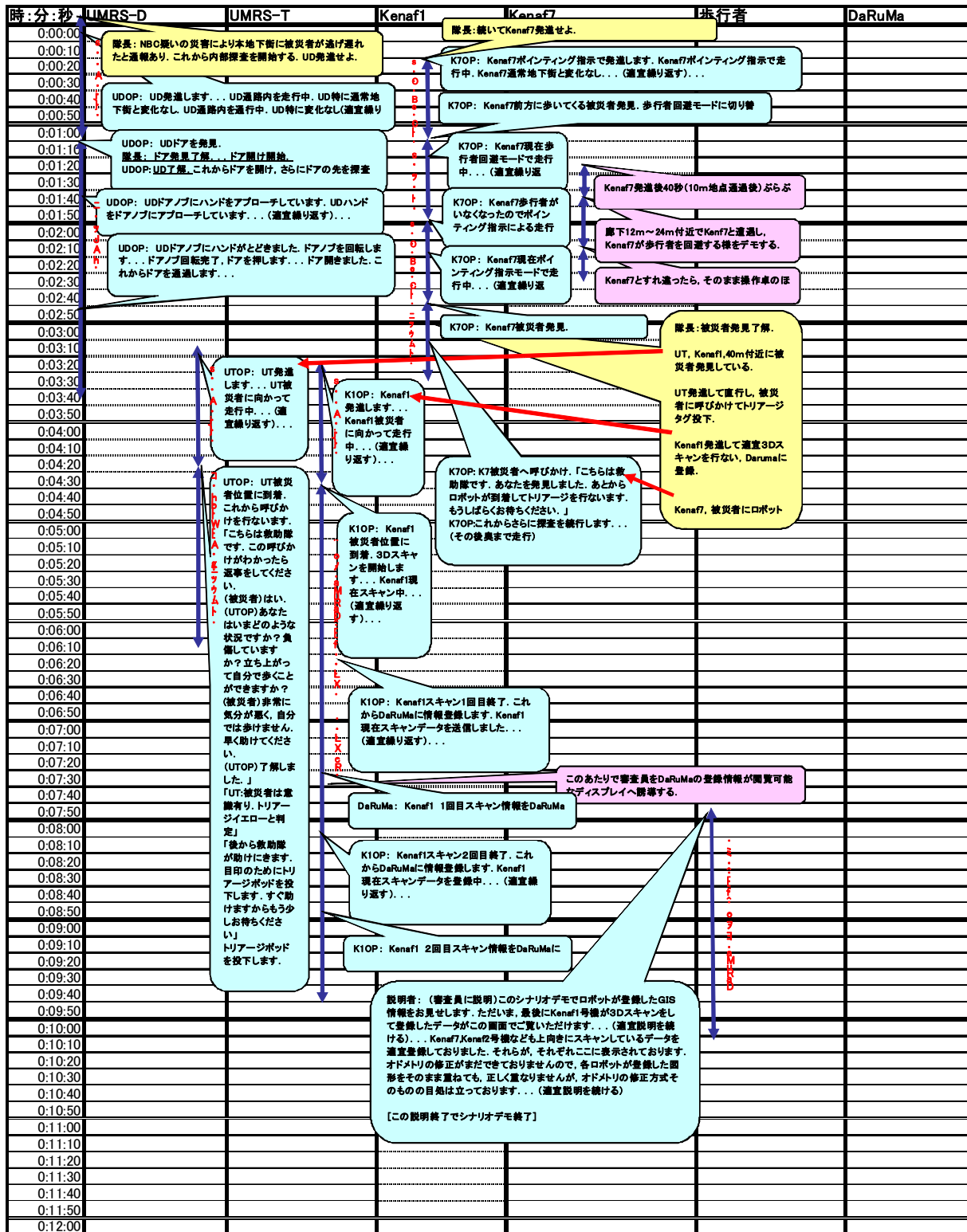


図 29 ステージゲートデモにおける成果活用のシナリオ

この想定シナリオにおいて提示したシステムの内容は次のとおりである。

- ・UMRS (UD 機) による, デモ用仮設ドアを開く動作 (遠隔操作マニピュレータによるドアノブの把持・回転とドアの押し開け, 通り抜け), 搭載カメラによるドア開け作業状態の監視
- ・UMRS (UT 機) による, 双方向通話機能による操作卓オペレータと被災者との通話, トリア

ージタグの投下と発光色設定, ならびに, 搭載カメラによる被災者状態の観察

- ・ Kenaf 機によるポインティング指示による半自律走行. 向かってくる歩行者を避けて走行する自律走行 (統合操作インタフェースの実現), ならびに搭載カメラによる進行方向の環境内部状態や被災者の観察, 上向き測域センサによる継続的な環境形状取得と GIS システムへの環境形状データの登録, 双方向通話機能による操作卓オペレータと被災者との通話
- ・ Kenaf 機による, 測域センサの機械式回転による 3 次元詳細環境データの取得と GIS システムへの環境形状データの登録
- ・ Kenaf 機による, 有線・無線ハイブリッド無線 LAN システムを介した長距離遠隔操作走行 (683m 先までの遠隔操作が可能であることを示した)

また, 個別デモで実施した機能内容は次のとおりである.

- ・ 不整地において, Kenaf のサブローラアームの動作を自律的に行うことができること. これにより, 半自律的な不整地の踏破を実現し, 遠隔操作者はロボットの進行方向の指示と, 搭載カメラからの画像の監視に集中できること.
- ・ Kenaf 機の不整地踏破能力の高さの実証. 階段における U ターンも可能.
- ・ Kenaf 機のサブローラメカニズムの改良を含めた高速走行.
- ・ ロボットによりハイブリッド無線 LAN システムの敷設を行なうことができること.
- ・ Kenaf などの遠隔操作をシミュレートできるシステム. 実機を用いなくても, 災害空間において遠隔操作の体験ができるため, 遠隔操作者のオペレーショントレーニングができること.

## 2) 地下街・地下鉄等において, 本プロジェクト単独で行った実証実験

- ・ 三ノ宮地下街 (さんちか) における実証実験 (2008 年中に 4 回)

(1 回目) 2008 年 6 月 17 日深夜~18 日未明

アドバイザーによる視察・指導会として実施した. 個別の開発技術のデモンストレーションのほか, 想定シナリオによるシナリオデモを試みた. しかし, 無線 LAN の帯域を妨害する電波が地下商店街の一店舗の無線防犯カメラから発信されていたため操作卓とロボット間の通信が確保できず, また, いくつかのロボットがデモ開始直前に故障したため, 実効あるシナリオデモが行なえず, 課題を残した.

(2 回目) 2008 年 8 月 29 日深夜~30 日未明

ロボット走行実験:

UMRS-2007-02 (UD), - 03 (UT) および Kenaf について, それぞれドア発見⇒ドア開け, 被災者発見⇒トリアージ投下およびポインティング指示による走行の実験を繰り返し実施した. UD についてはロボットとドア間の相対位置センシングとドアノブ操作時の視認性の性能不足が明らかとなった. UT については, トリアージタグの投下機構およびインターコム不安定性が明らかとなった. Kenaf はポインティング指示による操作インタフェースが実証できた.

ハイブリッド無線 LAN システム性能実験:

ハイブリッド無線 LAN システム (有線メッシュネットワーク×12 台含) 上で UMRS×2 台, Kenaf×1, ダミー台車×3 台を並行して走行できることを実証した. UMRS による上述の実験では, UD 機において通信パケットの欠落が数秒認められた. UT 機については特に通信上の問題は認めら

れなかった。Kenaf およびダミー台車によりこのハイブリッド無線システムを介した通信のテストを行なった。Kenaf はポインティング指示法を含む遠隔操作により操作卓から 150m までの長距離走行が行なえることを実証し、ダミー台車により操作卓から 300m までの有効通信記録を達成した。

(3 回目) 2008 年 9 月 13 日深夜～14 日未明

2 機の Kenaf と 2 機の UMRS (UT,UD 機) を用い、4 機により地下街の 300m 区間で探査を行なう想定シナリオデモを実行した。デモは、ドア開けや被災者の発見、歩行者の回避走行、双方向音声通話装置による呼びかけ、トリアージタグの投下、地下街内の 3 次元形状データ取得と GIS システムへの登録などを含め、さらにハイブリッド無線 LAN システムを介する遠隔操作による長距離走行も含むものとした。同無線 LAN システムは順調に稼動した。UMRS 機の稼動信頼性は向上した。長距離走行は操作卓から 550m 地点までの走行を実現した。想定シナリオデモは、想定 15 分のところほぼ 1 時間を要したので、ステージゲートデモのためには抜本的なシナリオ改訂が必要であることがわかった。Kenaf のポインティング指示による走行と人避けによる自律走行の間の統合に問題があることがわかった。

(4 回目) 2008 年 11 月 5 日深夜～6 日未明 (ステージゲートデモ)

3 機の Kenaf と 2 機の UMRS(UT,UD 機)を用いる想定シナリオデモを 15 分で終わるように調整し、また、個別の開発技術要素デモを行なった。シナリオデモは想定どおりに実行でき、実証システムが稼動していることを提示した。

・仙台市営地下鉄仙台駅コンコースにおける実証実験 (2007 年 12 月 15 日深夜～16 日未明)

実際に地下街を使用する初の実験。主として Kenaf 機を複数台利用し、測域センサの機械式回転を含めた走行環境の 3 次元の詳細スキャンと GIS 登録、歩行者回避走行アルゴリズムの基本的な部分の検証、ケーブル敷設ロボットの実験、遠隔操作 (ロボットを視認しない) による階段の降下を含む、地下鉄駅ホームの探査実験などを行った。いずれも、それまで開発をおこなってきた基本的部分は機能することが確認された。

・神戸市消防局との UMRS 操縦会 (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)

ポータブル遠隔操縦卓×2 を用いた UMRS-2007-02 (UD), -04 の神戸市消防隊員への操作体験とレスキューロボットの啓蒙を目的とした操縦会を行なった。IRS 側からの操縦操作法の説明と隊員自身による操作体験を行い、レスキューの現場で活動している隊員の意見徴収と改善の具体的方針についての討論・情報交換を実施した。

### 3) 他機関と共同で行った実証試験とデモンストレーション

・NIST/ASTM Disaster City での実証実験 (Response Robot Evaluation Exercise (#5))

(2008 年 11 月 17 日～21 日)

(於：Disaster City, FEMA TX-TF1 Training Site, College Station, Texas, USA)

NIST/ASTM が国際標準として提案しているレスキューロボットの評価メソッドを Kenaf に適用し、評価を行った。また、FEMA 隊員が Kenaf を実際に操縦し、評価や意見を直接聴取した。その結果、Disaster City のコンクリート・木材瓦礫のロボットによる踏破を世界で初めて達成し、倒壊建物内の探索操縦体験で三次元計測表示および半自律不整地踏破の有効性を示し、多くのロ

ボットの操縦経験を持つ複数の FEMA 隊員から高い評価を得た。

- RoboCup 世界大会 Rescue Robot League

(その 1) 2007 Atlanta Rescue Robot League (2007 年 6 月 30 日～7 月 10 日)

(於 : Georgia Tech, Atlanta, GA, USA)

Kenaf の性能を試験することを目的として、ロボカップレスキューロボットリーグに出場した。

NIST/ASTM が国際標準として提案している評価用不整地での走破の結果、運動性能の部で世界優勝を果たし、Kenaf は非常に優れた走破性能を持つとともに、ジョイスティックによる遠隔操縦システムが操縦しやすいことが実証された。

<http://www.robocup-us.org/Old/robocup-2007/index.html>

(その 2) 2008 蘇州 Rescue Robot League (2008 年 7 月 1 日～7 月 8 日)

(於 : 蘇州 International Expo Centre, 中国)

Kenaf の性能を試験することを目的として、ロボカップレスキューロボットリーグに出場した。

ただし、輸出規制によるセンサなどの持ち出し制限や主催者側によるロジスティクスの問題により、ロボットをフルスペックとすることができず、十分な性能評価を行うことができなかったと言えない。

<http://www.robocup-cn.org/>

- 経済産業省平成 19 年度化学災害対応装備技術開発支援事業「開発中の災害対應用ロボットのデモンストレーション」での動態展示

(2008 年 2 月 26 日) (於 : 神奈川県産業会館)

経済産業省製造産業局が主催した催しで、企業や大学等が有する技術と、実用化された装備を実際に使用して化学災害に対処する警察、消防、自衛隊などの機関がこれらの装備に求めるニーズとの整合性を図り、より実効性の高い装備の実用化に寄与することを目的としたデモンストレーション会であった。主催者の指示により、がれき走行、暗闇走行、階段走行、遠隔操作・映像受信に関するデモを Kenaf で行なった。その後、デモを視察した関係者との意見交換を行なった。

- 消防救急救助研究会でのデモンストレーション (2007 年 10 月 7 日) (於 : 電気通信大学)

東京消防庁が主催する消防救急救助研究会にて、全国の救助関係者の前でデモンストレーションを行った。国際レスキューシステム研究機構の現役消防隊員によるボランティア部隊 IRS-U がロボット活用シナリオを策定した。デモンストレーションでは、IRS-U が Kenaf を操縦し、不整地を乗り越え、要救助者を発見。東京消防庁ハイパーレスキュー隊員が救助を行う、という一連のシナリオデモを行い、意見交換を行った。

- Rescue Robotics Camp (2007 年 9 月 22 日～27 日)

(於 : イタリア高等消防大学校, Rome, Italy)

レスキューロボットをテーマとして、博士課程大学院生・ポスドククラスの研究者が共同で開発を行うキャンプ。Kenaf をテーマとしたコースを設け、実際に Kenaf を動かすプログラムを作成する演習を行うことにより、レスキューロボット研究用の機材として適していることを示した。その結果、多くの研究者から販売に関する問い合わせを受けた。また、消防関係者からの意見を聴取した。

[http://sied.dis.uniroma1.it/ssrr07/index.php?option=com\\_content&task=view&id=23&Itemid=37](http://sied.dis.uniroma1.it/ssrr07/index.php?option=com_content&task=view&id=23&Itemid=37)

### (3) 安全性に関する検討

これまでに、下記のような予備検討を行った。

#### 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。
- ・フリッパー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。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）

### 3.3.2 建設系産業廃棄物処理RTシステム

#### 3.3.2.1 次世代マニピュレータによる廃棄物分離・選別システムの開発

【実施者: 東急建設(株)】

##### 1) 研究概要

本研究開発は、廃棄物材質の判定手法、解体・選別作業の効率化・安全・高信頼性技術、機械本体および施工現場の環境認識技術、多自由度・多腕マニピュレータおよび多機能ハンド、複数腕、複数軸の同時操作を容易にする操作系の研究、およびオペレータ操作支援に最適な情報提示技術等の研究開発を実施した。

##### ・ 研究開発目標

###### (1) 【最終目標】

「中間目標で開発した要素技術を適用したプロトタイプ・マニピュレータを開発し、建物解体時に発生する実際の廃棄物（中間目標で対象とした材質）を選別判定し、廃棄物を移送できること。」

###### (2) 【中間目標】

① 「建物解体時に発生する廃棄物のうち、異なる5種類以上の材質を選別判定できること。」

解体作業を対象とした建物で使用されている物性の異なる材質（コンクリート塊、廃プラスチック、木くず、金属くず、紙くず等）を特定し、特定された材質を選別するための判定手法を開発する。

② 「建物解体時に発生する廃棄物を素材毎に分離できること」

建設機械レベルの大きさ、力を持つマニピュレータの開発を想定し、上記技術項目に関する要素技術を開発する。

##### 2) 成果詳細

###### ① 建物解体時に発生する廃棄物材質の判定手法

###### 【目標値の達成状況】

実際の解体現場における作業を分析した結果、非木造建物の躯体解体時における小割り、選別作業のRT化が最も効果が高いことが判明。発生する廃棄物を調査し、選別対象とする5品目を、コンクリート塊、鉄くず、アルミくず、木材、廃プラスチックと設定。設定した5品目の材質を判定するため、近赤外線センサ、渦電流センサ、蛍光X線分析計を採用した。統合化システムにより5品目全て（生材および解体現場から取得した実際の廃棄物サンプル）を判定可能なシステムを構築。また、画像処理による廃棄物一次判定システムを試作、次世代マニピュレータに搭載した。

###### ①-1 「廃棄物解体、選別に関する実態調査」

実際の解体現場で発生している廃棄物の調査（表1）、現場作業の調査（写真1、2）（図1、2）、現場周辺環境に関する調査を実施。将来の波及先として想定される中間処理場3箇所（写真3、4）、最終処分場1箇所、不法投棄処理現場1箇所（写真5）の実態調査も実施。顧客である解体主（ビルの所有者等）、解体工事を専門に実施している解体業者にヒアリングを実施。導入効果的が高いと思われる要素技術を絞り込んだ。

表1 判定対象廃棄物材質

材質名	コンクリート	鉄	アルミ	木	プラスチック
写真					
選定理由	①廃棄物排出割合(第一位) ②特定建設資材	①廃棄物排出割合(第二位) ②解体業者ニーズ	①解体業者ニーズ	①特定建設資材 ②混合廃棄物量削減 ③木造解体への発展性	①混合廃棄物量削減 ②特定建設資材指定の可能性有 ③製造団体の適正処理・再資源化への取り組み



写真1 排出廃棄物調査状況



写真2 作業記録映像

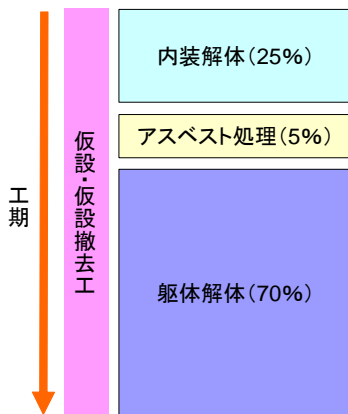


図1 工期の割合

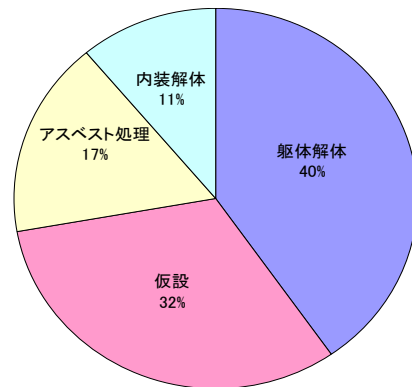


図2 コスト(工事費)の割合



写真3 中間処理場 A



写真4 中間処理場 B



写真5 不法投棄処理現場

①-2 「廃棄物材質の判定手法の研究開発」

廃棄物を判定することが可能な物性を調査するため「超音波センサ(写真6)」、「硬度計(写真7)」、「遠赤外線センサ(サーモグラフィ)(写真8)」、「色彩輝度計(写真9)」、「近赤外線センサ」、「渦電流センサ」、「蛍光X線分析計」の技術調査を実施。技術調査を実施したセンサの中から近赤外線センサ、渦電流センサ、蛍光X線分析計の有効性を確認。平成20年度に3種類のセンサを統合した廃棄物判別用のシステムを完成させ(図3)、5品目の判別精度65%以上の結果を得た。次世代コンピュータに画像処理による廃棄物一次判定システムを試作(図4)、搭載。



写真6 超音波センサ実験状況



写真7 硬度計実験状況

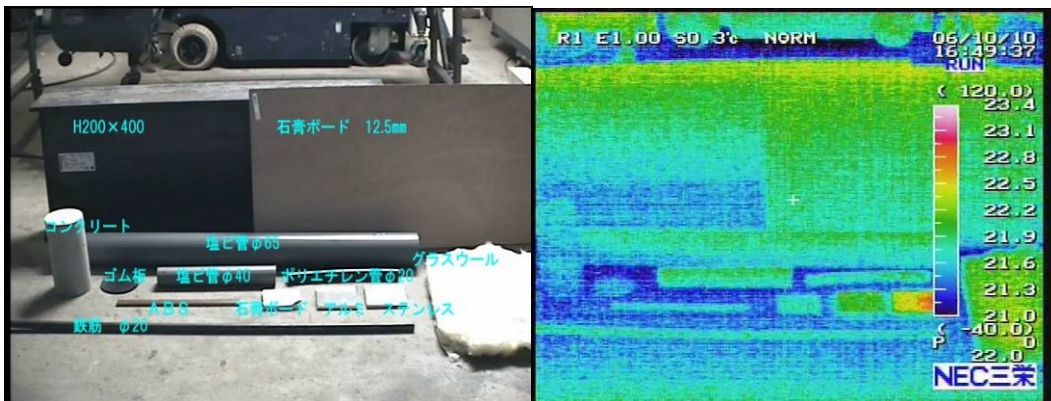


写真8 遠赤外線センサ実験状況



写真9 色彩輝度計実験状況

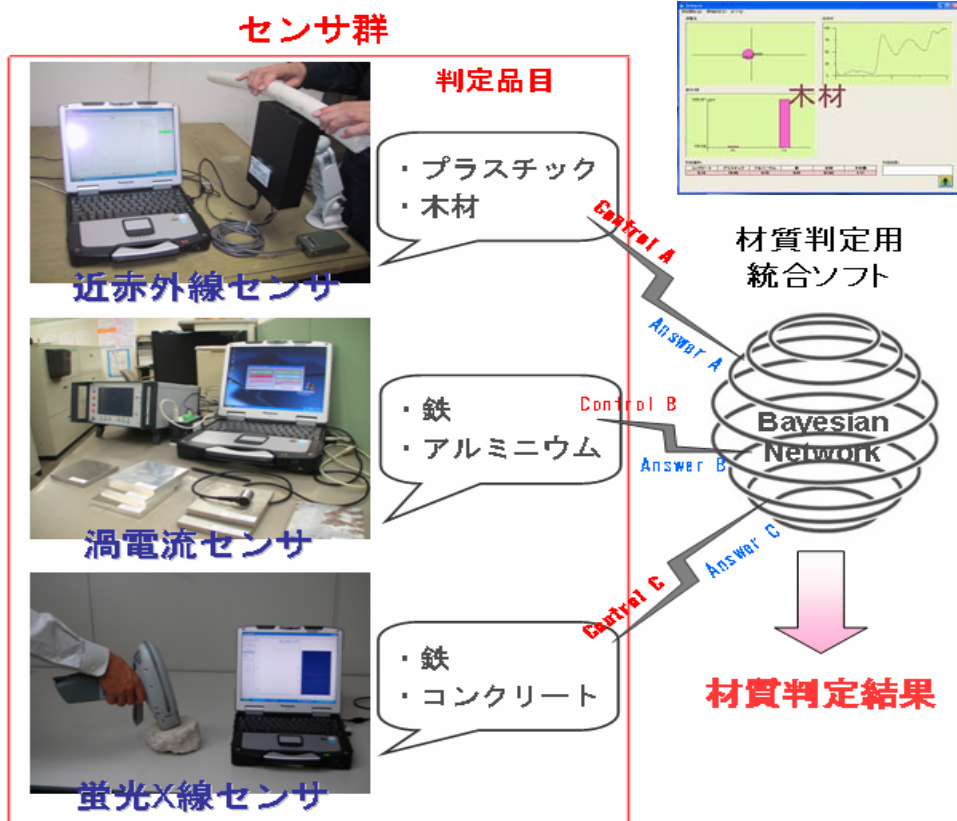


図3 統合材質判定フロー図

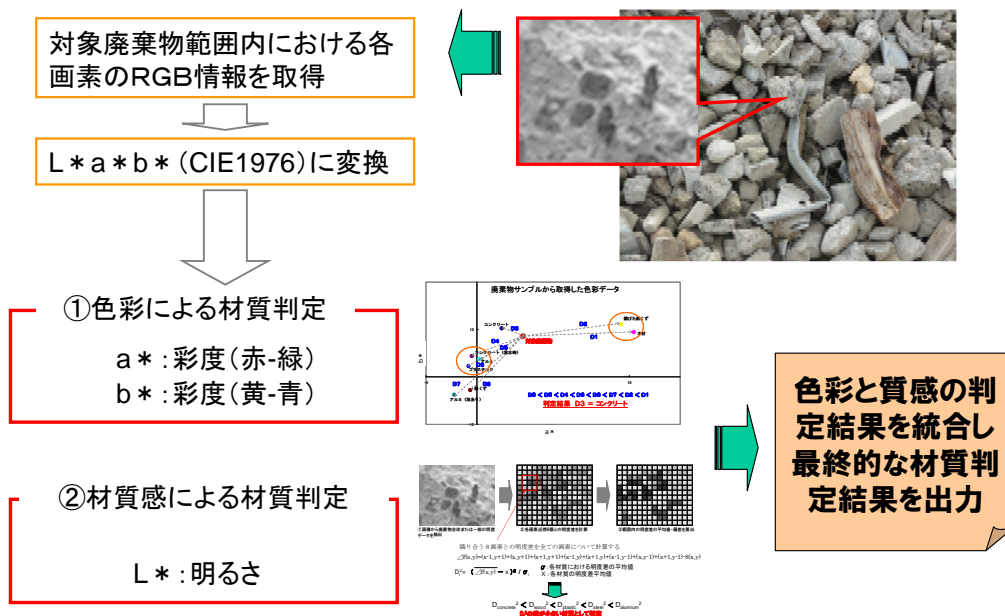


図4 画像材質判定概要図

②解体・選別作業を効率よく、安全に、かつ高信頼度で行う技術

【目標値の達成状況】

各研究開発項目から得られた結果を基に、実証ロボットの仕様を策定。ハンドリングのための作業対象状態センシングを可能とするセンサシステムとしてステレオビジョン方式を採用。また、カメラ映像に直接距離情報を埋込む新たなインターフェース技術、および対象物裏面のデータを推論する手法を考案し、試作。施工に必要な作業分析結果を基に機能分析を行い、廃棄物の種類、性状の範囲を決定した。また、把持方法・分離方法、作業速度や目標値を標準的な作業1サイクル当たり30秒以内と決定し、本体設計を実施。自動化、遠隔操縦化を想定した新たなコントロールシステムを開発し、本体に搭載。顧客ヒアリング、ユーザヒアリングを基に解体現場に求められる環境計測システムの開発および解体現場適用によるデータ収集を実施した。

②-1「実証ロボットの仕様策定」

①-1、および各要素技術の開発目標から以下のように、解体選別のモデル現場を想定した(図5)。また、分離対象物を表2に示すものと設定した。

【初期環境条件(非木造建築物、階上解体を想定)】

・周囲状況

建物面積 20m×15m、仮設足場、パネル組み

・床状況

平面、投下用開口部

・対象物

乾燥状態、平置き(重ねない)

・対象物種類

①コンクリート塊：300mm～200mm×1,500mm以下、鉄筋入り

下、鉄筋入り

②鉄くず：団子状のものφ500程度、H鋼(400mm×200mm×1,000mm程度)

③アルミくず：サッシ枠(外寸)1,500mm×3,000mm×□100mm程度

④木材：さん木、端太角、(木造(φ400～500mm、1=3,000mmのかたまり))

⑤廃プラスチック：塩ビ管φ100mm×1,000mm以下(灰色)、設備系廃プラスチック、白色断熱材巻き

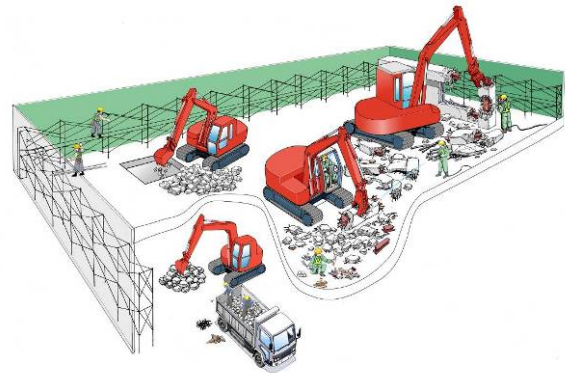


図5 モデル現場イメージ

表2 分離対象物

項目	説明
仕様	プレキャストコンクリート板(PC板) 外形:8,800×1,550×200mm 構成素材:コンクリート、鉄、アルミ、プラスチック 質量:1,200kg
写真	<p>サッシ枠(アルミ) 窓シール(プラスチック) 鉄筋(鉄) コンクリート ファスナ(鉄)</p>

②-2 「ハンドリングのための作業対象の状態センシング」

3D デジタイザ（レーザスキャン方式）とステレオカメラシステム（ステレオビジョン方式）を用いて基礎実験を実施。計測距離・計測範囲（画角）・環境条件の点で優位なステレオカメラシステム（図6、7、表3）を採用決定。

また、ステレオカメラシステムのレイアウトを検討。ステレオ画像（一方向）から形状を類推し3D解析を行う対象物認識ソフト（形状・体積・重心・慣性モーメントの計算）（図8）、およびタッチペン操作で実行するインターフェースソフト（図9）を試作。

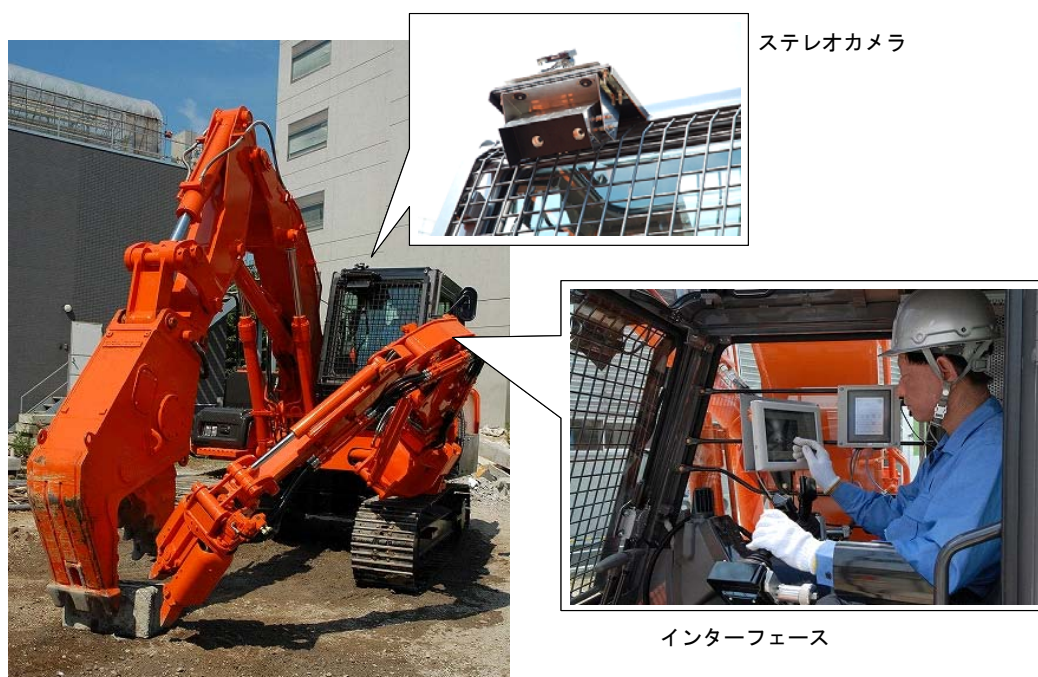


図6 対象物センシングシステムの実装

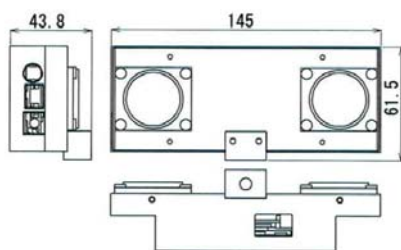


図7 ステレオカメラ寸法

表3 ステレオカメラの諸元

撮像素子	1/3.3型 1.3M画素カラーCMOSセンサ
光学系	f=4.4mm
画角	52°
基線長	10cm
フレームレート	15fps
ビデオ出力画像	QVGA
静止画出力画像	SXGA×2
静止画出力形式	YUV 4:2:2
出力インターフェース	USB2.0 NTSC
カメラユニット外形寸法	左図参照
カメラユニット質量	約250g
対応OS	Windows2000、XP



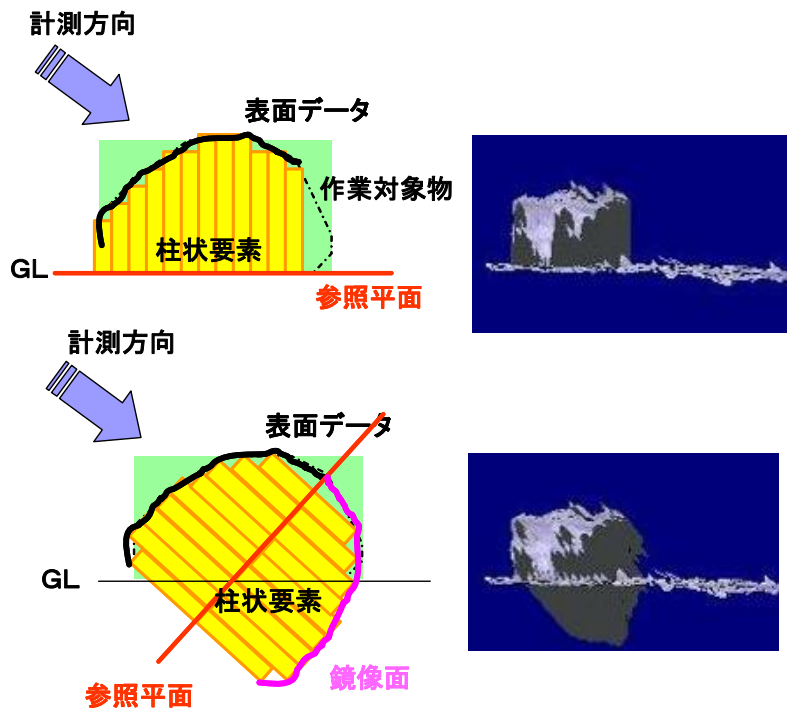


図8 形状推定の手法（上：手法1、下：手法2）

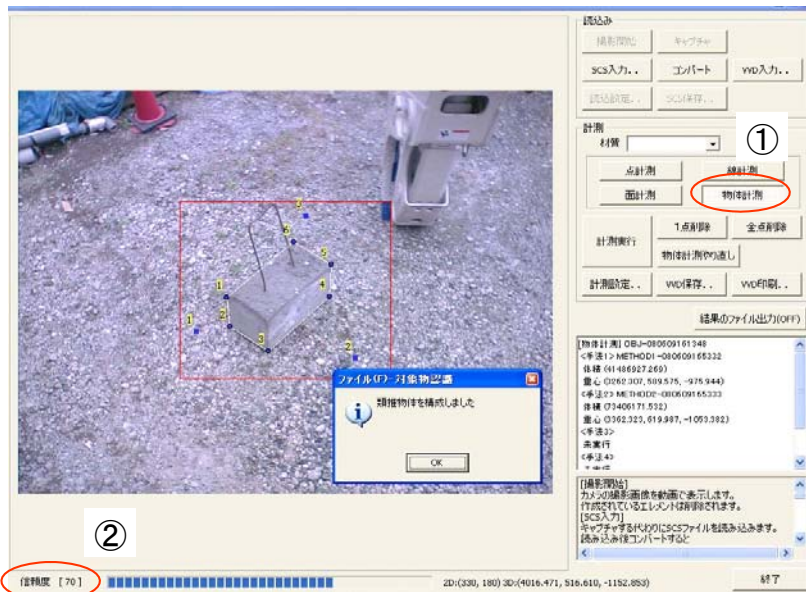


図9 インターフェース画面

②-3 「施工に必要な作業分析結果を基にし、作業対象の状態との関係で最適なハンドリング計画の策定」  
 廃棄物の種類性状の範囲を基に、把持力、分離方法(図 10)、旋回速度等を明確化。ハンドリング計画機能の策定(図 11、12) 及び最適性の検証を実施。

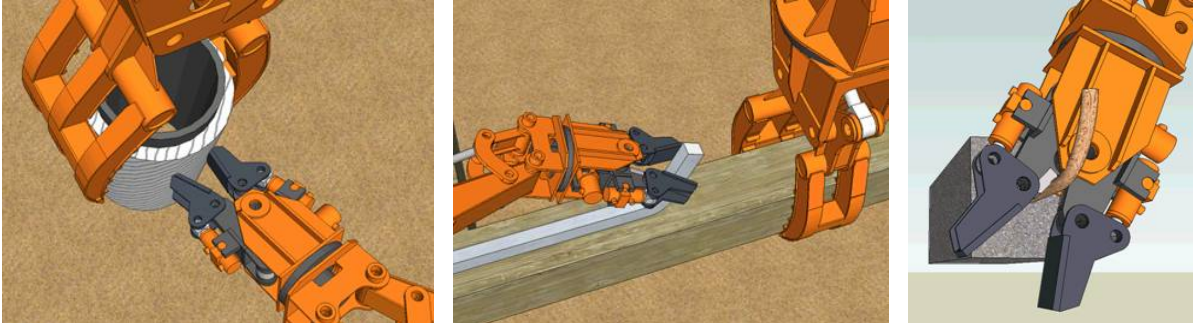


図 10 分離イメージ

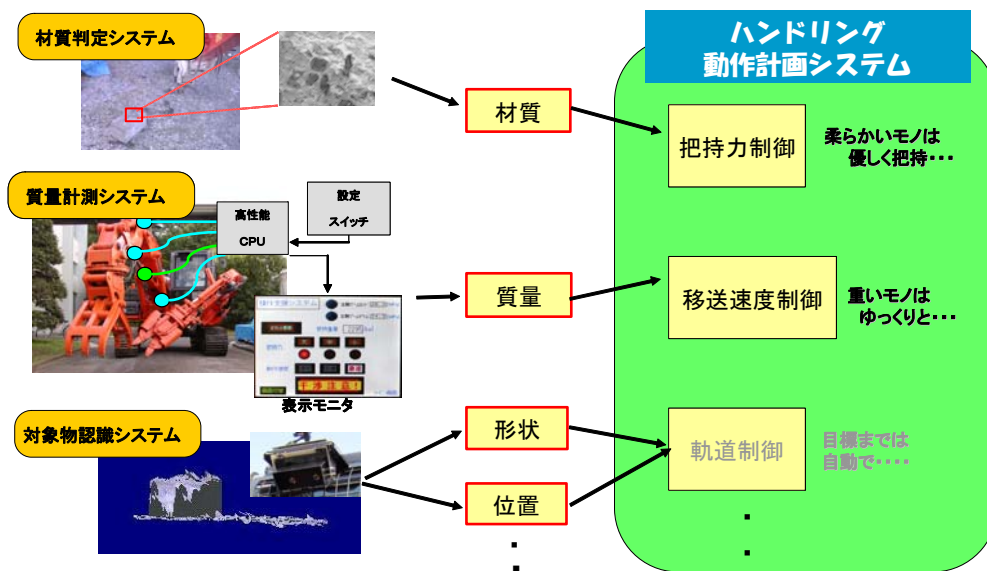


図 11 ハンドリング動作計画システム

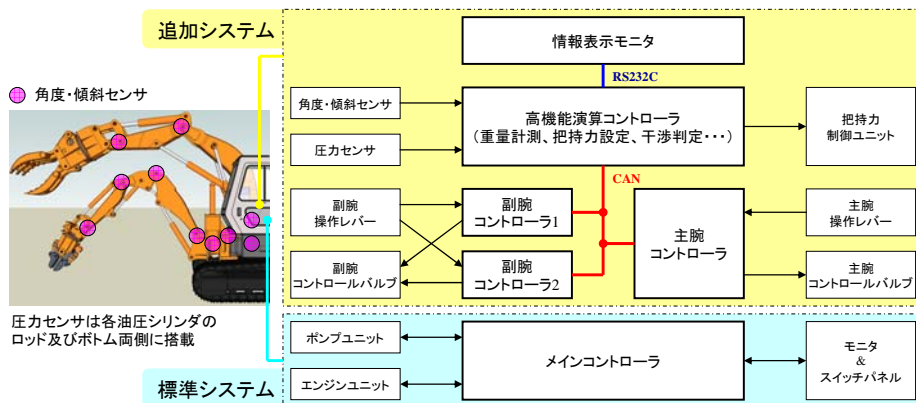


図 12 多機能コントローラ

②-4 「安心安全の技術」

計測データの蓄積方法および処理フローを明確にし(図 13、ネットワーク機器を利用した環境計測システムを設計・製作。現在(平成 21 年 3 月 31 日現在) 4 現場で 8 台が稼働中(図 14、15)(5 現場の実績)。

製造者、販売者及び、使用者、監理者の観点から開発品のリスクアセスメントを実施。

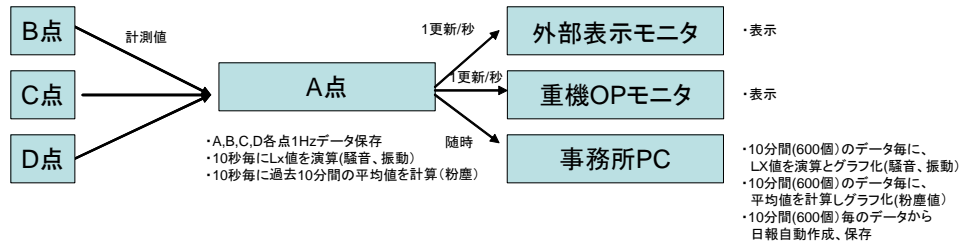


図 14 現場適用状況

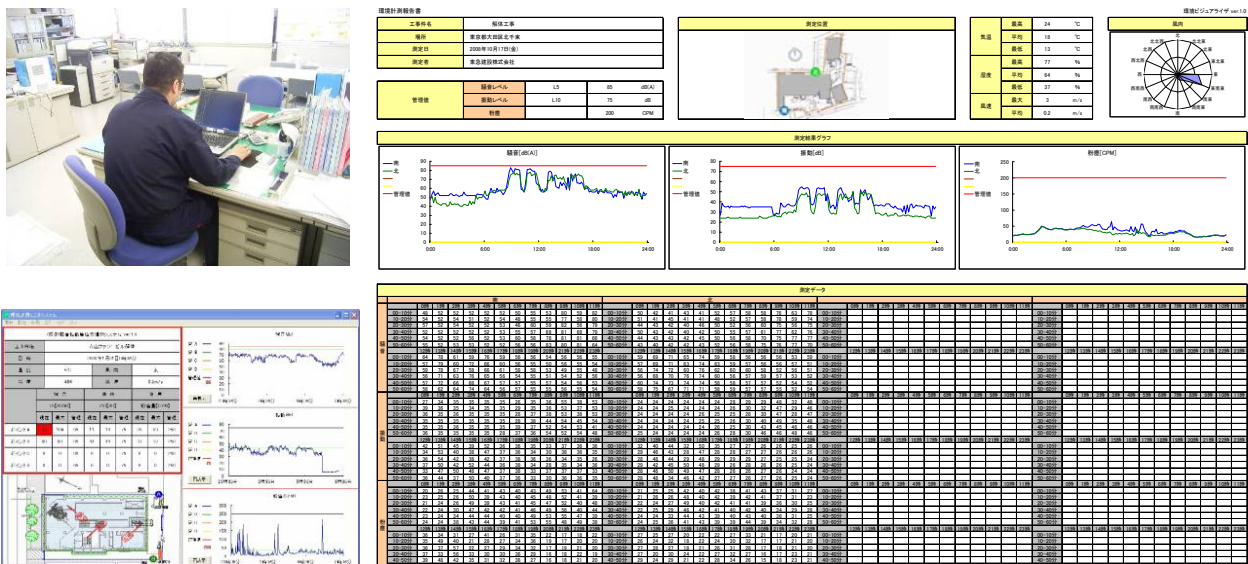


図 15 現場監理者用ソフトウェアと日報

③解体現場で使用可能で、かつ、建設機械相当の耐環境性を持つ次世代マニピュレータの開発

【目標値の達成状況】

機械周囲の環境認識技術により作業員を識別するシステムを試作、評価を実施した。掴み、切断等が可能な多機能ハンドを試作した。本体質量 13,400 kg、定格出力 63/1,950 (kW/min-1) の双腕マニピュレータ本体（主腕最大 6 自由度、副腕 9 自由度）を試作。対象物ごとの把持力調整機能、廃棄物質量測定装置の実装、建設機械相当の耐環境性の検証（通常の油圧ショベルの検査レベル）を実施した。

③-1 「施工現場の環境認識（機械周囲、機械本体）」

WAD-GPS（GPS 方式）とレーザポジショナ（回転レーザ方式）を用いて位置計測の基礎実験を実施。計測精度、解体現場における環境条件の点で優位なレーザポジショナの有効性を確認。レーザポジショナを利用した、機械周囲の作業員識別と、機械との位置関係を把握し接近時警告するシステムの試作（図 16、写真 10）、および実装（図 17）、機能確認を実施。

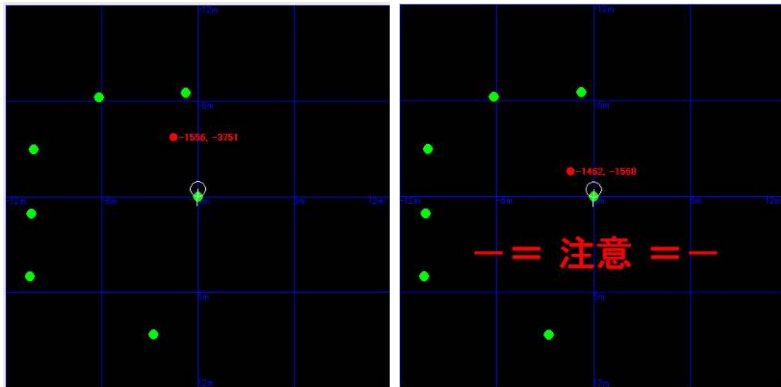


図 16 監視画面（左：警告半径外、右：侵入時）

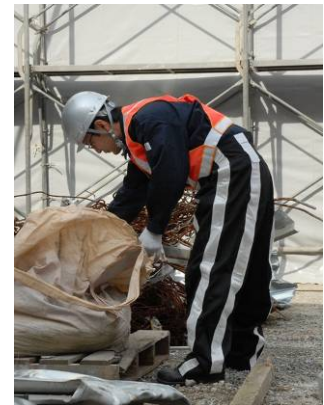


写真 10 リフレクティブウェア

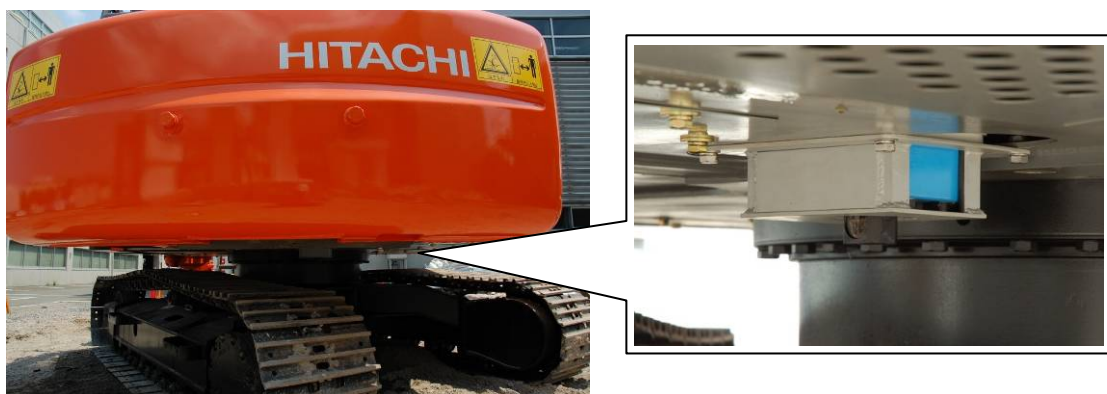


図 17 レーザポジショナの実装状況

③-2 「多自由度、多腕マニピュレータ、多機能ハンドの開発」

細かな、把持分離作業及び切断作業が可能な、多機能ハンドの設計製作。位置・姿勢の計測が可能な多自由度、多腕マニピュレータ本体の設計製作を実施（図 18、19、表 4、写真 11）。把持物質質量測定機能（図 20）を装備し、精度を検証。質量 200kg 程度のサンプルで誤差範囲 20%を達成。多機能ハンド付き多自由度多腕マニピュレータの廃棄物の分離実験を実施（写真 12）し、目標機能を確認。

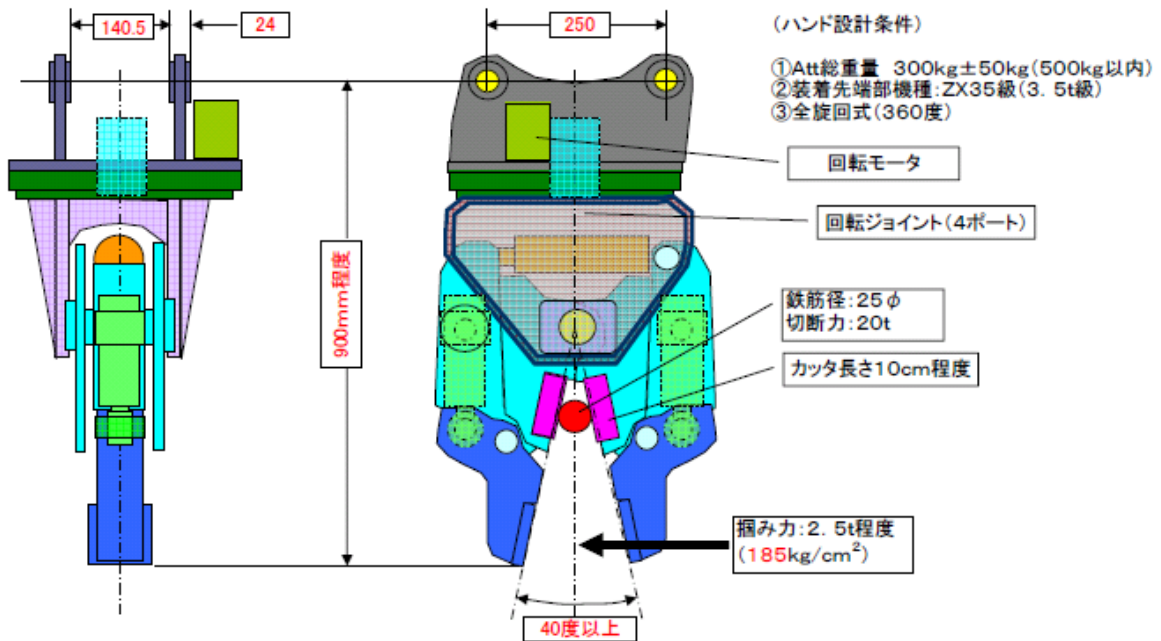


図 18 多機能ハンドの機能と仕様

表 4 マニピュレータの自由度

	Front DOF			Attachment DOF	Total DOF
	Roll	Pitch	Yaw		
Main	3	0	3	2	5
Sub	6	1	4	3	9

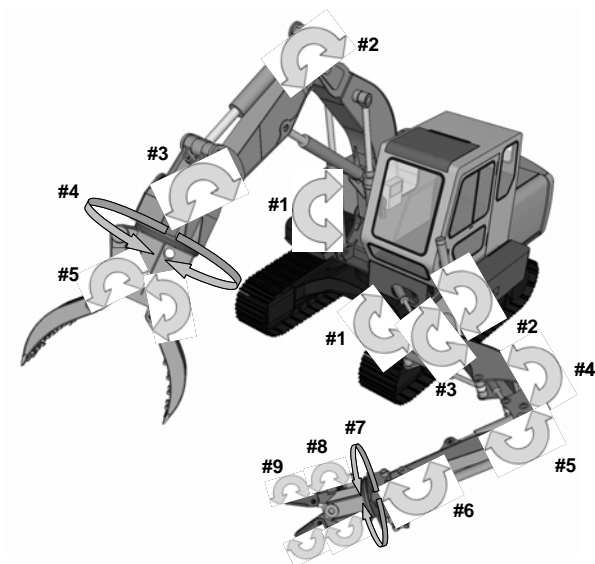


図 19 マニピュレータの自由度構成

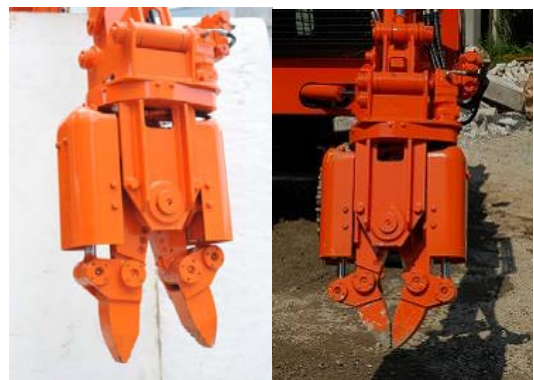


写真 11 製作した多機能ハンド

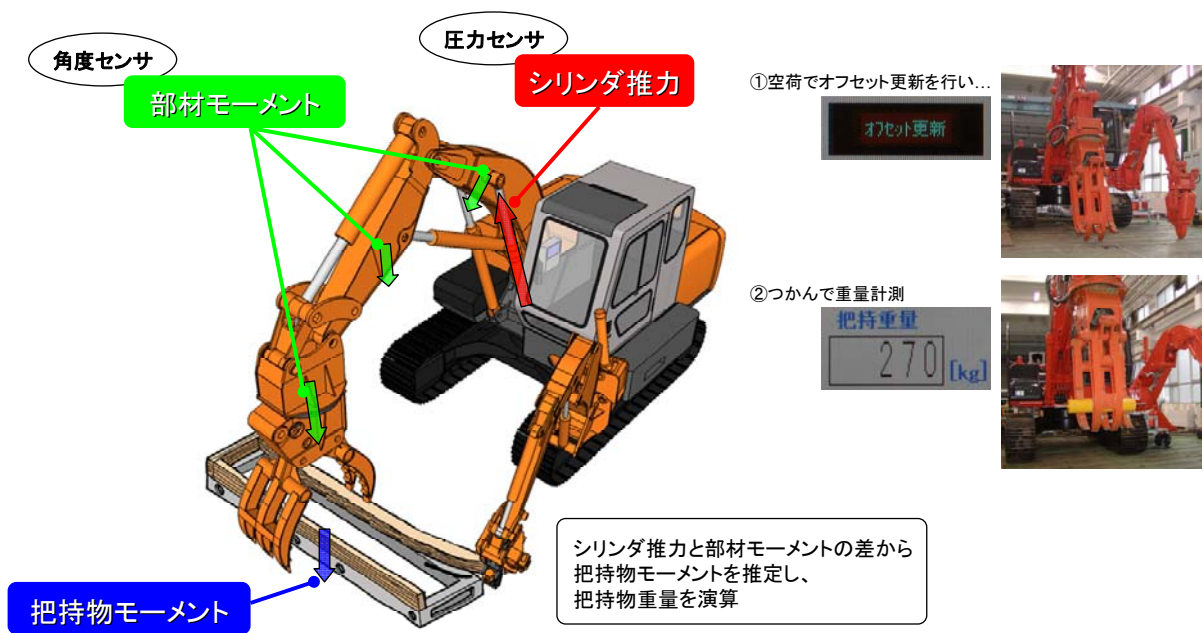


図 20 質量計測の概要



写真 12 廃棄物分離実験

### ③-3 「耐環境性能の検証」

主要使用機器について建設機械相当の耐環境性検証（通常の油圧ショベルの検証レベル）実験を実施し、基準を満足。

④現場作業員でも使用可能なヒューマンインタフェースの開発（複合操作、操作感覚、力制御、ビジュアルサーボ等）

【目標値の達成状況】

複数腕、複数軸の同時 8 自由度操作を容易にする操作系を試作。具体的には、主腕、副腕、走行、旋回等の同時動作が可能。また、複数腕の干渉防止システムを試作した。

④-1「複数腕、複数軸の同時操作を容易にする操作系」

多自由度多腕マニピュレータを同時に簡便に動かすための操作システム(図 21)を開発。事前シミュレーションの実施と実機に搭載した操作レバー(写真 13)の機能の確認。長時間運転しても疲労を感じないレバー操作力と配置を検討、開発。油圧ショベル同等の乗り降りが可能な運転席、室内環境を採用。協調作業時の主腕・副腕の干渉による機械の損傷を縮減する干渉防止機能(図 22)の開発と搭載(図 23)。

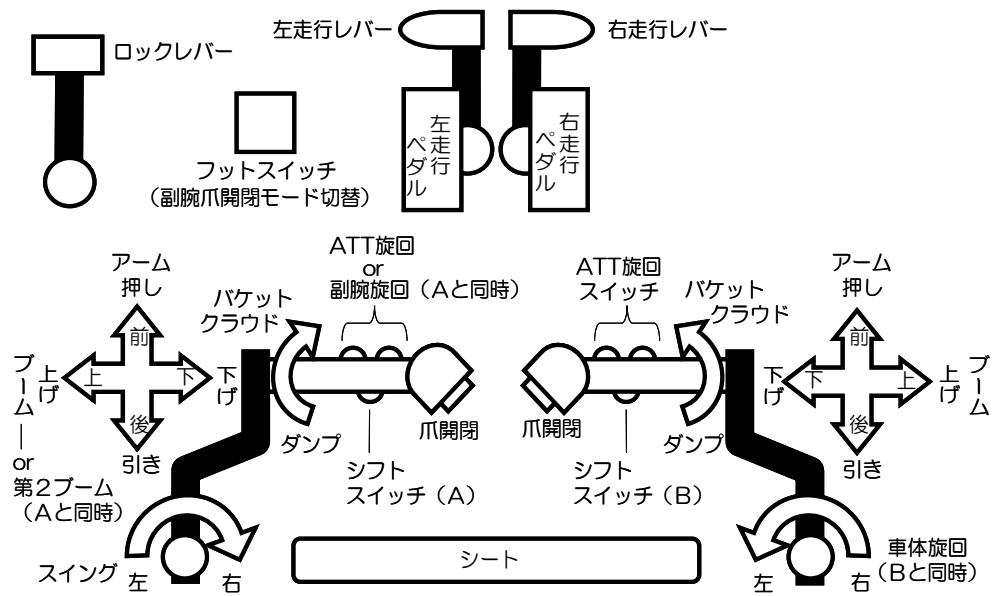


図 21 各操作レバーの機能



写真 13 搭載した操作レバー

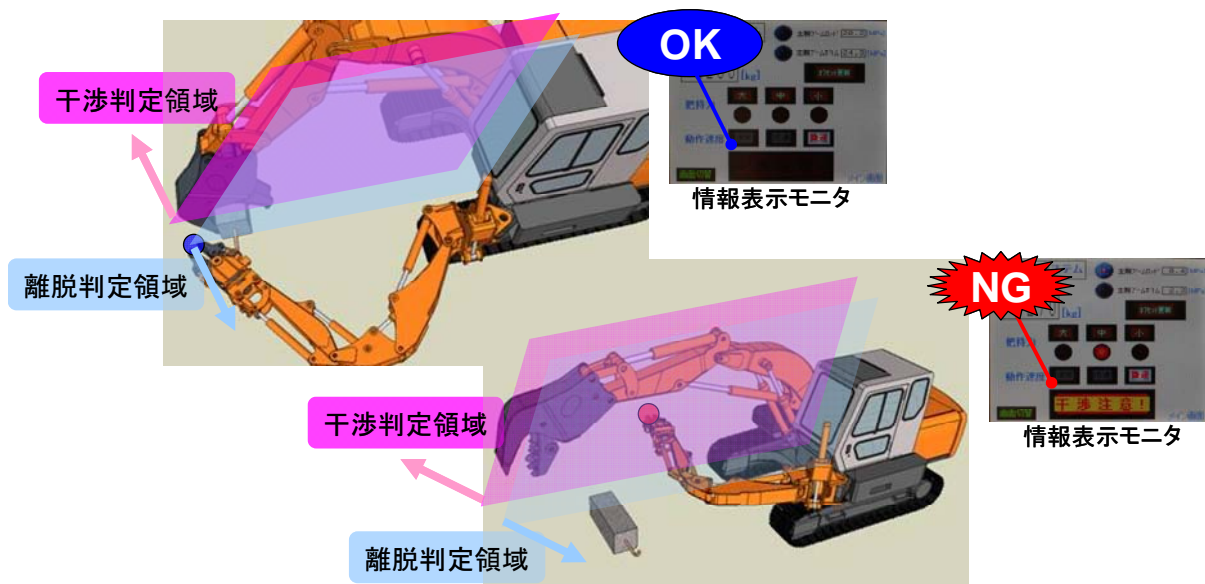


図 22 干渉防止機能



図 23 干渉防止等インターフェース



### ⑤達成状況

異なる 5 種類の廃棄物を判定可能な統合化システムを試作した。また、廃棄物一次判定システム、対象物センシングシステム、把持力調整機能、廃棄物質量測定装置、作業員識別システム等を双腕マニピュレータに試験的に実装し、中間評価実験（写真 23、24）を実施した。



写真 23 中間評価実験試験フィールド



写真 24 現地実査状況

中間評価実験の結果、以下の中間目標を達成した。

①「建物解体時に発生する廃棄物のうち、異なる 5 種類以上の材質を選別判定できること。」

解体作業を対象とした建物で使用されている物性の異なる材質（コンクリート塊、廃プラスチック、木くず、金属くず、紙くず等）を特定し、特定された材質を選別するための判定手法を開発した。

②「建物解体時に発生する廃棄物を素材料毎に分離できること」

建設機械レベルの大きさ、力を持つマニピュレータの開発を想定し、上記技術項目に関する要素技術を開発した。

## 最終成果目標

「中間目標で開発した要素技術を適用したプロトタイプ・マニピュレータ等を開発し、建物解体時に発生する実際の廃棄物（主として中間目標で対象とした材質）を選別判定し、廃棄物を移送できること。」

具体的には、マニピュレータにより複合廃棄物の分離作業を行い、5種類以上の材質を選別し、選別の精度（素材ごとの抽出率）は60%以上とする（図24）。開発にあたっては実際の現場において実証実験を2回以上実施する。

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。  
を達成するため、

### ①「廃棄物材料の判定手法の研究開発」

廃棄物解体、選別に関する実態調査、および廃棄物材質の判定手法・移送装置の研究開発を実施する。

### ②「解体・選別作業の効率化、安全、高信頼性技術の研究開発」

実証ロボットの仕様策定、ハンドリングのための作業対象の状態センシング、施工に必要な作業分析結果を基にし、作業対象の状態との関係で最適なハンドリング計画の策定、および安心安全の技術に関し研究開発を実施する。

### ③「建設機械相当の耐環境性能を持つ次世代マニピュレータの開発」

機械本体および施工現場の環境認識技術、多自由度、多腕マニピュレータ、多機能ハンドの開発、耐環境性能の検証を実施する。

### ④「現場作業員でも使用可能なヒューマンインターフェースの開発」

複数腕、複数軸の同時操作を容易にする操作系、および操作者への最適な情報提示技術の研究開発を実施する。

### ⑤「実証実験・作業性評価」

システム統合、中間評価実験、最終評価実験を実施する。

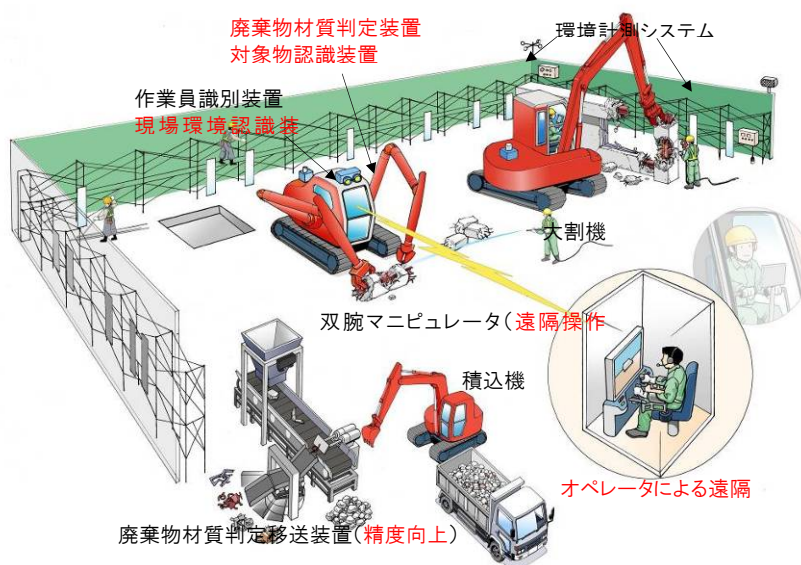


図24 最終試験フィールドのイメージ

### 3) 成果の意義

本研究開発の成果は、廃棄物の分離を行う次世代マニピュレータと、廃棄物の選別を行う判定移送装置からなる RT 技術を駆使した新たな建物解体工法であり、現場への普及を図ることにより資源循環型社会を形成し地球環境保全に貢献する。

次世代マニピュレータは、従来の建設機械を多自由度、多腕化し、RT 技術を活用することでこれまでにない細やかな分離選別作業が可能となる。廃棄物判定移送装置は、不純物混じりで排出していたリサイクル材料を高精度で選別し、廃棄物の純度向上、再資源化の促進を図る。

本成果は、建物解体現場だけでなく産業廃棄物中間処理場や最終処分場などの廃棄物処理関連作業はもとより、激甚災害時の救助や復興などへの波及効果も期待できる。

### 4) 特許の取得状況

特許の名称	特徴・強み・新規性
双腕マニピュレータ 4 件	従来の油圧ショベルと同等の力を持つ主腕と根本部分で旋回、スイング動作を可能とする副腕を協調作業させることで、作業対象に対して任意の位置から作業を行うことが出来る。また、対象物の荷重計測結果を反映した移送速度や材質に合わせた把持力制御が可能である。副腕の先端には、鉄筋などの切断と細かいものを掴む二つの作業を可能とするアタッチメントを取り付けている。また、装置については、意匠登録済み。
廃棄物材質判定装置 1 件	画像による色差および明暗の差とエッジ抽出による形状の情報から、対象とする廃棄物の材質を判定する。非接触で可能であり、連続高速処理を可能性とする。
環境計測システム 1 件	建設解体作業時に発生する騒音や振動など値を発生源である建設機械へリアルタイムで通知し設定値超過時には出力を行い、騒音、振動等を抑制することが出来る。建設現場内をネットワーク化し、現場事務所と現場、近隣住民間の情報伝達を円滑に行うことが出来る。
空間情報表示装置及び支援装置 1 件	遠隔操作時に不足する対象物の情報を、ステレオカメラで取得した映像から体積を推定し、重心等を表示する。空間情報に関連付けられた画像情報を操作する方式でロボット又はオペレータの支援を行うことが出来る。

添付資料用 国内出願・国外出願

番号	出願日	出願番号	名称	発明者
1	平成20年3月31日	特願2008-092957	環境情報監視管理システム	東急建設(株)
2	平成20年6月3日	特願2008-146192	把持装置及び作業機	東急建設(株) 日立建機(株)
3	平成20年6月3日	特願2008-146230	解体作業機	東急建設(株) 日立建機(株)
4	平成20年8月4日	特願2008-200890	廃棄物の材質判別方法および材質判別装置	東急建設(株)
5	平成20年8月4日	特願2008-200896	作業機械	東急建設(株) 日立建機(株)
6	平成20年9月2日	特願2008-224340	空間情報表示装置及び支援装置	東急建設(株)
7	平成21年1月30日	意匠第1352404号	自走式双腕機	東急建設(株) 日立建機(株)

### 5) 成果の普及

学会発表

番号	発表者	タイトル	発表先	発表年月
1	後久卓哉、他5名	次世代マニピュレータによる廃棄物分離・選別システムの開発ーその1 開発の計画、目標ー	東急建設株式会社技術研究所報 No. 32	2007.2
2	後久卓哉、他9名	次世代マニピュレータによる廃棄物分離・選別システムの開発	ロボット学会学術講演会	2007.9
3	後久卓哉、他3名	次世代マニピュレータによる廃棄物分離・選別システムー開発の計画と目標ー	東急建設株式会社環境発表会	2007.11
4	後久卓哉、他1名	次世代マニピュ	東急建設株式会社技	2008.2

		レータによる廃棄物分離・選別システムの開発ーその2 建築物躯体解体における作業分析	術研究所報 No. 33	
5	中村 聡、他1名	建設系産業廃棄物選別の要素技術研究(その1)ー近赤外線分光法による廃棄物材質判定ー	東急建設株式会社技術研究所報 No. 33	2008.2
6	柳原好孝、他9名	解体現場における廃棄物分離・選別システムの開発	建築施工ロボットシンポジウム	2008.3
7	後久卓哉、他5名	建設現場における作業環境計測IRTシステムの開発	日本機械学会ロボテイクス・メカトロニクス講演会	2008.6
8	石橋英人、他3名	解体・スクラップ処理に適した双腕型作業機械の提案	日本機械学会ロボテイクス・メカトロニクス講演会	2008.6
9	中村 聡、他4名	建物解体現場における廃棄物選別システムの開発	日本ロボット学会学術講演会	2008.9
10	上野隆雄、他4名	建設現場における作業環境認識技術の開発	日本ロボット学会学術講演会	2008.9
11	遠藤 健、他4名	建物解体現場における作業対象物情報取得技術の開発	日本ロボット学会学術講演会	2008.9
12	後久卓哉、他5名	解体・スクラップ処理に適した双	日本ロボット学会学術講演会	2008.9

		腕型作業機械の開発		
13	柳原好孝、他8名	次世代マニピュレータによる廃棄物分離・選別システムの開発 第2報 統合化システム構成要素技術の確立	日本ロボット学会学術講演会	2008.9
14	加藤晃敏、他4名	無線による建設環境モニタリングシステム	東急建設(株)第9回環境発表会	2008.11
15	後久卓哉、他8名	次世代マニピュレータによる廃棄物分離・選別システムの開発	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	2008.12
16	中村 聡、他1名	建設系産業廃棄物選別の要素技術研究(その2) -L*a*b*表色系を使用した廃棄物材質判定-	東急建設株式会社技術研究所報No.34	2009.3
17	後久卓哉、他4名	次世代マニピュレータによる廃棄物分離・選別システムの開発-その3 中間成果概要-	東急建設株式会社技術研究所報No.34	2009.3

プレス発表

番号	タイトル	掲載紙	発表年月
1	無線通信による建設環境モニタリングシステム「環境ビジュアライザ」を開発	日経産業新聞、建設通信新聞、建設工業新聞他	2008.05.22
2	次世代マニピュレータによる廃棄物分離・選別システムを開発	建設通信新聞, 建設工業新聞, 建設産業新聞, 日刊工業新聞, 産業機械新報, 建設技術新聞, 日経産業新聞, 建築技術(雑誌)2009年1月号P56, 積算資料(雑誌)2009年2月号前文P20 ロボット Watch (Web サイト) ロボナブル (Web サイト)	2008.11.18

## 6) 実用化・事業化の見通し

### 1. 事業化シナリオ

昨今、ビル等の建築物は、耐用年数に達しているものや、耐震構造問題等により、その解体需要は年々増加してきている。現在は地上部からのロングブーム仕様の解体機による解体が一般的であるが、今後はより高層化すること、また、地上の敷地スペースが少ないことから、階上に機械を載せ順次上層階から解体を行う階上解体工法の比率が高くなっていく。解体工事は低コスト、短工期化に加え、安全性に優れ、周辺環境に配慮した新工法が求められている。当事業は、新たに開発した双腕マニピュレータと、廃棄物材質判定移送装置等を用いた新階上解体工法にて解体工事を実施するものである。事業は、要素技術毎の開発進捗に合わせて3つのフェーズに分けて行なう予定である。

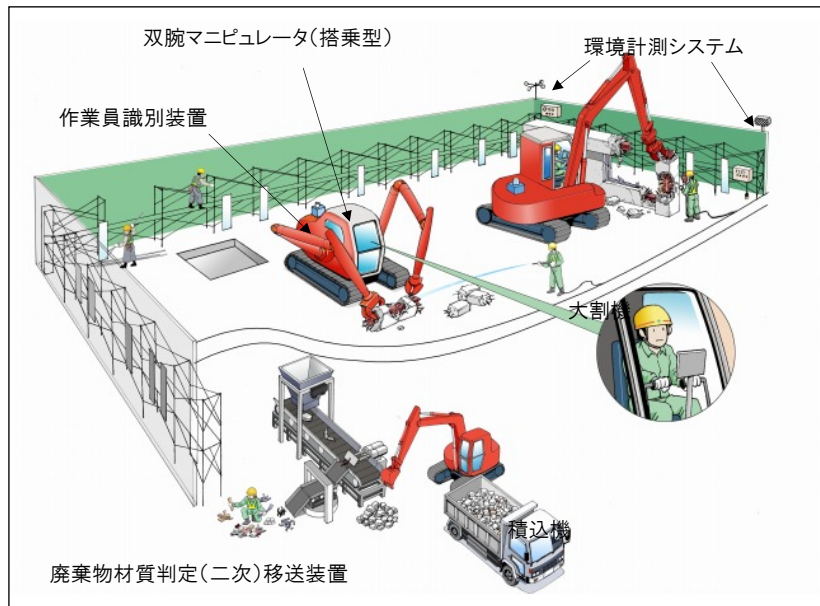
### 事業化商品 = 新階上解体工法を用いた解体工事

#### <第1フェーズ>

まず最初に、当該プロジェクト終了後の平成24年より、

- ・ 双腕マニピュレータ（搭乗型）
- ・ 廃棄物材質判定（二次）移送装置
- ・ 環境計測システム
- ・ 作業員識別装置

の4つの要素技術を統合システム化し、次世代の階上解体工法として東急建設が事業者（元請）となり解体工事を受注していく計画である。



第1フェーズ解体イメージ図

当工法は、今までの階上解体工事（在来工法）と比較し、工期短縮、コスト削減が可能であり、安価で安全、環境に配慮した施工を顧客（解体主）に対し提供することができる。顧客は工期の短縮とコストダウンが図れ、施工者は利益額の向上と安全が確保できる工法である。



また、平成 26 年には、建設業者、解体業者を中心とした工法協会を発足させ、実施料を支払うことで当工法が誰でも使用できる仕組みとし、解体業全体に広く展開させる方針である。

(第 1 フェーズ最終年度の平成 31 年には、市場の約 15% のシェアを想定する)

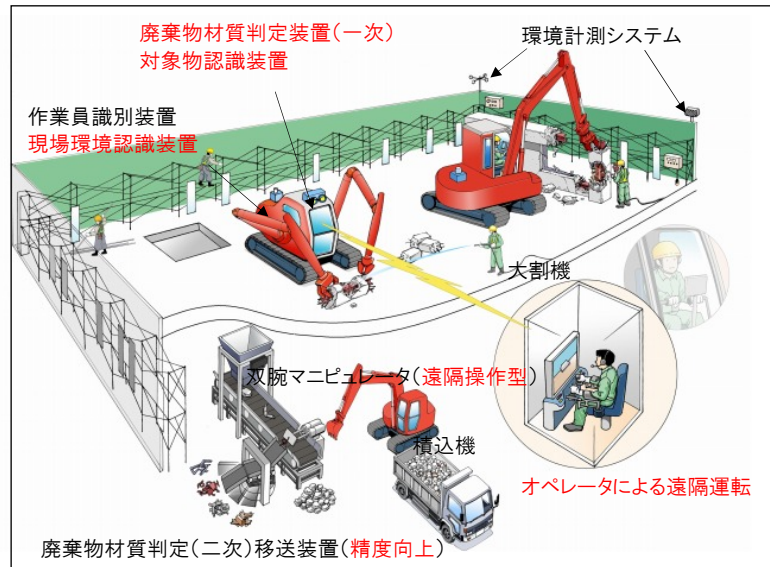
### <第 2 フェーズ>

平成 32 年頃には、第 1 フェーズで適用した要素技術に加え、

- ・ 廃棄物材質判定装置 (一次)
- ・ 対象物認識装置
- ・ 現場環境認識装置

等の要素技術を準じ開発し、オペレータによる遠隔運転が可能な解体工法とする予定である。また、廃棄物材質判定の精度も向上させ、作業員の削減を図る。

第 1 フェーズと比較し安全性、環境面がさらに向上し、工事受注金額の増加が期待できる。市場の 20% ~ 30% のシェアを想定する。

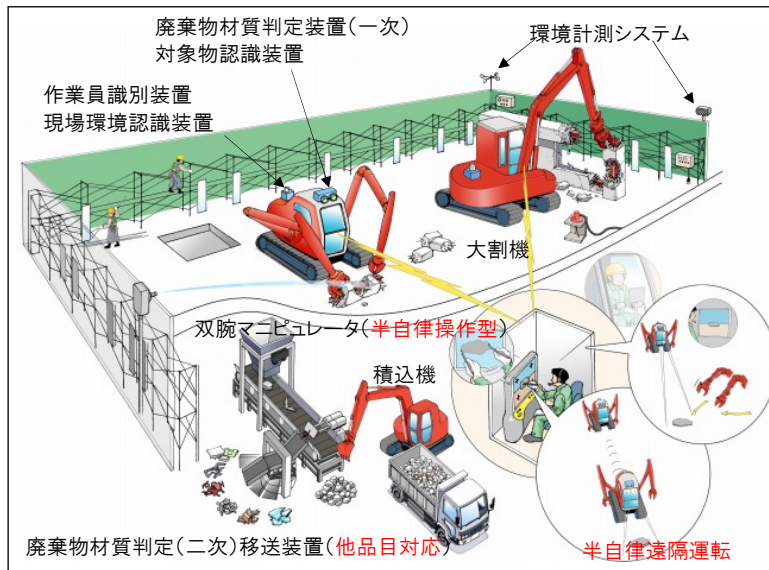


第2フェーズ解体イメージ図

### <第 3 フェーズ>

平成 37 年を目安に半自律遠隔運転により、オペレータ 1 人で複数台の機械を遠隔操作できる解体工法を実現させる。さらなるコストダウンと安全性を向上させ、市場の 30% 以上のシェア獲得を目指す。

当事業のターゲットは、統合システムとしては階上解体工事をメインとするが、技術の開発に合わせ、要素技術毎に中間処理施設、災害復旧現場、再資源化プラント等へ機器を導入していくことも視野に入れていく。



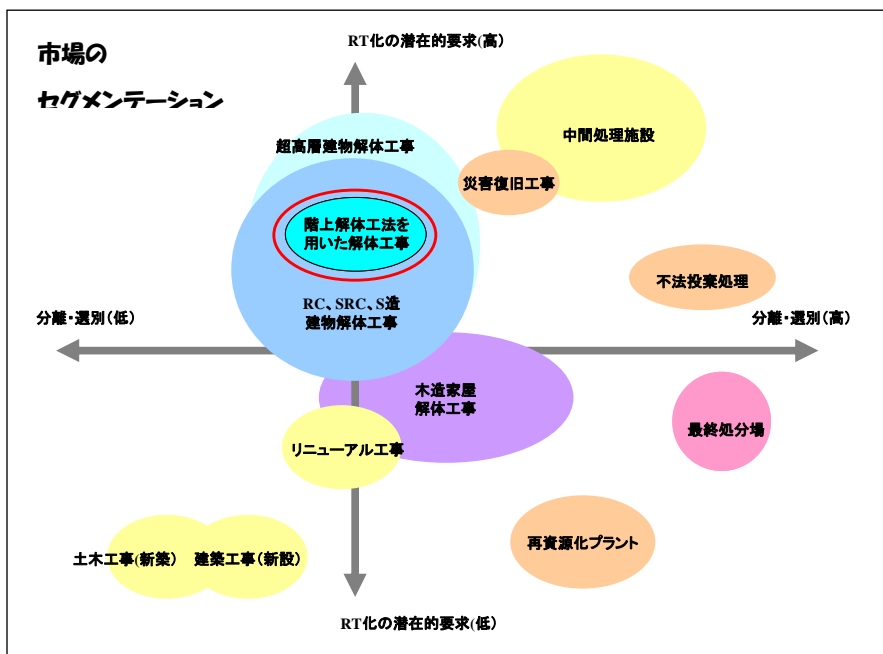
第3フェーズ解体イメージ図

## 2. 想定顧客・市場

### (1) 想定顧客のセグメンテーション

#### ■市場：階上解体工法を用いる建築物解体市場

システム全体としての市場は、建築建物の解体工事が想定され、その中でも階上解体工法を用いた解体工事が中心となる。しかし、双腕マニピュレータや廃棄物材質判定移送装置等個々の要素技術は、建物解体工事以外の中間処理施設、災害復旧、再資源化プラント等への導入も可能であり、市場の拡大は十分期待できるものである。



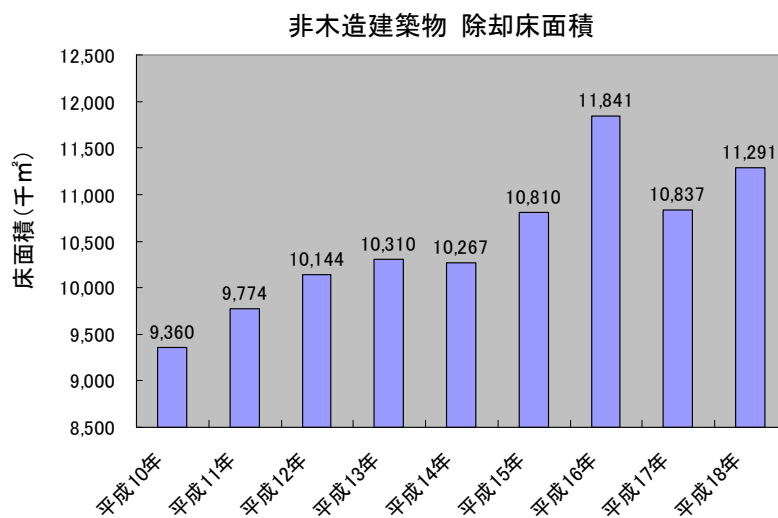
## ■潜在的ニーズおよびウォンツ

- ・ 工期の短縮
- ・ 工事費のコストダウン
- ・ 環境負荷の低減（騒音、振動、粉塵）
- ・ 安全性の向上
- ・ 機械の能力UPと軽量化
- ・ 多機能機械の開発
- ・ 廃棄物の選別が重要

### （2）市場規模と根拠

#### 非木造建築物の解体市場の推測

非木造建築物の解体市場は年々増加傾向にあり、平成18年には、11,291千㎡の除却床面積になっている。



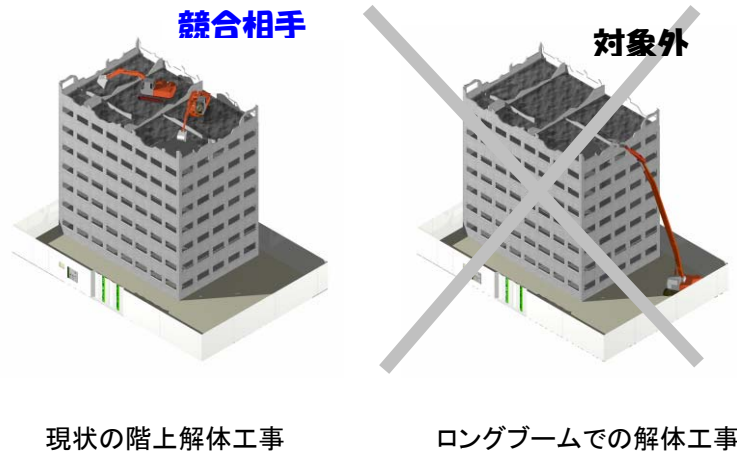
出典：「建設統計要覧」国土交通省総合政策局情報管理部建設調査統計課監修

平成10年から平成18年までの平均増加率は約2.5%であり、事業化開始予定の平成24年の除却床面積は、同率で増加すると約13,000千㎡に達しているものと想定される。

### (3) 競合状況

#### ■競合相手：現状の階上解体工事（在来工法）

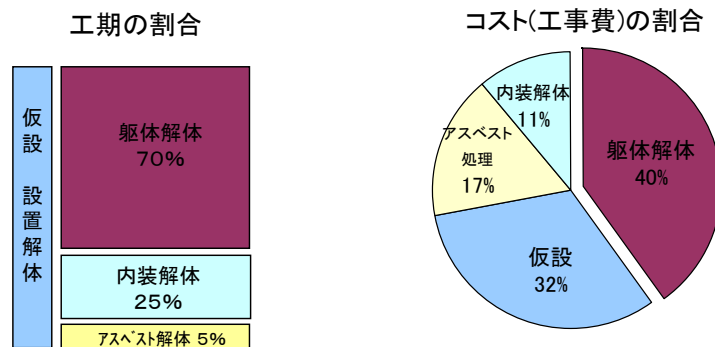
当事業（新工法を用いた解体工事）は、階上解体市場をターゲットとするため、ロングブーム仕様の解体機を用いての解体工事や大型機械を導入しての土間解体工事等は直接的な競合相手とはならない。



#### ■競合技術の分析

##### <作業分析>

解体作業における一般的な工種は、仮設工、アスベスト除去工、内装解体工、躯体解体工（階上解体＋地下解体）等である。その工期およびコストの割合は下図のとおりであり、工期、コスト共に**躯体解体作業の比率が大きく、作業の効率化が望まれる。**



- ・仮設の設置解体は、他工種と平行作業で行われることが多く、割合からは除いている
- ・工期、コスト共に東急建設の解体工事 4現場の平均値にて算出

躯体解体における現状の階上解体工法の技術は、汎用機械である油圧ショベル（バックホウ）に油圧ブレーカや油圧破碎機等のアタッチメントを付け替えながら実施する。

作業は一般的には、大割作業、小割作業、選別作業に大きく区分でき、大割機、小割機、選別機、積込機の4台の重機および5名の作業員にて実施される。（オペレータ4名を加えると作業員数は9名）

### 3. 波及効果

#### ①次世代マニピュレータ

- ・自動化、ロボット化が進まない建設業での RT 浸透の起爆剤として期待。労働生産性向上を目指す。
- ・地震、津波時の災害復旧作業や、このとき発生する大量の廃棄物処理への適用による、危機管理、環境、衛生面での社会貢献

#### ②判定システム

細かな材質判定の実現により、ゴミ拾いロボット等サービスロボットへの技術供与。