

## 2-4 情報収集用災害対応ロボットのための通信技術開発

### 2-4 Development of Communication Technology for Search and Rescue Robots

羽田靖史 滝澤 修

HADA Yasushi and TAKIZAWA Osamu

#### 要旨

既存の無線アドホック通信が有する帯域不足、信頼性低下、遅延増加、端末位置の制限等の問題点を解決する有線・無線ハイブリッドアドホックネットワークを提案・設計し、シミュレーションにより有効性の確認を行った。またこれを災害対応ロボット群の長距離遠隔操縦に適用するため、実システムを試作した上で地下街等において実証実験を行い、約700mの長距離遠隔操縦を実現した。これにより、従来困難であった危険区域の長距離探索活動が可能になった。

Conventional wireless ad-hoc network has many restrictions such as low rate, low reliability, delay of transmission, and restriction on node positions. In order to solve these problems, we propose new concept network; wired-wireless hybrid ad-hoc network. Efficiency of the new concept network has been evaluated by simulation. We adopted the network to long-distance remote control of rescue robots. Field experiments using prototype system have been frequently performed, and we achieved long-distance (700m) remote control of rescue robots. Thereby, the long-distance search activities of danger area were attained.

#### [キーワード]

ロボット, 無線アドホック通信, レスキュー Robot, Wireless Ad-hoc Network, Rescue

## 1 はじめに

大規模災害では、要救助者が多数発生する。その場合、救助はもっぱらレスキュー隊員が行うことになるが、救助作業の前に、狭隘や汚染物質により隊員が接近できない場所の状況把握のために、探索ロボットを併用することが有効である。いわゆるレスキューロボットという用語があるが、ロボットがレスキュー隊員の代わりに要救助者を確保して救出運搬作業を行うところまでは、まだ実用化されておらず、レスキューロボットとは現状では、状況把握のためのカメラや各種センサーを取り付けた探索ロボットのことを指す場合が多い。図1に、探索ロボットの概念を示す。

NICTでは、平成14年度から文部科学省の委託研究「大都市大震災軽減化特別プロジェクト(レ



図1 探索ロボットの概念

スキューロボット等次世代防災基盤技術の開発)」平成15年度から総務省戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE)による委託研究「遠隔ロボットを用いた災害時マルチメディア情報収集技術に関する研究開発」の研究分担機関として、探索ロ

ロボットを制御するための情報通信技術の研究開発に取り組んできた。そしてそれらの経験を踏まえ、防災・減災基盤技術グループは、平成18年度に始まった、NEDO 委託研究「戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト・被災建物内移動 RT (ロボットテクノロジー) システム」(特殊環境用ロボット分野)の研究開発プロジェクトの1つとして採択された、「閉鎖空間内高速走行探査群ロボット」(以下、NEDO プロジェクトと呼ぶ)(図2)に参加し、その中の通信部分の研究開発を分担して取り組んできた。

NEDO プロジェクトは、田所諭東北大学教授を研究代表者として、特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構(以下 IRS)、東北大学、独立行政法人産業技術総合研究所、独立行政法人情報通信研究機構(以下 NICT)、株式会社シンクチュープ、ビー・エル・オートテック株式会社、バンドー化学株式会社、株式会社ハイパーウェブ

の8機関を、委託先機関として開始された。また千葉工業大学の小柳栄次教授や、岡山大学の前山祥一講師など、他大学のロボット研究者も、IRS のメンバーとしてプロジェクトに参加した。NEDO プロジェクトは、実用化さらには産業化を始めから強く意識した経済産業省系のプロジェクトであり、開発システムの安定性や堅牢性を重視した研究開発を進めてきた。そして、IRS-U(国際ナショナル・レスキュー・システム・ユニット)と呼ばれる、ボランティアとして個人の意思で参加する消防・救助・救急隊員で編成されたレスキューチームを結成して、開発システムの評価を繰り返し、操作性向上の工夫を重ねて、実用化を目指してきた。NEDO プロジェクトの活動の経過については、本特集号の、1 はじめに ～防災・減災基盤技術グループが目指したこと～[5]の3を参照されたい。

本論文では、NEDO プロジェクトにおいて防

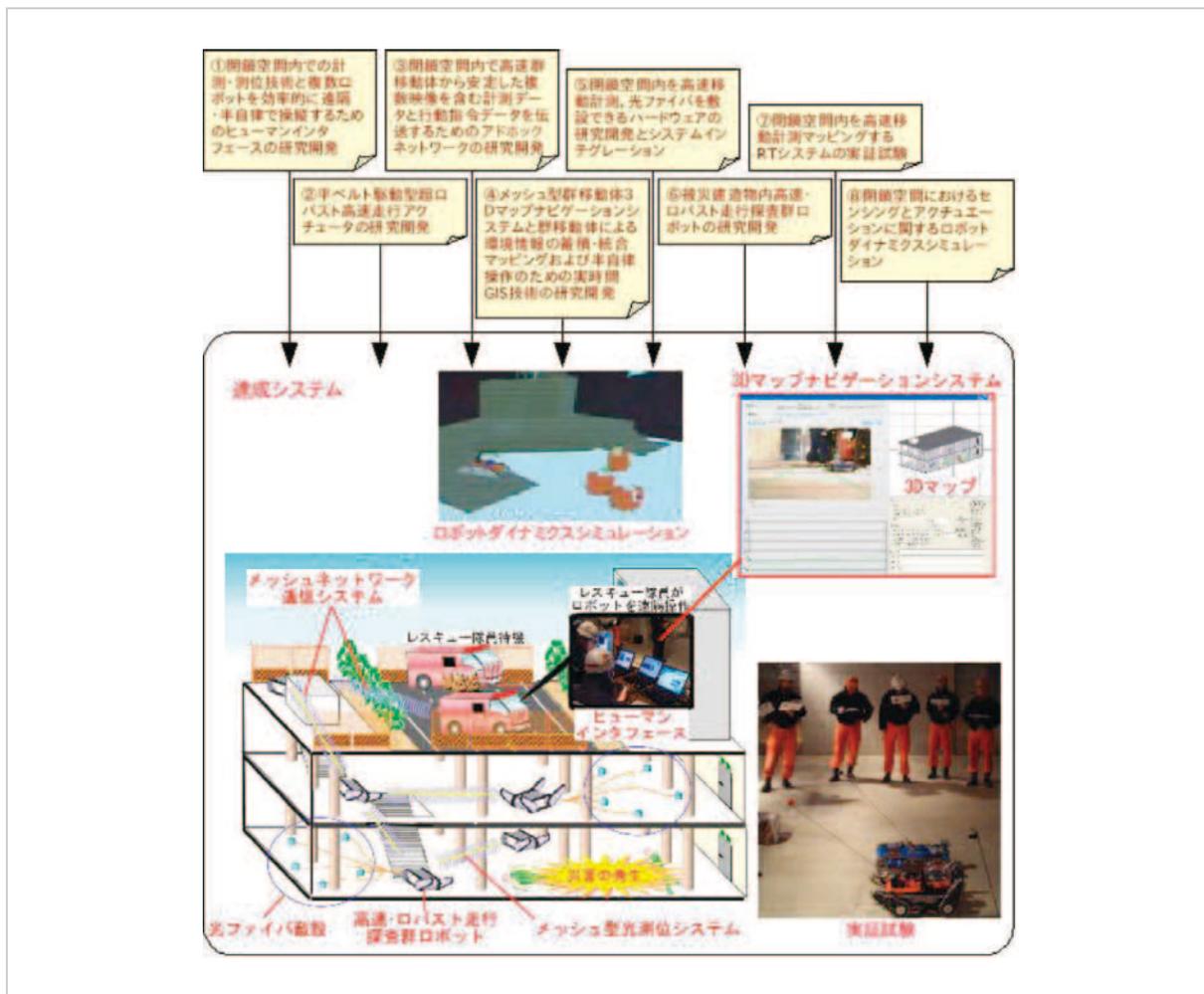


図2 NEDO プロジェクト「閉鎖空間内高速走行探査群ロボット」の全体概要

災・減災基盤技術グループが分担した通信部分を中心に、5年間の研究開発成果を述べる。

## 2 プロジェクトの目標

NEDO プロジェクトでは、「被災建物内に複数の探索ロボットを投入し、700 m 以上離れたオペレータステーション(操作卓)に、複数の遠隔操作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するための通信技術」を実現することが目標とされた。この目標は、無線通信環境にとって不利な閉鎖空間内であること、700m という長距離通信であること、複数のリアルタイム映像というブロードバンド通信であることを同時に満たすという、かなりチャレンジングな目標である。そこで、以下の技術課題を設定し、これらを満たす通信システムの実現を目指した。

- 技術課題1 探索範囲(距離) … 700m の地下街を含む広域領域を対象とすること。
- 技術課題2 規模(拡張性) … 上記広域領域内に分散した10台以上のロボットが同時に活動可能とすること。
- 技術課題3 通信サービスの安定性… 通信途絶を起こさず、低遅延であること。
- 技術課題4 システムの耐障害性… 冗長性を持ち一部が故障してもアプリケーションは継続可能であること。
- 技術課題5 簡便性… 電源を投入するだけで、ネットワークが自動構築されること。

## 3 有線・無線ハイブリッドアドホックネットワーク

### 3.1 既存通信方式の問題点

ロボット群を遠隔操縦するために考えられる通信方式を比較検討した結果を、表1に示す。有線方式、インフラ利用方式、無線方式が考えられる。有線方式は、絡まる、引っかかる、重い等の、ケーブルの物理的な制約を受ける。携帯電話等を用いたインフラサービス利用方式は、災害時には基地局の損壊や輻輳などにより利用できないことが考えられる。通常の無線LANや特定小電力を用いた無線方式は法規制により電力の制約を受け、特に地下街では減衰のため50～100m程度の通信距離しか実現できない。

一方、端末やロボット間でお互いの通信を中継し回線を構築する無線アドホックネットワークの研究が盛んに行われている。しかし、これを移動ロボット群の遠隔操縦に適用するには以下の問題点がある。

- 通信速度の低下… 同一通信範囲内では複数端末の通信は時分割となるため転送速度が低下する。また他の中継のため通信容量が圧迫されるため、複数の無線帯域を使っても2～3台(8～10Mbps)程度が限界である(図3左)。
- 信頼性の低下… 無線中継を繰り返すことにより信頼性が低下する。
- 中継端末の運搬… ロボットは端末を運搬するため重量が重くなり運動機能が低下する。

表1 遠隔操縦ロボットの通信方式の比較

	通信速度	通信距離	通信遅延	装備重量	災害時信頼性	機動性	柔軟性	冗長性
有線LAN	◎	◎	◎	×	◎	×	×	×
携帯電話網(3G)	△	◎	×	○	×	◎	○	×
無線LAN	○	×	△	○	○	○	○	×
無線マルチホップ通信	×	○	×	△	△	△	△	○
有線・無線ハイブリッド	○	◎	◎	△	○	○	○	◎

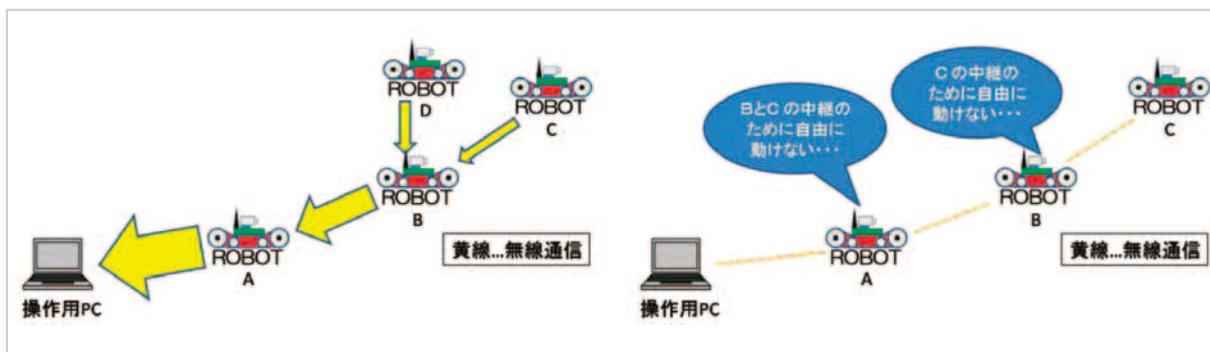


図3 無線アドホックネットワークの問題点(左: 中継容量の増加、右: 移動の制限)

- 中継端末のバッテリーの影響… 中継端末の電源が切れればロボットの通信が停止する。
- 位置関係の制限… 通信中継のため、端末やロボット相互間で位置の依存関係が起きる(図3右)。

一般的な無線アドホックネットワークは無線のみで構成されているが、被災現場では必ずしも平坦な場所ばかりを想定できず、階段などの偏波面を合わせるのが困難な環境や、壁が多くフェージング干渉の影響が大きい環境などでは、安定的な無線リンクを実現するのは容易ではない。一方、有線ネットワークは伝送容量や通信安定性の点で明らかに無線システムに比べて優位であると言えるが、災害現場でケーブル敷設を行う必要があるという課題を有する。しかし一度ケーブルを敷設してしまえば、有線ネットワークでは数100Mbpsの通信容量を提供可能である。現在、一般利用可能な無線ネットワークのなかで最も伝送容量が大きい無線LANシステムにおいても数10Mbpsの通信容量に留まる。無線または有線のいずれの方式が良いかは、災害現場の状況、ミッション遂行に与えられた時間などによって変わると考えるべきであり、いずれかが一義的に優位であるとは言えない。

そこで我々は、表1の最下段に示す「有線・無線ハイブリッドアドホックネットワーク」という新しい方式を提案する。これは、有線の敷設が容易である場所では有線を敷設し、その周辺に無線アドホックネットワークを設置することで、適材適所に有線と無線を組み合わせる方式である[1][2]。

### 3.2 提案方式

提案方式では、対象とする移動ロボット群を、

ケーブル敷設ロボットと、自由探索ロボットの2種類に分ける。

ケーブル敷設ロボットは、中継端末(アドホックノード)を一定間隔おきに接続したケーブル(アドホックケーブルと呼ぶ)を敷設しながら環境内を進む、インフラ構築型のロボットである。このロボットはケーブルの敷設が目的であり、詳細な探索活動は行わないものとする。ロボットは内部にアドホックケーブルを持ち、これを走行しながら順に繰り出していくことで敷設していく。このロボット自身は、自らが敷設するケーブルを用いて、操作卓から有線LAN経由で操縦される。

自由探索ロボットは、ケーブル上のノードにアドホック無線接続しながら環境内を自由に行動する探索型のロボットである。自由探索ロボットと操作側PCとの通信は、最寄りのアドホックノードに接続する部分のみ無線アドホックネットワークを用い、ノードから操作PCまでは高速な有線LANを用いる。これにより自由探索ロボットはケーブルの物理的な制約を受けず、また無線ホップ数の少ない通信を行うことが出来る。また、自由探索ロボット自体も無線アドホックノードの機能を持ち、複数のロボットを中継する無線マルチホップ通信を行うことで、アドホックケーブルから離れた場所を探索することも可能となる。探索処理を実施しながら同時並行で探索領域をオンデマンドで拡張可能である。さらに万一ケーブルからの無線通信が届かないエリアまで進んで操作不能になった際には、他の自由探索ロボットが間に入って中継することにより、通信を再接続させることが出来る(図4)。

既存通信方式に対し、本提案方式の優位性を整理すると、以下の通りとなる。

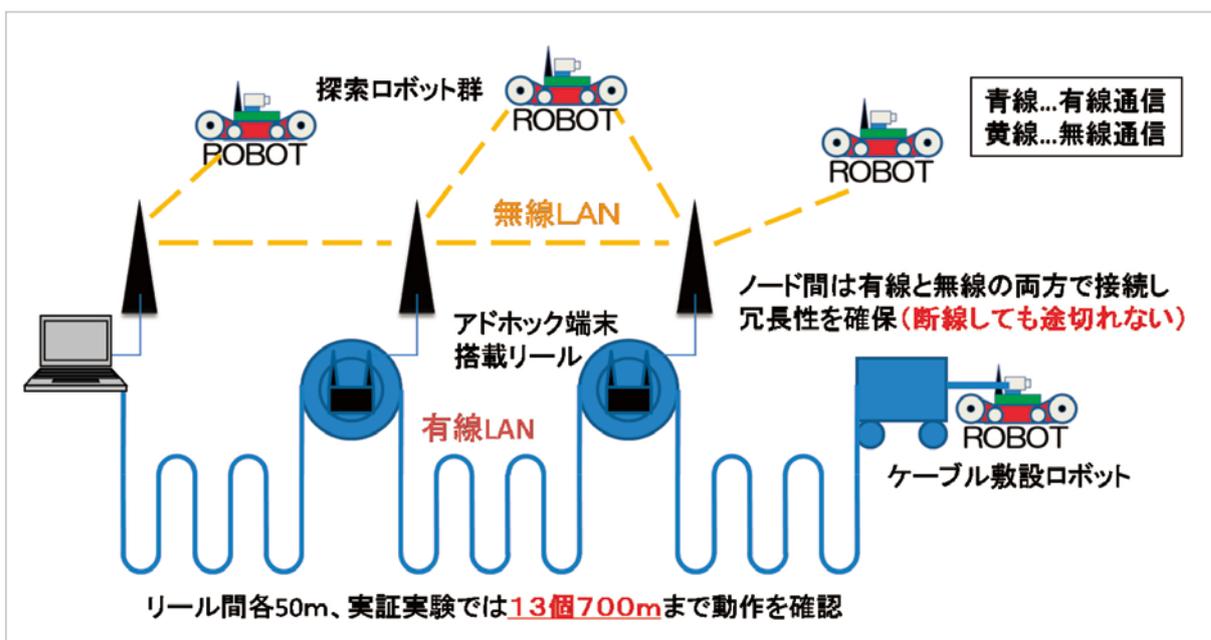


図4 有線・無線ハイブリッドアドホックネットワーク

- 無線通信量の負荷軽減… 各自由探索ロボットの無線通信は最寄りのアドホックノードまで済み、無線LANのみのアドホックネットワークのように無線帯域を圧迫しない。
- 信頼性の向上… アドホックノードから操作卓間は高速大容量で信頼性が高い有線通信を用いることが出来る。
- 行動自由度の向上… ロボットが他のロボットの通信を中継することが少なくなり、比較的自由的な行動が可能となる。
- 高い冗長性… 途中でケーブルが断線したとしても、断線したケーブルの両端のアドホックノードが無線でも接続されているため、通信は停止しない。またアドホックネットワークの機能を兼ね備えているため、自由探索ロボット間をマルチホップさせることによりさらに冗長性を高めることが出来る。

ケーブル敷設ロボットにより敷設された基幹の有線ネットワークを通信バックボーンとして、その周囲に無線アドホック機能を搭載した自由探索ロボットが展開することで、図5に示す特徴、すなわち「規模」と、必要に応じて探索範囲を柔軟に拡大可能な「拡張性」の両要件を実現する。

有線・無線ハイブリッドアドホックネットワークでは、ケーブル敷設ロボットが敷設したケーブルの周辺を他のロボットが自由に行動できる特長

があるが、一方、ケーブルの一定間隔おきに中継用ノードを設置する必要があるために、機構が複雑になるという課題がある。

### 3.3 評価

提案したシステムを用いて、2007年12月に地下鉄仙台駅、2008年6、8、9、11月に神戸三宮地下街等で実証実験を行い、最終的に5台のロボットを同時に遠隔操縦させ、うち2台は683mの遠隔操縦を実現した(図6)。但しこの実験ではケーブルの敷設は人手で行った。

ローミング時における通信切断は、ロボット操縦者にとっては深刻な問題であり操縦不能を招くこともある。そこで、2010年9月に東京消防庁立川訓練場で、一般の無線LANアクセスポイント(以下AP)を使用した場合と、当システムを使用した場合の、ローミング性能に関わる比較検証を実施した。

図7に示す構成で、一般のAP機器(NEC Aterm)を有線LAN接続し、ロボットには無線LANクライアント機を搭載して実験を行った場合、図8に示す通り、数十秒にも及ぶ通信切断が発生し、ロボットは長期間停止した。性能はクライアント機器の仕様に大きく依存した。L2ブリッジ機能を使用することになるためトポロジー変更に伴う場合は経路更新に時間を要した。



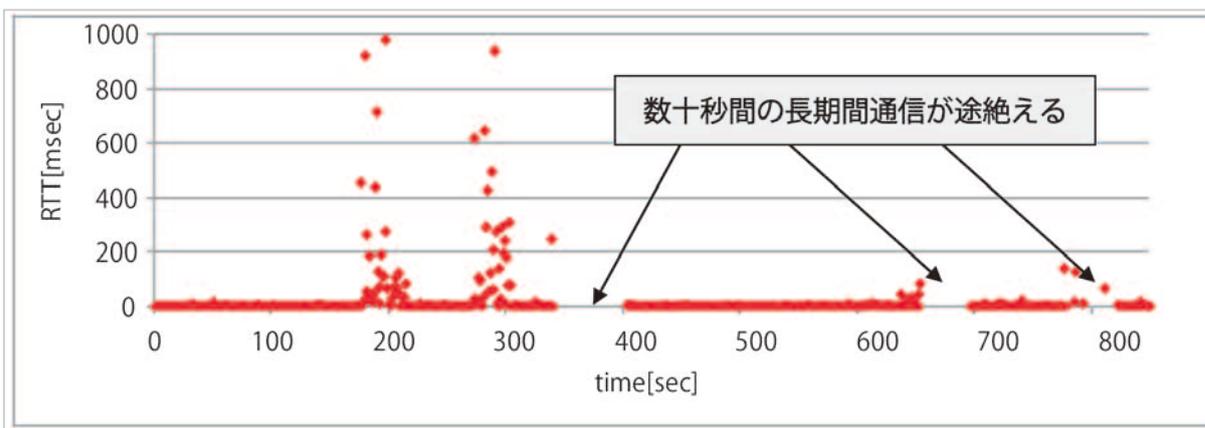


図 8 一般の WLAN AP を使用した場合のローミング性能検証結果

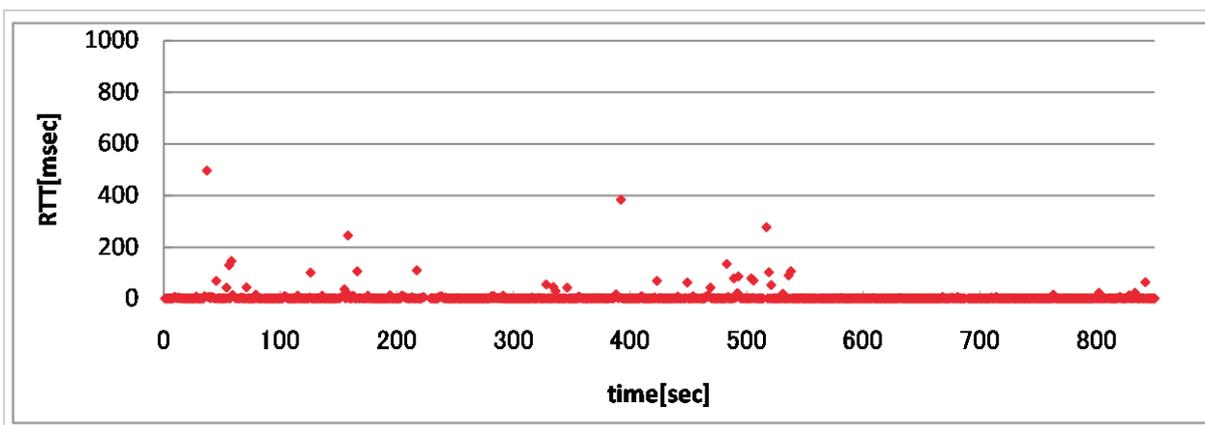


図 9 有線・無線ハイブリッドアドホックネットワークを利用した場合のローミング性能検証結果

それに対し、同じ図 7 の構成で、無線 LAN AP 機器及び無線 LAN クライアント機器の代わりにアドホック通信機器を使用した場合、図 9 に示す通り、ローミング時に 500ms 程度の通信遅延が発生することがあるが、通信切断はほとんど発生しなかった。

## 4 ネットワークミドルウェア

### 4.1 概要

広域工事現場や屋外空間で既に使用実績のあるアドホックミドルウェア (NEDO プロジェクトの研究分担機関の 1 つである (株) シンクチューブが 2001 年より研究開発し事業展開中) をベースに、有線・無線ハイブリッドアドホックネットワーク上で多数カメラ映像伝送を実現するために、以下の拡張機能開発及びその性能検証を行った。

**技術課題 1: ロボット移動中における操縦用映像の品質向上**

**技術課題 2: 操縦者支援のための映像遅延低減に関する取組み**

**技術課題 3: 5GHz 対応 (無線伝送容量の拡大)**

### 4.2 技術的内容

本研究開発で使用したミドルウェア (MeshCruzer) では有線 LAN 部分のリンクを、信頼性の高い仮想的な無線リンクとして扱うことで、複数の無線領域と有線領域が任意に混在する「仮想的な単一アドホックネットワーク」を実現している。また無線リンクを経由する伝送経路と有線リンクを経由する伝送経路とが存在する場合には、無線電波干渉を抑制しネットワークの総伝送容量を可能な限り最大化するために、有線リンクを優先的に採用する仕組みを実装している。このような設計に基づき敷設済みのケーブルが断線した際においても、瞬時に代替可能な無線リンクを探し出し、数秒以内に代替経路へ変更し、通信サービスをほぼシームレスに継続可能となっている。これらの機能は

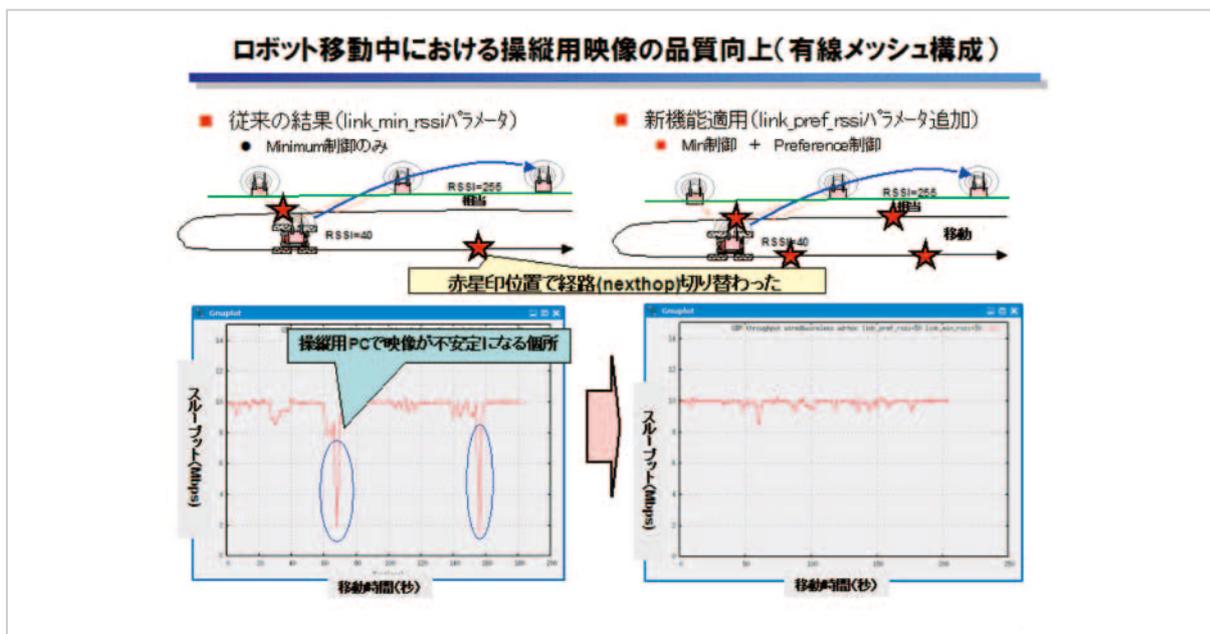


図 10 ロボット移動中における経路切替え時の通信性能検証結果

実証実験で確認している。

#### 4.2.1 技術課題 1：ロボット移動中における 操縦用映像の品質向上

2008年11月に行った実験において、ロボット操縦者(消防隊員)から経路切り替え時の映像遅延について報告があり、有線アドホックネットワークに沿って移動するロボットにおける経路切り替え方式の分析、検討、ならびに改良開発を行った。その結果、図10に示す改善効果を確認した。

#### 4.2.2 技術課題 2：操縦者支援のための映像 遅延低減に関する取組み

ロボットには複数のカメラ及びセンサーが搭載されており、これらのデータはネットワークを経由して全て操縦者またはサーバのもとへリアルタイム伝送されている。ロボットの移動に伴い、時々刻々通信状態は変化しており、無線リンクが不安定な状況に陥る。またロボットが中継ノードから離れすぎた場合などは、これらの大量のデータを伝送することは過負荷となり、遅延、ゆらぎ、映像停止などの現象を発生させることになる。

この課題を解決すべく、通信負荷及び通信遅延を低減するソフトウェア“UDP エージェント”を開発した。従来はTCPでしか利用できなかったカメラ映像を、通信機器に搭載したUDPエージェントでプロトコル変換することにより、上記課題の解決を図り、図11に示す改善効果を確認した。

#### 4.2.3 技術課題 3：5GHz 対応（無線伝送容量の拡大）

無線LANシステムは、電波法により2.4GHz帯及び5GHz帯で免許不要局として使用可能である。2.4GHz無線LANはオフィス、店舗、住宅などの広範囲で使用されており、商業ビルの特定場所における電波利用状況測定では、図12に示すように、2.4GHz帯を使用する機器はチャンネル1～14を合計すると数十台存在するが、5GHz帯を使用する機器はほとんど存在しない。多くの場所ではこの例と同様と考えられ、ロボットによる地下街探索での5GHz帯活用は有効であると考えられる。

5GHz帯はW52(5150-5250MHz)、W53(5250-5350MHz)、W56(5470-5725MHz)に分けられており、W52とW53は原則屋内使用のみ可能、W56は2007年1月より屋内外で使用可能となった。W53とW56ではDFS(Dynamic Frequency Selection: 動的電波周波数選択)により衛星レーダとの干渉を避けることが義務付けられており(干渉を検出した場合に回避動作を行う)、場合によっては通信の途絶等が起り得るため、NEDOプロジェクトではW52に限定し5GHz帯対応を行った。

#### 4.3 評価

有線・無線ハイブリッドアドホックネットワーク

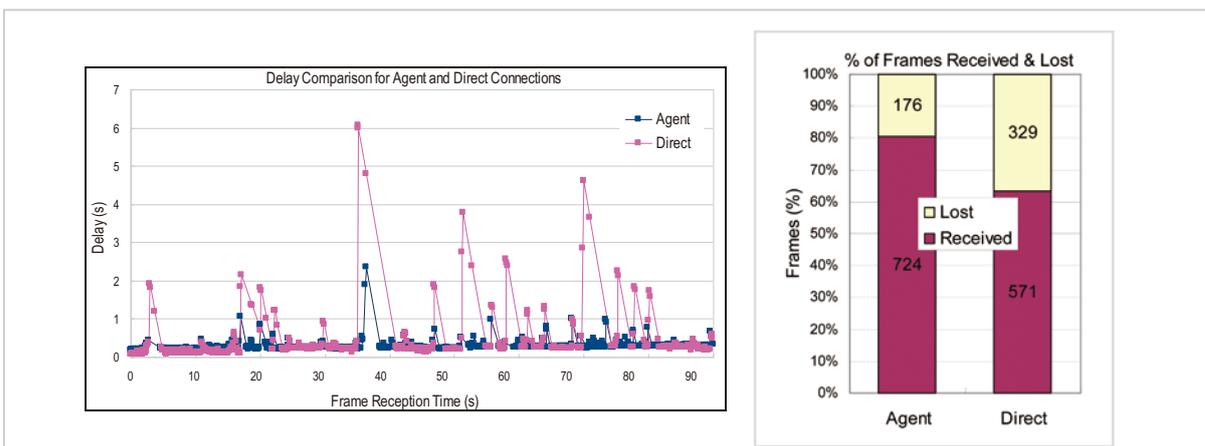


図 11 操縦者支援のための映像遅延低減の結果

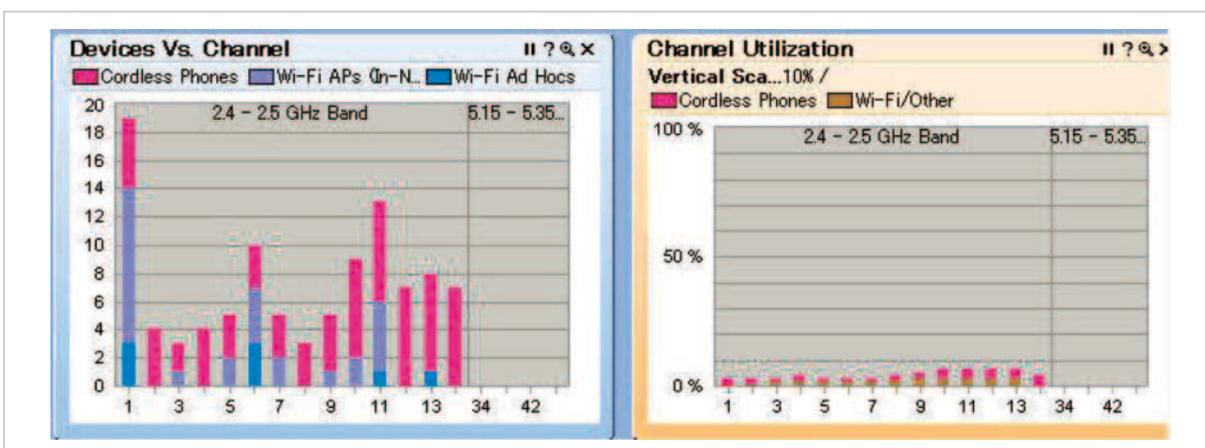


図 12 商業ビルにおける 2.4 と 5GHz 使用状況調査結果の比較 (左: 機器台数 右: 使用率)

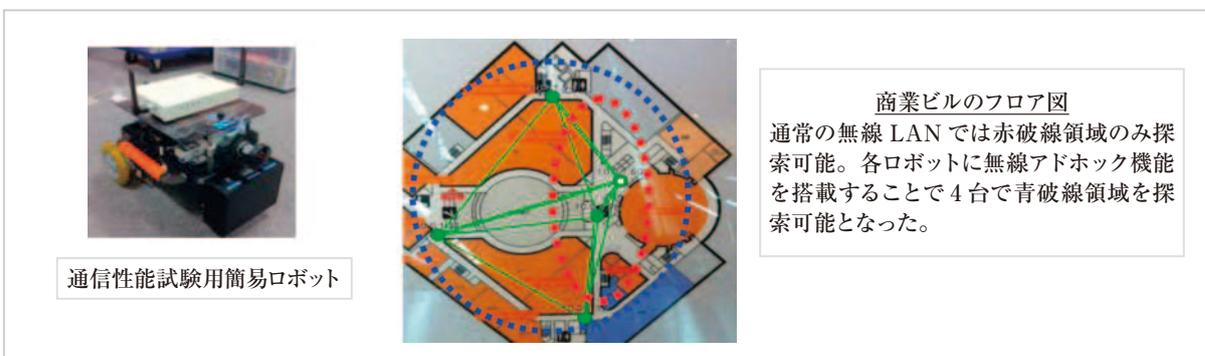


図 13 商業ビルにおける無線アドホックによる 4 台ロボットの遠隔操縦試験

クについては 2008 年度から 2010 年 11 月まで実証実験を繰り返し実施し、東京消防庁立川訓練場における最終デモを含めて、安定した通信機能を提供できることを確認した。これらの試験では中継ノードを実験者が手作業で設置しており、敷設ロボットによる自動敷設ではない点が、残された課題である。

一方、有線を使用しない無線のみによるロボッ

トの遠隔操縦については、2.4GHz と 5GHz の 2 本のアンテナを搭載した「通信性能試験用簡易ロボット」を使用し、約 100m 四方の規模の大型商業ビルのフロア内探索を目的とした実験を行い、探索範囲について図 13 に示す改善効果を確認した。

以上の通り、4.1 の冒頭に掲げた 3 つの技術課題は解決したと考える。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、実験レベル

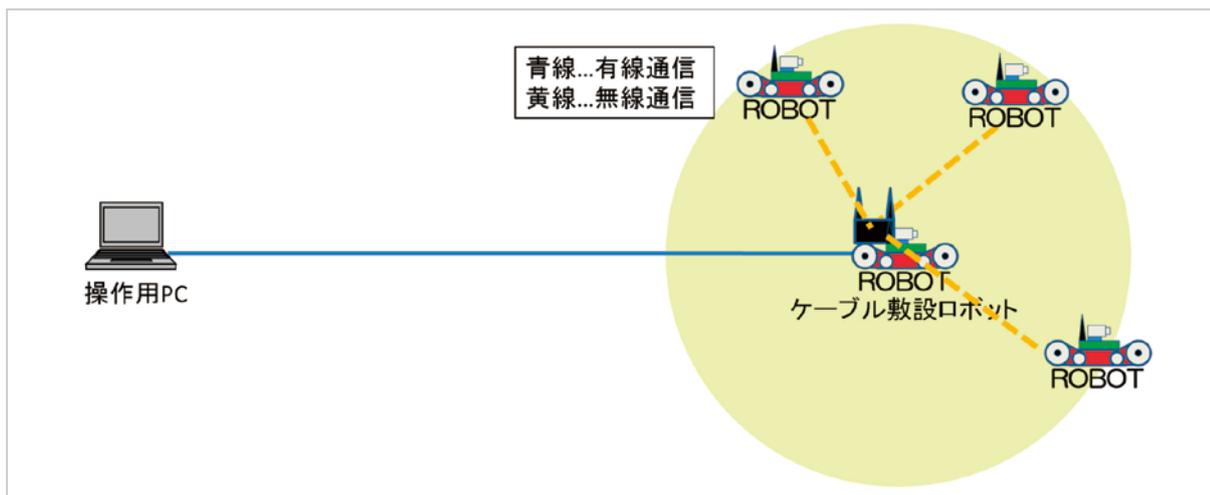


図 14 LAN ケーブルと無線基地局を敷設するロボットシステム

ではなく実用レベルに早い段階で到達しており、NEDO プロジェクト以外の場においても使われ始めている。

無線アドホックネットワークについても、従来の 2.4GHz 帯と新たな 5GHz 帯を組み合わせる方式により総伝送容量の増加を実現し、3 ホップ (2 回中継) する構成においても約 18Mbps というスループットが得られることを確認した。

## 5 ケーブル敷設ロボットの開発

### 5.1 概要

有線・無線ハイブリッドアドホックネットワークを実現するためには、有線部分を敷設するロボットが必要である。そこで、図 14 に示すような、LAN ケーブルと無線基地局を敷設するロボ

ットシステムを開発した。

### 5.2 技術的内容と評価

ケーブル敷設の方式として、自走ロボットにケーブルユニットを搭載する方式と、トレーラによる搬送方式とを検討した。800m に及ぶケーブルと 16 台に分割された通信ユニットを同期回転させ、ケーブルのねじれを防ぐ必要があるが、物理的接触を通じて電気信号を送るスリップリング方式では、10Mbps 程度以上の通信品質を得ることは困難である。また図 15 に示すように、ケーブルをロボット本体から離してリリースすることで、クローラへの巻き込みを防止する工夫も必要となる。

その結果、長さ 50m のフラットケーブル、電源、ルーターで構成される基地局ユニット「アドホックリール」を開発した。図 16 にアドホックリール、図 17 にトレーラ型ケーブル敷設システムを示し、

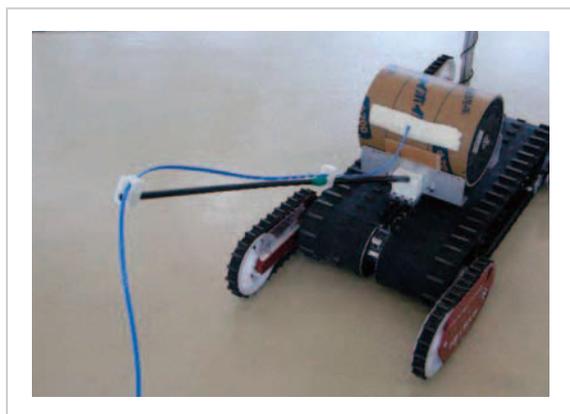


図 15 クローラへのケーブル巻き込みを防止する工夫



図 16 アドホックリール (青い部分はケーブル)



図17 トレーラ型ケーブル敷設システム

図18に、トレーラ型ケーブル敷設システムからアドホックリールを1つずつ排出して敷設するシーケンスを示す。アドホックリールについては、6で詳述する。

当初開発したケーブル敷設ロボットでは階段を踏破できない問題があったため改良を行ったほか、ケーブル敷設機構及びアドホックリールを改良し、小型軽量化、及びカメラ等のセンサーを搭載可能とした。図19に改良型システムを示す。これにより、ケーブル回転・自動送出・ケーブルドラム排出メカニズムを実現した。

## 6 アドホックリール

### 6.1 概要

ケーブル敷設ロボットから投下されることで環境内にアドホックネットワークを構成し、各探索ロボットと操作卓のPCを接続するためのアドホック端末のハードウェア及びソフトウェアを開発した。

### 6.2 技術的内容と評価

アドホックリールは有線・無線ハイブリッドアドホックネットワークを実現する中継端末である。既存の無線アドホック端末との違いは、端末内に50mのカテゴリ5eケーブルを持ち、これを相互に接続することで無線アドホック通信のみならず、有線アドホック通信を行う点である。有線を用いることにより、従来の問題点であった通信速度や遅延、電力供給の問題等が解決される(図20)。

アドホックリールは(株)シンクチューブ製 Rokko Mesh Router RMR7000と、ケーブル、及びケーブルを格納するドラムからなる。RMR7000は有線LANポートを3つ持ち、このうち2つをケーブル接続用に用いて100Mbps(理論値)の有線通信を行うことができる。また、RMR7000は無線LAN(IEEE802.11b/g)ポートを3つ持ち、マル



図18 アドホックリール敷設のシーケンス

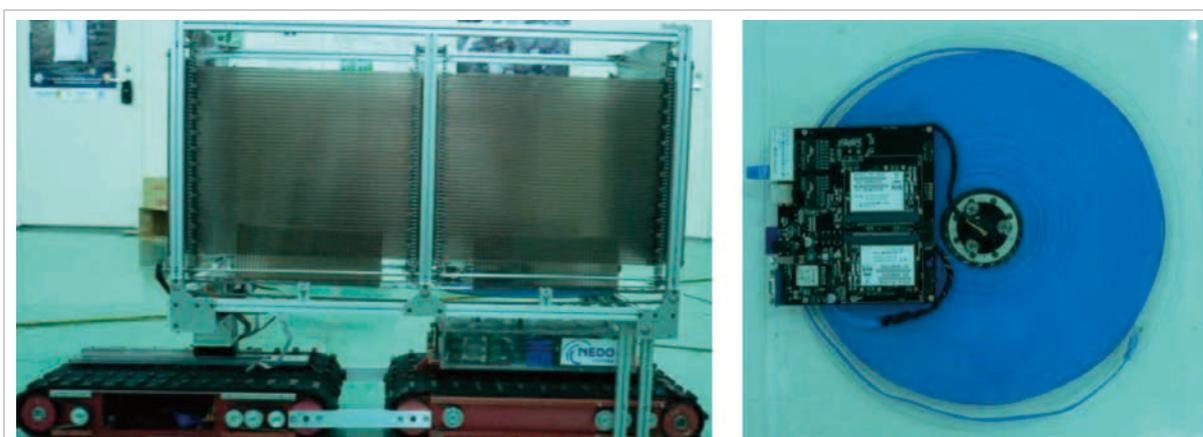


図19 左：改良型ケーブル敷設ロボットの外観 右：小型化したアドホックリール



図20 アドホックリール

チビームにより最大 162Mbps (理論値) の無線通信を行うことが出来る (図 21)。

本プロジェクトでは、5 で述べたケーブル敷設ロボットによるケーブル敷設、及びアドホックリールの投下システムまで完成した。探索ロボットによる実証実験、アンテナ直立機構 (もしくは低頭・平面アンテナの利用) の実装、PoE などを用いたリールへの電力供給機構の実装、マルチビーム化などが、今後の課題として残されている。

## 7 自由探索ロボットのアドホック通信システム

### 7.1 概要

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通信機器を、各ロボットに実装した。但し、個別研究や訓練を妨げないように、有線や通常の無線通信も切り替えにより利用可能とした。

### 7.2 技術的内容と実績

NEDO プロジェクトの研究開発用ロボット “Kenaf” の内部コントローラは、有線 LAN ハブを用いて接続されている。このハブに、(株)シンクチュープ製の Rokko Mesh Router EMB503 を接続することで、Kenaf がアドホックネットワークの 1 ノードとして有線・無線ハイブリッドアドホックネットワークに参加可能とした (図 22)。

また、開発時や訓練時、あるいは無線が利用できない場合に備えて、以下の 4 つの方式で Kenaf を操作可能とした。各方式は操作卓上から切替可能である。

- 有線ケーブル利用… 操作 PC と Kenaf を直

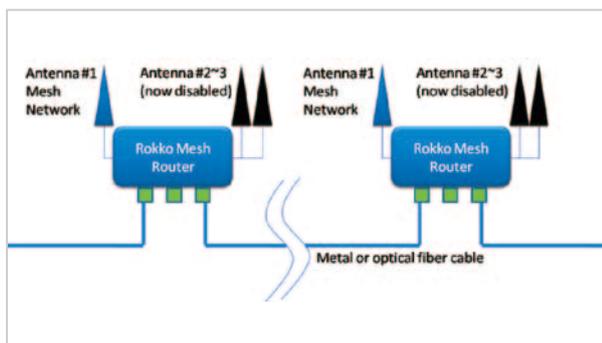


図21 アドホックリールの構成

接有線で接続する方式

- 5GHz帯無線 LAN (IEEE 802.11a) 利用… 通常の無線 LAN を用いて接続する方式
- 無線アドホックネットワーク利用… Rokko Mesh Router の無線アドホック通信を用いる方式
- 有線・無線ハイブリッドアドホックネットワーク利用… 6 までに述べた有線と無線を併用する方式

また、有線・無線ハイブリッドアドホックネットワークを利用するにあたり、無線 LAN の利用帯域を一台のロボット当たり 4Mbps とした。この時、ロボット一台あたり Web カメラ (解像度 320 × 240、フレームレート 15fps) を 4 台利用可能であり、探索目的には十分な帯域といえる。有線・無線ハイブリッドアドホックネットワークでは、これらのロボットを同一無線範囲内に 4 台、異なる無線範囲内に 17 台まで接続可能である。また、操作者は各ロボットの操作画面から現在の利用無線帯域を確認可能である (図 23)。

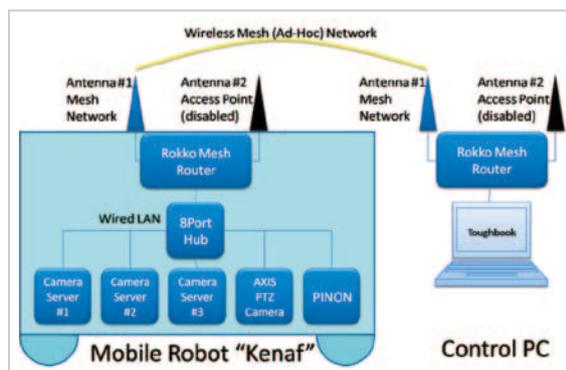


図22 ロボットと操作卓の通信構成



図23 操作卓のネットワーク負荷モニタ

## 8 多数ロボットの通信シミュレーション

ロボット開発と並行して、シミュレーションにより通信システムの妥当性を検証した[3][4]。シミュレーションは、ネットワーク・シミュレーションソフトウェア OPNET 11 上に有線・無線ハイブリッドアドホックネットワークを表現し、各ロボットを特定のパターンで動作させながら無線 LAN の映像送信率を計測することで行った。ケーブル敷設ロボット(図 24 中の TR)は環境に沿って直線

的に進みケーブルを敷設していくとした。また、自由探索ロボット(図 24 中の SR)は進行方向に偏向させたランダムパターンで探索を行いながら進行していくとした。自由探索ロボットの台数は最大 14 台とした。

例として、15 台のロボット(1 台のケーブル敷設ロボット+ 14 台の自由探索ロボット)を 750m の直線経路で動作させた際のシミュレーション結果を図 25 に示す。このシミュレーションでは 15 台のロボットが一斉に出発した場合(図 25 の上)、15 分間で 51.6% の面積のエリアを探索するが、映像の送信率が 26.4% と非常に悪い。これに対し、ロボットが 1 台ずつ一定時間おきに出発した場合(図 25 の下)、同一時間での探索エリアの面積は多少小さいものの、映像の送信率は 58.8% に向上することがわかった。

通信やロボットの行動パターンのパラメータを変えつつ、いくつかのシミュレーションを行った結果、ロボットは個別に発進することで 8 台程度まで、同時発進の際には 4 台程度までの同時利用が可能であることがわかった。

本シミュレーション結果の詳細については、文献[6]において詳しく述べられている。

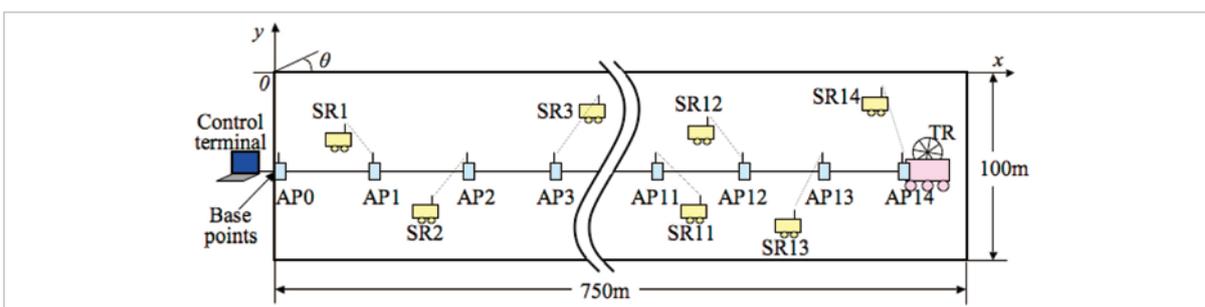


図 24 シミュレーション環境例

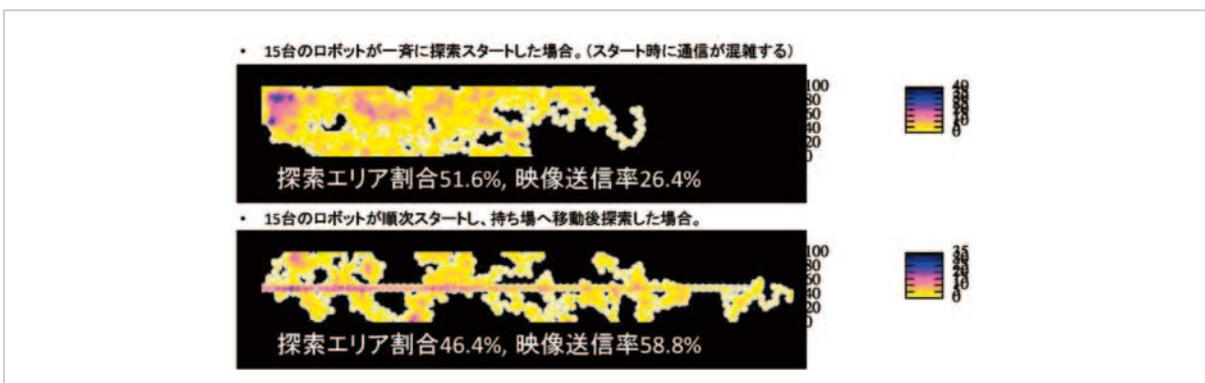


図 25 シミュレーション結果例

## 9 被災者・レスキュー隊員間通話用 VoIP システム

### 9.1 概要

探索ロボットにより発見された被災者と、ロボット操作者及び救助に向かうレスキュー隊員間の通話システムを開発した。

現状の救助現場では、レスキュー隊員は専用無線回線を用いて隊員間の通信を行っているが、地下街など閉鎖空間では通話が途切れることが問題となっている。そこで、ケーブル敷設ロボットが設置した有線・無線ハイブリッドアドホックネットワークをそのまま通話用のインフラとして利用することで、遠距離でもクリアな品質の VoIP (Voice over IP) 通信により、被災者やレスキュー隊員の支援を行うことを目指す(図 26)。

### 9.2 技術内容

VoIP にはサーバ、複数の通話端末、通信回線が必要である。通話端末はまずサーバに問い合わせることで他の端末のネットワーク上の位置を確認し、その後サーバを介さない P2P で通話を行う。

本プロジェクトではサーバとして Asterisk を用い、ロボット操作卓に設置する。また端末として、アイコム(株)の携帯型ワイヤレス IP フォン VP-71 を使用する。これらはアドホックネットワーク上で動作することが想定されていない。そのため、アドホックリールが 3 回線持つ無線 LAN (IEEE 802.11b/g) のうちの 1 回線を、ホットスポットエリアを提供する Master Mode で動作させた。これにより、アドホック通信機能を持たない端末であっても、アドホックリールをブリッジして有線・無線ハイブリッドアドホックネットワークに参加することが可能となった。また、アドホックリールに Flat Subnet 機能を実装し、たとえ VoIP 端末の位置が変わりネットワーク構成が変化した

としても、アプリケーション層では同一 IP で通信が出来るようにした。

これらにより有線・無線ハイブリッドアドホックネットワーク上で VoIP 端末を動作させることが出来た。通話一回線あたりの転送量は高々 80kbps であり、有線・無線ハイブリッドアドホックネットワーク上で十分に伝送が可能である。

### 9.3 ロボットネットワークと連携する要救助者と救助隊員用の高度通信資機材

有線・無線ハイブリッドアドホックネットワークを、ロボットの操作のみならず、その後に被災建築物に進入する救助隊員、並びに要救助者にも利用可能となるフレームワーク並びに実機を開発し、実証実験を通して有効性の検証を行った。図 27 に示すように、(株)谷沢製作所製のカメラ付き IT ヘルメットを、開発した VoIP ネットワークに合流させ、動作することを確認した。

### 9.4 ネットワークシミュレーション

ロボットシステム実用時において多数のロボットが同時に運用される局面を想定し、有線・無線ハイブリッドアドホックネットワークの有効性をシミュレーションにより確認した。その結果、図 28 に示す通り、通常の無線のみのアドホックネットワークに対して、提案方式は 6 倍以上の通信成功率であることが確認できた。

### 9.5 課題と評価

有線・無線ハイブリッドアドホックネットワーク上での VoIP システムの動作は実現しているが、ロボット等との共存環境での実証実験や品質検証は、課題として残されている。このシステムはロボットと関係なく動作するため、例えば消防隊のホースや命綱などの資機材に組み込むことにより、ロボットを用いない通常のレスキュー活動でも利

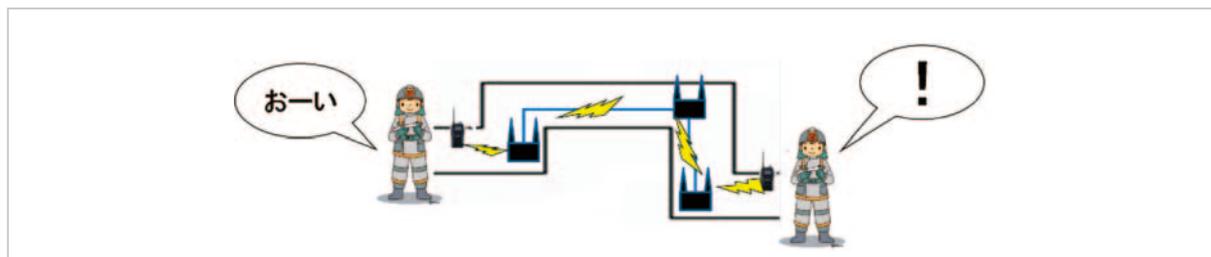


図 26 有線・無線ハイブリッドアドホックネットワーク上で動作する VoIP システムのイメージ

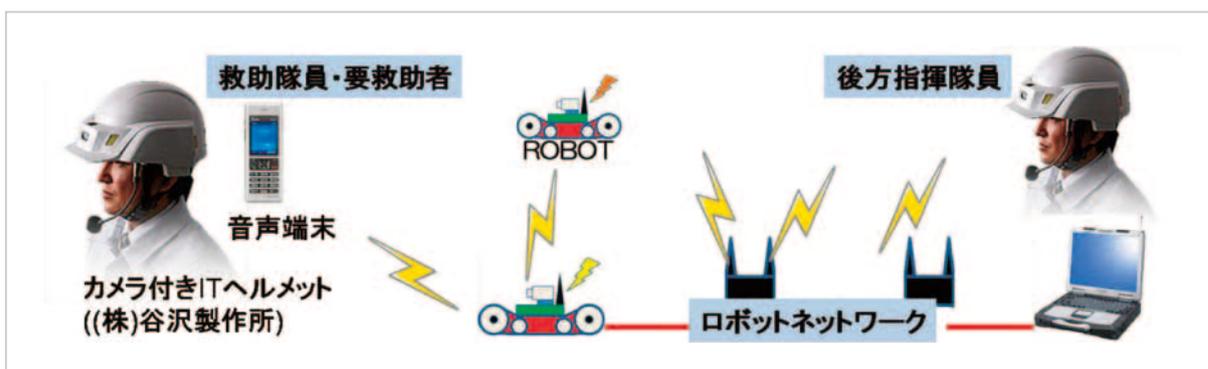


図 27 ロボットネットワークと連携する要救助者と救助隊員用の高度通信資機材

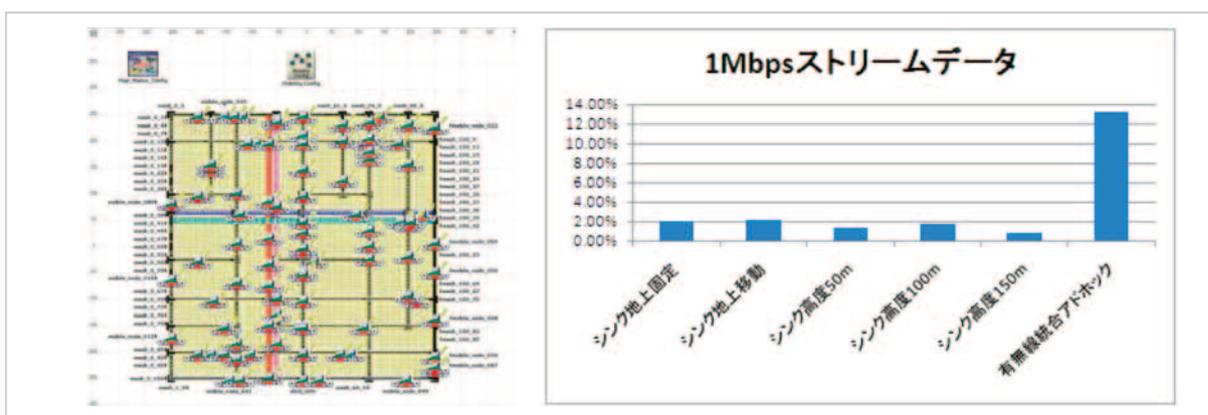


図 28 左: シミュレータ画面 右: シミュレーション結果

用可能であるため、実用性は高いと考えられる。

## 10 投下型 Pod 通信システムの開発

### 10.1 概要

無線 LAN の空中線電力は法規制により最大 10mW/MHz という制約から、屋内環境では無線リンクの到達距離は約 50m (無指向低利得アンテナの場合) 程度である。従って NEDO プロジェクトに与えられた目標である 700m に及ぶ閉鎖空間の場合には、14 個の無線中継ノードを設置する必要があることになり、接続の安定性を考えれば現実的ではない。そのため、700m の間を 4～6 程度のホップ数で無線マルチホップを構築する目的、及び有線・無線ハイブリッドアドホックネットワークシステムを補完する目的 (例えば有線ケーブルの敷設が困難な場所、または有線基幹部のバックアップ無線リンクとして) で、指向性アンテナを利用した長距離無線リンクを実現する機器を開発した。

### 10.2 技術的内容

高利得指向性アンテナを使用するにあたっての問題は、被災現場では通信機器の設置位置及び移動ロボットの存在場所をあらかじめ決定できないため、アンテナ方位を事前に決定できないことである。我々はこの課題を解決するために、指向性平面パッチアンテナ (利得: 8dBi、サイズ 114 × 114 × 23 mm、半値角: 約 60 度) 2つを円筒型の筐体の上部に取り付けた投下型 Pod 通信機を開発した (図 29)。2 枚の平面アンテナの方位を、隣接ノードの相対位置に応じてソフトウェア指令によって自由に変更可能とするため、2つのアンテナを独立して駆動するためのモーター、ロータリエンコーダー、近接センサー、多重インターフェース対応無線アドホックルーターから成るハードウェア機構と、アンテナ駆動用組込ソフトウェアならびに遠隔投下型 Pod アンテナ制御用プログラムから成るソフトウェア機構を開発した。重量はバッテリーを含み 7.5 kg、サイズは高さ 540mm、幅 200 mm となった。

アンテナ方位は、投下型 Pod 自身が計測している周辺ノードからの受信電界強度に基づいて自律的に決定する Auto モードと、前述の投下型 Pod



図29 投下型 Pod 通信機外観

通信機操作パネルを用いて操縦卓から遠隔制御するマニュアルモードの2モードを実装した。図30に、操作パネルの画面を示す。また移動ロボットが当 Pod 通信機を運搬投下する前提で、投下衝撃を吸収すると同時に安定して直立するように、低重心設計とした。

### 10.3 評価

投下型 Pod 通信システムは、2007年8月に、地下街において約100m間隔で数台設置し、基本機能を確認した。続いて同年9月には、IRS 神戸ラボ近くの屋外環境において検証し、約200mの距離で約-80 dBm(無指向性アンテナでは約55m)の性能を得た。同年12月には、東北大におけるNEDOプロジェクト中間ヒアリングにおいてデモ実演し、アンテナ方位が移動ロボットの移動先に追従する様子を示した。

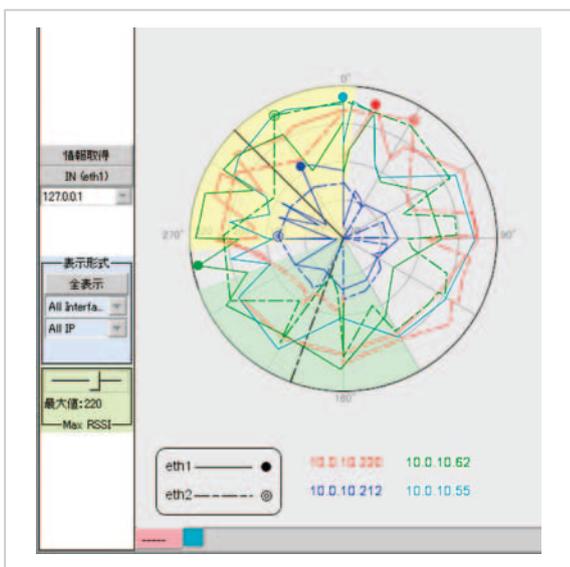


図30 投下型 Pod 通信機操作パネル

## 11 階段等高低差のある環境に適した移動ロボット用指向性可変アンテナ

階段等高低差のある環境において、既存アンテナでは通信が不安定となる問題に対して、電気的に指向性を変化させることのできる防水・防塵アンテナを新規開発し、基本特性の評価、ロボットへの実装、実証実験を行った。図31にアンテナの構成図、2種類の垂直方向指向性、外観を示す。

## 12 防水・防塵アンテナ台の開発

アンテナ高さを地上1mとすると、通信利得が大きく向上することがシミュレーションによりわかったため、選択式でアンテナを高くでき、さら

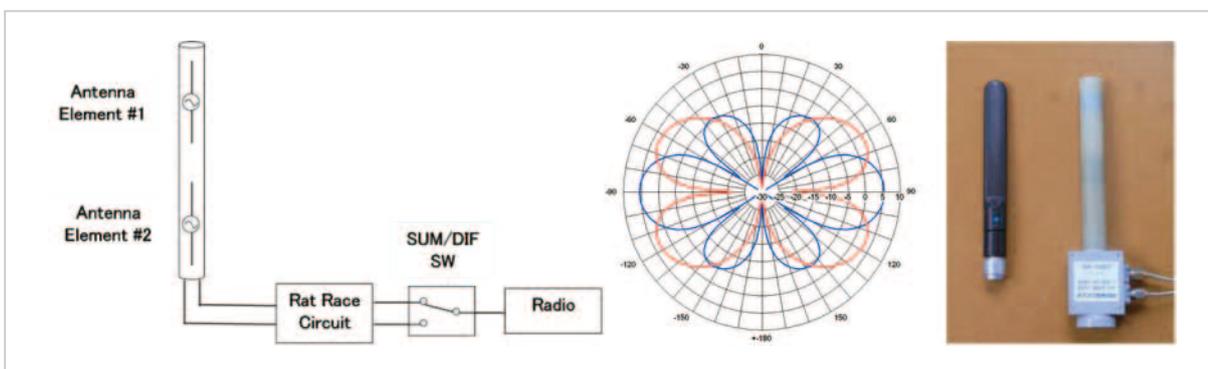


図31 左: アンテナの構成図 中: 2種類の垂直方向指向性 右: 開発したアンテナの外観

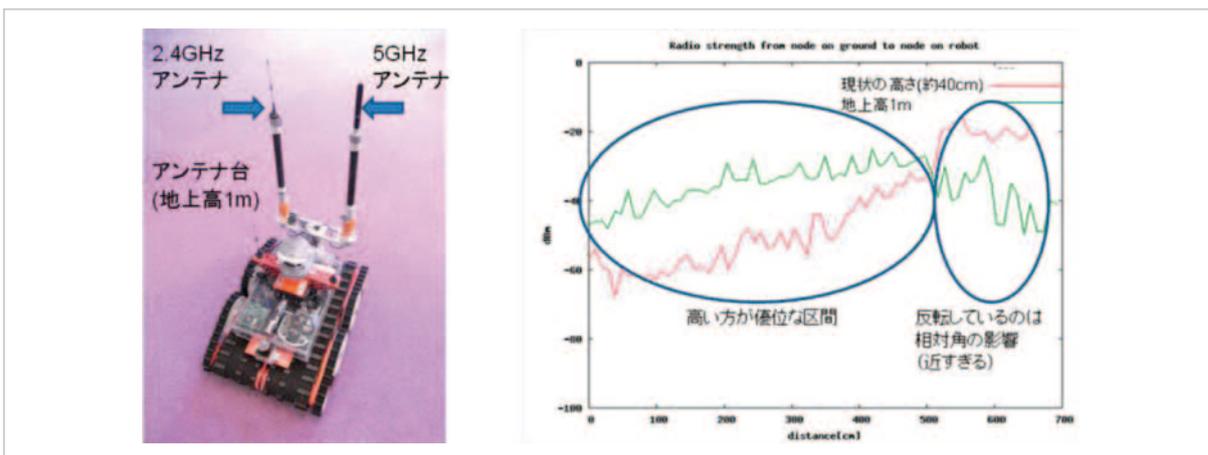


図 32 左: 試作した防水・防塵アンテナ台を取り付けたロボット 右: 高さ変化に対しての電界強度の比較



図 33 NEDO プロジェクトのロボット実用機 “Quince” に取り付けられた改良版防水・防塵アンテナ台

に防水・防塵機能を併せ持つアンテナ台を試作した。研究開発用ロボット“Kenaf”にて評価を行い(図 32)、改良版を NEDO プロジェクトのロボット実用機である“Quince”に実装した(図 33)。

### 13 無線通信切断時の自律復帰技術の開発

#### 13.1 通信範囲から外れた遠隔操縦ロボットの自律移動による通信回復

ロボットが意図せず通信範囲から出てしまい操縦不能となる問題に対し、過去の位置履歴と電界強度を元としてロボットが自律移動を行い、通信範囲に復帰し、操縦を再開させる技術を開発し、屋内及び屋外において実証実験を行った。これにより操作者は通信断絶を気にせず操縦に専念できるようになった(図 34)。

#### 13.2 異種・複数無線路の確保による通信の冗長化

2.4GHz 帯を用いたアドホックネットワークによる無線操縦のみならず、通常の 2.4GHz アクセスポイントを利用した無線 LAN、5GHz 無線 LAN を用いたアドホックネットワーク、第三代携帯

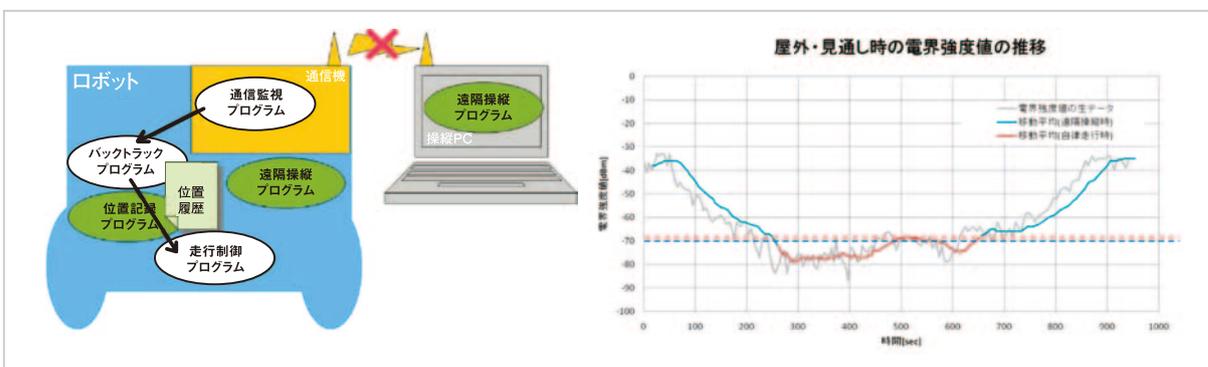


図 34 左: 通信回復システムの概要 右: 自律移動による電界強度回復と操縦復帰の様子

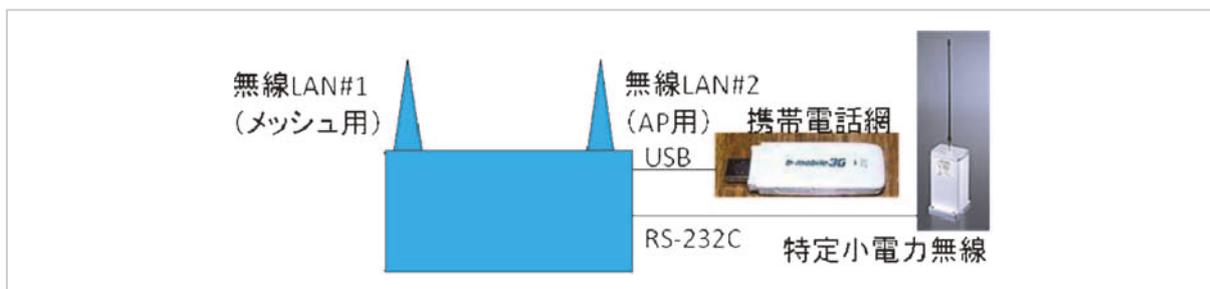


図 35 異種・複数無線路を統一的に扱うための通信機の概要

電話網、特定小電力無線等を統一的に利用可能な通信能力をロボット及び操作卓に持たせ、利用可能なネットワークを動的に選択し通信を維持するシステムの設計及びデバイスドライバの開発を行った(図 35)。

## 14 総合評価

以下に示す通り、開発した通信システムは 2 で述べた技術課題を満たしており、実用性及び完成度は高いと評価できる。

- **技術課題 1 探索範囲(距離)** … 683m の地下街で利用実証ができた。また 10 階建てビルの階段を使い 1 階から 10 階までの利用実証もできた。
- **技術課題 2 規模(拡張性)** … 実験では 6 台のロボットを実証したが、1 台あたりのスループットが 4Mbps の場合、理論上は 15 台までのロボットが同時利用可能である。4 で述べた 2.4GHz と 5GHz の複数周波数を活用することで、無線通信容量は増加可能である。
- **技術課題 3 通信サービスの安定性**… 上述の検証実験を含む 2009 年度、2010 年度を通じ、繰り返し実施した検証を通じて安定性、低遅延性能は確認できた。
- **技術課題 4 システムの耐障害性**… 実験ではケーブルの活線抜き差しを行い、ケーブル断線時でも通信が途切れないことを検証した。有線リンクから無線リンクへバックアップ機能を有することを確認した。
- **技術課題 5 簡便性**… ケーブル上のノード、及びロボット上の通信機器は電源を入れるだけで動作し、利用に特別な知識は必要としない。

## 15 まとめ

NEDO プロジェクトは、2011 年 3 月 4 日に IRS 神戸ラボ(神戸市長田区)で開催された公開デモをもって、5 年間の研究開発を終了した。その直後の 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う福島第一原子力発電所事故では、放射能汚染により近づくことができない被災現場へ探索ロボットを投入する必要性が出てきたため、NEDO プロジェクトが開発したロボット実用機“Quince”の投入準備作業を、筆者を含むプロジェクトメンバーによって進めている。この作業は 2011 年 4 月以降も継続予定である。

瓦礫を含む閉鎖空間内を高速に走破し探索することを想定した NEDO プロジェクトの成果が最初に投入されつつある実災害現場は、開発時に想定していなかった放射能と海水と多湿という環境下であった。新たに突きつけられた過酷な環境下に合わせた改修を急ぎ行い、我々の 5 年間の研究成果が今回の甚大な災害の復旧復興に少しでも寄与できることを願う。

## 謝辞

NEDO プロジェクトの推進では代表者の田所諭東北大学教授をはじめとする IRS の各氏、ロボット開発では小柳栄次千葉工業大学教授、アドホック通信実験では海藻敬之氏はじめ(株)シンクチューブの各氏及び永谷圭司東北大学准教授のお世話になりました。感謝いたします。

## 参考文献

- 1 羽田他, “地下鉄構内での無線通信を用いた移動ロボットの遠隔操縦実験,” Robomec2008, 2P2-A06, Jun. 5-7, 2008.
- 2 羽田他, “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,” 第14回ロボティクスシンポジウム, 2009.
- 3 Koichi Gyoda, et. Al., “Performance Analysis of the Network Model and Scenarios for the Search Robot Rescue System,” SICE 2007, 3B16-4, pp.2677-2681, Kagawa, 2007.
- 4 Koichi Gyoda, et Al., “Performance Analysis of the Network Models for the Search Robot Rescue System in the Closed Spaces,” SSRR2007, 21S7, Sep. 27-29, 2007.
- 5 滝澤修, “はじめに ～防災・減災基盤技術グループが目指したこと～,” 情報通信研究機構季報, 本特集号, 1, 2011.
- 6 行田他, “災害時における利用を想定した無線アドホックネットワークの性能評価,” 情報通信研究機構季報, 本特集号, 2-3, 2011.

(平成23年3月30日採録)



はた やすし †1  
羽田靖史

情報通信セキュリティ研究センター  
防災・減災基盤技術グループ専攻研究員  
(2007年4月～2011年3月)  
博士(工学)  
ロボット工学、知能システム、ユビキ  
タスネットワーク



たまざわ おさむ †2  
滝澤修

情報通信セキュリティ研究センター防  
災・減災基盤技術グループグループ  
リーダー(2006年4月～2011年  
3月)/セキュリティ基盤グループグ  
ループリーダー(2008年5月～  
2010年3月) 博士(工学)  
非常時防災通信、コンテンツセキュリ  
ティ

†1 現在、工学院大学工学部機械システム工学科 准教授

†2 現在、社会還元促進部門技術移転推進室 マネージャー

