情報処理学会論文誌　Vol. 51　No. 4　1204–1214 (Apr. 2010)

災害対応探索ロボット群の長距離遠隔操縦のための有線・無線統合型アドホックネットワーク

羽田 靖史[†1]　海藻 敬之[†2]　松山 健太郎[†2]
行田 弘一[†3]　滝澤 修[†1]

本論文では災害時に情報収集を行う屋内移動ロボット群の長距離遠隔操縦に必要な通信システムとして，高速かつ信頼性の高い有線 LAN と柔軟な運用が可能な無線アドホックネットワークを併用する有線・無線統合型アドホックネットワークを提案する．提案するシステムでは，従来の無線アドホックネットワークでは困難な複数の映像ストリームの転送を行い，かつ有線 LAN が切断されても通信が停止しない冗長性を持つ．試作したシステムを用いて，無線アドホックネットワークとの比較を行い，その優位性を確認した．また，試作システムを用いて実際の地下街で 5 台のロボットを遠隔操縦し，最大 683 m の長距離遠隔操縦を実現した．

Wired and Wireless Hybrid Ad-hoc Network for Long Distance Navigation of Rescue Search Robots

Yasushi Hada,[†1] Takayuki Kaiso,[†2]
Kentaro Matsuyama,[†2] Koichi Gyoda[†3]
and Osamu Takizawa[†1]

In this paper we propose a hybrid ad-hoc network for rescue robots, which uses both fast wired-LAN and flexible wireless-LAN. Proposed network system can transmit broadband video streams, which is difficult problem for the conventional wireless ad-hoc network. It also features redundancy that ensures the network to work even when the LAN cable is cut. We developed a prototype system to compare with the traditional ad-hoc network, and verified the merit of the system. And we conducted experiments in an underground mall, and successfully managed the long distance navigations of 683 meters with five mobile robots and showed what the proposed network system can archive.

1. はじめに

防災・減災活動の中で，救助は最も大きな活動の 1 つである．災害地や事故現場において救助活動に従事する隊員は，その現場に自身が進入する必要があるため，つねに危険と隣り合わせである．2009 年 6 月には，小麦粉を利用している工場の火災において，進入して 5 分後に粉塵爆発が起こり消防隊員が殉職する事故が発生した[1)]．また 2004 年の JR 福知山線列車脱線事故では，被災地内部の可燃性ガスの有無を確認できなかったため，チェーンソー等の資機材を用いることができず，救出が遅れた[2)]．サリン事件，阪神大震災，韓国大邱市の地下街火災等，現場内の状態を進入前に知ることがいかに重要かという事実は論をまたない．従来の活動では，消防隊は可能な限り監視カメラや被災者への聞き込み，棒状カメラ等により内部の情報を収集するが，近年はより詳細な情報を収集するための探索ロボットの研究が進んでいる[3)]．

本論文では，探索ロボット群の実用化のための通信技術について提案し，実証実験を通して有効性を確認した結果を述べる．まず 2 章ではロボット群による屋内環境の探索に必要な通信の要件と，現状の無線アドホックネットワークの問題点を述べる．3 章では，現状の問題点を解決する有線・無線統合型アドホックネットワークの提案を行い，4 章でその実装について述べる．5 章では開発したシステムを無線アドホックネットワークと比較しその優位性を説明し，実環境でロボット群を動作させた結果について述べる．6 章では今後の展望を述べる．7 章は本論文のまとめである．

2. 遠隔操縦ロボット群によるビル内または地下街調査の為の通信

2.1 要求仕様

我々は災害時に危険な場所，具体的には震災，NBCR テロ災害，プラント災害等の現場において，ビル内または地下街環境への迅速な進入と調査を目的とした移動ロボット群の研究開発を行っている．操縦者は消防隊，自衛隊等の訓練された者を想定し，安全圏からロボット群の複数のカメラ，センサを働かせ遠隔操縦を行いつつ情報をモニタし，以降の救助

†1 独立行政法人情報通信研究機構
National Institute of Information and Communications Technology
†2 株式会社シンクチューブ
Thinktube Inc.
†3 芝浦工業大学
Shibaura Institute of Technology

© 2010 Information Processing Society of Japan

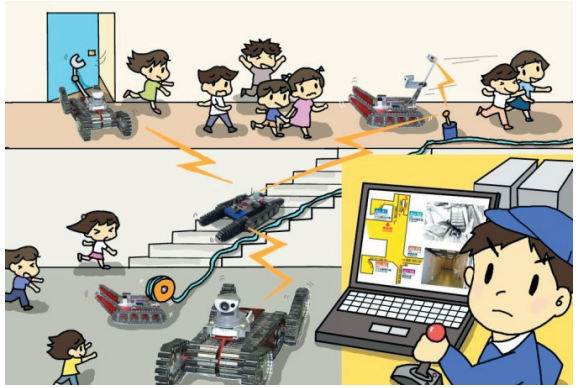

図 1　探索ロボット群のイメージ
Fig. 1　Task image of rescue search robots.

活動の判断の参考とする．**図 1** にロボット群とそれらが地下街で活動するイメージを示す．

このような情報収集ロボットの遠隔操縦のための通信内容は，ロボット群から操縦者への映像およびセンサデータ，操縦者からロボットへの操作コマンドからなる．被災地は瓦礫や火災等の危険があり，これらをカメラ映像，赤外線映像，レーザスキャナ等の多様なセンサで即時に判断し，必要に応じて注視，回避等の操縦に反映させる必要があるため，通信にはリアルタイム性と高速大容量が必要となる．また事故や故障等不測の障害時であっても通信可能な冗長性も重要である．

ロボットの遠隔操縦は，有線でロボットと操作ターミナルを 1 対 1 で結線する方式もあるが，絡まりや引っかかり，帰還時のケーブルの処理等問題点は多く[4),5)]，ロボットの運動を妨げない無線通信，なかでも高スループットが確保可能な無線 LAN（IEEE802.11b/a/g）を用いるのが一般である[6)]．ただし，無線電波は電波法により周波数，出力，帯域幅の制限を受けるため，数 m から数十 m までの利用が現実的である．一部の飛行ロボットでは数百 m 以上の距離で通信可能なものも存在するが[7)]，これは空中に障害物がないため見通し通信距離が長く，指向性の高いアンテナを地上側からロボットに向けて高利得を得ることができるためである．これに対して，本研究で対象とするビル内または地下街環境は見通し距離が短く，電波は反射や回折により伝搬方位も定まらないため，同様の手法を用いることは困難である．

昨今の携帯電話網の発達により大容量通信が可能となり，数 km 以上離れたロボットの遠隔操縦も可能となりつつある．一例として，PHS 網を用いたアミューズメントロボットの操縦システムがあげられる[8)]．携帯電話網を用いる利点は，事実上距離の制約がなくなり，携帯電話が利用可能なあらゆる場所でロボットを操縦可能な点にある．しかし，携帯電話のようなインフラストラクチャ型の通信は災害時に輻輳等の原因により用いることができない場合がある．一例として，2004 年の新潟県中越地震において一時的に平常時の 50 倍ものトラフィックが発生したためネットワークの容量をオーバ（輻輳）し，これを防ぐために最大 87%の通信制限が行われたという報告がある[10),11)]．

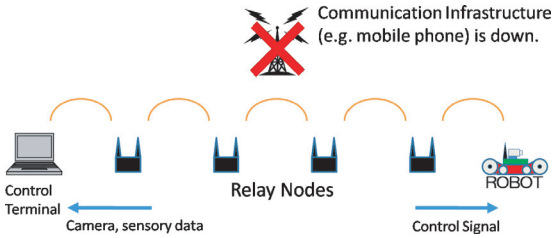

図 2　アドホックネットワークによる遠隔操縦
Fig. 2　Remote control using wireless ad-hoc network.

一方，有線通信と無線通信を併用する試みも行われている[12)]．このシステムは，PHS 構内無線の基地局を LAN ケーブル上に一定間隔に並べたものであり，各 PHS 通信端末はケーブルの制約を受けずに長距離の通信が可能な点でユニークである．ただし PHS を基本としているため通信速度は遅く映像等は転送できず，同時接続数の制限がある．また通信ケーブルが切れると切断部分以降の通信が不可能となるため，障害に弱いという欠点がある．

2.2　無線アドホックネットワークの問題点

複数の中継（マルチホップ）通信が可能な無線通信を，無線アドホックネットワークと呼ぶ[13)]．無線アドホックネットワークは主に環境内に多数のセンサをばらまき，広い範囲で並列的に情報を収集する目的（センサネットワーク）で用いられている[14),15)]．特長として面的にネットワークを構成し通信経路を動的に決定するため，一部の中継局に障害が生じても迂回可能な冗長性を持つ．無線通信方式には ZigBee[16)] や，無線 LAN 上においては AODV[17)]，DSR，OLSR，TBRPF 等のプロトコルを元に IEEE802.11s への標準化が作業中である．

この無線アドホックネットワークを応用し，**図 2** のようにロボットが無線中継局を設置，もしくはロボット自身が他の無線を中継することによって，活動可能範囲を延長する研究が

© 2010 Information Processing Society of Japan

行われている[18)–21)]．しかし，災害対応ロボット群の遠隔操縦に適用するには以下に示す多くの問題があり，容易ではない．

まず，センサネットワークは多数のセンサが少量のデータを間欠的に収集する目的を主として開発されているため，映像等の大容量のストリーム通信には向いていない．特に複数のロボットを操作ターミナルから遠隔操縦する場合，中継されたすべての通信が操作ターミナルに到達するため，容易に輻輳が発生する．たとえば**図 3** に示すような接続形態において Control Terminal — ROBOT A 間はロボット 4 台分のスループットが必要とされ，この部分の通信が滞るとすべてのロボットの操作に影響する．

次に，無線アドホックネットワークは隠れ端末問題や晒し端末問題等の性能低下がよく知られているが，特にロボットは移動にともなう電波環境変化のためこの影響を受けやすく，かつ頻繁に経路変更が行われることによりリアルタイム性が失われる．また中継局ごとに復調と再変調を繰り返し，かつ中継数も経路により不定であるために，一定のリアルタイム性を確保できない．

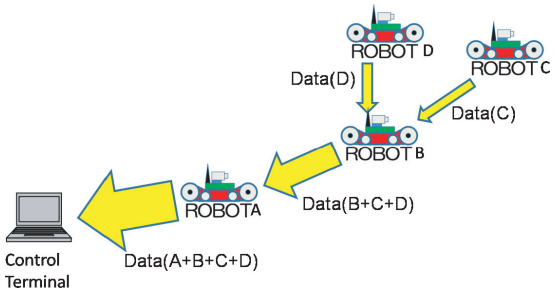

図 3　ロボット間無線中継による無線帯域の欠乏
Fig. 3　Network congestion around control terminal.

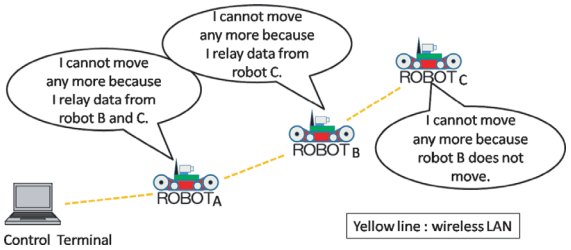

図 4　ロボット間無線中継による行動の制限
Fig. 4　Motion deadlock caused by communication relays.

また，ロボット間で通信の中継を行っている場合，他のロボットの移動により通信が切断される，または他ロボットへの中継のために自身が動けないという問題が発生し，自由な探索活動が制限される．たとえば**図 4** に示すような接続形態において，ROBOT C が Control Terminal 側に移動しない限り他のロボットは動くことができない．

加えて設置の時間的コストや，中継局のバッテリ容量も問題となる．設置に数時間必要であったり，中継局のバッテリ切れにより全体が動作不能となるようでは実用化は難しい．

3.　有線・無線統合型アドホックネットワーク

3.1　提案する通信システム

我々は情報収集ロボット群の遠隔操縦のために，有線通信を主としながらも無線アドホックネットワークを相補的に用いることによって，高いリアルタイム性と高速性，冗長性を兼ね備える有線・無線統合型アドホックネットワークを提案する．**図 5** に本ネットワークの概要を示す．提案するシステムはアドホックケーブル，アドホックケーブルを敷設するロボット，およびアドホックケーブルの周辺で活動を行う探索ロボットから構成される．

3.1.1　アドホックケーブル

操作ターミナルを端として環境中に有線通信ケーブルを伸ばし，一定間隔おきに無線中継局を接続する．中継局の電源はバッテリの他 PoE（Power over Ethernet）等の送電技術でケーブルから供給することも可能である．この中継局付きケーブルをアドホックケーブルと呼ぶ．アドホックケーブル上の中継局どうしは高速な有線通信と無線通信の双方で接続し，

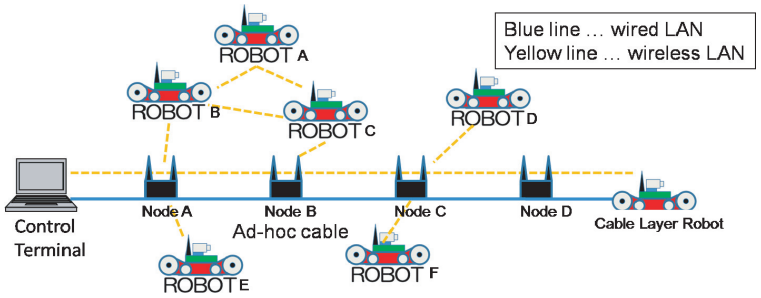

図 5　移動ロボット群の遠隔操縦のために提案する有線・無線統合型アドホックネットワークの概要
Fig. 5　Hybrid ad-hoc network system for remote control of mobile robots.

© 2010 Information Processing Society of Japan

有線・無線が混在したアドホックネットワークを構築可能とし，周辺の探索ロボット群と無線通信可能とする．

3.1.2　アドホックケーブル敷設ロボット

アドホックケーブルを敷設しながら環境内を進み通信インフラを構築するロボットである．このロボットは詳細な探索は行わず，直線的に移動しながらアドホックケーブルを繰り出して敷設していく．敷設するケーブルは 1 本でも複数本でもよい．

3.1.3　探索ロボット

アドホックケーブル上の中継局に無線接続し環境内を複雑に行動しながら詳細な情報を収集するロボットである．探索ロボットと操作ターミナルとの通信は，最寄りの中継局に接続する部分のみ無線通信を用い，中継局から操作ターミナルまでは高速な有線通信を用いる．例として図 5 中の ROBOT D の場合，ROBOT D—Node C 間は無線通信，Node C—Control Terminal 間が有線通信となる．これにより探索ロボットはケーブルの物理的な制約を受けず，かつ無線ホップ数の少ない通信を行うことができる．なお，探索ロボット自体も無線中継局の機能を持たせ，万が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，図 5 中の ROBOT A—B—C のように他のロボットが中継することにより通信を再接続させることができる．

3.1.4　経路決定手法

有線と無線が混在したネットワークの経路決定手法に関しては，スループット測定による経路選択基準を導出している例があるが[22]，本提案では，AODV の経路決定方式をもとに 2 つの簡単なルール「有線リンクは電界強度および品質がつねに最良な無線リンクとして定義する」「有線リンクはいくつの中継局を通過しても 1 ホップとカウントする」を加えることによって，経路を決定する．すなわち，アドホックケーブル上の中継局はいずれの 2 局間においてもホップ数は 1 とする．これらのルールを導入することにより，無線帯域の利用を極力抑えて高速大容量の有線通信を用い，必要な場合のみ無線アドホックネットワークを利用して接続を維持可能な，柔軟で冗長性の高いシステムが実現できる．具体的な実装方法は次章で述べる．

3.2　提案方式の利点

この通信方式のメリットは以下のとおりである．

・高速な通信とリアルタイム性の向上

中継局から操作ターミナル間は高速大容量で信頼性が高い有線通信を用い，無線中継が少なくなるので，リアルタイム性も向上する．

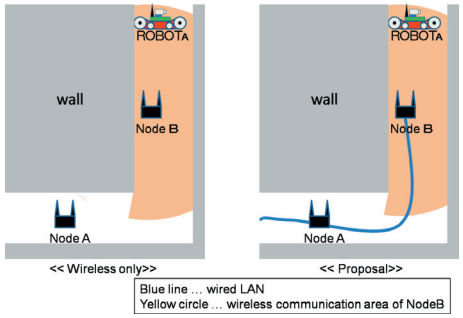

図 6　中継局配置の自由度向上
Fig. 6　Flexibility of installed position of nodes.

・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中継局までで済み，操作ターミナル周囲の無線帯域を圧迫しない．またマルチホップがほとんど起こらないため隠れ端末，晒し端末の影響も最小限に抑えることができる．

・行動自由度の向上

探索ロボットが，他のロボットの通信を中継することが少なくなり，比較的自由に行動可能となる．

・中継局配置の自由度の向上

従来の無線アドホックネットワークでは困難な中継局配置に対応する．たとえば**図 6** のような中継局の配置は無線のみでは通信が困難だが，提案する方式では有線リンクで可能である．また両方のリンクが通信可能な配置では後述の冗長性を有する．

・中継局に給電可能

PoE 等の技術を用いればケーブルから中継局に給電も可能であるため，バッテリの充電や，電源の冗長性を持たせることができる．

・通信の冗長構成によりケーブル切断等に対応

図 7 に示すように，事故等により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中継局が無線でも接続されているため，通信は停止しない（ただし断線部分を無線通信が補うためボトルネックとなり性能は低下する）．これにより探索ロボットは活動を続行または帰還することができる．また無線アドホックネットワークの機能を兼ね備えているため，図 5 中の ROBOT A—B—C のように，ロボット間をマルチホップさせることによ

© 2010 Information Processing Society of Japan

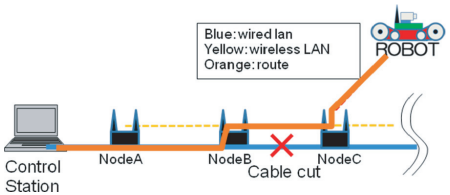

図 7　ケーブル切断時の無線による通信再開
Fig. 7　Rerouting when cable cut.

りさらに冗長性を高めることができる．

この通信方式の想定される欠点としては，ケーブル敷設ロボットの重量が重くなることと，探索ロボットの行動エリアが，ケーブル敷設が完了した部分の周囲に制限されることがあげられる．すなわち，ケーブル敷設ロボットは重いケーブルを運搬しながら迅速にケーブル設置を完了可能なメカニズムが必要となるため，探索ロボットよりも強いトルクが必要になる[23),27)]．

3.3　想定される提案方式の利用分野

提案する通信システムは，NBCR 災害環境や倒壊の恐れのある環境等，比較的静的だが人間の進入には危険のある数十〜数百 m の閉鎖空間において，救助隊員が進入前に広範囲のエリアを複数台のロボット群を用いて情報収集する局面での利用を想定している．逆に数十 cm から数 m 程度のごく小範囲で情報収集する際には有線方式が適している．また提案手法はケーブルを敷設するスペースがない狭窄な瓦礫内や，環境が動的に変化する水害や崩落現場には適していない．

4.　ネットワークシステムの実装

我々は前章で提案した通信システムを実際に試作し，実環境で実証試験を行っている．試作したシステムの詳細を以下で述べる．

4.1　プロジェクトにおける要求仕様

我々は現在，NEDO 21 世紀ロボットチャレンジプログラム戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト（以下 NEDO-PJ）において，10 台程度で構成されるロボット群が最大 700 m の距離を探索可能なシステムを開発している．NEDO-PJ で目的とするタスクのうち，通信に関する要件を以下に述べる．

- 移動ロボットは NEDO-PJ で開発した Kenaf を用いる．標準的な構成の Kenaf 外観を**図 8** に示す[23)]．Kenaf は 1 台あたり 2〜4 台のカメラと複数のセンサを持つ．1 台あたりのカメラの通信帯域を 0.8 Mbps 程度とし，センサデータ，操作コマンドを含めた 1 台あたりの通信帯域を 3 Mbps とする．最大 10 台の同時活動を実現するためには，要求されるロボット群の総スループットは約 30 Mbps となる．
- 必要なリアルタイム性は，カメラのフレームレート（10 fps）内で操作コマンドが到達するように，操縦ターミナルとロボットとの往復通信の遅延を 100 msec 以下であることとする．
- 複数の曲がり角を持つビルまたは地下街環境において，最大 700 m の行動を可能とする．携帯電話網等の社会インフラは利用しない．

図 8　災害対応探索ロボット Kenaf
Fig. 8　Mobile robot Kenaf for rescue search.

これらの要件を満たすべく，通信ハードウェアとソフトウェアの実装を行った．

4.2　通信ハードウェア

アドホックケーブルは 50 m のカテゴリ 5e Ethernet ケーブルと，無線ルータ，バッテリ，リール等からなる中継局を直列に 16 台接続し最大 800 m のケーブルとして構成したものである．1 台の中継局の外観を**図 9** に示す．Ethernet ケーブルは収納時にはリール状の本体に巻き取られている．Ethernet ケーブルは 50 m であるため各中継局間の距離もたかだか 50 m であり，見通しであれば無線 LAN でも十分中継局間を通信可能である．内蔵する無線ルータは（株）シンクチューブ製の Rokko Mesh Router RMR-7000 をもとにしている[24)]．このルータは有線 LAN（100Base-T，理論値 100 Mbps）ポートを 3 系統，無線

© 2010 Information Processing Society of Japan

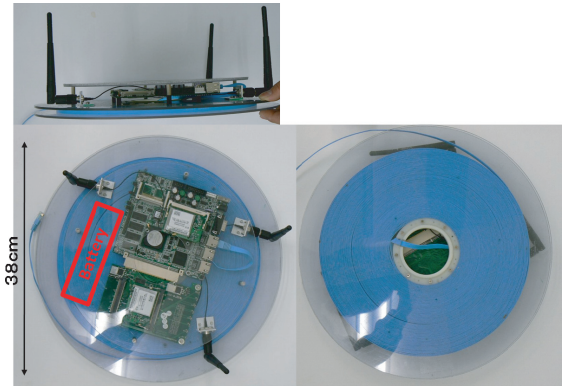

図 9　有線・無線統合型アドホック中継局（青色部分はケーブル）
Fig. 9　Ad-hoc relay node which uses wired LAN and WLAN.

LAN（IEEE802.11g，理論値 54 Mbps）ポートを最大 5 系統まで利用可能である（実装した中継局では有線 LAN2 系統，無線 LAN1 系統を利用）．なお，現時点では PoE は用いておらず，充電機能は有していない．

また，探索ロボットに Rokko Mesh Router EMB-503 を搭載し，ロボットの体内 LAN と接続した．こちらは無線 LAN を 1 系統，有線 LAN を 1 系統利用しており，有線 LAN ポートはロボットの体内 LAN と接続されゲートウェイとして動作する．

4.3　ソフトウェア

通信プロトコルは AODV [17] を独自拡張したものを用いている．通常の AODV プロトコルは無線 LAN が用いられるが，この中継局では有線 LAN も AODV プロトコルを用いる．これにより有線 LAN と無線 LAN を区別しないアドホックネットワークを構築可能である．また，通信相手が無線か有線のどちらを利用しているかを区別しないために，各中継局の有線・無線ポートはすべて同一 IP アドレスとして定義している．これにより同一 IP アドレス宛の通信であっても，複数の通信路が確保され，その一部が通信不可能となっても，別の転送路を用いて通信可能な冗長性が実現できる．

有線・無線統合環境の経路決定については，AODV では経路決定の評価値に電界強度値等を用いるが，本実装では有線 LAN は擬似的に電界強度がつねに最良の無線 LAN と設定している．これによりある中継局を通る経路のうち，有線 LAN が利用可能な場合はつねに有線 LAN を経路として選択することとなり，無線 LAN の利用を最小限に抑えることができる．また，有線経路のホップ数をつねに 1 とするために，中継局が持つ 2 つの有線 LAN ポート間はレイヤ 2 のソフトウェアブリッジで接続した．これにより自身宛の通信でない限り，有線 LAN を通る通信はレイヤ 3 の AODV では関知しないためホップ数は 1 のままであり，かつシンプルな転送が可能となる．たとえば**図 10** の場合，ロボットと操作ターミナル間の経路は ROBOT A—（NodeD—C—B—A）— Control Terminal となり，ホップ数は 2（有線リンク 1，無線リンク 1）となる．

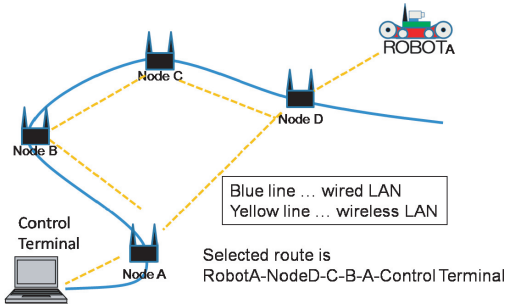

図 10　有線を優先する経路の一例
Fig. 10　Routing :wired LAN is used prior to wireless LAN.

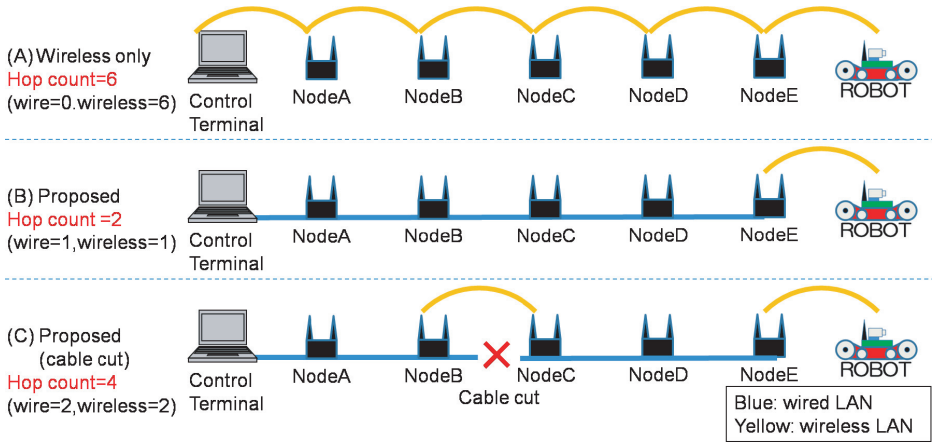

図 11　各方式のホップ数の比較
Fig. 11　A comparison of hop count.

© 2010 Information Processing Society of Japan

また，ケーブル切断時には，有線リンクにおける AODV プロトコルの HELLO パケットが到達しないことを検出して有線の切断を判断し，次に短いホップ数の経路が選択される．**図 11** に，(A) 無線アドホックネットワークのみの場合，(B) 提案する手法，(C) 提案する手法でケーブルが切断された際のホップ数の比較を示す．切断された場合のホップ数は 4 であり，切断部分の無線通信がボトルネックとなるものの，通信は停止せず，かつホップ数は無線のみの場合よりも少ない．

5. 実　　験

5.1 通信品質実験

提案したシステムのスループットおよび応答時間の優位性を検証するため，試作システムと，無線アドホックネットワークのみを用いたシステムとの比較実験を行った．実験はビル内環境において，5 台の中継局を 0 m，10 m，20 m，30 m の等間隔で直列に設置した状態で，それぞれの UDP スループットおよび無負荷時の RTT を計測した．実験環境の都合上，実験は 4 ホップ 30 m（総距離 120 m）までとした．なお，無線アドホックネットワークでは，近接で設置した場合は意図しない経路で通信してしまうため，想定する経路に必要な経路のみに制限して実験を行った．

図 12 に iperf を用いて 40 Mbps の負荷をかけた際の UDP スループット結果を示す．無線アドホックネットワークの場合ホップ数が増加するにつれスループットが大きく低下し，かつ 1 ホップ時であっても要求条件（30 Mbps）を満たしていないのに対し，提案するネットワークシステムではホップ数によらず 36 Mbps 程度のスループットを保っており，要求条件を満たしていることが分かる．

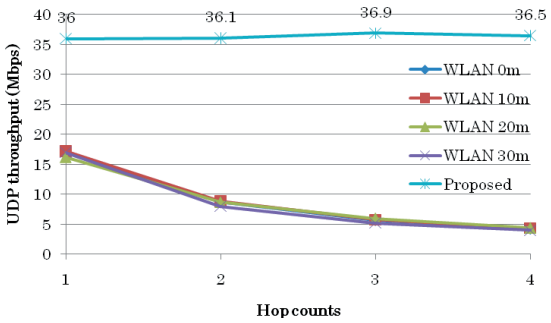

図 12　提案システムと無線アドホックネットワークでのスループット比較
Fig. 12　Throughput of proposed system and wireless ad-hoc network.

また**図 13** に無負荷状態での RTT の値を示す．どちらもホップ数に応じて RTT が増加しているが，提案システムの増加はごく小さいものにとどまっており，ロボット上のカメラのフレームレート（10 fps=100 msec）を十分満たしている．

これらの実験結果により，提案するシステムは目的とする遠隔操縦に必要な要件を満たしていることが分かる．

5.2 冗長性の確認

提案するシステムが，ケーブル断線時においても自動的に無線リンクに切り替わり通信を継続可能であるかを確認する実験を行った．図 7 に示す構成において，NodeB—C 間のケーブルを意図的に切断し，有線通信を不可能した際の，B—C 間の RTT の値の変化を**図 14** に示す．時刻 50 秒の時点でケーブル切断を行い，その後 14 秒後に無線リンクに自動的に経路変更が行われ通信が復帰している．この結果より，ケーブル切断時であっても通信可である冗長性が確認できた．試作システムでは経路変更に 10 秒以上かかっているが，今後のパラメタチューニングにより低減可能である．

5.3 実環境での運用実験

試作した通信システムの運用実験として，2008 年 9 月 14 日深夜に神戸三宮地下街において実験を行った．まず事前にアドホックケーブルを人間の手によって約 550 m の環境中に合計 13 セット設置し，その後 5 台の Kenaf を同時に操作ターミナルから操縦した．中継局

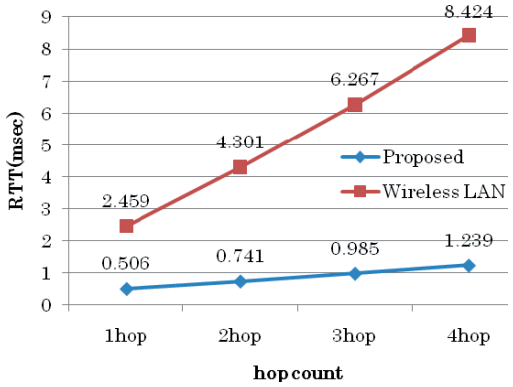

図 13　提案システムと無線アドホックネットワークでの RTT 比較
Fig. 13　RTT of proposed system and wireless ad-hoc network.

© 2010 Information Processing Society of Japan

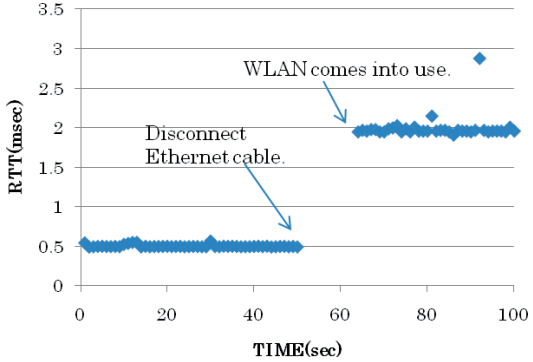

図 14　ケーブル切断時の通信の自動復帰
Fig. 14　Communication resumes after cable cut.

表 1　各ロボットの実験タスクとカメラ数，実測スループット
Table 1　Tasks, cameras and throughput of each robots in the experiment.

Robot name	Target task in the experiment.	Number of integrated cameras	Real throughput [Mbps]
Kenaf No. 5	Long exploration	2	1.6 ～ 1.8
Kenaf No. 2	Long exploration	4	1.8 ～ 2.2
Kenaf No. 1	3D map modeling	3	3.0 ～ 3.5
Kenaf No. 7	detailed exploration	4	1.5 ～ 2.2
Kenaf No. 3	Stand by as backup	4	2.4 ～ 3.1
Total		17	10.3 ～12.8

の設置箇所については，直線部分は 50 m 間隔とし，これに加え曲がり角には無線リンクの冗長性を確保するために距離にかかわらず設置した．また各 Kenaf には，被災者探索，地図作成，長距離走行，その場待機等の具体的なタスクを与えて行動させており，試作した通信システムがタスク実行の妨げにならないかどうかを確認した．**表 1** にそれぞれのロボットのタスク，カメラ数，実測したスループットを示す．総スループットは最大 12.8 Mbps である．

実験の結果，各 Kenaf はそれぞれのタスクを問題なく実行し，通信システムはトラブルなく動作した．また，5 台のうちの 2 台に環境中の長距離走行をさせたところ，アドホックケーブル末端地点（550 m）を越えて 683 m 先の再遠地点まで到達することができた．実験

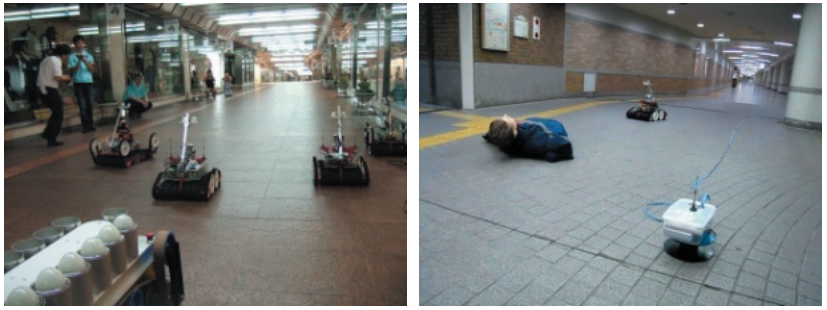

図 15　左：スタート地点の 5 台の情報収集ロボット右：アドホックケーブル末端地点付近で人形を発見した様子
Fig. 15　Left: Five mobile robots at start in the field test, Right : One robot found victim at the terminal of the Ad-hoc cable.

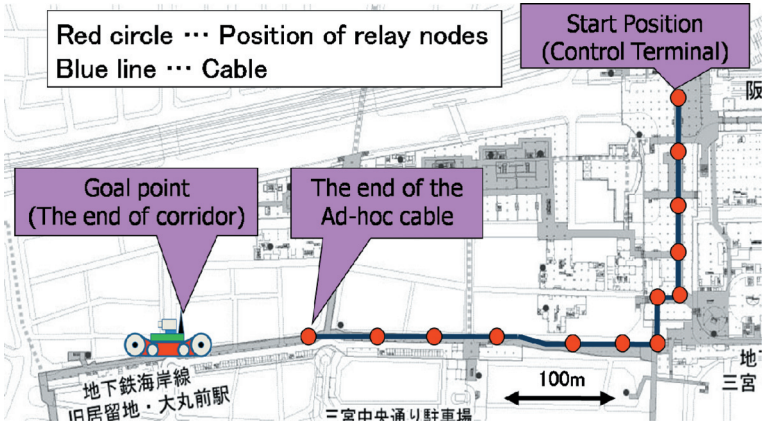

図 16　ケーブルの配置と走行経路
Fig. 16　Trajectory and position of relay nodes on long distance navigation.

の様子を**図 15** に，ケーブルの配置および長距離走行の道程を**図 16** に示す．この実験により試作システムが 5 台の Kenaf の遠隔操縦に耐える性能を持つことが実証できた．

6.　今後の展望

今後の展望としては，ロボットが敷設したケーブルによる通信の実現，探索ロボットの行

© 2010 Information Processing Society of Japan

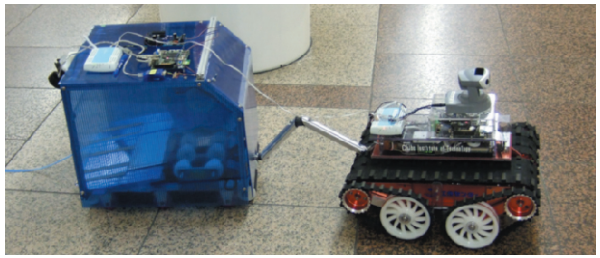

図 17　ケーブル敷設ロボット
Fig. 17　Cable Layer Robot.

動パターンによる通信への影響調査[25),26)]，無線通信のマルチビーム化による速度向上，等がある．本論文では取り扱わなかったが，我々はアドホックケーブルを敷設するための機構を持つロボットの開発を行っており，これを含めたロボットシステムを実環境で実験予定である．**図 17** に敷設ロボットの外観を示す[27)]．

なお，無線機器を利用するロボット全般に関する問題であるため本論文では議論を行わなかったが，ISM 帯（2.4 GHz，5 GHz）は他の通信機器，電子機器の影響を受けやすく，本質的には影響を回避不能である．この帯域は今後いっそう利用されていくことが予測されるため，研究開発段階においては現状の電波法の範疇で ISM 帯を利用するべきであるが，ロボットのように周囲に物理的な影響を及ぼす機器への利用は不適である．特に，人命救助に資する遠隔操縦ロボットにおいては「通信切断したら安全に停止」するシステムでは不十分で，「通信が切れない」ことを目指すべきであり[28)]，本研究成果を消防，自衛隊等で実配備する際には，防災無線のように専用の帯域を確保して運用すべきである．

7. おわりに

本論文では有線 LAN と無線アドホックネットワークを相補的に用い，ケーブル敷設ロボットが敷設したアドホックケーブルを探索ロボットが利用し長距離にわたり安定した遠隔操縦を行うことが可能な，有線・無線統合型アドホックネットワークを提案した．実装した試作システムは 36 Mbps という高いスループットを持ち，RTT も有線 LAN の特長を有している一方，各探索ロボット群はケーブルの物理的な制約を受けず，無線アドホックネットワークで問題となる他者の通信中継等を行う必要がない，柔軟性の高いシステムである．また，無線アドホックネットワークの機能をあわせ持つため，ケーブルが切断された場合でも迂回経路を無線通信で確保する冗長性も有している．

試作したシステム上で実験を行い，5 台の Kenaf による各種活動と，うち 2 台による 683 m の長距離遠隔操縦を実現した．今後は通信の性能向上だけでなく，ロボットシステム全体としての完成度を向上させ，消防や自衛隊等への実配備を目指す．

謝辞　本研究は NEDO 21 世紀ロボットチャレンジプログラム戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクトの一環として行った．

参　考　文　献

1) 総務省消防庁：倉庫火災発生時の消防活動に関する留意事項について，平成 21 年 6 月 17 日付け消防消第 176 号 (2009).
http://www.fdma.go.jp/html/data/tuchi2106/pdf/210617-sho176.pdf
2) 尼崎消防局：JR 福知山線列車脱線事故時の消防活動概要，消防研修，No.78, pp.120–169 (2004).
3) 田所　諭：大大特プロジェクトの目的と概要，日本ロボット学会誌，Vol.22, No.5, pp.544–545 (2004).
4) 新井雅之，広瀬茂男：球形トレーラ型ケーブルリール機構の開発—機構設計と基礎動作実験，設計工学，Vol.43, No.3, pp.148–156 (2008).
5) Birk, A. and Coindra, C.: Mobile Robot Communication Without the Drawbacks of Wireless Networking, *RoboCup 2005: Robot Soccer World Cup IX*, Bredenfeld, A., et al. (Eds.), pp.585–592, ISBN 978-3-540-35437-6 (2006).
6) 清水雅史：ロボットに適用可能な無線技術の動向，日本ロボット学会誌，Vol.26, No.2, pp.157–160 (2008).
7) 中西弘明，井上紘一，佐藤　彰：被災地における空からの情報収集技術の確立，日本ロボット学会誌，Vol.22, No.5, pp.546–549 (2004).
8) 高本陽一：役立つロボットを目指して，日本ロボット学会誌，Vol.24, No.3, pp.312–315 (2006).
9) 岡田和則：災害時の携帯電話の問題と対策，電子情報通信学会誌，Vol.92, No.3, pp.179–184 (2009).
10) 岡　政秀：通信事業者の災害対策，電子情報通信学会誌，Vol.92, No.3, pp.174–178 (2009).
11) 東京消防庁：火災予防審議会地震対策部会答申書（第 18 期）地震時における地域消防活動と災害情報収集伝達体制のあり方について (2008).
12) 田村裕之，松原美之，細川直史，高梨健一，志賀　崇，白井達郎，吉澤信一：統合化した消防防災通信システム（FiReCos）の開発，消防研究所報告第 89 号，pp.11–25 (2000).
13) 阪田史郎，青木秀憲，間瀬憲一：アドホックネットワークと無線 LAN メッシュネッ

© 2010 Information Processing Society of Japan

トワーク，電子情報通信学会論文誌 B，Vol.J86-B, No.6, pp.811–823 (2006).
14) 高橋義彦，大和田泰伯，須田利章，間瀬憲一：大規模無線アドホックネットワークテストベッドの開発，電子情報通信学会論文誌 B，Vol.J89-B, No.6, pp.836–848 (2006).
15) 王　彪，大坐畠智，川島幸之助：通信品質の向上を図るロボットアドホックネットワークの制御方式，情報処理学会研究報告，マルチメディア通信と分散処理研究会報告，IPSJ SIG Notes 2005 (111), pp.13–18 (2005).
16) ZigBee Alliance. http://www.zigbee.org/
17) Perkins, C.E. and Royer, E.M.: Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing, *Proc. 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, New Orleans, LA, February 1999, pp.90–100 (1999).
18) Kantor, G., et al.: Distributed Search and Rescue with Robot and Sensor Teams, *Field and Service Robotics: Recent Advances in Reserch and Applications* (*Springer Tracts in Advanced Robotics*), pp.529–538, ISBN 9783540328018 (2006).
19) 杉山久佳：ネットワーク化された群ロボットによる被災者発見システム，情報処理学会論文誌，Vol.46, No.7, pp.1777–1788 (2005).
20) Asama, H., Fujii, T., Kaetsu, H., Endo, I. and Fujita T.: Distributed Task Processing by a multiple Autonomous Robot System Using an Intelligent Data Carrier System, *Intelligent Automation and Soft Computing, An International Journal*, Vol.6, No.3, pp.215–224 (2000).
21) 羽田靖史，行田弘一，滝澤　修，海藻敬之，永谷圭司，関口晃博：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，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008，2P2-A06 (2008).
22) 吉田成志，三木哲也：既設ネットワークとアドホックネットワークの結合環境における移動端末間ルーチング方式，電子情報通信学会論文誌 B，Vol.J89-B, No.6, pp.887–896 (2006).
23) Yoshida, T., et al.: A High Mobility 6-Crawler Mobile Robot ‘Kenaf’, *Proc. 4th International Workshop on Synthetic Simulation and Robotics to Mitigate Earthquake Disaster* (*SRMED2007*), p.38 (2007).
24) Thinktube Inc. http://www.thinktube.com/
25) Gyoda, K., Hada, Y. and Takizawa O.: Performance Analysis of the Network Models for the Search Robot Rescue System in the Closed Spaces, *IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*, 21S7 (2007).
26) Gyoda, K., Hada, Y. and Takizawa O.: Performance Analysis of the Network Model and Scenarios for the Search Robot Rescue System, *SICE Annual Conference 2007*, 3B16-4, pp.2677–2681 (2007).
27) 川本将嗣，原　信人，吉田智章，小柳栄次，羽田靖史：LAN ケーブルを敷設するためのロボットの開発，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009（ROBOMEC2009），1A2-G20 (2009).
28) 山田陽滋，中坊嘉宏，斎藤　元：これからの通信技術—通信安全の話題，日本ロボット学会誌，Vol.26, No.2, pp.152–156 (2008).

(平成 21 年 7 月 8 日受付)
(平成 21 年 12 月 17 日採録)

羽田　靖史（正会員）

2003 年筑波大学大学院工学研究科知能機能工学専攻博士課程修了，博士（工学）．2003 年理化学研究所特定協力研究員．2007 年情報通信研究機構専攻研究員，現在に至る．東京大学人工物工学研究センター協力研究員，独立行政法人理化学研究所客員研究員を兼務．災害対応ロボット，自律ロボット，環境知能化，軽航空機，サービス工学等に関する研究に従事．2006 年第 16 回インテリジェント・システム・シンポジウムベストプレゼンテーション賞，2007 年第 2 回競基弘技術業績賞受賞．日本ロボット学会，日本機械学会等の会員．

海藻　敬之

1961 年生．1985 年東京大学理学部化学科卒業．同年日本アイ・ビー・エム入社，汎用機オペレーティングシステム関連の応用開発に従事．1998 年カリフォルニア大学サンタクルーズ校コンピュータ・エンジニアリング修士課程修了．同年より Rooftop communication Inc. 研究員（USA CA，Mountainview）．2001 年より株式会社シンクチューブ代表取締役．IEEE-CS 会員．

松山健太郎

1982 年生．2009 年近畿大学大学院総合理工学メカニックス系工学専攻博士前期課程修了．同年株式会社シンクチューブ入社．アドホックネットワークの研究に従事．

© 2010 Information Processing Society of Japan

行田　弘一

1992 年上智大学大学院理工学研究科電子・電子工学専攻（博士後期課程）修了．博士（工学）．1991 年郵政省通信総合研究所（現・情報通信研究機構）入所．1997〜2001 年 ATR 環境適応通信研究所出向，情報通信研究機構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主任研究員を経て，現在，芝浦工業大学准教授．アドホックネットワークの研究開発に従事．IEEE，電子情報通信学会各会員．

滝澤　　修

1987 年京都大学大学院工学研究科修士課程修了．同年郵政省電波研究所（現・情報通信研究機構）入所．駄洒落，皮肉等日本語修辞表現の工学的解析の研究により 1997 年大阪大学博士（工学）．郵政省通信政策局課長補佐を経て，2000 年から RFID 等のユビキタス技術を用いた非常時防災通信の研究開発に従事．現在，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リーダー．電子情報通信学会，日本災害情報学会等の会員．防災士．

© 2010 Information Processing Society of Japan