

# 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

杉山 久佳<sup>†</sup> 辻岡 哲夫<sup>†</sup> 村田 正<sup>††</sup>

無線アドホックネットワークによって結合された群ロボットによる被災者発見システムを提案する。同システムは、ロボット群およびオペレータが待機するモニタ局からなり、都市災害現場における被災者探索を目的とする。無線アドホックネットワークは、各ロボットによる自律的パス修復によって災害現場における通信パスの切断を修復する。各ロボットは災害現場に展開して、自己の持つセンサによって被災者を検出する。検出した情報はアドホックネットワークを通してモニタ局に伝える。モニタ局では、伝送された情報をオペレータが検証する。自律的パス修復は、アドホックネットワーク運用の基礎となるフォワーディングテーブルに基づく行動アルゴリズムに各ロボットが従うことによって実現する。被災者発見システムの運用方式の1つとして遠隔スペース探索を紹介し、ロボットの故障率を考慮して遠隔スペース探索のシミュレーションを行った。この結果、自律的パス修復に基づく被災者発見システムの有効性が明らかとなった。

## Victim Detection System Consists of Networked Mobile Robots

HISAYOSHI SUGIYAMA,<sup>†</sup> TETSUO TSUJIOKA<sup>†</sup> and MASASHI MURATA<sup>††</sup>

A victim detection system is proposed for rescue operations in urban disaster areas. This system consists of autonomous mobile robots and a stationary monitor station connected by a wireless ad hoc network with an autonomous path recovery. Robots are instructed to detect victims in a disaster area and send the information to the monitor station through the ad hoc network, and autonomous path recovery recovers the communication path breakages that sometimes occur in disaster areas where a conventional recovery scheme for an ad hoc network may not perform well. This additive network operation is executed by autonomous movements of robots which are installed with a behavior algorithm for communication path recovery. The system's performance is examined by a computer simulation for the case of reconnaissance into a distant location, taking into account robot breakdowns.

### 1. はじめに

自律移動ロボットを用いた都市災害救助方式：USAR (Urban Search And Rescue) の研究が進められている(以下、ロボットとは自律移動ロボットを指す)<sup>1),2)</sup>。USARは、特に倒壊した建造物などの瓦礫に囲まれた被災者を探索し、救助することを目的としている。しかし、しばしば劣悪な環境下で行動するロボットには、機械的あるいは電子的な故障を含む種々の問題が発生する。さらに、大規模地震などによって発生する広大な災害現場を単独のロボットが探索することには困難が予想される。

これらの問題は、無線ネットワークによって結合された群ロボットシステムを用いることによって解決さ

れる可能性がある。同システムによれば、もしあるロボットに故障が発生した場合、これを検知した近傍のロボットがその機能を代替することができる。広大な災害現場に対しては、ネットワーク化されたロボット群が互いの位置を調整しながら効率良く展開することができる。同時に各ロボットのセンサをネットワークを介して統合的に機能させることが可能である。

本論文では、無線ネットワークによって結合された群ロボットによるUSARシステムの1つとして、「被災者発見システム」を提案する。被災者発見システムは、USARに要求される機能のうち特に被災者の探索を目的とするシステムである。被災者発見システムは、無線ネットワークによって結合された群ロボットからなり、各ロボットは被災者を検知するセンサを備える。ネットワークの一端にはモニタ局を置き、これを通してオペレータが各ロボットにアクセスする。各ロボットは災害現場に展開し、人間の救助員には侵入不可能な場所を含む探索領域を自律的に行動する。も

<sup>†</sup> 大阪市立大学大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Osaka City University  
<sup>††</sup> 龍谷大学理工学部  
Faculty of Science and Technology, Ryukoku University

しあるロボットが持つセンサが被災者を検知したなら、その情報は無線ネットワークを通してモニタ局に送られる。この情報をオペレータが判定し、被災者の認識と位置の同定を行う。

被災者発見システムの基盤となる無線ネットワークとして「アドホックネットワーク<sup>3)</sup>」を使用し、さらに同ネットワークに付加する機能として、新たに提案する「自律的パス修復」を適用する。アドホックネットワークは、特に電波障害物の散在する災害現場におけるロボット間の接続性、および中央局を用いない分散システムであることによる信頼性において被災者発見システムに適している。自律的パス修復は、災害現場においてしばしば発生する通信リンクの切断を各ロボットの自律的な行動によって修復する方式である。自律的パス修復により、災害現場におけるアドホックネットワークの信頼性をさらに高めることができる。

2章では、被災者発見システムとアドホックネットワークについて説明する。3章では、自律的パス修復を各ロボットの行動アルゴリズムに基づいて示す。4章では、被災者発見システムの運用形態の1つとして「遠隔スペース探索」を紹介し、この探索法を用いたシミュレーションによって被災者発見システムの有効性を検証する。シミュレーションにおいては劣悪な環境に起因する各ロボットの故障率を考慮した。最終章においてこれらの要点を整理する。

## 2. 被災者発見システム

提案する被災者発見システムは、群ロボットと定在するモニタ局からなり、これらすべてがアドホックネットワークによって接続される。各ロボットは必要に応じて自律的パス修復を行い、災害現場における通信リンクの切断を修復する。本章では、まず被災者発見システムを構成するロボットが備えるべき機能について説明し、次に被災者発見システムのシステム構成を示す。最後にアドホックネットワークの基本原則を説明する。自律的パス修復については次章で述べる。

### 2.1 ロボットの機能

各ロボットは災害現場に展開し、瓦礫の間など未発見の被災者 (victim) が存在する可能性のある領域を探索する。この過程で得られた情報をアドホックネットワークにより伝送する。これらの機能の実現に関してロボットが備えるべき要件は以下である。

- (1) 瓦礫に覆われた不整地上を走破することのできる移動能力
- (2) 障害物を認識するセンサ機能とその回避を可能にする自律的制御機能

- (3) 被災者を認識するセンサ機能
- (4) 自己の位置 (モニタ局に対する距離と方向など) を計測する機能
- (5) アドホックネットワークの基盤となる無線通信機能

これらの要件は、災害救助ロボットに関する研究の成果として実現されつつある。たとえば要件 (1) は、キャタピラ型ロボット<sup>4)</sup> や多足型ロボット<sup>5)</sup> によって満足される可能性がある。特に前者は、ロボカップレスキュー<sup>6)</sup> における実験フィールド上でその機能を実証した。自由度の高い多関節構造を持つへび型ロボットであれば、瓦礫の間のわずかな隙間に進入することも可能である<sup>7)</sup>。

要件 (2) に関しては、自律移動ロボット研究において多くの研究例がある<sup>8),9)</sup>。災害救助ロボットにこの機能を備えた例としては、超音波センサと壁沿い移動アルゴリズムを用いた実験例がある<sup>10)</sup>。

要件 (3) にあげたセンサ機能は、たとえばロボットに CCD カメラを搭載して対象物の肌色領域を検知し、検知結果をもとにして被災者を認識するシステムとして実験例がある<sup>10)</sup>。あるいは、FLIR (forward-looking infra-red)<sup>11)</sup> による体温検出に基づいて同様の機能を実現することも可能である。

要件 (4) については、ジャイロスコープと GPS などを組み合わせたシステムにより自己位置を計測する災害救助ロボットの試作例がある<sup>12)</sup>。GPS に IMU (慣性姿勢計測装置) を組み合わせて 1 m 程度の計測精度が得られたとの報告もある<sup>13)</sup>。

要件 (5) は、IEEE 802.11b 規格の無線 LAN モジュールを搭載することにより満足される。同規格は人間の救助チームとロボットを統合したシステム例<sup>12)</sup> をはじめとして多くの災害救助実験システムに採用されている。ただし、いずれも中央局を用いたスター型ネットワークである。IEEE 802.11b 規格をアドホックネットワークに用いたシステムとしては車々間通信への適用例があり、実験によれば約 400 kbps のデータ伝送が実現している<sup>14)</sup>。この伝送速度は、動画像リアルタイムストリーミングに関する規格: MPEG-4 ARTS (advanced real time simple) level 3 プロファイルが要求する速度 384 kbps を満たすので<sup>15)</sup>、被災者の様子を動画像によりオペレータに伝えることが可能となる。

なお、IEEE 802.11b 規格は 2.4 GHz 帯の搬送波を用いる。この搬送波の波長は約 13 cm であるので、たとえば 1 m 四方の電波障害物があればその先への直達波の伝搬は困難となる。この理由から、種々の形状と

材質を持つ障害物が散在する災害現場では、被災者発見システム、すなわちアドホックネットワークと自律的パス修復を用いて通信パスの設定と維持を行うシステムが適すると考える。

以上に述べたように、被災者発見システムがロボットに期待する要件はいずれも実現の可能性があるが、研究段階である場合が多い。しかし本論文では、各ロボットがこれらの要件を備えるものと仮定して議論を進める。

## 2.2 システム構成

図 1 に、災害現場において被災者発見システムが展開する様子を示す。同図では、8 台のロボット：A～H およびモニタ局（monitor station）がアドホックネットワーク（ad hoc network）を形成している。ネットワークは、電波を遮断しロボットの行動を制限する瓦礫（debris）や障害物（obstacle）の間を縫って各ロボットとモニタ局を接続している。モニタ局は、ネットワーク中の固定ノードであり、アドホックネットワークを通して各ロボットの行動を監視するオペレータが待機している。

もしあるロボットが被災者を発見したなら、そのロボットは被災者に関する情報をアドホックネットワークを通してモニタ局に伝える。図 1 は被災者が障害物の陰に存在し、これをロボット A が発見した様子を示す。この場合、ロボット A はロボット B および C によって中継された通信パスを通してモニタ局に情報を伝える。ロボット A から伝送された情報には、ロボット自身の位置とその周囲の画像情報などが含まれる。同様な情報は他のロボットからも随時に伝送されてモニタ局に集められ、オペレータによる検証を受ける。オペレータは各情報が正しく被災者の発見を示すかどうかの最終判断を下す。

もしロボットが被災者を正しく検出できなくても、ロボットから送られた情報の最終判断はモニタ局のオペレータが下す。ロボットとオペレータによるこの階層的な協調作業は、各ロボットの被災者検出機能に対する要求条件を緩和し、単独ロボットやネットワークを持たないロボットシステムの場合に比べて被災者発見作業の信頼性をより高めることができる。しかし、各ロボットの被災者検出能力とオペレータの作業量とのトレードオフや、特に不確かな情報が多くのロボットから伝送された場合などのネットワーク伝送容量の問題など、さらに検討を必要とする問題が今後の課題として残る。

## 2.3 アドホックネットワーク

アドホックネットワークにおいては、互いの伝送範

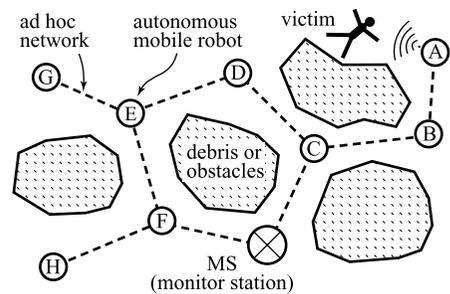


図 1 被災者発見システム

Fig.1 Victim detection system.

囲（transmission range）内にある通信端末 どうしが通信リンク（communication link）を形成する（以下、通信端末を単に端末と呼ぶ）。通信範囲は、通信半径（transmission radius）によって定まる円形の領域であり、その中心にある端末から直接に無線信号が伝達する範囲を指す。アドホックネットワークに含まれる任意の端末どうしは、通信パスを通して情報を交換する。通信パスは、両者の間に位置する中継端末が形成する通信リンクを継続に接続して形成する。

アドホックネットワークには、各端末が情報伝送に際して通信パスを決定する方式（ルーティング方式）に関して種々の方式があるが、大きく 2 種類に分類できる。テーブル駆動方式とオンデマンド方式である<sup>16)</sup>。このうちテーブル駆動方式は、各端末がルーティングテーブルを保持し、端末間での通信の有無にかかわらず定期的にルーティングテーブルを更新することを特徴とする。テーブル駆動方式として DSDV 方式（Destination-Sequenced Distance-Vector）<sup>17)</sup> が代表的であり、他にネットワークを階層化した CSGR 方式（Cluster Switch Gateway Routing）<sup>18)</sup> などがある。オンデマンド方式は、各端末が通信要求を持つたびに宛先へのルートを探査することを特徴とする。オンデマンド方式には AODV（Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing）<sup>19)</sup>、DSR（Dynamic Source Routing）<sup>20)</sup> などがある。

提案する被災者発見システムでは、後に 3 章で述べるように、各ロボットがつねにモニタ局との通信パスの存在を確認し、必要であればただちにパスの修復を行う。したがって、常時定期的に通信パスの確認を行

被災者発見システムにおいては、個々のロボットとモニタ局が通信端末として機能する。

たとえば 図 1 においては、ロボット AB 間、ロボット BC 間、およびロボット C とモニタ局の間にそれぞれ通信リンクが存在する。これらを接続した A→B→C→モニタ局がロボット A とモニタ局間の通信パスである。

うテーブル駆動方式が適している。これに対してオンデマンド方式を用いるなら、あるロボットが被災者を発見しても、モニタ局への通信パスの設定に時間を要したり、あるいは修復が不可能なほど多くの箇所での通信パスが切断していたりするなどの問題が発生する可能性がある。

以上の理由により、被災者発見システムには代表的なテーブル駆動方式である DSDV 方式を用いることとする。なお CSGR 方式は、階層化されたネットワーク内では特定のロボットに通信負荷が集中することから、群ロボットを用いることによる負荷分散の観点から見て災害救助システムには適切ではないと考える。ロボットの故障が生じやすい災害現場では、負荷分散によるシステムの信頼性向上が重要である。

DSDV 方式では、各ロボットが持つルーティングテーブルをフォワーディングテーブル（以下、FT と略称する）と呼ぶ。FT は、ネットワーク内のすべての端末について、それぞれを宛先として情報を伝送する際に利用する次の中継端末を指定する。この中継端末は、近傍の端末のうちの 1 つであり、「次ホップ」と呼ばれる。FT はネットワーク内の各端末を宛先とするエントリの集合である。次ホップは各エントリにおいて個別に指定されている。

各ロボットの FT は、ネットワークトポロジの変化にともなって更新される必要がある。この更新を目的として、各ロボットは定期的に更新パケットを発信する。更新パケットは、発信したロボットのネットワーク内での位置を示す。もしあるロボットがネットワークから切断されたなら、近傍のロボットが発信する更新パケットによってこの切断情報がネットワーク内に伝えられる。更新パケットの伝送においては、中継ロボットに起因する伝送遅延やパケットどうしの衝突などが発生する。したがって、各ロボットの FT の更新には遅延が生ずる場合がある。

図 1 におけるロボット A に注目したとき、その近傍（通信範囲内）にはロボット B のみが存在するので、他のすべてのロボットとモニタ局を宛先とする次ホップはいずれもロボット B となる。またロボット B のモニタ局への次ホップは C、C のモニタ局への次ホップはモニタ局自身なので、ロボット A からモニタ局への通信パスは  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow$  モニタ局となる。もしロボット C からモニタ局への通信リンクが切断したなら、ロボット A、B、および C の FT からモニ

タ局を宛先とするエントリが消失する。しかししばらく後に、ロボット C が自己の FT を更新し、この結果、モニタ局を宛先とするエントリがロボット D を次ホップとして再登録される。新たなロボット C の FT に従えば、ロボット A からモニタ局へのパスは  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow$  モニタ局となる。

以上に述べた手順、すなわちパスの切断に際して迂回路を用いて修復する方法は、アドホックネットワークにおける従来のパス修復方式である。しかしこの従来方式では、迂回路の発見が困難であったり、劣悪な環境下での故障により中継ロボット数の減少が予想される災害現場では正しく機能しなかったりする可能性がある。たとえば、図 1 においてももしロボット B と C の間の通信リンクが切断するか、あるいはいずれかのロボットがその通信機能を失った場合、切断箇所の迂回路が存在しないので、ロボット A が発見した被災者に関する情報をモニタ局に伝えることは不可能となる。特に災害現場では、障害物を避けて限られた数の通信リンクが設定されることが予想されるので、その切断に際して迂回路が存在しない場合がしばしば生ずるものと考えられる。

### 3. 自律的パス修復

自律的パス修復は、災害現場においてしばしば発生し、かつ先に述べたように従来方式では修復が困難な通信パスの切断を回復する方式である。自律的パス修復は、共通の行動アルゴリズムに従う個々のロボットによって自律的に実行される。

本章では、まずこの行動アルゴリズムを示し、次に同アルゴリズムに基づいてロボットが実行する通信パス修復手順の例を示す。

#### 3.1 ロボットの行動アルゴリズム

ロボットの行動アルゴリズムは、モニタ局への次ホップと自己との間の通信リンクが切断した際に、そのリンクを回復することを基本とする（これ以外の通信リンクに関しては、もし切断しても修復の対象としない）。このアルゴリズムに従い、各ロボットは自己が持つ FT のみをチェックして、その現在の状態に応じて自己の行動を決定する。被災者発見システムにおける各ロボットの行動アルゴリズムを、図 2 にフローチャートで示す。同図において NMS とは、モニタ局への次ホップ（Next hop to Monitor Station）を表す。行動アルゴリズムは、DSDV 方式に従う FT

この理由としては、両者の間の距離が増大して通信半径を超えたこと、あるいは両者の間に電波障害物が現れたことなどがあろう。

たとえば、図 1 においてロボット A の NMS はロボット B であり、ロボット B の NMS はロボット C である。ロボット C の NMS はモニタ局自身である。

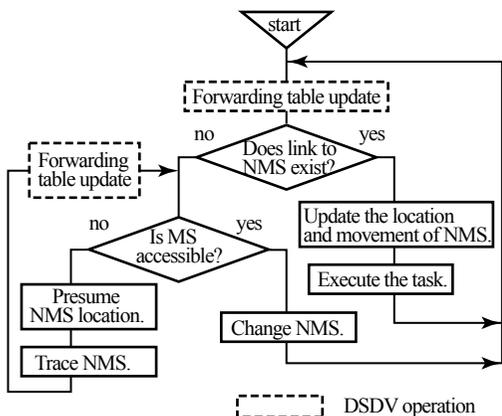


図 2 自律的パス修復を行うロボットの行動アルゴリズム  
Fig.2 Behavior algorithm of each robot for active network operation.

の更新処理をとまなう。この処理 (Forwarding table update) を図中に破線の枠で示し、行動アルゴリズムとの関係を明らかにした。

フローチャートが示すように、各ロボットは次のように行動する：ロボットはまず FT を更新し、この結果 NMS との通信リンクが存在するなら、つねに NMS の位置と移動方向 (location and movement of NMS) に関する知識を更新する。この知識は、NMS との通信リンクが切断した際に、NMS の現在位置を推定する目的で使用する。次に、ロボットは所定のタスクを遂行する。タスクには、災害現場への展開や被災者の検出作業が含まれる。もしロボットが NMS を次ホップとするエントリの消失を知ったなら、すなわち NMS への通信リンクの切断を検知したなら、次の行動はモニタ局がその時点でアクセス可能か (モニタ局を宛先とするエントリが存在するか) どうかによって分岐する。もしモニタ局がアクセス可能であれば、ロボットは当該エントリが含む次ホップを新たな NMS に変更してフローチャートの出発点に戻る。これは、モニタ局への迂回路が即座に発見されたことを意味する。

他方、もしモニタ局がアクセス可能でなければ、すなわちモニタ局へのパスが切断しかつ迂回路が存在しないならば、ロボットは NMS の現在位置を推定 (presume) して NMS の追跡を開始する。NMS の現在位置推定は、通信リンクが切断する直前まで更新していた NMS に関する知識に基づいて行われる。NMS の追跡は、モニタ局を宛先とするエントリが再び回復するまで、すなわちモニタ局がアクセス可能になるまで継続する。この追跡中に常時 FT を更新し、エントリが回復したかどうかを確認する。この追跡が終了したとき、その時点の NMS は、必ずしも追跡の対象ロボッ

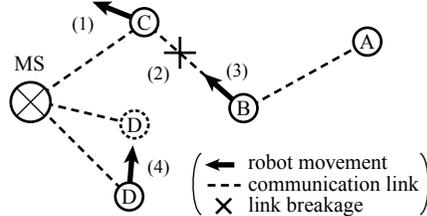


図 3 自律的パス修復の実行例  
Fig.3 An example procedure of communication path recovery.

トであるとは限らない。もしその時点で NMS が変更されたなら、このことは追跡中にモニタ局への他の通信パスが発見されたことを意味する。

ロボットが NMS の現在位置推定に失敗し、この結果、追跡が終了せず無意味に継続する可能性がある。この理由から、追跡の継続時間に時間制限を設ける。もし追跡時間がこの制限を超えたなら、ロボットは追跡対象をモニタ局に変更し、モニタ局の位置に向かって移動する。モニタ局の位置はシステム運用の開始時点で各ロボットが記憶するので、どのロボットもモニタ局の通信範囲内への移動は可能である。以上より、図 2 に示す行動アルゴリズムに従えば、災害現場において各ロボットがモニタ局への通信パスを失っても自律的に通信パスを修復すること、すなわち自律的パス修復が可能であることが分かる。

### 3.2 自律的パス修復の実行例

図 3 は、被災者発見システムを構成するロボットによる自律的パス修復の実行例を示す。手順が開始される直前において、ロボット A はロボット B および C に中継された通信パスを通じてモニタ局にアクセス可能であるとする。通信パスの切断を含む自律的パス修復の手順は以下のとおりである (各項の番号は図中の番号に対応する)。

- (1) ロボット C がロボット B の反対方向に移動する。この結果、ロボット B と C が互いの通信範囲外となる。
- (2) この結果、ロボット B と C 間の通信リンクが切断する。しばらく後に、ロボット A と B の FT からモニタ局とロボット C を宛先とするエントリが消失する。
- (3) NMS (ロボット C) とモニタ局がいずれもアクセス不可能となったので、ロボット B はロボット C の追跡を開始する。他方、NMS (ロボット B) がまだアクセス可能であるので、ロボット A の行動には変化がない。
- (4) ロボット B が C を追跡しているとき、ロボッ

ト D が偶然にロボット B に接近する。この場合、2種類の場合が可能である。第1は、ロボット B がロボット C との通信リンクを回復して追跡が終了する場合である。このとき、ロボット B からモニタ局への通信パスが回復する。第2は、ロボット B がロボット D との通信リンクを形成し、この結果追跡が終了する場合である。この時点において、ロボット B はロボット D を新たな NMS としてモニタ局を宛先とするエントリを保有する。すなわち、モニタ局への通信パスが回復される。

特に (2) における通信リンクの切断は、ロボット C に故障が生じても同様に発生する。この場合は、ロボット D が、ロボット B のモニタ局を宛先とするエントリにおける NMS として登録されるか、あるいはロボット B がロボット C の追跡時間を超過して移動方向をモニタ局に変更し、最終的にモニタ局と直接にアクセスできる状態になるかのいずれかの結果が可能である。

これらの手順を実行した結果、ロボット A と B の距離が通信半径を超過する可能性がある。このことによってもし両者の間の通信リンクが切断したなら、ロボット A はロボット B の追跡を開始し、ロボット B に関する上記の手順と同様にしてモニタ局への通信パスを回復する。

以上に述べた行動アルゴリズムを実行するには、各ロボットが自己の位置を正しく認識し、その位置情報を周囲のロボットに伝える必要がある。この機能は、各ロボットが 2.1 節で述べた GPS を含む自己位置計測機能を備えれば可能となる。しかし特に災害現場においては、倒壊したビルの陰や地下施設の内部など、GPS の利用が不可能な場所においてロボットが行動する場合が生じる。したがって、たとえば GPS の利用が可能一部のロボットが持つ位置情報をネットワークを通して共有する、あるいはこれに加えてロボットどうしが相互に位置を計測し合うなどの方法<sup>21),22)</sup> についてさらに検討する必要がある。

### 3.3 自律的パス修復の問題点

本章では、被災者発見システムを構成する各ロボットが自律的パス修復を行う行動アルゴリズムについて述べた。しかし、本アルゴリズムは比較的単純な原理に基づき、したがって必ずしも被災者発見システムの運用における最適なアルゴリズムではない。行動アルゴリズムに関して今後の検討を要する点は以下の2点である。

#### 1) 被災者発見とパス修復の優先度

図2に示したアルゴリズムでは、各ロボットはNMSとの通信リンクの存在を確認したうえで被災者の探索を含む所定のタスクを実行する。もし当該リンクが存在しなければ、被災者の探索を中断してパス修復作業を優先させる。自律的パス修復を被災者探索より優先させるこの方針は、ロボットが被災者を発見したなら対象物に関する情報をただちにMSに伝え、オペレータによる正確な判断を下すことを可能にする点で優れていると考える。特に、被災者の動画像をリアルタイムストリーミングによってオペレータに伝えようとする場合は、各ロボットからMSへの通信パスがつねに存在することが必要であるので、自律的パス修復を被災者探索より優先させる必要がある。

他方、各ロボットの被災者認識能力が高く、必ずしもオペレータによる最終判断が必要ではない場合は、被災者の探索作業を通信パス修復に優先させるアルゴリズムがより適切となる場合がある。したがって、今後の災害救助ロボット研究の進展によっては、被災者発見とパス修復の優先度に関する方針の見直しが必要となる可能性がある。

#### 2) ネットワークトポロジの考慮

通信リンクの切断に際して、ロボットは周囲のネットワークトポロジを考慮したうえで通信リンクを回復する最適な行動をとることができる。このようにネットワークトポロジを含む種々の情報を考慮して、さらに効率的な自律的パス修復の行動アルゴリズムを検討する必要がある。

## 4. 遠隔スペース探索

都市災害においてはしばしば周囲から隔絶されたスペースが発生し、そこに至る通路に煙や炎が充満して救助隊が到達できない場合がある(以後、このスペースを遠隔スペースと呼ぶ)。この場合、遠隔スペース内に孤立した被災者が存在するかどうかを緊急に判断する必要がある。本章では、遠隔スペース内を探索して被災者を発見することを目的とする被災者発見システムの運用方式:「遠隔スペース探索」を紹介する。

以下の各項では、遠隔スペース探索のシステム運用手順を示し、さらに計算機シミュレーションの結果に基づいて被災者発見システムの有用性を検証する。以後に示すシミュレーション結果は、多数回の試行によって得られた値の平均値である。シミュレータとしては“autonomous mobile robot simulator”<sup>23)</sup>と“ad hoc network simulator”<sup>24)</sup>を組み合わせたプログラムを用いた。

なお、実際の被災者発見システムの運用においては、

複数の遠隔スペースに複数の経路で到達する状況が考えられる．このような一般的な状況に対して，以下に示すシミュレーションモデルは遠隔スペースへの経路を1本とした点においてきわめて限定的な状況を対象とする．一般的な状況における被災者発見システムの有用性については，今後の検討課題である．

#### 4.1 システム運用手順

被災者発見システムによる遠隔スペース探索のシステム運用手順は，遠隔スペース内に設定した目的地へのロボット群の逐次的な移動，および目的地に到達したロボットのその周囲でのランダム歩行からなる．このうち，ロボット群の逐次的な移動は以下のように行う．

- (1) すべてのロボットが，安全地帯に設置されたモニタ局の周囲に集合してアドホックネットワークの運用（各ロボットが更新パケットを発信し，自己のFTを構築すること）を開始する．
- (2) 1台のロボットが遠隔スペース内に設定された目的地に向かって移動を開始する．このロボットを first ロボットと呼ぶ．
- (3) first ロボットの出発後，ある一定の時間が経過したなら，モニタ局周囲に待機するロボットのうちの他の1台，すなわち second ロボットが first ロボットと同じ目的地に向かって移動を開始する．
- (4) 以下同様にして，モニタ局周囲に待機するロボットが一定の時間間隔で逐次的に目的地に向けての移動を開始する．
- (5) first ロボットが目的地に到達したとき，first ロボットはその行動を目的地周囲でのランダム歩行に変更する．続いて目的地に到達する後続のロボットも，同様にその行動をランダム歩行に変更する．この結果，遠隔スペースは次第に被災者を探索するロボットによって満たされる．
- (6) 最終的に，遠隔スペースはロボット群のセンサによってくまなく探索され，もし被災者がスペース内に存在するなら，その情報がモニタ局に伝送される．

以上に述べた被災者発見システムのシステム運用において，各ロボットは図2に示したアルゴリズムにしたがって自律的に行動し，もしモニタ局への通信パスが消失したならその修復を行う．通信パスは，それ

を構成する通信リンクのいずれかが切断したときに消失する．通信リンクは，その両端にあるロボット間の距離が通信半径を超えた場合，あるいは両者の間に電波障害物が現れたときなどに切断する．さらに，劣悪な環境においてロボットの通信機能に障害が発生した場合は，そのロボットを端点とするすべての通信リンクが同時に失われる．

自律的パス修復は，これらの原因による通信パスの切断を修復し，遠隔スペース探索においてすべてのロボットがモニタ局へのアクセスを維持することを可能にする（以下，モニタ局へのパスが存在するロボットを「アクセスロボット」と呼ぶ）．ロボットのモニタ局へのアクセス性は，特にそのロボットが目的地への経路上で中継ロボットとして機能している場合に重要である．この理由は，目的地への経路上ではロボット群は線状のネットワークを形成するので通信リンク切断に際して迂回路の存在を期待できないこと，および同じ理由により，経路上に非アクセスロボットが発生すればその地点以遠の（目的地周辺を含む）システム全体が非アクセスとなってモニタ局への通信パスを失うことにある．

#### 4.2 コンピュータシミュレーション

先に述べたように，ロボット群の目的地への逐次的な移動と，各ロボットの自律的パス修復によるネットワークの維持は，遠隔スペース探索において基本的に重要である．これらのシステム運用方式の有効性を検証する目的で，図4に示すシステムモデルに基づいて計算機シミュレーションを行った．同システムモデルでは，2室のスペースとこれらをつなぐ屈曲した通路がある．モニタ局は一方のスペースの中央に設置される．他方のスペースが被災者の存在を探索する遠隔スペース（distant location）であり，その中央がロボットが目指す目的地（destination）である．

システム運用の初期状態では，40台のロボットがモニタ局の周囲に待機し，逐次的に目的地に向けて移動を開始する．移動は屈曲した通路に沿って行い，移動速度は2Km/hとする．目的地に到達したなら，ロボットはその周囲のランダム歩行を開始する．もしロボットが図2の行動アルゴリズムに従ってNMSを追跡する場合，その追跡速度は4Km/hとし，追跡時間は最大1minに制限されるものとする．これらのパラメータ，およびアドホックネットワークに関する伝送パラメータを表1に示す．

図5は，システム運用（system operation）がどのように進行するかを， $i$ -thロボットの状態と同時に示したタイムチャートである． $\tau$ はネットワークの形成

半倒壊のビル内部など，あらかじめ図面上で遠隔スペースが特定されている場合を考察の対象とする．この場合はオペレータがロボットの目的地と移動経路を指示する．目的地が不確定である場合は，ロボット自身が目的地を設定するなどの方法が別に必要となる．

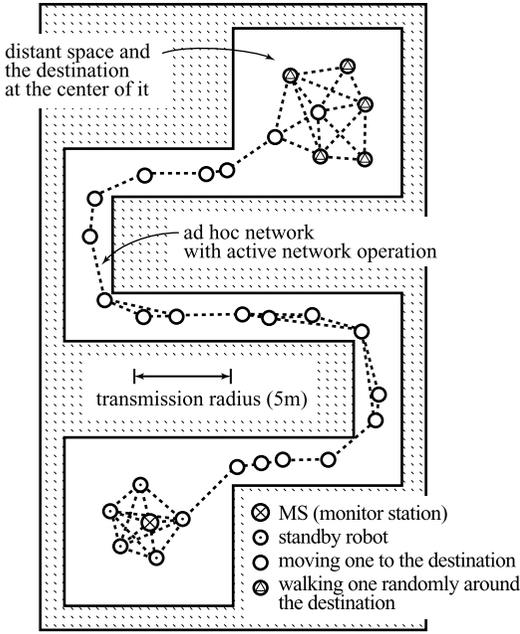


図4 被災者発見システムによる遠隔スペース探索のシミュレーションモデル  
Fig.4 Simulation model of reconnaissance into distant location.

に要する時間を表す．さらに同じ  $\tau$  を経て経過時間が  $2\tau$  となるまで全ロボットはモニタ局の周囲に待機し，この間に FT の最適化を図る．この後に，first ロボットが目的地への移動を開始する．

ロボットが目的地に向けて逐次的に出発する時間間隔を「時間間隔比 (interval ratio)  $c$ 」によって表す．時間間隔比  $c$  は，問題とする時間間隔を，ロボットが通信半径  $r$  の移動に要する時間で割った値である．表1に示すように，通信半径  $r$  を  $5\text{m}$ ，移動速度  $v$  を  $2\text{Km/h}$  としているので，ロボットは通信半径を  $(r/v) = 9\text{sec}$  で移動する．したがって，もし時間間隔比  $c$  が  $0.5$  なら，ロボットの逐次的出発の時間間隔は  $c \times (r/v) = 4.5\text{sec}$  となる．図5に示すように， $i$ -th ロボットの出発時刻は， $2\tau + (cr/v) \times (i-1)$  である．

先に述べたように，遠隔スペースに至る通路は，火災に起因する高温などによって救助隊の進行が困難であると仮定している．この環境はロボットにも影響を与え，その通信機能に障害を与える可能性がある．この理由から，シミュレーションではロボットが目的地に向かう間に生じる故障を考慮する．この間に各ロボットが故障する確率 (probability of breakdown of each robot occurring) を  $\zeta$  で表す．他方，隣り合うロボット間の間隔が通信半径を超える場合，あるいは屈曲点における通路の壁が電波を遮断する場合もしば

表1 シミュレーションパラメータ  
Table 1 Parameters used in the simulation.

ロボットの基本パラメータ	
台数	40 台
移動速度	2 Km/hour
自律的バス修復	
追跡速度	4 Km/hour
追跡時間制限	1 minutes
アドホックネットワーク	
通信半径	5 meters
伝送速度	10 Mbit/sec
更新パケット発信周期	10 times/sec (on average)
更新パケット長	1 kbit/entry

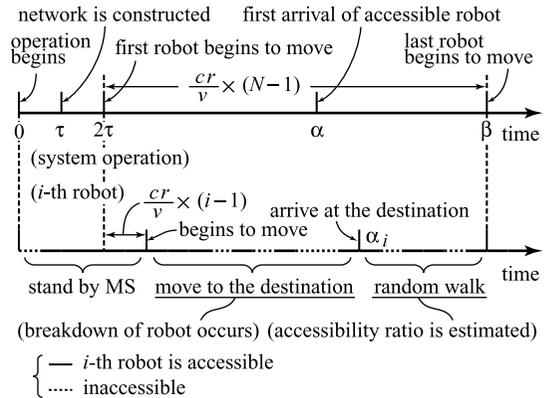


図5 全体のシステム運用と  $i$ -th ロボットに関するタイムチャート  
Fig.5 Simulation scenario of the system operation and the  $i$ -th robot.

しば生じる．これらに起因する通信パスの切断は，自律的バス修復によってただちに修復される．したがって，もし first ロボットが目的地に到達した時点でアクセスロボットではなくても，second ロボットまたは third ロボットが目的地においてアクセスロボットである可能性がある．

シミュレーションにおいては，被災者発見システムの運用特性として，「到達時間 (arrival time)  $\alpha$ 」と「アクセス率 (accessibility ratio)  $\xi$ 」を評価する．前者 (到達時間  $\alpha$ ) は，システム運用の開始時点から，最初のアksesロボットが目的地に到達するまでの経過時間である (図5 参照)．後者 (アクセス率  $\xi$ ) は，目的地の周囲でランダム歩行をするロボットがモニタ局への通信パスを持つ時間比率である． $\xi$  は次の式：

$$\xi = \frac{1}{|D|} \sum_{i \in D} \xi_i, \quad \xi_i = \frac{\eta_i}{\beta - \alpha_i} \quad (1)$$

で定義する．ここに  $\eta_i$  は， $i$ -th ロボットが目的地周囲でランダム歩行をする間にモニタ局にアクセスできる時間の総和である． $\alpha_i$  は， $i$ -th ロボットが目的地に到着してランダム歩行に行動を変更する時点を表す．

$\beta$  は、モニタ局周囲に待機するロボットのうちの最後の1台が目的地に向かう移動を開始する時点、すなわちすべてのロボットが逐次的な移動に残らず使用された時点である。 $\beta$  を、システム運用が終了する時点と見なす (図5参照)。これらの値より、 $i$ -th ロボットのアクセス率として  $\xi_i$  が導かれる。 $\xi_i$  の平均をとってアクセス率  $\xi$  が得られる。この平均処理は、システム運用の終了時点  $\beta$  以前に目的地に到達したすべてのロボットについて行われる。この条件を満たすロボットの集合を  $D$  で表す。

4.3 シミュレーション結果

遠隔スペース探索におけるロボット群の逐次移動の時間間隔比  $c$  が増大すれば、隣合うロボットどうしの距離が広がり、この結果両者が互いの通信範囲外となる可能性が高まる。したがって、 $c$  を大きく設定すれば自律的パス修復の実行頻度が高まる。同様に、ロボットの故障率  $\zeta$  を高くしても自律的パス修復の実行回数が増える。この様子を 図6 に実線で示す。横軸は時間間隔比  $c$  を表す。縦軸 (左側) は、システム運用が終了する時点 (図5における  $\beta$ ) までに自律的パス修復が実行された回数を各ロボットに関する平均値で表す。マークによって示された点がシミュレーション結果である。個々のマークは、図中に表示するように各ロボットの1分あたりの故障率  $\zeta$  に対応する (たとえば、 $\Delta$  は平均して10分に1台の故障が生じる場合である)。図6には、同時にロボットの故障発生数を右側の縦軸で表示し、この特性を一点鎖線で示している。

図6が示すように、時間間隔比  $c$  が増大し、かつロボットの故障率  $\zeta$  が高まれば、これらに対応して各ロボットの自律的パス修復の実行回数が増大する。この結果、たとえば  $c = 0.7$ ,  $\zeta = 0.1$  のときは、各ロボットが平均して 0.2 times/min, すなわち5分に1回の自律的パス修復を行うことが分かる。他方、ロボットの故障回数は (故障率  $\zeta$  が0でなければ)  $c$  の増大とともに増加している。この理由は、 $c$  が増大して自律的パス修復の回数が増えれば、ロボットの目的地への到達時間  $\alpha$  が増大し、この到達時間内に発生する故障回数が増加することにある。

なお、先に2.3節で述べたように、もしDSDV方式ではなくオンデマンド方式に従うルーティングを行うならば、自律的パス修復は各ロボットからの通信要

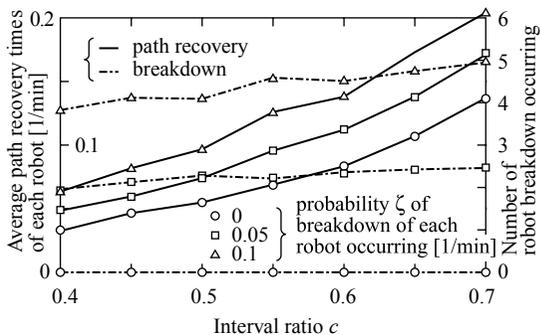


図6 各ロボットによる自律的パス修復の平均回数と故障発生数  
Fig. 6 Average path recovery times of each robot and number of robot breakdown occurring.

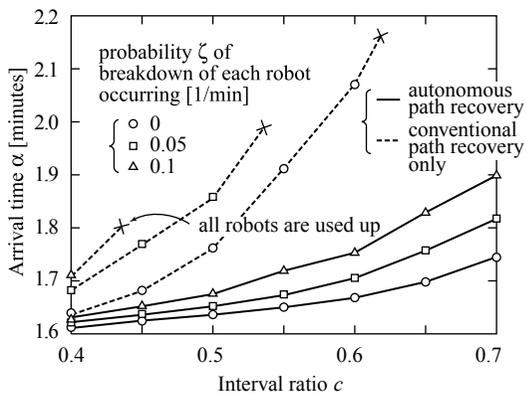


図7 アクセスロボットが目的地に到達する到達時間  $\alpha$   
Fig. 7 Arrival time  $\alpha$  of accessible robot at the destination in the distant space when 40 robots are used.

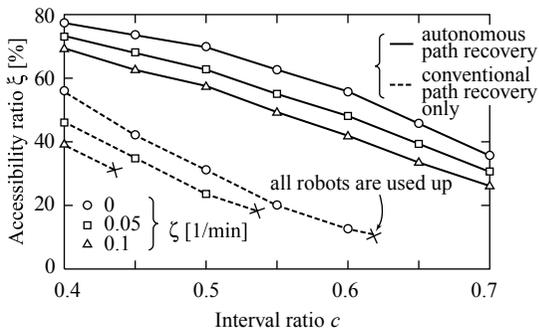


図8 ロボットが目的地周囲をランダム歩行する際のアクセス率  $\zeta$   
Fig. 8 Accessibility ratio  $\zeta$  of robots when walking randomly around the destination in distant space.

求がある場合にのみ実行されるので、図6に示すような頻度の高いパス修復は生じにくいと思われる。したがって、自律的パス修復の適切な実行によって得られる後のシミュレーション結果 (図7および図8) を、オンデマンド方式に基づくルーティングによって

実際のシステム運用においてオペレータは、 $\beta$  以前に被災者の探索作業が終了したと判断する場合がある。あるいは  $\beta$  以後も被災者の探索を継続すると判断する場合もある。しかし、これらの場合はシミュレーションにおいては考慮していない。

得ることは困難であると考えられる。

図 7 は到達時間  $\alpha$  のシミュレーション結果である。横軸は時間間隔比  $c$  を表し、縦軸は到達時間  $\alpha$  を分単位で表す。マークによって示された点がシミュレーション結果である。個々のマークが持つ意味は図 6 と同じである。自律的バス修復の有効性に関する検証を目的として、各ロボットが自律的バスの修復を行わない場合、すなわち従来方式による（非自律的な）通信バス修復のみが行われた場合を破線によって併記した。自律的バス修復がなければ、自律的バス修復を行う場合に比べて到達時間が大きくなる。特に、時間間隔比  $c$  がある臨界点を超えると、システム運用の終了時点  $\beta$  までにアクセスロボットが目的地に到達することが困難となる。この臨界点を図中に  $\times$  で示した。

先に述べたように、時間間隔比  $c$  が増大すれば自律的バス修復の実行頻度が高まって到達時間に遅れが生じる。同様に、ロボットの故障率  $\zeta$  を高くしても到達時間は増大する。しかし図 7 に示すように、自律的バス修復が行われるなら、これらのパラメータの増大は到達時間に大きな影響を与えない。他方、自律的バス修復がなければ、これらは到達時間に対して深刻な影響を与える。

たとえば、時間間隔比  $c$  が 0.7 に等しく、ロボットの故障率  $\zeta$  が 0.1 に等しければ、到達時間は平均して 1.9 min である。この値が実現するなら、実際の被災者探索活動においては許容できる可能性がある。これに対し、同じ故障率  $\zeta$  においても自律的バス修復がなければ、特に時間間隔比  $c$  が 0.44 を超えた場合にシステム運用が困難になる。たとえロボットの故障が生じない場合 ( $\zeta = 0$  の場合) においても、自律的バス修復を用いた場合の到達時間は、自律的バス修復を行わない場合に比べ、表示された  $c$  の範囲において顕著に短縮している。これらのシミュレーション結果は、図 2 に示した行動アルゴリズムに基づく自律的バス修復の有効性を示している。

図 8 は、ロボットが目的地周囲のランダム歩行を行っているときのモニタ局へのアクセス率を示す。横軸は時間間隔比  $c$  を表し、縦軸はアクセス率  $\xi$  を表す。すべてのマークと直線が持つ意味は図 7 と同じである。特に臨界点  $\times$  は、これを超える  $c$  に対してはアクセスロボットが目的地に到達できないので、アクセス率の算出が無意味であることを示す。この臨界

点以前においても、自律的バス修復なしの場合に比べて、自律的バス修復を行う場合のロボットのアクセス率が顕著に改善されることが分かる。たとえばロボットの故障率  $\zeta$  が 0.1 か時間間隔比  $c$  が 0.4 の場合、自律的バス修復なしではアクセス率  $\xi$  が 40% に満たないのに比べ、各ロボットが自律的バス修復を行えば、70% を超えるアクセス率が得られる。

## 5. まとめ

無線アドホックネットワークによって結合された群ロボットによる被災者発見システムを提案した。同システムは、アドホックネットワークを通して情報交換を行うロボット群とオペレータが待機するモニタ局からなる。ロボットは災害現場に展開し、もしセンサシステムが被災者を検出したなら、その情報をモニタ局に伝える。モニタ局に待機するオペレータは、伝送された情報が被災者を正しく検知したかどうかの判断を下す。自律的バス修復は、ロボットがモニタ局への通信バスを失ったとき、その自律的な行動によって通信バスを修復する方式である。通信バスの消失は、災害現場においてはしばしば発生する可能性がある。被災者発見システムが持つこの機能によって、ロボットの故障が発生する可能性のある劣悪な環境下においても、システムの信頼性を保つことができる。

被災者発見システムの運用方式の 1 つとして遠隔スペース探索を紹介した。遠隔スペース探索は、救助隊が到達できない隔離したスペース内に被災者が孤立している可能性がある場合、そのスペース内をロボット群によって探索しようとする方式である。システム運用手順は、遠隔スペース内へのロボット群の逐次的な移動、および目的地に到達したロボットのその周囲でのランダム歩行からなる。特定のシステムモデルにおいてパラメータを設定し、さらにロボットの故障がランダムに発生するものと仮定して計算機シミュレーションを行い、アクセスロボットの目的地への到達時間、およびその周囲でのランダム歩行時のモニタ局へのアクセス率を求めた。この結果、提示したシステムモデルとパラメータにおける被災者発見システムの有効性が明らかとなった。

今後は、2.1 節にあげたロボットが備えるべき要件に関する詳細な検討、2.2 節で述べたロボットとオペレータの協調作業の効率化、および 3.3 節にあげたロボットの行動アルゴリズムの改善に関する検討が必要である。さらに、4 章で述べたように、一般的な状況における被災者発見システムの有用性の検討も今後の検討課題である。

先に述べたように、シミュレーションは多数回試行した。もしこの中の 10% を超える場合においてアクセスロボットが目的地へ到達できなかったなら、そのときの時間間隔比が臨界点であると見なした。

なお、本研究は大川情報通信基金の研究助成により行われた。

### 参 考 文 献

- 1) Murphy, R., Casper, J., Micire, M. and Minten, B.: Mobility and Sensing Demands in USAR, *IECON2000*, Vol.1, pp.138–142 (Oct. 2000).
- 2) Murphy, R.: Trial by Fire (Rescue Robots), *IEEE Robot. and Automat. Mag.*, Vol.11, No.3, pp.50–61 (2004).
- 3) Hubaux, J.P., Gross, T., Boudec, J.L. and Vetterli, M.: Toward Self-Organized Mobile Ad Hoc Networks: The Terminodes Project, *IEEE Commun. Mag.*, Vol.39, No.1, pp.118–124 (2001).
- 4) Zalud, L. and Kopečný, L.: Teleoperated Reconnaissance Robotic System, *Proc. SSRR '04* (2004).
- 5) Fischer, O., et al.: Teleoperating a Six-Legged Walking Machine in Unstructured Environments, *Proc. SSRR '04* (2004).
- 6) Osuka, K., Murphy, R. and Schultz, A.C.: USAR Competitions for Physically Situated Robots, *IEEE Robot. and Automat. Mag.*, Vol.9, No.3, pp.26–33 (2002).
- 7) Erkmén, I., et al.: Snake Robots to the Rescue, *IEEE Robotics and Automation Mag.*, Vol.9, No.3, pp.17–25 (2002).
- 8) Florczyk, S.: *Robot Vision: Video-based Indoor Exploration with Autonomous and Mobile Robots*, John Wiley and Sons (2005).
- 9) Gavin, A.S. and Brooks, R.A.: *Low Computation Vision-Based Navigation for a Martian Rover*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. (1993).
- 10) Chang, C. and Brando, A.: Semi-Autonomous Victim Search, *Proc. SSRR '04* (2004).
- 11) Owens, K. and Matthies, L.: Passive Night Vision Sensor Comparison for Unmanned Ground Vehicle Stereo Vision Navigation, *IEEE ICRA*, Vol.1, pp.122–131 (2000).
- 12) Driewer, F., et al.: Hybrid Telematic Teams for Search and Rescue Operations, *Proc. SSRR '04* (2004).
- 13) Sukkariéh, S., Nebot, E.M. and Durrant-Whyte, H.F.: A High Integrity IMU/GPS Navigation Loop for Autonomous Land Vehicle Applications, *IEEE Trans. Robot. and Automat.*, Vol.15, No.3, pp.572–578 (1999).
- 14) Festag, A.: FleetNet: Bringing Car-to-Car Communication into the Real World, *11th World Congress on ITS* (2004).
- 15) Coding of audio-visual objects Part 2: Visual, AMD 1: Visual extensions, ISO/IEC 14496-2:1999/Amd. 1:2000(E) (Jan. 2001).
- 16) Royer, E.M. and Toh, C-K.: A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks, *IEEE Personal Communications*, pp.46–55 (1999).
- 17) Perkins, C.E. and Bhagwat, P.: Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers, *ACM SIGCOMM'94*, pp.234–244 (1994).
- 18) Chiang, C.-C.: Routing in Clustered Multihop, Mobile Wireless Networks with Fading Channel, *Proc. IEEE SICON '97* pp.197–211 (Apr. 1997).
- 19) Perkins, C.E. and Royer, E.M.: Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing, *Proc. 2nd IEEE Wksp. Mobile Comp. Sys. and Apps.*, pp.90–100 (Feb. 1999).
- 20) Johnson, D.B. and Maltz, D.A.: Dynamic Source Routing in Ad-Hoc Wireless Networks, *Mobile Computing*, Imielinski, T. and Korth, H. (Eds.), pp.153–81, Kluwer (1996).
- 21) Sugiyama, H.: A Method for an Autonomous Mobile Robot to Recognize its Position in the Global Coordinate System When Building a Map, *IEEE/RSJ IROS'93*, Vol.3, pp.2186–2191 (1993).
- 22) Sugiyama, H. and Murata, M.: A Method of Map Building with Multiple Mobile Robots in a Cooperative Process, *The 1st World Congress on Intelligent Manufacturing Processes & Systems*, pp.824–829 (1995).
- 23) Sugiyama, H. and Murata, M.: AMRS: An Autonomous Mobile Robot Simulator, *Memoirs of the Faculty of Engineering*, pp.105–121, Osaka City Univ. (1996).
- 24) Sugiyama, H., Tsujioka, T. and Murata, M.: Ad Hoc Network Simulator Based on DSDV Routing Method, *Memoirs of the Faculty of Engineering*, pp.43–58, Osaka City Univ. (2002).

(平成 16 年 9 月 13 日受付)

(平成 17 年 5 月 9 日採録)



杉山 久佳

1978年名古屋大学工学部電気工学科卒業。1983年同大学大学院博士課程修了。同年日本電信電話公社(現NTT)入社。1994年より、大阪市立大学講師。現在、同助教授。無線通信、光通信、移動ロボット間通信等の研究に従事。著書『デジタル信号処理』。工学博士。



辻岡 哲夫

1992年電気通信大学電気通信学部電子工学科卒業。1994年大阪市立大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年NTT光ネットワークシステム研究所入所。2000年より、大阪市立大学助手。現在、同講師。符号化変調、光直交符号、超高速メディア転送システムの研究に従事。工学博士。



村田 正

1970年大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻博士課程修了。同年大阪大学助手同講師、同助教授、大阪産業大学教授、大阪市立大学教授を経て、2005年龍谷大学教授。電子回路、通信方式、無線通信に関する研究に従事。著書に、電子回路の基礎、放送・通信・コンピュータ等。工学博士。

