

機関番号：24402

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20500073

研究課題名（和文）災害救助用群ロボットネットワークシステム

研究課題名（英文）Multi-robot network system for rescue operations

研究代表者

杉山 久佳（SUGIYAMA HISAYOSHI）

大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20264799

研究成果の概要（和文）：群ロボットがモバイルネットワークを維持しながら未知の災害現場を探索する方式として、既存の連鎖ネットワーク形成方式に群ロボット未知領域探索法を組み合わせた方式を提案し、その有効性を確認した。また、モバイルネットワークにもとづくシステム内ワイヤレス給電方式の基盤となる給電リンクについて検討し、その最適設計法を明らかにし、その有効性を実験的に確認した。

研究成果の概要（英文）：A method is proposed and confirmed that makes rescue robots possible to explore unknown environment maintaining their mobile network. This method is a combination of the method for multi-robot to form chain network and that to explore unknown environment. An optimal design method is investigated for power supply link of multi-robot network for wireless power supplying.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：モバイルネットワーク技術，移動ロボット，レスキューシステム

1. 研究開始当初の背景

近年になって連続して発生した大地震や大規模なテロ事件、あるいはハリケーンなどの破壊的な気象現象などによって、人口密集都市のこれらの災害に対する脆弱性が明らかになりつつある。本研究は、都市災害発生時に被災者のすみやかな救出を可能にする群ロボットによる救助システムの研究と開発を研究分野とする。ロボットによる救助システムは、人間の救助隊が持つ問題点、すなわち行動環境が制約されることおよび2次災害の可能性への対策から、多くの機関によって研究が行われている。しかし従来の研究

例では、災害現場におけるシステムの実現性と信頼性、および具体的なシステム運用手順などに関する検討が不十分であった。

2. 研究の目的

これらの従来研究に対して本研究では、群ロボットとこれらを接続するモバイルネットワークからなる災害救助システム「群ロボットネットワークシステム」を研究の対象として、以下の目的を設定して研究を進めた。

(1) 群ロボットがモバイルネットワークを維持しながら災害現場を探索することを可能とする、個々のロボットの移動方式を探る。

(2) モバイルネットワークを用いた情報交換に基づき、複数ロボットが協調的に他のロボットに遠隔給電を行うことを可能にする、システム内ワイヤレス給電方式を探る。

3. 研究の方法

上記2点の研究目的ごとに述べる。

(1) 群ロボットがモバイルネットワークを維持しながら未知の災害現場を探索する方式として、報告者が先に提案した「連鎖ネットワーク形成方式」に基づき、さらに Burgard によって提案された「群ロボット未知領域探索法」を導入する新たな方式「群ロボットによる連鎖ネットワークを用いた災害現場探索法」を検討する。本方式によれば、群ロボットによる未知領域探索を、基地局を一端とする連鎖ネットワーク形成とその未知領域探索の進展にともなう変形を持続させながら行うことが可能になる。本提案を実現する詳細な方式検討に加えてシミュレーション実験を行い、提案方式の有効性を確認する。

(2) まず、モバイルネットワークにもとづくシステム内ワイヤレス給電方式の概要を述べる。本方式では、外部の電源から有線によって常時に十分な給電を受けることを前提とする基地局が電力供給源となる。この電力源から遠隔で給電を受けるレスキューロボットが、基地局から直接に給電を受けることのできない他のレスキューロボットに対してさらに給電を行う。このバケツリレー方式を必要に応じて繰り返すことによって、レスキューシステム内のすべてのロボットに対する遠隔給電を実現する。遠隔給電に必要な情報（各ロボットの蓄電状況など）は、基地局およびロボットどうしがモバイルネットワークを用いて情報交換する。本方式の実現には、まず給電ネットワークの基盤となる給電リンクの検討を行う必要がある。給電リンクとは、1対1のロボット間の遠隔給電システムであり、同給電リンクにおける電力伝送特性を最適にするシステム設計パラメータの検討を行う。次に、複数のロボットが協調的に他のロボットに給電する局所的給電ネットワークの検討を行う。

4. 研究成果

前述した2点の研究目的ごとに述べる。

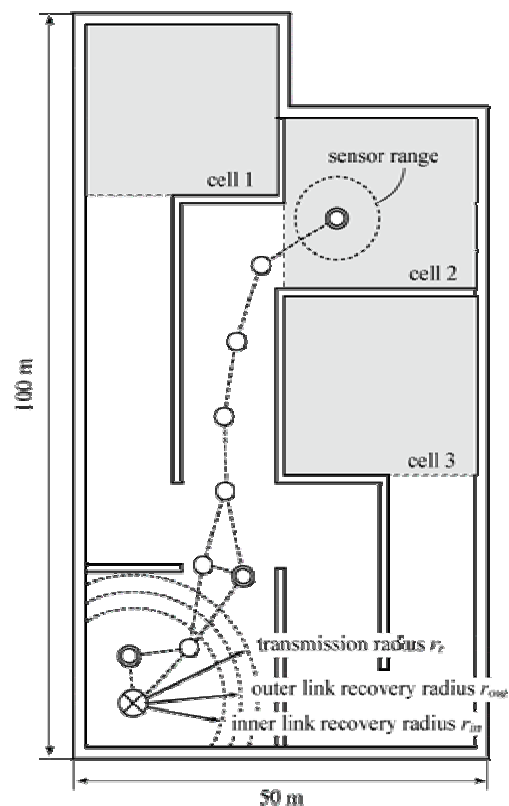
(1)「連鎖ネットワーク形成方式」とは、DSDV方式にもとづくアドホックネットワークを仮定し、各ロボットがネットワークポロジ-上の位置に応じて、自己を探索ロボット（Search Robot, 以下 SR と略する）および中継ロボット（Relay Robot, 以下 RR と略する）に分類する方式である。この分類は、ネットワークポロジ-の変化にともなって適宜に更新される。分類基準は以下である。（NMS とは、Next Hop to Base Station, すなわち基地局への次ホップノードを指

す。）

(SR) 隣接するどのロボットに対しても、そのロボットの NMS になっていないこと。
(RR) 隣接するロボットのうち少なくとも一台に対して、そのロボットの NMS になっていること。

ここに、隣接するロボットとはフォーディングテーブル上で1ホップの距離にあるロボットを指す。上記基準の判定に用いる目的で、各ロボットが隣接するすべてのロボットに対して、自己の NMS を伝える。SR は主として災害現場内の目的地に対して移動し、RR は SR と基地局との通信ネットワークを維持することのできる最適な位置をそれぞれが計算し、その目的地に移動する。

「群ロボット未知領域探索法」は、Yamauchi によって提案されたフロンティア探索方式（Frontier-based Exploration）を、Burgard 等が群ロボットによる協調的探索に拡張した方式である。フロンティア探索方式は、探索領域内においてロボットがすでに探索を行った領域（既探索領域）と未探索領域との境界をフロンティアと定め、フロンティアに含まれる位置をロボットの次の探索目標とする方式である。群ロボット未知領域探索法は、このフロンティア内の探索目標を複数のロボットが協調的に決定する方式である。



(図1) 災害現場のシミュレーションモデル

以上に述べた「連鎖ネットワーク形成方式」

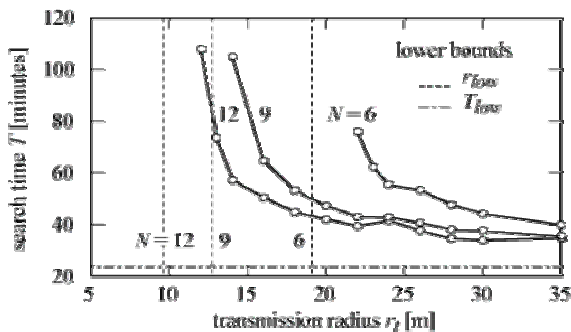
および「群ロボット未知領域探索法」を組み合わせ、「群ロボットによる連鎖ネットワークを用いた災害現場探索法」を提案した。提案方式では、災害現場探索の各時点において決定する複数のSR（探索ロボット）がたがいにネットワークを通じた情報交換により協調的に各自の移動目的地を決定する。この目的地は災害現場内の既知領域と未知領域の境界にあるフロンティア領域内から選定する。これらの既知領域と未知領域は、各ロボットが災害現場探索の過程で作成し、ネットワークを通じて共有することを仮定する。

提案した「群ロボットによる連鎖ネットワークを用いた災害現場探索法」の有効性を確認する目的で、計算機シミュレーションを行った。以下に、災害現場と基地局、およびレスキューロボット群をモデル化したシミュレーションモデルを示す。

同モデルにおいて、群ロボットと基地局によるアドホックネットワーク形成、および領域探索のパラメータを以下に定めた。

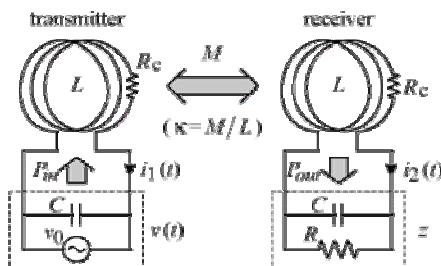
- ・ロボット台数 6, 9, 12 [台]
- ・通信半径 (transmission radius) 5~35[m]
- ・センサレンジ (sensor range) 5[m]
- ・ロボット移動速度 1 または 2[Km/h]

これらのパラメータにもとづくシミュレーション結果として、以下のグラフを得た。



(図2) シミュレーション結果

同グラフは、図1に示す災害現場内において群ロボットによる探索が、通信半径がある長さを下回らなければ、適当と判断することができる時間内に達成できることを示す。



(図3) 1対のコイルからなる給電リンク

(2) モバイルネットワークにもとづくシステム内ワイヤレス給電方式の検討として、まず同方式の基盤となる給電リンクの検討を行った。図3は、給電リンク解析に用いた回路である。

同回路では、コイルの内部抵抗を R_c で表し、この内部抵抗によって消費される電力が伝送効率低下の主因であるとする。この仮定のもとで回路解析を行い、まず以下の式によって伝送効率 ξ_m を最大とする受電側インピーダンス z^e を求めた。ここに、 κ は R_c とインダクタンス L との比率であり、コイルの形状のみから導くことができる。

$$\xi_m = 1 - \frac{2\sigma(\sqrt{\sigma^2 + k^2\omega^2} - \sigma)}{k^2\omega^2}$$

$$z_r^e = L\sqrt{\sigma^2 + k^2\omega^2}, \quad z_i^e = -L\omega$$

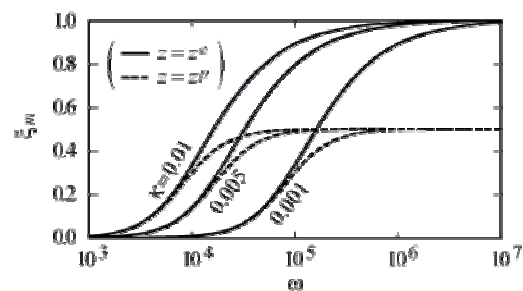
他方、以下の式によって、有効伝送パワー P を最大とする受電側インピーダンス z^p を求めた。これらの式において、 z の添え字 r は複素インピーダンスの実部を、 i は虚部をそれぞれ表す。

$$P_m = \frac{V^2 k^2 \omega^2}{8L\sigma(\sigma^2 + (1+k^2)\omega^2)},$$

$$z_r^p = L\sigma \frac{\sigma^2 + (1+k^2)\omega^2}{\sigma^2 + \omega^2},$$

$$z_i^p = -L\omega \frac{\sigma^2 + (1-k^2)\omega^2}{\sigma^2 + \omega^2}$$

これらの式にもとづき、具体的なシステムパラメータに対する給電リンクの特性を得た。図4は、このうち最大伝送効率の周波数に対する特性である。

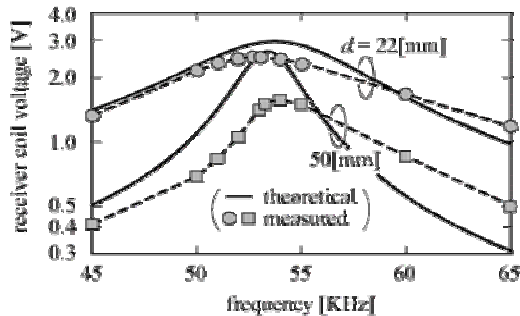


(図4) 最大伝送効率 ξ_m 対周波数

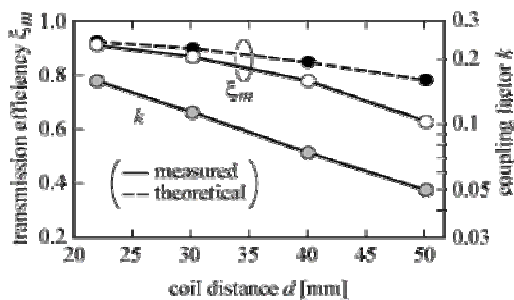
これらの具体的な特性グラフにもとづき、指定されたシステムパラメータに対する最適設計を行うことが可能になった。図5は、この最適設計にもとづいて試作した給電リンクの、実験による特性グラフである。

他方、図6は給電リンクの伝送効率を測定値よりおおまかに算出したグラフである。主な実験パラメータは以下である。

- ・コイル半径 65[mm]
- ・コイル導線巻き数 89[turns]
- ・インダクタンス L 0.718[mH]
- ・コイル内部抵抗 R_c 1.45[]
- ・コンデンサ容量 C 12.4[nF]



(図5) 給電リンクの受電側コイル電圧



(図6) 給電リンクの伝送効率

実験によって得られた値と理論値を比較した結果、給電リンクの最適設計を可能とする理論計算に誤りのないことがわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

H. Sugiyama, T. Tsujioka, M. Murata, Coordination of Rescue Robots for Real-Time Exploration Over Disaster Areas, International Journal of Computer Systems Science and Engineering (IJCSSE), 査読有, 2011 (Selected Paper, 採録決定)

杉山久佳, 非放射型磁気共振機構に基づく無線電力伝送リンクの最適設計, 電子情報通信学会論文誌C, 査読有, Vol.J93-C, No.6, 2010, pp.207-210

杉山久佳, 群ロボットレスキューシステムの非接触型給電ネットワーク, 計測自動制御学会論文, 査読有, Vol.44, No.12, 2008, pp.1009-1011 (Selected Paper)

[学会発表](計7件)

H. Sugiyama, Optimal Designs for Wireless Resonant Energy Link with

Symmetrical Coil Pair, IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission (IMWS-IWPT), 査読有, Kyoto, May, 2011

H. Sugiyama, Wideband Signal Transmission by QoS Ad Hoc Networking for Multi-Robot Rescue Systems, 3rd International Symposium on Applied Science in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL2010), 招待講演のため査読無, Rome, Nov, 2010

H. Sugiyama, Autonomous Chain Network Formation by Multi-Robot Rescue System with Ad Hoc Networking, 8th IEEE International Workshop on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR2010), 査読有, Bremen, July, 2010

H. Sugiyama, Optimal Designs for Wireless Resonant Energy Link Based on Nonradiative Magnetic Field, 13th IEEE International Symposium on Consumer Electronics (ISCE2009), 査読有, Kyoto, May, 2009

H. Sugiyama, Integrated Operations of Multi-Robot Rescue System with Ad Hoc Networking, 2nd International Conference on Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems (Wireless VITAE 2009), 招待講演のため査読無, Alborg, May, 2009

杉山久佳, レスキューロボット用非接触型給電システムの最適設計, 第9回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, 査読無, 岐阜, 12月, 2008

H. Sugiyama, T. Tsujioka, M. Murata, Coordination of Rescue Robots for Real-Time Exploration Over Disaster Areas, 11th IEEE International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC2008), 査読有, Orland, May, 2008

[図書](計3件)

H. Sugiyama, Wireless Energy Transfer based on Electromagnetic Resonance: Principles and Engineering Explorations, InTech Open Access Publisher, 2011, ページ未定(分担執筆)

H. Sugiyama, Telecommunications in Disaster Areas, River Publisher, 2011 , pp.213-241 (分担執筆)
杉山久佳, ワイヤレス・エネルギー伝送技術の最前線, エヌ・ティ・エス, 2011 , pp.310-320 (分担執筆)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

杉山 久佳 (SUGIYAMA HISAYOSHI)
大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号 : 20264799

(2)研究分担者

辻岡 哲夫 (TSUJIOKA TETSUO)
大阪市立大学・大学院工学研究科・講師
研究者番号 : 40326252

研究分担者

原 晋介 (HARA SHINSUKE)
大阪市立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号 : 80228618

(3)連携研究者

なし