

平成21年 4月30日現在

研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19500145
 研究課題名（和文） マルチロボット協調による可変構造モバイルセンサネットワーク
 研究課題名（英文） Reconfigurable Mobile Sensor Network with Multi-Robot Cooperation
 研究代表者
 関山 浩介（SEKIYAMA KOUSUKE）
 名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：40293675

研究成果の概要：

本研究では移動ロボットをアドホックモバイルセンサネットワークのノードと見なし、ロボットの環境探査に伴い、相互の通信リンクの接続を維持するような自律的な自己位置配置をロボット間の分散協調によって実現するシステムを構築した。各ロボットの位置、シンクノードである操作パネル GUI に収集され、ディスプレイ上の任意のロボットを選択し、適当な地点へ向かわせるためのマルチホップテレオペレーションシステムを実現した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：自律分散ロボット，マルチロボット，モバイルセンサネットワーク

1. 研究開始当初の背景

モバイルセンサネットワークの研究が進められている一方、ロボットの通信リンクを維持するような自己位置配置を完全分散的に行う研究は見られなかった。ネットワークロボットにおいては従来の通信インフラを適用するものであり、アドホック無線ネットワークの適用例は少なかった。

2. 研究の目的

本研究では、電磁波到達率や障害物の移動など環境に変化があつて、また観測地点の変更などミッションの変化にも対応可能な、可

変構造モバイルセンサネットワーク (= Mobile Robotic Sensor Network 以下 MRSN) を構築することを目的としている。ミッションに合わせたネットワークノード (ロボット) の配置を実現するにあたり、従来型のアクセスポイント (AP) を利用する集中制御型ネットワークでは、ロボットの移動可能な領域が、AP の通信範囲に限定されてしまうため、フレキシブルなネットワークを構築しにくい。そこで、P-to-P 通信機能を搭載したロボットにより MRSN を構成する。このように MRSN を完全分散ネットワークとして構築することで、環境やミッションの変化に柔軟な

ネットワークを構築することが可能になるが、無線通信に関して新たな問題が出現する。それらを含めて、提案する MRSN を実現するために解決すべきサブ課題を列挙する。

課題 1 : 環境やミッションに合わせたロボットの配置方法

課題 2 : ロボットの配置変更に伴って変更されるべき通信ルートの再構築方法

課題 3 : P-to-P 通信機能を持った自律移動ロボットシステム

課題 4 : 分散通信ネットワークにおいて、通信衝突によるパケットロスを防ぐための通信タイミング制御手法

上記の主要な 4 課題を解決することで、目的とする MRSN が実現可能である。

3. 研究の方法

研究目的に示すように、研究課題を主に 4 つのサブ課題に分割した。以下それぞれの課題について研究の方法を述べる。

課題 1 : 環境やミッションに合わせたロボットの配置方法

ネットワークを構成するロボットが少数の場合は、ネットワーク上の端末を使ってオペレータが個別に指示を送れば事足りるが、これではスケーラビリティの低いシステムである。そこで、**課題 1** では、各ロボットがそのロボットの置かれた状況を考慮して、移動すべき方向を自律的に判断して移動することで、全体として有意なネットワークを構築しうる自律配置アルゴリズムを開発する。

自律配置アルゴリズムは、様々な MRSN のアプリケーションに応用可能なようにスケーラビリティを考慮して設計される必要がある。実環境では、障害物の移動、電磁波伝搬特性の変化や観測対象の移動など、様々な環境の変化が MRSN に影響する。また、観測したいターゲットの位置や観測情報の集約地点であるシンクノード位置の変更もあり得る。さらに、多くのロボットは環境探索と同時に通信中継局としての役割も担うため、1 体のロボットの身勝手な移動によりネットワークが分断してしまう可能性もある。従って、移動ロボットの配置は環境とセンサネットワークの状態に適応して調整されなければならない。そこで、環境とセンサネットワークの状態を考慮してロボットに的確な配置をさせる手法として、我々は接続優先則に基づく自律配置アルゴリズムを提案する。このアルゴリズムは複数ロボットの協調動作モデルを規定する。移動方向を個々のロボットの意志決定に委ねるため、電磁波伝搬特性などの局所的な変化にも柔軟な対応が可能である。

自律配置アルゴリズムの開発では、シミュ

レーションにより個々のロボットの意志決定アルゴリズムが適切かどうかを確認し、続いて実機ロボットによる実験により有効性を検証する。

課題 2 : ロボットの配置変更に伴って変更されるべき通信ルートの再構築方法

ルーティングアルゴリズムは、ネットワークポロジの頻繁な変動に対応した、リアクティブ型プロトコルが適している。IETF (インターネットの標準化団体) は、リアクティブ型プロトコルとして、Dynamic Source Routing (DSR) と Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) を推奨しているが、本研究ではノード数の変化に対してよりスケーラビリティの高い AODV を採用する。AODV はその特製上、通信開始までに遅延が起こるといった問題があるが、自律配置アルゴリズムで規定される接続優先則をうまく利用することで、通信開始までの遅延を軽減することが可能である。AODV は実験により有効性を検証する。

課題 3 : P-to-P 通信機能を持った自律移動ロボットシステム

ロボットシステムの構築自体が本研究の目的ではないため、ロボットシステムは市販の電子デバイスを統合することで実現する。

ロボットの意思決定モジュールには PC (VAIO type-u: SONY), Pr-to-Pr 通信モジュールには Zigbee デバイス (ZIG-100B: Best-TechnologyCo., Ltd.), 移動モジュールには移動ロボット (Amigobot: Mobile Robots Inc.) を採用する。通信モジュールと移動モジュールは RS232, USB コネクタを介して PC に接続されている。

各デバイスを統合するにあたって、動作プログラムの開発が重要である。動作プログラムは PC 上で起動する実行プログラムが他のデバイスを制御するという形をとる。このプログラムでは、マルチスレッドプログラミング技術を利用して、複数のデバイスを同時並行的に制御可能なプログラムを実現している。この実行プログラムに**課題 1・2** で開発した自律配置アルゴリズムとルーティングアルゴリズムが実装される。

課題 4 : 分散通信ネットワークにおいて、通信衝突によるパケットロスを防ぐための通信タイミング制御手法

本課題は分散通信ネットワークでの通信効率を向上させるために非常に重要である。多数のメッシュセンサネットワークに移動ロボットがシンクノードとしてアクセスするようなシンクフリーメッシュセンサネットワークの実証実験により有効性を確認する。

4. 研究成果

本研究課題の成果として、**課題1・2・3**を統合して初めて実現される、マルチホップテレオペレーション実証実験の結果を述べる。**課題4**に関しては、シンクフリーメッシュセンサネットワークの実証実験の結果を述べる。

マルチホップテレオペレーション実験

本実験システムは、**課題3**により開発したロボットシステム5台と1台のシンクノードにより構成される。オペレータはシンクノードを通じて、ネットワーク上のロボットの配置を把握し、また、観測地点の指示やロボットごとの個別指示などのミッションの変更を行う。オペレータの操作性の向上を意図して、シンクノードGUI(図1)も開発した。サブ課題として“研究の方法”には挙げていなかったがこのGUIは実験を遂行する上で非常に有益であった。実験の様子とそれと同期したGUIの表示を図2に示す。

実験では、実験面積の関係からロボットの無線通信範囲を4mとした。最初に指定したTarget1はシンクノードから約15m離れているため、単一のロボットでは通信範囲を維持しながらターゲット地点に到達するのは当然不可能である。提案システムでは、各々のロボットがどれとどれのロボットの間の中継役を行うかの役割分担を自律的に行い、通信リンクを維持しながら、末端のロボットがターゲットに到達することに成功している。これにより提案する自律配置アルゴリズムが適切に作動していることが確認された(**課題1**達成)。

末端ロボットがTarget1に到達したのを確認後に、オペレータはシンクノードGUIを用いて次の観測ポイントとしてTarget2を指定する。シンクノードの通信範囲も4mに限定しているため、この命令パケットが全てのロボットにダイレクトに送られる訳ではない。シンクノードから命令パケットが送信された場合、ネットワークの中間に位置するロボットがそのパケットを中継し、マルチホップ通信により、末端のロボットまで届けられる。実験では、パケットを送ってから数秒後にネットワーク内の全ロボットが次のミッションに向けての移動を開始したことが確認された。これによりマルチホップ通信を実現する上で必須であるルーティングアルゴリズムが適切に作動していることが示された(**課題2**達成)。また、実験が適切に行われたことから**課題3**が達成されている。

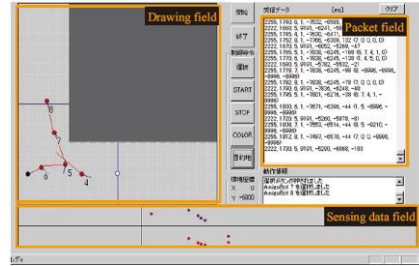


図1 シンクノードGUI

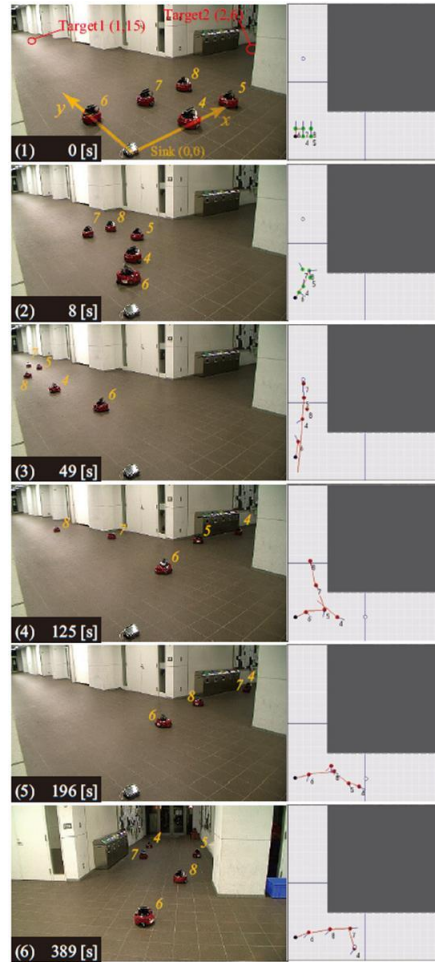


図2 マルチホップテレオペレーション実験の様子

シンクフリーメッシュセンサネットワーク

本実験システムは、7×7の格子状に配置された固定ノード49個からなる、メッシュセンサネットワークと、それに移動ノードとしてアクセスするシンクノードで構成される。各ノードは、観測データとして3秒に1度トラフィックを発生し、そのノードよりもシンクノードに近い中継ノードがそのデータパケットを転送する。従って、シンクノードでの最大スループットは約16pkt/sとなる。

る。シンクノードが移動しない場合の予備実験では、実験を通しての packets 到達率が提案手法：85%、CSMA：62% であり、有効性が示されている。

シンクノードが移動する場合は、通信ルートの更新アルゴリズムを実装しなければならない。この実験でのネットワークは端末ノードからシンクノードへ向けての単方向の通信ルートが構築されていれば十分であるため、ホップ数ベースのルーティングによりルート更新を行う。

実験結果として、図3に通信ルートが更新される様子を、図4に単位時間毎のスループットを示すグラフを示す。図3からホップ数ベースルーティングが正常に作動していることが確認できる。スループットグラフからは、シンクノード移動中は一時的にスループットを下げるものの、シンクノード停止後は数秒でスループットが回復されている様子が確認できる。このことから、シンクノード移動にともなうルートの更新、ルート更新にともなって変化するノード個別の通信負荷に合わせた、通信位相区間の最適割り当てが、適切にかつ高速に作動していることが確認された。これらの実験から課題4が達成されている。

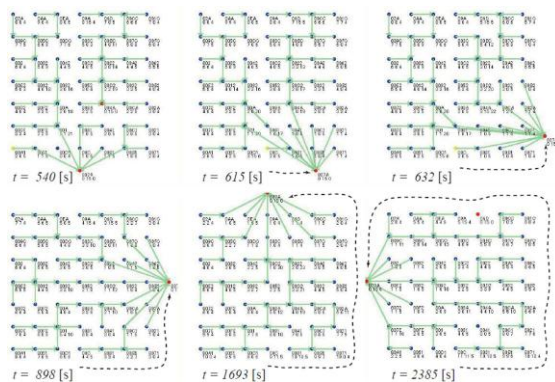


図3 通信ルート更新の様子

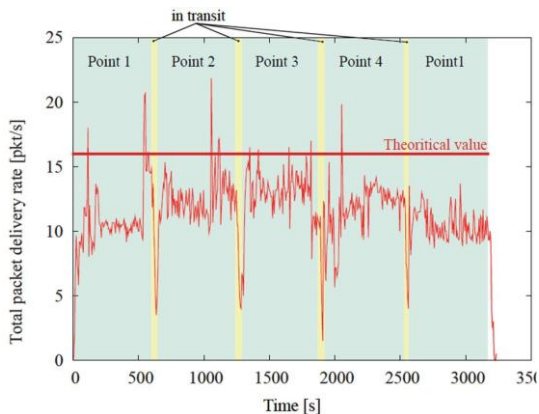


図4 単位時間当たりのスループット

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 2 件)

[1] 高橋淳二、関山浩介、福田敏男、“自律配置アルゴリズムを用いた群ロボットによるマルチホップテレオペレーション”、知能と情報、vol. 21、No. 3、pp 未定、印刷中、査読有

[2] Junji Takahashi, Takuya Yamaguchi, Kosuke Sekiyama, and Toshio Fukuda, “Communication Timing Control and Topology Reconfiguration of Sink-Free Meshed Sensor Network with Mobile Robots”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Focused Section on Mechatronics in Multi Robot Systems, Vol.14, No.2, pp.187-197, (2009). 査読有

[学会発表] (計 4 件)

[1] Junji Takahashi, Kosuke Sekiyama and Toshio Fukuda, “Cooperative Object Tracking with Mobile Robotic Sensor Network”, DARS 2008, *Best paper award*, November 17-19, 2008, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Ibaraki

[2] Junji Takahashi, MD Rokunuzzaman, Kosuke Sekiyama and Toshio Fukuda, “Mobile Robotic Sensor Network Using Vision Tracking”, IEEE International Symposium on System Integration, December 4, 2008, Nagoya Univ. Japan

[3] 高橋 淳二、山口 卓哉、関山 浩介、福田 敏男、“シンクフリーメッシュセンサネットワークにおける通信タイミング制御とトポロジー再構成”、FAN2008、2008年10月23日、広島県情報プラザ

[4] Junji Takahashi, Kosuke Sekiyama and Toshio Fukuda “Self-Deployment Algorithm for Mobile Sensor Network based on Connection Priority Criteria with Obstacle avoidance”, ROBI02007, June 5-7, 2008, Nagano

6. 研究組織

(1) 研究代表者

関山 浩介 (SEKIYAMA KOUSUKE)

名古屋大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：40293675