

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19360177

研究課題名（和文） 群ロボットのネットワーキングと行動制御

研究課題名（英文） Networking and Motion Control of Swarm Robots

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：無線通信を使ってネットワーキングされた複数のロボットから構成される群ロボットに対し、無線通信手段だけを使い、全ロボットが1つの共通座標系を生成し、個々のロボットがその中での自分の位置と向いている方向を自律的に推定する方法を確立する。理論解析と計算機シミュレーションにより提案法を詳細に検討し、30台のロボットから構成される群ロボット実験システムを用いて、その提案法の有効性を最終的に検証する。

研究成果の概要（英文）：For a robot swarm composed of many wirelessly networked robots, a method is proposed to autonomously generate a single set of common coordinates among the robots and to notify each robot of its location and heading direction in the coordinates. The proposed method is developed through theoretical analyses and computer simulations, and then after assembling an experimental robot swarm composed of thirty robots, it is finally validated by experiments with the robot swarm.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2008年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2009年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
総計	10,600,000	3,180,000	13,780,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：群ロボット，ネットワーキング，行動制御，共通座標生成，方向推定，位置推定，無線電力測定，無線伝搬特性

1. 研究開始当初の背景

(1) 多くのロボットを無線通信によりネットワークし、個々のロボットの知能はあまり高くないが、まとまった行動をとらせることができる等、全体としての知能を高く維持しようとするシステムは群ロボットあるいはロボットスワームと呼ばれる。群ロボットのこれまでの研究では、無線通信は個々のロボットの行動を制御するための単なる道具としてしか扱われてこなかった。

(2) 一方、無線情報通信のアドホックネットワークのこれまでの研究では、無線通信ノードはランダムに移動するものであり、ネットワークがうまく維持できるようにノードの移動を制御することはまったく考えられてこなかった。

(3) 群ロボットの中で、ネットワークの目的は個々のロボットの行動を制御することであり、一方、個々のロボットの行動制御の目的は群ロボット全体のネットワークが切れないようにすることである。つまり、群ロボットではネットワークと行動制御は互いに相補的な関係にある。本研究の斬新性は、これら2つを同次元で考え、これまでにない新しい学問を開拓するところにある。

2. 研究の目的

(1) 将来、体内に入っていけるような群マイクロロボットが実現される場合、エネルギーやメモリ等の厳しい制限から、個々のマイクロロボットの知能を高くすることはできない。従って、無線ネットワークをうまく使って、群マイクロロボット全体の知能を高くすることが重要となる。

(2) 全体としてまとまった行動をとらせる場合、群ロボットを構成する全ロボットの間で単一の共通座標系を生成し、個々のロボットにその座標系での自分の位置と向いている方向を自律的に把握させることが必要不可欠となる。特に、群マイクロロボットを想定すると、この共通座標生成と位置・方向推定に使えるツールは個々のロボットをネットワークしている無線通信手段しかない。

(3) 従って、無線通信手段の中に自然に実現されている機能だけを使い、群ロボットの中に単一の共通座標系を生成し、個々のロボットが自分の位置と方向を自律的に推定する方法を検討し、その有効性を理論解析、計算

機シミュレーションおよび実機を使った実験により明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 現在よく使われている無線通信手段には、信号の到来時間や受信電力を測定することにより、送受信機間の距離を推定する様々な測距方法が自然に実現されている。従って、理論解析と計算機シミュレーションにおいては、一般的な測距方法を前提とし、群ロボットを構成する全ロボットが1つの共通座標を生成し、個々のロボットがその中で自分の位置と方向を自律的に推定する方法（共通座標生成／自己位置・方向推定法）を検討する。

(2) 無線通信モジュール、頭脳となるパーソナルコンピュータと移動手段となる台車から構成される実験用ロボットを複数台製作し、提案する共通座標生成／自己位置・方向推定法を各ロボットに実装する。

(3) 実験用ロボットの無線通信モジュールには信号を受信した時に受信電力を測定する機能が付いているので、その機能をロボット間距離の測定に用い、提案する共通座標生成／自己位置・方向推定法の有効性を実験により評価する。

(4) 実験では、受信電力を用いてロボットが自己位置および方向推定を行っているため、それらの推定精度が非常に低い。従って、各ロボットが行動しながら精度が低い初期方向推定を改善していくような方向推定改善法を提案し、その有効性を実験により評価する。

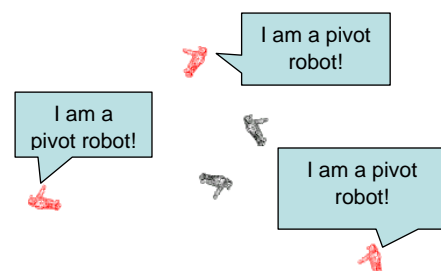


図1 ピボットロボットの選択法
(遠方ロボット選択の例)

4. 研究成果

(1) 共通座標生成／自己位置推定法の提案と評価：2次元平面に存在している群ロボットに共通座標を生成する場合、まず最初にロ

ロボットの中から基準となる3台のピボットロボットを選択する必要がある。ピボットロボットの選択には様々なものが考えられ、例えば、ランダムに3台選択する、互いに近い位置の3台を選択する、あるいは互いに遠い位置の3台を選択する等が考えられる。図1は互いに遠いところに位置する3台のロボットを選択する例を示している。3台のピボットロボットを選択した後に、それらを基準にして座標系を生成し、各ロボットがその座標系での自分の位置を自律的に推定する方法を提案した。さらに、自分の位置情報を繰返しブロードキャストすることにより、その位置推定精度を改善させる繰返し位置推定法を提案した。図2は、これら3種類のピボットロボット選択法の特徴を計算機シミュレーションで評価したものである。ここで、縦軸は位置推定の二乗平均平方根誤差、横軸は位置情報ブロードキャストの繰返し回数を表している。この図より、ブロードキャストの繰返し回数を増加させると位置推定誤差は小さくなり、また、ランダムロボット(random robots)、遠方ロボット(far robots)および近傍ロボット(near robots)選択法の中では遠方ロボット選択法の位置推定誤差が一番小さいことがわかる。なお、遠方ロボット選択法の位置推定精度が一番優れることは理論解析により証明している。

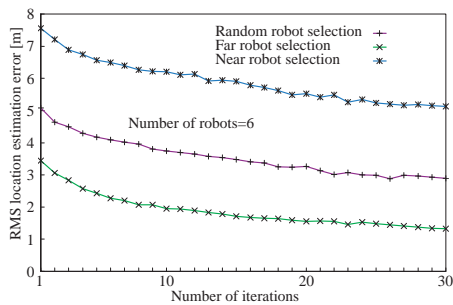


図2 3種類のピボットロボット選択法の位置推定精度

(2) 方向推定法の提案と評価：生成した座標系の中で、各ロボットが自分の位置を推定した後に、自分の向いている方向を推定するためには、各ロボットは自分が向いている方向に1回移動し、移動前後の推定位置を使って、自分が向いている方向と座標系のx座標との間のなす角度を推定する必要がある。この方向推定法の推定精度は移動前後の位置の推定精度と移動距離に依存し、位置推定精度が高ければ方向推定精度は高くなり、また、移動距離が大きくなれば、方向推定精度は高くなる。これらのことは、計算機シミュレーションにより明らかにした。図3にロボットが10台の場合の方向推定精度を示す。ここでは、共通座標生成に遠方ロボット選択法を用いており、位置情報ブロードキャストの繰返し

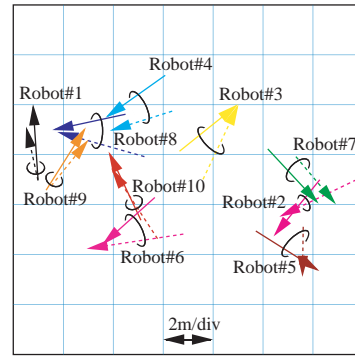


図3 方向推定精度

回数は30回、移動距離は3mである。図中で、破線は実際方向、実線は本方向推定法によって推定された方向を示している。0度から60度程度の方向推定誤差があることがわかる。

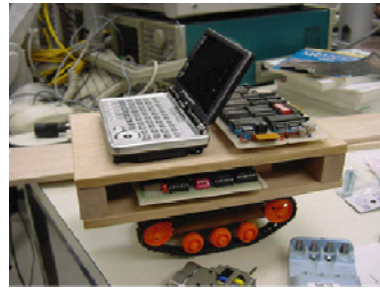


図4 開発したプロトタイプロボット

(3) 実験用群ロボットの開発

①プロトタイプロボットの開発：数十台のロボットを開発する前に、用いるモジュールの性能を確認するために4台のプロトタイプロボットを開発し、それらプロトタイプロボットを用いて実験を行った。図4に開発したプロトタイプロボットを示す。ロボットの台車はキャタピラを装備したもので手作りの木製である。無線モジュールはIEEE 802.15.4規格に準拠したものでデータ伝送速度は250kbits/sec、信号を受信した時にその受信電力を測定する機能を有している。従って、受信信号電力と送受信ロボット間の距離について確率モデルを用いてモデル化しておけば、測定した受信電力(RSSI; Received Signal Strength Indication)から測距が可能となる。一方、開発した共通座標生成/自己位置・方向推定法とキャタピラを動作させるコマンドはパームトップコンピュータにC言語のプログラムで実装される。さらに、パームトップコンピュータと無線通信モジュールとの間の通信手順は無線モジュールに実装される。実験を行った結果、キャタピラでは走行時に床との間でスリップが頻繁に発生することとロボットの旋回時の旋回精度が低いことが判明した。

②実験用ロボットの開発：プロトタイプロボットを用いた実験結果を考察し、30台の実験用ロボットを開発した。図5に開発した実験用ロボットを示す。無線通信モジュールとパームトップコンピュータはプロトタイプロボットと同一のものとしたが、ロボットの台車はキャタピラ型からホイール型に変更した。これにより高い精度の旋回が可能になった。図6に開発した20台の実験用ロボットを用いた実験風景を示す。

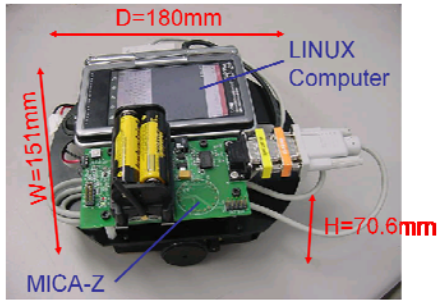


図5 開発した実験用ロボット



図6 開発した実験用ロボットを用いた実験風景 (20台)

(4)方向推定改善法の提案と評価：RSSIを用いた測距に基づく位置推定では推定精度が低くなってしまふことを計算機シミュレーションで確認していたが、実機を用いた実験では、計算機シミュレーションで考慮できなかった様々な要因により位置推定精度がさらに低くなる。これらの要因としては、場所に対して不均一なマルチパスフェージング、アンテナの指向性やロボット本体からの無線信号の反射等が考えられる。従って、この位置推定結果を用いて個々のロボットが方向推定を行っても、その推定精度は非常に低いものとなり、群ロボットとしてまとまった行動ができるような個々のロボットの行動制御が行えない。従って、何らかの方法で方向推定精度を改善する必要がある。従来の方向推定では、ロボットが移動を行い、その移動前後の位置推定結果から、自分が向いている方向と生成した座標系の x 軸との間のなす角度を推定していた。これを初期方向

推定と定義し、この方法を従来法 (conventional method) と呼ぶことにする。個々のロボットは自分の初期方向を基準にして、その後与えられたタスクを満足するように行動を開始する。提案する方向推定改善法は、ロボットの複数の旋回と複数の移動を1ブロックとし、ロボットは移動する毎に移動後の位置を推定し、その推定結果を1ブロックの間保持しておく。ロボットが x 軸となす角度、すなわち初期方向は、1ブロック内に命令された複数の旋回角度と移動距離、および推定した複数の位置の間数で表現できるので、それらの値を用いて最小二乗法に基づいてロボットの初期方向が推定できる。この方法を最小二乗法に基づいた方向推定法 (Least Square-based method) と呼ぶ。別の言い方をすると、最小二乗に基づいた方向推定法において従来法はブロックサイズを1にした場合に相当する。

提案する方向推定改善法の実験結果を示す。縦軸は角度推定誤差であり、横軸は移動回数、すなわちブロックサイズである。ここで、ロボットは6台、移動距離は1m、位置推定を行う場合のブロードキャスト数は10回である。RSSIを測定するための送信パケット数がパラメータとしてこの図は書かれている。初期方向推定誤差は約80度であり、従来法では、複数回移動を行っても、移動前後の推定位置から角度を推定するので、ブロックサイズを大きくしても角度推定誤差は改善されない。一方、最小二乗法に基づいた方向推定法では、ブロックサイズを大きくすると、それだけ多くの旋回角度、移動距離、および推定位置をまとめて角度が推定できるので、角度推定精度は改善する。例えば、ブロックサイズを10にすると、角度推定誤差は約30度になる。RSSIを測定するためのパケット数が大きくなると、それだけ位置推定精度が向上するので、その結果、角度推定精度も向上するはずであったが、実験ではそのような傾向は見られなかった。

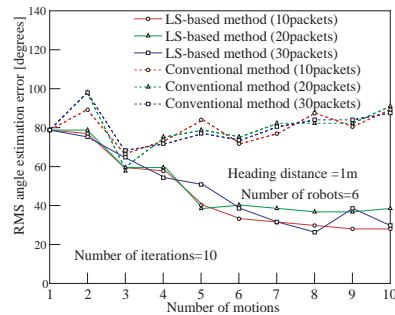


図7 方向推定改善法の推定精度

最後に、方向推定実験のスナップショットを図8に示す。図中には6台のロボットが示されているが、ビデオの視野外にピボットとな

る3台の静止しているロボットが存在している。これらの6台のロボットは(a)図のスタート地点を出発し、(c)図のところまで直進し、その場で自分の方向を推定した後、180度旋回し、同じ距離だけ進むようにプログラムされている。つまり、高精度に自分の方向が推定できていれば、スタート地点に戻ってこれる。左の3台のロボット(グループA)は(c)図の位置だけで従来法を用いて自分の方向を推定し、一方、右の3台のロボット(グループB)は(b)図に示すように、途中の5つの地点で位置を推定しながら(c)図の地点で最小二乗法に基づいた方向推定法を用いて自分の方向を推定する。(d)図から(f)図に示すとおり、従来法を用いたロボットはスタート地点にうまく戻ってこれないが、最小二乗法に基づいた方向推定法を用いたロボットはスタート地点に戻ってこれる。

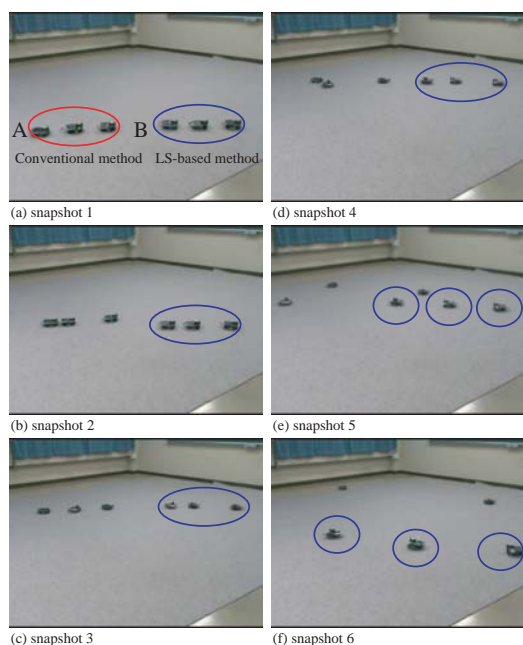


図8 方向推定実験のスナップショット

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計15件)

- ① Tatsuya Ishimoto and Shinsuke Hara, “A Method of Generating a Set of Common Coordinates for a Robot Swarm with Only Ranging Capability – Principles and Computer Simulations –,” IEICE Transactions on Communications, Vol. E-92-B, No. 12, pp.3726-3735, December 2009, 査読あり.
- ② Shinsuke Hara and Tatsuya Ishimoto, “Effect of Pivot Nodes Selection Schemes on Self-Localization Performance in a Mobile Sensor Network,” Proceedings of IEEE Global Communications Conference, Exhibition and Industry Forum

(GLOBECOM) 2009, in CD-ROM, Honolulu, USA, 30 November-4 December 2009, 査読あり.

- ③ Shinsuke Hara, Tatsuya Ishimoto, Masaya Kitano, and Tetsuo Tsujioka, “A Common Coordinates/Heading Direction Generation Method for a Robot Swarm with Only RSSI-Based Ranging,” EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, Vol. 2009, Article ID 434597, 11 pages, 2009, 査読あり.
- ④ Tatsuya Ishimoto and Shinsuke Hara, “Use of RSSI for Motion Control of Wirelessly Networked Robot Swarm,” Proceedings of The 6th IEEE International Workshop on Robotics and Sensor Environments (ROSE) 2008, in CD-ROM, Ottawa, Canada, 17-18 October 2008, 査読あり.

〔学会発表〕(計8件)

- ① 原 晋介, “無線通信システムとしてのロボットスワーム,” 電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会技術報告, WBS 2009-46, pp.55-60, 2009年12月9日.
- ② 北野雅也, 石本達也, 辻岡哲夫, 原 晋介, “モバイルセンサロボットの位置推定を用いた移動制御(1) ~ プロトタイプロボットの開発 ~,” 電子情報通信学会ユビキタスセンサーネットワーク研究会技術報告, USN 108 (43), pp.19-23, 2009年5月22日.
- ③ 石本達也, 北野雅也, 辻岡哲夫, 原 晋介, “モバイルセンサロボットの位置推定を用いた移動制御(2) ~ プロトタイプロボットを用いた実験 ~,” 電子情報通信学会ユビキタスセンサーネットワーク研究会技術報告, USN 108 (43), pp.25-30, 2009年5月22日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

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

(H20→H21：連携研究者)

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

(H20→H21：連携研究者)

(3) 連携研究者