

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年3月31日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360157

研究課題名（和文） ロボットスワームにおける無線ネットワークのロバスト化とルーズなコーディネート

研究課題名（英文） Robust Wireless Networking and Loose Coordination in Robot Swarm

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）：本研究は、無線でネットワークされている複数のロボットから構成されるロボットスワームを対象として、無線ネットワークのロバスト化としてマルチパスルーチングと協調伝送法を提案し、その有効性を計算機シミュレーションにより明らかにした。また、ルーズなコーディネートを実現する方法としてロボットの移動距離情報を用いて自己位置を推定する方法を提案し、その有効性を計算機シミュレーションと実験により明らかにした。

研究成果の概要（英文）：For a robot swarm, which is composed of a number of robots, this research proposed a distant multipath routing method and a cooperative transmission method as means for realizing robust wireless information networking among robots, on the other hand, a block localization method using moving distances as a means for enabling loose coordination of robots. The performances of the proposed robust wireless information networking methods were evaluated by computer simulations and that of the proposed loose coordination method was evaluated by computer simulations and experiments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2011年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2012年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
総計	9,100,000	2,730,000	11,830,000

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：ロボットスワーム、無線情報通信、ネットワークング、行動制御、コーディネート

1. 研究開始当初の背景

(1) 無線によりネットワークされた複数のロボットから構成された1つの群をロボットスワームと呼ぶ。ロボットスワームの応用として災害時の被災者発見・救済等が考

えられているが、そのような環境では、環境内の多くの障害物やスワーム内の他のロボットによりロボット間の無線リンクが簡単に切断されてしまう。従って、無線ネットワークの頑丈（ロバスト）化が必要となる。

(2) また、屋内では全地球測位システム (GPS; Global Positioning System) が使えないことから、情報ネットワーキングのための無線通信手段を使い、各ロボットは自己の位置と方向を推定し、そしてそれらの情報を他のロボットに伝えなければならない。しかし、屋内では無線通信路がマルチパスフェージング通信路となるため、その推定精度は極めて低い。従って、ロボットの位置推定精度がある程度悪いことを前提としたロボットスワームの行動制御 (ルーズなコーディネート) が必要となる。

(3) 本研究代表者は、ロボットスワームにおける自己位置推定および自己方向推定に関する研究をこれまで行ってきたが、その推定精度はルーズなコーディネートを実現するにも低く、また、無線ネットワーキング法も各ロボットが他のすべてのロボットとつながっているメッシュ型で、信頼性の高いものではなかった。

2. 研究の目的

(1) 本研究の1つの目的は、ロボットスワームの無線ネットワークをロバストなものにすることである。

(2) また、本研究のもう1つの目的は、ロボットスワームをルーズにコーディネートすることができるくらいに、ロボットの自己位置推定精度を高いものにするすることである。

3. 研究の方法

(1) 無線ネットワークのロバスト化とルーズなコーディネートを可能とする自己位置推定法の改善の2つは分けて研究することとし、無線ネットワークのロバスト化に関しては、提案法を計算機シミュレーションで評価し、一方、自己位置推定法の改善に関しては、計算機シミュレーションと実機ロボットを用いた実験で評価することにした。

4. 研究成果

(1) 無線ネットワークのロバスト化
ソースロボット (Source robot) とデスティネーションロボット (Destination robot) 間の無線通信をより頑丈なものにするには冗長を使う必要がある。本研究では、ルートに冗長性を持たせたマルチパスルーチングと、リンクに冗長性を持たせた協調伝送について検討を行った。

① マルチパスルーチング

図1に示すように、ソースロボットとデスティネーションロボット間に複数のルート形成し、それらを同時に用いてパケットを冗長に伝送すれば、障害物により片方のルート

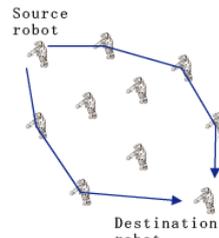


図1 マルチパスルーチング (2ルートの場合)

が切断されても、もう片方のネットワークが切断されなければ、パケットは正しく伝送される。これはマルチパスルーチングと呼ばれ、SMR (Split Multipath Routing) 等のルーチング法が従来から提案されている。しかし、従来のマルチパスルーチング法では、ルート間の距離を考慮に入れていないため、物理的に近いところに複数ルートが形成されると、それらのルートが障害物により同時に切断されてしまう。従って、ロボットスワームでは、障害物やロボットの大きさに合わせ、物理的に離れたところに複数のルートを柔軟に形成する必要がある。本研究では、ロボットの位置情報を使わずに、物理的に離れた複数のルートを形成することができる Distant Multipath routing 法を提案した。この方法はソースからルートを形成するソースルーチングの1つである DSR (Dynamic Source Routing) を基礎としており、ロボット間の無線通信で計測できるパケットの受信電力を用いてルート間の距離をユークリッド距離で表現する方法とホップカウント距離で表現する方法の2つがある。

図2は、提案したマルチパスルーチング法の締切り時間 (Deadline time) に対する締切り違反率特性 (Deadline time violation rate) を示しており、図中、 γ_E と γ_H はそれぞれユークリッド距離とホップカウント距離を使う方法のパラメータである。また、図1は、比較のため、単一のルートだけを形成する DSR と2ルートを形成する従来の SMR の特性も示している。提案法は、従来法である SMR より

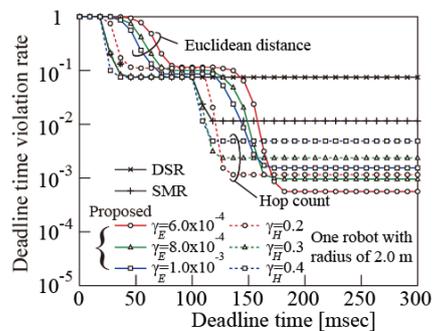


図2 締切り違反率特性 (2ルートの場合)

も大きく締切り違反率を改善することができ、ユークリッド距離を使う方法の特性がホップカウントを使う方法よりも優れることがわかる。

②協調伝送

有線がない無線通信固有の特徴に同報性がある。これは、送信者が、自分が意図する相手にパケットを送信する場合、受信を意図しない者であってもパケットが受信できることを指す。パケットの再送は、リンクの信頼性を向上させる手段であるが、送信者と受信者の間のリンクが障害物により切断される場合、その切断はしばらく持続すると考えられるので、送信者からのパケットの再送はうまく動作しない。無線通信の同報性をパケット再送に利用したものが協調伝送であり、協調伝送では、送信者は受信者の他に協調者を選択し、協調者であることを前もって通知しておく。送信者が受信者にパケットを送信する場合、協調者はそのパケットを受信できるので保存しておく。受信者がパケットを正しく受信できた場合、協調者はその保存しておいたパケットを破棄し、一方、受信者がパケットを正しく受信できなかった場合、協調者はその保存しておいたパケットを送信者に代わって再送する。受信者がパケットを正しく受信できたかどうかは、受信者が送信者に返送する確認応答(ACK; Acknowledgement)パケットを受信することにより行われる。

図3に示すように、ソースロボットとデスティネーションロボットの間には複数のリンクから構成されており、各リンクには、送信ロボットと受信ロボットが存在する。各送信ロボットは協調ロボットを前もって選択しておき、上で述べた手順で協調伝送を行う。協調ロボットの選択にも、マルチパスルーチングと同じ問題点がある。つまり、あまり離れた協調ロボットを選択すると、協調ロボットを経由するルートでのパケット誤り率が距離減衰の増加により大きくなり、逆に、あまり近い協調ロボットを選択すると、送信ロボットと受信ロボット間のリンクが障害物により切断された時に、送信ロボットあるいは受信ロボットと協調ロボット間のリンクも同時に切断される確率が高くなる。従って、障害物の大きさに合わせて適切に協調ロボットを選択する必要がある。本研究では、ロボットの位置情報を使わずに、障害物の大きさに合わせて複数の協調ロボットを適切に選択できる方法を提案した。この方法は、送信ロボットと受信ロボットから協調ロボットの広がり具合を表す「角度メトリック」と、送信ロボットと受信ロボット間の直接リンクと協調ロボットを経由する間接リンクから構成されるリンクに対して計算できる「通信品質メトリック」をまず定義する。そ

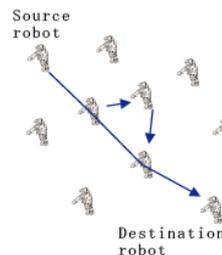


図3 協調伝送
(1台の協調ロボットの場合)

して、これら2つのメトリックは互いに競合するため、多目的最適化の方法を用いて、両方のメトリックを同時に大きくするロボットを協調ロボットとして選択する。

図4は、提案した協調伝送法の締切り時間に対する締切り違反率特性を示しており、図中、 N_c は1つのリンクに対して選択する協調ノード数である。また、図4は、比較のため、協調ロボットを選択しないDSRに加え、協調ロボットを候補の中からランダム(Random)に選択する方法の特性も示している。ここで、協調ロボット候補とは、DSRのルート要求過程において、送信ロボットと受信ロボットのパケットが受信できたので、ルート応答過程において、送信ロボットに協調ロボットになれることを自ら通知したロボットの集合である。提案法により協調ロボットを適切に選択する方が、ランダムに選択する場合に比較して、はるかに低い締切り違反率を達成でき、さらに、協調ロボット数を増加させた方が、より低い締切り違反率を達成できる。ただし、協調ロボット数を1台から2台に増加させた場合の改善割合が1番大きい。ランダム選択の場合は特性が交叉することはないが、提案法の場合は特性が交叉していることがわかる。これは、例えば、4台の場合に最適に動作する協調ロボットの組み合わせを3台で動作させた場合の特性は、3台の場合に最適に動作する協調ロボットの組み合わせを3台で動作させた場合の特性よりも悪いからである。

図3と図4は同条件での計算機シミュレー

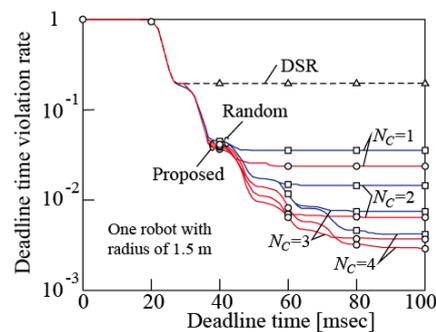


図4 締切り違反率特性
(協調ロボットが4台まで)

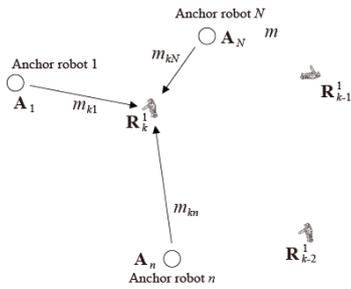


図5 従来の位置推定法

シジョン結果であるので、比較することができる。協調伝送はマルチパスルーチングよりも同じ締切り時間に対してより小さな締切り違反率を達成できる。

(2) ルーズなコーディネートが可能とする自己位置推定法の改善

ロボットスワームを構成する各ロボットは制御コマンドにより決定された方向と距離だけ移動し、このコマンドの連続により、ロボットスワーム全体としてのルーズなコーディネートが達成される。各ロボットが自己位置を推定する場合、ロボット間の無線通信手段を用いて得られるロボット間距離に関する情報、例えば、受信電力から測距そして測位すると、その推定精度は極めて低い。しかし、ロボットが制御コマンドにより移動した距離は正確であると考えられるので、本研究では、この「正確にわかっている移動距離」情報を用いて、ロボットの位置推定精度を向上させることを考えた。

①従来の位置推定法

図5は、位置ベクトル $(A_1, \dots, A_m, \dots, A_N)$ がすでに推定できている N 台のアンカーロボット (Anchor robot) から送信された無線信号を受信して、1 台のロボットが自己位置推定を行っている場合を示している。自己位置を推定するロボットは制御コマンドにより逐次移動しており、現在の k 番目の位置はベクトル R_k^1 で表され、 $k-1$ 番目および $k-2$ 番目の位置はそれぞれ R_{k-1}^1 と R_{k-2}^1 で表されている。また、 n 番目のアンカーロボットから送信される無

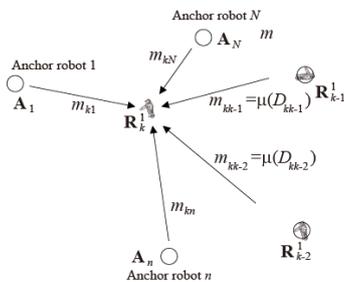


図6 過去のロボット位置をアンカーロボットの位置として用いる位置推定法

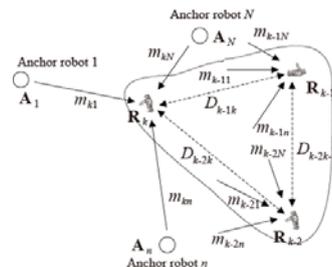


図7 複数位置の同時推定法

線信号から推定できる n 番目の位置に関する情報は m_{kn} で与えられている。

最尤推定に基づいた従来の位置推定法では、過去の位置で得られた情報と過去に推定した位置に関係なく、現在の位置である R_k^1 は1つの最適化問題として $m_{k1}, \dots, m_{kn}, \dots, m_{kN}$ だけから推定される。

②過去のロボット位置をアンカーロボット位置として用いる位置推定法

移動しているロボットの過去の推定位置をあたかもアンカーロボットの位置として用いれば位置推定精度が向上すると考えられる。図6は、ロボットの過去の推定位置 R_{k-1}^1 と R_{k-2}^1 をアンカーロボットの位置として、現在の位置 R_k^1 を推定する場合を示している。ここでは、本当のアンカーロボットから得られる情報 $m_{k1}, \dots, m_{kn}, \dots, m_{kN}$ に加え、 R_{k-1}^1 と R_{k-2}^1 から得られる情報 m_{kk-1} と m_{kk-2} を用いて1つの最適化問題として R_k^1 は推定されている。 R_{k-1}^1 と R_{k-2}^1 からは実際には無線信号を送信していないので、制御コマンドにより決定された移動距離 D_{kk-1} と D_{kk-2} を用いて $m_{kk-1} = \mu(D_{kk-1})$ と $m_{kk-2} = \mu(D_{kk-2})$ を逆に計算している。

③複数位置の同時推定法

複数の位置をそれぞれ独立に推定するのではなく、いくつかをまとめて同時に推定すれば位置推定精度は向上する。

図7は、現在の位置である R_k^1 において、3つの位置 R_k^1 、 R_{k-1}^1 と R_{k-2}^1 を同時に推定する場合を示している。この場合、それぞれの位置に対する3つの最適化問題は、位置間の距離

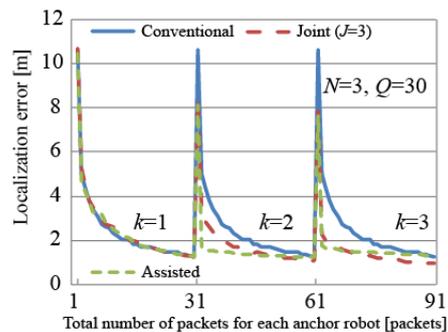


図8 計算機シミュレーション結果

が D_{kk-1} 、 D_{k-1k-2} と D_{k-2k} であるという拘束条件を用いて 1 つの最適化問題に統合される。

④ 計算機シミュレーションによる特性評価
 これまで説明してきた、従来の位置推定法 (Conventional)、過去のロボット位置をアンカーロボット位置として用いる位置推定法 (Assisted) と複数位置の同時推定法 (Joint) の特性を計算機シミュレーションにより評価した。図 8 に、その結果を示す。ここで、アンカーロボット数は $N=3$ で、ロボットは移動した位置に留まり、各アンカーノードからパケットを $Q=30$ 個まで受信し、受信電力を測定し平均しながら自己位置を推定する。そして、その後、次の場所へ移動する。過去のロボット位置をアンカーロボット位置として用いる位置推定法では過去 2 つの位置 (現在の位置を入れて $J=3$) を使い、一方、複数位置の同時推定法では現在の位置を入れて同時に 3 つの位置 $J=3$ を推定している。ロボットが動くたびに新しい位置が推定されるので、受信パケット数が小さい時は推定精度が低いが、受信パケット数が増加するに従い、推定精度が向上しているのがわかる。提案する、過去のロボット位置をアンカーロボット位置として用いる位置推定法と複数位置の同時推定法は、従来の位置推定法に比較して特性が優れることがわかる。過去のロボット位置をアンカーロボット位置として用いる位置推定法は、2 回目の移動以降、推定精度の収束が他の二つに比較して速いが、達成できる推定精度は複数位置の同時推定法が一番高くなる。



図 9 実験とロボットの写真

⑤ 実験による特性評価
 ロボットを 30 台作成し実験を行った。ここでは、ある体育館を借りて合計 8 台のロボットを用いて行った実験の結果を示す。図 9 が実験の風景とロボットの写真である。計算機シミュレーションでの合計ロボット数は 4 台であったが、その他の設定は、計算機シミュレーションと実験では同じである。図 10 に実験結果を示す。計算機シミュレーション結果のように、大きくは推定精度が改善され

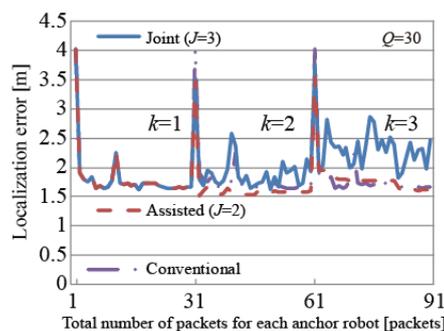


図 9 実験結果

ていない。これは、計算機シミュレーションでは、受信パケット間のフェージングが独立となることを仮定しているため、受信パケット数が増加すると、受信電力を平均することにより位置推定精度が向上するが、実験では、実際には独立とならないので、受信パケット数が増加しても位置推定精度は改善しないからである。計算機シミュレーションでは、複数位置の同時推定法の特性が一番優れたが、実験では逆に劣った。この理由は、位置間の距離が固定であるという拘束条件が厳しすぎて、過去の位置の推定精度が低ければ、それを用いた未来の位置の推定精度も低くなるからである。過去のロボット位置をアンカーロボット位置として用いる位置推定法の特性が一番優れている。この理由は、この方法は、複数位置の同時推定法と同様に、過去の推定位置を用いて未来の位置を推定するが、拘束条件がアンカーロボットと同じ、受信電力という情報に置き換えられているため、厳しくなりすぎていないからである。

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 11 件)

- ① S. Hara, D. Anzai, T. Yabu, K. Lee, T. Derham, and R. Zemek, A Perturbation Analysis on the Performance of TOA and TDOA Localization in Mixed LOS/NLOS Environments, IEEE Transactions on Communications, Vol. 61, No. 2, pp. 679-689, Feb. 2013, 査読あり
- ② 藪 智文, 原 晋介, セルラシステムにおける MIMO を用いた位置推定法, 電子情報通信学会誌 B, 査読あり, Vol. J95-B, No. 9, pp. 1197-1209, Sep. 2012, 査読あり
- ③ K. Terai, D. Anzai, K. Lee, K. Yanagihara, and S. Hara, A Distant Multipath Routing Method for Reliable Wireless Multi-Hop Data Transmission,

IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E95-A, No.4, pp.723-734, Apr. 2012, 査読あり

- ④ D. Anzai, K. Yanagihara, K. Lee, and S. Hara, Use of Area Layout Information for RSSI-Based Indoor Target Tracking Methods, IEICE Transactions on Communications, Vol.E94-B, No.7, pp.1924-1932, July 2011, 査読あり

〔学会発表〕(計6件)

- ① 藪 智文、原 晋介、MIMOを用いたTOA測距法の理論解析2012年電子情報通信学会、2012年電子情報通信学会ソサイエティ大会、2012年9月11日、富山大学
- ② 田中結子、原 晋介、スワームロボットにおける通信ネットワーク構築のための初期形態に関する研究、2011年電子情報通信学会ソサイエティ大会、2011年9月14日、北海道大学
- ③ 久保正樹、原 晋介、複数台の協調ノード選択による無線マルチホップ通信の高信頼性化、2012年電子情報通信学会総合大会、2011年3月22日、岡山大学
- ④ 安在大祐、藪 智文、原 晋介、セルラシステムにおける受信信号の到来時刻と電力による最大事後確率位置推定法、電子情報通信学会ワイドバンドシステム研究会、2010年10月7日、奈良市ならまちセンター

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

なし

(3) 連携研究者

なし