

高接続無線マルチホップネットワークのための 球形移動無線ノード

木ノ内 隆幸^{1, a)} 梶垣 博章^{1, b)}

概要 :

疎に分布する自律移動無線ノード間の通信を実現するためには、データメッセージの無線マルチホップ配送を担う中継専用移動無線ノードを導入することが有効な手法のひとつである。これらが、無線マルチホップネットワークの接続性を維持するためには、隣接無線ノードの移動方向を検出し、適切な方向へ迅速に移動することが求められる。本論文では、これを実現するために3つの指向性アンテナを搭載した球形移動無線ノードを提案し、その試作機を作成する。指向性アンテナのそれぞれによる受信電波強度の変化によって隣接無線ノードの移動方向を推定し、適切な方向へと追従移動する。このとき、最小回転半径を0とすることで、隣接無線ノードとの間の無線リンクの切断を回避もしくは削減する。試作機の性能を簡単な実験によって評価し、適用可能性と改善点を検討する。

キーワード：無線マルチホップネットワーク、移動無線ノード、指向性アンテナ

Spherical Mobile Wireless Nodes for Highly Connected Wireless Multihop Networks

TAKAYUKI KINOCHI^{1, a)} HIROAKI HIGAKI^{1, b)}

Abstract:

In order to support communication among sparsely distributed autonomous mobile wireless nodes such as robots and mobile sensor nodes, it is one of the effective methods to introduce dedicated intermediate wireless mobile nodes. For them to maintain network connectivity, detection of mobility of neighbor wireless nodes and appropriate and rapid mobility is required. This paper proposes spherical mobile wireless nodes with three directional antennas and implement a prototype. Mobility of neighbor nodes are detected by the change of RSSI of wireless signals from neighbor nodes and rapid mobility is achieved by its spherical form with a zero turning radius which avoids or reduces the breakage of wireless links. The performance of the prototype nodes are evaluated in simple experiments.

Keywords: Wireless Multihop Networks, Mobile Wireless Nodes, Directional Antennas

1. はじめに

移動無線ノード群から構成される無線マルチホップネッ

トワークでは、各無線ノードがアプリケーションの要求に応じて、あるいは、それとは無関係に移動する。一方、各無線ノードがアプリケーションを実行するために必要となるデータを相互に交換するためには、無線ノード間の接続性を高く維持することが求められる。例えば、被災地救済支援、工事現場/建設現場支援、地雷除去支援 [7] などを行なう移動ロボット群においては、各移動ロボットがセンサデータに基づいてアプリケーションプログラムを実行し、動作

¹ 東京電機大学大学院未来科学研究科ロボット・メカトロニクス学専攻
Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University

a) ttk@higlab.net

b) hig@higlab.net

および自律移動するとともに、センサデータの交換、動作状況データの交換、移動/動作支援要求などを移動ロボット間で相互に交換することが求められる。移動無線ノード間の高接続性を低コストで実現する手法として、無線マルチホップ通信を適用するものがあり、センサネットワーク等への適用が検討されている [2]。ここでは、各移動無線ノードが中継ノードとして機能することでエンドエンドの接続を実現する。このとき、無線マルチホップ配送経路を構築するためには、適切な位置に中継無線ノードが存在することが必要であり、また、無線ノードが移動する場合においてもその接続を維持することが必要である。すなわち、各移動無線ノードは、アプリケーションからの移動要求と移動無線ネットワークの高接続性要求とを両立させる位置へ迅速に移動することが求められる。本論文では、低密度分布する自律移動無線ロボット群からなるシステムにおける移動要求と高接続性要求を満足するために、専ら無線マルチホップ配送経路の中継無線ノードとして機能する移動無線ノードを導入することを提案する。このような中継専用ノードの少数導入により効果を得るためには、中継位置を的確に判断し、迅速に移動することが求められる。そこで、本論文では、これを実現する球形移動無線ノードを提案し、試作、評価評価を行なう。

2. 関連研究

無線マルチホップ通信の実現技術としてデータメッセージのルーティングプロトコルの研究は重要であり、無線アドホックネットワークを対象とした多数のアドホックルーティングプロトコルが研究されてきている [6]。ここでは、送信元無線ノードから送信先無線ノードまでの無線マルチホップ配送経路が高い確率で存在し、検出した経路の接続がデータメッセージ群配送を終えるまで高い確率で維持される、あるいは、経路修正や経路再探索によって高い確率で経路を最構築できる程度に無線ノードが高密度に分布していることを前提としている。センサネットワーク研究においても、観測対象領域全体を稼働中のすべての無線センサノードの観測可能領域で被覆し、各無線センサノードの取得したセンサデータをシンクノードへ無線マルチホップ配送可能な無線センサノード配置方法や無線移動センサノードの移動方法、あるいは、省電力を実現するためのスリープ/ウェイクアップスケジュールの決定方法などを含むセンサネットワークのトポロジ制御手法が検討されている [4]。

より低密度に分布する移動無線ノードからなる無線マルチホップネットワークの相互接続性を維持する手法として、隣接無線ノード間距離に基づいて各無線ノード位置を定めるもの [13] が提案されている。ここでは、引力/斥力モデルに基づいて無線センサノード位置を動的に変更することによって、無線マルチホップネットワークの接続性を高く

維持する手法を提案している。さらに、論文 [10] では、[13]と同様に引力/斥力モデルを用いて無線マルチホップ配送経路の接続性を維持するとともに、隣接無線ノード間距離を目標値に近づけるように位置を定めることでデータメッセージの配送性能を高めることを目指している。論文 [11] では、すべての移動無線センサノードが観測目的を持つことが可能である(すなわちアプリケーションの実行が可能である)ことを前提として、観測センサノード、中継無線センサノードのいずれにも成り得る(あるいは、同時に両方の役割を担う)移動無線センサノード位置を、獲得する観測 QoS(観測データの質)と提供する通信 QoS(データメッセージ配送の質)とのトレードオフによって決定する手法を提案している。論文 [11] では、観測対象周辺に散布されたサブセンサネットワークとシンクノードとを相互接続するために余剰移動センサノードを活用する手法を提案している。散布による無線センサノード設置では、観測対象位置を観測範囲に含まない余剰無線センサノードが発生する。そこで、この余剰無線センサノードを散布によって観測対象周辺に構成されたサブセンサネットワークとデータメッセージの送信先無線シンクノードとの間の無線マルチホップ配送経路構築のための中継無線ノードとなるように移動させる。

さらに移動無線ノード分布が疎となる場合には、DTN (Delay-Tolerant Network) 技術を活用し、データメッセージの隣接無線ノードへの転送とデータメッセージを保持しての移動とを組み合わせることによって送信先無線ノードまでデータメッセージを到達させる。論文 [9] では、観測データを保持する移動無線センサノードがシンクノード方向へと移動し、互いに隣接する移動途中の無線センサノード間でデータメッセージを転送することで無線シンクノードと隣接するまで移動する無線センサノードを削減する手法が提案されている。ここでは、可能であれば無線シンクノードまで無線マルチホップ通信によってデータメッセージを配送することによって、無線センサノードの移動も削減する工夫がなされている。DTN 技術を活用する手法は、少ない移動無線ノード数で高い接続性が得られる一方、データメッセージの配送遅延が延長する、各無線ノードが移動によるデータメッセージ配送に加わることによってアプリケーション実行が一時停止する、といった問題がある。

3. 中継専用無線ノードによる高接続無線マルチホップネットワーク

前章で述べたように、これまでに、疎に分布する移動無線ノードの相互接続性を高めることを少数の中継移動無線ノードで実現する様々な手法が提案されている。本論文では、(1) 高密度に無線ノードを配置する手法、(2) 無線ノードの移動により無線マルチホップ配送を構築/維持する手法、(3) 無線ノードの移動により DTN 配送する手法、のうち

(2) の実現を検討する。特に、アプリケーションを実行する自律移動無線ノード、例えば、センサ、アクチュエータ、プロセッサを備えた移動ロボットからなるシステムを対象とし、これらの間のデータメッセージ配送を支援する中継専用移動無線ノードを導入することによって無線マルチホップ配送経路を構築、維持することを目的とする(図1)。

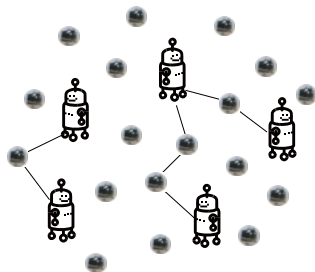


図1 中継専用移動無線ノードによる高接続無線ネットワーク

この目的を達成するためには、(1) 無線マルチホップ配送経路の構築、(2) 無線マルチホップ配送経路の維持、という2つの問題を解決する必要がある。アプリケーションを実行する移動無線ノード間の無線マルチホップ配送経路の構築には、通信要求の発生に応じて配送経路を構築する手法とあらかじめ配送経路を構築しておく手法とが考えられる。前者では、データメッセージ配送要求がない時間には配送経路を維持する必要がないというメリットがあるが、配送要求発生時には、(1) 送信先移動無線ノードの位置の取得、(2) 配送経路構築に必要な中継専用移動無線ノードの決定、(3) 経路の構築、という手順を実現する必要がある。しかし、(1) と (2) の実現には無線ノードの位置情報を常時管理するか、ブロードキャストによる通信要求広告が必要となるが、前者の通信オーバーヘッドは大きく、後者の実現にはネットワーク全体での接続性の維持が求められる。

移動無線ネットワークシステムの運用では、何らかの同期時刻が存在し、すべての移動無線ノードが初期位置等の所定の位置に移動することが考えられる(例えば、充電等の目的で初期位置へ移動するなどが考えられる)。そこで、この時点で中継専用移動無線ノードがアプリケーションを実行する移動無線ノード間を接続する初期位置へ移動することで、相互接続された無線ネットワークを構築する。そして、その後の移動に対して、相互接続を維持するように中継専用移動無線ノードを配置することとする。

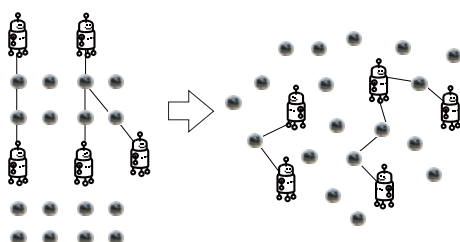


図2 初期位置における相互接続の確立と移動に対する接続維持

アプリケーションを実行する無線ノードの移動に対して、無線ネットワークの接続性を維持するためには、中継専用移動無線ノードに以下の機能が備えられていることが求められる。

- 隣接無線ノードの移動方向と移動距離の検知
- 接続維持のための移動方向と移動距離の決定
- 決定した移動の実現
- データメッセージの中継転送

隣接無線ノードの移動方向と移動距離を取得する方法として、GPSR[3]等の位置に基づくアドホックルーティングプロトコルで用いられるGPSによる自身の位置情報の取得とHelloメッセージへのピギーバックによる位置情報の広告を用いる方法がある。この方法では、定期的に受信される隣接移動無線ノードの位置情報に基づいて、この無線ノードの移動方向を定めることができる。ただし、論文[12]で指摘されているようにGPSによって取得される位置情報には誤差が含まれるために、この情報に基づいて定めた移動方向が必ずしも適切なものではない場合があるという問題がある。これに対して、隣接無線ノード間で定期的にビーコンメッセージを交換し、その受信電波強度の変化によって隣接移動無線ノードとの距離の変化を推定する方法が考えられる。RSSIによって無線ノード間距離を推定する手法は多くの論文に記述がある[8]。一般のシステム運用環境では、受信電波強度は距離に対して一定ではないため、ディスクモデル[1]のような論理モデルをそのまま適用することは困難である[5]。ただし、短時間の観測時間においては、同一方向における受信電波強度が距離の増加に対して単調減少する性質は概ね成り立つことから、電波強度の変化によって距離の変化を推定することが可能である。また、移動方向は、設置方向の異なる複数の指向性アンテナを中継専用移動無線ノードに備えることによって推定可能であると考えられる。

受信電波強度の変化によって隣接無線ノードの移動を検知したならば、ネットワーク接続性を維持可能な方向へと中継専用無線ノードが移動する必要がある。ここで、一般的な車輪を備えた移動ノード(図3)においては、図4に示すように、移動方向に対して車輪の初期方向が異なる場合には、迂回移動をしなければならない。この迂回移動によって移動時間が延長するばかりでなく、迂回そのものによって隣接無線ノードの無線信号到達範囲を逸脱し、この無線ノードとの無線通信リンクの接続を維持できなくなることが考えられる。この無線リンク切断問題は、左右の車輪を逆方向に回転させることによって移動ノード位置を固定したまま方向のみを変更することで縮小することが可能であるが、方向変換時間による遅延は避けることができない。

そこで本論文では、図5に示す球形移動無線ノードを中継専用移動無線ノードに適用することを提案する。

前章で述べた高接続無線マルチホップネットワークを実

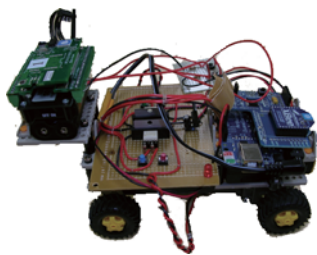


図 3 四輪移動ノード

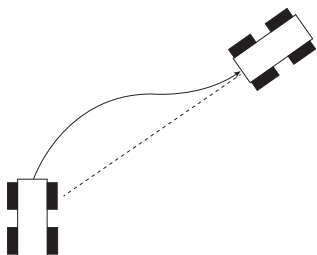


図 4 四輪移動ノードによる迂回移動



図 5 球形移動無線ノード

現するためには、隣接ノードの移動を検出し、移動方向を決定し、迅速に移動するノードが必要である。GPS による位置取得を前提としない屋内システムや比較的狭領域を対象としたシステムでは、隣接ノードの移動を受信電波強度の変化によって検知するのが一般的である。このとき、隣接ノードの相対的な移動方向を得るためには、ノードに指向性アンテナを備えることが求められる。また、任意の方向への迅速な移動を実現するために、冗長な移動を回避することが求められる。

そこで、本論文では、指向性アンテナを備えた球形移動無線ノードを提案する(図5)。球形容器には、120度ずらして2つのモータが配置された駆動部が格納されている。これらのモータが進行方向に対して適切な回転数で回転し、球形容器内面に接する駆動輪を回転させることでノードを移動させる。球形容器は1点で地平面に接していることから、最小回転半径0での方向転換が可能である。また、無線通信には正三角形に配置された3つの同一の指向性アンテナを用いることによって、隣接ノードの方向を120度を単位として取得する。後述するように、無線ノードの移動時には駆動部が球形容器内で振動する問題があるものの、モータの重量が大きいため、この指向性アンテナ群は基本的

には水平に近い状態となる。

4. 試作

前章で提案した球形移動無線ノードを試作する。駆動部は、制御用マイコンボード、モータドライバ、モータ、駆動輪、通信モジュール、指向性アンテナから構成され、各パーツを円盤状の板材に固定した。このとき、モータに取り付ける駆動輪の向きが120度間隔となるように固定した。また、搭載する指向性アンテナの向きが120度間隔とするためにノード上面から見て正三角形となるように配置した。駆動デバイスの板材に対するモータ配置と指向性アンテナの上面図をそれぞれ図6, 7に示す。

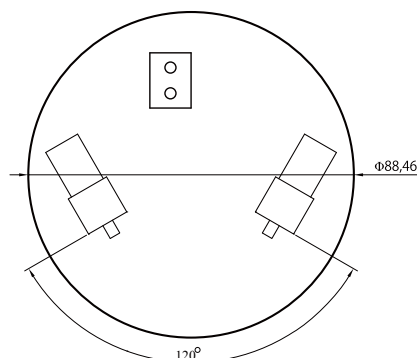


図 6 モータ配置

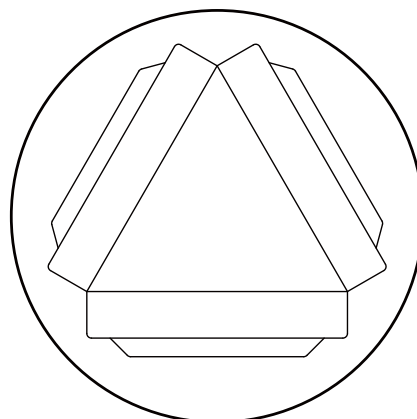


図 7 指向性アンテナ 上面図

図6上部の2個の円には、駆動部のバランスを取るための補助輪を取り付けるものとする。

制御用に搭載された Arduino のマイコンの機能によって、隣接ノードと交換するメッセージの処理、隣接ノードの移動推定、使用するアンテナの選択、自身の移動決定とモータドライバへの指示を行なう。通信モジュールには双葉電子工業製 FDE-02、指向性アンテナには FAA-01 を用いる。通信モジュールと Arduino はシリアル通信で接続され、送受信メッセージと受信電波強度の情報が交換される。マイコンは、通信モジュールからメッセージの受信後、通信モ

ジュールに受信したメッセージの電波強度を要求することで電波強度を得ることが可能になる。その後、保持していた前回通信時の電波強度と比較を行なうことでモータの制御信号を決定し、電波強度の保持を行なう。

モータには、S.T.L.JAPAN 製 DC モータを用い、マイコンから東芝製モータドライバ TA7291P を介してモータに対する入力電圧を定めることで各モータの回転数を制御する。モータに取り付けられた駆動輪は 120 度異なる方向に推進力を発生させることから、各モータの推進方向のベクトル和により駆動部の移動方向と移動速度が制御される。また、駆動輪と球形容器内面が接することによって回転が球形容器へと伝達され、ノードが移動する。

5. 評価

前章で作成した試作機を中継移動無線ノードとして適用するためには、受信電波強度から推定される送信無線ノードの移動方向の正確さと適切な移動の実現性を備えなければならない。本章では、簡易な評価実験結果を報告する。

まず、隣接無線ノードが送信した無線信号の受信電波強度から推定される送信無線ノード方向の正確さを評価する。図 8 に示すように試作機を中心として半径 R_m の円周に沿って移動する無線ノードが送信する無線信号の各指向性アンテナにおける受信電波強度を測定した。評価実験結果を図 9-11 に示す。 $R=20m$ においては、送信無線ノード方向の指向性アンテナにおける受信電波強度が最も高く、受信電波強度が 2 番目、3 番目の指向性アンテナの受信電波強度をも用いると概ね方向が推定できることが分かる。 $R=10m$ においても、 $R=20m$ の場合には及ばないものの、送信無線ノード方向の指向性アンテナにおける受信電波強度が最も高く、低精度ではあるものの方向推定は可能であると考えられる。 $R=0.45m$ においては、送信無線ノード方向と受信電波強度の関係が不明瞭となり、方向推定はほぼ不可能であると言える。ただし、隣接無線ノードが十分近くにある場合には移動によって無線リンクが切断されることはない。このため、隣接無線ノード方向が推定できなくても問題はない。方向推定が必要であるのは、中継専用移動無線ノードを移動させなければ無線リンクが切断し、ネットワークの接続性が低下する場合であることから、ノード間距離が長い場合には方向が推定可能であるという本実験結果は、提案手法の適用可能性を示すものであると考えられる。

次に、駆動部の重量によって指向性アンテナはほぼ水平状態を保つものの、ノードの移動が駆動部の傾きによって実現されることから、この傾きにもなる無線通信および隣接ノードの位置推定の性能低下が懸念される。そこで、ノードの直線移動時の駆動部の傾きを試作実機で測定評価した。ここでは、停止状態のノードを直線移動し、再度停止するまでの駆動部の傾きの変化を測定した。測定結果を図

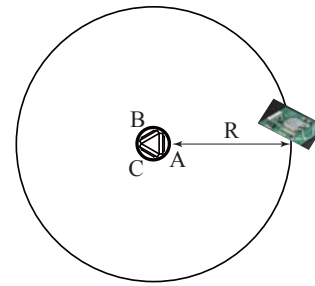


図 8 受信電波強度測定

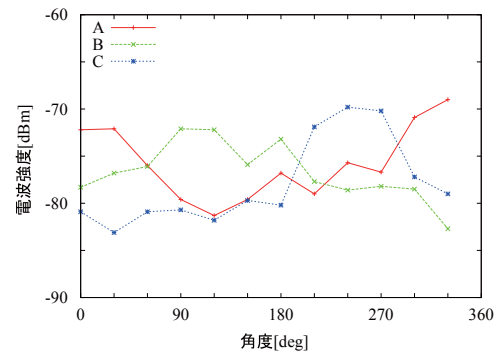


図 9 受信電波強度測定結果 ($R=20m$)

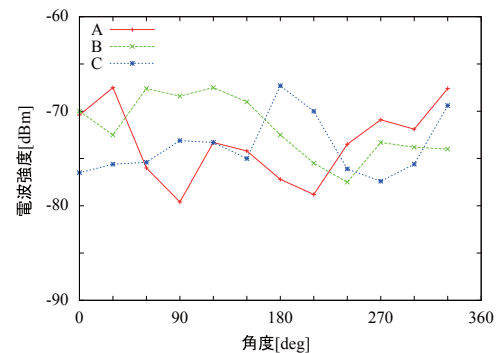


図 10 受信電波強度測定結果 ($R=10m$)

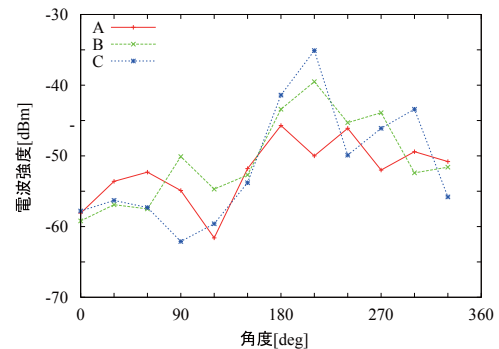


図 11 受信電波強度測定結果 ($R=0.45m$)

12 に示す。直線移動開始後に大きく振動した後は安定して $-5^{\circ} \sim +20^{\circ}$ の範囲で振動する。これによる通信品質への影響評価は今後の課題である。

6. まとめと今後の課題

本論文では、自律移動する移動無線ノード間の接続性を

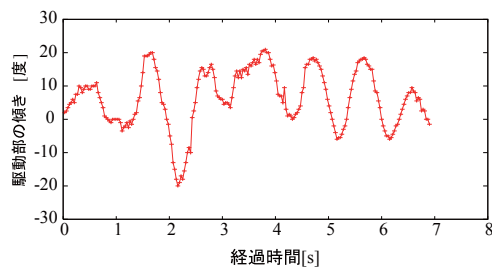


図 12 移動による試作機の傾き測定結果

維持するために中継専用移動無線ノードを導入する手法について検討した。このようなノードの導入によって無線ネットワークの接続性を維持するためには、自律移動無線ノードの位置変化に追従して適切かつ迅速に移動することが必要である。そこで、複数の指向性アンテナを備え、これらの電波強度の変化によって隣接無線ノードの移動方向を推定し、これらとの間の無線リンクを切断することなく迅速に移動するために球形ノードとすることによって最小回転半径 0 の移動を実現することを提案し、試作機を作成した。シミュレーション実験の結果、隣接無線ノードの方向推定が必要な程度に離れている場合には方向が概ね推定可能であること、走行時にはある範囲の振動が発生するため、無線信号到達への影響を評価する必要があることが明らかとなった。

今後は、マルチホップ配送機構を試作機に実装し、データメッセージ配送性能を評価する。特に、隣接無線ノードの移動に対する追従性能(ネットワーク接続性能)、移動による配送性能の変化等の評価実験を行なう。

参考文献

- [1] Bose, P., Morin, P., Stojmenovic, I. and Urrutia, J., "Routing with Guaranteed Delivery in Ad Hoc Wireless Networks," *Wireless Networks*, vol. 7, pp. 609-616 (2001).
- [2] Culler, D.E. and Hong, W., "Wireless Sensor Networks," *Communications of the ACM*, Vol. 47, No. 6, pp.30-33 (2004).
- [3] Karp, B. and Kung, H.T., "GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks," *Proceedings of the 6th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 243-254 (2000).
- [4] Meguerdichian, S., Koushanfar, F., Potkonjak, M. and Srivastava, M.B., "Coverage Problem in Wireless Sensor Networks," *Proceedings of the 20th IEEE INFOCOM*, pp. 1380-1387 (2001).
- [5] Moaveninejad, K. Song, W.Z. and Li, X.Y., "Robust Position-Based Routing for Wireless Ad-Hoc Networks," *Ad Hoc Networks*, Elsevier, Vol. 3, No. 5, pp. 546-559 (2005).
- [6] Perkins, C.E., "Ad Hoc Networking," Addison-Wesley (2001).
- [7] 石川, 古田, "人道的観点からの対人地雷探知システム技術開発における日本の取り組み," *計測と制御*, Vol. 45, No. 6, pp. 475-480 (2006).
- [8] 澤村, 水野, 峰野, "電子トリアージシステムにおけるモバイルノードを用いた RSSI 位置推定に関する研究," 情

- 報処理学会第 73 回全国大会論文集, No. 1, pp. 189-191 (2011).
- [9] 砂川, 桧垣, "移動中継ノード群による高接続センサネットワーク構築手法," *情処研報*, Vol. 2007, No. 91, pp. 61-66 (2007).
- [10] 荻野, 佐藤, "移動ノードを含むワイヤレスセンサネットワークにおける通信経路の維持方式の提案," *情報処理学会第 16 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集*, pp. 247-248 (2008).
- [11] 平井, 桧垣, "局所的情報に基づいた移動センサノードの自律的位置変更手法," *信学技報*, Vol. 110, No. 289, pp. 83-88 (2010).
- [12] 南本, 藤井, 山口, 東野, "移動無線端末の位置情報と通信情報を用いた災害現場地図の自動生成," *情報処理学会論文誌*, Vol. 51, No. 12, pp. 2169-2183 (2010).
- [13] 村瀬, 西尾, 徳田, "引力・斥力モデルに基づいたセンサノードの動的再配置手法," *情処研報*, Vol. 2003, No. 19, pp. 31-38 (2003).