

## 無線センサネットワークにおけるセンサノード移動手法

高橋 恵<sup>†1</sup> 桧垣 博章<sup>†1</sup>

無線センサネットワークにおいては、複数の無線センサノードの観測可能領域で観測対象領域を網羅し、観測データを無線マルチホップ配送でシンクノードへ配送可能であることが必要である。本論文では、継続的な観測を必要とせず、観測データの配送遅延の延長が許容されるアプリケーションを対象として、移動無線センサノードとDTNルーティング手法の導入によって、少数のセンサノードによって観測対象領域を間欠的観測によって被覆する手法を提案する。ここでは、互いに隣接した移動無線センサノード間で観測領域の境界線を規定し、この情報をDTN手法によって拡散することで、観測対象領域を移動無線ノード間で分割することで、複数無線センサノードによる重複観測を削減する。

### Mobility Algorithm for Coverage of Sensing Area in Mobile Wireless Sensor Networks

MEGUMI TAKAHASHI<sup>†1</sup> and HIROAKI HIGAKI<sup>†1</sup>

In wireless sensor networks, observable areas of multiple wireless sensor nodes are required to cover whole observation area and sensing data is required to be transmitted to one of sink nodes by using wireless multihop transmissions. This paper proposes a novel wireless sensor network configuration with less mobile wireless sensor nodes with intermittent observation and DTN routing for support of applications in which continuous observation in whole the observation area and realtime transmission of sensing data are not required. Here, accidental neighbor sensor nodes exchanges their locations and determine a border line between their assigned observation areas and the information is distributed by using DTN transmission method to achieve reasonable division of the observation area among the sensor nodes.

### 1. はじめに

近年、IEEE802.15 [10](Bluetooth [1], ZigBee [2])等の近距離無線通信に関わる技術開発が進展し、これを用いたセンサネットワーク [18]の研究開発が活発に行なわれている。ここでは、無線センサノードが取得した観測データを無線通信によってシンクノードへ配送し、これをデータベース等に蓄積し活用することによって高度な実世界コンピューティングを実現する。観測データの取得においては、無線センサノードの設置位置が重要である。各無線センサノードの観測可能領域は限られていることから、複数の無線センサノードを適切に配置することによって、観測対象領域を網羅することが求められる。ただし、すべてのアプリケーションにおいて観測対象領域全体を常時観測することが求められるのではないことから、より少数の移動センサノード [12]によって観測データを取得することが考えられる。

また、観測データは無線通信を用いてシンクノードへと配送されることが求められる。シンクノード設置数の増加は、センサネットワークの設置、運用コストを大きくし、また、観測対象領域およびその状態の変化に対して柔軟に対応することが困難になる。このため、より少数のシンクノードのみを設置し、シンクノードを無線信号到達範囲に含まない無線センサノードによって取得された観測データは、無線マルチホップ配送によってシンクノードへと配送する [3]。取得した観測データを実時間的に活用するアプリケーションにおいては、観測データがシンクノードに直ちに配送されることが求められる。これを実現するためには、すべての無線センサノードからシンクノードまでの無線マルチホップ配送経路が常時確保されていることが必要であり、高密度な無線センサノード配置が求められる。一方、観測データを蓄積し、統計的に活用するようなアプリケーションでは、必ずしも観測データが実時間的に配送される必要がなく、観測データの配送遅延の延長によるアプリケーションへの影響が小さい。

このように、観測対象領域全体を常時観測することは求められず、取得した観測データの配送遅延が一定範囲内で許容されるアプリケーションに対しては、比較的少数の移動無線センサノード [8]を用いて、DTN (Delay-Tolerant Network) [4]ルーティング手法によって観測データをシンクノードに配送する手法が考えられる。このとき、ある一定時間周期において観測対象領域の一定比率以上の領域を観測し、観測データを取得、配送することが求められるが、各移動無線センサノードが独立に移動する場合には、既に他の移動無線センサノードが観測済みの領域を繰返し観測してしまうことにより、有効な観測データを収集できない問題がある。本論文では、隣接した移動無線センサノードがDTNルーティングに基づ

<sup>†1</sup> 東京電機大学大学未来科学部ロボット・メカトロニクス学科  
Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University

いて観測データを交換するとともに、互いの既観測領域情報を交換し、観測領域を分割することによって、複数移動無線センサノードによる重複観測領域を削減し、有効な観測データを取得する手法について検討する。

## 2. 関連研究

無線通信機能を備える無線センサノードの観測可能領域は、その位置からの距離や設置方向からの角度などによって制約されていることから、複数の無線センサノードによって観測対象領域を被覆することが求められる。また、無線センサノードは、外部からの電力供給を受けることがなく、電池のような容量の限られた電源からの電力供給のみによって駆動するのが一般的であることから、経時的にセンサネットワークから離脱する。さらに、センサモジュールや通信モジュールの故障によって、センサネットワークから離脱することも考えられる。このため、観測対象領域を継続的に被覆するためには、必要以上に高密度に無線センサノードを初期配置し、観測対象領域を被覆するために必要な無線センサノードのみを稼働させる手法が求められる<sup>\*1</sup> (図1)。ここで、消費電力量を削減するためには、最小数の無線センサノードのみを稼働させることが望ましいが、これを決定する問題はNP困難であることが知られている。そこで、これを求める様々なヒューリスティック手法が提案されている [5, 6, 14, 15, 19]。なお、一般的な無線センサノードでは、観測可能領域は無線信号到達領域に包含されるため、観測対象領域を被覆するように配置された無線センサノード群は互いに無線マルチホップ通信によって到達可能となることから、適当なルーティングプロトコルを導入することによって、観測データをシンクノードまで配送することが可能である。

各無線センサノードがある程度安価に製造可能であり、その設置、保守運用、回収のコスト<sup>\*2</sup>が小さい場合には、上で述べた高密度な初期配置を行なうことが可能である。しかし、これらのコストが大きい場合には、より少数の無線センサノードのみを用いて観測対象領域の全域からの観測データの取得を可能とし、取得した観測データをシンクノードへと配送する機構が求められる。論文 [16] では、自律的な移動機能を備えた移動無線センサノードを用いて、観測対象領域を被覆するように各移動無線センサノードを適切な位置へと移動させる手法が提案されている。ここでは、すべての移動無線センサノードが無線基地局の無線信号到達範囲に含まれており、無線基地局からの制御メッセージがこれらの移動無線センサ

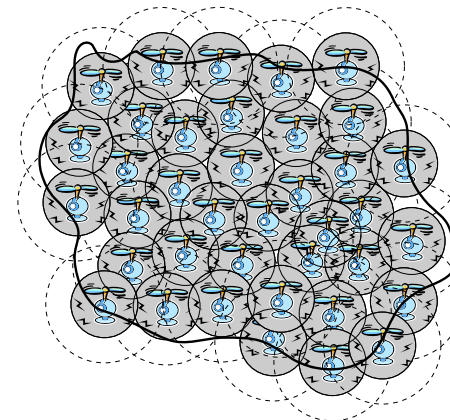


図1 観測対象領域を観測可能領域が被覆するセンサノード配置

ノードへ到達可能であることを前提とし、遺伝的アルゴリズムを活用して  $k$  重に観測対象領域を被覆する手法が提案されている。

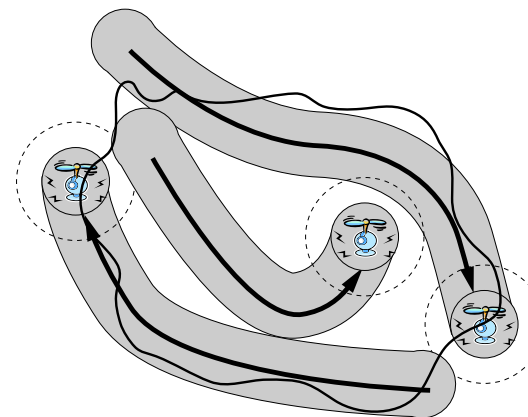


図2 移動無線センサノードによる間欠的全域観測

<sup>\*1</sup> 稼働無線センサノードの離脱に対しては、配置した無線センサノードから稼働無線センサノードを選択し直すことによって、観測対象領域を継続的に被覆する。

<sup>\*2</sup> あるいは回収せずに放置することによって生じるコスト

移動無線センサノードによって間欠的な観測によって観測対象領域を一定周期で被覆する場合、各移送無線センサノードは互いに無線マルチホップ通信が可能であるとは限らな

い。すなわち、シンクノードへの無線マルチホップ配送経路を継続的に維持できるとは限らず、隣接移動無線センサノードが存在しない時間帯も存在することが考えられる。このような環境においては、各移動無線センサノードが中継観測データを一時的に保持するための記憶領域を備えることによって、Store-Carry-Forward に基づく DTN (Delay-Tolerant Network) ルーティングを適用する。これまでに、Epidemic Routing [13]、Probabilistic Routing [11]、移動無線ノードの移動計画に基づくルーティング [7] など様々な DTN ルーティングプロトコルが提案されている。

### 3. 問題点

移動無線センサノードが低密度に配置され、間欠的観測による観測データを DTN ルーティングによってシンクノードに配送する環境では、移動無線センサノード間での情報交換は、互いに無線信号到達範囲に含まれる期間に限られており、また、シンクノード等から移送無線センサノードへ制御メッセージ等を配送する場合でも、それらが直ちに到達することは期待できない。このため、各移動無線センサノードが他の移動無線センサノードが既に観測を終えている領域を再度観測する重複観測によって、領域被覆率の低下や間欠観測周期の延長という問題が発生する (図 3)。

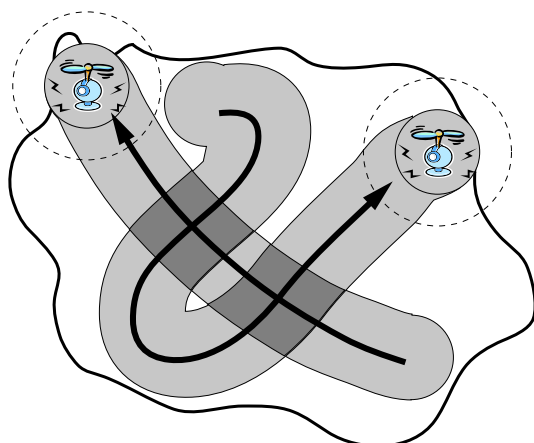


図 3 移動無線センサノードによる重複観測

そこで、各移送無線センサノード間での通信が一切行なわれず、それぞれ自律的に移動する場合、観測済領域が時間経過とともにどのように変化するかについてシミュレーション実験を行なう。ここでは、観測対象領域を  $500\text{m} \times 500\text{m}$  の正方形領域とし、移動無線センサノードの観測可能領域を自身を中心とした半径  $5\text{m}$  の領域とする。また、移動無線センサノードは、毎秒  $2\text{m}$  で等速直線運動により移動し、移動インターバルを  $0$  秒としたランダムウェイポイントモデルによって移動することとする。配置する移動無線センサノードを  $5\sim 30$  台とした場合の観測済領域の観測対象領域に対する比率の変化を測定した結果を図 4 に示す。移動無線ノード数が多いほど観測済領域比率は高くなっているが、いずれの台数の場合においても時間経過とともに重複観測量が拡大し、観測済領域の増加率が減少している。これは、各移動無線センサノードが自身の観測済領域とは無関係に移動していることに加え、他の移動無線センサノードの位置やこれらが観測済の領域についての情報を用いることなく、各移動無線センサノードが自身の移動を決定しているためである。

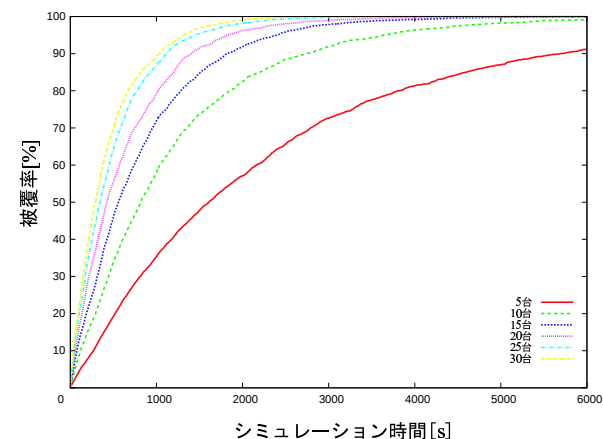


図 4 被覆領域の経時的変化

したがって、移動無線センサノードによる観測済領域をより短時間に拡大するためには、各移動無線センサノードが自身の観測履歴に基づいて移動方向を決定するとともに、他の移動無線センサノードの観測履歴を自身の移動方向決定に使用することが有効であると考えられる。しかし、各移動無線センサノードは、無線マルチホップ通信が必ずしも常に可能で

はないことから、これらを適切に交換し、限られた情報に基づいて各移動無線センサノードが自律的に移動方向を決定する手法が必要である。

#### 4. 提案手法

前節で述べた移動無線センサノードの重複観測領域を縮小するためには、移動無線センサノード間で観測履歴や現在位置情報等を交換し、各移動無線センサノードの観測領域を分割する方法が有効である。ただし、各移動無線センサノードに固定領域を割当てて手法は好ましくない。1章で述べたように、各移動無線センサノードは、電源電力の消耗や構成モジュールの故障等によって、移動無線センサネットワークから離脱することが考えられる。しかし、低密度に移動無線センサノードが配置された DTN 通信環境においては、この離脱を必ずしも検出することができない。また、移動無線センサノードを動的に追加することを容易にするためには、これを他の移動無線センサノードへ通知することを必須としない手法が有効である。論文 [9] では、定期的にすべての移動無線センサノードが無線マルチホップ通信によって情報交換可能な位置へと移動することを前提として、各移動無線センサノードの観測領域を定めるボロノイ図を構成する手法が提案されている。しかし、この手法では、移動無線センサノードが定期的に定められた移動を行なうことが必要となり、特に広域分布する移動無線センサノード群に対しては、移動オーバーヘッドが大きくなる。

そこで、本論文では、互いに無線信号到達範囲に含まれる隣接無線センサノード間で現在位置情報を交換し、これらの間で観測領域を分割する手法を提案する。各移動無線センサノードは基本的に他の無線センサノードの位置や移動とは独立に自身の移動を決定している。ここで、一対の移動無線センサノードが互いに隣接するとき、すなわち互いの無線信号到達範囲に含まれるとき、これらの移動無線センサノードの間で観測領域を分割する。分割方法として、互いに現在位置を含む制御メッセージを交換し、これらを結ぶ線分の垂直二等分線を観測領域の境界と定める (図 5)。以降、各移動無線センサノードは、この境界線を越えた移動を行なわない。

ここで定めた境界線の情報は、境界線を定めた一対の移動無線センサノードのみが保持しており、他の移動無線センサノードには直ちには周知されない。したがって、他の移動無線センサノードは、この境界線を越えた移動を行なう。適切な観測領域の分割を行なうためには、この境界線を他の移動無線ノードに通知することが求められる。そこで、論文 [17] における移動計画の拡散と同様、互いに隣接する移動無線センサノード間で自身の保持する境界線情報を互いに交換することによって、境界線情報を拡散していく方法を導入する (図

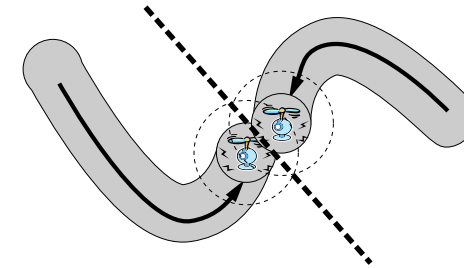


図 5 隣接移動無線センサノード間の観測領域分割

6)。これによって、一対の移動無線センサノード間で定めた境界線情報を共有し、各移動無線センサノードの観測領域を定めていくこととする。

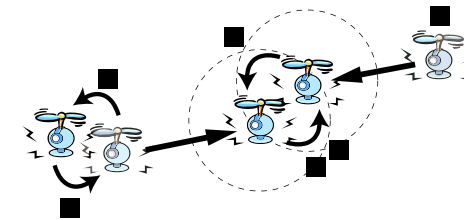


図 6 観測領域境界線情報の拡散

ここで提案した観測対象領域分割手法は、各移動無線センサノードを他の移動無線センサノードの位置や移動無線センサノードの総数、観測対象領域の形状とは独立に適用することができる自律分散的手法であり、全域的な情報を必要としない点で優れている。しかし、本手法によって観測対象領域を移動無線センサノード間で分割していくと、図 7 に示すようにいずれの移動無線センサノードによっても観測されない領域が発生する可能性がある。そこで、各観測領域境界線はある一定時間で破棄する手法を導入する。

ここで提案した観測対象領域分割手法は、各移動無線センサノードを他の移動無線センサノードの位置や移動無線センサノードの総数、観測対象領域の形状とは独立に適用することができる自律分散的+手法であり、全域的な情報を必要としない点で優れている。しかし、本手法によって観測対象領域を移動無線センサノード間で分割していくと、図 7 に示すようにいずれの移動無線センサノードによっても観測されない領域が発生する可能性がある。

そこで、各観測領域境界線はある一定時間で破棄する手法を導入する。これによって、一時的にいずれの移動無線センサノードによっても観測されない領域となった場合でも、いずれかの移動無線センサノードの観測領域に再度含まれることになる。また、この境界線の設定と破棄を繰り返すことによって、各移動無線センサノードが適切に分散し、ほぼ等面積の観測領域を割当てられるように分割されることが期待される。

図8は、500m × 500m の領域に、移動速度 2m/秒、観測可能領域が半径 2m の移動無線センサノード 20 台をランダムに初期配置し、ランダムウェイポイントモデルで移動させ、提案手法を適用した場合における各移動無線センサノードの観測領域の分散の時間的変化を表したものである。本シミュレーション実験では、観測対象領域面積に対する各移動無線センサノードの観測可能領域面積の比率が低いために明確ではないものの、時間経過とともに分散値が減少傾向にあることが読み取れる。

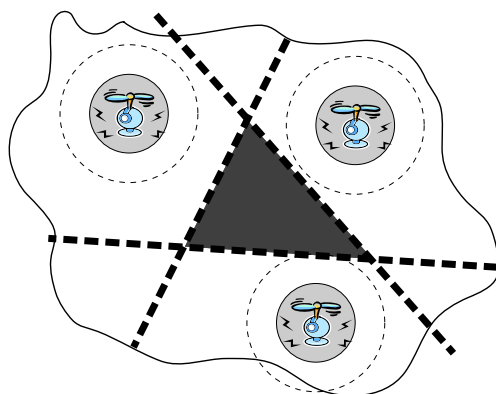


図7 観測不能領域

## 5. 提案手法

本論文では、移動無線センサノード群によって観測対象領域を間欠的に観測し、観測データを DTN ルーティングによってシンクノードへと配送することで、少数の無線センサノードでの観測を可能とする無線センサネットワーク実現手法を検討した。複数の移動無線センサノードが DNT 通信環境においても重複観測する領域を削減するために、一対の通信可能な無線センサノード間で観測領域境界を定め、これを DTN 手法によって拡散すること、

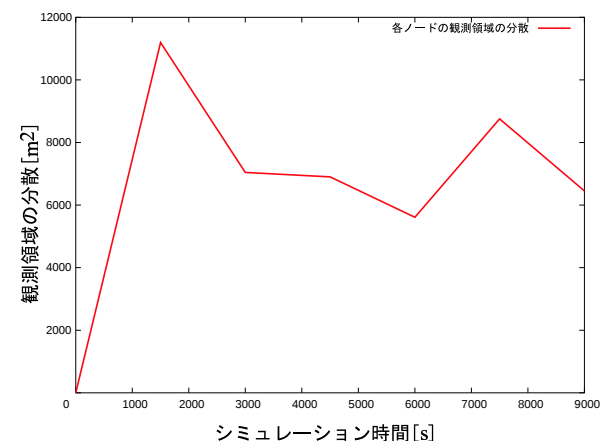


図8 無線センサノードへ割当てられた観測領域の分布傾向

この観測領域境界を一定期間ごとに破棄することを繰り返すことで、観測領域の偏りを経時的に減少させることができる可能性について述べた。今後は、提案手法のシミュレーション実験の継続とその解析、および、DTN 通信手法で交換可能なより適切な情報の選択について検討していく。

## 参考文献

- 1) “Local and Metropolitan Area Networks Specific Requirements Part 15.1: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs(tm)),” Standard IEEE 802.15.1 (2002).
- 2) “Local and Metropolitan Area Networks Specific Requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LRWPANs),” Standard IEEE 802.15.4 (2003).
- 3) Akyildiz, I.F., Weilian, Su., Sankarasubramaniam, Y., Cayirci, E., “A survey on sensor networks,” IEEE Communications Magazine, Vol.40, Issue.8, pp.102–114 (2002)
- 4) Farrell, S. and Cahill, V., “Delay- and Disruption-Tolerant Networking,” Artech House (2006).
- 5) Funke, S., Kesselman, A., Lotker, Z. and Segal, M., “Improved Approximation Al-

- gorithms for Connected Sensor Cover,” Proceedings of the 3rd International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless, pp.56–69 (2004).
- 6) Gupta, H., Das, S.R. and Gu, Q., “Connected Sensor Cover: Self-Organization of Sensor Networks for Efficient Query Execution,” Proceedings of the 4th ACM International Symposium on Mobile Ad-Hoc Networking and Computing, pp.189–200 (2003).
- 7) Jain, S., Fall, K. and Patra, R., “Routing in a Delay Tolerant Network,” Proceedings of the ACM SIGCOMM 2004, pp.145–158 (2004).
- 8) Jennifer, Y., Biswanath, M. and Dipak, G., “Wireless sensor network survey,” Computer Networks, Vol. 52, No. 12, pp. 2292–2330 (2008).
- 9) NojeongH.,PramodK.V., “Energy-Efficient Deployment of Intelligent Mobile Sensor Networks,” Systems, Man and Cybernetics, Part A:Systems and Humans, IEEE Transactions on,Vol.35 ,No 1 , pp.78–92 (2005).
- 10) Lee, S.J., Su, W.Y., and Shen, C.C., “A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi,” Industrial Electronics Society, 2007.IECON 2007.33rd Annual Conference of the IEEE, pp.46–51 (2007)
- 11) Lindgren, A., Doria, A and Schelen, O., “Probabilistic Routing in Intermittently Connected Networks,” Lecture Notes in Computer Science, No.3126, pp.239–254 (2004).
- 12) Sibley, G.T., Rahimi, M.H. and Sukhatme, G.S., “Robomote: A Timy Mobile Robot Platform for Large-Scale Ad-Hoc Sensor Networks,” Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1143–1148 (2003).
- 13) Vahdat, A. and Becker, D., “Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks,” Technical Report CS-200006, Duke University (2000).
- 14) Zhang, H. and Ho, J.C., “Maintaining Sensing Coverage and Connectivity in Large Sensor Networks,” Technical Report in Department of Computer Science, University of Illinois at Urbana-Champaign, UIUCDCS-R-2003-2351 (2003).
- 15) Zhou, Z., Das, S.R. and Gupta, H., “Variable Radii Connected Sensor Cover in Sensor Networks,” Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Sensor and Ad-Hoc Communications and Networks, pp.387–396 (2004).
- 16) 勝間, 村田, 柴田, 安本, 伊藤, “移動センサノードを用いたデータ収集型 WSN での  $k$  重被覆時間の最大化手法,” 情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用, Vol.2, No.3, pp.75–86 (2009).
- 17) 千明, 桧垣, “移動速度変動を考慮した DTN ルーティング手法,” 情報処理学会モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会, 情処研報, Vol.2010-MBL-55, No.13, pp.1–8 (2010).
- 18) 牧村, 斉藤, 戸辺, “冗長性を持たせたセンサネットワーク階層的領域管理,” 電子通信学会和文論文誌 A, Vol.89, No.12, pp.1079–1089 (2006).
- 19) 森川, 鈴木, 大下, 角川, 増澤, “領域被覆のためのセンサネットワークアルゴリズム,” 情処研報, Vol.2007, No.16, pp.357–362 (2007).