

# 移動シンクノードへのセンサデータ配送手法

鶴巻 利樹<sup>1,a)</sup> 梶垣 博章<sup>1,b)</sup>

**概要:** 観測データを取得した無線センサノードからこれを含むセンサデータメッセージをシンクノードへと配送する無線センサネットワークにおいては、無線マルチホップ配送に要する電力消費の削減とシンクノード周辺における配送センサデータメッセージの集中による配送遅延の延長回避の観点から移動シンクノードの導入が検討されている。これまでに、移動シンクノードの現在位置あるいは予測移動位置までセンサデータメッセージを無線マルチホップ配送する手法と移動シンクノードとの直接通信が可能となるまで無線マルチホップ配送せずに無線センサノードにセンサデータメッセージを保持する手法とが提案されている。本論文では、センサデータメッセージの各無線センサノードにおける保持時間に応じて保持の継続と転送とを選択することによって、センサデータメッセージの配送遅延と配送経路長（消費電力）、データメッセージバッファサイズ（保持オーバーヘッド）とのより良いトレードオフを実現する手法を提案する。また、ランダムディレクションモビリティモデルでのシンクノードの移動を対象として、提案する選択手法の妥当性をシミュレーション実験結果により示す。

**キーワード:** 無線センサネットワーク, 移動シンクノード, 無線マルチホップ配送, ルーティング

## Sensor Data Message Transmissions to Mobile Sink Node

TOSHIKI TSURUMAKI<sup>1,a)</sup> HIROAKI HIGAKI<sup>1,b)</sup>

**Abstract:** In sensor networks, sensor data messages are transmitted from sensor nodes to a sink node by using wireless multihop transmissions. For reduction of battery power consumption for wireless communications and for avoidance of congestions of sensor data messages around the sink node which cause longer transmission delay, mobile sink nodes are introduced. Until now, wireless multihop transmission methods to current or estimated locations of sink nodes and methods buffering the sensor data messages in source sensor nodes have been proposed. This paper proposes a hybrid method in which forwarding and buffering sensor data messages are adaptively selected based on buffering time duration in each sensor node. We propose a selection method with the criteria based on transmission delay, transmission power consumption and amount of required communication buffers. A preliminary simulation experiments show that the criteria is reasonable for the revision between data message arrival time and transmission delay.

**Keywords:** Wireless Sensor Networks, Mobile Sink Nodes, Wireless Multihop Transmissions, Routing

### 1. はじめに

通信機能を備えた無線センサノードを観測対象領域に多数配置し、これらの取得する観測データをシンクノードに収集する無線センサネットワークに関する研究が活発に行なわれている。ここでは、無線センサノードの設置を容易にするとともにネットワークの保守コストを低減するために、ZigBee や Bluetooth などの無線通信によって観測データを含むセンサデータメッセージを無線センサノードからシンクノードへと配送する。観測対象領域が広域におよぶ

場合には、すべての無線センサノードといずれかのシンクノードとが直接通信可能とする、すなわち、いずれかのシンクノードの無線信号到達範囲に含めるようにするためには、これらのノードの無線信号到達距離を拡大するか、シンクノードの配置数を増加することが必要である。しかし、無線信号到達距離の拡大は、継続的な電力供給源を持たずバッテリー供給電力のみによって動作する無線センサノードの動作継続時間を短縮するとともに、複数の無線センサノードからの通信間における衝突と競合の増加による無線センサネットワークの性能低下（配送遅延の延長やメッセージ到達率の低下）を招く。また、シンクノード配置数の増加は、無線センサネットワークの設置コストと保守コストを増大させる。そこで、無線マルチホップ通信によってセンサデータメッセージを送信元無線センサノードから送信先シンクノードまで配送する。ここでは、複数の無線センサノードがセンサデータメッセージを中継することによって、各中

<sup>1</sup> 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) tsurumaki@higlab.net

b) hig@higlab.net

継無線センサノードが隣接中継無線センサノードへセンサデータメッセージを転送するのに要する電力を消費するだけでシンクノードまでの配送を実現する。しかし、無線マルチホップ通信においては、各中継無線センサノードからのセンサデータメッセージの転送は、晒し端末問題と隠れ端末問題の影響により、前後2ホップのセンサデータメッセージ転送と競合し、配送遅延が延長する問題がある。また、各シンクノードには複数の無線センサノードからセンサデータメッセージ群が同時並行に配送されるため、シンクノード近隣の中継無線センサノードにはセンサデータメッセージが集中し、輻輳することがある。これによる配送遅延の延長やセンサデータメッセージの到達率の低下（紛失率の上昇）が問題となる。また、センサデータ転送機会がシンクノード近辺の無線センサノードに偏在するために電力消費が集中し、センサネットワークの接続性を低減する問題もある。これらの問題を解決する手法として、移動シンクノードを導入する方法が提案されている。移動シンクノードの導入によって、センサデータメッセージ配送に要する電力消費を削減し、シンクノード周辺へのセンサデータメッセージ集中による輻輳発生と電力消費の偏在を回避することが可能となる。これまでに、無線センサノードから移動シンクノードの現在位置または推定位置へとセンサデータメッセージを無線マルチホップ配送する手法とセンサデータメッセージの無線マルチホップ配送を原則として行わずに移動シンクノードと直接通信可能となるまで保持する手法とが提案されている。本論文では、各無線センサノードにおいて、センサデータメッセージの転送と保持とを適応的に選択する手法を検討する。また、センサデータメッセージの無線マルチホップ配送を低消費電力で実現するルーティング手法を提案する。

## 2. 関連研究

無線センサネットワークに移動シンクノードを導入する手法は、センサデータメッセージを移動シンクノードの現在位置または推定位置へ無線マルチホップ通信によって配送する手法とセンサデータメッセージを生成した無線センサノードが移動無線ノードと直接通信可能となるまで保持する手法とがある。

前者の手法には、移動シンクノードの移動にともなってルーティング情報を動的に更新する手法と、移動シンクノードの移動履歴等に基づいて移動シンクノードの現在位置や将来位置、すなわち、移動シンクノードと隣接する可能性の高い無線センサノードを推定し、これらに対してセンサデータメッセージを無線マルチホップ配送する手法が提案されている。[3]では、各移動シンクノードを根とする配送木をノードの移動にともなって更新する手法が提案されている。しかし、移動頻度、移動速度が高い環境、広域、大規模な無線センサネットワークにおいてはルーティング情報の更新オーバーヘッドが大きい問題がある。[4,5,10]では、各移動シンクノードの移動計画が既知である場合、および、移動には一定の傾向があるために履歴情報から移動経路が推定可能である場合の配送手法が提案されている。しかし、移動シンクノードの移動履歴を各無線センサノードと移動シンクノードとが直接通信可能となった時間の履歴から推定するため、各無線センサノードで分散的に取得された履歴から移動計画を推定するためには、これらの履歴を集約して計算する必要があり、通信と計算のオーバーヘッドが大きい問題がある。[13]では、移動シンクノードと直接通信可能となる頻度の高い無線センサノードへの近隣無線センサノード

からの無線マルチホップ配送経路を構成することで、センサデータメッセージの配送遅延の短縮と到達性の向上を実現する手法が提案されている。ここで、到達性を向上させるためにセンサデータメッセージを複製する手法が導入されているが、無線センサノードのメモリ量への考慮がなされていないため、過剰な複製がバッファオーバーフローを招くことで逆に到達性を低下させる可能性がある。

一方、後者の手法としては、移動シンクノードの移動計画を適切に構成することで、すべての無線センサノードと移動シンクノードとが直接通信可能になるようにする手法が提案されている [2,7,8]。このように移動シンクノードの移動が制御可能である場合のみ適用可能な手法に対して、[6]では、移動シンクノードの移動を制御できず、その移動計画の事前取得や推定も困難である前提でのセンサデータメッセージの直接転送手法を検討している。また、[11]では、同様の前提のもとで、マルチメディアセンサデータを含む多数のセンサデータメッセージの移動シンクノードへの直接転送手法を考案している。ここでは、無線センサノードのメモリ容量がマルチメディアセンサデータに対して十分ではない場合に近隣無線センサノードのメモリを一時的に借用する協調バッファリングが提案されている。無線マルチホップ配送は、協調バッファリングの実現のために局所的に使用され、移動シンクノードへの配送は、隣接無線センサノードからの直接配送を用いている。

このように、これまで提案されている手法では、各無線センサノードがセンサデータメッセージを転送するか保持するかのかのいずれかの手法を固定的に使用している。しかし、移動シンクノードのメモリ容量、受信したセンサデータメッセージの生成時刻からの経過時間、バッテリー残量などの状態に応じて移動計画を動的に変更することが必要であること、移動シンクノードの移動計画の広告に要する通信オーバーヘッドが大きいこと、移動シンクノード数を動的に変更する必要があることから、無線センサノードでは移動計画を取得あるいは推定することができない場合には、各無線センサノードにおいて動的に転送と取得を選択することによって、配送遅延、電力消費、通信バッファ消費の適切なトレードオフを実現できる可能性がある。

## 3. 提案手法

前章で述べたように、無線センサネットワークにおけるセンサデータメッセージの無線マルチホップ配送に各中継無線センサノードが消費する電力を削減し、シンクノード近隣の中継無線センサノードにおける輻輳の発生を回避する移動シンクノードの導入においては、無線センサノードにおける観測で取得されたセンサデータを含むセンサデータメッセージを無線マルチホップ通信によって移動シンクノードへと配送する手法と移動シンクノードと直接通信可能となるまで無線センサノードの通信バッファで保持する手法とが提案されている。センサデータメッセージを無線マルチホップ通信する手法は、配送遅延が短い点と転送センサデータメッセージを一時的に保持する通信バッファのみを要する点で優れている。しかし、配送経路長が比較的に長いために多数の中継無線センサノードにおいてセンサデータメッセージ転送に要する電力消費が求められることに加え、経路制御に要する制御メッセージのための電力消費も要する問題がある。一方、移動シンクノードと直接通信可能となるまでセンサデータメッセージを通信バッファに保持する手法では、移動シンクノードとの1ホップの無線通信のみで配送が完了するために各無線センサノードに

おける消費電力が削減される。さらに、ルーティングが不要であるため、制御メッセージ交換の消費電力も要さない点に優れている。しかし、配送遅延は無線マルチホップ通信する場合に対して大幅に延長することが考えられる。また、電力に限らず計算資源と記憶資源も十分ではない無線センサノードでは、多数のセンサデータメッセージを保持する十分な通信バッファ量が与えられないのが一般的であり、バッファオーバーフローによるセンサデータメッセージ紛失を回避することが求められる。そこで、本章では、各無線センサノードがセンサデータメッセージを隣接無線センサノードのひとつへと転送するか、転送せずに通信バッファに保持するかを適応的に選択する手法を提案する。

### 3.1 転送と保持の動的選択手法

各無線センサノードには、自身の観測によって取得したセンサデータを含むセンサデータメッセージと隣接無線センサノードから転送されたセンサデータメッセージとがある。本論文では、各無線センサノードはこれらを区別しないこととし、転送センサデータメッセージの受信と観測によるセンサデータメッセージの生成をセンサデータメッセージの到着として一律に扱う。各無線センサノードは、移動シンクノードが無線信号到達範囲に含まれるならば、到着したセンサデータメッセージを直ちに転送する(図1)。一方、移動シンクノードが無線信号到達範囲に含まれない場合には、到着したセンサデータメッセージを隣接無線センサノードひとつに転送するか、通信バッファに保持するかを選択する(図2)。

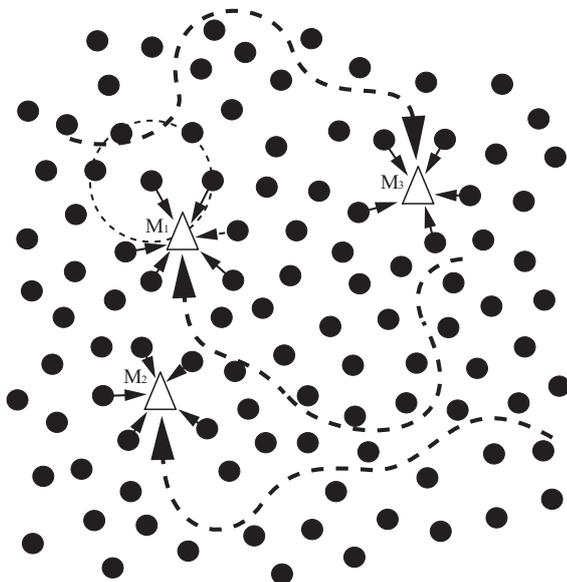


図1 移動シンクノードへの直接転送

隣接無線センサノードへ到着センサデータメッセージを転送する手法の利点は、配送遅延の短縮と通信バッファ消費の低減である。一般に、無線マルチホップ配送では、晒し末端問題と隠れ末端問題の影響によって各中継無線センサノードが前後2ホップの中継無線センサノードと競合するために、センサデータメッセージ群の配送においては、配送遅延が延長する問題がある[9]。また、各無線センサノードの通信モジュールにおける消費電力の低減のために間欠的通信[12]を導入する場合には、中継無線センサノードにおけるセンサデータメッセージの通信バッファへの保持時間

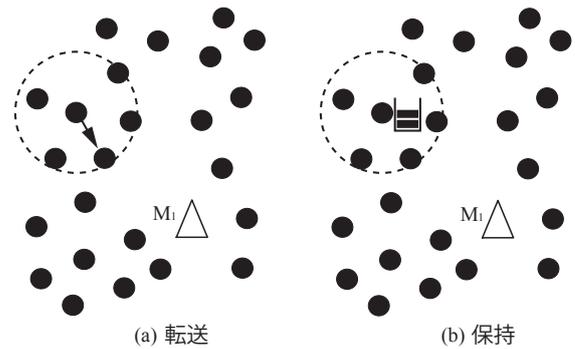


図2 隣接無線センサノードへの転送と通信バッファへの保持

が延長する。しかし、いずれかの移動シンクノードと各無線センサノードとが直接通信可能となる間隔(直接通信することができない時間)と比較するならば、無線マルチホップ配送遅延は十分に短いことが期待される。一方、すべての中継無線センサノードが次ホップ隣接無線センサノードへとセンサデータメッセージを転送することから、これによる電力消費拡大が問題である。逆に、各無線センサノードが生成したセンサデータメッセージを移動シンクノードと直接通信可能となるまで保持する手法(ここでは隣接無線センサノードからセンサデータメッセージが転送されることはない)の利点は、無線通信のための消費電力の削減である。各センサデータメッセージは、1ホップの無線通信によって無線センサノードから移動シンクノードへと配送される。中継無線センサノードは存在しないため、ルーティングのための制御メッセージ交換が行なわれず、これに対する電力消費も要さない。ただし、センサデータメッセージ生成時刻から移動シンクノードへの転送時刻までの時間は無線マルチホップ配送遅延より平均的には長いので、配送遅延が延長される問題がある。また、この時間はセンサデータメッセージが通信バッファに保持されるため、観測データの生成がバースト的である場合には、無線センサノードの通信バッファがオーバーフローすることも考えられる。

図3は、無線センサノードが移動シンクノードと直接通信不可能となった時刻、すなわち、移動シンクノードが無線センサノードの無線信号到達範囲外へ最後に移動した時刻からセンサデータメッセージ到着までの経過時間に対するセンサデータメッセージ配送に要する配送遅延の変化を示したものである。ここで、移動シンクノードの移動領域に境界が存在せず、その移動がランダムに決定される場合には、各無線センサノードへの移動シンクノードの到着はポアソン過程となり、その到着間隔は指数分布となる。このとき、指数分布のマルコフ性から、移動シンクノードの到着までの待機時間、すなわちセンサデータメッセージの配送遅延は、センサデータメッセージ到着時刻に依存せずに一定となる。しかし、移動シンクノードの移動領域には境界が存在することから、到着間隔分布は指数分布とは異なり、センサデータ配送遅延はセンサデータメッセージ到着時刻に依存する。例えば、後述するランダムディレクションモビリティモデル[1]においては、移動シンクノードの移動方向は領域境界においてのみ変更される。このため、無線センサノードの通信範囲外へと移動した移動シンクノードが再度通信範囲内へと移動するためには、最も近い領域境界までの往復時間を必ず要し、これ以下の間隔で移動シンクノードが到着することはない。また、無線センサノードから領域境界各点までの距離が異なることから、配送遅延分布にはいくつかの極大値、極小値があると考えられる。

そのため、移動シンクノードの到着時刻がこれらの極値をとる到着間隔近辺の値である場合には、配送遅延の期待値も極値となることが考えられる(図3)。したがって、センサデータメッセージ到着時刻が配送遅延が極小値を取る時刻以前である場合には、センサデータメッセージの転送を待機して保持することによって、配送遅延を短縮できることが期待できる。なお、直ちに転送する手法においては、平均的には待機手法に比べて配送遅延は大きく短縮される。待機手法と同様、移動領域に境界が存在しない場合には転送遅延は到着時刻の遅延とともに単調に延長することが考えられるが、移動領域に境界が存在することから、転送遅延にも極大値、極小値が存在するものの、その生起確率が到着時刻の遅延に対して単調に減少することから、ある一定値に収束するものと考えられる。

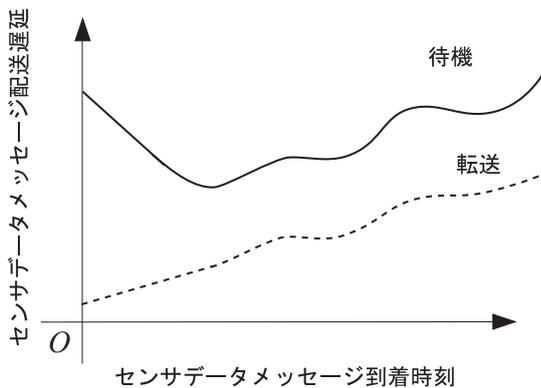


図3 センサデータメッセージ到着時刻と配送遅延

次に、センサデータメッセージ到着までの経過時間に対する消費電力の変化を図4に示す。無線センサノードがセンサデータメッセージを転送する手法では、移動シンクノードが無線センサノードの無線信号到達範囲外へと移動した時刻からの時間経過とともに無線マルチホップ配送経路が延長する。これは中継無線センサノード数の増加であり、センサデータメッセージ転送回数の増加である。したがって、通信に要する電力消費は図3と同様に増加する。なお、ルーティングプロトコルによって隣接無線センサノード間での制御メッセージ交換が必要となることから、これに要する通信のための電力消費が加わることになるが、ルーティングプロトコルの機能によって各無線センサノードが最も近接する移動シンクノードを検出できるのであれば、配送遅延と電力消費のいずれもが時間経過とともに単調に増加するのではなく、増減を繰り返すことが考えられる。一方、無線センサノードがセンサデータメッセージを保持する手法では、各センサデータメッセージはその到着時刻に依存せず、常時、1ホップの無線通信で移動シンクノードに配送されることから、消費電力は一定である。ここでは、ルーティングは不要であるため、これに要する電力消費も回避できる。

最後に、各無線センサノードにおける時間経過と通信バッファ残量との関係を図5に示す。無線センサノードでは、計算資源や記憶資源も十分に与えられるとは限らない。限られた通信バッファに到着センサデータメッセージを転送時まで保持しななければならない。通信バッファの残量は、センサデータメッセージを転送する手法では、限られた転送時間のみセンサデータメッセージが保持されるこ

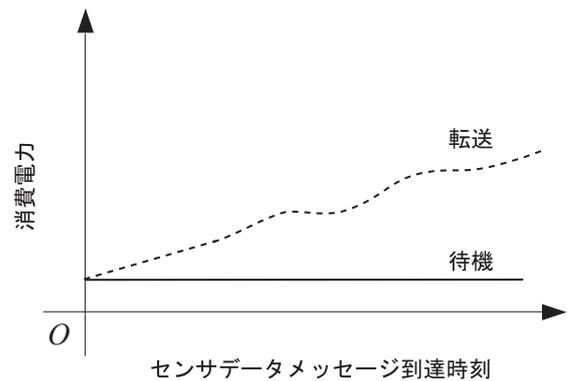


図4 センサデータメッセージ到着時刻と消費電力

とから、通信バッファ残量は一定である。一方、センサデータメッセージを保持する手法では、時間経過とともに通信バッファ残量が単調に減少する。なお、その減少量は、移動シンクノードと直接通信可能となる時間間隔分布の極大値までよりもそれ以降の方が大きくなると考えられる。そのため、図5のような変曲点を持つ。

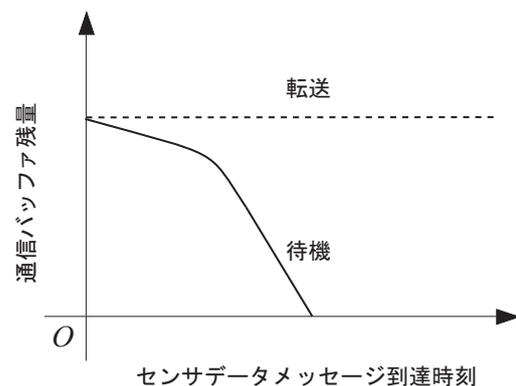


図5 センサデータメッセージ到着時刻と通信バッファ残量

以上の考察から、各無線センサノードにおいて到着センサデータメッセージを転送するか保持するかについての以下の選択手法が考えられる。

- センサデータメッセージの到着時刻までの経過時間が閾値  $t_0$  以下である場合、センサデータメッセージを隣接無線センサノードのひとつに転送する。これは、無線センサノードから移動シンクノードまでの距離が短く、低消費電力で無線マルチホップ配送を終えることができるためである。
- センサデータメッセージの到着時刻までの経過時間が閾値  $t_0$  を越えて閾値  $t_1$  以下である場合、センサデータメッセージを通信バッファに保持する。これは、 $t_0$  を越えることによって、無線マルチホップ配送の場合と通信バッファに保持する場合との消費電力差が配送遅延差に比して相対的に小さく評価されることで、後者が優位と評価されるようになるためである。
- センサデータメッセージの到着時刻までの経過時間が閾値  $t_1$  を越える場合およびセンサデータメッセージを通信バッファに保持したまま経過時間が  $t_1$  となった

場合、センサデータメッセージを隣接無線センサノードのひとつに転送する。これは、通信バッファに保持する手法の配送遅延が極小値を越えて延長に転じることにより、通信バッファへの保持手法の低消費電力という優位性を打ち消すだけの配送遅延時間差が生じることによるものである。さらに、時間経過とともに通信バッファの減少によるバッファオーバーフローのリスクも考慮しなければならないために転送手法へと転換する。

すなわち、通信消費電力差と配送遅延差のトレードオフおよび通信バッファ残量によって閾値  $t_0$  と  $t_1$  が決定され、これを境界として転送手法から保持手法、保持手法から転送手法へと転換する。

### 3.2 ルーティングプロトコル

3.1 節で述べたように、提案手法では、移動シンクノードが無線センサノードの無線信号到達範囲外へと移動してから閾値  $t_0$  だけ時間経過する以前に到着したセンサデータメッセージ、閾値  $t_1$  だけ時間経過した時点で通信バッファに保持されているセンサデータメッセージ、 $t_1$  だけ時間経過した以降に到着したセンサデータメッセージを隣接無線センサノードへと転送する。転送先無線センサノードを決定するルーティングプロトコルは、無線センサノードの消費電力が小さい手法が望まれる。そこで、移動シンクノードが無線センサノードの無線信号到達範囲内外へと移動したことを検出した時点にのみ各無線センサノードが制御メッセージをブロードキャスト送信する手法を提案する。

ここで、移動シンクノードには移動に要する動力源があることから、無線通信に対しても十分な電力が供給されることを前提とし、短周期でビーコンメッセージをブロードキャスト送信するものとする。各無線センサノード  $S_i$  は、このビーコンメッセージの受信開始時に移動シンクノード到着メッセージ  $MSArrival(S_i)$  をブロードキャスト送信する(図6)。 $S_i$  は自身に到着したデータメッセージを隣接する移動シンクノードへ直接転送する。また、継続していたビーコンメッセージの受信が終了した時点で移動シンクノード出発メッセージ  $MSDeparture(S_i)$  をブロードキャスト送信する(図7)。

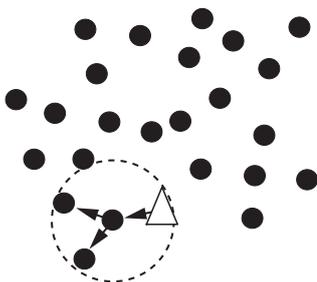


図6 MSArrivalの送信

各無線センサノード  $S_i$  は、移動シンクノードと直接通信可能な隣接無線センサノード集合  $CNeighbor_i$  とセンサデータメッセージ中継隣接ノード変数  $NextHop_i$  を保持する。 $S_i$  が隣接無線センサノード  $S_j$  から移動シンクノード到着メッセージ  $MSArrival(S_j)$  を受信したならば、 $CNeighbor_i$  に  $S_j$  を加える。 $CNeighbor_i$  に含まれる隣接無線センサノードはいずれかの移動シンクノードと直接通信可能である。そこで、 $S_i$  自身がいずれかの移動シンク

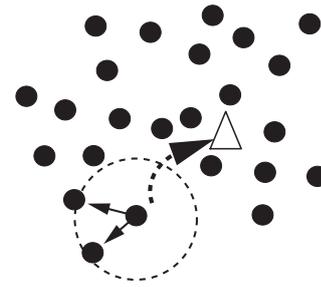


図7 MSDepartureの送信

ノードと直接通信可能である場合には、センサデータメッセージをこの移動シンクノードに直接転送し、 $S_i$  がいずれの移動シンクノードとも直接通信不可能である場合には、 $CNeighbor_i$  に含まれるいずれかの隣接無線センサノードへとセンサデータメッセージを転送する。 $S_i$  が隣接無線センサノード  $S_j$  から移動シンクノード出発メッセージ  $MSDeparture(S_j)$  を受信したならば、 $CNeighbor_i$  から  $S_j$  を除く。もし、これによって  $CNeighbor_i$  が空集合となったならば、すべての隣接無線センサノードがいずれの移動シンクノードとも直接通信不可能となっている。このとき、 $S_j$  は  $S_i$  の隣接無線ノードのうち最後まで移動シンクノードと直接通信可能であったことから  $S_i$  は  $S_j$  へとセンサデータメッセージを転送することによって移動シンクノードまで最小ホップ数、すなわち最少消費電力かつ最短配送遅延でセンサデータメッセージが配送されることが期待される。そこで、 $NextHop_i$  を  $S_j$  とし、 $CNeighbor_i$  が空集合である場合には、 $S_i$  はセンサデータメッセージを  $S_j$  へと転送するものとする。

#### [ルーティングプロトコル]

When  $S_i$  receives  $MSArrival(S_j)$ ,

$CNeighbor_i := CNeighbor_i \cup \{S_j\}$  and  
 $NextHop_i := \perp$ .

When  $S_i$  receives  $MSDeparture(S_j)$ ,

$CNeighbor_i := CNeighbor_i - \{S_j\}$ .

if  $CNeighbor_i = \emptyset$ ,

$NextHop_i := S_j$ .

When  $S_i$  becomes directly connected to mobile sink node,

$CNeighbor_i := CNeighbor_i \cup \{S_i\}$  and

$NextHop_i := \perp$ .

When  $S_i$  becomes disconnected to mobile sink node,

$CNeighbor_i := CNeighbor_i - \{S_i\}$ .

if  $CNeighbor_i = \emptyset$ ,

$NextHop_i := \perp$ .

□

#### [データメッセージ転送プロトコル]

When data message  $m$  arrives before  $t_0$  or after  $t_1$

or  $m$  is in message buffer at  $t_1$  in  $S_i$ ,

if  $S_i$  is directly connected to mobile sink  $M$ , i.e.  $S_i \in CNeighbor_i$

$S_i$  forwards  $m$  to  $M$ .

else if  $CNeighbor_i \neq \emptyset$ ,

$S_i$  forwards  $m$  to one of neighbor nodes in  $CNeighbor_i$ .

else if  $NextHop_i \neq \perp$ ,

$S_i$  forwards  $m$  to  $NextHop_i$ .

else

$S_i$  continues holding  $m$  in message buffer.

□

本提案プロトコルによって、図8に示すように、移動シンクノードを追跡するような無線マルチホップ配送経路を構成するように各無線センサノードが転送先隣接無線センサノードを選択する。なお、各無線センサノードは自律的に最近まで移動シンクノードと直接通信可能であった隣接無線センサノードをセンサデータメッセージの転送先として選択することから、3.1節で述べたように、無線マルチホップ配送におけるセンサデータメッセージの配送遅延と通信消費電力は経過時間とともに単調増加せず増減する場合がある(図9)。

各無線センサノードは、移動シンクノードと直接通信可能となった時点、直接通信不可能となった時点のそれぞれで1つの制御メッセージをブロードキャスト送信するのみであり、これを受信した隣接無線センサノードがルーティングに関する情報を更新する。したがって、消費電力の小さなルーティング手法であるといえる。なお、論文[4]に示されているように、無線センサノードの無線信号到達範囲によって移動シンクノードの移動可能領域が被覆されていない場合、すなわち、移動シンクノードがいずれの無線センサノードの無線信号到達範囲にも含まれない領域に移動することがある場合には、無線センサノードの転送先隣接無線センサノードが存在しなくなる場合がある。この問題の解決は、今後の課題とする。

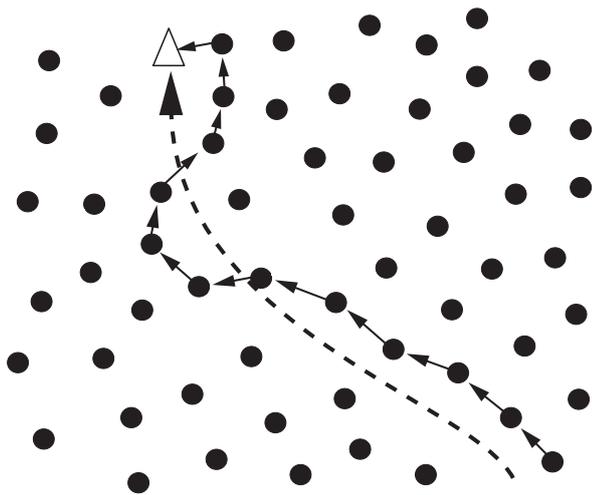


図8 転送先隣接無線センサノードの選択

#### 4. 評価

本章では、無線センサノードと移動シンクノードとの隣接時間間隔をシミュレーション実験により測定し、この結果に基づいて、移動シンクノードが無線センサノードの通信範囲外へと移動した時刻からセンサデータメッセージ到着時刻までの時間に対する配送遅延時間、すなわち、センサデータメッセージ到着時刻から移動シンクノードが無線センサノードの通信範囲内へと移動するまでの時間の期待値を求める。

移動シンクノードの移動領域を1,000m × 1,000mの正方形領域とし、3台の移動シンクノードがランダムディレクションモビリティモデルに従って移動する。この移動モデルでは、ランダムウェイポイントモデルと同様、移動方向をランダムに決定するが(本実験では、移動速度は1.0m/sで一定としている)、移動目標点を領域境界上のみ定める。

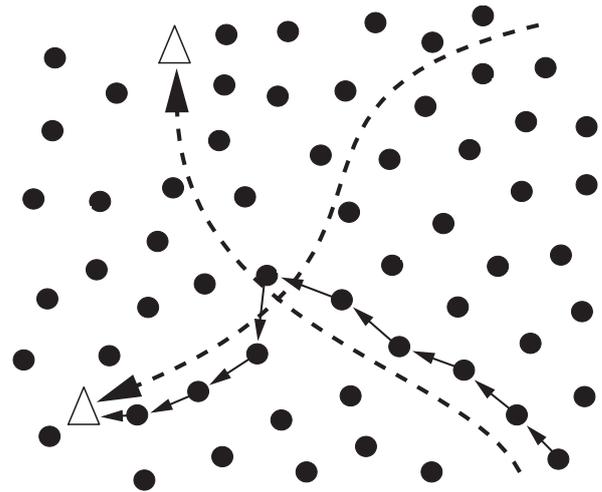


図9 複数移動シンクノードによる配送経路の構成

これは、ランダムウェイポイントモデルに従う移動では、移動シンクノードが領域中心部に偏在する傾向が強く、より多くの無線センサノードに対して均等なセンサデータ配送機会を提供することが求められる環境においては適切ではないためである。無線信号到達距離を30mとし、領域の中心 $C(500m, 500m)$ 、境界の頂点近辺 $V(100m, 100m)$ 、境界の辺の midpoint 近辺 $E(100m, 500m)$ における測定結果を図10, 11, 12に示す。

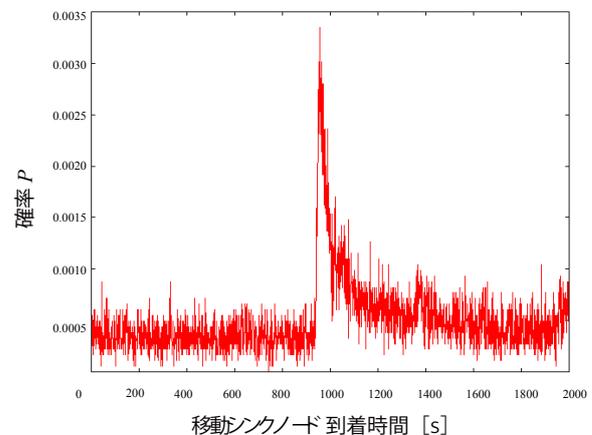


図10 移動シンクノード到着時間分布  $C(500m, 500m)$

図10, 11, 12は、移動シンクノードが到着するまでの時間 $t$ の分布を確率密度関数 $P(t)$ で示したものである。 $C, V, E$ のいずれにおいても、ある移動シンクノードがセンサノードの通信範囲外へと移動した後の一定時間はいずれかの移動シンクノードが通信範囲内へと移動する確率は低い値で一定となる。その後、ある時間が経過すると来訪確率は極大値となり、直後に急速に低下し、緩やかに減少する。その後もこれを繰り返すが、極大値は順次小さくなる。

また、 $P(t)$ に基づいて、データメッセージ到着時刻から移動シンクノード到着時刻までの時間、すなわち、保持手法におけるデータメッセージ配送遅延 $D(s)$ の期待値を求める。 $D(s)$ は次式で与えられる。

$$D(s) = \frac{\int_s^\infty P(t)(t-s)dt}{\int_s^\infty P(t)dt} \quad (1)$$

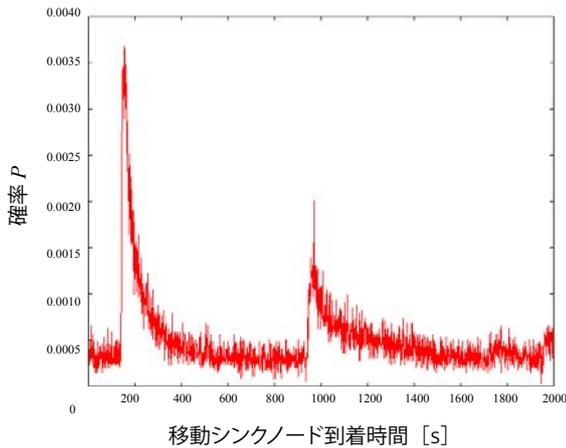


図 11 移動シンクノード到着時間分布  $V(100m,500m)$

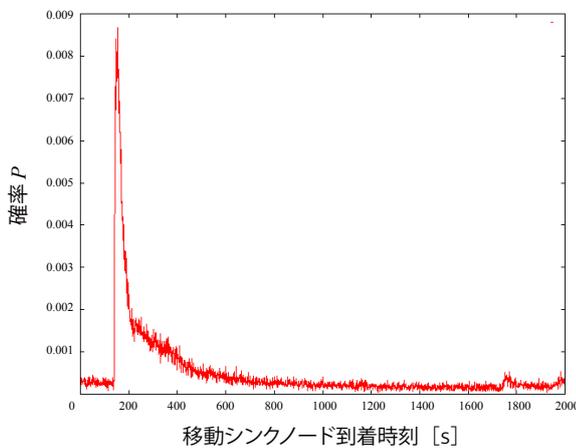


図 12 移動シンクノード到着時間分布  $E(100m,100m)$

ここで、 $\int_s^\infty P(t)(t-s)dt$  は、移動シンクノードが無線センサノードの無線通信範囲外へ移動してから  $s$  秒後にデータメッセージが到着した場合において、 $t$  秒後に無線センサノードが無線センサノードの無線通信範囲内へ移動する条件付き確率である。

$C, V, E$  の 3 点における  $D(s)$  の計算結果を図 13, 14, 15 に示す。  $C, V, E$  のいずれにおいても 3.1 節で述べたように、ある移動シンクノードがセンサノードの通信範囲外へと移動した時刻からセンサデータメッセージが到着する時刻までの時間に対する平均待機時間、すなわち、保持手法を適用した場合の配送遅延は減少、増加となり極小値を持つ。したがって、シンクノードの移動直後は、シンクノードが近隣に存在することから転送手法を選択し、平均待機時間が極小値となる付近では保持し、以降は再度転送を選択する手法が妥当なものであることが分かる。なお、データメッセージの到着時刻が遅い部分について 3.1 節の考察とは異なって平均配送遅延が減少しているが、これは実験データに基づいて式 (1) の積分区間を有限として計算していることが影響していると考えられる。到着時刻が遅い部分については、時刻 0 である移動シンクノードがセンサノードの通信範囲外へ移動したという初期状態の影響よりも指数分布のマルコフ性の影響が強くなり、一定値での推移へと移行していることが考えられる。

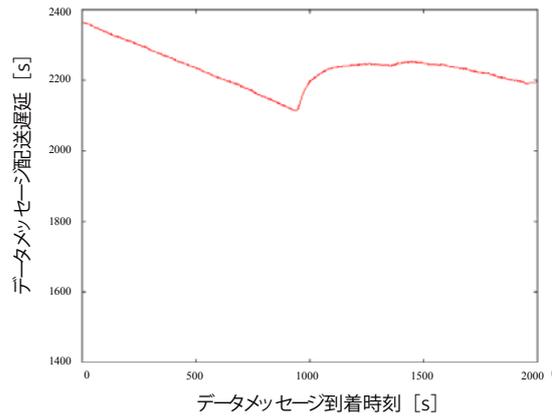


図 13 データメッセージ配送遅延  $C(500m,500m)$

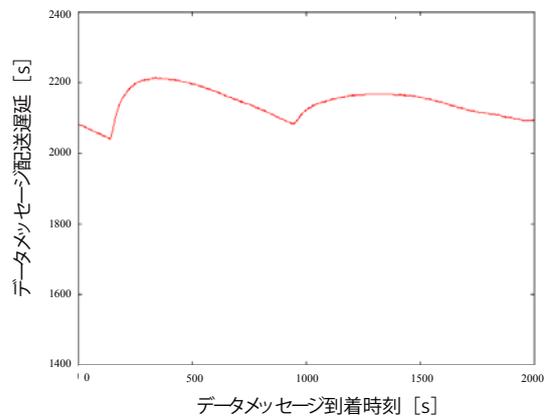


図 14 データメッセージ配送遅延  $V(100m,500m)$

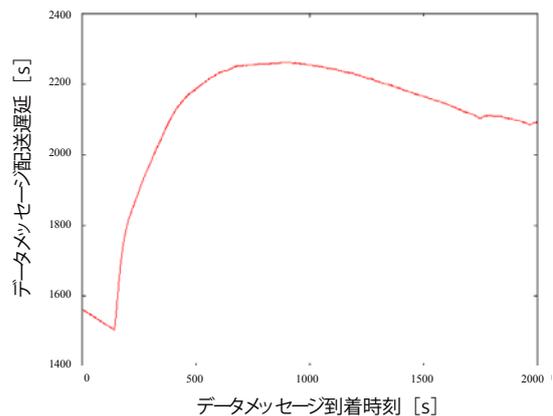


図 15 データメッセージ配送遅延  $E(100m,100m)$

## 5. まとめと今後の課題

本論文では、無線センサノードから移動シンクノードへのセンサデータメッセージの配送を、各無線センサノードが隣接無線センサノードのひとつに転送することと転送を行わずに保持することとを適応的に選択することにより、

センサデータメッセージを無線マルチホップ通信によって配送する手法と移動シンクノードと直接通信可能となるまで保持する手法とを組合せる手法を提案した。配送遅延、通信に要する電力消費、バッファオーバーフローの発生リスクとトレードオフを実現するために、各無線センサノードが移動シンクノードとの直接通信が不可能となった時刻からの経過時間に応じて転送と保持を選択する手法を示した。また、各無線センサノードの転送先隣接無線センサノードを選択するために、移動シンクノードとの接続状況が変化した時点でのみ各無線センサノードが制御メッセージをブロードキャスト送信する低消費電力のルーティング手法を提案した。本プロトコルによる隣接無線センサノード間の局所的な情報交換のみによって、最近隣接した移動シンクノードを追跡する無線マルチホップ配送経路が検出される。

各無線ノードの転送と保持の選択の境界となる経過時間は、移動シンクノード数、移動速度、移動頻度、無線センサノードの配置密度、センサデータメッセージ生成頻度、通信バッファサイズ、および、配送遅延と消費電力のトレードオフの設定によって異なる。これについて基礎実験を行ない、保持手法におけるデータメッセージ配送遅延が想定通りの極小値を持つことを確認した。今後はシミュレーション実験によって、求めるトレードオフに対して適切な経過時間を求める方法を検討する。

#### 参考文献

- [1] Camp, T., Boleng, J. and Davies, V., "A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research," *Wireless Communications and Mobile Computing*, Vol. 2, No. 5, pp. 483-502 (2002).
- [2] Chatzigiannakis, I., Kinalis, A., Nikolettseas, S. and Rolim, J., "Fast and Energy Efficient Sensor Data Collection by Multiple Mobile Sinks," *Proceedings of the International Workshop on Mobility Management and Wireless Access*, pp. 25-32 (2007).
- [3] Foder, K. and Vida'cs, A., "Efficient Routing to Mobile Sinks in Wireless Sensor Networks," *Proceedings of the International Conference on Wireless Internet*, pp. 1-7 (2007).
- [4] Kusy, B., Lee, H., Wicke, M., Milosavljevic, N. and Guibas, L., "Predictive QoS Routing to Mobile Sinks in Wireless Sensor Networks," *Proceedings of the International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, pp. 109-120 (2009).
- [5] Lee, H., Wicke, M., Kusy, B., Gnawali, O. and Guibas, L., "Data Stashing: Energy-Efficient Information Delivery to Mobile Sinks through Trajectory Prediction," *Proceeding of the International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, pp. 291-302 (2010).
- [6] Shah, R.C., Roy, S., Jain, S. and Brunette, W., "Data MULEs: Modeling and Analysis of a Three-Tier Architecture for Sparse Sensor Networks," *Ad-Hoc Networks*, vol. 1, pp.215-233 (2003).
- [7] Sugihara, R. and Gupta, R.K., "Scheduling under Location and Time Constraints for Data Collection in Sensor Networks," *Proceedings of the International Symposium on Real Time Systems* (2007).
- [8] Sugihara, R. and Gupta, R.K., "Improving the Data Delivery Latency in Sensor Networks with Controlled Mobility," *Proceedings of the International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, pp. 386-399 (2008).
- [9] 兼子, 松垣, "NeBuST-wide: パーストセンサデータの高性能低遅延配送プロトコル," *情処研報*, Vol. 2011-MBL-60, No. 15, pp. 1-8 (2011).
- [10] 清野, 坂下, 義久, 原, 西尾, "移動型ノードを用いたセンサデータ収集におけるデータ収集量向上のための通信方式," *情報処理学会 DICOMO 2010 シンポジウム論文集*, pp. 1790-1797 (2010).
- [11] 高田, 萬代, 木谷, 渡辺, "移動シンクを利用した協調型データ蓄積方式について," *情報処理学会 DICOMO 2009 シンポジウム論文集*, pp. 1592-1603 (2009).
- [12] 竹平, 松垣, "間欠的通信手法 IRDT のための位置ベースアドホックルーティング GEDIR の拡張," *情処研報*, Vol. 2011-MBL-60, No. 13, pp. 1-8 (2011).
- [13] 山本, 西尾, "無線センサネットワークにおけるモバイルシンクとの接続状況に基づくデータ転送先の決定法について," *情報処理学会 DICOMO 2011 シンポジウム論文集*, pp. 878-885 (2011).