

## 間欠的無線マルチホップ通信における次ホップ選択手法

竹平 貴紀<sup>†1</sup> 桧垣 博章<sup>†1</sup>

無線センサネットワークでは、通信モジュールを間欠的に動作させることによって省電力化が実現される。無線センサネットワークにおける非同期的間欠通信を実現する IRDT 手法は、送受信無線センサノード間の同期に要する消費電力を削減する。しかし、隣接無線センサノードへの制御メッセージのブロードキャストを複数のユニキャスト通信によって実現することから、プロアクティブ型ルーティングのオーバーヘッドが大きい問題がある。本論文では、隣接無線センサノードの位置情報を用いる GEDIR ルーティングプロトコルを IRDT 手法と組み合わせる IRDT-GEDIR 手法を提案する。ここでは、観測データの無線マルチホップ配送遅延を短縮するために、観測データ配送の擬似速度を次ホップ選択の指標とし、アクティブモードである隣接無線センサノードを次ホップに選択する場合の擬似速度と選択しない場合の擬似速度期待値とを比較することで起動した隣接無線センサノードを次ホップとするか否かを決定する。シミュレーション実験により、中継無線センサノードが隣接無線センサノード数を正しく把握している場合には、提案手法がより高い配送疑似速度を得ることを示す。また、隣接無線センサノード数を少なく推定した場合にも概ね同等の性能改善が見込まれることを明らかにする。

### Next-Hop Slection in Intermittent Wireless Multihop Communication

TAKANORI TAKEHIRA<sup>†1</sup> and HIROAKI HIGAKI<sup>†1</sup>

In wireless sensor networks, reduction of power consumption in sensor nodes is realized by intermittent communication among them. IRDT (Intermittent Receiver-Driven Transmission) is a low-power method for on-demand synchronization among neighbor sensor nodes. However, since broadcast transmission of a control message is realized by multiple unicast transmissions, communication overhead for a proactive routing protocol is too high. In order to solve this problem, this paper proposes IRDT-GEDIR in which a next-hop sensor node is determined in an on-demand manner based on location information of sensor nodes. For shorter transmission delay of sensor data, pseudo speed of sensor data transmission is evaluated for selection of a next-hop sensor node. Here, the method for estimation of expected pseudo speed in case that an intermediate sensor node does not select currently active neighbor sensor nodes is critical for next-hop selection for shorter transmission delay for sensor data. Simulation

experiment result shows the estimation method is reasonable and the proposed method is expected to achieve shorter delay multihop transmissions in cases that an estimated number of neighbor nodes is correct; in addition, even in case that the estimated number of neighbor nodes is less than the correct one, the proposed method achieves higher pseudo speed of sensor data transmissions.

#### 1. はじめに

無線通信機能を備えたセンサノードが取得した観測データをデータ収集のためのコンピュータへ接続するシンクノードへと無線マルチホップ配送するセンサネットワークの研究開発が活発に行なわれている [2]。一般に無線センサノードに備えられた電源容量は限られているため、取得した観測データを各無線センサノードからシンクノードへ直接配送する、すなわち、シンクノードを無線信号到達範囲に含むことができる電力を用いて各無線センサノードが観測データを送信することは省電力の観点からも、無線信号の競合、衝突の発生を回避する観点からも適切ではない。そこで、各無線センサノードが比較的小さな電力で送信する無線信号の到達範囲に含まれる隣接無線センサノードへと観測データを送信し、これを受信した無線センサノードが中継ノードとして観測データを転送することを繰り返すことによって観測データをシンクノードへと到達させる無線マルチホップ配送が用いられる。観測データを各無線センサノードからシンクノードまで他の無線センサノードの中継によって配送するためには、観測データの経路制御を適切に行なう必要がある。これまでに無線ノード間のマルチホップ配送を実現する様々なアドホックルーティングプロトコルが提案されている [11]。ここでは、すべての無線ノードが常時通信可能となっていることを前提としている。しかし、無線センサネットワークには継続的な電力供給源は存在せず、設置時に与えられた限られた容量の電源のみで一定期間動作することが求められることから、特に、通信モジュールにおける省電力化が求められる。

通信モジュールの消費電力を削減する最も有効な手法のひとつは、通信モジュールを間欠的に動作させるものである (図 1)。各無線センサノードは、観測データ取得時には、これをシンクノードへと無線マルチホップ配送するために、隣接無線センサノードのひとつへと転送する必要があることから、通信モジュールに電力を供給することが必要である。また、隣接無線センサノードから観測データを受信し、これを他の隣接無線センサノードへと転送する、すなわち、中継無線センサノードとして機能する場合にも、通信モジュールに電力を供給する必要がある。ただし、これ以外の時間においては、通信モジュールへの電力供給を遮断するスリープモードへと移行することによって、消費電力を削減し、無線センサネットワークをより長期間運用することが可能となる。

送信元無線センサノードでは、観測データ取得後に通信モジュールへの電力供給を開始す

<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

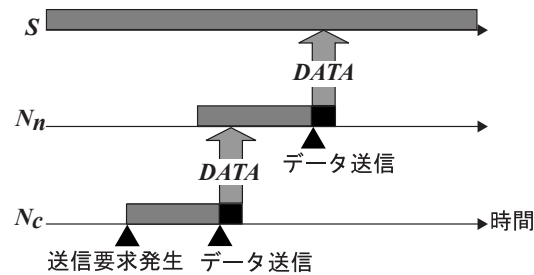


図1 通信モジュールの間欠動作による無線センサノードの省電力化

ればよい。しかし、中継無線センサノードでは、観測データの受信を開始する以前に電力供給を開始しなければならない。これを實現する非同期式間欠通信手法に IRDT (Intermittent Receiver-Driven Transmission) 手法がある [13]。ここでは、観測データの受信に必要な電力供給の開始、すなわち、スリープモードからアクティブモードへの移行を實現しつつ、より消費電力を削減することを可能としている。しかし、各無線センサノードの通信モジュールが間欠的に動作することから、常時通信モジュールに電力供給されていることを前提として設計された従来のアドホックルーティングプロトコルをそのまま適用することは困難もしくは不可能である。論文 [6] では、IRDT 手法のためのルーティングプロトコルについて議論されている。ここでは、配送経路を決定する各無線センサノードからシンクノードへのホップ数を指標として、各無線センサノードは、自身よりもシンクノードへのホップ数が少ない隣接無線センサノードを次ホップとして選択し、観測データを転送する。しかし、このようなプロアクティブ型の手法では、観測データの転送以前に必要な情報を各無線センサノードが取得するために何らかの制御メッセージをフラッディングすることが求められるが、無線センサノードが間欠通信を行なう場合には、これを行なうのに要する時間オーバーヘッド、通信オーバーヘッドが大きくなる。そこで本論文では、各無線センサノードが自身の位置情報を取得可能であることを前提として、位置情報を用いたグリーディアドホックルーティングプロトコルである GEDIR [7] を IRDT 手法と組み合わせる IRDT-GEDIR 手法を提案する。

## 2. 関連研究

無線センサネットワークを構成する各無線センサノードに備えられた電源容量が限られていることから、通信モジュールを間欠的に動作させる、すなわち、通信モジュールへ電力が供給されるアクティブモードと電力が供給されないスリープモードとを経時的に切り換えることによって省電力化を實現する。前章で述べたように、間欠的に動作する無線センサノードによって観測データを無線マルチホップ配送するためには、転送元無線センサノードが観測データを転送する直前までに転送先無線センサノードがアクティブモードへと移行す

ることが必要である。これを實現するための手法は、同期式手法と非同期式手法に分類される。同期式手法では、互いに隣接する無線センサノードを強く同期させ、各無線センサノードの送受信タイミングを定められたスケジュールに基づいて厳密に同期するものであり、TRAMA [12] や LMAC [4] などのプロトコルが提案されている。しかし、これらのプロトコルでは、無線センサノード間の強い同期を實現するメカニズムが必要となるが、そのためには制御メッセージの頻繁な交換を要するのが一般的である。

一方、観測データの転送が必要となった隣接無線センサノード間でのみ同期を實現する非同期式手法には、LPL (Low Power Listening) 手法 [5] や IRDT 手法がある。LPL 手法では、転送元無線センサノードは送信要求発生から観測データ転送開始までの間はプリアンプルメッセージをブロードキャスト送信し続けなければならない、転送先無線センサノード以外の転送元無線センサノードの隣接無線センサノードを受信待機させ続けなければならない。LPL 手法と比較してより省電力化した観測データ転送を實現する手法に IRDT 手法がある。IRDT 手法では、転送元無線センサノード  $N_c$  は、プリアンプルメッセージを送信し続けるのではなく、転送要求発生以降は、転送先無線センサノード  $N_n$  からのポーリング信号の受信待機状態となる (図 2)。各無線センサノードは、一定周期でスリープモードからアクティブモードへと移行し、自身の ID を含むポーリングメッセージをブロードキャスト送信すると直ちに送信要求メッセージの受信を待機する。一定時間の受信待機期間に送信要求メッセージの受信がない場合には、アクティブモードからスリープモードへと移行する。ポーリングメッセージの受信を待機している  $N_c$  が次ホップ隣接無線センサノードの ID を含むポーリングメッセージを受信したならば、直ちに送信要求メッセージ  $Sreq$  を  $N_n$  へ送信する。 $Sreq$  の受信に対して  $N_n$  が受信確認メッセージ  $Rack$  を返送すると、 $N_c$  がこれを受信することによって  $N_c$  は  $N_n$  が観測データの受信待機状態にあることを知る。そこで、 $N_c$  から  $N_n$  へと観測データを転送する。このように IRDT 手法では、無線センサノードからの継続的なメッセージ送信を除去し、継続的な受信待機と間欠的なメッセージ送信のみによって転送元無線センサノードと転送先無線センサノードとの間の同期を實現することができる。

論文 [6] では、IRDT 手法における観測データの無線マルチホップ配送のためのルーティング手法が議論されている。ここでは、各無線センサノードがルーティングテーブルを保持し、これを維持するプロアクティブな手法が用いられている。ここでは、各無線センサノードから送信先シンクノードへの最小ホップ数を取得するとともに、隣接無線センサノードから送信先シンクノードへの最小ホップ数を取得することによって、送信先シンクノードまでの自身からよりもホップ数が少ない隣接無線センサノードを次ホップ隣接無線センサノードとして選択し、観測データを転送する。このような観測データのルーティングを實現するためには、送信先シンクノードからのホップ数を計測する必要がある。類似の手法を一般的な無線アドホックネットワークで實現する場合には、送信先シンクノードからの制御メッセージの定期的なフラッディングを用いて、各無線センサノードとシンクノードとの間のホップ数の計測とその隣接無線センサノードへの通知を實現する。しかし、IRDT 手法を用いた

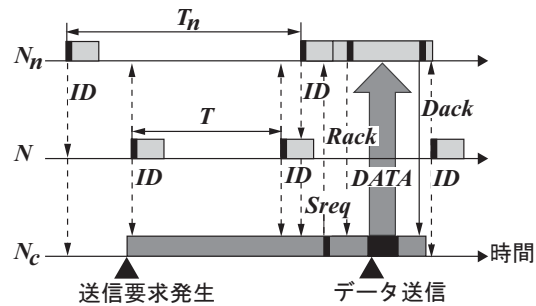


図2 IRDT手法

間欠通信を基礎とした無線センサネットワークでは、隣接無線センサノード間の通信はユニキャストを基礎としており、制御メッセージのブロードキャストは各隣接無線センサノードへのユニキャストの組によって実現される。このため、制御メッセージのフラッシングに要する時間オーバーヘッドと通信オーバーヘッドは大きい。また、無線センサノード周辺の電波環境の時間的変化、無線センサノードの電力消費や故障による無線センサネットワークからの離脱、無線センサノードが移動能力を備える場合にはその移動、等によってネットワークポロジは経時的に変化するため、ルーティングテーブルは随時更新されることが求められる。そのため、観測データの到達率を保証するためには制御メッセージのフラッシング周期を容易に延長することができず、観測データ配送遅延の延長、消費電力量の増加、観測データスループットの低下を招く問題がある。

### 3. 提案手法

#### 3.1 擬似速度期待値による次ホップ選択手法

本論文では、無線センサネットワークにおける非同期式間欠通信手法 IRDT 手法を用いた観測データの無線マルチホップ配送のためのルーティングに要する時間オーバーヘッドと通信オーバーヘッドを削減し、より省電力化された無線センサネットワークを実現するために、位置情報を用いたリアクティブ型アドホックルーティングプロトコルである GEDIR [7] を組み合わせた GEDIR-IRDT 手法を提案する。

GEDIR では、各無線センサノードは自身の現在位置情報が取得可能であるとする。このとき、観測データの中継無線センサノードは、隣接無線センサノードと送信先シンクノードの現在位置を取得することが必要である。隣接無線センサノードの現在位置は、隣接無線センサノードがブロードキャスト送信した自身の現在位置情報を含むメッセージを受信することによって取得可能である。また、送信先シンクノードの位置は固定、もしくは DREAM [1]、Octopus [8]、HRLI [9]、ABLA [10] 等の手法によって取得する。これらの位置情報に基づいて、GEDIR では以下の方法によって中継無線センサノードが次ホップ隣接無線センサ

ノードを選択し、観測データを転送する。

[GEDIR における次ホップ隣接無線センサノードの選択] 観測データを送信先シンクノード  $S$  へ配送する中継無線センサノード  $N_c$  の次ホップ隣接無線センサノード  $N_n$  は、 $N_c$  の隣接無線センサノードのうち  $S$  までの距離  $d_n = |N_n S|$  が最小となるものである。

IRDT 手法においては、各無線センサノード  $N_i$  が周期  $T_i$  で自身の ID を含むポーリングメッセージをブロードキャスト送信することから、このポーリングメッセージに自身の現在位置情報をピギーバックすることによって追加の通信オーバーヘッドを要することなく、 $N_i$  の位置情報を隣接無線センサノードへ送信することが考えられる。しかし、このポーリングメッセージがブロードキャスト送信された場合でも、隣接無線センサノードの通信モジュールに電力が供給されていないならば、ポーリングメッセージが受信されず、現在位置情報を広告することができない。

GEDIR における次ホップ隣接無線センサノードの選択手法をそのまま実現するためには、中継無線センサノード  $N_c$  がすべての隣接無線センサノードの位置情報を取得する必要がある。すべての無線センサノードのポーリングメッセージ送信周期が同じであるならば、この周期だけ受信待機することによって  $N_c$  はすべての隣接無線センサノードの位置情報を取得することができる (図3)。これによって、送信先シンクノード  $S$  に最も近い隣接無線センサノード  $N_n$  を次ホップに選択できるものの、ポーリングメッセージ送信周期だけ受信待機して隣接無線センサノードの位置情報を取得するとともに、次ホップ隣接無線センサノードを選択した後もこのノードからのポーリングメッセージを受信待機しなければならないため、観測データ配送遅延が延長する。

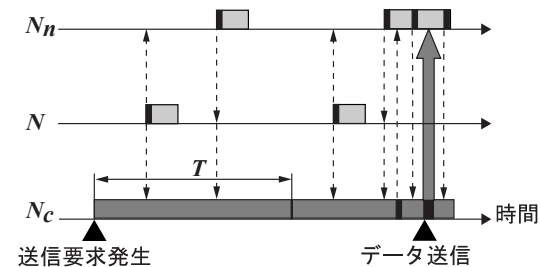


図3 隣接無線センサノードの位置情報取得による次ホップ選択手法

中継無線センサノード  $N_c$  が隣接無線センサノードの現在位置の取得を必要とするのは、転送すべき観測データを自身のセンサが取得するか前ホップ隣接無線センサノードから受信するかいずれかによって保持しており、次ホップ隣接無線センサノードを選択する場合である。すなわち、IRDT 手法では  $N_c$  がポーリングメッセージを受信待機している場合であり、この受信待機を開始した時点では、次ホップ隣接無線センサノードが決定されていない

い。そこで、 $N_c$  が以降に受信したポーリングメッセージにピギーバックされた位置情報に基づいて、次ホップ隣接無線センサノードを選択し、観測データを転送する。ここで、ポーリングメッセージをブロードキャスト送信した隣接無線センサノード  $N$  は、送信後一定時間しか送信要求メッセージ  $Sreq$  を受信待機しないことから、 $N_c$  は  $N$  を次ホップ隣接無線センサノードとして選択するか否かをこの受信待機時間内に決定しなければならない。

この問題を解決する手法として、あらかじめ定められた評価指標について、 $N$  を次ホップ隣接無線センサノードとして選択する場合と選択しない場合とを比較することが考えられる。GEDIR では、隣接無線センサノードの評価指標として送信先シンクノードまでの距離を用い、配送中の観測データがより送信先シンクノードへと近づくように次ホップ隣接無線センサノードを選択することによって配送遅延の短縮を目指している。しかし、IRDT-GEDIR 手法では、隣接無線センサノードの通信モジュールが間欠的に動作していることから、送信先シンクノードに最も近い隣接無線センサノードであっても、中継無線センサノードの送信要求発生時刻からポーリングメッセージ送信時刻までの時間が長い場合には必ずしも観測データの配送遅延を短縮するものではない。逆に、たとえ送信先シンクノードに最も近い隣接無線センサノードでない場合でも中継無線センサノードの送信要求発生時刻からポーリングメッセージ送信時刻までの時間が短いならば、観測データの配送遅延は短縮される。したがって、IRDT-GEDIR 手法では、送信先シンクノードまでの距離の短縮（中継無線センサノードから送信先シンクノードまでの距離と隣接無線センサノードから送信先シンクノードまでの距離の差分）を送信要求発生時刻からポーリングメッセージ送信時刻までの時間で除算した擬似速度を隣接無線センサノードの評価指標とする（図4）。これは、IRDT-GEDIR 手法における間欠的な通信モジュール動作を考慮した低遅延配送のための隣接無線センサノード評価指標としてより適切なものである。

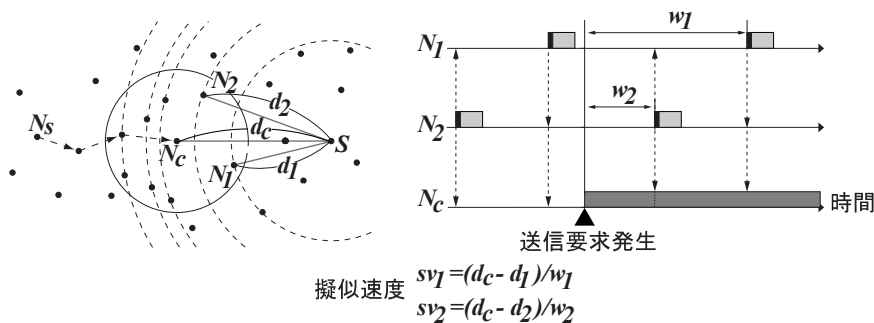


図4 擬似速度による次ホップ無線センサノードの選択手法

ただし、先に述べたように、中継無線センサノード  $N_c$  は、隣接無線センサノード  $N$  から

ポーリングメッセージを受信した後の受信待機時間内に  $N$  を次ホップ隣接無線センサノードとして選択するか否かを決定し、選択する場合には  $Sreq$  メッセージを  $N$  に送信しなければならない。すなわち、 $N_c$  は各隣接無線センサノード  $N_i$  を次ホップとして選択した場合の擬似速度  $sv_i$  を比較することはできない。これは秘書問題 [3] の設定と同等である。そこで、 $N_c$  は  $N$  を次ホップ隣接無線センサノードとして選択した場合の擬似速度  $sv$  と  $N$  を選択せずに以降にポーリングメッセージを送信した隣接無線センサノードを次ホップに選択した場合の擬似速度の期待値  $\bar{sv}$  とを比較し、 $sv \geq \bar{sv}$  であれば  $Sreq$  メッセージを  $N$  へ送信し、 $sv < \bar{sv}$  であれば送信しないこととする。

### 3.2 擬似速度期待値の評価手法

前節で述べた提案手法では、中継無線センサノードが隣接無線センサノードのひとつからポーリングメッセージを受信したならば、この無線センサノードに観測データを転送する場合の擬似速度と転送しない場合の擬似速度の期待値とを比較し、転送するか否かを決定する。そこで本節では、観測データを転送せず以降にポーリングメッセージを送信した隣接無線センサノードへ転送する場合の擬似速度の期待値を求める方法について述べる。ここでは、各無線センサノードのポーリングメッセージ送信周期を  $T$ 、中継無線センサノード  $N_c$  の隣接無線センサノード数を  $n$  とする。

まず、中継無線センサノード  $N_c$  の隣接無線センサノード  $N$  について、送信先シンクノード  $S$  までの距離の確率分布を調べる。図5に示すように、 $N_c$  の無線信号到達距離を  $r$ 、 $N_c$  と  $S$  との距離を  $d_c$  ( $d_c > r$ )、 $N$  と  $S$  との距離を  $d$  ( $d_c - r \leq d \leq d_c + r$ ) とする。無線センサノードは対象領域に一樣に分布すると仮定すると、 $N_c$  の隣接無線センサノードから  $S$  までの距離が  $d$  以下となる確率  $DP(d)$  は次式で与えられる。

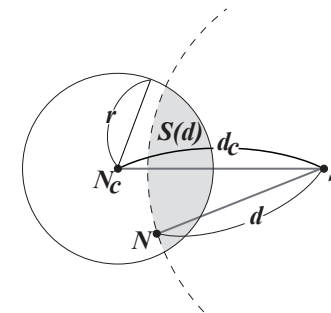


図5 各無線センサノードと送信先シンクノードの位置関係

$$DP(d) = \frac{S(d)}{\pi r^2} = \frac{2}{\pi r^2} \left( \int_{d_c-d}^{x'} \sqrt{d^2 - (x-d_c)^2} dx + \int_{x'}^r \sqrt{r^2 - x^2} dx \right)$$

$$(ただし x' = (d_c^2 + r^2 - d^2)/2d_c)$$

$DP(d)$  は  $d$  の分布関数であることから、 $S$  から隣接無線センサノードまでの距離が  $d$  である確率密度  $dp(d)$  は次式となる。

$$dp(d) = \frac{d}{dd} DP(d) = \frac{2}{\pi r^2} \frac{d}{dd} \left( \int_{d_c-d}^{x'} \sqrt{d^2 - (x-d_c)^2} dx + \int_{x'}^r \sqrt{r^2 - x^2} dx \right) \quad (1)$$

$N_c$  から  $S$  までの距離が観測データの  $N$  への転送によって  $N$  から  $S$  までの距離に短縮されたとすると、この短縮距離  $l = d_c - d$  の確率分布  $p(l)$  は次式で与えられる。

$$p(l) = dp(d_c - l) = \frac{2}{\pi r^2} \frac{d}{dl} \left( \int_r^{x''} \sqrt{r^2 - x^2} dx + \int_{x''}^l \sqrt{(l-x)(l+x-2d_c)} dx \right) \quad (2)$$

$$(ただし x'' = ((2d_c - l)l + r^2)/2d_c)$$

次に、中継無線センサノード  $N_c$  において観測データの送信要求が発生してから隣接無線センサノード  $N$  がポーリングメッセージを送信するまでの時間の確率分布を調べる。ここでは、送信要求発生時刻を  $t = 0$  として説明する。時刻  $t_i$  において、 $t = 0$  以降  $i$  番目の隣接無線センサノードがポーリングメッセージを送信するものとする(図6)。すなわち、 $0 \leq t < t_i$  において  $i-1$  隣接無線センサノードがポーリングメッセージを送信し、残る  $n-i$  隣接無線センサノードが  $t_i < t < T$  にポーリングメッセージを送信する。この  $n-i$  隣接無線センサノードのポーリングメッセージ送信時刻  $t$  が区間  $(t_i, T)$  に一様分布すると仮定すると、 $j$  番目 ( $i < j \leq n$ ) の隣接無線センサノードが時刻  $t$  ( $t_i < t < T$ ) にポーリングメッセージを送信する確率  $pp(i, j, t)$  は次式で与えられる。

$$pp(i, j, t) = n_{-i} C_{j-i-1} \left( \frac{t-t_i}{T-t_i} \right)^{j-i-1} n_{-j+1} C_1 \frac{1}{T-t_i} \left( \frac{T-t}{T-t_i} \right)^{n-j}$$

$$= \frac{n-i}{(T-t_i)^{n-i} n_{-i-1} C_{j-i-1}} (t-t_i)^{j-i-1} (T-t)^{n-j} \quad (3)$$

ここで、隣接無線センサノードの位置とそのポーリングメッセージ送信時刻とは互いに独立であることから、時刻  $t$  ( $t_i < t < T$ ) に  $j$  番目 ( $i < j \leq n$ ) の隣接無線センサノードがポーリングメッセージを送信し、この無線センサノードに観測データを送信することによって送信先シンクノードまでの距離が  $l$  だけ短縮する確率  $g(i, j, t, l)$  は (2) と (3) より次式で与えられる。

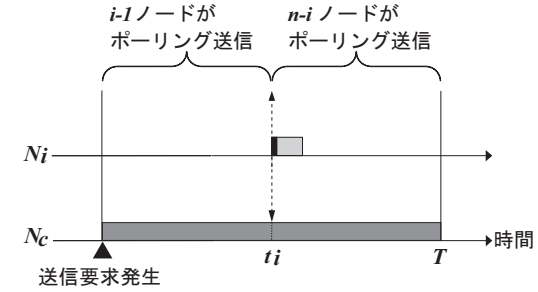


図6 ポーリングメッセージ送信時刻

$$g(i, j, t, l) = pp(i, j, t) \cdot p(l) \quad (4)$$

なお、この観測データ送信による擬似速度  $sv$  は  $sv = l/t$  である。

中継無線センサノード  $N_c$  は、時刻  $t_i$  に  $i$  番目にポーリングメッセージを送信した隣接無線センサノードを次ホップとして選択しない場合、時刻  $t_j$  ( $t_i < t_j < T$ ) に  $j$  番目にポーリングメッセージを送信した隣接無線センサノードを次ホップとして選択するか、時刻  $T$  以降に次のポーリングメッセージを送信した隣接無線センサノードを次ホップとして選択する。後者については、 $k$  番目 ( $1 \leq k \leq i$ ) の隣接無線センサノードが送信したポーリングメッセージの送信時刻が  $t_k$  ( $0 \leq t_k \leq t_i$ ) であり、送信先シンクノードまでの短縮距離が  $l_k$  であることから、1周期遅れで観測データを転送した場合の擬似速度は  $sv_k = l_k/(t_k + T)$  となる。 $t_k$  と  $l_k$  は  $N_c$  が取得済みであることから、 $t \geq T$  で観測データを転送する場合の擬似速度期待値は、

$$\overline{sv}_{n+1} = \max_{1 \leq k \leq i} sv_k = \max_{1 \leq k \leq i} \frac{l_k}{t_k + T} \quad (5)$$

である。これは、 $n$  番目にポーリングメッセージを送信する隣接無線センサノードへ観測データを送信しない場合の擬似速度期待値である。これに基づいて  $j$  番目 ( $i \leq j < n$ ) にポーリングメッセージを送信する隣接無線センサノードへ観測データを送信しない場合の擬似速度期待値を求める。

$j = n$  の場合、図7に示すように  $P(l)$  は  $-r \leq l \leq r$ 、 $pp(i, n, t_n)$  は  $t_i < t_n < T$  の範囲で定義され、 $g(i, n, t_n, l) = pp(i, n, t_n) \cdot p(l)$  である。ここで、この領域を直線  $l = \overline{sv}_{n+1} t_n$  によって2つの領域  $S, S'$  に分割すると、領域  $S$  では擬似速度  $l/t_n$  が  $\overline{sv}_{n+1}$  よりも大きい。したがって、観測データを  $n$  番目にポーリングメッセージを送信する隣接無線センサノードへ送信する。一方、領域  $S'$  では擬似速度  $l/t_n$  が  $\overline{sv}_{n+1}$  よりも小さい。そのため、観測データを送信せず、 $l_k/(t_k + T)$  の最大値を与える  $k$  番目にポーリングメッセージを送信

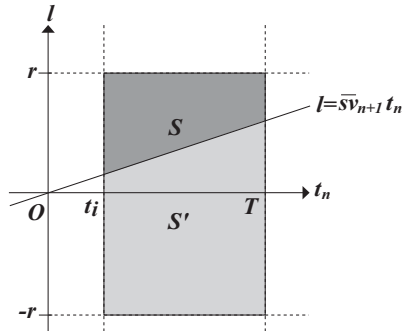


図 7  $n$  番目にポーリングメッセージを送信する隣接無線センサノードへ送信しない場合の擬似速度

した隣接無線センサノードからの再度のポーリングメッセージ送信時まで観測データ送信を待機する。以上により  $\bar{sv}_n$  は次式で与えられる。

$$\bar{sv}_n = \int_S \frac{l}{t_n} g(i, n, t_n, l) dS + \int_{S'} \bar{sv}_{n+1} g(i, n, t_n, l) dS' \quad (6)$$

一般に  $j$  番目 ( $i \leq j < n$ ) にポーリングメッセージを送信する隣接無線センサノードへ観測データを送信しない場合の擬似速度期待値も同様に求めることができる。すなわち、図 8 に示すように  $g(i, j, t_j, l)$  の定義領域は直線  $l = \bar{sv}_{j+1} t_j$  で 2 つの領域  $S$  と  $S'$  に分割される。領域  $S$  では擬似速度  $l/t_j$  が  $\bar{sv}_{j+1}$  よりも大きい。したがって、 $N_c$  は観測データを  $j+1$

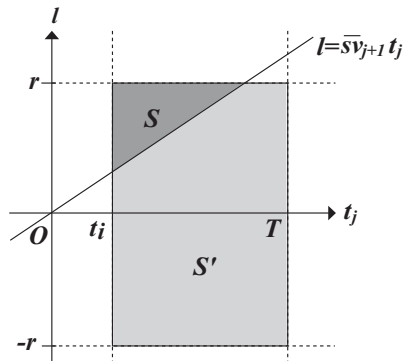


図 8  $j$  番目にポーリングメッセージを送信する隣接無線センサノードへ送信しない場合の擬似速度

番目以降にポーリングメッセージを送信する隣接無線センサノードへ送信する。一方、領域  $S'$  では擬似速度  $l/t_j$  が  $\bar{sv}_{j+1}$  よりも小さいため、 $N_c$  は観測データを送信せず、 $j$  番目に送信されるポーリングメッセージを待機する。以上により、 $\bar{sv}_j$  は次式で与えられる。

$$\bar{sv}_j = \int_S \frac{l}{t_j} g(i, j, t_j, l) dS + \int_{S'} \bar{sv}_{j+1} g(i, j, t_j, l) dS' \quad (7)$$

(5) と (7) より、 $N_c$  は  $\bar{sv}_i$  を求めることができる。したがって、時刻  $t_i$  に  $i$  番目のポーリングメッセージを送信した隣接無線センサノードが  $N_c$  よりも  $S$  までの距離が  $l_i$  だけ短縮されるならば、 $N_c$  は以下によって観測データを送信するか否かを決定する。

$$l_i/t_i \geq \bar{sv}_i \text{ ならば } N_c \text{ は観測データを送信する}$$

$$l_i/t_i < \bar{sv}_i \text{ ならば } N_c \text{ は観測データを送信しない}$$

#### 4. 性能評価

3.1 節で提案した IRDT-GEDIR 手法においては、観測データを保持する中継無線センサノードが現在位置情報をピギーバックしたポーリングメッセージを送信した隣接無線センサノードが受信待機している時間に観測データを転送するか否かを決定するために、擬似速度期待値を用いる手法を提案した。また、擬似速度期待値の算出手法を 3.2 節で述べた。本節では、提案した IRDT-GEDIR 手法の性能を得られる観測データ配送の擬似速度によって評価する。

ここでは、無線センサノードの無線信号到達距離を 10m、中継無線センサノードとシンクノードとの距離を 100m とする。また、中継無線センサノードの隣接無線センサノードは、中継無線センサノードの無線信号到達範囲内に一様分布乱数を用いてランダムに配置するものとし、その数を 5 台、10 台、15 台、20 台とする。各無線センサノードの通信モジュールの間欠起動周期は 1 秒とし、起動タイミングは一様分布乱数を用いてランダムに決定する。提案手法、最初に通信モジュールを起動した隣接無線センサノードを次ホップとする手法 (比較手法 1)、中継無線センサノードが 1 秒間ポーリングメッセージを受信して擬似速度が最大となる隣接無線センサノードを次ホップとする手法 (比較手法 2) について、得られた擬似速度を測定する。なお、あらかじめすべての隣接無線センサノードの位置情報が取得済みである場合 (比較手法 3) の最大擬似速度を比較のために測定する。また、すべての隣接無線センサノードが中継無線センサノードよりもシンクノードから遠い場合、すなわち中継無線センサノードがデッドエンドとなっている場合は、擬似速度を 0m/s と評価する。

図 9-12 に隣接無線センサノード数が 5-20 台の場合の結果を示す。ここでは、擬似速度  $sv$  が  $\bar{sv}$  以下である確率  $P(sv < \bar{sv})$ 、すなわち  $sv$  の確率分布関数を示す。いずれの隣接無線センサノード数においても、提案手法、最初に通信モジュールを起動した隣接無線センサノードを次ホップとする手法、1 秒間のポーリングメッセージ受信後に次ホップを選択する手法の順により高い擬似速度が得られている (低い擬似速度となる確率がより低い) ことが分かる。1 秒間のポーリングメッセージ受信後に次ホップを選択する手法では、すべての隣

接無線センサノードの位置情報を取得するオーバーヘッドが相対的に大きすぎるため、他の手法に比べて著しく性能が低い。提案手法と最初に起動した隣接無線センサノードを選択する手法では、隣接無線センサノード数が少ない場合には大きく性能が異なるものの、隣接無線センサノード数が多くなるにつれて、提案手法の優位性が顕著になる。また、隣接無線センサノード数がより多い環境であるほど、あらかじめ位置情報を取得していた場合の擬似速度に近づいていることが分かる。これにより、提案手法においては、ポーリングメッセージ受信時に直ちにその隣接無線センサノードを次ホップとするか否かを決定しなければならないにも関わらず、提案手法の擬似速度期待値の計算手法が妥当なものであり、より高い擬似速度の隣接無線センサノードを次ホップとして選択できていることが分かる。

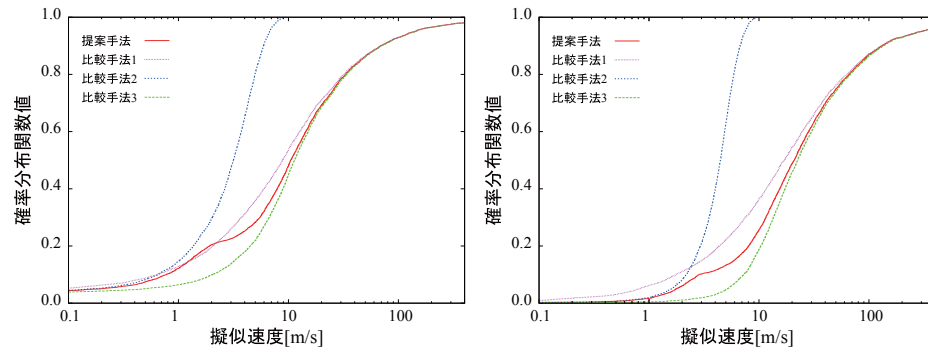


図 9 擬似速度測定結果 (隣接無線センサノード 5 台) 図 10 擬似速度測定結果 (隣接無線センサノード 10 台)

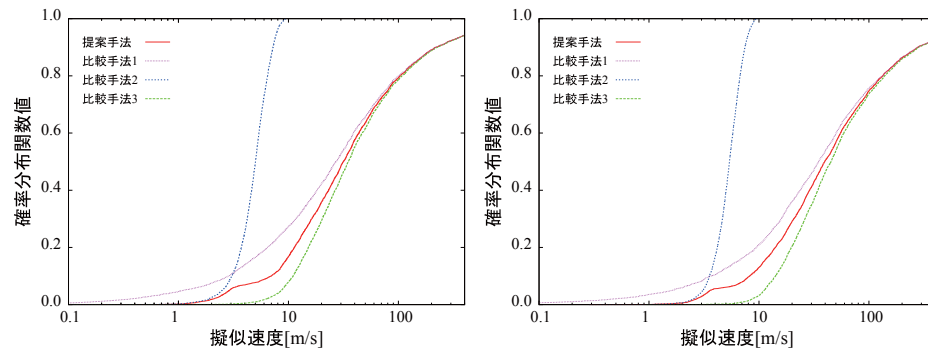


図 11 擬似速度測定結果 (隣接無線センサノード 15 台) 図 12 擬似速度測定結果 (隣接無線センサノード 20 台)

提案手法では、中継無線センサノードが次ホップ無線センサノードを隣接無線センサノードから選択するときに隣接無線センサノード数  $n$  を必要である。しかし、IRDT 適用環境においては、各無線センサノードが間欠的に無線モジュールを動作させることから、隣接無線センサノードからの無線信号を受信可能となるのは無線モジュール動作時間に限定される。このため、無線センサノードが計画的に配置され、障害、故障が発生することなくすべての無線センサノードが正常に動作しているという前提においては、隣接無線センサノード数を正確に取得することができるものの、無線センサノードのハードウェア、ソフトウェアの障害、故障が発生する場合や、長期的な運用によってバッテリー残量が枯渇した無線センサノードが離脱する場合、移動無線センサノードからセンサネットワークが構成されネットワークポロジが経時的に変化する場合などにおいては、正確な隣接無線センサノード数を各無線センサノードが取得することはできない。そこで、何らかの方法でその推定値  $n^e$  を得ることが求められる。ここでは、推定値  $n^e$  が真値  $n$  と異なる場合について、提案手法の性能を評価する。

シミュレーション実験環境は、シンクノードまでの距離を 100m とし、隣接センサノード数の真値  $n = 5$  に対してその推定値  $n^e$  を 2-10 の範囲とする場合の配送擬似速度、および、推定値  $n^e = 5$  に対して真値  $n$  が 2-10 の範囲である場合の配送擬似速度を測定する。測定結果を図 13 と図 14 に示す。図 13 は、推定値が真値と等しい場合 ( $n^e = n$ ) に配送擬似速度が最も高く、異なる場合には性能が低下することを示している。しかし、 $n^e < n$  である場合はその性能差は小さく  $n^e = n + 1$  でもその影響は小さいが、 $n^e > n + 1$  となると配送擬似速度が著しく低下する。隣接無線センサノード数が 5 以外の場合においても同様の実験結果が得られた。この点は図 14 においても示されており、 $n^e = 5$  である場合には  $n \geq 4$  では配送擬似速度は類似の分布となるが、 $n < 4$  では性能が著しく低下する。この結果、隣接無線センサノード数は小さめに見積るのが好ましく、大きくても真値+1 までとすることが強く求められることが明らかとなった。

## 5. ま と め

本論文では、省電力無線センサネットワークの実現手法のひとつである非同期式間欠通信手法 IRDT のためのルーティングプロトコル IRDT-GEDIR を提案した。IRDT では、無線センサノードからのブロードキャスト送信が複数のユニキャスト送信によって実現されるため、ブロードキャスト送信を基礎としたプロアクティブ型アドホックルーティングプロトコルでは、通信オーバーヘッドが拡大する問題がある。そこで、位置情報を用いたルーティングプロトコルである GEDIR を IRDT による省電力通信手法と合わせた IRDT-GEDIR を提案した。GEDIR プロトコルでは、中継無線センサノードが次ホップノードを決定するためには隣接無線センサノードの位置情報が必要となるが、提案手法では IRDT のポーリングメッセージに位置情報をピギーバックすることによって通信オーバーヘッドの拡大を回避している。また、IRDT では観測データを保持した中継無線センサノードが隣接無線センサノードからのポーリングメッセージを受信待機することから、配送遅延が延長する。そこ

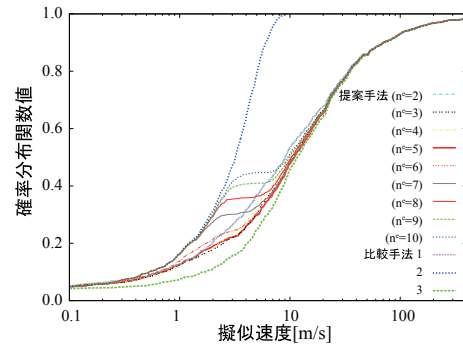


図 13 擬似速度測定結果  
(隣接無線センサノード数 5 台)

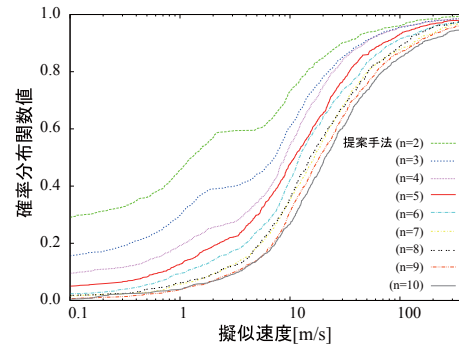


図 14 擬似速度測定結果  
(隣接無線センサノード推定数 5 台)

で、IRDT-GEDIR では観測データ配送の擬似速度を次ホップ隣接無線選択指標として用いることとした。さらに、中継無線センサノードが各隣接無線センサノードへ観測データを転送した場合の擬似速度を直接比較して次ホップを選択することができないことから、秘書問題を応用して、現在アクティブモードにある隣接無線センサノードを次ホップに選択した場合の擬似速度と選択しなかった場合の擬似速度期待値とを比較する手法を提案し、その算出方法を考案した。シミュレーション実験の結果、擬似速度算出手法の妥当性と提案手法がより高い擬似速度の次ホップ選択を実現することが示された。また、間欠的無線通信環境においては、中継無線ノードが必ずしも正確な隣接ノード数を得ることができないことから、これを誤る場合についての性能を評価した。その結果、隣接ノード数を小さく誤推定した場合は同等の性能を得られることが明らかとなった。今後はこの結果に基づいて隣接無線ノード数を推定する手法を考案するとともに、マルチホップ配送性能を実験評価する。

### 参 考 文 献

- 1) Basagni, S., Chlamtac, I. and Syrotiuk, V.R., “A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM),” Proceedings of the 4th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, pp.76–84 (1998).
- 2) Culler, D.E. and Hong, W., “Wireless Sensor Networks,” Communications of the ACM, Vol.47, No.6, pp.30–33 (2004).
- 3) Gilbert, J. and Mosteller, F., “Recognizing the Maximum of a Sequence,” Journal of the American Statistical Association, Vol.61, pp.35–73 (1966).
- 4) Hoessel, L.F.W. and Havinga, P.J.M., “A Lightweight Medium Access Protocol for Wireless Sensor Networks,” Proceedings of the 1st International Conference on Networked Sensing Systems, pp.205–208 (2004).

- 5) Jurdak, R., Baldi, P. and Lopes, C.V., “Adaptive Low Power Listening for Wireless Sensor Networks,” IEEE Transaction on Mobile Computing, Vol.6, No.8, pp.988–1004 (2007).
- 6) Kominami, D., Sugano, M., Murata, M., Hatauchi, T. and Fukuyama, Y., “Performance Evaluation of Intermittent Receiver-Driven Data Transmission on Wireless Sensor Networks,” Proceedings of the 6th International Symposium on Wireless Communication Systems, pp.141–145 (2009).
- 7) Lin, X. and Stojmenovic, I., “Geographic Distance Routing in Ad Hoc Wireless Networks,” Technical Report in University Ottawa, TR-98-10 (1998).
- 8) Melamed, R., Keidar, I. and Barel, Y., “Octopus: A Fault-Tolerant and Efficient Ad-Hoc Routing Protocol,” Proceedings of the 24th IEEE International Conference on Reliable Distributed Systems, pp.39–49 (2005).
- 9) Nakagawa, H., Ohta, T., Ishida, K. and Kakuda, Y., “A Hybrid Routing with Location Information for Mobile Ad Hoc Networks,” Proceedings of the 8th IEEE International Symposium on Autonomous Decentralized Systems, pp.129–136 (2007).
- 10) Oneda, R. and Higaki, H., “Lower Overhead Location Advertisement in Mobile Wireless Multihop Networks,” Proceedings of the 22nd International Conference on Parallel and Distributed Computing Systems, pp.81–87 (2010).
- 11) Perkins, C.E., “Ad Hoc Networking,” Addison-Wesley (2001).
- 12) Rajendran, V., Obraczka, K. and Garacia-Luna-Aceves, J.J., “Energy-Efficient Collision-Free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks,” Proceedings of the 1st ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, pp.181–192 (2003).
- 13) 畠内, 福山, 石井, 四蔵, “メッシュネットワークのためのポーリングによる低消費電力型アクセス方式の提案,” 電気学会論文誌, Vol.C-128, No.12, pp.1761–1766 (2008).