

# 無線センサネットワークのための 確率的アルゴリズムによるルーティング手法

竹平 貴紀<sup>1,a)</sup> 梶垣 博章<sup>1,b)</sup>

**概要:** 無線センサネットワークにおける省電力無線マルチホップ配送の実現手法のひとつに間欠通信の適用がある。しかし、間欠通信環境では、ルーティングテーブルの維持管理が困難である問題がある。そこで、本論文では、間欠通信手法 IRDT と位置ベースルーティング GEDIR との組合せ手法 IRDT-GEDIR を提案する。ここでは、起動した隣接ノードの位置情報に基づいて、この隣接ノードを次ホップ無線センサノードとするか否かを秘書問題を応用した確率的アルゴリズムによって決定する。また、提案手法のマルチホップ配送性能をシミュレーション実験評価し、IRDT-GEDIR が配送経路長、配送遅延を短縮することを示す。

**キーワード:** センサネットワーク, 間欠通信, ルーティング, 無線マルチホップ配送, 秘書問題

## Probabilistic Routing in Wireless Sensor Networks

TAKEHIRA TAKANORI<sup>1,a)</sup> HIROAKI HIGAKI<sup>1,b)</sup>

**Abstract:** Intermittent communication is one of the methods for low-power wireless multihop transmissions in wireless sensor networks. However, it is difficult to maintain routing tables in each sensor node due to the intermittent communication. Thus, this paper proposes IRDT-GEDIR which is combination of IRDT and a location-based proactive ad-hoc routing protocol GEDIR. Here, a novel probabilistic algorithm based on the solution of the secretary problem for determination whether the currently available neighbor wireless sensor node is selected as a next-hop node of the current one. In addition, performance of multihop transmissions of sensor data messages is evaluated in simulation experiments and IRDT-GEDIR achieves shorter transmission routes and end-to-end transmission delay.

**Keywords:** Sensor Networks, Intermittent Communication, Routing, Wireless Multihop Transmissions, Secretary Problem

### 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

<sup>1</sup> 東京電機大学大学院ロボット・メカトロニクス学専攻  
Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University

<sup>a)</sup> takehira@higlab.net

<sup>b)</sup> hig@higlab.net

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、各無線センサノード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。

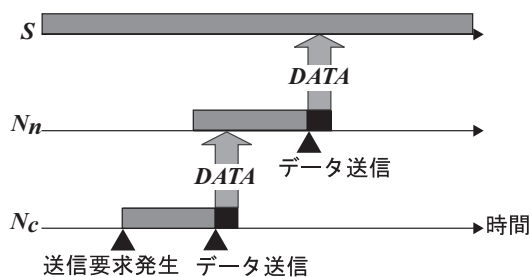


図1 通信モジュールの間欠動作による無線センサノードの省電力化

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。これを実現する非同期式間欠通信手法に IRDT (Intermittent Receiver-Driven Transmission) 手法がある [14]。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実現しつつ、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。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。しかし、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 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実現する。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。これを実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実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実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ブ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(図2)。LPL 手法と比較してより省電力化した観測データ転送を実現する手法に 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、プリアンブ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3)。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。一定の受信待機時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実現することができる。

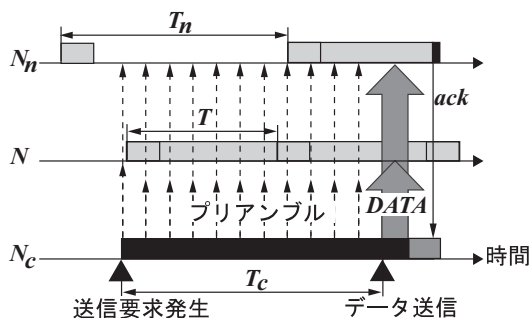


図 2 LPL 手法

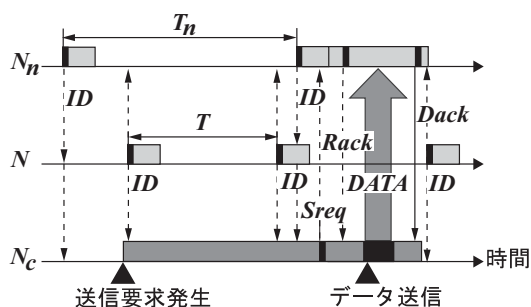


図 3 IRDT 手法

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実現するためには、送信先シンクノードまで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実現する場合には、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実現する。しかし、IRDT 手法を用いた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デ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ディ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 確率的次ホップ選択手法

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を実現する 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 IRDT-GEDIR 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]

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  $N_s$  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 4)。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。

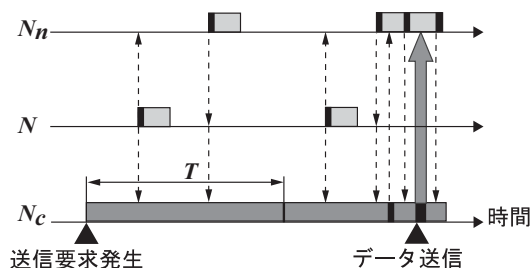
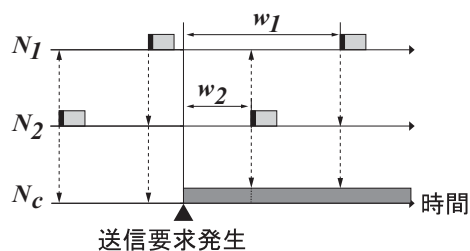
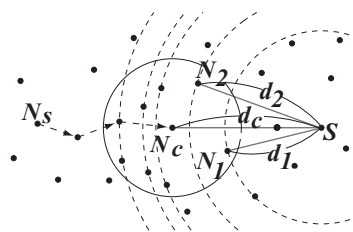


図 4 隣接無線センサノードの位置情報取得による次ホップ選択手法

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の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。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  $S_{req}$  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を最も送信先シンクノードに近い隣接無線センサノードへ転送することによって配送経路長を短縮し、配送遅延を短縮することを目指している。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とはならない。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 5)。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。



$$\begin{aligned} \text{擬似速度} \quad sv_1 &= (d_c - d_1) / w_1 \\ sv_2 &= (d_c - d_2) / w_2 \end{aligned}$$

図 5 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  $S_{req}$  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、秘書問題の解にならぬ、 $N_c$  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  $S_{req}$  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。

[IRDT-GEDIR における次ホップ隣接無線センサノード]

観測データの送信要求発生後  $t_i$  経過時に  $i$  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  $N_i$  が  $N_c$  の次ホップ無線センサノードとなるのは、 $N_i$  に観測データを転送しない場合の擬似速度期待値を  $\bar{v}_i$ , 送信先シンクノード  $S$  について  $l_i = |N_c S| - |N_i S|$  とするとき、 $l_i/t_i \geq \bar{v}_i$  を満足する場合である。□

なお、すべての隣接無線センサノードからのポーリングメッセージ受信後も観測データを転送していない場合には、 $N_c$  がすべての隣接ノードの位置情報と起動時刻オフセットを取得していることから、擬似速度が最大となる隣接無線センサノードを観測データの転送先とし、この起動を待つて転送することとする。

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 6 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様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。

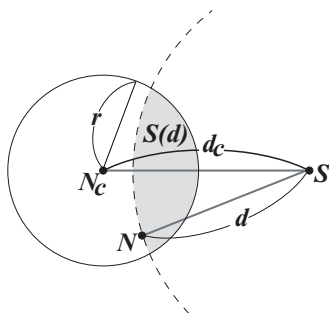


図 6 各無線センサノードと送信先シンクノードの位置関係

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

(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。

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

$N_c$  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  $l = d_c - d$  の確率密度  $p(l)$  は次式で与えられる。

$$p(l) = dp(d_c - l) = \frac{2}{\pi r^2} \frac{d}{dl} \left( \int_r^{x''} \sqrt{r^2 - x^2} dx + \int_{x''}^l \sqrt{(l-x)(l+x-2d_c)} dx \right) \quad (3)$$

(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 7)。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密度  $pp(i, j, t)$  は次式で与えられる。

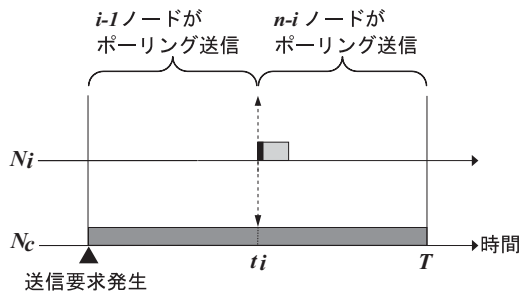


図 7 ポーリングメッセージ送信時刻

$$\begin{aligned}
 pp(i, j, t) &= {}_{n-i}C_{j-i-1} \left( \frac{t-t_i}{T-t_i} \right)^{j-i-1} \\
 &\quad \times {}_{n-j+1}C_1 \frac{1}{T-t_i} \times \left( \frac{T-t}{T-t_i} \right)^{n-j} \\
 &= {}_{n-i-1}C_{j-i-1} \\
 &\quad \times \frac{(n-i)(t-t_i)^{j-i-1}(T-t)^{n-j}}{(T-t_i)^{n-i}} \quad (4)
 \end{aligned}$$

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  $l$  だけ短縮する確率密度  $g(i, j, t, l)$  は (3) と (4) より次式で与えられる。

$$g(i, j, t, l) = pp(i, j, t) \cdot p(l) \quad (5)$$

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、

$$\overline{sv}_n = \max_{1 \leq k \leq i} sv_k = \max_{1 \leq k \leq i} \frac{l_k}{t_k + T} \quad (6)$$

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  $\overline{sv}_j$  を求める。

$j = n - 1$  の場合、図 8 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  $l = \overline{sv}_n t_n$  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  $\overline{sv}_n$  よりも大きい。したがって、 $N_c$  は観測データを  $n$  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  $\overline{sv}_n$  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

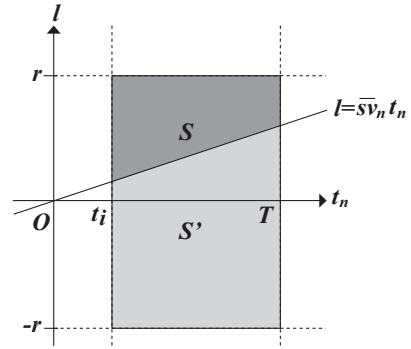


図 8  $n - 1$  番目にポーリングメッセージを送信する隣接無線センサノードへ送信しない場合の擬似速度

待機する。以上により  $\overline{sv}_{n-1}$  は次式で与えられる。

$$\overline{sv}_{n-1} = \int_S \frac{l}{t_n} g(i, n, t_n, l) dS + \int_{S'} \overline{sv}_n g(i, n, t_n, l) dS' \quad (7)$$

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  $\overline{sv}_j$  も同様に求めることができる。すなわち、図 9 に示すように  $g(i, j, t_{j+1}, l)$  の定義領域は直線  $l = \overline{sv}_{j+1} t_{j+1}$  で 2 つの領域  $S$  と  $S'$  に分割される。領域  $S$

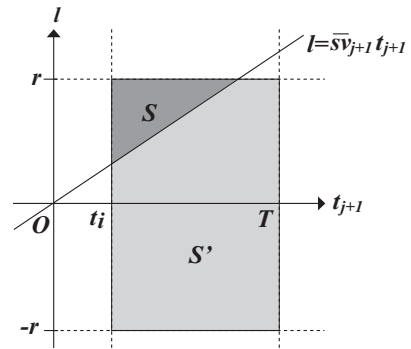


図 9  $j$  番目にポーリングメッセージを送信する隣接無線センサノードへ送信しない場合の擬似速度

では擬似速度  $l/t_{j+1}$  が  $\overline{sv}_{j+1}$  よりも大きい。したがって、 $N_c$  は観測データを  $j+1$  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  $l/t_{j+1}$  が  $\overline{sv}_{j+1}$  よりも小さいため、 $N_c$  は観測データを送信せず、以降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、 $\overline{sv}_j$  は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 \overline{sv}_j &= \int_S \frac{l}{t_{j+1}} g(i, j, t_{j+1}, l) dS \\
 &\quad + \int_{S'} \overline{sv}_{j+1} g(i, j, t_{j+1}, l) dS' \quad (8)
 \end{aligned}$$

(6) と (8) より、 $N_c$  は  $\overline{sv}_i$  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。

- $l_i/t_i \geq \overline{sv}_i$  ならば  $N_c$  は観測データを送信する
- $l_i/t_i < \overline{sv}_i$  ならば  $N_c$  は観測データを送信しない

#### 4. 性能評価

論文 [13] では、秘書問題の解法を応用した IRDT-GEDIR による次ホップ隣接無線ノードの選択手法が高い擬似速度を得ることが可能であることをシミュレーション実験によって確認した。本章では、ランダムに配置された無線センサノードから構成されるセンサネットワークを対象とした観測データのマルチホップ配送性能をシミュレーション実験により評価する。ここでは、100m×100m の正方形領域に無線信号到達距離 10m の無線ノード 1,000 台を一樣分布乱数によりランダムに配置する。ここで、送信元無線センサノードと送信先シンクノードをランダムに選択し、ひとつの観測データの配送性能を実験評価する。すべての無線センサノードの通信モジュールにおける間欠起動周期を 1 秒、それぞれの無線センサノードにおける通信モジュールの間欠起動時刻のオフセットを [0 秒, 1 秒] の範囲で一樣分布乱数によりランダムに定める。各中継隣接無線ノードにおける転送処理時間を 100 ミリ秒として、以下の 4 つの手法について比較評価する。

**比較手法 1** 前ホップ隣接無線センサノードからの観測データ受信後に、自身よりも送信先シンクノードに近い最初に通信モジュールを間欠起動した隣接無線センサノードへこの観測データを転送する手法。

**比較手法 2** 前ホップ隣接無線センサノードからの観測データ受信後に、1 秒間ポーリングメッセージを受信することで隣接無線ノードの位置情報と間欠起動時刻のオフセットを取得し、最大擬似速度が得られる隣接無線センサノードへこの観測データを転送する手法。

**比較手法 3** あらかじめすべての隣接無線センサノードの位置情報と間欠起動時刻のオフセットが取得されていることを前提として、最大擬似速度が得られる隣接無線センサノードへ受信した観測データを転送する手法。

**提案手法** 秘書問題の解法に基づく IRDT-GEDIR による次ホップ選択手法。

比較手法 1 は、起動タイミングのみによって次ホップ隣接無線ノードを選択する貪欲アルゴリズムに基づく手法である。一方、比較手法 2 は、最大擬似速度を得るために必要なすべての情報を得た後に次ホップ隣接無線ノードを選択する保守的アルゴリズムに基づく手法である。これらに対して、提案手法は、確率的アルゴリズムに基づく手法である。なお、比較手法 3 は、最大擬似速度が得られる隣接無線ノード選択に必要な情報を事前にすべて得ていることを前提とした理想的な手法である。すべての無線センサノードが移動や故障によって離脱することがなく、追加されることもなく、間欠起動時刻のオフセットも固定である場合には適用可能な手法であるが、一般的には現実的な手法ではない。ここでは他の手法の性能を比較評価することを目的として性能評価を行なう。

ランダムに選択した送信元無線センサノードから送信先

シンクノードまでの距離に対する無線マルチホップ配送経路の経路長(ホップ数)と配送遅延との測定結果をそれぞれ図 10 と図 11 に示す。無線センサネットワークのトポロジ、すなわち隣接無線センサノードの配置とこれらの間欠起動時刻オフセットによってばらつきがあるものの、いずれの手法においても概ね距離に比例して増加する経路長、配送遅延となっていることが分かる。比較手法 1 は、経路長、配送遅延ともに比較手法 3 よりも大きな値となっている。貪欲アルゴリズムの採用により、簡易に次ホップ隣接無線ノードを選択することができるものの、高い性能は得られていない。また、比較手法 2 は、経路長は比較手法 3 よりも短縮されるが、配送遅延が延長している。保守的手法の採用により 1 周期の観測時間が加わるために配送遅延が延長する一方、より送信先シンクノードに近い隣接無線センサノードほど評価指標である擬似速度が高くなり、次ホップとして選択されやすくなる傾向があることにより経路長は短縮している。これに対して、提案手法は、比較手法 1 と同様に経路長、配送遅延ともに比較手法 3 よりも大きくなっているものの、比較手法 1 よりもその拡大幅は大きく縮小されている。これは、間欠起動済みの隣接無線ノードの情報から確率的アルゴリズムの採用によって期待値を算出し比較することによる効果である。

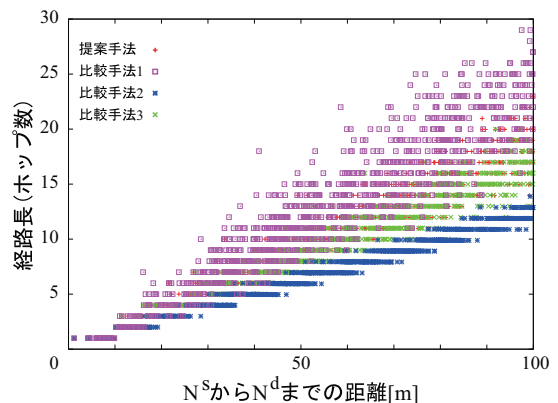


図 10 マルチホップ配送経路長(測定値)

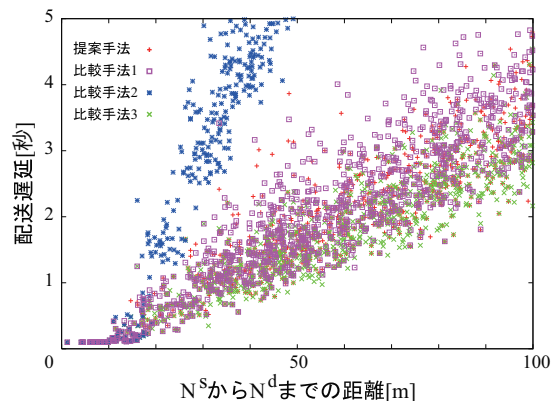


図 11 マルチホップ配送遅延(測定値)

図 12 と図 13 に、経路長と配送遅延の測定結果を 1 次関

数で最小二乗近似したものを示す。提案手法は、比較手法3に近い性能を得ていることが分かる。配送遅延については、比較手法1に対して平均10.2%、比較手法2に対して75.1%の短縮効果が得られている。以上により、確率的アルゴリズムの採用によるIRDT-GEDIRは、間欠通信環境において遅延の短い観測データ配送を実現することが示された。

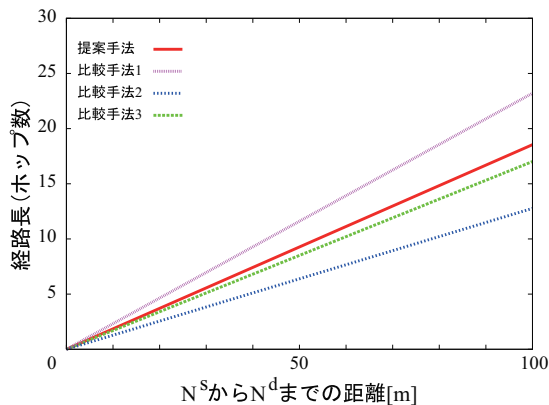


図 12 マルチホップ配送経路長 (平均値)

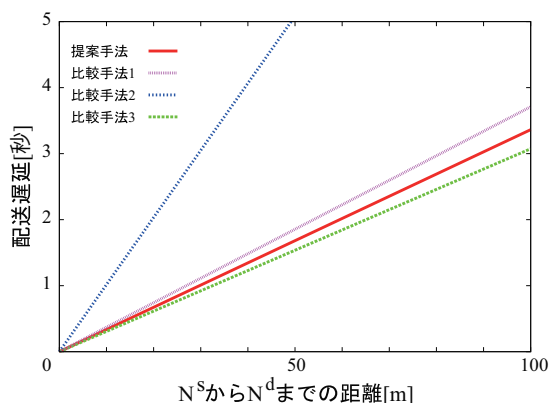


図 13 マルチホップ配送遅延 (平均値)

## 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。ここ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。このとき、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する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、秘書問題の解を応用し、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。提案手法のマルチホップ配送性能をシミュレーション実験評価した結果、貪欲アルゴリズム、保守的アルゴリズムに基づく手法よりも配送経路長、配送遅延を短縮することが示された。今

後は、提案手法が従来のプロアクティブ型ルーティングプロトコルを用いたIRDTに対して、電力消費、センサデータメッセージのスループットを改善することをシミュレーション実験によって確認する。

## 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] Hoesel, 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] 竹平, 松垣, "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," 情処研報, Vol. 2011-DPS-150, No. 14, pp. 1-8 (2012).
- [14] 畠内, 福山, 石井, 四蔵, "メッシュネットワークのためのボ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).