

IRDT 通信手法を用いた低遅延配送のための 位置情報に基づく次ホップ選択手法

竹平 貴紀^{†1} 桧垣 博章^{†1}

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式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 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、アクティブモードにある隣接無線センサノードを次ホップに選択しない場合の擬似速度期待値を選択基準に用いる。

Next-Hop Selection in IRDT-GEDIR for Shorter Transmission Delay in Sensor Networks

TAKANORI TAKEHIRA^{†1} and HIROAKI HIGAKI^{†1}

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.

^{†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

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 [3]。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 AODV [13]、DSR [6]、OLSR [2] といった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 [14]。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ればよい。しかし、中継無線センサノードでは、観測データを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 [16]。ここでは、観測データの転送を行なう無線センサノード N_c が次ホップ隣接無線センサノード N_n からのポーリングメッセージを受信待機する一方、各無線センサノードは定期的に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した後、一定時間アクティブモードのまま送信要求メッセージ $Sreq$ を受信待機する。 N_n からのポーリングメッセージを受信した N_c は、ただちに $Sreq$ メッセージを N_n へと送信することで、 N_c

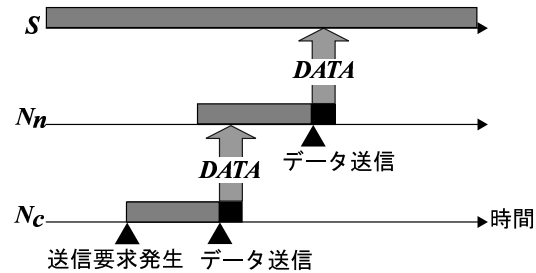


図1 通信モジュールの間欠動作による無線センサノードの省電力化

と N_n との間の接続を確立し、観測データの転送を可能とする。このように、IRDT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 [8] 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的手法では、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 [9] を IRDT方式と組み合わせる IRDT-GEDIR 手法を提案する。また、非同期式間欠通信手法では省電力が実現される一方、 $Sreq$ メッセージの受信待機によって配送遅延が延長することから、次ホップ選択手法を工夫することでその短縮を実現する。

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 [15] や LMAC [5] 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) [7] や IRDT がある。LPL では、各無線センサノード N_i は周期 T_i で間欠的に観測データの受信待機を行なう (図 2)。センサによる観測データの取得や前ホップ無線センサノードから転送された観測データの受信によって次ホップ無線センサノードへの観測データの転送を必要とする無線センサノード N_c は、プリアンブルメッセージを継続的に送信する。この送信期間 T_c は、次ホップ隣接無線センサノード N_n の間欠的受信待機周期 T_n よりも長いものとする。受信待機時にこのプリアンブルメッセージを受信した N_c の隣接無線センサノードは、 N_c から観測データが転送されるまで受信待機を継続する。 N_c は T_c の間のプリアンブルメッセージの継続的送信を終了すると、直ちに観測データを N_n へと転送する。このとき、 $T_c > T_n$ であることから、長さ T_c のプリアンブルメッセージ送信期間に必ず N_n はアクティブモードへ移行し、受信待機することによって、このプリアンブルメッセージを受信する。したがって、 N_c からの観測データ転送時には N_n は必ずアクティブモードとなっている。

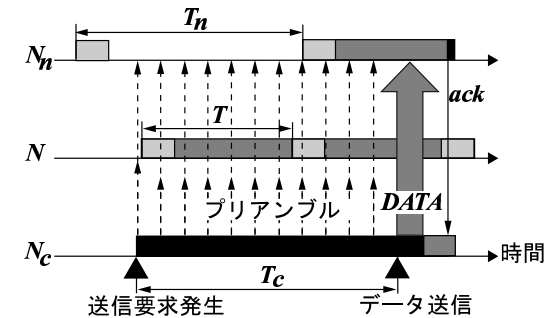


図2 LPL 手法

LPL 手法では、観測データ転送時に各無線センサノードを同期させ、転送元無線センサノードの観測データ転送時に転送先無線センサノードを受信待機させることが可能である。しかし、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。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同期を実現することができる。

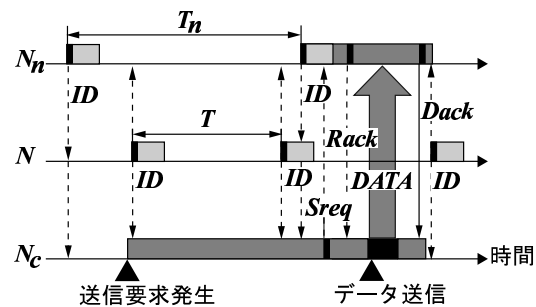


図3 IRDT手法

論文 [8] 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に

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、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

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 [9]を組み合わせたGEDIR-IRDT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 [10]、HRLI [11]、ABLA [12]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(図4)。

IRDT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(図5)。

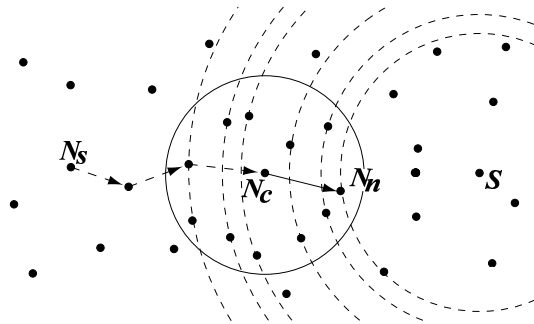


図 4 GEDIR における次ホップ選択手法

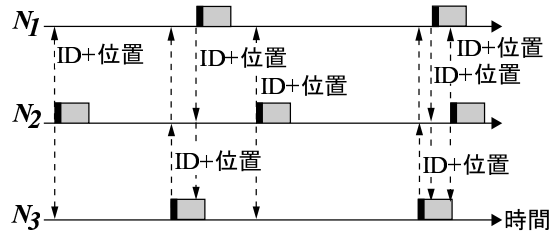


図 5 IRDT による現在位置情報の広告

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 6)。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。

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 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

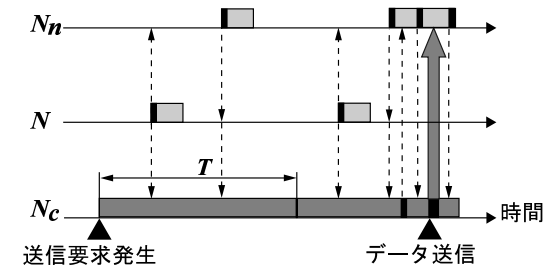


図 6 隣接無線センサノードの位置情報取得による次ホップ選択手法

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 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 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 7)。これは、IRDT-GEDIR 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。

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

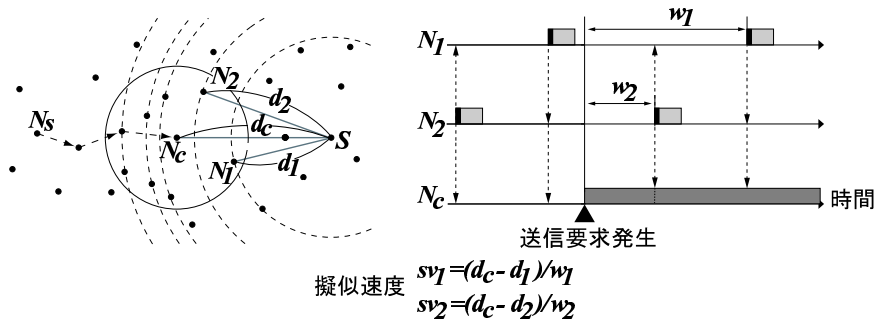


図7 擬似速度による次ホップ無線センサノードの選択手法

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 [4] 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 \overline{sv} とを比較し、 $sv \geq \overline{sv}$ であれば $Sreq$ メッセージを N へ送信し、 $sv < \overline{sv}$ であれば送信しないこととする。

4. 擬似速度の期待値

前章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。そこで本章では、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8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 ($d_c - r < d < d_c + r$) とする。無線センサノードは対象領域に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。

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

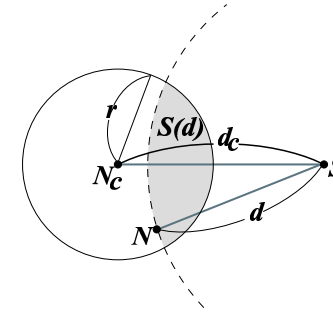


図8 各無線センサノードと送信先シンクノードの位置関係

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

特に、 $d \leq d_c$ のときは次式で与えられる

$$DP(d) = \frac{1}{\pi r^2} \left(x^2 \arccos \frac{d_c^2 + d^2 - r^2}{2d_c d} + r^2 \arccos \frac{d_c^2 + r^2 - d^2}{2d_c r} - 2\sqrt{s(s-d_c)(s-d)(s-r)} \right)$$

$$(ただし S = (d_c + d + r)/2)$$

$DP(d)$ 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9)。

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

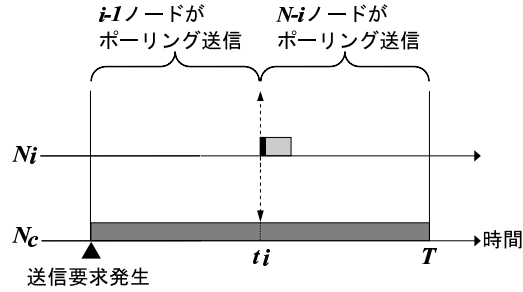


図9 ポーリングメッセージ送信時刻

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 ($i < j < N$) 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 ($i < j < N$) 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。

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

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、

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

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。

$j = N-1$ の場合、図 10 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 $l = \overline{sv}_N t_N$

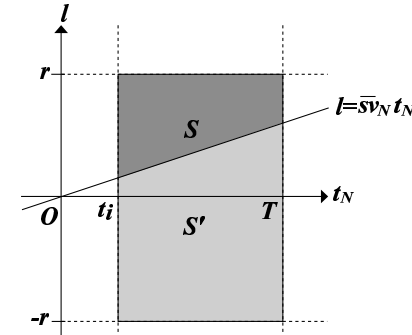


図10 $N-1$ 番目にポーリングメッセージを送信する隣接無線センサノードへ送信しない場合の擬似速度

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、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。

$$\overline{sv}_{N-1} = \int_S \frac{l}{t_N} g(i, N, t_N, l) dS + \int_{S'} \overline{sv}_N g(i, N, t_N, l) dS' \quad (6)$$

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 11 に示すように $g(i, j, t_{j+1}, l)$ の定義領域は直線 $l = \overline{sv}_{j+1} t_j$ 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+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

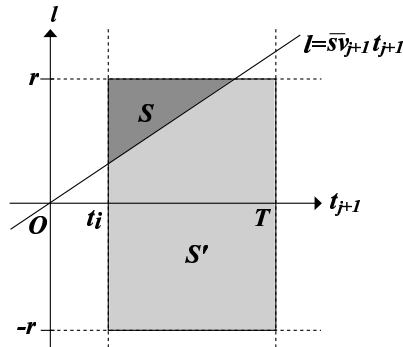


図 11 j 番目にポーリングメッセージを送信する隣接無線センサノードへ送信しない場合の擬似速度

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 \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、 N 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。

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

(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。

$$\begin{aligned} l_i/t_i \geq \bar{sv}_i & \text{ならば } N_c \text{ は観測データを送信する} \\ l_i/t_i < \bar{sv}_i & \text{ならば } N_c \text{ は観測データを送信しない} \end{aligned}$$

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、ブロードキャスト通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ビジ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。本手法の有効性を実験により検証することが課題である。

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) Clausen, T. and Jacquet, P., "Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)," RFC3626 (2003).
- 3) Culler, D.E. and Hong, W., "Wireless Sensor Networks," Communications of the ACM, Vol.47, No.6, pp.30-33 (2004).
- 4) Gilbert, J. and Mosteller, F., "Recognizing the Maximum of a Sequence," Journal of the American Statistical Association, Vol.61, pp.35-73 (1966).
- 5) 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).
- 6) Johnson, D., Hu, Y. and Maltz, D., "The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4," RFC4728 (2007).
- 7) 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).
- 8) 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).
- 9) Lin, X. and Stojmenovic, I., "Geographic Distance Routing in Ad Hoc Wireless Networks," Technical Report in University Ottawa, TR-98-10 (1998).
- 10) 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).
- 11) 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).

- 12) 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).
- 13) Perkins, C.E., Belding-Royer, E. and Das, S., "Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," RFC3561 (2003).
- 14) Perkins, C.E., "Ad Hoc Networking," Addison-Wesley (2001).
- 15) 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).
- 16) 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).