

残電力量の異なるセンサノード群のための IRDT-GEDIR

熊谷 翔^{1,a)} 梶垣 博章^{1,b)}

概要: 無線センサネットワークの省電力化手法のひとつとして、無線センサノードの通信モジュールを間欠的に動作させるものがある。IRDT 手法は、観測データの転送元無線センサノードと転送先無線センサノードの同期に要する電力を削減するが、間欠通信環境においては新しいリアクティブ型のルーティングプロトコルが必要である。そこで本論文では、隣接無線センサノードの位置情報を用いて観測データの転送先を選択する GEDIR と IRDT 手法を組合せた IRDT-GEDIR 手法を提案する。ここでは、アクティブモードに移行した隣接無線センサノードを観測データの転送先とするか否かを限定的な位置情報で決定するために、隣接無線ノードの評価指標として擬似速度を導入し、秘書問題に基づいて転送を見送る場合の擬似速度期待値の計算方法を考案する。これらによって観測データの転送先を決定する確率的アルゴリズムを提案する。なお、各無線センサノードの間欠受信待機周期はその残電力量によって決定されることから、本論文では周期が無線センサノードごとに異なる場合のアルゴリズムを提示する。

IRDT-GEDIR for Sensor Nodes with Various Residual Energy

SHO KUMAGAI^{1,a)} HIROAKI HIGAKI^{1,b)}

Abstract: In wireless sensor networks, reduction of power consumption in sensor nodes is realized by introduction of intermittent communication among them. IRDT (Intermittent Receiver-Driven Transmission) method achieves synchronization between a transmitter and a receiver sensor nodes with low power consumption. However, a novel reactive routing protocol is mandatory. This paper proposes a combination IRDT-GEDIR of IRDT and GEDIR which is a location-based reactive ad-hoc routing protocol. Here, pseudo speed of sensor data transmission is introduced for evaluation of candidates of a next-hop sensor node and a probabilistic algorithm for determination of a next-hop sensor node based on a solution of the secretaries problem is designed for evaluation of expected pseudo speed. Since the intermittent communication interval depends on the residual energy in each wireless sensor node, our proposed algorithm assumes that the interval is various in the wireless sensor nodes.

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、削減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 AODV [15], DSR [7], OLSR [2]

¹ 東京電機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

a) kuma@higlab.net

b) hig@higlab.net

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が可能である. これによって, 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.

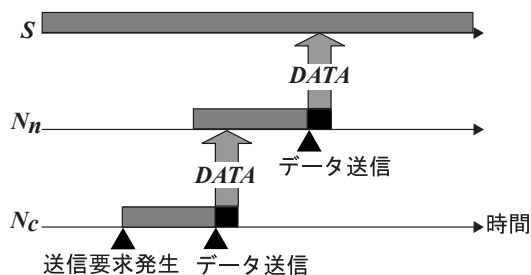


図 1 通信モジュールの間欠動作による無線センサノードの省電力化

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同期間欠通信手法に IRDT (Intermittent Receiver-Driven Transmission) 手法がある [17]. 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 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 手法では, 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 [9] 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, 各無線センサノードが, シンクノードへのホップ数を指標として, 配送経路を決定する. 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のひとつ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という問題がある. 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 [10] を IRDT 手法と組み合わせる IRDT-GEDIR 手法を提案する. また, 非同同期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, 次ホップ選択に秘書問題 [5] に基づいた確率的アルゴリズムを適用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 [16] や LMAC [6] 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 [8] や IRDT 手法がある。LPL 手法では、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 の間欠的な受信待機周期 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な送信を終了すると、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。LPL 手法で

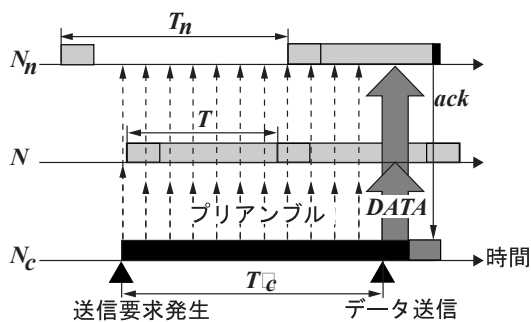


図 2 LPL 手法

は、観測データ転送時に転送元無線センサノードと転送先無線センサノードとを同期させ、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アクティブモードで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 からのポーリングメッセージ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 $Sreq$ の受信を待機する。一定の受信待機時間に $Sreq$ 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 $Sreq$ メッセージを N_n へ送信する。 $Sreq$ メッセージの受信に対して N_n が受信確認メッセージ $Rack$ を返送すると、 N_c はこれを受信することによって N_n が観測データの受信待機状態にあることを検出する。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制御メッセージ送信を回避し、継続的な制御メッセージ受信待機と間欠的な制御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省電力に実現することができる。

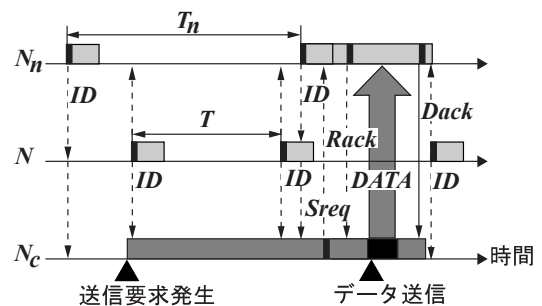


図 3 IRDT 手法

論文 [9] 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、これを維持管理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、すべての隣接無線センサノードが同時にアクティブモードであることは稀であることから、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く、フラッディング周期を延長することが求められる。一方、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耗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ト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。

なお、省電力のために各無線センサノードの通信モジュールの状態をアクティブモードとスリープモードの間で経時的に切替える間欠通信の実現において、間欠受信待機周期 T_i は各無線センサノード N_i ごとに異なり、各 T_i も一定ではなく経時変化させることが望ましい。観測データ配送遅延短縮の観点からは T_i の短縮が望ましく、省電力の観点からは T_i の延長が望ましいため、これらのトレードオフを考慮する必要がある。そこで、 T_i を N_i の残電力量によって変化させる手法が提案されている。 N_i が十分な残電力量を備える場合には、 T_i を短く設定することで観測データの配送遅延を短縮させる一方、 N_i の残電力量の減少とともに T_i を延長することで配送遅延の延長と引き換えに、 N_i がアクティブモードに移行する機会を削減することで消費電力を削減する。論文 [4] では、IRDT を対象として N_i とその隣接無線センサノードの残電力量を指標として T_i を更新する手法が提案されている。

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である 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 [10] 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 GPS 受信器のような位置情報取得デバイスを備え、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 [11], HRLI [12], ABLA [13] 等の手法によって取得する。GEDIR では、これらの位置情報に基づいて、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 $d_n = |N_n S| (< |N_c S|)$ 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 が間欠受信待機周期 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 4)。

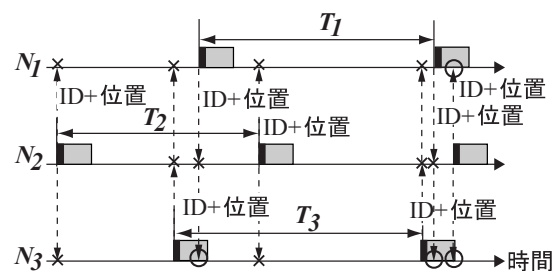


図 4 IRDT における現在位置情報広告の失敗

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 (図 5)。 N_c の各隣接無線センサノード N_i のポーリングメッセージ送信周期が T_i であるとき N_c は最長で $\max_i T_i$ だけ受信待機しなければすべての N_i の位置情報を取得することができない。また、これによって送信先シンクノード S に最も近い N_c の隣接無線ノード N_n を次ホップに選択できるものの、さらに N_n からのポーリングメッセージ受信を待機しなければならず、最長で T_n を要する。これにより、観測データの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 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るが、提案する IRDT-GEDIR 手

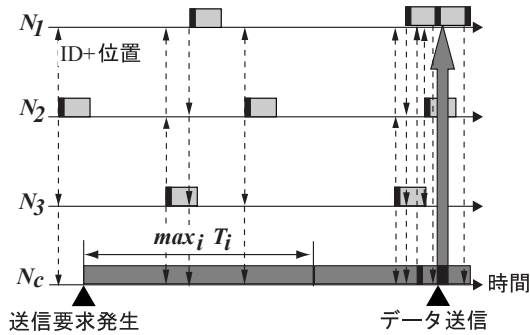


図 5 全隣接無線センサノード位置情報取得による次ホップ選択手法

法では、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 (図 6)。

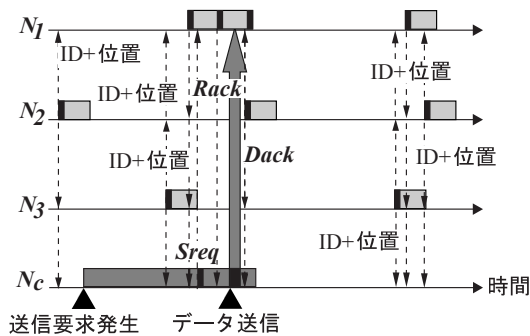


図 6 IRDT-GEDIR 手法

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_i 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_i 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_i 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。そこで、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) 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 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。

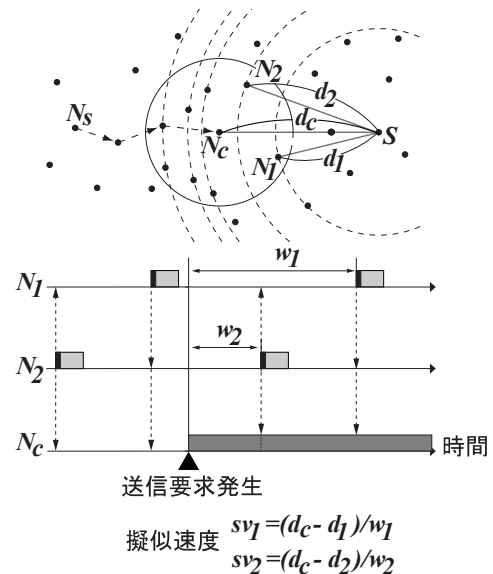


図 7 擬似速度による次ホップ無線センサノードの選択手法

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 $Sreq$ メッセージ受信待機時間内に 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_i 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 [5] の設定と同等である。そこで、 N_c は N_i 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_i と N_i 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}_i とを比較し、 $sv_i \geq \overline{sv}_i$ であれば $Sreq$ メッセージを N_i へ転送し、 $sv_i < \overline{sv}_i$ であれば転送しないこととする。

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 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 ($d_c - r \leq d \leq d_c + r$) 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。

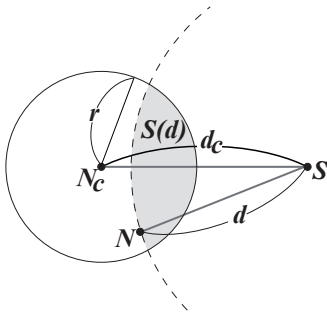


図 8 各隣接無線センサノードと送信先シンクノードの位置関係

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

(ただし $x' = (d_c^2 + r^2 - d^2)/2d_c$)

特に、 $d \leq d_c$ のときは次式で与えられる

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

(ただし $s = (d_c + d + r)/2$)

$DP(d)$ は S から N_c の隣接無線センサノードまでの距離が d である確率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 である確率密度関数 $dp(d)$ は次式となる。

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

(ただし $x' = (d_c^2 + r^2 - d^2)/2d_c$)

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

$$p(l) = dp(d_c - l) = \frac{2}{\pi r^2} \frac{d}{dl} \left(\int_r^{x''} \sqrt{r^2 - x^2} dx + \int_{x''}^l \sqrt{(l-x)(l+x-2d_c)} dx \right) \quad (4)$$

(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。また、各無線センサノード N_k のポーリングメッセージ送信時刻は区間 $[0, T_k)$ に様に分布すると仮定する。この仮定は、一定期間以上運用されたセンサネットワークでは各無線センサノードのポーリングメッセージ送信タイミングが観測データの送受信によって偏りなく分布することから妥当なものである。ここで、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最初の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最初の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 $t_i < t < T$ に最初の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 N_k のポーリングメッセージ送信時刻 t が区間 (t_i, T_k) に様分布することから、 j 番目 ($i < j \leq n$) の隣接無線センサノード N_j が時刻 t ($t_i < t < T_j$) に最初のポーリングメッセージを送信する確率 $pp(i, j, t)$ は T_k の確率密度関数 $\tau(t)$ を用いて次式で与えられる。

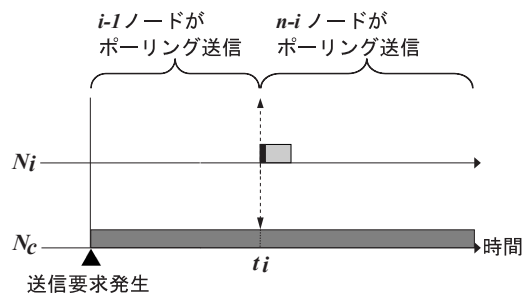


図 9 ポーリングメッセージ送信時刻

$$\begin{aligned}
 pp(i, j, t) &= \binom{n-i}{j-i-1} \left(\int_{t_i}^{\infty} \frac{t-t_i}{T-t_i} \tau(T) dt \right)^{j-i-1} \\
 &\times \binom{n-j+1}{1} \int_{t_i}^{\infty} \frac{1}{T-t_i} \tau(T) dt \\
 &\times \left(\int_{t_i}^{\infty} \frac{T-t}{T-t_i} \tau(T) dt \right)^{n-j} \quad (5)
 \end{aligned}$$

(ただし $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = {}_x C_y$)

ここで、隣接無線センサノードの位置とその最初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 ($t_i < t$) に j 番目 ($i < j \leq n$) の隣接無線センサノードが最初の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 (4) と (5) より次式で与えられる。

$$g(i, j, t, l) = pp(i, j, t) \cdot p(l) \quad (6)$$

なお、この観測データ転送の擬似速度は $sv=l/t$ である。

中継無線センサノード N_c は、時刻 t_i に i 番目に最初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しない場合、時刻 t_j ($t_i < t_j < T$) に j 番目に最初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か、時刻 t_k ($0 \leq t_k < t_i$) にすでに最初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以降に送信したポーリングメッセージを受信することによってこれ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最初の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、 t_i 以降の最初のポーリングメッセージ送信時に観測データを転送した場合の擬似速度は $sv_k=l_k/([\frac{t_i-t_k}{T_k}] + 1) \cdot T_k + t_k$ となる。 t_k と l_k は N_c が取得済みであることから、すでに最初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に観測データを転送する場合の擬似速度期待値は、

$$\begin{aligned}
 \overline{sv}_n &= \max_{1 \leq k \leq i} sv_k \\
 &= \max_{1 \leq k \leq i} \frac{l_k}{([\frac{t_i-t_k}{T_k}] + 1) \cdot T_k + t_k} \quad (7)
 \end{aligned}$$

である。これは、 n 番目に最初の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 ($i \leq j < n$) に最初の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 $t_i < t_n$ の範囲で定義され、

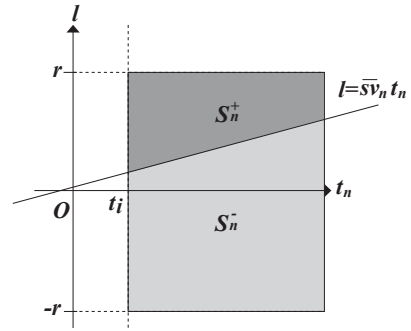


図 10 $n - 1$ 番目にポーリングメッセージを送信する隣接無線センサノードへ送信しない場合の擬似速度

$g(i, n, t_n, l) = pp(i, n, t_n) \cdot p(l)$ である。ここで、この領域 S を直線 $l = \overline{sv}_n t_n$ によって 2 つの領域 S_n^+ 、 S_n^- に分割すると、領域 S_n^+ 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 番目に最初の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_n^- 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、 $sv_k = l_k / ([\frac{t_i - t_k}{T_k}] + 1) \cdot T_k + t_k$ の最大値を与える k 番目に最初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 は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 \overline{sv}_n &= \int_S \max\left(\frac{l}{t_n}, \overline{sv}_n\right) g(i, n, t_n, l) dS \\
 &= \int_{S_n^+} \frac{l}{t_n} g(i, n, t_n, l) dS_n^+ \\
 &\quad + \int_{S_n^-} \overline{sv}_n g(i, n, t_n, l) dS_n^- \quad (8)
 \end{aligned}$$

一般に j 番目 ($i \leq j < n$) に最初の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 $g(i, j+1, t_{j+1}, l)$ の定義領域は直線 $l = \overline{sv}_{j+1} t_{j+1}$ で 2 つの領域 S_{j+1}^+ と S_{j+1}^- に分割される。領域 S_{j+1}^+ では擬似速度 l/t_{j+1} が \overline{sv}_{j+1} よりも大きい。

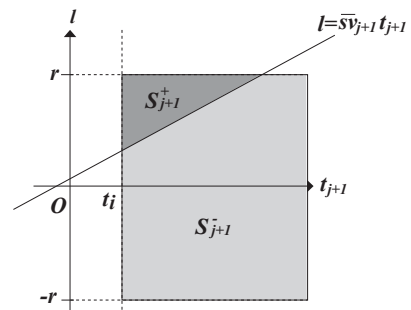


図 11 j 番目にポーリングメッセージを送信する隣接無線センサノードへ送信しない場合の擬似速度

したがって、 N_c は観測データを $j + 1$ 番目に最初の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_{j+1}^- 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、 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、 \overline{sv}_j は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \overline{sv}_j &= \int_S \max\left(\frac{l}{t_{j+1}}, \overline{sv}_{j+1}\right) g(i, j+1, t_{j+1}, l) dS \\ &= \int_{S_{j+1}^+} \frac{l}{t_{j+1}} g(i, j+1, t_{j+1}, l) dS_{j+1}^+ \\ &\quad + \int_{S_{j+1}^-} \overline{sv}_{j+1} g(i, j+1, t_{j+1}, l) dS_{j+1}^- \quad (9) \end{aligned}$$

(7) と (9) より、 N_c は再帰的に \overline{sv}_i を求めることができる。そこで、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。

[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 \overline{sv}_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、 $l_i/t_i \geq \overline{sv}_i$ を満足する場合である。□

4. 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 のためのリアクティブ型ルーティングプロトコル IRDT-GEDIR を提案した。間欠通信環境では、隣接無線センサノードが同時にアクティブモードであることを保証できないことから、制御メッセージのフラッディングを用いないルーティングプロトコルが必要である。そこで、隣接無線センサノードの現在位置情報に基づいて観測データの転送先を選択する GEDIR と IRDT との組み合わせが適切であるが、現在位置情報をポーリングメッセージへのピギーバックで実現する場合、全隣接無線センサノードの現在位置情報を収集せずにアクティブモードへ移行した隣接無線センサノードを転送先とするか否かを決定しなければならない。本論文では、観測データのシンクノードへの接近速度である擬似速度を評価指標とし、秘書問題の解法を応用することでアクティブモードへ移行した隣接無線センサノードを転送先としない場合の擬似速度期待値の計算手法を考案することによって観測データの転送先隣接無線センサノードを選択する確率的アルゴリズムを構成した。ここでは、各無線センサノードのアクティブモードへの移行周期、すなわち、間欠通信周期がそれぞれの残電力量によって決定するために周期が無線センサノードごとに異なる場合にも対応可能なアルゴリズムを示した。

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)," RFC 3626 (2003).
- [3] Culler, D.E. and Hong, W., "Wireless Sensor Networks," Communications of the ACM, Vol. 47, No. 6, pp. 30–33 (2004).
- [4] Damdinsuren, C., 小南, 菅野, 村田, 畠内, "受診端末駆動型無線マルチホップネットワークにおける残余電力に基づいた長寿命化手法の提案," 信学技報, Vol. 110, No. 12, pp. 11–14 (2010).
- [5] Gilbert, J. and Mosteller, F., "Recognizing the Maximum of a Sequence," Journal of the American Statistical Association, Vol. 61, pp. 35–73 (1966).
- [6] 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).
- [7] Johnson, D., Hu, Y. and Maltz, D., "The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4," RFC 4728 (2007).
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] Lin, X. and Stojmenovic, I., "Geographic Distance Routing in Ad Hoc Wireless Networks," Technical Report in University Ottawa, TR-98-10 (1998).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] Perkins, C.E., "Ad Hoc Networking," Addison-Wesley (2001).
- [15] Perkins, C.E., Belding-Royer, E. and Das, S., "Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," RFC 3561 (2003).
- [16] 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).
- [17] 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).