

間欠通信無線アドホックネットワークにおける配送遅延短縮手法

堀江 慎^{1,a)} 桧垣 博章^{1,b)}

概要：無線アドホックネットワークにおける無線ノードの省電力化を目的とした間欠通信手法である IRDT(Intermittent Receiver-Driven Transmission) 手法と無線ノードの移動に耐性を持つ位置ベースルーティングである GEDIR(Geographic Distance Routing) とを秘書問題の確率的解法を用いて組み合わせる IRDT-GEDIR が提案されている。ここでは、中継無線ノードがデータメッセージを転送する隣接無線ノードの起動スケジュールは自律的に決定されるが、隣接無線ノードが中継無線ノードの存在を検知し、起動スケジュールを変更することで配送遅延を短縮することが可能である。本論文では、IRDT-GEDIR を拡張し、受信応答 (*Rack*) メッセージとデータ応答 (*Dack*) メッセージを隣接無線ノードが傍受することにより、転送先無線ノードとなり得る場合には起動状態を維持することで配送遅延を短縮する手法を提案する。さらに、提案手法の適用機会を拡大するための受信応答メッセージ転送手法、複数の隣接無線ノードの起動スケジュール変更によるポーリングメッセージの衝突を回避するための待機時間調整手法を示す。また、シミュレーション実験によりデータメッセージの無線マルチホップ配送時間が 5.2-12.0% 短縮されることを示す。

キーワード：アドホック通信, ルーティング, 間欠的通信, 低電力消費, 確率的アルゴリズム

Transmission Delay Reduction in Intermittent Wireless Ad-Hoc Networks with Overhearing of Control Messages

SHIN HORIE^{1,a)} HIROAKI HIGAKI^{1,b)}

Abstract: For highly performing wireless ad-hoc networks, the authors have been proposed IRDT-GEDIR which is a combination of IRDT, an intermittent data message transmission protocol for low-power consumption in wireless nodes, and GEDIR, a mobility-tolerant location-based message-by-message ad-hoc routing. The combination is realized by help of probabilistic solution of the secretary problem. Here, the active mode interval in each wireless node is autonomously determined by individual wireless node. However, if each wireless node detects a neighbor intermediate wireless node holding data messages in transmission, their transmission delay can be reduced by modification of its activation schedule. This paper proposes an extension of IRDT-GEDIR for reduction of message transmission delay. Here, the neighbor wireless nodes of an intermediate wireless node with data messages in transmission keep their active mode since they overhear an *Rack* message transmitted by the intermediate wireless node. After reception of the data messages in the intermediate wireless node, the neighbor wireless nodes broadcasts polling messages without an interval. So shorter delay transmissions of data messages are achieved. In addition, delegation of the next-hop wireless nodes by forwarding of the received *Rack* messages and introduction of dynamically determined interval for collision avoidance among multiple polling messages are also discussed. Simulation experiment results show that end-to-end wireless multihop transmission delay is 5.2-12.0% reduced by the proposed extension of IRDT-GEDIR.

Keywords: Wireless Ad-hoc Networks, Routing Protocol, Intermittent Communication, Low Power Consumption, Probabilistic Approach.

1. はじめに

無線アドホックネットワークでは、中継無線ノード列から構成される無線マルチホップ配送経路に沿ってデータメッセージが運ばれる。各無線ノードの省電力化のために、無線ノードに起動状態と休止状態の区別を導入し、休止状態では通信モジュールの電源をオフとする。この間欠通信環境では、常時起動の無線ノードから構成されることを前提として設計された制御メッセージのフラッディングを基礎とする従来のルーティングプロトコルを適用することができない。そこで、間欠通信手法を実現する IRDT と局所的位置情報の取得により次ホップ隣接無線ノードを選択する GEDIR を組合せ、確率的に次ホップ隣接無線ノードを決定する IRDT-GEDIR を提案した。ここでは、各隣接無線ノード間のデータメッセージ転送は独立であるが、前ホップ隣接無線ノードにおける転送情報を入手することによって、ルーティングプロトコルのオーバーヘッドを削減することが期待される。本論文では、中継無線ノードの次ホップ隣接無線ノードの選択を次ホップ隣接無線ノード候補自身が先行して実施することでさらに配送遅延を短縮する拡張 IRDT-GEDIR 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起動状態と電力が供給されない休止状態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手法が提案されている。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データメッセージを転送する直前までに転送先無線センサノードが起動状態へと移行することが必要である。そのため、転送先無線センサノードが休止状態にある場合には、転送先無線センサノードに待機遅延が発生する。これによって、エンドエンド配送遅延が延長する。

データメッセージ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 [2] や 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 からのポーリングメッセージの受信待機状態となる (図 1)。各無線センサノードは、一定周期で休止状態から起動状態へと移行し、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

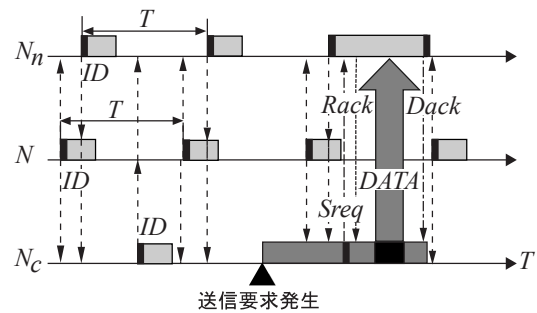


図 1 IRDT 手法

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、起動状態から休止状態へと移行する。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 N_n 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 がデータメッセージ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 へとデータメッセージを転送する。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。

論文 [3] では、IRDT 手法におけるデータメッセージ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、データメッセージを転送する。このようなデータメッセージ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起動状態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

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

a) horie@higlab.net

b) hig@higlab.net

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、データメッセージ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、データメッセージ配送遅延の延長、消費電力量の増加、データメッセージスループットの低下を招く問題がある。

フラッディングを基礎としたルーティングプロトコルを間欠通信環境に導入することによって発生するこれらの問題点を解決する手法として、データメッセージごとに隣接無線ノードの位置情報に基づいて転送先隣接無線ノードを決定する GEDIR を IRDT 手法と組み合わせた IRDT-GEDIR が提案されている [4]。IRDT-GEDIR では、起動した隣接無線ノードから受信したポーリングメッセージに隣接無線ノードの位置情報を含めることで、隣接ノード位置を得ることができる。この位置情報と送信要求発生時刻からの経過時間によって計算される擬似速度を指標とし、秘書問題の確率的な解法を適用することで、この隣接無線ノードを選択した場合に得られる擬似速度と、選択しなかった場合に得られる擬似速度期待値とを比較することで、起動隣接無線ノードを選択するか否かを決定する。これによって、消費電力と配送遅延のより適切なトレードオフが実現できる。しかし、無線ノードが中継無線ノードに隣接することを検出し、配送中のデータメッセージをより低遅延に受理するように起動スケジュールを修正することで、配送遅延を短縮する可能性がある。

3. 提案手法

3.1 起動スケジュール変更による配送遅延短縮

IRDT-GEDIR では、無線ノードの通信モジュールにおける消費電力を削減する間欠通信手法である IRDT と局所的な位置情報のみによって中継無線ノードによるデータメッセージの転送先を決定する GEDIR とを秘書問題の解法に基づいて結びつけ、データメッセージの無線マルチホップ配送に要するエンドエンドの配送遅延を短縮する。しかし、中継無線ノード N_i から隣接無線ノード N_j へのデータメッセージ転送遅延は、自律的に決定される N_j の起動スケジュールに依存している。この N_j の起動スケジュールの決定には、隣接無線ノードの状態、すなわち、 N_i が無線マルチホップ配送されるデータメッセージの中継無線ノードであるか否かが考慮されていない。このため、図 2 に示すように、中継無線ノードがデータメッセージを転送可能となった時刻から、中継無線ノードより送信先無線ノード

により近い隣接無線ノード、すなわち、データメッセージ配送のより大きな擬似速度が得られる可能性のある隣接無線ノードの次の起動時刻までの時間が長い場合には、この隣接無線ノードへの転送によって得られる擬似速度が低下したり、この隣接無線ノードを転送先無線ノードとして選択できないことが考えられる。逆に、図 3 に示すように、転送すべきデータメッセージを保持した中継無線ノードの存在を、このデータメッセージ配送のより大きな擬似速度が得られる可能性がある隣接無線ノードが検知可能であるならば、次の起動タイミングを調整する、あるいは、起動状態を維持するといった起動スケジュールの変更を行なうことで、配送遅延を短縮することが可能である。

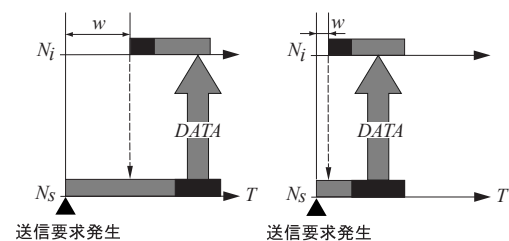


図 2 起動タイミングによる配送遅延の延長

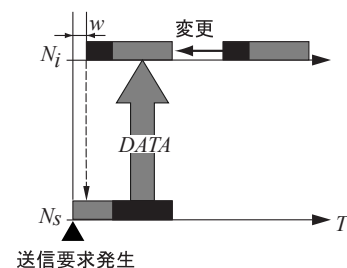


図 3 起動タイミング調整による配送遅延の短縮

3.2 起動スケジュール変更手法

3.2.1 隣接中継無線ノード検出

IRDT-GEDIR では、IRDT と同様の制御メッセージ交換を行なう。各無線ノードは、休止状態から起動状態に移行する際にポーリングメッセージをブロードキャスト送信する。また、転送すべきデータメッセージを保持する中継無線ノードは、転送先隣接無線ノードのポーリングメッセージ受信時に送信要求メッセージ $Sreq$ をユニキャスト送信し、これを受信した隣接無線ノードは受信応答メッセージ $Rack$ をユニキャスト送信する。データメッセージ転送終了時には、隣接無線ノードがデータ応答メッセージ $Dack$ をユニキャスト送信する。ここで、中継無線ノード N_s からのデータメッセージ転送先である隣接無線ノード N_r は、 N_r がデータメッセージの送信先無線ノードでない限りにおいて、転送データメッセージ受信後にこれを隣接無線ノード

ドのいずれかを転送先としてデータメッセージを転送する。すなわち、 N_r の隣接無線ノードのいずれかが N_r によるデータメッセージの転送先となる。ここで、 N_s から N_r へのデータメッセージ転送に先立って交換される制御メッセージのうち $Rack$ メッセージは N_r から N_s へとユニキャスト送信されるため、 N_r の隣接無線ノードが傍受可能である。つまり、 N_r が $Rack$ を N_s へユニキャスト送信する時に起動状態にある N_r の隣接無線ノードは、 N_r が転送すべきデータメッセージを保持することを検知することが可能である (図 4)

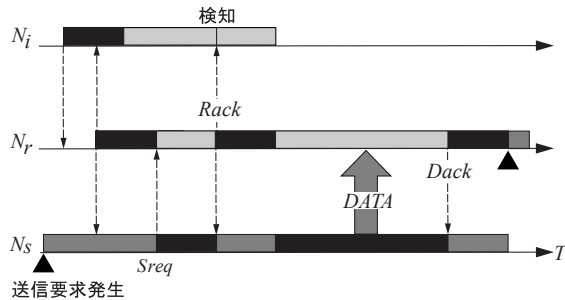


図 4 $Rack$ の傍受による中継無線ノードの検知

3.2.2 起動スケジュール変更

$Rack$ メッセージの傍受により、中継無線ノード N_r の隣接無線ノード N_i は、 N_r によるデータメッセージの受信後に自身がこのデータメッセージの転送先となる可能性があることを検知することができる。そこで、 N_i はデータメッセージ受信終了時に起動状態となっているように起動タイミングの変更や起動状態の維持などの起動スケジュール変更を行なう (図 5)。ここで、 N_i は N_r の隣接無線ノードではあっても、データメッセージの送信先無線ノード N_d について $|N_r N_d| < |N_i N_d|$ であるならば、データメッセージは N_i には転送されない。これは、GEDIR では中継無線ノードは隣接無線ノードのうち最も送信先無線ノードに近いものにデータメッセージを転送する、ということに基づいて、IRDT-GEDIR では、間欠通信手法に適合させるために擬似速度を基準に転送先無線ノードを選択するため、擬似速度が負となる隣接無線ノードには中継無線ノードがデータメッセージを転送しないためである。したがって、このような隣接無線ノードが起動スケジュールを変更することで通信モジュールの消費電力が拡大することは避けなければならないことから、隣接無線ノードは自身の位置に基づいて起動スケジュールの変更を行なうか否かを決定する必要がある。

IRDT-GEDIR では、中継無線ノードが起動した隣接無線ノードへデータメッセージを転送するか否かを決定するために、隣接移動無線ノードがブロードキャスト送信するポーリングメッセージに自身の位置情報を含めている。隣接移動無線ノードが中継無線ノードが受信するデータメッ

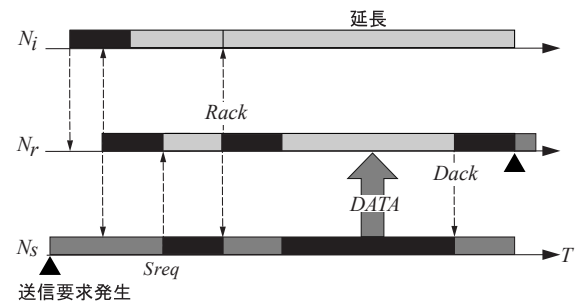


図 5 $Rack$ の傍受による起動スケジュール変更

セージの転送先無線ノードになる可能性があるか否かを判断するためには、送信先無線ノードと中継無線ノードの位置情報が必要である。そこで、図 6 に示すように、これらの情報を $Sreq$ メッセージと $Rack$ メッセージに含めることとする。 $Rack$ メッセージに送信先無線ノードと中継無線ノードの位置情報を含めることで、この $Rack$ メッセージを傍受した中継無線ノードの隣接無線ノードは、起動スケジュールを変更するか否かを以下のように決定することができる。

- $|N_r N_d| > |N_i N_d|$ ならば、 N_i は起動スケジュールを変更する。
- $|N_r N_d| \leq |N_i N_d|$ ならば、 N_i は起動スケジュールを変更しない。

また、 $Rack$ メッセージに送信先無線ノードの位置情報を含めるためには、 $Rack$ メッセージの送信以前に中継無線ノードがこれを取得する必要がある。このため、 $Sreq$ メッセージに送信先無線ノードの位置情報を含めることとする。

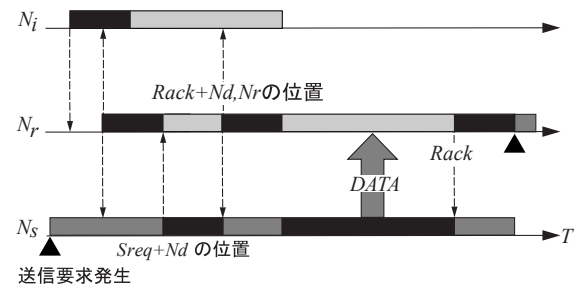


図 6 起動スケジュール変更のための位置情報通知

起動スケジュールを変更した隣接無線ノードは、中継無線ノードの送信する $Dack$ メッセージを傍受すると、起動を通知するためのポーリングメッセージをブロードキャスト送信する。このメッセージが中継無線ノードに受信されることによって、隣接無線ノードが起動状態にあることを通知することができる。中継無線ノードがデータメッセージを受信することによって送信要求が発生してからポーリングメッセージを受信するまでの時間を短縮することができるため、データメッセージの擬似速度が大きくなり、IRDT-GEDIR の転送先無線ノード選択アルゴリズムにおいて、この隣接無線ノードが転送先無線ノードに選択され

る可能性を高めることができる。以下に、本節で提案する起動スケジュール変更手法を起動状態を維持するとして記述したものを示す。

[起動スケジュール変更]

- (1) 起動状態にある無線ノード N_i は、隣接する中継無線ノード N_r がユニキャスト送信する *Rack* メッセージを傍受したならば、以下を満たすことを条件として起動状態を維持する。

$$|N_i N_d| < |N_r N_d|$$

(N_d はデータメッセージの送信先無線ノード)

- (2) N_i は、 N_r がユニキャスト送信する *Dack* メッセージを傍受したならば、ポーリングメッセージをブロードキャスト送信する。□

3.2.3 *Rack* 転送による拡張

本節で提案した手法により、中継無線ノードによるデータメッセージの転送先無線ノードとなることが見込まれる隣接無線ノードの起動スケジュールを変更し、より大きな疑似速度でデータメッセージを配送し、エンドエンド配送遅延を短縮することが期待される。しかし、隣接無線ノードが起動スケジュールを変更するのは、中継無線ノードがユニキャスト送信した *Rack* メッセージを起動状態にある隣接無線ノードが傍受した場合である。間欠通信手法の適用により休止状態にある隣接無線ノードは、この *Rack* メッセージを傍受することはできないし、起動状態にあることで傍受できた場合でも、その隣接無線ノードが中継無線ノードよりも送信先無線ノードに近くなければ起動スケジュール変更を行なうことができない。すなわち、起動スケジュール変更の機会が多くはないという問題点がある。

そこで、本節では *Rack* メッセージを転送することによって、中継無線ノードがデータメッセージの受信を終了して *Dack* メッセージを送信する時点で適切な隣接無線ノードがポーリングメッセージをブロードキャスト送信できるようにする手法を提案する。図7に示すように、中継無線ノードが *Rack* メッセージをユニキャスト送信すると起動状態にある隣接無線ノードがこの *Rack* メッセージを受信する。ここで、*Rack* メッセージを受信した隣接無線ノードは、その位置に依らずにこの *Rack* メッセージを保持することとする。この隣接無線ノードと中継無線ノードとに隣接する無線ノードがブロードキャスト送信するポーリングメッセージを受信することによって、ポーリングメッセージに含まれる位置情報を取得することができる。この位置情報から、起動した隣接無線ノードの方が送信先無線ノードに近い場合には、*Rack* メッセージを転送する。*Rack* メッセージを転送した隣接無線ノードは、休止状態となり通常の起動スケジュールを適用する。転送された *Rack* メッセージを受信した隣接無線ノードは、*Rack* メッセージを保持し、より送信先無線ノードの起動を検知した場合は *Rack* メッセー

ジを転送し、転送しないまま中継無線ノードがユニキャスト送信する *Dack* メッセージを傍受したならば、ポーリングメッセージをブロードキャスト送信する。なお、本手法では、データメッセージが転送されている間に *Rack* メッセージの転送を行なうことが必要であり、これらの衝突を回避しなければならない。したがって、データメッセージは制御メッセージとは異なるチャネルを用いて転送することとする。

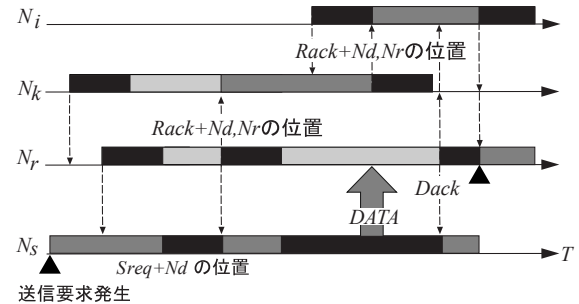


図7 *Rack* メッセージ転送手法

3.2.4 複数回ホップ無線ノード候補による衝突の回避

本手法を適用すると、図8に示すように中継無線ノードが送信された *Rack* メッセージ、あるいは、その隣接無線ノードから転送された *Rack* メッセージを起動状態にある複数の隣接無線ノードが受信することが考えられる。特に、前節で導入した *Rack* メッセージの転送手法の導入により、次ホップ無線ノード候補が起動タイミングを調節する機会が増加することは、エンドエンド配送遅延の短縮に効果的である一方、候補無線ノードが複数となる可能性も高めている。これらの無線ノードが *Dack* メッセージの受信に呼応してポーリングメッセージを同時に送信すると、中継無線ノードにおいてポーリングメッセージの衝突が発生し、中継無線ノードが転送先無線ノードを検知することができない。これによって、転送データメッセージの疑似速度が小さくなり、データメッセージ配送のエンドエンド遅延が延長する問題がある。

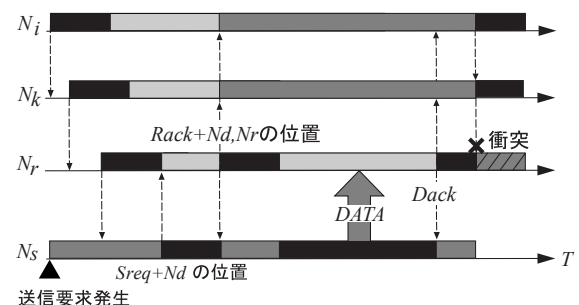


図8 ポーリングメッセージの衝突

そこで、[5] で提案されている手法を適用し、ポーリングメッセージの送信時刻が一致しないように *Dack* メッセージ受信からポーリングメッセージ送信までの待機時間を定

めることとする。この待機時間を次式のように送信先無線ノード N_d までの距離に対して単調増加するように定めることにより、より N_d に近い隣接ノードが先行してポーリングメッセージを送信できるようにする。

$$N_i \text{ の待機時間} = (|N_i N_d| - |N_r N_d| + R)T$$

(T は定数)

4. 評価

本論文で提案する手法では、送信先無線ノードに近い隣接無線ノードの起動スケジュールを変更し、中継無線ノードがデータメッセージの受信を終えてデータ応答メッセージを送信した直後にポーリングメッセージを送信する。これによって、中継無線ノードがこの隣接無線ノードへデータメッセージを転送する場合に得られる疑似速度を大きくすることができる。そこで、本論文で提案した隣接無線ノードの起動スケジュールの変更手法、さらに *Rack* メッセージの転送を加えた拡張手法によって無線マルチホップ配送遅延がどのように改善されるかをシミュレーション実験により評価する。ここでは、1 辺 100m の正方形領域に無線信号到達範囲が 10m の無線ノード 500–3,000 台を一様分布乱数によりランダムに配置する。送信元無線ノードと送信先無線ノードの対をランダムに選択し、そのエンドエンド配送遅延を測定する。ただし、各無線ノードの間欠周期は 1 秒、間欠周期の初期オフセットは [0 秒, 1 秒] の範囲でランダムに決定し、起動待機時間は 10 ミリ秒とする。図 9 に各無線ノード数ごとに 1,000 通りの異なる無線ノード配置によって測定したエンドエンド配送遅延の平均値をプロットしたグラフを示す。無線ノード数によらず、起動スケジュール変更、*Rack* メッセージ転送を加えた拡張手法により、エンドエンド配送遅延が短縮していることが分かる。オリジナルの IRDT-GEDIR 手法と比較して、起動スケジュール変更による拡張手法では平均 5.2%、さらに *Rack* メッセージ転送を加えた拡張手法では平均 12.0% のエンドエンド配送遅延短縮を実現することができた。また、図 10 には各データメッセージ転送における平均疑似速度の測定結果を示す。オリジナルの IRDT-GEDIR 手法と比較して、起動スケジュール変更による拡張手法では平均 5.0%、さらに *Rack* メッセージ転送を加えた拡張手法では平均 14.1% の疑似速度向上を実現することができた。以上のことから、提案手法がデータメッセージのエンドエンド配送遅延を短縮することが確認された。

5. まとめと今後の課題

本論文では、IRDT-GEDIR において交換される制御メッセージを傍受することによって、次ホップ中継無線ノードとなり得る隣接無線ノードの起動スケジュールを変更し、エンドエンド配送遅延を短縮する手法を提案した。さらに、

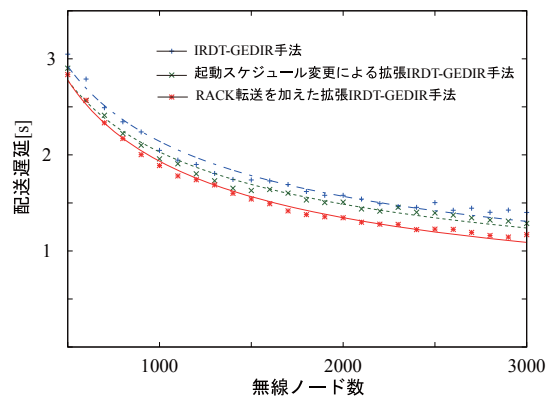


図 9 エンドエンド配送遅延

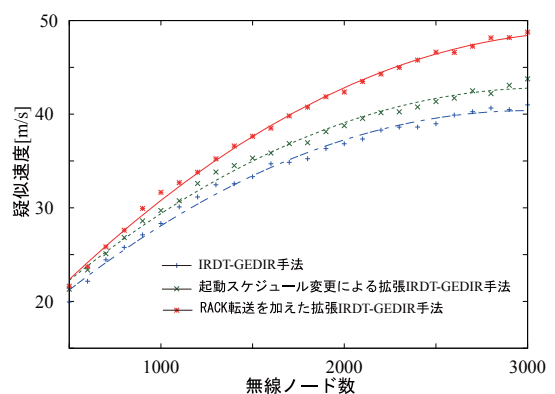


図 10 データメッセージ配送疑似速度

起動スケジュール変更機会を増加させるために、起動スケジュール変更を検知する *Rack* メッセージを他の隣接無線ノードが転送する手法も提案した。これらの手法がデータメッセージのエンドエンド配送遅延を短縮することをシミュレーション実験により確認した。提案手法は、無線ノードの起動スケジュールを変更している点、追加の制御メッセージ交換を要している点で、オリジナルの IRDT-GEDIR に比較して消費電力が増加している。今後は、この消費電力の増加を実験評価し、適切なトレードオフを実現する手法を考案する。

参考文献

- [1] Hatauchi, T., Fukuyama, Y., Ishii, M. and Shikura, T., “A Power Efficient Access Method by Polling for Wireless Mesh Network,” Transactions of IEEEJ, Vol. C-128, No. 12, pp. 1761–1766 (2008).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] Kumagai, S. and Higaki, H., “Low-Power and Shorter-Delay Sensor Data Transmission Protocol in Mobile Wireless Sensor Networks,” Proceedings of the 6th International Conference on Advances in Future Internet, pp. 26–34 (2014).
 - [5] Watanabe, M. and Higaki, H., “No-Beacon GEDIR: Location-Based Ad-Hoc Routing with Less Communication Overhead,” Proceedings of the 6th International Conference on Parallel and Distributed Computing and Networks, pp. 14–20 (2007).