

近隣ノードによるバッファリングを用いたセンサデータ配送プロトコル

東京電機大学大学院 理工学研究科 情報システム工学専攻
坂本 大樹 梶垣 博章
E-mail: {daiki, hig}@higlab.net

センサデータの無線マルチホップ配送では、無線通信の利用による衝突、競合の回避に加えて、センサノードの通信バッファ容量を考慮する必要がある。次ホップセンサノードの通信バッファに空きがない場合には、センサデータの転送を行なうことができない。このように通信バッファに格納されたセンサデータを短時間にシンクノードへと配送することが求められる。本論文では、シンクノードへの無線マルチホップ配送経路に隣接するセンサノードのバッファを利用して、よりシンクノードに近いセンサノードの通信バッファにセンサデータを格納することによって、センサデータの通信遅延を縮小する手法を提案し、これを実現するルーティングプロトコルとデータ配送プロトコルを設計する。また、シミュレーション実験評価により、中継センサノードのバッファに格納されたメッセージをシンクノードに配送するために要する時間が提案手法を用いることによって短縮されることを確認する。

Wireless Multihop Transmission of Sensor Data with Buffering in Neighbor Sensor Nodes for Shorter Transmission Delay

Daiki Sakamoto and Hiroaki Higaki
Department of Computers and Systems Engineering
Tokyo Denki University
E-mail: {daiki, hig}@higlab.net

In wireless multihop transmission of sensor data, in addition to avoidance of contentions and collisions of wireless signals, available capacity of communication buffers in sensor nodes should be considered. If a communication buffer in a next hop wireless sensor node is filled, it is impossible for a wireless sensor node to forward a message with sensor data to the next hop one. Here, the sensor node stores the message to its communication buffer and waits for the buffer in the next hop sensor node to have enough space. The buffered messages are required to be transmitted to a sink node as soon as possible. This paper proposes a method to store the messages not only into communication buffers in wireless sensor nodes along the multihop transmission route but also in wireless sensor nodes neighboring to the multihop transmission route. By applying this method, messages with sensor data are stored into communication buffers of wireless sensor nodes nearer to the sink node and shorter end-to-end transmission delay is required. We design a routing protocol and a message transmission protocol for implementation and evaluate time duration required to transmit all buffered messages to a destination sink node by comparing the conventional method only along a multihop transmission route.

1 はじめに

無線センサネットワークは、環境データの取得などに広く利用されつつあり、特に広域データの取得には、無線センサノードによるデータメッセージのマルチホップ配送が必要とされる。ここでは、センサノードの移動、センサノードの故障やバッテリーの消耗によるセンサネットワークからの離脱、省電力機能による一時的なネットワークからの離脱等によって構築された無線マルチホップ配送経路が経時的に無効となり、再構築する必要がある。そこで、無線アドホックネットワークのために設計されたルーティング手法を応用することが考えられる。特に、イベントを検知したセンサノードからシンクノードへのセンサデータのマルチホップ配送を行なう場合には、オンデマンド型のルーティングが通信オーバーヘッド

削減の観点から有効である。ここで、センサデータは小さな通信遅延で送信元センサノードから送信先シンクノードまで配送することが求められる。これまでに継続的に一定量のセンサデータを配送することを想定したセンサデータの配送手法が提案されている。しかし、イベント駆動によるセンサデータの配送では、配送要求されるセンサデータ量は経時的に大きく変化する。このとき、無線センサノードには一般に少量のメモリ装置しか搭載されていないため、マルチホップ配送されるセンサデータが中継無線センサノードでバッファオーバーフローを起こすことが考えられる。センサデータの紛失を回避するためには、次ホップセンサノードの通信バッファに空きがある場合にのみメッセージを転送することが求められるが、こうしてマルチホップ配送経路上のセン

サノード群の通信バッファに格納されたセンサデータをできるだけ短時間にシンクノードへと配送する手法が必要である。本論文では、マルチホップ配送経路の隣接センサノードを活用し、よりシンクノードに近いセンサノードの通信バッファにセンサデータを格納する手法を提案し、その実現プロトコルを設計し、有効性を実験評価する。

2 センサネットワーク

無線センサネットワークは、無線通信デバイスを備えたセンサノードとシンクノードから構成され、センサノードで測定されたセンサデータをシンクノードに配送することを目的として構築するネットワークである。

各センサノードは搭載された電池による電力で駆動され、測定によるセンサデータの取得とその無線通信による配送を行なう。電池の電源容量が限られていることから、すべてのセンサノードがシンクノードに対して直接センサデータを配送することができないため、センサノード群による無線マルチホップ配送を用いる。送信元センサノード $S_i (= S_0)$ から送信先シンクノード $S_d (= S_n)$ までの無線マルチホップ配送経路 $R = \{S_0, \dots, S_n\}$ は、中継センサノード $S_i (0 < i < n)$ 群で構成される。各中継センサノード S_i が S_{i-1} から受信したセンサデータを S_{i+1} に転送することで隣接センサノード間の無線通信に必要な電力のみを消費することによってセンサデータをシンクノードに配送することができる。無線マルチホップ配送経路を決定する手法として、さまざま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 [6]。アドホックネットワークは、無線通信デバイスを搭載した移動コンピュータからなるネットワークであり、移動コンピュータの経時的な位置変化、障害やバッテリー切れによる無線通信機能の喪失等を考慮したルーティングプロトコルが設計されている。特に、ネットワークトポロジ情報を恒常的に更新する通信コストを削減するために、マルチホップ通信要求発生時に経路探索を行なうオンデマンド型 (リアクティブ型) のルーティングプロトコルが多数提案されている [2, 5, 7]。無線センサネットワークにおいても、センサノードの障害やバッテリー切れによる無線通信機能の喪失、省電力機能による一時的なネットワークからの離脱、センサノードやシンクノードの移動等を考慮した無線マルチホップ配送のためのルーティングプロトコルが必要である。

ここで、送信元センサノードからシンクノードへのセンサデータの配送を以下の 3 種類に分類する。

- (1) クライアントからの要求に対して、センサデータをシンクノードへ配送する。
- (2) 送信元センサノードが定期的に取得したセンサデータをシンクノードへ配送する。
- (3) イベントの発生を検知した送信元センサノードがセンサデータをシンクノードへ配送する。

(1) の場合、各無線通信リンクが双方向通路であるならば、クライアントからの要求をシンクノード S_d からセンサノード S_i へと配送するマルチホップ配送経路を検出することによって、センサデータのマルチホップ配送経路 R を検出することが可能である。したがって、経路探索プロトコルは、シンクノードによって開始されることとなる。(2) の場合、多数のセンサノードがシンクノードへセンサデータを配送することが想定され、各センサノードからシンクノードへの経路を探索するよりも、シンクノードが定期的に経路探索のための制御メッセージをフラッディ

ングし、そのマルチホップ配送経路を逆方向に用いることによって少ない通信オーバーヘッドによる経路探索が可能となる [1]。ただし、この方法を用いることができるのは、(1) の場合と同様にすべての無線通信リンクが双方向通路である場合のみであり、マルチホップ配送経路の変動頻度によって定まる上記の経路探索頻度に対して相対的に多数のセンサノードがセンサデータを配送する場合にのみ有効である。したがって、(3) のように測定したセンサデータからイベント発生を検知し、センサデータを送信元センサノードから送信先シンクノードへと無線マルチホップ配送する場合や省電力機能によって稼働センサノードが頻繁に変化する場合には、オンデマンド型のルーティングプロトコルが適切であり、経路探索は送信元センサノードから開始される。

センサノードは、小型化と低価格化の要求から限られたバッテリー容量しか備えないことに加えて、搭載するメモリ容量も限られたものとなる。無線マルチホップ配送経路 $R = \{S_0, S_1, \dots, S_n\}$ を用いたセンサデータ配送において、センサノード S_i が次ホップセンサノード S_{i+1} にセンサデータを送信する場合、 S_{i+1} の通信バッファがあらかじめ定められた閾値以上に配送中センサデータで満たされている場合には、 S_i から転送されるセンサデータを受信することができない。この場合、 S_i は S_{i+1} への転送に失敗したセンサデータを自身の通信バッファに一時的に蓄積し、待ち時間経過後に再送信することとなるが、この間に自身の通信バッファが同様に閾値以上に配送中センサデータで満たされ、前ホップセンサノード S_{i-1} から転送されるセンサデータを受信することができなくなることが考えられる。このような現象は、多数の送信元センサノードが同一のシンクノードへ同時並行的にセンサデータのマルチホップ配送を行なう場合に発生すると考えられる。無線マルチホップ配送の各無線通信リンクにおいて、IEEE802.11 [10] や Bluetooth [11]、Zigbee [12] といった無線 LAN プロトコルを用いる場合、無線信号の衝突を回避するために CSMA/CA や RTS/CTS といった機構を用いるが、同時に無線信号送信を要求する無線センサノード間では競合が発生し、送信要求を受理されなかった無線センサノードは、送信要求が受理された無線センサノードによる通信が終了するまで待つこととなる。特に、シンクノードは複数のセンサノードからのマルチホップ配送経路の終点であることから、シンクノードに隣接する無線センサノード間では頻繁に競合が発生することになり、上記で述べたセンサノードの通信バッファが満たされる現象が発生し易いと考えられる。なお、本論文では、シンクノードとその隣接ノード間にはすべてのセンサデータを配送するための帯域が存在することが前提であり、一時的に多数の送信元センサノードからのセンサデータ配送が要求された場合に通信バッファが満たされる現象が発生することを問題としており、そもそも配送要求を充足するのに十分な帯域が存在しない場合を問題にしているのではないことに注意が必要である。また、本章で分類した (3) のタイプのセンサネットワークでは、イベントの発生時にのみ大量のセンサデータが配送され、他の場合には少数のセンサデータ (あるいは制御メッセージ) が配送されることとなることから、要求帯域 (ビットレート) が大きく変動することとなり、これも配送経路上で通信バッファが満たされる原因となり得る。このような現象は、最終的にはセンサデータの配送遅延となってセンサネットワークアプリケーションの障害

となり得る。

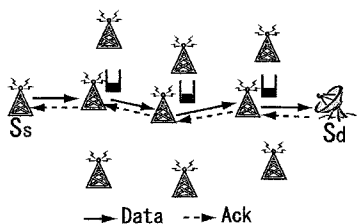


図 1: 無線マルチホップ配送 (空きバッファあり)

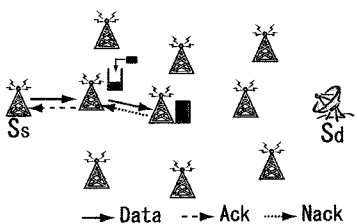


図 2: 無線マルチホップ配送 (空きバッファなし)

アドホックネットワークにおいて、マルチホップ配送経路における通信遅延の縮小を実現するためのプロトコルが提案されている。MARCH [8] では、 S_i が S_{i-1} から受信したメッセージを S_{i+1} に転送することを考慮して RTS/CTS によるオーバーヘッドを削減し、無線マルチホップ配送の通信遅延を短縮する方法を提案している。ただし、転送先センサノードは他のセンサノードの通信との衝突、競合がなければ常に転送メッセージを受信可能であることが前提となっている。また、無線信号送信電力が制御可能であることを前提として、マルチホップ配送経路上の競合を回避するプロトコルが提案されている [4]。ここでは、無線マルチホップ配送経路上の各センサノードが無線信号到達範囲に次ホップ移動コンピュータを含み、前ホップ移動コンピュータを含まないような経路を用いることによって隠れ端末問題を回避することで、配送スループットを向上させ、通信遅延を短縮させる手法を提案し、RH2SWL ルーティングプロトコルを設計している。本手法も、MARCH と同様に次ホップセンサノードが他のセンサノードの通信と衝突、競合がなければ常に転送メッセージを受信可能である場合を想定しており、通信バッファの不足に対する対処は考慮していない。一方、センサネットワークにおいてセンサデータを小さな通信遅延で配送するために、シンクノードにおいてセンサデータの配送スケジュールを決定する手法が提案されている [13]。本手法は、対象センサノードにおいて同期時計を共有可能であり、シンクノードからすべての無線センサノードへ直接無線信号を到達可能な規模において有効に機能するものである。ここでは、無線信号の衝突、競合のみを配送スケジュールの決定要素として含んでおり、本章で述べた空き通信バッファの有無は考慮されていない。

3 提案手法

送信元無線センサノード $S_s (= S_0)$ から送信先シンクノード $S_d (= S_n)$ までの無線マルチホップ配送経路 $R = \{S_0, S_1, \dots, S_n\}$ において、 k 台の中継無線センサノード $\{S_{n-k}, \dots, S_{n-1}\}$ の通信バッファが満たされている (メッセージを追加することができない状態である) 場合を考える。配送経路上にある無線センサノードのみを用いてメッセージを配送する場合には、次ホップ無線センサノードの通信バッファに空きができるまでメッセージの転送を行なうことができない。例えば、 $n = 6$ で $k = 6$ の場合を図 3 に示す。

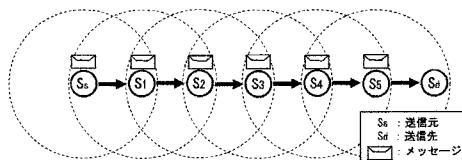


図 3: 配送経路上の配送待ちメッセージ

本論文では、簡単のためメッセージのサイズは同一とし、各無線センサノードには 1 メッセージ分の通信バッファのみが備えられているものとして説明する。このとき、中継無線センサノードの通信バッファに格納された 6 個のメッセージすべてがシンクノード $S_d (= S_6)$ まで配送されるには、理想的にメッセージ転送が行なわれた場合に以下の 15 単位時間 (1 ホップの配送に要する時間を 1 単位時間とする) を要することとなる。

表 1: 配送経路上のメッセージ転送

1	$S_5 \rightarrow S_6$	9	$S_2 \rightarrow S_3, S_5 \rightarrow S_6$
2	$S_4 \rightarrow S_5$	10	$S_0 \rightarrow S_1, S_3 \rightarrow S_4$
3	$S_5 \rightarrow S_6$	11	$S_1 \rightarrow S_2, S_4 \rightarrow S_5$
4	$S_3 \rightarrow S_4$	12	$S_2 \rightarrow S_3, S_5 \rightarrow S_6$
5	$S_4 \rightarrow S_5$	13	$S_3 \rightarrow S_4$
6	$S_2 \rightarrow S_3, S_5 \rightarrow S_6$	14	$S_4 \rightarrow S_5$
7	$S_3 \rightarrow S_4$	15	$S_5 \rightarrow S_6$
8	$S_1 \rightarrow S_2, S_4 \rightarrow S_5$		

本論文では、このように通信バッファに蓄積されて次ホップ無線センサノードの通信バッファに空きができるのを待つメッセージをよりシンクノードに近い無線センサノードのバッファに格納する方法を提案する。メッセージをよりシンクノードに近い無線センサノードの通信バッファに格納するために、無線マルチホップ配送経路 R の各中継無線センサノード S_i に隣接する R に含まれない無線センサノード S'_i を用いる。

ここで S'_i は、 S_{i-1} と S_{i+1} の無線信号到達範囲に含まれる無線センサノードである。 R 上の各中継無線センサノードに対して、上記の要件を満たす隣接無線センサノードを 1 個ずつ選択した場合、6 個のメッセージは $\{S_3, S'_3, S_4, S'_4, S_5, S'_5\}$ の通信バッファに格納される。ここで、 S_i と S'_i が互いの無線通信範囲内に含まれ、 S'_i と S'_{i+1} も互いの無線通信範囲内に含まれる場合、中継無線センサノードの通信バッ

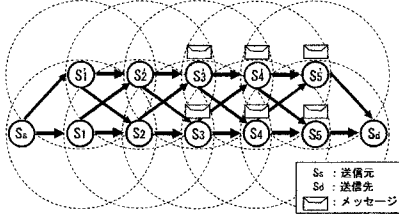


図 4: 1-バックアップにおける配送待ちメッセージ

ファに格納された 6 個のメッセージすべてがシンクノード S_d まで配送されるには、理想的にメッセージ転送が行なわれた場合に以下の 12 単位時間を要することとなり、従来手法と比べて 3 単位時間の短縮となる。

表 2: 1-バックアップにおけるメッセージ転送

1	$S_5 \rightarrow S_6$	7	$S'_5 \rightarrow S_6$
2	$S_4 \rightarrow S_5$	8	$S'_4 \rightarrow S_5$
3	$S_5 \rightarrow S_6$	9	$S_5 \rightarrow S_6$
4	$S_3 \rightarrow S_4$	10	$S'_3 \rightarrow S_4$
5	$S_4 \rightarrow S_5$	11	$S_4 \rightarrow S_5$
6	$S_5 \rightarrow S_6$	12	$S_5 \rightarrow S_6$

さらに、各無線センサノード S_i の 2 つの隣接無線センサノード S_i^L と S_i^R を S_i の通信バッファがメッセージで満たされているときの前ホップからの転送先として用いることとする。

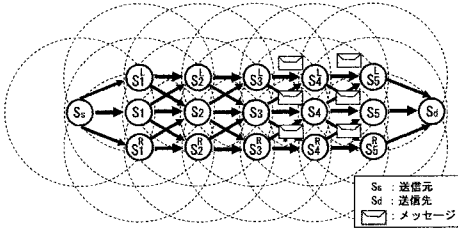


図 5: 2-バックアップにおける配送待ちメッセージ

この場合には、 $\{S_4, S_4^L, S_4^R, S_5, S_5^L, S_5^R\}$ の通信バッファに 6 個のメッセージが格納され、 $S_d (= S_6)$ への配送には 9 単位時間を要することとなり、従来手法に比べて 6 単位時間の削減となる。

本手法を実現するためには、 S_s から S_d までのマルチホップ配送経路 R に含まれる各中継センサノード S_i の隣接無線センサノードで S_{i-1} と S_{i+1} の無線信号到達範囲内にあるものを S_{i-1} のバックアップ次ホップ無線センサノードとしてルーティングテーブルに登録するルーティングプロトコルと、 S_i の通信バッファに空きがない場合に S_{i-1} がバックアップ次ホップ無線センサノードへメッセージの転送を行なうメッセージ配送プロトコルが必要となる。

4 提案プロトコル

前章で述べた無線マルチホップ配送経路の各無線センサノードの隣接無線センサノードをバックアッ

表 3: 2-バックアップにおけるメッセージ転送

1	$S_5 \rightarrow S_6$	6	$S_4 \rightarrow S_5$
2	$S_5^L \rightarrow S_6$	7	$S_5 \rightarrow S_6$
3	$S_5^R \rightarrow S_6$	8	$S_4^R \rightarrow S_5^R$
4	$S_4^L \rightarrow S_5^L$	9	$S_5^R \rightarrow S_6$
5	$S_5^L \rightarrow S_6$		

プとして利用することによって、よりシンクノードに近い無線センサノードの通信バッファにメッセージを格納して次ホップ無線センサノードの通信バッファが空くの待つ手法を実現するための経路探索プロトコルとメッセージ配送プロトコルを設計する。

経路探索プロトコルは、経路探索要求制御メッセージ $Rreq$ の配送によって経路探索を行ない、検出された経路に沿って経路探索応答制御メッセージ $Rrep$ を送信先シンクノード S_d から送信元センサノード S_s まで無線マルチホップ配送する任意のオンデマンドアドホックルーティングプロトコルに対して機能追加することで実現できる。本論文では、AODV [7] に対する拡張としてプロトコルを設計する。提案プロトコルは、マルチホップ配送経路に含まれる無線通信リンクの切断時に次ホップを隣接移動コンピュータへと切替える AODV-BR [3] を基礎としている。AODV-BR におけるバックアップ中継無線センサノードの選択は以下の条件に基づいて行なわれている。

[AODV-BR におけるバックアップの選択条件]

以下の条件を満足する無線センサノード S をバックアップに用いる。

- S は S_{i+1} の無線信号到達範囲に含まれる。
- S は $S_j (0 \leq j < i)$ の無線信号到達範囲に含まれる。

□

これに対して提案プロトコルでは、バックアップ中継無線センサノード S'_i は、 S_{i+1} と S_{i-1} の無線信号到達範囲に含まれることを条件としている。これは、AODV-BR が接続性の維持を目的としているために配送ホップ数の増加を許しているのに対して、提案プロトコルでは通信遅延の縮小を目的としているためにホップ数の増加を回避することに主眼を置いているためである。

[提案手法におけるバックアップの選択条件]

以下の条件を満足する無線センサノード S'_i をバックアップに用いる。

- S'_i は S_{i+1} の無線信号到達範囲に含まれる。
- S'_i は S_{i-1} の無線信号到達範囲に含まれる。

□

上記条件を満足するバックアップ中継無線センサノード S'_i を検出し、これを S_{i-1} の経路テーブルに加えることが必要となる。これには、AODV-BR と同様に経路探索応答制御メッセージ $Rrep$ を受信 (overhear) することによって実現する。 S_{i+1} から S_i へユニキャスト送信される $Rrep$ メッセージと S_{i-1} から S_{i-2} へユニキャスト送信される $Rrep$ メッセージをともに受信することができた無線センサノード S'_i が S_i のバックアップ中継センサノードとなる条件を満足することを検出する。このとき、 S'_i は送信先シンクノード S_d への次ホップ無線センサノードとして S_{i+1} を経路テーブルに登録し、自身がバックアップ中継無線センサノードであることを S_{i-1} に通知するための代替経路提案制御メッセージ $Rprop$ を

S_{i-1} にユニキャスト送信する。この $Rprop$ メッセージを受信した S_{i-1} は、 S_d へのバックアップ次ホップ無線センサノードとして S'_i を代替経路テーブルに登録する。なお、 S'_i が S_{i-1} へユニキャスト送信した $Rprop$ メッセージを受信したならば、 S'_{i-1} は S_d へのバックアップ次ホップ無線センサノードとして S'_i を代替経路テーブルに登録することで、 S'_{i-1} がメッセージを転送する時に S_i の通信バッファに空きがない場合に S'_i へメッセージを転送することが可能となる。

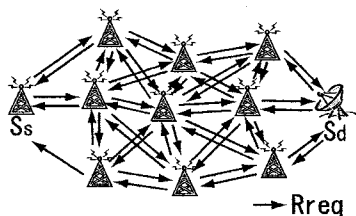


図 6: $Rreq$ のフラッディング

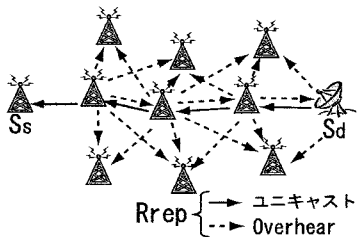


図 7: $Rrep$ のユニキャスト

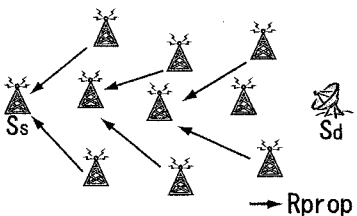


図 8: $Rprop$ のユニキャスト

この経路探索プロトコルによって、中継無線センサノード S_i およびそのバックアップ中継無線センサノード S'_i は、経路テーブルに次ホップ中継無線センサノードを S_{i+1} とする S_d へのエントリを持つとともに、代替経路テーブルに次ホップ中継無線センサノードを S'_{i+1} とする S_d へのエントリを持つこととなる。なお、代替経路テーブルのエントリ数は、無線センサノードの配置に依存し、ひとつもない場合もあれば、複数のエントリがあることもある。前ホップセンサノードからメッセージを受信した中継センサノード S_i は、経路テーブルを参照して次ホップノード S_{i+1} へメッセージをユニキャスト転送する。 S_{i+1} にこのメッセージを格納するために十分な空き通信バッファがあるならば、受信確認肯定応答制御

メッセージ Ack が返送されることで、このホップのメッセージ転送を終了する。一方、 S_{i-1} にこのメッセージを格納するために十分な空き通信バッファがないならば、受信確認否定応答制御メッセージ $Nack$ が返送される。これを受信した S_i は、代替経路テーブルを参照してバックアップ次ホップセンサノード S'_{i+1} を得て、メッセージの転送を行なう。この転送が成功した (Ack メッセージを受信した) ならば、このホップのメッセージ転送を終了する。この転送が失敗した ($Nack$ メッセージを受信した) ならば、バックアップも含めたすべての次ホップセンサノードの通信バッファに空きがないことから、このメッセージを通信バッファに格納し、次ホップへの転送が可能となるまでこのホップの転送を一時的に中断する。

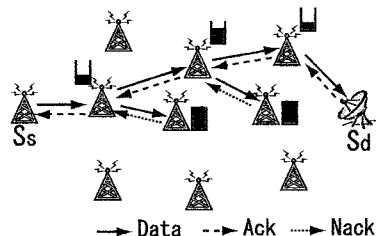


図 9: バックアップを用いたマルチホップ配送

[データ配送プロトコル]

- 1) 送信元センサノード $S_s (= S_0)$ は、経路テーブルを参照して送信先シンクノード S_d に対する次ホップ中継センサノード S_1 を得て、センサデータを含むメッセージを S_1 へユニキャスト送信する。なお、再送信に備えて S_s は送信メッセージのコピーを通信バッファに格納する。
- 2) S_s からユニキャスト送信されたメッセージを受信した次ホップ中継センサノード S_1 は、通信バッファに空きがあるならばメッセージを通信バッファに格納し、受信確認肯定応答メッセージ Ack を S_0 にユニキャスト返信する。通信バッファに空きがないならば、受信確認否定応答メッセージ $Nack$ を S_0 にユニキャスト返信する。
- 3) S_1 から Ack メッセージを受信したならば、 S_s はメッセージを通信バッファから削除する。一方、 S_1 から $Nack$ メッセージを受信した S_s は、代替経路テーブルを参照して S_d に対する次ホップ中継センサノード S'_1 を得て、メッセージを S'_1 へユニキャスト送信する。
- 4) S_s からユニキャスト送信されたメッセージを受信したバックアップ次ホップ中継センサノード S'_1 は、通信バッファに空きがあるならばメッセージを通信バッファに格納し、受信確認肯定応答メッセージ Ack を S_0 にユニキャスト返信する。通信バッファに空きがないならば、受信確認否定応答メッセージ $Nack$ を S_0 にユニキャスト返信する。
- 5) S'_1 から Ack メッセージを受信したならば、 S_s はメッセージを通信バッファから削除する。一方、 S'_1 から $Nack$ メッセージを受信した S_s は、代替経路テーブルを参照し、他の次ホップ中継センサノードが得られるならば、これに対して 3) 以下を繰り返す。すべてのバックアップ次ホップ中継センサノードから $Nack$ メッセージを受

信したならば、メッセージを通信バッファに格納してから一定時間再送信処理を中断し、その後 1) から処理を再開する。

- 6) 前ホップセンサノード S_{i-1} (またはそのバックアップセンサノード S'_{i-1}) から受信したメッセージを通信バッファに格納し、Ack メッセージを返送した中継センサノード S_i (またはそのバックアップセンサノード S'_i) は、経路テーブルを参照して S_d に対する次ホップ中継センサノード S_{i+1} を得て、このメッセージを S_{i+1} へユニキャスト送信する。
- 7) S_i (または S'_i) からユニキャスト送信されたメッセージを受信した次ホップ中継センサノード S_{i+1} は、通信バッファに空きがあるならばメッセージを通信バッファに格納し、Ack メッセージを S_i (または S'_i) にユニキャスト返信する。通信バッファに空きがないならば、Nack メッセージを S_i (または S'_i) にユニキャスト返信する。
- 8) S_{i+1} から Ack メッセージを受信したならば、 S_i (または S'_i) はメッセージを通信バッファから削除する。一方、 S_{i+1} から Nack メッセージを受信した S_i (または S'_i) は、代替経路テーブルを参照して S_d に対する次ホップ中継センサノード S'_{i+1} を得て、メッセージを S'_{i+1} へユニキャスト送信する。
- 9) S_i (または S'_i) からユニキャスト送信されたメッセージを受信したバックアップ中継センサノード S'_{i+1} は、通信バッファに空きがあるならばメッセージを通信バッファに格納し、Ack メッセージを S_i (または S'_i) にユニキャスト返信する。通信バッファに空きがないならば、Nack メッセージを S_i (または S'_i) へユニキャスト返信する。
- 10) S'_{i+1} から Ack メッセージを受信したならば、 S_i (または S'_i) はメッセージを通信バッファから削除する。一方、 S'_{i+1} から Nack メッセージを受信した S_i (または S'_i) は、代替経路テーブルを参照し、他の次ホップ中継センサノードが得られるならば、これに対して 8) 以下を繰り返す。すべてのバックアップ次ホップ中継センサノードから Nack メッセージを受信したならば、一定時間再送信処理を中断し、その後 6) から処理を再開する。
- 11) 前ホップセンサノード S_{n-2} (またはそのバックアップセンサノード S'_{n-2}) から受信したメッセージを通信バッファに格納し、Ack メッセージを返送した中継センサノード S_{n-1} (またはそのバックアップセンサノード S'_{n-1}) は、このメッセージを S_d へユニキャスト送信する。
- 12) S_{n-1} (または S'_{n-1}) からユニキャスト送信されたメッセージを受信した S_d は、Ack メッセージを S_{n-1} (または S'_{n-1}) にユニキャスト返信する。
- 13) S_d から Ack メッセージを受信したならば、 S_{n-1} (または S'_{n-1}) はメッセージを通信バッファから削除する。□

5 評価

本論文で提案するセンサデータの無線マルチホップ配送における通信バッファへの格納手法の性能評価を行なう。

まず、よりシンクノードに近い無線センサノードの通信バッファを利用する方法を用いることで、通信バッファに格納されたセンサノードが短時間でシン

クノードに配送されることを定期的なシステム環境を想定して確認する。ここでは、3章において $k=6$ とした場合の通信バッファが空になるまでに要する時間評価を $k = \{1, \dots, 12\}$ に対して行なう。各中継無線センサノード S_i にバックアップ中継無線センサノードが存在しない場合 (従来手法)、ひとつ存在する場合、ふたつ存在する場合を想定し、以下の4つのケースを比較する。

- (1) バックアップがひとつも存在しない (従来手法)。
- (2) ひとつのバックアップ中継無線センサノード S'_i が存在し、以下の条件を満足する。
 - S_i の無線信号到達範囲に S_{i+1} と S'_{i+1} が含まれる。
 - S'_i の無線信号到達範囲に S_{i+1} と S'_{i+1} が含まれる。
- (3) ふたつのバックアップ中継無線センサノード S'_i と S''_i が存在し、以下の条件を満足する。
 - S_i の無線信号到達範囲に S_{i+1} 、 S'^L_{i+1} 、 S''^R_{i+1} が含まれる。
 - S'^L_i の無線信号到達範囲に S_{i+1} 、 S'^L_{i+1} 、 S''^R_{i+1} が含まれる。
 - S''^R_i の無線信号到達範囲に S_{i+1} 、 S'^L_{i+1} 、 S''^R_{i+1} が含まれる。
- (4) ふたつのバックアップ中継無線センサノード S'_i と S''_i が存在し、以下の条件を満足する。
 - S_i の無線信号到達範囲に S_{i+1} 、 S'^L_{i+1} 、 S''^R_{i+1} が含まれる。
 - S'^L_i の無線信号到達範囲に S_{i+1} 、 S'^L_{i+1} が含まれる。
 - S''^R_i の無線信号到達範囲に S_{i+1} 、 S''^R_{i+1} が含まれる。

条件 (1) (従来手法) で要する時間に対する他の条件で要する時間の割合を図 10 のグラフに示す。通信遅延の削減率は、バックアップ中継無線センサノード数とその配置および通信バッファに格納されたメッセージ数によって異なる。バックアップ数が多く、それらが互いに無線信号到達範囲を共有しない (衝突、競合が少ない) 場合に削減率が向上するが、後述するようにバックアップ数が増加するとそれらは互いに近接する傾向にあることから、無線信号到達範囲を共有する可能性が高くなる。実験範囲のメッセージ数においては、10%~55%の配送遅延短縮が実現されていることが分かる。

次に、上記の条件を満足するように無線センサノードを配置して通信バッファに格納されたメッセージが送信先シンクノードにすべて配送されるまでに要する時間をシミュレーション実験によって測定する。シミュレーション実験は、無線モバイルネットワーク用シミュレータである GloMoSim [9] で行ない、無線 LAN プロトコルには IEEE802.11 を用いる。条件 (2)、(3)、(4) の環境において、経路テーブルおよび代替経路テーブルは、提案ルーティングプロトコルによって得られるものを設定によって与え、メッセージの転送には提案配送プロトコルを用いる。シミュレーション実験結果を図 11 に示す。通信遅延の削減率の傾向は、メッセージ数に対して図 10 と同様の変化をしているが、全体に削減効果が向上しており、25%~75%の範囲にある。これは、理論評価においては、隠れ端末とならない複数の無線センサノードがメッセージを次ホップに転送可能となった場合

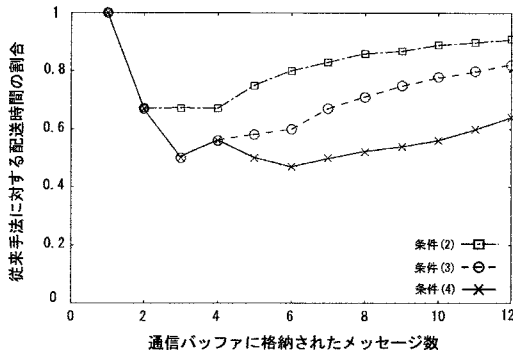


図 10: 通信バッファのメッセージを配送するのに要する時間 (理論値)

に同時に転送を行なうこととしているが、実際に無線 LAN プロトコルを用いて各無線センサノードが自律的に通信を行なう場合には必ずしも同時にメッセージの転送を行わないことによる影響が、提案手法よりも従来手法において大きいと考えられる。

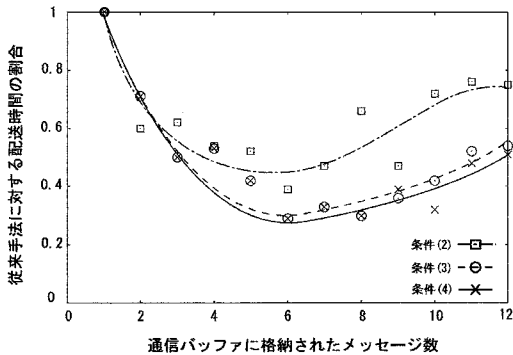


図 11: 通信バッファのメッセージを配送するのに要する時間 (実験値)

以上を踏まえて、センサノードを一様分布乱数を用いてランダムに配置した場合に、配送途中で通信バッファに格納されたセンサデータがシンクノードに配送されるまでに要する時間をシミュレーション実験によって評価する。500m × 500m の領域に無線通信距離 100m のセンサノードを 100-300 台ランダムに配置する。同様に、シンクノードもこの領域内にランダムに配置する。いずれもシミュレーション実験時間内に移動せず、障害も発生しないとする。各センサノードには 1 メッセージのみバッファリングが可能であるとする。

提案手法において、各中継センサノードに対して検出されるバックアップ中継センサノード数の平均を移動コンピュータ数についてまとめたものを図 12 に示す。バックアップ数は、センサノード数、すなわちセンサノード密度に比例して増加することが分かる。

次に、提案手法および AODV によって検出された経路を用い、1-6 個のセンサデータがバッファリン

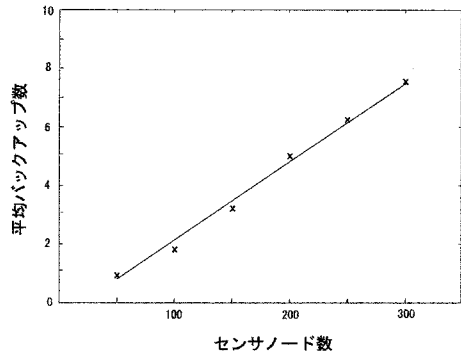


図 12: 平均バックアップ数

グされた状態から、これらがすべてシンクノードまで配送されるのに要する時間をセンサノード数 100 台、200 台、300 台について、バッファに格納されたメッセージ数に対してまとめたものを図 13、図 14、図 15 にそれぞれ示す。メッセージ数に対する配送時間の増加は、提案手法が従来手法よりも小さく、また、センサノード密度の増加にともなって配送時間が短縮されることが分かる。従来手法に対する配送時間の平均短縮率は図 16 に示すように、100 台、200 台、300 台でそれぞれ 47%、68%、72% となっており、高密度環境での効果大きい。

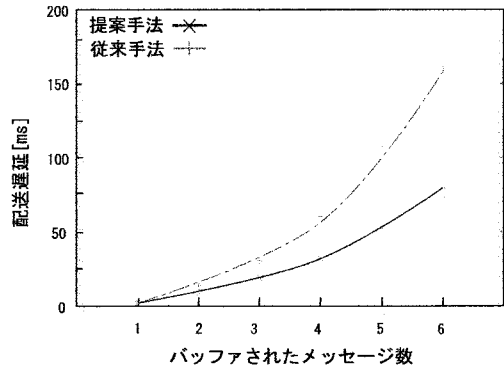


図 13: 配送遅延 (100 台)

6 まとめと今後の課題

本論文では、センサネットワークにおける送信元センサノードから送信先シンクノードへの無線マルチホップ配送において、中継センサノードの限られた通信バッファに空きがなくなった場合にマルチホップ配送経路に含まれない隣接センサノードの通信バッファに転送メッセージを格納するセンサデータ配送手法を提案し、このためのルーティングプロトコルとセンサデータ配送プロトコルを設計した。また、直線状に配置された中継センサノード群からなる単一の経路において、通信バッファに格納されたメッセージが従来手法よりも短時間にシンクノードへと配送されることをシミュレーション実験によって確

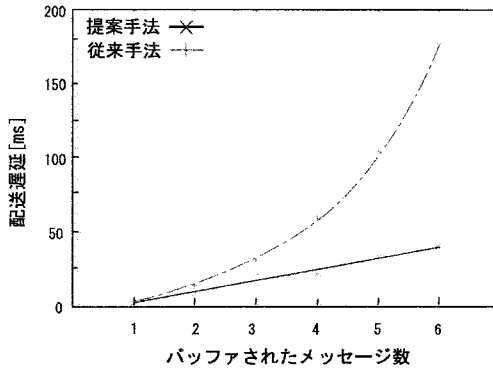


図 14: 配送遅延 (200 台)

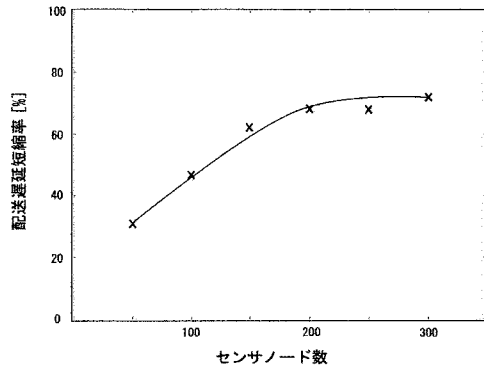


図 16: 配送遅延短縮率

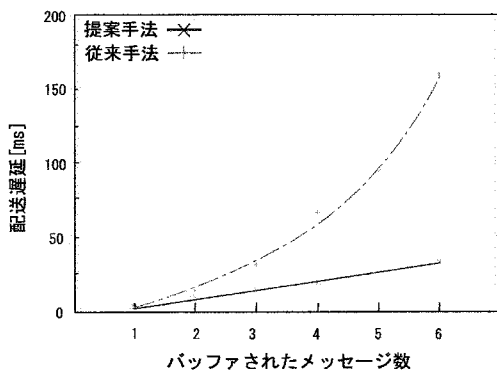


図 15: 配送遅延 (300 台)

認した。

本論文では、センサデータを格納したメッセージが中継センサノードのバッファに格納された状態から、これらのバッファが空になるまでの時間を測定した。今後は送信元センサノードのメッセージ送信速度を時間変化させることで中継センサノードにおけるメッセージのバッファリングを発生させ、各メッセージの配送遅延が短縮されることを実験によって確認する。また実際の無線マルチホップ配送では、複数のセンサノードから同時並行的に同一のシンクノードへセンサデータの配送が行なわれる。この場合、シンクノードに近い中継センサノード間ではバックアップセンサノードが重複することも考えられる。さらに、マルチホップ配送経路上のセンサノードがセンサデータの配送を必要とする場合には、中継のための通信バッファと自身の取得センサデータを格納するバッファとを適切に使い分けることも考慮しなければならない。今後は、これらの拡張についても検討を行なう。

参考文献

[1] Corson, M.S. and Ephremides, A., "A Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks," ACM Journal of Wireless Networks, Vol. 1, No. 1, pp. 61-81 (1995).
 [2] David, B., David, A. and Hu, Y.C., "The Dy-

namc Source Routing Protocol," Internet Draft, draft-ietf-manet-dsr-10.txt (2005).

[3] Lee, S.J. and Gerla, M., "AODV-BR: Backup Routing in Ad hoc Networks," Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, pp. 1311-1316 (2000).
 [4] Numata, Y. and Higaki, H., "Routing and Communication Protocols for Higher Throughput in Wireless Ad-Hoc Networks," Proceedings of the 7th International Conference on Wireless and Optical Communications, pp. 68-74 (2007).
 [5] Park, V. and Corson, S., "Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA) Version 1 Functional Specification," Internet Draft, draft-ietf-manet-tora-spec-04.txt (2001).
 [6] Perkins, C.E., "Ad-Hoc Networking," Addison-Wesley (2001).
 [7] Perkins, C.E. and Royer, E.M., "Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing," RFC 3561 (2003).
 [8] Toh, C.K., Vassiliou, V., Cuichal, G. and Shih, C.H., "MARCH: A Medium Access Control Protocol for Multiple Wireless Ad Hoc Networks," Proceedings of the IEEE Military Communications Conference, pp. 512-516 (2000).
 [9] "GloMoSim," <http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/>.
 [10] "Local and Metropolitan Area Network Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," Standard IEEE 802.11 (1997).
 [11] "Local and metropolitan area networks Specific requirements Part 15.1: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs(tm)), Standard IEEE 802.15.1 (2002).
 [12] "Local and metropolitan area networks specific requirements part 15.4: wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs)," Standard IEEE 802.15.4 (2003).
 [13] 赤嶺, 渡辺, "センサネットワークにおける衝突回避送受信スケジュールについて," 情報処理学会モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会, 情報研報, Vol. 2007, No. 44 (2007).