

バーストセンサデータの拡散マルチホップ配送手法

兼子 佑樹^{1,a)} 梶垣 博章^{1,b)}

概要: 中継センサノード列による無線マルチホップ通信によって一連のセンサデータをシンクノードへと配送する無線センサネットワークでは、バースト的に発生するセンサデータを紛失することなく低遅延で配送することが求められる。ここでは、隣接センサノード間の競合によって発生する中継センサノードにおけるバッファオーバーフローが問題となる。Nack 制御メッセージによる前ホップノードの転送抑制はセンサデータ紛失回避に有効であるものの、バッファが満たされたセンサノード列形成の原因となり、配送遅延を延長する。本論文では、次ホップセンサノードのバッファが満たされている場合には、その隣接センサノードへセンサデータを転送することで、配送経路を動的に拡散する手法を提案する。これによって、バッファが満たされたセンサノード列の形成を回避し、低遅延のセンサデータ配送を実現する。シミュレーション実験の結果、提案手法は、あらかじめ定められた複数経路を用いてバーストセンサデータ群を配送する手法と比較して、中継無線ノードにバッファリングされた各バーストセンサデータの配送遅延を平均 8.42%短縮し、センサデータ群全体の配送を終えるまでの時間を平均 1.5%短縮することが確認された。

キーワード: 無線センサネットワーク, バースト通信, バッファオーバーフロー, ルーティング

Dynamically Spread Wireless Multihop Transmissions for Burst Sensor Data Messages

YUKI KANEKO^{1,a)} HIROAKI HIGAKI^{1,b)}

Abstract: In wireless sensor networks where a sequence of sensor data messages are transmitted to a sink node by wireless multihop transmissions, burst sensor data messages are also required to be transmitted without losses and with shorter transmission delay. It is critical to avoid buffer overflow in intermediate sensor nodes caused by contentions among neighbor nodes. Suspension of forwarding of sensor data messages by using *Nack* control messages is one of reasonable solutions. However, it causes a sequence of intermediate sensor nodes with full communication buffers which results in longer transmission delay. This paper proposes dynamically spread wireless multihop transmissions where burst sensor data messages are forwarded to neighbor nodes of a next-hop node. Thus, the sensor data messages are buffered nearer to the destination sink node and transmission delay becomes shorter. Simulation results show that the proposed method achieves 8.42% shorter delay transmissions than a conventional multi-route wireless multihop transmissions along predetermined multiple routes.

Keywords: Wireless Sensor Networks, Burst Transmissions, Buffer Overflow, Routing

1. はじめに

無線通信機能を備えた多数のセンサノードを観測対象領域に配置し、取得したセンサデータを無線マルチホップ配送によってシンクノードへと配送する無線センサネット

¹ 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

a) kaneko@higlab.net

b) hig@higlab.net

ワークの活用が期待されている [1]。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、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センサノードでバッファオーバーフローを発生することが考えられる。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のみセンサデータを転送することが求められる。さらに、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ことによって、センサデータ配送遅延を短縮する手法である NeBuST 手法を拡張し、より広域に配送センサデータを拡散することでさらに配送遅延を短縮する NeBuST-wide 手法を提案する。

2. 無線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、センサノードで取得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、観測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。そのため、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 $S^s (= S_0)$ 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 $R = \{S_0 \dots S_n\}$ は、中継センサノード $S_i (0 < i < n)$ の列で構成される。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。そのため、隣接センサノード間の無線通信に必要な電力消費のみ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。

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 2 種類に分類する。

- 送信元センサノードが定期的に取り得たセンサデータをシンクノードへ配送する。
- 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。□

本論文では、イベント駆動型のセンサデータを対象として議論する。このようなセンサデータ配送を対象としたセンサネットワークでは、恒常的に高いトラフィックの通信をサポートすることは求められない。イベント駆動に対応してバースト的に生成される多数のセンサデータを短時間に紛失なくシンクノードへと配送することが求められる。なお、本論文では、シンクノードとその隣接ノードの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を前提とする。ここでは、一時的に送信元センサノードから多数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。すなわち、本論文で対象とするイベント駆動型のセンサネットワークでは、イベントの発生時にのみ多数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（および制御メッセージ）のみが配送されることによって、要求帯域（ビットレート）が大きく変動することとなり、配送経路上で通信バッファが満たされる原因となる。このような現象は、最終的にはセンサデータの配送遅延を延長させることになり、センサネットワークアプリケーションに対する障害となる。

3. 問題点

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。そのため、無線マルチホップ配送経路 $R = \{S_0 \dots S_n\}$ を用いたセンサデータ配送において、センサノード S_i の通信バッファがあらかじめ定められた閾値以上にセンサデータで満たされることがある。このような現象は、複数の送信元センサノードが同時並行にバースト的に生成された多数のセンサデータをシンクノードへ無線マルチホップ配送する場合に発生し易い。特に、図 1 に示すように、シンクノードに隣接するセンサノードや複数の無線マルチホップ配送経路が合流する中継無線センサノードにおいて、通信バッファが閾値以上にセンサデータで満たされる傾向がある。

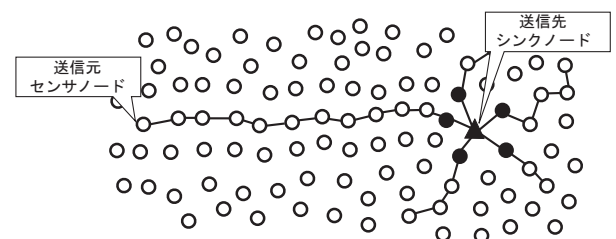


図 1 バッファが満たされたシンクノードの隣接センサノード

また、無線マルチホップ通信においては中継センサノード S_i の無線信号到達範囲に前ホップセンサノード S_{i-1} と次ホップセンサノード S_{i+1} が必ず含まれる。このため、

S_{i-1} は S_i から S_{i+1} へのセンサデータ転送に対する晒し端末となる．同様に， S_i は S_{i+1} から S_{i+2} へのセンサデータ転送に対する晒し端末となる．さらに， S_i は S_{i-2} および S_{i+2} と互いに隠れ端末の関係にある．以上により，図2に示すように， S_i は S_{i-2} ， S_{i-1} ， S_{i+1} ， S_{i+2} の4つのセンサノードと競合関係にあり，送信機会の減少から S_i の通信バッファが閾値以上にセンサデータで満たされる．

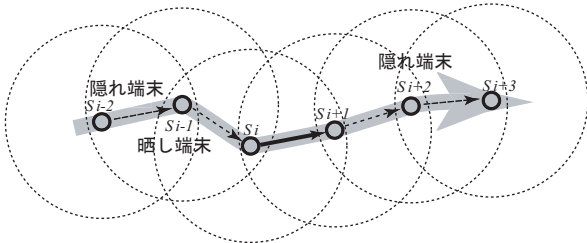


図2 無線マルチホップ配送経路における競合

さらに，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．多くの無線 LAN プロトコル [7, 8] では， S_{i+1} からの受信確認メッセージが受信されないことから S_i はこのセンサデータの再送信を行なうが，一定回数の再送信を行なっても受信確認メッセージが受信されない場合には，センサデータを破棄する．TCP/IP ネットワークにおいてはエンドエンドの再送機能が働くが，無線センサネットワークでは，配送遅延の短縮が求められること，無線通信コストが大きいこと，送信元無線センサノードに十分な通信バッファが存在しないことからホップ毎の再送信のみを用いることが求められる．そこで，この破棄によるセンサデータの紛失を回避するためには， S_i が 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が求められる．しかし，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．このように，無線マルチホップ配送経路上にある中継センサノード S_i の通信バッファが閾値以上にセンサデータで満たされると，センサノード列 S_{i-1} ， S_{i-2} ，... においても順次通信バッファがセンサデータによって閾値以上に満たされる(図3)．これによって，各センサデータの配送遅延が拡大する．

4. 関連研究

送信元センサノード $S^s (= S_0)$ 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 $R = \{S_0 \dots S_n\}$ において，連続する k 台の中継センサノード

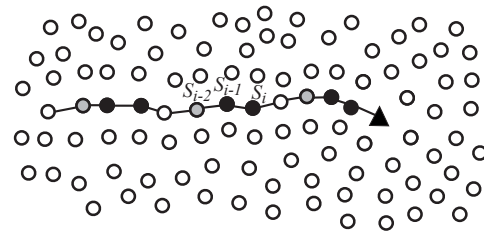


図3 バッファが満たされたセンサノード列

ド $\{S_{c_1}, \dots, S_{c_{k-1}}\}$ の通信バッファがセンサデータで閾値以上に満たされている場合を考える．配送経路上にあるセンサノードのみを用いてセンサデータを配送する場合には，図4に示すように，次ホップセンサノードの通信バッファに空きができるまでセンサデータの転送を行なうことができない．

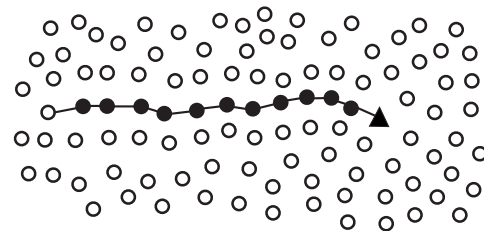


図4 従来手法による配送待ちセンサデータ

論文 [6] では，このように通信バッファに格納されて次ホップセンサノードの通信バッファに空きができるのを待つセンサデータを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格納する NeBuST (Neighbor Buffering for Congested Sensor Data Transmission) 手法を提案している．センサデータを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格納するために，図5に示すように，無線マルチホップ配送経路 R の各中継センサノード S_i に隣接する R に含まれないセンサノード 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

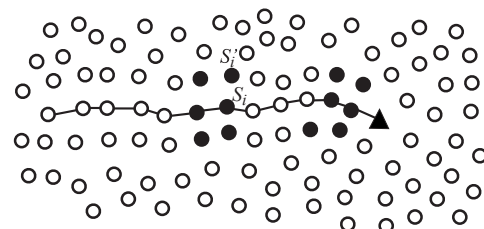


図5 NeBuST による配送待ちセンサデータ

るセンサノードである． S_{i-1} が S_i へのセンサデータ転送を試みた時に S_i の通信バッファに空きがない場合， S_i は S_{i-1} に対して nack メッセージを返信することで通信バッファに空きが無いことを明示的に通知し，これを受信した S_{i-1} は S'_i へのセンサデータ転送を試みる．この転送が成功したならば， S'_i は S_{i+1} を無線信号到達範囲に含むこと

から、 S_{i-1} の通信バッファにこのセンサデータを保持するよりも小さな遅延でシンクノードへマルチホップ配送することができる。なお、 S'_i の通信バッファにも空きがない場合には、 S_{i-1} の通信バッファにこのセンサデータを格納する。

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 S'_i を S_i のバックアップセンサノードとする^{*1}。このためには、 S_{i-1} のルーティングテーブルに次ホップノードとして S'_i を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 S'_i を次ホップセンサノードとしてセンサデータを転送するメッセージ配送プロトコルが必要となる。NeBuST 手法では、AODV-BR [2] の拡張によってこれを実現している。ここでは、送信元センサノード S_0 からフラッディングされた経路探索要求メッセージ $Rreq$ に対して、検出された S_0 から S_n までの無線マルチホップ配送経路 $R = \{S_0 \dots S_n\}$ を逆方向にユニキャスト配送される経路探索応答メッセージ $Rrep$ を中継センサノード S_i の隣接センサノードが傍受 (overhearing) することによって、バックアップセンサノードの検出とこれを中継するセンサデータ配送のためのルーティングテーブルの設定を実現する。

5. 提案手法

5.1 センサデータ転送手法

バーストセンサデータを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において、無線マルチホップ配送経路上の中継センサノードの通信バッファが満たされることによる配送遅延の短縮手法である NeBuST 手法では、1 ホップ隣接無線センサノードをオンデマンドにバックアップセンサノードとし、その通信バッファをも用いることによって、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。NeBuST 手法では、無線マルチホップ配送経路 $R = \{S_0 \dots S_n\}$ の中継センサノード S_i に対するバックアップセンサノード S'_i の通信バッファに格納されたセンサデータは、 S_i の次ホップセンサノード S_{i+1} へ転送される。これは、NeBuST 手法が主にシンクノード近辺において形成される通信バッファが満たされたセンサノード列を対象として設計されているためである。シンクノード近隣には、他のセンサノードからの無線マルチホップ配送経路が近接しているため、 S'_i の次ホップセンサノードとして他の無線マルチホップ配送経路に含まれない S_{i+1} 以外のものを定めることは困難である。論文 [6] で提案されている AODV-BR を拡張した経路探索プロトコルにおいても、 S_{i-1} のルーティング

テーブルに S'_i を加えるとともに、 S'_i のルーティングテーブルには S_{i+1} のみを登録することとしている。

ところが、3 章の実験結果が示すように、CSMA/CA を基礎とした無線 LAN プロトコルを用いてセンサデータを配送する無線センサネットワークでは、 R の任意の中継無線ノード S_i においてセンサデータが通信バッファを満たし、これが S_{i-1}, S_{i-2}, \dots の通信バッファを満たす原因となることで、バッファが満たされたセンサノード列が形成される (図 6)。シンクノード近隣に位置するのではない中継センサノード S_i においては、バックアップセンサノード S'_i が S_{i+1} ではなく、そのバックアップセンサノード S'_{i+1} が無線信号到達範囲に含まれるのであれば、 S'_i がセンサデータを S'_{i+1} へと転送することも可能である。さらに S'_i のバックアップセンサノード S''_i を定め、 S'_i の通信バッファが満たされた場合には、 S'_{i-1} が S''_i へと転送することによって、バーストセンサデータをよりシンクノードに近いセンサノードへと転送することができる (図 7)。すなわち、図 8 のように、無線マルチホップ配送経路 R の中継無線センサノード S_i で通信バッファが満たされたならば、配送途中のバーストセンサデータ群は次第に R から離れたセンサノードへと拡散しながらよりシンクノードに近いセンサノードの通信バッファへと格納される。このように、通信バッファに格納されたセンサデータは、そのセンサノードの次ホップセンサノードのバッファが閾値以上に満たされていないのであれば R とは無関係にこのセンサノードに転送される。このようにして、より配送遅延が短縮されたバーストセンサデータ配送を実現することができる。

5.2 ルーティング手法

前節で述べた拡張された NeBuST 手法では、送信元センサノード S_0 から送信先シンクノード S_n までの単一の無線マルチホップ配送経路 $R = \{S_0 \dots S_n\}$ とその中継センサノード S_i の隣接センサノード S'_i 以外のセンサノードも中継センサノードとして用いる。このように中継センサノード数が多く、広域に分散配置されている場合も想定されることから、NeBuST 手法で用いたリアクティブ型ルーティング手法ではなく、各センサノードがシンクノードに対する次ホップ中継センサノードの情報を保持するプロアクティブ型ルーティング手法を採用するのが適切である。これを実現する簡易な手法として、シンクノードが制御メッセージを定期的にフラッディングする手法が考えられる。

ここでは、TORA [4] の手法を応用してシンクノードからのホップ数を各センサノードが保持する手法を用いる。すなわち、フラッディングされる制御メッセージに初期値 0 のひとつの整数値をピギーバックし、これをブロードキャスト送信するセンサノードは、それまでに受信した制

*1 各中継センサノードに対して複数のバックアップセンサノードを定めることも可能である。

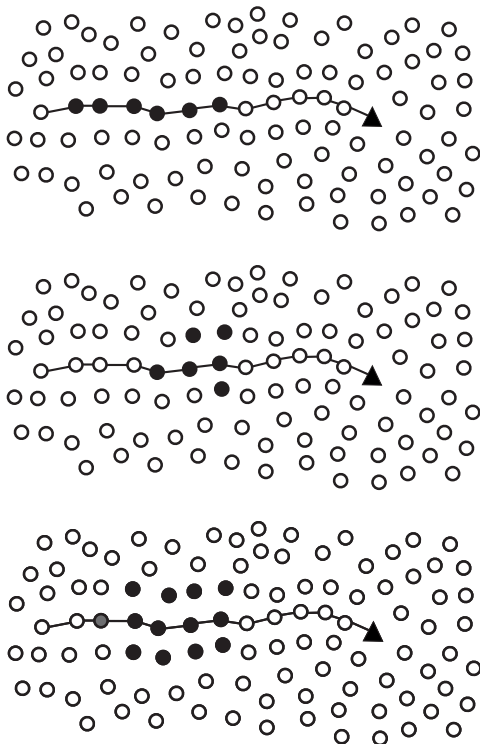


図 6 NeBuST 手法における配送待ちセンサデータ

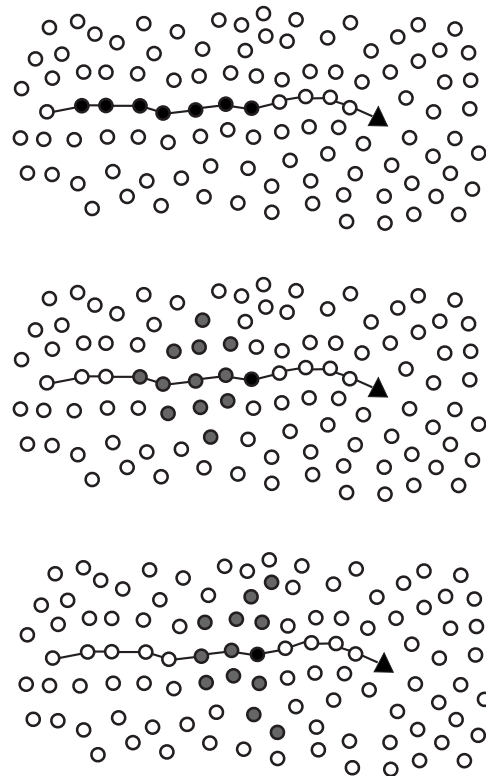


図 8 NeBuST-wide 手法による配送待ちセンサデータの拡散

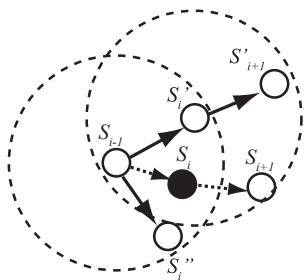


図 7 NeBuST-wide 手法における隣接センサノードへの転送手法

御メッセージにピギーバックされた最小の整数値に 1 を加えたものをピギーバックした制御メッセージを送信する。すべての隣接センサノードがブロードキャスト送信した制御メッセージを受信した*2センサノードは、受信した制御メッセージにピギーバックされていた最小の整数値をシンクノードまでの最小ホップ数として保持し、この値と自身の ID をピギーバックした制御メッセージをブロードキャスト送信する。これによって、各センサノードは、自身の前ホップセンサノード（複数）と次ホップセンサノード（複数）を得ることができる。前ホップセンサノードのいずれかから受信したセンサデータを、バッファが満たされていない次ホップセンサノードへと転送することによって、センサデータをシンクノードへと配送することができる。

*2 自身がこの制御メッセージをブロードキャスト送信する時にセットしたタイムアウトすることによって検出するのが一般的である。

6. 性能評価

提案手法である NeBuST-wide 手法では、あらかじめ定められた配送経路の次ホップセンサノードの通信バッファが満たされている場合、通信バッファに空きがある隣接ノードを動的に次ホップノードとして選択し、センサデータを転送する。この手法では、後続するバーストセンサデータの配送経路を動的に拡散し、シンクノードにより近い中継センサノードの通信バッファへと格納することで、配送遅延を短縮する。一方、あらかじめ送信元センサノードから送信先センサノードへの複数の経路を検出しておき、バーストセンサデータ群をこれらの複数経路に分割して配送する手法が提案されている。単一経路による配送と比較して、バーストセンサデータ群が分割配送されることから、通信バッファが満たされた中継センサノード列が形成される場合でもその列長を短縮することが可能である。そこで、ノード非共有の複数経路を検出するアドホックルーティングプロトコルである AODVM [3] によって検出した複数経路を用いてバーストセンサデータ群を配送する場合と比較することで、提案手法の性能を評価する。

シミュレーション環境は、2,000m × 2,000m の正方形領域の中央（対角線の交点）に送信先シンクノードを配置し、無線信号到達距離 100m で 5 つのセンサデータを格納可能な通信バッファを備えた無線センサノード 3,000 台を一様分布乱数によってランダムに配置する。シンクノードと無

線センサノードの移動，故障はないものとし，提案手法では5.2節で述べたルーティング手法により各無線センサノードの次ホップ無線センサノードを決定する．また，従来手法ではAODVMの適用によってあらかじめ複数の配送経路を検出する．AODVMではノード非共有の複数経路を検出するが，経路数は無線ノード配置と制御メッセージ交換タイミングによって定まる．提案手法と従来手法でそれぞれ図9と図10に示す無線マルチホップ配送経路を用い，送信元センサノードで毎秒30-50個のセンサデータが1.5-3.0秒間バースト的に生成されるものとする．シミュレーション実験開始後1.0-2.0秒間，シンクノードから300m以内に位置するセンサノードでは隣接センサノードからのセンサデータ転送に対して *nack* メッセージを返送することで中継センサデータによるセンサデータ転送を一時停止し，通信バッファが満たされたセンサノード群を生成する．

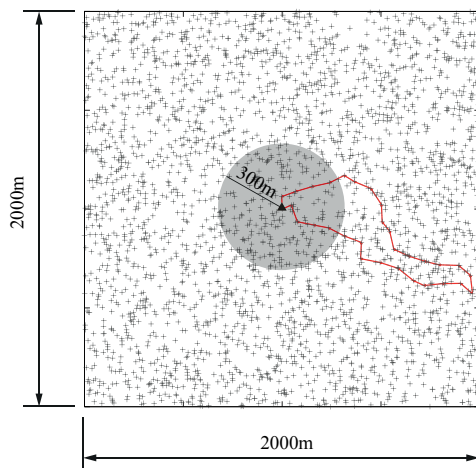


図9 従来手法 (AODVM)

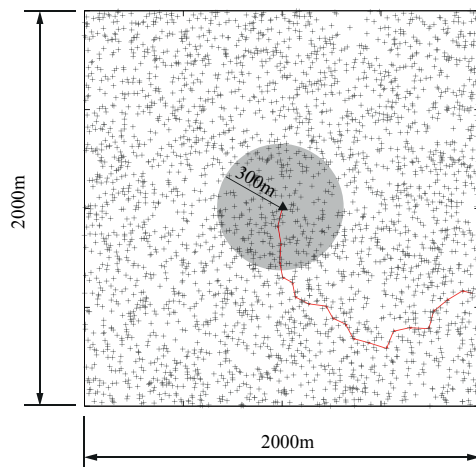


図10 提案手法 (NeBuST-wide)

すべてのバーストセンサデータが送信先シンクノードへ到達するまでの配送遅延を測定した結果を図11に示す．

NeBuST-wide手法を適用し，広域に分布するセンサノードを用いてセンサデータを転送することで，すべてのバーストセンサデータ送信条件において，センサデータ群の配送に要する時間が短縮されている．AODVMを適用した場合と比べて，NeBuST-wide手法は1.51%の配送遅延短縮を実現している．この結果から，あらかじめ定められた複数経路を用いてセンサデータを送信する手法よりも動的に定められる隣接中継無線ノードへと転送し，シンクノードにより近い中継センサノードにセンサデータをバッファリングする手法が有効であること，特にバーストセンサデータ数が多い場合により大きな効果が得られることがわかる．また，バーストセンサデータ配送を一時停止した時間に送信されたセンサデータがデータ配送再開後にシンクノードに到達するのに要する配送遅延の測定結果を図12に示す．先頭に近い一部を除いたほとんどのセンサデータについて，NeBuST-wideはAODVMよりも短時間にシンクノードへと配送されていることが分かる．これは，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が格納されており，それらの配送が互いに競合することを考慮しつつも提案手法の方がバッファリングされたセンサデータをより早くネットワークから取り除くことが可能であることを示している．測定範囲の平均として8.42%の短縮が実現されている．

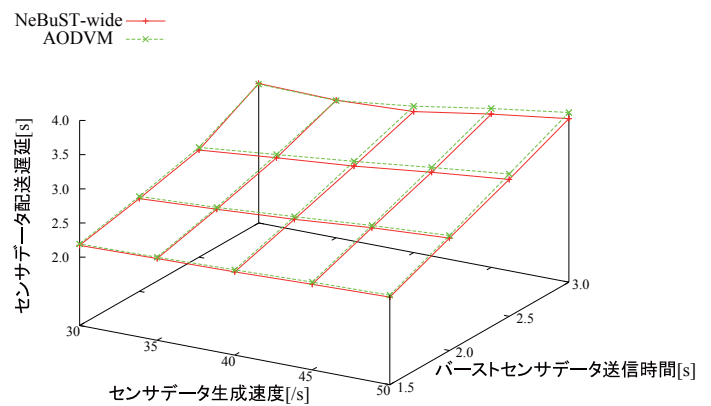


図11 センサデータ群配送遅延

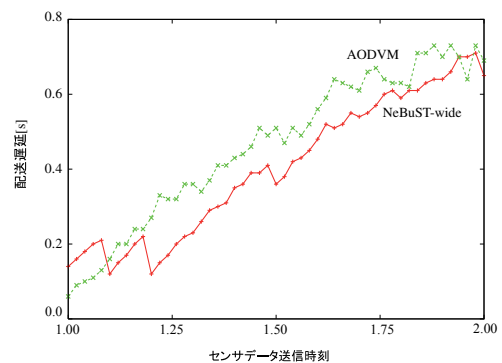


図12 センサデータ配送遅延

7. まとめ

本論文では、イベント駆動型センサネットワークにおいて生成されるバーストセンサデータを無線マルチホップ配送によって低遅延でシンクノードへ配送する NeBuST 手法の拡張について提案した。従来手法では、マルチホップ配送経路の 1 ホップ隣接無線センサノードの通信バッファを用いることによって、よりシンクノードに近いセンサノードへのセンサデータの格納を実現したが、本論文では、より広い領域に分布するセンサノードを用いることによって、さらに配送遅延を短縮する。これを実現するルーティングプロトコルを設計し、センサデータを拡散するための次ホップ中継センサノード選択手法を考案した。本手法の性能をシミュレーション実験により評価した結果、バーストセンサデータ群をより短時間にシンクノードへと配送することができること、特にバースト送信数が多く、バースト時間の長い配送が困難な環境における性能改善が優れていることが示された。本論文で述べた測定結果は限られたパラメータ設定でのみ得られたものである。今後はより広範囲の設定での評価を行なう必要がある。特に、センサデータのバッファリング状況の設定においてシンクノードから等距離の位置において転送を一時停止する方法は、従来手法の各経路で通信バッファが満たされたセンサデータの列がほぼ等しい長さになる。この長さの差違が大きい程すべてのセンサデータ配送を終えるのに要する時間が長くなる。一方、提案手法は動的に経路決定するために、バッファに格納されたセンサデータのシンクノードからの距離は均一になる傾向があることから、より大きな性能改善を見込むことができる。

参考文献

- [1] Culler, D.E. and Hong, W., "Wireless Sensor Networks," Communications of the ACM, Vol. 47, No. 6, pp. 30-33 (2004).
- [2] 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).
- [3] Motegi, S. and Horiuchi, H., "AODV-Based Multipath Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks," EICE TRANSACTIONS on Communications, Vol. E87-B, No. 9, pp. 2477-2483 (2004).
- [4] Park, V. and Corson, M., "Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA) Version 1 - Functional Specification," Internet Draft, MANET Working Group, draft-ietf-manet-tora-spec-04.txt (2001).
- [5] Perkins, C.E. and Royer, E.M., "Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing," RFC 3561 (2003).
- [6] Sakamoto, D. and Higaki, H., "Wireless Multihop Transmission with Buffering in Neighbor Sensor Nodes for Shorter Delay," Proceedings of the 10th IEEE International Wireless Communications and Networking Conference (2009).
- [7] "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).
- [8] "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 (LRW-PANs)," Standard IEEE 802.15.4 (2003).