

センサデータベースのためのクライアント参加型センサネットワーク

東京電機大学 理工学部

小野 真和 桧垣 博章 古田 勝久

E-mail: {masa,hig}@higlab.net, furuta@k.dendai.ac.jp

小型コンピュータに各種センサデバイスを接続したセンサノードを利用し、これらを無線ネットワークで相互に接続した無線センサネットワークの実現への要求が高まっている。無線ネットワークには長時間運用が要求されており、今までの研究等において、狭帯域な通信デバイスの採用や、センサデータを配送中に処理し、配送メッセージ数を削除することで消費電力を抑制する手法が採用されてきている。しかし、これらの手法は複数のセンサノードでスパンニングツリーを構築してマルチホップ配送でセンサデータを集約することを想定しているため、センサデータの配送によるセンサノードの消費電力量が増大してしまう問題がある。そこで、本研究では無線センサネットワーク内のセンサノードに加えて、クライアントとなる複数の移動ノードが存在する通信モデルに注目し、移動ノードがセンサデータの転送を行なうことによってセンサノードの消費電力を削減し、長期運用を実現する手法を提案する。

Client Participated Model of Sensor Networks for Sensor Databases

Masakazu Ono, Hiroaki Higaki and Katsuhisa Furuta

Department of Computers and Systems Engineering

Tokyo Denki University

E-mail: {masa,hig}@higlab.net, furuta@k.dendai.ac.jp

Achieving long-term operation of wireless sensor network which consists of wireless sensor nodes is highly required. Since sensor nodes are processing with battery, it is effective to reduce the number of messages which sensor nodes deliver. In traditional researches, this issue is resolved by deleting useless sensor data or by calculating sensor data on a sensor node under transmitting these data by multi-hop delivery. However, these researches premise on applying a spanning tree to sensor network. Hence, some sensor nodes which are upstream of the spanning tree are consuming own batteries more quickly than others and then disconnect from sensor network. Here, we pay attention to the model which client computers which use sensor data participates in a sensor network. And we propose a novel protocol for achieving long-term operation for the mode.

1 背景と目的

近年、集積回路などのハードウェア製造技術の高度化にともない、より小型で高性能なコンピュータが利用可能になっている。このような小型コンピュータに、気温、湿度、加速度などの数値を取得するセンサデバイスやカメラやマイクなどのマルチメディアデータを取得するセンサデバイスを接続したセンサノードが作られるようになってきた。さらに、このようなセンサノードに無線通信デバイスを搭載したセンサノードの研究開発が行なわれている。無線センサネットワークは数百から数

千個の無線センサノードを観測対象に対して高密度に設置してネットワークを構築する。無線センサネットワークは渋滞検出や流動量調査などの交通システム分野、環境モニタリングや気象観測などの環境保全分野、ホームネットワークなどの分野での利用が期待されている。

センサネットワークの長期運用を実現するためにセンサの消費電力を抑制する手法が必要となっている。センサノードはバッテリーで動作するため、あらかじめ電力供給などのインフラを必要としない利点があるがバッテリーの消費可能な電力量は限られている。そのため、センサノードの消費電力量を抑制することが求められる。

消費電力量を抑制するために、消費電力量の少ないハードウェアを実現したり、通信プロトコルなどのソフトウェアで実現する研究が行なわれている。ハードウェアである無線通信デバイスに注目したとき、IEEE802.11[1]などの無線LANで利用されているプロトコルは、広帯域を実現するためのさまざまな手法が利用されているため消費電力量が多い欠点がある。そこで、無線センサネットワークでは、無線通信は狭帯域であり、通信可能な距離は短い消費電力量が少なく、長期運用が可能なデバイスが利用される。たとえば、無線LANで利用されるIEEE802.11gは54Mbpsを実現することができるが、無線センサノードでの利用が期待されているIEEE802.15.4(ZigBee)[2]では250kbpsと、無線LANプロトコルと比較して狭帯域である。

ここで、センサネットワークに対するセンサデータ取得要求はフラッシングを利用して配送される。フラッシングと同時にセンサデータ配送のためのスパニングツリーを利用した経路を構築する。この経路構築手法は、センサノードに固有の識別子を取得しなくてよい利点がある。センサデータの配送に注目したとき、無線センサネットワークではすべてのセンサノードが互いに直接通信を行なうことができないため、センサデータの配送にマルチホップ配送が利用される。センサデータはスパニングツリーに沿ってマルチホップで配送される。このとき、1台のセンサノードが自身の取得したセンサデータ以外の複数のセンサデータを配送しなければならないため、マルチホップ配送の実現にはそれぞれの無線センサノードがより多くの電力を消費しなければならない。この問題に対し、センサデータをマルチホップで配送しているときに、センサノード上でデータの取捨選択や集計処理を行なうことにより無線センサネットワーク内を配送されるセンサデータのメッセージ数を削減する手法が提案されている [4]。

しかし、スパニングツリーの性質から、ツリーの上流に割り当てられたセンサノードは下流のセンサノードと比較してより多くのセンサデータを上流に配送しなければならない。そのため、センサノードの電力消費量に偏りが生じ、一部のセンサノードのバッテリー切れによる寿命が短くなる問題がある。また、複数の転送中のセンサデータが一部のセンサノードに集中的に集まるため、狭帯域なセンサネットワークでは輻輳が発生しやすくなる問題がある。

ここで、対象となるアプリケーションを考えると、アプリケーションによってはセンサデータを必要とするク

ライアントが車載コンピュータや携帯電話などのモバイルノードであり、センサネットワーク内を移動しながらセンサネットワークに対して問い合わせを行なう場合がある。そこで本論文では、そのような環境において、センサデータの中継にセンサネットワーク内のモバイルノードを利用することによって、センサノードによるマルチホップ配送を行わず、転送するセンサデータの数を削減し、センサネットワークの長期運用を実現する手法を提案する。

2 従来手法

2.1 クライアント非参加型センサネットワーク

従来の研究で対象となっているセンサネットワークのモデルは、センサネットワーク内のセンサノードから取得したセンサデータを利用するクライアントはセンサネットワークに参加しないモデルである (図1)。このモデルは、山林やジャングル、核汚染地帯などの人が立ち入ることができない危険地帯での利用が想定されている。

クライアントはクエリの発行を遠隔地から行なうことができる。クライアントから発行されたクエリはSinkとよばれるサーバを経由する。Sinkはクライアントからのクエリをセンサネットワークに配送したり、センサネットワークからのセンサデータを集約するサーバである。

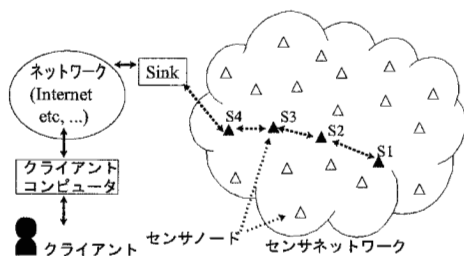


図1: クライアント非参加型センサネットワーク

センサノードからSinkにセンサデータを配送するとき、互いの無線信号が到達しない場合がある。このようなセンサノードとSinkが直接に通信が行なえない場合、センサノードとSinkの間で互いに直接通信可能な複数のセンサノードを経由して、センサデータをSinkまで配送する無線マルチホップ配送が利用される。例えば図1の場合、センサノードS₁が取得したセンサデータはS₂, S₃, S₄を経由してSinkまで配送される。

この形態の無線センサネットワークをクライアント非参加型センサネットワークとよぶこととする。

2.2 センサデータベース

センサネットワーク内の各センサノードが、センサデバイスから取得するセンサデータを情報源としてとらえ、センサネットワーク全体を大きなひとつのデータベースとして扱う研究が行なわれている。このようなセンサノードの集合から構成されるデータベースをセンサデータベースと呼ばれる。センサデータベースにアクセスする手法として、センサネットワークの構成(たとえば、センサノードの位置、センサノード上のセンサデバイスの種類、センサデータのデータ形式など)をセンサデータを取得するクライアント上のアプリケーションから隠蔽し、その代わりに統一されたアクセス方法を提供する手法が提案されている [3],[5]。また、MICA で利用される TinyOS 上で動作する TinyDB では、センサネットワークに対する問合せを SQL のような文法で表記することが可能である。また、実環境に依存した情報検索手法として、検索対象とするセンサノードの存在する範囲や計測時間などの属性が定義されている。

ここで、センサネットワーク内のセンサノードからセンサデータを取得するための手法が必要である。センサノードは高い密度で設置される点や、センサの故障や移動などによりネットワークポロジが動的に変化してしまうため、各センサノードに固有の識別子を設定し、クライアントがその識別子を指定して通信を行なうような通信手法を実現するのは難しい。センサノードの識別子を利用して通信を行なうには、センサノードの論理的な識別子と物理的な位置情報を結び付けるにはディレクトリサービスを実現し、常に各センサノードの位置情報と識別子を対応付けるための更新作業を行なわなければならない。これにより、センサノードの故障や移動などによるネットワークポロジの変化が大きいセンサネットワークでは帯域がディレクトリサービスのためのバケットによって占有されてしまったり、メッセージの配送のためにセンサノードの電力消費量が大きくなってしまいう問題が発生する。以上のことから、センサネットワークではセンサデータ取得時にセンサノードを一意に識別することなく、クライアントのクエリ送信およびセンサノードからのセンサデータ取得を行なうことができる手法が要求される。

この要求に対して、クライアントのクエリをフラッディングを利用して配送し、同時にセンサノードからクライアントまでのセンサデータの配送経路としてスパニ

ングツリーを構築することで、センサノードの識別子に依存せずにセンサデータを取得が実現できる手法が提案されている [3, 4, 5]。

フラッディングは無線通信がブロードキャストベースである点を利用したデータ配信手法である。あるノードがブロードキャストを開始したクエリは、そのノードの近隣のすべてのノードに配送することができる。そのクエリを受信したノードは、過去に同一のクエリを受信していなければ、同一のクエリを自身の近隣にブロードキャストする。このようにすることによって、センサネットワーク内のすべてのノードにメッセージを配送することが可能となる(図2)。

クエリがネットワーク内を配送される時、各無線センサノードから同時にクライアントまでの通信路を構築する。この通信路はクエリの送信元をルートとするスパニングツリーを構築することができる。このツリーの葉を利用することによって、センサデータをセンサノードからクライアントまでマルチホップで配送することが可能となる(図3)。

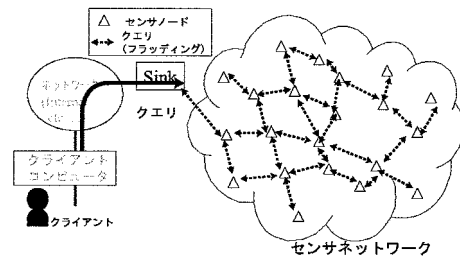


図2: クエリのフラッディング

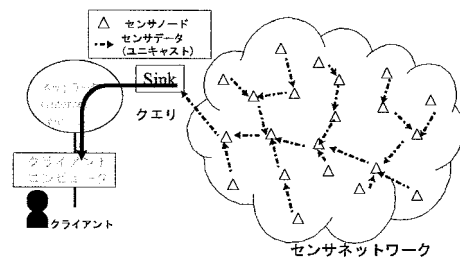


図3: スパニングツリーを利用したセンサデータ収集

ここで、センサノードの電力消費量削減のため、センサデータを途中の中継ノード上において処理する手法が提案されている [4]。論文 [4] では、クライアントが発行するクエリが平均値や総和などの集計値を求めるアプリ

ケーションを想定し、途中の中継ノード上において集計処理を行ない、集計結果のみをツリーの上流ノードに配送する手法である。この手法を利用することによって、クライアントに配送されるセンサデータ数が抑制できることと、クライアントが入手するセンサデータは集計処理が行なわれているセンサデータであるので、クライアント上ですべてのセンサデータを計算しなくてよい利点もある。

しかしながら、センサデータの配送にスパニングツリーを利用した場合、転送されるセンサデータが一部のセンサノードに集中する問題が考えられる。センサデータを集約するとき、Sinkを頂点としたスパニングツリーが構築される。Sinkに隣接するセンサノードがスパニングツリーの上流になるため、下流から転送されるセンサデータが上流のセンサノードに集中することになり、上流のセンサノードではメッセージ転送によって、より多くの電力を消費することになる。このとき、使用可能な電力がなくなったセンサノードはセンサネットワークから切断される。Sinkの近隣のセンサノードがセンサネットワークから切断され、Sinkがどのセンサノードとも通信できなくなると、他のセンサノードが利用可能であったとしてもそのセンサネットワーク全体が利用できなくなってしまう。

そこで、この問題に対し、対象となるセンサネットワークを限定したうえでセンサノードにマルチホップ配送とスパニングツリーの適用を行なわないことでセンサノードの消費電力量を削減し、センサネットワークの長期運用を実現する手法を提案する。

3 提案手法

3.1 クライアント参加型センサネットワーク

センサネットワーク内にクライアントが存在し、自律的に移動しているモデルを考える(図4)。

無線センサネットワークは、センシングを行なうセンサノードと無線センサネットワーク内でセンサノードからセンサデータを取得したり利用するモバイルノードから構成される。このような無線センサネットワークは、市街における交通システムや天候測定、ホームネットワークなど、クライアントがセンサネットワーク内に存在し、センサネットワーク内のセンサノードからセンサデータを取得して利用することが想定される。

無線センサノードはセンサデバイスと狭帯域な無線通信デバイスを持つ。ここで、無線センサノードは自身

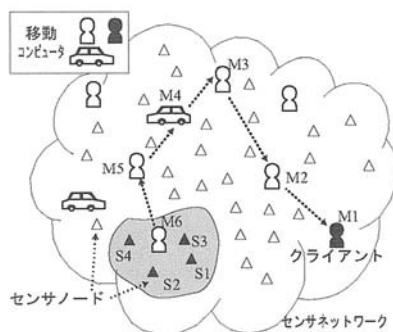


図4: クライアント参加型センサネットワーク

が設定した周期でセンサデバイスからセンサデータを取得し、マイクロコンピュータのメモリ上に一定期間保存するものとする。

モバイルノードは無線センサネットワーク内を自律的に移動し、センサノードからセンサデータを取得、利用する。モバイルノードは人が持ち運んだり、自動車や自律移動型ロボットなどに搭載されるコンピュータであり、センサノードと比較して高性能であり、IEEE802.11などの広帯域な通信を行なえる無線通信デバイス、再充電可能なバッテリーを搭載している。

センサノードはモバイルノードからセンサデータの要求を受信したときのみ、センサデータをモバイルノードに配送する。このとき、センサノードはマルチホップ配送を行なわない。したがって、モバイルノードがセンサデータを取得するとき、直接通信可能なセンサノードからのみセンサデータを取得することが可能である。モバイルノード間の通信はマルチホップ配送が実現可能であり、モバイルノードがセンサネットワーク内の遠隔地からセンサデータを取得したいとき、その地点に存在する別のモバイルノードからセンサデータを經由してセンサデータを取得することができる。たとえば、図4において、 M_1 が取得したいセンサデータが M_6 の周辺から取得できるとき、 M_6 から M_5, M_4, M_3, M_2, M_1 の順にモバイルノードを經由してセンサデータを収集する。

ここで、この通信モデルをクライアント参加型センサネットワークと呼ぶこととする。

3.2 センサデータ取得手法

クライアント参加型センサネットワークにおいて、センサデータを取得する概要について以下に示す。

- 1) センサデータの取得を開始するクライアントとなるモバイルコンピュータはクエリを作成する(図5)。

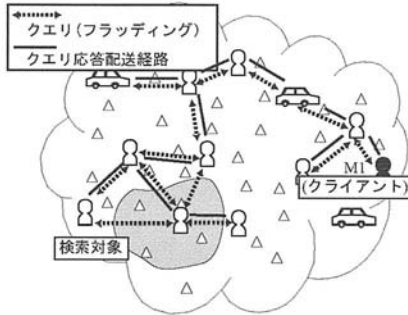


図5: クエリのフラッディング

- 2) クライアントはクエリをセンサネットワーク内のモバイルノードにフラッディングを利用して配送する。
- 3) フラッディングによってクエリを受信したモバイルノードはクエリの処理を開始する。これとともに、初回に受信したクエリの送信元を上流とするスパニングツリーを作成する。このとき、センサノードはクエリを受信したとしても処理をせず破棄する。
- 4) クエリの処理を開始したモバイルノードは自身がセンサデータを取得すべきかどうかクエリから判断する。
- 5) モバイルノードはセンサデータの取得が必要なとき、直接通信可能なセンサノードからセンサデータを取得する(図6)。

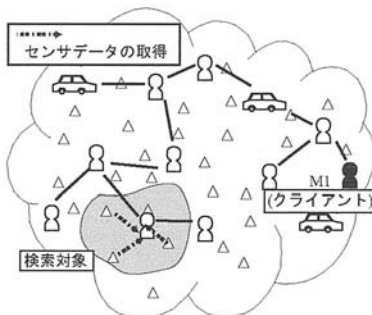


図6: センサデータの取得

- 6) センサデータを取得したモバイルノードはセンサデータを上流のモバイルノードに転送する。また、センサデータの取得が必要ないと判断したモバイルノードは対象外である情報を上流に配送する。
- 7) ツリーの上流に位置するモバイルノードは下流のすべてのモバイルノードからセンサデータあるいは対象外である情報を入手したら、下流のモバイルノードから取得したセンサデータに自身の情報を付加してさらに上流のモバイルノードに配送する(図7)。

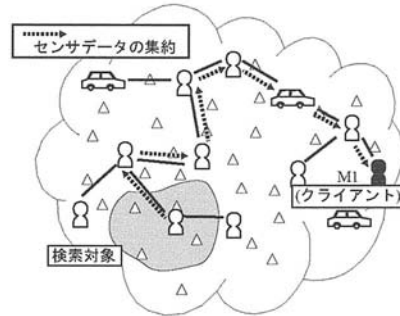


図7: センサデータの集約

- 8) 7)を繰り返すことによって、すべてのセンサデータはクライアントまで配送される

4 評価

クライアント非参加モデルとクライアント参加モデルにおけるセンサノードのメッセージ配送数についてシミュレーションによって評価した。通信半径50mのセンサノードを1000m×1000mのフィールドにランダムに配置した。

クライアント非参加型センサネットワークにおける集約サーバはフィールドの中心に配置した。センサデータの取得対象となるセンサノードをフィールド内の半径100mの円形の領域を1つ設定し、その領域に含まれるセンサノードのセンサデータを集約サーバへマルチホップ配送することとした。クライアント参加型センサネットワークにおいては、対象の領域内に存在するモバイルノードが近隣のセンサノードからセンサデータを取得することとした。

図8は、それぞれのセンサノードの配置密度において、各センサノードが転送したセンサデータの総和を表している。従来手法はセンサノードから集約サーバまでマルチホップ配送を行なっているためオーバーヘッドが大

きい。それに対し、提案手法では近隣のセンサノードからのみセンサデータを取得するため、センサノードが転送しなければならないセンサデータ数は従来手法と比較してそれぞれ約70%の転送メッセージ数を削減できている。

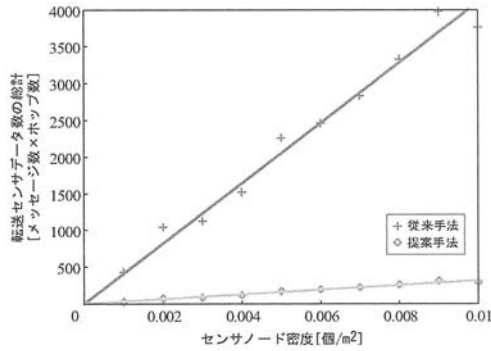


図 8: センサデータ転送数の比較

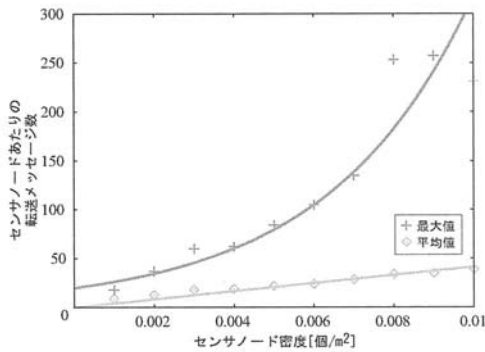


図 9: 従来手法でのセンサノードあたりの転送メッセージ数

また、スパニングツリーを利用するため、ツリーの最上流に位置するセンサノードではセンサデータの転送数が増え、他のセンサデータと比較して大きくなってしまいます(図9)。センサノードの密度が高くなるにつれ、最上流ノードでは転送センサデータ数が増える。したがって、集約サーバ周辺のセンサノードのバッテリー消費に起因する寿命が他のセンサノードよりも短くなる。集約サーバとセンサノード間の経路が切断されるとセンサネットワークが利用できなくなってしまうため、ネットワーク全体の寿命も短くなってしまいます。それに対し、提案手法では移動ノードが周辺のセンサノードからセンサデータを取得するため、一部のセンサノードがセンサノード間の

通信によって寿命が短く一部のセンサノードがバッテリー消費による寿命によって通信できなくなっても、ネットワーク全体が利用できなくなる問題が発生しない利点がある。

以上のことから、クライアント参加型センサネットワークにおいて、モバイルノードをセンサデータの収集や転送に利用することによってセンサノードの転送メッセージ数を削減する効果を示すことができた。

5 まとめと今後の課題

本研究では、新たにクライアント参加型センサネットワークを定義した。クライアント非参加型センサネットワークでは複数のセンサノードがクライアントまでマルチホップで転送していたセンサデータを、センサネットワーク内に存在するモバイルノードに代行させることでセンサノードが転送するメッセージ数を削減し、消費電力を抑制する手法を提案した。また、従来手法との比較を行ない、メッセージ数が約70%削減できることを示した。今後の課題は、モバイルノードにおけるセンサデータのキャッシュについて検討し、キャッシュを利用することによるセンサノードの通信を削減する手法について検討していく。

参考文献

- [1] “Local and metropolitan area networks- Specific requirements- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,” Standard IEEE 802.11 (1999).
- [2] “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).
- [3] Intanagonwiwat, C., Govindan, R., Estrin, D. and Heidemann, J., “Directed Diffusion for Wireless Sensor Networking,” IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 11, No. 1, pp. 2–16(2003).
- [4] Madden, S.R., Szewczyk, R., Franklin, M.J. and Culler, “Supporting Aggregate Queries Over Ad-Hoc Wireless Sensor Networks,” Proc. of 4th IEEE Workshop on Mobile Computing and Systems Applications (WMCSA), pp.49–58(2002).
- [5] Yao, Y. and Gehrke, J., “The Cougar Approach to In-Network Query Processing in Sensor Networks,” ACM SIGMOD Record., Vol. 31, No. 3, pp. 9–18(2002).