

## 長期運用を実現するセンサデータベースのための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。それに対し、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モバイルノードが存在する通信モデルに注目し、モバイルノードを利用した手法を提案している。本論文ではモバイルノードの接続率を考慮したときのセンサノードの接続率に関する評価を示す。

### 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-

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、無線センサネットワーク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ディングを利用して配送される。フラッディ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、センサネットワーク内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ネットワーク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台のセンサネットワーク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ネットワーク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、センサネットワーク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ネットワークは下流のセンサネットワーク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、センサネットワークの電力消費量が偏りが生じ、一部のセンサネットワーク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ネットワーク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、センサネットワーク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ネットワーク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。

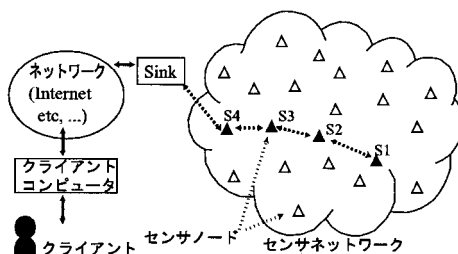


図1: クライアント非参加型センサネットワーク

センサネットワークから 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。このようなセンサネットワークと Sink が直接に通信が行なえない場合、センサネットワークと Sink の間で互いに直接通信可能な複数のセンサネットワークを経由して、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、センサネットワーク  $S_1$  が取得したセンサデータは  $S_2, S_3, S_4$  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ネットワークが、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パ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的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ド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]。

フラッド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)。

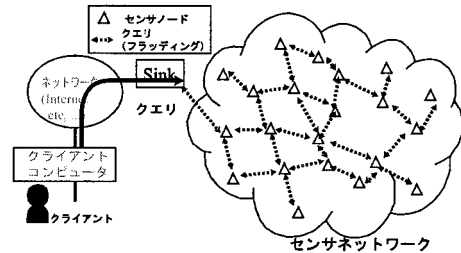


図 2: クエリのフラッドディング

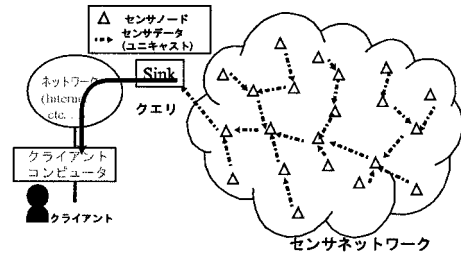


図 3: スパニングツリーを利用したセンサデータ収集

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)。

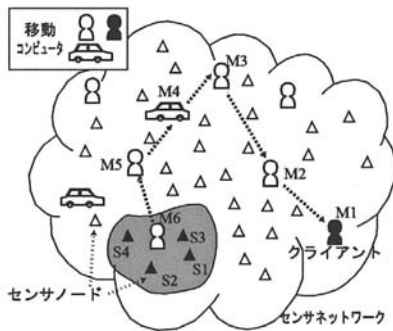


図4: クライアント参加型センサネットワーク

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)。
- 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。

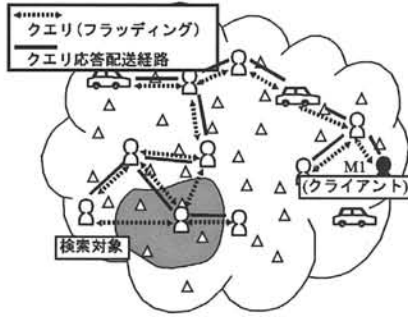


図 5: クエリのフラッディング

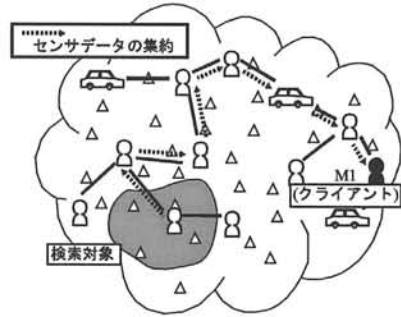


図 7: センサデータの集約

- 5) モバイルノードはセンサデータの取得が必要なとき、センサノードからセンサデータを取得する (図 6)。ここで、センサノード間でマルチホップ配送を行なうことによりセンサデータの取得数を増やすことも可能である。このとき、要求の送信を開始したモバイルノードを頂点としたスパニングツリーを形成することが可能である。

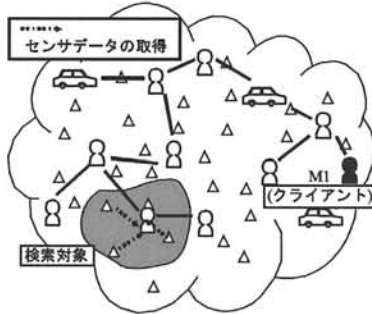


図 6: センサデータの取得

- 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)。
- 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

論文 [6] において、従来手法と比較して提案手法ではセンサノードにおける配送センサデータ数が削減できていることが示している。クライアント参加型モデルでは、センサノードからセンサデータが取得できるかどうかについてモバイルノードの配置密度に依存するが、論文 [6] では評価されていなかった。

そこで、クライアント参加型モデルにおける、フィールド上の全センサノードに対するクライアントとなるモバイルコンピュータから到達可能なセンサノードの比 (センサノードの接続率) についてシミュレーションにより評価を行なった。シミュレーション結果 (図 8,9) は、5000m × 5000m のフィールド上に、5000 台あるいは 10000 台のセンサノードを配置した時のセンサノードの接続率に対するモバイルノード密度について示している。

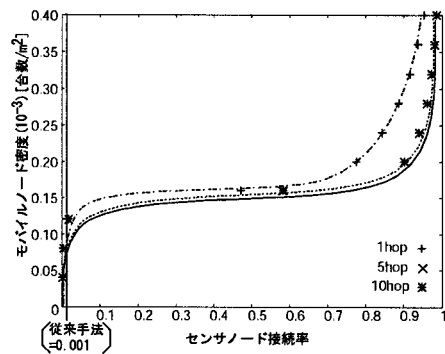


図 8: 接続率に対するモバイルノード密度 (センサノード 5000 台)

図 8,9 中の 1hop, 5hop, 10hop はそれぞれ、モバイル

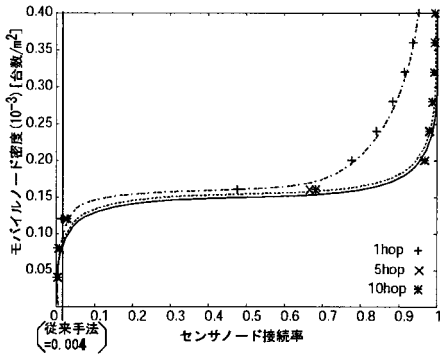


図 9: 接続率に対するモバイルノード密度 (センサノード 10000 台)

ノードを頂点とするスパニングツリーにおけるモバイルノードからセンサノードまで到達するために必要なホップ数の上限を示している。たとえば、1hop はモバイルノードとセンサノードが互いに通信可能な場合のみを接続可能なセンサノードとしている。5hop はモバイルノードからセンサノードを 5hop 中継することで到達可能なセンサノードを示している。どの場合においても、あるセンサノードがすでに他のモバイルノードやセンサノードとスパニングツリーを形成している場合は、他のスパニングツリーには属さないものとして計算している。

図 8 において、センサノードの接続率が 0.9 を達成するためにはモバイルノードの密度が 1hop の場合で  $0.32 \times 10^{-3}$ 、5hop および 10hop の場合で  $0.2 \times 10^{-3}$  以上になる必要がある。ここで、センサノード間でマルチホップ配送を利用する 5hop および 10hop はマルチホップ配送を行わない 1hop に対してより小さいモバイルノード密度で高いセンサノード接続率を得ることができる。同様に図 9 においても、5hop および 10hop の方が 1hop よりも小さいモバイルノード密度で高いセンサノードを得ることが可能となっている。また、図 8 と図 9 を比較すると、センサノードの配置密度が高いほうがモバイルノードの密度が低い場合においても高いセンサノード接続率を得ることが可能であることが示された。

それぞれの環境において、従来のセンサネットワークとクライアントネットワークが Sink を介する手法を利用した時のモバイルノード接続率はそれぞれ 0.001 (センサノード 5000 台) および 0.004 (センサノード 1000 台) である。これは、モバイルノードの密度がそれぞれ  $0.04 \times 10^{-3}$  および  $0.08 \times 10^{-3}$  で実現することができることから、センサノードの密度が低い場合においてもモバイルノードを利用することによって高いセンサノ

ード接続率を実現し、より多くのセンサデータが利用可能であることが示された。

## 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配送するメッセージ数を削減し、消費電力量を抑制する手法を提案した。また、評価を行ない、従来手法に対してセンサノードの接続率が向上できていることを示した。今後の課題は、センサノード接続率をクライアントネットワークで評価し、各モバイルネットワークが自律的に生成するスパニングツリーのサイズを決定して、クライアントが要求するセンサノード接続率を満たす手法について検討を行なう。

## 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] Intanagonwivat, 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).
- [6] 小野, 桧垣, 古田, "センサデータベースのためのクライアント参加型ネットワーク," 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会, 情処研報 Vol. 2007, No. 16, pp.339-344(2007).