

## モバイルネットワークを利用した長期運用実現のための センサネットワークの実現手法

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、センサネットワーク内の異なる2つの領域に対してクエリを発行するとき、センサデータを含むクエリ応答を中継する移動コンピュータ上において集約、演算処理を行なうことにより、センサネットワーク内を配送するセンサデータ数を削減する手法を検討する。

### 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が偏りが生じ、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なわず、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 クライアント非混在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。

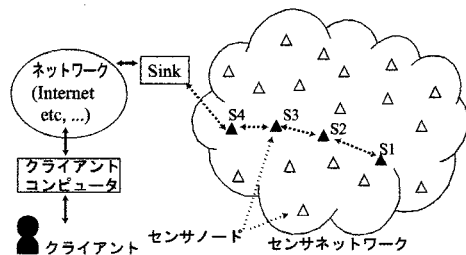


図1: クライアント非混在型センサネットワーク

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 $S_1$ 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混在型センサネットワークとよぶこととする。

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ン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]。

## 2.2 クライアント混在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 2)。

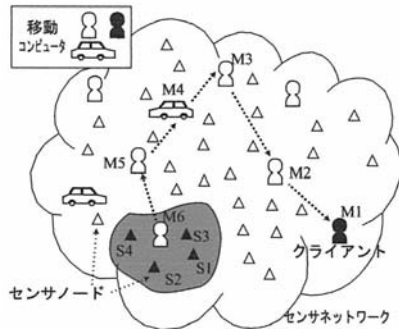


図 2: クライアント混在型センサネットワーク

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 2 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混在型センサネットワークと呼ぶこととする。

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 3)。

クエリがネットワーク内を配送されるとき、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4)。

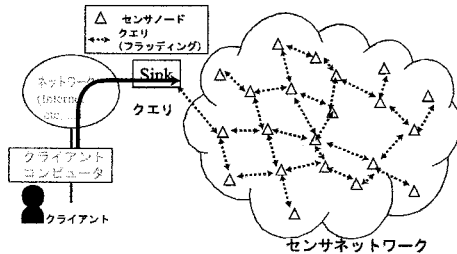


図 3: クエリのフラッディング

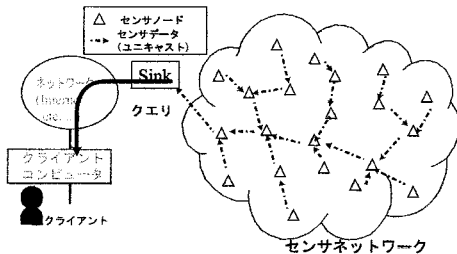


図 4: スパニングツリーを利用したセンサデータ収集

### 2.3 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。

ネットワークの長期運用の観点から、センサノードの電力消費量削減のためにセンサデータを中継するセンサノード上において、他のセンサノードが取得したセンサデータを含めた、センサデータの集合に対して演算処理を施す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。

ここで、1つのクエリをよって、1つのセンサネットワーク内の複数の領域を対象とした検索を行ない、複数の領域から得られるセンサデータをセンサネットワーク内で演算を行なう場合を考える。従来手法では、センサネットワーク内の全体あるいはひとつの特定の領域で得られたセンサデータに対して演算を行なうことを想定している。そのため、複数の領域から取得したセンサデータに対する演算は、それぞれの領域から個別にセンサデータの集合を取得し、Sinkサーバ上において演算を行なわなければならない、配送コストが高くなってしま(図5)。

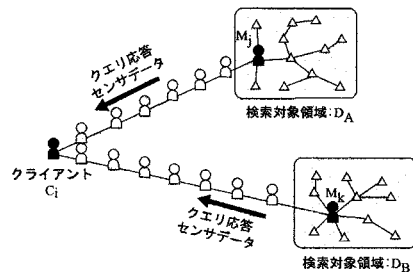


図 5: 複数の領域からのセンサデータの配送

そこで、本論文では、クライアント混在型センサネットワークにおいて複数の領域に対して集約可能なセンサデータ取得クエリを発行した場合に、各領域内における集約処理を行なったそれぞれの結果をクライアントまでの転送経路上のモバイルコンピュータにおいてさらに演算処理を行なうことで、配送するセンサデータ数を削減する手法について検討する。このとき、各領域のセンサデータの集約や演算処理を行なうモバイルノードを動的に決定することで、配送するセンサデータ数をできるだけ削減することを目的とする。

### 3 提案手法

クライアント混在型センサネットワークにおいては、クライアントとなるモバイルコンピュータがセンサネットワーク内に存在する。モバイルコンピュータは相互に無線ネットワークで接続され、アドホックネットワークが形成されている。各モバイルノードは自身の位置情報をGPSなどによって取得可能であるが、センサノードは位置情報を取得できないものとする。各モバイルコンピュータはクライアントのクエリを解釈し、センサノードと通信を行ないセンサデータの収集を行なう。他のモバイルノードを中継してマルチホップでセンサデータをクライアントまで配送することが可能である。また、クライアントが長期間にわたって2つの検索対象領域を同時に検索し、集約を行なうモデルを考える。

無線センサネットワークにおいて、図5に示すような複数の領域へのセンサデータ収集クエリの発行とセンサデータの収集を考える。従来ではこのような複数の領域にまたがるセンサデータの集約はクライアントコンピュータ上か、クエリのフラッディングによって生成されるスパンニングツリー上で生成された経路上のコンピュータによって行なわれている。

ここで、各領域からクライアントまで転送されるセンサデータを途中のセンサデータにおいて集計可能とし、センサデータを削減する手法について提案する。たとえば、クライアント  $C_i$  が領域  $D_A$  と領域  $D_B$  に対して同じ性質のクエリを発行し、その結果  $R_A, R_B$  を  $C_i$  に返信するとき、クエリ結果  $R_A$  と  $R_B$  を直接  $C_i$  に返信した場合、それぞれの配送コスト  $Cost_A$  と  $Cost_B$  を要する。ここで、中継モバイルノード  $M_j$  において、 $R_A$  および  $R_B$  を集約し、センサデータ数を削減した  $R_{AB}$  を生成して  $C_i$  に送信することができれば、 $R_A$  および  $R_B$  を個別に配送するよりも通信コストを削減することが可能である(図6)。

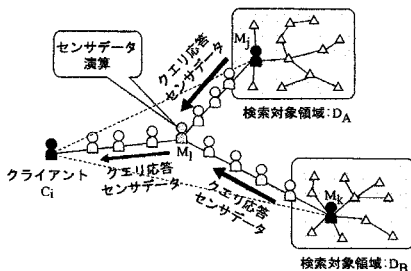


図 6: 中継モバイルノードを利用したセンサデータの削減

このとき、中継モバイルノードを決定することが要求される。しかし、モバイルノードは移動しており、必ずしもクライアントが想定する位置に存在するとは限らない。そのため、クライアントはジオキャストのような物理的な位置情報を用いる手法を利用する。このようにすれば、集約および演算するの決定は、クエリ要求・応答以外の新たな制御メッセージを利用せずにクライアントコンピュータ上で集約・演算を行なうモバイルノードが決定できる。クライアントは、検索対象位置を利用して中継対象領域の決定を行ない、この情報をクエリに付加し、中継対象領域に向かってクエリを送信する。各モバイルノードはクエリに付加されている中継対象領域情報を参照し、自身が対象領域に存在するのであれば、自身が配送するクエリに転送先を自身にするような情報を付加する。こうすることで、センサデータを中継対象領域に配送することが可能である。以降、検索対象領域にクエリを配送し、検索対象領域から中継モバイルノード、クライアントまでの経路を構築する。このようにすることで、複数の領域へのクエリの応答を中継モバイルノード上に集約し、演算が可能となる。

中継モバイルノードを経由することにより、クライアントと検索対象領域間の経路を直接構築するよりも経路が長くなり、ホップ数が増加する。たとえば、図6において、クライアント  $C_i$  と  $M_j$  間を直接接続するより、 $M_j$  を経由して相互に経路を構築すると経路長が長くなる。したがって、長くなった経路長に対して中継モバイルノードにおいてセンサデータ数がより削減できることが求められる。

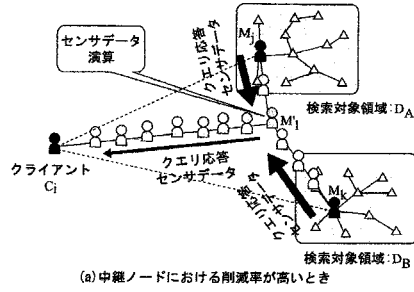
本論文ではクライアントは今までに発行した同一クエリの応答を利用して中継モバイルノードの決定を行なうこととする。各検索対象領域で得られたセンサデータが、中継モバイルノード上における演算でデータ数が削減できればできるほど、中継対象領域は検索対象に接近しさせ、データ数の削減をねらう(図7(a))。また、中継モバイルノード上で削減できなければ中継対象領域をクライアントに接近させ、経路長を短くし、転送ホップ数を小さく抑えることをねらう(図7(b))。

このようにすることで、ネットワーク内のセンサデータ転送量を抑制することが実現できる。

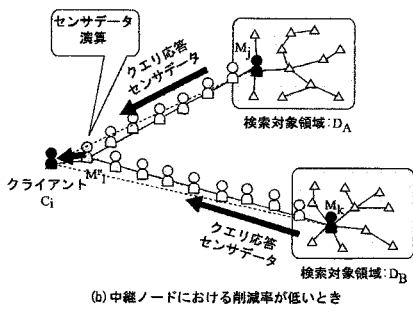
### 4 評価

以下のネットワークポロジにおいて、中継モバイルノード  $M_j$  を利用することによって削減するセンサデータ数の評価を行なった。

センサノードの配置密度  $0.04$  個/ $m^2$  のフィールドに、



(a) 中継ノードにおける削減率が高いとき



(b) 中継ノードにおける削減率が低いとき

図 7: センサデータ削減率による中継ノードの変更

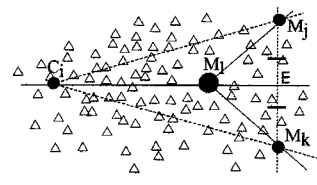


図 8: ネットワークトポロジ

モバイルノードを配置した。検索対象領域内のモバイルノードをそれぞれ  $M_j, M_k$  はそれぞれクライアント  $C_i$  から  $200m$  離れている。また、中継対象ノードは  $C_i$  から  $M_j, M_k$  を結ぶ線を 2 等分する線上に配置することとした。また、 $C_i$  からの距離を  $(1 - \frac{\text{集計処理後データ量}}{\text{集計処理前データ量}})C_i E$  とした。このとき、 $M_i$  に入力データ数を 1 から 200,  $M_i$  から出力されるデータ数を 1 から 50 とした。

図 9 に、提案手法を利用した際の配送データ削減数を示す。中継モバイルノードを利用することにより、センサデータ数を削減できることから、ネットワーク内を配送されるセンサデータの総数を抑制することが可能である。

## 5 まとめと今後の課題

本論文では、クライアント混在型センサネットワークにおいて、ひとつのクエリで複数の検索対象領域を

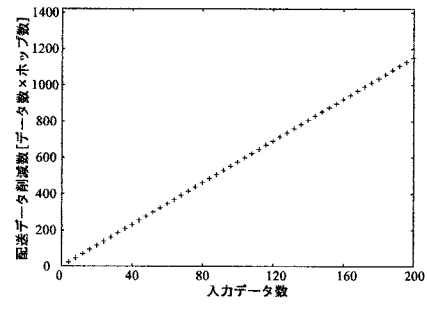


図 9: 配送データ削減数

検索し、センサネットワーク内のモバイルノードを中継モバイルノードとして定め、このノードにおいて各検索対象領域から受信したセンサデータを集計・演算することによってセンサデータ数を削減する手法について検討した。

今後の課題は、中継モバイルノードの選択手法の検討、およびセンサデータを取得および中継するモバイルノード上においてクエリの演算内容に基づき、クエリの計算順序を正しい値が取得可能な範囲で交換した上で集計処理を行なうことによって、中継するセンサデータ数を削減する手法について検討する。また、2つ以上の領域に対するクエリの発行およびセンサデータの収集・演算手法について検討する。

## 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] Intanagoniwat, 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, 情報処理 Vol. 2007, No. 16, pp.339-344(2007).