

同期センサデータ取得を実現するためのセンサデータベースの実現手法

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、センサデータの精度向上や画像などの大容量データの配送への要求が高まっており、無線センサネットワーク内のセンサノードのみで配送することはセンサデータの通信遅延や紛失を引き起こすだけでなく、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。また、センサデータを利用するクライアントがセンサネットワークに対して問い合わせる場合、従来はセンサネットワーク内の対象を明示的に指定することが想定されてきた。したがって、クライアントがセンサネットワーク内の検索対象が明確でない場合の問合せを行なう場合は、あらかじめ対象を決めるための問合せを行なってセンサデータを入手して検討した後もう一度クエリを送信するか、すべてのセンサデータを入手してクライアント上で必要なデータを抽出しなければならない。本研究では、以上の2つの問題を解決する手法を検討する。まず、無線センサネットワーク内に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を定義し、モバイルノードがセンサデータの配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。そして、その通信モデルにおいてクライアントが検索対象を明示的に指定できない場合のアプリケーション例をあげつつ、モバイルノード群がセンサネットワーク内のセンサデータの中から自律的に対象を決定し、その対象のセンサデータを同期センサデータとして収集する手法を検討する。

Collection of Synchronized Sensing Data in Wireless Sensor Networks

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

There is rising demand that achieving wireless sensor networks which is constructed by sensor nodes that small-sized computers connect sensor devices. Some application require that synchronized datas sensed from sensor nodes in wireless sensor network. In contrast, it is difficult that sensor nodes synchronize each other in wireless network before getting sensor data from sensor devices in sensor nodes. In this paper, we definition synchronized sensing data and propose a novel collection technique that unsatisfied sensed data from client requirement is dropped on a forwarding sensor node.

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、無線センサノードの研究開発がさかんに行なわれている。

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。

無線センサネットワークにおいてさまざまな問題が検討されているが、本論文では以下に注目する。

- 1) センサの消費電力を抑制する手法
- 2) センサデータ収集のためのクエリ発行およびデータ収集手法

1) は、センサネットワークの長期運用を実現するために必要となっている。無線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、無線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るが電力消費量が少なく、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。

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。無線マルチホップ配送の利用は、1台の無線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問題がある。この問題に対し、従来の研究ではセンサデータをマルチホップで配送しているときに、無線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]。

しかしながら、今後センサデバイスが取得するセンサデータの分解能向上や音声や画像、動画などのマルチメディアデータといった大容量データの配送が必要となったとき、無線センサノードによるマルチホップ配送では、長期運用のために狭帯域な無線通信デバイスを採用している無線センサノードがこれらのセンサデータを配送したとき、配送遅延やバッファあふれによるデータ紛失などの問題が発生すると考えられる。また、センサノードによる大容量データのマルチホップ配送はセンサデータの電力消費量を大きくする問題がある。

2) は、センサネットワークに対してセンサデータを取得するクライアントの要求を配送する手法およびその結果をクライアントに返信するための手法である。

現在提案されているセンサデータ取得手法では、クライアントとなるコンピュータがクエリを送信する場合、クライアントが取得しようとする対象が明らかな場合を想定している。例えば、天気観測システムでは特定の地名(東京、大阪など)や天候の状態(晴れ、雨など)といったようにクライアントは対象が明確に判断できる属性を条件に検索を行なう。

それに対して、クライアントが取得しようとする対象が明らかでない場合がある。ここで、市街にカメラをもつセンサノードが高密度に配置されたセンサネットワークを想定し、道路交通システムにおいて道路渋滞予測などでの利用が期待されている移動体の移動予測のアプリケーションを想定する。

従来の手法を利用したとき、クライアントがセンサネットワーク内のある移動体についてその移動履歴を入手するためには、あらかじめ移動体の特徴を入手しておき、それをもとに検索するか、検索時にすべてのセンサデータを入手してクライアント上で抽出処理を行なわなければならない。また、すべてのセンサデータをクライアントに集約する場合、センサデータがクライアントに近づくにつれて多くなり、クライアントに近い経路上で輻辳が発生する問題がある。

そこで本論文では、センサデータを利用するクライアントがセンサネットワーク内に存在することを想定した環境において、1)を満たす手法を提案する。その上で、クライアントがセンサネットワーク内の観測対象物を明示的にクエリに含めることができないような場合を考え、自律的にセンサネットワーク内でクエリを満たすセンサデータ(同期センサデータ)を決定し、クライアントへクエリ応答を返答する手法について検討する。

2 センサネットワーク

2.1 システムモデル

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。

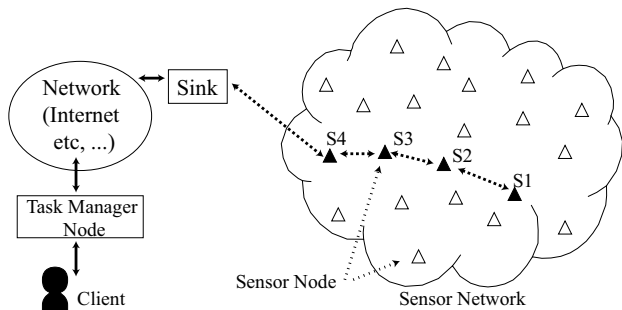


図1 クライアント非参加モデル

無線センサノードから 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、無線センサノードと Sink が直接に通信が行えない場合、無線センサノードと Sink の間で互いに直接通信可能な、複数の無線センサノードを経由してセンサデータを Sink に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参加モデルとよぶこととする。

それに対し、本研究では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)。

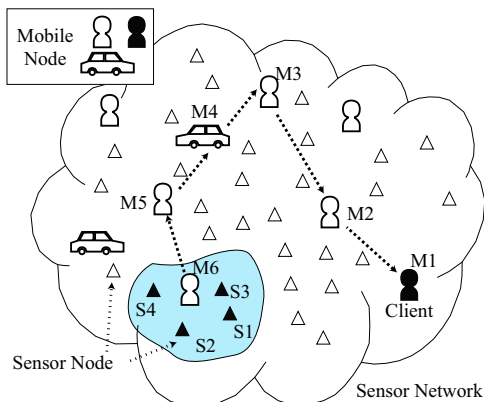


図2 クライアント参加モデル

無線センサネットワークは、センシングを行なう無線センサノードと無線センサネットワーク内で無線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、無線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、無線センサノードよりも高性能であり、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。

無線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、無線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、直接通信可能な無線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。

無線センサノードが利用する電波とは異なる周波数帯を利用することができ、無線センサノード間の通信とモバイルノード間の通信が衝突してしまうことを回避できる。

ここで、この通信モデルをクライアント参加モデルと呼ぶこととする。

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たとき、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。このようなデータベースは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

また、各センサノードに固有の ID を設定し、クライアントがその ID 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。センサノードの固有 ID を利用して通信を行なうには、センサノードの論理的な ID 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 ID 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ト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を構築することで、センサノードの識別し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の物理メディアがブロードキャストメディア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。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。

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。

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。

3 提案手法

3.1 同期センサデータ

センサネットワークからセンサデータを取得しようとするクライアントは、センサネットワーク内から取得しようとする観測対象があらかじめ明確な場合とそうでな

い場合がある。明確な場合の例として、特定の人物の発見システム (たとえば、迷子の発見のためのセンサネットワーク) などがあげられる。このようなシステムでは、センサネットワークに対するクエリに検索対象となる対象物の識別情報を含めることが可能である。

それに対して、明確でない場合の例として、交通システムにおける自動車移動測定システムが考えられる。このようなシステムでは、特定の自動車の移動を観測するのではなく、道路上の多くの自動車の一部がどのように移動するか測定する場合は考えられる。このような観測では、クライアントがあらかじめ与えられるのは観測対象範囲と時間程度であり、ネットワーク内の対象物を特定しうるの識別情報をクエリに含めることができない。識別情報が含まれないクエリがセンサネットワークに対して発行された場合、センサネットワーク内のそれぞれのモバイルノードが取得したセンサデータを用いて類似性の高いセンサデータを抽出することで対象物の移動などを検出する手法が必要となる。

そこで、本論文ではクライアントにおいて検索対象が明確でない適用例を想定し、クライアントが発行したクエリからセンサネットワーク内のモバイルノード上で検索対象を決定し、それに基づく新しいクエリをモバイルノードに配送することでセンサデータを取得する手法を検討する。モバイルノードは自身が近隣のセンサノードから取得したセンサデータと、マルチホップ配送で配送中のセンサデータを比較し、取捨選択を行ったり、集計処理を行ったりすることができる。このようにすることで、クエリを送信したクライアントに配送されるセンサデータ数を削減でき、クライアントに近い通信路における輻そうの発生を抑制することが期待できる。

3.2 同期センサデータ取得手法

クライアント参加モデル (図 2) の無線センサネットワークにおいて、モバイルノードがセンサデータを取得するには、クエリを作成し、センサネットワーク内に配送する。

本論文では、同期センサデータをクライアント参加モデルの無線センサネットワークから取得する手法について検討する。センサネットワーク内のモバイルノードがクライアントとなり、クエリを作成する。ここでは、図 3 に示すような、センサネットワーク内のある時刻 t にある領域 D から移動した移動体 (O_1, O_2, O_3) の移動履歴 $(O_1 \rightarrow O'_1, O_2 \rightarrow O'_2, O_3 \rightarrow O'_3)$ を検索するシステムを対象とした手法の検討を行なう。

無線センサネットワーク内の無線センサノードは任意の間隔でセンサデータを取得している。そのため、移動体 O_1, O_2, O_3 に関するセンサデータを収集している可能性がある。ただし、無線センサノードは移動体を識別する情報は持っていないため、それぞれの移動体を一意的に識別することはできない。

センサノードが取得するセンサデータにはセンサデータの取得時間を付加することができる。また、モバイルノードは GPS などにより最新の位置情報が入手可能であり、センサノードから取得したセンサデータに付加することも可能である。 M_1 はセンサデータ取得を行な

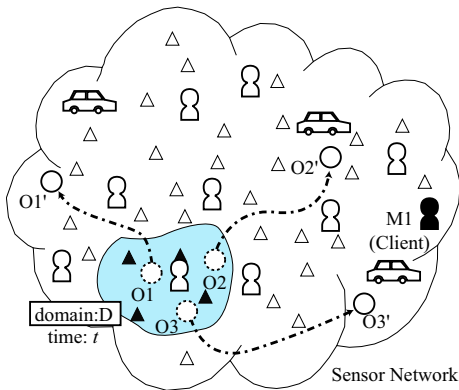


図3 アプリケーション例

うためにクエリを作成する。クエリには検索開始時の時刻 t と対象領域 D をクエリに含める。ただし、 M_1 は O_1, O_2, O_3 の存在をあらかじめ認識していないため、移動体に関する情報は含めない。

以下に、同期センサデータ取得の手順の概要を示す。

- 1) センサデータの検索を行なおうとするクライアントのモバイルノードは、時刻 t と対象となる領域 D 、検索処理のタイムアウト時間 t' を含んだクエリを作成する。
- 2) クライアントはクエリのフラッディングを開始する。
- 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、初回にフラッディングされてきたクエリを受信したとき、その送信元のモバイルノードを親とするツリーを作成する (図4)。

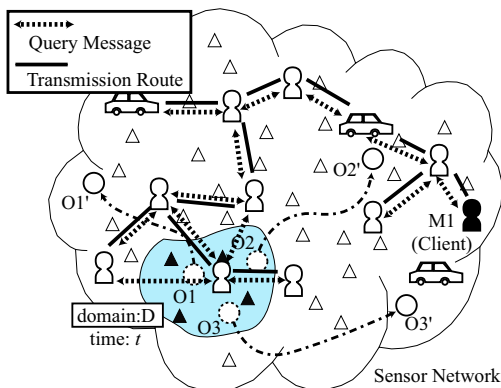


図4 クエリの配送とスパンニングツリーの作成

- 4) クエリを開始したモバイルノードは以下の処理を行なう。
 - 4-1) 自身が領域 D 内に存在しない場合、直接通信可能な近隣のセンサノードからセンサデータを取得し、待機する (図5)。取得したセンサデータには、モバイルノードの位置情報を付加しておく。
 - 4-2) 自身が領域 D 内に存在するとき、以下の処理を

行なう。

4-2-1) 近隣のセンサノードから時刻 t 近辺のセンサデータを取得する (図5)。取得したセンサデータには、モバイルノードの位置情報を付加しておく。

4-2-2) センサノードがすでに該当のセンサデータを破棄していたときや、センサノードが壊れていたときなどでセンサデータが存在しないとき、クライアントに対してセンサデータが存在しないことをセンサネットワーク内のモバイルノードに対してフラッディングで伝達する (図6)。

4-2-3) センサノードからセンサデータを入手できたとき、モバイルノードはセンサデータあるいはセンサデータから抽出した特徴を含むメッセージをモバイルノード内にフラッディングで伝達する (図6)。

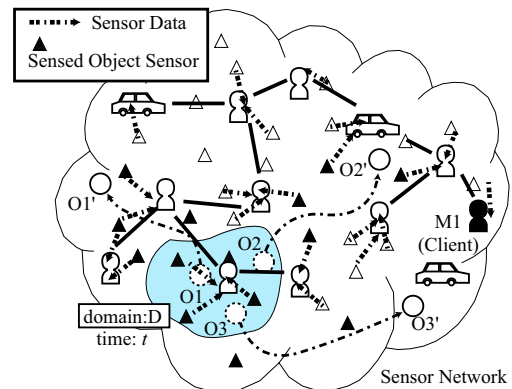


図5 近隣からセンサデータを取得

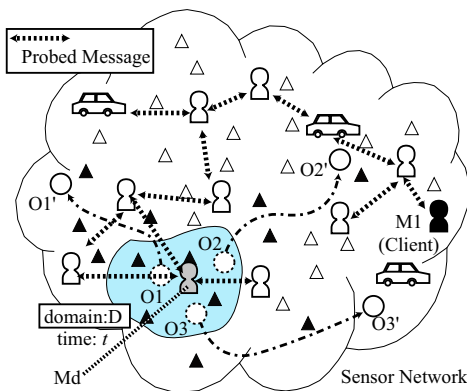


図6 M_d によるメッセージのフラッディング

- 5) 4-2-2) のメッセージを受信したモバイルノードはセンサノードから取得したセンサデータを破棄する。また、4-2-2) のメッセージを受信したクライアントは検索に失敗したとして、処理を終了する。
- 6) 4-2-3) のメッセージを受信したモバイルノードは、自身がセンサノードから取得したセンサデータと比較

を行ない、その結果、同一の移動体であると認められたとき、クライアントに対してセンサデータを転送する。転送はマルチホップ配送で行なわれる。クライアントは同期センサデータを入手することができる(図7)。

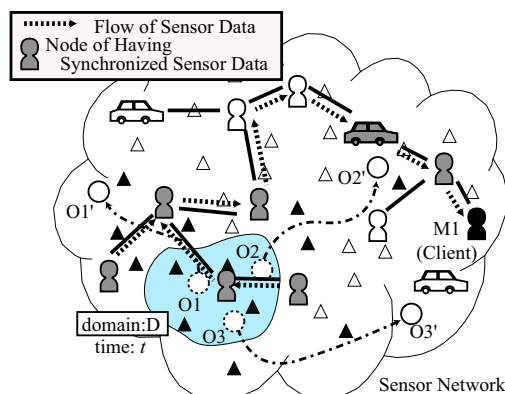


図7 センサデータの配送

- 7) もし、 t' を経過して上記の手続きが継続しなかった場合、各モバイルノードは取得したセンサデータを破棄し、処理を終了する。

4 検討

提案手法に対して、以下を今後検討する。

1) センサデータの配送経路

本提案では、モバイルノードがクエリを送受信した際に構築されるデータ配送経路は木構造である。このとき、近い位置にあるセンサノードが異なるモバイルノードとのリンクを構成した場合、それぞれのセンサデータがそれぞれのモバイルノード上で集計処理などの処理が行なわれる。このとき、モバイルノードによって片方は破棄され、もう片方は計算に利用されるといったように、処理に差が出てくるような場合が考えられる。そのような処理方法が問題になるか検討し、木構造以外のネットワークのモデルについても検討する。

2) モバイルノードにおけるキャッシュの利用

クライアント参加モデル(図2)の無線センサネットワークではセンサノードは固定されているが、モバイルノードはネットワーク内を自律的に移動している。そのため、図4のように、移動体 O_1, O_2, O_3 の場合のように、 M_1 は O_1, O_2 の移動履歴は取得できているが O_3 の移動履歴はまったく取得されないというように、取得できるデータ数が場合によって異なってくる。モバイルノードの数が多く、密な場合はこのような状態は発生しにくい、疎な場合は発生しやすくなるように、モバイルノードの密度に依存する。そこで、モバイルノードがセンサノードから一定間隔でセンサデータを取得し、キャッシュする方法が考えられる。しかし、キャッシュを利用したばあい、モバイルノードからクライアントにマルチホップ配送でセンサデータを配送するとき中継のモバイル

ノード上でセンサデータの処理が行なえず、すべてのセンサデータがクライアントに配送される場合が考えられる。この点をふくめて、キャッシュ利用の有効な点について検討する。

3) SQL 言語などの宣言的言語での定義

論文[3]で示されるように、クライアントのクエリが宣言的言語で示すことができれば、クライアントのプログラム構築が容易になる。そこで、本提案のような同期センサデータ取得のための変数の定義を検討していく。

5 まとめと今後の課題

本研究では、まず、センサノードから取得したセンサデータを利用するモバイルノードがセンサネットワーク内で移動するモデルにおいて、従来手法ではセンサノードがクライアントまでマルチホップで配送していたセンサデータをモバイルノードが代わりに行うことで、センサノードの配送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、センサデータ収集手法として、クライアントがセンシングを行なう対象が明確に分からないような観測物を観測する場合について注目し、センサネットワーク内のモバイルノードが取得したセンサデータをもとに対象とする観測物を決定し、決定したセンサデータと類似したセンサデータを同期センサデータとしてクライアントに提供する手法を検討した。このとき、同期条件から外れた同期センサデータをモバイルノード上で削除したり、集計したりすることにより、センサデータのメッセージ数を削減することで、クライアントのモバイルノードにおいてネットワークの輻辳を抑制したり、受信電力量を抑制することが可能である。

今後の課題は、検討で述べた事項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] 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).