

移動型ノードを用いたセンサデータ収集における 予測値配信による通信量削減手法

清野 航^{†1} 義久 智樹^{†1}
原 隆浩^{†1} 西尾 章治郎^{†1}

近年，街中の環境把握や気象予測のため，移動型ノードを用いたデータ収集方式が研究されている．移動型ノードがセンシング領域を移動して各センサから直接データを収集することでセンサネットワークを構築する場合に比べて通信量を削減できる．しかし，ほとんどの手法では，通信できるすべてのセンサからデータを収集しており，通信量が多くなって他の通信の妨げになるという問題があった．そこで本研究では，予測値配信を用いた通信量削減手法を提案する．提案手法では，移動型ノードが各センサが所持するデータの予測値を配信し，予測値が許容誤差以上外れているセンサのみデータを返信することで，冗長な通信を削減できる．性能評価の結果，提案手法の有効性を確認した．

A Communication Traffic Reduction Method by Delivering Predicted Values on Sensor Data Collection with a Mobile Sink

WATARU SEINO,^{†1} TOMOKI YOSHIHISA,^{†1}
TAKAHIRO HARA^{†1} and SHOJIRO NISHIO^{†1}

Recently many studies exploit mobile sinks to collect sensor data for environmental observations or weather forecasting. Mobile sinks travel in sensing areas and collect data directly from each sensor. By using mobile sinks, we can reduce communication traffic further than that for the case of constructing sensor networks. However, in many methods, the mobile sink collects data from all sensors that the mobile sink can communicate with. This causes much communication traffic and interferes with other communications. In this paper, we propose a communication traffic reduction method by delivering predicted values. In our proposed method, the mobile sink broadcasts predicted values to each sensor. Only sensors whose sensing data exceeds the admissible error margin from the predicted value transmit their data. By doing so, the communication traffic can be reduced. The evaluation results demonstrated the effectiveness of our proposed method.

1. はじめに

近年のセンサの小型化、高性能化に伴い、複数のセンサが観測したデータを収集して利用するさまざまな応用が考えられている．例えば，エアコンの室外機に内蔵された温度センサから温度を収集することで，街中の環境把握や気象予測といった応用が可能となる．このような応用を実現するため，複数のセンサからデータを収集する技術が必要とされている．センサデータを収集する方法の一つに，センサネットワークと呼ばれる情報ネットワークをセンサで構成し，ネットワークを介してシンクノードへデータを集約する方法があるが，センサの数が多い場合に通信量が多くなる．また，すべてのセンサがマルチホップ通信により互いに通信可能でなければならないといった制約がある．

そこで，シンクノードを搭載したバスやタクシー，モバイル端末を持つ人などの移動型ノードを用いてセンサデータを収集する方法に関心が高まっている．移動型ノードは通信範囲内のセンサから直接データを収集するため，従来のセンサネットワークと比較して通信量を削減できる．また，ロボットの移動型ノードを用いることで，福島県で起きた原子力発電所の事故のように，センサの通信範囲内に人が侵入しにくい場所でもデータを収集できる．図1に移動型ノードを用いたセンサデータ収集の例を示す．図1ではシンクノードを搭載したバスが街中を巡回し，街中に配置されたセンサからデータを収集している．このように，すでに運行している移動媒体を用いることで追加コストを抑えられる．

ほとんどの手法では，通信できるすべてのセンサからデータを収集しており，通信量が多くなって他の通信の妨げになるという問題点があった．しかし，移動型ノードが巡回して同じセンサから繰り返しデータを収集する場合や，周囲のセンサデータをすでに収集している場合に，これらのデータからこれから収集するセンサデータを予測できるものと考えられる．センサが観測したデータと，予測したデータが必ず一致するとは限らないが，収集するデータにはある程度誤差を許容できる場合が多い．例えば，環境把握では0.1度単位で温度データを収集することが考えられ，0.1度までの誤差であれば許容できると考えられる．このため，予測値が許容誤差以上外れているセンサのみデータを返信することで冗長な通信を削減できる．

^{†1} 大阪大学 大学院情報科学研究科 マルチメディア工学専攻

Department of Multimedia Engineering, Graduate School of Information Science and Technology,
Osaka University

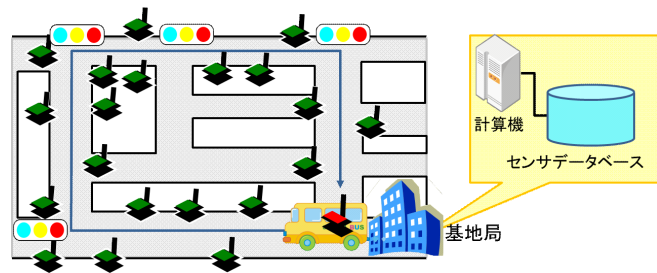


図 1 移動型ノードを用いたセンシングシステム
Fig. 1 Sensing system with a mobile sink.

そこで、本研究では移動型ノードを用いたセンサデータ収集における予測値配信を用いた通信量削減手法を提案する。移動型ノードはセンサが配置された地域を繰り返し巡回しており、一巡で収集したセンサデータを基地局にアップロードする。基地局では過去に収集されたセンサデータを基に、次の巡回時にセンサが観測しているデータを予測する。移動型ノードはセンサからデータを受信する前に、予測したセンサデータを配信する。各センサは受信した予測値と実際に観測した値を比較し、ユーザによって事前に設定された誤差の許容できる範囲から外れているセンサデータのみを返信する。これにより、各センサは保持する全てのセンサデータを送信する必要がないため、通信量を削減できる。性能評価を行った結果、単純に全てのセンサデータを収集する方法と比較して、通信量を削減できることを確認した。

以下では、2章で関連研究について述べ、3章で想定環境について説明する。4章で提案手法について述べ、5章で提案手法の性能評価を行う。6章で考察を述べ、最後に7章で本稿をまとめる。

2. 関連研究

近年、移動型ノードを用いたデータ収集に関する研究が多く行われている^{1)~3),5),7)}

2.1 移動型ノードを用いたセンサデータ収集に関する研究

ShahらはData MULEという移動型ノードを用いたデータ収集方式を提案している^{1),7)}。Data MULEはシンクノードを備えた牧場内の動物などを移動型ノードとして想定しており、ランダムに移動する。領域内には幾つかアクセスポイントがあり、アクセスポイントと通信可能な場合、移動型ノードは収集したデータをアップロードする。しかし、Data MULEは

通信できるすべてのセンサからデータを収集しており、通信量が多くなる。

文献3)では、MobiRouteという通信プロトコルが提案されている。この研究では、移動型ノードは領域内にあらかじめ設置されたアンカーポイントと呼ばれる地点を巡回する。移動型ノードは定められた位置で停止、移動を行うロボットなどを想定している。アンカーポイントで移動型ノードは一定時間停止し、通信範囲にあるセンサがつながっている無線センサネットワークからデータを収集する。移動型ノードの通信範囲内に含まれないセンサは、移動型ノードが収集できるように付近のセンサとセンサネットワークを構築している。しかし、アンカーポイントまでセンサデータをマルチホップ通信で転送しており、通信量が多くなるという問題点がある。

文献5)で提案されているEPCFC方式では、移動型ノードと各センサとの通信時間の公平性を確保するために各センサと移動型ノードとの初回の通信時間に上限を設けている。また、移動型ノードの周辺に通信済みのセンサのみが存在する場合には、データ収集量向上のためにすでに通信済みのセンサと再通信を行うことでデータ収集量の向上を図っている。しかし、センサの所持するデータを全て収集しているため、通信量が多くなるという問題が発生する。

2.2 センサデータ収集に伴う通信量削減に関する研究

センサ間の通信量削減の重要性は広く認知されており、幾つかの研究が行われている。これらの研究では、データの相関性に着目し、周辺のセンサデータから予測可能なセンサデータを収集しないことで通信量を削減している。

文献6)では時系列での相関性に着目した手法を提案している。Sharafらの手法では、各センサは自身が最後にシンクノードへ送信したデータから観測したデータが許容誤差以上離れている場合にのみデータを転送することによって通信量を削減している。

また、文献8)で提案しているCAG(Clustered AGgregation)では、データ収集の際に、許容誤差に基づいてクラスタを構築する。クラスタ内のセンサはクラスタヘッドのセンシングデータのみ収集することで通信量を削減できる。本研究で提案する手法においても、センサ間でクラスタを構築することでCAGを適用できる。

しかし、これらの手法は従来のセンサネットワークを対象としており、移動型ノードを用いたセンサデータ収集を考慮していない。

3. 想定環境

以下では、想定する基地局、移動型ノード、センサ、センサデータに関して順に説明する。

3.1 基地局

基地局には、計算機と収集したデータを蓄積するセンサデータベースがある。基地局の計算機は、このセンサデータベースに保存されたセンサデータを用いて、次回に移動型ノードが収集する際に各センサが保持するデータを予測できる十分な計算能力を持っている。

3.2 移動型ノード

移動型ノードはセンサが存在する領域を移動して、各センサからデータを収集する。センシング領域の移動を完了すると、停止して収集したデータを基地局にアップロードする。本研究では、移動型ノードとして固定された経路を定期的に巡回するような移動型ノードを想定する。例えば、街中を運行するバスや、固定経路を動くロボットなどが考えられる。移動型ノードは、通信範囲内のセンサを確認するため、定期的にデータ（ビーコン）を送信する。ビーコンを受信したセンサが応答することで、移動型ノードとセンサの通信が確立する。移動型ノードは各センサから返信されたデータを蓄積するのに十分な容量の記憶装置を搭載しているものとする。

3.3 センサ

センシング領域内には多数のセンサが設置されている。センサは設定されたタイミングでセンシングを行っており、センシングしたデータ（観測値）を自身の記憶装置に保存する。移動型ノードに観測データを送信すると、送信した観測データをバッファから削除する。バッファには、移動型ノードが巡回するまでのセンシングデータを保持するのに十分な容量があるものとする。各センサは位置情報を保持している。これは GPS などの測位技術を用いることで可能である。なお、本研究では移動型ノードとセンサの通信に焦点を当て、センサ間での通信や情報交換などは考えない。

3.4 センサデータ

本研究では、センサが観測するデータは、時間的、および地理的に相関性のあるデータであり、データは数値で表されるものとする。例えば、温度データや湿度データなどが挙げられる。

4. 提案手法

本節では提案する DPV (Delivering Predicted Value) 法に関して説明する。提案手法で

は移動型ノードが領域内を巡回してセンサデータを収集し、基地局のセンサデータベースにアップロードする。基地局の計算機はセンサデータベースに貯えられたセンサデータを用いて、次回に移動型ノードがデータ収集する際に各センサが保持するデータを予測する。

4.1 予測値平面の作成

時刻 t において、センサ i が保持する観測データの予測値を $P_i(t)$ と表す。各センサに予測値 $P_i(t)$ を配信することで、すべてのセンサに予測値を配信できるが、配信する予測値の数が多くなって、通信量が多くなる。そこで、DPV 法では、ある範囲内にあるセンサの予測値で予測値平面を作成し、予測値平面の係数のみ送信することで、予測値平面に含まれるセンサにまとめて予測値を配信して通信量を削減する。

予測値平面 $P_i(t)$ は以下の式で表される。

$$P_i(t) = a(t)x + b(t)y + c(t) \quad (1)$$

t はセンシング時刻であり、時刻によって変わる平面を表す一般的な式である。 $a(t)$, $b(t)$, $c(t)$ は、ある点を中心として移動型センサノードの通信半径と同じ半径 r の円内にあるセンサの予測値をから算出する。通信半径と同じ半径内にあるセンサの予測値を用いるのは、これらの係数を送信しても移動型ノードの通信範囲内のセンサしか受信できないためである。例えば、半径 r 内にセンサ A, B, C がある場合を考える。A の座標を (x_A, y_A) , B の座標を (x_B, y_B) , C の座標を (x_C, y_C) とする。それぞれの時刻 t の予測値は $P_A(t)$, $P_B(t)$, $P_C(t)$ となる。この場合、以下の式を満たすように $a(t)$, $b(t)$, $c(t)$ を決定する。

$$\begin{cases} P_A(t) = a(t)x_A + b(t)y_A + c(t) \\ P_B(t) = a(t)x_B + b(t)y_B + c(t) \\ P_C(t) = a(t)x_C + b(t)y_C + c(t) \end{cases}$$

半径 r 内に 4 個以上のセンサがある場合、それらの予測値と最小二乗の誤差が最も小さくなるように $a(t)$, $b(t)$, $c(t)$ を決定する。半径 r 内に二個しかセンサがない場合には、予測値平面の法線ベクトルが鉛直上向きに最も近くなる平面、1 個しかない場合には、水平な平面とする。予測値平面の中心点は、 x 軸および y 軸の方向に一定距離 d ずつずらしながら作成する。平面の作成される様子を図に示す。予測平面が重複する箇所も存在することになるが、予測値平面の数は多いほど予測値を平面化することによる誤差が小さくなり、より本来の予測値に近い値を送信できる。

初回の巡回時には、過去のセンサデータを用いることができない。そのため、平均気温や現在の気温といった情報を基に簡単にセンサデータを予測するなどして予測値平面を作成する。

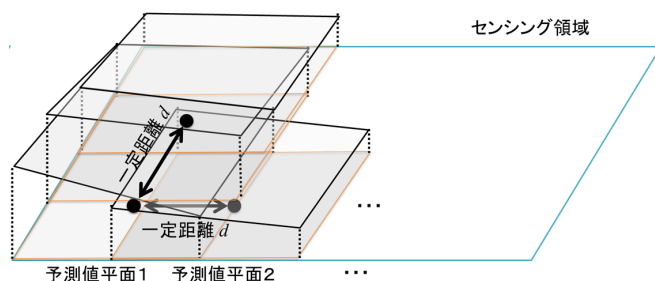


図 2 予測値平面の作成方法
Fig. 2 How to make predict plane

4.2 予測値配信のタイミング

移動型ノードは、以下の条件のいずれかが満たされた場合に行う。

- 前回の予測値配信箇所から一定距離移動した場合
- 前回の予測値配信時刻から一定時間経過した場合

一定距離移動する直前に信号などにより停止してしまった場合、データ収集可能にもかかわらずデータを収集しない時間帯が発生し、データ収集量が低下するため、前回の予測値平面の係数を配信した時刻から一定時間経過した場合に、予測値の配信を行うこととした。移動型ノードの速度が速い場合、予測値平面の係数を配信する間隔が長くなって、予測値を計算できないセンサが出てくる可能性があるため、前回の予測値配信地点から一定距離移動した場合に予測値を配信することとした。配信のタイミングは上記のいずれかの条件を満たした場合に移動型ノードは予測値を周辺のセンサに配信する。予測値平面の係数の配信は、3.2 節で説明したビーコンの役割を果たす。

移動型ノードは上記の条件によって定められたタイミングで予測値を配信する際に、事前に作成された予測値平面の選択を行う。移動型ノードは配信する時の位置から最も近い中心点を持つ予測値平面を選択して配信する。事前に作成された予測値平面の中心点の中点に移動型ノードが存在した場合には、自身がこれから進む側にある予測値平面を選択する。これにより、その地点から移動しながらデータを収集するセンサに対してより精度の高い予測値を配信できる。

4.3 観測値の返信

移動型ノードから予測値平面の係数を受信すると、自身の位置情報を用いて各時刻ごとの予測値を復元する。各センサは自身の観測データと復元した予測値を比較し、事前にユーザ

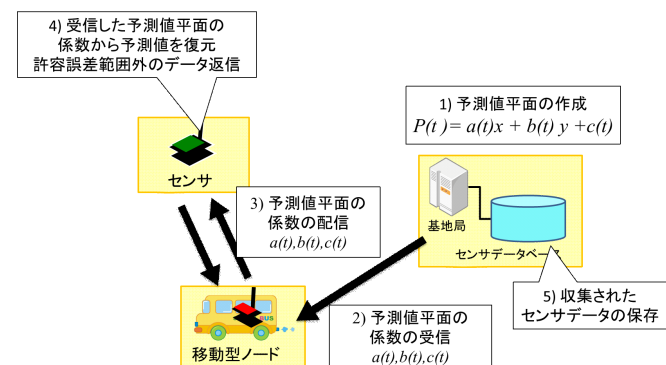


図 3 DPV 法の概略図
Fig. 3 Overview of DPV Method.

によって指定された許容誤差の範囲外である観測データのみを返信する。例えば許容誤差を D 、実際のデータを D_o 、時刻を T とすると、 $|P(T) - D_o| > D$ の場合にセンサデータを返信する。この許容誤差およびセンシング周期の値は各アプリケーションにより異なる。また、センサが同じ巡回の中で移動型ノードから新たな予測値平面を受信した場合、そのセンサはすでに観測値を送信している場合には、許容誤差範囲以上離れていても観測値を送信しない。また、移動型ノードから送信された予測値と観測値がすべて許容誤差の範囲内に存在する場合、自身の位置情報を返信する。これは、センサの位置が変わったり、新たなセンサが追加された場合に対応するためである。移動型ノードは各センサから送信されたセンサデータのみを保存し、それ以外の時刻のデータに関しては予測値を観測値としてセンサデータベースに保存する。また、センサからの返信がない場合、移動型ノードはそのセンサの値を予測値を観測値としてセンサデータベースへと登録する。

4.4 手法の動作

DPV 法の概略を図 3 に示す。図中の番号は、DPV 法の手順を示す。

- 1) 基地局では、過去に収集したセンサデータから予測値平面を作成する。
- 2) 移動型ノードは巡回する前基地局から各予測値平面の係数を受信する。予測値平面の係数を受け取ると、移動型ノードは巡回を始める。
- 3) 巡回を始めるとまず移動型ノードはセンサに対して予測値平面の係数を配信する。
- 4) 予測値平面の係数を受信したセンサは自身の位置情報を基に予測値を復元する。その

表 1 シミュレーションに用いたパラメータ
Table 1 Parameters for simulation.

パラメータ	値
バスの速度	10.0m/s.
センサ数	100 ~ 700 個
センシング周期	0.5s.
保持するデータ数	60 個分
バスの停止間隔	100m
バスの停止時間	30s
予測値平面の係数を配信する間隔 (距離)	100m
予測値平面の係数を配信する間隔 (時間)	10s.
領域サイズ	3000m×300m
許容誤差	0.06 度
平面の作成間隔 d	100m

後、観測値が予測値より許容誤差範囲以上離れていれば、観測値を送信する。センサが保持する全てのセンサデータを収集する必要がないため、通信量を削減でき、多くのセンサデータを収集できる。

5) 移動型ノードは、2), 3) を何度か繰り返して巡回を終了すると、受信したセンサデータ及び不足部分を予測値で保管したデータを基地局へとアップロードしその巡回のデータ収集を完了する。

5. 性能評価

本章では DPV 法の性能評価のために行ったシミュレーション実験の結果を示す。本実験では、ネットワークのシミュレーションによく用いられているネットワークシミュレータ Qualnet4.5⁴⁾ を用いた。

5.1 評価環境

本実験では、バスが巡回してデータを収集する状況を想定し、パラメータを設定した。表 1 に評価に用いるパラメータを示す。特に明記しない限り表 1 に示すパラメータをシミュレーションで用いる。密度が高くなると、センサの通信範囲の重なりにより、センサとの通信時間が短くなって通信量が減少することが考えられる。このため、今回の評価では、DPV 法で削減できる通信量を評価するため、移動型ノードがすべてのセンサと通信できるような疎な密度で実験を行った。

移動型ノードはバスを想定しており、時速は 36km/h. = 10m/s. とし、一度の巡回に 30

分かかる環境を想定した。バスは固定された経路を巡回するが、今回の実験では経路の一部を抜き出し 3000m の直線を移動するものとした。経路上の信号などで停止したり、客を乗降車させることなどにより等速で動き続けるとは限らないため、100m おきに最長で 30 秒ランダムな時間だけ停止するとした。センサは温度センサを想定し、30 秒に一度センシングを行うものとした。バスは 30 分に一度巡回を行うため、各センサは 60 個分のセンサデータを保持することとなる。各センサが所持するセンサデータは、ある一つのセンサで実際に温度データを取得し、その上限と下限の範囲でランダムに与えた。また、通信には 802.11b の無線を想定し、通信半径が 150m となるように出力を調整した。移動型ノードはセンサの通信半径内に存在するとそのセンサと通信できる。

予測値 $P_i(t)$ は前回収集した観測地をそのまま用いることとした。

5.2 評価方法

本稿では比較手法として単純に全てのセンサからデータを収集する手法を用いた。比較手法では、ビーコンを受信したセンサは自身の通信範囲内に移動型ノードが存在すると判断し、自身の識別子と所持する全てのセンサデータを添付して返信を行う。

評価指標を以下に示す。

- データの取得精度

データの取得精度は移動型ノードが実際に収集したデータの取得した割合を示す。DPV 法では、センサは予測値の許容誤差以上観測値が離れている場合のみ観測値を返信するため、予測値から許容誤差の範囲外のデータの返信を行うことができなかった場合にデータを取得できていないと判断する。例えば、センサが観測値を送信する際に衝突が発生する場合や、移動型ノードからセンサに対してデータが送信されなかった場合に観測値を収集できない。

- 通信トラヒック

通信トラヒックはネットワークを流れたデータの総量を意味する。移動型ノードに関して、センサに送信する予測値平面の係数や、自身が通信範囲内に存在することを通知するためのビーコンが通信トラヒックに含まれる。また、センサに関して、予測値が許容誤差以上離れている場合に送信する観測値が通信トラヒックに含まれる。通信トラヒックはこれら送信トラヒックと返信トラヒックの合計量で表される。

5.3 評価環境における取得精度

センサの数を 100 から 700 まで変化させたときのデータの取得精度の評価を行った。横軸が配置したセンサの数、縦軸がセンサデータの取得精度を示す。この結果より、実験を

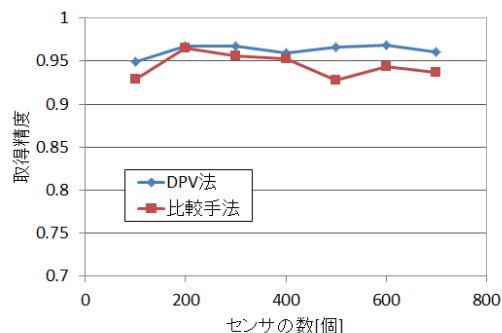


図 4 ノード数と取得精度

Fig. 4 Number of Sensors and Accuracy

行っている環境では、センサの数が増えてもほぼ全てのデータを収集できていることがわかる。これは、実験環境では、センサが密には配置されておらず、多くのセンサと通信できるためである。比較手法の取得精度が、センサの数が増えても減らないのはセンサが密には配置されておらずセンサからデータを収集できているためである。取得精度が 100%にならないのは、移動型ノードが予測値平面の係数を配信したときに、通信範囲の端の方にあるセンサは、移動型ノードとの通信時間が短くなって、観測値を送信しても移動型ノードが移動することによって受信されないためである。また、移動型ノードに対して返信を行う際に、パケットの衝突が発生してしまい移動型ノードへと返信が行えない場合も考えられる。

また、DPV 法が比較手法より精度が高くなっている。これは、DPV 法では、センサから返信がなかった場合でも、予測値をセンサデータベースに蓄えているためである。この値は、観測値とは異なるが、許容誤差範囲内であるため、アプリケーション上問題ない。

5.4 許容誤差の影響

許容誤差によって観測値を返信するセンサの数が増え、通信トラヒックに影響を及ぼすと考えられる。そこで、許容誤差を変化させて評価を行った。その結果を図 5 に示す。センサの数は 500 とした。通信トラヒックには移動型ノードが予測値平面の係数を配信することによる通信トラヒックと、センサが観測値を送信することによる通信トラヒックがある。グラフには、各手法の通信トラヒックと移動型ノードの通信トラヒックを示しており、これらの差がセンサの通信トラヒックに相当する。

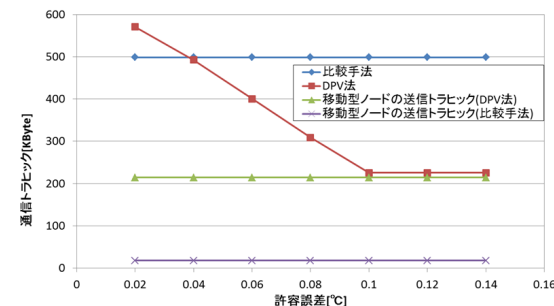


図 5 許容誤差と通信トラヒック

Fig. 5 Admissible Error Margin and Communication Traffic

このグラフより、DPV 法では許容誤差が大きいほど通信トラヒックが小さくなっていることがわかる。これは許容誤差の値を大きくとることによって、移動型ノードに対して観測値を送信するセンサの数が増えるためである。例えば、許容誤差を 0.08 とした場合、通信トラヒックは約 39%削減できる。また、この際の移動型ノードからセンサへと送信された通信トラヒックは DPV 法が 214032[byte]、比較手法が 17640[byte] となっており、DPV 法が比較手法に比べ 10 倍以上の値を示しているのは、DPV 法では、予測値平面の係数を送信しているためである。許容誤差がある程度小さい場合に、DPV 法は比較手法より通信トラヒックが大きくなっているのは、許容誤差が小さいと、観測値を送信するセンサの数が増え、さらに移動型ノードもデータを送信しているためである。

許容誤差が 0.1 以上の場合に変化がないのは、使用したセンサデータの上限と下限が予測値として送信された値の許容誤差の範囲内となったためである。

5.5 センサの数の影響

センシング領域に存在するセンサの数が増えると、移動型ノードが通信できるセンサの数が増え、通信トラヒックに影響がある。そこで、センサの数の影響を調べるために、センサの数を変化させてシミュレーションを行った。その結果を図 6 に示す。

まず、センサの数が増え、移動型ノードがセンサに対して送信する通信トラヒックは変わらない。これは、移動型ノードが周辺のセンサに対してデータを配信するタイミングが変わらないためである。図 6 よりセンサの数が増えるほど、比較手法、DPV 法ともに通信トラヒックが増加しているのは、センサの数が増えることで返信されるデータ量が増えるためである。

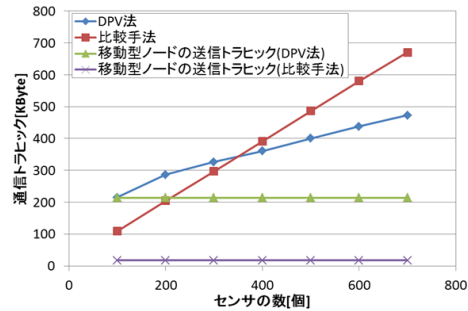


図 6 センサの数と通信トラヒック

Fig. 6 Number of Sensors and Communication Traffic

センサの数が少ない場合，DPV 法は比較手法に比べて通信トラヒックが大きい．これは，DPV 法では移動型ノードがセンサに対して予測値係数を配信する分，通信トラヒックが増加するためである．また，センサの数が多きときには，DPV 法は比較手法に比べて通信トラヒックを削減できている．これはセンサの数が多くなると，比較手法ではセンサが保持する全てのセンサデータを収集しているため，返信トラヒックが大きくなるためである．一方，DPV 法では，観測値が予測値の許容誤差内である場合には返信を行わないため，比較手法より通信トラヒックを大きく削減できる．

5.6 予測値平面の係数を配信する間隔

予測値平面の係数を配信する間隔が長いと，予測値平面の係数を受信できないセンサの数が少なくなると通信トラヒックに影響を及ぼす．そこで，予測値平面の係数を配信する間隔を変えて評価を行った．時間の間隔を変えた場合の取得精度を図 7，通信トラヒックを図 8 に示す．距離の間隔を変えても同様の評価結果が得られるため，ここでは時間の間隔を変えた評価結果のみ示す．

これらの評価より，予測値平面の係数を配信する間隔が長くなるほど，取得精度が低下することが分かる．これは，予測値平面の係数を受信したセンサのみ観測値を移動型ノードに送信する可能性があるためであり，取得精度と予測値平面の係数を配信する回数がほぼ比例するためである．比較手法では，予測値平面の係数を配信するタイミングでビーコンを送信し，周囲のセンサを探索している．このため，比較手法においても，予測値平面の係数を配信する間隔が長くなると，取得精度が減少している．また，予測値平面の係数を配信する間隔が長いほど移動型ノードの送信トラヒックが減少することがわかる．これは，一巡あたり

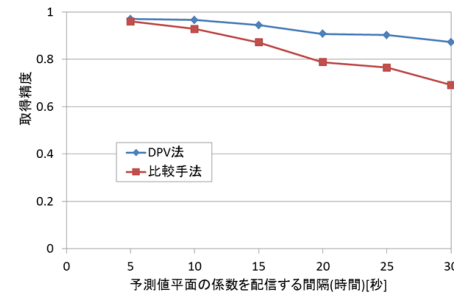


図 7 配信する時間間隔と取得精度

Fig. 7 Time Interval for Delivering Predicted Data and Accuracy

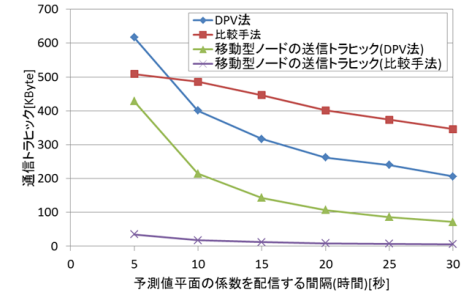


図 8 配信する時間間隔と通信トラヒック

Fig. 8 Time Interval for Delivering Predicted Data and Communication Traffic

の予測値平面の係数を配信する回数が減少し，移動型ノードの送信トラヒックが減少するためである．さらに，センサの送信トラヒックも減少する．これは，予測値平面の係数を受信できたセンサのみ観測値を移動型センサに送信する可能性があるためである．

このため，予測値平面の係数を配信する間隔が短いほど取得精度を高めることができるが，通信トラヒックが多くなって他の通信の障害になるといえる．

6. 考 察

6.1 提案手法の有効性

5 章の評価より，許容誤差があり，センサの数が多き場合に DPV 法は比較手法より通信トラヒックを削減できることが分かる．このため，許容誤差があつてセンサの数が多き，例えば，0.1 度単位での地理的に密なセンサからの環境観測などに適している．しかし，許容誤差が小さく，センサの数も少ない場合には比較手法のように全てのセンサから観測地を取得することが適しており，例えば詳細な気象予測や詳細な放射能濃度測定といった場合が挙げられる．DPV 法と比較手法のどちらかが適しているかについてはアプリケーションに依存する．

6.2 環境変動による性能変化

評価では，実際に取得した温度データを用いてセンサの観測値を与えた．これは，大きな変化のない温度データであつて，観測値が比較的予測値の許容誤差範囲内にある状況であつた．しかし，変化が激しい場合には，観測値が予測値から許容誤差範囲以上異なる確率が多

くなり、センサからの送信トラヒックが増えると考えられる。環境変動が激しく、予測値が大きく異なる場合の性能評価は今後の課題である。

6.3 予測値の計算方法

評価では、取得した値そのものを次回の予測値として与えたが、予測値の計算方法には他のアプローチも考えられる。例えば、これまでに取得したセンサデータの時間的平均値を予測値とする方法や、近似曲線を算出してその延長上の点を予測値とする方法がある。観測値と予測値の誤差が少ない予測値の計算方法が通信トラヒックを効率的に削減できるが、これはセンサデータの変動のしやすさなどの特徴に依存する。

6.4 予測値平面作成の計算量について

予測値平面作成の計算量は、予測値の計算方法が複雑なほど、またセンサの数が多いほど増加し、計算に時間がかかる。5章の評価の予測値平面の作成は、パソコン(3.2GHz)で1秒以下であり、データ収集するうえで大きな問題ではなかったが、複雑な計算でセンサの数が多い場合には、時間がかかり、移動型ノードが次の巡回を待たなければならなくなり、データ収集頻度が少なくなる問題が発生する。この場合、移動型ノードが基地局に戻ってくるまでにあらかじめ数回先の巡回のための予測値平面を計算しておくといった、複数個の予測値平面を作成しておくことで予測値平面作成の時間がかかるという問題を軽減できる。

基地局にはパソコン程度の計算機があり、この計算能力を用いて予測値平面を作成するため、移動型ノードの巡回中に計算を行う必要はない。

7. 結 論

本稿では、移動型ノードを用いたセンサデータ収集における予測値配信を用いた通信量削減手法を提案した。提案するDPV法では、移動型ノードが周辺のセンサに対して事前に過去のデータから作成された予測平面の係数を配信する。予測平面の係数を受信したセンサは自身の位置情報と時刻を用いて予測値を計算し、観測値と比較する。予測値と観測値の差が許容誤差以上であるセンサのみ観測値を送信することで通信量を削減できる。シミュレーション実験による性能評価の結果、DPV法は比較手法に比べて通信量を削減できることを確認した。

今後の課題としては、センサ間での通信を伴う場合や、複数台の移動型ノードを用いたセンサデータ収集といった手法の拡張を検討している。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(S)(課題番号:21220002)の研究助成による成果である。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) S.Jain, R.C.Shah, S.Roy and W.Brunette, "Exploiting mobility for energy efficient data collection in wireless sensor networks," Proc. IEEE Workshop on Modeling and Optimization in Mobile Ad hoc and Wireless Networks (WiOpt'06), vol.11, issue 3, pp.327-339, June 2006.
- 2) D.Jea, A.A.Somasundara, and M.B.Srivastava, "Multiple controlled mobile elements(data mules) for data collection in sensor networks," Proc. IEEE Int. Conf. on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS'05), pp.244-257, June 2005.
- 3) J. Luo, J. Panchard, M. Piorkowski, M. Grossglauser, and J.- P. Hubaux, "MobiRoute: routing towards a mobile sink for improving lifetime in sensor networks," Proc. IEEE Int. Conf. on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS'06), pp.10-11, June 2006.
- 4) Scalable Network Technologies: Creators of Qualnet Network Simulator Software, <URL: <http://www.scalable-networks.com/>>
- 5) 清野航, 義久智樹, 原隆浩, 西尾章治郎, "移動型ノードを用いたセンサデータ収集におけるデータ収集量向上のための通信方式," 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO2010) 論文集, vol. 2010, no. 1, pp. 1790-1797, July 2010.
- 6) M.A.Sharaf, J.Beaver, A.Labrinidis, and P.K.Chrysanthi, "TiNA: a scheme for temporal coherency-aware in-network aggregation," Proc. ACM Int. Workshop on Data Engineering for Wireless and Mobile Access, pp.69-76, Sep. 2003.
- 7) R.C.Shah, S.Roy, S.Jain, and W.Brunette, "Data MULEs: modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks," Proc. Int. Workshop on Sensor Network Protocols and Applications (SNPA'03), pp.30-41, May 2003.
- 8) S.H.Yoon, and C.Shahabi, "Exploiting spatial correlation towards an energy efficient clustered aggregation technique (CAG)," Proc. IEEE Int. Conf. Communications (ICC'05), pp.82-98, May 2005.