

# センサネットワークにおける放送型配信を用いたデータ収集方式

義久 智樹<sup>†</sup> 西尾章治郎<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 京都大学学術情報メディアセンター 〒 606-8501 京都市左京区吉田本町

<sup>††</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: <sup>†</sup>yosihisa@media.kyoto-u.ac.jp, <sup>††</sup>nishio@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 近年，気象観測や災害時の状況把握のため，温度や湿度といったセンサが情報ネットワークを形成して通信するセンサネットワークに対する注目が高まっている．センサから発生するデータを収集するために，様々な手法が提案されているが，非常に多数のセンサが存在する場合通信量が多くなり，データの収集に時間がかかるといった問題がある．そこで本研究では，センサデータを推測して放送型で配信するデータ収集方式を提案する．実際のセンサデータが推測値と大きく異なるセンサのみデータを送信することで，通信量を削減でき，データ収集時間の短縮につながる．放送型配信を用いるため，複数のセンサに同時に推測値を送信できる．評価の結果，センサの数が多い場合には，各センサから単純にデータを集める手法よりも提案手法が速くデータを収集できることが明らかになった．

キーワード センサネットワーク，データ収集，放送型配信，サンプリングレート

## A Data Collecting Scheme using Broadcast Delivery in Sensor Networks

Tomoki YOSHIHISA<sup>†</sup> and Shojiro NISHIO<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Academic Center for Computing and Media Studies, Kyoto University  
Hon-machi, Yoshida, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

<sup>††</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University  
Yamadaoka 1-5, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

E-mail: <sup>†</sup>yosihisa@media.kyoto-u.ac.jp, <sup>††</sup>nishio@ist.osaka-u.ac.jp

**Abstract** To make a weather observation or see the picture of a disaster, sensor networks, in which sensors such as temperature or humidity communicate, have recently attracted attention. Several schemes are proposed to collect data generated by sensors effectively. However, when there are many sensors, it takes long time to collect sensor data since information traffic is large. In this paper, we propose a data collecting scheme that conjectures sensor data and broadcasts them. In our proposed scheme, sensors that have data vastly differ from conjectured data only transmit their sensor data. Accordingly, information traffic is reduced and the necessary time for collecting data becomes short. Our evaluations show that our proposed scheme can collect data faster than a conventional collecting scheme when there are many sensors.

**Key words** sensor network, data collection, broadcast delivery, sampling rate

### 1. ま え が き

近年，気象観測や安全安心確保のため，温度やカメラといったセンサが情報ネットワークを形成して通信するセンサネットワークに対する注目が高まっている [10]．センサネットワーク

を構成するセンサを備えた小型の計算機をセンサノードと呼び，センサネットワークでは，これらが互いに通信し，自身のセンサから発生するセンサデータを送信する．例えば，気象観測システム [1] や温度分布の可視化システム [9] がある．  
これらほとんどの応用例では，センサデータを処理するため，

シンクノードと呼ばれるあるノードでセンサデータを収集している。各センサノードがセンサデータをシンクノードに送信するため、シンクノード付近の通信量が多くなる。このため、センサデータを効率よく収集する様々な手法が提案されている [2], [4], [6]。しかし、各センサノードが通信経路を確保してセンサネットワークのみを経由してセンサデータを収集するものがほとんどであり、非常に多数のセンサが存在する場合、通信量が多くなり、データの収集に時間がかかるといった問題がある。例えば、非常に多数のセンサが存在する以下の状況が考えられる。

- 高密度センシング

センサノードに近いほどセンサデータの精度は高いため、高精度のセンシングを行う場合、狭い範囲に多数のセンサノードを配置する必要がある。一般に、センサデータには地域局所性があり、地理的に近いセンサノードのセンサデータは近い値をもっている。高密度センシングの場合、多数のセンサノードのデータが近い値になる可能性がある。

- 多種センシング

一般に、1個のセンサノードがセンシングできる内容には制限があり、温度のみをセンシングするセンサノードやカメラのみを備えたセンサノードがある。このため、気象観測や科学実験といった多種のセンサデータを取得する場合、多数のセンサが必要になる。多種センシングの場合、データの種類によっては、センサノードごとにセンサデータが大きく異なるものや、近い値をもつものがある。

- 広域センシング

1個のセンサノードがセンシングできる範囲には限界があるため、町内や市内の気象観測や監視といった広域センシングを行う場合、多数のセンサが必要になる。広域センシングの場合、各センサノードのセンサデータは大きく異なる可能性がある。

センサネットワークの普及により、今後、センサの数は爆発的に増加する可能性があり、多数のセンサが存在する状況で効率的にセンサデータを収集する方式が求められている。

本研究では、センサデータを推測し、実際のセンサデータが推測値と大きく異なるセンサノードのみデータを送信するデータ収集方式を用いる。一部のセンサノードのみセンサデータを送信するため、通信量を削減でき、データ収集時間の短縮につながる。

提案手法では、多数のセンサノードに推測値を配信する必要がある。一般に、幾つかのセンサノードのセンサデータは近い値をもっており、高密度センシングでは近いセンサノード、多種センシングでは同じ種類のセンサノードのセンサデータが近い値になる。配信するセンサデータの推測値にある程度の誤差を許すことで、これらのセンサノードに同じ値の推測値を配信

できる。例えば、高密度センシングで1部屋に100個の温度センサが存在する場合、部屋の隅などに配置されたセンサノードの値はほぼ等しくなると考えられる。センサノードの位置によって4隅と4方の壁、床、その他にグループ化し、10個の推測値を配信することになる。100個のセンサノードの推測値を配信することなく、10個の推測値のみ配信すればよい。どの程度の誤差を許容できるかはデータ収集を行う目的に依存する。例えば先ほどの例の場合、部屋の中で快適な温度の場所を探すとして、摂氏1度単位の精度でデータ収集を行えば十分と考える。ある隅に10個のセンサノードがあり、それらのセンサデータの推測値が19.8度であれば、この値を10個のセンサノードに配信する。1度の誤差を許容して $19.8 \pm 0.5$ 度の範囲外のセンサデータをもつセンサノードは実際の値を送信する。

以上のように、ある程度の誤差を許すと、同じ推測値を複数のセンサノードに配信できる。そこで、提案手法では、放送型配信を用いたデータ収集方式を提案する。放送型配信では、複数のセンサノードに同じデータを同時に配信できるため、推測値の配信を効率的に行える [11], [12]。提案手法では、センサデータにある程度の誤差を許容し、複数のセンサノードに同じ推測値を配信して、実際のセンサデータを大きく異なるセンサノードのみセンサデータを送信してデータ収集時間を短縮している。

以下2.で関連研究について説明し、3.で推測値の的中率について説明する。4.で提案手法を説明し、5.で解析、6.で評価を行う。最後に7.で本稿をまとめる。

## 2. 関連研究

センサネットワークにおけるデータ収集のための手法が幾つか提案されている。

Directed diffusion [6]では、収集対象となるセンサノードの位置と収集周期、目的などを記述して問い合わせを発行する。問い合わせを受け取ったセンサネットワークは、対象となるセンサノードに処理を依頼し、依頼後は、対象センサノードとシンクノードで通信を行う。対象となるセンサノードは1個であり、本研究のように複数のセンサノードのデータを収集できない。

BBQ (Barbie-Q) [4]では、センサネットワークのモデルを作成し、モデルを用いてセンサネットワークの挙動を推測する。問い合わせへの応答は、推測値による確率的な回答になる。モデルを管理するノードが規定のタイミングで実際のセンサノードと通信し、モデルを修正することで、実際に近い推測値を得ることができる。センサノードとの通信を削減できるため、通信量が少なくなるが、センサデータの突発的な変化に対応できないといった問題がある。

Ken [2]では、BBQの問題点を解決するために、プッシュ型のアプローチを採用している。ベースステーションと呼ばれる管理ノードに、各センサノードが規定のタイミングでセンサデータを送信することで、センサネットワークのモデルを修正しながら、突発的な変化も検出できる。しかし、モデルを修正する必要のないセンサノードもデータを送信している。本研究では、許容誤差を設定することで、必要のないデータ送信を削

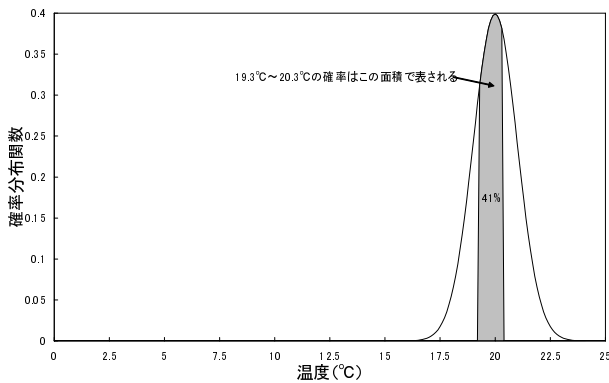


図1 温度分布の確率密度関数の例

Fig. 1 An example of the frequency function for temperature

減している点が異なる。

センサネットワークのネットワークトポロジを利用して通信量を削減する手法 [5], [7] があるが、提案方式は、シンクノードの受信帯域のみを考慮しているため、これらの手法を用いた上で提案方式を用いることも可能である。

### 3. 誤差と的中率

提案手法では、配信する推測値にある程度の誤差を許容することで、近い値のセンサデータがある値にまとめて配信することによって、複数のセンサノードに同じ推測値を配信でき、放送型配信による効率的な配信が可能になる。例えば、幾つかのセンサノードの温度分布が図1のようになっている場合を考える。図1では、横軸が温度、縦軸が確率密度関数の値であり、平均20.0度、標準偏差1.0の正規分布を示している。推測値が19.8度であり、許容誤差が $\pm 0.5$ 度の場合、推測値が的中しているとみなせる $19.8 \pm 0.5$ 度の分布は灰色で示す部分となる。この場合、温度分布が推測値から許容誤差範囲内にある確率は灰色の部分の面積であらわれ、41%になる。

推測値はシミュレーションによって与えられる値であり、本研究では、この的中率が問題となる。推測値から許容誤差範囲内のセンサデータをもつセンサノードの存在確率  $H$  は、センサデータが許容誤差範囲内にある確率と等しい。例えば、温度の例の場合、推測値の的中率  $H = 41\%$  となる。

### 4. 提案手法

本研究では、センサネットワークにおけるデータ収集時間短縮のため、推測値を放送型で配信するデータ収集方式である Broadcast and Collect (B&C) 方式を提案する。B&C方式では、推測値と実際のセンサデータが大きく異なるセンサノードのみセンサデータを送信することで、通信量を削減してデータ収集時間を短縮する。後に詳細を述べるが、データ収集中の時間の経過とともに、推測値を放送する期間(放送フェーズ)とセンサデータを収集する期間(収集フェーズ)に分かれていることが名前の所以である。

#### 4.1 想定環境

B&C方式で想定する環境を図2に示す。多数のセンサノード

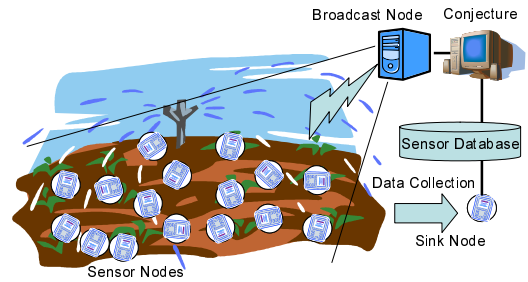


図2 想定環境

Fig. 2 An assumed environment

が存在し、これらは互いに接続され、センサネットワークを構成している。センサネットワーク自体のトポロジや通信プロトコルは特に規定しない。データを収集するシンクノードは、他のセンサノードから送信されるセンサデータを収集し、センサデータベースに格納する。格納された過去のセンサデータから、将来のセンサデータを計算機シミュレーションで推測する。計算量にも依存するが、推測にはパーソナルコンピュータやスーパーコンピュータを用いることが考えられる。センサノードに同じデータをまとめて放送型で配信できるノードを放送ノードと呼び、推測されたデータを放送ノードを通じて配信する。センサノードは、放送ノードに問い合わせる通信により推測されたデータを受信するのではなく、放送フェーズで放送ノードがセンサノードにデータを配信する。センサデータを収集するタイミングを収集時刻と呼び、収集時刻の間隔を収集周期と呼ぶ。収集周期は一定とする。

シンクノードや放送ノードを含め、センサノードに関する想定環境を箇条書きで示す。

- 放送された推測値の受信と自身のセンサデータの送信を同時に行えない。
- あらかじめ時刻同期しておくことで、フェーズの切り替えを自身で行える。
- 通信の帯域幅には制限がある。
- 送信したデータが必ず送信先に届く必要はなく、放送ノードが配信した推測値が幾つかのノードで受信されなかったり、シンクノードに送信したデータが届かなくてもよい。
- センサネットワークの構築は既に行われている。

MICA [3] や mind storm [8] といったセンサを備えた小型計算機をセンサノードとして用いることが考えられるが、これらは上記の特徴を有しており、現実的な想定環境であると考えられる。

提案手法の導入に必要なパラメタを表1に示す。放送グループとは、同じ推測値を送信するセンサノードのグループを示し、同じグループのセンサノードは同じ推測値を受信する。放送フェーズ、収集フェーズについては次節で説明する。放送ノードの送信帯域は、推測値の放送に使用できる帯域幅を示す。計算機シミュレーションが遅く、放送ノードが推測値の算出完了を待つ必要がある場合には、この送信帯域を計算機シミュレーションの速度に応じて小さくすることに相当する。シンクノードの受信帯域は、シンクノードがセンサデータを受信できる帯域幅を示す。センサネットワーク内で遅延が発生し、シンク

表1 提案手法のパラメタ

Table 1 Parameters for our proposed scheme

記号	説名
$N$	センサノードの数
$M$	放送グループの数
$D_B$	放送フェーズの期間
$D_C$	収集フェーズの期間
$B_B$	放送ノードの送信帯域
$B_C$	シンクノードの受信帯域
$H$	推測値の的中率
$S$	センサデータ 1 個あたりのデータサイズ

表2 収集フェーズのステップ

Table 2 Steps in collecting phase

推測値受信状況	送信するステップ	精度向上率	所要時間	
受信	誤差範囲外	修正ステップ	大	$D_{CC}$
	誤差範囲内	改善ステップ	小	$D_{CI}$
受信せず	報告ステップ	中	$D_{CR}$	

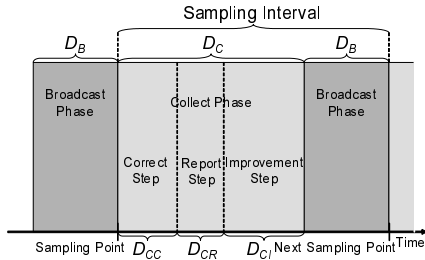


図3 放送フェーズと収集フェーズ

Fig. 3 Broadcast phase and collecting phase

ノードがセンサデータの到着を待つ必要がある場合には、この受信帯域を遅延に応じて小さくすることに相当する。推測値の的中率とは、3. で述べたように、実際のセンサデータが推測値の許容誤差範囲内であり、センサデータを送信する必要のないセンサノードの存在確率を示す。計算機シミュレーションの精度が悪かったり、許容誤差が小さい場合にはこの値は小さくなる。推測値の受信エラーやシンクノードへの送信エラーがある場合には、それらの発生確率に応じて的中率を小さくすることに相当する。 $S$  は、センサノードからシンクノードへ送信するセンサデータのデータサイズであり、放送する推測値のデータサイズにも相当する。例えば、10 個のセンサノードがシンクノードにセンサデータを送信する場合、シンクノードが受信するデータサイズは  $10S$  になる。また、10 個の放送グループがある場合に、放送ノードが配信するデータサイズは  $10S$  になる。

#### 4.2 放送フェーズと収集フェーズ

B&C 方式では、データ収集中の時間の経過とともに、放送フェーズと呼ぶ推測値を放送する期間と収集フェーズと呼ぶセンサデータを収集する期間に分かれる。これは、センサノードが推測値の受信とセンサデータの送信を同時に行えないためであり、放送フェーズではセンサノードは受信状態、収集フェーズでは送信状態にある。センサネットワークがマルチホップできる場合、マルチホップの際、センサノードは収集フェーズで受信を行うことがあるが、これはセンサネットワークが既に構築されているため、可能である。図3に示すように、収集時刻を境に放送フェーズと収集フェーズに分けられる。これは、センサノードが推測値と実際のセンサデータを比較する必要があるためであり、収集時刻を過ぎてからでなければ比較を行えないためである。センサノードは収集時刻で実際のデータを計測

する。収集フェーズが終了すると、次の放送フェーズが開始され、放送フェーズと収集フェーズを繰り返して行うことになる。

#### 4.3 放送フェーズ

放送フェーズでは、放送ノードが推測値をセンサノードに配信する。計算機シミュレーションによるセンサデータの推測と推測値の配信を交互に行うことや、シミュレーション終了後に推測値を配信することが考えられる。推測結果のデータサイズは放送グループの数とセンサデータのデータサイズの積で表され、 $MS$  となる。放送フェーズの期間は  $D_B$  で表され、この期間、放送ノードは最大で  $MS$  のデータを  $B_B$  の帯域を用いて放送する。放送フェーズの期間に制限があるため、放送フェーズ中にすべての推測値を配信できず  $B_B D_B < MS$  となる場合、放送できる最大の推測値の数  $\lfloor B_B D_B / S \rfloor$  個の推測値を放送する。記号  $\lfloor a \rfloor$  は  $a$  の整数部分を示す。このため、センサノードすべてが推測値を受信できるとは限らず、推測値を受信できないセンサノードもある。推測値を受信したセンサノードと受信しないセンサノードは、次の収集フェーズで区別して管理される。放送フェーズ開始から  $D_B$  経過すると放送フェーズが終了し、幾つかのセンサノードへの推測値の配信が完了する。

#### 4.4 収集フェーズ

放送フェーズ終了時点を集時刻と呼び、この時点でセンサノードは実際のデータを計測し、収集フェーズに入る。収集フェーズでは、センサノードがセンサデータをシンクノードに送信する。収集フェーズはさらに、推測値を受信したセンサノードの実際のセンサデータと推測値が許容誤差以上異なり、推測したセンサデータを修正する修正ステップ、推測値を受信しなかったセンサノードがセンサデータをシンクノードに報告する報告ステップ、推測値の許容誤差範囲内であるが、信頼性改善のために実際のセンサデータを送信する改善ステップに分けられる。これらのステップでセンサデータを送信するセンサノードの数は算出できるため、各ステップでセンサデータを送信するための所要時間も算出できる。ステップについてまとめたものを表2に示す。データ収集の精度を上げる効率は、修正ステップ、報告ステップ、改善ステップの順になる。これは、後述の式(7)から判断できる。このため、収集フェーズの長さに応じて修正ステップ、報告ステップ、改善ステップの順に遷移する。図3の例では、収集ステップ(Correct Step)、報告ステップ(Report Step)、改善ステップ(Improvement Step)が全て含まれている。

##### 4.4.1 修正ステップ

収集フェーズの最初のステップは修正ステップになる。修正ステップでは、放送ノードから推測値を受信し、推測値と実際のセンサデータが許容誤差以上異なるセンサノードが、実際の

センサデータをシンクノードに送信する．許容誤差以上になると分かっているセンサノードがデータを送信するため，データ収集の精度をもっとも向上できる．シンクノードの受信帯域  $B_C$  に依存するが，これらのセンサノードすべてがセンサデータを送信するために必要な時間を  $D_{CC}$  とする． $D_C < D_{CC}$  の場合，誤差以上の推測値がすべて修正されるとは限らない． $D_{CC} \leq D_C$  であれば，推測値を受信し，実際のセンサデータが誤差以上のセンサノードはすべてデータの送信を完了し，報告ステップに移る．

#### 4.4.2 報告ステップ

報告ステップでは，推測値を受信しなかったセンサノードが実際のセンサデータをシンクノードに送信する．こういった状況は，配信エラーや， $B_B D_B < MS$  となりすべての放送グループに推測値を配信できなかった場合に生じる． $MS \leq B_B D_B$  であり，配信エラーもない場合には，報告ステップは存在しない．推測値が許容誤差以上である可能性のあるセンサノードがデータを送信するため，データ収集の精度をある程度向上できる．修正ステップと同じく，シンクノードの受信帯域  $B_C$  に依存するが，これらのセンサノードすべてがセンサデータを送信するために必要な時間を  $D_{CR}$  とする． $D_{CC} \leq D_C < D_{CC} + D_{CR}$  の場合，推測値を受信しなかったセンサノードすべてがセンサデータを送信するとは限らない． $D_{CC} + D_{CR} \leq D_C$  であれば，推測値を受信しなかったセンサノードはすべてシンクノードにセンサデータを送信することになる．報告ステップが完了してもまだ収集フェーズの時間が余っている場合，改善ステップに移る．

#### 4.4.3 改善ステップ

改善ステップでは，推測値を受信し許容誤差範囲内であったセンサノードが，精度向上のため，センサデータをシンクノードに送信する．推測値すべてがはずれている場合には，センサデータを送信するセンサノードはすべて修正ステップに含まれるため，改善ステップは存在しない．シンクノードの受信帯域  $B_C$  に依存するが，これらのセンサノードすべてがセンサデータを送信するために必要な時間を  $D_{CI}$  とする． $D_{CC} \leq D_C < D_{CC} + D_{CR} + D_{CI}$  の場合，これらのすべてのセンサノードがセンサデータを送信できるとは限らない． $D_{CC} + D_{CR} + D_{CI} \leq D_C$  であれば，センサノードすべてが実際のセンサデータをシンクノードに送信することになる．改善ステップが完了してもまだ収集フェーズの時間が余っている場合，次の放送フェーズを待つ場合や，自動的に収集フェーズの期間を短くし，すぐに次の放送フェーズに移る場合が考えられる．

#### 4.5 センサノードの動作

放送ノード，センサノードの動作状態を図4に示す．

放送ノードの状態には，推測，放送，収集がある．推測状態では，計算機シミュレーションによるセンサデータの推測結果を待っている状態であり，放送フェーズに含まれる．放送状態では，推測結果をセンサノードに放送型で配信している状態であり，放送フェーズに含まれる．ある放送グループの推測結果が算出されるとその推測値を放送し，次の放送グループの推測

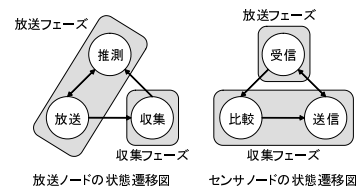


図4 状態遷移図

Fig. 4 An state-transition graph

結果を待つといったように，放送フェーズ中に推測状態と放送状態を繰り返し行う場合や，すべての放送グループのセンサデータの推測値を算出完了してから放送するといったように，推測状態と放送状態を順に遷移する場合が考えられる．放送フェーズが終了すると，収集状態に遷移し，センサノードから送信される実際のセンサデータをシンクノードが収集するのを待つ状態になる．収集状態は収集フェーズに含まれる．

センサノードの状態には，受信，比較，送信がある．受信状態では，放送ノードから配信される推測値を受信する．受信状態は，放送フェーズに含まれる．放送フェーズが終了すると，実際のセンサデータを計測し，比較状態に遷移する．比較状態では，推測値と実際のセンサデータを比較する状態である．比較するのみであるため，非常に短いと考えられ，本研究では，比較状態の時間を無視する．比較が完了すると，許容誤差以上であれば送信状態に遷移し，センサデータを送信する．送信状態では，センサデータをシンクノードへ送信し，受信状態に再び遷移する．比較状態と送信状態は収集フェーズに含まれる．ここで，送信状態とは，提案手法上での送信状態であり，センサネットワークにマルチホップが含まれる場合には，送信状態でも，センサデータの経路のため受信を行うこともある．

## 5. 解 析

本章では，提案手法の解析と，評価値の定義を行う．

まず，各フェーズやステップで送信するデータの数を求める．放送フェーズで送信するデータの数  $P_B$  は，センサデータあたりのデータサイズが  $S$ ，放送グループの数は  $M$  であるため，最大で  $P_{B \max} = M$  となり，次式で与えられる．

$$P_B = \begin{cases} \lfloor \frac{B_B D_B}{S} \rfloor & (B_B D_B < P_{B \max} S) \\ P_{B \max} & (B_B D_B \geq P_{B \max} S) \end{cases} \quad (1)$$

次に，修正ステップで送信されるデータの数  $P_{CC}$  を求める．的中率が  $H$  であり，確率的に求めるため，平均的なデータの数を求める．放送された  $P_B$  個の推測値のうち， $(1-H)$  の確率で許容誤差から外れることになる．推測値は放送グループ単位で配信され，放送グループ1個あたりの平均センサノード数は  $N/M$  であることから， $P_{CC}$  の最大値  $P_{CC \max} = P_B(1-H)N/M$  となる．収集フェーズの期間が短く， $B_C D_C < P_{CC \max} S$  となる場合にはすべてのデータを送信できない．結局， $P_{CC}$  は以下の式で与えられる．

$$P_{CC} = \begin{cases} \lfloor \frac{B_C D_C}{S} \rfloor & (B_C D_C < P_{CC \max} S) \\ P_{CC \max} & (B_C D_C \geq P_{CC \max} S) \end{cases} \quad (2)$$

修正ステップの最大の所要時間  $D_{CCmax} = P_{CCmax}S/B_C$  になる。

報告ステップで送信されるデータの数  $P_{CR}$  を求める。 $P_{CR}$  の最大値は、推測値を受信しなかったセンサノードの数と等しく、 $P_{CRmax} = N - P_B N/M$  となる。報告ステップに移る場合、収集フェーズの期間  $D_C$  のうち、 $D_{CCmax}$  については既に修正ステップで経過しているため、残りの時間  $D_{CR} = D_C - D_{CCmax}$  に応じて以下のように算出される。

$$P_{CR} = \begin{cases} 0 & (D_{CR} < 0) \\ \lfloor \frac{B_C D_{CR}}{S} \rfloor & (B_C D_{CR} < P_{CRmax} S) \\ P_{CRmax} & (B_C D_{CR} \geq P_{CRmax} S) \end{cases} \quad (3)$$

報告ステップの最大所要時間  $D_{CRmax} = P_{CRmax}S/B_C$  になる。

さらに、改善ステップで送信されるデータの数  $P_{CI}$  を求める。 $P_{CI}$  の最大値は、推測値を受信したが、センサデータが許容誤差以上であるセンサノードの数と等しく、 $P_{CImax} = P_B H N/M$  となる。改善ステップに移る場合、収集フェーズの期間  $D_C$  のうち、 $D_{CCmax} + D_{CRmax}$  については既に経過しているため、残りの時間  $D_{CI} = D_C - D_{CCmax} - D_{CRmax}$  に応じて以下のように算出される。

$$P_{CI} = \begin{cases} 0 & (D_{CI} < 0) \\ \lfloor \frac{B_C D_{CI}}{S} \rfloor & (B_C D_{CI} < P_{CImax} S) \\ P_{CImax} & (B_C D_{CI} \geq P_{CImax} S) \end{cases} \quad (4)$$

改善ステップの最大所要時間  $D_{CImax} = P_{CImax}S/B_C$  になる。

センサデータの収集周期は、放送フェーズと収集フェーズの和で与えられ、

$$Interval = D_B + D_C \quad (5)$$

となる。

以上で求めた  $P_{CC}$ ,  $P_{CR}$ ,  $P_{CI}$  の値は、次節で説明する妥当性と信頼性を求めるために用いる。

### 5.1 妥当性と信頼性

妥当性とは、収集したデータのうち許容誤差範囲内のデータの確率を示す。データ収集では、初めに、すべてのセンサノードのデータを推測値とする。同じ放送グループに含まれるセンサノードのデータはすべて同じ値になる。収集時刻が経過すると、収集フェーズで幾つかのセンサノードが実際のセンサデータを送信する。シンクノードが受信したセンサデータについては、その受信した実際の値をデータとする。このため、的中率が高いほど、また、収集できるセンサデータの数が大きいほど高い値となる。以下で妥当性の計算式を導出する。

推測値は  $H$  の確率で許容誤差範囲内にあるため、妥当性は常に  $H$  以上になる。修正ステップでセンサデータを受信すると、修正ステップで送信するセンサノードのセンサデータは、もともとすべて許容誤差範囲外であり、シンクノードが実際のセンサデータを受信すると妥当性が向上する。報告ステップでは、送信するセンサノードは  $(1 - H)$  の確率で許容誤差範囲外のデータをもつことになるため、平均して  $P_{CR}(1 - H)$  個のデータが許容誤差範囲内に置き換わることになる。改善ステッ

プで送信されるデータは、もともと許容誤差範囲内であったため、妥当性の向上にはつながらない。以上より、妥当性は以下で与えられる。

$$Adequacy = H + \frac{P_{CC}}{N} + \frac{P_{CR}(1 - H)}{N} \quad (6)$$

次に、信頼性とは、収集したデータのうち正確な値のデータの確率を示す。この値は、受信したセンサデータの割合となるため、以下の式で与えられる。

$$Reliability = \frac{P_{CC} + P_{CR} + P_{CI}}{N} \quad (7)$$

妥当性と信頼性は大きいほ性能がよいといえ、評価指標となる。

## 6. 評価

提案する B&C 方式の評価を行う。比較対象として、BBQ や Ken といった放送型配信を行わずに推測値を算出してセンサノードからデータを収集する方式と比較する。

従来方式では、収集周期  $D_A$  の間、シンクノードはセンサノードからデータを受信し続ける。センサデータを送信するセンサノードの数を  $P_A$  とすると、 $P_A$  は以下の式で与えられる。

$$P_A = \begin{cases} \lfloor \frac{B_C D_A}{S} \rfloor & (B_C D_A < NS) \\ N & (B_C D_A \geq NS) \end{cases} \quad (8)$$

$P_A$  のうち、 $(1 - H)$  の確率で推測値が許容誤差から外れているため、妥当性、信頼性は以下になる。

$$Adequacy = H + \frac{P_A(1 - H)}{N} \quad (9)$$

$$Reliability = \frac{P_A}{N} \quad (10)$$

次節から評価結果を示す。評価結果は、計算機シミュレーションによる計算結果である。グラフに多少のばらつきがあるように見えるが、これは、センサデータのデータサイズが  $S$  ごとに離散的に変化するためである。

### 6.1 センサノードの数と各性能

センサノードの数に応じてどの程度の性能が出るのかを把握するため、妥当性、信頼性に関する評価を行った。収集周期を 0.1 秒、放送グループの数  $M = 10$  とし、妥当性が最もよくなるように放送フェーズの期間  $D_B = 0.015$  秒とした。この場合、7 個の放送グループに推測値を放送できることになる。収集フェーズの期間  $D_C = 0.1 - D_B = 0.085$  となる。放送ノードの放送帯域  $B_B$  およびシンクノードの受信帯域  $B_C$  はセンサネットワークで用いられる Zigbee [13] の最大転送速度を想定し、 $B_B = B_C = 250$  kbps とした。推測値の的中率  $H = 0.41$  とし、センサデータのデータサイズは、64 バイトとした。従来方式での収集周期は、B&C 方式と従来方式の収集周期が同じになるように  $D_A = D_B + D_C = 0.1$  とした。

評価結果を図 5 に示す。縦軸が妥当性、信頼性の値、横軸がセンサノードの数を対数軸で示している。“Adequacy (B&C)” が提案手法の妥当性であり、“Reliability (B&C)” が提案手法の信頼性を示す。“Adequacy (conventional)”, “Reliability (conventional)”

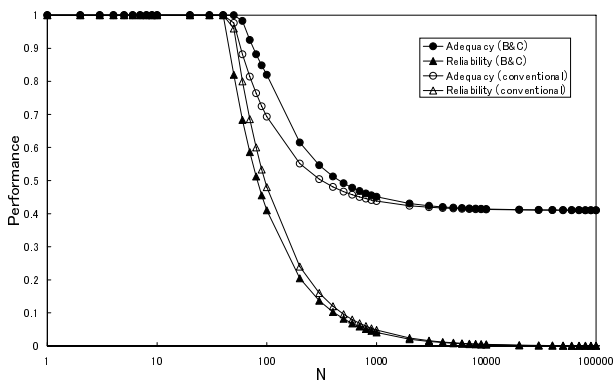


図5 各性能とセンサノードの数  
Fig.5 Performances and the number of sensor nodes

はBBQやKenといった従来方式の妥当性、信頼性である。

このグラフより、B&C方式の妥当性は従来方式より高いことが分かる。これは、提案手法では、あらかじめ推測値を放送し、センサデータが許容誤差範囲外にあるセンサノードが修正ステップで最初にセンサデータを送信しているためであり、送信されたセンサデータの中で許容誤差範囲外のデータの割合が高く、妥当な値を得やすいためである。従来方式では、センサノードは推測値を取得していないため、許容誤差範囲内のセンサノードがセンサデータを送信する割合が高くなるため、B&C方式より妥当性が高くなっていない。

また、信頼性はB&C方式よりも従来方式の方が高いことが分かる。これは、B&C方式の放送フェーズ期間中も、従来方式ではセンサノードからデータを取得しているため、センサデータを送信するセンサノードの数が多くなり、信頼性は高くなる。センサノードの数が40未満の場合、両方式の妥当性、信頼性ともに100%になっているが、これは、センサノードの数が少なく、収集周期ですべてのセンサデータを収集できるためである。

例えば、センサノードが100個ある場合、B&C方式の妥当性、信頼性は82%、41%となっており、従来方式では、69%、48%になっている。B&C方式では82%の妥当性を達成しており、ある程度の誤差を許してセンサデータを収集する場合には、収集したデータが82%の確率で正確であるといえる。十分現実的な範囲であると考えられる。誤差を許さず、実際のセンサデータを収集する場合には41%の確率で正確であり、この場合には従来方式の方が高い性能を与えている。

## 6.2 収集周期

データ収集の目的によっては、100%の妥当性を求める場合が考えられる。例えば、高精度の気象観測や、安全安心のための放射能汚染などの観測が考えられる。図5では、センサノードの数が40未満であれば、0.1秒の周期で100%の妥当性を与えているといえる。そこで、本節では、100%の妥当性を与える最小の収集周期を求める。B&C方式における $D_B$ は先ほどと同じく0.015秒とした。

算出結果を図6に示す。縦軸は妥当性が100%になる場合の最小の収集周期、横軸がセンサノードの数を示している。“B&C ( $H=h$ )”がB&C方式において的中率が $h$ の場合の収集周期、

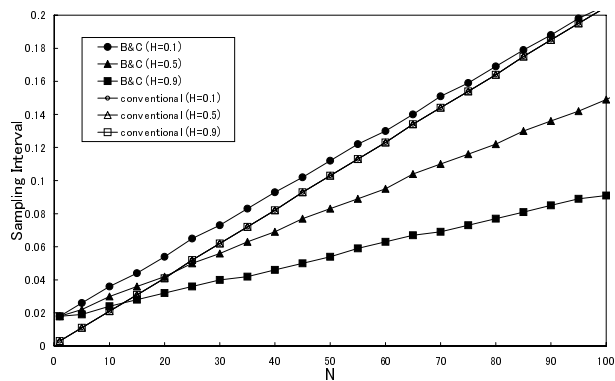


図6 収集周期とセンサノードの数  
Fig.6 Sampling rates and the number of sensor nodes

“conventional ( $H=h$ )”が従来方式を示す。

このグラフより、センサノードの数が少ない場合には従来方式の収集周期が短い、多い場合にはB&C方式の収集周期が速いことがわかる。これは、センサノードの数が少ない場合には、推測値から誤差以上のセンサデータのみ集めるよりも、すべてのセンサノードのデータを集める方が速いためである。B&C方式で放送フェーズに費やしている期間中もセンサデータを集められるため、従来方式の収集周期が短くなる。一方、センサノードの数が多くなると、推測値から誤差以上のセンサデータのみを集める方が速くなり、B&C方式の収集周期が速くなる。

また、B&C方式では的中率が大きいほど妥当性が100%になるために必要なセンサデータの数が少なくなるため、 $H$ が大きいほどセンサノードの数が増えても短い収集周期でデータ収集できるといえる。従来方式では、的中率に関わらず、すべてのセンサデータを集めることになるため、的中率に依存しない。

例えば、センサノードが100個あり、的中率が50%の場合、B&C方式では最大0.15秒の周期で100%の妥当性を確保したうえでデータ収集でき、従来方式では、0.21秒周期になる。

## 6.3 放送フェーズの期間

B&C方式では、放送フェーズと収集フェーズに分けてデータを収集するため、収集期間内におけるこれらの割合が性能に影響を及ぼす。そこで、収集周期を一定にして、放送フェーズの割合を変えることで、その影響を評価した。センサノードの数を100, 200とし、収集周期をこれまでと同じく0.1秒とした。すなわち、 $D_B + D_C = 0.1$ となるようにしたうえで評価を行った。

結果を図7に示す。縦軸が妥当性と信頼性、横軸が放送フェーズの期間 $D_B$ を示している。 $D_C = 0.1 - D_B$ である。“B&C ( $N=n$ )”がB&C方式においてセンサノードの数が $n$ 個の場合の結果である。

このグラフより、妥当性を最大にする $D_B$ があることが分かる。 $D_B$ が短すぎると推測値を十分に配信できず、長すぎると実際のセンサデータの収集に費やせる時間が短くなるためである。一方、信頼性は $D_B$ が長くなるほど低くなっている。これは、 $D_B$ が長くなるほど収集フェーズ費やせる時間が短くなり、収集できる実際のセンサデータの数が少なくなるためである。

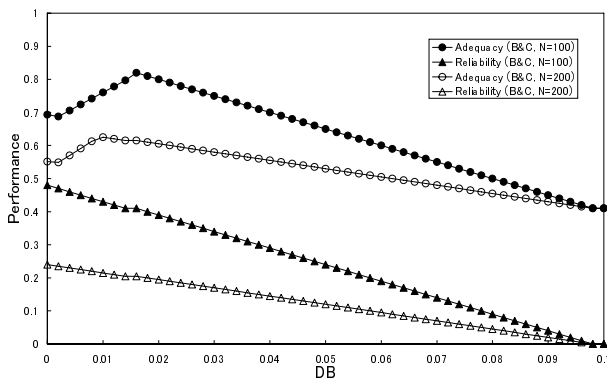


図7 各性能と放送フェーズの期間(収集周期一定)

Fig.7 Performances and the duration for the broadcast phase (constant sampling interval)

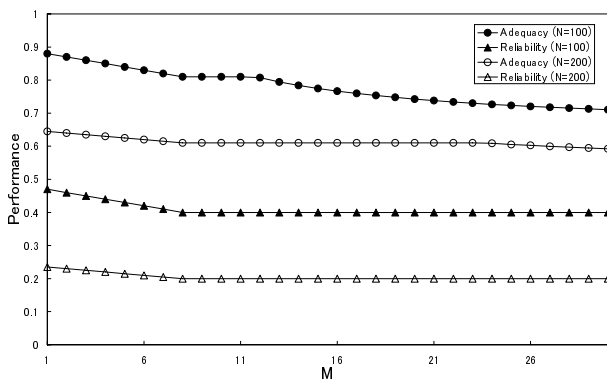


図8 各性能と放送グループ数

Fig. 8 Performances and the number of broadcast groups

最大の妥当性を与える  $D_B$  の値は、式(2)~(5)(7)から求められる。

#### 6.4 放送グループ数

B&C方式では、幾つかのセンサノードをグループ化し、それらに同じ推測値を配信することで、放送型配信の利点を生かし、効率的な推測値の配信を行う。そこで、放送グループ数の性能への影響を調べた。センサノードの数を100, 200とし、 $D_B = 0.015$ ,  $D_C = 0.085$ とした。他のパラメータについてはこれまでと同じである。

結果を図8に示す。縦軸が妥当性と信頼性、横軸が放送グループの数である。放送グループの数が小さいほど妥当性が高くなっているが、これは、放送グループの数が変化しても的中率が変わっていないためである。すなわち、グループ化して同じ推測値を配信できる場合には、グループ化したほうがよいといえる。このとき、各グループにおける平均的中率が最も高くなるようにグループ化することで、性能を向上できる。

## 7. むすび

本研究では、センサネットワークにおける放送型配信を用いたデータ収集方式B&C方式を提案した。B&C方式では、センサデータにある程度の誤差を許容し、複数のセンサノードに同じ推測値を放送型で配信して、実際のセンサデータを大きく

異なるセンサノードのみセンサデータを送信することでデータ収集時間を短縮している。収集周期を、推測値を放送する放送フェーズと実際のデータを収集する収集フェーズに分けてデータ収集を行う。提案手法の評価を行い、実際にどの程度の収集周期でデータ収集できるかを明らかにした。また、高密度センシングや多種センシングといった、センサノードの数が多く、幾つかのセンサノードが近いセンサデータをもつ場合には、従来のデータ袖手方式よりもB&C方式が速くデータを収集できることを明らかにした。

今後、複数回のセンサデータを推測して放送型配信する場合や、放送ノードが複数あり、階層構造になっている場合のデータ収集手法の提案を予定している。

謝辞 本研究の初期段階においてご教授いただいた先生方に感謝する。本研究の一部は、文部科学省21世紀COEプログラム「ネットワーク共生環境を築く情報技術の創出」および、文部科学省科学研究費補助金(若手研究(B))「選択型コンテンツの放送型配信に関する研究」(課題番号:18700085)の研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

## 文献

- [1] 「万博アメダス」及び「万博エコクラブ」の本格運用開始について、2005. <http://www.expo2005.or.jp/jp/N0/N2/N2.6/N2.6.75/index.html>
- [2] D. Chu, A. Deshpande, J. Hellerstein, W. Hong, Approximate data collection in sensor networks using probabilistic models, Proc. of the International Conference on Data Engineering (ICDE 2006), pp. 48-59, 2006.
- [3] Crossbow Technology, 2006. <http://www.xbow.com/Home/HomePage.aspx>
- [4] A. Deshpande, C. Guestrin, S. Madden, J. Hellerstein, W. Hong, Model-driven data acquisition in sensor networks, Proc. of the International Conference on Very Large Data Bases (VLDB 2004), pp. 588-599, 2004.
- [5] C. Guestrin, P. Bodi, R. Thibau, M. Paski, S. Madde, Distributed regression: an efficient framework for modeling sensor network data, Proc. international symposium on Information processing in sensor networks (IPSN 2004), pp. 1-10, 2004.
- [6] C. Intanagonwiwat, R. Gvindan, D. Estrin, J. Heidemann, F. Silva Directed diffusion for wireless sensor networking, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 11, Issue 1, pp. 2-16, 2003.
- [7] S. Madden, M. J. Franklin, J. M. Hellerstein, W. Hong, Tag: a tiny aggregation service for ad-hoc sensor networks, ACM SIGOPS Operating Systems Review, Vol. 36, Issue SI, pp. 131-146, 2002.
- [8] MINDSTORMS NXT Home, 2006. <http://mindstorms.lego.com/>
- [9] 瀬川典久, 安原幸生, 義久智樹, 小山田 耕二, センサネットワークを利用したリアルタイム可視化システムの構築, 電子情報通信学会第3回センサネットワーク研究会, 2006.
- [10] 総務省, 情報通信白書平成18年版, p. 219, 2006. <http://www.johotsusintokei.soumu.go.jp/whitepaper/ja/h18/pdf/index.html>
- [11] 義久智樹, 塚本昌彦, 西尾章治郎, 再生単位を考慮したスケジューリング手法における使用チャンネル数について, 日本データベース学会 Letters, Vol. 4, No. 3, pp. 5-8, 2005.
- [12] T. Yoshihisa, M. Tsukamoto, S. Nishio, A scheduling scheme for continuous media data broadcasting with a single channel, IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 52, Issue 1, pp. 1-10, 2006.
- [13] Zigbee Alliance, 2006. <http://www.zigbee.org/en/>