

## 大規模センサネットワークにおける 遅延の抑制を考慮したデータ収集機構の提案

岸野泰恵<sup>†</sup> 櫻井保志<sup>†</sup> 亀井剛次<sup>†</sup> 柳沢 豊<sup>†</sup> 前川卓也<sup>†</sup> 岡留 剛<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 日本電信電話株式会社 コミュニケーション科学基礎研究所

あらまし：本研究では、数多くのセンサノードからなる大規模センサネットワークのための効率的なデータ収集機構を提案する。収集したデータは、実世界の情報のリアルタイムなコンテンツ化に用いることを想定している。提案する機構では、データが発生してから基地局に到着するまでの遅延を抑制することを目的に、階層的にクラスタを作成してデータを収集する。クラスタリングは、クラスタ内の通信が他のクラスタと重複する度合いを指標として行い、クラスタ内のノードの個数や階層数は、データの発生量から遅延を見積もって決定する。本稿では、通信方式と、提案するクラスタリング手法について述べる。また、各階層ごとにデータを集めることで基地局にデータが到達するまでの時間を短縮できることを示す。

### Data Aggregation Method to Reduce Latency for Large-Scale Sensor Network

Yasue Kishino<sup>†</sup>, Yasushi Sakurai<sup>†</sup>, Koji Kamei<sup>†</sup>, Yutaka Yanagisawa<sup>†</sup>,  
Takuya Maekawa<sup>†</sup>, and Takeshi Okadome<sup>†</sup>

<sup>†</sup> NTT Communication Science Laboratories

**Abstract** : The data aggregation method for a large-scale sensor network proposed here aims to reduce the communication delay from the generation of a sensor event to the arrival of the data to a base station. The method adopts hierarchical clustering whose criterion is the degree of duplication of wireless communication area among clusters. The clustering parameters such as the number of hierarchies and those of nodes in a cluster are determined by estimating the amount of data. Analyses of a tree-structural communication model show the method using the hierarchical clustering enables to reduce the communication delay.

## 1 はじめに

近年、コンピュータや半導体、センサなどの小型化により、ユビキタスコンピューティング環境 [12] が実現しつつある。ユビキタスコンピューティング環境では、あらゆる場所にさまざまなデバイスが付与され、それらが連携してユーザにサービスを提供することが想定されている [1, 6, 11]。筆者の所属する研究グループでは、このようなユビキタスコンピューティング環境の実現に向けて、s-room[9] を構築し、研究を進めている。

s-room では、実世界にあるさまざまなモノにセンサノードを付与し、収集したデータを解析し、その場で起きているできごとを言語化することで、リアルタイムにコンテンツを作成することを目標としている。このような屋内型センサネットワークにおいては、屋内に存在する数多くのモノから確実にデータを取得し、コンテンツにリアルタイムに反映させる必要がある。このような環境を実現するためには、リアルタイムにセンシングデータを収集できるセンサネットワークが必要となる。

センサノード間でネットワークを構築するセンサネットワークに関しては、さまざまなアプローチで効率よくデータを収集しようとする研究が行われている。本研究では、センサノードのデータの発生頻度と無線通信の衝突を考慮してネットワークの構成を決めることで、より多くのセンサノードから少ない遅延でデータを収集することを目的としている。

本稿では、本研究で扱う通信方式と、クラスタリング手法について述べる。また、各階層毎にデータを集めることで遅延を短縮できることを示す。

## 2 想定環境

### 2.1 s-room

s-room では、センサによって実世界の状況を把握し、実世界をリアルタイムにコンテンツ化する、というコンセプトのもと、さまざまな研究を行っている。例えば、これまでに、モノ参加型 Weblog[5]、EventCapture といったアプリケーションを提案している。

モノ参加型 Weblog は、モノが自身の状況や、おきた出来事を元に blog を書くというアプリケーションで

ある。モノにはセンサノードが付与されており、このノードがセンシングしたデータを元に blog の記事が作成される。EventCapture は、モノとモノの間の接触関係を元に、モノの配置を再現し、それを動画で再生するアプリケーションである。モノの各面にはセンサノードが設置され、それによってモノの間の接触関係を測定している。

こういったアプリケーションにおいては、データをリアルタイムにアプリケーションに反映させられるセンサネットワークが必要となる。モノの状況が変わってから数時間後に blog にその結果が表示されたり、リアルタイムにモノの配置を再生しているにもかかわらず十分後にしかモノの移動の結果が反映されないと、アプリケーションが成り立ちにくい。さらにこういったアプリケーションは、センサノードが増えれば増えるほど効果的である。blog においては、より多くの記事を書くことができ、複数のモノの動きを連携させた記事も書けるようになる。

このように、数多くのセンサノードからリアルタイムにデータを収集できるセンサネットワークが必要とされている。

## 2.2 屋内型センサネットワークの特徴

s-room のような実世界の状況を収集するための屋内型センサネットワークには以下のような特徴がある。

### 1. リアルタイム性

実世界の状況をリアルタイムにコンテンツ化し、ユーザにサービスを提供する環境を想定しているため、階層の末端にあるセンサノードで発生したデータであっても、基地局に到着するまでの遅延を一定以下に抑えるような機構が必要となる。

### 2. センシング対象が膨大

屋内のモノは多岐にわたりその数も膨大である。また、多くの箇所にセンサを付与すればするほど、より詳細に実世界の状況を把握できるようになる。1 個のモノであっても筆筒の引き出しそれぞれにセンサを付与し、食器や文具の 1 個 1 個にまで付与できるほどセンサが小型化したとすると、1 つの部屋に設置されるセンサノードの個数も膨大なものになる。そのため、ノードの個数が膨大であっても、効率よくそのデータを収集できる必要がある。

### 3. センサデータの特徴

モノに付与されたセンサノードのセンシング結果は、人がそのモノに触れたり、日が差したときなどに値が変化するのみであり、その他の時間では、ほぼ同じ値をとり続ける。このような状況において、センサノードが測定したすべてのデータを基地局に収集しようとする、よく似た値を収集し続けるなど無駄が多い。そこで本研究では、センシング結果に変化があったときにのみ、データを基地局に向けてデータを送信するイベント駆動型センサノードを想定する。イベント駆動型センサノードを用いることで、限られた通信帯域を有効に使えるようになる。

## 4. 近距離通信

屋内型センサネットワークにおいては、多数のノードがお互いに通信可能な範囲内に設置されるため、単純に通信を行うと無線が干渉し合っ、効率よく通信できない。無線通信の電波強度を調整するなど通信の効率化が必要となる。

## 5. 生活空間でセンシング

本研究では、ユーザが日常生活で使用するようなさまざまなモノにセンサを付与しデータを収集することを想定している。各家庭や各職場においてセンサネットワークを構築することを想定しているため、ユーザ自身が簡単にセンサネットワークを構築できる必要がある。本研究では、センサノード、あるいはセンサノードがあらかじめ埋め込まれたさまざまなモノをユーザが部屋の中に自由に配置し、さらに基地局を 1 台設置すると、自動的にネットワークが構築されるという状況を想定している。センサノードについても、階層的にデータを収集することを考えているが、中継ノードとセンシングノードを別に設けるのではなく、単一のノードのみでネットワークを構成するものとする。

本研究では、以上のような特徴をもつ屋内型センサネットワークに適した通信方式を実現することを目的とする。想定する環境で最も重要となるのは、リアルタイム性であり、遅延を一定以下に抑制しながらデータを収集できる必要がある。

## 2.3 本研究のアプローチ

センサノード間でネットワークを構築し、効率よくデータを収集するための手法は、センサーネットワーク

やアドホックネットワークの研究分野で盛んに研究されている [4, 10] . 遅延を抑えながらデータを収集する手法もさまざまなものが提案されている . 例えば , アドホックネットワークの分野ではルーティングが盛んに研究されており , 経由するノードの数を抑えるようなルーティングを行えば , 遅延を抑えることができる . また , MAC 層の研究では , TDMA (Time Division Multiple Access) のスケジューリングを工夫することで遅延を抑える例 [2] や , CDMA (Code Division Multiple Access) を利用して衝突を避けようとする研究例 [3] もある . さらに , データを複数のノードを経由して収集する際に , 似たデータを統合して通信量を抑えるといったアプローチ [7] も存在する .

これに対して本研究では , 階層的な木構造のネットワークを想定し , ネットワーク構成をデータの発生量を見積もって最適化することで , 遅延を一定以下に抑える手法を提案する .

本研究で想定するのは一部屋に多数のノードが配置されるような状況であり , 設置されたすべてのノードが互いに通信できる可能性がある . このような環境でそこで , 無線の送信電力を調整できる無線通信モジュールを用いて , 必要最低限の強度の電波で通信し , 電波が互いに届かない複数箇所まで並行して通信できるようにする . 本研究では , こういった点を考慮して通信の効率がよくなるようにセンサノードをクラスタリングする .

また , 1 台の基地局とすべてのノードが直接通信を行うような状況を想定すると , 多数のノードが存在する状況では , それぞれのノードに通信の機会が頻繁には回ってこないため , 遅延が生じがちである . 本研究では , 木構造のネットワークを想定することで , 各親ノードには限られた数の子ノードしか存在しないため , 遅延を抑制できる .

このような , 階層的な木構造を用いてデータを収集するアプローチは , これまでのセンサネットワークでも研究例があり , それらは , 省電力化 [3] や , 通信のスケジューリング [2] に注目している . そのため , 通信遅延に関して最適な木構造とはならず , 遅延が大きくなる可能性がある . 本研究では , 木の構造を最適化することで , 効率のよいデータ収集を実現する .

なお , 本稿では , 通信帯域が溢れるほどのデータは発生しないものとする . また , センサノード間の距離は , 位置取得センサを用いるのではなく , 電波の強度を

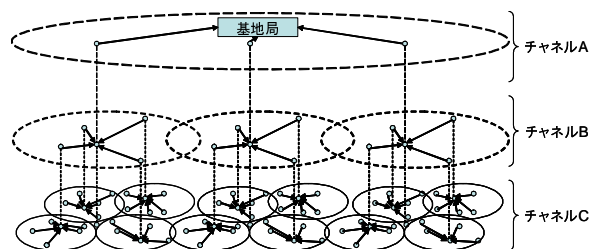


図 1: データ収集のイメージ

利用して計測するものとする . 具体的には , あるセンサノードから送信電波強度を変化させて複数のパケットを送信し , 受信側では , 受け取ったパケットのうち最小の電波強度を距離とする .

### 3 提案手法

#### 3.1 データ収集手法

ここで , 本研究で扱う通信方式について述べる . 手法のイメージを図 1 に示す . 最下位の階層では , 各ノードは近くに配置された他のセンサノードとクラスタを生成し , その中の 1 台 (クラスタヘッドと呼ぶ) にデータを集める . この際の通信は , クラスタ内のノードに届けば十分であるため , 無線送信の電波強度を制限し , 微弱な電波で通信すればよく , 電波の届かない他のクラスタでは , 並行してデータ収集を行える . クラスタヘッドは , 他のクラスタヘッドと 1 段上位階層のクラスタを生成する . このクラスタでさらにデータを集め , さらに上位階層のクラスタでデータを収集することを繰り返し , 最終的には最上位の基地局にすべてのデータが収集される . さらに , 各階層で異なる通信チャンネルを使用することで , 各階層で独立してデータを収集するものとする .

次に , データの流れに沿ってセンサノードの動作を詳細に述べる . まず , 最下位階層のクラスタで各センサノードのもつデータをクラスタヘッドに集める . クラスタヘッドは , クラスタ内の各ノード (子ノード) へデータ要求メッセージを送信する . 要求メッセージを受信した子ノードはその時点で自身の送信キューに格納されていたデータをクラスタヘッドへ送信する . 送信キューが空であれば , 何も送信しない . すべてのノードからデータを収集すると , チャンネルを上位階層との通信チャンネルに切り替え , この階層でのクラスタヘッドからデータ要求メッセージが送られるのを待つ . データ要求を受信すると , 子ノードの場合と同様にしてデー

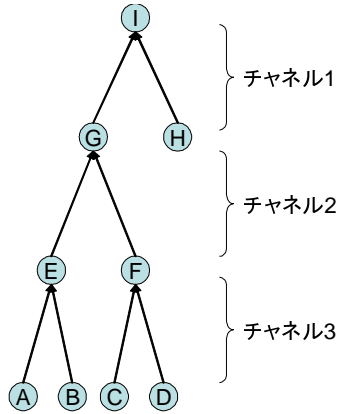


図 2: データ収集トポロジの例

データを収集する。全階層のノードでこの処理を繰り返し、最上位階層にある基地局にデータが収集される。各クラスターヘッドも他のノードと同じくセンシングを行っているため、上位階層へデータを送信する際には自身がセンシングした結果も統合して送信する。

例えば、図 2 のようなトポロジでは、以下のような手順でデータを収集する。

1. ノード A とノード B はノード E に、ノード C とノード D はノード F に、チャンネル 3 でデータを集める。
2. ノード E とノード F は、それぞれの子ノードからデータを集め終わると通信チャンネルを 2 に切り替え、ノード G にデータを集める。
3. ノード G とノード H は、それぞれの子ノードからデータを集め終わると通信チャンネルを 1 に切り替え、ノード I にデータを集める。

この処理を行う際の  $k$  階層目にあるノードの動作を擬似コードで記述したものを図 3 に示す。各ノードは、自身のセンシング結果と他の端末から受信したセンシング結果を送信キューで管理し、送信要求があったときにはキューに格納されているデータをすべて送信するものとする。1 行目で自身のセンシング結果を送信キューへ格納し、2 行目から 8 行目の処理で子ノードからデータを収集し、9 行目から 12 行目で送信キューに格納されたデータを上位階層へ送信している。データ収集部分は子ノードがあるときにだけ処理される部分であり、センサノードが子ノードをもたないときは、この部分は処理されない。

```

1.   センシングデータを送信キューに追加
2.   チャンネルを  $C_{k+1}$  に設定
3.   for each  $N_c$  do
4.       電波強度を  $E_c$  に設定
5.        $N_c$  にデータ要求メッセージ送信
6.       if  $N_c$  からのデータを受信
7.           受信データを送信キューに追加
8.   end for
9.   チャンネルを  $C_k$  に設定
10.  電波強度を  $E_p$  に設定
11.  if  $N_c$  からデータ要求メッセージを受信
12.      キューに入っている全データを送信

```

$N_c$ : 子ノード,  $N_p$ : 親ノード  
 $C_{k+1}$ : 子ノードとの通信チャンネル  
 $C_k$ : 親ノードとの通信チャンネル  
 $E_c$ : 各子ノードへの送信電波強度  
 $E_p$ : 親ノードへの送信電波強度

図 3: データ収集の擬似コード

### 3.2 クラスタリング手法

次に、ネットワークのトポロジを決定するためのクラスタリング手法について述べる。

クラスタリングは電波強度を距離として行う。電波強度を用いると、遮蔽物があるために本来の距離よりも強い電力が必要な場合があり、電波強度から 3 次元の位置を推測して、その上で一般的な手法を用いてクラスタリングすることはできない。このため、各ノード間の相対的な距離の情報のみを用いてクラスタリングを行う。

想定する屋内型センサネットワークにおいて通信の効率化を図るには、複数のクラスター間の無線の干渉を抑える必要がある。省電力のためにセンサノードをクラスタリングする手法がいくつか提案されているが、これらの研究では、省電力化が目的であるため、センサノードからクラスターヘッドまでの距離の和が最短になるようなクラスタリングを行っている。これに対して、本研究では、クラスター内の通信電波が他のクラスターの通信に干渉しないことが求められるため、クラスター間の重複を最小にするようにクラスタリングを行う。

クラスター間の重複は評価関数  $F$  を用いて評価する。

$$F = \sum_{i=1}^{i=k} \sum_{j=1}^{j=N_i} \left( \sum_{l=1}^{l=N} f(P_i, C_{ij}, x_l) + \sum_{l=1}^{l=N} f(C_{ij}, P_i, x_l) \right) \quad (1)$$

ここで、 $N$  はクラスタリングを行っている階層の全ノード数、 $k$  はクラスターの個数、 $N_i$  はクラスター  $i$  のノード数

```

1. for each  $N_p$  の組み合わせ do
2.   for each  $N_p$  とならなかった  $N$  do
3.     for each  $N_p$  do
4.        $N$  と  $N_p$  の距離を計算
5.     end for
6.      $N$  を距離が最短となる  $N_p$  の子とする
7.   end for
8.   式 (1) を用いて評価関数  $F$  を計算
9.   if  $F$  が今までの最小である
10.     $F$  の値と  $N_p$  の組み合わせを記録
11.   end if
12. end for

```

$N$ : ノード,  $N_p$ : 親ノード (クラスタヘッド)  
 $F$ : 評価関数

図 4: クラスタリングの擬似コード

ド数,  $P_i$  はクラスタ  $i$  のクラスタヘッド,  $C_{ij}$  はクラスタ  $i$  に属するクラスタヘッド以外の  $j$  番目のノード,  $x_l$  は全ノード中の  $l$  番目のノードである. 関数  $f$  は, あるノード (ノード  $x_a$ ) から別のノード (ノード  $x_b$ ) への通信が第 3 のノード (ノード  $x_c$ ) に聞こえるかを判別する関数であり, 以下のように定義する.

$$f(x_a, x_b, x_c) = \begin{cases} 1 & (d(x_a, x_b) \geq d(x_a, x_c)) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

$d(x_a, x_b)$  は, ノード  $x_a$  からノード  $x_b$  への距離, つまりノード  $x_a$  がノード  $x_b$  へパケットを送信できる最小の電波強度を意味する. ただし, ノード  $x_a, x_b, x_c$  の 3 つが同一のクラスタに属するときは, クラスタヘッドが通信が衝突しないように制御しているため,

$$f(x_a, x_b, x_c) = 0 \quad (3)$$

とする. 評価関数  $F$  は各クラスタにおいて, クラスタヘッドからクラスタ内の他のノードへの通信が聞こえてしまうクラスタ外のノードの個数と, クラスタ内のノードからクラスタヘッドへの通信が聞こえてしまうクラスタ外のノードの個数の合計を意味し, これが最小になるクラスタリングが最適なものとなる.

クラスタリングのアルゴリズムを図 4 に示す. これは, ある階層において,  $n$  個のノード  $N$  から  $k$  個のクラスタヘッド  $N_p$  を選択する際のアルゴリズムである. アルゴリズムでは, クラスタヘッドのある組み合わせに対して, クラスタヘッド以外のノードを最短の距離にあるヘッドのクラスタに所属させて式 (1) を用いて評価関数  $F$  を算出する. すべての組み合わせの  $N_p$  に

対してこの操作を行い, 評価関数が最小となる組み合わせを選択し, この階層のクラスタヘッドとする.

最下位の階層のクラスタリングが終了すると, クラスタヘッドを用いて 1 つ上位の階層のクラスタリングを行う. これを繰り返し, すべての階層のクラスタを決定する. 最上位のクラスタはネットワーク全体で 1 個であり, このクラスタのクラスタヘッドは基地局となる. この処理が終了すると, データを収集するためのネットワークトポロジと, 各ノード間の通信での最適な電波強度が決まるため, 基地局が, ノードのクラスタヘッド, 子ノードの一覧, それぞれの通信における送信電波強度をすべてのノードに対して通知する. これによって, データ収集が開始できるようになる.

### 3.3 最適なクラスタ構造の決定手法

効率のよい通信を実現するためには, クラスタリングする際の階層数や各クラスタのノード数を適切に決定する必要がある.

1 クラスタ内のノードが多すぎると, 各クラスタでのデータ収集に時間がかかる. また階層数が多すぎても, 各階層で転送の処理を行うのに時間がかかる. 本研究では, 最適な階層数や 1 クラスタのノード数といったクラスタ構造を決定することで, 通信の遅延を一定以下に抑えることを目的としている.

各ノードにおけるデータの発生頻度とその量を確率的に見積もり, 各クラスタヘッドへデータを集める際の通信の遅延を見積もることで, その遅延が最短になるようなクラスタ構造を選択する手法を検討中である. 手法の詳細や, 計算量を抑えるための工夫は今後の課題である.

## 4 データ収集手法の解析

ここで, 理想的な状況において, 本研究でのデータ収集手法における遅延と, スループットを解析した結果を述べる.

ネットワークの構成として,  $k$  階層の平衡木のネットワーク構成を考え, すべてのクラスタは  $n$  個のノードからなるものとする. このとき, 全ノードの個数  $N$  は,

$$N = \sum_{i=1}^k n^i$$

となる. また, 比較のために, 階層化せずにポーリングによってデータ収集を行う際の結果も同時に解析する. 木構造による手法では階層毎に異なる通信チャネルを用い, その個数は  $k$  個である. 比較手法においても,

$k$  個のチャネルを用いてデータを収集することを想定し,  $k$  個の異なるチャネルの基地局がそれぞれ  $N/k$  個のノードからポーリングによってデータを収集するものとする.

データの発生モデルは以下の 2 通りを考えた.

- $N$  台のノードすべてが同じ量のデータを発生させる.
- 最下位階層にある 1 台のノードのみがデータを発生させる.

2 手法について, 2 通りのデータ発生モデルで, 遅延  $D$  とスループット  $T$  を算出すると以下ようになる. スループットは, 1 台のノードが単位時間あたりに送信できるデータ量を意味し, 基地局にあるノードからのデータが届いてから次に同じノードからのデータが届くまでの時間の逆数で算出した. また,  $\alpha$  は 1 個のデータの転送に必要な時間であり,  $\beta$  は 1 回通信する毎に必要なオーバーヘッドの時間である.

木構造

全ノード

$$\begin{aligned} D_{cl}(N) &= \sum_{j=1}^k (\alpha \sum_{i=1}^j n^i + \beta n) \\ &= O(N) \quad . \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} T_{cl}(N) &= \frac{1}{\alpha N + \beta n} \\ &= O\left(\frac{1}{N}\right) \quad . \end{aligned} \quad (5)$$

1 ノード

$$\begin{aligned} D_{cl}(1) &= \sum_{j=1}^k (\alpha + \beta n) \\ &= O(n) = O(\log N) \quad . \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} T_{cl}(1) &= \frac{1}{\alpha + \beta n} \\ &= O\left(\frac{1}{n}\right) = O\left(\frac{1}{\log N}\right) \quad . \end{aligned} \quad (7)$$

ポーリング

全ノード

$$\begin{aligned} D_{po}(N) &= \frac{(\alpha + \beta)N}{k} \\ &= O(N) \quad . \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} T_{po}(N) &= \frac{k}{(\alpha + \beta)N} \\ &= O\left(\frac{1}{N}\right) \quad . \end{aligned} \quad (9)$$

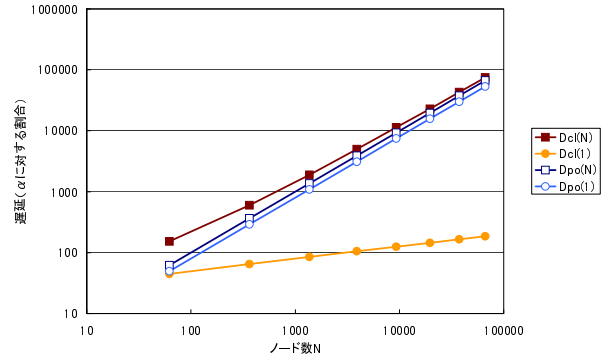


図 5: 遅延の解析結果

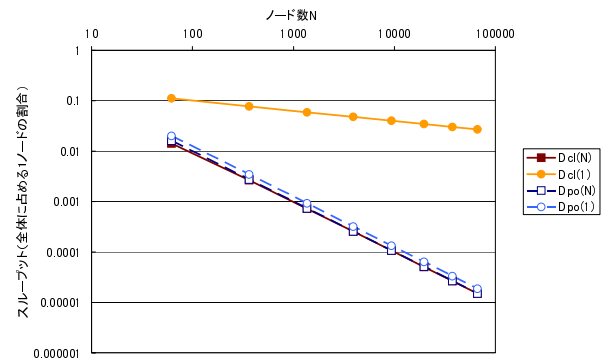


図 6: スループットの解析結果

1 ノード

$$\begin{aligned} D_{po}(1) &= \frac{\alpha + \beta N}{k} \\ &= O(N) \quad . \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} T_{po}(1) &= \frac{k}{\alpha + \beta N} \\ &= O\left(\frac{1}{N}\right) \quad . \end{aligned} \quad (11)$$

$n = 2 \sim 8, k = 5, \alpha : \beta = 1 : 4$  としたときの遅延とスループットを算出した結果を図 5, 図 6 に示す.  $\alpha$  と  $\beta$  の比は実機の無線通信モジュールの特性を考慮してこの値とした. 横軸がノード数, 縦軸がそれぞれ遅延 ( $\alpha$  を 1 としたときの遅延の大きさ) とスループット (無線通信モジュールの最高速度を 1 としたときに, 1 台のノードがデータ送信に専有できる割合) であり, 両軸とも対数スケールとなっている. 全ノードからデータを収集する場合を 2 手法で比較すると, (4) 式と (8) 式より遅延は  $O(N)$  であるため, ノード数が増加するにつれて単調に遅延も増加し, 木構造を用いる場合も

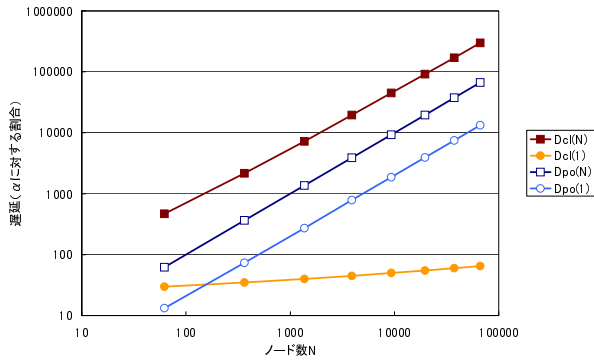


図 7: データ量が多い場合の遅延の解析結果

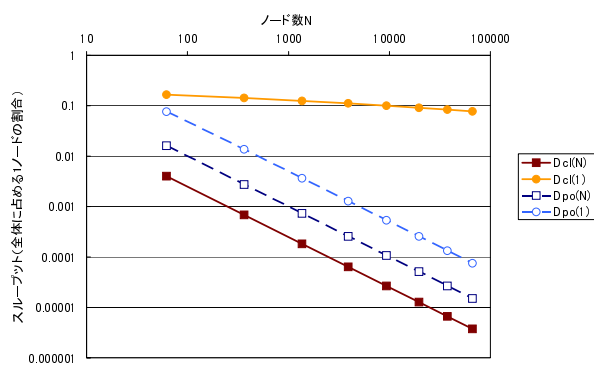


図 8: データ量が多い場合のスループットの解析結果

ポーリングの場合も同程度の性能である。末端の1ノードだけがデータを送信する場合は、木構造を用いると(7)式より遅延が $O(\log N)$ であるのに対して、ポーリングでは(11)式より $O(N)$ である。そのため、ノード数が増加しても、木構造を用いると、遅延は緩やかにしか増加せず、スループットが減少する割合もわずかである。

また、 $\alpha : \beta = 4 : 1$ とした場合の遅延とスループットの解析結果を図7, 図8に示す。グラフより、ノード数が少ないときは木構造を用いた方が遅延が大きくなる場合もあるが、ノード数が増加しても遅延の増加が抑えられている。

本研究ではイベント駆動型センサを想定しているため、全ノードが一斉にデータを送信するような状況はほとんど起きず、変化があった数個のノードのみがデータを送信するような状況が一般的になると考えている。このため実環境では、1ノードのみがデータを送信する場合に近い状況となると予想できる。これより、木

構造を用いること遅延を抑制でき、リアルタイムなアプリケーションを構築しやすくなる見込みがあることが明らかになった。より詳細な検討とクラスタリング手法を含めた評価は今後の課題である。

## 5 議論

### 5.1 通信方式について

本稿では、遅延を最小化するためにセンサノードのクラスタリング手法やネットワークの構築手法について述べた。さらに通信方式として、ポーリングを用い、階層毎に通信チャンネルを切り替える手法について述べた。このポーリングに基づく通信方式はシンプルであり実装が簡単であるという特長をもつ。センサノードへの実装が容易であれば、複数の通信チャンネルを利用する代わりに、階層毎に異なるタイムスロットで通信を行うTDMAによる通信や、クラスタ毎に異なるコードで通信を行うCDMAによる通信を適用することも可能である。提案する手法にTDMAやCDMAを組み合わせることによって、単一チャンネルで通信を行う場合であっても更なる遅延の抑制が可能になると考えられる。

### 5.2 クラスタリングの計算量

本稿で述べたクラスタリング手法は、単純にすべてのクラスタヘッドの組み合わせを列挙して、最適なクラスタヘッドを選択しているため、ノードの数が増えると、指数関数的に計算時間が増加する。これに対しては、CLARA法[8]など、既存のクラスタリングアルゴリズムを組み合わせることで計算量を減らすことができると考えている。

### 5.3 今後の課題

本稿では、ノードが移動したり、追加・削除されることはない想定しているが、研究の次のステップとして、これらの動的なネットワークの変更に対処する手法を考案する予定である。ネットワークの切断が起きた部分を中心に部分的に再クラスタリングすることで対処できるのではないかと予想している。

また、現段階では、すべての情報を基地局で収集し、クラスタリングも基地局で計算することを想定しているが、将来的には各ノードが局所的な情報を交換し合って自律的にクラスタリングを行う手法を提案したいと考えている。屋内型センサネットワークでは、センサノードの付与されたコップをユーザが持ち歩くといった状況は頻繁に起きると予想されるため、ネットワー

クの動的な変更にもより短時間で対応できるようになる自律的クラスタリングは重要な課題である。

さらに、実運用を想定すると、センサノードの省電力化という大きな課題がある。例えば、末端のノードがセンサデータが発生していない間はスリープして電力を節約し、必要なときだけスリープ状態から復帰するといったメカニズムを導入すれば、センサノードの電池寿命を延ばせる。さらにネットワーク全体の寿命を考慮すれば、定期的にクラスタヘッドを交替し、全体として平等に電力を消費するような機構が必要となる。

提案手法では、クラスタ内の通信については単純にクラスタヘッドが管理するものとしているが、実際には、他のクラスタとの無線干渉による通信の失敗などさまざまな問題が生じると予想される。クラスタ内の通信の効率化については今後の課題である。

## 6 まとめ

本稿では、大規模なセンサネットワークのためのデータ収集機構を提案した。提案手法では、センサノードを階層的にクラスタリングすることで、多数のノードから、遅延を一定以下に抑えながらデータを収集できる。提案手法によって、センサネットワークの構築が容易になるため、提案手法は一般家庭などへセンサネットワークを普及させる上で効果的である。

## 参考文献

- [1] M. Beigl and H. Gellersen: Smart-Its: An Embedded Platform for Smart Objects, Smart Objects Conference (sOc) 2003, 2003.
- [2] S. Gandham, Y. Zhang, and Q. Huang: Distributed Minimal Time Convergecast Scheduling in Wireless Sensor Networks, In Proc. of 26th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS 2006), p. 50, 2006.
- [3] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan: Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks, In Proc. of 33rd Hawaii International Conference on System Sciences-Volume 8, p. 8020, 2000.
- [4] D. B. Johnson and D. A. Maltz: Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks, in Proc. of Mobile Computing 1996, 1996.
- [5] 前川卓也, 柳沢 豊, 岡留 剛: センサネットワーク環境におけるモノ参加型 Weblog の実現, 電子情報通信学会技術研究報告 (ユビキタス・センサネットワーク研究会 USN-2007-30), pp.47-52, 2007.
- [6] MICA, [http://www.xbow.com/products/Wireless\\_Sensor\\_Networks.htm](http://www.xbow.com/products/Wireless_Sensor_Networks.htm).
- [7] 永田智大, 小熊 寿, 山崎憲一: 似たモノどうしをグループ化するためのセンサ用分散ミドルウェア, 情報処理学会論文誌: コンピューティングシステム, Vol. 47, No. SIG12 (ACS 15), pp. 387-398, 2006.
- [8] R. T. Ng and J. Han: Efficient and Effective Clustering Methods for Spatial Data Mining, in Proc. of VLDB'94, pp.144-155, 1994.
- [9] T. Okadome, Y. Kishino, T. Maekawa, K. Kamei, Y. Yanagisawa, and Y. Sakurai: Real-time creation of web content about physical objects and events using sensor network, Ubiquitous Computing and Communication Journal (Accepted for publication).
- [10] C. E. Perkins and E. M. Royer: Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing, in Proc. of WMCSA1999, 1999.
- [11] T. Terada, M. Tsukamoto, K. Hayakawa, T. Yoshihisa, Y. Kishino, A. Kashitani, and S. Nishio: Ubiquitous Chip: a Rule-based I/O Control Device for Ubiquitous Computing, in Proc. of Pervasive2004, pp.238-253, 2004.
- [12] M. Weiser: The Computer for the Twenty-first Century, Scientific American, Vol. 265, No. 3, pp. 94-104, 1991.