

## データ補間に基づく通信量削減手法を組み込んだ 進行波型センサ情報収集手法

谷口 義明<sup>†1,†2</sup> 神崎 映光<sup>†2</sup>  
若宮 直紀<sup>†2</sup> 原 隆浩<sup>†2</sup>

本稿では、センサネットワーク全体から基地局へセンサ情報を効率よく周期的に収集する手法を提案する。提案手法では、センサ端末は、パルス振動子モデルにおける進行波状態を応用することにより、自身の通信タイミングおよびスリープタイミングを自律的に制御する。さらに、センサ端末は、近隣のセンサ端末から受信したセンサ情報に基づき自身の持つセンサ情報の冗長性を自律的に判定し、冗長であるセンサ情報を発信しないことにより通信量を削減する。シミュレーション評価により、提案手法は既存手法と比べメッセージ送信数を最大で77%削減できることを示す。

### A Traveling Wave-based Data Gathering Mechanism with Transmission Reduction for WSNs

YOSHIKI TANIGUCHI,<sup>†1,†2</sup> AKIMITSU KANZAKI,<sup>†2</sup>  
NAOKI WAKAMIYA<sup>†2</sup> and TAKAHIRO HARA<sup>†2</sup>

In this report, we propose a periodical data gathering mechanism for wireless sensor networks. In our proposed mechanism, sensor nodes schedule their message transmission timing and sleep timing in a self-organizing manner by applying traveling wave phenomena of a pulse-coupled oscillator model. In addition, each sensor node determines the redundancy of its sensor data according to received messages so that only necessary sensor data are gathered to the sink node. Through simulation experiments, we confirmed that the number of message transmissions can be reduced by up to 77% with our proposed mechanism compared to a conventional mechanism.

#### 1. はじめに

無線通信機能を持ち電池で駆動するセンサ端末を多数配置してネットワークを構成することにより、職住環境や工場などの監視情報、農場や火口など大規模領域の観測情報など、さまざまな情報を収集可能なセンサネットワーク技術が注目を集めている<sup>2)</sup>。センサネットワークの長期運用のためには省電力制御が不可欠であるため、これまでに多くの省電力制御手法が提案されている<sup>3)-6)</sup>。

周期的な情報収集を行うアプリケーションでは、センシングや情報収集の周期にあわせてセンサ端末がアクティブ状態とスリープ状態を遷移するスリープ制御が電力消費の抑制に効果的である<sup>5)</sup>。我々は、多数のセンサ端末が無作為に配置された環境において、センサネットワーク全体で自己組織的なスリープ制御を実現できる進行波型通信手法 WAVE (Traveling wave-based communication mechanism) を提案している<sup>7)</sup>。WAVE は、全てのセンサ端末からある端末への定期的な情報収集や、あるセンサ端末から全てのセンサ端末への定期的な情報拡散など、アプリケーションの要求に応じた形態の通信を自律的に構成できる。基地局への定期的な情報収集の場合、WAVE では、センサ情報の収集タイミングにあわせて、センサネットワークの周縁部に位置するセンサ端末から順に、基地局から同じホップ数離れたセンサ端末が同じタイミングでセンサ情報を発信、転送していく。その結果、センサネットワークの周縁部から基地局へ向かう同心円状の情報伝搬の波（進行波）が形成される。センサ端末は、形成された進行波のタイミングにあわせて、通信に関与しない期間スリープを行うことで消費電力を節減する。WAVE はタイミング制御のためのシグナリングや制御メッセージを必要としない。

一方、センサ情報の空間相関性を利用し、センサ情報収集中に個々のセンサ端末が不要なセンサ情報を削減、集約することで、センサネットワーク内の通信量および消費電力を削減できる<sup>6)</sup>。我々はこれまでに、データ補間と通信傍受を利用した通信量削減手法 ODAS (Overhearing-based Data Aggregation mechanism using Spatial interpolation) を提案している<sup>8)</sup>。ODAS では、センサ端末は、メッセージを傍受することにより近隣のセンサ端末

†1 大阪大学 サイバーメディアセンター  
Cybermedia Center, Osaka University, Japan

†2 大阪大学 大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, Japan

本稿は文献<sup>1)</sup> に基づいている。

のセンサ情報を取得し、傍受したセンサ情報を元に自身の観測したセンサ情報の冗長性を自律的に判定する。センサ端末は、冗長と判定したセンサ情報の発信を行わないことにより、センサ情報の送受信に関わる通信量を削減する。しかしながら、ODAS は、下位層において TDMA (Time Division Multiple Access) 方式を用いた理想的な通信タイミング制御、スリープタイミング制御が実現されているなどいくつかの前提を置いている。実ネットワークに応用するためには下位層として何らかの情報収集手法を適用する必要がある。

本稿では、センサネットワークにおけるセンサ情報収集においてさらなる消費電力の削減を図るため、スリープ制御手法と通信量削減手法の二つの省電力手法を組み合わせたセンサ情報収集手法を提案する。本稿で提案するセンサ情報収集手法では、通信タイミングおよびスリープタイミングの自律的な制御のために WAVE を、中継センサ端末におけるセンサ情報の冗長性判定および通信量削減のために ODAS を用いる。提案手法は追加のシグナリングや制御メッセージを必要とすることなく、センサ情報を収集できる。本稿では、提案手法の有効性をシミュレーションにより評価する。

本稿の構成は以下の通りである。まず、2章で本稿における前提について述べる。次に、3章で既存手法である WAVE および ODAS の説明を行う。その後、4章で、両手法を組み合わせたセンサ情報収集手法の提案を行う。5章でシミュレーションによる提案手法の評価を行い、6章でまとめと今後の課題を述べる。

## 2. 前提

本稿では、二次元平面上に設置された1台の基地局と  $N$  台のセンサ端末  $\mathcal{N} = \{n_1, \dots, n_N\}$  からなる無線センサネットワークを対象とする。センサ端末は通信半径  $R$  で表される円形の無線通信範囲を持つ。互いに無線通信範囲内にいるセンサ端末を隣接センサ端末と呼ぶ。センサ端末は GPS あるいは既存の位置推定手法<sup>9)</sup> により、自身および隣接センサ端末の位置を把握できるものとする。基地局は全てのセンサ端末の位置を把握しているものとする。

アプリケーションはあらかじめ収集周期  $T$  と許容誤差  $E$  を設定する。センサ端末  $n_i \in \mathcal{N}$  は周期  $T$  毎に自身のセンサ値  $d_i$  をセンサ情報として基地局に無線ネットワークを介して送信する。ただし、センサ端末はアプリケーションにより設定された許容誤差  $E$  に基づき、次式を満たすようなセンサ情報を冗長であると判断し、送信しない。

$$|d_i - \hat{d}_i| \leq E \quad (n_i \in \mathcal{N}) \quad (1)$$

ここで、 $\hat{d}_i$  は基地局におけるセンサ端末  $n_i$  のセンサ値の推定値である。

## 3. 既存手法

本章では、我々がこれまでに提案してきた進行波型通信機構 (WAVE) およびデータ補間と通信傍受を利用した通信量削減手法 (ODAS) の概要を説明する。

### 3.1 進行波型通信手法 (WAVE)<sup>7)</sup>

WAVE では、任意のセンサ端末がコア端末と呼ばれる情報の拡散源、収集源となる。WAVE では、セッションがない場合にはセンサ端末は任意のタイミングでメッセージを送信する。一方、セッションがある場合は、センサネットワーク周縁部からコア端末への同心円状の情報伝搬、あるいは、コア端末からセンサネットワーク周縁部へ向かう同心円状の情報伝搬の波 (進行波) が自己組織的に形成される。センサ端末間の局所的な相互作用によってセンサネットワーク全体での情報伝搬順序やタイミングを決定するため、WAVE は、パルス結合振動子モデルにおける進行波状態<sup>10)</sup> を応用している。

以降、情報収集の場合の WAVE の動作概要を説明する。動作の詳細は文献<sup>7)</sup> を参照されたい。WAVE では、センサ端末  $n_i$  は、周期  $T$  のタイマ位相、PRC (Phase-Response Curve) 関数、レベル値、その他の制御情報を管理する。PRC 関数は、メッセージ受信時のタイマ位相の変化量を決める関数である。レベル値は基地局からのホップ数を表す。センサ端末は自身のタイマ位相が  $T$  に達すると、自身の持つセンサ情報を制御情報をメッセージとしてブロードキャストし、タイマ位相を 0 に戻す。メッセージを受信した近隣センサ端末は、制御情報および PRC 関数に基づき自身のタイマ位相を調整する。適切な PRC 関数を用いて、このようなセンサ端末間の局所的な相互作用を繰り返すことにより、センサネットワーク周縁部からコア端末へ向かう同心円状の進行波が形成されるようになる。

図 1 に進行波が形成された後の WAVE の動作例を示す。なお、図中の説明はコア端末から 2 ホップ離れたセンサ端末の視点で書かれている。進行波が形成された状態では、あるセンサ端末がメッセージをブロードキャストすると、隣接するコア端末により近いセンサ端末がこれを受信する。これらの隣接センサ端末は、一定時間後、さらによりコア端末に近いセンサ端末に対してメッセージをブロードキャストする。センサ端末は、通信にかかわらない時間帯は無線送受信機の電源を切るなどのスリープ制御を行い、電力消費を抑える。

WAVE では、全センサ端末がブロードキャストを基本としてセンサ情報を基地局へ転送する。そのため、マルチパス効果によりパケット損失への耐性が高まる一方で、中継センサ端末におけるセンサ情報転送量が增大する。冗長なセンサ情報の送信、センサ情報のマルチパス転送にを抑制することができれば、さらなる通信量、消費電力の削減が可能となる。

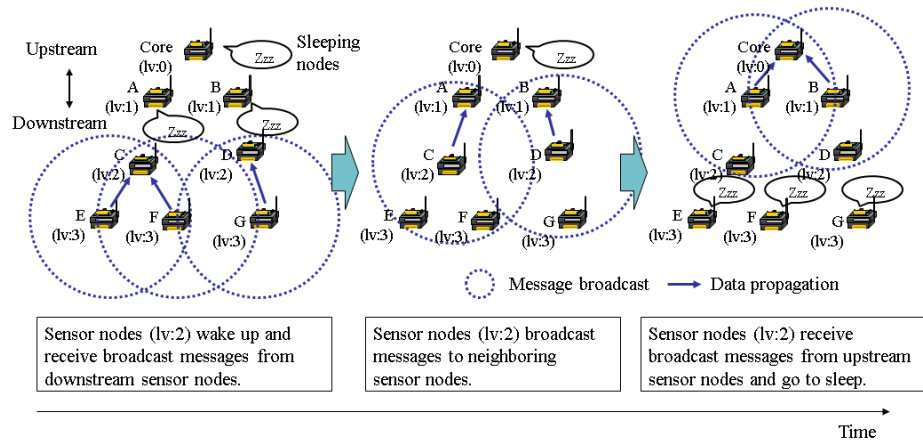


図 1 WAVE の基本動作 (情報収集の場合)

### 3.2 データ補間と通信傍受を利用した通信量削減手法 (ODAS)<sup>8)</sup>

次に ODAS の説明を行う。動作の詳細は文献<sup>8)</sup>を参照されたい。

#### 3.2.1 前提

ODAS では、各センサ端末から基地局への無線通信経路として、基地局を根とする木構造の経路があらかじめ構築されているものとする。MAC (Media Access Control) プロトコルとしては、TDMA 方式を用いた通信制御を想定する。TDMA 方式では電波資源はフレームと呼ばれる時間間隔で分割される。各フレームはさらにタイムスロットと呼ばれる単位に分割される。各リンクには 1 つのタイムスロットが割り当てられ、センサ端末間の通信は割り当てられたタイムスロット内でのみ行われる。なお、あらかじめリンク間の電波干渉を避けてリンクにタイムスロットが割り当てられているものとする。センサ端末は自身と隣接センサ端末に割り当てられたタイムスロットを把握しているものとする。センサ端末は、送受信の必要のないタイムスロット期間中はスリープを行うことで消費電力の節減を行う。センサ端末間の時刻同期は既存手法<sup>11)</sup>により達成されているものとする。

#### 3.2.2 基本動作

ODAS による情報収集は、図 2 に示されるように、 $F$  個のフレームからなる冗長性判定フェーズと  $G$  個のフレームからなる情報収集フェーズから構成される。情報収集周期  $T$  毎に、これら 2 つのフェーズが実行される。

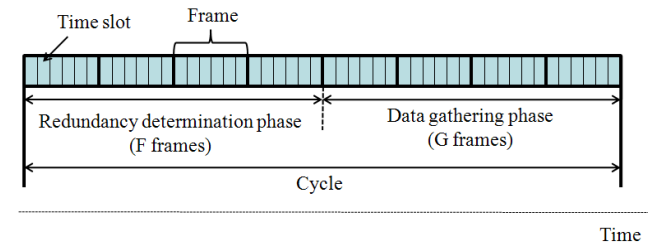


図 2 ODAS における TDMA フレーム構造

冗長性判定フェーズでは、まず、先頭フレームにおいて何台かのセンサ端末がメッセージをブロードキャスト送信する。メッセージにはセンサ情報とセンサ端末識別子が含まれる。これらのメッセージを送信するセンサ端末は、観測領域中、地理的に満遍なく分散するよう、自律的に選ばれる。隣接センサ端末からメッセージを受信したセンサ端末は、3.2.3 節で述べる冗長性判定手法により、自身のセンサ情報の冗長性を判定する。自身の持つセンサ情報が冗長でないと判断したセンサ端末は、続くフレームにおいてメッセージを送信する。冗長性判定フェーズの間、このようなメッセージ送受信が繰り返される。

情報収集フェーズでは、冗長でないと判断されたセンサ情報を持つセンサ端末が、自身のセンサ情報を、事前に構築された木構造の無線通信経路を使って基地局に転送する。冗長であると判断されたセンサ情報を持つセンサ端末は、センサ情報を発信しない。このような欠損情報は、基地局において各センサ端末の補間処理を再現することにより復元される。そのため、欠損情報と復元された情報との誤差は許容誤差  $E$  以内に収まる。

#### 3.2.3 冗長性判定手法

まず、センサ端末  $n_i$  は、 $x$  座標と  $y$  座標がセンサ端末の位置、 $z$  座標がセンサ値に対応する  $x-y-z$  空間を用いた線形補間を行い、自身のセンサ値の推定値  $\hat{d}_i$  を求める。線形補間は下記のように行われる。

- 受信したセンサ情報が 1 つの場合、受信したセンサ情報のセンサ値を自身のセンサ値の推定値  $\hat{d}_i$  とする。
- 受信したセンサ情報が 2 つの場合 (図 3(a))、受信した 2 つのセンサ値からなる直線から、 $x-y$  平面に平行な垂線を導出する。次に、それら 2 直線を含む補間平面を導出する。最後に、導出した補間平面上において、 $x$  座標と  $y$  座標が自身の位置座標と対応する値を推定値  $\hat{d}_i$  とする。

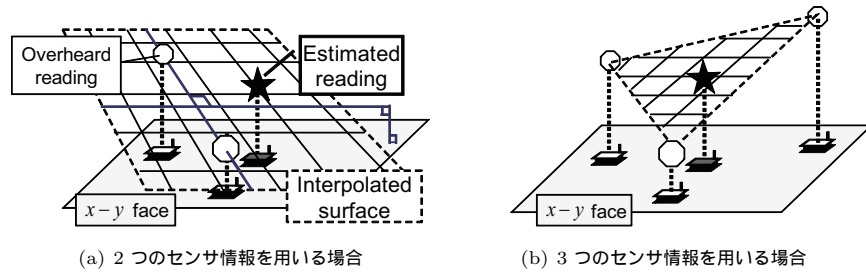


図 3 ODAS におけるセンサ情報の空間補間

- 受信したセンサ情報が 3 つ以上の場合 (図 3(b)), まず, それらのセンサ情報を発信した隣接センサ端末の中から, 自身を含む三角形を構成するように位置する 3 台のセンサ端末を選択する. その条件を満たすセンサ端末の組が複数存在する場合には, それらの中から, 自身からの距離の総和が最小となる組を選択する. 一方, この条件を満たす隣接センサ端末の組が存在しない場合, 自身からの距離の総和が最小となる 3 台のセンサ端末を選択する. 次に, 選択した 3 台のセンサ端末のセンサ値から補間平面を導出する. 最後に, 補間平面上において,  $x$  座標と  $y$  座標が自身の位置座標と対応する値を推定値  $\hat{d}_i$  とする.

センサ値の推定値  $\hat{d}_i$  を計算した後, センサ端末  $n_i$  は, 次の条件式を評価することによって自身の持つセンサ情報  $d_i$  の冗長性を判定する.

$$|d_i - \hat{d}_i| \leq E \quad (2)$$

この条件式が真の場合, センサ端末  $n_i$  は自身の持つセンサ情報  $d_i$  が冗長であると判定する. 偽の場合は, 自身の持つセンサ情報が冗長でないと判定する.

ODAS による冗長性判定は制御メッセージを必要としない. ODAS を用いることで, 制御メッセージおよびセンサ情報に関わる通信量を大幅に削減できる. しかしながら ODAS は, タイムスロット割り当て, 時刻同期, 経路構築などの下位層の実現方法やオーバーヘッドを十分に考慮していない. 次章では, ODAS の下位層として WAVE を用いた場合の, センサ情報収集手法の提案を行う.

## 4. 提案手法

本章では, ODAS と WAVE を組み合わせ, データ補間に基づく通信量削減手法を組み込んだ進行波型センサ情報収集手法を提案する.

### 4.1 制御情報

提案手法では, センサ端末  $n_i$  は, センサ, タイマおよびセンサ情報を蓄えるための領域として参照バッファ, 送信バッファを持つ. 以降, 参照バッファに蓄えられているセンサ情報の集合を  $D_i^r$ , 送信バッファに蓄えられているセンサ情報の集合を  $D_i^t$  と表記する. 参照バッファおよび送信バッファに蓄えられたセンサ情報は冗長性判定のために用いられ, 送信バッファに蓄えられているセンサ情報は上流センサ端末に転送するために用いられる. なお, あるセンサ端末から見て, 基地局までのホップ数の少ない近隣センサ端末を上流センサ端末, 基地局までのホップ数の大きい近隣センサ端末を下流センサ端末と呼ぶ.

センサ端末  $n_i$  は制御情報としてタイマ位相  $\phi_i \in [0, T]$  ( $d\phi_i/dt = 1$ ), PRC 関数  $\Delta(\phi)$ , レベル値  $l_i$  (初期値無限大), オフセット  $\tau_i$  ( $\tau_{min} < \tau < \tau_{max}$ ), 親端末の識別子  $n_i^p$  を管理する. 親端末識別子は自分に刺激を与えたセンサ端末の識別子である. 本稿では, 任意の初期状態から同心円状の進行波を生成するための PRC として文献<sup>7)</sup>と同じ次式を用いる.

$$\Delta(\phi_i) = a \sin \frac{\pi}{\tau_i} \phi_i + b(\tau_i - \phi_i) \quad (3)$$

ここで,  $a$  および  $b$  は進行波生成までの時間に関わるパラメータである.

### 4.2 センサ端末の動作

センサ端末は自身のタイマ位相にもとづいて動作する. 以降では進行波が生成され, 全センサ端末がスリープスケジューリング制御を開始した後のセンサ端末の動作を, 時系列に従って説明する. 時系列に従ったセンサ端末の動作の概要を図 4 に示す.

センサ端末  $n_i$  は自身のタイマ位相  $\phi_i$  が  $T - \tau_{max}$  になるとスリープ状態からアクティブ状態に遷移する. アクティブ状態になると参照バッファ, 送信バッファを初期化し, 近隣センサ端末からのメッセージ受信に備える. なお, パルス結合振動子モデルに基づくタイミング調整によって下流センサ端末はセンサ端末  $n_i$  の位相が  $T - \tau_{max}$  から  $T$  の間にメッセージを送出するようにスケジュールされている. 近隣センサ端末  $n_j$  が送出するブロードキャストメッセージには, 送信バッファに含まれているセンサ情報の集合  $D_i^t$  に加え, センサ端末識別子  $n_i$ , レベル値  $l_i$ , および親端末識別子  $n_i^p$  が含まれる.

センサ端末  $n_i$  は下流センサ端末  $n_j$  から受信したメッセージを調べ,  $l_j = l_i + 1$  かつ

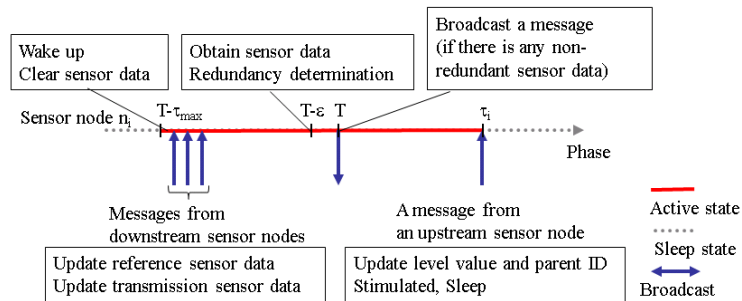


図 4 提案手法におけるセンサ端末の基本動作

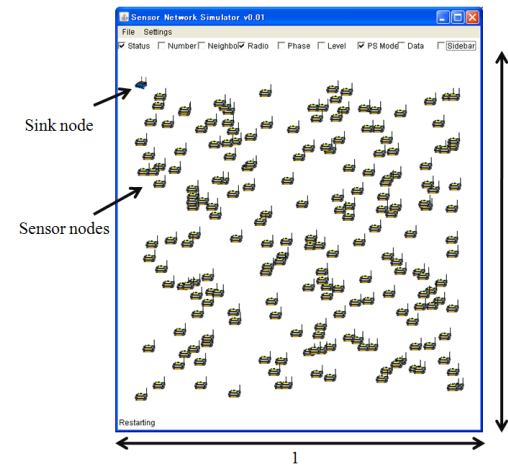


図 5 センサ端末配置の例

$n_j^p \neq n_i$  であった場合には、受信したセンサ情報を自身の参照バッファに格納する。一方、センサ端末  $n_j$  から受信したメッセージを調査し、 $l_j = l_i + 1$  かつ  $n_j^p = n_i$  であった場合には、受信したセンサ情報を自身の送信バッファに格納する。

センサ端末  $n_i$  は自身のタイマ位相  $\phi_i$  が  $T - \epsilon$  になると、自身のセンサからセンサ値  $d_i$  を読み取る。 $\epsilon$  ( $0 < \epsilon < \tau_{min}$ ) はセンシングおよび冗長性判定に要する処理遅延である。その後、参照バッファと送信バッファに蓄えられたセンサ情報のうち 1 ホップ下流のセンサ端末のセンサ情報  $D_i^{det} = \{d_k \in D_i^r \cup D_i^t \mid l_k = l_i + 1\}$  を利用し、読み取ったセンサ情報の冗長性を判定する。冗長性判定手法としては、3.2.3 節で述べた手法を用いる。1 ホップ下流のセンサ端末のセンサ情報のみを冗長性判定に用いるのは、基地局でセンサ端末の補間処理を再現可能とするためである。センサ値  $d_i$  が冗長でないと判定された場合、センサ端末  $n_i$  は読みとったセンサ値  $d_i$  をセンサ情報としてを送信バッファに格納する。冗長性があると判定された場合には、読み取ったセンサ情報を破棄する。

センサ端末  $n_i$  は自身のタイマ位相  $\phi_i$  が  $T$  になると、自身の送信バッファを確認する。送信バッファにセンサ情報がある場合には、メッセージを周囲のセンサ端末にブロードキャストする。一方、送信バッファにセンサ情報がない場合、すなわち  $D_i^t = \emptyset$  であれば、メッセージを送信しない。センサ端末  $n_i$  は  $T$  に達したタイマ位相  $\phi_i$  を 0 に戻す。

センサ端末  $n_i$  は、メッセージをブロードキャストした後、アクティブ状態を維持し、上流センサ端末からのメッセージの受信に備える。センサ端末  $n_i$  は、レベル値が  $l_j < l_i$  と設定されたブロードキャストメッセージを受信した場合には、自身のレベル値を  $l_i = l_j + 1$  と設定、親端末識別子を  $n_i^p = n_j$  と設定すると共に、刺激を受ける。刺激を受けたセンサ端末  $n_i$  は自身のタイマ位相  $\phi_i$  に  $\Delta(\phi_i)$  を加えることにより、自身の位相を調整する。その後、

センサ端末はスリープ状態に移行する。したがって、センサ端末は情報収集期間  $T$  中、最大  $\tau_{max} + \tau_i$  の間だけアクティブになればよく、デューティー比は  $(\tau_{max} + \tau_i)/T \simeq 2\tau_{max}/T$  となる。

## 5. シミュレーション評価

本章では、シミュレーションにより提案手法の基本的特性の評価を行う。

### 5.1 シミュレーション条件

$N = 200$  台のセンサ端末を  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$  の領域にランダムに配置し、領域の角に 1 台の基地局を配置する。図 5 にセンサ端末配置の一例を示す。センサ端末の通信半径  $R$  は 20 m とする。センサ情報としては図 6 に示される二次元正規分布状の温度分布を用いる。情報収集周期  $T$  は 60 秒とする。提案手法のパラメータとしては、 $\tau_{min} = 0.2$  秒、 $\tau_{max} = 0.6$  秒、 $a = 0.01$ 、 $b = 0.5$  を用いる。

評価指標としては収集センサ情報数、送信メッセージ数、情報収集遅延を用いる。収集センサ情報数は、1 周期あたりに基地局に収集されたセンサ情報の総数で、冗長でないと判定されたセンサ情報の数に等しい。送信メッセージ数は 1 周期あたりにセンサネットワーク全体で送信されたメッセージの総数である。情報収集遅延は、情報収集がはじまってから全て

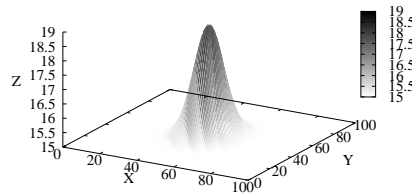


図 6 温度分布

の冗長でないセンサ情報を収集するまでに要する時間である．いずれも 100 トポロジ分のシミュレーションを行い，平均値を取得する．

比較の対象として，WAVE および ODAS を用いた場合のシミュレーションも行う．ODAS における冗長性判定フェーズのフレーム数としては  $F = 2$  を用いる．情報収集フェーズのフレーム数  $G$  は，生成された木構造の無線通信経路における基地局からの最大ホップ数を用いる．これらは，ODAS が最も高い性能を得るパラメータ設定である．各リンクには，干渉を避けた最適なタイムスロットがあらかじめ割り当てられているものとする．TDMA における 1 タイムスロット時間は 20 ミリ秒とする．

### 5.2 収集センサ情報数の評価

図 7 に，許容誤差  $E$  を変化させた時の収集センサ情報数の変化を示す．WAVE は冗長性判定を行わないため，図 7 に示されるように，許容誤差に関わらず全センサ端末のセンサ情報が基地局に収集される．一方，提案手法と ODAS は冗長性判定を行うことにより，基地局に収集されるセンサ情報数が大幅に削減される．提案手法，ODAS のいずれも許容誤差が大きくなるほど収集センサ情報数が少なくなる．これは，許容誤差を大きくすることにより，より多くのセンサ情報が式 (2) を満たすようになるからである． $E = 1.0$  の場合に，提案手法は WAVE と比べて最大で 61% 収集センサ情報数が抑制される．

一方，図 7 より提案手法と ODAS を比較すると，提案手法の収集センサ情報数は ODAS の収集センサ情報数と比べて 22% から 44% ほど高い．これは，それぞれの手法で，冗長性判定に用いるセンサ情報を発信したセンサ端末の地理的な分布が異なることによる．ODAS では，冗長性判定フェーズにおいて，地理的に万遍なく選ばれたセンサ端末が発信したセンサ情報を利用して，あるセンサ端末のセンサ情報の冗長性の判定が行われる．そのため，

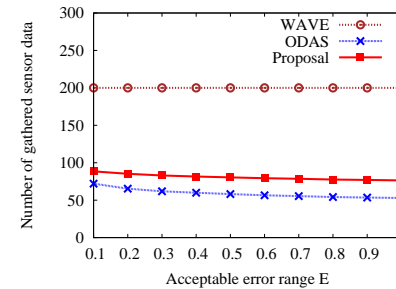


図 7 収集センサ情報数

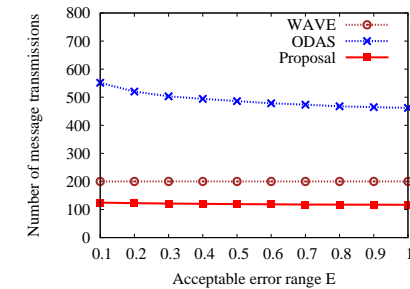


図 8 メッセージ送信数

3.2.3 節で述べた，自身を含む三角形を構成するように位置する 3 台のセンサ端末を選択し，冗長性判定に用いることができる．しかしながら，提案手法においては，センサ端末は，下流にあるセンサ端末から受信したセンサ情報を利用して自身のセンサ情報の判定を行う．そのため，冗長性判定に用いるセンサ情報を発信したセンサ端末の地理的な分布に偏りが生じ，これが冗長性判定の効率を低下させる．

### 5.3 メッセージ送信数の評価

図 8 に，許容誤差  $E$  を変化させた時のメッセージ送信数の変化を示す．図に示されるように，ODAS のメッセージ送信数が最も多くなる．これは，提案手法および WAVE では，センサ端末は 1 周期につきただか 1 回しかメッセージを送信しないのに対し，ODAS では冗長性判定フェーズおよび情報収集フェーズの両フェーズでメッセージ送信が行われるためである．また，提案手法および WAVE では，複数のセンサ情報を 1 つのメッセージとしてまとめて送信するのに対し，ODAS では 1 タイムスロットあたり 1 つのセンサ情報を送信することを前提としていることによる．その結果，図 8 に示されるように，提案手法は ODAS と比べて最大で 77% メッセージ送信数が少なくなる．一方，提案手法と WAVE を比較すると，提案手法は WAVE と比べて最大で 41% メッセージ送信数が少ない．これは，提案手法では，送信するセンサ情報のないセンサ端末はメッセージを送信しないためである．

### 5.4 情報収集遅延の評価

図 9 に，各手法の情報収集遅延を示す．提案手法および WAVE による情報収集遅延は，ODAS と比べて 58% 小さい．これは提案手法および WAVE が冗長性判定のための特別なフェーズを設けないのに対し，ODAS が冗長性判定フェーズと情報収集フェーズの 2 つのフェーズからなることによる．

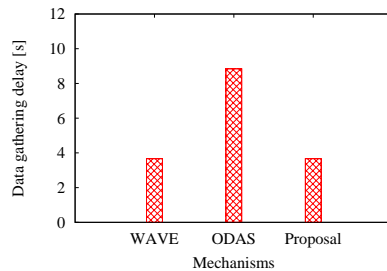


図9 情報収集遅延

### 5.5 消費電力に関する考察

最後に消費電力の観点からの考察を行う。提案手法は、WAVEを元にメッセージ送信量を抑制する手法を組み込んでいるため、提案手法とWAVEを比較すると提案手法の方がより消費電力が少ないと考えられる。一方、提案手法とODASを比較すると、提案手法の収集センサ情報数はODASと比べて多いが、提案手法のメッセージ送信数はODASと比べて大幅に少ない。一般的に、メッセージ送受信時のオーバーヘッドを考えると、データ送信量が同じであったとしても、メッセージ送信回数が増えると総消費電力は大きくなる。また、ODASで置かれている前提を満たすために必要なスケジューリング、同期、ルーティングのためのオーバーヘッドを考えると、ODASの消費電力はさらに大きくなると考えられる。さらに、提案手法は複数のセンサ情報をまとめて送ることを想定しているため、データ集約、圧縮技術の適用が容易である。その場合、提案手法の消費電力はさらに少なくなる。そのため、提案手法の消費電力はODASと比べて少なくなると期待される。今後、これらの議論を確認するために、消費電力を指標とした提案手法の評価を行うことを予定している。

### 6. まとめと今後の課題

本稿では、センサネットワーク全体から基地局へセンサ情報の効率よく周期的に収集する手法を提案した。提案手法は、パルス結合振動子モデルに基づく制御により、センサ端末の通信タイミングおよびスリープ移行タイミングを自律的に調整する。さらに、近隣センサ端末から受信したセンサ情報により自身のセンサ情報の冗長性を判定、冗長であるセンサ情報を発信しないことにより、通信量の削減を行う。シミュレーションによる評価の結果、提案手法を用いることにより既存手法と比べてメッセージ送信数を最大で77%削減できるこ

とを示した。しかしながらシミュレーション評価においては、センサの誤差がない、通信距離は一定である、など理想的な環境を想定していた。今後の課題として、消費電力や寿命の評価、ネットワーク変動への適応性の評価といったより詳細な評価が必要であると共に、実センサネットワークを使った提案手法の評価および提案手法の改良が必要である。

謝辞 本研究の一部は科学研究費補助金(課題番号:18049050,21700075)によっている。ここに記して謝意を表す。

### 参考文献

- 1) Taniguchi, Y., Kanzaki, A., Wakamiya, N. and Hara, T.: Autonomous data gathering mechanism with transmission reduction for wireless sensor networks, *Proceedings of CCCA 2011* (2011).
- 2) Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. and Cayirci, E.: A survey on sensor networks, *IEEE Communication Magazine*, Vol.40, pp.102-114 (2002).
- 3) Mahfoudh, S. and Minet, P.: Survey of energy efficient strategies in wireless ad hoc and sensor networks, *Proceedings of ICN 2008*, pp.1-7 (2008).
- 4) Anastasi, G., Conti, M., Francesco, M.D. and Passarella, A.: Energy conservation in wireless sensor networks: A survey, *Ad Hoc Networks*, Vol.7, No.3, pp.537-568 (2009).
- 5) Wang, L. and Xiao, Y.: A survey of energy-efficient scheduling mechanisms in sensor networks, *Mobile Networks and Applications*, Vol.11, No.5, pp.723-740 (2006).
- 6) Rajagopalan, R. and Varshney, P.K.: Data-aggregation techniques in sensor networks: A survey, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol.8, pp.48-63 (2006).
- 7) Taniguchi, Y., Wakamiya, N. and Murata, M.: A Traveling Wave based Communication Mechanism for Wireless Sensor Networks, *Journal of Networks*, Vol.2, No.5, pp.24-32 (2007).
- 8) Iima, Y., Kanzaki, A., Hara, T. and Nishio, S.: Overhearing-based data transmission reduction for periodical data gathering in wireless sensor networks, *Proceedings of DMIEW 2009*, pp.1048-1053 (2009).
- 9) Wang, J., Ghosh, R.K. and Das, S.K.: A survey on sensor localization, *Journal of Control Theory and Applications*, Vol.8, No.1, pp.2-11 (2010).
- 10) Goel, P. and Ermentrout, B.: Synchrony, stability, and firing patterns in pulse-coupled oscillators, *Physica D*, Vol.163, No.3-4, pp.191-216 (2002).
- 11) Sundararaman, B., Buy, U. and Kshemkalyani, A.D.: Clock synchronization for wireless sensor networks: a survey, *Ad Hoc Networks*, Vol.3, No.3, pp.281-323 (2005).