

無線センサネットワークにおけるデータの 空間的・時間的特性の変化を考慮した通信量削減手法

近藤 真也^{†1} 神崎 映光^{†1}
原 隆浩^{†1} 西尾 章治郎^{†1}

本稿では、筆者らの研究グループが提案した無線センサネットワークの通信量削減手法である ODAST に対し、さらなる通信量削減を目的とした拡張を行う。ODAST では、各ノードがデータの空間的あるいは時間的な補間処理を利用した通信量の削減を行うことで、ノードの消費電力を抑制している。拡張手法では、データの空間的および時間的特性の変化およびアプリケーション要求を考慮して、利用する補間処理を適切に選択することで通信量を削減する。さらに本稿では、シミュレーション実験によって、拡張手法の有効性を示す。

A Traffic Reduction Method considering Change in Spatial and Temporal Characteristics of Data in Wireless Sensor Networks

SHINYA KONDO,^{†1} AKIMITSU KANZAKI,^{†1}
TAKAHIRO HARA^{†1} and SHOJIRO NISHIO^{†1}

In this paper, we extend our traffic reduction method, named ODAST, to further reduce traffic in wireless sensor networks. ODAST suppresses the energy consumption by traffic reduction utilizing spatial and temporal interpolation. In the extended method, each node appropriately utilizes either of spatial or temporal interpolation according to the change in spatial and temporal characteristics of data distribution and requirements specified by the application. Furthermore, we verify the effectiveness of the extended method by a simulation experiment.

1. はじめに

無線通信機能を備えたノードのみによって構築される無線センサネットワーク (WSN: Wireless Sensor Network) では、サービスを長期間提供するために、ノードの省電力化が重要である。また、無線通信によるパケットの送受信は多くの電力を消費するため、ネットワーク全体の電力消費抑制には通信量の削減が効果的である。

WSN の主要な応用サービスとして、観測領域全体の定期的な情報を取得するモニタリングアプリケーションがある。このアプリケーションでは、各ノードが観測した情報 (データ) を、ネットワークに接続している基地局に収集することが一般的である。しかし、全ノードからデータを収集すると大量の通信が発生し、消費電力が増大してしまう。

そのため、データを収集する過程で不要なデータを削減し、ネットワーク内の通信量を削減する研究が盛んに行われており、特に、通信量を削減しつつ領域全体のデータ分布情報を収集する、モニタリングアプリケーションに対応したネットワーク内集約手法が数多く提案されている^{1),3),6)}。筆者らの研究グループにおいても、データの空間的および時間的な相関性を利用し、WSN 内の通信量を削減する手法として、これまでに ODAST (Overhearing based Data Aggregation using Spatial and Temporal interpolations) を提案している⁴⁾。ODAST では、各ノードが、自身が過去に観測したデータおよびパケットの傍受によって得た近隣のノードのデータを元に空間的および時間的な補間処理を実行し、現在の自身のデータが他のデータから予測可能である場合、自身のデータの発信を中止する。これにより、データの相関性を利用するための通信を最小限に抑えながら、無駄なデータ発信を抑制し、通信量を削減している。

ここで ODAST では、各ノードがデータを発信するか否かの判断を、空間的または時間的な補間処理のいずれかの結果に基づいて行う。そのため、発信を中止したノードのデータを基地局において復元するためには、そのノードがどちらの補間処理に基づいて発信を中止したか、基地局において把握する必要がある。そのために ODAST では、各ノードに対し、近隣のノードがどの程度データを発信したかを基準とし、その基準をもとに各ノードが行う補間処理を一意に決定することで、基地局におけるデータの復元を実現している。しかし ODAST では、ここで与える基準を、データの特性やアプリケーションの要求を考慮せずに

^{†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
Dept. of Multimedia Eng. Grad. Sch. of Information Science and Technology, Osaka Univ.

設定しているため、各ノードにおける補間処理の選択が非効率となり、基地局において復元可能なデータまで発信される可能性がある。そこで本稿では、ODAST に対し、さらなる通信量削減を目的とした拡張手法として、ODAST/DT (ODAST with Dynamic Threshold for selecting interpolations) を提案する。ODAST/DT では、各ノードが補間処理を選択するための基準を、そのノードの周辺におけるデータの空間的および時間的な特性の変化に基づき動的に設定する。これにより、データ分布の空間的および時間的な特性に応じて、各ノードがよりデータの発信を中止しやすくなる補間処理を選択でき、ネットワーク全体の通信量を削減できる。また、各ノードにおける基準の設定を、基地局において再現できる動作とすることで、ODAST における基地局でのデータ復元を実現する。

以下では、まず第 2 章で本稿の想定環境について述べた後、第 3 章で、拡張手法の基礎となる ODAST について概説する。第 4 章で、拡張手法について述べる。第 5 章で性能評価について述べ、最後に第 6 章で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2. 想定環境

本稿では、一つの基地局と n 個のノードから成り、二次元平面上に構築されたマルチホップな無線ネットワークシステムを想定する。各ノードは一意的識別子 $N_i (1 \leq i \leq n)$ が割り当てられており、各ノードの計算能力やメモリ容量、通信範囲などの性能は同等であるものとする。任意の 2 ノード間の通信は、その 2 ノードの距離が通信可能距離 r_c 以下である場合のみ可能とし、このような位置関係にあるノードを隣接ノードと呼ぶ。また、各ノードは自身および全隣接ノードの位置を、基地局は全ノードの位置を把握しているものとする。

各ノードは、温度や光などの物理現象を定期的に観測（センシング）し、無線ネットワークを介してデータを基地局に転送する。センシングは、一定の間隔で周期的に全ノードが一斉に行うものとする。本稿ではこの周期をサイクルと呼び、サイクルの長さはアプリケーションが予め指定するものとする。

アプリケーションは、各ノードがセンシングしたデータ値と、基地局から結果として返されるデータ値との間に許容できる誤差の範囲として、許容誤差 E を指定するものとする。つまり、本研究で想定するシステムの目的は、次式のように、全ノードがセンシングした各データに対して、誤差が E 以下に収まるような値を得ることである。

$$|v_i(t) - \hat{V}_i(t)| \leq E \quad (1 \leq i \leq n). \quad (1)$$

ここで $v_i(t)$ と $\hat{V}_i(t)$ はそれぞれ、サイクル t において、ノード N_i が実際にセンシングし

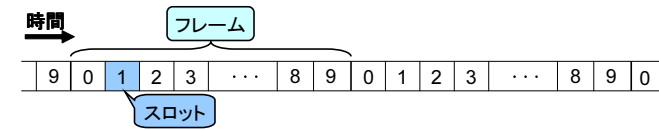


図 1 TDMA の概要 (スロット数 10 の場合)
Fig. 1 Overview of TDMA.

たデータと、基地局がノード N_i のデータとして扱う値である。本稿では、他のデータから上式を満たす精度で予測できるようなデータを冗長であると表現する。

各ノードから基地局までの無線通信経路は、静的な木構造ネットワークとして予め構築されているものとする。なお、本稿で提案する手法は基地局へのデータ収集から独立して動作するため、任意のデータ収集手法と組み合わせることができる。

MAC (Media Access Control) プロトコルとしては、TDMA 方式 (Time Division Multiple Access) を用いた通信制御を想定する。TDMA 方式では、図 1 に示すように、ノードが帯域を利用する時間をタイムスロット (以下スロット) と呼ばれる時区間に等分割し、各ノードに一つのスロットを割り当てる。ノードは、自身に割り当てられたスロットでのみ通信機会を得る。また、スロットをフレームと呼ばれる周期にまとめ、このフレームを繰り返すことによって、ネットワーク内の端末は周期的にパケットを発信する機会を得る。本稿では、各ノードへのスロット割当ては予め完了しており、各ノードは、自身と隣接ノードに割り当てられたスロット (割当てスロット) を把握しているものとする。さらに、全ノード間の時刻同期は、文献 2) などの既存プロトコルによって予め達成されているものとする。

3. 従来手法: ODAST⁴⁾

ODAST は、図 2 に示す通り、一つのサイクルを、時間的冗長性判定フェーズ、空間的冗長性判定フェーズ、およびデータ収集フェーズの三つのフェーズから構成する。以下では、基本的なノードの動作について述べた後、各フェーズについて述べる。その後、基地局の動作を述べる。

3.1 ノードの動作

各ノードは、基本的に無線通信デバイスの電源を切った状態である一時休止状態にある。隣接ノードの割当てスロットでは、通信デバイスを起動して受信待ち状態に移し、隣接ノードが発信したデータを傍受する。また、ノードは、データを傍受するたびに、3.3 節の手順に従って自身のデータの空間的冗長性を判定し、必要に応じて自身の割当てスロットで

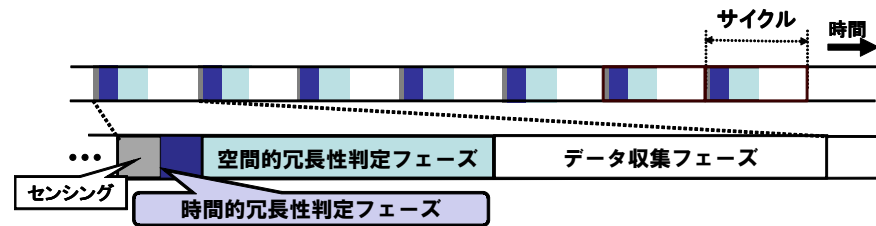


図 2 ODAST の概要
Fig. 2 Overview of ODAST.

データを発信する。

3.2 時間的冗長性判定フェーズ

センシングを行った各ノードは、自身が過去にセンシングしたデータをもとに、以下の手順に従って時系列補間を行うことによって、自身のデータの予測値を算出する。

- 過去に発信済みのデータが一つの場合、発信したデータをそのまま自身のデータの予測値とする。
- 過去に発信済みのデータが二つ以上の場合、図 3(a) に示すように、発信したデータの中からもっとも新しい二つを選択する。次に、それらのデータからなる直線を導出し、現在時刻と対応する値を現サイクルのデータの予測値とする。

予測値を算出したノードは、次の条件式を評価することによって、自身のデータの時間的冗長性を判定する。

$$|v_i(t) - \hat{v}_i^T(t)| \leq E. \quad (2)$$

上式の $\hat{v}_i^T(t)$ は、サイクル t において、上述の時系列補間処理で算出されたデータの予測値である。この条件式が真の場合、ノードは自身のデータが時間的に冗長であると判断し、データの発信を中止する。偽の場合、ノードは自身のデータが時間的に冗長でないと判断し、続く空間的冗長性判定フェーズにおいて最初のフレームでデータを発信する。このノードをトリガノードと呼ぶ。

3.3 空間的冗長性判定フェーズ

本フェーズは、複数の TDMA フレームから構成される。まず、最初のフレームにおいて、各トリガノードが自身の割当てスロットにおいてデータパケットを発信する。ここで、データパケットは、発信元であるノードの識別子、ノードがセンシングしたデータ、およびこの

パケットが最後のフレームで発信されたものかどうかという情報を含む。ここで各トリガノードは、隣接ノードが先に発信したデータパケットを傍受した場合、データパケットの発信を取りやめる。これにより、最初のフレームでは、ノードの通信範囲に応じて、地理的に満遍なく分散してデータパケットが発信される。

各ノードは、当該サイクルにおいて傍受したデータパケット数の、自身の全隣接ノード数に対する割合（以下、傍受率）が N_{IC} 以上の場合、後述する空間的冗長性判定処理を行う。これは、3.5 節で述べる通り、データパケットを発信しなかったノードが行った冗長性判定処理を基地局において一意に識別するためである。

後続するフレームでは、当該サイクル内における傍受率が N_{IC} 以上となったノードが、傍受したデータを元に後述する空間的冗長性判定を行い、その結果に応じてデータパケットを発信する。

また、本フェーズの最後のフレームでは、それまでデータパケットを発信していないノードのうち、本フレーム開始時に自身のデータが冗長でないと判断したノード、および隣接ノードからのデータパケットを一度も傍受しなかったノードがデータパケットを発信する。なお、このフレームで発信されたデータパケットは、傍受率の算出には用いない。

空間的冗長性判定処理は、 x 座標と y 座標がノードの位置に対応し、 z 座標がデータの値に対応する $x - y - z$ 空間を想定し、以下の手順によって行われる。

- 傍受したデータが一つの場合、傍受したデータをそのまま自身のデータの予測値とする。
- 傍受したデータが二つの場合、まず傍受したデータからなる直線から、 $x - y$ 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し、この平面上において自身の位置に対応する値を自身のデータの予測値とする。
- 傍受したデータが三つ以上の場合、図 3(b) に示すように、それらのデータを発信した隣接ノードの中から、自身を含む三角形を構成するように位置する 3 ノードを選択する。この条件を満たすノードの組が複数存在する場合は、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、この条件を満たすノードの組が存在しない場合は、自身からの距離の総和が最小となるノードの組を選択する。次に、選択した 3 ノードのデータから補間平面を導出し、この平面上において自身の位置に対応する値を自身のデータの予測値とする。

予測値を算出したノードは、次の条件式を評価することによって、自身のデータの空間的冗長性を判定する。

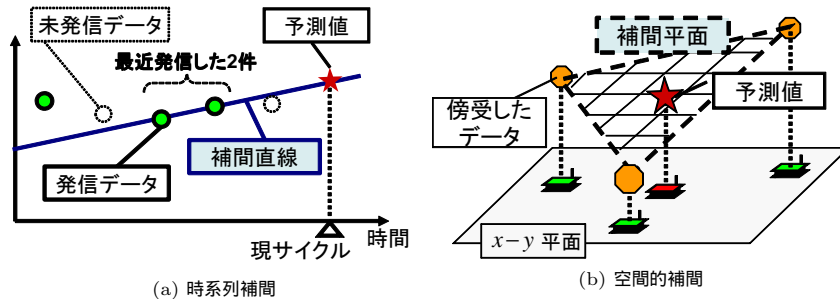


図3 データ補間
Fig.3 Data interpolation.

$$|v_i(t) - \hat{v}_i^S(t)| \leq E. \quad (3)$$

上式 $\hat{v}_i^S(t)$ は、サイクル t において、上述の空間的補間処理で算出されたデータの予測値である。この条件式が真の場合、ノードは自身のデータが空間的に冗長であると判断し、データパケットの発信を中止する。偽の場合は、ノードは自身のデータが空間的に冗長でないと判断し、後続するフレームにおいてデータパケットを発信する。

3.4 データ収集フェーズ

本フェーズは、空間的冗長性判定フェーズで発信されたデータパケットを木構造ネットワークを介して基地局に収集する。

3.5 基地局における欠損データの復元

ノードによって冗長であると判断されたデータは基地局に転送されない。本稿では、このようなデータを欠損データと呼ぶ。ODAST では、欠損データに対し、基地局において各ノードの補間処理を再現することで復元処理を行う。

まず、データが欠損しているノードに対し、その全隣接ノードのうち、空間的冗長性判定フェーズの最後のフレーム以外でデータパケットを発信したものの割合が N_{IC} 未満である場合、注目しているノードは時間的冗長性判定の結果データパケットを発信しなかったものと判断し、ノードが行った時間的冗長性判定を再現することで欠損データを復元する。一方、全隣接ノードのうちデータパケットを発信したものの割合が N_{IC} 以上の場合、注目しているノードは空間的冗長性判定の結果データパケットを発信しなかったものと判断し、ノードが行った空間的冗長性判定を再現することで欠損データを復元する。なお、空間的冗

長性判定フェーズの最後のフレームで発信されたデータパケットは、その隣接ノードが空間的補間処理に利用していないため、基地局における復元処理にも用いない。

4. ODAST/DT

本章では、本稿で提案する ODAST の拡張手法である ODAST/DT について述べる。

4.1 設計方針

ODAST⁴⁾ では、データパケットを発信しなかったノードが行った冗長性判定処理を一意に判別するため、システム全体で予め設定した共通の閾値 N_{IC} を基準とし、適用する冗長性判定処理を決定している。このため、ODAST では、センシングしたデータが時間的に冗長であるにもかかわらず、傍受率が N_{IC} を超過したために、強制的に空間的冗長性判定を行い、その結果データパケットを発信するノードが発生する可能性がある。本稿では、このようなノードが発信したデータパケットを強制発信データパケットと呼ぶ。強制発信データパケットの発信を抑えるには、 N_{IC} の値を大きく設定し、各ノードが空間的冗長性判定処理を行いにくくすることが有効であるものと考えられる。しかし、 N_{IC} の値が大きい場合、時間的に冗長でないデータをもつノードが空間的冗長性判定を行わず、データパケットを発信する可能性が増加する。このように ODAST では、全ノードの閾値を固定値で与えることで、データの空間的および時間的特性の変化によっては、不要なデータパケットが発信される可能性がある。

そこで、ODAST/DT では、データの空間的および時間的特性の変化に基づき、各ノードに対して個別の閾値を動的に設定する。ODAST/DT において、サイクル t にノード N_i が設定する閾値を $N_{IC}^i(t)$ と表記する。ODAST/DT では、データ分布の時間的な変化が緩やかな領域では、 $N_{IC}^i(t)$ を大きい値に設定することで、強制発信データパケットの発信を抑える。一方、データ分布の空間的な変化が緩やかな領域では、 $N_{IC}^i(t)$ を小さい値に設定することで、時間的に冗長でないデータを持つノードが空間的冗長性判定を行いやすくし、データパケットの発信を中止する機会を増加させる。

ここで、3章で述べたように、収集したデータからすべての欠損データを復元するためには、ノードが行った補間処理を基地局において再現する必要がある。つまり基地局は、各ノードが設定している $N_{IC}^i(t)$ を把握する必要がある。そのため ODAST/DT では、各ノードが閾値 $N_{IC}^i(t)$ を設定する際、過去に発信した（基地局に収集された）データのみを利用する。これにより、基地局では、収集されたデータのみを用いて、各ノードが行った動作を再現し、 $N_{IC}^i(t)$ を把握する。

以下では、閾値 $N_{IC}^i(t)$ の設定に用いる空間的特性および時間的特性の導出方法について述べた後、閾値 $N_{IC}^i(t)$ の設定方法について述べる。

4.2 空間的冗長度

サイクル t におけるノード N_i 付近のデータの空間的特性を表す指標として、空間的冗長度 $p_S^i(t)$ を定義する。 $p_S^i(t)$ は、サイクル t におけるノード N_i のデータに対し、3.3 節で述べた空間的冗長度判定処理を行った結果、式 (3) が真となった場合は 1、そうでない場合は 0 とする。すなわち $p_S^i(t)$ は、各サイクルにおいて、ノード N_i のデータが空間的に冗長であったかどうかを表す。

ここで、ODAST/DT では、ノード N_i がデータを一つも傍受しないサイクルが存在する。この場合、ノード N_i は空間的冗長度判定処理を行えないため、そのサイクルにおける $p_S^i(t)$ を定義しないものとする。

4.3 時間的冗長度

サイクル t におけるノード N_i のデータの時間的特性を表す指標として、時間的冗長度 $p_T^i(t)$ を定義する。 $p_T^i(t)$ は、サイクル t におけるノード N_i のデータに対し、3.2 節で述べた時間的冗長度判定処理を行った結果、式 (2) が真となった場合は 1、そうでない場合は 0 とする。すなわち $p_T^i(t)$ は、各サイクルにおいて、ノード N_i のデータが時間的に冗長であったかどうかを表す。ただし、3.2 節で述べた手順とは異なり、過去の未発信データは、基地局における復元処理によって得られる値を代用する。そのため、各ノードは、データを発信しなかったすべてのサイクルにおいて、基地局で復元される値を算出し、逐次記憶しておく。

4.4 閾値 $N_{IC}^i(t)$ の設定

ノード N_i は、過去に導出した t_{pre} [個] の $p_S^i(t)$ および $p_T^i(t)$ を用いて、以下の手順に従い、現サイクル t_c における自身の閾値 $N_{IC}^i(t_c)$ を自律的に計算する。

- (1) t_c までのある一定期間のノード N_i のデータの時間的特性を表す指標として、重み付き時間冗長度 $P_T^i(t_c)$ ($0 \leq P_T^i(t_c) \leq 1$) を定義する。 $P_T^i(t_c)$ は、過去 t_{pre} サイクルにおける時間的冗長度の線形加重移動平均とし、次式によって表す。

$$P_T^i(t_c) = \frac{\sum_{k=0}^{t_{pre}-1} \{(t_{pre}-k) \cdot p_T^i(t_c-k-1)\}}{\sum_{k=0}^{t_{pre}-1} (t_{pre}-k)} \quad (4)$$

例えば図 4(a) の例では、 t_{pre} を 3 としたとき、過去 3 件の時間的冗長度から、 t_c における重み付き時間的冗長度を算出する。なお、 $P_T^i(t_c)$ は、 t_c が 1 である場合定義しないものとし、 t_c が t_{pre} 以下である場合、サイクル $t_c - 1$ までの時間的冗長度の

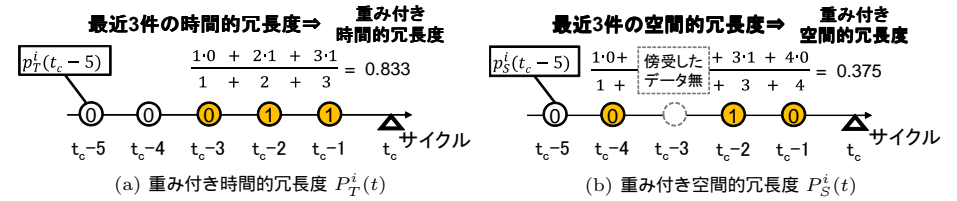


図 4 $P_T^i(t)$ および $P_S^i(t)$ の導出 ($t_{pre} = 3$ の場合)
Fig. 4 Calculations $P_T^i(t)$ and $P_S^i(t)$ ($t_{pre} = 3$).

線形加重移動平均とする。

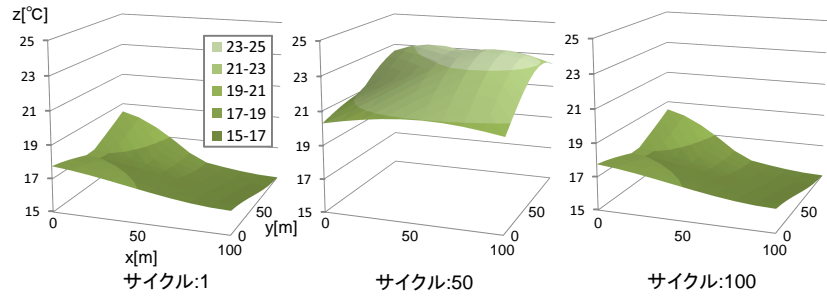
- (2) $P_T^i(t)$ と同様、過去に導出した空間的冗長度の線形加重移動平均として、重み付き空間的冗長度 $P_S^i(t_c)$ ($0 \leq P_S^i(t_c) \leq 1$) を定義する。ここで、過去 t_{pre} サイクルにおいて空間的冗長度が定義されないサイクルが存在する場合は、 t_{pre} [個] の空間的冗長度が得られるまで、さらに過去の空間的冗長度を利用する。例えば図 4(b) の例では、ノード N_i が、サイクル $t_c - 3$ において、全隣接ノードからデータを傍受していない。そのため、サイクル $t_c - 1$, $t_c - 2$ および $t_c - 4$ における空間的冗長度から、 t_c における重み付き空間的冗長度を算出する。なお、ノード N_i が過去にデータを一つ以上傍受したサイクルが存在しない場合、 $P_S^i(t_c)$ は定義しないものとする。また、そのようなサイクルが t_{pre} [個] 未満である場合、1 から $t_c - 1$ サイクルまでの時間的冗長度の線形加重移動平均を $P_S^i(t_c)$ とする。
- (3) 導出した $P_S^i(t_c)$ および $P_T^i(t_c)$ から、次式に基づいて閾値 $N_{IC}^i(t_c)$ を計算する。

$$N_{IC}^i(t_c) = (1 - M) \{c P_T^i(t_c) + (1 - c)(1 - P_S^i(t_c))\} \quad (5)$$

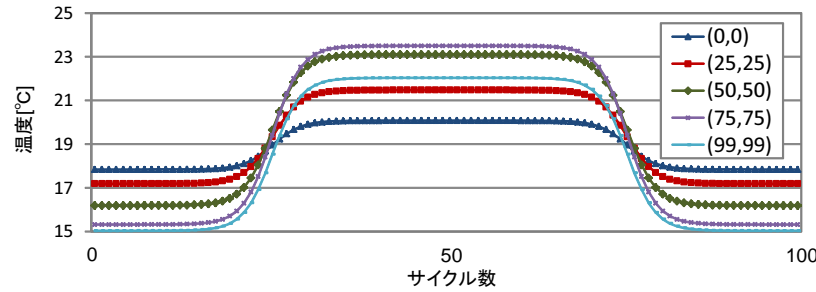
上式の c ($0 \leq c \leq 1$) は重み係数を表し、 M ($0 \leq M \leq 1$) は定数を表す。上式により、ODAST/DT における閾値は、 $[0, 1 - M]$ の範囲で動的に設定される。閾値の最大値を 1 としないのは、各ノードが冗長度判定処理等によってデータパケットの発信を中止することで、ODAST/DT における傍受率が比較的小さくなる傾向にあるためである。なお、 $P_T^i(t_c)$ および $P_S^i(t_c)$ のいずれかが定義されていない場合、 $N_{IC}^i(t_c)$ は初期値 $N_{IC}^i(0)$ を与える。

5. 性能評価

本章では、シミュレーション実験によって ODAST/DT の性能を評価する。実験では、観



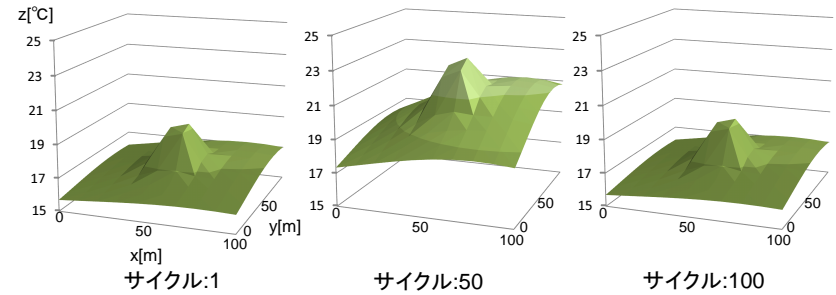
(a) 主なサイクルにおけるデータ分布



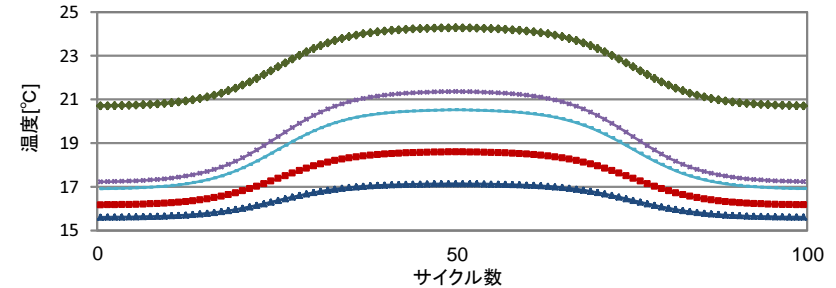
(b) 主な座標におけるセンシング値の時間的変化

図5 データ分布 (複合分布)

Fig. 5 Data distribution in the experiment (Compound distribution).



(a) 主なサイクルにおけるデータ分布



(b) 主な座標におけるセンシング値の時間的変化

図6 データ分布 (ガウス分布)

Fig. 6 Data distribution in the experiment (Gauss distribution).

測領域の温度分布を観測するモニタリングアプリケーションを想定する。

5.1 評価環境

実験では、100[m] × 100[m] の二次元平面に 600 個のノードをランダムに配置した。基地局は領域の角に一つ配置し、ノードの無線通信範囲 r_c は 10[m] とした。式 (5) の M は 0.8 とし、 $N_{IC}^i(0)$ は 0.1 とした。また、各ノードへの TDMA スロットの割当ては、通信の衝突が発生せず、TDMA フレーム内のスロット数が最小になるように行った。実験では、各座標の温度が時間経過に伴って変化する分布として、図 5 および図 6 に示すような 2 種類のデータ分布で行った。両分布とも、時間は 100 サイクル分である。

5.2 ODAST/DT の特性: t_{pre} の影響

まず、データ特性の変化を抽出するために利用するパラメータである t_{pre} を変化させ、空間的冗長性判定フェーズにおいて発信されたデータの総数 (発信データ数) が受ける影響を評価した。式 (5) における重み係数 c および許容誤差 E は、それぞれ 0.5 および 0.3 とした。結果を図 7 に示す。まず複合分布では、 t_{pre} が 2 のときに発信データ数が最小となるのがわかる。 t_{pre} が 1 の場合に発信データ数が増加するのは、データ特性の変化を抽出するデータ数があまりにも少なく、各ノードが適切な閾値を設定できなかったためであると考えられる。一方、 t_{pre} が 2 を超えたときに発信データ数が増加するのは、図 5(b) の 25 サイクル付近および 75 サイクル付近のように、データ分布が時間的に急激に変化した場合、

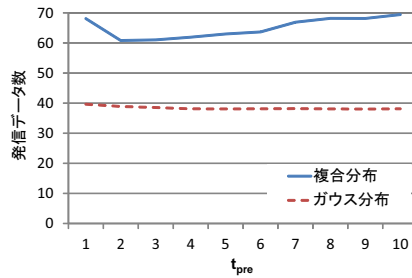


図 7 t_{pre} の影響
Fig. 7 Effects of parameter t_{pre} .

その急激な変化を閾値に反映するまでに時間がかかるためである。また、ガウス分布では、複合分布と比較して発信データ数が t_{pre} の値に大きく影響を受けないことがわかる。これは、図 6(b) に示すとおり、ガウス分布におけるデータの時間的な変化が緩やかであり、前述したデータ分布の変化を閾値に反映するまでにかかる時間の影響を受けないためである。

5.3 他手法との比較

ODAST/DT のパラメータ t_{pre} を 3 に設定した場合の性能を、以下の手法と比較した。

- ODAST: 冗長性判定処理を選択するための閾値を固定で与える。ここでは、時間的冗長性判定を優先的に行うものとして $N_{IC}=0.2$ 、空間的冗長性判定を優先的に行うものとして $N_{IC}=0.05$ の二つの場合における性能を評価した。
- 準最適手法: ODAST に対して、閾値を設定せず、時間的に冗長なデータをもつノードは必ず時間的冗長性判定を利用する手法。具体的には、空間的冗長性判定フェーズで、傍受率に関わらず、時間的に冗長なデータをもつノードは必ず時間的冗長性判定を利用する。また、時間的に冗長でないデータをもつノードは、ODAST と同様の手順に従って、空間的冗長性判定を利用する。この手法では、強制発信データパケットが全く発信されず、通信量を大きく削減できる。しかし、各ノードが行った冗長性判定処理を基地局において再現できないため、許容誤差を保証できるデータの復元が行えない。

c および E を変化させたときの発信データ数を図 8 および図 9 に示す。

図 8 の結果より、複合分布においては、 N_{IC} を小さくすることで、ODAST における発信データ数を抑えられることがわかる。これは、図 5(b) に示す通り、複合分布におけるデータの時間的な変化が急激であり、 N_{IC} を小さく設定し、空間的冗長性判定を利用しやすくすることで、より多くのデータ発信が抑制されたためであると考えられる。一方、図 9 の結

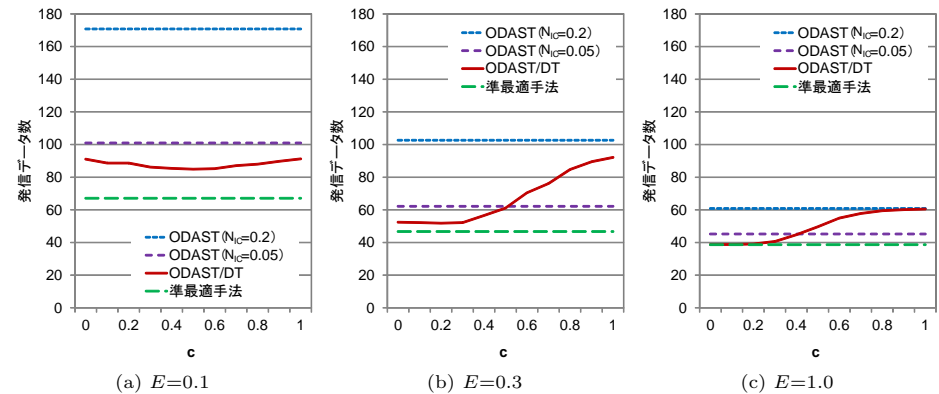


図 8 c および E の影響 (複合分布)
Fig. 8 Effects of parameters c and E (Compound distribution).

果より、ガウス分布では、図 6(a) に示す通りデータの空間的な変化が急激であり、空間的冗長判定を利用しにくくなるよう大きい N_{IC} を設定することが有効であることがわかる。

また、ODAST/DT における発信データ数は、 c および E の値に応じて、準最適手法と ODAST の間で遷移することがわかる。これは、ODAST/DT における閾値の動的な設定によって、特に強制発信データパケットの発信が抑制されたためである。一方、ODAST/DT における発信データ数が準最適手法より大きくなる原因としては、5.2 節で述べたとおり、データ分布の空間的あるいは時間的特性の急激な変化に対し、閾値の反映までに時間がかかるためである。

ここで、図 8(a) および図 9(a) の結果より、 E が 0.1 のとき、 c に関わらず、ODAST/DT におけるデータ発信数が ODAST と比較して小さくなることがわかる。これは、データの時間的および空間的な変化が、設定された許容誤差 E に対して大きくなるためである。このような環境では、ノードの位置および時刻に応じて、適切な冗長性判定処理が異なる傾向が大きくなる。そのため、各ノードに対して個別の閾値を動的に与える ODAST/DT は、予め設定した共通の閾値を利用する ODAST と比較して、通信量を抑制できる。

一方、図 8(b)、図 8(c)、および図 9(a) の結果より、データ分布の時間的な変化が許容誤差に対してある程度大きい場合、 c の値が大きいときの発信データ数が、 N_{IC} を大きく設定した ODAST に近づくことがわかる。これは、今回評価したデータ分布の時間的変化特

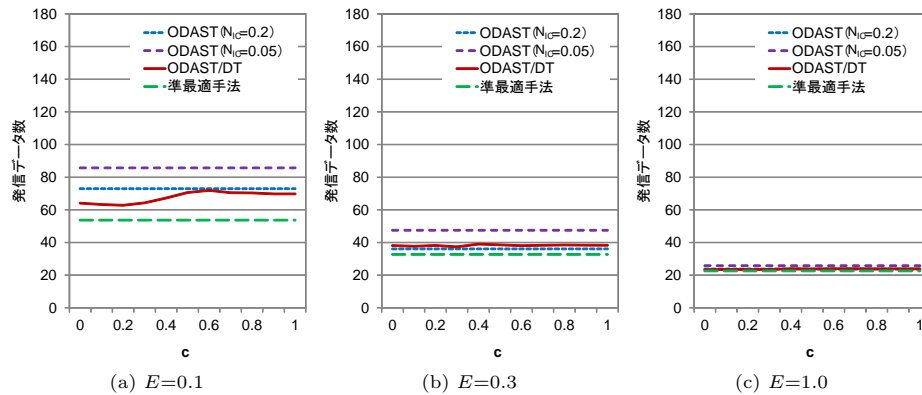


図9 c および E の影響 (ガウス分布)
Fig.9 Effects of parameter c and E (Gauss distribution).

性によるものであると考えられる．ここでは，図6(b)の変化に対するノードの挙動を用いて議論する． c の値が大きい場合，各ノードが設定する閾値は，時間的冗長度に大きく影響を受ける．この場合，最初の10サイクルのように，データが時間的に冗長である状況が続いているような環境では，各ノードにおける時間的冗長度が1になりやすく，閾値が増加していく．20サイクル付近において，センシングしたデータが時間的に冗長でなくなると，ノードがデータを発信するが，その後のデータの時間的変化が直線的であるため，発信したデータを用いた冗長性判定処理により，データが時間的に冗長と判定され，時間的冗長度が1になりやすい状態が継続される．これにより，各ノードが設定する閾値が常に大きく設定され，閾値を大きくしたODASTと同様の挙動を示す．一方，図8(a)の結果より，データ分布の時間的な変化が許容誤差に対して極端に大きい場合，データが時間的に冗長である状況が続かないため，上述した問題の影響は小さいことがわかる．

最後に，今回評価したデータ分布では概して， c が小さくなるにつれて，発信データ数が減少する傾向にあることがわかる．しかし，図8(a)および図9(a)からわかるように， E が小さい場合に過度に c を小さくすると発信データ数が増加するなど，データ分布や許容誤差によっては最適な c の値が異なる可能性が示唆される．今後さらに多様なデータ分布において同様の実験を行い，各パラメータが性能に与える影響を詳細に調査する予定である．

6. おわりに

本稿では，筆者らが文献4)において提案したODASTに対し，さらなる通信量削減を目的とした拡張を行った．拡張手法では，データの空間的および時間的特性の変化およびアプリケーション要求を考慮して，各ノードが利用する補間処理を適切に判断する．シミュレーション結果により，拡張手法では，データ分布等の環境に対してより柔軟なパラメータ設定により，通信量を削減することを確認した．

5.3節で述べた通り，今後は実データを用いるなど，図5および図6で示した分布以外のデータ分布における拡張手法の特性を調査する予定である．また，筆者らは文献5)において，ODASTに対して一部のノードをネットワークに参加しない休止状態とするスリープ制御を適用している．そこで今後は，本稿で提案した手法に対してスリープ制御を適用した手法の性能を評価する予定である．

謝辞 本研究は，文部科学省科学研究費補助金・基盤研究(S)(21220002)および若手研究(B)(23700078)の研究助成による成果である．また，本研究を進めるにあたり，多大なるご協力を頂いている大阪大学 若宮直紀教授に謝意を表す．

参考文献

- 1) Chu, D., Deshpande, A., Hellerstein, J.M. and Hong, W.: Approximate Data Collection in Sensor Networks using Probabilistic Models, *Proc. ICDE 2006*, pp.48–60 (2006).
- 2) Dai, H. and Han, R.: TSync: A Lightweight Bidirectional Time Synchronization Service for Wireless Sensor Networks, *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, Vol.8, No.1, pp.125–139 (2004).
- 3) Guestrin, C., Bodi, P., Thibau, R., Paski, M. and Madden, S.: Distributed Regression: An Efficient Framework for Modeling Sensor Network Data, *Proc. IPSN 2004*, pp.1–10 (2004).
- 4) 神崎映光, 飯間悠樹, 原 隆浩, 西尾章治郎: 無線センサネットワークにおける通信傍受とデータ補間を用いた通信量削減手法, *情報処理学会論文誌*, Vol.52, No.4, pp.1678–1692 (2011).
- 5) 近藤真也, 神崎映光, 原 隆浩, 西尾章治郎: 無線センサネットワークにおける空間的および時間的相関性に基づく通信量削減とスリープ制御の統合, *日本データベース学会論文誌*, Vol.10, No.2, pp.1–6 (2011).
- 6) Kotidis, Y.: Snapshot Queries: Towards Data-centric Sensor Networks, *Proc. ICDE 2005*, pp.131–142 (2005).