

推薦論文

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

神崎 映光^{†1} 飯間 悠樹^{†2}
 原 隆浩^{†1} 西尾 章治郎^{†1}

本論文では、無線センサネットワークにおいて、センサノードが取得したデータの補間および無線通信の傍受を利用した通信量削減手法を提案する。提案手法は、各センサノードが、自身が過去に観測したデータ、および無線通信の傍受によって得た隣接ノードの観測データを用いて、自身が観測したデータの冗長性を自律的に判断する。データの冗長性は、各ノードが、自身が過去に観測したデータをもとにした時間的補間、および傍受したデータをもとにした空間的補間によって判断し、自身のデータを冗長と判断したノードは、そのデータの発信を停止する。これにより、観測領域のデータ分布を予測するために必要なデータのみが発信され、ネットワーク内の通信量を削減できる。さらに本論文では、シミュレーション実験によって、提案手法による通信量の削減を確認する。

A Traffic Reduction Method Using Packet Overhearing and Data Interpolation in Wireless Sensor Networks

AKIMITSU KANZAKI,^{†1} YUUKI IIMA,^{†2} TAKAHIRO HARA^{†1}
 and SHOJIRO NISHIO^{†1}

This paper proposes a traffic reduction method that utilizes data interpolation and communication overhearing in wireless sensor networks. In the proposed method, each node autonomously determines the redundancy of its sensor reading. The determination is conducted by a temporal interpolation using readings acquired by itself in the past, and a spatial interpolation using overheard readings from its neighbors. When the node determines its reading as redundant, it stops transmitting the reading. Furthermore, this paper presents an evaluation based on simulation experiments and shows that the proposed method reduces data traffic.

1. はじめに

近年、センサノード（以下、ノード）の小型化や低価格化にともない、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への注目が高まっており、環境の観測や動物の生態調査、侵入監視など、様々な応用が期待されている。無線センサネットワークでは、一般にノードの計算機資源が乏しく、特にバッテリーで稼動させるものが多いため、無線センサネットワークのサービスを長期間提供するためには、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^{3),14)}。

無線センサネットワークの主要な応用サービスの1つに、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^{2),19),20),22)}。モニタリングアプリケーションでは、各ノードが観測した情報（以下、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、すべてのノードからデータを収集すると大量の通信が発生し、ノードのバッテリーが早期に切れてしまう。

ここで、モニタリングアプリケーションが観測対象とする気温などのデータは、空間的や時間的などの様々な相関性を持つことが一般的である。この例として、センサノードが取得した実データセットである Intel Lab Data¹⁸⁾（図1）におけるデータを図2に示す。図2は、図1の中央付近に配置されたノードが1日に取得した温度および湿度のデータ列を示しており、横軸は時刻を表す。図から分かるように、近い位置に配置されたノードが取得したデータは類似しており、また時間経過に応じて線形に増加または減少する期間が多く見られる。このような相関性を利用することで、あるデータから、他の時刻におけるデータや、他のノードが取得したデータを予測できる。この特徴を利用し、他のデータを予測するために必要な最低限のデータのみを収集することで通信量を削減する、ネットワーク内集約手法が多く提案されている^{5),7),9),10),16),21),23)}。しかし、これら従来手法は、データ間の相関性を利用するために、あらかじめノード間でデータを交換する必要がある、そのための通信に

^{†1} 大阪大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

^{†2} 株式会社野村総合研究所

Nomura Research Institute, Ltd.

本論文の内容は2010年4月のInternational Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU 2010)にて報告され、同プログラム委員長により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である。

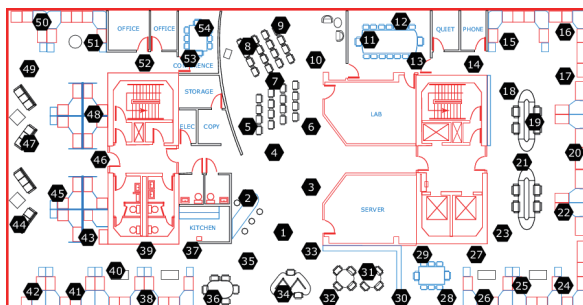


図 1 Intel Lab Data¹⁸⁾ におけるノード配置
Fig. 1 Node deployment in Intel Lab Data¹⁸⁾.

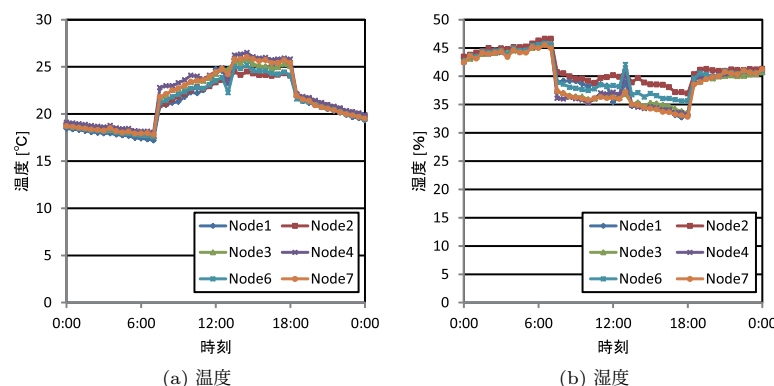


図 2 環境中央付近におけるデータ (2004 年 3 月 1 日)

Fig. 2 Sensor data in the central part of the environment (March 1st, 2004).

大きな電力を消費する。

筆者らはこれまでに、データ間の空間的な相関性に注目し、データ補間および通信傍受を利用することで、無線センサネットワークにおける通信量を削減する手法である ODAS (Overhearing based Data Aggregation method using Spatial interpolation) を提案している^{13),15)}。ODAS では、各ノードが、近隣のノードが発信したパケットを傍受し、それらのパケットに含まれるデータを元に、自身が観測したデータの空間的冗長性を自律的に判断する。ここで、空間的に冗長とは、ノードのデータが、近隣のノードが観測したデータか

ら十分な精度で推測可能であることを表す。自身のデータを冗長と判断したノードは、そのデータを発信しない。これにより、ノード間における事前のデータ交換なしに、観測領域の空間的なデータ分布を把握するために必要なデータのみが発信され、無線センサネットワークの通信量を削減できる。

ここで、センサノードが取得するデータには、空間的だけでなく、時間的な相関性も存在する。そこで本論文では、ODAS を拡張し、データ間の時間的相関性を利用することで、通信量をさらに削減する手法である ODAST (Overhearing based Data Aggregation method using Spatial and Temporal interpolations) を提案する。ODAST では、データの空間的冗長性判定に先立ち、各ノードが過去に観測したデータを利用し、自身が観測したデータの時間的冗長性を判定する。ここで、時間的に冗長とは、ノードのデータが、自身が過去に観測したデータから十分な精度で推測可能であることを表す。これにより、時間的に冗長なデータの発信を抑制し、通信量をさらに削減する。

以下では、まず 2 章で本論文の想定環境について述べた後、3 章で関連研究について述べる。4 章で筆者らがこれまでに提案した ODAS について概説し、5 章で、本論文で提案する ODAST について述べる。6 章で性能評価について述べ、最後に 7 章で本論文のまとめと今後の課題について述べる。

2. 想定環境

本論文で想定するシステムの概要を図 3 に示す。本論文では、1 つの基地局と n 個のノードからなり、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範囲 r 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。各ノードの位置は、文献 25) などのプロトコルによって既知であるものとし、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 (以下、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いつせに行うものとする。本論文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あらかじめ指定するものとする。また基地局は、ノードから収集したデータを自身の記憶領域に蓄積し、管理する。

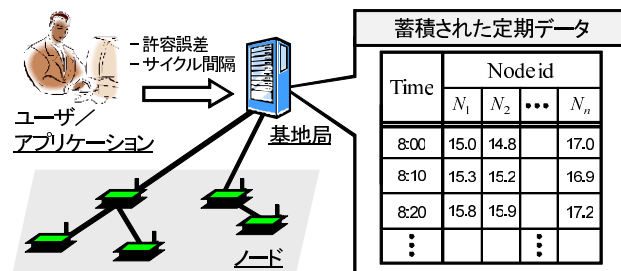


図 3 想定システム

Fig. 3 Overview of the system model.

アプリケーションは、各ノードが実際にセンシングしたデータ値と、基地局から結果として提示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、本論文で想定するシステムの目的は、全ノードがセンシングした各データに対して、次式のように誤差が 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たデータと、基地局がノード N_i のセンシングデータとして扱う値である。本論文では、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いう。

各ノードから基地局までの無線通信経路は、文献 12) などのプロトコルによってあらかじめ構築されているものとする。提案手法は基地局へのデータ収集と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。なお、6 章の性能評価では、静的な木構造ネットワークを用いてパケットを転送するものとした。

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 4 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 1 つのスロットを割り当てる。ノードは、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。本論文では、各ノードへのスロット割当ては、文献 17) などのプロトコルによってあらかじめ完了しているものとする。これらの手法は、システム運用開始前に全ノードに静的にスロット

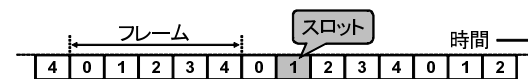


図 4 TDMA の概要 (スロット数 5 の場合)

Fig. 4 Overview of TDMA (the number of slots in a frame is 5).

割当てを行う。そのため、定期的センシングを行うシステム運用中は、スロット割当てのための通信がいったい発生しない。また、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 (以下、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 6) などの既存プロトコルによってあらかじめ達成されているものとする。これらのプロトコルは、ノードの消費電力を抑制するため、少ない通信量でノード間の時刻情報を同期させることができる。

3. 関連研究

本論文で想定するような、観測領域全体のデータ分布を把握するデータ群を収集する無線センサネットワークを対象とし、データ収集時の通信量を削減する研究は、これまでも数多く行われている^{1), 5), 9), 10), 16), 23)}。

文献 8), 16) では、互いのデータ間に相関性があるノード群から、それらを代表するノードを選出し、それら代表ノードのみがクエリに回答することで、通信量を削減する手法が提案されている。また、文献 5), 9) では、データ間の様々な相関性を表現する統計モデルを用い、クエリに対して予測値を回答することで通信量を削減する手法が提案されている。これらの手法は、ユーザやアプリケーションからの要求に応じて任意の時刻に発行されたクエリに対し、一部のノードがセンシングおよびデータ返送を行うものである。一方、本論文では、無線センサネットワークから定期的に収集したデータに基づき、各サイクルにおけるデータ分布を生成するアプリケーションを想定しており、基地局からのクエリが発行されない。そのため、クエリに回答する動作をとるこれらの手法は、本論文の想定環境に適用できない。また、代表ノードの選出や、統計モデルの生成および再構築のために、ノード間でデータを交換する必要があり、そのため通信に多くの電力を消費してしまう。また、文献 5), 9) で提案された手法は、統計モデルの性質上、応答が確率的であり、応答結果が許容誤差の範囲内に収まることを保証できない。

文献 1), 10) では、データ分布の回帰近似によって通信量を削減する手法が提案されている。これらの手法は、データ分布を近似計算するために必要な情報のみを基地局に収集する

ため、全ノードのデータを収集する場合と比較して、データ収集に要する通信を大幅に削減できる。しかし、近似に必要な情報を生成するために、データ収集前や近似の精度低下時にノード間でデータを交換する必要がある、そのための通信に多くの電力を消費してしまう。また、これらの手法も、近似結果と実際にセンシングしたデータとの誤差を保証できない。

文献 23) では、データ間の相関性を時間的なものだけに限定し、各ノードが、構築が容易な時系列モデルを用いて通信量を削減する手法が提案されている。この手法は、データの空間的相関性を考慮していないため、各ノードのデータの時間的変化が大きい環境では、通信量が増大するという問題がある。

4. 従来手法：ODAS

本章では、筆者らがこれまでに提案した通信量削減手法である ODAS^{13),15)} について述べる。ODAS では、図 5 に示すように、1 つのサイクルを以下の 2 つのフェーズから構成する。

冗長性判定フェーズ 各ノードは、自身がセンシングしたデータの空間的冗長性を自律的に判定し、冗長でないと判定されたノードのみ、データを発信する。

データ収集フェーズ 冗長性判定フェーズにおいて発信されたデータを、木構造ネットワークを介して基地局に収集する。

以下では、冗長性判定フェーズにおける各ノードの動作、およびデータ収集後の基地局の

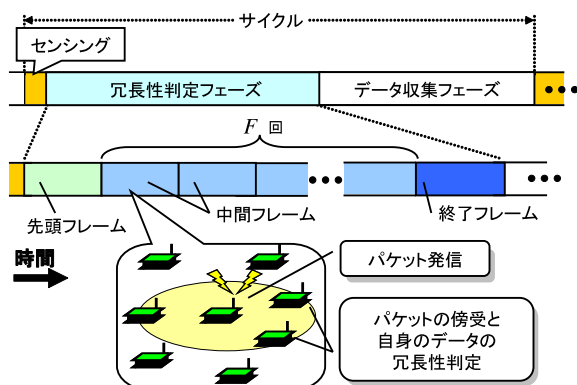


図 5 ODAS の概要
Fig. 5 Overview of ODAS.

動作について述べる。

4.1 ノードの動作

各ノードは、基本的に、トランシーバの電源を切った状態である休止状態にあり、隣接ノードの割当てスロットでトランシーバを起動して受信待ち状態に遷移する。なお、冗長性判定フェーズにおいて各ノードが発信するパケットはただか 1 つであるため、ノードは、すでにパケットを受信した隣接ノードの割当てスロットでは休止状態にある。また、ノードは、データを傍受するたびに、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パケットを発信する。ここで発信されるパケットには、発信ノードの識別子、および発信ノードがセンシングしたデータを含む。

4.2 TDMA フォーマット

図 5 に示すとおり、冗長性判定フェーズは、先頭フレーム、 F 個の中間フレーム、および終了フレームからなる。以下に、各フレームにおけるノードの動作を示す。

先頭フレーム 前サイクルでパケットを発信しなかったノードが、各々の割当てスロットにおいてパケットを発信する。このノードをトリガノードと呼び、トリガノードが発信したパケットをトリガパケットと呼ぶ。一方、隣接ノードが先にトリガパケットを発信した場合は、トリガノードはトリガパケットの発信をとりやめる。これにより、トリガパケットは、ノードの通信範囲に応じた密度で、観測領域全体に満遍なく分散して発信される。

中間フレーム 各ノードが、隣接ノードが発信したパケットを傍受し、4.3 節で述べる空間的冗長性判定の結果に応じてパケットを発信する。

終了フレーム それまで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空間的に冗長でないと判断したノード、および隣接ノードからのパケットを 1 度も傍受しなかったノードがパケットを発信する。

4.3 空間的冗長性判定

各ノードは、現サイクルにおいて傍受したパケットのデータをもとに空間的補間を行うことで、自身のデータの予測値を算出する。この処理は、 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 1 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 2 つの場合、図 6(a) に示すように、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

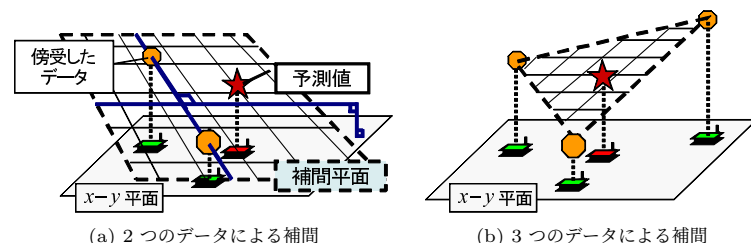


図 6 空間的補間
Fig. 6 Spatial interpolation.

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3つ以上の場合、図 6(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、自身を含む三角形を構成できる隣接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3ノードを選択する。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。

また、パケットを発信したすべての隣接ノードが直線状に位置しており、三角形を構成していない場合は、ノードはその直線を基に、傍受データが2つの場合と同様の補間処理によって自身のデータの予測値を算出する。

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。

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

上式の $v_i(t)$ および $\hat{v}_i^S(t)$ はそれぞれ、サイクル t において、ノード N_i がセンシングしたデータと、上述の空間的補間処理で算出されたデータ v_i の予測値である。また、上式の左辺を予測誤差と呼ぶ。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、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パケットを発信する。

このように、ODAS では、各ノードが傍受したパケットのデータから補間平面を導出し、これをもとに自身のデータの空間的冗長性を判定する。そのため、各ノードの通信範囲内に

におけるデータ分布がより平面的であるほど、パケットの発信が中止されやすくなり、通信量を大きく削減できるものと考えられる。一方、各ノードの通信範囲内におけるデータ値がノードごとに大きく異なり、データ分布が平面的にならない場合、多くのパケットが発信されるものと考えられる。

4.4 基地局における欠損データの復元

ノードによって空間的に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。このような欠損データは、4.3 節で述べた各ノードの補間処理を基地局において再現することで復元する。ここで、基地局における欠損データの復元処理は、対応するノードが用いたものと同じデータをもとに行う。そのため、欠損データと復元されたデータとの誤差（以下、復元誤差）が必ず許容誤差 E 以内に収まることが保証される。

5. 提案手法：ODAST

ODAS では、各ノードが、傍受したパケットのデータをもとに自身のデータの空間的冗長性を判定することで、通信量を削減している。本章では、ODAS を拡張し、データ間の時間的相関性を利用することで、さらに通信量を削減する手法である ODAST を提案する。ODAST では、各ノードがセンシングしたデータの時間的な相関性を利用することで、データ分布の変化が時間的に冗長な領域においても、パケットの発信を抑える。

ODAST は、ODAS と同様、1つのサイクルを、冗長性判定フェーズおよびデータ収集フェーズの2つのフェーズから構成する。ただし、図 7 に示すように、冗長性判定フェーズの開始時に、各ノードが自身のデータの時間的冗長性判定を行う。本章では、冗長性判定フェーズのうち、時間的冗長性判定を終了した後の期間を空間的冗長性判定フェーズと呼ぶ。

ここで、ODAST では、あるノードのデータが時間的あるいは空間的に冗長である場合、そのノードはパケットを発信しない。この場合、基地局は、パケットを発信しなかったノードが、時間的冗長性判定と空間的冗長性判定のどちらに基づいてパケットを発信しなかったのか一意に識別する必要がある。そこで ODAST では、ノードが行った処理を基地局において識別するため、空間的冗長性判定を行うために傍受すべきパケット数の閾値 N_{IC} を規定する。また、ノードが傍受するトリガパケット数を調整するために、パラメータ R_{TN} を設定する。これらのパラメータを用いた動作の詳細は 5.2 節で述べる。

以下では、まず時間的冗長性判定について述べ、次に空間的冗長性判定フェーズにおける各ノードの動作、およびデータ収集後の基地局の動作について述べる。

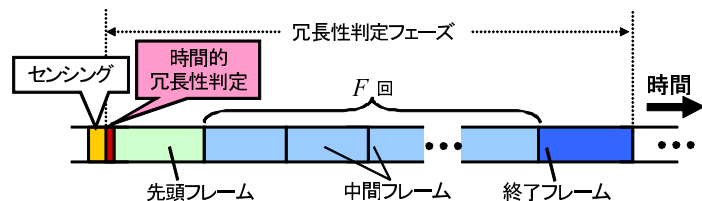


図7 ODASTにおける冗長性判定フェーズ

Fig. 7 Redundancy determination phase in ODAST.

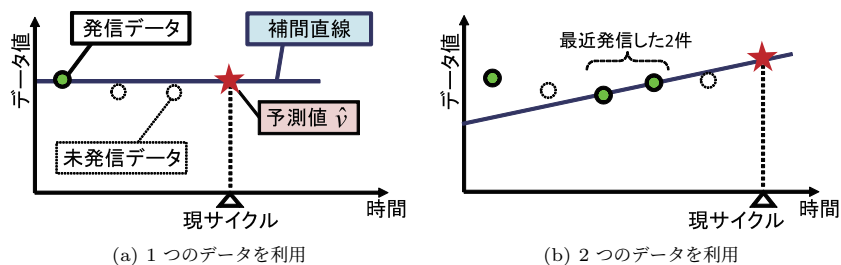


図8 時系列補間

Fig. 8 Temporal interpolation.

5.1 時間的冗長性判定

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1つの場合、図8(a)に示すように、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2つ以上の場合、図8(b)に示すように、発信したデータの中から最も新しい2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、現在時刻に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。

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

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 v_i 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、パケットの発信を中止する。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、続く先頭フレームにおいてトリガノードとなる。

このように、ODASTでは、各ノードが過去にセンシングしたデータから補間直線を導出し、これをもとに自身のデータの時間的冗長性を判定する。そのため、各ノードにおけるデータの時間的な変化がより直線的であるほど、パケットの発信が中止されやすくなり、通信量を大きく削減できるものと考えられる。一方、各ノードにおけるデータが頻繁に増減するなど、時間的な変化が直線的でない場合、多くのパケットが発信されるものと考えられる。

5.2 空間的冗長性判定

空間的冗長性判定フェーズにおけるノードの動作は、ODASと同様、スロットに応じて、パケット発信、パケット傍受、および休止状態への遷移を行う。ただし、ノードは、 N_{IC} 個の隣接ノードからパケットを傍受するまでは、空間的冗長性の判定は行わない。また、 N_{IC} 個以上の隣接ノードからパケットを傍受した場合、時間的冗長性判定の結果にかかわらず、空間的冗長性の判定を行う。これにより、5.4節で述べるとおり、基地局が、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識別できる。

5.3 TDMAフォーマット

空間的冗長性判定フェーズは、ODASと同様、先頭フレーム、 F 個の中間フレーム、および終了フレームからなる。

先頭フレーム 時間的冗長性判定において自身のデータが冗長でないと判断したノードのうち、前サイクルでトリガパケットを発信しなかったノードがトリガノードとなり、トリガパケットを発信する。トリガノードは、自身から距離 R_{TN} 以内に存在する隣接ノードが先にパケットを発信した場合、トリガパケットの発信をとりやめる。これにより、トリガノードは、 R_{TN} に従って地理的に満遍なく分散してトリガパケットを発信する。

中間フレーム 各ノードは、隣接ノードが発信したパケットを傍受し、4.3節で述べた空間的冗長性判定の結果に応じてパケットを発信する。

終了フレーム 現サイクルにおいて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時間的あるいは空間的に冗長でないと判断しているノードがパケットを発信する。なお、本フレームにおいて発信されるパケットには、終了フレームで発信されたことを示すフラグを付与する。また、各ノードは、本フレームにおいて傍受したパケットは、空間的冗長性の判定には用いない。

5.4 基地局における欠損データの復元

ODAST における欠損データの復元は、ODAS と同様、基地局において各ノードの補間処理を再現することで行う。ここで、基地局は、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再現するため、5.2 節で述べた閾値 N_{IC} を用いる。以下に、欠損データを復元する手順を示す。

- (1) データが欠損している各ノードに対して、その隣接ノードが発信したパケットのうち、終了フレーム以外で発信されたものの個数を調べる。
- (2) パケット数が 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。
- (3) パケット数が N_{IC} 以上である場合、注目しているノードは空間的冗長性判定の結果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。

ここで、基地局における欠損データの復元処理は、対応するノードが用いたものと同じデータをもとにして行う。そのため、ODAS と同様、欠損データと復元されたデータとの誤差が必ず許容誤差 E 以内に収まることが保証される。

5.5 考 察

5.5.1 パラメータ F , N_{IC} , R_{TN} の影響

ODAST では、基地局が、パケットを発信しなかったノードの冗長性判定処理を再現するため、隣接ノードからのパケットを N_{IC} 個以上傍受したノードは、時間的冗長性判定の結果にかかわらず、強制的に空間的冗長性判定処理を行う。そのため、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、隣接ノードがパケットを発信したことによって空間的冗長性判定を行い、自身のデータを発信するノードが発生する可能性がある。本論文では、このようなノードを偽非冗長ノードと呼ぶ。

ここで、空間的冗長性判定フェーズでは、 N_{IC} 個のパケットを傍受しない限り、時間的に冗長でないデータを持つノードのみがパケットを発信するため、データ分布の時間的変化が冗長でない領域において、多くのパケットが発信される傾向にある。このような領域の周辺に存在するノードは、 N_{IC} 個以上のパケットを傍受し、強制的に空間的冗長性判定処理を行う可能性が高い。これらのノードにおけるデータが時間的に冗長である場合、空間的冗長性判定処理の結果パケットを発信すると、これらのノードは偽非冗長ノードとなってしまう。すなわち、偽非冗長ノードは、データ分布の時間的変化が冗長な領域と冗長でない領域

との境界付近において、特に多く発生するものと考えられる。このとき、偽非冗長ノードがパケットを発信することによって、そのパケットを傍受したノードが新たな偽非冗長ノードとなることで、中間フレームの繰返しによって偽非冗長ノードが伝播するように発生する可能性がある。よって、中間フレーム数 F を小さくすることで、各ノードが隣接ノードのパケットを傍受する機会を抑え、偽非冗長ノードの発生数を削減できるものと考えられる。

また、 N_{IC} の値を大きく設定することで、データ分布の時間的変化が冗長な領域においてノードが空間的冗長性判定を行う機会が減少し、偽非冗長ノードの発生を抑えられ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持つノードが空間的冗長性判定を行えず、終了フレームでパケットを発信する可能性が増加するものと考えられる。この傾向は、特に中間フレーム数 F を小さくした場合に顕著に現れるものと考えられる。このような場合、トリガパケット発信のための閾値である R_{TN} を調整し、空間的冗長性判定を行う基準となるトリガパケット数を調整することが有効であるものと考えられる。なお、データ分布の時間的変化が冗長な領域ではトリガノードが発生しないため、 R_{TN} が偽非冗長ノードの発生に与える影響は小さいものと考えられる。

以上より、偽非冗長ノード数を削減するためには、中間フレーム数 F , N_{IC} , および R_{TN} の調整が必要になる。これらのパラメータが性能に与える影響は、6.2 節において評価する。

5.5.2 発信データの収集

提案手法は、冗長性判定フェーズにおいて、空間的あるいは時間的に冗長なデータの発信を抑制するものであり、いい換えれば、データ収集のためのネットワークに投入されるデータ量を削減するものである。そのため、2 章で述べたとおり、任意のデータ収集手法と組み合わせることができる。特に、マルチホップな通信経路を用いるデータ収集手法において、複数のノードを介して転送されるデータの発信が抑制された場合、通信経路上に存在するノードが当該データを転送する必要がなくなり、それらのノードにおける通信量が削減されるため、消費電力の削減に大きく貢献できるものと考えられる。

ここで、データ収集手法として、基地局への通信経路を構築・維持するためのパケット交換が必要なものをを用いた場合、経路の構築・維持のための通信量が増大し、提案手法による通信量削減の効果が小さくなるものと考えられる。たとえば、文献 4), 11) などで提案されている手法は、各ノードの残余電力などに関する情報をノード間で交換し、基地局までの通信経路を動的に構築する。これらの手法において、ノード間の情報交換が頻繁に行われた場合、そのための通信量が増大してしまい、提案手法における通信量削減の効果が小さくなるものと考えられる。一方、文献 12) で提案されている手法など、基地局までの通信

経路を静的に構築する手法は、経路の構築・維持のためのパケット交換が行われないため、提案手法による通信量削減の効果が大きくなる。なお、6章の性能評価では、後者に属するデータ収集手法のうち最も単純なものとして、静的な木構造ネットワークを用いてパケットを転送するものとした。

5.5.3 時刻同期

2章で述べたとおり、提案手法では、定期的なセンシングおよびTDMAによる通信を実現するため、文献6)などのプロトコルによってノード間の時刻同期が達成されている必要がある。これらセンサネットワーク向けの時刻同期手法は、1回の時刻同期に要するノード間の通信を最小限に抑えることで、ネットワーク内の消費電力を小さく抑えている。

一般に、センサノードに内蔵されているタイマは、時間経過とともに誤差が生じることが知られている。そのため、提案手法における通信を維持するためには、定期的に時刻同期を再実行する必要があるものと考えられる。この再実行を行う間隔は、定期的なセンシングおよびTDMAによる通信を実現するために要求される時刻の精度と、センサノードが持つタイマの精度に依存する。そのため、たとえば、時間経過によって生じるタイマの誤差が非常に大きく、短時間でシステムが要求する精度を満たせなくなるノードが設置された場合、頻繁に時刻同期を行う必要が生じ、そのための通信に多くの電力を消費してしまう可能性がある。これらの影響は、今後実ノードを用いた実証実験により検証する予定である。

5.5.4 パケットロスの影響

2章で述べたとおり、提案手法は、ノードが隣接ノードからのパケットをすべて傍受できるという理想的な環境を想定している。しかし、実環境では、様々な要因から隣接ノードからのパケットを傍受できない場合がある。本項では、このようなパケットロスが発生する場合の影響について考察する。

まず、冗長性判定フェーズでは、各ノードが行う冗長性判定処理と基地局が行う復元処理との間に不整合が生じる可能性がある。具体的には、 N_{IC} 個以上の隣接ノードがパケットを発信しているにもかかわらず、正常に傍受できたパケット数が N_{IC} を下回り、時間的冗長性判定処理を行うノードが発生するものと考えられる。このとき、そのノードが自身のデータを時間的に冗長と判定し、パケットを発信しなかった場合、そのノードのデータは基地局に転送されない。一方、基地局では、そのノードの隣接ノードのうち N_{IC} 個以上のノードがパケットを発信しているため、5.4節の手順(3)に従い、空間的冗長性判定処理によってデータを復元してしまう。また、 N_{IC} 個以上のパケットを正常に傍受し、空間的冗長性判定処理を行った場合でも、冗長性判定処理に用いるデータに不整合が生じる可能性がある。

たとえば、3つ以上の隣接ノードがパケットを発信しているにもかかわらず、そのうち2つしか正常に傍受できなかった場合、そのノードはそれら2つのデータを用いた空間的冗長性判定処理(図6(a))を行う。一方、基地局では、そのノードの隣接ノードのうち3つ以上のノードがパケットを発信しているため、それらのうち3つを用いた空間的冗長性判定処理(図6(b))に基づき、データを復元してしまう。このように、パケットロスによってノードと基地局との処理が一致しない場合、復元誤差が許容誤差 E を上回る可能性がある。

また、冗長性判定フェーズでは、ノードがパケットを傍受できなかった結果、自身のデータが冗長でないと判定し、実際には冗長なデータを発信してしまう可能性がある。この場合、発信したデータが基地局に到達するため、上述した復元誤差の問題は発生しないが、冗長なデータの転送により、消費電力が増加してしまう。

一方、データ収集フェーズについては、パケットロスを考慮したデータ収集手法を用いることで、冗長性判定フェーズで発信されたデータをすべて基地局に収集できるものと考えられる。しかし、再送制御などによって、通信量やデータ収集に要する時間が増加する可能性がある。また、データ収集手法にかかわらず、冗長性判定フェーズで発信されたデータが基地局に到達しなかった場合、正常な復元処理が行えず、許容誤差 E を保証できなくなる可能性がある。

これらの影響については、今後シミュレーション実験により、詳細な調査を行う予定である。

6. 性能評価

本章では、シミュレーション実験によって ODAST の性能を評価する。実験では、観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し、ODAST における各パラメータが性能に与える影響を評価した。また、ODAST の性能を他の手法と比較し、ODAST の有効性を評価した。

6.1 シミュレーション環境

実験では、 $100\text{ [m]} \times 100\text{ [m]}$ の二次元平面上に 600 個のノード ($N_1, \dots, N_{600}$) をランダムに配置し、領域の角に基地局を1つ配置した。各スロットおよびパケットの長さは、それぞれ 20 [ms] および 64 [byte] とした。ノードの無線通信範囲は 10 [m] とし、ノードの消費電力は、MEMSIC 社製の MICAz Mote²⁴⁾ を想定し、表1で表されるものとした。データの分布は、以下の2種類を用いた。

- データ分布1：空間内における温度の時間的な変化を想定し、図9に示す分布を生成

表 1 消費電力モデル

Table 1 Energy consumption model.

処理	電流 [mA]
パケット発信	22
パケット受信 (傍受)	22
受信待ち状態	2
休止状態	0.15

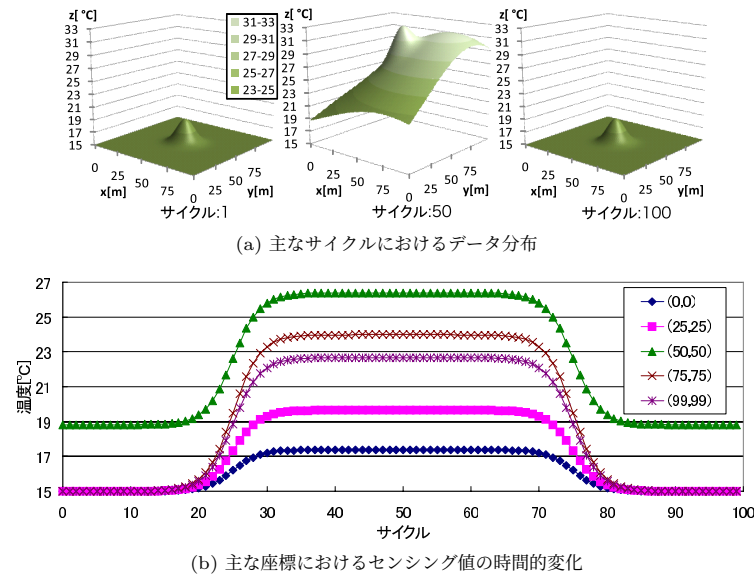


図 9 データ分布 1 (温度)

Fig. 9 Data distribution 1 (temperature).

した。

- データ分布 2: 壁で区切られた屋内空間において、照明器具の点灯および消灯によって変化する照度を想定し、図 10 に示す分布を生成した。
- 許容誤差 E は、データ分布 1 では $0.2 [^{\circ}\text{C}]$ 、データ分布 2 では $20 [\text{Lux}]$ とした。

発信されたデータの基地局への収集は、静的な木構造ネットワークを用いるものと想定した。具体的には、各ノードから基地局までのホップ数が最小となる木構造のネットワークを

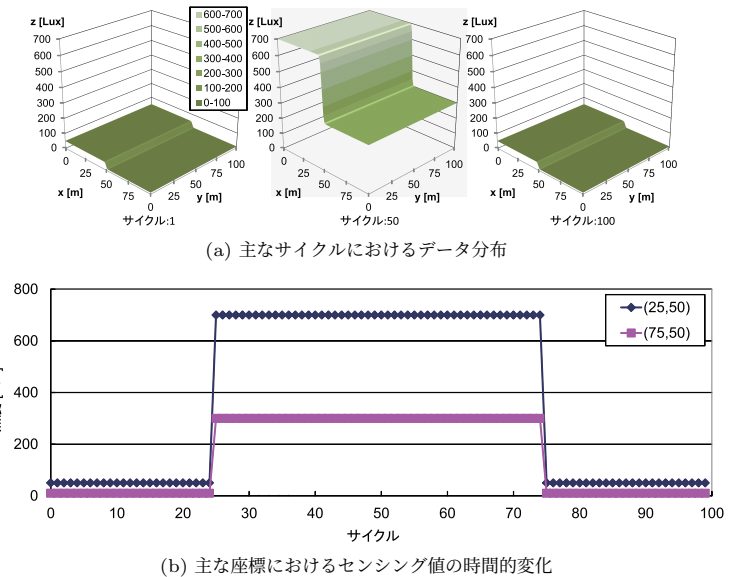


図 10 データ分布 2 (照度)

Fig. 10 Data distribution 2 (illuminance).

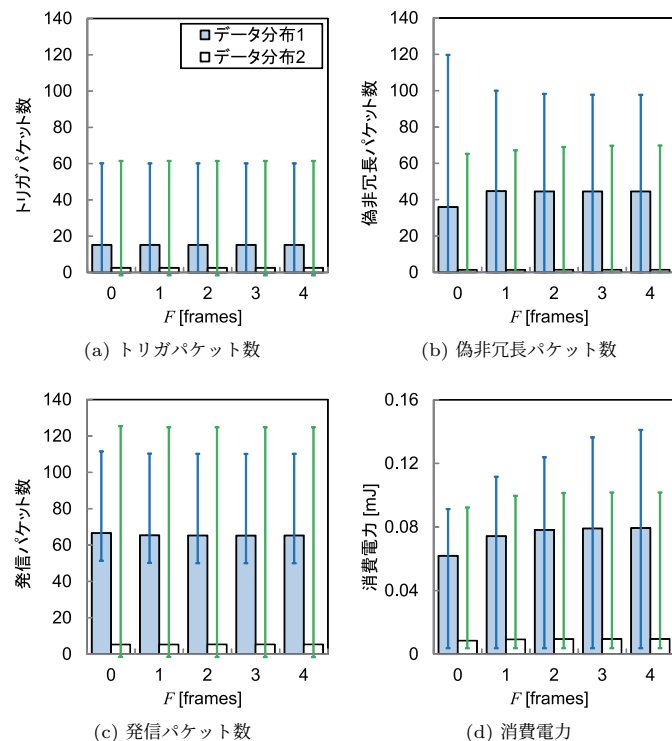
あらかじめ与え、このネットワークの高さ H に対し、 $(H - 1)$ 個のフレームからデータ収集フェーズを構成した。各ノードは、冗長性判定フェーズにおいて傍受したデータのうち、木構造ネットワークにおける子ノードが発信したものを収集対象とし、木構造ネットワークにおける自身の深さ D に対し、 $(H - D)$ 番目のフレームにおける自身の割当てスロットにおいてパケットを発信する。また、自身の子ノードがパケットを発信するスロットにおいてのみ受信待ち状態に移行し、発信されたパケットを受信する。これにより、木構造ネットワークにおいて深さが大きいノードから順にパケットを発信し、冗長性判定フェーズにおいて発信された全データが基地局に収集される。

6.2 ODAST の特性

前述した環境で、ノードの配置を変えて 100 回のシミュレーション実験を行い、以下の指標を評価した。

トリガパケット数 冗長性判定フェーズにおいて発信されたトリガパケット数。

偽非冗長パケット数 冗長性判定フェーズにおいて偽非冗長ノードが発信したパケット数。

図 11 中間フレーム数 F の影響Fig. 11 Effects of the number of intermediate frames F .

発信パケット数 冗長性判定フェーズにおいて発信された全パケット数（上記 2 種のパケットも含む）。

消費電力 1 サイクルあたりに全ノードが消費した電力の総和。

6.2.1 中間フレーム数 F の影響

パラメータ N_{IC} , R_{TN} をそれぞれ 1, 10 に設定し、中間フレーム数 F を変化させたときの実験結果を図 11 に示す。各グラフにおいて、横軸は F を、縦軸はそれぞれ、図 11 (a) ではトリガパケット数、図 11 (b) では偽非冗長パケット数、図 11 (c) では発信パケット数、図 11 (d) では消費電力を示す。各グラフの棒グラフは平均値であり、棒グラフから伸びる

線分は、各評価値がとった値の範囲を示す。

図 11 (a) の結果より、トリガパケット数が F の大小にかかわらず一定であることが分かる。これは、トリガノード数に影響を与える要素が R_{TN} およびデータの時間的な変化のみであり、中間フレーム数の影響を受けないためである。また、データ分布 2 におけるトリガパケット数の平均値が、データ分布 1 を大きく下回ることが分かる。これは、データ分布 2 における大半のサイクルにおいてデータ値が変化せず、これらのサイクルにおいてほぼすべてのノードが自身のデータを時間的に冗長であると判定するためである。

図 11 (b) の結果より、 $F = 0$ のとき、偽非冗長パケット数が減少することが分かる。これは、5.5 節で述べたとおり、 F を小さく抑えることで、偽非冗長ノードの伝播を防ぐことができたためと考えられる。また、データ分布 2 における偽非冗長パケット数が、データ分布 1 を下回ることが分かる。これは、データ分布 2 において、データ値が時間的に変化するサイクルが一致しており、自身のデータが時間的に冗長でないにもかかわらず空間的冗長性判定を行うノードが発生しにくいためである。

図 11 (c) の結果より、データ分布 2 における発信パケット数の平均値が、データ分布 1 を大きく下回ることが分かる。これは、前述したとおり、大半のサイクルにおいてデータ値が変化しないためである。一方、最大値については、データ分布 2 がデータ分布 1 を上回ることが分かる。これは、図 10 から分かるとおり、25 サイクルおよび 75 サイクルにおいて領域全体のデータ値が急激に変化し、また領域の中央付近におけるデータ分布の空間的な変化が急激であるためである。このような環境では、すべてのノードが自身のデータを時間的に冗長でないと判定し、トリガパケットが R_{TN} に従って領域全体で満遍なく発信される。さらに、データ値の空間的な変化が急激な領域の中央付近では、データが空間的に冗長でないと判定されやすく、多くのパケットが発信される。また、どちらのデータ分布においても、 F の変化に対する発信パケット数の変化がわずかであることが分かる。これは、図 9 および図 10 から分かるとおり、データの時間的な変化の傾向が領域全体で類似しており、また全サイクルにおいてデータ値が空間的に連続している箇所が多いためであると考えられる。このような環境では、データが時間的に変化した場合、ほぼすべてのノードがトリガノードとなり、結果的に R_{TN} に従って満遍なくトリガパケットが発信される。トリガパケットを受信したノードは空間的冗長性判定を行うが、空間的なデータ分布が連続的な領域では、ほぼすべてのノードが自身のデータを空間的に冗長であると判定する。その結果、サイクル内でトリガパケット以外のパケットがほとんど発信されなかったものと考えられる。なお、データ分布 2 については、前述したとおり、領域の中央付近において多くのノードがパケットを

発信するものと考えられるが、その範囲が限定的であるため、先頭フレーム直後のフレーム（中間フレームまたは終了フレーム）以外におけるパケット発信がほとんどなかったものと考えられる。

最後に、図 11 (d) の結果より、消費電力は F の増加にともなって大きくなることが分かる。この結果から、中間フレーム数が多いほど、各ノードが受信待ち状態や休止状態において消費する電力が増大することが分かる。

以上の結果より、消費電力を抑制するためには、中間フレーム数を小さく抑えることが有効であるといえる。

6.2.2 パラメータ N_{IC} , R_{TN} の影響

前述した結果を考慮し、中間フレーム数 F を 0 にし、パラメータ N_{IC} および R_{TN} を変化したときの実験結果を図 12 に示す。各グラフにおいて、横軸は R_{TN} を、縦軸はそれぞれ、図 12 (a) ではトリガパケット数、図 12 (b) では偽非冗長パケット数、図 12 (c) では発信パケット数、図 12 (d) では消費電力を示す。なお、データ分布 1 およびデータ分布 2 において同様の結果が得られたため、ここではデータ分布 1 における結果のみ示す。

図 12 (a) の結果より、 N_{IC} の値によらず、 R_{TN} の減少にともなってトリガパケット数が増加することが分かる。これは、5.5 節で述べたとおり、 R_{TN} が小さいほど、トリガノードがトリガパケットの発信を中止する可能性が低くなるためである。

図 12 (b) の結果より、 N_{IC} の増加にともなって偽非冗長パケット数が減少することが分かる。これは、5.5 節で述べたとおり、 N_{IC} が大きいほど、ノードが空間的冗長性判定を行う機会が減少するためである。

図 12 (c) の結果より、 N_{IC} の値によらず、 R_{TN} の増加にともなって発信パケット数が減少することが分かる。これは、 R_{TN} が大きいほど、トリガノードがトリガパケットの発信を中止する可能性が高くなるためである。また、 $N_{IC} > 1$ のとき、ある R_{TN} を超えたところで発信パケット数が増加することが分かる。これは、 R_{TN} の増加によるトリガパケット数の過剰な減少によって、時間的に冗長でないデータを持つノードが先頭フレームにおいて空間的冗長性判定を行わず、終了フレームにおいてパケットを発信する可能性が増加するためである。

図 12 (d) の結果より、消費電力については、発信パケット数とほぼ同様の傾向を示すことが分かる。これは、中間フレームが存在しないため、消費電力に影響を与える要因が発信パケット数の変化のみとなるためである。

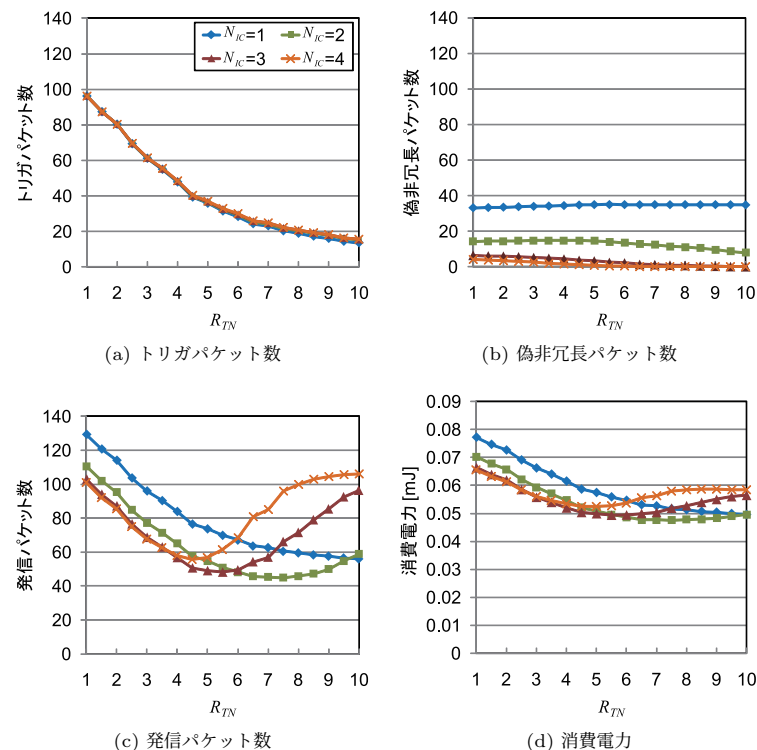


図 12 パラメータ N_{IC} , R_{TN} の影響

Fig. 12 Effects of the parameters N_{IC} and R_{TN} .

6.3 他手法との比較

ODAST の性能を評価するため、6.2 節で評価した発信パケット数および消費電力を、6.3.1 項で述べる手法と比較した。ODAST のパラメータである F , N_{IC} , R_{TN} の値は、前述の結果を考慮し、それぞれ 0, 2, 7.5 に設定した。また、評価に用いたすべての手法において、データ収集に用いる通信経路は全手法で同一の木構造ネットワークとした。

6.3.1 比較手法

本項では、ODAST の性能を、以下に示す 3 つの手法と比較した。これらの比較手法は、ODAST と同様、すべての欠損データに対して、復元誤差が許容誤差 E を下回るデータを

復元できる。

ODAS^{(13),(15)}

筆者らがこれまでに提案した通信量削減手法。データの時間的冗長性判定を行わず、通信傍受をもとにした三次元線形補間を利用し、空間的に冗長なデータの発信のみを抑制する。

時間的冗長データ削減法

ODAST のうち時間的冗長性判定のみを行い、時間的に冗長なデータの発信のみを抑制する。通信傍受による空間的冗長性判定を行わないため、空間的冗長性判定フェーズは存在せず、各ノードは、時間的冗長性判定の後、即座にデータ収集フェーズに移行するものとした。

Snapshot Queries^{(8),(16)}

3 章で述べた関連研究のうち、許容誤差を指定したモニタリングアプリケーションに適用可能なものとして、Snapshot Queries を比較対象とした。この手法では、互いのデータ間に相関性がある隣接ノード群から、それらを代表するノード（代表ノード）を選出し、代表ノードが統計モデルを生成する。データ収集時には、代表ノードのみがデータを基地局に送信することで通信量を削減する。ここでは、本章の環境上で動作させるため、この手法の動作を以下のとおり規定した。

まず、10 サイクルの間、全ノードがパケットを発信し、隣接ノードとのデータ交換を行う。各ノード N_i は、隣接ノード N_j に対し、自身と N_j とのデータの相関性を表す統計モデルを生成する。この統計モデルは、サイクル t における自身のデータ $x_i(t)$ とノード N_j のデータの予測値 $\hat{x}_j(t)$ に対し、 $\hat{x}_j(t) = a \times x_i(t) + b$ で表される。統計モデルを生成したノードは、各隣接ノードがセンシングしたデータ値と統計モデルから得られる予測値との差が許容誤差 E の範囲内に収まる場合、その隣接ノードの代表ノードとなり、統計モデルにおける係数 a および b を基地局に送信する。以降のサイクルでは、代表ノードが隣接ノードのデータを受信し、統計モデルから得られる予測値の誤差が許容誤差の範囲に収まる場合、自身のデータのみを基地局に送信する。一方、統計モデルから得られる予測値の誤差が許容誤差を満たさなくなった場合は、それまでに隣接ノード間で送受信したデータを用いて代表ノードの再選出を行う。

6.3.2 評価結果

結果を図 13 に示す。各グラフにおいて、横軸はサイクル、縦軸は、図 13(a) では発信パケット数、図 13(b) では消費電力を示す。6.2.2 項の結果と同様、データ分布 1 およびデータ分布 2 において同様の結果が得られたため、ここではデータ分布 1 における結果のみ示す。

図 13(a) の結果より、Snapshot Queries では、シミュレーション開始後 10 サイクルの

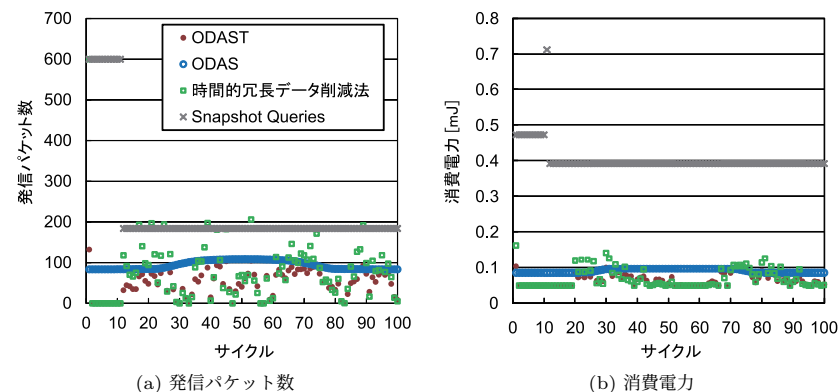


図 13 他手法との比較

Fig. 13 Comparison with other methods.

間、モデル生成のために全ノードがパケットを発信していることが分かる。モデル生成後の発信パケット数は 180 程度となっており、この数は代表ノード数と等しい。また、モデル生成後、シミュレーション終了まで発信パケット数が一定となることが分かる。これは、最初の 10 サイクルで生成したモデルが後続の全サイクルにおいて有効であり、代表ノードやモデルの変更が発生しなかったためである。ODAS では、通信範囲に従ってある程度のトリガパケットが発信される必要があるため、つねに 100 個程度のパケットが発信されている。これは、データの時間的冗長性にかかわらず、通信範囲に従ってトリガパケットが発信されるためである。また、時間的冗長データ削減法では、サイクル 10 付近やサイクル 55 付近において発信パケット数が 0 になるものの、サイクル 30 付近やサイクル 80 付近において、多くのノードがパケットを発信している。これは、図 9(b) から分かるとおり、サイクル 30 付近やサイクル 80 付近においてデータ分布の時間的変化の特性が変化し、時間的に冗長でないデータを持つすべてのノードがパケットを発信するためである。一方、ODAST は、サイクル 10 付近など、時間的に冗長なデータを持つノードが多いサイクルでは発信パケット数を大きく削減しながら、サイクル 30 付近など、時間的に冗長でないデータを持つノードが多いサイクルにおいても、発信パケット数を ODAS と同程度まで削減できていることが分かる。以上の結果から、ODAST が、データの空間的冗長性と時間的冗長性を利用することで、発信パケット数を効果的に削減できることが確認できる。

図 13(b) の結果より、ODAST、ODAS、および時間的冗長データ削減法における消費電

力が, Snapshot Queries と比較して大幅に小さくなることが分かる. これは, Snapshot Queries においてモデルの精度を維持するために, 全サイクルにおいて各代表ノードにデータパケットを発信しているためである. また, 代表ノードの選出や管理のために必要なメッセージ交換を実現するために, 多くのノードが, 隣接ノードの割当てスロットにおいてつねに受信待ち状態となる必要があり, このことも消費電力増加の要因となっている. 一方, ODAST, ODAS, および時間的冗長データ削減法では, 各ノードが冗長性判定フェーズでデータを発信する機会は, 各サイクルでただか 1 回であり, また制御パケットの交換が不要なため, 消費電力を最小限に削減できる. また, ODAST における消費電力は, 空間的冗長性と時間的冗長性を利用することで, 全サイクルを通して消費電力を削減できることが分かる.

7. おわりに

本論文では, 無線センサネットワークにおいて, データ補間および通信傍受を利用した通信量削減手法として, 筆者らがこれまでに提案した ODAS の拡張手法である ODAST を提案した. ODAST では, 無線センサネットワーク内の各ノードが, 時系列補間および空間的補間を用いることで, 自律的に自身のデータの時間的および空間的冗長性を判定し, 冗長データの発信を抑制する. さらに本論文では, シミュレーション実験を行い, ODAST における通信量および消費電力が, 他の手法より抑えられることを確認した.

5.5.4 項で述べたとおり, パケットロスが発生する環境では, 基地局において復元されたデータが許容誤差 E を保証できなくなる可能性がある. そのため今後は, パケットロスが提案手法に与える影響について詳細に調査する予定である. また, 6 章では, 図 9 および図 10 に示すように, 比較的単純なデータ分布における性能評価を行った. 今後は, 実データを用いるなど, 様々なデータ分布における提案手法の特性を調査する予定である. さらに, これら調査の結果から, より実環境に即した提案手法の拡張について検討する予定である.

謝辞 本研究の一部は, 文部科学省科学研究費補助金・特定領域研究 (18049050) および基盤研究 (S) (21220002) の研究助成によるものである. ここに記して謝意を表す.

参 考 文 献

- 1) Banerjee, T., Choudhury, K. and Agrawal, D.P.: Tree Based Data Aggregation in Sensor Networks using Polynomial Regression, *Proc. Int'l Conf. on Information Fusion (FUSION 2005)*, Vol.2, pp.25–29 (2005).

- 2) Brooke, T. and Burrell, J.: From Ethnography to Design in a Vineyard, *Proc. Conf. on Designing for User eXperience (DUX 2003)*, pp.1–4 (2003).
- 3) Chang, J.-H. and Tassiulas, L.: Energy Conserving Routing in Wireless Ad-hoc Networks, *Proc. INFOCOM 2000*, Vol.1, pp.22–31 (2000).
- 4) Chen, B., Jamieson, K., Balakrishnan, H. and Morris, R.: SPAN: An Energy-Efficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks, *Wireless Networks*, Vol.8, No.5, pp.481–494 (2002).
- 5) 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).
- 6) 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).
- 7) Dai, X., Xia, F., Wang, Z. and Sun, Y.: A Survey of Intelligent Information Processing in Wireless Sensor Network, *Proc. Int'l Conf. on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN 2005)*, Vol.3794, pp.123–132 (2005).
- 8) Deligiannakis, A. and Kotidis, Y.: Exploiting Spatio-temporal Correlations for Data Processing in Sensor Networks, *GeoSensor Networks*, LNCS, Springer-Verlag, Vol.4540, pp.45–65 (2008).
- 9) Deshpande, A., Guestrin, C., Madden, S.R., Hellerstein, J.M. and Hong, W.: Model-driven Data Acquisition in Sensor Networks, *Proc. VLDB 2004*, pp.588–599 (2004).
- 10) Guestrin, C., Bodi, P., Thibau, R., Paski, M. and Madden, S.: Distributed Regression: An Efficient Framework for Modeling Sensor Network Data, *Proc. Int'l Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2004)*, pp.1–10 (2004).
- 11) Heinzelman, W.B. and Balakrishnan, H.: An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks, *IEEE Trans. Wireless Communications*, Vol.1, No.4, pp.660–670 (2002).
- 12) Kalpakis, K., Dasgupta, K. and Namjoshi, P.: Efficient Algorithms for Maximum Lifetime Data Gathering and Aggregation in Wireless Sensor Networks, *Computer Networks*, Vol.42, No.6, pp.697–716 (2003).
- 13) Iima, Y., Kanzaki, A., Hara, T. and Nishio, S.: Overhearing-based Data Transmission Reduction for Periodical Data Gathering in Wireless Sensor Networks, *Proc. Int'l Workshop on Data Management for Information Explosion in Wireless Networks (DMIEW 2009)*, pp.1048–1053 (2009).
- 14) Jang, H.-C. and Lee, H.-C.: Efficient Energy Management to Prolong Wireless Sensor Network Lifetime, *Proc. Int'l Conf. in Central Asia on Internet (ICI 2007)*,

- pp.1–4 (2007).
- 15) Kanzaki, A., Wakamiya, N. and Hara, T.: Energy-efficient Scheduling and Data Aggregation Techniques in Wireless Sensor Networks for Information Explosion Era, Book Chapter in *Wireless Sensor Network Technologies for Information Explosion Era (Book Series: Studies in Computational Intelligence)*, Springer-Verlag (2010).
 - 16) Kotidis, Y.: Snapshot Queries: Towards Data-centric Sensor Networks, *Proc. ICDE 2005*, pp.131–142 (2005).
 - 17) Lee, H., Yeo, J., Kim, S. and Lee, S.: Time Slot Assignment to Minimize Delay in Ad-hoc Networks, *Proc. IST Mobile Communications Summit 2001* (2001).
 - 18) Madden, S.: Intel Lab Data (online), available from (<http://db.csail.mit.edu/labdata/labdata.html>) (accessed 2010-09-30).
 - 19) Mainwaring, A., Polastre, J., Szewczyk, R., Culler, D. and Anderson, J.: Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring, *Proc. Int'l Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA 2002)*, pp.88–97 (2002).
 - 20) Musăloiu-E, R., Terzis, A., Szlavacz, K., Szalay, A., Cogan, J. and Gray, J.: Life Under Your Feet: A Wireless Soil Ecology Sensor Network, *Proc. Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNets 2006)* (2006).
 - 21) Rajagopalan, R. and Varshney, P.K.: Data Aggregation Techniques in Sensor Networks: A Survey, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol.8, No.4, pp.48–63 (2007).
 - 22) Tolle, G., Polastre, J., Szewczyk, R., Culler, D., Turner, N., Tu, K., Burgess, S., Dawson, T., Buonadonna, P., Gay, D. and Hong, W.: A Macroscopic in the Redwoods, *Proc. SenSys 2006*, pp.51–63 (2005).
 - 23) Tulone, D. and Madden, S.: An Energy-efficient Querying Framework in Sensor Networks for Detecting Node Similarities, *Proc. Int'l Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM 2006)*, pp.191–300 (2006).
 - 24) Wireless Sensor Networks - MEMSIC (online), available from (<http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/7-datasheets.html>) (accessed 2011-03-07).
 - 25) Zhong, Z. and He, T.: MSP: Multi-sequence Positioning of Wireless Sensor Nodes, *Proc. SenSys 2007*, pp.15–28 (2007).

(平成 22 年 6 月 18 日受付)

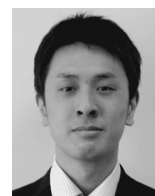
(平成 23 年 1 月 14 日採録)

推 薦 文

本論文は、無線センサネットワークにおいて、同じノードがセンシングした複数データ間の時間的冗長性を検出することによってデータ転送量を削減する方法を提案している。本手法は、著者らが過去に提案した、センシングデータの空間的な冗長性を検出しデータ転送量を削減する手法の拡張であり、両方を組み合わせて用いることで、データ転送量をさらに削減できることをシミュレーションにより示している。提案手法は、センシングしたデータが、近接する場所や時刻において類似している性質をうまく利用しトラフィック量を削減しており、新規性・有用性が高い。今後の無線センサネットワークの研究の発展に寄与すると考えられるので、本論文を推薦論文として推薦する。

(International Conference on Mobile Computing and

Ubiquitous Networking (ICMU 2010) プログラム委員長 安本慶一)



神崎 映光 (正会員)

2002 年大阪大学工学部情報システム工学科卒業。2004 年同大学院情報科学研究科博士前期課程修了。2005 年同大学院情報科学研究科博士後期課程中退後、同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻特任助手を経て、2007 年より同助教となり、現在に至る。博士 (情報科学)。2008 年、2009 年本学会論文賞受賞。2009 年本学会山下研究記念賞受賞。無線ネットワーク、通信プロトコル、分散処理に関する研究に従事。IEEE、電子情報通信学会、日本データベース学会の各会員。



飯間 悠樹 (正会員)

2007 年立命館大学情報理工学部卒業。2009 年大阪大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。同年株式会社野村総合研究所に入社し、現在に至る。大阪大学大学院情報科学研究科在籍時は無線センサネットワークに関する研究に従事。



原 隆浩（正会員）

1995 年大阪大学工学部情報システム工学科卒業。1997 年同大学院工学研究科博士前期課程修了。同年同大学院工学研究科博士後期課程中退後、同大学院工学研究科情報システム工学専攻助手、2002 年同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻助手、2004 年より同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻准教授となり、現在に至る。工学博士。1996 年本学会山下記念研究賞受賞。2000 年電気通信普及財団テレコムシステム技術賞受賞。2003 年本学会研究開発奨励賞受賞。2008 年、2009 年本学会論文賞受賞。モバイルコンピューティング、ネットワーク環境におけるデータ管理技術に関する研究に従事。IEEE, ACM, 電子情報通信学会, 日本データベース学会の各会員。



西尾章治郎（フェロー）

1975 年京都大学工学部数理工学科卒業。1980 年同大学院工学研究科博士後期課程修了。工学博士。京都大学工学部助手、大阪大学基礎工学部および情報処理教育センター助教授、大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻教授を経て、2002 年より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教授となり、現在に至る。2000 年より大阪大学サイバーメディアセンター長、2003 年より大阪大学大学院情報科学研究科長、その後 2007 年より大阪大学理事・副学長に就任。この間、カナダ・ウォータールー大学、ビクトリア大学客員。データベース、マルチメディアシステムに関する研究に従事。現在、Data & Knowledge Engineering 等の論文誌編集委員。本会理事を歴任。本会論文賞を受賞。電子情報通信学会フェローを含め、ACM, IEEE 等 8 学会の各会員。