

無線センサネットワークにおける 情報共有のための情報伝播手法の比較評価

田辺 智行[†] 若宮 直紀[†] 村田 正幸[†]

[†] 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: †{t-tanabe,wakamiya,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 無線センサネットワークにおいてノード間で効率的な情報共有を行うために、フラッディング、ゴシッピングなどをはじめとした様々な手法が提案されている。それぞれの手法は、ノード数や密度、情報の発生パターンなどの動作環境や、情報の伝播速度、電力消費量などの評価尺度によって一長一短があるが、その統一的な比較評価はこれまで行われておらず、手法ごとの適用領域も明確ではなかった。そこで、本稿では、さまざまな環境における手法の特性を平均受信率と稼働率の観点から比較評価した。その結果、ノード密度によらず観測領域が広くない場合にはツリー型の情報伝播手法を用いることにより、効率のよい情報共有が可能であり、また、観測領域が広い場合にはゴシッピング型の情報伝播手法が効果的であることが明らかとなった。

キーワード 無線センサネットワーク, 情報共有, 情報伝播手法

Comparative evaluation of information dissemination methods for effective and efficient information sharing in wireless sensor networks

Tomoyuki TANABE[†], Naoki WAKAMIYA[†], and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

E-mail: †{t-tanabe,wakamiya,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract Wireless sensor networks (WSNs) consist of small nodes with sensing, computation, and wireless communication capabilities. Since overlaying multiple service-oriented networks on a WSN wastes bandwidth and energy, we consider all-to-all type information sharing in this paper. Although there have been various proposals of mechanisms to disseminate information among nodes in an efficient and effective manner, their performance is evaluated under specific conditions. In this paper, we conducted comprehensive evaluation of information dissemination methods to clarify their comparative characteristics and the range of application. Through simulation experiments, we showed that tree schemes could achieve high delivery ratio in a WSN of low density, whereas a gossiping method was more effective for high density cases.

Key words wireless sensor networks, information sharing, information dissemination protocols

1. はじめに

無線センサネットワークでは、限られた資源である通信帯域や電力の消費を抑制するため、アプリケーションに対応した一部のノード間でメッセージ交換を行い、所望の機能やサービスを実現するのが一般的である。しかしながら、このようなアプリケーションごとに独立した通信を行うと、アプリケーション数が増えるにしたがって、ネットワーク全体でやりとりされるメッセージの量や、それぞれのノードがメッセージを送受信する回数が増加し、かえって帯域や電力を大きく消費してしまう

という問題がある。また、利用者の要求やその場の状況に応じて動的にサービスを構成し、提供するような場合には[1]、ノードの状態管理やトポロジ制御などのオーバーヘッドが大きくなる。このような問題に対して、アプリケーションの区別なく、全てのノードの情報を簡便かつ効率的にノード間で共有し、また、制御情報を通知することができれば、アプリケーションごとに独立した冗長なメッセージ送受信やトポロジ管理などによる帯域、電力の消費を抑えることができると考えられる。

従来より、無線センサネットワークにおける効率的な情報共有のための様々な情報伝播手法が提案されており、それぞれ一

長一短がある[2-4]。最も基本的な手法であるフラッディングは簡便で情報伝播力も高いが、ノードが繰り返し同じ情報を受信することによって電力を消費してしまう。また、フラッディングで用いられるブロードキャスト通信は、IEEE 802.11におけるRTS/CTS (Request To Send/Clear To Send)などの事前の送受信確認[5]を行わず、また、MAC層でのフレーム再送も行わないため、特にノード密度が高い場合には、ブロードキャスト通信が頻繁に衝突して情報が失われてしまう。一方、SPIN[6]に代表されるパブリッシュ・サブスクライブ型の手法では、情報転送に先立って情報の内容を表すメタデータを送信することにより、情報転送の要否を確認する。その結果冗長な情報転送による電力消費を抑制するとともに、情報の到達性を保証できるが、一方で、特に新しい情報の共有に際しては要否確認のためにメッセージの送信回数が増えてしまう。したがって、効率的な情報共有のためにはその特性や適用範囲を考慮して情報伝播手法を選択しなければならないが、従来研究では、ある特定の条件設定の元での評価しか行われておらず、また、基本原理の異なる様々な手法間の網羅的な比較にはなっていない。

そこで、本稿では、これまでに提案されている情報伝播手法を、フラッディング型、ゴシッピング型、パブリッシュ・サブスクライブ型、リング型、ツリー型、およびクラスタ型に分類し、それぞれの基本原理にもとづいて設計した機構の比較評価を行うことにより、その特性や適用範囲を明らかにする。具体的には、無線センサネットワークのノード数とノード密度を変化させることにより、ノード数に対する拡張性と、高密度で通信の衝突が発生しやすい環境での性能を評価する。評価尺度としては、全ノード間情報共有の達成度を表す指標として情報およびノードあたりの平均受信率を、また、メッセージ送受信によるノードの電力消費を評価するため情報およびノードあたりの平均稼働率をそれぞれ用いる。

本稿の構成は以下の通りである。まず2章では、本稿で対象とする6つの情報伝播手法の概要について述べる。次に3章において、無線センサネットワークにおける情報共有のための情報伝播手法の比較評価を行うための、シミュレーション条件の設定や、評価指標の算出法について述べる。4章において、シミュレーション結果を示し、それぞれの情報伝播手法の特性や適用範囲について議論する。最後に、5章において、本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2. ノード間情報伝播手法

本稿では、トポロジ構造を持たないフラッディング型手法、ゴシッピング型手法、パブリッシュ・サブスクライブ型手法と、トポロジ構造を持つリング型手法、クラスタ型手法の6種類の情報伝播手法を評価の対象とする。なお、以降では、センサ情報などの拡散、共有したいデータを含むメッセージをデータメッセージ、制御のための広告メッセージなどのメッセージを制御メッセージと呼び、データメッセージに制御情報を付加することは考えない。

フラッディング型手法 [7]

拡散、共有したいデータが発生したノードは、ブロードキャスト通信により全隣接ノードにデータメッセージを送信する。データメッセージを受信したノードは、そのデータが初めて受信したものであれば、データメッセージをブロードキャスト通信

によって全隣接ノードへ転送する。一方、過去に受信、転送したものと同じデータを受信した場合には、データの転送は行わない。

ゴシッピング型手法 [8-10]

拡散、共有したいデータが発生したノードは、ブロードキャスト通信により全隣接ノードにデータメッセージを送信する。データメッセージを受信したノードは、そのデータが初めて受信したものであれば、確率 p ($0 < p < 1$)でブロードキャスト通信によりデータを転送する。一方、過去に受信、転送したものと同じデータを受信した場合には、データの転送は行わない。

パブリッシュ・サブスクライブ型手法 [6, 11]

パブリッシュ・サブスクライブ型手法では、ノードは、データの転送に先立ち、メタデータと呼ばれるデータに関する情報を隣接ノードに通知する。メタデータを受信したノードは、未受信のデータであればメタデータの送信元にデータ転送を要求する。データ転送の要求を受けたノードは、データメッセージを隣接ノードに送信する。代表的なパブリッシュ・サブスクライブ型手法のSPINでは、メタデータの広告(ADV ステージ)、リクエストの送信(REQ ステージ)、データの送信(DATA ステージ)の3つのステージ(ADV-REQ-DATA)を繰り返すことで、効率的な情報伝播を行う[6]。SPINには、メッセージ転送をユニキャスト通信で行うSPIN-PP、SPIN-EC、SPIN-RLと、ブロードキャスト通信で行うSPIN-BCがあり、本稿ではSPIN-BCを評価対象とする。

リング型手法 [12, 13]

リング型手法では、隣接ノードを順々に接続することにより、ネットワーク内の全ノードを一つの輪で繋ぐリング型の論理トポロジを構築し、リングに従ってデータを巡回させることにより情報伝播を行う。拡散、共有したいデータが発生したノードは、論理トポロジ上で隣接する2つのノードに対してデータメッセージをユニキャスト通信により送信する。データメッセージを受信したノードは、そのデータが初めて受信したものであれば、論理トポロジ上のデータメッセージの送信元ノードではない隣接ノードに対して、データメッセージをユニキャスト通信により転送する。論理トポロジ上でデータメッセージが転送される結果、いずれあるノードで論理トポロジ上の両方の隣接ノードから同じデータを受信する。このとき、全ノードでデータの共有が完了したと見なされ、そのノードからのデータメッセージの転送は行われぬ。なお、本稿では、リング状の論理トポロジを構築した後のデータメッセージのやりとりのみを評価対象とする。

ツリー型手法 [14]

ツリー型手法では、ネットワークを構成する全ノードからなる木構造を構築する。拡散、共有したいデータが発生したノードは、親ノードとして指定された自身より根ノードに近い隣接ノードに、データメッセージをユニキャスト通信で送信する。データメッセージを受信したノードは、そのデータが初めて受信したものであれば、さらにその親ノードに対してデータを転送する。順次、親ノードへとデータを伝えていくことにより、データが基地局に到達する。基地局は、データメッセージを全ての子ノードに対してブロードキャスト通信で送信する。子ノードは、受信したデータをこれまで自身の子ノードに対して転送したことがなければ、基地局と同様に、全ての子ノードに

ブロードキャスト通信でデータメッセージを送信する。子ノードへのデータ転送を繰り返すことにより、いずれ全ての葉ノードにデータが到達し、全ノードへの情報伝播が達成される。なお、本稿では、ツリー状の論理トポロジを構築した後のデータメッセージのやりとりのみを評価対象とする。

クラスタ型手法 [15-17]

クラスタ型播手法では、隣接ノード間でクラスタと呼ばれる集合を構成し、クラスタを構成するいずれかのノードにクラスタ内のノードのデータを集約し、このノードが基地局や他のクラスタなどに集約したデータを転送するとともに、基地局や他のクラスタから転送されてきたデータメッセージをクラスタ内のノードに伝える。クラスタを形成することをクラスタリング、クラスタ内のデータを集約を行うノードをクラスタヘッド、クラスタ内の残りのノードをクラスタメンバと呼ぶ。本稿では、以下に述べる方法によりクラスタを形成し、情報を伝播させる。なお、本稿では、クラスタを構成した後のデータメッセージのやりとりのみを評価対象とする。

まず、無線センサネットワーク中の一定数のランダムなノードが、クラスタヘッドとして立候補し、立候補メッセージをブロードキャストする。クラスタヘッドに立候補しないノードが、受信した立候補メッセージのうち、最も受信電波強度が強いものを送信したノードを自身のクラスタヘッドとして選択することによりクラスタが形成される。なお、複数のクラスタヘッドから立候補メッセージを受信したノードを境界ノードと呼ぶ。拡散、共有したいデータが発生したクラスタメンバは、クラスタヘッドに対してユニキャスト通信によりデータメッセージを送信する。クラスタメンバからデータメッセージを受信したクラスタヘッドは、受信した複数のデータと自身のデータを集約してデータメッセージを作成し、クラスタメンバに対してブロードキャスト通信により送信する。クラスタメンバのうち、境界ノードは、初めて受信したデータであれば、データメッセージの送信元ではないクラスタヘッドにデータをユニキャスト通信により転送する。なお、境界ノードが複数存在する場合は、クラスタヘッドが1つの境界ノードを選択し、選択された境界ノードからのみ他のクラスタヘッドへデータメッセージの送信が行われるものとする。境界ノードからデータメッセージを受信したクラスタヘッドは、そのデータが初めて受信したものであれば自身のクラスタメンバに対してブロードキャスト通信により転送する。以上の手続きを繰り返すことにより、ネットワーク全体で全ノードの情報が共有される。なお、ランダムに作成したクラスタ構成のうち、全ノードがクラスタヘッドまたはクラスタメンバのいずれかになり、かつ、クラスタ間の接続性が確保されているものを評価の対象とした。

3. 評価条件と評価指標

本章では、比較評価に用いたシミュレーションの条件設定や評価尺度の導出方法について述べる。なお、シミュレーションは ns-2.34 [18] を用いて行った。

3.1 ノードの配置

本稿では、ノード数やノード密度が情報伝播手法の性能に与える影響を評価し、それぞれの手法の適用範囲を明らかにするため、以下に述べる方法によってノード数、ノード密度を変化させてシミュレーションを行う。なお、ノードは MAC 層プ

ロトコルとして IEEE802.11 を用いてメッセージの送受信を行う。ユニキャスト通信においては、RTS/CTS を用いるものとする。シミュレーション評価では、ノードは自身を中心とする半径 100 [m] の正円内のノードと互いに通信できるものとし、通信速度は 1 [Mbps] とする。

3.1.1 観測領域とノード台数の変更

40 [m] × 40 [m] の領域をブロックと呼び、ブロック内のランダムな位置に 1 台のノードを配置する。縦横に並べるブロックの個数を変えることにより、領域の広さ、およびノードの台数を変化させる。評価においては、縦横 8 ブロック (ノード数 64) から 30 ブロック (ノード数 900) まで変化させた。

3.1.2 ノード密度の変更

480 [m] × 480 [m] の領域を分割するブロックの大きさ、数を変化させ、それぞれのブロックに 1 台ずつノードを配置することで、ノードの密度を変化させる。評価においては、60 [m] × 60 [m] のブロックによる 64 分割 (ノード密度 0.00028 [台/m²]) から 16 [m] × 16 [m] のブロックによる 900 分割 (ノード密度 0.0039 [台/m²]) まで変化させて評価を行う。

3.2 情報の発生モデル

情報伝播手法の特性は、無線センサネットワーク内で共有する情報の発生仕方によっても異なる。情報の発生モデルとしては、同時に高々 1 台のノードで情報が発生する単発型、全てのノードで同時に発生する同期型、ある程度ばらつきをもって情報が発生する非同同期型などが考えられるが、本稿では、紙面の都合により、非同同期型情報発生モデルの評価結果を示す。非同同期型情報発生モデルでは、全ノードで同時にデータが発生するが、データ発生時刻を 0~1 秒の間でランダムに設定する。データの集約を行うツリー型手法では葉ノード、クラスタ型手法ではクラスタメンバから、それぞれ設定されたタイミングでデータメッセージの送信を開始するが、他の手法ではデータ発生と同時にデータメッセージの送信を開始する。なお、ノードにおいて発生するデータのサイズは 1 [Kbyte] とする。

3.3 データ集約

ツリー型手法とクラスタ型手法では、複数のデータを受信する親ノード、根ノード、およびクラスタヘッドでデータの集約を行う。なお、集約により生成したデータメッセージのサイズが集約したデータの数に比例する場合と、データフュージョンによりデータの数によらず一定のメッセージサイズになる場合について評価を行う。ただし、無線チャネルの空きを待つためのバックオフによる遅延やデータ発生タイミングが異なることなどによって、全く同じ時刻に複数のデータメッセージを受信することはない。そのため、ツリー型では、子ノードを持たない葉ノードの根ノードからのホップ数を a 、自身の根ノードからのホップ数を b としたとき、根ノードはいずれかの子ノードから初めてデータメッセージを受信してから $a - b$ 秒間待機し、その間に受信したデータを集約し、親ノードへ送信するものとする。 $a - b$ 秒以降に受信したデータメッセージは転送せず、破棄する。また、クラスタ型手法では、クラスタヘッドはいずれかのクラスタメンバから初めてデータメッセージを受信してから 1 秒間待機し、その間に受信したデータを集約し、クラスタメンバへ送信するものとする。待機時間後に受信したデータメッセージはすぐにクラスタメンバへブロードキャスト通信で送信する。

3.4 評価指標

評価指標として、データの伝播が完了した際のデータあたり、ノードの平均受信率と、データ、ノードあたりの平均稼働率を用いる。以下にそれぞれの評価指標の算出式を示す。なお、ノード数を n とし、無線センサネットワーク全体で一番最初にデータが発生した時刻を 0 とする。

時刻 t までにノード j がノード i のデータを受信しているかどうかを表す関数 $R(t, i, j)$ を次式で定義する。

$$R(t, i, j) = \begin{cases} 1, & \text{received} \\ 0, & \text{if } i = j \text{ or unreceived} \end{cases} \quad (1)$$

また、ノード i においてデータが発生してから、伝播が完了するまでの時間を情報伝播時間 $T(i)$ と定義する。平均受信率 D は、情報伝播完了時にデータが到達したノードの割合を表し、次式で求められる。

$$D = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R(T(i), i, j) \quad (2)$$

時間 $T(i)$ のうち、ノード j がメッセージ送信のためのキャリアアセスを開始してからメッセージ送信を完了、または中止するまでの時間と、ユニキャスト通信の場合にはメッセージ受信のための RTS を受信してから ACK を送信完了または中止するまでの時間、ブロードキャスト通信の場合には、メッセージ受信を開始してから受信完了するまでの合計を、稼働時間 $A(i, j)$ とする。情報伝播における平均稼働率 W は次式で求められる。

$$W = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n A(i, j)}{T(i)} \quad (3)$$

4. 評価結果

本章では、観測領域を拡大させる場合、ノード密度を増加させる場合について、非同期型情報発生モデルにおけるシミュレーション結果を示し、情報伝播手法の特性と適用範囲について考察する。なお、ゴシップ型手法では情報の転送確率 p として、0.5 を用いて評価を行った。また、パブリッシュ・サブスクライブ型手法における制御メッセージのサイズは 16 [byte] とした。トポロジ構造を持つ手法については、最初の情報伝播の前にトポロジが形成され、シミュレーション時間を通してトポロジが変化しないものとした。

4.1 観測領域を拡大させる場合

ランダムな位置に 1 台のノードを配置した 40 [m] × 40 [m] のブロックを縦横に並べる数を、8 ブロック (ノード数 64) から 30 ブロック (ノード数 900) まで変化させ、観測領域を拡大することで、情報伝播手法の拡張性の評価を行う。ノード数ごとに、50 通りのランダムなノード配置を用いてシミュレーションを行った結果の平均値を示す。なお、図中の (a), (b) はそれぞれノード数に対する平均受信率、平均稼働率の割合に対応している。ここで、収束時間とは、データが発生してから全てのノードからのメッセージ送信が終了するまでの時間とする。

4.1.1 非同期型情報発生モデル

非同期型情報発生モデルの評価結果を図 1 に示す。図 1(a) に示されるように、ツリー型手法の平均受信率は、ノード数が 300 台程度までは全ての手法の中で最も高いが、400 台から急

激に低下している。ツリー型手法では、葉ノードから根ノードまで 1 ホップごとに、1 秒間の待ち受け時間を設定し、その間に受信したデータの集約を行っている。また、根ノードでの受信待ち時間の短縮や、根へ向かう通信と根から葉へ向かう通信の衝突の回避のため、各ホップでは 1 秒を超えて受信したデータメッセージは棄却される。したがって、チャンネルの競合によって、親ノードへのデータメッセージ送信が子ノード間でばらついたとしても、その幅が 1 秒以内であれば、データは集約されて根ノードへ向かって転送される。しかしながら、ノード数の増加にともなって葉ノードから根ノードまでの距離が大きくなると、ホップごとのばらつきが重畳され、子ノードからのデータメッセージ送信の遅延が 1 秒を超えてデータメッセージが棄却される可能性が高くなる。データメッセージの棄却が発生すると、そのメッセージに集約された全てのデータが失われるため、結果として受信率が大きく低下する。

一方、リング型手法では、ツリー型手法やクラスタ型手法と異なり、リング状のトポロジ上での隣接ノードから受信したデータをすぐに転送する。そのため、同じノードにおいて、複数のメッセージが送信待ち状態となりやすいため、チャンネルの空きを待つためのバックオフが上限回数に達することによるメッセージの棄却が起こりやすい。

また、リングの長さがノード数に等しいため、メッセージ棄却の可能性はノード数の増加に従って高くなるため、平均受信率が低下する。しかしながら、図に示されるとおり、ノード数が 250 台を超えると平均受信率が比較的安定している。これは、長いリング状のトポロジでは、あるノードで発生したデータがある程度離れたノードに到達するところには、データの同時発生による輻輳の影響が緩和されており、メッセージが失われにくくなるためであると考えられる。

さらに、クラスタ型手法が全ての手法の中で最も低い平均受信率となっているが、これは、クラスタ間の境界ノードにおいてデータメッセージの送信が衝突しやすいためである。境界ノードは、自身の属するクラスタのクラスタヘッドからブロードキャストされたクラスタ内のデータを、隣接するクラスタのクラスタヘッドに転送する役割を担っている。しかしながら、非同期型情報発生モデルでは、隣接するクラスタヘッド同士が同じようなタイミングで、クラスタメンバから受信したデータを集約し、ブロードキャスト送信が行われるため、境界ノードでブロードキャスト通信が衝突し、境界ノードがデータメッセージの受信に失敗しやすいため、特にノード数が増えると、あるノードで発生したデータは、属するクラスタ内のノードにしか伝播しなくなる。

トポロジ構造を持つ手法が一樣にノード数の増加にともなって平均受信率が低下するのに対し、トポロジ構造を持たず、ブロードキャスト通信を用いてデータ送信を行っているフラッシング型手法、ゴシップ型手法、パブリッシュ・サブスクライブ型手法では、ノード数 150 台以降で平均受信率の向上がみられる。データが短期間に同時に発生する非同期型情報発生モデルでは、データ発生直後に多数のブロードキャスト通信が行われるため、通信の衝突によりデータメッセージが失われやすく、ノード数の増加にともなって平均受信率が低下する。特にユニキャスト通信と異なりブロードキャスト通信では RTS/CTS を行わないため、データメッセージ送信にユニキャ

スト通信を用いるトポロジ構造を持つ手法と比較して平均受信率が低くなりやすい。しかしながら、ユニキャスト通信では、受信ノードを指定してデータメッセージを送信するため、受信ノードがメッセージ受信に失敗すると、そのデータは失われてしまうのに対し、ブロードキャスト通信では、電波の到達範囲に位置するノードのいずれか一つでもデータメッセージの受信に成功すれば、データの伝播は継続される。ノード数が多くなり、ネットワークの領域が広がるに従って、このような損失を免れたデータメッセージが複数の経路を通してネットワーク内に拡散されていきやすくなる。さらに、あるノードで発生したデータが離れた位置にある別のノードに到達する頃には、その近傍では、全てのノードでのデータ発生による輻輳が解消されており、さらに、異なるデータ間での転送のタイミングのばらつきも大きくなるためブロードキャスト通信の衝突も起きにくくなり、多くのノードにデータが拡散されやすい。その結果、ネットワークがある規模より大きくなると、平均受信率が向上する。ただし、フラディング型手法では、いったん高くなった平均受信率がノード数の増加にともなって低下していく。これは、ノード数が増加するにともなって、あるノードで発生したデータが離れた位置にある別のノードに到達する経路が増加し、転送されたデータ同士の衝突が発生しやすくなるため、受信率が低下する。一方で、ゴシッピング型手法では、確率 p によってデータ転送を抑制しているため、上記のような効果を得にくく、平均受信率の向上度合いはフラディング型手法と比較して小さいが、ノード数が増加しても、あるノードで発生したデータが離れた位置にある別のノードに到達するデータ数は抑えられるため、転送されたデータ同士の衝突が発生しにくく、受信率が低下しないと考えられる。

図1(b)に示されるとおり、平均稼働率はノード数の影響をそれほど受けない。リング型手法の平均稼働率が最も高いのは、全て通信がユニキャスト通信であるためである。ユニキャスト通信では、ブロードキャスト通信に比べてRTS/CTSを行うため一度の通信にかかる時間が長く、キャリアセンスを行っている間に次のデータを受信するなど待機時間が長くなる。また、パブリッシュ・サブスクライブ型手法では、フラディング型手法やゴシッピング型手法におけるブロードキャスト通信によるデータメッセージ送信に加えて、転送の要否確認のための制御メッセージ送受信が必要となるため、平均稼働率が高くなっている。

以上より、非同期型情報発生モデルによる情報共有を行う場合には、本稿でのシミュレーション条件では、ノード数300程度で広さが約1000[m]×1000[m]までは、平均受信率が高く、稼働率が低いツリー型を用いるのがよく、より多いノード数、より広い観測領域においては、平均受信率の高い、フラディング型やゴシッピング型を用いるのがよいと言える。

4.2 ノード密度を増加させる場合

480[m]×480[m]の領域を分割するブロックの数を64から900まで変化させ、それぞれのブロックに1台ずつノードを配置することで、ノード密度を0.00028[台/m²]から0.0039[台/m²]まで変化させた場合の評価を行う。ノード数ごとに、50通りのランダムなノード配置を用いてシミュレーションを行った結果の平均値を示す。なお、図中の(a)、(b)はそれぞれノード数に対する平均受信率、平均稼働率の割合に対応してい

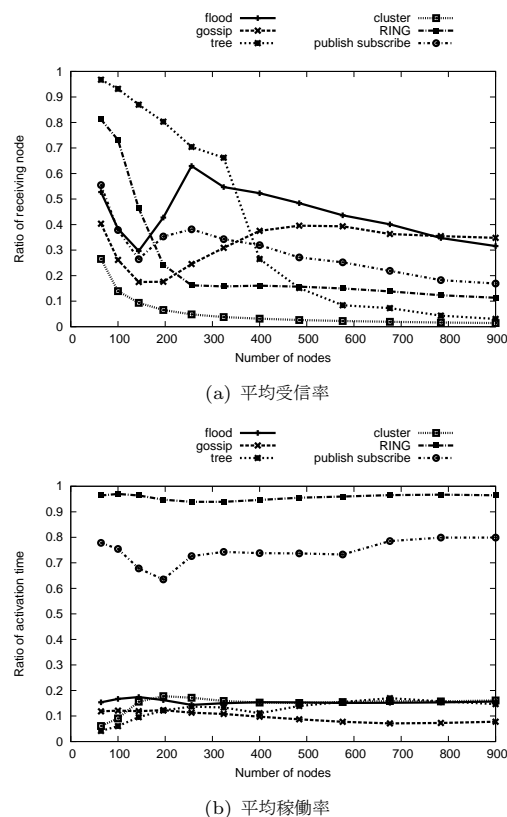


図1 観測領域の拡大に対する非同期型情報発生モデルの評価

る。ここで、収束時間とは、データが発生してから全てのノードからのメッセージ送信が終了するまでの時間とする。

4.2.1 非同期型情報発生モデル

非同期型情報発生モデルの評価結果を図2に示す。図2(a)に示される平均受信率は、領域を拡大させた場合(図1(a))の同程度のノード数の結果と比較して、全体的に平均受信率が低い。これは、高密度な環境では、通信範囲内に存在するノード数が多く、近いタイミングでのメッセージ送信に失敗しやすいためである。ユニキャスト通信の場合は、チャンネルに空きが生じにくいいため、送信側ノードでのバックオフ回数が制限に達しやすく、メッセージ送信を行えない。ブロードキャスト通信の場合には、RTS/CTSによる事前確認を行わないため、チャンネルに空きが生じたとしても送信したメッセージ同士が衝突して失われる。ツリー型手法では、ノード密度が増加しても葉ノードから根ノードまでのホップ数は変化しないため、密度の増加にともなう平均受信率の低下は他の手法よりも緩やかである。また、フラディング型手法、パブリッシュ・サブスクライブ型手法において、ノード密度が小さい場合には、ネットワーク内に存在するメッセージが少なくなるため、メッセージ同士が衝突しにくくなり、平均受信率が高くなる。クラスタ型手法は観測領域が拡大する場合と同様の理由により平均受信率が低くなっている。しかし、いずれの手法においても、ノード密度が0.0039[台/m²]付近になると平均受信率に差はみられない。

また、平均稼働率は、観測領域を拡大した場合と比較すると、パブリッシュ・サブスクライブ型手法の平均稼働率が減少し、ツリー型手法の平均稼働率が上昇している。パブリッシュ・サブスクライブ型手法は、ブロードキャスト通信によってデータメッセージを送受信するため、ノード密度の増加にともない

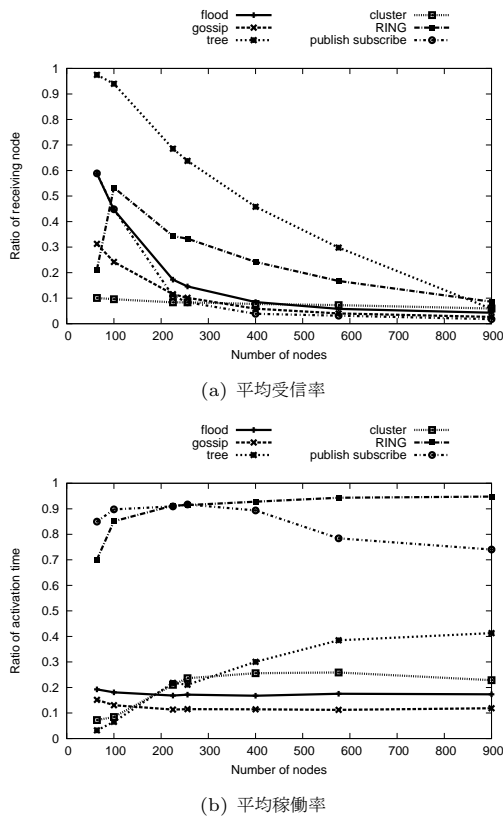


図2 ノード密度の増加に対する非同期型情報発生モデルの評価

メッセージ同士の衝突が頻発し、受信率が低くなる。この場合、転送する機会が減少するため転送が行われにくくなり、稼働率が低下する。一方で、ツリー型手法は、ノード密度の増加にともない、1つの親ノードに属している子ノードの数が増えるため、子ノードが親ノードに送信する際にチャンネルに空きが生じるまで待つ時間が増加する。その結果、平均稼働率が増加している。

以上のことから、非同期型情報発生モデルの場合、高密度環境において情報共有を行うためには、平均受信率が高く、平均稼働率が低いツリー型手法が望ましいと言える。

5. おわりに

本稿では、従来より提案されている、無線センサネットワークにおける効率的な情報共有のための様々な情報伝播手法を基本原理ごとに6つに分類し、その特性や適用範囲をシミュレーション評価によって明らかにした。ノード数や密度を変えたシミュレーションを行い、情報の受信率やノードの稼働率の観点から比較評価を行った結果、情報共有を用いる場合には、観測領域が広くない場合にはノード密度によらずツリー型手法が、広域な観測を行う場合には、ゴシップ型手法が効率のよい手法であることがわかった。

今後は、ノード故障に対する耐性などの観点からも比較評価を行うとともに、フラッディング型手法やゴシップ型手法においても、データアグリゲーションを導入した場合や、全ノード間情報共有を前提とした自律分散型のネットワーク制御技術の提案、評価を行う。

- [1] N. Wakamiya and M. Murata, "Dynamic network formation in ambient information networking," in *Proceedings of IEEE International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies*, pp. 443–448, Dec. 2008.
- [2] C. Herring and S. Kaplan, "Component-based software systems for smart environments," *Personal Communications, IEEE*, vol. 7, pp. 60–61, Oct. 2002.
- [3] K. Akkaya and M. Younis, "A survey on routing protocols for wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 3, pp. 325–349, May 2005.
- [4] R. Rajagopalan and P. Varshney, "Data-aggregation techniques in sensor networks: a survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 8, pp. 48–63, Apr. 2006.
- [5] K. Xu, M. Gerla, and S. Bae, "Effectiveness of RTS/CTS handshake in IEEE 802.11 based ad hoc networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 1, pp. 107–123, July 2003.
- [6] W. Heinzelman, J. Kulik, and H. Balakrishnan, "Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks," in *Proceedings of ACM annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pp. 174–185, June 1999.
- [7] Y. Dalal and R. Metcalfe, "Reverse path forwarding of broadcast packets," *Communications of the ACM*, vol. 21, pp. 1040–1048, Dec. 1978.
- [8] S. Hedetniemi, S. Hedetniemi, and A. Liestman, "A survey of gossiping and broadcasting in communication networks," *IEEE Networks*, vol. 18, no. 4, pp. 319–349, 1988.
- [9] Z. Haas, J. Halpern, and L. Li, "Gossip-based ad hoc routing," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 14, pp. 491–450, June 2006.
- [10] A. Dimakis, A. Sarwate, and M. Wainwright, "Geographic gossip: efficient aggregation for sensor networks," in *Proceedings of IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, pp. 69–76, Apr. 2006.
- [11] J. Kulik, W. Heinzelman, and H. Balakrishnan, "Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks," *Wireless Networks*, vol. 8, pp. 169–185, Mar. 2002.
- [12] S. Huang, R. Jan, and W. Yang, "RICA: A ring-based information collection architecture in wireless sensor networks," *Sensor Networks*, vol. 1, pp. 190–199, Jan. 2006.
- [13] R. Nowak, "Distributed EM algorithms for density estimation and clustering in sensor networks," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 51, pp. 2245–2253, Aug. 2003.
- [14] T. Banerjee, K. Chowdhury, and D. Agrawal, "Tree based data aggregation in sensor networks using polynomial regression," in *Proceedings of IEEE International Conference on Information Fusion*, pp. 25–29, July 2005.
- [15] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in *Proceedings of IEEE Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 1–10, Jan. 2000.
- [16] A. Manjeshwar and D. Agrawal, "TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks," in *Proceedings of IEEE International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing*, pp. 2009–2015, Apr. 2001.
- [17] O. Younis and S. Fahmy, "HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 3, pp. 366–379, Oct. 2004.
- [18] "The network simulator ns-2." <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.