

特別研究報告

題目

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

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

田辺 智行

平成 23 年 2 月 16 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

内容梗概

無線センサネットワークでは、アプリケーションの必要とする情報をアプリケーションごとにノード間でやりとりするため、アプリケーション数が増加すると、アプリケーションごとに独立したメッセージの送受信による帯域および電力の消費や、アプリケーションの要求の変化に対してメッセージをやりとりするノードを追加・削除するオーバーヘッドが問題となる。そのような環境においては、アプリケーションの区別なく、全てのノードの情報を効率的にノード間でやりとりすることで、同時動作する複数のアプリケーションの動的に変化する様々な要求に対応できると考えられる。全ノードの情報を利用したセンサネットワークの制御機構としては、基地局のような管理ノードを置き、管理ノードに状況判断、処理決定などの制御ルールを組み込んだ上で、管理ノードに全てのノードの情報を集約し、管理ノードが無線センサネットワーク内の全ノードを管理・制御する集中型制御機構と、それぞれのノードに制御ルールをあらかじめ組み込んだ上で、それぞれのノードが他の全てのノードの情報を把握し、ノード自身の制御を決定する自律分散型制御機構が考えられる。集中型制御機構には、ネットワークトポロジの変化へ適応するための管理オーバーヘッドや、単一障害点となること、また、メッセージの集中による局所的な輻輳と電力消費などの問題があることから、本報告では、自律分散型の制御機構のための全ノード間の情報共有について検討する。これまで、効率的に無線センサネットワーク間で情報を共有するための様々な情報伝播手法が提案されているが、それぞれの手法ごとに利用環境や評価尺度によって一長一短がある。そこで、本報告では、ノード数やノード密度を変化させて、情報伝播開始からの情報の受信率、メッセージの送信量と送信回数、衝突回数の変化の様子を検証することにより、全ノード間の全ノードの情報共有における情報伝播手法の特性や適用範囲を明らかにする。シミュレーションによる評価の結果、ノードの数によらず低密度な環境においてはゴシップ型の情報伝播手法を用いることにより、少ない送信メッセージで高受信率な全ノード間情報共有が可能になり、また、高密度にノードが配置された環境においてはリング型、クラスタ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。

主な用語

無線センサネットワーク, 情報共有, 情報伝播手法

目次

1	はじめに	7
2	ノード間情報伝播手法	10
2.1	フラッディング型手法	10
2.2	ゴシッピング型手法	12
2.3	パブリッシュ・サブスクライブ型	12
2.4	リング型手法	15
2.5	ツリー型手法	15
2.6	クラスタ型手法	17
3	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	21
3.1	ノードの配置	21
3.1.1	基本設定	21
3.1.2	観測領域の拡大	21
3.1.3	ノード密度の増加	22
3.2	情報の発生モデル	22
3.2.1	単発型情報発生モデル	22
3.2.2	同期型情報発生モデル	23
3.2.3	非同期型情報発生モデル	23
3.3	評価指標	23
4	評価結果	25
4.1	基本設定における評価	25
4.1.1	単発型情報発生モデル	25
4.1.2	同期型情報発生モデル	27
4.1.3	非同期型情報発生モデル	30
4.2	観測領域の拡大に対する評価	30
4.2.1	単発型情報発生モデル	33
4.2.2	同期型情報発生モデル	35
4.2.3	非同期型情報発生モデル	36
4.3	ノード密度の増加に対する評価	38
4.3.1	単発型情報発生モデル	38
4.3.2	同期型情報発生モデル	40

4.3.3	非同期型情報発生モデル	43
4.4	考察	43
5	おわりに	46
	参考文献	48

目次

1	フラッシュ型手法における情報伝播の様子	11
2	ゴシップ型手法における情報伝播の様子	12
3	パブリッシュ・サブスクライブ型手法における情報伝播の様子	14
4	リング型手法における情報伝播の様子	16
5	ツリー型手法における情報伝播の様子	18
6	クラスター型手法における情報伝播の様子	20
7	基本設定における単発型情報発生モデルの評価	28
8	基本設定における同期型情報発生モデルの評価	31
9	基本設定における非同期型情報発生モデルの評価	32
10	観測領域の拡大に対する単発型情報発生モデルの評価	34
11	観測領域の拡大に対する同期型情報発生モデルの評価	37
12	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	39
13	ノード密度の増加に対する単発型情報発生モデルの評価	41
14	ノード密度の増加に対する同期型情報発生モデルの評価	42
15	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	44

表 目 次

1	ノード間情報伝播手法の特性比較	45
2	無線センサネットワークにおける情報共有における情報伝播手法の特性 . . .	46

1 はじめに

近年，センサやアクチュエータを具備する無線デバイス（以降，ノードと呼ぶ）を設置し，無線通信によってネットワークを構成することにより場所や環境，モノなどの情報を収集し，制御する無線センサネットワーク技術の研究開発が活発に行われている [1]．ノードを小型化，電池駆動にすることで設置容易性が格段に向上することから，環境モニタリング，植物工場，ファクトリーオートメーション，インテリジェントホーム，見守りシステムなど多様なアプリケーションへの展開が期待されている．

無線センサネットワークでは，アプリケーションごとに，アプリケーションの必要とする情報や機器の制御機能を提供可能なノード間で必要十分な情報をやりとりするのが一般的である．しかしながら，無線センサネットワーク上で同時に動作するアプリケーションが増えるにつれて，ノードがメッセージを送受信する回数が増加し，帯域や電力を大きく消費してしまう．また，無線センサネットワークによって人や環境に関する情報を取得し，そのとき，その場，その人の状況に応じた環境制御や情報提供を行うアンビエント情報環境 [2] のようなアプリケーションでは，状況に応じて情報や制御機能を提供するノードが動的に変化する．そのため，新たな状況に適応して変化するアプリケーションの要求に対して，適切なノードをネットワークから発見し，制御メッセージを共有して，情報の提供や制御を行うようにするためのオーバーヘッドが発生する．

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することができれば，このような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による帯域および電力の消費や，メッセージを共有するノードの追加・削除などのオーバーヘッドを抑えることができると考えられる．全ノードの情報を利用したセンサネットワークの制御機構としては，基地局やホームサーバーのような管理ノードにアプリケーションに対応した状況判断，処理決定などの制御ルールをあらかじめ用意し，管理ノードに全てのノードの情報を集約した上で，管理ノードから全てのノードを管理，制御する集中型の制御機構 [3, 4, 5] と，それぞれのノードに状況判断，処理決定のための制御ルールをあらかじめ組み込んだ上で，それぞれのノードが他の全てのノードの情報を把握することにより，ノード自身が実施する制御を決定する自律分散型の制御機構 [6, 7, 8] が考えられる．集中型制御機構においては，アプリケーションに関わらないノードは管理ノードへの状態通知と，管理ノードからの指示受信のためのメッセージ送受信を行えばよく，また，管理サーバが全ての情報を管理しているため，無線センサネットワークの最適な制御が可能となる．しかしながら，管理ノードは単一障害点であり，ノード故障などによって管理ノードへ至る通信経路が失われると無線センサネットワーク全体が機能しなくなる．また，無線通信品質の変動などによって生じるトポロジ変化などに対処するためには頻繁な管理情

報の収集が必要となり、さらに、管理、制御のためのメッセージが管理ノードに集中するため、管理ノード近傍での局所的な輻輳と周辺ノードへの高い負荷も問題となる。例えば、ガス漏れを検知した時にガスの供給を中止するといった即応性が求められるアプリケーション [9, 10] においては、情報や制御が管理ノードを経由することによって遅延が発生する。一方、自律分散型の制御機構では、低遅延、低消費電力、高配信率な全ノード間の情報共有が実現できれば、ノード負荷の均一化による無線センサネットワークの長寿命化、ノード故障に対する耐性の向上、トポロジ変化などの局所的な変動に対する即応性のある適応などの効果が期待できる。そこで、本報告では、全ノードの情報を用いた無線センサネットワークの制御機構として、自律分散型のものを対象とする。

従来より、無線センサネットワークにおいてノード間で効率的に情報を共有するための、様々な情報伝播手法が提案されている [11, 12, 13]。最も基本的な手法であるフラッディングでは、ノードは、共有したい情報をブロードキャスト通信により無線電波の到達範囲内に存在する全ての隣接ノードに送信する。隣接ノードは、受信した情報を過去に受信、転送したことがなければ、ブロードキャスト通信によりさらに隣接ノードへと転送する。このような全隣接ノードへの情報転送を繰り返すことにより、情報はいずれ全ノードに伝達される。このようにフラッディングは簡便で、情報の伝播力も高い手法であるが、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、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) のような事前の送受信確認 [14] を行わず、また、MAC 層で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、ノードの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 [15] 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して、情報転送の可否を確認する。そのため、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。一方で、多くのノードが未受信の新しい情報を伝播する際にも、毎回の転送ごとに可否確認を行うため、フラッディングと比較してメッセージの送信回数が増えてしまう可能性がある。このように、使用される条件によって、手法の優位性が異なるため、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。従来の研究においても、提案手法の有効性を示すために他の情報伝播手法との比較評価を行っているが、ある特定の条件設定の元での比較であり、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、本報告では、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、ゴシップ型、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

ド密度を変化させることにより、ネットワークの台数的規模拡大に対する拡張性と、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あたり、ノードあたりの受信率を、また、メッセージ送受信によるノードの電力消費に関わる指標として、全ノード間の情報共有における情報あたり、ノードあたりの送信メッセージ量とメッセージ送信回数を、さらに、無線センサネットワークに対する負荷を表す指標として、メッセージ送信のノードあたり平均衝突回数をそれぞれ用いる。

本報告の構成は以下の通りである。まず2章では、本報告で対象とする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、本報告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

本章では、本報告において比較評価の対象とする情報伝播手法について、その概要を述べる。なお、例えばパブリッシュ・サブスクライブ型としては、SPIN [15] やその改良版である SPIN-BB, SPIN-EC, SPIN-RL [16] など様々な手法が提案されているが、本報告では特定の手法の評価をするのではなく、ある種類の手法間で共通の基本原則にもとづいて設計した手法を用いる。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、制御に必要な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ぶ。また、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。

情報伝播手法は、情報伝播のためのトポロジ構造を持つものと、持たないものに大別することができる。トポロジ構造を持たず、全てのノードが対等な手法としては、受信したデータを送信元ノードを除く全隣接ノードに転送するフラッディング型の手法 [17]、確率的に選択された一部の隣接ノードに転送するゴシップ型の手法 [18, 19, 20]、データ転送に先立ってデータに関する情報を隣接ノードに通知してデータ転送の要不要を確認するパブリッシュ・サブスクライブ型の手法 [15, 16] などがある。一方、ツリー型の手法ではノード間に木構造を構築し、いったん根に位置するノードに全てのノードの情報を収集した後、全ノードに対して情報を伝播する [21]。また、リング型の手法では全てのノードを一つの輪で繋ぐリング状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で全ノードに情報を伝える [22, 23]。さらに、クラスタ型の手法では、近隣のノードでクラスタと呼ばれるグループを形成し、クラスタの中でのクラスタヘッドと呼ばれるノードにいったんデータを集約して、クラスタヘッド間通信によってデータを伝播させる [24, 25, 26, 27, 28]。これらのトポロジ構造を持つ手法は持たない手法と比較して、情報伝播に関わるメッセージ量が少ない、低消費電力などの特徴があるが、トポロジ構造を構築、管理、維持するための制御が必要となる。ただし、構造管理の方法は様々に存在するため、本報告ではその制御オーバーヘッドは評価の対象外とする。また、トポロジ構造を持たない手法と比較してノード故障などに対する耐性も低くなりやすく、例えば1重・1方向のリングだけを用いる簡便なリング型手法ではリングを構成するリンクのうち一つでも切断されると情報伝播が行えなくなる。

2.1 フラッディング型手法

フラッディング型の手法では、ネットワーク内を網羅的にメッセージが拡散していく。新たに拡散、共有したいデータが発生したノードが、まず、ブロードキャスト通信によって全ての隣接ノードに対してデータメッセージを送信する (図 1(a))。なお、図中の実線の丸はノードを、赤丸はデータの発生元のノードをそれぞれ表す。また、点線の丸は電波の到達範囲を表し、矢印はメッセージの送受信関係を表している。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して隣接ノードに転送する (図1(b))。一方、過去に受信、転送したものと同一データを受信した場合には、データの転送は行わない。このような全隣接ノードへのデータ転送を繰り返すことにより、ネットワーク全体にデータが伝播する。なお、有線ネットワークにおけるフラッディング型手法の場合には、データメッセージを受信したノードは送信元のノードに対してはデータメッセージを送信しないが (self-avoidance と呼ばれる)、無線ネットワークではブロードキャストによりデータメッセージが同報されるため、転送元のノードもデータメッセージを受信する。

フラッディング型手法は簡便ではあるが、あるノード間でデータメッセージが失われたとしても、いずれ他の隣接ノードから同じデータが転送されてくる可能性が高いため、メッセージ損やノード故障などに対する耐性が高い。一方、ネットワーク内を流れるメッセージ量が多く、また、あるノードからブロードキャストによりデータメッセージが転送されると、次の瞬間にその隣接ノードが一斉にデータメッセージのブロードキャストを行うため、ネットワークの輻輳が発生しやすいという問題を有する。

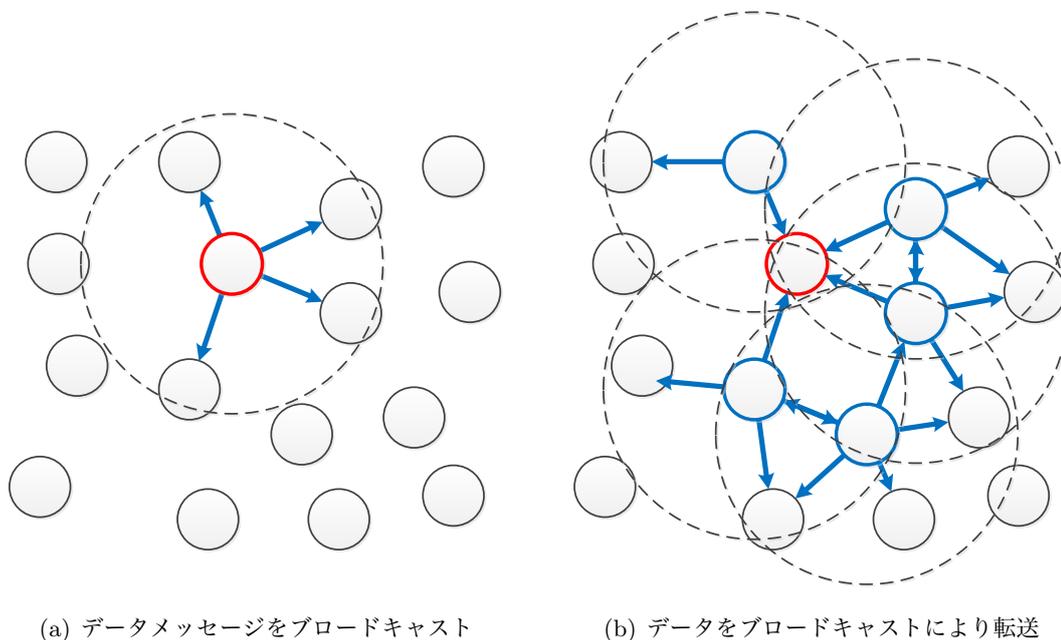
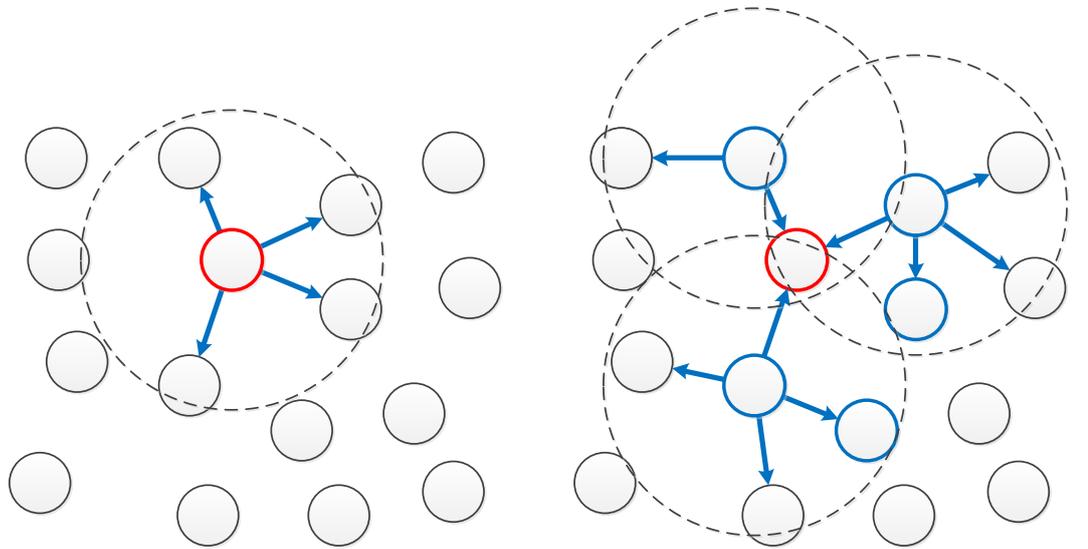


図 1: フラッディング型手法における情報伝播の様子

2.2 ゴシッピング型手法

ゴシッピング型の情報伝播手法では、データメッセージの転送に確率的な要素を導入することにより、ネットワーク内のデータの到達性を保ちつつ、フラッディング型手法におけるデータメッセージの爆発的増加を抑制する [18, 20, 19]. データが発生したノードは、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 (図 2(a)). 隣接ノードは、受信したデータメッセージが過去に受信、転送したものでなければ、確率 p ($0 < p < 1$) でブロードキャスト通信によりメッセージを転送する (図 2(b)). パーコレーション理論によると、隣接する格子点 (site) 間に確率 p で接続 (open bond) 関係がある場合、ある確率 p_c を境に、独立した小さな接続集合 (cluster) がある状態から、ほぼ全ての格子点が接続された状態への相転移現象が生じることが知られている [29]. ゴシッピング型手法においても、確率 p を適切に設定することにより、最小のメッセージ送信回数・量でネットワークを構成する全てのノードにデータを伝播させることができる.



(a) データメッセージをブロードキャスト

(b) データを確率 p でブロードキャストにより転送

図 2: ゴシッピング型手法における情報伝播の様子

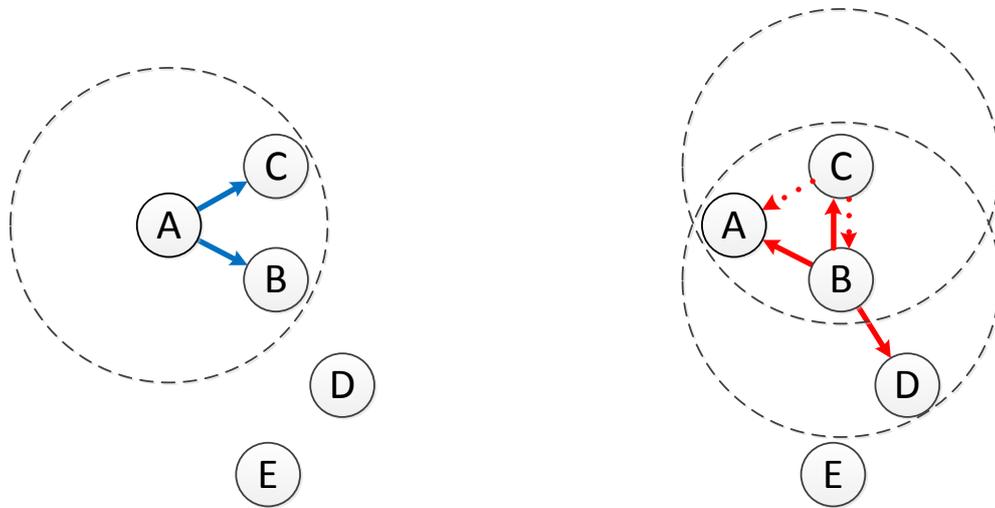
2.3 パブリッシュ・サブスクライブ型

パブリッシュ・サブスクライブ型の情報伝播手法では、ノードは、データの転送に先立ち、まず、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。メタデータのサ

イズはデータよりも小さい。隣接ノードは、受信したメタデータからデータ転送の要否を判断し、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。このように、データ転送の要否をあらかじめ隣接ノードに確認することにより、データの到達性を確保しつつ、すでにデータを受信しているノードに対する冗長なデータ転送を抑制することができる。また、無線センサネットワークにおいて、同じ対象物や領域を観測するノードが複数存在している場合、メタデータによるデータ転送要否の事前確認を行うことで、あるノードが、観測対象の重複したノードで取得された同じセンシング情報を別々のノードから受信することを回避できる。さらに、残余電力が少ないノードは、未受信のデータのメタデータを受信してもデータ転送を要求しなければ、データ処理やメッセージ転送による電力消費を抑えることができる。しかしながら、データ転送の有無によらず、メタデータなどの制御メッセージのやりとりが発生するため、かえって輻輳が生じる可能性があり、また、特にデータのサイズが小さい場合には制御オーバーヘッドによる帯域や電力の消費が問題となる。

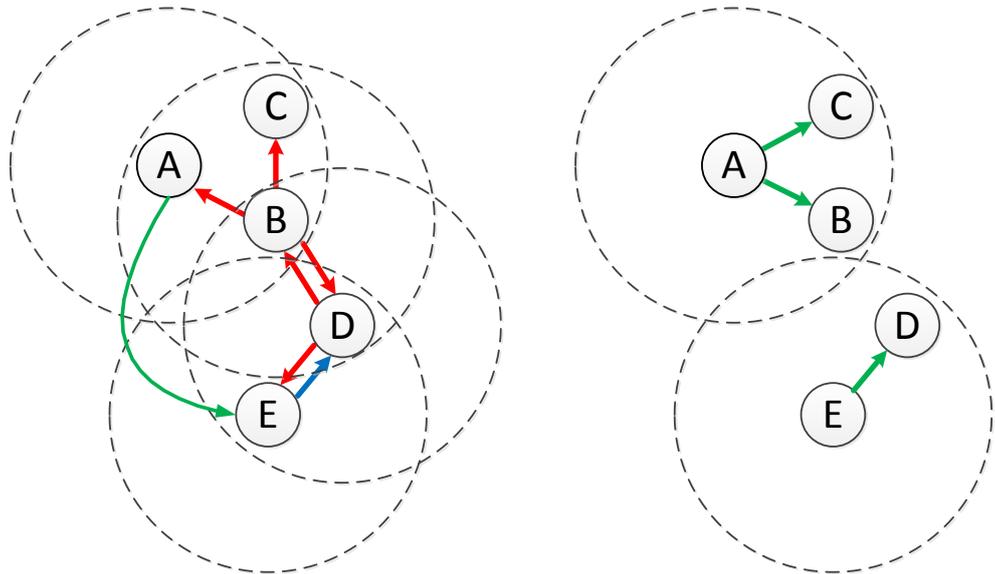
代表的なパブリッシュ・サブスクライブ型手法の SPIN では、メタデータの広告 (ADV ステージ)、リクエストの送信 (REQ ステージ)、データの送信 (DATA ステージ) の 3 つのステージ (ADV-REQ-DATA) を繰り返すことで、効率的な情報伝播を行う [15, 16]。SPIN には、メッセージ転送をユニキャスト通信で行う SPIN-PP, SPIN-EC, SPIN-RL と、ブロードキャスト通信で行う SPIN-BC があり、本報告ではブロードキャスト通信を用いる手法を評価対象とする。

図 3 中のノード A で他のノードと共有したいデータが発生したものとする。ノード A は、データの内容を表すメタデータを広告メッセージとして全隣接ノードにブロードキャスト通信で送信する (図 3(a))。隣接ノード B は、広告メッセージ含まれるメタデータから、このデータが未受信であると判断し、ノード A に対して要求メッセージをブロードキャスト通信で送信する (図 3(b))。一方、ノード C も、このデータが未受信のため要求メッセージを送信しようとするが、ノード C の通信範囲にあるノード B からノード A に対して送信された要求メッセージを受信することにより、データがノード A から送信され、ノード C 自身もデータを受信できることがわかるため、要求メッセージを送信しない。また、このとき、ノード E がノード A のデータを別の経路から受信し、広告メッセージを送信したとする。ノード D は、ノード E から広告メッセージを受信し、さらにノード B から同じデータに対するノード A への要求メッセージを受信する。このとき、ノード D は、ノード B のデータ転送要求先であるノード A の通信範囲外にあるため、ノード E に対して要求メッセージを送信する (図 3(d))。なお、図中、緑の矢印はデータの流れを、青色の矢印は要求メッセージを、赤色の矢印は広告メッセージをそれぞれ表す。最後に、要求メッセージを受信したノード A とノード E はデータメッセージを隣接ノードにブロードキャスト通信で送信する (図 3(c))。



(a) 広告メッセージのブロードキャスト

(b) 要求メッセージのブロードキャスト



(c) 同じデータに対する広告メッセージの受信 (ノード D)

(d) データメッセージのブロードキャスト

図 3: パブリッシュ・サブスクライブ型手法における情報伝播の様子

2.4 リング型手法

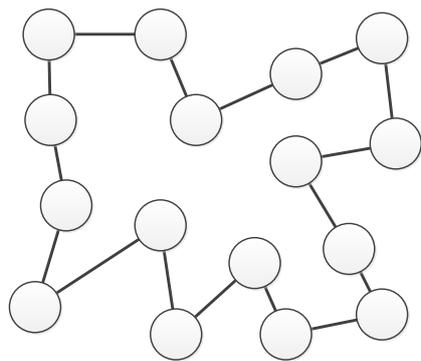
リング型の情報伝播手法では、隣接ノードを順々に接続することにより、ネットワーク内の全てのノードを一つの輪で繋ぐリング型の論理トポロジを構築し（図4(a)）、リングに従ってデータを巡回させることにより情報伝播を行う[22, 23]。拡散、共有したいデータが発生したノードは、論理トポロジ上で隣接する2つのノードに対してデータメッセージをユニキャスト通信で送信する（図4(b)）。データメッセージを受信したノードは、過去に受信、転送したデータでなければ、データメッセージの送信元ノードではない論理トポロジ上の隣接ノードに対して、データメッセージをユニキャスト通信で転送する（図4(c)）。論理トポロジ上で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、全ての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ない（図4(d)）。

リング型手法では、データの発生源のノードと、データメッセージ転送の終端ノードを除き、全てのノードにおけるメッセージの送受信回数がそれぞれ1回ずつであるため、情報伝播における帯域、電力の消費や輻輳の発生を抑えられる。また、ほとんどのメッセージ送信が一方向のため、隠れ端末問題を回避でき、さらにユニキャスト通信を用いるためMAC層での到達確認や再送を利用した高信頼性通信が行える。しかしながら、1回のメッセージ転送あたり1台のノードにしかデータが伝わらないため、情報伝播の遅延が大きくなり、特にノード数が多い場合には問題となる。また、ノードの故障や通信状態の悪化などにより、2カ所以上で隣接ノード間の通信が切断されると、論理トポロジが分断され、データメッセージが到達しないノードが生じる。

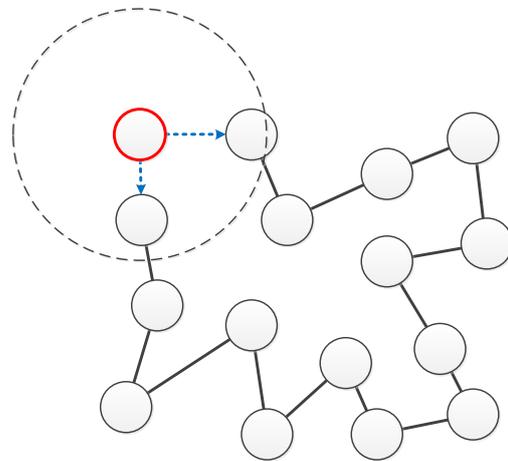
2.5 ツリー型手法

ツリー型の情報伝播手法では、ネットワークを構成する全てのノードからなる木構造を構築する（図5(a)）[21]。無線センサネットワークを用いて機器や環境の状態を定時観測するアプリケーションでは、多くの場合、インターネットや他の情報システムとの接続を有するシンクや基地局と呼ばれるノードへ、定期的に全てのノードからセンシング情報を収集し、また、基地局から全てのノードに制御情報などを通知する。このような通信形態においては、隣接ノード間に親子関係を設定し、基地局を根とする木構造を利用することにより、効率的なデータ収集が可能となる。

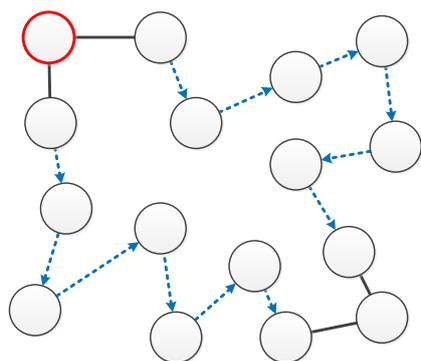
拡散、共有したいデータをもつノードは、親ノードとして指定された自身より根ノードに近い隣接ノードにデータメッセージをユニキャスト通信で送信する（図5(b)）。図では子ノードを持たない全ての葉ノードでデータが発生したものとする。親ノードは、そのデータが未受信であれば、さらにその親ノードに対してデータを転送する。順次、親ノードへと



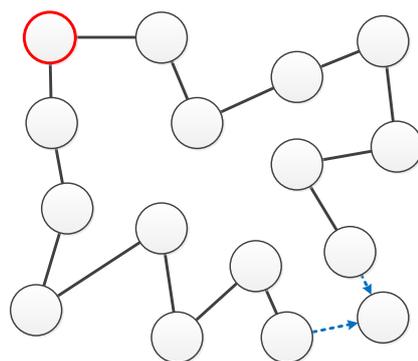
(a) リング状の論理トポロジ



(b) データメッセージのユニキャスト



(c) データのユニキャスト転送



(d) 情報伝播の完了

図 4: リング型手法における情報伝播の様子

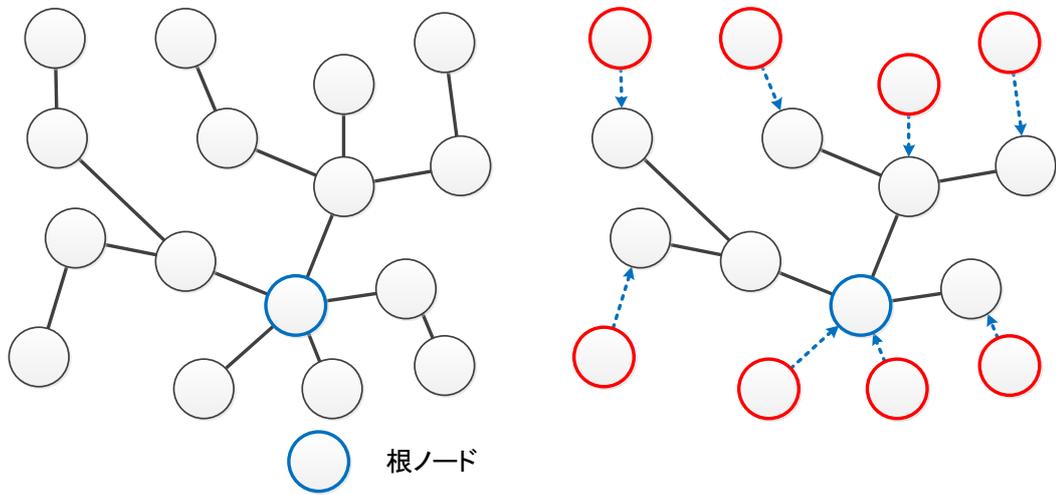
データを伝えていくことにより、データが基地局に到達する (図 5(c))。基地局は、データメッセージを全ての子ノードにブロードキャスト通信で送信する (図 5(d))。子ノードは、これまで自身の子ノードに対して受信したデータを転送したことがなければ、基地局と同様に、全ての子ノードにブロードキャスト通信でデータメッセージを送信する。子ノードへのデータの転送を繰り返すことにより、全ての葉ノードにデータが到達し、全てのノードへのデータ伝播が達成される。

なお、図 5 では、基地局で全てのノードからデータを収集し、ネットワーク全体に伝播させる場合について示しているが、メッセージの送受信回数を減らして電力消費を抑えるため、異なるデータメッセージに含まれる複数のデータをまとめて一つのデータメッセージとして送信する集約処理を行うのが効果的である。全てのデータが集まる基地局で集約を行うだけでなく、根ノードから同じホップ数にあるノードがある程度同期してデータメッセージを送信する場合には、それぞれの親ノードで自身のデータとともに子から受信したデータを集約することができる [30]。ただし、集約に際して、単にデータを複数個並べてデータメッセージを構成すると、ツリーの深さや幅が大きい場合に根ノードに近づくにつれてデータメッセージのサイズが指数的に大きくなり、送受信が困難になってしまう。そのため、データ圧縮や、排他的論理和や最大値、平均値などの演算処理を行うことによって、データメッセージを大きくすることなく集約する手法が用いられデータフュージョンと呼ばれる [31]。

2.6 クラスタ型手法

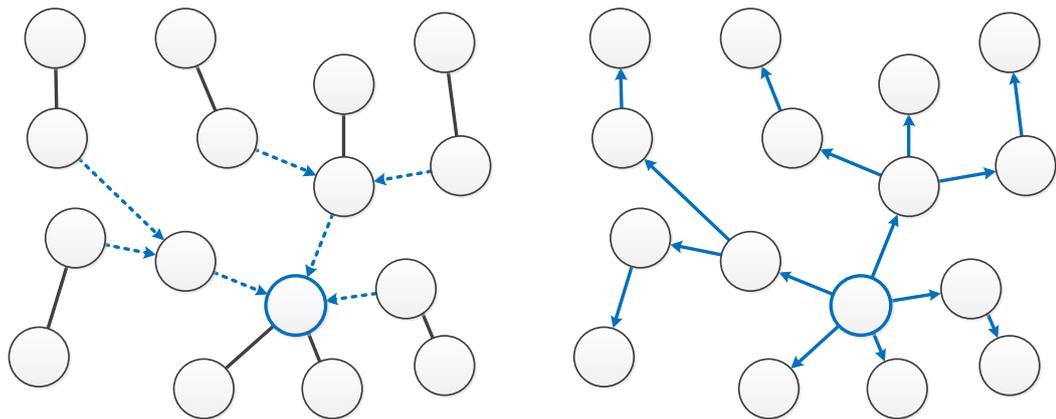
無線センサネットワークに関する多くの研究で想定されているように、ノードが電池で駆動している場合には、送信電力を抑えてマルチホップ通信を行うとともに、メッセージの送受信回数を減らすことなどにより、通信における消費電力を抑制することが望まれる。クラスタ型の情報伝播手法では、近隣のノード間でクラスタと呼ばれる集合を構成し、クラスタを構成するいずれかのノードにクラスタ内のノードのデータを集約し、このノードが基地局や他のクラスタなどに集約したデータを転送するとともに、基地局や他のクラスタから転送されてきたデータメッセージをクラスタ内のノードに伝える (図 6) [24, 32, 26, 33]。クラスタを形成することをクラスタリング、クラスタ内のデータの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。

地理的に近いノードの取得するセンシング情報は相関が高く、効率的に圧縮などの処理を行えるため、クラスタヘッドにおける集約効果が高いことから、クラスタ型の手法は、多くの場合、ツリー型と同様に基地局への定期的な情報収集に用いられることが多い [24, 32, 26]。また、階層構造により通信制御の拡張性の向上が期待できるため、任意のノード間で通信が発生するようなアプリケーションにも用いられる [34]。ZigBee におけるクラスタツリーは、



(a) ツリー状の論理トポロジ

(b) データメッセージを親ノードへ送信



(c) データを根ノードへと転送

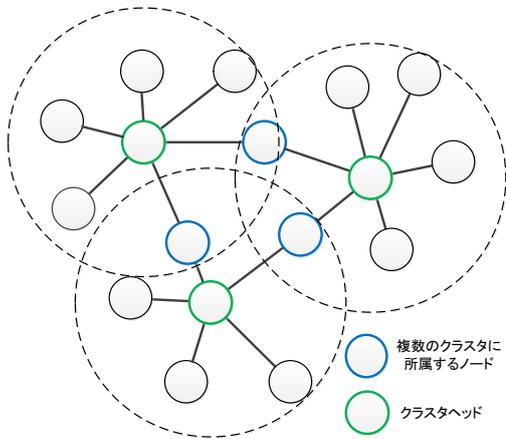
(d) データをネットワーク全体へ伝播

図 5: ツリー型手法における情報伝播の様子

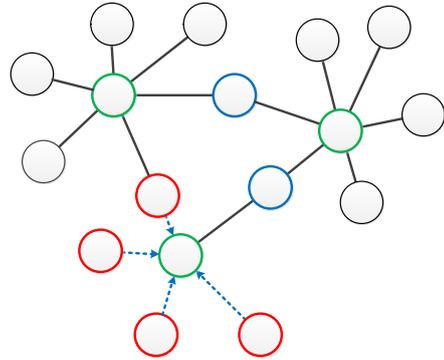
スター型トポロジとメッシュ型トポロジの組み合わせであるが、1種のクラスタ構造とみなすことができる [35].

クラスタメンバがデータを拡散, 共有する際にはクラスタヘッドにデータメッセージを送るだけでよく, 通信にかかる電力消費を抑えることができる. 一方, クラスタヘッドは, クラスタメンバとのメッセージ送受信, データ集約, 基地局や他のクラスタとのメッセージ送受信を行うことから, 電力消費が大きい. そのため, ノードの残余電力や処理能力を考慮してクラスタヘッドを選出するとともに, ノード間でクラスタヘッドを交代するクラスタリングが必要となる. 例えば LEACH [24] では, 全てのノードに対するクラスタヘッドの割合を P としたとき, 過去 $1/P$ 回のクラスタリングにおいてクラスタヘッドになっていないノードのみが立候補することにより, 全てのノードが平均 $1/P$ 回のクラスタリングに1回クラスタヘッドになる. 想定するアプリケーションや動作環境, ノードの種別などによって他にも様々な異なるクラスタリング手法が提案されているが [28], 本報告では以下に述べる方法を用いる.

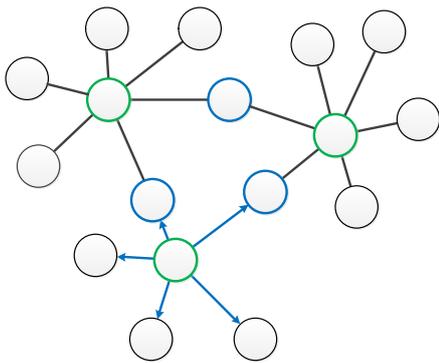
まず, 無線センサネットワーク中の一定数のランダムなノードが, クラスタヘッドとして立候補し, 立候補メッセージをブロードキャストする. クラスタヘッドに立候補しないノードは, 受信した立候補メッセージのうち, 最も受信電波強度の強いものを送信したノードを自身のクラスタヘッドとして選択する (図 6(a)). 次に, クラスタメンバはクラスタヘッドに対してデータメッセージをユニキャスト通信で送信する (図 6(b)). 全てのクラスタメンバからデータメッセージを受信したクラスタヘッドは, 受信したデータと自身のデータと集約してデータメッセージを生成し, クラスタメンバにブロードキャスト通信で送信する (図 6(c)). クラスタヘッドからのデータメッセージを受信したノードのうち, 複数のクラスタヘッドからの立候補メッセージを受信したノードは, 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以外のクラスタヘッドにデータメッセージをユニキャスト通信で送信する (図 6(d)). なお, クラスタ同士の境界の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. 他のクラスタに属する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でデータを転送する. 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, ランダムに生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.



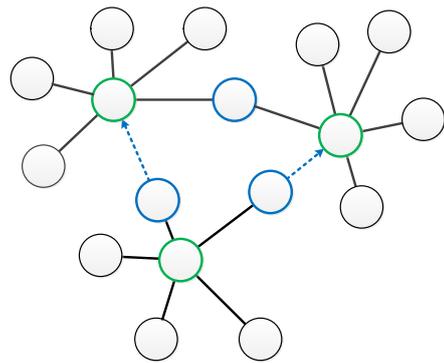
(a) クラスタリングによる論理トポロジ



(b) クラスタヘッドへデータメッセージをユニキャスト送信



(c) 集約したデータをクラスタメンバへブロードキャスト送信



(d) 隣接するクラスタへのデータのユニキャスト転送

図 6: クラスタ型手法における情報伝播の様子

3 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

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。シミュレーションは ns-2 [36] を用いて行った。

3.1 ノードの配置

本報告では、ノード数やノード密度が情報伝播手法に与える影響を評価し、それぞれの手法の適用領域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。

3.1.1 基本設定

400 [m] × 400 [m] の領域を 40 [m] × 40 [m] の正方のブロックに分割し、それぞれのブロックごとのランダムな位置にノードを 1 台ずつ配置する。ノードは MAC 層プロトコルとして IEEE 802.11 [37] を用いてメッセージ送受信を行う。IEEE 802.11 では、フレーム送信に際してまずチャンネルの空きを確認するが（キャリアセンスと呼ばれる）、チャンネルが空いていない場合にはバックオフを行い、一定時間後に再度キャリアセンスを行う。チャンネルに空きがあれば、フレームの送信を行った後、受信側ノードからの応答確認（ACK フレーム）を待ち、応答確認を得られない場合には再送を行う。バックオフの回数には制限があり、2 回バックオフをした後、チャンネルが空いていなければフレームは棄却される。なお、ユニキャスト通信においては、RTS/CTS（Ready To Send/Clear To Send）を用いるものとする。RTS/CTS 機構を用いる通信においては、送信側ノードはデータフレームの送信に先立って、キャリアセンスの後に RTS フレームをブロードキャスト通信で送信する。受信側ノードは通信中でなく、また、他のノードとの通信待機中でなければ CTS フレームをブロードキャストし、送信側ノードからのデータフレーム送信を開始させる。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。

3.1.2 観測領域の拡大

それぞれランダムな位置に 1 台のノードが配置された 40 [m] × 40 [m] のブロックの、縦横に並べる個数を変えることにより、領域の広さ、および無線センサネットワークを構成す

るノードの台数を変化させる。評価においては、縦横 10 ブロック（ノード数 100）から 30 ブロック（ノード数 900）まで変化させた。

3.1.3 ノード密度の増加

400 [m] × 400 [m] の領域を分割するブロックの数を変化させ、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、50 [m] × 50 [m] のブロックによる 64 分割（ノード密度 0.0004 [台/m²]）から 16 [m] × 16 [m] のブロックによる 625 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

本報告では、1 対多型や多対 1 型の情報伝播手法を用いた全ノード間の情報共有の評価を行うが、共有するデータの発生するタイミングはアプリケーションなどによって異なると考えられる。例えば、対象物の位置検出や追跡など、同時刻に得られたセンサ情報を必要とするアプリケーションの場合には、時刻同期プロトコル [38] などを用いてノードの時刻を同期させ、複数のノードが同じタイミングでセンサ情報を取得、送信することとなる。一方、農場監視などのアプリケーションではセンサ情報の取得時刻の一致に対する要求はそれほど厳しくないため、センサ情報の取得タイミングに多少のばらつきがあってもよい。そこで、シミュレーションにおいては、以下に述べる、単発型情報発生モデル、同期型情報発生モデル、非同期型情報発生モデルの 3 通りについて、情報伝播手法の評価を行う。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。また、センサ情報の取得を同期させる場合でも、データメッセージの送信タイミングを意図的にばらつかせることでメッセージの衝突を回避することも考えられるが、本報告では、データの発生と同時に情報伝播が開始されるものとする。

3.2.1 単発型情報発生モデル

単発型情報発生モデルでは、他のモデルと異なり、一つの情報の伝播を対象とした評価を行い、1 対多や多対 1 型の情報伝播手法そのものの特性を検証する。シミュレーションにおいては、全てのノードについて、順次、情報伝播を行うが、ノード間で情報伝播を開始する時刻を十分長く（1000 [s]）離して設定する。得られた結果より、データあたりのノードあたり平均送信メッセージ量などを算出する。

また、ノード間で情報伝播の期間が重ならないように、無線センサネットワーク全体で情報伝播開始のタイミングを調整する場合、単発型情報発生モデルの結果から全ノード間除法

共有における清野を評価することができる。次に述べる同期型、非同期型の情報発生モデルと比較して、バックオフによる遅延やメッセージ衝突が起きにくくなり、情報共有の度合いは高くなると考えられるが、一方で、ツリー型手法やクラスタ型手法におけるデータの集約効果を得ることができず、また、ノード台数に比例して情報伝播の時間が長くなる。

3.2.2 同期型情報発生モデル

同期型情報発生モデルでは、全てのノードが同じタイミングで情報伝播を開始する。そのため、チャンネルの空きを待つためのMAC層でのバックオフ回数が増加し、情報伝播の遅延が大きくなると考えられる。また、ブロードキャスト通信ではRTS/CTSによる隠れ端末問題の回避と同時送信の抑制や、MAC層での再送制御を行わないため、フラディング型手法、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、同期したデータメッセージ送信によりデータメッセージが失われやすくなると考えられる。データの集約を行うツリー型とクラスタ型では、それぞれ子ノードを持たない葉ノード間、クラスタメンバ間でデータメッセージ送信が同期しており、親ノードは子ノードから、クラスタヘッドはクラスタメンバからデータメッセージ受信を待つ。

3.2.3 非同期型情報発生モデル

非同期型情報発生モデルでは、一定時間ごとの情報共有において、意図的、あるいは時計のずれなどによってデータの発生、伝播の開始のタイミングがノード間でずれた場合を扱う。シミュレーションにおいては、タイミングが同期している場合のデータ発生のタイミングを時刻0とし、それぞれのノードは0～1秒の間のランダムな時刻に情報伝播を開始するものとした。メッセージ送信のタイミングがずれることにより、ブロードキャスト通信におけるメッセージ損の可能性の低減を期待できる。同期型情報発生モデルと同様に、ツリー型では葉ノード、クラスタ型ではクラスタメンバが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。

3.3 評価指標

評価指標として、データ発生からの経過時間に対するデータあたり、ノードあたりの平均受信率、平均累積送信量、平均累積オーバーヘッド、平均送信回数、およびネットワーク全体でのデータあたりの平均衝突回数を用いる。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、単発型情報発生モデルでは、それぞれのノード i ($1 \leq i \leq n$) の情報伝播においてノード i におけるデータの発生時刻を0、同期型情報発生モデル、非同期

型情報発生モデルにおいては、複数のノードの情報伝播が重なり合うシミュレーションの結果について、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、スケジューリング型情報発生モデルでは、ランダムに選ばれた一つ目のノードにおけるデータの発生時刻を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。

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

平均受信率 $A(t)$ は、時刻 t までにデータが到達したノードの割合を表し、次式で定義する。

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

次に、ノード i の情報伝播のために時刻 t までにノード j が送信したデータメッセージ、制御メッセージの総量を $M_{all}(t, i, j)$ [Kbyte]、制御メッセージの総量を $M_c(t, i, j)$ [Kbyte] とすると、平均累積送信量 $S_{all}(t)$ 、平均オーバーヘッド $S_c(t)$ は次式で求められる。なお、送信メッセージの総量 $M_{all}(t, i, j)$ 、送信制御メッセージの総量 $M_c(t, i, j)$ には、ノード i 自身が情報伝播のために送信したメッセージも含まれる。

$$S_{all}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_{all}(t, i, j)}{n^2} \quad (3)$$

$$S_c(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_c(t, i, j)}{n^2} \quad (4)$$

また、ノード i の情報伝播のために時刻 t までにノード j がデータメッセージ、制御メッセージを送信した回数を $F(t, i, j)$ で表すと、平均送信回数 $T(t)$ は次式で求められる。

$$T(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n F(t, i, j)}{n^2} \quad (5)$$

さらに、ノード i の情報伝播において、時刻 t 秒までにメッセージの衝突が $C(t, i)$ 回発生したとすると、平均衝突回数 $D(t)$ は次式で求められる。

$$D(t) = \frac{\sum_{i=1}^n C(t, i)}{n} \quad (6)$$

4 評価結果

本章では、基本設定、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、3つの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、ゴシップ型では情報の転送確率 p として、0.5と0.8の2通りについて評価した。また、パブリッシュ・サブスライブ型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。

ツリー型とクラスタ型では、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、親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。 $a-b$ 秒以降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、クラスタメンバへブロードキャストで送信する。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で送信する。

4.1 基本設定における評価

100台のノードを400 [m] × 400 [m]の領域に配置した基本設定での評価結果について考察する。なお、それぞれのモデルについて50通りのランダムなノード配置を行い、それぞれのノード配置について全ての情報伝播手法を順次動作させた。以降では、シミュレーション間の平均値について、情報発生モデルごとに図を示しており、図中の(a)～(e)はそれぞれデータ発生からの経過時間に対する平均受信率、平均累積送信量、平均累積オーバーヘッド、平均送信回数、および平均衝突回数にそれぞれ対応している。

4.1.1 単発型情報発生モデル

図7(a)に示されるように、クラスタ型を除く情報伝播手法において、リング型は1.0、フラッキング型、ゴシップ型、パブリッシュ・サブスライブ型、ツリー型は0.99以

上と非常に 1.0 に近い受信率を達成している。また、高受信率を達成しているもののうちリング型、パブリッシュ・サブスクリプト型を除く手法では、情報伝播開始直後に急激に受信率が上昇し、ネットワークに情報が広まるにつれて受信率が収束していく。パブリッシュ・サブスクリプト型は、データの転送に際して広告メッセージと要求メッセージのやりとりによる転送の要否確認を行うため、フラッディング型、ゴシップ型、ツリー型と比較して情報伝播の速度が遅い。一方、リング型は、1 回のデータ転送により 1 ノードずつ受信ノードが増えていくため、時間経過に対して線形に受信率が増加している。クラスタ型手法は他と比較して低い受信率で収束しているが、これは、複数のクラスタに属しているノードでのデータメッセージ受信漏れによるものである。複数のクラスタに属するノードでは、それぞれのクラスタにおけるブロードキャスト通信によるクラスタメンバへのデータメッセージ送信が衝突することがある。さらに、そのようなノードが、クラスタ間のデータメッセージ転送に関わっている場合、データ型のクラスタに伝播せず、受信率が大きく低下する。なお、フラッディング型、ゴシップ型 ($p=0.8$)、ゴシップ型 ($p=0.5$)、パブリッシュ・サブスクリプト型、リング型、ツリー型、クラスタ型において、平均受信率の増加が停止し、収束する時間は、それぞれ 602 ミリ秒、565 ミリ秒、410 ミリ秒、795 ミリ秒、1063 ミリ秒、618 ミリ秒、314 ミリ秒である。

次に、図 7(b) において、フラッディング型、パブリッシュ・サブスクリプト型、リング型、およびツリー型における収束時のノードあたり平均累積メッセージ量はおよそデータメッセージ 1 つ分になっている。フラッディング型およびリング型では、ノードは平均してたかだか 1 回のデータメッセージ送信しか行わない。パブリッシュ・サブスクリプト型では、制御メッセージ送受信のオーバーヘッドが発生するが、平均累積メッセージ量が 1 データメッセージ分程度なのは、隣接ノードのいずれからも要求メッセージを受信しなかったノードはデータメッセージを送信せず、また、広告メッセージと要求メッセージの送信はデータ転送あたりにそれぞれ最大 1 回ずつにすぎないため、オーバーヘッドが相殺されるためである。ツリー型では、いったん根ノードにデータメッセージが送信された後、フラッディングによりデータが拡散される。そのため、根ノードへのデータ転送分だけフラッディング型よりも平均累積メッセージ量が多くなる。一方、ゴシップ型はフラッディング型の結果に確率 p を掛け合わせたのと同程度の平均累積メッセージ量となっており、平均受信率の高さに対して非常に効率のよい情報伝播手法であることがわかる。また、クラスタ型の平均累積メッセージ量が最も少ない。これは、基本設定におけるクラスタ数は 10 個程度であり、一回の通信におけるメッセージ送信回数は、データの発生したノードからクラスタヘッドへのユニキャスト通信によるデータメッセージの送信、それぞれのクラスタヘッドからクラスタメンバへのブロードキャスト通信によるデータメッセージ送信、クラスタの境界に位置するノードから他のクラスタヘッドへのユニキャスト通信によるデータメッセージ送信を合わせ

て高々30回程度であるためである。なお、データ伝播のためのメッセージ送信が終了し、平均累積メッセージ量が収束する時間は、フラッディング型、ゴシッピング型 ($p=0.8$)、ゴシッピング型 ($p=0.5$)、パブリッシュ・サブスクライブ型、リング型、ツリー型、クラスタ型について、それぞれ752ミリ秒、676ミリ秒、506ミリ秒、923ミリ秒、1373ミリ秒、777ミリ秒、330ミリ秒である。

また、図7(c)に示されるとおり、情報伝播における制御メッセージのやりとりのため、パブリッシュ・サブスクライブ型の平均累積オーバーヘッドが他の手法と比較して非常に大きい。図からは読み取れないが、ユニキャスト通信を使用するリング型、ツリー型、クラスタ型ではRTS/CTSによるオーバーヘッドが発生している。一方、フラッディング型、ゴシッピング型では制御メッセージがなく、オーバーヘッドは生じない。

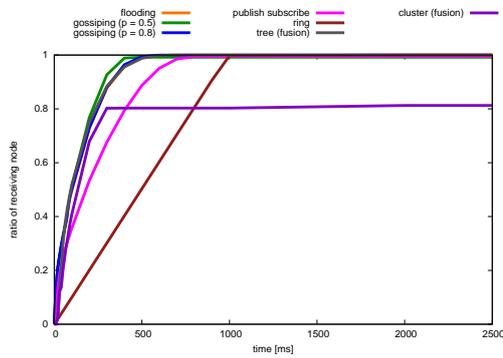
図7(d)より、メタデータを送信するパブリッシュ・サブスクライブ型よりもリング型の方が平均送信回数が多い。これは、リング型においては全てのデータメッセージ送信をユニキャスト通信で行うため、データを転送するたびにRTS/CTSのやりとりが発生することによる。また、フラッディング型、ゴシッピング型、ツリー型の平均送信回数はおおよそ平均累積メッセージ量に比例しているが、クラスタ型の平均送信回数が多くなっている。これはクラスタ型ではブロードキャスト通信よりもユニキャスト通信の方が多いためである。

最後に、図7(e)に示されるとおり、メッセージの平均衝突回数はパブリッシュ・サブスクライブ型が最も多く、次いでツリー型、フラッディング型であることがわかる。これは、RTS/CTSを用いないブロードキャスト通信では隠れ端末問題による衝突が発生しやすいためであり、特にパブリッシュ・サブスクライブ型では広告メッセージ、要求メッセージの送信にもブロードキャスト通信を用いることから衝突回数が多くなる。クラスタ型で衝突回数が少ないのは、1つのデータ伝播においてブロードキャスト通信でメッセージを送信する回数はたかだかクラスタ数に限られるためである。

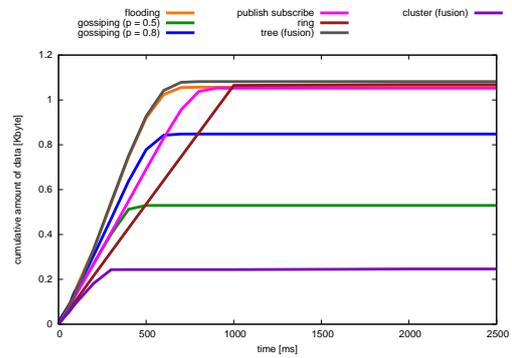
以上より、基本設定における単発型情報発生モデルでは、平均受信率が高く、平均累積メッセージ量、平均累積オーバーヘッド、平均送信回数、および平均衝突回数の少ない、転送確率 p を0.5としたゴシッピング型の情報伝播手法が最も効率がよいと言える。

4.1.2 同期型情報発生モデル

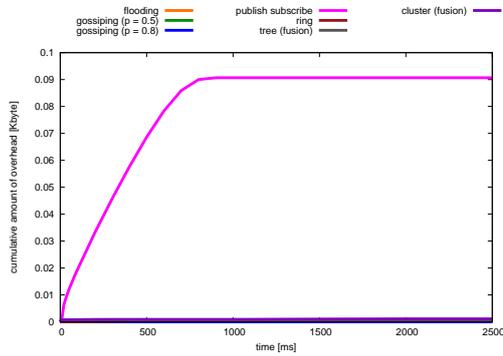
同期型情報発生モデルの評価結果を図8に示す。なお、データフュージョンを行う場合の結果をfusionと表記している。全てのノードにおいて同じタイミングでデータが発生し、情報伝播を開始する同期型情報発生モデルでは、図8(a)に示される受信率が、図7(a)と比較して、全ての情報伝播手法において低下している。データフュージョンを行うツリー型の平均受信率が比較的高いのは、それぞれのノードから親ノードへのデータメッセージ送信がユ



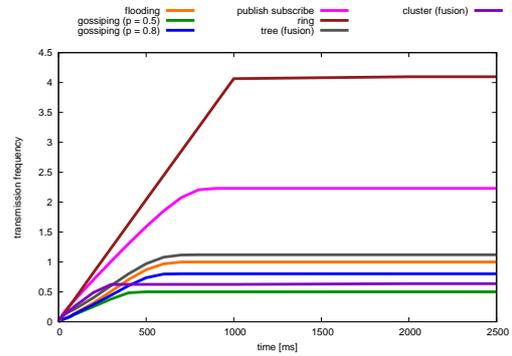
(a) 平均受信率



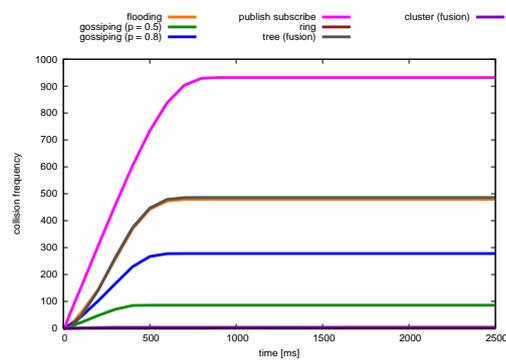
(b) 平均累積メッセージ量



(c) 平均累積オーバーヘッド



(d) 平均送信回数



(e) 平均衝突回数

図 7: 基本設定における単発型情報発生モデルの評価

ユニキャスト通信で行われているために、ブロードキャスト通信より衝突が起きにくいこと、また、データフュージョンによってネットワークで送受信されるデータ量を抑えられること、さらに、いったん根ノードに到達したデータは集約され、単発型情報発生モデルにおけるフラッディング型と同じように全ノードに拡散されることによる。なお、データフュージョンを行わない場合、平均受信率はほぼ0となっている。データフュージョンを行わない場合には、根ノードに近づくにつれてメッセージサイズが大きくなるため、衝突が発生しやすくなる。また、送信に時間がかかるために、あるノードがデータメッセージの送信を開始すると、電波の到達範囲にある他のノードでは、チャンネルの空きを待つためのバックオフを繰り返した後、バックオフ回数の制限によりメッセージ送信に失敗する。そのため、ほとんどのデータが根ノードに届かず、平均受信率が低くなる。

また、リング型手法は、ユニキャスト通信によるデータメッセージの送信が成功しやすく、ツリー型と同程度の平均受信率を達成している。ただし、データメッセージの送信ごとにバックオフによりチャンネルの空きを待つため、平均受信率がおおよそ収束するまでにツリー型の約11倍、単発型情報発生モデルにおけるリング型の約80倍の約65秒がかかっている。なお、ノード間で情報伝播が重ならないようにスケジューリングした場合には、全てのノードの情報伝播が完了するまでに、図7(b)から約110秒かかると考えられる。また、図8(c)に示されるように、RTS/CTSによるオーバヘッドが発生し、そのため、図8(d)に示されるように、メッセージの平均送信回数が最も多くなる。

さらに、フラッディング型とゴシップ型を比較すると、フラッディング型の方がメッセージ送信の平均衝突回数が多いにも関わらず(図8(e))、ゴシップ型よりも平均受信率が高い(図8(a))。ゴシップ型においても、平均衝突回数の多い転送確率 p を0.8とした時の方が、転送確率 p を0.5とした時よりも高い受信率を達成している。これは、全てのノードが新しく受信したデータの転送を行うフラッディング型の方がゴシップ型と比較して、また、ゴシップ型ではより転送確率の高い方が、ノードが隣接ノードからデータメッセージを受信できる機会が多いためである。

一方、単発型情報発生モデルにおいて平均受信率が高かった手法のうち、パブリッシュ・サブスクライブ型の性能劣化が最も著しい。これは、ブロードキャスト通信で送信される広告メッセージが多く失われ、隣接ノードへのデータ転送が行われなかったためである。広告メッセージが失われると要求メッセージも発生しないため、図8(c)に示されるとおり、図7(c)と比較して平均累積オーバヘッドも低くなる。

クラスタ型では、データフュージョンを行わない場合の平均受信率はおおよそ0であるが、データフュージョンを行う場合には0.3程度の平均受信率を達成している。ただし、平均受信率が高いとは言い難く、これは、クラスタメンバからクラスタヘッドへのユニキャスト通信によるデータメッセージ送信の失敗、およびクラスタヘッドからクラスタメンバへのブ

ロードキャスト通信によるデータメッセージ送信のクラスタ間での衝突によるものである。

以上より、基本設定における同期型情報発生モデルでは、平均受信率が高く、平均累積メッセージ量、平均累積オーバーヘッド、平均送信回数、および平均衝突回数の少ないツリー型の情報伝播手法が最も効率がよいと言える。

4.1.3 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9に示す。情報伝播開始のタイミングを0～1秒の範囲でばらつかせることにより、図8(a)と比較して、平均受信率が上昇しており、特にツリー型とクラスタ型においてデータフュージョンを行う場合、それぞれ0.267、0.256程度高くなっている。これは、ツリー型では葉ノード間の、クラスタ型ではクラスタメンバー間のデータメッセージの送信のタイミングがばらつくことで、チャンネルの空きが生じやすくなり、メッセージ送信の成功率が高くなるためである。

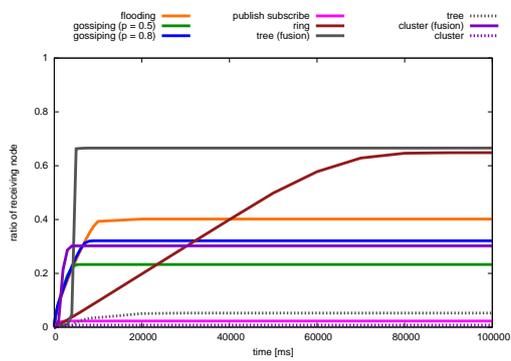
パブリッシュ・サブスクライブ型においても、約0.1の平均受信率の向上が認められる。図9(c)と図8(c)を比較すると、非同期型の方が平均累積オーバーヘッドが約3倍程度高くなっている。これは、広告メッセージと要求メッセージの増加によるものであり、同期型情報発生モデルの場合よりもデータメッセージの転送が行われる回数が多くなっていることを意味する。ただし、データメッセージの送信はブロードキャスト通信によって行われるため、図9(e)に示されるように衝突回数も増加する。

一方、フラッディング型、ゴシップ型では、同期型、非同期型によらず、いずれの評価尺度でも同様の結果となっている。これは、同期型情報発生モデルにおいても、データが伝播していくにつれて、データメッセージの送信タイミングが様々にばらつくためである。また、同期型情報発生モデルでは、データの発生源のノードの隣接ノードのブロードキャスト通信が衝突しやすいが、その隣接ノードの一部でもデータメッセージを受信できていれば、それらのノードのデータメッセージ送信を受信することによって、メッセージ損を補完することができる。

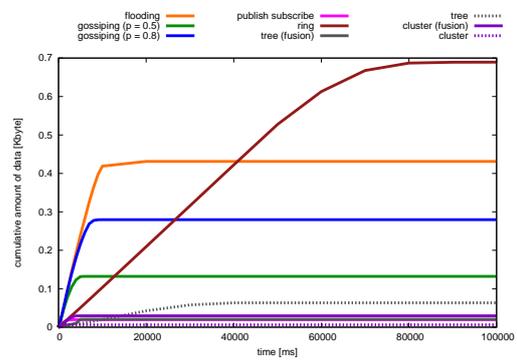
以上より、基本設定における非同期型情報発生モデルでは、同期型情報発生モデルと同様に、平均受信率が高く、平均累積メッセージ量、平均累積オーバーヘッド、平均送信回数、および平均衝突回数の少ないツリー型の情報伝播手法が最も効率がよいと言える。

4.2 観測領域の拡大に対する評価

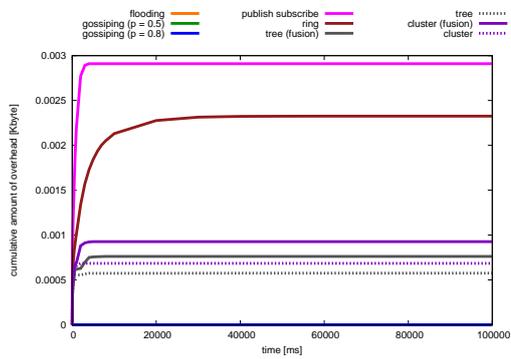
ランダムな位置に1台のノードを配置された40[m]×40[m]のブロックを縦横に並べる数を、10ブロック(ノード数100)から30ブロック(ノード数900)まで変化させ、観測



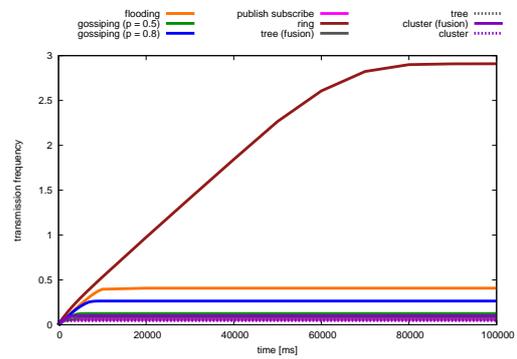
(a) 平均受信率



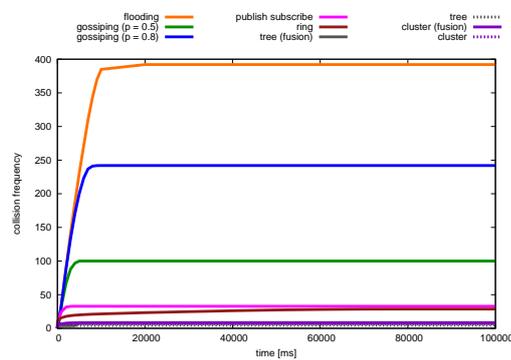
(b) 平均累積メッセージ量



(c) 平均累積オーバーヘッド

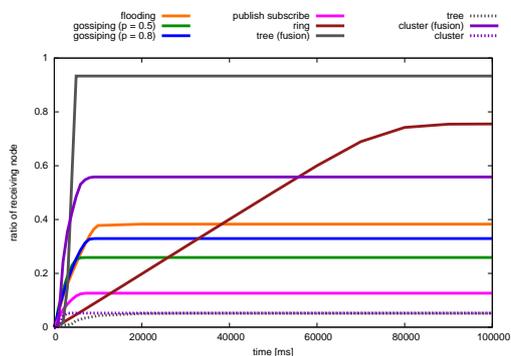


(d) 平均送信回数

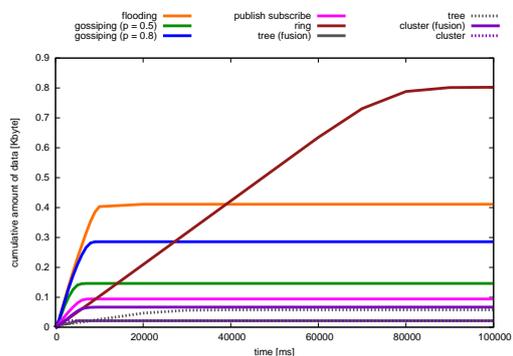


(e) 平均衝突回数

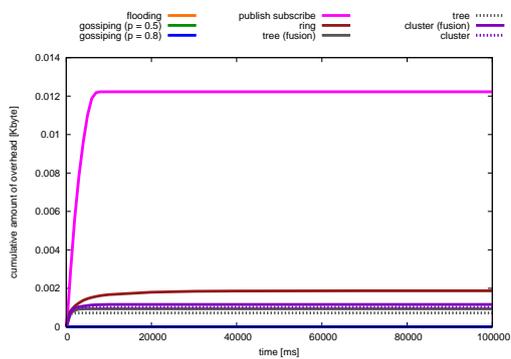
図 8: 基本設定における同期型情報発生モデルの評価



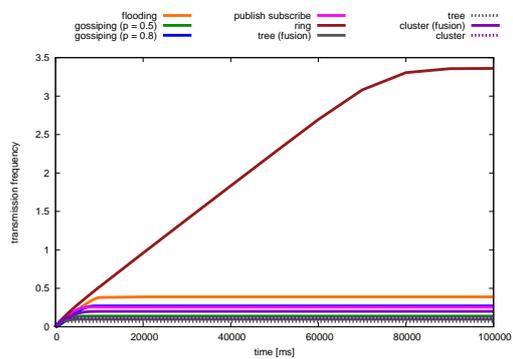
(a) 平均受信率



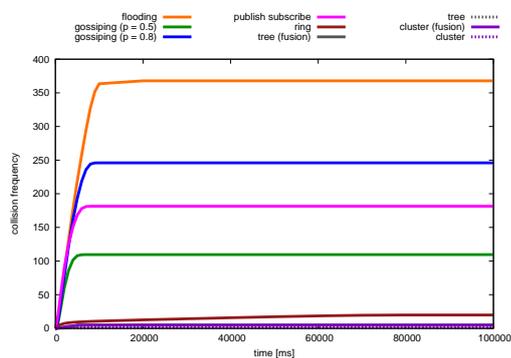
(b) 平均累積メッセージ量



(c) 平均累積オーバーヘッド



(d) 平均送信回数



(e) 平均衝突回数

図 9: 基本設定における非同期型情報発生モデルの評価

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、情報発生モデルごとに図を示しており、図中の(a)～(f)はそれぞれノード数に対する平均収束時間、平均受信率、平均累積送信量、平均累積オーバーヘッド、平均送信回数、および平均衝突回数にそれぞれ対応している。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。

4.2.1 単発型情報発生モデル

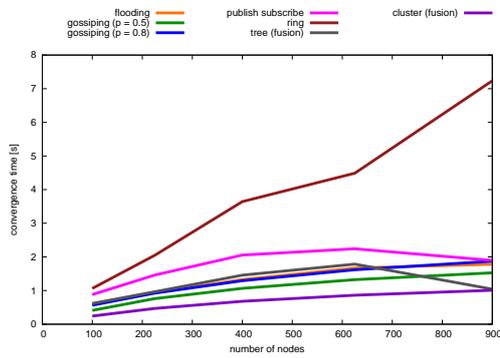
図10(a)に示されるように、リング型、ツリー型を除く情報伝播手法について、ノード数と平均収束時間は比例関係にあることが分かる。リング型が他の手法よりも平均収束時間が長くなるのは、1回のデータメッセージ送信あたり1ノードにしかデータが伝播しないためである。また、図10(c)に示されるように平均累積メッセージ量はノード数によらずほぼ1つのデータサイズである。なお、図10(b)において、ノード数によっては平均受信率が下がっている箇所があるが、これは、一部のシミュレーションにおいて、リングの2カ所でデータメッセージの送信に失敗し、データが到達しないノードが生じたためである。

一方、ツリー型では、観測領域が拡大することによって根ノードから葉ノードへのホップ数が増加するため、データが失われやすくなる。本シミュレーション条件では100ノードの場合に約6ホップ、900ノードでは約9ホップであった。

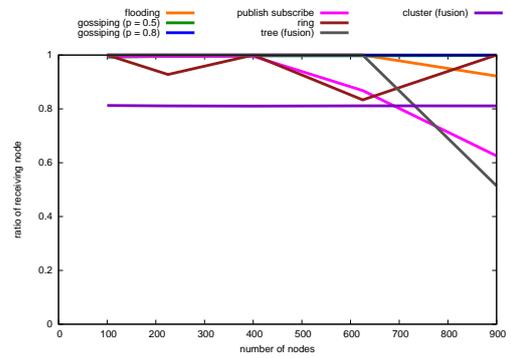
図10(b)において、フラッディング型とパブリッシュ・サブスクライブ型の平均受信率がノード数の増加にしたがって低くなっている。これらは他の手法と比較してブロードキャスト通信の回数が多いためである(図10(f))。ノード数が増え、ネットワークの規模が大きくなると、データがネットワークを伝播する過程において衝突によるメッセージ損が起りやすくなる。

また、ゴシッピング型はノード数の増加に関わらず高い受信率を達成している。これはゴシッピング型では転送確率 p によってデータを転送するノード数を削減して衝突回数を少なく抑えられるためである。クラスタ型では決して高くはないがノード数の増加に関わらず一定の受信率を達成している。クラスタ型の平均受信率がノード数の影響を受けにくいのは、クラスタごとのクラスタメンバ数が観測領域の大きさの影響を受けないため、クラスタヘッドへのデータ到達率が保たれているためである。

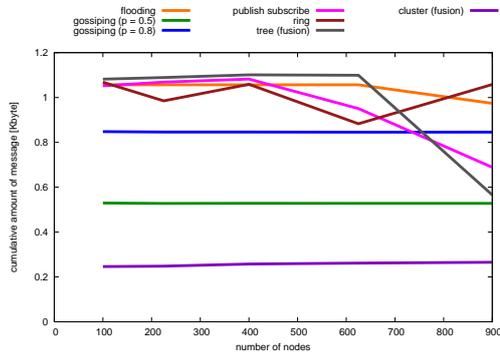
以上のことより、観測領域の拡大における単発型情報発生モデルでは、平均受信率が高く、平均累積メッセージ量、平均累積オーバーヘッド、平均送信回数、および平均衝突回数の少ない、転送確率 p を0.5としたゴシッピング型の情報伝播手法が最も効率がよいと言える。



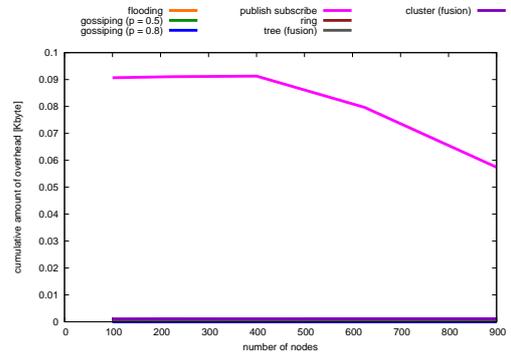
(a) 平均収束時間



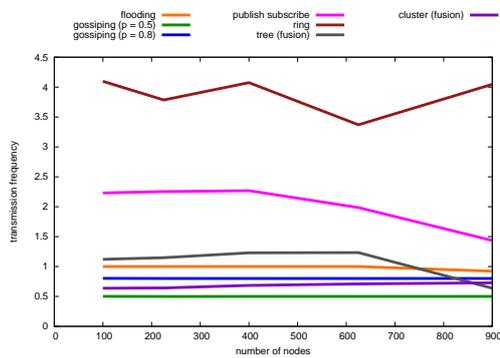
(b) 平均受信率



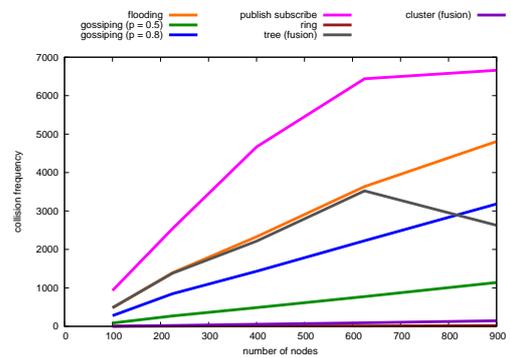
(c) 平均累積メッセージ量



(d) 平均累積オーバーヘッド



(e) 平均送信回数



(f) 平均衝突回数

図 10: 観測領域の拡大に対する単発型情報発生モデルの評価

4.2.2 同期型情報発生モデル

同期型情報発生モデルの評価結果を図 11 に示す。図 11(a) に示されるように、いずれの手法も観測領域の拡大にともなって平均収束時間が長くなっているが、その増加率は手法によって異なる。リング型では、ノード数に応じて平均収束時間がほぼ線形に増加するが、ノード数が多くなるに従ってデータメッセージがより多く失われるようになり（図 11(b)）、その結果、増加の割合が低下する。ブロードキャスト通信によるデータメッセージ送信が大量に発生するフラッディング型とゴシップ型 ($p=0.8$) では、リング型と同程度まで平均収束時間が増加している。これは、あるノードにおいて、ブロードキャスト通信の衝突によって直接の近隣ノードから受信できなかったデータが、他の複数のノードを経由して到達することによって、情報伝播の時間が長くなるためである。特に、観測領域が拡大するに従って、そのような迂回の経路が増えるため、収束時間の増加が顕著になる。一方、単発型情報発生モデルではリング型に次いで平均収束時間の長かったパブリッシュ・サブスライブ型が（図 10(a)）、同期型情報発生モデルではツリー型の次に収束が早い。これは、図 11(c) に示されるように、平均累積メッセージ量が少なく、平均受信率も低いことからわかるように、広告メッセージが衝突することで、データメッセージがほとんど送信されることがないためである。また、クラスタ型では、フラッディング型、ゴシップ型、リング型に比べて収束時間が短くなっている。クラスタ型における収束時間はクラスタヘッドの数に依存する。本シミュレーション条件では、クラスタ数は 100 ノードの場合に約 9 個、900 ノードでは約 85 個であった。そのため、収束時間は 50 倍程度しか長くならない。データフュージョンを行うツリー型の収束時間は他の手法より短い。これは、各親ノードでデータ集約のための待機時間が根ノードからのホップ数によって定められるためである。葉ノードまで 9 ホップのノード数 900 台のネットワークでは、寝ノードまでデータが到達するまでの 10 秒に、フラッディング型手法によつてデータ伝播の時間である 1.7 秒の和におおよそ等しい。

また、図 11(b) から、手法によらず、平均受信率も観測領域の拡大にともなって低下している。特に、ツリー型、リング型の性能劣化は著しい。いずれの手法においてもデータメッセージの送信が、定められたノード間でユニキャスト通信によって行われている。ツリー型においては、観測領域が拡大すると、根ノードまでのホップ数が増加するため、データメッセージの根ノードへの到達率が低下し、根ノードに到達できなかったデータは失われたノードまでの経路上のノードにしか受信されない。特に、ツリー型では親ノードでデータの集約を行うため、一つのデータメッセージ損が受信率に与える影響が大きい。リング型においても、リング上を転送される過程でデータメッセージが失われる確率が高くなり、特にリングにおいてデータの発生元のノードの反対側に位置するノードには、データが届きにくい。一方、データメッセージの送信にブロードキャスト通信を用いる手法は、メッセージの送信量

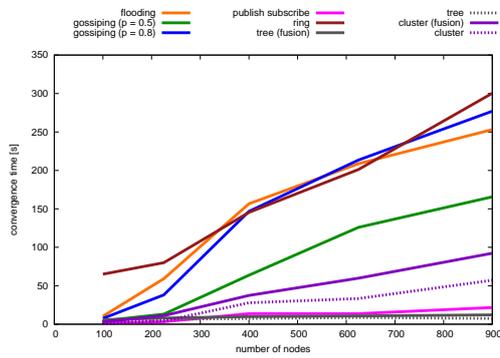
が多く (図 11(c)), 衝突も頻繁に発生するものの (図 11(f)), ネットワーク内を多数のデータのコピーがやりとりされるため,ユニキャスト通信を用いる手法と比較して,データが失われにくい。クラスタ型の平均受信率がノード数の影響を受けにくいのは,クラスタごとのクラスタメンバ数が観測領域の大きさの影響を受けないため,クラスタヘッドへのデータ到達率が保たれていることと,ユニキャスト通信は少数のノードの間でクラスタ間データ転送を行うときのみ使用されるためである。また,パブリッシュ・サブスクライブ型はブロードキャスト通信で送信される広告メッセージが失われやすいため,平均衝突回数が少ないにも関わらず (図 11(f)), 平均受信率は非常に低い。データフュージョンを行わないツリー型では,平均受信率は全ての手法のなかで最も低くなっている。これは,ツリー型では根ノードに近づくにつれて集約したデータサイズが増加することで,集約したデータをユニキャスト通信で親ノードへ送信する際に受信ノードがビジー状態が続きやすく,バックオフ時間を過ぎてタイムアウトしてしまうため,親ノードに到達するデータ数が少なくなる。一方でデータフュージョンを行わないクラスタ型では,ノード数による受信率への影響が小さい。これは先ほど述べたクラスタ型の特徴である。

以上より,より広い観測領域において,同期型情報発生モデルによる情報共有を行う場合には,本報告でのシミュレーション条件では,ノード数 300 程度で観測領域の広さが約 1000 [m] × 1000 [m] までは,平均受信率が高く,平均累積メッセージ量や平均累積オーバーヘッド,平均送信回数,および平均衝突回数が非常に低い,データフュージョンを行う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,平均受信率の高い転送確率 p を 0.8 としたゴシップ型を用いるのがよいと言える。

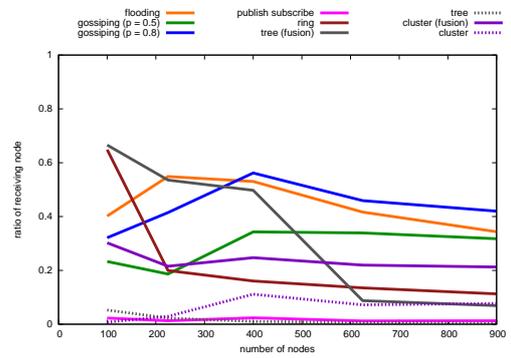
4.2.3 非同期型情報発生モデル

非同期型情報発生モデルの評価結果を図 12 に示す。情報伝播開始のタイミングを 0 ~ 1 秒の範囲でばらつかせることにより,図 11(b) と比較して,ノード数が少ないときには平均受信率が向上しているが,ノード数が 200 台を超えるとおおそ同程度の結果となっている。また,平均収束時間,平均累積メッセージ量,平均累積オーバーヘッド,平均送信回数,平均衝突回数のいずれも,同期型情報発生モデルと非同期型情報発生モデルでほぼ同じ傾向を示している。ただし,パブリッシュ・サブスクライブ型は平均受信率の向上と,それともなう平均収束時間などの増加が認められる。これは,広告メッセージの送信タイミングがばらつくことによって,データの転送が行われるようになったことによる。ただし,得られる平均受信率は 0.2 を下回っており,実用的ではない。

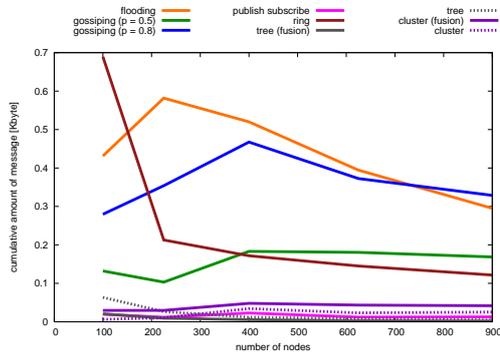
以上のことより,同期型情報発生モデルと同様に,非同期型情報発生モデルの場合には,ノード数 300 台程度まではツリー型の情報伝播手法が,また,それ以上では転送確率 p を



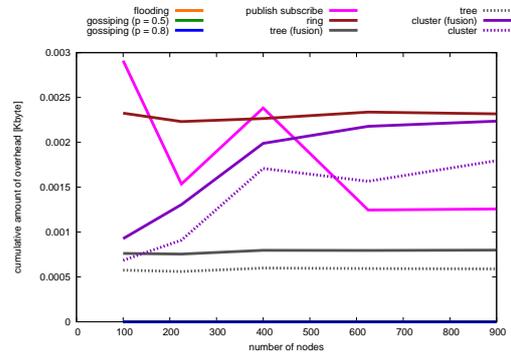
(a) 平均収束時間



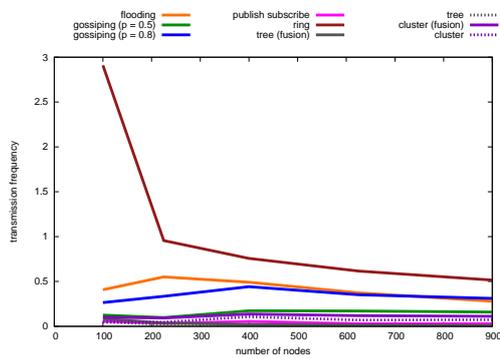
(b) 平均受信率



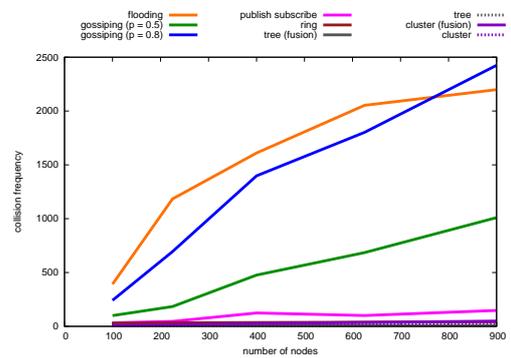
(c) 平均累積メッセージ量



(d) 平均累積オーバーヘッド



(e) 平均送信回数



(f) 平均衝突回数

図 11: 観測領域の拡大に対する同期型情報発生モデルの評価

0.8としたゴシッピング型の情報伝播手法が最も効率がよいと言える。

4.3 ノード密度の増加に対する評価

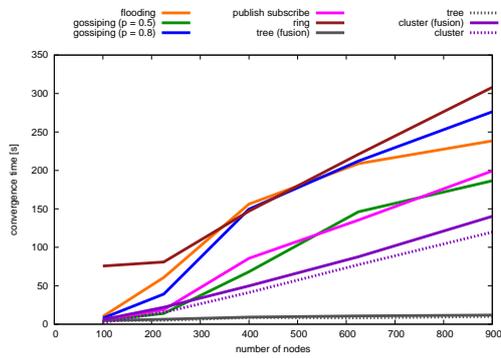
400 [m] × 400 [m] の領域を分割するブロックの数を 64 から 625 まで変化させ、それぞれのブロックに 1 台ずつノードを配置することで、ノード密度を 0.0004 [台/m²] から 0.0039 [台/m²] まで変化させた場合の評価結果について考察する。

4.3.1 単発型情報発生モデル

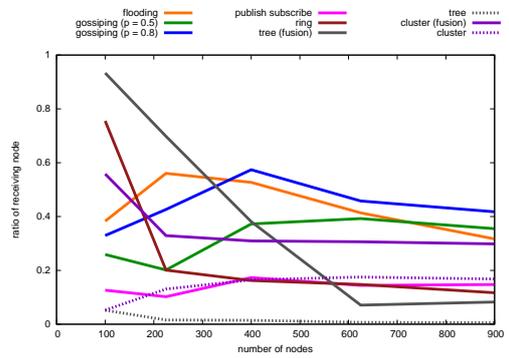
単発型情報発生モデルの評価結果を図 13 に示す。図 13(b) に示されるように、クラスタ型、ツリー型を除く情報伝播手法において、ノード密度によらず高い平均受信率を達成している。フラッディング型は、ノード密度が高くなるとブロードキャスト通信が衝突しやすくなり、平均受信率が低下する。低密度の時にゴシッピング型 ($p=0.5$) の平均受信率が低いのは隣接ノード数が少なく、さらに転送確率 p が低いことにより、データを転送するノードが少なくなるためである。転送確率 p を 0.8 とした場合には、隣接ノード数の減少を補うことができるため、密度の減少に対して高い平均受信率を保つことができている。なお、ノード密度 0.0004 [台/m²] における平均隣接ノード数は約 12.5 台、ノード密度 0.0039 [台/m²] で約 122.7 台、基本設定では 19.6 台である。

リング型では、ノード密度の増加によってリングが長くなるため、図 13(a) に示される平均収束時間もノード密度に比例して長くなる。また、観測領域を拡大した場合と同様に、リングが長くなることによってデータの中継回数が多くなるが、隣接ノードとの距離が近くなることにより信号雑音比が高くなり、送信に失敗しにくくなることで、高い平均受信率を達成できていると考えられる。また、ツリー型はノード密度によらず受信率はほぼ一定である。これは、ノード密度が変化しても、葉ノードから根ノードへの最大ホップ数は変化せず、基本設定の場合とほぼ同じ環境にあるからと言える。

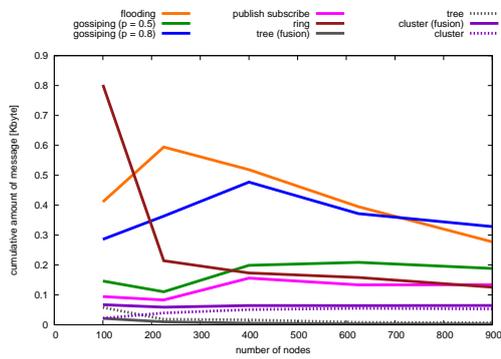
一方で、クラスタ型においては、ノード密度の増加と共に受信率が上昇している。これは、クラスタを構成するノード数が増えるため、クラスタヘッドから送信されたデータメッセージを受信するノード数が増えるからである。また、図 13(e) に示されるように、クラスタ型では平均送信回数がノード密度と共に減少している。クラスタ型では、送信が必要なのは、データが発生したノードからクラスタヘッドへの送信、クラスタヘッドからクラスタメンバーへの送信、クラスタ境界ノードから他のクラスタヘッドへの送信のみであるので、ノード密度に関わらず、ネットワーク全体でのデータあたりの送信回数はあまり変化しないためである。



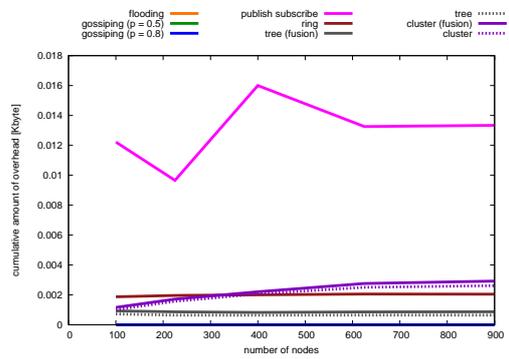
(a) 平均収束時間



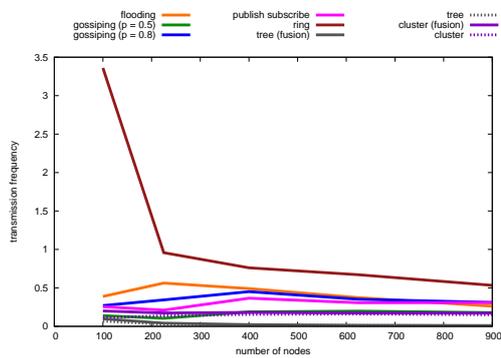
(b) 平均受信率



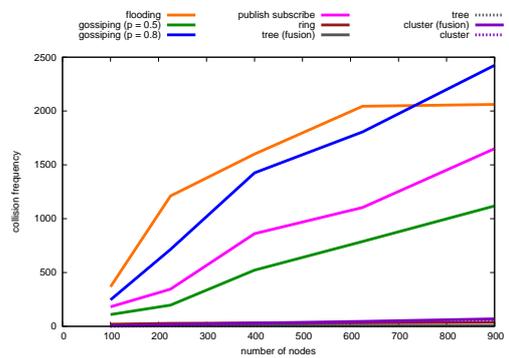
(c) 平均累積メッセージ量



(d) 平均累積オーバーヘッド



(e) 平均送信回数



(f) 平均衝突回数

図 12: 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

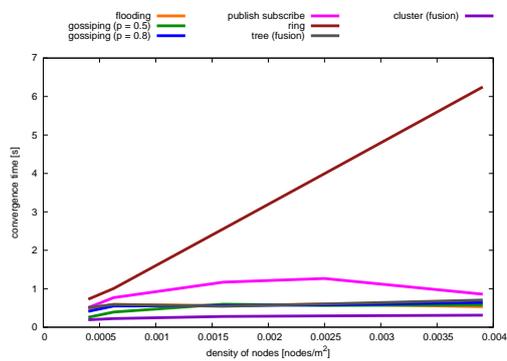
また、パブリッシュ・サブスクライブ型は、図 13(c) や図 13(d) に示されるように平均累積メッセージ量や平均累積オーバーヘッドがノード密度の増加と共に減少しているのにも関わらず、高い受信率を維持している。これは、一度のメッセージ送信を受信できるノード数が増加することにより、要求メッセージとデータメッセージのノードあたりの送信回数が減少することによる。

以上より、密度によらず、平均受信率が高く、平均累積メッセージ量、平均累積オーバーヘッド、平均送信回数が少ない転送確率 p を 0.8 としたゴシップ型の情報伝播手法が最も効率がよいと言える。しかしながら、100 [m] × 100 [m] に 1 台のノードを置くなど、さらに低密度の環境では転送確率をより高く設定する必要があると考えられるため、フラッディング型と同等になる。

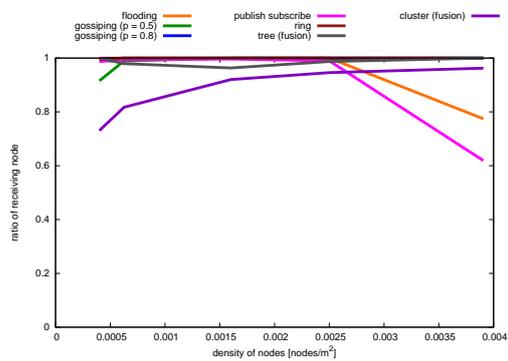
4.3.2 同期型情報発生モデル

同期型情報発生モデルの評価結果を図 14 に示す。全てのノードにおいて同じタイミングでデータが発生し、情報伝播を開始する同期型情報発生モデルでは、図 14(b) に示される受信率が、図 13(b) と比較して、全ての情報伝播手法において低下している。また、領域を拡大させた場合（図 11(b)）の同程度のノード数の結果と比較しても平均受信率が低い。なお、密度 0.0039 [台/m²] の時のノード数は 625 台である。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くなるためである。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。さらに、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。リング型は密度の増加に対して他の手法と比較して高い平均受信率を得ているが、ネットワーク全体で同時に発生するメッセージ送信がたかだか 2 つであり、かつ、ユニキャスト通信であるためにメッセージ送信に成功しやすいためである。ただし、図 14(a) に示されるように、情報の伝播に時間がかかる。図 14(f) において、パブリッシュ・サブスクライブ型の平均累積オーバーヘッドが急激に低下するのは、ブロードキャスト通信で送信される広告メッセージが失われることにより、要求メッセージが発生せず、またデータも転送されないために次ホップ以降でも制御メッセージが送信されないためである。

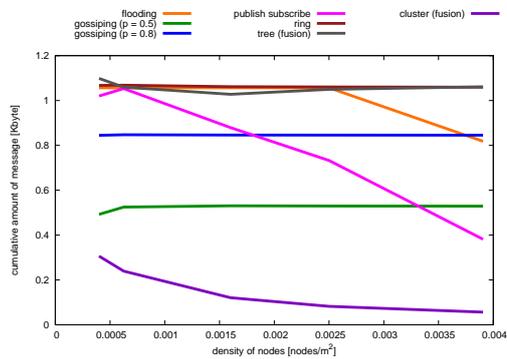
以上のことより、収束時間が長いことを除けば、同期型情報発生モデルの場合、高密度環境において情報共有を行うためには、リング型が望ましいと言える。



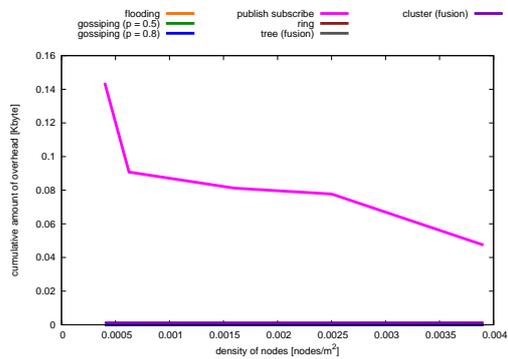
(a) 平均収束時間



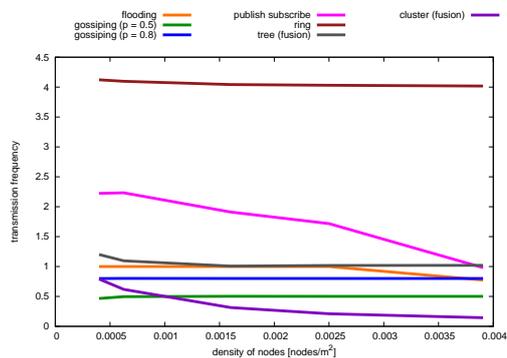
(b) 平均受信率



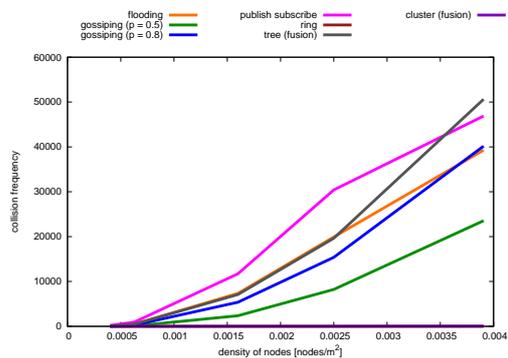
(c) 平均累積メッセージ量



(d) 平均累積オーバーヘッド

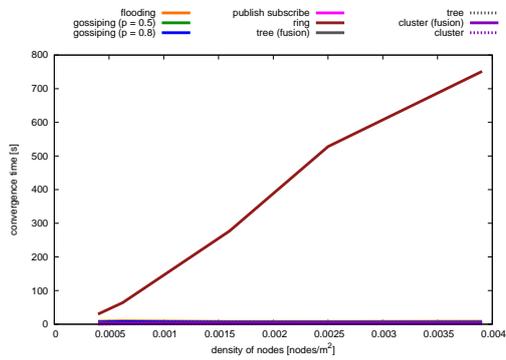


(e) 平均送信回数

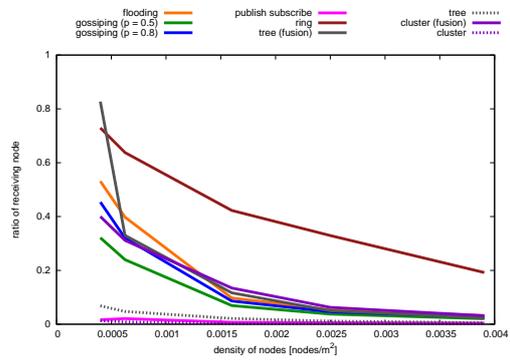


(f) 平均衝突回数

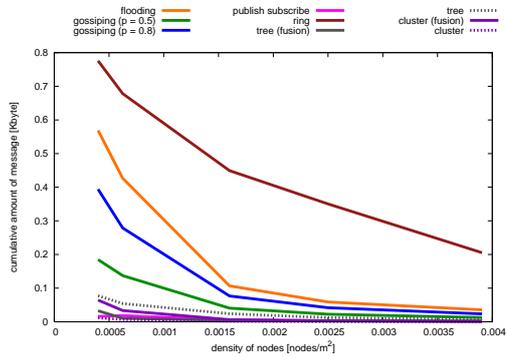
図 13: ノード密度の増加に対する単発型情報発生モデルの評価



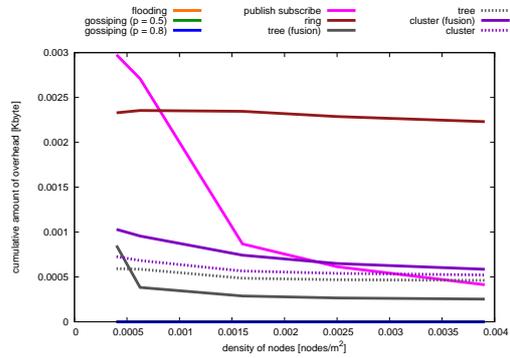
(a) 平均収束時間



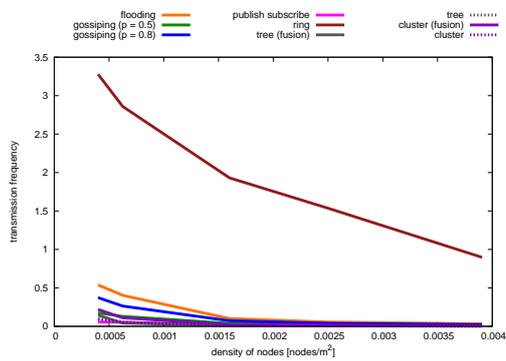
(b) 平均受信率



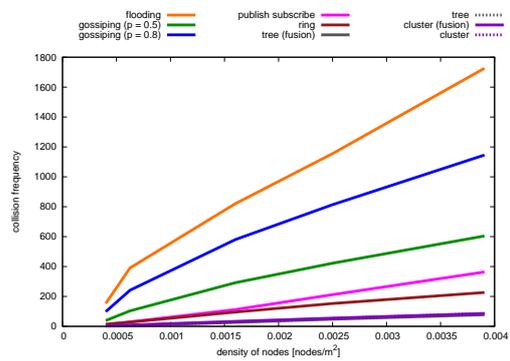
(c) 平均累積メッセージ量



(d) 平均累積オーバーヘッド



(e) 平均送信回数



(f) 平均衝突回数

図 14: ノード密度の増加に対する同期型情報発生モデルの評価

4.3.3 非同期型情報発生モデル

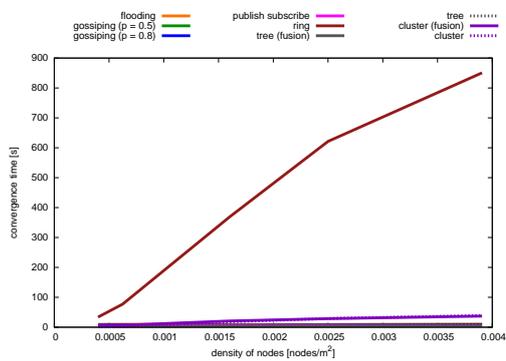
非同期型情報発生モデルの評価結果を図 15 に示す。情報伝播開始のタイミングを 0 ～ 1 秒の範囲でばらつかせることにより、図 14(b) と比較して、クラスタ型を除く情報伝播手法において、ノード密度が低いときには受信率は若干高くなるが、ノード密度が高くなると同期型情報発生モデルと同等の結果となる。一方、ノード密度の増加に対し、データフュージョンを行うクラスタ型の平均受信率の低下は小さく、さらに、データフュージョンを行わないクラスタ型は平均受信率が増加している。クラスタ型では、ノード密度が高くなるとクラスタあたりのクラスタメンバ数が増加する。クラスタメンバ数が増加することでユニキャスト通信を行うノードが増えるためチャンネルに空きが生じにくくなるためメッセージ送信が失敗しやすくなる。その結果、チャンネルに空きが生じにくくなり、データメッセージの送信に失敗するノードが多くなる。ノード密度が 0.0025 [台/m²] 以上になると平均受信率の減少小さくなるのはこのためである。また、シミュレーションにおいてクラスタ A からクラスタ B への通信を考えたときに、共有するクラスタメンバの中で最もクラスタ B に近いノードを介して通信を行うため、クラスタメンバ数が増加することで、より相手のクラスタヘッドに近いノードを介して通信できるようになる。よって、クラスタヘッド間の距離の差が大きくなり、クラスタヘッド間の通信を中継するノードにおいて衝突が発生しにくくなる。データフュージョンを行う場合には、データサイズが小さく、衝突の発生はあまりおこらないため、前者の影響を強く受け、受信率が低下する。一方で、データフュージョンを行わない場合には、データサイズが大きく、通信に時間がかかり、衝突が発生しやすくなるため、後者による影響を受けて受信率が上昇する。

ツリー型においては、ノード密度の増加にともない、子ノードから親ノードへのユニキャスト通信によるデータメッセージ送信に失敗しやすくなるため、平均受信率が低下する。

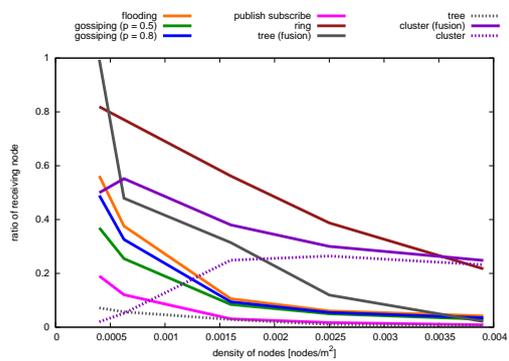
以上のことより、高密度な環境において非同期型情報発生モデルで情報共有を行う場合には、平均受信率が高いが、共有に時間がかかるリング型か、平均受信率では劣るが、平均収束時間の短いクラスタ型を用いるのが適当であると言える。

4.4 考察

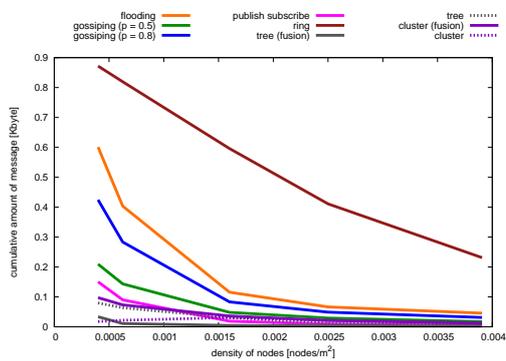
本章では基本設定、観測領域を拡大させる場合、ノード密度を増加させる場合について、3つの情報発生モデルにおけるシミュレーション結果を示し、それぞれの条件における性能評価を行った。単発型情報発生モデルにおけるそれぞれの手法の特性を表 1 にまとめる。また、同期型、非同期型情報発生モデルにおける全ノード間情報共有での手法の特性を表 2 にまとめる。



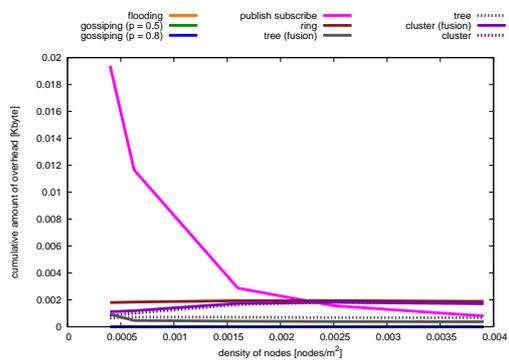
(a) 平均収束時間



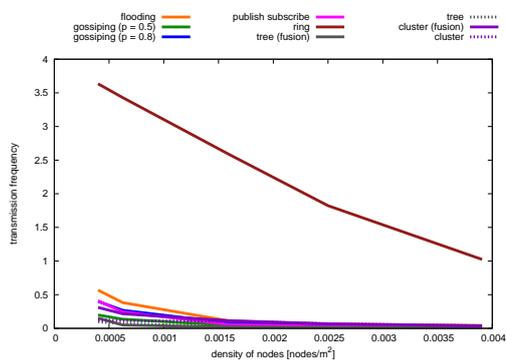
(b) 平均受信率



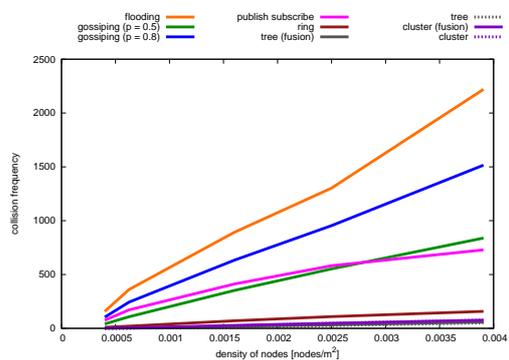
(c) 平均累積メッセージ量



(d) 平均累積オーバーヘッド



(e) 平均送信回数



(f) 平均衝突回数

図 15: 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

単発型情報発生モデルを用いた情報伝播手法の性能比較では、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、いずれにおいてもゴシッピング型の情報伝播手法が最も効率がよいと言える。また、同期型、非同期型情報発生モデルのいずれの場合においても効率的な情報伝播手法はほぼ同じである。観測領域を拡大させる場合では、ノード数が300台程度までであればツリー型の情報伝播手法が、それ以上であればゴシッピング型の情報伝播手法が最も効率がよく、ノード密度を増加させる場合では、高密度な環境において平気受信率が高いが、共有に時間がかかるリング型か、平均受信率では劣るが、平均収束時間が短いクラスタ型の情報伝播が効率がよいことが分かった。

表 1: ノード間情報伝播手法の特性比較

		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	リング型手法	ツリー型手法	クラスタ型手法
狭域	伝播速度	○	○	△	×	○	○
	メッセージ量	×	△	×	×	×	○
	受信率	○	○	○	○	○	×
広域	伝播速度	○	○	△	×	○	○
	メッセージ量	×	△	×	×	×	○
	受信率	△	○	△	△	×	△
低密度	伝播速度	○	○	△	×	○	○
	メッセージ量	×	△	×	×	×	○
	受信率	○	△	○	○	○	×
高密度	伝播速度	○	○	△	×	○	○
	メッセージ量	×	△	×	×	×	○
	受信率	×	○	○	○	○	○

表 2: 無線センサネットワークにおける情報共有における情報伝播手法の特性

		フラッド型手法	ゴシップ型手法	バブルッシュ・サブスクライブ型手法	リング型手法	ツリー型手法	クラスタ型手法
狭域	伝播速度	○	○	△	×	○	○
	メッセージ量	×	△	×	×	×	○
	受信率	○	○	○	○	○	×
広域	伝播速度	○	△	△	×	○	△
	メッセージ量	×	△	×	×	×	○
	受信率	○	○	×	×	×	△
低密度	伝播速度	○	○	△	×	○	○
	メッセージ量	×	△	×	×	×	○
	受信率	○	△	○	○	○	×
高密度	伝播速度	○	○	○	×	○	△
	メッセージ量	×	×	×	×	○	○
	受信率	×	×	×	○	△	○

5 おわりに

本報告では、自律分散型制御のための全ノード間情報共有について、様々な情報伝播手法の特性とその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、情報の受信率やメッセージ送信量などの観点から比較評価を行った結果、情報伝播手法としては、ネットワークの条件や情報発生仕方によらず、おおむねゴシップ型の情報伝播手法がよい特性を示した。また、情報共有に用いる場合には、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が、広域な観測を行う場合にはゴシップ型が効率のよい手法であることがわかった。

今後は、電力消費量や、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、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。

謝辞

本報告を終えるにあたりまして、日頃より熱心に指導して下さいました大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸教授，ならびに若宮直紀准教授に厚く御礼申し上げます。また大阪大学大学院情報科学研究科の荒川伸一助教，ならびに大阪大学大学院経済学研究科の大下裕一助教には適切な助言を頂き，指導して頂きました。心より御礼申し上げます。さらに報告の作成にあたり，様々な助言を下さった梶岡慎輔氏，Narun Asvarujanon 氏，山本宏氏，岩井卓也氏をはじめとする村田研究室の方々にも御礼を申し上げます。

参考文献

- [1] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, “Wireless sensor network survey,” *Computer Networks*, vol. 52, no. 12, pp. 2292–2330, 2008.
- [2] 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.
- [3] E. Jung, Y. Park, M. Domingo, S. Mao, I. Son, S. Behrens, F. Abdesslem, M. de Amorim, A. Ziviani, and H. Kim, “Tinyonet: A cache-based sensor network bridge enabling sensing data reusability and customized wireless sensor network services,” *Sensors*, vol. 8, no. 12, pp. 7930–7950, 2008.
- [4] M. Cardei and D. Du, “Improving wireless sensor network lifetime through power aware organization,” *Wireless Networks*, vol. 11, pp. 333–340, Nov. 2005.
- [5] M. Cardei, M. Thai, Y. Li, and W. Wu, “Energy-efficient target coverage in wireless sensor networks,” in *Proceeding of IEEE Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies on INFOCOM*, vol. 3, pp. 1976–1984, Mar. 2005.
- [6] N. Wakamiya and M. Murata, “Synchronization-based data gathering scheme for sensor networks,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. 88, pp. 873–881, Mar. 2005.
- [7] G. Xing, X. Wang, Y. Zhang, C. Lu, R. Pless, and C. Gill, “Integrated coverage and connectivity configuration for energy conservation in sensor networks,” *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 1, pp. 36–72, Aug. 2005.
- [8] B. Wang, C. Fu, and H. Lim, “Layered diffusion-based coverage control in wireless sensor networks,” *Computer Networks*, vol. 53, pp. 1114–1124, May 2009.
- [9] C. Suh and Y. Ko, “Design and implementation of intelligent home control systems based on active sensor networks,” *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 54, pp. 1177–1184, Aug. 2008.

- [10] C. Herring and S. Kaplan, "Component-based software systems for smart environments," *Personal Communications, IEEE*, vol. 7, pp. 60–61, Oct. 2002.
- [11] J. Al-Karaki and A. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks: a survey," *IEEE Wireless Communications*, vol. 11, pp. 6–28, Dec. 2004.
- [12] K. Akkaya and M. Younis, "A survey on routing protocols for wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 3, pp. 325–349, May 2005.
- [13] R. Rajagopalan and P. Varshney, "Data-aggregation techniques in sensor networks: a survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 8, pp. 48–63, Apr. 2006.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Y. Dalal and R. Metcalfe, "Reverse path forwarding of broadcast packets," *Communications of the ACM*, vol. 21, pp. 1040–1048, Dec. 1978.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Z. Haas, J. Halpern, and L. Li, "Gossip-based ad hoc routing," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 14, pp. 491–450, June 2006.
- [21] 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.

- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] A. Manjeshwar and D. Agrawal, “APTEEN: A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks,” in *Proceedings of IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium*, pp. 195–202, Apr. 2002.
- [28] S. Bo and Z. ZHANG Shi-Yong, “Cluster-Based Routing Protocols for Wireless Sensor Networks,” *Journal of Software*, vol. 7, July 2006.
- [29] D. Stauffer and A. Aharony, *Introduction to percolation theory*. Taylor & Francis, 1992.
- [30] W. Yuan, S. Krishnamurthy, and S. Tripathi, “Synchronization of multiple levels of data fusion in wireless sensor networks,” in *Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference on GLOBECOM.*, pp. 221–225, Dec. 2004.
- [31] Y. Yang, X. Wang, S. Zhu, and G. Cao, “SDAP: A secure hop-by-hop data aggregation protocol for sensor networks,” *ACM Transactions on Information and System Security*, vol. 11, pp. 1–43, July 2008.

- [32] S. Lindsey and C. Raghavendra, "PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems," in *Proceedings of IEEE Aerospace Conference*, pp. 1125–1130, Mar. 2002.
- [33] K. Du, J. Wu, and D. Zhou, "Chain-based protocols for data broadcasting and gathering in the sensor networks," in *Proceedings of IEEE International Conference on Parallel and Distributed Processing Symposium*, pp. 8–15, Apr. 2003.
- [34] S. Banerjee and S. Khuller, "A clustering scheme for hierarchical control in multi-hop wireless networks," in *Proceedings of IEEE Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, pp. 1028–1037, Apr. 2002.
- [35] A. Koubâa, A. Cunha, M. Alves, and E. Tovar, "TDBS: A time division beacon scheduling mechanism for ZigBee cluster-tree wireless sensor networks," *Real-Time Systems*, vol. 40, pp. 321–354, Oct. 2008.
- [36] "The network simulator ns-2." <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [37] I. C. Society, "802.11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," June 1997.
- [38] S. Ganeriwal, R. Kumar, and M. Srivastava, "Timing-sync protocol for sensor networks," in *Proceedings of the ACM international conference on Embedded networked sensor systems*, pp. 138–149, Nov. 2003.