

大規模センサネットワークにおける クラスタ間マルチホップ通信の性能評価

木利 友一[†] 菅野 正嗣^{††} 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科 〒 565-0871 吹田市山田丘 1-5

^{††} 大阪府立大学総合リハビリテーション学部 〒 583-8555 羽曳野市はびきの 3-7-30

E-mail: [†]{y-kiri,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}sugano@rehab.osakafu-u.ac.jp

あらまし 広い観測領域に多数のセンサノードを設置して構成されるセンサネットワークでは、センサノード同士によるマルチホップ通信が必要とされる。また、スケーラビリティや耐故障性の観点からはセンサノードをいくつかのクラスタにグループ化することが望ましい。本論文ではこのような大規模センサネットワークを対象に、クラスタ間でマルチホップ通信を行った場合の特性をシミュレーションを通して明らかにした。さらに、すべてのセンサノードの位置情報に基づいて TDMA による理想的なスケジューリングを行う場合と比較して、位置情報を必要としない CSMA/CA を適用した場合は、データの収集に要する時間が 3.7 倍となり、消費電力は 12% 増となることを示した。
キーワード センサネットワーク、クラスタリング、マルチホップ通信、シミュレーション、干渉

Performance Evaluation of Intercluster Multi-hop Communication on Large-scale Sensor Networks

Yuichi KIRI[†], Masashi SUGANO^{††}, and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology
1-5 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871, Japan

^{††} School of Comprehensive Rehabilitation, Osaka Prefecture University
3-7-30 Habikino, Habikino-shi, Osaka, 583-8555 Japan

E-mail: [†]{y-kiri,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}sugano@rehab.osakafu-u.ac.jp

Abstract In large-scale sensor networks, it is necessary to communicate in a multi-hop fashion between sensor nodes in order to cover a large monitoring region. Moreover, it is desired that grouping sensor nodes into some clusters in terms of scalability and robustness. In this paper, we examined characteristics of the multi-hop communication between clusters in large-scale sensor networks, and compared with other routing methods through simulation experiments. We also investigated the characteristics of the sensor network using CSMA/CA. As a result, it was clarified that power consumption increased by 12% and packet collecting time became about four times longer in comparison to the case of using TDMA based on location information of all sensor nodes.

Key words sensor networks, clustering, multi-hop communication, simulation, interference

1. ま え が き

センサネットワークへの期待から、災害予測や防犯をはじめ、環境モニタリングや交通制御などの様々なアプリケーションが考えられており、その規模も多岐に及んでいる。たとえば環境モニタリングを考えると、数百、数千個のセンサノードが広い観測領域に配置されることが予想される。このような大規模なセンサネットワークにおいては、スケーラビリティや耐故障性

が重要となる。また、センサノードは小容量のバッテリーで駆動されるため、センサネットワークとしての機能を維持するためにはできる限り個々のセンサノードの消費電力を抑えて動作させることが望ましい。センサノード同士でグループを構成するクラスタリングはこれらの要求を満たす方法として注目を浴びており、様々なクラスタリングの方法が研究されている [1-7]。また、センサノードの通信可能距離は一般に短く、広い観測領域全体からデータを収集するためには、データ収集地点である

シンクノードにより近いセンサノードにデータの中継させるマルチホップ通信を行う必要がある。

以上から大規模なセンサネットワークにおいては、クラスタを構成後、マルチホップ通信を行ってデータを収集する方法が望ましいと考えられ、そのようなセンサネットワークを対象とした研究がいくつかなされている[8-11]。しかしながら従来の研究では、各センサノードのネットワーク内の位置に関する消費電力の分布が十分明らかにされていない。ネットワークの稼働時間を考える場合、どの領域において電力枯渇が生じ、それがコネクティビティにどのような影響を与えるかが重要となる。また、センサノードが高密度に配置される場合には、通信範囲内に多数のセンサノードが存在するため、あるセンサノードの送信が他のセンサノードに干渉を与える可能性が高い。すべてのセンサノードの位置情報を把握できれば、TDMAによって干渉を避けるような送信スケジューリングが可能である。しかしながら、センサノードの位置情報を収集し、送信スケジュールを配布するためのオーバーヘッドを考えると、そのような方式は大規模なセンサネットワークでは現実的ではない。つまり、大規模なセンサネットワークでは、局所的なセンサノードの位置情報だけで動作できるようなマルチプルアクセス方式を用いる必要があり、その場合の特性についても明らかにする必要がある。

本論文では、複数のクラスタを構成しクラスタ間およびクラスタ内でマルチホップ通信を行うセンサネットワークを対象として、センサノードの位置による消費電力の分布や、局所的な位置情報のみに基づくマルチプルアクセス方式を用いた場合の影響などを明らかにすることを旨とする。最初に、全センサノードの位置に基づき干渉を避ける送信スケジュールを構成し、この場合におけるクラスタ間マルチホップ通信の基本的特性を明らかにする。次に、全センサノードの位置情報が利用できない場合、干渉によるデータ損失を避けるためのマルチプルアクセス方式としてCSMA/CAを適用することとし、このときの消費電力やデータ収集時間を評価する。これにより、全センサノードの位置情報が利用できない場合に、性能面でどの程度の劣化が生じるかを示す。

本論文の構成は以下のとおりである。2章にクラスタリングおよびクラスタ間マルチホップ通信に関する関連研究を挙げる。3章では本論文で対象としたセンサネットワークについて説明する。4章で、全センサノードの位置情報に基づいた理想的な送信スケジューリングを行う場合について、他の方式との比較によりクラスタ間マルチホップ通信の基本的特性を明らかにする。5章では、CSMA/CAを適用した場合にどれほど性能が劣化するかを示す。6章でまとめと今後の課題について述べる。

2. 関連研究

センサネットワークにおいて、消費電力を抑えるためにクラスタを構成する方法として提案されたものの一つがLEACH[1]である。LEACHでは各センサノードがあらかじめ決められた確率に基づいてクラスタヘッドに立候補し、クラスタヘッドから1ホップで到達できるセンサノードからなるクラスタを構成

する。センサノードからクラスタヘッドまでの通信、各クラスタヘッドからシンクノードまでの通信はともに1ホップで行われる。

LEACHを改良したクラスタリング方法も多く提案されている。LEACHではクラスタの位置に偏りが生じ、ネットワークの稼働時間を短くしてしまうため、[2]ではセンサノード間の残余電力のバランスを保ち、さらにエリア全体に対するクラスタの均一配置を実現するクラスタリング方式HEEDを提案している。また、[3]では各クラスタの大きさを一定にするような中央制御型のアルゴリズムが述べられている。クラスタヘッドへの通信が1ホップで行われるLEACHに対して、それをマルチホップ通信とすることで干渉範囲を押さえ、できるだけ多くの同時並行通信を行うプロトコルとしてHITがある[4]。

送信距離を小さくすることで消費電力を抑制しようという考えから、PEGASIS[6]ではクラスタではなく、最も近いセンサノード同士を結びチェーンを構成する。また、このチェーンをクラスタ内で構成するTPC[7]も提案されている。

センサネットワークにおけるクラスタ間マルチホップ通信に関する研究もなされている。観測領域を複数の正方形領域に分割し、その頂点に位置するクラスタヘッド間でマルチホップ通信を行う方式として[8]がある。シンクノードから全センサノードへのシングルホップの通信が可能という仮定の下で、各クラスタに存在するクラスタヘッド間でマルチホップ通信を行う研究として[9]がある。[10]では、円形の観測領域をレイヤと呼ばれる2つの同心円に分割し、内側のレイヤ内のクラスタサイズを小さくすることで各クラスタヘッドの消費電力を等しくするUCSを提案している。[11]では観測領域を複数のレイヤに分割し、coverage-timeを最長にする各レイヤのクラスタ半径や中継確率などの最適パラメータを導出している。しかし、これらは消費電力のみ評価していたり、クラスタの数を限定していたりするなど、一般的なマルチホップ通信の性能を表すものではない。

3. 対象とするセンサネットワークモデル

3.1 ネットワークモデル

本論文で対象とするセンサネットワークは観測領域を円形とし、シンクノードをその円の中心に配置する。また、データフュージョンによるデータ量の削減は行わないものとし、センシングによって発生したデータはそのままシンクノードに送信される。センサノードは観測領域内のランダムな位置に均等に配置され、移動はしないものとする。すべてのセンサノードは同じ初期電力、通信能力を有する。各センサノードはさらに、通信相手との距離に応じて送信電力を変更する送信電力制御機能を持つ。また、全てのセンサノードは同期しているものとし、固定長のタイムスロットに合わせてデータの送受信を行う。通信に用いる無線チャネルは、センサノード間通信のためのチャネルと、クラスタヘッド間通信のためのチャネルであり、それぞれ全ネットワークで同一とする。

受信ノードが複数のセンサノードのデータを同時に受信した場合には、正しくデータを受信することができない。これを

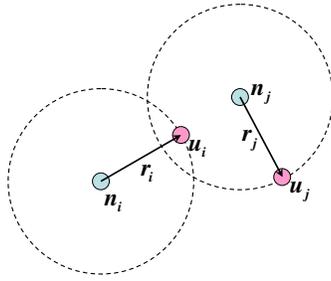


図 1 干渉が発生する場合

データの干渉と呼ぶ。この干渉を考慮するために、本論文では[4]で用いられている干渉モデルを用いた。今、図1のようにセンサノード n_i が距離 r_i だけ離れたセンサノード u_i に送信するのと同時に、センサノード n_j が r_j だけ離れたセンサノード u_j に送信する場合を考える。このときセンサノード u_i はセンサノード n_i 、センサノード n_j 双方のデータを同時に受信してしまうことになる。この結果センサノード u_i は正しくデータを受信できない。この状況を式で表せば式(1)のようになる。つまり、この式を成立させるようなセンサノード n_i, n_j が同時にデータを送信した場合にデータの干渉が発生する。

$$d(u_i, n_j) < r_j \quad (1)$$

なお、 $d(u_i, n_j)$ はセンサノード u_i とセンサノード n_j 間の距離を表している。

3.2 電力モデル

センサネットワークとしての稼働時間はセンサノード自体の稼働時間に依存するため、センサノードの各動作で消費する電力量を定める電力モデルがネットワーク寿命に大きな影響を与えることになる。本論文においては[1]と同じ電力消費モデルを用いる。つまり、 k [bits] を d [m] 離れたセンサノードまで送信するときに要する消費電力は式(2)で、 k [bits] 受信する際に要する消費電力は式(3)で与えられる。

$$E_{Tx} = E_{elec}k + \epsilon_{amp}kd^2 \quad (2)$$

$$E_{Rx} = E_{elec}k \quad (3)$$

3.3 ルーティング

クラスタ間マルチホップ通信を用いるにあたり、どのセンサノードにデータを中継させるかという、中継ノードの決定が必要になる。本論文では、単純に中継ノードまでの距離のみを基準とした。たとえば、クラスタ内での中継ノードの決定方法は以下ようになる。データを送信するセンサノードを n_s 、センサノードの最大通信距離を r_{max} 、中継ノードを n_i, n_s のクラスタヘッドを CH_{n_s} と表す。 n_s はクラスタヘッドまでのマルチホップ通信を行うために

$$d(n_i, CH_{n_s}) < d(n_s, CH_{n_s}) \quad (4)$$

$$d(n_s, n_i) < d(n_s, CH_{n_s}) \quad (5)$$

$$d(n_s, n_i) \leq r_{max} \quad (6)$$

の3つの式を成立させる n_i の中で最も n_s に近いセンサノード

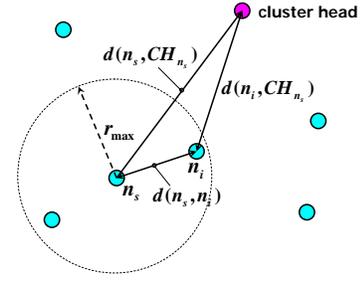


図 2 クラスタ内マルチホップ通信における次ホップの決定方法

を次ホップのセンサノードとして選ぶ。式(4)は中継ノードが送信ノードよりクラスタヘッドに近い位置にあること、式(5)は送信ノードがクラスタヘッドに送信するより中継ノードに送信した方が消費電力が小さくなること、式(6)は中継ノードがセンサノードの最大通信距離以内であることを表現している。ここで、 n_i は n_s と同じクラスタに属するセンサノードである。そのような n_i が存在せず、 $d(n_s, CH_{n_s}) \leq r_{max}$ であれば、 n_s の次ホップとなるセンサノードはクラスタヘッド CH_{n_s} となる。図2に n_s の次ホップとして n_i が選ばれる場合の例を示した。クラスタヘッド間でのマルチホップ通信における中継ノードの決定方法も、上記のものと同様である。

4. クラスタ間マルチホップ通信の基本特性

4.1 干渉のない送信スケジュールの構成

本論文で用いた[4]の干渉モデルでは、各センサノード間の距離のみを用いて干渉条件を記述できる。全てのセンサノードの位置情報が得られていれば各センサノード間の距離が分かるため、まったくデータの干渉の起こらないような送信スケジュールを構成することができ、TDMAによる通信が可能となる。送信スケジュールの構築方法としては、[4]で提案されている干渉のない送信スケジュールを自律分散的に構築する方法を参考にした。本章のシミュレーションにおいては、各センサノードはこの送信スケジュールに従い、割り当てられたタイムスロットに、次ホップとなるセンサノードへデータを送信する。これらの送信は干渉が起こらないことが保証されており、また伝送誤りがないことを仮定しているため、送信したデータは誤りなく次ホップとなるセンサノードが受信でき、あらかじめ定められたスケジュールどおりに全センサノードのデータがシンクノードへと到着する。

4.2 シミュレーション条件設定

クラスタヘッド間マルチホップ通信の基本的な特性を明らかにするため、クラスタ間マルチホップを行う LEACH+multihop および HEED+multihop の比較対象として、以下の3種の方法を考える。

- 各センサノードが直接シンクノードと通信を行う (direct)
- クラスタを構成後、各センサノードはクラスタヘッドへとデータを送信し、クラスタヘッドはそれらのデータおよび自身の生成したデータを直接シンクノードへ送信する (LEACH)
- クラスタを構成せずに、センサノード間でのマルチホップ

表 1 シミュレーションパラメータ

パラメータ	値
センサノード数	500
初期電力	2 J
最大通信距離	300 m
E_{elec}	50 nJ/bit
ϵ_{amp}	100 pJ/bit/m ²
データサイズ	2000 bits

ブ通信によってシンクノードにデータを送信する (multihop)

用いたシミュレーションパラメータは表 1 のとおりである。また、各センサノードは一斉にセンシングを行い、送信するデータを生成することとし、シンクノードまで到達可能な全てのデータをシンクノードが受信した後、再び各センサノードがセンシングを行う。ここでは、この期間を 1 サイクルと定義する。クラスタを構成する方法では、クラスタヘッドとなったセンサノードに消費電力が大きく偏ることを防ぐため、ラウンドと呼ばれる周期に 1 度クラスタリングを行いクラスタヘッドを交代させる必要がある。このときクラスタリングを行うごとにセンサノード間でクラスタヘッド広告などの制御信号の送受が行われ、センサノードの電力が消費されるが、本論文におけるシミュレーションでは、1 ラウンドと 1 サイクルを等しいものとした。つまり、各サイクルでクラスタリングが行われる。各試行の結果はセンサノードの配置によって大きく結果が異なるため、100 回の試行の平均を取ったものをシミュレーション結果として示した。

クラスタ間マルチホップ通信を行う場合、まずクラスタヘッドの割合を決める必要がある。データ収集率を全データ中でシンクノードが受信できたデータの割合と定義し、クラスタリング手法として LEACH と HEED を用いてクラスタ間マルチホップ通信を行ったときのラウンドごとのデータ収集率の変化を調べたところ、クラスタヘッドの割合はデータ収集率の変化にほとんど影響を及ぼさないことが分かった。以下ではわずかながらデータ収集率を長く保つことができたクラスタヘッドの割合として 20% を用いることとする。

4.3 消費電力の特性

シンクノードまで到達できない領域が存在するとマルチホップ通信との性能面での比較が難しいので、1 ホップでシンクノードとの通信を行う LEACH や direct では、最大通信距離を 500m とした。この場合の消費電力を図 3 に示す。図 3 から、クラスタリングせずにセンサノード間でマルチホップ通信を行った場合、最も電力消費の大きい領域 (シンクノードから 25m-50m の領域) を生むということがわかる。これはシンクノードに近いセンサノードが、自分より外側の多数のセンサノードのデータを中継しなければならないためである。一方、クラスタリングを行い、クラスタヘッド間でマルチホップを行う場合は、クラスタを構成しない方式に比べて電力消費が抑えられる。また、電力消費が最大となる領域はシンクノードから 100m 程度離れた領域となる。この理由は、この領域に位置するクラスタヘッドより内側に他のクラスタヘッドが存在する確

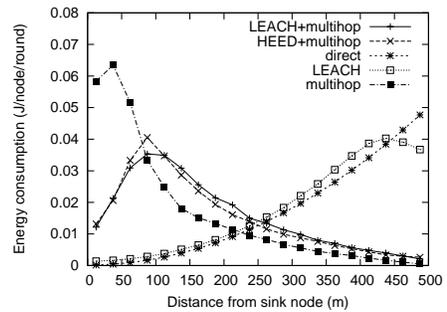


図 3 シンクノードからの距離と、ラウンドあたりのセンサノードごとの消費電力の関係

率が小さいため、多くの場合にデータを中継させることができず、直接シンクノードと通信を行うためである。

マルチホップ通信を用いる場合は対照的に、センサノードから直接シンクノードへ通信を行う LEACH, direct では、シンクノードから遠い領域ほど通信距離が長くなるために消費電力が大きくなる。LEACH と direct を比較して前者のほうがほとんどの領域で消費電力が大きくなっているが、これはクラスタリングに伴う制御信号の送受信に電力が消費されるためである。

4.4 電力枯渇によるデータ収集率の変化特性

データ収集率はネットワーク寿命を意味するため、どれだけ高いデータ収集率を維持できるかということが重要となる。ラウンドごとのデータ収集率を図 4 に示す。各方式におけるデータ収集率の変化は 80 ラウンド程度まではほぼ同じ軌跡を描くことが分かる。しかし、図 3 に示すように、電力が枯渇するセンサノードの位置は方式によって異なる。マルチホップ通信を行う 3 つの方式は、ピークの位置に差はあるが、いずれも電力が枯渇するセンサノードはシンクノードに近い位置に集中する。これらのセンサノードの電力枯渇により、ラウンドが進むにつれてその位置周辺の情報を得ることができなくなり、また、中継ノードがなくなることから観測領域周縁部の情報を得ることも次第に難しくなっていく。そのため、ラウンドが増加するにつれてデータ収集率は大きく減少し続ける。

LEACH や direct では、長距離の通信が必要な観測領域周縁部のセンサノードから電力が枯渇していく。ラウンドの進行につれてデータ収集率の下降はなだらかになるが、これはシンクノードに近い位置にあるセンサノードのみが残余電力を持っている状況を示している。しかし観測領域全体からデータを収集する必要があるセンサネットワークにおいては、このような偏りは望ましいものではない。

4.5 データ収集時間の特性

図 5 はデータ収集時間を表すグラフである。センサノード数を 500 としているためシンクノードが受信するデータ数も 500 であり、データ収集の最短時間は 500 タイムスロットとなる。direct および LEACH では、この最短時間を達成しており、データ収集時間の点では最適となっている。direct では、各センサノードに対して、他のセンサノードと同時に通信を行わないように 1 タイムスロットを割り当てただけで良い。LEACH

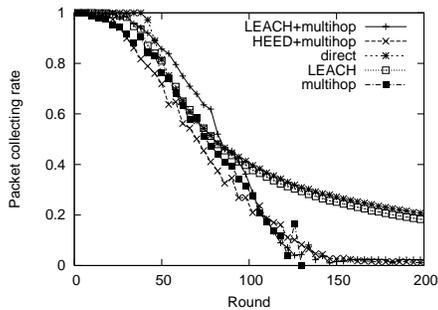


図 4 電力枯渇によるデータ収集率の変化

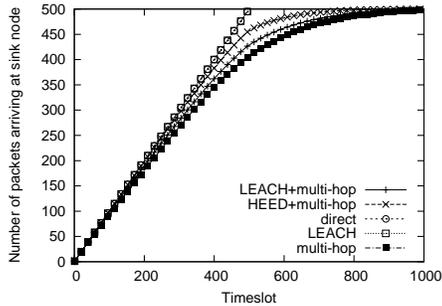


図 5 方式によるデータ収集時間の違い

についても、あるクラスタヘッドがシンクノードと通信を行う間、他のクラスタではクラスタヘッドがクラスタ内ノードからのデータ収集を行えるため、最短のデータ収集時間が達成できるような干渉のないスケジューリングが可能である。

一方マルチホップ通信を行う場合は、クラスタリングを行う、行わないに関わらず、時間が進むにつれてシンクノードが受信するデータの数が増えなくなる。これは、シンクノードから離れた位置にあるセンサノードが生成したデータがシンクノードに届くまでに時間がかかるためである。干渉を避けるため、センサノードは送信を待つようにスケジュールが組まれていることが多く、それがデータ収集時間に大きな影響を与えている。クラスタを構成した場合、わずかにデータ収集時間が短くなるのは、クラスタヘッド間通信によってシンクノードへのホップ数が小さく抑えられるためである。

5. CSMA/CA を適用した場合

前章では全センサノードの位置情報を利用して、TDMA による理想的な送信スケジューリングが可能であるという前提の下、クラスタ間マルチホップ通信の基本的特性を評価した。しかし、大規模なセンサネットワークにおいて、全センサノードの位置情報を利用するのは現実的でなく、干渉を完全に避けるような送信スケジューリングを構築することは難しい。そこで全センサノードの位置情報を利用できない場合は、送信スケジュールに基づいた TDMA ではなく、CSMA/CA を適用することで分散的にネットワークを構成することとする。

本論文で用いた CSMA/CA は IEEE 802.15.4 [12] を参考にした。各センサノードはそれぞれ BE (Backoff Exponent) という変数を保持する。この変数はチャネルの空きを評価する前のランダムな待ち時間の長さを決定するのに用いられる。図 6 に

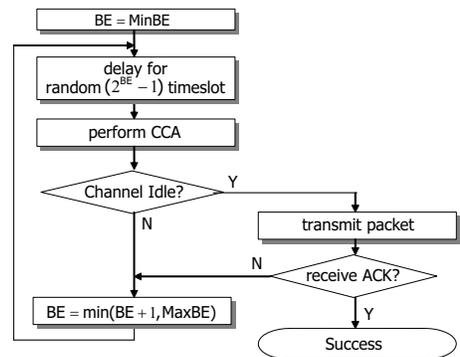


図 6 CSMA/CA の送信アルゴリズム

この送信アルゴリズムを示す。通常、CSMA/CA ではバックオフを行う回数の上限を定め、その上限に達すると送信失敗としてそれ以上送信を行わないが、本論文においてはセンサノード間通信の干渉による再送の影響に注目するため、送信が成功するまで何度でもバックオフが可能であるとしている。 $MinBE$ 、 $MaxBE$ の値は、それぞれ IEEE 802.15.4 のデフォルト値である 3 および 5 に設定した。

CSMA/CA を用いた場合でも隠れ端末問題などによって干渉は完全には避けられず、再送信の必要が生じる。また、CSMA/CA ではキャリアセンスの前にバックオフが必要である。これらの要因により、全センサノードの位置情報が利用でき、TDMA によって干渉を避ける送信スケジュールを構成できる場合に対して、消費電力やデータ収集時間が悪化することが予想される。シミュレーション対象として用いるのは CSMA/CA を導入した HEED+multihop と 4 章で用いた干渉のない送信スケジュールに沿って通信を行う HEED+multihop である。

5.1 消費電力の比較

位置別消費電力の比較を図 7 に示す。結果を見ると全ての位置において、CSMA/CA を適用した場合の方が全センサノードの位置情報を利用した送信スケジュールに従った場合と比較して消費電力が大きくなっている。この大きな原因は、データの干渉に伴う再送であると考えられる。CSMA/CA を用いたとしても隠れ端末問題などによって完全にデータの干渉を回避できるわけではない。この場合、干渉時のデータ送信、そして再送時のデータ送信と少なくとも 2 度の送信が必要になる。

シンクノードから 75m-100m の領域が最も消費電力が大きくなっているが、これは、シンクノードに近いセンサノードほど中継するデータが多く、干渉を起こす可能性が増加すること、そしてクラスタヘッドの割合が小さいとラスト 1 ホップノードとシンクノードとの距離が長くなり、通信電力が増加することの 2 つの要因が組み合わさった結果である。この区間は、全センサノードの位置情報を利用したときに消費電力が最大となる区間と一致する。現実的に問題となるのは、センサノードの電力枯渇によって、このエリアのセンシングが不可能になることであり、ルーティングやクラスタの構成法によって、このような電力の偏りを均一化することが重要である。

TDMA によって干渉を避けるスケジューリングを行った場

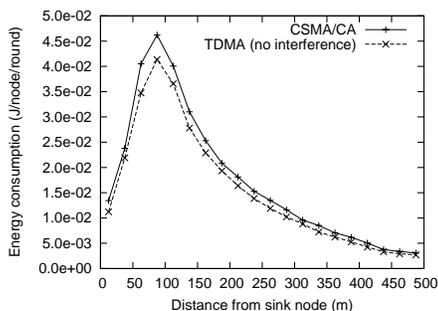


図7 干渉を回避したTDMAと、CSMA/CAにおけるノードあたりの消費電力の比較

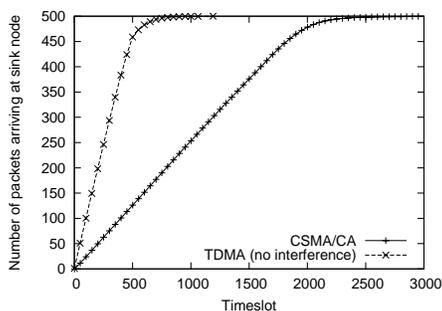


図8 データ収集時間の比較

合の消費電力 E_{TDMA} と CSMA/CA を適用した場合の消費電力 $E_{CSMA/CA}$ において、 $\frac{E_{CSMA/CA} - E_{TDMA}}{E_{TDMA}}$ を増加割合と定義した。この増加割合を全領域で平均すると、CSMA/CA を適用した場合は干渉を避ける送信スケジューリングに従った場合と比べ、約 12% 消費電力が増加することが分かった。

5.2 データ収集時間の比較

CSMA/CA ではチャンネルの空き状態を評価する前にバックオフが必要なため、TDMA による送信スケジュールに従う場合に比べてデータ収集時間が大きく悪化する。図8にデータ収集時間の比較結果を示す。90% のデータを収集するために必要な時間を TDMA によるスケジューリングに従う場合と比較すると、3.7 倍の時間がかかるという結果となった。多数のセンサノードが高密度に配置される大規模なセンサネットワークでは、センサノードが送信を試みる場合に他のセンサノードの送信によってチャンネルが使用中であることが非常に多くなり、何度もバックオフが必要になる。シンクノードに近いエリアほどデータ送信の頻度が多いためバックオフ回数も多く、データ収集時間が悪化するという結果に陥る。このような特性から、リアルタイム性を要求するようなアプリケーションに対して、中継ホップ数の多いネットワーク構成を適用する場合には注意が必要である。

6. まとめ

本論文では、大規模なセンサネットワークを対象に、データ収集の際にクラスタ内およびクラスタヘッド間でマルチホップ通信を用いた場合の基本的な特性を調査した。その結果クラスタを構成しない場合に比べて、シンクノードに近いセンサノードにおけるデータの中継負荷が抑えられることが分かった。さ

らに本論文では、TDMA による干渉のない送信スケジュールに従う場合と比較して、CSMA/CA を適用した場合に、同じデータ量の収集時に 12% の電力増となり、データ収集時間に関しても 3.7 倍になることを示した。消費電力については干渉による再送、データ収集時間については CSMA/CA のバックオフ時間が大きな影響を与えている。干渉以外に無線伝送時における誤りの発生によっても再送が起るため、今後の課題としてはこの誤りの影響を考慮した性能の評価が挙げられる。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省 21 世紀 COE プログラム（研究拠点形成費補助金）、および科学研究費補助金基盤研究 (C)17500043 によっている。ここに記して謝意を表す。

文献

- [1] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan: "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks", Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 1-10 (2000).
- [2] O. Younis and S. Fahmy: "Distributed clustering in ad-hoc sensor networks: A, hybrid, energy-efficient approach", Proceedings of IEEE INFOCOM 2004, pp. 629-640 (2004).
- [3] S. Ghiasi, A. Srivastava, X. Yang and M. Sarrafzadeh: "Optimal energy aware clustering in sensor networks", Sensors Magazine, **2**, pp. 258-269 (2002).
- [4] B. J. Culpepper, L. Dung and M. Moh: "Design and analysis of hybrid indirect transmissions (HIT) for data gathering in wireless micro sensor networks", ACM Mobile Computing and Communications Review, **8**, 1, pp. 61-83 (2004).
- [5] H. Chan and A. Perrig: "ACE: An emergent algorithm for highly uniform cluster formation", Proceedings of the First European Workshop on Wireless Sensor Networks (2004).
- [6] S. Lindsey, C. Raghavendra and K. M. Sivalingam: "Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics", IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, **13**, 9, pp. 924-935 (2002).
- [7] W. Choi, P. Shah and S. K. Das: "A framework for energy-saving data gathering using two-phase clustering in wireless sensor networks", Proceedings of the First Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services, pp. 203-212 (2004).
- [8] A. A. Papadopoulos and J. A. McCann: "Connectionless probabilistic (CoP) routing: an efficient protocol for mobile wireless ad-hoc sensor networks", Proceedings of the 24th International Performance Computing and Communications Conference, pp. 73-77 (2005).
- [9] J. Neander, E. Hansen, M. Nolin and M. Björkman: "Asymmetric multihop communication in large sensor networks", Proceedings of International Symposium on Wireless Pervasive Computing 2006 (2006).
- [10] S. Soro and W. B. Heinzelman: "Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering", Proceedings of the 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (2005).
- [11] T. Shu, M. Krunz and S. Vrudhula: "Power balanced coverage-time optimization for clustered wireless sensor networks", Proceedings of ACM MobiHoc '05, pp. 111-120 (2005).
- [12] IEEE: "802.15.4-2003 IEEE Standard for Information Technology-Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)" (2003).