

マルチクラスタ構成を持つ大規模センサネットワーク アーキテクチャに関する検討

菅野 正嗣[†] 木利 友一^{††} 村田 正幸^{††}

[†] 大阪府立大学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

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

E-mail: †sugano@rehab.osakafu-u.ac.jp, ††y-kiri@nal.ics.es.osaka-u.ac.jp, †††murata@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 多数のセンサノードからなる大規模なセンサネットワークでは、ネットワークを複数のクラスタに分割し、クラスタヘッド間でマルチホップ通信を行なうことでデータ収集が可能となる。本稿では、このようなネットワークにおいて、センサノードの通信距離などのパラメータが消費電力やスループットにどのように影響を与えるかを解析的に導出した。また、センサネットワークではシンクノード近傍のノードの負荷が非常に大きくなることに着目し、シンクノード近辺の不要な中継を削減することで、電力消費量を抑え、スループットも 2 倍程度向上できることを明らかにした。

キーワード センサネットワーク, シミュレーション, スループット, エネルギー消費

Large-scale Wireless Sensor Network Architecture with Multi-cluster Configuration

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

[†] School of Comprehensive Rehabilitation, Osaka Prefecture University

3-7-30 Habikino, Habikino-shi, Osaka, 583-8555 Japan

^{††} Graduate School of Information Science and Technology

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

E-mail: †sugano@rehab.osakafu-u.ac.jp, ††y-kiri@nal.ics.es.osaka-u.ac.jp, †††murata@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract Large-scale sensor networks containing many sensor nodes are often divided into clusters so large that necessary to use multi-hop communication between cluster heads when collecting data. In this paper we derive analytically how parameters such as the communication distance of a cluster head affect the power consumption and throughput of such networks. We also that power consumption can be reduced and throughput roughly doubled by not unnecessarily relaying data in the neighborhood of the sink node.

Key words sensor network, simulation, throughput, energy consumption

1. ま え が き

センサネットワークの利用範囲の拡大に伴い、多数のセンサノードを広範囲に設置するような大規模なセンサネットワークの実現も可能となってきている。センサネットワークでは、各ノードはバッテリーで動作するため、送信電力をできるだけ抑えることが必要であり、通信可能な距離は 10 ~ 100 m 程度になっている。したがって、より広い範囲のセンシングを行なうような大規模なネットワークを構築するためには、センサノード間のマルチホップ通信が必要となる。また、スケーラビリティや耐故障性などの観点からは、このように多数のセンサノードを

一元的に扱うのではなく、クラスタリングによる階層的な構造をとることで分散制御を行なうことが望ましい。すなわち、センシングエリアを複数のクラスタに分割し、個々のクラスタにはクラスタヘッドを配置する。センサノードで発生したデータは、まずクラスタヘッドに集約され、クラスタヘッドからシンクノードへと送信される。クラスタヘッドになったセンサノードは、中継による消費電力が大きくなるために、電力消費量の偏りを防ぐためには、周期的にクラスタヘッドを切り替えることが必要となる。

このようにセンサネットワークでは、すべてのデータはシンクノードに集約される。ネットワーク内でのデータフュージョ

ンなどの処理を行わないとすれば、発生したすべてのパケットはそのままシンクノードに送られることになる。したがって、相互にデータをやり取りする一般のアドホックネットワークとは異なり、センサネットワークではシンクノードの周辺に負荷が集中するという特性がある。そのため、シンクノードの受信チャンネルがボトルネックとなり、この部分でネットワーク全体のスループットが制約される。またシンクノードに近くなるほど、より離れたノードからのデータが累積されるため、中継に伴う電力消費量が大きくなる。つまり、ネットワークの寿命もシンクノード近辺のセンサノードの負荷によって決まることになる。したがって、大規模なセンサネットワークにおける性能評価では、クラスタサイズなどの、シンクノード近辺の負荷を支配するパラメータと性能指標との関係を明らかにする必要がある。

このようなセンサネットワークの性能を解析的に評価した研究としては [1] があり、階層化を行わない単一のネットワークでの解析、およびクラスタリングを行なった場合の解析を行っている。しかしながら、クラスタリングを行なった場合については、クラスタヘッドからシンクノードへの通信は 1 ホップで行なわれるとしているために、クラスタヘッド間でマルチホップ通信を行なう場合の特性は明らかではない。そこで、本研究では、クラスタヘッド間でマルチホップ通信を行なうような大規模なセンサネットワークを対象とし、クラスタの大きさなどのパラメータがスループットや消費電力にどのような影響を与えるのかを解析的に明らかにすることを旨とする。さらに、シンクノード近辺の不要な中継を削減することで、スループットや電力消費量をどのように向上できるかを明らかにする。

本論文の構成は以下のとおりである。2 章にクラスタ構成からなるセンサネットワークに関する関連研究を挙げる。3 章では解析のためのネットワークのモデル化を示す。4 章で消費電力を導出し、シミュレーションとの比較を行なう。また、シンクノード近辺の負荷集中を避ける効果も示す。5 章ではスループットに関する評価を行なう。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ける消費電力を考慮したデータ収集方式に関する研究は、従来から行なわれてきている。消費電力を抑えるためにクラスタを構成する方式として提案されたのが LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [2] である。LEACH が対象としているネットワークでは、クラスタ内およびクラスタヘッドからシンクノードへの通信ともにシングルホップで行なわれる。

一方、電力消費を抑えるには、通信距離を抑えることが効果的であるという観点から、最も近いセンサノード同士で通信を行なうチェーンを構成する方式として提案されたのが PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) [3] である。PEGASIS では、センサノードは CDMA を仮定すると、ノード間での干渉がなく並列動作が可能であるとしている。また、CDMA 以外の方式であっても、3 階層の

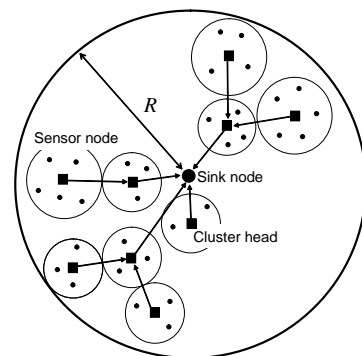


図 1 対象とするセンサネットワークモデル

チェーンを構成し空間的に離れていれば、ある程度の並列動作を実現できるとしている。

LEACH は各センサノードが自律分散的にクラスタを構成できるが、それを改良する方式が多数提案されている。LEACH では、クラスタ内はシングルホップで通信を行なうが、クラスタ内でマルチホップ通信が可能であるとし、消費電力を考慮したルーティング方式を提案した研究として [4] がある。また [5] では、クラスタ構成後に、クラスタ内で PEGASIS のようなチェーンを構成することで、より消費電力を抑えることを目指している。チェーンによって通信距離が短くなり、消費電力は抑えられるが遅延が増大する。そこで、遅延に関して上限を設定できるようにしている。

また、クラスタの構成方式を改良した研究も行なわれている。LEACH の場合、クラスタヘッドはランダムに決定されるので、クラスタの大きさや所属するセンサノード数に偏りが生じる。ネットワーク寿命の観点から偏りは好ましくないのので [6, 7] では、バランスのとれたクラスタ構成法を提案している。また [8] では、クラスタヘッドを決定する際に、残余電力とクラスタヘッドの負荷を分散する方式である HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed clustering system) を提案している。また、[9] では、TDMA を前提としてスケジューリングまで考慮したクラスタリングとデータ収集方式である HIT (Hybrid Indirect Transmission) を提案している。前提として、ネットワーク全体が同期しており、すべてのセンサノードに関して経路と干渉を起こす隣接ノードについて情報交換することで、干渉を起こさないスケジューリングを実現している。

3. ネットワークモデル

対象とするセンサネットワークのモデルを図 1 に示す。また、システムの定式化を行なうために、以下の記法および仮定を導入する。

- センシングエリアの形状は半径 R の円とする。
- 全ノード数を N 、クラスタヘッド数を N_{CH} とし、センシングエリア全体に一樣に分布しているものとする。
- 各センサノードは、センサノードとして同一の通信チャンネルと、クラスタヘッドとして同一通信チャンネルを共有する。また、すべての無線チャンネルは固定長で時分割される。
- センサノードとしての通信距離を r 、クラスタヘッドと

しての通信距離を r_{CH} とし、それに応じた送信電力制御を行なうものとする。

- あるノード X_i の送信データが X_j に正しく受信されるためには、以下の条件を満たす必要がある [10]。

(1) ノード X_j はノード X_i の通信距離内に存在する

$$|X_i - X_j| \leq r$$

(2) 他のすべてのノード X_k に関して

$$|X_k - X_j| \geq |X_i - X_j| + \Delta$$

ここで $\Delta > 0$ は、他のノードからの干渉を避けて確実に受信するためのガードゾーンである。クラスタヘッド間通信に関しても、同様の干渉条件が存在するものとする。

- クラスタリングを行なうことで、センシングエリア全体をクラスタに分割し、各クラスタの中心にクラスタヘッドが 1 つ置かれるものとする。

- クラスタ内では、センサノードはマルチホップでクラスタヘッドにデータを送信する。また、クラスタヘッドは、収集したデータを、よりシンクノードに近い隣接クラスタのクラスタヘッドに送信することで、マルチホップによりシンクノードに送られる。

- データフュージョンは行なわないものとする。すなわち、センシングによって発生した k bit のデータは、そのままシンクノードに送られる。

- センサノードの消費電力モデルは [2] と同じものを用いる。すなわち、センサノードは、無線送受信機の動作に E_{elec} (nJ/bit)、送信機の信号増幅に ε_{amp} (pJ/bit/m²) の電力を必要とする。

4. 解析による消費電力の導出

4.1 シンクノードからの距離と消費電力の関係

前述の仮定より、対象とするシステムにおいてセンサノードが消費する電力は、センサノードとして動作する場合は、

- クラスタ内において、より外側のセンサノードからのデータを中継する際に必要となる受信電力。

- 他のセンサノードからの受信データと、自分がセンシングしたデータを、より内側のセンサノードあるいはクラスタヘッドに送信するための電力。

が消費される。また、クラスタヘッドとして動作する場合は、

- センシングエリア内で、より外側に位置するクラスタヘッドからのデータを中継する際に必要となる受信電力。

- クラスタ内のセンサノードからのデータを受信するための電力。

- これらのデータを、より内側のクラスタヘッドあるいはシンクノードに送信するための電力。

となる。

まず、ノードが通常のセンサノードである場合の消費電力を導出する。ノードのクラスタ内の位置によって中継のために消費される電力が異なるが、簡単のために [11] の方法で、クラスタ全体での消費電力を求め、それをクラスタ内ノード数で割る

ことでノードあたりの平均の消費電力としている。

クラスタに属するすべてのセンサノードで発生した k bit のデータを、クラスタヘッドに収集する場合を考える。それぞれのクラスタ内のセンサノード数 N_c は、

$$N_c = \frac{N}{N_{CH}} \quad (1)$$

となる。クラスタ内での全送信回数を x_c とすると、クラスタヘッドから h ホップ離れたノード数 $n(h)$ は、以下のように求められる。

$$n(h) = N_c \frac{r^2}{l^2} \{h^2 - (h-1)^2\} \quad (2)$$

ここで l はクラスタを円とみなしたときの半径である。また、 h ホップ離れたあるノードの送信回数 $l(h)$ は

$$l(h) = \frac{\sum_{i=h}^{\lfloor \frac{r}{l} \rfloor} n(i)}{n(h)} = \frac{N_c \{1 - (h-1)^2 \frac{r^2}{l^2}\}}{n(h)} \quad (3)$$

となる。したがって、クラスタ内の全送信回数 x_c は、

$$x_c = \sum_{h=1}^{\lfloor \frac{r}{l} \rfloor} n(h)l(h) = \sum_{h=1}^{\lfloor \frac{r}{l} \rfloor} N_c \{1 - (h-1)^2 \frac{r^2}{l^2}\} \quad (4)$$

となる。以上より、あるクラスタにおいてクラスタヘッドにデータを収集するために必要な電力 E_c は

$$E_c = x_c (E_{elec}k + \varepsilon_{amp}kr^2) + x_c E_{elec}k \quad (5)$$

となる。

次に、クラスタヘッドである場合の消費電力を求めるために、中継によって消費される電力を導出する。シンクノードから距離 $d - r_{CH}/2$ から $d + r_{CH}/2$ の、幅 r_{CH} の環状領域内に存在するクラスタヘッドに着目する。幅 r_{CH} はクラスタヘッドの通信距離であるので、環状領域内部においてクラスタヘッド間で中継が行なわれる可能性は非常に小さいと考えることができる。また、環状領域より外側のクラスタヘッドから、この領域を超えて内側のクラスタヘッドへは伝送することができない。したがって、これらのクラスタヘッドは、環状領域の外側に位置するすべてのセンサノードが発生したデータを受信し、内側に位置するクラスタヘッドあるいはシンクノードに送信することとなる。

単位面積あたりのセンサノードの密度は $\frac{N}{\pi R^2}$ 、クラスタヘッドの密度は $\frac{N_{CH}}{\pi R^2}$ となるので、外側の領域が存在する $d + r_{CH}/2 < R$ の範囲において、外側に存在するセンサノードからのデータ量は

$$\frac{R^2 - (d + r_{CH}/2)^2}{R^2} Nk \quad (6)$$

となる。また、環状領域内のクラスタヘッド数は

$$\frac{(d + r_{CH}/2)^2 - (d - r_{CH}/2)^2}{R^2} \cdot N_{CH} \quad (7)$$

であるが、簡単のために、外部からのデータをこれらのクラスタヘッドで均等に分けるものとする。さらにクラスタヘッドは、自クラスタで発生した

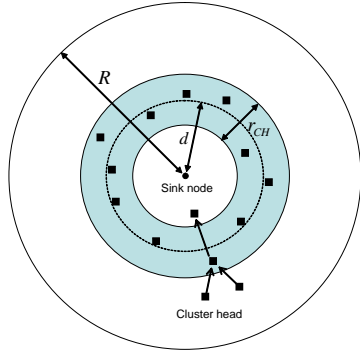


図 2 環状領域より外側で発生したデータは，環状領域内のクラスタヘッドで中継され，内側に送られる．

表 1 パラメータ値

ノード数 N	2000
エリア半径 R	300 m
センサノード通信距離 r	20 m
ガードゾーン Δ	0 m
E_{elec}	50 nJ/bit
ϵ_{amp}	100 pJ/bit/m ²

$$\frac{N}{N_{CH}} \cdot k \quad (8)$$

のデータを併せて，内側のクラスタヘッドあるいはシンクに送信する．

$d + r_{CH}/2 > R$ の範囲では，環状領域の外側にはセンサノードが存在しないので，クラスタヘッドは中継を行なうことはなく，自クラスタ内のセンサノードで発生したデータを受信し，次のクラスタヘッドに送信するだけである．また，クラスタヘッドがエリアの周辺に位置するために，クラスタの形状が半径 l の円であると仮定すると，クラスタがセンシングエリアからはみ出るために，クラスタ内のセンサノード数は少なくなる．円形のクラスタのうちエリア内にかかる面積は以下のようになり，近似的にセンサノード数を求めることができる．

$$l^2 \cdot \left(\pi - \arccos\left(\frac{x-d}{l}\right) \right) + R^2 \arccos\left(\frac{x}{R}\right) - dy \quad (9)$$

ここで

$$x = \frac{R^2 - l^2 + d^2}{2d}, \quad y = \sqrt{R^2 - x^2}$$

である．

以上より，一般のセンサノードとしての消費電力と，クラスタヘッドとしての消費電力が求められる．電力消費の偏りを避けるために，周期的にクラスタヘッドを交代するとすれば，あるセンサノードの平均消費電力は，センサノード数とクラスタヘッド数で比例配分したものとなる．

表 1 に数値例で用いたパラメータ値を示す．また解析との比較を行なうために，シミュレーションも同時に行なった．まず，クラスタヘッド間の通信距離である r_{CH} が 40 m, 100 m, 200 m の場合に，シンクノードからの距離と消費電力との関係を求めた結果を図 3 に示す．シミュレーションは，幅 15 m の環状領域ごとに平均した値をプロットしている．この結果より，

シンクノードに近いセンサノードほど，消費電力が急激に増加していることがわかる．これは，データフュージョンを行っていないために，すべてのデータが累積されていくためである．またクラスタヘッド間の通信距離が大きいほど，すなわちクラスタが大きいほど消費電力が大きくなっている．つまり，消費電力の観点からは，クラスタはできるだけ小さいほうが望ましいといえる．

解析とシミュレーションの比較をすると，クラスタヘッド間通信距離が 100 m の場合は，解析とシミュレーションの結果がよく合致するが，距離が大きい場合には解析の値が大きくなり，距離が小さい場合にはシミュレーションの値が大きくなる．この原因は，以下のように考えられる．

- 解析ではクラスタは円形で同じ個数のセンサノードからなるとしているが，実際にはクラスタに属するセンサノードの個数はばらつきがある．特に，クラスタヘッド間距離が小さい場合には，クラスタヘッド単独からなるクラスタも多数存在し，それらのノードはセンサノードとして動作するよりも消費電力が大きいために，シミュレーションの値が大きくなる．

- エリアの周辺に位置するクラスタに対しては，実際のクラスタの形状が円ではないにもかかわらず円であるとしてクラスタ内消費電力を求めているため，実際よりも距離が大きくなる．特にクラスタが大きくなるほど，その誤差が大きくなる．

4.2 ネットワーク全体の総消費電力

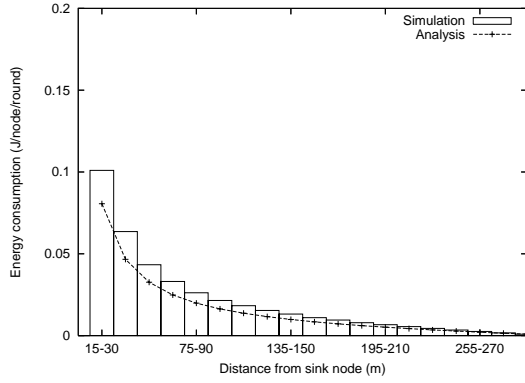
前節で求めたシンクノードからの距離と消費電力の関係より，ネットワーク全体の総消費電力が求められる．ここで，消費電力モデルにおける距離に依存する項である ϵ_{amp} によって，総消費電力がどのように変化するかを図 4 に示す． ϵ_{amp} が大きいほど総消費電力は急激に増加し，クラスタヘッド間距離が大きいほど顕著になる．逆に， ϵ_{amp} が小さければ距離による影響は小さくなる．特に $\epsilon_{amp}=0$ の場合には，クラスタを小さくすると送受信回数が増加するために，クラスタヘッド間距離が小さくなりすぎると総消費電力が増加している．

4.3 シンクノード近辺の中継を避けることによる性能向上

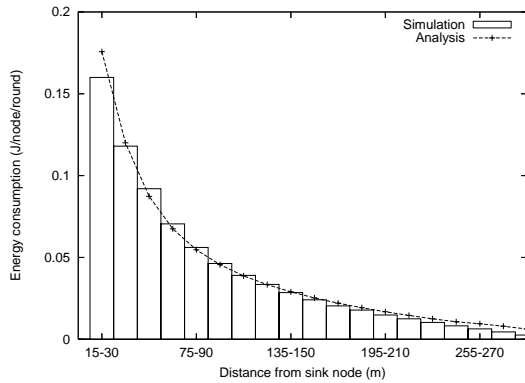
データフュージョンを行わないシステムでは，クラスタヘッド間でマルチホップ通信を行なうと，シンクノードに近づくほどデータが累積されることになる．そのため，シンクノードに近いほどクラスタヘッドになった場合の送受信データ量が多くなり，消費電力が非常に大きくなる．そこで，シンクノードの近傍にあるセンサノードの寿命を延ばすためには，中継の負荷をできるだけ減らすようなルーティングを行なえばよい．つまり，図 5 に示すように，シンクノードから r_{CH} 以内にあるクラスタヘッド間では隣接クラスタに送信するのではなく，直接シンクノードに送信することで無駄な中継を減らすことができる．図 6 に解析とシミュレーション結果を示す．これより，半径 r_{CH} 以内の中継を避けることにより，シンクノード近辺の消費電力を非常に小さく抑えることができることが示された．

5. センサノードあたりのスループットの評価

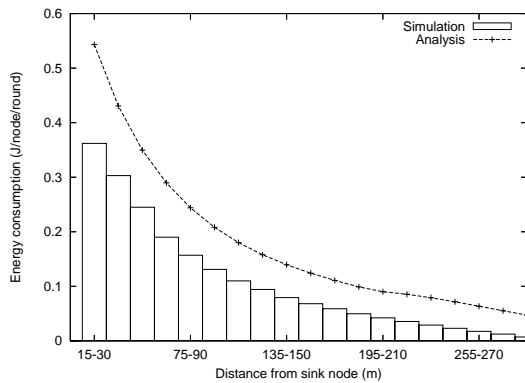
対象としているセンサネットワークでは，シンクノードの受信チャンネルにすべてのパケットが集中するために，その部分が



(a) $r_{CH}=40$ m の場合



(b) $r_{CH}=100$ m の場合



(c) $r_{CH}=200$ m の場合

図3 シンクノードからの距離と平均消費電力の関係

ボトルネックとなる。つまり、シンクノードに直接送信するクラスタヘッドの送信チャンネルが干渉を起こさないような送信スケジュールを行なうことで、そのスケジュール長からセンサノードあたりのスループットを導くことができる。いま、そのようなクラスタヘッドの個数を n_{1hop} とする。

$$n_{1hop} = \frac{\pi r_{CH}^2}{\pi R^2} N_{CH} \quad (10)$$

となる。ここであるひとつのクラスタヘッドに着目する。このクラスタヘッドを中心とした半径 $2r_{CH} + \Delta$ の円内の他のクラスタヘッドからの送信がなければ、シンクノードへの送信が干渉を受けることはない。これらのクラスタヘッドの負荷が同一であると仮定すれば、着目したクラスタヘッドからの送信に関して干渉を起こさないようなスケジュール長 s は、半径

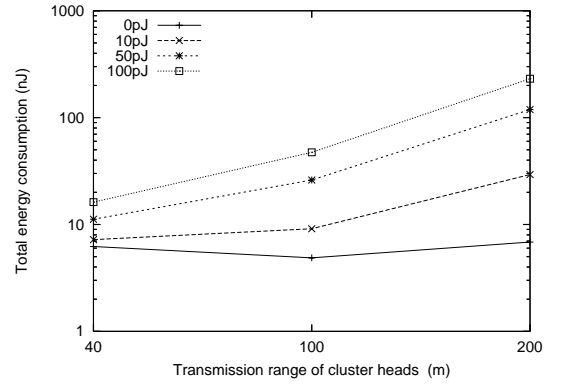


図4 ε_{amp} と総消費電力の関係

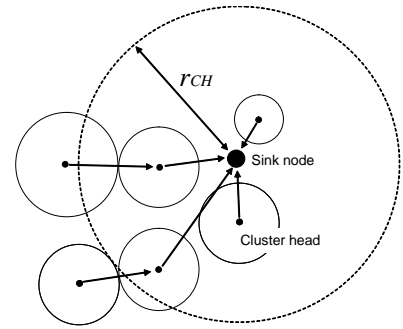


図5 半径 r_{CH} 以内のクラスタヘッドは直接シンクノードへ送信する

$2r_{CH} + \Delta$ 内のクラスタヘッドの個数となるため、

$$s = \frac{\pi(2r_{CH} + \Delta)^2}{\pi R^2} N_{CH} \quad (11)$$

チャンネルの帯域を W 、センサノードあたりのスループットを λ とする。センシングエリア内で発生するすべてのデータは n_{1hop} 個のクラスタヘッドのいずれかを介してシンクノードに送信される。それらの負荷が均等に分散されるとすれば、

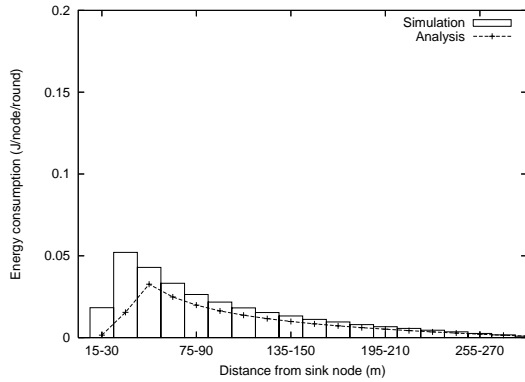
$$\frac{N\lambda}{n_{1hop}} = \frac{W}{s} \quad (12)$$

となる。これらの式より、

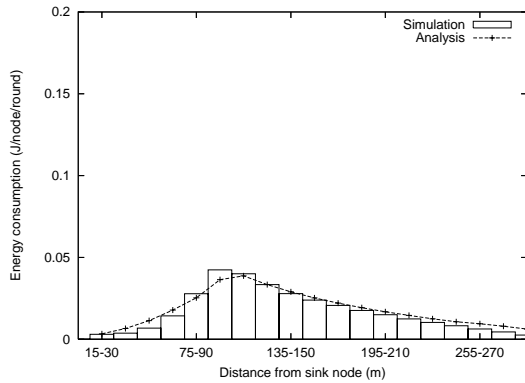
$$\lambda = \frac{W}{4n(1 + \Delta(\frac{1}{r_{CH}} + \frac{\Delta}{4r_{CH}^2}))} \quad (13)$$

となる。

図7に解析およびシミュレーション結果を示す。ここでシミュレーションの結果は、すべてのセンサノードからのパケットが到着するまでの100回分の平均スケジュール長を求め、その逆数をプロットした。併せて標準偏差を示している。単純に内側のクラスタヘッドに中継する場合は Sim-norm で、シンクノードに届く場合は直接送信した場合が Sim-cont である。これらと比較すると、シンクノードに届く場合は中継を行なわないことで、スループットがおよそ2倍に増加することがわかる。また、クラスタ半径が大きくなるほど、スループットの最大値である0.0005(ノード数2000の逆数)に近づくことがわかる。すなわち、スループットと消費電力は、クラスタ半径に関してトレードオフの関係にあることがわかる。一方解析のほうは、半径 $2r_{CH} + \Delta$ の円内の他のクラスタヘッドからの送信



(a) $r_{CH}=40$ m の場合



(b) $r_{CH}=100$ m の場合

図 6 シンクノード近辺の中継を抑制することによる消費電力の削減

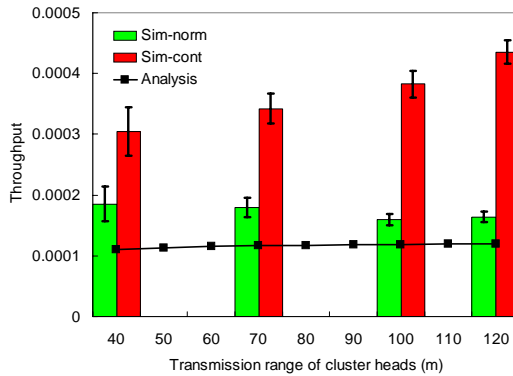


図 7 シンクノード近辺の中継を抑制することによるスループットの向上

を行わないように、干渉に関する制約を安全側にとっているため、実際にはより多くの同時送信が可能である。すなわち、より短いスケジュール長で干渉を避けることができるため、シミュレーションの方がスループットが大きくなっている。

6. まとめ

本研究では、クラスタヘッド間でマルチホップ通信を行なうような大規模なセンサネットワークを対象として、クラスタヘッドの通信距離などのパラメータが、消費電力やスループットに与える影響を解析的に導出した。その結果、クラスタサイズを大きくするほどスループットは向上するが、センサノード

の消費電力は増加するために、ネットワーク寿命が短くなることが明らかとなった。また、シンクノードに1ホップで接続するクラスタヘッドを増やして、シンクノード近辺の負荷を抑えることで、スループットや消費電力が非常に向上することを明らかにした。

今回対象としたモデルでは、すべてのセンサノードは同期しており、TDMAによる通信を行なうことを前提としている。しかしながら実際のシステムでは、このような集中管理を行なうことは現実的ではなく、センサノードの局所的な情報だけで自律分散的な動作を行なう必要がある。その場合には、干渉によるデータの損失が発生する。確実にデータを収集する必要があるアプリケーションの場合には再送が行なわれるため、それによるデータ収集時間や消費電力の増加を評価することは今後の課題である。

謝 辞

本研究の一部は、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] E. J. Duarte-Melo and M. Liu: "Data-gathering wireless sensor networks: Organization and capacity", *Computer Networks*, **43**, 4, pp. 519–537 (2003).
- [2] 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 2000* (2000).
- [3] 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).
- [4] M. Younis, M. Youssef and K. Arisha: "Energy-aware routing in cluster-based sensor networks", *Proceedings of International Workshop on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS 2002)* (2002).
- [5] 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 1st International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services (MobiQuitous 2004)* (2004).
- [6] S. Ghiasi, A. Srivastava, X. Yang and M. Sarrafzadeh: "Optimal energy aware clustering in sensor networks", *Sensors Magazine*, **2**, 7, pp. 258–269 (2002).
- [7] H. Chan and A. Perrig: "ACE: An emergent algorithm for highly uniform cluster formation", *Proceedings of European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN 2004)* (2004).
- [8] O. Younis and S. Fahmy: "Distributed clustering in ad-hoc sensor networks: A hybrid, energy-efficient approach", *Proceedings of INFOCOM 2004* (2004).
- [9] B. J. Cluettepper, L. Dung and M. Moh: "Design and analysis of hybrid indirect transmission (HIT) for data gathering in wireless micro sensor networks", *ACM Mobile Computing and Communications Review*, **8**, 1, pp. 61–80 (2004).
- [10] P. Gupta and P. R. Kumar: "The capacity of wireless networks", *IEEE Transactions on Information Theory*, **46**, 2, pp. 388–404 (2000).
- [11] E. J. Duarte-Melo and M. Liu: "Energy efficiency of many-to-one communications in wireless networks", *Proceedings of IEEE 45th Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS'02)* (2002).