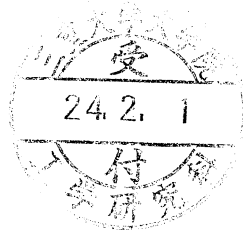


修士論文

周辺ノードの位置情報を用いた移動型 センサネットワーク



平成 23 年度修了
三重大学大学院 工学研究科
博士前期課程 情報工学専攻

長崎 淳

目次

はじめに	1
第1章 センサネットワーク	2
1.1 センサネットワーク	2
1.2 移動型センサネットワーク	4
1.3 想定環境	5
第2章 ノードの移動制御手法	7
2.1 プッシュ型放送を用いた移動制御手法	7
2.2 リレー通信を用いた移動制御手法	9
2.3 理想移動手法	10
第3章 提案手法	11
3.1 周辺ノードの位置情報を用いた移動制御手法	11
3.2 ノードの故障について	12
第4章 シミュレーション実験	13
4.1 実験概要	13
4.2 シミュレーション実験条件	13
4.3 実験結果	15
4.3.1 すべてのノードの消費電力	15
4.3.2 ノードごとの消費電力	15
4.3.3 1サイクルに要する時間	16
4.4 考察	17
第5章 提案手法の改善	18
5.1 改善手法の概要	18
5.2 実験概要	19

目次

5.3	実験結果	20
5.3.1	すべてのノードの消費電力	20
5.3.2	ノードごとの消費電力	22
5.3.3	1サイクルに要する時間	25
5.4	考察	28
5.4.1	すべてのノードの消費電力について	28
5.4.2	ノードごとの消費電力について	28
5.4.3	1サイクルに要する時間について	28
おわりに		29
謝辞		30
参考文献		31

はじめに

近年，無線通信技術の発達やコンピュータの小型軽量化・高性能化が進んでいる．これらの技術を用いて，無線通信機能，計算能力などを持つ小型で安価なセンサノード（以下，ノード）が開発されている．さらに近年のロボット技術の発展により，ノード自身が自律的に移動する移動型センサネットワークが注目を集めている．センサネットワークでは複数の分散配置されたノードがセンシングを行い，取得したセンシングデータをマルチホップ通信を用いて基地局に収集する．また，移動型センサネットワークではノードがセンシング機能・無線通信機能に加えて移動能力を持っているため，広範囲でのセンシングやセンサを直接設置することが困難な場所でのセンシングが可能となる．そのため，広範囲での環境モニタリングや動植物の生態調査，未開地のデータ収集，災害現場や汚染地域などの人が近づくことが困難な場所でのデータ収集などへの応用が期待されている．

移動型センサネットワークは通常，少ないノードから構成される疎なネットワークとなり，他ノードと通信を行うためには移動が必要となる．そのため，移動型センサネットワークでは移動及び通信に要する電力を削減することが課題となっている．従来，あらかじめノードが移動するルートを設定しておき，ノード間でデータをリレーする手法が提案されてきた [1]．しかし，まだルール上への移動のために移動距離が大きい，センシング行動に要する時間が大きいという課題がある．

本研究では，センシングにおける 1 サイクル目を周辺ノードの初期位置情報取得のために使用し，2 サイクル目以降は初期位置を取得したノードと通信可能になる位置まで移動することで移動距離を削減する手法を提案する．

本稿では，第 1 章でセンサネットワークについて述べる．第 2 章でノードの移動制御方式について述べる．第 3 章で提案するノードの移動制御方式について述べる．第 4 章でシミュレーション実験及びその評価について述べる．第 5 章でさらに提案手法の改善を行ったノードの移動制御方式について述べる．第 6 章でシミュレーション実験及びその評価について述べる．

第 1 章

センサネットワーク

本章では，1.1 節においてセンサネットワークについて述べる．1.2 節において本研究で対象とする移動型センサネットワークについて述べる．1.3 節において本研究における移動型センサネットワークの想定環境について述べる．

1.1 センサネットワーク

センサネットワークとは，対象とする領域にセンシング機能と無線通信機能を持つセンサノードを分布させ，各センサノードが取得した環境データを基地局に収集するためのネットワークである．図 1 に示すように，センサネットワークでは，分散配置されたセンサノードが周辺をセンシングし，複数のセンサノードを介してマルチホップ通信を行うことにより，広範囲でデータを共有することが可能になる．また，広範囲のセンサネットワークでは，通信の負荷を軽減するため，シンクと呼ばれる特別なノードが存在し，センサノードが領域内で観測したデータはシンクに集められる．図 1 では観測者や基地局がシンクとなる．シンクで集められたデータが融合・加工 (センサフュージョン) され，冗長性が取り除かれたデータが基地局まで伝送される．

センサネットワークは様々な分野に応用されており，医療・健康，防犯・セキュリティ，防災，環境リスクの対応，農産物などの各種生産過程の観測などの分野が実用例として挙げられる．また，Mote[2] に代表されるセンサノードのハードウェアもいくつも開発が行われている．センサノードの例を図 2,3,4 に示す [2][3][4]．今後もセンサネットワークは，いつでも，どこでも，誰でも様々なサービスを受けることができるユビキタス社会を実現するために，重要な技術だと考えられている．

しかし，センサネットワークには様々な技術的な課題がある．特に電池で駆動するセンサノードにおいて，消費電力を削減し，長期間動作させることが重要だと考えられている．そのため，長期間のセンシングを行うためには，消費電力を削減することが重要な課題であり，様々な研究がなされている．

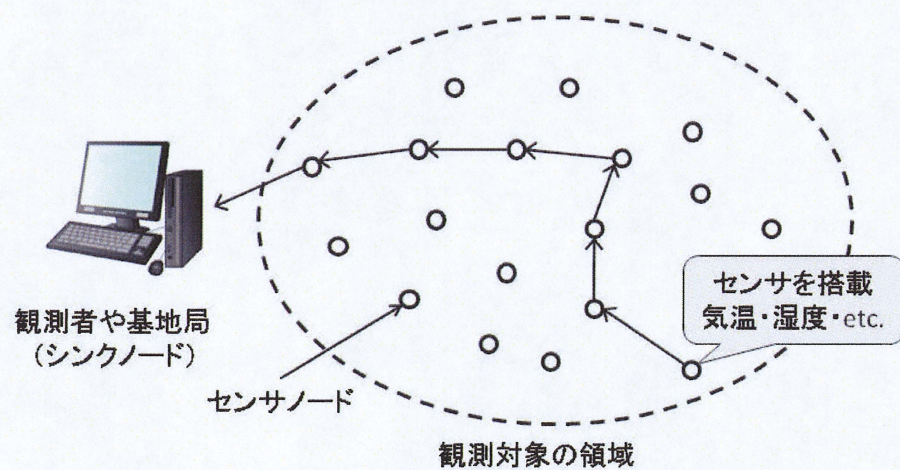


図1 センサネットワーク

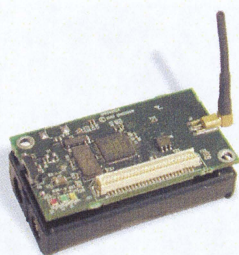


図2 MICAz



図3 フィールドサーバ



図4 SunSPOT

1.2 移動型センサネットワーク

センサネットワークの中でも、近年のロボット技術の発展により、移動型センサネットワークが注目を集めている。移動型センサネットワークとは、移動能力を持つセンサノード（以下、ノード）によって構成されるセンサネットワークである。移動型センサネットワークも通常のセンサネットワークと同様、分散配置されたノードがセンシングを行い、複数のノード介してマルチホップ通信を行うことにより、広範囲でデータを共有することが可能となる。文献 [5] では、ノードが移動可能であることを利用して、ノード同士でセンシングされていない位置に関する情報を交換し、観測領域の穴を埋めるために協調動作をさせる研究が行われている。また、文献 [6] では実際に Robomote と呼ばれる実機のノードを用いて検証を行っている。

移動型センサネットワークでは、通常のノードが固定されたセンサネットワークと比較して、以下のような特徴を持つ。

- ノードの初期配置を深く考慮する必要が無い

通常のセンサネットワークでは、観測対象やセンシングデータや使用するノードの種類や個数を考慮してノードの配置場所を決定し、その決定した場所に正確にノードを配置する必要がある。ノードが正確な位置に配置されていないと、センシング不可能な領域の発生、電波が混信、電波が届かないために通信不可能なノードが発生するなどの問題が生じる。移動型センサネットワークでは、ノードの配置後に問題が生じてても、センシング領域を移動することで解決することが容易である。

- センシング要求の変化に柔軟に対応できる

通常のセンサネットワークでは、ノードが固定されているため、センシングする場所の変更が要求された場合、ノードの再配置、もしくは新たなノードを追加する必要がある。移動型センサネットワークでは、ノードが移動することでセンシング地点を自由に変更することができる。

- ノードの配置が困難な場所でもノードを配置可能

通常のセンサネットワークでは、災害現場や汚染地域、未開地のような人が近づけないような場所に固定ノードを設置することは非常に困難である。移動型センサネットワークでは、ノードが自律的もしくは遠隔操作で移動することにより、配置困難な場所でもセンシングを行うことができる。

- 自律的な電力供給が可能

センサネットワークではノードに搭載されたバッテリーには電力容量に限界があるため、長期間継続してセンシングを行うために、ノードに電力を供給する場合がある。通常のセンサ

ネットワークの場合、移動可能なノードが固定ノードに電力を供給する手法 [7] もある。しかし、広範囲でセンシングを行っている場合、すべてのノードを探索し、電力供給することは困難である。移動型センサネットワークの場合、ノードが自律的に電力供給源に移動することで、全てのノードが自動で電力供給をすることが可能である。

- ノード回収が容易に可能

広範囲にノードが配置された環境では、全てのノードを回収して再利用することは困難である。しかし、移動型センサネットワークの場合、利用終了後、一箇所に集めることで回収することが容易に可能なため、再度別の環境で利用することができる。

移動型センサネットワークは通常のセンサネットワークと比較して優れている点が多く、更に多様な環境への適用が期待されている。移動型センサネットワークでは、通常のセンサネットワークにおいて課題とされた消費電力を考慮すると同時に、移動に要する消費電力も考慮する必要がある。また、ネットワーク全体の寿命を延ばすため、消費電力の隔たりが少ないことが望まれている。

1.3 想定環境

本研究における移動型センサネットワークの想定環境を図 5 に示す。センシング領域には 1 つの基地局と複数の移動可能なセンサノードが存在する。各ノードは基地局の位置と自身のセンシング地点、全ノード数は既知であり、自身の位置情報をリアルタイムで取得可能な場合を想定する。また、本研究では簡単化のため、センシング途中のノードの追加・削除は存在せず、観測領域内のノード数は常に一定とする。

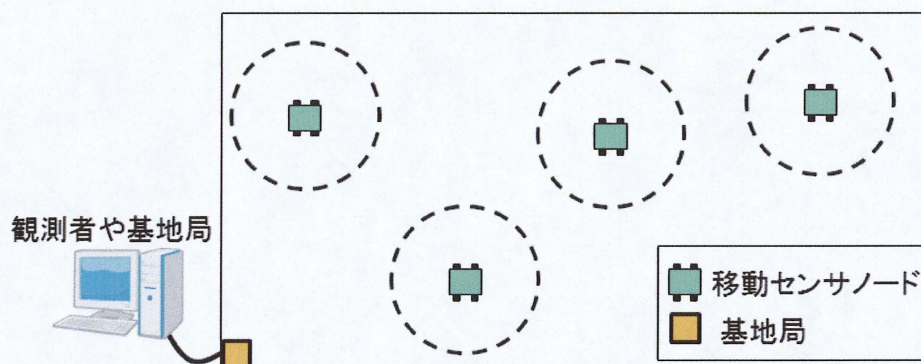


図 5 移動型センサネットワークの想定環境

本研究では以下の動作をセンシング行動における 1 サイクルとして定義する。この動作を繰り返し行うことでセンシング領域のセンシングを行う。

1. データ収集フェーズ

データ収集フェーズでは、ノードはセンシング地点の情報を収集する。本研究では、データ収集のために移動することは考慮していない。

2. データ転送フェーズ

データ転送では、収集したデータを基地局もしくは他ノードへ転送する。データを受信したノードは、自身が収集したデータと受信したデータの両方を基地局もしくは他ノードへ転送する。これを繰り返すことで、すべてのノードが収集したデータを基地局で収集する。

3. 帰還フェーズ

データ転送が終了した後、ノードはセンシング地点へ移動する。全てのノードがセンシング地点へ帰還した時点でセンシング行動における 1 サイクルの終了とする。

この方式は一定時間ごとにデータを収集するタイプの移動型センサネットワークを想定している。そのため、例えば農場の家畜や農作物に関するデータ収集や環境モニタリングなどに利用できると考えられる。

第2章

ノードの移動制御手法

本章では、本研究と関連のある従来研究について述べる。2.1 節においてプッシュ型放送を用いた移動制御手法について述べる。2.2 節においてリレー通信を用いた移動制御手法について述べる。2.3 節において移動電力が最も小さくなる理想移動手法について述べる。2.4 節において提案手法について述べる。リレー通信を用いた移動制御手法、理想移動手法、提案手法ではプッシュ型放送を用いた移動制御手法とは異なり、ノードの搭載メモリに制限がないと仮定した上で消費電力の削減を図っている。

2.1 プッシュ型放送を用いた移動制御手法

文献 [8] では、プッシュ型放送を用いた移動制御手法 (以下, SR 手法) が提案されている。SR 手法の例を図 6 に示す。SR 方式では、各ノードはデータ収集後、基地局とマルチホップ通信が可能となる位置までセンシング領域を移動し、基地局へデータを転送する。この時、SR 手法では基地局とマルチホップ通信が可能なネットワーク (以下, 収集ネットワーク) が形成される。基地局はセンシング領域内に存在するノードに対して、現在の収集ネットワークの構成 (位置情報) をブロードキャストする。各ノードは放送された情報に基づき、収集ネットワークに参加しているノードの中で、最も距離が近いノードと通信可能となる位置に目的地を設定する。これにより、各ノードが最短経路で収集ネットワークに参加できるように目的地を随時更新することにより、移動に要する電力を削減することができる。

SR 手法では、プッシュ型放送により、各ノードは収集ネットワークの構成に基づいて目的地の更新を行う。しかし、実際の環境下では障害物などにより放送が届かない可能性がある。その場合、この手法がうまく機能せず、性能が低下すると考えられる。

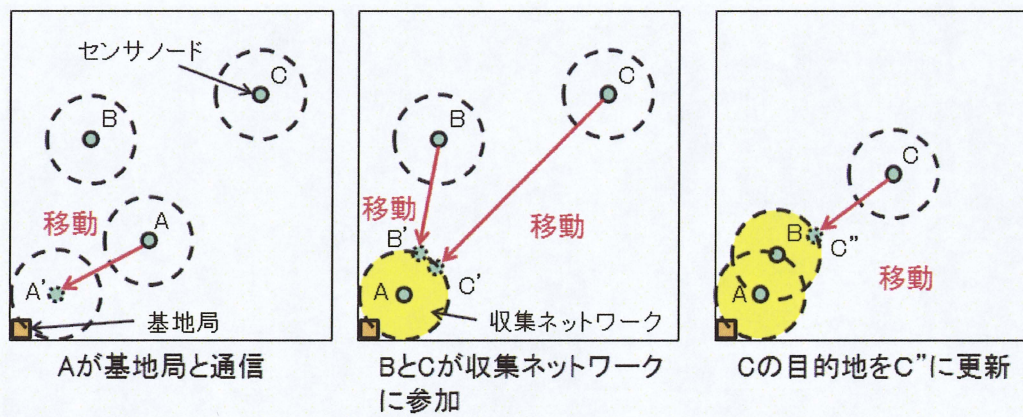


図 6 SR 手法の例

2.2 リレー通信を用いた移動制御手法

リレー通信を用いた移動制御手法 [1] とは、あらかじめ仮想的なレールを設定しておき、そのレール上でデータをリレーすることにより消費電力を削減する手法である。リレー通信を用いた移動制御手法の例を図 7 に示す。この手法では、あらかじめパラメータとしてレール数 R をノードに設定する。ノードは保持しているレール数 R とセンシング領域の大きさにより、自身の位置情報から最も近いレールを計算し、所属レールを決定する。ここで、基地局の位置を原点とし、センシング領域の大きさは対角となる頂点の位置情報をノードに設定しておくことで一意に定めることができる。ノードは所属レールに対して垂直に最短距離で移動し、レールへ移動中における隣接ノードとの通信は考慮しない。レール間の角度 θ はセンシング領域を等角度で分割を行うため、レール数 R を用いて $\theta = \pi/2(R+1)$ と表される。

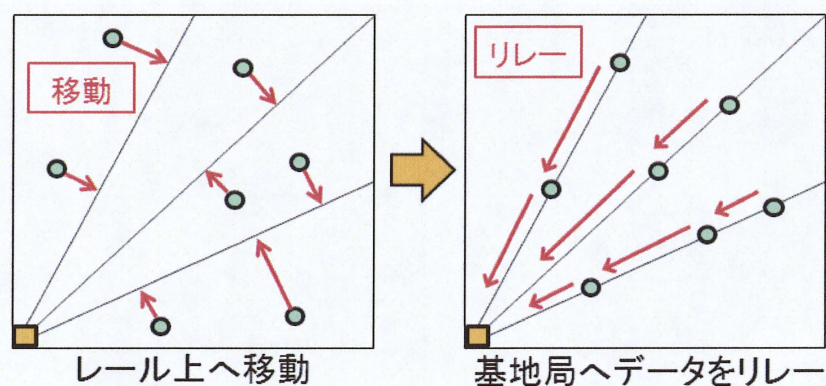


図 7 リレー通信を用いた移動制御手法の例

2.3 理想移動手法

理想移動方式とは，すべてのノードの配置を既知として，最も移動に要する電力が小さくなるようにノードの移動ルートを設定する手法である．ノードの配置が確定的な場合にのみ可能となる方式であるが，ノードを配置することに手間がかかったり，各ノードに異なる移動ルートを設定したりする必要がある．また，ノードが故障や離脱した時にはノードの移動ルートを再設定する必要があるため，実現性が低い問題がある．移動距離が最小となる方式として，文献 [1] でも比較に使用していたため，本研究にも提案手法との比較に用いる．移動電力が最も小さくなるのは，ノード間距離をコストとして，最小全域木 (MST: Minimum Spanning Tree) を構築するようにノードが移動する場合である．今回，最小全域木を構築するためにプリム法を使用した．構築された最小全域木の例を図 8 に示す．点がノード，線がデータを受け渡すノードのペアを表している．

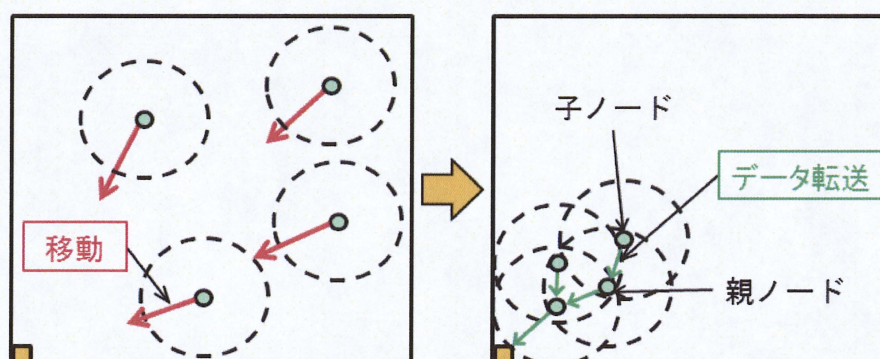


図 8 最小全域木の一例

第3章

提案手法

本章では、周辺ノードの初期位置情報を用いた移動制御手法を提案し、その概要を説明する。3.1節において提案手法の概要について述べる。3.2節においてノードが故障した時について述べる。

3.1 周辺ノードの位置情報を用いた移動制御手法

SR手法では、実際の環境下では障害物等の影響によりすべてのノードがプッシュ型放送を受信できる保証はない。また、基地局から遠いノードほど消費電力が大きくなる傾向があるため、消費電力に隔たりができるため好ましくない。リレー通信を用いた移動制御手法では、SR手法と比較して大きく消費電力を削減できているが、センシング行動に要する時間が大きい課題がある。また、設定するレール数により、基地局付近のノードへの負荷が増加する課題もある。本研究では、センシング行動における1サイクル目を周辺ノードの初期位置情報取得のために使用し、2サイクル目以降は周辺ノードと通信を行うことで移動に要する電力を削減する手法を提案する。1サイクル目及び2サイクル目以降の動作の例を図9,10に示し、以下に動作の概要を示す。

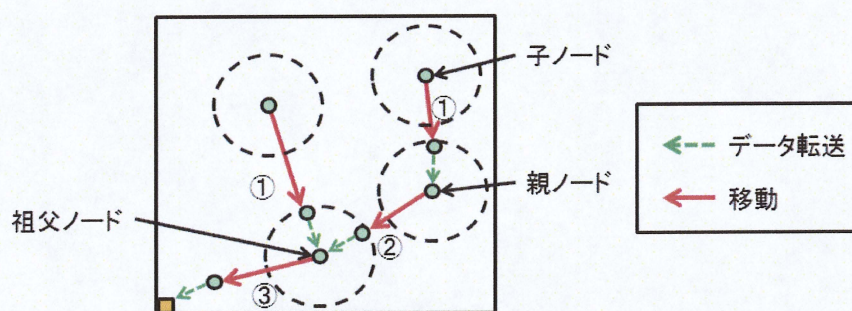


図9 1サイクル目

<1サイクル目>

1. センシング地点のデータを収集する。
2. 基地局とマルチホップ通信が可能となる位置まで基地局方向へ移動する。この時、基地局とマルチホップ通信が可能なネットワーク（以下、収集ネットワーク）が形成される。

3. 収集ネットワークに参加中のノードは、自身が収集したデータを基地局へ送信する。この時、データを送信しているノード（子ノード）は受信中のノード（親ノード）の初期位置情報を取得する。親ノードは子ノードの情報を記録する。
4. すべてのノードが収集ネットワークに参加し、収集したデータを基地局に転送が完了するまでは、自身の収集データの送信及び中継データの送信が完了していてもその場で待機する。
5. 基地局へすべてのノードの収集データが転送されたことが、基地局からの制御メッセージにより分かると、ノードは自身のセンシング地点へ帰還する。

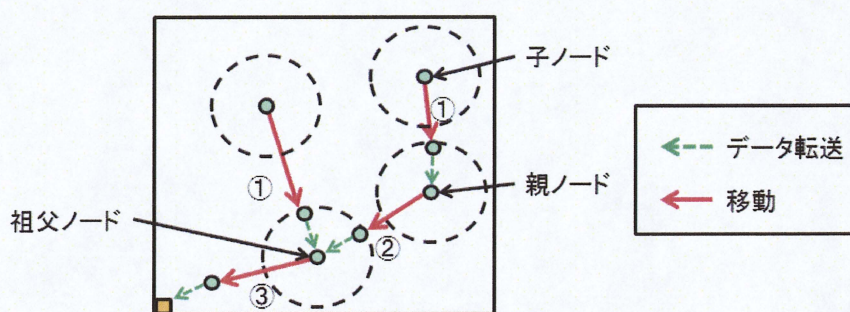


図 10 2 サイクル目以降

＜2 サイクル目以降＞

1. センシング地点のデータを収集する。
2. 子ノードのいないノードから移動を開始する。子ノードは1サイクル目で初期位置情報を取得した親ノードと通信可能となる位置へ移動し、データ転送を行う。また、親ノードは記録したすべての子ノードのデータを受信後、祖父ノードと通信可能となる位置へ移動し、データ転送を行う。
3. 収集データの送信が終了したノードは、センシング地点へ帰還する。

3.2 ノードの故障について

本研究では、ノードに故障がなく常に動作する想定をしている。提案手法において、1 サイクル目の収集ネットワークを形成する際、もしくは2 サイクル目以降の子ノードと接続をする際にノードが通信に来るまで待ち続ける。ノードが故障等により、収集ネットワークに参加できなくなった場合や親ノードと通信ができなくなった場合、データ収集フェーズからデータ転送フェーズへ移行できず、センシング行動が不可能になる。そこで、故障等に対処するためには、ノードの待ち時間に制限を設定し、データ転送フェーズを終了させる方法が考えられる。

第 4 章

シミュレーション実験

本章では，提案手法の有効性を示すための実験について述べる．6.1 節においてシミュレーション実験の概要について述べる．6.2 節においてシミュレーション条件について述べる．6.3 節において実験の結果について述べる．6.4 節において実験の考察について述べる．

4.1 実験概要

提案手法の有効性を示すために，シミュレーションによる比較実験を行う．Java 言語を用いてシミュレータを作成し，以下の移動制御手法を実装し，比較実験を行った．

- リレー通信を用いた移動制御手法 (Relay)
- 理想移動手法 (Move-ideal)
- 提案手法 (1 サイクル目:Proposed-1cycle, 2 サイクル目以降:Proposed-2cycle)

2.1 節で紹介した SR 手法は文献 [1] において，リレー通信を用いた移動制御手法と比較してセンシング行動に要する時間は短い，消費電力が非常に大きい結果となっている．そのため，本研究では評価対象としなかった．また，リレー通信を用いた移動制御手法において，パラメータであるレール数 R はすべてのノード数に対して最も消費電力が小さくなる時のものを用いる．

4.2 シミュレーション実験条件

シミュレーションで用いたパラメータを表 1 に示す．センシング領域は二次元平面とし，障害物等はなく，ノードの移動速度はすべてのノードで等しい．ノードは GPS 等により，自身の位置情報を把握できる．また，ノードはデータの送受信中に移動しないものとした．各ノードのセンシング地点はランダムに選び，1 回のシミュレーションごとに新しい配置でシミュレーションを行う．

ノードの移動コストは $1[\text{J}/\text{m}]$ ，データの送信コストを $(k \cdot 50) + (0.1 \cdot k \cdot d^2)[\text{nJ}]$ ，受信コストを $k \cdot 50 [\text{nJ}]$ とそれぞれモデル化した．ここで， k は送受信されるデータ量 $[\text{bit}]$ ， d は送信距離 $[\text{m}]$ を表す．なお，移動コストは文献 [9]，送信コスト及び受信コストは文献 [10] に示されるモデルを適用した．ノードの移動や通信以外に要する消費電力は，移動コストや通信コストと比較して非常に小さいとして考慮しない．

表 1 シミュレーション実験のパラメータ

パラメータ	パラメータ
センシング領域	2000 × 2000 [m]
基地局の位置	領域の角
ノード数	10 – 600
移動速度	1 [m/s]
通信可能距離	50 [m]
通信速度	2 [Mbit/s]
シミュレーション回数	500 回
1 回のセンシングで発生するデータ	5 [Mbit]

それぞれの手法について，以下の項目で評価を行う．

- すべてのノードの消費電力
すべてのノードの移動及びデータの送受信に要する電力の合計の平均値である．
- ノードごとの消費電力
各ノードの移動及びデータの送受信に要する電力である．
- 1 サイクルに要する時間
センシング行動の 1 サイクルに要する時間である．

4.3 実験結果

4.3.1 すべてのノードの消費電力

ノード数を変化させた時のすべてのノードの消費電力の結果を図 11 に示す。

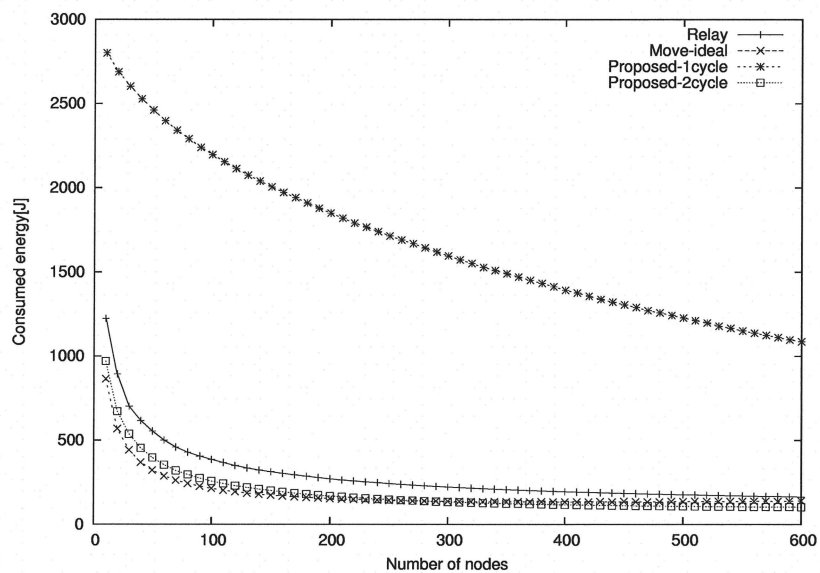


図 11 ノードの消費電力

4.3.2 ノードごとの消費電力

ノード数が 400 個の時のノードごとの消費電力の結果を図 12 に示す。ここで、グラフの横軸は Node ID が小さいほど基地局からの距離が近く、大きいほど基地局から遠いことを表す。

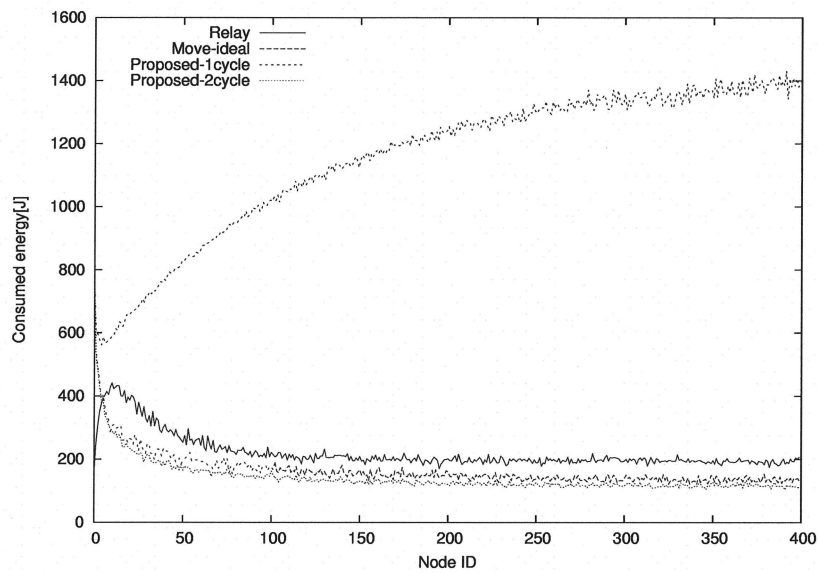


図 12 ノードごとの消費電力 (ノード数:400)

4.3.3 1 サイクルに要する時間

ノード数を変化させた時の 1 サイクルに要する時間の結果を図 13 に示す。

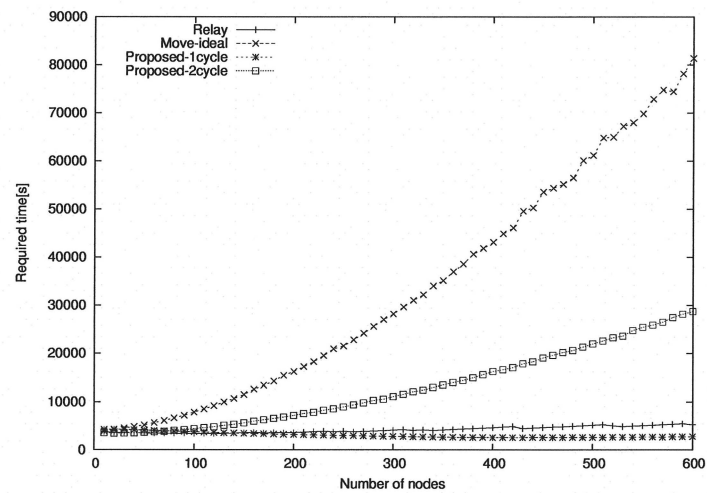


図 13 1 サイクルに要する時間

4.4 考察

すべてのノードの消費電力について、提案手法の1サイクル目が従来手法と比較して非常に大きくなったが、提案手法の2サイクル目以降において消費電力を6割程度削減できている。また、提案手法の2サイクル目以降は理想移動手法と同程度まで消費電力を削減できおり、ノード数が300以上の時、理想移動手法よりも削減ができている。これは1サイクル目に位置情報を取得した周辺ノードが、移動距離を短くすることができるノードを選択できているためと考えられる。

どの手法についてもノード数が増加するに従って、ノードの消費電力が低下している。これはノードの分布密度が低い時は、基地局もしくは他ノードと通信を行うためにノードが長距離の移動するため、移動に要する電力が増大しているためと考えられる。ノードの分布密度が高い時は、長距離を移動しなくても基地局もしくは他ノードと通信可能となり、移動に要する電力が削減できているためと考えられる。

ノードごとの消費電力について、すべてのノードの消費電力と同様、提案手法の1サイクル目の消費電力が他の手法と比較して非常に大きくなった。1サイクル目では基地局とマルチホップ通信可能な収集ネットワークを形成するため、基地局から遠いノードほど消費電力が大きくなっている。しかし、2サイクル目以降では、従来手法と比較して消費電力を6割程度削減できている。また、どの手法についても基地局付近のノードの消費電力が高くなっている。これは遠くのノードから送られてきた大量の収集データが集中して集められるためと考えられる。リレー通信を用いた移動制御手法だけ基地局付近の消費電力が高くなるノードの位置が異なっている。これは基地局付近に近いノードがレールに対して少なく、データを基地局までリレーするために移動する距離が大きくなっていると考えられる。

1サイクルに要する時間について、提案手法の1サイクル目はマルチホップ通信により基地局へデータを送信しており、収集データのリレーを行っている他の手法と比較して所用時間が小さくなっている。理想移動手法は他の手法と比較して、最も所要時間が大きくなっている。これは移動距離を最短になるように収集データを渡すノードを決定したため、中継するノード数が増加している、あるいは収集データを自身より基地局から遠いノードへ渡しているなどの可能性が挙げられる。提案手法の2サイクル目以降でも、1サイクルに要する時間が理想移動手法ほどではないが長くなっている。これも理想移動手法と同様、中継するノード数の増加が原因として考えられる。

提案手法の2サイクル目以降は従来手法と比較して消費電力を6, 7割程度削減できているが、1サイクル目に要する消費電力が非常に大きい。そのため、十数回以上センシングサイクルを繰り返すような観測を行う場合、提案手法は従来手法よりも消費電力を抑えてセンシングを行うことができる。

第 5 章

提案手法の改善

本章では，提案手法の 1 サイクル目における消費電力が非常に大きかったため，その問題点を改善するための手法について述べる．4.1 節において改善手法の概要について述べる．4.2 節において実験概要について述べる．4.3 節において実験の結果について述べる．4.4 節において実験の考察について述べる．

5.1 改善手法の概要

提案手法では，周辺ノードの位置情報を取得するための 1 サイクル目に要する消費電力が非常に大きい問題があった．そこで，基地局からの距離に応じたタイマーにより移動開始時刻を遅らせる手法（以下，提案手法 2 と呼ぶ）を提案する．各ノードのタイマーは，基地局までの距離 D_x に応じて決定し，基地局から遠いノードほど早く移動開始するように設定する．移動を開始したノードは移動中に通信範囲内へ入った待機中のノードもしくは移動中のノードへ収集データを送信する．移動中のノード同士が通信範囲内に入った場合，ノードは移動を停止し，初期位置が基地局から遠いノードが近いノードへ収集データを送信する．親ノードはデータを受信した後，移動を再開する．また，基地局とマルチホップ通信可能になったノードは，第 3 章で説明した提案手法（以下，提案手法 1 と呼ぶ）の 1 サイクル目と同様に収集ネットワークを形成する．収集ネットワークを形成しているノードは，すべてのノードの収集データが基地局へ転送されたことが基地局からの制御メッセージにより分かると，自身のセンシング地点へ帰還する．データを送信する際，提案手法 1 と同様に，データを送信しているノード（子ノード）は受信中のノード（親ノード）の初期位置情報を取得する．親ノードは子ノードの情報を記録する．2 サイクル目以降の動作は 1 サイクル目に取得した周辺ノードの初期位置情報を用いて，提案手法 1 と同様の動作を行う．

上記の動作に提案手法 1 を改善することで，1 サイクル目に周辺ノードの初期位置情報を取得するために要する消費電力を削減できると考えられる．

5.2 実験概要

提案手法 2 の有効性を示すために、シミュレーションによる比較実験を行う。

以下の移動制御手法を実装し、比較実験を行った。

- リレー通信を用いた移動制御手法 (Relay)
- 理想移動手法 (Move-ideal)
- 提案手法 1 (1 サイクル目:Proposed-1cycle, 2 サイクル目以降:Proposed-2cycle)
- 提案手法 2 (Proposed2)

センシング領域における最も基地局から遠い位置までの距離を D_{max} [m], 基地局から各ノードの位置を D_x [m] と表し, 提案手法 2 における各ノードのタイマー T_x [s] の設定方法を以下に示す. センシング領域における最も基地局から遠い位置とは, 基地局が領域の角であるため, その対角となる位置となる.

- $T_x = (D_{max} - D_x) \times 0.9$ (Proposed2-a)
- $T_x = (D_{max} - D_x)^{0.9}$ (Proposed2-b)
- $T_x = D_{max} - D_x$ (Proposed2-c)
- $T_x = (D_{max} - D_x) \times 1.1$ (Proposed2-d)
- $T_x = (D_{max} - D_x)^{1.1}$ (Proposed2-e)

実験条件及びパラメータは 4.2 節及び表 1 の説明と同様として実験を行う. また, 4 章での実験と同様に, すべてのノードの消費電力, ノードごとの消費電力, 1 サイクルに要する時間の項目で比較を行う.

5.3 実験結果

5.3.1 すべてのノードの消費電力

ノード数を変化させた時のすべてのノードの消費電力の結果を図14,15,16,17,18に示す。

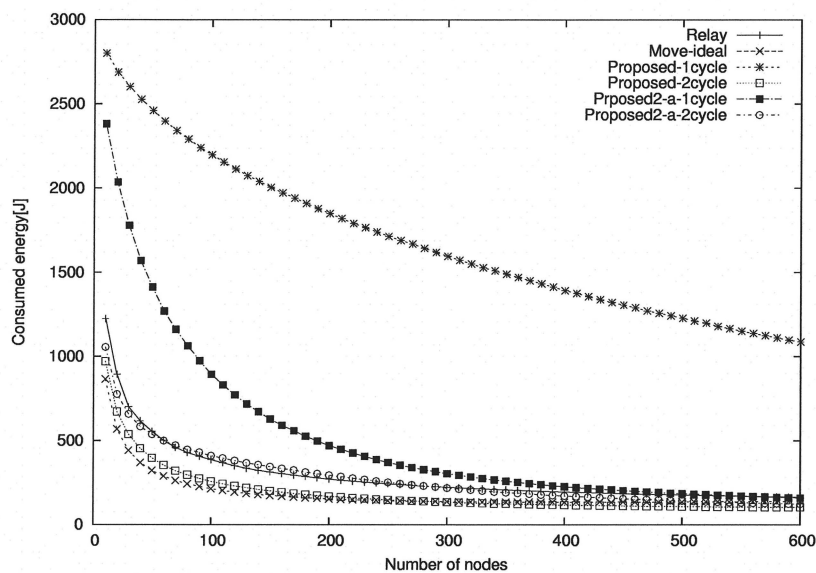


図14 すべてのノードの消費電力 (a)

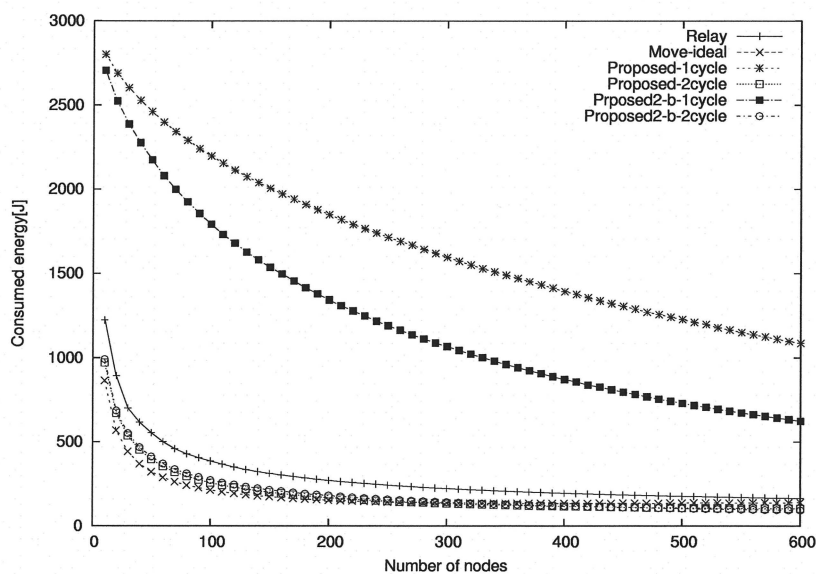


図15 すべてのノードの消費電力 (b)

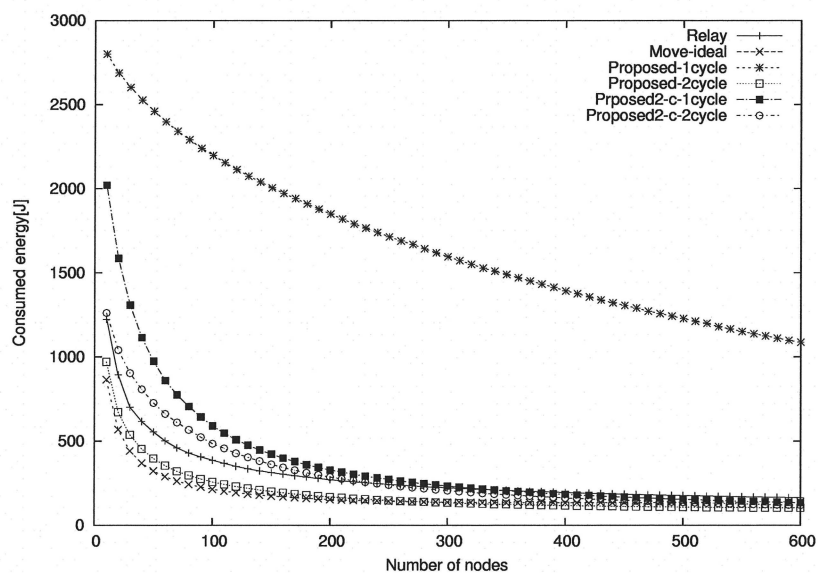


図 16 すべてのノードの消費電力 (c)

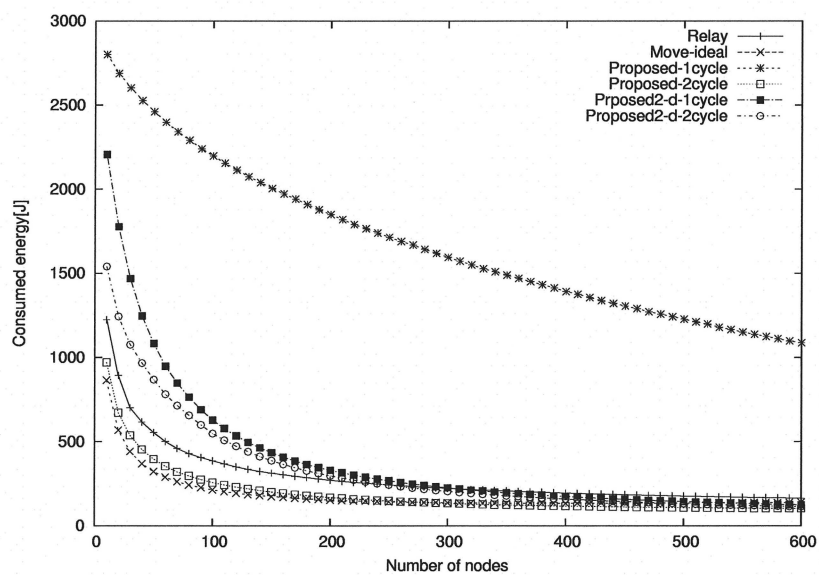


図 17 すべてのノードの消費電力 (d)

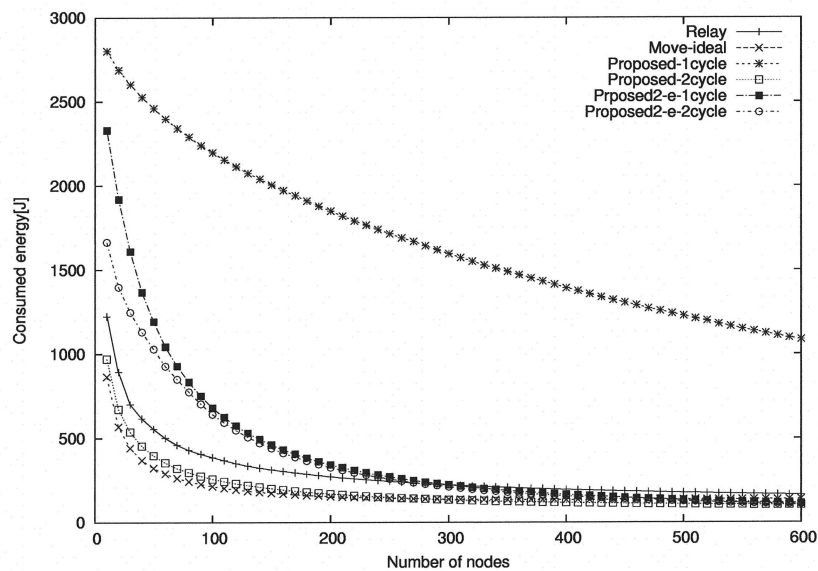


図 18 すべてのノードの消費電力 (e)

5.3.2 ノードごとの消費電力

ノード数が 400 個の時のノードごとの消費電力の結果を図 19,20,21,22,23 に示す。ここで，グラフの横軸は基地局からの距離が近いほど Node ID の小さく，遠いほど大きいことを表す。

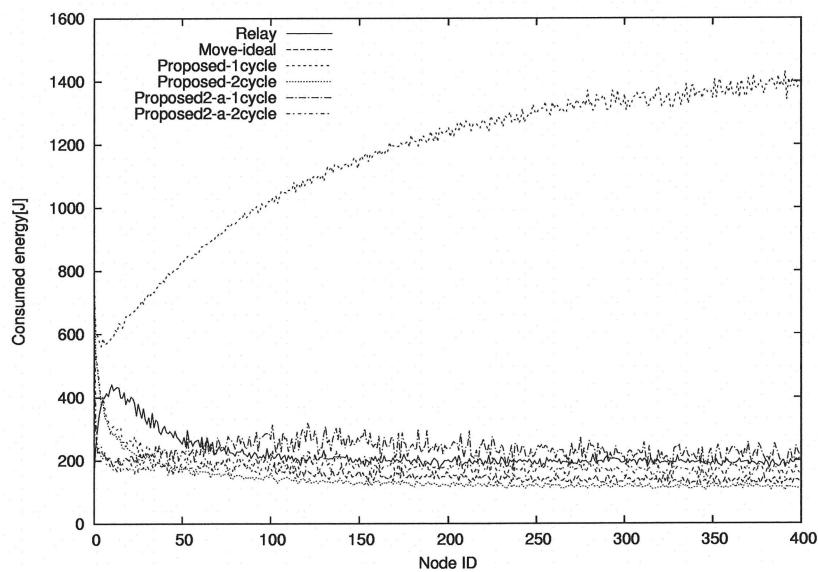


図 19 ノードごとの消費電力 (ノード数:400)(a)

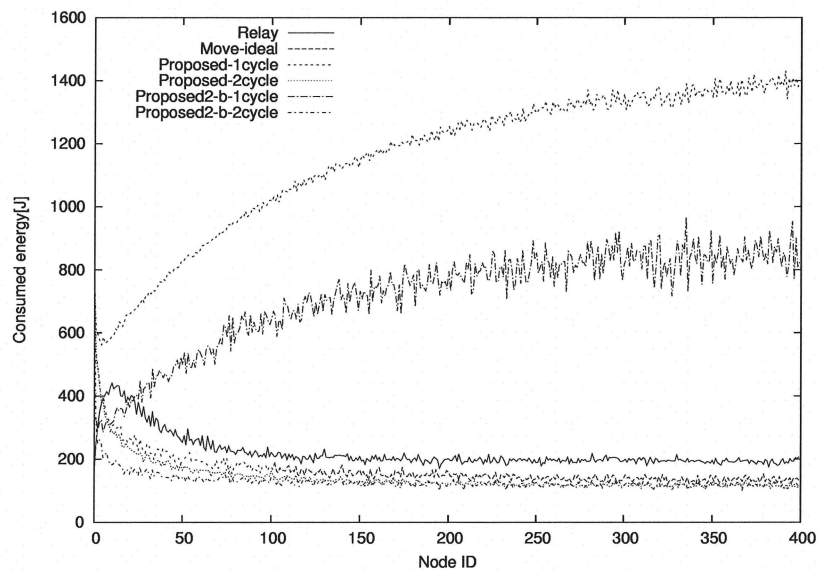


図 20 ノードごとの消費電力 (ノード数:400)(b)

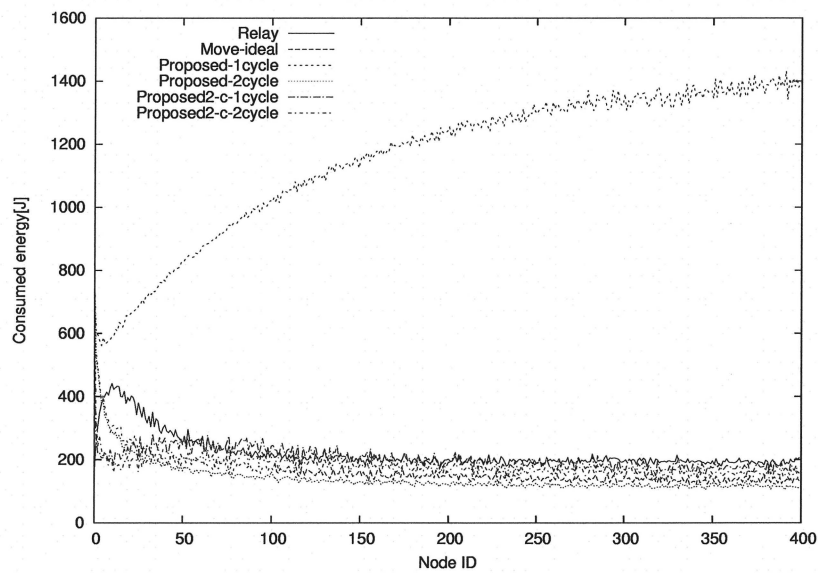


図 21 ノードごとの消費電力 (ノード数:400)(c)

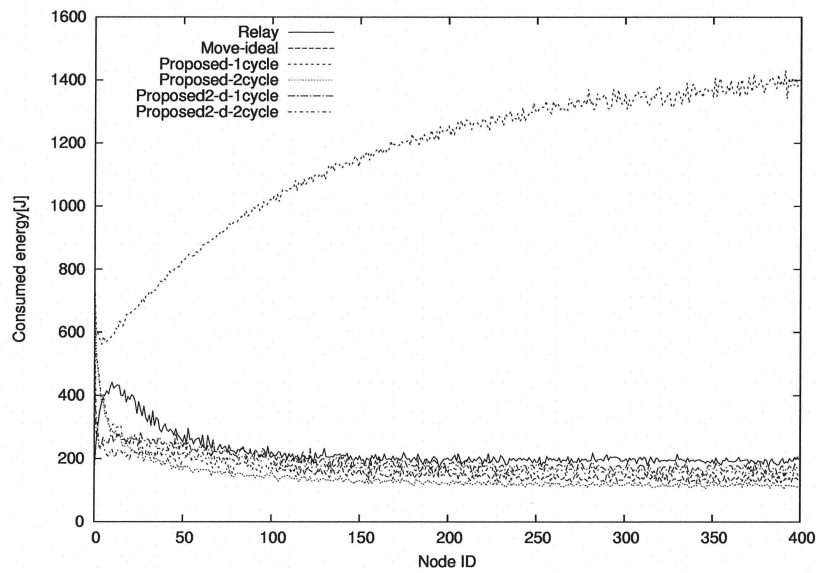


図 22 ノードごとの消費電力 (ノード数:400)(d)

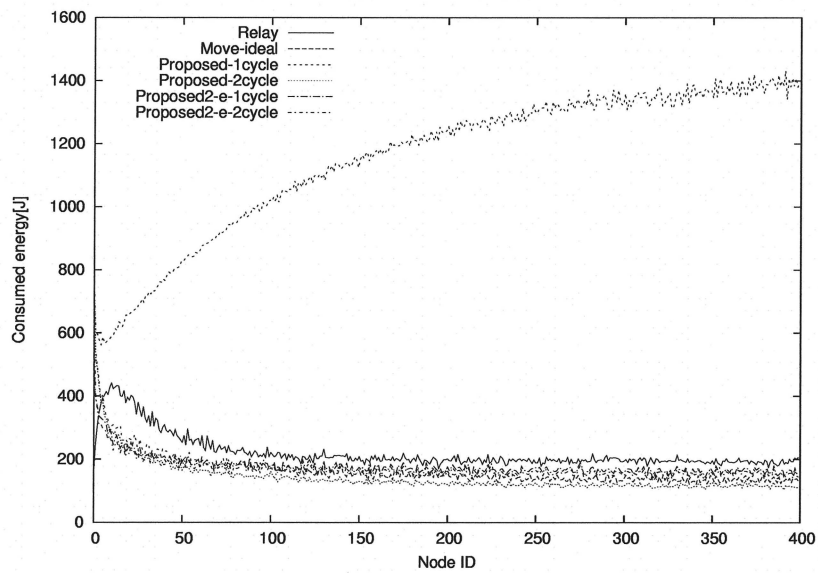


図 23 ノードごとの消費電力 (ノード数:400)(e)

5.3.3 1 サイクルに要する時間

ノード数を変化させた時の1サイクルに要する時間の結果を図24,25,26,27,28に示す。

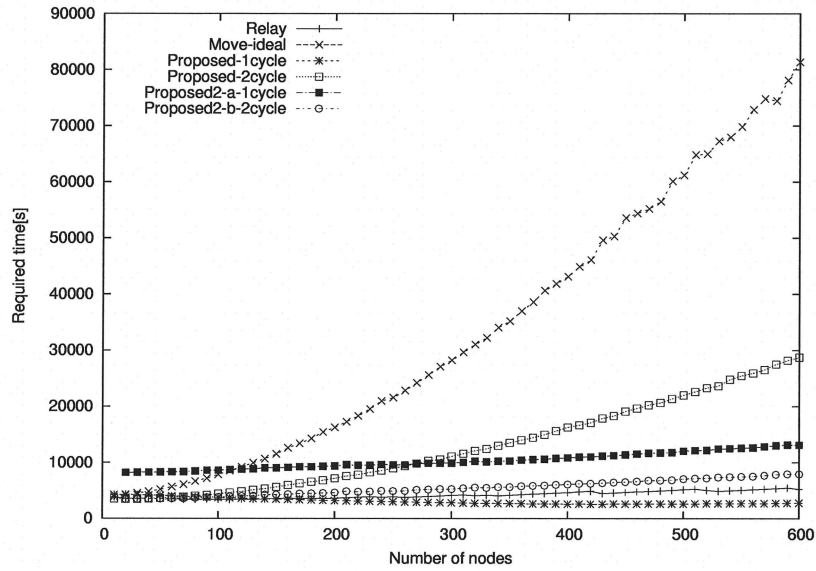


図24 1 サイクルに要する時間 (a)

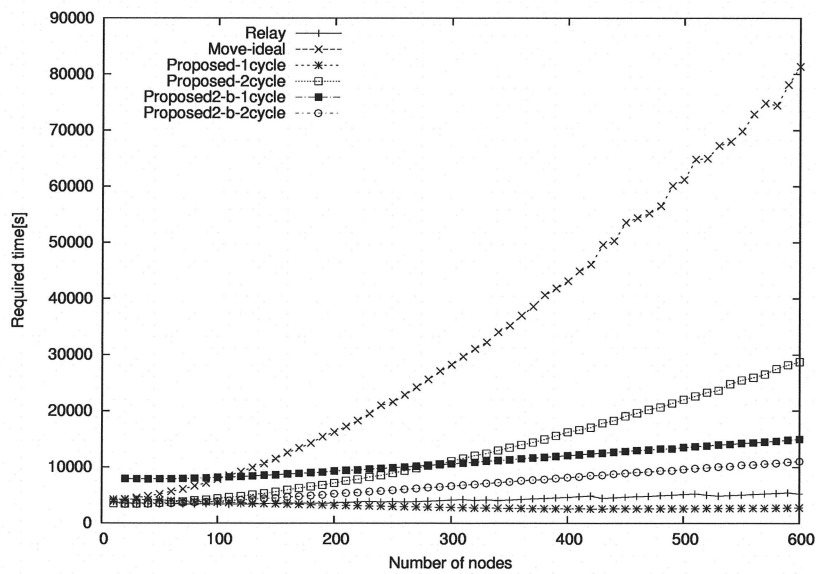


図25 1 サイクルに要する時間 (b)

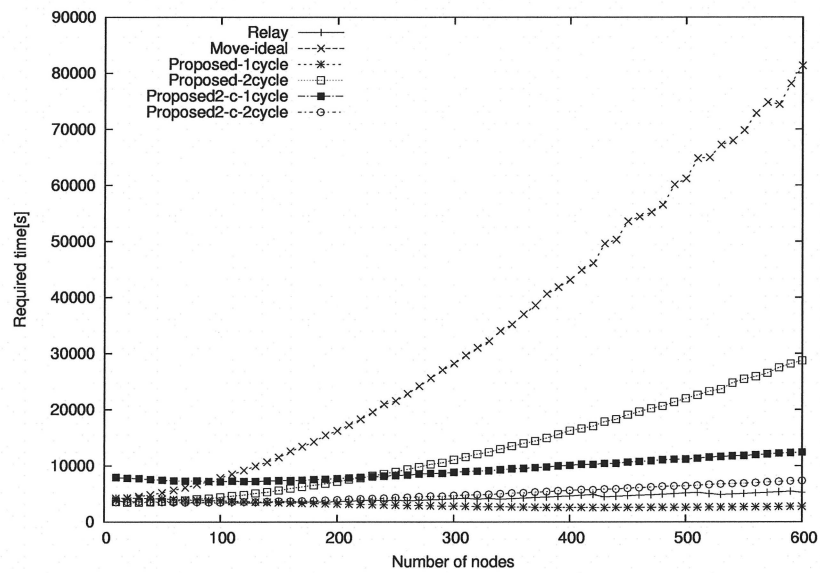


図 26 1 サイクルに要する時間 (c)

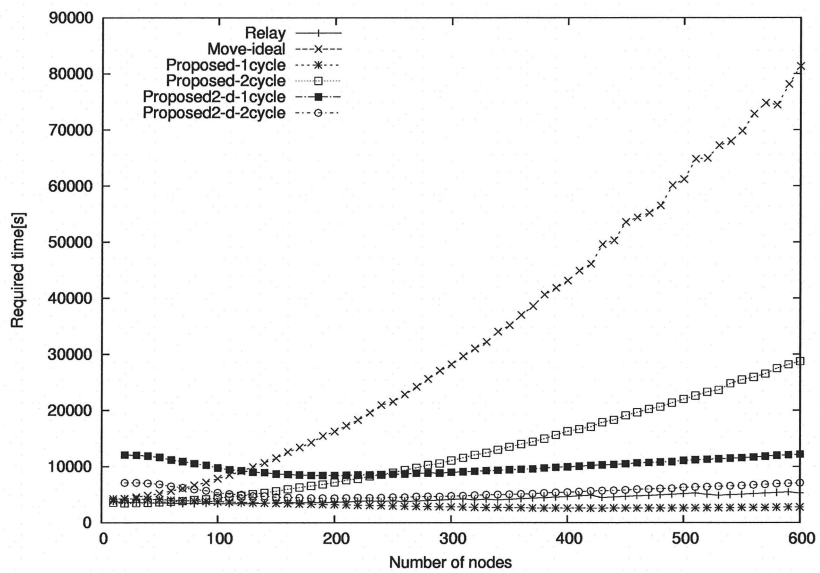


図 27 1 サイクルに要する時間 (d)

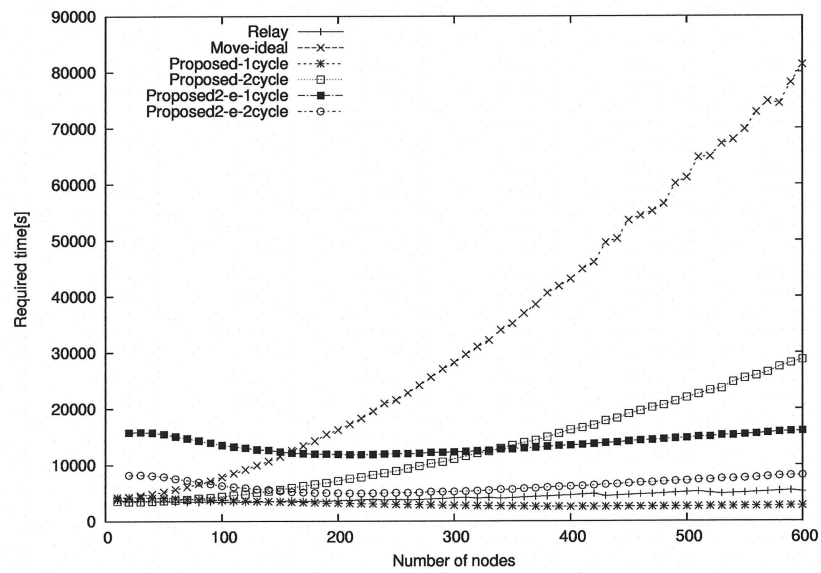


図 28 1 サイクルに要する時間 (e)

5.4 考察

5.4.1 すべてのノードの消費電力について

提案手法 2 はすべてのタイマー設定方法について、提案手法 1 の 1 サイクル目の消費電力よりも削減することができた。タイマー設定方法の Proposed2-c, Proposed2-d, Proposed2-e の 1 サイクル目について、ルールを用いた移動制御手法と比較して消費電力に大きな差がなくなったが、2 サイクル目以降の消費電力もあまり 1 サイクル目と分からなかった。反対に、Proposed2-a, Proposed2-b の 1 サイクル目は従来手法と比較して、1 サイクル目に要する消費電力が大きい、2 サイクル目以降は提案手法 1 の 2 サイクル目以降と同等の消費電力の削減をすることができた。このことから、Proposed2-b において、提案手法 1 の 1 サイクル目に要する消費電力を抑えつつ、2 サイクル目以降の消費電力を同等にできたと考えられる。

5.4.2 ノードごとの消費電力について

すべてのタイマー設定方法について、提案手法 1 と比較して全体的に均等に電力が消費されているが、基地局付近のノードだけ消費電力が高くなっている。これより、移動に要する電力よりも基地局付近のノードにデータが集中しているために通信電力を消費していると考えられる。また、すべてのタイマー設定方法について、基地局付近以外のノードの消費電力はほぼ均等になっているため、複数回センシング行動を繰り返してもまんべんなくセンシング領域のデータを収集することができる。

5.4.3 1 サイクルに要する時間について

すべてのタイマー設定方法について、リレー通信を用いた移動制御手法と比較して 1 サイクルに要する時間は小さくすることができなかった。Proposed2-c の 2 サイクル目以降において約 2 割ほど大きくなっている。また、提案手法 1 とは反対に、1 サイクル目に要する時間の方が長く、2 サイクル目以降に要する時間の方が小さくなった。これは基地局付近のノードがタイマーにより、ずっと待ち状態であったことが原因と考えられる。

おわりに

本研究では，周辺ノードの初期位置情報を用いて移動制御手法の提案し，さらに周辺ノードの初期位置情報を取得するまでの消費電力が大きい問題を解決する手法を提案した．シミュレーション実験により，1つ目と2つ目の提案手法をシミュレーション実験により，評価を行った結果，1つ目の提案手法は1サイクル目の消費電力が非常に大きくなったが，2サイクル目以降は6割程度消費電力を削減することができた．また，2つ目の提案手法は1つ目の提案手法と比較して，2サイクル目以降の消費電力を変えずに1サイクル目の消費電力を大きく削減することができた．2サイクル目以降の消費電力をそこまで削減することができなかった．

今後の課題として，ノードの通信の混信や，Khepera や heli[11] のようなノード速度の変化を考慮したシミュレーションを行う必要がある．また，ノードの故障や離脱に対する考慮やノードに搭載するメモリサイズを削減することが可能な手法を考える必要がある．

謝辞

日ごろから多くの御指導を頂きました太田義勝教授，鈴木秀智准教授，テープウィロージャナボン・ニワット 助教，院生の方々に深く感謝致します。そして，日頃何かとお世話になりました落合美子事務員に感謝致します。また，本論文作成にあたって特にお世話になりました太田義勝教授に深く感謝いたします。最後に，日頃から熱心に討論して頂いた研究室の諸氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] 岩成祐樹, 朝香卓也, 高橋達郎: “リレー通信を用いた省電力移動型センサネットワーク,” 電気情報通信学会論文誌 B, Vol. J94-B, No. 5, pp. 673–685, 2011.
- [2] Open Automation: <http://www.openautomation.net/>
- [3] データベースモデル協調システム: <http://zoushoku.narc.affrc.go.jp/DataModel/>
- [4] SunSPOTWorld: <http://www.sunspotworld.com/>
- [5] Guiling Wang, Guohong Cao and Tom La Porta, “Movement-Assisted Sensor Deployment,” IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 5, No. 6, pp. 640–652, June 2006.
- [6] Gabriel T. Sibley, Mohammad H. Rahimi, Gaurav S. Sukhatme, “Robomote: A Tiny Mobile Robot Platform for Large-Scale Ad-hoc Sensor Networks,” IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1143–1148, May 2002.
- [7] Mohammad Rahimi, Hardik Shah, Gaurav S. Sukhatme, “Studying the Feasibility of Energy Harvesting in a Mobile Sensor Network,” in Proc. of International conference on Robotics and Automaiton(ICRA 2003), Vol. 1, No. 1, pp. 19–24, Sept. 2003.
- [8] 新城達也, 北島信哉, 小川剛史, 原隆浩, 西尾章治郎: “移動型センサネットワークにおけるプッシュ型放送を用いたノード移動制御手法に関する評価,” 日本データベース学会論文誌, Vol. 7, No. 1, pp. 199–204, 2008.
- [9] David K. Goldenberg, Jie Lin, A. Stephen Morse, Brad E. Rosen, Y. Richard Yang, “Towards Mobility as a Network Control Primitive,” ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing(MOBIHOC 2004), pp. 163–174, May 2004.
- [10] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan, “Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks,” Hawaii International Conference on System Sciences(HICSS 2000), pp. 1–10, Jan. 2000.
- [11] Karthik Dantu, Mohammad Rahimi, Hardik Shah, Sandeep Babel, Amit Dhariwal and Gaurav Sukhatme, “Robomote: Enabling Mobility In Sensor Networks,” the 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks(IPSNS 2005), pp. 404–409, Apr. 2005.