

修士論文

無線センサネットワークにおける
観測値分布情報を用いたデータ収集法

15892501 青木 悠将

指導教員 朝香 卓也 教授

2017 年 1 月

首都大学東京 大学院システムデザイン研究科
システムデザイン専攻 経営システムデザイン学域

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究の目的	2
1.3	本論文の構成と要旨	3
第 2 章	無線センサネットワーク	4
2.1	現状と展開	4
2.2	無線センサネットワークにおける課題	5
2.3	関連研究	6
第 3 章	高精度な観測値分布推定のための省電力型データ収集法	8
3.1	概要と前提	8
3.2	提案方式手順	9
3.3	提案方式の特徴・利点・欠点	12
3.4	シミュレーション評価	13
3.4.1	シミュレーション 1 の結果	17
3.4.2	シミュレーション 2 の結果	19
3.4.3	シミュレーション 3 の結果	21
3.5	議論	27
第 4 章	観測値分布情報を用いたクラスタ構造型データ収集法	28
4.1	概要と前提	28
4.2	提案方式手順	29
4.3	提案方式の特徴・利点・欠点	32
4.4	シミュレーション評価	33
4.4.1	シミュレーション 1 の結果	34
4.4.2	シミュレーション 2 の結果	37

– ii – 目次

4.5	議論	37
第 5 章	結論	41
5.1	本論文のまとめ	41
5.2	今後の課題	42
	謝辞	44
	参考文献	45

表目次

3.1	各パラメータの値	14
-----	--------------------	----

2.1	無線センサネットワークの概要	5
3.1	提案方式の概念図	9
3.2	イベント例	11
3.3	提案方式の流れ	12
3.4	シミュレーション 1 イベント観測値の形状	15
3.5	シミュレーション 1 イベントの形状	15
3.6	シミュレーション 2 イベント観測値の形状	16
3.7	シミュレーション 2 イベントの形状	16
3.8	シミュレーション 3 イベント観測値の形状	16
3.9	シミュレーション 3 イベントの形状	16
3.10	線形モデルによるノード数変化における消費電力への影響	18
3.11	線形モデルによるノード数変化における精度への影響	18
3.12	線形モデルによる収集層数の変化における消費電力と精度への影響	19
3.13	シミュレーション 1 最短経路方式 イベント観測値の形状	20
3.14	シミュレーション 1 最短経路方式 イベントの形状	20
3.15	シミュレーション 1 提案方式 イベント観測値の形状	20
3.16	シミュレーション 1 提案方式 イベントの形状	20
3.17	非線形モデルによるノード数変化における消費電力への影響	21
3.18	非線形モデルによるノード数変化における精度への影響	22
3.19	非線形モデルによる収集層数の変化における消費電力と精度への影響	22
3.20	シミュレーション 2 最短経路方式 イベント観測値の形状	23
3.21	シミュレーション 2 最短経路方式 イベントの形状	23
3.22	シミュレーション 2 提案方式 イベント観測値の形状	23
3.23	シミュレーション 2 提案方式 イベントの形状	23
3.24	複雑なモデルによるノード数変化における消費電力への影響	24

3.25	複雑なモデルによるノード数変化における精度への影響	25
3.26	複雑なモデルによる収集層数の変化における消費電力と精度への影響	25
3.27	シミュレーション 3 最短経路方式 イベント観測値の形状	26
3.28	シミュレーション 3 最短経路方式 イベントの形状	26
3.29	シミュレーション 3 提案方式 イベント観測値の形状	26
3.30	シミュレーション 3 提案方式 イベントの形状	26
4.1	提案方式 2 の概念図	29
4.2	提案方式 2 イベント例	32
4.3	提案方式 2 線形モデルによるノード数変化における消費電力への影響	35
4.4	提案方式 2 線形モデルによるノード数変化における精度への影響	35
4.5	提案方式 2 線形モデルによる収集層数の変化における消費電力と精度への 影響	36
4.6	シミュレーション 1 提案方式 2 イベント観測値の形状	36
4.7	シミュレーション 1 提案方式 2 イベントの形状	36
4.8	提案方式 2 複雑なモデルによるノード数変化における消費電力への影響	38
4.9	提案方式 2 複雑なモデルによるノード数変化における精度への影響	38
4.10	提案方式 2 複雑なモデルによる収集層数の変化における消費電力と精度への 影響	39
4.11	シミュレーション 2 提案方式 2 イベント観測値の形状	39
4.12	シミュレーション 2 提案方式 2 イベントの形状	39

第 1 章

序論

1.1 研究背景

近年，無線ネットワーク技術を応用したユビキタスネットワーク社会が注目されている．ユビキタスネットワーク社会とは，「いつでも，どこでも，何でも，誰でも」ネットワークにつながるにより，様々なサービスが提供され，人々の生活をより豊かにする社会のことである．このユビキタスネットワーク社会を実現するための技術の一つとして，無線センサネットワークがある．無線センサネットワークとは，複数のセンサ付き無線端末（以下センサノードとする）を空間に散在させ，それらが協調して環境や物理的状況を収集することを可能とする無線ネットワークのことである．ここ数年で，センサノードは飛躍的に小型化，低価格化され，研究が活発になっている技術である．無線センサネットワークを構成するセンサノードは温度，照度，加速度等のセンサデータを取得し，取得したデータは無線波を利用して送信することができる．消費電力をできる限り抑えるため，各端末間の通信距離を短くして，センサノードから得られた情報をノードからノードへバケツリレー式で伝送するマルチホップ伝送が使われ，シンクノードと呼ばれる端末（以下 SINK とする）に収集することで観測範囲内の情報の取得が可能となる．また，ネットワークの制御方法として，集中制御と自律分散制御が想定されているが，無線センサネットワークでは自律分散制御が想定されており，センサノードを配置するだけで自律的なネットワークを構成できるため，利用現場での敷設作業を軽減することができる．利用分野としては，防犯・防災・農業・医療・福祉・物流などが考えられ，それぞれのセンサが認識した人や環境の情報をセンサ同士でやり取りすることによって，利用者が求める情報を提供することが出来るため，幅広い分野で無線センサネットワークの応用が期待されている [1]．

無線センサネットワークは環境モニタリング型とイベント駆動型の 2 種類に分類される．環境モニタリング型は定期的にデータ収集するのに対し，イベント駆動型は事象（以下イベントとする）が起こった場合にのみデータ収集を行う．特にイベント駆動型無線センサネットワー

2 第1章 序論

クは異常気象の観測や防犯，災害などの検知に適している．

無線センサネットワークを実利用する際の最大の課題は消費電力量の削減である．有線のシステムにおいてはセンサノードに電力を供給するのが容易であり，一度敷設してしまえば半永久的に機能することが可能である．ところが無線センサネットワークの場合，適用が考えられている多くの例は広域な環境や人の立ち入りが困難な場所であり，設置するセンサノードは数百，数千にもものぼる．そのため，個々のセンサノードに外部から電源を供給することは困難であり，電池交換するのにも莫大なコストがかかってしまう．現在はバッテリーの限られた電力を節約して利用すること以外，有効なアプローチは存在せず，根本的な解決策は存在しない．そのため，電力をいかに効率的に使うかが重要な課題となる．

1.2 研究の目的

大規模な無線センサネットワークの運用には消費電力量を削減することが重要であり，省電力化のための研究が多く行われている．センサノードの動作で消費される電力の内訳として，センシング，データ通信，CPUなどが挙げられるが，消費電力量の最も高い割合を占める要因がデータ通信時によるものであるということが過去の研究 [3] において示されている．そのため，無駄なデータ通信を排除することが省電力化のために最も効果的であり，これまでに様々なデータ収集法が提案されているが，その多くが定期的にデータ収集する環境モニタリング型を想定した方式である．イベントの発生を契機に情報収集を開始するイベント駆動型において，イベント非発生時のセンサノードの低消費電力化や，イベント発生時の局所的なデータ配送要求の集中による高トラヒックなどの対応が求められるため，環境モニタリング型と同様のデータ収集法を適用することは望ましくない．そのため，イベント駆動型に適したデータ収集法が提案されている．関連研究 [4]～[6] ではイベント駆動型センサネットワークにおいて，すべての観測ノードの情報を SINK に送信するのではなく，イベント発生領域の縁に位置するセンサノードの観測情報のみ送信するという方式を提案している．この方式によってイベント発生領域の検知が省電力で可能となる．しかし，イベント領域内の観測情報をユーザは知ることができない．そのため，ユーザがイベントが起こっている領域の検知のみを知りたいケースにしかこの方式は適用できない．イベント駆動型センサネットワークにおいてユーザが必要とする情報はイベント領域の検知のみで十分なケースと，イベント領域の検知とイベント領域内の観測値情報の2つの情報が必要なケースがあると考えられる．例えば原子力発電所の事故により放射線が漏れた場合，イベント発生領域の検知は人の立ち入りが危険な場所をユーザが知ることができ，イベント領域内の観測値情報はイベント領域内のどの場所がどの程度の観測値なのかをユーザが知ることができる．

そこで，本論文では，災害発生等の事象の検出を目的としたイベント駆動型センサネットワークにおいて，省電力化と収集したデータから得られる観測値情報の精度向上を目的とした

データ収集法を提案する．また，計算機シミュレーションを用いて既存技術と提案方式を消費電力量と精度の観点から比較することによって提案方式の有用性を示す．

1.3 本論文の構成と要旨

本論文は全 5 章で構成される．

第 2 章では，無線センサネットワークの概要について述べ，センサネットワーク特有の技術的な課題を明らかにする．

第 3 章ではこの課題を軽減するために，無線センサネットワークにおける高精度な観測値分布推定のための省電力型データ収集法を提案する．本章では，計算機シミュレーションを用いて既存技術と提案方式を消費電力量と精度の観点から比較することによって提案方式の有用性を示す．

第 4 章では，第 3 章にて提案するデータ収集法の問題点を解決するために，クラスタ構造を用いたデータ収集法を提案する．本章では，第 3 章と同様にシミュレーションによって既存方式と従来方式の消費電力量と精度の観点から比較することによって提案方式の有用性を示す．

第 5 章では第 3 章，第 4 章を踏まえた上で本論文の結論と今後の展望を述べる．

第 2 章

無線センサネットワーク

2.1 現状と展開

無線センサネットワーク (図 2.1) とは，センシング機能と無線通信機能を持ち合わせたセンサノードをネットワークで相互に接続することにより多地点のセンシング情報を収集し，利活用するためのシステムを指す．この無線センサネットワークにはセンサノードと SINK の 2 種類のノードが存在する．センサノードの主な特徴は無線通信機能とバッテリー駆動である．各センサノードは自律的に動作し，温度，湿度などを測定する．取得したデータは，センサノードの無線通信機能およびバッテリーを使用して SINK へ転送される．一方，SINK はセンサノードよりも計算機能や計算機資源に優れており，センサノードからなる無線網との接続性に加えて，インターネットなどの有線通信基盤網との接続性も有している．そのため，ホストは SINK を通じてセンサノードにセンサデータの要求や制御命令を発行できる．SINK は，こうした有線基盤網上のホストに対応するため，常時動作することが求められる．したがって，SINK はセンサノードと異なり，太陽電池や電力線による電力確保が常に可能なノードとして動作する．

先にも述べたが無線センサネットワークの最大の課題は消費電力量の削減である．そのため，センサノードにおけるバッテリーの制約を軽減する目的で，発電素子や無線電力伝送技術を用いるセンサノードの研究が進んでいる．発電素子を用いることによって十分な電力が確保できればバッテリーの制約から解放され，センサノードの長期連続運用が可能となるが，得られるエネルギーは場所と時間に依存して変動するため，安定動作を確保するための電力管理が難しくなる．無線電力伝送技術を用いるとマイクロ波電力伝送技術や RFID 技術などにより，外部からセンサノードへエネルギーを供給できるが，長距離化や効率などに依然課題がある．センサノードのハードウェア技術は半導体技術の進化とともに機能・性能が向上する．今後はセンサネットワーク専用マイクロプロセッサの開発や高度な信号処理機能の搭載なども進み，開発環境が整備されていくと予想される．

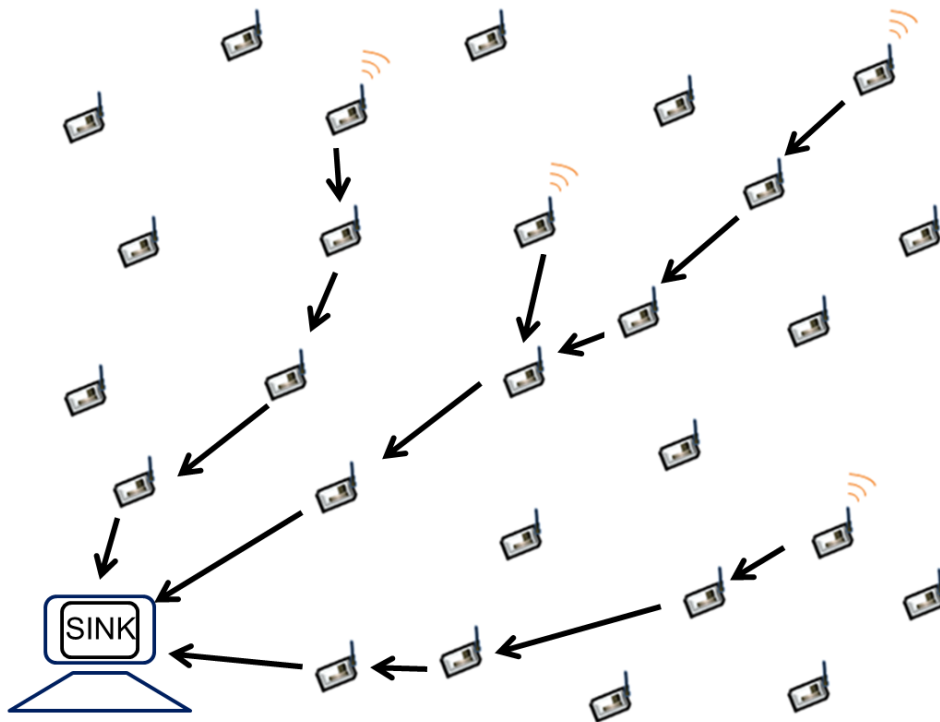


図 2.1. 無線センサネットワークの概要

2.2 無線センサネットワークにおける課題

無線センサネットワークで使われるセンサノードは利便性の点から小型でかつ軽量であり、利用できる資源（電力、通信、計算等）に大きな制約があるため、無線センサネットワークには様々な課題が存在する。まず1つ目の課題として電力枯渇問題が挙げられる。膨大なセンサノードによって構成される無線センサネットワークではノードへの有線による電力供給は不可能だとされている。そのため、センサノードはバッテリーで駆動することが必要となる。またバッテリーの交換を行うことも膨大なノード数を考えると現実的ではないため、ネットワークの寿命はノードのバッテリーに依存すると言える。このことから、無線センサネットワークにおいてノードの消費電力量の削減は最重要課題となる。次に2つ目の課題として頑健性・信頼性が挙げられる。現在のセンサノードは特定の社会ニーズに対応したレベルまでハードウェアとして最適化されていないのがほとんどである。例えば環境情報取得のため、森林にセンサノードを設置する場合には風雨・衝撃に対する加工が必要になる。加えて、無線通信を行うために、通信相手との通信失敗時の処理に対する対策を考慮する必要がある。これらの課題に対しては、産業界における実利用による知見の集約により用途毎に解決方法が構築されることが考えられる。また、無線センサネットワークの固有の性質として、悪意をもった人間がノードを乗っ取

6 第2章 無線センサネットワーク

り、データを盗聴・改竄される危険性がある。測定対象となる実空間情報には、映像、体温、血圧などのように個人のプライバシーに関わるものが含まれる場合も十分に考えられる。無線センサネットワークにおけるセキュリティは重要な課題であり、現在研究が進んでいる分野である [7]。次に 3 つ目の課題として適用現場における調整が挙げられる。無線通信を行うため、適用現場毎に無線波の調整が必要であり、特定の環境で実装したシステムがシステム運用者の業務現場で期待されたパフォーマンスを発揮できるとは限らない。システム運用者の業務環境におけるアプリケーションの最適化のための調整を実施しやすくする工夫、運用時の障害の切り分け、例外処理に対する対策等は、システム構築者の差別化要素になると考えられる。

2.3 関連研究

無線センサネットワークにおいて最大の課題である省電力化を目的とした研究がこれまでに数多く行われている [8]~[30]。センサノードの動作で消費される電力の内訳として、センシング、データ通信、CPU などが挙げられるが、消費電力量の最も高い割合を占める要因がデータ通信時によるものであるということが過去の研究 [3] において示されている。そのため、データ通信量の削減により省電力化を図るアプローチが数多く存在する。文献 [2] では無線センサネットワークにおけるデータ収集法はネットワーク構造によって階層型、フラット型、位置情報型の 3 つに大きく分けることができると述べている。

階層型はセンサノードがそれぞれ違う機能を持ち、また、センサノード間で親子関係のような階層構造を形成し、通信を行う方式である。代表的な方式に、Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) [8] や Hybrid Energy Efficient Distributed clustering (HEED) [9] などがある。LEACH とはセンサネットワーク内にいくつかのクラスタを形成することにより負荷を分散させる自律分散型のクラスタリングプロトコルである。それぞれのクラスタには、クラスタ内のすべてのセンサノードからのデータを集約し、SINK へ遠距離送信する役割を担うクラスタヘッドが 1 つずつ存在する。センサノードからクラスタヘッド、クラスタヘッドから SINK まで、それぞれ 1 ホップでデータ送信を行う。遠距離送信を行うクラスタヘッドはその他のセンサノードよりも多量の電力を消費する。すなわち、特定のセンサノードがクラスタヘッドの役割を長時間担い続けるとそれらのセンサノードからバッテリー切れを起こしてしまう。そのため、LEACH ではクラスタヘッドの役割を交代することによって、特定のセンサノードのバッテリー切れを防いでいるが、単純に確率とクラスタヘッドに選出された回数で判定しているため、最終的にどのノードも同じ頻度でクラスタヘッドになってしまうという問題があった。その点を改良したのが HEED である。HEED では、各センサノードがクラスタヘッドに立候補する確率を、初期電力とその時点の残存電力の比とすることで、より残存電力の大きいセンサノードがクラスタヘッドに立候補しやすくしている。ただし、各センサノードが SINK と直接通信できる環境を想定しており、小規模なネットワークでしか適用できない。ま

た、全てのデータを送信するため、冗長なデータが含まれてしまうという欠点が存在する。

フラット型は全てのセンサノードが同一の機能を持ち、通信を行う方式である。代表的な方式に Directed diffusion[11][12] や SPIN[13][14] などがある。Directed diffusion は、定期観測向けのプロトコルであり、まず SINK が条件や収集間隔、期間を記述したメッセージをフラッディングする。各ノードは、interest を送信してきたノードを gradients として記憶する。メッセージに記載された条件に合致するノードは、観測データを SINK に対して送信する。観測データは gradients をたどることで最終的に SINK に到達する。SINK は、観測データが転送されてきた経路のうち、遅延が最小である経路を選択し、それ以降に同様のデータを要求する際には、その経路を利用してデータを取得する。SPIN はデータ転送の前に情報の内容を表すメタデータを送信して、データ転送が必要か確認する。これにより冗長なデータ転送による電力消費を抑制するとともに、データの到達性を保証できる。始めに、データ送信を行うセンサノードは ADV(メタデータ) を近隣ノードであるセンサノードに送信する。ADV には各センサノードがセンシングしている対象の属性のみが含まれており、センシングデータよりもデータ量が少ない。そしてメタデータを受信したセンサノードはデータが必要であるかを判断し、必要であれば送信要求を送信する。そして、REQ を受け取ったセンサノードは REQ の送信元であるセンサノードに向けてデータを送信する。データを受け取ったセンサノードは同様の方法で ADV, REQ の交換を行いデータ転送を行う。このようにして、データ送信、転送の前にメッセージの交換を行うことで冗長なデータを抑制する。しかし、新たな要求を行う際に、毎回要否確認が必要となるため、メッセージの送信回数の増加、またデータ送信が遅延するという欠点が存在する。

ここで紹介した研究は定期的にデータ収集する環境モニタリング型を想定した方式であるが、イベントの発生を契機に情報収集を開始するイベント駆動型への適用を目的としたデータ収集法も提案されている。関連研究 [4]~[6] ではイベント駆動型センサネットワークにおいて、すべての観測ノードの情報を SINK に送信するのではなく、イベント発生領域の縁に位置するセンサノードの観測情報のみ送信する方式を提案している。イベントが発生するとイベント観測ノードは隣接ノードにメッセージをフラッディングし、イベント未観測ノードから返信があった場合、自身はイベント領域の縁に位置していると判断し、エッジノードとする。その後、最も近い位置に存在するエッジノードに観測データを送信し、全てのデータが集約されたら、SINK に送信する。イベント領域の検知が省電力で可能となるが、イベント内部の観測値情報が一切収集できないといった問題点がある。

本提案方式では HEED と似たクラスタ方式を採用し、Directed diffusion のように SINK が決定した条件に合致するノードがデータを送信する。しかし、これらの方式に見られる小規模なネットワークのみ適用可能や冗長なデータが多い、また、メッセージ送信回数の増加という問題を改善している。

第 3 章

高精度な観測値分布推定のための省電力型データ収集法

3.1 概要と前提

無線センサネットワークは比較的低コストでの構築が可能である。また、センサノード同士が自律的にネットワークを形成し、マルチホップ伝送を行うため、光ファイバやアクセスポイントなど固定的なインフラを必要とせず、センサノードの故障に対しても自律的に再構成ができ、どこにでも設置できるという利点を持つことから広域な環境の情報取得に極めて有効な技術である。先にも述べているが無線センサネットワークは数百、数千もの膨大な数のセンサノードから構成されるため、個々のノードに電力供給を行うことは極めて難しい。しかし、無線センサネットワークのセンシング期間は電池駆動で数年以上を求められているため、長期間システムの稼働を維持するためにも消費電力を抑制することが重要な課題となる [31]。特に、消費電力の大半を無線通信によるデータの送受信が占めるため、消費電力抑制には通信量の削減が効果的である。

本論文では、定期的に対象となる領域を観測する環境モニタリング型ではなく、イベントが発生した場合のみ観測情報を通知するイベント駆動型無線センサネットワークにおいてイベント検出後、周期的にデータ収集する環境を想定する。そして、膨大な数のセンサノードが高密度で設置されている環境で複数のセンサノードがイベントを観測し、SINK に向けて情報を送信する状況に着目する。イベント発生時、センサノードは密に配置されていることから複数のセンサノードがイベント情報を検出することが想定される。この場合、ユーザが必要とする情報はイベントが発生した範囲と観測値情報である。このことから、本論文ではイベント発生領域の通知、観測値情報を従来方式よりも省電力でかつ同等の精度を有するデータ収集法を提案する。

提案方式の概念図を図 3.1 に示す。図中の左上は SINK、円はセンサノードを表しており、

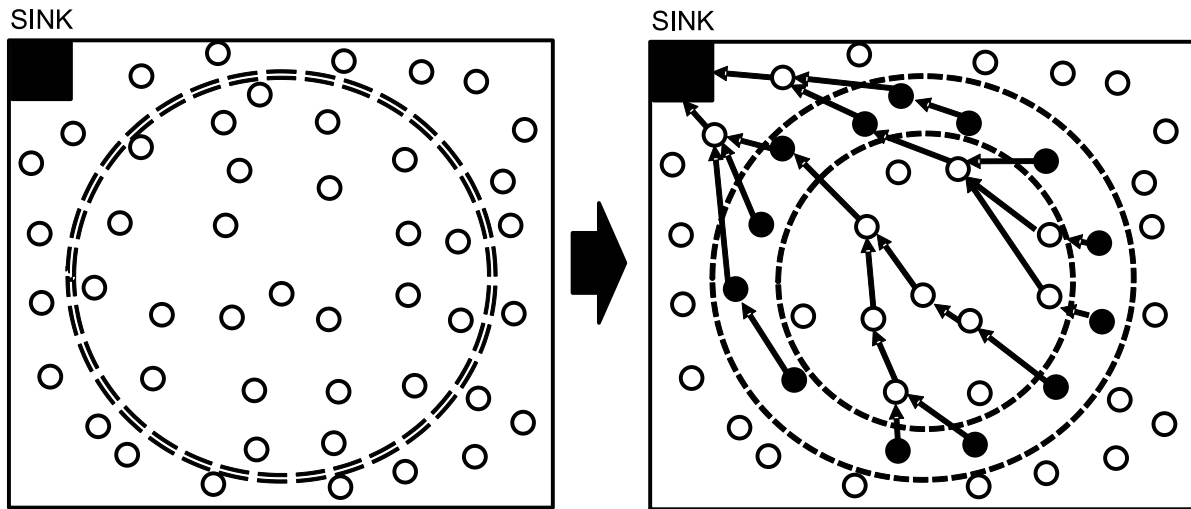


図 3.1. 提案方式の概念図

左図中の二重破線の円はイベント領域を示している。右図中の二つの破線の円で囲まれている領域は SINK が設定したデータ収集する値をもつ領域を示し、黒い円は SINK にデータ送信するノードを示す。提案方式はイベント観測値の最大値と最小値、また、イベント領域の大きさから一定の間隔の値を設定する。そして、その値を観測したノードのみがデータを送信することによって、一定の間隔の値ごとの領域の検知を実現し、消費電力量を削減する方式である。

適用先として各センサノードのモビリティは無いものとし、全てのセンサノードがセンシングを行い、データ転送のみに利用されるセンサノードは存在しない環境を想定する。また、文献 [32][33] によって提案されているようなイベント駆動型 MAC プロトコルを導入し、イベント非発生時のセンサノードはスリープ動作によって省電力化を図る。センサノードにはそれぞれに ID が割り当てられており、さらに、ある一定のデータを保持することが可能なストレージを内蔵しているものとする。また、各センサノードは SINK までの最短経路をセンサノードが設置された後にメッセージ交換によって学習する。

3.2 提案方式手順

提案方式は観測ノード収集フェーズ、収集観測値設定フェーズ、データ収集フェーズ、観測値補間フェーズの 4 つのフェーズによって構成される。観測対象となるイベントが観測されると観測ノード収集フェーズとなり、イベントを観測したセンサノードはすべて SINK にデータ送信を行う。一定時間後、収集観測値設定フェーズに移り、SINK がイベントの観測値分布情報よりデータ収集する観測値を設定し、全ノードに向けフラッシングする。そして、次の一定時間後のデータ収集フェーズでは収集観測値設定フェーズで設定した観測値を観測時のみ、

10 第3章 高精度な観測値分布推定のための省電力型データ収集法

SINK に向け、データ送信を行う。一定時間後、観測値補間フェーズに移り、収集したセンサデータから逆距離荷重法によって観測値を補間する。イベント検出後、Phase 1, Phase 2 を実行する。その後、一定時間毎 (例. 5 分) に Phase 3, Phase 4 を実行する。ただし、Phase 4 において Phase 2 で設定した収集観測値が適切でないと SINK が判断した場合、次の一定時間後は Phase 1, Phase 2 を実行する。以下にそれぞれフェーズの詳細を示す。

Phase 1 観測ノード収集フェーズ

予めユーザが設定した閾値を上回る、もしくは下回るようなイベントが観測された時、センサノードはイベントが発生したと見なし、観測した全てのセンサノードは SINK に向けて最短経路でデータ送信を行う。イベント未観測ノードがイベント観測ノードからデータを受信した場合、中継ノードとなり、受信したデータを SINK に送信する。

Phase 2 収集観測値決定フェーズ

SINK は各センサノードから送信されたデータより、収集する観測値の間隔とその間隔で決定された値を中央値とした幅を設定する。各センサノードから得られる情報はイベント観測値と位置情報である。イベント観測値の情報よりイベントの最大値と最小値、位置情報よりイベント領域の大小を把握する。イベントの最大値と最小値の情報と収集する層の数から観測値の間隔を式 (3.1) によって決定する。収集する観測値の間隔を d 、イベントの最大値を max 、イベントの最小値を min 、収集する層の数を N とすると

$$d = (max - min) / (N - 1) \quad (3.1)$$

で表される。イベントの最大値と最小値の差が大きい場合、間隔を大きく設定する。イベントの最大値と最小値の差が小さい場合、間隔を小さく設定する。また、イベント観測ノードの位置情報より収集する観測値の間隔で決定された値を中央値とした幅を設定する。イベント領域が大きい場合、幅を大きく設定し、イベント領域が小さい場合、幅を小さく設定する。その後、SINK は全ノードに向け、設定した収集する観測値情報をフラッティングする。

Phase 3 データ収集フェーズ

各ノードは Phase 2 で指定された値を観測時のみ、SINK に向け、最短経路を通してデータ送信を行う。

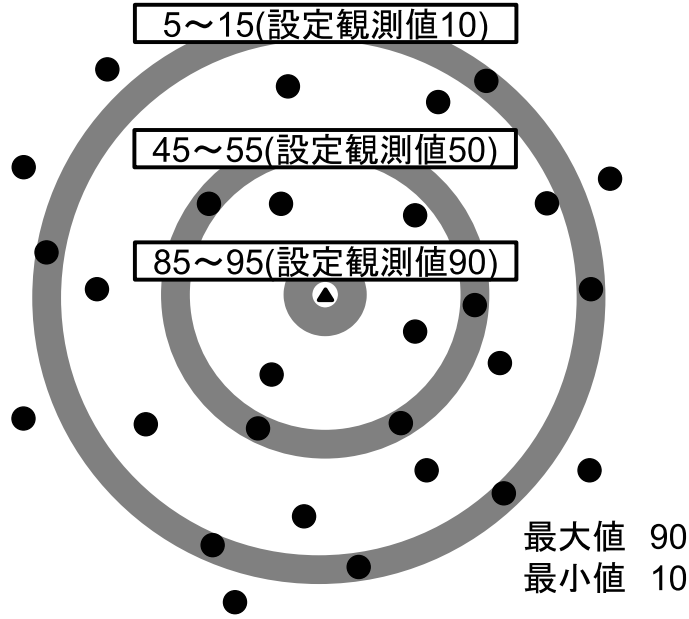


図 3.2. イベント例

Phase 4 観測値補間フェーズ

SINK は送信されてきたセンサデータに含まれる位置情報と観測値情報から逆距離荷重法 [34] によって観測値を補間する．逆距離荷重法とは補間する地点といくつかの観測点の位置情報より距離に重みづけをし，観測値情報のない領域の予測値を算出する方法である．地点 s の予測値を $\mu(s)$ ，観測点数を n ，観測点全てに $1 \sim n$ までの番号を振り， i 番目の観測点 s_i の実測値を $\mu(i)$ ，地点 s と観測点 s_i の距離を $d(s, s_i)$ ，地点 s における観測点 s_i の重みを $w_i(s)$ ，距離指数を p とすると，

$$\mu(s) = \sum_{k=1}^n w_k(s) \mu_k / \sum_{j=1}^n w_j(s) \quad (3.2)$$

$$w_i(s) = 1/d(s, s_i)^p \quad (3.3)$$

で表される．観測値補間後，SINK が適切なデータ収集を実行できていないと判断するのは下記の条件のいずれかが R 回以上続いた場合とする．

- 収集ノード数が極端に多いもしくは少ない場合
- 収集する観測値の層が増加，減少した場合

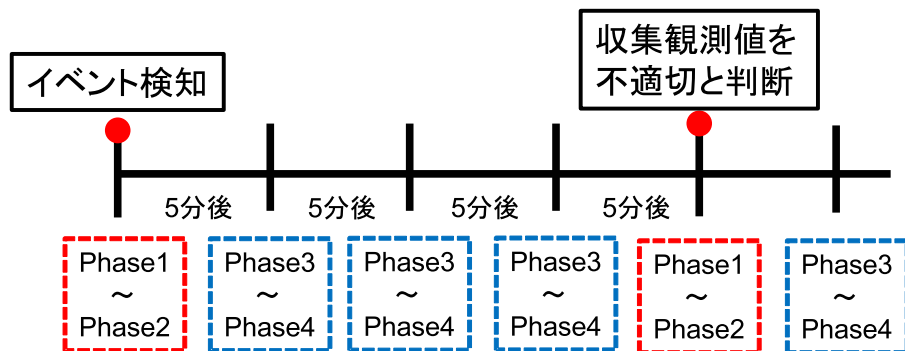


図 3.3. 提案方式の流れ

〔動作例〕

具体的な動作例を示す。Phase 1 でイベントが発生するとイベント観測ノードは全て SINK に観測データを送信する。Phase 2 で SINK は各センサノードから送信されたデータより、収集する観測値の間隔とその間隔で決定された値を中央値とした幅を設定する。図 3.2 のような値を示すイベントで収集する層の数を 3 とした場合、観測値の最大値が 90、最小値が 10 のため、収集する観測値の間隔は 40 となる。次にこの収集する間隔の値を中央値とした幅を設定する。この例ではイベントサイズが小さいと SINK が判断し、幅の値を 10 と設定する。これによって収集する観測値の間隔が 40、幅が 10 という値が決定し、収集する観測値は 5~15, 45~55, 85~95 の値と設定される。次にここで設定された収集する観測値情報を全ノードに向け、フラットニングする。Phase 3 ではイベントを観測し、かつ Phase 2 で決定した収集する観測値情報の 5~15, 45~55, 85~95 の値を観測時のみ、観測ノードは SINK に向け、データ送信を行う。Phase 4 で逆距離荷重法 [20] によって観測値補間を行う。

イベント発生後、1 回目の観測時は Phase 1, Phase 2 を実行する。その後、一定時間毎に Phase 3, Phase 4 のみ実行する。しかし、適切な観測値が設定できていないと SINK が判断した場合、次の測定は Phase 1 からやり直す (図 3.3)。

3.3 提案方式の特徴・利点・欠点

提案方式はイベントを検知すると Phase 1, Phase 2 を実行し、その後、一定時間毎に Phase 3, Phase 4 を実行する。これは Phase 2 まで実行すると各センサノードは SINK にデータを送信する収集観測値情報をフラットニングメッセージによって学習し、Phase 1, Phase 2 を実行する必要がないためである。また、適切な収集観測値間隔が設定できていないと判断する 2 つの条件は以下の理由を考慮し、設定した。収集センサノード数が極端に多い場合、送信

ノードを適切に選別することができておらず消費電力量が大きくなってしまふ。また、収集センサノード数が極端に少ない場合、観測値補間に必要なサンプルを十分に取得できていないため精度が悪くなってしまふ。収集する観測値の層が増加、減少する場合はイベント最大値が大きく変化した際に生じてしまい、ユーザが必要とする精度を満たすことができない。以上の理由より、適切な収集観測値間隔が設定できていないと判断された場合、Phase 1 から再度実行する。

提案方式では全ノードから観測値分布情報を収集し、イベントの傾向を判断する。そして全ノードに収集観測値情報をフラッティングすることによって一定の間隔の値ごとの領域の検知を実現し、消費電力量を削減する方式である。また逆距離荷重法によって観測値補間を実行し、最小限のサンプルから高い精度の観測値分布情報の取得が可能といった利点がある。しかし、イベントの最大値最小値が急激に変化する場合やイベント領域が急激に拡大、縮小するような場合の観測には向いていない。本提案方式はデータ収集を行う観測値を設定し、その指定された値を観測したノードのみがデータ送信をすることによって省電力化を図っており、SINK が適切に設定できていないと判断し、全ノードからデータを頻繁に収集すると本提案方式の利点がなくなってしまうためである。

3.4 シミュレーション評価

本論文のシミュレーションは文献 [8] に記載されている下記の電力消費モデルを用いる。この電力消費モデルでは無線通信の送信時には無線送信回路 (Transmit Electronics) と電力増幅器 (Tx Amplifier) の動作、受信時には無線受信回路 (Receive Electronics) の動作が必要とされている。式 (3) は送信時の消費電力を、式 (4) は受信時の消費電力の式を表したものである。 k はデータ長 (bit), d は通信距離 (m), E_{elec} はデータ処理にかかる消費電力係数, ε_{amp} は信号増幅にかかる消費電力係数である。

$$\begin{aligned} E_{Tx}(k, d) &= E_{Tx-elec}(k) + E_{Tx-amp}(k, d) \\ &= E_{elec} \times k + \varepsilon_{amp} \times k \times d^2 \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} E_{Rx}(k) &= E_{Rx-elec}(k) \\ &= E_{elec} \times k \end{aligned} \quad (3.5)$$

シミュレーションにおける評価パラメータ値を表 1 に示す。センサノード間の通信以外に要するセンシングや時刻同期による消費電力量は非常に小さいものとしてシミュレーション中では考慮しない。センシングエリアは二次元平面とし、障害物はなく、使用されるすべ

表 3.1. 各パラメータの値

Notation	Description	Value
$M \times M$	Area	max $100 \times 100(\text{m}^2)$
N	Number of Sensor Nodes	max 2000
$Sink$	Sink node location	bottom of left side
E_{elec}	Electronic energy	$100(\text{pJ/bit/m}^2)$
ε_{amp}	Amplified transmitting energy	$50(\text{nJ/bit})$
k_{data}	Data packet size	128(bit)
k_{header}	Header length	32(bit)
k_{ID}	Node ID length	96(bit)
$k_{control}$	Control packet size	20(bit)
d	Range of wireless communication	5(m)

てのセンサノードのバッテリー容量や通信速度等の能力は均一であるものとする．すべてのシミュレーションプログラムは C++ で実装した．また，実行環境として，OS は Windows 7 Professional，プロセッサは Intel Core i5-4570 3. 20GHz，メモリは 4GB を利用した．シミュレーションではセンサノードをランダムに配置する．これはセンサノード一つ一つを人間の手によって正確に設置することが難しい無線センサネットワークの配置に近いモデルでシミュレーションを行うためである．SINK は左下に設置し，センサノードは SINK に向けてマルチホップ通信によってデータを送信する．本シミュレーションでは送受信は必ず成功するものとし，メッセージのフラッティング等におけるパケットの衝突などによる送信失敗でのデータの欠落は考慮しない．また，データ収集回数は 10 回とする．精度は補間によって算出した値とシミュレーションにおいて設定するイベントの値の誤差を，全てのイベント領域において求め，算出する．例えば，シミュレーション上で設定する値を 100 とし，補間によって 95 という値を算出したとする．この場合，0.95 の精度となる．このような計算を全てのイベント領域で計算する．そのため，シミュレーションにおいて設定するイベントの値と全く同じ値を補間によって算出した場合，精度は 1 となる．

本提案方式の有用性を示すにあたり，3 種類の異なる観測値分布を持つイベントでシミュレーションを行った．シミュレーション 1 では提案方式が 2 つの既存方式と比較して，より高い省電力効果を発揮し，高い精度を維持することができるか検証した．これにはイベントの中心地点から線形的に一定の値で観測値が小さくなるシンプルなイベント観測値形状 (図 3.4) を適用した．イベントはシミュレーションエリアの中央で発生し，イベントの形状は正円とする (図 3.5)．イベントの最大値は 200，最小値は 10 とした．

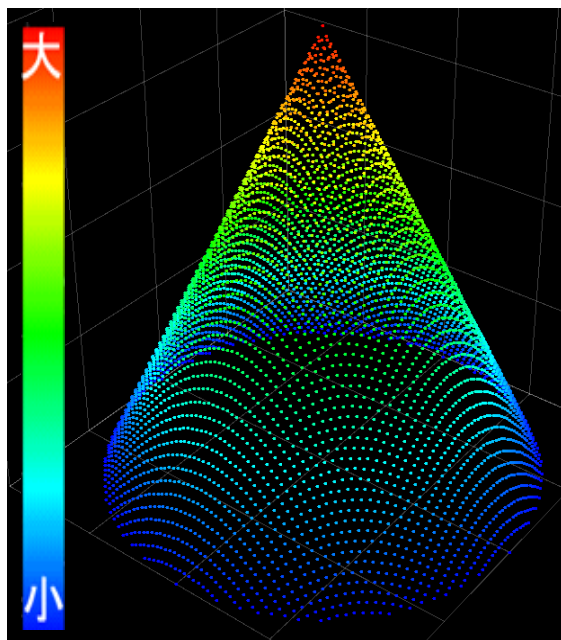


図 3.4. シミュレーション 1 イベント観測値の形状

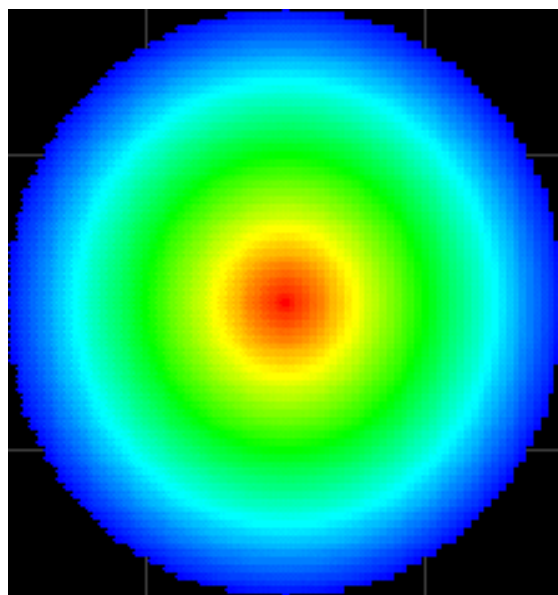


図 3.5. シミュレーション 1 イベントの形状

次にシミュレーション 2 では放射能などのイベントを想定した．放射能などのイベントはイベント中心地から遠くなるほど急激に値が小さくなるという特性がある．そのため，イベントの中心地点から急激に観測値が小さくなる非線形的なイベント観測値形状 (図 3.6) を適用した．イベントはシミュレーションエリアの中央で発生し，イベントの形状は正円とする (図 3.7)．イベントの最大値は 200，最小値は 10 とした．

最後にシミュレーション 3 では実環境を想定した場合，イベント値の形状が非常に複雑であることが考えられる．そのため，一定の値で変化するような形状ではなく，複雑にイベント値が変化するイベント観測値形状 (図 3.8, 3.9) を適用した．イベント観測値を設定するために使用した式は，最適化アルゴリズムを評価する際に使われるベンチマーク関数を用いた． $f(x_1, x_2)$ を設定するイベント観測値， x_1 をノードの x 座標値， x_2 をノードの y 座標とすると

$$f(x_1, x_2) = (x_2 + 100) \sin(\sqrt{|x_2 + x_1/2 + 47|}) + x_1 \sin(\sqrt{|x_1 - (x_2 + 47)|}) \quad (3.6)$$

で表される．イベントの最大値は 280，最小値は 10 とした．

シミュレーションでは比較方式として，最短経路方式，クラスタ方式を用いる．最短経路方式はイベントを観測した全てのセンサノードが最短経路を通過して SINK にデータを送信する方式である．クラスタ方式はセンサノードを複数のクラスタに分割し，クラスタ内で選出されたクラスタヘッドがクラスタ内のデータを集約し，まとめて SINK に送信する方式である．クラスタヘッドの選出方法は各クラスタからランダムに 1 つ選出され，変更はしないものとする

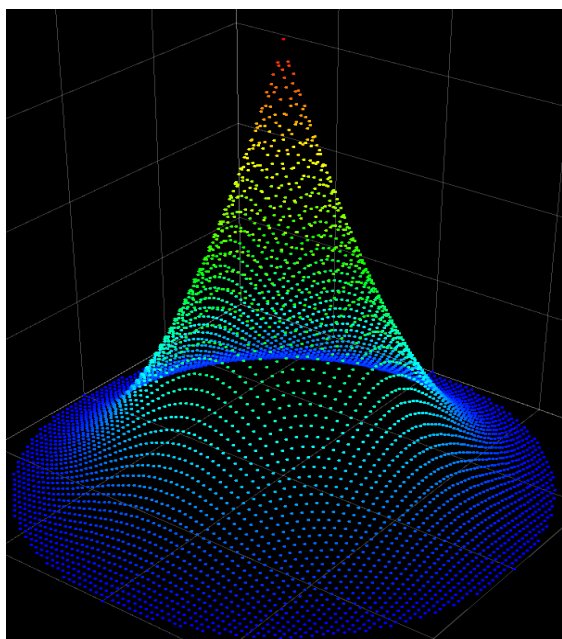


図 3.6. シミュレーション 2 イベント観測値の形状

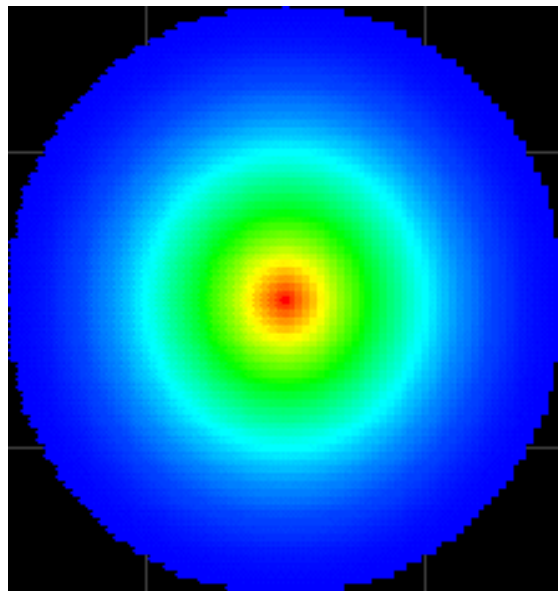


図 3.7. シミュレーション 2 イベントの形状

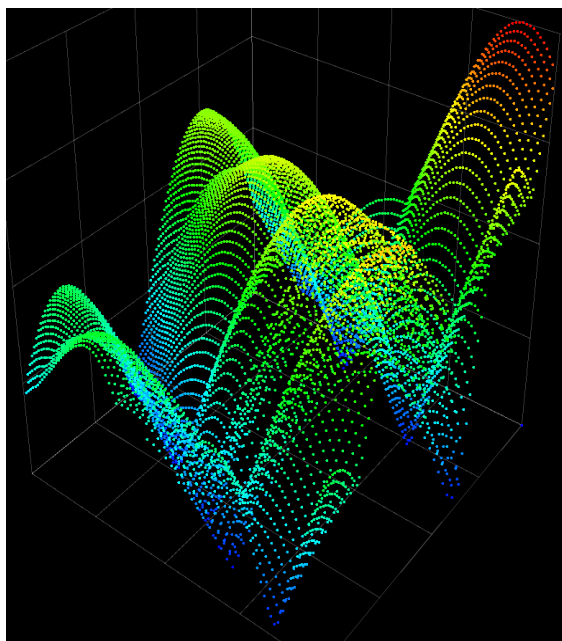


図 3.8. シミュレーション 3 イベント観測値の形状

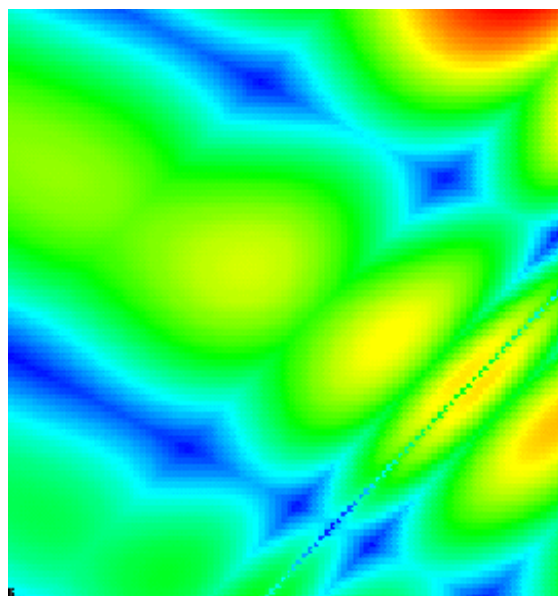


図 3.9. シミュレーション 3 イベントの形状

る。2つの比較方式ではデータを収集した観測値情報と位置情報より提案方式と同じように逆距離荷重法によって観測値補間をし、精度を算出した。シミュレーションにおいては、ノード数、収集する層の数による変化の影響をそれぞれ評価した。ノード数変化による検証では、ネットワークサイズを $100 \times 100\text{m}^2$ に固定し、ノード数を 200~2000 個に変化させた。提案方式の収集する層の数は 5 とした。収集する層の数による変化の検証ではネットワークサイズを $100 \times 100\text{m}^2$ 、ノード数を 1000 個に固定し、提案方式の収集する層の数を 2~8 とした。

3.4.1 シミュレーション 1 の結果

シミュレーション結果を図 3.10, 図 3.11, 図 3.12 に示す。図 3.10 はノード数変化による消費電力への影響を検証した結果である。図中の折れ線グラフは上から順に最短経路方式、クラスタ方式、提案方式を示し、横軸は総ノード数、縦軸は消費電力量 (J) を示している。提案方式は、総ノード数が 2000 の場合には、最短経路方式に対して約 0.34 倍、クラスタ方式に対して 0.37 倍の消費電力量でのデータ収集が可能であることが分かる。図 3.11 はノード数変化による精度への影響を検証した結果である。図中の折れ線グラフは上から順に最短経路方式、クラスタ方式、提案方式を示し、横軸は総ノード数、縦軸は精度を示している。総ノード数が 2000 の場合には、比較方式に対して高い精度を維持していることが分かる。図 3.12 は収集層数変化による消費電力と精度への影響を検証した結果である。図中の折れ線グラフは精度、棒グラフは消費電力量を示し、横軸は収集層数、左側の縦軸は消費電力量 (J)、右側の縦軸は精度を示している。提案方式は収集層数が増えると精度が 90 % 程度を示し、消費電力量は微増の傾向にあることが分かる。

図 3.10, 図 3.11 より、提案方式はノード数の増加に伴い、比較方式と比べ高い省電力効果を示し、かつ高い精度を維持することが確認できる。提案方式はイベントの最大値と最小値、イベント領域の大きさ、収集層数によって均等な間隔の収集観測値を SINK が設定し、その値を観測したノードのみデータを送信する。そして、逆距離荷重法によって観測値補間するがこの補間法は距離に重みづけをするため、線形的な補間に向いているという特徴をもっている。そのため、シミュレーション 1 ではイベント中心地点から線形的に値が減少していくイベント観測値形状であるため、ノード数が少ない場合でも、比較方式、提案方式共に高い精度を示した。次に図 3.12 より、消費電力量は微増の傾向にあることが分かる。これは提案方式が 1 回目のデータ収集時は全てのイベント観測ノードよりデータを収集するが 2 回目からのデータ収集時は SINK が設定した値を観測したノードのみからデータを収集するためである。また収集層数が少ない場合は、非常に低い精度を示している。これは観測値補間に必要最低限な分のデータ量を収集できなかったためである。

以上のことから、提案方式は線形的な値の変化を示すイベントでは高い省電力効果を示し、かつ高い精度を維持することが分かった。しかし、収集層数が少ない場合は非常に低い精度を

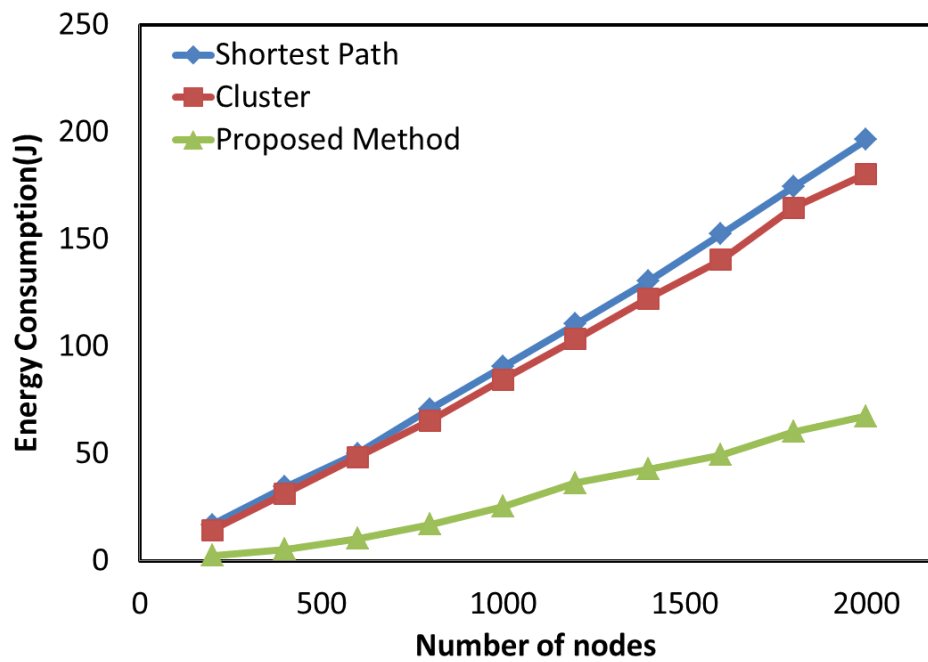


図 3.10. 線形モデルによるノード数変化における消費電力への影響

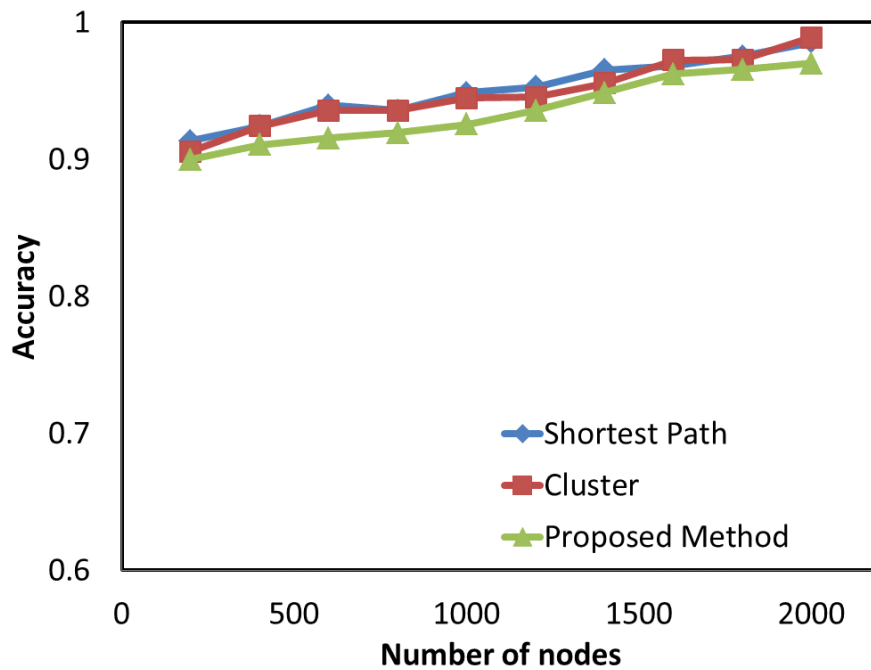


図 3.11. 線形モデルによるノード数変化における精度への影響

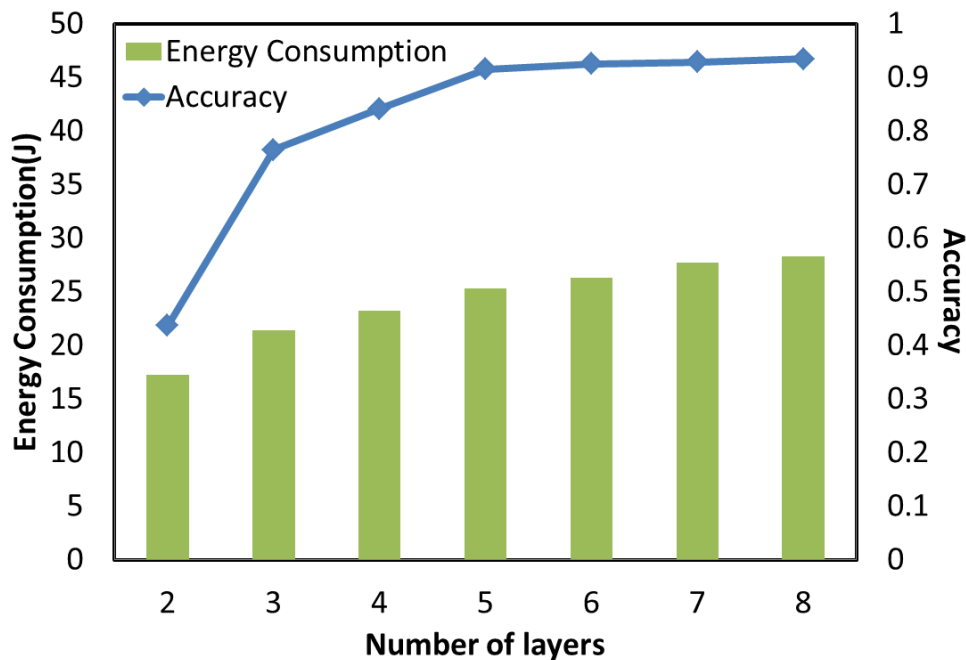


図 3.12. 線形モデルによる収集層数の変化における消費電力と精度への影響

示すため、最低限必要な精度を決定し、収集層数を決めなければならない。

3.4.2 シミュレーション 2 の結果

シミュレーション結果を図 3.17, 図 3.18, 図 3.19 に示す。図 3.17 はノード数変化による消費電力への影響を検証した結果である。図中の折れ線グラフは上から順に最短経路方式、クラスタ方式, 提案方式を示し, 横軸は総ノード数, 縦軸は消費電力量 (J) を示している。提案方式は, 総ノード数が 2000 の場合には, 最短経路方式に対して約 0.35 倍, クラスタ方式に対して 0.39 倍の消費電力量でのデータ収集が可能であることが分かる。図 3.18 はノード数変化による精度への影響を検証した結果である。図中の折れ線グラフは上から順に最短経路方式, クラスタ方式, 提案方式を示し, 横軸は総ノード数, 縦軸は精度を示している。提案方式は最短経路方式, クラスタ方式に対して約 3 % 程度, 精度が低下している。図 3.19 は収集層数変化による消費電力と精度への影響を検証した結果である。図中の折れ線グラフは精度, 棒グラフは消費電力量を示し, 横軸は収集層数, 左側の縦軸は消費電力量 (J), 右側の縦軸は精度を示している。提案方式は収集層数が増えると精度が 90 % 程度を示し, 消費電力量は微増の傾向にあることが分かる。

図 3.17, 図 3.18 より, シミュレーション 1 と同様に提案方式はノード数の増加に伴い, 比較方式と比べ高い省電力効果を示し, かつ高い精度を維持することが確認できる。理由としてはシミュレーション 1 で述べた理由と同様のことが挙げられる。しかし, 最短経路方式, クラ

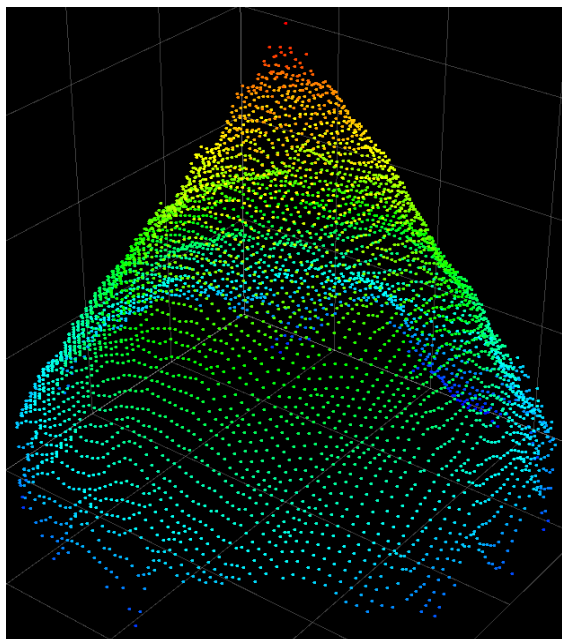


図 3.13. シミュレーション 1 最短経路方式 イベント観測値の形状

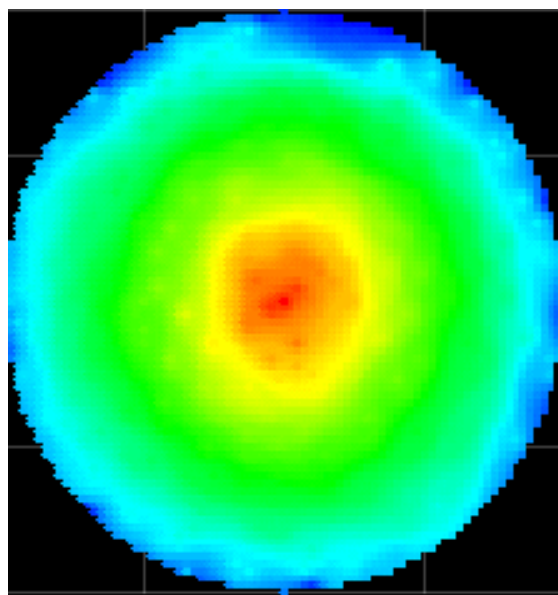


図 3.14. シミュレーション 1 最短経路方式 イベントの形状

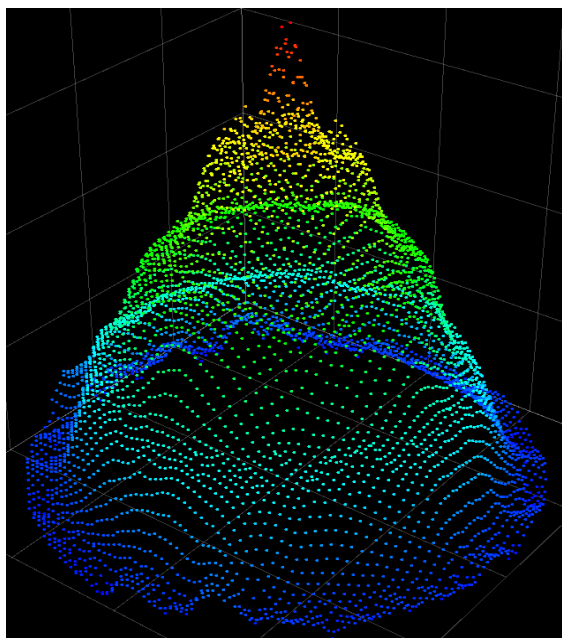


図 3.15. シミュレーション 1 提案方式 イベント観測値の形状

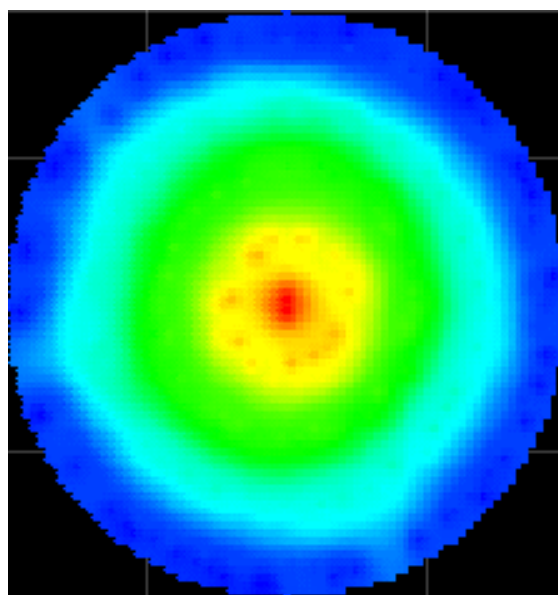


図 3.16. シミュレーション 1 提案方式 イベントの形状

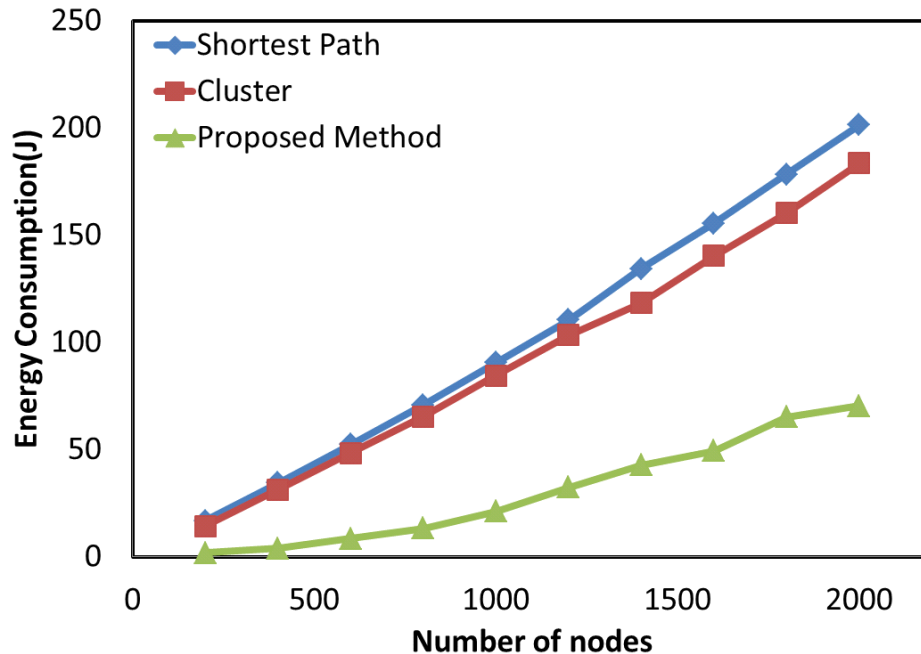


図 3.17. 非線形モデルによるノード数変化における消費電力への影響

スタ方式，提案方式の精度はシミュレーション 1 と比較して若干低下した．これはシミュレーション 1 で述べた逆距離荷重法の特徴が影響しており，非線形に変化するイベント観測値形状を線形的に補間したためである．次に図 3.19 より，シミュレーション 1 と同様に消費電力量は微増の傾向にあることが分かる．また収集層数が少ない場合は，非常に低い精度を示している．理由としてはシミュレーション 1 で述べた理由と同様のことが挙げられる．

以上のことから，提案方式は非線形的な値の変化を示すイベントでは高い省電力効果を示し，かつ高い精度を維持するが，線形的な値の変化を示すイベントと比べ，精度が低下することが分かった．

3.4.3 シミュレーション 3 の結果

シミュレーション結果を図 3.24，図 3.25，図 3.26 に示す．図 3.24 はノード数変化による消費電力への影響を検証した結果である．図中の折れ線グラフは上から順に最短経路方式，クラスタ方式，提案方式を示し，横軸は総ノード数，縦軸は消費電力量 (J) を示している．提案方式は，総ノード数が 2000 の場合には，最短経路方式に対して約 0.27 倍，クラスタ方式に対して 0.31 倍の消費電力量でのデータ収集が可能であることが分かる．図 3.25 はノード数変化による精度への影響を検証した結果である．図中の折れ線グラフは上から順に最短経路方式，クラスタ方式，提案方式を示し，横軸は総ノード数，縦軸は精度を示している．提案方式は最短経路方式，クラスタ方式に対して約 5 % 程度，精度が低下している．図 3.26 は収集層数変化

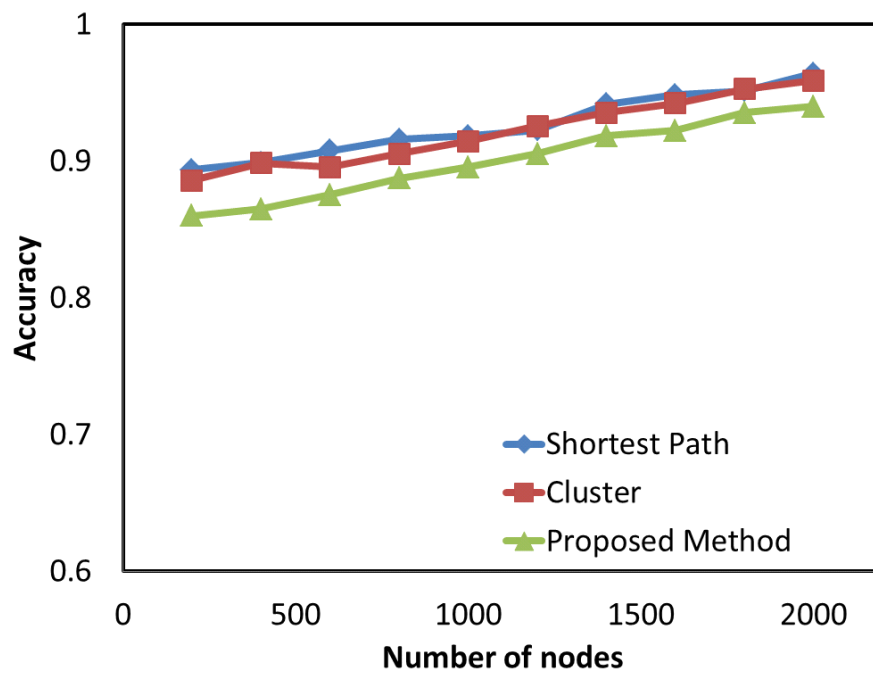


図 3.18. 非線形モデルによるノード数変化における精度への影響

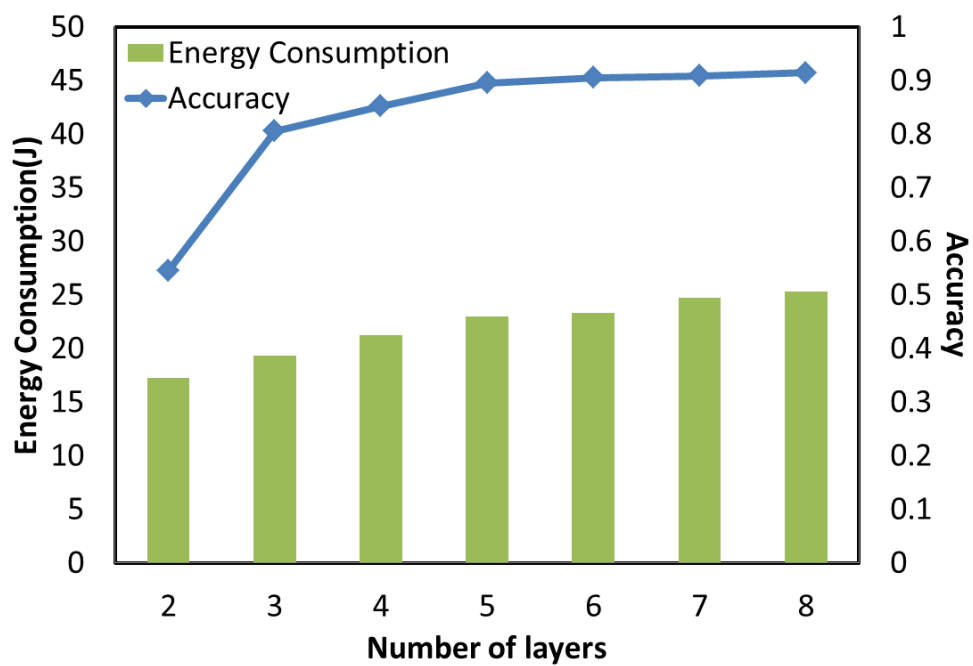


図 3.19. 非線形モデルによる収集層数の変化における消費電力と精度への影響

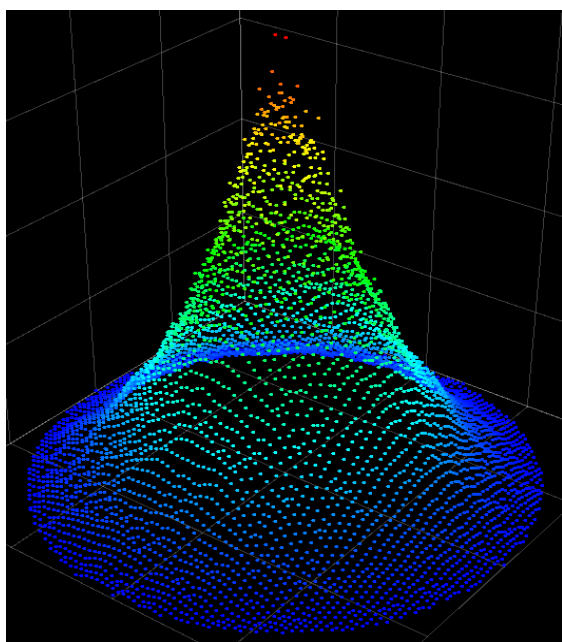


図 3.20. シミュレーション 2 最短経路方式 イベント観測値の形状

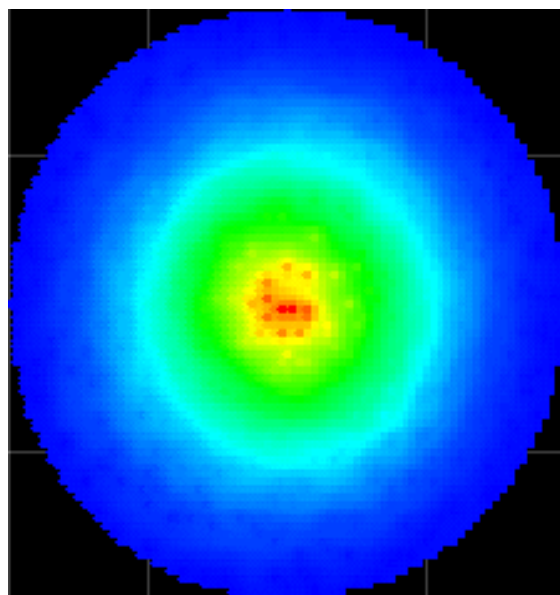


図 3.21. シミュレーション 2 最短経路方式 イベントの形状

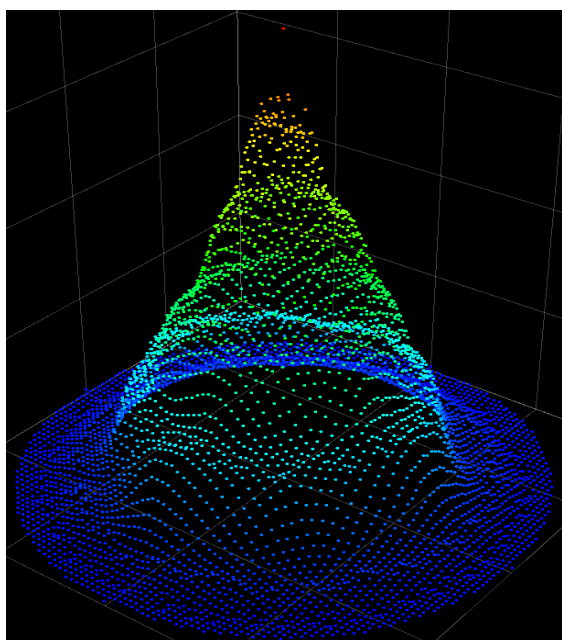


図 3.22. シミュレーション 2 提案方式 イベント観測値の形状

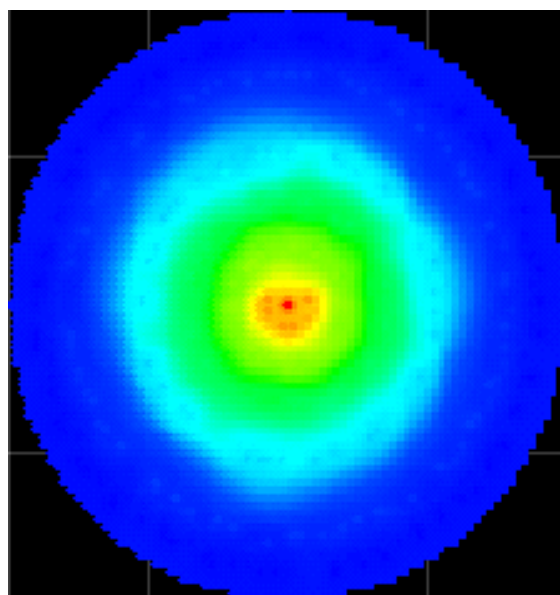


図 3.23. シミュレーション 2 提案方式 イベントの形状

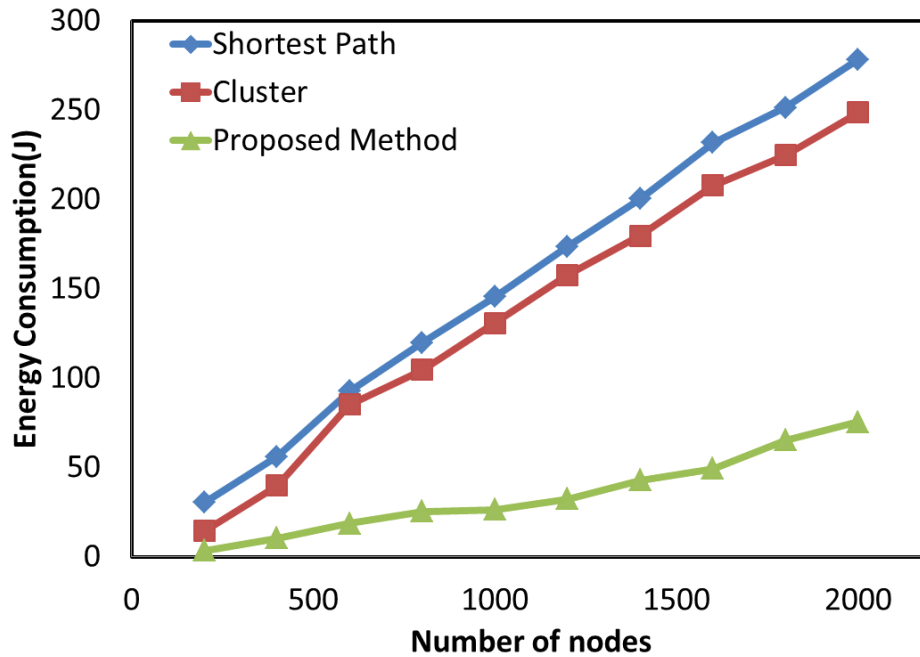


図 3.24. 複雑なモデルによるノード数変化における消費電力への影響

による消費電力と精度への影響を検証した結果である。図中の折れ線グラフは精度、棒グラフは消費電力量を示し、横軸は収集層数、左側の縦軸は消費電力量 (J)、右側の縦軸は精度を示している。提案方式は収集層数が増えると精度が 90 % 程度を示し、消費電力量は微増の傾向にあることが分かる。

図 3.24, 図 3.25 より、シミュレーション 1, 2 と同様に提案方式はノード数の増加に伴い、比較方式と比べ高い省電力効果を示し、かつ高い精度を維持することが確認できる。理由としてはシミュレーション 1 で述べた理由と同様のことが挙げられる。しかし、提案方式の精度はシミュレーション 1, 2 と比較して大きく低下した。提案方式はイベントの最大値と最小値、イベント領域の大きさ、収集層数からデータ収集する値を設定するが、複雑に観測値が変化するイベントでは、上記で設定した値を観測するノードが少ない場合があり、精度に影響を与えた。これはシミュレーション 1 で述べた逆距離荷重法の特徴が影響しており、非線形に変化するイベント観測値形状を線形的に補間したためである。次に図 3.26 より、シミュレーション 1, 2 と比較し、収集層数が 2~4 の場合、特に精度が低下することが確認できる。これは収集層数が少ない場合、観測値情報を収集していない地点の補間による推定値を線形的に補間してしまい、複雑な波打つような形状を再現できなかったためである。

以上のことから、提案方式は複雑な値の変化を示すイベントでは高い省電力効果を示し、かつ高い精度を維持するが、単純な値の変化を示すイベントと比べ、精度が低下することが分かった。また、高い精度を示すためには最適な収集層数について考慮する必要がある。

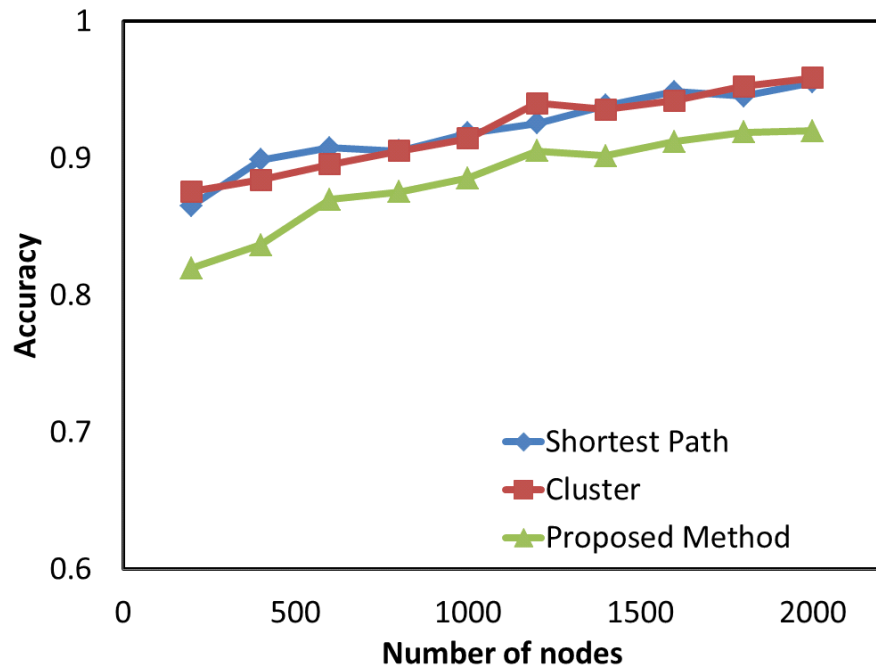


図 3.25. 複雑なモデルによるノード数変化における精度への影響

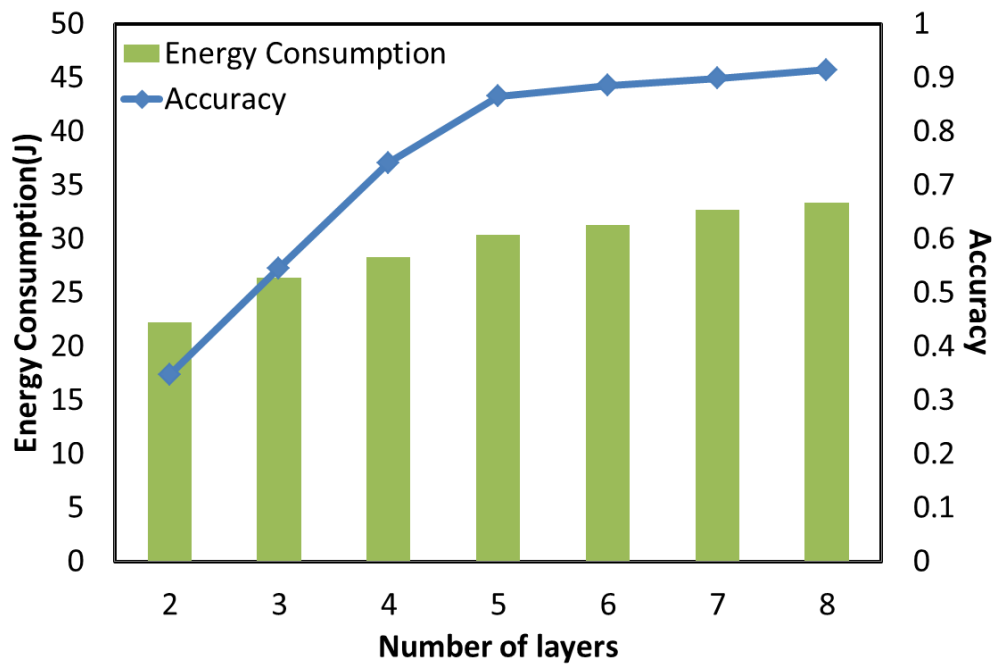


図 3.26. 複雑なモデルによる収集層数の変化における消費電力と精度への影響

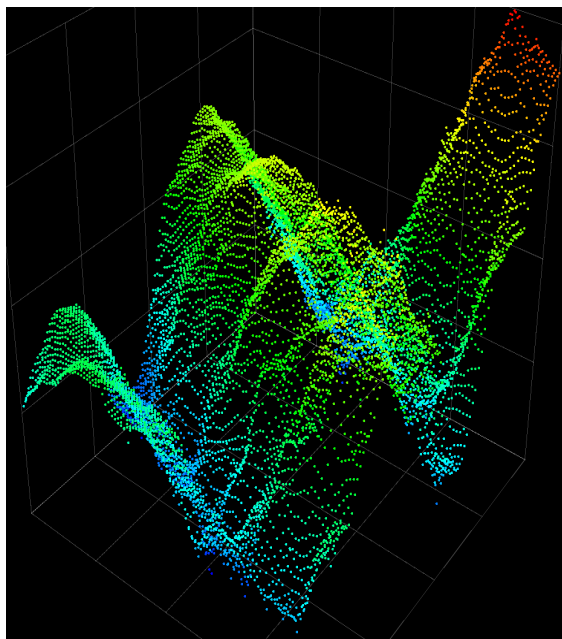


図 3.27. シミュレーション 3 最短経路方式 イベント観測値の形状

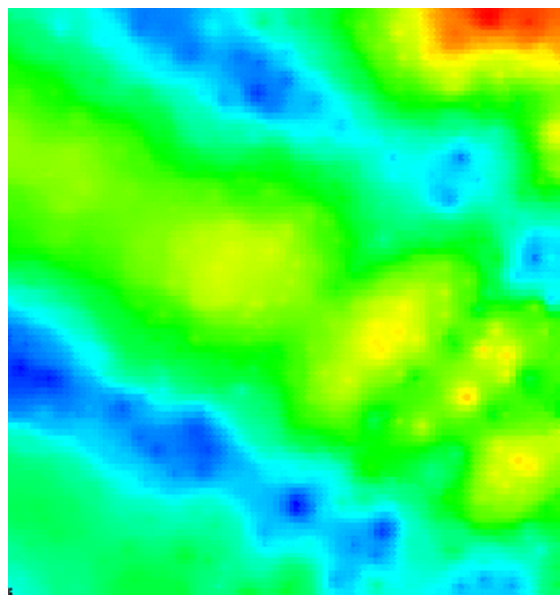


図 3.28. シミュレーション 3 最短経路方式 イベントの形状

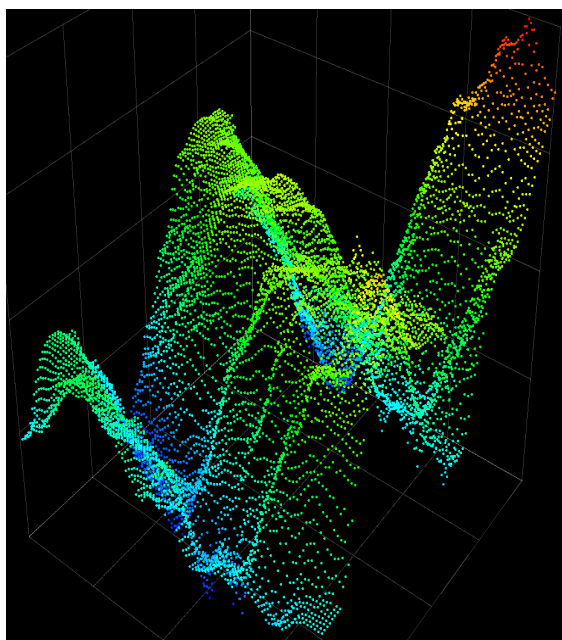


図 3.29. シミュレーション 3 提案方式 イベント観測値の形状

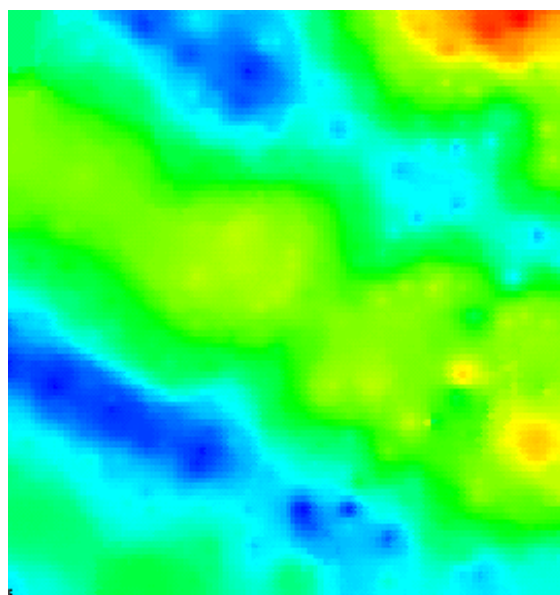


図 3.30. シミュレーション 3 提案方式 イベントの形状

3.5 議論

図 3.11, 図 3.18 より, 線形的な観測値の変化を示すイベント観測のほうが, 非線形的な観測値の変化を示すイベント観測よりも高い精度を示すことが分かった. また, 図 3.11, 図 3.25 より, シンプルな観測値の変化を示すイベント観測のほうが, 複雑な観測値の変化を示すイベントよりも高い精度を示すことがわかった. これは逆距離荷重法が補間する領域と観測点との距離を基に重みづけをし, 予測値を算出するためである. そのため, イベントの特徴によって補間方式を変更すれば複雑な形状のイベント観測にも適用可能であると考ええる.

本提案方式は測定対象となるイベント毎に適したパラメータを設定するため, 実験を重ね, より精度が高くなる条件をみつける必要がある. それゆえ, 適したパラメータ設定に手間がかかり実用的ではないという欠点がある. 今後の課題として, ユーザが容易にパラメータ設定を行える方式を検討していく必要がある.

第 4 章

観測値分布情報を用いたクラスタ構造型データ収集法

4.1 概要と前提

イベント駆動型センサネットワークでは、閾値を超える観測値を検出したノードのみからデータを収集することで通信トラフィックを削減している。3 章で述べた提案方式ではイベントを観測した全てのノードが SINK にデータを送るのではなく、SINK が指定した値を観測したノードのみがデータを送信することによって、大幅な消費電力量削減を実現した。しかし、実環境で観測が想定されるイベントは温度や湿度のように地理的相関が強いことが考えられる。そのため、広域な範囲に及ぶイベントでは近い場所に位置するノードは同一の観測値情報を観測すると考えられるため、値を指定するだけでは同一の情報が送信されてしまい、冗長である。そこで 3 章で提案した方式を拡張し、重複した観測情報を持つ複数のノードからのデータ収集を抑制するために、イベントの発生領域の推定に重点を置き、SINK が指定した値を観測したノードが所属するクラスタの情報のみを収集するデータ収集法を提案する。これによってデータ収集量を大幅に削減し、既存方式、従来方式と比較して高い省電力効果を達成する。

提案方式の概念図を図 4.1 に示す。図中の左上は SINK、円はセンサノードを表しており、二重円はクラスタヘッドを示している。二つの破線の円で囲まれている領域は SINK が設定したデータ収集する値をもつ領域を示し、黒い円は SINK にデータ送信するノードを示す。左図中で SINK が設定した値を観測した黒い円のノードは自らが所属するクラスタヘッドに向け、データを送信する。次に右図のようにクラスタヘッドは SINK に向け、データを送信する。提案方式は 3 章で述べた提案方式と同様にイベントの観測値分布情報からデータ収集する値を設定する。そして、その値を観測したノードがクラスタヘッドにデータを送信し、クラスタヘッドはクラスタ内で 1 つの観測ノードのデータのみを選択し、SINK に最短経路で送信する。

適用先として各センサノードのモビリティは無いものとし、全てのセンサノードがセンシ

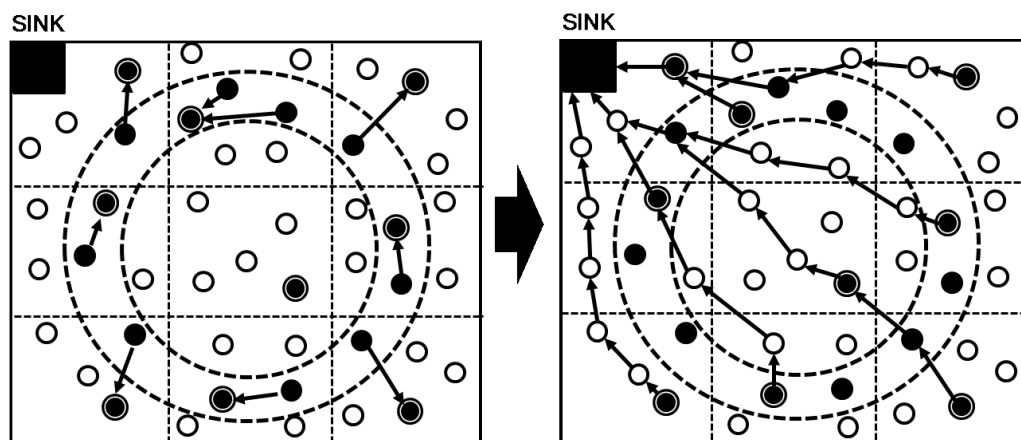


図 4.1. 提案方式 2 の概念図

グを行い，データ転送のみに利用されるセンサノードは存在しない環境を想定する．また，文献 [32][33] によって提案されているようなイベント駆動型 MAC プロトコルを導入し，イベント非発生時のセンサノードはスリープ動作によって省電力化を図る．センサノードにはそれぞれに ID が割り当てられており，さらに，ある一定のデータを保持することが可能なストレージを内蔵しているものとする．また，各センサノードは SINK までの最短経路をセンサノードが設置された後にメッセージ交換によって学習する．

4.2 提案方式手順

提案方式はクラスタ構成フェーズ，観測ノード収集フェーズ，収集観測値設定フェーズ，データ収集フェーズ，観測値補間フェーズの 4 つのフェーズによって構成される．センサノードが配置されるとクラスタ構成フェーズとなり，センシング領域を格子状のクラスタに分割し，各クラスタのクラスタヘッドを決定する．観測対象となるイベントが観測されると観測ノード収集フェーズとなり，イベントを観測したセンサノードはすべて SINK にデータ送信を行う．一定時間後，収集観測値設定フェーズに移り，SINK がイベントの観測値分布情報よりデータ収集する観測値を設定し，全ノードにフラッティングする．そして，次の一定時間後のデータ収集フェーズでは収集観測値設定フェーズで設定した値を観測時のみ，各ノードが所属しているクラスタのクラスタヘッドに向けてデータ送信を行う．クラスタヘッドは一定時間後，SINK に向けてデータを送信する．その後，観測値補間フェーズに移り，収集したセンサデータから逆距離荷重法によって観測値を補間する．イベント検出後，Phase 2, Phase 3 まで実行する．その後，一定時間毎 (例. 5 分) に Phase 4, Phase 5 を実行する．ただし，Phase 5 において Phase 3 で設定した収集観測値が適切でないと SINK が判断した場合，次の一定時

間後は Phase 2, Phase 3 を実行する．以下にそれぞれフェーズの詳細を示す．

Phase 1 クラスタ構成フェーズ

センサノード配置後，センシング領域を格子状のクラスタに分割する．クラスタヘッドは各クラスタ内で残存電力が最も大きいノードをメッセージ交換によって決定する．このクラスタヘッドは自らの領域内に位置しているセンサノードの ID, 位置情報等をメッセージ交換によって学習する．長時間同じセンサノードがクラスタヘッドに選出されている場合，定期的にクラスタヘッドとなるセンサノードを変更する．クラスタ内のセンサノードの初期電力とその時点の残存電力の比が最も大きいセンサノードをクラスタヘッドとすることにより残存電力の大きいセンサノードがクラスタヘッドに選出されるようにする．

Phase 2 観測ノード収集フェーズ

予めユーザが設定した閾値を上回る，もしくは下回るようなイベントが観測された時，センサノードはイベントが発生したと見なし，観測した全てのセンサノードは SINK に向けて最短経路でデータ送信を行う．イベント未観測ノードがイベント観測ノードからデータを受信した場合，中継ノードとなり，受信したデータを SINK に送信する．

Phase 3 収集観測値設定フェーズ

SINK は各センサノードから送信されたデータより，収集する観測値の間隔とその間隔で決定された値を中央値とした幅を設定する．各センサノードから得られる情報はイベント観測値と位置情報である．イベント観測値の情報よりイベントの最大値と最小値，位置情報よりイベント領域の大小を把握する．イベントの最大値と最小値の情報と収集する層の数から観測値の間隔を式 (4.1) によって決定する．収集する観測値の間隔を d ，イベントの最大値を max ，イベントの最小値を min ，収集する層の数を N とすると

$$d = (max - min) / (N - 1) \quad (4.1)$$

で表される．イベントの最大値と最小値の差が大きい場合，間隔を大きく設定する．イベントの最大値と最小値の差が小さい場合，間隔を小さく設定する．また，イベント観測ノードの位置情報より収集する観測値の間隔で決定された値を中央値とした幅を設定する．イベント領域が大きい場合，幅を大きく設定し，イベント領域が小さい場合，幅を小さく設定する．その後，SINK は全ノードに向け，設定した収集する観測値情報をフラッティングする．

Phase 4 データ収集フェーズ

各ノードは Phase 3 で指定された値を観測時，自らが所属するクラスタヘッドに向けて観測値情報を送信する．クラスタヘッドは自らのクラスタ内のノードからデータ送信があった場合，SINK にデータを送信する準備を始める．一定時間内に自らが所属するクラスタ内の 1 つのノードからのみデータを受信した場合，クラスタヘッドは受信したデータを SINK に最短経路で送信する．一定時間内に複数のノードから同一の観測値情報を受信した場合，最も早くクラスタヘッドが受信したセンサノードの観測値情報のみを SINK に向け，送信する．一定時間内に複数のノードから異なる観測値情報を受信した場合，同一の観測値の層につき 1 つのセンサノードの観測値情報のみを SINK に向け，送信する．

Phase 5 観測値補間フェーズ

SINK は送信されてきたセンサデータに含まれる位置情報と観測値情報から逆距離荷重法 [31] によって観測値を補間する．逆距離荷重法とは補間する地点といくつかの観測点の位置情報より距離に重みづけをし，観測値情報のない領域の予測値を算出する方法である．地点 s の予測値を $\mu(s)$ ，観測点数を n ，観測点全てに $1 \sim n$ までの番号を振り， i 番目の観測点 s_i の実測値を $\mu(i)$ ，地点 s と観測点 s_i の距離を $d(s, s_i)$ ，地点 s における観測点 s_i の重みを $w_i(s)$ ，距離指数を p とすると，

$$\mu(s) = \sum_{k=1}^n w_k(s) \mu_k / \sum_{j=1}^n w_j(s) \quad (4.2)$$

$$w_i(s) = 1/d(s, s_i)^p \quad (4.3)$$

で表される．

〔動作例〕

具体的な動作例を示す．センサノードを配置後，Phase 1 でセンシング領域を複数のクラスタに分割し，クラスタ内に 1 つクラスタヘッドを決定する．Phase 2 でイベントが発生するとイベント観測ノードは全て SINK に観測データを送信する．Phase 3 で 3 章の提案方式と同様に SINK は各センサノードから送信されたデータからイベントの傾向を判定し，収集する観測値の間隔とその間隔で決定された値を中央値とした幅を設定する．次にここで設定された収集する観測値情報を全ノードに向け，フラッティングする．Phase 4 では Phase 2 で設定した値を観測したノードは自らの所属するクラスタのクラスタヘッドにデータ送信を行う．図 4.2 のイベントにおいて Phase 3 で設定した値を観測したノードを N1～N7 とし，同じ色の領域は同じ値を示す．1 のクラスタの場合，N1 はクラスタヘッドに観測データを送信する．一定時

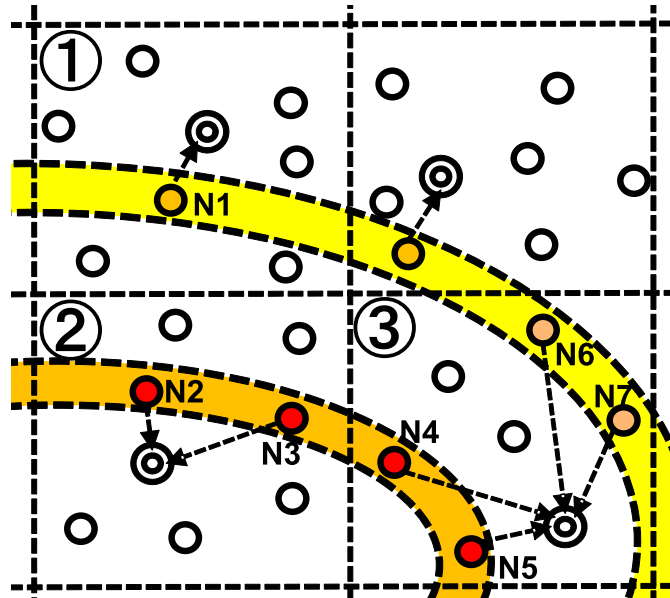


図 4.2. 提案方式 2 イベント例

間後，クラスタヘッドは SINK にデータを送信する．2 のクラスタの場合，N2，N3 はクラスタヘッドに観測データを送信する．一定時間後，クラスタヘッドは同一の値を観測したノードから情報を 2 つ受信しているため，最も早く受信した N2 のデータのみ SINK に送信する．3 のクラスタの場合，N4～N7 はクラスタヘッドに観測データを送信する．一定時間後，クラスタヘッドは 4 つのノードからデータを受信するが，N4 と N5，また，N6 と N7 は同一の値を観測しているため，最も早く受信した N5 と N7 のデータのみ SINK に送信する．Phase 5 で逆距離荷重法 [20] によって観測値補間を行う．

センサノードを配置後，Phase 1 を実行する．イベント発生後，1 回目の観測時は Phase 2，Phase 3 を実行する．その後，一定時間毎に Phase 4，Phase 5 のみ実行する．しかし，適切な観測値が設定できていないと SINK が判断した場合，次の測定は Phase 2 からやり直す．

4.3 提案方式の特徴・利点・欠点

提案方式では全ノードから観測値分布情報を収集し，イベントの傾向を判断する．そして全ノードに収集観測値情報をフラットニングすることによって一定の間隔の値ごとの領域の検知を実現し，クラスタヘッドが受信データを選択することによって消費電力量を削減する方式である．また逆距離荷重法によって観測値補間を実行し，最小限のサンプルから高い精度の観測値分布情報の取得が可能といった利点がある．しかし，クラスタヘッドにかかる負担が他のノードと比較して大きくなり，電力を大きく使うことが考えられる．また，3 章で述べた提案方式と比較して SINK が受信するイベント観測データが少なくなるため，消費電力は小さくな

るが、精度が著しく悪化するおそれがある。

4.4 シミュレーション評価

シミュレーション中で送信電力及び受信電力の計算に用いる電力消費モデルは第3章でのシミュレーションと同様に文献[8]に記載されている電力消費モデルを用いる。シミュレーション中でのパラメータの値についても、同様に表1に示すパラメータ値を用いる。センシングエリアは二次元平面とし、障害物はなく、使用されるすべてのセンサノードのバッテリー容量や通信速度等の能力は均一であるものとする。すべてのシミュレーションプログラムはC++で実装した。また、実行環境として、OSはWindows 7 Professional、プロセッサはIntel Core i5-4570 3.20GHz、メモリは4GBを利用した。シミュレーションではセンサノードをランダムに配置する。SINKは左下に設置し、センサノードはSINKに向けてマルチホップ通信によってデータを送信する。本シミュレーションでは送受信は必ず成功するものとし、メッセージのフラッティング等におけるパケットの衝突などによる送信失敗でのデータの欠落は考慮しない。また、センサノード間の通信以外に要するセンシングや時刻同期による消費電力量は非常に小さいものとしてシミュレーション中では考慮しない。データ収集回数は10回とする。

本提案方式の有用性を示すにあたり、2種類の異なる観測値分布を持つイベントでシミュレーションを行った。シミュレーション1では提案方式が2つの既存方式と比較して、より高い省電力効果を発揮し、高い精度を維持することができるか検証した。これには3章のシミュレーション1と同様にイベントの中心地点から線形的に一定の値で観測値が小さくなるシンプルなイベント観測値形状を適用した。イベントはシミュレーションエリアの中央で発生し、イベントの形状は正円とする。イベントの最大値は200、最小値は10とした。

次にシミュレーション2では実環境を想定した場合、イベント値の形状が非常に複雑であることが考えられる。そのため、一定の値で変化するような形状ではなく、複雑にイベント値が変化するイベント観測値形状を適用した。イベント観測値を設定するために使用した式は、3章のシミュレーション3と同様に最適化アルゴリズムを評価する際に使われるベンチマーク関数を用いた。イベントの最大値は280、最小値は10とした。

シミュレーションでは比較方式として、最短経路方式、クラスタ方式、3章で提案した従来方式を用いる。3つの比較方式ではデータを収集した観測値情報と位置情報より提案方式と同じように逆距離荷重法によって観測値補間をし、精度を算出した。シミュレーションにおいては、ノード数、収集する層の数による変化の影響をそれぞれ評価した。ノード数変化による検証では、ネットワークサイズを $100 \times 100\text{m}^2$ に固定し、ノード数を200~2000個に変化させた。提案方式、従来方式の収集する層の数は5とした。収集する層の数による変化の検証ではネットワークサイズを $100 \times 100\text{m}^2$ 、ノード数を1000個に固定し、提案方式の収集する層の

数を2～8とした。

4.4.1 シミュレーション1の結果

シミュレーション結果を図4.3, 図4.4, 図4.5に示す。図4.3はノード数変化による消費電力への影響を検証した結果である。図中の折れ線グラフは上から順に最短経路方式, クラスタ方式, 従来方式, 提案方式を示し, 横軸は総ノード数, 縦軸は消費電力量 (J) を示している。提案方式は, 総ノード数が2000の場合には, 最短経路方式に対して約0.11倍, クラスタ方式に対して0.13倍, 従来方式に対して0.32倍の消費電力量でのデータ収集が可能であることが分かる。図4.4はノード数変化による精度への影響を検証した結果である。図中の折れ線グラフは上から順に最短経路方式, クラスタ方式, 従来方式, 提案方式を示し, 横軸は総ノード数, 縦軸は精度を示している。総ノード数が2000の場合には, 提案方式は比較方式に対して同等の精度を有することが分かる。図4.5は収集層数変化による消費電力と精度への影響を検証した結果である。図中の折れ線グラフは精度, 棒グラフは消費電力量を示し, 横軸は収集層数, 左側の縦軸は消費電力量 (J), 右側の縦軸は精度を示している。提案方式は従来方式に対して, 収集層数が5を超えると同等の精度を有するが, 少ない場合, 約5%程度低下することが分かる。また, 収集層数が増加すると提案方式は従来方式に対して, 消費電力量は微増の傾向にあることが分かる。

図4.3, 図4.4より, 提案方式はノード数の増加に伴い, 比較方式と比べ高い省電力効果を示し, かつ比較方式に対して同等の精度を有することが確認できる。従来方式に対して, 提案方式はクラスタヘッドにデータを集約し, SINKに送信する観測データを選択する。そのため, 非常に高い省電力効果を発揮できる。また, イベントの最大値と最小値からデータ収集する観測値を設定するため, 送信ノード数を大きく減少させつつ, イベント観測値の大きい場所と小さい場所に位置するノードの観測情報を取得できたため, 逆距離荷重法によって高い精度を示すことができた。次に図4.5より, 消費電力量は従来方式よりも微増の傾向にあることが分かる。これは収集層数が増えた場合, データ送信を行う値を観測したノードの数が従来方式, 提案方式共に増加する。しかし, 従来方式は観測ノードが全てSINKに送信するが, 提案方式は自身が所属するクラスタヘッドにデータを送信する。そのため, 収集層数が増加すると従来方式に対して高い省電力効果がある。

以上のことから, 提案方式は線形的な値の変化を示すイベントでは高い省電力効果を示し, かつ高い精度を維持することが分かった。また, 収集層数が増加すると従来方式に対して高い省電力効果を示し, かつ同等の精度を有することが分かった。

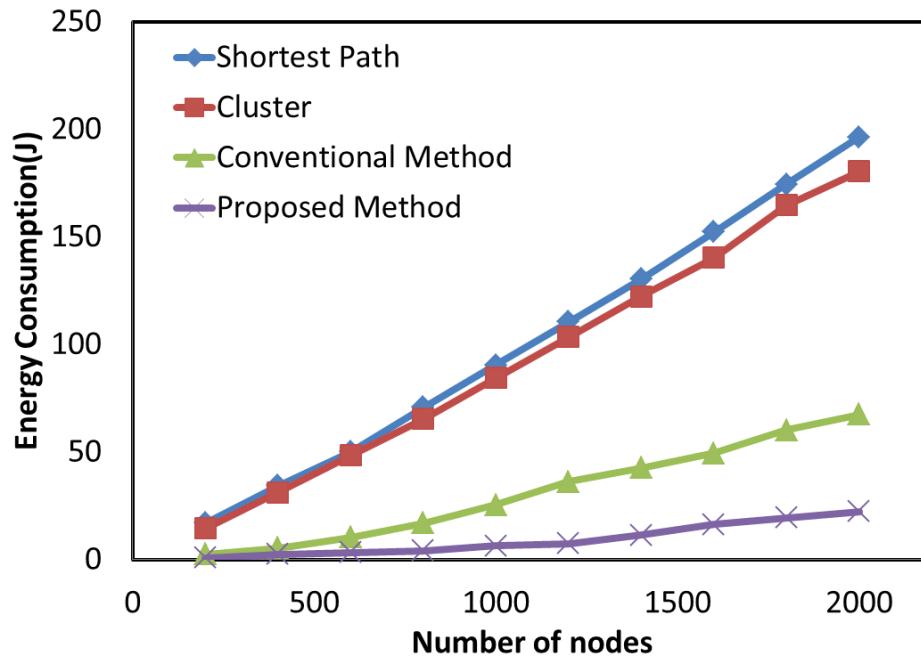


図 4.3. 提案方式 2 線形モデルによるノード数変化における消費電力への影響

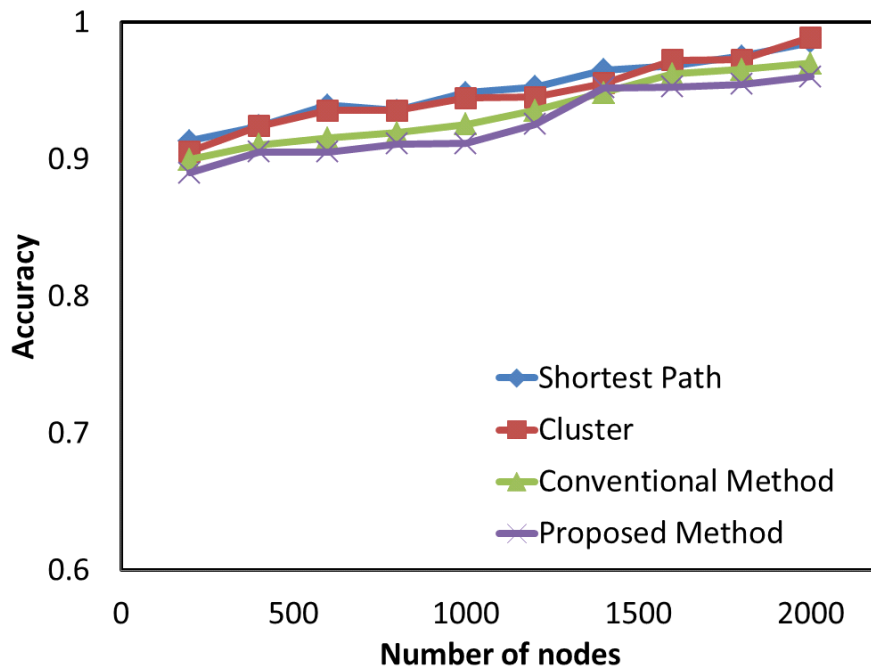


図 4.4. 提案方式 2 線形モデルによるノード数変化における精度への影響

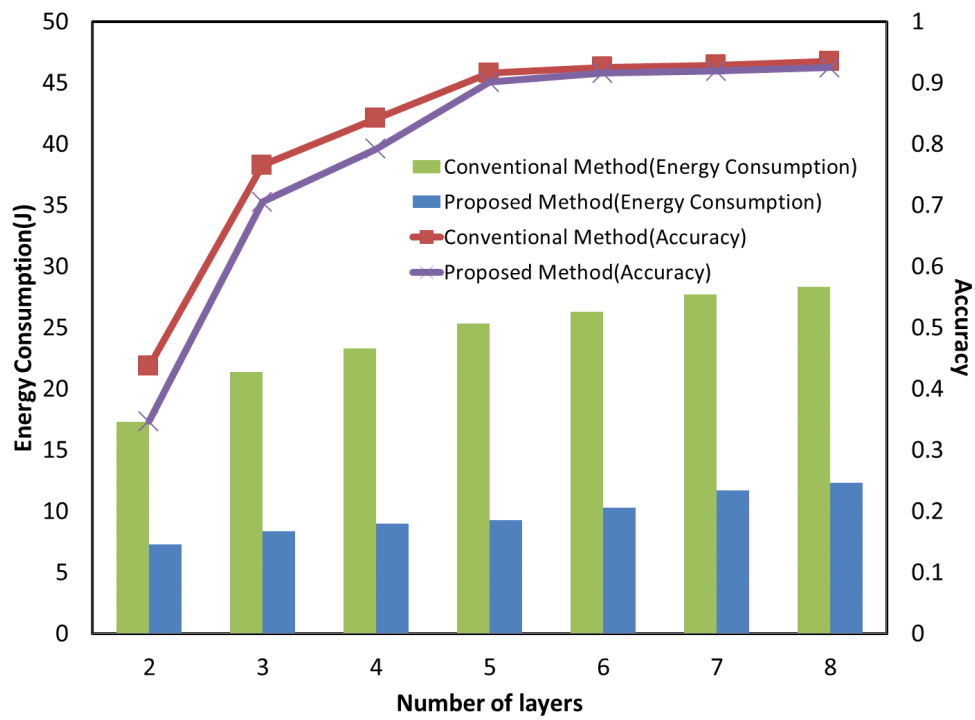


図 4.5. 提案方式 2 線形モデルによる収集層数の変化における消費電力と精度への影響

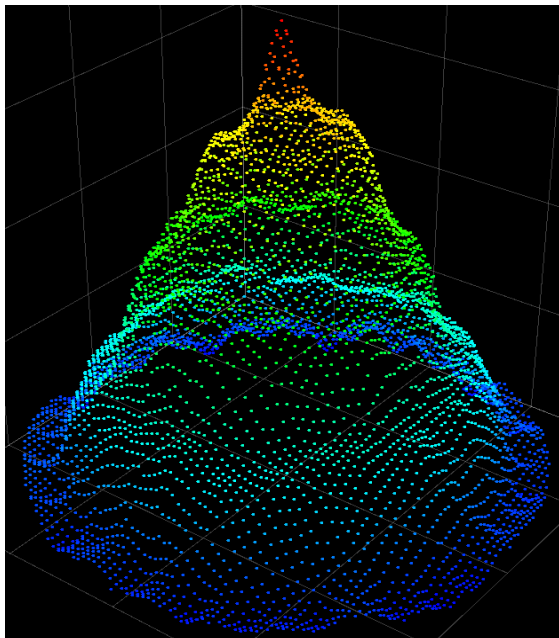


図 4.6. シミュレーション 1 提案方式 2 イベント観測値の形状

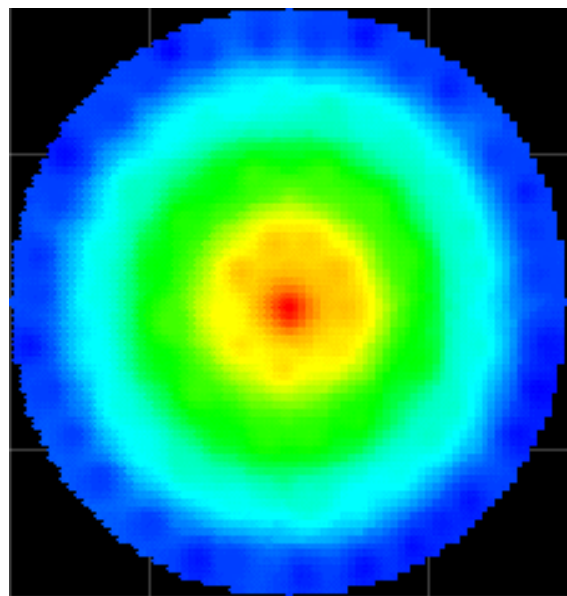


図 4.7. シミュレーション 1 提案方式 2 イベントの形状

4.4.2 シミュレーション 2 の結果

シミュレーション結果を図 4.8, 図 4.9, 図 4.10 に示す. 図 4.8 はノード数変化による消費電力への影響を検証した結果である. 図中の折れ線グラフは上から順に最短経路方式, クラスタ方式, 従来方式, 提案方式を示し, 横軸は総ノード数, 縦軸は消費電力量 (J) を示している. 提案方式は, 総ノード数が 2000 の場合には, 最短経路方式に対して約 0.1 倍, クラスタ方式に対して 0.12 倍, 従来方式に対して 0.40 倍の消費電力量でのデータ収集が可能であることが分かる. 図 4.9 はノード数変化による精度への影響を検証した結果である. 横軸は総ノード数, 縦軸は精度を示している. 図中の折れ線グラフは上から順に最短経路方式, クラスタ方式, 従来方式, 提案方式を示し, 横軸は総ノード数, 縦軸は精度を示している. 図 4.10 は収集層数変化による消費電力と精度への影響を検証した結果である. 図中の折れ線グラフは精度, 棒グラフは消費電力量を示し, 横軸は収集層数, 左側の縦軸は消費電力量 (J), 右側の縦軸は精度を示している. 提案方式は従来方式に対して, 収集層数に関わらず 10 %程度精度が低下している. また, 収集層数が増加すると提案方式は従来方式に対して, 消費電力量は微増の傾向にあることが分かる.

図 4.3, 図 4.4 より, 提案方式はノード数の増加に伴い, 高い省電力効果を示すが, 比較方式に対して低い精度を示すことが分かる. 提案方式はクラスタヘッドにデータを集約し, SINK に送信する観測データを選択する. そのため, 各クラスタが 2 つ以上の層の領域を含まない限り, 1 つのセンサデータのみを送信することになる. 単純な観測値変化を示すイベントでは高い精度を示したが, 複雑な観測値形状を再現するためには送信ノード数が少なすぎたためである. 次に図 4.5 より, 収集層数が増加すると従来方式との精度の差が大きくなることが分かる. また, 収集層数が 5 層を超えると精度の上昇が小さくなる. このシミュレーションで用いた複雑な観測値形状の分布推定の従来方式が示す精度の限界が約 90 %, 提案方式が約 80 %だと考えられる. 提案方式ではイベント観測値形状によって大きく精度の差が生じることが分かった.

以上のことから, 提案方式は複雑な値の変化を示すイベントにおいても高い省電力効果を示すが, 比較方式に対して, 精度は低下することが分かった. また収集層数が増加しても提案方式では精度が約 10 %低下することが分かった.

4.5 議論

提案方式はネットワーク領域をクラスタに分割し, クラスタヘッドが SINK へのデータ送信を担う. そのため, 他のノードと比較し, クラスタヘッドに選出されたノードが消費する電力量が大きくなってしまふ. 定期的に残存電力が大きいノードにクラスタヘッドの役割を交代さ

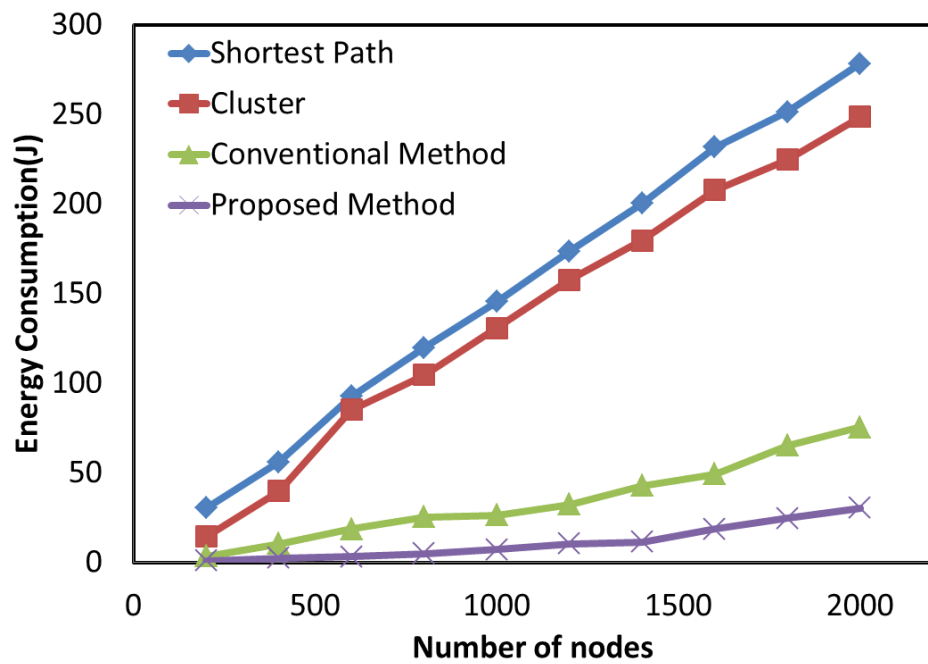


図 4.8. 提案方式 2 複雑なモデルによるノード数変化における消費電力への影響

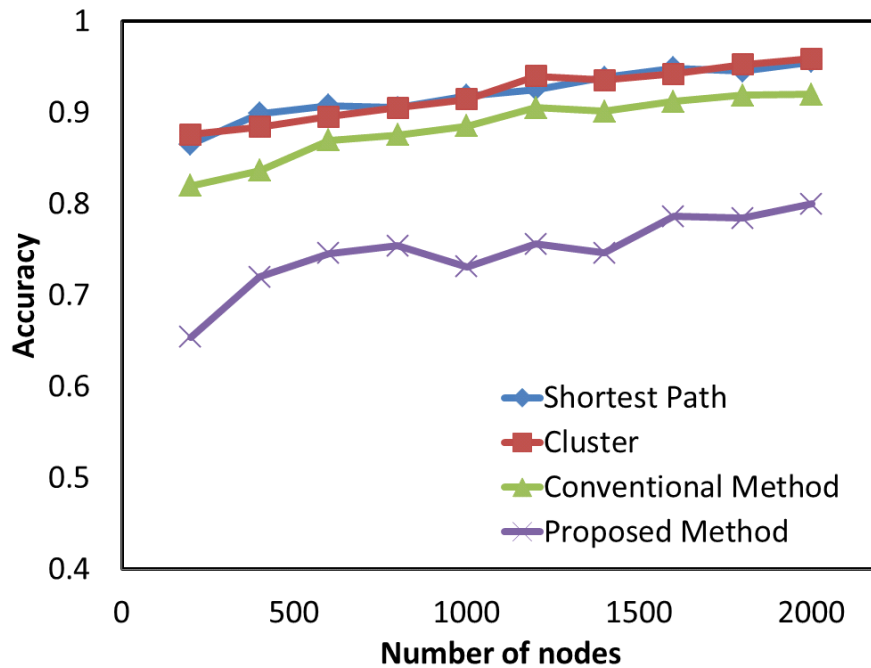


図 4.9. 提案方式 2 複雑なモデルによるノード数変化における精度への影響

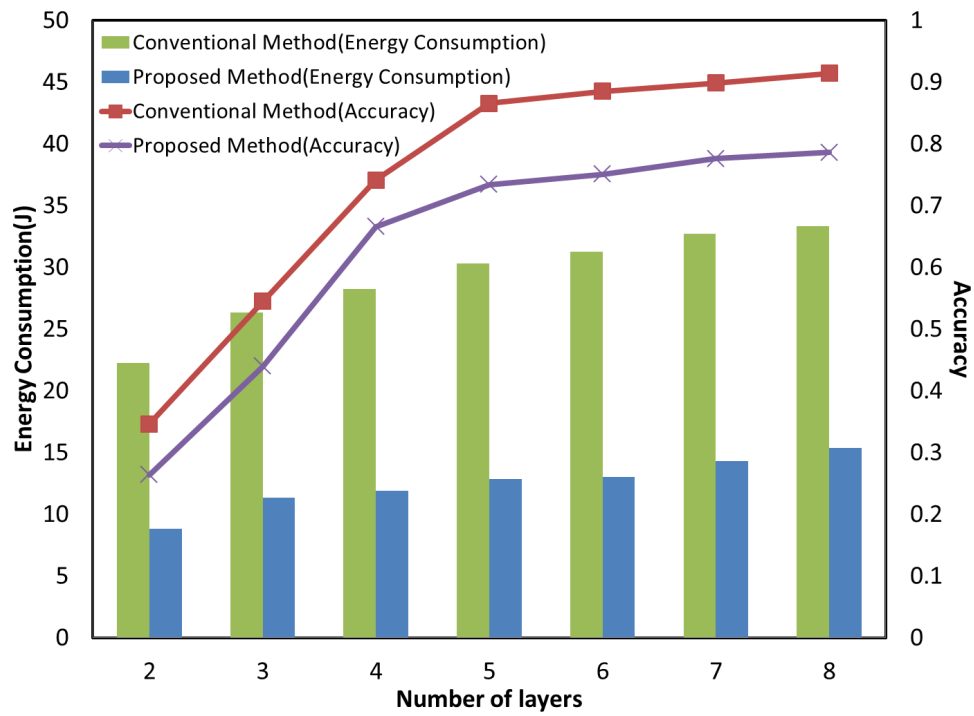


図 4.10. 提案方式 2 複雑なモデルによる収集層数の変化における消費電力と精度への影響

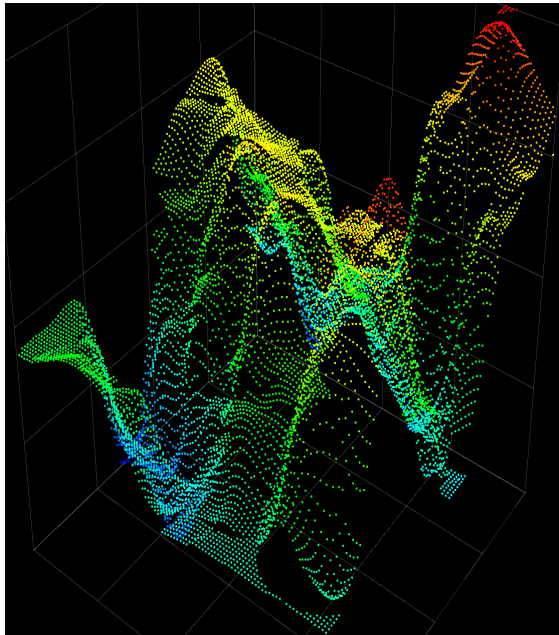


図 4.11. シミュレーション 2 提案方式 2
イベント観測値の形状

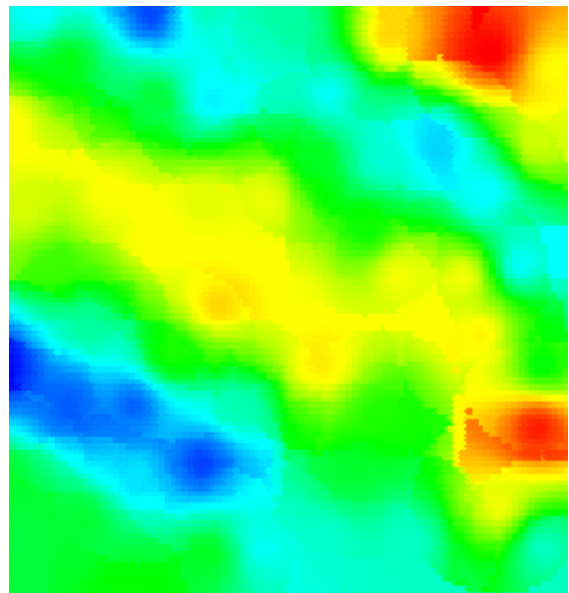


図 4.12. シミュレーション 2 提案方式 2
イベントの形状

せることによって、各センサノードの消費電力量の均一化を図るが、クラスタを維持するために定期的にメッセージ交換等をしなくてはならない。また、従来方式と同様にイベントの場所と値が時間によってほぼ変化しないようなイベントの場合、常に同じノードがデータを送信することになり、各センサノードの消費電力量の均一化が図れない。1つのノードがダウンしてしまうと、データ送信ができず孤立するノードが生じる可能性があり、負荷を均一化させることは重要である。そのため、より負荷が大きいと考えられる地域に大きなバッテリーを搭載したセンサノードを配置することや、各センサノードの消費電力量の均一化を図る仕組みを取り入れていくことが必要である。また、図 4.4, 図 4.9 より、線形的な値の変化を示すイベントでは従来方式と同等の精度を有することが分かるが、複雑な値の変化を示すイベントでは従来方式よりも精度が低下することが分かる。そのため、観測対象となるイベントの特徴と必要とされる精度によって、データ収集方式を使い分ける必要がある。

第 5 章

結論

5.1 本論文のまとめ

本研究では、無線センサネットワークにおいて最大の課題である消費電力量の削減という問題について注目した。センサノードの動作で消費される電力の内訳として、消費電力量の最も高い割合を占める要因がデータ通信時によるものであるため、無駄なデータ通信を排除することにより、省電力化を図り、収集した観測データから高精度な観測値分布図の再現を目的としたデータ収集法を提案した。本方式は、イベント観測値の最大値と最小値、またイベント領域の大きさからイベントの傾向を判断し、一定の間隔の値を設定する。そして、その値を観測したノードのみがデータを送信することによって、一定の間隔の値ごとの領域の検知を実現し、消費電力量を削減する方式である。

この方式の有用性を示すにあたり、3種類の異なる観測値分布を持つイベントでシミュレーションを行い、ノード数、収集層数を変化させ、その影響を検証した。シミュレーション 1 では、イベントの中心地点から線形的に一定の値で観測値が小さくなるシンプルなイベント観測値形状を適用した。シミュレーションの結果、提案方式は比較方式に対して、高い省電力効果を示し、かつ同等の精度を有することが分かった。しかし、収集層数が少ない場合は低い精度を示すため、最低限必要な精度を決定し、収集層数を決めなければならない。シミュレーション 2 では、イベントの中心地点から急激に観測値が小さくなる非線形的なイベント観測値形状を適用した。シミュレーションの結果、提案方式は比較方式に対して、高い省電力効果を示し、かつ同等の精度を有するが、逆距離荷重法の影響によって、観測点と観測点の間を線形的に補間してしまうため、線形的な値の変化を示すイベントと比べ、精度が低下することが分かった。シミュレーション 3 では、複雑にイベント値が変化するイベント観測値形状を適用した。シミュレーションの結果、提案方式は比較方式に対して、高い省電力効果を示し、かつ同等の精度を有するが、単純な値の変化を示すイベントと比べ、精度が低下することが分かった。また、収集層数が少ない場合、観測値情報を収集していない地点の補間による推定値を線形的に

補間してしまい、複雑な波打つような形状を再現できないため、精度が大きく低下することが分かった。

また、本論文では、実環境で観測が想定されるイベントは温度や湿度のように地理的相関が強く、広域な範囲に及ぶイベントでは近い場所に位置するノードは同一の観測値情報を観測すると考えられるため、これに対して省電力観点でより効率的にデータ収集を可能とする方式を提案した。現行方式では、SINK が設定した値を観測したノードがデータを送信するが、近い場所に位置するノードから同一の情報が送信されてしまい、冗長である。そこで現行方式を拡張し、重複した観測情報を持つ複数のノードからのデータ収集を抑制するために、イベントの発生領域の推定に重点を置き、SINK が指定した値を観測したノードが所属するクラスタの情報のみを収集するデータ収集法を提案した。

この方式の有用性を示すにあたり、2種類の異なる観測値分布を持つイベントでシミュレーションを行い、ノード数、収集層数を変化させ、その影響を検証した。シミュレーション1では、イベントの中心地点から線形的に一定の値で観測値が小さくなるシンプルなイベント観測値形状を適用した。シミュレーションの結果、提案方式は従来方式に対して、高い省電力効果を示し、かつ同等の精度を有することが分かった。また、収集層数が増加すると従来方式に対して高い省電力効果を示し、かつ同等の精度を有することが分かった。シミュレーション2では、複雑にイベント値が変化するイベント観測値形状を適用した。シミュレーションの結果、提案方式は従来方式に対して複雑な値の変化を示すイベントにおいても高い省電力効果を示すが、比較方式に対して、精度は低下することが分かった。また収集層数が増加すると、提案方式では精度が約10%低下するため、観測対象となるイベントの特徴と必要とされる精度によって、データ収集方式を使い分ける必要がある。

以上より、本論文では無線センサネットワークにおける最重要課題の一つである消費電力量の削減という問題に対して2つの新たなデータ収集法の提案を行い、計算機シミュレーションを用いてその有用性を示した。

5.2 今後の課題

本提案方式はイベント発生後、初回のデータ収集時は全てのイベント観測ノードからデータを収集する。その後、SINK が設定した値を観測したノードのみがデータを送信するが、イベント測定が1回の場合、本提案方式の利点が無くなってしまう。全てのイベント観測ノードからデータを収集するのではなく、送信ノードを少なくし、高い精度の観測値分布推定を実現する方法を考えていく必要がある。また、センサノードが1つでもバッテリー切れになると、システムの信頼性が大きく下がってしまうため、各センサノードの消費電力量の均一化を図る方法を考えていく必要がある。また、観測値補間法として逆距離荷重法を使用したのが、イベントの特徴によって補間方式を変更すれば複雑な形状のイベント観測にも適用可能であると考え

る。そのため、様々な補間法を検討する必要がある。

本提案方式は測定対象となるイベント毎に適したパラメータを設定するため、実験を重ね、より精度が高くなる条件をみつける必要がある。それゆえ、適したパラメータ設定に手間がかかり実用的ではないという欠点がある。今後の課題として、ユーザが容易にパラメータ設定を行える方式を検討し、より複雑な条件や実データを用いたシミュレーション評価を行う必要がある。その後、無線センサネットワーク用端末に提案方式を導入し、実空間での様々な影響を考慮するために実証実験を行う必要がある。また、災害時等にトラヒックが SINK に集中してしまい、ダウンしてしまう可能性があるため、改善策を考慮する必要がある。

謝辞

本論文の作成にあたり日頃よりご指導頂きました朝香卓也教授，佐藤雅俊助教にこの場を借りて深くお礼申し上げます．また本研究を進めるにあたり多くの場面で助言を頂いた研究室の皆様に深くお礼申し上げます．

参考文献

- [1] 財団法人ニューメディア開発協会, “センサネットワークを活用した情報システムに関する調査・開発報告書,” May 2006.
- [2] K. Akkaya and M. Younis , “A survey on routing protocols for wireless sensor networks,” Elsevier Ad Hoc Network Journal, vol. 3, no. 3, pp.325-349, May 2005.
- [3] S. Tilak, N. Ghazaleh, and W. Heinzelman, “A tazonomy of wireless microsensor network models,” ACM Mobile Computing and Communications Review (MC2R), vol.6, nol. 2, pp.28-36, Apr. 2002.
- [4] 河井 彩公子, 朝香 卓也, “イベント駆動型センサネットワークにおけるエッジ探索を用いたデータ収集法,” 電子情報通信学会論文誌 B Vol. J95-B, No.7, pp.848-859, 2012.
- [5] 河井 彩公子, 朝香 卓也, “イベント駆動型センサネットワークにおけるクラスタ構造を用いたエッジ探索型データ収集法,” 電子情報通信学会技術研究報告 USN, ユビキタス・センサネットワーク 112(406), 45-50, 2013
- [6] 門沢 宏樹, 朝香 卓也, “イベント駆動型センサネットワークにおけるバッテリー残量を考慮した経路制御,” 電子情報通信学会論文誌 B Vol. J97-B, No.6, pp.465-467, 2014.
- [7] Z. Yu and Y. Guan , “A dynamic enroute scheme for filtering false data injection in wireless sensor networks,” IEEE INFOCOM, IEEE 2006.
- [8] W. Heinzelman, A. Chandrakasan and H.Balakrishnan, “Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks,” Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), pp.1-10, jan. 2000.
- [9] O. Younis, S. Fahmy, “Distributed clustering in ad hoc sensor networks : A hybrid, energy efficient approach,” IEEE Transaction on Mobile Computing, vol.3, No.4, pp.366-379, 2004.
- [10] S. Lindsey, C. Raghavendra, and K. Sivalingam, “Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics,” IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol.13, No.9, pp.924-935, 2002.
- [11] C. Intanagonwiwat, R. Govindan and D. Estrin, “Directed diusion: A scalable and ro-

- bust communication paradigm for sensor networks,” ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom), pp.56-67, 2000.
- [12] C. Intanagonwiwat, R. Govindan and D. Estrin, “Directed diusion for wireless sensor networking,” ACM/IEEE Transactions on Networking, vol.11, nol. pp.2-16, 2003.
 - [13] W. Heinzelman, A. Chandrakasan and H.Balakrishnan, “Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks,” ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom), pp.174-185, 1999.
 - [14] J. Kulik, W. Heinzelman, “Negotiation based protocols for disseminating information in wireless sensor networks,” Wireless Networks, vol.8, no.2, pp.169-185, 2002.
 - [15] S. Lindsey, C. Raghavendra, and K. Sivalingam, “Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics,” IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol.13, No.9, pp.924-935, 2002.
 - [16] Y. Xu, J. Heidemann, and D. Estrin, “Geography-informade energy conservation for ad hoc routing,” ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking(Mobicom), pp.70-84, April 2001.
 - [17] B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishman, and R. Morris, “AN energy-ecient coordination algorithm for topolog maintenance in ad hoc wireless networks,” ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking(Mobicom), pp.85-96, April 2001.
 - [18] Z. Zeng, Z. Wu, and H. Lin, “An event driven clustering routing algorithm for wireless sensor networks,” IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1802-1806, Sept. 2004.
 - [19] O.Buyanjargal and Y.Kwon, “AEEC: Adaptive and energy efficient clustering algorithm for event-driven application in wireless sensor networks,” IEEE International Conference on Industrial Electronics and Applications(ICIEA), pp. 3950-3954, Dec. 2009.
 - [20] V.Quang and T.Miyoshi, “Adaptive routing protocol with energy efficient and event clustering for wireless sensor network,” IEICE Transactions on Communications, Vol. E91-B, No9, pp.2795-2805, Sep. 2008.
 - [21] C.Figueiredo and E. F. Nakamura, “A hybrid adaptive routing algorithm for event-driven wireless sensor networks,” Sensors, vol. 9, no. 9, pp.7287-7307, Sept. 2009.
 - [22] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, “Wireless sensor network survey,” Computer Networks, vol.52, no. 12, pp. 2292-2330, Dec. 2008.
 - [23] C. Li, H. Zhang, and B.Hao, “A survey on routing protocols for large-scale wireless sensor networks,” Sensors, vol. 11, no.4, pp.3498-3526, March 2011.

- [24] E. Fasolo, M. rossi and J. Widmer, "In-network aggregation techniques for wireless sensor networks," *IEEE Wireless Communications*, vol.14, no. 2, pp.70-87, Feb. 2007.
- [25] K. K. Chintalapudi and R. Govindan, "Localized edge detection in sensor fields," *Ad Hoc Networks*, vol.1, pp.273-291, Sept. 2003.
- [26] Ritika, T. Kumar, and A. Kaur, "Outlier detection in WSN a survey," *IJARCSSE*, Volume 3, Issue 7, pp.609-617, Jul. 2013.
- [27] V. Chandola, A. Banerjee and V. Kumar, "Outlier detection: a survey," *Technical Report*, University of Minnesota, 2007.
- [28] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal, "Wireless sensor network suvey," *Computer Networks*, vol.52, no. 12, pp.2292-2330, Dec. 2008.
- [29] C. Li, H. Zhang, and B. Hao, "A survey on routing protocols for large-scale wireless sensor networks," *Sensors*, vol.11, no. 4, pp.3498-3526, March. 2011.
- [30] E. Fasolo, M. Rossi and J. Widmer, "In-network aggregation techniques for wireless sensor networks: A survey," *IEEE Wireless Communications*, vol.14, no. 2, pp.70-87, Feb. 2007.
- [31] IT 化監視制御技術協同研究委員, "IT 化監視制御システムの構成技術," *電気学会技術報告*, pp.31-34, 2009.
- [32] T. Dam and K. Langendoen, "An adaptive energy ecient MAC protocol for wireless sensor networks," *ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems(SENSYS)*, pp.171-180, Nov. 2002.
- [33] K. Jamieson, H. Balakrishnan, and Y. Tay, "A MAC protocol for event-driven wireless sensor networks," *Technical Report*, MIT-LCS-TR-894, MIT Laboretory for Computer Science, May 2003.
- [34] 塩出 志乃, "逆距離荷重法によるネットワーク空間上での点補間に関する研究," *Theory and Applications of GIS*, 2004, Vol.13, No.1, pp.33-41.