

卒業論文

2001年度(平成13年度)

GOMASHIO : アドホックセンサネットワーク におけるノード位置特定方式

指導教員

慶應義塾大学環境情報学部

徳田 英幸

村井 純

楠本 博之

中村 修

南 政樹

慶應義塾大学環境情報学部

岩谷 晶子

GOMASHIO:アドホックセンサネットワークにおける ノード位置特定方式

近年，ハードウェアの発達により，センサデバイスと無線通信能力を持った小型コンピュータによるセンサネットワークが実現可能となった．センサネットワークでは数百から数万のセンサノードが自律分散型ネットワークを構築する．各センサノードは，センサによる環境情報の取得と簡単な計算処理，そして周辺ノードやセンサネットワークの情報を利用するアプリケーションと通信を行う．

センサノードが取得した情報をアプリケーションから利用する場合，“情報を取得した位置”は欠かせない要素である．しかし，センサネットワークにおいてセンサノードの位置情報を取得するのは，無線通信デバイスによる通信の制約，計算処理能力の制約などが存在し容易ではない．

本研究では，センサネットワークの制約下でセンサノードの位置を特定するために必要な要件について考察し，これをもとにGOMASHIOモデルを提案する．GOMASHIOモデルは分散するセンサノードが位置情報を持つGOMAノードの位置情報とホップカウントを取得し自分の位置を計算する．また，存在する可能性のある範囲を求めることで，取得した位置情報に誤差が含まれる可能性を示す指標をアプリケーションに対して提供する．これにより，アプリケーションが位置情報を利用する場合には誤差を考慮することが可能となる．

また，GOMASHIOモデルを利用した位置特定システムに対してシミュレーションによる評価を行った．存在する可能性のある範囲が小さい程，位置情報が正確であることにより，誤差が含まれる可能性を示す指標として，存在する可能性のある範囲の利用が適切であることが示された．GOMASHIOモデルは，センサネットワークにおいて位置情報の取得に有効であることを示した．

慶應義塾大学 環境情報学部
岩谷晶子

Abstract of Bachelor's Thesis

Academic Year 2001

GOMASHIO: Proximity Based Localization In Wireless Ad-Hoc Sensor Networks

Summary

Recent advances in radio and integrated circuit technology have enabled construction of wireless sensor networks. The networks formed by hundreds or thousand of nodes process distributed algorithms, self-organize themselves and carry out wide-area sensing. Each node has the ability to sense elements of its environment, perform simple computations, and communicate either among its peers or directly to an external observer.

It is essential for applications to know where the data was sensed. Localizing sensor nodes and data in wireless sensor networks is far from easy because of constraints in a network architecture, wireless communication devices and computational power .

In this research we propose a GOMASHIO, a technique for localizing nodes under hardware constraints. GOMASHIO enables nodes to estimate their own location and area from proximal GOMA locations and hop counts. GOMASHIO provides applications with estimation of potential area of existence and the error.

We ran simulations of GOMASHIO and demonstrated it that GOMASHIO was a localizing solution for networks with several hundreds nodes. Our simulations confirm the effectiveness of localizing nodes with GOMASHIO in wireless sensor networks.

Akiko Iwaya

**Faculty of Environmental Information
Keio University**

目次

第1章	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	本研究の目的および意義	3
1.3	本論文の構成	3
第2章	センサネットワークにおける位置情報	5
2.1	センサネットワークの概要	6
2.1.1	センサネットワークの特徴	6
2.1.2	センサネットワークの先行研究	7
2.2	センサネットワークにおける位置特定的前提	8
2.3	センサネットワークにおける位置情報取得の諸課題	9
2.3.1	位置情報の伝搬	9
2.3.2	位置情報の特定	10
2.3.3	位置情報の信頼性	11
2.4	センサネットワークにおける位置情報取得の要件	11
2.5	本章のまとめ	11
第3章	センサネットワークにおける位置特定手法の考察	13
3.1	位置特定手法の比較検討	14
3.1.1	Lateration	14
3.1.2	Proximity	15
3.1.3	各方式の問題点	15
3.2	本研究のアプローチ	16
3.2.1	位置特定的前提条件	16
3.2.2	GOMASHIO	17
3.3	本章のまとめ	19
第4章	関連研究	20
4.1	関連研究	21
4.2	各研究の比較	23
4.3	本章のまとめ	24

第5章	GOMASHIOを利用した位置特定システムの設計	25
5.1	構成要素	26
5.2	位置特定アルゴリズム	26
5.2.1	位置情報の宣伝とホップカウントの取得	26
5.2.2	存在する可能性のある範囲の取得と位置の計算	27
5.2.3	SHIOGOMA 変異	30
5.3	本章のまとめ	30
第6章	実装と評価	31
6.1	シミュレータの実装	32
6.1.1	実装環境	32
6.1.2	ノード情報	32
6.1.3	位置特定アルゴリズムの実装	33
6.2	評価	34
6.2.1	シミュレーション結果	34
6.3	本章のまとめ	40
第7章	結論	41
7.1	今後の課題	41
7.1.1	シミュレーション	41
7.1.2	GOMASHIOの機能拡張	42
7.2	まとめ	42

目 次

1.1	TINY OS プロジェクト [3] によるセンサノードのプロトタイプ	1
1.2	アプリケーションの要求する位置	3
2.1	アドホックセンサネットワーク	7
2.2	位置情報の宣伝	9
3.1	Lateration	14
3.2	Proximity の問題点	16
3.3	固定的な半径と可変的な半径	17
3.4	ランドマークから 3 ホップの例	18
3.5	GOMASHIO モデル	18
3.6	センサノードの存在する可能性のある範囲	19
4.1	多辺測量	21
4.2	電波の到達範囲と受信角度を利用した存在する可能性のある範囲の絞り込み	22
5.1	位置情報の宣伝とホップカウントの取得	28
5.2	存在する可能性のある範囲を求める方法	29
5.3	存在する可能性のある範囲の範囲矩形	30
6.1	シュミレータの概観	32
6.2	sensor_node 構造体	33
6.3	location_condition 構造体	33
6.4	neighbor_node 構造体	34
6.5	位置特定アルゴリズムにおける関数群	34
6.6	孤立ノードの割合	36
6.7	位置情報の誤差の累積分布図：疎な場合	37
6.8	位置情報の誤差の累積分布図：密な場合	38
6.9	位置の誤差と存在する可能性のある面積:疎な場合	39
6.10	位置の誤差と存在する可能性のある面積:密な場合	40

表 目 次

4.1	機能性の比較	24
5.1	SHIO ノードが持つリストの例	27
6.1	実装環境	32
6.2	測定条件	35
6.3	GOMA ノードが 30%の分散	36
6.4	疎な場合と密な場合の定義	37
6.5	ヒストグラムの分析	38
6.6	相関係数	39

第1章 序論

1.1 本研究の背景

近年，計算機の小型化に伴って，従来のコンピューティング環境とは異なった新しいコンピューティング環境が登場している．その一つがセンサネットワークといわれる，センサをもつ小型コンピュータ（以降センサノード）によって構成される無線アドホックネットワークである．センサネットワークの実現はハードウェアの発展によるところが大きい．具体的には，電力消費量を抑えたデジタル回路の実現 [1]，センサやアクチュエータなどを統合した超小型基盤 (MEMS)[2] の実現，無線通信技術の発達により，超小型のセンサノードによって構成される無線ネットワークが低コストで実現可能となったことである (図 1.1) ．

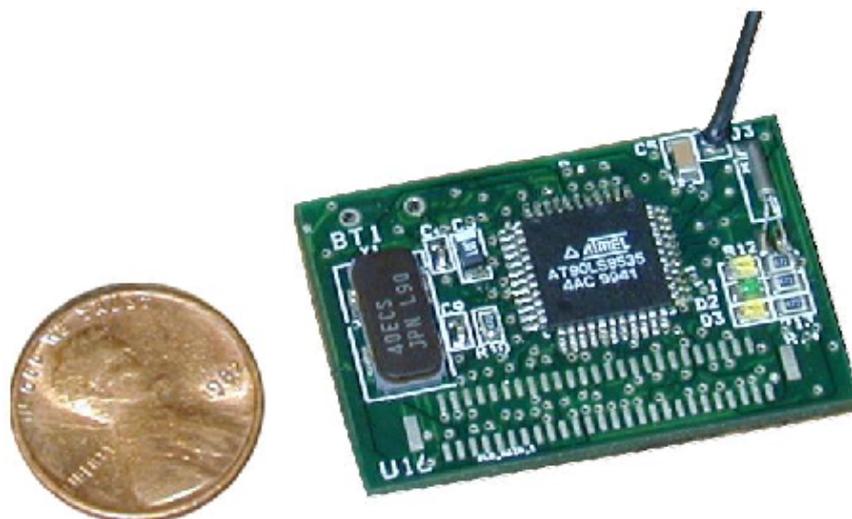


図 1.1: TINY OS プロジェクト [3] によるセンサノードのプロトタイプ

このようなテクノロジーにより，単一センサノードのセンサによる情報の収集能力に加え，センサノード同士が協調動作を行ってネットワークを構築することによって，より大きなスケールで情報の収集が可能となる．

今後，センサネットワークはさまざまな分野において，新しい情報収集・処理方法を提供すると考えられる．例えば，ユビキタスコンピューティング環境におけるコン

テキストウェアアプリケーションにおいては、アプリケーションはGPSや温度センサなどのセンサデバイスを通じて、ユーザの状況を認識し、状況に併せた動作をする。このような場合、ユーザが複数のセンサを携帯する代わりに、ユーザの近傍に配置されたセンサネットワークを利用して情報を取得できる。もう一つの例として、リモートセンシングを挙げる。衛星を利用した場合、広域的な情報を取得するためには有効であるが、局所的な情報を取得する場合には、金銭的成本がかかるため適切ではない。このような場合には、情報を収集したいエリアに低コストなセンサノードを大量に用いることによって、高いスケーラビリティを持ち、密な情報を取得可能なセンサネットワークが適切である。

センサネットワークは、サーバによって管理される中央集権的な構造ではなく、各センサノードが自律的に動作し、協調してネットワークとしての機能を果たす分散構造である。このため、アプリケーションが各センサノードの状態を把握や制御をすることは困難である。代わりに、各センサノードはアプリケーションの要求に対応可能なように、自分自身の位置情報などの状態を把握する必要がある。例えば、“10:33分52秒の地震データ”、“駅前の温度”などのような情報をアプリケーションが要求している場合、各センサノードは自分が持つセンサの種類や時間、自分の位置などの状態を把握し、アプリケーションが要求する情報を取得可能な場合にはデータを送信する。

ノードが把握しなければならない状態の中で、位置に限定して考えると、地震が検知された場合、火事が起こった場合、友人を発見した場合、それらの情報は“どこで起こったか”という位置情報が付属してはじめてアプリケーションにとって価値がある情報となる。多くのアプリケーションは、センサネットワーク上で取得されたデータだけでなくそのデータが取得された位置を必要とする。

データの位置はセンサの種類によって、データを取得したセンサノードの位置をそのまま利用する場合と、センサの向きや範囲に合わせてセンサノードの位置を補正する場合がある。図1.2はそれぞれの例を示している。左は、ノードの位置をそのままデータの位置として利用する例として、分散する温度センサによって作成する温度分布図を示している。右は、データの位置を取得するためにセンサノードの位置を補正しなければならない例として、動物をトラッキングするアプリケーション例を示している。いずれの場合にもセンサデータの位置を特定するためには、データを取得したセンサノードの位置が必要である。しかし、アドホックに構築されるセンサネットワークにおいてセンサノードの位置を特定するのは容易ではない。その理由を以下に示す。

- センサノードの配置は、上空からノードをばらまいて行うように各ノードの位置をネットワーク構築以前に決定して、その通りに配置することは困難である。
- 屋外で利用する場合、センサノードは風などの影響で移動する可能性があり、センサノードの位置は固定ではない。

位置情報を取得する最も単純な方法はセンサノードすべてがGPSのような位置情報取得デバイスを利用することである。しかし、センサネットワークの構築には最大で数万個のセンサノードを利用することが想定されている。個々のセンサノードの位置

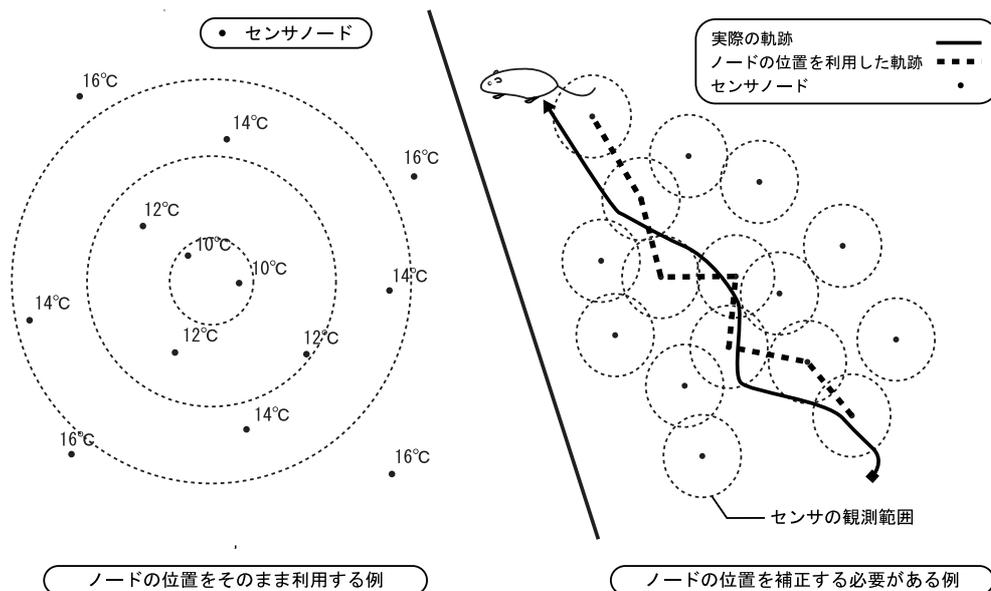


図 1.2: アプリケーションの要求する位置

を特定するために、すべてのセンサノードが位置情報取得デバイスを利用する方法はコストの面から考えると現実的とは言えない。

センサネットワークにおいては、全てのセンサノードが位置情報を取得するためのデバイスを利用しないで、センサノード上で動作するソフトウェアで位置情報の特定を行うのが望ましい。本論文では、上記の要件を満たすセンサノードの位置特定方式を提案する。

1.2 本研究の目的および意義

本研究の目的は、センサネットワークにおいて、ソフトウェアによってノードの位置を特定することである。この目的を達成するために、センサネットワークにおける位置特定方式として GOMASHIO を提案する。GOMASHIO では、位置情報を取得可能なノードの情報を利用して、位置情報を取得できないノードが自分の位置を見積もる。GOMASHIO によって、センサネットワークを構成するノードの位置の特定が可能となり、アプリケーションが要求するデータの位置を取得するために、データを取得したノードの位置を利用することが可能となる。

1.3 本論文の構成

本論文は、全 7 章から成る。次章では、本研究の想定するセンサネットワークについて述べる。続く 3 章では、センサノードの位置の特定方式について論考し、本研究のアプローチとして GOMASHIO の説明をする。4 章では、センサネットワークにお

けるノードの位置特定を目的とする関連研究を挙げ、機能性の比較を行う。5章では、GOMASHIOを利用した位置特定システムの設計について述べ、6章でGOMASHIOの評価用シュミレータの実装の説明とGOMASHIOの評価を行なう。7章にて、本論文をまとめ、今後の課題について言及する。

第2章 センサネットワークにおける位置情報

本章ではまず，本研究で想定するセンサネットワークの特徴について述べる．次に，センサネットワークにおけるノードの位置情報取得の諸課題について考察する．最後にこれらの考察を踏まえセンサネットワークにおいて位置情報取得の際に満たすべき要件について明らかにする．

2.1 センサネットワークの概要

センサネットワークには、さまざまな特徴があり、またアプリケーションによってその特徴は異なる可能性がある。本節では、まず本研究において重要なセンサネットワークの特徴を挙げる。次に、センサネットワークの課題に取り組む先行研究を紹介する。

2.1.1 センサネットワークの特徴

センサネットワークの特徴として、本研究で特に注目するものはハードウェア、無線アドホックネットワーク、自律分散ネットワークである。各項目を詳細に説明する。

貧弱なハードウェア

以下にセンサノードに必須なハードウェアをまとめる。

- 計算処理能力 計算処理能力は、小型なコンピュータを実現するために PC などに比べ劣るが、位置特定やルーティングなどの計算を行うために必要である。
- センサ センサの種類はアプリケーションの目的に応じて異なるものが用いられる。例えば、温度センサや、光量、赤外線、カメラなどがある。
- 無線通信デバイス アドホックネットワークを構築するために、無線通信デバイスが利用される。オフィスや家庭などで一般的に用いられる IEEE802.11b[4] 準拠のデバイスや Bluetooth[5] に準拠したデバイスのように、指向性が低く、障害物の存在に強い電波を利用した無線デバイスが適している。
- バッテリ センサネットワークは恒常的な電力供給を得られない場所での利用を要求するため、バッテリーが必要となる。センサネットワークにおいては、電力消費量を抑えた動作をすることが一つの大きな

無線アドホックネットワーク

センサネットワークでは大量のセンサノードを高密度に配置し、無線通信機能を利用してアドホックネットワークを構築する。アドホックネットワークでは、各センサノードは周辺ノードのみと通信を行い、それが全体として大きなネットワークを実現する。ケーブル等のインフラストラクチャを利用しないため、トポロジの動的変化に柔軟に対応可能であり、ネットワークの再構築が比較的容易に可能なことが特徴である (図 2.1)。

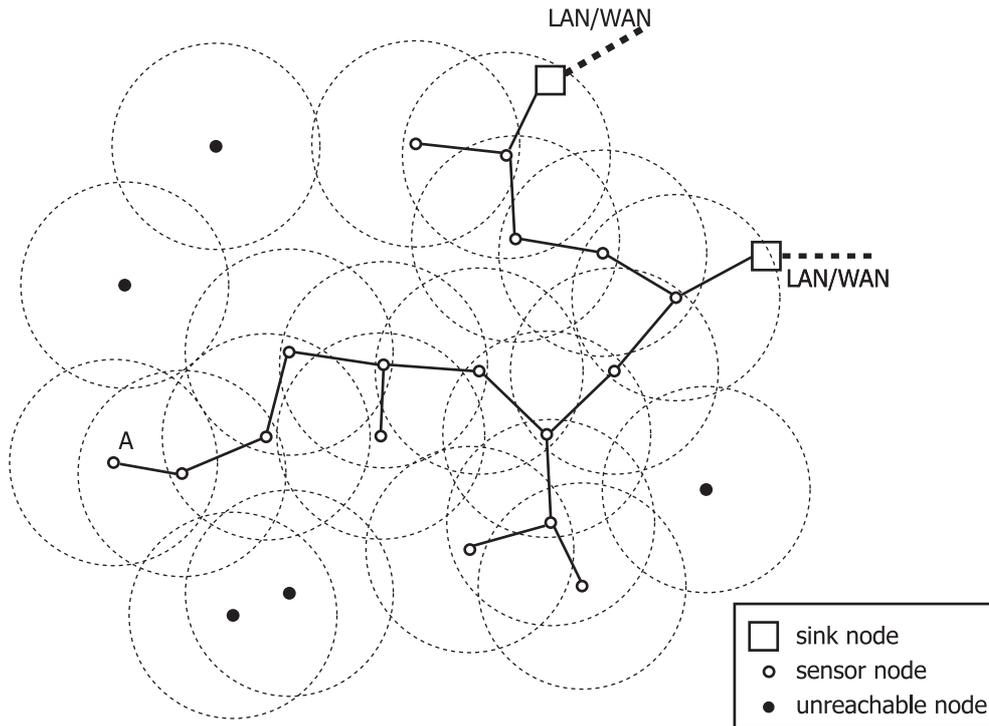


図 2.1: アドホックセンサネットワーク

自律分散ネットワーク

センサネットワークはアプリケーションにデータを届けることを目的とする。この目的を達成するためには、ネットワークの構築、再構築、ルーティング、アドレッシングなどをセンサノード同士の協調動作によって自律的に実現される必要がある。

原則として、個々のノードがネットワーク全体を把握することはなく、周辺ノードとの協調動作によりセンサネットワークとしての機能を実現する。

2.1.2 センサネットワークの先行研究

センサネットワークの位置情報の取得以外の先行研究について言及する。

省電力ルーティング

従来のアドホックネットワークの研究分野では数々のルーティングプロトコルが提案されている。これらはルーティングにおけるパケット損失率を抑えること、ルーティングメッセージのオーバーヘッドを抑えること、ルートの長さなどが議論の対象であった。センサネットワークでは、これらに加えて、電力消費量が重要な評価項目となっている。センサネットワークの存続期間は、各センサノードのバッテリーの持続期間に依存しているため、センサノードの電力消費量を抑えた通信方式やメカニズムが

必要である。センサネットワークにおける電力消費量を抑えた情報伝達方式として、Directed Diffusion[6]、アイドル状態のノードが休眠することによって電力消費量を抑える SPAN[15]、地理情報を利用し不必要なノードへのデータ送信を防ぐ GAF[16]などの方式が提案されている。

センサネットワークの自己組織化

センサネットワークでは、ケーブルなどの基盤を必要としないため、有線ネットワークに比べてコストを抑えたネットワークの構築が可能である。この簡便性を実現するためには、センサノード同士の協調動作によるネットワークの構築と維持が課題となる。[13]では、センサネットワークの完全な自己組織化を目的とし、センサノードのアドレッシングや、ブロードキャストの問題に取り組んでいる。

2.2 センサネットワークにおける位置特定の前提

センサネットワークに限らず、現在、位置情報を取得する方法として最も利用されているものは、GPSのような位置情報取得デバイスを利用することである。例えば、カーナビゲーションシステムのように位置を正確に把握することを第一の目的とする場合、位置情報取得デバイスを利用する方法が最も適切である。センサネットワークにおいてもこのようなデバイスを利用して、センサノードの位置の特定を行う必要がある。しかし、センサノードに位置情報取得デバイスを利用すると、ノードの単価、電力消費量が増加し、アンテナとデバイス本体のためにセンサノードの重量や体積が増加するという欠点がある。

センサネットワークは、小型で安価なセンサノードによって構築するため、設置が容易で、ネットワーク構築が低コストであるという大きな利点がある。しかし、位置情報を取得するために全てのセンサノードがGPSのような位置情報取得デバイスを持つ場合、小型で安価なセンサノードの実現が難しくなる。しかも、センサノードの本来のタスクの実行に当てられるべき電力などの資源を、位置情報取得デバイスが多量に消費することは、センサネットワークを利用する多くのアプリケーションにとって望ましいことではない。従って、全てのセンサノードが位置情報取得デバイスを持つ方法は適していない。

本研究では、全てのセンサノードが位置情報取得デバイスを利用する代わりに、一部のセンサノードに位置情報取得デバイスを採り入れて、他のセンサノードの位置の特定に利用する。位置の特定は、位置情報取得デバイスを持つランドマークとセンサノードの位置関係を把握し、センサノードの位置を見積もることによって実現する。

2.3 センサネットワークにおける位置情報取得の諸課題

前節で述べた前提以外にも，センサネットワークにはセンサノードのハードウェアやネットワークアーキテクチャなどの制約が存在する．位置情報の見積もりは，これらの制約のもとで実現しなければならない．センサネットワークにおいて位置情報の取得のために考慮する必要がある諸課題を以下に述べる．

2.3.1 位置情報の伝搬

位置情報取得デバイスを持たないセンサノードは，位置を特定するためにランドマークが取得した位置情報を利用する．そのためには，ランドマークが自分の位置情報をセンサネットワークに伝搬する必要がある．この位置情報を伝搬する方法としては，ランドマークがセンサネットワーク全体にフラッディング¹する方法，周辺のセンサノードのみに伝搬する方法(図 2.2)，あるいはセンサノードからリクエストがあった場合にリクエストしたセンサノードに対して返信する方法などが考えられる．センサネットワークでは，電力消費量を抑えた動作を要求するため，各センサノードが情報を送受信する回数を可能な限り減少させる必要がある．

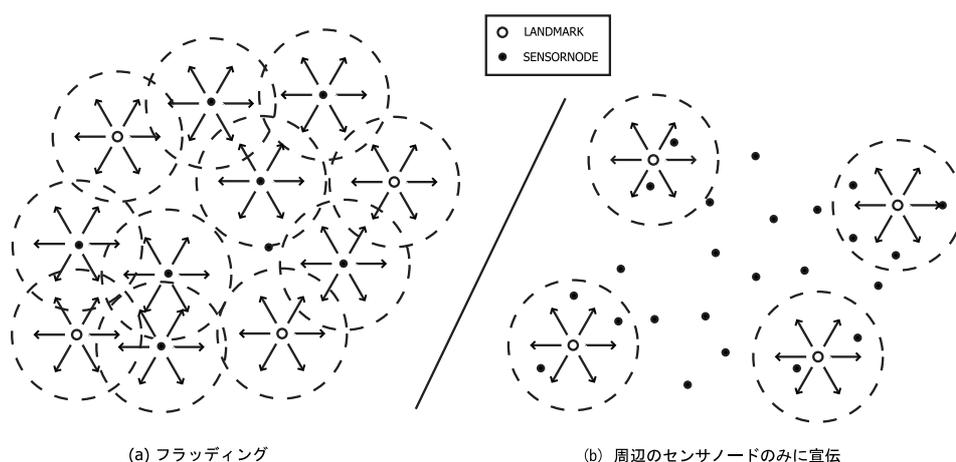


図 2.2: 位置情報の宣伝

また，ランドマークの位置情報を利用して位置を特定したセンサノードは自分の位置情報を周辺のノードに再び宣伝する必要があるか判断する仕組みも重要である．一般に，センサネットワーク上で位置情報を宣伝するセンサノードが増加することにより，より多くのセンサノードが位置情報を取得可能となる．しかしながら，見積もった位置情報はかならずしも正確ではない．誤差を含む位置情報を利用して位置情報を

¹ネットワーク全体に情報を伝搬する最も単純な方法で，全てのノードは受信したデータを周辺のノードに送信する．

見積もる場合を想定し，誤差の大きな位置情報は伝搬しないとといった処理を追加することで伝搬する情報量を減少させることが望ましい．

位置情報の伝搬方法は，最小の通信量で，より多くのセンサノードが誤差の少ない位置情報を見積もるように調整する必要がある．

2.3.2 位置情報の特定

位置情報の特定は，位置情報の伝搬と同様に電力消費量を抑えた動作をすることが望ましい．位置情報の特定段階においてこれを実現するためには，位置特定のアプローチを単純にすることによって計算量を少なくすること，あるいは再計算の必要性を減らすことによって，計算に要する電力消費量を減少させることなどの方法を講じる必要がある．

位置情報の特定に関わる問題としては位置特定の計算を実行する場所に関する問題と，位置特定手法に関する問題がある．

中央集権型アプローチ vs 分散型アプローチ

ソフトウェアによってセンサノードの位置を見積もる計算を実行する場合に，計算を実行する場所の違いによって，中央集権型のアプローチと分散型のアプローチの二種類が考えられる．前者は，各センサノードが持つ情報を位置情報計算サーバに集約し，そこで計算を実行し，各センサノードに計算結果を返送する方法である．後者は，各センサノード上で計算を実行する．前者は，各センサノードと位置情報計算サーバとの通信量が多く，センサノードの電力消費量が増加してしまう欠点がある．利点は，計算量の多い綿密な位置情報の計算が可能なことである．後者は通信量と電力消費量を抑えた動作が可能である．欠点は，センサノードに対して負荷をかけないようにするために，計算量の多い位置の特定方法は利用できないことである．GOMASHIOと同様，位置特定システムの AHLoS[12]のシミュレーションでは，中央集権型アプローチに比べ，分散型アプローチの通信量は約 $1/5$ 以下，電力消費量は $1/6$ から $1/10$ 以下に抑えられるという結果が出ている．

実際にはアプリケーションの要求と電力や通信のコストを加味した上で，いずれかの方法を決定するべきである．

位置特定手法

位置情報取得デバイスを持たないセンサノードの位置の特定には伝搬されたランドマークの位置情報とそのランドマークとの位置関係(距離や方角など)を把握することによって実現する．センサノード間の位置関係を把握するためには無線電波を利用する必要がある．無線電波の，距離に応じて信号強度が減衰する特性や，送信してから受信するまでの時間と電波の伝搬速度を利用して，センサノード間の距離を取得する

ことが可能である．このような位置特定手法の詳細は 3 章にて述べる．

2.3.3 位置情報の信頼性

実際にセンサネットワークを利用する場面において，誤差のない位置情報を取得することは非常に困難である．一方で，アプリケーションがセンサノードの見積もった位置情報の正確さを検定することも困難な作業である．

これに対して，情報を取得したセンサノードはアプリケーションが位置情報の正確さを判断するための指標を提供することが望ましい．例えば，取得した位置情報が誤差を含む可能性を提示する方法などが考えられる．

2.4 センサネットワークにおける位置情報取得の要件

前節での考察から，センサネットワークにおいてセンサノードの位置情報取得の要件を以下にまとめる．

省リソース

ハードウェアが貧弱でバッテリーによる駆動であることを考慮し，位置の伝搬や位置の特定は可能な限り，電力などのリソースを消費しない動作が要求される．多くのアプリケーションはセンサネットワークのライフタイムを長引かせることを要求するため，位置の特定に関しては分散型アプローチにすべきである．

位置情報の正確さを表す指標の提供

センサノードが特定した位置情報に対して，アプリケーション側が位置情報への依存性を変更可能なようにアプリケーションに対しては，見積もった位置情報の他に位置情報の正確さを表す指標を提示することが必要である．

2.5 本章のまとめ

本研究で扱うセンサネットワークの概要とセンサネットワークにおいて位置情報取得デバイスを利用する際の前提を述べ，センサネットワークの制約下において位置情報取得を実現するための課題について考察した．

この考察の結果，センサネットワークにおける位置取得機構の要件として，電力消費量を抑えた位置情報の伝搬方式と位置特定のアプローチ，位置情報を利用するアプリケーションに対する位置情報の正確さの指標を提示することがあることを示した．

次章では，センサネットワークにおけるノードの位置特定方式について考察し，本

研究でのアプローチを述べる．

本章では，本研究で想定するセンサネットワークについて論考する．まず，センサネットワークの設計について再考する．続いて，センサネットワークで必須となる基盤技術の説明をする．

第3章 センサネットワークにおける位置特定手法の考察

本章では，センサネットワークにおけるセンサノードの位置特定手法を述べる．まず，二つの位置特定手法を説明し，各方式をセンサネットワークで利用する場合の問題点を挙げる．次に本研究での位置特定手法を述べる．

3.1 位置特定手法の比較検討

無線電波を利用した位置特定手法は、無線電波の種類や計算の方法などで、さまざまなものが存在する ([7], [17] 参照)。本節では、その中でもセンサネットワークにおいて有効な二種類の方法を紹介し、その利点と利用例を述べる。また、それぞれの方法をセンサネットワークにおいて利用する場合の問題点を挙げる。

3.1.1 Lateration

Lateration とはランドマークからの距離を利用して、センサノードの現在地を計算する方法である。距離を利用して計算を行う場合、3つの同一直線上に存在しないノードからの距離を無線電波などを利用して測定し位置の計算を行う (図 3.1)。

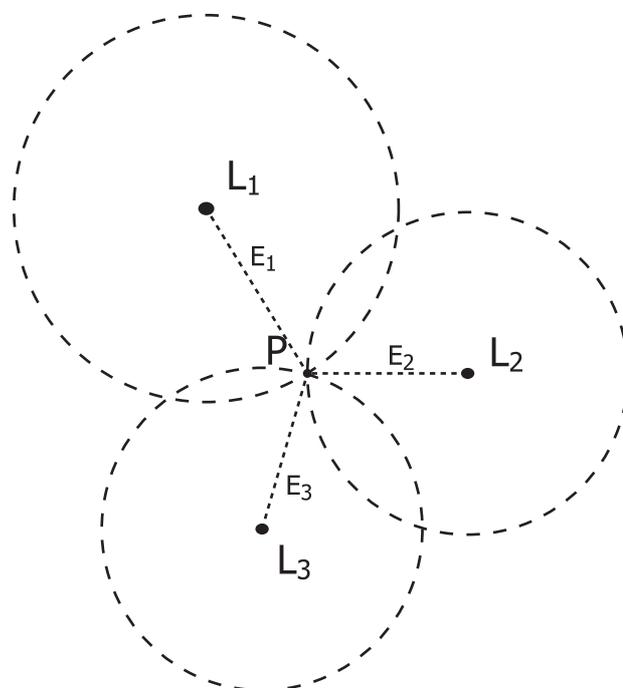


図 3.1: Lateration

任意のセンサノード P の位置を求める場合、以下の式を利用する。

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^N (D_i(x, y) - E_i)^2$$

D_i は見積もった P の位置とセンサノード L_i の距離を表す。 E_i は P とセンサノード L_i 間の実際に測定して取得した距離を表す。 $F(x, y)$ が最小になる (x, y) が P の位置となる。¹

¹この値は MMSE (Minimum Mean Square Error) と言われ、位置情報の正確さを表す場合に利用される。

無線電波を利用して距離を測定する方法には、無線電波の信号強度の減衰を利用する方法や、無線電波を発信してから受信するまでの時間を取得して計算する方法 (Time of Arrival, ToA) などが存在する。

3.1.2 Proximity

Proximity とはセンサノードがランドマークから物理的に近くに存在することを認識して位置情報を特定する方法である。人やノードなどのオブジェクトがランドマークの無線電波の到達範囲内に存在する場合、ランドマークの位置がそのオブジェクトの位置となる。Proximity を利用して、位置情報サービスを提供するセルラーフォネットワークも存在する。この場合、ランドマークは携帯電話のアクセスポイントである。センサネットワークにおいてはGPSを持つセンサノードがランドマークとなる。

センサノードがランドマークの近くにいることを認識する方法としては、物理的な接触によるものや、無線電波の到達範囲を利用する方法などがある。センサネットワークでは無線電波の到達範囲を利用して、近傍に存在するかどうかを判断する。無線電波はその性質上、伝搬した距離に比例して信号強度が減衰する。すなわち、ランドマークの近傍に存在するかどうかは、ランドマークからの電波を受信可能か否かによって判断する。

3.1.3 各方式の問題点

Lateration は位置情報が既知のノードからの距離の正確さが位置特定の上で重要である。無線電波の信号強度の減衰を利用して距離を測定するためには、信号強度が距離と比例して減衰する必要がある。しかし、現在一般的に利用されている IEEE802.11 などの無線電波ではマルチパスフェージング²やシャドウイング³により信号強度が大きく影響を受けるため ([18] 参照)、正確な距離を測定するのは困難である。一方、ToA を利用して距離を測定する場合、受信側と発信側で正確な時間の同期が要求される。例えば、超音波を利用する場合、超音波が一秒間に伝搬する距離は約 340m である。cm 単位でセンサノードの位置を特定するためには、ピコ秒⁴単位でセンサノード間の同期を図る必要がある。ToA を利用する場合、全てのセンサノード間で時間の同期を行うための優れたメカニズムが要求される。

センサネットワークにおいて、Proximity を利用する場合、無線電波の到達範囲を利用して位置の同定を行うため、到達範囲が広すぎると特定する位置の誤差が増大する。図 6.1 はこの問題を簡単に表したものである。図中のランドマーク L の無線電波到達範囲内に存在するセンサノード N_a, N_b, N_c は、 L の位置と同定される。それぞれの

²一つの信号に対し複数の伝送路が存在するマルチパス環境において起こる受信信号強度の変動のことで、無線通信特有の問題である。

³障害物によってできる電波の影ができてしまうことで、シャドウイングがある場合、電波は障害物などに反射し減衰するため、信号強度は小さい値になる。

⁴ピコ秒 = 一兆分の 1 秒

実際の位置と Proximity による位置との誤差は、 E_a 、 E_b 、 E_c である。 N_b のように無線電波到達範囲の限界付近に存在する場合、同定された位置と本来の位置との誤差は大きくなる。

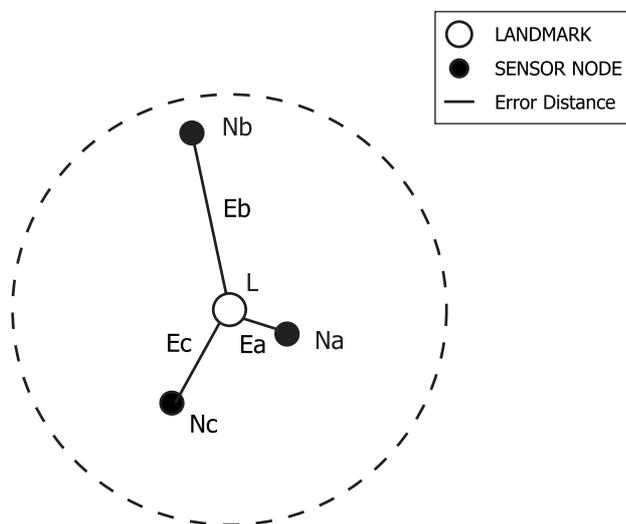


図 3.2: Proximity の問題点

3.2 本研究のアプローチ

本節では、前節で示した位置特定手法を応用した GOMASHIO を提案する。まず、GOMASHIO の前提条件を述べ、次に具体的な位置特定手法を説明する。

3.2.1 位置特定的前提条件

センサノードの無線電波の到達範囲は位置特定を行う上で重要な制約条件である。すべてのセンサノードは無線電波の到達範囲内に存在するノードとのみ通信する。到達範囲が狭すぎると、到達可能なノードが周辺に存在せず、位置情報の送受信が不可能になるため、位置の見積もりが困難になる。広いと多くのノードから情報を受信できるが、送受信にかかる電力コストが増大してしまう。

同一のセンサネットワークを構成する全てのセンサノードの無線電波の到達範囲が同一であるとは限らない。ランダムにセンサノードを配置するセンサネットワークでは、センサノードの周辺にコミュニケーション可能なノードが存在しない可能性がある。このような場合、センサノードは無線電波の出力電力を増加させることによって到達範囲を拡張する動作が考えられている (図 3.3)。

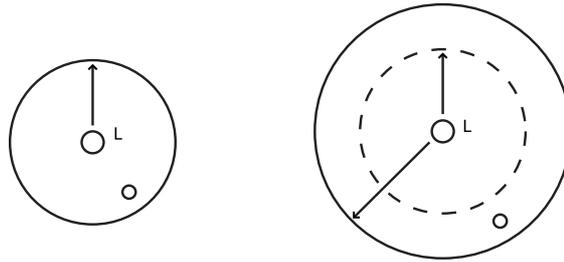


図 3.3: 固定的な半径と可変的な半径

本研究では，全てのセンサノードは同一の無線通信媒体を利用し，各ノードは到達範囲の大きさのコントロールは行わないことを前提とする．無線電波の到達範囲は理論上は全て等しいという前提のもと，本研究での位置取得手法の説明を行う．なお，将来的には可変的な到達範囲への対応も必要である．

3.2.2 GOMASHIO

前節で説明したように，Proximity ではランドマークの近傍にいるセンサノードは，ランドマークの位置をそのまま利用する．しかし，この方法では取得する位置情報の誤差が大きくなる可能性が高く，またランドマークの近傍にいないセンサノードは位置を取得できない．

GOMASHIO では単一のランドマークの位置をそのまま利用する代わりに，複数のランドマークからのホップカウントを利用する．ここでのホップカウントとは，ランドマークからセンサノードまでデータの送信をする場合に，経由するノードの数を表している (図 3.4)．ランドマークからのホップカウントを距離として利用するには問題がある．例えば，図のセンサノード A とセンサノード B はいずれもランドマーク L から 3 ホップであるが，ランドマークと各センサノード間の距離は大きく異なる．しかし，ランドマークとセンサノードの位置関係を把握する上で有用である．ホップカウントを利用することによって，ランドマークから 1 ホップ以上離れたノードでも位置の特定が可能となる．

ランドマークとセンサノードの配置が図 3.5(a) のような場合，各センサノードのランドマークからのホップカウントは (b) になる．ランドマークの無線電波の到達範囲内に存在するセンサノードは 1 ホップノード，1 ホップノードの無線電波の到達範囲内に存在するセンサノードは 2 ホップノードと認識する．これを繰り返して，ランドマークからマルチホップを経由して到達可能なノードはすべて，ホップカウントを取得する．(b) で示したホップカウントを利用して，それぞれの範囲を色分けしたものが (c) である．各色の範囲内に存在するノードは，ランドマーク L から 1 ホップ，2 ホップ，3 ホップと分類する．

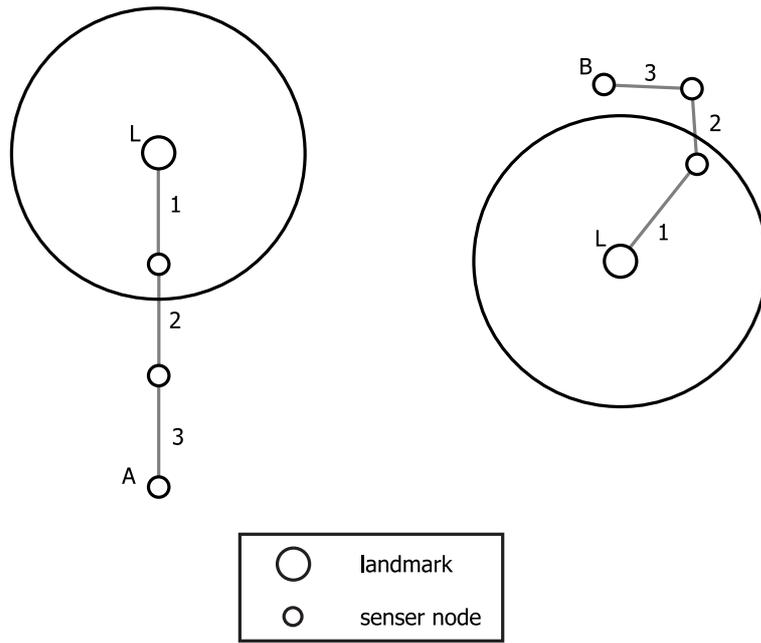


図 3.4: ランドマークから 3 ホップの例

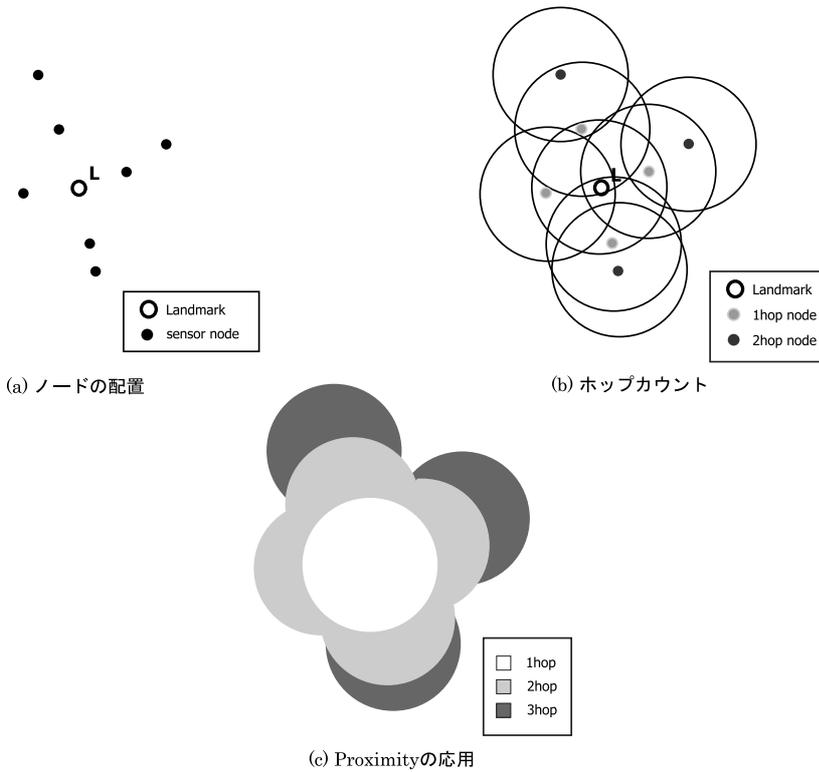


図 3.5: GOMASHIO モデル

図 3.5 では，説明のためにノードの配置を鳥瞰する図を用いた．実際にセンサネットワークにおいて，センサノードが得る情報は，ランドマーク L の座標と L からのホップカウントである．図 3.6(a) は，これらの情報からセンサノードが実際に求める“存在する可能性のある範囲”である．図 3.6(a) は，センサノードがランドマークから 2 ホップの場合を表している．ランドマークから 2 ホップである場合，ランドマークから 1 ホップの円の中は存在する可能性のある範囲から除外される．図 3.6(b) は，ランドマーク N_a から 2 ホップ，ランドマーク N_b から 3 ホップにセンサノードが存在する場合を表している．この場合，二つの円が重なっている部分が実際にセンサノードが存在する可能性のある範囲である．このように，複数のランドマークからの情報を利用することによって，存在する可能性のある範囲を絞り込む．

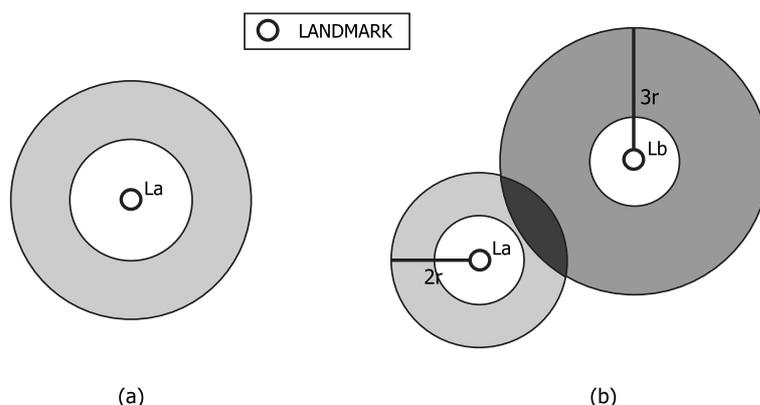


図 3.6: センサノードの存在する可能性のある範囲

センサノードの位置は，存在する可能性のある範囲の範囲矩形を求め，その重心を利用する．単一のランドマークの情報のみの場合には，ランドマークの位置情報をセンサノードの位置として利用する．

3.3 本章のまとめ

本章では二つの位置特定手法について説明し，本研究で位置特定手法である，GOMASHIO について述べた．GOMASHIO は Proximity を応用し，ホップカウントを利用することによって位置情報を特定する方法である．

次節では，センサノードの位置特定を取り上げた関連研究について述べる．

第4章 関連研究

本章では，アドホックセンサネットワークにおけるノードの位置特定を目的とする関連研究を取り上げ，それぞれの位置特定手法の特徴述べる．

4.1 関連研究

本節では，アドホックセンサネットワークにおけるノードの位置特定に取り組む四つの関連研究を取り上げ，それぞれの位置特定手法の特徴と利点・欠点を述べる．

Dynamic Fine-Grained Localization in Ad-Hoc Networks of Sensors

AHLoS(Ad-Hoc Localization System) [12] ではセンサノード間の距離を異なる二種類のデバイスを用いて測定し，位置情報を特定する．AHLoSは位置情報の精度が高く，シミュレーションの結果では，誤差を 20cm 以下に抑えることが可能であると述べられている．

位置の特定手法は Lateration を応用し，3 つ以上の周辺のセンサノードの位置情報をもとに位置の計算を行う多辺測量 (Multilateration) を用いる (図 4.1)．多辺測量は，センサノードが位置を見積もるために，位置情報を持つ三つ以上の周辺ノードから測定した距離と見積もった距離の誤差が最小になるようにセンサノードの現在地を算出する．

センサノードの 1 ホップ以内に位置情報を持つセンサノードが三つ以上存在しない場合，複数ホップを経由するセンサノードの位置情報を利用して位置情報の特定を行う．また，位置情報の正確さを高めるために，位置の特定は繰り返し実行する．

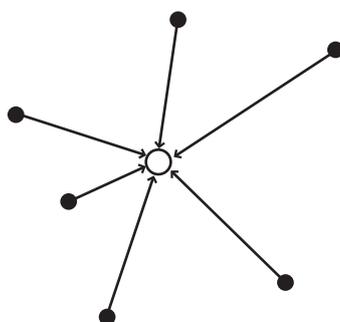


図 4.1: 多辺測量

ランドマークからの距離の測定には，ToA を応用した TDoA (Time difference of arrival) を利用する．TDoA では，伝搬速度の異なる 2 種類の無線電波を同時に発信し，受信側は，2 種類の電波の時間差を利用して距離を計算する．ToA ではセンサノード間の時間の同期メカニズムを必要とするが，TDoA では無線電波を受信する側の時間のみを利用するため時間の同期は必要ない．しかし，二種類の無線電波を利用するため通信用の無線機器の他に異なる無線の送受信デバイスが必要である．このため AHLoS

では全てのセンサノードが超音波の送受信デバイスを装備している。

位置を計算したセンサノードは、その位置情報を周辺に宣伝し、周辺のセンサノードが位置情報の計算を行うために利用される。

Convex Position Estimation in Wireless Sensor Networks

“Convex Position Estimation in Wireless Sensor Networks” [9] では、GOMASHIOモデルと同様、存在する可能性のある範囲を見積もり、その重心を利用する。

存在する可能性のある範囲の見積りには、無線電波の到達範囲を利用する方法と角度計を利用して無線電波の受信角度を利用する方法の二つを挙げている(図4.2)。無線電波の到達範囲を利用する場合、複数の周辺のノードの位置を利用し、半正定値計画を用いて存在する可能性のある範囲を絞り込んでいる。受信角度を利用する場合、電波のレシーバが回転し、信号強度が最大になる角度と無線電波の到達範囲を利用して、存在する可能性のある範囲を三角形に絞り込む。

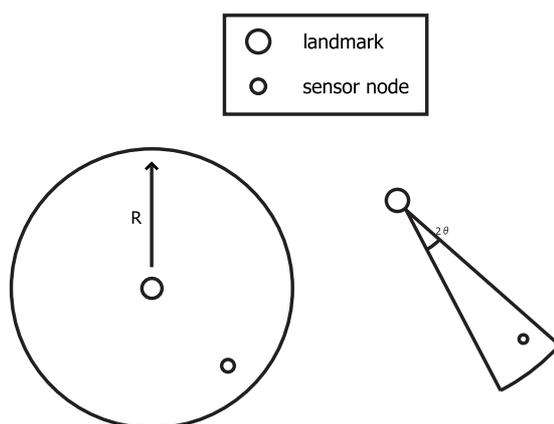


図 4.2: 電波の到達範囲と受信角度を利用した存在する可能性のある範囲の絞り込み

シミュレーションの結果、取得した位置の誤差は半径の三分の二程度に抑えている。

この研究で採用されている手法は緻密な計算を必要とするため、位置情報計算サーバが存在し、計算はそのサーバ上で一括して実行する。数万個のセンサノードを利用する場合には、サーバに負荷が集中し拡張性に乏しいシステムとなるため問題である。

Localized Algorithms In Wireless Ad-Hoc Networks: Location Discovery And Sensor Exposure

“Localized Algorithms In Wireless Ad-Hoc Networks: Location Discovery And Sensor Exposure”[10]では、センサネットワーク上での位置情報に関する問題として、位置の特定とセンサネットワークが監視する範囲を挙げている。exposureとは、センサネットワーク内でセンサが対象を捉える可能性を表す指標である。センサノードが密で均等に配置されている場合、exposureは大きくなる。exposureではセンサノードをランダムに設置したときにセンサが監視する範囲を計算するアルゴリズムを作成し、センサノードが配置されたエリア内を通る際にセンサノードから最も遠い通り道を求める。これによって、センサノードの配置が疎な部分を発見する。センサがカバーする範囲に関しては[8]で、exposureに関しては[11]で詳細に述べられている。

センサノードの位置特定では AHLoS と同様に多辺測量を利用して位置の計算を行う。センサノード間の距離の測定方法は詳しく述べられておらず、超音波を利用する方法と無線の信号強度を利用する方法の両方に触れている。

特定する位置の誤差を減少するために、多辺測量を行う際に、周辺に存在する複数のセンサノードからランダムに三つ選択し位置特定の計算を実行する。これを繰り返すことにより、より正確な位置を算出し、誤差を減少させるアルゴリズムを採っている。

Locating In Distributed Ad-Hoc Wireless Sensor Networks

Locating In Distributed Ad-Hoc Wireless Sensor Networks[14]では位置の特定手法として三角関数を用いている。距離の測定には信号強度を利用する。

位置特定のアルゴリズムは以下のとおりである。

1. 論文で提案されている ABC(Assumption Based Coordinates) アルゴリズムを利用して、すべてのセンサノードが自分を中心と仮定して相対的な位置情報を特定し、それを周辺ノードに伝搬する。
2. Anchor nodes(ランドマークと同義)は、周辺ノードの相対的な位置情報を絶対的座標に変換し、ネットワーク全体に伝搬する。
3. 最終的にこれらの情報は、一ヶ所に集約される。

このアルゴリズムを実行後は、局所的に繰り返し位置補正アルゴリズムを実行することによって、位置情報の精度の向上を図っている。

4.2 各研究の比較

上述した関連研究の機能性について、位置情報の誤差、位置情報の誤差を表す指標、無線通信機器以外に必要なデバイスのそれぞれの比較を表 4.1 に表す。1 は “Dynamic

fine-grained localization in Ad-Hoc Wireless of Sensors”, 2は “Convex Optimization Method for Sensor Node Position Estimation”, 3は “Localized Algorithms In Wireless Ad-Hoc Networks:Location Discovery And Sensor Exposure” 4は “Locating In Distributed Ad-Hoc Wireless Sensor Networks”, を表している .

表 4.1: 機能性の比較

システム	誤差	誤差の指標	位置関係の測定方法	計算手法
1 ¹	20cm	N/A	超音波デバイス, 距離	多辺測量
2 ²	$\frac{2}{3}R$	N/A	角度計, 角度	凸包装法
3 ³	5m	N/A	信号強度, 距離	多辺測量
4	(不明)	N/A	信号強度, 距離	多辺測量

¹ 15m 四方, 全ノード数 50, ランドマーク数 10, 超音波デバイスの範囲 3m

² 10R 四方, 全ノード数 200, 半径 R

³ 40m 四方, 全ノード数 50, ランドマーク数 10, 半径 10m

誤差は見積もった位置と実際の位置との差の絶対値の最大値を取り上げた . また, それぞれを比較するために各条件での無線電波到達範囲の半径を基準に表しているが, 各システムともフィールドサイズや全ノード数などのシミュレーションの測定環境が異なるため, 誤差の項目は参考程度に利用する . 誤差の指標の項目では, センサノードが取得した位置情報に含まれる可能性のある誤差をアプリケーションに対して提供する機能を持っているかどうかを表している .

ここで挙げたシステムはすべて, 位置情報の誤差の程度を表す指標をアプリケーションに対して提供する機能を持っていない .

また, 超音波デバイスや角度計のように, 位置情報の取得のためにデバイスを利用することは, GPS と同様にセンサノードの大きさやコスト, 電力などの資源に影響するため利用は避けるべきである .

4.3 本章のまとめ

本章では, センサネットワークにおける位置情報特定システムおよび位置特定手法に関する関連研究を取り上げ, 各研究の特徴と利点および欠点について述べた .

各位置情報システムは地理的な制約を有効に活用した位置特定アルゴリズムや手法を用いてセンサノードの位置特定を実現しているが, それぞれに欠点があり本論文で提案する位置特定システムの要件に沿わない .

第5章 GOMASHIOを利用した位置特定システム的设计

本章では，GOMASHIOを利用した位置特定システムを设计する．GOMASHIOを利用した位置特定システムとは，位置情報取得デバイスをもつGOMA ノード（ランドマーク）が宣伝する位置情報を利用して，各SHIO ノード（位置情報を持たないセンサノード）がそれぞれ位置情報の計算を行う方法を採用したシステムである．まず，GOMA ノードとSHIO ノードの説明をし，次にアルゴリズムの詳細を説明する．

5.1 構成要素

GOMASHIO モデルを利用するセンサネットワークでは、役割に応じて GOMA ノードと SHIO ノードの二種類のノードが必要である。以下にそれぞれのノードの役割とハードウェア構成を説明する。

GOMA ノード

GOMA ノードは前章で説明したランドマークノードとほぼ同義である。GOMA ノードは、GPS などの位置情報取得デバイスを利用して、正確な位置情報を定期的に取得し、周辺ノードに位置情報を送信する。

SHIO ノード

SHIO ノードはセンサによって環境情報を取得しそれをアプリケーションに送信するセンサノードである。GOMASHIO モデルでは、GOMA ノードが送信する位置情報を受信し、その情報を利用して自分の位置を計算する。5.2.3 節で詳説するが、特定した位置の精度が高い場合には、GOMA ノードのように位置情報を周辺ノードに送信する。また、GOMASHIO 方式で位置の特定をできなかった SHIO ノードを孤立ノードと呼ぶ。

5.2 位置特定アルゴリズム

3.2 節では、位置の特定手法として、Proximity を応用することを説明した。本節では、これを利用して位置特定を実現するアルゴリズムを説明する。アルゴリズムでは、位置情報の宣伝とホップカウントの取得部と存在する可能性の面積と位置の特定部の二つの部分について説明する。

5.2.1 位置情報の宣伝とホップカウントの取得

GOMASHIO モデルでは、まずセンサノード同士が自分の位置情報に関するメッセージの交換を行う。GOMA ノードは、自分の位置情報を送信し、SHIO ノードは、GOMA ノードの座標と GOMA ノードからのホップカウントを周辺ノードに送信する。この行程で各 SHIO ノードは、GOMA ノードとホップカウントを組みにした情報のリストを作成する(表 5.1)。

GOMA ノードや SHIO ノードは、位置情報やホップカウントをビーコンに付加して送信する。ビーコンは無線ネットワークにおいてノード同士がお互いの存在を認識するために利用される識別信号で、一定間隔で無線デバイスが発信している。このためセンサネットワークにおいて GOMASHIO の利用時に位置情報のメッセージのやりと

表 5.1: SHIO ノードが持つリストの例

GOMA ノードの ID	GOMA ノードの位置	ホップカウント
1	(x_1, y_1)	2
5	(x_5, y_5)	3
6	(x_6, y_6)	1

りのために，フラディングが発生する問題を回避可能である．

図 5.1 は位置情報の宣伝とホップカウントの取得の部分を表す疑似コードである．以下にその詳細を説明する．

1. SHIO ノードは周辺ノードからメッセージを受信したかどうかで挙動が異なる．メッセージを一つ以上受信した場合，メッセージに含まれている GOMA ノードとホップカウントを既に自分の情報として持っていないかを調べる (図 5.1(1))．持っている場合には，ホップカウントを比較して，小さい方を利用する．持っていない場合，新たにリストに追加する．
2. GOMA ノードが送信した情報を直接受信した場合，SHIO ノードは GOMA ノードから 1 ホップであると認識する．
3. SHIO ノードが送信した情報を受信した場合，送信側の SHIO ノードのホップカウントより 1 多い数を自分のホップカウントとして認識し，その情報をリストに追加する (図 5.1(2))．これを受信した情報分だけ繰り返す．
4. 周辺ノードから情報を受信しなかった場合，孤立ノードとして認識する (図 5.1(3))．孤立ノードは，周辺ノードから情報を受信可能な状態になるまで情報の送信は行わない．

この結果，到達不可能でない全ての SHIO ノードは GOMA ノードのリストを保持する．この情報は，アルゴリズムの次の行程で利用する．

5.2.2 存在する可能性のある範囲の取得と位置の計算

SHIO ノードが位置を特定するためには，前行程で取得した GOMA ノードリストをもとに，SHIO ノードが存在する可能性のある範囲を求める．次に，存在する可能性のある範囲の範囲矩形を求め，その重心を取得する．この重心が，特定された SHIO ノードの位置となる．

SHIO ノードの存在する可能性のある範囲を求める方法を，図 5.2(a) に示すように，三つの GOMA ノードの位置とホップカウントを取得している場合を例に考える．

```

receive_messages();
/* (1) */
if ( number of neighbors > 0 ) {
    for ( i = 1 to number of neighbors ) {
        if( check_list() ) {
            update_list();
        }
    }
    break;
}
/* (2) */
if( neighbor Hop count == GOMA ) {
    add_list( ONEHOP,GOMA Location );
}
/* (3) */
} else if ( neighbor's GOMA != GOMA ) {
    add_list( neighbor Hop count + 1, GOMA Location );
}
}
/* (4) */
} else {
    Hop count = Unreachable;
    GOMA Location = false;
}
}

```

図 5.1: 位置情報の宣伝とホップカウンタの取得

1. GOMA ノードの位置を中心とし，無線電波の到達範囲の半径にホップカウントを乗算した値を半径とする円を，各 GOMA ノードに関して求める (図 5.2(b)) .
2. 1 で求めた円の範囲矩形を求め，全ての範囲矩形が重なる四角形を求める (図 5.2(c)) .
3. 2 で求めた四角形中の各座標に関して，SHIO ノードが実際に存在する可能性があるかどうかを判定する．判定には以下の式を用いる． h_g は GOMA ノードからのホップカウントを， r は 1 ホップの半径を表す． (x_g, y_g) は GOMA ノードの位置座標を示す． n は SHIO ノードが取得した GOMA ノードの情報の個数を表している．

すべての $(x_g, y_g) (0 < g < n)$ に関して

$h_g = 1$ の場合：

$$(x_i - x_g)^2 + (y_i - y_g)^2 < r^2$$

$h_g > 1$ の場合：

$$(x_i - x_g)^2 + (y_i - y_g)^2 < r^2 h_g^2$$

でかつ

$$(x_i - x_g)^2 + (y_i - y_g)^2 > r^2$$

が真の時，任意の座標 (x_i, y_i) は存在する可能性のある座標と認められる．

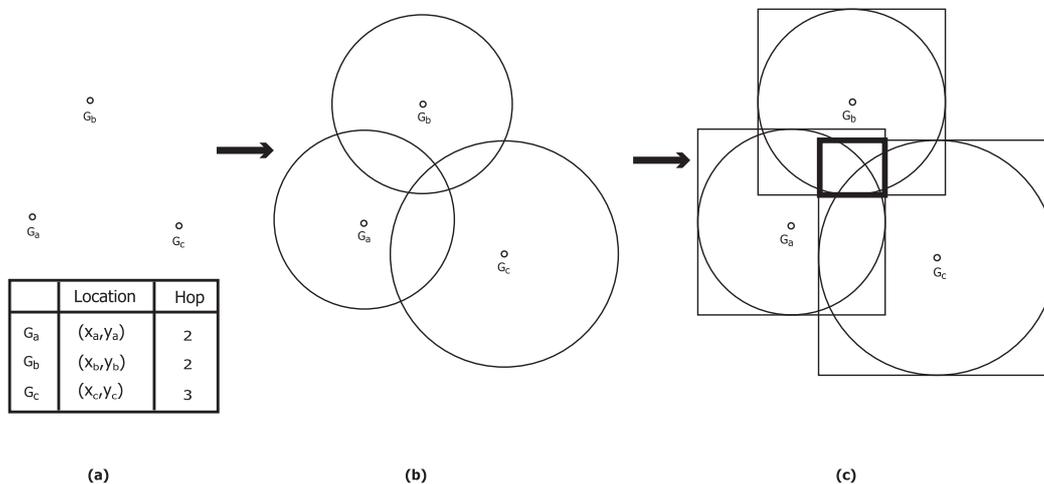


図 5.2: 存在する可能性のある範囲を求める方法

3の行程では，存在する可能性のある座標として取得されたものの中で， x 座標と y 座標のそれぞれに関して，最小値と最大値を取得することにより，存在する可能性のある範囲の範囲矩形 (四角形) を求める (図 5.3) . この範囲矩形の重心が最終的に，SHIO ノードの位置となる .

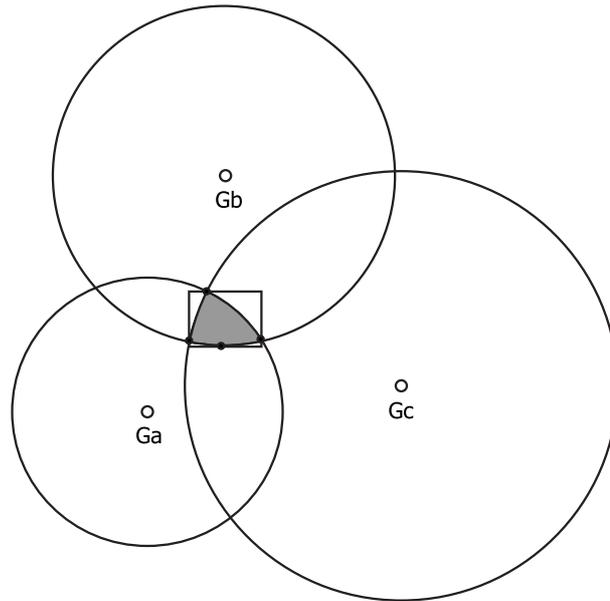


図 5.3: 存在する可能性のある範囲の範囲矩形

5.2.3 SHIOGOMA 変異

GOMASHIO では、基本的に GOMA ノード以外は自分の位置情報の送信を行わない。SHIO ノードが送信するのは、GOMA ノードの座標とホップカウントである。SHIOGOMA 変異とは、SHIO ノードの存在する可能性のある範囲の面積がある程度小さくなった場合に、SHIO ノードが GOMA ノードと同様に位置情報を周辺ノードに送信する機能を持つように SHIO ノードが GOMA ノードに変異することである。

5.3 本章のまとめ

本章では GOMASHIO を利用した位置特定システムの設計を述べた。本システムでは SHIO ノードは GOMA ノードの位置情報と GOMA ノードのホップカウントを取得し、位置の特定を行う。

第6章 実装と評価

本章では，まず GOMASHIO の評価のために実装したシミュレータについて述べる．次に，GOMASHIO の評価について述べる．GOMASHIO の評価では，特定した位置の誤差の測定，孤立ノード数の測定，存在する可能性のある面積の測定を実施する．これにより，GOMASHIO によって特定する位置情報の精度を明らかにし，それぞれの測定結果について考察を加える．

6.1 シミュレータの実装

GOMASHIO の評価のために実装したシミュレータについて説明する .

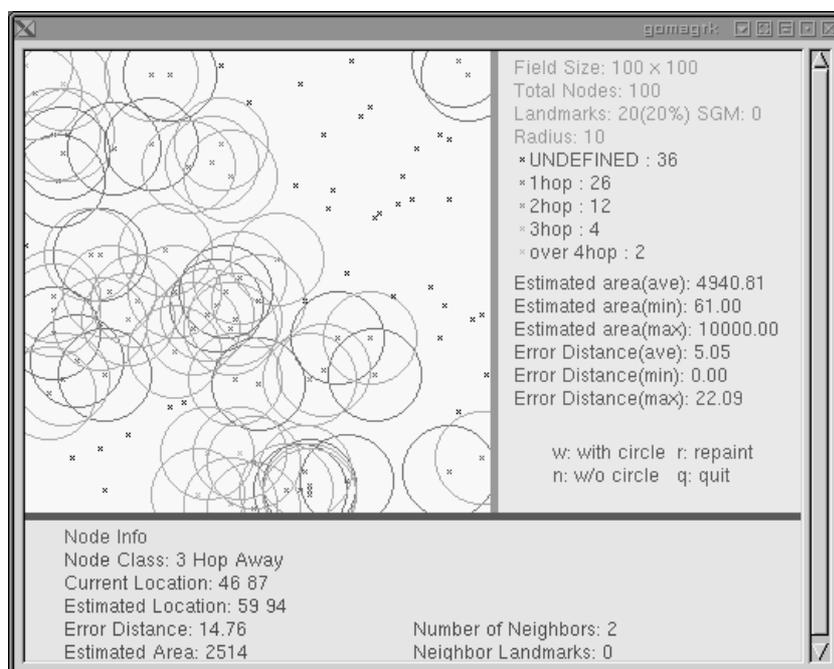


図 6.1: シミュレータの概観

6.1.1 実装環境

GOMASHIO の位置特定アルゴリズムおよび , シミュレータを C 言語を用いて実装した . 表 6.1 に実装環境を示す .

表 6.1: 実装環境

項 目	説 明
ハードウェア	AMD Athlon 1GHz
オペレーティングシステム	FreeBSD-4.4-RELEASE
実装言語	C 言語

6.1.2 ノード情報

全センサノードは図 6.2 に示す構造体を保持する . sensor_node 構造体では , GOMA ノードからのホップ数や GOMA ノードの位置情報を保持する location_condition 構造

体 (図 6.3), 周辺に存在するノードの情報を保持する `neighbor_node` 構造体 (図 6.4), 現在の位置情報などを保持している。GOMA ノードと周辺に存在するノードの情報はそれぞれリンクリストによって管理する。

```
typedef struct sensor_node {
    int sensor_id;                // node ID
    coordinate_t current_location; // this sensor's location
    int node_class;               // node type identifier
    location_condition_t *cond;   // location of landmarks
    struct neighbor_node *neighbor_node; // information of
                                    // the neighbor node
} sensor_node_t;
```

図 6.2: `sensor_node` 構造体

```
typedef struct location_condition {
    struct location_condition *next;
    struct sensor_node *landmark;
    int hops;
} location_condition_t;
```

図 6.3: `location_condition` 構造体

GOMA ノードと SHIO ノードの区別は `node_class` 変数によって行う。この値が 0 ならばそのノードは GOMA ノードである。また、孤立ノードと位置が特定できる SHIO ノードを識別するため、`node_class` 変数の値が -1 の場合は孤立ノードを表わし、それ以外の数値の場合は位置が特定可能な SHIO ノードである。

6.1.3 位置特定アルゴリズムの実装

位置特定アルゴリズムでは、SHIO ノードの位置決定のために 4 つの関数 6.5 が利用される。GOMA ノードが 1 ホップで通信できるノードを発見するための `one_hop` 関数、SHIO ノードが 1 ホップで通信できる周辺のセンサノードを発見するための `n_hop` 関数を実装した。

```
typedef struct neighbor_node {
    struct neighbor_node *next;
    sensor_node_t *neighbor;
} neighbor_node_t;
```

図 6.4: neighbor_node 構造体

また，存在する可能性のある範囲を計算するための area_calc 関数がある．centroid 関数は孤立ノードでない SHIO ノードが位置を特定する際に利用される．

```
one_hop (int lanmar);
n_hop(int n, int lanmar, int sensors);
area_calc(void);
centroid(int left, int right, int top, int bottom, int i);
```

図 6.5: 位置特定アルゴリズムにおける関数群

area_calc 関数は，GOMA ノードを中心とする円の範囲矩形を求め，その重なった長方形を算出する．次に，SHIO ノードが存在する可能性のある範囲を求めるため，上記で算出した長方形の領域内で GOMA ノードを中心とした円が重なっている領域を探索する．探索アルゴリズムについては，第 5.2.1 項に基づいて実装した．この探索が完了することで，SHIO ノードが存在する可能性のある領域の範囲矩形を求められる．最後に，各 SHIO ノードが centroid 関数を呼びだし，この範囲矩形の重心を自身の位置として決定する．

6.2 評価

本論文では，シミュレーションによる GOMASHIO の評価を行う．シミュレーションの各パラメータに設定した値を表 6.2 に示す．

全てのセンサノードの位置はランダムに決定される．

6.2.1 シミュレーション結果

シミュレーションでは以下の値を測定した．

表 6.2: 測定条件

パラメータ	設定値
フィールドサイズ	100 x 100
全ノード数	20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200
1 ホップの半径	10
GOMA ノードの割合	全ノード数の 10%, 20%, 30%, 40%, 50%
測定回数	各条件において 100 回

- 孤立ノードの割合
- 取得した位置の精度
- センサが存在する可能性のある面積

各項目についての測定結果を以下に述べる。

孤立ノードの割合

GOMASHIO を利用した位置特定システムでは、対象フィールドにおけるセンサノードの密度によって、また、同じノード数でも GOMA ノードの割合によって位置を特定可能なセンサノード数が異なる。位置を特定可能なセンサノードとは GOMA ノードの情報を間接あるいは直接受信可能なノードである。図 6.6 は GOMA ノードの割合と総センサノード数の条件を表 6.2 に設定して、100 回のシミュレーションを実行し取得した孤立ノードの割合の平均のグラフである。

同じ条件であっても、センサノードの配置の偏りによって孤立ノードの割合は変動する。表 6.3 は全ノード数に対して GOMA ノードが 30% の条件で測定した孤立ノードの割合の平均値の分散である。100x100 のフィールドにおいては、全ノード数が 100 の場合に最も分散が大きくなる。全ノード数が少ない場合、孤立ノードの割合が大きくなり、センサノードの配置の偏りに影響を受けなくても孤立ノードの割合が大きくなってしまふ。今回のシミュレーションでは、全ノード数が 100 以下の場合、ノード数が少なすぎると言える。

図 6.6 を見ると、全ノード数が 100 以上の場合、ノード数の値が大きくなる程、また GOMA ノードの割合が多くなる程、孤立ノードの割合が低減する傾きが小さくなっている。これは、総ノード数が多い程、また GOMA ノード数が多い程、分散が小さく、安定した値が取得されるためである。

センサノードの配置の偏りに影響を受けない、最も安定した値が取得できるのは、全ノード数が 200 かつ GOMA ノードの割合が 20% 以上の場合である。それ以外の場合は、偏りが生じた場合に、GOMASHIO による位置特定を実行する場合の誤差が大きくなる可能性が高い。

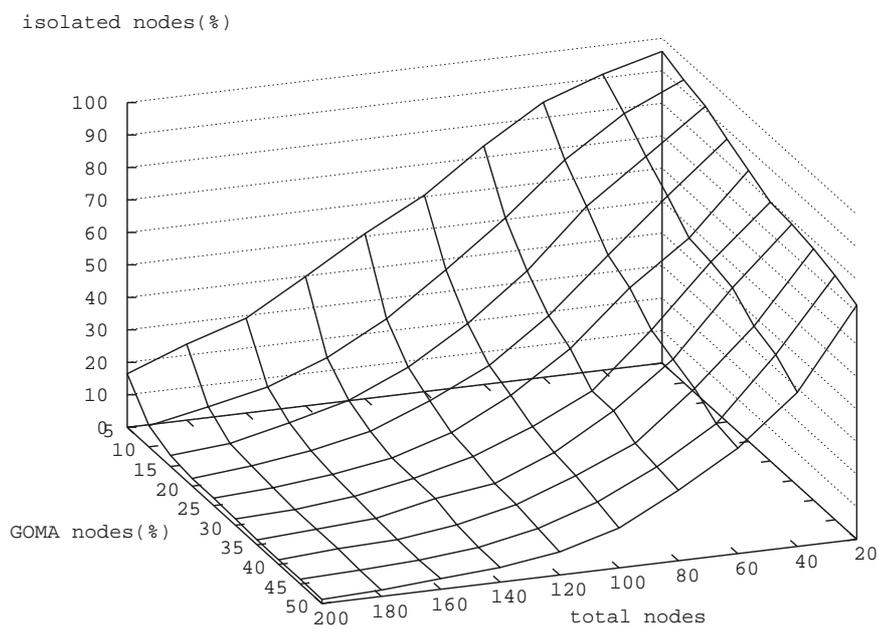


図 6.6: 孤立ノードの割合

表 6.3: GOMA ノードが 30%の分散

全ノード数	分散
20	3.06
40	9.37
60	20.47
80	27.59
100	35.43
120	23.41
140	19.27
160	12.18
180	12.6
200	7.4

この結果より，センサノードの配置の偏りに影響を受けない密な場合とセンサノードの配置の偏りに影響を受けやすい疎な場合を表 6.4 のように定義する．以降のシミュレーションでは，密な場合と疎な場合の値を利用して測定を行う．

表 6.4: 疎な場合と密な場合の定義

密度	全ノード数	GOMA ノードの割合
密	200	30%
疎	100	30%

位置情報の精度

図 6.7 と図 6.8 は，それぞれ，ノードが疎な場合と密な場合の位置情報の誤差別ヒストグラムと，誤差の累積パーセントを表している．それぞれ，各ノード数で 100 回ずつ測定した値を全て利用している．全ノード数が 200 の場合と 100 の場合でそれぞれ総個体数が異なるため，ヒストグラムの値は，全ノード数に対する各度数における割合を利用している．

センサノードが密な場合と疎な場合を比べると，密な場合の方が取得した位置の誤差の小さい値が占める割合が多い．表 6.5 では，全体の 90%，50% が含まれる誤差の値を示している．また，誤差が半径の半分である 5 以下のノードの割合も示している．

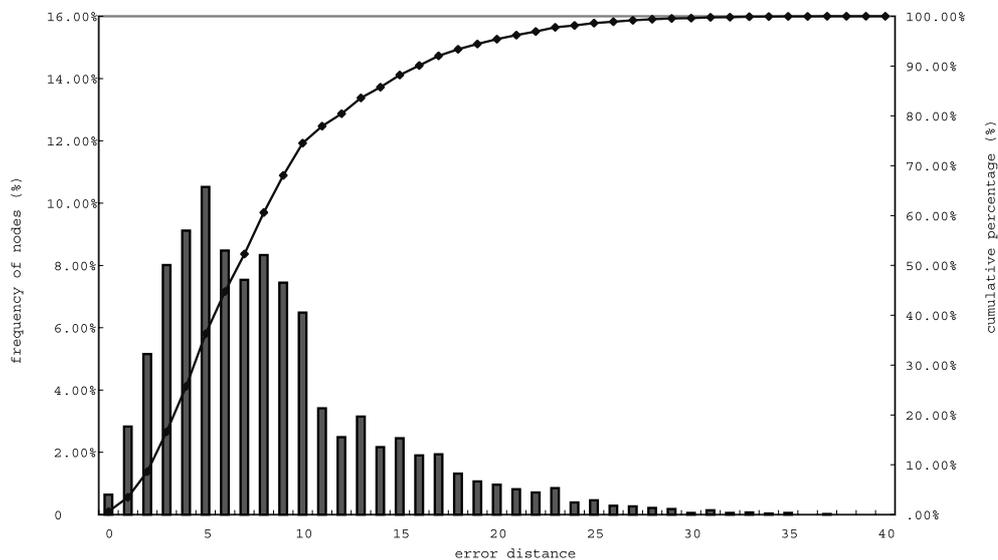


図 6.7: 位置情報の誤差の累積分布図：疎な場合

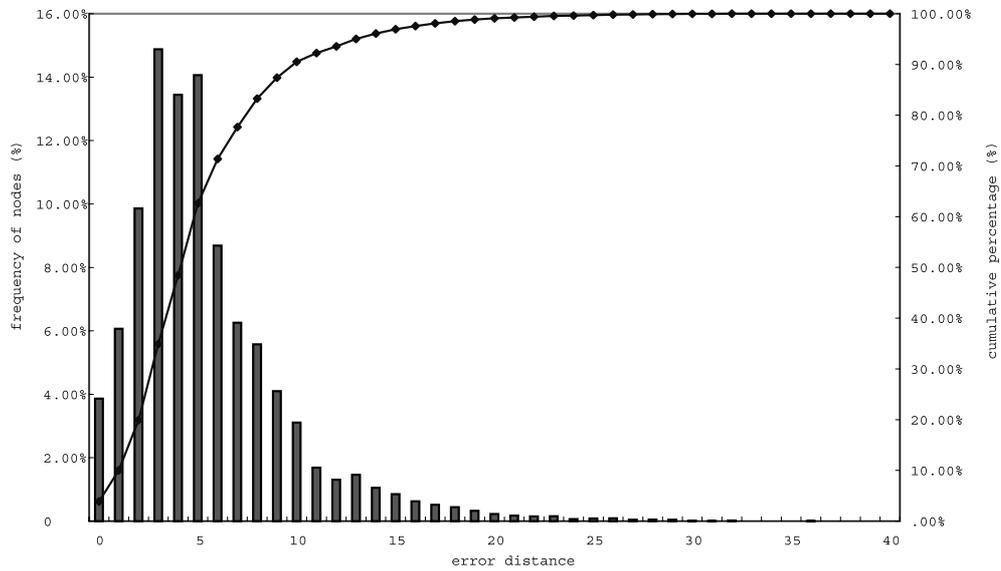


図 6.8: 位置情報の誤差の累積分布図：密な場合

表 6.5: ヒストグラムの分析

条件	疎な場合	密な場合
全体の 90%以下が含まれる誤差	16	10
全体の 50%以下が含まれる誤差	7	4
誤差が 5 以下の割合	36.24 %	62.61 %

誤差の指標

図 6.9, 6.10 は x 軸に位置の誤差を, y 軸に存在する可能性のある範囲をとったグラフである. 100 回の測定結果の中から 1000 の標本をランダムに取り出し, プロットしたものである.

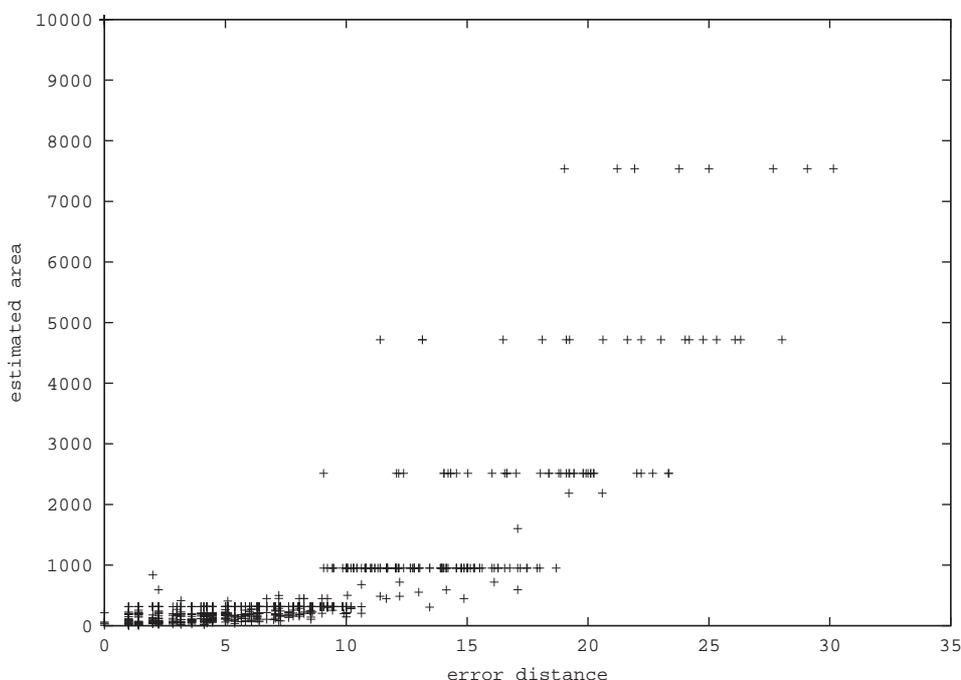


図 6.9: 位置の誤差と存在する可能性のある面積:疎な場合

表 6.6: 相関係数

密度	相関係数
疎な場合	0.79
密な場合	0.75

センサノードが疎な場合と密な場合, いずれの場合においても存在する可能性のある面積が小さくなると位置の誤差も小さくなるという傾向が見られる. 疎な場合のグラフでは, 存在する可能性のある面積が 1000, 2800, 4500, 7800 辺りに分布が集合している. これは, 取得した GOMA ノードの情報が一つだけの場合に SHIO ノードが見積もった存在する可能性のある面積を表しており, それぞれ GOMA ノードが SHIO ノードから 2 ホップ, 3 ホップ, 4 ホップ, 5 ホップの場合である. 密な場合も同様である.

センサノードが密の場合と疎の場合それぞれの, 位置の誤差と存在する可能性のある面積の関係を調べるために, 100 回の測定結果から, 孤立ノードの結果を除いたも

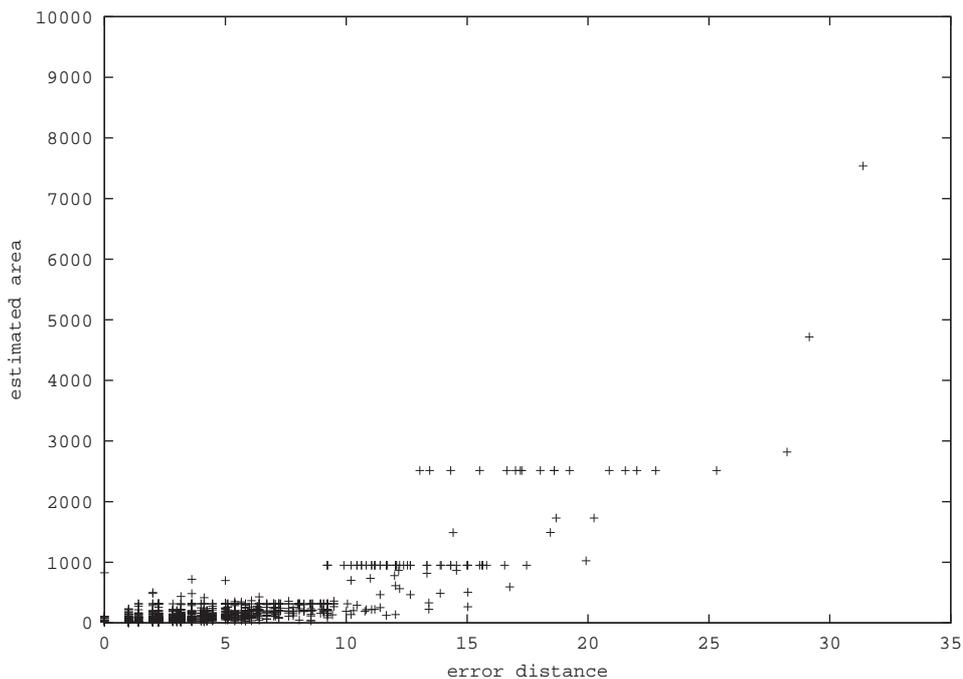


図 6.10: 位置の誤差と存在する可能性のある面積:密な場合

のを利用して相関係数を取得した．表 6.6 がその結果である．位置情報の誤差と存在する可能性のある面積に強い正の相関が認められた．すなわち，存在する可能性のある面積が小さい程，位置の誤差は小さい．逆に，存在する可能性のある面積が大きい場合，位置には大きな誤差が含まれている可能性があることを示す．

GOMASHIO はアプリケーションに対して，SHIO ノードの見積もった位置座標だけでなく存在する可能性のある範囲と面積を提供する．誤差が大きいと考えられる場合には，アプリケーションは点としての位置座標を利用するよりも，存在する可能性のある範囲の範囲矩形を利用したり，誤差を見積もって利用するなどの方法を選択可能となる．

6.3 本章のまとめ

本章では，孤立ノードの割合のグラフを元に密な場合と疎な場合の二つの状態を定義し，それぞれに対して位置の誤差のヒストグラムとを測定した．

また，位置の誤差と存在する可能性のある面積の関係についても，ノードの密度が密な場合と疎な場合のそれぞれについて測定した．また存在する可能性のある面積と位置情報の誤差と存在する可能性のある面積に正の相関が認められた．

第7章 結論

本論文の最後に、今後の課題を述べ、その後本研究をまとめる。

7.1 今後の課題

本章では今後の課題として、シミュレーションと GOMASHIO の機能の拡張に分けて述べる。

7.1.1 シミュレーション

シミュレーションにおける今後の課題として、移動するノードに対する評価と評価項目の増加を挙げる。

移動するノードに対する評価

今回のシミュレーションは静止しているセンサノードを対象に評価を行った。しかし、センサノードは実際には移動する場合がある。移動には二種類存在し、センサノードに車輪などの移動装置があり自律的に移動するものと、風や雨などの環境の影響によって意図せずして移動してしまうものがある。GOMASHIO を利用するセンサネットワークとしては、後者の移動が想定される。センサノードが移動する場合に、GOMASHIO によって位置の特定を実行する場合の問題点を明確にし、移動するノードへの対応を目指す。

測定項目の増加

本論文で説明したシミュレータは位置情報の取得部分のみの実装であり、評価は位置情報の精度を中心に行った。今後は、シミュレータにノードの電力消費量や、計算量を測定する機能を組み込み、センサネットワークに適した位置情報特定方式を実現するためのシミュレーションを行う。また、時間軸を評価項目に追加し、すべてのノードが位置を見積もるようになるまでの時間等を測定し、アプリケーションに対する指標として提供したい。

7.1.2 GOMASHIO の機能拡張

GOMASHIO によって特定する位置の精度を向上するために必要な事項として、可変的な無線電波の到達範囲への対応が挙げられる。孤立ノードは、無線電波の出力電力を増加して電波の到達範囲を拡大する動作が考えられる。

また、見積もる位置の精度を向上するために、条件付きで信号強度を利用して距離を測定する方法を採用する。条件とは、信号強度の大きな値が取得できる場合である。信号強度は実際よりも小さい値が取得される可能性が非常に大きいため信頼できないが、大きい場合にはそのかのうせいが小さくなるため信頼性が増す。

7.2 まとめ

本論文では、はじめにセンサネットワークにおける位置情報の必要性を述べた。センサネットワークでは、センサノードのハードウェアの制約などにより、位置情報の取得は容易ではない。このような制約下においてセンサノードが位置情報を取得するために、GOMASHIO を提案した。

GOMASHIO は、位置情報取得デバイスを持つ GOMA ノードからの情報を利用して SHIO ノードが位置を特定するための、無線を利用した位置特定手法である。GOMASHIO では GOMA ノードの位置と GOMA ノードからのホップカウントを利用して位置情報の取得を実現する。

加えて、GOMASHIO のシミュレータを実装し、評価として GOMASHIO によって取得される位置情報の精度の評価および、GOMASHIO で取得した位置情報の誤差の指標の評価を行った。

シミュレーションの結果より、GOMASHIO によるセンサノードの位置の特定が可能である。

謝辞

本研究を進めるにあたり，御指導を頂きました，慶應義塾大学環境情報学部教授徳田英幸博士に深く感謝致します。

また，貴重な御助言を頂きました慶應義塾大学政策・メディア研究科の西尾信彦博士に感謝の意を表します。

徳田・村井・楠本・中村・南研究室の方々には，研究会の活動を通じて多くの御意見，御助言を頂きました。特に徳田研究室の諸先輩方，及び，梅染充男氏，村瀬正名氏をはじめとする MCng 研究グループの諸先輩方には，本論文の執筆にあたって絶えざる御指導や励ましを頂きました。ここに深い感謝の意を表します。また，青木俊氏，大島ひとみ氏，鈴木源太氏，田丸修平氏，守分滋氏の協力と心遣いに感謝致します。

最後に，研究の日々を共に過ごした，権藤俊一氏，斎藤匡人氏その他多くの友人に深く感謝し，謝辞と致します。

2001年1月31日

岩谷 晶子

参考文献

- [1] G.J. Pottie and W.J. Kaiser, "WIRELESS INTEGRATED NETWORK SENSORS", Communications of ACM, vol.43, pp.43-50, May 2000.
- [2] MEMS Exchange, "MEMS Clearinghouse", <http://www.memsnet.org/>
- [3] "TinyOS: An operating system for Networked Sensors" <http://tinycos.millennium.berkeley.edu/>
- [4] IEEE, "Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) specifications." IEEE Standard 802.11, 1999.
- [5] Bluetooth SIG, Inc. "Bluetooth" <http://www.bluetooth.com/>
- [6] C.Intanagonwiwat, R.Govindan and D.Estrin, "Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks", ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom 2000), pp.56-67, 2000.
- [7] J.Hightower and G.Borriello, "Location Systems for Ubiquitous Computing" IEEE Computer magazine, pp.57-66, August 2001
- [8] S.Meguerdichian, F.Koushanfar, M.Potkonjak, M.Srivastava, "Coverage Problems in Wireless Ad-Hoc Sensor Networks", IEEE Infocom 2001, Vol 3, pp.1380-1387, 2001.
- [9] L.Doherty, K.S.J.Pister, L.E.Ghaoui, "Convex Optimization Method for Sensor Node Position Estimation", IEEE INFOCOM, Vol 3, pp.1380-1387, April 2001.
- [10] S.Meguerdichian, S.Slijepcevic, Vahag Karayan, M.Potkonjak, "Localized Algorithms In Wireless Ad-Hoc Sensor Networks: Location Discovery And Sensor Exposure", ACM/IEEE Workshop on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, 2001.
- [11] S.Meguerdichian, F.Koushanfar, Gang Qu, M.Potkonjak, "Exposure In Wireless Ad-Hoc Sensor Networks", ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom 2001), pp.139-149, 2001.

- [12] A.Savvides, C.Han and A.B.Strivastava, “Dynamic Fine-Grained Localization in Ad-Hoc Networks of Sensors”, ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom 2001), pp.166-179, April 2001.
- [13] L.Subramanian and R.H.Katz, “An Architecture for Building Self-Configurable Systems”, ACM/IEEE Workshop on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, 2000.
- [14] C.Savarese, J. Rabaey, and J. Beutel, “Locationing in Distributed Ad-Hoc Wireless Sensor Networks” Proceedings of the ICASSP, May 2001.
- [15] B.Chen, K.Jamieson, H.Balakrishnan, and R.Morris “Span:An Energy-Efficient Coordination Algorithm for Topolog Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks” ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom 2001), pp.85-96, April 2001.
- [16] Y.Xu, J.Heidemann, and D.Estrin, “Geography-informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing” ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom 2001), pp.70-84, April 2001.
- [17] J.Gibson, “The Mobile Communications Handbook” IEEE Press 1999
- [18] 重野 寛, 松下 恩, “ネットワーク・ユーザのための無線 LAN 技術講座” SRC, 1994