

修士論文

アドホックネットワークを利用した シームレスな位置情報の取得に関する研究

指導教員 瀬崎 薫 助教授

東京大学大学院情報理工学系研究科電子情報学専攻
56429 田中 隆浩

平成 19 年 2 月 2 日提出

目 次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	2
1.1.1	ユビキタスネット技術を用いた子どもの安全確保システム	3
1.1.2	消防活動が困難な地下空間等における活動支援情報システム	3
1.2	研究目的	4
1.3	本論文の構成	5
第 2 章	関連研究	6
2.1	概要	7
2.2	レンジベースな位置推定手法	7
2.3	レンジフリーな位置推定手法	7
2.3.1	Iterative Multilateration を利用しない手法	8
2.3.2	Iterative Multilateration を利用する手法	8
2.3.3	レンジフリーな位置推定における精度	8
2.3.4	レンジフリーな位置推定における誤差の解析	9
2.4	センサーによるユーザー行動のコンテキスト抽出手法	11
2.5	自律方式による歩行者ポジショニングシステム	11
第 3 章	位置推定手法における技術的課題	15
3.1	概要	16
3.2	位置情報取得の課題	16
3.3	位置情報取得における目標	16
3.4	位置情報取得技術の方向性	17
第 4 章	提案手法	19
4.1	概要	20
4.2	最尤推定法をもちいた位置推定手法の考察	20
4.2.1	最尤推定法	20
4.2.2	2次元正規分布への拡張	21
4.2.3	測位誤差の解析	22
4.3	自律的測位	23
4.3.1	ポイントマン DRM の概要	23
4.3.2	存在範囲の生成	24
4.3.3	確率楕円の生成	25
4.4	位置情報の交換および高精度化	26
4.4.1	時空間アドレス (STA)	27
4.4.2	移動端末同士の位置推定アルゴリズム	27
4.4.3	基準点による位置補正アルゴリズム	29

第 5 章	提案手法の実装	31
5.1	概要	32
5.2	システムの概要	32
5.2.1	Location Middleware	32
5.2.2	STA Management	33
5.2.3	GPSR	33
5.3	Location Middleware の実装	34
5.4	GPSR の改造	38
5.5	MadWifi	38
第 6 章	実装システムの実験と評価	40
6.1	概要	41
6.2	基準点による位置情報補正実験	41
6.3	歩行者 2 人による実験	45
6.4	歩行者 18 人による実験	48
第 7 章	結論	50
7.1	本研究のまとめ	51
7.2	課題と展望	51
7.2.1	信号強度を利用した位置推定	51
7.2.2	マップマッチング	52
7.2.3	実装システムの課題	52

目 次

1.1	位置情報サービス	2
2.1	Active Badge System	7
2.2	GoPS の概要	9
2.3	Random Waypoint による精度比較	10
2.4	City Section による精度比較	10
2.5	平均誤差の解析	10
2.6	CoCo の概要	12
2.7	CoCo における行動認識アルゴリズムの概要	12
2.8	自律方式による歩行者ポジショニングシステムの概要	13
2.9	廊下を歩行したときに推定された歩行軌跡	14
2.10	市街地を歩行したときに推定された歩行軌跡	14
3.1	カーラーの救命曲線	17
4.1	最尤推定と尤度の最大化	21
4.2	ポイントマン DRM の概要	24
4.3	歩行動作による存在範囲の生成と近似	25
4.4	2次元正規分布と確率楕円	26
4.5	時空間アドレス STA の概要	27
4.6	位置情報の高精度化アルゴリズムの概要	28
4.7	基準点による位置補正アルゴリズムの概要	29
5.1	実装システムの概要	32
5.2	GPSR の概要	33
5.3	Dead End	34
5.4	Location Middleware GUI 版の初期設定	36
5.5	Location Middleware GUI 版のスクリーンショット	37
6.1	駒場リサーチキャンパス・グラウンドでの実験概要 (歩行者 1 人による)	41
6.2	ポイントマン DRM のみの実験	42
6.3	1つの基準点による実験	43
6.4	2つの基準点による実験	44
6.5	駒場リサーチキャンパス・グラウンドでの実験概要 (歩行者 2 人による)	45
6.6	歩行者 2 人による実験 歩行者 1	46
6.7	歩行者 2 人による実験 歩行者 2	47
6.8	18 端末による実証実験の概要	48
6.9	レーザースキャナ SICK 社製 LMS 291	49
6.10	歩行者 18 人による実験 位置推定結果	49
7.1	信号強度と実際の距離との関係	51

第 1 章 序論

1.1 研究背景

無線端末における通信技術として、現状の固定基地局利用型の通信体系とは異なり、複数の無線端末によって短期的、動的に形成されるネットワークをアドホックネットワークと呼ぶ。無線端末は中継ノードにもなり、自身の無線通信半径外の無線端末にもマルチホップによって通信することができる。

アドホックネットワークは固定基地局などのインフラによらずネットワーク構築が可能であり、無線センサ端末により地質や気象といったデータの取得、災害時の救助活動での情報ネットワークの構築、ロケーションベースのユーザーサービスといった様々な分野で活躍すると期待されている。

アドホックネットワークは技術的な課題がいくつか存在する。中継ノードによってマルチホップすることでネットワークを構築するアドホックネットワークでは、端末の移動によって頻繁に通信が切断されることを想定しなくてはならない。そのためルーティングに関しても通信の切断を考慮する必要がある。通信の切断をみとめるテーブル駆動型のルーティングプロトコルとして DSDV[1]、送信者始動型のテーブルをもたないルーティングプロトコルとして AODV[2]、DSR[3] などが提案されている。さらに、無線端末の電池残量や消費電力を考慮して経路制御を動的に行うルーティングプロトコルも研究されている。

また無線端末間の通信に必要な ID を一意に定めるアドレッシングやネーミングの技術も既存の固定 IP 技術と異なる技術が必要になる。メディアアクセスプロトコルにおいては隠れ端末問題と呼ばれる競合の問題や、関係のない端末が情報を他の端末から傍受してしまうさらし端末問題がある。

こうしたアドホックネットワーク特有の問題を解決するうえで、端末の位置情報は大変有用である。端末の位置情報を考慮したルーティングプロトコルとして GPSR[4] などが提案されており、効率的なルーティングやスケーラビリティを実現している。また、我々が提案している STA(Spatio Temporal Addressing)[5] など、端末の位置情報に基づいたアドレッシングが研究され、データセントリックなアドレッシングの実現が期待されている。

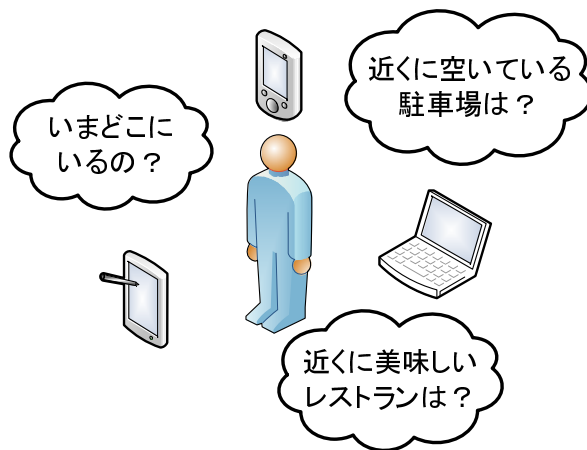


図 1.1 位置情報サービス

一方で、無線携帯端末をもったユーザーにたいしてコンテキスト・awareなサービスを提供するためにも端末の位置情報は大変重要である(図 1.1)。無線端末に表示される観光案内、場所ごとに異なる広告を同じ端末へ切り替え配信するサービスなどに活用が期待されている。また、無線センサ端末による地質や気象といったデータの取得や、災害時の救助活動での情報ネットワークの構築、行方不明者の搜索に活用するなど

災害救助での利用も考えられる。

現在、位置情報を活用し国民の安全・安心を確保する試みが関係省庁によってなされている。以下に数例を紹介したい。

1.1.1 ユビキタスネット技術を用いた子どもの安全確保システム

近年の小学生の通学時等における犯罪の被害の現状から、登下校時の安全確保が社会的な課題となっており、「犯罪から子どもを守るための対策」が2006年12月に関係省庁連絡会議において取りまとめられた。

総務省では、情報通信技術を活用した地域における対策として「電子タグ・ユビキタスセンサーネットワーク技術を活かした子どもの安全確保」のために必要な技術の研究開発を進めるとともに、「ユビキタス子ども見守りシステムの構築手法の普及」を実施している。

また、各地の自治体や学校などにおける子どもの安全確保システムの構築事例や企業における子どもの安全を確保するための実用化等に関する情報の収集を行い「ユビキタスネット技術を用いた子どもの安全確保システムに関する事例」として取りまとめ公表している [6]。

子どもの安全確保には、子どもの状態をリアルタイムに把握し見守るシステムの実現が望まれる。現在構築されているシステムでは、携帯電話に搭載されたGPSやPHSの基地局の位置情報等を基に、子どもの現在位置を捕捉し、保護者が知りたい時に子どもの位置情報を入手することができる。また、防犯カメラ等で撮影した映像をPC等で確認できるシステムも運用されている。しかし、地下街等ではGPSは利用できず、また携帯電話等のサービスエリア外では子どもの位置情報を把握することができない。また、防犯カメラによる子どもの状態の把握は、教室内等の屋内か通学路等のカメラが設置できる限られた範囲でのみ可能である。加えて、携帯電話等の不感エリアと子どもを狙った犯罪の多発地域には高い相関性があり、子どもの安全の確保には、利用エリアが限定されないシームレスな位置情報取得システムの構築が不可欠であるといえる。

1.1.2 消防活動が困難な地下空間等における活動支援情報システム

「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」が平成12年5月に施行され、現在、大深度地下空間の整備・利用が進んでいる。大深度地下空間や既存の地下街等は、密閉された空間であるため、煙や熱が充満し易く、煙の流動方向と消防活動の進入方向が逆行し、進入路が限定されるなど消防活動が極めて困難な空間となる。こうした消防活動が困難な空間において、迅速で円滑な活動を安全に行うためには、指揮本部による一元的な情報管理が特に重要であり、活動中の隊員位置や活動状況等の情報をリアルタイムに把握することが必要である。そこで、消防庁では消防活動の基本戦術である救助・検索ロープと携帯無線機だけに頼る従前の手法を改善するアプローチの一つとして、消防活動が困難な地下空間等を対象として、安全確保を目的とする活動支援情報システムの開発検討を行っている [7]。

活動支援情報システムは、慣性航法装置・電子タグ等による「位置特定システム」、「情報通信システム」、「位置表示システム」という要素技術で構成されている。慣性航法装置による位置特定システムに関しては、技術的な完成度は高いものの、コスト面や操作性などから早期の実践投入までには時間を要する。また電子タグ等を利用した位置補正では、電子タグの配置に検討を要する。このような課題を踏まえつつ、実際の現場に適用するシステムとしていくため、実証実験の積み重ねや装置の改良などを行っている。

1.2 研究目的

端末の位置情報を高精度に取得する技術には GPS や、赤外線、超音波、電波などを用いたものがあるが、このような、端末ごとに高精度に位置を特定できる専用の機器をとりつけるような方法ではコストがかかるうえ、機器の消費電力も大きく、また端末の大きさにも影響し、アドホックネットワークで利用するには不向きである。また GPS は消費電力の問題に加え、衛星からの見通しの悪い建物付近では精度が落ちてしまう、屋内や地下では使用できないといった制約がある。その場で短期的なネットワークを構成するアドホックネットワークの特徴をうまく利用し、特別なハードウェアを装着しないで、コスト削減すると共に高精度な位置推定を行えることが望ましい。

そのような要求から、特別なハードウェアを用いた測距を行わないレンジフリーな位置推定手法が多数提案されている。レンジフリーな手法では、電波の到達可能性のみを利用することで低コストな位置推定を行っている。しかしこうした手法では、ネットワーク内においてアンカーとなる高精度な位置情報を保持したノードが 2 ホップ以内に存在する程度の密度が必要であり、そうして得られた位置情報も誤差は数十メートル程度にもなってしまう [19]。したがってレンジフリーな手法のみで低コスト・高精度な位置情報取得を実現するのは難しいと言える。

本研究で提案する手法は、レンジフリーな手法から取得した位置情報と、端末に搭載された廉価なセンサー群から取得した位置情報、あるいは従来のように GPS から得られた位置情報など、さまざまな測位手段を統合し、低コスト・高精度な位置情報取得を実現しようというものである。

本研究で想定する環境は以下のようなものである。

- 市街地
- ユーザーが持ち歩く携帯端末
- GPS やセンサーを装着した高機能端末と測位手段をもたない低機能端末が混在する
- 市街地には位置情報を発信する電子タグ付きの基準点が存在する

現在、国土地理院を中心に、位置情報の参照点となる電子タグ付きの基準点を国土に展開する構想がなされており、また、そのための基盤技術や、電子タグ配備、電子タグ応用などの研究が進んでいる [8]。本研究ではそのような状況をふまえ、GPS やセンサー群を搭載した端末など、自律的な位置情報取得を可能とした端末や、自律的な位置情報を取得できない低機能な端末が混在する環境で、電子タグ付き基準点や隣接端末と位置情報を交換することで高精度な位置情報の取得を実現することを目的とする。

異なる位置情報インターフェースを統合することは、面的にシームレスな位置測位の実現に有用である。例えば GPS による測位では建物内や地下街などでは利用できず、また屋外においても近隣の建物によって衛星からの信号受信に影響がある場合が考えられ、場所によって位置情報の精度はまちまちであった。また前述したような高精度な位置情報を保持したアンカーを用いて測位するその他の手法でも、測位地点がアンカーから遠くなるほど測位誤差が拡大する、アンカー密度の程度によって位置情報精度に影響がでる、などといったことが考えられる。また無論、アンカーが近隣に存在しない場所ではそもそも位置情報を取得することができない。このように従来の、単一な手段による位置情報取得のみでは、フィールド上において同程度の精度の位置情報を、シームレスに取得することは困難であると考えられる。

本研究ではこのような状況をふまえ、さまざまな精度の位置情報と、アドホックネットワークを介して他の高機能端末やインテリジェント基準点の位置情報を統合することで、高精度な位置情報を低コストに取得する手法を提案し、さらに面的にシームレスな位置情報取得を検討する。

1.3 本論文の構成

まず 2 章で位置推定における関連研究について説明した後, 3 章で位置推定における技術課題について明らかにする. 次に 4 章で本稿で提案するアドホックネットワークを利用した位置情報の高精度化について述べる. さらに, 5 章でアドホックネットワークを利用した位置情報の高精度化アルゴリズムの実装について述べる. そして 6 章で実装システムの実験・評価をおこない, 最後に 7 章でまとめる.

第 2 章 関連研究

2.1 概要

この章では位置情報取得手法における関連研究について説明する。まずレンジベースな位置推定手法について述べ、次にアドホックネットワークにおけるレンジフリーな位置推定手法の概要を述べる。また、ノードに搭載されたセンサー群からユーザー行動のコンテキストを抽出する手法を説明する。最後に、ジャイロセンサーなどを利用した自律方式による歩行者ポジショニングシステムについて説明する。

2.2 レンジベースな位置推定手法

レンジベースな位置推定手法とは、各センサ端末間の距離レンジを測定し、距離に基づいてデバイスの位置を決定するものである。距離測定に用いる信号（電波、音波）の時間的なパラメータを利用する TOA（Time of Arrival）や TDOA（Time Difference of Arrival）の手法と、信号の受信強度に基づく手法がある。一般的には、距離測定に用いる信号の受信強度は周辺の環境により大きく変動するため、時間を利用する手法の方が高精度に距離を測定できると言われている。センサ端末間の距離からある端末の位置を決定する手法は、GPS の測位原理と同一の原理に基づいている。



図 2.1 Active Badge System

Active Badge System[10] は、赤外線を用いた屋内位置情報取得システムである。ユーザはバッジを持つ（図 2.1）。バッジは、定期的にリーダーにユニークな ID を送信する。ユーザは、PC ディスプレイから位置情報を知ることができる。Bat System（または Sentient Computing system）[11] は、Active Badge System を改良したシステムであり、3 次元の位置情報を取得可能である。RADAR[12] は、無線によって、位置を検知するシステムである。Cricket システム [13] は、超音波によって、位置を検知するシステムである。

2.3 レンジフリーな位置推定手法

GPS による位置情報取得は現在最も一般的であるが、機器のコストの問題、消費電力の問題に加え、衛星からの見通しが悪い建物付近などで精度が落ちる、屋内や地下では利用できないなどの問題があるため、GPS を用いない様々な位置推定手法が提案されている。前述した、AOA や TOA では超音波や特殊なアンテナ配

置を利用するため、数ミリメートル以内の誤差で位置推定が可能であるが、特別なハードウェアが必要なため GPS と同様コストの問題がある。

そこで、アドホックネットワークやセンサーネットワークの分野では、特別のハードウェアを用いないレンジフリーな手法が数多く提案されている。レンジフリーな手法では、電波の到達可能性のみを利用することで、数十メートル以内の誤差での位置推定を目的としてコストを抑えている。レンジフリーの手法は、さらに Iterative Multilateration を利用する手法と利用しない手法に分類できる。Iterative Multilateration とは、位置推定を行ったノードの位置情報を、他のノードの位置推定に利用する手法である。

2.3.1 Iterative Multilateration を利用しない手法

Centroid[14] は位置推定を行う範囲をカバーするために、無線範囲の広いシードまたは多数のシードを仮定し、各ノードは情報を受信した全シードの重心を計算することで位置を推定する。Amorphous [15] はシードからのホップ数を基にシードとの距離を推定して、位置を推定する。Othello [16] では、過去のシード情報を保持することで、高精度な位置推定を行える場合のみ、位置推定を実行する。MCL [17] はセンサとシードが移動するようなモバイルセンサネットワークを対象とした、位置推定手法である。MCL は存在予測範囲を狭めて測位精度を高めるために、移動可能範囲と無線範囲を利用する。

2.3.2 Iterative Multilateration を利用する手法

ごましお [18] は、シード以外に位置推定により存在予測範囲が狭まった（高精度な位置推定ができた）ノードの位置情報も利用して、シード情報をマルチホップで伝搬させる手法を提案している。

GoPS[19] では、移動ノードにおける位置推定に着目している。GoPS が想定する状況は、全移動ノードがシードになり得るが、過去の位置情報、あるいは不正確な位置情報を提供することがある、というものである。GPS で測位した情報が過去の情報であったり、ノードが移動するために、移動ノードの現在地は最後に測位した位置から離れている。しかし、そのような不正確な位置情報を複数重ね合わせることによって、存在予測範囲を狭めることができる。

GoPS では、一部の移動ノードが GPS 端末、あるいはその他の測位機器を保持しているが、急激なバッテリーの消費を避けるために、これらのノードは低頻度で測位を行う。そこで GoPS を利用して位置推定を行う。各ノードは測位機器のあるなしに関わらず、移動可能範囲に基づく存在予測範囲の軌跡を保持し、他のノードと遭遇した時に、遭遇したノードの存在予測範囲の情報と移動可能範囲を基に、自身の存在予測範囲を調整する（図 2.2）。GoPS ではシミュレーションにより、無線範囲が 50m の機器を想定した場合に精度が数十メートル向上することが確認されている。

2.3.3 レンジフリーな位置推定における精度

内山ら [19] は GoPS の精度を確認するため、MCL、Centroid および Amorphous と比較し、シミュレーションによる性能評価を行っている。

シミュレーションでは、500m*500m の正方形の範囲内にノードとシードノードをランダムに配置し、通信範囲は半径 50m の円としている。ノードの移動速度は 30 ~ 50(m/slot) の範囲でランダムに決定、また、GoPS におけるサンプル数 N は 50、ノード密度はあるノードの無線範囲内に存在するノード数の平均 n_d として定義し、 $n_d = 16$ としている。シード密度は、あるノードの無線範囲内で 1 タイムスロットあたりに正

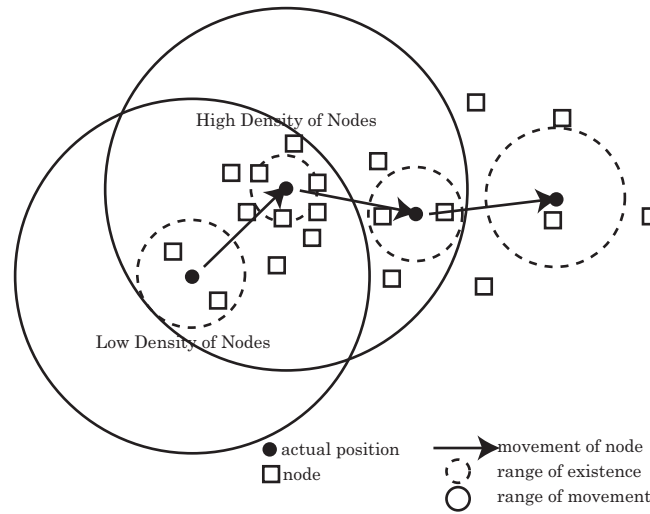


図 2.2 GoPS の概要

確な位置を取得するシードノード数の平均 s_d (シード/ホップ) として定義する。デフォルト値は $s_d = 1.0$ としている。GoPS ではシードノードが低頻度で正確な位置を取得することを仮定している。従って、シミュレーションでは各シードノードが T タイムスロット毎に正確な位置を取得するものとしている。例えば、シードノードの密度が 10 (シードノード/ホップ) で $T = 10$ の場合、 s_d は 1.0 となる。このシミュレーションでは Random Waypoint モビリティモデル [20] および City Section モビリティモデル [21] での精度を示している。

MCL では、シードの位置情報を周辺のノードに伝えるため、one-hop モードと two-hops モードの二つのモードが提案されている。two-hops モードではシードから位置情報を受信したノードが直ちにその情報を無線範囲内にいるノードへ転送する。シミュレーションでは、one-hop モードよりも多くのノードがシードの位置情報を取得できる two-hops モードで MCL を実装している。図 2.3 は、比較結果を示している。Centroid は無線範囲内にシードがいないノードは、位置推定を行えないため、シード密度が低い状況 ($s_d = 1.0$) ではやや性能が低い。Amorphous は、フラッディングによってネットワーク全体に全てのシードの位置情報が伝えられるために、比較的高い精度を示している。MCL は 2 ホップ以内に存在するシードの位置情報を利用するため、ネットワーク全体にシードが分散していなければならない。また、モビリティの影響で、シードに遭遇する確率が静的なネットワークよりも高くなる。

図 2.4 は City Section モビリティモデルにおける精度の比較結果を示している。シミュレーションでは、見通し通信のみ可能である単純な電波伝搬モデルを適用している。GoPS はシードノードの正確な位置情報が障害物で遮られて取得できなくても、不正確な位置情報を利用できるために、ビルが建ち並ぶ市街地のような場所でもより高精度な位置推定が可能であるといえる。

2.3.4 レンジフリーな位置推定における誤差の解析

内山ら [19] は、GoPS における平均推定誤差についての解析を行っている。

あるノード O が別のノード A と出会った時の 2 ノード間の距離の平均を考える。ノードの通信範囲を

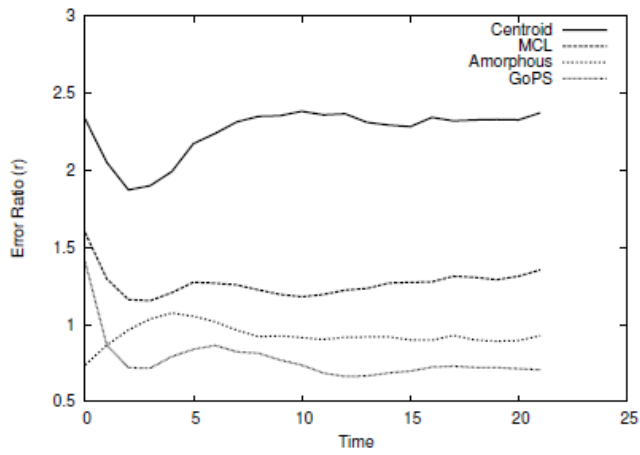


図 2.3 Random Waypoint による精度比較

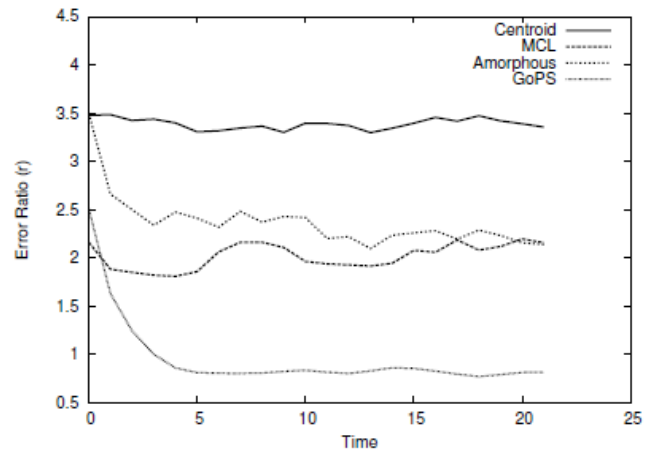


図 2.4 City Section による精度比較

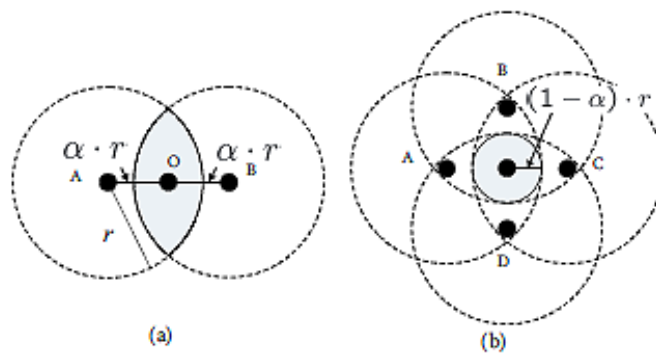


図 2.5 平均誤差の解析

r とすると、ノード O の通信範囲の面積 S は $S = \pi r^2$ となる。面積 S の半分は $S/2 = \pi(\frac{r}{\sqrt{2}})^2$ であり、 $\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0.7$ とすると、2 ノードが通信可能になった際の 2 ノード間の平均距離は αr になる。また、ノード O が 2 つのノード A, B と遭遇した時のノード O の位置はノード A, B の通信範囲の共通部分の中にあると考えられる。以降、ノード O と各ノードの距離は αr であると仮定する。共通部分の面積が最も小さくなる（精度が高くなる）のは、ノード A, O, B が一列に直線上に並んでいる場合（図 2.5 (a)）と考えられる。この場合の共通部分の面積 W は

$$W = 4 \int_{\alpha r}^r \sqrt{r^2 - x^2} dx \quad (2.1)$$

である。

ノード O が 4 つのノード A, B, C, D と遭遇した時に精度が最も高くなるのは、ノード O の周りにノード A, B, C, D が 90 度ずつ離れて配置されている場合（図 2.5 (b)）と考えられる。同様にノード O の周りに n 個のノードが $360/n$ 度ずつ離れて配置された場合、これらのノードの通信範囲の共通領域はノード O を中心とした半径 $(1 - \alpha)r \approx 0.3r$ の円よりも大きくなる。上述のような議論から、正確な位置情報を持つ n 個のシードノードからの情報を用いて位置推定を行った場合でも、 $(1 - \alpha)r \approx 0.3r$ 程度の誤差が生じるのはやむを得ないと考えられる。

一方 GoPS では、各シードノードは σ 秒に 1 回程度しか正確な位置情報が得られないと仮定し、速度 v で移動するシードが t 秒経過した際の現在位置は正確な位置情報を得た場所から最大で vt 離れた（ずれた）位置にあると仮定している。通信範囲 $r = 50m$ 、位置情報取得間隔 $\sigma = 25$ 秒、シードノードの移動速度 $v = 2m/\text{秒}$ 程度であるとする、各シードノードの現在位置は平均で $v(\sigma/2) \approx 0.5r$ 程度の誤差があると考えられる。

以上の議論から、 n 個のシードノードから位置推定した場合の誤差 $(1 - \alpha)r \approx 0.3r$ と位置のずれによる誤差 $v(\sigma/2) \approx 0.5r$ をあわせると、高度な位置推定方式を考案したとしても、 $0.8r$ 以上の推定誤差が生じる可能性が高いと考えられる。

2.4 センサーによるユーザー行動のコンテキスト抽出手法

近年、携帯電話や携帯端末に GPS や電子コンパスが搭載され、ユーザーの置かれている環境の情報を取得することができるようになってきている。これに伴い、ユーザの物理的な状況に応じて適切な情報を提供するコンテキストウェアサービスがより一層普及することが期待されている。これを実現するには、ユーザの置かれている状況をいかにして推定するかが重要な技術課題となる。現在、携帯端末に搭載された小型センサーからユーザー行動のコンテキストを抽出する方法が様々に提案されている。

CoCo[22] では、ユーザーが日常的に持ち歩ける携帯端末に取り付けた小型加速度センサーから、ユーザの行動認識を行っている（図 2.6）。ユーザーのズボンのポケットに 2 軸の加速度センサーを装着し、取得した加速度情報を記録用 PC で図 2.7 のように処理して、ユーザー行動の認識を行っている。結果 95 パーセント以上の精度で、座る・立つ・歩く・走る、といったユーザーの姿勢を推定することに成功している。

2.5 自律方式による歩行者ポジショニングシステム

アドホックネットワークの領域以外でも、歩行者の位置情報を自律的に取得する研究が行われている。自律方式による歩行者ポジショニングシステム [23] では、ジャイロセンサー、地磁気センサー、気圧センサーを

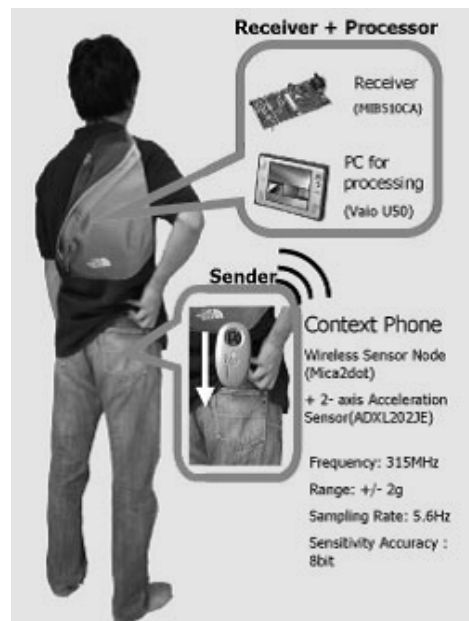


図 2.6 CoCo の概要

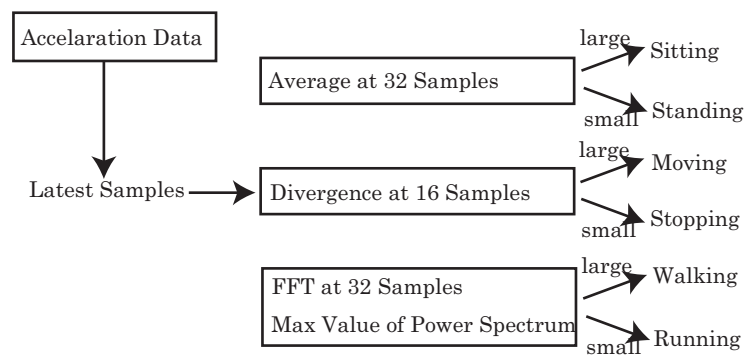


図 2.7 CoCo における行動認識アルゴリズムの概要

ユーザーに装着し（図 2.8）、自律的に位置情報を取得することに成功している。この手法ではジャイロセンサーから得られる加速度の時系列データを FFT することで、ユーザーの歩幅、歩行周期を推定し、歩行速度を割り出している。また、地磁気センサーとジャイロセンサーで計測されるヨー角からユーザーの進行方向を決定している。こうして得られたユーザーの位置情報は、これだけでは誤差が累積されてしまうため、マップマッチングによって位置情報の補正を行っている。

小西ら [23] が提案するポジショニングシステムは、いくつかのセンサ、各種のデータ処理を行うノートパソコン、およびそれらを接続するためのシリアルインタフェースを組み合わせて構成される。使用するセンサは、ジャイロセンサ (Japan Aviation Electronics, JIMS-30S)、磁気センサ (Honeywell, HMR2300)、および気圧計 (Yokogawa, MU101-AM1P) である。各センサは、それぞれ RS-232C のシリアル接続によりノートパソコンと接続される。ノートパソコン側は、4 つの RS-232C シリアルポートを備えた PCMCIA Type II カード (National Instruments, PCMCIA-232/4) を利用することにより、センサとの接続に必要なシリアルポートを確保した。

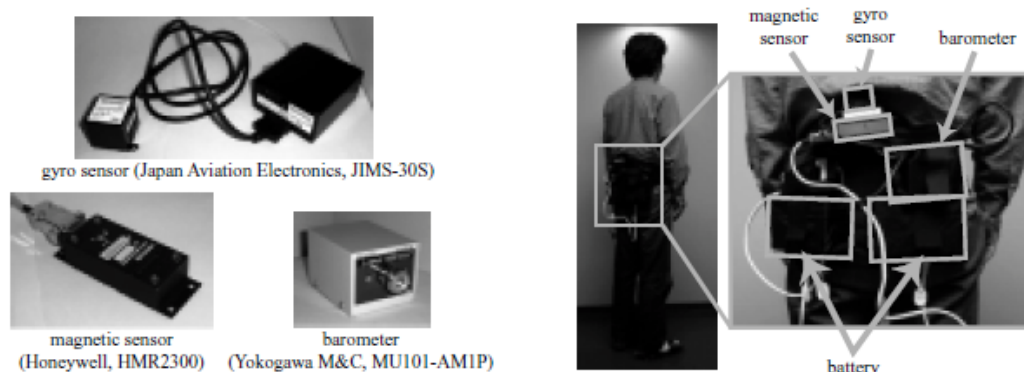


図 2.8 自律方式による歩行者ポジショニングシステムの概要

ポジショニングシステムの利用可能性と精度を検証するにあたって、屋内での利用と、屋外での利用を想定して評価を行っている。屋内での利用を想定した検証実験のためのテストサイトとしては、東京都目黒区駒場にある東京大学生産技術研究所（以下、生研）の C 棟 5 階の廊下を選択、また屋外での利用を想定したテストサイトとしては、京王井の頭線の駒場東大前駅から東京大学生産技術研究所のキャンパスまで、歩いて 10 分程度、500m 四方程度のエリアを選択している。

以下のような実験について結果を紹介する。生研 C 棟 5 階の廊下から、部屋に入って部屋の中を歩いて一周する。その後また廊下に戻り、続けて廊下を歩いて一周する。結果を図 2.9 に示す。駒場東大前駅から生研キャンパスまで歩く。結果を図 2.10 に示す。

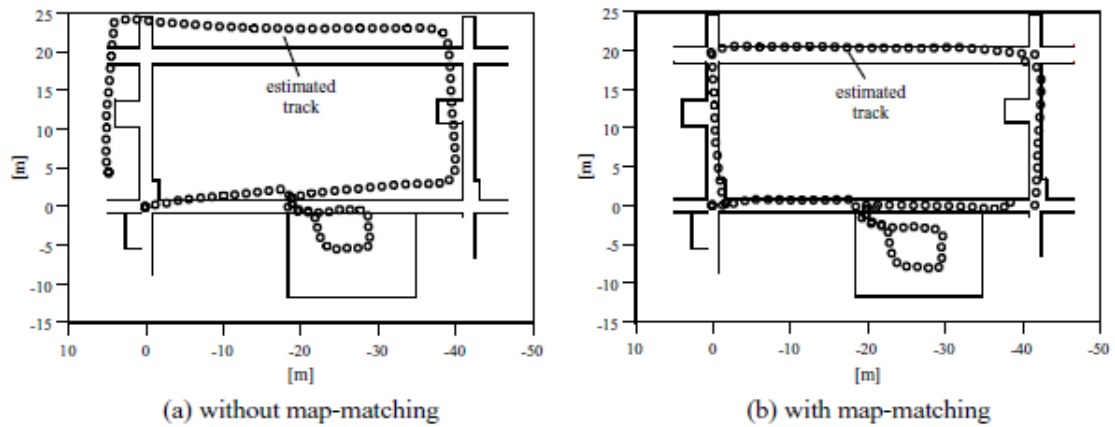


図 2.9 廊下を歩行したときに推定された歩行軌跡

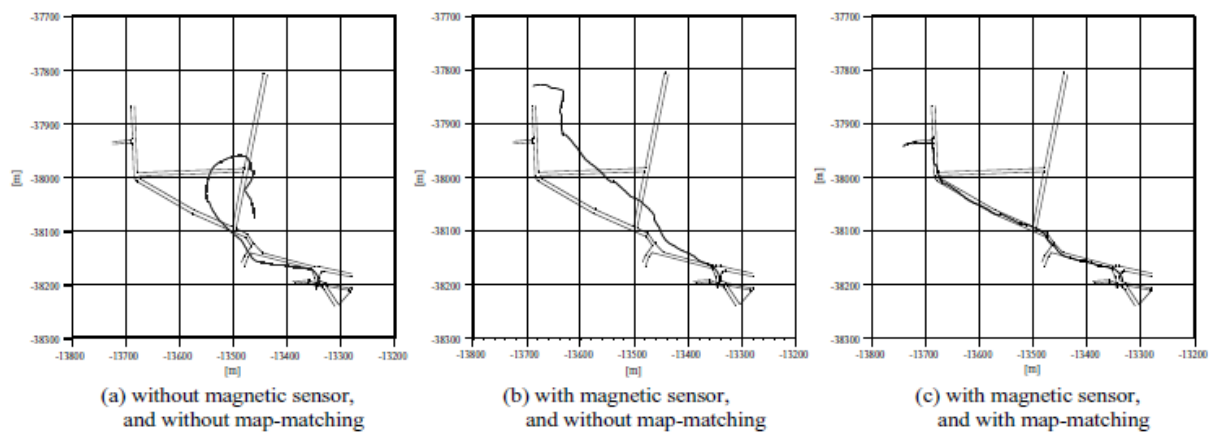


図 2.10 市街地を歩行したときに推定された歩行軌跡

第3章 位置推定手法における技術的課題

3.1 概要

本章では位置情報取得手法における関連研究についてまとめ、それぞれの手法について位置情報を取得するうえでの課題について検討する。また、位置情報取得における技術的な目標について述べ、本研究の目指す位置情報取得手法の方向性についてまとめる。

3.2 位置情報取得の課題

現状のレンジフリーな位置情報取得手法では、低コストにノードの位置を特定することができるが、前章の考察にあるようにその誤差は数十メートルと非常に大きなものであり、フィールドに多数のセンサーノードを散布し、粒度の大きな位置情報とあわせて環境情報を取得する、といったアプリケーションでしか活用することができない。現在、多くのレンジフリーな位置情報取得手法では、モバイルノードの移動度を固定して、モバイルノードの予測移動範囲を推定している。したがって、モバイルノードの速度や進行方向をリアルタイムに取得することができれば、位置情報の高精度化が可能であると考えられる。

一方、前章で述べた自律方式による歩行者ポジショニングシステムでは、加速度情報を用いてユーザーの位置情報を自律的に取得できることが示されたが、この研究で用いられているセンサー群はある程度大きく、また高価であり、携帯端末に内蔵することは難しい。また累積誤差を補正する必要上、マップマッチングやGPSによる位置情報の補正が必要不可欠である。

加速度センサーを用いてユーザー行動のコンテキスト抽出を行っている CoCo では、小型で廉価なセンサーを用いてもユーザーの姿勢が高精度で認識できることが示されている。これより、小型・廉価なセンサーを用いてより手軽で安価な自律方式による歩行者ポジショニングシステムを構築できる可能性があると考えられる。

3.3 位置情報取得における目標

アプリケーションによって様々に考えられるが、一般に位置情報の取得手法における目標は以下のようなものであると考えられる。

- 高精度な位置情報の取得
- モバイル端末に対応
- 高価なハードウェアが必要ない
- 通信コストが低い
- 面的にシームレスな位置情報（精度・利用可能範囲）

総務省は、110 番・119 番など緊急通報した携帯電話などの位置情報を、警察や消防署が確認できるようにするため、通信設備規則を改正する省令案などを作成し、2005 年 10 月 25 日、同省の諮問機関である情報通信審議会に省令案が提出された。キャリアの通信設備において、緊急通報を行なった場所を管轄する警察や消防署に電話が繋がることや、通報した端末の電話番号と位置情報が通知されること、緊急通報中の回線を保留することなどが盛り込まれている。これを受け「携帯電話・IP 電話等からの 119 番緊急通報に係る位置情報通知システム」の運用が 2007 年 4 月 1 日から開始される予定である [9]。

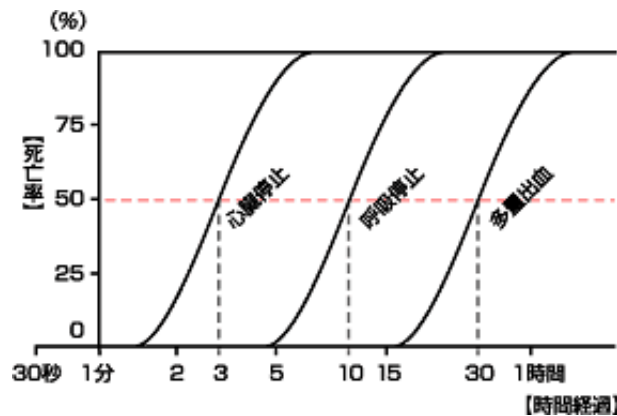


図 3.1 カーラーの救命曲線

図 3.1 はフランスの救急専門医 M.Cara が 1981 年に報告したもので「カーラーの救命曲線」の名で知られている。これは心臓停止、呼吸停止、出血などの緊急事態における経過時間と死亡率の関係を示し、例えば、心臓停止では 3 分間放置されると死亡率が約 50% に、呼吸停止では 10 分間放置されると死亡率が約 50% にもなる。このことは、緊急事態が重大であるほど早く適切な応急手当をしなければ、死亡者が増加することを意味している。

前述した位置情報通知システムは緊急通報時に通報者の位置を正確に特定することを目指す。現在、携帯電話に搭載されている GPS の測位性能は低く、実際の測位誤差は 30m ほどであり、その実効性は低いと考えられる。緊急通報をうけ、速やかに通報者のもとへ到着するためには、集合住宅の間取りを考慮すると、すくなくとも 10m ほど、実際には 5m ほどの測位性能が必要であるといえる。この値は、位置情報取得技術における目標精度のひとつの目安になると考えられる。

また、位置情報を取得する必要のある端末は、一般的にモビリティをもち、測位手法もこれに対応したものでなくてはならない。そして、これを一般に広く普及させるためには、特殊で高価なハードウェアを必要とする測位手段は不適當であるといえる。また、安価なデバイスを携帯端末に搭載する場合にも、消費電力や実装サイズを考慮する必要がある。

前述したレンジフリーな測位手法は、センサーネットワークにおいて多用される低コストな測位手法であるが、提案手法の評価でしばしば用いられる指標として、通信のオーバーヘッドが挙げられる。すなわち、通信のオーバーヘッドによって通信コストが増大し、消費電力問題と端末の寿命に直結するからである。携帯端末は、センサーネットワークのノードより消費電力や計算リソースといった点で余裕があるとはいえ、こうした点も考慮にいれるべきである。

3.4 位置情報取得技術の方向性

位置情報の取得手法における最終的な目標は、精度・利用可能範囲といった点で面的にシームレスな位置情報取得システムの実現であると言える。前述した「携帯電話・IP 電話等からの 119 番緊急通報に係る位置情報通知システム」では、携帯電話に搭載された GPS によって測位することを現時点で想定しているが、市街地や地下街などではそもそも GPS 信号が受信できず、測位不能な状況になる可能性が大きい。したがっ

て、面的にシームレスな位置情報取得システムの実現には、複数の測位手段を用意し、各々の測位手段から得られた位置情報のフュージョンが必要不可欠であると考えられる。

第 4 章 提案手法

4.1 概要

ここではシステムの構成と、本研究で提案する手法について説明する。提案手法は大きく 3 つの手法で構成される。

- 端末に搭載されたセンサ群による自律的測位
- 隣接端末や電子タグつき基準点との位置情報の交換
- 位置情報の高精度化アルゴリズムの実行

本研究のシステムはノート PC 端末と、測位手段として使用するポイントマン DRM と呼ばれる歩行者用慣性ナビユニットから構成される。ポイントマン DRM には加速度、ジャイロ、磁気方位、気圧センサが搭載され、ユーザーの相対位置を推定することが可能である。ポイントマン DRM と PC は RS232C によって接続される。また PC は 802.11 により他の端末とアドホックモードで通信することができる。

まず、PC に接続されたポイントマン DRM によって自律的な測位を行う。次に得られた位置情報とセンサ情報を用い、自身の位置の存在範囲を生成する。この存在範囲情報を隣接端末と交換し、隣接端末の存在範囲情報を用いて自身の位置情報を高精度化する。また隣接端末と存在範囲情報を交換する際には、プライバシー保護の観点から、端末固有のアドレスではなく時空間アドレス、STA(Spatio Temporal Address)を用いる。以上が本研究のシステムの概要である。

4.2 最尤推定法をもちいた位置推定手法の考察

ここでは確率論的なアプローチで位置推定に対する考察を行う。後述するポイントマン DRM の概要で詳しく論じるが、位置推定における測位誤差にはアルゴリズム的な誤差からセンサー測定値のずれまで、さまざまな要因が考えられる。このように、測位誤差には独立した要因による誤差が累積されていることを考えると、その誤差は正規分布として取り扱うことができる。

4.2.1 最尤推定法

データを生成する確率分布の形が $p(x; \theta)$ であるとし、パラメータ μ は未知とする。観測データからパラメータ μ を推定するとき、平均や分散の推定では不偏推定量で推定することができた。不偏推定量が簡単に構成できるときには、そのような方法が適用可能だが、任意の統計モデルのパラメータに対して、簡単な不偏推定量が作れるとは限らない。どのような統計モデルにも (原理的には) 適用可能な普遍的な方法が最尤推定である。

観測値 x_1, \dots, x_n が得られているとする。これらの値は、密度関数が $p(x; \mu)$ であるような確率分布に独立にしたがう確率変数の実現値とする。このとき、

$$\prod_{i=1}^n p(x_i; \hat{\theta}_n) = \max_{\theta} \prod_{i=1}^n p(x_i; \theta) \quad (4.1)$$

$$\sum_{i=1}^n \log p(x_i; \hat{\theta}_n) = \max_{\theta} \sum_{i=1}^n \log p(x_i; \theta) \quad (4.2)$$

を満たすパラメータ $\hat{\theta}$ が μ の最尤推定量である。すなわち x の出現確率が大きい分布 $\max_{\theta} p(x; \theta)$ を推定量とする (図 4.1)。

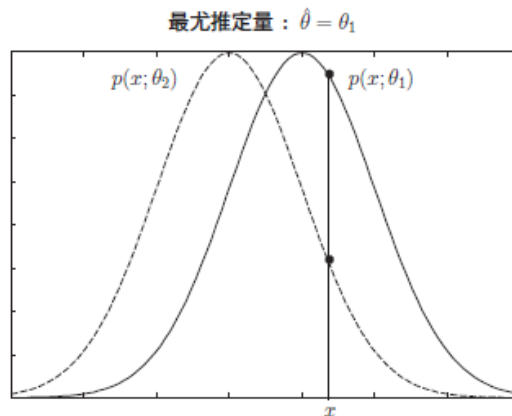


図 4.1 最尤推定と尤度の最大化

いま, データ X_1, \dots, X_n は独立であり, それぞれ X_i は正規分布 $N(\mu, \sigma_i^2)$ に従うとする. ただし σ_i^2 はすべて既知とする. 前述した最尤推定により平均パラメータ μ の最尤推定量 μ' を求めることができる. このとき,

$$P(\mu') = \prod_{i=1}^n \left(\frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \right) \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \mu'}{\sigma_i} \right)^2 \right] \quad (4.3)$$

より尤度方程式は以下ようになる.

$$\frac{\partial}{\partial \mu'} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \mu'}{\sigma_i} \right)^2 = - \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \mu'}{\sigma_i} \right) = 0 \quad (4.4)$$

したがって最尤推定量 μ' , μ' の分散 $\sigma_{\mu'}^2$ はそれぞれ

$$\mu' = \frac{\sum (x_i / \sigma_i^2)}{\sum (1 / \sigma_i^2)} \quad \sigma_{\mu'}^2 = \frac{1}{\sum (1 / \sigma_i^2)} \quad (4.5)$$

となる.

4.2.2 2次元正規分布への拡張

同様の議論を2次元正規分布に拡張しておこなうことができる. 確率変数

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

に対して2次元正規分布の密度関数は以下のように定義される。

$$p(\mathbf{X}; \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}) = \frac{\sqrt{|\boldsymbol{\Sigma}^{-1}|}}{2\pi} \exp\left[-\frac{1}{2}(\mathbf{X} - \boldsymbol{\mu})^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1}(\mathbf{X} - \boldsymbol{\mu})\right] \quad (4.7)$$

ここで $\boldsymbol{\mu}$ は平均ベクトル, $\boldsymbol{\Sigma}$ は分散共分散行列であり

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{pmatrix} \mu_x \\ \mu_y \end{pmatrix} \quad \boldsymbol{\Sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x \sigma_y \\ \sigma_y \sigma_x & \sigma_y^2 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

のようにあらわされる。

4.2.3 測位誤差の解析

次に, 最尤推定をもちいて n 個の端末が自身の位置情報を交換した場合の位置精度の向上について解析を行う。いまある地点で, 端末 i が観測した位置を x_i とする。端末が観測した位置情報の誤差は2次元正規分布にしたがうとし, いまその誤差が分散共分散行列 $\boldsymbol{\Sigma}_i$ によってあらわされているとする。このとき, n 個の端末の観測した位置情報にもとづいて最尤推定をおこない最尤推定量 $\boldsymbol{\mu}'$, $\boldsymbol{\Sigma}'$ を求める。このとき, 尤度 $L(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$ は

$$L(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma}) = \prod_{i=1}^n \frac{\sqrt{|\boldsymbol{\Sigma}^{-1}|}}{2\pi} \exp\left[-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i - \boldsymbol{\mu})^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} (x_i - \boldsymbol{\mu})\right] \quad (4.9)$$

となる。 $L(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$ を最大にする $\boldsymbol{\mu}'$, $\boldsymbol{\Sigma}'$ を求めるために, 両辺の対数を取り, $\boldsymbol{\mu}$, $\boldsymbol{\Sigma}$ で偏微分をおこなうと,

$$\frac{\partial L(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})}{\partial \boldsymbol{\mu}} = \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\Sigma}_i^{-1} (x_i - \boldsymbol{\mu}) = 0 \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial L(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})}{\partial \boldsymbol{\Sigma}} = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\Sigma}_i^{-1} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\Sigma}_i^{-1} (x_i - \boldsymbol{\mu})(x_i - \boldsymbol{\mu})^T \boldsymbol{\Sigma}_i^{-1} = 0 \quad (4.11)$$

これを解き, $\boldsymbol{\mu}'$ の最尤推定値は

$$\boldsymbol{\mu}' = \frac{\sum_{i=1}^n \boldsymbol{\Sigma}_i^{-1} x_i}{\sum_{i=1}^n (\boldsymbol{\Sigma}_i^{-1})} \quad (4.12)$$

また, $\boldsymbol{\mu}'$ の分散 $\boldsymbol{\Sigma}_{\boldsymbol{\mu}'}$ は

$$\boldsymbol{\Sigma}_{\boldsymbol{\mu}'} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (\boldsymbol{\Sigma}_i^{-1})} \quad (4.13)$$

となる。

いま、2 個の端末で位置情報を交換した場合の位置精度の向上について考える。簡単のため、2 端末の分散共分散行列は等しく Σ_0 とし、また、

$$\Sigma_0 = \begin{pmatrix} \sigma_0^2 & 0 \\ 0 & \sigma_0^2 \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

とする。

このとき、最尤推定量の偏差は $\sigma_0/\sqrt{2}$ となる。すなわち、2 個の端末で位置情報を交換した場合、推定される位置情報の誤差は、交換前に比べておよそ 7 割程度に低減されていることがわかる。

また、2 個の端末で位置情報を交換する際の通信半径を r とすると、2 個の端末で通信ができる（お互いが通信半径内に存在する）場合、端末間の距離の期待値は $r/\sqrt{2}$ であると考えられる。この端末間の距離を推定誤差として加味した場合、最尤推定量の偏差 $\sigma_{\mu'}$ は

$$\sigma_{\mu'} = \frac{1}{\sqrt{1/\sigma_0^2 + 1/(\sigma_0 + r/\sqrt{2})^2}} \quad (4.15)$$

程度となることが予想される。

当然ながら、端末間の通信距離、すなわちカバレッジと位置推定の精度はトレードオフの関係にある。例えば、測位誤差が 10m 程度である端末が 2 個存在し、半径 3m 程度でお互い通信することができる状況で、端末間で位置情報を交換し最尤推定を行った場合、推定される位置情報の誤差は 7.7m 程度になると予想される。この誤差は、より多数の端末と位置情報を交換することで、さらに低減させることができると考えられる。

4.3 自律的測位

ここではポイントマン DRM より得られた位置情報とセンサ情報から自身の存在範囲を生成する手法について検討する。ポイントマン DRM は搭載されたセンサ群によりユーザーの歩行動作を認識し、歩幅、歩数、進行方向を推定することができる。このパラメータを用いてユーザーの存在範囲の推定を行う。

4.3.1 ポイントマン DRM の概要

ポイントマン DRM は、GPS 信号の全くないところでも自律航法・モニター・記録を可能とする歩行者用携帯ユニットであり、米 Honeywell 社が米軍プロジェクトで開発した兵員用慣性航法ユニットを一般個人用としたものである。本機は地磁気センサで常に方角を検知し、加速度センサによる歩行検知で距離を算出する。内蔵された誤差補正ソフトは体の傾斜等の各種補正が可能である。加速度の 2 回積分で距離を算出する手法は非常に高価で大きな装置でないかぎり、誤差の積算となり携帯式では事実上不可能である。そこで、ポイントマン DRM は歩行による衝撃波の周波数解析により、最も精度の高いパルスとその周波数を判断し、各種補正アルゴリズムで高精度に歩幅・歩数・歩測により距離を算出し、歩行距離・軌跡を出力することができる。

本機は図 4.2 のようにベルトにつけて行動でき、大きさ約 110x84x39mm 275 グラムで最大 20 時間の運用が可能である。警ら・救助活動や森林管理、歩行者 ITS、要員管理・隊形把握といったアプリケーションが想定されている。本機の自律モードでのおよその精度は、歩行距離に対して平地で 3-5 パーセント、山林で 4-7

パーセントほどとの実験結果がでている。また、気圧高度計が内蔵されているため、スタート時にセットした気圧との相対で高度の変化を認識することができ、その精度は大体ビル2～3階単位程度である。

本機では、ユーザーの進行方向を地磁気センサによって推定しているが、地磁気は、屋内、ビル街、地下でも有効なため、これらの場所でも測位可能である。また、オプションとしてジャイロセンサをあわせることで地磁気が乱れやすい鉄筋コンクリート建造物内でも進行方向の推定を行うことができる。

本機はノートPCとRS232C-USB変換ケーブルで接続され、スタート地点からのユーザーの相対位置、進行方向、相対高度といった情報を、歩行動作時に出力することができる。



図 4.2 ポイントマン DRM の概要

4.3.2 存在範囲の生成

予備実験により、ポイントマン DRM による歩行距離の推定値、および進行方向角の推定値の誤差はガウス分布をとることがわかった。したがって1歩進んだときのユーザーの存在範囲は図 4.3 左のような扇形をとると考えられる。一方、進行方向角の推定値の誤差は十分小さい(標準偏差 5deg 程度)ため、ユーザーの存在範囲は2次元 Gauss 分布をとり、図 4.3 右のような楕円形に近似することができる。

ポイントマン DRM による測位は以下のようにあらわされる。

$$x_{i+1} = \vec{x}_i + w_i \vec{d}_i \quad (4.16)$$

ここで \vec{x}_i は i 歩目の位置ベクトル、 w_i は i 歩目の歩幅、 \vec{d}_i は i 歩目の進行方向単位ベクトルである。

次に測位誤差のふるまいについて検討する。いま i 歩目のステップで、進行方向の方位角が平均 θ_i 、分散 $\sigma_{\theta_i}^2$ の Gauss 分布にしたがうとする。ここで方位角の分散が十分小さいことから、進行方向ベクトルの誤差を、進行方向と垂直の Gauss 分布にしたがう誤差 e_i と近似することができる。

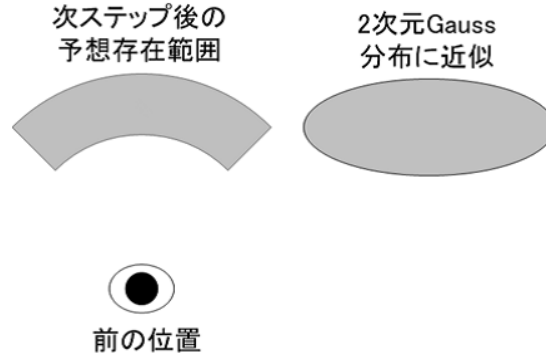


図 4.3 歩行動作による存在範囲の生成と近似

したがって、 i 歩目の移動後のユーザーの位置は以下の式で示される。

$$\begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i + w_i \cos \theta_i - e_i \sin \theta_i \\ y_i + w_i \sin \theta_i + e_i \cos \theta_i \end{bmatrix} = A_i \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ w_i \\ e_i \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

ここで

$$A_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cos \theta_i & -\sin \theta_i \\ 0 & 1 & \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix}$$

である。

いま S_i を $\begin{bmatrix} x_i & y_i & w_i & e_i \end{bmatrix}^T$ の分散共分散行列とすると、 x_i, y_i, w_i, e_i は互いに独立なので、以下のようにあらわされる。

$$S_i = \begin{bmatrix} \Sigma_i & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{w_i}^2 & 2 \\ 0 & 0 & (w_i \tan \sigma_{\theta_i})^2 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

x_i, y_i, w_i, e_i はそれぞれ Gauss 分布に従うので、その線形結合である x_{i+1}, y_{i+1} も当然 Gauss 分布に従う。したがって、その平均ベクトル μ_{i+1} および分散共分散行列 Σ_{i+1} は以下のようにあらわされる。

$$\mu_{i+1} = \mu_i + w_i \vec{d}_i \quad (4.19)$$

$$\Sigma_{i+1} = A_i S_i A_i^T \quad (4.20)$$

以上のようにユーザーの存在範囲は近似的に 2 次元 Gauss 分布、すなわち平均 μ_i と分散共分散行列 Σ_i によりあらわされ、ポイントマン DRM で計測される歩行動作のパラメータより求めることができる。

4.3.3 確率楕円の生成

次に、分散共分散行列から確率楕円を生成するアルゴリズムについて述べる。すべての固有値が正な 2 次の実対称行列 A は次のように 2 次形式であらわされる。前述した分散共分散行列も 2 次の実対称行列で、す

すべての固有値が正であるので同様にあらわすことができる。

$$\begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix} A \begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix}^T = a_{11}x^2 + 2a_{12}xy + a_{22}y^2 = c > 0 \quad (4.21)$$

この式は、 $a_{12}^2 - a_{11}a_{22} < 0$ で、かつ、 $a_{11}(a_{11}a_{22}c - a_{12}^2c) > 0$ の場合、楕円の方程式となる。行列 A の固有値を、大きい方から λ_1, λ_2 とすると、楕円の長軸の方向が λ_1 に対する固有ベクトルの方向、また、短軸の方向が λ_2 に対する固有ベクトルの方向になる。さらに、長軸と短軸の長さの比が、 $(\lambda_2/\lambda_1)^{0.5}$ となる。

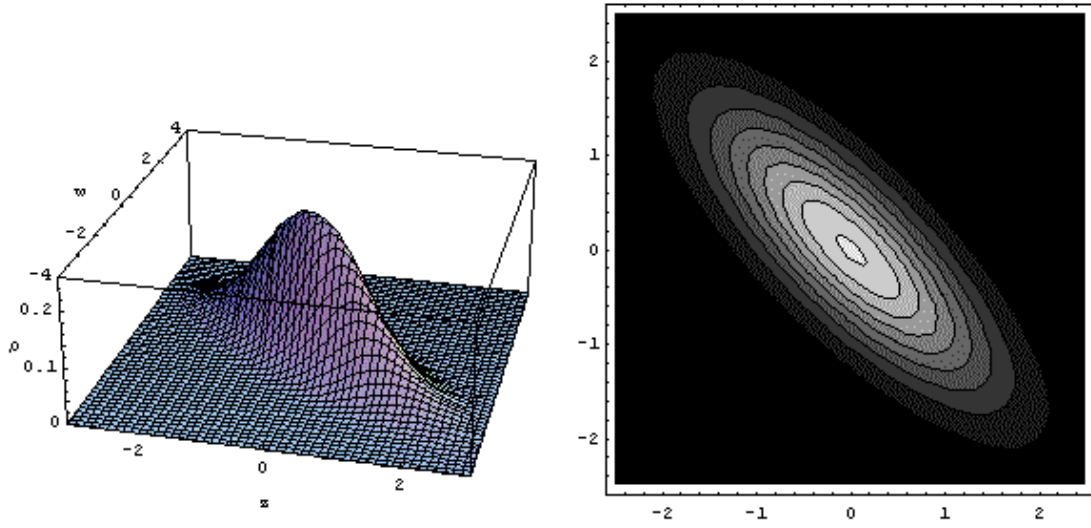


図 4.4 2次元正規分布と確率楕円

以上に述べた手法を用いて、分散共分散行列より求められる楕円を確率楕円と呼ぶ(図 4.4)。この場合、楕円の長軸、短軸の長さは以下の式で求められる。

$$a = -2 \ln(1 - c) \sqrt{\lambda_1} \quad (4.22)$$

$$b = -2 \ln(1 - c) \sqrt{\lambda_2} \quad (4.23)$$

ここで、 a, b はそれぞれ楕円の長軸と短軸の長さであり、 c は確率楕円の信頼限界である。本手法のアルゴリズムでは 95 パーセントの信頼限界で確率楕円を生成している。

以上のように、ポイントマン DRM のセンサデータより生成された分散共分散行列 Σ_i から、その固有値と固有ベクトルを計算することで、その確率楕円を信頼限界に応じて求めることができる。確率楕円は、ユーザーの存在範囲を GUI 上で視覚化する際に用いるほか、後述する位置情報の高精度化アルゴリズムにおいても利用する。

4.4 位置情報の交換および高精度化

ここでは我々が提案する時空間アドレス (STA) の概要、および隣接端末との位置情報の交換、位置情報の高精度化アルゴリズムについて説明する。

4.4.1 時空間アドレス (STA)

アドホックネットワークを利用した位置情報サービスでは、位置情報に基づいたデータの配信ができること、端末の詳細な行動履歴は隠蔽しつつ端末同士の位置情報を交換できることが重要であるが、そのためには端末のアドレスとして位置情報が含まれていることが望ましい。このような経緯にもとづき、我々は各端末の存在する時空間情報をもとに算出する時空間アドレス (Spatio-Temporal Address : STA) という手法を提案している [5]。

STA とは端末の存在する (位置, 時刻) の組み合わせを基本情報として用いるアドレスである。図 4.5 に示されるように、理論的に同時刻・同位置に複数の物体が存在することはありえないので基本的に一意性が保証されているという特徴がある。また時刻については時計から、位置情報は測位システムから取得可能であり、各端末が自律的に算出できるアドレスである。本研究のシステムでは各端末の位置情報の交換に、STA を用いた通信を利用する。

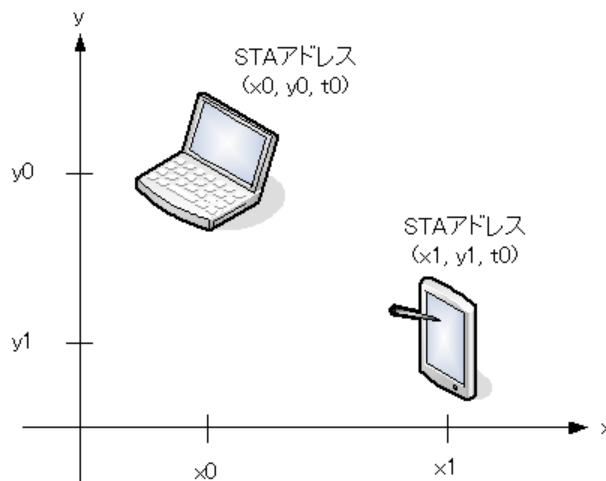


図 4.5 時空間アドレス STA の概要

前述したように、ある 1 つの STA だけでは端末のトラッキングは難しいため、ユーザープライバシーの保護が期待できるといった利点が挙げられるほか、STA にはさまざまな用途が考えられる。STA は理論的にはアドレス衝突が起こらず、各端末が自律的に取得可能なアドレス体系である。また、アドレスそれ自体に位置情報が含まれているため、位置情報をベースとしたルーティングプロトコルとの親和性が非常に高いといえる。本研究と STA を発展させることで、ある特定の地域にいるすべてのノードにメッセージを配信するサービス (ジオキャスト) の実現が考えられる。

4.4.2 移動端末同士の位置推定アルゴリズム

次にアドホックネットワークを利用した周囲の端末との位置情報の交換、および高精度化アルゴリズムについて説明する。本研究ではここで説明するアルゴリズムを全ての移動端末で実行することを仮定している。図 4.6 にその概要をしめす。

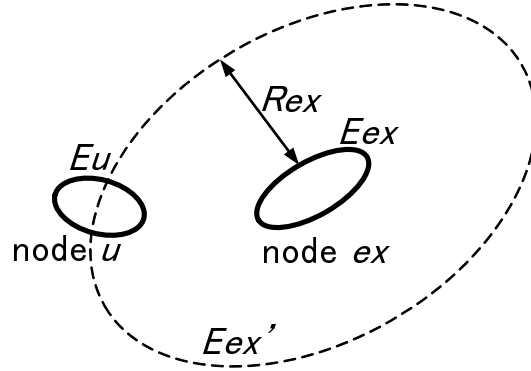


図 4.6 位置情報の高精度化アルゴリズムの概要

各端末は自身の存在範囲を、2次元 Gauss 分布、すなわち分散をあらわす分散共分散行列、および平均をあらわす平均ベクトルにより保持している。この近似により位置情報交換の際のオーバーヘッドを削減し、かつ一定にすることができる。また位置推定アルゴリズム実行の際の計算量を削減することができる。各端末の存在範囲は前述のとおりセンサ群の情報より推定される。

分散共分散行列はすなわち、その端末のもつ位置情報の誤差の表現である。したがって、電子タグつき基準点といった、位置情報に誤差のないものは、その分散共分散行列を 0 とすることで統一的に取り扱うことが可能である。したがって以下に述べる高精度化アルゴリズムにおいても移動端末と電子タグつき基準点を区別することなく適用することができる。

端末 i はタイムスロットごとに Hello メッセージとして、自身の存在範囲 L_i 、通信半径 R_i を隣接端末にブロードキャストする。タイムスロットの粒度は各端末の移動度を加味し、十分に小さいものとする。各端末は Hello メッセージを受信し、位置情報の高精度化アルゴリズムを実行し、自身の存在範囲 L_i を更新する。

以下に、端末 u における高精度化アルゴリズムの詳細を説明する。端末 u は隣接端末 ex より Hello メッセージを受信した場合を考える。

1. 端末 u は自身の存在範囲 L_u 、すなわち平均ベクトル μ_u および分散共分散行列 Σ_u から信頼限界 95 パーセントの確率楕円 E_u を生成する。確率楕円の中心座標は平均ベクトル μ_u より、また、確率楕円の長軸、短軸の長さ、および傾きは分散共分散行列 Σ_u の固有値より算出することができる。
2. 受信した端末 ex の存在範囲 L_{ex} より同様に確率楕円 E_{ex} を生成する。この確率楕円 E_{ex} の長軸と短軸を、端末 ex の通信半径 R_{ex} だけ拡大したものを E_{ex}' とする。すなわちこれが予想される端末 E_{ex} の通信範囲である。
3. 自身の確率楕円 E_u と隣接端末の通信範囲 E_{ex}' の共通範囲 Z を求める。まず E_u を満たす格子点集合 N_u を生成する。格子点は求める位置精度に比べ十分小さいものとする（ここでは $1m$ 四方の格子点）。次に $N_u' \subseteq E_{ex}'$ かつ $N_u' \subseteq N_u$ となる N_u' を求める。
4. N_u' より平均ベクトル μ_u' および分散共分散行列 Σ_u' を求め、自身の存在範囲を L_u' に更新する。

以上が高精度化アルゴリズムのステップである。各端末の位置情報の誤差を、分散共分散行列で近似するため、アルゴリズムの計算のオーバーヘッドが少ないと考えられる。

4.4.3 基準点による位置補正アルゴリズム

次にアドホックネットワークを利用した基準点による位置補正アルゴリズムについて説明する。基準点は、高精度な位置情報を保持した固定端末であり、アドホックモードで通信することができる。基準点が保持する位置情報は十分に高精度なものであり、存在範囲をあらわす分散共分散行列はゼロ行列としてよい。

基準点による位置補正アルゴリズムは、基準点の通信範囲によって2つの場合に分けられる。

- 基準点の通信範囲が十分に小さい場合 (本手法では $3m$ 以内)
- 基準点の通信範囲が大きい場合

基準点はタイムスロットごとに Hello メッセージとして、自身の位置情報、通信半径 R をブロードキャストする。隣接端末 i は Hello メッセージを受信し、位置情報の高精度化アルゴリズムを実行し、自身の存在範囲 L_i を更新する。

基準点の通信範囲が十分に小さい ($3m$ 以内) 場合、基準点の Hello メッセージを受信できる端末 i は、基準点の保持する位置を中心とした半径 $3m$ 以内に存在することが予想される。したがって、基準点の Hello メッセージを受信した端末 i は、基準点の保持する位置を中心とした半径 $3m$ の確率楕円を生成し、それを自身の新たな存在範囲 L_i として更新する。以上のようにして端末 i は位置の補正を行う。

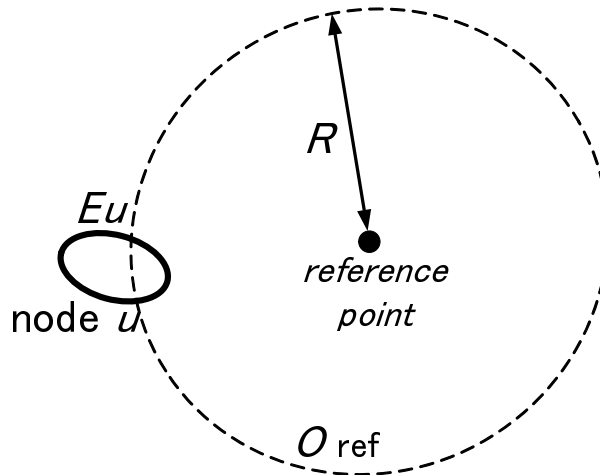


図 4.7 基準点による位置補正アルゴリズムの概要

次に、基準点の通信範囲が大きい場合であるが、通信範囲が広すぎるため、これをそのまま端末 i の存在範囲として更新することはできない。そこで以下のようなアルゴリズムで端末 i の位置補正を行う。端末 i が基準点より Hello メッセージを受信した場合を考える。図 4.7 にその概要を示す。

1. 端末 i は自身の存在範囲 L_i 、すなわち平均ベクトル μ_i および分散共分散行列 Σ_i から信頼限界 95 パーセントの確率楕円 E_i を生成する。確率楕円の中心座標は平均ベクトル μ_i より、また、確率楕円の長軸、短軸の長さ、および傾きは分散共分散行列 Σ_i の固有値より算出することができる。
2. 次に、受信した基準点の位置を中心とし、基準点の通信範囲を半径とする円 O_{ref} を生成する。すなわちこれが予想される基準点の通信範囲である。

3. 自身の確率楕円 E_i と基準点の通信範囲 O_{ref} の共通範囲 Z を求める. まず E_i を満たす格子点集合 N_i を生成する. 格子点は求める位置精度に比べ十分小さいものとする (ここでは $1m$ 四方の格子点). 次に $N'_i \subseteq O_{ref}$ かつ $N'_i \subseteq N_i$ となる N'_i を求める.
4. N'_i より平均ベクトル μ'_i および分散共分散行列 Σ'_i を求め, 自身の存在範囲を L'_i に更新する.

以上のようにして, 基準点の通信範囲が大きい場合でも, 端末 i は位置補正を行うことができる.

第 5 章 提案手法の実装

5.1 概要

本章では提案手法の実装について述べる。まず実装されたシステムの概要について説明し、次に前章に述べたアルゴリズムを実装した LocationMiddleware および GPSR の改造について詳しく述べる。また、本システムで利用した無線 LAN ドライバ MadWifi について説明する。

5.2 システムの概要

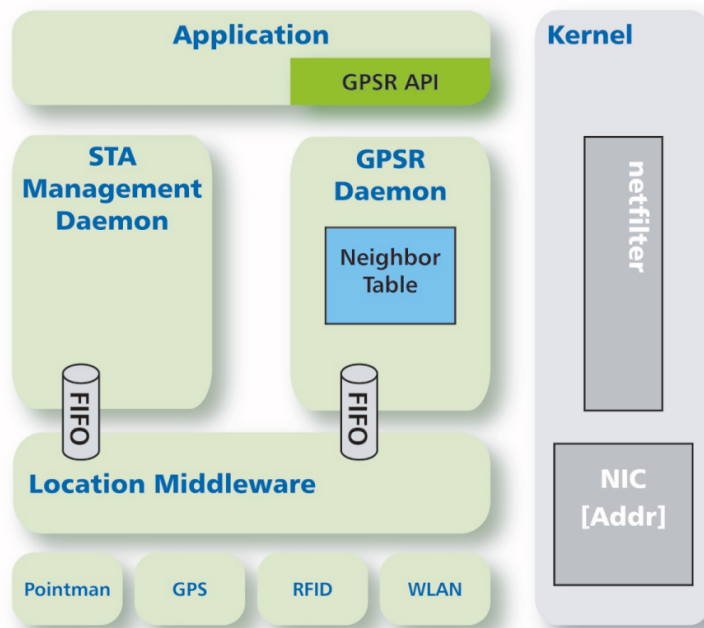


図 5.1 実装システムの概要

ここでは、本システムの実装手法について説明する。本システムは実機 (Linux 2.6) 上に実装されている。本システムの概要は図 5.1 のとおりである。本システムは、Location Middleware, STA Management, GPSR の 3 アプリケーションより構成される。以下にそれぞれのアプリケーションの働きについて述べる。

5.2.1 Location Middleware

Location Middleware は、PC に接続された測位デバイスであるポイントマン DRM からの出力を受け、位置情報と誤差情報を生成する (今後 GPS, RFID リーダーなど各種の測位デバイス入力に対応予定)。生成された情報は FIFO 経由で STA Management と GPSR へと渡される。また、GPSR より隣接端末の位置情報と誤差情報を受け取り、位置情報の高精度化を行う。

5.2.2 STA Management

STA Management は, FIFO 経由で Location Middleware から受け取った位置情報に基づき, STA を生成し, STA を IPv6 アドレスに埋め込む形で NIC に設定する機能をもつ. 具体的に STA を実現する方法として IPv6 のアドレス中に STA を埋め込む方法を提案する. RFC3513 などによれば IPv6 アドレス後半は必ずしも MAC アドレスでなくてよい, この部分の 64 ビットを用いる. 通常の IPv6 アドレスとして実現することにより STA を使ったネットワークと, STA を使わない外部ネットワークとの通信が容易に可能になる.

情報の詳細さという点では, 64 ビットを用いた場合全地球上, 経度緯度方向を約 1m 粒度, 高さ方向を約 1m 粒度, 1 日の時刻を約 1 秒粒度で表現することができ, 通常は十分といえる. 位置情報を用いたルーティングのため GPSR を使うが, 従来の GPSR の実装で用いられていたような端末のアドレスとその位置情報との対応表は不要となり, STA が埋め込まれた IPv6 アドレスをみるだけでパケットのフォワーディングが可能となる.

5.2.3 GPSR

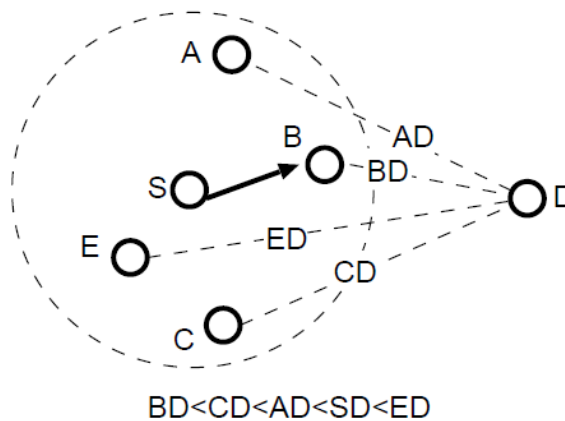


図 5.2 GPSR の概要

Greedy Perimeter Stateless Routing(GPSR)[4] は位置情報を利用した無線マルチホップ経路制御手法である. GPSR では, 各ノードは各々の隣接ノードのテーブルを持ち, 位置情報を保持する. ノード同士は互いに定期的にビーコンをやりとりし, 互いの位置を確認する. 一定時間情報が更新されない場合はすでに隣接していないものとして, テーブルから除去する. 定期的な広告は無線マルチホップ経路制御の分野では消費電力や帯域の面から敬遠されているため, パケットの送信時にのみ広告を交換し, 位置を確かめるという手法をとる. よりプロアクティブな経路制御を実現する. また以下では送信者は目的地ノードの位置を通信前に制御パケットをフラグディングすることにより既に知っているものとし, 通信は全てのリンクで双方向であると仮定する. 通信を開始する際, 送信者はより目的地ノードに近い隣接ノードに対してパケットを送信する. 中継ノードも同様に中継することにより目的地ノードまでパケットが到達する. 図 5.2 の場合,

送信者 S の隣接ノード群 A, B, C, E の内, 送信者よりも目的地ノード D に近く, かつ隣接ノードの内, 最も目的地ノードに近いノード B を次ホップノードとして選択する。

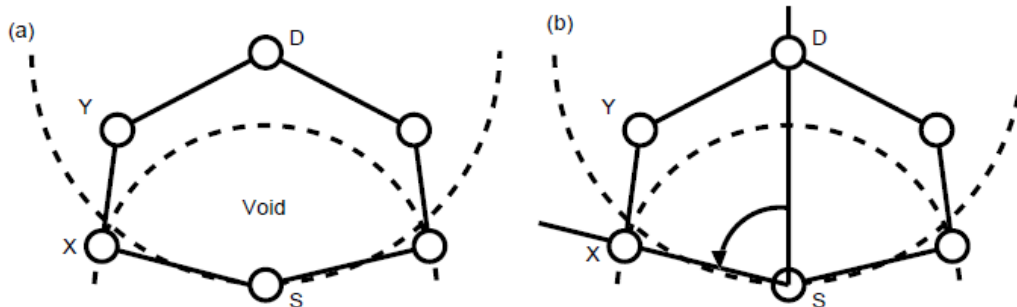


図 5.3 Dead End

しかし, 迂回ルートしか存在しなかった場合 (図 5.3 (a)), 上述の方法では経路制御が不可能となる。この状態をデッドエンドと呼び, GPSR ではこの状態を回避するために, 以下のスキームを実行する。デッドエンド発生時には, 中継ノードは自分と目的地ノードを結んだ線から半時計まわりに隣接ノードを探索し, 最初に発見したノードに対してパケットを送信する。これにより迂回ルートを構築することが可能となる (図 5.3 (b))。

しかし, このスキームのみでは地理的な最短ルートが存在した場合にも迂回ルートを構築してしまう可能性がある。そこで GPSR ではこれらの二つを組み合わせで用いる。つまり, パケットを送信するノードは隣接ノードの内, 自分よりも目的地ノードに近いものがあつた場合はそのノードに対して送信し, なかった場合, 半時計周りに中継ノードを検索し, 送信先を決定する。

GPSR は Southern California 大学 Embedded Networks Laboratory によって実装が行われている [24]。本システムではこの実装を利用・改造し, 自ノードの位置情報を, NIC に設定された STA から取得するよう置き換え, STA に基づいたルーティングをおこなう。また, 自端末の位置情報, 存在範囲, 通信半径を含んだビーコンメッセージをブロードキャストすることで, 隣接端末との位置情報の交換を行う。

5.3 Location Middleware の実装

ここでは Location Middleware の実装の詳細について述べる。Location Middleware の構成は大きく以下の 3 つのスレッドにわかれる。

- main スレッド
- ポイントマン DRM の読み込みスレッド
- 隣接ノード情報を GPSR より FIFO 経由で読み込むスレッド

この他に, ポイントマン DRM の情報よりユーザーの存在範囲を生成する関数群 (*location_error.c*, *location_error.h*) と, 存在範囲より確率楕円を生成し位置情報の高精度化をおこなう関数群 (*ellipse.c*, *ellipse.h*), 緯度経度系と直角平面座標系を変換する関数群 (*utility.c*, *utility.h*) が存在する。

次に Location Middleware の動作の流れについて説明する。Location Middleware の初期化動作の流れは以下のようなものである。

1. 自端末の初期位置の設定
2. STA Management への FIFO を作成
3. STA Management の起動
4. STA Management へ FIFO 経由で自端末の初期位置を送信 (STA Management は自端末の初期位置から STA を生成し NIC に設定)
5. GPSR Daemon への FIFO を作成
6. GPSR Daemon の起動
7. GPSR Daemon から隣接ノード情報を FIFO 経由で読み込み開始
8. ポイントマン DRM からの読み込み開始

STA Management において、端末の位置情報を保持するのに緯度経度系を用いている関係上、Location Middleware でも初期位置を緯度経度系で保持している。以上で Location Middleware の初期化が終了する。以降、ユーザーの歩行動作、GPSR Daemon からの隣接ノード情報の受信にしたがい、以下のように動作する。

- ポイントマン DRM からユーザーの歩幅・進行方向情報を受信し、分散共分散行列を計算、自端末の存在範囲を更新する。
- GPSR Daemon から隣接ノードの位置・存在範囲・通信半径情報を受信し、位置情報の高精度化アルゴリズムを実行、自端末の存在範囲を更新する。

ポイントマン DRM から得られるユーザーの歩幅はメートル、進行方向は方位角であらわされ、いわゆる平面直角座標系にしたがっている。そのため、そこから生成される分散共分散行列および自端末の存在範囲も平面直角座標系にしたがう。

一方、GPSR Daemon から得られる隣接ノードの位置情報は緯度経度系で表現されており、緯度経度系と平面直角座標系の変換を適宜おこなっている。

Location Middleware で位置情報高精度化アルゴリズムの動作を表示させるため、GUI 版を GTK+ で開発した。以下に Location Middleware GUI 版の動作を説明する。

Location Middleware GUI を立ち上げ、「ファイル」 「start」から図 5.4 のような初期設定ダイアログを呼び出すことができる。また、「表示」 「scale」から表示画面の倍率を変更することができる。初期設定ダイアログでは以下の項目を設定することができる。

- 自端末の通信半径
- 自端末の初期位置 (緯度)
- 自端末の初期位置 (経度)

Parameter	Value
communication range [m]	3.0
latitude [deg]	26.70775
longitude [deg]	127.80220
altitude [m]	0.0
north [m]	0.0
east [m]	0.0
pointman stride [m]	0.7
pointman stride var [m]	0.1
pointman heading var [deg]	3.6
STAMD Path	../../stamanagement/trunk/s
GPSR Path	../../svngpsrrepos/gpsr-linu

図 5.4 Location Middleware GUI 版の初期設定

- 自端末の初期高度
- 設定した初期位置からずれがある場合, m で指定 (北方向)
- 設定した初期位置からずれがある場合, m で指定 (東方向)
- ポイントマン DRM で推定される歩幅の平均 (デフォルトでは $0.7m$)
- ポイントマン DRM で推定される歩幅の偏差 (デフォルトでは $0.07m$)
- ポイントマン DRM で推定される方向角の偏差 (デフォルトでは 3.0 deg)
- STA Management のパス
- GPSR Daemon のパス

初期設定ダイアログで「OK」ボタンを押し、ポイントマン DRM を動作させ歩行をはじめると、図 5.5 のように自端末の位置が赤い円、自端末の軌跡が緑の点線、自端末の存在範囲が赤い破線の楕円で表示される。存在範囲を示す赤い破線の楕円は、自端末の存在範囲 (分散共分散行列) から信頼限界 95% で生成した確率楕円を描画したものである。歩行しつづけるにつれこの楕円が大きくなり、自端末の存在範囲が拡大していく様子が見て取れる。

また、GPSR Daemon より FIFO 経由で受信した隣接端末情報を利用して、Location Middleware GUI では隣接端末の通信範囲を青い破線の楕円で表示している。これも自端末の存在範囲と同様に、受信した隣接

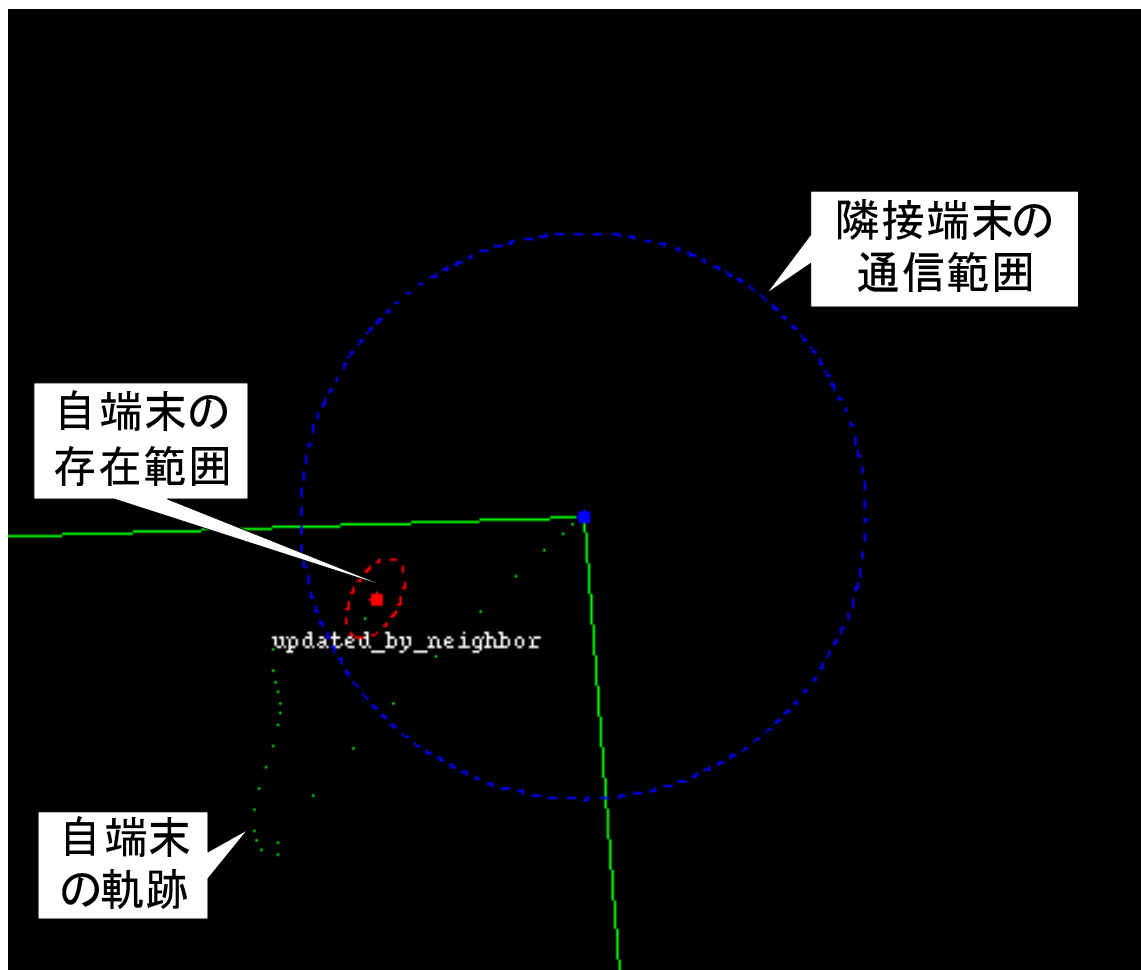


図 5.5 Location Middleware GUI 版のスクリーンショット

端末の分散共分散行列より信頼限界 95% で生成された確率楕円を、通信半径だけ拡大したものを描画している。

隣接端末情報を受信し位置情報高精度化アルゴリズムが実行され、自端末の位置情報と存在範囲が更新された場合、Location Middleware GUI の画面には「updated by neighbor node」の表示がなされる。また、隣接端末の通信半径が $3m$ 以内、位置情報の誤差が 0 であった場合、この隣接端末を基準点とみなし「updated by RFID」の表示がなされるようになっている。将来的には、こうした基準点をアクティブ型の電子タグで置き換える計画である。

5.4 GPSR の改造

ここでは、GPSR の改造の詳細について説明する。前述のとおり GPSR は Southern California 大学 Embedded Networks Laboratory によって実装が行われている。本システムではこの実装を利用するにあたって、以下のような改造を行っている。

- IPv6 への対応
- GPSR で保持する位置情報を緯度経度系に変更
- GPSR のビーコンメッセージを Location Middleware の高精度化アルゴリズム対応に変更
- GPSR と Location Middleware を双方向の FIFO で接続

まず IPv6 への対応について述べる。従来の GPSR の実装版は IPv4 のみの対応であった。しかし本システムでは、各端末が保持する位置情報から自律的に自身の STA を生成することで通信を行う。STA は前述のように Mobile IPv6 のフォーマットによるアドレス体系であり、STA によって通信を行うためには、GPSR の IPv6 化が不可欠であった。

次に GPSR で保持する位置情報であるが、従来の実装版では自身の保持する位置情報は (x, y) であらわされる平面直角座標系であった。しかし、このようなローカルな座標系にもとづく位置情報の表現では、将来的なグローバルな位置情報サービスへの発展を考えたときに合理的ではない。また、そもそも STA に含まれる位置情報は緯度経度系で表現されており、この点でも GPSR 側の保持する位置情報形式の改造が必要であった。また、STA では端末の存在する高さの情報も含まれている。そこで従来の GPSR では (x, y) の整数型であった位置情報を、 $(\text{latitude}, \text{longitude}, \text{altitude})$ の double 型で保持するように変更した。

5.5 MadWifi

本システムでは、Linux2.6 上で無線 LAN の制御を行うため、無線 LAN ドライバとして MadWifi 0.9.1[25] を使用した。MadWifi は Atheros 社の無線 LAN チップセットを Linux 上で動作させるには不可欠である。MadWifi の機能として、インフラストラクチャモードの他に、802.11 アドホックモードもサポートしている。

MadWifi では iwconfig コマンドから無線 LAN の送信電力のパラメータを変更することができる。提案手法において、およその通信範囲の測定が必要なため、iwconfig コマンドでさまざまな送信電力のパラメータを変更して測定実験を行った。

結果, 送信電力 $0 \sim 2dBm$ で通信範囲が $3 \sim 4m$ ほど, 送信電力 $3dBm$ で通信範囲が $60m$ 以上となった. すなわち, MadWifi では `iwconfig` コマンドからでは送信電力が極端に小さいか, あるいは大きい場合の 2 通りにしか制御できないのではないかと考えられる. きめ細かな送信電力の制御と通信範囲の計測は本手法において大変重要であり, 電磁波スペクトラムアナライザーなどを用いて今後引き続き詳細な調査を行う必要がある. 同時に, MadWifi の送信電力制御部分のバグフィックスが強く望まれる次第である.

第 6 章 実装システムの実験と評価

6.1 概要

本章では実装システムの実験と評価を行う。本手法は慣性歩行ナビユニット・ポイントマン DRM のスペックと、802.11 アドホックモードでの電波伝搬状況に大きく左右されるため、シミュレーターによる評価は必ずしも適切ではないと考えられる。そこで、前章に述べた実機上のシステムで実験を行った。ここでは提案手法で課題としている、位置情報の交換による高精度化について評価する。

6.2 基準点による位置情報補正実験

まず、基準点となる端末を用いた位置情報の補正実験をおこなった。ここでは、駒場リサーチキャンパスのグラウンド (ほぼ長方形) を実験フィールドとして使用した (図 6.1)。以下に概要を挙げる。



図 6.1 駒場リサーチキャンパス・グラウンドでの実験概要 (歩行者 1 人による)

- 歩行者は $54m \times 63m$ の長方形のグラウンドを周回
- 歩行者が持ち歩く端末の通信半径は約 $3m$
- 歩行者はグラウンドを時計回りに 5 周する
- 基準点となる端末を曲がり角に設置
- 基準点となる端末の通信半径は約 $3m$
- 基準点となる端末のビーコン発信間隔は 2 秒

以上のような条件に加えて、比較のため、基準点の設置数を 0 個, 1 個, 2 個 とかえてそれぞれ実験を行った。以下に結果を示す。

まず最初に、基準点を設置せずポイントマン DRM 単体の実験を行った (図 6.2)。これから分かるように、ポイントマン DRM のみでは累積誤差を補正することができず、周回するごとに測位誤差が増大していくこ

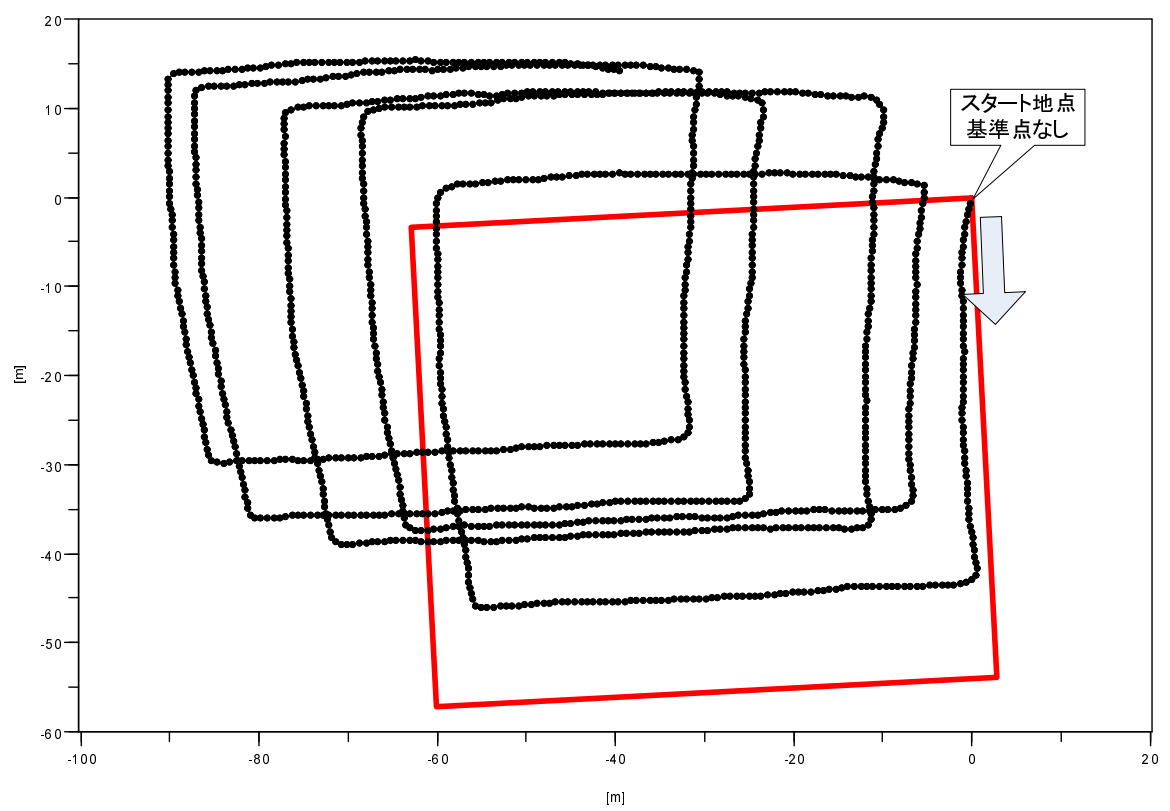


図 6.2 ポイントマン DRM のみの実験

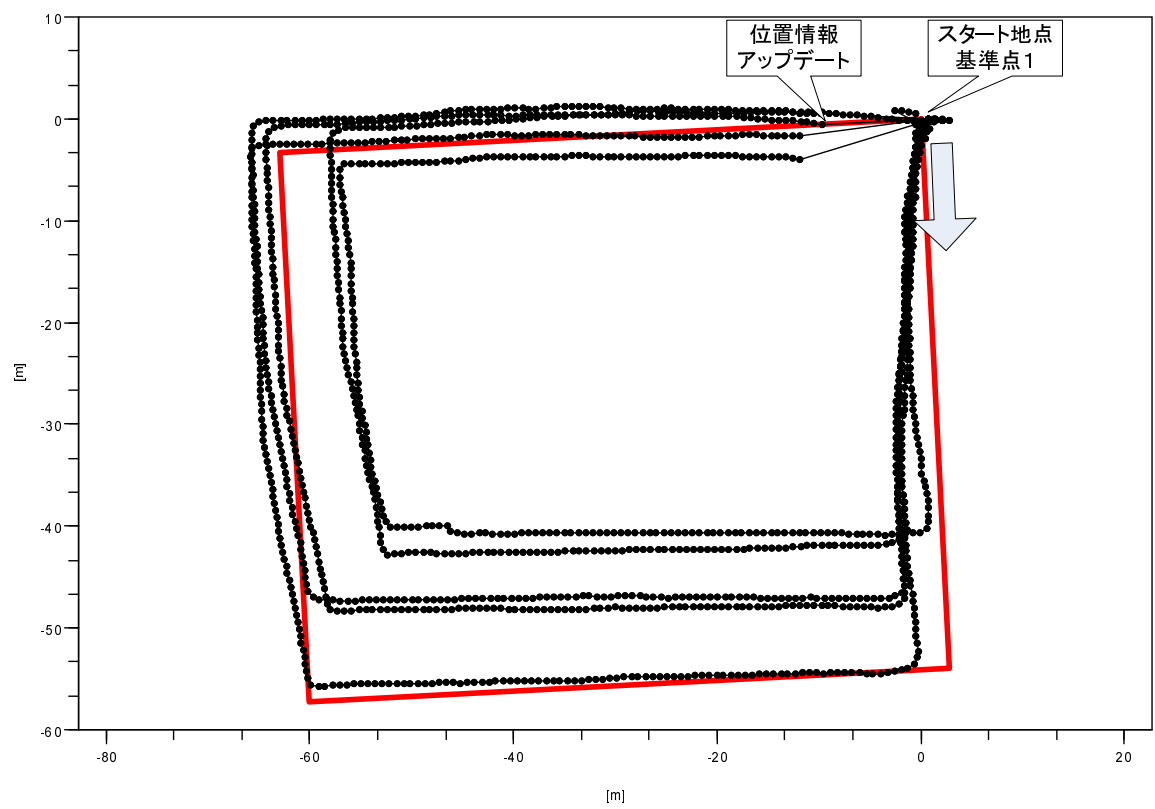


図 6.3 1つの基準点による実験

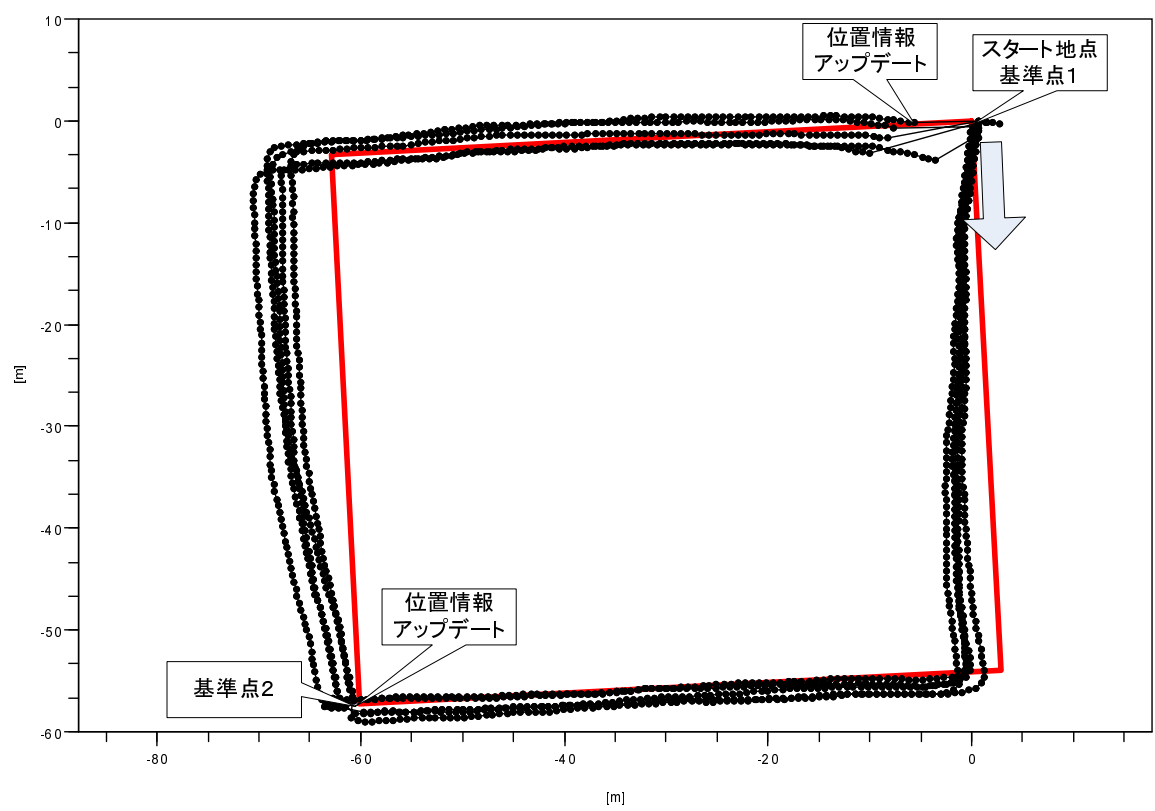


図 6.4 2つの基準点による実験

とが分かる。5 周, すなわち約 1200m を歩行者が歩いた後の測位誤差は 45m 程度となった。歩行距離に対する測位誤差は 3.8% 程度である。

次に, スタート地点に基準点を 1 個設置し実験を行った (図 6.3)。歩行者が周回し, スタート地点, 図 6.3 の右上角に到達する直前で基準点によって位置を補正されている様子がみられる。この実験では, ポイントマン DRM 単体での実験のように累積誤差が増大し続ける傾向はみられず, 基準点を設置した効果が認められる。歩行者は 1 周, すなわち 240m ごとに基準点と遭遇することになる。実験では最大で 18m 程度の誤差がみとめられた。

最後に, スタート地点に 1 個, スタート地点から対角線上反対の角に 1 個, 計 2 個の基準点を設置して実験をおこなった (図 6.4)。この実験では, 歩行者はおよそ 120m ごとに基準点と遭遇することになる。この結果, グラウンドを 5 周する間の最大測位誤差は 10m 程度, 約 0.8% であった。また, グラウンドを 5 周する間歩行者の軌跡に大きな変化がないことから, 定常的に測位誤差が 10m 以内に抑えられているといえる。

6.3 歩行者 2 人による実験



図 6.5 駒場リサーチキャンパス・グラウンドでの実験概要 (歩行者 2 人による)

ここでは 2 端末で位置情報の交換による高精度化について評価を行った。前述した実験と同様, 駒場リサーチキャンパス・グラウンドで実験を行った。図 6.5 のようにスタート地点から歩行者 2 人がそれぞれ時計周り・反時計周りにグラウンドを 5 周した。実験は以下の条件でおこなった。

- 歩行者は 54m * 63m の長方形のグラウンドをそれぞれ時計周り・反時計周りに 5 周
- 歩行者が持ち歩く端末の通信半径は約 3m
- 歩行者が持ち歩く端末のビーコン発信間隔は 2 秒
- 基準点となる端末は設置しない

2 人の歩行者はお互いの端末の通信範囲内にはいったときに、位置情報の交換を行い高精度化アルゴリズムを実行する。図 6.6, 図 6.7 に結果を示す。それぞれの図において、太線が周回コース、丸点・四角点であらわされているのが各々の端末で推定された位置である。丸点・四角点がとんでいるところは、高精度化アルゴリズムによって位置情報のアップデートが行われた結果である。

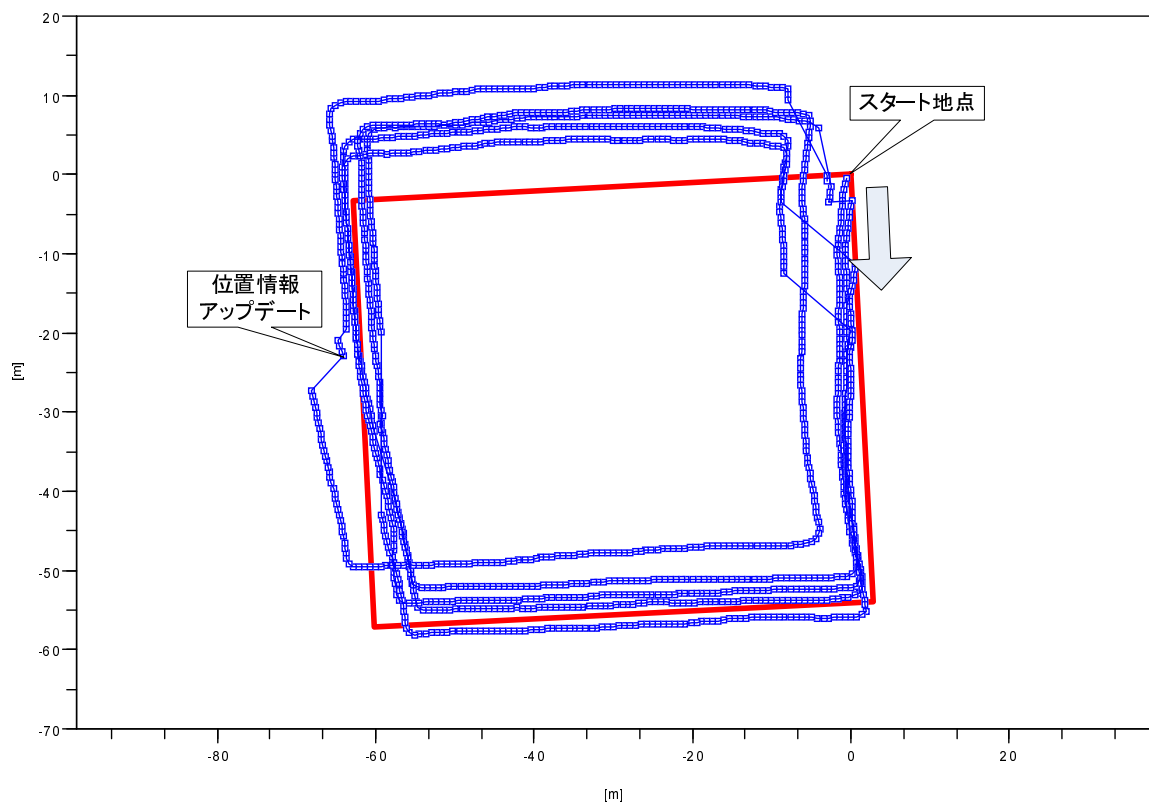


図 6.6 歩行者 2 人による実験 歩行者 1

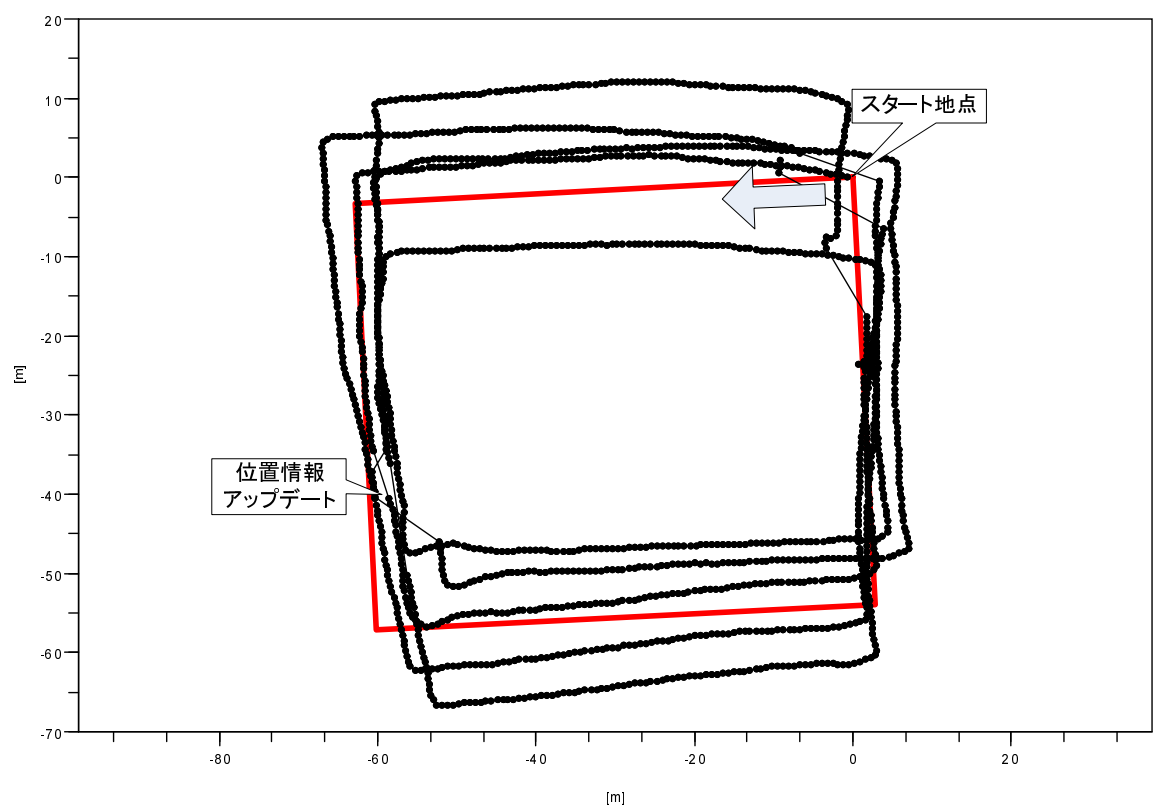


図 6.7 歩行者 2 人による実験 歩行者 2

図 6.6 の歩行者 1, 図 6.7 の歩行者 2 とともに最大誤差が $15m$ 程度におさえられている。図 6.2 のポイントマン DRM 単体でおこなった実験では、約 $1200m$ の歩行で $45m$ 程度、約 3.8% の誤差がみとめられ、歩行距離に比例して累積誤差が増していくと考えられる。同じく本実験でも基準点を設置しておらず、基準点による位置補正は行っていない。しかし歩行者 2 人で位置情報の交換を行うことで誤差の累積を抑えられることが確認された。

グラウンドは周囲が約 $240m$ であり、歩行者 2 人はおよそ $120m$ 歩くごとに位置情報の交換を行う。これにより累積誤差を解消し、最大誤差を $15m$ 程度、約 1.3% に抑えられることがわかった。

6.4 歩行者 18 人による実験

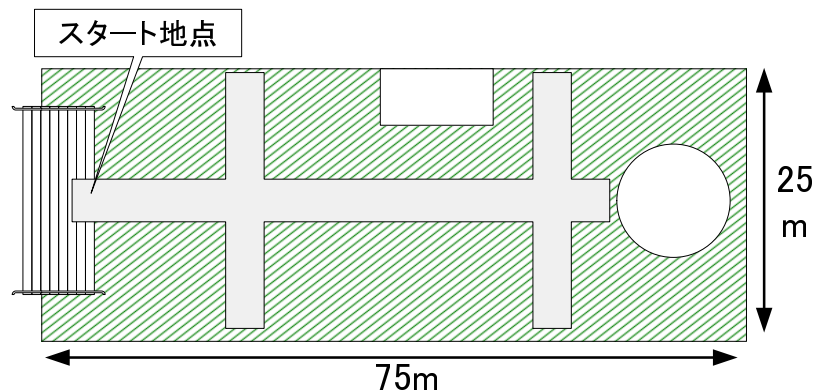


図 6.8 18 端末による実証実験の概要

本研究で提案するアルゴリズムは、第 4 章の位置推定誤差の考察で述べたように、端末同士の位置情報の交換の頻度を高めることによって、位置情報の精度をさらに向上させることができると予想される。そこで、2007 年 1 月 13 日、本学柏キャンパス総合研究棟ピロティにおいて 18 端末による実証実験を行った。18 人の被験者にポイントマン DRM を装着し、実装システムを搭載したノート PC を持って歩いてもらった。図 6.8 はピロティを俯瞰したものである。ここに市街地を模したコースを設定した。

本実験では柴崎研究室にご協力いただき、図 6.9 のようなレーザースキャナ SICK 社製 LMS 200 および LMS 291 をピロティ周囲に計 7 台設置、歩行者の位置を測定し、実装システムの測位誤差を評価しようと試みた。本レーザースキャナによる測位誤差は約 $4cm$ 、計測範囲はそれぞれ $30m$ 、 $80m$ である。

図 6.10 に実験でえられた位置推定の結果を示す。赤い細線がレーザースキャナで測定した歩行者の軌跡、黒い点が実装システムによる位置推定結果、黒い点がとんでいるところで位置情報の交換とアップデートをおこなっている。本実験では、図 6.8 のように設定したコースの交差点に位置情報補正のための基準点端末を設置したが、動作不良により実験中に位置補正が働いていないことがわかった。また、ポイントマン DRM 自体のキャリブレーションの問題、送信電力制御の問題などがあり、結果、図 6.10 でわかるように測位誤差が $40m$ 程度と非常に大きくなってしまった。しかし「歩行者 2 人による実験」でも示されたように、端末同士の位置情報の交換の結果、累積誤差の影響は少なくなっていると考えられる。



図 6.9 レーザースキャナ SICK 社製 LMS 291

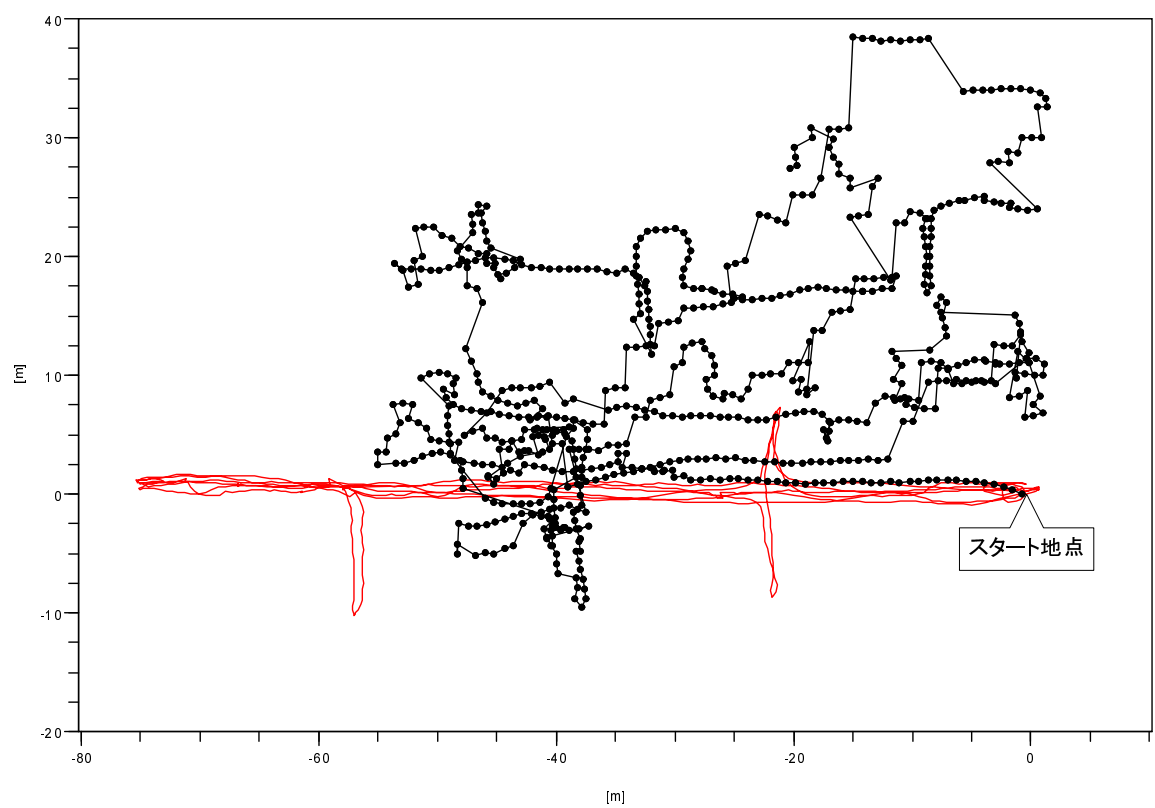


図 6.10 歩行者 18 人による実験 位置推定結果

第 7 章 結論

7.1 本研究のまとめ

本研究では、ポイントマン DRM に搭載されたセンサ群などによる自律的な測位手法と、アドホックネットワークを利用した位置情報の交換と高精度化の概要、および実装手法について述べた。また、実装システムを搭載したノート PC とポイントマン DRM を用いた位置情報取得システムの実証実験を行い、STA および位置情報取得システムの各機能について、その動作・性能を検証し統合的に評価した。

ポイントマン DRM 単体での測位精度は 3.8% 程度であり、歩行距離に比例した累積誤差の問題は避けられないが、実験により、基準点となる端末によって位置補正を行うことで累積誤差は解消され、約 120m ごとに基準点を設置した場合は測位誤差は 10m 程度、約 0.8% におさえられることがわかった。また、基準点を設置しない場合でも、歩行者のもつ端末同士で約 120m ごとに位置情報の交換を行うことで累積誤差は解消され、測位誤差も 15m 程度、約 1.3% におさえられることが確認された。

7.2 課題と展望

以下に本研究の課題と展望について、アルゴリズムと実装の両面から述べる。

7.2.1 信号強度を利用した位置推定

本研究では、ポイントマン DRM と無線 LAN によるレンジフリー測位によって位置推定をおこなった。しかし無線 LAN によるレンジフリー測位には精度の向上に限界がある。無線 LAN の信号強度を利用した位置推定手法は、特別なハードウェアがいらず、本研究の位置推定精度の向上の解決策のひとつである。

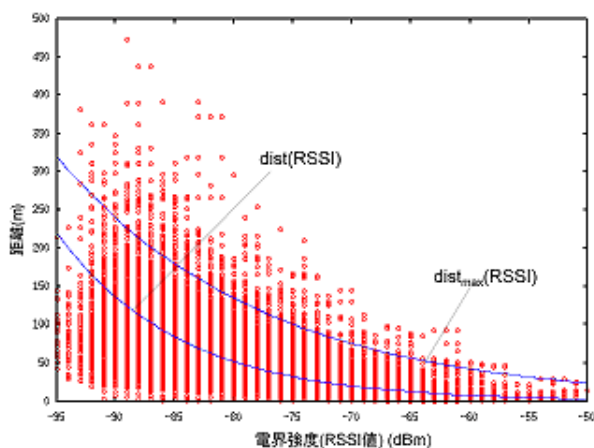


図 7.1 信号強度と実際の距離との関係

理想的な環境では、信号強度は距離の二乗に反比例するが、実際の環境では、遮蔽物・反射物・ノイズ等の影響を受ける。またアクセスポイント出力強度やアンテナ利得・アンテナ方向など、特定できない要因も多くある。したがって単純に信号強度が距離に関係しているかは自明ではない。暦本ら [26] は一般の無線 LAN 機器を現実的な環境で利用した場合の、距離と信号強度の関係について検証を行っている (図 7.1)。

図からも明らかなように、実際の環境でも信号強度と距離の間には明瞭な関係があることがわかる。しかし、本研究が想定するようなアドホックな移動端末間での信号強度を用いた距離推定は、各端末に由来する誤差や歩行者の挙動による電波受信状況の変化など、さまざまな擾乱が考えられ、さらなる検討を要する。

7.2.2 マップマッチング

以上にのべた手法では、ユーザーの絶対座標がセンサー群により推定された位置と、他ノードとの通信から推定された位置の統合から得られるユーザーの位置情報も誤差が依然として存在するが、実環境においてユーザーが存在可能な範囲を加味すれば、さらに位置情報を高精度化することができる。これがマップマッチングである。ここでは一般的なマップマッチング手法について述べたい。マップマッチングのために用いる地図データは、2種類のデータベースで構成される。1つは、地物の外郭線のデータから成り立っており、線分データの集合である。もう1つは、エッジとノードからなる道路ネットワークデータである。マップマッチング処理としては2種類の方式を同時に用いる。1つは、毎処理ステップごとに地物の外郭線との交差を解決するために機能するローカルマッチングであり、もう1つは、ユーザーの進行方向に明確な角度変化があった場合に、道路ネットワークを参照してユーザーが存在するネットワーク上の点を推定する機能である。これら二つの方式を同時進行で機能させることにより、マップマッチングを実現している。このようなマップマッチングによる位置補正を行うことで、フィールド上における位置情報の精度を高め、均一化できると考えられる。

一方で、このようなGISデータを用いたマップマッチングにより、ユーザー行動のコンテキストを抽出することができる。例えば、一般的な測位手法では、位置情報は座標で提供されるのみであり、ユーザーが「どの部屋にいる」「どの建物にいる」といったように実際に地理上のどこにいるのかは把握することができない。しかしGISデータを用いたマップマッチングを行うことで、ユーザー行動のコンテキストを把握することができ、より高度なロケーションベースサービスを提供することができると考えられる。

7.2.3 実装システムの課題

また今後、本研究のテーマを継続するうえで、GPSR Daemon, STA Management, Location Middlewareを統合的にGUIで表示・操作できる環境の開発が不可欠である。本研究ではLocation MiddlewareのGUI版を開発したが、これはLocation Middlewareの機能に即し、自端末の位置情報と存在範囲、隣接端末の通信範囲を表示するにとどまっており、STA、隣接する端末情報テーブルなどを表示・操作することはできない。したがって、これらを統合的に扱うことができるGUI環境をGTK+ベースで開発していく予定である。

また位置表示についても、端末を画面上に配置する際の座標系の設定、背景の地図表示などさまざまな点で改良の余地があると考えられる。さらにGoogle Map APIなどを用いて、本研究で提案したシステムをグローバルサービスと連携させていく試みも考えられるだろう。いずれにせよ本研究は、位置情報を利用したルーティングプロトコルや、環境情報取得アプリケーションなどのベースとなるものであり、今後さらなる実用性の追求が望まれる。

参考文献

- [1] Perkins C.E. and Praveen Bhagwat, *Destination-Sequenced Distance Vector (DSDV) Protocol*, Proceedings of SIGCOMM '94, Conference on Communications Architecture, Protocol and Application, pp. 234-244, Aug 1994.
- [2] Perkins C.E. and Royer E.M., *Ad-hoc on-demand distance vector routing*, Proceedings of Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, WMCSA '99, 1999, pp.90-100, 25-26 Feb. 1999.
- [3] David B. Johnson and David A. Maltz, *Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks*, Mobile Computing, Kluwer Academic Publishers, vol 353, 1996.
- [4] Brad Karp, H. T. Kung, GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing in Ad Hoc Wireless Networks. Proceeding of Mobicom, 2000
- [5] 岡野諭, 瀬崎薫, “ 時空間アドレスの応用に関する研究 ”, 信学ソ大, B-7, 2006
- [6] 総務省, “ ユビキタスネットワーク技術を用いた子どもの安全確保システムに関する事例”, http://www.soumu.go.jp/s-news/2006/pdf/00_honbun/00_main_all.pdf
- [7] 総務省消防庁, “ 消防活動が困難な空間における消防活動支援情報システム”, 平成 16 年度報告書
- [8] Sezaki, K. and Konomi, S. “RFID-based positioning systems for enhancing safety and sense of security in Japan”, UPIMap 2006.
- [9] 総務省, “ 携帯電話・IP 電話等からの 119 番緊急通報に係る位置情報通知システム”, <http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/houdou/190126-1/190126houdou.pdf>
- [10] R. Want, A. Hopper, V. Falcao, and J. Gibbons, “The active badge location system,” ACM Transactions on Information Systems, vol. 10, pp. 91–102, Jan. 1992.
- [11] “ The Bat Ultrasonic Location System, ” ATandT Laboratories Cambridge, 2002, [Online]. Available: <http://www.uk.research.att.com/bat/>
- [12] P. Bahl and V. N. Padmanabhan, “ RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system, ” Proc. IEEE INFOCOM 2000, 2000, pp. 775-784.
- [13] A. C. N. Priyantha and H. Balakrishnan, “The cricket location support system,” in *In Proc. of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 2000)*, Boston, MA, August 2000.
- [14] N. Bulusu, J. Heidemann and D. Estrin: “ GPS-less low cost outdoor localization for very small devices ”, IEEE Personal Communications Magazine, 7, 5, pp. 28.34 (2000).
- [15] R. Nagpal, H. Shrobe and J. Bachrach: “ Organizing a global coordinate system from local information on an ad hoc sensor network ”, Proc. of IPSN, pp. 333.348 (2003).

- [16] 佐藤雅幸, 若山公威, 松尾啓志, 岩田彰: “ アドホックネットワークにおける推定精度を考慮した位置範囲推定法 ”, 情報処理学会, MBL 研究会, Vol.2004, No.21, pp.179.186 (2004).
- [17] L. Hu and D. Evans: “ Localization for mobile sensor networks ”, Proc. of MobiCom, pp. 45.57 (2004).
- [18] 岩谷晶子, 西尾信彦, 村瀬正名, 徳田英幸: “ ごましお: アドホックセンサネットワークにおけるノード位置決定方式 ”, 情報処理学会, MBL 研究会, Vol.2001, No.108, pp.22.30 (2001).
- [19] 内山彰, 佐藤和基, 塚本淳, 山口弘純, 東野輝夫: “ 遭遇する移動ノード間での位置推定に基づく測位手法 GoPS の提案と評価 ”, 第 3 回アドホックネットワーク・ワークショップ (2006.1)
- [20] J. Broch, D. Maltz, D. Johnson, Y.-C. Hu and J. Jetcheva: “ A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols ”, Proc. of MobiCom, pp. 85.97 (1998).
- [21] V. Davies: “ Evaluating mobility models within an ad hoc network ”, Master 's thesis, Colorado School of Mines (2000).
- [22] 倉沢 央, 川原 圭博, 森川 博之, 青山 友紀: “ 単一の無線加速度センサを用いたユーザコンテキストの推定 ”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-19-23, September 2005.
- [23] Y. Konishi and R. Shibasaki, “ Development of an autonomous personal positioning system, ” Proc. Asia GIS '2001, 2001.
- [24] Young-Jin Kim, Ramesh Govindan, Brad Karp, Scott Schenker, “Geographic Routing Made Practical”, Proceedings of the USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation, May 2005
- [25] MadWifi, <http://madwifi.org/>
- [26] 暦本純一, “PlaceEngine:実世界集合知に基づく WiFi 位置情報基盤”, Internet Conference 2006, pp.95-104, 2006.

発表文献

- [1] 田中 隆浩, 瀬崎 薫, “アドホックネットワークを利用したシームレスな位置情報の取得”, 信学ソ大 B-21-32, 2006 年 9 月発表 .
- [2] 田中 隆浩, 瀬崎 薫, “アドホックネットワークと電子タグを利用したシームレスな位置情報の取得”, 第 6 回 AN ワークショップ, pp.2-5 - 2-8, 2007 年 1 月発表 .
- [3] 田中 隆浩, 瀬崎 薫, “アドホックネットワークと電子タグを利用した位置情報高精度化アルゴリズムの検討”, 信学総大 B-21-33, 2007 年 3 月発表予定 .

謝辞

本研究は文部科学省科学技術振興調整費「電子タグを利用した測位と安全・安心の確保」によるものです。関係各位に感謝致します。また、実験にご協力頂いた東京大学空間情報科学研究センターの柴崎教授、金杉さん、帷子さんをはじめとする柴崎研究室のみなさま、東京電機大学の戸辺教授、石塚さん、鈴木さん、戸辺研究室のみなさま、実験に参加していただいた方々に深く感謝致します。

本研究を進めるにあたり、大勢の方々のお力添えをいただきました。まず、指導教官として直接御指導いただき、また研究に対して有益な御指導、御批評、そして励ましの言葉をくださいました、瀬崎薫助教授にあつく御礼申し上げます。瀬崎助教授には、本研究の実験を行ううえで理想的な環境をご用意いただき、通常の研究生活では味わえないような貴重な経験を積ませていただきました。また、飲み会や研究室合宿、学会などを通じて公私にわたって深くお付き合いいただきました。学生の意見を誠実に受け止めてくださるそのお人柄から、研究室に自由闊達な雰囲気が生まれてたと思います。人格を陶冶し、探究に精進されるその姿は学ぶことが多く、模範とするところでありました。

また、実験装置の購入や研究を進めるにあたってご尽力いただき、研究に対して多くの示唆をくださったリサーチフェローの木實さん、常日頃研究室において研究環境の整備に尽力してくださった小松邦紀助手、松本夏穂秘書、小野裕子秘書に深く感謝致します。

最後になりましたが、瀬崎研究室の学生のみなさんには大変お世話になりました。同期の岡野くんは事務処理能力に長け、深い専門知識を持ち非常に有能な人物であり、彼なしではとてもここまで来ることはできなかったでしょう。飲み会で漏らすシュールなギャグや壊れっぷり、スルメのように味わい深く愛すべきキャラクターであり、同時に大変心強い存在でありました。面白いほどに僕とは正反対の性格の彼でしたが、同期として、戦友として2年間この研究室で過ごせたことを幸せに思います。

博士3年の関根さんと魏さんには、研究室に入りたての右も左も分からないころからさまざまなアドバイスをいただきました。魏さんに教えていただいた餃子のレシピ、また挑戦してみたいと思います。また、博士2年の寺田さんとは恐ろしいほど趣味もあい、マニアックな話に花を咲かせました。同じく博士2年角田さん、その鶴の一声で始まる研究室の飲み会が潤い少ない修論期間中の楽しみでありました。また、研究に対するアドバイスにとどまらずミーティングや学会発表など、さまざまな場面で面倒をみていただきました。修士1年のオラナットさん、島田くん、一松くん、研究生のマルセロくん、みんながこの研究室に入ってから研究室もより一層楽しく賑やかなものとなり、元気づけられることも多々ありました。みなさん、どうもありがとうございました。

2007年2月2日

田中 隆浩