

測位を利用したサービス技術に関する研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 静岡大学 公開日: 2012-03-28 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 森, 信一郎 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00006529

静岡大学 博士論文

測位を利用した
サービス技術に関する研究

2011年1月

大学院 自然科学系教育部

情報科学専攻

森 信一郎

要旨

GPS の利用によって、位置情報を使ったサービスが容易に活用できるようになった。携帯端末を使ったナビゲーションなど既に端末の標準搭載サービスとして普及しているものもある。これは、汎用システムである GPS(Global Positioning System)の普及により、位置情報の利用が容易になった事が背景にある。本稿では、この様な測位を利用したサービス技術について論ずる。この先行研究により、今後普及が予想される位置情報を利用したサービスの多様化に伴うより高度なサービス技術に対し、新しい測位技術を通して対応する事を目的とする。

これまで測位技術は提供されるサービス毎に新規に開発され利用されてきた。測位はサービスを実現する為の手段であり、そのサービスに特化して利用されている。例えば、船舶の位置を把握するロラン C などが上げられる。サービスを提供するためには、サービスを実現する測位技術の開発が別途必要であり、それが位置情報を使ったサービスの増加を抑制する原因でもあった。しかし、GPS の出現により、特化した測位システム開発の必要性が減少した。GPS は、屋内やビル街などの一部の地域を除き地球上全ての地域で利用が可能である。その結果、サービスに特化した測位インフラは減少し、インフラとして GPS を使ったサービスが増加した。また、GPS を使った測位は誰でも容易に利用できる事から、サービスの開発が容易になり、個人のサービスから企業のサービスに至るまで様々なサービスが提供されるに至っている。現在では携帯端末に GPS が搭載されるようになり、携帯端末による位置情報を使ったサービスは既に 7000 種類 [1]を超えている。

しかし、サービスの種類が増加する事により今後はサービスが多様化すると考えられる。多様化に伴い、GPS のスペックでは対応できないサービスが要望される。その為、GPS のスペックを拡張する個別のサービス補間技術が増加すると考えられる。その一例として、A-GPS (Assisted GPS) がある。A-GPS は携帯端末で GPS を使って位置情報を取得する際、携帯端末に搭載されている公衆網を使って、本来 GPS 衛星から取得するデータをネットワークから取得したり、公衆網の基地局情報から携帯端末のおおよその位置を把握する事で、測位時間の短縮や、測位感度の向上を実現している。これは携帯端末特有の低消費電力化や小型アンテナでの感度向上に対応した専用のサービス補間技術である。今後、サービスの多様化に伴いこの様なサービス補間技術の増加が予想される。

本稿では、今後多様化するサービスを測位精度と測位情報の完全性を軸にした4象限マトリクスで分類する。各象限に分類されたサービスから、今後必要とされる専用のサービス補間技術の技術要件を抽出し、その要件を満たす技術を提案する。

第1象限には「次世代交通システム」が分類された。その上で具体的なサービスとして交差点における車両間衝突防止サービスを想定し、技術要件を抽出した。車両の衝突防止には、高い測位精度と測位情報の高い完全性が必要であり、既存の測位技術では対応が困難である。そこで、既に一般道路で路車間通信に利用されている光ビーコンを利用した高精度かつ高い完全性をもつ測位技術について検討を行った。光ビーコンが照射する赤外線の利用した測位技術の開発を行い、測位精度が50cm以下になる事を確認した。

第2象限には「見守り」サービスが分類された。見守りサービスは既に携帯電話のGPSを使って普及している。しかし、GPSの測位における消費電力が大きすぎる為、常時安定した測位を行うことができない。そこで、人の歩行形状を推定する事で、GPSによる測位数を削減しても測位精度が劣化しない技術を開発した。人の歩行を直線移動の組み合わせとして近似し、それらが組み合わさって歩行形状を成すリンクモデル方式を新たに開発し、測位精度を変えずに消費電力が1/10以下になる事を確認した。

第4象限には「ピンポイント広告」サービスが分類された。ピンポイント広告を実現する為には、広告（情報）の可視化が必要である。しかし、「情報」は無形であり可視化が難しい。そこで、無形の「情報」に位置情報・占有情報・存在形式の各情報を付加して、仮想的に有形化を行う。この有形化された「情報」を人が認識できるようにする為に超音波による測位技術を開発し、測位精度が5cm以下で、有形化された「情報」を人が認識できる事を確認した。

目次

第1章	はじめに.....	1
1.1	サービスに特化した専用測位技術.....	1
1.2	汎用測位技術に特化したサービス.....	2
1.3	サービスの多様化に対応する測位技術.....	3
1.4	論文構成.....	6
第2章	多様化するサービスと汎用測位技術.....	9
2.1	多様化するサービスの分析.....	9
2.2	汎用技術の分析.....	12
2.3	今後必要とされる測位技術.....	16
第3章	高い完全性で高精度な測位技術.....	19
3.1	はじめに.....	19
3.2	光ビーコンを使った高精度測位技術.....	22
3.2.1	車両測位の技術要件.....	22
3.2.2	光ビーコンを用いた高精度測位.....	23
3.2.3	検証実験.....	26
3.2.4	検証実験まとめ.....	38
3.2.5	関連研究.....	39
3.2.6	むすび.....	40
3.3	光ビーコンを利用した連続自車位置推定方式.....	41
3.3.1	関連研究.....	41

3.3.2	提案方式.....	42
3.3.3	評価実験.....	49
3.3.4	むすび.....	57
3.4	まとめ.....	59
第4章	高い完全性で低精度な測位技術.....	61
4.1	はじめに.....	61
4.2	地磁気センサを使った高精度測位技術.....	63
4.2.1	携帯電話の測位技術.....	63
4.2.2	関連研究.....	63
4.2.3	提案方式.....	64
4.2.4	実機検証.....	71
4.2.5	むすび.....	80
4.3	バネモデルを用いた歩行軌跡補間技術.....	82
4.3.1	従来技術.....	82
4.3.2	提案手法.....	84
4.3.3	実機検証.....	93
4.3.4	むすび.....	98
4.4	まとめ.....	99
第5章	低い完全性で高精度な測位技術.....	101
5.1	はじめに.....	101
5.2	実空間定義型ユビキタスシステム：空間情報サービス (USIS)	103
5.2.1	関連研究.....	103

5.2.2	空間情報サービス.....	103
5.2.3	検証システム.....	105
5.2.4	実装評価.....	108
5.2.5	むすび.....	112
5.3	まとめ.....	114
第6章	おわりに：成果と今後の課題.....	115
	謝辞.....	117
	引用文献.....	119
	筆者発表論文.....	129
	付録.....	131

第1章 はじめに

GPSの利用によって、位置情報を使ったサービスの構築が容易にできるようになった。携帯電話を使ったナビゲーションなど既に端末の標準搭載アプリケーションとして利用されているものもある。これは汎用測位システムであるGPS(Global Positioning System)の普及により、位置情報の利用が容易になった事が背景にある。本稿では、位置情報を使った今後のサービスに対し、必要になると考えられる技術について論ずる。この先行研究により、今後普及が予想される位置情報を利用したサービスの多様化に伴うより高度なサービス技術に対し、新しい測位技術を通して対応する事を目的とする。

1.1 サービスに特化した専用測位技術

日本の測位の歴史は古く中国・宋から伝えられたとされている。645年の大化の改新では班田収授法に基づいた土地区画管理制度である条里制が立案され、田図や田籍が作成された。条里制は土地を約109m間隔で直角に交わる方格線によって正方形に区分した。土地の計測には車輪による距離測定と、羅針盤による方位測定が使われたとされる。距離と方位による相対位置測位は、現在の自律測位方法と同じであると言える。基本的に方格線は南北に引かれ、一辺109mで囲まれた1区画を「坪」と呼び、6x6の坪を「里」と呼んだ体系的に構成された土地管理方法であった。班田制は荘園制となり、後に豊臣秀吉の太閤検地へと引き継がれる。秀吉は1589年に検知を発令し1595年に完了した。測定には10進法が使われ、比較的高い精度で土地の計測がなされたと言われている。これらにより、限られたエリア(狭域)での測位技術が発展したと思われる。

江戸時代に入り、三角法を用いた測位方式がオランダから伝わった。1821年に陸地の目印を頼りに、歩数による測距で大日本沿海輿地全図が伊能忠敬によってまとめられた。忠敬は道線法と呼ばれる地点から次の地点へ次々と方位と距離を測る方法(多角測量)を使ったとされる。これに交会法や天文測量を加えて誤差を修正したと言われている。日本の周囲を歩きながら、既に計測した地点を目印にして新しい地点を測位し、また新しく測位された地点を目印にさらに新しい地点の測位を行う。この方法で日本の海岸線を周回する事で日本の外形を把握する事が可能となる。古代の自律測位

と比較して測位の技術が格段に向上した事で実現した成果である。古代の狭域での測位から、視認が可能な範囲（中域）の測位技術が発展した事がわかる。

明治に入り船舶による陸の認知を補助する為、灯台が作られる様になった。灯台は光の中心を捉える事で、船舶からみた陸の方向を正確に認識する事ができる優れた測位標識である。また、関東全域の広範囲な三角測量が行われ、東京、大阪、京都、及び開港地の市街図も作成された。経緯度原点を東京麻布に設置し、水準原点を東京三宅坂に設置した。これにより、日本国内における緯度、経度、高度を定める原点が決まった。江戸時代の中域における測位技術が、広い範囲（広域）にわたる測位技術へと進化した事がわかる。

昭和に入り、船舶の安全を向上させる為、無線測位技術（ロラン C）が導入された。ロラン C は 2 つの同期した送信局からの信号の到達時間差 (TDOA : time difference of arrival) を利用している。これまでの測位には、測位基準点の視認が必要であったのに対し、電波を使う事で、さらに広範囲の測位技術へと繋がっていった。これらの基本技術は携帯電話の広域測位技術の一つである OTDOA (Observed Time Difference Of Arrival : 3 局以上の携帯基地局からの電波を使って測位する方式) でも利用されており、GSM [2] や CDMA 方式の携帯電話で活用されている。一方、PHS の様な小電力無線の基地局を使った狭域の測位技術も開発されている。複数の基地局と移動端末間の電界強度から移動端末の測位を行う。

これまでの測位の歴史はその時々々の位置情報を使ったサービスの歴史であるといえる。測位はサービスを提供する範囲で動作すればよい。土地の区画を管理するサービスは、土地の区画を測位できる技術であればよい。日本地図を作製するには、日本の周囲を相対的に測位できる技術があればよい。船舶安全の為には対象エリアでの船舶の測位ができる技術があればよい。つまり、これまでの測位技術はサービス毎に特化した専用技術として、狭域から中域そして広域に、サービスを提供するエリアが拡大しながら発展してきたと言える。しかし、そのサービスの対象範囲が地球上を対象とした時、測位技術は専用技術から汎用技術として利用されるようになる。

1.2 汎用測位技術に特化したサービス

1993 年、米国国防総省により GPS の運用が正式に開始された。GPS は地球を周回する衛星位置と衛星と受信局との距離から測位を行う為、これまでの測位に必要なであった目印になる基準点は必要ではなくなった。計算上、仮想的に地球の中心が座標系

の基準点として定義されている。その為、衛星電波を受信できる地域であればどこでも測位が可能である。この特徴から GPS を使ったサービスは世界中で利用できる様になった。その為、これまで専用測位システムの開発が必要であった位置情報を扱うサービスは、逆に汎用システムである GPS システムの性能に合わせた形で提供する形式に遷移 [3]しつつある。例えば、位置情報を使った最も身近なサービスとして、カーナビゲーションシステムがある。1980 年代に初めてコンシューマ向けに電子地磁気センサを利用した簡易ナビゲーションシステムが開発された。地図はなく、目的地の方角と距離を表示していた。同年、地磁気センサの代わりにジャイロ스코ープによる自律測位技術を使って、地図上に自車位置を表示するナビゲーションシステムが開発された。しかし、測位ズレなど問題も多く、1980 年後半には車載向け電子地図に GPS を利用する構想が学会で発表されている [4]。その後、GPS を使ったナビゲーションシステムの試作が行われ、同時にマップマッチング技術も開発された。汎用測位技術を使った事によるサービスエリアの拡大と、測位にかかる費用がこれまでの測位技術と比較して、低価格を実現できた事から、2000 年以降 GPS を使ったカーナビゲーションシステムは指数的に増加を始め、2010 年度には計 900 万台以上の出荷が予想されている。このようにカーナビゲーションの測位技術は、地磁気やジャイロを利用したローカルエリアにおける自律測位を始めとする専用測位技術から始まり、日本全土のエリアを対象とした GPS による汎用測位技術に至ったと言える。2007 年からは契約者数が 1 億人を超えた [5]携帯電話にも GPS が搭載され、その利用度は広範囲に及んでいる。測位システムの汎用化によってだれもが容易に、いつでも位置情報が使えるようになった。これにより、位置情報を使ったサービスは加速度的に増加し、最近の携帯端末で提供されている位置情報を使ったアプリケーションの種類は既に 7000 種類を超えている [1]。

1.3 サービスの多様化に対応する測位技術

これまでは、サービス毎に専用測位技術が必要な為、位置情報を使ったサービスの普及が遅れていた。現在は汎用測位技術である GPS の普及により、サービス毎の専用測位技術開発の必要がなくなり、位置情報を使ったサービスは GPS のスペックに合わせて普及が始まっている。しかし、サービスの普及はサービスの多様化を加速させ、それによって汎用技術のスペックでは対応が困難なサービスが増加すると思われる。それに対応する為、汎用技術を補間する専用のサービス補間技術の開発が必要となる。図 1.3-1 に専用のサービス補間技術の位置づけを示す。

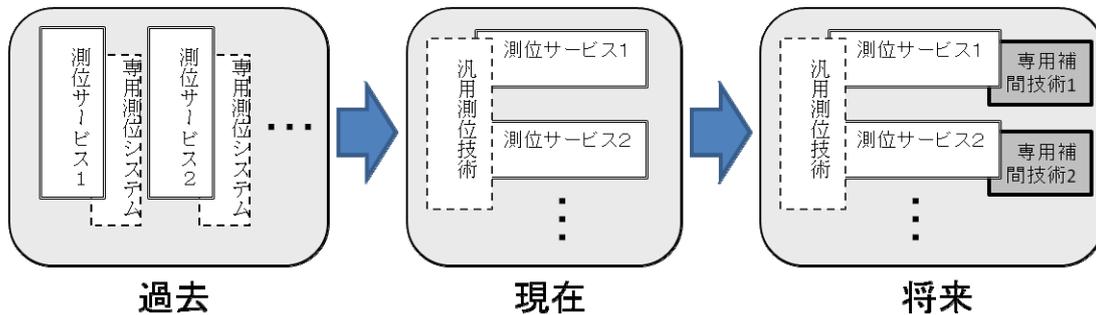


図 1.3-1 測位サービス毎に必要なとなる専用のサービス補間技術の位置づけ

この専用のサービス補間技術の開発は既に一部では始まっている。例えば、カーナビゲーションシステムがある。GPSは地上から200km離れた衛星から発射された電波を受信して現在位置を算出するしくみである。その為、各衛星の同期誤差、電離層遅延、受信機の性能誤差など測位誤差要因が多く上げられる。また、GPSから放射される電波が届かないトンネル等では測位ができない。そこで、GPSの測位精度や測位の安定度を補間、改善する仕組みとして車載ナビゲーション用マップマッチングや自律航法が考案された。また、GPS衛星と受信機間の通信にはスペクトル拡散技術が使われている為、情報を利用するためには相関器によるデコード処理が必要となる。GPS衛星は移動している事から、この相関処理には多くの消費電力が必要となる。スペクトル拡散技術は携帯電話などでも利用されている技術であるが、携帯電話の場合は、電波の圏内/圏外を判定する特殊なチャンネルが用意されており、携帯電話はそのチャンネルを監視し圏内にいると判断された時に通信機が動く事で低消費電力を実現している。しかし、GPSはGPS測位圏内/圏外を判断する手段が用意されていない。その為、受信機は常に相関器を動作させる必要があり、消費電力削減を実現する事が困難となっている。そこで、測位時間を短くする事で消費電力を削減する携帯電話専用のサービス補間技術であるA-GPS(2.2節参照)が利用されている。

本稿では今後展開が期待されるサービスと、それに必要とされる測位性能を体系的に整理し、多様化するサービスの増加に伴い必要となる測位技術を中心とする個別のサービス補間技術について検討を行う。図1.3-2に本稿で対象とするエリアを示す。

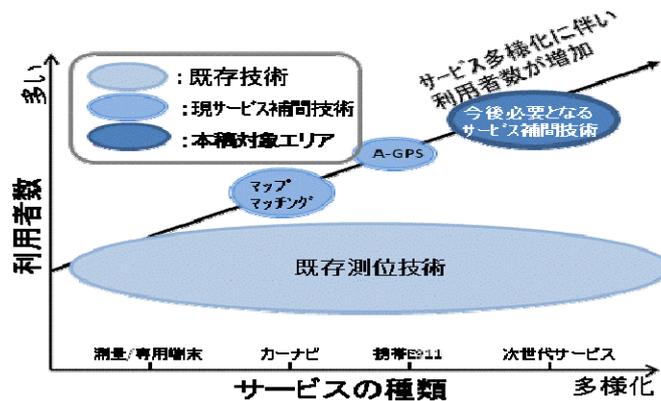


図 1.3-2 本稿で対象とするエリア

この対象エリアを、測位技術の「測位情報の完全性」と「測位精度」の各軸で4象限マトリクスを使って分析を行う。その上で各象限におけるサービスを想定し、サービスに必要な技術について検討を行う。ここでいう完全性とは実位置と測位位置の最大ズレを含む測位の安定性を示す。測位環境によって、測位精度がバラつく測位技術は測位の安定性が低く完全性も低いと言える。必要な測位が持続して利用できない場合も安定性が低く、完全性が低いとする。例えば、消費電力が大きい為に連続測位が困難な技術も完全性が低いと考える。サービスの観点から見れば、人の命にかかわるようなサービスには高い完全性の技術が必要と思われる。一方、利便性が求められるようなサービスでは高い完全性は必ずしも必要ではないと思われる。

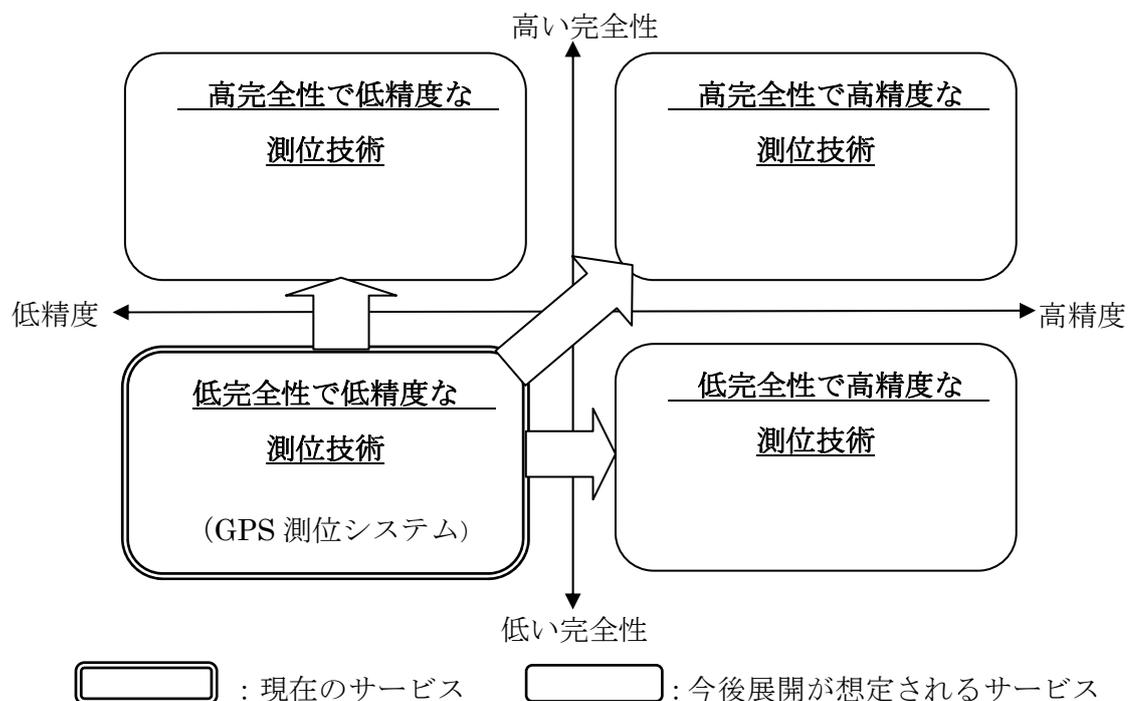


図 1.3-3 測位技術における4象限マトリクス

図 1.3-3 に測位技術の 4 象限マトリクスを示す。このマトリクスにおいて、GPS による測位技術 (L1 波帯を使った、実時間測位) は測位精度が約 30m [6] で測位精度が低く、マルチパスなどによる測位精度の変動や、衛星の配置による精度の変動など安定した測位が困難という事から、完全性が低く測位精度も低い第 3 象限に位置する測位技術として定義する。今後のサービスは現在の第 3 象限の技術を使ったサービスから、第 1, 2, 4 象限の技術を使ったサービスに多様化すると考えられる。

1.4 論文構成

前節で述べた内容に沿って、本論文の構成と概要を述べる。

2 章では、測位技術に対する技術要件を明確にするために、今後多様化するサービスについて整理し、図 1.3-3 に示す 4 象限マトリクスにおける各象限の代表的なサービスを提案する。今後想定される位置情報サービス [7] から、特に重要と思われる 8 つのサービスを分類する。また、第 3 象限に定義した GPS の概要についても述べる。その上で、現在の汎用測位技術で対応できないものを抽出し、測位を補間する必要があるサービスとして図 1.3-3 に示す 4 象限マトリクスの第 1 第 2 第 4 象限に対応するサービスの具体例を提案し、必要な測位技術の技術要件を示す。

3 章では、図 1.3-3 の第 1 象限である高い完全性と高い測位精度が必要とされるサービスについて検討を行う。2 章の今後必要なサービス提案に基づき、車両の安全サービスを取り上げ、特に交差点における車両間の衝突を防止するサービスに必要な専用のサービス補間技術について検討を行う。近年、より高度な ITS システムを実現するために、高精度な自車位置情報が要求されている。従来、自車位置情報を取得するために多用されてきた GPS は、複数の人工衛星が発射する電波を同時に受信して測位するといった原理上、高度な ITS サービスを実現するために必要な測位精度と完全性を実現することが困難だった。また、レーンマーカなどの新しいインフラを用いて自車位置情報を取得する技術には高い精度が期待できるが、新しいインフラの設置が必要であり普及が困難である。そこで、既存の道路情報提供インフラである光ビーコンが路車間通信のために発射している赤外線に着目し、車両側でこの赤外線の発射地点を精密に標定することによって、自車が光ビーコン路側装置の直下に位置している状態を検出する技術を提案する。赤外線は直進性が高いことから、その発射地点を標定することは電波と比べて容易である。また、光ビーコンシステムは短距離通信であることから、通信の信頼性も高い。これらの光ビーコンシステムの特徴を生かすことで高精度な自車測位を実現する技術の原理を説明する。そして、本技術が従来の汎用

測位技術では不可能だった精度 50cm 以下の精度で自車測位を実現できることを実証実験の結果によって示す。しかし、この技術は光ビーコン直下のみ測位が可能であり、それ以外の場所では測位する事ができない。これでは、光ビーコン直下以外の場所で車両の衝突を回避するサービスを提供する事ができない。そこで光ビーコンを利用して車両の正確な位置情報を取得する技術と、複数の光ビーコンを使った車頭方位の検出技術、及び出力ドリフトを補正したジャイロと車速パルスを使った高精度な自律航法技術を組み合わせた測位技術を検討する。この技術はマルチパスの様に環境に応じて完全性や精度が変化する GPS と比較して、より高完全性で高精度な車両位置推定方式であると言える。この提案方式の位置推定精度を実車で評価し、自車位置の推定誤差は約 1800m 走行した際に約 20m であることを示す。

4 章では、図 1.3-3 の第 2 象限である高い完全性と低い測位精度が要求されるサービスに必要な測位技術について検討を行う。2 章で示すサービス提案に基づき、安心サービスを取り上げ、具体的なサービスとして子供の歩行履歴サービスに必要な専用のサービス補間技術の検討を行う。携帯端末を使った人の歩行履歴はこれまで GPS を使って提供されている。しかし、連続測位を行なうと携帯端末の電池容量では数時間しか動作する事ができず、サービスを持続的に行う事ができない。GPS を間欠動作させて消費電力を削減し、加速度センサによる歩数計と地磁気センサによる方位計を使って、GPS による間欠測位の間を補間する研究 [8]もあるが、携帯電話内の金属が帯磁し、方位情報に誤差が加算される問題があった。そこで、方位計の情報から直線状の歩行形状を捉え、間欠に測位した GPS の位置情報を使って補正し、携帯電話の帯磁の影響を小さくするアルゴリズムを提案する。実証実験を行なったところ、GPS と同等の測位精度で消費電力が最大で 90%削減できる事がわかった。しかしこの方式には、GPS の測位誤差によって補正された経路の位置精度が劣化するという問題が発生する。そこで、歩行軌跡の形状と、GPS の間欠測位による位置情報の関係を、GPS の誤差を弾性バネの変位とするバネモデルとして扱い、GPS の測位誤差を吸収する仕組みを提案し実証実験で検証を行ない、GPS の取得回数を連続測位の 5%以下にしても位置精度が劣化しない事を示す。

5 章では、図 1.3-3 の第 4 象限である低い完全性と高い測位精度が要求されるサービスに必要な測位技術の検討を行う。2 章の今後必要なサービス提案に基づき、ピンポイント広告を取り上げ、具体的なサービスとして空間情報サービス [9]を提供するのに必要な測位技術について検討を行う。空間情報サービス (USIS : Ubiquitous

Space and Information Services) はサービスや情報に“バルーン”と呼ばれる様々な大きさを持った仮想空間情報を付加し、現実空間を使って情報を整理するサービスである。このバルーンは広告などの情報発信媒体として利用が可能である。本章では、空間情報サービスについて説明し、それを実現する為の測位技術として超音波測位技術を提案し実装評価を行う。

6章ではこれらの研究によって実現された汎用測位技術における専用のサービス補間技術について整理し、まとめを述べる。

第2章 多様化するサービスと汎用測位技術

2.1 多様化するサービスの分析

測位技術を考える上で今後多様化するサービスを分析する。文献 [7]では、今後展開が予想される位置情報を活用した事例（29例）を仮説として設定し（表 2.1-1）、地理空間情報とそれに関連した分野（ユビキタス、モバイル、ロボット、ITS など）の専門家・実務家へのアンケート・ヒアリング調査でもって仮説の修正及び重要性分布の整理を行っている。その中で今後重要と思われる活用事例は図 2.1-1 に示すようになるかと予測している。

図 2.1-1より抽出された今後重要となる活動事例の中で特に主だった事例を下記に示す。

- ① 個人、携帯、コミュニティの活動支援
 - ・見守り
 - ・個人活動支援
- ② 災害
 - ・災害情報共有
 - ・斜面/崩壊/鉄砲水警戒
- ③ 農林水産
 - ・IT農業支援
- ④ 広告
 - ・ピンポイント広告
- ⑤ 交通運輸
 - ・シームレスモビリティ
 - ・次世代交通システム
- ⑥ 地図
 - ・地図作成/統合/更新

抽出された活動事例（サービス）を、図 1.3-3に示す4象限マトリクスで分析する。

図 2.1-2に分析結果を示す。尚、現状の汎用技術で対応が可能と思われるサービスは第3象限に定義する。

表 2.1-1 「活用例と技術のマトリクス」における活用例仮説（29例） [7]

個人、世帯、コミュニティの活動支援サービス	1	社会的弱者や家族の見守り・緊急対応サービス
	2	健康メンテナンス支援サービス
	3	ナビゲーションを中心とした総合的な個人活動支援サービス
	4	アウトドア活動における安全確保や学習支援サービス
	5	地域コミュニティの活動支援サービス
環境	6	企業の環境保全活動支援サービス
	7	個人・世帯の環境保全活動支援サービス
災害	8	企業の BCP 立案支援と発災後の復旧支援サービス
	9	自治体等の災害情報共有・対応支援サービス
	10	斜面崩壊、鉄砲水等の検知・警報システム
物流	11	物流トラッキング・管理サービス（動産担保付き）
農業・林業・水産業	12	IT 農業支援システム
	13	IT 林業支援システム
建築・土木	14	IT による設計、施工から維持管理までの一貫システム
	15	現場作業員の安全管理システム
製造業	16	化学物質や廃棄物の排出・移動管理
通信・放送	17	ローカルコンテンツの制作と配信サービス
	18	映像コンテンツの高度化
広告・マーケティング	19	人々の時空間流動特性に適合したピンポイント広告
観光	20	旅行支援総合サービス
交通・運輸	21	シームレスなモビリティサービス
	22	次世代高度道路交通システム
保健・疾病対策	23	食と水の安全管理サービス
	24	新型インフルエンザなどの新興感染症のパンデミック抑制支援
電子行政サービス	25	バックオフィス事務の情報化・共同化と地域資源情報の高度化・共有化の組み合わせによる自治体の現場改善力・地域営業力向上支援
	26	道路空間の共用管理サービス
地域開発・不動産開発	27	不動産開発と総合的な都市マネジメントの支援サービス
	28	地域統計の高度化
安全保障	29	周辺海域における不審船などのモニタリング

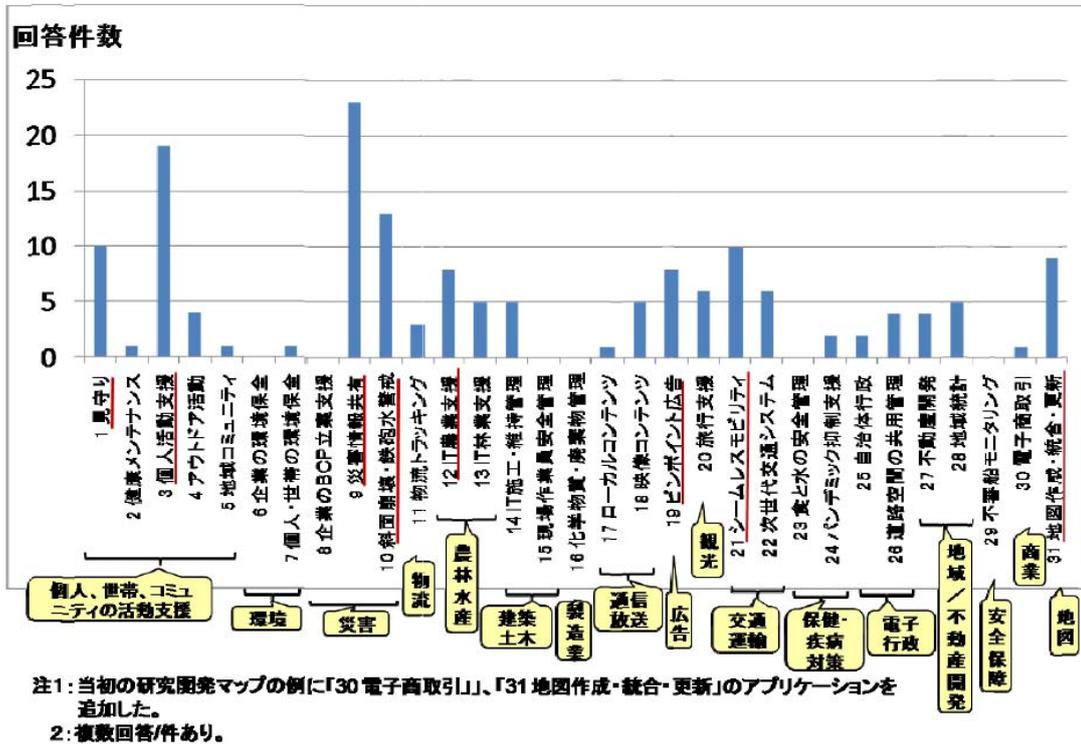


図 2.1-1 今後重要と思われる活用例の内容 [7]

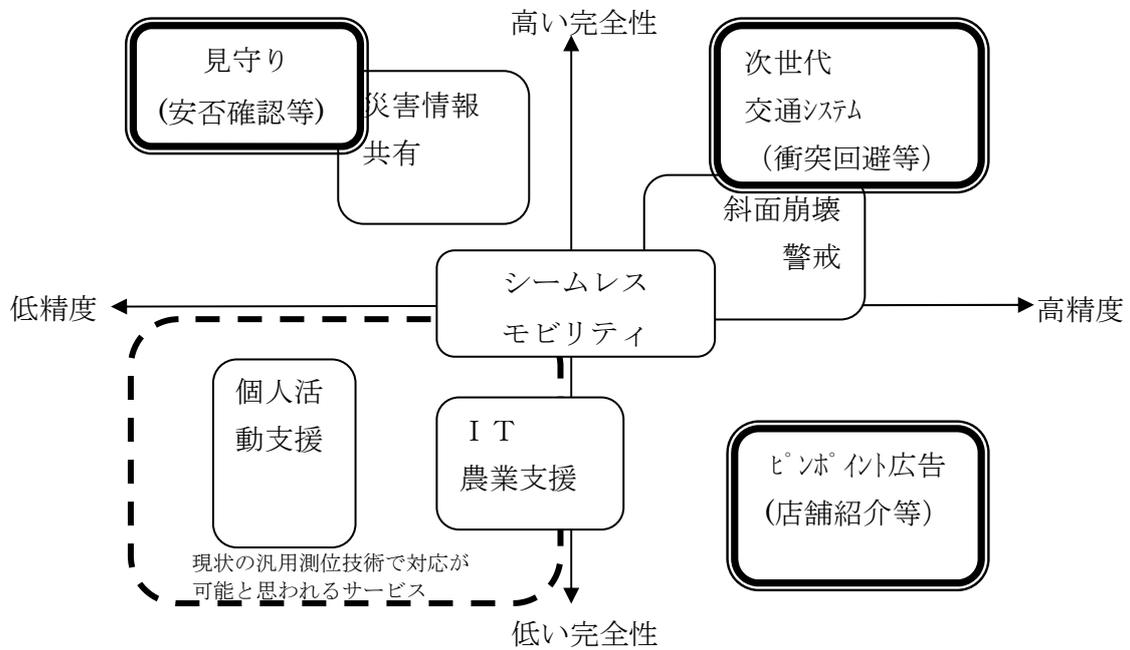


図 2.1-2 サービスの4象限マトリクス分類

図 2.1-2 から、測位技術を検討する為の第1第2第4象限を対象とする今後の主なサービスがそれぞれ、「次世代交通システム」、「見守り」、「ピンポイント広告」

である事がわかった。「次世代交通システム」の具体的なサービスとして、交差点における車両間衝突防止サービスを想定する。車両間の衝突を防止するには、測位の完全性が特に必要である。また、車両の測位精度も50cm程度が必要 [10]とされている。

「見守り」の具体的なサービスとして、子供の歩行履歴サービスを想定する。子供の歩行履歴サービスは既に公衆網を使って普及が始まっている。が、モバイル環境で提供されるサービスの為、消費電力の大きい測位技術は連続して測位をする事ができない。その為、間欠測位となり安定した測位を行う事ができない。完全性の高い安定的な測位を実現するには、低消費電力の測位技術が必要となる。「ピンポイント広告」には空間情報サービス [9]を想定する。ピンポイントには高精度な測位技術が必要であり、また情報と位置の連携方法についても検討する必要がある。

2.2 汎用技術の分析

前節で定義したサービスを実現するにあたり、現在の汎用測位技術の分析を行った。文献 [11]は現在の汎用測位技術をインフラ設備の設置密度で分類している。(図 2.2-1)

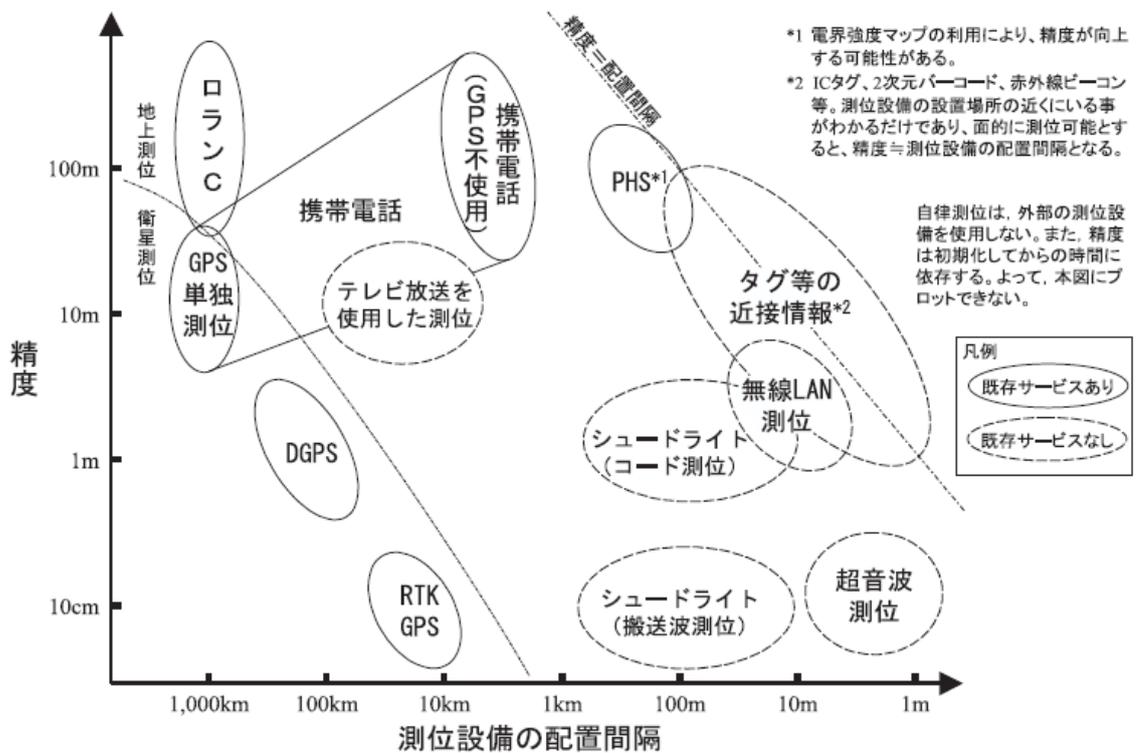


図 2.2-1 汎用測位技術とインフラの設置間隔 [11]

図 2.2-1 より、超音波測位技術 [9] [12]のように測位インフラの密度が高くなると測位精度が高くなることがわかる。また、測位精度が高い測位技術はインフラの設置が多数になる事から、現状ではまだサービスが提供されていない事がわかる。単一インフラでは 10 km 以上の測位エリアを確保できる測位システムは GPS 以外にない事もわかる。従って、サービスを広域で展開する場合や、測位を共通のプラットフォームで提供する場合は GPS が現状最も適した測位システムであるといえる。

GPS は 1970 年台に米国防総省によって開発 [13]が始まって以来、様々な機器で利用されている。測位技術の分類としては単独測位と相対測位に分けられ、相対測位はさらに DGPS (Differential GPS) と干渉測位とに分けられる。携帯電話の GPS 測位は基地局側に緯度・経度・高度を予め測定された測位基準局を備え、その情報を元に DGPS 測位を実現している。日本国内においても国土地理院で電子基準点が管理 [14]され、高精度な測位が行われている。利用できる GPS 衛星は 6 軌道上に 4 衛星の計 24 衛星であり、高度約 2 万 km を約 4 km/sec の速度で移動している。また、各衛星は時刻が同期されている。各衛星からは L1 帯 (1575.42Mz) 及び L2 帯

(1227.6MHz) を搬送波とする GPS 信号が送信されており、携帯電話の GPS 受信機では L1 帯の C/A コードを使って測位を行っている。L1 帯には 50bps の航法メッセージが衛星毎に割り振られた 1023 チップ (チップとは擬似乱数雑音コードを適用するレート) の C/A コードでスペクトル拡散されている。GPS 受信機では受信機の擬似乱数雑音コードと受信した信号との相関をとりコード位相のトラッキングを行う。複数の衛星のトラッキングにより受信機内の時刻の補正がなされ、各衛星との擬似距離から受信機の位置が算出できる。カルマンフィルター [15] [16]などを使っても理論精度は 10m~60m 程度である。測位衛星のトラッキングには 1023 回以上の相関処理が必要である。また、上記で説明したように、衛星は高速で軌道を移動しており、地上の観測者も新幹線などで移動している可能性がある。お互いの相対速度によって、搬送波は 5KHz から 10KHz ほどのドップラーシフトが発生する。ドップラーシフトが発生すると 1 チップ長も変化するため、トラッキングには位相フェーズ合わせだけでなく、周波数バイアスの特定も必要となる (図 2.2-2)。さらにこの処理を 24 個の衛星に対し個別に行う必要があり、膨大な衛星探索処理が必要となる。

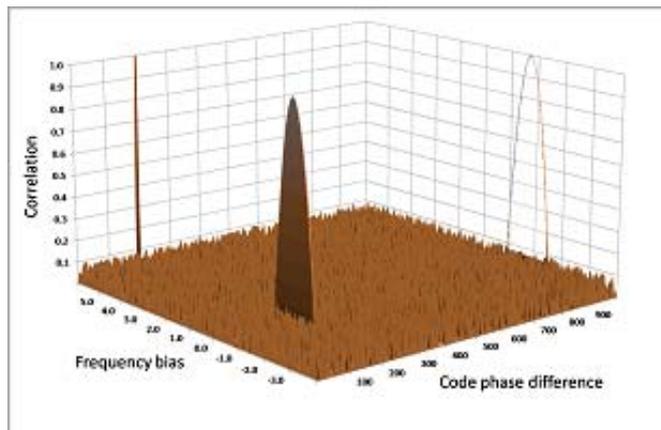


図 2.2-2 周波数バイアス/位相フェーズにおける相関値

そこで、携帯電話の特徴をうまく使うことによって、処理する周波数範囲、位相、探索衛星数を削減して探索処理を短時間でを行う方式が開発された [17] [18]。まず探索衛星は受信者の位置がおおよそ分かれば把握可能である。携帯電話の場合その特性上電波の届く範囲に基地局があるため、基地局の半径数Km内に存在することが分かる。この情報から、利用すべき探索衛星の番号を特定することができる。また、探索衛星の受信機に対する見かけ上の速度から探索周波数の絞込みが可能となる。さらに、携帯電話の公衆無線の搬送波の周波数精度を使って算出される高精度なクロックや、基地局とGPSとの同期（W-CDMAの場合は非同期）信号を利用すれば位相合わせ [19] [20]の時間短縮が可能となる。測位時間を短縮することで探索精度の向上や受信感度 [21] [22]の向上も期待できる。先述のように衛星のトラッキング [23] [24] [25]には周波数バイアスの特定と位相合わせが必要であり、その相関値は論理上1になる。しかし、実際は周波数バイアスと1チップ以下の位相ズレにより1よりも小さい値となる。一般的には一定以上の相関値でトラッキングしたと判断される。受信感度の向上は、位相合わせと周波数バイアスを正確に合わせて相関値を1に近づける事で実現できる。通常、周波数バイアスは0.5KHz刻みで相関処理を行い、位相は0.5チップ刻みで相関処理をする受信機が多い。つまり、受信感度の向上にはこれらの刻みをさらに小さくすればよい。ただし、探索に要する処理量は大きくなるため、感度向上処理を行なうと処理時間は反比例して増加する。

以上のように、携帯電話の公衆無線のしくみを使ってGPS測位の処理時間短縮と感度向上を実現する事が可能となる。一般的に携帯電話の基地局からの情報を使ったGPSの測位方法をA-GPS (Assisted GPS) 方式 [17] [18]とよぶ。数年前までは全ての測位をA-GPSのみで行っていた。しかし、A-GPSは公衆無線から探索衛星番

号や探索周波数などの情報を得る為、公衆無線を利用するための電力が別途必要になる。そこで最近ではA-GPSを用いた初期測位の後は携帯電話で単独測位をする方式も開発されている。

上記A-GPSおよび、レーンマーカ測位技術 [26]と光ビーコン測位技術 [26]を含めた文献 [11]で抽出された主な測位技術の性能比較を表 2.2-1 に示す。ここで、完全性は第1章で述べたように測位の安定性と測位精度の誤差の範囲で表現する。例えば、GPSの場合、測位精度は約30m [6]とされているが、高層ビル街では約45m [26]になると報告されている。この場合、測位精度誤差は15mであるので、完全性は15mと表現する。測位精度が環境によって変動しなければ、完全性は0mである。完全性は0mに近いほど完全性が高いと言える。

表 2.2-1 主な汎用測位技術の性能比較

測位方式	測位精度	完全性	備考
D-GPS/A-GPS	約 5	15 以上	マルチパスによる劣化
GPS 単独測位	約 30	15 以上	マルチパスによる劣化
RTK-GPS	約 0.1	15 以上	マルチパスによる劣化
超音波	約 0.1	0.1 以上	包絡線近似式
無線 LAN	約 1.3	予測が困難	電界強度測定式
ロラン C	約 100	100 以上	地域限定
レーンマーカ	約 0.05	0	磁場検知式
光ビーコン	約 6	6	スポット測位

単位 m

主な汎用測位技術を図 1.3-3 測位技術における4象限マトリクス図 1.3-3の4象限マトリクスで分析を行う。分析結果を図 2.2-3 に示す。

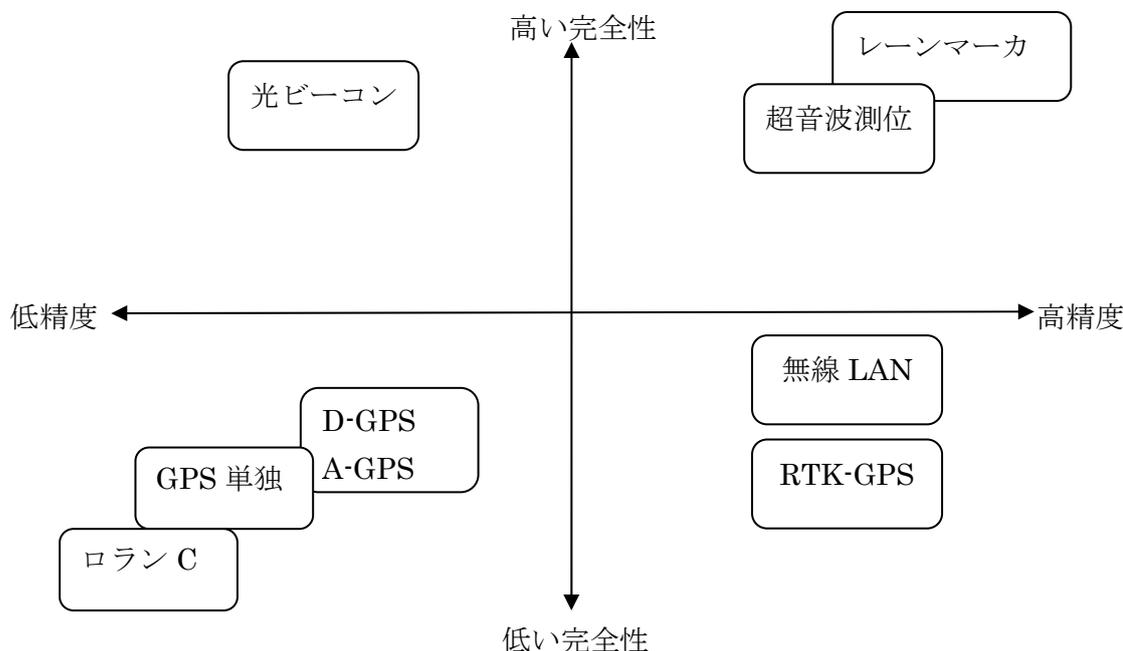


図 2.2-3 汎用測位技術の4象限マトリクス分類

2.3 今後必要とされる測位技術

図 1.3-3 測位技術における4象限マトリクスで示した技術の明確化を行う。多様化するサービスについては、図 2.1-2 にて分類を行い、第1象限は交差点における車両間衝突防止サービスを、第2象限は子供の歩行履歴サービスを、第4象限は空間情報サービスをそれぞれ適応する事とした。それぞれのサービスに対し、現状の汎用技術で対応できるかどうかについて、図 2.2-3 汎用測位技術の4象限マトリクスを使って検討を行う。まず、車両間衝突防止サービスにおいては、屋外で測位精度が50cm以下でかつ環境に依存しない高い完全性が必要である。図 2.2-3 から対象となる汎用測位技術は、レーンマーカと超音波測位技術である。しかし、レーンマーカは新たなインフラ整備を必要とし超音波は利用距離が短い為、利用が困難である。次に、子供の歩行履歴においては、屋外で長時間にわたる連続測位が必要である。携帯端末の充電サイクルを考えると、最低24時間の連続測位は必要である。図 2.2-3 から対象となる汎用測位技術は、光ビーコン、超音波測位技術、レーンマーカであるが、光ビーコンは歩行者向けに利用できない、超音波やレーンマーカは連続測位を行う為には屋外に新たなインフラが必要であり、対応が困難である。従って、現状利用できる汎用技術は存在していないと言える。次に、空間情報サービス [9]が対応可能な汎用測位技術として図 2.2-3 から無線 LAN 測位技術 [27], RTK-GPS (リアルタイム

キネマティック GPS) , 超音波が上げられる. 空間情報サービスは空間を検知する為の携帯端末が必要であり, 屋内のサービスに絞って検討すると, 人が空間を認識できる大きさは携帯端末程度と予想される. そこで, 技術要件として測位精度を 10 c m 以下と設定し, 電波より扱いが容易な超音波を使った技術で検討する事とした.

本稿では, このサービスと測位技術の 4 象限マトリクスにおける, 各象限を代表するサービスに必要な測位技術を中心としたサービス補間技術に関する研究について述べる. 図 2.3-1 に各象限の位置づけと具体的なサービスに対する測位技術の技術要件を示す.

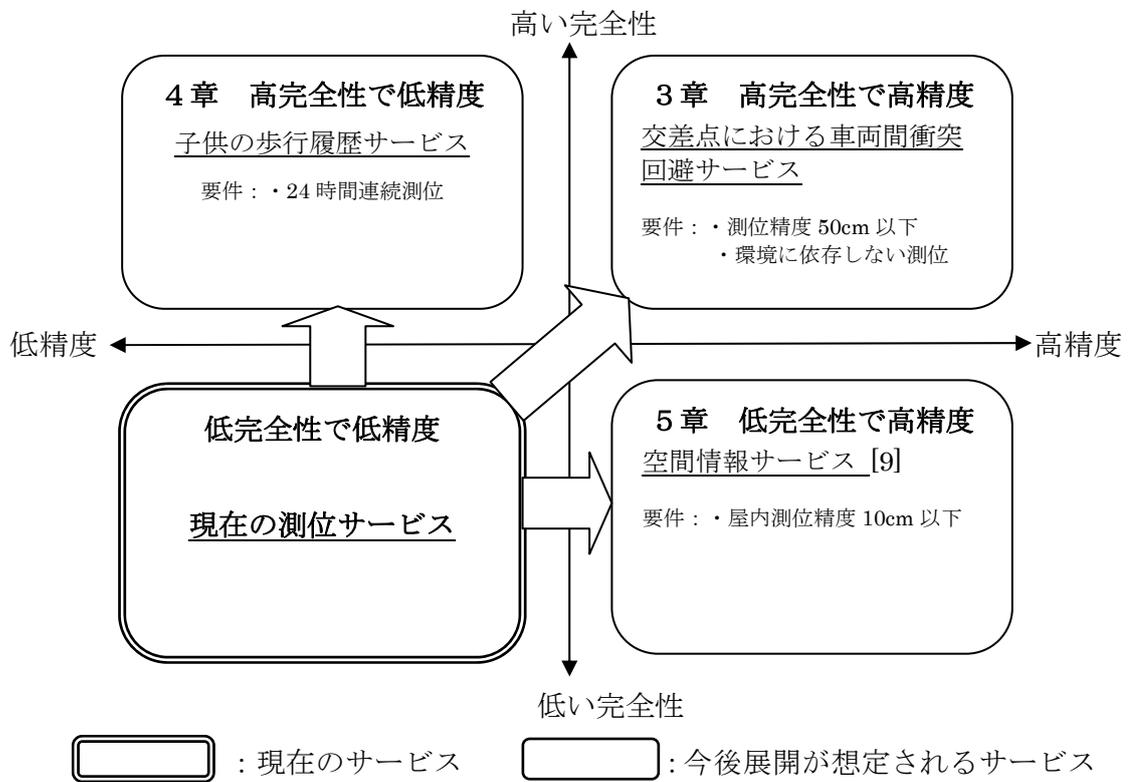
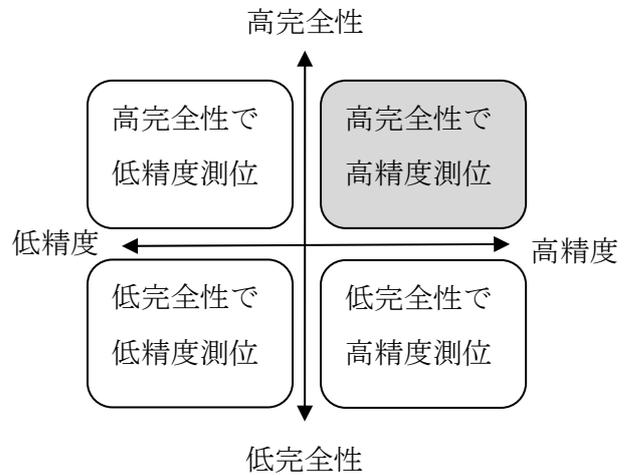


図 2.3-1 各象限で検討する測位技術の技術要件

第3章 高い完全性で高精度な測位技術

本章では、サービスと測位技術の4象限マトリクスにおける第1象限である高完全性で高精度測位が必要なサービスに適した技術について述べる。具体的なサービスとして、交差点における車両間衝突防止サービスを想定し、必要な測位技術を検討する。図 2.3-1 に示すように、技術要件を



- ・ 50cm 以内の測位精度
 - ・ 環境に依存しない高完全性な測位
- とし検討する。3.1 節で背景を述べ、3.2 節では、ピンポイント車両高精度測位について述べる。3.3 節でピンポイント高精度車両測位と車両の自律航法の連携について述べ、3.4 節でまとめを述べる。

3.1 はじめに

近年、カーナビゲーションシステムをはじめ、高速道路の自動運転 [28]や、リアルタイムプローブ [29]や運行管理システム [30]や交通事故や渋滞などの社会問題を解決する車両の安心安全を目指したインフラ協調システム [31]を含む ITS(Intelligent Transport Systems)を実現するために、人と道路と車両を高度な情報通信ネットワークで繋ぐ技術の研究が活発に行われている [32]。警察庁が推進する UTMS(新交通管理システム)は、光ビーコン [33]などの路側インフラを用いて個々の車両と交通管制システムとの双方向通信を実現し、「安全・快適にして環境にやさしい交通社会」の実現を目指している [34]。中でも、車両と路側インフラが協調することで交差点の交通事故を予防する DSSS(安全運転支援システム)の普及が推進されている [35]。路側のカメラやセンサが検出した他車両の情報を運転者に通知し注意を促す。更に、衝突、追突、および信号見落とし車両に対する減速停止支援(介入制御)を含めた研究の実証実験も行われている。これらの安全サービスを実現するために、車両の位置情報が利用されている [36]。

カーナビゲーションシステムや運行管理システムなどは、既に GPS を使った測位システムで運用されており、測位精度は約 30m [6]である。しかし、安心安全のインフラ協調システムに利用する為には 50cm 程度 [37]の高精度な測位技術 [38]が必要であり、車両の寿命が約 10 年とすると、10 年間は保守無で測位精度が維持できなければならない。また、トンネルや高層ビル街での測位も必要である。しかし、一般的に利用されている GPS (L1 波利用の実時間測位技術) はマルチパスにより、数十 m も測位精度が悪くなる事が知られている [39]。それを補正する為に、カーナビゲーションシステムではマップマッチング方式が採用されているが、最新の地図情報でなければ正確な測位を維持できない。

以上の理由から、ITS 関連のサービスに求められる測位精度は約 50cm 以下と約 30m 以内の 2 種類ある事がわかる。全ての範囲で約 50cm 以下を実現する事は困難と思われる。従って、必要なエリアで高精度を実現するシステムを検討する。また、高精度が必要なエリアにおける技術に対する要求は、トンネルや高層ビル街などの測位環境によって測位の可否に変化が無い事、10 年間は保守無で測位精度を維持できる事、測位不能状態がない事が上げられる。

表 2.2-1 主な汎用測位技術の性能比較に示すように、GPS はマップマッチング [40] [41] [42]を利用しなければ、トンネル内や高層ビル街では測位精度が劣化する。マップマッチングの測位精度は、地図の情報に依存する為、地図が古くなると測位精度が劣化する。無線 LAN は測位のために新たにインフラを設置する必用がある。また、測位環境のマルチパスによる測位精度の劣化は、予測する事は困難 [43]と報告されているので、完全性も予測が困難である。レーンマーカ [44] [45] [46] [47]は環境に依存せずに測位が可能であるので、完全性は 0m であるが、新たなインフラが必要である等、普及が難しい [33] [48]。設置位置がわかっている路側装置の、通信エリアを検出する事でスポット的な測位を行なう光ビーコンによる測位 [37]は、受信機やフロントガラスの赤外線透過率の違いによって測位精度にバラツキが発生する。しかし、光ビーコンは既存のインフラで既に運用されており、赤外線という比較的直進性に優れた通信媒体を利用していることから、本節では光ビーコンによるピンポイント高精度測位技術と高精度車両自律航法技術を組み合わせた測位技術について検討する(図 3.1-1 参照)。以下本章の構成を示す。

3.2 節では、車両の位置情報を取得する手段として路側インフラ(光ビーコン)を使った高精度測位システムについて述べる。3.2.1 節で車両の高精度測位のシステム要件

について述べ、3.2.2節で光ビーコンを使った高精度測位システムについての提案方式を説明し、3.2.3節で提案技術の検証実験結果を示す。3.2.4節、3.2.5節で検証まとめと関連研究について述べ3.2.6節でまとめを述べる。

3.3節では光ビーコンによる高精度測位地点間の自律航法について、3.3.1節で関連研究について説明し、3.3.2節で提案手法の詳細を述べる。3.3.3節で実車による評価実験と結果について報告し、3.3.4節でまとめを述べる。

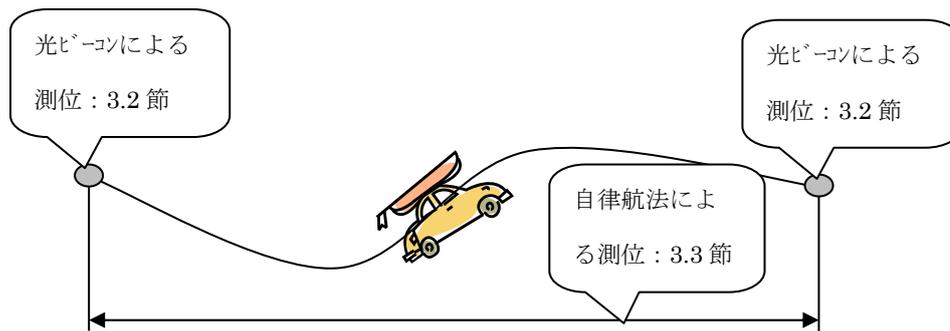


図 3.1-1 本章提案の測位技術概要

3.2 光ビーコンを使った高精度測位技術

本節では光ビーコンを使ったピンポイントの高精度車両測位技術について述べる。

3.2.1 車両測位の技術要件

(1) 車両高精度測位のシステム要件

JARI によって安全運転支援システムを実現するための高精度測位システムの要件が報告されている [10]. この文献を参考に、測位精度と完全性をシステム要件とした。

1) 測位精度

文献 [10] で示された技術要件を鑑み、本研究では測位精度の目標値を 50cm とする

2) 完全性

文献 [10] では精度と完全性を両立するために技術を組み合わせる必要があることが示されている。そこで、本研究は路側インフラからの支援を受ける方式を提案する。既に活用されている道路インフラを利用する事で、完全性を小さくする事ができる。

安全運転支援システムでは、これらの要件を満たす測位技術が望まれる。次に、既存の測位技術の精度と完全性について述べる。

(2) 既存技術

従来多用されている自車測位技術は、カーナビゲーションシステムが採用している GPS 測位 [6] である。GPS 測位は既に稼働中のインフラである GPS 衛星を用いるため、導入・保守コストが低い。また、搬送波位相を用いた RTK-GPS 測位 [49] では数 cm の測位精度が実現している。しかし GPS 測位はその原理上、測位精度が電波伝搬環境の影響を受けやすい。また、障害物が多い環境では測位に利用可能な衛星が限定されることから測位精度が劣化する。RTK-GPS 測位は搬送波位相の連続した履歴情報を用いるといった原理上、衛星からの電波が寸断されると測位不能になり、再び測位可能になるまで長い復帰時間を要するという問題もある。

無線を使った測位システムには、GPS 測位の他に、無線 LAN [50] のような近距離無線を用いる測位技術がある。しかし、電波を利用するため、GPS 測位と同様に伝搬環境の影響を受けて測位精度が劣化しやすい。従って、安全運転支援システムのような

高い完全性を必要とするシステムにこれらの技術を単独で使用することは適切ではないとされている [10].

一方で、自車の測位技術には、レーンマーカ、光ビーコンなど、路側インフラを利用するものも存在する。レーンマーカを使った測位技術は、車両が道路に埋め込まれた磁気マーカが発する磁気を検出する事で測位を行う。測位精度と完全性共に優れた技術だが、設置保守コストが高いといった問題がある。また従来の光ビーコンを用いた測位技術は、スポット的な位置補正を行う原理上、測位精度が低い [10]。しかし、光ビーコンは、既存の路側インフラ装置であることから完全性と普及性に優れている。そこで本稿では光ビーコンを用いた車線方向に対する自車測位技術を高精度化するための技術を提案する。

3.2.2 光ビーコンを用いた高精度測位

(1) 光ビーコン概要

光ビーコンは、車両との間で双方向通信をするための路側インフラ装置であり、主要な一般道路を中心に設置されている。路側装置と車両搭載装置間の通信には赤外線が使用され、路側装置は車両搭載装置に渋滞情報や旅行時間情報等を含む交通情報を提供する [35]。同様に、車両搭載装置が路側装置に情報を通知する事も可能である。光ビーコンの通信は路側装置周辺でのみ行われるスポット通信であり、路側装置を車線毎に設置することにより車両が走行している車線の識別も可能で、2008年現在、日本国内に約48000基設置されている。図 3.2-1 に路側装置(投受光器)の外観を、図 3.2-2 に通信エリアの仕様をそれぞれ示す [35]。

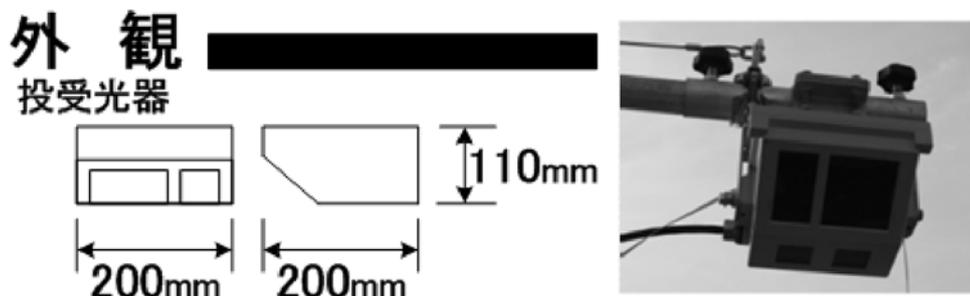


図 3.2-1 光ビーコン投受光器の外観図

- ② DL 圏外境界 (DL 通信エリアからの退出時)
- ③ UL 圏内境界 (UL 通信エリアへの進入時)
- ④ UL 圏外境界 (UL 通信エリアからの退出時)

※ DL:ダウンリンク UL:アップリンク

の4つである。図 3.2-3 に通信境界の定義を示す。

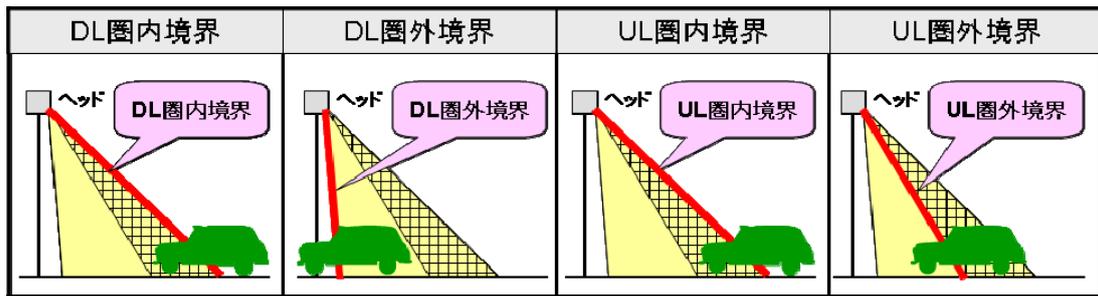


図 3.2-3 通信境界の説明図

提案技術には、以下(a)~(c)に示す誤差要因が存在する。

a) 路側投受光器の取付角

光ビーコン路側装置が作り出す通信境界は、図 3.2-3 に示すように、投受光器から道路に向けて斜め方向の直線として存在しているため、投受光器の取付角が変化することにより、通信境界の位置が変化する。そのため、車載機による境界検出誤差が生じる。

b) 車高

大型車など車高が高い車両では、道路から高い位置に車載受信機が設置されることが予想される。光ビーコンの通信境界は、投受光器から道路に向けて斜め方向の直線として存在しているため、道路から高い地点においては道路から低い地点と比べて、車両進行方向投受光器側に近い地点で通信境界を検出する。このため、境界検出誤差が生じる。

c) フロントガラスの材質

自動車のフロントガラスには赤外線を遮断する加工が施されているものがあり、これらのガラスは光ビーコン路側装置から発射された赤外線を減衰させる働きを持つ。そのため、車両に使用されているフロントガラスの材質に依存して車載受信機の受光素子に到達する赤外線の光量が増減することから、境界検出地点の検出誤差が生じる。

上記誤差要因の影響を少なくするには以下の条件を満足する必要がある。

- ・ 車載機が投受光器の可能な限り直下に位置すること(a, b 対策)
- ・ 車載機への到達光量が可能な限り大きい(投受光器との距離が近い)こと(c 対策)

これらの条件を満足することにより提案技術による車線方向に対する高精度測位が実現する。

3.2.3 検証実験

現状の測位精度を検証する為に、実物の光ビーコン路側装置を使用して検証実験を行った。

(1) 光ビーコンの DL 通信エリア

図 3.2-2 に示す光ビーコンの通信エリアの仕様を確認するための実験を行った。実験は、安全が確保された実験専用コース上に光ビーコン投受光器を設置して実施した。車両の代わりに手押し台車を使用した。手押し台車に三脚を固定し、三脚上に車載受信機を路面から 1m の高さ(図 3.2-2 で示した車載受信機の最下位置)になるように設置した。そして、受信機の受光レベルと光ビーコン路側投受光器との通信状況を測定器(データロガ)で監視しながら台車をゆっくり移動し、通信が不可能になった地点をダウンリンク圏外境界エリアと判定し記録する。光ビーコンは投光器から放射状に光を放射している為、投光器からの距離を測定してダウンリンク境界エリアの形状を求める事にした。具体的には、投受光器直下地点から、地面に対し平行に受光素子を設置した台車を放射状に移動し、ダウンリンク圏外境界地点を検出する。通信エリアの形状は進行方向に対し対称であると予想されることから、片側(投受光器右方向)の通信エリアの形状だけ測定した。通信エリア形状(TopView)の測定結果を図 3.2-4 に示す。

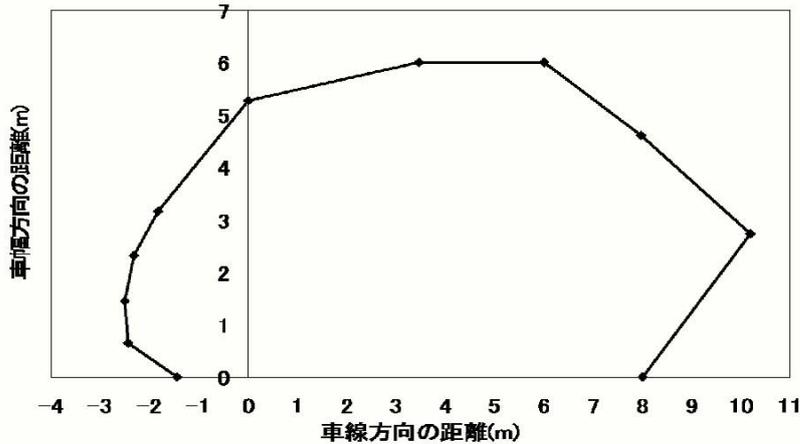


図 3.2-4 DL 通信エリア形状 (TopView) の測定結果

図 3.2-4 の原点(0, 0)は投受光器直下地点である。縦軸は車幅方向の距離を、横軸は進行方向の距離をそれぞれ示す。横軸の正方向、負方向は、投受光器の前方、後方をそれぞれ示す。つまり、車両はこの横軸上を右から左に移動する。図 3.2-4 よりダウンリンク通信エリアは、車幅方向には一車線以上の範囲を、進行方向には投受光器手前 10m から投受光器後方 2m までの範囲をカバーしている事がわかった。

(2) 遮蔽板を用いた投受光器の直下地点検出技術

1) 遮蔽板の効果

3.2.3 節より、投受光器から発射される赤外線は、仕様上のダウンリンク圏外境界より 3.3m 以上投受光器の後方まで伸びていることがわかった(仕様ではダウンリンクエリアは投受光機手前 1.3m で終了しているが、上記から投受光器後方 2m まで光が漏洩していた為、 $2\text{m}+1.3\text{m}=3.3\text{m}$ となる)。そこで、筆者らは、この漏洩光の存在を利用し、車載受信機に遮蔽板を装着することにより、投受光器直下で正確に人工的なダウンリンク圏外境界を作り出すことで測位精度の高精度化を実現する技術を提案する。次に本技術の原理を説明する。

図 3.2-5 (1)は、車両の位置と車載受信機における赤外線の入射角の関係を示す。図からわかるように、投受光器から離れた地点では、車載受信機に入射する赤外線の入射角 $\theta 1$ は小さい。そして車両が投受光器に近づくと車載受信機に入射する赤外線の

入射角 $\theta 2$ は大きくなる。車載受信機に遮蔽板を装着し、一定の入射角以上で入射する赤外線を遮断する特性を持たせることにより車載受信機において赤外光の受光レベルを監視することを可能にし、ダウンリンク通信境界を判別することを実現する。図 3.2-5(1)図 3.2-5 (2)に遮蔽板と光ビーコンの入射角の関係を示す。

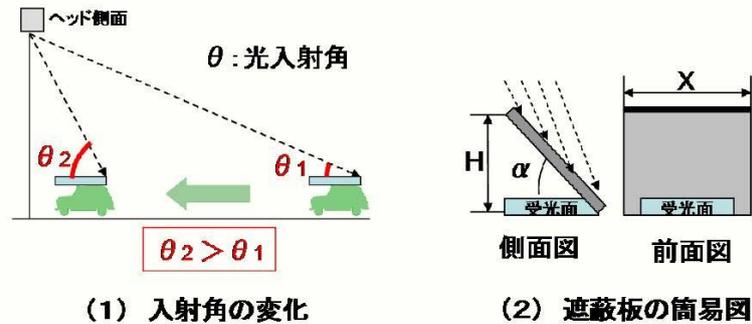


図 3.2-5 遮蔽板と光ビーコン入射角の関係

遮蔽板は車両進行方向に向かって仰角 α で、車載受信機の受光素子上方に設置する。 α に加えて、遮蔽板の高さ H 、および幅 X を調整することにより、光遮断の開始/終了地点を制御することが出来る。次に遮蔽版の設計パラメータの詳細を説明する。

2) 遮蔽板の設計パラメータ

- α (遮蔽板の仰角)

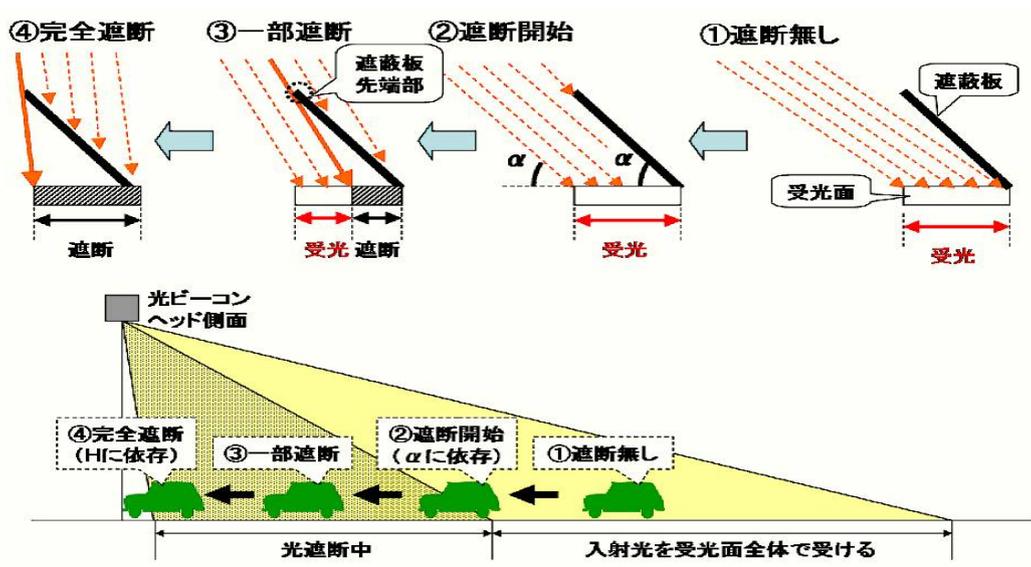


図 3.2-6 α と赤外線遮断特性の関係

α は進行方向の光遮断開始位置を決定するパラメータである。図 3.2-6 に示すように、車両の移動に伴い、光の入射角は大きくなる。 α を光遮断を開始したい地点における光の入射角とすることで、光の入射角が α 以下のときは、受光面全体で受光することが可能で、入射角が α よりも大きくなると、遮蔽板は受光面への入射光を遮断し始める。

α は式 (1) により求められる。

$$\alpha = \arctan\left(\frac{H_b}{L_s}\right) \quad (1)$$

ここで、 H_b は車載受信機と投受光器の高低差、 L_s は投受光器と光遮断開始地点間の水平距離である。 H_b と L_s を与えることにより α を求めることができる。

・ H (遮蔽板の高さ)

H は光遮断完了地点を決定するパラメータである。車両が α により決定する光遮断開始地点を通過すると、遮蔽板は車載機の受光面に入射する赤外線のを遮断を開始する。車両の移動に伴い光の入射角が大きくなると、赤外線の遮光量が多くなる。この時、受光面中の遮断されている部分と受光している部分の面積比は H により決定される。車両が路側機に接近すると、更に赤外線の遮光量が多くなり、遮蔽板の先端部を通る入射光が受光面の端に到達すると、遮蔽板は完全に赤外線を遮断する(図 3.2-5)。つまり、赤外線が遮蔽板の先端部を経由して受光面の前端に到達するときの車両の位置が光遮断完了地点となる。このことは H を調整することで、光遮断完了地点を決定することが出来ることを意味する。

H は式(2)より求められる。

$$H = \frac{H_b d_c \tan \alpha}{H_b - L_f \tan \alpha} \quad (2)$$

ここで、 d_c は受光センサ面の進行方向の長さで、 L_f は投受光器と光遮断完了地点の水平距離である。H は d_c と L_f を与えることにより求めることができる。

・ X (遮蔽板の幅)

X は車両が車幅方向のどの位置を通行しても光遮断完了地点を同一の場所に保障するためのパラメータである。車両の走行位置が車幅方向に逸れた場合の遮断の様子を

図 3.2-7 に示す．X が短いと車両が投受光器から車幅方向に逸れて走行した場合に側方から入射する光の遮蔽が不十分になり，光遮断地点において正確な境界検出ができない．そこで，車両が投受光器から車幅方向に逸れた地点を走行しても光を遮蔽するよう X を調整する必要がある．

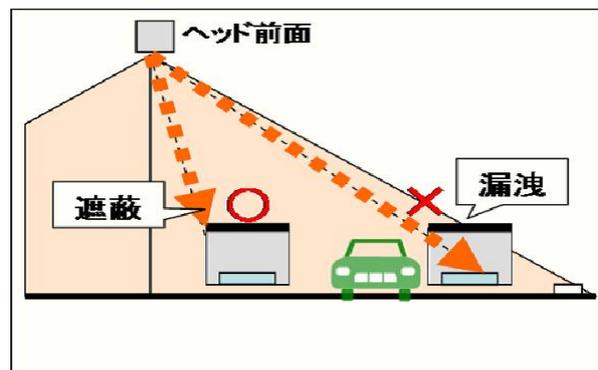


図 3.2-7 車幅方向に走行位置が逸れた場合の光遮断の様子

X は式(3)より求められる．

$$X = \frac{2L_w H}{H_b} + w_c \quad (3)$$

ここで L_w は投受光器直下地点から車幅方向に逸れて走行する距離の最大許容値で， w_c は受光面の車幅方向の長さである．X は L_w と w_c を与えることにより求めることができる

3) 遮蔽板の設計例

光ビーコンを用いた高精度測位技術を検証するために遮蔽板を設計した図 3.2-8 に今回設計した遮蔽板を示す．遮蔽板は，4.2.2 節で示したパラメータを用いて以下の 4 つの要求条件を満たすように設計した．

① 遮蔽板の大きさ

一般的に、車載受信機は小型なほど設置場所の自由度が高い。従って、遮蔽板を設計する際の α と、 H をできるだけ小さくし、遮蔽板が小型になるようにすることが望ましい。

② 光ビーコンで規定されている通信領域の確保

光ビーコンの通信領域は、図 3.2-2 に示す仕様により規定されているため、遮蔽板は規定通信領域内において光を遮蔽することは望ましくない。光遮断地点は、車載受信機の設置高が図 3.2-2 に示す最下位置(1m)である場合、投受光器直下地点から 1.3m 離れた地点であるので、これ以上離れた地点において光を遮蔽しないように遮蔽板を設計する必要がある。

③ 投受光器直下付近における通信境界の検出

遮蔽板を利用することにより、誤差要因の影響が少ない地点での境界検出を行うことができる。路側機の投受光器直下地点が境界検出地点として最適である。理由は投受光器直下における境界は道路に対してほぼ垂直に存在していることから誤差要因の影響が少ないためである。すなわち、投受光器の取付角の違いに起因する通信境界の変化量が少なく、境界位置の検出誤差が少ない。通信境界面が道路に対して垂直に存在していることから、車載受信機の設置高の違いに起因する境界位置の検出誤差も少ない。また、投受光器直下地点では投受光器と車載機間の直線距離も最短になるため車載受信機への到達光量は最も強い。そのため、赤外線遮断加工済みのフロントガラスによる赤外線の減衰を考慮しても、境界位置の検出への影響は最小である。

④ 車幅方向に逸れた走行に対する耐性

一般に光ビーコン路側装置の投受光器は各走行車線の中央に 1 基ずつ設置されている。そのため、投受光器直下地点に対して車両が左右に逸れて走行する最大距離は、投受光器が走行車線の中央に設置されていると想定した場合、車線幅の半分である。道路構造令で規定された最大幅を持つ道路である第一種第一級または第一種第二級道路では、走行車線の幅員の最大値は 3.75m であるため、車両位置検出時には、投受光器直下地点から 1.875m 逸れて走行した場合まで考慮する必要がある。

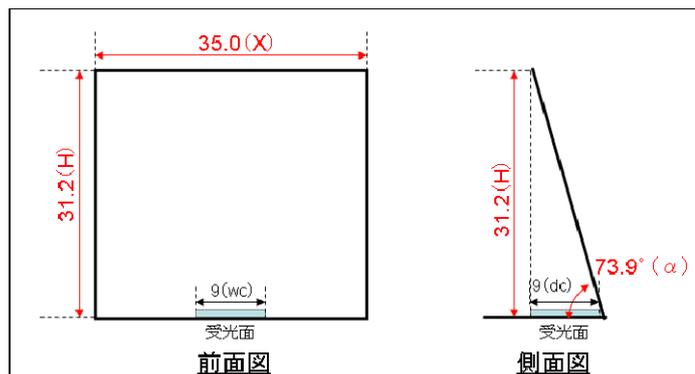


図 3.2-8 遮蔽板の設計図 (単位 mm)

要求条件②より、仕様で規定された通信領域内で赤外線を遮断してはならないため、通信終了地点は、車載機の設置高が1mの場合に投受光器直下から1.3m離れた地点となる。車載機の設置高を1mとし、投受光器の設置高を仕様通りに5.5mとすると、投受光器と路側受信機の設置高低差は4.5mとなる。従い、(1)式より、 α の最小値は 73.9° となる。要求条件①より α は可能な限り小さいことが望まれるため、 α を 73.9° とする。

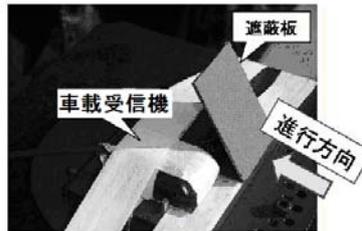
次にHを求める。要件3より、投受光器直下付近で光遮断を行うために光遮断完了地点を投受光器直下地点とした。今回使用する車載機の受光センサ面の奥行長が0.9cmであったため、(2)式からHを3.12cmとした。今回の光受信素子の受信性能では光ビーコン設置位置手前約40cmから光量不足となる計算である。

最後にXを求める。要件4より、投受光器直下地点から車両が逸れて走行した場合の最大許容距離は1.875mである。今回使用する車載機の受光センサ面の横幅は0.9cmであるため、(3)式からXは3.5cmとなる。このようにして設計した遮蔽板を車載受信機に装着することにより、誤差要因に対する影響が少ない、高精度な自車測位が可能になる。

(3) 遮蔽板の性能評価

1) 実験環境

図 3.2-9 で設計した遮蔽板を用いて、誤差要因が通信境界検出に対して与える影響を評価する。本実験用に試作した遮蔽板を図 3.2-9 に示す。本実験では受光センサ面に遮蔽板を直接装着することが困難であったため、車載受信機に遮蔽板を装着し、受光素子に直接遮蔽板を装着した場合と同等の性能が得られるように設計をすることで代用した。また、受信機装着場所は光ビーコン受信機装着指定場所（ダッシュボード中央付近で±10 度以内の水平な場所）に設置した。



(試作遮蔽板の写真)

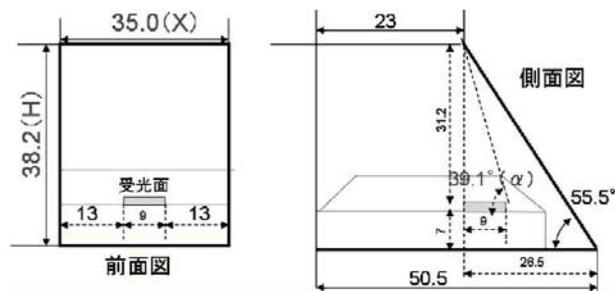


図 3.2-9 試作遮蔽板の設計(単位 mm)

本実験では誤差要因として想定した下記項目を評価項目とし、車両進行方向へ移動したときに各パラメータを変化させることによって、誤差要因の影響を評価する。

- 車線幅方向の走行位置
- 車高
- 投受光器取り付け角度
- 車載受信機取り付け角度
- 赤外線遮断量

なお車高については、実験の便宜上、投受光器の高さを変え、投受光器と車載受信機との相対的な高さを変化させることで代用する。フロントガラスの代用として、光ビームで使用している帯域の赤外線を83%カットする特性を持つ車両用透明熱遮断フィルム(アルフォリア製サンクリア SC)を使用した。また、境界検出位置は投受光器を中心に車両進行方向に対し左右対称であると想定し、今回は片側(投受光器右側)の特性のみを検証する。

本実験の実験環境を図 3.2-10 に示す。車両の天井の影響を考慮し、車両の代用として台車を用いた。台車に三脚を設置し、三脚上に遮蔽板付車載受信機を設置する。遮蔽板付車載受信機は図 3.2-2 で示した領域の下限である道路から1mの地点に設置した。車載受信機の受光レベルをモニタし、ダウンリンク圏外境界を観測するためにデータロガーを使用した。データロガーで受光レベルを観測しながら台車を投受光器に向けて車両進行方向に移動させ、ダウンリンク圏外境界を観測した地点をメジャーにより測定して記録する。

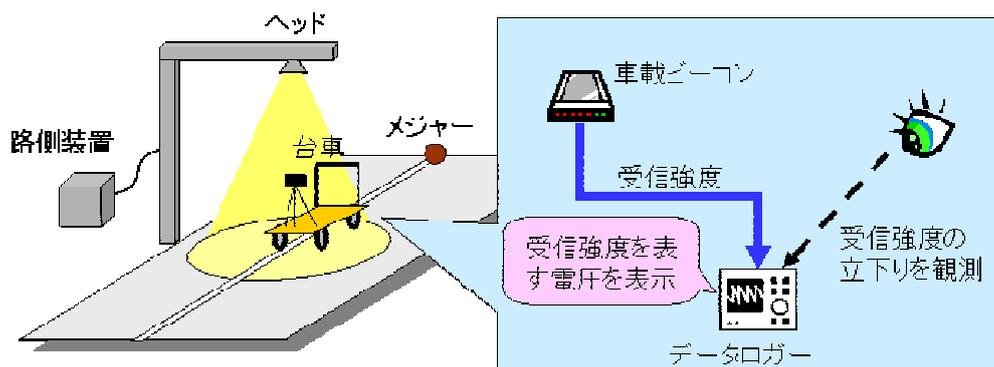


図 3.2-10 遮蔽板の性能評価実験系

2) 評価結果

本実験の結果(台車位置-受光強度特性)を図 3.2-11 に示す。

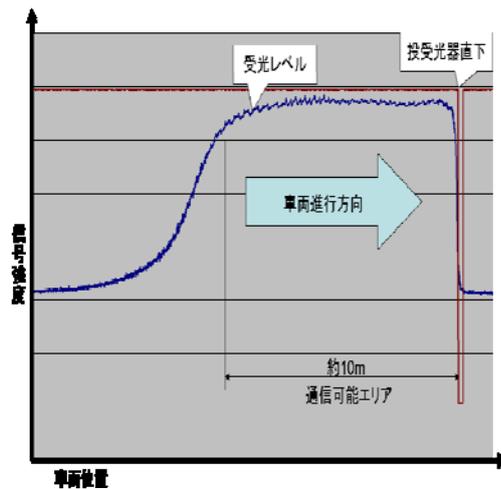


図 3.2-11 車両位置—受光強度特性

図 3.2-11 から、赤外線を受光強度は台車の移動に伴い緩やかに上昇し、光ビーコン投受光器の直下地点で急峻に下降していることがわかる。この結果は、投受光器直下で遮蔽板による人工的な光の遮断が機能している事がわかる。また、遮蔽板が図 3.2-2 に示す通信エリア内における受光レベルに影響を与えていない事も確認した。図 3.2-12 に、誤差要因である評価パラメータを変化させた時の、通信境界検出位置の評価結果を示す。縦軸と横軸は、それぞれ投受光器直下を基点とした車線方向、車幅方向の距離である。原点(0, 0)は投受光器直下地点であり、車線方向距離は正方向を投受光器後方、負方向を投受光器前方とする。また、グラフにおける評価パラメータの標準値とは、車線中央で、車高 1m、車載機左右 0° 、投受光器角度 0° 、赤外線遮断無しの状態である。グラフから、誤差要因である車高や投受光器の設置角度、赤外線遮断は、境界検出地点が標準値と同様に投受光器直下から 20cm 以内に収束している。以上の実験結果から、提案技術が誤差要因から受ける影響は小さいことがわかった。

また、車載受信機の左右設置角度については、台車の進入位置が車線幅方向に逸れると、ダウンリンク圏外境界検出地点が投受光器直下地点から離れる傾向がある。車載機の左右設置角度が 10° の時と 20° の時のダウンリンク圏外境界検出地点を比較すると、車載機の左右設置角度が大きくなるにつれて、ダウンリンク圏外境界検出地点が投受光器直下地点から離れていく。

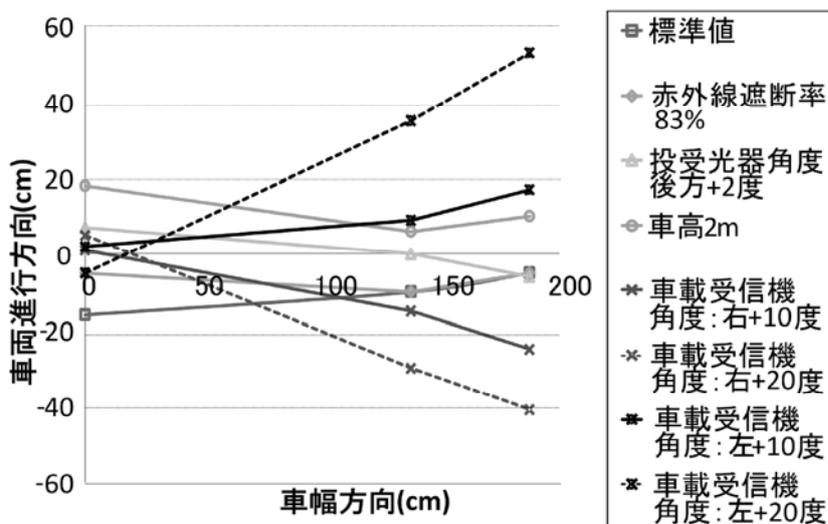


図 3.2-12 境界検出地点に誤差要因が与える影響

表 3.2-1 に投受光器直下地点から境界検出地点までの距離を誤差とした、各誤差要因による最大累積誤差を示す。車載機の左右設置角度が 10° であるときの誤差要因による累積誤差は最大 41cm であることから、目標である 50cm を満たすことが確認された。この結果から、走行車両が車線内を走行しており、車載機の左右設置角度 10° 以内であれば提案技術による測位誤差は 50cm 以下になる事がわかった。

表 3.2-1 誤差要因による累積誤差

	0cm(レーン中央)	1375cm	1875cm(レーン右端)
標準	-16	-10	-5
遮断率 83%	-5	-10	-5
車高 2m	18	6	10
車載機取付角度 左 10° (右 10°)	2(1)	9(-15)	17(-25)
ヘッド取付角度 後方 2°	7	0	-6
最大誤差	27	-35	-41

(4) 車両走行実験による性能評価

1) 実験環境

遮蔽板を装着した車載受信機の実車環境における有効性を確認するために、車載受信機を実車両に搭載し、ダウンリンク圏外境界検出地点を測定した。台車を用いた実

験では誤差要因に関して詳細な評価を行ったため、実車を用いた実験では以下のような代表的な誤差要因のみを実験パラメータとした。

- ・ 車線幅方向の車両進入位置
- ・ 車高
- ・ 車速

本実験の実験環境を図 3.2-13 走行実験環境図 3.2-13 に示す。評価は車載受信機の受光レベルを記録し、受光レベルの立下り発生地点を追跡することによって行う。本実験で使用した光ビーコン車載受信機と投受光器は、台車による実験で使用したものと同一のものである。データロガを路側と車側に各 1 台設置し、路側のデータロガはテープスイッチの信号を記録し、車側のデータロガは車載機における受光レベルと実験車両の車速パルスを記録する。テープスイッチは投受光器直下に設置され、車両が投受光器の直下地点を通過したイベントの検出を行う。路側と車側のデータロガは予め同期してあり、テープスイッチの出力信号と車速パルスと受光レベルを同時に記録出来るようにしてある。車両が通過しテープスイッチが入る前後の車速パルスと車載受信機の受光レベルを観測することにより、誤差要因による投受光器直下地点の検出誤差を観測することができる。

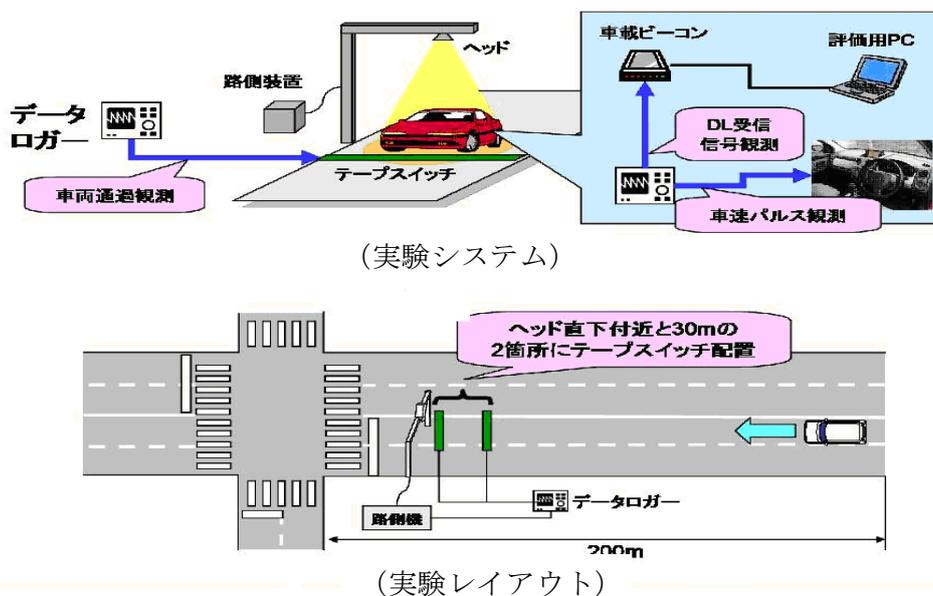


図 3.2-13 走行実験環境

光ビーコン投受光器は、実験車両が十分に加速できるよう、実験車両スタート地点から 200m 離れた場所に設置する。

2) 実験結果

表 3.2-2 実験結果表 3.2-2 に、実験結果(各誤差要因による最大誤差値)を示す。各誤差要因による最大誤差は 37cm である事がわかった。

表 3.2-2 実験結果

検討事項		パラメータ	誤差 (cm)
走行位置	車道中央	ヘッド直下	37
	車道端	ヘッド直下から1.8m端	28
車高	普通乗用車	車高 1m	37
	大型乗用車	車高 2m	19
車速	高速	110km/h	21
	低速	30km/h	37

以上から、提案技術による遮蔽版は、実車両においても適正に動作し、投受光器直下に近い地点で光遮断を正しく行うことが確認できた。投受光器直下での光遮断終了を遮蔽板の高さ H により設定しているため、この評価結果から、H による光遮断性能は車両走行時においても有効であることが確認できた。また、車両の車線幅方向の走行位置が変化した場合も、投受光器直下付近でダウンリンク圏外境界検出をしている事を確認した。これらの結果から、遮蔽板の幅 X による車幅方向に対する位置補正は、実車においても有効であることが確認できた。

また、実際の走行車両時においても遮蔽板における角度 α 、高さ H、幅 X の設計は有効であることが確認できた。

3.2.4 検証実験まとめ

検証実験では、自車測位システム要件のうち測位精度について、投受光器直下に近い場所でのダウンリンク圏外境界を捕らえる事により高精度測位が可能になることを

検証した。投受光器直下でのダウンリンク圏外境界を人工的に作り出す為に、遮蔽板を実装し、複数の誤差要因の影響を評価した。結果、測位精度は 50cm 以下となる事がわかった。これは、表 2.2-1 の完全性(実環境における精度劣化量)では 10cm(精度劣化量=実環境における精度-理想環境における精度)に相当する。これにより、本提案の有効性と必要性が示された。

3.2.5 関連研究

路側に設置されたインフラを使った自車測位の関連研究として、既に説明したレーンマーカを利用した測位システムと、本稿と同様光ビーコンを使った測位システム [51]が報告されている。

文献 [52] [53]は、路面に沿って M-CubITS 素子を M 系列に従って配置し、車載カメラで M-CubITS の並びを検出し位置を算出する。この方式は、安価な車載カメラを利用した測位システムであるが、路面に描かれたマークを認識する為、路面の経年変化に伴うマーカ誤認識が増える事が予想される。レーンマーカを使用した技術と本稿提案の技術を比較すると、本提案技術は短距離赤外線通信であり、且つ車線毎に路真上に設置する為、障害物による通信障害も少ない。また、既に全国で 48000 基の稼動実績もある。

文献 [51]は光ビーコンのアップリンク領域の車両を、車両からのアップリンクタイミングを光ビーコン投受光器が捉え自車測位を行う。この方式は投受光器より車線方向手前で測位する為、本稿でも述べたように

- (a) 投受光器の前後取り付け角度による劣化(0.4m)
- (b) 車高(光ビーコン車載受信機設置高さ)による劣化(0.3m)
- (c) 車両フロントガラスの赤外線遮断加工による劣化

が発生する。また、文献 [51]はアップリンクの車両位置に対する精度を上げる為、アップリンク領域を絞り込んでいる。その為、約 65%の通信に輻輳処理が発生している。本稿提案の技術は既に述べた様に上記 (a)から (c)の誤差要因の影響は少ない。且つ、通信品質は従来方式と比較して劣化していない。また、文献 [51]が既存の光ビーコンインフラを利用することが出来ないに対し、本稿提案技術では既存の光ビーコンインフラに手を加えることなく利用することが可能である。

3.2.6 むすび

交差点における車両間衝突防止サービスを実現する為、高精度で高完全性のピンポイント測位技術の検討を行った。

既存の光ビーコンの通信領域を調査し、光ビーコン投受光器直下でダウンリンク圏外境界を捉えることにより高精度な測位を実現する技術を提案した。提案技術の効果を検証する為、遮蔽板を車載機側光ビーコン受信機に取り付け、投受光器直下で測位が高精度に行われる事を確認した。これにより本提案技術が、以下に示す全ての測位システム要件を満足する事を示した。

- ① 測位精度：50cm 以下
- ② 完全性：路インフラを使った測位システム（環境に依存しない測位）
- ③ 導入・保守コスト：既存インフラの利用

また、遮蔽板の機能要件を提示し、要件を満たす設計方法についても触れ、遮蔽板が設計思想に基づいた通りに動作する事を確認した。

今回提案した遮蔽板付き光ビーコン受信機を使う事により、既設 48000 基のインフラをそのまま利用した高精度測位が可能となる。

3.3 光ビーコンを利用した連続自車位置推定方式

本節では、前節で検討した光ビーコンを使った高精度測位技術と車両の自律航法技術を組み合わせて、環境に依存しない高精度な連続測位技術を検討する。

3.3.1 関連研究

マップマッチング [54] [55]とは論理的なアルゴリズムを使用して位置情報と地図情報を符合させる技術であり、自律航法やGPS測位のサービス補間技術としてカーナビゲーションシステムで使用されている。マップマッチングは、似た形状の道路が近接している場合に、誤った道路に自車の位置情報をマッチングしてしまう問題がある。オープンスカイでのGPS測位結果と併用した場合のマッチングの成功率は約75%であり [56]、マルチパスなどが多発するビル街においてはさらに完全性が劣化する。

自車の過去の走行履歴から、確からしい道路情報に重み付けを行う事で完全性を向上させるアルゴリズムが提案されている [57] [56]。しかし、このアルゴリズムでは、車両を利用するほかの人には適用できない。また、車両の寿命である10年先までの道路計画を反映させた地図情報がなければ、新しい道路ができた際、間違った測位をする可能性が高い。

また、RTK-GPSと光振動ジャイロ及び車速センサーを使用した自律航法を組み合わせた位置推定システムも開発されている [58] [59] [60]。このシステムの位置推定誤差は4kmの自律航法に対し7.6mである。しかし、このシステムはRTK-GPSを使用することから位置基準局とのリアルタイムな通信手段が必要である。また、RTK-GPSは搬送波の位相を検出する原理上、ビル陰等で搬送波の位相の検出が寸断されると位相の再検出に時間を要する [26]ため、環境によって完全性が変動する。

醍醐らはジャイロと車速パルスを使った実験 [26]を行っている。実験によって約1400m走行して相対誤差が最大58.3mの誤差が発生した事を報告している。特に途中から誤差の累積が変動する事を報告している。これには車頭方位が考慮されていないので、相対位置しか判別できない。また、ジャイロによるの誤差が大きい為、測位誤差の累積が変動するものと思われる。

以上のように、測位精度が 50cm の車両の連続測位技術や、トンネル、高層ビル街に影響をうけない車両の寿命に合った測位技術や、高い完全性を維持する測位技術はまだ実現されていない。

3.3.2 提案方式

(1) 概要

トンネルやビルなどの環境に影響されない測位技術は重要である。確実な測位を実現する方法として、公共インフラ設備の利用があげられる。光ビーコンなどの公共インフラ設備は、新旧のあらゆる車両へ適用できるような路側設置方法を含めて設計されている為、車両の長い寿命にも対応が可能である。そこで、路側に複数の公共インフラ設備を使った測位基準点を設け、測位基準点間を自律航法で補間して車両位置を推定するシステムを提案する。しかし、従来方式の自律航法 [26]では、車頭方位やジャイロの補正が行われないうえ、完全性を向上させる事が難しい。そこで、測位基準点で車両の位置を校正し、複数の測位基準点の位置情報を使用して車頭方位を補正する。さらに、車両停止毎のジャイロの情報からジャイロの出力ドリフトを補正し、車両を周回させてジャイロの感度を補正する事で、自律航法による位置推定誤差を改善する車両位置推定システムを提案する。

このシステムは、複数の測位基準点間の車両の位置を自律航法で推定するため、連続した車両の位置推定が実現できる。測位精度は、測位基準点からの移動距離に応じて劣化するが、移動距離がわかればその場所での測位精度を推定する事ができる。また、高い測位精度が必要な交差点などでは、その直前に測位基準点を設置する事で、高い測位精度を実現できる。これらの特徴から、高精度で高完全性な測位システムを実現する事が可能と考えられる。本節では、測位基準点に公共インフラ設備である光ビーコンを使った測位システム [43]を利用する。図 3.3-1 に提案方式の概要を示す。

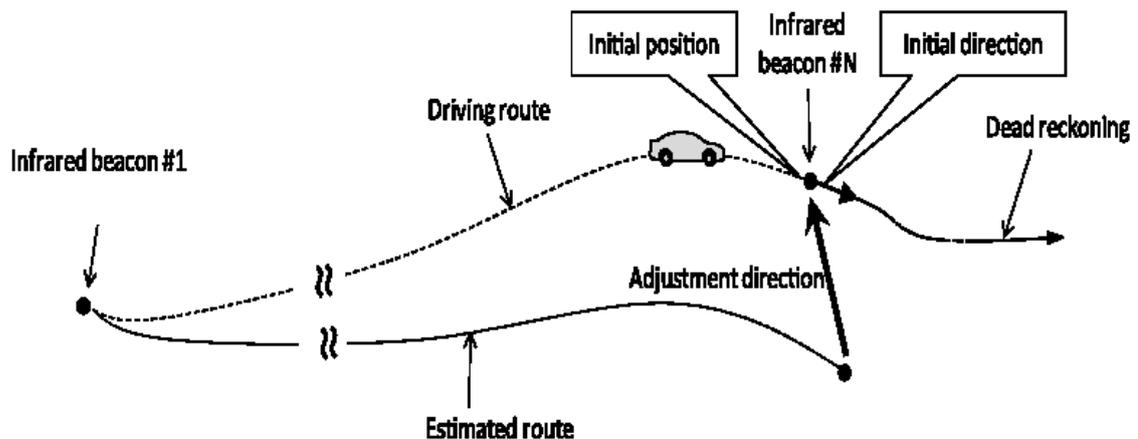


図 3.3-1 提案方式概要

提案方式は、複数の光ビーコン路側装置の直下で車両が測位を行い、自律航法によって推定された走行軌跡と比較する事によって、正しい車頭方位(車両の向いている方位)を算出し、次の光ビーコン路側装置までの自律航法に適用している。このシステムを実現するためには以下の技術が必要である。

- ① 光ビーコンによる高精度測位技術
- ② 光ビーコン間の自律航法技術
- ③ 車頭方位検出技術

本稿では、特に自律航法技術と車頭方位検出技術について検討を行い、実証実験を行った。

(2) 光ビーコンの高精度測位技術

光ビーコンを使ったピンポイントの高精度測位技術については、3.2節を参照の事。この技術により、高精度で高完全性な測位基準点を構成する。

(3) 光ビーコン間の自律航法技術

ジャイロを使用した既存の自律航法技術の原理・性能・課題を述べる。

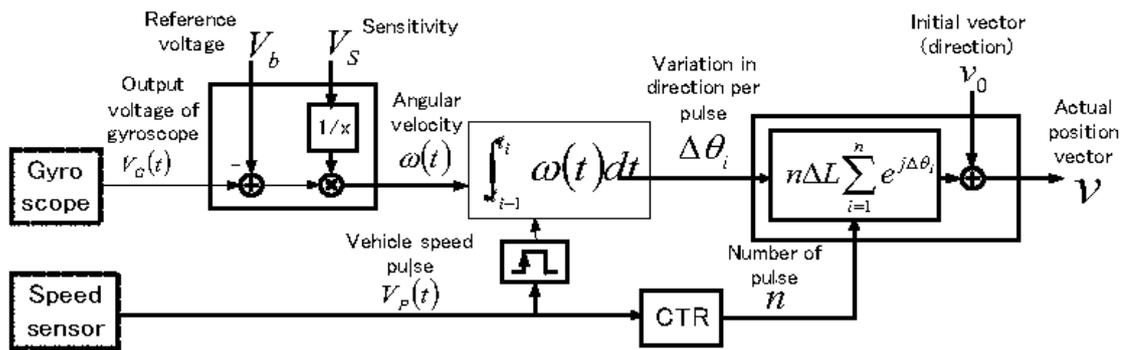


図 3.3-2 ジャイロを使用した自律航法技術の原理

図 3.3-2 に代表的なジャイロ스코ープと車速パルスを使用した自律航法技術の原理を示す [26]. 図では、ジャイロの出力電圧は角速度 $\omega(t)$ に変換され、 $\omega(t)$ を車速パルスが出力されるタイミング毎に積分することで積分開始時の車両の方位を基準とした相対方位を算出する事を示している. 更に、1 車速パルスあたりの移動距離 ΔL と車速パルス数 n を乗算することで $\omega(t)$ の積分開始時を基準とした移動距離を算出する. このようにして求めた相対方位と移動距離に、 $\omega(t)$ の積分開始時に車両が持っていた初期ベクトルを加算することで現在位置と車頭方位を算出する.

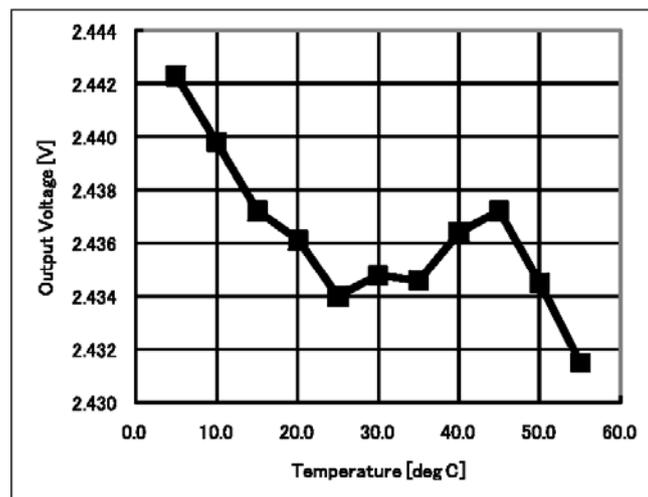


図 3.3-3 ジャイロの温度特性

今回実験で使用したジャイロの零点電圧の温度特性（温度変化に伴う出力の変化）を図 3.3-3 に、経過時間特性（時間経過に伴う出力の変化）を図 3.3-4 に示す。

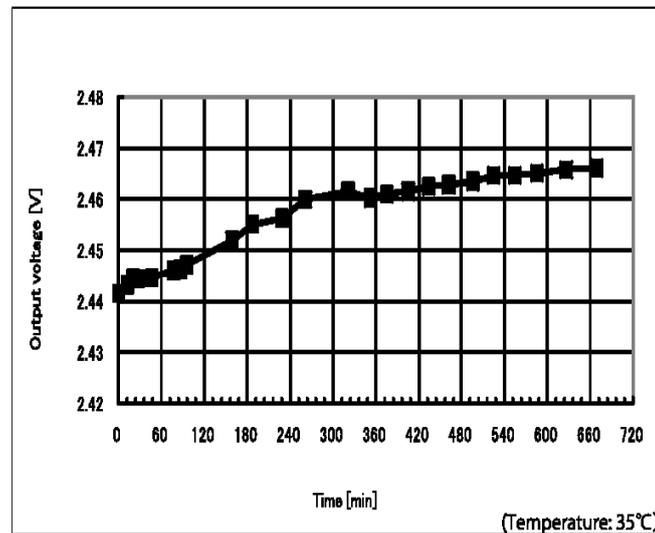


図 3.3-4 ジャイロの経過時間特性（温度=35°C）

図 3.3-3 図 3.3-4 から、ジャイロの出力は周辺温度や経過時間に伴い変動する事がわかる。同様に感度も周辺温度と時間経過によって変動する事が予想される。その結果、醍醐らの実験 [26] の様に走行途中から測位精度の劣化が観測されると思われる。しかし、変動には規則性がある。例えば、図 3.3-4 から時間経過に伴う変化は緩慢である事が読み取れるので、前後の値がわかれば値を補間する事ができる。

そこで、これらジャイロの出力の変動を補正する方法を検討した。車両は道路上しか走れないという制約と、停止時は動けないという特徴を使って変動を補正する。

具体的なジャイロ出力の変動の補正方法を以下に示す。

① 零点電圧の変動の補正：

車両が停止している時は角速度が 0 である事を利用して、ジャイロの零点電圧の変動を補正する。車両の停止間の零点電圧の変化から、移動中の零点変動を補正する。

② 感度の変動の補正

同一地点を二度通過し自律航法による位置推定誤差を算出することで感度を補正する。

ジャイロの感度補正による効果を確認するため、図 3.3-5 に示すように、同一ルートを車両で 5 周(300m/周)する実験を実施した。まず、車両速度と車速パルスの誤差について調査を行った。実験道路で 70m の直線距離を車両の速度を変えて走行し、その際の車速パルスを計測し誤差を調査した。調査結果を表 3.3-1 に示す。

表 3.3-1 車両速度と車速パルス誤差

車速	パルス / 70m
30Km / h	178
45Km / h	177
60Km / h	178

道路の状態によって変動は予想されるが、道路上に砂や凹凸が無い場合は時速 60km 以下でパルスの誤差は 1 パルス以下である事がわかった。この結果より、この実験道路では車速パルスの影響が十分小さいと考えられる。

図 3.3-5 で、走行開始前と停車直後にジャイロの零点電圧の変動を補正し、感度の変動の補正を行わずに自律航法を使って、実験道路を時速 30km 以下で走行した車両の移動軌跡を図 3.3-6 に示す。

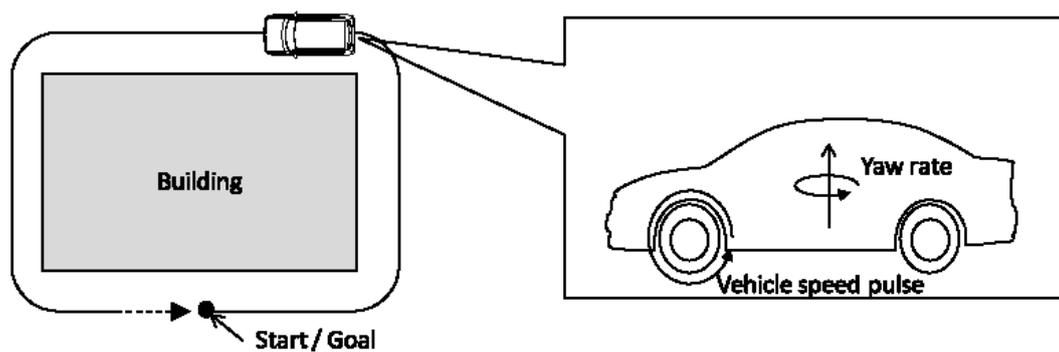


図 3.3-5 自律航法性能の評価実験コース

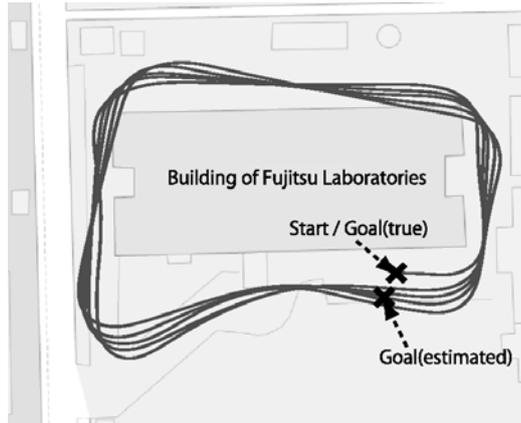


図 3.3-6 自律航法による車両の移動軌跡 (感度補正なし)

図 3.3-6 より、車両がコースを一周する毎に車両の移動軌跡が回転していることがわかる。図 3.3-2 に示すように、自律航法は車速パルスとジャイロの情報から相対位置を算出している。実験道路での車速パルスの影響は微小であるから、車両の移動軌跡が回転している原因はジャイロにある。ジャイロの誤差要因である零点電圧変動は補正済みであることから、ジャイロの感度が変動していることが原因と予想される。

そこでジャイロの感度から、自律航法による位置推定誤差を計算した。ジャイロの感度の値を前後に振り、図 3.3-6 の Start(true)と Goal(estimated)の距離の差 (距離誤差) を計算しプロットした結果を図 3.3-7 に示す。

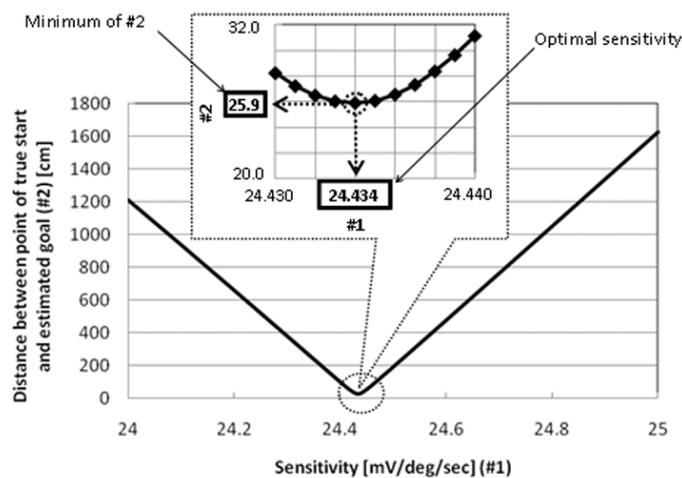


図 3.3-7 感度と自律航法による距離誤差の関係

図 3.3-7 から感度が 24.434mV/deg/sec の時、最も距離誤差が小さくなる事がわかった。そこで、感度(24.434mV/deg/sec)を使用してジャイロの感度変動を補正したところ、車両の移動軌跡は図 3.3-8 のようになり、正しく感度が補正されている事がわかった。また、図 3.3-9 に示すように同様の実験を複数回行ったところ、距離誤差は 0.25m から 1.2m であった。これより、測位誤差には感度の誤差が支配的である事がわかる。

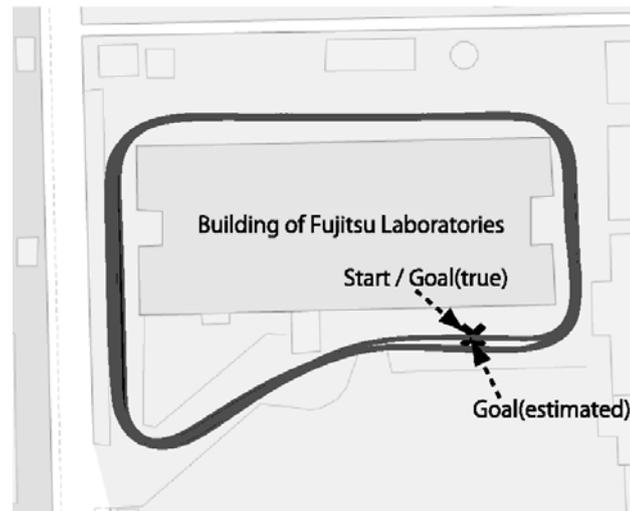


図 3.3-8 自律航法による車両の移動軌跡（感度補正あり）

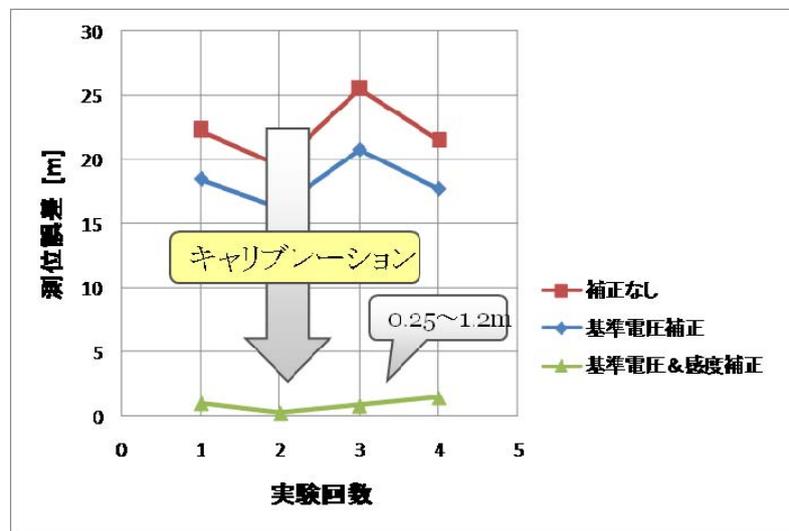


図 3.3-9 測位誤差の要因と測位誤差

(4) 車頭方位検出技術

前項で説明した自律航法技術では車頭方位を認識することができない。そのため、車頭方位を認識する手段が必要である。図 3.3-10 に車頭方位を認識する方法を示す。

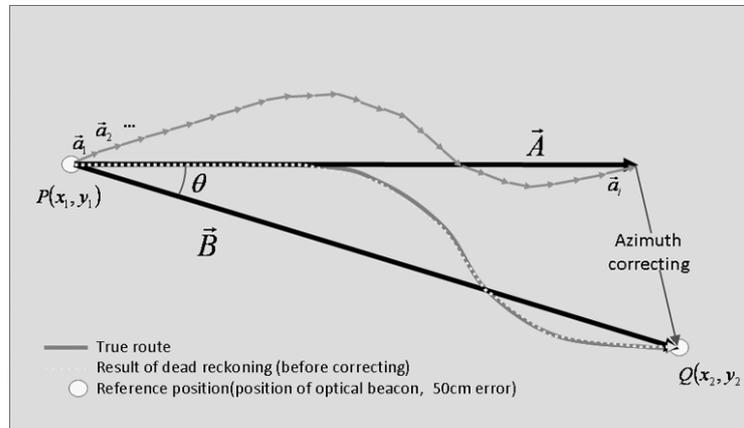


図 3.3-10 車頭方位検出方法

自律航法技術により描かれた軌跡ベクトルを A 、光ビーコン P と光ビーコン Q を結ぶベクトルをベクトルを B とすると、車頭方位の補正角 θ は (1) 式で表される。

$$\theta = \frac{A \cdot B}{|A| \cdot |B|} \tag{1}$$

ここで、ベクトル A は、 i 番目の車速パルスが出力されてから次の車速パルスが出力されるまでの車両の移動距離を長さに、ジャイロの出力を積分した結果を方位に持つベクトルを a_i とした場合に、 n パルス出力された後の合成ベクトルであり、(2)式で示される。

$$A = \sum_{i=1}^n a_i \tag{2}$$

自律航法で認識している車頭方位から θ だけ補正した値が光ビーコン Q で適用される新しい車頭方位となる

3.3.3 評価実験

実車を使用した走行実験により、提案方式による自律航法技術の性能を評価した。

(1) 評価実験系の概要

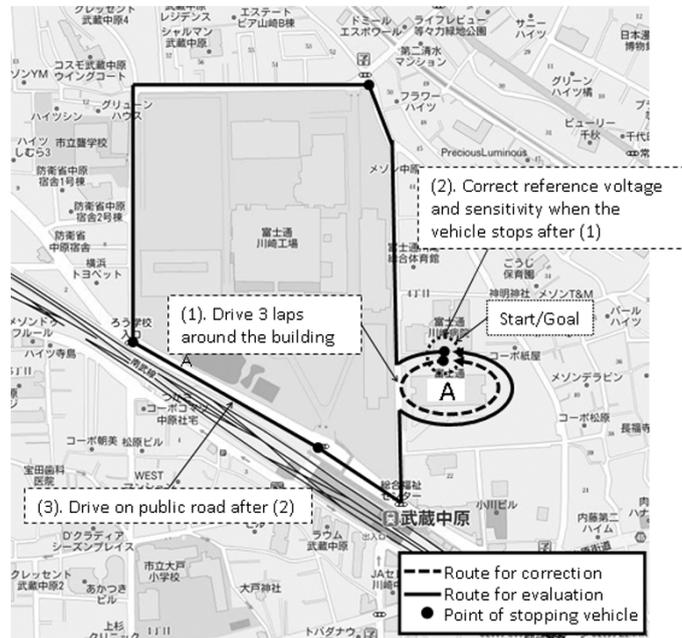


図 3.3-12 自律航法技術の単独評価走行ルート

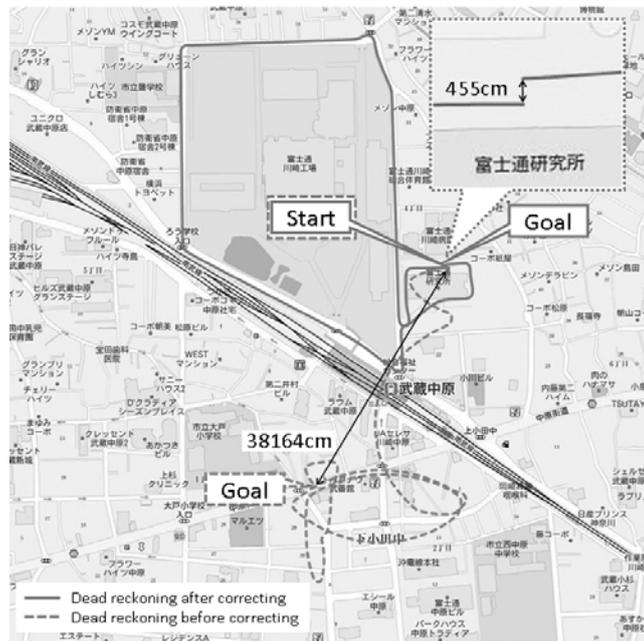


図 3.3-13 自律航法技術による誤差

(3) 提案技術の評価

提案方式(光ビーコンを使用した車両位置推定技術)の評価結果を示す。

車両が走行したルートを図 3.3-14 に、評価結果を図 3.3-15 にそれぞれ示す。本実験の条件は、信号停止時に基準電圧を補正し、基準地点の測位手段として光ビーコン測位技術を使用した他は図 3.3-12 と同様である。また、各光ビーコン路側装置の正確な座標は国土地理院が設置した一等三角点を基準に測量した結果を使用した。図 3.3-14 で、車両は光ビーコン路側装置 A の直下を二度通過(破線)してジャイロの感度を補正し、光ビーコン路側装置 A と B の直下を通過(一点破線)することで車頭方位を修正し、光ビーコン路側装置 C の直下を通過(実線)するまで自律航法を実施した。破線の経路長は約 1300m、一点破線の経路長は約 215m、実線の経路長は約 1797m だった。

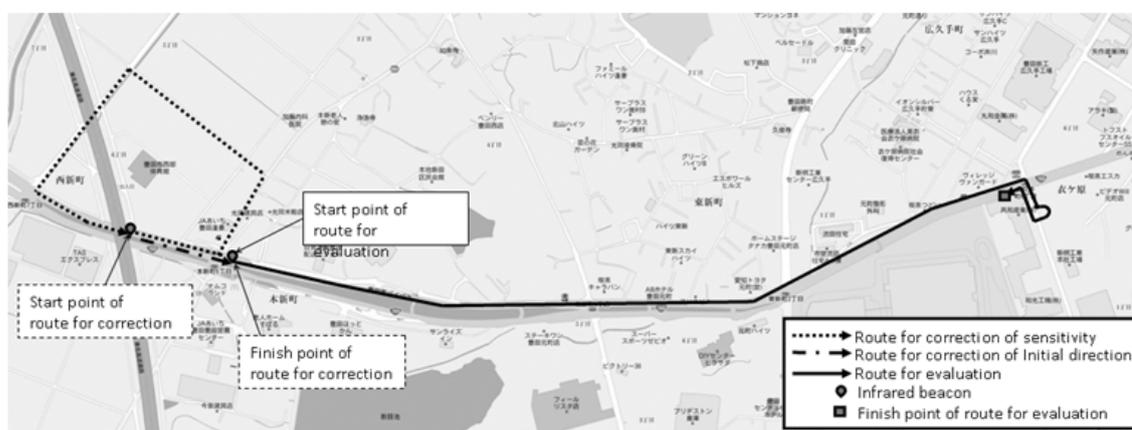


図 3.3-14 光ビーコンを使用した評価ルート

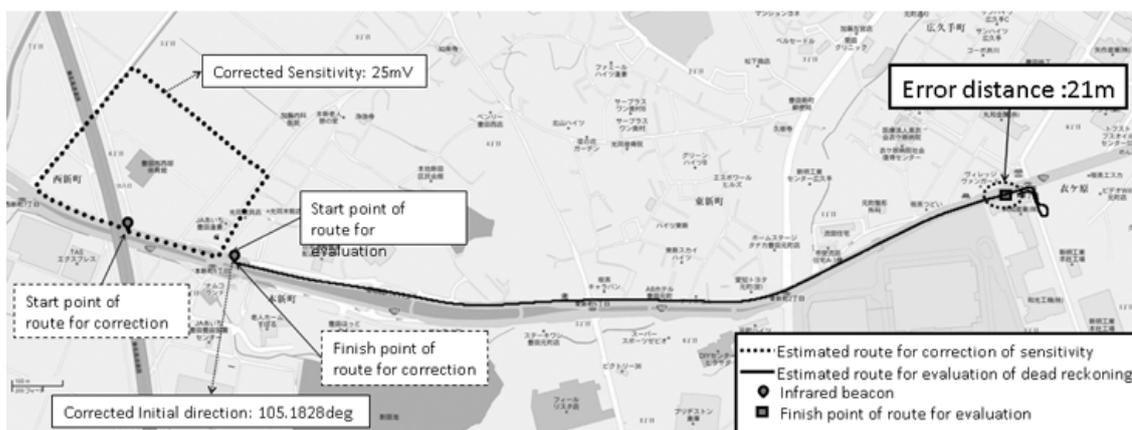


図 3.3-15 光ビーコンを使用した評価結果

本評価実験の結果、約 1797m 自律走行した場合の提案技術による位置推定誤差はレンジで約 21m になる事がわかった。よって、この実験環境での測位精度は最小 50cm

から最大 21m である。測位精度は走行距離に比例して増大していくと考えられるので、推定する事が可能である。つまり、完全性は小さくする事ができる。以上より、走行距離が 1800m 以内であれば、提案技術は既存のGPSより高い測位精度を期待できる事がわかった

(4) 考察

本稿で提案するシステムは、光ビーコンを使用した測位により測位基準点を求め、その情報を基準として自律航法による車両位置推定を実施している。本提案は既に、交差点安全支援サービスに適用され検証実験が行われている [31]。しかし、本技術を広域に展開するためには、光ビーコンを設置する間隔についても検討が必要である。サービスに必要な位置精度に合わせて設置間隔を決めるという方法がある。光ビーコンの設置間隔を短くすれば、位置推定精度は向上する。しかし、インフラ設備である以上、特定のサービスに限って設置する事は難しい。一方、システムの特長に合わせて最適な設置間隔を決める方法もある。本提案の位置推定システムは、大きく二つの誤差が発生する。一つは光ビーコンによる測位時に発生する測位誤差であり、一つは自律走行時に発生する自律位置の推定誤差である。前者は光ビーコンの設置間隔が長くなると誤差の影響が小さくなる。後者は光ビーコンの設置間隔が長くなると誤差の影響が大きくなる。従って、この二つの誤差の影響がお互い最も小さくなる光ビーコン間隔が存在するはずである。

そこで、本節では、検証結果を基に提案方式を使用した場合の最適な光ビーコン路側装置の設置間隔について考察する。

図 3.3-16 に車両走行位置における走行車両数の分布特性(PDF)を示す。車線中心の車両数を 1 として正規化している。図から、ほとんどの車が車線中央を走行している事がわかる。図 3.3-17 に車両走行位置におけるの走行車両数の分布特性(CDF)を示す。

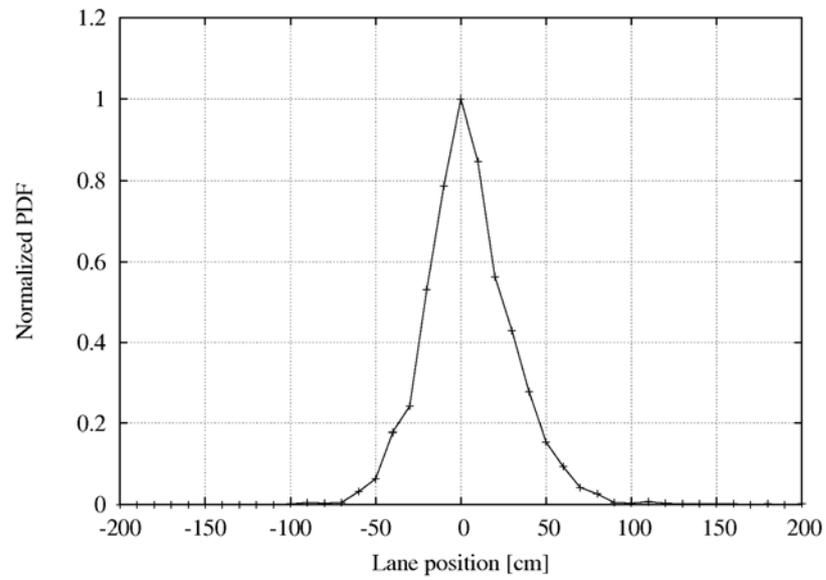


図 3.3-16 車両走行位置（レーン方向）の分布特性（PDF）

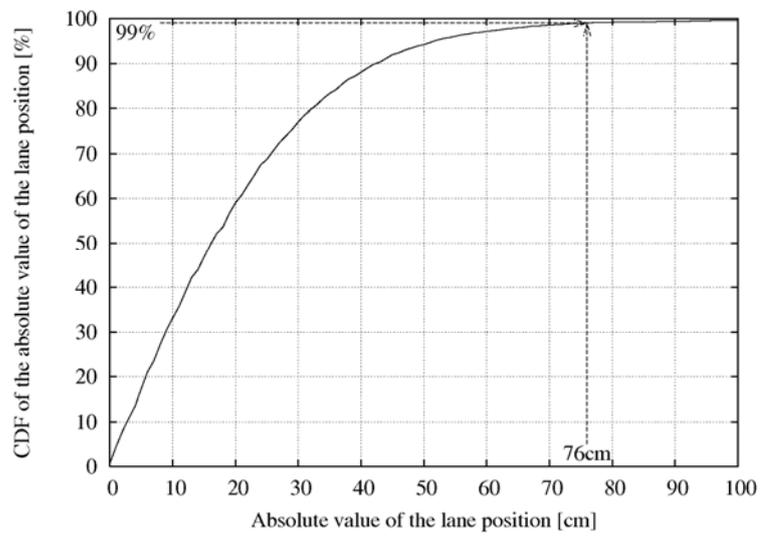


図 3.3-17 車両走行位置（レーン方向）の分布特性（CDF）

図 3.3-17 から、99%以上の車両が車両通行帯の中央から±76cm 以内の場所を走行していることがわかった。このことから、光ビーコン測位技術による車両のレーン方向の測位誤差は $76 \times 2 = 152\text{cm}$ と考える。また、光ビーコンによる進行方向の測位誤差は $-29\text{cm} \sim +11\text{cm}$ である事が過去の検討により判明していることから [43], 光ビーコンによる測位誤差エリアは図 3.3-18 に示す形状であると考えられる。

次に図 3.3-18 に示した光ビーコン測位誤差エリアの情報を使用して光ビーコン路側装置が二基ある場合の車頭方位の推定誤差を算出する。車両は光ビーコン測位の原理から、図 3.3-18 で示した誤差エリアのいずれの地点を通過した場合も、光ビーコンの直下地点を通過したと判断する。図 3.3-19 に示すように、 $L[\text{m}]$ 離れて設置された二基の光ビーコン路側装置#1 と光ビーコン路側装置#2 を想定する。車両が光ビーコン路側装置#1 と#2 の直下地点を直線的に通過すると、車両は光ビーコン路側装置#1 と#2 のそれぞれの直下地点で図 3.3-18 に示す測位誤差を持つ光ビーコン測位を行う。

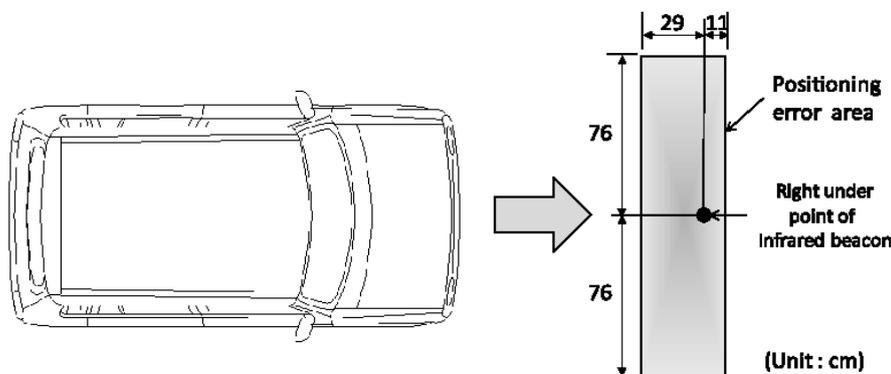


図 3.3-18 光ビーコン測位誤差

従って、光ビーコン路側装置#2 の直下地点における測位誤差の最大値は図 3.3-19 のベクトル v_a となる。更に、光ビーコン路側装置#1 と#2 の間を走行する際には、自律位置推定誤差に起因する誤差ベクトル v_b もまた発生することから、光ビーコン路

側装置#2の直下地点、即ち基準地点で車両が持つ誤差ベクトル v_0 は $v_0 = v_a + v_b$ となる。そして、基準地点をスタートして自律位置推定を実施した際に、新たに自律位置推定誤差に起因して発生する誤差ベクトル v_c の影響を考慮すると、提案方式による最終的な誤差ベクトル v_e は、 $v_e = v_0 + v_c$ となる。

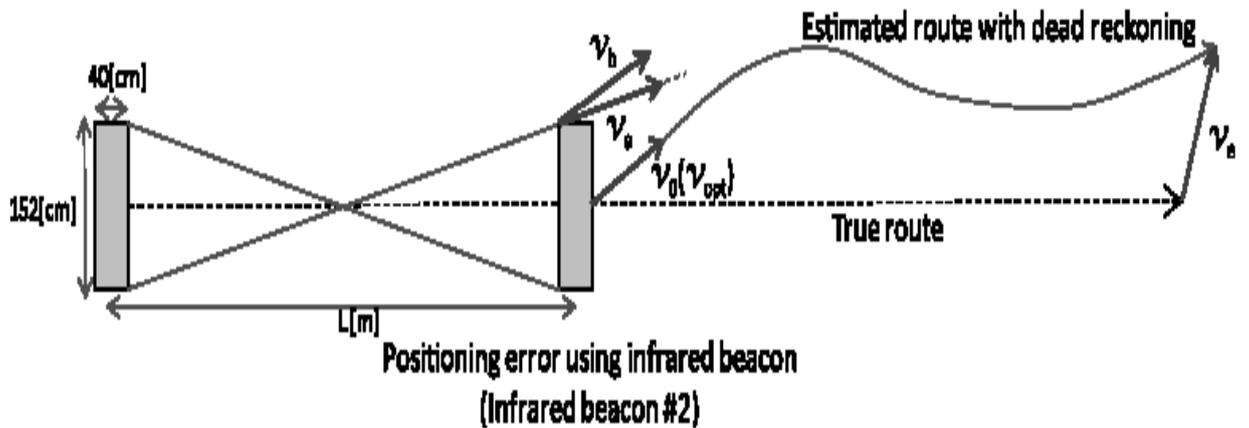


図 3.3-19 提案方式の理論位置推定誤差

以上の考えから、光ビーコン路側装置の間隔と自律位置推定誤差の関係をプロットしたものを図 3.3-20 に示す。尚、周回実験によって得られた距離誤差の最大値（図 3.3-7）を、ベクトル v_b およびベクトル v_c の加算ベクトルのスカラー量として使った。

図 3.3-20 の横軸は光ビーコン路側装置#1 と#2 の間隔 L で、縦軸は v_e の方位誤差成分である。

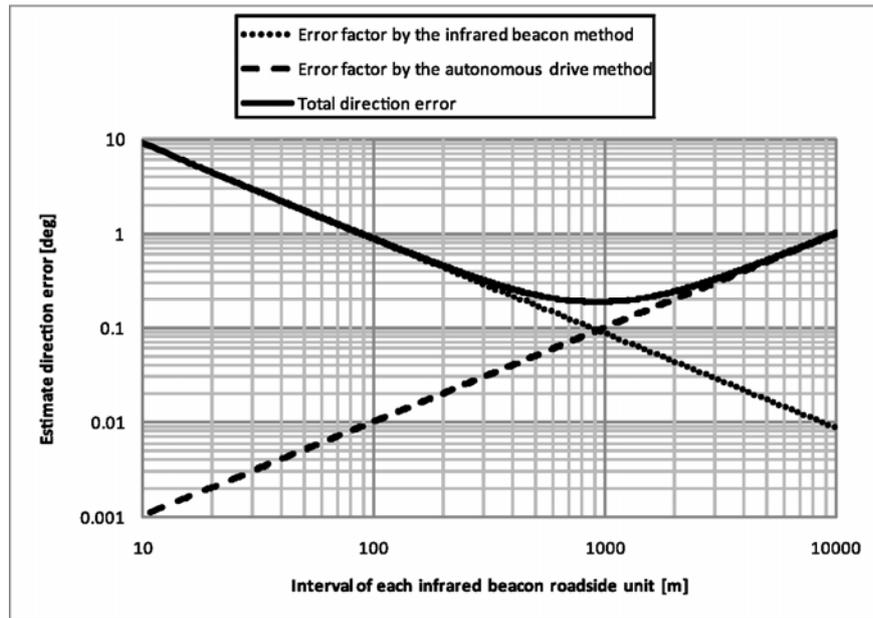


図 3.3-20 ビーコン間隔と自律位置推定誤差特性

図 3.3-20 から、光ビーコンによる誤差と、自律航法による誤差を考慮した、最も良い位置推定精度が得られる最適な光ビーコン路側装置の設置間隔は 900m であることがわかった。

3.3.4 むすび

本節では、既存インフラである光ビーコンを使用した測位技術 [43]による測位基準点と、ジャイロと車速パルスを利用した自律航法による位置推定システムを提案した。その際、ジャイロの出力情報がドリフトする現象を明確にし、車両停止時のジャイロ情報を使って出力ドリフトを補正する事で、高精度な車両の自律航法が可能である事を示した。また、光ビーコンによる複数の測位基準点を使って車頭方位を補正し、自車位置推定の実車評価を行ったところ、約 1800m 走行して約 50cm から約 21m の誤差である事がわかった。さらに、光ビーコンによる測位誤差と自律航法による位置推定誤差の関係から、両誤差の最も小さくなる光ビーコンの設置間隔について考察し、最適な間隔は 900m である事を示した。以上より、ITS 関連サービスを行うために必

要な測位精度約 50cm から約 30m は満足している事がわかった。完全性も連続測位が可能な他測位技術と比較してよい事がわかった。また、トンネルや高層ビル街での測位や、10 年間は保守無しで測位精度が維持できるなどの技術に対する要求事項も、提案技術の構成上、満足できる事を説明した。

今後の研究として、実験道路と実道路の差分と思われるタイヤと路面のスリップによる位置推定誤差の増大対策や、バンクカーブの様な地面に水平でない場所での自律航法方法など、特異な環境における検討も進める予定である。また、本稿ではジャイロの感度を補正する為、車両を周回して同じ位置を通過したが、将来は位置情報が既知である光ビーコンを複数使って行う方式も検討する予定である。

3.4 まとめ

本章では、高い完全性と高精度測位が必要なサービスとして次世代交通システムを取り上げ、具体的なサービスとして交差点における車両衝突防止サービスに必要な測位技術を検討した。

既存の測位システムは、測位精度を測位技術の要件として捉えてきた。しかし、広域で利用する ITS 関連のサービスに使われる測位技術は、サービスの種類と測位する場所によって、それぞれ測位精度と技術に対する要求条件が変わってくる。例えば、車両の衝突防止を防ぐサービスであれば、高い測位精度が必要である。近傍車両の注意喚起であればそれほど高い測位精度は要求されない。従って、必要なエリアで必要な測位精度を実現できるしくみをつくる必要がある。

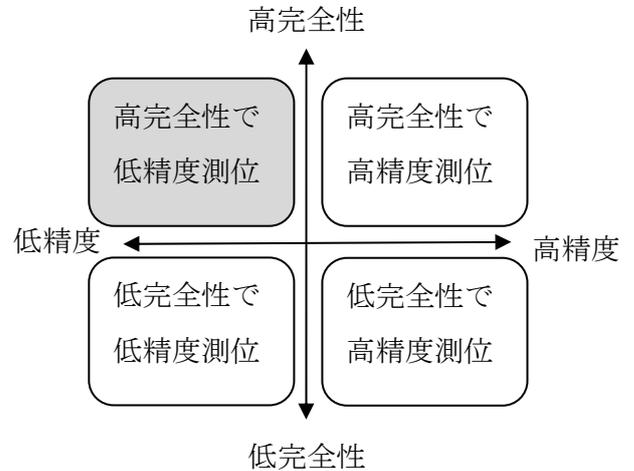
必要な測位精度を実現する為、高精度なピンポイント車両測位技術として光ビーコンを使った測位技術と、車両自律航法技術が連携した測位システムを検討した。今回の技術は交差点というエリアで高精度を実現できればよい。つまり、交差点手前で光ビーコンによるピンポイント測位を行い、その後車両の自律航法によって位置を把握する事により、交差点内における車両の高精度測位技術を実現する事ができる。

また、本章提案である光ビーコンの測位技術は GPS 測位の測位誤差のキャリブレーションに利用する事もできる。GPS 測位はマルチパスなどの要因で測位誤差が発生する場合、基本的に測位誤差が発生している事を検出する事は困難である。しかし、光ビーコンによる測位は高い完全性と高い測位精度を同時に実現している為、光ビーコンによる測位と GPS 測位の差分から GPS の測位誤差を修正する事が可能である。さらに、光ビーコンは既に一般道路に普及しているインフラ設備であり利用しやすく、基本機能である路車間の相互通信を使ってインフラの情報と車両の情報の送受信が可能である。通信と測位を同時に行うことが可能な本提案方式は、今後 ITS 関連のサービスと大変親和性の高いシステムの構築が期待できる。ITS は物流の効率化だけではなく、安全性についても検討が必要である。安全性の向上には、人の判断による運転からインフラ支援による運転へと遷移させる必要がある。その為には高い完全性を備えた測位技術が必要であり、本技術は将来の交通制御に必要な測位技術に繋がるものとして期待している。

本システムは既に一部地域で実証実験が進められており、近年中に他地域においても同様な実証実験がおこなわれ実用化へと進む予定であるが、本技術に対応した光ビーコン受信機やカーナビゲーションの普及も合わせて考える必要がある。また、道路に対する適用条件として、サービスを適用する前に光ビーコンが設置できる道路である必要があり、適用道路の選定も必要である。タイヤがスリップする道路では移動距離の誤差が増大する。市街地における誤差の平均は100m走行して約1m～2m程度 [62]である。雪道などではさらに誤差の増大が予想され、これらの誤差を吸収するしくみも必要である。今後は、早期実用化に向けこれらの課題について検討を進める予定である。

第4章 高い完全性で低精度な測位技術

本章では、サービスと測位技術の4象限マトリクスにおける第2象限である高完全性で高精度測位が必要でないサービスに適した技術について述べる。サービスとして、子供の歩行履歴サービスを想定し、必要な測位技術を検討する。図 2.3-1 に示すように、技術要件を



- ・24時間連続して測位が可能
- とし検討する。4.1節で技術背景を述べ、4.2節では間欠測位GPSと低消費電力デバイスによるサービス補間技術について述べる。4.3節で補間技術による高精度化について述べ、4.4節でまとめを述べる

4.1 はじめに

近年、携帯電話にGPS [63]の搭載が増加し、それに伴い人の位置情報を使ったサービスが増加している。人の位置を車両に伝えて、ドライバーに注意喚起をする安全サービス [64]、人を目的地まで案内するナビゲーションサービス、人の歩行履歴に基づくサービスの提供 [65]、位置情報履歴を利用したユーザアダプティブなサービス提供 [66]、状況に合わせて適切な情報を自動的に推薦、選択するサービス [67] [68] [69] [70]など様々なサービスが検討されている。これらのサービスはGPSの測位精度に基づいて提供されており、今後さらに普及すると考えられ、歩行者ナビゲーションを代表とする利用時にGPSを起動するサービスと、歩行履歴のように常時測位を必要とするサービスに分類する事ができる。

携帯電話の測位にはGPSが利用されるが、GPSは携帯電話に搭載される他のデバイスと比較して消費電力が大きい為、常時測位を必要とするサービスではGPSを間欠に動作させる必要があった。しかし、間欠動作の間は測位する事ができない為、サービスはGPSを動作させている間のみ限定され、利便性に欠ける。従って、サービスを提供させる為には、他の低消費電力デバイスで補間しながら測位をする方法が

必要である。文献 [71] [72] [73]では方位計と、歩数と歩幅を乗じた移動距離から、相対位置を推定する方法が提案されている。相対位置の初期位置や、相対位置の補正には GPS を使う。しかし、これには GPS の誤差に対する検討と、方位計に対する携帯電話の実装部品の帯磁や、周辺環境の磁力の影響など（磁場ノイズ）の検討を行う必要がある。

本章では現在地の測位ではなく、歩行履歴における測位の低消費電力化を目的とする。GPS を間欠に動作させ、GPS の間欠動作の間の測位を携帯電話に搭載されている地磁気センサや加速度センサによる歩数計を使って測位を補正する。その際、地磁気センサに対する磁場ノイズのフィルタリングや、GPS の誤差の影響を小さくしながら、GPS の連続測位と同じ精度を確保する方法を提案する。

4.2 節は地磁気センサを使った高精度測位技術について述べる。特に、人の直線の歩行形状をリンクと見立て、人の歩行形状は複数のリンクの組み合わせとして考えるリンクモデルについて検討する。4.2.1 節で地磁気センサを使う際の課題について述べ、4.2.2 節では技術要件と関連技術について述べる。4.2.3 節で提案方式について説明し、4.2.4 節で実証実験の結果を示し4.2.5 節でまとめを述べる。

4.3 節は4.2 節で提案したリンクモデルの補正性能の向上を目的とし、バネモデルを用いた歩行軌跡補間技術について述べる。4.3.1 節で背景を述べ、4.3.2 節で提案方式について説明し、4.3.3 節で実証実験の結果を示し4.3.4 節でまとめを述べる。

4.2 地磁気センサを使った高精度測位技術

4.2.1 携帯電話の測位技術

4.2節の目的は携帯電話による歩行履歴情報を取得する事である。その際、GPSと同じ測位精度で、かつ消費電力を下げる必要がある。従来の測位技術はGPSやジャイロ [74]、地磁気や気圧 [74] [8] [73]、無線LAN [75]、RFID [76]、Bluetooth [77]等を用いた技術がある。しかし、GPSは多くの相関回路を必要とするため、消費電力が高いという課題がある。ジャイロを用いた方式は、センサの形状が大きく、携帯電話への実装が困難という課題がある。無線LAN、RFID、Bluetoothはマルチパスの影響による測位精度の劣化や、新たなインフラが必要となる為、広範囲での測位が困難といった問題がある。

以上のような観点から、携帯電話の測位技術には以下の技術要件を満足する必要がある。

(1) 携帯電話へのデバイス実装

携帯電話へ実装可能なデバイスの利用が必要である。

(2) 測位精度と利用エリア

既存の位置情報サービスとの互換性から、GPSと同等な精度と利用エリアの確保が必要である。

(3) 低消費電力

携帯電話の充電サイクルを最低1回/日と考えると、24時間以上の連続稼働が必要である。

4.2.2 関連研究

携帯電話にも搭載されているカメラを使った画像による測位技術 [11]が検討されている。しかし、カメラは単体で数百mAの消費電力が必要であり、常時測位への適用は困難である。

GPSの動作間隔を加速度センサや人の行動履歴から動的に変更する事で消費電力を削減する方法が文献 [78]に示されている。文献 [78]では加速度センサにより人の歩行を認識し、停止時にはGPSの測位を停止する事で消費電力を抑える事を示してい

る。また、人の行動履歴から GPS の測位をしない時間帯を予想し、GPS の動作を制御することにより消費電力を抑える事も可能としている。しかし、この方法では GPS の間欠動作の間の測位を補間することはできない。

GPS が利用できないところでは加速度センサを使った歩数計と、地磁気センサを使った方位計を利用して歩行者の移動経路を求める方式が文献 [8] [79] [80] [81] [82] [83] [84] に示されている。文献 [8] では加速度センサから得られる一步の情報に独自のアルゴリズムによる歩幅を乗じ、それに方位計から得られる方位を加味する事で、位置を推定する自律型の測位方法（単位ベクトル加算方式）が報告されている。これらの仕組みは文献 [74] [73] でも示されている。しかし、この方法は携帯電話の帯磁による地磁気センサへの影響が想定されていない。携帯電話の帯磁の影響を受けると、方位情報に誤差を含んでしまう為、正しい携帯電話の位置を推定する事が困難である。

4.2.3 提案方式

そこで、地磁気センサによる方位情報の変化量を観察する事で、歩行軌跡の形状を捉える方式を考案した。これにより、携帯電話の帯磁の影響を回避できる。その歩行軌跡の形状を間欠動作させた GPS で補正し、正しい歩行履歴を算出する。

以下、上記方式の詳細について説明する。

(1) 消費電力

提案方式が 24 時間以上の連続稼動が可能か評価をする為、試作した携帯電話使って消費電力を測定した。消費電力測定は文献 [78] と同様に、携帯電話のバッテリー部の電流を測定した。GPS は既存の携帯電話で使われているデバイスを使用し、加速度センサと地磁気センサは文献 [85] を利用した。また、地磁気センサによる方位計のポーリング間隔は 100ms とした。オープンスカイの状態では、GPS の平均消費電流を測定したところ、約 90mA であった。また、地磁気センサを使った方位計、加速度センサを使った歩数計及び公衆無線の待機電流を含めたベース電流は約 1.5mA であり、GPS と比較して 1/60 程度の消費電力である事がわかった。また、満充電の電池（公称容量 870mAh）で、GPS を連続して約 1 秒間隔で測位（連続測位）した場合は約 8 時間程度動作する事がわかった。従って、充電電池の放電容量を公称容量の 85% とすると、GPS の連続動作時間を 3 割程度に削減する事で約 24 時間の連続測位が可能となる。

(2) 携帯電話の帯磁による方位誤差への影響

地磁気センサを携帯電話に実装し方位を算出する場合、携帯電話の帯磁による方位誤差が発生することが知られている [72]。本来、地磁気センサは、地球が持つ磁場の強さ(地磁気値)を検出するものである。地磁気は大きさと方向を持つベクトルで表す事ができ、ベクトルの方向を調べることで、方位を計算することができる。携帯電話は、高密度に部品が実装されており、一部に金属やスピーカ、マイクなどの磁気を持った部品が使われている。その金属が外的影響によって帯磁すると、地磁気センサに対して帯磁による磁気成分が付加され、真の地磁気値からの誤差(オフセット値)となり、正しい方位を算出できない。地磁気センサのメーカーは、このオフセット値を算出し、地磁気センサの検出値からオフセット値を減算して正しい方位を計算するキャリブレーションという仕組みを用意している [72] [86]。また、携帯電話に実装される磁気を持った部品は、地磁気センサから十分離れた場所に実装され、その磁気の影響は帯磁した金属部品と等価に扱う事ができる程度小さくなっているため、両部品による磁気の変化を合わせてキャリブレーションが可能となっている。

通常、キャリブレーションは携帯電話を人の手で動かす(携帯電話を水平に1周させる)ことで始まり、十分な方位精度を充たすには、30秒~1分程度動かす必要があると言われている。携帯電話内部の磁場の変化量が常に一定である保証は無く、さらに、磁石などの磁力の強いものに携帯電話を近づけると、オフセット値が変わるため、その都度、携帯電話をキャリブレーションする必要がある。

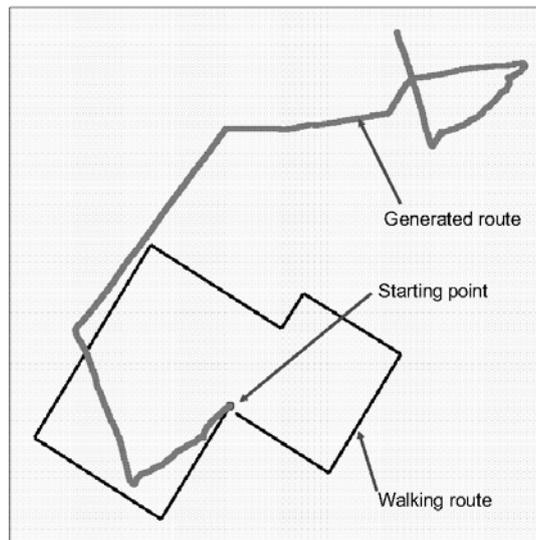


図 4.2-1 方位誤差による測位ズレ

図 4.2-1 は、単位ベクトル加算方式で歩行履歴を算出した一例を示している。便宜上、出発地点は正解の歩行経路（正解経路）の出発点に合わせている。測定された経路（測定経路）と正解経路を重ねると、測定経路に大きな誤差が生じており、地磁気センサが出力する方位の誤差が原因である事がわかる。測定経路を正解経路に近づけるためには、携帯電話の帯磁による方位誤差を改善する必要がある。

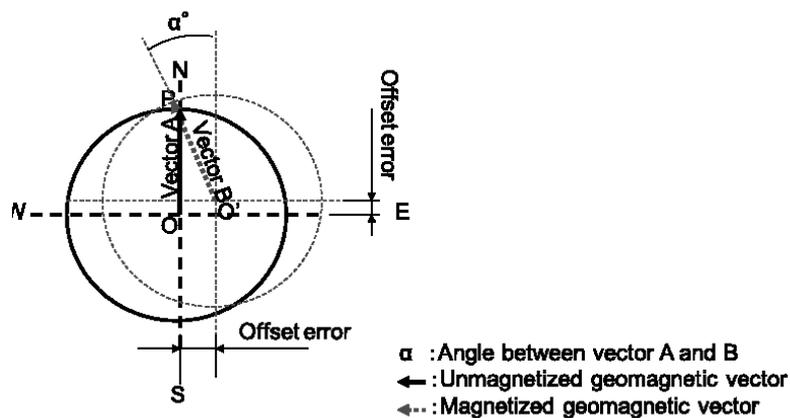


図 4.2-2 方位誤差発生原因

図 4.2-2 に示すように、直行する 2 軸の地磁気センサの場合、オフセット値とは、帯磁していない携帯電話を動かした時、地磁気センサの出力値（地磁気値）を直交する軸にプロットした際に得られる円の中心座標（点 O）と、帯磁している携帯電話を

動かして、地磁気値を直交する軸上にプロットした際に得られる円の中心座標（点 O' ）との差分である。

方位は直行された地磁気値の合成ベクトルで表されるので、磁北を向いている帯磁していない携帯電話であれば、合成ベクトルはベクトル A となるところが、帯磁した携帯電話であると合成ベクトルがオフセット分加算される為、ベクトル B と判断され、磁北より α° の誤差（誤差角）が生じる。そこで本稿では、高層ビルや発電所などの磁場を歪ませる影響物の少ない住宅街で歩行実験を行い、かつ歩行中は携帯電話に磁石を近づけるなど、携帯電話の帯磁量に大きな変化がない状態を想定して検討を進める。

（3）方位計を使った歩行軌跡の形状推定

上記オフセット値は外的影響が新たに付加されない限り安定して同じ値である。つまり、移動に伴う方位の差分を検出すれば、歩行軌跡の形状を知ることが可能である。例えば移動に伴い、地磁気センサからの方位情報が増加すれば、円弧を描きながら移動をしているという事がわかる。移動に伴い、方位情報に変動がなければ、直線に移動している事がわかる。急な方位の変動は、そこが曲がり角であると予想する事ができる。本稿では特に市街地での測位を想定しており、市街地の歩行道路の多くは直線であると想定して、下記の特長を使ってアルゴリズムを構築する。

- 1) 直線を歩けば、方位は誤差を含んでいるが、直線状に歩いた事がわかる
- 2) 角を曲がると、曲がり角度に関係なく、曲がった事がわかる

図 4.2-2 が示すように、直線状に歩くことは、同じ方向に向かって歩くことになるので、誤差角が常に一定となる。例えば、北に向かって歩けば、誤差角は α° のままである。また、図 4.2-1 から、直線状に歩いた経路は測定経路でも直線である事、角で曲がった角度には誤差が含まれているが、曲がった事がわかる。本稿では、以上の単純なアルゴリズムの有効性を検証することを目的とし、歩行者の多い道路を歩行するといった直線状に歩行ができそうにないより複雑な状態は想定せず、道路に沿って直線状に歩行する場合を対象として検討を進める。

(4) GPSの間欠動作と地磁気センサの出力補正

そこで、上記2点の特徴を利用して方位誤差を解消する。前述から方位誤差には以下の2点の誤差があることがわかる。

- 1) 絶対方位誤差：測定経路と、正解経路の方位の誤差
- 2) 相対方位誤差：曲がり角の角度の誤差

これらの誤差をGPSの間欠動作による測位情報を用いて補正（補正経路）する。基本アルゴリズムを以下に示す。

加速度センサによる歩数と、地磁気センサが出力する方位情報の変化から、歩行軌跡の直線形状を抽出し、曲がり角も判断する。GPSによる位置情報を用いて、測定経路の直線部分の方位を補正することで、絶対方位誤差の補正が可能となる。また、測定経路を角で分け、前後の直線部分の方位を補正することで、相対方位誤差を補正することができる。（図4.2-3参照）

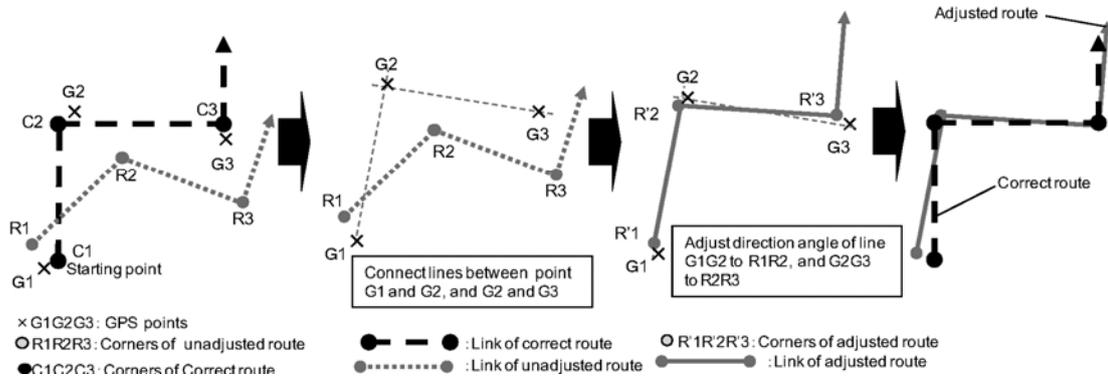


図 4.2-3 GPSを使った方位補正方法

図4.2-4は、測定経路の直線部分の始点と終点で、GPSによる測位をした場合の、補正経路の位置精度を示している。理論的には、GPSの測位精度を半径 r (m)とすると、補正経路の位置精度（正解経路との差）を r (m)以内（図4.2-4点線の範囲内）に収めることができる。ここで、本論文では提案アルゴリズムの有効性の確認および議論を簡単にするため、GPSの測位精度の半径に影響を与えるマルチパス等に関しては考慮していない。

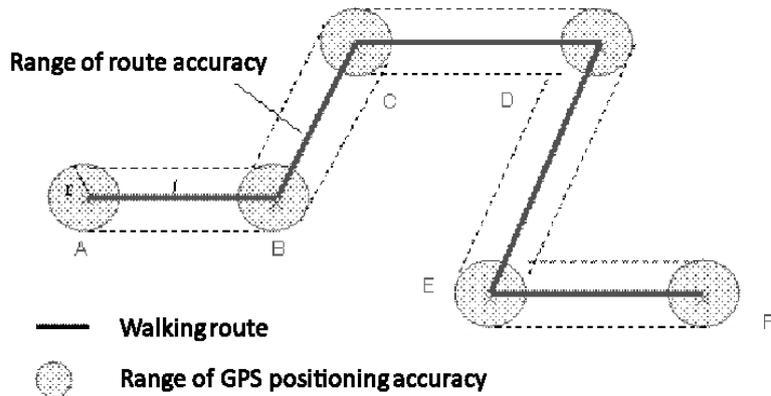


図 4.2-4 歩行軌跡における位置精度

(5) GPS の測位タイミング

基本アルゴリズムをベースに GPS 測位のタイミングを考える。正解経路と補正経路の位置の誤差を小さくする為、以下の 2 方式を提案する。

- ・{方式 1}: 曲り角で GPS の測位を行い、2 箇所角を通る直線から、補正経路の絶対方位誤差を計算する

- ・{方式 2}: 直線部分で 2 箇所以上の GPS の測位を行い、近似直線をもとめ、近似直線から補正経路の絶対方位誤差を計算する

<方式 1: 曲り角で GPS の測位をする方式>

曲り角と曲り角の間の直線の長さを利用し、正解経路と補正経路の位置の誤差を少なくする方式である。一辺の直線が長ければ GPS による測位誤差の影響を低減させる事ができる (図 4.2-5)。歩き始め、あるいは、曲り角で GPS の測位を行い、2 点の GPS の測位地点を通る直線を計算し、絶対方位を計算する。

この方式の課題は、GPS の測位に時間がかかる為、地磁気センサで曲り角を検出してから GPS の測位を開始すると、実際の測位地点は曲り角を過ぎた後になる点である。GPS の測位にかかる時間は、オープンスカイで 4~7 秒程度であり、曲り角から約 5~10m 離れた場所で測位を行う。そこで、曲り角から進んだ距離を、算出した方

位情報に沿って、GPS による位置情報から引いたものを、曲り角における GPS による位置情報とする。その時の方位情報には帯磁による方位誤差が含まれる。

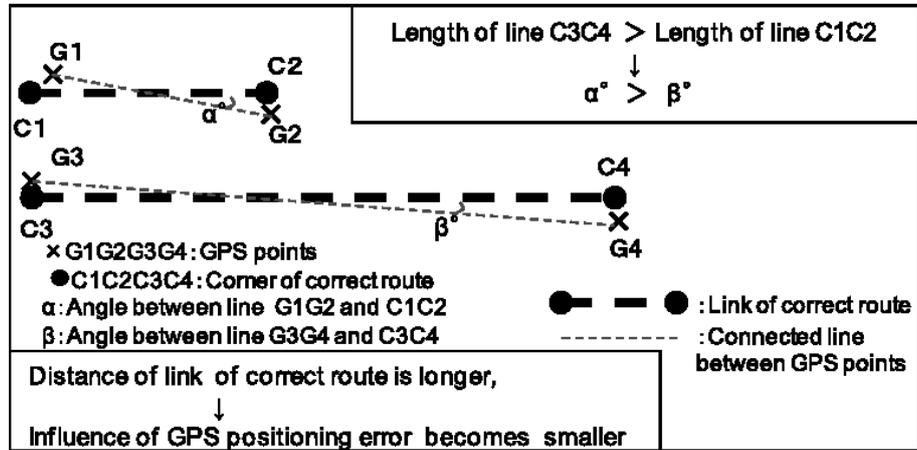


図 4.2-5 曲り角でGPSを測位する方式

<方式2: 直線部分で2点以上GPS測位する方式>

直線状に歩行中に、複数回GPSによる測位を行い、測位による複数の位置情報から近似直線を算出し、補正経路とする方式である。近似直線は、最小二乗法を用いて求め、近似直線から絶対方位誤差を計算する。(図4.2-6参照)

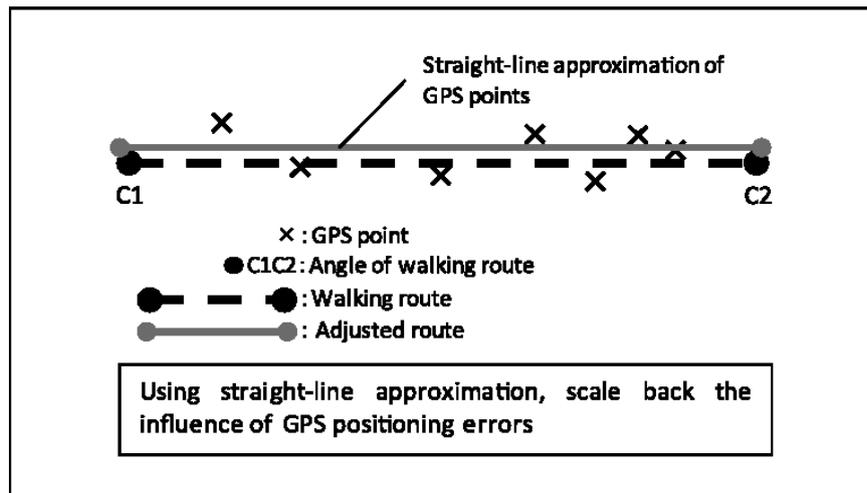


図 4.2-6 直線部分で複数点GPS測位する方式

4.2.4 実機検証

(1) 実験環境

提案手法を、試作した携帯電話を使って評価した。評価時の実験環境を下記に示す。携帯電話に搭載されているGPSは、1測位地点あたりのGPSの測位回数の設定が可能である。これは、複数回測位することで、GPSの測位精度の向上が期待できるための機能である。しかし、測位回数の増加に応じて消費電力も増加する。また、評価時はGPSの測位時に被験者が立ち止まるなどは行わず、歩き続けるものとする。

- ・ 評価機は4.2.3節で使用した試作携帯電話を使用する
- ・ 地磁気センサ/加速度センサは文献 [85]と同等品を使用する
- ・ 評価した歩行経路は総歩行距離が1193.5mである。[72]のGoogleマップ上に重ねた角Aから角Iをもつ経路で行う。角Aはスタート地点であり、角Iはゴール地点である。また、角Aと角Iは同じ場所である
- ・ 被験者は、地磁気センサとGPSを搭載した携帯電話を掌の上に乗せ、歩数計を搭載した携帯電話を腰のホルダーに装着し、歩行する
- ・ 歩数情報と方位情報は100msec間隔で取得する
- ・ 被験者数は5名（男性2名、女性3名）で行う
- ・ 各被験者の歩幅は身長×0.41で算出（表4.2-1）する

表 4.2-1 被験者と歩幅

被験者	W 1	W 2	W 3	M 1	M 2
歩幅(cm)	65.6	67.24	63.14	68.47	72.57

・ GPS の測位のタイミングは方式 1 (曲がり角で GPS の測位をする方式), 方式 2 (直線部分で 2 点以上 GPS 測位する方式), GPS の連続測位の 3 種類行なう

・ 1 測位地点あたりの GPS の測位回数は 5 回, 10 回の 2 種類行なう

・ 方式 2 は図 4.2-7 の歩行経路において, 48m の最短辺 (角 E と角 F の間の直線) を除き, 各辺で 3 点以上の GPS の測位を実現するため, 60 歩 (約 40m) 毎に GPS による測位を行なう

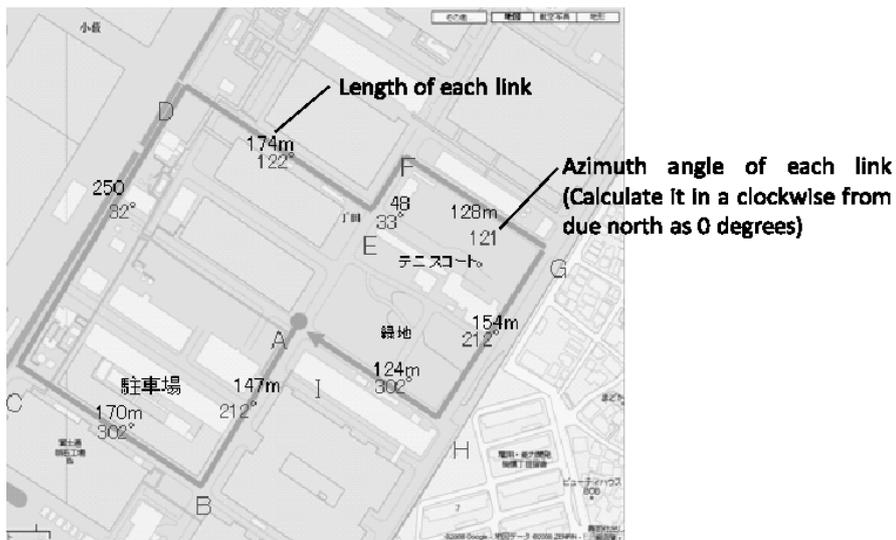


図 4.2-7 実験歩行経路

方位精度は, 絶対方位誤差で比較する.

位置精度は正解経路と補正経路の距離差の平均と, 正解経路と補正経路の距離差の標準偏差を足したものとし, 次式で定義する.

$$\ell_i = \sqrt{(x_i - cx_i)^2 + (y_i - cy_i)^2} \quad (1)$$

$$\bar{\ell} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ell_i \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ell_i - \bar{\ell})^2} \quad (3)$$

ここで,

経路精度・・・距離差の平均

σ ・・・ $\bar{\ell}$ +差の標準偏差

ℓ_i ・・・地点*i*における正解との距離

x_i, y_i ・・・補正結果の座標値

cx_i, cy_i ・・・正解座標

である.

(2) 実験結果

図 4.2-8 は GPS の連続測位した測位結果をマップ上にプロットし正解経路に重ねたものである. 図 4.2-8 の各点が GPS の測位結果である.



図 4.2-8 GPS 単体連続測位による歩行軌跡

図 4.2-9 に、出発地点を歩行開始点に重ねた場合の単位ベクトル加算方式の一例を示す。

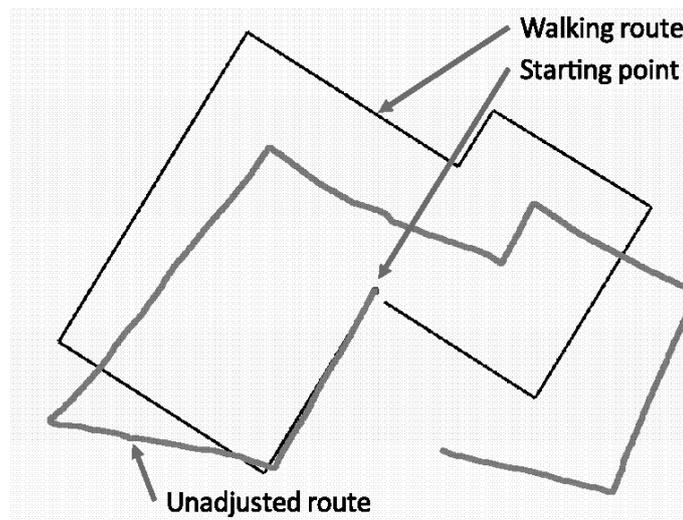


図 4.2-9 単位ベクトル加算方式での歩行軌跡

図 4.2-10, 図 4.2-11 は、図 4.2-9 が示す単位ベクトル加算方式の経路に対し方式 1, 方式 2 で補正をした結果である。正解経路に近い経路に補正されている事がわかる。図 4.2-10, 図 4.2-11 の黒い点は GPS によって測位された位置であり、5 回測位/測位地点を被験者の代表値で示している。

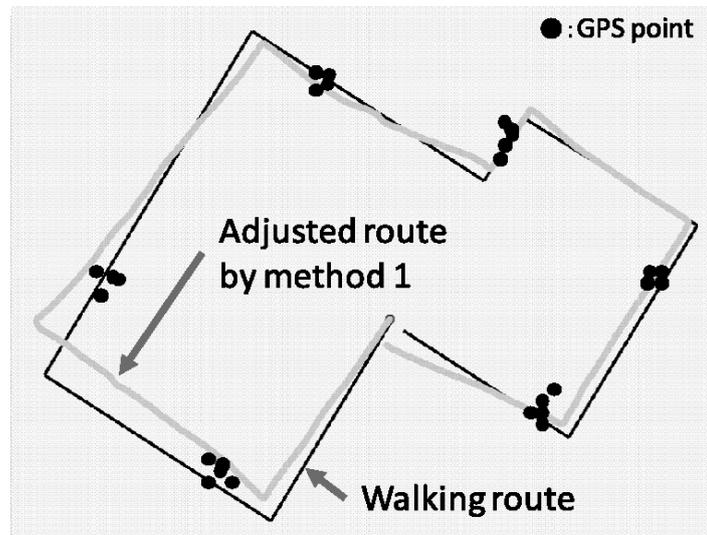


図 4.2-10 方式1による歩行軌跡

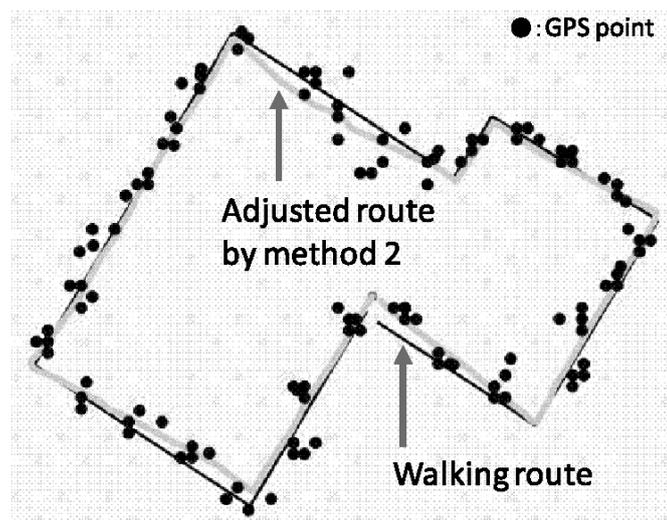


図 4.2-11 方式2による歩行軌跡

<移動軌跡の精度>

単位ベクトル加算方式，方式1（曲り角でGPSの測位をする方式）及び方式2（直線部分で2点以上GPS測位する方式）による補正経路の位置精度を表4.2-2に示す．単位ベクトル加算方式の位置精度は出発地点を歩行開始点に重ねて算出した，方式1，方式2の位置精度は，出発地点の座標をGPSで測位して計算した．また，GPS連続測位による位置精度の平均値は12.88mであった．方式1と方式2の位置精度は，単

位ベクトル加算方式の位置精度よりも明らかに向上しており、GPS の連続測位と比較してほぼ同じ精度であると思われる。

表 4.2-2 各方式による精度比較

1 測位あたりのGPS 起動数	単位ベクトル加算方式	方式 1	方式 2
5	190.6m	16.0m	14.2m
10	190.6m	14.6m	12.6m

表 4.2-2 の GPS の測位回数による精度への影響について、単位ベクトル加算方式、方式 1、方式 2 を要因 A、GPS の 1 測位地点あたりの GPS 測位回数である 5 回と 10 回を要因 B として分散分析および多重比較を行ったところ、要因 A における単位ベクトル加算方式と方式 1、単位ベクトル加算方式と方式 2 において有意水準 5% で有意となった。一方、要因 B である GPS の測位回数である 5 回と 10 回では有意とならなかった。このことから、現状では、GPS の 1 測位地点あたりの GPS 測位回数によって位置精度に差は無いといえる。つまり、消費電力の観点から言えば、1 測位地点あたりの GPS 測位回数は 5 回で十分であるといえる。

また、実験環境における GPS の測位精度（半径 r ）を測定したところ、22.4m であり、GPS の測位精度より位置精度が良い評価データの割合は、方式 1 で 100%、方式 2 で 90% ある事がわかった。これにより 4.2.3 節で示した理論上の位置精度をほぼ満足しているといえる（表 4.2-3）。

表 4.2-3 各方式における GPS の測位精度より位置精度がよい評価データの割合

1 測位あたりの GPS 起動数	単位ベクトル加算方式	方式 1	方式 2
5	0%(0/10)	100%(10/10)	88.9%(8/9)
10	0%(0/10)	100%(10/10)	88.9%(8/9)

<補間経路と方位精度>

単位ベクトル加算方式, 方式 1 (曲り角で GPS の測位をする方式), 方式 2 (直線部分で 2 点以上 GPS 測位する方式) の方位精度を表 4.2-4 に示す.

表 4.2-4 各方式による方位精度比較

1 測位あたりの GPS 起動数	単位ベクトル加算方式	方式 1	方式 2
5	12.7°	5.2°	5.7°
10	11.2°	4.8°	4.7°

方式 1 及び, 方式 2 は単位ベクトル加算方式より方位精度が向上する事がわかった.

<消費電力分析>

GPS による測位は, GPS 衛星の捕捉処理と, 位置を算出する処理に分けられる. 連続測位の場合は 1 回目の測位以降, GPS 衛星の補足処理は割愛される. 測位に数十秒以上の間隔が空いた測位 (単独測位) の場合は, GPS 衛星に搭載されている原子時

計と携帯電話の時計に誤差が生じる為、再度、GPS 衛星の捕捉処理が必要となる。例えば、5回の連続測位の場合は、1回のGPS衛星補足処理と5回の位置算出処理が必要である。5回の単独測位の場合は、5回のGPS衛星補足処理と5回の位置算出処理が必要である。つまり、同じ測位回数でも連続測位と単独測位ではGPSの稼働時間に差が出る。従って、GPSの測位回数で比較すると、正確な消費電力の比較をすることができない。そこで、GPSの測位回数ではなく、GPSの稼働時間で消費電力の比較する事とする。本稿では、加速度センサと地磁気センサとGPSを併用しているので、各センサの消費電力をGPSの稼働時間に変換する。加速度センサと地磁気センサは歩行中連続稼働であり、消費電力はGPSの消費電力の1/60(4.2.3節)として計算する。評価データの平均歩行時間は約847秒であることから、平均歩行時間の1/60が加速度センサと地磁気センサのGPSの換算時間となる。間欠動作したGPSの稼働時間は、1測位地点あたりのGPSの1回目測位に約5.5秒かかり、2回目以降は1秒かかるので、1測位地点あたりのGPS測位回数に応じて計算して求めた。例えば、GPS測位回数が5回の方式1の場合は次の様に計算できる。

- ・ GPSの1測位地点あたりの消費電力は、測位回数が5回/1測位地点で単独測位であるので、 $5.5 \text{ 秒} + 1 \text{ 秒} \times 4 \text{ 回} = 9.5 \text{ 秒}$ である。
- ・ 1実験あたりの消費電力は、GPS測位地点数が7箇所なので、 $9.5 \text{ 秒} \times 7 \text{ 回} = 66.5 \text{ 秒}$ である。
- ・ 1実験あたりの地磁気センサと加速度センサの消費電力は平均歩行時間の1/60なので、 $847 \text{ 秒} \times 1/60 = 14.1 \text{ 秒}$ である。
- ・ 1実験当りの総消費電力は、GPSと地磁気センサと加速度センサの消費電力の合算であるから、 $66.5 \text{ 秒} + 14.1 \text{ 秒} = 80.6 \text{ 秒}$ となる。また、GPS連続測位によるGPS稼働時間は歩行時間と一致するので、847秒である。換算時間の結果を表4.2-5に示す。

表 4.2-5 GPS 稼働時間

1測位あたりのGPS起動数	単位ベクトル加算方式	方式1	方式2
5	847秒	80.6秒	256.9秒
10	847秒	115.6秒	384.7秒

方式1（曲り角でGPSの測位をする方式）、方式2（直線部分で2点以上GPS測位する方式）は、加速度センサと地磁気センサによるGPS相当の稼働時間は同じであるが、間欠動作したGPSの稼働時間が異なる。方式1は曲り角でGPSの測位するので、歩き始めと曲り角の数のGPSの測位時間を乗じた値がGPSの稼働時間になるが、方式2は直線部分でGPSが3～4回間欠測位するため、方式1より稼働時間が長くなる。

表4.2-6に、GPS連続測位と比較したGPS稼働時間の削減率を示す。表4.2-6が示すようにGPSの連続測位に対し、50%から90%、GPS稼働時間を削減することができた。従って、4.2.3節から、方式2のGPS取得数10の場合を除き、連続測位24時間を達成できるがわかる。

表 4.2-6 GPS 稼働時間の削減率

1 測位あたりのGPS起動数	方式1	方式2
5	90.5%	69.7%
10	86.4%	54.6%

（3）まとめと考察

単位ベクトル加算方式に対する経路補正の方式として、方式1（曲り角でGPSの測位する方式）および方式2（直線部分で2点以上GPS測位する方式）を考案し比較して以下の知見を得た。

- ・ 方式1と方式2は単位ベクトル加算方式と比較し、方位精度と位置精度が向上する
- ・ 1測位地点あたりのGPS測位回数（5回または10回）によって、測位精度に変化は無い

- ・ 方式 1, 2 共に GPS 測位精度（半径 r ）で囲まれた範囲にバラツキは収まる
- ・ GPS 連続測位と比較して，方式 1, 2 は消費電力を 5 割～9 割削減できる

方式 2 においては，複数の GPS の測位点を用いて最小二乗法による測位精度の改善を期待した．しかし，表 4.2-2 の結果から GPS 連続測位と比較してほぼ同じ精度である事がわかった．そこで，GPS 連続測位の全測位点を使って最小二乗法にて軌跡を求める方式（方式 3）と比較した．表 4.2-7 に比較結果を示す．

表 4.2-7 各方式による精度比較

	G P S 連続測位	方式 2	方式 3
平均値	7.72	8.0	5.7
誤差	5.15	4.7	3.6
合計	12.88	12.6	9.3

単位 m

表 4.2-7 より，方式 3 が他の方式と比較して測位精度が高い事がわかった．これにより，方式 3 を利用する事で，GPS 連続測位の精度より精度向上が期待できる事がわかった．

4.2.5 むすび

携帯電話を携帯する人の歩行履歴を求める方法として，GPS の連続測位を用いる場合は消費電力が大きく，携帯電話の充電サイクルに合わないという課題を提起し，それを解決する仕組みとして GPS より低消費電力な加速度センサや地磁気センサを補間的に利用する事を提案した．しかし，地磁気センサは携帯電話の帯磁により誤った方位情報を出力する為，その方位情報を使って歩行軌跡を算出する事はできない．そこで，人の移動に伴う方位情報の変化量を観察する事により，人の歩行軌跡の形状を推定し，GPS の間欠測位による位置情報を使って，人の歩行履歴を補正する事が可能である事を示した．

今後の展開には GPS が利用できる屋外だけでなく、地下街の様な GPS 波が届かない場所での測位も検討する必要がある。また、振り向く、立ち止まるなど、歩行に伴う想定外の人動きに対する対処も必要である。人の歩幅誤差については、本稿では人の身長に対して係数を乗ずる事で歩幅を算出しているが、文献 [8] のように移動速度によって歩幅を決める方式や文献 [87] のように歩行周波数によって歩幅を決定する方式もあり、本稿方式と比較する必要があると思われる。

今後、上記項目を検討し、より実用的な技術にしていく予定である。

4.3 バネモデルを用いた歩行軌跡補間技術

本節の目的は4.2節で論じたリンクの生成方法やリンクの補正方法と比較して、より高性能な方法を提案する事である。

4.3.1 従来技術

文献 [88]は、過去のGPSの測位情報を使って、歩行の経路（歩行経路）精度を向上する方法を提案している。過去の歩行履歴と現在のGPSの測位による歩行履歴を比較して同じルートと判断されると、過去の歩行履歴の情報を使って測位誤差を補正する。過去の歩行履歴情報が6回程度あれば改善されるとしている。しかし、過去の歩行履歴がなければ補正する事ができない。

文献 [89]は、方位センサの変化とGPSによるハイブリッド経路推定方式を提案している。方位センサを用いて方位の変化を検出し、方位の変化時にGPSの起動を判断する。変化前後の方位と方位変化位置を用い移動経路を過不足なく特定できる方位変化位置でGPSを起動する。方位変化位置とそれまでの経路の方位が分かれば、歩行経路を推定する事ができ、その上でGPSの測位回数を減らすことができるとしている。しかし、この方式は方位が絶対的に正しい事を前提としている為、端末部品の帯磁によって、方位情報に誤差が含まれる [90]と経路を正しく推定する事ができない。また、方位センサを使った経路の推定は、相対的な経路であり、推定された経路を正しい経路に補正する為にGPSを使うとしているが、GPSによる位置情報には誤差が含まれる為、方位センサが正しい方位を算出しても、GPSによる位置情報の誤差を解消しなければ、正しい経路を推定する事ができない。

4.2節では、方位の変化の情報から、人の歩行する軌跡（歩行軌跡）の推定と曲がり角の検出を行った。歩行軌跡を曲がり角で複数の歩行軌跡に分割し、それぞれの歩行軌跡をGPSの位置情報を使って補正し、歩行経路を推定する。文献 [89]と違って、誤差を含まない方位を利用するのではなく、方位の変化による差分を利用する為、方位の情報に、端末の帯磁による方位誤差が含まれていても、正しい歩行経路を推定できる。しかし、帯磁によって、方位の変化による差分が小さくなると、曲がり角や歩行軌跡を検出する感度が劣化し、正しい経路推定をする事ができない。図 4.3-1は、帯磁した携帯電話を人が歩行しながら90度旋回する場合の一例を示している。説明を容易にする為、地面に水平に設置した2軸 (X,Y) の地磁気センサで帯磁による感度の

劣化を説明する。円Oは端末が帯磁していない状態で、地磁気センサを地面に水平に1回転させた時に、地磁気センサが検出した磁束密度の大きさを表している。円Pは円OがベクトルOP分だけ地磁気センサに対して、地磁気以外の磁気成分が付加された（帯磁オフセット）状態である。この状態で人が歩行しながら地面に水平に回転する（曲がり角を曲がる）と、その回転角度は本来 $\angle RPR'$ が正しいが、帯磁オフセット分観測される磁束密度がシフトしている為、計算される回転角度は $\angle ROR'$ となり、正しい回転角度より小さい角度になる。この現象は帯磁オフセットが大きくなるとさらに顕著に現れる。図 4.3-2は図 4.3-1と同様に第一象限で90度回転した時、帯磁オフセットと計算される回転角度の関係を示している。携帯電話の帯磁量は100uT以上になる事が実験で確認されており、その場合、90度の回転角度は帯磁オフセットによって5度以下として認識される事がわかる。回転角度が小さく見えると、ノイズとの区別が困難になる。また、文献 [90]は、歩行軌跡をGPSで補正する際、曲がり角でGPS測位をする方法（方式1）や直線歩行時に複数回GPSで測位して、測位値を使った近似直線で補正する方法（方式2）が提案されている。しかし、この方法は隣接した歩行軌跡との関係を考慮していない為、経路補正の誤差が大きくなる事が予想される。また、方式1の場合は、曲がり角でGPSによる測位を行う為、曲がり角でGPSの測位ができない場合、経路補正ができなくなる。

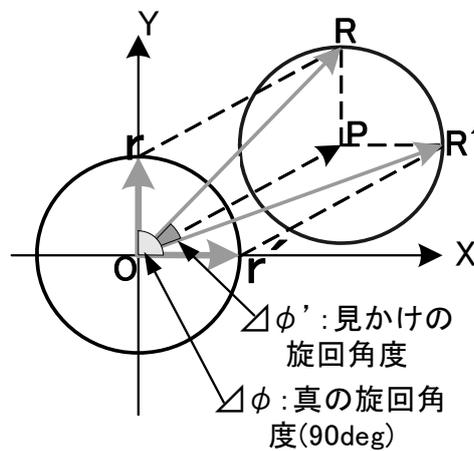


図 4.3-1 帯磁による旋回角変動の原因

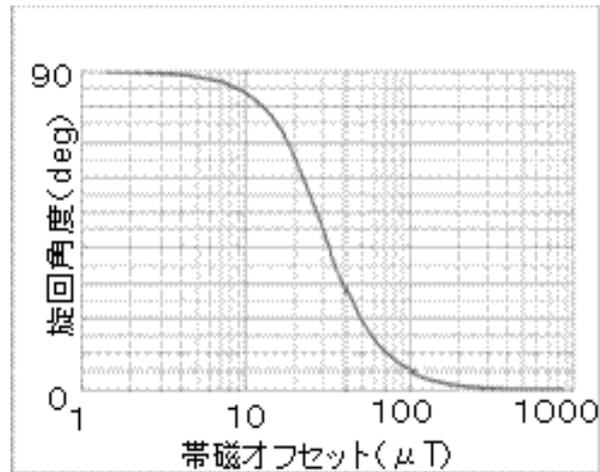


図 4.3-2 帯磁オフセットと旋回角度出力の関係

4.3.2 提案手法

本稿では、地磁気センサによる曲がり角の検知によって、図 4.3-3のように人の歩行軌跡を推定し、推定した歩行軌跡を図 4.3-4のようにGPSによる位置情報を用いて補正する方法を提案する。その際、曲がり角の検出を方位の変化ではなく、磁束密度の変化を使って検出する。そして、GPSによる補正を行う際、GPSの測位誤差を弾性バネの変位として扱うバネモデルを使って補正する方法を提案する。

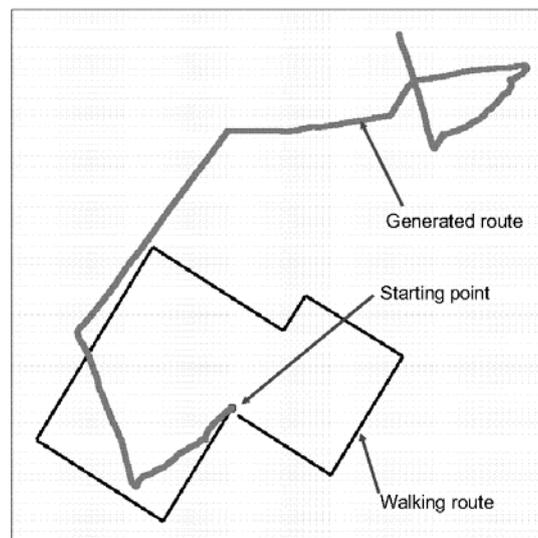


図 4.3-3 帯磁による測位ズレ

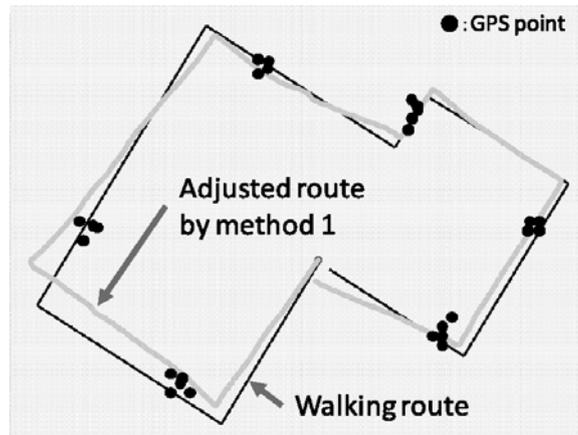


図 4.3-4 GPS による方位補正

(1) 地磁気を使った曲がり角検出方式

携帯電話に搭載された地磁気センサは、磁束密度を検出する。人が直線状に歩行すれば（同じ方向に歩けば）、磁束密度の変化はないので、直線に歩行している事がわかる。人が角を曲がると磁束密度が変化するので角を曲がったことがわかる。図 4.3-5 に歩行に伴う磁束密度の変化を示す。51歩目で角を曲がった事による磁束密度の変化がある。人が曲がり角で曲がる際、基本的には地面に水平な旋回しか起こらない。従って、3軸の地磁気センサを利用する事で、携帯電話の姿勢に関係なく旋回における磁束密度の変化を捉える事ができる。磁束密度の変化量は式1に示すように、3軸の磁束密度(H_{xn}, H_{yn}, H_{zn})の変化量の総和で表す事ができる。磁束密度の変化量がある閾値を超えると、人が曲がったと判断する。

$$\Delta H = \sqrt{(H_{x_1} - H_{x_2})^2 + (H_{y_1} - H_{y_2})^2 + (H_{z_1} - H_{z_2})^2} \dots (1)$$

歩行時は、地磁気以外の磁場（外乱ノイズ）によって、一時的に磁束密度の変化が検出される事がある。その為、式1による変化量 ΔH のみを検出していると、外乱ノイズも曲がり角と誤検出する。図 4.3-6 に外乱ノイズによる磁束密度の変化の例を示す。51歩目に外乱ノイズによる磁束密度の変化を確認できる。図 4.3-5 の51歩目の変化量 ΔH と図 4.3-6 の51歩目の変化量 ΔH は変化量の観察のみでは区別する事ができない。しかし、図 4.3-6 に示す様に変化は一時的なものであり、すぐに元の磁束密度に戻っている事がわかる。従って、変化量 ΔH と共に、磁束密度の変化も観察し、磁束密度が変動後、元の磁束密度に戻れば外乱ノイズとして判断し、曲がり角とは判

断しないアルゴリズムで外乱ノイズを除去する事とした。この外乱ノイズに対する変化を観察する時間の歩数（観察歩数）は、取得したデータを分析したところ、20歩以内で対象外乱ノイズの95%以上が含まれる事がわかった。そこで、観察歩数は20歩とした。

図 4.3-5で測定された磁束密度の総和は、角軸の二乗和で求められ、おおよそ $54\mu\text{T}$ である。また、図 4.3-6で測定された磁束密度の総和はおおよそ $61\mu\text{T}$ である。測定した環境の地磁気はおおよそ $46\mu\text{T}$ であるので、測定に使用した端末は $8\sim 15\mu\text{T}$ ほど地磁気とは別の磁場の影響をうけている事がわかる。図 4.3-5, 図 4.3-6ともに、移動中も安定して地磁気以外の磁場の影響を受けている事から、原因は測定端末の帯磁であると考えられる。本提案では、磁束密度の変化量を使うので、帯磁の影響は、計算上無くなる。そこで、携帯電話に磁石を近づけて人工的に帯磁させて従来手法 [90] と提案手法の性能を比較した。図 4.3-3に示すルートの曲り角の検出を両手法で行ったところ、従来手法は7ヶ所の曲り角中3ヶ所は帯磁の影響で曲り角による方位変化が微小となり、ノイズと判別がつかなくなった。一方、本提案手法は帯磁の影響がない為、全ての曲り角を認識した。この結果より、従来手法 [90] と比較して提案手法には優位性がある事がわかった。

本稿では、人は直線状に移動するとして、曲線状の移動や、人を避けるような移動は想定しない。また、人の歩幅は身長に0.4を乗じた値として検討を行い、移動距離は加速度センサを使った歩数計による歩数と歩幅を乗じて算出する。

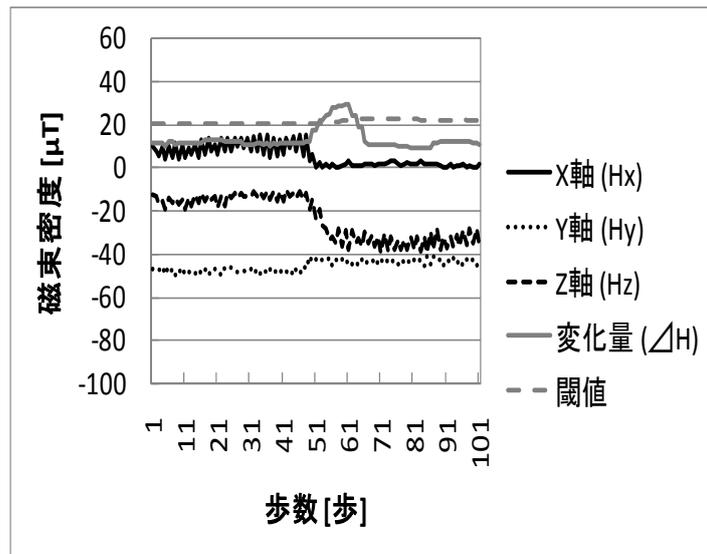


図 4.3-5 曲がり角での地磁気の変化

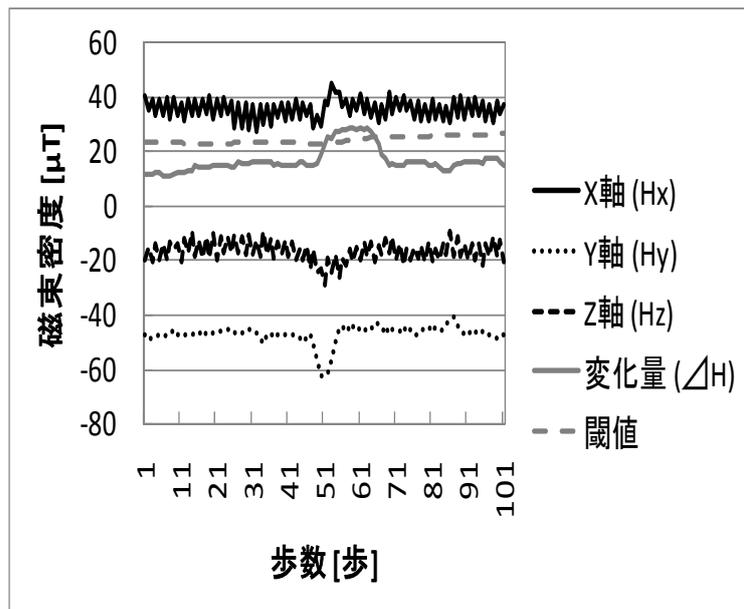


図 4.3-6 一時的な磁場の変化

磁束密度に変化のない歩行は直線状に歩いていると考えられるため、歩行経路は移動距離の長さを持つ線分（リンク）であるといえる。磁束密度の変化によって検出される曲がり角は、リンクとリンクを繋ぐ節に相当する。従って、磁束密度の変化と歩数の検知によって、リンクのつながりの情報（リンク情報）を得る事ができる。ただ

し、節を中心とするリンクとリンクが成す角度は、携帯電話の帯磁によって誤差を含んでいる。

(2) バネモデルを使った歩行軌跡補正方式

地磁気の変化を観察して得られたリンク情報に、GPS によって測位された地点 (GPS 測位点) を使って補正を行う。補正に最適な処理方法と、補正に影響を与えるリンク数を調査するため、シミュレーションを行った。図 4.3-7 にシミュレーションモデルを示す。●と■が並んでいる直線はシミュレートするためのリンク情報である。●はリンク間の節を示している。■はリンク上で GPS が測位を完了した場所 (GPS 測位地点) を示している。今回はリンク毎に 1 回 GPS を起動するとして検討を進める。また、補正に影響を与えるリンク数の調査に対しリンク長の影響を避ける為、リンク長は全て同じとした。円中の+は GPS 測位点を示している。円の半径は GPS の誤差範囲(誤差円)を示している。破線は正解の経路 (正解経路) を示している。GPS 測位点は GPS の誤差を考慮に入れ、誤差円に入る様に乱数を使って正解経路に沿って設置した。このシミュレーションモデルを使って、リンク情報を GPS 測位点に合わせて補間する方法を検証する。結果的にリンク情報が正解経路に近づく事を期待している。

本稿では、リンク情報を GPS 測位点に合わせて補間するのに、GPS の誤差を弾性バネの変位に置き換えたバネモデルを使って検討を行う。バネモデルとは、一般的にグラフィレイアウトなど、グラフを視覚的に見やすいレイアウトにする物理的手法の一つとして用いられている [91]。また、アドホックネットワーク上の端末間の相対位置を把握する方法としても検討 [92]されている。

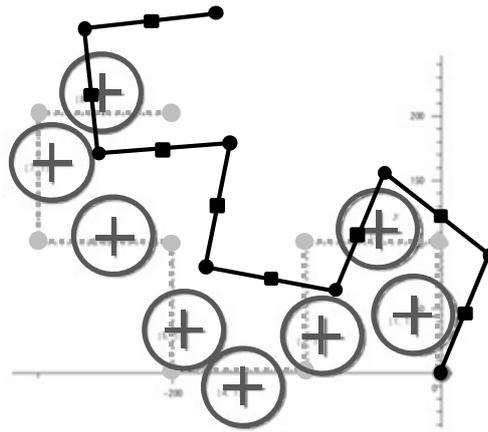


図 4.3-7 リンク情報を GPS で補正するシミュレーションモデル

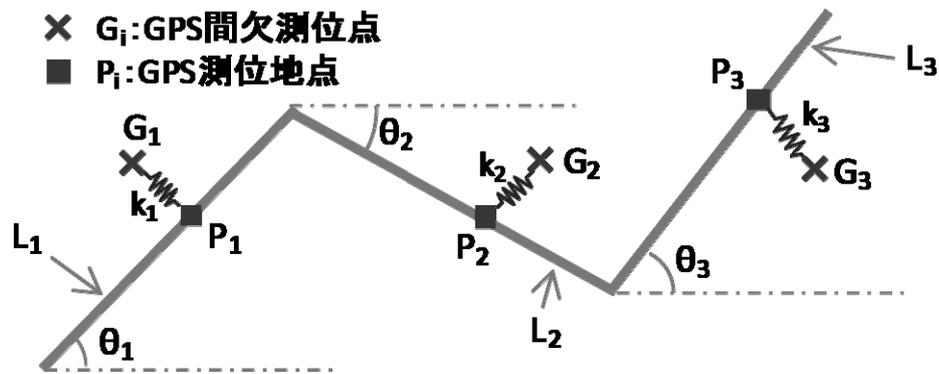


図 4.3-8 バネモデル概要図

GPS の誤差を弾性バネに置き換える為、GPS 測位地点と GPS 測位点の間をバネ定数 k の仮想バネで接続したモデルで検討する。GPS の測位誤差を弾性バネの変位の位置エネルギーとして扱い、全てのバネが安定した状態、つまり、バネの変位の位置エネルギーが最も小さくなった状態を最も正解経路に近いリンク情報と考える。図 4.3-8 にバネモデルの概要図を示す。 $L_1, L_2, L_3 \dots L_n$ はリンク長である。 $\theta_1, \theta_2, \theta_3 \dots \theta_n$ はリンク間の相対角を、水平軸を基準に表している。 $G_1, G_2, G_3 \dots G_n$ は GPS 測位点を表し、 $P_1, P_2, P_3 \dots P_n$ は GPS 測位地点を表している。

弾性バネの位置エネルギーを求める式を式 2 に示す。

$$E = \sum_{i=m}^l \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} k_{ij} (G_{ij} - P_{ij})^2 \quad \dots (2)$$

n は 1 リンク内の GPS による測位回数を示す. 本シミュレーションでは 1 リンクあたりの測位回数は 1 回なので, $n=1$ となる. m は補間を行う開始リンク, l は補間を行うリンク数, k はバネ定数を示す. i 番目のリンクから $i+l-1$ 番目までのリンクに接続されたバネの位置エネルギーの総和を示している. L_n, G_n, P_n はそれぞれ既知であるため, θ_n を E が最小になるよう最適化を行う.

数値の最適化は, 全てのパターンを計算する方法 (総当たり法), 最急降下法, PSO 法 (粒子群最適化) を用いた. 各最適化法の概要を下記に示す.

- 総当たり法: リンクの全角度 (0° から 360° まで) の組み合わせについて位置エネルギーを算出し, 最も小さい解を算出する方法である. 今回は処理時間を考慮して, 角度の分解能を 8 度に設定して行った.

最急降下法: 関数の傾きから, 関数の最小値を探索する勾配法の一つである. ここでは, $\theta = (\theta_m, \theta_{m+1}, \dots, \theta_{m+l-1})$ を引数とする関数 $f(\theta)$ とし, θ が状態 $\theta^{(k)}$ の時, 各要素に対する一階偏微分によって次のように値を更新する.

$$\theta^{(k+1)} = \theta^{(k)} - \alpha \begin{bmatrix} \frac{\partial f((x)^{(k)})}{\partial \theta_m^{(k)}} \\ \frac{\partial f((x)^{(k)})}{\partial \theta_{m+1}^{(k)}} \\ \vdots \\ \frac{\partial f((x)^{(k)})}{\partial \theta_{m+l-1}^{(k)}} \end{bmatrix}$$

α は一回で更新する数値の割合を決めるパラメータである. 全ての傾きが 0 の時に計算を終了して最も近い解を求める. 初期値は全て 0° で, 探索範囲は -2π から 2π までと設定した.

- PSO 法: 多次元空間において位置と速度を持つ粒子群でモデル化されている手法である. 各粒子 k には, それぞれ異なる初期値 $\theta^{(k)} = (\theta_m^{(k)}, \theta_{m+1}^{(k)}, \dots, \theta_{m+l-1}^{(k)})$ をランダムで与え, 自身の位置エネルギーと全粒子の中で最も小さい位置エネルギーの情報から, 次のように値を更新する.

$$\begin{aligned} \theta^{(k)} &= \theta^{(k)} + v \\ v &= wv + c_1 r_1 (\hat{\theta} - \theta^{(k)}) + c_2 r_2 (\hat{\theta}_g - \theta^{(k)}) \end{aligned}$$

w は, 慣性定数であり, 多くの場合 1 より若干小さい値が最適である. 今回は 0.9 に設定した. c_1, c_2 は粒子群のうちでよい位置に向かう粒子の割合である. 今回は, $c_1=1, c_2=0.9$ と設定した. また, r_1, r_2 は, $[0,1]$ の範囲の値をとる乱数である. θ は, その

粒子がこれまでに発見した最適な値, θ は全体でこれまでに発見した最適な値である. 今回は粒子数を $k=10$, 繰り返し回数を 20 回に設定して, 最も近い解を求めた.

また, 全てのリンクに対して, 位置エネルギーの最小値を求めると, リンク数が増加すると計算量も指数的に増加してしまう. しかし, ある L_n に対して影響があるリンクはその近隣のリンクが最も影響が大きいと考えられる. そこで, リンクの配置に影響を与えるリンクの数 (深度) について調査を行った. 深度内のリンクで最適化を行い, 最適化が終了すると, 1 リンクをシフトさせていく方法で検討する. 例えば, 総リンク数 4, 深度を 3 とすると, まず, L_1 から L_3 で位置エネルギーが最小となる θ_1 を求める. 次に, リンクを一つシフトさせて, L_2 から L_4 で位置エネルギーが最小となる θ_2 を求める. θ_3, θ_4 に関しては, この後にリンクが続く場合は, 上記と同じように処理を進める.

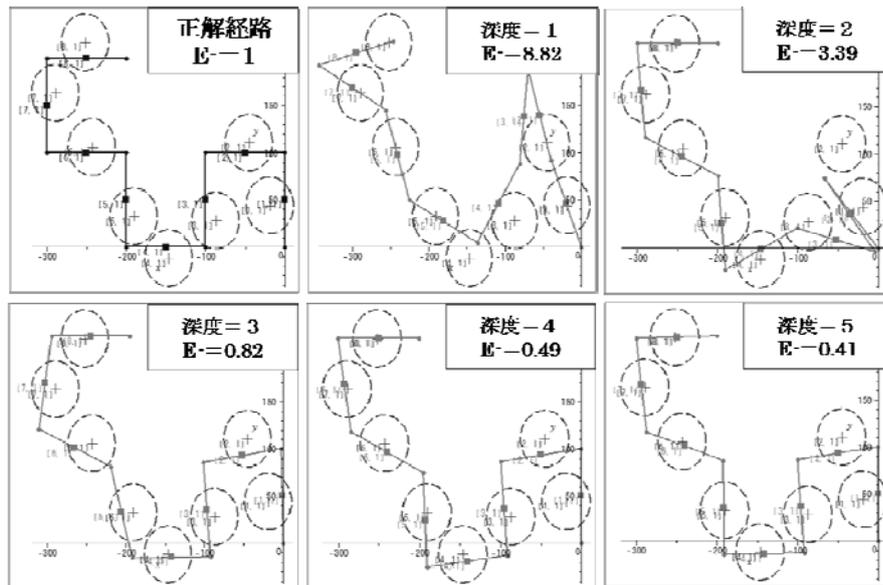


図 4.3-9 シミュレーション結果

図 4.3-9 に最急降下法によるシミュレーションの結果を示す. 図 4.3-10 に位置エネルギーと深度の関係のグラフを示す. 検討を容易にする為, 正解ルートの位置エネルギーを 1 として正規化を行っている.

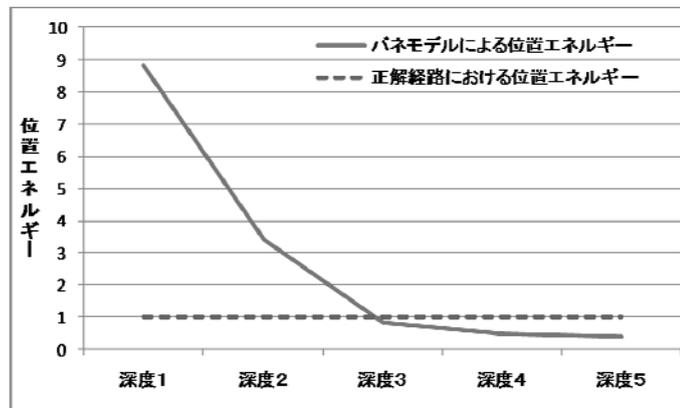


図 4.3-10 位置エネルギーと深度の関係

図 4.3-10 より、深度 3 以降は位置エネルギーが漸近していく事がわかる。これより、リンク長が同じ場合は、リンクの最適化に影響を与えるリンク数は 3 である事がわかった。また、図 4.3-9 からも、深度 3 で正解経路に近い形状が算出できている事がわかる。

同様に PSO 法、総当たり法についてもシミュレーションを行った。結果を表 4.3-1 に示す。検討を容易にする為に、最急降下法の深度 3 の位置エネルギーと処理時間をそれぞれ 1 として、正規化している。総当たり法の深度 5 は計算量が大きく、処理できなかった為、計測不能とした。

表 4.3-1 より、PSO 法、総当たり法でも深度 3 でエネルギー値が十分小さくなる事がわかる。しかし、最急降下法と比較して処理時間が大きい事から、本提案における最適化手法は最急降下法であるといえる。また、従来手法 [90] と提案手法についても比較を行った。従来手法は曲り角で測位と補正を行い、その補正位置を曲り角の位置として設定する為、本実験では測位精度が劣化している。一方、提案手法は曲り角の位置に依存しない為、従来手法と比較して測位精度がよく優位性がある事がわかる。

表 4.3-1 最適化手法と深度による位置エネルギー最小値の比較

	最適化手法						従来手法 エネルギー値
	最急降下法		PSO法		震当たり法		
	エネルギー値	処理時間	エネルギー値	処理時間	エネルギー値	処理時間	
深度1	10.744	0.681	9.167	17.617	10.744	0.681	4.790
深度2	4.136	0.979	1.491	22.915	8.452	21.915	
深度3	1.000	1.000	0.621	27.872	0.603	310.340	
深度4	0.598	1.340	2.174	33.191	0.603	4025.489	
深度5	0.502	1.000	17.802	38.489	計測不能	計測不能	

4.3.3 実機検証

シミュレーションの結果から、バネモデルによる補正は、深度3の最急降下法がもっとも効率がよいと考えられる。そこで、実機による検証を行った。

(1) 実験環境

実験は、高層ビルによるGPS搬送波のマルチパスが比較的少ない、住宅街の一般道路を約2km使って行なった。実験歩行経路を図4.3-11に示す。図上部が北であり、実験経路は東西南北を網羅する経路を選択した。地磁気センサ [85]とGPS及び加速度センサ [85]を装備した携帯電話を市販の携帯ホルダーに入れて腰に装着し、被験者は道路に沿って歩行した。GPSを起動するタイミングは次のルール(GPS起動ルール)に合わせて行った。

- ① 基本3分間隔で測位を行う
- ② 直進継続中に再度3分が経過した場合は測位を行わず、曲り角を検出すると即座に測位を行う
- ③ 3分以内に2回曲り角を検出すると、即座に測位を行い、約22m後に再度測位を行う

項②は、直進しているという特徴を利用し、消費電力の節約のために行う。項③は経路推定の際、左右対称となる推定経路の発生を防ぐために行う。本稿で提案している技術は、曲り角の曲がった方向を把握する事ができない。その為、位置が特定できない状態で3つ以上の曲り角を連続して検出すると、2番目の角が1番目の角と3番

目の角を結ぶ直線の線対象の位置になるため、位置を特定する事ができない。そこで、3つ目の角を検出する前に2番目の角の位置を特定する測位を行い、左右対称となる推定経路の発生を防いでいる。22m³⁾というのは、GPSの実測した測位精度であり、GPSの精度の劣化が経路推定精度の劣化に与える影響を小さくする為に設定している。また、一時的な磁場の変化の除去に要する観察歩数は、3.1章で述べたように20歩で行った。

評価は、GPSの連続測位、最急降下法を使ったバネモデルで2種類、文献[90]の方式2の計4種類を、各方式による測定位置と正解経路の差で比較した。文献[90]の方式2はリンク毎に複数のGPS測位点が必要である為、20秒間隔でGPSを起動した。

- 1) GPS連続測位方式：GPSを連続で（約1秒毎）動作する測位方式
- 2) バネモデル最少測位法：上記GPS起動ルールとバネモデルによる測位方式
- 3) バネモデル定期測位法：20秒のGPS測位間隔とバネモデルによる測位方式
- 4) 最小二乗定期測位法：20秒のGPS測位間隔で取得した位置情報を、最小二乗法によって近似化して経路推定を行う方式[90]。



図 4.3-11 実験歩行ルート



図 4.3-12 提案手法による実験結果

歩行中は、GPS による位置情報、加速度センサ情報、地磁気センサ情報の 3 種類のデータを保存した。GPS の起動は各方式に合わせて制御した。加速度センサおよび、地磁気センサは 40msec 周期で取得した。取得したデータは、携帯電話に装着したメモリーカードに保存し、試験後に分析を行った。

(2) 実験結果

図 4.3-12 に、バネモデル最小測位法を使った場合の推定経路を示す。太線が正解経路であり、細線が推定経路である。破線円は GPS 測位点であり、半径は GPS の誤差の範囲を示している。■は GPS 測位地点であり、●は検出した曲がり角を示している。概ね、正解経路に沿って補正されている事がわかる。表 4.3-2 各方式における測位精度の比較に各方式による測位と正解経路との差を示す。測位精度は GPS 連続測位方式と比較する為、リンクを使う他方式の一秒毎の位置を計算し、それぞれ実道路との差分を平均化して求めた。

表 4.3-2 より、バネモデルを使った経路推定は、最小二乗法による経路推定より高精度に測位できる事がわかった。また、GPS の測位回数を連続測位の 5% まで削減しても連続測位と同精度である事がわかった。

表 4.3-2 各方式における測位精度の比較

	GPS 連続 測位方式	バネモデル 最小測位方式	バネモデル 定期測位方式	最小二乗法 定期測位方式
精度 (m)	12.2	14.5	10.8	22.4
GPS 測位回数	1888	11	96	96

(3) 考察

提案手法では、曲がり角の検出に磁束密度の変化を捉えて曲がり角を検出している。しかし、検出される磁束密度にはノイズ成分も含まれており、曲がり角の検出はノイズ成分を取り除く閾値を設定している。その為、曲がり角度が小さい（磁束密度の変化が小さい）と曲がり角を検出する事ができない。

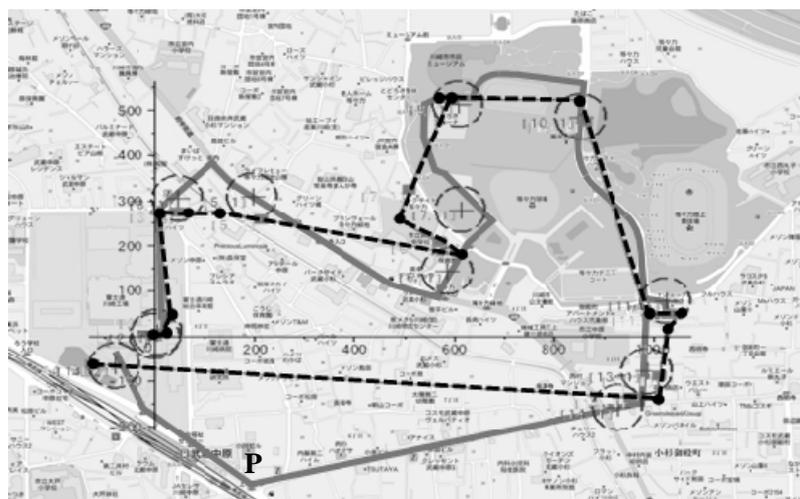


図 4.3-13 地磁気ノイズ除去対応時の補正経路

一方、閾値を下げると曲がり角の検出率は向上するが、誤った曲がり角の検出が増大する。そこで、誤った曲がり角の検出を、バネモデルを使って補正できないか検討した。図 4.3-13 に閾値を上げて間違っ角の検出率を下げた（地磁気ノイズ高除去法）ルートの補正を示す。太線は正解経路を示し、破線は推定ルートを示している。破線円は GPS の測位点を示している。正解経路の下部の、鈍角な曲がり角 P を検出できなかった為、補正経路が間違って補正されている。

そこで、閾値を下げて、正しい曲がり角の検出率が上げて、間違っ角の検出率も上げた（地磁気ノイズ低除去法）アルゴリズムを使った補正の曲がり角検出率の比較を表 4.3-3 に示す。

表 4.3-3 曲がり角検出率の比較より、曲がり角検出成功率が向上すると、曲がり角誤検出率も上がる事がわかる。この地磁気ノイズ低除去法にバネモデルを適用し、経路補正を行なった。結果を図 4.3-14 に示す。経路が正しく補正されている事がわかる。曲がり角の検出数が増加したため、GPS の測位回数も約 1.5 倍に増加している。地磁気ノイズ高除去法では認識できなかった角 P が検出できている事がわかる。

表 4.3-3 曲がり角検出率の比較

地磁気ノイズ高除去法		地磁気ノイズ低除去法	
曲り角 検出成功率	曲り角 誤検出率	曲り角 検出成功率	曲り角 誤検出率
58.8	16.8	97.1	26.6

(単位：%)

曲り角検出成功率：(検出できた曲り角数) / (実際の曲り角数) × 100

曲り角誤検出率：(曲り角誤検出数) / (総検出数) × 100

一方、間違っ角 M が新たに追加されているが、バネモデルによる最適化で直線と認識されている事がわかる。以上により、バネモデルを適用する場合は、地磁気ノイズ低除去法が適している事がわかった。

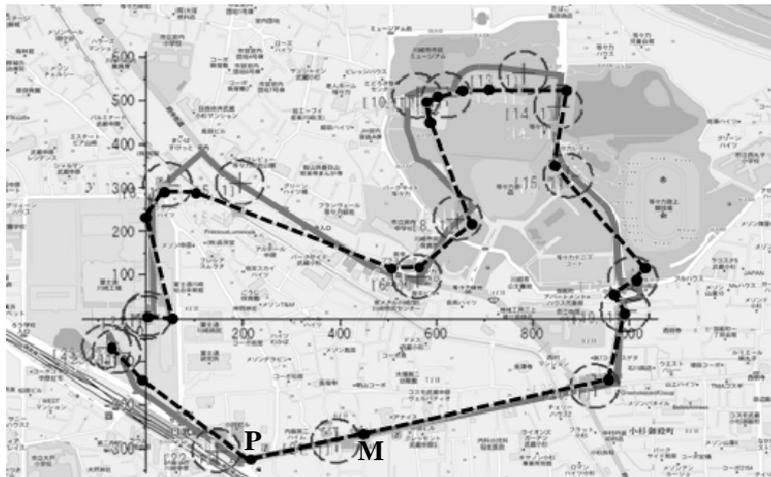


図 4.3-14 地磁気ノイズ低除去法とバネモデルによる補正経路

4.3.4 むすび

4.3節では、4.2節で提案した絶対方位の変化量によって曲り角を検出し、リンクを生成する方法ではなく、磁束密度の変化を使う事によって、携帯電話の帯磁の影響による、曲がり角の検知の感度劣化を改善する方法を示した。また、曲り角検出時にGPSで測位を行ってリンクを補正するのではなく、GPSの測位誤差を弾性バネの変位として扱うバネモデルとして補正する方法を提案した。バネの変位による位置エネルギーを最小にするための手法として、数値最適化手法を取り入れ、その場合、深度3の最急降下法が最適である事を示し、実証実験で検証したところ、GPSの測位回数を約5%にしても測位精度が劣化しないことを確認した。

また、位置精度を向上させるためには、曲がり角の検知が重要であり、間違った曲がり角を検出しても、バネモデルによる補正で改善されることがわかった。

4.4 まとめ

本章では、既に一部でサービスが展開されている、安心安全の為の歩行履歴サービスを想定し従来と同じ測位精度を保ちながら、低消費電力測位を実現する技術について検討を行った。歩行履歴サービスは、高い測位精度は必要としないが、高い完全性（測位の安定性）は必要とされる。一般的に長時間の利用が必要であり、高い完全性を確保する上でも最低 24 時間（携帯端末の最短充電サイクル）の連続測位を実現しなければならない。

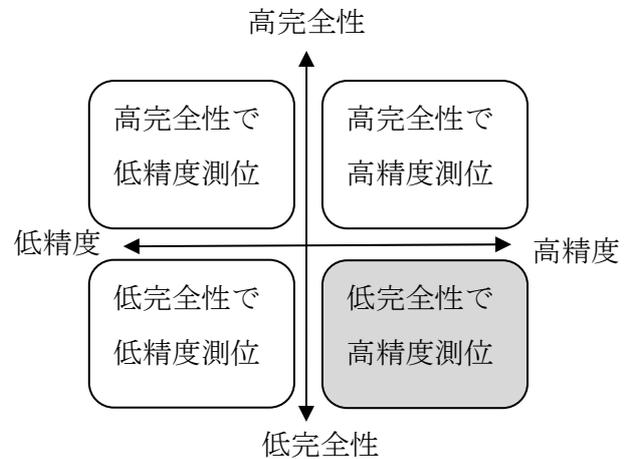
課題を解決する為、地磁気センサを使って低消費電力で歩行履歴を推定する技術の検討を行った。地磁気センサを方位検出として利用するのではなく、歩行の形状を検出するセンサとして利用し、歩行履歴を曲がり角で繋がるリンクの組み合わせとするリンクモデルとしてモデル化した。モデル化したリンクをGPSの誤差を弾性バネの伸びとするバネモデルとして最適化する事で、低消費電力で歩行履歴を計測する技術の開発を行った。この技術により、今後普及が始まると考えられている見守りサービスの利便性向上を実現できる。また、歩行履歴をリンクモデルとしてモデル化した事により、屋外だけでなく、地下街やGPSの受信が困難な繁華街の測位への適用にも期待できる。

しかし、一般的に地磁気は環境によって変動することが想定されるため、地磁気の利用可否の判定を環境に応じてできるしくみが必要である。例えば、繁華街の高層ビル近くでは磁場の歪みが顕著に表れる可能性がある。歩行時に人を避けるなど、環境からのノイズだけではなく、人によるノイズを除去するしくみも必要である。また、加速度センサによる歩数の誤差や、歩幅の誤差に伴う移動距離の変動についても考慮する必要がある。バネモデルを使った最適化手法として、最急降下法を提案したが、最急降下法は初期値の与え方によって、局地解が発生する。最適解を得るためには、深度数に応じて、複数回最急降下法による最適化も検討する必要がある。また、提案した歩行履歴サービスは屋外のみを対象としており、屋内及び高層ビルが乱立する繁華街、オフィス街については今後対応する必要がある。基本的な考えである歩行リンクは歩行距離によってリンク長を決定している。公共機関など歩行を伴わない移動手段ではリンク長を把握する事が困難となるので、既存のGPS測位とのシームレス性も検討が必要である。

今後、これらの課題について検討を行い、早期の実用化に向けて開発を進める予定である。

第5章 低い完全性で高精度な測位技術

本章では、サービスと測位技術の4象限マトリクスにおける第4象限である低完全性で高精度測位が必要なサービスに適した技術について述べる。サービスとして、ピンポイント広告サービスを掲げ、具体的には空間情報サービス [9] の実現を想定する。図 2.3-1 に示すように、技術要件を



- ・測位精度 10cm 以下の測位技術とし検討する。5.1 節で技術背景を述べ、

5.2 節では、位置情報を使って情報を整理する空間情報サービスについて述べ、5.3 節でまとめを述べる。

5.1 はじめに

位置情報によって、利便性高いサービスが増加している。ナビゲーションサービスや検索サービスなど、利用頻度は増加傾向にある。これまでの位置情報は現実存在する物の整理に利用されてきた。道路の構成情報（道路トポロジ情報）や、お店の場所、住所などがそれにあたる。そこで、本来無形である「情報」をあたかも有形な物として整理する事で、ピンポイント広告のような利便性の高いサービスが期待できると考えた。

そこで、本章では無形な「情報」を有形として扱う技術についての検討と、人がその有形化された「情報」（バルーン）を操作する為に必要な測位技術について検討を行う。操作とは、バルーンに接触する（発見する）、バルーンをつかむ、バルーンを移動する（ドラッグ）、バルーンを離す（ドロップ）の事をいう。

5.2 節では、実空間定義型ユビキタスシステム空間情報サービスについて述べる。5.2.1 節で関連研究について述べ、5.2.1 節で空間情報サービスについて述べる。5.2.3 節で実証システムについて述べ、5.2.4 節で実装方法及び検証を行う。

5.3節でまとめを述べる

5.2 実空間定義型ユビキタスシステム：空間情報サービス (USIS)

空間情報サービス (USIS : Ubiquitous Space and Information Services) は実際にサービスや情報を提供する場所に“バルーン”と呼ばれる有形化情報を付加された「情報」を設定し、バルーンに接触する、バルーンを掴む、バルーンを移動させるといった情報整理を可能とする技術である。また、いろいろな場所に点在するバルーンは、位置情報を使ったファイルシステムとして構成/管理する事も可能であり、現実空間を媒体とした情報整理を実現する事もできる。本節では、実現形態の一つとして室内での利用を想定し、超音波による測位システムを使ったサービスの試作と評価を述べる。

5.2.1 関連研究

これら情報の有形化に関連した研究として香川大学の垂水が提案している時空間限定型オブジェクトシステムSpaceTagがある[8][9][10][11]。SpaceTagには次の属性がある。

- ・有効空間
- ・時間 {中心座標 {緯度, 経度, 高度} と有効半径, 時間帯}

この情報を元に、現実空間にあたかもタグを貼り付ける様に情報を定義する事を特徴としている。しかし、情報を現実空間にリンクさせる事が目的である為、情報の管理が単層構造であり、ファイルシステムそのものを現実空間に投影するような情報整理は困難である。情報を整理するためには、情報にアクセスするだけでなく、情報の移動や情報の階層化が必要である。

5.2.2 空間情報サービス

(1) 空間情報とは

空間情報とは「情報」に現実空間の位置情報に連携した有形化情報を付加し、現実空間上に仮想的に物として定義された情報である。現実には存在するものではないが、情報を現実空間の位置情報をつかって連携させている為、モニターや地図にマッピングして可視化する事が可能である。この空間情報は、普及しているファイルシステムに付加されているアトリビュートや更新時刻情報と共に、下記の3要素が追加される。

- ・現実空間にマッピングする位置情報

- ・ 現実空間を占有する大きさ
- ・ 存在形式（生存時間，空間占有方式：空間共有や空間独占など）

この3要素により，無形な情報が有形な情報として現実空間を使って整理できるようになる．この情報の定義形態を空間情報（バルーン）と呼ぶ．有形な情報として実空間とリンクさせる為，携帯端末などを使う事により，現実空間からその情報に触れる事ができるようになる．また，存在形式を定義できる事もこれまでのファイルシステムにはない特徴である．

（2）空間情報サービスとは

情報はファイルと同意であり，実空間上に定義されたバルーンはファイルそのものである．しかし，ファイル間の連携やグループなどの概念を持たない為，バルーンを整理するしくみが必要になる．そこで，コンピュータで普及しているファイルシステムが持つ階層化(ディレクトリ)を空間情報を構成する3要素を使って表現する．図 5.2-1 に空間情報における階層化システムの概念図を示す．

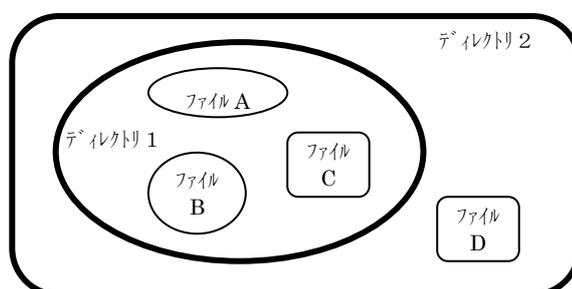


図 5.2-1 空間情報サービス階層化概念図

いろいろな形状で空間を占めるファイルを空間的に含有する空間をディレクトリ空間として定義する．これをディレクトリバルーンと呼ぶ．基本的なアトリビュートやファイル更新時刻などの情報は，コンピュータで利用されている階層型ファイルシステムと同様である．

この様に階層のツリー構造を空間の含有という形で表現する事により，実空間上でファイルの整理が可能となる．空間情報サービスは実空間上に定義したファイルシステムを実空間を使って制御するサービスである．また，ファイルを測位システムに置き換えると測位システム間の連携 [93] [94] [95] [96]が容易になる事もあり，測位システムとの親和性もよいと思われる．

(3) 空間情報サービスにおける課題

空間情報サービスによって実空間上に定義されたファイルシステムは、実空間を使って制御できなければならない。その為にはバルーンを認識しバルーンをファイルシステムに合わせて移動する機能が必要である。それには、

- ・バルーンを掴む
- ・バルーンを移動させる
- ・バルーンを離す

の機能が必要である。その為、実際に実空間上にバルーンを仮想的に設定し、携帯端末の測位情報を使って上記機能の実現性を検証した。

5.2.3 検証システム

バルーンを認識し扱える事を検証するため、室内に高い測位精度をもった3次元超音波測位システムを構築し、携帯端末を測位する。空間情報を管理するデータベースサーバを構築し、携帯端末とバルーンの距離を測定する。バルーンに接触した携帯端末のユーザインターフェースを使ってバルーンを掴む、移動する、離すを実現する。ユーザが判断しやすいように、バルーンの情報を実空間の物から連想できる情報に特化し、バルーンを使って現実空間の物と物を接続する事によって、ユーザがバルーンを認識できるかどうか検証した。

(1) 超音波測位システム

携帯端末の測位を高精度に行う為、超音波を利用した測位システムを構築した。超音波システムは概ね以下の通りである。実験室天井の複数箇所に超音波受信モジュールを設置する。実験用に開発したユビキタス IP 携帯端末に超音波発信モジュールを装着し超音波をバースト送信する。受信モジュールで受信した超音波を測定し測位モジュールに転送する。そこで伝播時間から伝播距離を演算する。測距演算結果をシリアル経由で測位サーバに転送し、そこで送信機の測位演算を行う。測位演算結果を LAN 経由で空間情報サーバに転送し、そこでバルーンと PDA の相対距離を測定する。なお、超音波の送信タイミングを受信側に通知する必要があるため、赤外線超音波と同時に送信する。また超音波センサおよび赤外線センサは指向性が強い為、複数のセンサを搭載することで対処した。赤外線だけを使った測位技術 [97]もあるが、今

回は超音波と同期を取る為に赤外線を利用する。3次元空間の測位演算は、球を表す2次の非線型方程式を摂動法により線形近似し、繰り返し演算により解く方法を用いた。実験システムの機能ブロック概要を図 5.2-2 に示す。

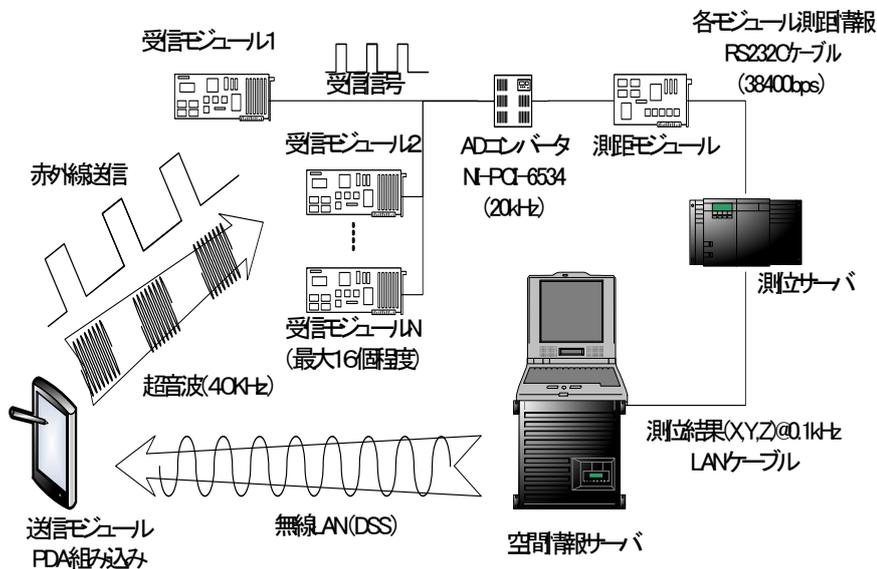


図 5.2-2 実験システム概要

本検証は室内で行なう為、到達距離、指向性、マルチパスの影響などを少なくするよう工夫する必要がある。また小型超音波送受信素子は音波到達距離が10m以下の為、受信モジュールは2~3m程度の間隔で天井に設置した。これにより14m四方の部屋の空間で3次元測位が可能となるようにした。

(3) PDA 端末

今回は、携帯端末の測位を行う為、超音波発信機を装着した試作端末を使用した。概観図を図 5.2-3 に示す。この端末は OS として WindowsCE を搭載し、汎用 CF インターフェースを装備している。(CF スロットに超音波発信カードを搭載している)

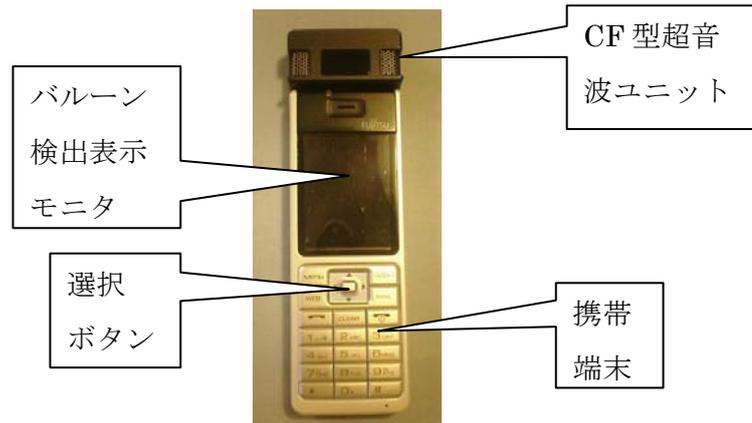


図 5.2-3 超音波発信機付ユビキタス IP 携帯端末

この端末にバルーン表示モニターと選択ボタンを実装し、下記機能を実現する。

- ・ バルーンの検出：バルーンを検出すると音とモニターでユーザーに通知
- ・ バルーンを掴む：バルーンを掴むには、バルーンに接触した状態で選択ボタンを押す。
- ・ バルーンを移動する：選択ボタンを押したまま、移動する。
- ・ バルーンを離す：選択ボタンはなす事で、バルーンを開放する。

バルーンの検知はバルーンを管理する空間情報サーバが端末とバルーンの距離を測定して判断する。バルーンの移動による新しい位置の登録も空間情報サーバで行なわれる。

(4) 空間情報サーバ

空間情報サーバはバルーンをディレクトリバルーンも含めてツリー構造上に整理されているデータベースサーバである。携帯端末の位置から携帯端末とバルーンの相対距離を計算し、携帯端末とバルーンが接触したかを判定する。下記にバルーンのフォーマット例を示す。

```

<guide>
  <point>
    <name>      Printer      </name>
    <category>  Balloon     </category>
    <area>      Labo. FJLab. Kawasaki.
                kanagawa.jp    </area>
    <position>
      <latitude>          </latitude>
      <longitude>        </longitude>
      <altitude>         </altitude>
      <sub-position>
        <x>  1000  </x>
        <y>  2000  </y>
        <z>  100   </z>
      </sub-position>
    </position>
  </point>
  <info>
    <balloon-figure>    ball </balloon-figure>
    <balloon-radius>    100  </balloon-radius>
    <balloon-attribute> link </balloon-attribute>
    <url>  URL:XXXXXX.YY.ZZ/NNNN/ </url>
    <balloon-lifetime>  always </balloon-lifetime>
    <balloon-status>   occupation </balloon-status>
  </info>
</guide>

```

この例では、位置は絶対位置ではなく、この超音波測位システムの基準点からの相対位置で示されている。

5.2.4 実装評価

(1) 超音波測位システムの測位精度

天井に設置した受信モジュール（モジュール ID1～3）を3個用い送信モジュールを静設置した場合の測距及び測位結果を示す。表 5.2-1 は各モジュールまでの測距精度，表 5.2-2 は測距結果から演算した測位精度，図 5.2-4 は測距精度の経時変化，図 5.2-5 は測位精度を3次元表示にしたものであり，図 5.2-6 は測位精度の経時変化である。

表 5.2-1 各モジュールまでの測距精度

モジュール ID	1	2	3
標準偏差 3σ	9.57mm	1.89mm	10.81mm

表 5.2-2 測距結果から演算した測位精度

測位方向	X軸（水平）	Y軸（水平）	Z軸（垂直）
標準偏差 3σ	17.4mm	11.8mm	57.9mm

測距モジュールの分解能（サンプリング時間）は $10\mu s$ なので，理論測距分解能は，3mm 程度となるが，表 5.2-1 および図 5.2-4 を見るとモジュール 2 のみが理論値に近く，それ以外は3倍程度の精度となっていることが分かる。今回のシステムは超音波の包絡線を捉えているため，環境ノイズが精度に影響を及ぼしたと考えられる。しかし，表 5.2-2 および図 5.2-5 図 5.2-6 を見ると，この程度の測距精度でも測位精度は水平方向を見ると $\pm 20\text{mm}$ 程度には収まっている。なお鉛直方向の精度が水平方向に比べて悪いのは，受信モジュールをすべて天井に設置したためである。以上より，今回の実験システムにおいては，バルーンの見識精度は 50mm 程度であるといえる。

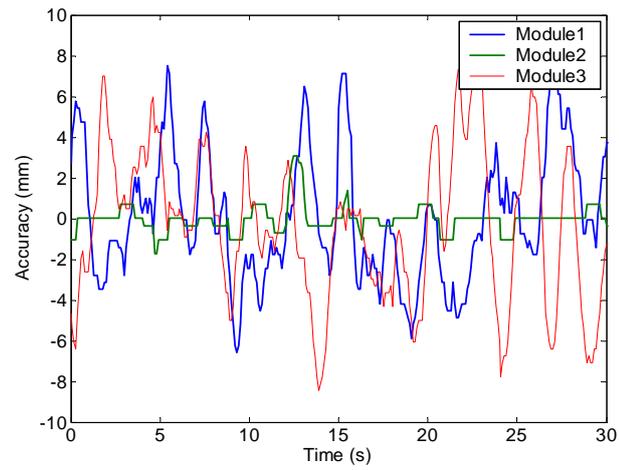


図 5.2-4 各モジュールの測距精度の経時変化

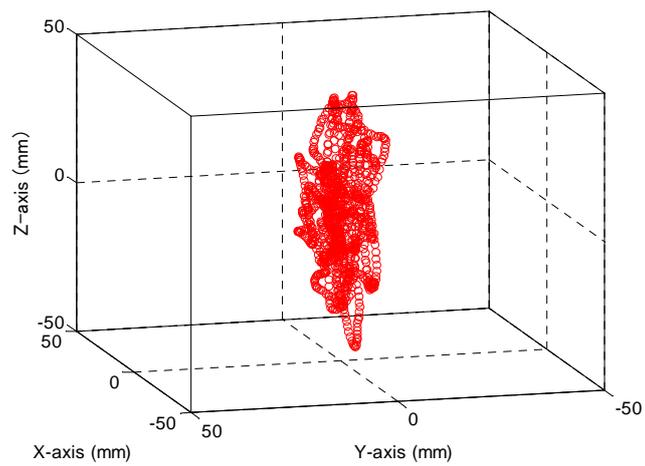


図 5.2-5 測位精度

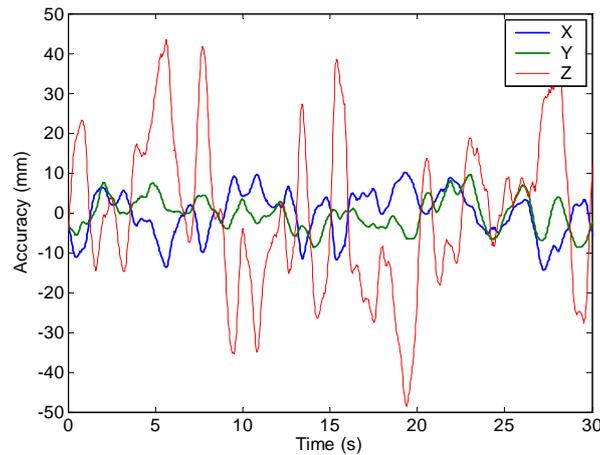


図 5.2-6 測位精度経時変化

(2) ユーザ評価環境

上記、超音波3次元測位システムと空間情報サーバを使いバルーンの有形化を表現するサービスを構築する。図 5.2-7 にサービス構成を示す。具体的には、バルーンを以下のパターンで配置し、ユーザがどのようにバルーンを認識するか調査した。壁にプレスされたレコードジャケットの前にバルーンを配置し、前項にて紹介した携帯端末を使ってバルーンをまるで3次元マウスのドラッグ&ドロップの様にバルーンを掴み、出力デバイスに移動させる事によってサービスが起動するようにした。出力デバイス A の場合は音のみが出力され、出力デバイス B の場合は各バルーンに合わせて音声と映像が表示される。デバイス C に移動させた場合はレコードジャケットが印刷される。バルーン A~C は壁にプレスされたレコードジャケットに関連して配置された。バルーン D は物理的に何も関連されない状態で配置された。

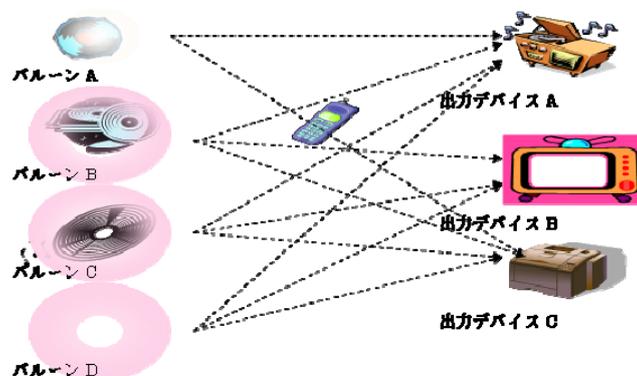


図 5.2-7 評価システム概要

図 5.2-8に携帯端末のディスプレイ表示を示す。小さな丸い部分と大きな丸い部分がバルーンをあらわしている。



図 5.2-8 実験端末表示部

(1) ユーザ評価結果

のべ数十人に対し、上記サービスを実際に使ってもらった。結果、バルーン A からバルーン C については 3 次元マウスの様にしたというコメントが多数を占めた。同時にユーザに対しディスプレイにバルーンの状態を表示し、ユーザがそのバルーンを掴むとユーザに合わせて移動するバルーンを見せたところ、論理空間に有形化された情報を現実空間から捕捉する概念をバルーンのアナロジーとして容易に理解できるとの意見が多数を占めた。しかし、バルーン D においては、アナロジーとしてのバルーン認識は非常に困難であり、同じ人においてもバルーン補足再現率は非常に低い事もわかった。バルーンの大きさと認識度を調査したところ、レコードジャケットやモニタなどに付随する形でバルーンを設定する際は、その被対象物と同じ大きさくらい（約径 50 cm 程度）が使いやすいという意見が多かった。また、何も参照できない場所（部屋の中心など）でバルーンを認識する場合は、直径約 2 m くらいの大きさのバルーンが必要である事もわかった。しかし、この場合は部屋の大きさにも関係してくると考えられる。

5.2.5 むすび

今回の実験によって、論理空間に有形化されたバルーンのアナロジーは使い方によって確立可能という事がわかった。一方、実空間の認知されている物に関連されない状態で設定されるバルーンに関しては、有形化として捉えにくい事もわかった。今後は、これらバルーンをいかにうまく利用するかを検討が必要である。また、一元化できない位置情報を

ツリー構造で整理する方法や測位デバイスに依存せず、シームレスに測位する技術の検討も必要であると考えている。

5.3 まとめ

本章では、低い完全性と高精度測位が必要なサービスについて検討するにあたり、サービス例としてピンポイント広告サービスとシームレスな測位システムを取り上げた。

ピンポイント広告を展開する上で、無形な広告の情報を有形化して仮想的に持ち運ぶサービスとして、空間情報サービスの実現を検討した。情報の有形化にはバルーンと呼ばれる情報の形態に物理的な大きさを付加した情報を携帯端末でスキャンする事で実現した。実際に、被験者を使って情報の搬送を行なったところ、ユーザインターフェースとして高い親和性を得られた。その際の測位精度は概ね5cm以下が必要である事もわかった。

このサービスの実現によって、現実空間を使った情報の整理方法の可能性もある事もわかった。これまでハードディスクに格納されていた情報を、仮想的に現実空間をファイルシステムとして見立てる事で実現する。その際、ファイルはバルーンとして定義し、ディレクトリはバルーンを大きさに包括するディレクトリバルーンで定義する。これにより、将来現実空間上に仮想空間を同時に描画できるディスプレイが可能になれば情報そのものを可視化して操作できるようになる。有形化された情報に触れる事ができると、オフィスのファイルキャビネットは有形化された情報キャビネットとして利用できる可能性がある。自宅のテレビやビデオ、オーディオ機器も有形化された情報に置き換わる可能性がある。既に一部では類似のパイロットサービス展開が始まっており早期のサービス展開が期待できる。

しかし、一般に適用する為には、屋内外の測位を含めた、シームレスな環境での空間情報サービスを含む情報提供技術の開発が必要である。また、コンテンツの形態や利用方法についても利便性の高い汎用のプラットフォームの開発が必要になると思われる。今後は実用化に向けこれらの課題の検討を進める予定である。

第6章 おわりに：成果と今後の課題

本稿では、汎用測位システムである GPS の登場によって、これまでの位置情報を扱うサービスが、GPS のスペックに合わせて利用する事で急激に増加し始めている背景を説明した。今後はサービスの多様化が起こり、GPS のスペックでは対応が難しいサービスの出現が考えられる。それらのサービスに対応する為、現状の汎用測位システムにサービス毎の専用のサービス補間技術を付加するハイブリッドな測位技術が普及すると考えた。検証を行なう為、今後普及されるであろうサービスを整理し、特に重要と思われるものを抽出し具体的なサービス例を提案した。その上で、それらのサービスが現状の汎用測位システムでは解決できない課題が存在する事を示し、今後必要となる技術を測位の完全性と測位の精度を軸に4象限マトリクス上で分類を行い、サービスと技術の位置づけを行った。この分類にあたり、現在の汎用測位システムである GPS 衛星の L1 波を利用した実時間測位を「完全性も低く、測位精度も低い」第3象限に定義し、他象限のリファレンスとした。

4象限マトリクス分類における第1象限には、「完全性が高く、測位精度が高いサービス」が位置づけられ、具体的なサービス例として交差点における車両間衝突防止システムの検討を行った。車の車両衝突を防止するためには、50cm程度の車両測位精度が必要とされている。さらに、風雨やビルなどの周りの環境に依存しない測位技術が必要である。その為、現在の GPS では対応が困難である。そこで、通常は GPS で測位を行ないながら、車両の衝突が多い交差点のみ高精度な車両測位を行なうサービス補間技術の検討を行った。既にサービスを展開していて車両との親和性が高い光ビーコン装置装置を使ってピンポイントに測位を行なう技術を開発し、実車で測定したところ 50cm以下の車両測位が可能である事を確認した。さらに、光ビーコンでピンポイント測位した車両を車速パルスとジャイロスコープによる自律航法で連続測位を行う技術の検討を行い、900mの間隔で光ビーコンを設置すると GPS より測位精度が高い事がわかった。この研究で得た知見を使って、実際の道路で交差点における車両間衝突防止装置の試作評価を行い、事故防止に有用である事を確認した。

4象限マトリクス分類における第2象限には、「完全性が高く、測位精度が低いサービス」が位置づけられ、具体的なサービス例として歩行履歴サービスの検討を行った。歩行履歴サービスは既に公衆無線網を使ってサービスが展開されている。従って測位

精度は GPS の測位精度で対応が可能である。しかし、測位の安定性において測位の消費電力が大きいため、持続的に測位ができないといった課題があった。そこで、GPS は間欠に動作させながら、間欠間を他の低消費電力デバイスで補間する技術の検討を行った。人の歩行の形状を直線のリンクの組み合わせで表現し、そのリンクを間欠測位した GPS で補間する事で消費電力を現状と比較して 1/10 以下に抑えた。さらに、測位環境に伴う GPS の測位タイミングのズレに対し、GPS による測位の誤差を仮想的な弾性バネの弾性エネルギーとするバネモデルに置き換える事を提案した。これによりより実用的な低消費電力測位技術の開発を行った。

4 象限マトリクス分類における第 4 象限には、「完全性が低く、測位精度が高いサービス」が位置づけられ、具体的なサービス例としてピンポイント広告を実現する空間情報サービス [9] の実現を検討した。無形の広告情報を有形な情報に仮想化する為にバルーンを現実空間に仮想的に設置し、ユーザがそのバルーンを認識する（ピンポイント広告を認識する）のに必要なバルーン径を認識する為の測位精度を求めた。超音波を使った測位技術で検証したところ、約 5 cm 以下の測位精度で、径 50 cm 程度のバルーンが扱える事がわかった。

以上から、サービスの多様化に伴う測位技術は、既存の汎用測位システムにサービス毎に特化した専用のサービス補間技術を付加したハイブリットな測位技術の形態で対応が可能と思われる。また、今回検討した要素以外にもサービスに応じて補完する技術は必要と考えられ、特に屋内の測位については、早急な対応が必要になると思われる。本稿では超音波を使った屋内測位を実現したが、図 2.2-1 に示した様に新たなインフラを必要とする測位技術は普及が難しい。従い、既存インフラを別の視点からとらえ利用するような測位技術の検討が必要と考え、今後の研究の対象として進めていく予定である。

謝辞

本論文は筆者が静岡大学創造技術大学院自然科学系教育部情報科学専攻博士後期仮定に在籍中の研究成果をまとめたものである。同専攻教授 水野忠則先生には指導教官として本研究の実施の機会を与えて戴き、その遂行にあたって始終、ご指導を戴いた。ここに深謝の意を表す。同専攻講師 峰野博史先生には副指導教官としてご助言を戴くとともに本論分の明細にわたりご指導を戴いた。ここに深謝の意を表す。

静岡大学大学院への入学を研究業務の一環として了承し、多くのご配慮とご支援を戴いた株式会社富士通研究所 ITS 研究センター長富士通研究所フェロー 松田喜一氏、同ヒューマンセントリック研究所長 飯田一朗博士、同 ITS 研究センター主席研究員 森松映史氏、富士通株式会社モバイルフォン事業部本部長付 山澤昌夫博士に心から深謝の意を表す。

株式会社富士通研究所 ITS 研究センター 沢田健介氏、同 肥田一生氏、同 花田雄一氏、同 ヒューマンセントリック研究所主管研究員 藤野信次博士には本研究全般にわたり日頃より有益なご討論ご助言を戴いた。また、大野敬太郎博士には多大なご助力を戴いた。ここに深謝の意を表す。

本研究の実験では株式会社富士通研究所 ITS 研究センターの研究員、富士通九州ネットワークテクノロジーズ株式会社第一開発統括部の開発設計者、および富士通関西中部ネットテック株式会社システム開発センターの開発設計者には研究遂行にあたりご助力を戴いた。ここに感謝の意を表す。

最後に、両親及び家族には大学院在学中に多方面で助力を戴いた。ここにあらためて深謝の意を表す。

引用文献

1. *Location Aware App Report*. s.l. : Skyhook Wireless, 2010.
2. A.Lamarca,
Y.Chawathe,S.Consolvo,J.Hightower,I.Smith,J.Scott,T.Sohn,J.Howadr,J.Hughes,
F.Potter,J.Tabert,P.Powledge,G.Borriello,B.schilit. *Place lab: Device positioning
using radio beacons in the wild*. s.l. : Proc.3rd Annual Conf. on Pervasive
Computing, 2005.
3. 安田明夫. *GPS の現状と展望*. s.l. : 電気情報通信学会, 1999.
vol.119,no.12,pp.1207-1215.
4. 平田誠一郎. *ナビゲーションシステムとセンサ 自動車用GPSナビゲーションシス
テム*. 1988. S0554B ISSN : 0285-5348.
5. 社団法人電気通信事業者協会. 携帯電話・PHS・無線呼び出し事業者別契約数.
[Online] <http://www.tca.or.jp/database/index.html>.
6. 土屋淳, 辻宏道. *GPS 測定の基礎*. s.l. : 日本測量協会. pp. pp98-100.
7. 地理空間情報産学官連携協議会. *地理空間情報の利活用に係わる研究開発マップ
に関する報告書*. s.l. : 内閣官房, 2010.
8. 李欣洙, 間瀬憲一, 阿達透, 大沢達哉, 中野敬介, 仙石正和, 日高裕敏, 品川準
輝, 小林岳彦. *GPS, 歩数計及び方位計を用いた歩行者移動経路追跡法*. s.l. : 信学論
(B) , 2001. vol.J84-B, no.12, pp.2254--2263.
9. 森信一郎, 畠添菜美, 塩内正利, 原政博, 藤野信次. *実空間定義型ユビキタスイン
フォメーションサービス (空間情報サービス)*. 情報処理学会研究報告. s.l. : モバイ
ルコンピューティングとワイヤレス通信研究会, 2005. pp. pp. 201-206.
2005-MBL-35.
10. JARI. *移動体用高精度位置標定システムに関する研究調査*. s.l. : 財団法人日本自
動車研究所.

11. 神谷泉. *測位技術の調査と I C タグ, UWB 測位への応用*. s.l. : 国土地理院, 2005. No106.
12. **A.Ward, A.Jones,A.Hopper**. *A new location technique for the active office*. s.l. : IEEE pers.Commun, 1997. vol4,no5,pp42-47.
13. **B.W.Parkinson and J.J.Spilker**. *Global Positioning System: Theory and Application*. s.l. : AIAA, 1995. vol.1,pp.481-483.
14. 白井澄夫. *高精度ネットワーク型 GPS とその応用システムに関する研究*. s.l. : 静岡大学大学院, 2004.
15. **Andrew Howard, Denis F. Wolf,Gaurav S. Sukhatme**. *Towards 3D mapping in Large Urban Environments*. s.l. : Proc. of 2004 IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2004. pp.419-423.
16. **Branko Ristic, Sanjeev Arulampalam,Neil Gordon**. *Beyond the Kalman filter: particle filters for tracking applications*. s.l. : Artech House, 2004.
17. 相賀康則, 鷲頭浩一,小笠義治,東海林昌伸,反田和忠,津田伸啓. *高度 GPS 受信機*. <http://www.jrc.co.jp/jp/company/html/review45/01.html>.
18. **Ralph E.Taylor, James W.Sennott**. *NAVIGATION SYSTEM AND METHOD*. s.l. : United States Patent, Apr 24,1984. 4445118.
19. **J.J.Spiker**. *GPS Signal Structure and Performance Characteristics*. s.l. : Navigation, 1978. vol.25,no2,pp.121-146.
20. **Gill, W.J**. *A Comparison of Binary Delay-Lock Tracking-Loop Implementations*. s.l. : IEEE, 1966.
21. **OFFICE, GPS JOINT PROGRAM**. *Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces*. s.l. : ARINC Engineering Services, LLC, 2006. IS-GPS-200,RevD.
22. **K.Ghassmi, S.C Fisher and**. *GPS IIF-The Next Generation*. s.l. : IEEE, 1983. vol87,no1,pp.24-47.

23. **P.C.Fenton, W.II.Falkenberg,T.J.Ford,K.NG.Keith,A.J.Van Dierendonck.** *NovAtll's GPS Receiver: The High Performance OEM Sensor of the future.* s.l. : Proc. of the 4th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 1991. pp.49-58.
24. **A.J.Van Dierendonck, P.C.Fenton,T.J.Ford.** *Theory and Performance of Narrow Correlator Spacing in a GPS Receiver.* s.l. : Navigation, 1993. vol39,no3,pp.265-283,1993.
25. **G.A McGaw, M.S.Braasch.** *GNSS Multipath Mitigation Using Gated and High Resolution Correlator Concepts.* s.l. : Proc.Natl.Tech Meeting.Inst.Navi, 1999. vol.1999.no3.pp.333-342.
26. 移動体用高精度位置標定システムに関する調査研究報告(2005). s.l. : (財) 機械システム振興協会. システム技術開発調査研究 16-R-1.
27. **P.Bahl, V.N.Padmanabhan.** *RADRR:An in building RF based user location and tracking system.* s.l. : INFOCOM2000, 2000. pp.775-784.
28. **Tsugawa, Sadayuki.** *A History of Automated Highway Systems in Japan and.* s.l. : Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on, 2008. p p . 2 - 3 .
29. スマートループ. *Pioneer (オンライン)* . [Online] パイオニア (株) . [Cited: 3 23, 2009.] <http://pioneer.jp/carrozzeria/smartloop/>.
30. 矢崎テレマティクスサービス. *YAZAKI (オンライン)* . [Online] [Cited: 3 23, 2009.] <http://www.yazaki-keiso.com/product/telematics.html>.
31. 富士通 (株) . インフラ協調システム. [Online] <http://jp.fujitsu.com/group/labs/downloads/business/activities/activities-4/>.
32. 国土交通省道路局 ITS ホームページ. *国土交通省道路局 ITS ホームページ*. [Online] <http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/>.
33. 走行支援道路システム開発機構. 技術研究組合 位置特定技術の開発. [Online] 2009. <http://www.ahsra.or.jp/jpn/\c04j/7th/08pos/11pos3.htm>.

34. 警察庁. UTMS 新交通管理システム. [Online]
<http://office.microsoft.com/ja-jp/default.aspx>.
35. 社団法人新交通管理システム協会. 社団法人新交通管理システム協会ホームページ). [Online] <http://www.utms.or.jp/japanese/system/dsss.html>.
36. 半場信宏. インフラ協調型安全運転支援システム(DSSS)の公道実験. s.l. : (社)新交通管理システム協会.
37. Minakata, T., Kobayashi, M. and Seto, M. *Demonstration test for signal information provision system in DSSS by UTMS*. s.l. : World Congress On Intelligent Transport Systems Proceedings, 2007. Paper ID 3094.
38. K.Koike. *Improvement in positioning accuracy of GPS receiver*. s.l. : Proc.World Congress 2003, 2003. doc3214..
39. 久保信明, 安田明生. 単独測位におけるマルチパスの評価と精度改善方法. s.l. : 電気情報通信学会, 2001. vol.J84-B,no.12,pp.2123-2131.
40. T.Weiss, B.Schiele,K.Dietmayer. *Robust Driving Path Detection in Urban and Highway Scenarios using a Laser Scanner and Inline Occupancy Grid*. s.l. : IEEE Interigent Vehicles Symposium(IV2006), 2006. pp.184-189.
41. T.Weiss, N.Kaempchen,K.Dietmayer. *Precise EgoLocation in Urban Areas using Laserscanner and High Accuracy Feature Maps*. s.l. : IEEE Intelligent Vehicles Symposium(IV2005), 2005. pp.284-289.
42. B.Gao, B.Coifman. *Vehicle Identification and GPS Error Detection from a LIDAR Equipped Probe Vehicle*. s.l. : Proc.9th International IEEE Conference on Intelligent Transport Systems, 2006. Paper WB4.1.
43. 森信一郎, 肥田一生, 沢田健介. 光ビーコンを使った高精度測位技術. s.l. : 情報処理学会, 2009. Vol.~50, No.~1, pp.¥ 87--97.
44. 西村明彦, 長谷川孝明. 走行車線認識システムの位置検討. s.l. : 電子情報通信学会技術報告, 2007. ITS2007-34, pp.19--22.

45. **J.Kim, T.Hasegawa.** *On re-positioning of the PN code magnetic markers in road platform.* s.l. : Proc.ITSC2002, 2002. pp.259-262.
46. 第7回AHS研究報告会. 国土交通省国土技術政策総合研究所. 2003.
47. 位置検出支援道路システムの開発. 鈴木尋喜, 浅山嘉明, 小野治, 片山重厚, 大谷健一, 真崎裕. s.l. : 電気情報通信学会, 1998. SAD-5-9.
48. **USA, Bureau of Transportations Statisticstics of.** *Transportation statistics.* s.l. : Annual Report , 1999.
49. **C.Talbot, Nicholas.** *Centimeters in the Field, a Users Perspective of Real-Time Kinematic Positioning in Production Environment.* s.l. : Proc.ION GPS-93 , 1993. pp.1049-1057.
50. 神谷泉. 無線LANとICタグの測位への利用と屋内外のシームレス測位. s.l. : 国土地理院.
51. **Toshio Minakata, Masafumi Kobayashi, Masatada Seto.** *DEMONSTRATION TEST FOR SIGNAL INFORMATION PROVISION SYSTEM IN DSSS BY UTMS.* s.l. : World Congress On Intelligent Transport Systems, 2007. Paper ID 3094.
52. 増田亮, 金帝演, 長谷川孝明. 指示位置指向のM-CubITS車両WYISWYASナビゲーションについて. s.l. : 電子情報通信学会小特集, 2007. Vol.~J91--A No.~1,pp.11--20.
53. 金帝演, 長谷川孝明. M-CubITSを用いた夜間走行測位実験. s.l. : 電子情報学会技術報告, 2006. ITS2005--113,pp.19--24.
54. **Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, Dieter Fox.** *A Probabilistic Approach to Concurrent Mapping and Localization for Mobile Robots.* s.l. : Machine Learning, 1998. vol.31,pp.29-53.
55. **Stefan B.Williams, Hugh Durrant-Whyte, gamini Dissanayake.** *Constrained Initialization of the Simultaneous Localization and Mapping Algorithm.* s.l. : The International Journal of Robotics Research, 2003. vol.22,no.7-8,pp.541-564.

56. 宮下浩一, 寺田努, 田中宏平, 西尾章治郎. 目的予測型カーナビゲーションシステムのためのマップマッチング手法. s.l.: 情処学論, 2009. vol.50, no.1, pp75-86.
57. 寺田努, 宮前雅一, 岸野泰恵, 中川隆志, 山口善久, 西尾章次郎. 目的地予想型カーナビゲーションシステムの実現. s.l.: 2006 通信学会総合大会, 2006. A-17-19.
58. Inc., NovAtel. *NovAtel* (オンライン). [Online] [Cited: 3 23, 2009.]
<http://waypnt.com/Documents/Papers/FSAS.pdf>.
59. S. Kenney, J. Hamilton, and H. Martell. Architecture and system performance of SPAN. [Online] [Cited: 3 23, 2009.]
http://waypnt.com/Documents/Papers/SPAN_PLANS2006.pdf.
60. —. GPS/INS integration with the iMAR-FSAS IMU. [Online] [Cited: 3 23, 2009.]
http://www.canalgeomatics.com/product_files/ts64_01_kenney_etal_0472_139.pdf.
61. 富士通メディアデバイス(株). 小型圧電ジャイロ FAR-S1BG シリーズ. [Online] [Cited: 03 23, 2009.] <http://edevic.fujitsu.com/jp/catalog/find/22-4j/pdf/p28-30.pdf>.
FIND, vol.22, no.4, 2004.
62. 醍醐英字, 高橋寿平. 移動体用高精度位置標定システムに関する調査研究. s.l.: JARI, 2005. No27-10,p604-609.
63. 安田明生. *GPS 技術の展望*. s.l.: 電子情報通信学会. Vol.J84-B No.12 pp.2082-2091.
64. SKYプロジェクト. [Online] 日産自動車株式会社.
<http://blog.nissan-carwings.com/sky/>.
65. 田島 孝治, 安藤 公彦, 大島 浩太, 寺田 松昭. 行動履歴に基づく予測型情報提示システム「水晶珠」の試作. s.l.: 電子情報通信学会. Vol.J84-B No.12 pp.2082-2091.
66. 竹内 雄一郎, 杉本 雅則. 位置情報履歴を利用したユーザアダプティブな街案内システム. s.l.: 電子情報通信学会. Vol.J91-D No.2 pp.250-258.

67. **B.Schilit, N.Adams,R.Want.** *Context-aware computing applications*. s.l. : IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Application, 1994.
68. **G.chen, D.Kotz.** *A survey of contextaware mobile computing research*. s.l. : Dept. of Computer Science,Dartmouth College , 2000. TR2000-381.
69. **T.P.Moran, P.Dourish.** *Introduction to this special issue on context-aware computing*. s.l. : Special Issue of Human-Computer Interaction, 2001. vol.16,no2,pp.87-95.
70. **P.Bellavista, A.Corradi,R.Montanari,A.Toninelli.** *Context-aware semantic discovery for next generation mobile system*. s.l. : IEEE Commun.Mag, 2006. vol44,no9,pp.62-71.
71. 欣洙他, 李. *GPS,歩数計及び方位計を用いた歩行者移動経路追跡法*. s.l. : 電子情報通信学会, 2001. 通信 J84-B(12), pp.2254-2263.
72. 昌哉, 山下. *携帯機器に搭載する電子コンパス技術とその応用*. s.l. : 電気学会. S4(17)-S4(20).
73. **L. Fang, P. J. Antsaklis, L. A. Montestruque, M. B. McMickell, M. Lemmon, Y. Sun, H. Fang, I. Koutroulis, M. Haenggi, M. Xie, X. Xie.** *Design of Wireless Assisted Pedestrian Dead Reckoning System-The NavMote Experience*. s.l. : IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, 2005. vol.54, no.6, pp.2342-2358.
74. 興梠正克, 蔵田武志. *組み込み型 GPS・自蔵式センサシステムによる屋内外歩行者ナビ*. s.l. : 信学技報, 2006. vol.106, No.73, pp.75--80.
75. 加治充, 原隆浩, 西尾章治郎. *無線 LAN による位置推定のためのオンライン生成可能な電波環境地図とその特性*. s.l. : 情処学論, 2009. vol.50, no.1, pp51--63.
76. 興梠正克, 酒田信親, 大隈隆史, 蔵田武志. *屋内外歩行者ナビのためのデッドレコニング/GPS/RFID を統合した組み込み型パーソナルポジショニングシステム*. s.l. : 信学技報, 2006. vol.106, no.234, pp.109--114.

77. 内山彰, 藤井彩恵, 梅津高朗, 山口弘純, 東野輝夫. アドホック無線通信を用いた位置推定法の現実環境を想定した性能評価. s.l. : 情処学論, 2008. vol.49, no.10, pp.3612--3621.
78. 清原良三, 三井聡, 松本光弘, 沼尾正行, 栗原聡. 携帯電話におけるコンテキスト情報としての低消費電力位置情報取得方式. s.l. : 情処学モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会研報. vol.2008, no.44, pp.33--38.
79. 興梠正克, 蔵田武志. 慣性センサ群とウェアラブルカメラを用いた歩行動作に基づくパーソナルポジショニング手法. s.l. : 信学技報, 2004. PRMU2003-260, pp. 25-30.
80. **Kurata, M. Kourogi and T.** *Personal positioning based on walking locomotion analysis with self-contained sensors and a wearable camera.* s.l. : Proc. ISMAR2003, 2003. pp. 103-112.
81. **Paul Kemppi, Juuso Pajunen.** *Use of Artificial Magnetic Anomalies in Indoor Pedestrian Navigation .* s.l. : Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), 2010 IEEE 72nd , 2010. pp.1 - 5 .
82. **Wei Chen, Ruizhi Chen, Yuwei Chen, Kuusniemi, H., Zhongqian Fu, Jianyu Wang.** *An adaptive calibration approach for a 2-axis digital compass in a low-cost pedestrian navigation system .* s.l. : Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2010 IEEE , 2010. pp.1392 - 1397 .
83. **Tom Judd, Toan Vu.** *Use of a new pedometric dead reckoning module in GPS denied environments.* s.l. : Position, Location and Navigation Symposium, 2008 IEEE/ION , 2008. pp.120 - 128 .
84. 中村和弘, 青野嘉幸, 田所嘉昭. 視覚障害者用誘導型歩行支援システム. s.l. : 電子情報通信学会, 1996. vol.J79-D-2,no.9,pp.1610-1618.
85. ヤマハ株式会社. YAS526c 製品仕様書. [Online] [Cited: 12 22, 2009.] <http://www.yamaha.co.jp/product>.
86. 旭化成エレクトロニクス株式会社. 方位角計測装置および方位角計測方法. 特願 2002-192546

87. 小西勇介, 柴崎亮介. 自律方式による歩行者用ポジショニングシステムの開発. [Online] [Cited: 3 30, 2009.]
http://www.chikatsu-lab.g.dendai.ac.jp/s_forum/pdf/2001/08_konishi.pdf.
88. 山田, 磯田, 南, 森川. 携帯電話の GPS 位置情報を用いた高精度移動経路推定手法. s.l.: 電子情報, 2010.
89. 斎藤, 鹿谷, 横掘, 伊藤, 寺崎. 歩行者端末の省電力化を考慮した経路推定方式. s.l.: 電子情報通, 2010.
90. 森, 奥山, 峰野, 水野. 地磁気センサを使った高精度測位技術. s.l.: 電気情報通信学会.
91. S.Kawai, T.Kamada and. *An Algorithm for Drawing General Undirected*. s.l.: Information Processing Letters, 1989. 31, 7-15.
92. 佐藤雅幸, 松尾啓志. 統計的近似とばねモデルを用いたアドホックネットワークにおける端末位置決定手法. s.l.: 情報処理学会, 2005. Vol.46, No.12, pp.2892-2902.
93. P.Bahl, V.N.Padmanabhan. *Radar: An inbuilding rf-based user location and tracking system*. s.l.: INFOCOM2000, 2000. pp.775-784.
94. 高島雅弘, 趙大鵬, 柳原健太郎, 福井潔, 福永茂, 原晋介, 北山研一. センサーネットワークにおける受信電力と最ゆう法を用いた位置推定 8.
95. Ekahau Positioning Engine. [Online] ekahau Inc.
<http://www.ekahau.com/products/real-time-location-system/positioning-engine.html>.
96. 原史明, 沼田雅美, 植原啓介, 砂原秀樹, 寺岡文男. *Univasal location platform:汎用的位置情報基盤の設計と実装*. s.l.: 情報処理学会, 2006. vol.47,no12,pp.3112-3123.
97. R.Want, A.Hopper,V.Falcao,J.Gibbons. *The active badge location system*. s.l.: ACM Trans Information Systems, 1992. vol.10,no.1,pp91-102.
98. 総務省. 情報通信白書. s.l.: 総務省, 2010.

99. 間邊哲也, 長谷川孝明, 松岡義大, 古川誠治. *M-CubITS・可視光通信協調型歩行者 WYSIWYAS ナビゲーションシステムについて*. s.l. : 電子情報学会技術報告. ITS2007--10, pp.5--10.
100. 光ビーコン技術的特徴. [Online] [Cited: 3 23, 2009.]
<http://www.utms.or.jp/japanese/beacon/gijutu.html>.
101. **J.Krumm, E.Horvitz.** *Predestination: Where do you want to go today?* s.l. : IEEE Comput.Mag, 2007. vol.40,no.4,pp.105-107.
102. セカイカメラ. [Online] <http://sekaicamera.com/>.

筆者発表論文

A 学術論文

- 1) 森信一郎, 沢田健介, 肥田一生, 峰野博史, 水野忠則, 光ビーコンを使用した連続自車位置推定方式, 情報処理学会論文誌, Vol.52, No.1,2010
- 2) 森信一郎, 奥山鏡子, 峰野博史, 水野忠則, 地磁気センサを使った高精度測位技術, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J93-D, No. 10, pp. 1894-1902, 2010, DICO2009優秀論文賞
- 3) 森信一郎, 肥田一生, 沢田健介, 光ビーコンを使った高精度測位技術, 情報処理学会論文誌, Vol.50, No.1, pp.87-97, 2009
- 4) 森信一郎, 沢田健介, 肥田一生, 花田雄一, 峰野博史, 水野忠則, ばねモデルを用いた歩行軌跡補間技術, 情報処理学会論文誌, Vol.52, No.3,2010,DICO2010最優秀論文賞
- 5) Shinichiro Mori, Kazuo Hida and Kensuke Sawada, Advanced car positioning method using infrared beacon, Proc. ITS Telecommunications 2008, pp. 45-50
- 6) Shinichiro Mori, Kazuo Hida and Kensuke Sawada, Advanced car positioning and bearing method using optical beacon, ITS World Congress 2009, PaperID3665

B 研究会, シンポジウム発表論文

- 1) 森信一郎, 畠添菜美, 塩内正利, 原政博, 藤野信次, 実空間定義型ユビキタスシステム: 空間情報サービス (USIS), 情報処理学会研究報告. MBL, [モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会研究報告] 2005(113), 201-206, 2005-11-17, MBL研究会優秀発表賞
- 2) 森信一郎, 野口祐一郎, 高木悟, 上村城慈, 藤野信次, シームレス位置測位システム, 情報処理学会研究報告. ITS, [高度交通システム] 2006(22), 71-78, 2006-03-06, ITS研究会優秀発表賞

C その他の論文

- 1) 森信一郎, 峰野博史, (2010)携帯端末向け測位技術の動向サーベイと新技術の紹介 (特集 社会に浸透する新たなコンピュータ/ネットワークの世界), 情報処理学会論文誌, 51(1) (通号 539), 2010, pp43-46, 2006-03-06

付録

図 1.3-1 測位サービス毎に必要なとなる専用のサービス補間技術の位置づけ	4
図 1.3-2 本稿で対象とするエリア	5
図 1.3-3 測位技術における 4 象限マトリクス	5
図 2.1-1 今後重要と思われる活用例の内容 [7]	11
図 2.1-2 サービスの 4 象限マトリクス分類	11
図 2.2-1 汎用測位技術とインフラの設置間隔 [11]	12
図 2.2-2 周波数バイアス/位相フェーズにおける相関値	14
図 2.2-3 汎用測位技術の 4 象限マトリクス分類	16
図 2.3-1 各象限で検討する測位技術の技術要件	17
図 3.1-1 本章提案の測位技術概要	21
図 3.2-1 光ビーコン投受光器の外観図	23
図 3.2-2 スポット通信エリア仕様	24
図 3.2-3 通信境界の説明図	25
図 3.2-4 DL 通信エリア形状 (TopView) の測定結果	27
図 3.2-5 遮蔽板と光ビーコン入射角の関係	28
図 3.2-6 α と赤外線遮断特性の関係	28
図 3.2-7 車幅方向に走行位置が逸れた場合の光遮断の様子	30
図 3.2-8 遮蔽板の設計図 (単位 mm)	32
図 3.2-9 試作遮蔽板の設計(単位 mm)	33

図 3.2-10 遮蔽板の性能評価実験系	34
図 3.2-11 車両位置—受光強度特性	35
図 3.2-12 境界検出地点に誤差要因が与える影響	36
図 3.2-13 走行実験環境	37
図 3.3-1 提案方式概要	43
図 3.3-2 ジャイロを使用した自律航法技術の原理	44
図 3.3-3 ジャイロの温度特性	44
図 3.3-4 ジャイロの経過時間特性 (温度=35℃)	45
図 3.3-5 自律航法性能の評価実験コース	46
図 3.3-6 自律航法による車両の移動軌跡 (感度補正なし)	47
図 3.3-7 感度と自律航法による距離誤差の関係	47
図 3.3-8 自律航法による車両の移動軌跡 (感度補正あり)	48
図 3.3-9 測位誤差の要因と測位誤差	48
図 3.3-10 車頭方位検出方法	49
図 3.3-11 実車による評価実験系の概要	50
図 3.3-12 自律航法技術の単独評価走行ルート	51
図 3.3-13 自律航法技術による誤差	51
図 3.3-14 光ビーコンを使用した評価ルート	52
図 3.3-15 光ビーコンを使用した評価結果	52
図 3.3-16 車両走行位置 (レーン方向) の分布特性 (PDF)	54
図 3.3-17 車両走行位置 (レーン方向) の分布特性 (CDF)	54
図 3.3-18 光ビーコン測位誤差	55

図 3.3-19 提案方式の理論位置推定誤差.....	56
図 3.3-20 ビーコン間隔と自律位置推定誤差特性	57
図 4.2-1 方位誤差による測位ズレ	66
図 4.2-2 方位誤差発生原因	66
図 4.2-3GPSを使った方位補正方法.....	68
図 4.2-4 歩行軌跡における位置精度	69
図 4.2-5 曲り角でGPSを測位する方式	70
図 4.2-6 直線部分で複数点GPS測位する方式	71
図 4.2-7 実験歩行経路	72
図 4.2-8GPS 単体連続測位による歩行軌跡	74
図 4.2-9 単位ベクトル加算方式での歩行軌跡	74
図 4.2-11 方式2による歩行軌跡	75
図 4.2-10 方式1による歩行軌跡	75
図 4.3-1 帯磁による旋回角変動の原因.....	83
図 4.3-2 帯磁オフセットと旋回角度出力の関係	84
図 4.3-3 帯磁による測位ズレ	84
図 4.3-4 GPS による方位補正.....	85
図 4.3-5 曲がり角での地磁気の変化	87
図 4.3-6 一時的な磁場の変化	87
図 4.3-7 リンク情報をGPSで補正するシミュレーションモデル	89
図 4.3-8 バネモデル概要図.....	89
図 4.3-9 シミュレーション結果.....	91

図 4.3-10 位置エネルギーと深度の関係.....	92
図 4.3-11 実験歩行ルート	94
図 4.3-12 提案手法による実験結果.....	95
図 4.3-13 地磁気ノイズ除去対応時の補正経路.....	96
図 4.3-14 地磁気ノイズ低除去法とバネモデルによる補正経路.....	98
図 5.2-1 空間情報サービス階層化概念図	104
図 5.2-2 実験システム概要	106
図 5.2-3 超音波発信機付ユビキタス IP 携帯端末.....	107
図 5.2-4 各モジュールの測距精度の経時変化.....	110
図 5.2-5 測位精度	110
図 5.2-6 測位精度経時変化.....	111
図 5.2-7 評価システム概要	111
図 5.2-8 実験端末表示部	112
表 2.1-1 「活用例と技術のマトリクス」における活用例仮説（29例） [6]	10
表 2.2-1 主な汎用測位技術の性能比較.....	15
表 3.2-1 誤差要因による累積誤差.....	36
表 3.2-2 実験結果.....	38
表 3.3-1 車両速度と車速パルス誤差.....	46
表 4.2-1 被験者と歩幅.....	72
表 4.2-2 各方式による精度比較.....	76

表 4.2-3 各方式における GPS の測位精度より位置精度がよい評価データの割合	77
表 4.2-4 各方式による方位精度比較	77
表 4.2-5 GPS 稼働時間.....	78
表 4.2-6 GPS 稼働時間の削減率	79
表 4.2-7 各方式による精度比較.....	80
表 4.3-1 最適化手法と深度による位置エネルギー最小値の比較	93
表 4.3-2 各方式における測位精度の比較	96
表 4.3-3 曲がり角検出率の比較.....	97
表 5.2-1 各モジュールまでの測距精度.....	109
表 5.2-2 測距結果から演算した測位精度	109