

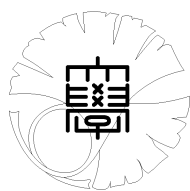
修 士 論 文

センサフュージョンによる Urban Canyon における 歩行者位置推定

Pedestrian Position Estimation in Urban Canyon by Sensor Fusion

指導教員

上條 俊介 准教授



東京大学大学院
情報理工学系研究科
電子情報学専攻

学籍番号・氏名 48-136420 砂川 健一

提出日

2015 年 2 月 5 日

概要

歩行者位置推定技術は歩行者のナビゲーションやウィンドウショッピング等でのマーケティング、交通量マネジメント等のロケーションサービスの分野において重要になってきている。近年ではセンサ類を搭載したスマートフォンの登場により携帯端末上のアプリケーションとしての歩行者位置推定が実現可能になった。本論文では様々な誤差要因が含まれる Urban Canyon と呼ばれる都会環境において、歩行者デッドレコニング (PDR, Pedestrian Dead Reckoning) や GPS(Global Positioning System) を用いて測位精度を向上させる複数のアプローチについて述べる。まず、局所的な磁場の偏向量の分布データを作成し、それを用いて PDR の進行方向を補正する手法を提案する。次に、PDR と GPS とのフュージョンにおける GPS の精度に関して、GPS 受信機によらない新しい精度の算出方法を提案する。最後に実際の屋外環境において実証実験を行い、いずれの手法も歩行者位置の推定精度向上に有効であることを確認する。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	2
1.3	本論文の構成	3
第 2 章	関連研究	4
2.1	センサユニットを身につけて行う PDR	4
2.2	携帯端末を用いた PDR	6
2.3	磁場偏向情報の利用	8
2.4	他測位技術との融合手法	9
第 3 章	歩行者デッドレコニングシステムと磁場偏向補正技術	12
3.1	PDR システム	12
3.2	磁場偏向マップを用いた推定進行方向の修正	16
第 4 章	PDR・GPS フュージョンにおける GPS 精度の定量化	21
4.1	カルマンフィルタの枠組みによる PDR と GPS の統合	21
4.2	GPS と測定誤差	24
4.3	Android から出力される GPS 精度の評価とマルチパスの検出	34
4.4	提案する GPS 精度の計算手法	35
第 5 章	実験	36
5.1	実験環境設定	36
5.2	磁場偏向マップを用いた手法に対する実験結果	39
5.3	GPS 精度を用いた手法に対する実験結果	40
5.4	提案手法の統合による実験結果	41
第 6 章	結論と今後の課題	50
6.1	結論	50
6.2	今後の課題	50

iv 目次

謝辞	52
発表文献	53
参考文献	54

目次

2.1	誤差のある PDR 軌跡の例	8
3.1	PDR システムの概観	13
3.2	歩行動作時の鉛直方向および前方向の加速度の推移	15
3.3	本研究における磁場偏向の定義	17
3.4	磁場偏向の時間変化の例	18
3.5	磁場偏向マップの作成	20
4.1	DOP 値が小さい場合における衛星の配置例	33
4.2	DOP 値が大きい場合における衛星の配置例	33
4.3	スマートフォンによる GPS Accuracy 値とその時の実際の位置誤差	34
5.1	実験に使用したスマートフォン	37
5.2	実験に用いた GPS 受信機	38
5.3	一ツ橋での実験コース	42
5.4	一ツ橋での 3 次元俯瞰図	43
5.5	一ツ橋での磁場偏向マップサンプル点と、主要な道での磁場偏向カラーマップ	44
5.6	Urban Canyon における磁場偏向マップを用いた実験結果	45
5.7	Urban Canyon における新たな GPS 精度を用いた実験結果	46
5.8	皇居外苑での実験コース	47
5.9	皇居外苑周辺の 3 次元俯瞰図	47
5.10	皇居外苑での新しい GPS 精度を適用した実験結果	48
5.11	提案手法の統合による実験結果	49

表目次

4.1	本研究で用いる各誤差の標準偏差 [m]	32
5.1	実験における PDR システムのパラメータ設定	37
5.2	実験における PDR+GPS カルマンフィルタのパラメータ設定	38
5.3	磁場偏向マップを用いた手法に対する実験での位置推定誤差平均値 [m] . . .	39
5.4	新たな GPS 精度を用いた手法に対する実験 (一ツ橋) での位置推定誤差平均 値 [m]	40
5.5	新たな GPS 精度を用いた手法に対する実験 (皇居外苑) での位置推定誤差平 均値 [m]	41
5.6	提案手法の統合に対する実験 (一ツ橋) での位置推定誤差平均値 [m]	41

第 1 章

序論

本研究では、様々な誤差要因を潜在的に含み難いとされる Urban Canyon における歩行者位置推定について、その測位精度の向上を実現した。本章では本研究の背景と目的、本論文の構成について述べる。

1.1 研究背景

歩行者の現在位置を精度良く推定する技術は、様々な情報システムにおいて重要な要素である。第一に考えられるものとしては交通安全分野における事故防止システムが挙げられる。ITS(Intelligent Transportation System, 高度交通システム) 分野において高く注目されており、世界中で様々な研究が行われている。これらのシステムは歩行者の安全に関わるため非常に高い位置推定精度が要求され、また自動運転技術としてのプリクラッシュセーフティシステム等の事故を未然に防ぐアクティブセーフティー分野ではいかに素早く歩行者を検知・認識できるかも重要になるため情報処理時間の短さも求められる。これらの解決手法として用いられるセンサはレーザーレーダー (LIDAR) やミリ波センサ、赤外線センサ、カメラセンサ等大小さまざまなものがあり、その設置場所も路上、車載と多岐にわたる。最近の研究ではインターネット上の 3D マップを用いて自己位置を計算する手法等も存在し、計算リソースを含め大規模になる傾向がある。

一方で歩行者推定技術は、歩行者自身のナビゲーションや、局所的な位置に応じて適切な情報を歩行者に提示するマーケティングなどのロケーションサービス分野においてもまた重要である。近年位置情報を利用したサービスは様々なゲームやソーシャルネットワークサービスで多く利用されており、特定の地域や施設における人の流動分析を多数の歩行者からの連続した位置情報収集によって行うといった調査・研究を意図したものにも利用される ([1] など)。この場合、非常に正確な位置推定よりも簡単に位置を推定できることが重要になるため、カメラ等の安価で手に入れやすいセンサや携帯性に優れているセンサを用いたものが多く研究されている。特に近年爆発的に普及が進んだスマートフォン等の携帯情報端末には加速度センサや磁気センサ、GNSS あるいは GPS 受信機等の複数のセンサが搭載されており、より多様で簡便な歩行者位置推定ができる環境となってきた。

2 第1章 序論

ロケーションサービス分野においては、歩行者位置推定を行う場所として大きく屋内環境と屋外環境に分けられる。屋内環境においての推定では屋外環境に比べてインフラとしてのセキュリティカメラや Wi-Fi スポットが多いためこれらを利用した画像処理による位置推定や Wi-Fi フィンガープリンティングなどの技術が盛んに研究されている。しかし、屋外環境においては上記のセンサの設置に対するコストパフォーマンスが低下する。

屋外環境において歩行者が現在位置情報を取得する手段として GNSS (Global Navigation Satellite System) がある。現在異なる国、機関によって複数種類の GNSS が運用されているが、その中でも広く普及しているものがアメリカ合衆国によって運用されている GPS (Global Positioning System) である。複数の衛星との距離から位置を推定するこの手法は Urban Canyon (Urban Canyon) と呼ばれる周りに高いビルの多い都市部などでは特に、建物による衛星電波の遮断、反射により測位精度が大きく低下してしまう。

GNSS が絶対位置を測定する手法である一方で、歩行者自身が所持したセンサによって移動の変移を継続的に測定し、初期位置との相対位置を算出する歩行者デッドレコニング (Pedestrian Dead Reckoning) の手法がある。PDR では歩行者が主に磁気センサや等加速度センサを身につけそれらによって歩行する際の体の動きを計測し、計測結果から歩幅情報や移動速度、進行方向を推定することで変位を求めるのが一般的となっている。PDR のメリットとして GNSS と異なり電波の伝搬環境によらず、また道路や建物等のインフラにも特別な設備を必要としないという点があるが、推定手法の特性上計測誤差が蓄積し徐々に推定パフォーマンスが劣化するデメリットが存在する。

スマートフォン等の高度な携帯情報端末には、GPS 受信端末だけでなく、加速度センサ・磁気センサを含む多様なセンサが搭載されているため、PDR および GPS は専用の機器を身につけることなく、身近に動作するアプリケーションとして実現可能となっている。

1.2 研究目的

本研究ではスマートフォンによる PDR および GPS を利用した歩行者位置推定について、特に都市部の Urban Canyon においてよく発生する誤差要因を克服し位置推定精度を向上させることを目的とする。具体的な位置推定精度向上手法として次の2点を定める。

- 1) PDR システムにおいて進行方向を推定する場合磁気センサがよく用いられる。しかし歩行者の周辺に局在する人工物等の影響によって地磁気以外の磁気成分によって磁場の方向が乱れる磁気擾乱のために進行方向に大きな誤差が生じることがある。このような環境は電気設備等が多く存在する都市部に多いと考えられるが、そのような環境でも進行方向推定が正しく行えるようにするため、局所的な磁場ベクトルの偏向量の分布データを作成し、進行方向を修正する機構を提案する。
- 2) Urban Canyon において GPS 測位は建物等により受信電波が反射・吸収されてしまうため、ビル等がない Open Sky な地域と比べて正しく位置推定を行うことが難しい。これにより PDR と GPS をフュージョンさせる場合には GPS がどの程度正確に位置を

推定できているかの精度が重要になってくるが、電波の反射や吸収が頻繁に起こる都市部における PDR フュージョンのための GPS の精度の計算手法を提案する。

上記 2 点の技術を適用した推定結果の目標として、幹線道路において歩行者が左右どちら側の道路にいるかが判別できる程度まで誤差を低減することを目指す。これは位置を利用した情報サービスや人流分析といったアプリケーションにとって左右の差が大きな意味を持つことに由来している。なお、本研究において扱う PDR は屋外環境で使われることを想定し、また位置推定は水平方向のみ行うものとする。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。第 1 章では、本研究の背景および目的について述べた。

第 2 章では、PDR や GPS、磁場偏向などの、提案手法に関連する主な研究を紹介する。

第 3 章では、本研究で用いる PDR システムについて述べ、PDR において局所的な磁場偏向量の分布データ (磁場偏向マップ) を適用する手法を提案する。

第 4 章では、歩行者デッドレコニングと GPS をカルマンフィルタによってフュージョンする手法を述べ、フュージョンにあたり重要な概念となる新しい GPS 精度の算出方法を提案する。

第 5 章では、第 3 章および第 4 章で説明した手法を使った実際の屋外の環境での実証実験とその結果について述べる。

最後に、第 6 章で結論と今後の課題を述べる。

第 2 章

関連研究

近年、爆発的な勢いで携帯情報端末が普及し、個人で携帯電話やスマートフォン、タブレット端末等をもって行動することが当たり前の時代となったことは周知の事実である。これらの機器には GPS 受信機だけでなく、様々な IMU センサ（加速度計、ジャイロセンサ、磁気計など）が合わせて搭載されていることが一般的である。

そのような背景から、個人の位置情報を正確に推定することは重要度を増してきている。PDR も位置を推定する要素技術の一つとして、非常に多くの研究者がこれまでに研究を進めており、多くの関連研究が存在する。

PDR の研究分野の一つにポジショニングとナビゲーションをトピックとする分野がある。この分野では、端末を持った歩行者や車両などが GPS や電波強度による位置推定を行ったり、RFID (radio frequency identification) や慣性センサを合わせて用いることで位置を推定することを目的とする。

地球上の絶対座標を知りたい場合に、最も簡便に用いられるのは GPS を用いた測位であるが、これを行うためには GNSS の電波が端末に届いていることが前提となる。したがって、GPS の電波が届きにくい Urban Canyon や屋内などでは基本的に GNSS による測位はできず、仮に電波を受信できたとしてもその位置推定結果は真の位置と大きく乖離している場合が多い。そのような状況下でも PDR は信頼できる位置推定を提供することができる。よって、PDR の研究分野では GPS の電波が届きにくい都市部や室内での位置推定手段を提供する」という目的設定を前提としている場合が多い。

本論文では 2 つの手法の提案を行うが、どちらも PDR を使った測位に関するものであるため、2.1 から 2.4 まで PDR を軸とし、それに関連する研究を紹介する。

2.1 センサユニットを身につけて行う PDR

近年のセンサの進化はめざましく、小型・軽量かつ低コストな MEMS (micro-electro-mechanical system) センサの技術の発達により、従来携帯端末には搭載が難しかった様々なセンサも、当たり前のように携帯端末に搭載されるようになった。従来は慣性センサを搭載できたのは航空機、船舶、ロケットなど大型の移動体に限られていたが、これらの研究が人間に

も応用されるようになった。前者に搭載されるような慣性航法システム (inertial navigation system, INS) は一般に、加速度値を二回積分することにより変位を算出する。しかしこれをそのままに人間が身につけたセンサに用いることは誤差の蓄積の観点から現実的ではない。MEMS センサが持つ誤差が、積分操作により時間の二乗に従って蓄積される結果、人間の移動速度に比べて急速に位置誤差が生じてしまうためである。

そこで、この問題を回避するため、PDR においては、人間の歩行動作の特性を利用して間接的に変位を求めるアルゴリズムが用いられる。これは、人間が歩行する際に観測される周期的な体の動きと計測値のレンジを利用して一步一步のステップを検出する方法である。歩行時に得られるセンサの周期的かつ特徴的なパターンと、歩行者の速度によって変化する計測値のレンジをパターン化し、ステップ検出と歩幅、移動速度が得られるようなモデルを考える。

たとえば歩幅 l と進行方向 θ が求められたとき、初期位置から数えて n 歩目の位置座標 $\mathbf{x}_n = (x_n, y_n)^T$ は以下のように計算される。

$$\mathbf{x}_n = \mathbf{x}_{n-1} + \begin{pmatrix} l \cos \theta \\ l \sin \theta \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

このように一步一步ごとに位置を更新するステップベースの PDR アルゴリズムは、その原型を Point Research 社の Levi および Judd による研究 [2, 3] に見ることができる。Levi らは、鉛直方向の加速度値からピーク検出アルゴリズムによってステップを検出した。歩幅については、ステップ頻度 (単位時間当たりの歩数) の一次関数として計算するモデルを提案した。進行方向については、身につけたセンサの計測軸が体の向きと一致していると仮定し、磁気センサを用いて推定した。

これ以降、センサユニットを体の特定の部位に身につけて行う PDR の研究が進められた。Ladetto ら [4] は、進行方向の推定に関して、磁気センサとジャイロセンサを相補的に用いる手法を提案した。ある場所において、磁気擾乱の影響度を計測し、磁気擾乱の影響が比較的小さいと判断した場所では磁気センサの値を参照してジャイロセンサの誤差を修正し、逆に磁気擾乱の影響が大きいと判断した場所では磁気センサの代わりにジャイロセンサを用いて方向を推定するというものである。

Fang ら [5] は、各種センサ (加速度センサ・磁気センサ) に無線通信機器を内蔵したプラットフォームを提案した。これは、ユーザは PDR の計算を行う端末を持つのではなくセンサとそのセンシング結果をサーバに送るための通信機器のみを内蔵した機器を持ち歩き、それらのデータをサーバに送信して結果をサーバから取得することで、ユーザ側が持ち歩くべき機器の重量や電力消費の負担を減らすことに成功した。

また彼らは、磁気センサのキャリブレーションの方法として、ユーザが円周上に歩くことでセンサをキャリブレーションする手法も提案した。

Sun ら [6] は、加速度センサと磁気センサを用いた PDR について、機械学習の手法を用いてその精度を向上させる方法を提案した。センサから計測した加速度の値から、フーリエ変換を用いて特徴量を抽出し、確率的ニューラルネットワークを学習することで歩行者の行動を歩行・静止・不規則動作の三つに判別した。この結果から歩行と判断される場合にのみ PDR を用いることで、歩行者の不規則な動作による振動を誤検出することを防止することに成功

した。

また、PDR の計測結果はそのセンサを体のどこに身につけるのかによって影響を受けることが知られている。通常であれば、センサに加わる振動は個人差が少なく、進行方向に関係ない回転の力が加わりにくい場所が望ましいとされる。[5] や [6] ではセンサユニットをベルト等で腰に固定して実験を行っているが、腰は人体の重心に近く、上記の条件も適度に満たすためセンサの保持場所には適していると言える。

一方、Beauregard ら [7, 8] や Jimenez ら [9] は、足の甲に固定したセンサユニットを用いる PDR システムについて提案した。静止した状態で速度の誤差を補正するキャリブレーション操作のことを速度ゼロ補正 (zero velocity update, 慣例的に ZUPT と略される) と言うが、センサが足に付けられている場合、歩いている時も足が地面と接触している間は速度がゼロになることを利用し、毎ステップで ZUPT を行うことができる。このため、加速度の二回積分でもある程度正確に歩幅を推定することができる。

2.2 携帯端末を用いた PDR

近年は、多様なセンサ類を搭載したスマートフォン等の携帯情報端末の普及が世界的に進んでおり、それにしたがって、携帯端末一台でセンシング・位置推定処理・他のアプリケーションやサービスへの情報提供を一通り行うことを想定した PDR システムの研究が、多く行われるようになってきた。

携帯端末のセンサを利用した PDR は、専用のセンサ端末を身につける従来の PDR システムで用いられてきた手法をほぼそのまま踏襲することができるが、携帯端末自体の利用目的が、本来は PDR をするためのものではないので、携帯端末の日常的な使用形態からは逸脱しないような実用的な状況を想定しなければならないという制約があることに注意しなければならない。具体的には、「センサは一つずつしかなく、それらは同一の箇所にとまっていること」「消費電力がより懸念すべき事項となること」などが挙げられるが、最も重要なのは「体に対するセンサの姿勢（向き）は変化しうること」である。専用のセンサユニットを用いる場合、センサが固定されている方向や部位をある程度限定することでそれに付随する誤差は既知のものであるとしてその修正もしやすい。しかし、実際の携帯端末でそのような固定方法や保持位置を限定することは、ユーザがにとっては不便でしかなく、現実的ではない。そのため、端末をポケットに入れたり手に持って歩いたりといった、体に対するセンサの姿勢（向き）が変化しうる状況を想定する事が必要である。この場合、センサによる計測値から体の向いている方向を推定する処理が PDR システムに組み込まれ、その処理の正確さが位置推定の誤差に影響する。あるいは、三軸計測値のノルムのみを利用するなど、センサの姿勢に無関係な手法を選択する。

Kunze ら [10] は、センサの座標系から見た身体の進行方向を継続して計測した加速度の値から推定した。人間が足を振り動かす時、振動により前後方向に特に大きな加速度がかかることを利用し、加速度の水平成分を主成分分析 (principal component analysis, PCA) を適用することで体の前後軸を決定した。Steinhoff ら [11] は、同様に PCA に基づいた手法につい

て、いくつかのバリエーションを検討しどれが最も精度が良いか検証した。また、その手法を取り入れた PDR システムを構築し、多数の参加者・多種のズボンを使って位置推定・追跡の実験を行った。その結果、端末の進行方向誤差は一回毎の軌跡ではほぼ一定であること、服装などによっても端末にかかる振動特徴が異なることを発見した。

Hoseinitabatabaei ら [12] は、太腿の移動と回転が端末に与える加速度の関係を表す式を導出した。さらに、歩行動作の周期の内、端末を保持している方の足が地面に設置している時に、加速度の前後方向以外の成分が最小になることを理論的に説明している。このことを利用し、最初に鉛直方向の加速度からかかとが地面につくタイミングとつま先が地面から離れるタイミングを検出し、それらの中間点における水平加速度の方向から進行方向を推定した。

一方、ユーザが端末を手にとって歩くケースに対応した研究として、[13, 14] が挙げられる。こちらは、ユーザが携帯端末で何らかのアプリケーションを利用している時に同時に位置推定を行う状況を想定している。Kamisaka ら [13] の PDR システムは、端末を目の前に保持して画面を見ながら歩いている状態、および画面を見ずに手を振って歩いている状態を想定した。計測した磁場ベクトルの変化からそれら二つの状態を判別する手法を提案し、また、それらの状態に対応したステップ検出や進行方向推定の手法を提案した。Susi ら [14] も同様に、端末を目の前に保持するか耳に当てながら歩いている状態および手を振って歩いている状態を判別する手法を提案し、そしてそれらの状態に対応したステップ検出手法を提案した。これらの研究の共通点として、端末を保持している場合とそうでない場合で、手法を分けて考えている。特に、端末を振って歩く場合には、足が地面につく際の振動が加速度としてピークの検出が難しいため、代わりに磁気センサやジャイロセンサで腕のふりの周期を推定する手法を採用している。

2.2.1 歩行モデル

PDR の位置精度は、ステップ検出、歩幅推定、進行方向推定のプロセスにおける精度に大きく依存する。ステップ検出と歩幅推定における誤差は、移動距離が本来より短く/長くなる誤差となり、進行方向推定における誤差は、移動した方向に対して左右にずれる誤差を生じる(図 2.1)。

ここで、人間の歩幅は歩く速度、身長、歩く姿勢、靴の種類、路面の状態など、個人や時、状況に対して変化するものである。したがって、多くの PDR システムでは、固定の歩幅を用いるのではなく、センサ情報から歩幅を動的に推定することで、移動距離の面で高精度化を図っている。ただし、実用性の観点から、この歩幅を推定するアルゴリズムにおいては、ユーザの身長や脚の長さといった情報を事前に入力が必要であることが好ましい。

先述の Levi ら [2] は、歩幅 l はステップ頻度 f の一次関数に従うとする以下のモデルを提案している。

$$l = l_0 + K(f - f_0) \quad (2.2)$$

l_0 , f_0 はそれぞれ歩幅とステップ頻度の初期値であり、個人によって異なる係数 $K(> 0)$ は

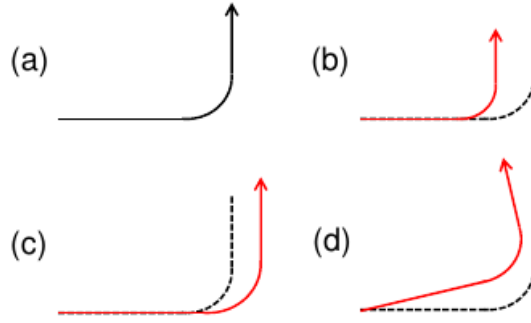


図 2.1. 誤差のある PDR 軌跡の例 (a) 正解軌跡 (b) 推定歩幅が真の歩幅より短い場合
(c) 推定歩幅が真の歩幅より長い場合 (d) 推定進行方向に誤差がある場合

キャリブレーションを行って決定する．このモデルは歩みが速いほど歩幅も大きくなることを表している．ただし，Egerton らの実験 [15] によると，被験者に自然な歩行動作を行わせたところ，毎分 150 歩以下では 95% 以上が線形モデルに従ったが，毎分 150 歩を超えると一部の被験者では歩幅が減少し始め，全体として線形ではなく上に凸な二次関数に従う歩幅になる．

また，Weinberg[16] は，人間の歩行動作を表す力学モデルの一つである倒立振子モデルを用いて，鉛直方向の加速度 a_v から歩幅 l を計算する以下のモデルを提案している．

$$l = K \sqrt[4]{a_{v,max} - a_{v,min}} \quad (2.3)$$

$a_{v,max}, a_{v,min}$ はそれぞれ，前回のステップから今回のステップまでの鉛直方向加速度の，最大値と最小値であり，個人によって異なる係数 $K(> 0)$ はキャリブレーションを行って決定する．このモデルは歩幅が大きいほど体の垂直方向の動きも大きくなることを表している．

上記の二つ以外にも様々な歩幅モデルが経験的に導き出され，提案されてきた．Kim ら [18]，Bylemans ら [19] は，一ステップの間の鉛直方向加速度の絶対値を用いて歩幅を求める，それぞれ別々のモデルを提案している．これらの提案を受けて，Jahn ら [20] は [16][18][19] において提案されている歩幅モデルの比較実験を行っている．その結果，いずれのモデルにおいても誤差の平均は 5% 程度であるが，[18] のモデルは個人や歩行速度によって誤差の偏差が大きく，[16] と [18] の方法は平均的な速度での歩行時に推定誤差が小さいというような、モデル間での利点および欠点を明らかにした．

このように歩幅モデルでは多くのモデルが提案されているものの，式 (2.2) や式 (2.3) は，シンプルな形ながらある程度高い精度で歩幅を推定できるモデルであるとして，現在まで多くの PDR 研究において用いられている．特に，式 (2.3) はパラメータが一つであり複雑なモデルのものに対し簡単に実装できるという利点がある．

2.3 磁場偏向情報の利用

PDR システムにおいては歩行時の進行方向を推定する必要があるが，地表面上では南北方向に地磁気による磁場が存在しており，これを磁気センサによって計測することで，センサの

姿勢を知ることができ、センサから見た体の進行方向と絶対的な方角を比べることで、東西/南北の地図座標上での歩行者の進行方向を決定することができる。しかし、何らかの要因によって地磁気以外の磁気成分が加わり、その結果トータルの磁場の方向が変化してしまう磁気擾乱のある場所では、磁気センサで正確な方角を知ることは難しい。磁気擾乱の原因としては、ビルや車といった鉄製の構造物、送電線や変圧器といった電力設備、コンピュータや家電製品といった電子機器などが挙げられ、都市部の歩道や屋内など PDR の効果が期待される場所は同時に、磁気擾乱の存在しやすい環境であるとも言える。

しかし、多くの PDR 研究において、磁気擾乱の影響は特に言及されていないか、もしくは予測不可能な誤差成分として扱われている。Chen ら [21] の研究では、磁気センサを用いた進行方向推定に関して様々な誤差要因をモデル化しその影響を議論したが、磁気擾乱による誤差は予測不可能な誤差であるとして考慮する対象から外している。

一方で、特定のエリアにおける磁場偏向 (磁場ベクトルの方向や大きさが、純粋な地磁気の磁場と比べてどの程度変化しているか) の情報を利用することで、位置推定・追跡の高精度化が可能であることが主に移動ロボティクスの分野の研究から見てとれる。

PDR における Judd ら [22]、移動ロボティクスにおける Rahok ら [23] は、“フィンガープリンティング” の考え方に基づいて、位置追跡の途中で位置を修正する手法を提案した。まず準備段階として、ロボットあるいは歩行者の行動範囲における磁場を移動しながら計測、磁場の異常を検知した場合、その磁場偏向のパターンとそれが起こった場所 (区間) との対応をデータベース化する。そして、位置推定・追跡を行う段階では、データベースと一致するような磁場偏向を観測した場合、それに対応する場所へと現在位置を修正する。これらは磁場の異常の判定が微分によって判定されるが、PDR のようなさらに Urban Canyon 下において適用は難しいと考えられる。

また、Navarro ら [24] は、ロボットの行動エリア全体における磁場偏向の分布を利用して進行方向推定を行う手法を提案している。まず、予め行動エリア内にグリッド上に設定した基準測定点で磁場を計測し、測定位置と磁場偏向値の対応のデータベース化を行う。そして、位置推定/追跡の実行時は、データベースの補間によって現在位置における磁場偏向を求め、これと磁気センサ計測値からロボット進行方向の推定を行っている。

2.4 他測位技術との融合手法

式 (2.1) において、 n ステップ時の位置 \mathbf{x}_n の誤差は、一ステップ前における位置 \mathbf{x}_{n-1} の誤差に、歩幅 l や進行方向 θ の誤差を加えたものとなる。つまり PDR は、過去の位置を基準に現在の位置を推定するという逐次的な方法を取るために、誤差が蓄積していく性質がある。そのため、PDR のみを長時間使用しながら、十分な位置精度を保つことは難しく、PDR を適用する際の欠点となっている。

こうした背景から、PDR と他の過去の測位結果を用いない非逐次的、絶対位置を直接測位する手法と組み合わせて高精度化を図る研究が数多くなされている。以下の項で、本研究でも重要な技術である GPS や、Wi-Fi, RFID, 地図情報を用いるマップマッチングについて述

べる。

2.4.1 GPS

元来 PDR は GPS 測位の代替手段として想定され研究が行われてきたという背景が存在する。Levi ら [2, 3] を始めとして、基本的な概念は、GPS が利用可能な時は GPS のみによる測位を行い、その結果から PDR のパラメータを学習/補正し、GPS が利用できなくなった時のみ PDR に切り替えて位置追跡を行う、二者択一的なものであった。

これに対し、Jirawimut ら [25]、興梠ら [26]、Gusenbauer ら [27] は、PDR と GPS を共に常時利用する手法を提案している。PDR と GNSS を融合的に利用する場合、カルマンフィルタが用いられることが多い。これは導入が他のフィルタの場合よりも簡単で、かつ PDR を状態遷移モデルとして用いることで PDR の長所を生かすことができると考えられているからだと推察される。カルマンフィルタに関する詳細は後述するが、システムから観測される雑音をを含んだデータに対して、線形な状態遷移モデルと観測モデルを仮定し、予測/更新処理によって、再帰的に潜在的なシステムの状態を推定するものである。[25][26][27] では、状態を位置座標、また観測量の誤差のモデルとして GPS の DOP 値から算出される値を用いることで、GPS 測位の誤差が考慮されている。また、[26] と [27] は、PDR による推定変位をカルマンフィルタにおける状態遷移モデルとして利用している。

このように PDR と GPS を融合的に利用することで、PDR のみ/GPS のみで使用した場合に比べて、少なくともそれらのうち精度の悪い方より高い精度を保つことができる。しかし、いずれの研究も GPS 受信感度が良好である Open Sky の環境での実験や、マップマッチング等の他の技術を利用した屋内での実験であり、高層ビルの立ち並ぶ Urban Canyon における実験は少ない。GPS において測位した結果を正しく評価することは難しく、特に都市部において測位結果がマルチパスなどの影響を受けて著しく悪くなることが知られているが、その精度の良し悪しを評価することは困難であることが知られている [28]。

2.4.2 Wi-Fi

Wi-Fi の電波強度を用いる手法は、特に携帯情報端末向けの位置推定技術として取り上げられることが多い。

Wi-Fi フィンガープリンティングと呼ばれる手法は、いくつかの場所において、観測されるアクセスポイントの識別情報 (MAC アドレス等) およびそれぞれの電波強度のリストを位置情報と対応付けたデータベースとしてあらかじめ作成し、実際の測位の際には観測されるアクセスポイントごとの電波強度に対しそのデータベースを参照することで位置を推定する。Seitz ら [29] は、この Wi-Fi フィンガープリンティングと PDR を、隠れマルコフモデルを用いることによって複合的に利用する手法を提案した。Wi-Fi データベースの位置情報を各隠れ状態、観測される電波強度をその出力、PDR を状態間遷移モデルとして適用してゐる。

また、アクセスポイントの密度が高い都市部やビル内部で効果が高いことから、Wi-Fi フィ

ンガープリンティングは GPS とも相補的な手段として用いることができる。

2.4.3 RFID

RFID(Radio Frequency IDentifier) は、ID 情報を埋め込んだ RF タグから電磁界や電波などを用いた無線通信のシステムであり、特定の場所に設置された RFID タグと通信することによりその位置情報を取得することができる。ただし、先述の Wi-Fi アクセスポイントのように既存の利用可能な設備があるわけではなく、またタグのある場所でしか位置情報を取得できないため、他の手法に対して実用性に乏しい手法と考えられる。

興梠ら [26] や Wakuda ら [30] は、RFID を用いた位置特定を使い、PDR で推定した位置を修正するとともに進行方向等補正を行う手法を提案している。

2.4.4 マップマッチング

マップマッチングとは、地図情報を用い、移動体を取りうる位置に対してその地図上で制約条件をかける手法である。例えば、実交通社会において車両の通行可能な領域のほとんどが車道である。よって、車両の通行領域を地図上の車道に限定することによって、その他の測位手法による推定位置や軌跡を車道上に修正することが可能であり、実際にカーナビゲーションシステムはこの手法により位置推定精度を高めていることが知られている。

これは歩行者の場合も同様な制約を仮定することが可能で、道路上に位置を制限する手法のほか、屋内の場合はビルフロアマップなども利用できる。Gusenbauer ら [27] は、加速度から特定の歩行者の行動モード(階段やエレベータの上昇下降)を判別する識別器を作り、その識別モードに対して適した地図上の位置に修正する手法を提案した。また、Wakuda ら [30] は、歩道や横断歩道を網羅した地図データを作成し、動的時間伸縮法(dynamic time warping)を用いて PDR の軌跡全体をその地図上にマッチングする手法を提案している。

しかし追加のデータセットが必要になる、歩行者が歩道を外れた動きをするなどの異常に対して非常に脆弱である等の欠点がある。歩行者位置推定がある程度正しく行われた後の副次的な処理として大きく活用できると考えられる。

第 3 章

歩行者デッドレコニングシステムと 磁場偏向補正技術

本章では，垣内 [31] が構築した Pedestrian Dead Reckoning(以下 PDR) システムの構成と各プロセスの詳細について述べ，続いて提案手法である局所的な磁場偏向の補正方法について解説する．

3.1 PDR システム

本研究の PDR 部分は垣内が提案したシステムをベースとしており、PDR システムの概要を図 3.1 に示す．入力は加速度センサ/磁気センサから同一サンプリングレート，座標系 (3 軸) で得られる加速度/磁場計測値であり，図 3.1 中に対応する以下の 5 つのプロセスによって，端末位置の推定を行う．

姿勢推定 (Device Orientation Estimation) 計測端末の姿勢の推定

ステップ検出 (Step Detection) 歩行動作 (ステップ) の検出

進行方向推定 (Stride Length Estimation) 一ステップ間の移動方向の推定

歩幅推定 (Direction Estimation) 一ステップ間の移動距離 (歩幅) の推定

位置更新 (Displacement) 現ステップにおける推定歩幅/進行方向と一ステップ前までの推定位置を用いた位置の更新

以降の節ではこれらの各プロセスに関する詳細を述べる．

ここで PDR システムは実行環境としてスマートフォン等の携帯端末を，そしてその保持場所として最も多い場所と考えられるポケットに限定して推定を行う．

3.1.1 姿勢推定

本節では，入力である加速度と磁場の観測値を用いて，計測端末の姿勢 (方向) を推定するプロセスに関して述べる．

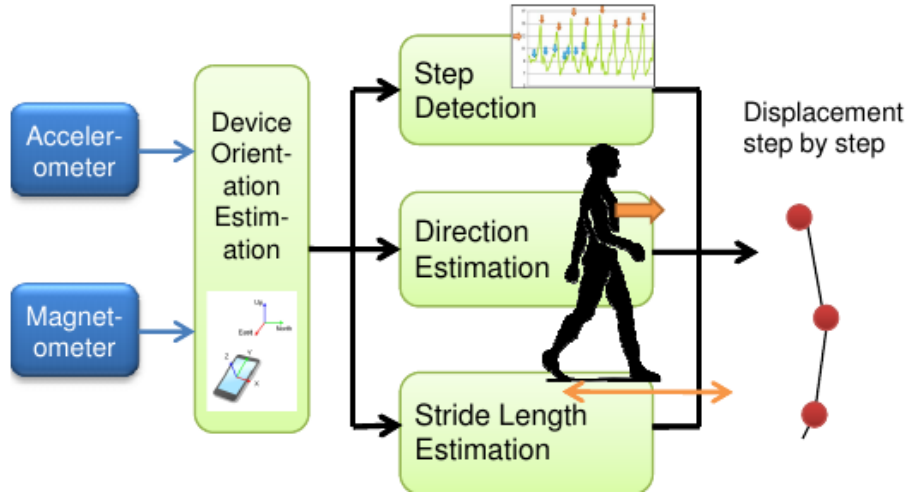


図 3.1. PDR システムの概要 [31]

移動体の現在位置から見て東西/南北/鉛直方向の三つの座標軸 (それぞれ東/北/天上方向が正) からなる直交座標系をグローバル座標系と呼ぶ。端末の姿勢を推定することとは、センサ座標系-グローバル座標系間の変換行列を求めることであるが、任意の点のセンサ座標系における座標 $\mathbf{q} = (q_x, q_y, q_z)^T$ をグローバル座標系の座標 $\mathbf{q}^* = (q_e, q_n, q_v)$ に変換する変換行列 \mathbf{R} は、センサ座標系におけるグローバル座標系の単位ベクトル $\mathbf{e}_e, \mathbf{e}_n, \mathbf{e}_v$ を用いて次のように書ける。

$$\mathbf{q}^* = \mathbf{R}\mathbf{q} = (\mathbf{e}_e \ \mathbf{e}_n \ \mathbf{e}_v)^T \mathbf{q} \quad (3.1)$$

これらのグローバル座標系の単位ベクトルを $\mathbf{e}_v, \mathbf{e}_n, \mathbf{e}_e$ の順に決定する。

鉛直方向の単位ベクトル \mathbf{e}_v の方向は重力の方向の真逆であり、計測された加速度 \mathbf{a} に対して、ローパスフィルタによって振動から生じる加速度を取り除き、重力の成分を取り出すことで得る。時刻 i における推定は、一時刻前の推定値を用いて以下のように行われる。

$$-\hat{\mathbf{g}}_i = (1 - \alpha)\mathbf{a}_i + \alpha(-\hat{\mathbf{g}}_{i-1}) \quad (3.2)$$

$$\mathbf{e}_{v,i} = \frac{-\hat{\mathbf{g}}_i}{\|-\hat{\mathbf{g}}_i\|} \quad (3.3)$$

ここでのパラメータ α ($0 < \alpha < 1$) は、大きいほどフィルタの周波数応答は急なものとなる。

南北方向の単位ベクトル \mathbf{e}_n は、磁場の観測値 \mathbf{m} 、および \mathbf{e}_v から求める。一般に、磁北 (地磁気の水平分力の向き) と真北 (北極点に向かう方位) の向きは同じにはならず、地磁気の偏角と呼ばれるそれらの差は、IGRF(International Geomagnetic Reference Field: 国際標準地球磁場) や国土地理院による日本におけるモデルと現在位置の緯度経度から求めることができるほか、限られた範囲で PDR を行う場合の偏角は一定値としても十分である。

具体的な推定では以下のように、磁場の水平成分を取得しその地点における偏角の影響を補正することで北方向を得る。

$$\mathbf{n}_i = \mathbf{D}(\gamma, \mathbf{e}_v)(\mathbf{m}_i - \mathbf{m}_i \cdot \mathbf{e}_v) \quad (3.4)$$

$$\mathbf{e}_{n,i} = \frac{\mathbf{n}_i}{\|\mathbf{n}_i\|} \quad (3.5)$$

$\mathbf{D}(\gamma, \mathbf{e}_v)$ は、 \mathbf{e}_v を軸として、偏角 γ に対し $-\gamma$ 回転させる回転行列である。

東西方向は、鉛直/南北方向の単位ベクトル $\mathbf{e}_v, \mathbf{e}_e$ の外積として求めることができる。

$$\mathbf{e}_e = \mathbf{e}_n \times \mathbf{e}_v \quad (3.6)$$

以上によって求めた変換行列 $\mathbf{R} = (\mathbf{e}_e \ \mathbf{e}_n \ \mathbf{e}_v)^T$ を用いて、センサ座標系である加速度観測値 $\mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z)^T$ をグローバル座標系における加速度 $\mathbf{a}^* = (a_e, a_n, a_v)$ へと変換する。

これらの \mathbf{R} や \mathbf{a}^* を後のステップ検出/歩幅推定/進行方向推定のプロセスで用いる。

3.1.2 ステップ検出

ステップ検出は、歩行動作における、前方に踏み出した片足が地面に着いた瞬間を検出し、それらの間の「一步」/「ステップ」を認識するプロセスである。

これには、鉛直方向の加速度 a_v の推移パターンを使って行う。一般に、周期的な歩行動作の中で、足が地面に着く際の衝撃が携帯端末に伝わることで、鉛直加速度 a_v の波形には一ステップにつき上下一組の顕著なピークが現れることが知られている。例を図 3.2 青線に示す。ここでは、下向きのピークをステップとして数え、この検出を行う。

まず、 a_v の計測ごとに移動平均によって平滑化を行い、直近の n_s 時刻の値に関して、その中央時刻 ($n_s/2 + 1$ 番目) の値が閾値 $a_{v,th}$ 以下であり、かつ n_s 個の値の中で最小値である時、その中央時刻は下向きピークであるとし、これをステップと判定する。ただし、これによりステップの検出は、鉛直加速度のピークの時刻よりも、(移動平均の窓長の半分) + (n_s の半分) だけ遅れる。

ノイズ等の局所的な浅いピークを誤って検出することを防止するため、 n_s は a_v の平均的な周期と同程度の長さにとる。

3.1.3 進行方向推定

進行方向推定は、ステップのグローバル座標系の水平面 (東西/南北方向) 上における方向ベクトル (方角) を推定するプロセスである。

具体的には、東西/南北方向の加速度 a_e, a_n から、前後方向の軸とその軸のどちらが前側かを推定することで、進行方向を決定し、前後方向軸の推定は、脚を踏み出すことによって生じる前後方向の大きな加速度を利用して行う。ここでは、Steinhoff ら [11] によって比較検討され最も良い精度を達成した、主成分分析 (PCA) に基づく手法を用いる。ステップが検出された際、それぞれ移動平均によって平滑化した a_e, a_n の直近 n_d サンプルの値に対して PCA を

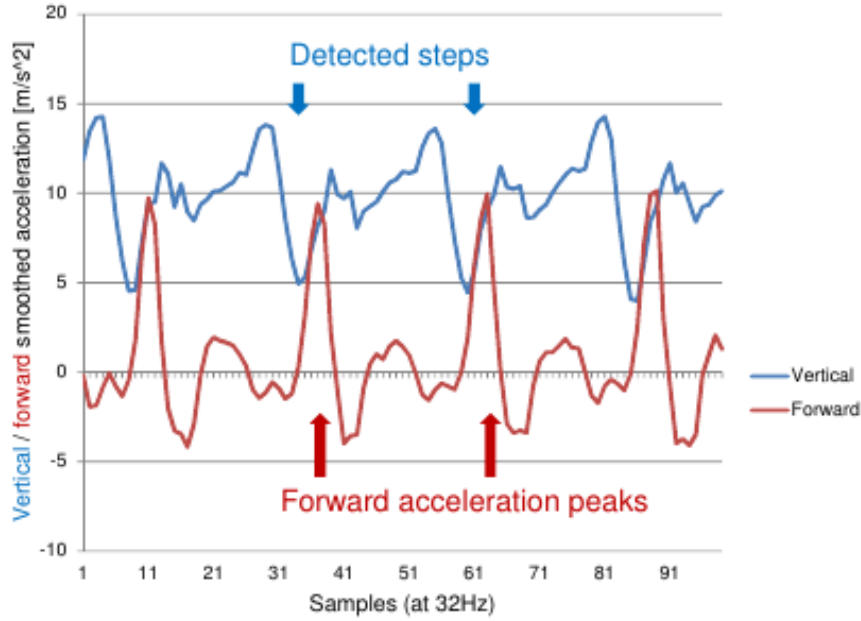


図 3.2. 歩行動作時の鉛直方向 (青) および前方向 (赤) の加速度の推移の例 (移動平均による平滑化済み/ポケットモード).

適用し、固有値の大きい方から 2 つに対応する固有ベクトルの正規化したものを前後方向軸を表す方向ベクトル (前後軸ベクトル) とする.

このようにして得られる前後軸ベクトルに対して、歩行者の進行方向が正方向であるか負方向であるのかを決定する必要がある。図 3.2 の例に示すように、鉛直方向 (青線) と前後方向 (赤線) の加速度のパターンでは、一般に鉛直加速度の下向きピークの直後に前方向のピークが来るという関係がある [13, 32]. この関係性を用いて、検出ステップから n_f サンプル分について、(a_e の偏差, a_n の偏差) のベクトルを前後軸ベクトルへ投影し、半数以上が正の値ならば前後軸ベクトルをそのまま進行方向ベクトルとし、半数以上が負の値ならば前後軸ベクトルに -1 をかけたものを進行方向ベクトルとする.

3.1.4 歩幅推定

歩幅推定は、ステップ間に進んだ長さ (歩幅) を推定するプロセスである.

ここではステップが検出された際に、鉛直方向の加速度 a_v のパターンを利用して行われる. 歩幅のモデルは、Weinberg[16] の式 (3.7) を用いる.

$$l = K \sqrt[4]{a_{v,max} - a_{v,min}} \quad (3.7)$$

毎時刻得られる鉛直加速度 a_v によって最大値 $a_{v,max}$ や最小値 $a_{v,min}$ の更新を行い、ステップが検出されると式 (2.3) を用いて歩幅を決定し、最大値 $a_{v,max}$ や最小値 $a_{v,min}$ の値をリセットする.

3.1.5 位置更新

3.1.3, 3.1.4 節で述べたプロセスで求められる歩幅 l および進行方向 $(\theta_e, \theta_n)^T$ を用いて, 初期位置から n 歩目の位置座標 \mathbf{x}_n を以下のように計算し, 位置を更新する.

$$\mathbf{x}_n = \mathbf{x}_{n-1} + \begin{pmatrix} l\theta_e \\ l\theta_n \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

ただし, 位置座標を, 初期位置からの相対距離ではなく緯度経度で表している場合は, 以下のように地球の回転楕円体近似に基づいた計算で緯度変位 $\delta\phi$ および経度変位 $\delta\lambda$ を求めることで位置の更新を行う必要がある.

$$Z = \frac{2F - 1}{F^2} \quad (3.9)$$

$$\delta\phi = \frac{l\theta_n(1 - Z(\sin\phi_{n-1})^2)^{3/2}}{R(1 - Z)} \quad (3.10)$$

$$\delta\lambda = \frac{l\theta_e\sqrt{1 - Z(\sin\phi_{n-1})^2}}{R\cos\phi_{n-1}} \quad (3.11)$$

ただし, R は地球の赤道半径, F は地球の扁平率の逆数, ϕ_{n-1} は \mathbf{x}_{n-1} の地点の緯度である.

3.2 磁場偏向マップを用いた推定進行方向の修正

前節までに述べた PDR による位置推定の誤差要因は大きく分けて歩幅の推定誤差と進行方向の推定誤差があり, こうした誤差を含むステップの推定値を用いて位置情報の更新を繰り返すことはより大きな誤差を生み得る. 特に, 都市部のような Urban Canyon エリアでは人工物の影響によって磁気擾乱がしばしば起きるため, 方向推定の信頼性は低くなる. また, ポケットにいられてスマートフォンを持ち歩く人は非常に多いと考えられるが, 端末の姿勢推定にも地磁気の方法が用いられるため, このような磁気擾乱は歩幅の推定誤差と進行方向の更なる推定精度を悪化にもつながる.

本章では, このような誤差要因に対し, 磁場ベクトルの偏向量の分布データを用いて進行方向を補正する手法について述べる.

ここで, 予測不可能な誤差として扱われてきた磁気擾乱に基づく誤差であるが, 磁場ベクトルがずれている方向と大きさが PDR システムで想定されるあらゆる地点において既知あるいは計算可能で, かつ時間による変動が無い場合においては予測可能である. そこで, 磁場ベクトルの偏向量の分布を表すデータ (磁場偏向マップ) を実際に磁場測定によって作成し, 進行方向推定のプロセスにおいてそのマップを参照し, 現在位置の磁場偏向情報を用いることで, 推定した進行方向を補正する.

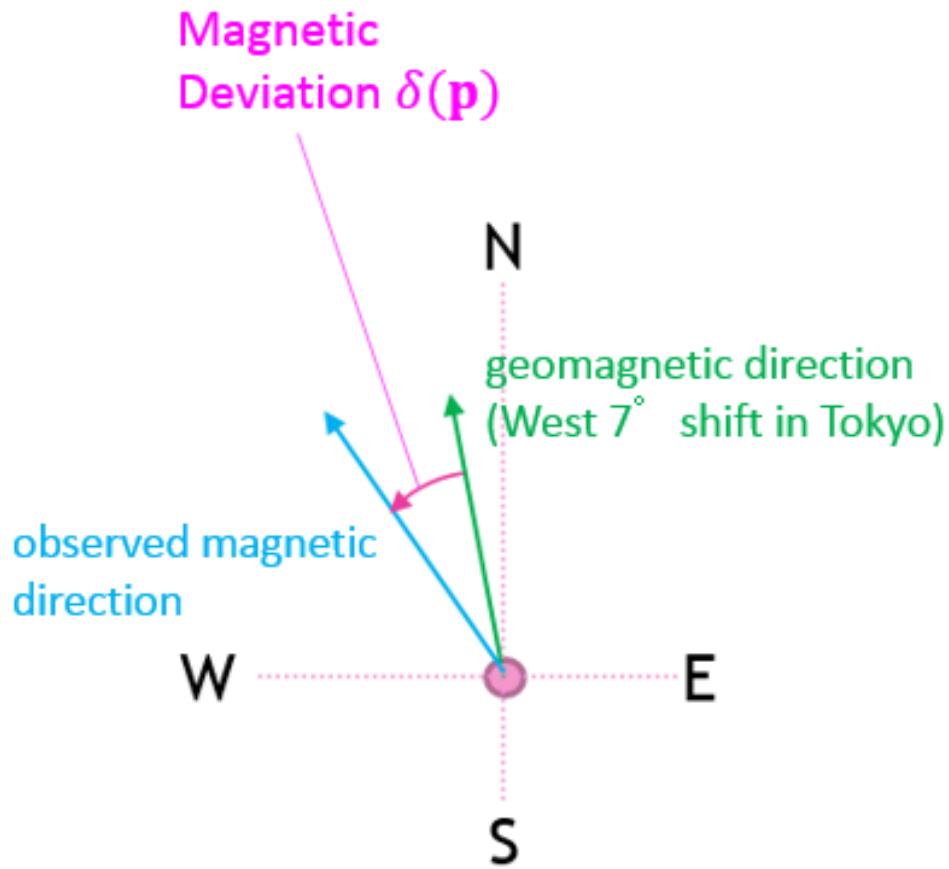


図 3.3. 本研究における磁場偏向 (magnetic deviation) の定義

3.2.1 磁場偏向の定義

本研究における磁場偏向の定義を図 3.3 に示す。なお、ここでは重力方向が加速度センサによって正しく推定されたことを仮定し水平方向における磁場偏向を議論し、本研究ではこれを適用する。図 3.3 において、 p 地点において想定される真の地磁気の磁場を緑、 p 地点において観測された磁場を青で表す。このとき、真の地磁気の水平磁場方向と水平観測磁場方向との差の角度を磁場偏向 $\delta(p)$ と定義する。

このような磁場偏向は、PDR を行う間の時間変化という点で見たとき、一定値の静的な成分、振動している成分、不規則で突発的な成分の 3 つの成分によって構成され则认为する。静的な成分は建物などの静的物体、振動成分は送電線などの電気設備、不規則な成分は車や自転車などの動的物体が、それぞれ主要な発生源である。これらの人工物は都市部に多く、ビルや電気設備が立ち並ぶ Urban Canyon エリアにおいて磁気センサの妨げとなっている可能性が高いと考えられる。これを示す例として、図 3.4 にアーバンエリアである品川の歩道上で観測した二つの磁場偏向の時間変化を示す。この実験結果を含む様々なパターンでの磁場偏向の観

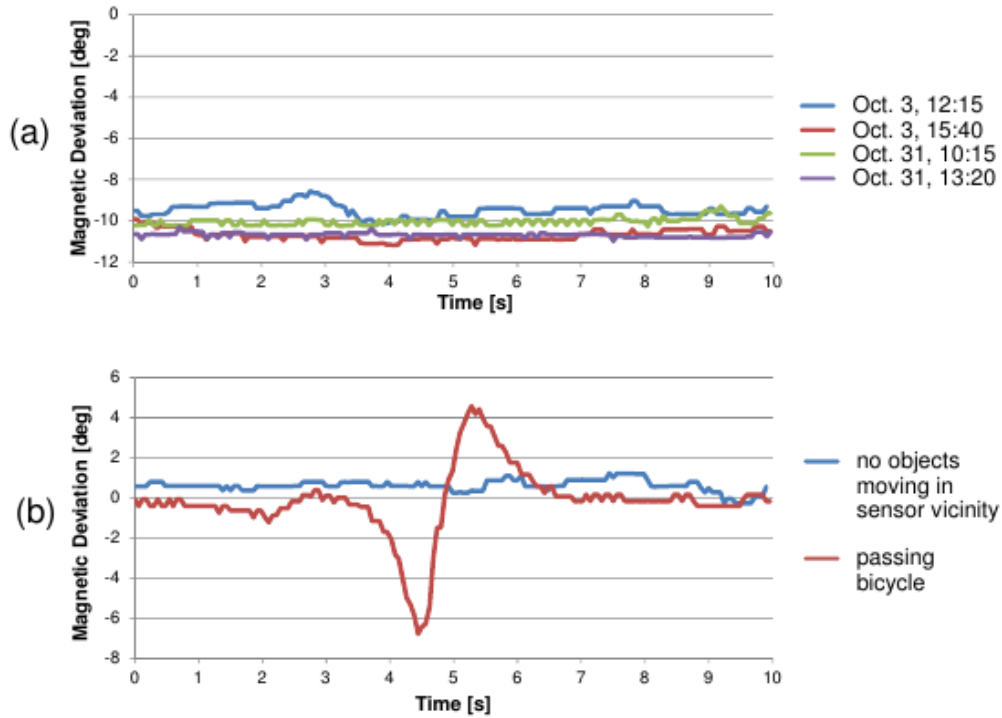


図 3.4. 品川での磁場偏向の時間変化の例. 二つの異なる観測点において 10 秒間磁場を計測, 磁場偏向の値に変換した [33] (a) 同じ観測点において日付と時刻を変えて観測した際の磁場偏向の推移 (b) 観測中に傍を自転車が通った場合と, 何も通らなかった場合の磁場偏向の推移

測結果から, 以下のような仮定を得た.

- 静的成分の偏位は時刻に対し微小であり無視できる (図 3.4(a)).
- 振動成分は十分小さい, もしくは周期が短く計測結果に表れない (図 3.4(a)).
- 動的物体による不規則成分の影響はほぼ瞬間的で, 進行方向推定に影響を及ぼさない (図 3.4(b)).

そこで磁場偏向の中でも特に静的な成分による影響を除去することで進行方向推定の誤差要因を減らすことができ, PDR システムへの適用によって誤差の蓄積が抑えられると考えられる.

ある地点 \mathbf{p} において $\delta(\mathbf{p})$ の磁場偏向が存在した場合, 推定される端末の方向推定が水平方向 (東西/南北方向) に $-\delta(\mathbf{p})$ だけずれ, それに伴い進行方向も $-\delta(\mathbf{p})$ だけずれる. このことは, それ以前の端末姿勢/進行方向には依存しない.

3.2.2 磁場偏向マップによる推定進行方向の修正手法

磁場偏向の分布を表すデータは, 基準観測点の位置座標 $P = \{\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots\}$ とそれらの地点での磁場偏向値 $\Delta = \{\delta(\mathbf{p}_1), \delta(\mathbf{p}_2), \dots\}$ の対応表の形式であるとする. PDR システムが n ス

テップ目の進行方向を推定する時、まず一ステップ前の位置 \mathbf{x}_{n-1} における磁場偏向の値を以下の式 (3.12) によって求める。

$$\delta(\mathbf{x}_{n-1}) = \frac{\sum_{i \in K_{n-1}} w(\mathbf{x}_{n-1}, \mathbf{p}_i) \delta(\mathbf{p}_i)}{\sum_{i \in K_{n-1}} w(\mathbf{x}_{n-1}, \mathbf{p}_i)} \quad (3.12)$$

ただし,

$$w(\mathbf{x}, \mathbf{p}) = \|\mathbf{x} - \mathbf{p}\|^{-2} \quad (3.13)$$

であり, また K_{n-1} は, P のうち \mathbf{x}_{n-1} に近い方から k 個の基準観測点を取り出した集合 (k nearest neighbor) である ($k < |P|$). つまり, 磁場偏向マップ上の基準点から距離の近さに応じて重みを付ける補間法を用いて, 任意の位置における磁場偏向を推定する. なお, 本研究では十分な磁場偏向のサンプルポイントのデータを集めることができていないと判断し, 一番単純な補間法として $k = 2$ として磁場偏向の計算を行う.

磁場偏向の推定後, 通常の進行方向推定方法によって n 歩目の進行方向ベクトル $\begin{pmatrix} \theta_e \\ \theta_n \end{pmatrix}$ を推定した後, 推定磁場偏向 $\delta(\mathbf{x}_{n-1})$ を用いて以下のように進行方向補正を行う.

$$\begin{pmatrix} \hat{\theta}_e \\ \hat{\theta}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta(\mathbf{x}_{n-1}) & -\sin \delta(\mathbf{x}_{n-1}) \\ \sin \delta(\mathbf{x}_{n-1}) & \cos \delta(\mathbf{x}_{n-1}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_e \\ \theta_n \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

そして, $\begin{pmatrix} \theta_e \\ \theta_n \end{pmatrix}$ の代わりに $\begin{pmatrix} \hat{\theta}_e \\ \hat{\theta}_n \end{pmatrix}$ を用いて次の位置 \mathbf{x}_n を計算し, 位置を更新する.

$$\mathbf{x}_n = \mathbf{x}_{n-1} + \begin{pmatrix} l\hat{\theta}_e \\ l\hat{\theta}_n \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

3.2.3 磁場偏向マップの作成

前項にて磁場偏向マップの利用を前提とした手法について述べたが, 磁場偏向分布のデータベースはオープンデータとして存在しないため, 実験場所および周辺における磁場偏向マップを自ら作成した. その手法は以下のとおりである.

実験コース上にいくつかの基準観測点を設定し, それぞれの点において, 以下のような手順で, 実際の PDR 実験に使用するものと同一のスマートフォンを用いて計測した磁場から磁場偏向の算出を行った. 道路の方角および基準観測点の位置 (緯度経度) は, Google Maps 等の地図サービスを利用して求めた.

1. 三脚および非金属製のステージからなるスタンドの上にスマートフォンを置く.
2. $n = 0, 1, 2, 3$ について, 以下を実行する.
 - センサの Y 軸を, 道路の方角 θ_r から $n\pi/2[\text{rad}]$ 回転させた方角に合わせる.
 - 加速度と磁場を 10 秒間計測する.
 - 計測した加速度から水平面を求める (3.1.1 節参照).

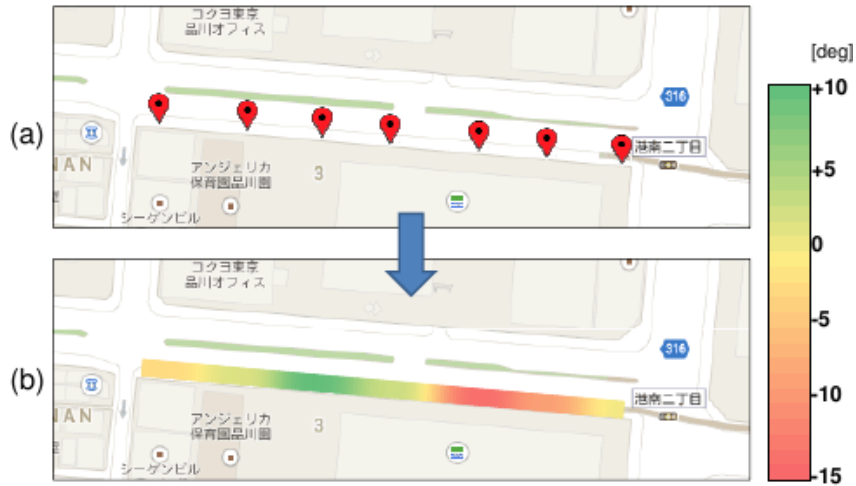


図 3.5. 磁場偏向マップの作成 [33] (a) 基準観測点 (b) 補間法による主要な歩道の磁場偏向のカラーマップ

- 計測した磁場を水平に $n\pi/2[\text{rad}]$ 回転し，記録する．
- 3. 得られた計 40 秒間の磁場計測値の水平成分の平均を計算する．
- 4. 磁場偏向値 δ を以下の式で求める．ただし γ は偏角の値である．

$$\delta = (\theta_r + \theta_{r \rightarrow m}) - (\pi/2 - \gamma), \quad (3.16)$$

計測された磁場偏向マップを分かりやすくカラーマップで表示した品川駅前での例を図 3.5 に示す．図 3.5(a) は，15m～30m の間隔で設定した基準観測点の位置を示し、図 3.5(b) は， $k = 2$ とした先述の補間法によって計算したコース全体の磁場偏向の値をカラーマップで表示したものである．

通常，磁気擾乱を生み出す人工物は歩道の周りに点々と存在すると考えられたため，この実験場所のように数～数十 m 移動するだけで磁場偏向の向きあるいは大きさは大きく異なるようなことが起こり得，磁気擾乱が進行方向推定に与える影響は歩行者の位置によって変化する．したがってもし正しい位置における磁場偏向マップの値が参照されれば，実験場所を道路沿いに歩行した時の軌跡は道路の形状通りの直線に近くなり，進行方向誤差が補正されると考えられる．

第 4 章

PDR・GPS フュージョンにおける GPS 精度の定量化

本章では、PDR システムに対して GPS 測位を組み合わせるにあたり、GPS 幾何に基づいた GPS の精度の定量化を行う。また、提案した GPS 精度とスマートフォンから出力される「GPS Accuracy 値」(後述)の問題点に触れ、Urban Canyon において提案する GPS 精度の推定手法が PDR の蓄積誤差を軽減するしくみについて説明する。

PDR は歩行者の一步一步の相対位置座標を推定する手法であるのに対し GPS は絶対位置座標を計算できるため、PDR で推定した位置を GPS を利用して繰り返し修正することができる。しかし Urban Canyon と呼ばれる高層ビルの立ち並んだ都市部では人工衛星からの電波がビルにより反射あるいは吸収されるため GPS による測位は難しい。

この際位置推定精度を高く維持するためには、GPS の測位結果の誤差の大きさも動的に考慮することが重要となる。それには GPS 測位結果が「どの程度正確であるか」を正確に把握することが重要になるが、現在の Android スマートフォンで定義されている「GPS Accuracy 値」(後述)はスマートフォン内蔵の GPS 受信機に強く依存するため、GPS 幾何に基づいた GPS の精度を再度定義し、定量化を行う。

4.1 カルマンフィルタの枠組みによる PDR と GPS の統合

本節では、垣内 [31] により提案された、PDR による位置の更新と GPS 測位の結果とをカルマンフィルタの枠組みによりフュージョンを行う手法について説明する。そして、Urban Canyon において GPS の精度が重要になることについて言及する。

4.1.1 カルマンフィルタについて

最初に本項において一般のカルマンフィルタのアルゴリズムについて述べる。カルマンフィルタとは、観測雑音下の入力データストリームに対して、システムの線形性を仮定した上で、再帰的に潜在的なシステムの状態を推定するものである。PDR や GPS といった測位技術に

限らず、トラッキングや制御などの様々なアプリケーションにも用いられており、また非線形なシステムモデルにも適用したものとして、extended/unscented Kalman Filter がある。

まず、システムの状態を \mathbf{x} とする。例えば、歩行者のトラッキングを目的としたシステムの場合、この状態 \mathbf{x} として歩行者の水平面上での2次元的位置および速度が用いられることが多い。この状態 \mathbf{x} の時間変化を記述するモデルとして、時刻 k におけるシステムの真の状態 \mathbf{x}_k は以下のように線形な状態方程式として表される。

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{F}_k \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{G}_k \omega_k, \quad \omega_k \sim N(0, \mathbf{Q}_k) \quad (4.1)$$

ここで、 \mathbf{F}_k は状態遷移行列、 ω_k は、平均が零ベクトルで共分散が \mathbf{Q}_k の多変数正規分布に従う駆動雑音と呼ばれるものあり、 \mathbf{G}_k は駆動雑音と状態の関係性のモデル行列である。ただし、制御を目的とした場合、更に右辺に制御入力 \mathbf{u}_k を加算したものになるが、本項では省略する。

これに対し、時刻 k における観測 \mathbf{z}_k は以下のように線形な観測方程式として表される。

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \nu_k, \quad \nu_k \sim N(0, \mathbf{S}_k) \quad (4.2)$$

ここで、 \mathbf{H}_k は状態空間から観測空間への写像を行う観測モデル行列、 ν_k は、平均が零ベクトルで共分散が \mathbf{S}_k の多変数正規分布に従う観測雑音である。

カルマンフィルタは以上のような線形の状態遷移モデルおよび観測モデルを仮定し、各時刻において以下で述べる予測/更新の二段階の処理を行うことで、時刻 $k-1$ の推定状態と時刻 k の観測から、時刻 k の真の状態を推定する手法である。

まず予測手続きでは、現時刻における状態およびその精度を表す誤差の共分散行列を、一時刻前のそれらから式 (4.3), (4.4) のように予測する。ただし、時刻 m 時点における時刻 n に対する状態の推定値を $\hat{\mathbf{x}}_{n|m}$ とし、同様に誤差の共分散行列を $P_{n|m}$ で表す。

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \mathbf{F}_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} \quad (4.3)$$

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{F}_k \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{G}_k \mathbf{Q}_k \mathbf{G}_k^T \quad (4.4)$$

更新手続きでは、時刻 k における観測 \mathbf{z}_k から、予測された状態 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ と誤差共分散行列 $\mathbf{P}_{k|k-1}$ を式 (4.5)~(4.7) のように更新する。

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{S}_k + \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T)^{-1} \quad (4.5)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}) \quad (4.6)$$

$$\mathbf{P}_{k|k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k|k-1} \quad (4.7)$$

ここでの $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ が、時刻 k におけるカルマンフィルタによる状態推定値である。ただし、 \mathbf{K}_k はカルマンゲインと呼ばれるものであり、直観的には予測値と観測値に対して考慮する重みを表す量である。

4.1.2 PDR と GPS を用いた実際の処理

本項では、PDR と GPS による測位に対する、前項のカルマンフィルタの適用方法について述べる。

本システムにおける状態量 \mathbf{x} は、測位開始時の初期位置を原点とした相対位置座標であり、水平面上（東西/南北方向）の 2 次元量である。PDR による位置更新は、この状態量に対する状態遷移モデルとして用いられる。この時、式 (3.8) において、 $\mathbf{F}_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ 、 $\mathbf{u}_k = \begin{pmatrix} l_k \theta_{e,k} \\ l_k \theta_{n,k} \end{pmatrix}$ となる。また、駆動雑音に関しては、前の時刻の推定位置座標に加えて、歩幅と進行方向の推定誤差についても考慮する。ここで、一ステップ分の移動の際の推定歩幅の長さに対する誤差分散が σ_l^2 、推定進行方向の角度に対する誤差分散が σ_θ^2 であるとき、これら両方を合わせた誤差分布は、一ステップ前における位置を中心とした扇状となるが、カルマンフィルタで仮定されている線形モデルの中で扱いやすくするため、歩行者の前後/左右方向の誤差を互いに独立とする、楕円状の 2 次元正規分布で近似する。つまり、推定歩幅が l であるとき、歩行者の前後方向の誤差分散は σ_l^2 、左右方向の誤差分散は $(l \tan \sigma_\theta)^2$ とする。この時、駆動雑音 ω_k は位置座標/前後/左右の 4 次元量であり、以下のように書ける。

$$\mathbf{Q}_k = \begin{pmatrix} \mathbf{P}_{k-1} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \begin{pmatrix} \sigma_{l,k}^2 & 0 \\ 0 & (l_k \tan \sigma_\theta)^2 \end{pmatrix} \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

$$\mathbf{G}_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \theta_{e,k} & -\theta_{n,k} \\ 0 & 1 & \theta_{n,k} & \theta_{e,k} \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

これに対し、GPS の測位値はカルマンフィルタにおける観測量として、観測モデルに組み込まれる。緯度経度値として得られる測位結果を相対座標に変換することで、観測量 \mathbf{z} は状態 \mathbf{x} と同じ空間上におかれ、 $\mathbf{H}_k = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ となる。また、観測雑音の共分散行列は

$\mathbf{S}_k = \begin{pmatrix} \sigma_G^2 & 0 \\ 0 & \sigma_G^2 \end{pmatrix}$ とする。ただし、 σ_G^2 は GPS 受信部を制御する Android API を通じて取得できる Accuracy 値を二乗とする。この Accuracy 値は、Android の仕様にて「GPS 測位の 68% 信頼円 (confidence circle) の半径長」と定義されている値であり、実際の算出方法は受信機依存である。

以上のような $\mathbf{F}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{Q}_k, \mathbf{G}_k, \mathbf{H}_k, \mathbf{S}_k$ 、および初期値 $\hat{\mathbf{x}}_{0|0} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{P}_0 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ を用いて、カルマンフィルタ: 式 (4.3) から式 (4.7) までを実行することで、初期位置に対する相対位置を推定することができる。

ただし、PDR においてステップが検出される頻度と GPS 測位におけるフレームレートは異なるため、一ステップが検出される間に GPS の測位が行われなかった場合は、更新ステップは行わず、 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}, \mathbf{P}_{k|k} = \mathbf{P}_{k|k-1}$ とする。

4.1.3 Urban Canyon における PDR と GPS とのフュージョン

Urban Canyon の環境下において GPS は位置推定精度がよくない場合が多い．受信電波がビル等の建物により遮断・反射されてしまうことが主な原因であるが，この環境下において精度良く位置推定結果を保つためには GPS の精度を動的に把握することが重要であるといえる．そのため，以下の節より GPS の精度を測定誤差の定量化から議論を行う．

4.2 GPS と測定誤差

本章では GPS がどのように測定誤差を生むのかを測位原理からひもとき，Urban Canyon において特にクリティカルとなりえるマルチパス誤差とその他の誤差の違いについて触れる．

4.2.1 GPS の概要

GPS は地球上のあらゆる場所で絶対位置を取得する方法の 1 つである．元来は軍事用途として開発・研究されてきたものであるが，現在では民生用にも広く普及し，航空機や船舶，自動車のナビゲーションシステムや測量など，様々な目的で使用されている．近年では，GPS 受信機の小型化や低価格化が進み，携帯電話やスマートフォン，デジタルカメラ等，様々な機器に搭載されている．

4.2.2 GPS の測位原理

GPS を用いた測位を考える上で，最も基本的な，1 つの GPS 受信機を用いた受信機位置の推定を考える．GPS の測位原理の最も基本的な考え方は，三辺測量である [34]．すなわち，3 つの衛星の位置と衛星-観測者間の距離が既知であれば，観測者の位置は 1 つに定めることができる，という考え方である．

空間上の 3 基の衛星の位置とその距離が既知である場合を考えると，観測者の位置は各衛星の位置を中心とする球面の交差する点，すなわち 2 点に絞り込むことができる．ただし，観測者が地球表面付近にいるということを考えると，現実的には観測者の位置を 1 点に絞り込むことが可能である．

ここで，衛星から信号が発信された時刻と受信機が信号を受信した時刻が正確にわかれば，電波は光速で空間を進む特性があるため，各衛星と観測者間の距離を知ることができる．ただし，現実的には受信機が信号を受信した時刻を知ることができても，そのせい買うな距離を測定することは難しい．これは，受信機に搭載されている時計には GPS 時計とのオフセットが存在するためである．GPS 時計は互いに同期されているため，衛星間の時計のオフセットを考える必要はないが，最低でも GPS 時計と受信機時計のオフセットを考える必要がある．このオフセットも含めて観測者の位置を特定するには，未知数が 4 つ（観測者の 3 次元空間上の座標 x, y, z と GPS 時計と受信機時計のオフセット b ）が存在するので，最低 4 基の衛星を用い

て方程式を計算する必要がある。

以上より、観測者の位置を決めるためには最低 4 基の衛星の位置とその距離が必要である。衛星の座標については、衛星からの放送を用いて観測者は取得することができるため、改めて計算する必要はない。

本節では、衛星-観測者間の距離をどのようにして算出するのかについて述べる。

4.2.3 GPS の幾何学的距離と擬似距離

GPS 受信機は、はじめに受信した衛星の信号に含まれている信号の発信時刻と、受信機自身の時計の時刻に基づき、衛星-観測者間の信号の伝播時間を計算する [34]。伝播時間が計算できた後、これに光速をかけることで衛星-観測者間の距離が計算できる。

ただし、前節で述べたとおり、GPS 時計と受信機自身の時計の間にはオフセットが存在している。よって、ここで計算する衛星-観測者間の距離には、このオフセットに相当する分の距離の誤差が含まれている。この距離を衛星-観測者間の真の距離、すなわち幾何学的距離と区別するために擬似距離と呼び、幾何学的距離と明確に分けて計算に用いる。

ここで、 n 基衛星からの信号を、GPS 時刻 t において受信したことを考える。衛星が信号を送信時刻 $t^{\text{sv}}(t - \tau)$ に発信し、信号が空間を τ の時間をかけて伝播し、受信機時計時刻 $t^{\text{r}}(t)$ で信号を受信したとすると、 n 基衛星-観測者間の擬似距離 ρ は以下のように定義される。

$$\rho(t) = c\{t^{\text{r}}(t) - t^{\text{sv}}(t - \tau)\} \quad (4.10)$$

ここで、GPS 時刻 t と信号の伝播時間 ρ は未知数である。また、受信機と衛星時計のそれぞれと GPS 時刻の関係は次のように関連付けることができる。

$$t^{\text{r}}(t) = t + \delta t^{\text{r}}(t) \quad (4.11)$$

$$t^{\text{sv}}(t - \tau) = (t - \tau) + \delta t^{\text{sv}}(t - \tau) \quad (4.12)$$

ここで、 $\delta t^{\text{r}}(t)$ は受信機のクロックバイアス、 $t^{\text{sv}}(t - \tau)$ は衛星のクロックバイアスで、進んだ時刻を正の値として扱う。なお、衛星のクロックバイアスは航法メッセージとして放送されている。

これらクロックバイアスを考慮して擬似距離の式 (4.10) を再定義すると、

$$\begin{aligned} \rho(t) &= c\{t^{\text{r}}(t) - t^{\text{sv}}(t - \tau)\} \\ &= c\{t + \delta t^{\text{r}}(t) - (t - \tau + \delta t^{\text{sv}}(t - \tau))\} + \varepsilon_{\rho}(t) \\ &= c\tau + c\{\delta t^{\text{r}}(t) - \delta t^{\text{sv}}(t - \tau)\} \end{aligned} \quad (4.13)$$

となる。 $\varepsilon_{\rho}(t)$ は、モデル化できない効果や、モデル化の際に生じる誤差、測定誤差などを含んだ値である。

一方、衛星-観測者間の幾何学的距離 $r(t, t - \tau)$ は、

$$r(t, t - \tau) = c\tau - I_\rho(t) - T_\rho(t) \quad (4.14)$$

と表すことができる。ここで、 $I_\rho(t)$ 、 $T_\rho(t)$ は電離層と対流圏を通過する際に生じる伝搬遅延距離分を反映したものである。

この式から $c\tau$ 定式化することができるので、これを式 (4.13) に代入すると、

$$\rho(t) = r(t, t - \tau) + c\{\delta t^r(t) - \delta t^{sv}(t - \tau)\} + I_\rho(t) + T_\rho(t) + \varepsilon_\rho(t) \quad (4.15)$$

となり、擬似距離 ρ が定式化される。

さらにこの式を拡張して、ある GPS 時刻 t において、全部で K 基の可視衛星を受信できた場合に、 k 番衛星からの擬似距離 $\rho^{(k)}(t)$ は

$$\rho^{(k)}(t) = r^{(k)}(t, t - \tau) + c\{\delta t^r(t) - \delta t^{(k)}(t - \tau)\} + I_\rho^{(k)}(t) + T_\rho^{(k)}(t) + \varepsilon_\rho^{(k)}(t) \quad (4.16)$$

となる。

4.2.4 測位計算

ある GPS 時刻 t における受信機座標を $\mathbf{x} = [x, y, z]^T$ 、信号送信時刻の n 番衛星の座標を $\mathbf{x}_n = [x_n, y_n, z_n]^T$ とする。受信機と衛星間の幾何学的距離 r_n は、

$$r_n = \sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 + (z_n - z)^2} = \|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}\| \quad (4.17)$$

であるので、式 (4.16) は

$$\begin{aligned} \rho_n &= \|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}\| + c[\delta t^r - \delta t_n^{sv}] + I_n + T_n + \varepsilon_n \\ \rho'_n &= \|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}\| + b + \tilde{\varepsilon}_n \end{aligned} \quad (4.18)$$

ここで、この式に含まれる誤差の内、ユーザが航法メッセージのパラメータを使って補正できるのは次の通りである [34]。

- GPS 時刻に関する衛星のクロックオフセット
- 相対論効果
- Klobuchar モデルのパラメータを使った電離層遅延

加えて、GPS 以外にリソースを持つ場合、次の誤差も取り除くことが可能である。

- コード測定値はマルチパスや雑音を減らした搬送波位相の測定値によってスムージングできる

- 電離層遅延は、複数の周波数を受信できる受信機であれば誤差源を取り除くことができる
- 対流圏遅延は、モデルを使ってソフトウェアで補正できる
- 局所または広域 DGPS を用いれば衛星の位置とクロック誤差、信号伝搬遅延を低減できる

ρ' は、これらを用いて擬似距離を補正したの擬似距離を示す．この式の誤差項 $\tilde{\varepsilon}_n$ は残差が合成された結果である．

また、簡単のため $c\delta t^r = b$ とし、単位は m となっている．誤差項 $\tilde{\varepsilon}$ は式 4.18 の ε に、モデルによって補正されない残差が加わった結果である．

このように n 番衛星の擬似距離は、非線型の方程式としてモデル化され、 b および x, y, z の 4 つの未知数が含まれている．よってこれを解くため、少なくとも 4 機の衛星からの擬似距離が必要となる．

今、 N 機 ($N \geq 4$) の衛星からの信号が受信できているとして、式 (4.18) を解くことを考える．一般に K 本の方程式を解く簡単な方法としては、適当な観測者の位置を初期値として与え、その近傍で式 (4.18) をテイラー展開によって線形化し、逐次的に解く方法がある．この方法は、ニュートンラフソン法と言われている．

$\mathbf{x}^0 = [x^0, y^0, z^0]^T$ を観測者の初期値、 b^0 を受信機時計バイアスの初期値として、真の位置 $\mathbf{x} = \mathbf{x}^0 + \delta\mathbf{x}$ 、真の時計バイアス $b = b^0 + \delta b$ とする．これより、擬似距離の初期値 $\delta\rho_n'^0 = \|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}^0\| + b^0$ であるので、 $\delta\mathbf{x}$ と δb の 4 変数を未知数とする連立方程式

$$\begin{aligned}\delta\rho_n &= \delta\rho_n' - \delta\rho_n'^0 \\ &= \|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}\| - \|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}^0\| + (b - b^0) + \tilde{\varepsilon}_n\end{aligned}\quad (4.19)$$

が成立する．右辺第一項を \mathbf{x}^0 の周りでテイラー展開すると

$$\begin{aligned}\|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}\| &= \sum_{\alpha} \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)^{\alpha}}{\alpha!} \partial^{\alpha} \|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}\|(\mathbf{x}_0) \\ &\simeq \|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}^0\| + \partial \|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}\|(\mathbf{x}_0) \\ &= \|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}^0\| - \frac{\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_0}{\|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_0\|} \cdot \delta\mathbf{x}\end{aligned}\quad (4.20)$$

となる．この式を式 (4.19) に代入すると、

$$\begin{aligned}\delta\rho_n &\simeq -\frac{(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}^0)}{\|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}^0\|} \cdot \delta\mathbf{x} + \delta b + \tilde{\varepsilon}_n \\ &= -\mathbf{l}_1 \cdot \delta\mathbf{x} + \delta b + \tilde{\varepsilon}_n\end{aligned}\quad (4.21)$$

が立てられる．この式の $-\mathbf{l}_1$ は、観測者の初期値から見た 1 番衛星への視線方向の単位ベクトルである．衛星を N 基受信している今、この式が N 本あるので、

$$\begin{aligned}\delta\rho &= \begin{bmatrix} \delta\rho_1 \\ \delta\rho_2 \\ \vdots \\ \delta\rho_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-\mathbf{l}_1)^T & 1 \\ (-\mathbf{l}_2)^T & 1 \\ \vdots & 1 \\ (-\mathbf{l}_N)^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\mathbf{x} \\ \delta b \end{bmatrix} + \tilde{\varepsilon} \\ &= G \begin{bmatrix} \delta\mathbf{x} \\ \delta b \end{bmatrix} + \tilde{\varepsilon}\end{aligned}\quad (4.22)$$

となる。これより

$$\begin{bmatrix} \delta\mathbf{x} \\ \delta b \end{bmatrix} = G^{-1}\delta\rho \quad (4.23)$$

となる。したがって $\text{rank}G = 4$ であれば解析的に解くことが出来る。

実際に測位をする際、 $\text{rank}G = 4$ にならないような場合を考えると、 $-\mathbf{l}_n = \frac{(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}^0)}{\|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}^0\|}$ であり、先程も述べたとおりこれは観測者の初期値から見た n 番衛星への視線方向の単位ベクトルである。したがって、ユーザから見てすべての衛星が同じ仰角、方位角に見えているような場合にのみ $\text{rank}G < N$ となり計算ができなくなってしまうが、衛星の空間配置を考えるにそういった状況になることは非常に少ないと言えるし、衛星は常に動いているので、数秒後にはそれら衛星の位置が変わり、再び $\text{rank}G = 4$ を満たすようになることで計算をすることができるようになる。よって、実用的にはほとんど問題がないといえる。

また、 $\text{rank}G > 4$ のときは連立方程式は過剰決定となる。この場合、測定値に最も適合する解を最小二乗法などを用いて求めることとなる。つまり、

$$\min \left\| \delta\rho - G \begin{bmatrix} \delta\hat{\mathbf{x}} \\ \delta\hat{b} \end{bmatrix} \right\|^2 \quad (4.24)$$

を満たす $\delta\hat{\mathbf{x}}, \delta\hat{b}$ を最適解として求めれば良い。これは実際には、正規方程式

$$\begin{bmatrix} \delta\hat{\mathbf{x}} \\ \delta\hat{b} \end{bmatrix} = (G^T G)^{-1} G^T \delta\rho \quad (4.25)$$

を求めることと同値である [35]。

先ほどと同様、衛星の空間配置より基本的に $G^T G$ は正則行列とみなせるため、 $\delta\hat{\mathbf{x}}, \delta\hat{b}$ は一意に求まる。実際に計算機上でこれを解くためには、行列 G を QR 分解し、 $[\delta\hat{\mathbf{x}}, \delta\hat{b}]^T$ を求める。

$\mathbf{x}^1 = \mathbf{x}^0 + \delta\mathbf{x}$, $b^1 = b^0 + \delta b$ と更新して $\delta\mathbf{x} \approx 0$ となるまで逐次的に計算し、解を求める。これは通常、数回の反復で収束する。

以上のようにして、GPS は観測者の位置を推定する。

4.2.5 GPS の誤差要因

GPS の測位をした結果、その測位結果が真の位置から大きく外れてしまうことは実際にはよくあることである。本節では、GPS の誤差要因のうち、本研究と特に関連の深いものを中

心に述べる。

衛星座標誤差（エフェメリス誤差）

衛星座標誤差は、衛星座標のパラメータがケプラーの法則に基づく軌道要素として与えられるが、これは過去の値からフィッティングを行って推定しており、モデル化をする際に修正できない誤差が含まれている [34]。

このパラメータは主制御局（master control station : MCS）によって計算されているが、これらのパラメータの現在の値は衛星（位置、速度）と衛星クロック（位相バイアス、周波数バイアス、周波数のドリフト率、詳細は後述）の状態を生成するために使用されているカルマンフィルタによって算出されている。

このパラメータの誤差は衛星にアップロードされた直後が最も小さく、その後時間経過とともに増大していく。よって、より頻繁に衛星のデータが更新されるほど MCS の誤差も削減される。

通常、後述する衛星時計のパラメータとこの衛星座標（エフェメリス情報）のパラメータに起因する誤差は 1.5m 程度が見込まれているが、もし衛星の推定距離誤差が閾値を超えた場合には臨時にのデータアップロードが計画されているようになっている。

衛星時計誤差（クロック誤差）

GPS 衛星には、ルビジウム及びセシウム周波数標準を複数搭載しており、これらのクロックは主制御局（master control station : MCS）で監視されている [34]。GPS 時刻における衛星クロックの補正量は次の 2 次関数 (4.26) で定義され、推定されたパラメータは航法メッセージのとして配信されている。

ここで、GPS 時刻 t における衛星クロックのオフセットは、

$$\delta t^{\text{sv}} = a_{f_0} + a_{f_1}(t - t_{0c}) + a_{f_2}(t - t_{0c})^2 + \Delta t_r \quad (4.26)$$

で示される。ただし、 t_{0c} は時計の基準時刻、 a_{f_0} はクロックオフセット（単位 [m]）、 a_{f_1} は周波数オフセットの変化率（単位 [s/s]）、 a_{f_2} は周波数ドリフトの変化率（単位 [s/s²]）である。さらに、 Δt_r は衛星の高度変化から生じた相対論補正であり、次式で与えられる [36]。

$$\Delta t_r = Fe\sqrt{a} \sin E \quad (4.27)$$

ここで e は離心率、 a は軌道の軌道長半径、 E は離心近点角、 $F = -2\sqrt{\mu}/c^2 = -4.4442807633 \times 10^{-10}$ [s/m] であり、 μ は地球重力定数、 c は光速である。

これら補正係数は過去の値からフィッティングを行って推定されており、修正できない誤差が含まれている。この誤差の値は、MCS からの情報が衛星にアップロードされた直後が最も小さく、その後時間経過とともに増大していく。

電離層遅延による誤差

地球上には、地表面から約 50km～1000km の高さに電離層と呼ばれる領域が広がっている。これは、電離された気体（自由電子とイオン）が存在する領域を指す [34]。この現象は太陽放射により引き起こされ、電離層の状態は主に太陽の活動に依存して決まる。

電離層は、異なる高度に幾つかの層を形成（D, E, F1, F2）しており、それぞれの層で発生する自由電子の生成や消滅の割合は異なる。

電離層の物理的性質は昼と夜、また日毎の太陽活動や地場変化によっても変化する。例えば、太陽が昇り始めてから、太陽から放射される紫外線は気体分子をイオンや自由電子に分離させる。その後その活動は午後 2 時頃にピークを迎え、その後は減少し、太陽光の届かない夜間には電子密度は低い値を維持する。

この電離層遅延量は、2 周波（L1 と L2 の両方を受信できる）用の GPS 受信機を用いると、その遅延量を推定することができる。1 周波のみを受信できる受信機でも、Klobuchar モデルを利用することでその誤差を 50% 程度補正することが可能である [37]。

対流圏遅延による誤差

GPS 信号は乾燥した空気（N₂ や O₂ を主成分とする空気）及び水蒸気から構成される地球大気の下層部分でも屈折される [34]。この遅延量は電波の伝播経路の長さに依存する。つまり、衛星が仰角の低いところにあると伝播経路が長くなり、遅延量も大きくなる。この遅延量は一般的には 2.5～25m 程度である。

対流圏遅延は電離層遅延とは異なり、GPS 信号に対して分散性を持たない。すなわち、屈折率は信号の周波数に依存しない。したがって、2 周波の信号を受信できる受信機を用いても補正はできない。そこで、修正モデルを別途定義してその遅延量を補正する必要があるが、幸いな事に屈折率は最もその数値が大きくなる海拔 0m 地点でも 1.0003 と 1 をわずかに上回る程度で、対流圏上端では更に 1 に近づく値を取る。よって、電離層に比べて変化が少なく、モデルによる補正も比較的容易である。

実際には、次の 2 ステップで GPS 信号による対流圏遅延量の推定を試みる。

1. 乾燥空気（ $\tilde{T}_{z,d}$ ）および水蒸気（ $\tilde{T}_{z,w}$ ）による遅延量から天頂方向の遅延量（ \tilde{T}_z ）の推定を行う。

$$\tilde{T}_z = \tilde{T}_{z,d} + \tilde{T}_{z,w} \quad (4.28)$$

2. 天頂方向の遅延量を実際の遅延量に変換するための衛星仰角（ el ）の関数として傾斜計数を定義する。この対流圏の傾斜計数はしばしばマッピング関数と呼ばれる。

$$\tilde{T} = \tilde{T}_{z,d} \cdot m_d(el) + \tilde{T}_{z,w} \cdot m_w(el) \quad (4.29)$$

ここでは説明のため、乾燥空気と水蒸気成分に別々のマッピング関数 $m_d(el)$, $m_w(el)$ を定

義したが、単純なモデルでは乾燥空気と水蒸気成分の大気特性を無視し、共通のマッピング関数を用いることもある。

対流圏モデルに関しても、いくつかのモデルが存在するが、代表的なものにサースタモイネンモデル [38][39] やポップフィールドモデル [40][39] があり、これらはそれぞれ温度と水蒸気の高度変化に関して異なった仮定をおいている。

マッピング関数に関しても、ごく簡単にその関数をモデル化するならば、 $1/\sin el$ であるが、このモデルは平坦な地球を前提として考えており、衛星の仰角が 15 度以下になると近似としては不十分である。より正確に近似するのであれば、

$$m(el) = \frac{1}{\sqrt{1 - (\cos el / 1.001)^2}} \quad (4.30)$$

となる。

さらに、乾燥空気と水蒸気による遅延量のための各マッピング関数を示す。

$$m_d(el) = \frac{1}{\sin el + \frac{0.00143}{\tan el + 0.0445}} \quad (4.31)$$

$$m_w(el) = \frac{1}{\sin el + \frac{0.00035}{\tan el + 0.017}} \quad (4.32)$$

マルチパス誤差

マルチパスとは、信号が 2 つ以上の経路を通過してアンテナに到達する信号の現象を指す [34]。都市部など、周辺に電波の反射するような物体に囲まれた環境において、衛星からの電波は周辺の建物に反射、回折、散乱しアンテナに到達することもある。このように反射、回折、散乱してアンテナに届いた搬送波をマルチパス波と便宜上呼ぶが、これらは衛星から直接アンテナに届く直接波の経路よりも必ず長くなる。すると、アンテナは直接波を受信した後、僅かな時間をおいてマルチパス波を受信する。すると、受信された信号はそれぞれの波を加算したような形になり、これが擬似距離の測定に大きな影響を及ぼす。

通常、GPS の搬送波はこのように遅れてやってくる搬送波の影響を極力受けないような仕組みを持っており、500m 以上遅れてやってくるようなマルチパス波の影響は信号の特性上ほとんど影響を受けない。しかし、ビルなどの比較的受信機の近くにあるような物体に反射して届いたマルチパス波は 500m より小さな遅れを持って受信されることも多いため、その場合はマルチパス波の影響を受ける。

このマルチパス誤差は本節で紹介してきた誤差と性質が少し異なる。まず、衛星に依存する衛星座標誤差や衛星時計誤差、伝送路に依存する電離層遅延や対流圏遅延の誤差は、一定の値を持続する傾向を持つ性質があり、いわゆるバイアスである。しかし、このマルチパスによる誤差はランダム性をもっており、その誤差の補正をすることが容易ではない。

表 4.1. 本研究で用いる各誤差の標準偏差 [m]

誤差の種類	標準偏差 [m]
エフェメリス誤差 σ_{eph}	0.8
クロック誤差 σ_{clk}	1.1
電離層遅延による誤差 σ_{ion}	1.0
対流圏遅延による誤差 σ_{trop}	0.2

さらに、マルチパスに起因する誤差は他の誤差要因と比べても誤差の大きさが大きくなりやすいという特性がある。他の誤差要因による誤差の大きさがおよそ数メートルであるのに対し、マルチパスに起因する誤差は 100m に達する場合もある。

4.2.6 GPS 誤差の評価と指標

GPS の精度 σ は衛星情報や擬似距離の情報を使って計算する手法が知られており、次のような式で表される。

$$\sigma = \sigma_{URE} \times HDOP \quad (4.33)$$

上式における UERE および HDOP の概念について説明する。

URE(User-Equivalent Range Error)

URE とは簡単に言えば擬似距離を誤差を見積もって計算してなおかつ残る誤差を定量化した指標である。上節でも述べたが、GPS による誤差のうちいくつかは誤差のモデル化がなされており、正しく見積もることができれば推定位置の誤差は小さくなる。しかし不確定要素がモデル化してもなお残るため、推定擬似距離との本当の誤差として現れてしまう。この UERE の偏差 σ_{URE} は誤差の偏差を表し、擬似距離推定の精度の指標として使用される。Kaplan[41] によると、 σ_{URE} は次のように表される。

$$\sigma_{URE} = \sqrt{\sigma_{eph}^2 + \sigma_{clk}^2 + \sigma_{ion}^2 + \sigma_{trop}^2 + \sigma_{Multipath}^2} \quad (4.34)$$

ただし、 σ_{eph} はエフェメリス誤差、 σ_{clk} はクロック誤差、 σ_{ion} は電離層遅延による誤差、 σ_{trop} は対流圏遅延による誤差、 $\sigma_{Multipath}$ はマルチパスによる誤差である。[42] において、空が開けてマルチパスが発生しにくい Open Sky 環境において標準的な GPS 受信機に生じる誤差が定量化されており、これを基にして本研究ではマルチパス誤差以外の誤差偏差情報を大きく変動することが少ないため表 4.1 のように定数として扱うこととした。

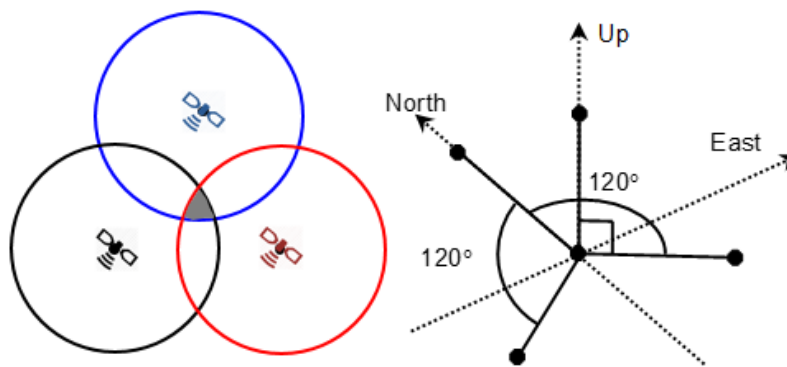


図 4.1. DOP 値が小さい場合における衛星の配置例

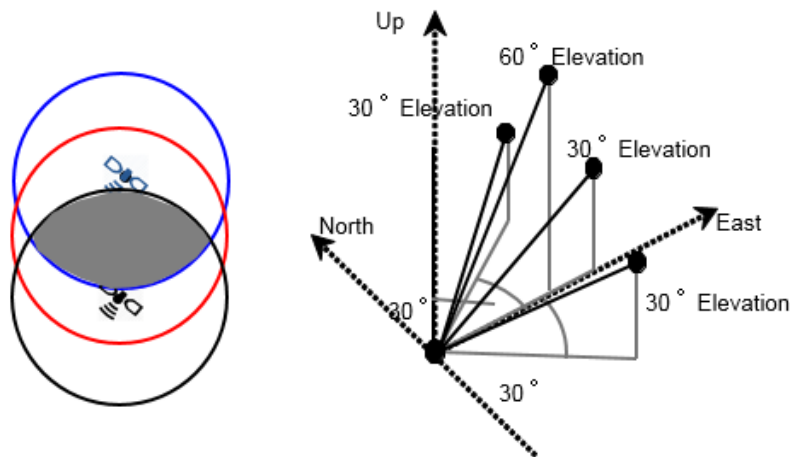


図 4.2. DOP 値が大きい場合における衛星の配置例

HDOP(Horizontal Dilution of Precision)

上記で述べた UERE の値が大きければ擬似距離が正しく推定できないため推定位置に誤差が生じる。しかし、衛星の幾何的な配置の変化によりその誤差の生じ方は変化する。例えば、図 4.1, 4.2 のような衛星の配置に差が生じると、不確実性が大きくなる。このように衛星の幾何学的配置と位置推定のばらつきには相関があり、それを数値として定義したものを DOP(Dilution of Precision) とよぶ。DOP が大きくなればその精度は悪化し、DOP の値が小さいほど推定精度がよくなる。歩行者位置推定においては大多数の場合地平面での位置推定を行うことを目的としているため、水平方向における DOP の値である HDOP(Horizontal Dilution of Precision) を考え、誤差推定の指標となっている。

4.3 Android から出力される GPS 精度の評価とマルチパスの検出

スマートフォンから GPS 精度の値を取得する際、Android システムのセンサライブラリから出力される GPS 精度である”GPS Accuracy”という値を用いることが自然である。しかし、Urban Canyon においてこの精度と実際の位置誤差は大きく異なることが多い。

Urban Canyon である新宿においてスマートフォンの出力する”GPS Accuracy”の値と実際の位置誤差とを同時に示した図を図 4.3 に示す。

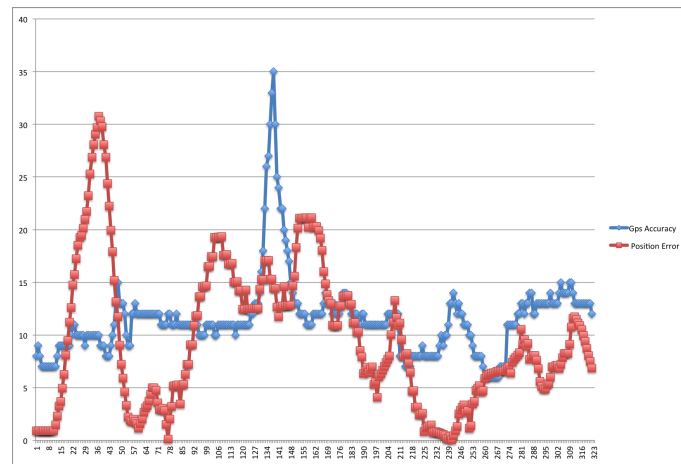


図 4.3. スマートフォンによる GPS Accuracy 値 (青) とその時の実際の位置誤差 (赤)

結果から、実際の誤差と GPS 精度とはあまり相関がないことがわかる。この誤差と精度のミスマッチは Drawil らによっても指摘されている [28]。この原因として、前節で述べた σ_{URE} が原因であると考えられる。マルチパス誤差はその他の誤差に比べてユーザーの位置が少し変化することによって反射・吸収の仕方が大きく変わるので、Urban Canyon において前もって正しく見積もることができない。ここが Urban Canyon において GPS 推定が難しい所以であるが、この環境において GPS 推定を正しく行うためには、このマルチパス誤差が含まれている可能性をダイナミックに判定する必要があると考えられる。

マルチパスが存在しているかどうかの検出方法は仰角を用いる方法 [43] や搬送波電力対雑音電力密度 C/N_0 の値によって定める方法 [44] などが知られている。本研究ではスマートフォンの GPS においても比較的適用が簡単な搬送波電力対雑音電力密度 C/N_0 を用いる方法として、GPS がマルチパスを含んでいない信頼できる時に限り GPS 信頼度があがるような新たな GPS 精度を提案する。

4.4 提案する GPS 精度の計算手法

本研究では Urban Canyon での GPS の精度が悪い環境において、マルチパス誤差を含まない良い推定ができる瞬間を動的かつ正確に把握するため、マルチパス誤差を衛星からの C/N_0 比を使い次式のように定義した。

$$\sigma_{Multipath} = \sum_i \sigma_{Multipath_i} \quad (4.35)$$

$$\sigma_{Multipath_i} = \begin{cases} 10 & (C/N_0 \leq 30dB) \\ 0.2 & (30dB < C/N_0 \leq 40dB) \\ 0 & (C/N_0 > 40dB) \end{cases} \quad (4.36)$$

ただし、 i を受信した衛星であるとする。 C/N_0 比が 30dB 以下である場合は衛星からの受信電波が建物等に遮られている (NLOS) 可能性が高く、40dB 以下は反射等を起こしている可能性があると考えられる。各場合での σ の値は経験則的に定めた。この GPS 精度を適用することで、ほとんどが精度の悪い推定になってしまっても推定が良いと判断された瞬間の推定のみを使って PDR の蓄積誤差を軽減することができると考えられる。次章にて磁場偏向補正の技術とあわせて有効性を確認するために実験を行う。

第 5 章

実験

本章では第 3 章で説明した磁場偏向マップおよび第 4 章で述べた GPS 精度を用いて実証実験を行い，歩行者位置推定の精度を評価する．

5.1 実験環境設定

5.1.1 PDR システムの実行環境

本研究で実験を行う際には，GPS 測位データの記録およびセンサでの計測，データ記録はスマートフォンで行い，実際の歩行者位置の推定計算はそれらのデータに基づいて PC を用いて行った．

実験として使用したスマートフォンは Pantech 社の IS11PT MIRACH という機種 of スマートフォンである (図 5.1)．このスマートフォンに搭載されている機能うち，主に本研究と関連のある機能をまとめると次のようになる．

- スマートフォン機種：Pantech IS11PT MIRACH
- OS：Android 2.3
- プロセッサ（チップ）：Qualcomm Snapdragon S2 MSM8655（GPS 機能内蔵）
- 磁気センサ：YAMAHA 製 YAS530
- 加速度センサ：Bosch Sensortec 製 BMA150

Android の仕様において，センサの Z 軸は画面の向いている方向，X 軸と Y 軸はそれぞれスマートフォンの画面をポートレート（縦長になる向き）で見たときの左から右，下から上の方向と定められているため，こちらを利用した．その他第 MAG 章にて説明した PDR の実装部分に関して，本章の全ての実験に共通して定めるパラメータを表 5.1 の通りに定める．

5.1.2 併用する GPS 受信機の概要およびカルマンフィルタの設定

本研究で用いたスマートフォン内蔵の GPS 受信機では受信衛星番号や受信強度といった受信衛星毎の情報を取得することができなかったため，GPS レシーバー (Ublox EVK-6PPP-0,

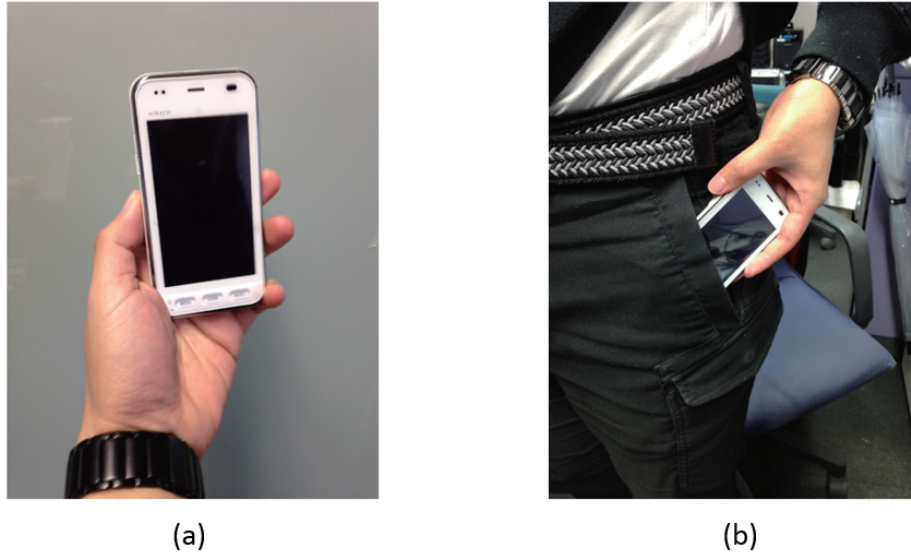


図 5.1. (a) 実験に用いたスマートフォンの写真 (b) スマートフォンをポケットに入れて実験を行う様子

表 5.1. 実験における PDR システムのパラメータ設定

加速度センサ と磁気センサ	加速度センサのサンプリングレート 磁気センサのサンプリングレート	32 Hz 32 Hz
端末の姿勢推定	フィルタ係数 α 磁気偏角 γ	0.8 西方向に 7.0°
ステップ検出	移動平均の窓長 ピーク検出の窓長 n_s ピーク検出の閾値 $a_{v,th}$	4 サンプル 25 サンプル (0.8 秒) 9 m/s^2
進行方向推定	移動平均の窓長 PCA の窓長 n_d 前後方向決定において考慮するサンプル数	3 サンプル 64 サンプル (2 秒) 3 サンプル (約 0.1 秒)

図 5.2) を併用して実験を行った。比較実験のため、この GPS レシーバーでは各時刻の GPS の受信衛星情報 (その中でも受信強度情報のみ) を入手するためだけに用い、GPS による位置推定はスマートフォン内蔵の GPS 受信機から出力された値を用いて行った。また、本研究でのカルマンフィルタにおけるパラメータ設定を表 5.2 にまとめる。



図 5.2. 実験に用いた GPS 受信機

表 5.2. 実験における PDR+GPS カルマンフィルタのパラメータ設定

GPS	測位間隔	1000 ミリ秒
PDR	K_w の最大値・最小値	1.2, 0.3
カルマンフィルタ	歩幅の標準偏差 σ_l	0.2m
	進行方向の標準偏差 σ_θ	$\frac{\pi}{18}$ (10°)
	最新の GPS 修正点からの歩数閾値 n_{th1}	10
	固定点からの歩数閾値 n_{th2}	10

5.1.3 実験場所・コース等設定

実験は主に東京都内の一ツ橋交差点において歩行者の実験コースを設定して行った。実験場所の地図と実験コースを図 5.3 に示す。コースの全長はおよそ 418m で、首都高速道路の高架下をくぐり高層ビルが立ち並ぶ Urban Canyon エリアでの実験である。図 5.4 に Google Earth(Google Inc.) による 3 D 表示されたコース概要を示す。この図からも GPS などの電波が受信しづらい環境であることが分かる。

2 名の実験参加者が前述のスマートフォンおよび GPS 受信機を身に付け実験コースをそれ

表 5.3. 磁場偏向マップを用いた手法に対する実験での位置推定誤差平均値 [m]

Method	Subject 1[m]	Subject 2[m]	Average Error[m]
PDR	32.36	31.98	31.17
PDR+MAG	20.10	24.14	22.12

ぞれ 2 回ずつ、計 4 回歩き、その間加速度センサ・磁気センサ・それぞれの GPS 受信機の記録を取った。コースの途中に 2 回の横断歩道があるが、信号が赤の場合は停止を行い、青になった際に安全を確認して歩行を再開した。測位の精度を数値として評価する際、各時刻に対応する正解位置を正解データとして記録することは難しい。よって本研究では各ステップ位置 \mathbf{x}_n について実験コースの正解軌跡との最短距離を計算し平均を取ったものを誤差の平均値とし測位精度の評価値とする。GPS 測位の結果については、 i 回目の観測点における前回の観測点との距離を $l_{i|i-1}$ 、正解軌跡との最短距離を $d_{z,i}$ として

$$\frac{\sum_i l_{i|i-1} d_{z,i}}{\sum_i l_{i|i-1}}$$

を測位精度の評価値として使用する。

本章にて説明した実装に関して、この実験で定めるパラメータの値は表??の通りである。また、歩幅モデルの初期パラメータ $K_{w,0}, K_{r,0}$ に関しては、参加者に対して事前にキャリブレーションを行い決定した値を用いる。

5.2 磁場偏向マップを用いた手法に対する実験結果

まず第 3 章で定義した磁場偏向マップの有無により実験を行った。一ツ橋の実験コース周辺の磁場偏向マップのサンプル点を表示した図と、磁場偏向マップを主要な道に対して図示したものを図 5.5 に示す。図 5.5 左ではマーカーの点がサンプル点を示している (各最近点との距離はおよそ 30m 以内)。マーカーの色は便宜上の色で字 k 変更の値と案系がない。図 5.5 右によると首都高速の高架下など、多くの場所で磁場が局所的に偏向されていることがわかる。ただし磁気偏向マップ作成の際の 4 回の測定において、ノイズが大きく偏向の値の差が 15 度以上であったサンプル点データに対してはそれを使用しない処理を行った。実験結果の一例を図 5.6 に示す。それぞれ対応する色と推定軌跡は下のようになっている。

- 橙: PDR (PDR のみ)
- 青: PDR+MAG (PDR に磁場偏向マップによる補正を加えたもの)

実験の結果、磁場偏向マップを用いた場合、主に最初の曲がり角における進行方向の推定精度が向上していることが図 5.6 から見てとれる。また、2 名の実験参加者による計 4 回の試行による誤差の平均値を表 5.3 に示す。誤差平均の値が磁場偏向マップの適用の有無により 31.17m から 22.12m になった。しかし磁場偏向マップを用いた推定は推定位置の磁場偏向を

表 5.4. 新たな GPS 精度を用いた手法に対する実験 (一ツ橋) での位置推定誤差平均値 [m]

Method	Subject 1[m]	Subject 2[m]	Average Error[m]
PDR	32.36	31.98	31.17
GPS	13.06	13.49	13.27
PDR+GPS(conv)	13.09	14.64	13.87
PDR+GPS(acc)	11.93	12.55	12.24

参照するため、正解位置から離れた場所を推定してしまえばこれを活用することができないと考えられる。

5.3 GPS 精度を用いた手法に対する実験結果

次に 4 章で定義した新たな GPS 精度を使用した実験を行った。第 5.2 節で示したものと同じケースの実験結果を図 5.7 に示し、それぞれ対応する色と推定軌跡は次のようである。

- 橙: PDR (PDR のみ)
- 淡青: GPS (GPS のみ)
- 黄: PDR+GPS(conv) (PDR, GPS のフュージョンに従来の accuracy 値を適用させたもの)
- 緑: PDR+GPS(acc) (PDR, GPS のフュージョンに提案する GPS 精度を適用させたもの)

図 5.4 において、新たな GPS 精度を用いた測位軌跡では途中で大きく GPS のほうにシフトした結果その後の軌跡が修正されていることが分かる。これは提案モデルにおいて GPS 精度が高いと判定された位置が修正されたためであると考えられる。また、5.2 節と同じく、2 名の実験参加者による計 4 回の試行による誤差の平均値を表 5.3 に示す。この結果からも提案手法が効果的であると考えられる。

なお、この実験では新たな GPS 精度の効果を示すため、補助的な実験として周囲にビルのなく GPS 精度が比較的高い皇居外苑地区においても実験コースを設定した。図 5.8 に皇居外苑地区での実験コース、図 5.9 に 3D 表示されたコース概要を示す。実験結果を図 5.10 に示し、実験者 4 名でそれぞれ 2 回ずつ (ただし実験者 3 のエラー計測 1 回を除く)、計 7 回の実験の誤差平均を示したものを表 5.5 に記す。周囲にビル等の遮蔽物がないため GPS による結果が最も良いが、スマートフォンの GPS Accuracy 値を使用したものの誤差平均 7.72m に対し提案した GPS 精度が 4.75m となった結果からも、本研究の提案した GPS 精度の評価手法が PDR の推定結果をより正解位置へ修正できていることがわかり、本手法が GPS の良好であるケースを判断する際に効果的であるということが分かる。

表 5.5. 新たな GPS 精度を用いた手法に対する実験 (皇居外苑) での位置推定誤差平均値 [m]

Method	Subject 1[m]	Subject 2[m]	Subject 3[m]	Subject 4[m]	Average Error[m]
PDR	23.64	51.90	84.96	46.56	47.02
GPS	2.21	2.83	3.01	3.26	2.80
PDR+GPS(conv)	5.19	8.14	14.40	6.49	7.72
PDR+GPS(acc)	2.67	5.40	7.57	4.78	4.75

表 5.6. 提案手法の統合に対する実験 (一ツ橋) での位置推定誤差平均値 [m]

Method	Subject 1[m]	Subject 2[m]	Average Error[m]
PDR	32.36	31.98	31.17
GPS	13.06	13.49	13.27
PDR+MAG+GPS(acc)	7.70	7.94	7.81

5.4 提案手法の統合による実験結果

最後に両方の提案手法を適用した実験結果を図 5.11 に示し、それぞれ対応する色と推定軌跡は次のようである。これも第 5.2 節および第 5.3 節と同じ試行のものを表示している。

- 橙: PDR (PDR のみ)
- 淡青: GPS (GPS のみ)
- 赤: PDR+MAG+GPS(acc) (磁場偏向補正, 新たな GPS 精度を共に適用させたもの)

また、表 5.6 に提案手法の統合に対する実験 (一ツ橋) での位置推定誤差の平均値を示す。図 5.4・表 5.6 の両方の結果より本論文における 2 つの提案手法を適用することで歩行者がどちら側の歩道を通行しているか判断可能な精度での推定ができていることがわかる。



図 5.3. 一ツ橋での実験コース

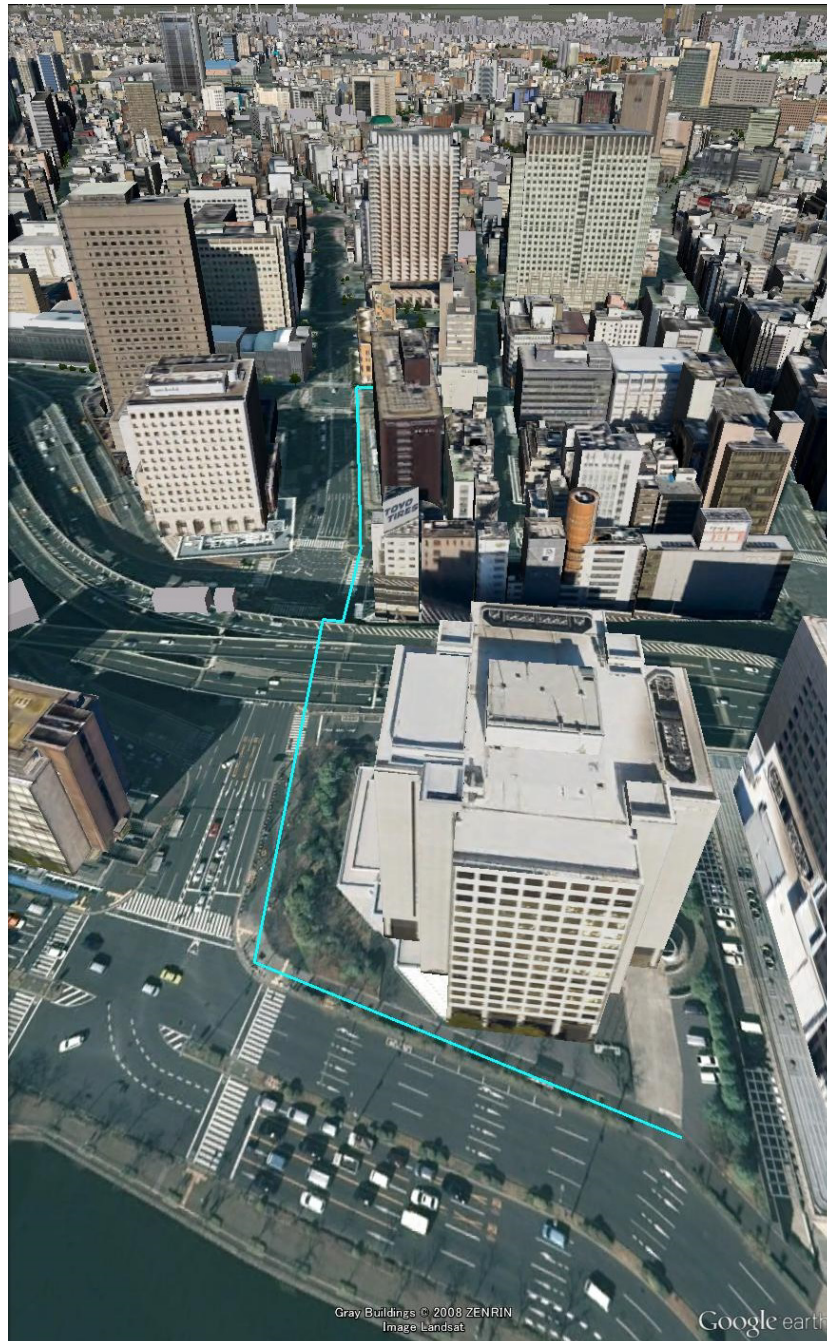


図 5.4. 一ツ橋での 3 次元俯瞰図



図 5.5. 一ツ橋での磁場偏向マップサンプル点と、主要な道での磁場偏向カラーマップ



図 5.6. Urban Canyon における磁場偏向マップを用いた実験結果



図 5.7. Urban Canyon における新たな GPS 精度を用いた実験結果



図 5.8. 皇居外苑での実験コース

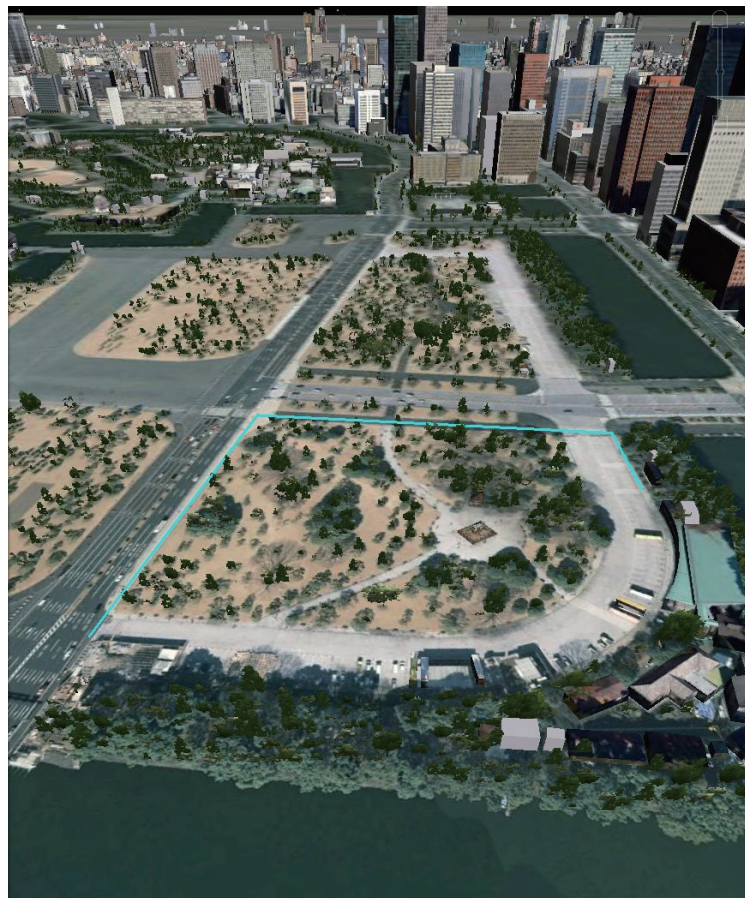


図 5.9. 皇居外苑周辺の 3 次元俯瞰図



図 5.10. Open Sky 環境下での新しい GPS 精度を適用した実験結果 (橙: PDR (PDR のみ), 淡青: GPS (GPS のみ), 黄: PDR+GPS(conv) (PDR, GPS のフュージョンに従来の accuracy 値を適用させたもの), 緑: PDR+GPS(acc) (PDR, GPS のフュージョンに提案する GPS 精度を適用させたもの))



図 5.11. 提案手法の統合による実験結果

第 6 章

結論と今後の課題

最後に本研究について総括し、今後取り組むべき課題について述べる。

6.1 結論

本研究では、Urban Canyon における歩行者位置推定の精度向上の手法を提案し、それが実際の屋外 Urban Canyon 環境において有効であることを確認した。

本論文における主な成果として以下の 3 点が挙げられる。

第一に、歩行者デッドレコニングにおいて進行方向の誤差を修正するための磁場ベクトル偏向量の分布データの機構を提案し、実際の推定結果を良くすることを実験により確認した。また、推定位置によって磁場偏向マップから参照される磁場偏向の値が変わるため、この手法により正しい方向推定を行うためには別の手法により良い位置推定が与えられることが条件になることを確認した。

第二に、GPS において、GPS 幾何に基づいた独自の GPS 精度モデルを導入し、このモデルが PDR とのフュージョンにおいて動作することを実験により実証した。GPS の accuracy 値は GPS の信頼度を図る上で重要な指標であり、他のセンサとのフュージョンを考える際の推定根拠となる。PDR と GPS のフュージョンによる実験の結果スマートフォンの accuracy 値を使用した場合に比べてよい推定を与えることを示し、多くの場合において信頼度が高い GPS 推定ができない Urban Canyon においても適用できることを確認した。

第三に、提案した 2 つの手法を両方適用することで、Urban Canyon においても道路のどちら側の歩道にいるかまで分かる程度の歩行者位置推定精度を達成した。GPS によって正解位置により近い推定を行うことで、磁場偏向の修正がより正しく行えたことが歩行者位置推定精度向上の要因であると考えられる。

6.2 今後の課題

ここでは今後取り組むべき課題や研究の発展の方向性についていくつか述べる。

6.2.1 GPS 精度の更なる向上

本論文で提案した GPS 精度は受信強度に応じて離散的な定義で計算を行ったが、必ずしも本手法で計算した GPS 精度がよくないからといって GPS の推定が正しく行うことができないわけではない。電波の反射や透過による誤差が生じる場合においても、正しく擬似距離が計算できる衛星のみを使用して位置推定をより精度良く行うことができるため、それらの検知手法を複合的に用いることで改善の余地がかなり残されていると考えられる。

6.2.2 Wi-Fi フィンガープリンティングの導入

本手法は GPS 精度が良い場合があることを前提としたものであるため、GPS の精度が常に悪い箇所やトンネル等のように GPS による測位がそもそも行えない場所では使用できない。そのような場合 Wi-Fi フィンガープリンティングは絶対位置が推定でき GPS の代替として機能させることができる。Wi-Fi フィンガープリンティングを使用した手法は主に屋内環境において多くの有用な研究が発表されており、スマートフォンを用いたフュージョンが容易に可能となると考えられる。現在この手法を適用した屋外における研究はあまりないが、その原因として Wi-Fi フィンガープリンティングの精度が現在あまり高くない事が挙げられる。GPS による測位が難しい部分に効果的に配置することで、PDR の蓄積誤差の修正が継続的に行える可能性があり、今後の研究が期待される。

謝辞

本研究を進めるに当たり、指導教員として多大なご指導をいただきました上條俊介准教授に心より感謝致します。研究の基礎からはじまり論文の構成方法や効果的なプレゼンテーションなど、様々な事柄についてご助言を頂きまして誠にありがとうございました。

秘書の三輪祐子さんには、研究活動に関する事務手続きなどで度々お世話になりました。どうもありがとうございました。

また、研究員の古艶磊さん、許立達さんには研究方針の立て方や英語論文の書き方など、様々な部分において研究において手本となる姿を示してくださり大変感謝しております。先輩の垣内紀明さん、青木尚久さん、三浦俊祐さん、矢野進也さんにはどんな些細な相談事でも誠意を持って応じて頂き、感謝申し上げます。そして、それに加えて同期の陳飛宇君、後輩の和田雄太郎君、橋本順祥君、黄宇陽君を含む上條研メンバーの皆さん、暑い日も寒い日も屋外での実験にご協力頂き本当にありがとうございました。

最後に、家族や友人など、日々の学生生活でお世話になりました全ての方に感謝致します。

2015 年 2 月 5 日

発表文献

国内研究会

- [1] 砂川 健一, 許 立達, 上條 俊介, “Pedestrian Dead Reckoning for Mobile Phones with Magnetic Deviation Map and GPS Accuracy,” 電子情報通信学会 ITS 研究会, vol. 114, no. 225, ITS2014-17, pp. 71-76, 2014 年 9 月.

論文誌

- [2] Noriaki KAKIUCHI, Kenichi SUNAGAWA, and Shunsuke KAMIJO, “Pedestrian Dead Reckoning for Mobile Phones using Magnetic Deviation Map,” IEICE TRANSACTIONS on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E98-A, No.1, pp.313-322, JANUARY 2015.

参考文献

- [1] 野村幸子, 岸本達也. GPS・GIS を用いた鎌倉市における観光客の歩行行動調査とアクティビティの分析. 日本建築学会総合論文誌, Vol. 4, pp. 72–77, 2006.
- [2] R. Levi and T. Judd. Dead reckoning navigational system using accelerometer to measure foot impacts, 1996. U.S. Patent Number 5583776.
- [3] T. Judd. A personal dead reckoning module. In *10th International Technical Meeting of the Satellite Division (ION GPS) 1997*, pp. 47–51, 1997.
- [4] Q. Ladetto and B. Merminod. Digital magnetic compass and gyroscope integration for pedestrian navigation. In *9th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, pp. 111–120, 2002.
- [5] L. Fang, P. J. Antsaklis, L. A. Montestruque, M. B. McMickell, M. Lemmon, Y. Sun, H. Fang, I. Koutroulis, M. Haenggi, M. Xie, and X. Xie. Design of a wireless assisted pedestrian dead reckoning system - the NavMote experience. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 54, No. 6, pp. 2342–2358, 2005.
- [6] Z. Sun, X. Mao, W. Tian, and X. Zhang. Activity classification and dead reckoning for pedestrian navigation with wearable sensors. *IOP Measurement Science and Technology*, Vol. 20, No. 1, pp. 15203–15212, 2009.
- [7] S. Beauregard. Omnidirectional pedestrian navigation for first responders. In *4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication*, pp. 33–36, 2007.
- [8] S. Beauregard, Widyawan, and M. Klepal. Indoor PDR performance enhancement using minimal map information and particle filters. In *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS) 2008*, pp. 141–147, 2008.
- [9] A. R. Jimenez, F. Seco, C. Prieto, and J. Guevara. A comparison of pedestrian dead-reckoning algorithms using a low-cost MEMS IMU. In *IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP) 2009*, pp. 37–42, 2009.
- [10] K. Kunze, P. Lukowicz, K. Partridge, and B. Begole. Which way am i facing: Inferring horizontal device orientation from an accelerometer signal. In *International Symposium on Wearable Computers 2009*, pp. 149–150, 2009.
- [11] U. Steinhoff and B. Schiele. Dead reckoning from the pocket - an experimental study. In *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*

- (*PerCom*) 2010, pp. 162–170, 2010.
- [12] S. A. Hoseinitabatabaei, A. Gluhak, and R. Tafazolli. uDirect: A novel approach for pervasive observation of user direction with mobile phones. In *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom) 2011*, pp. 74–83, 2011.
 - [13] D. Kamisaka, S. Muramatsu, T. Iwamoto, and H. Yokoyama. Design and implementation of pedestrian dead reckoning system on a mobile phone. *IEICE Transactions on Information and Systems*, Vol. E94-D, No. 6, pp. 1137–1146, 2011.
 - [14] M. Susi, V. Renaudin, and G. Lachapelle. Motion mode recognition and step detection algorithms for mobile phone users. *Sensors*, Vol. 13, No. 2, pp. 1539–1562, 2013.
 - [15] T. Egerton, M. Danoudis, F. Huxham, and R. Ianseck. Central gait control mechanisms and the stride length - cadence relationship. *Gait & Posture*, Vol. 34, No. 2, pp. 178–182, 2011.
 - [16] H. Weinberg. *Using the ADXL202 in Pedometer and Personal Navigation Applications*. Analog Devices Inc., 2002.
 - [17] Q. Ladetto. On foot navigation: Continuous step calibration using both complementary recursive prediction and adaptive Kalman filtering. In *13th International Technical Meeting of the Satellite Division (ION GPS) 2000*, pp. 1735–1740, 2000.
 - [18] J. Kim, H. Jang, D. Hwang, and C. Park. A step, stride and heading determination for the pedestrian navigation system. *Journal of Global Positioning Systems*, Vol. 3, No. 1-2, pp. 273–279, 2004.
 - [19] I. Bylemans, M. Weyn, and M. Klepal. Mobile phone-based displacement estimation for opportunistic localisation systems. In *3rd International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies (UBICOMM)*, pp. 113–118, 2009.
 - [20] J. Jahn, U. Batzer, J. Seitz, L. Patino-Studencka, and J. G. Boronat. Comparison and evaluation of acceleration based step length estimators for handheld devices. In *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN) 2010*, pp. 1–6, 2010.
 - [21] W. Chen, R. Chen, Y. Chen, H. Kuusniemi, and J. Wang. An effective pedestrian dead reckoning algorithm using a unified heading error model. In *IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium (PLANS) 2010*, pp. 340–347, 2010.
 - [22] T. Judd and T. Vu. Use of a new pedometric dead reckoning module in GPS denied environments. In *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS) 2008*, pp. 120–128, 2008.
 - [23] S. A. Rahok, Y. Shikanai, and K. Ozaki. Navigation using an environmental magnetic field for outdoor autonomous mobile robots. *Advanced Robotics*, Vol. 25, No. 13-14, pp. 1751–1771, 2011.

- [24] D. Navarro and G. Benet. Magnetic map building for mobile robot localization purpose. In *IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA) 2009*, pp. 1–4, 2009.
- [25] R. Jirawimut, P. Ptasiński, V. Garaj, F. Cecelja, and W. Balachandran. A method for dead reckoning parameter correction in pedestrian navigation system. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 52, No. 1, pp. 209–215, 2003.
- [26] 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. 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU, パターン認識・メディア理解, Vol. 106, No. 73, pp. 75–80, 2006.
- [27] D. Gusenbauer, C. Isert, and J. Krsche. Self-contained indoor positioning on off-the-shelf mobile devices. In *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN) 2010*, pp. 1–9, 2010.
- [28] N.M. Drawil, H.M. Amar, and O.A Basir. GPS localization accuracy classification: A context-based approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 14, No. 1, pp. 262–273, March 2013.
- [29] J. Seitz, T. Vaupel, J. Jahn, S. Meyer, J. G. Boronat, and J. Thielecke. A hidden markov model for urban navigation based on fingerprinting and pedestrian dead reckoning. In *13th Conference on Information Fusion (FUSION)*, pp. 1–8, 2010.
- [30] Y. Wakuda, S. Asano, N. Koshizuka, and K. Sakamura. An adaptive map-matching based on dynamic time warping for pedestrian positioning using network map. In *IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium (PLANS) 2012*, pp. 590–597, 2012.
- [31] Noriaki Kakiuchi and Shunsuke Kamijo. Pedestrian dead reckoning for mobile phones through walking and running mode recognition. *IEEE 16th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, October 2013.
- [32] M. Kourogi and T. Kurata. Personal positioning based on walking locomotion analysis with self-contained sensors and a wearable camera. In *2nd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 103–112, 2003.
- [33] Noriaki KAKIUCHI, Kenichi SUNAGAWA, and Shunsuke KAMIJO. Pedestrian dead reckoning for mobile phones using magnetic deviation map. *IEICE TRANSACTIONS on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, Vol. 98, No. 1, pp. 313–322, 2015.
- [34] Pratap Misra, Per Enge, 日本航海学会 GPS 研究会, 日本航海学会. 精説 GPS : 基本概念・測位原理・信号と受信機. 正陽文庫, 2004.
- [35] Gilbert Strang and Kai Borre. *Linear algebra, geodesy, and GPS*. Siam, 1997.
- [36] Ashby Neil. Relativity and global positioning system. *Physics Today*, pp. 41–47, May 2002.
- [37] WA Feess and SG Stephens. Evaluation of gps ionospheric time-delay model.

- Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, No. 3, pp. 332–338, 1987.
- [38] J Saastamoinen. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites. *Geophysical Monograph Series*, Vol. 15, pp. 247–251, 1972.
 - [39] Bernhard Hofmann-Wellenhof, Herbert Lichtenegger, and James Collins. GPS theory and practice. 1997.
 - [40] HS Hopfield. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. *Journal of Geophysical research*, Vol. 74, No. 18, pp. 4487–4499, 1969.
 - [41] E.D. Kaplan. *Understanding GPS: Principles and Application*. Artech House Publishers: Boston, MA., 2005.
 - [42] P.D. Groves. *Principles of GNSS, Inertial, and Multi-Sensor Integrated Navigation Systems (GNSS Technology and Applications)*. 2nd ed. Artech House Publishers., 2013.
 - [43] 久保信明, 安田明生, 鈴木崇史. 衛星測位におけるマルチパス誤差の削減と高精度化への可能性について. 電子情報通信学会技術研究報告 (ITS 研究会) 資料, 信学技報, Vol. 104, No. 230, p. 12, 2004.
 - [44] 白井友子, 久保信明. 都市部における rtk-gps の信頼性向上. 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 60, No. 1, pp. 40–47, 2012.