

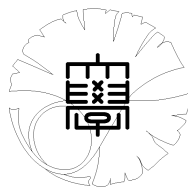
修 士 論 文

3次元構造データを活用した都市部における GPS の測位精度改善に関する研究

Improvement of GPS accuracy utilizing
3D structure data of urban canyon

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 48-126439 三浦 俊祐

提出日

平成 26 年 2 月 6 日

概要

衛星測位システムにおいて、現在最も大きな誤差の要因となっているものは見通し外伝搬およびマルチパスである。これらの影響を受けている衛星を推定し、測位計算から除くことによって、衛星測位の精度を高めることができる。しかし、単純に衛星を除く場合、高層ビル街のような環境において可視衛星数が極端に減少するという問題が生じる。我々は、3次元地図およびレイトレーシングを用いた NLOS 信号、マルチパス信号の識別手法および誤差距離の推定手法を考案し、これをもとに衛星を取り除くのではなく反射波の遅延距離を考慮した正解位置の探索手法を提案した。この提案手法について、都内の高層ビル街において衛星データを実際に取得し検証を行った結果、従来手法と比較して測位誤差の最大値、平均値、標準偏差などの面で提案手法の優位性を示した。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	目的	3
1.3	本論文の構成	5
第 2 章	衛星測位システムによる単独測位	6
2.1	GPS の概要	6
2.1.1	GPS の構成	7
2.2	測位原理	12
2.2.1	擬似距離	13
2.2.2	測位計算	15
2.3	誤差要因	17
2.3.1	衛星時計誤差	18
2.3.2	衛星座標誤差	18
2.3.3	相対論的効果	19
	GPS 衛星側での補正	19
	受信機側での補正	19
2.3.4	電離層遅延	19
	2 周波測定による遅延量の推定	21
	Klobuchar モデル	22
2.3.5	対流圏遅延	23
	対流圏モデル	23
	マッピング関数	24
2.3.6	シャドウイングとマルチパス	25
2.3.7	受信機雑音	29
2.3.8	測位誤差	29
第 3 章	関連研究	30

3.1	受信機の内部処理	30
3.2	受信データの整合性	32
3.3	外部データとの融合	33
3.4	本研究の位置づけ	34
第 4 章	システム概観	36
4.1	GPS 受信機	36
4.2	3 次元構造物マップ	37
4.3	レイトレーシング	40
4.4	3 次元構造物マップの誤差による影響	42
第 5 章	推定アルゴリズム	46
5.1	レイトレーシングによる NLOS 伝搬誤差	46
5.2	候補点	47
5.3	擬似距離の類似度	47
5.4	仮測位値の類似度	49
5.5	候補点の評価	50
5.6	パーティクルフィルタによる平滑化	52
5.7	探索候補点の削減	52
5.8	レイトレーシングによるマルチパス誤差	53
5.8.1	同相マルチパス	54
5.8.2	逆相マルチパス	56
5.9	擬似距離の外れ値の除去	56
第 6 章	実証実験	58
6.1	移動軌跡からの評価	58
6.2	正解座標からの評価	61
6.3	探索時間の評価	66
6.3.1	ランダムサンプリングによる探索	66
6.3.2	携帯端末を用いた評価	66
6.4	マルチパスの考慮	69
6.4.1	マルチパスを補正した通常測位	69
第 7 章	結論と今後の課題	77
7.1	本研究のまとめ	77
7.2	今後の課題	78
7.2.1	3 次元構造物マップの間違いに対する考察	78

7.2.2	擬似距離の間違いについて	79
7.2.3	衛星数の不足	79

表目次

2.1	GPS 衛星の主要諸元	10
4.1	GPS 受信機の出力情報	36
4.2	DSM データの例	39
6.1	試行の平均誤差の最大値, 時間平均, 標準偏差	60
6.2	試行の平均誤差の最大値, 時間平均, 標準偏差 (詳細評価)	61
6.3	位置推定の平均誤差および平均計算時間	66
6.4	試行の平均誤差の最大値, 時間平均, 標準偏差 (マルチパス考慮)	76

目次

1.1	都市部における主要誤差要因	2
1.2	GPS による測位結果と正解位置（都内高層ビル街において測定）	3
1.3	都内における LOS の GPS 衛星数	4
2.1	GPS 衛星の空間配置.	8
2.2	エフェメリスの利用の概念図.	8
2.3	異なるクロックの安定度の比較.	9
2.4	複数の衛星を中心とする球の交差	12
2.5	測定距離および時刻系の関係.	14
2.6	Sagnac 効果.	20
2.7	大気による信号への影響の概念図.	20
2.8	Klobuchar モデル.	22
2.9	GPS 受信機のトラッキングループ.	26
2.10	受信信号と Early, Late 信号.	27
2.11	コリレータ（ワイドコリレータ）.	27
2.12	マルチパス誤差と遅延距離の関係.	27
2.13	マルチパスが存在する場合のコリレータへの影響	28
3.1	Narrow Correlator の原理.	31
3.2	全方位赤外線写真を用いた衛星の識別 [1].	33
3.3	3 次元地図およびレイトレーシングによる衛星の識別 [2].	34
3.4	誤った基準位置からのレイトレーシング	35
4.1	使用した受信機	37
4.2	3 次元構造物マップの構築	38
4.3	3 次元構造物マップの内容	39
4.4	レイトレーシング	40
4.5	イメージング法による反射波の探索	42

4.6	LOS のマルチパスと NLOS 伝搬の識別例	43
4.7	建物とレイとの最短距離	43
4.8	建物とレイとの最短距離に対する NLOS である確率	44
5.1	初期位置の周囲に格子状に用意した候補点 $P^{(i)}$ (青点)	48
5.2	測位結果による候補点の評価	49
5.3	y_{GPS} と $x(t - \Delta t)$ の周囲にランダムに配置された候補点の例 (青点: GPS の測位結果の周囲に広く分布する候補点, 水色の点: 前回位置の周囲に狭く 分布する候補点)	54
5.4	遅延距離とマルチパス誤差の関係 [3]	55
6.1	従来手法と提案手法の軌跡. (赤丸: 従来手法, 黄色の四角: 提案手法, 白線: 正解軌跡)	59
6.2	従来手法と提案手法の測位誤差距離	60
6.3	従来手法と提案手法の測位結果の比較 (一ツ橋)	62
6.4	真値からの測位誤差距離の例	63
6.5	従来手法と提案手法の測位結果の比較 (品川)	64
6.6	品川駅東口の実験サイトの電波環境	64
6.7	従来手法と提案手法の比較 (1 点のみの推定結果例)	65
6.8	スマートフォン向けシステム構成	67
6.9	使用した Android 端末および受信機	68
6.10	測位結果におけるマルチパス誤差の効果	70
6.11	測位結果におけるマルチパス誤差の効果	71
6.12	候補点の分布 (赤: 尤度の高い候補点, 緑: 尤度の低い候補点, 黄: 加重平均 (=推定結果))	72
6.13	候補点の分布 (赤: 尤度の高い候補点, 緑: 尤度の低い候補点, 黄: 加重平均 (=推定結果))	73
6.14	候補点の分布 (赤: 尤度の高い候補点, 緑: 尤度の低い候補点, 黄: 加重平均 (=推定結果))	74
6.15	マルチパスを考慮した際の測位結果 (一ツ橋)	75

第 1 章

序論

本研究では都市部における歩行者の高精度位置情報取得のための、3次元地図およびレイ
トレーシングを用いた GPS (Global Positioning System) に代表される衛星測位システム
(Global Navigation Satellite Systems; GNSS) の精度改善手法の提案を行う。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 背景

自身の位置を高精度に求めることは非常に重要な意味を持っている。近年、位置の把握の
ニーズは高まっており、数 mm の精度から 10m 程度の精度まで様々なアプリケーションが開
発され、実用化されている。中でも特に都市部における正確な位置情報は様々な用途がある。
例えば、歩行者の統計情報であったり、どういった店舗に立ち寄り、どのように移動したか等
のマーケティング情報、またそのほかには事故防止などの交通安全のアプリケーションもあ
る。自己の絶対位置を認識する技術としては、現在、GPS が非常に広く普及している。GPS
は、地球上であれば自分自身の 3 次元座標を単独で求めることが可能であるため、位置情報
の算出に関して非常に大きなアドバンテージがあると言える。多くの携帯電話や自動車には安
価な GPS 受信機がすでに搭載されており、これらは理想的な環境の下では誤差 10m 以下の
精度で位置を知ることができると言われている。この精度は、カーナビなどの案内をするアプ
リケーションにおいては、十分な精度であると考えられる。これに加えて自動車では、車速
情報やジャイロセンサ、ステアリングホイールの舵角センサなど、車両からの情報が簡単に
入手できる。これらと GPS とを組み合わせることでより高精度な位置推定が可能となる。ま
た、高精度な受信機を搭載することも可能であり、自動車における測位はかなりの精度で達成

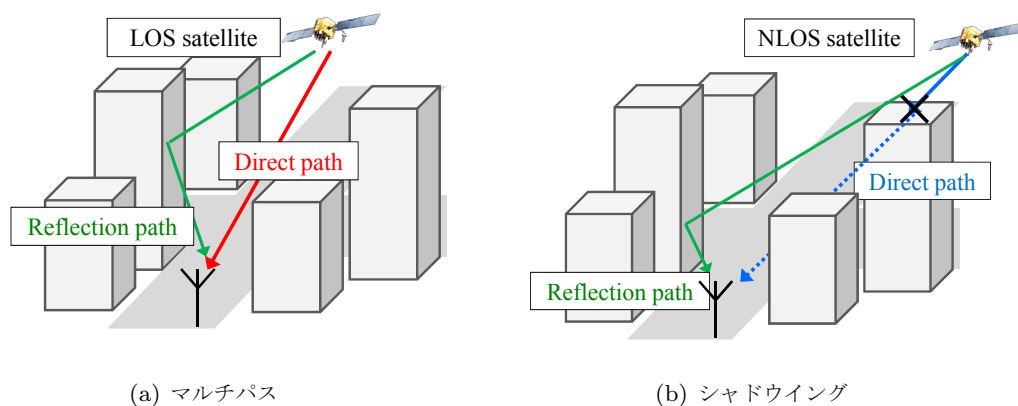


図 1.1. 都市部における主要誤差要因

できていると言える。しかし、センサや大規模な受信機などは歩行者にとっては負担となるため、歩行者の位置推定を行う場合は小型の受信機単独での測位を行うことが現実的である。さらに、この精度は良好な環境下での想定であり、都心部や山間部などにおいては受信機の周囲の構造物によって、GPS 信号は遮蔽、反射、回折、散乱などの影響を受ける。その結果、図 1.1(a) に示されるようなマルチパスと呼ばれる直接波と反射波が同時に受信されるような現象が発生し、GPS には大きな誤差が生じる。さらに、図 1.1(b) のように直接波が遮蔽され反射波のみが受信されることも起こり得る。これはシャドウイングと呼ばれ、非常に大きな誤差要因となる。またここで図 1.1(a) のように、受信機から衛星が直接見えているような領域を Line-of-sight (LOS) といい、図 1.1(b) のように障害物によって隠れているような領域を Non-line-of-sight (NLOS) と呼ぶ。特に高層ビルが立ち並ぶ環境においては衛星からの信号が多重反射して受信されることもあり、場所や状況によっては 100m 以上もの大きな誤差を生じさせる [4, 5, 6]。経験的には、これらの影響で GPS の結果は道の反対側に算出されることが多い (図 1.2)。先に述べたマーケティングや事故防止などのアプリケーションを考えると、歩行者が道のどちら側にいるかという情報は非常に重要である。自身の位置を求めるニーズの多い都市部において、GPS の測位精度を向上させることは非常に大きな社会的ニーズがあると言える。

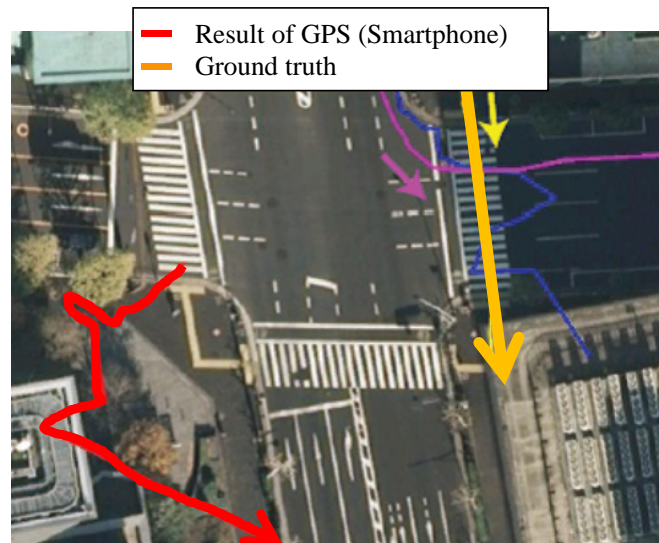


図 1.2. GPS による測位結果と正解位置（都内高層ビル街において測定）

1.2 目的

GPS そのものの精度向上としては、古くから多くの研究がなされてきた。最新の高精度受信機では、受信機内部の相関器（コリレータ）の改良によって大きなマルチパスの影響はすでに大幅に低減されている。また測位計算の過程で、例えば最小二乗法の残差を小さくするよう衛星の選択を行うことで、マルチパスの影響を小さくするという手法もある。近年では、周囲の構造物をカメラ、測量データなどから把握し、NLOS である GPS 衛星を推定し測位計算から除くことによって、GPS そのものの精度の向上を狙った研究が多くなされてきた。しかしながら、NLOS 衛星を推定し除外する手法全般的に言えることとして、衛星数が極端に減少してしまうという問題がある。GPS などの衛星測位システムにおいては、衛星座標がすべて既知のもとに受信機座標（緯度、経度、高さ）の算出を行う。このとき受信機時計には GPS 時系からのオフセットがあるため、3 次元座標および時計遅れを求めることとなる。これより求める未知数は 4 であるので、計算には少なくとも 4 機の衛星が必要となる。ここで、何らかの手法を用いて不可視衛星を特定し、それらを単純に除去してしまうと、測位計算に使用できる衛星数が減少してしまうという問題がある。実際に東京の都心において GPS 信号を受信し、レイトラッキングにより不可視衛星を推定、可視衛星数を測定した。これを図 1.3 に示した。このグラフより、高層ビルが建ち並ぶような環境では、4 機以上の衛星が直接見えている

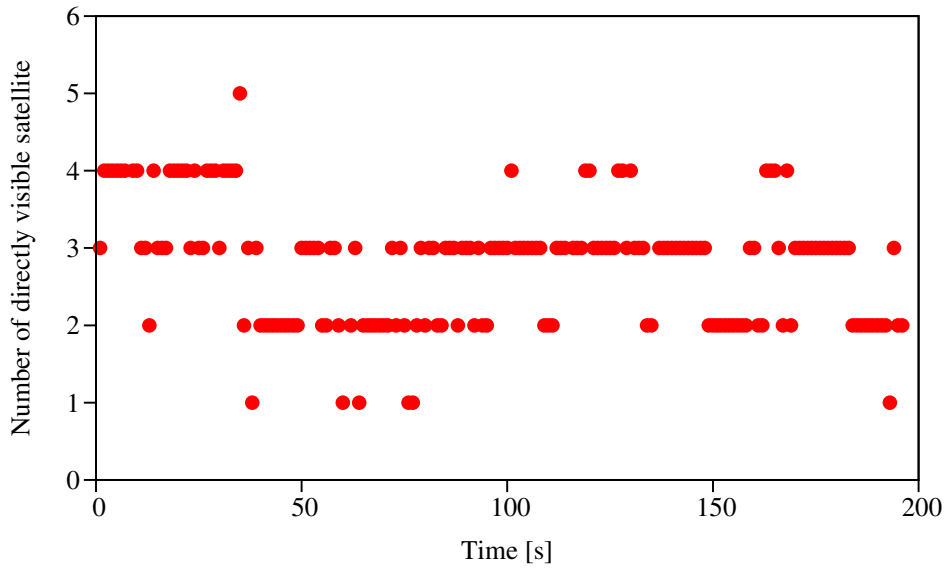


図 1.3. 都内における LOS の GPS 衛星数

時間は全体の 3 分の 1 程度のみであることが分かる．つまり，NLOS 衛星を単純に取り除いてしまう場合，都心部においては測位率が非常に低下してしまうことが考えられる．一方，衛星測位技術は多くの国や地域で近年開発が非常に進んでおり，ロシアの GLONASS，EU の GALILEO や中国の BeiDou，日本の準天頂衛星システムなど，世界的に衛星数は増加の傾向にあるため，可視衛星数の問題は解消される可能性もある．しかしながら，衛星が増加したとしてもシャドウイングやマルチパスの問題は残る．また，現在最も安定しており，技術的にも資源的にも普及し，さらには非常に低価格となっている 1 周波数の GPS 受信機を活用するというのも重要であると我々は考えている．したがって，本論文における提案手法では衛星数を減少させないために，NLOS である衛星からの信号も積極的に利用しつつ測位精度の改善を行う．

以上をまとめると，本研究では都市部において歩行者および自動車に適用可能な，高精度かつシンプルな測位方法の実現を目指す．このために，歩行者にとって負担となるセンサなどを用いず，建物の高さまでを含めた 3 次元構造データのみを用いて NLOS 伝搬およびマルチパスの影響を推定する．また，ビルの谷間においても衛星数を確保するために，伝搬経路が推定できた衛星すべてを用いて測位を行うこととする．

1.3 本論文の構成

第2章では、最も広く利用されている GNSS として GPS を例に取り、システム全体の概要およびその測位原理を説明し、誤差の要因について詳細に検討する。

第3章では関連技術として、GPS におけるマルチパスおよびシャドウイングの誤差低減技術、研究等を紹介する。

第4章では、本提案手法で用いる機器、技術の詳細について説明する。

第5章では、測定した擬似距離および3次元構造物データから現在位置推定を行うアルゴリズムについての説明を行う。

第6章では、本研究において行った実験の詳細とその結果について述べ、前章で示したアルゴリズムがどのように動作しているかを説明する。

最後に、第7章で本研究の結論と今後の課題を述べる。

第 2 章

衛星測位システムによる単独測位

位置を特定するための手段の 1 つである衛星測位システム (GNSS) は、複数の衛星からの信号を利用し、受信機端末とアンテナさえ持てば世界中で利用することのできる位置特定システムである。本章では GNSS の単独測位に関して、その代表である GPS についてシステム全体の概要およびその測位原理を説明し、都市部において特に大きな誤差をもたらす要因について説明する。

2.1 GPS の概要

GPS は高精度な位置・速度・時刻の情報を提供するために、米国米国防総省によって開発された人工衛星による位置の算出システムである。元々は軍用のために計画・開発されたが、一部は民間用に公開され航空・船舶・車のナビゲーションシステムや測量などにも利用されてきた。近年では、携帯電話やデジタルカメラなどにも搭載されるようになり、非常に広く普及している。

GPS は 1973 にその設計が始まり、試作開発用のブロック I 衛星が 1978 年から 1985 年までの間に 10 機打ち上げられ、1989 年からの 6 年間に、24 機の量産型の衛星であるブロック II・ブロック IIA 衛星が打ち上げられ、1995 年に本格的なシステムとして運用が開始された。衛星は、地球上のどの場所においても最低 4 機の衛星を捕らえることができるように配置されており、これにより地球規模で連続的かつ瞬時に、無制限の数のユーザが利用することが可能なシステムとなっている。

GPS は運用可能となった世界で初めての衛星航法システムである。同様のシステムと独

自の衛星を使った衛星航法システムをまとめて、衛星測位システム (GNSS) と呼ぶ。GNSS には旧ソ連が開発し、現在ロシア連邦が運用している GLONASS, EU が開発を行っている GALILEO, 中国による BeiDou Navigation Satellite System がある。また、特定地域向けのシステムである RNSS (Regional Navigation Satellite System) としては、我が国における準天頂衛星システム (Quasi-Zenith Satellite System; QZSS), インドによる IRNSS (Indian Regional Navigational Satellite System) が計画されており、世界中で非常に活発に衛星測位システムの開発が行われている。

2.1.1 GPS の構成

GPS は、ユーザセグメント、コントロールセグメント、スペースセグメントの 3 つのセグメントから構成されている。ユーザセグメントはいわゆる GPS 受信機であり、GPS 衛星から送られてくるデータを受信している地球上の利用者、軍関係者、民間人を指す。

コントロールセグメントは米国コロラド州に設置された主制御局と、世界中に分布している監視局とで成り立っている。監視局は無人であり、主制御局から遠隔で運用されている。コントロールセグメントの役割は

- GPS 衛星に搭載されている原子時計の監視、維持
- 衛星の軌道パラメータ、時計の補正パラメータの推定
- 衛星の航法メッセージの更新
- 衛星軌道の監視、修正
- 衛星の健康状態の監視、維持

などがあげられる。

スペースセグメントは、先にも述べたように複数の衛星から構成されている。衛星の基本配置は、高度 20,200 km の軌道に配備された 24 衛星で構成される。各軌道には最低 4 機の衛星が不均一に配置されているが、予備衛星スロットがあり、現在では 31 機体制で運用されている。衛星が不均一な間隔で配置されている理由としては、衛星の故障に対してその影響を最小限にするという目的があげられる。この軌道は、赤道面に対して傾斜角 $55(\pm 3)$ 度で、60 度間隔に合計 6 軌道ある。また、軌道の周期は平均恒星日の 0.5 倍、約 11 時間 58 分 2 秒 (0.5 恒星日) である。つまり衛星が地球の周りを 2 周すると同一の地上奇跡を描くように設計されているが、実際には衛星の軌道は随時変更されており完全には決定していない。衛星の軌道は、

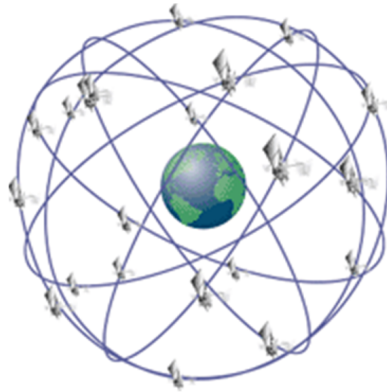


図 2.1. GPS 衛星の空間配置.

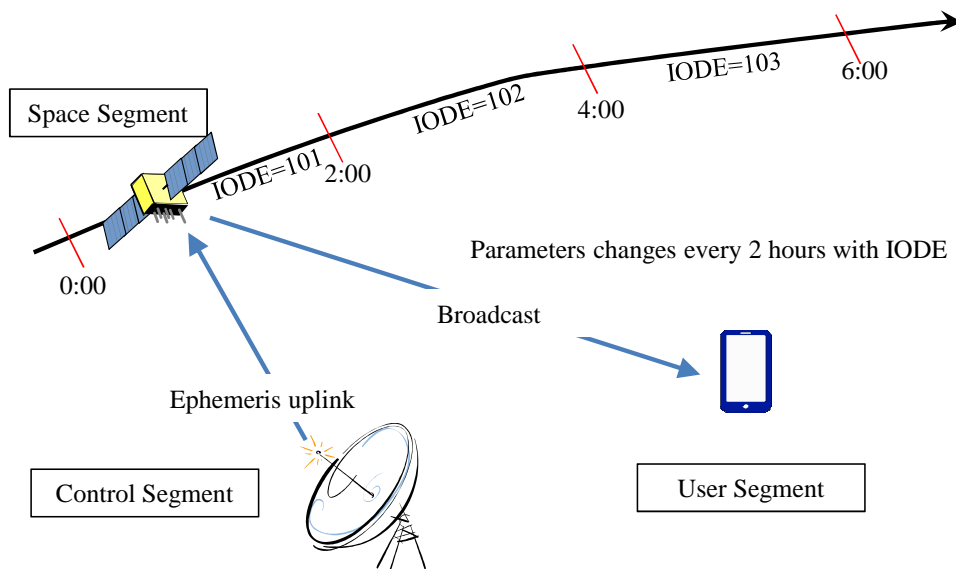


図 2.2. エフェメリスの利用の概念図.

コントロールセグメントである地上局において算出され、エフェメリス (ephemeris, 放送暦) と呼ばれる軌道パラメータとなる。エフェメリスパラメータは最小二乗法により軌道に合うように推定され、現在のところ 2 時間毎に更新される。またこのエフェメリスには、衛星に搭載されている原子時計の補正情報も含まれている。エフェメリス情報には IODE という番号が付けられており、IODIE の変化によりエフェメリス情報が更新されたことがわかる。各 GPS 受信機は、エフェメリス情報が更新された場合、基本的には新しいものを使用する。放送されたエフェメリスの有効時間は 4 時間とされており、放送暦の品質は時間とともに低下する。そ

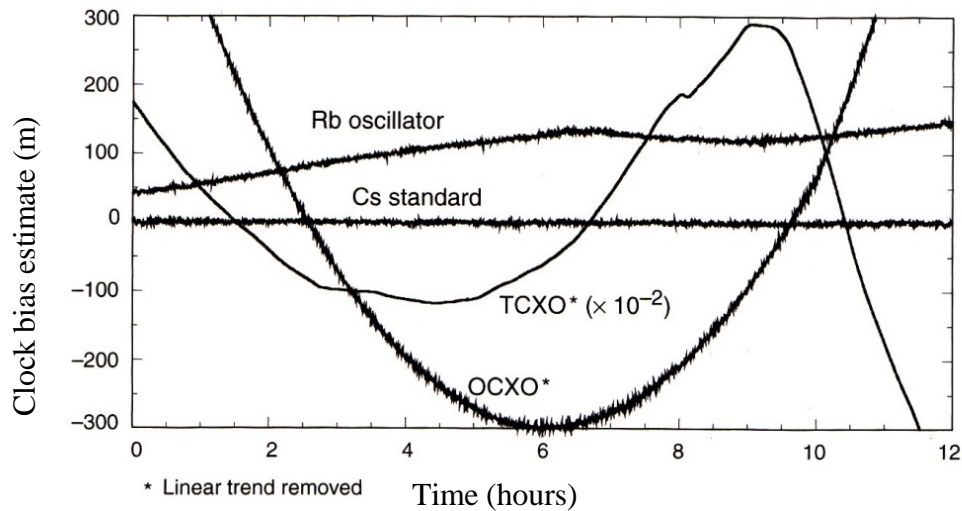


図 2.3. 異なるクロックの安定度の比較.

それぞれの衛星から常時放送されている信号には、その衛星自身のエフェメリスパラメータが含まれている。これに加えて、すべての衛星の粗い軌道情報もアルマナック (almanac, 天体暦) 形式で含まれている。アルマナックはクロックおよびエフェメリス情報の一部を含むが、精度はかなり低下したものである。このアルマナック情報の目的は、各衛星が水平線上に現れるおおよその時刻を受信機位置に基づいて求め、信号補足の補助を行うことにある。このためアルマナックはエフェメリスと比べ、精度が低くなっている。実際、エフェメリスの位置精度は 2 ～ 5 m 以下であるのに対し、アルマナックの精度は 1 ～ 2 km とされている。

GPS は独自の GPS 時刻と呼ばれる時刻標準を用いている。各 GPS 衛星の持つ時計と GPS 時刻の間にはバイアスがあるが、その値は地上の制御局によって監視されている。そのために必要となるのが非常に高い精度および安定度を持つ時計であり、衛星には複数の基準発信器が搭載されている。クロックは GPS の心臓部である。受信機は衛星信号に記されている発信時刻と、自身の時計との時間差を見ることで伝搬時間を決定し、衛星までの距離を測定している。信号は光速で伝搬するため、 $1\mu\text{s}$ の時計の誤差は約 300 m の距離の誤差となってしまう。したがって、受信機の位置を精度良く求めるためには、ナノ秒以下のレベルでの時刻管理が必要となる。一般的な電子機器や腕時計、GPS の受信機などに用いられているような水晶振動子の安定度は、 $\pm 50 \sim \pm 100 \times 10^{-6}$ 程度である。ただし水晶の共振周波数は温度依存性があるため、温度を補償あるいは制御することで安定度は向上させることが可能であ

表 2.1. GPS 衛星の主要諸元

基本衛星数	24
軌道面数	6
軌道高度	約 20,200 km
軌道半径	約 26,560 km
軌道傾斜角	55 度
軌道形状	円 (離心率 <0.02)
周回周期	約 11 時間 58 分 02 秒 (0.5 恒星日)
設計寿命	7.5 年
搬送波周波数	L1=1,575.42 MHz (154×10.23 MHz) L2 = 1,227.60 MHz (120×10.23 MHz)
基準発信器	10.23 MHz - 0.00455 Hz : セシウム原子周波数標準 (原子時計) 2 台 安定度 $10^{-14} \sim 10^{-13}$ ルビジウム原子周波数標準 2 台 予備水晶発振器
放送内容	衛星軌道情報 (エフェメリス), 全衛星の位置情報 (アルマナック), 衛星時計の補正值, 電離層補正パラメータ, etc

る。温度補償水晶発振器 (TCXO; temperature compensated crystal oscillator) は温度補償回路を付加し、温度変化による周波数変化の影響が少なくなるようにした水晶発振器で、周波数安定度は $\pm 0.5 \sim \pm 2.5 \times 10^{-6}$ 程度となる。また、恒温槽付き水晶発振器 (OCXO; oven controlled crystal oscillator) は、水晶振動子を恒温槽内に配置し、ヒータで水晶振動子の周囲を一定温度に保つ構造をとるため最も高精度な水晶発振器であり、その周波数安定度は $\pm 1 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-10}$ 程度である。セシウムおよびルビジウムの原子時計は水晶振動子と同程度の短期安定度を持ち、長期に対しても $10^{-12} \sim 10^{-13}$ の安定度がある。さらに時間が長くなるとルビジウム原子時計の安定度は悪化するが、セシウム原子時計は 10 日間に対しても 10^{-14} のオーダを達成している。これらのクロックの安定度の比較を図 2.3 に示す。実際のところ、各衛星にはセシウムの原子時計と、予備のルビジウム原子時計が 2 台ずつ搭載されている。前述の通り、地上の制御局からこれら原子時計の時刻を監視を行っており、原子時計の GPS 時刻からのオフセットを軌道情報と同様に衛星から放送している。これら軌道情報など

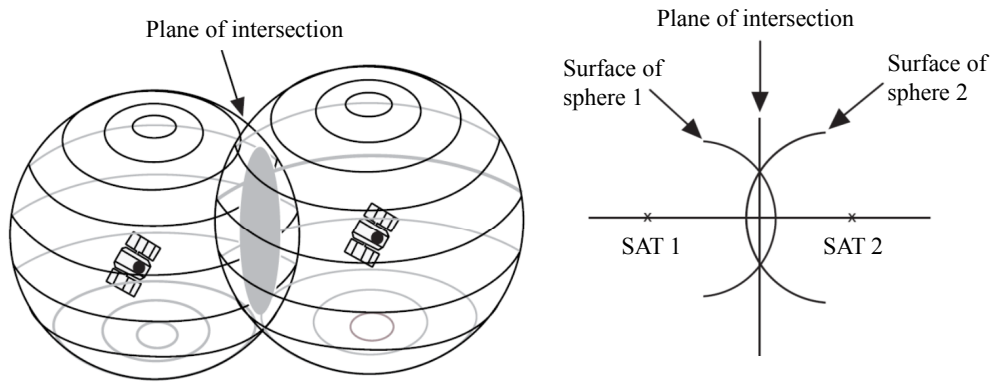
が載せられた衛星からの放送は航法メッセージと呼ばれる。

現在、全ての GPS 衛星で同じ周波数帯の信号が使われているため、それらを区別する手段が必要である。異なる衛星からの信号を区別するには、擬似雑音コード (pseudo random noise: PRN code) が用いられる。最も一般的に用いられている L1 帯の C/A コードは、1023 チップの PRN コードであり毎秒 1.023 M チップの速度で送信しているため、1000 分の 1 秒ごとに乱数は一順する。PRN コードは、1,-1 がランダムに見えるように並べられており、異なる PRN コード間での相関はほぼゼロになる。また、同一の PRN コード同士でも、タイミングが同期してない場合には、相関値がほぼゼロとなるように設計されている。これにより、各衛星に互いに異なる PRN コードを割り当てることで衛星の識別が可能となり、特定の衛星の信号のみを抽出することが可能となる。

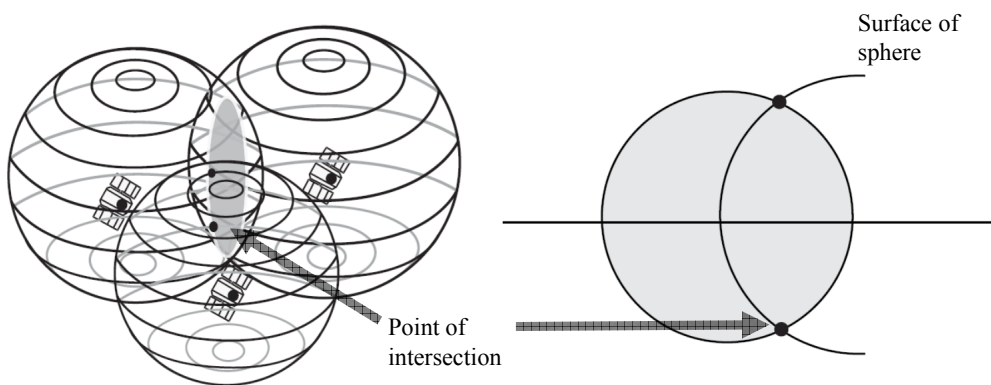
2.2 測位原理

単独測位とは1つのGPS受信機のみを用いてリアルタイムに位置の推定を行うことで、GPSの最も基本的な利用方法である。この測位原理の最も基礎となる部分は、三辺測量である。ここでは衛星の座標は分かっているものとして、衛星からの距離が分かっている状態を考える。まず1つの衛星からの距離のみが分かっている状態では、その解の候補は衛星の位置を中心とし半径が測定距離の球面上にある。

図2.2を見ると分かるように、2つの衛星からの距離が既知であるような場合、その候補は



(a) 2 衛星から距離が既知の場合



(b) 3 衛星から距離が既知の場合

図 2.4. 複数の衛星を中心とする球の交差

2つの球表面の交差する範囲にある。2つの球面の交差は円であるので、解の候補はこの円環の上すべてである。衛星が3つであれば、3個の球面の交差であるので、解は2点にのみ絞られる。衛星測位において受信機は地球表面付近にあることを考えれば、現実的には1点のみになる。このように、座標が既知である3点と、それぞれからの距離を用いて座標を求めることが三辺測量である。電波は光速で伝搬するため、信号の発信時刻と受信時刻が正確にわかれば、衛星からの距離は測定可能である。以上のように、3つの衛星からの信号が届いていれば受信機座標を計算することができる。実際には、衛星の時計と受信機の時計との間にはオフセットが存在するため、衛星—受信機間の距離を正確に測定することは難しい。しかしGPSでは、衛星同士の時計は同期されているため、受信機時計のオフセットのみを考えれば良い。これを解くためには、4つの衛星からの信号が届いていればよいことが分かる。

したがって、GNSSにおいて測位を行うために必要となる情報は、衛星の座標および衛星—アンテナ間の距離の2つのみである。衛星の座標については2.1節において述べたように、衛星からの放送に含まれているため、本節においてはまず衛星—アンテナ間の距離の測定について紹介を行う。その後、それらを用いて実際に受信機座標を算出する手法についてを説明する。

2.2.1 擬似距離

GPS受信機は、衛星からの信号に含まれている信号の発信時刻と自身の時計の示す時刻に基づき、その信号の伝搬時間を算出する。ただしこのとき衛星時計と受信機時計は同期されていないため、この伝搬時間には時計のずれによるバイアスを含んでいる。このため、この伝搬時間に真空中の光速を乗じたものを擬似距離と呼び、真の距離（幾何学的距離）と区別している。

ここで、 n 番衛星からの信号をGPS時刻 t において受信したことを考える。信号の実際の伝搬時間を τ 、送信時刻に相当する時刻を $t^{\text{sv}}(t - \tau)$ 、受信機時計で測定した到着時刻を $t^{\text{r}}(t)$ とすると、受信機によって測定される擬似距離 ρ は以下ようになる。

$$\rho_n(t) = c[t^{\text{r}}(t) - t_n^{\text{sv}}(t - \tau)] \quad (2.1)$$

このとき、 t と τ はどちらも未知数である。また、受信機時計と衛星時計の時刻それぞれと、

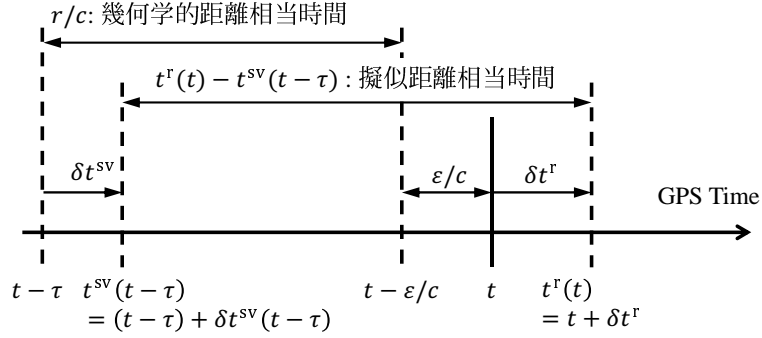


図 2.5. 測定距離および時刻系の関係.

GPS 時刻との関係は以下のように表せる.

$$t^r(t) = t + \delta t^r(t) \quad (2.2)$$

$$t_n^{sv}(t - \tau) = (t - \tau) + \delta t_n^{sv}(t - \tau) \quad (2.3)$$

ここで, $\delta t^r(t)$ は受信機時計の GPS 時系からのバイアス (進み正) であり, $\delta t_n^{sv}(t)$ は n 番衛星の時計の GPS 時系からのバイアス (進み正) である. これを考慮すると, 式 2.1 は

$$\begin{aligned} \rho_n(t) &= c[t + \delta t^r(t) - ((t - \tau) + \delta t_n^{sv}(t - \tau))] + \epsilon(t) \\ &= c\tau + c[\delta t^r(t) - \delta t_n^{sv}(t - \tau)] + \epsilon(t) \end{aligned} \quad (2.4)$$

のように変形できる. ここで ϵ はモデル化できない効果, モデル化によって生じる誤差, 測定誤差を表すために使用している. 図 2.5 にこれらの時刻の関係を図示する. 一方, 受信機—衛星間の幾何学的距離 $r(t, t - \tau)$ は,

$$r_n(t, t - \tau) = c\tau - I_n(t) - T_n(t) \quad (2.5)$$

と表すことができる. ただし $I(T), T(t)$ はそれぞれ電離層と対流圏を通過する際に生ずる伝搬遅延距離を表しているものとする. これらの詳細については後述する. 以上より擬似距離 ρ は,

$$\rho_n = r_n + c[\delta t^r - \delta t_n^{sv}] + I_n + T_n + \epsilon_n \quad (2.6)$$

として定式化できる.

2.2.2 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 は,

$$r_n = \sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 + (z_n - z)^2} = \|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}\| \quad (2.7)$$

であるので, 式 2.6 は

$$\begin{aligned} \rho_n &= \|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}\| + c[\delta t^r - \delta t_n^{\text{sv}}] + I_n + T_n + \varepsilon_n \\ \rho'_n &= \|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}\| + b + \tilde{\varepsilon}_n \end{aligned} \quad (2.8)$$

となる. ただし ρ' はユーザが補正可能な, 衛星時計のオフセット, 電離層遅延, 対流圏遅延は, 測定した擬似距離 ρ_n から補正を行ったものとする. また, 簡単のため $c\delta t^r = b$ とした. 誤差項 $\tilde{\varepsilon}$ は式 2.6 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る. この方程式には, b および x, y, z の 4 つの未知数が含まれている. したが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 (2.9) を解くことを考える. 最も基本的な解法としては, Newton 法 (Newton-Raphson 法) と呼ばれる手法を用いて, 近似した受信機座標周りで式 (2.9) を線型化し, 逐次的に解を求める. これを以下に示す.

$\mathbf{x}^0 = [x^0, y^0, z^0]^T$ を受信機座標の初期値, 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

$$\begin{aligned} \delta\rho_n &= \delta\rho_n' - \delta\rho_n'^0 \\ &= \|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}\| - \|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}^0\| + (b - b^0) + \tilde{\varepsilon}_n \end{aligned} \quad (2.9)$$

が成立する．右辺第一項を \mathbf{x}^0 の周りで Taylor 展開すると

$$\begin{aligned}\|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}\| &= \sum_{\alpha} \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)^{\alpha}}{\alpha!} \partial^{\alpha} \|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}\|(\mathbf{x}_0) \\ &\simeq \|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}^0\| + \partial \|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}\|(\mathbf{x}_0) \\ &= \|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}^0\| - \frac{\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_0}{\|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_0\|} \cdot \delta \mathbf{x}\end{aligned}\tag{2.10}$$

$$(2.11)$$

となり，これを代入すると

$$\begin{aligned}\delta \rho_n &\simeq -\frac{(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}^0)}{\|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}^0\|} \cdot \delta \mathbf{x} + \delta b + \tilde{\varepsilon}_n \\ &= -\mathbf{l}_1 \cdot \delta \mathbf{x} + \delta b + \tilde{\varepsilon}_n\end{aligned}\tag{2.12}$$

とできる．これが N 本あるので，

$$\begin{aligned}\delta \boldsymbol{\rho} = \begin{bmatrix} \delta \rho_1 \\ \delta \rho_2 \\ \vdots \\ \delta \rho_N \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} (-\mathbf{l}_1)^T & 1 \\ (-\mathbf{l}_2)^T & 1 \\ \vdots & 1 \\ (-\mathbf{l}_N)^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \mathbf{x} \\ \delta b \end{bmatrix} + \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}} \\ &= G \begin{bmatrix} \delta \mathbf{x} \\ \delta b \end{bmatrix} + \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}\end{aligned}\tag{2.13}$$

となる．これより

$$\begin{bmatrix} \delta \mathbf{x} \\ \delta b \end{bmatrix} = G^{-1} \delta \boldsymbol{\rho}\tag{2.14}$$

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． $-\mathbf{l}_n = \frac{(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}^0)}{\|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}^0\|}$ であり，これはつまり受信機から n 番衛星へ向かう単位ベクトルである．つまり，ユーザから見てすべての衛星が同じ仰角に見えているような場合にのみ $\text{rank} G < N$ となるが，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．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，

$$\min \left\| \delta \boldsymbol{\rho} - G \begin{bmatrix} \delta \hat{\mathbf{x}} \\ \delta \hat{b} \end{bmatrix} \right\|^2\tag{2.15}$$

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

$$\begin{bmatrix} \delta\hat{\mathbf{x}} \\ \delta\hat{b} \end{bmatrix} = (G^T G)^{-1} G^T \delta\boldsymbol{\rho} \quad (2.16)$$

を求めることと同値である [7]。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、数値的安定性も考慮して Householder 変換や Gram-Schmidt の直交化と呼ばれる手法を用いて、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。

ここまでは、測定された擬似距離に対してはすべて同等の扱いをしてきた。しかし例えば現実的には、高仰角の衛星に比べて低仰角の衛星には誤差が多く含まれるなど、測定値の質には不均一性がある。このように測定値に重みを考慮することが一般的であり、衛星の仰角は重みとしてよく利用されている [8]。式 (2.16) の重み付き最小二乗解は

$$\begin{bmatrix} \delta\hat{\mathbf{x}} \\ \delta\hat{b} \end{bmatrix} = (G^T W G)^{-1} G^T W \delta\boldsymbol{\rho} \quad (2.17)$$

であり、 G は対角成分を $\{w_1, w_2, \dots, w_N\}$ とする対角行列である。本論文では、GNSS の擬似距離を用いた測位計算を行う際に、この重み付き最小二乗法を用いて計算を行う。

2.3 誤差要因

ここでは、擬似距離測定における誤差について論じる。測定誤差には、ランダム性を持つ雑音と、一定の値を持続する傾向を持つバイアスとの 2 種類が存在する。また、誤差の原因により、衛星から放送されるパラメータに含まれる誤差、衛星から受信機への信号の伝搬過程における誤差、雑音などの受信機による誤差の 3 つに分類することができる。これらの誤差要因について以下で検討し、各誤差要因によって引き起こされる距離誤差の大きさと性質を理解し、誤差削減への様々な手法による効果を検証する。

2.3.1 衛星時計誤差

先に述べたように、衛星には複数の原子時計が搭載されており、その時刻は非常に精度よく管理されている。航法メッセージに含まれている原子時計の補正量は、以下のような2次関数の係数 $a_{f_0}, a_{f_1}, a_{f_2}$ として配信されている。

$$\delta t^{sv} = a_{f_0} + a_{f_1}(t - t_{oc}) + a_{f_2}(t - t_{oc})^2 + \Delta t_r \quad (2.18)$$

ただし、 t_{oc} は時計の基準時刻、 Δt_r は衛星の高度変化による重力変化から生じる相対論効果で

$$\Delta t_r = Fe\sqrt{a} \sin E \quad (2.19)$$

として与えられる [9]。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、 $F = -2\sqrt{\mu}/c^2 = -4.4442807633 \times 10^{-10} \text{s/m}$ であり、 μ は地球重力定数、 c は光速である。

これらの補正係数の現在の値は、過去の値からのフィッティングによる推定である。したがってそこには補正できていない残差が生じており、距離にして典型的には 0.3~4 m 程度の誤差が含まれている [10]。この誤差の値は、制御局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、その後時間を経るにつれ拡大していく。一日を通した時計誤差による距離誤差は、 1σ にして 1.5 m 程度である。またこの値は、高性能の原子時計を搭載した新しい衛星の打ち上げとともに減少される [11]。

2.3.2 衛星座標誤差

衛星座標のパラメータは、Kepler の法則に基づく軌道要素であり、これも時計の補正と同様に過去の値からのフィッティングによる予測である。したがってここにもモデル化による誤差は生じており、一般的には 1~6 m 程度の誤差があると言われている [12]。

衛星時計とエフェメリスのパラメータにおける誤差に起因する距離誤差は、制御局によってリアルタイムで 1 m (rms) 以内で推定されている。1 日 1 回の衛星へのアップロードによって、エフェメリスと衛星時計パラメータに起因する距離誤差の推定値は各 1.5 m (rms) 程度である。また、もし衛星の推定距離誤差が閾値を超えるた場合には、臨時のデータアップロードが計画されるようになっている。

2.3.3 相対論的効果

GPS 衛星は特殊相対性理論および一般相対性理論の両方の影響を受けている。

GPS 衛星側での補正

地球表面と GPS 衛星上では重力ポテンシャルに差があるため、一般相対論によると GPS 衛星上での時間は地表よりも早くなることが言える。また、GPS 衛星の速度は 3.87 km/sec と非常に高速であるため、特殊相対論によると GPS 衛星上での時間は地表よりも遅くなることが言えるこれらの効果を考慮し、あらかじめ搭載されている原子時計の周波数を $10.2299999543 \text{ MHz}$ にしておくことで、地表において 10.23 MHz になるよう補正がされている。

受信機側での補正

前述したように GPS 衛星の周回軌道は完全な円軌道ではないため、この離心率による効果が生じる。これは衛星時計誤差において論じた、式 (2.19) にて表される時間変化である。この離心率の相対論的効果は最大で 70 ns (21 m) になることが分かっており、発信時刻を正確に求める上で補正が必要となる。

この他にも、地球の自転によって生じる相対論的効果がある。これは Sagnac 効果と呼ばれており、GPS 衛星からの信号が受信機に届くまでの約 70 ms の間に地球が自転することで、回転系と非回転系で差が生じることによる効果である。図 2.6 にその概念図を示す。もし受信機が自転によって衛星から遠ざかる方向に動けばこの伝搬距離は増大し、この逆も言える。このサニャック効果は 30 m のオーダーで誤差が生じる。

2.3.4 電離層遅延

地球表面から高度 $50 \text{ km} \sim 1,000 \text{ km}$ の上空には電離層と呼ばれる領域がある。これは、太陽からの紫外線などにより、大気中の分子がイオン化し、自由電子が多く存在するような領域である。この自由電子によって、伝搬する信号の速度は減少することが知られている。電離層の状態は太陽からの紫外線によって変わるため、昼と夜とその性質は大きく変化する。太陽が昇り始めてから午後 2 時ごろまでは電子密度は上昇を続け、その後減少し夜は少ない数で落ち着いている。この電子密度は日ごとの太陽活動と地磁気化によって変化し、さらには予測できない短期間の影響や局所的な異常も存在する。

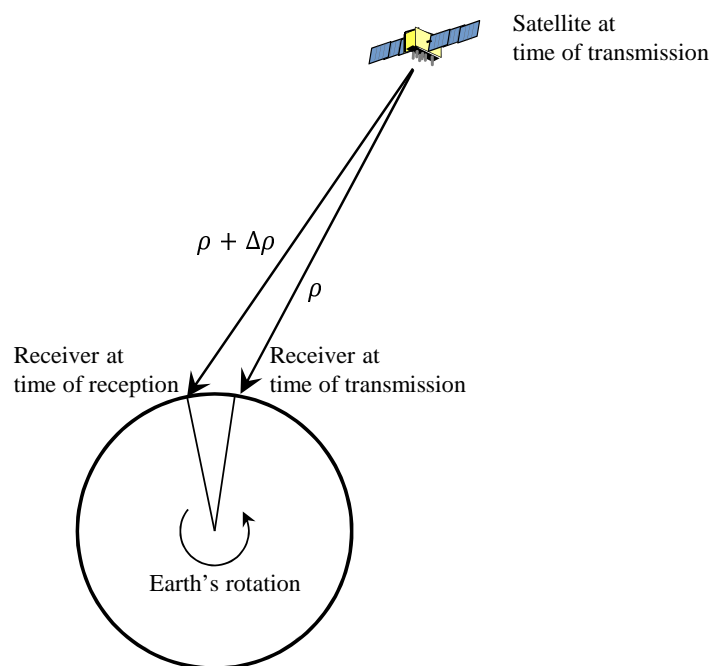


図 2.6. Sagnac 効果.

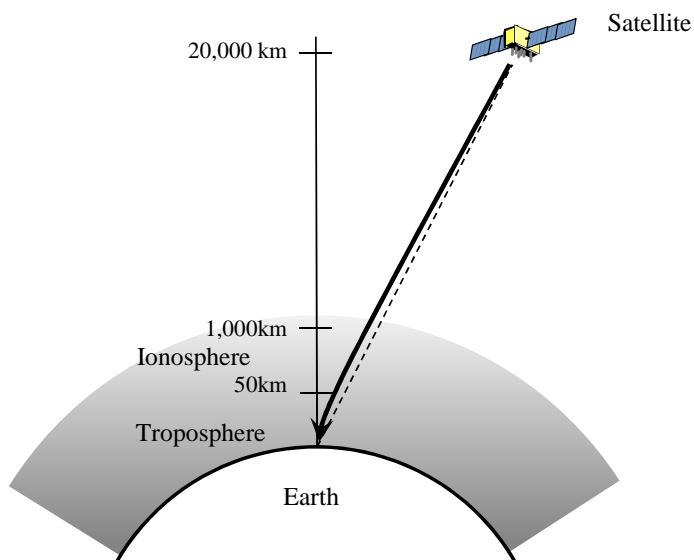


図 2.7. 大気による信号への影響の概念図.

ここで n_e を電子密度とすると、伝搬経路上にある全電子数 (TEC; total electron content) は

$$\text{TEC} = \int_{\text{sv}}^{\text{receiver}} n_e(l) dl \quad (2.20)$$

である。地表から天頂近くに衛星が存在する場合、電離層を通過する経路の長さ最短となるため、TEC は鉛直方向 (TECV) において最も少ない値を取る。TEC は、通常 1m^2 当たり 1×10^{16} から 150×10^{16} の間で変化している。ある場所と時間を特定して観測すると、TECV は月平均値から 20~25% 変動する可能性がある。このことから、現在の最もよく使われているであろう電離層の放送モデルは、TEC の日々の変化を適切に表現しているとは言えない。

電離層を通過する際の遅延量 I は周波数と TEC に依存し、近似的に

$$I = \frac{40.3 \text{ TEC}}{f^2} \quad (2.21)$$

と表現される。天頂方向の遅延量は夜間において~3 m、昼間において~15 m 程度であるが、低仰角 ($0^\circ \sim 10^\circ \text{C}$) の衛星にに関しては、夜間において~9 m、中間において~45 m となる。周波数依存性があるため、2 周波以上の電波を使うことで、電離層遅延量を測定することが可能となりこの量を正確に補正することができる。また、1 周波のみの受信機であっても Klobuchar model と呼ばれるモデルを適用することで 50% 程度の誤差を補正することができるといわれている。

2 周波測定による遅延量の推定

GPS 衛星からの L2 周波数、ブロック IIF 以降の GPS 衛星からの L5 帯信号、QZSS の LEX 信号 (L6 帯) などの複数の周波数帯を受信可能な機器では、2 種類の周波数を用いることで電離層遅延距離をほぼ正確にモデル化することができる。例えば L1 および L2 の受信可能な受信機として、L1, L2 の周波数をそれぞれ f_{L1}, f_{L2} とし測定擬似距離をそれぞれ ρ_{L1}, ρ_{L2} とすると、L1 の電離層遅延距離 I_{L1} は

$$I_{L1} = \frac{40.3 \text{ TEC}}{f_{L1}^2} = \frac{f_{L2}^2}{f_{L2}^2 - f_{L1}^2} (\rho_{L1} - \rho_{L2}) \quad (2.22)$$

となる。

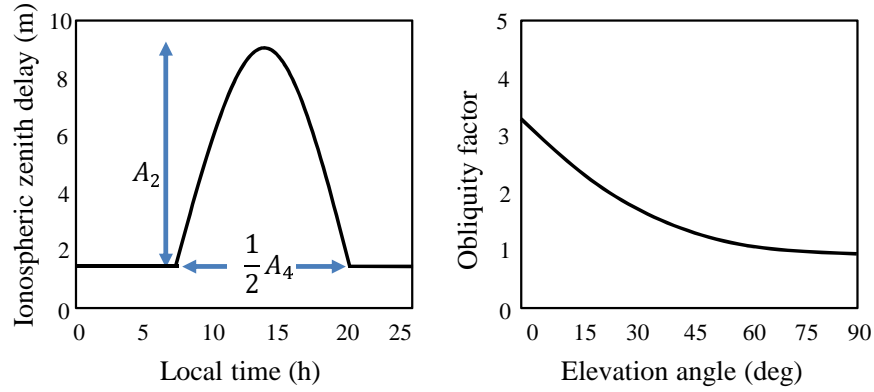


図 2.8. Klobuchar モデル.

Klobuchar モデル

L1 の周波数のみしか利用できない受信機は、モデルによって遅延量を計算することとなる．一般的に利用されているモデルとして Klobuchar モデルであり、放送モデルとしてパラメータが衛星から放送されている．これは経験的な値から考案されたモデルで、そのパラメータ値は衛星から放送されている．このモデルは電離層の落ち着いている夜間は一定の値をとり、昼間は半余弦関数によってその値を表すことにしている．L1 帯の天頂方向の電離層遅延量の推定値 I は以下のように与えられる．

$$\frac{I}{c} = \begin{cases} A_1 + A_2 \cos\left(\frac{2\pi(t - A_3)}{A_4}\right), & \text{if } |t - A_3| < A_4/4 \\ A_1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.23)$$

ここで、 A_1 は夜間の天頂方向の遅延量 (5×10^{-9} 秒)、 A_2 は昼間に使用する余弦関数の振幅、 A_3 は余弦関数の頂点に対応する位相（現地時間の 14 時（50,400 秒）に固定）、 A_4 は余弦関数の周期である．パラメータ A_2 と A_4 の値は制御局で決められ、各衛星によって放送されている．これよりわかるように、Klobuchar モデルでは電離層遅延量のピークがその場所での 14 時に起こるように設計されている．しかし実際にピークとなる時刻は 11 時から 17 時の間で変化しており、季節、緯度、太陽活動に依存している．放送モデルは、補正されていない電離層遅延量による測距誤差の rms 値を約 50% 削減できると考えられる [13]．

2.3.5 対流圏遅延

中性である乾燥空気および水蒸気から構成される大気の下層部分によっても、GPS 信号は屈折する。遅延量は伝搬経路長に依存する（仰角が低いほど長くなる）ため、衛星の仰角に依存しており一般的に 2.5～25 m である。対流圏は電離層とは違い、屈折率は信号の周波数に依存しない。このため、2 周波の受信機を用いてもこの補正は不可能である。しかしその屈折率は、海面においても 1.0003 と 1 よりわずかに大きい程度であり、電離層と比較すると変化が少ないためモデルによる補正を行うことが比較的容易である。実際、GPS 受信機の緯度、経度、高度およびその日の平均的な気象状態に基づき、対流圏遅延量を推定することが一般的である。補正を行うためにはまず、乾燥空気による遅延量 T_d および水蒸気による遅延量 T_w の和として、天頂方向の遅延量 $T_z = T_d + T_w$ を推定する。続いて、この天頂方向の遅延量 T_z を実際の仰角に応じた遅延量に変換するために、衛星の仰角 E を関数とする傾斜係数 $m_d(E), m_w(E)$ を定義する。この傾斜係数をマッピング関数と呼び、対流圏遅延量 T は $T = T_d \cdot m_d + T_w \cdot m_w$ として求める。単純なモデルでは乾燥空気と水蒸気の差を考えず、共通のマッピング関数が用いられることも多い。

対流圏モデル

対流圏の補正のためのモデルは多数あるが、ここでは単純な 2 つのモデルについて紹介する。

Saastamoinen モデル [14, 15] は気体の法則に基づいており、気圧、温度、湿度の変化に関する仮定より導かれる。遅延距離の推定値 T は

$$T = \frac{2.277 \cdot 10^{-3}}{\cos z} \left[P + \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) e - B \tan^2 z \right] + \delta R \quad (2.24)$$

で与えられる。ここで、 z は衛星の天頂角、 T は気温、 P は気圧、 e は水蒸気分圧、 B は高度による補正係数、 δR は補正項である。

Hopfield モデル [16, 15] は広範囲の測定値によって得られた、地上と高度 h との乾燥空気の屈折指数の関係に基づいている。乾燥空気の屈折指数が 0 となる高度を $h_d = 40136 + 148.72(T - 273.16)$ 、 h_w を 12,000 m とすると乾燥空気による遅延の推定値 T_d 、水蒸気によ

る遅延の推定値 T_w はそれぞれ

$$T_d = 77.6 \cdot 10^{-6} \frac{P}{T} \frac{h_d}{5} \quad (2.25)$$

$$T_w = 0.373 \frac{e}{T^2} \frac{h_w}{5} \quad (2.26)$$

と表現される.

マッピング関数

マッピング関数もこれまでに数多く提案されている. 最も単純なモデルは, 地球を平坦と仮定して仰角にのみ依存するようなモデルであり, $1/\sin E$, である. しかしこれは低仰角の衛星に対しての近似として適していないことが分かっている. より正確なモデルの例として, Black and Eisner's Mapping Function[17]

$$m(E) = \frac{1.001}{\sqrt{0.002001 + \sin^2(E)}} \quad (2.27)$$

が挙げられる.

Ifadis Mapping Function [18] は3次までの連分数の形をとり, 経験的に求めらた係数 a, b, c によって

$$m_i(E) = \frac{1}{\sin(E) + \frac{a_i}{\sin(E) + \frac{b_i}{\sin(E) + c_i}}} \quad (2.28)$$

と表される.

Niell Mapping Function [19] はさらに正確なマッピング関数であり,

$$m_i(E) = \frac{1 + \frac{a_i}{1 + \frac{b_i}{1 + c_i}}}{\sin(E) + \frac{a_i}{\sin(E) + \frac{b_i}{\sin(E) + c_i}}} \quad (2.29)$$

係数 a_i, b_i, c_i は, 乾燥空気によるもの ($i = d$) と水蒸気によるもの ($i = w$) のそれぞれにつき, その座標, 高度, 気温, 気圧, 日付などから決まる値である.

2.3.6 シャドウイングとマルチパス

シャドウイングとは、信号が何らかの物体によって遮蔽されたときに生じる物理現象のことである。またマルチパスとは、信号が反射や回折、散乱などの影響を受け、2 つ以上の経路を通過してアンテナに到達する物理現象のことである。これら 2 つは GNSS における位置推定において重要な誤差要因であり、特に都市部においては主要な誤差要因であると言える。

反射、回折、散乱などの影響を受けて受信機へ届く信号をここではまとめてマルチパス波と呼ぶこととする。マルチパス波の原因となるものは、地面、アンテナの周囲の建物や構造物などである。GPS 衛星と受信機の間に何らかの構造物が存在したり、樹木が存在したりするような場合、衛星からの直接波は遮蔽され非常に大きく減衰する。これをシャドウイングと呼ぶ。こういった状況下において、マルチパス波のみが減衰されずに受信機に到達した場合、受信信号はマルチパス波が支配的となる。更には、直接波が完全に遮蔽されてしまい、マルチパス波のみが受信されるような状況も起こりうる。それゆえ、シャドウイングはマルチパスよりも大きな誤差を発生させる要因となっている。

このマルチパス波の伝搬距離は、直接波の伝搬距離より必ず長くなるため、直接波に対して遅れてアンテナに届く。このように直接波とマルチパス波がほぼ同時に受信されるような現象を、マルチパスと呼ぶ。マルチパス波の遅延量が C/A コードの 1.5 チップ幅以上の場合には、信号の性質上受信機はほとんどこのマルチパス波の影響を受けない。しかし、アンテナの付近にある物体によって反射して到達するようなマルチパス波は、小さな遅延をもってアンテナに到達する。このため受信機はその影響を排除できず、直接波とマルチパス波の干渉により歪んだ信号を追尾してしまうこととなり擬似距離測定に誤差を生じさせる。この測距誤差がマルチパス誤差である。この場合、マルチパス波の遅延距離と測定される擬似距離に含まれるマルチパス誤差は同じ値ではない。この関係は受信機内部にある相関器（コリレータ）によって決められる。受信機内部の信号処理部では、複数チャンネルで同時に衛星信号のおおよその識別、追尾、航法メッセージの復調、SNR の測定そして擬似距離と搬送波位相の測定を行っている。ここでは衛星からの信号を追尾する際に、Delay Lock Loop (DLL) と呼ばれる機構を用いてその受信タイミングを求めている。この DLL の簡単な構成図を図 2.9 に示し、以下ではこの原理について説明する。

DLL ではまず 2 つの異なるレプリカ信号を生成する。1 つは受信信号よりわずかに進んだ Early 信号、もう一つはわずかに遅れた Late 信号である。この 2 つのレプリカ信号のタイミ

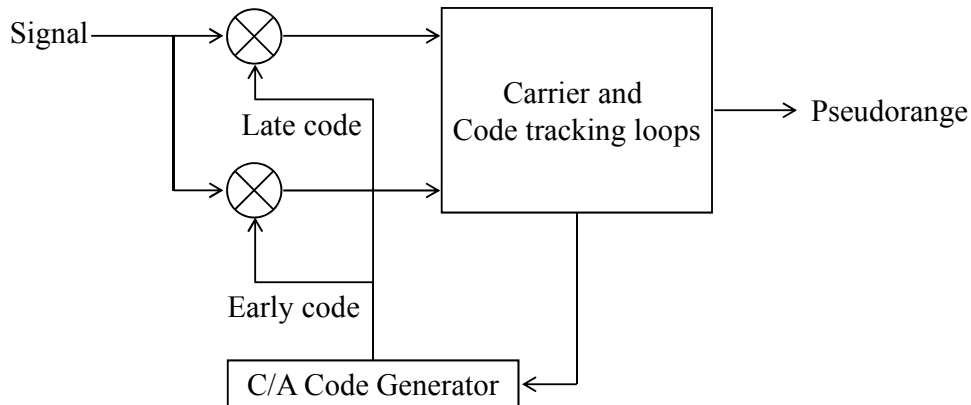


図 2.9. GPS 受信機のトラッキングループ.

ング差を1チップ（もしくはそれ以下）で一定に保つ（図 2.10）。そしてその2つのレプリカと信号と受信信号の相関をそれぞれ求め、両者の相関値が等しくなるようにレプリカ信号のタイミングを前後させる。このようにして、Early と Late の相関値が等しくなったとき、その中心を受信時刻としてトラッキングを行う。これが最も単純なコリレータの動作である。図 2.11 はコリレータ間隔と同じのタイミング差を持った2つのレプリカ信号との相関を示す模式図を示す。横軸を受信信号とレプリカ信号の時間差、縦軸を相関値としている。この図において点線で示したものが DLL であり、1チップ幅の Early と Late の相関値が等しくなるところの中心でトラッキングしている様子を表している。

ここにわずかに遅れた反射波が混入した状態を考える。1例として、同相かつ強度が0.3倍、0.2チップ遅れの波が加わったケースを図 2.13(a) に、逆相かつ強度が0.3倍、0.2チップ遅れの波が加わったケースを図 2.13(b) に示す。これらの図から分かるように、同相のマルチパス波が混入した場合、相関値は右側が膨らんだような形となる。これによってトラッキングポイントが右側になってしまい、実際よりも長い測定値となる。逆相の場合の相関値は、右側が削られた形状となり、その結果実際よりも短い測定値となる。

最後にマルチパス誤差と遅延距離の関係を図 2.12 に示す。横軸が遅延距離、縦軸がマルチパス誤差を表す。ただしここでは直接波に対するマルチパスの振幅比は0.5、コリレータ幅を1チップ、帯域幅は無限と仮定している。

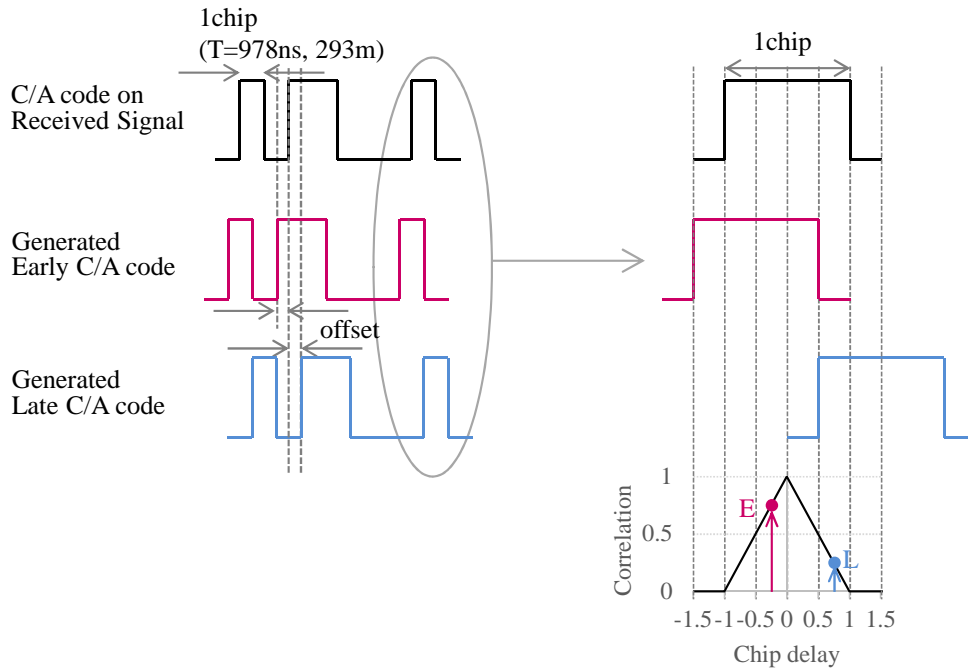


図 2.10. 受信信号と Early, Late 信号.

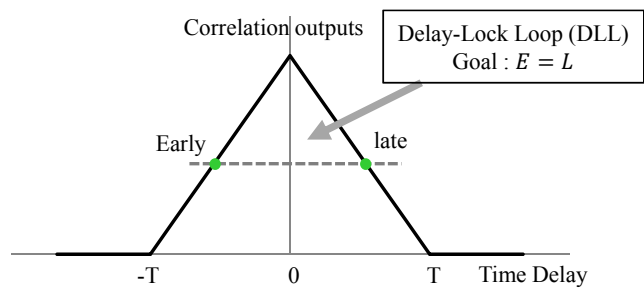


図 2.11. コリレータ (ワイドコリレータ) .

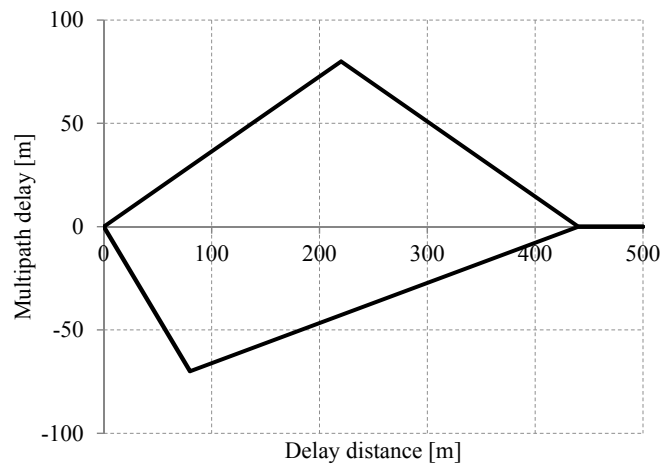
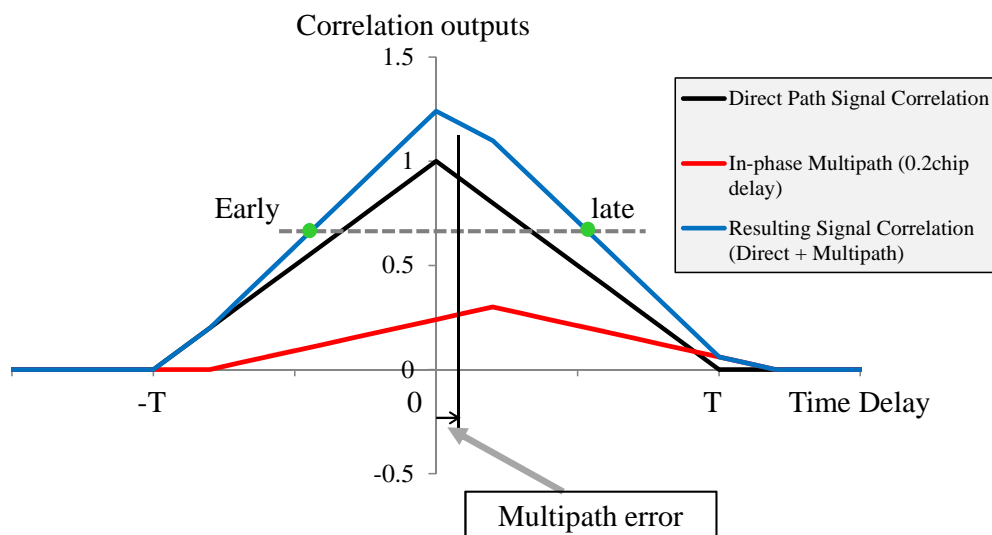
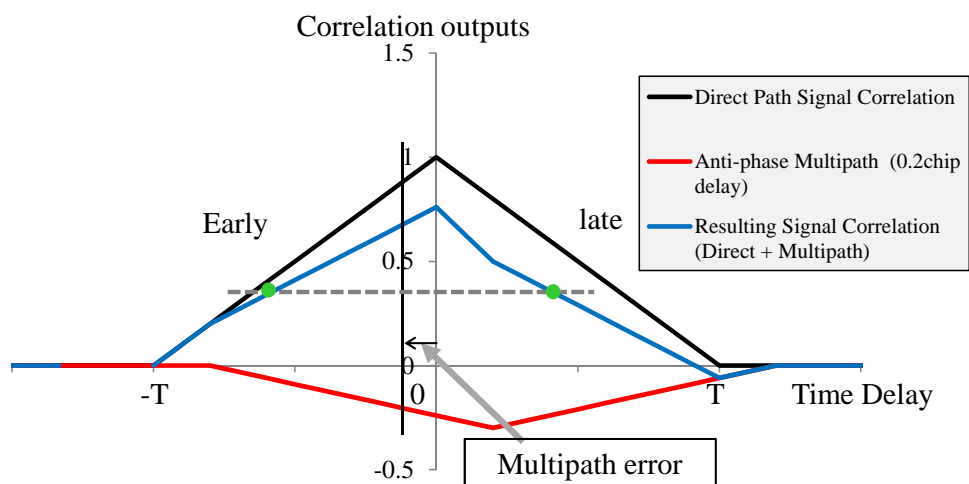


図 2.12. マルチパス誤差と遅延距離の関係.



(a) 0.2 チップ遅れ, 同相の場合



(b) 0.2 チップ遅れ, 逆相の場合

図 2.13. マルチパスが存在する場合のコリレータへの影響

2.3.7 受信機雑音

擬似距離測定値は受信機雑音と呼ばれるランダムな測定雑音による影響を受けている。ここで受信機雑音とは、アンテナ、増幅器、ケーブル、受信機からの雑音、他の GPS 信号からの干渉などのマルチアクセス雑音、量子化雑音の総称として用いられている。GPS 衛星からの信号を捕捉しその追尾を行うにあたり、受信機単体では完全に信号波形の変化を追うことはできず、必然的に遅延と歪みが発生する。その結果として受信機は、GPS 信号にランダムに雑音加わっているような信号を見ることになる。この受信機雑音の典型的な大きさとしては、0.1 m (1σ) のオーダーであるといわれており、マルチパスなどの他の誤差と比べて非常に小さい。

2.3.8 測位誤差

以上では、誤差の原因によって 3 種類に分け議論を行った。測定誤差には、ランダム性を持つ雑音と、一定の値を持続する傾向を持つバイアスとの 2 種類が存在する。これまでに説明した誤差について、以下表にまとめる。

誤差源	誤差要因	誤差の大きさと性質
衛星依存	軌道要素	2 m (バイアス)
	時計の摂動	2 m (バイアス)
伝送路依存	電離層遅延	2 ~ 数十 m (バイアス)
	対流圏遅延	2.3 ~ 2.6 m (バイアス)
	マルチパス	~ 100 m (ランダム)
受信機依存	擬似距離測定雑音	~ 1 m (ランダム)

第 3 章

関連研究

前述の通り，マルチパスおよびシャドウイングの影響で GPS 受信機のみでの高精度な位置推定を安定して行うことは難しく，安全運転支援システムなどへの単体での応用は難しいとされている．実用的なシステムの開発を目指すためには，GPS 単体ではなくその他センサと組み合わせを行うか，GPS 自体の精度を改善を行うかのどちらかが一般的となる．センサとの組み合わせにおいては，レーザレーダ [20] やライダ [21]，3D レーザスキャナ [22]，画像カメラ [23]，無線通信の受信強度を用いたもの [24]，マップマッチングを用いたもの [25] など非常に多岐にわたる．近年市販されている車にはこういった手法が応用され，プリクラッシュセーフティシステムとして実際に搭載され始めている．一方本稿では，GPS の精度自体に着目し，特に都市部において有効と考えられる精度向上手法を提案する．以前から，GPS そのものの改良には非常に多くの研究がなされており，現在我々が利用している GPS 受信機にはそれらの技術が多く組み込まれている．本章では GPS の精度向上に関連する研究として，マルチパスおよびシャドウイングの誤差低減技術についてまとめる．

3.1 受信機の内部処理

マルチパスに対策した技術として，古くから受信機内部のコリレータを改良することによって大きなマルチパスの影響を低減させる技術が多く開発された [26, 27, 28, 29, 3, 30, 31]．2.3.6 項で詳しく説明したが，最も基本的なコリレータは 1 チップ幅のワイドコリレータと呼ばれるものである．1990 年代付近より，マルチパス誤差を低減するための様々なコリレータ技術が開発されるようになった．始めに登場したのが Narrow Correlator (ナローコリレー

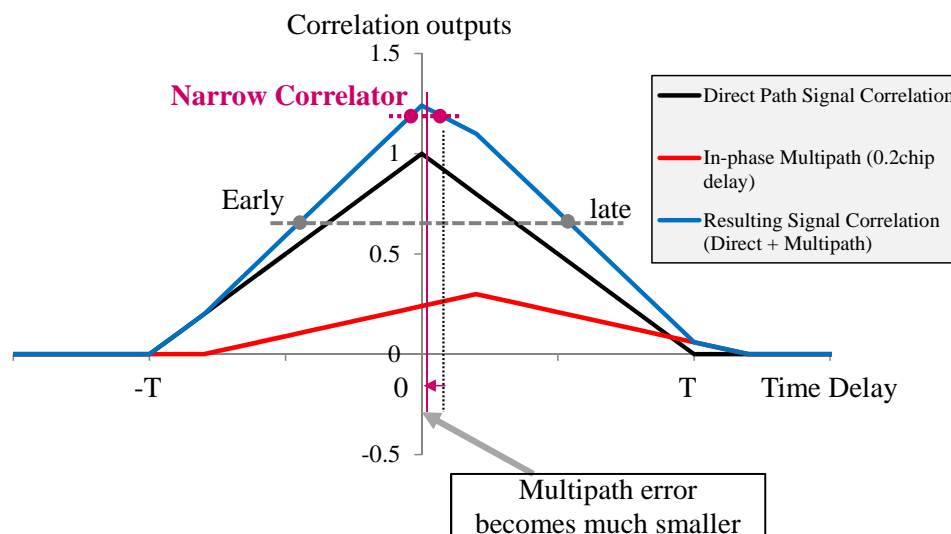


図 3.1. Narrow Correlator の原理.

タ) [26] である。このナローコリレータの登場により、それまでのマルチパス誤差を受信機内で大幅に削減することが可能になった。それまでの受信機は、基本的に GPS 衛星からの拡散信号をほぼ包含する 2 MHz の帯域幅で設計され、1 チップの間隔を持った 2 つのレプリカ信号でコードのトラッキングを行う仕様であった。(帯域幅とは、受信機の帯域特性を支配している中間周波数フィルタにおける帯域幅のことである。) しかし、帯域幅を広げ (8 MHz 程度以上)、かつ early 信号と late 信号の幅を狭めることにより、マルチパスが存在する場合でも存在しない場合でも、大幅に測距精度が向上することが確認された [27]。帯域幅は相関関数のピーク付近の形状に非常に大きな影響を与える。図 2.11 や図 3.1 は仮想的に帯域幅が無限大の場合の相関値を表しているが、帯域幅が狭いとこのような鋭いピークは得られず、大きく丸まったピークの形状となる。ピーク付近が丸くなることで相関波形の傾きも小さくなり、遅延距離の短いマルチパス波の影響が見えにくくなる。したがって帯域幅を広めることは、相関値の分解能を高めることに相当している。

続いて、Early 信号と Late 信号の幅を狭める効果について説明する。2.3.6 項で説明したように、受信機は early と late の相関値が等しくなるとき、その中心をトラッキングしている。このためマルチパス波が存在すると、このトラッキングポイントは必ず左右どちらかに移動する。これがマルチパス誤差である。図 3.1 に 0.1 チップの場合のトラッキングの様子を 1 チップの場合の図に重ねて描いた。この図からも明らかに、0.1 チップの方がマルチパス誤差が

小さくなっていることが見て取れる。数値としてはおよそ 10 分の 1 程度にまで減少させることができている。

この後、さらに相関波形の左右の傾きの違いに注目した Early-late-slope 方式 [28]、複数の Narrow Correlator を組み合わせた Strobe Correlator 方式 [29]、相関値ではなく受信電力の波形変化に注目した Vision Correlator 方式 [31] などが開発された。これらの技術は、最新の高精度受信機においても広く利用されており、実際の環境において 30 m 程度以上の遅延を持つマルチパス波の影響をほとんど無視できる程度にまで取り除くことが可能となっている。ただし、それ以下の短い遅延距離のマルチパス波に対しては依然としてその影響がある。

3.2 受信データの整合性

コリレータによってマルチパス誤差はかなり低減されたものの、短いマルチパスによる誤差は依然として存在している。また、市場に普及している安価な GPS 受信機には高性能な最新のコリレータは搭載されておらず、マルチパス低減に関してはナローコリレータと同等のものも多く存在する。こういった影響は、実際のマルチパス波の遅延距離およびその信号強度を求めることができれば、理論的にマルチパス誤差として算出できる。しかし実際には、遅延距離および信号強度を正確に求めることは難しいため、このマルチパス誤差の影響を低減するための様々な手法が考案されている。

マルチパス誤差の影響を低減するためには、大きく分けて 2 つの方法がある。1 つは、マルチパス誤差を数値として求め、これを用いて擬似距離を補正する方法である。もう 1 つは、受信データの整合性などからマルチパスの影響を受けている擬似距離を認識して、この擬似距離を計算に用いないという方法である。

先にも述べたように、実際のマルチパス波の遅延距離、信号強度を正確に求めることは難しい。このため、そのマルチパスの結果である相関値のみを見て、マルチパス誤差の大きさを推定するという手法が提案されている [32]。同様にコリレータによる相関値を利用し、その値からマルチパス波の同相/逆相判定および、直接波とマルチパスのどちらが支配的かの判定を行い、これに対処しているものもある [33]。また、RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) と呼ばれる、最小二乗法の残差を小さくするよう衛星の選択を行うことで、マルチパスの影響を小さくするという手法も一般的である [34, 35]。しかしこの手法では、受信した衛星の半分以上がマルチパスとなるような環境では効果が期待できないことも知られている。

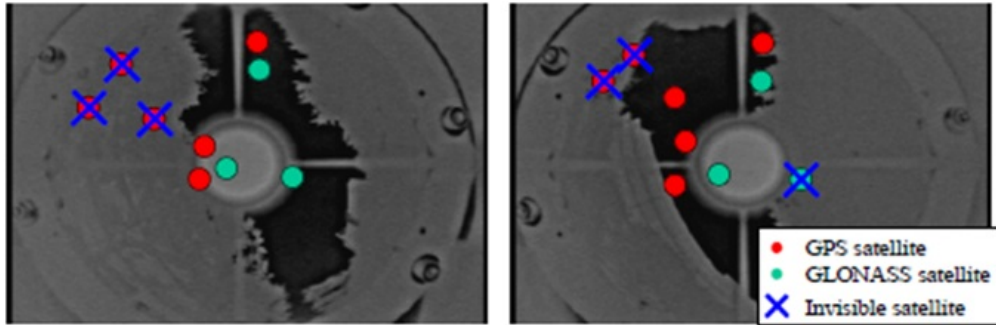


図 3.2. 全方位赤外線写真を用いた衛星の識別 [1].

[36]. 受信機の出力する信号強度のみを用いて、信号が直接波であるかどうかを判定する技術も提案されている [37]. マルチパスの少ない開けた環境において、GPS 衛星の信号強度はアンテナ・ケーブルの特性および仰角に依存する. したがって、あらかじめアンテナ・ケーブルの特性を測定しておけば、仰角に対応したあるべき受信強度が考えられる. 一方、都市部などマルチパス波を多く受信してしまうような環境では、反射波や回折波を受信することにより、信号強度が常に大きく変動する. 直接波が大きく減衰され、反射波を強く受信する状況においては、ビル街の壁面等での反射により、最低でも 6 dB-Hz 以上減衰されることが予想される. この手法はこの特徴を利用して、強く受信している反射波を排除するというものである.

3.3 外部データとの融合

近年では、周囲の構造物をカメラ、測量データなどから把握し、NLOS である GPS 衛星を推定し測位計算から除くことによって、GPS そのものの精度の向上を狙った研究が多くなされてきた [1, 2, 38, 39, 36]. 高度情報を含んだ三次元地図などを用いた GPS のシミュレータも考案されてきた [40, 41, 42].

Suzuki ら [1] は広角な遠赤外線カメラによって上空を撮影し、その画像と衛星位置とを比較することで、衛星が可視であるか不可視であるかを推定する手法を提案している. 図 3.2 に赤外線カメラによって撮影された写真を示す. 赤外線カメラで撮影された画像では、近くにある構造物は白く、空は暗く写るため、閾値を設けることで非常に簡単に衛星の識別を行うことが可能となっている.

Obst ら [2] は簡単なレイトレーシング法を用いることで、衛星と受信機との間に障害物が存在するかどうかを確認する手法を提案している (図 3.3). この手法は、カメラなど他のセン

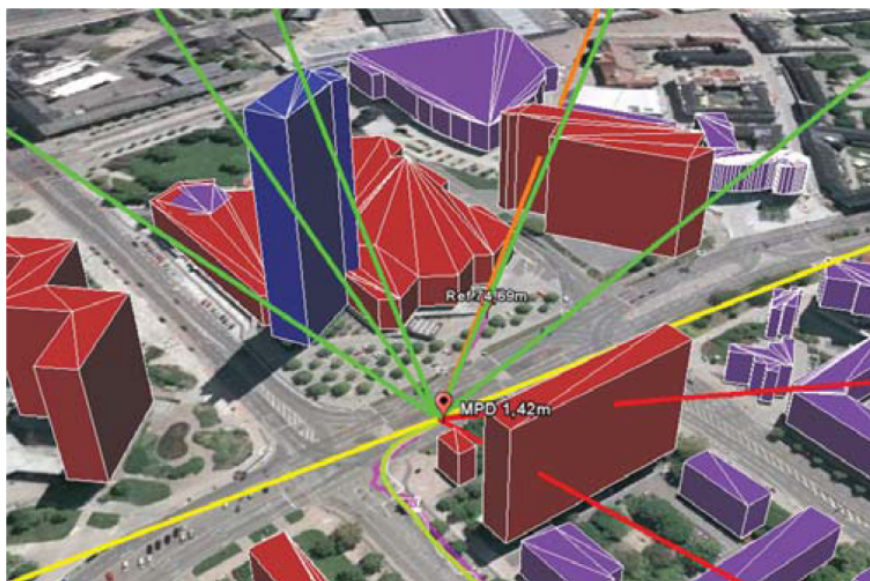


図 3.3. 3次元地図およびレイトレーシングによる衛星の識別 [2].

サを用意しなくても、周囲の構造物の高度情報さえ事前に保持してさえおけばマルチパスの推定が可能となるため、利用者にとって負担が少ない。また、計算量も少ないため非常に容易である。

3.4 本研究の位置づけ

本論文では、歩行者にも適用可能な高精度かつシンプルな GPS の実現を目指し、歩行者にとって負担となるセンサなどを用いず、建物の高さまでを含めた 3 次元高度情報のみを用いた GPS の高精度化手法の提案を行う。衛星の LOS/NLOS の識別は、3 次元高度情報より作成した 3 次元構造物マップおよびレイトレーシングによって行う。

しかしながら、レイトレーシングを用いて衛星の識別を正確に行うためには、実際に自分自身がどこにいるかを詳細に把握している必要がある。Obst らは自身の位置を高精度の GPS により決定しているため、受信機の出力座標と真の座標とが十分に近いと仮定することができる。この条件のもとでは、受信機の出力する位置を基準にレイトレーシングを行うことで衛星の状態が識別可能である。しかし前述のとおり、低価格の小型受信機においては、その出力座標と真の座標との間に非常に大きな誤差が存在する場合がある。このような場合には、出力座標を基準にレイトレーシングを行っても、実際の信号伝搬経路とは全く異なる経路をシミュレートすることとなる (図 3.4)。これにより、受信機の出力する位置精度や周囲の構造物の状

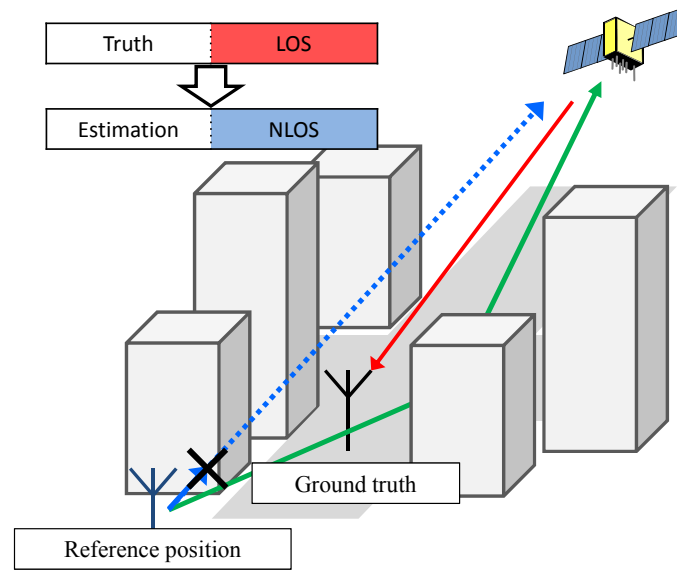


図 3.4. 誤った基準位置からのレイトレーシング

況によっては、レイトレーシングによる可視衛星の判別精度が非常に低下してしまうという問題があると言える。

本手法ではこの問題を回避するため、GPS によって得られた測位結果の周囲に、解の候補点を複数用意する。このすべての候補点からレイトレーシングを行い、これによって得られる推定擬似距離と、測定された擬似距離とを比較し最適な位置の探索を行う。また、都市部における位置推定に重みを置いているため、NLOS やマルチパスの衛星を排除すると衛星数が不足してしまう。そのため、衛星を使用しないのではなく、レイトレーシングによって求めた遅延距離に基づきマルチパス誤差を算出し、推定擬似距離の算出にはこれを考慮している。以上より、候補点の数およびビル情報に応じて計算量は増加することとなるため、計算量および測位精度の両方から評価を行い、本提案の現実的な利用可能性について議論を行っていく。

第 4 章

システム概観

4.1 GPS 受信機

今回実験に用いる受信機は測位座標のみでなく，受信衛星の座標，GPS 時，測定された擬似距離など，衛星から受信された生に近いデータを可能な限り取得できる受信機が望ましい．市販されている GPS 受信機というものは，NMEA-0183 と呼ばれるフォーマットにしたがって測位結果を出力するのが通常である．このフォーマットでは，測位結果（位置・速度・時刻），計算に使用した衛星，その方位，仰角，受信強度などを ASCII で出力するというものである．しかしこのフォーマットでは，今回必要となる擬似距離の情報が含まれていないため，追加でこういった情報を出力可能な受信機が必要である．このため，ここでは u-blox NEO-6P という受信機を用いた．この受信機出力の詳細は表 4.1 に示す．この受信機は NMEA-0183

表 4.1. GPS 受信機の出力情報

製品名	u-blox NEO-6P GPS module
アンテナ	u-blox ANN-MS（アクティブ GPS アンテナ，ケーブル長 5m）
受信周波数	GPS L1 周波数 C/A コード
受信感度	-160 dBm
最大出力周期	1 Hz
出力データ	NMEA フォーマット，ubx フォーマット（独自形式） 受信機座標，受信機速度，DOP，アルマナック，エフェメリス，サブフレーム，衛星状態，GPS 時，GPS 週，擬似距離，受信強度，etc.

フォーマットに加え、独自形式で GPS 衛星から受信した生データを出力することが可能となっている。また、RS-232C もしくは USB によって接続可能であり、シリアル通信でその情報を送ることが可能となっている。

4.2 3次元構造物マップ

本手法の実現のために、まず初めに3次元地図を作成する必要がある。3次元地図はデータ量を可能な限り小さくし、読み込みにかかる負荷を低減、メモリを節約する必要がある。これを考慮し、通常の2次元の地図データより建物や道路の形状を含んだ2次元座標の情報を取得し、これと購入した高度のデータを組み合わせることで3次元構造物マップを作成した。取り出した2次元座標情報は、建物のすべての角を表すノード（緯度・経度の情報を持つ）と、1つの建物としてのノードの集合である。今回、2次元地図データとしては編集が容易かつフリーである OpenStreetMap(OSM)、もしくは国土地理院の公開している基盤地図情報を使用した。また、数値表層モデル (Digital Surface Model; DSM) としては朝日航洋株式会社の good-3DTM を用いた。この DSM データは、緯度・経度・高度の3次元の情報の集合となっている。例として表 4.2 にその一部を掲載する。今回用いた数値標高モデルは水平方向 1m メッシュごとのデータであり、その正確度は水平方向 50cm、鉛直方向 15cm である。図 4.2(a), 4.2(c) に使用した2次元地図データ、図 4.2(b), 4.2(d) に作成した3次元構造物マッ



図 4.1. 使用した受信機

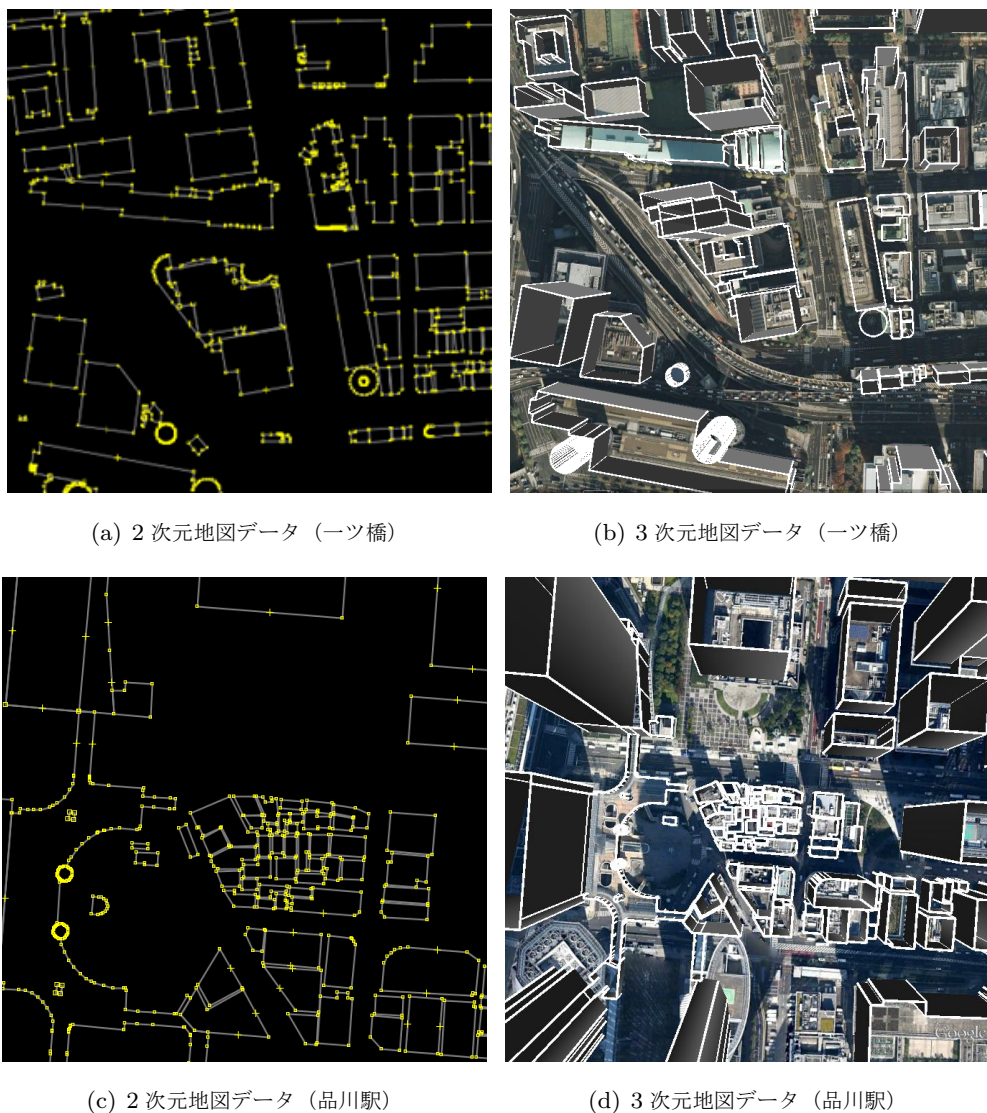


図 4.2. 3次元構造物マップの構築

プの例を示す．以上により作成した3次元構造物マップとしては，各建物のすべての角の3次元座標データのみを持つkmlファイルとして作成されている（図4.3）．1つの建物に対して非常に小さいデータ量の読み込みで済むため，短時間での読み込みが可能である．実際に計算を行うときには，実験サイトの周囲のマップのみを読み込むことで，更なる読み込み時間の短縮を図ることができ，計算を行う際にも計算量の削減となる．

本実験を行うにあたり，千代田区一ツ橋および港区品川駅周辺の3次元構造物マップを作成した．実験を行った環境，および後述のレイトレーシングによるシミュレーションの様子を図

表 4.2. DSM データの例

longitude	latitude	height
139.761221	35.697297	17.71
139.761232	35.697297	33.13
139.761243	35.697297	69.27
139.761254	35.697297	104.71
⋮	⋮	⋮

```

<Placemark>
  <name>1</name>
  <styleUrl>#1</styleUrl>
  <LineString>
    <extrude>1</extrude>
    <altitudeMode>absolute</altitudeMode>
    <coordinates>
139.758851000000,35.693436600000,10.51807056
139.758936000000,35.693449300000,10.51828516
139.758921000000,35.693499900000,10.51787107
139.758895000000,35.693497000000,10.51779843
139.758886000000,35.693501600000,10.51774057
139.758842000000,35.693453500000,10.51791795
139.758848000000,35.693450000000,10.51796440
139.758851000000,35.693436600000,10.51807056
    </coordinates>
  </LineString>
</Placemark>

```

図 4.3. 3次元構造物マップの内容

4.4 に示す．道路の両側には高いビルが多く存在しているため，複数の信号がマルチパスとして受信機に到達している様子が見られる．

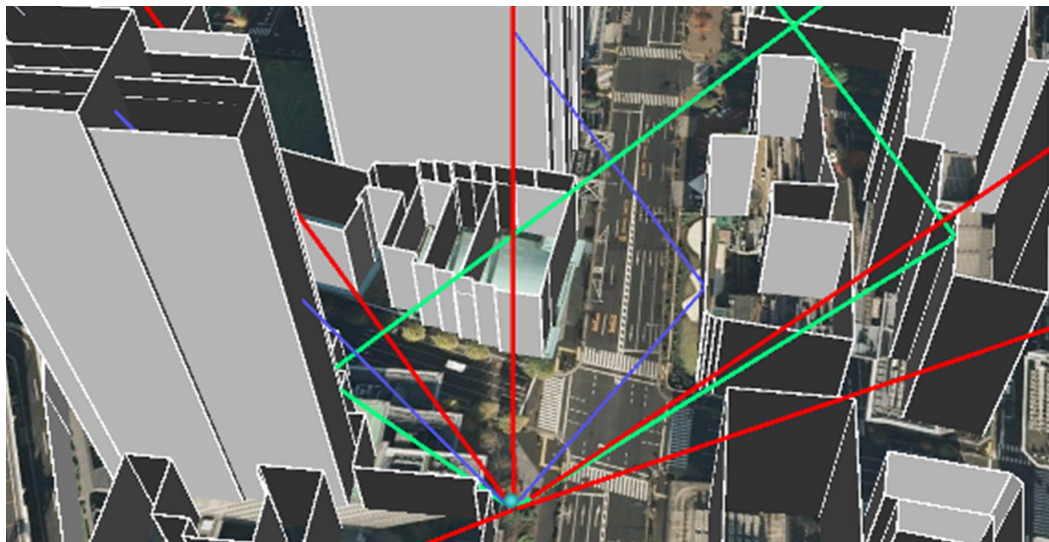


図 4.4. レイトレーシング

4.3 レイトレーシング

レイトレーシングは、元々コンピューターグラフィックスの分野において用いられてきた手法で、光の経路をシミュレートすることで物体を表現する手法である。しかし近年、この手法は電磁波の伝搬シミュレーションにも用いられており [43, 44]、本提案ではこれを用いて GPS 衛星からの信号伝搬の状況を推測を行っている。シミュレーションの様子を図 4.4 に示す。ここで、赤線は直接波を、緑線は 1 回反射波を、青線は回折や多重反射などの経路を通して受信機に到達している信号を表している。このようにレイトレーシング法を用いることで、受信した GPS 信号のうち反射波となっているものを認識することができ、直接波との距離を比較することで遅延距離も算出することができる。図を見ると分かるように、構造物マップでは大きな建物のみを考慮しており、電柱や街路樹、小さな看板など季節や時間などによって簡単に変化してしまうような物体、また電波への影響が複雑であるような物体については考慮していない。このため、受信機では実際に受信できているが、その伝搬経路が分からない信号というものもいくらか存在している。こういった信号については提案手法では取り扱わないこととしている。

レイトレーシングとは、送信点から放射される電波をレイ (Ray) とみなし、そのレイが途中の構造物で反射、透過、回折の影響を受け受信点に到達するパスをトレース (Tracing) す

ることである。受信電界強度は受信点に到達した全てのレイを合計することによって求められる。レイトレーシングにおいて送信点から受信点までのレイの軌跡を求める方法は、レイラウンチング法 (ray-launching method) とイメージング法 (image method) の2種類がある。イメージング法とは、送信点、受信点および考慮するすべての反射面の組み合わせから幾何的に反射点や透過点を求めて3次元的なパスを求める。この方法は受信点に到達するレイを厳密に求めることができるが、送信点と受信点間の反射点や回折点を決定するためにすべての反射面、回折点の組み合わせに対してレイを探索する必要がある。したがって構造物の数が多い場合、それらすべての組み合わせを考慮する必要があるため、計算量が膨大となる。ラウンチング法では、送信点から一定角度ごとに離散的にレイを発射させ、その軌跡を逐次追跡する。受信点を考慮する場合、離散的な角度でレイを放射させるため、受信点に完全に一致するレイが求まる確率は極めて小さい。そこで、受信点のまわりに一定の受信エリアを定義して、受信エリア内に到達したレイを、その受信点に到達したレイとみなし、電界強度を算出する。また、同一経路の履歴をもつレイは、試行回数に影響をうけるため、重複してカウントしない。

以上より、シミュレーションを行う前に、回折、透過、散乱、反射について、どの程度のレイまで考慮するか決定し、どちらの手法でレイトレースを行うかを決める必要がある。まず、透過および散乱の過程を経た電波に関しては、複数の物体からの影響を受けていることが考えられる。これより遅延時間を正確に求めることは難しく、電波強度自体もかなり微弱になっていることが考えられる。回折や複数反射は、実際に受信機によって測定されている可能性も高いが、リアルタイム性を優先し、今回は考慮しないこととする。したがって、今回我々は1回反射波のみを考慮することとし、計算量の観点からイメージング法によってその遅延を求めることとする。以下では、イメージング法によりマルチパス波の軌跡および遅延距離を推定するアルゴリズムについて説明する。

イメージング法ではまず、建造物の反射面を鏡面とみなし、反射面に対して受信機の鏡像位置を求める (図 4.5)。この鏡像位置と衛星を直線で結び、反射面との交点を求める。交点が構造物の壁面内であれば、反射経路が存在していることが分かる。ここで、反射点と衛星、および反射点と受信機の間には障害物の有無を確認し、どちらにも存在しなかった場合にのみ反射波が存在するとしている。この衛星から反射点、反射点から受信機までの距離の和から、受信機から衛星までの距離を引くことで、この反射波の遅延距離は算出できる。

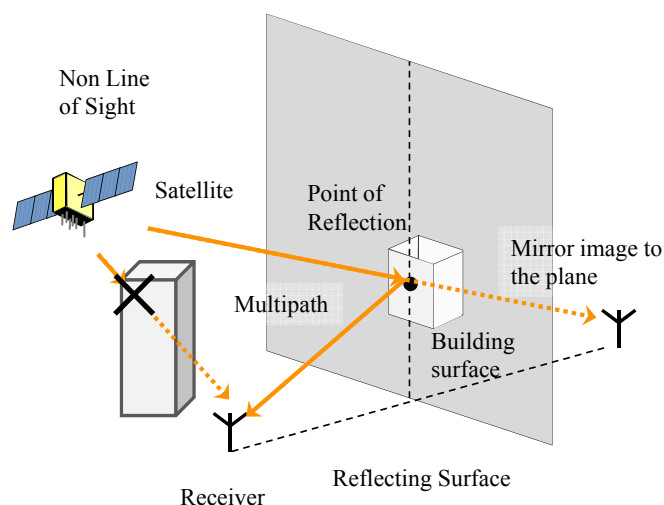


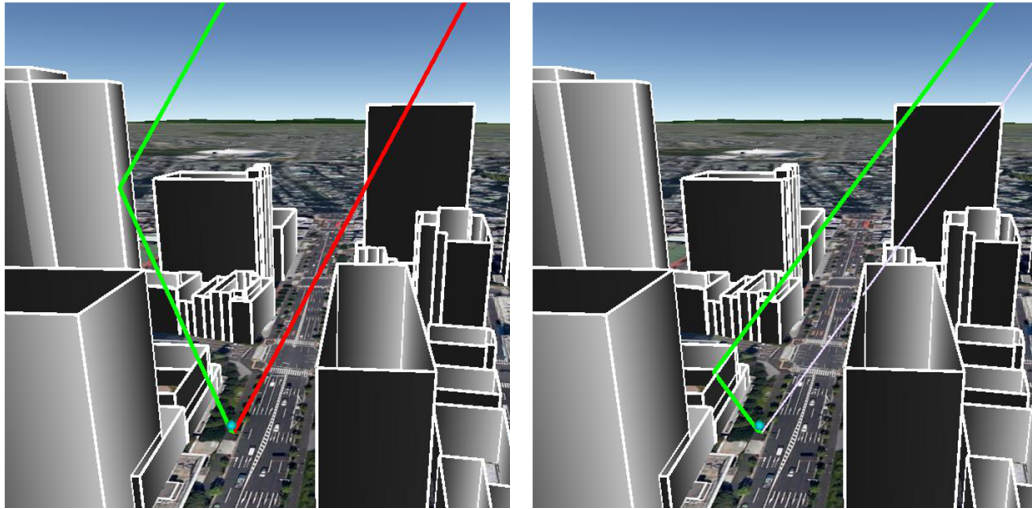
図 4.5. イメージング法による反射波の探索

Algorithm 1 1つの壁面に対する反射波の探索アルゴリズム

- 1: 反射面（構造物の壁面を含む平面）に対して，受信機の鏡像位置を算出する．
- 2: 鏡像の座標と衛星の座標を結ぶ線分を用意する．
- 3: 線分と反射面の交点を算出する．
- 4: **if** 交点が構造物の壁面内 **then**
- 5: 交点と衛星，交点と受信機を結ぶ2本の線分を用意する．
- 6: どちらの線分も他の構造物と交差しないのであれば，以上の2本の線分を電波の反射経路とみなす．
- 7: **end if**

4.4 3次元構造物マップの誤差による影響

今回作成した3次元構造物マップは，2次元の地図に建物毎の高さ情報を加えたものと考えることができる．また，2次元地図として利用したのは国土地理院にて公開されている基盤地図情報である．その必要とされている精度は法令によって定められており，本研究で対象と考えているような都市計画区域内での平面位置の誤差は2.5 m以内とされている．これに加えて，購入したDSMにもある程度の誤差が含まれている．したがってこれらから作成した3次元構造物マップには，建物の位置に関して無視できない大きさの誤差が含まれていることが考えられる．構造物マップの誤差は，レイトレーシングによる推定の間違いの原因となるた



(a) LOS (マルチパス)

(b) NLOS (反射波のみ)

図 4.6. LOS のマルチパスと NLOS 伝搬の識別例

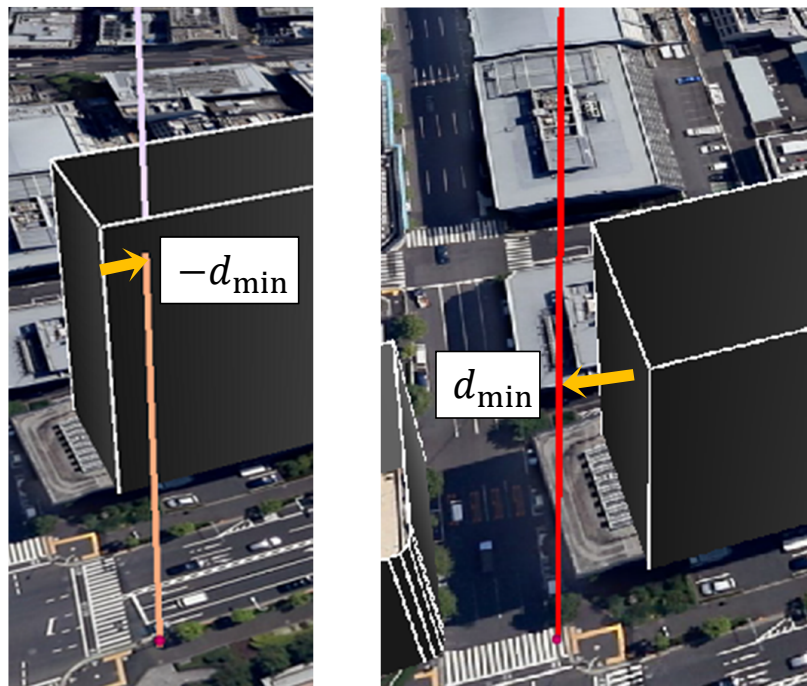


図 4.7. 建物とレイとの最短距離

め、推定を行う際にこの影響を補正することが必要となる。ここではレイトレーシングによる推定間違いを抑制する手法を考案する。

ここで問題となるのは、レイが建物のすぐ近くを通過する場合と建物の端で遮られるような

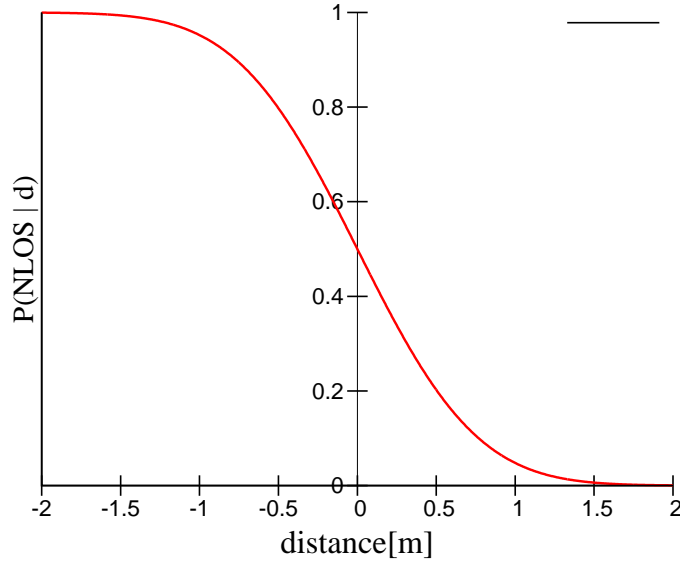


図 4.8. 建物とレイとの最短距離に対する NLOS である確率

場合である (図 4.7). このため, レイが遮られているかどうかの検証を行う際に, 建物とレイとの最短距離を算出するようにし, その値が小さいときは電波の受信強度を参照し, これを踏まえて LOS/NLOS 判定を行うこととした. レイが建物によって遮られる場合には, その交点と遮っている面の端との距離を算出し, こちらも同様とした. 具体的には, 建物までの最短距離 d_{\min} がある閾値 $d_{\text{threshold}}$ 以下であるような場合, その見通し判定はまず強度によって決めることとした. また閾値 $d_{\text{threshold}}$ は 3 次元構造物マップの精度によってあらかじめ決めた値であり, ここでは 3 m としている. その衛星からの平均受信強度より現在の受信強度が明らかに強い場合その信号は LOS であるとし, 明らかに弱い場合は NLOS であるとする. 受信強度からの見通し判定が難しい場合には, 確率的モデルに従い判定する.

建物とレイとの最短距離に応じた LOS, NLOS の確率を定義する. まず, 構造物のエッジからその構造物の外側に向かう方向を正としたとき (図 4.7 参照), NLOS である確率は相補誤差関数の積分値に従うこととする. つまり,

$$P(\text{NLOS} | d_{\min}) = \int_{d_{\min}}^{\infty} \mathcal{N}(x, 0, \sigma_{\text{map}}) dx \quad (4.1)$$

を NLOS である確率とする. ただし $\mathcal{N}(x, 0, \sigma_{\text{map}})$ は確率変数 x , 期待値 0, 分散 σ_{map} に従う正規分布である. また σ_{map} は 3 次元地図の精度から決定する. 一例として, 縦軸に NLOS である確率 $P(\text{NLOS} | d_{\min})$, 横軸にエッジからの最短距離 d_{\min} を, $\sigma_{\text{map}} = 0.5$ としたものを

図 4.8 に示す.

この確率をもって LOS/NLOS の判断を行うものとする.

第 5 章

推定アルゴリズム

測位計算手法，レイトレーシング，3次元構造物マップなどの各要素技術について前章までに説明した．これらの技術を用いて，地上の任意の地点からの推定擬似距離を定義し，これをもとに最適位置を探索を行う．本章ではこのアルゴリズムについて説明する．

5.1 レイトレーシングによる NLOS 伝搬誤差

前章において求めた電波の反射経路が，実際に受信機の距離測定にどのような影響を与えているかを考察する．提案手法ではまず，衛星が NLOS 領域にあり反射波は建物によって遮られており，反射波のみが受信機に到達しているケース（NLOS 伝搬）を考える．この場合，受信機は最初に到達する反射波を追尾すると考えられ，その遅延距離は比較的簡単に求められる．つまり直接波がシャドウイングによって減衰し反射波を追尾するようなケースにおいて，マルチパス誤差は反射波の遅延距離そのものとなる．また遅延距離は，NLOS 伝搬距離から直接波が取るであろう距離を引いたものとしてすることが出来る．したがって測定された擬似距離に含まれる NLOS 伝搬誤差 $\varepsilon^{\text{reflection}}$ は，

$$\varepsilon^{\text{reflection}} = \|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}^{\text{reflection}}\| + \|\mathbf{x} - \mathbf{x}^{\text{reflection}}\| - \|\mathbf{x}_n - \mathbf{x}\| \quad (5.1)$$

となる．ただし $\mathbf{x}^{\text{reflection}}$ は反射点の座標である．また，反射波が存在しない NLOS 衛星に関しては使用しないこととした．

5.2 候補点

前述のようにレイトレーシングは追加のセンサが必要なく、事前にデータを保持していれば反射波の推定が可能となる。また、計算量も少ないため非常に容易である。しかしながら 3.4 節でも述べたように、地上の基準点が正確でないとレイトレーシング結果は全く意味の無いものになってしまう。本手法ではこの問題を回避するため、GPS によって得られた測位結果の周囲に解の候補点を配置している。この候補点からレイトレーシングを行い、これによって得られる推定値と測定されたデータとを比較し最適な位置の探索を行っていく。

受信機が出力する擬似距離 $\boldsymbol{\rho} = [\rho_1, \dots, \rho_N]^T$ と衛星位置 $\mathbf{x}_n (n = 1, \dots, N)$ を用いて最小二乗法により求まる測位結果を初期位置 \mathbf{y}_{GPS} とする。この初期位置にはこれまで述べたとおり誤差が含まれている。しかし受信機の真の位置はこの \mathbf{y}_{GPS} のある程度近傍に存在すると考えられる。そこで提案手法では、 \mathbf{y}_{GPS} の周囲を探索することで、より正解位置に近い座標を推定していく。具体的には \mathbf{y}_{GPS} の周囲に多数の候補点を用意し、これら一つ一つを真の位置と仮定し、それらの尤もらしさを求めることで最適な座標を算出する。ここでは候補点の座標を $\mathbf{P}^{(i)}$ (i は位置を表すインデックスとする) と表し、図 5.1 に示すように \mathbf{y}_{GPS} の周囲に格子状に用意する。経験的に真の位置はこの \mathbf{y}_{GPS} から 30 m 以内に存在することが多いため、格子のサイズは 50 m \times 50 m とし、これを 1 m 間隔のメッシュにしそれぞれを解の候補とした。

5.3 擬似距離の類似度

上記候補点 $\mathbf{P}^{(i)}$ を地上の基準点とみなすと、各衛星からの反射波の遅延距離 $\varepsilon_n^{\text{refle}(i)}$ をレイトレーシングによって推定できる。これを用いて、受信機が候補点 $\mathbf{P}^{(i)}$ にあったときに受信するであろう擬似距離を推定する。ここではこれを推定擬似距離と呼ぶこととし、 $\hat{\boldsymbol{\rho}}$ と書き表す。各座標から各衛星への擬似距離 $\hat{\rho}^{(i)}$ を以下のように推定する。

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{\rho}}^{(i)} &= [\hat{\rho}_1^{(i)} \ \hat{\rho}_2^{(i)} \ \dots \ \hat{\rho}_{N_{\text{sim}}}^{(i)}]^T \\ &= \mathbf{r}^{(i)} + c(\delta \mathbf{t}^{\text{r}} - \delta \mathbf{t}^{\text{sv}}) + \mathbf{I} + \mathbf{T} + \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{reflection}(i)} \end{aligned} \quad (5.2)$$

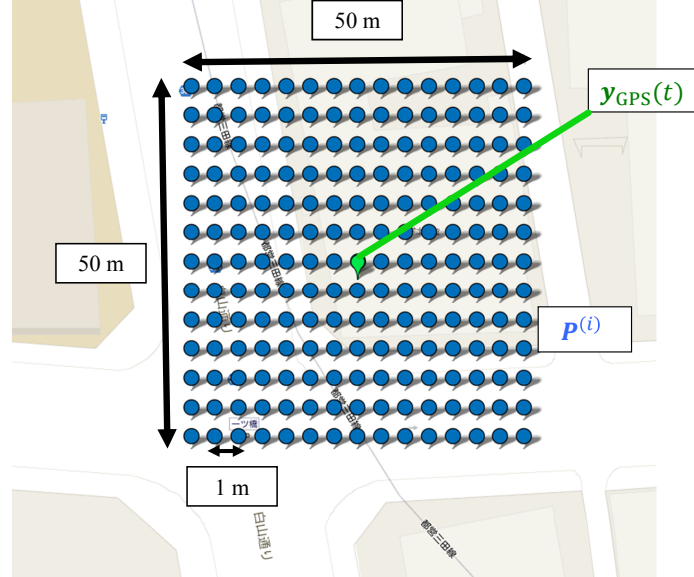


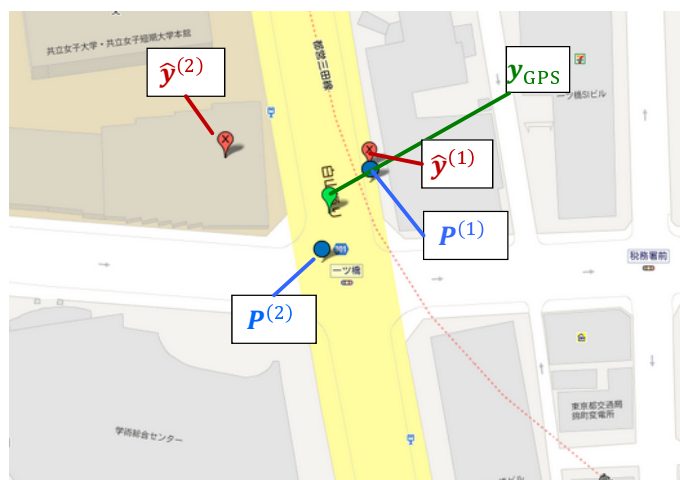
図 5.1. 初期位置の周囲に格子状に用意した候補点 $P^{(i)}$ (青点)

ここで、2章と同様であるが、 $r_n^{(i)}$ は点 $P^{(i)}$ から n 番衛星 x_n までの幾何学的距離 $\|P^{(i)} - x_n\|$ ， δt^r は受信機時計の GPS 時刻からのオフセット， δt^{sv} は衛星時計の GPS 時刻からのオフセット， I_n は電離層遅延， T_n は対流圏遅延を表している．ここで受信機時計のオフセットは衛星からのエフェメリスに基づき算出，電離層遅延は Klobuchar モデルを，対流圏遅延は Saastamoinen モデルを用いて算出している．しかし衛星時計のオフセットは測位計算によって求めるものであるため，推定擬似距離を求める上で明確には求まらない．そのため，ここではこの推定擬似距離列 $\hat{\rho}^{(i)} = [\hat{\rho}_1, \hat{\rho}_2, \dots, \hat{\rho}_{N_{\text{sim}}}]^T$ および測定擬似距離列 $\rho = [\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N]^T$ との絶対値差が最小となる値を取るように決めた．

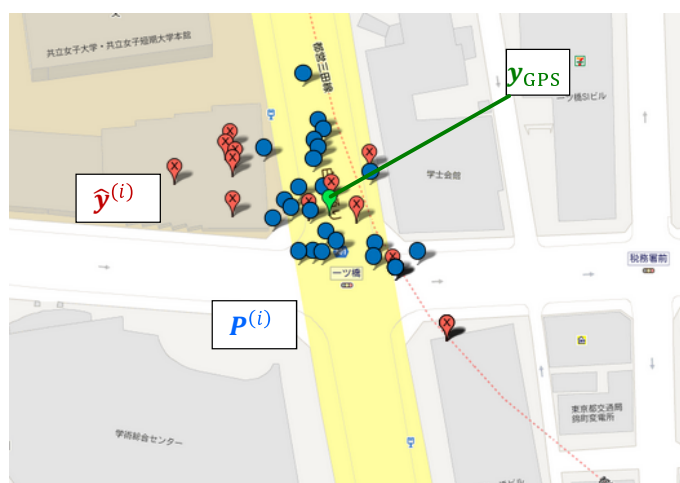
もしある候補点が正解位置付近であれば，レイトラッキングによって正確に反射経路が求められ，この推定擬似距離と受信機による測定擬似距離との差は非常に小さくなるであろう．したがってこの2つの擬似距離列の差は候補点の尤もらしさを表す1つの指標とすることができ．この擬似距離の平均誤差 $\text{diff}^{\text{pr}(i)}$ は

$$\text{diff}^{\text{pr}(i)} = \min_{\delta t^r(i)} \sum_n^{N_{\text{sim}}} \frac{|\rho_n - \hat{\rho}_n^{(i)}|}{N_{\text{sim}}} \quad (5.3)$$

と定義する．



(a) 候補座標 $P^{(1)}, P^{(2)}$ と対応する算出座標 $\hat{y}^{(1)}, \hat{y}^{(2)}$ の例



(b) 候補座標 $P^{(i)}$ と、その推定擬似距離からの測位結果 $\hat{y}^{(i)}$ の例

図 5.2. 測位結果による候補点の評価

5.4 仮測位値の類似度

候補点の評価のため、擬似距離の類似度のみでなく推定擬似距離を用いて求めた測位計算を行った結果も利用することを考える．先ほど求めた推定擬似距離列が測定した擬似距離列と十分に近いものであれば、それら 2 つの擬似距離列を用いて計算した座標同士も同様に近くにあると考えられる．この測位結果としての座標をここでは仮測位値と呼ぶこととする．一例として、測定した擬似距離からの測位結果 y_{GPS} 、ある 2 つの候補点 $P^{(1)}, P^{(2)}$ 、それらの推定擬似距離からの仮測位値 $\hat{y}^{(1)}, \hat{y}^{(2)}$ を図 5.2(a) に示す．また、測位結果 y_{GPS} の周囲に用意した

多数の候補点 $P^{(i)}$ と、その推定擬似距離からの仮測位値 $\hat{\mathbf{y}}$ の様子を図 5.2(b) に示す。

算出した推定擬似距離 $\hat{\rho}^{(i)}$ には NLOS 伝搬誤差が含まれているため、ここで算出される仮測位値 $\hat{\mathbf{y}}^{(i)}$ も NLOS 伝搬の影響を受けている。したがって、 $\hat{\mathbf{y}}^{(i)}$ は図 5.2(a) における $\hat{\mathbf{y}}^{(1)}$ のように $P^{(1)}$ の近傍に現れることもあるが、 $\hat{\mathbf{y}}^{(2)}$ のように $P^{(2)}$ から非常に離れた場所に現れることもある。ここでもし $P^{(i)}$ が正解座標であれば、その擬似距離列 $\hat{\rho}^{(i)}$ は受信機が測定した擬似距離列 ρ と反射波の影響を受けることとなり、 $\hat{\mathbf{y}}^{(i)}$ は \mathbf{y}_{GPS} の近傍に算出されると考えられる。これより、2 つの仮測位値間の距離 $\text{diff}^{\text{pos}(i)}$ を、 $P^{(i)}$ を候補点 i の尤もらしさを表す 1 つの指標とみなす。

$$\text{diff}^{\text{pos}(i)} = \|\hat{\mathbf{y}}^{(i)} - \mathbf{y}_{\text{GPS}}\| \quad (5.4)$$

5.5 候補点の評価

以上の 2 つの評価値を用いて候補点の評価を行うが、その前に 3 次元マップおよび受信強度などの測定値の整合性より候補点の選別を行う。つまり候補座標 $P^{(i)}$ に以下の条件を設ける。

- 衛星からの受信電力が十分に大きい場合、建物の内部に存在する候補点 $P^{(i)}$ は使用しない
- 受信電力が閾値（過去の受信電力の平均値より決定する）以上の衛星が NLOS と認識された場合、その候補点 $P^{(i)}$ は使用しない
- 受信電力が閾値（過去の受信電力の平均値より決定する）以下の衛星が LOS と認識された場合、その候補点 $P^{(i)}$ は使用しない

以上を満たす $P^{(i)}$ を、正解座標の候補として評価を行う。候補点の尤度 $\alpha^{(i)}(t)$ には前述した 2 つの評価値を用いるが、さらにここに状態遷移の連続性を考慮に入れて、

$$\alpha^{(i)}(t) = L_{\text{pseudorange}}^{(i)} L_{\text{positioning}}^{(i)} L_{\text{transition}}^{(i)}, \quad (5.5)$$

$$L_{\text{pseudorange}}^{(i)} = \begin{cases} \exp \left[- \left(\frac{\text{diff}^{\text{pr}(i)}}{\sigma_{\text{pr}}} \right)^2 \right] & (\text{diff}^{\text{pr}(i)} < C_1) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}, \quad (5.6)$$

$$L_{\text{positioning}}^{(i)} = \begin{cases} \exp \left[- \left(\frac{\text{diff}^{\text{pos}(i)}}{\sigma_{\text{GPS}}} \right)^2 \right] & (\text{diff}^{\text{pos}(i)} < C_2) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}, \quad (5.7)$$

$$L_{\text{transition}}^{(i)} = \begin{cases} \exp \left[- \frac{\|\mathbf{p}^{(i)}(t) - F\mathbf{x}(t - \Delta t)\|^2}{\sigma_{\Delta t}^2} \right] & (\text{diff}^{\text{pos}(i)} < C_3) \\ 0, & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (5.8)$$

とした．ここで C_1, C_2, C_3 は収束させるための閾値であり， $C_1 = 8$ m, $C_2 = 40$ m, $C_3 = 15$ m としている．また $\mathbf{x}(t - \Delta t)$ は前回の推定位置， F は遷移行列を表す． $L_{\text{pseudorange}}^{(i)}$ は擬似距離同士の類似度に基づく尤度で， $L_{\text{positioning}}^{(i)}$ は測位結果同士の類似度に基づく尤度， $L_{\text{transition}}^{(i)}$ は動作の連続性を考慮した尤度であり，それぞれの正規分布を考慮しそれらの掛け合わせとしている．最終的に，全ての候補点の尤度による重み付き平均を求め，これを推定座標 $\mathbf{x}(t)$ として出力する．

$$\mathbf{x}(t) = \frac{\sum_i \alpha^{(i)}(t) \mathbf{P}^{(i)}(t)}{\sum_i \alpha^{(i)}(t)} \quad (5.9)$$

アルゴリズムの詳細は Algorithm 2 に記す．

Algorithm 2 位置推定アルゴリズム

- 1: 受信機出力する擬似距離 ρ より，初期位置 \mathbf{x}_{GPS} を求める．
 - 2: \mathbf{x}_{GPS} の周囲 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ の範囲に 1 m 間隔のメッシュを切る．この各座標が正解位置の候補座標であり，これを $\mathbf{P}^{(i)}$ と表す．
 - 3: **for all** i such that $0 \leq i < (50 \times 50)$ **do**
 - 4: LOS/NLOS の判定を行い，反射波の遅延距離 $\varepsilon^{\text{reflection}(i)}$ を算出する．
 - 5: **if** 受信データとレイトラシングの判定との整合性に矛盾がない **then**
 - 6: $\hat{\rho}^{(i)} \leftarrow \rho^{(i)} + c(\delta t^{\text{r}} - \delta t^{\text{sv}}) + \mathbf{I} + \mathbf{T} + \varepsilon^{\text{reflection}(i)}$
 - 7: $\text{diff}^{\text{pr}(i)} \leftarrow \min_{\delta t^{\text{r}(i)}} \sum_n^{N^{\text{sim}}} \frac{|\rho_n - \hat{\rho}_n^{(i)}|}{N^{\text{sim}}}$
 - 8: $\text{diff}^{\text{pos}(i)} \leftarrow \|\hat{\mathbf{y}}^{(i)} - \mathbf{y}_{\text{GPS}}\|$
 - 9: $\alpha^{(i)}(t) = L_{\text{pseudorange}}^{(i)} L_{\text{positioning}}^{(i)} L_{\text{transition}}^{(i)}$
 - 10: **end if**
 - 11: **end for**
 - 12: $\mathbf{x}(t) = \frac{\sum_i \alpha^{(i)}(t) \mathbf{P}^{(i)}(t)}{\sum_i \alpha^{(i)}(t)}$
 - 13: $\mathbf{x}(t)$ を推定位置として出力する．
-

5.6 パーティクルフィルタによる平滑化

GPS 受信機の出力する座標には、受信機独自の何らかのフィルタリングやスムージングが行われている。したがって我々も推定結果のスムージングを行うこととし、本研究においてはパーティクルフィルタを用いることとした。

パーティクルフィルタを使用するにあたり、状態遷移モデル、状態ベクトル、観測ベクトルを次のように定義する。

$$\text{観測ベクトル: } \mathbf{x}(t) = [\varphi(t), \lambda(t)]^T \quad (5.10)$$

$$\text{状態ベクトル: } \hat{\mathbf{x}}(t) = [\varphi(t), \lambda(t), v_\varphi(t), v_\lambda(t)]^T \quad (5.11)$$

$$\text{状態遷移モデル: } \hat{\mathbf{x}}(t) = F\hat{\mathbf{x}}(t - \Delta t) + \mathbf{N}(t) \quad (5.12)$$

$$\text{状態遷移行列: } F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

ただし φ, λ はそれぞれ緯度、経度を表すものとし、 v_φ, v_λ はそれぞれの方角への速度を表すものとする。観測ベクトル $\mathbf{x}(t)$ は提案手法により求めた緯度経度の 2 次元ベクトルとし、状態ベクトルは緯度、経度およびそれぞれの方向への速度を持つ 4 次元ベクトルとした。 $\mathbf{N}(t) \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \Sigma_N)$ は状態ノイズを表す四次元正規分布とし、その成分は経験的に定めた。ここに、 $N_p = 4000$ とするパーティクルを用意し、これら一つ一つが上記状態ベクトル \mathbf{s} を持つものとする。パーティクルの集合 $\mathbf{S}(t) = [\mathbf{s}^{(1)}(t), \mathbf{s}^{(2)}(t), \dots, \mathbf{s}^{(N_p)}(t)]^T$ に対してその重み $\pi^{(j)}(t)$ での加重平均をとり、これを出力とすることで平滑化を行う。この重み $\pi^{(j)}(t)$ は簡単に 2 次元ベクトルの距離の逆数 $1/\|\mathbf{s}^{(j)} - \mathbf{x}(t)\|$ とした。

5.7 探索候補点の削減

これまでに説明したメッシュを用いた手法では、1 m 間隔に用意した格子点の総数が 2,500 点となる。このため、1 秒以内の推定を行うためには 1 候補点にかかる時間を 0.4 ms 以内にしなければならない。しかしながら、各候補点から複数の衛星に対してレイトレーシングを行い、反射経路を探すというアルゴリズムであるため、その計算量を考えるとこれは不可能に近い。したがって、この格子状の候補点で提案手法の有用性について簡単な評価を行った後、高

速化のためまずは候補点の数を削減することを考える。

GPS の結果の周囲に均一に候補点を用意する場合、非常に計算量が多くなる上、正解位置から遠い点もすべて同様に探索することとなる。これを改善するため、パーティクルフィルタにおける粒子のリサンプリングの要領で候補点を配置することを考える。正解位置は、前述の通り $\mathbf{y}_{\text{GPS}}(t)$ のある程度周囲に存在していると考えられるが、同時に動作の連続性から $\mathbf{x}(t - \Delta t)$ のごく近傍に存在するとも考えられる。これを満たすため、図 5.3 に示すように、候補点を設置する過程においてこれをパーティクルとみなし、半数の座標を二次元正規分布 $\mathcal{N}(\mathbf{y}_{\text{GPS}}(t), \Sigma_{\text{GPS}})$ に従い分布させ、残りの半数を別の二次元正規分布 $\mathcal{N}(\mathbf{x}(t - \Delta t), \Sigma_{\Delta t})$ に従って分布させることとした。ここで正規分布を用いたのは GPS および提案手法の誤差範囲をカバーするためである。当然であるが、前回の推定結果の周囲には GPS の周囲の候補点の広がりよりも狭い範囲に候補点を配置する。今回の実験においては歩行者を対象としたため、前回の推定位置 $\mathbf{x}(t - \Delta t)$ の周囲には半径 15 m 程度の広がりを持つように分布させ、GPS の出力座標の周囲 $\mathbf{y}_{\text{GPS}}(t)$ の周囲には半径 50 m 程度の広がりを持つように分布させた。つまり、アルゴリズム 2 の STEP2 を以下のように変更し、パーティクルの数は 200 とした。この例を図 5.3 に示す。

Algorithm 3 候補点の配置方法

- 1: 半数の候補点を \mathbf{x}_{GPS} の周囲に 50 m 程度の広がりを持つ二次元正規分布 $\mathcal{N}(\mathbf{y}_{\text{GPS}}(t), \Sigma_{\text{GPS}})$ に従い配置し、残りの半数を残りの半数を 15 m 程度の広がりを持つ $\mathcal{N}(\mathbf{x}(t - \Delta t), \Sigma_{\Delta t})$ に従って配置する。
-

5.8 レイトレーシングによるマルチパス誤差

これまでの提案手法ではすべてシャドウイング、つまり NLOS 衛星からの反射波として受信機に到達している信号を探し、この信号と辻褄が合う位置を探すという方法であった。つまり LOS の衛星に関しては、測定した擬似距離が正確であるという仮定に基づいてきた。しかし実際の環境においては、LOS の衛星であってもマルチパス波が受信されることで、その測定擬似距離にはマルチパス誤差が加わっている。このマルチパス誤差の値は NLOS 伝搬の影響と比べれば非常に小さいが、都市部においてさらなる精度向上を目指す上ではこの考慮を避けることはできない。本節においてはマルチパス誤差を推定するモデルを、非常に簡単なものではあるが定義する。直接波に対して反射波の位相が変化することで、マルチパスの影響は大き

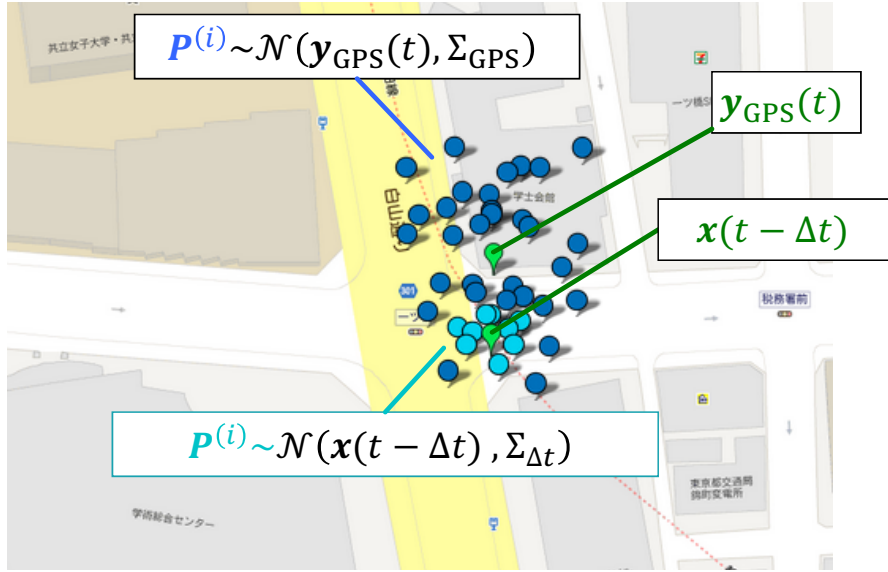


図 5.3. y_{GPS} と $x(t - \Delta t)$ の周囲にランダムに配置された候補点の例（青点：GPS の測位結果の周囲に広く分布する候補点，水色の点：前回位置の周囲に狭く分布する候補点）

く変化する．このためここではマルチパスを同相と逆相に分けそれぞれの効果を考える．レイトレーシングによって直接波および反射波が存在していることが分かっている衛星に関して，そのマルチパスの同相および逆相の判別についてはその時の信号強度を参考にして行う．もしくは受信機から相関値を出力できるような場合は，その波形を評価することで同相/逆相の判別が可能である．

5.8.1 同相マルチパス

衛星が LOS でありかつ同相の反射波が混在しているケース，つまり同相マルチパスとなっているケースを考える．この場合，受信機は直接波を追尾しており，わずかに遅れて来る反射波が干渉してマルチパス誤差となっている．たとえば遅延距離が分からなくとも受信機内部の相関値のみを用いてマルチパス誤差を推定する手法がある [32] が，われわれは地図情報より遅延距離を求めることが可能なためこれを基準に以下のようにマルチパス誤差を推定している．反射波の遅延距離に対してのマルチパス誤差の関係を求めなければならないが，これは遅延距離のみならずその電波強度および位相，また受信機内部のコリレータの特性によって大きく異なる．反射波の電波強度は反射面の材質および入射角によって非常に大きな差異があるため，反射する建物の材質が判明しない限り正確に求めることはできない．しかし一般的に，反射波

の電波強度は 6 dB 以上低下 (0.5 倍以下になる) することが知られている。

図 5.4 に遅延距離に対するマルチパス誤差との関係を示す [3]。この図では、マルチパス波の振幅は直接波の半分とし、Wide Correlator と Narrow Correlator, さらに Pulse Aperture Correlator (PAC) のコリレータを用いた場合のマルチパス誤差の最大値を表している。PAC は ELS の帯域を広く取ったもので、Strobe コリレータと同様の結果を示すとされている。実際には、マルチパス波の振幅比や位相、遅延距離は時々刻々と変化していくので、マルチパス誤差は図 5.4 に示す最大値の範囲内で生じることになる。

これに基づいて、使用した受信機におけるマルチパス誤差のモデルを考える。ここでは簡単な見積もりとして Narrow Correlator を想定し、遅延距離 d に対するマルチパス誤差 ε は

$$\varepsilon_{\text{multipath}} = \begin{cases} \alpha \frac{d}{d_{\text{threshold}}}, & (d < d_{\text{threshold}}) \\ \alpha, & (d \geq d_{\text{threshold}}) \end{cases} \quad (5.14)$$

とした。この $\alpha, d_{\text{threshold}}$ は経験的に定めた定数であり、ここではそれぞれ 6 m, 30 m とした。

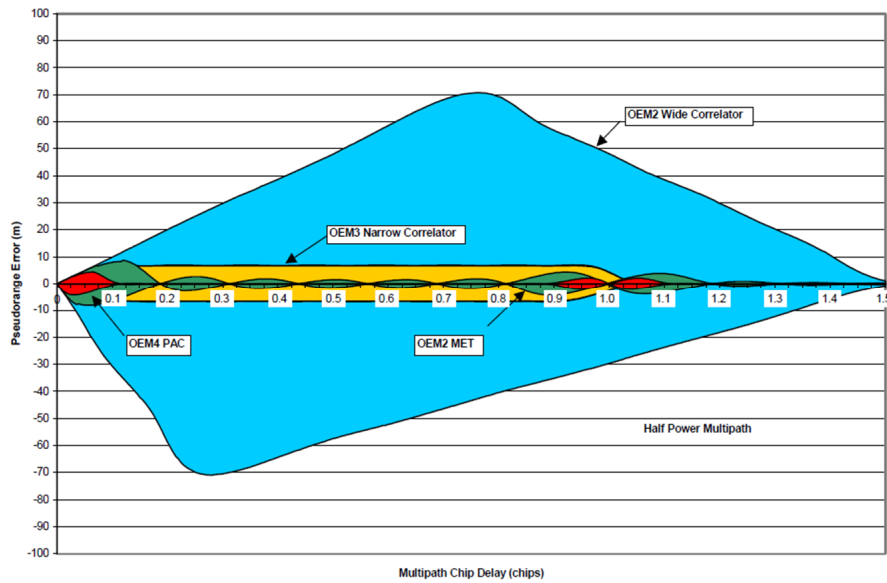


図 5.4. 遅延距離とマルチパス誤差の関係 [3]

5.8.2 逆相マルチパス

ここからは衛星が LOS, かつ逆相の反射波が混在しているケースを考える. 逆相マルチパスの特徴は2つある. 1つ目は, 測定擬似距離の誤差がマイナスであるということである. 2つ目の特徴としては, 逆相の波が干渉することで信号強度が低下することである.

まず, マルチパス誤差のモデルについてを考える. 逆相マルチパスのマルチパス誤差は, 理論的には図 5.4 の下側半分のように, 反射波の遅延距離に応じたマイナスの値をとる. 逆相の場合は同相の時と比べ誤差がマイナスであることに加え, 影響してくる最大の遅延距離も変化している. したがってこれは式 (5.14) において, $\alpha = -6, d_{\text{threshold}} = 20$ とすることで対応できる.

続いて強度が低いことに対する対策を考える. 逆相マルチパスの場合は LOS であっても強度が非常に低くなることがある. これによってマルチパスが同相であるか, 逆相であるかの判別を行うことが可能となる. しかし, 5.5 節において候補点に課していた条件の1つに“受信電力が閾値以下の衛星が LOS と認識された場合, その候補点 $\mathbf{P}^{(i)}$ は使用しない”という項目があった. 逆相マルチパスはこれに反するので, 従来であれば矛盾があるとして候補点が棄却されてしまう. これを防ぐため, マルチパスを考慮する際にはこの項目を破棄することとする.

5.9 擬似距離の外れ値の除去

本アルゴリズムは受信機によって測定した擬似距離を基準として正解位置の探索を行っている. しかし, 測定擬似距離には様々な不確定要素による誤差が含まれている. これらは通常は提案したアルゴリズムの閾値内であり無視できる大きさであるが, 場合によっては大きな問題となる. これは例えば,

- 衛星の状態異常
- 電離層の異常
- レイトレーシングでは推定不可能な複雑な経路を通ったもの
- 伝搬の過程において何らかの干渉を受けたもの

などであり, 測定擬似距離が大きく変化してしまう場合である.

ところで GPS などの衛星測位においては、最小二乗法の残差に注目し、そういった誤差の多い信号を検知、その擬似距離を計算から除去するという事は一般的に行われている。したがって我々もこのような精度の悪い擬似距離は外れ値として除外することを考案する。具体的には 5.3 節の擬似距離の類似度を求める際に、一本一本の擬似距離の組についてその差を計算し、 $|\rho_n - \hat{\rho}_n^{(i)}| > C_1$ であればこの推定擬似距離 $\hat{\rho}_n^{(i)}$ を使用しないとする。ただしこの操作を行うことで衛星数が 4 機を下回るようなケースにおいては、この操作は行わないこととする。また、もし候補点 $\mathbf{P}^{(i)}$ から衛星 n までの間に複数の反射パスが見つまっている場合には、2 番目に短い反射パスを採用して推定擬似距離 $\hat{\rho}_n^{(i)}$ を再度算出し、同様の評価を行う。

あるいはアルゴリズムにおいて初期位置を求める際に、測定擬似距離を用いた測位計算を行うが、その際に衛星毎の残差に着目し、測定擬似距離の中から外れ値となっている衛星があればそれを除外して測位計算を行う。この除外した衛星に関しては推定擬似距離を算出せず、それ以外の衛星のみでその後の評価を行うこととする。ただしこちらに関しても先ほどと同様に、この操作を行うことで衛星数が 4 機を下回るようなケースにおいてはこの操作は行わないこととする。

第 6 章

実証実験

前章までに紹介した本論文の手法が、実際の都市部における測位手法として程度の性能を発揮できるかというのを調べるために実験を行った。6.1～6.3 節までは NLOS 衛星からの信号に着目し、測位精度を上げることを狙った実験である。また本章を通して、候補点の評価方法、および現在位置の推定方法は前章 5.2～5.5 節に記述した方法としている。まず提案手法の有効度を検証するための簡単な実験を行い、その後正解座標と比較し正確な評価を行った。さらに、現実的なアプリケーションをめざすため、計算時間についても評価および改善を行った。続いて 6.4 節では、更なる精度の改善と測位率の向上のため、前章 5.8 において説明したマルチパスの影響を考慮して実験を行った。

6.1 移動軌跡からの評価

本手法を評価するため、我々は東京都千代田区一ツ橋交差点の周辺に於いて実験を行った。一ツ橋交差点付近は道は広いがその両側に 10 階建て程度のビルがならんでおり、それに加えて非常に高い建物がいくつか存在している。このため、建物の横を歩いている時など、電波が非常に届きづらい環境となっており、実際に多数の反射波が検出されている (図 4.4)。実験では、u-blox 受信機からの出力を每秒記録し、記録されたデータに対して後処理にてアルゴリズムを適用している。また本研究においては、信号強度が 25 dB-Hz 以下、もしくは衛星仰角が 15° 以下のものについては使用しないこととした。まずはメッシュを用いた提案手法を適用し、本提案の有用性の検証を行った。

測定は 2013 年 1 月に行われた。実験結果を図 6.1 に示す。赤い丸、黄色の四角、白線はそ

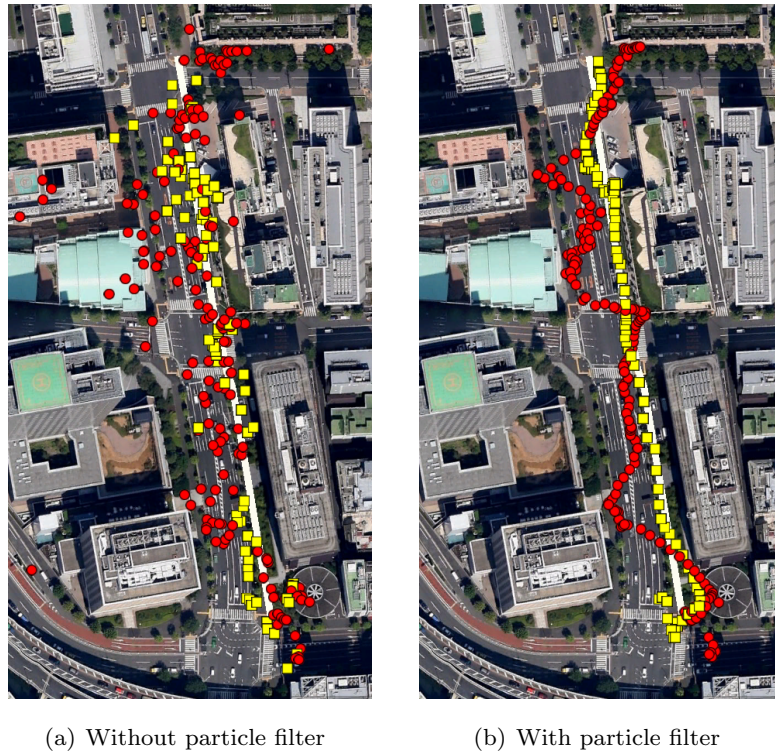
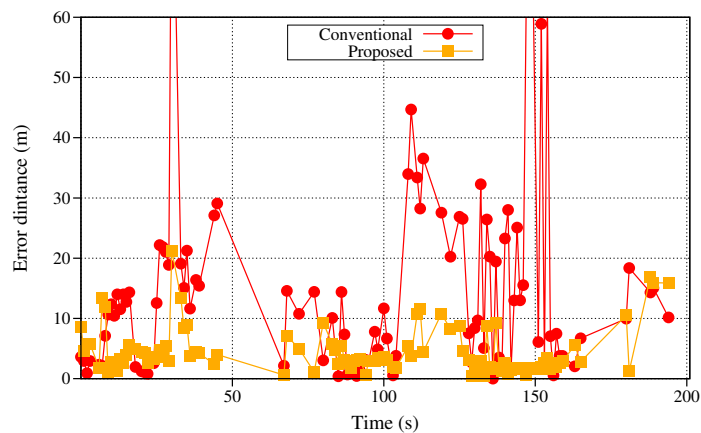


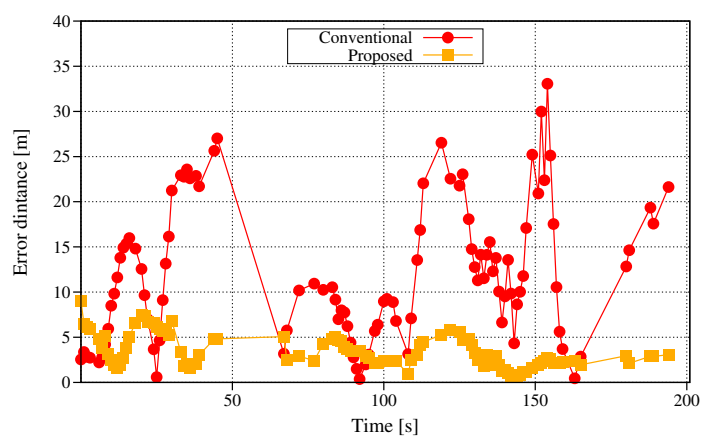
図 6.1. 従来手法と提案手法の軌跡. (赤丸：従来手法，黄色の四角：提案手法，白線：正解軌跡)

れぞれ，従来手法，提案手法，正解軌跡を表している．また，パーティクルフィルタによる平滑化の効果も同時に検証するため，平滑化後の結果も同様に示している．ここで言う従来手法とは，通常の衛星測位のことであり，測定した衛星データをそのまま用い最小二乗法によって位置を算出したものである．また提案手法とは，従来手法によって求めた座標を初期位置とし，その周囲に 1 m 間隔のメッシュを用意してその各点を候補点とし 5 章に説明した方法で探索を行うものである．この実験では，受信機を持った歩行者が図の中央の道路右側の歩道を南から北へ歩行で移動した．経路の距離は約 250 m で，180 秒程度の移動時間であった．

簡易的にはあるが定量的な評価を行うため，ここでは各出力座標の正解軌跡からの最短距離を誤差として定義した．これは軌跡からの距離であるため，軌跡上の前後の情報がないため正確な評価ではない．本来であれば毎秒毎秒の正解座標を映像などから取得し，各推定座標との距離を誤差とすべきではあるが，毎秒の正解座標を求めることの煩雑さにより，およその誤差を表す指標として本定義を使用することとした．この評価は軌跡からの相対評価とはなるためあくまでも参考値ではあるが，最低限の性能を確認するという意味では有効であると考えている．これを用いて複数回の試行に対して平均をとり，その最大値，平均値，標準偏差を求



(a) Without particle filter



(b) With particle filter

図 6.2. 従来手法と提案手法の測位誤差距離

表 6.1. 試行の平均誤差の最大値, 時間平均, 標準偏差

Case		最大値 [m]	平均値 [m]	標準偏差 1σ [m]
(a) Without filter	Conventional	65.7	10.0	11.0
	Proposed	34.0	6.6	5.4
(b) With filter	Conventional	28.7	10.1	6.6
	Proposed	9.1	3.6	2.3

めた. 結果を表 6.1 に示す. この実験結果より, 提案アルゴリズムを用いることで平滑化まで含めると最大誤差は 28.7 m から 9.1 m へ, 平均誤差は 10.1 m から 3.6 m へ, また標準偏差は 6.6 m から 2.3 m へ, すべて減少していることが見られた.

表 6.2. 試行の平均誤差の最大値, 時間平均, 標準偏差 (詳細評価)

Case		最大値 [m]	平均値 [m]	標準偏差 1σ [m]
(a) Without filter	Conventional	68.6	25.7	14.8
	Proposed	63.6	5.8	5.3
(b) With filter	Conventional	54.5	19.8	14.2
	Proposed	31.0	5.7	4.3

6.2 正解座標からの評価

以上の評価により, 我々の提案アルゴリズムを用いることで既存の測位手法と比較して精度良く位置を推定することが可能であると言える. 本節の実験では正解座標を取得し, 正確に測位誤差の評価を行う. 以下の実験においては, 交差点付近の建物の高層階にビデオカメラを設置し, 時刻に応じた歩行者の座標を取得できるようにして実験を行った. 正解位置はこの記録された映像と高解像度のオルソ写真 (25cm/pixel) とを比較することで緯度経度の情報として作成した. これによって正解座標が正確に分かっているので, この正解座標と本手法での推定座標との絶対距離を誤差距離とする. また, この実験より性能の比較対象として一般に広く利用されている携帯端末である iPhone4S も利用した. iPhone4S は, 測位計算の内容まで詳細には開示されていないが, 携帯電話網による大まかな位置推定, GPS+GLONASS による衛星測位, Wi-Fi Positioning system と呼ばれる手法の組み合わせで現在位置を算出している. このため, 近年広く利用されているスマートフォン内蔵型 GPS の最先端として, 比較対象とすることとした.

図 6.3 は実験の結果として従来手法と提案手法を同時に航空写真にプロットしたものである. 赤は u-blox からの従来手法, 緑は iPhone の出力, 黄が提案手法で青線は真値である. 本実験は, 前回と同様に東京都千代田区一ツ橋交差点の周辺において行った. 実験時期は 2013

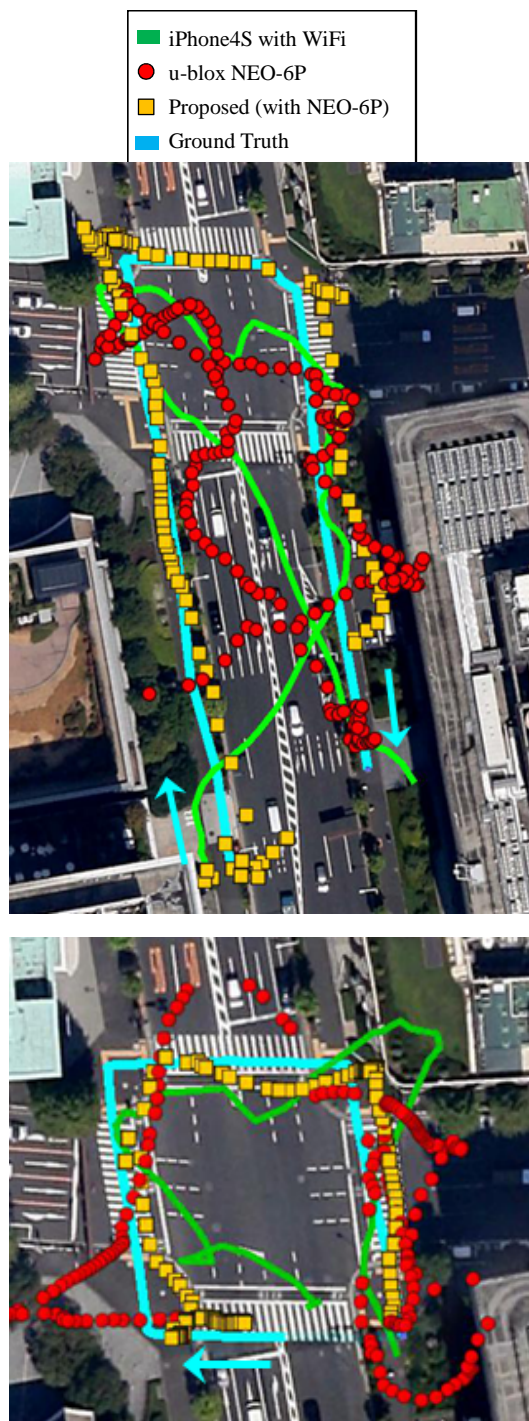


図 6.3. 従来手法と提案手法の測位結果の比較（一ツ橋）

年 8 月である。ただし今回は直線を歩くのではなく、1 つのシナリオ内に右折や横断、信号待ちなどのシチュエーションも含まれるようなシナリオとした。このシナリオでは、受信機を持つ

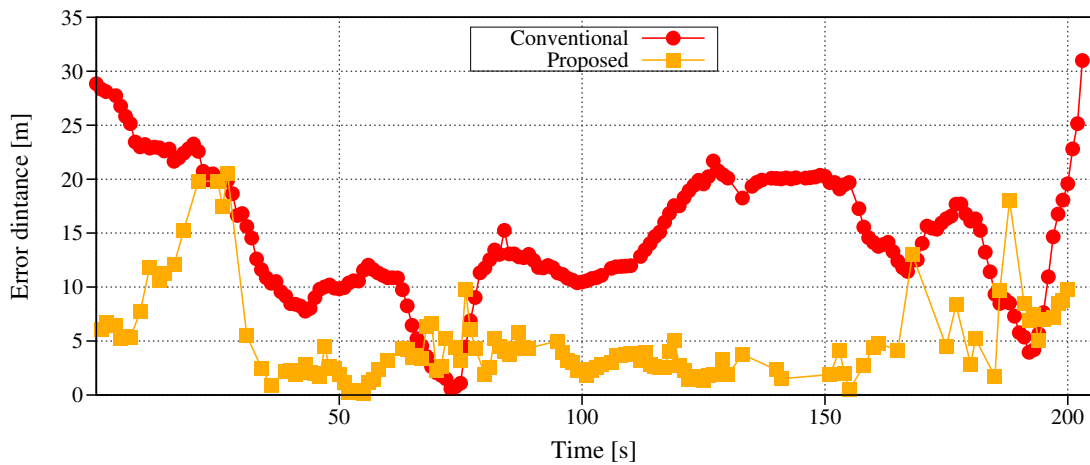


図 6.4. 真値からの測位誤差距離の例

た歩行者が図の中央の道路西側から北方向へ歩き、横断歩道を東側へ渡った後、南下するというものである。もう 1 つは、一ツ橋交差点の周囲を単に一周するというシナリオである。結果の図を見て分かるように、iPhone や u-blox など通常の衛星測位においては、道路の反対側にあるビルからの反射波の影響を受け、測位結果が道の反対側に出てしまうことも多い。これに対して提案手法では、少なくとも道の反対側に算出されることはなくなっている。実際に、シナリオを通して測位誤差がどのように推移しているかを一ツ橋実験における一例として図 6.2 に示した。加えて、異なる場所での実験として品川駅東口周辺の道路においても追加の実験を行った（図 6.5）。こちらの実験時期は 2013 年 11 月である。こちらは、駅前の広場（図中の中央左）から道の南側を東へまっすぐ歩き、折り返して最初の位置に戻るといったシナリオとした。品川駅東口は、狭い道の両側に 3～5 階建てのビルが密集しているような環境となっており、非常に多くのものが存在しており電波への干渉が多い。電波伝搬の様子を図 6.6 に示した。こういった環境においても、実験結果より iPhone や u-blox などの既存の受信機と比べて非常に正解に近い位置に測位されていることが見て取れる。また、測位誤差について定量的な評価を行うため、複数回の試行に対して平均をとり、その最大値、平均値、標準偏差を求めた。結果を表 6.2 に示す。

次に、シナリオを通しての評価ではなく、1 点 1 点の測位結果について評価を行う。図 6.2 には 1 点の推定結果の例を示す。真値（青）は道の左側であるのに対して、受信機の出力した擬似距離からの結果（赤）は右側に、つまり道路の反対側の歩道に出力されている。これは図中の左上からの信号が右側のビルに反射して受信機に到達していることで、左側からの距離が

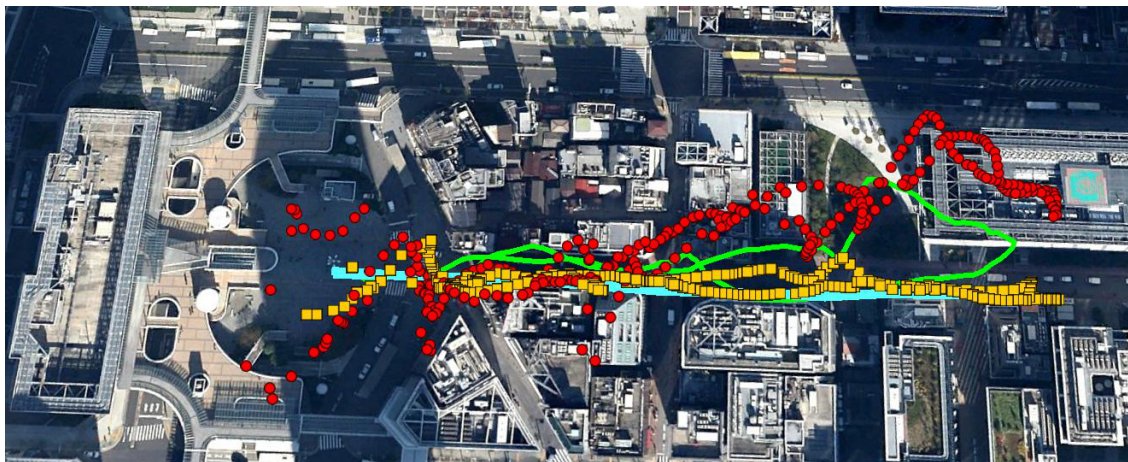


図 6.5. 従来手法と提案手法の測位結果の比較（品川）

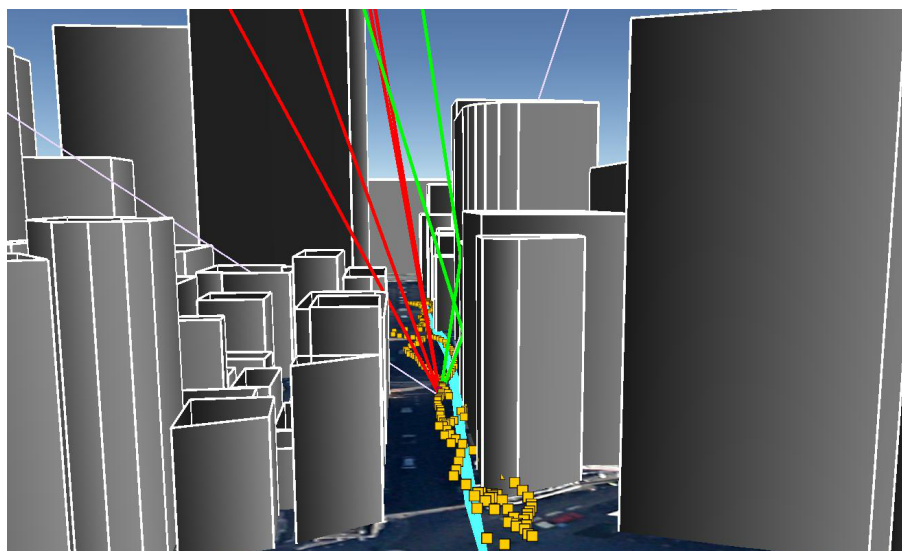


図 6.6. 品川駅東口の実験サイトの電波環境

実際よりかなり大きく測定されてしまっていることが要因と考えられる．これに対して本手法（黄）は受信信号のうち2つの直接波（赤線）と2つの反射波（緑線）を正確に識別することで正解座標に非常に近い結果となっていることが分かる．

ここで測位誤差のみならず，位置を推定できる時間の割合，つまり測位率についても考慮した．高層ビル街では受信機へ到達する信号の多くが NLOS であり，LOS の衛星が4つ以上見えているケース，つまり NLOS 衛星を全て排除しても測位のできる時間の割合はおよそ25%であった．これに対して，提案手法の測位率は71%，NLOS 衛星も含めた GPS の測位方法では91%であった．このことから，提案手法は従来の LOS 衛星のみを用いる手法と比

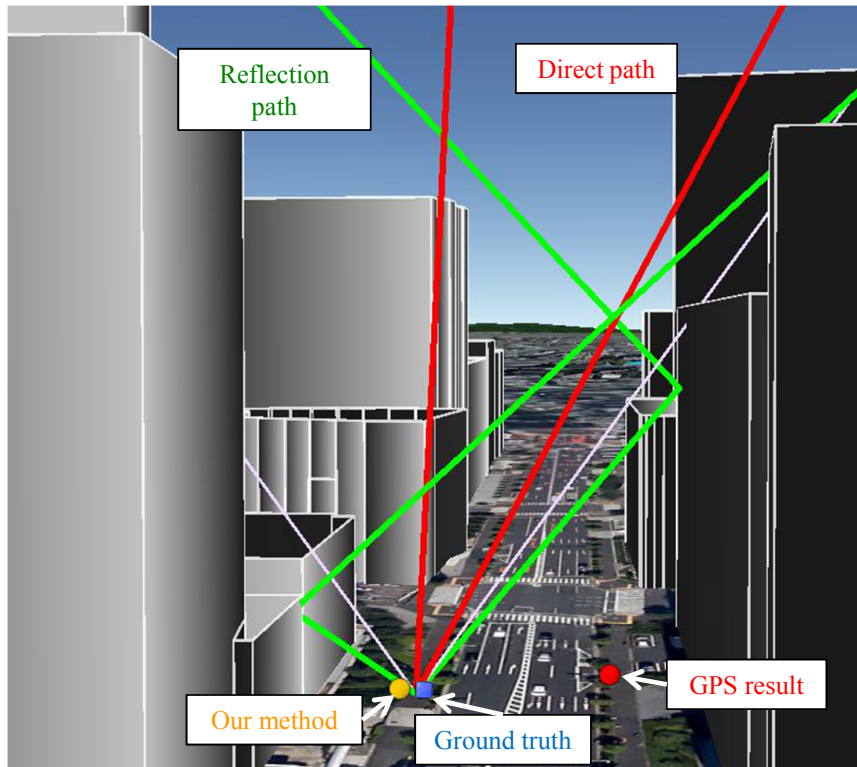


図 6.7. 従来手法と提案手法の比較（1 点のみの推定結果例）

べ、非常に高い測位率を達成していると言える。しかし当然ではあるが、GPS 単体の通常測位よりは低くなっている。これに対しては、何らかのフィルタを用いるなどして移動予測までも含めれば、測位率は簡単に GPS 単体での測位と同等まで高めることが可能である。

6.3 探索時間の評価

前節において本手法の優位性が示されたため、本節では位置推定的高速化を考える。高速化としてはアルゴリズム内の処理を減らすことが重要ではあるが、ここでは最も単純な高速化として候補点の数の削減を行う。削減の方法については5.7節に記述した。

6.3.1 ランダムサンプリングによる探索

メッシュ状に配置した候補点を用いたものと、5.7節において説明したランダムパーティクルを用いたもので1点の位置推定にかかる計算時間を評価する。評価を行うにあたり、Intel® Core™ i7 2.70 GHz の搭載されたノート型パソコンを使用した。また、ソースコードはC++によって記述した。計算時間の評価と同時に測位精度についても評価する必要があるため誤差評価も行う。計算の結果を表6.3に示す。測位誤差についてはどちらもほぼ同等であるのに対して、パーティクルを用いた場合の計算時間は大幅に短縮できていることが見て取れる。

表 6.3. 位置推定の平均誤差および平均計算時間

	平均誤差 [m]	計算時間 [ms]
メッシュ	2054	5.8
ランダム	310	5.6

6.3.2 携帯端末を用いた評価

これまでの計算時間の評価は、パーソナルコンピュータ上で行っており、スマートフォンなどの携帯端末と比べると非常に高速な環境である。実際にユーザが持っている端末で上記のような計算を行うことはCPUパワー、バッテリー容量から考えて非常に難しいと言える。そこでここでは、ユーザは受信機の内蔵（もしくは接続）された携帯端末を持ち、この測定データをインターネットを通してサーバに送り、サーバで算出された座標を受け取るというモデルを考える。3次元構造物マップ、位置推定プログラムはサーバーコンピュータ側に整備し、携帯端末からの衛星データが送られてくると、位置推定プログラムが動作する設定とした。これによって修正された現在地情報を携帯端末側に戻すというシステム構成である。システムの構成

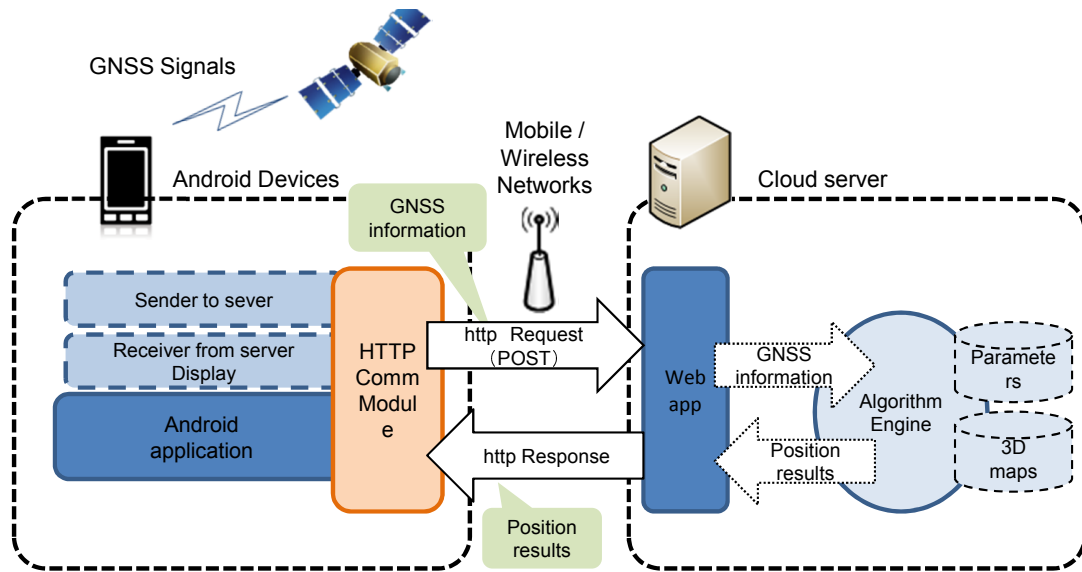


図 6.8. スマートフォン向けシステム構成

図を図 6.8 に示す。このシステムにおいて、ユーザ側でリアルタイムにユーザ位置を認識できるようなシステムを目指した。

今回は、実証実験として Android 端末に u-blox 受信機を接続し、この情報をネットワークを通して研究室内に設置したサーバへと送信している。サーバは必要なデータを受け取り、アルゴリズムを動作させる。これによって得られた推定位置（緯度・経度・高さ）を再びネットワーク経由で Android 端末に送っている。動作の様子を図 6.9 に示す。本システムにおいて、通信・計算を含めたリアルタイムの測位が達成できている。



図 6.9. 使用した Android 端末および受信機

6.4 マルチパスの考慮

これまでの実験はすべて、NLOS 衛星からの反射波を探し、これと矛盾しない位置を探索してきた。つまり LOS の衛星に関しては、測定した擬似距離が正確であるという仮定に基づいてきた。ここからは LOS の衛星に対してもマルチパス波による誤差を考慮し、測位誤差の更なる低減を目指す。5.8 節に紹介した単純なモデルによって、LOS の衛星に対してもその擬似距離に対してマルチパス誤差を補正していく。

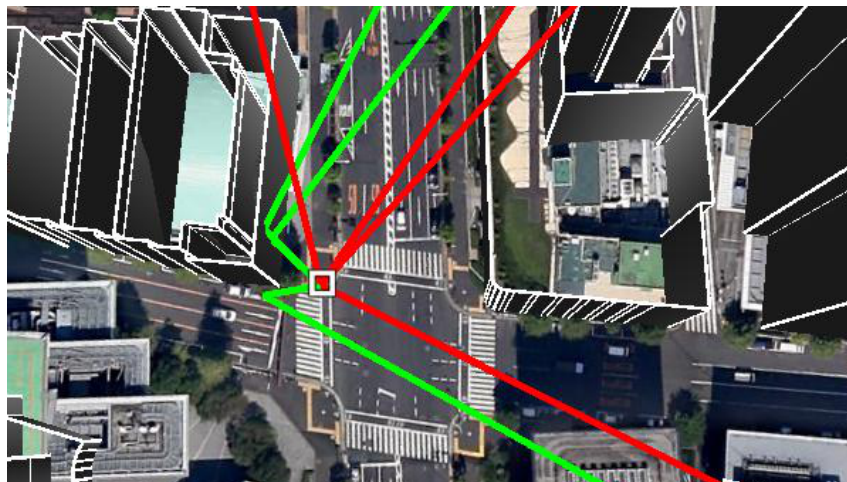
6.4.1 マルチパスを補正した通常測位

まずは仮定したマルチパス誤差のモデルを検証するため、候補点を利用する手法ではなく、受信機の測定した擬似距離に対してマルチパス誤差を補正することで測位結果が改善する例をいくつか示す。

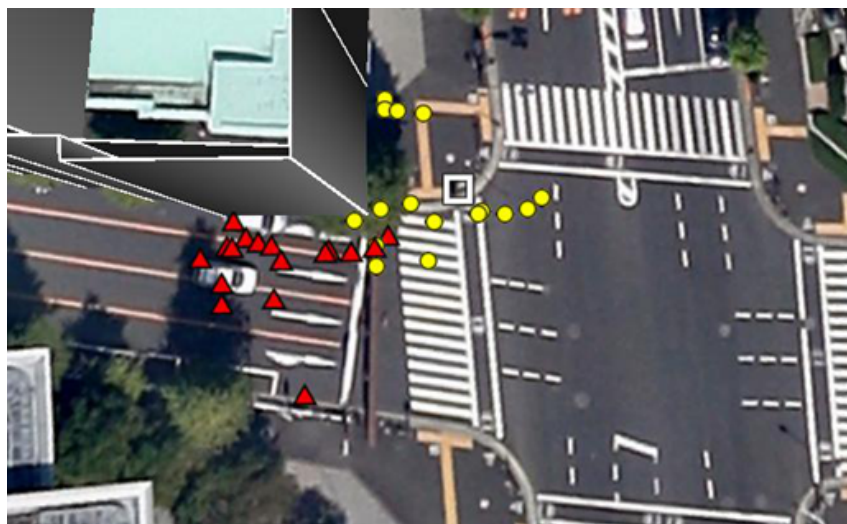
図 6.10 は、図中の四角の位置に 20 秒程静止している時の測位結果を示している。正解位置からのレイトレーシングを行うことで、受信している信号のどれがマルチパスとなっているかが判別できる。このケースでは左側にある建物の影響で 4 つある信号のうち 3 つがマルチパスとなっていることが分かる。図 6.10(a) の赤線が直接波、緑線が反射波を表している。図 6.10(b) の赤三角は受信機の出力した擬似距離をそのまま使用して測位計算を行った結果である。黄色の丸はそこから上記モデルによるマルチパス誤差を算出し、これを補正した擬似距離によって測位計算を行った結果である。このように測定した擬似距離にはマルチパス誤差が含まれており、この 20 秒間の平均誤差は 13.7m であった。ここからマルチパスを補正した結果、平均誤差は 6.8m まで低減することができた。

他の場所における例も図 6.11 に示す。この場所においては、右側にある建物の影響で 4 つある信号のうち 1 つがマルチパスとなっていることが分かる。これは図中の四角に 15 秒程静止している時の測位結果を示している。図 6.10(b) は測位結果は表しているが、この 15 秒間の平均誤差は 11.1m であった。ここからマルチパスを補正した結果、平均誤差は 6.6m まで低減することができた。

以上より、簡単なマルチパス誤差のモデルを用いても、ある程度はマルチパスの影響を低減できると言える。続いて提案手法にマルチパスの考慮も組み込むことを考えていく。まず、マルチパスを考慮したことによる候補点の評価について 1 点 1 点を詳細に確認していく。



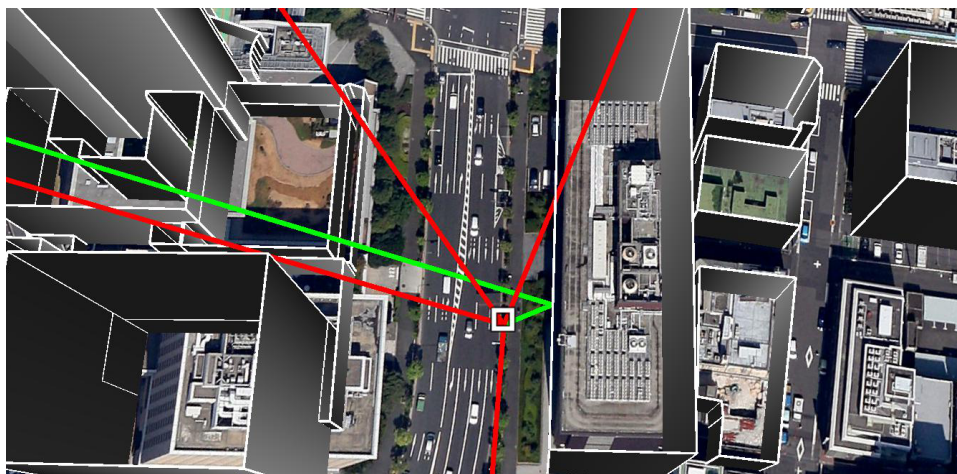
(a) 正解位置でのレイトレーシング



(b) 擬似距離からの測位結果（赤：測定擬似距離をそのまま使用，黄：モデルにより求めたマルチパス誤差補正後の擬似距離を使用）

図 6.10. 測位結果におけるマルチパス誤差の効果

まずは一ツ橋交差点の北東において検証した（図 6.12）マルチパスを考慮しない場合，正解座標（図中のレイが集まっている場所）において，測定擬似距離と推定擬似距離の差の平均が 2.1m となり，候補点の分布は以下の図 6.12(b) のようになっている．赤点が尤度の高い候補点，緑点が尤度の低い候補点，黄点がすべての候補点の加重平均（＝推定結果）である．この推定結果の誤差は 3.3 m である．これに対してマルチパスを考慮した場合，擬似距離の差の平均が 0.5m と小さくなっており，その推定結果も正解座標に近づいている（図 6.12(c)）．このときの推定結果の誤差は 0.5m であり改善がみられる．



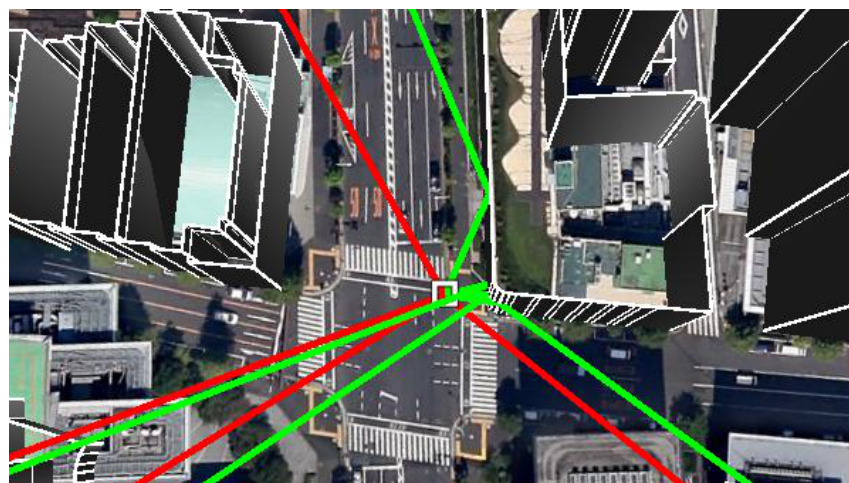
(a) 正解位置でのレイトレーシング



(b) 擬似距離からの測位結果 (赤：測定擬似距離をそのまま使用，黄：モデルにより求めたマルチパス誤差補正後の擬似距離を使用)

図 6.11. 測位結果におけるマルチパス誤差の効果

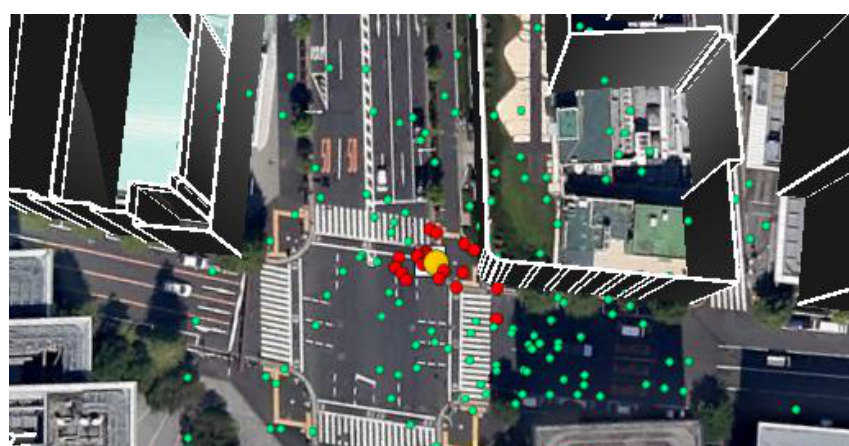
続いての交差点の北西での場合を紹介する (図 6.13). このケースでは左側にある建物の影響で 4 つある信号のうち 3 つがマルチパスとなっている (図 6.13(a)). マルチパスを考慮しない場合, 正解位置での擬似距離差の平均は 1.9m, 推定結果の誤差は 12.9 m である (図 6.13(b)). これに対しマルチパスを考慮すると, 擬似距離差の平均は 1.5m, 推定結果の誤差は 2.3 m と改善される (図 6.13(c)). 図 6.14 でも同様である.



(a) 正解位置でのレイトレーシング

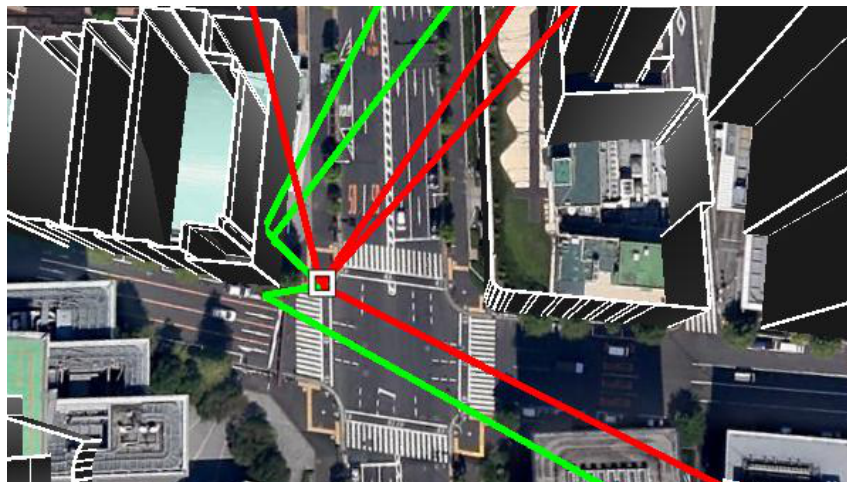


(b) マルチパス考慮前の候補点



(c) マルチパス考慮後の候補点

図 6.12. 候補点の分布（赤：尤度の高い候補点，緑：尤度の低い候補点，黄：加重平均（＝推定結果））



(a) 正解位置でのレイトレーシング

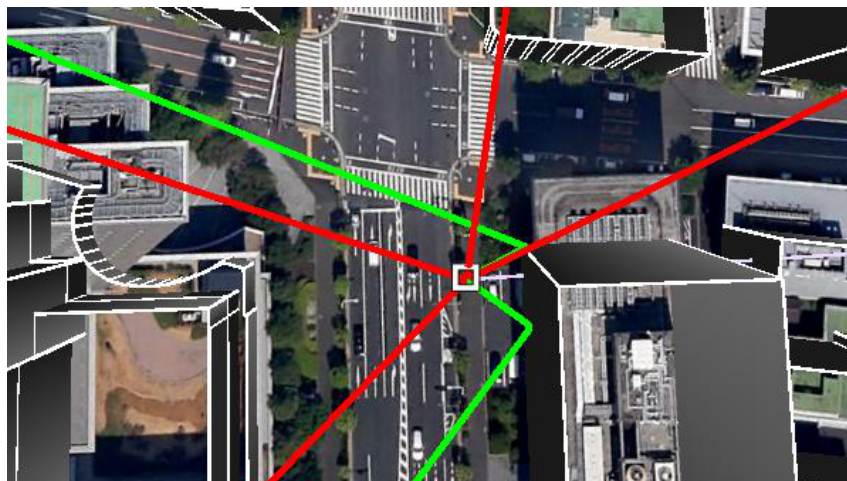


(b) マルチパス考慮前の候補点



(c) マルチパス考慮後の候補点

図 6.13. 候補点の分布（赤：尤度の高い候補点，緑：尤度の低い候補点，黄：加重平均（＝推定結果））



(a) 正解位置でのレイトレーシング



(b) マルチパス考慮前の候補点



(c) マルチパス考慮後の候補点

図 6.14. 候補点の分布 (赤：尤度の高い候補点，緑：尤度の低い候補点，黄：加重平均 (=推定結果))

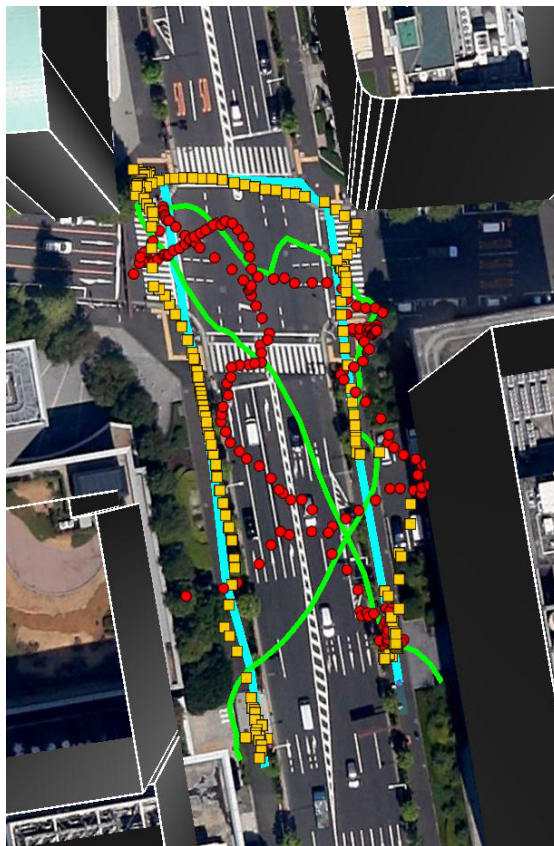


図 6.15. マルチパスを考慮した際の測位結果（一ツ橋）

このように、都市部の歩道はほとんどが壁に面しているため、非常に多くの信号はマルチパスの影響を受けている。したがってこのマルチパス誤差を考慮することで、測位精度の向上が見込まれる。これより式 (5.2) で示した推定擬似距離を以下のように変更して再度検証実験を行った。

$$\rho = \begin{cases} r + c(\delta t^r - \delta t^{sv}) + I + T + \varepsilon^{\text{reflection}(i)}, & (\text{衛星 } n \text{ が } \mathbf{P}^{(i)} \text{ から NLOS}) \\ r + c(\delta t^r - \delta t^{sv}) + I + T + \varepsilon^{\text{multipath}(i)}, & (\text{衛星 } n \text{ が } \mathbf{P}^{(i)} \text{ から LOS}) \end{cases} \quad (6.1)$$

ただし反射波が存在しない NLOS 衛星に関しては使用しないこととしている。

この結果を表 6.4, 図 6.15 に示す。これより分かるように、精度に関してマルチパスを考慮していないものより約 1 m 向上し、4.7 m となった。また、マルチパス逆相の可能性を考慮したことで測位率は 71% から 84% へ向上した。

表 6.4. 試行の平均誤差の最大値，時間平均，標準偏差（マルチパス考慮）

Case	最大値 [m]	平均値 [m]	標準偏差 1σ [m]
Without filter	43.3	5.3	5.1
With filter	34.4	4.7	3.0

第 7 章

結論と今後の課題

本章では、本研究のまとめと今後の課題について述べる。

7.1 本研究のまとめ

本論文では、位置推定における重要な要素技術である GNSS，中でも現在最も普及している GPS の都市部において精度が劣化してしまうという問題に対して，3 次元地図情報を用いた高精度測位手法について提案した．本提案では，2 次元地図情報と高度情報とを組み合わせた 3 次元構造物マップを作成し，レイトレーシングを用いて簡易的に衛星が LOS であるか NLOS であるかの判別を行っている．また，反射波が見つかった場合には同時にその遅延距離を算出している．受信機の真の位置とレイトレーシングの基準となる位置，この 2 つが異なるためにレイトレーシングの結果に誤りが生じる問題に対して，GPS で求まる座標を中心にしてその周囲に候補点をランダムにサンプリングし，その各候補点についてもっともらしさを評価し，正解位置の探索を行うようにした．受信機の出力する擬似距離，そこから求められる測位位置，前回の推定位置，受信信号強度，衛星の可視不可視などの情報を総合的に用いて，無矛盾な候補点の探索を行うようにした．この手順を簡単にまとめると，

- GPS 結果および前回の推定位置の周囲に候補点を用意する．
- 候補点ごとに NLOS 衛星をレイトレーシングによって判定，遅延距離を求める．
- レイトレーシングと受信データとの整合性を確認する．
- 擬似距離の類似度および仮測位値の類似度から全ての候補点を評価し，現在位置の推定を行う

という流れである．これを用いて都内で実際に取得した衛星データを用いて複数回の検証を行った結果，従来手法と比較して測位誤差の最大値，平均値，標準偏差のすべてにおいて優位性が見られたため，本研究の有用性が示せたと考えられる．また，更なる精度および測位率の向上と，計算速度の改善のために

- メッシュ状の候補点からランダムサンプリングへ変更．
- ビルの誤差を考慮し，誤差モデルを導入．信号のパスをより多く見つけられるように修正．
- Android 端末を用いた実地的な位置推定アプリケーションの作成と評価．
- NLOS 衛星のみでなく，LOS 衛星に関してもマルチパス誤差の考慮と改善．
- 衛星数が十分にあるときには，擬似距離誤差の多い外れ値の信号は利用しない操作の追加．

など，様々な改良を行った．最終的な測位システムとして，都市部においても非常に高精度に位置推定のできる測位方法を確立することができたと言える．

7.2 今後の課題

7.2.1 3次元構造物マップの間違いに対する考察

本研究においてもっとも危惧すべき点は，保持している3次元構造物マップが現実の建物と整合していないことである．これは，測量の際のエラーによってマップが間違っている場合もあるが，それよりも建物が建て替えによって変わってしまうことが多い．実際に，本研究において実験データを詳細に検証している際に，1月の実験の時には存在していた建物8月の実験の時には取り壊されていたということがあった．しかしこういった事実でさえ，GPSのデータおよび移動経路などから判別することが可能であった．このため，サーバにアルゴリズムを持たせクライアント（GPS受信機）が多数いるような状況では，多くのGPSデータが集まるため建物の有無を自動的に検出することも比較的容易にできると考えられる．これに加えて，非常に多い数の受信データを集めることで，3次元地図に存在していない建築物を推定することが考えられる．3次元地図に存在しない構造物があるような場合，その陰にある衛星に関してはマルチパス推定などの際に矛盾が生じるため，外れ値となり測位に利用されない．したがって測位自体は従来の手法通り行うことができ，さらにその座標からLOS/NLOS判定に矛

盾がある衛星という情報が集まる。こういった多数集めることで、3次元地図に存在しないような構造物もその形状を推定するような手法も考えられる。

7.2.2 擬似距離の間違いについて

現状のアルゴリズムでは候補点からレイトレーシングを行うが、これによる推定擬似距離が間違うことも考えられる。この原因としては、電離層遅延および対流圏遅延のモデル補正誤差、反射波の経路推定間違い、複数反射波、もしくは複数の一回反射波の影響、などが挙げられる。電離層遅延および対流圏遅延の誤差に関しては、例えば準天頂衛星の L1-SAIF 信号や、静止衛星による補強システム SBAS（日本では MSAS）からの情報を利用するなどが考えられる。また反射波に関しては、より正確な伝搬経路の推定が求められる。現在、反射パスが複数ある時には最も遅延の短い反射波を採用している。これに加えて、もし擬似距離の類似度が低いような場合には、さらに遅延の大きい反射波を採用して再評価する操作も入っている。しかし、それでも信号の伝搬を完全にシミュレートすることは不可能であるので、推定擬似距離にはエラーが含まれることを許容しなければならない。特に、本研究におけるマルチパス誤差のモデルは非常に簡単なものを用いているため、複数本の反射波がほぼ同時に到達することには対処できていない。これらについて、もっと正確に信号の伝搬の推定が可能となれば、推定擬似距離に含まれる誤差を小さくすることができる。これによって擬似距離類似度の閾値を小さくすることができ、その結果として推定位置はより正解に近いものとなることが考えられる。

7.2.3 衛星数の不足

我々のアルゴリズムでは NLOS 衛星からの信号も除外せず、積極的に使うことで真の位置を探している。しかし、都市部においてはそれでも衛星数が不足することがあり、測位率が低下してしまう。この大きな原因の1つにレイトレーシングによる推定失敗があげられる。これはつまり、受信している信号のいくつかは NLOS と判定できるがその反射パスが見つからないような場合である。反射波の探索について本研究では一回反射のみを考慮しているため、複数回の反射や回折、散乱などの影響を受けながら受信機に到達したもの、もしくは構造物マップの間違いのどちらかと考えられる。これに対する対策の1つとしては、回折の影響を考えるなどして利用できる衛星数を増やすことが考えられる。ただし複雑な処理を追加することになるため、どうしても計算量が増加してしまう。加えて、誤った経路を検出してしまう可能性も

ある．このため，本研究においてはシンプルさを追求し，一回反射波のみを取り扱うこととした．衛星数が不足することに対しての対策としては，昨今の主流である Multi-GNSS，つまり GPS 以外の衛星測位システムとの組み合わせを考えることが効率的ではないかと考えられる．これであれば，現在のアルゴリズムに大きな変更を加える必要はなく，更なる測位率の改善および測位精度の改善も期待できる．またこれに関連する話題として，準天頂衛星みちびきからの様々な補強信号の利用，複数周波数帯の利用，位相測定による距離測定などの技術を採用，組み合わせるなどして更なる高精度化が考えられる．

謝辞

本研究を進めるにあたり、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感謝いたします。実験の計画方法、実験データに対する考察、解析方法のみならず、論文の構成からプレゼンテーションの構成に至るまで様々な指導をいただきました。私の研究で解決できない問題があるときなど、非常に長時間の議論を何度も交わしてアドバイスをいただきました。おかげさまで非常に良い成果を得ることができ、大変感謝しております。先生の教えは私の中の強い柱として、今後の生活の1つの支えとなると信じています。

秘書である三輪祐子さんには、研究生生活を送るにあたって多くの点でサポートいただきました。ご迷惑をおかけすることもありましたが、いつでも親切に対応してくださいました。特に、バイオ実験室の片づけや廃棄物処理の際にはたくさんご面倒をおかけしました。この場を借りて感謝いたします。

博士研究員の古艶磊さんには、研究における技術的なアドバイス、論文の論理展開、研究方針の相談など様々な面で助けていただきました。本当にありがとうございました。

研究室の先輩にあたる日坂翔馬さんには、研究室での基本的な生活態度から始まり、実験の手順、装置の使い方、議論の進め方など教えていただき、大変お世話になりました。また、研究テーマが同じ電波ということから、研究の方針、実験の手法など非常に参考になるアドバイスをいただきました。電波伝搬について詳しい議論をできる学生が他にいなかったこともあり、大変長い時間議論に付き合っていただいたこともありました。ご迷惑もおかけしましたが、本当に感謝しております。

高橋俊充さん、新見洋正さんの両先輩には、1つ上の先輩として議論に付き合っていただいたり、進路や大学院生活の相談に乗っていただいたりととても助かりました。今の研究室での生活があるのもお二方のおかげです。本当にありがとうございました。

同期の青木尚久君、垣内紀明君、矢野進也君には、日常の些細な疑問から、研究室での生活、研究の方針や意義などについて大変多くの相談に乗っていただいたり、意見をくださいま

した。愚痴っぽくなってしまうことも多く空気を悪くさせることもありましたが、大変感謝しております。

後輩の陳飛宇君は私の研究を引き継ぐにあたり、先輩として十分な指導ができなかったことをここにお詫びいたします。1年間という短い間でしたが、幾度も実験に付き合ってくださいました。また、研究内容に関しても非常に素早く知識を習得していただいたおかげで、深い議論を行うことができました。本当に感謝しています。言語や文化の違う国で研究生活を送るのは大変かと思いますが、頑張ってください。今後益々この技術が進歩していくことを願っています。

砂川健一君には、入ってすぐのころから何度か実験を手伝っていただき、ありがとうございました。また、車の担当や物品の購入など様々な仕事を引き受けていただいて、感謝しております。

最後に、2年間の大学院生活を過ごすに当たってお世話になりましたすべての方に感謝いたします。

2014年2月6日

発表文献

論文誌

- [1] S. Miura and S. Kamijo,, “GPS Error Correction by Multipath Adaptation,” *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, pp. 1–8, 2014.

他 1 件掲載待ち, 1 件投稿中

国際学会

- [2] S. Miura, S. Hisaka and S. Kamijo, “GPS Multipath Detection and Rectification using 3D Maps,” in *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2013 16th International IEEE Conference on*. IEEE, 2013, pp. 1528–1534.

他 2 件

国内研究会等

- [3] 三浦俊祐, 上條俊介, “3 次元地図情報を用いたマルチパス推定による GNSS 測位精度の改善,” 電子情報通信学会技術研究報告, 信学技報, vol.113(163), pp. 37–42, 2013.

参考文献

- [1] T. Suzuki, M. Kitamura, Y. Amano, and T. Hashizume, “High-accuracy GPS and GLONASS positioning by multipath mitigation using omnidirectional infrared camera,” in *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, may 2011, pp. 311–316.
- [2] M. Obst, S. Bauer, P. Reisdorf, and G. Wanielik, “Multipath detection with 3D digital maps for robust multi-constellation GNSS/INS vehicle localization in urban areas,” in *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2012 IEEE*, june 2012, pp. 184–190.
- [3] M. Braasch, “Performance comparison of multipath mitigating receiver architectures,” in *Aerospace Conference, 2001, IEEE Proceedings.*, vol. 3, 2001, pp. 3/1309–3/1315 vol.3.
- [4] G. MacGougan, G. Lachapelle, R. Klukas, K. Siu, L. Garin, J. Shewfelt, and G. Cox, “Performance analysis of a stand-alone high-sensitivity receiver,” *GPS Solutions*, vol. 6, no. 3, pp. 179–195, 2002.
- [5] O. Mezentsev, Y. Lu, G. Lachapelle, and R. Klukas, “Vehicular navigation in urban canyons using a high sensitivity GPS receiver augmented with a low cost rate gyro,” in *Institute of Navigation GPS Conference*, vol. 15, 2002, pp. 263–369.
- [6] J. Wang and Y. Gao, “High-sensitivity GPS data classification based on signal degradation conditions,” *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 2, pp. 566–574, 2007.
- [7] G. Strang and K. Borre, *Linear algebra, geodesy, and GPS*. Siam, 1997.
- [8] G. A. McGraw, T. Murphy, M. Brenner, S. Pullen, and A. Van Dierendonck, “Development of the LAAS accuracy models,” in *Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS*

- 2000), 2000, pp. 1212–1223.
- [9] G. Navstar, “Space segment/navigation user interfaces,” *Arinc research corporation*, 2000.
 - [10] E. D. Kaplan and C. J. Hegarty, *Understanding GPS: principles and applications*. Artech house, 2005.
 - [11] C. Yinger, W. Feess, V. Nuth, and R. Haddad, “Gps accuracy versus number of nima stations,” in *Proc. of ION GPS*, vol. 3.
 - [12] D. L. Warren and J. F. Raquet, “Broadcast vs. precise gps ephemerides: a historical perspective,” *GPS Solutions*, vol. 7, no. 3, pp. 151–156, 2003.
 - [13] W. Feess and S. Stephens, “Evaluation of gps ionospheric time-delay model,” *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, no. 3, pp. 332–338, 1987.
 - [14] J. Saastamoinen, “Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites,” *Geophysical Monograph Series*, vol. 15, pp. 247–251, 1972.
 - [15] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins, “GPS theory and practice,” 1997.
 - [16] H. Hopfield, “Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data,” *Journal of Geophysical research*, vol. 74, no. 18, pp. 4487–4499, 1969.
 - [17] H. Black and A. Eisner, “Correcting satellite doppler data for tropospheric effects,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)*, vol. 89, no. D2, pp. 2616–2626, 1984.
 - [18] I. Ifadis, *The atmospheric delay of radio waves: Modeling the elevation dependence on a global scale*, 1986.
 - [19] A. Niell, “Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths,” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, vol. 101, no. B1, pp. 3227–3246, 1996.
 - [20] 小島祥子, 高橋新, and 二宮芳樹, “汎用 gps と車載レーザレーダを用いた高精度自車両位置推定,” *情報処理学会論文誌*, vol. 50, no. 1, pp. 64–74, 2009.
 - [21] P. Lindner and G. Wanielik, “3D LIDAR processing for vehicle safety and environment recognition,” in *Computational Intelligence in Vehicles and Vehicular Systems, 2009. CIVVS '09. IEEE Workshop on*, 30 2009–april 2 2009, pp. 66 –71.

- [22] L. Jin, Q. Niu, H. Hou, H. Shunxi, and W. Fangrong, "Study on vehicle front pedestrian detection based on 3D laser scanner," in *Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE), 2011 International Conference on*, dec. 2011, pp. 735–738.
- [23] H. Kim, Y. Shibayama, and S. Kamijo, "Acquisition of pedestrian trajectory using on-board monocular camera," in *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2011 14th International IEEE Conference on*, oct. 2011, pp. 544–549.
- [24] S. Hisaka and S. Kamijo, "Positioning of road users by RSSI with road surface reflection model," in *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2012 15th International IEEE Conference on*. IEEE, 2012, pp. 54–60.
- [25] N. Suganuma and T. Uozumi, "Precise position estimation of autonomous vehicle based on map-matching," in *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011 IEEE*, june 2011, pp. 296–301.
- [26] P. Fenton, B. Falkenberg, T. Ford, K. Ng, and A. Van Dierendonck, "Novatel's gps receiver, the high performance oem sensor of the future," in *Proc. of GPS*, vol. 91, 1991, pp. 49–58.
- [27] A. Van Dierendonck, P. Fenton, and T. Ford, "Theory and performance of narrow correlator spacing in a GPS receiver," *Navigation*, vol. 39, no. 3, pp. 265–283, 1992.
- [28] B. Townsend and P. Fenton, "A practical approach to the reduction of pseudorange multipath errors in a L1 GPS receiver," in *Proceedings of the 7th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Salt Lake City, UT, USA*, 1994.
- [29] L. Garin, F. van Diggelen, and J.-M. Rousseau, "Strobe & edge correlator multipath mitigation for code," in *Proceedings of the 9th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1996)*, 1996, pp. 657–664.
- [30] B. Townsend, P. Fenton, K. Van Dierendonck, and D. Van Nee, "Performance evaluation of the multipath estimating delay lock loop," *NAVIGATION-LOS ANGELES AND WASHINGTON-*, vol. 42, pp. 503–514, 1995.
- [31] P. Fenton and J. Jones, "The Theory and Performance of NovAtel Inc.'s Vision Correlator," *ION GNSS*, 2005.

-
- [32] 久保信明, 安田明生, and 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.
 - [33] 土本和彦, 久保信明, 海老沼拓史, and 安田明生, “反射波が支配的な状況下でのマルチパス誤差低減,” *日本航海学会論文集*, no. 118, pp. 221–227, 2008.
 - [34] R. G. Brown, “A baseline gps raim scheme and a note on the equivalence of three raim methods,” *Navigation*, vol. 39, no. 3, pp. 301–316, 1992.
 - [35] Y. C. Lee and D. G. O’ Laughlin, “A performance analysis of a tightly coupled gps/inertial system for two integrity monitoring methods,” *Proceedings of ION GPS, Nashville*, pp. 14–17, 1999.
 - [36] T. Iwase, N. Suzuki, and Y. Watanabe, “Estimation and exclusion of multipath range error for robust positioning,” *GPS solutions*, vol. 17, no. 1, pp. 53–62, 2013.
 - [37] N. Kubo, T. Suzuki, A. Yasuda, and R. Shibasaki, “An effective method for multipath mitigation under severe multipath environments,” in *Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2005)*, 2005, pp. 2187–2194.
 - [38] C. Pinana-Diaz, R. Toledo-Moreo, D. Betaille, and A. Gomez-Skarmeta, “GPS multipath detection and exclusion with elevation-enhanced maps,” in *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2011 14th International IEEE Conference on*, oct. 2011, pp. 19–24.
 - [39] F. Peyret, D. Bétaille, and M. Florian, “Non-line-of-sight GNSS signal detection using an on-board 3d model of buildings,” *Proceedings of the IEEE ITST*, 2011.
 - [40] Y. SUH and R. SHIBASAKI, “Evaluation of Satellite-Based Navigation Services in Complex Urban Environments Using a Three-Dimensional GIS,” *IEICE transactions on communications*, vol. 90, no. 7, pp. 1816–1825, jul 2007.
 - [41] E. Costa, “Simulation of the Effects of Different Urban Environments on GPS Performance Using Digital Elevation Models and Building Databases,” *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, vol. 12, no. 3, pp. 819–829, sept. 2011.
 - [42] J. Marais, M. Berbineau, and M. Heddebaut, “Land mobile GNSS availability and multipath evaluation tool,” *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 54,

no. 5, pp. 1697 – 1704, sept. 2005.

- [43] H. L. Bertoni, *Radio propagation for modern wireless systems*. Pearson Education, 1999.
- [44] M. F. Iskander and Z. Yun, “Propagation prediction models for wireless communication systems,” *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 50, no. 3, pp. 662–673, 2002.