

自動車運転支援のための
高精度自車位置推定に関する研究

小島 祥子

目次

第 1 章	序論	1
1.1	高度交通システム (ITS) と運転支援システム (ADAS)	2
1.2	運転支援システムと自車位置推定精度の関係	3
1.3	本研究の目的と位置づけ	7
1.4	本論文の構成	9
第 2 章	運転支援のための位置推定技術に関する現状と本研究のアプローチ	11
2.1	屋外環境における自車位置推定技術の現状	11
2.1.1	GPS を用いた位置推定の原理	12
2.1.2	GPS を用いた位置推定の現状と課題	16
2.1.2.1	GPS 単独測位	17
2.1.2.2	D-GPS (Differential GPS)	19
2.1.2.3	PPP (Precise Point Positioning)	19
2.1.2.4	干渉測位 K-GPS (Kinematic-GPS)	20
2.1.3	GPS と INS の統合による位置推定の現状と課題	21
2.1.3.1	ルーズカップリング (Loosely Coupled Integration)	21
2.1.3.2	タイトカップリング (Tightly Coupled Integration)	22
2.1.3.3	ウルトラタイトカップリング (Ultra Tightly Coupled Integration)	23
2.2	本研究のアプローチ	24
2.2.1	周辺監視用センサの活用による高精度化	25
2.2.2	GPS Raw データを活用した疑似的な衛星数増加による高精度化	26
第 3 章	周辺監視用センサを活用した SLAM 型自車位置推定による高精度化	29

3.1	はじめに	29
3.2	関連研究と本研究のアプローチ	30
3.2.1	GPS と周辺監視用センサを利用した従来研究	30
3.2.2	SLAM の従来研究	30
3.2.3	本研究のアプローチ	31
3.3	提案手法 1-1 : SLAM 型高精度自車位置推定手法	32
3.3.1	本手法の概要	32
3.3.2	拡張 Kalman フィルタを用いた解法	34
3.3.2.1	Kalman フィルタと拡張 Kalman フィルタの概説	35
3.3.2.2	提案手法 1-1 への拡張 Kalman フィルタの適用	36
3.4	実験	39
3.4.1	実験条件	39
3.4.2	実験結果	41
3.5	考察	43
3.5.1	周辺静止物間隔と自車位置推定精度の関係	43
3.5.2	SLAM 型位置推定と高精度地図利用の比較	47
3.5.3	実環境における周辺静止物間隔の調査	48
3.6	本章のまとめ	50
第 4 章	周辺監視用センサに基づく運動推定型自車位置推定による高精度化	53
4.1	はじめに	53
4.2	関連研究と本提案のアプローチ	54
4.2.1	関連研究	54
4.2.2	本提案のアプローチ	54
4.3	提案手法 1-2 : 運動推定型高精度自車位置推定	55
4.3.1	本手法の概要	55
4.3.2	拡張 Kalman フィルタを用いた解法	57
4.4	実験	58
4.4.1	実験条件	58
4.4.2	自車運動推定実験結果	58
4.4.3	自車位置推定実験結果	59

4.5	周辺監視用センサを用いた自転車位置推定の高精度化に関する考察	61
4.6	本章のまとめ	63
第 5 章	走行軌跡上の GPS Raw データ活用による自転車位置推定の高精度化	65
5.1	はじめに	65
5.2	関連研究と本研究のアプローチ	66
5.2.1	関連研究のアプローチ	66
5.2.2	本研究のアプローチ	67
5.3	提案手法 2-1：走行軌跡上の GPS Raw データ活用型高精度自転車位置推定	68
5.3.1	手法の概要	68
5.3.2	GPS Doppler を用いた高精度軌跡推定	70
5.3.2.1	GPS Doppler の特徴と速度推定	71
5.3.2.2	GPS Doppler を用いた速度・軌跡推定精度の評価	74
5.3.3	バンドルアジャスト型位置推定とその解法	78
5.4	実験	81
5.4.1	実験条件	81
5.4.2	実験結果	82
5.5	考察	83
5.6	本章のまとめ	84
第 6 章	複数走行分の GPS Raw データ活用による自転車位置推定の高精度化	87
6.1	はじめに	87
6.2	関連研究と本研究のアプローチ	88
6.2.1	関連研究のアプローチ	88
6.2.2	本研究のアプローチ	89
6.3	提案手法 2-2：複数走行分の GPS Raw データ活用型高精度自転車位置推定	90
6.3.1	手法の概要	90
6.3.2	走行間相対位置関係推定	92
6.3.3	インテグラル型位置推定とその解法	95
6.4	実験	97
6.4.1	実験条件	97
6.4.2	実験結果	100

6.5	考察	103
6.5.1	複数走行間の相対位置推定精度	104
6.5.2	走行回数と位置推定精度の関係	105
6.6	本章のまとめ	109
第 7 章	結論	111
7.1	本研究のまとめ	111
7.2	今後の課題と展望	115
付録 A	高精度自転車位置推定の地図作成への応用	119
A.1	はじめに	119
A.2	高精度地図作成の課題と解決策の一検討	121
A.2.1	高精度地図作成の現状と課題	122
A.2.2	高精度地図作成手法の一検討	123
A.3	車載カメラを用いたプローブ型高精度地図作成	125
A.3.1	高精度自転車位置推定手法の地図作成への適用	125
A.3.2	高精度路面画像作成手法の概要	125
A.4	ローカルマップとグローバルマップの作成例	127
A.5	まとめ	128
謝辞		133
参考文献		137
研究業績		149

表目次

2.1	GPS を用いた位置推定手法と精度	17
3.1	レーザレーダ (RIEGL 社製 LMS-Q140i-80) の諸元	40
3.2	進行方向位置推定誤差の数値評価	42
3.3	周辺静止物の配置とレーザレーダ計測誤差及び GPS 測位誤差設定条件	44
3.4	自車位置推定誤差 2RMS 評価 (提案手法)	46
3.5	自車位置推定誤差 2RMS 評価 (高精度地図利用)	48
4.1	レーザレーダを用いた自車運動推定誤差の評価	60
4.2	進行方向位置推定誤差数値評価	61
4.3	SLAM 型と運動推定型の特徴	62
5.1	GPS Doppler を用いた速度推定精度	77
5.2	実験機器一覧	82
6.1	実験環境と計測条件一覧	98
6.2	走行回数と位置推定誤差の関係	109
A.1	カーナビ地図と高精度地図	120

目次

1.1	交通事故件数と交通事故死者数の変遷	3
1.2	運転支援システムと自車位置推定精度の関係	6
1.3	本研究で提案する各手法が扱う情報	10
2.1	GPS を用いた単独測位の概略図	12
2.2	GPS の搬送波/PN コード/送信波の例	13
2.3	受信機による伝搬時間計測	14
2.4	GPS 単独測位性能の代表例	18
2.5	GPS と INS のルーズカップリングによる位置推定例	22
2.6	GPS と INS のタイトカップリングによる位置推定例	23
2.7	GPS と INS のウルトラタイトカップリングによる位置推定例	24
3.1	SLAM 型高精度自車位置推定の仕組み	33
3.2	SLAM 型高精度自車位置推定の推定手順	34
3.3	SLAM 型高精度自車位置推定における座標系	37
3.4	実環境シーン例	41
3.5	データ収集環境における周辺静止物の配置	41
3.6	実環境における SLAM 型高精度自車位置推定の結果	42
3.7	周辺静止物の設置間隔一例 (100m 間隔の場合)	44
3.8	進行方向位置推定誤差 (周辺静止物間隔 50 m)	45
3.9	進行方向位置推定誤差 (周辺静止物間隔 500 m)	45
3.10	自車位置推定誤差 2RMS 分布 (提案手法)	46
3.11	自車位置推定誤差 2RMS 分布 (高精度地図利用)	48
3.12	実環境調査対象道路	49

3.13	周辺静止物の出現間隔評価結果	50
4.1	運動推定型高精度自転車位置推定の仕組み	55
4.2	運動推定型高精度自転車位置推定の推定手順	56
4.3	レーザレーダの反射パターンと時系列間照合による移動量推定	59
4.4	レーザレーダを用いた車速推定とヨーレイト推定結果	60
4.5	運動推定型位置推定による進行方向位置推定誤差の評価	61
4.6	SLAM 型と運動推定型の周辺取得データの特徴	62
5.1	提案手法 2-1 による衛星数の疑似的増加の様子	68
5.2	提案手法 2-1 による位置推定の処理手順	68
5.3	軌跡上 GPS Raw データを用いた高精度位置推定の仕組み	70
5.4	疑似距離と GPS Doppler の分解能の比較	71
5.5	衛星との相対速度算出結果の比較	72
5.6	自転車速度と衛星速度，相対速度（計測値）の関係	73
5.7	GPS Doppler による速度推定と軌跡推定評価環境	75
5.8	GPS Doppler による速度推定結果	76
5.9	GPS Doppler による速度推定誤差	76
5.10	軌跡推定誤差評価結果	77
5.11	提案手法と一般的な手法による最終地点位置誤差の比較	78
5.12	バンドルアジャスト型位置推定（軌跡上全体の疑似距離残差の評価）	80
5.13	マルチパスと直接波の分布	80
5.14	マルチパス判定を伴うバンドルアジャスト型位置推定	81
5.15	走行軌跡上の GPS Raw データ活用による高精度自転車位置推定 評価 コース（Google Earth 表示利用）	83
5.16	走行軌跡上の GPS Raw データ活用による高精度自転車位置推定の精度評価	84
5.17	位置推定結果の比較（Google Earth 表示利用）	85
6.1	提案手法 2-2 による衛星数の疑似的増加の様子	89
6.2	提案手法 2-2 による位置推定の処理手順	89
6.3	複数走行 GPS Raw データを用いた高精度位置推定の仕組み	91
6.4	複数走行 GPS Raw データを用いた高精度位置推定手順	91

6.5	前方画像の例	93
6.6	前方画像を用いた場合のカメラ中心の位置関係の推定	93
6.7	軌跡に沿って投影された路面画像例	94
6.8	路面画像を用いた GPS Raw データ受信位置の相対位置推定	94
6.9	郊外のコースと走行シーン例	98
6.10	都心のコースと走行シーン例	99
6.11	郊外のコースにおける 10 走行回分の各回の測位結果	100
6.12	郊外のコースにおける 10 走行回分の測位結果の平均を用いた推定結果 (従来手法)	101
6.13	郊外のコースにおける 10 走行回分の GPS Raw データを用いた推定結 果(提案手法)	101
6.14	都心のコースにおける 10 走行回分の各回の測位結果	102
6.15	都心のコースにおける 10 走行回分の測位結果の平均を用いた推定結果 (従来手法)	103
6.16	都心のコースにおける 10 走行回分の GPS Raw データを用いた推定結 果(提案手法)	104
6.17	GPS Doppler を用いた軌跡に沿って生成した路面画像の精度	105
6.18	郊外のコースにおける走行回数と測位率の関係	106
6.19	都心のコースにおける走行回数と測位率の関係	106
6.20	郊外のコースにおける走行回数と位置推定誤差標準偏差の関係	107
6.21	郊外のコースにおける走行回数と位置推定誤差平均の関係	107
6.22	都心のコースにおける走行回数と位置推定誤差標準偏差の関係	108
6.23	都心のコースにおける走行回数と位置推定誤差平均の関係	108
A.1	プローブ型高精度地図作成の様子	124
A.2	ローカルマップ作成とグローバルマップ作成の手順	126
A.3	後方カメラと軌跡を用いた路面画像作成	128
A.4	作成された路面画像と専用計測車両の路面画像の比較	129
A.5	ローカルマップの単純な重ね合わせ例と位置合わせ例	129
A.6	住宅街におけるグローバルマップ作成例	130

第 1 章

序論

本論文は，自動車の運転支援に必要な高精度な自車位置推定に関する研究の成果をまとめたものである．

2010 年以降，自動車の運転支援システムの発展は目覚ましく，米国国防高等研究計画局（DARPA）が主催した自動車の無人運転競技である，Grand Challenge I, II [1][2] と Urban Challenge [3] をきっかけに，自動運転に必要な技術開発が大きく進んだ．そこで開発された技術を適用した Google 社の自動運転車両 [4] は広く認知されるようになり，自動車会社各社も自動運転機能を盛り込んだコンセプトカー [5][6][7] を紹介している．ここで実現されている自動運転の機能は，高精度に絶対位置を推定するシステムと，車両が走行する周辺の環境を高精度に記述した事前地図と，周辺環境を高密度に取得するセンサが搭載され，それらを用いた周辺環境の理解判断によって成立するものである．2015 年 1 月現在，市販車両としてこれらの機能を実現した自動運転車両はなく，現状では限られた環境でかつ特殊な車両で動作するものである．

自動運転で広く知られるようになった自車位置推定や周辺環境理解の技術は，自動運転用に一足飛びに実現されたものではない．渋滞緩和や運転負荷の軽減などをめざし，1990 年代の初めから高度交通システム（Intelligent Transport Systems：以下 ITS）が社会に導入されるようになり，その中で，各種技術の研究開発が積み重ねられてきた．本研究は特に高精度に自車両の位置を推定することを目的として実施したものである．本章では，本研究の背景となる運転支援システムに必要な自車位置推定精度について述べ，本研究の目的を述べる．まず背景として，1.1 節で運転支援システムの発展と位置推定の必要性，1.2 節で運転支援システムと自車位置推定およびセンサ構成の関係を述べる．そして，1.3

節で本研究の目的について述べ，1.4 節で本論文の構成について述べる．

1.1 高度交通システム (ITS) と運転支援システム (ADAS)

ITS は渋滞緩和のための施策や，道路や信号の改良などの道路側の設備も含み，また，列車の運行管理や道路交通情報，街中に見られる駐車場情報などもその一種である．1980 年代に市販が開始され，現在広く普及しているカーナビゲーションシステム（以下，カーナビ）や，1996 年から実用化されたカーナビ画面に渋滞情報を表示する VICS（Vehicle Information Communication System）をはじめ，高速道路自動料金収受システム ETC（Electric Toll Collection）なども ITS の一環である．

運転そのものを支援するシステムは，ITS の中でも特に運転支援システム（Advanced Driver Assistance Systems：以下，ADAS）と呼ばれる．ADAS は当初は情報提供が中心であり，車両後方に取り付けられたカメラで後退スペースを撮影し，撮影されたカメラ画像上に後退時の車両予想軌跡を描く「バックガイドモニタ [8]」や，車両の先端に設置したカメラを用い，見通しの悪い交差点での映像を視野 180° で提供する「フロント&サイドモニタ [9]」などが商品化されている．また，運転者の行動を代行するシステムの開発も進み，一定車速で走行する「クルーズコントロール（Cruise Control：以下，CC）」や，レーダなどで検知した前方車両との車間時間を一定に保つ「アダプティブクルーズコントロール（Adaptive Cruise Control：以下，ACC）[10]」などのシステムも 1990 年代には商品化されている．

近年では，将来の衝突可能性を検知し，警報の提示やブレーキ補助，緊急停止を行うような「衝突被害軽減ブレーキ」や，ドライバーが白線を逸脱しそうになった時に警報を与える「車線逸脱警報」などが市販されている．致命的な交通事故を未然に防ぐこれらのシステムは「予防安全システム」と呼ばれている．これらの予防安全システムは，当初は高級乗用車向けのオプションとして設定されていたが，2008 年の Volvo 社の「City Safety [13]」や，国内では 2010 年のスバル社の「Eye Sight [14]」など搭載車種が増加し，2014 年には国土交通省や自動車事故対策機構による「予防安全性能評価 [17]」によって性能が評価されるようになり，予防安全システムは激しい開発競争の段階に入った．

図 1.1 に交通事故数と交通事故死亡者の変遷を示す．1970 年に 16,765 人であった交通事故死亡者は 2011 年には 4,612 人に減少している [18]．エアバッグの標準搭載や車体構

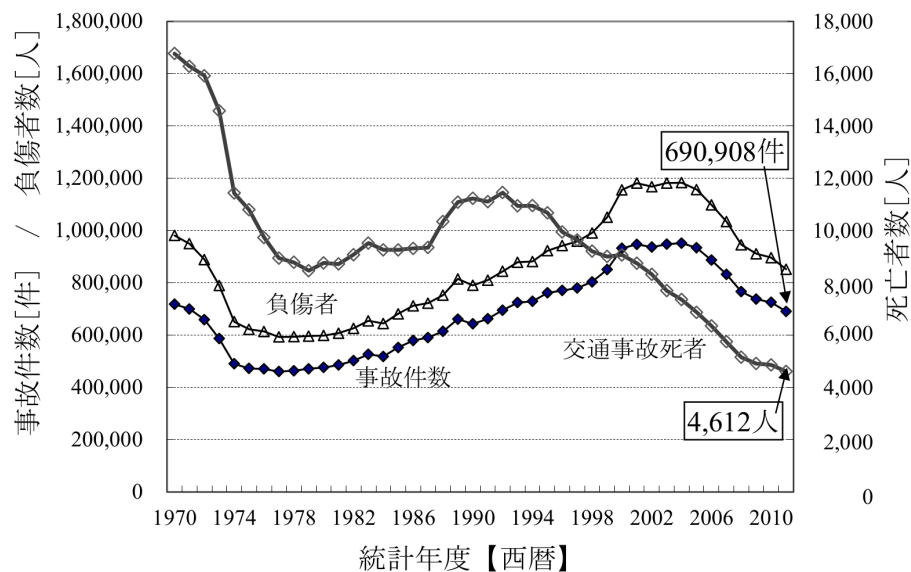


図 1.1 交通事故件数と交通事故死者数の変遷

文献 [18] のデータ引用

造の改良など、衝突時の被害を軽減する衝突安全の普及の効果と考えられる、一方、交通事故は依然として 70 万件近く発生している。交通事故件数そのものの減少には、上述の予防安全システムの普及が有効である。しかし、予防安全システムは危険な状況に陥った時に初めて動作するものであり、事前に運転を安全に保つことを目的としていない。一方、「交通事故死者ゼロ」を目指す次世代の ADAS として期待されるシステムが「先読み運転支援システム」と呼ばれるものである。

「先読み運転支援システム」は運転者の運転状態や周辺の環境、交通規則に則り、自車の将来の経路において生じうる危険を予測し、予め危険をさけるように支援するシステムである。例えば、見通しが悪い交差点やカーブ手前で減速するような、経路上の特定の場所で動作する機能が代表的なものである。このような機能を特定の場所で確実に動作させるためには、高精度な自車位置の推定が非常に重要となる。

1.2 運転支援システムと自車位置推定精度の関係

移動体の位置推定の歴史は古く、さまざまな種類があるが、現在は屋外での位置推定には GPS (Global Positioning System) を利用する手法が一般的である。本節では、位置

推定の歴史とその中における GPS の位置づけを簡単に述べた後，運転支援システムで要求される自車位置推定精度について整理する．

移動体が現在の位置を知り，目的地までの針路を定める作業を「航法 (navigation)」と言い，航法のうちで現在位置を知ることが「測位 (positioning)」と言う．最初は，山などの目立つ地形を目印にし，その大きさや角度から距離や方角を推定していた．これを「地文航法」と呼ぶ．また船舶が沖に出ようになると地形の特徴が使えなくなり，天体を利用するようになった．天体の見え方を利用する方法を「天文航法」と呼ぶ．第 2 次世界大戦でレーダが登場するまでは，位置推定にはこのような原始的な方法が用いられてきた．

レーダなどの電子的な手段を用いた航法技術を「電子航法」と言い，GPS を用いた測位もこの一種である．電子航法のうち地上系の代表的なものとして，第 2 次世界大戦中に開発された「LORAN (LOng RAng Navigation)」と呼ばれるシステムがある．2 つの送信局からの信号の到達時間差が一定になる点の軌跡は，送信局を焦点とする双曲線となることから，2 つ以上の双曲線の交点を求めることで，移動体の位置を推定する手法である．LORAN A は 1,750 kHz ~ 1,950 kHz の周波数帯が用いられ，LORAN C は 100 kHz の長波帯が用いられている．特に LORAN C では，波長が長いため 1 つの送信局が広い範囲をカバーでき，電波の到達範囲は 2,000 km 程度となることから，船舶用に広く利用されてきた．LORAN A は日本でも 1950 年代から運用されたが現在は廃止されている．LORAN C は現在も船舶を中心に利用されているが，GPS の登場によって運用が廃止された地域もある [22][23]．

電子航法のうち，人工衛星を利用する航法を「衛星航法」と言い，代表的なシステムとして米国の GPS がある．第 2 次世界大戦後の冷戦時代に，宇宙開発競争が激化する中で誕生した．GPS の場合，1973 年に米国国防総省がその開発を認可し，1978 年には 1 号機が打ち上げられている．高度約 20,000 km の上空を周回する衛星から信号が送信され，受信機が衛星との距離を計測する．複数の衛星位置とそれらとの距離を用いた三角測量によって移動体の位置を決定する手法である [20][24]．主に軍事用途に利用されてきたが，1993 年に合計 24 個の衛星が配備され，本格的な民生運用が開始された．現在，衛星数は 32 個になり安定した運用の段階に入っている．安価な GPS 受信機も広く出回るようになり，GPS を用いた位置推定はカーナビをはじめ，スマートフォンにも広く利用されている．GPS を利用した位置推定の精度については，第 2 章で詳細に述べる．

なお，前述の通り，GPS は米国の測位衛星システムを指し，ロシアの GLONASS や欧

州連合の Galileo，中国の BeiDou，日本の準天頂衛星（Quasi Zenith Satellite System：以下，QZSS）など，様々な測位衛星システムがある．これらは総称して GNSS（Global Navigation Satellite System）と呼ばれる．本研究は特定の測位衛星システムに限定されるものではないが，民生用に仕様が公開され，市販の受信機が広く販売されている GPS を用いて研究を実施する．

運転支援システムと位置推定精度の関係，およびその精度実現に利用されるセンサを図 1.2 に示す．本研究では，周辺環境を記述する地図についても，位置を推定すれば周辺環境の情報を返すセンサの 1 つと考える．本論文において，「位置推定精度」は精密さを指すものではなく，「参照位置に対する推定された位置の誤差」を指すものとする．最も良く知られた位置を利用した運転支援システムはカーナビである．目的地を設定すれば現在位置からの経路を探索し，車両の進行に従って道案内をするものである．カーナビの画面では地図上の道路を走行しているように表示され，道路幅の精度で自車位置が推定されているように見える．しかしこれは，道路上の位置を正確に推定しているわけではなく，実際はカーナビの地図上に自車位置が載るように表示を修正する「マップマッチング」を行っているだけである．カーナビが提供する機能が経路案内であるため，走行する道路を間違えない程度の自車位置推定精度があればよく，要求精度は 50 m 程度である．

道路のカーブに応じて，AT（Automatic Transmission）のシフト制御を行うシステム（ナビ協調シフト制御）も実現されている．カーナビの地図から推定した前方の道路曲率*と，運転者のアクセル操作やブレーキ操作から加減速意志を推定し，シフト制御を行うものである．シフト制御のタイミングは運転者の操作を参照しているため，カーブの入口や出口の有無を判断できる程度の自車位置推定精度があればよく，要求精度は 30 m 程度である．

交差点手前の一時停止地点で警報や制御を行う一時停止支援システムもある．これは前述した「先読み運転支援システム」の 1 つであり，一時停止線の存在を手前で運転者に知らせ，一時停止線までの距離と自車速に応じてブレーキ制御を行うシステムである．運転者の操作状態に関わらず，特定の場所で確実に支援を行う必要がある．ここで，警報を与える場合，停止のために必要な減速度が運転者の想定と大きく異なると違和感がある．また，システムが車両を一時停止線手前で停止させる場合，実際の停止位置と本来の停止

* カーナビの道路形状を示す点列から算出．

支援内容	位置精度	利用情報				
		GPS	ジャイロ	車速計	地図	その他
経路案内	数10 m ↓ 10m ↓ 5m ↓ 1m ↓ 5cm	汎用GPS	ナビ用	車速パルス	ナビ用	通信
シフト制御					専用地図 (情報追加)	
ISA※ ¹ Intelligent Speed Adaptation					高精度路面 マーク	
交差点情報提供					距離点群	
一時停止支援	1m ↓ 5cm	2周波GPS	VSC※ ² 用	専用車速計	カメラ	レーザ
			FOG※ ³ , RLG※ ⁴			
自動運転						

※1 規定エリアで自動的に走行速度が制限されるシステム

※2 Vehicle Stability Control 車両の横滑り防止機能

※3 Fiber Optics Gyroscope 光ファイバジャイロ 数十万～数百万円

※4 Ring Laser Gyroscope リングレーザジャイロ 1千万円超

図 1.2 運転支援システムと自車位置推定精度の関係

線位置の誤差が大きいと運転者はその誤差を許容できず、システムそのものを受け入れられなくなる。一時停止線の情報を予め精度よく計測した地図がある場合、警報には 5 m 程度、制御には 1 m 程度の自車位置推定精度が必要と考えられている。しかし、現状のカーナビ用の汎用 GPS 受信機が出力する測位結果には、受信環境が比較的良好な場合でも 10 m 程度の誤差がある。都心部などでは信号の遮蔽や反射などの影響により 30 m 以上の誤差が含まれることも多く、GPS だけで一時停止支援に必要な自車位置推定精度を得ることができない。

そこで、現行の一時停止支援システムは一時停止線とその手前の路面マークとの位置関係を専用の高精度地図上に予め記録しておき、駐車支援用に車両後方に設置されたカメラ（以下、バックカメラ）で撮影した路面と照合することで、自車両の位置と一時停止線との位置関係を高精度に推定している [19]。この手法では、一時停止線と手前の路面標示の情報を予め専用の高精度地図上に記録するとともに、その更新が必要である。このコストが高いことから、高精度地図の整備は特定の交差点に限られ、一時停止支援システムの適用範囲も限定される。

更に自動運転の機能を実現するためには、制御対象との位置関係を 5 cm の精度で取得

する必要がある．絶対位置推定の誤差を 5 cm 程度にすることは容易ではないため，自車の絶対位置を基準に地図情報を取得しても，5 cm 以上の誤差が生じる．そこで，車載されたカメラやレーザレーダなどから得られる情報と地図上に記録された情報とを照合することで地図上の位置推定を行っている．ただし，絶対位置は，地図情報と検出情報との照合範囲を限定するためには不可欠であり，走行車線を判定可能な 1 m[†]程度の自車位置推定精度が必要である．そのためには，専用車速計や航空機に利用される FOG (Fiber Optic Gyroscope: 光ファイバージャイロ) や RLG (Ring Laser Gyroscope: リングレーザジャイロ) などの高精度なジャイロ스코プが必須である．更に，5 cm の精度で位置を推定するためには高精度な地図の整備も必要である．そのため，特殊な車両で限られた環境でのみ，5 cm の精度で制御対象との位置関係を得ることができる．

1.3 本研究の目的と位置づけ

交通事故の予防には予め進路上の危険等を把握する「先読み運転支援システム」が有効であり，その普及が事故件数の低減に寄与すると考えられる．「先読み運転支援システム」では，より高精度な自車位置推定が必要であり，警報には 5 m，制御には 1 m の精度が必要であるとされる．また，自動運転で地図上の位置推定を行うためには走行車線を判定可能な 1 m の位置推定精度が必要である．

交通事故件数の低減には，このようなシステムを市販車両に広く普及させる必要がある．そのため，位置推定に使用するセンサはカーナビ用の汎用 GPS 受信機とすでに車両制御用に搭載されている車速計やジャイロ스코プ，更に，運転支援用に搭載台数の増加が見込めるレーザレーダやカメラなどの周辺監視用センサの利用までにとどめる必要がある．本研究では，先読み運転支援システムに必要な 1 m ~ 5 m の位置推定精度を，汎用 GPS 受信機と既存のセンサを用いた安価な構成を郊外および都心部で実現することを目的にする．これは，1.2 節で述べた通り，現状の汎用 GPS 受信機では実現できなかった精度を目指すものである．

1 m の精度で位置推定が可能な方法は，すでに測量などの分野では広く使われている．たとえば，第 2 章で述べる干渉測位手法などがある．干渉測位をリアルタイムに実現し

[†] レーン幅は一般道で 3.0 m 程度が標準

たものが、Real Time Kinematic-GPS (以下、RTK-GPS) である。RTK-GPS による測位は GPS 受信環境や通信環境が良好な場合は 3 cm の精度で位置推定が可能であるが、反射や回折、通信途絶に非常に弱く都心部では位置推定そのものものが困難であり、本研究の目的を達成することはできない。

1 m の精度で位置推定が可能な別の方法として、高精度位置計測システム [87] があるが、1.2 節でも述べた通り、航空機用の高精度ジャイロスコープと専用車速計を利用した測量用のシステムである。航空機用の高精度ジャイロスコープは数 100 万から数 1,000 万円に相当し、一般車両への搭載は現実的ではない。航空機用ジャイロを安価に製造できる技術革新がない限り、同一の構成を広く普及させることは困難であり、本研究の目的を達成することはできない。

本研究で想定するカーナビ用の汎用 GPS 受信機の測位結果を用いた場合、GPS の受信環境が良好な場合でも 10 m 程度の位置推定誤差が生じる。更に受信環境が劣化する場合には 30 m 以上の誤差が頻繁に生じる。GPS を用いた場合の位置推定誤差は、大きく分けて次の 3 つの性質がある。

- (I) ばらつき誤差
- (II) 外れ値誤差
- (III) オフセット誤差

(I) のばらつき誤差は、GPS 受信機が衛星からの信号を計測した際のノイズや距離計測の分解能などに起因するものである。(II) の外れ値誤差は、建物などの遮蔽によって衛星からの直接波を計測できず、反射や回折などによって伝搬距離に大きな誤差が生じた信号 (以下、マルチパス信号) を用いて位置推定が行われることによるものである。(III) のオフセット誤差は、衛星からの信号が受信機に到達するまでの時間が電離層などの影響で遅延することに起因するものである。衛星の配置に偏りがあると遅延の影響を受けやすく、オフセット誤差が生じる。また、(I) ~ (III) までの誤差に加え、都心部などでは可視衛星数の不足によって測位ができなくなるなどの問題もある。本研究では計算手法や車載センサの利用によって、これらの誤差の低減と測位可能な地点の増加を目指す。

なお、運転支援の用途によっては自車位置の高さ方向の精度も重要であるが、本研究では平面内位置の高精度化に焦点を絞った。また、本論文では特別に定義しない限り「位置

推定」の「位置」は緯度経度などの地球上の 1 点を特定する「絶対位置」を指すものとし、「GPS 受信機」もカーナビ用の汎用 GPS 受信機を指す。「測位結果」は「GPS 受信機の中で演算、出力された位置推定結果」を指すものとする。

1.4 本論文の構成

本論文では、自動車運転支援のための高精度自車位置推定に関する研究内容を以下の構成で記す。

第 2 章では屋外環境における位置推定の現状と課題について述べ、上記 3 つの位置推定誤差の低減に対する、本研究のアプローチについて述べる。位置推定の現状課題を明らかにするために、最初に GPS の測位原理について説明する。GPS を用いた各種位置推定手法や、GPS と車速センサやジャイロスコープなどの車載センサを統合する関連研究を示し、それぞれの特徴と課題について述べる。次に、整理した課題を解決するための 2 つのアプローチについて述べる。具体的には、GPS 受信機が出力する単独測位結果に周辺監視用センサを活用した位置推定手法と、衛星数を疑似的に増加させる位置推定手法の 2 つである。各手法が扱う情報を図 1.3 に整理して示す。

第 3 章と第 4 章では「(I) ばらつき誤差」の低減に寄与する、1 つ目のアプローチである周辺監視用センサを用いた高精度自車位置推定手法を提案する。このアプローチでは、GPS 受信機が出力する測位結果と、レーザレーダなどの周辺監視用のセンサを用いて計測した周辺との相対位置関係を利用する。第 3 章では、自車位置とともに周辺静止物の位置を推定することで位置推定精度を改善する「SLAM 型高精度自車位置推定」を提案する。次に第 4 章では、周辺静止物の位置を推定する代わりに周辺静止物との相対位置変化を用いて自車の運動を推定し、測位結果とその運動推定結果を用いて位置推定精度を改善する「運動推定型高精度自車位置推定」手法を提案する。第 3 章と第 4 章で提案する手法は、特に郊外環境で推定精度向上の効果があると考えられる。

第 5 章と第 6 章では「(II) 外れ値誤差」と「(III) オフセット誤差」の低減に寄与する、2 つ目のアプローチである衛星数を疑似的に増加させることによる高精度位置推定手法を提案する。このアプローチでは、GPS 受信機内で演算された測位結果ではなく、GPS 受信機が計測した信号（以下、GPS Raw データ：詳細は第 2 章で説明）を用いる。特に第 5 章では汎用 GPS 受信機と車速センサとヨーレートセンサを用い、走行中の GPS Raw

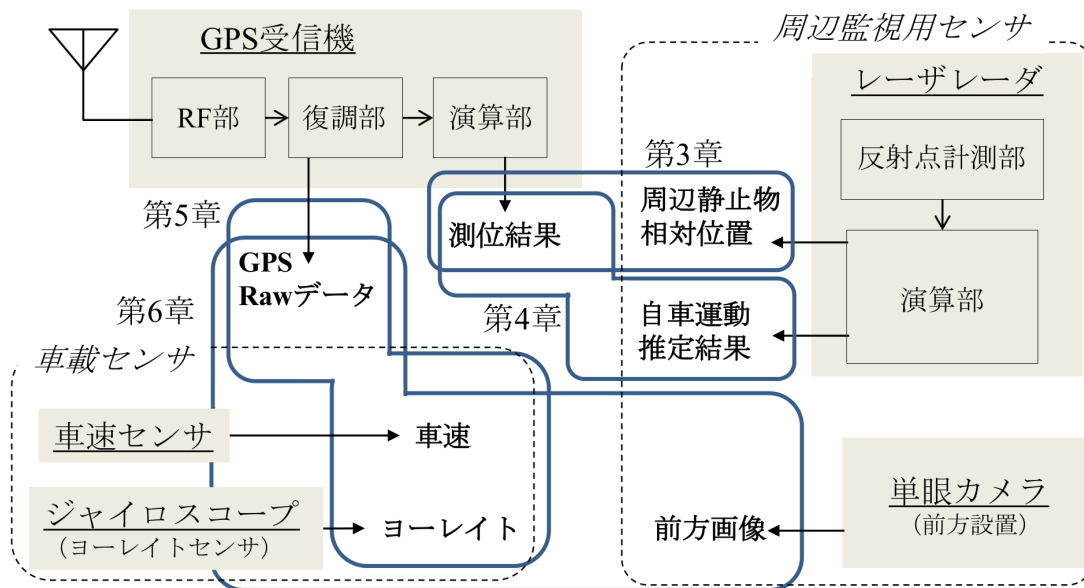


図 1.3 本研究で提案する各手法が扱う情報

データ全体を利用する「走行軌跡上の GPS Raw データを活用した高精度自車位置推定」を提案する。次に第 6 章では汎用 GPS 受信機と周辺監視用のカメラを用い、過去に走行した時に受信した GPS Raw データ全体を利用する「複数走行分の GPS Raw データを活用した高精度自車位置推定」を提案する。第 6 章では、第 5 章に加えて周辺監視用センサとしてカメラを用いている。第 5 章と第 6 章で提案する手法は、マルチパス信号や疑似距離遅延誤差の影響がある環境においても、位置推定精度向上の効果があると期待できる。

第 7 章において、第 3 章から第 6 章までに提案した高精度自車位置推定手法についてまとめる。各手法が解決した課題と残存する課題を明らかにするとともに将来の展望を示し、本研究をまとめる。

第 2 章

運転支援のための位置推定技術に関する現状と本研究のアプローチ

本章では、運転支援のための屋外環境における位置推定の現状とその課題について整理し、本研究のアプローチについて述べる。課題の整理のために、最初に GPS の測位原理について説明するとともに、GPS と車速センサやジャイロ스코プなどの車載センサを統合する関連研究を示す。課題を整理した結果に基づき、本研究における高精度自転車位置推定のアプローチを示す。将来の「先読み運転支援システム」には、支援が必要な位置を特定できる精度の絶対位置推定が必須である。本研究では自転車の絶対位置推定精度を向上させることを目的とし、安価な構成でも高精度に位置を推定する手法を提案する。

本章では、2.1 節において車両が走行する屋外環境における自転車位置推定技術の概要と課題を示し、GPS を用いた位置推定の原理について説明する。次に、2.2 節で本研究のアプローチを示す。

2.1 屋外環境における自転車位置推定技術の現状

第 1 章で述べた通り、将来の運転支援システムである「先読み運転支援システム」の実現には、安価な構成で 1 m ~ 5 m の自転車位置推定精度を実現する必要がある。自動車の走行環境の大半は屋外であり、代表的な屋外の位置推定技術はカーナビなどに広く利用されている GPS (Global Positioning System) を利用した位置推定である。GPS による位置推定精度は、一般的な測位手法を用いた場合、受信環境が良好な郊外環境においても 10 m 程度であり、建物などの遮蔽や反射が生じる都心部環境では 30 m 以上の誤差も頻発

する．GPS だけでは測位結果が得られない場合もあり， $1\text{ m} \sim 5\text{ m}$ の位置推定精度を常時実現するためには，GPS の測位結果だけでは不十分である．そのため，現行のカーナビでは GPS の測位結果だけではなく，車両から取得する車速やヨーレイトを用いた慣性航法結果と統合する手法が用いられている．

以下，2.1.1 節では GPS を用いた位置推定の原理について概説する．GPS を用いた位置推定には各種手法があり，手法によって用いる情報や実現できる精度に差がある．2.1.2 節では GPS を用いた代表的な位置推定手法の特徴と課題を示し，2.1.3 節では，GPS と車速センサやヨーレイトセンサを用いた，代表的な統合手法の特徴と課題について整理する．なお，本研究は特定の測位衛星システムに限定されるものではないが，民生用に仕様が公開され，市販の受信機が広く販売されている GPS を用いて研究を実施した．

2.1.1 GPS を用いた位置推定の原理

本節では GPS を用いた位置推定の原理について解説する．本節の内容は GPS 測位の基本について記述された実用書である参考文献 [20][21][22] に基づいて記述したものである．GPS を用いた位置推定の概略図を図 2.1 に示す．これは GPS を用いた最も基本的な位置推定である単独測位手法の概略図である．

GPS の単独測位手法では，各 GPS 衛星から送信された信号から，受信機が衛星との距離（疑似距離）を計測する．衛星の位置は時間の関数として定義されているため，GPS から信号が送信された時刻が決定できれば衛星位置を算出できる．衛星 i の位置を $x^i = (x^i, y^i, z^i)$ とし，推定値である移動体（GPS 受信機のアンテナ中心）の位置を

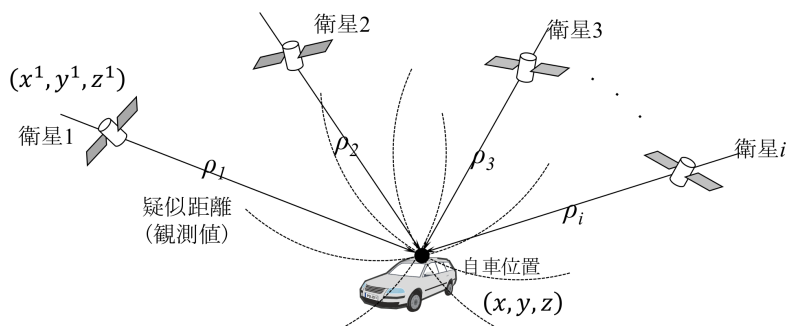


図 2.1 GPS を用いた単独測位の概略図

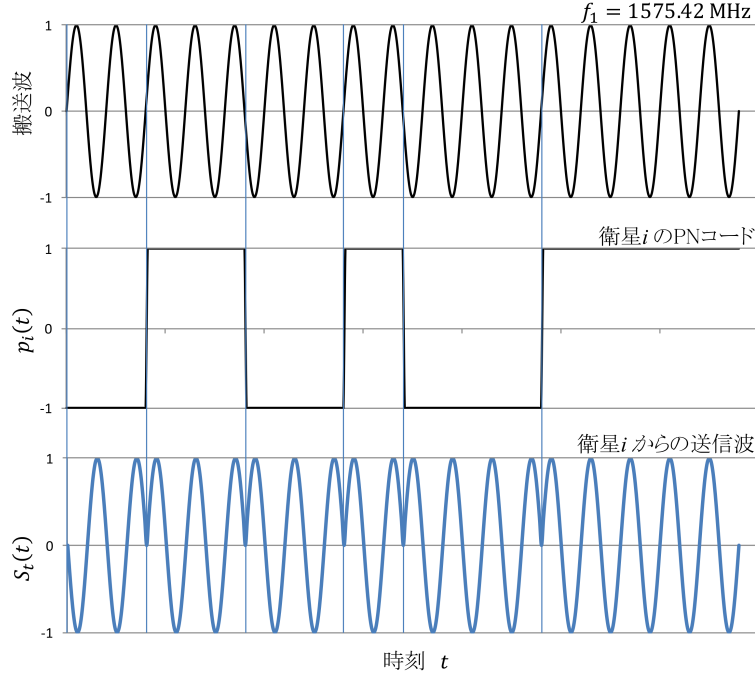


図 2.2 GPS の搬送波/PN コード/送信波の例

$x = (x, y, z)$ とした場合，衛星と受信機との最も基本的な関係を式 (2.1) に示す．

$$r^i = \sqrt{(x^i - x)^2 + (y^i - y)^2 + (z^i - z)^2} \quad (2.1)$$

ここで， r^i は衛星 i と受信機との距離である．通常，GPS 衛星と受信機との距離は，衛星から送信された信号が受信機に到達するまでに要する伝搬時間から計測する．衛星との距離を複数計測できれば，自車の位置を推定できる．

GPS 衛星は周波数 f_c の搬送波に，衛星ごとに異なるパターンを持つ $\{+1, -1\}$ の方形波 $p(t)$ を乗じた信号を送信している．送信信号 $s_t(t)$ は式 (2.2) で表される．なお，搬送波周波数 $f_c = \omega_c/2\pi$ であり， ϕ_t は送信波の位相を示す．また，受信機が受信する信号 $s_r(t)$ は式 (2.3) で表され，送信信号から時刻 t_D 分だけ遅れた波形である．搬送波と衛星ごとの方形波と送信波の例を図 2.2 に示す．

$$s_t(t) = p(t) \sin(\omega_c t + \phi_t) \quad (2.2)$$

$$s_r(t) = p(t - t_D) \sin\{\omega_c(t - t_D) + \phi_t\} \quad (2.3)$$

この受信信号に対して， f_c 以上の周波数を通さないフィルタを利用して受信すると，

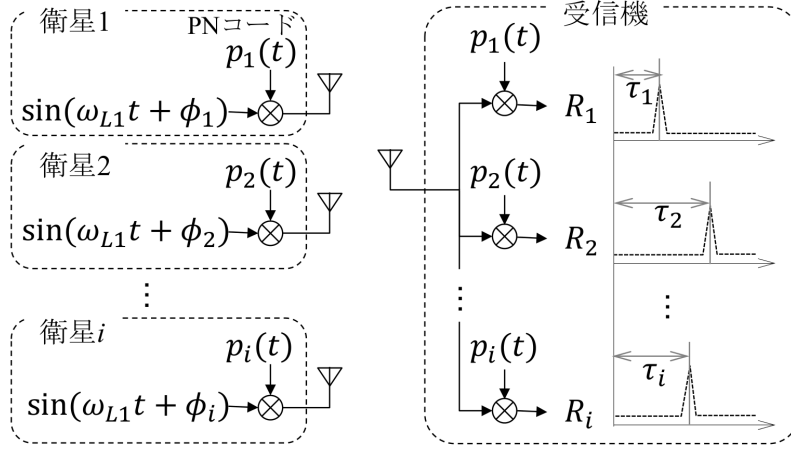


図 2.3 受信機による伝搬時間計測

方形波の成分 $p(t - t_D)$ のみを取り出すことができる．信号の伝搬時間 t_D を求めれば GPS 衛星から受信機までの距離を算出できる．衛星ごとの方形波パターン $p(t)$ は一見するとランダムで雑音のようなパターンであることから，疑似雑音符号 (pseudo-noise code: 以下, PN コード) と呼ばれる．時間を τ ずらして自身の PN コード同士を掛け合わせた $p(t)p(t - \tau)$ の期待値 $E\{p(t)p(t - \tau)\}$ は τ によらず 0 となる． $E\{p(t - t_D)p(t - \tau)\}$ が 1 になるような τ が伝搬時間 t_D である．

$$E\{p(t - t_D)p(t - \tau)\} = \begin{cases} 1, & t_D = \tau \\ \left| \frac{t_D - \tau}{T_p} \right|, & |t_D - \tau| < T_p \\ 0, & |t_D - \tau| \geq T_p \end{cases} \quad (2.4)$$

PN コードは衛星ごとに異なり，他の衛星の PN コードと掛け合わせても 0 になるように設計されている．GPS 受信機は予め各 GPS 衛星の PN コードを有し，受信信号 $s_r(t)$ との相関をとることで，GPS 衛星から受信機までの伝搬時間を計測している．

方形波 $p(t)$ の周波数を f_p とした場合， $k f_p = f_c$ (k は整数) の関係がある．GPS の場合，搬送波 f_c には， f_1 (1,575.42MHz) と f_2 (1,227.60MHz) の 2 種類の周波数があり，それぞれの搬送波のことを L1, L2 と呼ぶ．また，各衛星は 2 種類の疑似雑音符号を送信し，C/A コード (coarse/acquisition code) と P (Y) (precision (encrypted) code) がある．C/A コードの周波数 f_p は 1.023MHz であり，波長に換算すると約 300 m である．衛星との距離は GPS 衛星から送信された信号が受信機に到達する伝搬時間 t_D から計測

する．伝搬時間から算出した衛星 i との距離 ρ_i のことを「疑似距離」と呼ぶ．この時，衛星が持つ時計と受信機が持つ時計が完全に同期している場合は時計の誤差を考慮する必要はないが，一般的に GPS 衛星の時計と受信機の時計は非同期である．そのため，伝搬時間を計測しても，そこには時計が持つ誤差の影響が含まれる．時計誤差に起因する距離誤差をクロックバイアス C_b と呼び，時間とともに変化する値であり計測できないため，未知数として扱う．このことから，式 (2.1) にクロックバイアスを含めた場合，式 (2.5) のように表現できる．

$$\rho_i = \sqrt{(x^i - x)^2 + (y^i - y)^2 + (z^i - z)^2} + C_b \quad (2.5)$$

観測された衛星数分だけ式 (2.5) を連立させて解くことで自転車位置を推定できる．自転車位置とクロックバイアスを未知数として連立方程式を解くことで，受信機の時計誤差を考慮した位置推定が可能になる．ここで，未知数が自転車位置 $x = (x, y, z)$ とクロックバイアス C_b の 4 個であるため，観測できる衛星が 4 個未満の場合は不定となり解くことができない．4 個の場合は一意に解が決定され，5 個以上ある場合は最小 2 乗法などを用いて最適解を求める．具体的な解法については GPS 測位の実用書 [20][21][22] に託す．

式 (2.5) を解くためには，GPS 衛星の位置 $x^i = (x^i, y^i, z^i)$ が必要である．GPS 衛星は地球の周りを概ね 1 日に 2 周しており，衛星が周回する平面の傾斜角や赤道上と交わる位置などによって軌道が決定されている．その軌道情報は衛星位置を決定するためのパラメータで表現され，各 GPS 衛星から「航法データ」として，上述の送信信号に重畳して送信されている．測位に利用する疑似距離は伝搬時間から計測されるが，GPS 衛星から信号が送信され，地表面まで到達するまでの間に様々な伝搬遅延が生じる．大きく分けて，(i) 電離層遅延 I ，(ii) 対流圏遅延 T ，(iii) マルチパス M がある．最後に (iv) 受信機のノイズ e を考慮し，観測される GPS 衛星 i からの疑似距離と各遅延は式 (2.6) で表現できる．

$$\rho_i = \sqrt{(x^i - x)^2 + (y^i - y)^2 + (z^i - z)^2} + C_b + I^i + T^i + M^i + e \quad (2.6)$$

(i) の電離層遅延は GPS 衛星から送信された信号が電離層を通過する際に生じる．受信機と衛星 i との位置関係によって電離層を通過する距離が異なるため，遅延も異なる．また，電離層遅延は電離層の状態に大きく依存し，太陽活動が活発な時はその遅延が大きくなる．(ii) の対流圏遅延は，同じく送信された信号が地表面に到達する前に大気内を通

過する際に生じる．主に気温や湿度などの天候によって変化する値である．対流圏遅延も電離層遅延と同じく，受信機と衛星 i との位置関係によって大気内を通過する距離が異なるため遅延も異なる．電離層遅延と対流圏遅延については遅延モデルが存在し，遅延を算出するためのパラメータは衛星軌道情報と合わせて衛星から航法データとして送信される．ただし，正しく遅延を推定することは難しく，それぞれの遅延をモデルに基づいて補正しても誤差が残るため，オフセット誤差の要因になり得る．受信環境が良好でかつ高性能な受信機を用いた場合でも，(i) 電離層遅延 I によって約 4 m，(ii) 対流圏遅延 T によって約 0.7 m，(iii) マルチパス M には約 1 m，(iv) 受信機のノイズ e には 0.5 m，合計で約 5 m の測距誤差があると報告されており [26]，衛星配置が最良の場合でも，5 m の位置推定誤差が生じる．位置推定誤差の 95% を収めるためには，その 2 倍の 10 m を見込む必要がある．

GPS 衛星から送信された信号が受信位置とは異なる位置で反射・回折された信号をマルチパス信号と呼び，マルチパス信号は直接波に比較して伝搬時間が長くなるために疑似距離に誤差が生じる．反射された位置が受信機の位置から遠いと大きな伝搬誤差が生じ，大きな位置推定誤差を生じることが多い．そのため，GPS を用いた位置推定においては，受信信号がマルチパス信号であるか否かを判定し，マルチパス信号を用いないようにすることが望ましい．しかし，信号の伝搬の状況は周辺環境によって異なるため，受信機が単独で直接波かマルチパス信号かを判定することは容易ではない．

最後に (iv) の受信機のノイズは受信回路上のノイズであり，受信機ごとに異なる．また上記以外にも，衛星軌道の誤差と衛星クロックの誤差が疑似距離には含まれる．衛星軌道の誤差はオフセット誤差の要因となり，衛星クロックの誤差はばらつきにつながる．

自動車の運転環境では，様々な GPS 受信環境が想定されることから，上記の各誤差要因が複雑に変化しながら伝搬誤差の計測に影響を与え，疑似距離の誤差となって現れる．疑似距離の誤差の状態によって，位置推定誤差の特性が異なる．疑似距離の誤差状態を見極め，誤差の除去や誤差の影響を緩和することが位置推定精度の向上に重要である．

2.1.2 GPS を用いた位置推定の現状と課題

自動車運転支援のための位置推定として，本研究では 1 m ~ 5 m の精度の実現を目指している．本節では GPS による代表的な位置推定手法について概説する．それぞれが使用する情報の特徴と実現可能な精度の一覧を表 2.1 に示す．なお，GPS 受信機が計測する

表 2.1 GPS を用いた位置推定手法と精度

手法	精密暦	即時性	基準局	遅延補正	受信機	金額[円]※	測位精度[m]
単独測位	-	○	不要	モデル	L1	数1,000円～	5～30
				差分	L1/L2	数10万～	3～10
D-GPS (SBAS利用)	-	○	要	補正情報	L1	数1,000円～	1
PPP (精密単独測位)	軌道時計	×	不要	補正情報	L1/L2	数10万～	0.003
K-GPS (静止干渉測位)	軌道	×	要	基準局	L1/L2	数10万～	0.003
	-	○				数10万～	0.03
RTK-GPS	-	○	要	基準局	L1/L2	数10万～	0.3
後処理RTK (FB処理)	-	×	要	基準局	L1/L2	数10万～	0.03

※市販されている受信機金額であり受信素子の金額ではない

信号は、衛星の軌道情報と、疑似距離と、Doppler 効果に基づく搬送波周波数のシフト量（以下、GPS Doppler）と、受信信号の S/N であり、これらは本研究で頻繁に利用する情報である。本研究では、これらの情報をあわせて「GPS Raw データ」と呼ぶ。

2.1.2.1 GPS 単独測位

カーナビなどに用いられる位置推定は GPS 受信機の L1 の C/A コードのみを利用した方法（2015 年 4 月現在）であり、安価に実現可能であるが精度も高くない。以前は軌道情報に故意に誤差を与える、選択利用性（Selective Availability：以下、SA）と呼ばれる措置が行われていたため、100 m ～ 300 m の位置推定誤差があった。しかし、2000 年に SA が解除され、郊外などの受信環境が良好な場合の位置推定精度は 10 m 程度となっている[20]。図 2.4 に郊外と都心部環境における、水平面内の位置推定誤差と場所率*の関係を示す。ここで評価した郊外環境では 5 m 以下の誤差で位置推定可能な場所率は 90% 程度に達している。一方、ビルが林立する都心部では 5 m 以下の誤差で位置推定可能な場所率は 50% 以下である。可視衛星数不足のため位置推定できない場所もあるため、大きな測位誤差を許容しても場所率は 70% 程度にとどまっている。

郊外環境において、受信機のノイズと電離層遅延と対流圏遅延が疑似距離に含まれる主

* 総走行距離における、指定する誤差以下で位置推定結果が得られた距離の割合

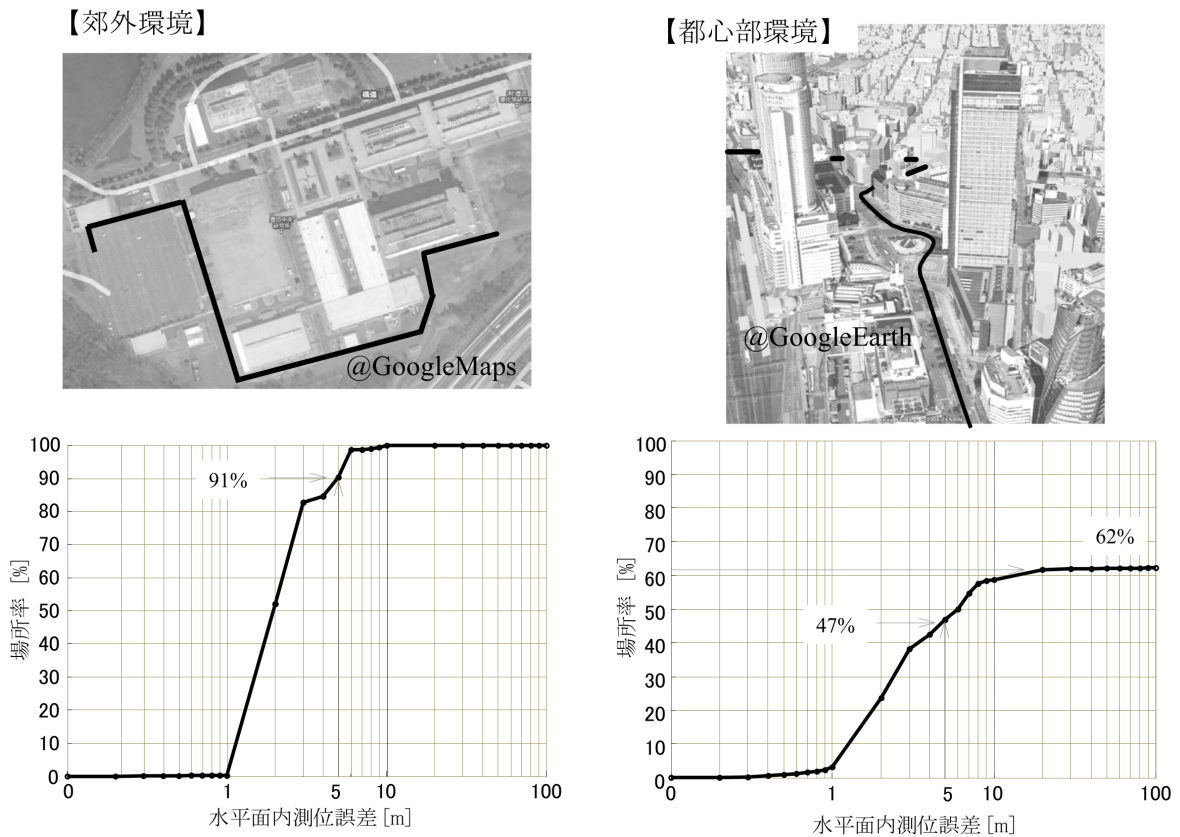


図 2.4 GPS 単独測位性能の代表例

な誤差である。なお、疑似距離は $L1$ の C/A コードを用いて計測されるため、伝搬時間計測の分解能に起因する疑似距離計測誤差も位置推定結果に影響を与える。都心部環境の場合はさらにマルチパスの影響による誤差が含まれる。

電離層遅延量は周波数に依存することから、 $L1$ と $L2$ の 2 周波を受信できる場合、 $L1$ で計測される疑似距離と $L2$ で計測される疑似距離の誤差に基づいて電離層遅延 I を推定できる。そのため、2 周波受信機は $L1$ のみの単独測位結果に比較して位置推定精度は向上するが、測量用途に用いられることが多く、市販車両への搭載コストに問題がある。また、式 (2.6) において、(i) の電離層遅延の補正に効果はあるものの、それ以外の誤差要因は依然として残ることから、大きな位置推定精度の向上は見られない。

2.1.2.2 D-GPS (Differential GPS)

単独測位と同様に L1 の C/A コードに基づく疑似距離を用い、電離層遅延と対流圏遅延による誤差を補正情報を用いて軽減する手法が D-GPS (Differential GPS) である。D-GPS は予め正確に位置が計測された電子基準点などで計測された疑似距離から、電離層遅延と対流圏遅延の補正量を算出し、受信機側は、その補正量を利用することで位置推定精度を向上させる方法である。電離層や大気の状態は一定範囲内では大きく変化しないため、基準点が近傍にあれば補正の効果がある。補正が良好な場合、位置推定誤差 1m 以下で推定できる可能性もある。

かつて SA があった頃は D-GPS の効果が大きく、FM 多重でも補正情報が放送されていた。しかし SA の解除後は、郊外路では 10m 精度の単独測位精度が得られるため、FM 多重での補正情報の放送は現時点 (2015 年 4 月) では行われていない。日本の D-GPS には現在、沿岸部の中波ビーコンから船舶用に提供される仕組みと、多目的衛星 MTSAT (Multi-functional Transport SATellite) から補正情報を送信する仕組みがある。特に、衛星から放送される補正情報を用いた D-GPS を SBAS (Satellite-Based Augmentation System) と呼ぶ。この SBAS は各地域で運用され、日本では MSAS (Mtsat-based Satellite Augmentation System)、米国では WAAS (Wide Area Augmentation System)、欧州では EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) として運用されている。

D-GPS は電離層遅延と対流圏遅延の補正に効果があるが、日本の場合、MSAS で用いられる静止衛星は赤道にあることから、静止衛星が存在する方向 (南側) に遮蔽物がある場合は補正信号を受信できない。また、カーナビ用の汎用 GPS 受信機では SBAS の補正信号の受信に対応していないものも多い。受信できたとしても、補正情報の精度などにはまだ課題があるとともに、マルチパスの軽減や受信機ノイズの低減には直接の効果はなく、常時 1m ~ 5m の位置推定精度の実現は容易ではない。

2.1.2.3 PPP (Precise Point Positioning)

GPS を用いた位置推定において、軌道情報に基づいて衛星位置を算出する過程がある。実際の GPS 衛星の軌道には誤差が含まれているため、算出される衛星位置にも誤差が生じ、ひいてはその位置に基づく位置推定結果にも誤差が生じる。この衛星軌道の情

報を補正した「精密暦」を用いた位置推定が PPP (Precise Point Positioning) である [28][29]。ただし、精密暦は即時に取得できるものではなく、米国の IGS (International GNSS Service) [30] によって軌道情報が補正されて公開されるものであり、公開までに時間を要するほど補正情報の精度が高く、位置推定精度も補正情報精度に依存する。電離層の遅延や対流圏遅延も補正することから、マルチパスがない良好な受信環境では、数 cm の位置推定誤差を実現できる可能性がある。さらに PPP は基準局を必要としないため、基準局が整備されていない地域でも有効である利点がある。

一方、PPP は精密暦の取得までに時間を有するため、移動体での位置推定精度の向上には適さない。日本上空の GPS 補強システムである QZSS ではこの精密暦相当の情報を即座に放送することが計画され、現在 (2015 年 4 月) 1 機の QZSS 衛星が打ち上げられ、試験放送中である。軌道情報の補正方法 [31][32] が提案され、QZSS の試験放送を利用した実証実験において、マルチパスがない環境下において移動体で位置誤差 15 cm 以下の位置推定精度が報告されている [33]。今後、3 機以上の QZSS 衛星が打ち上げられれば、移動体でも 1 m の位置推定精度が可能になる期待がある。

2.1.2.4 干渉測位 K-GPS (Kinematic-GPS)

GPS を用いた高精度な位置推定手法として最も一般的な方法が干渉測位である。干渉測位とは、予め正確に位置が計測された基準局において受信した GPS 信号と、移動体で受信した GPS 信号とを比較し、双方の波数と位相差の決定をすることで、基準局からの正確な位置を計測する手法である。C/A コードではなく搬送波を用いるため分解能が高い。波長の $1/100 \sim 1/10$ の精度で位相の推定は可能になるため、L1 の波長約 20 cm に対し理論的には 0.2 cm ~ 2 cm の精度で位置推定が可能である。基準局に対する相対位置を推定するため、電離層遅延や対流圏遅延の影響は受けず、衛星の軌道や衛星クロックの誤差の影響も少ない。ただし、干渉測位は主に測量などに用いられ、オフラインでの利用が主流である。

リアルタイムで干渉測位を行う手法が RTK-GPS (Real Time Kinematic-GPS) であり、基準局の情報をリアルタイムで取得するための通信手段を必要とする。基準局の位置は既知であるが、基準局の受信機の時計誤差は推定する必要があり、単独測位よりも推定パラメータが増加するため、位置推定に必要な可視衛星数は多くなる。また、干渉測位には移動体側と基準側の受信信号の波数差の決定が必要であるため、初期化に時間を要す

る．衛星からの信号が途切れやすい環境では頻繁に初期化が必要になることから，都心部で利用することは容易ではない．更に，現状の RTK-GPS の位置推定には L1 と L2 の 2 つの周波数を受信可能な GPS 受信機が必要であり，L1 だけを用いるカーナビ用の汎用 GPS 受信機と比較するとコスト面での課題も大きい．

表 2.1 で示した通り，市販車両に広く搭載することを考えると，L1 のみを利用した受信機を用いるように設計することが妥当である．本研究では，補正信号や基準局の情報を用いることなく，単独測位で得られる測位結果あるいは GPS Raw データ（疑似距離，GPS Doppler，S/N，軌道情報）を GPS 受信機から得られる情報として，位置推定を行う．

2.1.3 GPS と INS の統合による位置推定の現状と課題

上述したように GPS 測位手法は各種あるが，安価なカーナビ用の汎用 GPS 受信機を用い，常時 1 m ～ 5 m の精度で位置推定を実現することは容易ではない．カーナビでは，ヨーレートセンサや車速センサなどの慣性航法装置（Inertial Navigation System：以下，INS）と GPS とを統合する手法が主流であり，さらにカーナビ用地図の道路形状と自車の走行履歴の形状とを照合して地図の道路上にのせるマップマッチングによって，位置推定を実現している．ここでは，GPS と INS を統合して位置推定を行う現状の手法の概要と課題について示す．

統合時の観測値と推定値を何にするかによって統合方法は大きく 3 つに分けられる．以下にそれぞれの特徴を示す．

2.1.3.1 ルーズカップリング（Loosely Coupled Integration）

ルーズカップリング [34] は GPS と INS を統合する最も一般的な手法であり，GPS 受信機から得られる測位結果と，INS から推定された慣性航法結果とを統合することの特徴とする．測位結果と慣性航法結果を入力とし，それらの修正量が最小になるような位置が最適値として推定される．GPS の測位結果が得られなかった場合でも，INS の慣性航法結果を用いることで位置推定が可能である．GPS 受信機からの出力と INS からの出力を統合する構成上，統合処理はセンサと個別に設計できるため，構成が平易である．統合に用いる手法は Kalman フィルタ [41][42] が典型的であるが，特に解法は特定されていない．具体的なルーズカップリングのイメージを図 2.5 に示す．

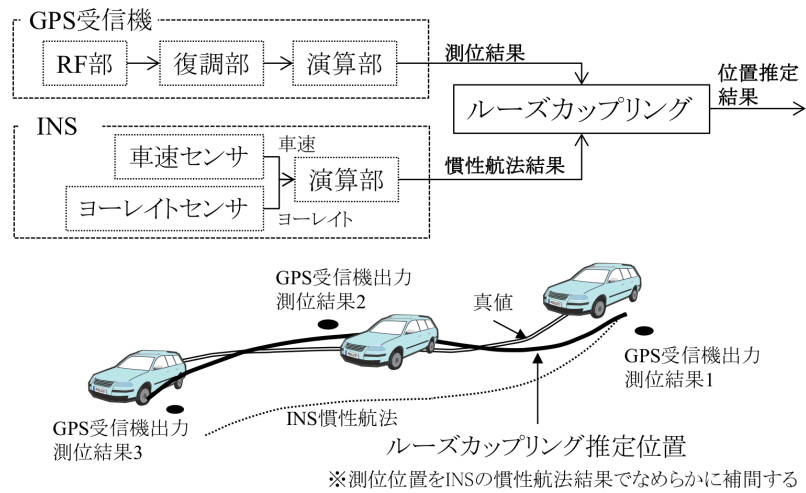


図 2.5 GPS と INS のルーズカップリングによる位置推定例

ルーズカップリングは GPS の受信環境に関わらず位置を推定できる。また、INS で推定された慣性航法結果と GPS の測位結果とを比較し、大きな差異がある場合にはマルチパスがあると判断し、GPS 受信機が出力する測位結果を用いないようにすることで位置推定精度の向上も期待できる。一方、INS だけでは慣性航法の進行方位（真北に対する進行方向の確度）の決定ができないため、初期方位は GPS 受信機が出力する測位結果を用いて決定する。このため、測位結果に大きな誤差が含まれる場合、INS の慣性航法精度も劣化しやすい。マルチパスの影響が大きい都心部などでは、ルーズカップリングは十分な位置推定精度向上の効果がみられない可能性がある。

2.1.3.2 タイトカップリング (Tightly Coupled Integration)

GPS 受信機で計測された信号を用いて受信機内で演算された位置推定結果と INS の慣性航法結果とを統合する手法がルーズカップリングと呼ばれるのに対し、受信機内で演算される前の疑似距離などの GPS Raw データと INS とを統合する手法はタイトカップリングと呼ばれる。GPS と INS のタイトカップリングの場合、衛星数が不足し、受信機から測位結果が得られない状況においても、INS から得られる速度やヨーレイトと GPS の疑似距離とを観測値として統合することで、衛星数が 4 個未満の場合でも、GPS からの信号を反映した位置を推定できる効果がある。特に、GPS 衛星ごとに疑似距離の誤差を評価し、良好な信号のみを利用した位置推定が可能になる [35][36]。図 2.6 に統合イメージを示す。

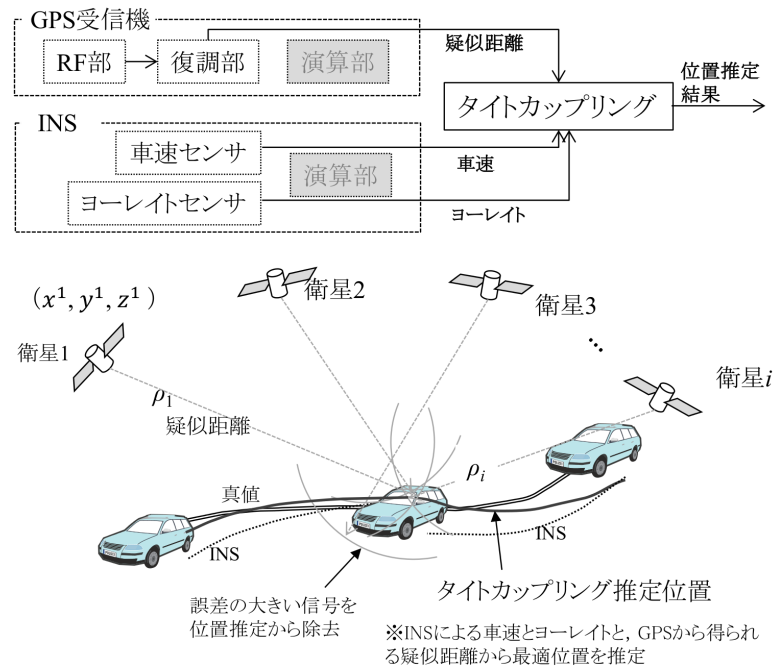


図 2.6 GPS と INS のタイトカップリングによる位置推定例

特に、INS の性能が高く慣性航法の精度が高い場合は、大きな誤差を含む疑似距離を判断して、位置推定に利用しないようにすることで位置推定誤差の低減も期待できる。測量目的の計測車両に利用される高精度な位置計測装置はジャイロ스코プの性能が高いため、タイトカップリングによる位置推定を行うことで位置推定精度を向上させている。しかし、ルーズカップリングの場合と同様に、汎用の車載ジャイロを想定すると慣性航法の精度を保つことは容易ではない。都心部では受信した信号の半数がマルチパスとなることも多く、1 エポック[†]で疑似距離誤差が大きい衛星を確実に判別することは容易ではない。

2.1.3.3 ウルトラタイトカップリング (Ultra Tightly Coupled Integration)

上記 2 つの統合手法は、GPS 受信機内で演算された測位結果あるいは計測された信号と、INS との統合を行うものであった。それらに比較して、受信機が衛星からの信号を計測する段階において INS の情報を用いる手法はウルトラタイトカップリングと呼ばれる [43][44]。ルーズカップリングやタイトカップリングは、GPS 受信機と INS が独立した構成になっているため、設計が容易であった。一方、移動体の速度変化が大きい場合には、

[†] 測位に必要な 1 回分のデータ計測、あるいはそのタイミング。

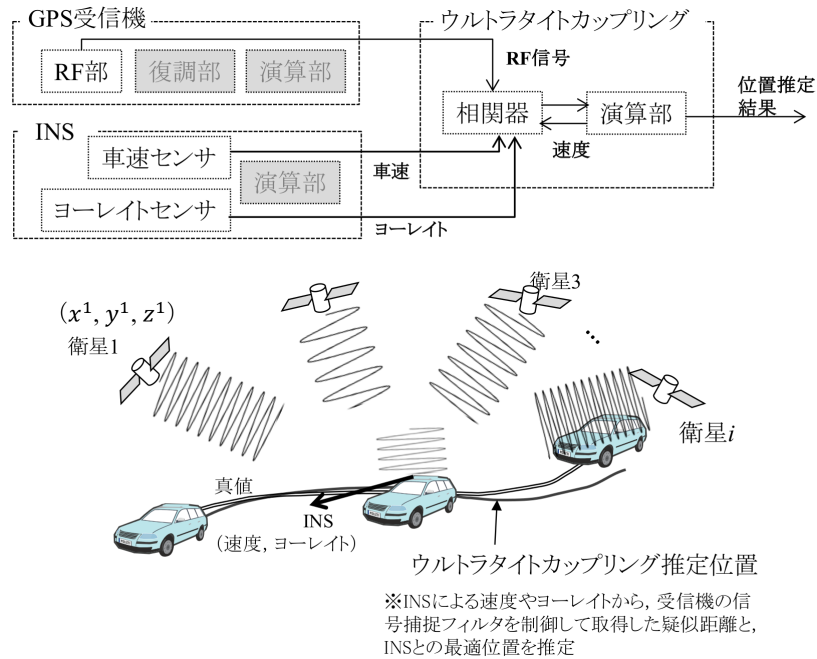


図 2.7 GPS と INS のウルトラタイトカップリングによる位置推定例

受信機が 1 時刻前と同じ速度で信号捕捉を行うと現時刻との速度差が大きくなり、信号捕捉に失敗する状況が生じる。ウルトラタイトカップリングでは、INS で得られる速度を参照することで衛星との相対速度を予測し、信号捕捉を確実行うことが可能になる。高速で移動する航空機用途を中心に研究開発されている手法であるが、車両用途にも、車速を利用してマルチパス信号の受信そのものの回避などが期待できる。この様子を図 2.7 に示す。ただし、現時点（2015 年 4 月）では実際に車両への適用した製品は見当たらない。

2.2 本研究のアプローチ

本節では、関連研究に対する本研究のアプローチとその位置づけについて記す。本研究では自動車運転支援用の位置推定を目的とし、汎用車載レベルのセンサを用いた 1 m ~ 5 m の精度の実現を目指す。交通事故を無くするためには、広く車載可能な安価な構成でなくてはならない。そこで本研究では、カーナビ相当の汎用 GPS 受信機と車載の INS、更に、運転支援システム用に普及が期待される周辺監視用センサまでを想定する。

カーナビの経路案内レベルに必要な位置推定精度は 30 m ~ 50 m 程度であるため、GPS の単独測位や GPS と INS のルーズカップリングで実現できる位置推定精度で大きな問題

はなかった．本研究の目的とする「先読み運転支援システム」では特定の場所での支援を行うため，警報には 5 m，制御には 1 m の位置推定精度が必要と考えられている．2.1 節で述べた通り，汎用 GPS 受信機を用いた場合，郊外の受信環境が良好な場合は 5 m の精度を実現できる場合もあるが，概ね 10 m 程度の位置推定誤差が生じる．都心部では遮蔽などによって可視衛星数が不足する状況も多く，GPS だけで常時位置推定を行うことは困難である．そのため，GPS と INS との統合手法が各種提案されているが，GPS 受信環境が厳しい環境では 1 m ～ 5 m の位置推定精度を実現できていない．

第 1 章で述べた通り，GPS を用いた位置推定には大きく分けて「(I) ばらつき誤差」，「(II) 外れ値誤差」，「(III) オフセット誤差」の 3 種類の誤差がある．本研究では，安価な構成で 1 m ～ 5 m の精度を実現することを目的に，2 つのアプローチで上記誤差の低減に取り組み，位置推定精度向上を目指す．1 つ目は周囲との位置関係を計測可能なレーザなどの周辺監視用センサと GPS の測位結果を統合する高精度位置推定手法であり，2 つ目は GPS 受信機で取得できる疑似距離や Doppler シフト周波数などの計測値（GPS Raw データ）を利用し，特に 1 エポック分の GPS Raw データではなく複数エポック分の GPS Raw データを用いて疑似的に衛星数を増加させる高精度位置推定手法である．以下にこれら 2 つのアプローチのねらいを整理する．

2.2.1 周辺監視用センサの活用による高精度化

近年，先行車両に対する自動追従や障害物に対する自動ブレーキ，白線検出による車線維持[‡]などのシステムが市販されている．これらのシステムにはレーザレーダやミリ波レーダ，カメラなどのセンサが周辺監視用に搭載され，システムの普及に伴い，今後も市場での周辺監視用センサの台数は増加すると考えられる．

周辺監視用センサは周辺にある対象物との相対位置関係を計測する機能がある．本研究では 1 つ目のアプローチとして，周辺監視用センサを活用し，GPS 受信機内で演算されて出力された単独測位結果に対する位置推定精度の向上を狙う．運転支援用に搭載された周辺監視用センサを利用するため，センサの追加は不要である．1 つ目のアプローチは周辺監視用センサが計測した周辺静止物との相対位置関係を活用することで位置推定時の拘束条件を強くし，「(I) ばらつき誤差」の低減効果を狙う．本アプローチでは特に周辺監視

[‡] カメラで検出した白線と自車との位置関係から，車線内で走行するように操舵制御を行うシステム．

用センサとしてレーザレーダを使用し，GPS 受信機の単独測位結果とレーザレーダによる周辺監視結果とを統合する高精度自車位置推定を提案する．

本アプローチに基づいて，第 3 章と第 4 章において 2 つの手法を提案する．第 3 章では自車の絶対位置とあわせて，周辺監視用センサで相対位置を計測した周辺静止物の絶対位置を推定することで自車位置推定精度を向上させる「SLAM 型高精度自車位置推定手法」を提案する．第 4 章では周辺監視用センサで計測される周辺静止物との相対位置関係の変化から推定した自車の移動量を利用し，自車の位置推定精度を向上させる「運動推定型高精度自車位置推定手法」を提案する．本アプローチは「(I) ばらつき誤差」の低減を狙うものであり，マルチパスなどによる外れ値誤差やオフセット誤差がない郊外の環境においてその効果を検証する．その場合，汎用 GPS の単独測位の位置推定誤差は 5 m 以内となることも多いことから，本アプローチでは，周辺監視用センサを活用することで 1 m の位置推定精度の実現可能性について評価する．

2.2.2 GPS Raw データを活用した疑似的な衛星数増加による高精度化

汎用 GPS 受信機が出力する測位結果には，「(I) ばらつき誤差」の他，マルチパスの影響による「(II) 外れ値誤差」や，伝搬遅延などの影響による「(III) オフセット誤差」がある．例えば，都心部の位置推定誤差は図 2.4 に示した通り 30 m 以上になることも多い．一般的に GPS 受信機が出力する測位結果は 1 エポックで計測した疑似距離のみを用いた結果が主流である．都心部などでは遮蔽などにより衛星数が不足し，測位できない地点も多い．また，衛星からの信号を受信できたとしても反射や回折などのマルチパスが多くなり，位置推定誤差が大きくなる地点も多い．位置推定を都心部でも可能にするため，GPS 測位結果と INS とのルーズカップリングが用いられるが，直接波が少ない状況でマルチパス信号を判定することは容易ではないため，GPS と INS を統合した場合でも，5 m の位置推定精度を実現することは難しい．観測できる衛星数が増加すると位置推定精度が向上する傾向にあるが，衛星数には物理的な限界があり，1 エポックで観測できる衛星数は限られている．

本研究では 2 つ目のアプローチとして，GPS 受信機内で演算される前の，計測した GPS Raw データ（疑似距離，GPS Doppler，S/N，軌道情報）を利用し，疑似的に衛星数を増加させることで位置推定精度の向上を狙う．衛星数を疑似的に増加させることでマルチパス信号の判別が容易になる可能性がある．また，衛星数が増加すると，衛星配置の

幾何学的な偏りが少なくなることの他に、疑似距離の誤差の偏りも少なくなる傾向にある。2 つ目のアプローチは疑似的に衛星数を増加させることで、「(I) ばらつき誤差」だけでなく、特に「(II) 外れ値誤差」と「(III) オフセット誤差」の低減効果を狙う。本アプローチに基づいて、第 5 章と第 6 章において 2 つの手法を提案する。

第 5 章では、現在の位置から過去数 10 メートルの範囲の走行軌跡上の GPS Raw データを利用することで衛星数を疑似的に増加させる「走行軌跡上の GPS Raw データを活用した高精度自転車位置推定手法」を提案する。衛星数を疑似的に増加させることで「(I) ばらつき誤差」を低減するとともに、マルチパス判別を可能にして「(II) 外れ値誤差」を低減し、自転車位置推定精度の向上を目指す。特に、マルチパス信号が存在する環境での効果を検証するため、都心部の環境においてその効果を検証する。なお、走行軌跡上の GPS Raw データを利用するためには、走行軌跡の推定精度も重要である。そこで、第 5 章では GPS Raw データを活用した高精度な軌跡推定についても提案する。本手法は GPS Raw データを利用し、都心部において 5 m の自転車位置推定精度を目指す。

第 5 章で提案する走行軌跡上の GPS Raw データを利用する場合、同一走行中は電離層遅延などの変化が少ないため、「(III) オフセット誤差」の影響はそのまま残ることが考えられる。そこで第 6 章では、現在の走行中のデータだけではなく、過去の走行時に同一地点付近を走行した時の GPS Raw データを利用することで衛星数を疑似的に増加させる「複数走行分の GPS Raw データを活用した高精度自転車位置推定手法」を提案する。GPS Raw データの計測時刻を変えることで、電離層遅延や対流圏遅延にも変化が生じ、「(I) ばらつき誤差」だけでなく、特に「(III) オフセット誤差」の低減が期待できる。なお、過去の走行も含めて複数回分の GPS Raw データを利用するためには、現在の地点と過去の走行時に走行した地点の位置関係が必要である。そこで、汎用 GPS 受信機と前方カメラを利用して GPS Raw データを取得した周辺環境の情報を保存し、各走行間の相対位置関係を推定する方法についても述べる。本手法は GPS Raw データを利用し、郊外環境と都心部の両方の環境で 5 m の自転車位置推定精度を目指す。

第 3 章

周辺監視用センサを活用した SLAM 型自車位置推定による高精度化

3.1 はじめに

本章と次章では，本研究における自車位置推定精度向上のための 1 つ目のアプローチとして，汎用 GPS 受信機が出力する測位結果とレーザーレーダなどの車載の周辺監視用センサを用いた手法を提案し，その効果について検証する．このアプローチは，周辺静止物と自車との相対位置関係を常時計測することで，自車の位置変化に拘束を与え，GPS を用いた位置推定における誤差のうち，主に「(I) ばらつき誤差」の低減を狙う．

まず本章では，周辺監視用センサで検出できる周辺静止物の位置と自車位置とを同時に推定する SLAM 型高精度自車位置推定を提案する．SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) とは，移動体の位置 (Localization) とともに周辺の静止物の位置 (Mapping) を同時に推定する課題設定であり，ロボットの自律移動などにおいて広く研究されている．本研究では，SLAM の考え方を自動車の走行環境に適用し，自車位置推定精度の向上を図る．本章では，GPS 受信機が出力する測位結果に対し，提案手法を適用した場合の位置推定精度向上について議論する．

3.2 関連研究と本研究のアプローチ

3.2.1 GPS と周辺監視用センサを利用した従来研究

GPS と周辺監視用センサを用いることで自車の位置推定精度を向上させる代表的な手法として、予め周辺静止物の位置を高精度に計測して保存しておき、実走行時に周辺監視用センサで検出した周辺静止物とを照合して、自車位置を推定する手法 [45] がある。そのためには高精度な静止物地図を事前に作成する必要があるため、非常に高いコストを要する。そのため一部の限られた環境下で適用することは現実的であるが、一般の運転環境に広く適用することは容易ではない。

別の手法として、あらかじめ周辺監視用センサと、RTK-GPS などの高精度測位が可能な受信機とを搭載した車両で走行し、自車の高精度な測位位置を中心にして、周辺静止物の相対位置を計測した記録を用いる手法がある [46][47]。実走行時は周辺監視用センサと安価な GPS 受信機とを搭載し、計測した周辺静止物と記録された静止物を照合することで、周辺静止物の位置から自車位置を計算する。Google 社の自動運転車両 [4] の位置推定手法は、予め高精度なレーザレーダで計測したレーザの反射点位置の情報を保存しておき、実走行時は計測したレーザレーダの結果と保存したレーザ反射位置情報とを照合して自車位置を推定するものであり、参考文献 [46]、[47] に示す研究などと同じ考え方に基づいて高精度な位置推定を実現している。

周辺監視用センサを用いる場合、参考文献 [45]、[46]、[47] のように周辺静止物の位置情報を予め作成しておき、それを利用するアプローチがよく見られる。しかし、これらの手法は計測結果が保存されていない場所での高精度な自車位置の推定は困難であり、自動車の走行環境に広く適用することは容易ではない。本研究の目的は、安価なセンサを用いた市販車両に広く適用可能な高精度自車位置推定であるため、周辺監視用センサを用いた従来の位置推定手法 [45][46][47] を適用することは適切ではない。

3.2.2 SLAM の従来研究

予め周辺静止物の位置情報を用意することなく、自車位置と周辺静止物の位置とを同時に推定する「SLAM (Simultaneous Localization And Mapping)」と呼ばれる課題設定

がある。SLAM は 1980 年代頃から現在に至るまで、移動ロボットの分野において広く研究が行われている [48][49]。移動ロボットは GPS からの測位位置が利用できない屋内環境 [50] を対象とすることも多く、SLAM は移動体の移動量を取得するオドメトリと、周辺静止物との位置関係を計測するレーザレーダなどを用いて解決されることが多い。オドメトリから得られる移動体の移動量と、レーザレーダで取得した周辺静止物に対する相対的な位置変化の整合性を考慮することで、移動体と周辺静止物の位置推定精度を同時に向上させる考え方である。

オドメトリによる移動体の位置変化には累積誤差が含まれたため、推定される周辺静止物の位置も累積誤差の影響を受ける。オドメトリによる累積誤差を削減するには、累積誤差が生じている地点間で同一の静止物を計測できると有効である。例えば、始点と終点で同じ周辺静止物を計測できると、移動量と静止物との相対位置関係から累積誤差を推定し、経路全体を補正できる。そのため、周回して起点に戻る閉ループを設定することで累積誤差を推定して削減し、位置推定精度を向上させている研究が多い [63]。屋外環境を対象とした SLAM の問題設定においても屋内と同様に、閉ループを想定した研究 [64] が主流であり、通常の自動車が行く状況を想定して取り組んだ研究では、道路形状などの事前情報を利用している [52][53][54]。

3.2.3 本研究のアプローチ

本章では、「先読み運転支援システム」に適用可能な 1 m ~ 5 m の自車位置推定精度実現のために、SLAM の概念を自動車の一般的な走行環境に適用させる「SLAM 型高精度自車位置推定」を提案する。前述のように、SLAM の代表的なアプローチは閉ループの経路を想定し、同一の周辺静止物を照合することでオドメトリの蓄積誤差を低減して、周回後に自車位置推定精度を向上させる方法である。しかし、実際の自動車の走行環境では、走行後の自車位置推定精度の向上ではなく、リアルタイムで高精度に位置を推定する必要がある。そこで、提案する SLAM 型高精度自車位置推定では、オドメトリの代わりに GPS を用いることで蓄積誤差を低減し、閉ループの設定を不要とするとともにリアルタイム性を確保する。また、GPS を用いることによる位置推定誤差の 1 つである「(I) ばらつき誤差」を、周辺静止物の位置も同時に推定することで低減し、自車の位置推定精度を向上させる。

世界座標系などのような、共通の固定座標系で示される位置を「絶対位置」と呼ぶこと

にすると，GPS 受信機から出力される測位結果は絶対位置である．一方，レーザレーダで計測される周辺静止物の位置は，レーザレーダ原点からの相対位置である．周辺静止物の絶対位置は自車の絶対位置とレーザレーダで計測された相対位置とによって推定される．提案手法による位置推定精度向上において重要な点は，自車の絶対位置は移動によって変化しても，周辺静止物の絶対位置は変化しないことである．GPS の測位結果に誤差がある場合でも，周辺静止物の絶対位置を繰り返し推定することで，その位置推定誤差の低減が期待できる．その結果，周辺静止物の絶対位置推定結果と計測した相対位置から，自車位置の推定誤差の低減も期待される．本提案は，周辺静止物の位置を登録した地図を予め用意する必要がなく，安価な構成で GPS 受信機の単独測位結果よりも高精度な自車位置推定を実現できる可能性がある．

以降，3.3 節において提案手法による高精度化の概要と解法について示し，3.4 節で提案手法の効果を実環境データを用いて検証する．また，3.5 節において，実際の自動車が走行する環境への適用可能性について検証する．

3.3 提案手法 1-1：SLAM 型高精度自車位置推定手法

3.3.1 本手法の概要

提案手法による自車位置推定の高精度化の仕組みについて図 3.1 に図解し，図 3.2 に処理手順を示す．図 3.1 に示す通り，Step 1 において，時刻 t_1 の自車の絶対位置を GPS 受信機の測位結果から取得し，想定される GPS の測位誤差に基づいて自車位置の誤差分散を推定する．また周辺静止物の相対位置をレーザレーダで計測し，想定される相対位置誤差分散を評価する．最後に，計測された自車の絶対位置と周辺静止物との相対位置に基づいて，周辺静止物の絶対位置を算出するとともに位置誤差分散を算出する．

次の Step 2 においては， Δt 経過後の自車の絶対位置と位置誤差分散を時刻 t_1 で推定された運動から予測する．その時，レーザレーダで計測した周辺静止物の相対位置と，予測された自車の絶対位置に基づいて，周辺静止物の絶対位置と位置誤差分散を算出する．Step 1 で算出した周辺静止物と Step 2 で算出した周辺静止物が同一であれば，それらの絶対位置は等しいはずなので，それぞれで算出した絶対位置の最適解を求めると，周辺静止物の絶対位置と位置誤差分散が更新される．周辺静止物が同一であれば推定された絶対位置は徐々に真の位置に近づき，その位置誤差分散は縮小する．周辺静止物の位置と

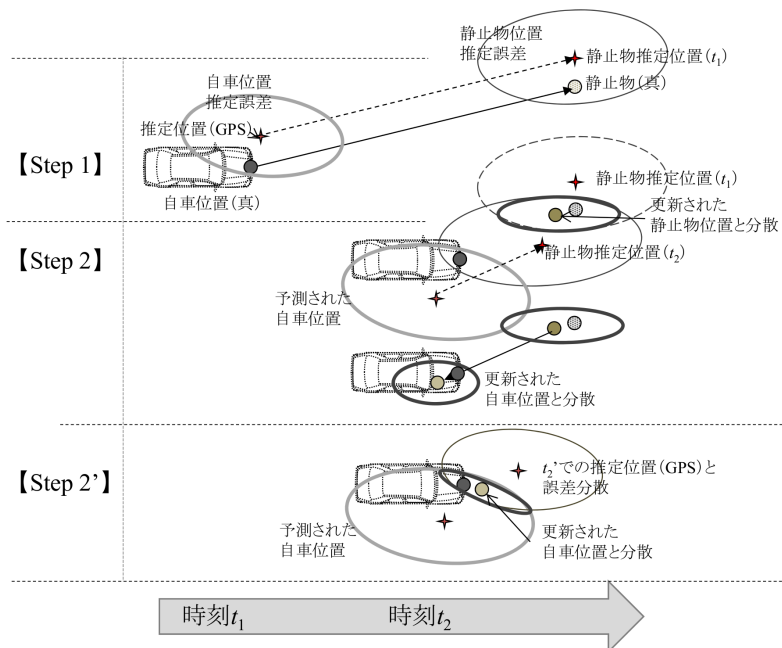


図 3.1 SLAM 型高精度自車位置推定の仕組み

位置誤差分散が更新されれば，レーザレーダの計測値と計測誤差に基づいて自車の位置と位置誤差分散も更新され，自車の位置推定精度が向上すると考えられる．

レーザレーダからの計測値がなく，GPS からの測位結果のみがある場合は，Step 2' において自車位置の予測値と GPS 受信機からの測位結果とを用い，位置と誤差分散とを更新する．レーザレーダの計測値と GPS 受信機からの測位結果の両方を得られる場合は，Step 2 と Step 2' を同時に実施する．

上記を繰り返すことで周辺静止物と自車の絶対位置が同時に推定され，その位置誤差分散も徐々に小さくなり，推定位置精度も徐々に向上する．上記の手法で自車と周辺静止物の位置を逐次的に推定し，その推定精度を向上することが可能になる．なお，以上の説明では 1 つの周辺静止物を想定したが，複数の周辺静止物がある場合も同様に絶対位置を推定し，複数の周辺静止物の絶対位置から自車位置を推定することができるため，周辺静止物の数が増加するほど自車位置推定精度も向上すると考えられる．

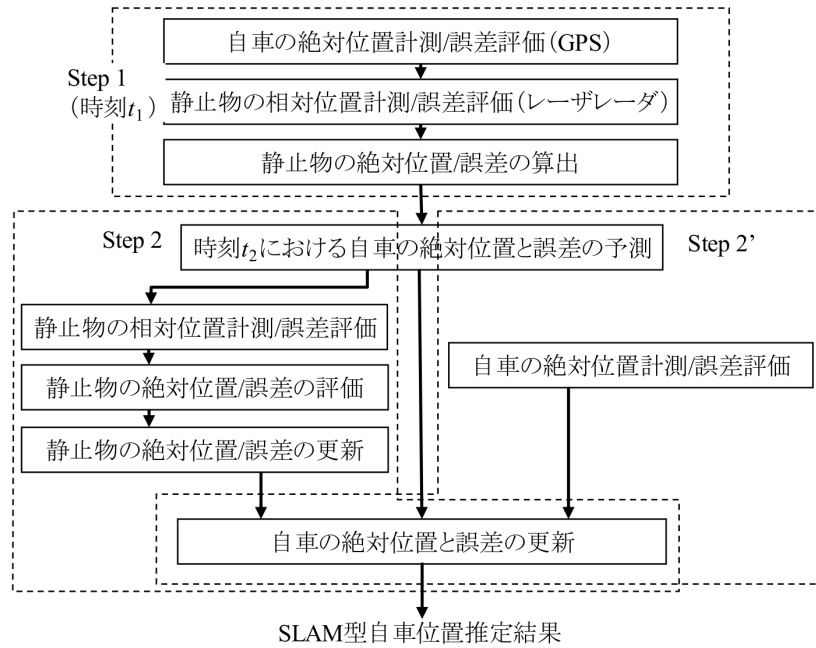


図 3.2 SLAM 型高精度自車位置推定の推定手順

3.3.2 拡張 Kalman フィルタを用いた解法

上記のような、逐次的に最適解を求める代表的な方法として Kalman フィルタがあり、従来より SLAM の解法として多く用いられている。非線形の問題を扱う拡張 Kalman フィルタ (Extended Kalman filter) [60][61] やパーティクルフィルタ (Particle filter) [62][65]、近年は拡張カルマンフィルタの非線形近似に改良が加えられた UKF (Unscented Kalman Filter) [66][67] やパーティクルフィルタの計算コストを低下させた RBPF (Rao-Blackwellised Particle Filter) [68][69] などで SLAM を解く試みがなされている。SLAM では自車の位置と周辺静止物の位置を同時に推定するため、推定する静止物の数に応じて未知数が増加し、膨大な計算コストを必要とすることから、上記の工夫がなされている。本研究では特定の周辺静止物に対する位置推定をするのみであり、典型的な SLAM で行われるような密な周辺静止物の位置推定を実施しないため、基本的な手法である拡張 Kalman フィルタを用いて推定を実施する。本節では拡張 Kalman フィルタについて概説し、それを用いた具体的な SLAM の解法について示す。

3.3.2.1 Kalman フィルタと拡張 Kalman フィルタの概説

拡張 Kalman フィルタは非線形の状態モデルを線形化して Kalman フィルタに適応させたものである．まず最初に線形推定問題である Kalman フィルタについて簡単に示した後、非線形推定問題である拡張 Kalman フィルタについて説明する．なお、本論文におけるカルマンフィルタの説明は文献 [42] の記述を参考にした．

Kalman フィルタとは式 (3.1) と (3.2) に示す離散時間の線形確率システムを対象とし、観測信号を入力として、システムの状態の最適推定値を逐次出力するフィルタ（アルゴリズム）である．このモデルは一般的に状態空間モデルと呼ばれる．

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{G}_k \mathbf{w}_k \quad (3.1)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{s}_k + \mathbf{v}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (3.2)$$

ここで、 \mathbf{x}_k は時刻 t_k の状態ベクトルと呼ばれ、システムノイズと呼ばれる白色雑音 \mathbf{w}_k を入力とする線形動的システムで表されている．一方、通常のシステムではすべての状態が観測されることは稀であり、一部の状態、あるいは線形関数として観測されることが一般的である．システムの出力は観測時に混入する観測ノイズ \mathbf{v}_k を考慮して式 (3.2) として扱われる．ここで、 $\mathbf{x}_k, \mathbf{w}_k, \mathbf{y}_k, \mathbf{v}_k, \mathbf{s}_k$ はベクトルである．

$\mathbf{F}_k, \mathbf{G}_k, \mathbf{H}_k$ は物理的な法則から導かれる場合と、実験的に計測された相関に基づいて導かれる場合があり、その導出に基づいた行列である． \mathbf{F}_k を状態遷移行列、 \mathbf{G}_k を駆動行列、 \mathbf{H}_k を観測行列と呼ぶ．この状態空間モデルにおいて、観測値 $\mathbf{y}_0, \dots, \mathbf{y}_k$ が得られた時の状態ベクトル \mathbf{x}_k の最適値を求める方法を Kalman フィルタと呼び、式 (3.3) ~ (3.6) で表すことができる．但し、初期値を式 (3.8) とする．

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}) \quad (3.3)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} = \mathbf{F}_k \hat{\mathbf{x}}_{k|k} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{K}_k = \hat{\Sigma}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \hat{\Sigma}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \Sigma_{\mathbf{v}_k})^{-1} \quad (3.5)$$

$$\hat{\Sigma}_{k|k} = \hat{\Sigma}_{k|k-1} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \hat{\Sigma}_{k|k-1} \quad (3.6)$$

$$\hat{\Sigma}_{k+1|k} = \mathbf{F}_k \hat{\Sigma}_{k|k} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{G}_k \Sigma_{\mathbf{w}_k} \mathbf{G}_k^T \quad (3.7)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{0|-1} = \bar{\mathbf{x}}_0, \hat{\Sigma}_{0|-1} = \Sigma_{\mathbf{x}_0} \quad (3.8)$$

実世界の問題では、システムが線形である場合よりも非線形である場合の方が多い．非

線形の状態空間を式 (3.9) , (3.10) とした場合に Kalman フィルタを適用する考え方について説明する .

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}_k(\mathbf{x}_k) + \mathbf{g}_k(\mathbf{x}_k)\mathbf{w}_k \quad (3.9)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k \quad (3.10)$$

状態ベクトル \mathbf{x}_k の推定値 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$, $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ を既知とし , その推定値の近傍で $\mathbf{f}_k(\mathbf{x}_k)$ と $\mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k)$ をそれぞれ Taylor 展開する .

$$\mathbf{f}_k(\mathbf{x}_k) = \mathbf{f}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k|k}) + \mathbf{F}_k[\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k|k}] + \dots \quad (3.11)$$

$$\mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k) = \mathbf{h}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}) + \mathbf{H}_k[\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}] + \dots \quad (3.12)$$

ただし ,

$$\mathbf{F}_k = \left. \frac{\partial \mathbf{f}_k(\boldsymbol{\xi}_k)}{\partial \boldsymbol{\xi}_k^T} \right|_{\boldsymbol{\xi}_k = \hat{\mathbf{x}}_{k|k}}, \quad \mathbf{H}_k = \left. \frac{\partial \mathbf{h}_k(\boldsymbol{\xi}_k)}{\partial \boldsymbol{\xi}_k^T} \right|_{\boldsymbol{\xi}_k = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}} \quad (3.13)$$

である . また , $\mathbf{G}_k = \mathbf{g}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k|k})$ と定義し , Taylor 展開の 1 次の項までを採用して , 整理すると拡張 Kalman フィルタの式 (3.14) , (3.15) が得られる . Kalman ゲイン \mathbf{K}_k や共分散 , 初期値は Kalman フィルタと同じ , 式 (3.5) ~ (3.8) の形で表記される .

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k(\mathbf{y}_k - \mathbf{h}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})) \quad (3.14)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} = \mathbf{f}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k|k}) \quad (3.15)$$

3.3.2.2 提案手法 1-1 への拡張 Kalman フィルタの適用

本節では SLAM 型高精度自車位置推定に対して拡張 Kalman フィルタを適用する際の , 状態ベクトル , 観測値 , 状態遷移行列 , 観測行列について具体的に示す . 図 3.3 に使用した座標系を示す . 自車中心座標系とレーザレーダ座標系は同一とし , それぞれの原点を O_v , O_l とする . 原点を O_w とする世界座標系は固定の座標系であり , 世界座標系の上に自車が存在する . 本研究で想定する環境において推定する状態ベクトル \mathbf{x}_k を式 (3.16) に示し , 観測値 \mathbf{y}_k を式 (3.17) に示す . 状態ベクトル \mathbf{x}_k は世界座標系における自車の絶対位置 (x, z) と , 世界座標系の北方向 (Z_w) に対する自車中心座標系の進行方向 (Z_v) の角度 (方位角 : 時計回りを正) ϕ , 進行方向 (Z_v) の速度 v , ヨーレート ω , 周辺静止物

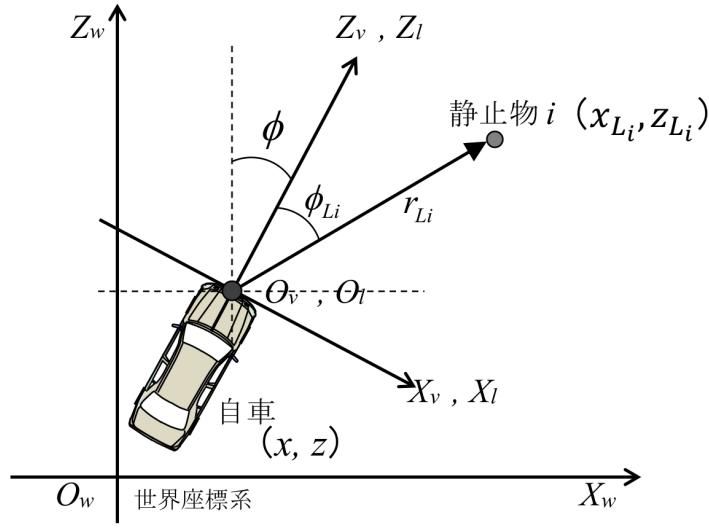


図 3.3 SLAM 型高精度自車位置推定における座標系

L_i の絶対位置 (x_{L_i}, z_{L_i}) で構成される．周辺静止物 L_i の数が増加すれば，状態変数の数も増加する．観測値 y は GPS で取得される緯度経度を平面座標系に変換した平面上の絶対位置 (x_g, z_g) と，周辺静止物 L_i の自車両に対する相対距離 r_{L_i} と相対角度 ϕ_{L_i} で構成される．周辺静止物の数が増加すると観測値の数も増加する．

観測値は状態ベクトルの関数として表現できる．SLAM 型高精度自車位置推定で想定する環境では，ステップ k における状態ベクトルと観測値の関係 $h_k(x_k)$ は式 (3.18) で表される．また，ステップ k からステップ $k+1$ への状態遷移に要する時間を Δt とすると，状態遷移 $f_k(x_k)$ は運動方程式に従い式 (3.19) で表される．式 (3.16)～(3.19) については表記の煩雑さをさけるため，ステップを示す添え字 k を省略して示す．なお，進行方向速度 v とヨーレート ω については急激な変化はないものとした．ここで， Δt を 50 msec 程度と想定しているため，上記前提条件で状態遷移を想定したが， Δt としてより程度長い時間が想定される場合は，進行方向速度やヨーレートの変化も考慮する必要がある．また，周辺静止物の位置 (x_{L_i}, z_{L_i}) は固定である．パラメータ $(v, \omega, x_{L_i}, z_{L_i})$ の値は状態遷移によっては更新されない．

$$\mathbf{x}_k = (x, z, \phi, v, \omega, x_{L_i}, z_{L_i})^T \quad (3.16)$$

$$\mathbf{y}_k = (x_g, z_g, r_{L_i}, \phi_{L_i})^T \quad (3.17)$$

$$\mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k) : \begin{cases} x_g = x \\ z_g = z \\ r_{L_i} = \sqrt{(x_{L_i} - x)^2 + (z_{L_i} - z)^2} \\ \phi_{L_i} = \tan^{-1} \left(\frac{x_{L_i} - x}{z_{L_i} - z} \right) - \phi \end{cases} \quad (3.18)$$

$$\mathbf{f}_k(\mathbf{x}_k) : \begin{cases} x(t + \Delta t) = x(t) + v(t) \sin(\phi(t)) \Delta t \\ z(t + \Delta t) = z(t) + v(t) \cos(\phi(t)) \Delta t \\ \phi(t + \Delta t) = \phi(t) + \omega(t) \Delta t \\ v(t + \Delta t) = v(t) \\ \omega(t + \Delta t) = \omega(t) \\ x_{L_i}(t + \Delta t) = x_{L_i}(t) \\ z_{L_i}(t + \Delta t) = z_{L_i}(t) \end{cases} \quad (3.19)$$

状態ベクトルと観測値の関係式 $\mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k)$ を状態ベクトル \mathbf{x}_k で線形化し，行列表記したものを式 (3.20) に示す．

$$\mathbf{H}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{(x - x_{L_i})}{\hat{r}_{L_i}} & \frac{(z - z_{L_i})}{\hat{r}_{L_i}} & 0 & 0 & 0 & \frac{-(x - x_{L_i})}{\hat{r}_{L_i}} & \frac{-(z - z_{L_i})}{\hat{r}_{L_i}} \\ \frac{(z - z_{L_i})}{\hat{r}_{L_i}^2} & \frac{-(x - x_{L_i})}{\hat{r}_{L_i}^2} & -1 & 0 & 0 & \frac{-(z - z_{L_i})}{\hat{r}_{L_i}^2} & \frac{(x - x_{L_i})}{\hat{r}_{L_i}^2} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

また，同様に，状態ベクトルの状態遷移 $\mathbf{f}(x)$ を同じく状態ベクトルで線形化し，行列表記したものを式 (3.21) で示す．

$$\mathbf{F}_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & v \cos \phi \Delta t & \sin \phi \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -v \sin \phi \Delta t & \cos \phi \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

拡張カルマンフィルタの更新式は式 (3.9) の形で記述され、現時刻の推定値 $\hat{x}_{k|k}$ は、予測値 $\hat{x}_{k|k-1}$ に対して、実際の観測値 y_k と、予測値 $\hat{x}_{k|k-1}$ から観測行列によって算出される、観測値の予測値 $h(\hat{x}_{k|k-1})$ との差を考慮した値を付与することで更新される。なお、式 (3.20) と (3.21) においても各変数のステップ k と $k|k-1$ については、式の煩雑さを避けるため省略している。また、 $\hat{r}_{L_i} = \sqrt{(x - x_{L_i})^2 + (z - z_{L_i})^2}$ である。推定対象となる周辺物の数に応じて、状態ベクトルや観測値のパラメータ数は変化し、状態遷移や観測行列の行列数も変化する。

本研究で想定する環境は非線形のモデルであり、上述の方法で状態ベクトルの変数まわりで線形化することによって行列の演算として扱うことができるようになる。また、観測値と状態遷移に含まれる誤差の分散を観測ノイズ、システムノイズとして設定することで、観測値の誤差が大きいと想定される時は拡張 Kalman フィルタで予測される値の確からしさの方が大きくなり、観測値の誤差が少ないと想定される時は観測値の確からしさの方が大きくなる。このように拡張 Kalman フィルタを用い、観測される値に基づいて推定値 $\hat{x}_{k|k}$ を繰り返し求めることで、最適解に収束し、自車位置推定誤差の低減が期待できる。

なお、GPS アンテナの位置とレーザのセンサ中心位置、車両中心位置は一致しないため、予めレーザのセンサ中心位置に、GPS 受信機から出力される位置推定結果を変換して扱った。また、レーザレーダと車体中心は同一とし、レーザレーダの光軸方向と車体の方向も同一とした。

3.4 実験

3.4.1 実験条件

本節では、実際に屋外を走行して取得したデータを用い、提案手法の有効性について検証する。特に、本章の提案は GPS 受信機が出力する測位結果が持つ「(I) ばらつき誤差」の低減に対して効果があると考えられる。そこで、「(II) はずれ値誤差」の影響が少ない郊外の環境において、「(III) オフセット誤差」がなかったシーンを用いて評価する。本節では検証に用いる実際の走行環境で収集したデータについて説明する。郊外の住宅街の一方通行道路約 400m を走行し、周辺監視用センサとしてレーザレーダ (RIEGL 社製 LMS-Q140i-80 [70]) を用いて周辺静止物に対する測距データを収集するとともに、汎用

表 3.1 レーザレーダ (RIEGL 社製 LMS-Q140i-80) の諸元

測距範囲	2 ~ 150 m
距離精度	25 m
FOV (水平角度範囲)	$\pm 40^\circ = \text{Total } 80^\circ$
角度ステップ	0.18°
観測周期	20 Hz

GPS (Pioneer navicom 社製 GPS-M1zz [71]) を搭載して測位位置を取得した。また、位置の参照値として測量用の 2 周波受信機* (Trimble 社製 5700 [72]) の信号を収集し、収集した信号の K-GPS[†] 処理によって算出した位置を真値とした。また参照用にカメラ画像もあわせて取得した。

表 3.1 にレーザレーダの諸元を記す。図 3.4(a) はデータ収集を実施した実環境の状況であり、図 3.4(b) はレーザレーダによって取得された反射点のデータを鳥瞰表示したものである。原点はレーザレーダ中心に相当する。交差点付近に存在する家屋の外壁や縁石、電柱や標識などの柱状物が観測されていることがわかる。図 3.4(a) の網掛け部分と、図 3.4(b) の破線円で囲った部分に対応する周辺静止物と反射点位置である。本研究では、電柱や標識などの柱状物を周辺静止物として計測し、提案手法の有効性を検証する。なお、本研究では、周辺静止物位置の繰り返し推定による自車位置推定精度の向上を目的としているため、レーザレーダの計測データ間の照合問題は解かず、周辺静止物の計測値 (反射点の角度方向と距離) は人手で抽出した。

データを収集した 400 m 分の道路に存在する柱状物体の配置の模式図を図 3.5 に示す。図 3.4(b) において、柱状物に相当する破線円で囲まれた点のレーザレーダ原点からの相対位置を計測し、提案手法を用いて自車の絶対位置推定を行う。前述した拡張 Kalman フィルタを用い、推定値の更新を 20Hz で行った。GPS から測位結果が得られない場合はレーザレーダからの観測結果のみを用いて更新する。なお、観測誤差はレーザレーダの性能に基づいて、距離誤差を 0.5 m、角度誤差を 1.0° と設定した。

* 第 2 章参照

† 第 2 章参照

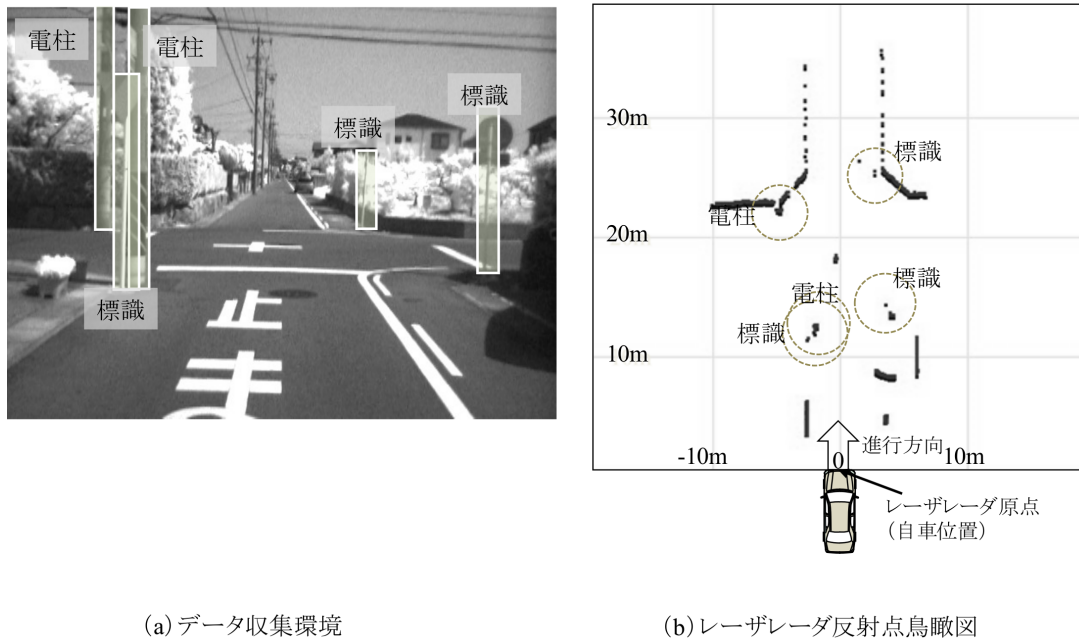


図 3.4 実環境シーン例

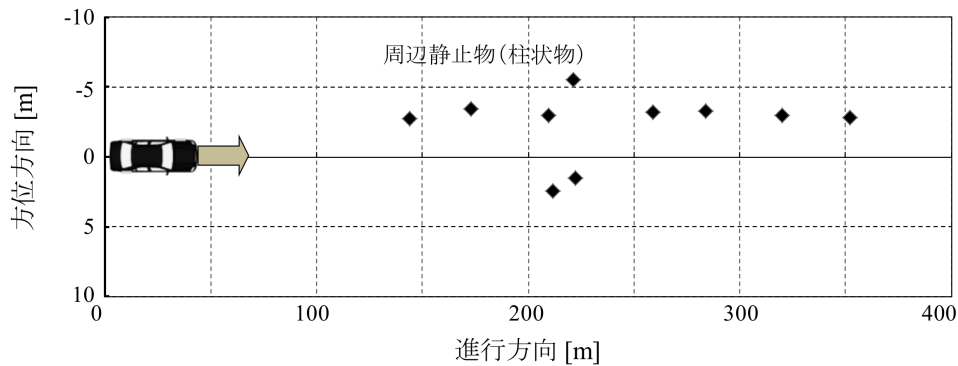


図 3.5 データ収集環境における周辺静止物の配置

3.4.2 実験結果

上記の実験条件における、自車位置推定結果の進行方向位置誤差を図 3.6 に示す。図 3.6 中の網掛け部分が周辺静止物を観測可能であった時間を示す。提案手法による推定結果（太実線）とともに、GPS の測位結果のみを用いて同一条件で自車位置を推定した結果（細実線）、および GPS の測位結果をプロットして記す。

表 3.2 進行方向位置推定誤差の数値評価

進行方向位置推定方法	2RMS	誤差 1 m 未満の時間割合
GPS 測位結果の利用	5.60 m	31.1%
提案手法	1.66 m	84.7%

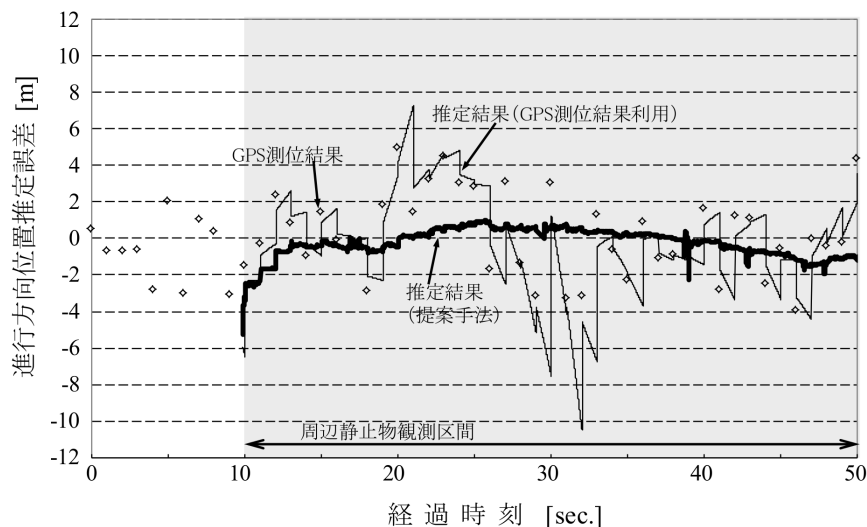


図 3.6 実環境における SLAM 型高精度自車位置推定の結果

データ収集は郊外の住宅地で実施したため，GPS の受信環境は比較的良好であり，10 m を超える誤差を含む測位結果は観測されず，測位誤差の標準偏差は約 3 m であった．この値を測位位置 (x_g, z_g) の観測誤差として推定を行った．図 3.6 より，提案手法を用いた場合，GPS の測位結果のみを入力とした位置推定結果に比較して誤差が大きく減少していることがわかる．推定誤差の評価結果を表 3.2 に示す．位置推定誤差の評価を RMS (Root Mean Square : 2 乗平均平方根)[‡]で行うと，GPS 単独の場合の進行方向推定誤差の 2RMS は 5.60 m であり，自車位置を推定した時間全体の 31.1% において進行方向位置誤差が 1 m 未満となった．一方，提案手法を用いた場合の進行方向推定誤差の 2RMS

[‡] $\text{RMS}[x] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$ 誤差の分布が Gauss 性の場合，誤差分布の 95% は概ね 2RMS の範囲に入る．

は 1.66 m であり，同じく推定時間全体の 84.7% において，進行方向位置誤差が 1 m 未満であった．上記の結果から，実環境における提案手法の有効性が確認できた．

3.5 考察

郊外の住宅街において，GPS と周辺監視用センサを用いた SLAM 型高精度自車位置推定の有効性が確認できた．提案手法は同一の周辺静止物を繰り返し観測することによって，自車位置推定精度の高精度化を実現した．周辺静止物との相対位置の計測が拘束条件となるため，計測可能な周辺静止物の間隔は自車の位置推定精度に影響があると考えられる．本実験環境では，周辺静止物の平均出現間隔は約 40 m であり，利用したレーザレーダの測距性能では常時 1 個以上の周辺静止物を計測可能な環境であった．

本節では，SLAM 型高精度自車位置推定における，周辺静止物間隔の影響をシミュレーションで検証する．また，高精度地図の情報と照合する周辺監視用センサと GPS を用いた従来の高精度位置推定手法 [45] と，提案する位置推定の効果の特性についても考察する．最後に，実際の道路環境において周辺静止物の出現間隔を調査し，実際の走行環境における提案手法の適用可能性について検証する．

3.5.1 周辺静止物間隔と自車位置推定精度の関係

提案手法は，レーザレーダなどの周辺監視用センサで計測した周辺静止物の絶対位置を自車位置と同時に推定することで自車位置の推定精度を向上させたが，周辺静止物との相対位置を計測できない場合や，同一の静止物を繰り返し計測できない場合に，推定精度が低下する可能性がある．提案手法の自車位置推定精度に影響する項目として，周辺監視用センサの計測誤差のほか，周辺静止物の出現間隔と GPS の測位誤差がある．レーザレーダの場合，その距離計測精度は環境によらずに一定なので，本節では周辺静止物の出現間隔及び GPS 測位誤差と，自車位置推定精度との関係を示す．

シミュレーションとして，相対位置を計測可能な周辺静止物を一定間隔で配置し，自車が一定速度で走行する状況を想定して自車の位置推定を実施する．周辺静止物の出現間隔と GPS の測位誤差とを変化させて推定精度を評価した．図 3.7 に想定環境の一例を示し，想定したレーザレーダの性能と，GPS 測位誤差 (σ) と周辺物標の出現間隔を表 3.3 に示す．実環境の実験で使用したレーザレーダ RIEGL 社製 LMS-Q140i-80 は高

表 3.3 周辺静止物の配置とレーザレーダ計測誤差及び GPS 測位誤差設定条件

レーザレーダ	距離誤差	0.5 m
	方位角度誤差	1.0 °
	検知距離	70 m
	FOV	$\pm 20^\circ$
GPS	測位誤差 σ [m]	1, 3, 5, 10, 15, 20, 30
周辺静止物	出現間隔 [m]	10, 20, 30, 50, 70, 100, 200, 500

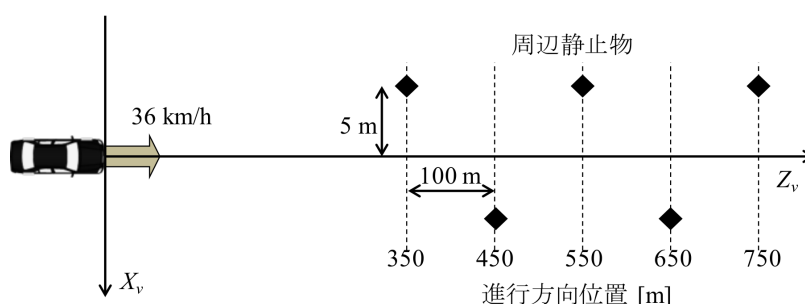


図 3.7 周辺静止物の設置間隔一例（100m 間隔の場合）

性能レーザレーダであり、雑音除去性能に優れ、角度分解能も高く、距離精度も高い。シミュレーションでは廉価なレーザレーダを利用する可能性を考慮し、それよりも性能が低いレーザレーダを想定した。GPS 測位誤差、レーザの距離誤差及び方位角誤差が表 3.3 中の値となるような誤差を真値に付与し、GPS、レーザレーダの観測値とした。また、拡張 Kalman フィルタにおける各々の観測パラメータに対し、表 3.3 に基づいて算出される σ^2 の値を観測ノイズの対角成分として与えた。

提案手法を用いた自車位置の進行方向位置推定の誤差を、それぞれの設定条件において GPS だけを用いた場合と比較して評価する。結果の一例として、GPS の測位精度を 3m、周辺静止物の出現間隔を 50 m とした時の進行方向位置推定誤差を図 3.8 に示し、出現間隔を 500 m とした時の結果を図 3.9 に示す。レーザレーダが周辺静止物を観測できた範囲を図中に網掛けで示す。想定しているレーザレーダの検知距離は 70 m であるため、周辺静止物の間隔が 50 m（図 3.8）の場合は常に周辺静止物を観測できている。そのため、常時、提案手法を適用可能であり、推定精度の向上が期待できる。図 3.8 より、提案手法による位置推定誤差は GPS 単独に比較して減少していることがわかる。図 3.9 に

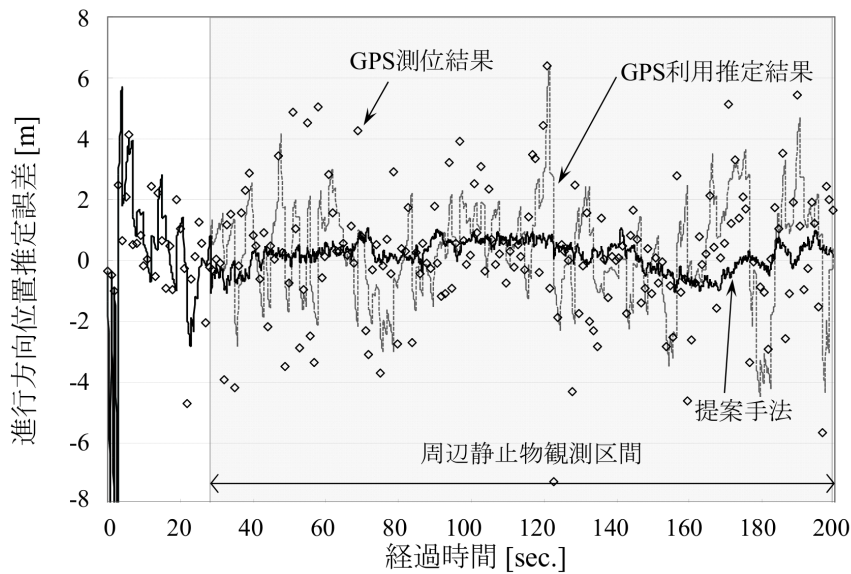


図 3.8 進行方向位置推定誤差 (周辺静止物間隔 50 m)

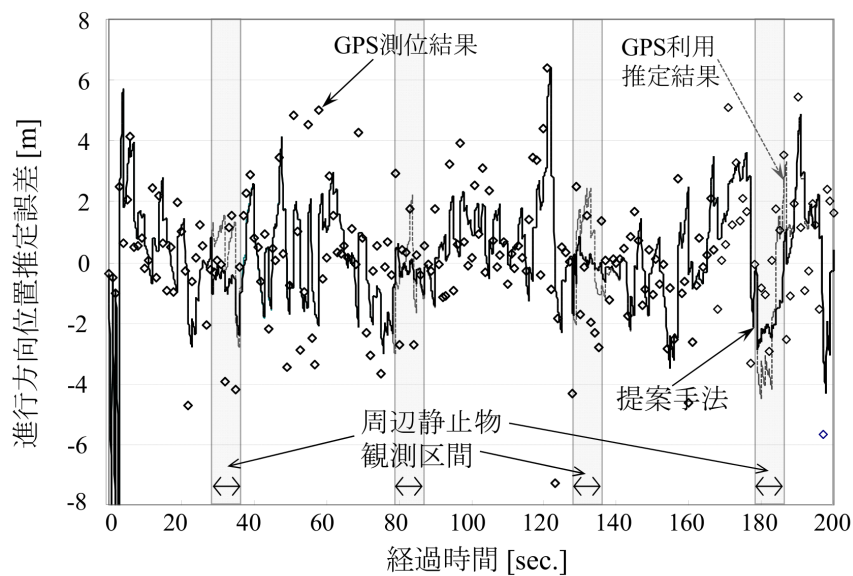


図 3.9 進行方向位置推定誤差 (周辺静止物間隔 500 m)

おいても、周辺静止物を観測可能な区間では推定誤差が減少していることがわかる。しかし、周辺静止物の間隔が 500 m であるため、観測できなくなる区間が多い。周辺静止物を観測できない間、自車の位置推定誤差は増大し GPS 単独で推定した場合と大きな差がないことが分かる。

表 3.4 自車位置推定誤差 2RMS 評価（提案手法）

GPS 測位誤差 (σ)		1 m	3 m	5 m	10 m	15 m	20 m	30 m
周 辺 静 止 物 間 隔	GPS のみ	1.44	3.33	4.85	8.15	11.1	14.0	19.3
	500 m	1.38	3.19	4.62	7.66	10.4	12.9	17.5
	200 m	1.23	2.75	3.94	6.54	9.09	17.0	56.6
	100 m	1.10	2.25	2.87	3.74	4.46	5.18	6.88
	70 m	0.91	1.62	2.11	3.15	4.13	5.18	7.69
	50 m	0.63	1.06	1.42	2.42	3.55	4.78	7.60
	30 m	0.55	0.93	1.28	2.10	2.84	3.60	5.43
	20 m	0.45	0.81	1.17	2.10	3.01	3.92	6.00
	10 m	0.41	0.76	1.08	2.02	3.23	4.67	8.12

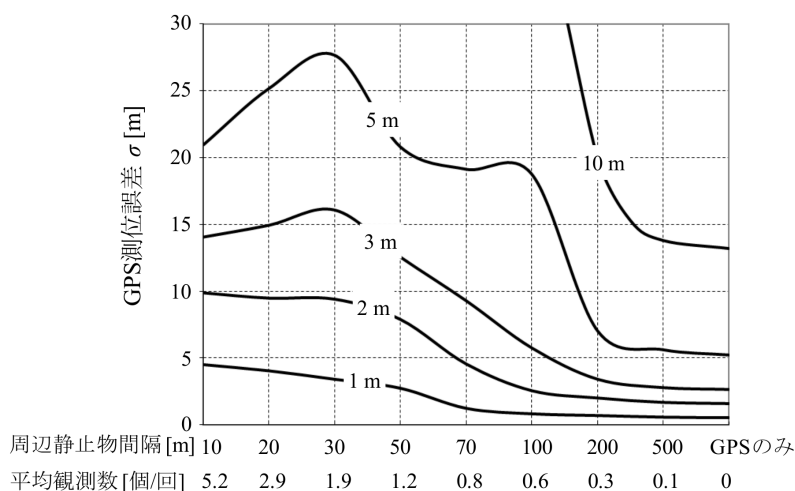


図 3.10 自車位置推定誤差 2RMS 分布（提案手法）

GPS の測位誤差と周辺静止物の間隔が、提案手法の位置推定精度に大きく影響すると思われる。本節では、GPS の測位誤差及び周辺静止物の間隔と、自車位置推定誤差の関係をシミュレーションで確認する。最初の周辺静止物の観測時点（28 秒後）から、200 秒が経過する範囲までの進行方向自車位置推定誤差の 2RMS 値を算出した。表 3.4 に設定条件における位置推定誤差 2RMS 値を示し、図 3.10 に 2RMS の分布を示す。なお、各組み合わせにおいて設定条件に相当する誤差を模擬して乱数を発生させ、評価結果は 15 回分の平均から算出した。

表 3.4 と図 3.10 より、周辺静止物の間隔が 200 m、500 m と広い場合は GPS 単独の場合の自車位置推定精度と大きな差が見られない。しかし、観測可能な周辺静止物の間隔

が 100 m 以下になると位置推定誤差が増大する前に次の周辺静止物を観測可能であるため、推定精度が向上すると考えられる。また、間隔が 50 m 未満になると、想定したレーザレーダでは常に 1 つ以上の周辺静止物を観測できる状況となる。観測可能な周辺静止物の数が増加すると、位置推定の拘束条件が強くなるため、推定精度がより向上すると考えられる。ただし GPS の測位誤差が 15m 以上になる場合は、周辺静止物の観測数と推定精度に相関は見られなかった。測位誤差が大きいため、周辺静止物の絶対位置推定誤差も大きくなり、観測中に推定誤差が十分に減少しないためと考えられる。

シミュレーションから、GPS の測位誤差を 3 m とした場合、周辺静止物の平均観測個数が 1.2 個以上であれば、進行方向位置推定誤差の 2RMS の値は 1 m 以下となることが分かる。提案する周辺監視用センサを用いた SLAM 型の高精度自車位置推定手法を適用することで、3 m の位置誤差を 1m に低減できる可能性があることを確認できた。また、検証実験を実施した実環境の条件（GPS の測位誤差 σ : 3 m、周辺静止物の観測数：約 1 個）におけるシミュレーション結果では、位置推定誤差の 2RMS は 1.5m 程度であり、実環境の結果である 2RMS=1.66 m とよく合致すると考えられる。本節の検証から、提案手法は安価なセンサを用い、郊外の比較的 GPS の受信環境が良好な場合は、GPS 測位結果のばらつき誤差を低減し、自車位置推定誤差 2RMS を 1 m 以下にできる可能性があることを確認した。

3.5.2 SLAM 型位置推定と高精度地図利用の比較

従来研究である周辺静止物の位置が予め記載された高精度地図を用いた手法 [45] の推定結果と比較し、提案手法の有効性検証する。前述の提案手法と同一条件下で高精度地図を利用した場合の自車両位置の推定精度をシミュレーションによって算出し、提案手法の結果（表 3.4 と図 3.10）と同様に、高精度地図を利用した場合の評価結果を表 3.5 と図 3.11 に示す。なお、評価結果は提案手法の評価と同様に、各組み合わせにおいて設定条件下で乱数を発生させ、15 回のシミュレーションの平均から算出した。

予め用意された高精度地図（精度 1 m）を利用し、同じセンサを用いて位置推定を行った場合、推定精度は GPS の測位誤差ではなく静止物の間隔に依存することがわかる。GPS の測位誤差標準偏差 σ が 3 m であったとしても、自車位置推定誤差 2RMS を 1 m 以下にするためには、常に 2 つ以上の静止物を高精度地図より参照できなければならない。一方、周辺静止物と自車位置の同時推定を実施する SLAM の概念を走行環境に適用

表 3.5 自車位置推定誤差 2RMS 評価（高精度地図利用）

GPS 測位誤差 (σ)		1 m	3 m	5 m	10 m	15 m	20 m	30 m
周 辺 静 止 物 間 隔	GPS のみ	1.44	3.33	4.85	8.15	11.1	14.0	19.3
	500 m	1.43	3.	4.37	7.01	9.20	11.1	14.5
	200 m	1.40	2.66	3.56	5.15	6.27	7.08	7.90
	100 m	1.44	2.00	2.18	2.22	2.19	2.17	2.17
	70 m	1.42	1.51	1.52	1.52	1.52	1.52	1.53
	50 m	1.38	1.41	1.41	1.41	1.423	1.42	1.43
	30 m	1.09	1.10	1.10	1.10	1.11	1.11	1.12
	20 m	0.84	0.85	0.85	0.84	0.84	0.86	0.90
	10 m	0.64	0.65	0.65	0.65	0.66	0.65	0.66

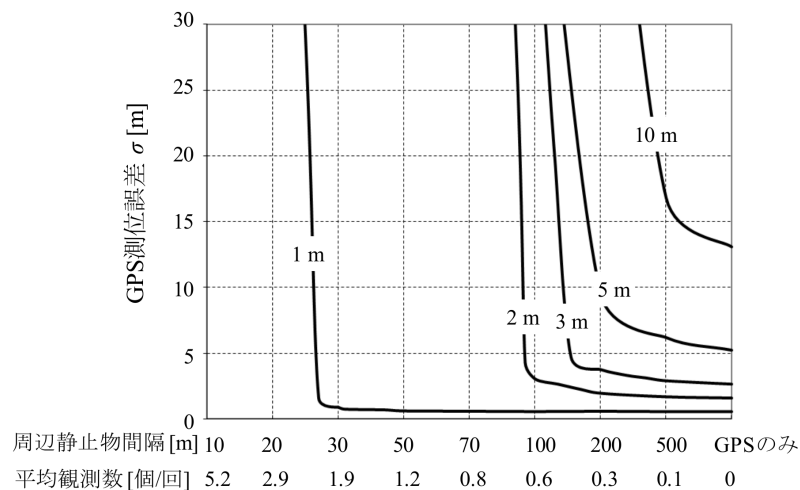


図 3.11 自車位置推定誤差 2RMS 分布（高精度地図利用）

した本提案手法は，GPS の測位誤差に依存するが，常時 1.2 個以上の周辺物標が観測されている状況であれば進行方向位置推定精度 1 m を達成できる可能性がある．提案手法は地図の作成や維持のコストが不要であり，高精度地図を用いた場合と同等以上の精度を実現できる可能性がある．

3.5.3 実環境における周辺静止物間隔の調査

提案手法による自車位置推定精度向上の効果を前節までで確認した．実験を実施したコースでは，常時 1 つ以上の周辺静止物を観測できたが，周辺静止物が存在しないコースでは推定精度の向上が期待できない．本節では実際の走行環境において，周辺静止物の出

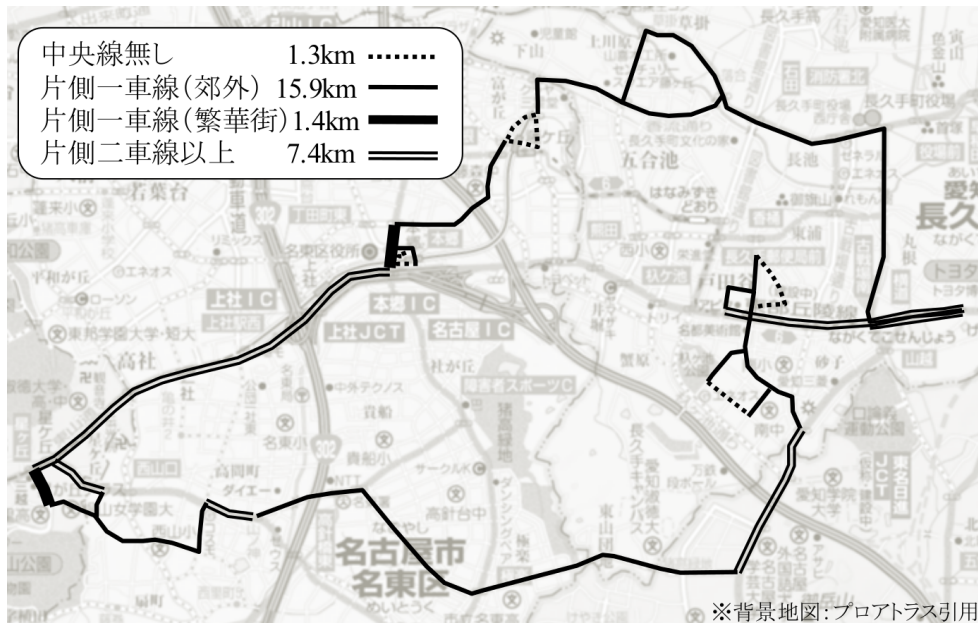


図 3.12 実環境調査対象道路

現間隔を調査し，実走行環境への提案手法の適用可能性について議論する．

名古屋市東部から隣接する地域において，片側 2 車線以上の中央分離帯がある道路 7.4 km，繁華街の片側 1 車線道路 1.4 km，郊外の片側 1 車線道路 15.9 km，中央線の無い道路 1.3 km の総計 26.0 km に対して周辺静止物の出現間隔を調査した．図 3.12 に調査対象道路を示す．調査対象とした周辺静止物は実環境での検証に利用した，「電柱」「標識」「ガードレール支柱の始点」の柱状物体とした．正確な出現間隔の取得には測量等が必要であるが，広範囲における測量は容易ではないため，車両に汎用 GPS とカメラを搭載し，前方カメラ画像と GPS の測位結果を収集した．対象とする周辺静止物が収集画像の視野から外れた時の車両の測位位置を抽出し，測位位置の間隔から算出された値を簡易的な周辺物の出現間隔とした．本節における「出現間隔」は実際の測量ではなく，上記方法で調査した間隔を指す．

実データに基づいて周辺静止物が出現する間隔を調査し，出現頻度と出現間隔が占める割合をまとめた結果を図 3.13 に示す．棒グラフで示す出現頻度から，周辺静止物の間隔は 25 m 以下の場合が大半であることがわかる．また，折れ線グラフで示す出現間隔の累積確率より，全分布の 95% に相当する間隔は約 32 m であることがわかる．なお，本提案の実環境での検証箇所での周辺静止物の間隔は約 40 m であった．

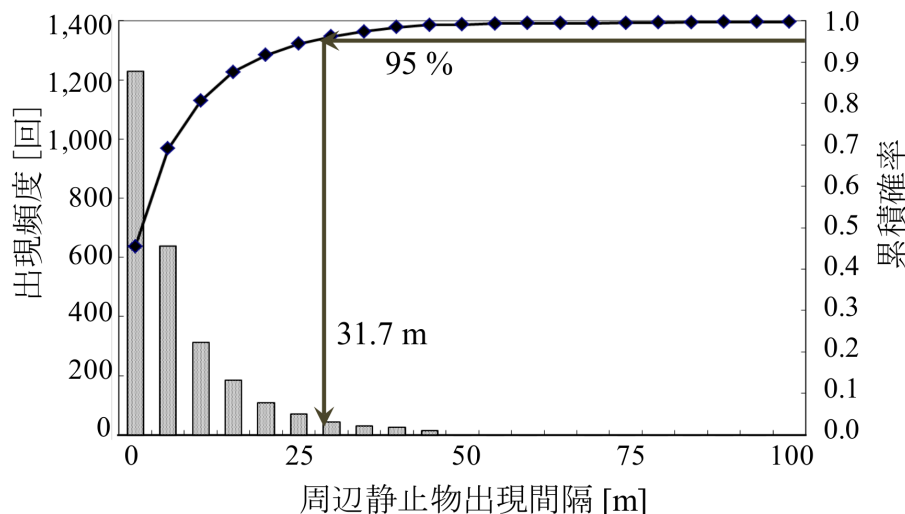


図 3.13 周辺静止物の出現間隔評価結果

以上のことから，本提案の検証実験を実施した環境は，周辺静止物が多く存在するような特殊な状況ではないと判断できる．本節の実環境調査結果より，前節の位置推定精度評価で用いたレーザレーダと同等の性能のセンサを想定すると，95% 以上の状況で 1 つ以上の静止物を計測可能であり，提案手法の効果が期待できる．また，出現間隔の調査を行った道路環境は郊外路であるため，大きな GPS 測位誤差は発生しないと考えられる．測位誤差の標準偏差 σ は 10 m 程度であり，提案手法で効果が期待できる環境であると考えられる．

3.6 本章のまとめ

本章では汎用 GPS 受信機が出力する測位結果とレーザレーダなどの車載の周辺監視用センサを用いた SLAM 型高精度自車位置推定を提案し，その効果について検証した．本章の提案は汎用 GPS 受信機が出力する測位結果の「(I) ばらつき誤差」に相当する誤差を低減する効果がある．GPS の測位結果に「(II) 外れ値誤差」と「(III) オフセット誤差」の影響が少ない郊外環境の検証では，「周辺監視用センサを用いた SLAM 型高精度自車位置推定手法」を適用することで，目標とする 1 m ~ 5 m の自車位置推定精度を得られる可能性があることを確認できた．

本章の提案手法では，位置推定の対象となる周辺静止物を時系列間で照合する必要があ

る．実験では時系列間の周辺静止物の照合を人手で行い，照合誤差はないものとして効果の検証を実施したが，実際は照合誤差による最終的な位置推定誤差が生じることが考えられる．また，壁面のような周辺静止物の進行方向位置を特定することが難しい場合や，移動物による遮蔽などで周辺静止物を連続的に計測できない状況も想定される．更に，SLAM 型高精度自車位置推定では，推定対象となる周辺静止物の数が多い場合は計算コストが高くなる．これらの課題に対し，次章では，特定の周辺静止物の絶対位置を推定することなく高精度化を図る手法を提案する．

第 4 章

周辺監視用センサに基づく運動推定 型自転車位置推定による高精度化

4.1 はじめに

本章では、GPS 受信機が出力する測位結果と周辺監視用センサを用いた 1 つ目のアプローチにおける、2 つ目の手法を提案する。本章での提案は第 3 章と同じく、GPS を用いた位置推定における「(I) ばらつき誤差」の低減に効果があると考えられる。第 3 章では周辺静止物の絶対位置と自転車の絶対位置とを同時に推定することによる高精度位置推定手法について提案し、GPS の測位誤差 σ が 10 m 程度以下の環境では効果があることを確認した。一方、周辺静止物の数が極端に多い場合には計算時間が増大する問題や、遮蔽などによって特定の周辺静止物を観測し続けることが難しい場合に、十分な効果を期待できないという問題がある。

本章では周辺静止物の特定やその絶対位置の推定を行うことなく、周辺静止物と自転車との相対位置関係の変化を利用することで自転車位置推定精度を向上させる手法を提案する。周辺静止物を特定してその位置を繰り返し推定する SLAM 型に比較して拘束条件は弱くなるが、計算コスト低減などの効果が期待できる。本章では、第 3 章と同一の汎用 GPS 受信機とレーザレーダを利用し、同一の実験環境において位置推定精度の評価を行う。また、提案手法の効果を検証するとともに、SLAM 型と運動推定型の両手法の比較検証も行う。第 3 章と同一のセンサかつ同一の実験環境において位置推定精度評価を行い、提案手法の効果を検証するとともに、SLAM 型と運動推定型の両手法の比較検証についても本章にて行う。

4.2 関連研究と本提案のアプローチ

4.2.1 関連研究

自車の相対位置変化と GPS の測位結果を利用して自車位置を推定する代表的な手法として、カーナビなどで用いられている GPS の測位結果と INS（車速センサとヨーレイトセンサ）による慣性航法結果とを統合するルーズカップリング [34] がある。車速は通常、タイヤの回転から得られる車速パルスに基づいて算出されるため、タイヤ径の変化などの影響を受ける。また、ヨーレイトセンサには温度によって変化するバイアス誤差があるため、ヨーレイト補正が常時必要である。補正が行われたとしても、車両に搭載されている一般的な INS では高精度な慣性航法結果を取得することは難しく、カーナビのルーズカップリングの技術を用いて、1 m ~ 5 m の精度で自車位置推定を実現することは困難である。また、RTK-GPS [27] の測位結果と、単眼カメラを用いた回転並進方向推定とを組み合わせ、位置の補間やカメラ姿勢推定を高精度化する取り組みもある [39][40]。単眼カメラは回転量と並進方向の推定は可能であるが、移動量を推定することは容易ではなく文献 [39]、[40] で推定される相対位置変化の精度は必ずしも高くない。

4.2.2 本提案のアプローチ

本章では、GPS 受信機内で演算された測位結果と周辺監視用センサから得られる自車の運動推定結果とを統合する「運動推定型高精度自車位置推定」を提案する。提案手法は、車速センサやヨーレイトセンサを用いた慣性航法結果の代わりに、周辺監視用センサで取得した周辺静止物と自車との相対位置変化から自車の運動を求め、GPS の測位結果と統合する。周辺監視用センサを用いる場合、周辺との相対位置の変化を直接計測できることから、車速センサのパルスあたりの移動距離の補正も不要であり、車速センサでは計測が困難なスリップ時においても位置変化を計測できる。また、ヨーレイトセンサでは時間変動のあるバイアス誤差の補正が必要であったが、周辺監視用センサ場合、バイアス誤差の変動は考慮しなくて良いため、初期キャリブレーションを確実に実施することで補正は不要になる。

また提案手法では、周辺監視用センサで取得できる周辺から得られる計測結果の特徴全

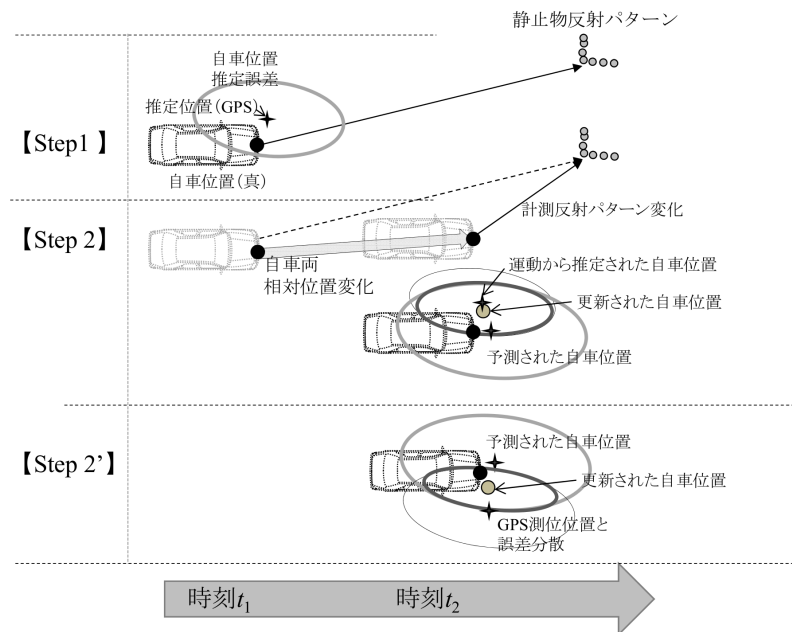


図 4.1 運動推定型高精度自車位置推定の仕組み

体を用いて相対位置変化を推定しているため、一部の静止物が移動物によって一時的に遮蔽されたとしても、相対位置変化の推定が可能であり、特定の周辺静止物を追跡する SLAM 型の高精度位置推定と比較してロバスト性が高くなると考えられる。更に、周辺静止物の絶対位置を推定しないことから、計算コストの削減が期待できる。

以降、4.3 節において本章の提案手法を第 3 章で提案した「SLAM 型高精度自車位置推定手法」と比較して示し、4.4 節で提案手法による位置推定精度を実環境データを用いて評価する。また、SLAM 型高精度位置推定と運動推定型高精度位置推定の 2 つについて比較して評価する。

4.3 提案手法 1-2：運動推定型高精度自車位置推定

4.3.1 本手法の概要

提案手法による高精度化の仕組みについて、図 4.1 に図解し、図 4.2 に推定手順を示す。

図 4.1 に示す通り、Step 1 において、時刻 t_1 の自車の絶対位置を GPS 受信機の測位結果から取得し、想定される GPS の測位誤差に基づいて自車位置の誤差分散を推定する。また周辺環境をレーザレーダで計測し、その反射パターンを記憶しておく。

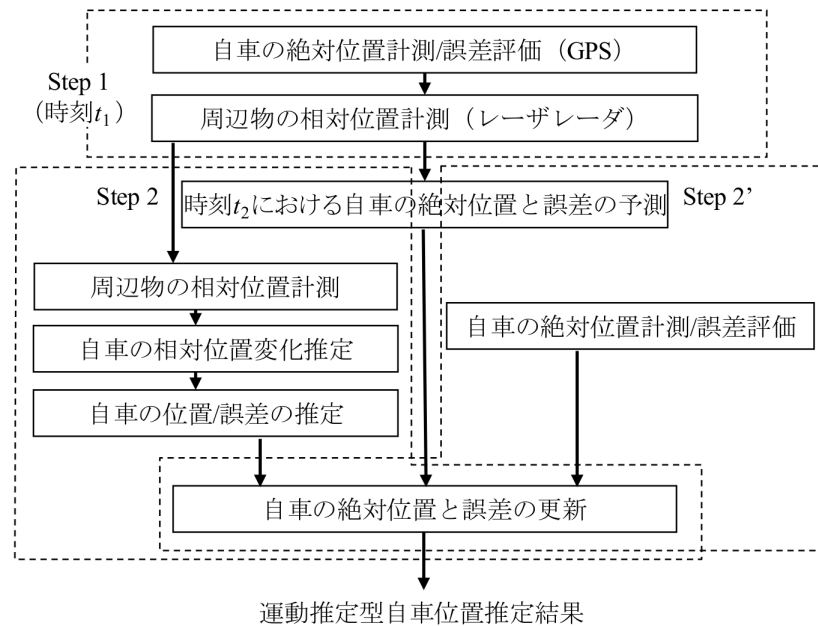


図 4.2 運動推定型高精度自転車位置推定の推定手順

次の Step 2 においては、 Δt 経過後の自転車の絶対位置と位置誤差分散を時刻 t_1 で推定された運動から予測する。同時に周辺静止物との相対位置をレーザレーダで計測し、反射パターンを取得する。 Δt 分の相対位置変化（運動）を 2 時刻間の反射パターンの変化から推定し、時刻 t_1 の自転車の絶対位置に基づいて、時刻 t_2 における自転車位置を推定するとともに、位置誤差分散を推定する。Step 2 において、予測した自転車位置とその誤差分散と、運動推定結果に基づいて推定した自転車位置とその誤差分散から、時刻 t_2 での自転車位置と位置誤差分散を更新する。

レーザレーダを用いた自転車運動推定は、特定の周辺静止物との相対位置関係を追尾して求めることもできるが、時系列間に対応付けを行う際の静止物特定の誤りによる推定誤差や、周辺静止物が少ない環境での推定誤差が生じやすい。そこで、提案手法では特定の静止物を追跡するのではなく、レーザレーダの反射パターン全体を 2 時刻間で照合して自転車の運動を推定する。レーザから運動推定結果が得られず、GPS の測位結果のみが得られる場合は、Step 2' において自転車位置の予測値と GPS 受信機からの測位結果とを用い、位置と誤差分散を更新する。レーザレーダからの運動推定結果と GPS 受信機からの測位結果の両方得られる場合は、Step 2 と Step 2' を同時に実施する。上記を繰り返すことで自転車位置の誤差分散の大きさが徐々に小さくなり、推定位置精度も徐々に向上すると考え

られる．

4.3.2 拡張 Kalman フィルタを用いた解法

運動推定型高精度自車位置推定も第 3 章で述べた SLAM 型高精度自車位置推定と同様に拡張 Kalman フィルタを用いて最適解を求めることができる．座標系は第 3 章と同様，図 3.3 を想定し，推定する状態ベクトル \mathbf{x} を式 (4.1) に示し，観測値 \mathbf{y} を式 (4.2) に示す．ここでは，特に SLAM 型の拡張 Kalman フィルタの式と比較して記述する．

運動推定型では，周辺静止物の位置の推定を行わないため，第 3 章で必要であった周辺静止物 L_i の位置を示すパラメータ (x_{L_i}, z_{L_i}) は不要である．状態ベクトルは自車両の絶対位置 (x, z) と，方位角 ϕ ，進行方向速度 v ，ヨーレート ω となり，式 (4.1) のように記述できる．周辺静止物 L_i の位置 (x_{L_i}, z_{L_i}) を推定しないため，静止物の数が増加しても状態変数の数は増加しない．また観測値については，GPS で取得される平面上の絶対位置 (x_g, z_g) と，周辺物 L_i の自車両に対する相対距離 r_{L_i} と相対角度 ϕ_{L_i} の代わりに，周辺監視用センサで推定した並進移動量と回転量に基づく並進方向速度 v_s とヨーレート ω_s を観測値とし，式 (4.2) のように記述できる．状態ベクトルと同様，個々の周辺静止物との相対位置関係を観測値としないため，静止物の数が増加しても観測パラメータの数は増加しない．また，状態ベクトルと観測値の関係は式 (4.3) のように示すことができる．Kalman フィルタの更新や状態遷移に関する式は SLAM 型と同じく式 (3.3) ~ (3.8) までと同じように記述できる．

$$\mathbf{x}_k = (x, z, \phi, v, \omega)^T \quad (4.1)$$

$$\mathbf{y}_k = (x_g, z_g, v_s, \omega_s)^T \quad (4.2)$$

$$\mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k) : \begin{cases} x_g = x \\ z_g = z \\ v_s = v \\ \omega_s = \omega \end{cases} \quad (4.3)$$

状態ベクトルと観測値の関係 \mathbf{h}_k は線形で記述できるため，観測行列 \mathbf{H}_k の算出も容易である．また，周辺静止物の数に影響を受けないため変数の数が一定となり，Kalman

フィルタ全体が平易な形になる．

4.4 実験

4.4.1 実験条件

本節では，3.4.1 節における SLAM 型高精度自車位置推定の検証と同じデータを用いて，運動推定型の位置推定精度について評価する．ここでは最初にレーザレーダを用いた運動推定を行う手順を示し，その推定結果を評価する．

4.4.2 自車運動推定実験結果

レーザレーダの場合，平面内角度 θ_i 方向に観測される物体までの距離情報が得られる． $R_{t_1+\Delta t}(\theta_i)$ を時刻 $t_1 + \Delta t$ において角度 θ_i 方向に観測された物体までの距離とする．また，車両の並進移動を (d_x, d_z) ，回転を d_ϕ とした時の時刻 t_1 の情報 $R_{t_1}(\theta_i)$ から予測される，角度 θ_i 方向に観測された物体までの距離を $R'_{t_1}(\theta_i; d_x, d_z, d_\phi)$ とする． $R_{t_1+\Delta t}(\theta_i)$ と $R'_{t_1}(\theta_i; d_x, d_z, d_\phi)$ の差全体の和が最小になるような移動量 (d_x, d_z, d_ϕ) を探索することで，2 時刻間の自車の並進方向速度 v_s とヨーレイト ω_s を推定する．評価関数を式 (4.4) に示す．

$$S(d_x, d_z, d_\phi) = \sum_{\theta_i} |R_{t_1+\Delta t}(\theta_i) - R'_{t_1}(\theta_i; d_x, d_z, d_\phi)| \quad (4.4)$$

図 4.3 にレーザレーダの反射パターンの例と時系列間の照合を示す．時系列間において並進移動量 (d_x, d_z) と回転量 d_ϕ を仮定し，これらの値を変化させ，2 時刻間の反射パターンの照合度合が高いパラメータを推定することで，自車の移動量を推定する [58]．同様の考え方はミリ波レーダの反射パターンを用いた場合にも適用可能である [58]．カメラの場合はレーザレーダやミリ波レーダのような反射パターンを利用することはできないが，画像間の特徴を照合することで回転と並進方向を推定できる [73]．

レーザレーダを用いた自車運動推定結果の例を図 4.4 に示し，コース全体の運動推定精度を評価した結果を表 4.1 に示す．図 4.4 の推定結果は，車速変化が大きかったエリア A とヨーレイトの変化が大きかったエリア B について，それぞれ車速推定結果とヨーレイト推定結果を参照値と比較して評価した結果である．なお，参照値は収集した GPS 信号を K-GPS 処理で取得した位置から算出した値である．車速とヨーレイトの推定値はい

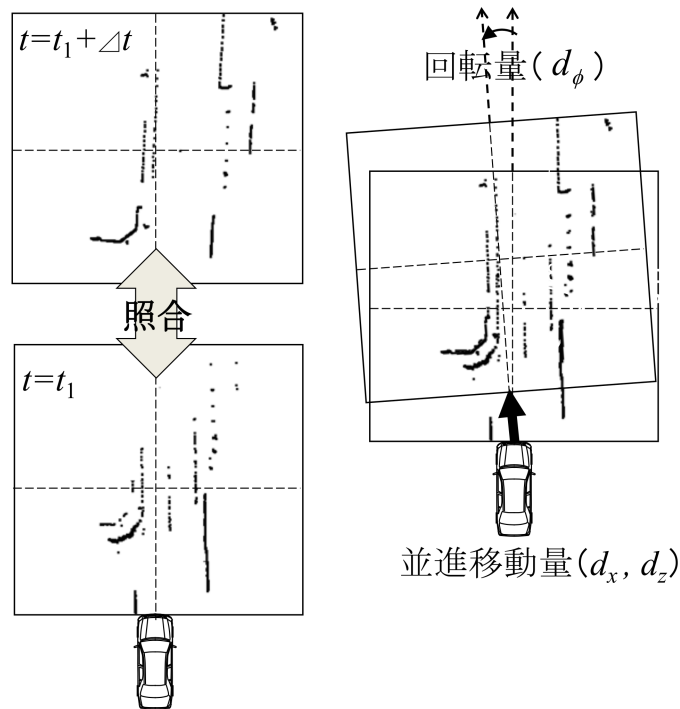


図 4.3 レーザレーダの反射パターンと時系列間照合による移動量推定

ずれも参照値によく一致していることが分かる．表 4.1 より，車速とヨーレイトの推定誤差平均は非常に小さいことが分かる．これは推定値のオフセット誤差が少ないことを示し，蓄積誤差も小さくなる．また，100 m あたりの蓄積誤差を算出しその平均を求めると，進行方向誤差は 0.15 m，角度誤差は 0.43° と非常に小さい値となる．停止時や右左折時においても，レーザレーダを用いた自車運動推定精度は良好であることが分かる．この運動推定結果を用いるため，「運動推定型高精度自車位置推定」においても，GPS 受信機が出力する測位結果よりも位置推定精度が向上することが期待できる．

4.4.3 自車位置推定実験結果

本章で提案した，レーザレーダを用いた運動推定型高精度自車位置推定手法の効果について，実データを用いて検証する．実験は第 3 章で提案した SLAM 型高精度自車位置推定手法の検証と同じ環境で実施した．推定結果の進行方向位置誤差の変化を SLAM 型と比較して図 4.5 に示す．また，進行方向位置誤差の標準偏差と誤差が 1 m 以下となる割合を表 4.2 に示す．

表 4.1 レーザレーダを用いた自車運動推定誤差の評価

	推定誤差平均	推定誤差標準偏差	100m 走行後蓄積誤差
車速	0.01 m/s	0.69 m/s	0.15 m
ヨーレイト	0.01°/s	1.91°/s	0.43°

図 4.5 より，運動推定型の推定結果は SLAM 型に比較して GPS の測位結果の影響を受けやすい傾向にあり，GPS 単独の位置誤差変化と一致度が高いことがわかる．表 4.2 より，運動推定型位置推定結果は SLAM 型に比較すると推定精度の低下は見られるものの，その誤差の 2RMS*は 1.98m であり，GPS 単独時の位置推定誤差の 2RMS である 5.60m に比較すると大幅に精度が向上していることがわかる．

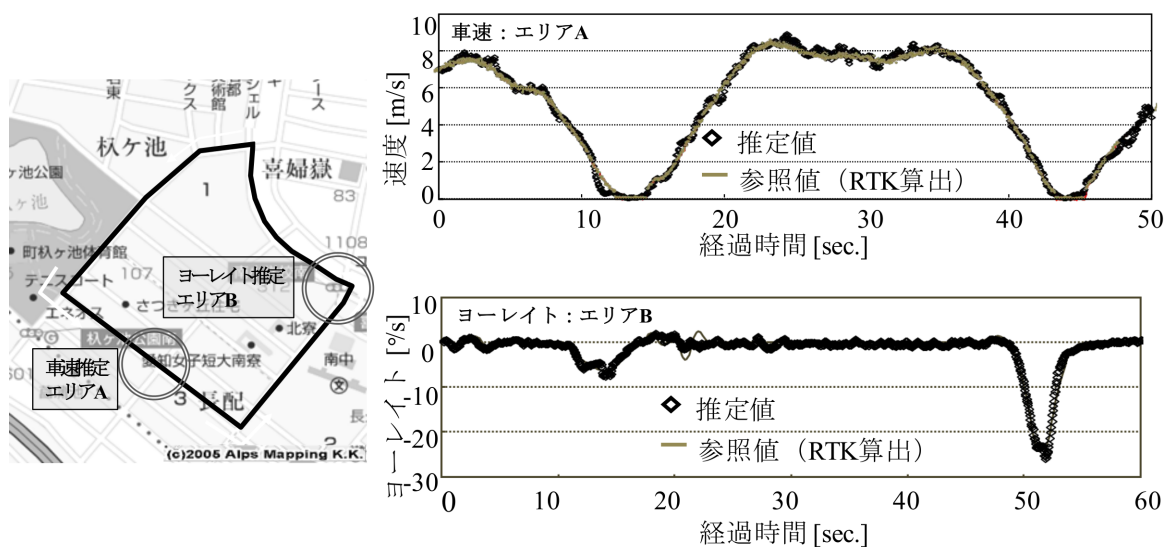


図 4.4 レーザレーダを用いた車速推定とヨーレイト推定結果

* RMS : Root Mean Square 二乗平均平方根 第3章参照

表 4.2 進行方向位置推定誤差数値評価

手法	誤差 2 乗平均平方根 2RMS	誤差 1 m 未満の時間割合
GPS 単独	5.60 m	31.1%
SLAM 型	1.66 m	84.7%
運動推定型	1.98 m	65.1%

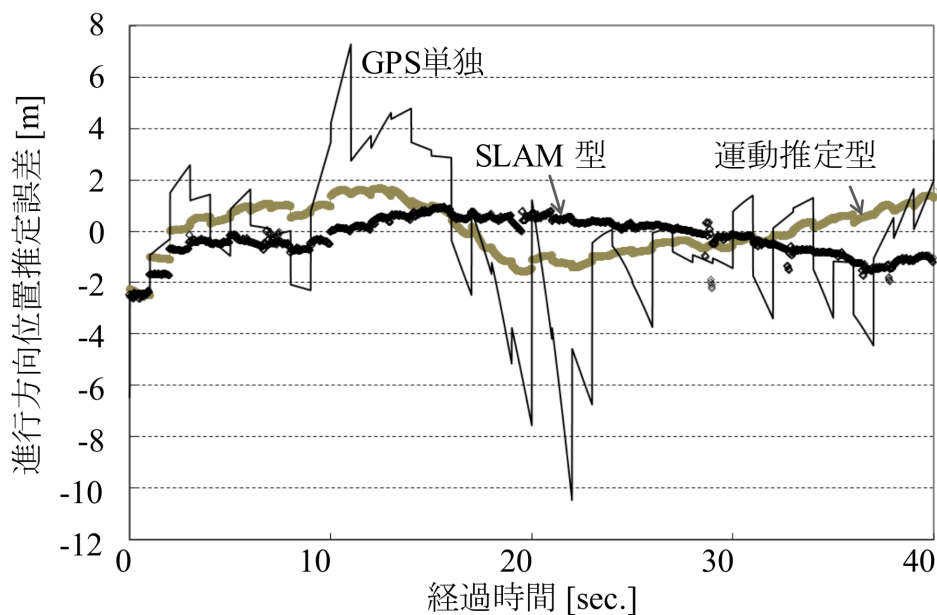


図 4.5 運動推定型位置推定による進行方向位置推定誤差の評価

4.5 周辺監視用センサを用いた自車位置推定の高精度化に関する考察

本節では、第 3 章と第 4 章で提案した SLAM 型高精度自車位置推定手法と運動推定型高精度自車位置推定手法の特徴を比較し、結果の考察を行う。図 4.6 に SLAM 型と運動推定型の周辺取得状況を併記し、表 4.3 に双方の推定手法の特徴について示す。SLAM 型は自車と周辺静止物の絶対位置を同時に推定することで自車位置推定の拘束条件を強くし、推定精度を向上させる手法である。そのため、特定の周辺静止物の相対位置を繰り返

表 4.3 SLAM 型と運動推定型の特徴

提案手法	静止物間照合	静止物絶対位置	計算コスト	ロバスト性	推定精度
GPS 単独	不要	不要	少	低	低
SLAM 型	要	不要	高	中	高
運動推定型	不要	不要	少	高	中

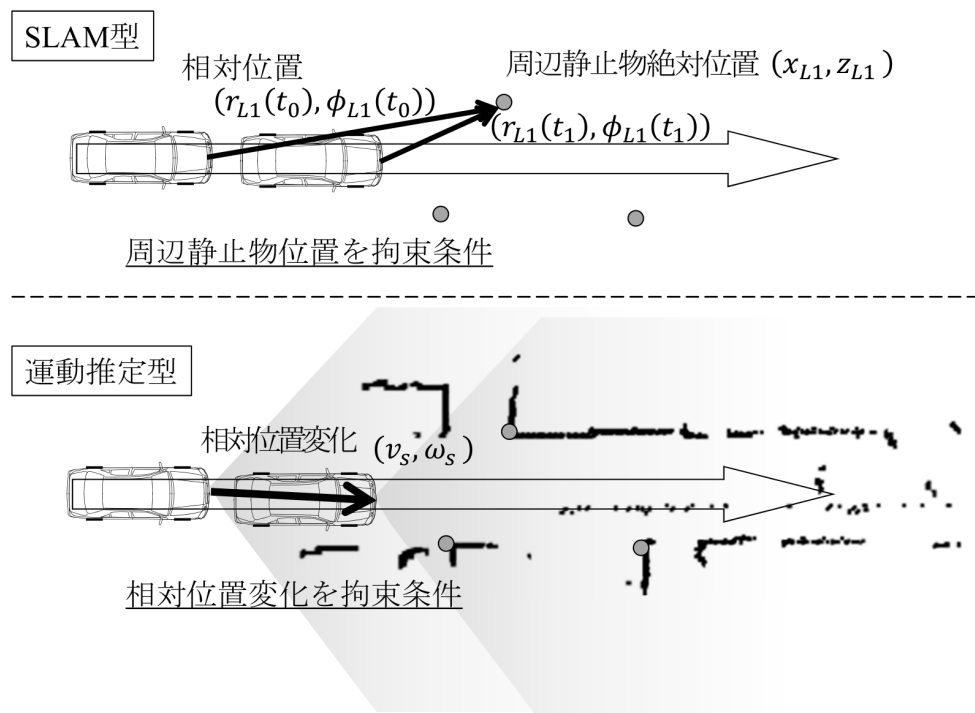


図 4.6 SLAM 型と運動推定型の周辺取得データの特徴

し計測し、計測データ間で照合する必要がある。一方、運動推定型は周辺静止物の相対位置の計測はするものの、特定の周辺静止物に対する照合は不要であり、計測パターン全体で自車位置の変化を推定した結果を拘束条件とする手法である。

運動推定型は明確な位置特定に適した電柱のような周辺静止物がない場合や、遮蔽などによる一時的な欠落などに対しても相対位置変化の推定が可能であり、ロバスト性が高

い。また、運動推定型は周辺静止物の絶対位置の推定が不要であるため状態変数のパラメータの数が少なくなり、計算コストは SLAM 型よりも低減できる。一方、周辺静止物の絶対位置を推定しないため、拘束条件が SLAM 型よりも弱い。そのため、運動推定型の位置推定誤差は SLAM 型に比較して増加する傾向にある。しかしながら、GPS 単独の位置推定に比較して、位置推定誤差を大きく低減できる特性を持つ。

実環境での検証結果は、SLAM 型も運動推定型も GPS の測位誤差 σ が数 m 程度と比較的良好な環境での結果である。第 3 章と第 4 章で提案した、周辺監視用センサと GPS の測位結果を統合して位置推定精度を向上させる手法は、GPS を用いた位置推定誤差における「(I) ばらつき誤差」の低減に効果がある手法である。マルチパスなどの影響による「(II) 外れ値誤差」、伝搬遅延の影響による「(III) オフセットの誤差」が生じる場合には、それらを削減する別の手法が必要となる。

4.6 本章のまとめ

本章では、汎用 GPS と車載化が進んでいるレーザレーダなどの周辺監視用センサを用いて高精度な自車両の位置を推定するアプローチの 2 つ目の手法である、「運動推定型高精度自車位置推定」を提案した。周辺静止物との相対位置を計測し、計測データ間で得られる周辺との相対位置関係の変化から自車の運動を推定し、それを位置推定精度の向上に利用するものである。実験を実施した郊外環境では、GPS の測位結果のみを利用した位置推定誤差の 2RMS は 5.6 m であったのに対し、提案手法による位置推定誤差の 2RMS は約 2.0 m に改善することを確認できた。また、第 3 章で提案した「SLAM 型高精度自車位置推定」の手法と比較し、その特徴について示した。拘束条件が弱くなることから若干の位置推定精度の低下は見受けられるが、計算コストの大幅な低減が期待できることを確認した。

提案手法は、GPS を用いた位置推定誤差における「(I) ばらつき誤差」の低減に効果があり、GPS からの受信信号に大きな誤差が含まれていない環境や伝搬遅延の影響が少ない環境で位置推定向上の効果がある。次章以降では、GPS の測位結果がマルチパスなどによって大きく劣化する「(II) 外れ値誤差」や伝搬遅延の影響で「(III) オフセット誤差」が生じる環境において、自車位置推定精度を向上させる手法を提案する。

第 5 章

走行軌跡上の GPS Raw データ活用 による自転車位置推定の高精度化

本章と次章では、本研究における位置推定精度向上のための 2 つ目のアプローチとして、GPS 受信機内で演算された測位結果を利用するのではなく、受信機が計測した GPS Raw データを活用した手法を提案し、その効果について検証する。GPS 受信機の測位結果をそのまま利用した第 3 章と第 4 章の手法は、マルチパスが多い環境や測位結果にオフセットが生じる環境では、位置推定精度の向上が困難であった。本章と次章のアプローチは、衛星数を疑似的に増加させることで、GPS を用いた位置推定における誤差のうち、「(II) 外れ値誤差」や「(III) オフセット誤差」の低減を狙う。

本章では特に、汎用 GPS 受信機と車速センサとヨーレートセンサ (Inertial Navigation System: 以下、INS) を利用する安価な構成を想定し、走行軌跡上の GPS Raw データを利用することで衛星数を疑似的に増加させる手法を提案する。本章の提案手法は「(II) 外れ値誤差」が生じやすいマルチパスが多い都心部の環境においても、位置推定誤差の低減を可能にする高精度自転車位置推定手法を提案する。

5.1 はじめに

「先読み運転支援システム」に必要とされる位置推定精度は 1 m ~ 5 m である。しかし、都心部ではビルからの反射などによるマルチパスの影響で、GPS の測位結果には 30 m 以上の誤差が生じることも少なくない。第 3 章と第 4 章では運転支援システム用に搭載が進むレーザレーダなどの周辺監視用センサと GPS の測位結果とを組み合わせることで自

車位置推定精度を向上させるアプローチで 2 つの手法を提案した。GPS 受信機が出力する測位結果をそのまま利用し、周辺監視用センサの計測結果から得られる情報を拘束条件として、位置推定精度を向上させる手法である。この手法は測位誤差の「(I) ばらつき誤差」の低減に有効であるが、マルチパスなどによる測位結果に極端な誤差が生じる「(II) 外れ値誤差」がある場合や、伝搬遅延の影響によるバイアス性の誤差である「(III) オフセット誤差」がある場合には、十分な効果が得られない問題があった。

そこで、本章と次章では GPS 受信機が出力する測位結果ではなく、衛星からの信号を計測した値を活用して位置推定精度を向上させる。受信機と衛星との距離計測値に相当する「疑似距離」と受信機と衛星との相対速度計測値に相当する「Doppler シフト周波数（以下、GPS Doppler）」とその「信号強度 (S/N)」, 衛星軌道を示す「軌道情報」を本研究では「GPS Raw データ」と呼ぶ。本章と次章では、GPS Raw データのレベルで信号処理することで高精度化を図る。第 2 章で述べたように、通常の GPS 受信機内で推定される測位位置も疑似距離を用いて算出されている。しかし、マルチパスによる反射波の影響を排除できない場合には大きな測位誤差が生じることが多い。本章では、汎用 GPS と INS を利用し、マルチパスの判別と除去を行うことで「(II) 外れ値誤差」の要因を低減し、位置推定精度を向上させる手法を提案する。

5.2 関連研究と本研究のアプローチ

5.2.1 関連研究のアプローチ

GPS 受信機で演算された測位結果も、疑似距離や軌道情報などの GPS Raw データを用いて算出されたものであり、その基本的な測位手法は第 2 章でも概説した通りである [20][21][22]。一方、都心部のような環境で測位精度を向上させることは受信機製造社には共通の課題であり、受信機ごとに様々な工夫がなされていると考えられるが、それらは秘匿されほとんど明らかにされていない。そこで、都心部における位置推定精度向上の関連研究として、本論文では第 2 章で記した一般的な手法について述べる。

都心部では建物の遮蔽などによって可視衛星数が減少するため、測位に必要な衛星数を観測できなくなり、GPS だけでは位置推定結果が得られないことも多い。そのため、INS などを用いた慣性航法結果と GPS の測位結果とを統合するルーズカップリング [34] による位置推定手法が採用されることが主流である。カーナビでは、さらにマップマッチング

によって地図に合うように位置推定結果を修正している．他にも，INS の計測値と GPS Raw データの段階で統合するタイトカップリング [35][36] と呼ばれる手法や衛星からの信号復調の段階で INS を利用するウルトラタイトカップリング [43][44] などがある．これらの手法は第 2 章で述べた通り，一定の位置推定精度向上の効果はあるものの，特に 1 エポック（GPS Raw データ 1 回分）だけで都心部でマルチパスの影響を低減することは容易ではない．INS の慣性航法だけでは世界座標系における車両の進行方位を定められないため，進行方位は測位結果から推定されることが多い．そのため，都心部では INS の慣性航法の精度も測位誤差の影響を受けて劣化しやすいことから，慣性航法結果を拘束条件としてマルチパス判別を行うことは容易ではない．特に直接波が少なくマルチパス信号が多い環境では判定が困難である．

そこで，本研究では GPS Raw データ 1 エポックと INS との統合ではなく，走行中に計測した複数エポック分の GPS Raw データを利用することで疑似的に衛星数を増加させ，高精度な自転車位置を推定する手法を提案する．

5.2.2 本研究のアプローチ

第 3 章において観測可能な周辺静止物が多いほど，位置推定精度が向上する傾向があった．同様に，観測可能な GPS 衛星数が増加するほど拘束条件が強くなり，位置推定精度が高くなる傾向がある．そこで，本研究では 2 つ目のアプローチとして，1 エポック分の GPS Raw データと INS との統合ではなく，複数エポック分の GPS Raw データを利用することで疑似的に衛星数を増加させ，測位率を向上させるとともにマルチパスの影響を削減し，位置推定精度を向上させる手法を提案する．

本研究では疑似的に衛星数を増加させるアプローチに基づいて，大きく分けて 2 つの手法を提案する．1 つ目は走行中の複数エポック分の GPS Raw データを利用して衛星数を増加させる手法であり，現在の位置から過去 50m 程度の範囲で計測した GPS Raw データを利用する [74] [75] [76] [77] [78]．2 つ目は同一エリアを複数回走行し，特定地点における複数走行分の GPS Raw データを集めて衛星数を増加させる手法である [79] [80] [81] [82]．本章では，走行中の GPS Raw データを活用する「走行軌跡上の GPS Raw データを活用した高精度自転車位置推定」について提案し，第 3 章と第 4 章では位置推定精度の向上が困難であった，都心部のマルチパスが多い環境における効果について検証する．提案手法によつ衛星数の疑似的増加の様子を図 5.1 に示し，処理の流れをを図 5.2 に示す．

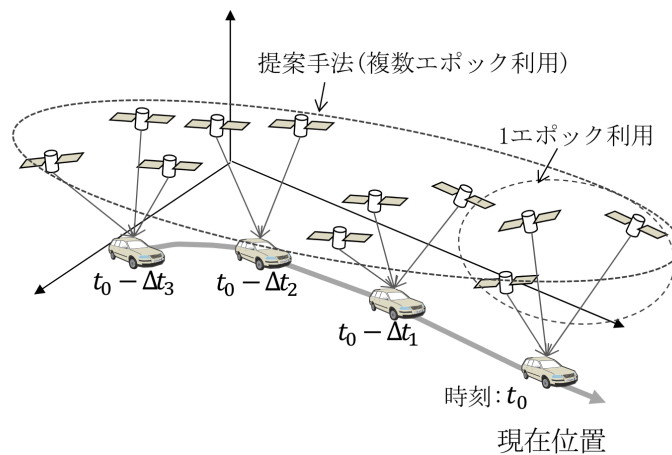


図 5.1 提案手法 2-1 による衛星数の疑似的増加の様子

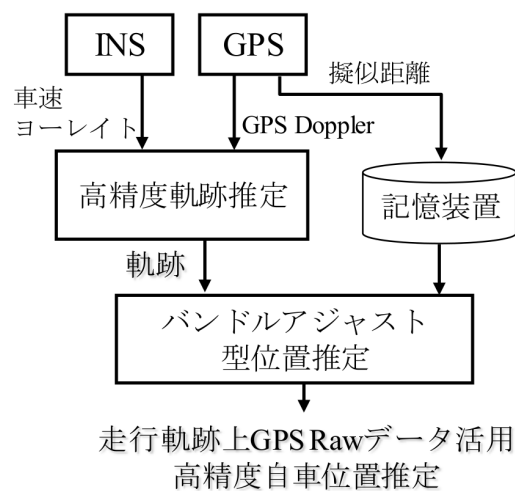


図 5.2 提案手法 2-1 による位置推定の処理手順

5.3 提案手法 2-1：走行軌跡上の GPS Raw データ活用型高精度自車位置推定

5.3.1 手法の概要

本節では，過去 50 m 程度の走行軌跡上で計測した複数エポック分の GPS Raw データを利用する「走行軌跡上の GPS Raw データを活用した高精度自車位置推定」について

提案する．従来の GPS と INS の統合手法は各エポックの測位結果を INS から得られた慣性航法結果で補間する手法である．マルチパス判定は各エポックごとに行われていたため，良好な判定ができないことも多かった．提案手法と，従来のルーズカップリング [34] やタイトカップリング [36] との大きな違いは，1 エポック分の GPS Raw データだけでなく，走行軌跡上で受信した複数エポック分の GPS Raw データ全体を用いることにある．提案手法には 2 つの特徴がある．1 つ目は高精度な走行軌跡を先に求める「高精度軌跡推定」である．GPS Raw データに含まれる GPS Doppler を用いて INS と統合することで高精度な軌跡推定を実現する．2 つ目は，1 つ目の特徴で推定された軌跡上で計測した複数エポック分の衛星全体で位置推定を行う「バンドルアジャスト型位置推定」である．計測した疑似距離全体を用い，1 つ目の特徴で推定した軌跡と最も合致するように絶対位置を推定する．

高精度軌跡推定では，GPS Doppler と INS とを統合し，走行軌跡を高精度に推定する．GPS Doppler とは 2.1.2 節で述べた通り Doppler シフト周波数のことであり，GPS 衛星と受信機との相対速度として計測されるものである．衛星が航行する速度は既知であるため，GPS Doppler を利用することで世界座標系における自車の速度ベクトルを推定できる．そのため，自車の真北に対する進行方位も推定できる．汎用の車載 INS として用いられるヨーレイトセンサには方位推定機能はない．従来のルーズカップリングでは，GPS の測位位置の差分などに基づいて決定した方位を初期方位として軌跡を求めているため，測位誤差の影響を受けやすかった．一方，提案手法では GPS Doppler を用いて自車の速度を推定するため，車輪パルスから算出する車速の補正も可能になり，角度変化も推定されるため，ヨーレイトセンサが持つバイアス性誤差の補正も可能になる．これらの特徴から高精度な軌跡推定が可能になる．

高精度に推定した軌跡を拘束条件として，「バンドルアジャスト型位置推定」では軌跡上の GPS Raw データ全体を用いて位置推定を行う．現時刻の位置から過去 50 m 程度分の軌跡形状と，その軌跡上で計測された GPS Raw データを用いる．軌跡形状とその軌跡上の各エポックで計測された疑似距離全体が最も合致するように，現時刻の位置を推定する．提案手法の高精度化の仕組みについて図 5.3 に図解する．本節では，5.3.2 節で高精度軌跡推定について記し，5.3.3 節でバンドルアジャスト型高精度位置推定について記す．

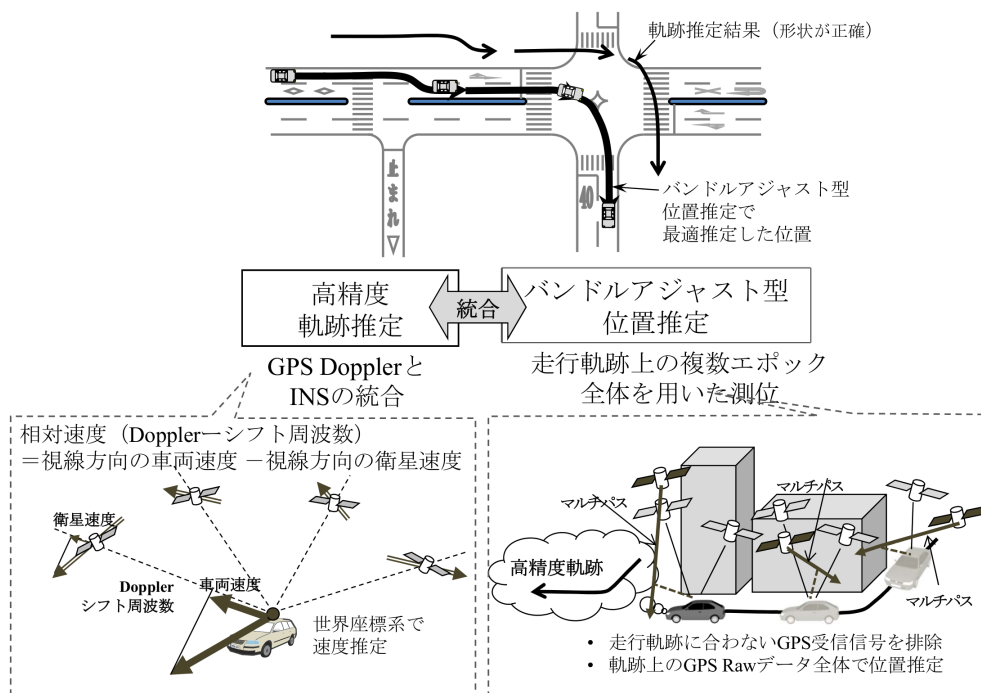


図 5.3 軌跡上 GPS Raw データを用いた高精度位置推定の仕組み

5.3.2 GPS Doppler を用いた高精度軌跡推定

提案する「走行軌跡上の GPS Raw データを活用した高精度自車位置推定」は軌跡を拘束条件にするため、軌跡を高精度に推定することが重要である。INS を利用した従来の慣性航法では、GPS の測位結果を利用して初期方位を求めることが一般的であるが、GPS 測位結果の誤差の影響で方位精度が劣化するため、軌跡推定精度も低下する。そこで本手法では、GPS Raw データの 1 つである GPS Doppler を用いて速度を推定し、軌跡の推定精度を向上させる。本節では GPS Doppler の特徴と GPS Doppler を用いた速度推定手法を示し、GPS Doppler を用いた速度推定誤差と、軌跡の推定誤差について評価する。

なお、可視衛星数が少なくなる都心部では、1 エポックで観測できる GPS Doppler だけでは速度の推定ができなくなり、軌跡推定精度が低下する可能性がある。GPS の受信環境が悪化する環境では、過去複数エポックの GPS Doppler と INS とを統合して軌跡を推定する「タイトカップリング型軌跡推定手法」[83] [84] [85] [86] を用いる。

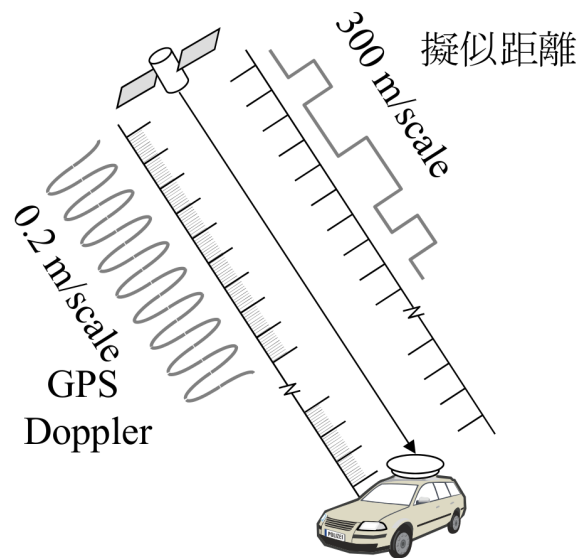


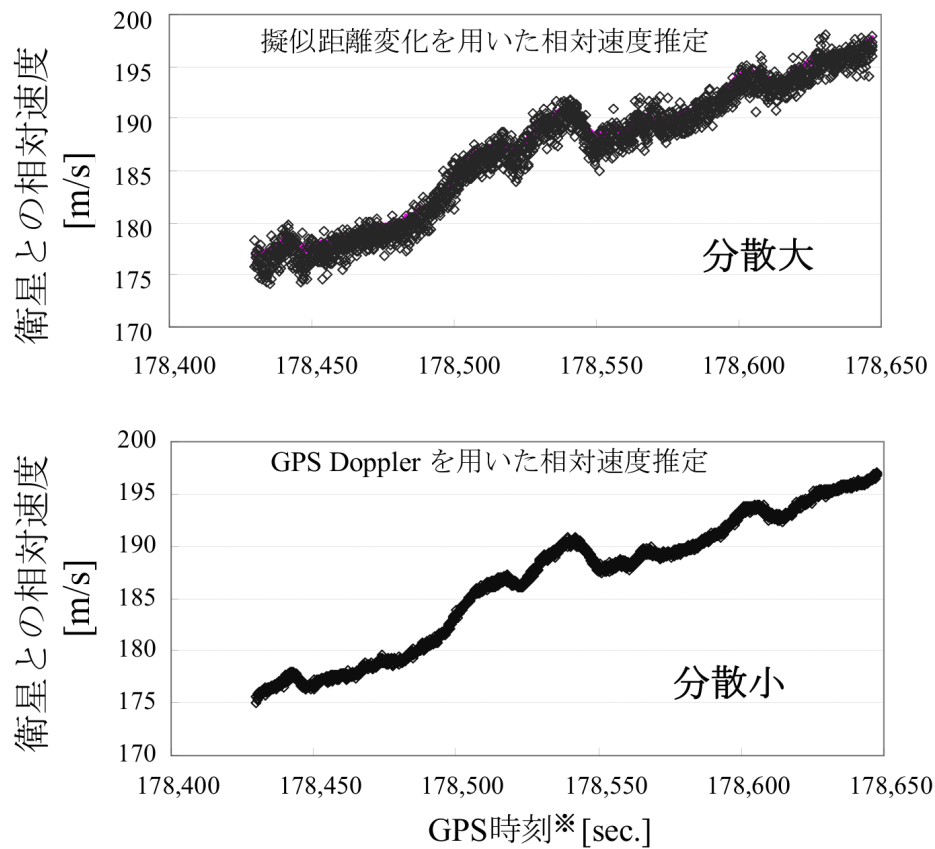
図 5.4 疑似距離と GPS Doppler の分解能の比較

5.3.2.1 GPS Doppler の特徴と速度推定

本節では GPS Doppler の特徴と GPS Doppler を用いた速度推定手法について示す。第 2 章で概説した通り、GPS 衛星から送信される信号は、衛星ごとに決められた 0,1 の 2 値パターンが搬送波信号に乘じられ、0,1 の信号は疑似雑音符号（Pseudo-noise code：以下 PN コード）と呼ばれる。米国の GPS において、L1 ($f = 1575.42$ MHz) と呼ばれる搬送波と C/A コードと呼ばれるチップレート 1.023 MHz のコードでの送信が民生用に開放されている。

GPS 受信機では、衛星との相対距離である疑似距離と、衛星との相対速度である GPS Doppler が計測される。民生用の受信機で得られる疑似距離の距離分解能は規定ビットに基づいて算出すると 300 m 程度であり距離分解能が低い。一方、搬送波については $1/10$ 波長分の位相計測が可能であるため、GPS Doppler は L1 周波数の波長（約 20 cm）の $1/10$ に相当する 2 cm の分解能で距離変化を計測できる。図 5.4 にコードと搬送波の分解能の比較を示す。

1 つの GPS 衛星に対して、疑似距離変化に基づいて相対速度を算出した結果と、GPS Doppler に基づいて相対速度を算出した結果を図 5.5 に示す。疑似距離に基づく相対速度は分散が大きいが、GPS Doppler に基づく相対速度は分散が小さいことが分かる。また、



※GPSで用いられる世界標準時日曜日0時を起点とする時刻
週番号と共に一週間単位で管理される。

図 5.5 衛星との相対速度算出結果の比較

距離変化計測の分解能が高いため、原理的に精度が高い。GPS Doppler を用いた速度推定は、GPS の測位結果の差分を用いた速度推定に比較して高精度に推定できる可能性がある。

第2章で概説した GPS の測位原理では、衛星と自車の位置と疑似距離を用いて衛星数分の方程式を連立させて自車両位置を推定した。式 (2.6) を時間微分することで自車速度 $\mathbf{v}=(v_x, v_y, v_z)$ と衛星 i の速度 $\mathbf{v}^i=(v_x^i, v_y^i, v_z^i)$ 、自車と衛星 i との相対速度 v_{vs}^i の関係が得られる。図 5.6 に Doppler シフト周波数 D_i と衛星速度、自車速の関係を図示するとともに、式 (5.2) に相対速度と衛星速度、自車速の関係式を示す。

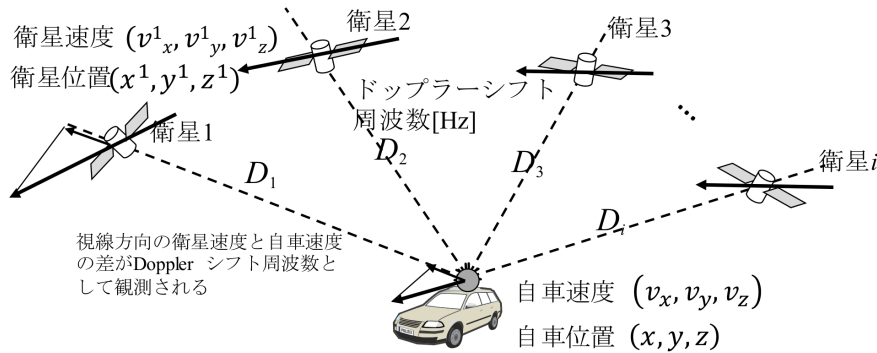


図 5.6 自車速度と衛星速度，相対速度（計測値）の関係

$$\rho^i = r^i + C_b \quad (5.1)$$

$$v_{vs}^i = \dot{\rho}^i \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{(x^i - x)(v_x^i - v_x)}{r^i} + \frac{(y^i - y)(v_y^i - v_y)}{r^i} \\ &\quad + \frac{(z^i - z)(v_z^i - v_z)}{r^i} + C_v \\ r^i &= \sqrt{(x^i - x)^2 + (y^i - y)^2 + (z^i - z)^2} \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$v_{vs}^i = -D_i \cdot \frac{c}{f_1} \quad (5.4)$$

衛星の速度は衛星軌道の時間微分で表現できるため，時刻を決定できれば衛星の速度は算出できる．自車と衛星 i との相対速度 v_{vs}^i は，計測された Doppler シフト周波数 D_i と搬送波周波数 f_1 ，光速 c を用いて表現できる．この時，式 (2.6) にある電離層遅延，対流圏遅延は数秒で変化するものではないため，電離層遅延と対流圏遅延の時間微分の項は無視できる．マルチパスやノイズも時間の関数ではないため，これも無視して考えることができる．受信機の時計誤差であるクロックバイアス C_b は緩やかに時間変化をしていることから，クロックバイアス C_b の時間微分であるクロックドリフト C_v を未知数として扱う．

観測された Doppler シフト周波数 D_i から衛星数分の相対速度 v_{vs}^i を計算し，自車速度を求める．位置推定と同様に，未知数は 4 つであるため，4 つ以上の衛星から GPS

Doppler が観測できれば，自車の速度 (v_x, v_y, v_z) とクロックドリフト C_v を求めることができる．

自車速度の推定には，自車の位置 (x, y, z) に対する衛星位置 (x^i, y^i, z^i) の方向が必要である．これらの値は速度推定精度に影響を与える．しかし，GPS 衛星は高度約 20,000 km の上空にあるため，自車位置は 100 m 程度の位置誤差があったとしても，自車に対する衛星の方向に与える影響は小さく，速度推定精度にも大きな影響はないと考えられる．

5.3.2.2 GPS Doppler を用いた速度・軌跡推定精度の評価

上記の手法で推定した自車速度 (v_x, v_y, v_z) は，受信点の世界座標系である ECEF 座標系*の速度ベクトルである．これを時間積分すると世界座標系における軌跡を推定できる．ここでは，ECEF 座標系を ENU[†]座標系に変換し，速度と軌跡の推定精度を評価する．

GPS Doppler を用いた速度推定評価のための実験環境を図 5.7 に示す．実験コースの環境は，GPS 受信環境が比較的良好な郊外環境であるが，図 5.7 中に示すように地点 BC 間に道路南側に 5 階建ての建物が接してる．また地点 BC 間の南側の建物と北側の建物を結ぶ通路があり，一部で GPS 信号が遮断される．なお，参照値は高精度位置計測システム POSLV610 [87] による計測値を用いた．POSLV610 は RTK-GPS と航空機に用いられる高精度ジャイロと高分解能車速計で構成され，これらの計測値を後処理で統合し，都心部などの環境でも 30 cm 程度以下の誤差で位置推定が可能なシステムである．

図 5.8 に GPS Doppler を用いて推定した速度を East 方向と North 方向に分けて示し，参照値の車速を重ねて示す．横軸は時刻を示す．速度が負の値になるのは，West 方向の速度や South 方向の速度となった場合である．また，図 5.9 に参照値に対する速度推定誤差を示す．なお，衛星数が 4 未満となり，速度推定ができなかった区間を図中にグレーで示す．

図 5.8 と図 5.9 より，速度推定結果は参照値と良く一致していることがわかる．遮蔽の直前や衛星数が少なくなる場合，図 5.9 中で示したように速度誤差が増大するが，全般にオフセット誤差も殆どみられない．受信環境が良好で衛星数が十分である場合には，速度推定精度は極めて高いと判断できる．その速度推定誤差の評価結果を表 5.1 に示す．

表 5.1 に示したとおり，GPS Doppler を用いた速度推定はばらつきも小さくオフセッ

* 地球中心を中心とし，北極方向を Z 軸，Greenwich 子午線と赤道面が交わる方向を X 軸とする座標系 [21]

† ある任意の点を中心とした地球表面の接平面 (East/North) と高さ (Up) で表す座標系

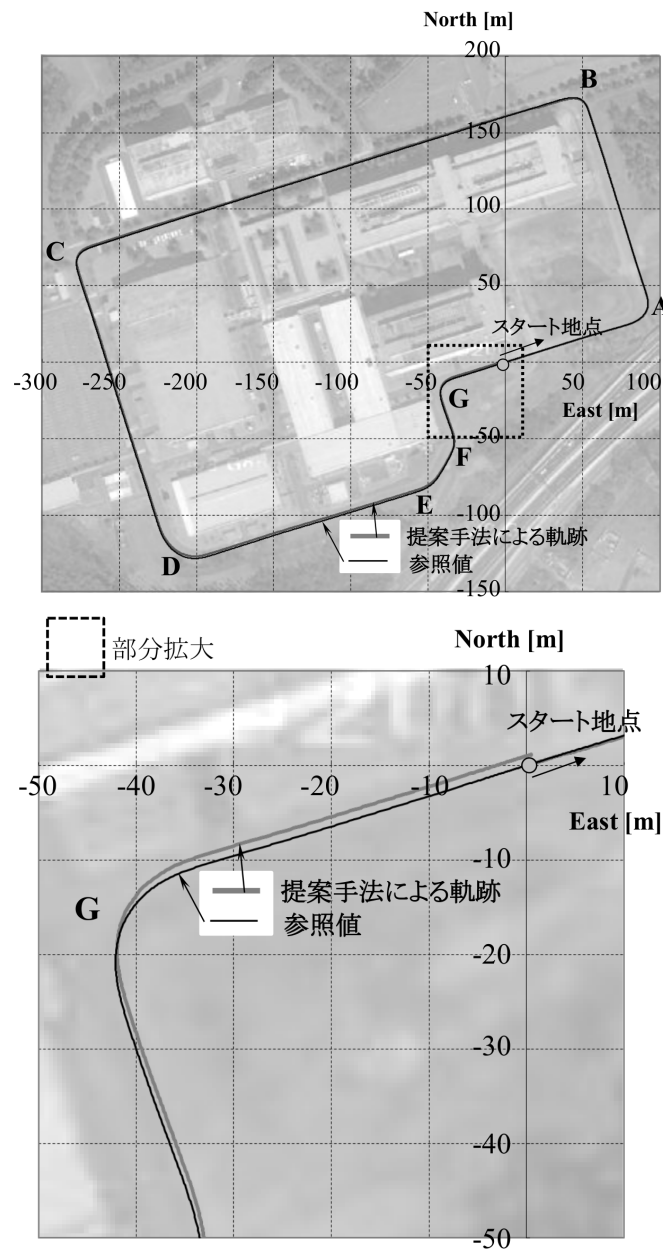


図 5.7 GPS Doppler による速度推定と軌跡推定評価環境

ト誤差もほとんどないため，この結果を時間積分した軌跡推定精度が高くなると期待できる．そこで，始点を参照値と揃えて軌跡を推定し，その時の East 方向と North 方向の推定誤差を図 5.10 に示す．速度推定結果が得られない一部の区間では，INS で得られる車速の値を用い，直前の速度比から得られる方位方向に進行するものとして推定した．また，INS を用いた場合や，GPS の単独測位結果と比較して提案手法の誤差を評価した結

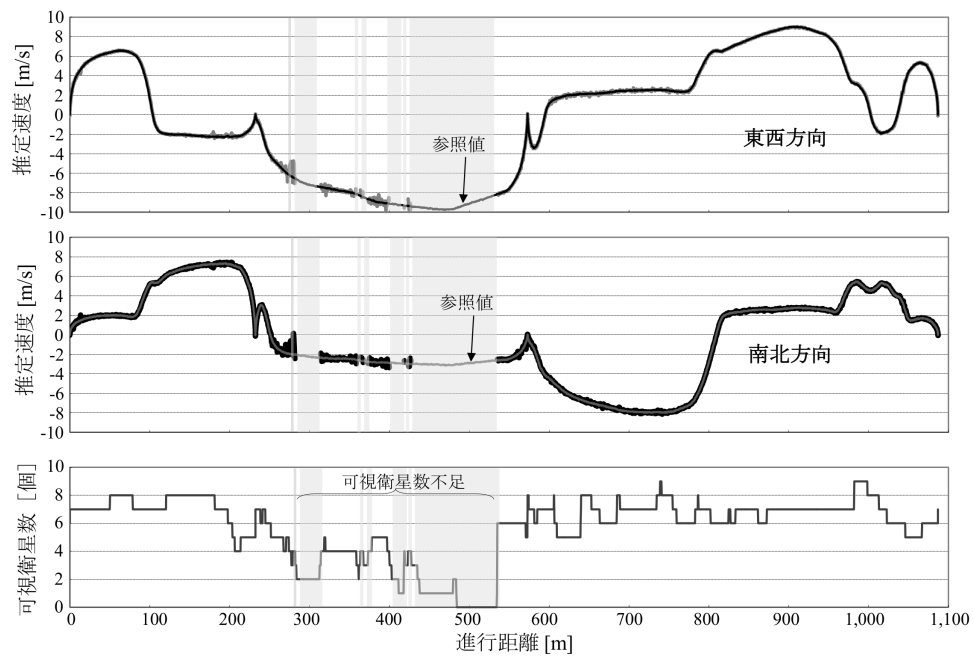


図 5.8 GPS Doppler による速度推定結果

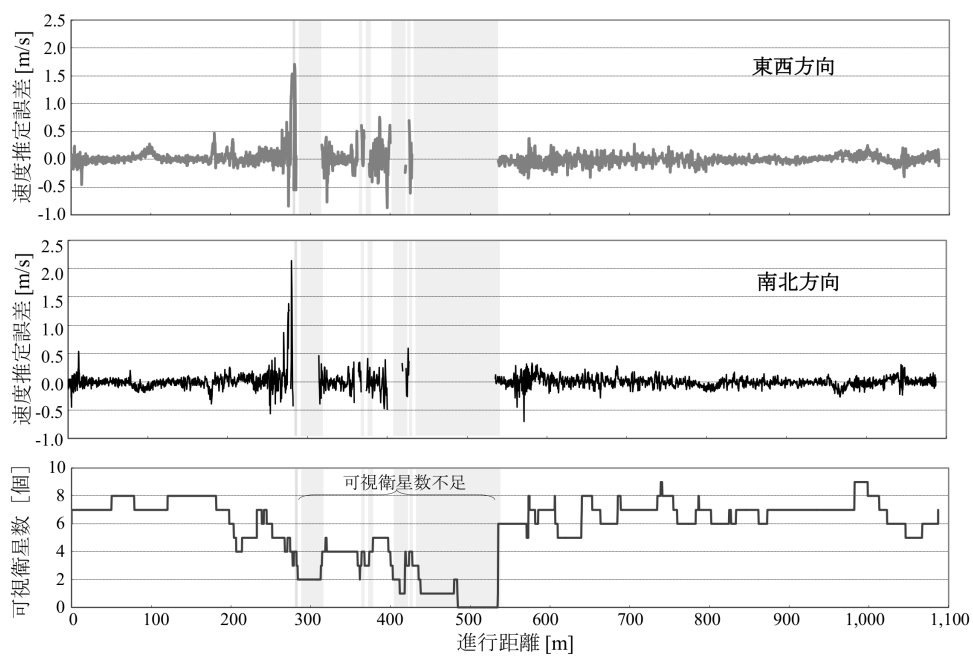


図 5.9 GPS Doppler による速度推定誤差

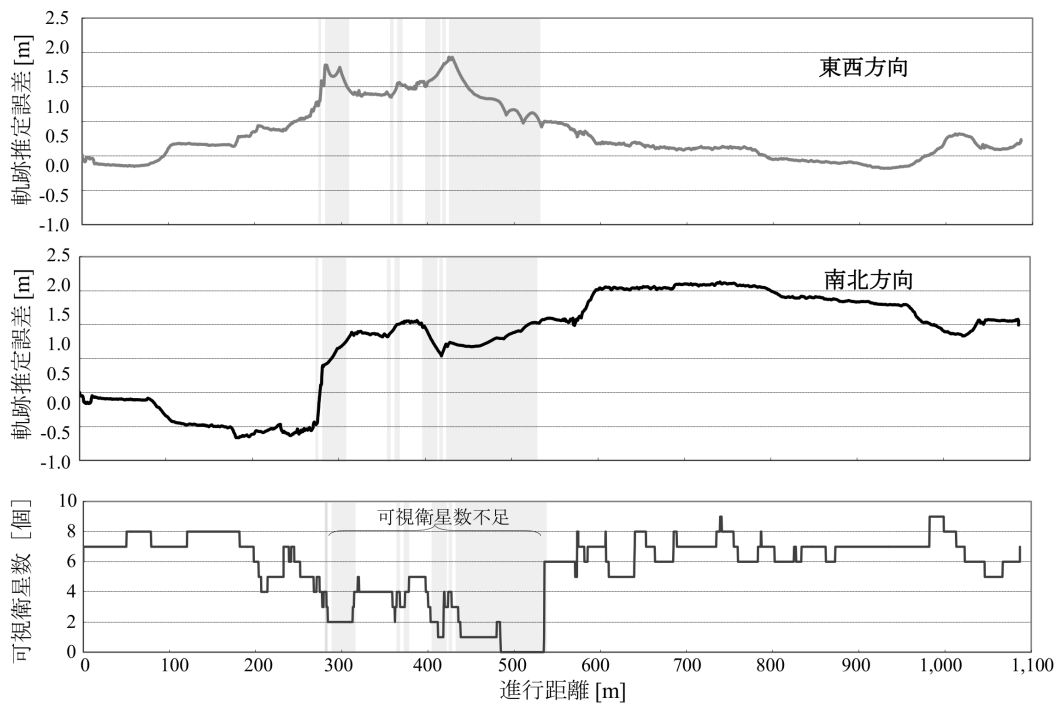


図 5.10 軌跡推定誤差評価結果

果を図 5.11 に示す。

図 5.10 より、蓄積誤差は、East 方向も North 方向も最大 2.0 m 程度であり、最終地点の誤差は 1.0 m であった。以上より、GPS Doppler に基づいて推定した速度比によって決定される軌跡の方位は参照値と良く一致していることが分かる。また、軌跡推定誤差も INS の慣性航法結果と比較して大きく改善されたことがわかる。

軌跡上の GPS Raw データを用いて衛星数を疑似的に増加させるためには、軌跡を拘束条件とすることから、その軌跡の推定精度が重要である。通常の INS を用いた軌跡推

表 5.1 GPS Doppler を用いた速度推定精度

	速度推定誤差平均 μ	速度推定誤差標準偏差 σ
East 方向	0.0071 m/s	0.12 m/s
North 方向	0.0005 m/s	0.12 m/s

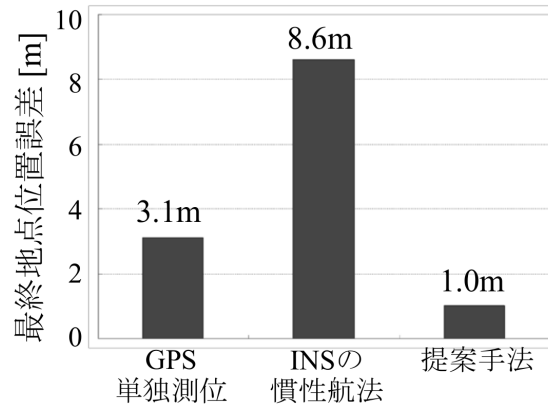


図 5.11 提案手法と一般的な手法による最終地点位置誤差の比較

定では，初期方位に測位結果を利用するため方位推定誤差が生じやすく，ヨーレートセンサのバイアスに時間変化があるため，方位にも蓄積誤差が生じやすい．そこで，本論文では，GPS Doppler を用いた速度推定結果に基づいて軌跡を推定する．GPS Doppler を用いた速度推定結果はバイアス誤差が少なく，軌跡の蓄積誤差を低減できる．また，位置の差分ではなく速度によって 1 エポックで進行方位を決定できる利点がある．

5.3.3 バンドルアジャスト型位置推定とその解法

本論文で提案する，走行軌跡上の GPS Raw データ全体を用いることで衛星数を疑似的に増加させ，高精度な位置推定を実現する方法について詳しく述べる．衛星全体を束にして全体を調整するように位置を推定することから，この手法をバンドルアジャスト型位置推定と呼ぶ．提案手法では，精度の高い軌跡を拘束条件として軌跡上の GPS Raw データからマルチパスを排除して位置の推定を行う．本節では具体的な推定手法と，マルチパス判別手法について記す．

前節までで，GPS Doppler を用いた軌跡の推定精度は高いことが分かっている [75][85]．推定したい現時刻 t_0 での位置とクロックバイアスの値を $\mathbf{x}(t_0) = (x(t_0), y(t_0), z(t_0), C_b(t_0))^T$ とし，現時刻から過去 t_j までの軌跡 $\mathbf{x}_{tr}(t_j) = (x_{tr}(t_j), y_{tr}(t_j), z_{tr}(t_j), C_{btr}(t_j))^T$ を利用して，軌跡上の位置 $\mathbf{x}(t_j)$ を記述する．

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t_j) &= \mathbf{x}(t_0) + \mathbf{x}_{tr}(t_j) \\ &= (x(t_0) + x_{tr}(t_j), y(t_0) + y_{tr}(t_j), z(t_0) + z_{tr}(t_j), C_b(t_0) + C_b(t_j))^T \end{aligned} \quad (5.5)$$

軌跡の推定精度が高いため， j エポック前の時刻 t_j での自車の位置 $\mathbf{x}(t_j)$ は式 (5.5) の形で記述される．この時，各エポック t_j で受信した衛星 i の位置を $(x^i(t_j), y^i(t_j), z^i(t_j))$ とすると，各エポック j における衛星位置 i の疑似距離 $\rho_i(t_j)$ は式 (5.6) で記述される．

$$\rho_i(t_j) = \sqrt{(x^i(t_j) - x(t_j))^2 + (y^i(t_j) - y(t_j))^2 + (z^i(t_j) - z(t_j))^2} + C_b(t_j) \quad (5.6)$$

時刻 t_j で計測された衛星 i の疑似距離 $\rho_i(t_j)$ と，衛星 i と自車の距離 $r^i(t_j)$ の差は疑似距離残差と呼ばれ，一般的な GPS を用いた位置推定では，受信衛星分の疑似距離残差の総和が最小になるように自車の位置を推定している．バンドルアジャスト型位置推定では，全エポック分の全衛星の疑似距離残差 $d^i(t_j)$ の総和が最も小さくなるように現在位置を求めればよい．現在位置の初期位置 $\mathbf{x}(t_0)$ に対して Δx だけずらすと，軌跡上の点も同じだけずれる．そのため，軌跡全体の GPS Raw データを用いた場合でも未知数は $(x(t_0), y(t_0), z(t_0), C_b(t_0))^T$ の 4 つのままであり，相対的に衛星数を増加させることができる．全エポック分の GPS Raw データを用いて $\mathbf{x}(t_0)$ を求めればよい．これは，衛星数が増加した時の単独測位の位置推定と同義であるため，第 2 章で記述した測位手法に基づいて，式 (5.6) を満たす $(x(t_0), y(t_0), z(t_0), C_b(t_0))^T$ を求めることと同じである．図 5.12 にバンドルアジャスト型位置推定の様子を示す．

一般的なタイトカップリングによる位置推定では，1 エポックごとに INS と GPS Raw データとを統合している．1 エポックごとに統合する場合，直接波よりもマルチパスが多数を占める環境ではマルチパスの判別が困難になり，大きな疑似距離誤差が含まれた状態で位置の推定が行われる可能性がある．その場合，位置推定結果に大きな誤差が生じる可能性が高い．また，マルチパスを除くと衛星数が不足し，INS による慣性航法が長く続くと軌跡の蓄積誤差の影響を受けやすくなり位置推定誤差が大きくなる．一方，本章で提案する手法では，高精度な軌跡上の各エポックで受信した GPS Raw データ全体を利用する．軌跡上で受信位置が異なるとマルチパスの状態も変わるため，マルチパスの判別がしやすくなる．また，高精度に推定された軌跡を拘束条件とするため，軌跡の形状に合わない信号をマルチパスとして判別できる．マルチパス信号を除いても全体として十分な衛星

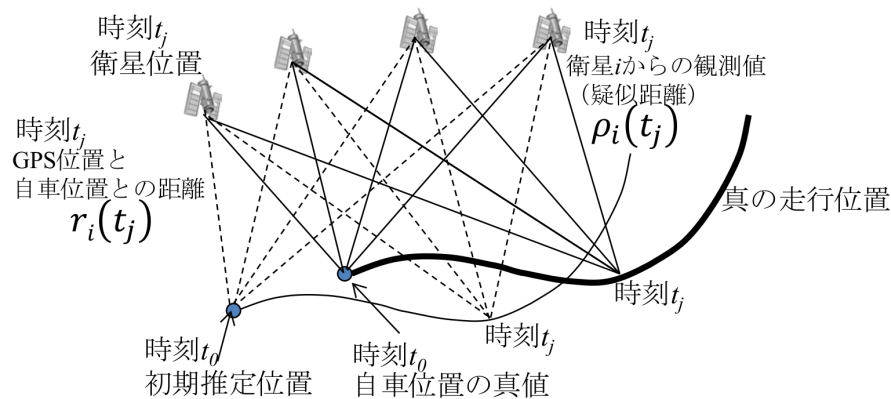


図 5.12 バンドルアジャスト型位置推定 (軌跡上全体の疑似距離残差の評価)

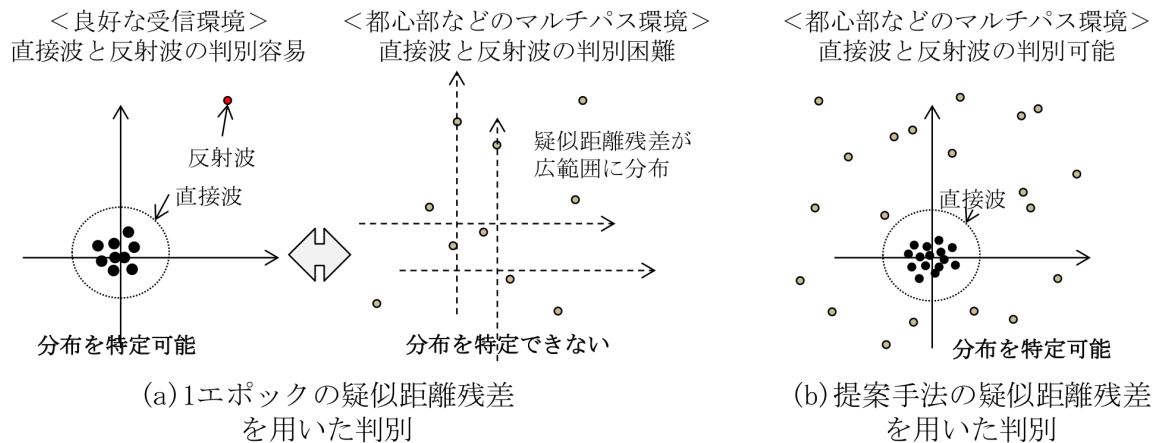


図 5.13 マルチパスと直接波の分布

数があるため、位置精度の向上が期待でき、測位率も向上する。加えて、衛星の幾何学的な配置の偏りも改善し、位置推定精度の向上が期待出来る。

1 エポックごとの判別と、軌跡上の複数エポックを用いた場合の判別について、その疑似距離残差の分布の様子を図 5.13 の (a)(b) に示し、提案手法によるマルチパス判定の具体的な状況を図 5.14 に示す。1 エポックごとの場合、直接波とマルチパス信号の数に差がないため、図 5.13(a) のように、残差の分布から直接波とマルチパスとを区別することが難しい。一方、図 5.13(b) のように、図 5.13(a) が複数エポック集まった場合、マルチパスは広く分布し、直接波は一定の範囲に固まることから、マルチパスを判別しやすくなる。

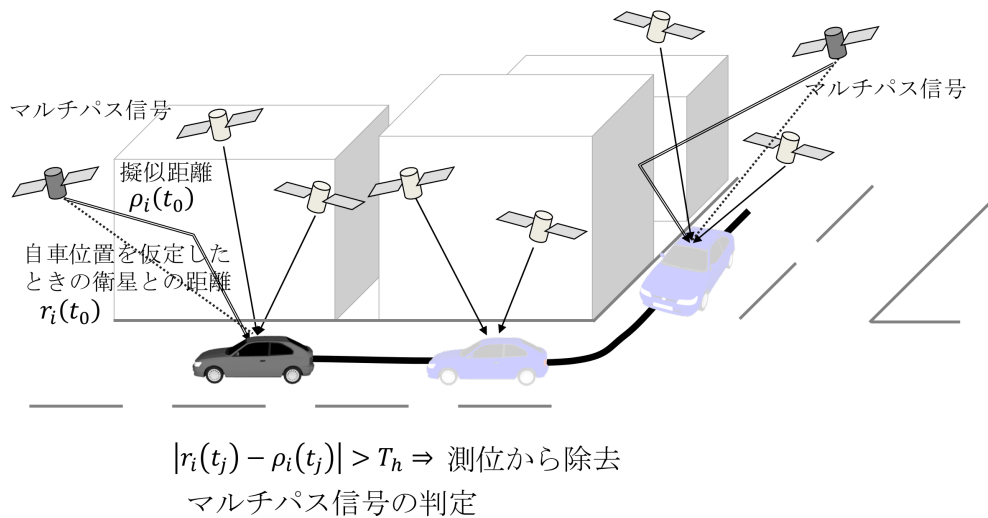


図 5.14 マルチパス判定を伴うバンドルアジャスト型位置推定

軌跡全体で最適な位置 $x(t_0)$ を探索する際，疑似距離残差 $d^i(t_j)$ が閾値 T_h よりも大きくなる信号をマルチパス信号として判別する．マルチパス信号として判別した衛星からの信号を除去し，位置を再推定することで自車位置推定精度の向上が期待できる．

5.4 実験

本節では，本章で提案した「走行中の GPS Raw データを活用した高精度自車位置推定」の効果を検証するため，実際の道路環境で取得したデータを用い，推定された位置の誤差を評価する．名古屋駅周辺の高層ビル街を含む都心部の環境を評価コースとして定め，評価用のデータを収集した．

5.4.1 実験条件

本章で提案した手法の検証には，建物による GPS 信号の遮蔽や反射が発生する都心部の環境を想定する．受信機は Novatel 社製の OEMV [88] を用い，車両（トヨタ自動車社製 エスティマ HV）に搭載して走行し，20 Hz の標本周波数収集した．車速とヨーレートは車両の CAN 上の情報を利用し，GPS 時刻を付けて収集した．なお，同じ車両に Applanix 社製の高精度位置計測システム POSLV610 [87] を搭載し，参照値として同時に収集した．POSLV610 は前述した通り，GPS の遮蔽が多い都心部でも概ね 30 cm 以内

表 5.2 実験機器一覧

機器種別	機種名	取得周期
GPS 受信機	Novatel 社製 OEMV	50 ms
車速，ヨーレート	CAN-BUS 取得	12 ms
実験車	トヨタ社製 Estima HV	
高精度位置計測システム	POSLV610	10ms

の誤差で位置を推定できる測量用のシステムである．提案手法の位置推定誤差の評価はこの参照値と比較することで行った．

表 5.2 に実験に用いた機器の一覧とデータ取得周期を示し，図 5.15 に評価コースを示す．区間 (a) が高速道路下を走行し，区間 (b) が鉄道高架の下を横断する部分である．区間 (c) の部分が 10 階～50 階建のビルが立ち並ぶ範囲であり，区間 (d) の鋭角を描く区間は，建物が道路近くまで迫る比較的細い路地である．

5.4.2 実験結果

提案手法を用いた位置推定結果について，従来手法との比較を図 5.16 に示す．従来手法として，GPS 受信機が出力する測位結果と INS とを統合するルーズカップリングを用いた．横軸は参照値との平面内の位置誤差であり，縦軸がその誤差以下になる場所率[‡]を示す．提案手法を黒の太実線で示し，従来手法 (LC) を黒細実線で示す．また，実験コースの地点 A と地点 B の位置推定結果を Google Earth 上に重畳したものを図 5.17 に示す．図 5.17 中の白 2 重線を参照位置とし，提案手法による位置推定結果を白実線で示し，従来手法 (LC) による推定結果を黒細実線で示した．

図 5.16 より，従来手法では推定された位置誤差が 5 m 以内になる場所率は約 60% であり，全体走行区間の半分程度であることがわかる．また，従来手法において，95% の場所率を得るために許容しなければならない位置誤差は 20 m であり，運転支援システムなどに適用するには不十分であることもわかる．一方，提案手法による推定位置誤差が 5 m

[‡] 総走行距離における，指定する誤差以下で位置推定結果が得られた距離の割合．2.1.2 節参照．

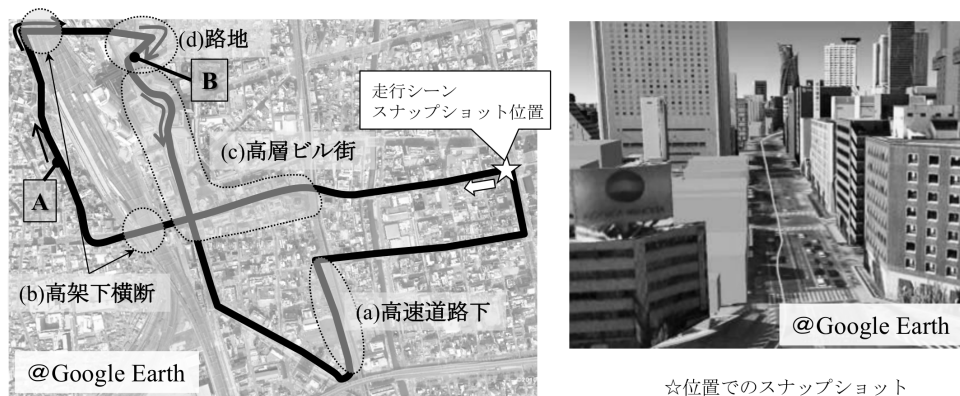


図 5.15 走行軌跡上の GPS Raw データ活用による高精度自転車位置推定 評価コース (Google Earth 表示利用)

以内になる場所率は 99% であり，従来手法に比較して 30 ポイント以上向上している．提案手法は都心環境においてもほぼ全域で 5m の位置推定精度を実現できたことがわかる．

図 5.17(a) から，従来手法の位置推定結果は対向車線側までずれて推定されていることに対し，提案手法の位置推定結果は参照値と比較して車線幅程度の範囲に収まっていることがわかる．また，図 5.17(b) は，道路近くまでビルが建つ比較的狭い路地での推定結果である．従来手法はマルチパスの影響を大きく受け，推定結果が大きく外れ，軌跡推定の精度も劣化することがわかる．一方，提案手法で大きな外れ値は見られず，軌跡推定精度も維持されることがわかる．

5.5 考察

都心部環境で取得したデータを用いて評価した結果，従来手法 (LC) では 5m 場所率が 63% にとどまる評価コースにおいて，提案手法は 99% とほぼ全区間で 5m の位置推定精度を達成できた．提案手法は軌跡をあらかじめ正確に推定し，その軌跡上の GPS Raw データ全体を用いることで，衛星数を疑似的に増加させるとともに，マルチパスの判別を容易にした．特に，GPS Doppler を用いて推定した速度を利用することで軌跡推定精度を向上させたことが，位置推定精度の向上につながったと考えられる．

一方，走行軌跡上の GPS Raw データを活用する自転車位置推定は，疑似距離にバイアス誤差が含まれる場合は取り除くことが難しい．バイアス誤差は，伝搬遅延誤差のモデル化が不十分である時など衛星からの疑似距離に誤差が生じたものである．バイアス誤差は比

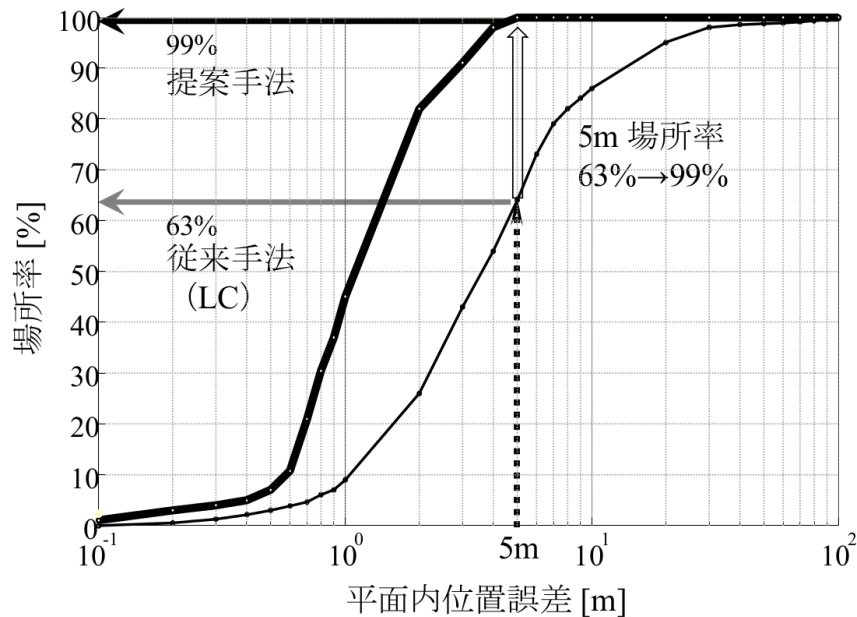


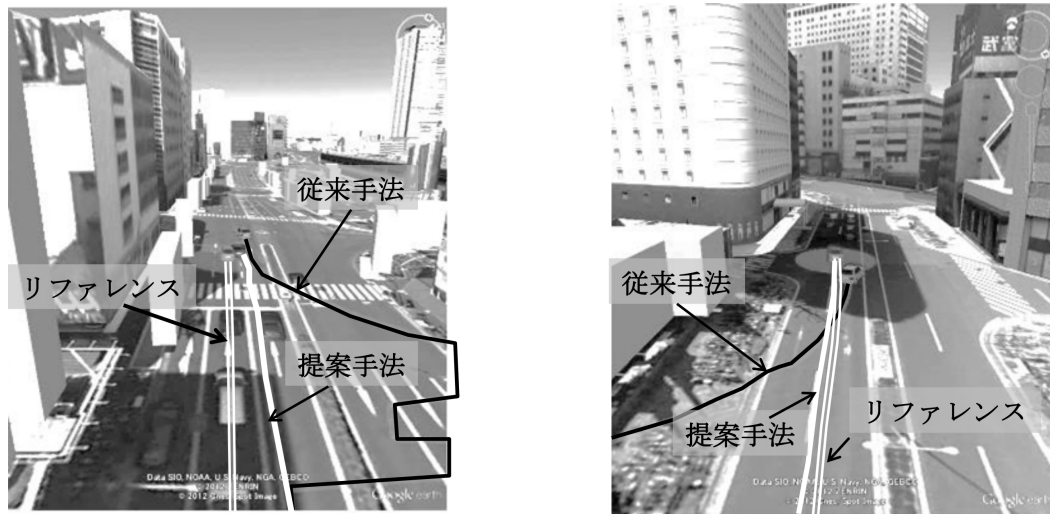
図 5.16 走行軌跡上の GPS Raw データ活用による高精度自車位置推定の精度評価

較的長時間かけて変化する特性を持つため，同一時系列上の GPS Raw データを用いる場合，衛星数を疑似的に増加させたとしても，オフセット誤差の除去ができない可能性が高い．このオフセット誤差は都心部にかぎらず，受信環境のよい郊外でも生じる．第 2 章で示した D-GPS はこのオフセット誤差を低減する効果があるが，補正信号を受信する必要がある．日本では赤道線上にある静止衛星から補正信号が送信されるが，自車と衛星との位置関係上必ずしも受信できるわけではない．また，MSAS の補正信号は広域でモデル化を行うため，基準位置から離れると補正誤差が大きくなる可能性もある．

次章では，同一の走行軌跡上の GPS Raw データを用いる方法ではなく，異なる走行時刻の GPS Raw データを用いることによる高精度自車位置推定を提案し，オフセット誤差の低減を目指す．

5.6 本章のまとめ

本章では，マルチパスの発生や可視衛星数が減少する都心部のような環境においても，1 m ~ 5 m の位置推定精度を実現する手法を提案した．第 4 章までに提案した GPS 受信機内で演算された測位結果を用いて INS と統合する場合，マルチパスや伝搬遅延がある



(a) 地点 A のスナップショット

(b) 地点 B のスナップショット

図 5.17 位置推定結果の比較 (Google Earth 表示利用)

環境では位置推定精度の改善への寄与が少なかった．そこで，一般的に可視衛星数が多いほど位置推定精度が良好であることから，2 つ目のアプローチとして，GPS 受信機の測位結果ではなく，GPS 受信機が計測する GPS Raw データを活用して衛星数を疑似的に増加させることで測位可能な地点の割合と測位精度を向上させる方法と提案した．特に本章では，現時刻の過去 50 m 程度の範囲で計測した GPS Raw データ全体を利用して位置推定精度を向上させる手法を提案した．

本章で提案した走行軌跡上の GPS Raw データを用いた高精度な自転車位置推定手法において，「高精度軌跡推定」と軌跡上の GPS Raw データ全体で測位をする「バンドルアジャスト型位置推定」の 2 つが重要である．従来の軌跡推定は GPS 測位結果で算出した方位と INS の慣性航法を組み合わせたものであったが，提案手法では，GPS Doppler を用いた世界座標系での速度推定結果を用いて軌跡を推定した．GPS Doppler とは Doppler シフト周波数として得られる衛星との相対速度であり，自転車の世界座標系での速度を推定することができる．速度分解能は搬送波周波数で決定されるため，コード疑似距離に比較して分解能が高い．速度誤差のバイアス成分が少なく，1 エポックで方位の推定が可能になるため，GPS Doppler を用いた速度推定結果に基づいて算出した軌跡は蓄積誤差が少なく推定精度が高い．

軌跡推定精度が高いことから，現在位置を正確に推定できれば，一定時間過去の軌跡

上の位置も正確であると考えられる．本章では GPS Doppler に基づいて推定した過去 50 m 程度の軌跡上で計測した複数エポック分の GPS Raw データを利用し，衛星数を疑似的に増加させた．1 エポックでのマルチパス判断と比較して，推定した軌跡形状に合致しない信号をマルチパスとして判断することが容易になる．本章の提案は，GPS を用いた位置推定誤差における「(II) 外れ値誤差」の要因を取り除くことで，都心部のマルチパスが多い環境においても，位置推定精度が格段に向上することを確認した．提案手法では名古屋駅前の高層ビル街を含む都心部の環境において，位置推定誤差 5 m 以下となる場所率を 99% に改善できる可能性があることを確認した．

「先読み運転支援システム」に必要な自車位置推定精度は 1 m ~ 5 m であり，本提案では従来の 1 エポックでの測位結果を用いるのではなく，複数エポック分の GPS Raw データを用いることで位置推定精度を向上させる手法を提案し，実環境においてその有効性を確認した．一方，電離層遅延や対流圏遅延などの伝搬遅延誤差が信号に含まれると，オフセット誤差に繋がるがあった．これらの遅延はゆっくりと変動するため，同一の時系列上では衛星数を疑似的に増加させたとしても残存する可能性があり，本章までの提案手法では，誤差要因の「(III) オフセット誤差」については対策できていない．

次章では，主に「(III) のオフセット誤差」の低減を可能にする複数走行分の GPS Raw データを活用する高精度自車位置推定手法について提案する．

第 6 章

複数走行分の GPS Raw データ活用 による自車位置推定の高精度化

本章では，GPS 受信機で計測される GPS Raw データを利用し衛星数を疑似的に増加させる 2 つ目のアプローチにおける，2 つ目の手法を提案する．本章での提案は，GPS を用いた位置推定における「(III) オフセット誤差」の低減に効果があると考えられる．第 5 章では，走行軌跡上の複数エポック分の GPS Raw データを用いて「(II) 外れ値誤差」の低減を可能にしたが，伝搬遅延はゆっくり変動するため，1 回の走行では伝搬遅延に起因する誤差に変動がなく，「(III) オフセット誤差」を削減できないという問題があった．

本章では，同一の区間を異なる時刻に複数回走行して得られた GPS Raw データを利用し，伝搬遅延の偏りを低減することで「(III) オフセット誤差」を低減する手法を提案する．提案手法は汎用 GPS 受信機と車載 INS から得られる車速とヨーレート，および，複数回の GPS Raw データを利用する際に必要となる周辺監視用センサを利用することを想定する．

6.1 はじめに

将来の「先読み運転支援システム」には特定の場所で動作する支援が重要であり，そのための自車位置推定精度は 1 m ~ 5 m と考えらえる．第 2 章で述べた通，汎用の GPS 受信機を用いた単独測位の場合，郊外の受信環境が良好な場合でもその位置推定精度は 10 m 程度であり，都心部の場合は 30 m 以上の誤差が生じることも多い．第 3 章，第 4 章では運転支援用に搭載が進む周辺監視用センサを GPS の測位結果とを組み合わせること

で自車位置推定精度を向上させる手法を提案した．この手法は測位誤差の「(I) ばらつき誤差」の低減に有効であり，「(II) 外れ値誤差」と「(III) オフセット誤差」のない郊外路では，位置推定精度を 1 m ~ 5 m に向上できることを確認した．第 5 章では「(II) 外れ値誤差」を低減するため，GPS 受信機が出力する測位結果ではなく，GPS 受信機が衛星からの信号を計測した，疑似距離や GPS Doppler などの GPS Raw データを利用し，疑似的に衛星数を増加させることで特に都心部での位置推定精度を向上させる手法を提案した．「(II) 外れ値誤差」の原因となるマルチパス信号の除去を可能にすることで，都心部でも 5 m の位置推定精度を実現できる可能性を確認した．

疑似距離に含まれる伝搬遅延誤差は位置推定誤差の「(III) オフセット誤差」と関連する．電離層の環境に変化がない場合は伝搬遅延誤差の有無の判断は困難であることから，同一走行中の場合，複数エポック分の GPS Raw データを用いたとしても「(III) オフセット誤差」の低減は困難である．本章は，同一の区間を異なる時刻で複数回走行して得られる GPS Raw データを利用することで，疑似距離に含まれる伝搬遅延誤差を平滑化し，偏りを低減する．異なる時刻の GPS Raw データを用いることで伝搬遅延に基づく誤差を相殺し，「(III) オフセット誤差」を低減する効果を狙う．

6.2 関連研究と本研究のアプローチ

6.2.1 関連研究のアプローチ

異なる走行時における同一地点の測位結果の平均を用いて高精度化を図る手法 [89][90] が提案されている．この手法は GPS Raw データで複数回のデータを統合するのではなく，GPS 受信機内で演算されて出力された測位結果を用いて平均測位結果を算出している．そのため，マルチパスによる誤差が少ない郊外路では，オフセット誤差の低減に一定の効果がみられる．しかし，都心部などのマルチパスが多い環境では大きな測位誤差が頻出するため，平滑化の効果が表れにくい．また，測位結果が得られない場所ではその精度向上に時間がかかる可能性がある．

また，前章までで提案した，走行軌跡上の GPS Raw データを活用する高精度自車位置推定では，軌跡上の異なる地点の複数エポック分の GPS Raw データを用いることで，疑似的に衛星数を増加させた．また，マルチパスによる誤差が場所によって変化することを利用し，軌跡上の信号全体を用いることでマルチパス判別を容易にした．しかしな

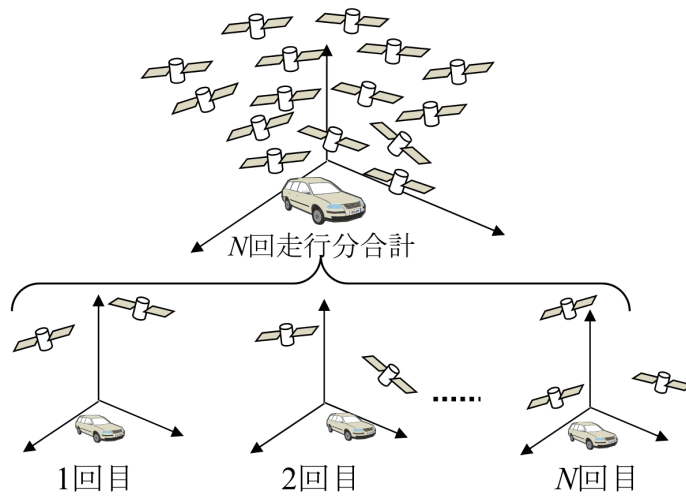


図 6.1 提案手法 2-2 による衛星数の疑似的増加の様子

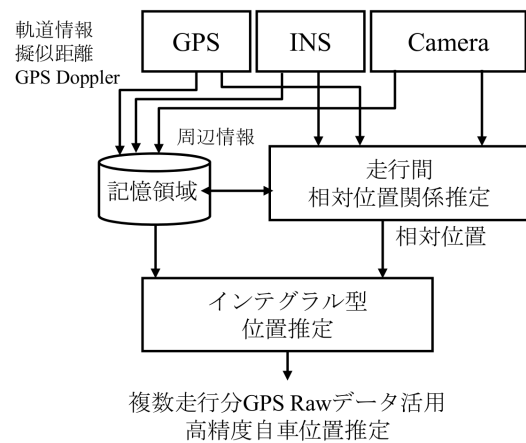


図 6.2 提案手法 2-2 による位置推定の処理手順

がら，伝搬遅延誤差は比較的長い周期で変化するため，同一走行中の軌跡上の GPS Raw データだけでは影響を取り除くことが困難であった．

6.2.2 本研究のアプローチ

GPS を用いた測位の特性として，測位に用いる衛星数が増加するほど位置推定精度が向上する傾向にある．本論文では 2 つ目のアプローチとして，疑似的に衛星数を増加させる手法を提案し，前章ではそのアプローチの 1 つ目の手法として，走行軌跡上で受信した

GPS Raw データを利用して衛星数を増加させる手法 [74][75][76][77][78] を提案した．本章では，比較的近い地点を複数回走行した時の，過去の GPS Raw データを集めて衛星数を疑似的に増加させる 2 つ目の手法「複数走行分の GPS Raw データ活用型高精度自車位置推定」[79][80][81][82] を提案し，特に「(III) オフセット誤差」低減の効果について検証する．提案手法の衛星数増加の様子を図 6.1 に示し，あわせて処理手順を図 6.2 に示す．なお，提案手法では，自車が同一の区間を複数回走行して取得したデータを自車自身が保存して利用することを想定する．但し，将来の運転支援システムとして，多数の車両が走行して取得したデータを保存できる仕組みが整えば，自車以外の車両が走行したデータを利用することも可能になる．

6.3 提案手法 2-2：複数走行分の GPS Raw データ活用型高精度自車位置推定

6.3.1 手法の概要

本節では同一区間を異なる時刻に走行して取得した GPS Raw データを複数エポック分利用する「複数走行分の GPS Raw データ活用型高精度自車位置推定」について提案し，その効果を検証する．本手法は異なる時間に計測した GPS Raw データを集めることで，疑似距離の伝搬遅延誤差にもばらつきを持たせ，都心部，郊外に関わらず生じる「(III) オフセット誤差」の低減を狙う．提案手法は，図 6.1 に示すように，同じ区間を別時刻に走行したときに計測された疑似距離を用いて位置推定を行う．異なる時刻の GPS Raw データを用いることで，疑似距離の伝搬遅延誤差も変動分として見なすことができ，長時間の静止測量と同じ効果を得られる可能性がある．

ただし，各走行で必ずしも同じ地点を通過する保証はなく，仮に同じ地点を通過したとしても同じ地点で GPS Raw データが計測される保証もない．提案手法には 2 つの特徴がある．1 つ目はカメラやレーザなどの周辺監視用センサを用い，計測した周辺環境のデータを走行ごとに保存し，周辺環境データ間を照合することで複数走行間の走行位置の相対位置関係を推定する「走行間相対位置関係推定」である．2 つ目は複数回の走行で得られた複数エポック分の GPS Raw データと相対位置関係が最も合致するように絶対位置を推定する「インテグラル型位置推定」である．

基準走行時のある時刻 t_0 の自車位置を基準位置 $(x(t_0), y(t_0), z(t_0))$ とした時，別走行

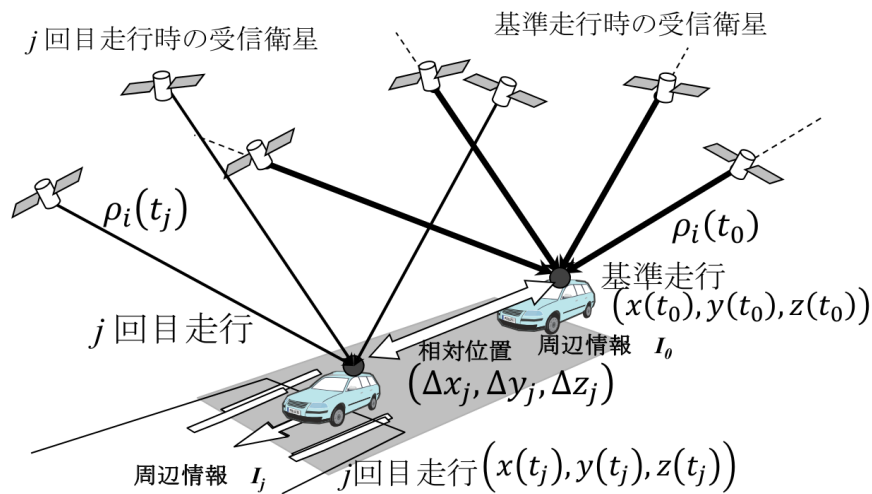


図 6.3 複数走行 GPS Raw データを用いた高精度位置推定の仕組み

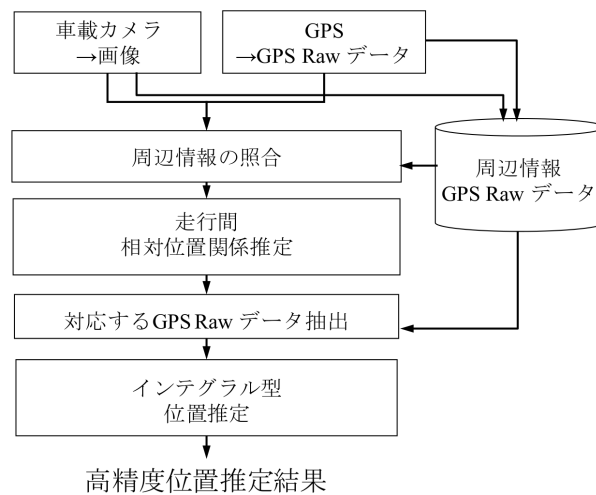


図 6.4 複数走行 GPS Raw データを用いた高精度位置推定手順

の時刻 t_j での走行位置と基準位置との相対位置 $(\Delta x_j, \Delta y_j, \Delta z_j)$ を推定できれば，時刻 t_j での位置は $(x(t_0) + \Delta x_j, y(t_0) + \Delta y_j, z(t_0) + \Delta z_j)$ と表現することができる．各走行における GPS Raw データを計測し地点間の相対位置関係がわかれば，推定位置は基準位置 $(x(t_0), y(t_0), z(t_0))$ だけとなる．第 2 章で述べた通り，GPS を用いた位置推定には，受信機の時計誤差も未知数として推定する必要がある．第 5 章で提案した軌跡上の GPS Raw データを用いる場合は受信機の時計誤差 C_b は一定としてみなすことができたが，受

信機の時計誤差が各走行で異なるため，各走行の時計誤差もパラメータとし，走行回分の時計誤差 $C_b(t_j)$ も未知数として推定する必要がある．

各走行のある地点間の相対位置関係を推定できれば，複数の走行で計測された複数エポック分の GPS Raw データをまとめて用いることができる．提案手法では周辺監視用センサとして前方カメラ画像を用いて周辺環境を保存し，GPS Raw データを計測した地点間の相対位置関係を推定する．特に，前方カメラ画像で取得した画像を第 5 章で提案した GPS Doppler を用いて推定した軌跡に沿って投影して保存する．図 6.3 に提案手法における高精度化の仕組みについて図解し，図 6.4 に推定手順を示す．

6.3.2 走行間相対位置関係推定

前述した通り，各走行で同一地点を通過する保証はなく，仮に同一地点を通過したとしても，GPS Raw データの計測タイミングも異なるため，通常の走行の場合，同一地点で GPS Raw データが計測される可能性は極めて低い．そのため，複数の走行データから得られる GPS Raw データを利用するためには，GPS Raw データ取得地点の相対位置関係を推定する必要がある．本論文では前方カメラを用いてこの相対位置関係を推定する．

図 6.5 に同一の区間を 2 回走行し，GPS Raw データを取得したタイミングでの前方カメラの画像の例を示す．これらの前方カメラ画像で相対位置関係を推定する場合，画像中の特徴点間の照合を行い，異なる走行間のカメラの位置関係を推定する手法が考えられる（図 6.6）．単眼カメラの場合，回転成分と並進方向の推定はできるが，周辺との距離が不定であるため，並進ベクトルの大きさを推定することは容易ではない [73]．提案手法で必要とするのは相対位置関係 $(\Delta x_j, \Delta y_j, \Delta z_j)$ の推定であるため，単眼カメラ画像だけで推定することは困難である．

提案手法では，GPS Doppler に基づく軌跡推定結果と前方カメラ画像を利用し，相対位置を推定する．第 5 章で述べた通り，GPS Doppler で推定した速度推定結果から算出した軌跡は，方位推定精度が高く軌跡の蓄積誤差も少ない．GPS Doppler を用いた場合，100 m 走行したとしても軌跡の蓄積誤差は 1 m 程度である．一定区間の高精度な軌跡に沿って前方カメラ画像を道路面に投影し，路面画像を生成する．生成された路面画像の一例を図 6.7 に示す．前方画像のカメラに比較的近い部分はピッチ変動の影響が少ないことを利用し，前方画像中のカメラに近い部分を軌跡に沿って重畳して描いた．なお，カメラの取り付け位置は既知とし，カメラのピッチ変動は推定していない．



図 6.5 前方画像の例

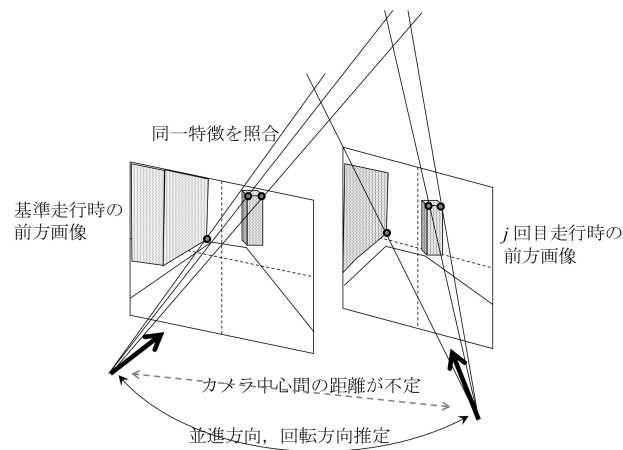


図 6.6 前方画像を用いた場合のカメラ中心の位置関係の推定

各走行時の周辺環境を路面画像として保存し、各走行間の GPS Raw データを受信したタイミングの位置関係を推定する。路面画像は GPS Raw データを受信した位置を原点として描き、基準とする路面画像 I_0 に対し、走行 j で作成した路面画像 I_j の相対位置関係が推定できれば、GPS Raw データを取得した地点間の相対位置関係 $(\Delta x_j, \Delta y_j, \Delta z_j)$ も推定できるようになる。基準路面画像の原点を O_0 、 j 回目の走行時に描いた路面画像の原点を O_j とすると、相対位置関係 $(\Delta x_j, \Delta y_j, \Delta z_j)$ は原点 O_0 から O_j へのベクトルとして表される。基準とする路面画像 I_0 と走行 j で作成した路面画像 I_j の特徴から、 I_0 上の点 P_0 と I_j 上の点 P_j が同一点として照合できた場合、原点間のベクトルは式 (6.1) の形で記述できる。

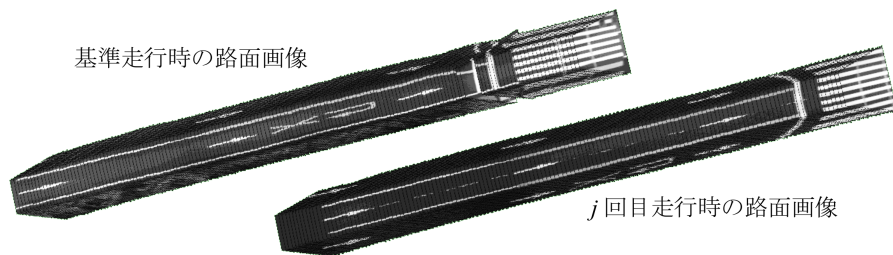


図 6.7 軌跡に沿って投影された路面画像例

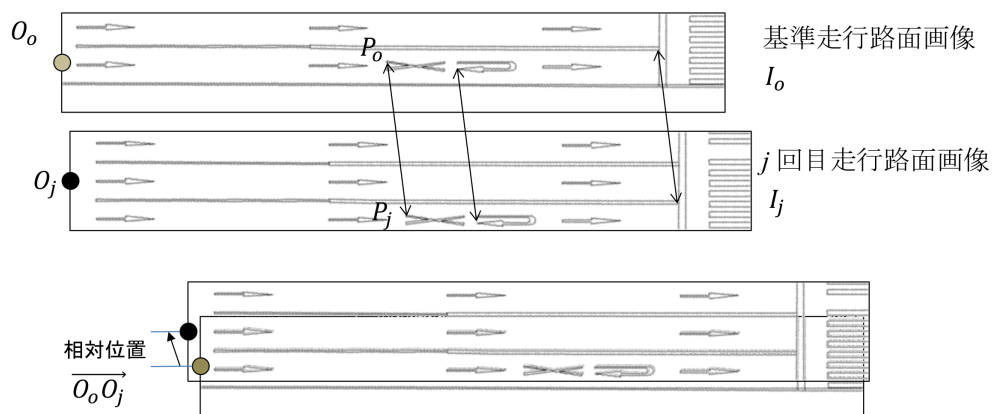


図 6.8 路面画像を用いた GPS Raw データ受信位置の相対位置推定

$$\begin{aligned}
 \overrightarrow{O_0 O_j} &= \overrightarrow{O_0 P_0} - \overrightarrow{O_j P_0} \\
 &= \overrightarrow{O_0 P_0} - \overrightarrow{O_j P_j}
 \end{aligned}
 \tag{6.1}$$

図 6.8 に、路面画像間の相対位置関係と、各走行の GPS Raw データ取得地点間の位置関係とを図解する。

図 6.8 では P_0 と P_j の 1 点のみの照合を例にして示したが、画像間の相対位置推定は、特定の特徴点間の全体距離誤差の和が最も小さくなるような形で求められる。前方カメラ画像で照合する場合、前方障害物による周辺環境の隠蔽などによって照合が困難な場合もあるが、路面画像は一定時間の画像が重畳されているため範囲内全体の特徴を用いて照合することが可能であり、周辺環境の隠蔽や変動にもロバストである。また、GPS Doppler

に基づく高精度な軌跡に沿って生成されているため、投影された情報の位置関係の精度が高いのも大きな利点である。

6.3.3 インテグラル型位置推定とその解法

異なる走行間の GPS Raw データの計測位置の相対位置関係 $(\Delta x_j, \Delta y_j, \Delta z_j)$ が得られると、複数走行分の GPS Raw データを用いて測位するインテグラル型位置推定が可能になる。本節ではその解法を定式化する。

研究 [89], [90] では、レーザレーダで得られた周辺との距離情報を周辺環境情報として GPS 測位結果とともに記録し、保存した複数走行の情報間を照合して同一地点と判断される地点の測位結果の平均化を行うことで、位置推定誤差の低減を実現した。この研究では走行間の相対位置関係 $(\Delta x_j, \Delta y_j, \Delta z_j)$ を考慮していないが、本論文では相対位置関係を考慮した測位結果の平均化による高精度化の手法を従来手法とし、測位結果ではなく GPS Raw データ全体を用いて衛星数を疑似的に増加させるインテグラル型を提案手法として、比較する。

従来手法は測位結果を平均化することで高精度化を図った。基準走行の地点 $x(t_0) = (x(t_0), y(t_0), z(t_0))^T$ で得られた測位結果 $x_0 = (x_0, y_0, z_0)^T$ と、異なる時刻に走行して得られた地点 $x(t_j) = (x(t_j), y(t_j), z(t_j))^T$ での測位結果 $x_j = (x_j, y_j, z_j)^T$ を保持している。各走行の測位結果から、基準走行との相対位置 Δx_j を介して基準位置の疑似的な測位結果を求め、複数走行分の平均位置を算出する。基準走行の $x(t_0)$ と j 回目の走行における x_j の位置関係は、式 (6.2) の形で表せるため、 N 回走行した場合は、基準走行に対する N 回分の走行の相対位置関係を求め、各測位結果 (x_j, y_j, z_j) を利用して、式 (6.3) の形で表せる。

$$x_j = x(t_0) + \Delta x_j \quad (6.2)$$

$$x(t_0) = \frac{x_0 + \sum_{j=1}^N (x_j - \Delta x_j)}{N + 1} \quad (6.3)$$

通常の受信機は衛星数が不足した場合でも何らかの推測処理を行って測位結果を出力していると考えられるが、そのアルゴリズムは秘匿されているため分からない。そこで、本研究では平均化の効果と疑似的な衛星数増加の効果を同一の条件で比較するため、従来手法で用いる測位結果は、GPS Raw データから算出した単独測位結果を利用する。受信さ

れた衛星 i の位置と疑似距離 ρ_i と, j 回目の走行における自車位置 (x_j, y_j, z_j) は, 式 (6.4) のように表わせる.

$$\rho_i(t_j) = \sqrt{(x^i(t_j) - x_j)^2 + (y^i(t_j) - y_j)^2 + (z^i(t_j) - z_j)^2} + C_b(t_j) \quad (6.4)$$

j 回目の走行において, 3 次元位置 (x_j, y_j, z_j) と受信機の時計誤差であるクロックバイアス $C_b(t_j)$ を求める必要があるため, 1 回の走行で測位結果を得るためには, 各走行において 4 個以上の衛星が必要である. 各走行で得られる位置推定結果 $(x_j, y_j, z_j, C_b(t_j))$ の平均値を利用するため, 各走行で 4 個以上, 合計で $4N$ 個以上の衛星数が必要である.

一方, 提案手法である「インテグラル型位置推定」は測位結果ではなく各走行における GPS Raw データを複数回分用いて位置を推定する手法である. 基準走行で得られた GPS Raw データ, 異なる時刻における j 回目の走行で得られた GPS Raw データを用いて位置推定を行う. 本論文では, 第 5 章で提案した走行軌跡上の GPS Raw データ全体で位置を推定する「バンドルアジャスト型位置推定」に対し, 異なる時刻間の GPS Raw データを用いて位置を推定する手法を「インテグラル型位置推定」と呼ぶ.

j 回目の走行における GPS Raw データには, 受信した時刻 t_j と, 衛星の軌道情報と, 受信された衛星 i からの疑似距離 $\rho_i(t_j)$ が保存されている. 各 GPS 衛星の位置は軌道情報と受信時刻を用いて算出する. 推定したい基準走行の位置と受信機の時計誤差であるクロックバイアスを $(x_0, y_0, z_0, C_b(t_0))$ とすると, j 回目における位置は相対位置関係 $(\Delta x_j, \Delta y_j, \Delta z_j)$ を用いて表せる. 基準走行と j 回目の走行における GPS Raw データを用いた時, 疑似距離と衛星位置, 基準走行の位置は式 (6.5) の形で表せる.

$$\rho_i(t_j) = \sqrt{(x^i(t_j) - x_0 - \Delta x_j)^2 + (y^i(t_j) - y_0 - \Delta y_j)^2 + (z^i(t_j) - z_0 - \Delta z_j)^2} + C_b(t_j) \quad (6.5)$$

この時, j 回目の走行と基準走行との相対位置 $(\Delta x_j, \Delta y_j, \Delta z_j)$ は既知であるため, 位置の未知数は基準走行の位置 (x_0, y_0, z_0) のみである. 一方, 異なる走行時における受信機の時計誤差間に関係性はないため, 各走行ごとの受信機の時計誤差であるクロックバイアス $C_b(t_j)$ を推定する必要がある. 式 (6.5) では全体をまとめて 1 つの方程式として扱うことができるため, N 回の走行データを用いた場合, 未知数はクロックバイアス N 個と 3 次元位置の $N + 3$ となる.

N 回分の走行データを用いる場合、従来手法の未知数は $4N$ であり、提案手法の未知数は $N+3$ である。そのため、走行回数 N が増加すれば、提案手法は従来手法の約 $1/4$ の衛星数で位置の推定が可能になる。 j 回目の走行では衛星数が不足して測位できなかった場合も、複数走行分の衛星を利用することで、位置推定が可能になる可能性がある。また、提案手法の場合は未知数に対する拘束条件が強くなり、高精度化が期待できる。

衛星数の増加の効果に加え、衛星配置が異なる時刻に計測されたデータ全体で測位を行うことから、衛星配置の改善による測位結果の改善も期待できる。また、異なる時刻では電離層や対流圏の遅延誤差が変化するため、走行軌跡上の GPS Raw データを用いた高精度自動車位置推定では低減できなかった、「(III) のオフセット誤差」を低減できる可能性がある。

6.4 実験

本章で提案した、「インテグラル型位置推定」の効果を検証するため、郊外と都心の両方の環境において、収集した実データを用いて位置推定精度の評価を行う。測位結果を平均化する手法を従来手法とし、それと比較して評価する。本評価では、基準走行（初回走行時）の全エポックに対し、提案手法を適用して評価する。提案する手法の絶対位置推定精度は、各走行回の相対位置精度にも依存する。本評価では、周辺環境を記録した路面画像の位置精度から、相対位置の推定精度を模擬し、提案手法による絶対位置推定精度向上の可能性について検証する。

6.4.1 実験条件

本章で提案した、複数走行分の GPS Raw データを用いて衛星数を疑似的に増加させる手法の効果を検証するため、同一地点付近を複数回走行し、GPS Raw データとカメラデータを収集した。特に、提案手法は「(III) オフセット誤差」の低減の効果を狙ったものであり、オフセット誤差は周辺環境によらず発生することから、郊外と都心の2か所において検証を行う。GPS Raw データ取得用に GPS 受信機（2010 年以前：Trimble 社製 5700 [72]，10 Hz　2010 年以降：Novatel 社製 OEMV [88]，10 Hz）を搭載し、郊外と都心のコースを複数回走行してデータを収集した。都心でも 30 cm 精度で位置推定が可能な高精度位置計測システム（Applanix 社製 POSLV610 [87]，100Hz）のデータも併せ

表 6.1 実験環境と計測条件一覧

周辺環境	郊外	都心
コース全長	4,016 m	2,463 m
平均衛星数	5.5 個	2.9 個
データ収集回数	10 回	20 回

て収集し、参照値として利用した。GPS 受信機では提案手法に必要な GPS Raw データ（時刻、擬似距離、GPS Doppler、S/N、軌道情報）を取得した。

郊外のコースを図 6.9 に示し、都心のコースを図 6.10 に示す。郊外路は低層の住宅が立ち並ぶ道路を中心に、都心のコースは名古屋駅前の高層ビル街を含むコースを各々 10 回走行して収集した。実験環境と計測条件の一覧を表 6.1 に示す。



図 6.9 郊外のコースと走行シーン例

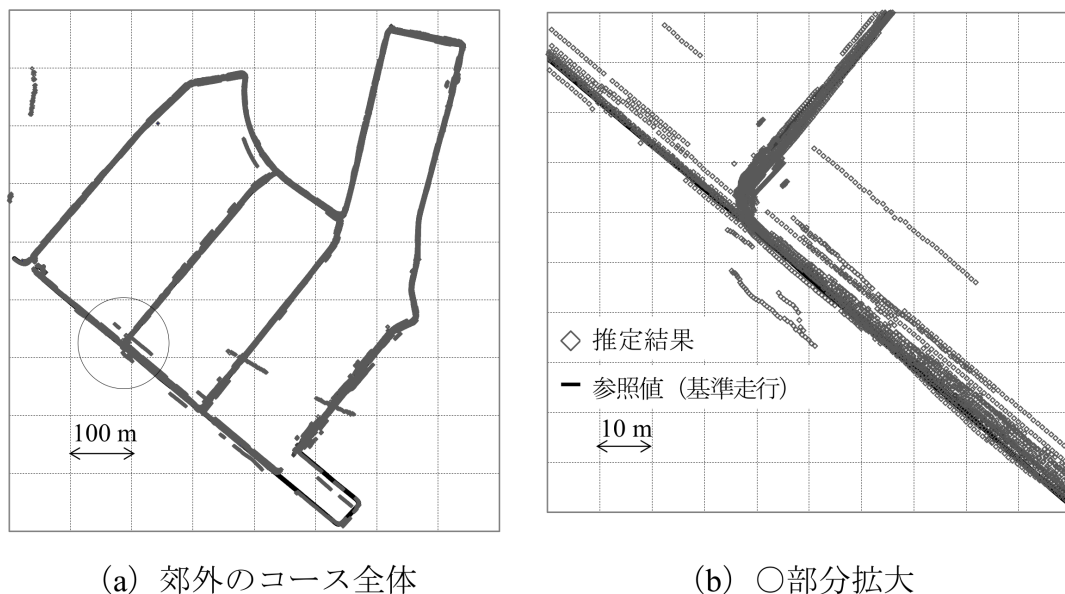


図 6.11 郊外のコースにおける 10 走行回分の各回の測位結果

6.4.2 実験結果

郊外のコースにおける全走行回数分の全エポックに対する位置推定結果を、図 6.11 に示す。特にコース全体の結果を同図 (a) に示し、コースの一部を拡大表示したものを同図 (b) に示す。本論文の評価では、基準走行（1 回目の走行）時の全エポックについて、各走行において対応する地点の GPS Raw データを統合して位置を推定した。対応する地点は各走行の基準走行に対する最近傍の点とし、その相対位置関係は POSLV から得られる参照値を用いて算出した。路面画像間の照合によって相対位置関係を推定する場合、路面上の位置精度は、路面画像原点からの距離によって変化する。路面画像中の照合の手がかりとなる路面標示の位置は実際の環境に依存するため予め規定できない。そこで、想定される範囲の誤差をランダムに発生させたものを、正しい相対位置に対して与え、走行間相対位置推定の結果として用いた。想定した相対位置精度については次節の考察において詳細を述べる。

図 6.12 は従来手法である 10 走行分の測位結果の平均値を用いた推定結果を示し、図 6.13 は提案手法である 10 走行分の GPS Raw データを用いて擬似的に衛星数を増加させたときの推定結果を示す。なお、黒実線が基準走行の参照位置である。従来手法の場

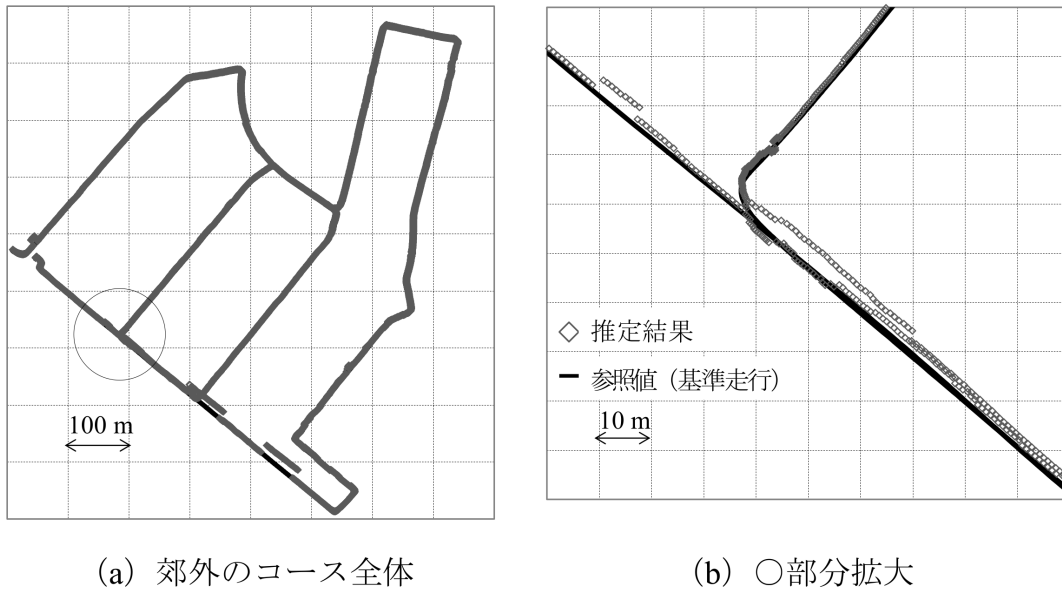


図 6.12 郊外のコースにおける 10 走行回分の測位結果の平均を用いた推定結果 (従来手法)

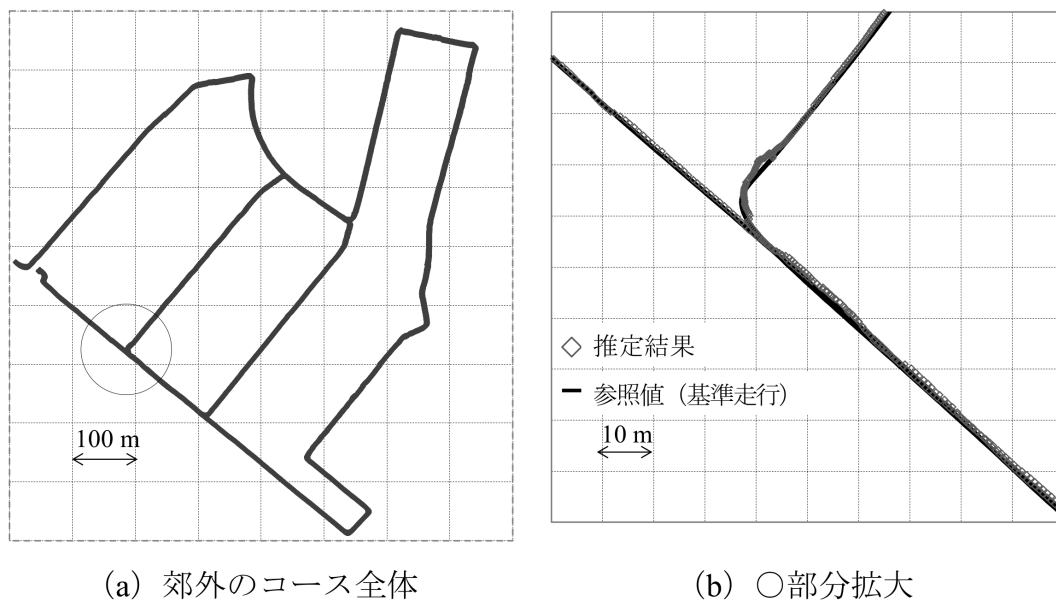


図 6.13 郊外のコースにおける 10 走行回分の GPS Raw データを用いた推定結果 (提案手法)

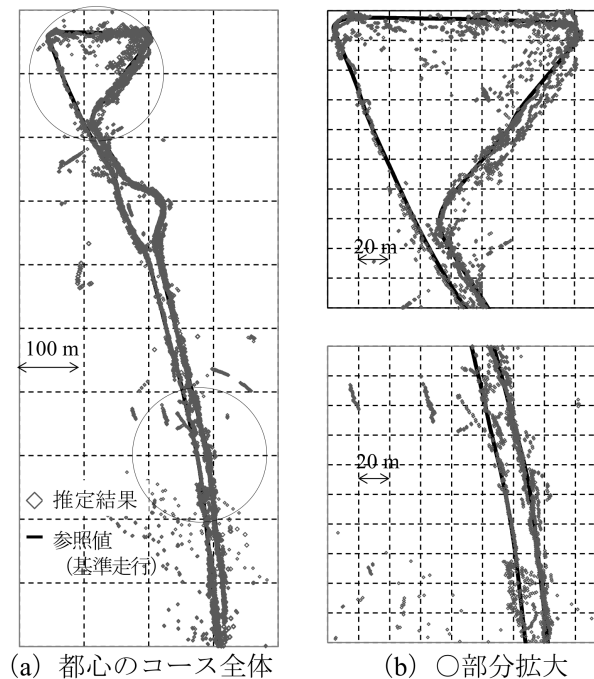


図 6.14 都心のコースにおける 10 走行回分の各回の測位結果

合，各走行時に発生した誤差の偏りの影響を受け，大きな誤差が残ることが分かる．一方，提案手法を用いた場合，各走行時の測位結果に大きい偏りがあった部分でもその影響を受けず，衛星数を擬似的に増加させたことによる効果が確認できる．図 6.11 より，各測位結果にはオフセット誤差がみられ，第 5 章で提案した走行軌跡上の GPS Raw データを用いた場合にはオフセット誤差が残存することが想定されるが，提案手法により，オフセット誤差も低減されたことがわかる．

同様に都心のコースにおける結果を図 6.14，図 6.15，図 6.16 に示す．図 6.14 は 10 走行分の測位結果を示し，図 6.15，図 6.16 はそれぞれ従来手法による位置推定結果と提案手法による位置推定結果を示す．図 6.14 より，都心のコースは郊外のコースに比較して測位結果の誤差が大きく，位置推定結果が参照位置と 100 m 以上の誤差をもつ地点もある．また，測位できない地点も多い．複数回の測位結果を平均する従来手法の場合，図 6.15 の結果から位置推定ができないところがある．都心のコースの場合，提案手法は，従来手法に比べ位置推定できる地点が増加し，その精度も向上したことがわかる．ただし，提案手法を用いた場合においても，郊外のコースに比較すると誤差が大きい．

以上により，複数走行 GPS Raw データ活用型の高精度位置推定による効果を確認し

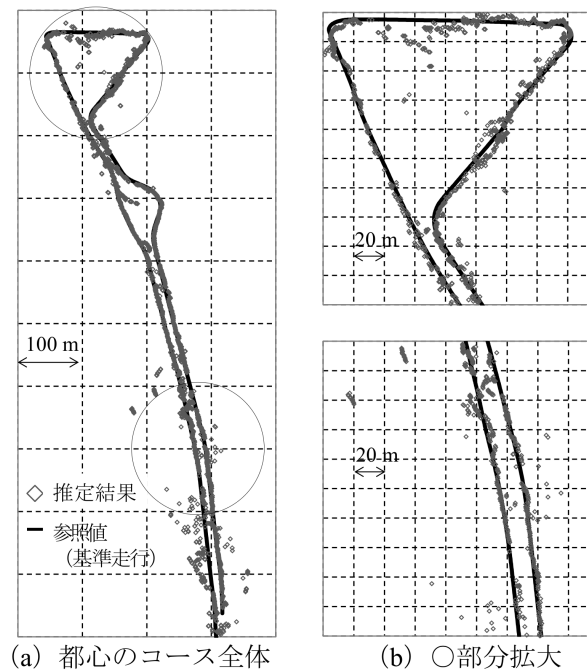


図 6.15 都心のコースにおける 10 走行回分の測位結果の平均を用いた推定結果
(従来手法)

た．次節で，走行地点間の相対位置推定精度，走行回数と測位率や測位精度の関係について考察する．

6.5 考察

本節では，提案手法の効果を従来手法と比較して考察する．複数走行分のデータを用いるためには各走行時の地点間の相対位置関係が必要であり，その推定誤差は絶対位置推定精度に影響を与える．提案手法では，GPS Doppler を用いて推定した高精度な軌跡を利用して路面画像を生成し，生成した路面画像を照合することで各走行間の相対位置関係を推定している．ここでは，実験において想定した，複数走行間の相対位置推定精度について考察する．

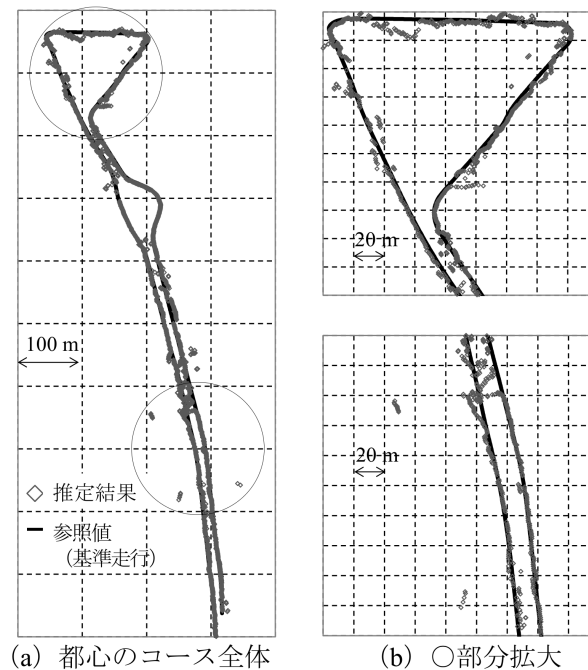


図 6.16 都心のコースにおける 10 走行回分の GPS Raw データを用いた推定結果
(提案手法)

6.5.1 複数走行間の相対位置推定精度

相対位置推定精度は路面画像の生成精度と，路面画像間の照合精度によって決まる．路面画像間の照合精度は，路面標示などの明確な特徴がある場合，1 ピクセルの精度で画像間の位置照合が可能である [91]．このことから，複数走行間の相対位置誤差は路面画像の生成誤差に相当すると考えられる．ここでは，生成した路面画像の位置精度について評価する．図 6.17 に評価結果を示す．

図 6.17 の評価結果は，都心部の同一区間を 6 回*走行して取得したデータを元に 100 m 単位で路面画像を 30 枚生成し，生成誤差の平均を示したものである [92]．生成したそれぞれの路面画像の原点を参照位置とあわせ，予め計測した参照地図（朝日航洋製）と比較して生成誤差を算出した．なお，誤差の算出に路面標示の端点位置を利用した．路面画像は軌跡に基づいて生成しているため，原点から離れるほど，軌跡の推定誤差が増加し，生

* GPS のデータは 10 回収集したが，画像データはそのうちの 6 回分のみ収集．

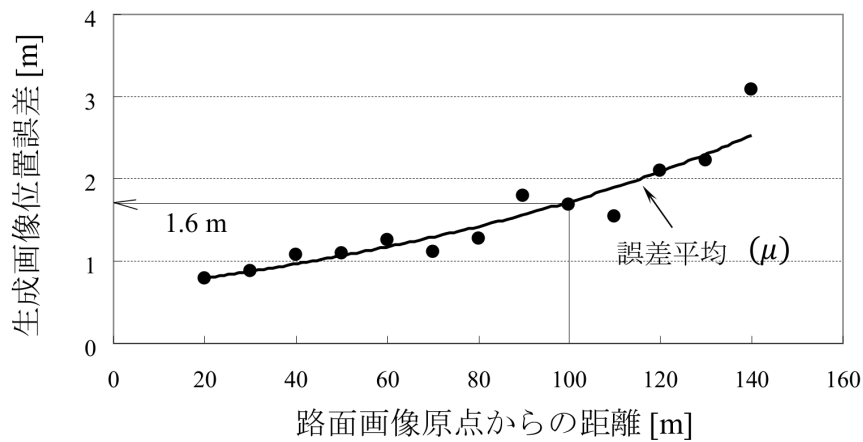


図 6.17 GPS Doppler を用いた軌跡に沿って生成した路面画像の精度

成された路面画像の誤差も大きくなったことが確認できる。

路面画像の生成精度は原点から離れるに従って低下するが、50 m で 1.1 m、100 m で 1.6 m の精度で生成できた。GPS Doppler に基づく軌跡の蓄積誤差は 100 m で 1 m であるが、路面画像はカメラ画像を路面に投影して生成するため、カメラの姿勢誤差などの影響によって軌跡精度よりも低下していると考えられる。

上記の評価結果から、100 m 単位の路面画像を用いて複数走行間の相対位置推定に利用する場合、路面画像内の点には最大 ± 1.6 m の誤差が含まれていると考えられる。以下の検証では、基準走行の位置に対する走行 j の相対位置 $(\Delta x_j, \Delta y_j, \Delta z_j)$ には、最大 ± 1.6 m の相対位置誤差がランダムに含まれる可能性があると考え、絶対位置推定精度の評価では、相対位置推定で生じ得る誤差を考慮して最終的な位置推定精度を評価する。

6.5.2 走行回数と位置推定精度の関係

図 6.18 と図 6.19 に走行回数と測位率の関係を示し、図 6.20～図 6.23 に走行回数と位置推定誤差の関係を示す。表 6.2 に評価結果の数値データをまとめる。

図 6.18 の郊外のコースにおける走行回数と測位率の関係の評価では、各走行の大半が測位可能な地点であったため、走行回数の増加による測位率改善の効果はほとんど見られない。一方、図 6.19 に示す都心のコースにおける走行回数と測位率の関係については、全走行データで測位できない地点があったため、従来手法を用いた場合には 10 回分

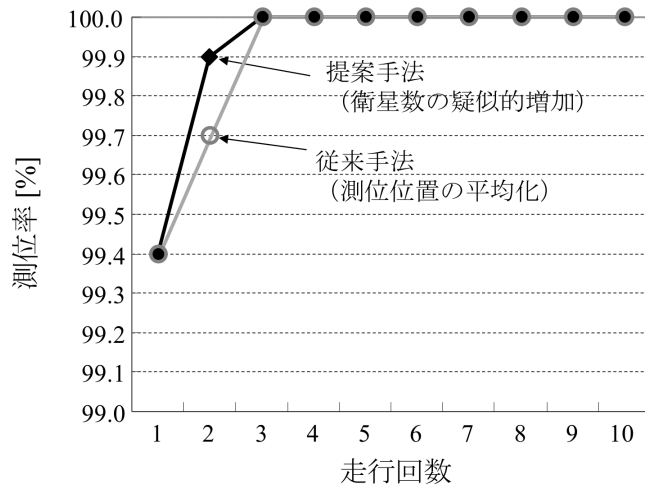


図 6.18 郊外のコースにおける走行回数と測位率の関係

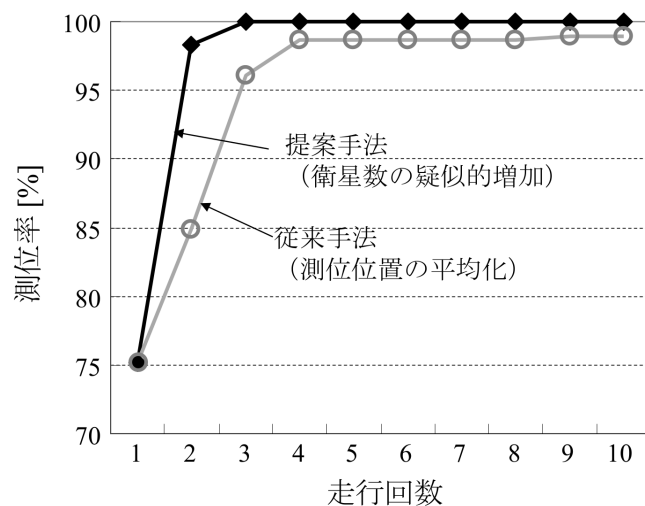


図 6.19 都心のコースにおける走行回数と測位率の関係

のデータを用いても位置推定できない場所があった。提案手法の場合、都心部においても 3 回の走行で 100% の測位率に改善し、繰り返し回数が少ない状態でも全域の位置推定が可能になる見通しがあることが分かった。位置推定結果に基づいて、推定位置の平面内誤差を参照位置と比較して算出し、ばらつき誤差に相当する標準偏差 (2σ) とオフセット誤差に相当する誤差平均 μ を評価する。郊外のコースにおけるの結果を図 6.20 と図 6.21 に示す。都心部のコースにおける結果も同様に図 6.22 と図 6.23 に示す。測位率の評価と同様に、従来手法を用いた評価結果もあわせて示す。

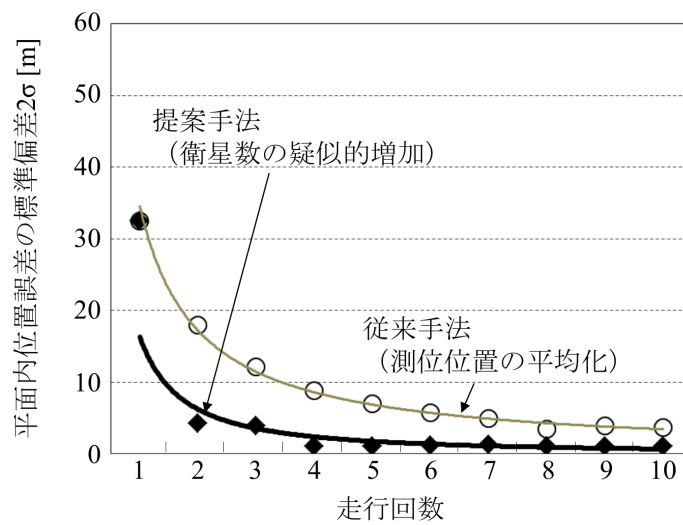


図 6.20 郊外のコースにおける走行回数と位置推定誤差標準偏差の関係

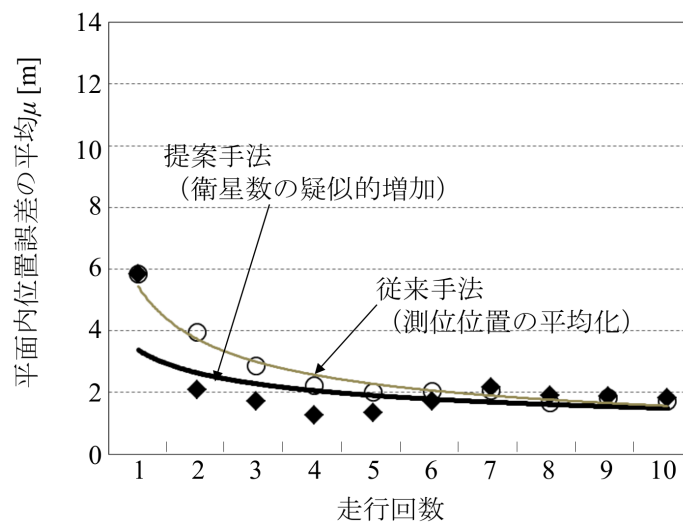


図 6.21 郊外のコースにおける走行回数と位置推定誤差平均の関係

郊外，都心いずれのコースにおいても，提案手法の方が従来手法に比較して特に位置推定誤差の 2σ の低減が早い段階で進み，2 回分の走行分の GPS Raw データを用いただけでも急激に誤差が低減することがわかる．郊外のコースについては 5～10 回分の GPS Raw データを用いることで位置誤差の 2σ は約 1 m となる．オフセット誤差に相当する誤差平均 μ も，1 回のデータでは 6 m あったが，5～10 回分の GPS Raw データを用いることで 2 m 未満となった．提案手法により，郊外のコースでは 10 回分の GPS Raw デー

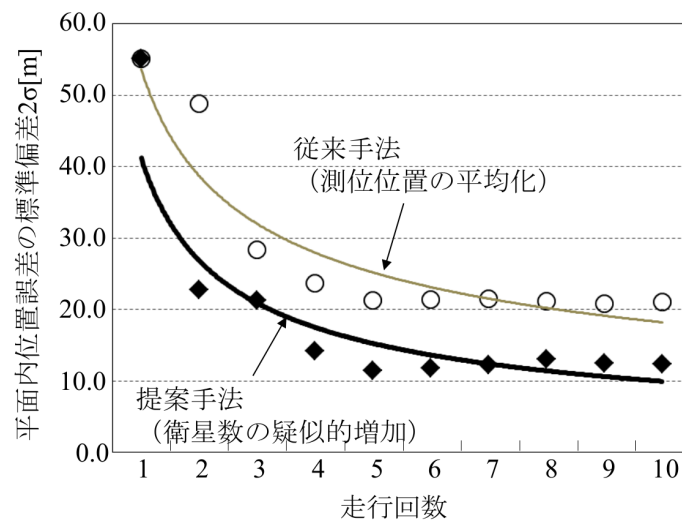


図 6.22 都心のコースにおける走行回数と位置推定誤差標準偏差の関係

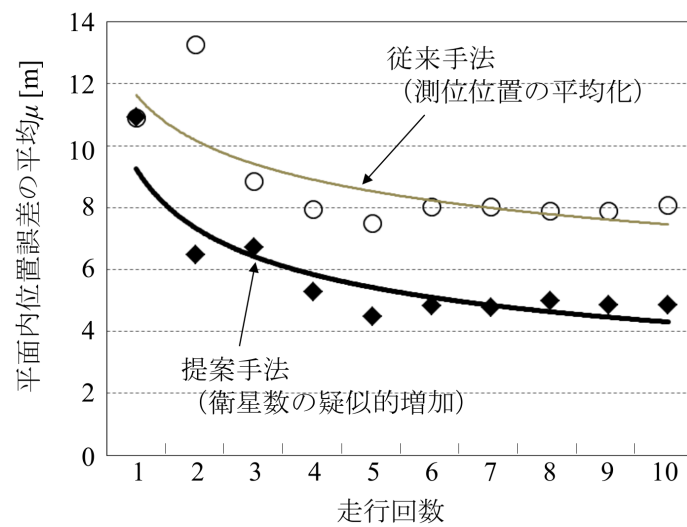


図 6.23 都心のコースにおける走行回数と位置推定誤差平均の関係

タを用いることで、疑似距離のバイアス誤差の影響で 5m のオフセット誤差が生じるような場合においても、位置推定精度を 1m ~ 5m に向上できる見込みがあることを確認した。一方、都心のコースでは従来手法に比較すると誤差の低減の効果は大きいものの、10 回分の GPS Raw データを用いたとしても、位置推定誤差の 2σ は 10m、誤差平均 μ は 5m にとどまり、提案手法だけで都心部の「(III) オフセット誤差」を 1m 未満に低減することは困難であることを確認した。

表 6.2 走行回数と位置推定誤差の関係

			走行回数									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
郊外のコース	従来手法	測位率 [%]	99.4	99.7	100	100	100	100	100	100	100	100
		推定誤差平均 μ [m]	5.9	4.0	2.9	2.2	2.0	2.1	2.1	1.7	1.7	1.7
		推定誤差標準偏差 2σ [m]	32.5	17.9	12.1	8.9	7.0	5.8	5.0	3.5	3.9	3.6
	提案手法	測位率 [%]	99.4	99.9	100	100	100	100	100	100	100	100
		推定誤差平均 μ [m]	5.9	2.1	1.7	1.3	1.3	1.7	2.2	1.9	1.9	1.8
		推定誤差標準偏差 2σ [m]	32.5	4.2	3.9	1.0	1.0	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1
都心のコース	従来手法	測位率 [%]	75.2	84.9	96.0	98.6	98.6	98.6	98.6	98.6	98.9	98.9
		推定誤差平均 μ [m]	10.9	13.3	8.8	8.0	7.5	8.0	8.0	7.9	7.9	8.1
		推定誤差標準偏差 2σ [m]	55.1	48.8	28.4	23.7	21.3	21.4	21.4	21.1	20.8	21.1
	提案手法	測位率 [%]	75.2	98.3	100	100	100	100	100	100	100	100
		推定誤差平均 μ [m]	10.9	6.5	6.7	5.3	4.5	4.8	4.8	5.0	4.9	4.9
		推定誤差標準偏差 2σ [m]	55.1	22.8	21.2	14.2	11.4	11.8	12.3	13.1	12.4	12.4
相対位置推定		推定誤差平均 μ [m]		0.82	0.55	0.47	0.34	0.31	0.30	0.28	0.26	0.25
誤差の影響分		推定誤差標準偏差 2σ [m]		0.62	0.43	0.35	0.33	0.28	0.25	0.24	0.22	0.21

6.6 本章のまとめ

本章では，GPS 受信機の出力する測位結果ではなく，GPS 受信機が計測した信号である GPS Raw データを活用し，衛星数を疑似的に増加させることで位置推定精度を向上させる手法を提案した．特に，複数走行分のデータを用いて時間方向に衛星数を疑似的に増加させる，「複数走行分 GPS Raw データ活用型高精度位置推定」を提案し，「(III) オフセット誤差」の低減を狙った．異なる時刻に同一地点付近を走行し，各走行時に受信した GPS Raw データを用いることで長時間の静止測量と同等の効果が得られることを期待した．各走行における GPS Raw データを受信した地点の相対位置関係が得られれば，時刻が異なる場合の GPS Raw データも位置推定に利用できる．郊外のコースでは 10 回の走行によって，ばらつきもオフセットも低減し，従来手法に比較して位置推定精度向上の効果が大きいことを確認するとともに，位置推定誤差標準偏差の 2σ が 1m となり，オフ

セット誤差も 2 m 未満になる可能性があることを確認した。一方，都心のコースでは繰り返し走行によって疑似的に衛星数を増加させた場合でも，十分な位置推定精度が得られなかった。郊外のコースと同様，走行回数が増加するとばらつきもオフセットも低減し，従来手法に比較すると改善効果は大きい。10 回まで増加させた場合でも，位置推定誤差標準偏差 2σ は 12 m，オフセット誤差も 5 m にとどまった。衛星数が郊外路に比較して少ないことと，同一の区間の GPS Raw データを用いるため，時間軸方向だけの GPS Raw データの利用では，周辺環境によっては一定方向からの信号しか得られなかったり，マルチパスの影響が残ったものと考えられる。

2 つ目のアプローチとして第 5 章と第 6 章で提案した手法は，ともに衛星数を疑似的増加させることで位置推定精度の向上が可能であることを確認した。走行軌跡上の GPS Raw データを活用する手法は周辺監視用センサも不要であるため，安価に 5 m の位置精度を実現できる。複数回走行分の GPS Raw データを活用する手法は，保存した周辺環境の情報を走行間で照合する必要があることから地図の生成などに適用可能である。本アプローチにおける複数走行分の GPS Raw データを用いた高精度自車位置推定では，同一走行時の前後方向の拘束条件は用いていない。そのため，マルチパスの影響が残った状態で複数走行分のデータを用いて推定が行われた可能性がある。第 6 章で提案した手法だけで 1 m の精度を実現することは困難であるが，第 5 章の走行軌跡上の GPS Raw データを活用する手法と統合することで，推定精度の向上が期待できる。

第 7 章

結論

本章では本研究全体を総括し，自動車運転支援のための高精度自車位置推定に関する今後の展望について述べる．

7.1 本研究のまとめ

本論文では将来の運転支援システムに重要な機能の 1 つであると考えられる高精度自車位置推定を目的とし，特に，一般の市販車両に広く搭載可能な安価なセンサを用いて高精度化を実現することを課題として取り組んだ一連の研究をまとめた．

第 1 章では，交通事故低減のためには自車が将来進行する先の情報をあらかじめ取得し，警報や制御を行うシステムが必要であることを示し，「先読み運転支援システム」が重要であることを述べた．運転支援システムと位置推定精度の関係について示し，「先読み運転支援システム」に必要な位置推定精度として，1 m ~ 5 m を目標として定めた．また，交通事故低減にはシステムの普及が重要であることから，安価なセンサで実現することを条件とした．安価なセンサとして，カーナビで利用されるような汎用 GPS 受信機と，車載の車速センサとヨーレイトセンサ，運転支援用に普及が進むと考えられる周辺監視用センサの利用までを限度とすることを示した．

第 2 章では屋外の走行環境で利用される位置推定技術の現状を示し，課題を明らかにするとともに，本研究における 2 つのアプローチを示した．また，GPS を利用した測位の概略についても説明した．GPS の単独測位は，郊外の GPS 受信環境が良好な状態でも 10 m 程度の位置推定誤差が生じ，都心部などの受信環境が劣化する状態では測位できない地点や 30 m 以上の誤差が頻繁に発生する．GPS と INS を組み合わせて都心部など

でも位置推定を可能にする手法は多くあるが、目標精度の達成は容易ではないことを記した。GPS を用いた位置推定誤差には主に「(I)ばらつき誤差」、「(II)外れ値誤差」、「(III)オフセット誤差」の 3 つの種類がある。これらの誤差に対し、本論文では 2 つのアプローチで誤差の低減を図ることを示した。1 つ目は、GPS 受信機内で演算された測位結果に対し、レーザレーダなどの周辺監視用センサを用いて高精度化を狙う手法である。2 つ目は GPS 受信機内で演算された測位結果ではなく、演算に用いられる計測値である GPS Raw データを活用した、衛星数を疑似的に増やすことで高精度化を狙う手法である。2 つ目のアプローチでは、1 エポックだけの GPS Raw データを用いた位置推定ではなく、複数エポック分の GPS Raw データを利用して衛星数を疑似的に増やしている。それぞれに対して具体的には 2 つ手法を提案した。本論文で示した、高精度化手法について以下に整理する。

(アプローチ 1): 周辺監視用センサを活用した高精度化

(手法 1-1) SLAM 型高精度自車位置推定

(手法 1-2) 運動推定型高精度自車位置推定

(アプローチ 2): 衛星数の疑似的増加による高精度化

(手法 2-1) 走行軌跡上の GPS Raw データを活用した高精度自車位置推定

(手法 2-2) 複数走行分の GPS Raw データを活用した高精度自車位置推定

第 3 章と第 4 章では、(アプローチ 1) の周辺監視用センサを活用した高精度化について示し、GPS 受信機内で演算された測位結果と周辺監視用センサの情報を統合して位置推定精度の向上を目指した。(アプローチ 1) の手法は主に GPS を用いた位置推定誤差の「(I)ばらつき誤差」の低減を狙ったものである。周辺監視用センサで計測した周囲との相対位置関係を用いることで GPS を用いた測位結果に比較して位置推定精度を向上させる手法であり、本アプローチでは、周辺監視用センサとしてレーザレーダを用いた。

第 3 章では、(手法 1-1) の SLAM 型高精度自車位置推定について提案した。GPS 受信機から出力される測位結果と、周辺監視用センサで計測した周辺静止物の相対位置を用い、自車位置と同時に周辺静止物の絶対位置も推定することで拘束条件を強くし、自車位置推定精度を向上させた。GPS 受信機から出力される測位結果の位置推定精度は 10 m

程度であることに対し、周辺監視用センサの距離計測精度は $2\text{ cm} \sim 3\text{ cm}$ であるため、推定する周辺静止物の絶対位置は変化しないことを利用すると、自車の位置推定精度が向上する。提案手法の有効性検証のため、郊外環境で取得した実データを用い、 5.60 m の誤差を 1.66 m に低減できることを確認した。また、周辺静止物の出現間隔と GPS 測位精度が最終的な位置推定精度に影響を与えることから、周辺静止物の出現感覚と GPS 測位精度と提案手法の位置推定精度との関係についてシミュレーションで確認し、誤差の 2 RMS を 1 m 以下にするための要件について示した。更に、実環境における周辺静止物の出現間隔について調査し上記の条件は実環境で一般的な環境であることを示した。(手法 1-1) の課題として、周辺静止物の時系列間の照合が必要になるため、欠落などに弱く、周辺静止物の絶対位置も推定するため、静止物が増加すると計算コストが増大することを述べた。

第 4 章では SLAM 型高精度自車位置推定の課題を解決する(手法 1-2)の運動推定型高精度自車位置推定について提案した。周辺監視用センサで得られる静止物との相対位置関係の時系列変化に基づいて、自車の移動量を推定し、GPS 受信機から得られる測位結果と推定した移動量から自車の絶対位置を推定する。周辺監視用センサから得られる計測結果全体を用いて時系列間の照合を行うため、情報の一部に欠落があったとしてもロバストに移動量を推定できる。また、推定した移動量を用い、周辺静止物の絶対位置の推定を行わないため、SLAM 型に比較して計算コストを低減できる。提案手法の有効性検証のため、第 3 章と同じデータを用いて実験を行い、 5.60 m の誤差が 1.98 m に低減することを確認した。SLAM 型に比較して拘束条件が弱くなることから推定精度が若干低下するが、GPS 単独の測位結果に比較して位置推定精度が向上することを確認した。(手法 1-2) は、GPS と INS のルーズカップリングにおける INS を用いた推測航法の代わりに、周辺監視用センサを用いて推定した自車の移動量を利用することに等しい。周辺との相対位置関係を直接計測した結果から移動量を推定するため、INS の推測航法の誤差の要因であるスリップや熱によるバイアス変動がなく、位置推定精度を向上できる利点があることを示した。

(アプローチ 1) は GPS を用いた位置推定における、「(I) ばらつき誤差」に相当する誤差を低減する効果があり、マルチパスの影響による「(II) 外れ値誤差」や「(III) オフセット誤差」が無い郊外の GPS 受信環境が良好な場合は、汎用 GPS 受信機とレーザレーダを用いることで位置推定誤差の 2 RMS を 1 m に低減できることを確認した。一方、GPS 受信機の測位誤差の 2 RMS が 15 m を超えるような環境では、(アプローチ 1) では十分

な精度向上を実現することは難しいこともシミュレーションで確認した。測位結果をそのまま用いるため、可視衛星数の減少やマルチパス信号が増加する都心部などの環境では、GPS 受信機が出力する測位結果に 30 m 以上の大きな誤差が含まれることが多い。都心部で位置推定精度を向上させるためには、GPS 受信機の測位結果そのものを向上させるような手法が必要であることに言及した。

第 5 章と第 6 章では、(アプローチ 2) の GPS Raw データを活用して衛星数を疑似的に増加させることによる高精度化について示し、ここでは GPS 受信機で演算された測位結果ではなく、GPS 受信機で計測された疑似距離や Doppler シフト周波数などからなる GPS Raw データの段階で INS と統合することで高精度化を目指した。GPS を利用した測位において可視衛星数が増加すると位置推定精度が向上する傾向がある点に着目し、複数のエポックで計測した GPS Raw データを用いることで衛星数を疑似的に増加させる手法を提案した。都心部などのマルチパスが発生しやすい環境や、オフセットが生じる場合においても位置推定が向上することを確認した。

第 5 章では(手法 2-1)の走行軌跡上の GPS Raw データを活用した高精度自転車位置推定について提案した。自転車位置を推定したい現在位置から過去一定範囲の走行軌跡上で受信した複数エポック分の GPS Raw データを用いて疑似的に衛星数を増加させて位置推定精度を向上させた。(手法 2-1)の高精度化は、軌跡を高精度に推定する「高精度軌跡推定」と軌跡上の GPS Raw データ全体を使って位置推定を行う「バンドルアジャスト型位置推定」によって実現した。特に「高精度軌跡推定」では、GPS 衛星との相対速度である GPS Doppler を用いることで、軌跡推定精度を向上させた。GPS Raw データの段階で統合する点では、GPS と INS のタイトカップリングの一種であるが、既存のタイトカップリングは 1 エポックごとに統合することから、マルチパスの影響を受けやすかった。提案手法は、予め高精度な軌跡を推定し、軌跡上の GPS Raw データを用いて疑似的に衛星数を増加させることによって衛星配置の改善とマルチパスの判別を可能にした。(手法 2-1)は都心部などで生じることが多い「(II) 外れ値誤差」の要因であるマルチパス信号の判定に効果があり、都心部において 95% の区間で位置誤差 5 m 以下で推定できることを確認した。

第 6 章では、(手法 2-2)の複数走行分の GPS Raw データを活用した高精度自転車位置推定について提案した。複数回分の GPS Raw データを用いた疑似的な衛星数の増加に加え、異なる時刻のデータを利用することで時間的な変動を持たせることが可能になり、

「(III) オフセット誤差」の低減に効果がある。GPS Raw データとあわせて周辺環境の情報を取得しておき、GPS Raw データを取得した地点間の相対位置関係を周辺環境情報を照合して推定することで、異なる走行データを用いる場合でも衛星数を疑似的に増加させることを可能にした。提案手法は、各走行間の相対位置関係を推定する「走行間相対位置推定」と複数時刻の GPS Raw データ全体を使って位置推定を行う「インテグラル型位置推定」によって実現した。走行間の相対位置関係を取得する必要があるため、周辺環境の位置関係を正しく記述する必要がある。GPS Doppler に基づいて推定した軌跡に沿って路面情報を保存することで、周辺環境の情報を記述し、走行間の相対位置関係を推定することを可能にした。

提案手法は郊外、都心部の周囲環境によらず、「(III) オフセット誤差」を従来手法に比較して低減できることを確認した。一方、受信衛星の方向に偏りがある場合などは、一定方向の誤差が残存する可能性があることも確認した。

7.2 今後の課題と展望

本研究では、将来の「先読み運転支援システム」で必要とされる 1 m ~ 5 m の位置推定精度を安価なセンサを用いて実現することを目標として取り組んだ。安価なセンサとして、カーナビで利用されるような汎用 GPS 受信機と、車載センサである車速とヨーレートセンサ、運転支援用に普及が進むと考えられる周辺監視用センサの利用までを想定し、2 つのアプローチで合計 4 つの手法を提案した。「(I) ばらつき誤差」と「(II) 外れ値誤差」、「(III) オフセット誤差」をそれぞれ低減することで、5 m の位置推定実現の可能性を確認した。しかし、任意の場所において位置推定精度 1 m の可能性を確認するには至らなかった。(手法 2-1)において、大きな位置誤差を生じる要因となるマルチパス信号を判定し、位置推定に用いないようにすることで、位置推定精度を向上させたが、オフセット誤差は残った。更に、(手法 2-2)において、異なる時刻の GPS Raw データを用いることで伝搬遅延誤差の影響を緩和し、オフセット誤差の低減を図ったが、特に都心部では十分な低減効果が得られなかった。都心部では建物の配置によっては、受信できる衛星の方向に偏りが生じ、受信できない方向に誤差が生じやすいためと考えられる。

都心部において「(III) オフセット誤差」の低減効果を得るためには、(手法 2-1)と(手

法 2-2) を組み合わせ、予め (手法 2-1) を用いてマルチパス信号を除去し、(手法 2-2) を用いてオフセット誤差を低減させることが望ましいと考えられる。また、衛星数を疑似的に増加させる (アプローチ 2) に周辺監視用センサを用いる (アプローチ 1) を適用し、自車の相対位置変化に更に拘束を加えることも考えられる。(アプローチ 1) が「(I) ばらつき誤差」を低減し、(手法 2-1) で「(II) 外れ値誤差」を低減し、更に (手法 2-2) を組み合わせることで「(III) オフセット誤差」を低減できるようになり、より高精度に自車位置を推定可能になることが期待される。

本研究では、使用する衛星を GPS に限定し、補正信号の利用を想定しなかった。また、使用するセンサも現行の車両制御用に搭載されている車速センサやヨーレートセンサ、運転支援用に普及が見込まれる周辺監視用センサに限定した。都心部で 1 m の位置推定精度を実現するには、本研究で想定しなかったセンサや信号を用いて精度向上を図る必要があると考えられる。以下に今後の位置推定精度向上の可能性について述べる。

第 2 章で述べた通り、近年、GPS だけでなく、ロシアの GLONASS も運用され、他にも欧州の Galileo、中国の Beidou など地域ごとの測位衛星システムが計画され、予定されているものを含めると 2020 年には 120 機以上の衛星が利用可能となることが想定される。測位に利用できる衛星が増加すると、1 エポックでも 30 機程度の衛星を受信できる可能性があり、大幅な精度向上が期待できる。更に本研究を適用することで、より精度が向上する見込みがある。また、補正信号を積極的に利用する必要がある。疑似距離の遅延誤差が補正され、オフセット誤差の低減が可能になる。日本では現在 (2015 年 4 月) も赤道上の多目的衛星 (MTSAT) から送信されている補正信号を利用できるが、南側に建物がある場合は信号を受信できないことも多い。QZSS が 4 機以上日本上空に打ち上げられ、少なくとも 1 機以上の衛星からの信号が、常時利用可能になれば補正信号 (L1-SAIF) を都心部でも常時受信できるようになる。また、将来的には RTK-GPS を都心部の移動体で実現できるような技術開発が必要である。QZSS の補強信号 (LEX 信号) を用いると、QZSS からの信号受信で RTK-GPS と同じ機能を実現できることが期待されている。

また別のアプローチとして、INS の性能を向上させ、長時間の軌跡推定を高精度に実現する方法もある。航空機用の高額なジャイロを安価に実現できれば、現在は数 1,000 万円する POSLV のような高精度位置計測システムが車載可能になり、GPS の受信環境が劣化する場合も位置推定精度を保つことができる可能性がある。

本研究では平面内に限った高精度化を行っており、いずれの手法においても高さ方向の

推定を実施していない。GPS などの測位衛星を用いた位置推定の特性として、高さ方向の位置推定精度は平面内の精度に比較して低下することから、単純に推定パラメータを増加させるだけでは平面内と同じ精度を確保することは困難である。また、車両の姿勢についても本研究では考慮していない。車両のロールやピッチなどによって、周辺監視用センサで得られる情報も、INS で得られる情報も影響を受ける。特に 3 次元化の場合は車両の姿勢の考慮が必要になる。平面内の位置だけではなく、高さ情報も車両走行におけるエネルギー効率化などを考えると重要な要素である。

本研究では自車位置の絶対位置推定精度の向上について論じてきたが、自車の絶対位置の精度だけが向上しても先読み運転支援システムの実現には不十分である。先読み運転支援システムに重要な情報は自車とその制御対象となるものとの相対位置関係である。LKA (Lane Keeping Assist) や PCS (Pre Crash Safety System) などはミリ波レーダやレーザレーダ、カメラなどの周辺監視用センサを用いて直接制御対象との相対位置関係を取得している。交差点のような特定の地点で制御を行う場合においても、必要なものは特定の地点との相対位置関係である。このことから、相対位置関係を正確に記述できる空間情報 (高精度地図) が重要であり、その空間情報と現在の周辺の情報とを照合することで周辺の環境を理解する形が望ましいと考えられる。本論文で提案した高精度自車位置推定は、1 m ~ 5 m の位置推定精度を実現できており、上記の情報を取得する際に誤った位置の情報を照合しないようにするためには、概ね良好な性能であると考えられる。

高精度な空間情報は運転支援に重要な情報であるが、広く空間情報を生成することは容易ではない。本論文ではその解決策として、車載センサを用いた高精度な空間情報生成の可能性について、付録において示す。技術的には高精度な空間情報の生成は可能であるが、その生成に必要な情報の収集やデータ管理、更新の自動化や、車両が利用できるようにするためには、社会全体の仕組みとともに考えていく必要がある。

付録 A：高精度自車位置推定の地図作成への応用

交通事故を低減するためには、先読み運転支援システムの普及が重要である。先読み運転支援システムの実現には、特定の位置で支援を行うために 1 m ~ 5 m の位置推定精度が必要であり、本論文ではその位置推定精度を安価な構成で実現することを目的として取り組んだ研究をまとめた。しかし、先読み運転支援システムの実現には、位置推定だけではなく周辺の情報も重要である。具体的には周辺の環境が位置に基づいて記述された地図や、通信などで得られる周辺移動物の位置など、制御対象との位置関係を取得できる情報が必要である。特に周辺にある規制情報や道路形状などの情報を保持した空間情報の整備が不可欠である。本付録では、現状のナビ用地図だけでなく、このような情報を運転支援用に加工/整備し、「走行環境の空間情報」を「位置情報に紐づけたもの」を「地図」と呼ぶ。

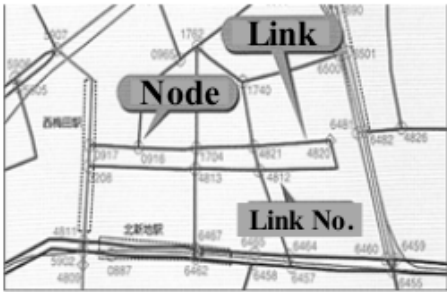

運転支援に地図を利用しようとする場合、その位置精度や保存された情報の信頼度、鮮度が重要である。現時点において、高精度な地図の作成と維持には多大なコストが必要であり広域での整備は進んでいない。より高機能な運転支援の実現には、高精度かつ高鮮度な運転支援用地図を、安価に整備することが重要である。

本付録では、将来の運転支援システムに利用可能な高精度地図を安価に作成するための方法を検討した結果について述べる。

A.1 はじめに

地図を用いた代表的な運転支援システムとしてカーナビがある。カーナビは広く普及し、現在はスマートフォンなどでの利用も広がっている。カーナビは経路案内が主要機

表 A.1 カーナビ地図と高精度地図

	カーナビ（経路案内用）	運転支援用
特徴		
地図整備範囲	日本全国	日本全国の 0.7%
情報	ノード，リンク	規制情報 (レーン，停止線，路面標示)
精度	不明（～30m）	1 m ～ 2 m
更新	1 回/5 年	1 回/1 年
作成方法	人手	人手
課題	情報と精度不十分	作成コスト大

能であるため，走行する道路を判定できる程度の位置推定精度があればよい．一方，一時停止支援やカーブ前の速度制御支援など，前方の走行環境を予め取得して運転を支援するシステムの実現も望まれている．このような次世代の運転支援にはシステムに必要な情報をあらかじめ高精度に取得する必要がある，高精度地図の利用が不可欠である．例えば，停止線前で車両を確実に停止させるには，仮に自車の絶対位置が正しく取得できたとしても地図にも 1 m 程度の精度が必要 であると考えられる．カーナビ用の地図と運転支援用の高精度地図の特徴について表 A.1 にまとめる．

表 A.1 に示す通り，カーナビ用の地図は日本全国の道路で広く整備され，都心部などでは車線数やその進路規制情報（矢印情報）なども網羅されている．最近では AR ナビ [94] のように車載カメラ画像上にカーナビで得られる情報を重畳するようなものもある．製造者ごとに独自のデータが整備されることはあるものの，カーナビは経路案内を目的として

いるため、主にノードとリンクの情報で構成され、停止線、交差点の構造などの情報は含まれていない。また、その精度に規定はなく数 m ~ 数 10 m の誤差を含むことも多い。そのため、警報や制御などの次世代の運転支援に適用するためには、カーナビ用の地図では情報の種類も精度も不十分である。また、その更新も年に 1 回程度の頻度であり、道路状況が即座に反映されるものではない。

一方、一部の道路では車線数や一時停止線などの情報が正確に登録された高精度地図も整備されている [95]。高精度地図は次世代の運転支援システムに欠かせない情報であり、このような高精度地図を作成するには、高精度な路面画像から車線や停止線、路面標示などの情報を抽出することが必要である。高精度な路面画像は航空写真測量や専用の計測車両 [96] によって作成される。これらの路面画像作成には専用の機器を必要とするためコストがかかる。また、高精度な路面画像が作成されたとしても、路面画像から車線や停止線、路面標示などの運転支援に必要な情報をロバストに自動抽出することは容易ではなく、現状では人手による作業が欠かせない。そのため、作成コストと情報の抽出コストが高く、高精度地図は広く整備される状態に至っていない。

そこで、高精度地図を広範囲で整備することをめざし、本付録では、本論文で提案した高精度な自車位置推定の結果と車載センサで取得する情報とをあわせ、高精度な地図を安価に作成する可能性を検討する。高精度地図作成には高精度な路面画像作成と、そこからの情報抽出が必要である。特に本付録では高精度な路面画像作成を安価に実現する方法について検討する。現状での高精度地図作成の課題と、検討する高精度地図作成のアプローチについて述べ、実データを用いた路面画像作成例を示す。作成結果に基づいて、高精度自車位置推定の高精度地図作成への応用可能性について考察する。

A.2 高精度地図作成の課題と解決策の一検討

警報や制御などを行う運転支援システムにおいて、制御対象となる情報と自車の相対位置関係は、警報のレベルならば 5 m 程度、制御には 0.3 m ~ 1 m の精度が必要である。欧州を中心に進められている ADAS MAP [97] は 1 m ~ 5 m の精度で道路形状を記述し、一定の警報レベルの運転支援には適用可能なものになっている。将来的には 1 m 以下の精度で、レーンごとの形状や路面情報を保持することが提案されているが、2015 年 1 月現在、その実現には至っていない。一方、日本国内において、国直轄の道路においては 1/500 の

道路図面のデジタル地図がそろいつつある [98]。精度としては 1 m 以下で記述されているものの、道路工事図面として作成されたものであるため、運転支援用の地図として整えられてはならず、現状ではそのまま利用することはできない。

運転支援用の情報として有用なものは、例えば路面上に描かれた一時停止線や横断歩道、予告表示や制限速度、車線や進路規制などである。また、縁石、ガードレール、標識、信号、建物などの車両の走行に関係する立体物情報も重要である。これらの情報は、それぞれ高精度な位置関係で記述されていることが望ましい。本付録では、高精度地図作成の現状から課題を示し、安価な高精度地図作成手法について示す。

A.2.1 高精度地図作成の現状と課題

一部で運転支援用に整備されている高精度地図では、航空写真測量や計測車両によって高精度な路面画像を作成し、作成された路面画像から車線数や一時停止線、路面マークなどの情報を手作業で抽出してデータ化をおこなっている。

航空写真測量は、上空から道路面を解像度の高いカメラで撮影し、画像間でステレオマッチングを行うことで 3D 化している。真上から見下ろした画像に変換されたものをオルソ画像といい、道路面の情報はこのオルソ画像から抽出している。航空写真測量は広範囲のデータを一度に収集できるが、トンネルや高架下などの上空に遮蔽物がある道路の情報は取得できない。また、道路上にある走行する車両などによる遮蔽もあるため、航空写真測量だけで路面画像全部を取得することは困難である。航空写真で取得できない区間の情報を取得する方法として有効なものが、測量用の計測車両である。計測車両で得られる高精度な絶対位置に基づいて、レーザレーダなどの周辺の情報を収集して作成されている。

絶対位置は、前述した Applanix 社製の POSLV [87] など高額な測量用の高精度位置計測システムを用いて取得したものであり、30 cm 程度の精度が実現できていると考えられる。この絶対位置に基づいて、車載したレーザレーダで周辺との距離を計測し、その地点の色情報をカメラで取得することで、高精度な 3 次元点群が得られる。路面画像はこれらの情報を真上から見下ろした画像に変換して作成される。センサの計測誤差やキャリブレーション誤差などを考慮しても、絶対位置として 50 cm 程度、相対位置関係としては数 cm 精度で計測できると考えられる。自車が走行した地点の情報を得られることから、高架下やトンネル内の情報も取得でき、路面画像については遮蔽物がほとんどない状態の情

報が得られる．一方，高精度な位置計測システムや高精度なレーザやハイビジョンカメラなどを搭載することからセンサの構成が過大になりやすく，作成コストも高くなる．現状の高精度地図は，これらの航空写真や計測車両で計測した路面画像から，路面マークなどの規制情報を人手で抽出している．

別の地図作成の動きとして，OSM (Open Street Map) [99] がある．これは，図面として提供されている地図情報に基づいて有志が情報抽出をすることで，地図を作成する全世界的な取り組みである．OSM のデータ化された地図はオープンであり，自らがデータを登録したり修正したりすることもできる．ただし，提供された地図自体の精度は不明であり，この地図に基づいて各有志がそれぞれの基準で抽出するため，その精度や信頼性は保証されていない．

近年，DARPA の Grand Challenge [1][2] や Urban Challenge [3] によって，高精度な地図と位置，センサを用いる自動運転技術の進歩が目覚ましい．ここで培われた技術を用い，Google 社が自動運転車を走行させている [4]．Google 社の自動運転車で用いられる地図は，あらかじめ高精度な位置とともに計測したレーザの距離点群データと走行軌跡を持つことが特徴である．この距離データを利用し，走行時の計測結果と照合し，周辺に対する自車位置精度の向上や移動物の検出などを容易にしている．あらかじめ MMS [96] のような計測車両でデータを取得しておく必要があり，現在の高精度地図と同様に，作成コストが高く広範囲に整備することは現状では困難である．

高精度地図を現実のものにする要素として，高精度な路面画像を安価に作成する構造が重要である．本付録では，提案した高精度位置推定手法を適用し，高精度かつ高鮮度な路面画像を安価に作成するための手法を検討する．

A.2.2 高精度地図作成手法の一検討

高精度地図作成に必要な高精度な路面画像を安価に実現する方法を検討する．現在，カメラを用いた運転支援システムの開発が進み，カメラを搭載した車両が増加している．またスマートフォンの利用拡大により，車がクラウドにつながる状況が現実になってきている．車載カメラの搭載数の増加と，車両で取得したデータを集めることが容易になってきたことから，第 6 章までで提案した高精度自車位置推定とカメラ画像とを合わせて，各車両がデータを集めることで地図を作成する，プローブ型の高精度地図作成の可能性を検討する．

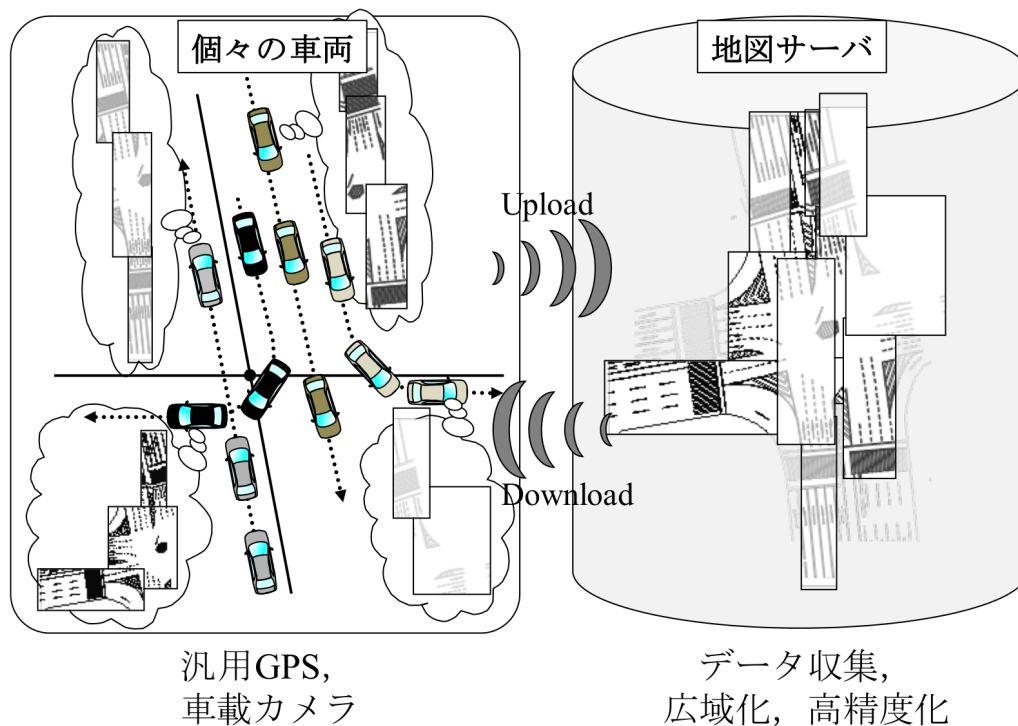


図 A.1 プローブ型高精度地図作成の様子

プローブ型の地図作成の様子を図 A.1 に示す．各車両には汎用の GPS と CAN 上の INS 情報と運転支援システム用のカメラが搭載されている．これらのセンサは安価なもので構成されているため，第 6 章までの手法を適用したとしても，絶対位置推定誤差は 1 m 以上あり，各車両から得られる情報の位置精度は地図作成のためには高くない．車両がプローブの役割を果たし，各車両が取得した周辺環境データをクラウド上などに構築されたサーバ側で集約する．

各車両が走行する区間は限られていたとしても，センサが安価であるため搭載車両の数を増やすことが可能である．現状の高精度地図作成と比較して，通常の車両が走行するすべての道路での作成が可能であり，車両が道路を走行する頻度に応じて更新することも可能である．プローブ型のシステムで高精度地図作成ができれば，作成コスト低減と更新頻度向上が期待できる．最大の技術的な課題は，各車両から得られる情報の位置推定精度が高くない状況で，高精度化を実現することである．

A.3 車載カメラを用いたプローブ型高精度地図作成

A.3.1 高精度自車位置推定手法の地図作成への適用

運転支援に必要な高精度地図として、自車線を判定可能な 1 m の絶対位置精度と、相対的なすり抜けや停止判断が可能な 50 m あたり 30 cm の相対位置精度が必要であると想定し、路面画像を上記精度で作成可能な手法について検討する。

専用の計測車両を用いる場合、高精度な自車の絶対位置に基づいて路面画像を作成するため、絶対位置精度は 50 cm 程度、相対位置精度も数 cm 精度で実現可能である。しかし、本付録で検討するプローブ型の高精度地図作成では、汎用 GPS と車載の CAN 上の INS（車速センサとヨーレートセンサ）情報と周辺監視用センサを想定する。汎用 GPS の測位精度は 10 m 程度であり、各車両から得られる情報の絶対位置精度は高くない。都市部では 30 m ~ 100 m の位置誤差が生じることも少なくない。これらの位置を利用して周辺の情報を登録したとしても、目標性能を満たすことはできない。

そこで、本研究で提案した汎用 GPS を用いた高精度自車位置推手法を適用することを検討する。第 6 章で提案した複数走行回の GPS Raw データ活用したオフライン型の高精度自車位置推定において、郊外路環境では、10 回程度の走行データを蓄積することで、絶対位置精度 1m の達成ができる可能性を確認した。また、複数走行分の GPS Raw データを統合するために、GPS Doppler に基づいて作成した路面画像を利用した。この考え方を地図作成に適用する [93]。

A.3.2 高精度路面画像作成手法の概要

汎用 GPS を用いた場合、良好な受信環境においても絶対位置の推定精度は 10 m 程度であり、その絶対位置に基づいて路面画像を作成しても精度が不足する。そこで、本研究では、推定された絶対位置を直接用いて高精度路面画像を作成するのではなく、路面画像の相対位置精度の確保と絶対位置精度の確保を 2 段階で考える。

（手順 1）路面画像の相対位置精度の確保

第 5 章で提案した GPS Doppler を用いた軌跡推定結果を利用して、相対位置精度を確保する。GPS Doppler に基づく軌跡推定において、GPS 受信環境が良好な場

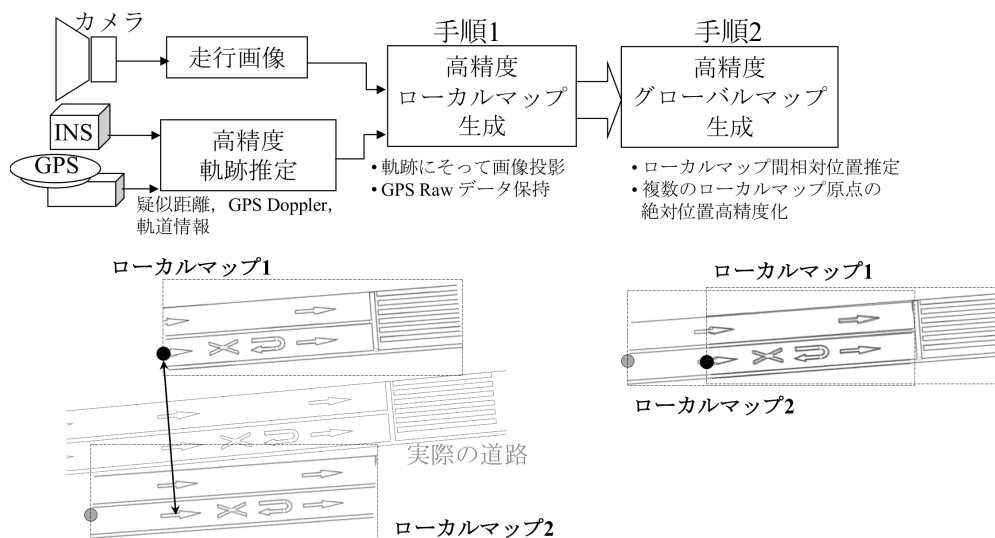


図 A.2 ローカルマップ作成とグローバルマップ作成の手順

合は、1 km 走行後であっても蓄積誤差が 1 m 程度であることを考慮すると、50 m あたりの蓄積誤差を 5 cm 程度にできる可能性がある。軌跡に基づいて画像を投影することで、投影誤差などを考慮しても 50 m あたり 30 cm 程度の精度の実現可能性がある。

ある受信タイミングでの絶対位置を路面画像の原点とし、原点から 100 m 程度の範囲の軌跡を推定し、軌跡に沿って画像を投影して相対位置精度が高い路面画像を作成する。初期の絶対位置としては、あまり精度は高くないが単独測位結果を暫定的に利用し、路面画像原点での GPS Raw データを保存しておく。

（手順 2）路面画像の接続と絶対位置精度の向上

同一のエリアを複数回走行し、手順 1 に従って、相対的に精度の高い路面画像を複数個取得する。路面画像原点の初期の絶対位置精度は高くないが、路面画像内の相対的な位置関係は正しく作成されている。路面画像内にある路面標示などの情報を手がかりにして、それぞれの路面画像を照合して路面画像を接続する。接続を繰り返し広域の路面画像を作成する。

次に路面画像間の照合によって、路面画像原点間の相対位置関係が得られる。推定された相対位置関係を利用し、第 6 章で提案した複数回 GPS Raw データを活用

した位置推定を適用して各路面画像の原点位置を高精度化する．推定された絶対位置に基づいて，路面画像原点位置を更新することで，路面画像の相対位置精度と絶対位置精度を確保する．上記の考え方を図 A.2 に図示する．特に手順 1 で作成する一定区間の路面画像を「ローカルマップ」と呼び，手順 2 によって位置合わせされ，「ローカルマップ」を接続し，絶対位置を更新した広域の路面画像を「グローバルマップ」と呼ぶ．次節でそれぞれの作成例を示す．

A.4 ローカルマップとグローバルマップの作成例

本節では，手順 1 を用いたローカルマップ作成の例と手順 2 を用いたグローバルマップ作成の例を示す．本論文で提案した GPS Doppler を用いた軌跡推定結果に基づいて路面画像を作成する．車載カメラは，駐車支援用に搭載されることも多い後方カメラを利用する．図 A.3 に路面画像作成の様子を示す．

図 A.3 に示す通り，後方カメラは比較的車両直近を監視するように設置されているため，カメラの光軸が前方カメラに比較して下向きになっている．路面との距離が近いいため，カメラ画像の中心付近の大半に路面が撮像され，路面の解像度が高い．また，路面との距離が近いいため，車両姿勢による変動を受けにくいことから，駐車支援用の後方カメラは，路面画像の作成に有効である．ただし，駐車時の周辺監視用に画角が広がっているため周辺は歪みが大きい．歪み補正を行った上で，歪みが少ない範囲を切り出して投影する．

図 A.4 に軌跡に沿って後方カメラ画像を路面投影して作成したローカルマップの例を示す．また，測量用の専用計測車を用いて計測した路面画像を合わせて示す．図 A.4 より，GPS Doppler を用いて推定した軌跡は方位推定精度が高いため，作成された路面画像の方向も正しいことが分かる．作成された路面画像の解像度も，専用計測車を用いた計測結果と同等の解像度が得られていることが分かる．

手順 1 で一定区間において作成された複数のローカルマップを，手順 2 で統合することで，グローバルマップを作成する．手順 2 では，作成されたローカルマップ上にある路面標示などを手掛かりにして複数のローカルマップを結合する．同一交差点を複数回走行した時のローカルマップを単純に重ねた例と，路面標示を用いて位置合わせを行った例を図 A.5 に示す．また，同様にして郊外路の住宅街を走行して作成したグローバルマップの

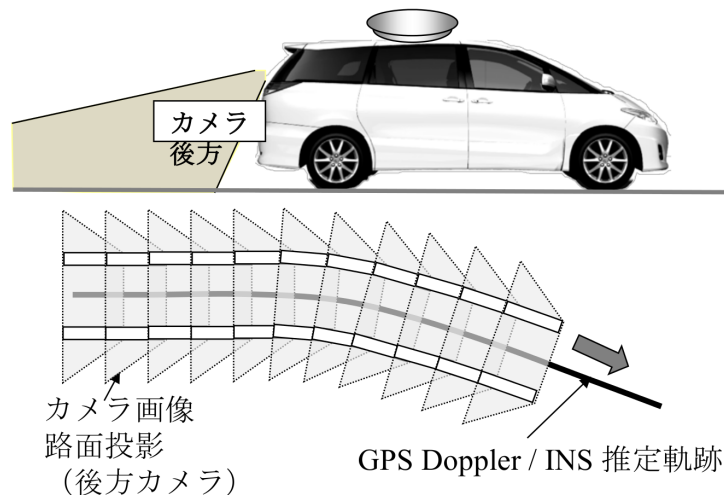


図 A.3 後方カメラと軌跡を用いた路面画像作成

作成例を図 A.6 に示す。ローカルマップ間で位置合わせをすることで、原点間の相対位置関係の算出が可能になる。原点に蓄えた GPS Raw データを第 6 章で提案した複数走行 GPS Raw データ活用型高精度位置推定手法を用い、衛星数を疑似的に増加させて位置推定を行うことで、ローカルマップの原点の絶対位置精度が向上していくと考えられる。

作成された路面画像そのものの精度の検証は、高精度地図が必要であるため容易に検証できないが、相対位置精度は第 5 章で示した GPS Doppler に基づく軌跡推定の精度を期待でき、絶対位置精度は第 6 章で示した 1m 精度を期待できることから、安価な構成で高精度な路面画像作成を実現できる可能性がある。

A.5 まとめ

高度な運転支援システムの実現には、高精度な自車位置推定結果だけではなく、周辺の情報を記述した高精度地図の整備が欠かせない。しかしながら、従来の高精度地図作成は、航空写真測量や専用の計測車両を用いて、高精度に路面画像を作成し、そこから情報を手動で抽出しているため、作成コストも情報抽出コストも極めて高く、運転支援用の地図が普及しない大きな要因になっている。

そこで、本付録では、安価な車載センサを用い、複数の車両が走行、取得したデータを統合して広域化と高精度化を図る「プローブ型高精度地図作成」の可能性を検討した。安価な車載センサを用いることで、搭載台数を増加させ、データ数を増加させて広域化と高

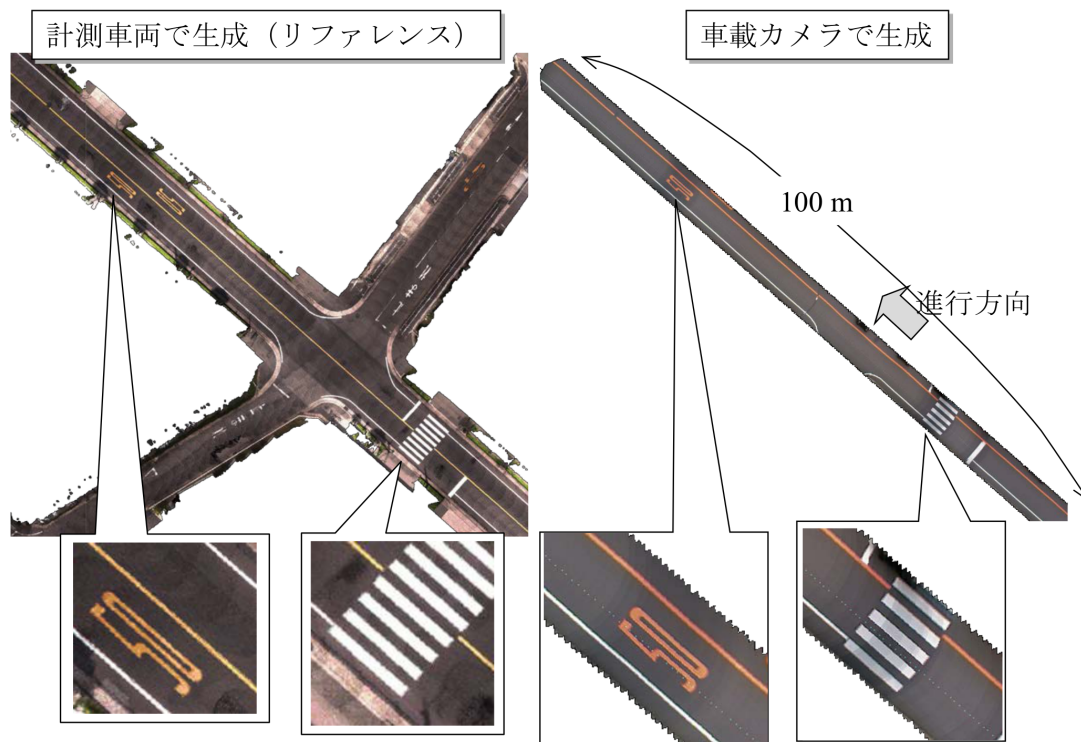


図 A.4 作成された路面画像と専用計測車両の路面画像の比較

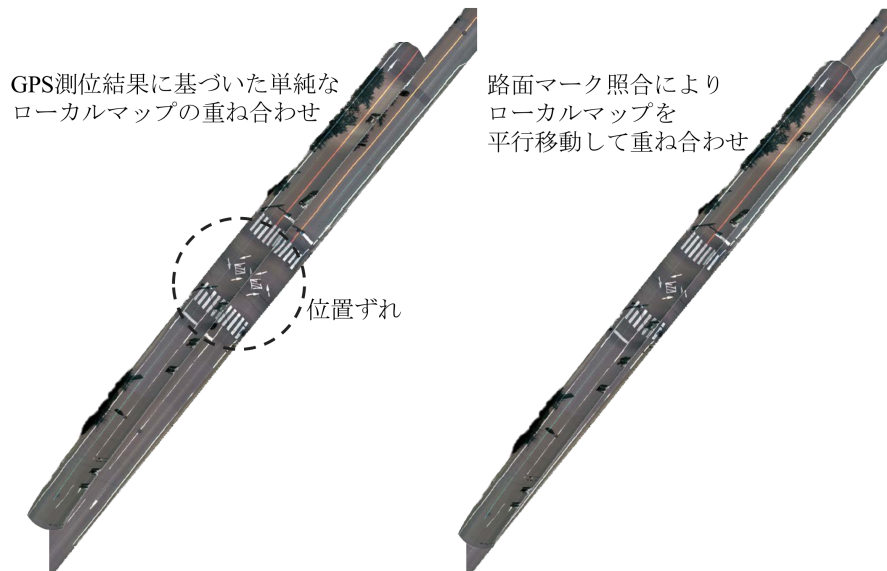


図 A.5 ローカルマップの単純な重ね合わせ例と位置合わせ例

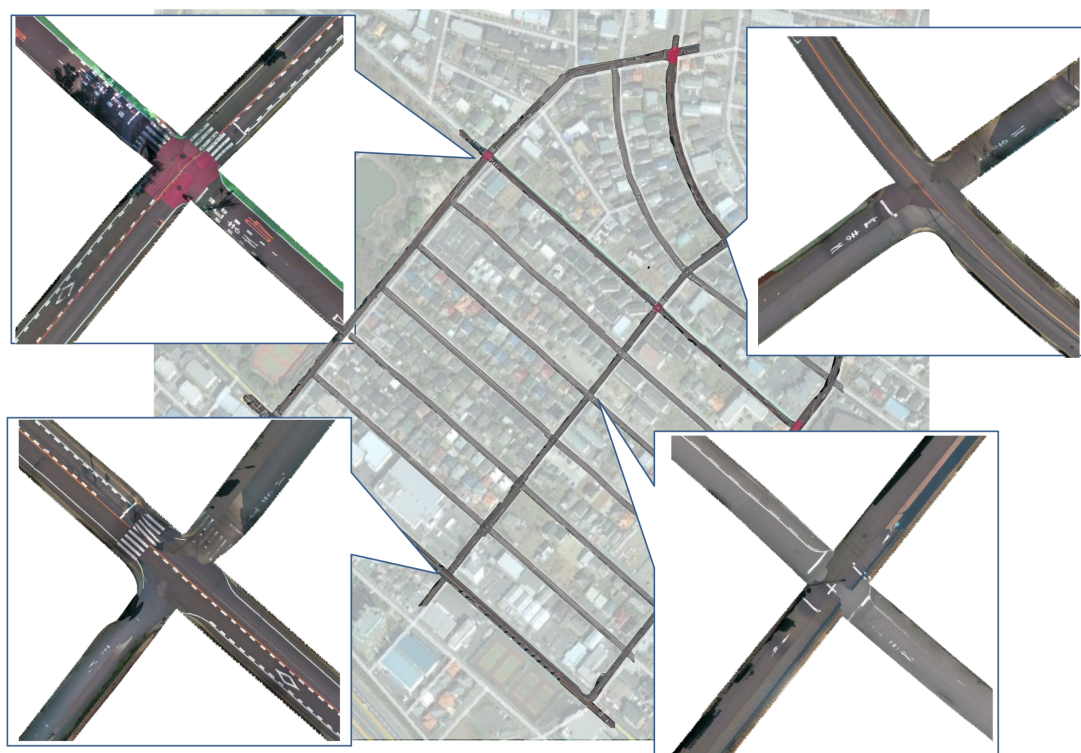


図 A.6 住宅街におけるグローバルマップ作成例

鮮度化を図る．特に，安価なセンサで取得したデータ単独の精度は高くなく，それらを複数集めることで高精度化することに課題がある．そこで，本文中に提案した位置推定手法を路面画像作成に適用し，高精度な路面画像作成を安価に実現する可能性について検討した．

従来手法は高精度な絶対位置に基づいて路面画像を作成していたが，本検討では，相対位置精度の確保と絶対位置精度の確保を 2 段階で実施することで，安価なセンサでの高精度化を実現する手法を提案した．第 1 に GPS Doppler を用いた高精度な軌跡に沿ってカメラ画像を投影することで，高精度な相対位置関係を確保する（ローカルマップ作成）．第 2 に複数のローカルマップを統合し広域化するとともに，ローカルマップ原点に蓄えられた GPS Raw データを複数回分用いて疑似的に衛星数を増加させることで，ローカルマップ原点の位置精度を向上させる（グローバルマップ作成）．

以上により，本検討で作成したローカルマップの解像度は専用の計測車両を用いて作成したものと遜色がない．本文中の第 6 章の検討において，路面画像を GPS Doppler を用

いて推定した軌跡に沿って作成した場合，路面画像は 100 m 先で ± 1.6 m 以下の誤差で作成できる可能性がある．また，GPS Raw データを複数回分統合する 6 章の検討において，絶対位置誤差を 1m にできる可能性がある．相対的な精度が目標とする精度に不足するが，軌跡推定の改善と，複数のローカルマップ間の統合による軌跡修正などによって，更に向上できる可能性がある．検討した高精度地図作成手法は，データを収集し，維持管理を行うためのシステムなどが必要であるが，技術的には現状の地図作成のコストを大きく低減できる可能性があることが確認できた．

謝辞

本博士論文は、筆者が社会人博士として名古屋大学大学院情報科学研究科博士後期課程に在籍した 2009 年 10 月から 2012 年 9 月までに行った研究と、併せて在職する（株）豊田中央研究所で 2005 年から 2012 年までに実施した内容をまとめたものである。本論文の執筆にあたって、多くの先生方、会社の上司、諸先輩方他、研究室諸氏、その他多くの皆様のご指導、ご協力に深く感謝いたします。ご指導頂いた先生方のお力添えがなければ、本博士論文としてまとめることはできませんでした。また、論文として公知にできる研究をする機会と、社会人博士として大学に行く機会やその時間を許容して頂かなければ、そもそも一連の研究を実施できませんでした。ここに、改めてお世話になった皆様への感謝の意を示します。

名古屋大学大学院情報科学研究科 村瀬洋 教授に心より感謝いたします。2005 年に共同研究に参加させて頂いて以来、実走行環境での自車位置推定精度の向上は、私の研究の大きな柱となりました。情報科学に関する広い見識と熱心なご指導に深く感銘し、先生のご指導を仰ぎたいと思ったことが、社会人博士として在籍するきっかけでもありました。在籍中も私個人の研究に熱心に議論、指導頂くだけでなく、共同研究でも本当にお世話になりました。心から感謝の意を示します。ありがとうございました。

また、本研究の副査を務めて頂きご指導賜った、名古屋大学大学院情報科学研究科の村瀬研究室 井手一郎 准教授と出口大輔 准教授、名古屋大学大学院情報科学研究科 武田一哉 教授に深く感謝いたします。随所で本研究についてご議論頂いた他、特に本論文の執筆において、本当に粘り強く細部までご指導頂いたことを心から感謝致します。先生方のお力添えがなければ本論文は形にはなりませんでした。本当にありがとうございました。

加えて、名古屋大学未来創造機構 二宮芳樹 教授に心より感謝いたします。先生が（株）豊田中央研究所に在職時にテーマを与えて下さった、「地図と画像の統合による道路構造の再構築」や「高精度自車位置推定」などが、本博士論文の基盤となっています。ま

た，村瀬先生との共同研究に参加させて頂くなど，多くのきっかけを与えて頂き，感謝しております．業務設計をする立場になった今，その役割の重大さを痛感しております．

（株）豊田中央研究所 西川訓利 監査役，脇田敏裕 取締役，佐藤和夫 部長，寺本英二氏に心より感謝いたします．企業研究所の性質上，特許出願や発表ができないような業務もある中，本テーマに携わること，また社会人ドクターとして博士課程に進学する機会を与えて頂くとともに，それに要する時間を許容頂きました．2009 年当時，立ち上げて間もない位置推定のテーマは，ともすれば目標を見失いそうになるときもありました．議論を重ね，納得して形にすることができたのは，出来ると信じて任せて頂けたおかげです．ありがとうございました．

そして，（株）豊田中央研究所 位置推定チーム諸氏に感謝いたします．本論文の後半のアプローチは会社の業務と直結し，私だけではその提案や実験，検証などは到底出来ませんでした．2009 年に取り組み始めた当初は，GPS の勉強会からスタートするような素人でしたが，自動車の運転支援に利用できる位置推定を実現したいという強い思いの下，現状の GPS を用いた位置推定手法の評価にはじまり，誤差要因の追究，解決策の試行錯誤をともに進め，世の中の一步先をいくところにまで成長できたと思っております．これは，共に業務を進めてきたチーム諸氏のおかげです，心より感謝しております．

また，（株）豊田中央研究所 システム・エレクトロニクス 1 部の諸先輩，走行環境理解研究室及びインフォマティクス研究室諸氏の皆様には，長くご迷惑をおかけしました．研究実務から一步退き，室長の役目を担い始めた 2013 年頃から本博士論文の執筆を開始しました．当初は，極力会社に持ち込まないように執筆しておりましたが，最終的には相当の業務に影響が出たことを大変申し訳なく思っております．これからは，今までの不足分を補うよう皆様の研究成果創出のために力を注ぎたいと考えております．

名古屋大学大学院情報科学研究科 村瀬研究室の秘書の蒲文代 氏と田中弘美 氏，研究室の皆様には感謝いたします．共同研究に参加させて頂いた 2005 年頃から，研究室に伺う度に皆様と話をすることが楽しみでした．いつもご心配，フォロー頂いたこと，感謝しております．

本研究の遂行にあたり，地域社会やコミュニティでの役割を果たせない時もありました．特に娘のことは友人たちにお世話になったことも多々ありました．申し訳ないと言う私に「大丈夫．働く母の星だから頑張って．」と自分も忙しいのに色んな事を引き受けてくれた友人たちに感謝します．

最後に、支えてくれた家族に感謝いたします。2004年に娘を出産、2005年に復職した後開始した本研究は、私自身の大きな柱となりましたが、家族には常に負担を強いてきました。不義理をしてもそれを責めることなく見守ってくれた義両親と両親、本当に小さな頃から「お母さん頑張ってね。」と送り出してくれた娘の佳澄と、仕事も家事も育児もすべてイーブンであるという考えの下、何も文句も言わずに多くのことを今も引き受けてくれている夫 崇に、最上の感謝の意を表したいと思います。心からありがとうございました。

参考文献

- [1] United States Department of Defense, “DARPA GRAND CHALLENGE 2004,” <http://archive.darpa.mil/grandchallenge04/index.htm> [2015/05/21 アクセス].
- [2] United States Department of Defense, “DARPA GRAND CHALLENGE 2005,” <http://archive.darpa.mil/grandchallenge05/index.html> [2015/05/21 アクセス].
- [3] United States Department of Defense, “DARPA URBAN CHALLENGE 2007,” <http://archive.darpa.mil/grandchallenge/index.html> [2015/05/21 アクセス].
- [4] E. Guizzo, “How Google’s Self-Driving Car Works,” IEEE Spectrum Online, Posted 18 Oct. 2011, <http://spectrum.ieee.org/autoton/robotics/artificial-intelligence/googles-autonomous-car-takes-to-the-streets> [2015/05/21 アクセス].
- [5] Daimler AG, “Daimler Autonomous Long Distance Drive,” <http://media.daimler.com/dcmedia/0-921-614307-1-1629819-1-0-0-0-0-1-11702-0-0-1-0-0-0-0-0.html> [2015/05/21 アクセス].
- [6] 日産自動車（株）, “日産が考える自動運転,” http://www.nissan-global.com/EN/NEWS/2013/_STORY/131004-01-e.html [2015/05/21 アクセス].
- [7] トヨタ自動車（株）, “自動運転技術の実験車両,” http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/safety/automatic_drive/ [2015/05/21 アクセス].

セス].

- [8] トヨタ自動車 (株), “パーキング,”
<http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/safety/technology/parking/> [2015/05/21
アクセス].
- [9] トヨタ自動車 (株), “フロント&サイドモニター,”
[http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/safety/technology/technology_file/active/
monitoring.html](http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/safety/technology/technology_file/active/monitoring.html) [2015/05/21 アクセス].
- [10] トヨタ自動車 (株), “レーダークルーズコントロール,”
[http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/safety/technology/technology_file/active/
radar.html](http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/safety/technology/technology_file/active/radar.html) [2015/05/21 アクセス].
- [11] トヨタ自動車 (株), “レーンキーピングアシスト,”
[http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/safety/technology/technology_file/active/
lka.html](http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/safety/technology/technology_file/active/lka.html) [2015/05/21 アクセス].
- [12] トヨタ自動車 (株), “プリクラッシュセーフティ,”
http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/safety/technology/pre_crash/ [2015/05/21
アクセス].
- [13] Volvo Car Corporation “INTELLISAFE,”
<http://www.volvocars.com/intl/about/our-innovation-brands/intellisafe>
[2015/05/21 アクセス].
- [14] 富士重工業 (株), “Eye-Sight,” <http://www.subaru.jp/eyesight/> [2015/05/21
アクセス].
- [15] Volks Wagen AG, “City Emergency Brake,”
[http://webspecial.volkswagen.de/innovative-technologies/com/en/mainpage.
html](http://webspecial.volkswagen.de/innovative-technologies/com/en/mainpage.html) [2015/05/21 アクセス].
- [16] ダイハツ工業 (株), “Smart Assist,”
<http://www.daihatsu.co.jp/lineup/move/detail.htm#section.07> [2015/05/21
アクセス].

- [17] (独)自動車事故対策機構, “予防安全性能アセスメントパンフレット 2015 年版,”
http://www.nasva.go.jp/mamoru/download/JNCAP_2015_active_safety.pdf
[2015/05/21 アクセス].
- [18] 警察庁交通局, “交通事故発生状況の推移:平成 25 年中の交通事故の発生状況”,
2014.
- [19] トヨタ自動車(株), “クラウンマジェスタの予防安全,”
<http://toyota.jp/crownmajesta/safety/active/> [2015/05/21 アクセス].
- [20] 坂井丈泰, “GPS 技術入門,” 東京電機大学出版局, 2003 .
- [21] 坂井丈泰, “GPS のための実用プログラミング,” 東京電機大学出版局, 2007 .
- [22] P. Misra and P. Enge, “Global Positioning System Signals, Measurements, and Performance,” Ganga-Jamuna Press, 2001.
- [23] 海上保安庁交通部, “ロラン C とは,”
<http://www.kaiho.mlit.go.jp/syokukai/soshiki/toudai/lolanc/index.htm>
[2015/05/21 アクセス].
- [24] 海老沼拓史, “第 4 章 GPS ナビゲーション・システムの仕組みと技術動向,” RF
ワールド, No.7, pp.39–52, 2009 .
- [25] 久山敏史, “第 2 章 GPS 受信機のハードウェア,” GPS のしくみと応用技術, CQ
出版社, 2009.
- [26] B.W.Parkinson, “Chapter 11: GPS Error Analysis,” Global Positioning
System: Theory and Applications, Vol.I, pp.469–483, American Institute of
Aeronautics and Astronautic, 1996.
- [27] N.C.Talbot, “Centimeters in the Field, A Users Perspective of Real-Time
Kinematic Positioning in a Production Environment,” Proc. 6th International
Technical Meeting of The Institute of Navigation, pp.1049–1057, 1993.
- [28] 高須知二, 笠井晶二, “GPS による精密単独測位 (PPP) 法の精度評価,” 電子情
報通信学会技術研究報告, SANE 2005-45, 2005 .
- [29] 高須知二, “精密単独測位 (PPP) によるスタティック・キネマティック測位解精

- 度の評価，” 日本測地学会第 104 回学術講演会，口頭報告資料，2005．
- [30] International GNSS Service, “IGS Data,” <https://igsb.jpl.nasa.gov/components/data.html> [2015/05/21 アクセス]．
- [31] 河手香織，小暮聡，中村信一，三吉基之，曾我広志，平原康孝，安田明生，高須知二，“準天頂衛星システムの LEX 信号を用いた PPP 実証実験地上システム開発状況，” 電子情報通信学会技術研究報告，SANE 2012-17，012．
- [32] 吉川和宏，河手香織，小暮聡，佐田辰則，高須知二，平原康孝，“準天頂衛星システムの LEX 信号を用いた PPP 実証実験，” 電子情報通信学会技術研究報告，SANE 2013-33，2013．
- [33] 曾我広志，“センタ型自動走行システムへの準天頂衛星システムの利用，” 第 7 回宇宙政策セミナー，発表資料，
<http://www8.cao.go.jp/space/seminar/fy25-dai7/jyunten.pdf>，2013．
- [34] S.Sukkairieh, E.M.Nebot, and H.F.Durrant-Whyte, “A High Integrity IMU/GPS Navigation Loop for Autonomous Land Vehicle Application,” IEEE Trans. on Robotics and Automation Vol.15, Issue 3, pp.572–578, 1999.
- [35] W.Ding, “Integration of MEMS INS with GPS Carrier Phase Derived Velocity: A New Approach,” Proc. of 20th International Technical Meeting of The Institute of Navigation, pp.2085–2093, 2007.
- [36] 広川類，梶原尚幸，中久喜健司，“タイトカップリング型搬送波 DGPS/DR 複合航法の設計評価，” 誘導制御シンポジウム資料，pp.185–192，2005.
- [37] R. Hirokawa, “A Low Cost GPS/INS Sensor for Small UAVs Augmented with Multiple GPS Antennas,” Proc. of 20th International Technical Meeting of The Institute of Navigation, pp.96–103, 2007.
- [38] R. Hirokawa and T. Ebinuma, “A Low-Cost Tightly Coupled GPS/INS Small UAVs Augmented with Multiple GPS Antennas,” Journal of the Institute of Navigation, Vol.56, No.1, pp.35–44, 2009.

- [39] 横地祐次, 池田聖, 佐藤智和, 横矢直和, “特徴点追跡と GPS 測位に基づくカメラ外部パラメータの推定,” 情報処理学会論文誌 コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.47, No.SIG5(CVIM13), pp.69–79, 2006.
- [40] 条秀行, 穴井哲治, 佐藤智和, 武富貴史, 高地伸夫, 横矢直和, “信頼度を考慮した GPS 測位情報の併用による動画像からのカメラ位置・姿勢推定,” 画像電子学会誌, Vol.43, No.1, pp.35–43, 2014.
- [41] 片山徹, “応用カルマンフィルタ,” 朝倉書店, 2000.
- [42] 西山清, “最適フィルタリング,” 培風館, 2001.
- [43] M.G. Petovello and G. Lachapelle, “Comparison of Vector-Based Software Reciever Implementations with Application to Ultra-Tight GPS/INS Integration,” Proc. of 19th International Technical Meeting of The Institute of Navigation, pp.1790–1799, 2006.
- [44] B.David, P.Closas, and J.A.Fernandez-Rubio, “Particle Filtering Algorithm for Ultra-tight GNSS/INS Integration,” Proc. of 21st International Technical Meeting of The Institute of Navigation, pp.2137–2144, 2008.
- [45] W.Thorsten, K.Nico, and K.Dietmayer, “Precise Ego-Localization in Urban Area using Laserscanner and High Accuracy Feature Maps,” Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2005, pp.283–288, 2005.
- [46] P. Bonnifait, M. Jabbour, and V. Cherfaoui, “Integrated Navigation using GIS-based Information,” European Journal of Navigation, Vol.5, No.1, pp.2–7, 2007.
- [47] P. Bonnifait, M. Jabbour, and V. Cherfaoui, “Autonomous Navigation in Urban Areas using GIS-Managed Information,” International Journal on Vehicle Autonomous Systems, Vol.6, No.1–2, pp.83–103, 2008.
- [48] S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox, “A Probabilistic Approach to Concurrent Mapping and Localization for Mobile Robots,” Machine Learning, vol.31, pp.29–53, 1998.

- [49] S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox, “Probabilistic ROBOTICS,” MIT Press, 2005.
- [50] 子安大士, 三浦純, 白井良明, “不確かさを考慮した複数のスキャンマッチング結果の統合による移動ロボットの移動量推定,” 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.2, pp.263–271, 2005.
- [51] C.-C. Wang and C. Thorpe, “A Hierarchical Object Based Representation for Simultaneous Localization and Mapping,” Proc. 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.412–418, 2004.
- [52] J. Guivant and R. Katz, “Global Urban Localization based on Road Maps,” Proc. 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1079–1084, 2007.
- [53] F. Capezio, A. Sgorbissa, and R. Zaccaria, “An Augmented State Vector Approach to GPS-Based Localization,” Proc. 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2480–2485, 2007.
- [54] G. Grisetti, A. Grzonka, C. Stachniss, P. Pfaff, W. Burgard, “Efficient Estimation of Accurate Maximum Likelihood Maps in 3D,” Proc. 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3472–3478, 2007.
- [55] 小島祥子, 高橋新, 二宮芳樹, “レーザレーダを用いた路側物計測と GPS による高精度自車位置推定手法の提案,” 電子情報通信学会 技術研究報告, ITS-2006-12, 2006.
- [56] Y. Kojima, A. Takahashi, and Y. Ninomiya, “Precise Ego-localization Using GPS and an Outside-monitoring Sensor,” Proc. ITS World Congress 2006, paper ID 5511, 2006.
- [57] 小島祥子, 高橋新, 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.
- [58] 小島祥子, 高橋新, 城殿清澄, 山口晃一郎, 二宮芳樹, “車載外界監視センサを用い

- た高精度自車運動推定および自車位置推定，” 電子情報通信学会技術研究報告，ITS-2007-11，2007．
- [59] Y.Kojima, A.Takahashi, K.Kidono, K.Yamaguchi, and Y.Ninomiya, “Precise Ego-Localization by Integration of GPS and Sensor-based Odometry,” Proc. International Symposium on Advanced Vehicle Control 2008, pp.485–490, 2008.
- [60] B.S.Williams, H. Durrant-Whyte, and G. Dissanayake, “Constrained Initialization of the Simultaneous Localization and Mapping Algorithm,” The International Journal of Robotics Research, Vol.22, No.7–8, pp.541–564, 2003.
- [61] B.Ristic, S.Arulampalam, and N.Gordon, “Beyond the Kalman Filter: Particle Filters for Tracking Applications,” Artech House Publishers, 2004.
- [62] D.Fox, W.Burgard, F.Dellaert, and S.Thrun, “Monte Carlo Localization: Efficient Position Estimation for Mobile Robots,” Proc. 16th National Conference on Artificial Intelligence, pp.343–349, 1999.
- [63] T.N.Yap, Jr. and C.R.Shelton, “SLAM in Large Indoor Environments with Low-Cost, Noisy, and Sparse Sonars,” Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation 2009, pp.1395–1401, 2009.
- [64] K.Granstrom, J.Callmer, F.Ramos, and J.Nieto, “Learning to Detect Loop Closure from Range Data,” Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation 2009, pp.15–22, 2009.
- [65] 上田隆一，新井民雄，浅沼和範，梅田和昇，大隅久，“パーティクルフィルタを利用した自己位置推定に生じる致命的な推定誤りからの回復法，” 日本ロボット学会誌，Vol.23，No.4，pp.466–473，2005．
- [66] 吉田圭吾，白坂洋平，矢入健久，町田和雄，“Unscented Kalman Filter を用いた故障衛星のロバスタな姿勢運動推定，” 日本航空宇宙学会論文誌，Vol.56，No.649，pp.65–71，2008．
- [67] J.Ko, J.D.Klein, D.Fox, and D.Haehnel, “GP-UKF: Unscented Kalman Filters

- with Gaussian Process Prediction and Observation Models,” Proc. 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1901–1907, 2007.
- [68] A.Doucet, N.Freitas, K.Murphy, and S.Russel, “Rao-Blackwellised Particle Filtering for Dynamic Bayesian Networks,” Proc. 16th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence, pp.176–183, 2000.
- [69] C.Stachniss, G.Grisetti, and W.Burgard, “Recovering Particle Diversity in a Rao-Blackwellized Particle Filter for SLAM After Activity Closing Loops,” Proc. 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.667–672, 2005.
- [70] リーグルジャパン (株), “航空レーザスキャナー , ”
<http://www.riegl-japan.co.jp/product/airborne/> [2015/05/29 アクセス
LMS-Q140i-80 は廃盤で参照情報なし].
- [71] パイオニア (株), “業務向け車載用 GPS センサー 「GPS-M1ZZ」 , ”
http://pioneer.jp/biz/biz_carnavi/what/lineup/gps_m1zz.php [2015/05/21 ア
クセス].
- [72] (株) ニコン・トリンブル , “ Trimble 5700 , ”http://www.nikon-trimble.co.jp/support/pdf/faq/guide/5700quick_card.pdf [2015/05/21 アク
セス].
- [73] K.Yamaguchi, T.Kato, and Y.Ninomiya, “Vehicle Ego-Motion Estimation and Moving Object Detection using a Monocular Camera,” Proc. 18th International Conference on Pattern Recognition 2006, pp.610–613, 2006.
- [74] Y.Kojima, N.Suzuki, Y.Hattori, and E.Teramoto, “Precise Localization using Tightly Coupled Integration based on Trajectory Estimated from GPS Doppler,” Proc. International Symposium on Advanced Vehicle Control 2010, pp.406–411, 2010.
- [75] Y.Kojima, N.Suzuki, Y.Hattori, and E.Teramoto, “Proposal for a New Localization Method using Tightly Coupled Integration based on a Precise

- Estimation of Trajectory from GPS Doppler,” Journal of Vehicle System Dynamics, Vol.50, Issue 6, pp.987–1000, 2012.
- [76] Y.Kojima, T.Iwase, J.Meguro, K.Takeyama, N.Suzuki, and E.Teramoto, “Development of a Novel Integrated Positioning System “PRECISE” for ADAS Applications,” Proc. ITS World Congress 2012, paper ID AP–00067, 2012.
- [77] J.Meguro, Y.Kojima, N.Suzuki, and E.Teramoto, “Automotive Positioning Based on Bundle Adjustment of GPS Raw Data and Vehicle Trajectory,” Proc. 24th International Technical Meeting of The Institute of Navigation, pp.1005–1011, 2011.
- [78] J.Meguro, Y.Kojima, N.Suzuki, and E.Teramoto, “Positioning Technique based on Vehicle Trajectory using GPS Raw Data and Low-cost IMU,” International Journal of Automotive Engineering, Vol.3, No. 2, pp.75–80, 2012.
- [79] 小島祥子, 鈴木徳祥, 寺本英二, 村瀬洋, “GPS 生データの蓄積による高精度自車位置推定の提案 ～移動体における基礎検討～,” 電子情報通信学会技術研究報告, ITS-2010-6, 2010 .
- [80] Y.Kojima, N.Suzuki, E.Teramoto, and H.Murase, “Accurate Positioning for High-Accuracy Map Generation Using a Standard GPS,” Proc. International Symposium on Advanced Vehicle Control 2012, paper ID ITS-3-2, 2012.
- [81] 小島祥子, 鈴木徳祥, 寺本英二, 村瀬洋, “過去の GPS 衛星情報を利用した高精度位置推定 —郊外路と都心部における検証—,” 電子情報通信学会技術研究報告, ITS-2011-16, 2011.
- [82] 小島祥子, 石田皓之, 寺本英二, 村瀬洋, “汎用 GPS と車載カメラデータ収集による高精度地図生成手法の提案 —複数時刻の衛星情報を用いた精度向上—,” 情報処理学会論文誌, Vol.54, No.1, pp.103–115, 2013 .
- [83] 武山洪二郎, 小島祥子, 鈴木徳祥, “GPS ドップラーを用いた推測航法精度の向上,” 自動車技術会 2011 年秋季大会 予稿, 発表番号 98-11-36, 2011 .

- [84] 武山洪二郎, 小島祥子, 目黒淳一, 岩瀬竜也, 寺本英二, “GPS ドップラー/INS タイトカップリングによる走行軌跡推定の提案 —都心部における軌跡推定性能の向上—,” 自動車技術会論文集, Vol.44, No.1, pp.199–205, 2013.
- [85] K.Takeyama, Y.Kojima, and E.Teramoto, “Trajectory Estimation Improvement Based on Time-series Constraint of GPS Doppler and INS in Urban Areas,” Proc. IEEE/ION Position, Location And Navigation Symposium 2012, pp.700–705, 2012.
- [86] K.Takeyama and Y.Kojima, “Robust Dead Reckoning in Urban Area with Tightly Coupled Integration of GPS Doppler and INS,” Proc. 20th ITS World Congress, Paper No. 3121, 2013.
- [87] Applanix Corporation, “POSLV,”
<http://www.applanix.com/products/land/pos-lv.html> [2015/05/21 アクセス].
- [88] Novatel Inc., “OEMV,” <http://www.novatel.com/products/gnss-receivers/oem-receiver-boards/oemv-receivers/> [2015/05/21 アクセス].
- [89] N.Shibuhisa, J.Sato, T.Takahashi, I.Ide, H.Murase, Y.Kojima, and A.Takahashi, “Accurate Vehicle Localization using DTW between Range Data Map and Laser Scanner Data Sequences,” Proc. 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.975–980, 2007.
- [90] 渋谷奈保, 高橋友和, 井手一郎, 村瀬洋, 小島祥子, 高橋新, “車載レーザスキャナによる距離データマップの構築と高精度自車位置推定,” 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol.J92-DiII, No.2, pp.215–225, 2009.
- [91] H.Ishida, K. Kidono, Y. Kojima, and T. Naito, “Road Marking Recognition for Map Generation using Sparse Tensor Voting,” Proc. 21st International Conference on Pattern Recognition, pp.1132–1135, 2012.
- [92] Y.Kojima, J.Meguro, H.Ishida, A.Watanabe, N.Suzuki and H.Murase, “High Accuracy Local Map Generation Method Based on Precise Trajectory from GPS Doppler,” International Journal of Automotive Engineering, Vol.3, No.2,

- pp.63–68, 2012.
- [93] 小島祥子, 目黒淳一, 鈴木徳祥, 寺本英二, “汎用 GPS と車載カメラ画像を用いた高精度地図生成手法の提案 ～基本概念と可能性検討～,” 電子情報通信学会技術研究報告, ITS-2010-73, 2011.
- [94] パイオニア (株), “サイバーナビ,”
<http://pioneer.jp/carrozzeria/carnavi/cybernavi/> [2015/05/21 アクセス].
- [95] (株) トヨタマップマスター, “高精度デジタル地図,”:
<http://www.mapmaster.co.jp/product/index.html> [2015/05/21 アクセス].
- [96] 三菱電機 (株), “三菱モバイルマッピングシステム,”
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/mms/> [2015/05/21 アクセス].
- [97] ERTICO, “ADASIS Forum,”<http://ertico.com/projects/adasisforum/>
[2015/05/21 アクセス].
- [98] 国土交通省総合技術政策研究所, “研究成果資料,”
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/index.htm> [2015/05/21 アクセス].
- [99] “OpenStreetMap,” <http://www.openstreetmap.org/#map=5/51.500/-0.100>
[2015/05/21 アクセス].

研究業績

本人主筆の主な研究業績

学術雑誌論文

1. 小島祥子，高橋新，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．
2. Yoshiko Kojima, Noriyoshi Suzuki, Yoshikazu Hattori, Eiji Teramoto, “Proposal for a new localisation method using tightly coupled integration based on a precise estimation of trajectory from GPS Doppler,” Journal of Vehicle System Dynamics, Vol.50, Issue 6, 2012.
3. Yoshiko Kojima, Jun-ichi Meguro, Hiroyuki Ishida, Noriyoshi Suzuki, Eiji Teramoto, Hiroshi Murase, “High accuracy Local Map generation method based on precise trajectory from GPS Doppler,” International Journal of Automotive Engineering, Vol.3, No.2, pp.63–68, 2012.
4. 小島祥子，石田皓之，寺本英二，村瀬洋，“汎用 GPS と車載カメラデータ収集による高精度地図生成手法の提案 —複数時刻の衛星情報を用いた精度向上—，” 情報処理学会論文誌，Vol.54，No.1，pp.103–115，2013．

査読付き国際会議論文

1. Yoshiko Kojima, Arata Takahashi, and Yoshiki Ninomiya, “Precise ego-localization using GPS and an outside-monitoring sensor,” Proc. ITS World Congress 2006, paper ID 5511, London, U.K., Oct. 2006.
2. Yoshiko Kojima, Kiyosumi Kidono, Arata Takahashi, and Yoshiki Ninomiya,

- “Precise ego-localization by integration of GPS and sensor-based odometry,” Proc. International Symposium on Advanced Vehicle Control 2008, pp.485-490, Kobe, Japan, Oct. 2008.
3. Yoshiko Kojima, Noriyoshi Suzuki, Yoshikazu Hattori, and Eiji Teramoto, “Precise localization using tightly coupled integration based on trajectory estimated from GPS Doppler,” Proc. International Symposium on Advanced Vehicle Control 2010, pp.406-411, Loughborough, U.K., Aug., 2010.
 4. Yoshiko Kojima, Jun-ichi Meguro, Hiroyuki Ishida, Noriyoshi Suzuki, Eiji Teramoto, and Hiroshi Murase, “High accuracy local map generation method based on precise trajectory from GPS Doppler,” Proc. 1st International Symposium on Future Active Safety Technology toward zero-traffic-accident 2011, paper ID 20117339, Tokyo, Japan, Sep., 2011.
 5. Yoshiko Kojima, Noriyoshi Suzuki, Eiji Teramoto, and Hiroshi Murase, “Accurate positioning for map generation by using a standard GPS,” Proc. International Symposium on Advanced Vehicle Control 2012, paper ID ITS-3-2, Seoul, Korea, Sep., 2012.
 6. Yoshiko Kojima, Tatsuya Iwase, Jun-ichi Meguro, Kojiro Takeyama, Noriyoshi Suzuki, and Eiji Teramoto, “Development of a novel integrated positioning system ”PRECISE”for ADAS applications,” Proc. ITS World Congress 2012, paper ID AP-00067, Vienne, Austria, Oct., 2012.

国内会議口頭発表

1. 小島祥子, 高橋新, 二宮芳樹, “レーザレーダを用いた路側物計測と GPS による高精度自車両位置推定手法の提案,” 電子情報通信学会技術研究報告, ITS-2006-12, 7月, 2006.
2. 小島祥子, 高橋新, 二宮芳樹, “外界監視センサと GPS による高精度自車両位置推定手法の提案,” 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 2006, 講演番号 1D1-5, 12月, 2006.
3. 小島祥子, 城殿清澄, 山口晃一郎, 高橋新, 二宮芳樹, “車載外界監視センサを用

- いた高精度自車運動推定および自車位置推定，” 電子情報通信学会 技術研究報告，ITS-2007-11，7月，2007．
4. 小島祥子，鈴木徳祥，寺本英二，村瀬洋，“GPS 生データの蓄積による高精度自車位置推定手法の提案 —移動体における基礎検討—徳祥，寺本英二，“汎用 GPS と車載カメラ画像を用いた高精度地図生成手法の提案 —基本概念と可能性検討—，” 電子情報通信学会技術研究報告，ITS-2010-73，3月，2011．
 5. 小島祥子，鈴木徳祥，寺本英二，村瀬洋，“過去の GPS 衛星情報を利用した高精度位置推定 —郊外路と都心部における検証—，” 電子情報通信学会技術研究報告，ITS-2011-16，9月，2011．

受賞

1. Yoshiko Kojima, Noriyoshi Suzuki, Yoshikazu Hattori, and Eiji Teramoto, Best Paper Award, 10th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Aug., 2010.

本人主筆のその他の主な研究業績

学術雑誌論文

1. 松久祥子，山村毅，大西昇，杉江昇，“有彩色物体を含むシーン中の半透明物体の検出について，” 電子情報通信学会論文誌 Vol.J80-D2，No.7，pp.1695–1704，1997．
2. 小島祥子，山田啓一，二宮芳樹，“地図と画像の融合によるレーン形状推定手法の提案，” 情報処理学会論文誌，Vol.42，No.12，pp.3194–3200，2001．
3. Yoshiko Kojima, Keiichi Yamada, Yodhiki Ninomiya, “Three-dimensional road structure estimation by fusion of a digital road map and an image,” SAE Technical Paper, 2002-01-0758, 2002.

受賞

1. 小島祥子，山田啓一，二宮芳樹，平成 13 年度情報処理学会 高度交通システム研究会優秀研究報告賞，1 月，2002 .
2. 小島祥子，平成 14 年度山下記念研究賞，情報処理学会，7 月，2002 .
3. 小島祥子，山田啓一，二宮芳樹，平成 14 年度情報処理学会論文賞，5 月，2003.

本人主筆以外の関連する主な研究業績

学術雑誌論文

1. 渋谷奈保，高橋友和，井手一郎，村瀬洋，小島祥子，高橋新，“車載レーザスキャナによる距離データマップの構築と高精度自車位置推定，” 電子情報通信学会論文誌，Vol. J92-D，No.2，pp.215–225，2009 .
2. 浅井俊弘，山口晃一郎，小島祥子，内藤貴志，二宮芳樹，“構造物の知識に基づく車載カメラ画像からの走行環境の三次元直線復元，” 電子情報通信学会論文誌，Vol.J93-D，No.7，pp.1236–1247，2010 .
3. 野田雅文，高橋友和，出口大輔，井手一郎，村瀬洋，小島祥子，内藤貴志，“位置依存型識別機を用いた車載カメラ画像からの路面標示検出，” 電気学会論文誌，産業応用部門誌，Vol.131，No.4，pp.466–474，2011 .
4. 野田雅文，高橋友和，出口大輔，井手一郎，村瀬洋，小島祥子，内藤貴志，“空撮画像と時系列車載カメラ画像からの特徴点の時系列対応付けによる自車位置推定の高精度化，” 電子情報通信学会論文誌，Vol.J95-D，No.1，pp.111–121，2012 .
5. 目黒淳一，小島祥子，鈴木徳祥，寺本英二，“GPS ドップラーと慣性センサの統合による車両軌跡推定手法の提案，” 情報処理学会論文誌，Vol.53，No.1，pp.212–222，2012 .
6. Jun-ichi Meguro, Yoshiko Kojima, Noriyoshi Suzuki, and Eiji Teramoto, “Positioning technique based on vehicle trajectory using GPS raw data and low-cost IMU,” International Journal of Automotive Engineering, Vol.3, No.2, pp.75–80, 2012.

7. 岩瀬竜也，小島祥子，目黒淳一，武山洪二郎，寺本英二，“INS による GPS マルチパス誤差の排除と測位の信頼度について，”自動車技術会論文集，Vol.44，No.1，pp.119–124，2013．
8. 武山洪二郎，小島祥子，目黒淳一，岩瀬竜也，寺本英二，“GPS ドップラー / INS タイトカップリングによる走行軌跡推定の提案 —都心部における軌跡推定性能の向上—，”自動車技術会論文集，Vol.44，No.1，pp.199–204，2013．

その他，査読付き国際会議 21 件，国内口頭発表 38 件，受賞 4 件．

本人主筆以外のその他の主な研究業績

学術雑誌論文

1. 城殿清澄，内藤貴志，小島祥子，“高解像度レーザレーダを用いた走行環境認識，”日本赤外線学会誌，Vol.23，No.2，pp.22–29，2013．
2. Chunzhao Guo, Jun-ichi Meguro, Yoshiko Kojima, and Takashi Naito, “A multimodal ADAS system for unmarked urban scenarios based on road context understanding,” IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems, Vol.PP, Issue 99, pp.1–15, 2014.
3. Hiroyuki Ishida, Jun-ichi Meguro, Yoshiko Kojima, and Takashi Naito, “3D road boundary detection using conformal geometric algebra,” IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications Vol.5, pp.176–182, 2013.
4. 加藤武男，城殿清澄，小島祥子，内藤貴志，“物体識別のための低計算コスト画像特徴 Sparse FIND の提案，”精密工学会誌，Vol.79，No.11，pp.1063–1068，2013.

その他，査読付き国際会議 10 件，国内口頭発表 12 件，受賞 1 件．