

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

都市部におけるGNSS単独測位性能改善に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2019-06-25 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 富永, 貴樹 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1793

博士学位論文

都市部における GNSS 単独測位性能改善に関する研究

平成 30 年度

(2019 年 3 月)

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

応用環境システム学専攻

富永貴樹

目次

第1章	序論	1
1.1	GNSS 受信機の歴史	1
1.2	研究の背景	4
1.3	本研究の目的	6
1.4	論文の構成	7
第2章	観測ノイズアダプティブ推定による都市部 GNSS 単独測位誤差の低減	8
2.1	拡張カルマンフィルタによる GNSS 単独測位	8
2.1.1	カルマンフィルタの基礎	8
2.1.2	GNSS 単独測位における観測方程式と状態方程式の導出	9
2.2	拡張カルマンフィルタにおけるアダプティブ推定	15
2.2.1	イノベーションによる観測ノイズ共分散アダプティブ推定	15
2.2.2	残差シーケンスによる観測ノイズ共分散アダプティブ推定	16
2.2.3	プロセスノイズ共分散のアダプティブ推定	16
2.3	都市部走行実験による評価	18
2.3.1	実験概要	18
2.3.2	カルマンフィルタのチューニング	19
2.3.3	位置誤差比較	22
2.3.4	速度誤差比較	26
2.4	本章のまとめ	29
第3章	NLOS 信号追尾に起因する観測誤差と測位誤差の関係性に関する考察	36
3.1	NLOS 観測誤差の抽出	36
3.1.1	NLOS 観測誤差抽出法	36
3.1.2	シミュレータ実験による立証	37
3.2	都市部における NLOS 観測誤差の評価	42
3.3	NLOS 観測誤差と測位誤差の関係性	46
3.4	本章のまとめ	50
第4章	都市部 GNSS 単独測位におけるインテグリティ情報の評価	66
4.1	プロテクションレベルの定義	66
4.1.1	プロテクションレベルの導出	66
4.1.2	プロテクションレベル評価の仕方	69
4.2	都市部単独測位誤差との比較	71
4.3	MI の移動速度への依存性	77

4.3.1	位置のプロテクションレベルと移動速度の関係性	77
4.3.2	速度のプロテクションレベルと移動速度の関係性	78
4.4	MI と場所の依存性	79
4.5	本章のまとめ	82
第 5 章	結論	83
5.1	本研究のまとめ	83
5.2	今後の展望及び課題	85

謝辞

参考文献

図一覧

図 1.1	古野電気製 GPS 受信機 GP-500(1989 年発売)	1
図 1.2	古野電気製カーナビ向け初代 GPS 受信機 GN-72(1992 年発売)	2
図 1.3	古野電気製評価用多周波マルチ GNSS アンテナ及び受信機	2
図 1.4	LOS 及び NLOS の概念図	4
図 2.1	拡張カルマンフィルタ概念図	9
図 2.2	時間更新概念図	12
図 2.3	GNSS 単独測位概念図([21]より引用)	14
図 2.4	走行コース及び周囲の 3D 地図画像	18
図 2.5	実験の構成	19
図 2.6	アダプティブ推定概念図	20
図 2.7	観測ノイズアダプティブ推定の処理フロー	21
図 2.8	従来の拡張カルマンフィルタによる水平方向測位結果	23
図 2.9	アダプティブ拡張カルマンフィルタによる水平方向測位結果	23
図 2.10	従来の拡張カルマンフィルタによる高さ方向位置誤差	24
図 2.11	アダプティブ拡張カルマンフィルタによる高さ方向位置誤差	24
図 2.12	位置誤差累積度数分布 (左側: 水平方向、右側高さ方向)	25
図 2.13	速度誤差累積度数分布 (左側: 水平方向、右側高さ方向)	26
図 2.14	従来の拡張カルマンフィルタによる 3 次元速度誤差	27
図 2.15	アダプティブ拡張カルマンフィルタによる 3 次元速度誤差	28
図 2.16	シミュレータ信号による水平方向測位結果	35
図 3.1	NLOS 誤差抽出の概念図	37
図 3.2	開始時刻におけるスカイプロット	38
図 3.3	NLOS 擬似距離誤差設定画面 (左側: PRN.13、右側: PRN.23)	39
図 3.4	NLOS ドップラー誤差設定画面 (上側: PRN.13、下側: PRN.23)	39
図 3.5	シミュレータ実験の擬似距離一重差残差	40
図 3.6	シミュレータ実験のドップラーシフト一重差残差	41
図 3.7	Lap04 における GPS 擬似距離一重差残差	43
図 3.8	Lap04 における GLONASS 擬似距離一重差残差	43
図 3.9	Lap04 における GPS ドップラーシフト一重差残差	44
図 3.10	Lap04 における GLONASS ドップラーシフト一重差残差	44
図 3.11	Lap04 における擬似距離 NLOS 観測誤差とアダプティブ推定による観測ノイズ標準偏差の相関 (左側; GPS、右側: GLONASS)	47
図 3.12	Lap04 におけるドップラー NLOS 観測誤差とアダプティブ推定による観測ノイズ標準偏差の相関 (左側; GPS、右側: GLONASS)	47
図 3.13	Lap04 における擬似距離 NLOS 観測誤差と SNR 近似による観測ノイズ標準偏差の相	

関（左側；GPS、右側：GLONASS）	48
図 3.14 Lap04 におけるドップラーNLOS 観測誤差と SNR 近似による観測ノイズ標準偏差の 相関（左側；GPS、右側：GLONASS）	48
図 3.15 Lap01 における擬似距離一重差残差（左側；GPS、右側：GLONASS）	51
図 3.16 Lap01 におけるドップラーシフト一重差残差（左側；GPS、右側：GLONASS）	51
図 3.17 Lap02 における擬似距離一重差残差（左側；GPS、右側：GLONASS）	52
図 3.18 Lap02 におけるドップラーシフト一重差残差（左側；GPS、右側：GLONASS）	52
図 3.19 Lap03 における擬似距離一重差残差（左側；GPS、右側：GLONASS）	53
図 3.20 Lap03 におけるドップラーシフト一重差残差（左側；GPS、右側：GLONASS）	53
図 3.21 Lap05 における擬似距離一重差残差（左側；GPS/QZSS、右側：GLONASS）	54
図 3.22 Lap05 におけるドップラーシフト一重差残差（左側；GPS/QZSS、右側：GLONASS）	54
図 3.23 Lap06 における擬似距離一重差残差（左側；GPS/QZSS、右側：GLONASS）	55
図 3.24 Lap06 におけるドップラーシフト一重差残差（左側；GPS/QZSS、右側：GLONASS）	55
図 3.25 Lap01 の擬似距離誤差とアダプティブ推定観測ノイズの相関（左側；GPS、右側： GLONASS）	56
図 3.26 Lap01 のドップラー誤差とアダプティブ推定観測ノイズの（左側；GPS、右側： GLONASS）	56
図 3.27 Lap01 の擬似距離誤差と SNR 近似による観測ノイズの相関（左側；GPS、右側： GLONASS）	57
図 3.28 Lap01 のドップラー観測誤差と SNR 近似による観測ノイズの相関（左側；GPS、右側： GLONASS）	57
図 3.29 Lap02 の擬似距離誤差とアダプティブ推定観測ノイズの相関（左側；GPS、右側： GLONASS）	58
図 3.30 Lap02 のドップラー誤差とアダプティブ推定観測ノイズの相関（左側；GPS、右側： GLONASS）	58
図 3.31 Lap02 の擬似距離誤差と SNR 近似による観測ノイズの相関（左側；GPS、右側： GLONASS）	59
図 3.32 Lap02 のドップラー観測誤差と SNR 近似による観測ノイズの相関（左側；GPS、右側： GLONASS）	59
図 3.33 Lap03 の擬似距離誤差とアダプティブ推定観測ノイズの相関（左側；GPS、右側： GLONASS）	60
図 3.34 Lap03 のドップラー誤差とアダプティブ推定観測ノイズの相関（左側；GPS、右側： GLONASS）	60
図 3.35 Lap03 の擬似距離誤差と SNR 近似による観測ノイズの相関（左側；GPS、右側： GLONASS）	61
図 3.36 Lap03 のドップラー観測誤差と SNR 近似による観測ノイズの相関（左側；GPS、右側：	

GLONASS)	61
図 3.37 Lap05 の擬似距離誤差とアダプティブ推定観測ノイズの相関 (左側 ; GPS/QZSS、右側 : GLONASS)	62
図 3.38 Lap05 のドップラー誤差とアダプティブ推定観測ノイズの相関 (左側 ; GPS/QZSS、右側 : GLONASS)	62
図 3.39 Lap05 の擬似距離誤差と SNR 近似による観測ノイズの相関 (左側 ; GPS/QZSS、右側 : GLONASS)	63
図 3.40 Lap05 のドップラー観測誤差と SNR 近似による観測ノイズの相関 (左側 ; GPS/QZSS、右側 : GLONASS)	63
図 3.41 Lap06 の擬似距離誤差とアダプティブ推定観測ノイズの相関 (左側 ; GPS/QZSS、右側 : GLONASS)	64
図 3.42 Lap06 のドップラー誤差とアダプティブ推定観測ノイズの相関 (左側 ; GPS/QZSS、右側 : GLONASS)	64
図 3.43 Lap06 の擬似距離誤差と SNR 近似による観測ノイズの相関 (左側 ; GPS/QZSS、右側 : GLONASS)	65
図 3.44 Lap06 のドップラー観測誤差と SNR 近似による観測ノイズの相関 (左側 ; GPS/QZSS、右側 : GLONASS)	65
図 4.1 誤差楕円導出の概念図	67
図 4.2 スタンフォードチャートによる評価例	69
図 4.3 従来の拡張カルマンフィルタによる位置の HPL	72
図 4.4 アダプティブ拡張カルマンフィルタによる位置の HPL	72
図 4.5 従来の拡張カルマンフィルタによる位置の VPL	73
図 4.6 アダプティブ拡張カルマンフィルタによる位置の VPL	73
図 4.7 従来の拡張カルマンフィルタによる速度の HPL	74
図 4.8 アダプティブ拡張カルマンフィルタによる速度の HPL	74
図 4.9 従来の拡張カルマンフィルタによる速度の VPL	75
図 4.10 アダプティブ拡張カルマンフィルタによる速度の VPL	75
図 4.11 アダプティブ拡張カルマンフィルタによる HPL_{pos} の MI 発生箇所	80
図 4.12 アダプティブ拡張カルマンフィルタによる VPL_{pos} の MI 発生箇所	80
図 4.13 アダプティブ拡張カルマンフィルタによる HPL_{vel} の MI 発生箇所	81
図 4.14 アダプティブ拡張カルマンフィルタによる VPL_{vel} の MI 発生箇所	81

表一覧

表 2.1 走行実験概要	19
表 2.2 位置誤差統計値まとめ	25
表 2.3 速度誤差統計値まとめ	26

表 2.4	各周回の水平方向位置誤差統計値まとめ	30
表 2.5	各周回の高さ方向位置誤差統計値まとめ	31
表 2.6	各周回の水平方向速度誤差統計値まとめ	32
表 2.7	各周回の高さ方向速度誤差統計値まとめ	33
表 2.8	シミュレータシナリオ概要	34
表 2.9	シミュレータ実験位置誤差統計値まとめ	35
表 2.10	シミュレータ実験速度誤差統計値まとめ	35
表 3.1	シミュレータシナリオ概要	38
表 3.2	シミュレータ実験の擬似距離一重差残差統計値まとめ	40
表 3.3	シミュレータ実験のドップラーシフト一重差残差統計値まとめ	41
表 3.4	各周回の擬似距離 NLOS 観測誤差統計値まとめ	45
表 3.5	各周回のドップラーシフト NLOS 観測誤差統計値まとめ	45
表 3.6	各周回のアダプティブ推定による観測ノイズ標準偏差と NLOS 観測誤差の相関係数まとめ	49
表 3.7	各周回の SNR と NLOS 観測誤差の相関係数まとめ	49
表 4.1	周回毎の位置の MI まとめ	76
表 4.2	周回毎の速度の MI まとめ	76
表 4.3	時速 5km/h で区切った場合の位置の MI まとめ	77
表 4.4	時速 5km/h で区切った場合の速度の MI まとめ	78

略語一覽

ECEF	Earth Centered, Earth Fixed
EKF	Extended Kalman Filter
ENU	East, North, Up
GGTO	Galileo/GPS Time Offset
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HMI	Hazardously Misleading Information
HPL	Horizontal Protection Level
IAE	Innovation-based Adaptive Estimation
IMU	Inertial Measurement Unit
ISB	Inter-system Bias
JST	Japan Standard Time
LiDAR	Light Detection and Ranging
LOS	Line-of-sight
MI	Misleading Information
NLOS	Non-line-of-sight
NMEA	National Marine Electronics Association
PPP	Precise Point Positioning
PVT	Position, Velocity, and Time
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System
RMS	Root Mean Square
RTK	Real-Time Kinematic
SNR	Signal to Noise Ratio
SV	Space Vehicle
UTC	Coordinated Universal Time
VPL	Vertical Protection Level

第1章 序論

本論文は、都市部における GNSS(Global Navigation Satellite System)単独測位性能の向上に関する研究成果をまとめたものである。本章ではまず GNSS 受信機の歴史について振り返り、その中にある研究の背景を示す。その後目的と本論文の構成について述べる。

1.1 GNSS 受信機の歴史

1980年代後半の GPS(Global Positioning System)受信機の市場における登場は、航海における電波航法に革新をもたらした。当時の電波航法といえば、ロラン A、ロラン C、デッカなどがあった。位置精度は 100m から数百 m 程度で、利用可能な地域は近海のみに限られていた[1] [2]。外洋でも利用可能だったものはオメガである。しかし位置精度が悪く、数海里程度(1 海里約 1852m)の誤差を持っていた。衛星を利用したトランシット(Transit)も外洋で利用可能であったが、こちらも地上局が静止している等の理想的な状態で位置精度 100m 程度、船舶で実際に利用する場合はさらに精度が悪かったとも言われている[1] [3]。このような背景から、外航船舶用に外洋でも利用可能な高精度な測位システムが求められていた。



図 1.1 古野電気製 GPS 受信機 GP-500(1989 年発売)

図 1.1 は古野電気製の初期の GPS 受信機、GP-500 である。1989 年の発売で、タワー型デスクトップパソコンほどの大きさであった。当時は米国国防総省により SA と呼ばれるポリシーが運用されていたため、民生信号(C/A コード)を利用した測位では 100m 程度の誤差まで保証されるといったものであったが、実際のところ GPS 測位精度は 20m 程度であったそうである。このように従来の航法システムと比較して測位精度の大幅な改善ができたこともあつてか、大きさは問題にならなかったようである。とはいえ当時は GPS 衛星の数が十分には揃っていなかったため、利用可能な時間帯も一日数時間程度に限られていたことが課題であった[1]。

1990年代に入ると利用可能な GPS 衛星も増え、1993年12月に正式に GPS の運用開始が宣言された[4]。このときから、地球上どこでもいつでも連続的に利用できるようになった。また、ロランやトランシットといった従来の航法装置は、GPS の補間システムのような位置付けとなった[5]。

この頃から自動車のカーナビへの GPS 利用が進んだ。そのため低価格帯に位置するローエンド GPS 受信機は爆発的に普及していき、大量生産による半導体受信 IC も現実となった。集積化技術の進歩により受信機の小型化も進み、2000年頃にはアナログ部・デジタル部の2チップ構成受信機も登場した。その後1チップの GPS 受信 IC が登場し、さらに高感度受信技術も登場する。高感度化により都市部のビル街のような場所でも GPS 信号を受信し、測位を継続できるようになった。さらには携帯電話にも GPS 受信チップが搭載されるようになるなど、GPS は陸上においても位置センサーとしての確固たる地位を築いた。



図 1.2 古野電気製カーナビ向け初代 GPS 受信機 GN-72(1992年発売)

一方で、GPS 近代化(Modernization)が計画され始め、多周波民生信号の仕様が公開された。2周波目である L2 帯の信号は基本的に米国関係者のみが利用可能なサービスであったが、民生用信号が重畳されることで GPS の用途がますます拡大すると考えられた。

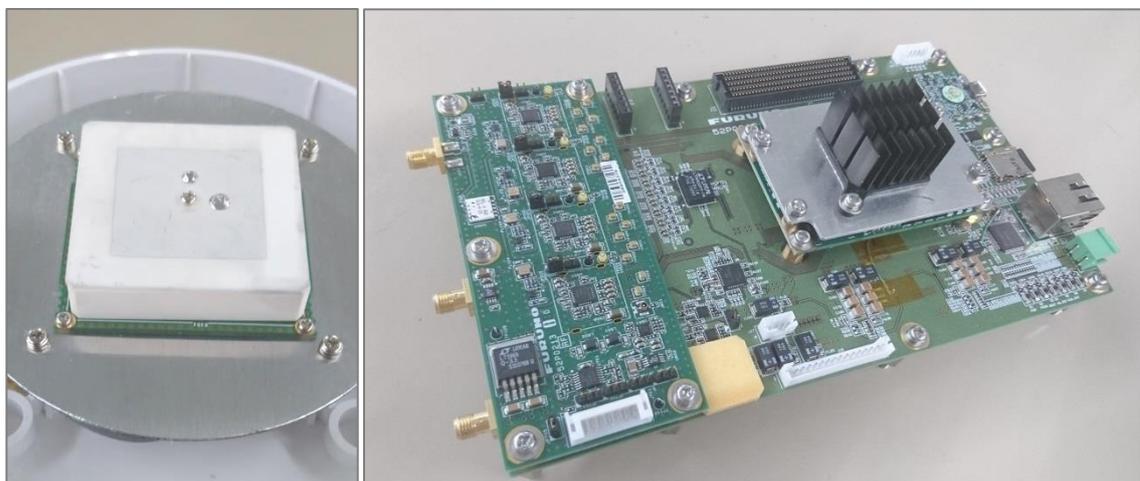


図 1.3 古野電気製評価用多周波マルチ GNSS アンテナ及び受信機

それが現実味をおびてきたのが 2010 年代で、マルチ GNSS 時代の幕開けでもある。GPS とほぼ同時期に配備が進んだロシアの GLONASS や、欧州の Galileo、中国の BeiDou といった複数の衛星測位システムがローエンド製品でも利用可能になり、受信可能な衛星数が制限される都市部における測位精度や利用率の改善が実現した。この過程においては我が国の準天頂衛星システム(QZSS, Quasi-Zenith Satellite System)の貢献も大きい。2018 年 11 月 1 日に正式にサービスが開始されたことにより、日本上空に常に 1 機の準天頂衛星が位置することになったためである。また、それぞれの衛星測位システムが多周波の民生信号を放送する計画があることから、多周波マルチ GNSS 受信機の開発も活発化している。図 1.3 がその例の一つで、古野電気製の評価用多周波マルチ GNSS アンテナ及び受信機である。L1/L2/L5/L6 帯のマルチ GNSS 信号受信及びその利用が可能なものである。

近い将来、いよいよローエンド製品による多周波民生信号の搬送波位相を利用した cm レベルの測位が市場に登場する。さらには準天頂衛星のセンチメートル級測位サービスも開始されるなど、ローエンド製品のさらなる高精度化が期待されている。

1.2 研究の背景

前節で述べたように、GPS/GNSS は海上のみならず、陸上における航法にも革新をもたらした。GNSS デバイスの出荷台数は今後もさらに増加するとの予測もある[6]。その一方で、依然として測位精度およびその信頼性への要求は高まるばかりである。例えば自動車分野では、自動走行や先進運転支援システムにおける車両位置推定の精度、コスト、及びロバスト性への要求が高まっている。特に自動運転システムの実現には数十 cm の精度が求められる[7] [8]。

そのため、GNSS と各種センサーの統合や、GNSS の搬送波位相を用いた精密測位による研究がなされている。それら測位技術の高精度化が進む一方で、GNSS を用いた測位では多くの場合に擬似距離とドップラーシフトを用いる単独測位を起点にする。例えばセンサーを利用する際には、単独測位による速度情報からキャリブレーションを行うことで、初めてセンサーによる速度情報が利用可能になる。また、搬送波位相を用いる PPP(Precise Point Positioning)や RTK(Real-Time Kinematic)の場合は、単独測位結果を初期値としてフィルタ演算を行ったり、あるいは搬送波位相測位が途切れる場合に単独測位がその間を補ったりすることもある。このように、GNSS の測位計算において基礎となる単独測位の性能改善は、位置推定のロバスト性を高めるために無視できない項目である。

しかしながら高層ビルが立ち並ぶ都市部においては、LOS 信号(Line-of-sight、GNSS 信号の直接波)の受信が建物に妨げられると同時に、反射や回折によって生じる NLOS 信号(Non-line-of-sight、GNSS 信号の直接波ではないもの)を受信してしまうことが多い。図 1.4 にその概念図を示す。



図 1.4 LOS 及び NLOS の概念図

GNSS 測位では衛星からユーザーまでの距離を求めるが、NLOS 信号は LOS 信号よりも伝搬経路が長くなるため、NLOS 信号のみを受信する場合は真の距離よりも大きな値を観測してしまう。この観測誤差が都市部における GNSS 単独測位の支配的な誤差要因とされている[9]。さらにその信号経路は複雑になるため、観測誤差の分布の仕方や誤差の絶対量を見積もることは非常に難しい。そのため魚眼カメラとユーザー方位から LOS 信号を特定し、NLOS 信号を測位計算から除外する研究や[9] [10]、3D 都市モデルと呼ばれるモデル化した誤差による観測誤差低減などがなされている[11]。しかし、こういった処理は負荷がやや大きいため、ローエンド製品である低コスト GNSS 受信機で動作させることは難しいのが現状である。また、測位アルゴリズムは受信機内のブラックボックスであるため、必然的に各受信機メーカーに委ねられる。そのため自動車分野、特に都市部における測位精度が詳細に議論された例は少ない。また、GNSS による速度推定性能に関しても具体的に示された文献はまず見当たらないのが現状である。

さらに、都市部におけるインテグリティ情報も議論されることは非常に稀である。この背景には、インテグリティ情報自体が測位アルゴリズムに大きく依存することが挙げられる。

1.3 本研究の目的

本研究の目的は、都市部における GNSS 単独測位性能の改善のため、従来の測位アルゴリズムを明らかにすると共に性能改善のための有効な手法を確立し、提案することである。なお、本稿における単独測位性能とは、位置及び速度の推定精度と確度、さらにその信頼性としてのインテグリティ情報を意味する。

また、本研究では IMU(Inertial Measurement Unit)等のセンサー統合を行ったり、3D マップやカメラ画像、LiDAR(Light Detection and Ranging)等による地形データを利用したりしない。さらに魚眼レンズ等による上空の視界から衛星の可視状態を判断したりすることも行わない。これによりローエンド製品を含めたいかなるグレードの GNSS 受信機でも効果が得られ、都市部における GNSS のさらなる有用性が確立できるものと確信する。

1.4 論文の構成

本論文の構成は以下である。

第2章では測位アルゴリズムを明らかにして都市部 GNSS 単独測位結果を評価する。従来技術である拡張カルマンフィルタ(EKF, Extended Kalman Filter)と、提案手法としてのアダプティブ拡張カルマンフィルタを導出し、低コスト GNSS 受信機の観測生データを用いてオフライン処理による GNSS 単独測位を行い、位置及び速度推定結果を比較する。

第3章では観測誤差と測位誤差の関係性を議論する。都市部における測位誤差の主要因とされる NLOS に起因する観測誤差を算出する手法を示し、誤差を定量的に評価する。さらに観測誤差と第2章で示した両拡張カルマンフィルタとの関係性から位置及び速度推定誤差について考察する。

第4章ではインテグリティ情報について述べる。位置及び速度のプロテクションレベルと呼ばれるインテグリティ情報を算出し、これも第2章で示した両拡張カルマンフィルタによる位置及び速度推定誤差との関係性について議論する。また、車両速度とインテグリティ情報との関係性やインテグリティ情報の場所への依存性についても言及する。

第5章にて本論文をまとめるとともに、今後の展望及び課題を述べる。

第2章 観測ノイズアダプティブ推定による都市部 GNSS 単独測位

誤差の低減

本章では、GNSS 単独測位に利用される拡張カルマンフィルタ及び提案手法であるアダプティブ拡張カルマンフィルタを導出する。アダプティブカルマンフィルタの特徴の一つは、観測ノイズの分散、あるいは共分散行列が未知の場合を想定したアルゴリズムであることである。一方、前章で述べた通り、NLOS に起因する観測誤差分散は未知である。そこで、アダプティブカルマンフィルタを NLOS が支配的な誤差要因となる都市部における GNSS 測位に適用することにした。アダプティブカルマンフィルタの処理はさほど複雑ではないため、低コスト受信機でも十分にリアルタイムで動作させることが可能である。都市部における走行実験データを用いて、双方の拡張カルマンフィルタによる位置及び速度誤差について述べる。

2.1 拡張カルマンフィルタによる GNSS 単独測位

本節にて GNSS 単独測位に用いられる拡張カルマンフィルタの観測方程式及び状態ベクトルを導出する。

2.1.1 カルマンフィルタの基礎

GNSS 単独測位は非線形システムであるため、測位計算には拡張カルマンフィルタが用いられる。エポック k における状態ベクトル \mathbf{x} 及びその共分散行列 \mathbf{P} の観測更新方程式は、観測ベクトル \mathbf{z}_k を用いて次のように表すことができる [12] [13] [14]。

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{x}}_k &= \hat{\mathbf{x}}_{\bar{k}} + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{\bar{k}})) \\ \mathbf{P}_k &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_{\bar{k}})) \mathbf{P}_{\bar{k}} \\ \mathbf{K}_k &= \mathbf{P}_{\bar{k}} \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_{\bar{k}})^T (\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_{\bar{k}}) \mathbf{P}_{\bar{k}} \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_{\bar{k}})^T + \mathbf{R}_k)^{-1}\end{aligned}\tag{2.1}$$

ここで、 $\hat{\mathbf{x}}_k$ と \mathbf{P}_k はそれぞれエポック k における観測更新後の状態ベクトルとその共分散行列、 $\hat{\mathbf{x}}_{\bar{k}}$ と $\mathbf{P}_{\bar{k}}$ はそれぞれ観測更新前の状態ベクトルとその共分散行列である。 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 、 $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ 、 \mathbf{R} 、はそれぞれ、観測モデルを表す非線形ベクトル、状態ベクトル $\hat{\mathbf{x}}_{\bar{k}}$ のまわりでテーラー展開することにより得られる偏微分係数の行列、観測ノイズ共分散行列である。

一方、GNSS 単独測位の場合、システムモデルは線形であると仮定できるため、状態ベクトル及びその共分散行列の時間更新は次式のように表される。

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{x}}_{\bar{k}} &= \mathbf{F}_{k-1}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{D}_k\mathbf{u}_k \\ \mathbf{P}_{\bar{k}} &= \mathbf{F}_{k-1}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{F}_{k-1}^T + \mathbf{Q}_{k-1}\end{aligned}\quad (2.2)$$

ここで、 \mathbf{F}_k と \mathbf{Q}_k はそれぞれエポック $k-1$ から k への状態遷移行列とシステムノイズ共分散行列である。 \mathbf{D}_k はオプションとしての外部からの制御入力 \mathbf{u}_k に対する係数からなる行列である。

図 2.1 は拡張カルマンフィルタの公式を概念図で表したもので、例えば次のような手順で動作する。

あるエポック k において：

- ① 観測ベクトル \mathbf{z}_k とその共分散行列 \mathbf{R}_k を得る。
- ② 一つ前のエポックから状態ベクトルの予測値を意味する $\hat{\mathbf{x}}_{\bar{k}}$ とその共分散行列 $\mathbf{P}_{\bar{k}}$ を得る。
- ③ カルマンゲイン \mathbf{K}_k を算出し、フィルタリングを施すことで状態ベクトル $\hat{\mathbf{x}}_k$ とその共分散行列 \mathbf{P}_k を得る。

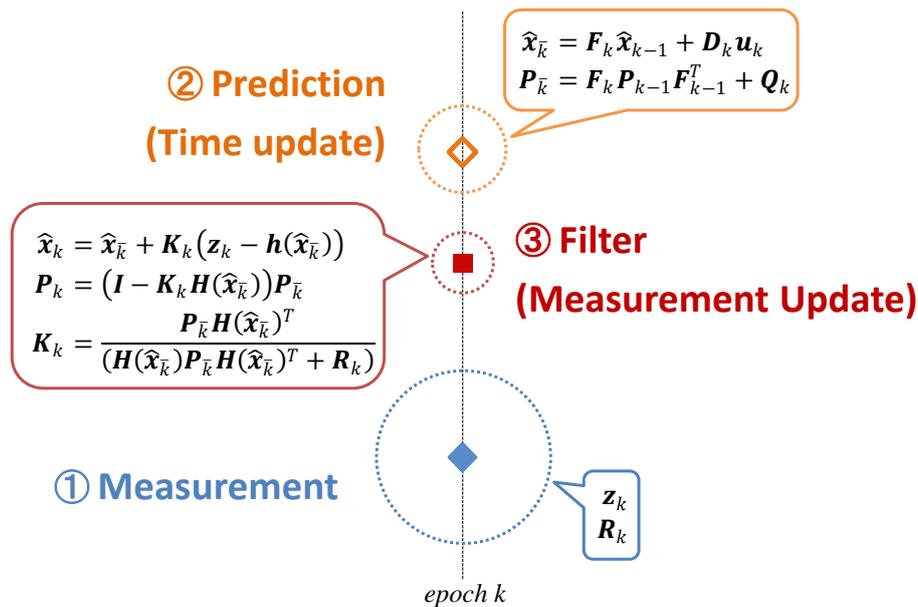


図 2.1 拡張カルマンフィルタ概念図

なお、上述の②がカルマンフィルタの時間更新、③が観測更新と呼ばれるものである。次節以降で、式(2.1)及び(2.2)を用いた GNSS 単独測位を導出する。

2.1.2 GNSS 単独測位における観測方程式と状態方程式の導出

観測モデルは次のように定義される。

$$\begin{aligned}\rho^i &= \gamma^i + \delta t^i + \delta t_u + ISB + I^i + T^i + \epsilon_{\rho^i} \\ \dot{\rho}^i &= \dot{\gamma}^i + \dot{\delta t}^i + \dot{\delta t}_u + \dot{ISB} + \dot{I}^i + \dot{T}^i + \epsilon_{\dot{\rho}^i}\end{aligned}\quad (2.3)$$

ここで、

- ρ^i : 衛星*i*から観測される擬似距離[m]
- $\dot{\rho}^i$: 衛星*i*から観測されるドップラーシフト[m/s]
- γ^i : 衛星*i*とユーザー間の幾何距離[m]
- $\dot{\gamma}^i$: 衛星*i*とユーザー間の幾何距離変化 [m/s]
- δt^i : 衛星*i*の時計バイアス誤差[m]
- $\dot{\delta t}^i$: 衛星*i*の時計ドリフト誤差[m/s]
- δt_u : ユーザー（受信機）の時計バイアス誤差[m]
- $\dot{\delta t}_u$: ユーザー（受信機）の時計ドリフト誤差[m/s]
- ISB : GNSS システム間時刻バイアス[m]
- \dot{ISB} : GNSS システム間時刻バイアス変化[m/s]
- I^i : ρ^i に重畳される電離層遅延誤差[m]
- \dot{I}^i : $\dot{\rho}^i$ に重畳される電離層遅延誤差変化[m/s]
- T^i : ρ^i に重畳される対流圏遅延誤差[m]
- \dot{T}^i : $\dot{\rho}^i$ に重畳される対流圏遅延誤差変化[m/s]
- ϵ_{ρ^i} : ρ^i の観測ノイズ[m]
- $\epsilon_{\dot{\rho}^i}$: $\dot{\rho}^i$ の観測ノイズ[m/s]

である。

GNSS 単独測位の場合、衛星の時計バイアス及びドリフトは、航法メッセージから得られる衛星時計補正値を用いて消去することができる[15] [16] [17]。電離層遅延及び対流圏遅延はそれぞれモデル補正を施すことで消去でき、さらにこれらの時間変化も小さいことから無視できる。

ここで GNSS システム間時刻バイアス(ISB , Inter-system Bias)について特筆しておく。この値も衛星時計補正値同様に航法メッセージより得られる。例えば GLONASS の場合、GPS 時刻と GLONASS 時刻の差分のうち、1秒未満の値 τ_{GPS} を航法メッセージにて放送している[16]。1秒以上の値は UTC(Coordinated Universal Time)との差分と同義であり、これは GPS の航法メッセージから得ることができる。よって両者をシステム間時刻バイアスに換算することができる。一方、Galileo の場合は1秒未満の値を GGTO(Galileo/GPS Time Offset)として放送している[17]。GPS 時刻と Galileo 時刻の差は1秒未満であるため、GGTO のみを用いることシステム間時刻バイアスを求めることが出来る。また、各 GNSS システム時刻の短期安定度が非常に高いことから、GNSS システム間時刻バイアス変化は無視できる。システム間時刻バイアスを未知数として求めることもあるが[12] [18]、以降で述べる状態ベクトルの要素が増えることを意味するため、最も負荷の小さな時刻バイアスの補償は航法メッセージから補正することである。そのため低コスト GNSS 受信機における時刻バイアス補償方法の有力な手段の一つと考えられる。

以上より、最終的に観測モデルは次式のように単純化できる。

$$\begin{aligned}\rho^i &= \gamma^i + \delta t_u + \epsilon_{\rho^i} \\ \dot{\rho}^i &= \dot{\gamma}^i + \dot{\delta t}_u + \epsilon_{\dot{\rho}^i}\end{aligned}\quad (2.4)$$

GNSS 単独測位における状態ベクトルは次のように定義される。

$$\begin{aligned}\mathbf{x} &= (\mathbf{g}_u, \delta t_u, \dot{\mathbf{g}}_u, \dot{\delta t}_u)^T \\ \mathbf{g}_u &= (x_u, y_u, z_u) \\ \dot{\mathbf{g}}_u &= (\dot{x}_u, \dot{y}_u, \dot{z}_u)\end{aligned}\quad (2.5)$$

ここで、 (x_u, y_u, z_u) と $(\dot{x}_u, \dot{y}_u, \dot{z}_u)$ はそれぞれ ECEF(Earth Centered, Earth Fixed)座標系におけるユーザー位置[m]及び速度[m/s]である。

例えば m 機の衛星から観測データが得られる場合、観測ベクトル \mathbf{z} は次のようになる。

$$\begin{aligned}\mathbf{z} &= (\boldsymbol{\rho}, \dot{\boldsymbol{\rho}})^T \\ \boldsymbol{\rho} &= (\rho^1, \rho^2, \dots, \rho^m) \\ \dot{\boldsymbol{\rho}} &= (\dot{\rho}^1, \dot{\rho}^2, \dots, \dot{\rho}^m)\end{aligned}\quad (2.6)$$

式(2.4)から、観測更新方程式(2.1)における観測モデルベクトル $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ と偏微分係数行列 $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ は次式のように定義できる[12] [20]。

$$\begin{aligned}\mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}) &= (\boldsymbol{\gamma}, \dot{\boldsymbol{\gamma}})^T \\ \boldsymbol{\gamma} &= (\gamma^1 + \delta t_u, \gamma^2 + \delta t_u, \dots, \gamma^m + \delta t_u) \\ \dot{\boldsymbol{\gamma}} &= (\dot{\gamma}^1 + \dot{\delta t}_u, \dot{\gamma}^2 + \dot{\delta t}_u, \dots, \dot{\gamma}^m + \dot{\delta t}_u) \\ \gamma^i &= \|\mathbf{g}^i - \mathbf{g}_u\| \\ \dot{\gamma}^i &= \mathbf{a}_u^i (\dot{\mathbf{g}}^i - \dot{\mathbf{g}}_u)^T \\ \mathbf{g}^i &= (x^i, y^i, z^i) \\ \dot{\mathbf{g}}^i &= (\dot{x}^i, \dot{y}^i, \dot{z}^i) \\ \mathbf{a}_u^i &= \frac{\mathbf{g}^i - \mathbf{g}_u}{\|\mathbf{g}^i - \mathbf{g}_u\|}\end{aligned}\quad (2.7)$$

$$\begin{aligned}\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}) &= \left. \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} \\ &= \begin{pmatrix} \boldsymbol{\alpha} & \\ & \boldsymbol{\alpha} \end{pmatrix} \\ \boldsymbol{\alpha} &= \begin{pmatrix} \mathbf{a}_u^1 & 1 \\ \mathbf{a}_u^2 & 1 \\ \vdots & \\ \mathbf{a}_u^m & 1 \end{pmatrix}\end{aligned}\quad (2.8)$$

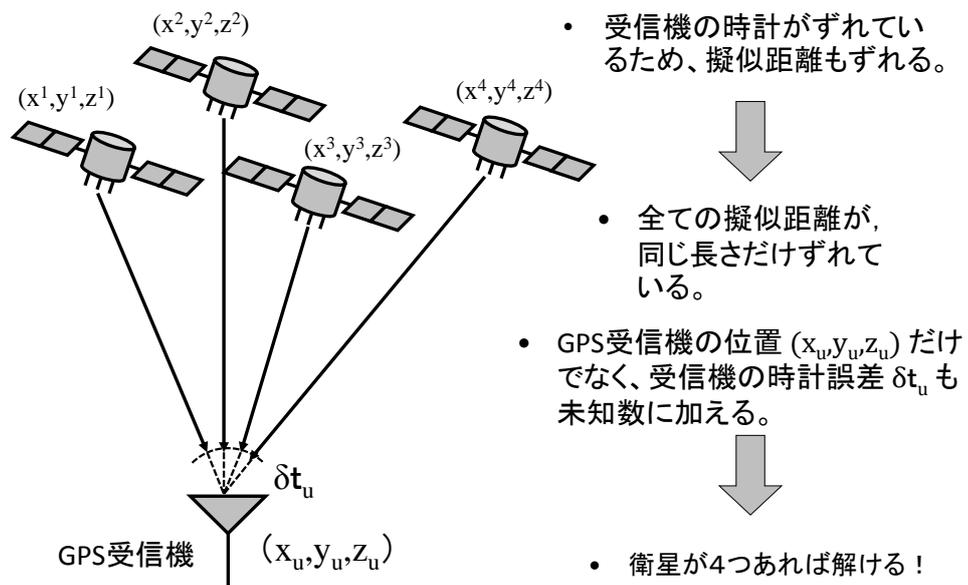


図 2.3 GNSS 単独測位概念図([21]より引用)

2.2 拡張カルマンフィルタにおけるアダプティブ推定

本節では、本稿で採用した観測ノイズのアダプティブ推定法である IAE(Innovation-based Adaptive Estimation)の拡張カルマンフィルタへの適用を導出すると共に、採用を見送った他のアダプティブ推定方法についても紹介する。

2.2.1 イノベーションによる観測ノイズ共分散アダプティブ推定

アダプティブカルマンフィルタの中で最も重要なテクニックの一つが、イノベーションを基に観測ノイズ共分散行列へと適用させるアルゴリズム、IAEである。式(2.1)から、イノベーションシーケンス(Innovation sequence) \mathbf{d}_k は次式のように定義される[22] [23] [24]。

$$\mathbf{d}_k = \mathbf{z}_k - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_k) \quad (2.14)$$

式(2.14)からわかる通り、イノベーションシーケンスは観測ベクトルと状態ベクトル予測値及びその観測システムモデルから得られる。式(2.12)における \mathbf{z}_k を式(2.14)に代入すると次式が得られる。

$$\mathbf{d}_k = \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k)(\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k) + \mathbf{v}_k \quad (2.15)$$

フィルタが最適に動作している場合、イノベーションシーケンス \mathbf{d}_k は白色正規分布に従う。すると両辺の共分散の理論値は次のように定義される[24]。

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{d_k} &= \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k)\mathbf{P}_k\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k)^T + E\{\mathbf{v}_k\mathbf{v}_k^T\} \\ &= \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k)\mathbf{P}_k\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k)^T + \mathbf{R}_k \\ \mathbf{C}_{d_k} &= E\{\mathbf{d}_k\mathbf{d}_k^T\} \end{aligned} \quad (2.16)$$

式(2.16)より、観測ノイズ共分散行列 \mathbf{R} はイノベーションシーケンスを適用することで得られる[23] [24]。

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{R}}_k &= \hat{\mathbf{C}}_{d_k} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k)\mathbf{P}_k\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k)^T \\ \hat{\mathbf{C}}_{d_k} &= \frac{1}{N} \sum_{i=k+N-1}^N \mathbf{d}_i \mathbf{d}_i^T \end{aligned} \quad (2.17)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{C}}_{d_k}$ はイノベーションシーケンスの共分散行列の推定値で、ウィンドウサイズ N の移動平均より算出される。

式(2.1)における \mathbf{R}_k を $\hat{\mathbf{R}}_k$ に置き換えて拡張カルマンフィルタを実行することで、アダプティブ拡張カルマンフィルタを実行することができる。言い換えると、IAEによる拡張カルマンフィルタと従来の拡張カルマンフィルタとの唯一の差異は、観測ノイズ共分散行列のみである。

2.2.2 残差シーケンスによる観測ノイズ共分散アダプティブ推定

本稿では採用を見送ったものの、残差シーケンス(Residual sequence)による観測ノイズ共分散のアダプティブ推定を行った文献も見られる[22]。アダプティブ推定における残差シーケンスは次式で表される。

$$\bar{\mathbf{d}}_k = \mathbf{z}_k - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_k) \quad (2.18)$$

イノベーションシーケンスを表す式(2.15)との違いは、観測更新後の状態ベクトルを用いて算出される点である。式(2.18)の両辺の共分散理論値は次のように表される[25]。

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{\bar{\mathbf{d}}_k} &= E\{\mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^T\} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k) \mathbf{P}_k \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k)^T \\ &= \mathbf{R}_k - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k) \mathbf{P}_k \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k)^T \\ \mathbf{C}_{\mathbf{d}_k} &= E\{\bar{\mathbf{d}}_k \bar{\mathbf{d}}_k^T\} \end{aligned} \quad (2.19)$$

すると、観測ノイズ共分散行列 \mathbf{R} はイノベーションシーケンス同様に残差シーケンスから同得られる。

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{R}}_k &= \hat{\mathbf{C}}_{\bar{\mathbf{d}}_k} + \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k) \mathbf{P}_k \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k)^T \\ \hat{\mathbf{C}}_{\bar{\mathbf{d}}_k} &= \frac{1}{N} \sum_{i=k+N-1}^N \bar{\mathbf{d}}_i \bar{\mathbf{d}}_i^T \end{aligned} \quad (2.20)$$

2.2.3 プロセスノイズ共分散のアダプティブ推定

プロセスノイズ共分散行列 \mathbf{Q} のアダプティブ推定法として、スケーリングが提唱されている[22] [24]。例えばイノベーションシーケンスによるアダプティブ推定を行う場合、観測ノイズ共分散行列 \mathbf{R}_k と時間更新後の状態ベクトル共分散行列 \mathbf{P}_k から、スケーリングファクター \mathbf{a} を次式のように定義する。

$$\mathbf{a} = \frac{\text{trace}\{\hat{\mathbf{C}}_{\mathbf{d}_k} - \mathbf{R}_k\}}{\text{trace}\{\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k) \mathbf{P}_k \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k)^T\}} \quad (2.21)$$

式(2.2)を式(2.21)に代入すれば、次式のように変形できる。

$$a = \frac{\text{trace}\{\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k)(\mathbf{F}_{k-1}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{F}_{k-1}^T + \tilde{\mathbf{Q}}_{k-1})\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k)^T\}}{\text{trace}\{\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k)(\mathbf{F}_{k-1}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{F}_{k-1}^T + \mathbf{Q}_{k-1})\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k)^T\}} \quad (2.22)$$

ここで、 $\tilde{\mathbf{Q}}_k$ はエポック k におけるプロセスノイズ共分散行列の推定値を表している。式(2.21)及び式(2.22)より、スケーリングによるプロセスノイズ共分散行列のアダプティブ推定が得られる。

$$\hat{\mathbf{Q}}_k = \mathbf{Q}_{k-1}\sqrt{a} \quad (2.23)$$

スケーリング係数 a は1より小さくなることも大きくなることもある。さらには1になることもあり得る。このテクニックの意図することは、カルマンフィルタにおける状態ベクトル共分散行列の推定値 \mathbf{P}_k を、イノベーションによる推定値との比較から調整することと考えられる。例えば、1つ前のエポックの共分散行列 \mathbf{P}_{k-1} が信頼できる場合、プロセスノイズを小さくすることで \mathbf{P}_k を小さめの値に、逆にあまり信頼できない場合はプロセスノイズを大きくすることで \mathbf{P}_k を大きめに設定できる。

2.3 都市部走行実験による評価

本節にて、都市部における走行実験からアダプティブ拡張カルマンフィルタの評価を行う。

2.3.1 実験概要

図 2.4 に走行実験の経路及び周囲の状況を表す 3 次元地図画像を示す。図から走行コースが高層ビルに囲まれていることがわかり、LOS 信号が遮られ、NLOS 信号が発生しやすい環境にあると想像される。このような実験環境にて、低コスト GNSS 受信機である古野電気製 GN-8720 から走行経路全 6 周回分の観測生データを収録し、後処理解析にて両拡張カルマンフィルタを実行することで評価を行った。古野電気は[6]にてトップ 10 に数えられる GNSS 受信機メーカーであり、本実験に使用した GN-8720 は代表的な GNSS 受信機と考えられる。なお、前述の通り本研究では IMU 等のセンサー統合を行わないため、観測生データにはいかなるセンサーデータも含まれず、GNSS 観測データのみで構成される。実験の構成を図 2.5 に示す。

実験概要を表 2.1 にまとめている。使用したアンテナ(Taoglas 社製 AA.171.301111)は、一般的に低コスト GNSS 受信機とともに用いられる L1 帯のマルチ GNSS 信号に対応した標準的なものである。このアンテナを実験車両のルーフに設置してデータ収録を行った。また、位置・速度の真値とした Applanix 社製 POS LV の精度はそれぞれ、RMS(Root Mean Square)で cm 及び cm/s レベルであり [26]、本実験の評価においては十分な数値である。

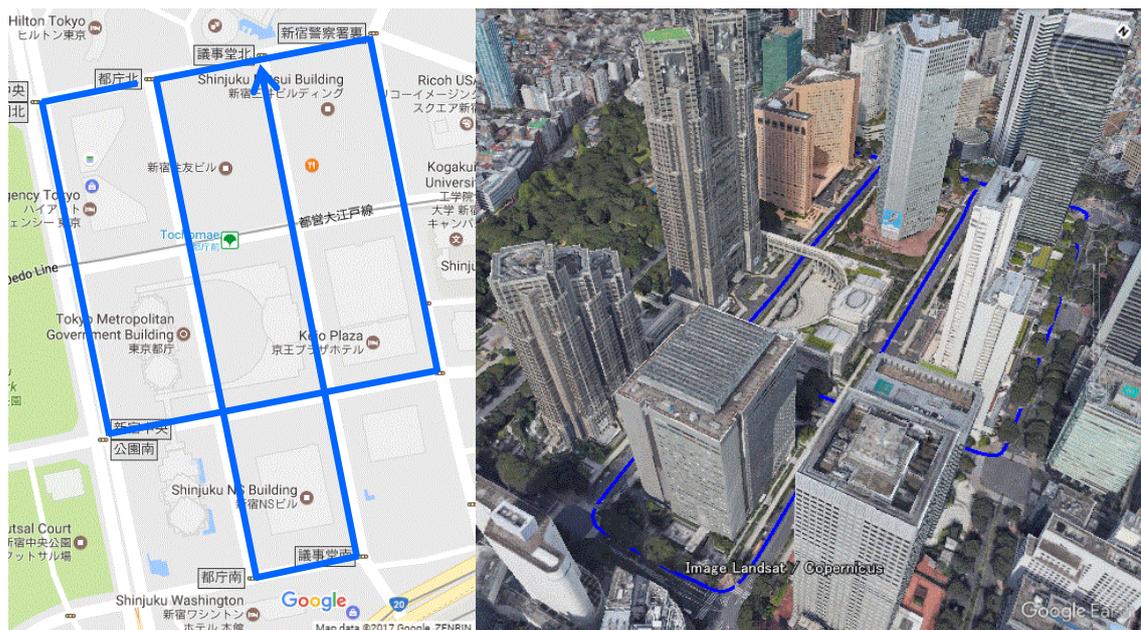


図 2.4 走行コース及び周囲の 3D 地図画像

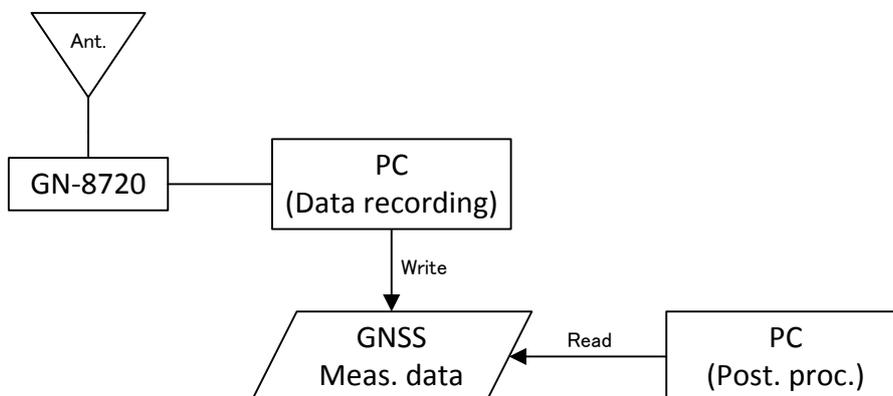


図 2.5 実験の構成

表 2.1 走行実験概要

収録日時	2015/11/9 10:00-18:00(JST)
走行場所	西新宿（都庁周辺）
周回数	6 周
アンテナ種別	Taoglas AA.171.301111
アンテナ設置位置	カールーフ
GNSS 受信機	古野電気製 GN-8720
利用した GNSS システム 及び信号種別	GPS/QZSS L1CA GLONASS L1OF
各種マスク設定	仰角: 5[°] SNR: 33[dB-Hz](GPS/QZSS) 34[dB-Hz](GLONASS)
サンプリングレート	1 Hz
電離層遅延モデル	Klobuchar モデル(GPS 放送モデル[15])
対流圏遅延モデル	Simplified モデル [19]
GNSS 間時刻バイアス	UTC パラメータ[15]及び τ_{GPS} [16]
位置及び速度の真値	Applanix POSLV 520 (Post Proc.)

2.3.2 カルマンフィルタのチューニング

本実験では、両拡張カルマンフィルタにおける式(2.2)における状態ベクトル及び式(2.11)のシステムノイズ共分散行列の初期値を経験的に以下のように設定した。普通自動車が急旋回するなどしても十分に追従可能な値である。

$$\begin{aligned}
\sigma_n &= 3 \\
\sigma_{\dot{n}} &= 1 \\
\mathbf{P}_0 &= \text{diag}(10^2, 10^2, 10^2, 10^2, 1^2, 1^2, 1^2, 1^2)
\end{aligned}
\tag{2.24}$$

式(2.9)の観測ノイズ共分散行列は次式のような SNR[dB-Hz]に対する指数近似式を用いた。近似式の導出は[27]及び[28]を参考にした。

$$\begin{aligned}
\sigma_p(\text{SNR}) &= 0.64 + 784 * e^{-0.142 * \text{SNR}} \\
\sigma_{\dot{p}}(\text{SNR}) &= 0.0125 + 6767 * e^{-0.267 * \text{SNR}}
\end{aligned}
\tag{2.25}$$

従来の拡張カルマンフィルタでは、式(2.17)から得られる値のみを用いて観測ノイズ共分散行列 \mathbf{R} を作成するのに対して、アダプティブ拡張カルマンフィルタはその限りではない。以下でその具体的な方法を述べる。

本研究では、式(2.17)における観測ノイズ共分散行列のアダプティブ推定をウィンドウサイズ $N = 1$ のイノベーションシーケンスに基づく値とした。最も小さなサイズにした理由の一つは、応答性である。NLOSによる観測誤差の変動が非常に速く、測位計算エポック毎の変化が大きいと予想したためである。もう一つの理由は、実機上での動作における処理負荷を減らすためである。本研究では後処理による解析から評価を行うものの、実時間での実行を意識したチューニングを行うことにした。こうしたアダプティブ推定の実行は低コスト受信機にとっても大きなストレスにはならないと考えられる。

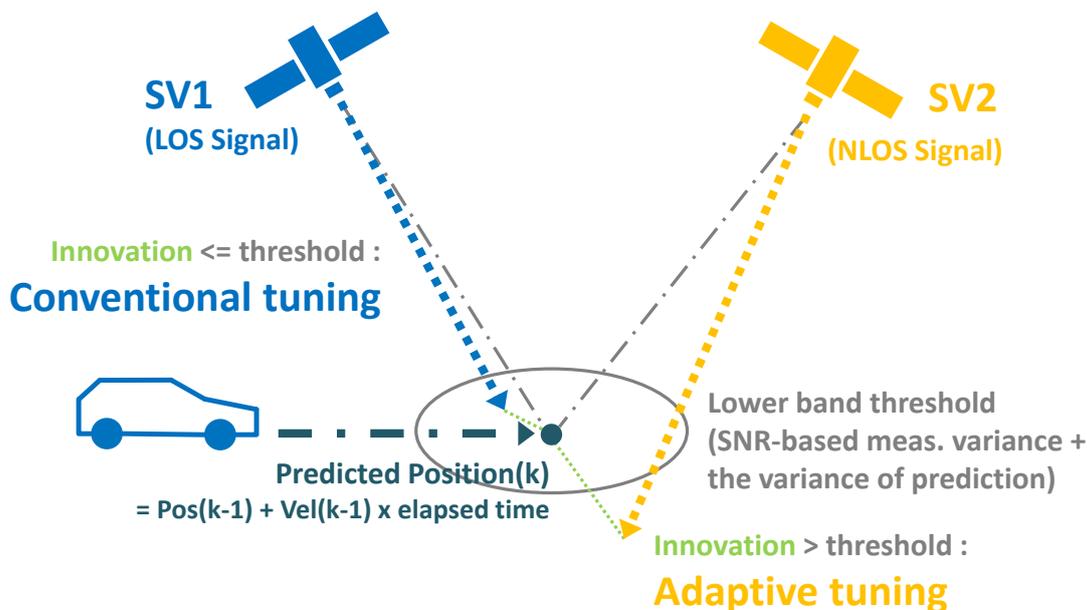


図 2.6 アダプティブ推定概念図

さらに、本研究では式(2.17)によるアダプティブ推定を実行する際に以下の 2 つの制約を設けた。

- (1) 推定した共分散行列は従来の EKF が十分に収束した後にのみ適用する
- (2) 観測ノイズ分散の下限値を式(2.25)の値とする

この 2 つの制約の目的は、LOS 信号に対しては従来の拡張カルマンフィルタと同様の誤差分散を設定し、NLOS 信号にのみアダプティブ推定を施すことである。つまり衛星によって従来通りのカルマンフィルタチューニングかアダプティブ推定にするかを変えるのである。この点が一般的なアダプティブ拡張カルマンフィルタとの大きな差異であり、また改良点である。なお、拡張カルマンフィルタの収束が条件であることから、公平な評価をするため各周回全て収束前の状態からアダプティブ拡張カルマンフィルタの演算を開始している。

図 2.6 にその概念を示す。各衛星信号のイノベーションに閾値を設け、閾値よりも小さければ(図中 SV1)、LOS 信号と判断して従来通りのチューニングを行う。もし閾値を超える場合は(図中 SV2)、NLOS 信号と判断してアダプティブ推定を行う。

具体的な処理フローが図 2.7 である。従来の拡張カルマンフィルタが十分に収束したと判断した後に、式(2.20)から得られるイノベーションから推定した観測ノイズ共分散行列 $\hat{\mathbf{R}}_k$ の各要素と、式(2.9)から得られる共分散行列 \mathbf{R}_k の各要素を比較する。前者の方が大きい場合にのみアダプティブ推定から得られる分散を観測ノイズ共分散行列の要素とし、それ以外の場合は行列 \mathbf{R}_k の各要素をそのまま用いることで最終的に拡張カルマンフィルタ演算に用いるアダプティブ推定による観測ノイズ共分散行列 $\hat{\mathbf{R}}_k$ を作成する。そのため閾値は衛星毎に異なる値となる。

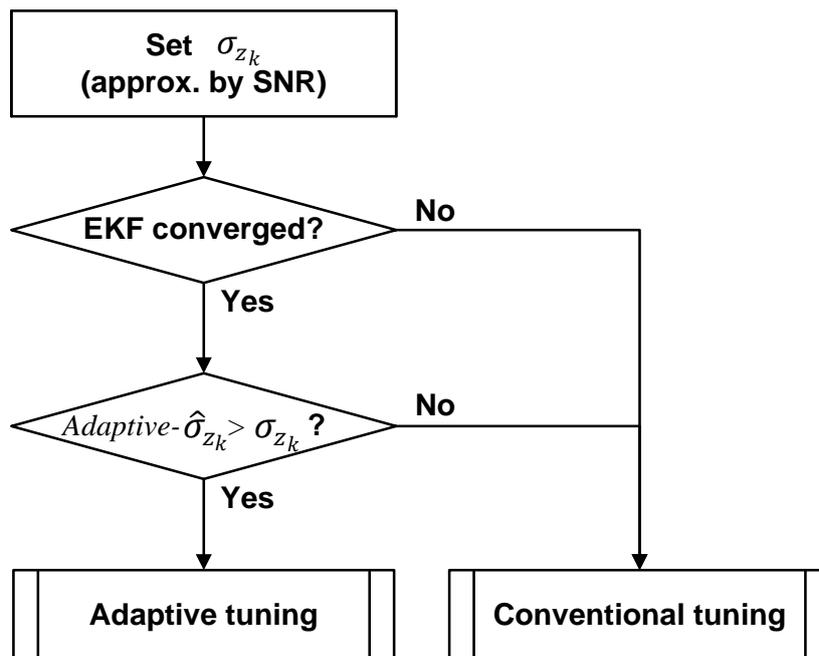


図 2.7 観測ノイズアダプティブ推定の処理フロー

一方で、本研究ではプロセスノイズ共分散行列 Q のアダプティブ推定は行わず、一定値とした。これは 2.2.3 節で示したスケーリングによる効果を得るには、大きめのウィンドウサイズによる移動平均を施す必要があるためである[22]。これは実時間における推定や NLOS 信号に対して不向きと考えたためである。

2.3.3 位置誤差比較

図 2.8 及び図 2.9 はそれぞれ、従来の拡張カルマンフィルタ及びアダプティブ拡張カルマンフィルタによる水平方向の測位結果を示している。どちらの図も原点は走行経路のスタート地点を表していて、全 6 周回分の航跡を描いている。繰り返しになるが、これら測位結果は GNSS 受信機 GN-8720 が出力したものではなく、本章で示した双方の拡張カルマンフィルタ演算により得られてものである。

比較から、アダプティブ拡張カルマンフィルタにて測位誤差が劇的に改善していることがわかる。図 2.8 の従来の拡張カルマンフィルタでは、全周回の結果において大きな位置誤差や航跡の揺れや乱れが見られるのに対して、アダプティブ拡張カルマンフィルタはそのような位置誤差を抑制していることがわかる。また何より、非常に滑らかな航跡が得られている。

同様の改善は高さ方向の測位結果にも見られる。図 2.10 及び図 2.11 はそれぞれ、従来の拡張カルマンフィルタ及びアダプティブ拡張カルマンフィルタにおける高さ方向の位置誤差を示している。従来の拡張カルマンフィルタによる結果にはやはり大きな誤差が発生しているのに対して、アダプティブ拡張カルマンフィルタにてそれが大幅に抑制されていることがわかる。

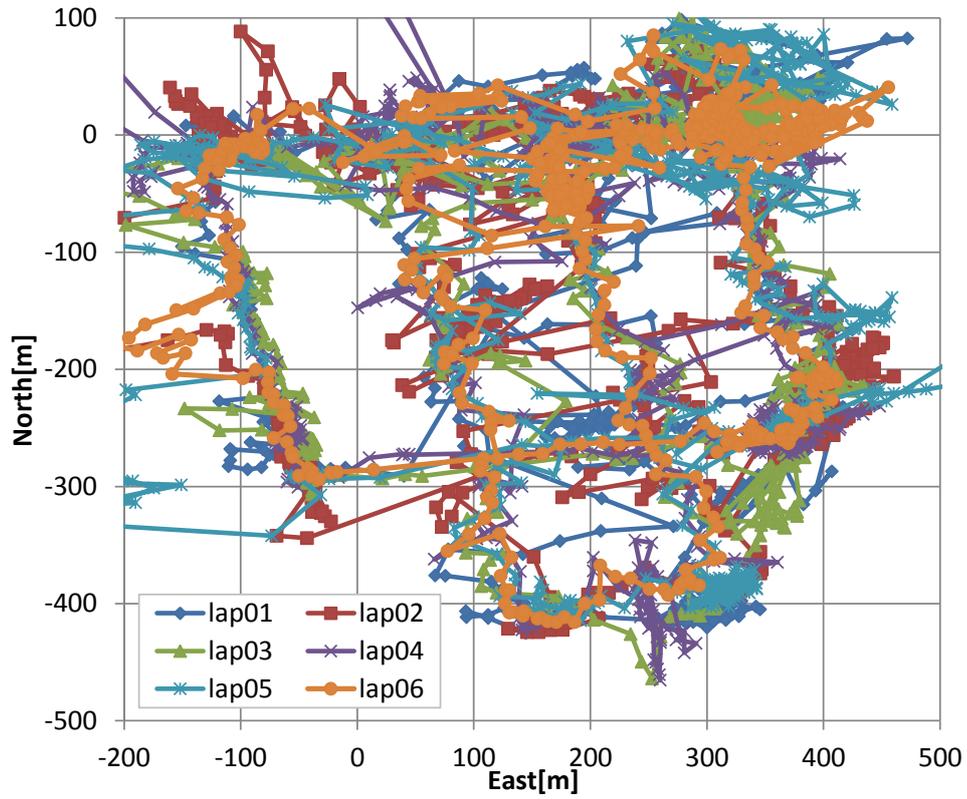


図 2.8 従来の拡張カルマンフィルタによる水平方向測位結果

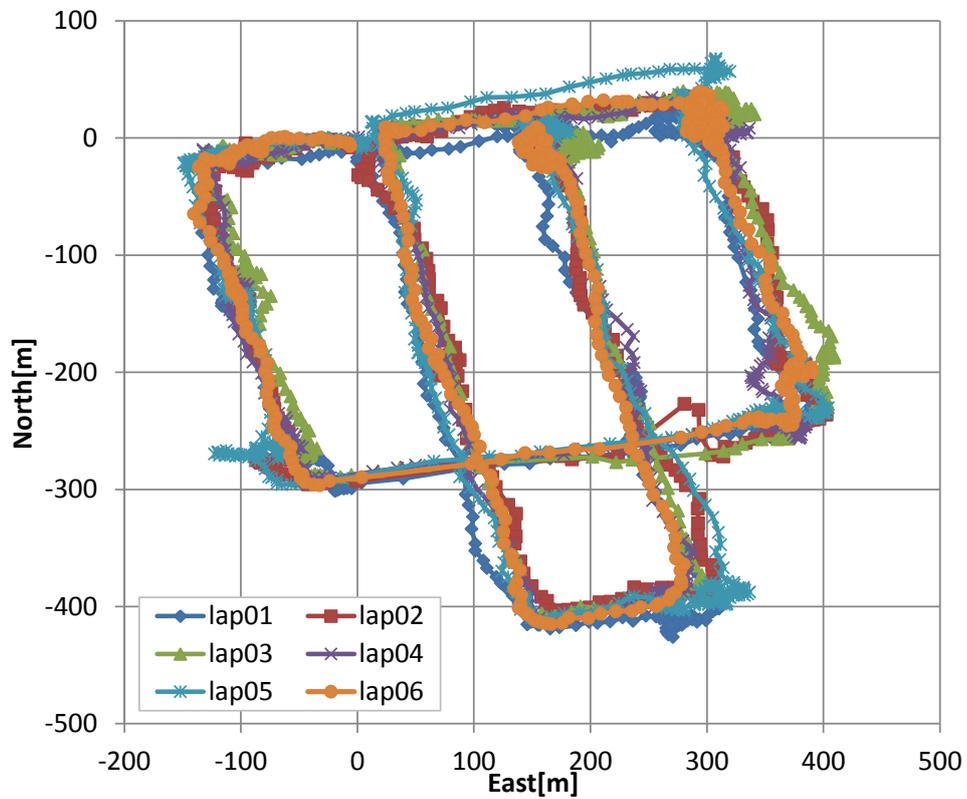


図 2.9 アダプティブ拡張カルマンフィルタによる水平方向測位結果

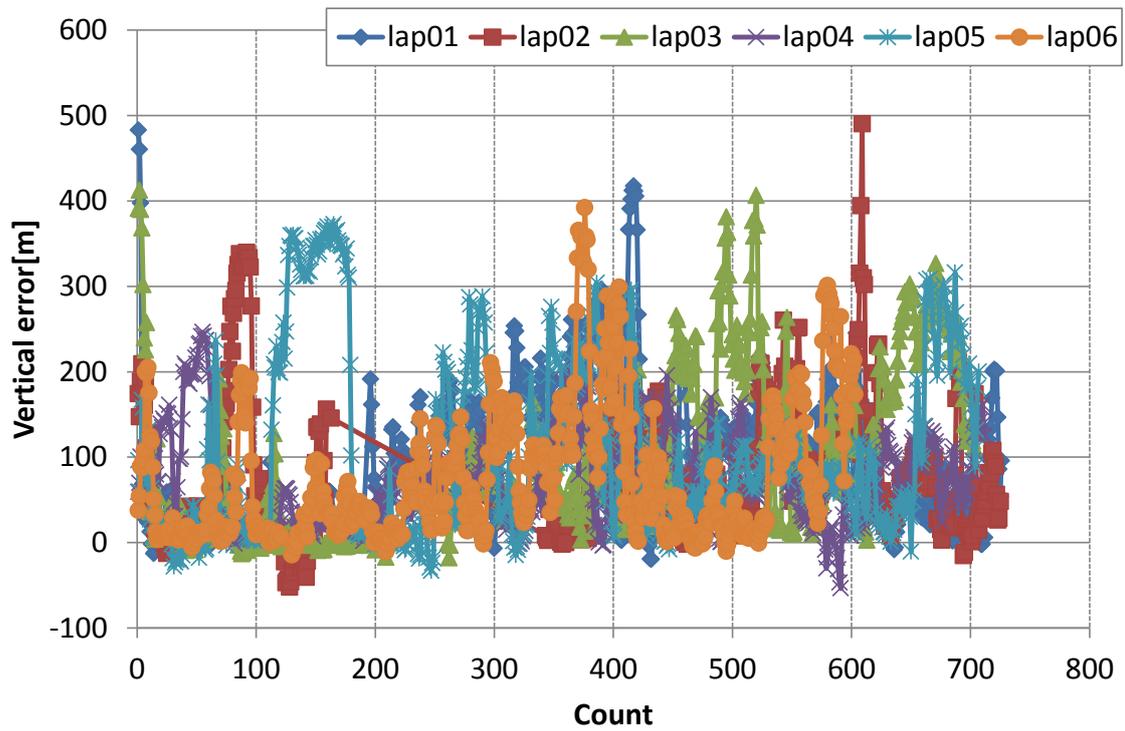


図 2.10 従来の拡張カルマンフィルタによる高さ方向位置誤差

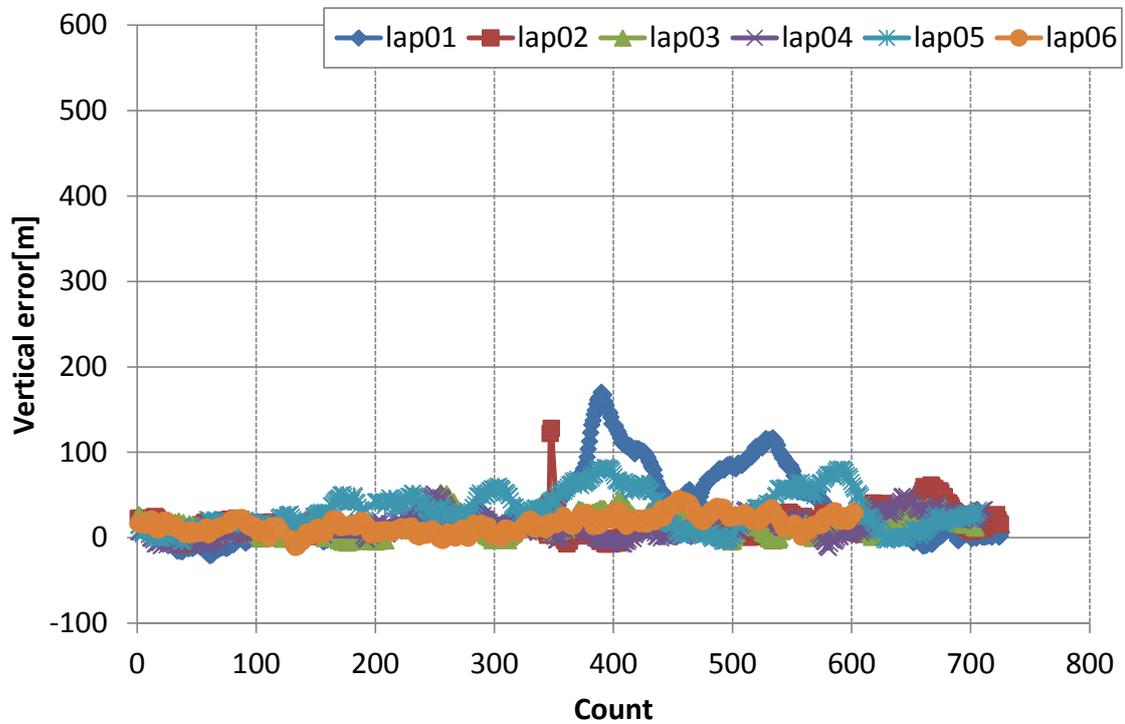


図 2.11 アダプティブ拡張カルマンフィルタによる高さ方向位置誤差

水平方向及び高さ方向の位置誤差の累積度数分布をそれぞれ図 2.12 に示す。これらの図からもアダプティブ拡張カルマンフィルタの誤差低減への寄与が見て取れる。表 2.2 に各統計値をまとめている。例として水平方向の位置誤差に着目する。1 σ 相当の誤差を表す 68.27% の位置誤差累積度数を比較すると、従来の拡張カルマンフィルタが 46.7m であるのに対して、アダプティブ拡張カルマンフィルタにて 15.9m までに抑えられる。また、確度を表す誤差の平均を比較すると、従来の拡張カルマンフィルタが 13.35m であるのに対して、アダプティブ拡張カルマンフィルタでは 2.50m となっている。他にも、2 σ 相当の誤差を表す 95.45% や誤差の最大値を表す 100% の累積度数を比較しても同様にアダプティブ拡張カルマンフィルタによる改善が見られる。

前述の通り、両拡張カルマンフィルタの唯一の差異は観測ノイズの共分散行列である。アダプティブ推定自体は非常にシンプルな処理であるにもかかわらず、その効果は絶大で GNSS 単独測位の位置誤差が劇的に改善されることがわかった。

表 2.2 位置誤差統計値まとめ

		Mean error[m]	Error at 68.27% [m]	Error at 95.45% [m]	Error at 100% [m]
Horizontal	Adaptive EKF	2.50	15.9	36.6	85.0
	Conventional EKF	13.35	46.7	141.6	290.0
Vertical	Adaptive EKF	21.44	23.9	70.6	170.0
	Conventional EKF	88.89	109.6	272.9	490.2

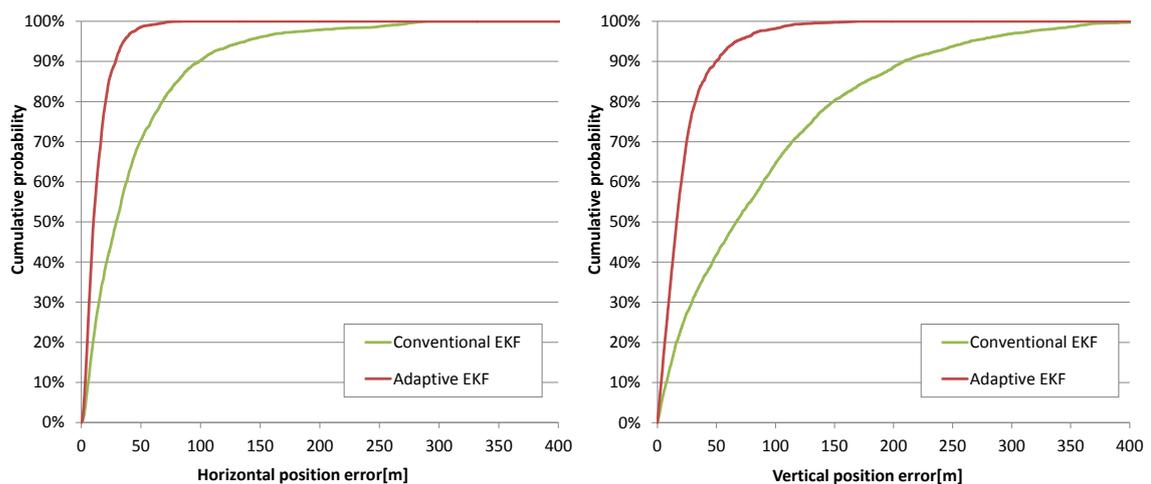


図 2.12 位置誤差累積度数分布（左側：水平方向、右側高さ方向）

2.3.4 速度誤差比較

図 2.14 と図 2.15 はそれぞれ、従来の拡張カルマンフィルタ及びアダプティブ拡張カルマンフィルタによる 3 次元方向の速度計算誤差を示している。こちらも位置誤差同様に観測ノイズのアダプティブ推定により速度誤差が改善されていることがわかる。両拡張カルマンフィルタによる速度計算結果の累積度数分布を図 2.13 に示す。水平方向、高さ方向共にアダプティブ拡張カルマンフィルタによる改善傾向が伺える。表 2.3 にまとめた統計値も同様で、速度推定の確度、精度共にアダプティブ推定による改善が見られる。

繰り返しになるが、両カルマフィルタの唯一の差異は観測ノイズ共分散行列である。その唯一の差異が速度誤差低減においても非常に大きく寄与することが示された。

表 2.3 速度誤差統計値まとめ

		Mean error[m/s]	Error at 68.27%[m/s]	Error at 95.45%[m/s]	Error at 100%[m/s]
Horizontal	Adaptive EKF	0.010	0.12	0.73	6.92
	Conventional EKF	0.027	0.16	1.39	15.80
Vertical	Adaptive EKF	0.033	0.16	1.07	11.63
	Conventional EKF	0.146	0.23	2.19	-16.91

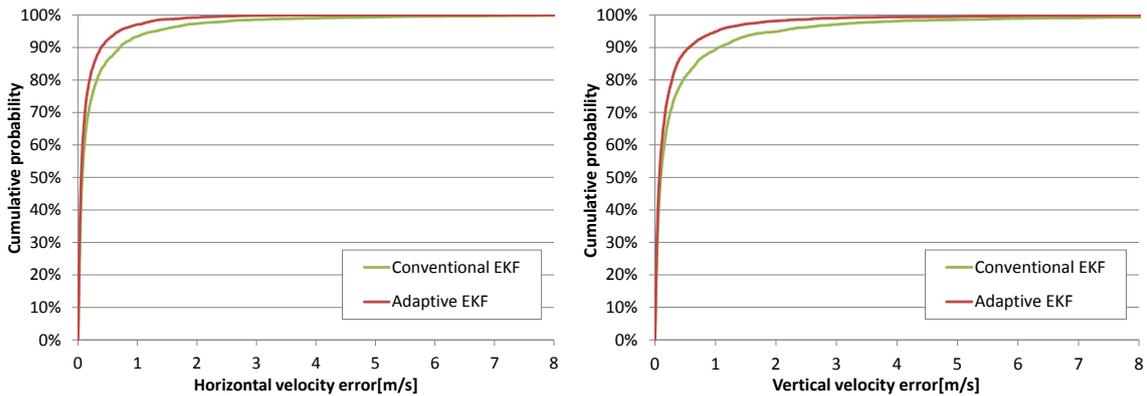


図 2.13 速度誤差累積度数分布 (左側：水平方向、右側高さ方向)

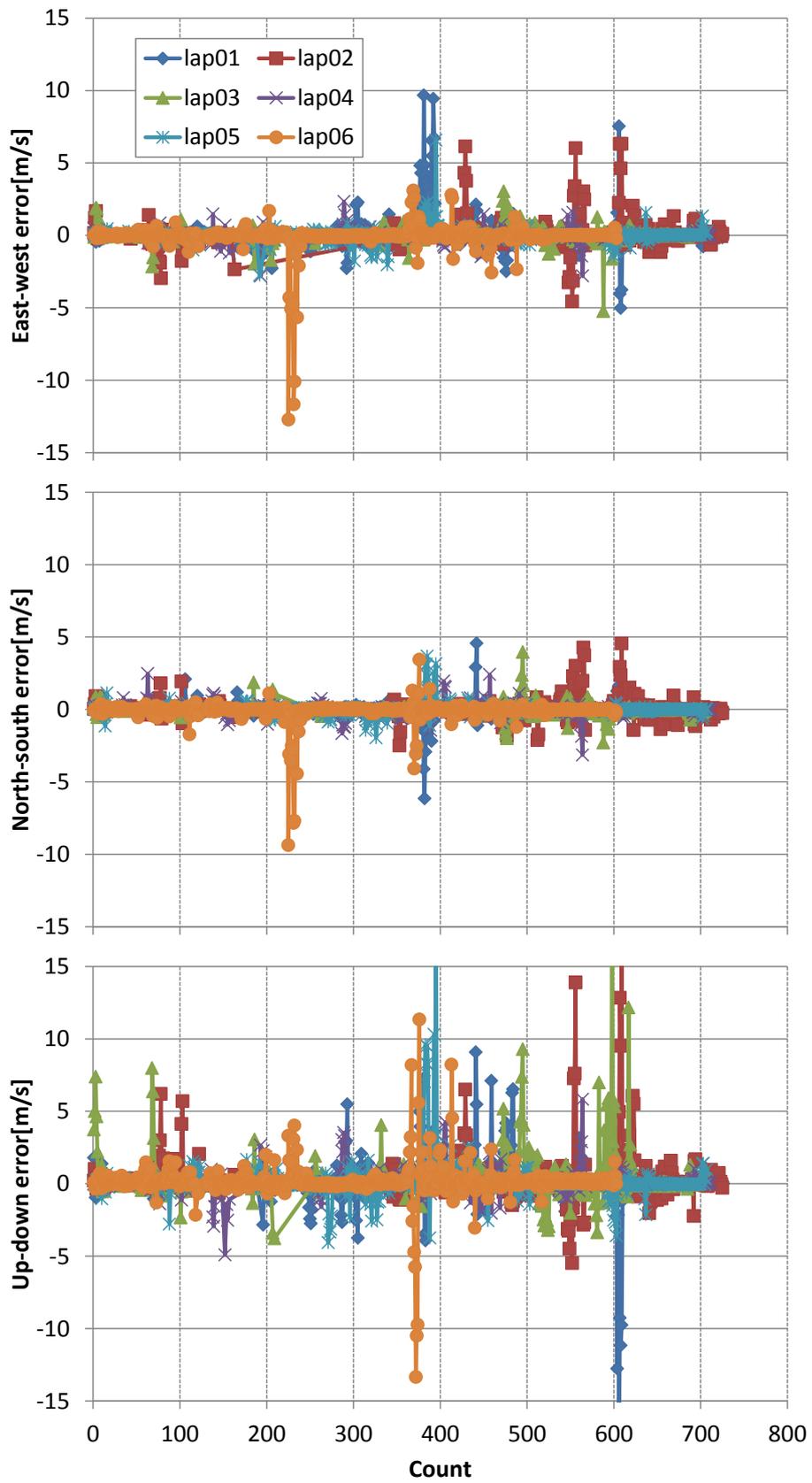


図 2.14 従来の拡張カルマンフィルタによる3次元速度誤差

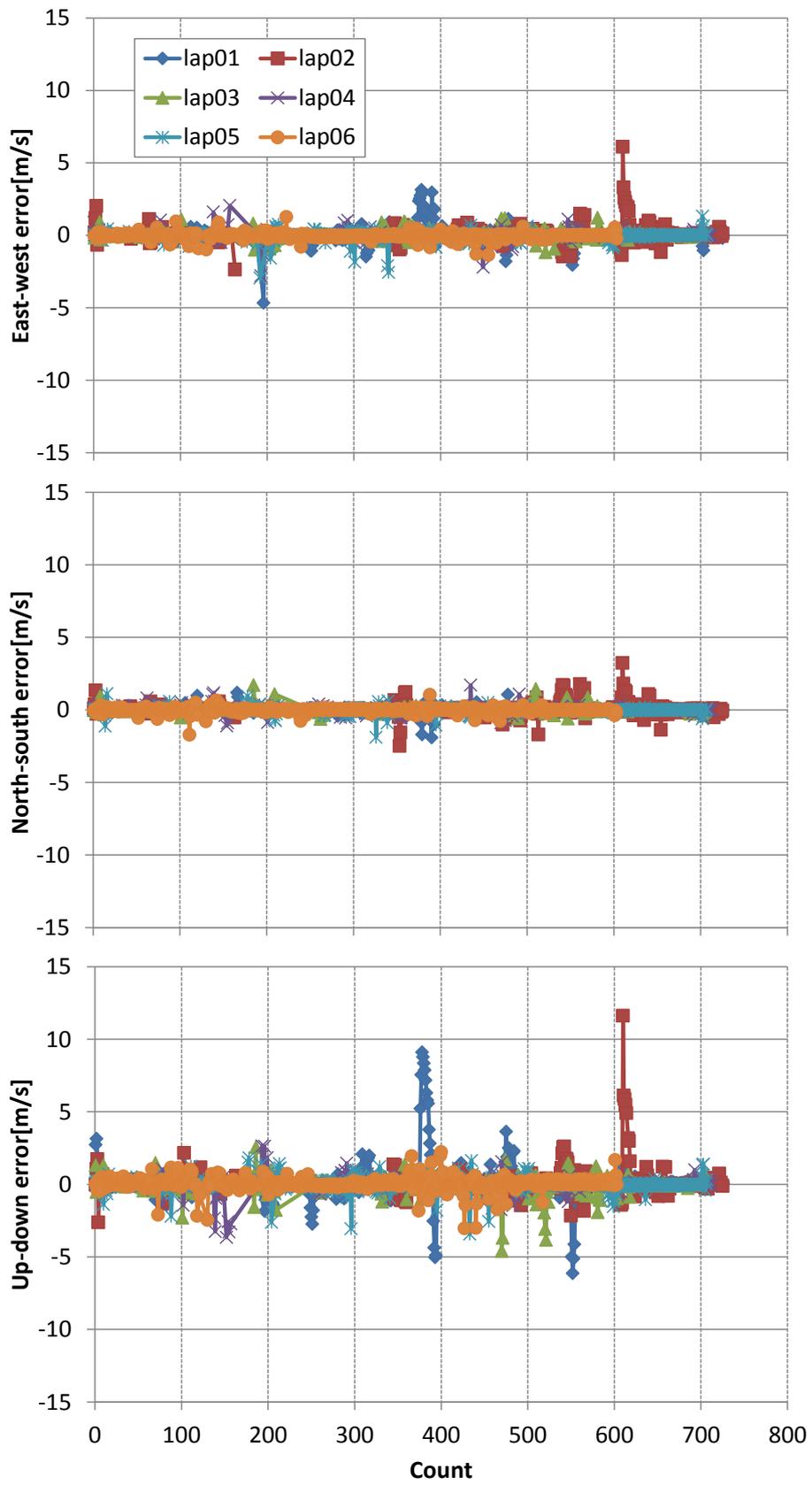


図 2.15 アダプティブ拡張カルマンフィルタによる3次元速度誤差

2.4 本章のまとめ

本章では、従来の拡張カルマンフィルタ及びアダプティブ拡張カルマンフィルタによるGNSS単独測位アルゴリズムを導出し、都市部における走行実験より得たGNSS観測データに対して、後処理にて両拡張カルマンフィルタを実行することで評価した。

アダプティブ拡張カルマンフィルタと従来の拡張カルマンフィルタとの差異は、観測ノイズ共分散行列のみであった。しかしながら、この唯一の差異により都市部における位置及び速度計算が大幅に改善されることがわかった。なお、本研究の評価対象ではなかったものの、受信機の時計バイアス及びドリフトの推定結果もアダプティブ拡張カルマンフィルタにより改善されると考えられる。なぜなら、本章で導出した拡張カルマンフィルタの状態ベクトルは、ユーザーの位置、速度、受信機時計バイアス及びドリフトから構成されるためである。このことを踏まえれば、アダプティブ拡張カルマンフィルタは、都市部のGNSS単独測位によるPVT(Position, Velocity, and Time)推定結果の改善に大きく寄与するものと結論付けることが出来る。

アダプティブ拡張カルマンフィルタはIMU等のセンサー統合との相性がよいためか、センサーを用いた研究は散見される。しかしながら、GNSS信号のみを用いることは稀で、さらに位置だけでなくPVT全てに寄与する点は本章より得られた新たな知見であると認識している。なお、本稿ではそのような状況には陥らなかったものの、状態ベクトルの予測値が大きな誤差を持ち、意図通りにアダプティブ推定ができない事態も考えられる。そのような場合は視野内衛星全てが大きな観測誤差を持つと判断してしまうことが予想される。また、擬似距離やドップラーシフトの観測残差の2乗和からも明らかな異常が認められると考えられる。そのため実環境においては、リカバーリーのためのフィルタリセットも思慮する必要がある。

それでもなお、アダプティブ拡張カルマンフィルタの効果は高く、さらに処理自体は非常にシンプルで低コストGNSS受信機でも十分に実時間での動作が可能な手法である。よって本章で示した単独測位によるPVTの精度および確度の向上は、いかなるGNSS受信機においても実施可能で、都市部のGNSS単独測位性能改善のための手法として提案できるものとする。

付録：周回毎の位置及び速度誤差まとめ

表 2.4 及び表 2.5 に周回毎の水平方向及び高さ方向の位置誤差統計値まとめを示す。全ての周回においてアダプティブ拡張カルマンフィルタによる性能の改善が見られた。

表 2.4 各周回の水平方向位置誤差統計値まとめ

		Mean error[m]	Error at 68.27%[m]	Error at 95.45%[m]	Error at 100%[m]
Lap01	Adaptive EKF	9.58	21.1	39.8	60.3
	Conventional EKF	15.01	43.4	112.5	272.4
Lap02	Adaptive EKF	2.43	11.9	30.4	82.6
	Conventional EKF	3.40	45.8	163.3	264.2
Lap03	Adaptive EKF	10.20	16.4	32.9	47.6
	Conventional EKF	30.62	53.0	137.0	169.4
Lap04	Adaptive EKF	2.43	9.0	22.1	40.2
	Conventional EKF	7.46	37.5	96.8	179.5
Lap05	Adaptive EKF	3.71	21.8	58.2	85.0
	Conventional EKF	7.66	68.2	265.3	290.0
Lap06	Adaptive EKF	7.27	11.0	23.1	46.4
	Conventional EKF	19.25	35.4	104.1	202.1

表 2.5 各周回の高さ方向位置誤差統計値まとめ

		Mean error[m]	Error at 68.27%[m]	Error at 95.45%[m]	Error at 100%[m]
Lap01	Adaptive EKF	32.61	38.9	114.5	170.0
	Conventional EKF	90.45	120.4	244.6	482.5
Lap02	Adaptive EKF	17.53	20.7	41.3	127.8
	Conventional EKF	77.04	97.6	251.1	490.2
Lap03	Adaptive EKF	15.48	21.1	34.2	52.7
	Conventional EKF	97.46	122.2	284.7	412.1
Lap04	Adaptive EKF	13.23	18.4	40.0	51.2
	Conventional EKF	75.88	97.2	184.6	246.3
Lap05	Adaptive EKF	31.76	42.9	73.7	82.4
	Conventional EKF	110.82	130.2	333.7	372.4
Lap06	Adaptive EKF	15.83	20.2	34.8	45.8
	Conventional EKF	77.37	97.8	251.1	392.0

表 2.6 と表 2.7 に周回毎の水平方向及び高さ方向の速度誤差統計値まとめを示す。こちらも全ての周回においてアダプティブ拡張カルマンフィルタによる性能の改善が見られた。

表 2.6 各周回の水平方向速度誤差統計値まとめ

		Mean error[m/s]	Error at 68.27%[m/s]	Error at 95.45%[m/s]	Error at 100%[m/s]
Lap01	Adaptive EKF	0.022	0.13	1.09	4.67
	Conventional EKF	0.091	0.17	1.96	9.10
Lap02	Adaptive EKF	0.065	0.18	1.29	6.92
	Conventional EKF	0.093	0.31	2.04	11.63
Lap03	Adaptive EKF	0.034	0.10	0.65	1.75
	Conventional EKF	0.053	0.15	1.13	-4.59
Lap04	Adaptive EKF	0.002	0.10	0.58	2.81
	Conventional EKF	0.014	0.14	1.01	-3.65
Lap05	Adaptive EKF	0.027	0.09	0.60	2.98
	Conventional EKF	0.012	0.13	1.06	-3.44
Lap06	Adaptive EKF	0.028	0.13	0.55	1.79
	Conventional EKF	0.146	0.15	1.43	-3.03

表 2.7 各周回の高さ方向速度誤差統計値まとめ

		Mean error[m/s]	Error at 68.27%[m/s]	Error at 95.45%[m/s]	Error at 100%[m/s]
Lap01	Adaptive EKF	0.094	0.19	2.04	10.50
	Conventional EKF	0.026	0.22	2.63	-16.91
Lap02	Adaptive EKF	0.085	0.21	1.32	7.79
	Conventional EKF	0.251	0.34	2.44	15.32
Lap03	Adaptive EKF	-0.019	0.16	0.98	5.72
	Conventional EKF	0.296	0.25	2.94	16.86
Lap04	Adaptive EKF	0.007	0.11	0.70	4.22
	Conventional EKF	0.077	0.18	1.40	5.83
Lap05	Adaptive EKF	-0.011	0.15	0.96	7.28
	Conventional EKF	0.108	0.19	1.66	15.57
Lap06	Adaptive EKF	0.052	0.20	0.88	15.80
	Conventional EKF	0.144	0.26	1.66	-13.35

付録：シミュレータ信号による副作用の有無の確認

本章で導出したアダプティブ拡張カルマンフィルタは都市部における性能改善を目的としたものであったが、観測誤差の大きいと思われる衛星観測値に対してのみアダプティブ推定を適用する手法であることから、例えばオープンスカイのような NLOS 信号がまず見られない環境において大きな副作用はみられないと考えている。それを確かめるため、Spirent 社製 GNSS シミュレータ GSS7700 の信号による実験を行ったため、ここに記載しておく。

実験に用いたシミュレータ及びシナリオの概要を表 2.8 にまとめている。兵庫県西宮市にある西宮浜における走行データを模して[29]を参考にシミュレータシナリオを作成し、2.3.1 節同様の受信機設定にて両拡張カルマンフィルタを比較した。

表 2.8 シミュレータシナリオ概要

日時	2018/2/18 01:40-02:00(UTC)
走行場所	西宮浜（兵庫県西宮市）
出力端信号レベル	-125dBm（全衛星同一）
マスク仰角	5°
GNSS システム及び信号種別	GPS L1CA
その他の設定	デフォルト値（シナリオ All_Defaults と同様）

図 2.16 は水平方向の測位結果である。両拡張カルマンフィルタの結果がほぼ一致しているため、プロットからは大きな差異を認めることができない。高さ方向も含めた位置推定結果の統計値を表 2.9 にまとめている。以上の結果より、位置推定結果について大きな副作用はないことが確認できた。

一方、速度推定結果の統計値を表 2.10 にまとめているが、アダプティブ拡張カルマンフィルタにいくつか外れ値が見られた。そのため、統計値では若干の劣化がある。この点は都市部以外の環境におけるアダプティブ推定利用の課題として挙げられる。しかしながら NLOS 誤差と比べると誤差のオーダーは小さく、速度推定においても大きな副作用はないものと考えている。

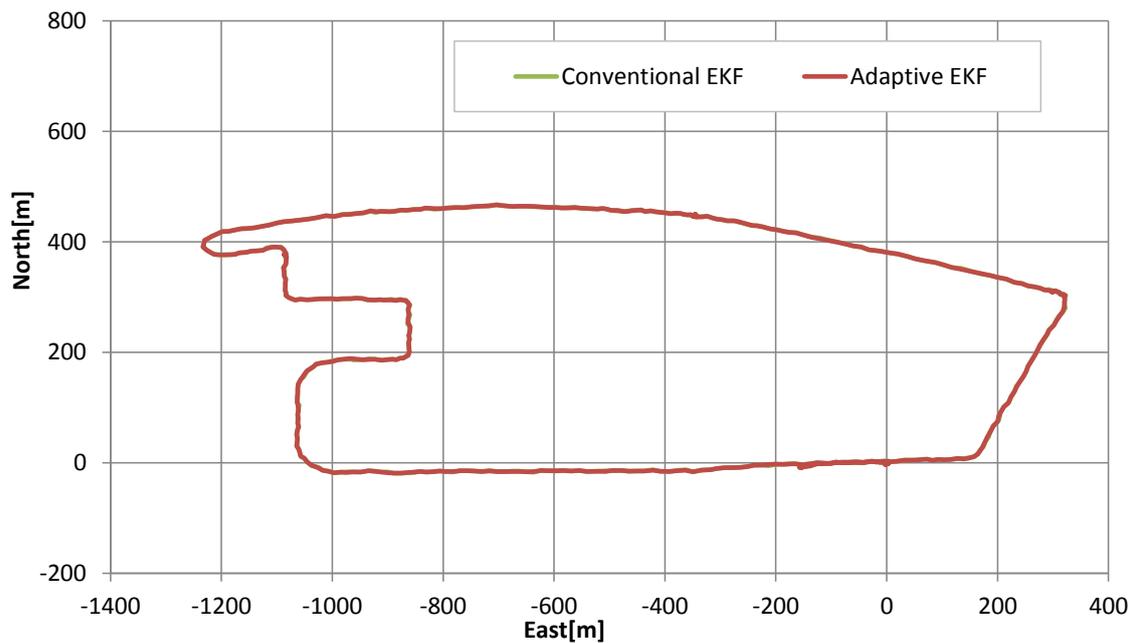


図 2.16 シミュレータ信号による水平方向測位結果

表 2.9 シミュレータ実験位置誤差統計値まとめ

		Average[m]	StDev[m]	Max/Min[m]
Horizontal	Adaptive EKF	0.177	0.78	4.27
	Conventional EKF	0.199	0.86	5.87
Vertical	Adaptive EKF	1.707	1.60	7.64
	Conventional EKF	1.430	1.81	-8.63

表 2.10 シミュレータ実験速度誤差統計値まとめ

		Average[m/s]	StDev[m/s]	Max/Min[m/s]
Horizontal	Adaptive EKF	0.001	0.08	1.75
	Conventional EKF	0.002	0.02	0.13
Vertical	Adaptive EKF	-0.002	0.04	0.64
	Conventional EKF	-0.002	0.02	0.18

第3章 NLOS 信号追尾に起因する観測誤差と測位誤差の関係性に

関する考察

本章では、都市部における擬似距離及びドップラーシフト観測データに重畳される NLOS 信号追尾に起因する誤差（以下 NLOS 観測誤差）を抽出する方法を導出し、それらと GNSS 単独測位から得られる位置及び速度誤差との関係性について考察する。

3.1 NLOS 観測誤差の抽出

本節ではまず NLOS 観測誤差の抽出法を示し、シミュレータ実験により効果を立証する。

3.1.1 NLOS 観測誤差抽出法

NLOS 観測誤差の抽出のために、高仰角に位置する衛星信号とそれ以外の衛星信号との衛星間一重差を用いる。例えば高仰角に位置する衛星を準天頂衛星 QZSS とすれば、それ以外の衛星 i との衛星間一重差の残差は次式より表される。

$$\begin{aligned}\Delta\rho_{(residual)}^{QZSS,i} &= (\rho^i - \rho^{QZSS}) - (\gamma_{(true)}^i - \gamma_{(true)}^{QZSS}) \\ \Delta\dot{\rho}_{(residual)}^{QZSS,i} &= (\dot{\rho}^i - \dot{\rho}^{QZSS}) - (\dot{\gamma}_{(true)}^i - \dot{\gamma}_{(true)}^{QZSS})\end{aligned}\quad (3.1)$$

ここで、 ρ^{QZSS} と $\dot{\rho}^{QZSS}$ はそれぞれ準天頂衛星の擬似距離及びドップラーシフト観測値である。また、 $r_{(true)}$ と $\dot{\gamma}_{(true)}$ はそれぞれ衛星とユーザー間の幾何距離とその変化率で、航法メッセージにて放送される衛星軌道情報であるエフェメリスと、ユーザー位置及び速度の真値とした POS LV[26]の結果から算出される。

いま、衛星 i の観測値に NLOS 観測誤差、 δ_{NLOS} 及び $\dot{\delta}_{NLOS}$ が存在すると仮定すると、式(2.4)を次式のように変形できる。

$$\begin{aligned}\rho^i &= \gamma^i + \delta t + \delta_{NLOS}^i + \epsilon_{\rho^i} \\ \dot{\rho}^i &= \dot{\gamma}^i + \dot{\delta} t + \dot{\delta}_{NLOS}^i + \epsilon_{\dot{\rho}^i}\end{aligned}\quad (3.2)$$

なお、準天頂衛星のように高仰角に位置する衛星信号は LOS 信号を追尾していると仮定し、 $\delta_{NLOS}^{QZSS} \equiv 0$ and $\dot{\delta}_{NLOS}^{QZSS} \equiv 0$ とする。

$$\begin{aligned}\rho^{QZSS} &= \gamma^{QZSS} + \delta t + \epsilon_{\rho^{QZSS}} \\ \dot{\rho}^{QZSS} &= \dot{\gamma}^{QZSS} + \dot{\delta} t + \epsilon_{\dot{\rho}^{QZSS}}\end{aligned}\quad (3.3)$$

式(3.2)及び式(3.3)を式(3.1)に代入すると次のようになる。

$$\begin{aligned}\Delta\rho_{(residual)}^{QZSS,i} &= \delta_{NLOS}^i + \epsilon_{\Delta\rho^{QZSS,i}} \\ \Delta\dot{\rho}_{(residual)}^{QZSS,i} &= \dot{\delta}_{NLOS}^i + \epsilon_{\Delta\dot{\rho}^{QZSS,i}}\end{aligned}\quad (3.4)$$

式(3.4)を用いれば、衛星*i*の NLOS 観測誤差を直接参照できると考えられる。

本節で導出した抽出法は、図 3.1 のような状況を仮定している。例えば準天頂衛星のように、高仰角に位置する衛星の場合は LOS 信号を追尾していると仮定したものである。もし、衛星*i*に NLOS 観測誤差が重畳されない、すなわち LOS 信号を追尾できている場合、式(3.4)からはノイズ成分のみ得られることになる。



図 3.1 NLOS 誤差抽出の概念図

3.1.2 シミュレータ実験による立証

前節で示した NLOS 観測誤差抽出法の効果を確認するため、Spirent 社製 GNSS シミュレータ GSS7700 の信号に NLOS 誤差を重畳させ、古野電気製 GN-8720 から観測生データを収録し、正しい観測誤差が抽出できるか確認する。表 2.1 及び図 3.2～図 3.4 は実験に用いたシミュレータシナリオの概要である。シナリオの作成は[29]を参考にした。式(3.4)では準天頂衛星 QZSS を基準としたが、ここでは最高仰角に位置した PRN.1 を基準に一重差を算出した。他の受信機

の設定等は全て前章の実験と同様である。

なお、評価のためにシミュレータでは NLOS 擬似距離誤差と NLOS ドップラー誤差に一定値を設定したが、同一のシナリオで同時に両者を設定することは不可能であった。つまり、一定の NLOS 擬似距離誤差を重畳させる場合にはドップラー誤差は設定不可で、また一定の NLOS ドップラー誤差を重畳させる場合は相応に擬似距離誤差が変化する。そのため擬似距離評価とドップラー評価のため2つのシナリオを作成し、2回に分けてデータ収録を行った。

表 3.1 シミュレータシナリオ概要

日時	2016/8/1 00:00-00:30(UTC)
アンテナ座標	緯度: 35.0° 経度: 134.0° 高度: 0m
GNSS システム及び信号種別	GPS L1CA
出力端信号レベル	-125[dBm]
マスク仰角	5°
NLOS 擬似距離誤差	PRN.13: 100m PRN.23: 200m その他: 0m
NLOS ドップラーシフト誤差	PRN.13: -0.9515m/s (-5Hz) PRN.23: -1.9029m/s (-10Hz) その他: 0m
その他の設定	デフォルト値 (シナリオ All_Defaults と同様)

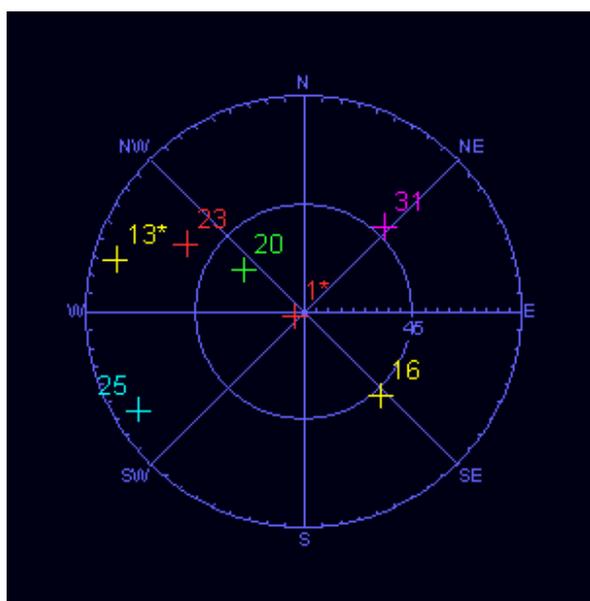


図 3.2 開始時刻におけるスカイプロット

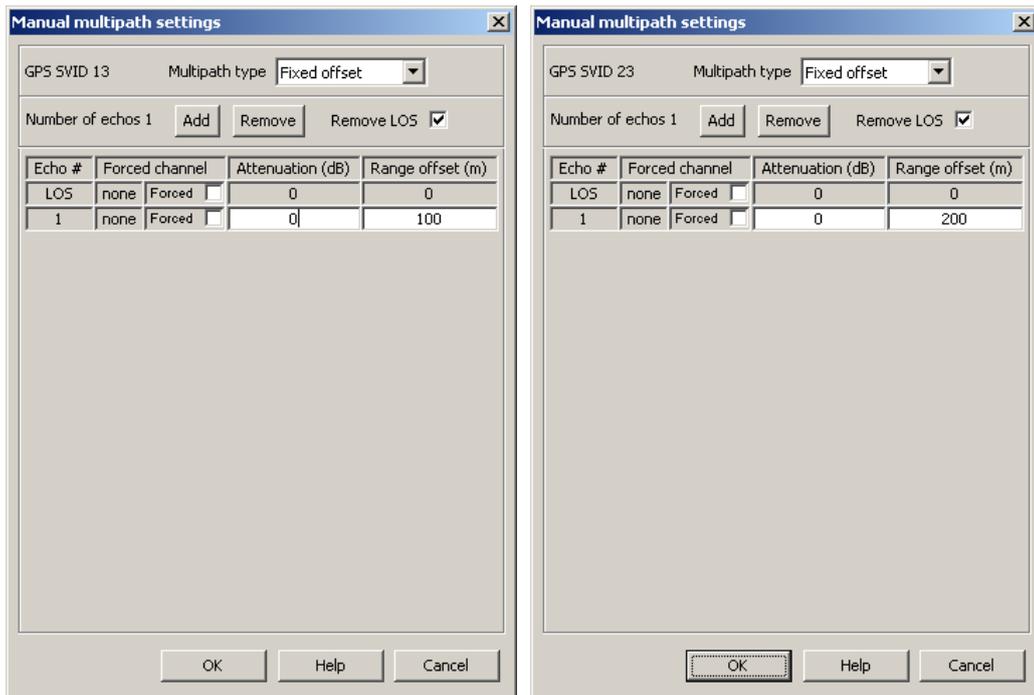


図 3.3 NLOS 擬似距離誤差設定画面 (左側 : PRN.13、右側 : PRN.23)

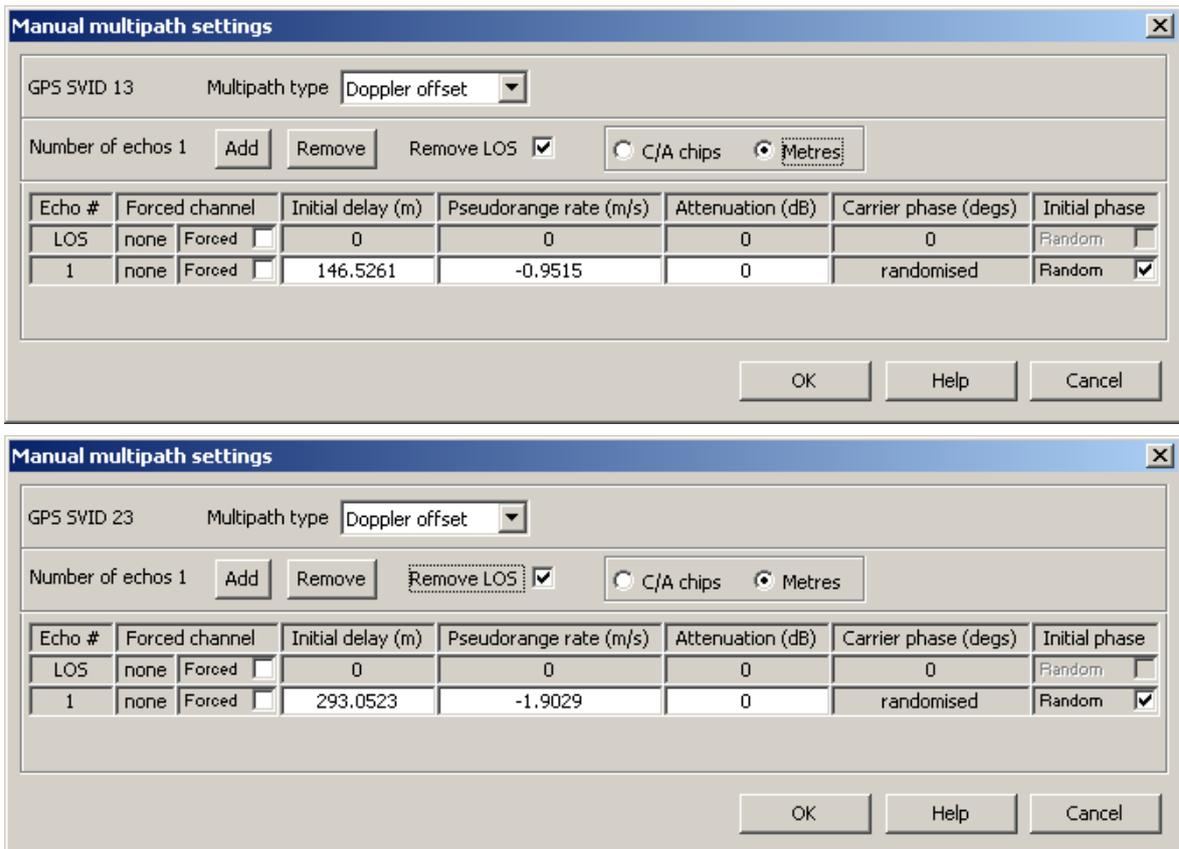


図 3.4 NLOS ドップラー誤差設定画面 (上側 : PRN.13、下側 : PRN.23)

図 3.5 及び表 3.2 は擬似距離の NLOS 観測誤差抽出結果である。PRN.13 と PRN.23 の擬似距離一重差残差に、重畳させた NLOS 誤差が現れていることがわかる。NLOS 誤差を設定しなかった他の衛星にはそういった誤差が無いこともわかる。

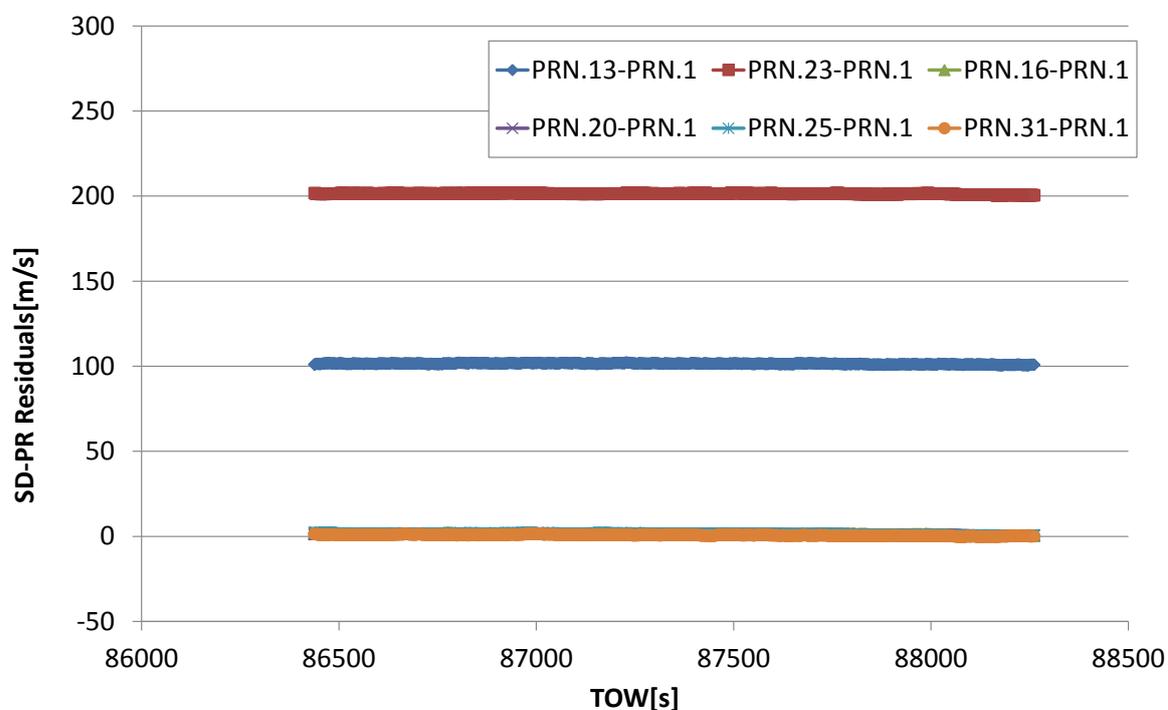


図 3.5 シミュレータ実験の擬似距離一重差残差

表 3.2 シミュレータ実験の擬似距離一重差残差統計値まとめ

	Mean[m]	StDev[m]	Max[m]
PRN.13-PRN.1	101.433	0.33	102.21
PRN.23-PRN.1	201.359	0.33	201.93
PRN.16-PRN.1	1.305	0.43	2.09
PRN.20-PRN.1	1.103	0.31	1.82
PRN.25-PRN.1	1.475	0.46	2.30
PRN.31-PRN.1	0.637	0.36	1.48

図 3.6 及び表 3.3 はドップラーシフトの NLOS 観測誤差抽出結果である。こちらも擬似距離同様に PRN.13 と PRN.23 のドップラーシフト一重差残差に重畳させた NLOS 誤差が現れており、他の衛星にはそういった誤差が無い。

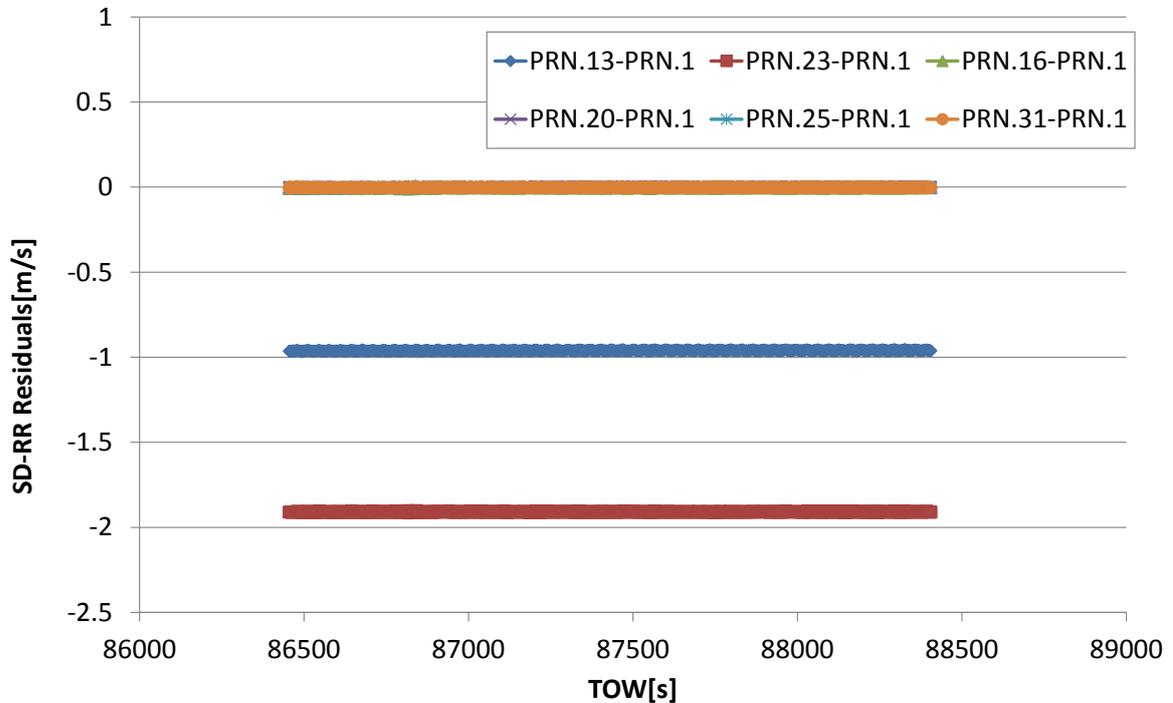


図 3.6 シミュレータ実験のドップラーシフト一重差残差

表 3.3 シミュレータ実験のドップラーシフト一重差残差統計値まとめ

	Mean[m/s]	StDev[m/s]	Max[m/s]
PRN.13-PRN.1	-0.9608	0.003	-0.971
PRN.23-PRN.1	-1.9095	0.003	-1.917
PRN.16-PRN.1	-0.0035	0.003	-0.015
PRN.20-PRN.1	-0.0003	0.002	-0.007
PRN.25-PRN.1	-0.0051	0.002	-0.012
PRN.31-PRN.1	-0.0029	0.002	-0.010

以上より、天頂方向の衛星からの信号が NLOS では無いという仮定のもとではあるが、上述の抽出法にて正しく NLOS 観測誤差を抽出することができることが立証された。次節では本抽出法を用いて実走行データにおける NLOS 観測誤差を評価する。

3.2 都市部における NLOS 観測誤差の評価

図 3.7～図 3.10 は前章の走行実験における Lap04 観測データから式(3.4)を用いて算出した各衛星の擬似距離及びドップラーシフトの一重差の残差で、NLOS 観測誤差を表したものである。この周回を選んだ理由は、準天頂衛星初号機が全周回の中で最高仰角(86° 付近)を示していたためである。そのため準天頂衛星初号機からの信号には NLOS 観測誤差が無いものと仮定できると考えた。

擬似距離の残差を見てみると、100m を優に超える誤差が多くの衛星からの観測値に存在していることがわかる。しかしながらゼロ付近を推移する衛星観測値もあることから、基準とした準天頂衛星初号機は LOS 追尾を継続していたと考えられる。よって、NLOS 信号追尾のために信号経路が長くなり、結果としてこのような大きな擬似距離誤差が発生していたことを示している。また、信号経路が長くなることから、概ね正の方向の大きな値を示していると解釈される。

ドップラーシフトの残差にも同様に NLOS 誤差が存在しており、数 m/s 程度の誤差が状態化しており、時に 5m/s を超えた値となっている。ドップラーシフトの誤差について議論されることは少ないため、誤差量に関して一概には言えないものの、経験的に LOS 信号を追尾する場合は大きくても数十 cm/s 程度の誤差に収まる。そのため非常に大きな観測誤差が発生していると考えられる。なお、ドップラーシフトの場合は衛星とユーザー間の幾何距離の相対変化を表すため、誤差は正負の方向双方に分布する。

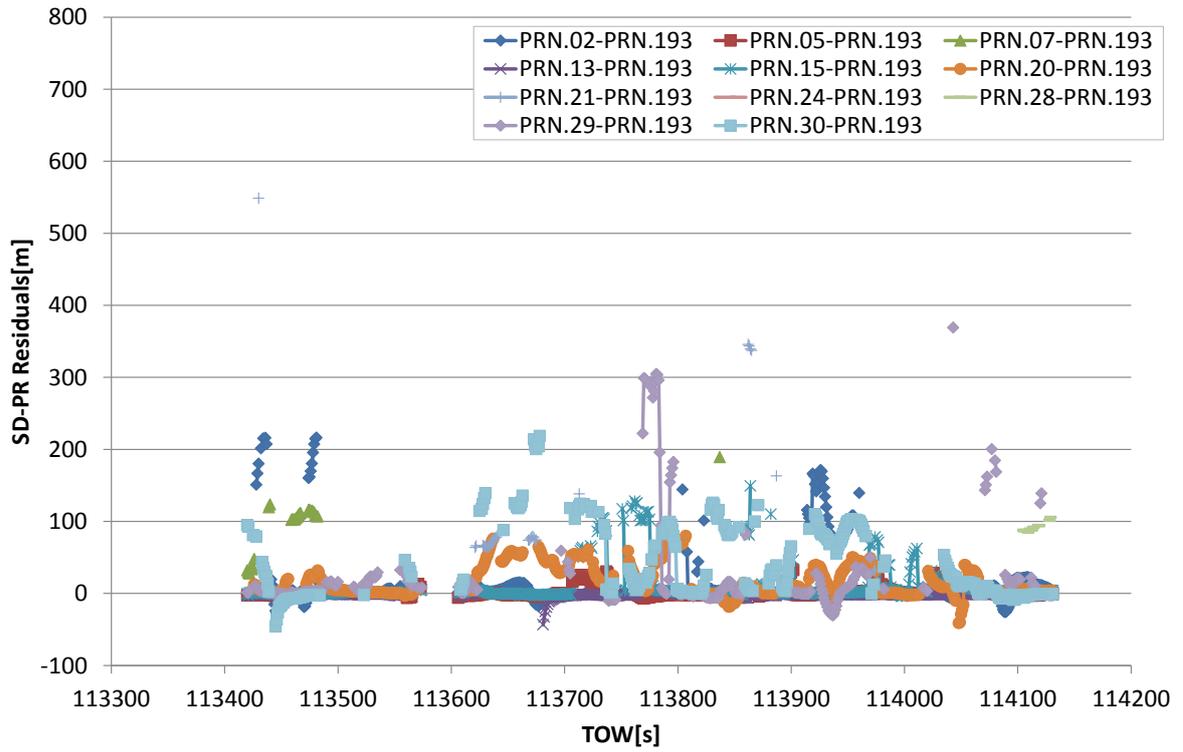


図 3.7 Lap04 における GPS 擬似距離一重差残差

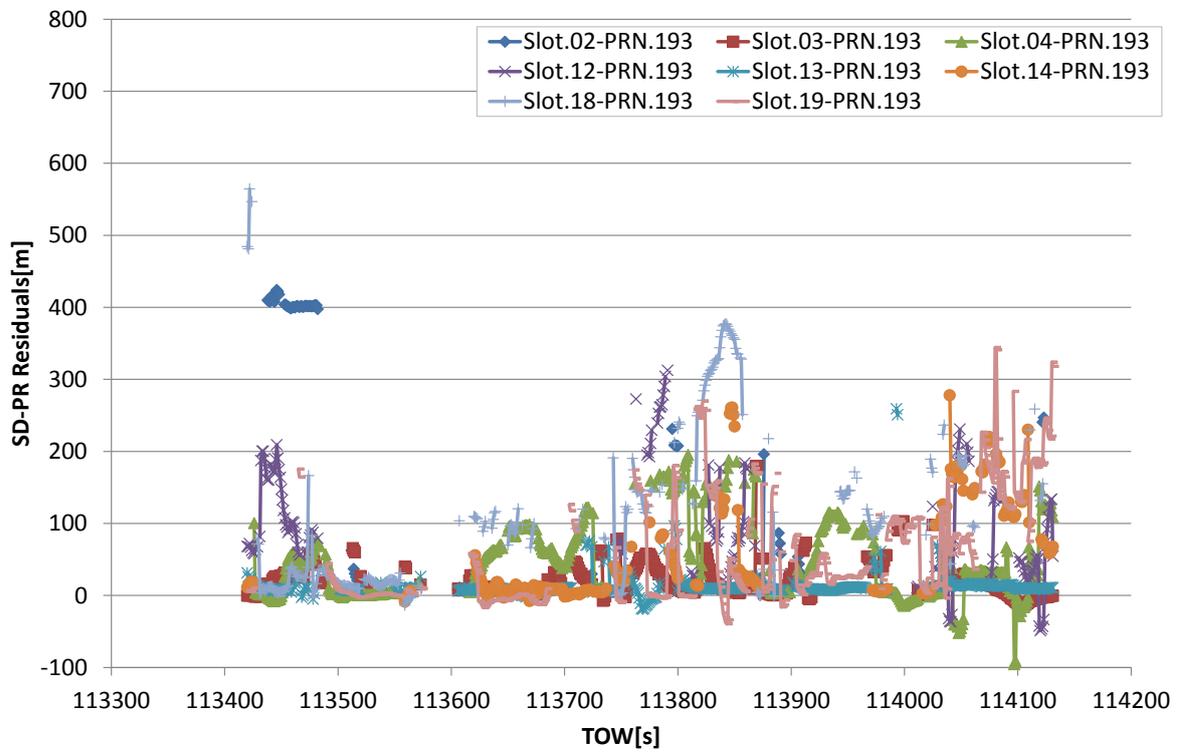


図 3.8 Lap04 における GLONASS 擬似距離一重差残差

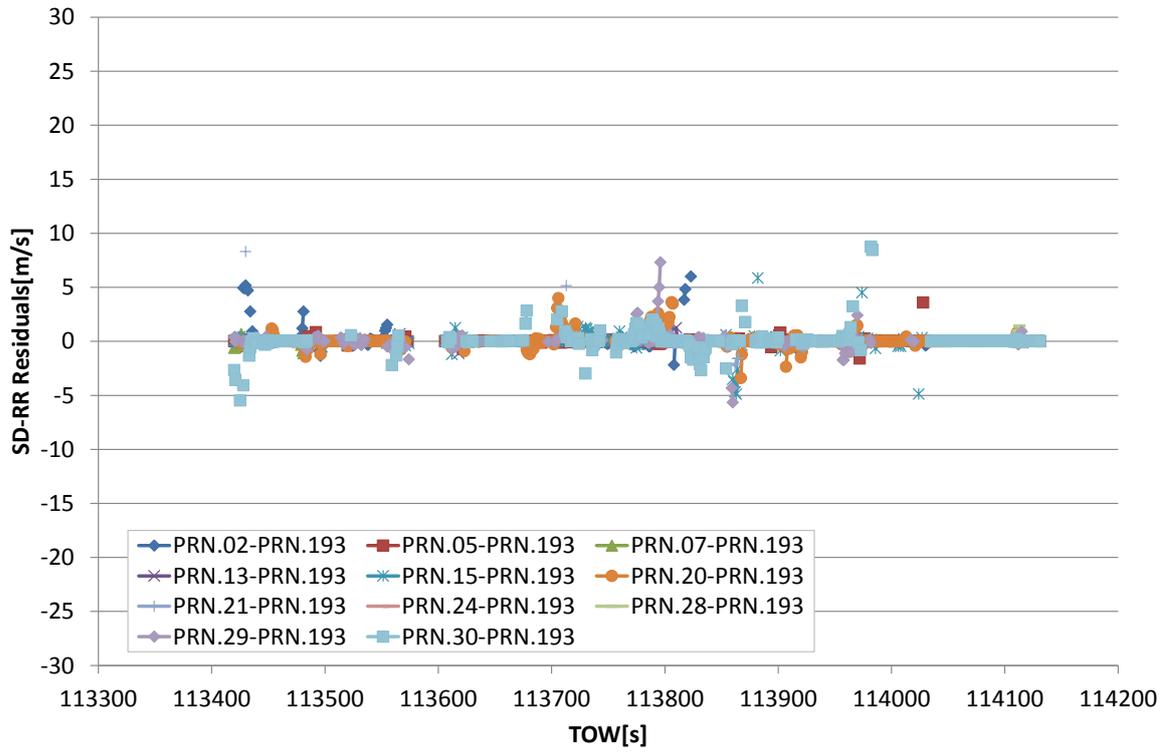


図 3.9 Lap04 における GPS ドップラーシフト一重差残差

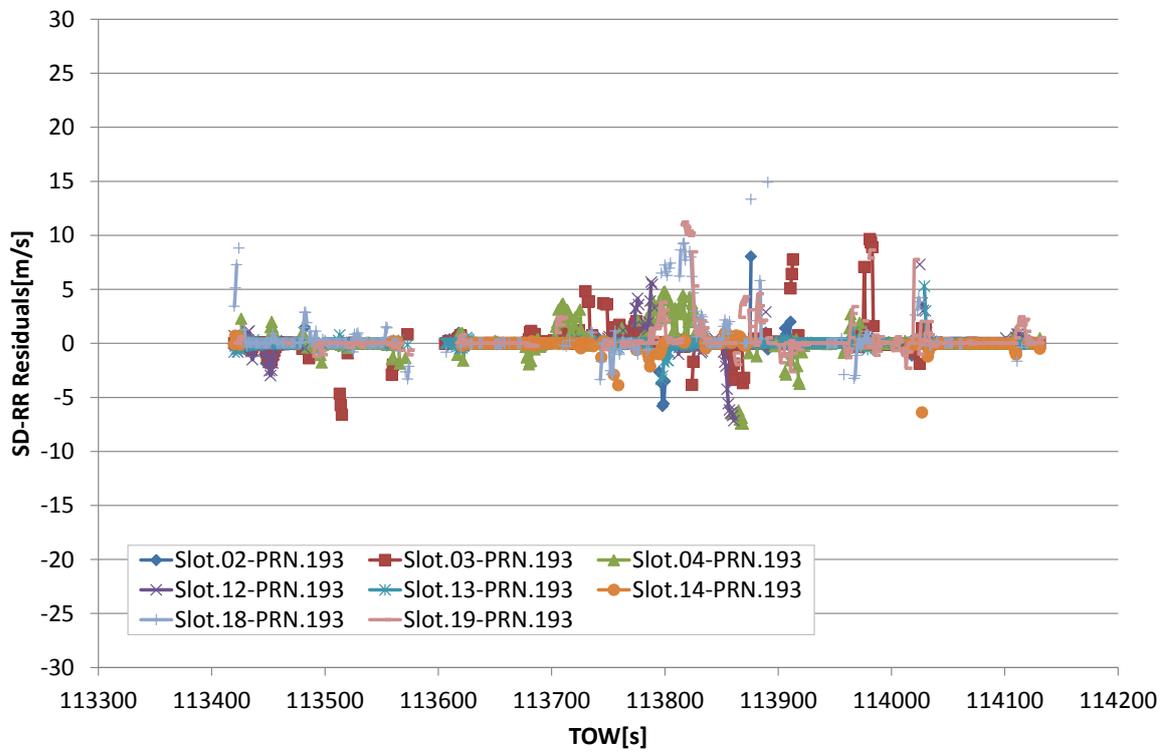


図 3.10 Lap04 における GLONASS ドップラーシフト一重差残差

表 3.4 と表 3.5 はそれぞれ、各周回の全衛星の観測値から算出した擬似距離およびドップラーシフトの NLOS 観測誤差の統計値のまとめである。図 3.7～図 3.10 に示した Lap04 が特別に擬似距離やドップラーシフトの大きな周回だった訳ではなく、全ての周回に同様の NLOS 観測誤差が存在していたことがわかる。また、擬似距離には最大で 700m を超える誤差があったり、ドップラーシフトも最大で 20m/s を超える周回がいくつかみられたりする。このように、これら NLOS 観測誤差が都市部における単独測位誤差を引き起こす支配的な要因であることが容易に想像できると同時に、西新宿の都庁付近の走行コースでは非常に大きな NLOS 観測誤差が存在することがわかる。

表 3.4 各周回の擬似距離 NLOS 観測誤差統計値まとめ

	GPS/QZSS			GLONASS		
	Mean[m]	StDev[m]	Max[m]	Mean[m]	StDev[m]	Max[m]
Lap01	32.9	66.9	593.4	20.2	41.6	297.5
Lap02	43.1	94.0	530.8	24.6	48.5	477.4
Lap03	33.5	77.8	491.8	50.5	87.3	516.9
Lap04	14.0	38.6	548.6	53.4	82.5	564.5
Lap05	34.8	83.6	542.8	33.9	77.2	731.3
Lap06	33.9	84.4	576.1	21.6	55.8	531.7

表 3.5 各周回のドップラーシフト NLOS 観測誤差統計値まとめ

	GPS/QZSS			GLONASS		
	Mean[m/s]	StDev[m/s]	Max[m/s]	Mean[m/s]	StDev[m/s]	Max[m/s]
Lap01	0.06	1.74	-23.11	0.05	1.15	-14.97
Lap02	0.27	2.03	16.90	0.14	1.24	9.92
Lap03	0.15	1.28	23.74	0.44	2.57	24.68
Lap04	0.04	0.59	8.77	0.20	1.44	14.90
Lap05	0.04	1.19	-18.27	0.12	1.58	23.06
Lap06	0.20	1.77	20.15	0.09	1.12	16.80

3.3 NLOS 観測誤差と測位誤差の関係性

本節では、NLOS 観測誤差と測位誤差の関係性について議論する。具体的には、前節で示した NLOS 観測誤差の値と、従来の拡張カルマンフィルタが想定している式(2.25)より得られる観測ノイズの標準偏差および式(2.20)のアダプティブ推定によって得られる観測ノイズ標準偏差との相関から判断する。

図 3.11 及び図 3.12 は Lap04 における擬似距離及びドップラーシフトの NLOS 誤差とアダプティブ推定から得られる観測ノイズ標準偏差の相関を示している。なお、観測誤差は正負双方の値を取るため、誤差の絶対値との比較を行っている。図から両者の非常に高い相関が確認できる。相関係数が全て 0.9 を超え、実際の観測誤差と標準偏差の傾向がよく一致していることがわかる。これは前章で示したアダプティブ拡張カルマンフィルタが正しく NLOS 信号を検出し、イノベーションシーケンスによる観測ノイズ推定により実際の観測誤差を正しく見積もることが出来たためである。またこの非常に高い相関が、正確かつ高精度な位置及び速度情報をもたらした要因であると考えられる。

一方、図 3.13 及び図 3.14 に示す通り、SNR と実際の観測誤差にはアダプティブ推定に見られるような高い相関は確認できなかった。例えば SNR45[dB-Hz]以下の場合の擬似距離誤差に着目すると、観測誤差が小さいこともあるが、100m を超える大きな誤差を示すこともある。さらに特定の衛星信号のみ誤差が大きかったり、あるいは小さかったりすることも無い。ドップラーシフト誤差についても同様に SNR と観測誤差に顕著な相関はみられなかった。つまり、SNR による近似から観測ノイズ標準偏差を推定する従来の拡張カルマンフィルタでは、実際の観測誤差を正確に見積もることは非常に難しいのである。結果として都市部において大きな位置及び速度誤差が生じたものと考えられる。

なお、今回設定した SNR 近似式よりももっと大きな誤差分散値を設定することも、都市部 GNSS 単独測位性能の改善案の一つに挙げられる。しかしながら改善の効果は限定的であったこと、またオープンスカイや郊外といった NLOS の影響が小さい都市部以外の環境における副作用が懸念されることから、得策ではないと判断している。その点、前章で示した観測ノイズ共分散行列のアダプティブ推定では SNR による近似から得られる標準偏差を下限値とするため、他の環境における副作用の懸念は少ない。

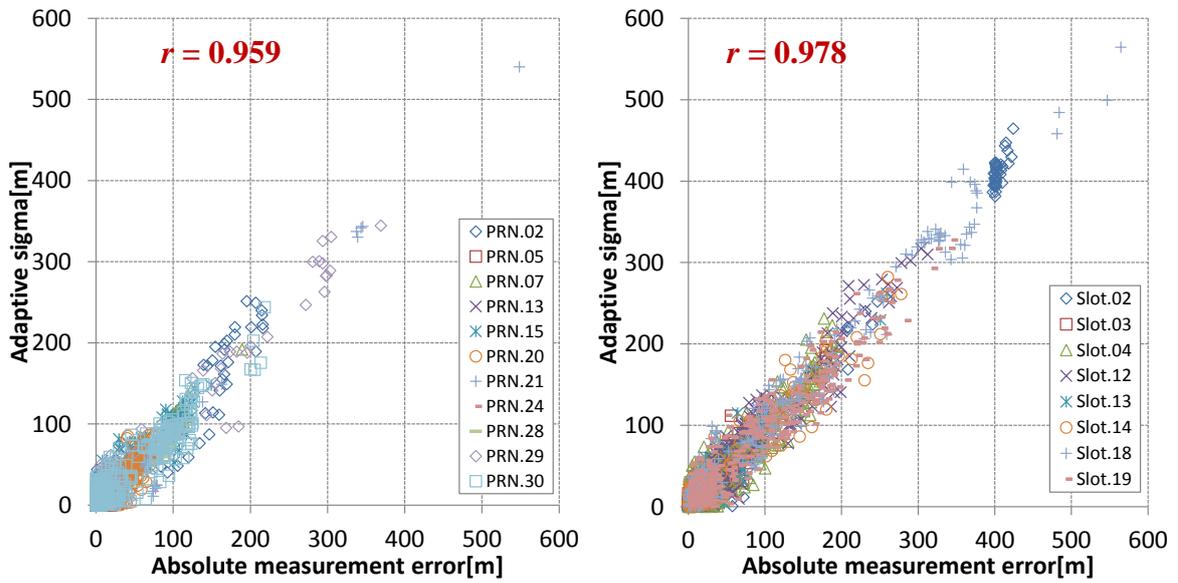


図 3.11 Lap04 における擬似距離 NLOS 観測誤差とアダプティブ推定による観測ノイズ標準偏差の相関 (左側 ; GPS、右側 : GLONASS)

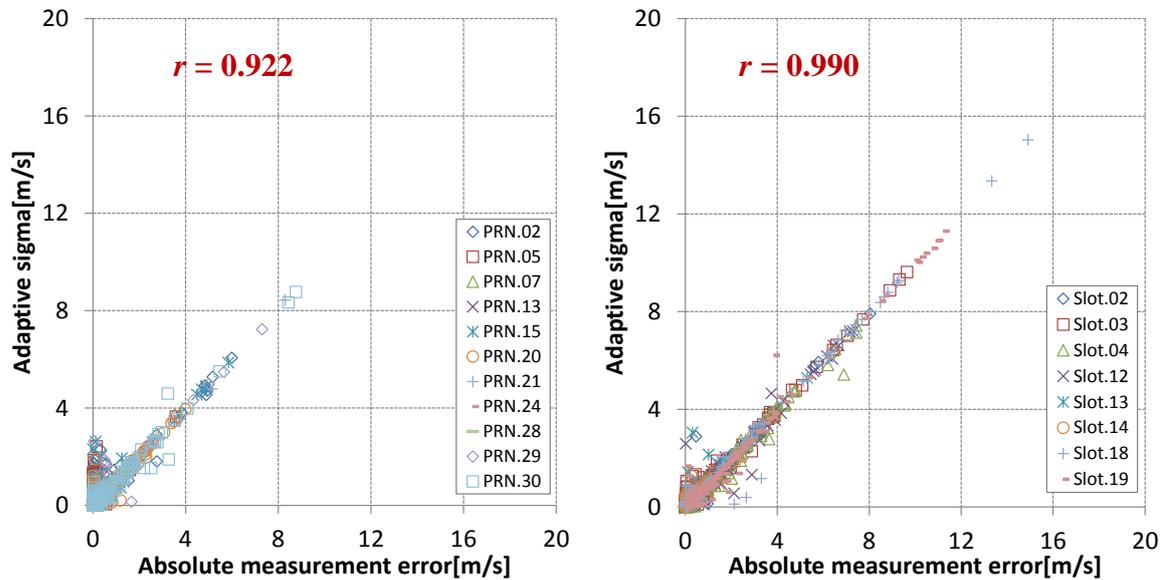


図 3.12 Lap04 におけるドップラー NLOS 観測誤差とアダプティブ推定による観測ノイズ標準偏差の相関 (左側 ; GPS、右側 : GLONASS)

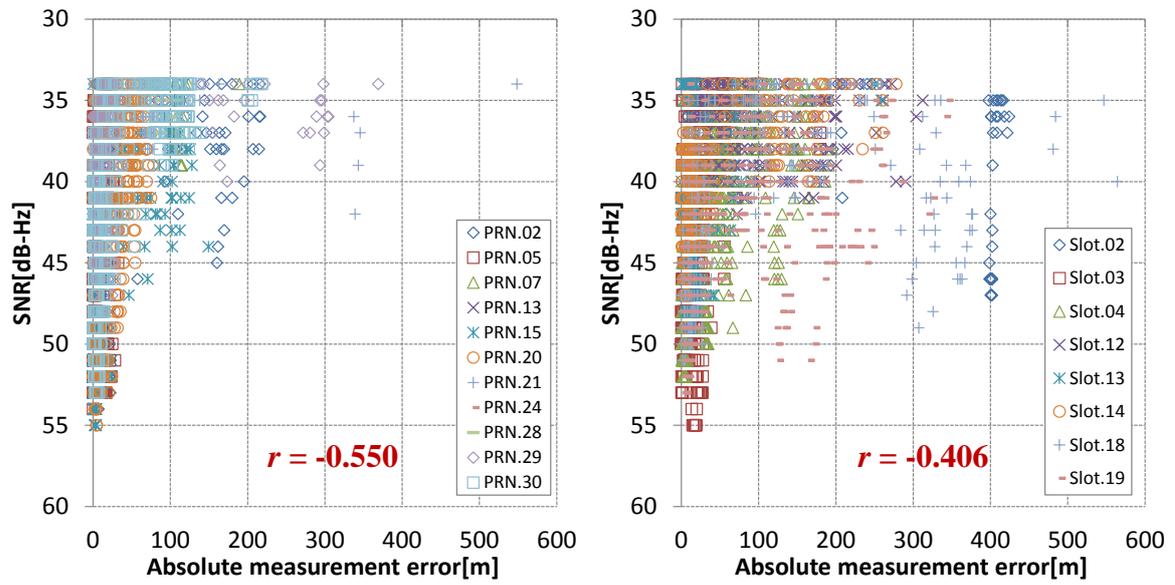


図 3.13 Lap04 における擬似距離 NLOS 観測誤差と SNR 近似による観測ノイズ標準偏差の相関 (左側 ; GPS、右側 : GLONASS)

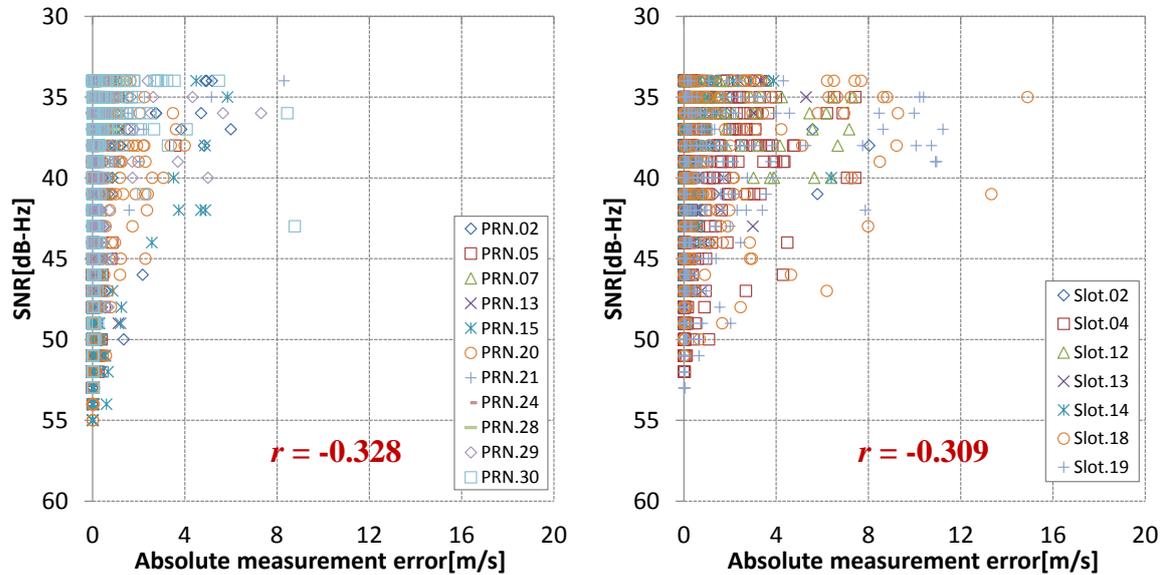


図 3.14 Lap04 におけるドップラー NLOS 観測誤差と SNR 近似による観測ノイズ標準偏差の相関 (左側 ; GPS、右側 : GLONASS)

表 3.6 は、各周回の NLOS 観測誤差とアダプティブ推定による標準偏差との相関係数のまとめである。全周回において、擬似距離及びドップラーシフト共に高い相関が得られていることがわかる。一方、表 3.7 は NLOS 観測誤差と SNR との相関係数のまとめである。やはり数値からは顕著な相関が見受けられず、SNR のみによる標準偏差の推定だけでは都市部における単独測位性能の劣化を招くことが懸念される。

表 3.6 各周回のアダプティブ推定による観測ノイズ標準偏差と NLOS 観測誤差の相関係数まとめ

	GPS/QZSS		GLONASS	
	Pseudo-range	Doppler shift	Pseudo-range	Doppler shift
Lap01	0.932	0.954	0.949	0.976
Lap02	0.990	0.982	0.953	0.954
Lap03	0.983	0.982	0.980	0.996
Lap04	0.959	0.922	0.978	0.990
Lap05	0.979	0.979	0.954	0.987
Lap06	0.989	0.990	0.979	0.989

表 3.7 各周回の SNR と NLOS 観測誤差の相関係数まとめ

	GPS/QZSS		GLONASS	
	Pseudo-range	Doppler shift	Pseudo-range	Doppler shift
Lap01	-0.517	-0.265	-0.592	-0.276
Lap02	-0.528	-0.357	-0.503	-0.421
Lap03	-0.455	-0.288	-0.521	-0.292
Lap04	-0.550	-0.328	-0.406	-0.309
Lap05	-0.405	-0.232	-0.468	-0.254
Lap06	-0.494	-0.206	-0.549	-0.273

3.4 本章のまとめ

本章では、観測値に重畳される **NLOS** 観測誤差の抽出法を示し、前章で推定した観測ノイズの標準偏差との関係性から従来の拡張カルマンフィルタ及びアダプティブ拡張カルマンフィルタの位置及び速度推定結果との関係性について議論した。

都市部における擬似距離及びドップラーシフト双方の観測値には、**LOS** 信号を追尾している場合はまず考えにくい非常に大きな観測誤差が存在していることがわかった。また、アダプティブ拡張カルマンフィルタの場合は擬似距離及びドップラーシフトの **NLOS** 観測誤差と観測ノイズ標準偏差に高い相関が見られ、都市部における正確かつ高精度な位置及び速度推定結果が得られる要因であることがわかった。しかしながら、そのような推定は **SNR** 近似から観測ノイズを見積もる従来の拡張カルマンフィルタでは難しく、都市部における位置及び速度性能劣化の原因であることも示された。

両拡張カルマンフィルタの唯一の差異は、観測ノイズ共分散行列である。これに起因して都市部における **GNSS** 単独測位による位置及び速度が改善された。よって本章の評価からも、アダプティブ拡張カルマンフィルタは都市部における **GNSS** 単独測位性能の改善に寄与する手段として提案できるものと結論付ける。

付録：全周回の NLOS 観測誤差及び観測ノイズとの相関

付録として全周回の擬似距離及びドップラーシフトの NLOS 観測誤差（1 重差残差）及びその観測ノイズとの相関を図示する。

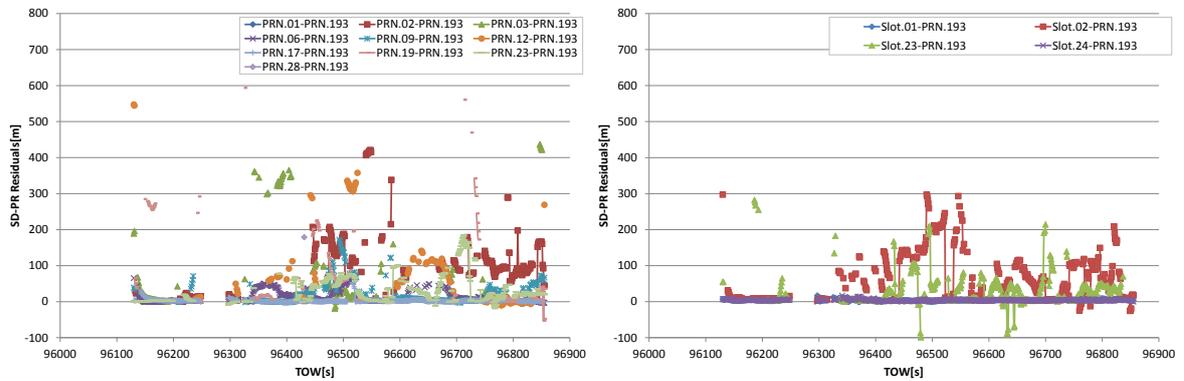


図 3.15 Lap01 における擬似距離一重差残差（左側；GPS、右側：GLONASS）

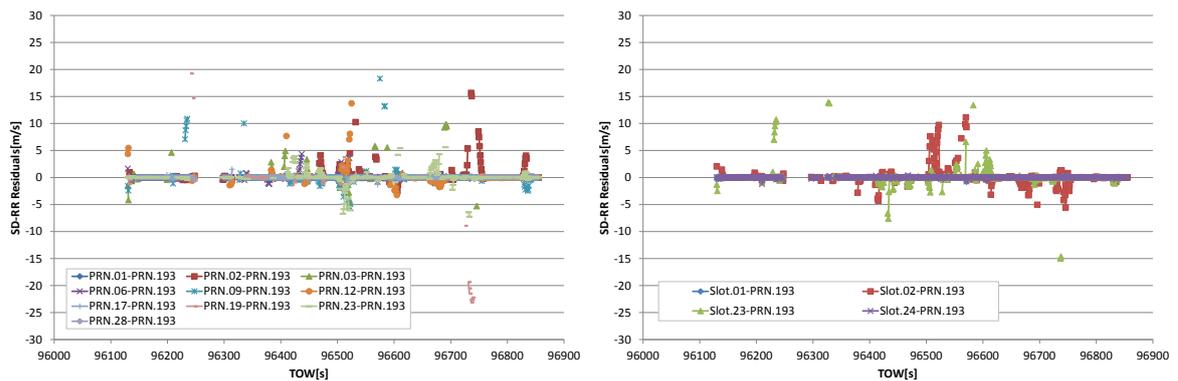


図 3.16 Lap01 におけるドップラーシフト一重差残差（左側；GPS、右側：GLONASS）

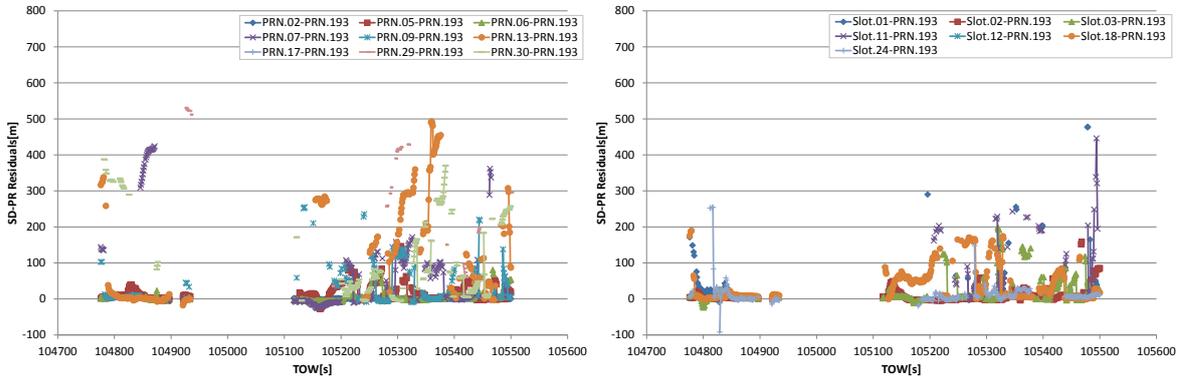


図 3.17 Lap02 における擬似距離一重差残差 (左側 ; GPS、右側 : GLONASS)

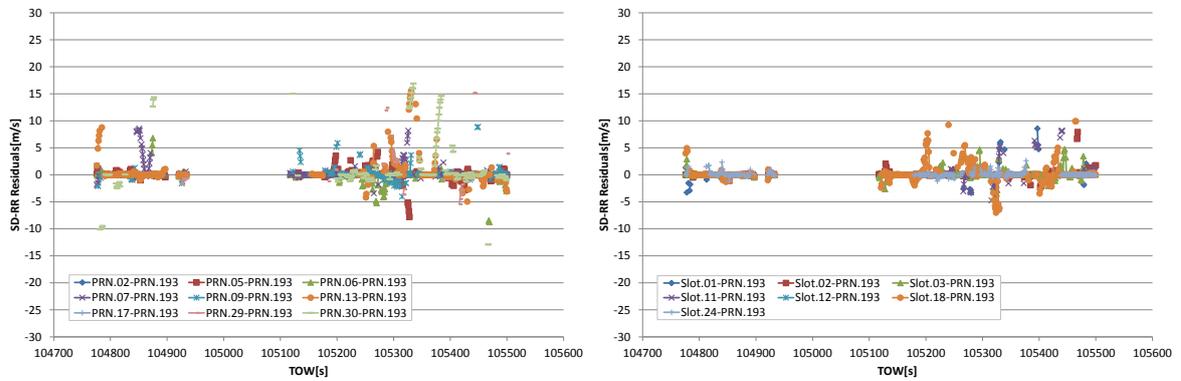


図 3.18 Lap02 におけるドップラーシフト一重差残差 (左側 ; GPS、右側 : GLONASS)

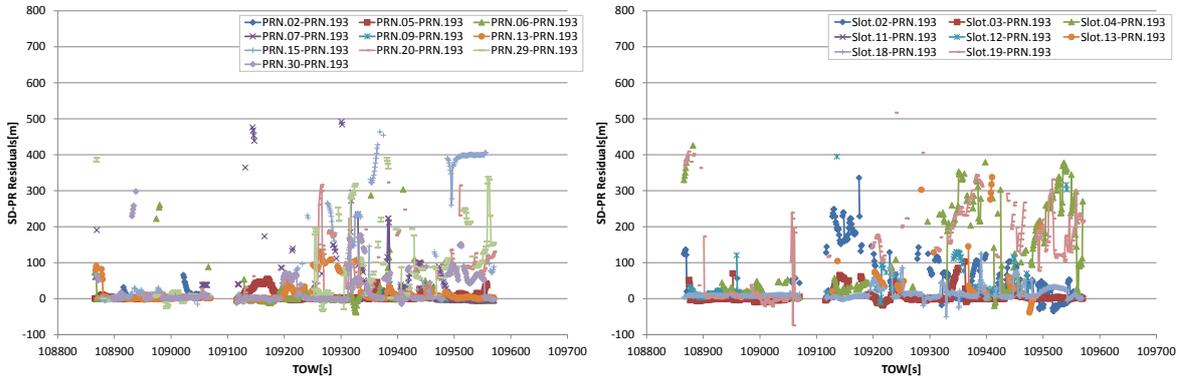


図 3.19 Lap03 における擬似距離一重差残差（左側；GPS、右側：GLONASS）

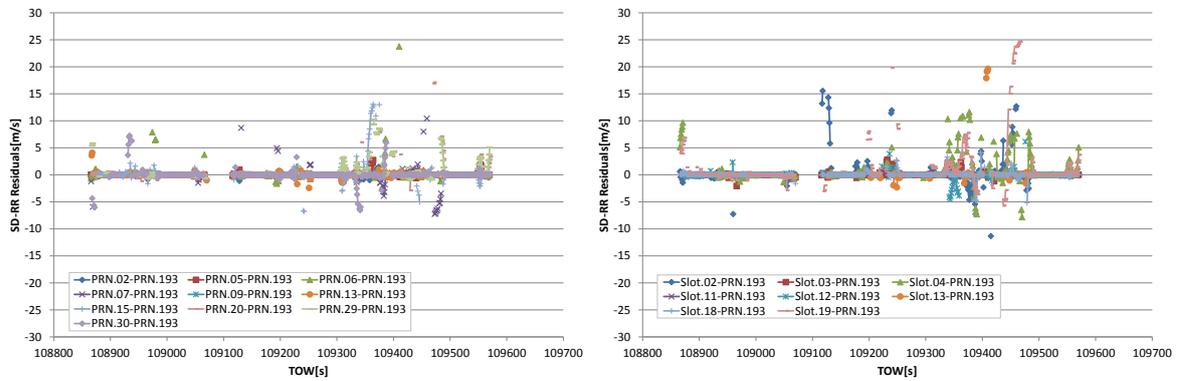


図 3.20 Lap03 におけるドップラーシフト一重差残差（左側；GPS、右側：GLONASS）

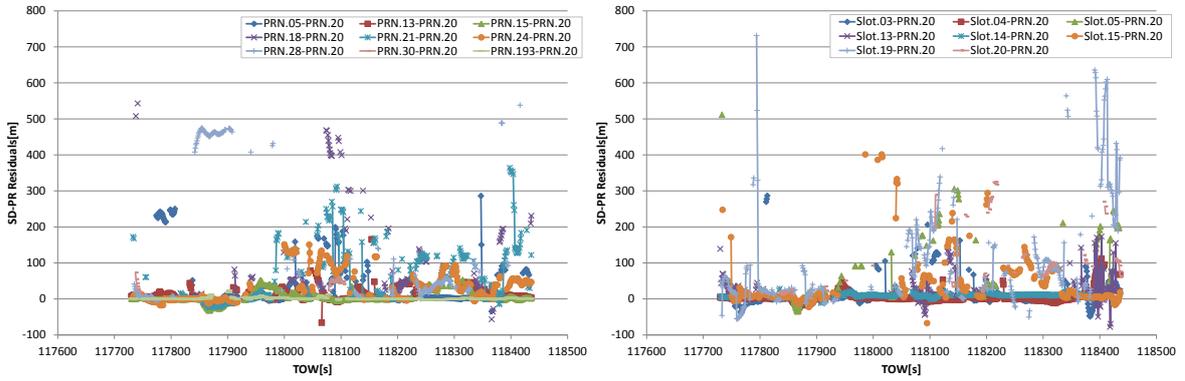


図 3.21 Lap05 における擬似距離一重差残差（左側；GPS/QZSS、右側：GLONASS）

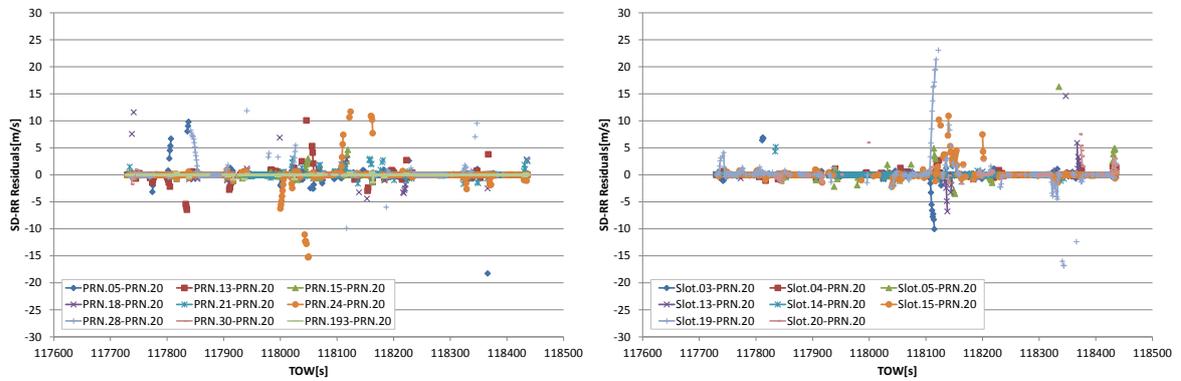


図 3.22 Lap05 におけるドップラーシフト一重差残差（左側；GPS/QZSS、右側：GLONASS）

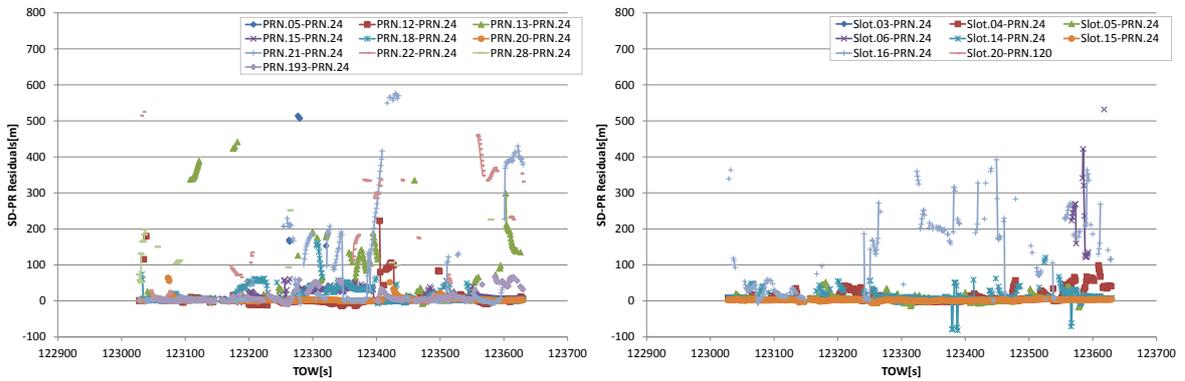


図 3.23 Lap06 における擬似距離一重差残差 (左側 ; GPS/QZSS、右側 : GLONASS)

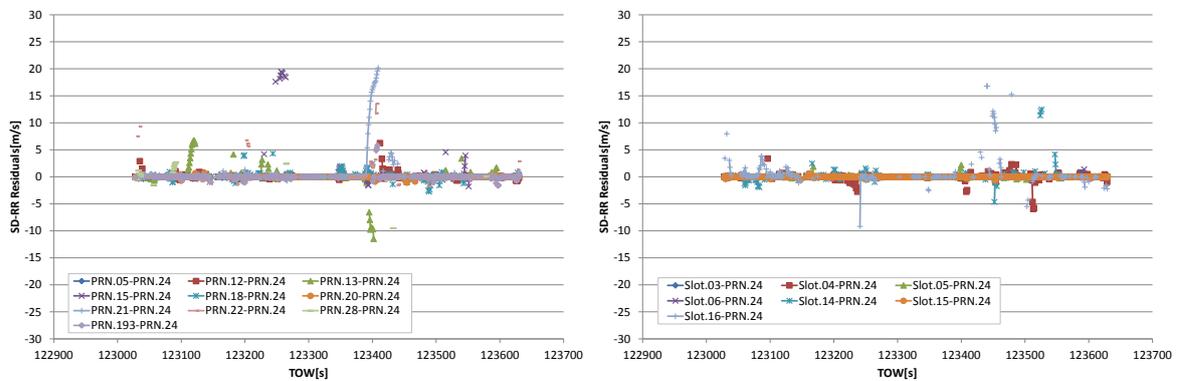


図 3.24 Lap06 におけるドップラーシフト一重差残差 (左側 ; GPS/QZSS、右側 : GLONASS)

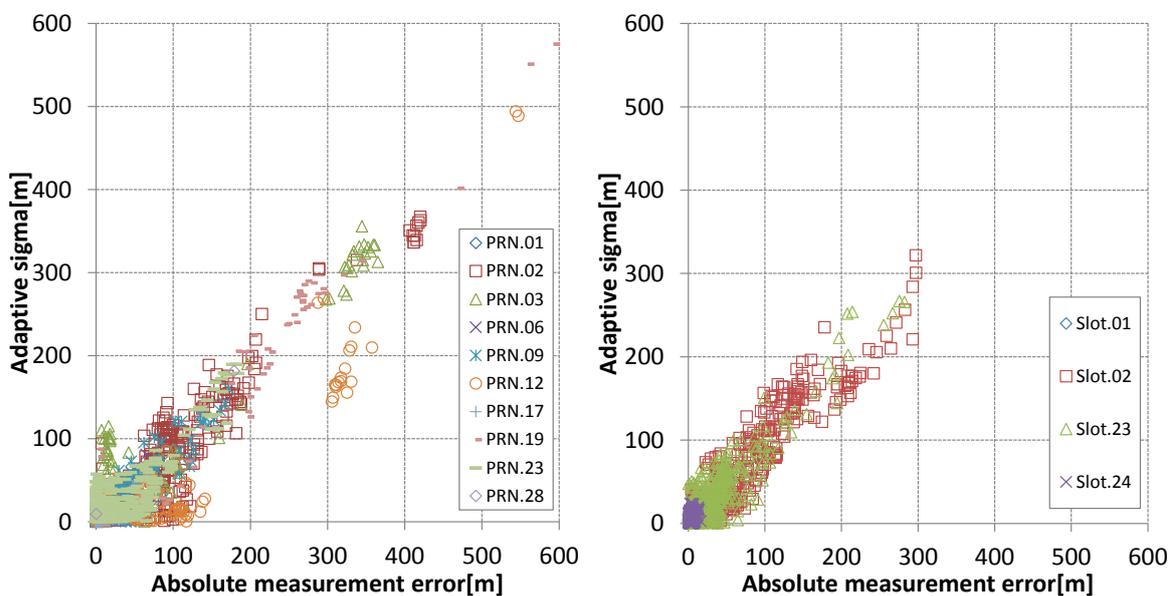


図 3.25 Lap01 の擬似距離誤差とアダプティブ推定観測ノイズの相関
(左側 ; GPS、右側 : GLONASS)

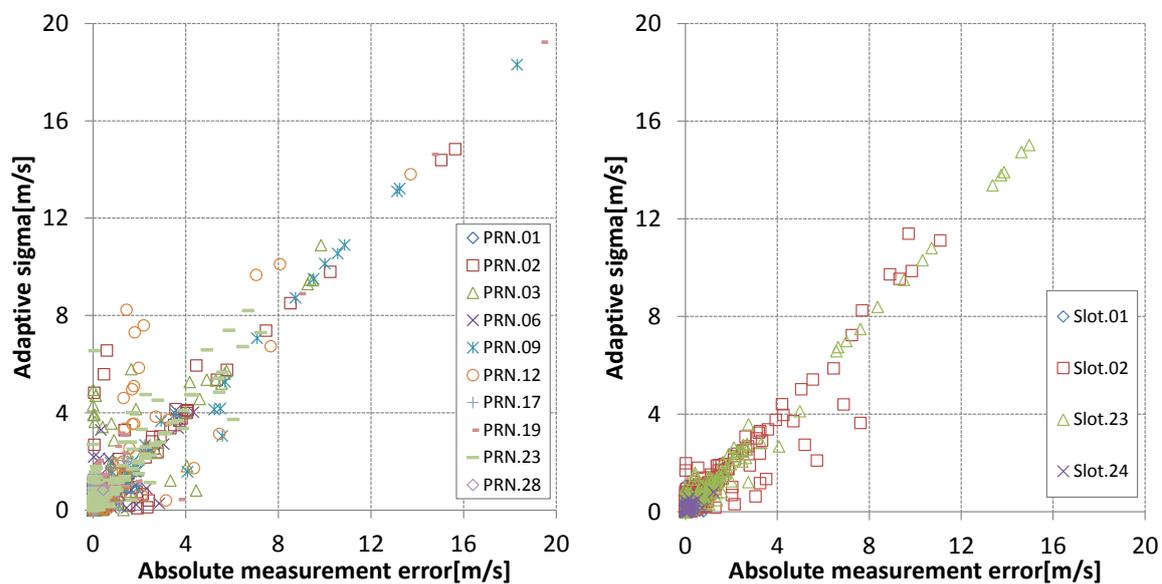


図 3.26 Lap01 のドップラー誤差とアダプティブ推定観測ノイズの相関
(左側 ; GPS、右側 : GLONASS)

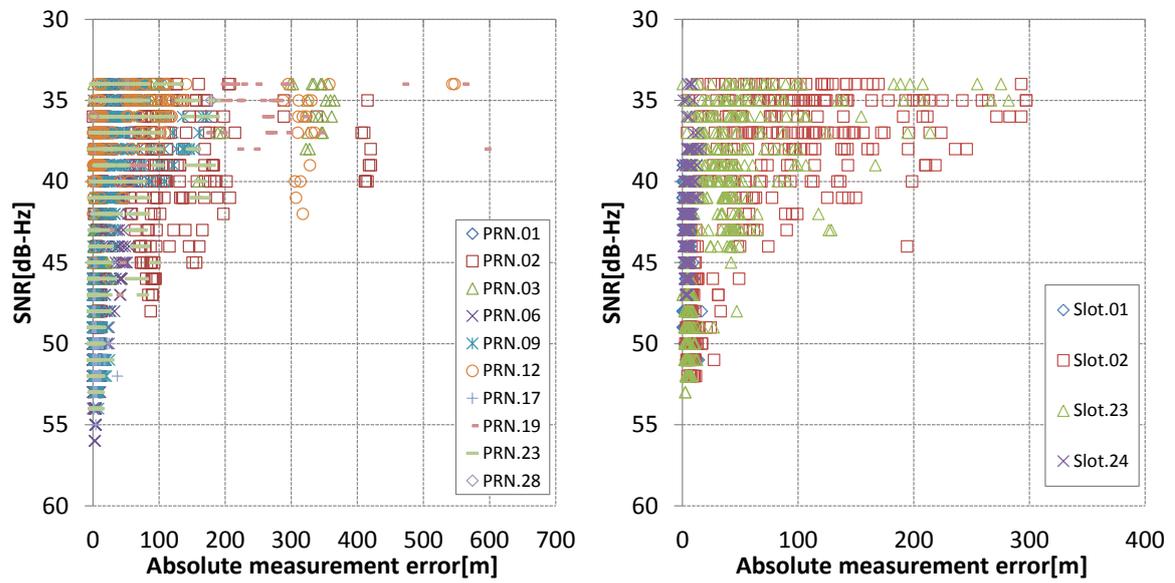


図 3.27 Lap01 の擬似距離誤差と SNR 近似による観測ノイズの相関
(左側 ; GPS、右側 : GLONASS)

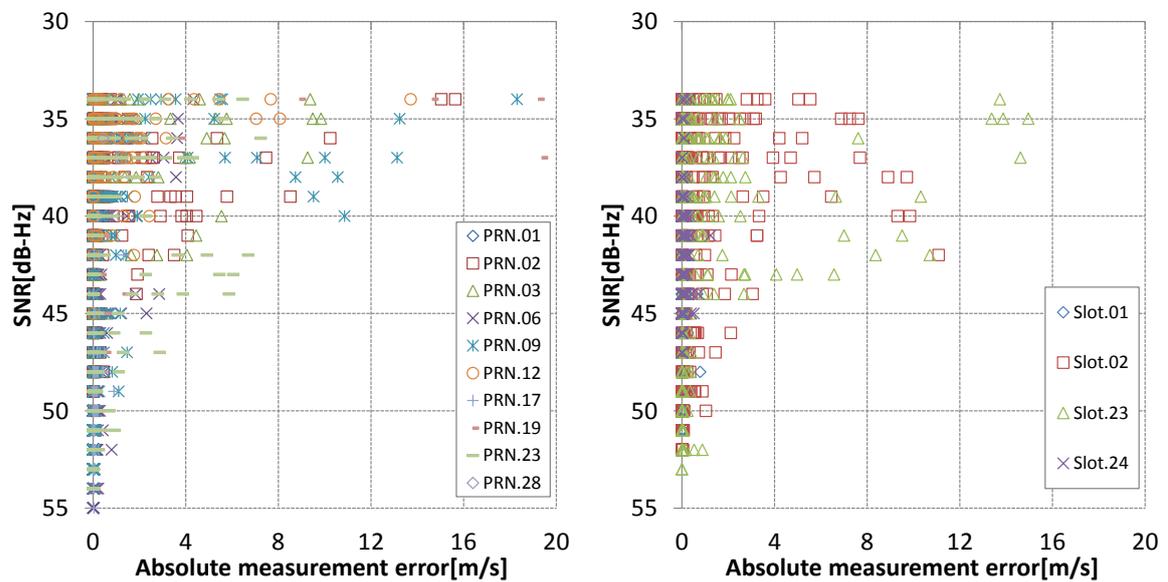


図 3.28 Lap01 のドップラー観測誤差と SNR 近似による観測ノイズの相関
(左側 ; GPS、右側 : GLONASS)

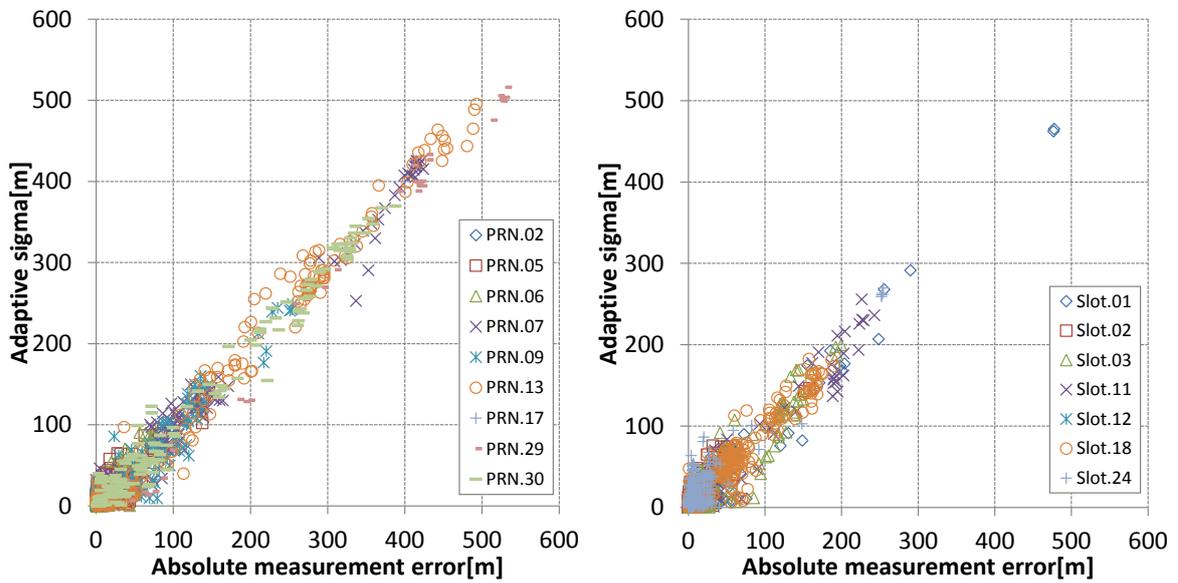


図 3.29 Lap02 の擬似距離誤差とアダプティブ推定観測ノイズの相関
(左側 ; GPS、右側 : GLONASS)

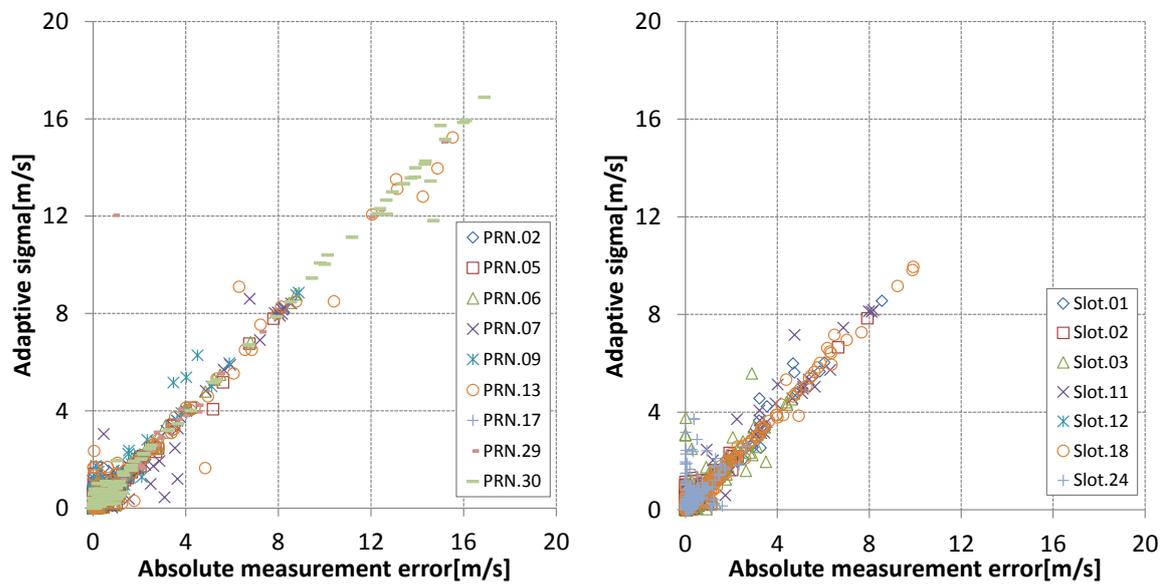


図 3.30 Lap02 のドップラー誤差とアダプティブ推定観測ノイズの相関
(左側 ; GPS、右側 : GLONASS)

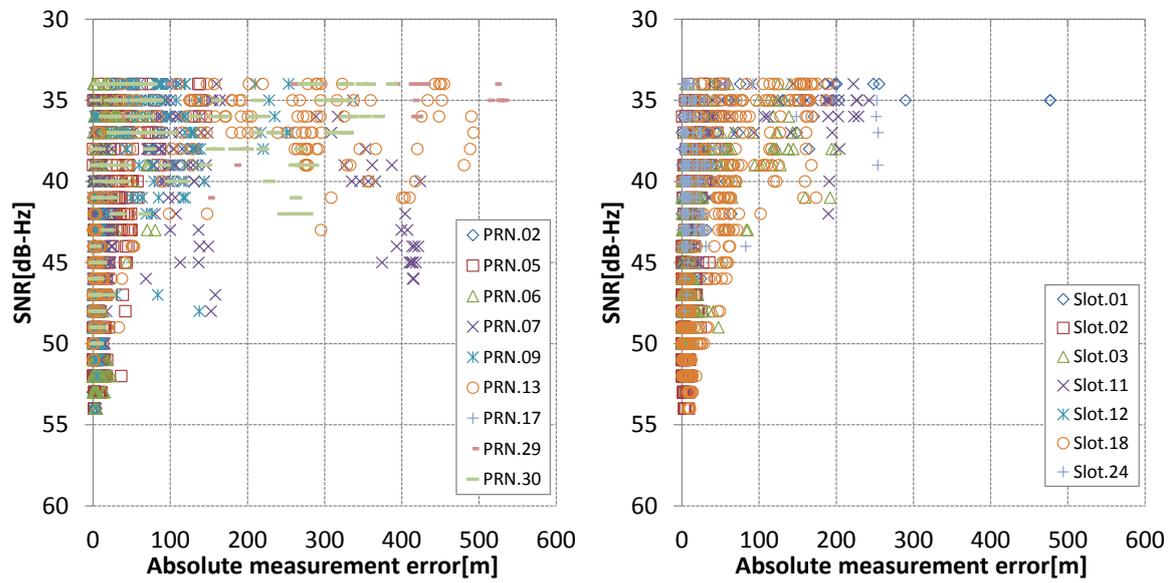


図 3.31 Lap02 の擬似距離誤差と SNR 近似による観測ノイズの相関
(左側 ; GPS、右側 : GLONASS)

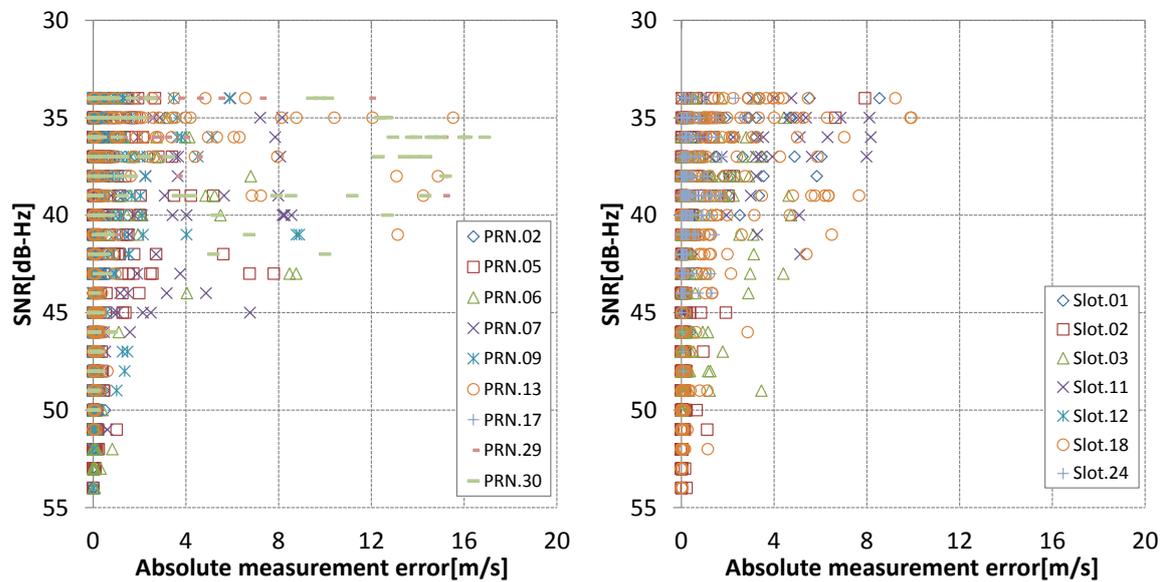


図 3.32 Lap02 のドップラー観測誤差と SNR 近似による観測ノイズの相関
(左側 ; GPS、右側 : GLONASS)

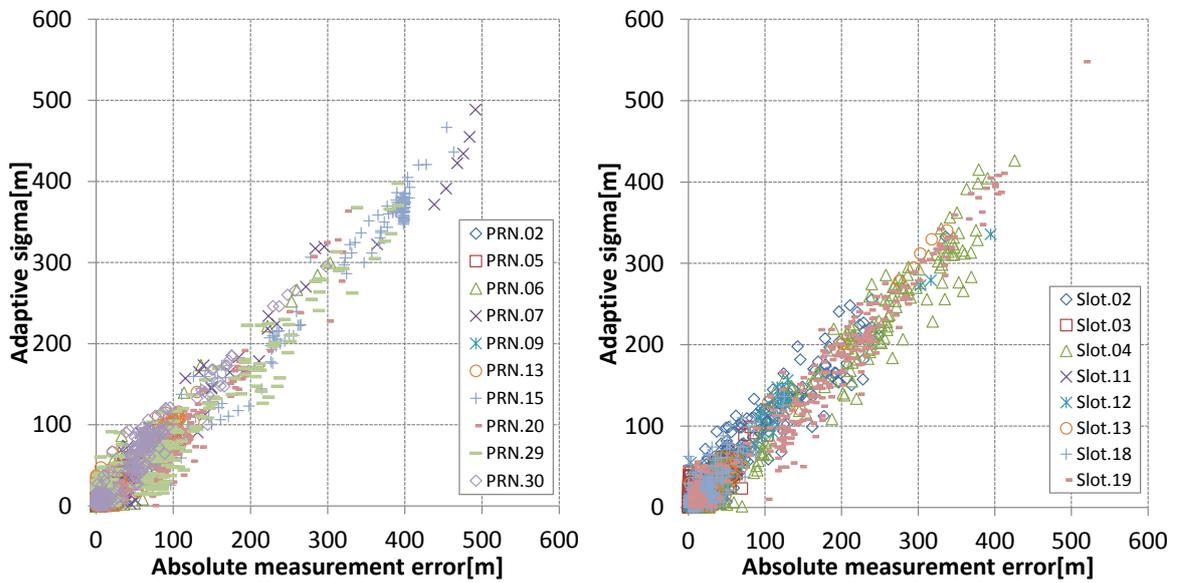


図 3.33 Lap03 の擬似距離誤差とアダプティブ推定観測ノイズの相関
(左側 ; GPS、右側 : GLONASS)

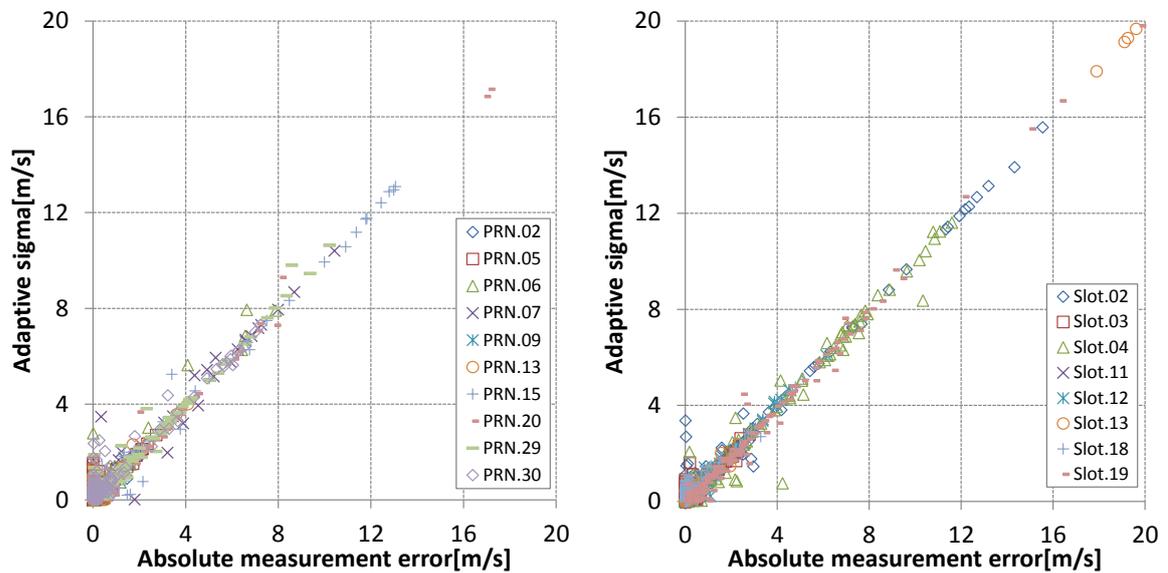


図 3.34 Lap03 のドップラー誤差とアダプティブ推定観測ノイズの相関
(左側 ; GPS、右側 : GLONASS)

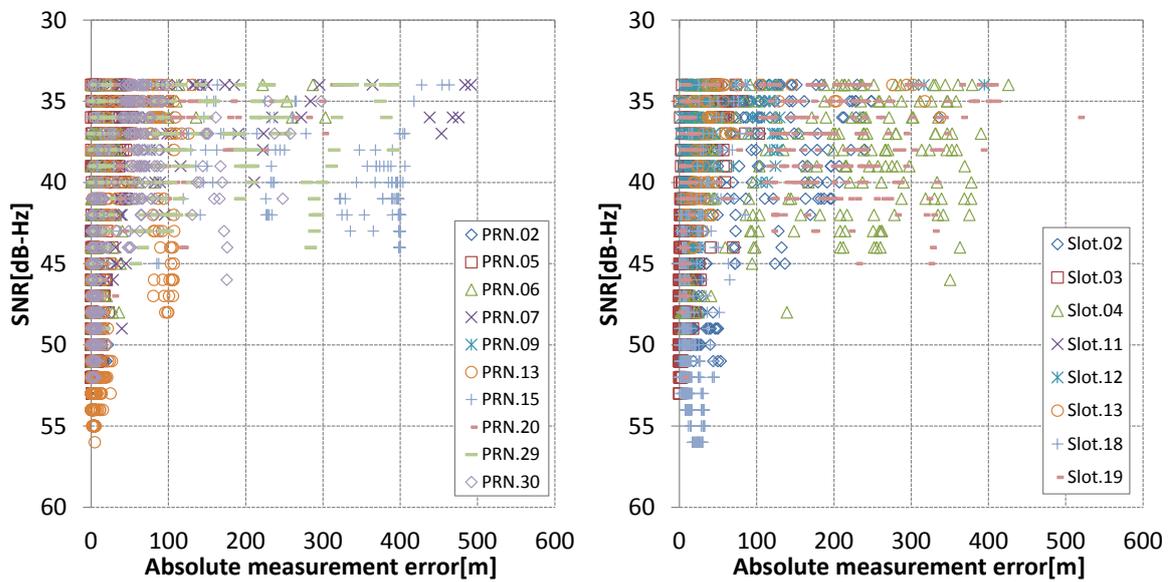


図 3.35 Lap03 の擬似距離誤差と SNR 近似による観測ノイズの相関
(左側 ; GPS、右側 : GLONASS)

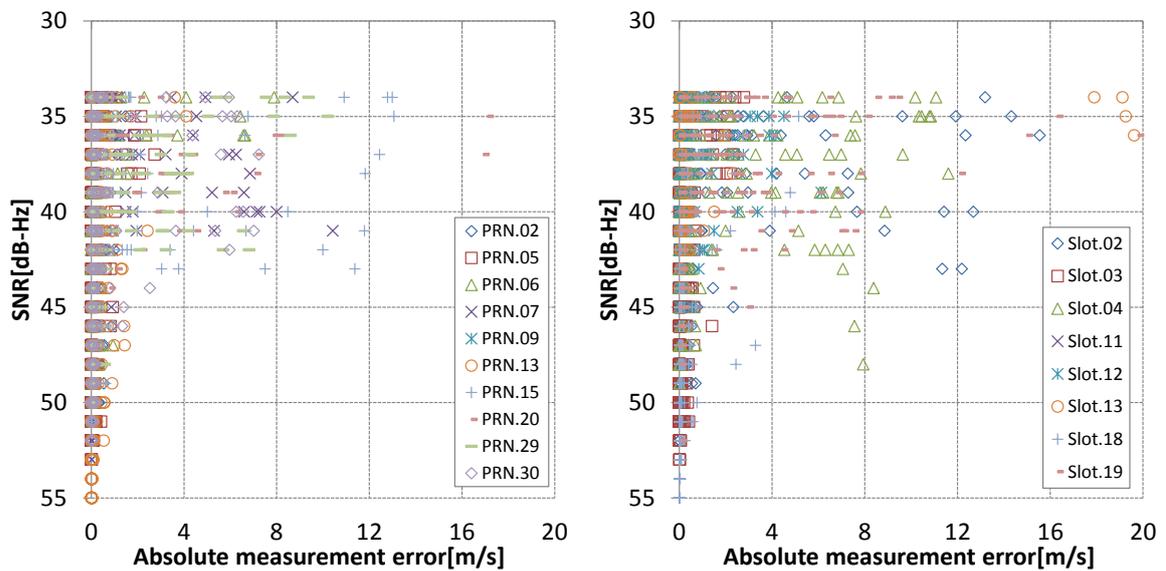


図 3.36 Lap03 のドップラー観測誤差と SNR 近似による観測ノイズの相関
(左側 ; GPS、右側 : GLONASS)

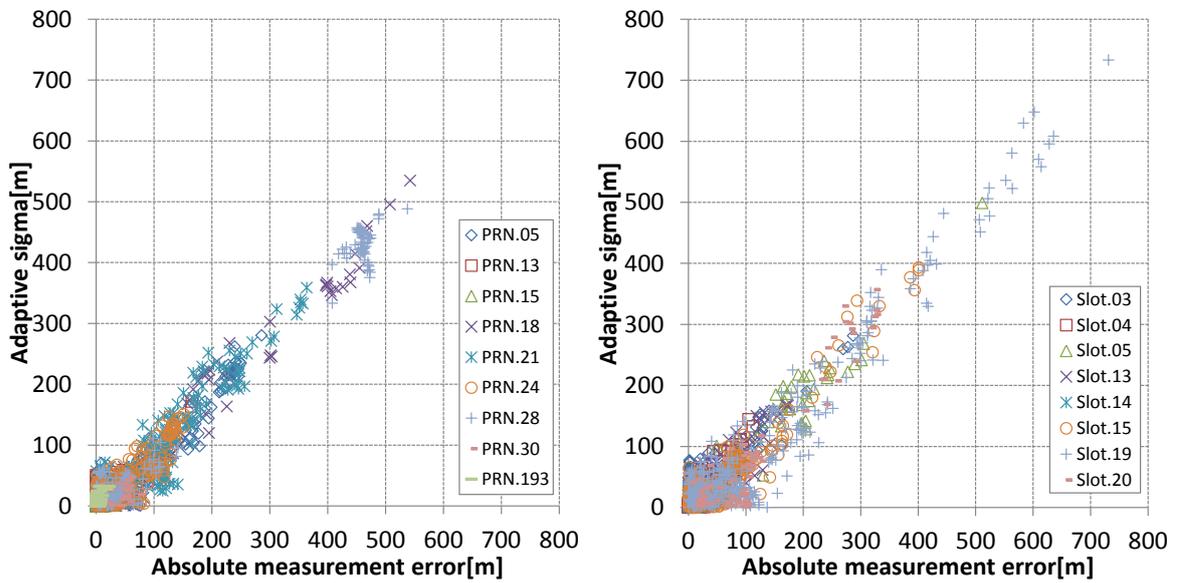


図 3.37 Lap05 の擬似距離誤差とアダプティブ推定観測ノイズの相関
(左側 ; GPS/QZSS、右側 : GLONASS)

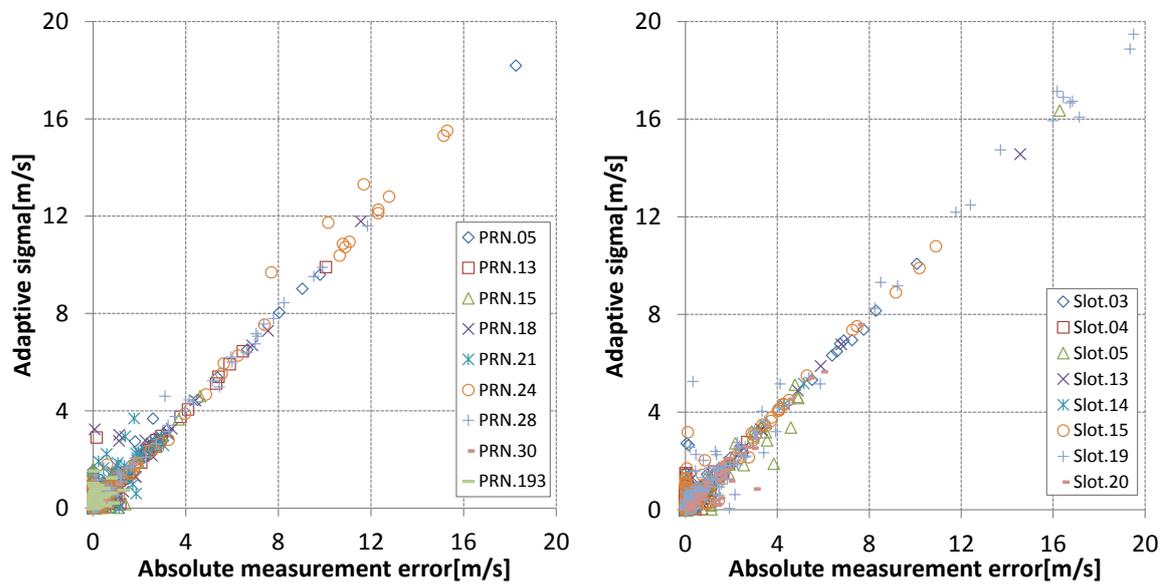


図 3.38 Lap05 のドップラー誤差とアダプティブ推定観測ノイズの相関
(左側 ; GPS/QZSS、右側 : GLONASS)

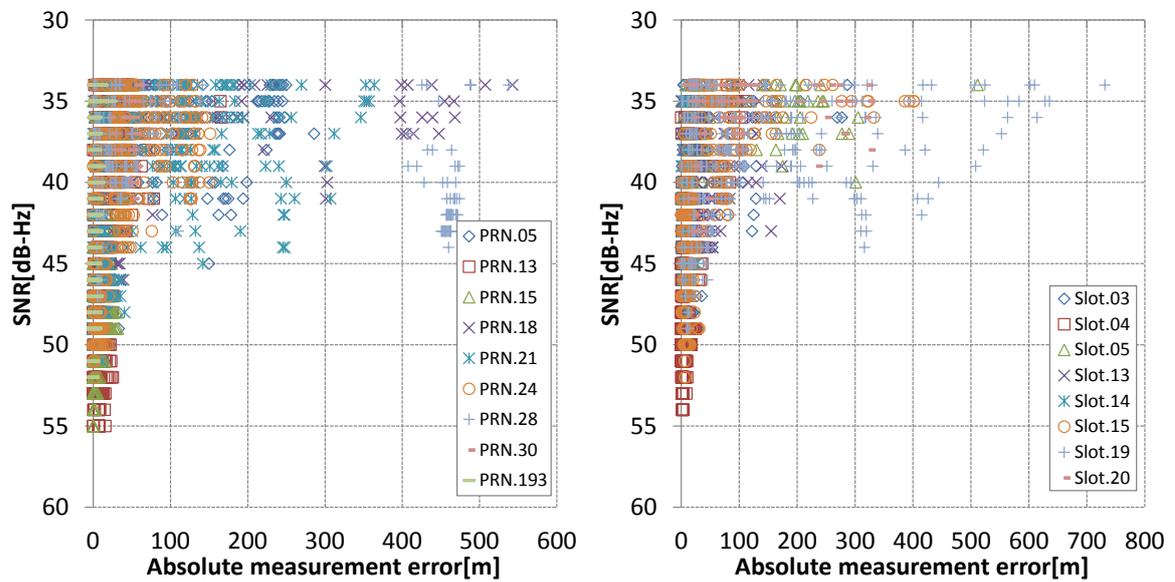


図 3.39 Lap05 の擬似距離誤差と SNR 近似による観測ノイズの相関
(左側 ; GPS/QZSS、右側 : GLONASS)

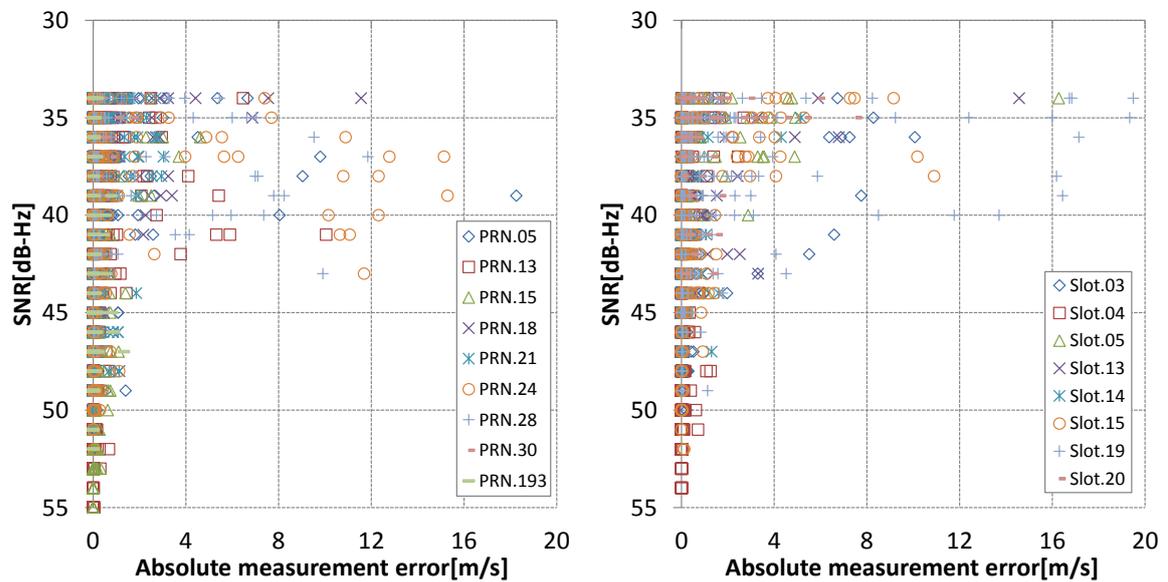


図 3.40 Lap05 のドップラー観測誤差と SNR 近似による観測ノイズの相関
(左側 ; GPS/QZSS、右側 : GLONASS)

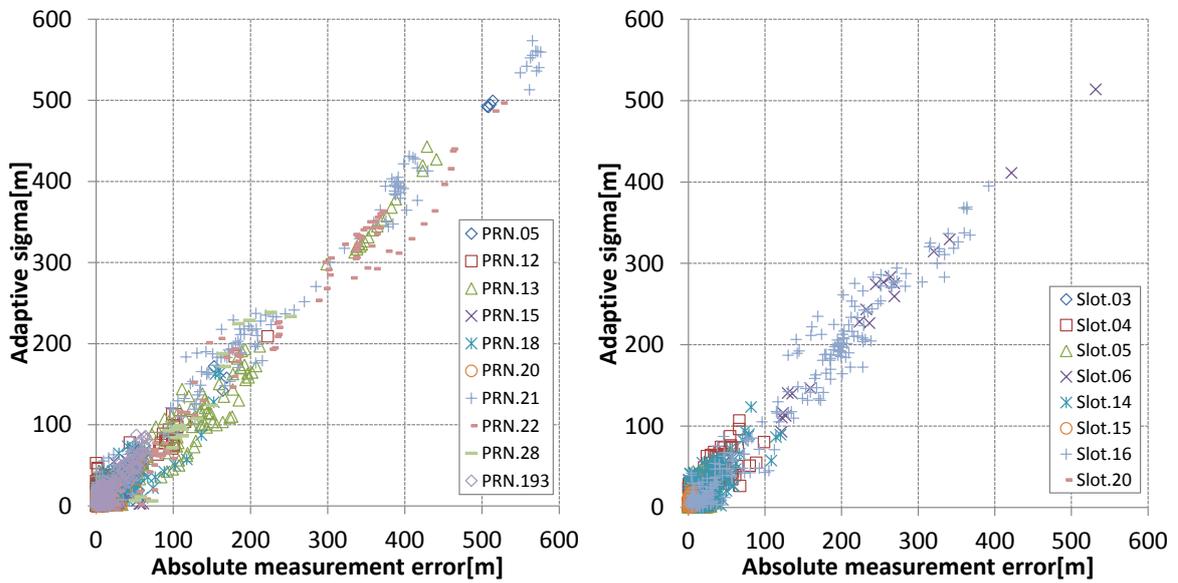


図 3.41 Lap06 の擬似距離誤差とアダプティブ推定観測ノイズの相関
(左側 ; GPS/QZSS、右側 : GLONASS)

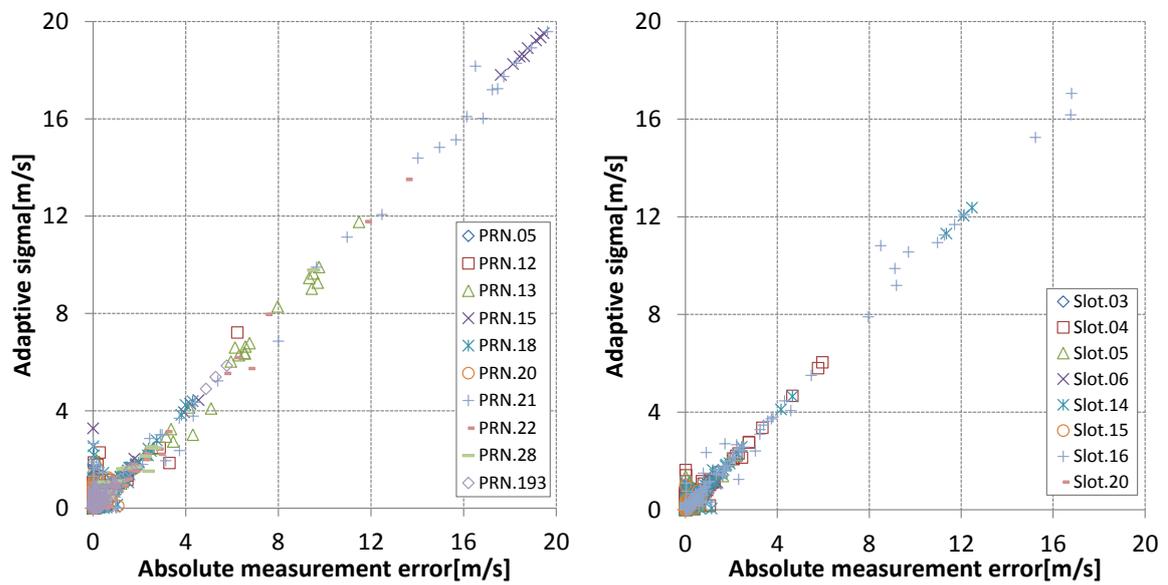


図 3.42 Lap06 のドップラー誤差とアダプティブ推定観測ノイズの相関
(左側 ; GPS/QZSS、右側 : GLONASS)

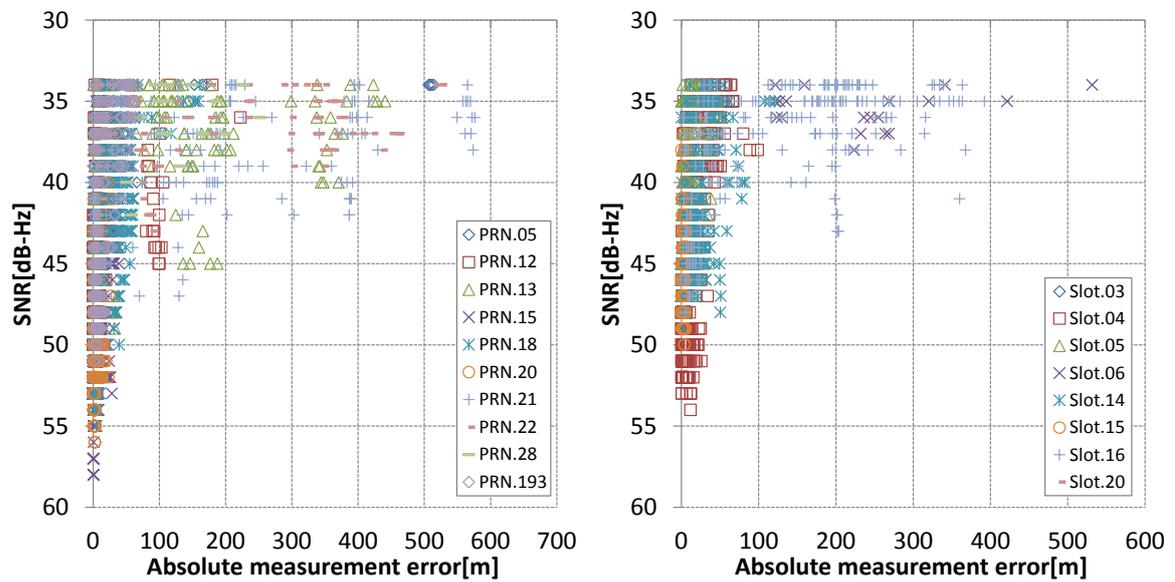


図 3.43 Lap06 の擬似距離誤差と SNR 近似による観測ノイズの相関
(左側 ; GPS/QZSS、右側 : GLONASS)

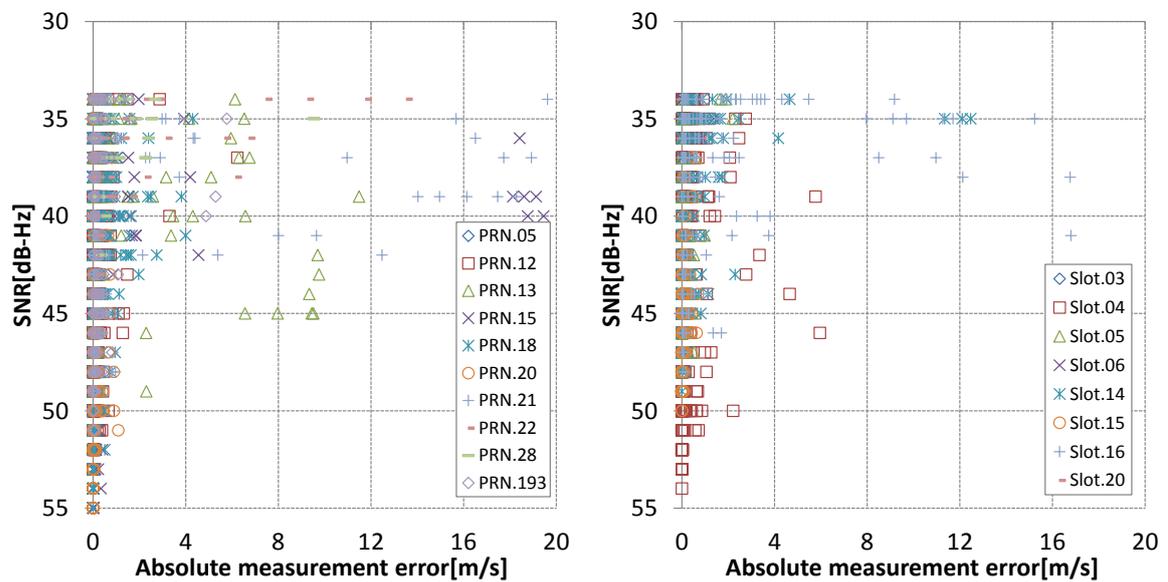


図 3.44 Lap06 のドップラー観測誤差と SNR 近似による観測ノイズの相関
(左側 ; GPS/QZSS、右側 : GLONASS)

第4章 都市部 GNSS 単独測位におけるインテグリティ情報の評価

本章では、都市部 GNSS 単独測位結果と、インテグリティ情報の一つであるプロテクションレベル（保護レベルとも呼ばれる）との関係性について議論する。初めに本研究で採用するプロテクションレベル及びその評価方法を定義し、位置及び速度誤差との関係性と、場所や自動車速度への依存性について議論する。

4.1 プロテクションレベルの定義

プロテクションレベルの導出には様々な手法が提案されているが、本研究では水平方向の誤差楕円及び高さ方向の標準偏差から得られる手法[30] [31]を採用する。理由の一つは、拡張カルマンフィルタの状態ベクトルの共分散行列の要素からさほど複雑な処理を要せずに算出できることである。そのため低コスト GNSS 受信機でも負担の無い計算が可能である。もう一つの理由は、最も一般的な手法と考えたためである。例えば、NMEA(National Marine Electronics Association, 全米船舶用電子機器協会)が定める船用機器間の通信に使用されるプロトコルの規格の一つである、NMEA 0183 V4.10[32]においてもそれらの標準偏差の出力について定められていることから、このように考えた。なお、本研究では拡張カルマンフィルタの観測ノイズに衛星起因の誤差項を含んでいないため、厳密には RTCA SC-159[30]の定めるプロテクションレベルとは異なり、状態ベクトルの共分散行列を用いる点のみ一致する。それでも、水平方向の誤差に対して誤差楕円を用いることは、自動車の走行データにおいて水平方向の位置誤差は東西方向と南北方向とが互いに独立になることは極めて稀で、ほとんどの場合に相関を持つという筆者の経験に合うものである。以下で上述の水平方向の誤差楕円及び高さ方向の標準偏差によるプロテクションレベルの算出方法を定義し、またその評価方法について詳しく述べる。

4.1.1 プロテクションレベルの導出

まずは位置情報のプロテクションレベルを導出する。水平方向及び高さ方向の位置の標準偏差を得るため、式(2.1)の ECEF 座標系で表される状態ベクトル共分散行列 \mathbf{P} のうち、位置情報を表す 3×3 のブロック \mathbf{P}_{g_u} を ENU(East, North, Up)座標系に変換する。

$$\begin{aligned}
P_{g_u,ENU} &= T^T P_{g_u} T \\
&= \begin{pmatrix} \sigma_e^2 & \sigma_{en} & \sigma_{eu} \\ \sigma_{ne} & \sigma_n^2 & \sigma_{nu} \\ \sigma_{ue} & \sigma_{un} & \sigma_u^2 \end{pmatrix} \\
T &= \begin{pmatrix} -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ -\cos\theta \sin\phi & -\sin\theta \sin\phi & \cos\phi \\ \cos\theta \cos\phi & \sin\theta \cos\phi & \sin\phi \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{4.1}$$

ここで、 T は経度 θ 、緯度 ϕ の地点にて ECEF 座標系から ENU 座標系に変換する回転行列である。

水平方向のプロテクションレベル導出時に誤差楕円を考える理由は、多くの場合に東西方向と南北方向の位置誤差に相関があると仮定するためである。概念図を図 4.1 に示す。誤差分布が真円でなく楕円のような形となり、さらに座標軸も東西南北から回転したようになる。そこで対角化による無相関化を行う。図 4.1 では長軸方向と短軸方向からなる座標系に回転させることを意味する。すると長軸方向の分布が最も大きくなり、こちらの標準偏差にて水平方向の位置誤差を正しく表現することができる。

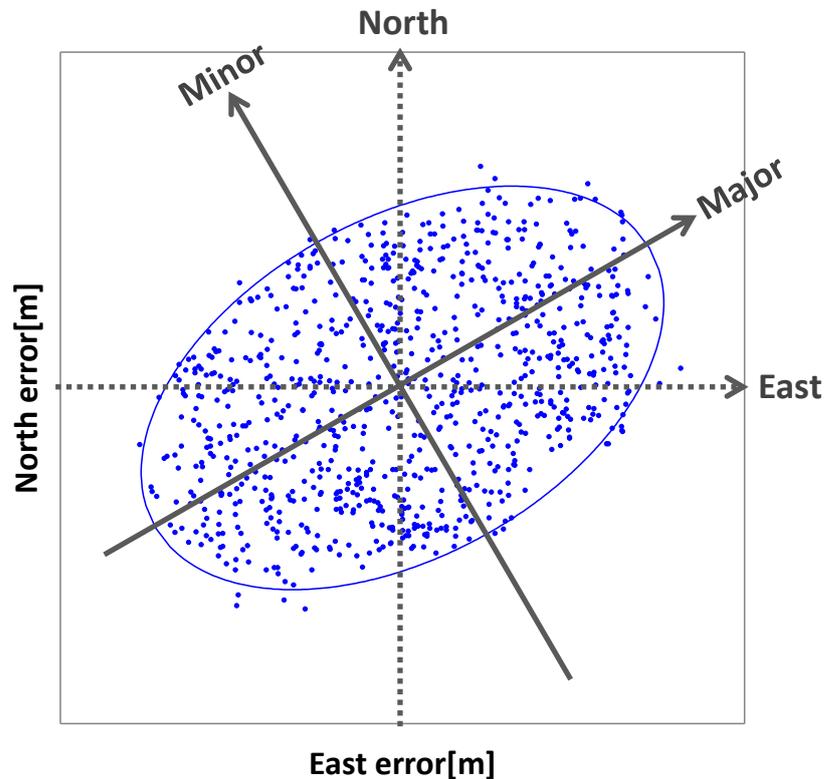


図 4.1 誤差楕円導出の概念図

対角化を行う場合、緯度及び経度方向の状態ベクトル共分散行列 $\mathbf{P}_{g_{u,EN}}$ の固有値 λ を求めればよい。すなわち、固有多項式

$$(\mathbf{P}_{g_{u,EN}} - \lambda \mathbf{I}) = 0 \quad (4.2)$$

を解くことで対角行列の要素が得られる。 $\sigma_{en} = \sigma_{ne}$ であることを利用すれば、式(4.2)の解は次のようになる。

$$\lambda = \frac{\sigma_e^2 + \sigma_n^2}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_e^2 - \sigma_n^2}{2}\right)^2 + \sigma_{en}^2} \quad (4.3)$$

値の大きい方が長軸方向の分散を示すことから、長軸方向の標準偏差 σ_{Hmajor} は次式より得られる[20] [30] [31]。

$$\sigma_{Hmajor} = \sqrt{\frac{\sigma_e^2 + \sigma_n^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_e^2 - \sigma_n^2}{2}\right)^2 + \sigma_{en}^2}} \quad (4.4)$$

式(4.4)から水平方向プロテクションレベル(HPL, Horizontal Protection Level)が定義される。また高さ方向プロテクションレベル(VPL, Vertical Protection Level)は式(2.3)の高さ方向の標準偏差 σ_u から定義される。

$$\begin{aligned} HPL_{pos} &= n \cdot \sigma_{Hmajor} \\ VPL_{pos} &= n \cdot \sigma_u \end{aligned} \quad (4.5)$$

ここで、 HPL_{pos} と VPL_{pos} はそれぞれ水平方向及び高さ方向の位置のプロテクションレベルである。なお、次に述べる速度のプロテクションレベルと区別するため添字を付与している。 n はプロテクションレベルの有意水準を調整するためのパラメータである。

速度のプロテクションレベルも位置のものと同様に状態ベクトルの共分散行列から導出することができる。

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{\dot{g}_{u,ENU}} &= \mathbf{T}^T \mathbf{P}_{\dot{g}_u} \mathbf{T} \\ &= \begin{pmatrix} \sigma_{\dot{e}}^2 & \sigma_{\dot{e}\dot{n}} & \sigma_{\dot{e}\dot{u}} \\ \sigma_{\dot{n}\dot{e}} & \sigma_{\dot{n}}^2 & \sigma_{\dot{n}\dot{u}} \\ \sigma_{\dot{u}\dot{e}} & \sigma_{\dot{u}\dot{n}} & \sigma_{\dot{u}}^2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\sigma_{\dot{H}major} = \sqrt{\frac{\sigma_{\dot{e}}^2 + \sigma_n^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\dot{e}}^2 - \sigma_n^2}{2}\right)^2 + \sigma_{\dot{e}n}^2}} \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} HPL_{vel} &= n \cdot \sigma_{\dot{H}major} \\ VPL_{vel} &= n \cdot \sigma_{\dot{u}} \end{aligned} \quad (4.8)$$

ここで、ここで、 HPL_{vel} と VPL_{vel} はそれぞれ水平方向及び高さ方向の速度のプロテクションレベルである。

本研究では、式(4.5)及び式(4.8)から得られる値をプロテクションレベルと定義し、評価する。いずれも状態ベクトルの共分散行列の要素を用いて算出されることから、観測ノイズ共分散行列のチューニングの影響を直に受ける。そのため従来の拡張カルマンフィルタとアダプティブ拡張カルマンフィルタには差異が生まれると考えられる。

4.1.2 プロテクションレベル評価の仕方

プロテクションレベルの評価では、スタンフォードチャート (Stanford diagram, Stanford plot とも呼ばれる) を用いる[33] [34]。

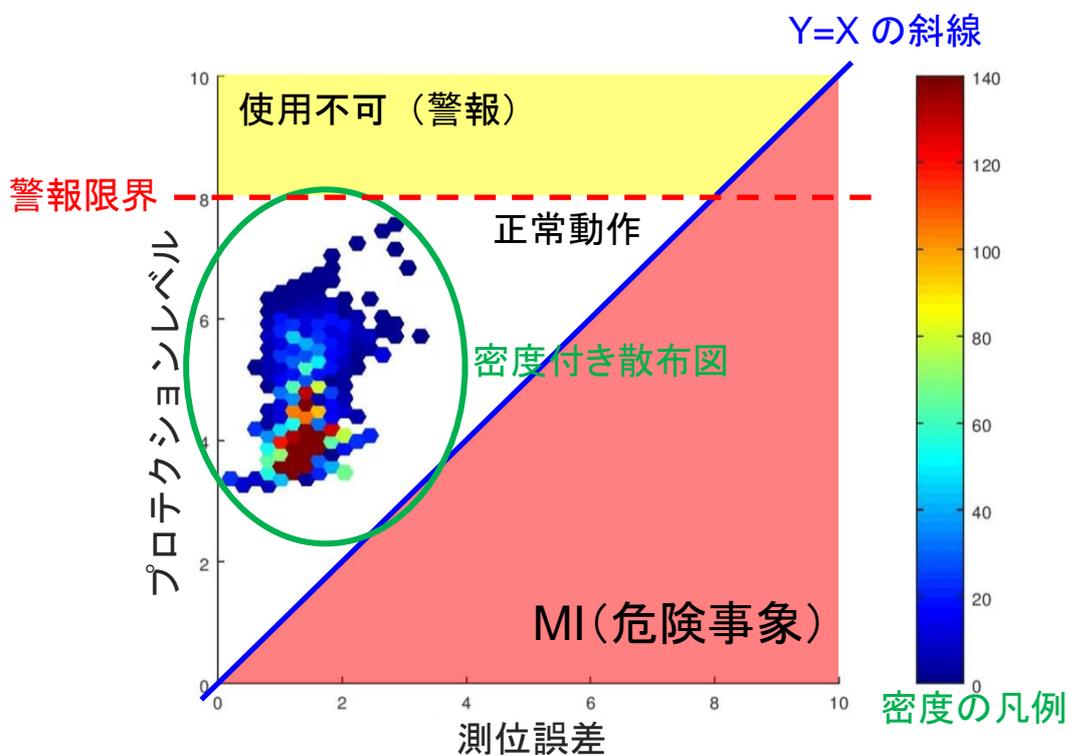


図 4.2 スタンフォードチャートによる評価例

図 4.2 がスタンフォードチャートによるプロテクションレベル評価の例である。横軸を測位誤差、縦軸をプロテクションレベルとして密度付きの散布図を描く。プロテクションレベルの評価においては、測位誤差がプロテクションレベルを上回らない状態、図中青色で示した $Y=X$ の斜線よりも上側が正常とされる。また、環境に応じてあらかじめ決めてある測位誤差の上限（警報限界、Alert Limit）とも比較される。最終的に図中白色の所が正常動作とされるエリアである。このエリアの中で、測位誤差が小さくかつプロテクションレベルも小さい値で分布することが理想的な状態と考えられる。もし測位誤差がプロテクションレベルを上回らない場合でも、プロテクションレベルが警報限界を超えてしまった場合は使用不可となる。図中の黄色のエリアがその状態を示し、アプリケーションによっては警報が鳴る状態である。そして最も危険な状態が、測位誤差がプロテクションレベルを上回る、図中の赤色で示したエリアである。この事象をミスリーディング情報（Misleading Information、危険事象）と呼び、本稿では“MI”と表記する。プロテクションレベルでは測位誤差を見積もれていない状態であるため、大きな測位誤差が発生しているにもかかわらず測位結果を信頼してしまう可能性のある、大変危険な状態である。なお、図では示していないが、MI の中でも測位誤差が警報限界を超える状態は、HMI(Hazardously Misleading Information)とも呼ばれる。

第 2 章で示した都市部の走行実験データにおいて、同じく第 2 章で示した従来の拡張カルマンフィルタ及びアダプティブ拡張カルマンフィルタそれぞれの位置・速度のプロテクションレベルを算出し、MI の発生率から評価する。なお、評価に際しては警報限界を設けなかった。理由は、同一環境の走行データであっても用途によってその値が変わるためである。例えば、主に低コスト GNSS 受信機が利用されるカーナビ等の場合、数十 m の位置精度でも許容されるのに対して、同じく低コスト受信機が用いられる停止支援や V2X 通信の場合は、数 m 程度、場合によってはさらに小さい精度を要求されることがある。一方で、本研究は特定の用途を対象としていないため、警報限界を設定することが難しいと考えた。そのため、本稿では MI のみで評価することにした。

4.2 都市部単独測位誤差との比較

図 4.3～図 4.10 は、両拡張カルマンフィルタの状態ベクトル共分散行列の要素を用いて、式 (4.5)及び式(4.8)を $n = 6$ として算出したプロテクションレベルのスタンプフォードチャートである。赤色で塗りつぶした所が **MI** を示している。

まず、水平方向の位置に着目する。図 4.3 に示した従来の拡張カルマンフィルタでは、**MI** が 82.7%(3173/3837)となっているのに対して、図 4.4 のアダプティブ拡張カルマンフィルタではそれが 26.4%(1012/3837)まで軽減されている。繰り返しになるが、両拡張カルマンフィルタの唯一の差異は、観測ノイズ共分散行列である。観測ノイズのアダプティブ推定により、位置の精度や確度だけでなく、インテグリティ情報の信頼性も大幅に向上していることがわかる。

同様の傾向は図 4.5 及び図 4.6 に示した高さ方向の位置にも表れている。しかしながら、アダプティブ拡張カルマンフィルタを用いた場合でも **MI** が 35.3%となっており、水平方向の **MI** よりもやや大きな値となっている。これは水平方向よりも高さ方向の誤差が大きくなるという GNSS 測位の傾向が関係している。第 2 章で示した通り、位置誤差は水平方向よりも高さ方向の方が大きな値であった。しかし、カルマンフィルタチューニングでは ECEF 座標系の 3 軸方向の誤差を同列に扱い、誤差分散の初期値やプロセスノイズ Q を 3 軸方向全てにおいて同値としたため、状態ベクトルの高さ方向の分散が水平方向に比べて極端に大きくなることは考えにくい。そのためプロテクションレベルの **MI** も高さ方向の方が大きな値になったものと考えられる。

速度結果についても同様にアダプティブ拡張カルマンフィルタによる性能の改善が見られる。図 4.7 の従来の拡張カルマンフィルタによる水平方向のプロテクションレベルでは **MI** が 13.6%(521/3837)であるのに対して、図 4.8 のアダプティブ推定の場合は 5.2%(200/3837)となっている。位置に比べて **MI** の値が小さめであるが、これも第 2 章で議論した通り、GNSS ドップラーシフトの NLOS 誤差が擬似距離に比べて小さいことが一因であると考えられる。また、速度誤差は停車中には発生しにくいことも要因の一つと思しい。これについては次節以降で述べる。同様に図 4.9 及び図 4.10 に示した高さ方向のプロテクションレベルでもアダプティブ推定による改善が見られる。なお、**MI** は水平方向よりも小さな値をとる傾向にあった。これは自動車のダイナミクスに起因する。自動車の場合、水平方向に比べて高さ方向の変動が小さいため、速度誤差が発生しにくいものと考えられる。

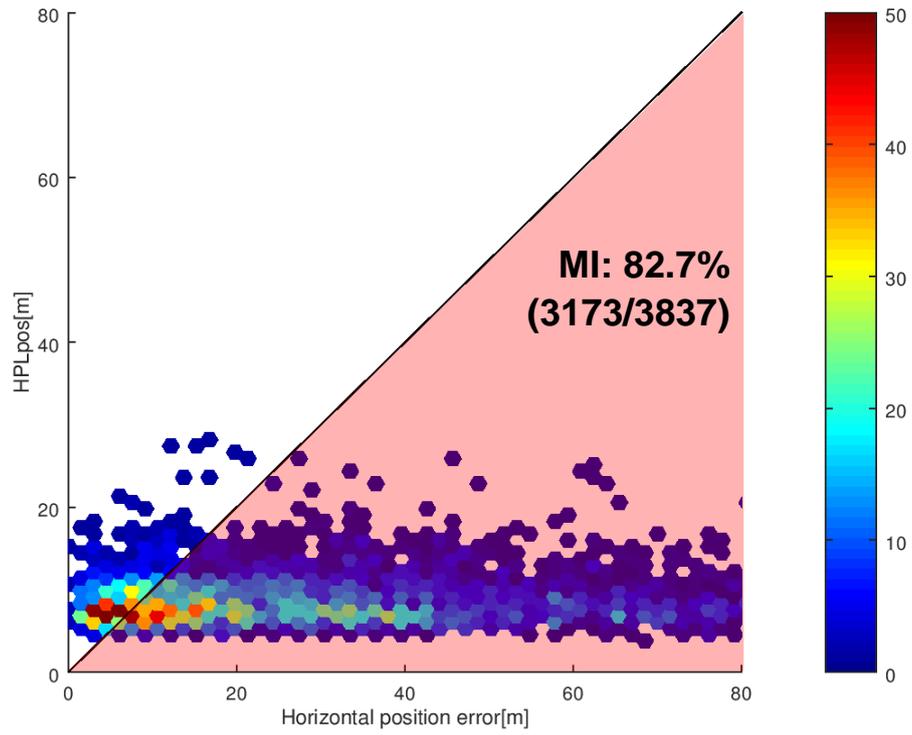


図 4.3 従来の拡張カルマンフィルタによる位置の HPL

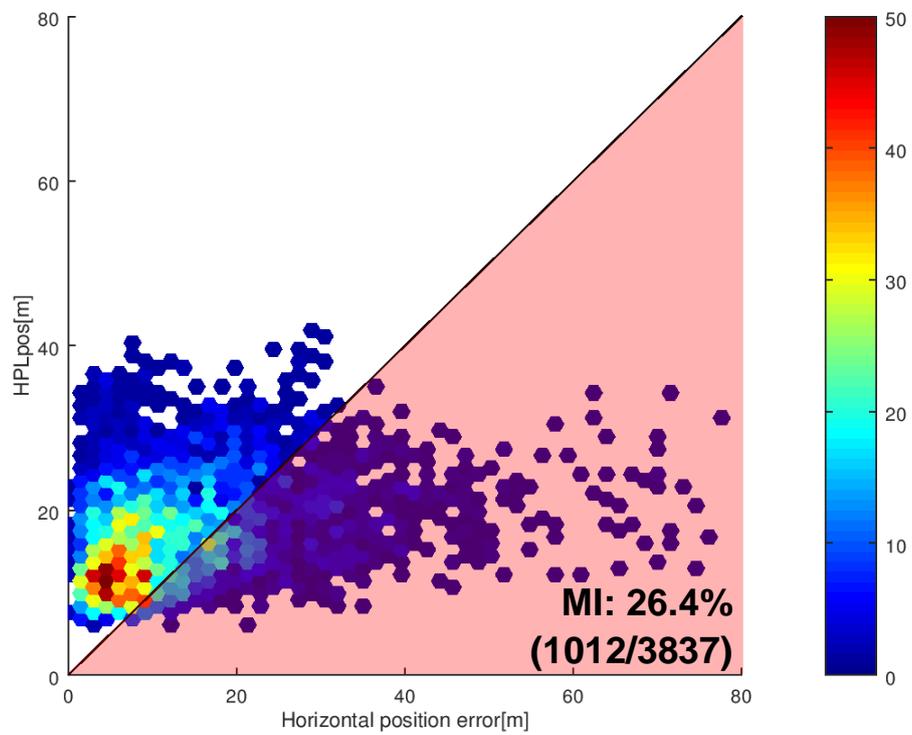


図 4.4 アダプティブ拡張カルマンフィルタによる位置の HPL

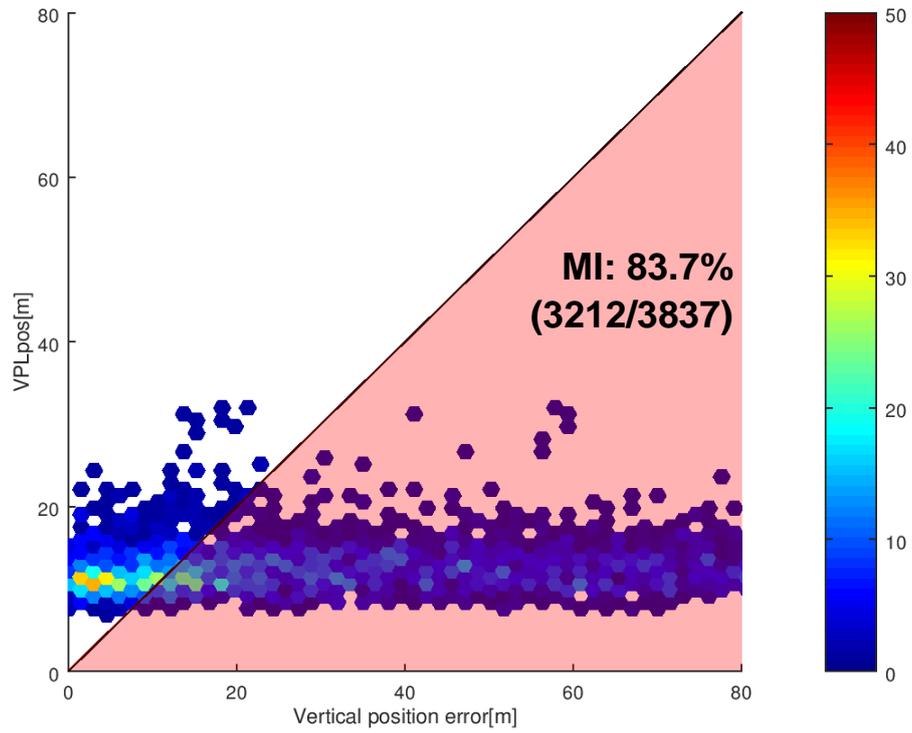


図 4.5 従来の拡張カルマンフィルタによる位置の VPL

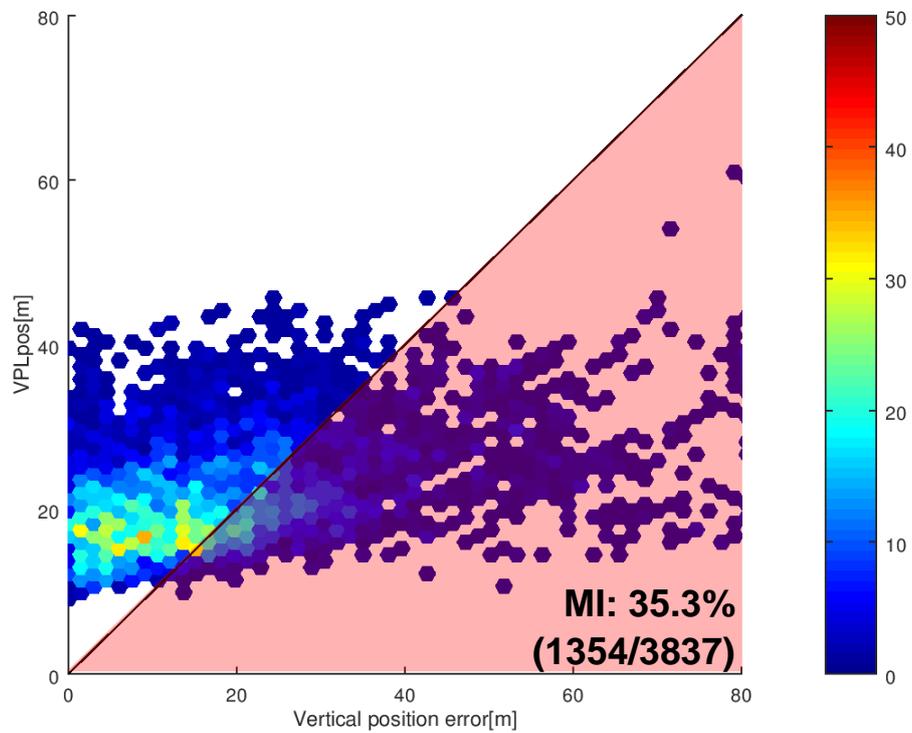


図 4.6 アダプティブ拡張カルマンフィルタによる位置の VPL

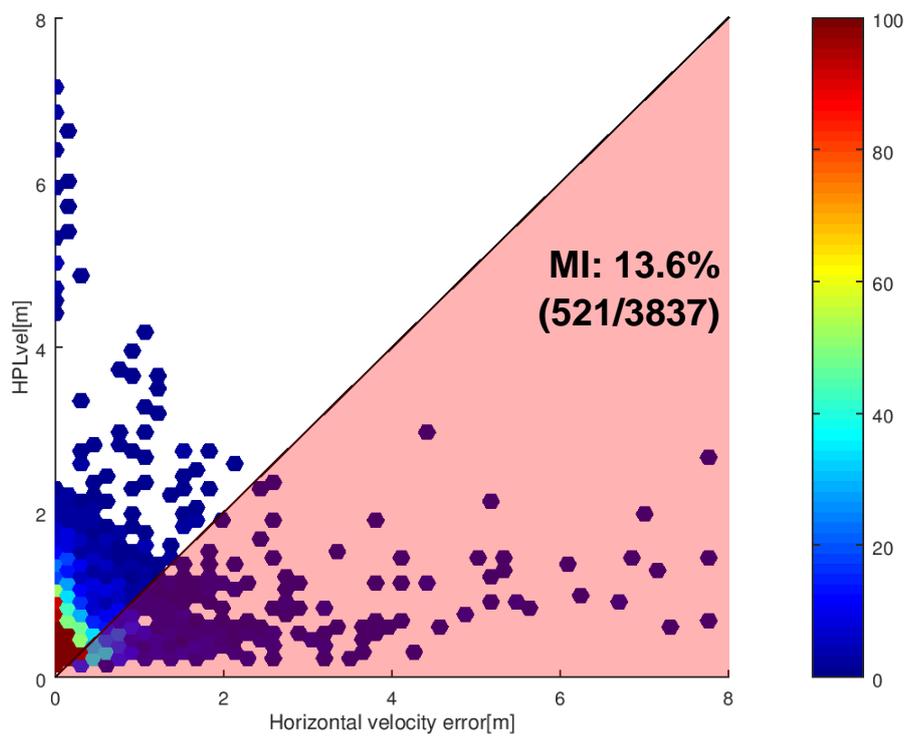


図 4.7 従来の拡張カルマンフィルタによる速度の HPL

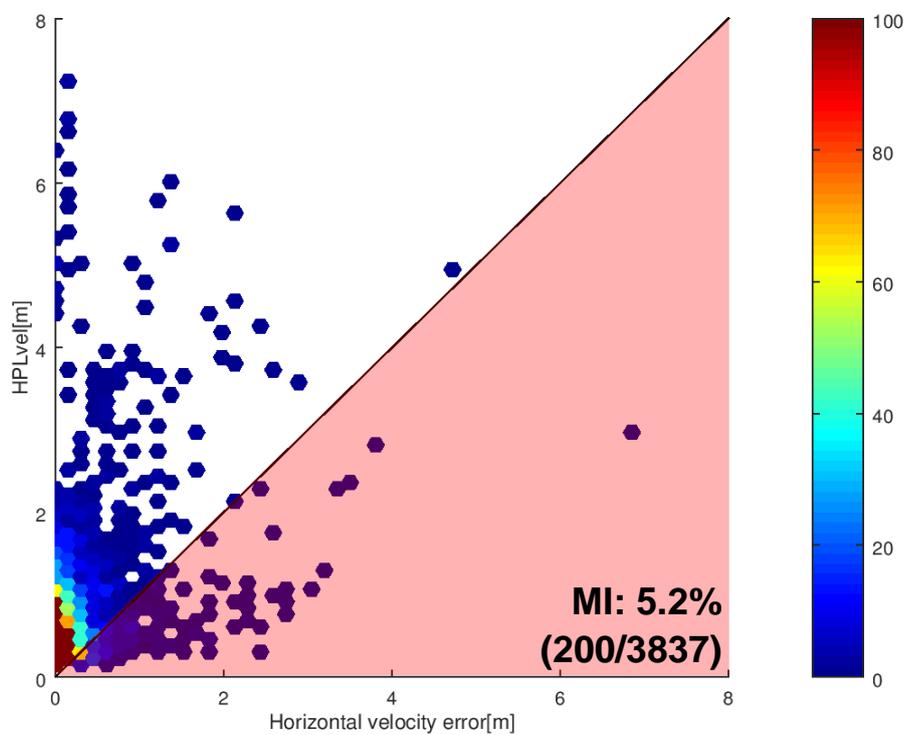


図 4.8 アダプティブ拡張カルマンフィルタによる速度の HPL

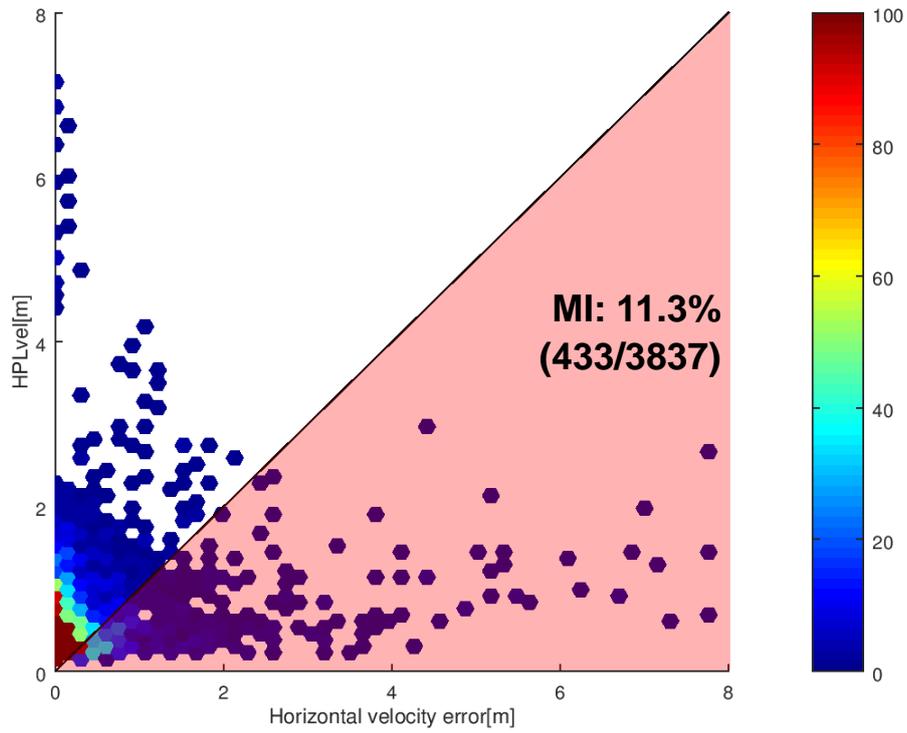


図 4.9 従来の拡張カルマンフィルタによる速度の VPL

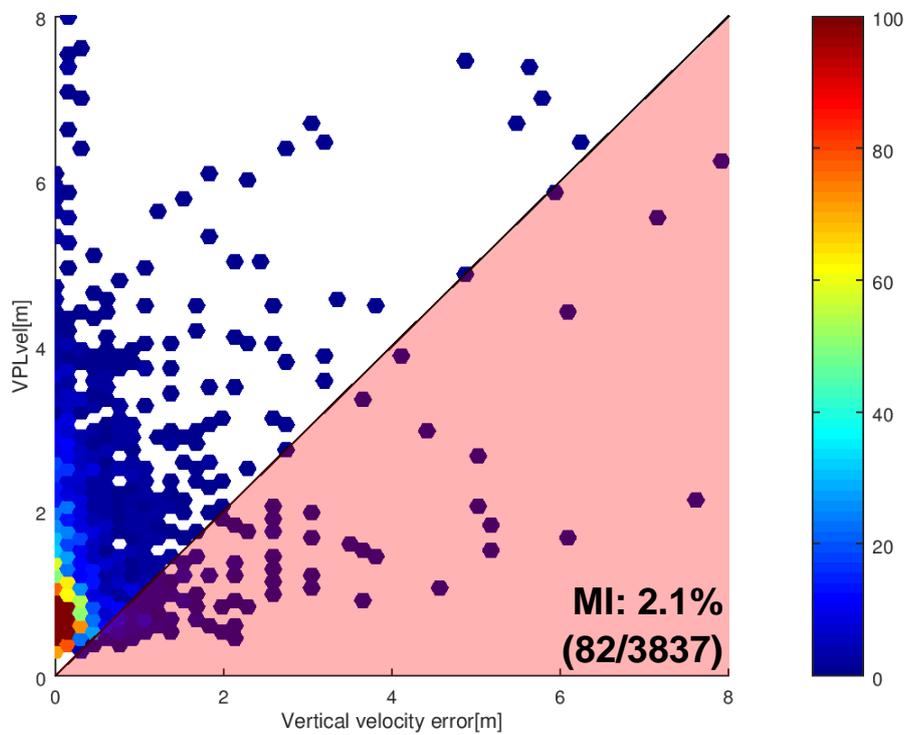


図 4.10 アダプティブ拡張カルマンフィルタによる速度の VPL

表 4.1 と表 4.2 に周回毎の位置のプロテクションレベル及び速度のプロテクションレベルによる MI の値をまとめる。周回毎にばらつきがあるものの、全ての周回において従来の拡張カルマンフィルタに見られた大きな MI の値がアダプティブ拡張カルマンフィルタにて抑制されることが確認できる。

表 4.1 周回毎の位置の MI まとめ

	HPL _{pos}		VPL _{pos}	
	Adaptive EKF	Conventional EKF	Adaptive EKF	Conventional EKF
Lap01	30.6%(210/687)	82.0%(563/687)	34.9%(240/687)	81.4%(559/687)
Lap02	15.4%(83/538)	86.1%(463/538)	38.7%(208/538)	86.6%(466/538)
Lap03	32.6%(213/654)	82.7%(541/654)	30.4%(199/654)	81.2%(531/654)
Lap04	13.2%(89/673)	85.0%(572/673)	26.7%(180/673)	89.9%(605/673)
Lap05	44.7%(311/695)	83.7%(582/695)	52.7%(366/695)	84.6%(588/695)
Lap06	18.0%(106/590)	76.6%(452/590)	27.3%(161/590)	78.5%(463/590)

表 4.2 周回毎の速度の MI まとめ

	HPL _{vel}		VPL _{vel}	
	Adaptive EKF	Conventional EKF	Adaptive EKF	Conventional EKF
Lap01	4.8%(33/687)	10.3%(71/687)	3.3%(23/687)	9.5%(65/687)
Lap02	6.5%(35/538)	21.6%(116/538)	2.6%(14/538)	14.9%(80/538)
Lap03	6.0%(39/654)	15.7%(103/654)	1.7%(11/654)	14.5%(95/654)
Lap04	4.6%(31/673)	11.9%(80/673)	1.0%(7/673)	9.7%(65/673)
Lap05	4.5%(31/695)	11.2%(78/695)	1.3%(9/695)	9.1%(63/695)
Lap06	5.3%(31/590)	12.4%(73/590)	3.1%(18/590)	11.0%(65/590)

4.3 MI の移動速度への依存性

本節では、[35]にて報告された GNSS 測位誤差と移動速度との関係性について考察するため、アダプティブ拡張カルマンフィルタにより得られた位置及び速度のプロテクションレベルに対して、車両速度が時速 5km 未満の場合とそれ以上の場合で MI の値を比べることで、プロテクションレベルと移動速度との関係性を考察する。なお、車両速度は真値（POS-LV 出力値）を参照した。

4.3.1 位置のプロテクションレベルと移動速度の関係性

表 4.3 は時速 5km/h を閾値とした場合のアダプティブ拡張カルマンフィルタより得られる位置のプロテクションレベル評価における MI の値のまとめである。水平方向の結果を見てみると、全周回とも時速 5km/h 未満の MI の方が大きい傾向にある。しかしながら、高さ方向の結果にその傾向は認められず、周回によっては時速 5km/h 未満の MI の方が小さい場合がある。

当初は、低速時や停車時の MI が大きくなると予想していた。これは以下のような事象が発生すると考えたためである。

- 車両が移動することで NLOS 信号経路が変わる、あるいは途切れるために NLOS 信号追尾が安定しない
- 低速時、あるいは停車時には NLOS 信号の経路が安定する

水平方向の結果は予想通りであったが、高さ方向に関してはその限りではなかった。本研究ではこの原因究明に至らなかったため、今後の課題としたい。

表 4.3 時速 5km/h で区切った場合の位置の MI まとめ

	Horizontal		Vertical	
	Speed < 5km/h	Speed ≥ 5km/h	Speed < 5km/h	Speed ≥ 5km/h
lap01	34.7%(125/360)	26.0%(85/327)	26.1%(94/360)	44.6%(146/327)
lap02	20.4%(34/167)	13.2%(49/371)	21.0%(35/167)	46.6%(173/371)
lap03	51.6%(130/252)	20.6%(83/402)	43.8%(134/306)	18.7%(65/348)
lap04	13.8%(43/312)	12.7%(46/361)	47.1%(147/312)	9.1%(33/361)
lap05	48.6%(172/354)	40.8%(139/341)	50.6%(179/354)	54.8%(187/341)
lap06	23.5%(58/247)	14.0%(48/343)	14.2%(35/247)	36.7%(126/343)
Total	33.2%(562/1692)	21.0%(450/2145)	35.7%(624/1746)	34.9%(730/2091)

4.3.2 速度のプロテクションレベルと移動速度の関係性

表 4.4 は時速 5km/h を閾値とした場合のアダプティブ拡張カルマンフィルタより得られる速度のプロテクションレベル評価における MI の値のまとめである。水平方向、高さ方向共に時速 5km/h 未満の低速時、あるいは停車時には MI が発生する頻度が極めて小さいことがわかる。つまり、速度のプロテクションレベルにて発生した MI は全て走行中に発生していたことになる。

この要因を次のように考える。

- 停車時や低速時にもドップラーシフトに NLOS 観測誤差が重畳されるものの、速度計算結果の値自体が小さいため、結果として MI にならない
- 移動中は速度計算結果の値がある一定値以上になるため、NLOS 観測誤差の影響で MI が発生する場合がある

表 4.4 時速 5km/h で区切った場合の速度の MI まとめ

	Horizontal		Vertical	
	Speed < 5km/h	Speed ≥ 5km/h	Speed < 5km/h	Speed ≥ 5km/h
lap01	0.0%(0/360)	10.1%(33/327)	0.0%(0/360)	7.0%(23/327)
lap02	0.6%(1/167)	9.2%(34/371)	0.0%(0/167)	3.8%(14/371)
lap03	0.0%(0/306)	11.2%(39/348)	0.0%(0/306)	3.2%(11/348)
lap04	0.0%(0/312)	8.6%(31/361)	0.0%(0/312)	1.9%(7/361)
lap05	0.0%(0/354)	9.1%(31/341)	0.0%(0/354)	2.6%(9/341)
lap06	0.0%(0/247)	9.0%(31/343)	0.0%(0/247)	5.2%(18/343)
Total	0.1%(1/1746)	9.5%(199/2091)	0.0%(0/1746)	3.9%(82/2091)

4.4 MI と場所の依存性

図 4.11～図 4.14 に、アダプティブ拡張カルマンフィルタより得られた位置及び高さのプロテクションレベルにて MI が発生した場所をプロットしている。図の原点が走行コースのスタートと地点で、それぞれの図において MI が発生した場合の真の水平位置を示してある。

まず図 4.11 示した水平位置プロテクションレベルの MI 発生箇所を見てみると、ある特定の場所にて必ず発生する訳ではないことがわかる。交差点の左折時（走行コースは全て左折で右折する箇所はない）に MI が発生するようにも見受けられるが、これはフィルタ演算を行っているため一定期間 MI が発生すること、前節で述べた水平位置における MI は低速時に発生しやすいことから、左折時に発生しやすいものと考えている。

高さ方向の位置プロテクションレベルではまた違った傾向が見られる。MI 発生箇所を図 4.12 に示してあるが、コース全体でほぼ満遍なく発生しているように見受けられる。また、水平方向と高さ方向の MI 発生箇所にある程度の差異が見られる。例えば水平位置で MI が発生しても、高さ方向では発生していない地点があることである。両者にどの程度相関があるのかは、今後調査・検討していきたい。

図 4.13 と図 4.14 はそれぞれ水平方向と高さ方向の速度のプロテクションレベルによる MI 発生箇所を示している。位置に比べて速度の MI 発生率が非常に低いため、プロットが疎になっている。速度に関してもある特定の場所で MI が発生するという事はなかった。

以上より、本研究にて示したプロテクションレベルによる MI に場所の依存性はないと結論付ける。

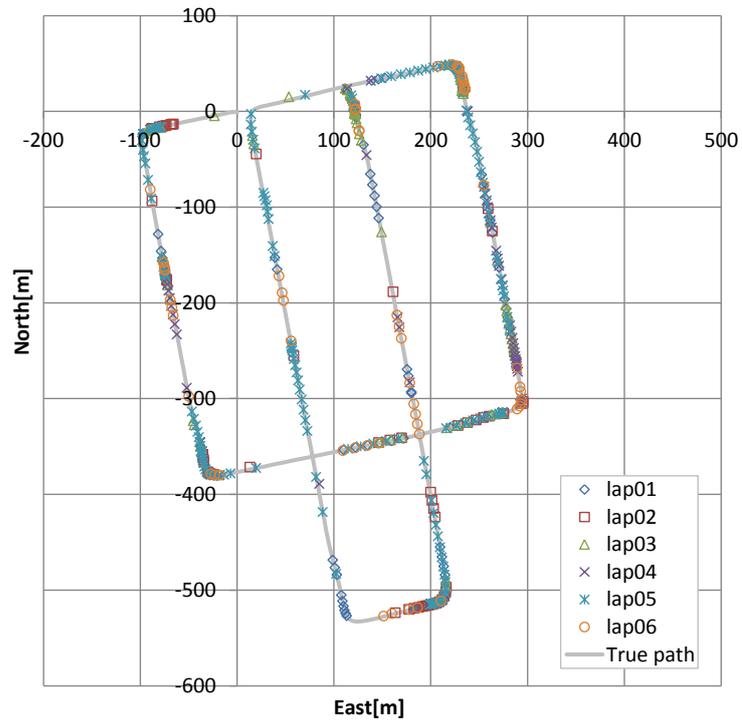


図 4.11 アダプティブ拡張カルマンフィルタによる HPL_{pos} の MI 発生箇所

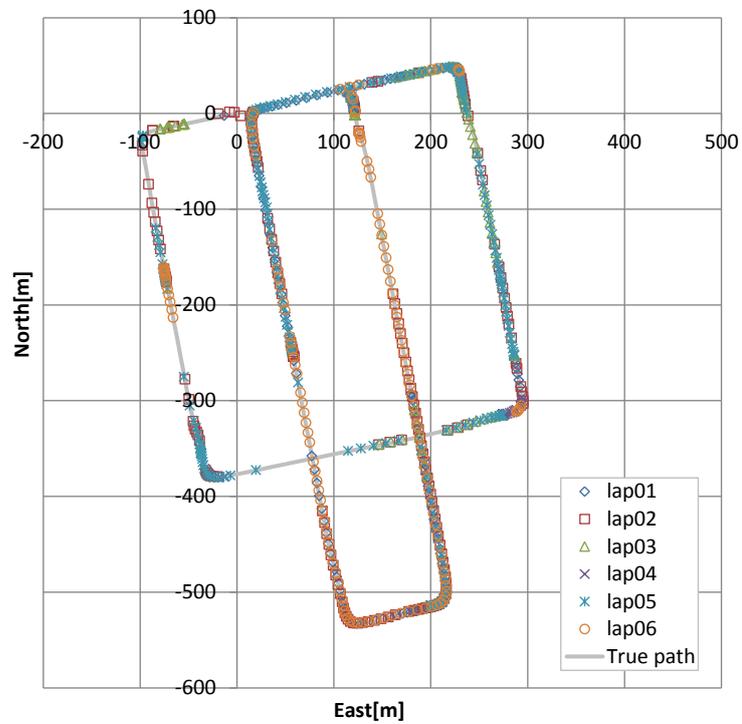


図 4.12 アダプティブ拡張カルマンフィルタによる VPL_{pos} の MI 発生箇所

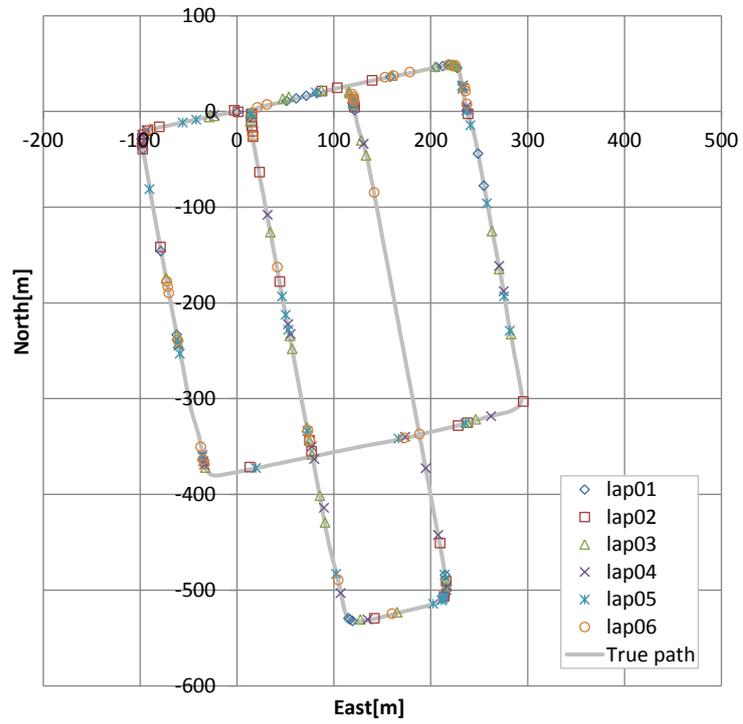


図 4.13 アダプティブ拡張カルマンフィルタによる HPL_{vel} の MI 発生箇所

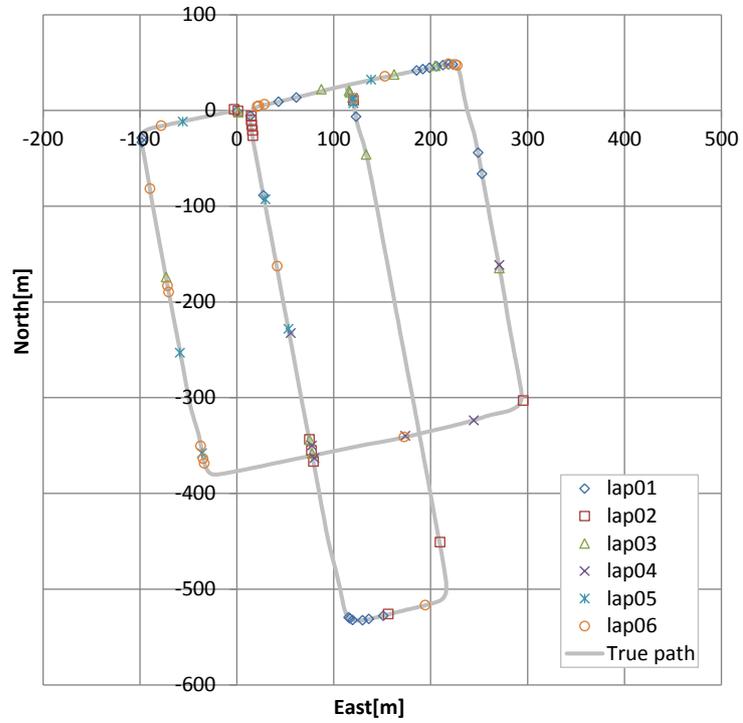


図 4.14 アダプティブ拡張カルマンフィルタによる VPL_{vel} の MI 発生箇所

4.5 本章のまとめ

本章では、拡張カルマンフィルタより得られる状態ベクトルの共分散行列を利用したプロテクションレベルを定義し、都市部の走行実験データにて従来の拡張カルマンフィルタを用いた場合と提案手法であるアダプティブ拡張カルマンフィルタを用いた場合のミスリーディング情報 **MI** の発生率に着目し、位置及び速度のプロテクションレベルの評価を行った。

位置と高さ双方において従来の拡張カルマンフィルタでは大きな **MI** 発生確率となったが、アダプティブ拡張カルマンフィルタにてそれが抑制されることがわかった。両者の差異は観測ノイズの共分散行列であるが、位置及び速度誤差を抑制することと、さらに状態ベクトルの共分散行列に寄与することにより、**MI** 発生確率の差が生まれたものと考えられる。

より詳細に解析するため、自動車の速度 5km/h を閾値として停車・低速時および移動時の **MI** の発生率の比較を行った。水平方向の位置については停車・低速時の **MI** 発生率が高いことが確認されたが、高さ方向の位置については速度による顕著な差は認められなかった。両者の結果に差異が生まれた原因の究明は今後の課題としたい。一方速度については、**MI** の発生は水平方向と高さ方向共にほぼ全て移動時であることがわかった。言い替えば、アダプティブ拡張カルマンフィルタによる速度計算結果が小さい場合は、ほぼ信頼して良いと解釈できる。

さらに、位置及び速度の **MI** 発生場所を確認し、ある特定の場所でのみ **MI** が発生する訳ではないこともわかった。

なお、総じてアダプティブ拡張カルマンフィルタによるプロテクションレベルの改善は見られたものの、理想的な **MI** は 0% である。今回は 6σ 相当のプロテクションレベルを算出したにもかかわらず、位置及び速度において相応の **MI** を得ることはできなかった。理想的な **MI** を本研究で示したアダプティブ拡張カルマンフィルタのみで実現することは非常に難しいと考えられる。よりロバストな **GNSS** 測位を実現するためには、さらなる調査・検討による信頼性指標の改善が課題として挙げられる。

第5章 結論

本章にてこれまで述べた内容についてまとめ、今後の展望と課題について述べる。

5.1 本研究のまとめ

本研究では、GNSS 単独測位による位置及び速度の信頼性を高めることを目的として、GNSS 信号の反射や回折の影響が大きい都市部においても高精度で高確度な測位、及び信頼性の高いインテグリティ情報を実現する手法を提案した。

第1章では航法の歴史を振り返ると共に、GNSS が海上や陸上における航法に革新をもたらしたことを紹介し、特に近年の自動車分野における GNSS 利用動向にて精度、コスト、及びロバスト性への要求が高まっていることを述べた。枯れた技術とも捉えられる擬似距離とドップラーシフトを用いた単独測位においても、都市部における支配的な誤差要因である NLOS の影響を低減することで測位性能を向上することの恩恵があることを示した。

第2章では、都市部の GNSS 観測データにてアダプティブ拡張カルマンフィルタを適用することにより、GNSS 単独測位の位置及び速度の精度、確度が大幅に改善することを示した。NLOS に起因する観測ノイズはその複雑な信号経路により未知であると考え、観測ノイズが未知の場合を想定したアダプティブ拡張カルマンフィルタの効果を期待した研究であった。ただし、一般的なアダプティブ拡張カルマンフィルタとは異なり、フィルタが収束後にアダプティブ推定を適用すること、従来の拡張カルマンフィルタによる観測ノイズの分散推定値をアダプティブ推定した分散の下限値とすること、を特徴とするフィルタを考案した。このフィルタは低コスト GNSS 受信機の実時間の動作にも支障の無い処理負荷である。西新宿の都庁付近で収録した同一の周回コース全6周分の観測データを用いて、従来の拡張カルマンフィルタとアダプティブ拡張カルマンフィルタによる測位結果を比較することで、GNSS 単独測位の位置及び速度におけるアダプティブ推定の効果を立証した。

第3章では、第2章で示した効果の要因を探るため、実際の観測誤差と両拡張カルマンフィルタにより推定される観測ノイズの分散を比較した。まずは実際の観測誤差、特に NLOS に起因する誤差を抽出する方向を示した。天頂方向に位置する衛星信号は NLOS 信号ではないとの仮定から、擬似距離及びドップラーシフトに重畳される NLOS 観測誤差を抽出することに成功した。抽出法の立証のため、GNSS シミュレータを用いた評価を行い、その効果を示した。都市部の走行データにおける NLOS 観測誤差を評価したところ、擬似距離には 100m を優に超える観測誤差が見られ、最大で 700m を超えることもあった。ドップラーシフトにも数 m/s の観測誤差が顕著にみられ、最大で 20m/s を超える誤差もみられた。どちらもオープンスカイ等の NLOS 信号追尾が起きない環境ではまず考えにくい誤差量であった。この抽出した観測誤差と両拡張カルマンフィルタの観測ノイズとの比較から、両拡張カルマンフィルタによる位置及び速度の精度、確度の差異が生まれる原因が明らかになった。従来の拡張カルマンフィルタでは

SNR から観測ノイズを推定したが、観測誤差と SNR に明確な相関が見られなかった。NLOS 信号でなければ概ね SNR から観測ノイズを推定できるが、NLOS 観測誤差の前ではその推定が無効であることがわかった。一方、アダプティブ推定による観測ノイズと実際の観測誤差には非常に高い相関がみられた。NLOS 信号であっても、提案手法であるアダプティブ拡張カルマンフィルタは観測誤差を正しく推定できたことにより、都市部においても位置及び速度の精度、確度の改善が実現できたことを示した。

第4章では両拡張カルマンフィルタより得られるインテグリティ情報の検証を行った。状態ベクトルの共分散行列を利用したプロテクションレベルを定義し、実際の測位誤差との比較からミスリーディングの発生率(MI)に着目して評価した。従来の拡張カルマンフィルタによるプロテクションレベルでは、水平方向、高さ方向共に位置及び速度の MI が頻発した。特に位置情報については、MI が 82~84%となり、プロテクションレベルによる測位誤差の検出はまず不可能であるとの見解を得た。一方、アダプティブ拡張カルマンフィルタにて MI が大きく抑制されることもわかった。さらに、自動車の速度と MI 発生との関係性、及び発生する場所の依存性についても調査した。位置プロテクションレベルの場合、水平方向では停車時や低速時に多く MI が発生するのに対して、高さ方向はその限りではないことを示した。また、速度の MI は停車時や低速時には発生せず、移動時のみに発生することも明らかになった。場所の依存性については、位置、速度共に傾向は認められず、特定の場所においてのみ MI が発生する訳ではないことも示された。

5.2 今後の展望及び課題

自動車分野における車両の位置・速度推定は、今後いっそう精度や確度、その信頼性、そしてコストが求められると考えられる。GNSS の搬送波位相を用いた精密測位や、GNSS と各種センサーとの統合がますます積極的になされることが考えられる。さらには、ローエンド製品の利用によるコストダウンもなされるであろう。

その一方で、やはり擬似距離やドップラーシフトを用いる単独測位の担う役割は重要である。筆者は単独測位が全ての GNSS 測位の基準になると考えている。例えば搬送波位相を用いた精密測位の場合、フィルタ演算の PVT 初期値を単独測位結果とすることがある。初期値が正しければ正しいほどフィルタ演算は安定して実行することができる。また、擬似距離やドップラーシフトと比較するとどうしても搬送波位相の追尾は途切れやすい。これに起因して精密測位が途切れ、フィルタ演算のリセットを余儀なくされた場合でも、並列して実行できる単独測位の性能が高ければ、フィルタリセットの悪影響を最低限に抑えることができる。そのため単独測位の重要視性は今後も無視できないと考えている。

さらに、ロバスト性を追求するためには位置・速度の信頼性への関心が高まるものと予想する。GNSS による位置・速度は、どうしても誤差が大きくなることがある。様々な誤差要因が混在する GNSS 測位においては、避けようの無い事象とも言うことができる。しかし、そのような場合でも信頼性を指標として示すことができれば、例えばアプリケーション側で位置・速度情報の取捨選択が可能になる。このような情報により、GNSS の利便性がますます高まる。その視点では、本研究で示したアダプティブ拡張カルマンフィルタによるプロテクションレベルではその要求を満たすことができない。さらに MI 発生の傾向について事象を明らかにすることが出来なかった点もあった。これらの問題を解決し、信頼性指標をより堅牢なものにすべく、更なる調査・研究を継続していく。

謝辞

本論文は、筆者が古野電気株式会社に在籍しながら東京海洋大学大学院博士後期課程の社会人学生として執筆したもので、多くの方のご協力を経て完成に至りました。ここに皆様への謝意を表したいと思います。

まず、指導教官の東京海洋大学准教授、久保信明先生に感謝申し上げます。初めて久保先生と出会ったのは2001年、東京商船大学の3年生だった頃です。思い起こせば、右も左も言葉もわからなかった筆者にGPSのいろはやプログラムの組み方等を丁寧に教えて下さいました。博士前期課程修了後に社会人となり、10年程してから再びご指導いただきましたが、当時と変わらず優しく、時に厳しく接していただき、嬉しかったです。学生の身分はこれで最期かもしれませんが、また一緒に論文が書ければと思います。

本論文の副査を務めていただきました東京海洋大学教授の庄司りり先生にも感謝申し上げます。在学中いつも明るく励ましていただき、何とか論文を仕上げることができました。公開発表会後「カルマンフィルタの解説がわかりやすかった」と言っていただけたこと、誇りです。

同じく副査を務めていただきました電子航法研究所上席研究員の坂井丈泰先生にも感謝申し上げます。公開発表会後「非常に面白い内容だった」と言っていただき嬉しかったですし、何より保護レベルに言及した論文を権威であります坂井先生に読んでいただけたことは自信になりました。

東京海洋大学名誉教授で測位航法学会会長の安田明生先生にも感謝申し上げます。私をGPSの世界に誘って下さったのは他にもない安田先生です。出身大学の出身研究室で博士後期課程を修了できることはこの上ない幸せです。

情報通信工学研究室のメンバーにも感謝申し上げます。ゼミに参加して議論したり、一緒に学会に行ったり、一緒に門仲に行ったりできたこと、刺激にもなりましたし楽しかったです。

多大なご支援をいただきました古野電気株式会社の皆様にも感謝申し上げます。入学に際しては社会人学生の先輩でもある近藤さんにご尽力いただきました。入学後異動となってからは、同じく社会人学生の先輩にあたる岡田さんにもご協力いただきました。また、実験や解析環境構築は古野電気及びeRide, Incの同僚の皆様のご協力なくしては実現しえませんでした。

両親姉弟にも感謝申し上げます。筆者が博士後期課程を志したのは、紛れもなく充実した博士前期課程を過ごせたからです。あの2年間があったからこそ、GPSに関する研究開発を生業とすることができました。

最後に、妻と息子達にも感謝申し上げます。家を留守にするだけならまだしも、学位論文作成のために妻の誕生日を一緒に過ごすことができなかつたのは痛恨の極みです。今後ありとあらゆる形で償っていく所存です。また息子達は、癒しでした。

今回の学位取得は、筆者にとって新たなスタートです。入学前に思い描いたような学生生活とはやや異なる面もありましたが、何とか終えることができました。この3年間の経験を糧に、今後の研究者・技術者としての人生を歩んで参ります。

参考文献

- [1] Furuno Electric Co., Ltd., “FURUNO GPS 開発ストーリー,”
https://www.furuno.com/special/jp/gps_history/index.html (last visited Dec. 2018)
- [2] 松浦 晋也, “航法の歴史 (1) 電波航法,” http://qzss.go.jp/column/column01_151010.html (last visited Dec. 2018)
- [3] 松浦 晋也, “航法の歴史 (2) 初期の測位衛星,” http://qzss.go.jp/column/column02_151108.html (last visited Dec. 2018)
- [4] 安田 明生, “GPS 技術の展望,” 電子情報通信学会論文誌 B Vol. J84-B No. 12, 2001, pp. 2082-2091.
- [5] S. Ryan and G. Lachapelle, “Impact of GPS/Galileo Integration on Marine Navigation,” Proceedings of the IAIN World Congress in association with the U.S. ION ANNUAL MEETING, 26-28 June 2000, pp.721-731.
- [6] EUROPEAN GNSS AGENCY, “GNSS Market Report,” Issue 5, 2017, pp.34-41.
- [7] 武山 洪二郎, “カメラ画像と汎用センサの統合による自動車位置推定の研究,” 東京海洋大学大学院 博士学位論文, 2018, pp.3-6.
- [8] C. Basnayake, T. Williams, P. Alves, and G. Lachapelle: “Can GNSS Drive V2X?” GPS World, October 2010, pp.35-43.
- [9] 土倉 弘子, “複数測位衛星システムの衛星選択手法に関する研究,” 東京海洋大学大学院 博士学位論文, 2017, pp.53-55.
- [10] T. Suzuki and N. Kubo: “NLOS GNSS Signal Detection Using Fish-Eye Camera for Vehicle Navigation in Urban Environments”, Proceedings of the 27th International Technical Meetings of the ION satellite division (ION GNSS+ 2014), 2014, pp.1897-1906.
- [11] N. Kbayer, M. Sahnoudi, and E. Chaumette: “Robust GNSS Navigation in Urban Environments by Bounding NLOS Bias of GNSS Pseudoranges Using a 3D City Model”, Proceedings of the 28th International Technical Meetings of the ION satellite division (ION GNSS+ 2015), 2015, pp.2410-2420.
- [12] T. Takasu, “RTKLIB ver.2.4.2 Manual,” 2013.
- [13] T. Takasu and A. Yasuda, “Kalman-Filter-Based Integer Ambiguity Resolution Strategy for Long-Baseline RTK with Ionosphere and Troposphere Estimation,” Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2010), 2010, pp.161-171.
- [14] 片山 徹, “新版応用カルマンフィルタ,” 朝倉書店, 2000.
- [15] GPS Directorate, “SYSTEMS ENGINEERING AND INTEGRATION INTERFACE SPECIFICATION IS-GPS-200J,” 2018. <https://www.gps.gov/technical/icwg/> (last visited Dec. 2018)

- [16] Russian institute of space devise engineering, "GLOBAL NAVIGATION SATTELITE SYSTEM GLONASS INTERFACE CONTROL DOCUMENT," Navigational radiosignal In bands L1, L2 (Edition 5.1), 2008 <http://gauss.gge.unb.ca/GLONASS.ICD.pdf> (last visited Dec. 2018)
- [17] European Union, "EUROPEAN GNSS (Galileo) OPEN SERVICE SIGNAL-IN-SPACE INTERFACE CONTROL DOCUMENT," Issue 1.3, December 2016 https://www.gsc-europa.eu/system/files/galileo_documents/Galileo-OS-SIS-ICD.pdf (last visited Dec. 2018)
- [18] 土倉 弘子, 久保 信明, "RTK-GNSS における GPS と BeiDou のシステム間バイアス推定に関する研究," 電子情報通信学会論文誌 B, 2017.
- [19] B. W. Parkinson, J. J. Spilker, "Global Positioning System: Theory and Applications, Volume 1," AIAA, 1996.
- [20] E. Kaplan and C. Hegarty, "Understanding GPS, Principles and Applications," Second Edition, ARTECH HOUSE, 2006.
- [21] 富永 貴樹, "衛星測位のメカニズム," Interface 2013 年 10 月号, CQ 出版社, pp.36-42.
- [22] A. Almagbile, J. Wang, and W. Ding, "Evaluating the Performances of Adaptive Kalman Filter Methods in GPS/INS Integration," Journal of Global Positioning Systems (2010), Vol.9, No.1, 2010, pp33-40.
- [23] R. Mehra, "On the Identification of Variance and Adaptive Kalman Filtering," IEEE Transactions on Automatic Control, Volume: 15, Issue: 2, Apr 1970, pp175-184.
- [24] D. J. Jwo and H. C. Huang, "Neural Network Aided Adaptive Extended Kalman Filtering Approach for DGPS Positioning," The journal of navigation (2004), 57, pp449-463.
- [25] S. Akhlaghi, N. Zhou, and Z. Huang. "Adaptive adjustment of noise covariance in Kalman filter for dynamic state estimation." 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2017, pp1-5.
- [26] Applanix, "POSLV SPECIFICATIONS," https://www.applanix.com/pdf/specs/POSLV_Specifications_dec_2015.pdf (last visited Dec. 2018)
- [27] C. Kee, T. Walter, P. Enge, and B. Parkinson, "Quality Control Algorithms on WAAS Wide-Area Reference Stations," Journal of The Institute of Navigation, Vol. 44, No. 1, Spring, 1997, pp.53-62.
- [28] T. Tominaga and T. Yasumoto, "Multipath detection method, multipath detection program, GNSS receiver pparatus, and mobile terminal," U.S. Patent Application No. 13/581,260, 2011.
- [29] Spirent Communications plc, "SIMGEN SOFTWARE USER MANUAL," Date of Issue: 13th December 2012.
- [30] RTCA SC-159, "Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment", RTCA , 2006.
- [31] T. Tominaga and N. Kubo, "Performance Improvement of Adaptive Kalman Filter-based GNSS Single Point Positioning in Dense Urban Environment," Proceedings of the 16th IAIN World Congress 2018, D5-3.
- [32] National Marine Electronics Association, "NMEA 0183 Standard," V4.10, 2012.

- [33] 坂井 丈泰, “GPS/GNSS シンポジウム 2007 チュートリアル GPS/GNSS の基礎知識,”
https://www.enri.go.jp/~sakai/pub/symp07_tutorial.ppt (last visited Dec. 2018)
- [34] 福島 荘之介, 齊藤真二, 吉原貴之, 齋藤亨, 藤田征吾, “地上型衛星航法補強システム (GBAS)の開発と安全性要求の保証,” 第 12 回電子航法研究所研究発表会
https://www.enri.go.jp/report/hapichi/pdf2012/H24_07p.pdf (last visited Dec. 2018)
- [35] 久保信明, “都市部移動体における GNSS 技術の測位精度と課題について,” GPS/GNSS シンポジウム 2007 テキスト,
http://www.denshi.e.kaiyodai.ac.jp/kubo/kubo_gnss.pdf (last visited Dec. 2018)