

博士学位論文

都市部における GNSS を用いた高精度測位解の
利用可能性に関する研究

2023 年度
(2024 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

小林 海斗

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	2
1.3	論文の構成	3
第 2 章	GNSS 測位の誤差と信頼性	4
2.1	GNSS 測位の概要	4
2.2	GNSS 測位手法	4
2.3	GNSS 測位の誤差要因	8
2.4	GNSS 測位の信頼性	10
第 3 章	衛星可視環境のシミュレーション	11
3.1	衛星可視環境と GNSS 誤差の関係	11
3.2	衛星可視環境を推定する手法	12
3.3	3D マップを使用した可視環境の推定	13
第 4 章	機械学習による RTK 可用性の予測	18
4.1	RTK の可用性について	18
4.2	データの収集	21
4.3	機械学習による予測手法	23
4.4	各予測手法の結果	27
4.5	RTK 可用性予測のまとめ	31
第 5 章	統合測位解の閾値以上の誤差推定	33
5.1	GNSS の統合測位について	33
5.2	データの収集	34
5.3	DNN による予測	38
5.4	予測結果とその改善	40
5.5	統合測位解の閾値以上の誤差推定のまとめ	45
第 6 章	準天頂衛星による高精度測位可用性の調査	47
6.1	CLAS について	47
6.2	シミュレーション条件	50
6.3	各体制での CLAS 可用性調査	57
6.4	CLAS 可用性調査のまとめ	70
第 7 章	準天頂衛星が RTK Fix 率に与える影響の予測	71
7.1	シミュレーションの条件	71
7.2	QZSS の各体制における RTK Fix 率の予測	72
7.3	QZSS の各体制における RTK Fix 率予測のまとめ	74
第 8 章	低軌道衛星を RTK 測位に使用した場合の RTK 可用性の予測	75
8.1	低軌道衛星による PNT	75

8.2	低軌道衛星の可視環境シミュレーション	76
8.3	低軌道衛星を含めた場合の RTK Fix 予測	79
8.4	低軌道衛星を使用した RTK Fix 予測のまとめ	82
第 9 章	UAV の飛行高度別の RTK Fix 率の予測	83
9.1	都市部における UAV の利活用.....	83
9.2	UAV の飛行高度を変えた場合の RTK Fix 率の予測.....	83
9.3	UAV の飛行高度別 RTK Fix 率予測のまとめ.....	88
第 10 章	むすび.....	89
10.1	本研究のまとめ	89
10.2	結論.....	89
10.3	今後の課題.....	90
参考文献		92

図表一覧

表 2.2-1 主な測位手法	8
図 2.2-2 搬送波測位のイメージ	8
図 2.2-1 擬似距離測位のイメージ	8
図 3.1-1 LOS 衛星と NLOS 衛星のイメージ	11
図 3.1-2 各 LOS 衛星数における RTK Fix 率	12
図 3.1-3 各 LOS 衛星数における水平誤差 30cm 未満の解の割合	12
図 3.3-1 LOD の概念[17]	15
図 3.3-2 使用した東京都内の 3D マップ	15
図 3.3-3 Ray-Launching 法における衛星の分別	16
図 3.3-4 シミュレーションの様子	16
図 3.3-5 天空率の計算イメージ	17
図 3.3-6 RTK Fix タイプと天空率の関係	17
図 4.1-1 走行試験における F9P の RTK Fix 結果の例	19
図 4.1-3 LOS 衛星の PDOP に閾値を設定した場合の RTK Fix 可否予測精度	20
図 4.1-2 LOS 衛星数に閾値を設定した場合の RTK Fix 可否予測精度	20
図 4.1-4 二重位相差の数に閾値を設定した場合の RTK Fix 可否予測精度	20
図 4.2-1 実験用車両の構成	22
図 4.2-2 機械学習用モデル作成までの流れ	22
図 4.2-3 Ray-Launching 法によるシミュレーション結果	22
図 4.2-4 全走行ルート	23
図 4.3-1 教師データとテストデータによる予測の流れ	25
図 4.3-2 説明変数と目的変数	25
図 4.3-3 今回使用した交差検証	25
図 4.3-4 K 近傍法の例	25
図 4.3-5 K 近傍法において各 K の値のときの予測精度	26
図 4.3-6 Logistic Regression による予測のイメージ	26
図 4.3-7 DNN のイメージ	27
図 4.3-8 7 回のテストにおける損失関数	27
図 4.4-1 各手法による交差検証における予測精度	28
図 4.4-2 各手法による ROC カーブ	29
表 4.4-1 混合行列	29
図 4.4-3 Test1 における RTK Fix 区間の水平プロット	30
表 4.4-2 試行した説明変数の組み合わせ	31
図 4.5-1 都市部の面的な RTK 可否予測の結果	32
図 5.1-1 都市部の面的な RTK 可否予測の結果	33

図 5.1-2 POLVX125 と F9R の測位結果比較	34
図 5.2-1 実験機器構成	35
図 5.2-2 走行実験における F9R の結果	35
図 5.2-3 No.1 データにおける水平誤差と hAcc, HPL の比較	36
図 5.2-4 No.2 データにおける水平誤差と hAcc, HPL の比較	36
図 5.2-5 No.3 データにおける水平誤差と hAcc, HPL の比較	37
表 5.2-1 F9R の hAcc を使用した場合のミス Fix(水平誤差 30cm)以上の推定精度	37
図 5.2-6 hAcc を利用した推定の ROC カーブ	37
図 5.3-1 使用した DNN のイメージ	39
図 5.3-2 DNN における説明変数の使用フロー	39
図 5.3-3 統合測位のデータにおける損失関数	40
表 5.4-1 交差検証の組み合わせ	41
表 5.4-2 DNN の結果	41
表 5.4-3 試した説明変数の組み合わせ	41
図 5.4-1 各説明変数の組み合わせにおける推定精度	42
図 5.4-2 各説明変数の組み合わせにおける TPR	42
図 5.4-3 組み合わせ 7w とその他の精度比較	43
図 5.4-4 組み合わせ 7w とその他の TPR 比較	43
図 5.4-5 組み合わせ 1 と 7w の ROC カーブの比較	44
図 5.4-6 閾値以上の誤差推定の例 1	44
図 5.4-7 閾値以上の誤差推定の例 2	45
図 5.4-8 閾値以上の誤差推定の例 3	45
図 6.1-1 CLAS のシステム構成図	48
図 6.1-2 CLAS のサービス範囲[6]	49
図 6.1-3 CLAS と SPP の比較	49
図 6.1-4 都市部走行時の CLAS Fix 率	50
図 6.1-5 CLAS Fix 時の水平誤差	50
図 6.2-1 それぞれの QZSS の軌道	52
図 6.2-2 7 機体制時の QZSS の仰角	53
図 6.2-3 11 機体制時の追加の QZSS の仰角	53
表 6.2-1 検証点一覧	53
図 6.2-4 検証点 No.1	54
図 6.2-5 検証点 No.2	54
図 6.2-6 検証点 No.3	55
図 6.2-7 検証点 No.4 と No.5	56
図 6.2-8 検証点 No.6 と No.7	57
表 6.2-2 各体制における配信衛星と補強衛星の組み合わせ	57
表 6.3-1 検証点 No.1 の CLAS PS を満たす時間と割合	58

図 6.3-1 検証点 No.1 の補強対象衛星可視数.....	58
図 6.3-2 検証点 No.1 の補強対象衛星の HDOP.....	59
図 6.3-3 検証点 No.1 の補強対象衛星の VDOP.....	59
表 6.3-2 検証点 No.2 の CLAS PS を満たす時間と割合.....	59
図 6.3-4 検証点 No.2 の補強対象衛星可視数.....	60
図 6.3-5 検証点 No. 2 の補強対象衛星の HDOP.....	60
図 6.3-6 検証点 No. 2 の補強対象衛星の VDOP.....	61
表 6.3-3 検証点 No.3 の CLAS PS を満たす時間と割合.....	61
図 6.3-7 検証点 No.3 の補強対象衛星可視数.....	61
図 6.3-8 検証点 No.3 の補強対象衛星の HDOP.....	62
図 6.3-9 検証点 No.3 の補強対象衛星の VDOP.....	62
表 6.3-4 検証点 No.4 の CLAS PS を満たす時間と割合.....	62
図 6.3-10 検証点 No.4 の補強対象衛星可視数.....	63
図 6.3-11 検証点 No.4 の補強対象衛星の HDOP.....	63
図 6.3-12 検証点 No.4 の補強対象衛星の VDOP.....	64
表 6.3-5 検証点 No.5 の CLAS PS を満たす時間と割合.....	64
図 6.3-13 検証点 No.5 の補強対象衛星可視数.....	64
図 6.3-14 検証点 No.5 の補強対象衛星の HDOP.....	65
図 6.3-15 検証点 No.5 の補強対象衛星の VDOP.....	65
表 6.3-6 検証点 No.6 の CLAS PS を満たす時間と割合.....	65
図 6.3-16 検証点 No.6 の補強対象衛星可視数.....	66
図 6.3-17 検証点 No.6 の補強対象衛星の HDOP.....	66
図 6.3-18 検証点 No.6 の補強対象衛星の VDOP.....	67
表 6.3-7 検証点 No.7 の CLAS PS を満たす時間と割合.....	67
図 6.3-19 検証点 No.7 の補強対象衛星可視数.....	67
図 6.3-21 検証点 No.7 の補強対象衛星の VDOP.....	68
図 6.3-20 検証点 No.7 の補強対象衛星の HDOP.....	68
図 6.3-22 各検証点の天空率.....	69
図 6.3-23 各検証点の補強対象衛星可視数の 24 時間平均.....	69
図 6.3-24 各検証点の HDOP 24 時間平均.....	69
図 6.3-25 各検証点の VDOP 24 時間平均.....	70
図 7.1-1 QZSS の各体制で補完に利用される衛星.....	71
図 7.2-1 データ 220119 の走行軌跡.....	72
図 7.2-2 データ 220516 の走行軌跡.....	73
表 7.2-1 7 機体制、11 機体制での平均衛星増加数.....	73
表 7.2-2 2 つの走行経路における RTK Fix 率.....	73
図 7.2-3 QZSS の各体制における RTK Fix 率の予測値.....	73
図 8.1-1 DLR の計画する GNSS 補完型低軌道衛星[40].....	76

図 8.2-1 東京上空の Starlink 衛星数	77
図 8.2-2 走行時の LOS 継続衛星数の比較	77
図 8.2-3 高層ビル街における LOS 継続衛星数の増加量	78
図 8.2-4 LEO と MEO の速度差のイメージ	78
図 8.2-5 走行データにおける PDOP の比較	79
図 8.3-1 低軌道衛星を含んだ RTK Fix 予測のフロー	80
図 8.3-2 GNSS の RTK Fix 率と低軌道衛星を含んで予測した RTK Fix 率	80
図 8.3-3 GNSS の RTK Fix 率と低軌道衛星を含んで予測した RTK Fix 率	80
図 8.3-4 低軌道衛星の RTK Fix 予測で新たに Fix した場所	81
図 8.3-5 低軌道衛星の RTK Fix 予測で Fix しなかった場所	81
図 9.2-1 実験経路 1 の自動車による実際の RTK 結果	84
図 9.2-2 実験経路 2 の自動車による実際の RTK 結果	84
図 9.2-3 シミュレートした実験経路 1 での LOS 継続衛星数	85
図 9.2-4 シミュレートした実験経路 2 での LOS 継続衛星数	85
図 9.2-5 東京丸の内付近の高さ 60m 以上のビル	86
図 9.2-6 経路 2 の周囲のビル	86
表 9.2-1 経路 1 の各高度における RTK Fix 率予測結果	86
表 9.2-2 経路 2 の各高度における RTK Fix 率予測結果	87
図 9.2-7 経路 1 の予測結果水平プロット	87
図 9.2-8 経路 2 の予測結果水平プロット	87

第1章 序論

本研究は衛星測位システムを利用した高精度測位が難しい都市部環境において、自動運転や建設に必要とされる cm レベルの測位が実際に可能かどうかを予測・推定した内容をまとめたものである。

1.1 研究背景

衛星測位システム GNSS(Global Navigation Satellite System)は衛星を利用して地球上の絶対位置を三次元で求めることのできるシステムである。2023 年 9 月時点では米国の GPS(Global Positioning System)、ロシアの GLONASS、中国の BDS(BeiDou Navigation Satellite System)、EU の Galileo が全世界をカバーしている。また地域限定の RNSS(Regional Navigation Satellite System)として日本の QZSS(Quasi-Zenith Satellite System)、インドの NAVIC が運用されている。これらの衛星数は全球で約 140 機になる。

GNSS は全世界の屋外で利用可能かつ、受信機とアンテナが小型・安価なため様々な分野で利用され社会インフラの一部となっている。近年ではスマートフォン向けの市場がもっとも大きく、誰もが自分の位置を即座に知ることが可能である。スマートフォンに搭載されている GNSS は誤差が数 m レベルであるが、cm レベルのより高精度な測位が可能になる様々な手法が提案されている。この高精度測位も手法の多様化、受信機とアンテナの小型化・低価格化が進んでおり普及が進んでいる。

そして高精度測位のアプリケーションの大きな市場として期待されているのが高度道路交通システム(ITS: Intelligent Transportation System)と i-Construction である。ITS における高精度測位の利用用途は自動運転、ダイナミックな道路課金システムなどである。i-Construction は ICT (Information and Communication Technology) 技術を土木建築現場に導入して土木建築の効率化・省力化・労働環境向上を目指すプロジェクトである。高精度測位は土木建築現場における測量、モニタリング、重機の操縦ガイダンスなどに期待されている。

しかし、cm レベルの高精度測位解が利用できるかどうかは周囲の環境に大きく左右されるという課題が利用促進の障害となっている。GNSS は衛星からの電波を使用しているので障害物による遮蔽、反射や回折によって測位精度が悪化する。特に ITS や i-Construction が利用される都市部では高精度測位にとって厳しい環境が多い。また近い周波数の電波によって干渉を受けることがある他、最近ではジャミングやスプーフィングといった故意的に GNSS の利用を妨害する事象が多発している。そのため、高精度測位の利用者には利用したい環境で本当に cm レベルの高精度測位が可能なのか知りたいといった需要が存在する。

以上の背景から本研究では都市部の環境において高精度測位で cm レベルの測位が可能かどうかを予測、推定する手法について研究を行った。

1.2 研究目的

以下に本研究の目的を示す。

(1). RTK 測位における RTK Fix 解が得られるかどうかの予測

高精度測位の 1 つに RTK(Real-Time Kinematic)測位がある。RTK の解は cm の精度を保証する RTK Fix 解と cm 精度でないそれ以外の解に分かれる。ITS では RTK Fix が難しい場所には車両の正確な測位を補佐する路側機やマーカーなどの設置をする必要がある。i-Construction では RTK Fix が難しい場所では RTK に頼らない光学機器などを利用した測位技術が求められる。

しかし実際に RTK Fix 解が得られるかどうかは通常現場にアンテナと受信機を持っていき測位を行わないとわからない。多くの現場では事前の実測もしくは熟練した GNSS 技術者の経験と勘をもとに RTK Fix 解が得られるかどうか判断されている。本研究ではそういった事前調査の手間を軽減するために、3D マップを利用した衛星の可視環境のシミュレーションと機械学習を利用して任意の場所で RTK Fix 解が得られるかどうかの予測を行う。

(2). RTK と IMU の統合測位解の閾値以上の誤差の推定

自動車は高架下やトンネルを通ると GNSS の信号が遮断され測位が不可能になることが多い。また船舶ではジャミングやスプーフィングといった電波妨害により GNSS が利用不可能になる海域を通行することがある[1][2]。こういった GNSS 測位が不可能な箇所でも測位を継続するする手法が慣性航法装置(IMU: Inertial Measurement Unit)やスピードセンサー、LiDAR(Light Detection And Ranging)を利用して GNSS 測位を補完する統合測位である。しかし、RTK 測位では受信機が RTK Fix かどうかを出力してくれるのに対し、統合測位解では出力値が cm レベルであるかどうかを判別する指標を出せないことが多い。特に安価な IMU を使用した場合、統合測位解で cm レベルの解が得られる頻度が低くなる。

そのため本研究では RTK が Fix していない状況下の統合測位解の結果が規定した以上の誤差を持つかどうかを、3D マップを利用した衛星の可視環境と実際の GNSS・IMU の観測データをもとに深層学習で推定する。

(3). CLAS 測位のアベイラビリティの評価

CLAS(Centimeter Level Augmentation Service)は QZSS の L6D 信号を利用した日本国内向けの高精度測位サービスである。日本国内に設置された電子基準点の観測値を用いて GPS, Galileo, QZSS の補強データを作成し、それを QZSS 経由で地上に放送することで、高精度な測位が可能となる。しかし衛星経由の補強サービスのため、QZSS から補強信号を正しく受信できないと CLAS 測位ができない。また、補強信号を受信できても補強対象衛星数が最大で 17 機のため、都市部では建物による遮蔽で CLAS 測位のための衛星数が確保できないことがある。

そのため 3D マップを利用した衛星の可視環境をシミュレーションすることで都市部での具体的な CLAS 測位のアベイラビリティを調査する。さらに今後 QZSS が現在の 4 機体制から 7 機体制になり、最終的に 11 機体制になる可能性を踏まえて、QZSS が増加した場合

に CLAS 測位のアベイラビリティがどの程度改善するかどうかを予測する。

(4). 準天頂衛星増加時の RTK 測位可用性の評価

(3)で述べたように今後 QZSS は 7 機体制、11 機体制へと拡張される計画がある。それを踏まえて QZSS が増加した場合に東京の都市部を走行中に RTK Fix 率がどの程度増加するかを(1)の RTK Fix 予測のアルゴリズムを応用してシミュレーションと評価を行う。

(5). 低軌道衛星で GNSS を補完した場合の RTK 測位可用性の評価

近年では GNSS の脆弱性が表面化したことと、低軌道(LEO: Low Earth Orbit)衛星の打ち上げ・運用コストが下がっていることから、低軌道衛星を利用した測位が研究され始めている。特に Xona Space Systems が打ち上げた Xona Pulsar 衛星は GNSS と互換性のある信号を送信して GNSS 測位を補完することができる。

将来的に GNSS を補完するような測位用低軌道衛星群が形成された場合、RTK に利用可能な衛星数は大幅に増加し、RTK Fix 解を得られる場所も増加すると予想できる。そのため、(1)の RTK Fix 予測のアルゴリズムを応用して低軌道衛星を測位衛星に含めた場合の RTK 測位可用性のシミュレーションと評価を行う。

1.3 論文の構成

本論文ではまず第 2 章で GNSS 測位の概要、測位手法、高精度測位について、そして測位の誤差要因について説明を行い、その後 GNSS 測位の実際の誤差と信頼性について保護レベルの概念から説明する。

第 3 章では本論文の研究全てに使用した衛星可視環境のシミュレーション方法について説明する。これは都市の 3D マップと衛星の軌道情報を使用したシミュレーションである。このシミュレーションから第 3 章以降の高精度測位可用性の予測や推定に必要なパラメーターを作成している。

第 4 章では RTK の可用性、つまり特定の地点・時間で RTK Fix 解が得られるかを予測した研究についてまとめる。第 5 章では通常の RTK からこれに IMU、車速センサーを加えた統合測位解に焦点を当てて、その統合測位解の水平誤差が許容値以下であるかどうかを推定する研究についてまとめる。第 6 章では QZSS の高精度測位サービスである CLAS の都市部における可用性について現在の 4 機体制、将来の 7 機体制、11 機体制で衛星可視環境シミュレーションと CLAS のパフォーマンススタンダードに基づいて評価した結果をまとめる。第 7 章では同じく QZSS の衛星数増加によって RTK Fix 率が都市部の走行においてどの程度改善するかを予測した結果をまとめる。第 8 章では既存の GNSS に加えて測位信号を放送する低軌道衛星が将来的に実現した場合に RTK Fix 率がどの程度改善するかを予測を衛星可視シミュレーションと機械学習をもとに行い結果をまとめる。

第 9 章で本論文のまとめ、結論、今後の課題について記載する。

第2章 GNSS 測位の誤差と信頼性

2.1 GNSS 測位の概要

ここでは GNSS 測位の概要を説明する。

GNSS は 4 つ以上の衛星を用いて、各衛星とユーザーの受信アンテナ間の距離を測距用のデジタル信号を用いて測ることで、ユーザーの地球上の絶対位置を計算するシステムである。GNSS 衛星は地球をあらかじめ決められた軌道で周回し、決められたタイミングとパターンに従って測距用信号を放送している。距離は電波の伝搬時間をから計算するが、正確な距離を測るためには衛星と受信機の時計が正確に同期している必要がある。しかし、受信機の内部時計と衛星に搭載されている原子時計には誤差 t が存在するため、GNSS 測位では 3 次元座標の x, y, z と時計誤差 t の 4 つの未知数を求めるために最低 4 本の距離の線が必要である [3]。したがって GNSS 測位では最低 4 基の衛星から同時に信号を受信する必要がある。GNSS ではこの時刻誤差 t を求める過程で衛星上の原子時計に同期した正確な時刻情報も得られる。

また、衛星は高速で軌道上を動いているためドップラー効果によって受信した電波は本来の中心周波数からオフセットが生じる。これを用いると衛星・ユーザー間の相対速度を計算することが可能で、さらに衛星の速度は提供される軌道情報（エフェメリス）から既知のため、相対速度ベクトルから衛星の移動速度ベクトルを引くことで最終的に地球に対するユーザーの絶対速度ベクトルを計算することができる。

GNSS を用いて得られるこれらの情報はまとめて PVT(Position, Velocity, Timing)と呼ばれる。

2.2 GNSS 測位手法

GNSS には様々な測位手法が提案されており、ここでは本研究で言及する測位手法を簡単に説明する。測位手法の分類ではまず使用するアンテナと受信機の数で単独測位と相対測位に分類している。1 つのアンテナと 1 つの受信機で完結する測位手法が単独測位、異なる場所に設置した 2 つのアンテナと 2 つの受信機を使用する測位手法が相対測位である。衛星とアンテナ間の距離の測り方でも分類を行っている。距離の測り方は擬似距離を使用するものと搬送波で測る方法の 2 つがある。

擬似距離は GNSS からの信号に乗っている送信時刻の情報と受信機における受信時刻の差に光速を乗ずることで計算される距離の値である。しかし様々な誤差が伝播経路で発生するため、衛星-アンテナ間の幾何学的距離と擬似距離は異なる値となる。これは以下の式で表現できる。

$$\text{擬似距離[m]} = \text{幾何距離} + \text{光速} \times (\text{衛星時計誤差} + \text{受信機時計誤差}) + \text{伝搬誤差} \quad \dots(2-2-1)$$

擬似距離の分解能は PRN コードの 0,1 の立ち上がり・立ち下りのタイミング測定性能に依存し、これはチップ周期の 1/300 程度が普通である。GPS の C/A コードはチップ率 1.023Mbps

で 0 と 1 の送信時刻情報を送信している。チップ率からチップ周期を計算すると以下の式より $1\mu s$ である。

$$1 \div (1.023 \times 10^6) \approx 1[\mu s] \quad \cdots(2-2-2)$$

電波の速度は $3 \times 10^8 m/s$ なので 1 チップ周期の距離は

$$3 \times 10^8 \times 1[\mu s] = 300[m] \quad \cdots(2-2-3)$$

となる。この $1/300$ は 1m のため GPS の擬似距離分解能は 1m 程度が限界であることがわかる(図 2.2-1)。

一方で搬送波を使用して距離を測る方法では、送信時刻の情報は使わずに L バンドの波の数をカウントすることで距離を計算している(図 2.2-2)。GPS L1 信号では搬送波の周波数が 1575.42MHz であり波長は 19.042cm である。さらに波の位相角も $1/100$ 周期程度の分解能で計測することで mm 単位の分解能を得ることができる。しかし搬送波は情報を持たない sin 波であるため衛星-アンテナ間の絶対的な距離はわからない。これを波数不確定性と呼び搬送波位相バイアスとして現れる。搬送波位相の値は以下の式で表わすことができる。

$$\text{搬送波位相[サイクル]} = (\text{幾何距離} + \text{伝搬誤差}) / \text{波長} + \text{搬送波位相バイアス} \quad \cdots(2-2-4)$$

また、搬送波測位でも伝搬誤差は観測値に含むため、搬送波位相バイアスと伝搬誤差の推定がアンテナ位置を求める上で重要な課題となり、測位手法によってこの解き方が異なる。

擬似距離または搬送波を利用した代表的な測位手法を表 2.2-1 に示し、以下で簡単に紹介する。

(1). 単独測位

1 つのアンテナと受信機で GNSS 衛星からの擬似距離信号だけを使用したものが(SPP: Single Point Positioning)と言われる。GPS だけを使用した場合 SPP の精度は 5~10m レベルだが、マルチ GNSS で測位した場合安価な受信機でも 2~5m 程度の精度で測位できる。複数の周波数を使用した場合電離層の遅延量を削除できるため精度はさらに改善する。スマートフォンやカーナビ、IoT デバイスなどで最も一般的に利用されている手法である。

(2). SBAS 測位

SBAS(Satellite Based Augmentation System)は衛星ベースの GNSS を補強するシステムのことである。地上局で GNSS の各種誤差の推定や異常検知を行い、この情報を SBAS 衛星から放送することで、SBAS 測位では SPP よりも測位精度が向上し、インテグリティ情報の利用も可能となる[4]。このインテグリティ情報は GNSS の結果を使用してい良いかどうかを知らせるものである。SBAS が利用できるエリアは各国のシステムによってことなり、通常は SBAS 補強信号がサポートしているその国の周囲エリアに限られる。2023 年 9 月現在、米国(WAAS)、EU(EGNOS)、日本(MSAS)、ロシア(SDCM)、インド(GAGAN)が SBAS を運用しており、中

国(BDSBAS)、韓国(KASS)、オーストラリア(SouthPAN)、アフリカ(ANGA)の SBAS が将来的な運用を計画中である。

(3). PPP 測位

高精度単独測位(PPP: Precise Point Positioning)は SBAS と似ている GNSS の補強方法だが、衛星-アンテナ間の距離を搬送波測位で求めるため 10~30cm 程度の精度を出すことができる。衛星軌道誤差・衛星時計誤差を補正するほか、受信機側では二周波の GNSS 信号で電離層遅延量を消去しカルマンフィルタ等で対流圏遅延量を推定することで精密な測位を行う。この対流圏遅延量の推定に時間が必要で、解が cm レベルに収束するまでに通常 10~20 分の時間が必要である[5]。受信機はインターネット経由または衛星経由の補強信号を受信することで PPP 測位を行う。これらは通常有料サービスであるが MADOCA-PPP(Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis-PPP)や Galileo HAS(High Accuracy Service)、BDS-PPP など測位衛星のサービスの一つとして無料で PPP 補強信号を提供している例もある。

(4). PPP-RTK 測位

PPP-RTK は PPP で使用している衛星軌道誤差・衛星時計誤差に加えて、地域特有の誤差要因である電離層遅延量と対流圏遅延量も補正する PPP である。補正情報は RTK とは異なり SSR(Space State Representation)方式で与えられる。PPP-RTK では搬送位相の整数値バイアスを決定することが可能であり、Fix 解と Float 解が得られる。また、対流圏遅延量の推定が不要であるため PPP に比べて Fix 解を得るまでの時間が 1 分程度と短い[6]。精度も PPP よりも良い。一方で地域的な誤差要因を補正するためには補正対象地域に GNSS 観測網が必要であるため、PPP と異なり地域限定のサービスである。

PPP-RTK サービスとしては QZSS が L6D 信号で CLAS(Centimeter Level Augmentation Service)を、Galileo が E6 信号で HAS を提供している他、複数の有料サービスが有る。

(5). DGNSS 測位

DGNSS(Differential GNSS)測位では基準局と呼ばれる 1 つのアンテナ・受信機のペアを既知の固定点に設置し、そこで推定した各衛星の擬似距離誤差情報を移動局と呼ばれるユーザー受信機へ送信する。移動局では基準局からもたらされた擬似距離の推定誤差を観測された擬似距離から減算することで誤差の除去された衛星-アンテナ間距離を使用して測位ができる。このため擬似距離測位の分解能の限界である 1~2m 程度の精度を出すことができる。基準局はマルチパスや干渉が発生しない場所に設置する必要がある。基準局と移動局で同時に同じ衛星を観測する必要があるため、DGNSS 測位の可能エリアは基準局から半径約 200km 以内[7]である。また、移動局のマルチパスや干渉による誤差は除去することができない。

海上交通分野ではビーコン DGPS として MF の電波に乗せて補正情報を放送する仕組みが国際的に規定され、沿岸部での船舶の位置精度向上のために使用されている。RTK 測位では搬送波位相が利用できない場合、擬似距離のみを利用した DGNSS 測位解が発生する。

(6). SLAS 測位

SLAS(Submeter Level Augmentation Service)測位は日本で提供されている擬似距離を使用した衛星経由の DGNSS 測位である[8]。日本の各地に設置された基準局で計算された擬似距離誤差情報を QZSS の L1S 信号で放送することで SLAS に対応した受信機は DGNSS と同様の解を得ることができる。日本では SLAS 測位の開始に伴い 2019 年 3 月 1 日に海上保安庁の運用するビーコン DGPS 局の運用が停止された。

(7). RTK 測位

DGNSS と同様に既知の固定点のアンテナ・受信機から補正情報を移動局に送信し、高精度測位を行う方法である。しかし DGNSS と異なり搬送波位相を使用するため mm レベルの精度で絶対位置を求めることができる。搬送波測位で課題となる搬送波位相バイアスは基準局と移動局で二重位相差を取り、同時観測した複数の二重位相差を逐次最小二乗計算することで求めている。RTK の結果は基線ベクトルと呼ばれる基準局と移動局の正確なアンテナ間ベクトルとなり、このベクトルに基準局位置を加えることで移動局の絶対位置が求まる。RTK 測位の利用可能範囲は受信機にもよるが 1 周波受信機では基準局から半径 20km 以内、2 周波受信機で基準局から半径 40km 以内である[9]。1 周波受信機よりも 2 周波受信機の方が利用可能エリアが広いのは基準局と移動局の間の距離が離れると上空の電離層の状態に差が発生してしまうが 2 周波受信機では電離層遅延量を推定し補正できるためである。また多周波受信機では 2 つの周波数の位相値を組み合わせる搬送波位相を解くワイドレーンやナローレーン[3]と言われる整数値バイアス決定方法が利用できるため、ミス Fix と呼ばれる外れ値を減らすことが可能である。補正情報は基準局のアンテナ位置と基準局で観測された擬似距離、搬送波、ドップラーシフト値であり、通常インターネットや無線通信を利用して移動局に送られる。

RTK 測位用の補正情報をインターネット経由で広範囲に提供するサービスも存在する。日本では国土地理院の電子基準点データを利用した VRS(Virtual Reference Station)サービスが主流であったが近年では携帯事業者もこの配信事業に進出している[10][11]。

(8). Moving-Base RTK

RTK 測位を基準局が移動する条件下で行う測位手法である。基準局の位置が既知の固定点でないため移動局の絶対位置は計算できないが、2 つのアンテナ間の相対的な位置関係が mm レベルで計算可能である。そのためコンパスなどの方位センサーや距離測定センサーとして使用されることが多い。方位精度は基線長と呼ばれる 2 つのアンテナ間距離が大きいほど向上する。

表 2.2-1 主な測位手法

	擬似距離測位	搬送波測位
単独測位	SPP SBAS	PPP PPP-RTK
相対測位	DGNSS SLAS	RTK Moving-Base RTK

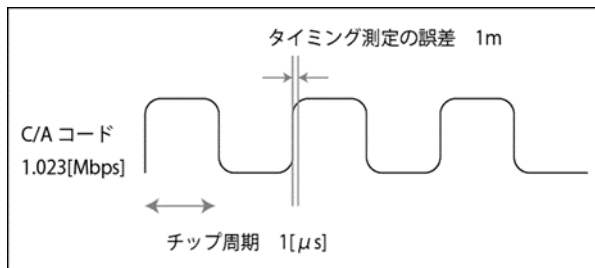


図 2.2-1 擬似距離測位のイメージ

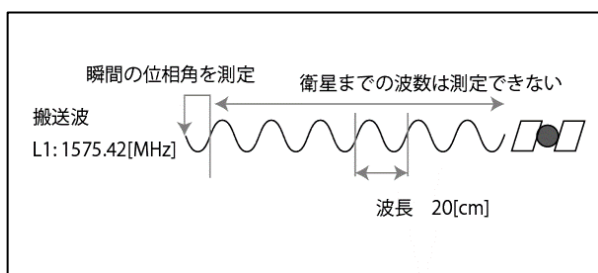


図 2.2-2 搬送波測位のイメージ

2.3 GNSS 測位の誤差要因

GNSS は衛星からの電波を受信して衛星とアンテナ間の距離を測定するが、その伝搬中にさまざまな誤差が測距信号に乗ることで最終的な PVT の精度悪化が発生する。この誤差要因を以下に挙げる。

(1). 衛星軌道誤差

衛星測位をするためには GNSS 衛星の正確な位置情報が必要であり、これは衛星の軌道情報としてエフェメリスという名前で各衛星から配信される。エフェメリスの更新間隔は GPS 衛星では 2 時間であるが、QZSS 衛星では 1 時間と衛星によって異なるが、更新から時間が経つにつれて実際の軌道とエフェメリスの軌道との間に誤差が生じる。この誤差は衛星への視線方向で 1m ほどになる[3]。

(2). 衛星時計誤差

GNSS 衛星には原子時計が搭載されており衛星単体では誤差 10 万年に 1 秒とも言える高精度の時刻を刻んでいる。しかし GNSS 衛星毎に協定世界時(UTC: Coordinated Universal Time)からのずれがある。このずれは地上の GNSS 衛星モニタリング局で補正值を作成しアップロードされ、衛星からのエフェメリスに載せて放送されるが、このエフェメリス上の補正值は将来の予測値であるため、数 ns(0.5~1m)レベルの予測誤差が含まれる[3]。

(3). 衛星配置

GNSS の受信機で観測できる衛星の配置が偏っている場合や衛星数が少ない場合、衛星数が十分で上空に満遍なく配置している場合に比べて幾何学的理由から測位精度は悪くなる。これは精度劣化指数(DOP: Dilution of Precision)として評価される。DOP には水平精度への影響を表す HDOP、垂直精度への影響を表す VDOP、三次元精度への影響を表す PDOP などがある。

(4). 電離層遅延

地表からの高度 50~1000km までの区間には電離層という電子の層が存在する。GNSS 衛星からの電波がこの電離層を通過すると屈折で伝搬速度が遅くなることにより観測された衛星とアンテナ間の距離（擬似距離）が実際の幾何学的距離よりも長くなり、これが位置精度悪化の要因となる。GNSS 衛星の仰角が低いほど通過する電離層の距離が長いことにより遅延量が大きい。

(5). 対流圏遅延

大気通過時にも GNSS の電波が屈折して伝搬速度が低下することにより擬似距離の遅延が発生する。遅延量は主に空気中の水蒸気量によるものが大きく熱帯地域などでは対流圏誤差が大きくなる。また GNSS 衛星の仰角が低いほど通過する電離層の距離が長いことにより遅延量が大きい。

(6). マルチパス遅延

地表に到達した電波が GNSS アンテナで受信されるまでに障害物（建物・地面など）によって反射や回折をして複数の到達経路を伝うことをマルチパスと呼ぶ。反射や回折では実際よりも伝搬距離が伸びるため、擬似距離の遅延量として現れる。低仰角衛星からの信号ほど大きなマルチパス遅延をもたらしやすい。通常は衛星から直接受信した信号(直接波)とマルチパスの混合波がアンテナで受信されるが、都市部では建物によって直接見えない(NLOS: Non Line-Of-Site)衛星の信号が反対側の建物で反射してマルチパスのみでアンテナに入ることがあり、この場合の擬似距離誤差は非常に大きくなる。

(7). 電波遮蔽・干渉・妨害

GNSS の擬似距離測位では 0,1 のデジタル符号からなる PRN(Pseudo Random Noise/擬似ランダムノイズ)の立ち上がり・立ち下がりを見て擬似距離を、搬送波測位では L バンドの搬送波の位相を追尾して搬送波位相を計算しているが、受信した信号の信号雑音比(SNR: Signal to Noise Ratio)や搬送波雑音電力密度比 (C/N0: Carrier to Noise Density Ratio)が低くなると、この位相を正確につかめず、擬似距離や搬送波の値に誤差が発生してしまう。SNR, C/N0 が低下する原因として屋内や橋梁、樹木による GNSS の信号の遮断と電波干渉、マルチパスが存在する。故意の電波干渉をジャミングと呼び、これは GNSS と同じ周波数帯域の電波を送信することで周囲のユーザーが GNSS を使用することを妨害する。GNSS の社会的・軍事的な利用が増えることでジャミングの発生件数も増加している。

電波の遮断とマルチパスでは信号が小さくなることで、電波干渉とジャミングではノイズが大きくなることで SNR, C/N0 が低下する。

(8). 受信機時計精度

GNSS は衛星と受信機間の電波の伝搬時間から距離を計算するが、受信機内の時計は衛星に搭載されているものと同期していないので、計測した距離にこの時計誤差が含まれる。測位に使用する衛星間の時計誤差が存在しない場合、受信機時計誤差は全ての衛星-アンテナ間距離で同じなので、4 機の衛星を使用することで受信機時計誤差は求めることが可能で最終的な PVT の精度には影響しない。

しかし受信機の時計は GNSS 信号の追尾にも使用されるため、時計の精度が悪いと搬送波位相の精度が悪くなり搬送波測位の誤差につながる。

2.4 GNSS 測位の信頼性

GNSS 測位をアプリケーションで使用するときには主に以下に注意する必要がある。

- ・ 精密度

精密度は測位解の誤差の標準偏差で表すことができる。標準偏差が小さい、つまりばらつきの少ない解であるほど良いとされる。

- ・ 正確度

正確度は測位解が実際の真値にどれだけ近いかを示し、主に誤差の平均値で表すことができる。正確度の低い解は誤差の平均値が大きくバイアスを持っていることとなる。

- ・ インテグリティ

測位解が正確であることを保証し、規定値以上の不正確性がある場合にアラートを出すのがインテグリティ(完全性)である。インテグリティは保護レベル(PL: Protection Level)と警報限界(AL: Alert Limit)によって決定され、PL が AL を超えた場合は GNSS 測位を使ってはいけない。PL は GNSS 受信機などから得られる。AL は飛行機では 50m、自動運転では 50cm などというようにアプリケーションごとに設定される。PL が AL を超えていることを判断できないことをインテグリティリスクと呼び、この航空分野などではインテグリティリスクの確率が既定値以下である必要がある。ジャミングやスプーフィングといった妨害の検知もインテグリティに含まれることがある。

- ・ アベイラビリティ

アベイラビリティ(可用性)は希望する GNSS 測位解が得られる割合である。RTK 測位のアベイラビリティは RTK Fix 率という全時間中 RTK Fix 解が得られた割合で示すことができる。

このうち精密度と正確度はまとめて RSME(Root Mean Squared Error)や CEP(Circular Error Probability)で表すことができる。RSME や CEP が低いほど測位精度が良いと言える。また測位解が PL を超えないことも重要で、PL を超えた場合信頼できない測位解となる。アベイラビリティは高い方が良いが、高いアベイラビリティとインテグリティリスクはトレードオフの関係となっている。GNSS 測位ではこれらの要素を考慮してアプリケーションに適用する必要がある。

第3章 衛星可視環境のシミュレーション

GNSS 測位は衛星からの信号を受信して行うので、そのアベイラビリティや精度には衛星の可視環境が大きく影響する。ここでは本研究を行う上でベースとなる衛星可視環境をシミュレーションするソフトウェアについて記載する。

3.1 衛星可視環境と GNSS 誤差の関係

GNSS 測位において衛星数が多いほど精度及びアベイラビリティが向上する。これは RTK 測位においても同様である。しかし都市部においては、建物などによって衛星が遮蔽され実際に使用できる衛星は天空上に存在する衛星数よりも少ない。このため衛星を、アンテナと衛星間に障害物がない LOS(Line-Of-Site)衛星と NLOS(Non Line-Of-Site)衛星に分けて考えることが多い。LOS 衛星と NLOS 衛星の違いを図 3.1-1 に示す。LOS 衛星の信号には直接波とマルチパスが含まれるが NLOS 衛星の信号にはマルチパスのみが含まれる。そのため、天空上の衛星数が多くても NLOS 衛星の割合が多いと測位精度が悪化する。先行研究[12]より LOS 衛星数が減少すると RTK Fix 率が低下することが示されており、実際に 112,047 エポックの都市部を走行したデータの LOS 衛星数ごとの RTK Fix 率を見ると LOS 衛星数が多いほど RTK Fix 率が高いことが多い。(図 3.1-2) また、LOS 衛星数と RTK 測位解の水平誤差が 30cm 未満の解の割合をグラフに示すと図 3.1-3 のようになる。これらより LOS 衛星数を推定することは RTK 測位における誤差や RTK Fix の可否を推定する上で重要なパラメーターであるといえる。図 3.1-2 および図 3.1-3 の LOS 衛星数は後述するソフトウェアによって計算された。

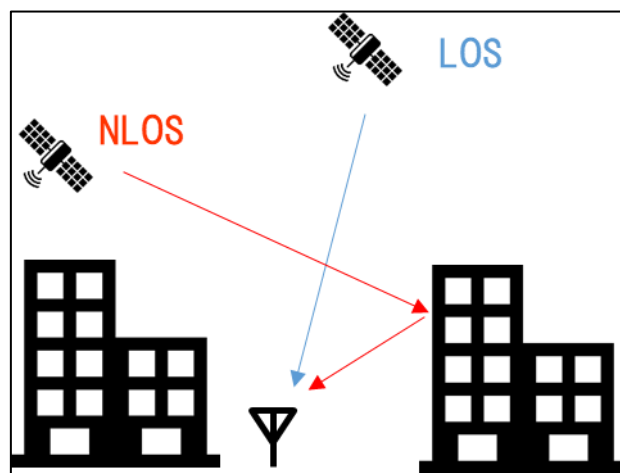


図 3.1-1 LOS 衛星と NLOS 衛星のイメージ

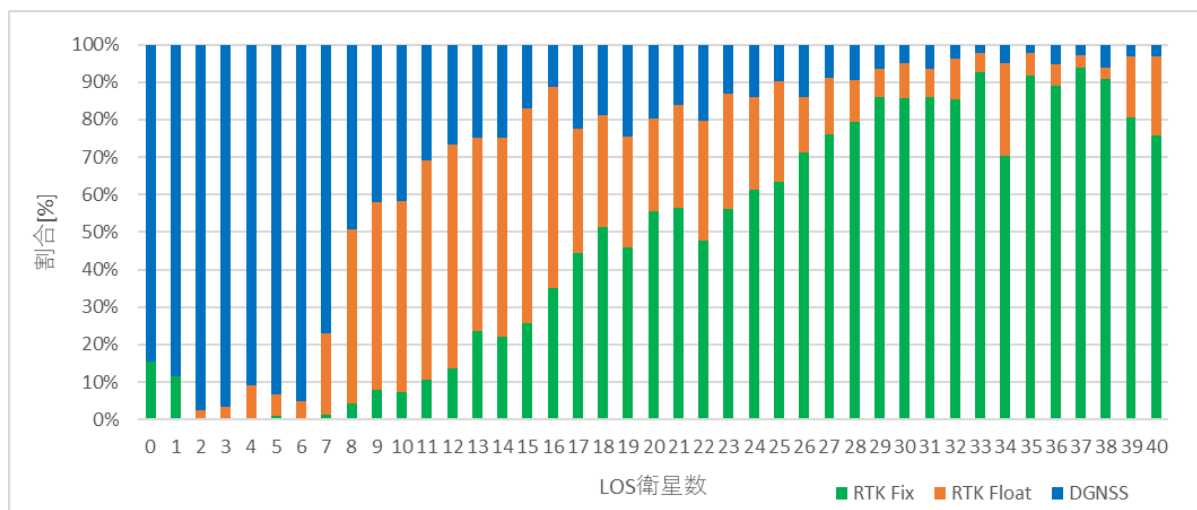


図 3.1-2 各 LOS 衛星数における RTK Fix 率

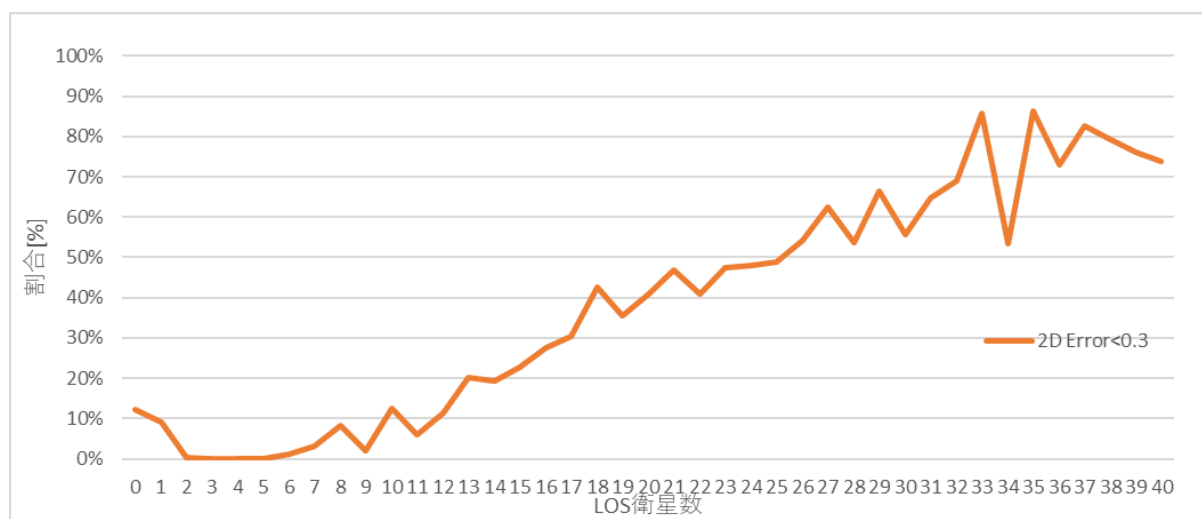


図 3.1-3 各 LOS 衛星数における水平誤差 30cm 未満の解の割合

3.2 衛星可視環境を推定する手法

LOS と NLOS を判別する手法として主に下記のものが提案されている。

・ 3D マップを使用した手法[13]

建物の 3D モデルとアンテナ、衛星の位置関係から Ray-Casting 法や Ray-Tracing 法で LOS 衛星と NLOS 衛星を判別できる。3D モデルがあればあらゆる地点の衛星環境をシミュレートできる。欠点として 3D モデルの更新が必要である、Ray-Tracing 法は計算コストがかかる、3D モデルの精度に結果が左右されるが挙げられる。

・ Lidar を使用した手法[14]

Lidar を使用して周囲の 3D モデルをリアルタイムで製作することで 3D モデルの事前準備が不必要となる。3D モデルの更新や精度の問題点が解決でき、樹木や信号等の細かな障害物もモ

デルに反映することができる。欠点として Lidar が高額なこと、方位情報が必要であること、現場でデータを取得する必要があることが挙げられる。

- ・ 魚眼カメラを使用した手法[15]

魚眼カメラで天球の写真を撮影し、画像処理をすることで建物を抽出することができる。抽出した建物の位置と衛星の位置を合わせることで、LOS/NLOS の判別が可能である。欠点として悪天候時や夜間などでは建物の正確な抽出に失敗する場合あること、方位情報が必要であること、こちらも現場でのデータ取得が必要であることが挙げられる。

- ・ GNSS 観測データを使用した手法[16]

GNSS の観測データのみで LOS/NLOS 判定をする手法も提案されている。主に SNR や擬似距離残差などが使用され、衛星ごとに機械学習などで判定が行われる。欠点として判定精度の問題と現場でのデータ取得が必要であることが挙げられる。

本研究では以上に挙げた LOS/NLOS 判定手法のうち、現場での高精度測位の利用可能性推定や任意の場所での利用可能性の予測を行うために、現場でのデータ収集が不要な 3D マップを使用した手法を採用した。

3.3 3D マップを使用した可視環境の推定

3D マップを使用した LOS/NLOS の判別には以下の要素が必要となる。

- ・ 衛星軌道情報

衛星軌道情報にはアルマナックを使用した。アルマナックとは 1 週間程度の大まかな GNSS 衛星の軌道情報である。GNSS 衛星からはそのコンステレーションのすべての衛星のアルマナックが常に送信されている。アルマナックの衛星位置精度は最大数 km になるが、アンテナから衛星への視線ベクトルにおける誤差は 0.01 度以下であるので無視できると判断した。誤差の小さい衛星軌道情報としてエフェメリスも存在するが、こちらは 2 時間程度の短期的な軌道情報である上各衛星が自身のエフェメリスしか放送していないので、長時間や任意の場所で衛星軌道をシミュレーションする用途には向かない。本研究では東京海洋大学に設置されている GNSS 基準局の Trimble NetR9 受信機が受信したアルマナックをダウンロードしてシミュレーションに使用した。

- ・ 3D マップ

本研究では国土交通省が PLATEAU Project[17]として公開している無償の 3D モデルをインポートして 3D マップを作成した。CityGML 形式の建物モデル、橋梁モデル、地面を使用した。建物モデルとしては LOD(Level Of Detail)2 の建物の屋根や側面形状が再現されたモデルを使用している。図 3.3-1 に LOD1 と LOD2 の違いを示す。PLATEAU の建物位置精度は水平方

向で標準偏差 1.75m 以内、高度方向で標準偏差 0.66m 以内[18]となっている。PLATEAU Project の CityGML モデルは平面直角座標系で定義されている。また高度は標高で定義されている。今回は図 3.3-2 に示す地域の東京都内のマップを作成した。

・衛星伝搬シミュレーション

LOS と NLOS の判別には衛星からの電波がアンテナにどう届くかをシミュレーションする必要がある。今回は Ray-Casting 法と Ray-Launching 法を用いてこれをシミュレートした。Ray-Casting 法ではアンテナから衛星への視線ベクトルを両者の位置関係から計算する。そして、アンテナから視線ベクトル方向へ Ray を投射し、3D モデルに衝突すれば NLOS, 衝突しなければ LOS という判断をした。Ray-Casting 法ではマルチパスのシミュレーションはできないが計算コストが低いという利点がある。一方の Ray-Launching 法はアンテナから 1 度単位で 360×90 個の Ray を上空に投射し、建物に衝突した場合は鏡面反射をさせる。Ray のうち建物に衝突せず、衛星への視線ベクトルとの角度差が 1 度未満のものがあった場合は LOS と判別した。建物での反射は 1 回以下に制限し、反射して視線ベクトルとの角度差が 1 度未満となった Ray があればそれはマルチパスとした。Ray-Launching 法では衛星からの信号受信環境を直接波のみを受信、直接波とマルチパスを受信、マルチパスのみを受信、完全な NLOS で何の信号も受信できない、の 4 種類に分けることができる (図 3.3-3)。一方で計算コストは Ray-Casting 法に比べて高い。

今回は Unity エンジンにて上記の GNSS アルマナック、CityGML の 3D モデル、Ray-Casting 法または Ray-Launching 法を使用して任意の地点・時間における各衛星の LOS/NLOS を判別するシミュレーションソフトウェアを作成した。図 3.3-4 にシミュレーションの様子を示す。緑線が LOS 衛星への伝播経路、赤線が NLOS 衛星への伝播経路、黄色線がマルチパスを示している。

また、シミュレーションソフトウェアでは LOS 衛星のみの DOP と天空率も計算を行った。GNSS 受信機の出力する DOP は使用した衛星の DOP であり、これにはマルチパスのみの NLOS 衛星なども含まれているため、シミュレーションでもとめた LOS 衛星のみの DOP がより衛星の可視環境を示していると思われるためである。また天球のうち障害物に遮られていない部分の割合を天空率と定義した。天空率は天球を 360×90 の 1 度グリッドに分け、それぞれのグリッドで Ray-Casting 法を行って障害物のないグリッドの割合から計算した。以下が天空率の計算式である。

$$\text{天空率} = \frac{\sum \text{no_blocked}}{360 \times 90} \quad \dots (3-3-1)$$

図 3.3-5 に天空率の計算のイメージを示す。天空率が高いほど衛星の受信環境が良いと言える。図 3.3-6 に車両実験における RTK Fix タイプと天空率の関係を示す。天空率の低い箇所では Fix タイプが Float 解や DGNSS 解となっていることがわかる。



図 3.3-1 LOD の概念[17]

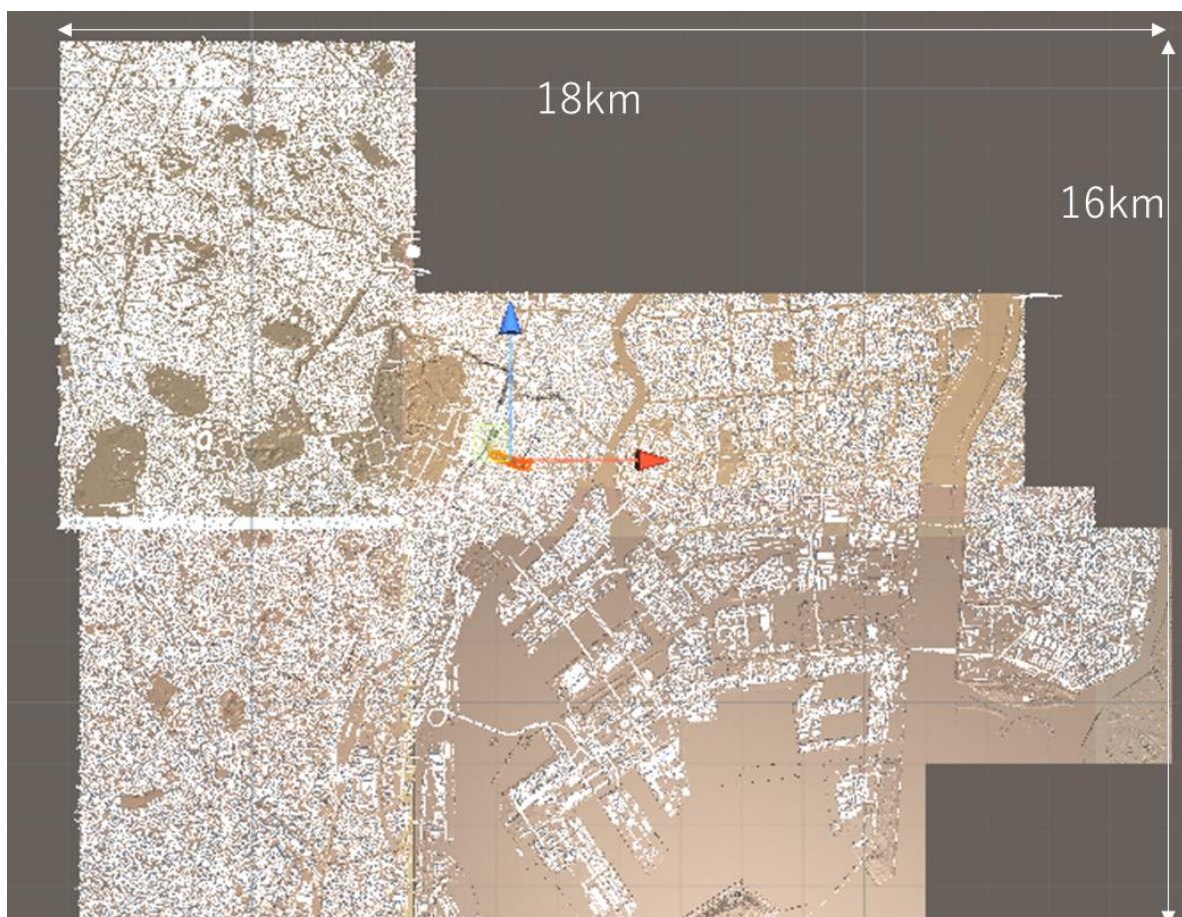


図 3.3-2 使用した東京都内の 3D マップ

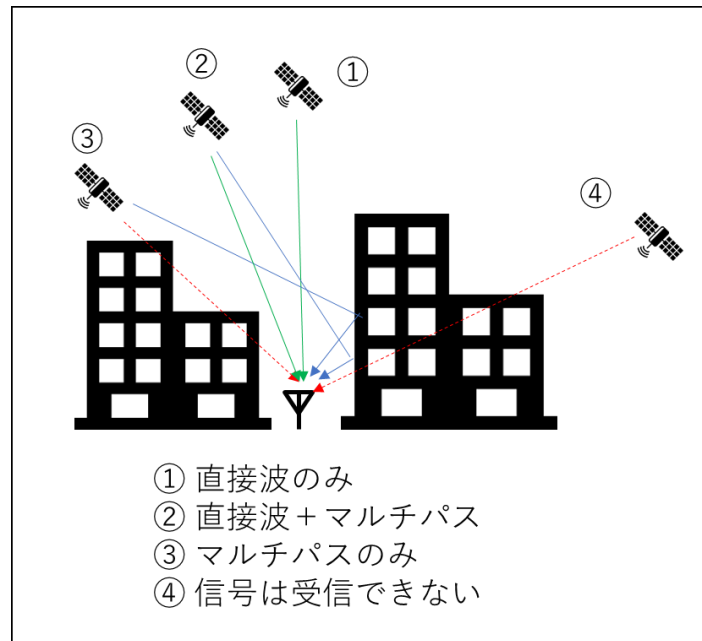


図 3.3-3 Ray-Launching 法における衛星の分別

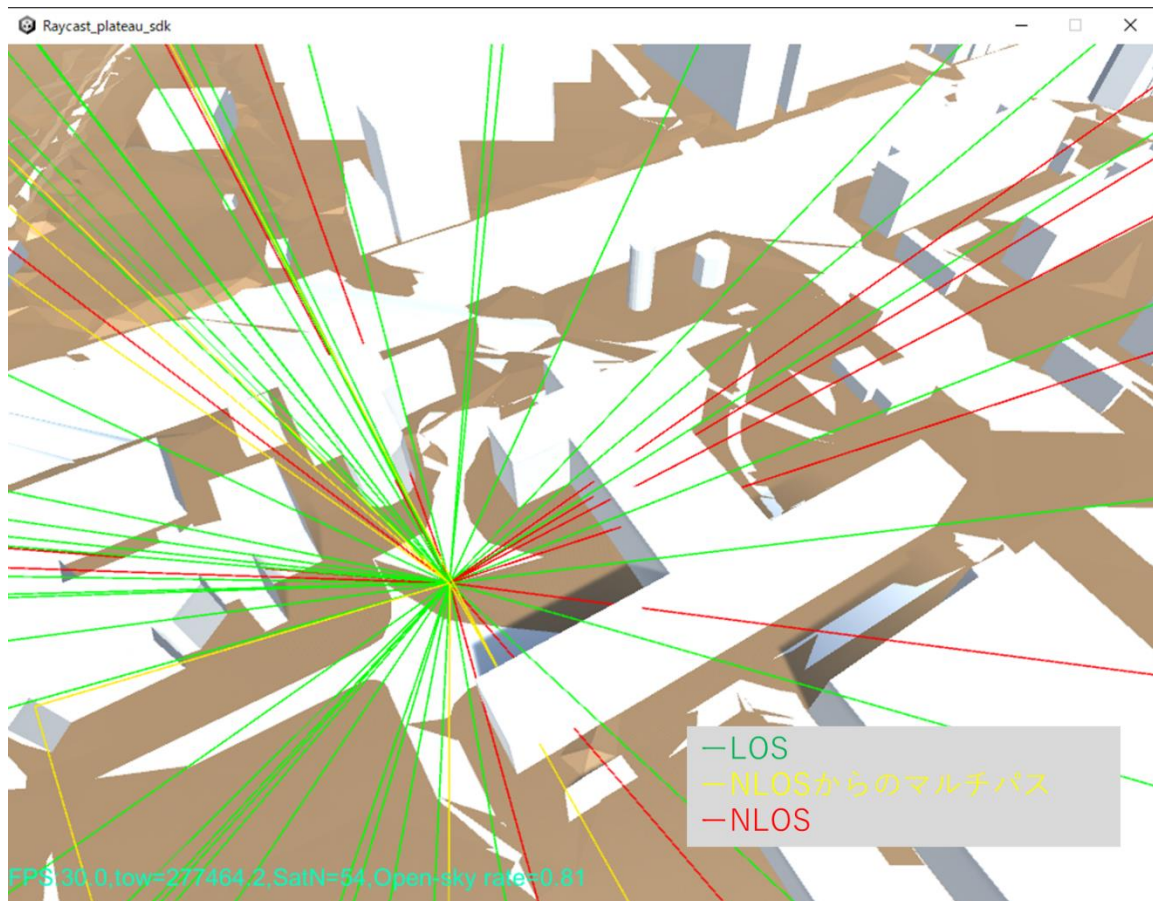


図 3.3-4 シミュレーションの様子



図 3.3-5 天空率の計算イメージ

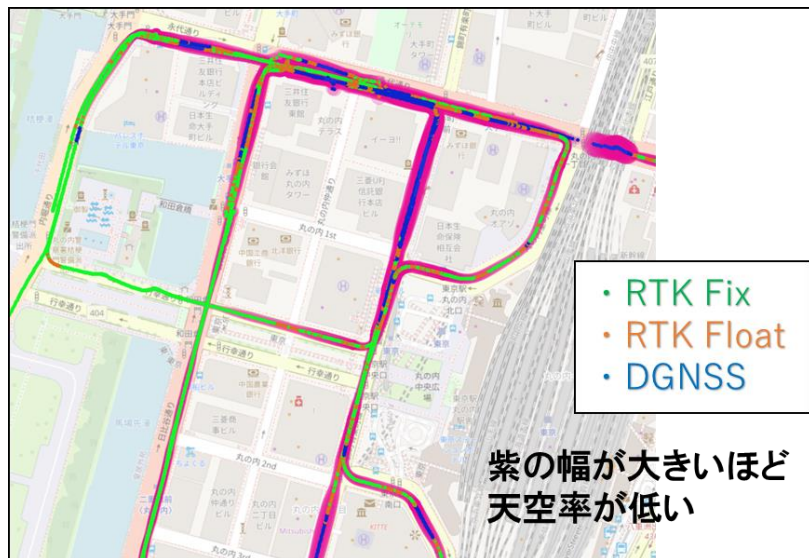


図 3.3-6 RTK Fix タイプと天空率の関係

第4章 機械学習による RTK 可用性の予測

本章では RTK 測位の可用性を予測する手法とその予測結果の評価を行う。

4.1 RTK の可用性について

RTK 測位は第 2 章 2.2 で述べたように基準局と移動局の間で搬送波の二重位相差を使用して cm レベルの測位を行う方法である。搬送波位相は以下の式で表すことができる。

$$\phi_i^j(t) = f \cdot \rho_i^j(t)/c + N_i^j + f\{\delta^j(t) - \delta_i(t)\} - \Delta_{ion\ i}^j + \Delta_{trop\ i}^j \quad \cdots(4-1-1)$$

- $\phi_i^j(t)$: 測定される搬送波位相[Cycle]
- f : 搬送波の周波数[Hz]
- $\rho_i^j(t)$: 時刻 t に受信機 i で受信された衛星 j の信号が伝播してきた距離
- c : 光速[m/s]
- N_i^j : 搬送波位相バイアス[Cycle]
- $\delta^j(t)$: 衛星 j の時計・軌道誤差[sec]
- $\delta_i(t)$: 受信機 i の時計誤差[sec]
- $\Delta_{ion\ i}^j$: 電離層による電波伝搬遅延量[Cycle]
- $\Delta_{trop\ i}^j$: 対流圏による電波伝搬遅延量[Cycle]

この搬送波位相を受信機と衛星の組み合わせで以下のように二重位相差をとると、伝搬誤差である $\delta^j(t)$, $\delta_i(t)$, $\Delta_{ion\ i}^j$, $\Delta_{trop\ i}^j$ は相殺される。

$$\begin{aligned} DD\phi_{ijAB} &= (\phi_{jB} - \phi_{jA}) - (\phi_{iB} - \phi_{iA}) \\ &= (\phi_{jB} - \phi_{iB}) - (\phi_{jA} - \phi_{iA}) \\ &= \frac{f}{c} \{(\rho_B^j - \rho_B^i) - (\rho_A^j - \rho_A^i)\} + N_{AB}^{ij} \quad \cdots(4-1-2) \end{aligned}$$

- $DD\phi_{ijAB}$: 衛星 i, j と受信機 A, B 間の搬送波位相二重位相差
- ϕ_{iA} : 受信機 A で測定した衛星 i からの搬送波位相
- ϕ_{iB} : 受信機 B で測定した衛星 i からの搬送波位相
- ϕ_{jA} : 受信機 A で測定した衛星 j からの搬送波位相
- ϕ_{jB} : 受信機 B で測定した衛星 j からの搬送波位相
- N_{AB}^{ij} : 整数値バイアス

最終的に式には伝搬距離と搬送波位相バイアスの二重位相差である整数値バイアスのみが残るた

め、これを逐次最小二乗法で収束させ LAMBDA 法[19]などで決定できれば基線ベクトルを求める事ができる。複数の衛星と受信機の二重位相差で整数値バイアスを求めることができたときの RTK 測位解を Fix 解と呼び、これは cm 精度の位置精度を担保する。一方で衛星数の不足やマルチパス等によって整数値バイアスを決定できなかった際の RTK 測位解を Float 解と呼び、これは cm 精度での位置精度を担保していない。

全測位期間のうち RTK Fix 解が得られた割合を RTK Fix 率と呼び主にこれが RTK の可用性として用いられる。例として図 4.1-1 の走行試験では緑色で示した部分が RTK Fix 解が得られた箇所全体のうち 55.7%であった。これは残りの 44.3%の地点では cm レベルの解が保証できないことを示す。自動運転に RTK を実装する場合にはこの RTK Fix 解が得られない区間では別の車載センサーや道路上に設置したセンサーで車両の位置を正確に求める必要がある。実際に走行試験を行うことである程度 RTK Fix 解が得られない区間を知ることができるが、時間帯によって衛星配置は異なり、車線によっても RTK が Fix するかもしれないが異なる場合もあるので、RTK Fix しない区間の調査には大きな労力がかかる。そのため本研究では衛星可視シミュレーションの結果と実際の走行試験の結果を紐づけたデータセットを用いて機械学習で任意の地点の RTK Fix 可否を予測できないか試みた。

ここで機械学習を使用した理由としては単純な閾値による判別では RTK Fix 可否の予測正答率が最大でも 50%代と低いためである。図 4.1-2 は LOS 衛星数に閾値を設定したときの予測精度、図 4.1-3 は LOS 衛星の PDOP に閾値を設定したときの予測正答率、図 4.1-4 は二重位相差の数に閾値を設定したときの予測正答率である。この予測正答率は合計の RTK Fix 率が 53.7%の 7 回の走行データを使用して計算した。今回それぞれのグラフでは横軸が閾値、縦軸が予測正答率を示している。どの閾値設定でも精度良く予測することが難しいことがわかる。先行研究[12]では LOS 継続衛星が 9 機以上のとき RTK Fix するという設定で 84%の予測正答率を出していたが、このとき使用されたデータは RTK Fix 率が 80%代と高かったため正答率が高かったと考えられる。



図 4.1-1 走行試験における F9P の RTK Fix 結果の例

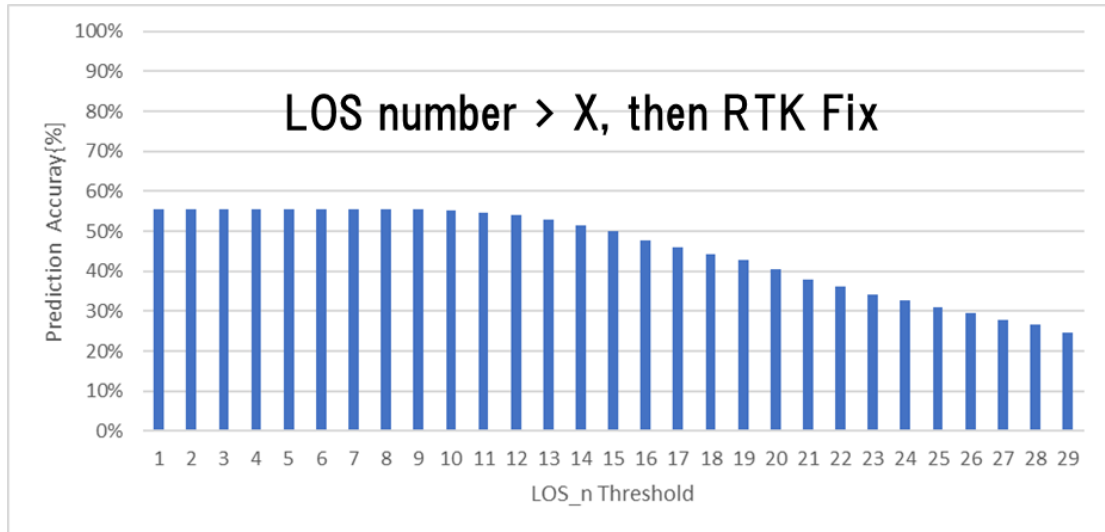


図 4.1-3 LOS 衛星数に閾値を設定した場合の RTK Fix 可否予測精度

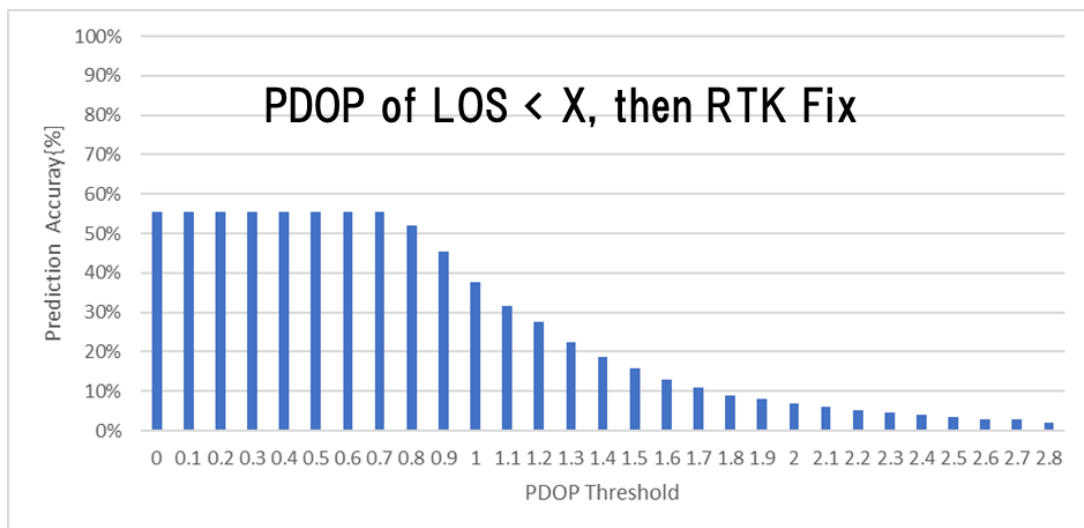


図 4.1-2 LOS 衛星の PDOP に閾値を設定した場合の RTK Fix 可否予測精度

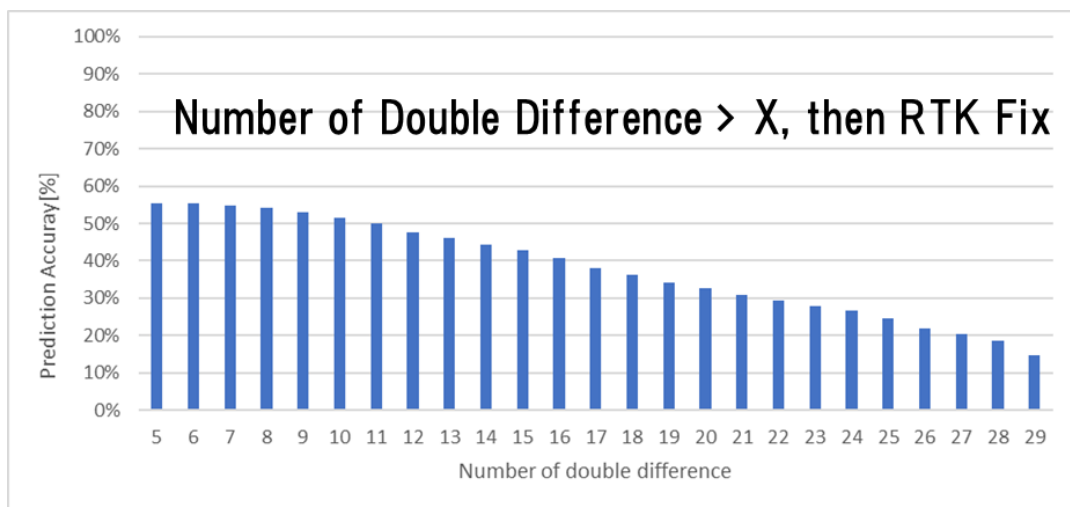


図 4.1-4 二重位相差の数に閾値を設定した場合の RTK Fix 可否予測精度

4.2 データの収集

RTK の Fix 可否を機械学習で判別するために、まず実際の GNSS 測位データを取得した。図 4.2-1 に走行実験における実験構成図を示す。RTK は ublox 社の F9P 受信機[20]で行い、INS、スピードセンサー、RTK、姿勢センサーが組み合わさったリファレンスシステム POSLVX125[21]で F9P が RTK Fix しない場所も正確な車両の位置を計算した。GNSS アンテナには AT1675-540TS を使用した。受信機間のバイアスを防ぐために F9P の基準局受信機には F9P を、POSLVX125 の基準局受信機には Trimble netR9 を使用している。使用衛星は POSLVX125、F9R ともに GPS, GLONASS, BDS, Galileo, QZSS であるが POSLVX125 が 3 周波まで使用できるのに対し、F9R は 2 周波のみ受信できる。

図 4.2-2 に教師データの作成と評価方法の流れを示す。POSLVX の車両軌跡とアルマナックから衛星の位置を計算し、3D マップで Ray-Launching 法を行うことで図 4.2-3 に示したようなシミュレーション結果を出力する。機械学習に使用する説明変数として LOS 継続衛星数、NLOS 衛星数、LOS 継続衛星の PDOP、各仰角範囲内の LOS 継続衛星数、各衛星システムの LOS 継続衛星の二重位相差数を出力している。LOS 継続衛星数とは搬送波を受信してから搬送波位相のハーフサイクルアンビグイティが解決して RTK に使用できるようになるまでの 6 秒間以上継続して LOS 状態にある衛星である。Galileo や GLONASS 以外の測位衛星は主に L1 帯で BPSK(Binary Phase Shift Keying)変調を行っており、半波長ずれた状態で信号を追尾してしまうことがある。これをハーフサイクルアンビグイティと呼び RTK Float 解や RTK Fix 解のミス Fix の原因となる。このハーフサイクルアンビグイティは航法メッセージのサブフレームの受信タイミングを利用して修正できるが、サブフレームは 6 秒間に 1 度の頻度でしか送られてこないのが最大 6 秒間待つ必要がある[22]。二重位相差数は各衛星システムの LOS 衛星数から基準衛星数 1 機を引いた値となっている。この後シミュレーション結果と F9P の実際の Fix Type を時刻で同期させた csv ファイルを作成した。

東京 23 区内で 7 回の走行を行い、合計で約 6 時間、計測周期は 5Hz で 106565 エポックの教師データを取得した。計 7 回の走行を行ったルートを図 4.2-4 に示す。できるだけ同じ道路を通らないよう注意をして走行を行った。また、データには交差点での停止状態などが含まれている。

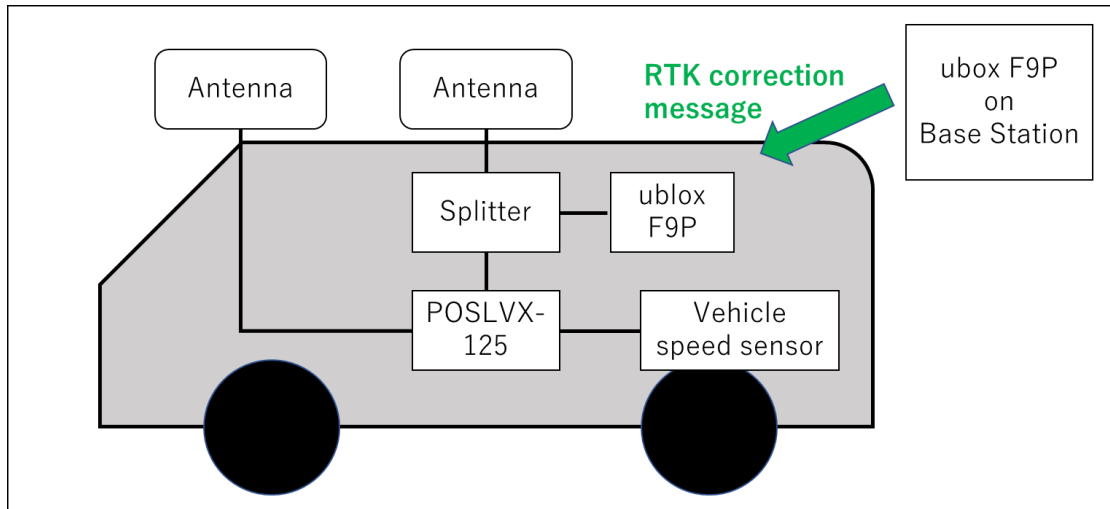


図 4.2-1 実験用車両の構成

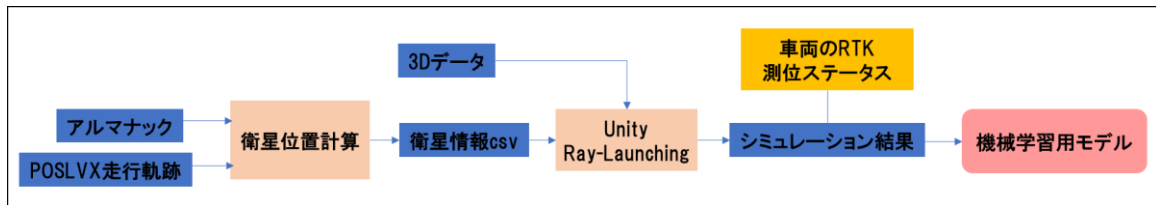


図 4.2-2 機械学習用モデル作成までの流れ

GPSW	GPST[sec]	Lat[deg]	Lon[deg]	Hgt[m]	LOS_n	NLOS_n	PDOP	ele0	ele15	ele30	ele45	ele60	ele75	GQ	E	C	R
2210	97761.6	35.66757	139.7911	39.499	40	5	0.730365277	9	8	9	5	7	2	12	6	13	5
2210	97761.6	35.66757	139.7911	39.499	40	5	0.730365812	9	8	9	5	7	2	12	6	13	5
2210	97761.6	35.66757	139.7911	39.499	40	5	0.730365746	9	8	9	5	7	2	12	6	13	5
2210	97761.8	35.66757	139.7911	39.495	40	5	0.730366276	9	8	9	5	7	2	12	6	13	5
2210	97762	35.66757	139.7911	39.494	40	5	0.730366715	9	8	9	5	7	2	12	6	13	5
2210	97762.2	35.66757	139.7911	39.492	40	5	0.730366465	9	8	9	5	7	2	12	6	13	5
2210	97762.4	35.66757	139.7911	39.493	40	5	0.730366853	9	8	9	5	7	2	12	6	13	5
2210	97762.6	35.66757	139.7911	39.492	40	5	0.730367021	9	8	9	5	7	2	12	6	13	5
2210	97762.8	35.66757	139.7911	39.491	40	5	0.730367077	9	8	9	5	7	2	12	6	13	5
2210	97763	35.66757	139.7911	39.495	40	5	0.730366786	9	8	9	5	7	2	12	6	13	5

図 4.2-3 Ray-Launching 法によるシミュレーション結果

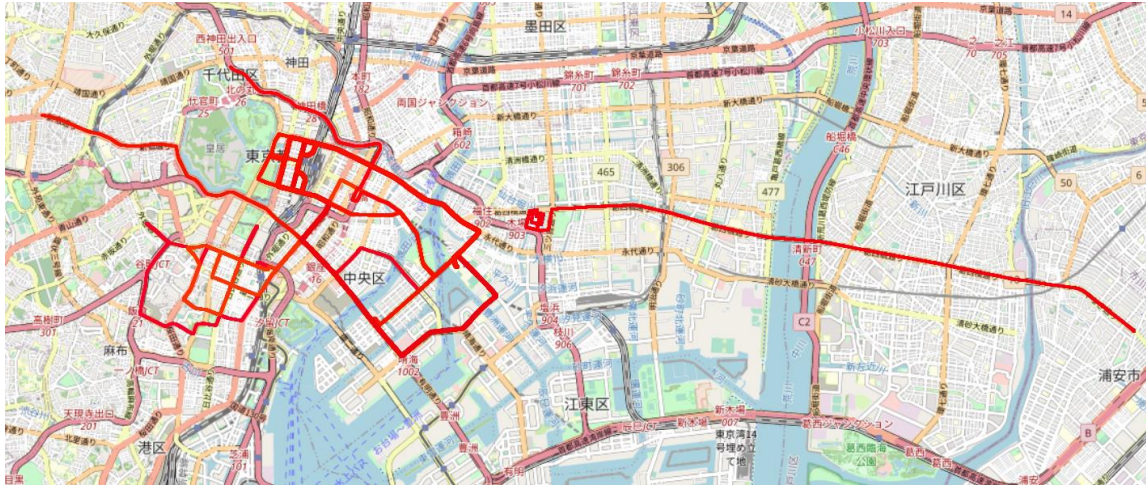


図 4.2-4 全走行ルート

4.3 機械学習による予測手法

機械学習では説明変数をもとに、目的変数を推定する。今回の手法では1エポックの衛星環境シミュレーションの結果を1データとして扱い、説明変数として

- ・LOS 継続衛星数
- ・マルチパスを発生させる NLOS 衛星数
- ・LOS 継続衛星の PDOP
- ・天空率
- ・GPS と QZSS の二重位相差数
- ・Galileo の二重位相差数
- ・BDS の二重位相差数
- ・GLONASS の二重位相差数

の8個を利用した。実際の走行軌跡をもとにした第3章で説明した衛星可視環境シミュレーションからこの説明変数を作成した。LOS 継続衛星とマルチパスを発生させる NLOS 衛星の判別には Ray-Launching 法を利用した。二重位相差は衛星システムごとに中心周波数が異なるので別に計上しているが GPS と QZSS は同じ周波数帯を使用しているのでまとめている。目的変数は測位結果のステータスである RTK Fix と No RTK Fix の二種類とした。図 4.3-1 に予測の流れを、図 4.3-2 に説明変数と目的変数の関係性を示す。教師データは ublox 社の F9P 移動局で取得した観測データと東京海洋大学に設置した F9P 基準局の観測データを用いた後処理 RTK の結果を説明変数と関連付けすることで作成した。今回は1エポックごとに独立して目的変数を求めるため、RTK の計算も1エポックで独立して二重位相差のアンビギュイティを解く instantaneous 法で計算した。

予測の評価方法として交差検証を行った。交差検証では K 個のデータセットを用意して、そのうち1つをテストデータに残りの K-1 個を教師データとして正解率の評価を行う。これを K 個のデータセットすべてが1回ずつテストデータになるように K 回学習を行なって精度の平均

を算出する。図 4.3-3 に交差検証のイメージを示す。今回データセットは各走行テストとし、7 個あるので予測も 7 回行う。

予測するための機械学習手法としては K 近傍法、Logistic Regression そして深層学習(DNN; Deep Neural Network)の 3 種類を試した。

K 近傍法では入力データの説明変数をもとに教師データから近似性のある K 個のサンプルを抽出し、それらのサンプルのクラス・ラベルの多数決の結果が予測値となる[23]。図 4.3-4 に K 近傍法の例を示す。XY は説明変数の空間を示しており K=3 の場合、入力データに近い教師データの 3 つうち No RTK Fix が 2:1 で多いので、入力データは No RTK Fix に分類される。一方で K=5 にしたときは RTK Fix と No RTK Fix の比は 3:2 なので入力データは RTK Fix と判別される。そのため K の値は教師データのサンプル数によって適切に設定する必要がある。今回は 7 回のテストそれぞれで K を K=1~1600 まで変化させた。図 4.3-5 にそのときの RTK Fix 可否の予測精度を示す。この結果よりすべてのテストで K=1000 以降で予測精度が安定しているため、K=1000 として予測を行った。

Logistic Regression 法では RTK Fix と No RTK Fix の発生確率を計算し、その確率を 0.5 の閾値で二値分類する。Logistic Regression 法のイメージを図 4.3-6 に示す。確率 P は以下の式で計算できる。a は回帰変数、X は説明変数である。[24]

$$P = \frac{1}{1+e^{-Y}} \quad \cdots(4-3-1)$$
$$(Y = a_1X_1 + a_2X_2 + \cdots + b)$$

DNN では Keras[25]という Python ライブラリーを利用した。図 4.3-7 に DNN のイメージを示す。推定はエポックごとに行い、入力層には推定に必要と思われる説明変数を入力し、隠れ層を通して二値分類の出力レイヤーで RTK Fix かそうでないかを判断する。隠れ層は 1 層で隠れ層のノードは 3 つに、各層間の活性化関数には Sigmoid 関数を使用した。説明変数は min-max 法によって正規化を行った。DNN は推定前に学習データによるトレーニングを必要とするがこのトレーニング回数と損失関数の関係を図 4.3-8 に示す。Train loss は学習データに対するモデルの適合度合い、Valid loss は学習に使用していないデータに対するモデルの適合度合いを示す。Train loss は学習回数を増やすほど減少していくが、Valid loss はある時点で上昇に転じる。Train loss が下降し Valid loss が上昇している状態は過学習(Overfitting)の状態である。そのため、Valid loss が最低になった時点で学習を停止するのが最適である[26]。図 4.3-8 のデータでは Test1, Test5, Test7 でトレーニング回数が 200 回以下の時点で Valid loss が上昇に転じている。そのため今回はトレーニング回数を 200 回に設定した。

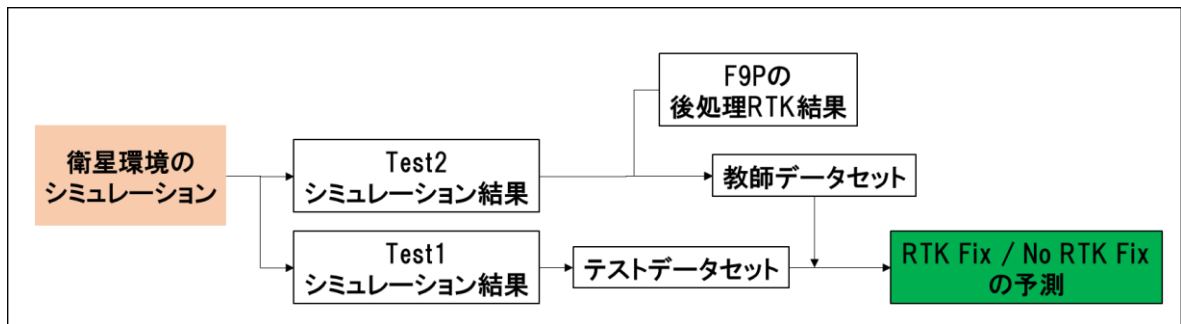


図 4.3-1 教師データとテストデータによる予測の流れ

目的変数			説明変数										
GPSW	GPST[sec]	Q	Lat_ref[deg]	Lon_ref[deg]	Hgt_ref[m]	LOS_n	NLOS_n	PDOP	sky rate	GQ	E	C	R
2225	279821.4	?	35.68497079	139.7608481	41.111	22	18	1.473134	0.678333	3	3	2	10
2225	279821.4		35.68495011	139.7608313	41.133	22	18	1.473141	0.683889	3	3	2	10
2225	279821.8		35.68492959	139.7608151	41.118	23	17	1.431935	0.684167	4	3	2	10
2225	279822		35.68490908	139.760799	41.097	23	17	1.431943	0.687083	4	3	2	10
2225	279822.2		35.68488845	139.7607822	41.148	23	17	1.431953	0.692222	4	3	2	10
2225	279822.4		35.68486781	139.7607662	41.176	23	17	1.431962	0.692361	4	3	2	10
2225	279822.4		35.68484703	139.7607511	41.146	23	17	1.43197	0.695833	4	3	2	10

図 4.3-2 説明変数と目的変数

Test Number	Dataset 1	Dataset 2	Dataset 3	Dataset 4	Dataset 5	Dataset 6	Dataset 7		
1	Test set	Training set						↕Result 1	Average of Prediction Accuracy
2	Training set	Test set	Training set					↕Result 2	
3	Training set	Test set		Training set				↕Result 3	
4	Training set	Test set			Training set			↕Result 4	
5	Training set	Test set				Training set		↕Result 5	ROC curve
6	Training set	Test set					Training set	↕Result 6	
7	Training set	Test set						↕Result 7	

図 4.3-3 今回使用した交差検証

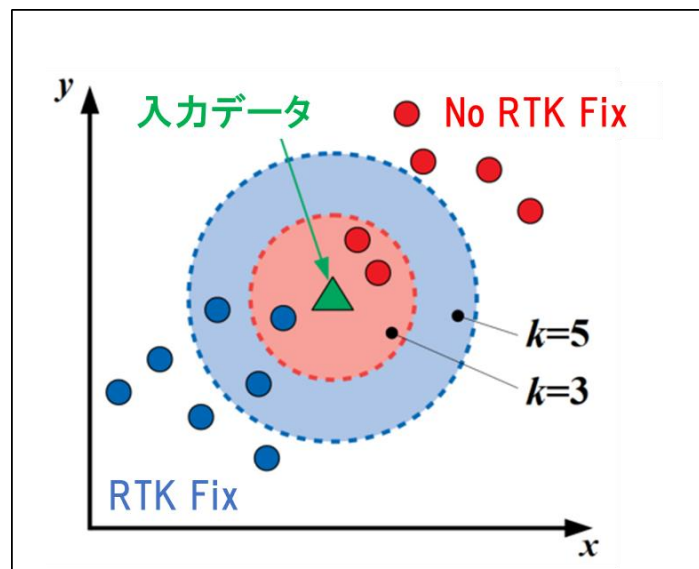


図 4.3-4 K 近傍法の例

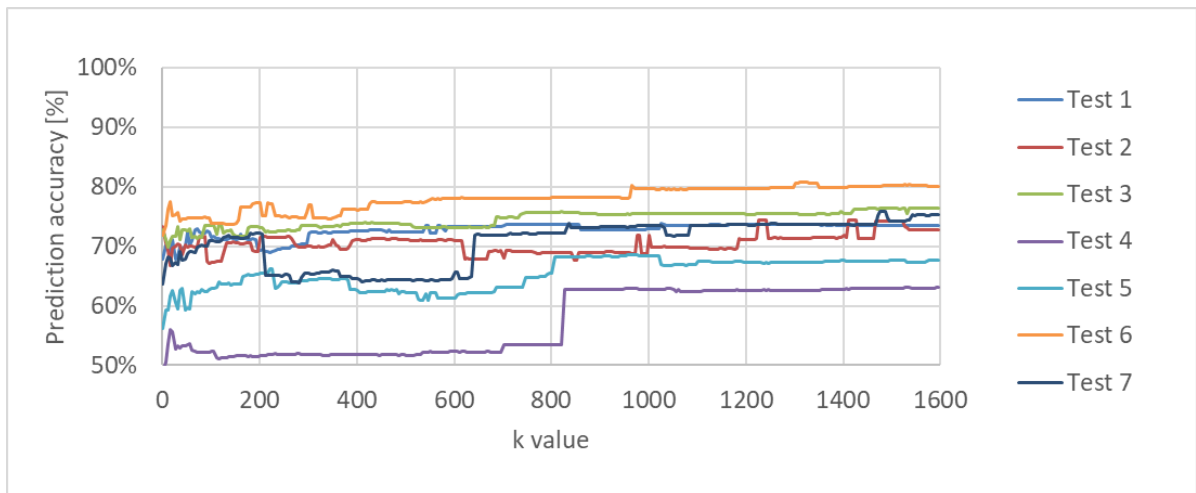


図 4.3-5 K 近傍法において各 K の値のときの予測精度

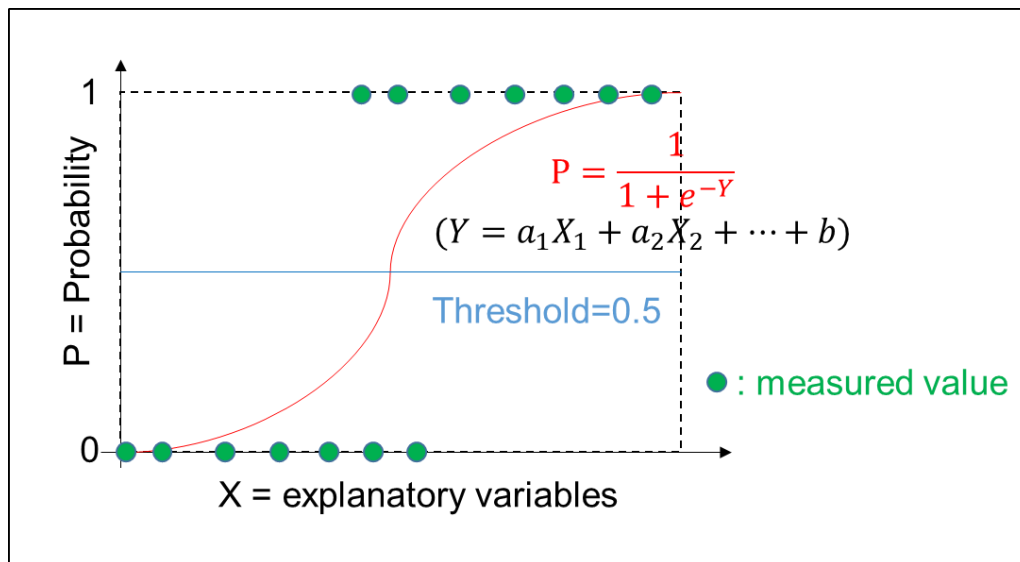


図 4.3-6 Logistic Regression による予測のイメージ

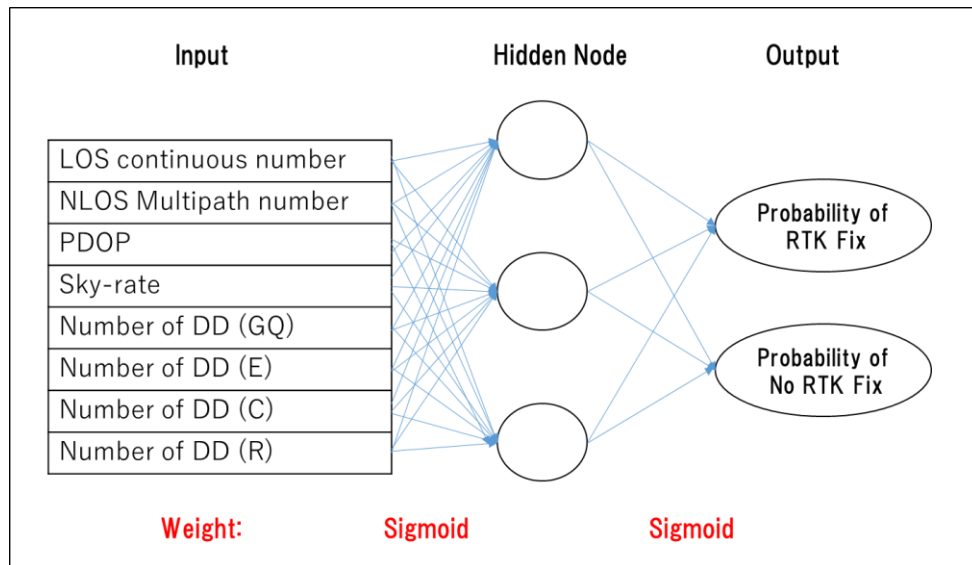


図 4.3-7 DNN のイメージ

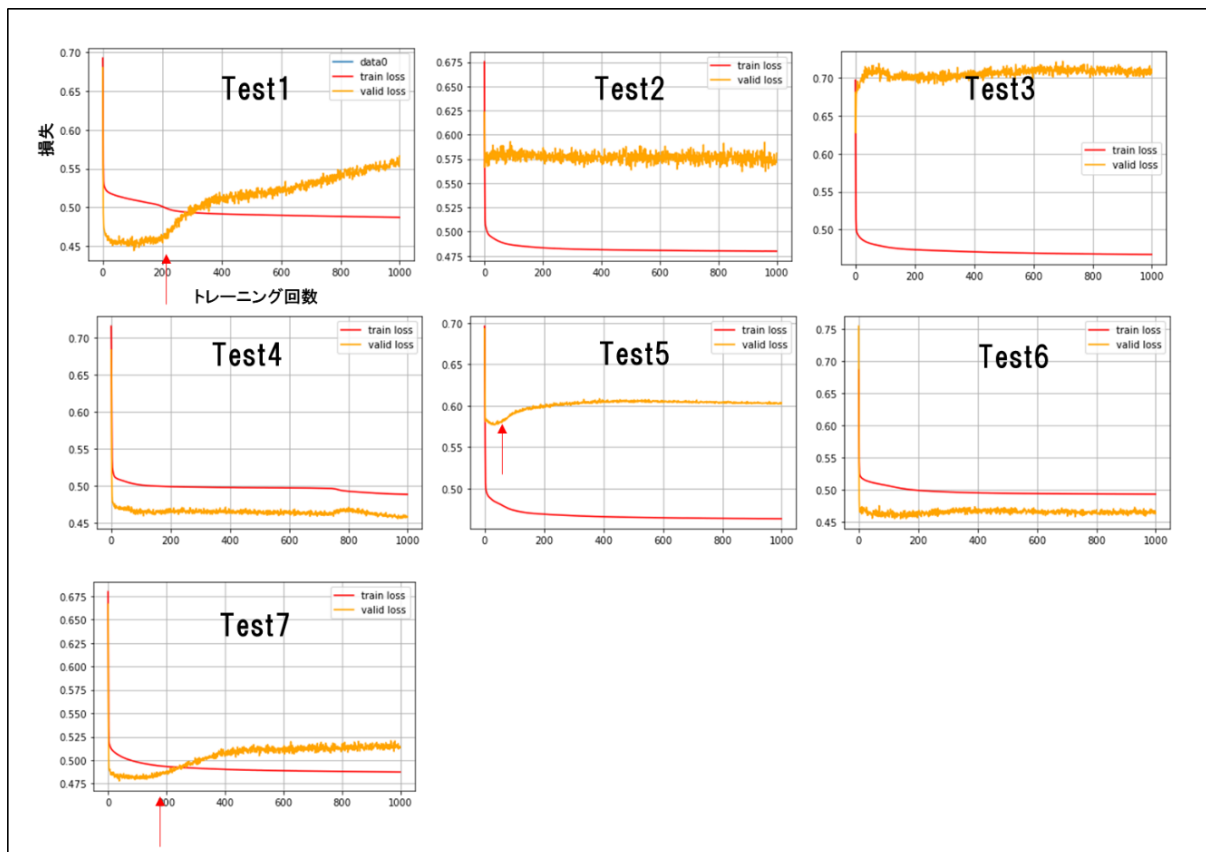


図 4.3-8 7 回のテストにおける損失関数

4.4 各予測手法の結果

4.3 で示した 3 つの手法、K 近傍法、Logistic Regression 法、DNN による予測の結果を図 4.4-1 に示す。7 つのテストの予測精度平均値は K 近傍法で 72.2%、Logistic Regression 法で 72.9%、DNN で 73.4%であった。また 7 つのテスト結果を使用して (ROC: Receiver Operating

Characteristic)カーブを描き、その面積(AUC: Area Under Curve)で評価した。ROC カーブを図 4.4-2 に示す。ROC カーブは各テストの真陽性率(TPR: True Positive Rate)と偽陽性率(FPR; False Positive Rate)をプロットすることで作成する。TPR と FPR は混合行列 (表 4.4-1) を使用して以下の式で計算を行う。

$$TPR = \frac{TP}{TP+FN} , FPR = \frac{FP}{TN+FP} \quad \cdots(4-4-1)$$

TPR は実際に陽性であるもののうち、正しく陽性と予測できたものの割合を示す。FPR は実際には陰性であるもののうち、誤って陽性と予測したものの割合を示す。ROC カーブと TPR=0%、FPR=100%の線で囲んだ部分を AUC と呼び、AUC は 0~1 の間で 1 に値近いほど予測性能が良いとされる[27]。今回の結果では K 近傍法で AUC=0.77、 Logistic Regression 法で AUC=0.76、 DNN で AUC=0.78 と機械学習の手法別では大きな差がなかった。

図 4.4-3 に Test1 での予測結果を水平プロットで示す。この図から 3 つの予測手法では RTK Fix 区間がほぼ同じであることがわかる。一方で予測と実測値 (正解) では主に赤枠で囲んだ部分で差異が見られた。

また、今回使用した説明変数の組み合わせは平均正答率が最も高くなった組み合わせである。この組み合わせ以外にも様々な説明変数の組み合わせを試しており、そのときの K 近傍法を使用した場合の平均正答率を表 4.4-2 に示す。

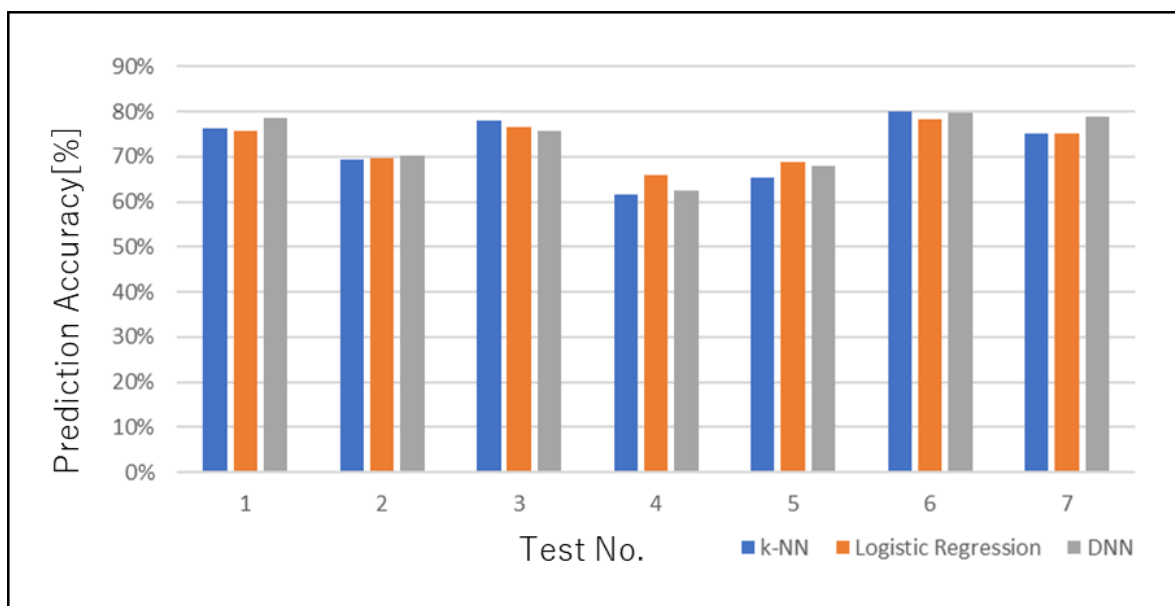


図 4.4-1 各手法による交差検証における予測精度

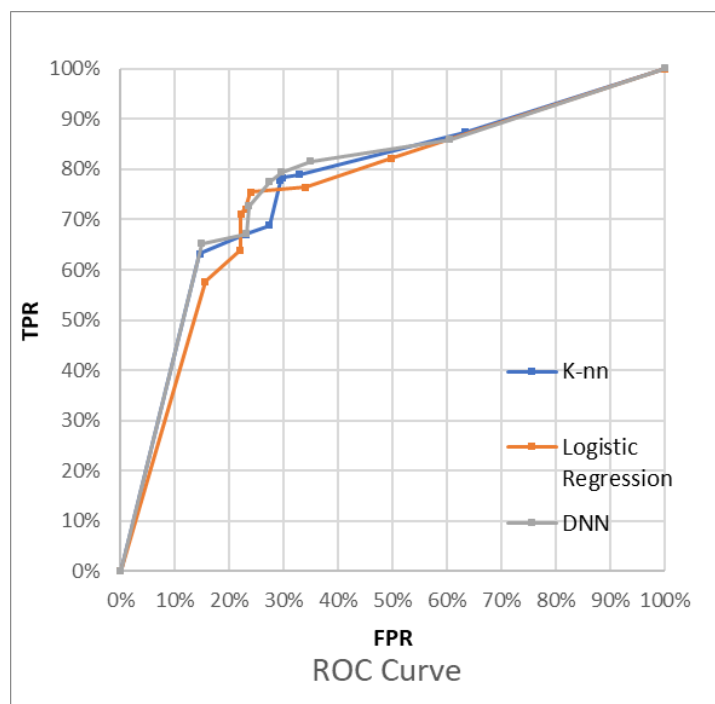


図 4.4-2 各手法による ROC カーブ

表 4.4-1 混合行列

	Prediction is RTK Fix	Prediction is No RTK Fix
Measurement is RTK Fix	TP: True Positive	FN: False Negative
Measurement is No RTK Fix	FP: False Positive	TN: True Negative

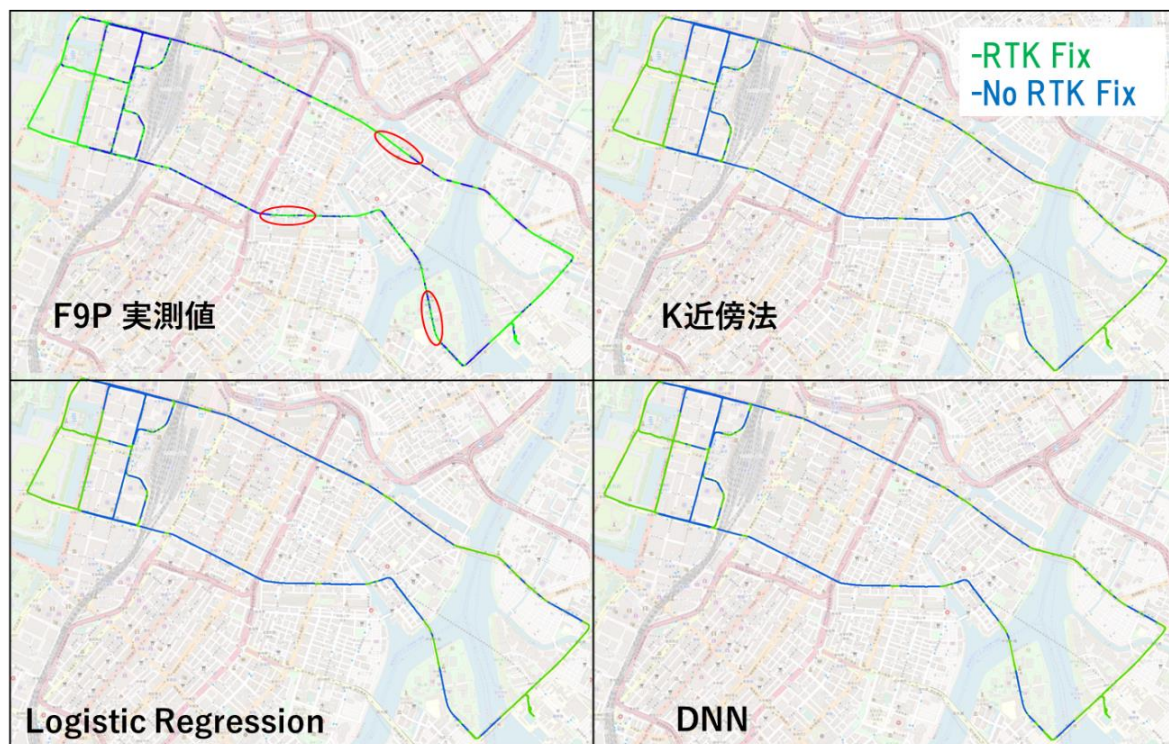


図 4.4-3 Test1 における RTK Fix 区間の水平プロット

表 4.4-2 試行した説明変数の組み合わせ

説明変数	組み合わせ						
LOS衛星数	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
LOS継続衛星数							✓
LOS衛星のPDOP	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
LOS継続衛星のPDOP							✓
NLOS衛星数							
仰角0-15度のLOS衛星数		✓					
仰角15-30度のLOS衛星数		✓					
仰角30-45度のLOS衛星数		✓					
仰角45-60度のLOS衛星数		✓					
仰角60-75度のLOS衛星数		✓					
仰角75-90度のLOS衛星数		✓					
GPS/QZSS二重位相差数			✓	✓	✓	✓	✓
GLONASS二重位相差数			✓	✓	✓	✓	✓
BDS二重位相差数			✓	✓	✓	✓	✓
Galileo二重位相差数			✓	✓	✓	✓	✓
半径20m以内の建物の密度				✓			
半径20m以内の建物の平均高さ					✓		
天空率						✓	✓
K-NNでの平均予測正答率	59%	66%	69%	68	65	71%	72%

4.5 RTK 可用性予測のまとめ

本章では7つの走行データを使用して、その走行における RTK Fix 区間と No RTK Fix 区間の予測とその評価を行った。3D マップと衛星のアルマナックを使用した衛星可視衛星シミュレーションを用いて説明変数を作成し、これを実際の RTK Fix ステータスと紐づけたものを教師データとした。テストデータは観測値を使用しないシミュレーション結果のみを使用して K 近傍法、Logistic Regression 法、DNN 法の3種類の機械学習で RTK 可否の予測を行った。予測精度は3つの手法すべてで70%代であり、AUC も70%代であった。これらの予測性能は単純な閾値を使用した予測よりも良い結果であった。この手法を使用すれば自動運転インフラを設計する上で実際に試験走行せずに効率的にどこで RTK Fix 解が得られないかを事前に知ることが可能である。また建設現場に RTK 測位を導入するかどうかの目安にもなる。面的な RTK 可否の予測も図 4.5-1 のように可能である。この例ではビルを除いた道路上に1m間隔でグリッドを作成し各点における予測を4.4で使用した教師データを用いて k 近傍法で行った。

一方で今回使用した 3D マップには街路樹や歩道橋、信号などが含まれておらず、それらの GNSS 信号への影響が考慮されていないため、今後はそれらも推定できる仕組みが必要であると思われる。

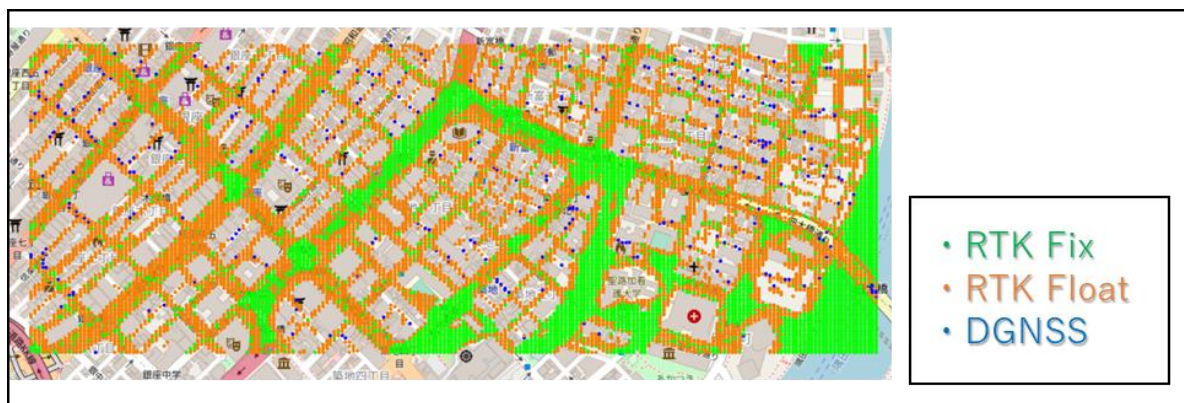


図 4.5-1 都市部の面的な RTK 可否予測の結果

第5章 統合測位解の閾値以上の誤差推定

5.1 GNSS の統合測位について

RTK 測位は数 cm 程度の誤差で車の絶対位置を測位可能で、これは自動運転で許容される誤差 30cm[28]以下である。しかし、市街地や橋下、トンネルなどでは RTK の精度はマルチパスなど影響で劣化する他、GNSS 測位が不可能となることもある。また、ジャミングやスプーフィングといった妨害行為が行われた場合、それを検知して GNSS を使わない航法に切り替えるということも提案されている。スプーフィングの検知にはすでに様々な手法が提案されているが[2]、検知後の代替測位手法については現在議論が盛んなところである。このため GNSS に IMU とスピードセンサーを統合して GNSS の環境が悪い・使用できない場所でも車の位置を正確に出力する統合測位が一般的に提案されている。IMU は 3 軸の加速度と 3 軸の角速度を提供し、車速センサーは車のタイヤの回転数から進行方向への速度を提供する。図 5.1-1 にそれぞれ市販の RTK 受信機 ublox F9P とこれに IMU と車速センサーが付随した ublox F9R[29]の測位結果を示す。橋下の通過時や高架下にて F9R は F9P と比べて飛びのない位置を出力できていることがわかる。

しかし F9R のような数万円の低コストの統合測位モジュールでは 30cm 以上の誤差を持った位置を出力してしまうことがある。図 5.1-2 に F9R の出力結果とハイエンドなリファレンスシステム POSLVX125 との比較を示す。赤で示した POSLVX125 の正しい軌跡に対して F9R の解は一部で大きくずれている。このようなリファレンスから水平で 30cm 以上ずれた統合測位解を閾値以上の誤差と規定して本研究ではこれを推定する手法を提案する。

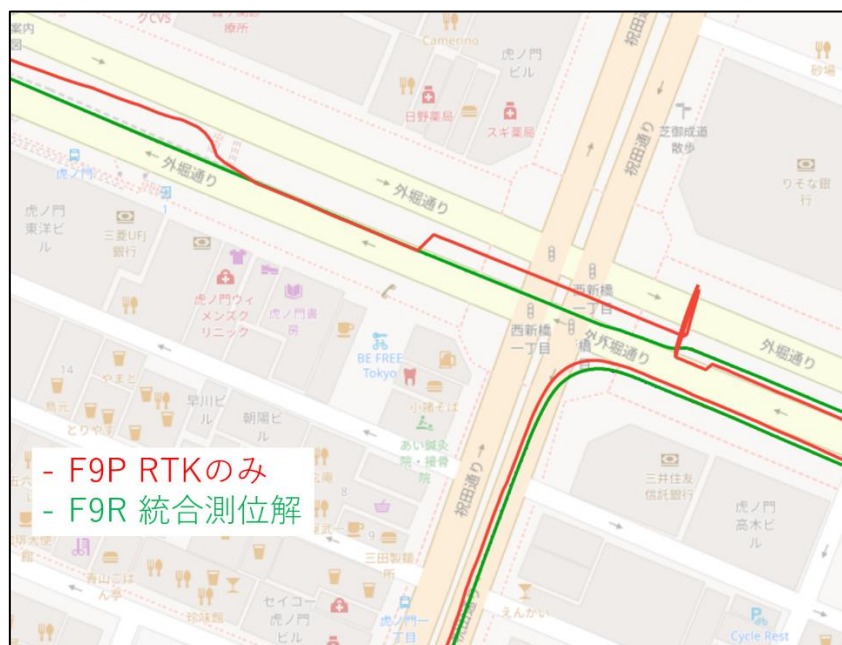


図 5.1-1 都市部の面的な RTK 可否予測の結果

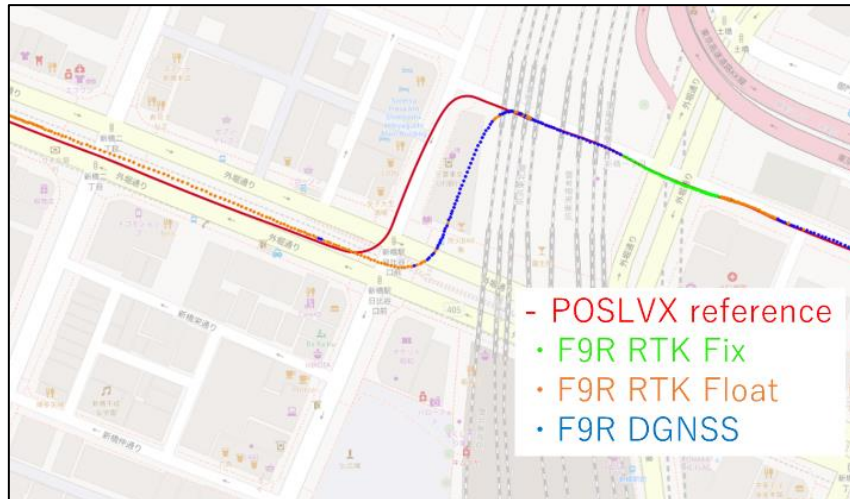


図 5.1-2 POLVX125 と F9R の測位結果比較

5.2 データの収集

東京都内で車両走行により 3 つのデータを取得した。実験構成を図 5.2-1 に示す。車両には F9R 受信機とレファレンスの POSLVX125 を搭載し、それぞれ東京海洋大学の基準局を使用して RTK を行った。受信機間のバイアスを防ぐために F9R の基準局受信機には F9P を、POSLVX125 の基準局受信機には Trimble netR9 を使用している。使用衛星は POSLVX125、F9R とともに GPS, GLONASS, BDS, Galileo, QZSS であるが POSLVX125 が 3 周波まで使用できるのに対し、F9R は 2 周波のみ受信できる。GNSS アンテナには AT1675-540TS を使用した。IMU はそれぞれ受信機に搭載されたのものを使用しているが、価格的に POSLVX125 の IMU の方が精度良いと思われる。車速については POSLVX125 が専用の走行距離計(DMI: Distance Measurement Instrument)を使用しているのに対し F9R は車に標準搭載されている 4 パルスの車速信号を使用している。DMI や F9R で取得できる車速は車のタイヤの回転数から計算している。F9R の場合はタイヤが 1/4 回転でパルス信号が発生しするのでパルス間隔が距離にするとタイヤの円周の 1/4 となる。なので 1 秒間に受信したパルス数×タイヤ円周/4 が車の速度となる。POSLVX125 の DMI はパルスの周期が 4Hz よりも多いので特に低速域において車速の精度が良い。

車両のデータは 1Hz で取得した。図 5.2-2 に三回の走行試験の結果を示す。緑が RTK Fix、オレンジが RTK Float、青が DGNSS の区間を示す。F9R の RTK Fix 率は No.1 で 57.7%、No.2 で 70.0%、No.3 で 55.7%であった。これら 3 つのデータは経路と RTK Fix 率が異なるため DNN を使用した推定の評価に利用するのに適切だと判断した。この 3 つのデータを使用して POSLVX125 を真値として F9R の水平測位誤差を求め、これが 30cm 以上か以下かで閾値以上の誤差の判定を行った。

F9R 受信機は推定水平精度(UBX-PVT-NAV 内の hAcc)[30]と PL を出力できるので、まずこのデータで RTK Fix 以外の統合測位となっている区間の実際の水平誤差と hAcc、HPL(Horizontal Protection Level)の比較を行った。この結果を図 5.2-3~5-2-5 に示す。3 つのデ

ータから HPL が大きな余裕を持って出力されているのに対して、hAcc の値は実際の水平誤差よりも低めに設定されており、最高値が 3m 台であった。このグラフより hAcc と実際の水平誤差はあまり一致していないことがわかる。また、hAcc の値を使用して統合測位区間の閾値以上の誤差(水平誤差 30cm 以上)を推定したところ、正答率・TPR・FPR は表 5.2-1 のようになった。表 5.2-1 から走行データごとで統計値がばらけていることがわかる。この TPR, FPR を使用した ROC カーブを図 5.2-6 に示す。ROC カーブの形状としてはあまり適切ではなく、AUC は 73.7%であった。そのため深層学習を用いた閾値以上の誤差判定で hAcc を使用した閾値以上の誤差判定よりも良い判定精度が得られるかどうかを以降の章で評価する。

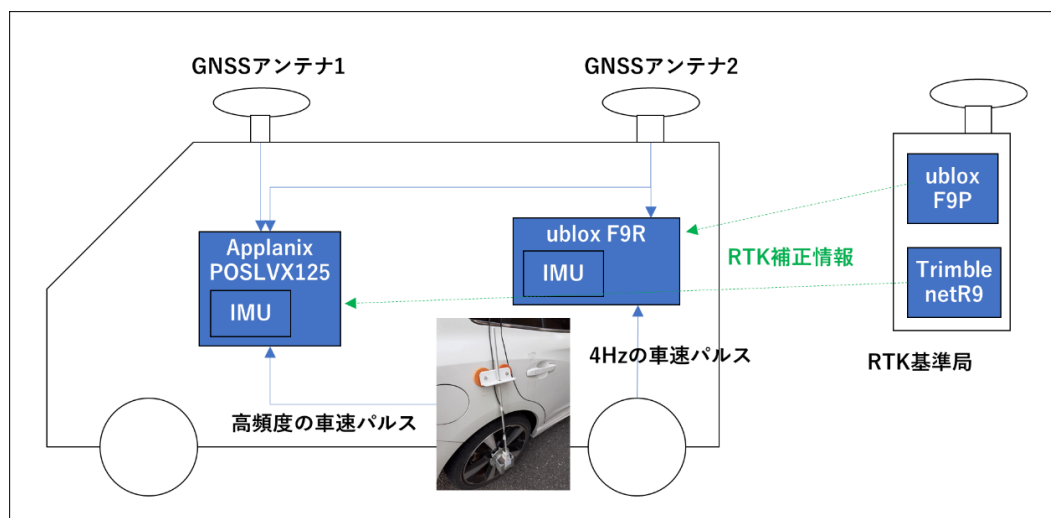


図 5.2-1 実験機器構成

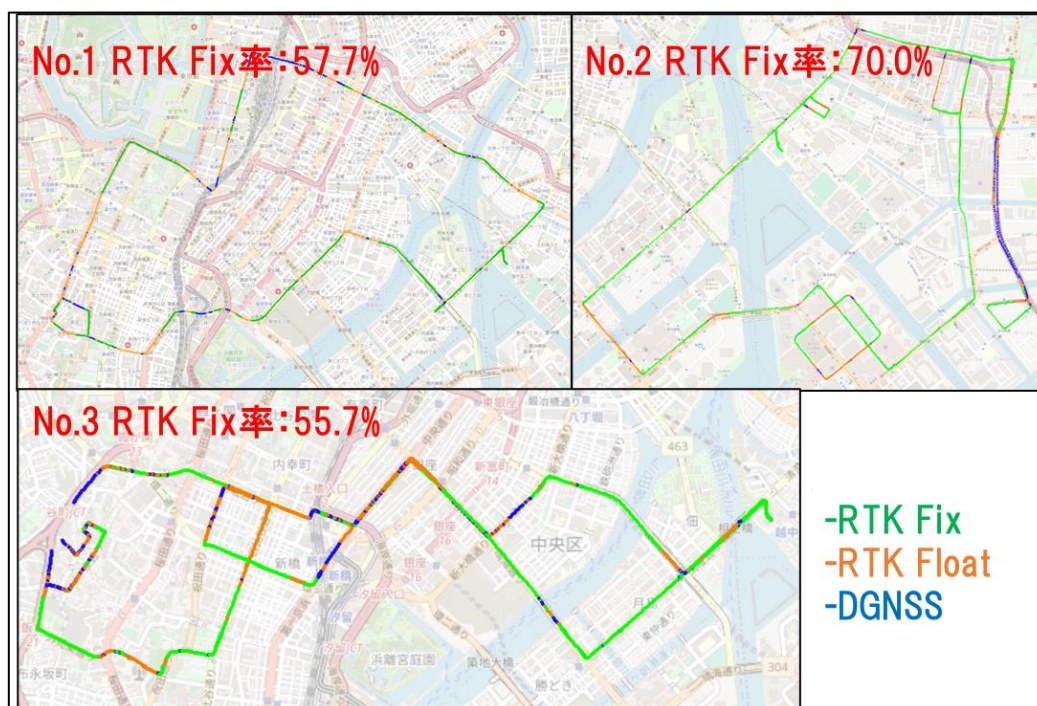


図 5.2-2 走行実験における F9R の結果

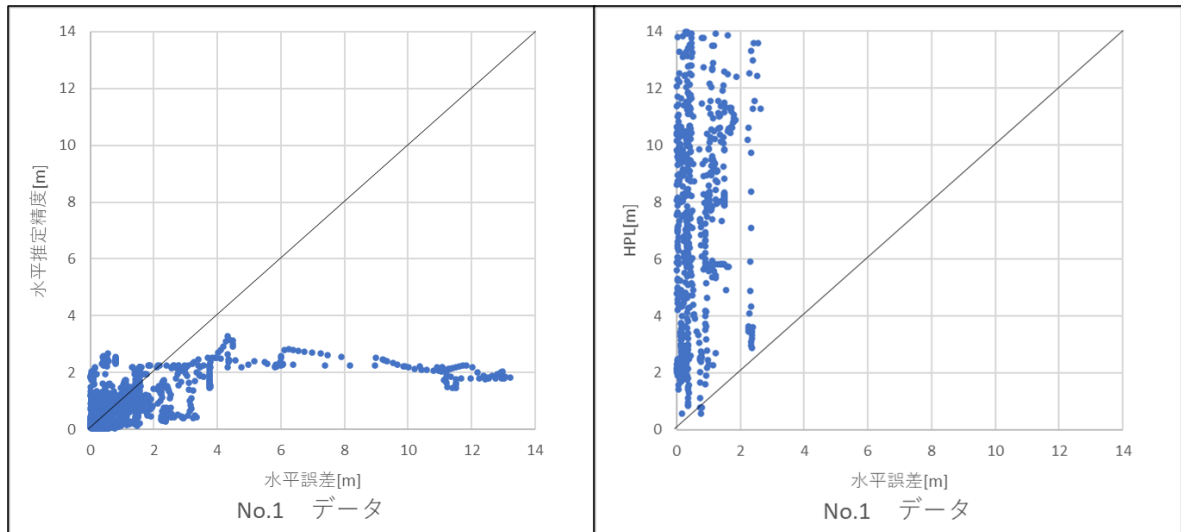


図 5.2-3 No.1 データにおける水平誤差と hAcc, HPL の比較

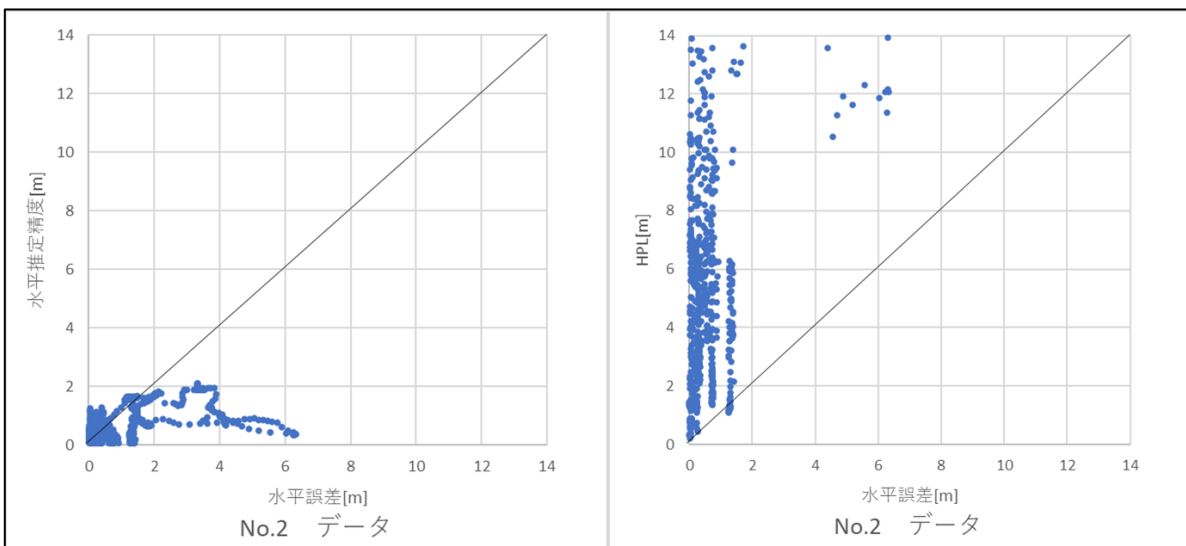


図 5.2-4 No.2 データにおける水平誤差と hAcc, HPL の比較

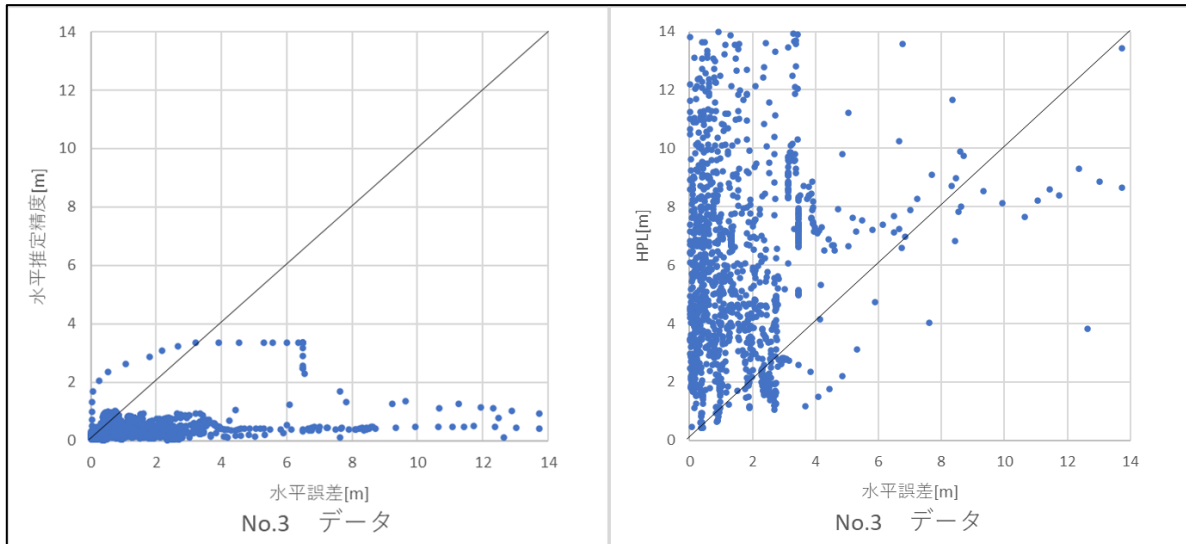


図 5.2-5 No.3 データにおける水平誤差と hAcc, HPL の比較

表 5.2-1 F9R の hAcc を使用した場合のミス Fix(水平誤差 30cm)以上の推定精度

	正答率	TPR	FPR
No.1	78.0%	50%	13%
No.2	55.4%	40%	35%
No.3	65.8%	91%	40%

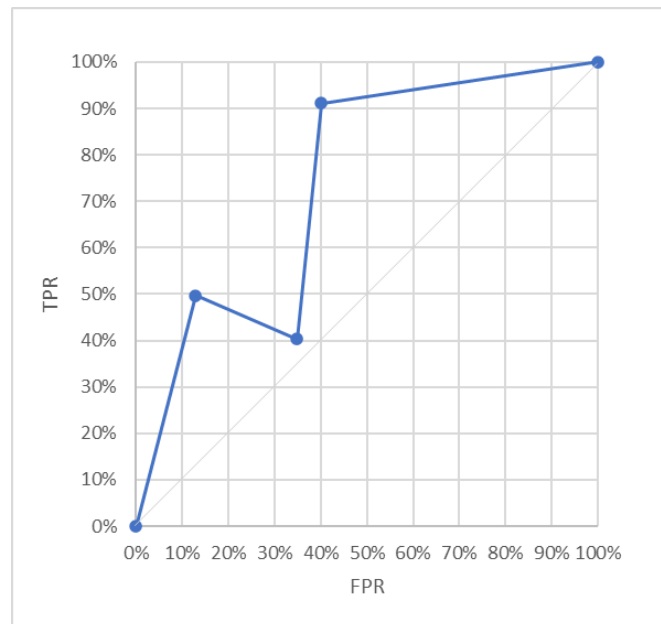


図 5.2-6 hAcc を利用した推定の ROC カーブ

5.3 DNN による予測

DNN については 4.3 で述べたものと同じ Keras ライブラリーのアルゴリズムを使用した。図 5.3-1 に DNN のイメージを示す。推定はエポックごとに行い、入力層には推定に必要と思われる説明変数を入力し、隠れ層を通して二値分類の出力レイヤーで閾値以上の誤差かそうでないかを判断する。説明変数としては以下の 6 つを用意した。

- ・ Line-of-Sight(LOS)継続衛星数

LOS 継続衛星は搬送波のハーフサイクルアンビギュイティが決定する 6 秒以上継続して見通し環境にある衛星のことを指す。3D マップ上で Ray-Launching 法を行うことでカウントした。LOS 継続衛星数が低いほど統合測位解の誤差は大きくなると考えられる。

- ・ 位置精度劣化率(PDOP)

これは LOS 継続衛星の PDOP を計算した。PDOP が大きいほど GNSS 測位誤差は大きくなる。

- ・ 最終 RTK Fix からの継続時間

IMU は RTK Fix のときその加速度や方位が校正されるが、RTK Fix 解が得られなくなると誤差が蓄積していくため[31]、この時間が長くなると統合測位解の誤差が増大していく。

- ・ L1 帯 SNR の平均値

LOS 継続衛星の SNR の平均値を計算した。基本的にマルチパスと直接波を同時に受信すると GNSS 信号の SNR は低下する。そのため LOS 継続衛星数が同じでも SNR が低いとマルチパスの影響が大きく、観測データの質が悪くなると考えたためである[32]。

- ・ GNSS 速度の大きさ

IMU の方位は車が高速で走っていると方位精度が良いためバイアスが補正される。しかし長時間停車してような環境だと車の方位がわからず IMU の方位に誤差が蓄積してしまう。

- ・ RTK Fix タイプ

これは F9R の RTK Fix タイプで Fix, Float, DGNSS, No Fix に分けられる。それぞれに大体の精度として 10cm, 40cm, 2m, 5m の値を設定した。

以上の説明変数を DNN で使用するフローを図 5.3-2 に示す。一部の説明変数はシミュレーションから、他の特徴料は実際の GNSS 観測データから取得した。各説明変数は min-max 法によって正規化してから機械学習に使用した。層間の活性化関数には Sigmoid 関数を使用した。隠れ層は 1 層で隠れ層のノードは 9 個に設定した。DNN は推定前に学習データによるトレーニングを必要とするがこのトレーニング回数と損失関数の関係を図 5.3-4 に示す。Train loss は学習データに対するモデルの適合度合い、Valid loss は学習に使用していないデータに対するモデルの

適合度合いを示す。Train loss は学習回数を増やすほど減少していくが、Valid loss はある時点で上昇に転じる。Train loss が下降し Valid loss が上昇している状態は過学習(Overfitting)の状態である。そのため、Valid loss が最低になった時点で学習を停止するのが最適である [26]。図 5.3-4 のデータではトレーニング回数が 2000 回を超えたあたりから valid loss が上昇に転じている。他のデータを使用した際も 1500~2000 回から valid loss が最低となったため、今回はトレーニング回数を 2000 回に設定した。

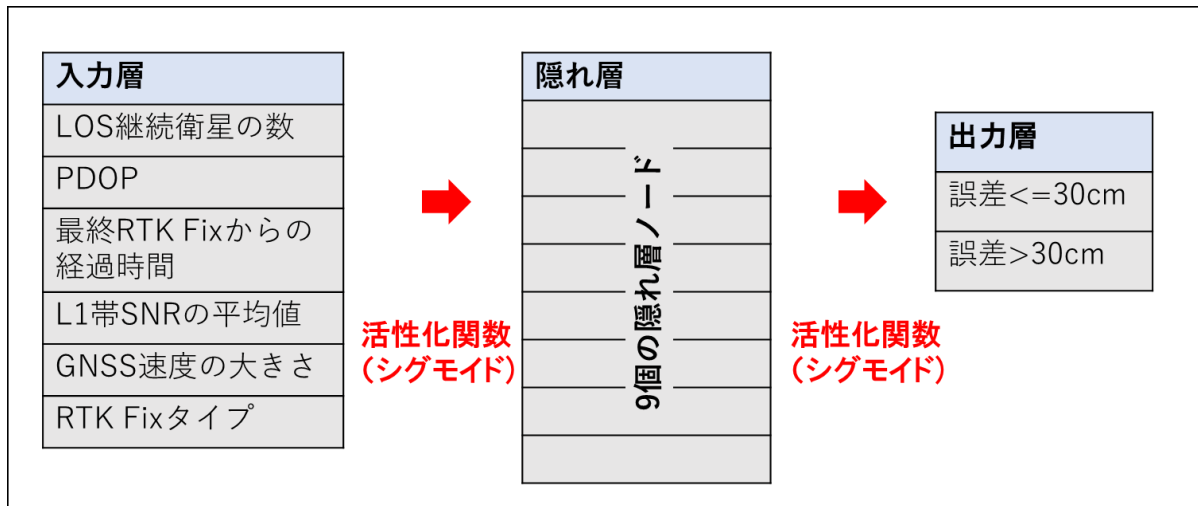


図 5.3-1 使用した DNN のイメージ

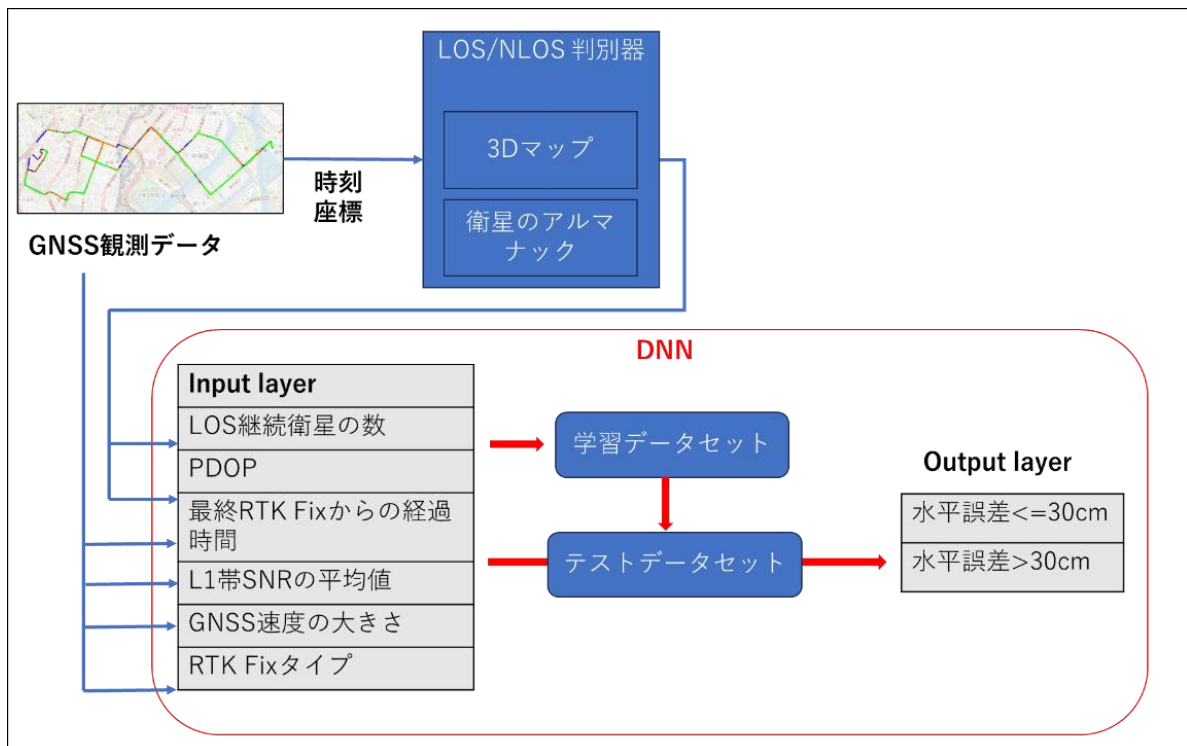


図 5.3-2 DNN における説明変数の使用フロー

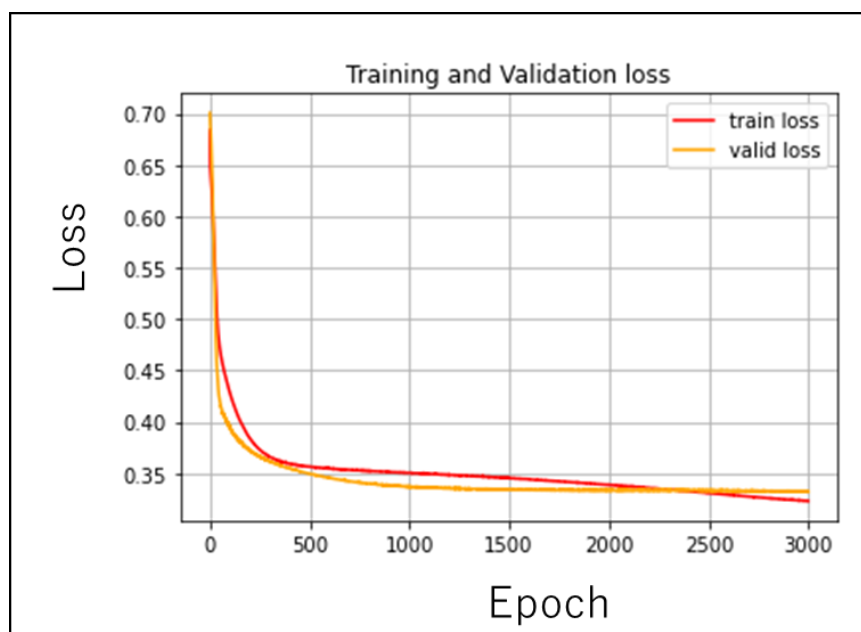


図 5.3-3 統合測位のデータにおける損失関数

5.4 予測結果とその改善

5.3 の設定で 3 データの閾値以上の誤差推定を行った。評価には交差検証とそれによる推定精度、ROC カーブ、その AUC を用いた。ただし、これらの評価に実際に RTK Fix の部分を含んだ場合大部分の推定結果が誤差 30cm 以内となってしまう、統合測位解の精度評価とならないので F9R が RTK Fix 解が得られなかった区間のみを抽出して評価を行った。表 5.4-1 に異なるテストデータと学習データの組み合わせによる 3 回の交差検証方法を示す。このテスト結果を表 5.4-2 に示す。正答率は平均で 79.4% と高いが、TPR の平均が 37.1% と低かった。このため ROC カーブの AUC は 0.609 であった。

TPR が低いということは誤差 30cm 以下の場所を 30cm 以上の誤差として判別している割合が高いことを示す。このため、説明変数を調整して推定パフォーマンスを改善することを試みた。まず 6 つの説明変数から 1 つの説明変数を外した場合の推定結果を比較することで最も重要な説明変数と最も悪影響を及ぼす説明変数を判別した。表 5.4-3 に説明変数の組み合わせを示す。5.3 で示したすべての説明変数を使用した場合を含めて 7 パターンの組み合わせで推定精度がどう変わるかを検証した。各組み合わせの推定精度を図 5.4-1 に TPR を図 5.4-2 に示す。1 つの組み合わせにつき 3 パターンの交差検証を行っている。3 つの交差検証の平均値をグラフの上方に赤字で示している。推定精度は組み合わせ間であまり変化がないが、TPR は組み合わせ 4 で非常に低く、組み合わせ 7 で最も高くなっていた。このことから「最終 RTK Fix からの経過時間」がもっとも重要な説明変数である一方で「RTK Fix タイプ」は推定性能に悪影響を与えている説明変数であることが予測できる。

この結果をもとに「最終 RTK Fix からの経過時間」を二乗することで重みを与え、「RTK Fix タイプ」を説明変数から除いて推定した結果を組み合わせ 7w として図 5.4-3、図 5.4-4 に示す。

推定精度は 78.6%と大きな違いはないが、TPR は 67.8%と他の組み合わせに比べて大きく改善された。オリジナルの組み合わせと 7w を ROC カーブで比較すると図 5.4-5 のようになる。AUC は 0.609 から 0.801 へ 20%ほど改善した。

また、組み合わせ 7w での予測結果を地図上に示したものを図 5.4-6, 5-4-7, 5-4-8 に示す。3 例とも高架下を走行しており F9R の出力が統合測位解となっている例である。緑のラインはレファレンスとなる POSLVX125 の軌跡で、ドットが F9R の統合測位解を示す。F9R の解は緑が RTK Fix、オレンジが RTK Float、青が DGNSS である。赤丸で囲んだものは閾値以上の誤差推定が成功した解を示している。図 5.4-6 は統合測位解が 30cm 以下の精度を持つときに推定が成功した例を、図 5.4-7 は統合測位解が 30cm 以上の誤差を持つとき推定が成功した例を示す。ほとんどの地点で推定成功を示す赤丸がついており、この結果より閾値以上の誤差推定の予測性能がある程度良いことがわかる。

表 5.4-1 交差検証の組み合わせ

テストNo. \ データセット	No.1	No.2	No.3
Test 1	テスト	学習	学習
Test 2	学習	テスト	学習
Test 3	学習	学習	テスト

表 5.4-2 DNN の結果

	Accuracy (%)	TPR (%)	FPR (%)
Test 1	81.5	33.1	8.2
Test 2	77.9	46.5	9.2
Test 3	78.7	31.8	11.5
Average	79.4	37.1	9.6

表 5.4-3 試した説明変数の組み合わせ

入力特徴量 \ 組み合わせ	1	2	3	4	5	6	7
LOS継続衛星の数	✓		✓	✓	✓	✓	✓
PDOP	✓	✓		✓	✓	✓	✓
最終RTK Fixからの経過時間	✓	✓	✓		✓	✓	✓
L1帯SNRの平均値	✓	✓	✓	✓		✓	✓
GNSS速度の大きさ	✓	✓	✓	✓	✓		✓
RTK Fixタイプ	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

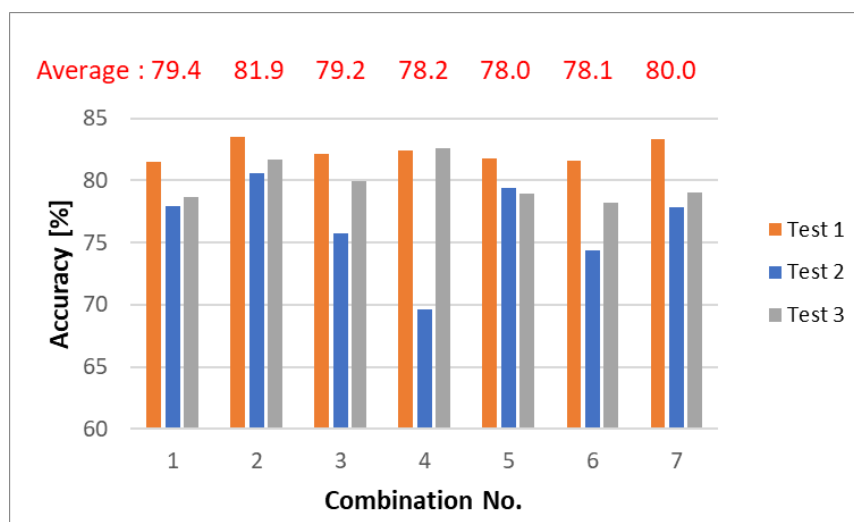


図 5.4-1 各説明変数の組み合わせにおける推定精度

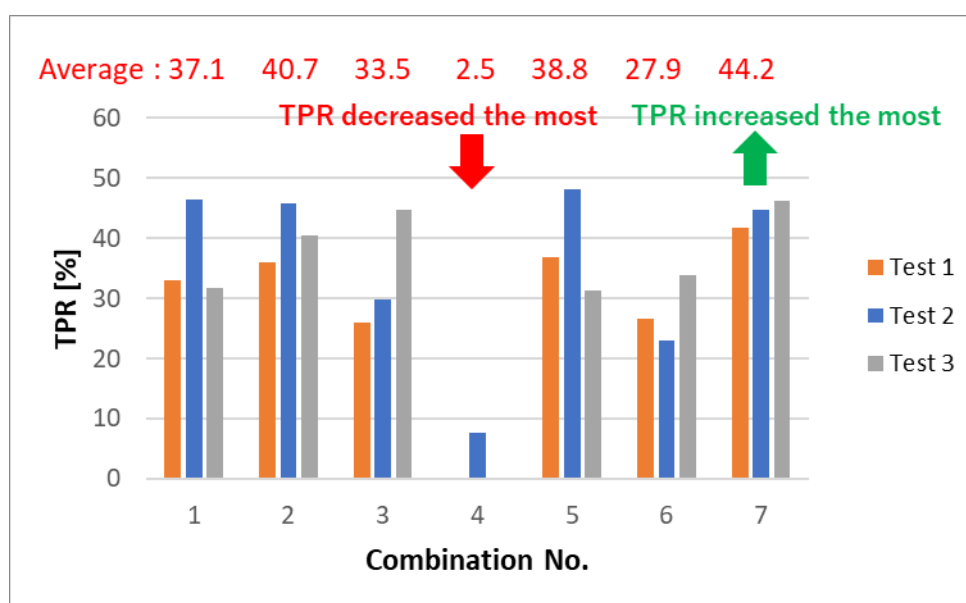


図 5.4-2 各説明変数の組み合わせにおける TPR

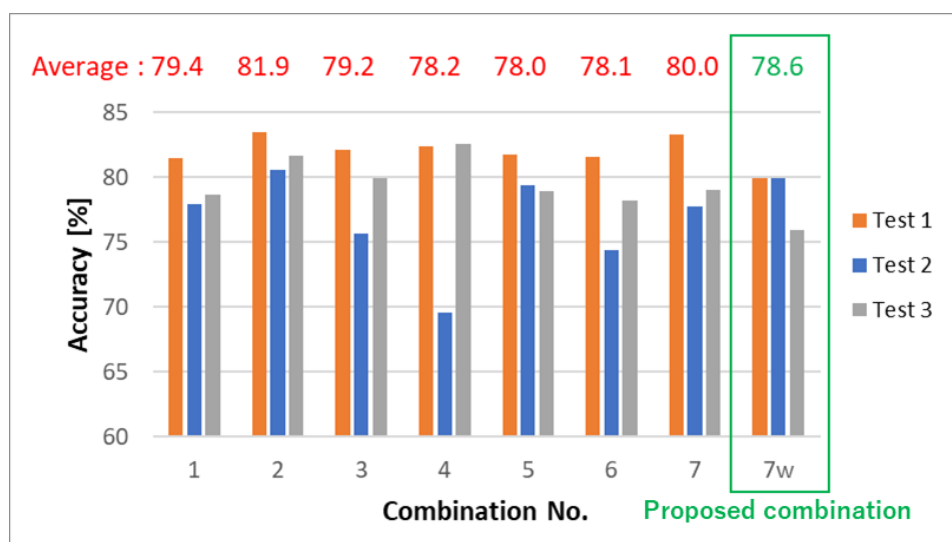


図 5.4-3 組み合わせ 7w とその他の精度比較

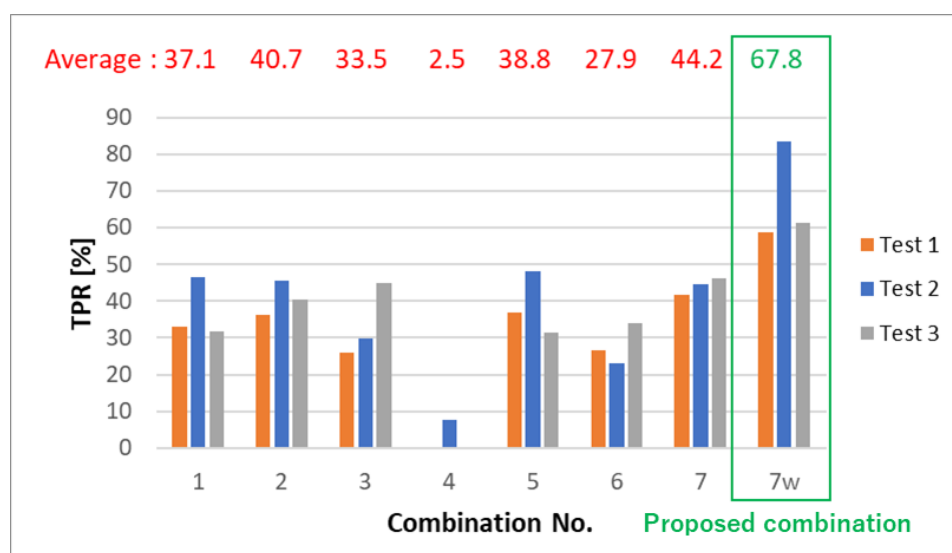


図 5.4-4 組み合わせ 7w とその他の TPR 比較

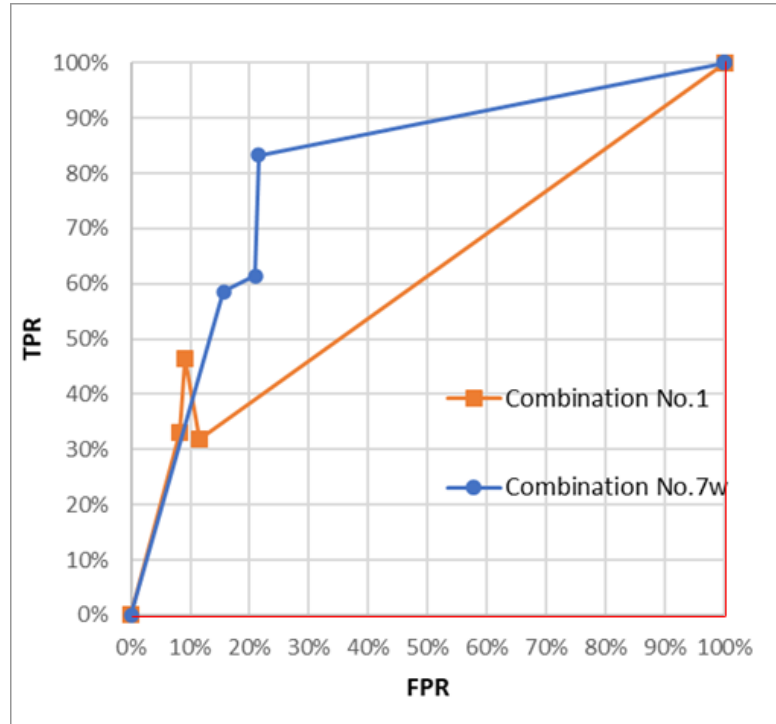


図 5.4-5 組み合わせ 1 と 7w の ROC カーブの比較

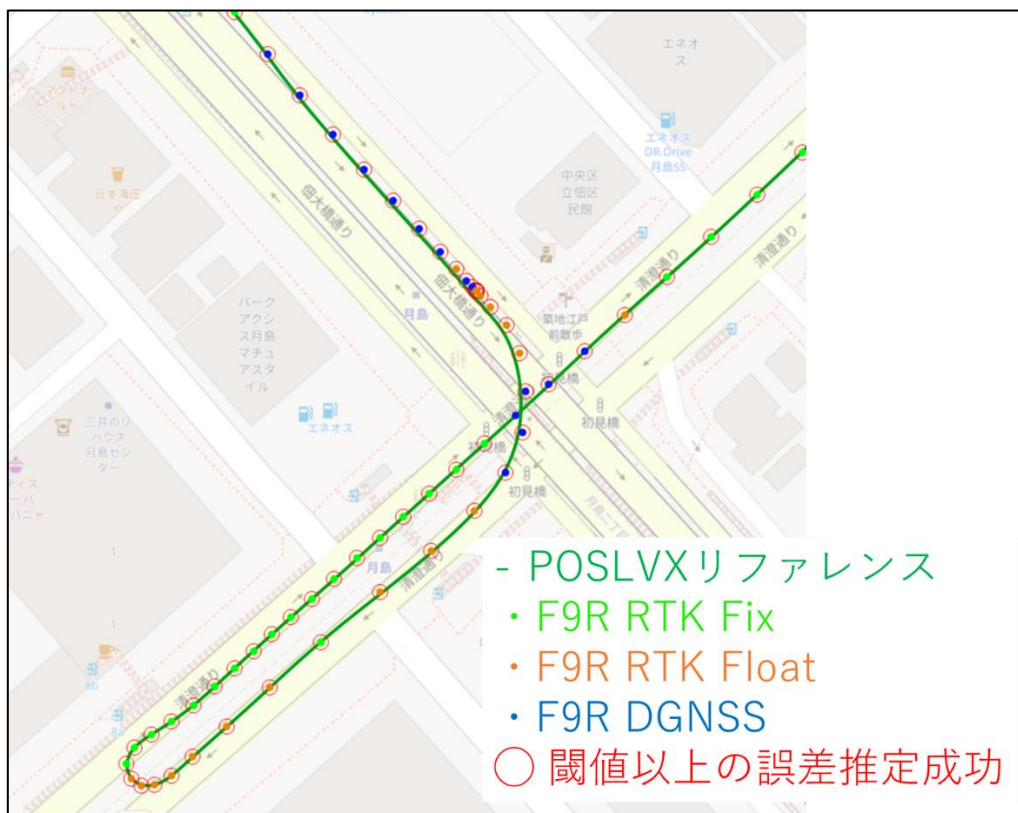


図 5.4-6 閾値以上の誤差推定の例 1

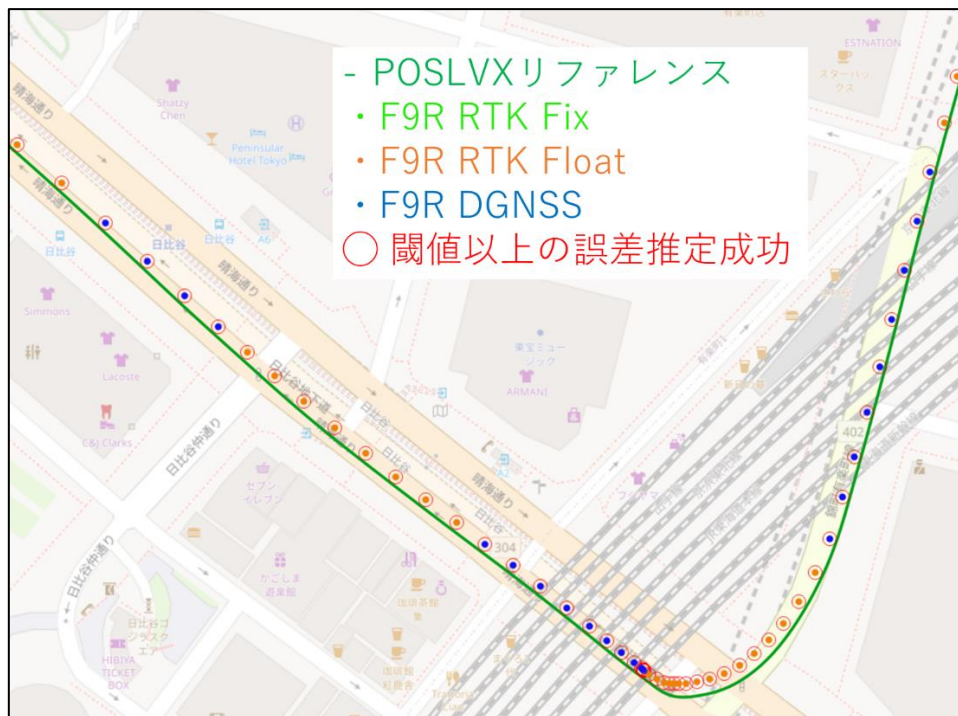


図 5.4-7 閾値以上の誤差推定の例 2

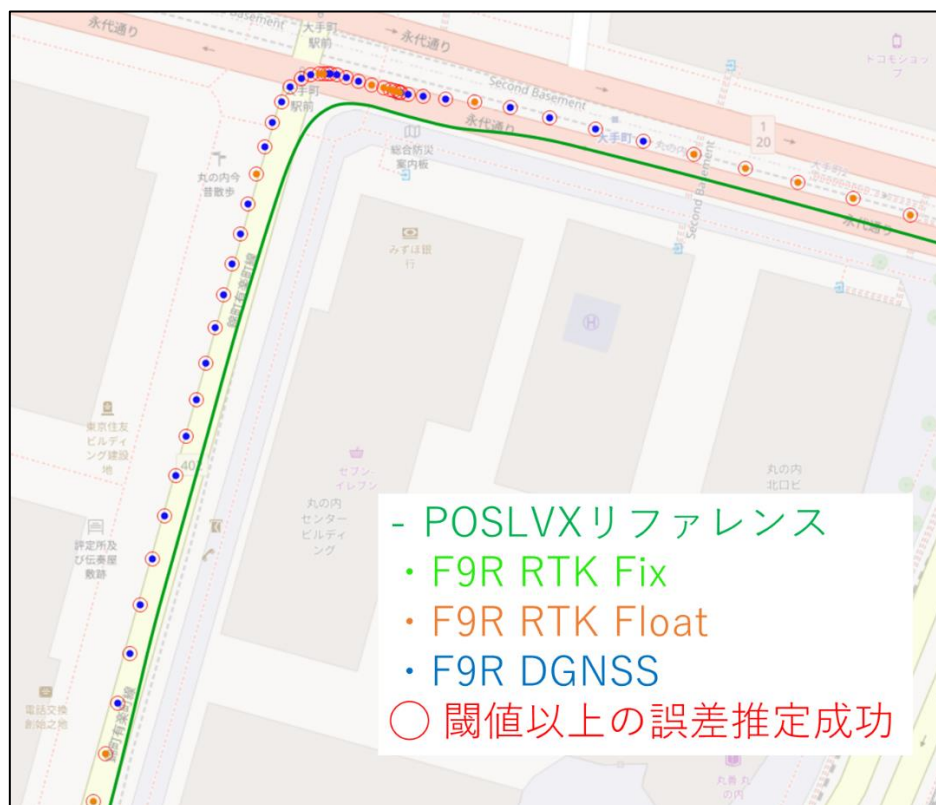


図 5.4-8 閾値以上の誤差推定の例 3

5.5 統合測位解の閾値以上の誤差推定のまとめ

今回の研究では判断が難しい統合測位における閾値以上の誤差の推定を DNN を使用して行

った。当初設定した説明変数を使用した推定は性能が良くなかったが、説明変数の組み合わせ検証を通して「最終 RTK Fix からの経過時間」を二乗することで重みを与え、「RTK Fix タイプ」を特徴量から除去することで AUC の値で 0.609 から 0.801 へ 20%ほどの推定性能改善を行うことができた。推定正答率の平均は 78.6%であった。この推定結果は F9R の出力する推定水平精度(hAcc)を利用した閾値以上の誤差判定よりも良い結果であった。また本手法では数学的な推定ではなく DNN を使用したため誤差閾値の値（今回は 30cm）を変更しても推定精度はあまり変化しないと思われる。

一方で今回の推定手法は 3D マップの Ray-Launching 法を LOS/NLOS 判定に使用しているため計算コストが重く、リアルタイム性がないが、LOS/NLOS 判定を別の高速な手法に変えることで走行中のリアルタイム推定が可能となる。LOS/NLOS 判定の高速な手法としては魚眼カメラを使用したものや Lidar によって 3D マップを随時作成する手法が考えられる。走行中にレーン判定に使用できない測位解をリアルタイムに推定できれば、統合測位を利用した自動車のナビゲーションの安全性をモニターする用途に応用可能だと考えられる。

第6章 準天頂衛星による高精度測位可用性の調査

本章では第3章で述べた衛星可視シミュレーションを使用して準天頂衛星の高精度測位サービスの1つである CLAS の都市部でのアベイラビリティを予測について述べる。今後 QZSS が追加で打ち上げされる予定であるため、その時に CLAS アベイラビリティがどう変化するかを都市部の7箇所でシミュレーションをして調査した。

6.1 CLAS について

CLAS とは QZSS 経由の PPP-RTK サービスである。日本の電子基準点の GNSS 観測データを使用して衛星のクロック誤差、軌道誤差、電離層遅延量、対流圏遅延量を計算し、それを QZSS から L6D 信号で配信することでこの補強信号を受信した受信機は PPP-RTK を実行して cm レベルの解を得ることができる。RTK と比べて補正情報に必要な基準局やインターネット回線が不要であるのが大きなメリットである。CLAS のシステム構成図を図 6.1-1 に示す。また CLAS は電子基準点を利用しているためサービス範囲は図 6.1-2 で示すように日本の陸上と沿岸部に限定される。図 6.1-3 に実際に CLAS 対応受信機の Septentrio 社の mosaic-CLAS にてオープンスカイの静止点で 24 時間取得した測位結果を示す。赤が CLAS、グレーが同じ時間に取得した SPP を示しており、CLAS の水平精度は RMS 値で 4.8cm であり非常に良い精度が出ている。CLAS はオープンスカイの環境では L6D 信号の受信から 60 秒以下[6]で CLAS Fix 解を得ることができるが、RTK と同じく可視衛星数が少ない環境やマルチパスが多い環境では CLAS Fix 解を得ることが難しく、さらに補強信号を配信する衛星が見えない場合 CLAS Fix 解は得ることができない。図 6.1-4 に同じく mosaic-CLAS 受信機を使用した場合の都市部走行時の CLAS 測位の結果を示す。緑色の部分が CLAS が Fix した部分であり、この実験では Fix 率は 81.9%であった。車両位置のリファレンスである Applanix POSLVX125 の結果を使用してとこの mosaic-CLAS の水平誤差を CLAS Fix 解に限定して時系列プロットしたグラフを図 6.1-5 に示す。この実験では水平誤差の 95%値は 17cm であった。CLAS では現在パフォーマンススタンダード[33]で水平誤差の 95%値を静止時は 6cm 以下、移動体では 12cm 以下としているが、この精度を出力する条件として以下を設定している。

- ・ PPP-RTK 測位演算では、L6D メッセージに含まれる補強対象として有効である全ての衛星及び GNSS を使用している。
- ・ 観測データ（搬送波位相）で、サイクルスリップが発生していない補強対象の衛星が 5 衛星以上である。
- ・ 仰角マスクが 15° である。
- ・ 補強対象衛星による平均的な測位精度劣化係数（DOP; Dilution of Precision）が以下の環境である。水平：1.1 以下。垂直：1.8 以下。
- ・ マルチパス誤差（環境に起因するユーザ測距誤差）が、以下の環境である。コード：34cm（RMS）以下（衛星毎）。搬送波位相：0.75cm（RMS）以下（衛星毎）。受信機ノイズが、以下の精度である。

- ・搬送波位相： 0.30cm (RMS) 以下 (衛星毎)
- ・アンテナ位相中心誤差が、0.30cm(RMS)以下 (周波数毎) である。

CLAS は L6D 信号を利用した衛星経由の配信サービスであるため、補強できる衛星数にはサイズの制限があり、2023 年 10 月現在では GPS, Galileo, QZSS の合計で 17 機以内ということになっている。QZSS 衛星は 2023 年現在で Q1R, Q2, Q3, Q4 の 4 機が軌道上に存在し、全ての QZSS 衛星が補強情報を配信している。Q1R, Q2, Q4 は準天頂軌道(QZO: Quazi Zenith Orbit)で Q3 は経度 127 度に位置する静止軌道(GEO: Geostationary Orbit)である。2023 年現在では追加の 3 機の打ち上げはすでに決定しており、この内訳は Q5 が QZO、Q6 が経度 90.5 度の GEO、Q7 が経度 177 度の準静止軌道である。さらに 2023 年 6 月に閣議決定された宇宙基本計画で追加の 4 機の検討が決定された [34]。しかし今後打ち上げられる QZSS 衛星では全てが補強情報を配信せず、また補強対象にならない衛星も存在する。そのため、4 機体制、7 機体制、11 機体制のそれぞれで配信衛星と補強衛星の組み合わせを設定して可視状態や衛星数、DOP などをシミュレーションして、それが CLAS の上記したパフォーマンススタンダードを満たしているかどうかを調査する。

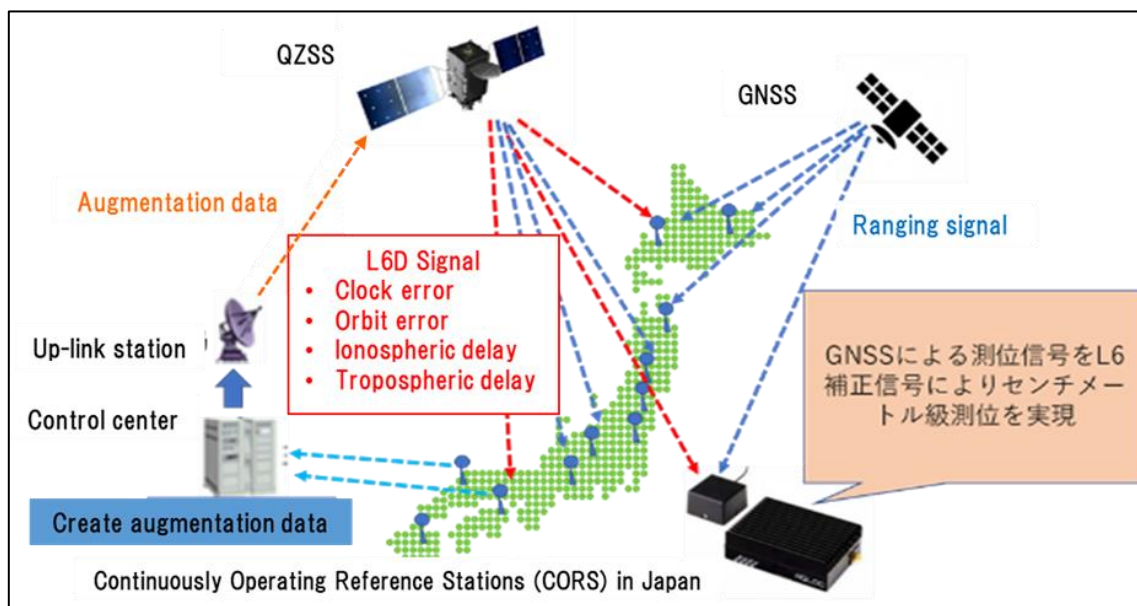


図 6.1-1 CLAS のシステム構成図

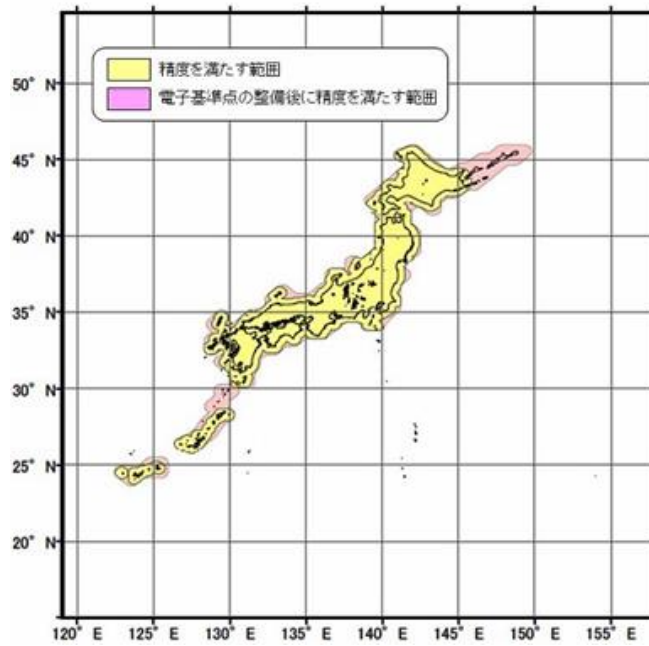


図 6.1-2 CLAS のサービス範囲[6]

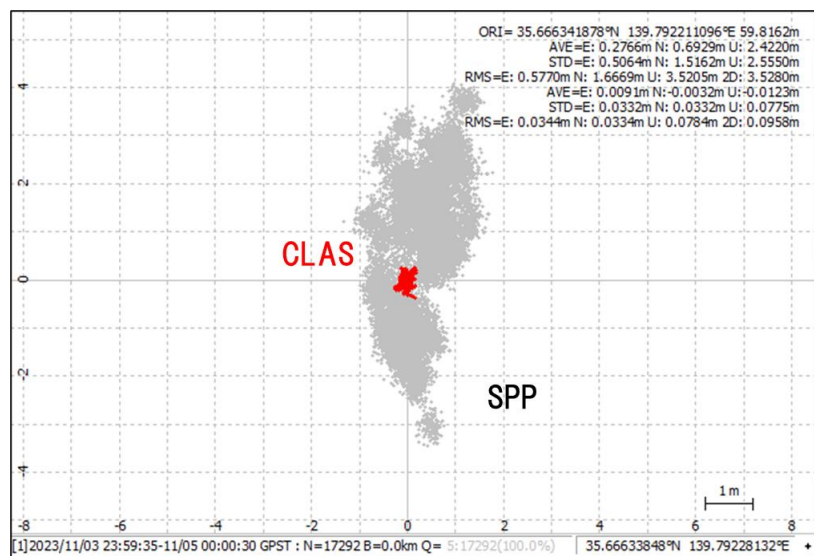


図 6.1-3 CLAS と SPP の比較

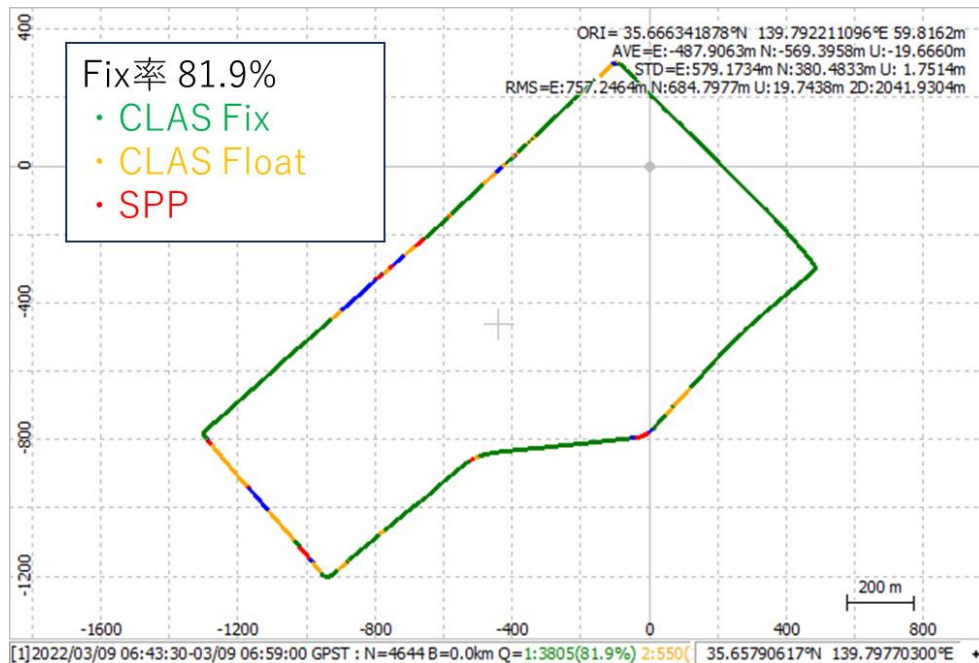


図 6.1-4 都市部走行時の CLAS Fix 率

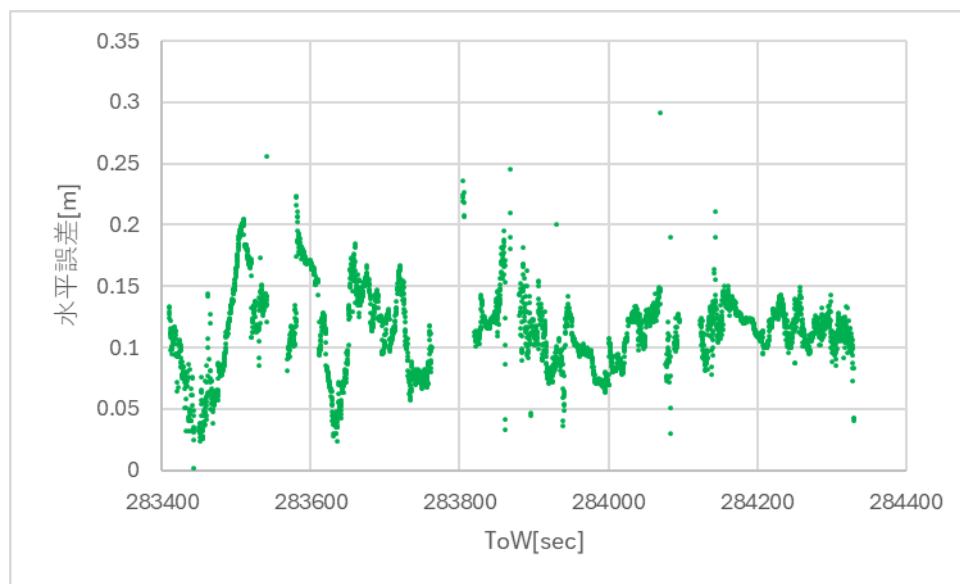


図 6.1-5 CLAS Fix 時の水平誤差

6.2 シミュレーション条件

CLAS 可用性を調査するために第 3 章で利用した衛星可視シミュレーションソフトを利用した。今回は LOS 衛星数のみ知りたいため計算が高速な Ray-Casting 法を利用した。QZSS11 機を含むアルマナックを使用し、仰角マスク 15 度で 2023/08/23 の 24 時間分シミュレーションを行った。東京から見える QZSS 衛星のそれぞれの軌道を図 6.2-1 に示す。11 機体制では日本上空をカバーする QZO(Quasi-Zenith Orbit)が 4 つ、GEO が 3 つ、日本の東西に位置する QZO が 2 つずつとなっている [35]。また各 QZSS 衛星の時系列仰角を仰角マスク 15 度で示したグラフを図 6.2-2, 6-2-3 に示す。このグラフより 7 機体制になると 1 日のうちの QZSS 最低仰角が

84 度となることがわかる。また 11 機体制で打ち上げられる追加の 4 機は東西方向に位置するため、南北が遮蔽された環境で有効だと考えられる。

検証に使用した地点は表 6.2-1 に示す 7 点である。図 6.2-4~図 6.2-8 に検証点を衛星写真上に示す。No.1, 2, 3 は天空率の異なる交差点。No.4, 5 は南北方向の道路上で東西方向が遮蔽されている環境である。No.6, 7 は東西方向の道路上で南北方向が遮蔽されている環境である。

今回は Ray-Casting の結果から LOS 衛星のみを抽出し、その中でさらに 4 機体制、7 機体制、11 機体制それぞれの配信衛星と補強衛星の組み合わせで LOS 衛星を抽出して DOP などを計算する。配信衛星と補強衛星の組み合わせを表 6.2-2 に示す。静止衛星(GEO: Geostationary Orbit) の Q6, 準静止衛星の Q7 からは補強情報を配信しないことと、7 機体制、11 機体制では GEO の Q3, Q6, Q7 を補強しないのが特徴である。なおこの配信衛星と補強対象衛星の組み合わせは 2023 年 10 月時点の計画であり、今後変更される可能性がある。

DOP は補強対象の GPS, Galileo, QZSS から計算した。また PS を満たす条件を、HDOP1.1 以下かつ VDOP1.8、補強対象衛星数が 5 機以上、配信衛星数が 1 機以上という条件とし、24 時間のうちこれを満たす時間を計算した。

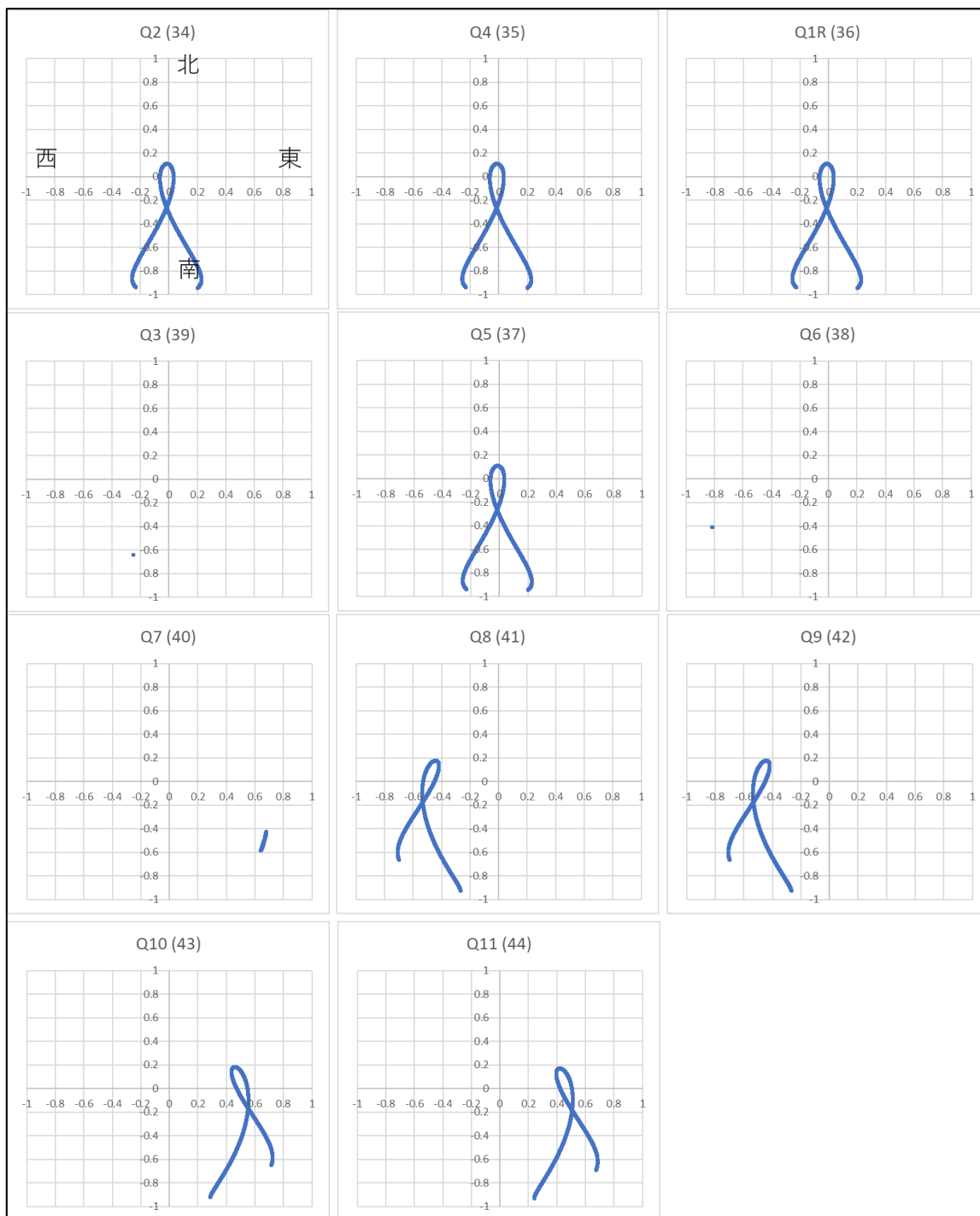


図 6.2-1 それぞれの QZSS の軌道

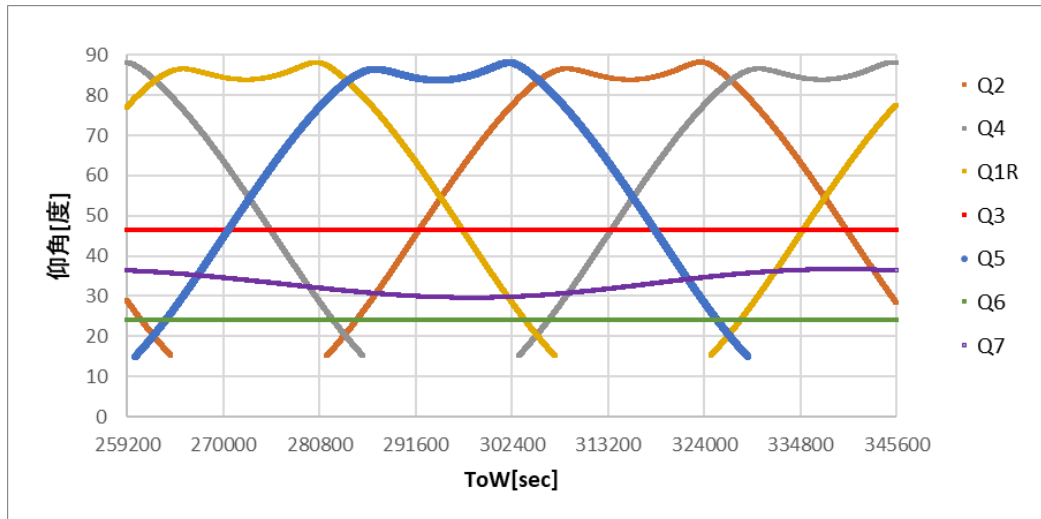


図 6.2-2 7 機体制時の QZSS の仰角

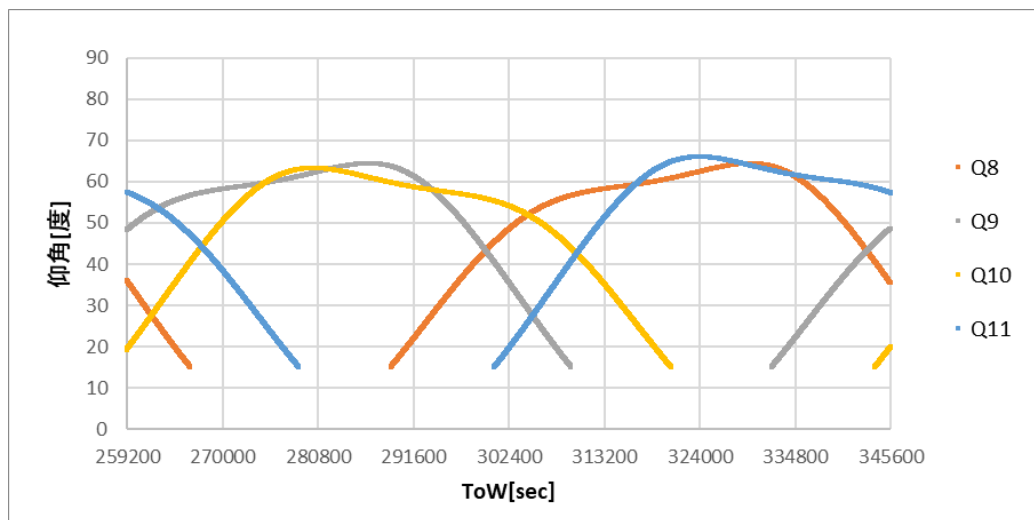


図 6.2-3 11 機体制時の追加の QZSS の仰角

表 6.2-1 検証点一覧

検証点	場所	lat[度]	lon[度]	hgt[m]	天空率[%]
1	虎ノ門交差点	35.66613560	139.75015839	42.78	64.2
2	丸の内交差点	35.68470317	139.76576000	41.90	41.3
3	築地交差点	35.66659020	139.77064618	40.48	72.8
4	新橋北	35.67628067	139.75262117	45.60	44.8
5	新橋南	35.67348033	139.75083983	45.80	46.8
6	新橋西	35.67014955	139.75000607	44.54	40.8
7	新橋東	35.66818607	139.75601412	42.08	52.6



図 6.2-4 検証点 No.1

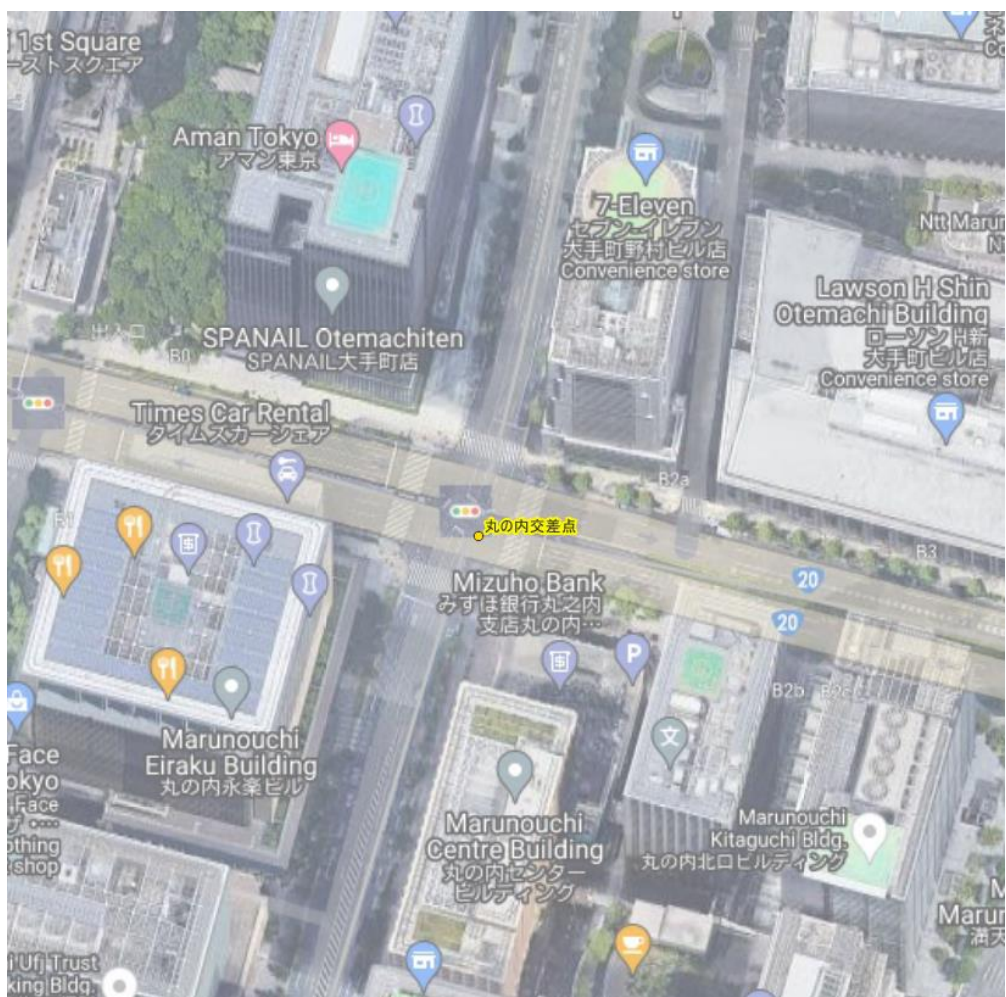


図 6.2-5 検証点 No.2

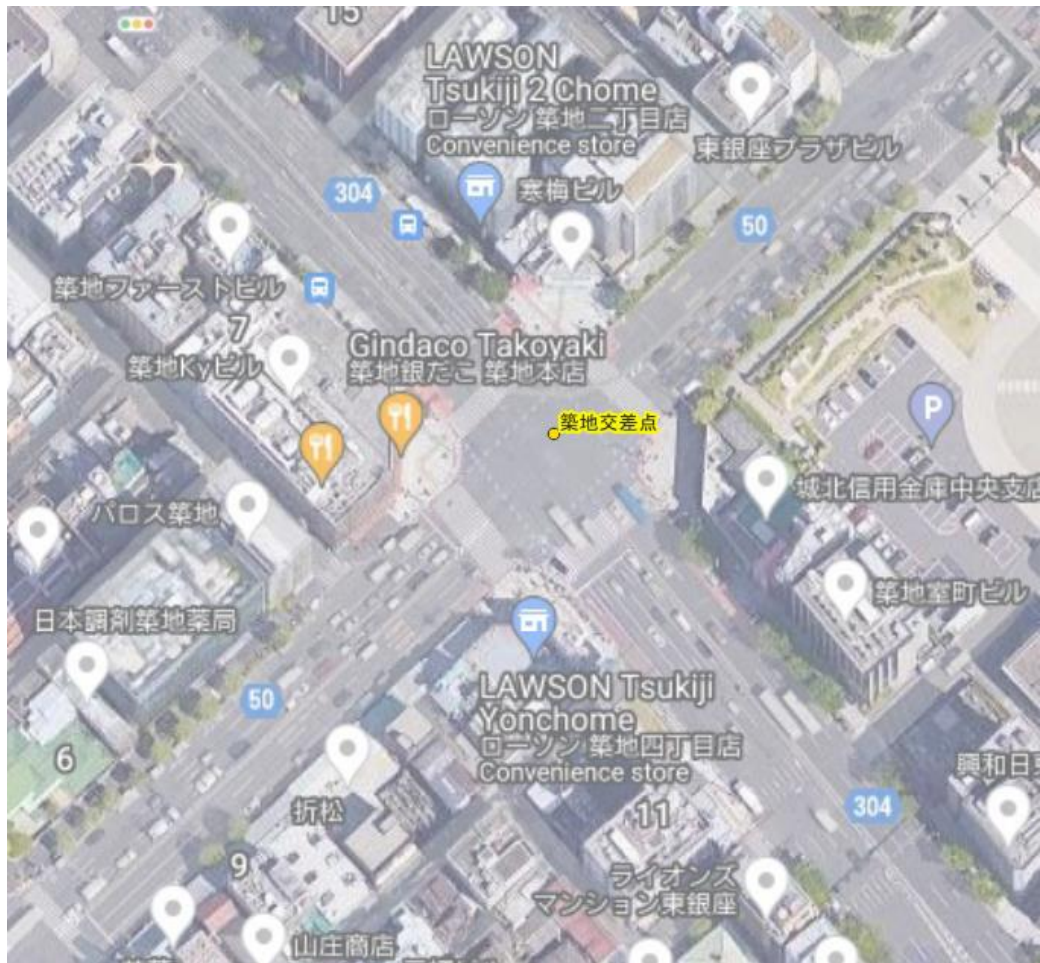


図 6.2-6 検証点 No.3



図 6.2-7 検証点 No.4 と No.5



図 6.2-8 検証点 No.6 と No.7

表 6.2-2 各体制における配信衛星と補強衛星の組み合わせ

	配信衛星 (QZSS)	補強衛星(GPS)	補強衛星(Galileo)	補強衛星(QZSS)
4機体制	1R,2~4	1~32	1~36	1R,2~4
7機体制	1R,2~5	1~32	1~36	1R,2,4,5
11機体制	1R,2~5,8~11	1~32	1~36	1R,2,4,5,8~11

6.3 各体制での CLAS 可用性調査

6.2 の条件に従ってシミュレーションと補強対象衛星数の推移、DOP の計算、PS を満たす時間を 4 機体制、7 機体制、11 機体制で計算した。

まず図 6.3-1~6.3-21 に 7 箇所の補強対象衛星可視数と HDOP, VDOP のグラフを示す。HDOP と PDOP は LOS 状態にある補強対象衛星(GPS, Galileo, QZSS)の仰角と方位角から計算しており、CLAS の PS に従って補強対象衛星数が 5 機以上のときのみを表示している。また表 6.3-1~表 6.3-7 に 7 箇所の 24 時間中 CLAS の PS である、配信衛星 1 機以上かつ HDOP1.1 以下, VDOP1.8 以下, 補強対象衛星数 5 機以上を満たす時間とその割合を表で示す。各検証点の天空率を図 6.3-22 に、補強対象衛星数の可視数の 24 時間平均を図 6.3-23 に、HDOP と VDOP の 24 時間平均をそれぞれ図 6.3-24 と図 6.3-25 に示す。

No.2, No.4, No.5, No.6 の結果より HDOP1.1 以下、VDOP1.8 以下という基準が都市部では満たすことが難しいことがわかる。また、11 機体制でも補強対象衛星数が 5 機以下となっている

時間帯が発生していた。このため、天空率が60%以上ある開けた交差点以外の都市部におけるCLAS 可用性は11 機体制で若干改善するものの依然として厳しいと考えられる。さらに今回は可視状態にあるGPS とGalileo の全てを補強対象衛星としているが、実際はCLAS の衛星選択アルゴリズム[36]により17 機程度まで絞られるため可視衛星数は今回のシミュレーションよりも低くなる。また、4 機体制と7 機体制の比較では7 機体制の方が可視衛星数が低い時間があったがこれは7 機体制で補強対象のQZSS がGEO のQ3 からQZO のQ5 に変わったためである。GEO のQ3 は衛星の高度が高いため信号強度が低いという欠点があるが、可視性で言えばQZO のQ5 よりも優位である結果であった。そのため、アベイラビリティにおいてもNo.1, No.2, No.7 で7 機体制の方が低い値であった。

表 6.3-1 検証点 No.1 の CLAS PS を満たす時間と割合

補強対象衛星	時間[秒]	一日の割合[%]
4機体制	15177	17.6
7機体制	14220	16.6
11機体制	30342	35.1

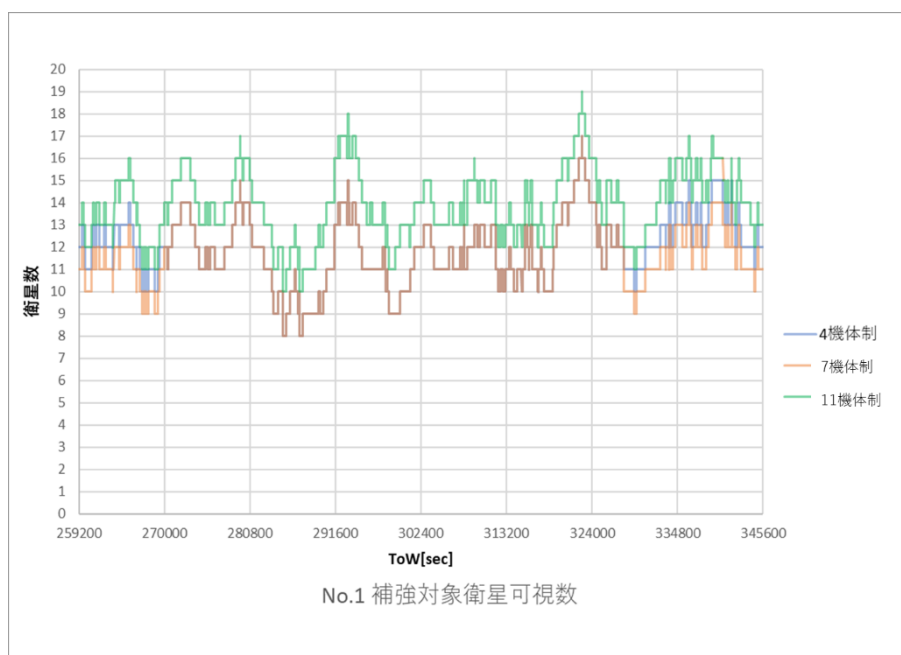


図 6.3-1 検証点 No.1 の補強対象衛星可視数

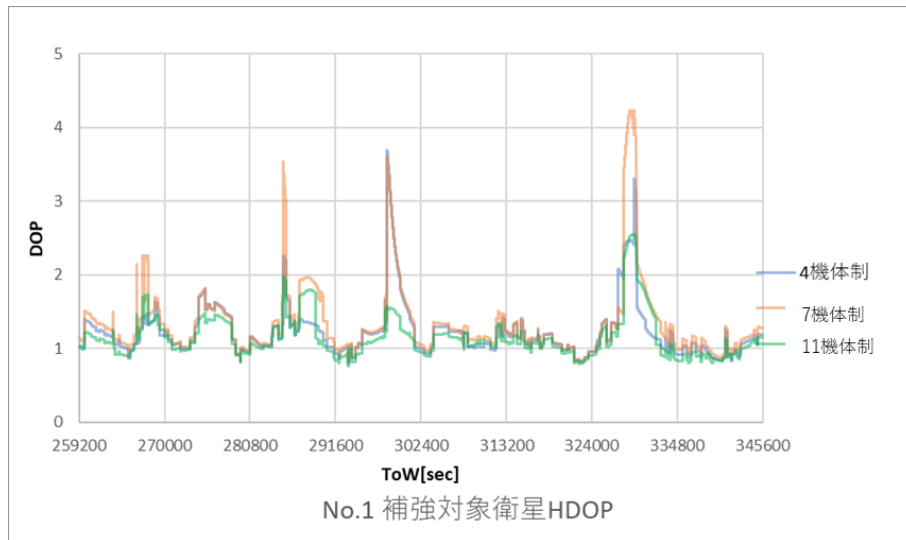


図 6.3-2 検証点 No.1 の補強対象衛星の HDOP

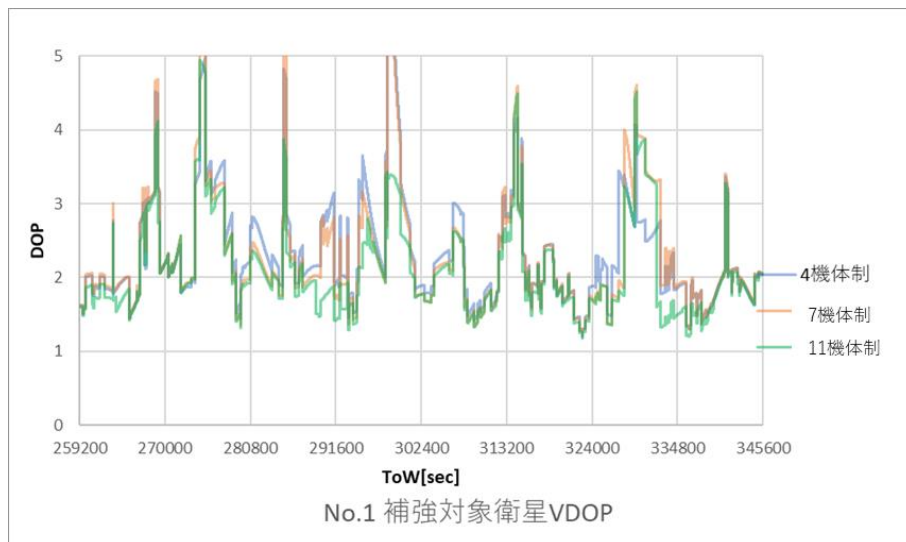


図 6.3-3 検証点 No.1 の補強対象衛星の VDOP

表 6.3-2 検証点 No.2 の CLAS PS を満たす時間と割合

補強対象衛星	時間[秒]	一日の割合[%]
4機体制	898	1.0
7機体制	471	0.5
11機体制	2840	3.3

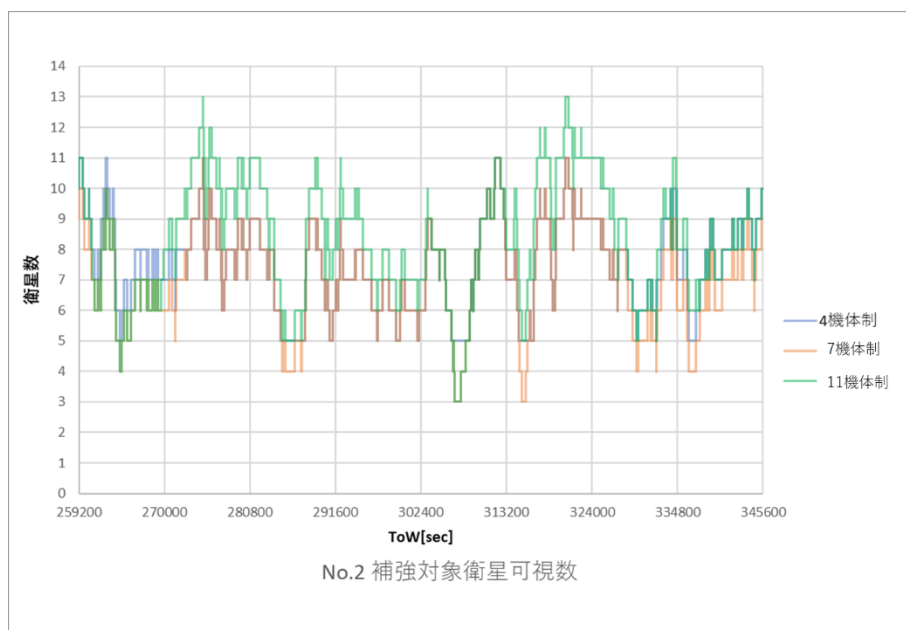


図 6.3-4 検証点 No.2 の補強対象衛星可視数

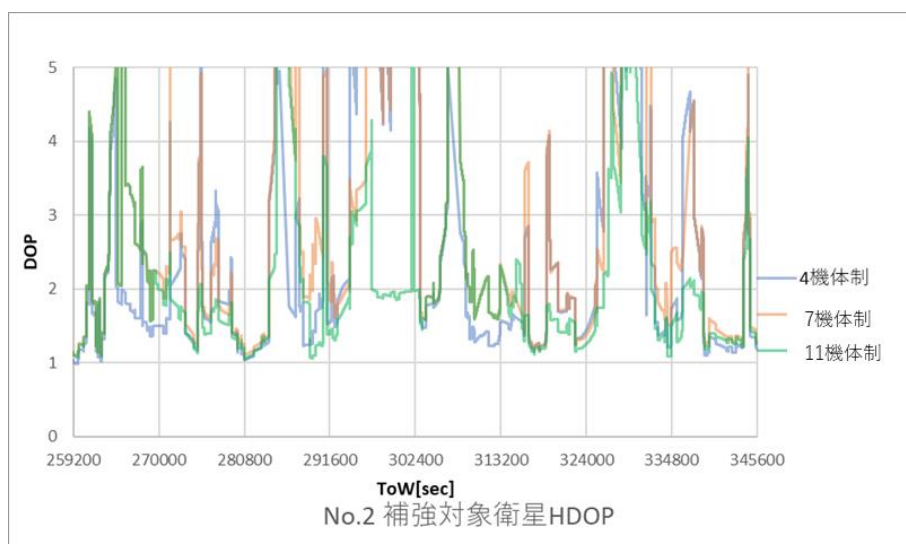


図 6.3-5 検証点 No.2 の補強対象衛星の HDOP

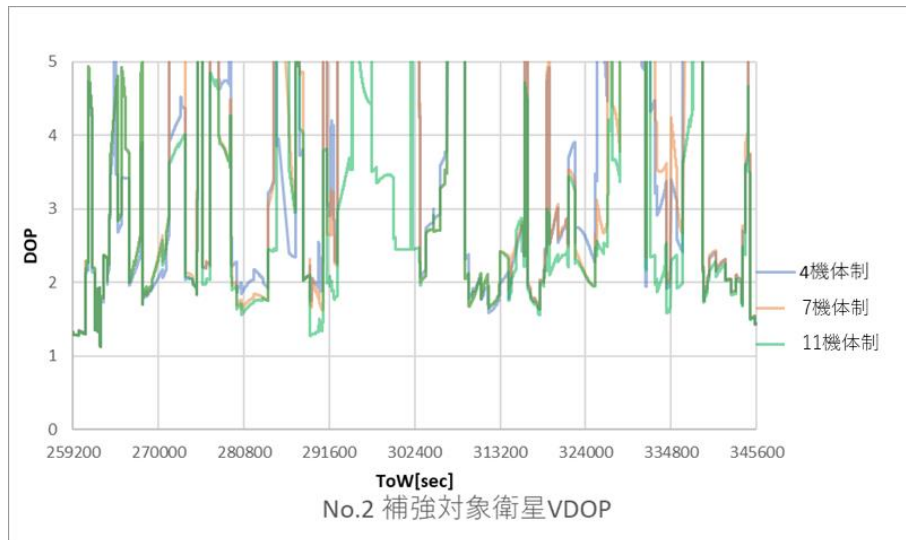


図 6.3-6 検証点 No. 2 の補強対象衛星の VDOP

表 6.3-3 検証点 No.3 の CLAS PS を満たす時間と割合

補強対象衛星	時間[秒]	一日の割合[%]
4機体制	77262	89.4
7機体制	80516	93.2
11機体制	85175	98.6

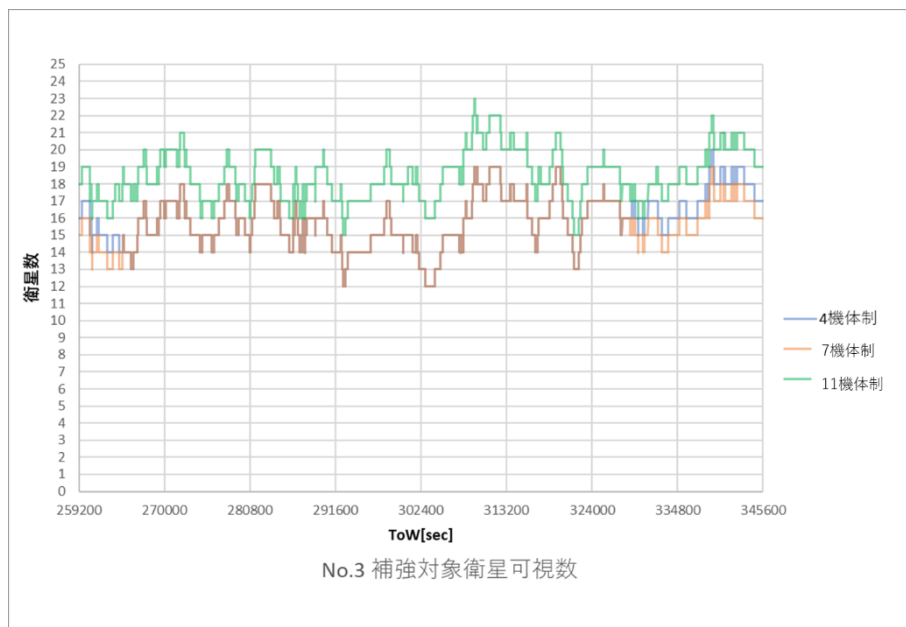


図 6.3-7 検証点 No.3 の補強対象衛星可視数

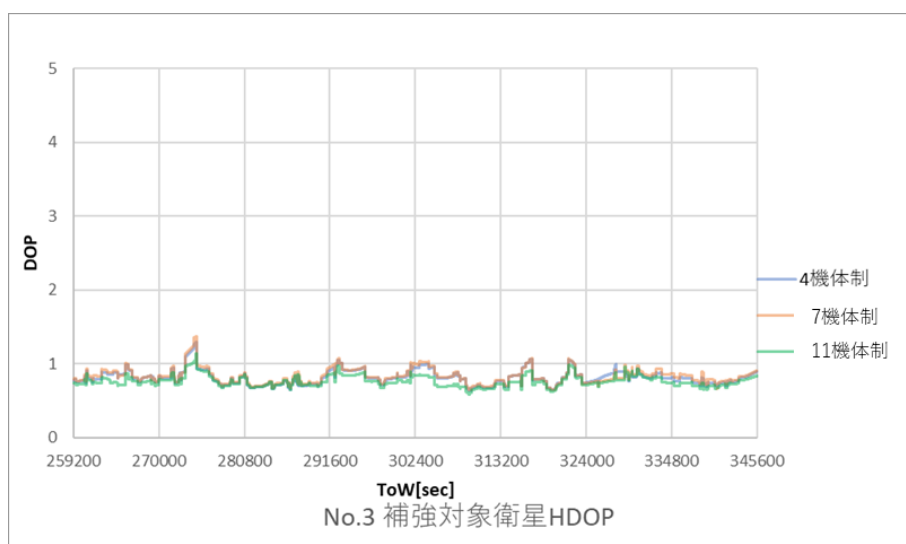


図 6.3-8 検証点 No.3 の補強対象衛星の HDOP

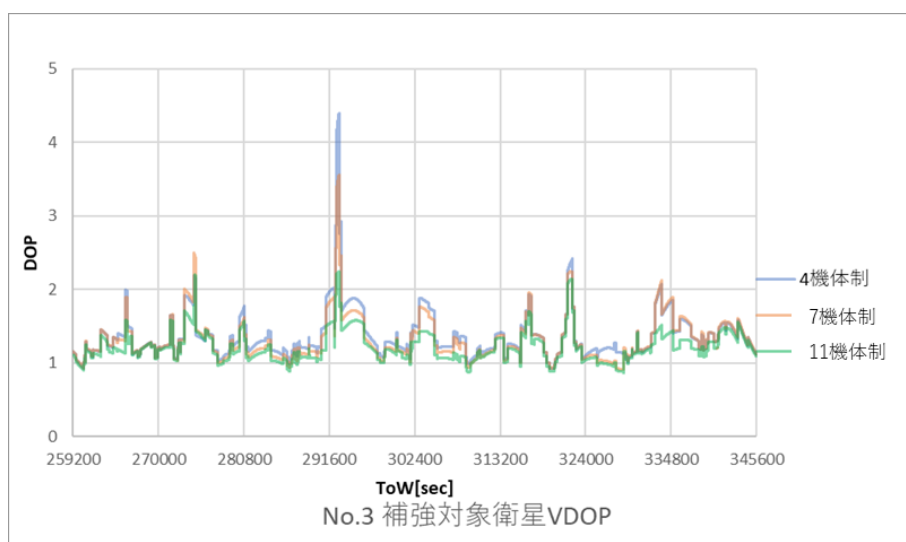


図 6.3-9 検証点 No.3 の補強対象衛星の VDOP

表 6.3-4 検証点 No.4 の CLAS PS を満たす時間と割合

QZSS体制	時間[秒]	一日の割合[%]
4機体制	0	0.0
7機体制	0	0.0
11機体制	0	0.0

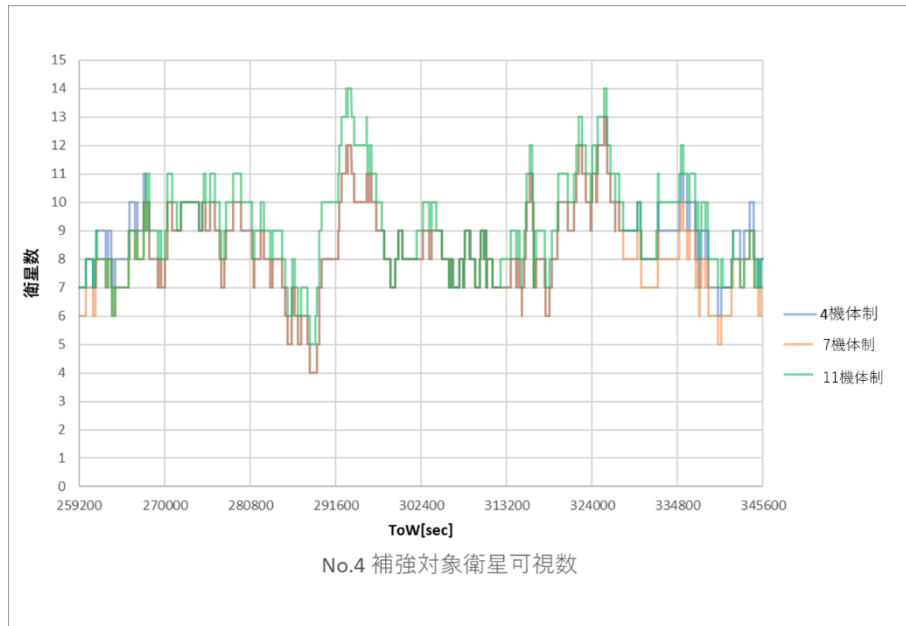


図 6.3-10 検証点 No.4 の補強対象衛星可視数

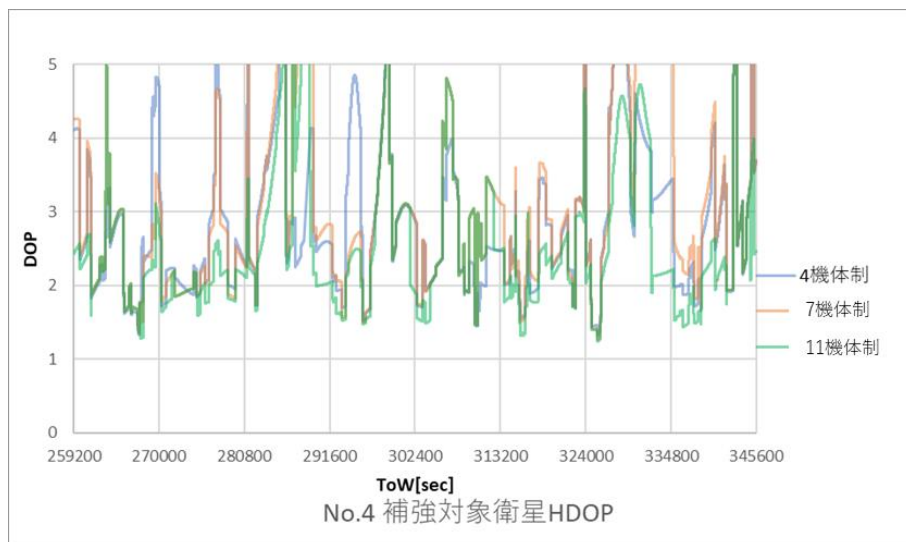


図 6.3-11 検証点 No.4 の補強対象衛星の HDOP

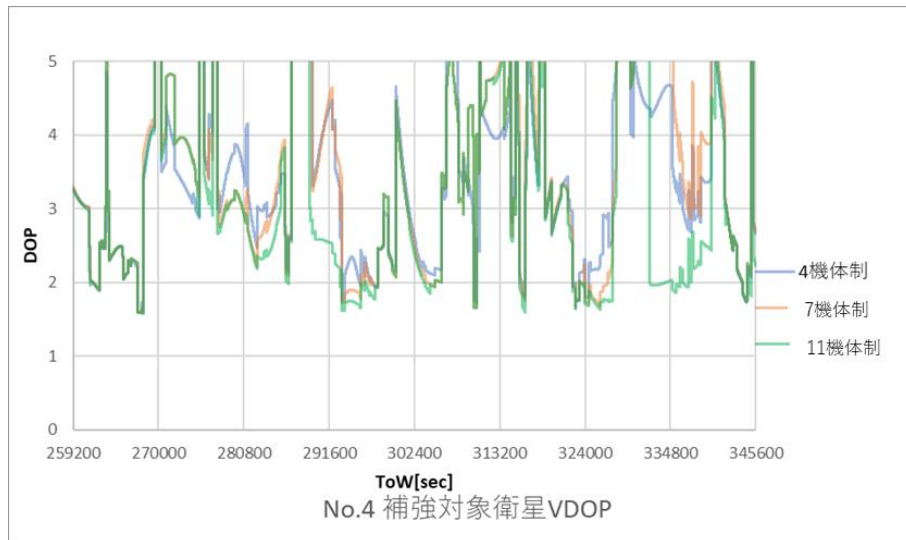


図 6.3-12 検証点 No.4 の補強対象衛星の VDOP

表 6.3-5 検証点 No.5 の CLAS PS を満たす時間と割合

補強対象衛星	時間[秒]	一日の割合[%]
4機体制	0	0.0
7機体制	0	0.0
11機体制	0	0.0

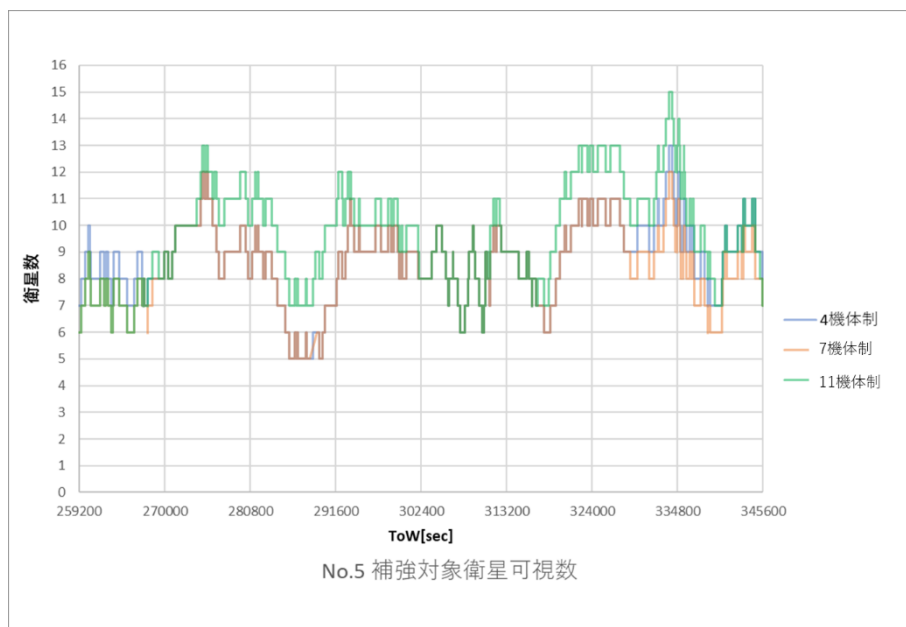


図 6.3-13 検証点 No.5 の補強対象衛星可視数

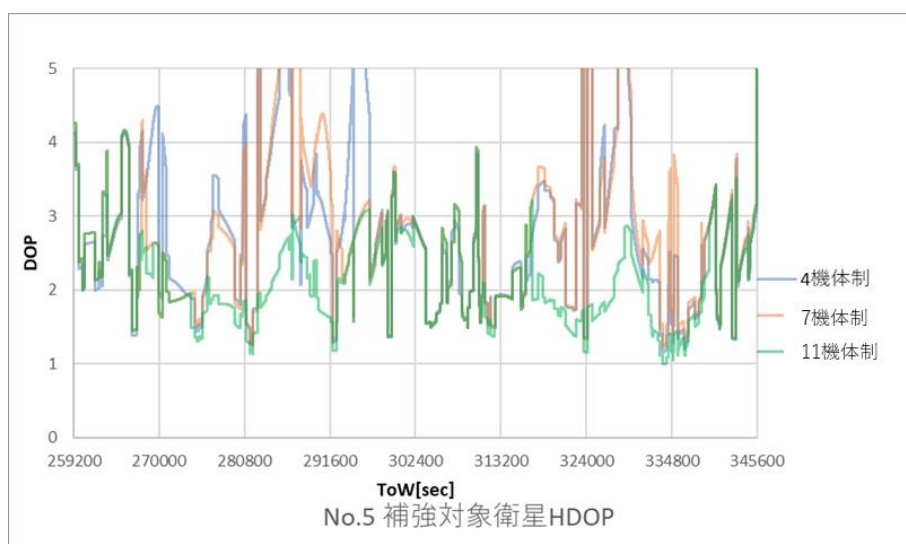


図 6.3-14 検証点 No.5 の補強対象衛星の HDOP

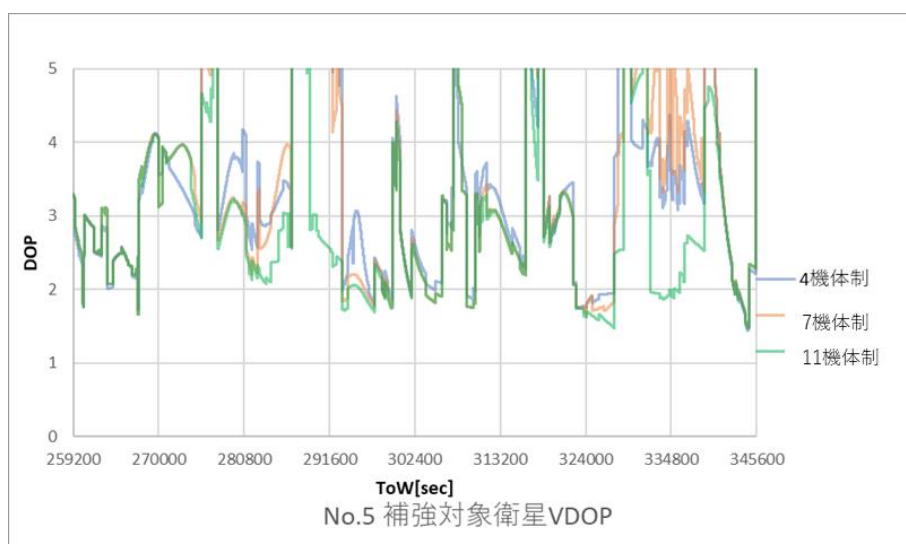


図 6.3-15 検証点 No.5 の補強対象衛星の VDOP

表 6.3-6 検証点 No.6 の CLAS PS を満たす時間と割合

QZSS体制	時間[秒]	一日の割合[%]
4機体制	0	0.0
7機体制	0	0.0
11機体制	0	0.0

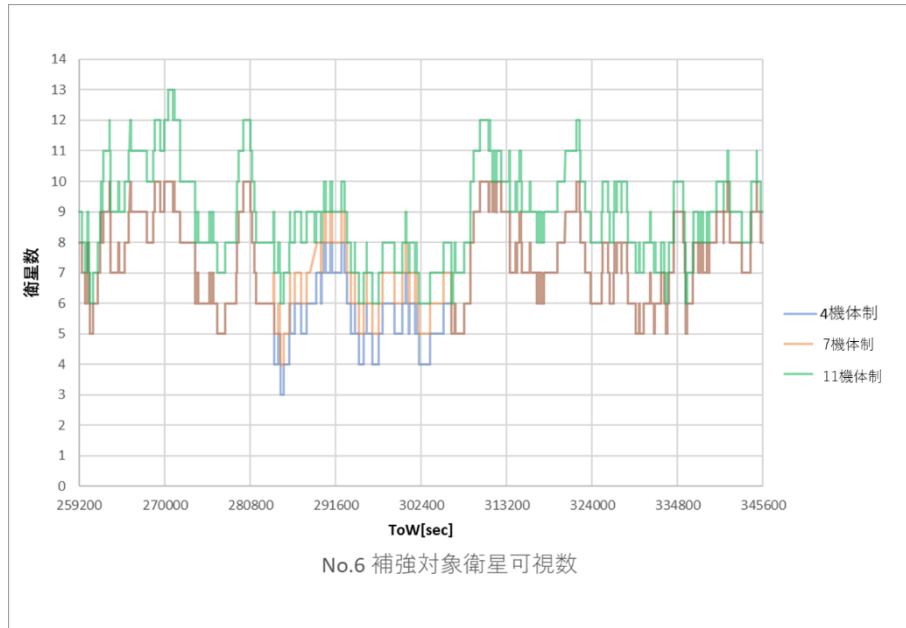


図 6.3-16 検証点 No.6 の補強対象衛星可視数

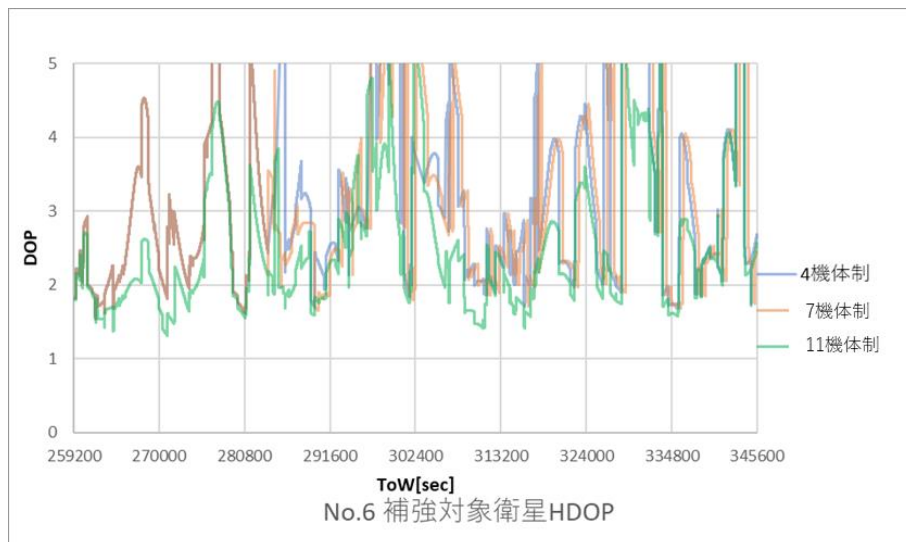


図 6.3-17 検証点 No.6 の補強対象衛星の HDOP

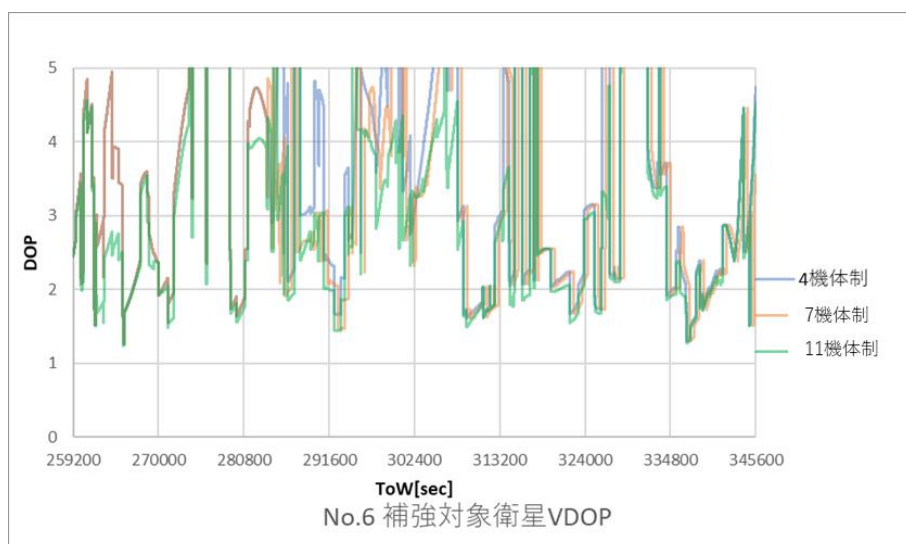


図 6.3-18 検証点 No.6 の補強対象衛星の VDOP

表 6.3-7 検証点 No.7 の CLAS PS を満たす時間と割合

補強対象衛星	時間[秒]	一日の割合[%]
4機体制	6901	8.0
7機体制	6347	7.4
11機体制	14294	16.5

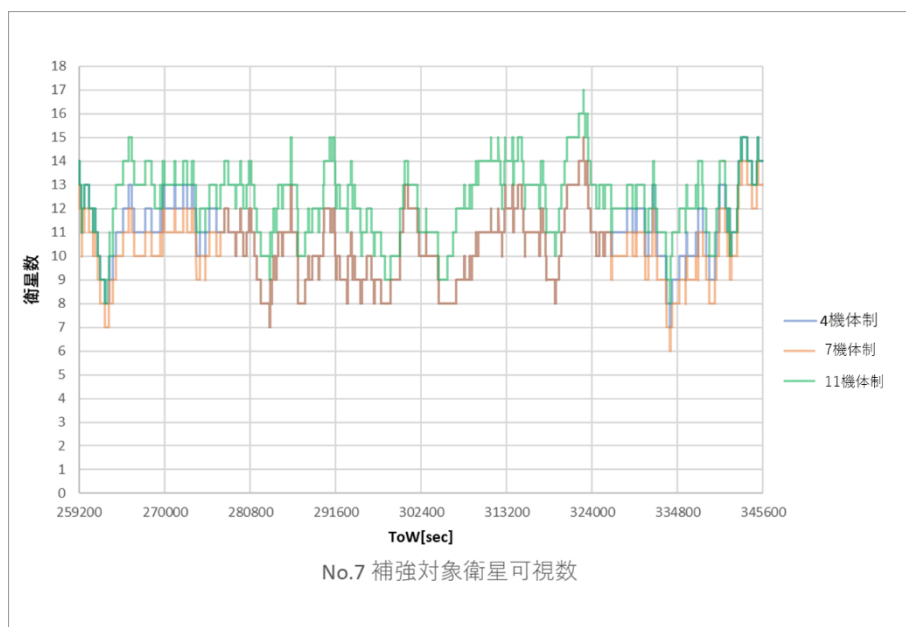


図 6.3-19 検証点 No.7 の補強対象衛星可視数

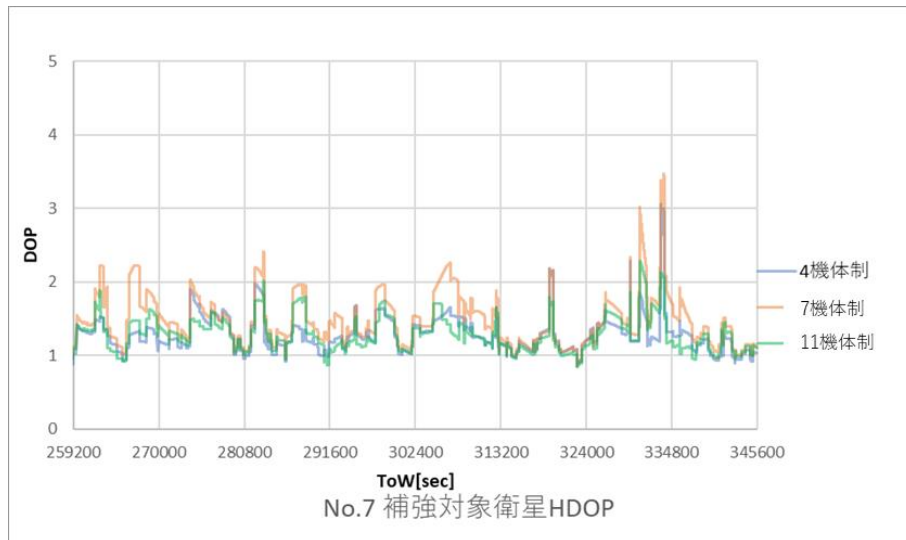


図 6.3-21 検証点 No.7 の補強対象衛星の HDOP

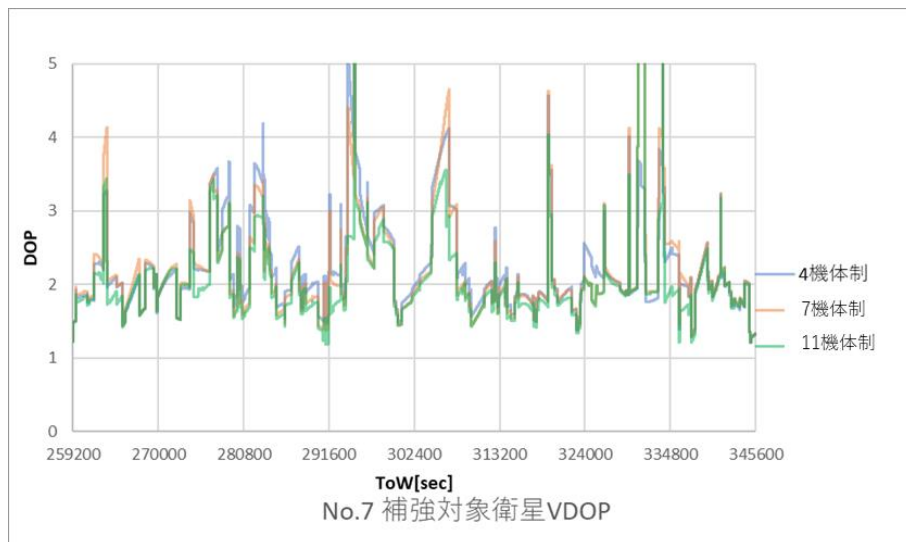


図 6.3-20 検証点 No.7 の補強対象衛星の VDOP

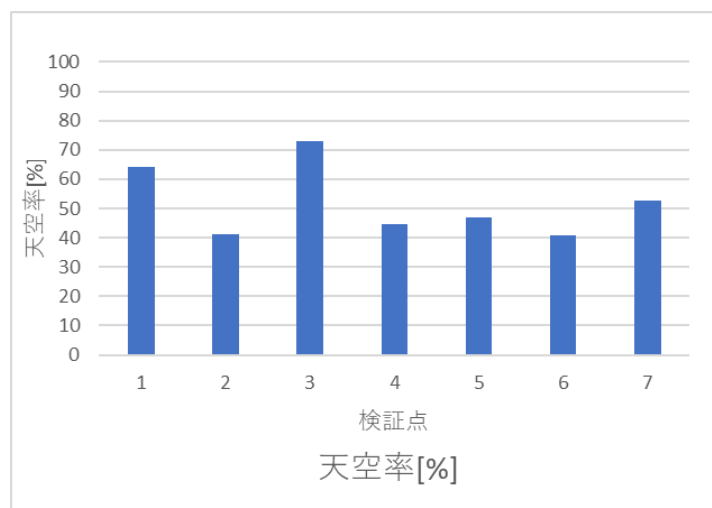


図 6.3-22 各検証点の天空率

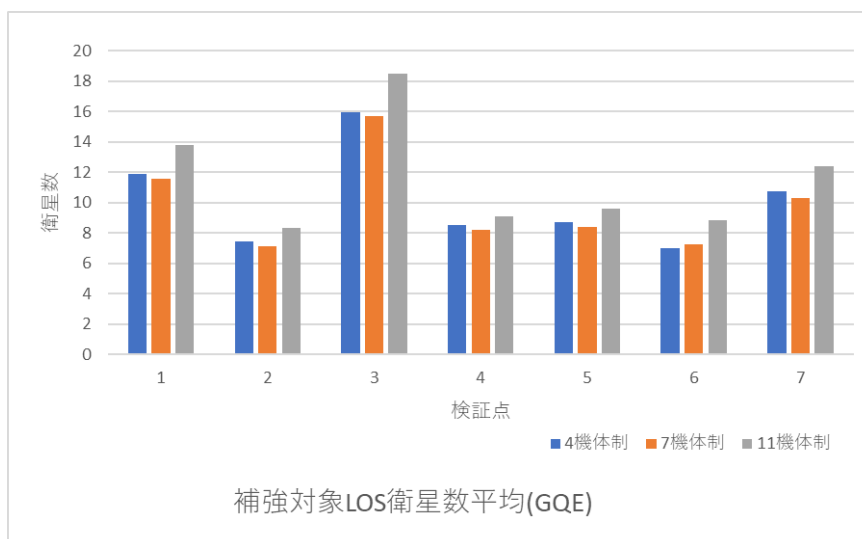


図 6.3-23 各検証点の補強対象衛星可視数の 24 時間平均

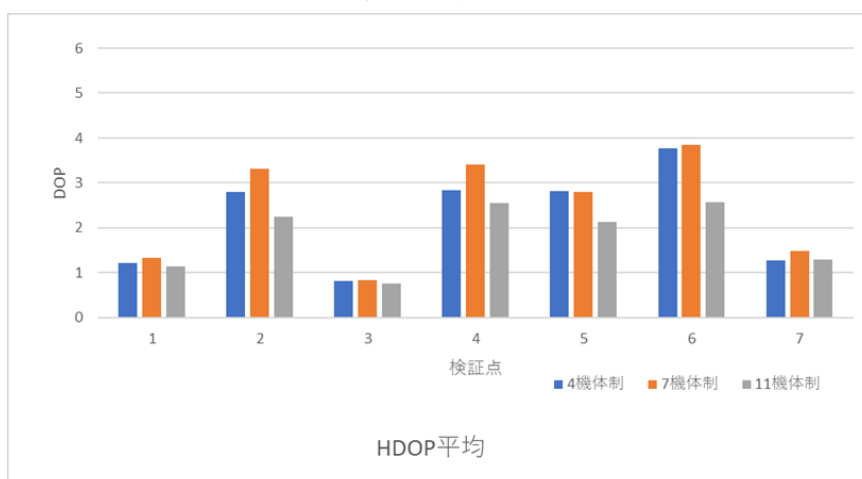


図 6.3-24 各検証点の HDOP 24 時間平均

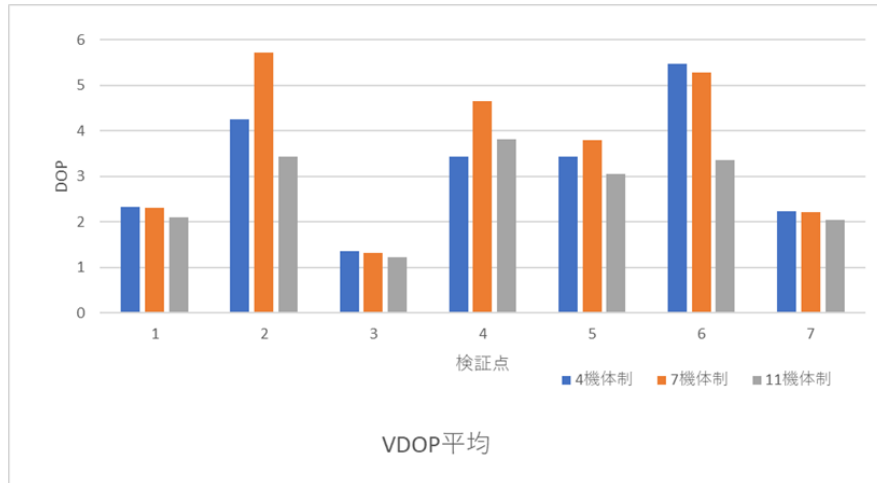


図 6.3-25 各検証点の VDOP 24 時間平均

6.4 CLAS 可用性調査のまとめ

衛星可視シミュレーションを使用して都市部の 7 箇所で CLAS の可用性を 4 機体制、7 機体制、11 機体制の 3 パターンで調査した。結果的に DOP が PS で規定されている HDOP1.1 以下、VDOP1.8 以下を超えて 4 機体制ではアベイラビリティが 0% の箇所が見られた。このような厳しい場所では 11 機体制になっても DOP があまり向上せずアベイラビリティの増加は僅かであった。一方で天空率が 60% を超えた検証点 No.1 と No.3 では 11 機体制によるアベイラビリティの向上が見られた。このため 11 機体制はデンスアーバンエリアや東西が遮蔽された環境では効果が薄い、ミドルアーバンエリアでは CLAS 可用性の向上に寄与すると考えられる。

一方で CLAS 測位は L6D 信号の受信環境が非常に重要であり、補強可能衛星が多くても L6D 信号を正確にデコードできないと PPP-RTK が行えない。L6D 信号のデコード率は L6D 信号の SNR がマルチパスで低下すると低くなる傾向にあり[37]、3D マップのシミュレーションで行えない配信信号の劣化度合いも調査する必要があると考えられる。

第7章 準天頂衛星が RTK Fix 率に与える影響の予測

第6章で QZSS の精密測位サービス CLAS の可用性について今後 QZSS の数が増えることによる影響の調査を行った。しかし QZSS には GNSS を補完するという目的もある。QZSS の増加を GNSS 補完の観点から見た場合、単純に衛星数が増加するため RTK などでは Fix 率の向上が予想される。そこで本章では QZSS の 7 機体制、11 機体制時に RTK Fix 率がどの程度上昇するかを第4章で述べた RTK Fix 可否予測の手法で予測する。

7.1 シミュレーションの条件

QZSS は L1 帯、L2 帯、L5 帯で測位信号を送信している。対応した受信機はこれらの信号を受信して他の GNSS システムと混合して測位に利用できる。このためアジア地域では衛星数が増加するため、精度の向上や RTK の場合 Fix 率の上昇の恩恵を受けることができる[38]。これが QZSS の補完機能である。今回はこの補完機能により都市部の走行中に RTK Fix 率が 7 機体制、11 機体制でどのくらい向上するかをシミュレーションして調査を行う。図 7.1-1 に QZSS の 4 機体制、7 機体制、11 機体制でそれぞれ補完に使用する衛星を示す。衛星可視シミュレーションソフトで 7 機体制、11 機体制それぞれの可視環境を Ray-Launching 法でシミュレートし、その結果から第4章で述べた機械学習のうち DNN を使用した手法で RTK が Fix するかどうかを判別した。この判別結果を実際の 4 機体制の RTK 結果と比較して RTK Fix 率がどの程度向上したかを調べる。実在しない Q5 以降の衛星はアルマナックに軌道情報を追加することでシミュレーションに加えた。機械学習のデータセットには第4章で使用した衛星可視環境と実際の RTK Fix 可否を紐づけた 7 つのデータを使用した。

slot	PRN	
C-3 Q2R	194	4機体制
C-4 Q4R	195	
C-1 Q1RR	196	
G-1 Q3R	199	
C-2 Q5R	197	7機体制
G-2 Q6R	198	
Q-3 Q7R	200	
W-3 Q8	201	11機体制
W-1 Q9	202	
E-2 Q10	203	
E-4 Q11	204	

図 7.1-1 QZSS の各体制で補完に利用される衛星

7.2 QZSS の各体制における RTK Fix 率の予測

テストデータとして QZSS7 機体制で図 7.2-1 と図 7.2-2 に示す 2 つの走行実験の軌跡を用いて衛星可視シミュレーションを行った。2 つの走行軌跡をもとに QZSS が 4 機体制、7 機体制、11 機体制でそれぞれ衛星環境シミュレーションを行い、その結果をもとに RTK Fix 可否を書くエポックで推定した。そしてその推定結果から RTK Fix 率の予測値を計算した。機械学習には K 近傍法を使用し、パラメーターは第 4 章と同じとしている。教師データには第 4 章で使用した実際の F9P の観測データを使用したエポック毎の整数値バイアスを解く instantaneous 法を使用した RTK の結果から作成した 7 つの教師データを結合したものを使用した。

表 7.2-1 に 2 つの走行データの 3D マップを使用した LOS/NLOS シミュレーションで QZSS4 機体制から 7 機体制、11 機体制それぞれで増加した LOS 衛星数を示す。5/16 の走行経路の方が厳しい環境であるので衛星増加数は低い。表 7.2-2 に 2 つの走行経路における RTK Fix 率を実測値と予測値で示す。RTK Fix 予測自体の精度の問題から同じ衛星環境である実測値と 4 機体制の予測値に 1/19 のデータでは 4.8%、5/16 のデータでは 1.3%の差がある。しかし予測結果のみを見ると QZSS の数が増加するにつれて RTK Fix 率が増加していることがわかる。これを図 7.2-3 に示す。1/19 のデータでは 7 機体制から 11 機体制で RTK Fix 率が 6.6%上昇した。一方で 5/16 のデータでは 1/19 のデータに比べて衛星数の増加が少ないためか 7 機体制から 11 機体制で RTK Fix 率の上昇度合いは低かった。また 7 機体制で追加される QZO の Q5 衛星はデータを取得した時間帯が異なるため、1/19 のデータでは仰角 68-79 度で、5/16 のデータでは仰角 44~58 度に見えていた。これも 5/16 のデータで LOS 衛星数の増加が少なかった理由であると考えられる。

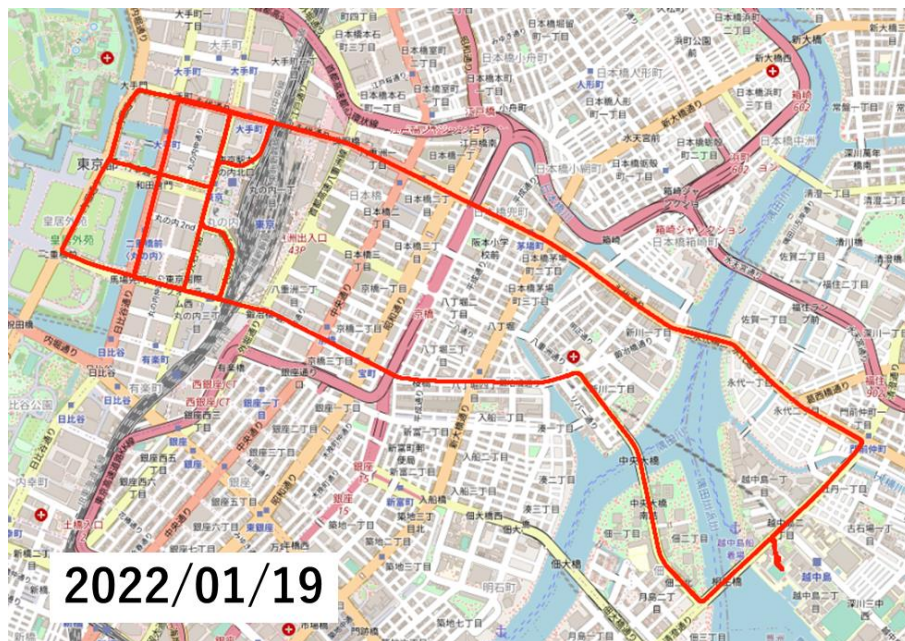


図 7.2-1 データ 220119 の走行軌跡

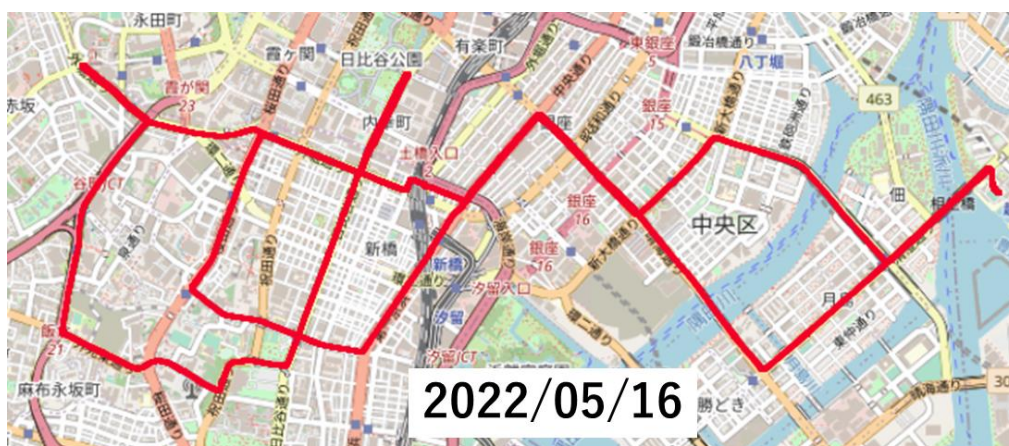


図 7.2-2 データ 220516 の走行軌跡

表 7.2-1 7 機体制、11 機体制での平均衛星増加数

	220119	220516
4機体制→7機体制	+1.83	+1.02
4機体制→11機体制	+3.70	+2.53

表 7.2-2 2 つの走行経路における RTK Fix 率

データ \ Fix率	実測値	4機体制予測	7機体制予測	11機体制予測
220119	68.2%	63.4%	64.9%	71.5%
220516	45.2%	46.5%	47.9%	48.3%

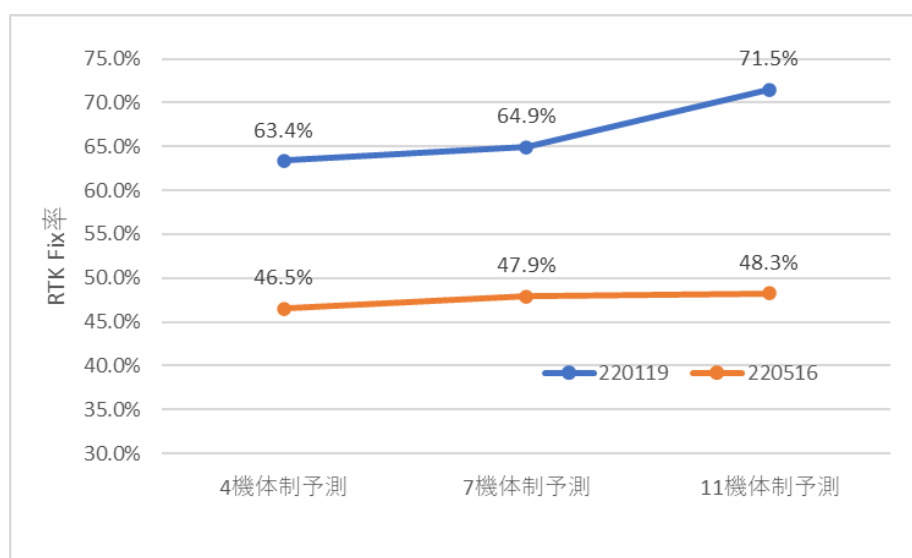


図 7.2-3 QZSS の各体制における RTK Fix 率の予測値

7.3 QZSS の各体制における RTK Fix 率予測のまとめ

本章では QZSS が今後 7 機体制、11 機体制と増加する上で GNSS の補完という観点から都市部での RTK Fix 率がどの程度向上するかをシミュレーションを用いて予測した。2 つの走行経路についてこれを予測したところ、もともと RTK Fix 率が高い、つまり衛星観測環境が厳しくないルートでは現在の 4 機体制から 11 機体制で 8.1% の RTK Fix 率の向上が見られた。一方で RTK Fix 率の低い環境では大きな向上は見られなかった。

また本シミュレーションはマルチ GNSS 受信機を想定した結果であるため厳しい環境での QZSS 増加の効果が低かったが、GPS+QZSS のみ対応のような受信機では QZSS 増加の効果は本シミュレーションよりも高いと思われる。

第8章 低軌道衛星を RTK 測位に使用した場合の RTK 可用性の予測

近年低軌道衛星による PNT サービスが具現化しつつある。当初は通信衛星からの信号のドップラー周波数を使用したものがメインであったが、最近では衛星運用側が PNT 用測位信号を検討するようになりつつある。もし低軌道衛星が PNT 信号を送信し、それを RTK に利用できた場合 RTK の Fix 率は現在の GNSS のみの場合と比べて向上すると考えられる。本章では低軌道衛星の衛星可視環境シミュレーションと機械学習によって、低軌道衛星が RTK に与える寄与がどの程度化をシミュレーションした。

8.1 低軌道衛星による PNT

現在事業化が予定されている低軌道衛星による測位サービスは Xona Space Systems の Xona Pulsar と OneWeb の Gen2 衛星がある。Xona Pulsar では L バンド(1260MHz)と C バンド(5020MHz)の二周波を使用して Timing 同期用信号、GNSS 精密測位用補強データの送信、PNT 信号の送信を予定している[39]。2023 年 3 月に 1 号機を打ち上げ、最終的には全球 258 機で Pulsar のみで測位ができることを目指している。OneWeb は現在すでに通信用の Gen.1 衛星を 648 機運用中だが今後打ち上げる Gen.2 衛星では Ku バンドを使用して PNT サービスを提供する。PNT の測位はメートルレベルを目指すとしている[40]。両方とも GNSS に頼らず低軌道衛星のみで測位が可能なサービスを目指している。一方で GNSS を補完する PNT 信号を送信する低軌道衛星の計画も存在する。その一つが DLR(German Aerospace Center)が 2024 年に打ち上げ予定の低軌道衛星である。これは図 8-1-1 に示す通り GNSS と同じ形式の PNT 信号を GNSS とのコードバイアス(DCB: Differential Code Bias)やタイミングオフセットを含んで低軌道衛星から送信することで GNSS を補完する[41]。この衛星のクロックは GNSS と同期するため、GNSS と混ぜて使用が可能である。

低軌道衛星による PNT のメリットとして

- ・ 高度が低く受信信号強度が強いのでジャミングや干渉などに強い。
- ・ 衛星の速度が速くマルチパスが常に変化するのでマルチパスの影響が少ない。
- ・ MEO 衛星と比べて開発・打ち上げコストが低い。

が挙げられる

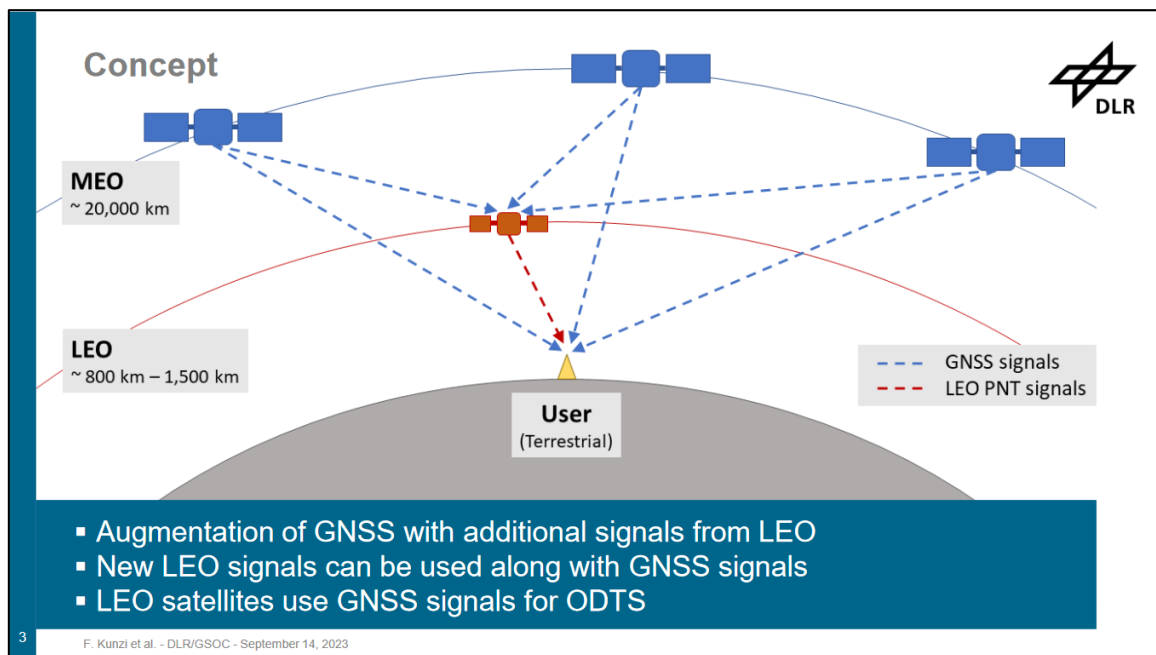


図 8.1-1 DLR の計画する GNSS 補完型低軌道衛星[40]

8.2 低軌道衛星の可視環境シミュレーション

まず第 3 章の衛星可視シミュレーションソフトを使用して低軌道衛星の LOS 継続衛星数と NLOS 衛星数を計算した。今回は低軌道衛星として Starlink 衛星の軌道を使用した。2023 年 3 月 6 日の Starlink の軌道情報である TLE(二行軌道要素形式)[42]には 3729 機の衛星が含まれていた。この TLE から SGP4(Simplified General Perturbations Satellite Orbit Model 4)という軌道計算アルゴリズム[43]を使用して衛星の位置を計算した。図 8.2-1 に東京上空における約 1 時間の Starlink 衛星数を示す。仰角マスク 10 度の場合 60 機~90 機が観測可能であった。

次に各 Starlink 衛星の方位角、仰角を使用して 3D マップ上で Ray-Launching 法を行い LOS/NLOS 判定を行った。衛星可視シミュレーションは第 4 章で使用した 7 つの走行軌跡に基づいて行った。1 つの走行データでの LOS 継続衛星数を図 8.2-2 に示す。青が GNSS のみの LOS 継続衛星数、オレンジが GNSS と Starlink 衛星を合わせた LOS 継続衛星数である。このグラフより、GNSS の LOS 継続衛星数が多い箇所では Starlink によって LOS 継続衛星数が 60 機ほど増加しているが、GNSS の LOS 継続衛星数が少ない、つまり高層ビル街の厳しい環境では Starlink のよる LOS 継続衛星数の増加量が低いことがわかる。図 8.2-3 に高層ビル街での LOS 継続衛星数の増加量つまり Starlink の LOS 継続衛星数を地図上に示す。この図より Starlink によってほとんど LOS 継続衛星数が増加していない場所があることがわかる。これは低軌道衛星の速度が中軌道(MEO: Medium Earth Orbit)の GNSS に比べて速いためである。高層ビルの谷間では上空視界が狭いため、図 8.2-4 に示すように低軌道衛星が可視になってからハーフサイクルアンビギュイティが解決する 6 秒以内にビルの影に隠れて NLOS となってしまうケースが多く見られた。

また走行データにおける LOS 衛星の PDOP の比較を図 8.2-5 に示す。低軌道衛星を加えると

PDOP が大幅に改善されることがわかる。図 8.2-5 のデータにおける低軌道衛星を含んだときの PDOP は GNSS のみの場合に比べて平均 1.6 低い値であった。



図 8.2-1 東京上空の Starlink 衛星数

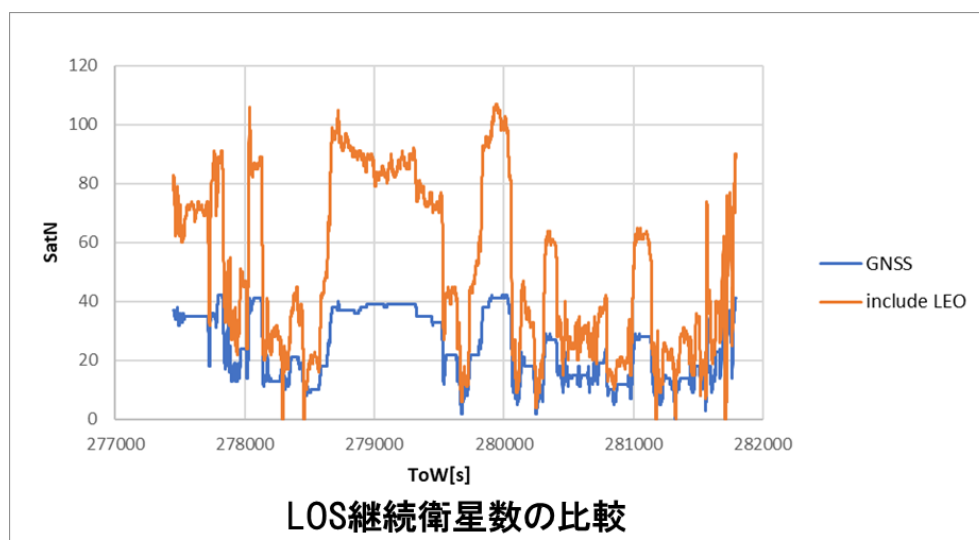


図 8.2-2 走行時の LOS 継続衛星数の比較

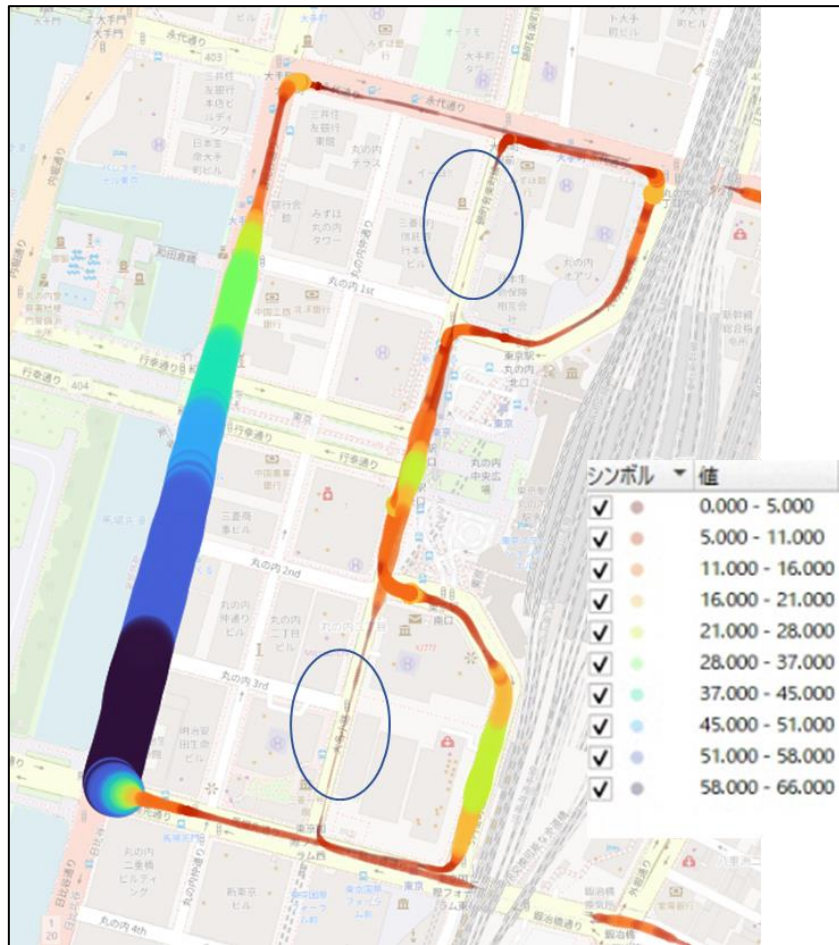


図 8.2-3 高層ビル街における LOS 継続衛星数の増加量

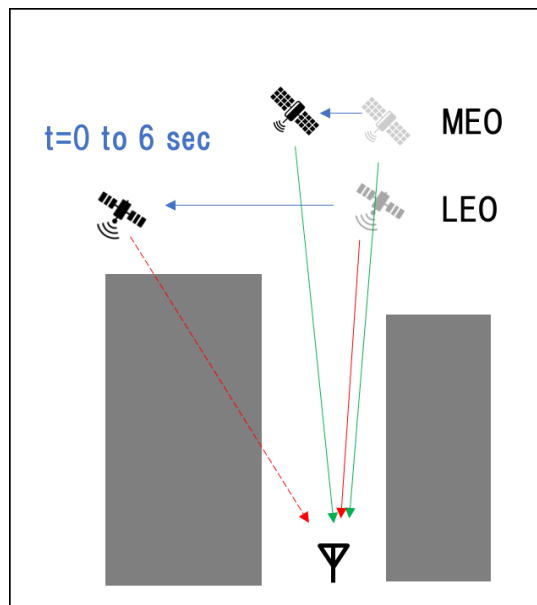


図 8.2-4 LEO と MEO の速度差のイメージ

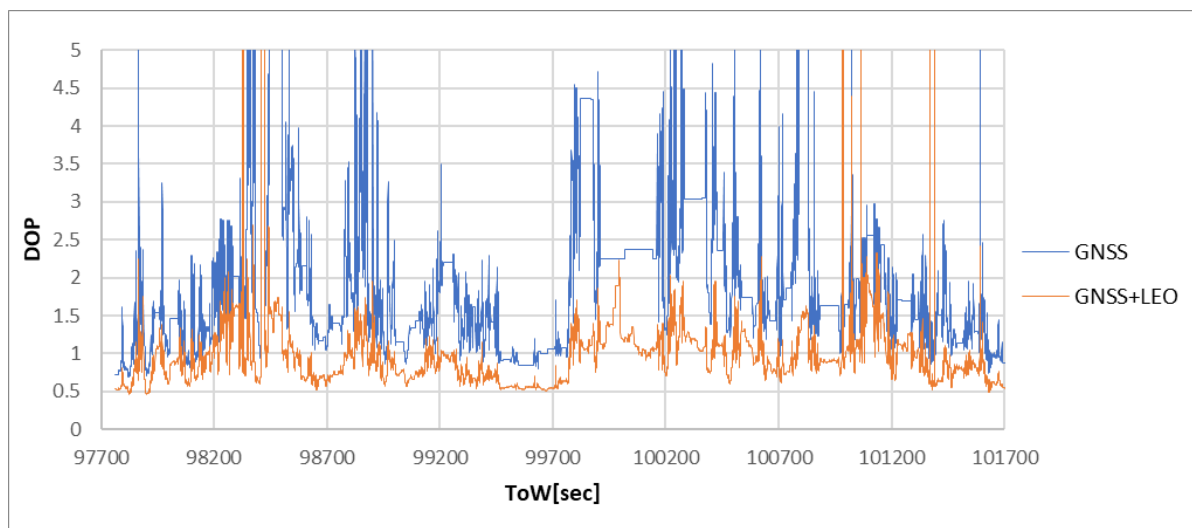


図 8.2-5 走行データにおける PDOP の比較

8.3 低軌道衛星を含めた場合の RTK Fix 予測

Starlink 衛星の LOS/NLOS 情報を含めた場合の RTK Fix 予測は第 4 章と同じ手法で行った。まず東京都市部で収集した 7 つの走行実験の走行軌跡を用いて衛星可視シミュレーションを行いそれぞれのデータで以下の説明変数を取得した。

- ・ LOS 継続衛星数
- ・ マルチパスを発生させる NLOS 衛星数
- ・ LOS 継続衛星の PDOP
- ・ 天空率
- ・ GPS と QZSS と LEO の二重位相差数
- ・ Galileo の二重位相差数
- ・ BDS の二重位相差数
- ・ GLONASS の二重位相差数

低軌道衛星の二重位相差数は低軌道衛星の PNT 信号が GPS と互換性があると仮定して GPS, QZSS の二重位相差数に追加した。この説明変数の 7 つのテストデータについて K 近傍法によって各エポックで RTK Fix 解が得られるかどうかを判定した。教師データには第 4 章で使ったのと同じ F9P を瞬時 AR で解いた RTK Fix 結果と GNSS のみの衛星可視環境を紐づけたデータセットを利用した。図 8.3-1 にこの予測のフローを示す。この判定結果を低軌道衛星を RTK に利用したときの RTK 可否とした。

図 8.3-2 に 7 つのデータセットにおける RTK Fix 率を示す。F9P の観測値を使用した実際の RTK Fix 率を青色で、低軌道衛星を含んだ予測の RTK Fix 率をオレンジ色で示している。全てのデータセットで RTK Fix 率は上昇したが、その上昇率はデータごとに差があり、上昇した Fix 率の平均は 23.8%であった。例として Fix 率が最も上昇した 05/16 のデータの実験の結果と低軌道衛星を含めた結果を図 8.3-3 で地図上に示す。緑色が RTK Fix した場所、青が RTK Fix でない場所である。RTK Fix 率が増加したため青の区間が緑色に変化していることがわかる。このデ

ータを拡大したものを図 8.3-4 と図 8.3-5 に示す。緑色が RTK Fix した場所、青が RTK Fix でない場所、RTK Fix のうち赤丸が低軌道衛星によって新たに Fix した場所である。図 8.3-4 は高架横で GNSS のみでは Fix しなかったが、低軌道衛星を追加すると Fix するという予測を示す。図 8.3-5 は高層ビルの谷間の道路でここでは低軌道衛星を追加しても RTK Fix が得られないという予測であった。

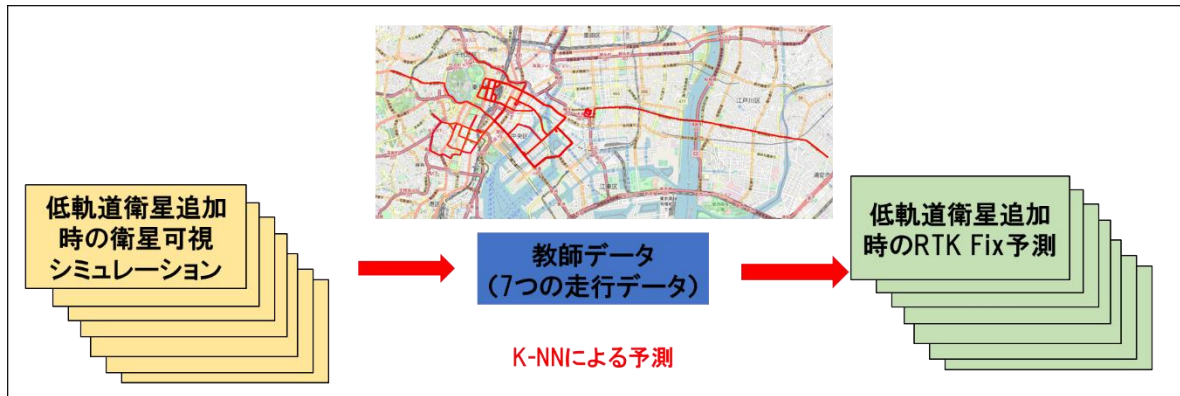


図 8.3-1 低軌道衛星を含んだ RTK Fix 予測のフロー

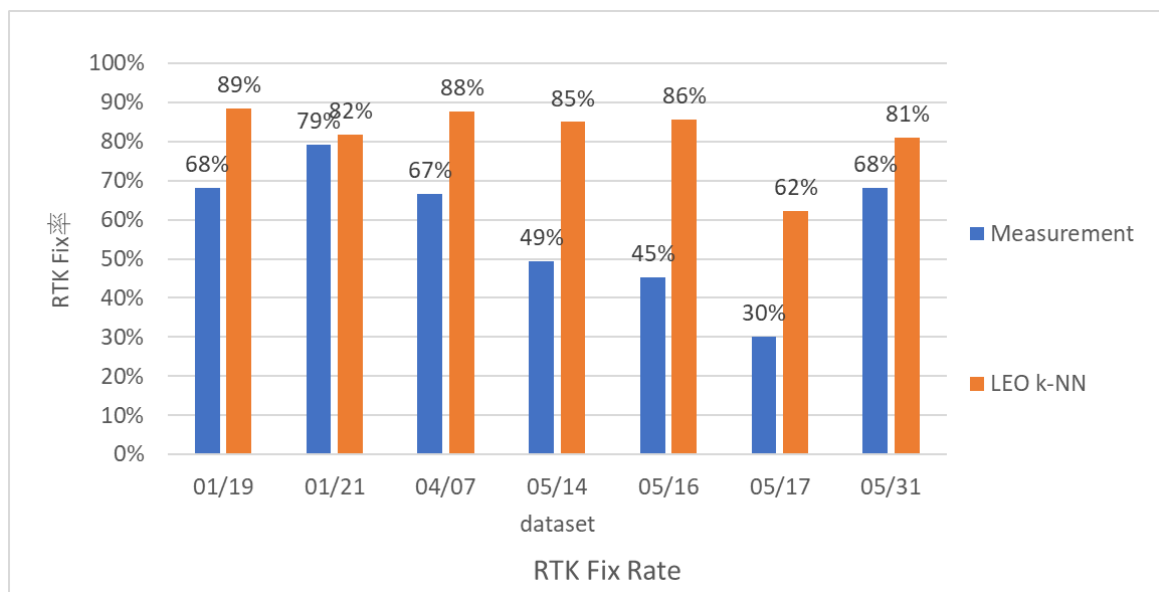


図 8.3-2 GNSS の RTK Fix 率と低軌道衛星を含んで予測した RTK Fix 率

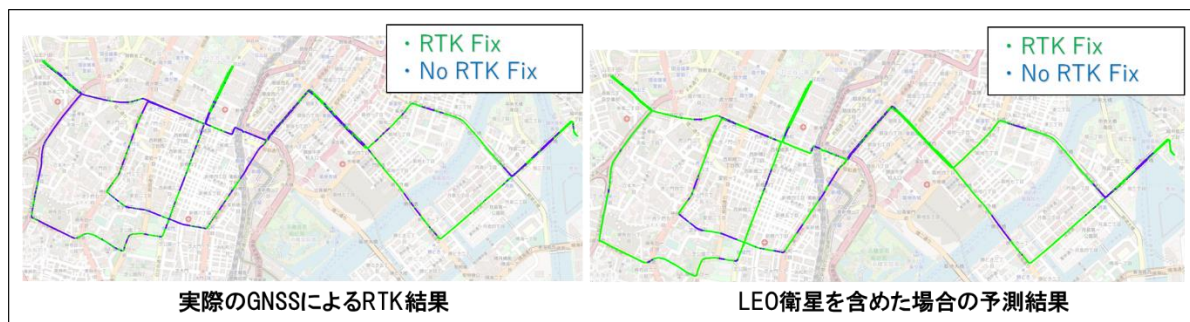


図 8.3-3 GNSS の RTK Fix 率と低軌道衛星を含んで予測した RTK Fix 率



図 8.3-4 低軌道衛星の RTK Fix 予測で新たに Fix した場所



図 8.3-5 低軌道衛星の RTK Fix 予測で Fix しなかった場所

8.4 低軌道衛星を使用した RTK Fix 予測のまとめ

本研究では低軌道衛星が GNSS の補完として RTK に使用できたらという仮定で、Starlink 衛星の軌道情報を使用して RTK Fix 可否の予測を行った。予想通り RTK Fix 率は GNSS のみのときと比べて上昇したが、データセットによって上昇率には差があった。また RTK Fix に重要な LOS 継続衛星数の数は低軌道衛星の速度が速いことで、高層ビルの谷間では増加率が低かった。

今後世界的に低軌道衛星による PNT 事業が開始される中で、本研究は都市部において低軌道衛星を測位に使用すると PDOP は大幅に改善され、RTK に利用できた場合 RTK Fix 率も大きく改善されるという予測を示すことができた。また、シミュレーションソフトを使うことで Starlink 以外の低軌道衛星の場合でも RTK Fix 率の予測が行うことが可能である。一方で低軌道衛星の速度が速いことから天空率が低い高層ビルの谷間などでは LOS 継続衛星となる低軌道衛星が少ないこともわかった。この問題を解決するには低軌道衛星を使用した RTK を行う場合はハーフサイクルアンビギュイティを素早く解ける信号形式の採用が必要だと思われる。

第9章 UAV の飛行高度別の RTK Fix 率の予測

9.1 都市部における UAV の利活用

近年では UAV(Unmanned Aerial Vehicle)でも RTK を使用する機会が増えており、その多くは航空測量のための UAV である。航空測量では UAV から地上のカメラによる画像やレーザーを使った点群を取得することで地上の地図や 3D モデルを作成する。しかし UAV がデータを取得した位置が正確でないと作成した地図の精度も悪化する。そのため RTK で UAV の位置を正確に求める必要がある。

一方で航空測量以外の分野でも UAV の精密誘導が必要なアプリケーションが登場している。それが都市部におけるインフラの点検や宅配、救急などである。それらの要望から 2022 年 12 月には日本でも UAV のレベル 4 飛行解禁された。このレベル 4 飛行は「住宅やビルなど人口が集中しているエリアなどにて、補助者の配置なしで目視できない範囲を自動飛行させる」と定義されている[44]。しかし都市部では高層ビルによって GNSS 信号が劣化し通常の UAV で使用されている単独測位では 10m 以上の誤差を生じるため、UAV と建物の衝突や UAV 同士の衝突の危険がある。そのためレベル 4 飛行を行う UAV には RTK の搭載が必須ではないかと議論がされている[45]。本章ではレベル 4 飛行を行う RTK 搭載 UAV を安全に誘導・自律飛行させるためには飛行高度をどの程度上げればよいかを予測する。なぜなら UAV の飛行高度が上昇するほど周囲の建物の影響は少なくなり RTK Fix 率が上昇するためである。

9.2 UAV の飛行高度を変えた場合の RTK Fix 率の予測

今回、都市部の自動車の走行経路から高度のみを 10m, 30m, 50m, 100m の三段階で変化させた飛行ルートを作成し、第 4 章で示した RTK Fix 予測手法でその RTK Fix 率を予測した。走行ルートは高層ビル街を含む自動車での RTK Fix 率が 68.2%の 01/19 の経路（経路 1）と高層ビルが周囲に少ない RTK Fix 率が 68.6%の 05/14 の経路（経路 2）を使用した。図 9.2-1 に経路 1、図 9.2-2 に経路 2 の自動車による RTK 結果の水平プロットを示す。緑色が RTK Fix、オレンジ色が RTK Float、青色が DGNSS、赤色が SPP の箇所を示している。この 2 つの経路で高度を変更してシミュレーションした LOS 継続衛星数を図 9.2-3 と図 9.2-4 に示す。経路 1 では UAV の高度を 100m まで上げても LOS 継続衛星数が減少する区間がある。これは東京都丸の内付近で高さ 100m 以上の高層ビルが多数存在する部分を飛行しているためである。図 9.2-5 に丸の内付近で高さ 60m 以上のビルのみを表示した 3D マップを示す。特に黄色で示した建物が高さ 100m 以上の建物である。一方で図 9.2-6 に経路 2 の一部区間の周囲の 30m 以上の建物のみを示した 3D マップを示す。このマップから 100m 以上の高層ビルは周囲に存在せず、60m 以上のビルも少数であることがわかる。そのため図 9.2-4 に示すように UAV の高度が 50m 以上になるとほぼ建物の影響によって LOS 継続衛星数が減ることがなくなる。

各高度による LOS 継続衛星数などを使用して第 4 章と同じ手法で RTK 予測をおこない、RTK Fix 率を計算した。経路 1 における結果を表 9.2-1 に、経路 2 における結果を表 9.2-2 に示

す。また、RTK Fix した場所を示す水平プロット図を図 9.2-7、図 9.2-8 に示す。経路 1 では高層ビルの影響によって UAV の高度を 100m まで上げないと RTK Fix 率が 99% にならなかった。特に高度 50m の時点では丸の中で RTK できないという予測になっている。しかし経路 2 では周囲に高層ビルがないため高度 30m で RTK Fix 率が 100% となった。

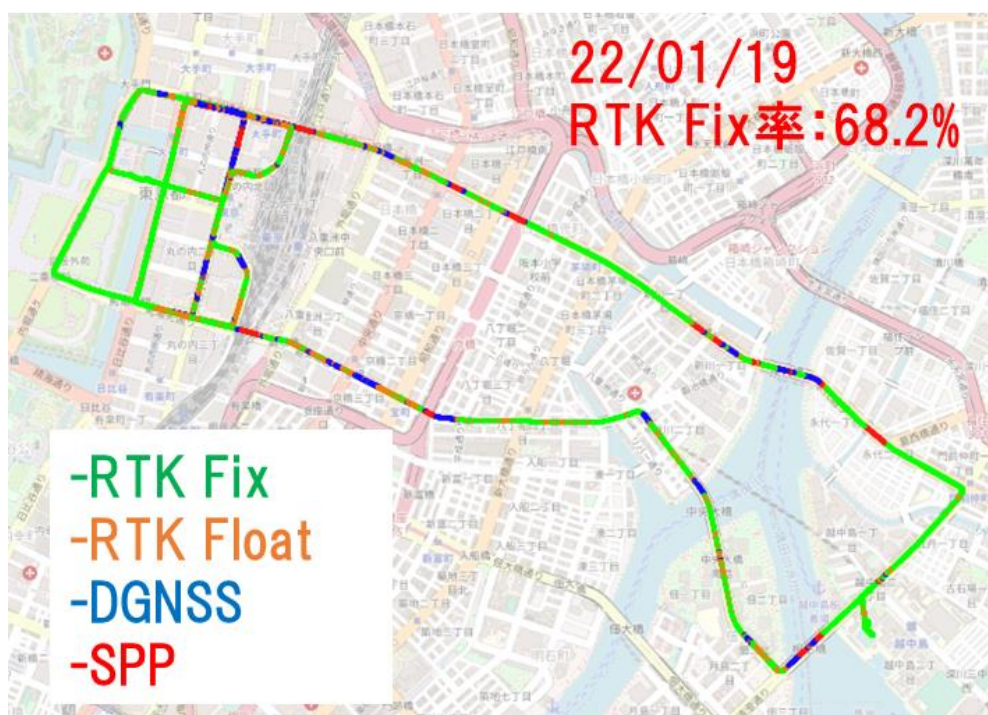


図 9.2-1 実験経路 1 の自動車による実際の RTK 結果

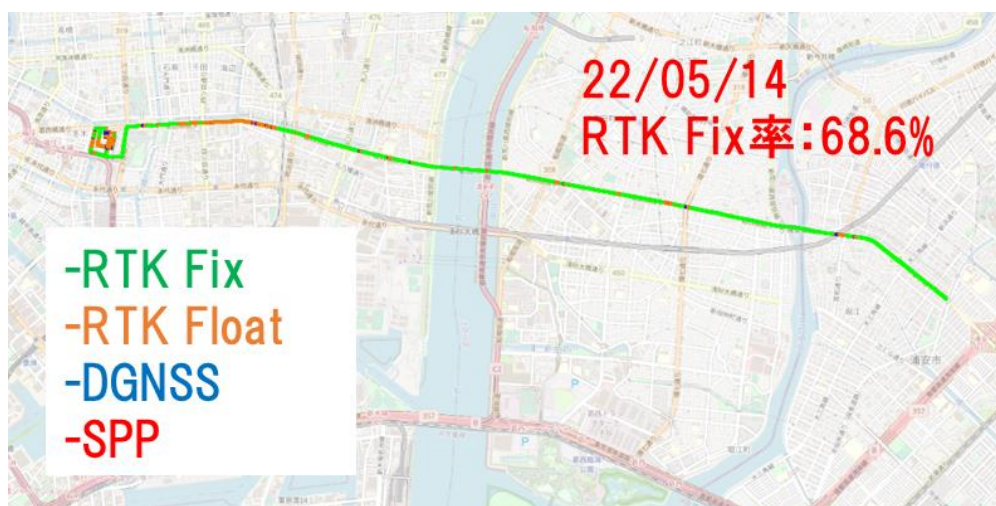


図 9.2-2 実験経路 2 の自動車による実際の RTK 結果

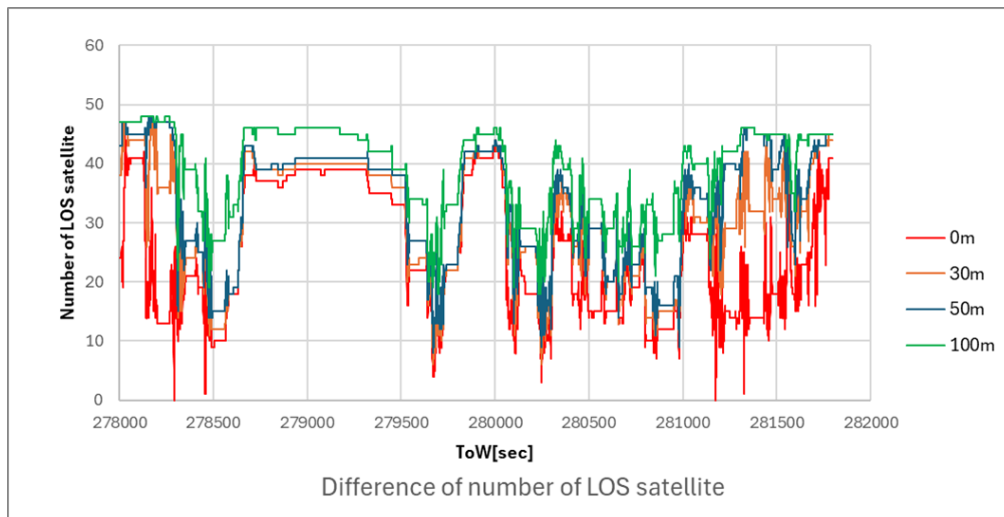


図 9.2-3 シミュレートした実験経路 1 での LOS 継続衛星数

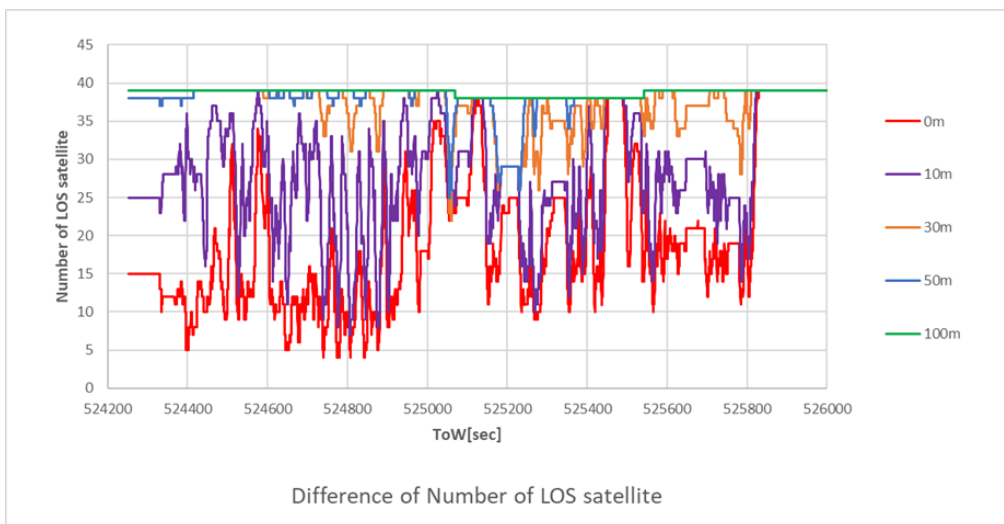


図 9.2-4 シミュレートした実験経路 2 での LOS 継続衛星数



図 9.2-5 東京丸の内付近の高さ 60m 以上のビル

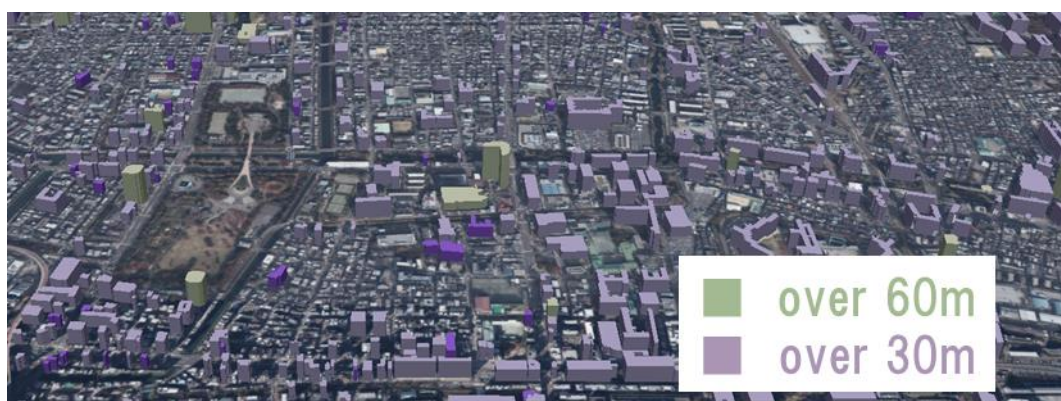


図 9.2-6 経路 2 の周囲のビル

表 9.2-1 経路 1 の各高度における RTK Fix 率予測結果

Height[m]	RTK Fix Rate		
	K-NN	Logistic Regression	DNN
0 (Measured)	68.2		
0	63.4%	59.1%	61.5%
30	86.7%	84.7%	85.4%
50	89.5%	88.3%	89.4%
100	98.9%	99.4%	99.8%

表 9.2-2 経路 2 の各高度における RTK Fix 率予測結果

Height[m]	RTK Fix Rate		
	K-NN	Logistic Regression	DNN
0(Measured)	68.6%		
0	62.1%	66.1%	76.6%
10	94.9%	96.9%	98.3%
30	100.0%	100.0%	100.0%
50	100.0%	100.0%	100.0%
100	100.0%	100.0%	100.0%

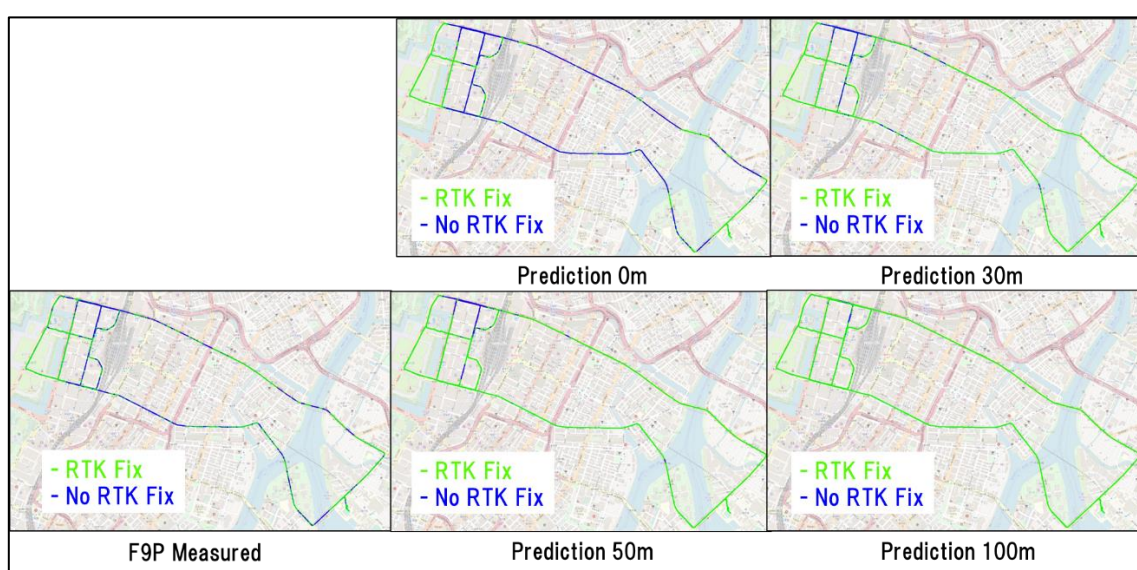


図 9.2-7 経路 1 の予測結果水平プロット

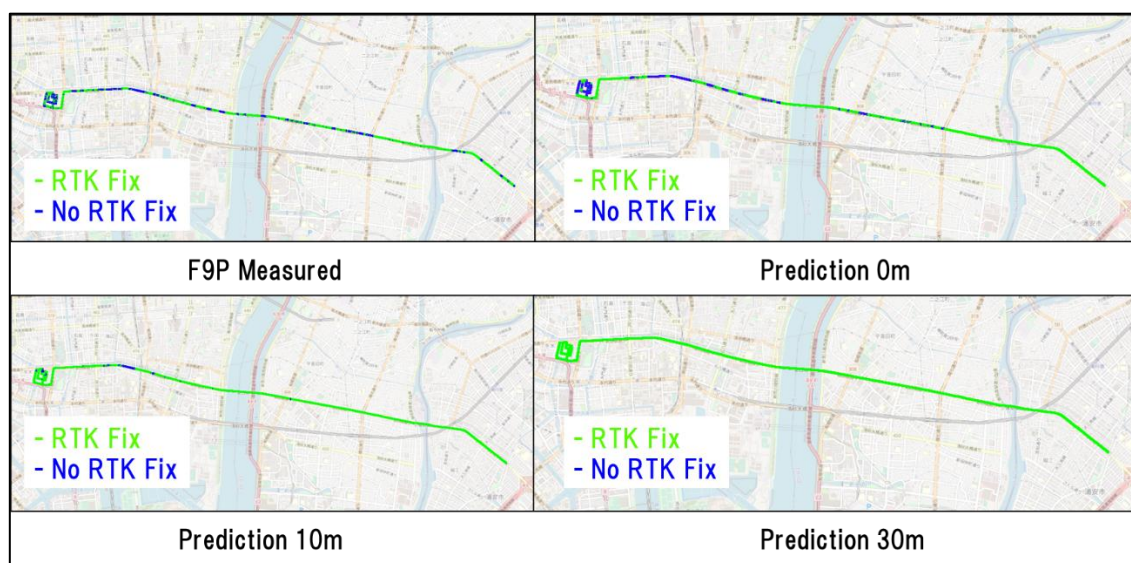


図 9.2-8 経路 2 の予測結果水平プロット

9.3 UAV の飛行高度別 RTK Fix 率予測のまとめ

本章では UAV がレベル 4 飛行で都市部を自律飛行する将来を見据えて飛行高度別の RTK Fix 率を予測した。予測には 100m 以上の高層ビルが存在する厳しい経路 1 と高層ビルのない経路 2 の 2 つで行った。予測結果は想定通り経路 1 では 100m まで高度を上げないと十分な RTK Fix 率が得られなかったのに対して、経路 2 では UAV の飛行高度は 30m で十分という結果になった。実際に UAV を用いて宅配などを行う場合、UAV の高度を上昇させるには余分なエネルギーと時間がかかるためできるだけ低高度を飛行させたいと思われる。そのため、UAV 運用者は十分な RTK Fix 率を得られる最低高度を知りたいという需要が想定できる。本章では本論文で提案した RTK Fix 予測の手法によってこの需要について満たすことができると示すことができた。

第10章 むすび

10.1 本研究のまとめ

本研究では主に高精度測位が使用できるかどうかの予測・推定手法とその応用に焦点を当てた。この予測・推定には第3章で述べた3Dマップを利用したLOS/NLOS判定が基礎となっている。国土交通省によるPLATEAU Projectによって広範囲の3Dマップが無償で利用できることが研究に大きく貢献した。RTK Fix可否の予測を第4章で統合測位の誤差推定を第5章で行い、両者とも機械学習を使用した。機械学習を使用したのは高精度測位の誤差に与える原因が多岐にわたっておりモデル化が難しいためである。複雑かつ正確なモデルを作るのには使用する受信機のアルゴリズムなどを詳しく知る必要があり、基本的にブラックボックスである市販GNSS受信機を用いた場合これは難しい。そのため本研究では比較の実装が簡単な機械学習にてどの程度予測・推定ができるかを調査した。

また衛星可視シミュレーションの応用としてQZSSの高精度測位サービスであるCLASのアベイラビリティ調査、QZSS増加によるRTK Fix率向上の程度の調査、低軌道衛星を使用したRTKのアベイラビリティシミュレーションも行った。

本研究では3Dマップを使用した衛星可視シミュレーションソフトを使用することで、観測現場に行かずに高精度測位の利用可能性を調査できるという利点を大きく示すことができたと考える。社会利用的な側面では建設現場で高精度測位を利用すべきか悩んでいるユーザーにRTK導入すべきかどうかの判断目安になると思われる。自動運転バスなどを設計する際にはどこでRTKができなくなり道路側の補助インフラ(カメラ用マーカーなど)が必要かどうかを知ることができると思われる。

10.2 結論

都市部走行データにおけるRTK Fix解の予測では7つの走行経路において予測正答率の平均がK近傍法、Logistic Regression法、DNN法の3つでそれぞれ72.2%、72.9%、73.4%であった。予測性能を示すROCカーブのAUCは3つの手法で0.77、0.76、0.78であった。各手法でほぼ同じ結果が得られたことで予測手法の方向性がある程度正しいことが確認できた。

次にRTKに加えてIMUと車速センサーを使用した統合測位解の水平誤差がITSにおけるレーン判別に必要とされる30cmを超えているかどうかの推定を行った。近年懸念されるジャミングやスプーフィングを念頭にRTK Fix解が得られない場合の誤差に注目をして推定を行った。こちらは衛星可視環境に加えてGNSSの観測データを推定に使用した。評価には3つの走行実験のデータを使用した。推定はDNN法で行い、入力説明変数の組み合わせや重み付けを調整することで正答率が78.6%、ROCカーブのAUCが0.80であり良い推定性能を得られた。説明変数の組み合わせを検討する仮定でIMUの蓄積誤差を表す統合測位の継続時間が誤差推定に大きく寄与することを発見できた。

CLASの利用可能性調査では都内7箇所で衛星可視環境を24時間分シミュレートし、それらの環境がCLASのパフォーマンススタンダードを満たすかどうかの評価を行った。さらに現行の

QZSS4 機体制に加えて 7 機体制、11 機体制におけるシミュレーションも行い、QZSS の増加により CLAS のアベイラビリティが改善されることを示した。

また、RTK における RTK Fix 区間の予測手法を応用して地球上の測位衛星数が増加したときに RTK Fix 率がどの程度向上するかシミュレーションを行った。シミュレーションは QZSS が 7 機及び 11 機体制になった場合と測位信号を提供する低軌道衛星が現れた場合の 2 種類で行った。QZSS の増加による RTK Fix 率の向上は 2 つの走行経路で評価し、どちらのルートでも 7 機体制、11 機体制と衛星が増えるにつれ RTK Fix 率が向上することを確認できた。低軌道衛星から測位信号が提供された場合のシミュレーションでは Starlink 衛星の軌道情報を使用して 7 つの走行ルートで衛星可視シミュレーションとそれを用いた RTK Fix 率の予測を行った。全ての走行ルートで RTK Fix 率が向上し、最大で 41% 向上した。しかし低軌道衛星は GNSS に比べて速度が速いためビルの谷間では可視状態が継続する時間が短く、高層ビル街では効果が低いことも確認できた。

10.3 今後の課題

3D マップを使用した高精度測位利用可能性の予測は現場での GNSS 観測データ取得が不要であるという利点の一方で 2 つの欠点がある。まず現実とモデルに細かな差異があるという欠点である。この差異としては現実世界での新規建築や開発にモデルの更新が追いつかない、樹木、歩道橋、信号機、看板などの細かな物体がモデルに含まれていないという 2 つの点によるものが大きい。このため現場で魚眼カメラによって建物をマスクする、Lidar を使用して正確な 3D モデルを作成する手法に比べて LOS/NLOS 判定の正確度は低い。2 つ目の欠点として計算コストの重さがある。今回使用した Ray-Launching 法では 1 エポックの LOS/NLOS シミュレーションに一般的な PC で 2 秒ほどかかる。このため車両で必要な 5Hz や 10Hz のシミュレーションをリアルタイムで行う場合、処理が追いつかないことが明確である。これに対してやはり魚眼カメラによるマスクや Lidar による 3D モデル作成はリアルタイム性の面で優位である。特に第 5 章の統合測位解の閾値以上の誤差推定はリアルタイム性が求められるものであり、3D マップを使用しない LOS/NLOS 判定手法が現実的である。そのため今後の課題として LOS/NLOS 判定について 3D マップを使用した手法とそれ以外の手法で比較する必要がある。

また、今回マルチパスのシミュレーションは Ray-Launching 法で行ったが使用したのはマルチパスを含む NLOS の数のみで、そのマルチパスの伝搬遅延量や信号強度などはシミュレーションしなかった。RTK や統合測位の誤差にはマルチパスの大小が大きく影響するので今後の研究ではマルチパス成分を定量的に評価して予測・推定に使用するのが良いと思われる。

機械学習については今回 1 エポックごとに独立して教師データの作成と分類を行った。これは LOS/NLOS のシミュレーションと機械学習の過程を単純化するためである。しかし GNSS 測位というものは本来連続的なものであるため、シミュレーションであれば仰角の変化率やマルチパスの遅延量・到来方向変化率、GNSS 観測データであれば擬似距離、搬送波、Loop Lock Indicator (LLI)、信号強度の変化率を考慮して機械学習に時間成分を追加することで予測・推定精度はより向上するのではないかと考えられる。

謝辞

東京海洋大学教授、久保信明先生には指導教官として、本研究の遂行にあたり研究方針から研究のアドバイスまで熱心にご指導頂きました。長期間にわたり大変お世話になりました。ここに、心より感謝の意を表します。

副査として、研究内容について多くのご指導を頂くと共に、公聴会および本論分の細部にわたりご助言を頂きました独立行政法人電子航法研究所、坂井丈泰先生および東京海洋大学教授、部大輔先生に心より感謝の意を表します。

副査として、本論分の構成から細部にわたりご助言を頂きました東京海洋大学教授渡部大輔先生に心より感謝の意を表します。

香港理工大学における3ヶ月の研究におきまして多くの助言をいただきました香港理工大学 Wen Weison 先生、Li-Ta Hsu 先生及び Intelligent Positioning and Navigation Laboratory の皆様に心より感謝の意を表します。

情報通信工学研究室の社会人学生、学生、卒業生には研究遂行にあたり、実験支援や活発な討論、助言を頂きました。心より感謝の意を表します。

最後に今までの大学院での生活を通しお世話になりました全ての皆様へ、心より感謝の意を表します。また、本研究の一部として掲載している成果は JSPS 科研費 21J20360 の助成を受けました。

参考文献

- [1] 小林海斗, 久保信明, & 坂井丈泰. (2021). マルチパスモニタリングによる GNSS スプーフィング検知の研究. 日本航空宇宙学会論文集, 69(6), 247–256.
- [2] Kobayashi, K., & Kubo, N. (2020), Spoofing Detection on Ships Using Multipath Monitoring and Moving-baseline Analysis, *Proceedings of the 33rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2020)*, 3283-3293.
- [3] 土屋淳, & 辻宏道. (2012). GNSS 測量の基礎 (改訂版 1 版). 日本測量協会.
- [4] 坂井丈泰. (2007). 衛星航法システム MSAS の導入. 第 50 回自動制御連合講演会, 723–726.
- [5] 小野裕喜. (2019). 精密単独測位の初期収束時間短縮に関する研究. 飛行機シンポジウム講演集, 57, 2E07.
- [6] センチメートル級測位補強サービス. (n.d.). みちびき(準天頂衛星システム). <https://qzss.go.jp/technical/system/l6.html>. 最終アクセス : 2023/10/10
- [7] 大王埼ディファレンシャル GPS 局.(n.d.). 鳥羽海上保安部. <https://www.kaiho.mlit.go.jp/04kanku/toba/a/A-5-radio.html>. 最終アクセス : 2023/11/24
- [8] サブメートル級測位補強サービス. (n.d.). みちびき(準天頂衛星システム). <https://qzss.go.jp/technical/system/l1s.html>. 最終アクセス : 2023/10/10
- [9] mosaic-X5 データシート. (n.d.). Septentrio. <https://www.septentrio.com/ja/zhpin/gps/gnssshouxinjimoshiyuru/mosaic-x5>. 最終アクセス : 2023/11/24
- [10] センチメートル級測位サービス ichimill (イチミル) . (n.d.). SoftBank. <https://www.softbank.jp/biz/services/analytics/ichimill/>. 最終アクセス : 2023/11/24
- [11] docomo IoT 高精度 GNSS 位置情報サービス. (n.d.). NTT Communications Corporation. https://www.ntt.com/business/services/highprecision_gnss_positioning.html. 最終アクセス : 2023/11/24
- [12] Furukawa, R., & Kubo, N. (2019), Prediction of Fixing of RTK-GNSS Positioning in Multipath Environment Using Radiowave Propagation Simulation. *Journal of the Institute of Positioning Navigation and Timing of Japan*, 10(2). 13–22.
- [13] Furukawa, R., Kubo, N., & El-mowafy, A. (2020). Verification of GNSS Multipath and Positioning in Urban Areas Using 3D Maps. *IEICE Communications Express*, 9(11).
- [14] Wen, W., & Hsu, L. (2021). 3D LiDAR Aided GNSS Real-Time Kinematic Positioning. *Proceedings of the 34th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2021)*, 2212–2220.
- [15] Yoshida, A., Kubo, Y., & Koya, Y. (2019). NLOS Satellite Detection Using Fish-Eye Camera for Improving GNSS Positioning Accuracy — Further Results. *Proceedings of the 51th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications*, 54–59.
- [16] Ozeki, T. & Kubo, N. (2022). GNSS NLOS Signal Classification Based on Machine Learning

- and Pseudorange Residual Check. *Frontiers in Robotics and AI*, 9:868608.
- [17] 3D 都市モデルの特徴と活用法. (n.d.). PLATEAU.
<https://www.mlit.go.jp/plateau/learning/tpc01-2/>. 最終アクセス: 2023/09/28
- [18] 3D 都市モデルデータの基本[3/4] | LOD レベルによる表現の違い. (n.d.), PLATEAU.
<https://www.mlit.go.jp/plateau/learning/tpc03-3/>. 最終アクセス: 2024/02/15
- [19] Teunissen, P. J. G. (1995). The Least-Square Ambiguity Decorrelation Adjustment: A Method for Fast GPS Integer Ambiguity Estimation. *Journal of Geodesy*, 70, 65–82.
- [20] ZED-F9P データシート. (n.d.). u-blox.
https://content.u-blox.com/sites/default/files/ZED-F9P-04B_DataSheet_UBX-21044850.pdf. 最終アクセス: 2023/10/06
- [21] Applanix POSLVX125 データシート. (n.d.). ニコン・トリンブル.
https://www.nikon-trimble.co.jp/pdf/field/0601_autonomous/poslvx125_datasheet_J.pdf.
 最終アクセス: 2023/07/21
- [22] McBurney, P. W., Clara, S. & Calif. (1997) GPS receiver having fast resolution of carrier phase ambiguity, United State Patent, US5847680A
- [23] Dasarathy, B., V. (1991). Nearest Neighbor (NN) Norms: NN Pattern Classification Techniques. IEEE Computer Society Press.
- [24] Hosmer, D., W. & Lemeshow, S. (2000). Applied logistic regression. 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- [25] Keras: the Python deep learning API. (n.d.). Keras. <https://keras.io/>. 最終アクセス: 2023/07/21
- [26] 用語解説、過学習. (n.d.). 野村総研.
<https://www.nri.com/jp/knowledge/glossary/1st/ka/overfitting>. 最終アクセス: 2023/11/20
- [27] Yang, S., & Berdine, G. (2017). The Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve. *The Southwest Respiratory and Critical Care Chronicles*, 5(19), 34.
- [28] Reid, T., Houts, S., Cammarata, R., Mills, G., Agarwal, S., Vora, A. & Pandey G. (2019). Localization Requirements for Autonomous Vehicles. *SAE Journal of Connected and Automated Vehicles*, 2(3). 173-190.
- [29] ZED-F9R データシート. (n.d.). u-blox.
https://content.u-blox.com/sites/default/files/documents/ZED-F9R-03B_DataSheet_UBX-22024085.pdf. 最終アクセス: 2023/07/21
- [30] ZED-F9P Interface Description. (n.d.). u-blox.
https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/1/1/7/2/ZED-F9R_Interfacedescription__UBX-19056845_.pdf. 最終アクセス: 2023/11/08
- [31] 小松大生, & 久保信明. (2022). RTK-GNSS/IMU/Speed のタイトカップリングの評価. 宇宙科学技術連合講演会講演集, 66th, 2I06.
- [32] Tokura, H. & Kubo, N. (2017). Efficient Satellite Selection Method for Instantaneous RTK-GNSS in Challenging Environments. *Transaction of The Japan Society for Aeronautical and*

- Space Sciences. 60(4), 221-229.
- [33] Quasi-Zenith Satellite System Performance Standard (PS-QZSS-003) . (2022). Cabinet Office. <https://qzss.go.jp/en/technical/download/pdf/ps-is-qzss/ps-qzss-003.pdf?t=1696915290139>. 最終アクセス:2023/10/10
- [34] 宇宙基本計画工程表. (2023). 内閣府. https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei_fy05/kouteihyou_fy05.pdf. 最終アクセス:2023/10/10
- [35] 細田聡史, 富高真, 松本純, 坂井洋子, 岸本続久, & 沼田健二. (2023). 将来準天頂衛星システムの計画検討報告. 宇宙科学技術連合講演会講演集, 67th, 1G13.
- [36] 佐藤友紀, 宮雅一, 藤田征吾, & 廣川類. (2016). センチメートル級測位補強サービスでの測位衛星の選択的補強. 測位航法学会論文誌, 7(2), 11-20.
- [37] Ozeki, T., Kubo, N., Suzuki, T., Ebinuma, T., & Takasu, T. (2023). Evaluation of the Actual Performance of PPP in Urban Areas Using Pocket SDR, *Proceedings of the 36th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2023)*, 3488-3498.
- [38] 中島和希, 佐田達典, & 江守央. (2019). 街路走行時の高精度測位における QZSS の併用効果の検証. 土木学会論文集 F3, 75(2), 87-96.
- [39] Zimmerman, K., Banville, S., Chan, B., Gunning, K., Manning, B., Marathe, T., Neish, A., Perkins, A., Sibois, A., & Reid, T. G. r. (2023). Commercial Satellite Navigation Architecture, Trades, & Roadmap. IONGNSS+2023, Denver, Colorado, United States.
- [40] Zuo, R. (2023). OneWeb Timing Technology and PNT Service Status and Plan. IONGNSS+2023, Denver, Colorado, United States.
- [41] Florian, K., Benjamin, B., Markus, M., & Oliver, M. (2023). A GNSS-Synchronized Satellite Navigation Payload for LEO PNT. Proceedings of the 36th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2023), 1425-1435.
- [42] Basic Description of the Two Line Element (TLE) Format. (n.d.). Space-Track.org. <https://www.space-track.org/documentation#/tle>. 最終アクセス:2023/10/10
- [43] Vallado, D., Crawford, P., Hujsak, R., & Kelso, T. (2006). Revisiting Spacetrack Report 3: Rev, AIAA Astrodynamics Specialist Conference
- [44] レベル 4 飛行の実現、さらにその先へ. (2022). 内閣官房小型無人機等対策推進室. https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/drone_platform/pdf/20220721kouen.pdf. 最終アクセス:2024/02/19
- [45] 解禁されたドローンのレベル 4 飛行。「目視外飛行」のために押さえておくべきポイント. (2023). ソフトバンク. <https://www.softbank.jp/biz/blog/business/articles/202301/drone-level4/>. 最終アクセス:2024/02/19

研究業績

学術誌掲載論文	小林海斗, 久保信明, & 坂井丈泰. (2021). マルチパスモニタリングによる GNSS スプーフィング検知の研究. 日本航空宇宙学会論文集, 69(6), 247-256.
	Kobayashi, Kaito., & Kubo, Nobuaki. (2023). Prediction of Real-Time Kinematic Positioning Availability on Road Using 3D Map and Machine Learning. International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, 21(2), 277-292.
国際学会発表論文（査読付き）	Kobayashi, Kaito., & Kubo, Nobuaki. (2023). RTK Availability Prediction Using a 3D City Model and Machine Learning. Proceedings of the 2023 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, 580-590.
	Kubo, Nobuaki., Kobayashi, Kaito., Ozeki, Tomohiro. (2022). A New Approach of GNSS Multipath Detection using the Guard time of Satellite based on C/N0. Proceedings of the 2022 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, 932-946.
	Kobayashi, Kaito., Kumagai, Nanase., Kubo, Nobuaki. (2023). RF signal transmitter location by LEO satellite using TDOA and FOA method, IEICE Technical Committee on Space, Aeronautical and Navigational Electronics, 123(SANE-298), 47-51.
国際学会発表	Kobayashi, Kaito., & Kubo, Nobuaki. (2021). Real-Time Monitoring of Structure Movements Using Low-Cost, Hand-held RTK-GNSS Receiver. 2021 AUA and ICSGS Academic Conference.
	Kubo, Nobuaki., Ozeki, Tomohiro., Kobayashi, Kaito. (2023). Applications of GNSS Measurements from Smartphones. IONGNSS+ 2023.
	Kobayashi, Kaito., & Kubo, Nobuaki. (2023). Report of long term MADOCA-PPP monitoring in Asia and Oceania countries. 8th Multi GNSS Asia.
国内学会発表	小林海斗, 久保信明. (2021). LoRa を使用した RTK 測位 IoT システムの試作. 第 65 回宇宙科学技術連合講演集, 2G02.
	小林海斗, 久保信明. (2022). 3D マップと機械学習を用いた RTK 測位可用性の予測. 第 66 回宇宙科学技術連合講演集, 2I08.
	小林海斗, 久保信明. (2023). 深層学習を利用した GNSS と IMU の統合測位解のミス Fix 推定. 第 67 回宇宙科学技術連合講演集, 2G05.
	小林海斗, 久保信明. (2021). サーバー型 RTK を使用した建設現場での静止点モニタリング. 測位航法学会 GPS/GNSS シンポジウム 2021.
	小林海斗, 久保信明. (2023). 低軌道衛星から測位信号が放送された場合の RTK Fix 率向上のシミュレーション. 測位航法学会全国大会 2023.