

3Dマップを用いた衛星測位の性能予測と改善に関する研究

著者	古川 玲
学位名	博士(工学)
学位授与機関	東京海洋大学
学位授与年度	2020
学位授与番号	12614 博甲第559号
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00001982/

博士学位論文

3D マップを用いた
衛星測位の性能予測と改善に関する研究

2020 年度

(2020 年 9 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

古川玲

博士学位論文

3D マップを用いた
衛星測位の性能予測と改善に関する研究

2020 年度

(2020 年 9 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

古川玲

内容

第 1 章 序章	1
1.1. 研究の背景.....	1
1.2. 研究の目的.....	3
1.3. 先行研究	3
1.4. 論文の構成.....	5
第 2 章 衛星測位について	7
2.1. GNSS について	7
2.2. GNSS の信号	8
2.2.1. GPS の信号と航法メッセージ.....	8
2.2.2. GLONASS の信号と航法メッセージ	10
2.2.3. QZSS の信号と航法メッセージ.....	10
2.2.4. Galileo の信号と航法メッセージ.....	10
2.2.5. BDS の信号と航法メッセージ.....	10
2.3. GNSS の観測量	10
2.3.1. 擬似距離.....	10
2.3.2. 搬送波位相.....	11
2.3.3. GNSS の観測量における誤差.....	12
2.3.4. GNSS における測位.....	16
2.3.4.1. 単独測位.....	16
2.3.4.2. 相対測位 (DGNSS)	17
2.3.4.3. 相対測位 (RTK-GNSS)	18
2.4. 高精度測位に関する現状.....	20
2.5. 高精度測位の精度向上手法に関する手法	21
2.6. 高精度測位の精度向上手法に関する技術課題.....	22
2.7. まとめ.....	23
第 3 章 3D マップを用いた GNSS シミュレーション	24
3.1. 概要.....	24
3.2. 3D マップ	24
3.3. GNSS シミュレーション.....	26
3.3.1. 衛星位置の推定.....	26
3.3.2. 見通しと電波伝搬経路の推定.....	27
3.3.2.1. レイトレーシング法.....	27
3.3.2.2. 見通し判定の高速化手法の検討.....	28
3.4. GNSS の信号エミュレーション.....	31
3.4.1. 概要.....	31
3.4.2. GNSS 信号エミュレーションの妥当性評価 (静止点)	31
3.4.3. 信号エミュレーションの妥当性評価 (移動体)	34

3.4.4.	信号エミュレーションのまとめ	36
3.5.	まとめ	37
第 4 章	3D マップを用いた衛星測位の性能予測	38
4.1.	概要	38
4.2.	衛星の信号品質の検証手法	38
4.2.1.	二周波観測データによる品質検証	38
4.2.2.	擬似距離残差による品質検証	38
4.3.	3D マップを用いた衛星測位の性能予測手法の提案	39
4.3.1.	3D マップによる伝搬経路種別判定と継続的見通し	39
4.3.2.	RTK-GNSS の性能予測	40
4.4.	3D マップを用いた衛星測位の性能予測の実験評価	41
4.4.1.	日比谷における信号品質予測	41
4.4.1.1.	評価環境	41
4.4.1.2.	評価結果	43
4.5.	日比谷における RTK-GNSS の FIX 状況の予測	48
4.6.	まとめ	50
第 5 章	3D マップを用いた衛星測位の性能向上	51
5.1.	概要	51
5.2.	3D マップを用いた衛星測位の性能向上手法の提案	51
5.3.	3D マップを用いた衛星測位の性能向上の実験評価	52
5.3.1.	東京駅付近における静止点評価(評価環境その 1)	52
5.3.1.1.	評価環境	52
5.3.1.2.	擬似距離残差と伝搬経路種別の評価	53
5.3.1.3.	静止点における真値を前提としない衛星選択を用いた RTK-GNSS の評価	55
5.3.2.	東京駅付近における静止点評価(評価環境その 2)	60
5.3.2.1.	評価環境	60
5.3.2.2.	静止点における真値を前提としない衛星選択を用いた DGNS の評価	61
5.3.3.	東京駅付近における走行評価(評価環境その 3)	64
5.3.3.1.	評価環境	64
5.3.3.2.	評価結果	65
5.3.4.	東京駅付近における走行評価(評価環境その 4)	66
5.3.4.1.	評価環境	66
5.3.4.2.	評価結果	67
5.3.5.	東京駅付近における走行評価(評価環境その 5)	70
5.3.5.1.	評価環境	70
5.3.5.2.	走行データにおける高精度な概算位置を前提とする衛星選択の評価	73
5.4.	まとめ	74
第 6 章	結論	75

6.1. まとめ	75
6.2. 今後の課題と問題点	76
第 7 章 謝辞	78
第 8 章 参考文献	79
8.1. 参考論文等リスト	79
8.2. 業績リスト	81

図一覧

図 1-1 衛星測位シミュレーション	3
図 1-2 3DMA Positioning のフロー	5
図 2-3 各衛星システムにおける衛星の配備数の変化	8
図 2-4 GPS の L1 信号の模式図	9
図 2-5 航法メッセージ	9
図 2-6 電離層誤差補正量	13
図 2-7 マルチパス波による誤差の概要	14
図 2-8 擬似距離に含まれるマルチパス誤差	14
図 2-9 擬似距離に含まれる NLOS マルチパス誤差	15
図 2-10 単独測位の概要	16
図 2-11 単独測位 (マルチ GNSS) の概要	17
図 2-12 相対測位 (DGNSS) の概要	17
図 2-13 相対測位 (RTK-GNSS) の概要	18
図 2-14 東京駅周辺における RTK-GNSS	21
図 2-15 日比谷周辺における建物	23
図 2-16 東京駅周辺における建物	23
図 3-17 3D マップの種類	25
図 3-18 3D マップの形状修正	25
図 3-19 レイトレーシング法による電波伝搬推定	27
図 3-20 受信機のアンテナ利得	28
図 3-21 作成するマスク画像のイメージ	29
図 3-22 評価エリアと 3D マップ	29
図 3-23 3D マップとソフトウェア無線機を用いた GNSS 信号エミュレーション	31
図 3-24 ソフトウェア無線を用いた信号による RTK-GNSS	33
図 3-25 シミュレーションに用いた 3D マップと走行コース	34
図 3-26 評価時の衛星配置	35
図 3-27 SDR による信号精製と実信号の比較	36
図 3-28 レイトレース法と実信号の比較	36
図 4-29 LOS 継続衛星	39
図 4-30 3D マップを用いた RTK-GNSS の予測	40

図 4-31	シミュレーションに用いた 3D マップと走行コース.....	41
図 4-32	G02 における SNR, 見通し, 信号品質判定結果.....	43
図 4-33	シミュレーションに用いた建物と走行コース抜粋.....	44
図 4-34	LOS 衛星と信号品質の良い衛星の比較.....	45
図 4-35	LOS の継続時間と信号品質の良い衛星の一致率.....	46
図 4-36	LOS 継続衛星と信号品質の良い衛星の比較.....	47
図 4-37	信号品質の良い衛星数と LOS 継続衛星数の時系列化および RTK の推定.....	48
図 4-38	11 RTK-GNSS の FIX 地点と LOS 継続衛星による RTK-GNSS の FIX 予測地点	49
図 5-39	3D マップを用いた衛星選択を用いた測位.....	51
図 5-40	衛星配置と測定位置および周辺の建物環境.....	53
図 5-41	電波伝搬経路の種別.....	54
図 5-42	道路上に設けた評価地点と位置の真値.....	55
図 5-43	3D マップにより LOS 衛星を選択した場合の各評価地点の RTK-GNSS の FIX 率	56
図 5-44	3D マップにより LOS 衛星(反射波除去)を選択した場合の各評価地点の RTK- GNSS の FIX 率とミス FIX 率.....	57
図 5-45	3D マップにより LOS 衛星, LOS 衛星(反射波除去)を選択した場合の各評価地点 の衛星数.....	58
図 5-46	地点 15 と地点 33 の RTK-GNSS における使用衛星と FIX 時間の比較.....	59
図 5-47	各地点で算出された RTK-GNSS の Fix 解の重心と真値.....	59
図 5-48	測定位置および周辺の建物環境.....	61
図 5-49	道路上に設けた評価地点と位置の真値.....	62
図 5-50	各測位手法の RMS 誤差(地点 19).....	62
図 5-51	各測位手法の RMS 誤差(全地点).....	63
図 5-52	シミュレーションに用いた 3D マップと走行コース.....	64
図 5-53	従来手法と LOS 継続衛星を用いた RTK-GNSS の結果比較.....	65
図 5-54	シミュレーションに用いたシミュレーションに用いた 3D マップと走行コース.....	67
図 5-55	LOS 継続衛星と二周波観測データが出力されている衛星の比較.....	67
図 5-56	従来手法と 3D マップを用いた場合の RTK-GNSS の FIX 解の比較.....	68
図 5-57	NLOS 衛星を受信し二周波の搬送波位相が出力されていた場合の電波伝搬経路.....	69
図 5-58	シミュレーションに用いた 3D マップと走行コース.....	70
図 5-59	走行経路上に配置した評価地点.....	71
図 5-60	近傍の評価地点の選定.....	71
図 5-61	SNR マスクを用いた DGNSS 測位解 (5/30).....	72
図 5-62	RTK-GNSS と IMU などを併用した走行軌跡 (5/30).....	73
図 5-63	3DMAP と SNR マスクを用いた DGNSS 測位結果 (5/30).....	73

表一覧

表 2-1	GNSS の概要	7
表 2-2	典型的な誤差の大きさ	12
表 2-3	測定環境.....	20
表 3-4	エフェメリスを用いた場合の位置推定誤差.....	26
表 3-5	シナリオの設定.....	29
表 3-6	計算機の諸元	30
表 3-7	シナリオの設定.....	32
表 3-8	信号生成器の設定	32
表 3-9	シナリオの設定.....	34
表 4-10	評価シナリオ	42
表 4-11	シミュレーション諸元.....	42
表 4-12	LOS 継続衛星数と RTK 実施時の一致率	49
表 5-13	評価シナリオ	52
表 5-14	電波伝搬経路の種別と擬似距離の残差	54
表 5-15	評価シナリオ	60
表 5-16	評価シナリオ	64
表 5-17	評価シナリオ	66
表 5-18	評価シナリオ	70

第1章 序章

1.1. 研究の背景

Global Navigation Satellite System(GNSS)の配備の進展やスマートフォン・カーナビゲーションシステムなどの発展により衛星測位は広く普及しており、近年では Real Time Kinematic (RTK)-GNSS をはじめとした高精度測位も様々な分野で利用されている。例えば、自動車分野においては自動運転時の自己位置推定による走行車線の検出に活用する用途として高精度測位の可用性が検証されている[1]。土木分野においては STATIC 法や RTK-GNSS が公共測量などに活用されてきたが、情報化施工においても盛土の締固め管理[2] に利用されるなど利用範囲が拡大している。一方、衛星測位の観測量にはさまざまな要因の誤差が含まれており、観測情報に大きな測距誤差が含まれる場合高精度測位における正しい解の算出が困難になる課題がある。都市部においては建物の遮蔽・反射によるマルチパス誤差の影響がおおきく測位率が大きく下がる[1]。土木現場においても、山や樹木により衛星と受信機間の見通し遮蔽され、マルチパス誤差が生じる場合があり、遮蔽の分析をおこなう検討が進められている[3]。さらに、RTK-GNSS の動向として、日本の大手携帯電話ネットワーク事業者であるソフトバンクと NTT DoCoMo が、2019 年後半に RTK-GNSS の補正情報の配信サービスを開始した[4] [5]。そのため、日本の様々な企業が様々な場所で RTK-GNSS の利用を検討している。

衛星測位を安定して運用するためには測位環境を正しく把握することが重要である。また、衛星測位の観測量に含まれる誤差が大きくなる環境では、誤差が大きい衛星を測位の利用対象から排除し、測位精度や解が算出される割合を上げることも重要である。

RTK-GNSS の利用が検討されており、実用化されていない用途は多い。上記にも述べたが、都市部における車両の自己位置推定に RTK-GNSS が安定して使えれば、車両の自己位置推定の精度は数 cm 以内となり、自動運転や安全運転支援システムへの活用として非常に有効である。また、都市部の土木や建築分野においては、周辺建物による GNSS の信号の反射・遮蔽によりマルチパス誤差が生じるため、RTK-GNSS が安定して利用出来ない。そのため RTK-GNSS によるガイダンス機能が搭載された建機は使用されない。飛行ドローンによる配送の自動化も検討されているが、活用は一部限られた環境や実証実験に限定されている。特に都市部においては飛行ドローンの自己位置推定の精度による事故が発生し、危険であるため、飛行可能空域が制限されている。自動運転、RTK-GNSS によるガイダンス機能が搭載された建機や飛行ドローンによる配送の自動化は省力化を実現するものであり、今後の労働人口減少に向けて活用の拡大は重要である。

現状は都市部においては RTK-GNSS が使えない状況が多く、または使えない状況は周辺環境と衛星配置にも依存するため、予測が難しい。RTK-GNSS が使える状況、使えない状況が確実に予測出来るのであれば、自動運転などの省力化を実現する用途には、RTK-GNSS が使える状況に利用すれば部分的な省力化に繋がる。また、RTK-GNSS が使える状況を増やせるのであれば、部分

的な省力化の増加に繋がる。先行研究については、1.3にて述べるが、これまでも RTK-GNSS の予測や GNSS の測位精度の向上の研究は行われてきており、3D マップなどを用いたシミュレータも発売されているが、RTK-GNSS のユーザが一般的に使うサービスとしては普及していない。本研究において、RTK-GNSS の予測と性能向上を行い、RTK-GNSS の利便性を上げることで、RTK-GNSS の普及と自動運転への活用の拡大、今後の労働人口が減少した社会への貢献が期待できる。

また、RTK-GNSS の自動運転への活用においては、安全性も重要である。本研究においてもソフトウェア無線機を用いて GNSS 信号の生成を行っているが、実際の信号を模した信号による Spoofing による自動運転への攻撃への対処は課題である。本研究において GNSS 信号の予測が行えれば、予測信号と Spoofing により生成された信号の強度の差をみることにより、Spoofing 対策が行えると考えられる。本用途も自動運転への活用への貢献となると期待出来る。

1.2. 研究の目的

本研究では、都市部における RTK-GNSS の性能を予測する手法を確立すること、都市部における RTK-GNSS の性能を向上させる手法を確立することを目的とする。

1.3. 先行研究

実環境における高精度測位の可用性を推定する手法として、衛星の軌道情報である Two Line Element (TLE)やアルマナックから、対象エリア上空の衛星配置を算出し、衛星数および Dilution of precision(DOP)を算出する飛来予測などが一般的であり、Web サービスとして公開されているアプリケーションなどもある[6]。

図 1-1 に衛星飛来シミュレーション、見通しシミュレーション、電波伝搬シミュレーションを示す。上空視界を考慮しない衛星数と DOP のみでは、建物の多い都市部などにおいて、遮蔽を考慮した衛星配置と乖離が生じる。都市部における誤差要因として建物の遮蔽によるマルチパス誤差が大きい。そのため、マルチパス誤差が大きい衛星を推定することは測位状況の推定となり、マルチパス誤差が大きい衛星を除外することは、衛星測位の観測量に含まれる誤差が大きくなる衛星を排除することにあたる。

従来の研究として、建物の多い都市部などにおける、遮蔽を考慮した衛星の可視数と DOP の予測は多く実施されている。村木らは、3D マップを用いた見通しシミュレーションにより利用可能な衛星数を推定する手法を構築している[7]。徐[8] や Karen[9] らは 3D マップを用いた、電波伝搬シミュレーションにより、利用可能な衛星数を推定している。Sven らは 3D マップを用いた、ShadowMatching と実測を比較し、ShadowMatching により位置を推定出来ることを報告している[10]。

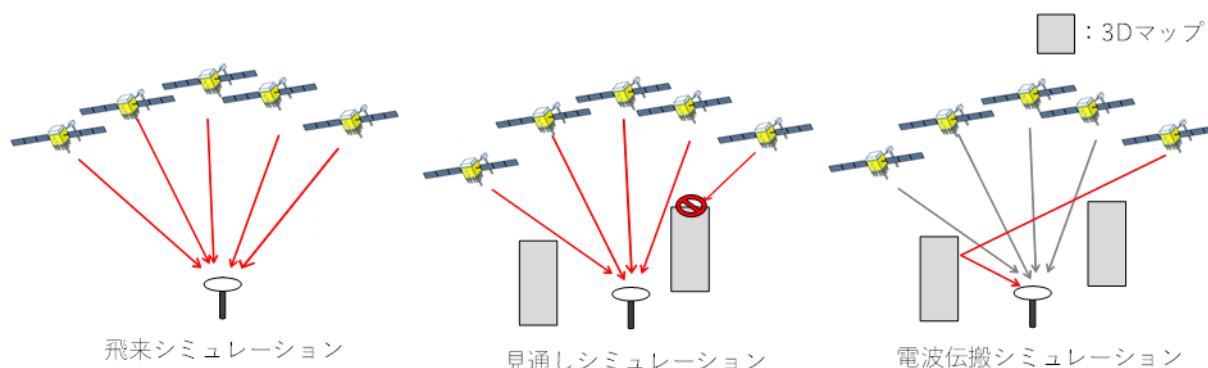


図 1-1 衛星測位シミュレーション

シミュレーションと実測結果の比較として、Chapuis らは 3D マップを用いた、電波伝搬シミュレーションにより予測した測位結果と実測の測位結果において、誤差が生じるタイミングを再現していることを報告している[9]。小松らは 3D マップと電波伝搬シミュレーションにより、マルチパス誤差を推定し、測定データと比較し、見通し波が存在する場合についてマルチパス誤差を推定し得ることを報告している[11]。

3D マップを用いた衛星選択による測位精度向上の研究として、三浦らは、3D マップを用いたシミュレーションにより推定した擬似距離より、衛星選択を実施する手法を提案している[13]。鈴木らは 3D マップとパーティクルフィルタを活用し、衛星選択を実施することにより、単独測位の精度向上を行っている[14]。Li らは 3D マップとスマートフォンに搭載されたセンサによるデッドレコニングによる歩行者の測位精度の向上手法[15] や 3D マップと RAIM を組み合わせることで、都市部において従来手法で 25m ほど精度を 4m ほどの精度に向上させる手法を報告している[16]。Ivan らは実測データと機械学習を用いた衛星の信号品質の推定を報告している[17]。実測の観測データと 3D マップの形状を学習させることで、カルマンフィルタの性能を 13-17% 向上させると報告している。Bourdeau らはカルマンフィルタにより、3D マップで判定された NLOS を活用する手法を報告している[18]。

Groves らは 3D マップとシャドウマッチングや尤度推定を組み合わせた測位手法を提案している[19][20]。図 1-2 に Groves らの提案している 3DMapAided Positioning(3DMA)のフローを示す。

最初に Least-Square 3DMA Ranging として、GNSS 受信機の概算位置と 3D マップより観測衛星が LOS である確率を算出する。信号の一貫性と衛星の仰角と C/N_0 により衛星に重み付けを行う。概算位置周辺の仮想的な測定値を推定し算出し、重み付けと組み合わせ位置を算出する。次に、Likelihood-Based 3DMA Ranging として半径 40m の探索範囲を設け、範囲内に 1m 間隔で候補点を設け、各候補点において最も仰角が高い衛星を基準衛星とし、他の衛星と擬似距離の差分をとり、さらに幾何学的距離の差を引くことにより、観測誤差の推定値を算出する。観測誤差の推定値の分布より位置の候補を推定する。また、Shadow matching として 3D マップにより推定される見通しと、観測情報の C/N_0 から推定される見通しの一致度より位置の候補を推定する。次に Position-Domain Integration として、Shadow matching により算出された位置と Likelihood-Based 3DMA Ranging で算出された位置の加重平均を算出する。さらに Hypothesis-Domain Integration として Shadow matching で算出された尤度と Likelihood-Based 3DMA Ranging で算出された尤度が重なる点より位置を算出する。この二つの位置を統合し、測位解とする。この手法によりコード測位において、数カ所の実験結果により従来手法より測位精度が向上することを報告している。

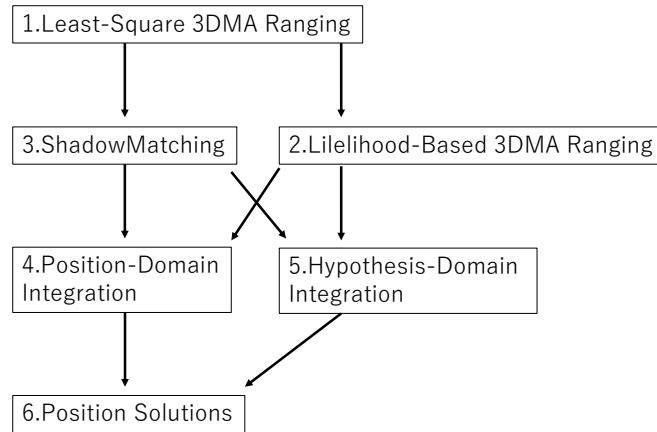


図 1-2 3DMA Positioning のフロー

以上の研究はいずれも可視衛星数の予測やコード測位の性能向上に関するもので、RTK-GNSSの精度向上の検証や、RTK-GNSSの予測まで踏み込んだものはなかった。

一方、RTK-GNSSの予測については、次の2件が発表されている。3Dマップと衛星の見通し状態を用いたRTK-GNSSの予測として、平山らは格子状に高さが同じ建物が並んだ、簡易的な3Dマップにおいて、見通し衛星数とPDOP値よりRTK-GNSSの予測を行っている[21]。この研究は、非常に簡素化された3Dマップのため、正確に実性能を推定するというよりは、あくまでも予測のみの範疇である。福森らは比較的空が開けた環境において、3D点群データを用いた天空画像と衛星の配置を重ねることにより、見通し状態を推定し、移動体のRTK-GPS測位の予測を行っており、FIX状況が推定できると報告している[22]。広域な3D点群データの取得には、多大なコストがかかり、見通し判定には目視による判断も含まれるため、適用範囲に課題がある。以上より、広域なマルチパス環境において、実環境を模した建物を考慮し、マルチGNSSを対象として、RTK-GNSSの可用性の予測を行い、実験との比較を行っているものはない。また、3Dマップを使った衛星選択において、信号品質の検証を行い、現実的な都市部におけるRTK-GNSSの精度向上に適用した研究はない。また、3Dマップを使用して、衛星とアンテナの位置を推定するために、真の位置が必要かということにフォーカスした研究はない。

1.4. 論文の構成

本論文では、2章にて研究対象となる衛星測位について述べる。各国が運用しているGNSSの概要、各衛星システムの信号、GNSSの観測量を擬似距離と搬送波について、典型的な誤差とその要因について述べる。GNSSの測位について単独測位、DGNSS、RTK-GNSSの概要、高精度測位に関する現状と精度向上に関する手法および技術課題について述べる。

3章では、本研究において重要な技術である、3D マップを用いた衛星測位シミュレーションについて、3D マップの概要と GNSS シミュレーションにおける衛星位置の推定、見通しと電波伝搬経路の推定、GNSS 信号エミュレーションに関して述べる。

4章では、3D マップを用いた衛星測位の性能予測手法と評価について、衛星の信号品質の検証手法として、二周波観測データによる品質検証および擬似距離残差による品質検証について述べる。3D マップを用いた衛星測位の性能予測手法として、3D マップによる伝搬経路種別判定と継続的見通しおよびそれを用いた RTK-GNSS の性能予測について述べる。また、3D マップを用いた衛星測位の性能予測の実験評価として、日比谷における信号品質予測と日比谷における RTK-GNSS の FIX 状況の予測の評価結果を述べる。

5章では、3D マップを用いた衛星選択による、衛星測位の性能向上手法と評価について、東京駅付近における静止点評価および東京駅付近における走行評価により検証を行った結果を述べる。6章にて、本論文の結論をまとめる。

本論文では図として、航空写真画像および 3D マップを掲載している。航空写真は国土地理院の航空写真（地理院地図 KML データ）を用いている。3D マップを航空写真に重ねて表示している場合、NTT 空間情報の GEOSPACE 3D[23] を用いている。NTT 空間情報の GEOSPACE 3D は東京海洋大学 情報通信工学研究室にて購入したライセンスのものを使用している。

第2章 衛星測位について

2.1. GNSS について

GNSS (Global Navigation Satellite System) とは人工衛星を用いた測位システムの総称である。代表的なシステムとしては米国が運用する GPS(Global Positioning System), ロシアが運用する GLONASS(GLOBAL NAVIGATION Satellite System), 欧州が運用する Galileo(Galileo Satellite Navigation System), 中国が運用する BeiDou(Beidou Satellite Navigation System)や日本が運用する準天頂衛星 QZSS(Quazi-Zenith Satellite System)が挙げられる。衛星は地球の周回軌道, 静止軌道, 準天頂軌道に位置し, 測位のための電波を送信している。

表 2-1 に各衛星システムの概要を示す。

表 2-1 GNSS の概要

衛星システム	衛星数	中心周波数	軌道半径	周回周期	信号形式
GPS (米国)	31	1575.42 MHz(L1) 1227.6 MHz(L2) 1176.45 MHz(L5)	26561km	11h58m	CDMA
GLONASS (ロシア)	24	1602 MHz(L1)*1 1246 MHz(L2)*2	25510km	11h15m	FDMA
QZS (日本)	4	1575.42 MHz(L1) 1227.6 MHz(L2) 1176.45 MHz(L5)	42000km	23h56m	CDMA
Beidou (中国)	35	1561.098 MHz(B1) 1207.14 MHz(B2) 1268.52 MHz(B3)	27905km	12h53m	CDMA
Galileo (欧州)	30	1575.42 MHz(E1) 1191.8 MHz(E5) 1207.1 MHz(E5b)	29600km	14h4m	CDMA

*1 衛星毎に0.5625 MHz 周波数がシフトする *2衛星毎に0.4375 MHz 周波数がシフトする

図 2-3 に, 測位衛星数の推移を示す。この測位衛星数は NASA(National Aeronautics and Space Administration)の CDDIS(The Crustal Dynamics Data Information System)[23] にて配信されている, 衛星軌道情報に含まれていた衛星数を衛星システム毎に算定したものである。算定対象は GPS, GLONASS, QZSS, BeiDou, Galileo, IRNSS とし, 各年 1 月 1 日の軌道情報より算定した。

衛星数

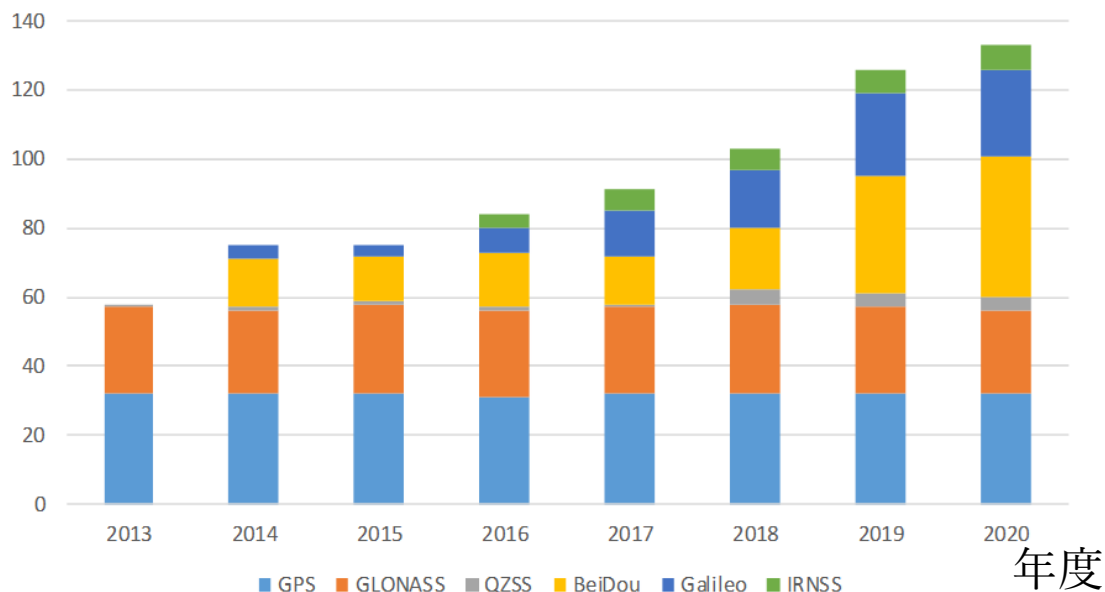


図 2-3 各衛星システムにおける衛星の配備数の変化

2013 年には GPS, GLONASS, QZSS の合計 58 機が利用可能だったが、急速に衛星システムの配備が進み、2018 年には 100 機を越え、2020 年には 133 機に達していることが分かる。

2.2. GNSS の信号

2.2.1. GPS の信号と航法メッセージ

図 2-4 に GPS の L1 C/A 信号の模式図を示す。GPS L1 C/A 信号および L2 信号は、航法データ (bpsk) と、Pseudo Range Number (PRN) コード (bpsk) を加算した変調信号である。L1 は 1575.42MHz, L2 は 1227.6MHz の搬送波にて送信している [25]。

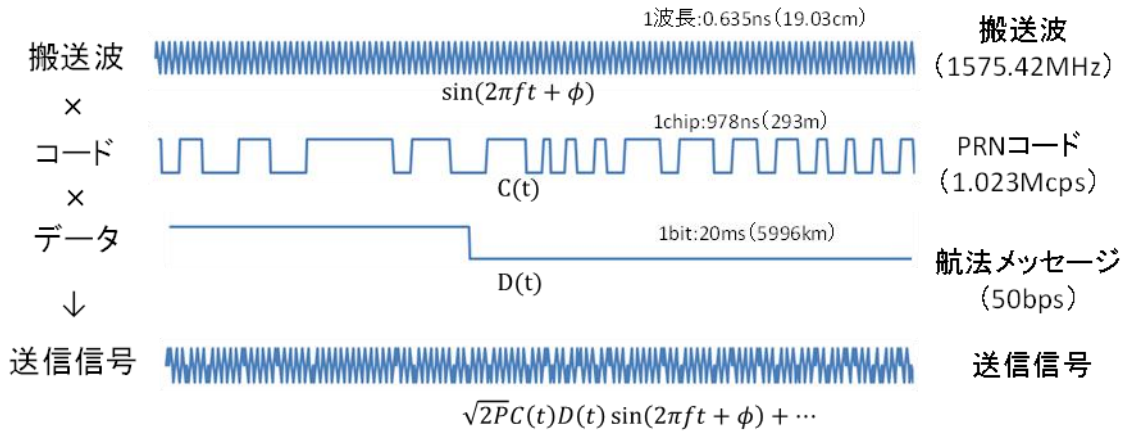


図 2-4 GPS の L1 信号の模式図

GPS 衛星からは P コード、Y コード、C/A コードの 3 種類の測距コードが送信され、民間用測距信号は C/A コードである。測距コードは異なるパターンで CDMA 変調されるため、複数の GPS 衛星が同じ周波数で信号を送信しても、受信機は識別して受信が可能である。航法メッセージ $D(t)$ は衛星の軌道情報、衛星の時計の振る舞い情報、衛星の状態メッセージ、C/A から P または Y コードへのハンドオーバー情報などが含まれている。航法メッセージは L1 および L2 チャンネルの両方で共通である。航法メッセージを図 2-5 に示す。航法メッセージ 1 フレームは 1,500 bits からなり、50 bps で 30 秒掛けて繰り返し送信される。メッセージ構造は、各サブフレームの長さが 300 ビットの 5 つのサブフレームで構成される。一つのサブフレームの受信には 6 秒かかるため、BPSK のハーフサイクルアンビギュイティを推定するためには、最大 6 秒間の時間がかかる。

サブフレームには送信衛星のクロック補正情報、送信衛星の軌道情報 (エフェメリス)、全衛星の粗い軌道情報 (アルマナック)、電離層補正情報などが含まれる。受信機は航法メッセージを受信することで、衛星の位置やクロック誤差を推定し測位を行えるようになる。

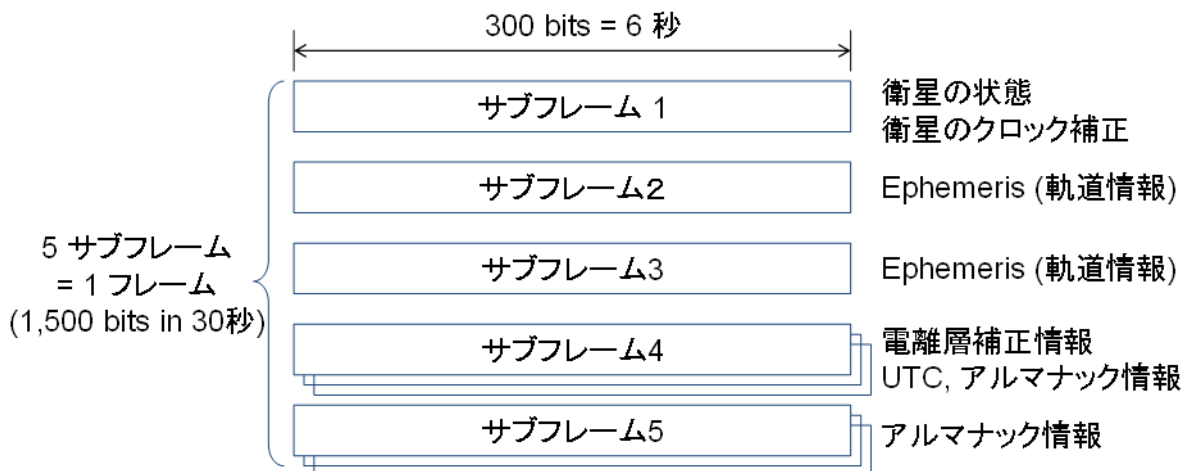


図 2-5 航法メッセージ

2.2.2. GLONASS の信号と航法メッセージ

GLONASS の L1 信号および L2 信号は，航法データ(bpsk)と，Pseudo Range Number(PRN)コード (bpsk) を加算した変調信号である．L1 は 1592.9-1610 MHz，L2 は 1237.8-1256.8MHz の搬送波にて送信している[26]．航法メッセージには，即時データとして，エフェメリスとクロック補正情報が含まれており，非即時データとして，アルマナックや地球の自転パラメータ，電離層モデルパラメータなどが含まれている．GLONASS の信号のハーフサイクルアンビギュイティを推定するためには，最大 2 秒間の時間がかかる．

2.2.3. QZSS の信号と航法メッセージ

QZSS の GPS 互換信号は周波数，メッセージフォーマットともに GPS と共通である．つまり，L1 では 1575.42MHz，L2 では 1227.6MHz を中心周波数としている[27]．QZS の信号のハーフサイクルアンビギュイティを推定するためには，最大 6 秒間の時間がかかる．

2.2.4. Galileo の信号と航法メッセージ

Galileo は E1 の周波数が 1575.420MHz，E5 の周波数が 1191.8 MHz，E5b の周波数が 1207.1 MHz である[28]．Galileo の信号のハーフサイクルアンビギュイティを推定するためには，最大 6 秒間の時間がかかる．

2.2.5. BDS の信号と航法メッセージ

BDS(BeiDou)は B1C の中心周波数は 1575.42MHz であり，B2a の中心周波数は 1176.45MHz である[29]．Beidou の信号のハーフサイクルアンビギュイティを推定するためには，最大 6 秒間の時間がかかる．

2.3. GNSS の観測量

2.3.1. 擬似距離

GNSS の送信信号のうち，擬似距離と搬送波位相の観測値が測位に用いられる．擬似距離とは衛星と受信機間距離(時間差)のコードを用いた推定値である．受信機を r ，衛星を s として，擬似距離 P_r^s の観測方程式は以下である．

$$P_r^s = \rho_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s + \delta r^s) + I_r^s + T_r^s + \epsilon_r^s \quad (1)$$

ここで

ρ_r^s : 幾何学的距離 c : 光速 δt_r : 相対論的誤差 δt^s : 衛星のクロック誤差
 δr^s : 受信機のクロック誤差 I_r^s : 電離層誤差 T_r^s : 対流圏誤差 ϵ_r : 熱雑音およびマルチパス誤差
 である。各誤差については 2.3.3 にて述べる。

2.3.2. 搬送波位相

受信機を r , 衛星を s とし、搬送波位相 Φ_r^s の観測方程式は以下である。

$$\Phi_r^s = \rho_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s + \delta r^s) - I_r^s + T_r^s + \lambda B_r^s + d_r^s + \epsilon_\phi^s \quad (2)$$

ρ_r^s : 幾何学的距離 c : 光速 δt_r : 受信機クロック誤差 δt^s : 衛星クロック誤差 δr^s : 相対論効果
 I_r^s : 電離層誤差 T_r^s : 大気圏誤差 λB_r^s : 搬送波位相バイアス d_r^s : その他誤差 ϵ_ϕ : マルチパス誤差

また搬送波位相バイアスは以下である

$$\lambda B_r^s = \phi_{r,0} - \phi_0^s + N_r^s \quad (3)$$

$\phi_{r,0}$: 受信機初期位相 ϕ_0^s : 衛星初期位相 N_r^s : 整数曖昧性

継続的に観測することで、搬送波の位相の回数の変化を計測している。

2.3.3. GNSS の観測量における誤差

L1 の 1 周波受信機の擬似距離観測量における誤差要素の典型的な大きさを、文献[30] より引用し表 2-2 典型的な誤差の大きさに示す。

表 2-2 典型的な誤差の大きさ

誤差要因	擬似距離測距誤差(RMS)	備考
衛星クロック誤差 と軌道パラメータ	3m	文献[30] より
大気圏伝搬誤差	5m	文献[30] より
電離層誤差	~10m	計算値より。 衛星の仰角および電離層の活発度に依存する。
相対論効果	~25m	文献[25] より
受信機雑音 とマルチパス誤差	オープンスカイ環境：1m マルチパス環境：~400m	オープンスカイ環境は文献[30] より。 マルチパス環境は計算値より。受信機の帯域、コリレータのチップ幅に依存する。

A) 受信機クロック誤差

受信機の時計の誤差により生成される信号が安定しないため誤差が生じる。この受信機クロック誤差は測位演算をする際に一つの未知数となる。

B) 衛星クロック誤差

測位衛星は原子時計を搭載しているが、セシウム原子時計ルビジウム原子時計それぞれ、徐々に誤差が生じていく。このクロック誤差は航法メッセージとして受信機に送信される。

C) 衛星の位置誤差

衛星の軌道情報（エフェメリス）から推定した衛星の位置は数 m の誤差を含む。この誤差は受信機から衛星に対する LOS 方向の成分のみ測位誤差として影響が生じる。この衛星の位置の誤差は相対測位においては基準局における観測情報との差分により、ほぼ除去される。

D) 相対論効果

衛星の移動速度は速いため相対論的影響が起こる。この誤差は数メートルから数十メートルでありモデル式[25] p.92 により補正し、ほぼ除去される。

E) 電離層誤差

衛星が送信した信号が受信機に届くまでに、電離層を通過する際に電子による散乱が起こり、伝搬距離が長くなる。この影響の大きさは電離層の状態、仰角および周波数に依存するため、2周波を用いた観測情報では各周波数の観測情報を線形結合することにより除去できる。また相対測位においては、基線長が短い場合、基準局における観測情報との差分により除去される。電離層の補正式は[25] p.120にて定義されており、補正係数は航法メッセージにより配信されている。図2-6に推定した擬似距離の補正量を示す。

電離層補正係数は

$$\alpha_0 = 0.1397 \times 10^{-7}, \alpha_1 = 0, \alpha_2 = -0.596 \times 10^{-7}, \alpha_3 = 0.596 \times 10^{-7},$$

$$\beta_0 = 0.1106 \times 10^6, \beta_1 = -0.3277 \times 10^5, \beta_2 = -0.2621 \times 10^6, \beta_3 = 0.1966 \times 10^6,$$

とし、全GPS衛星をまとめてプロットしている。

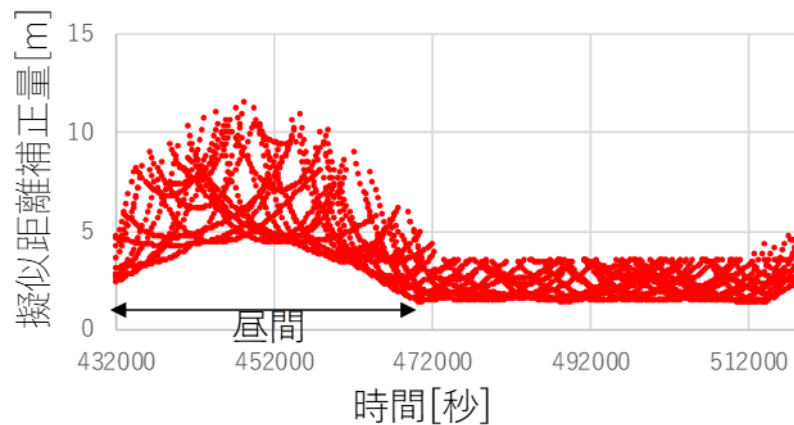


図 2-6 電離層誤差補正量

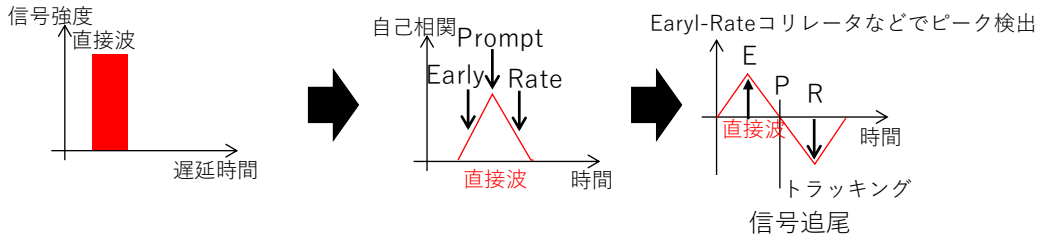
F) 大気圏誤差

衛星の信号が大気圏に突入する際に屈折が起こり伝搬距離が長くなる。ホップフィールドモデルなどの誤差を低減するためのモデル式も存在する。また相対測位においては基線長が短い場合、基準局における観測情報との差分により除去される。

G) LOS マルチパス誤差

衛星の信号が都市部の建物や山などによって、反射や屈折をすることにより伝搬距離が長くなる。衛星と受信機の間に見通しがある場合、直接波をトラッキングするが、反射や回折して届いた遅延信号も受信することにより、相関波形が崩れ誤差となる。図2-7にマルチパス環境において、衛星から直接届いた直接波と、周辺の建物で反射され遅延して届いた遅延波を受信した場合の遅延プロファイルおよび自己相関波形および信号追尾を示す。遅延波より遅延波を含んだ相関波形となり、信号追尾時に誤差となる。誤差の大きさは遅延波の位相、振幅比と遅延距離およびコリレータ帯域とチップ幅に依存する。

マルチパス波のない場合



マルチパス波のある場合

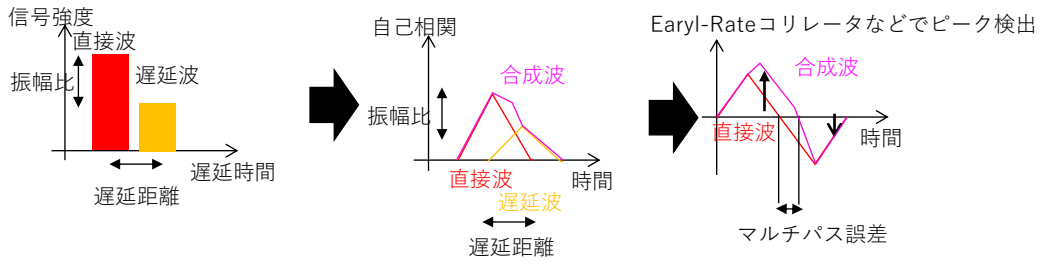


図 2-7 マルチパス波による誤差の概要

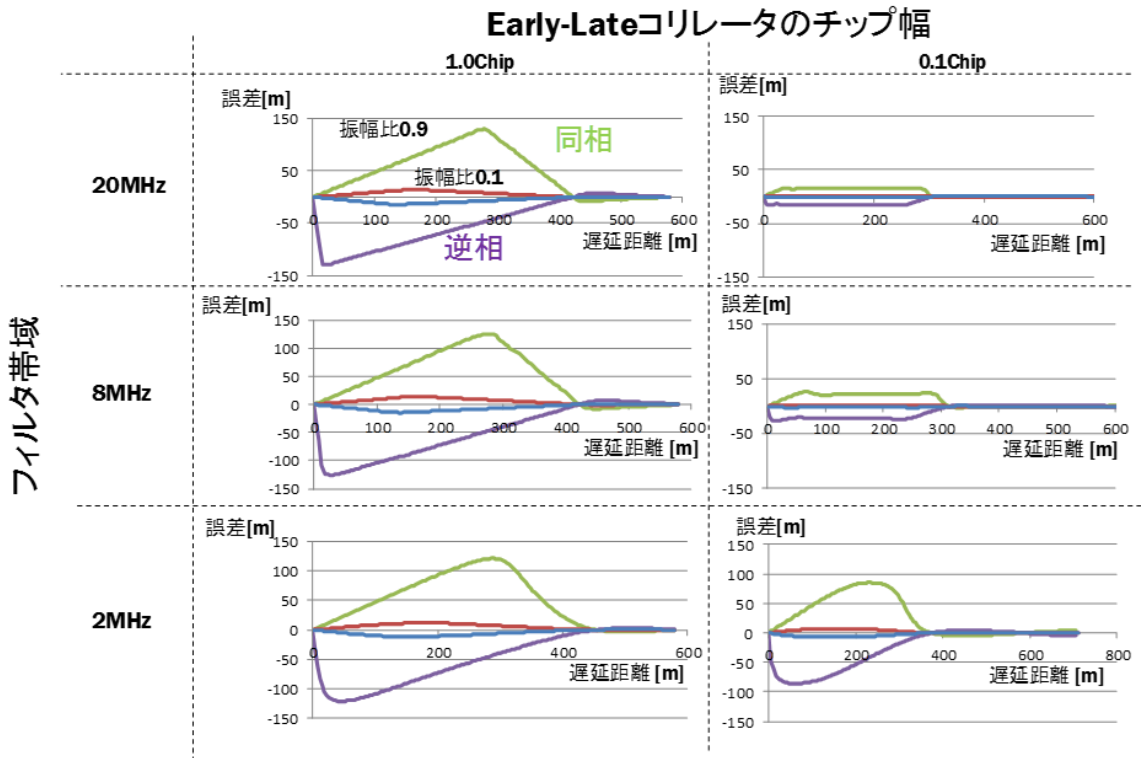


図 2-8 擬似距離に含まれるマルチパス誤差

図 2-8 に Early Rate コリレータのマルチパス誤差を示す。基準波に対し 1つの遅延波が届いた場合の誤差を示している。フィルタ帯域を 20MHz, 8MHz, 2MHz とし、コリレータのチップ幅が 1Chip および 0.1Chip のものを示した。図の横軸はトラッキングしているパスに対する遅延距離を示している。振幅比を 0.9 および 0.1 の同相と逆相の誤差を示している。コリレータのチップ

幅と遅延距離と振幅比により、誤差は大きくなる。また遅延波の位相により誤差の正と負は反転する。

H) NLOS マルチパス誤差

衛星と受信機の間に見通しが無く、強い反射波・回折波が受信機に届いている場合、受信機はそれらの遅延波をトラッキングする。そのため直接波が届いている場合と比べ伝搬距離が伸びた分がオフセットとして誤差となる。NLOS マルチパス誤差は必ず正であり、擬似距離が伸びる方向に影響する。図 2-9 に示すように、衛星の信号の直接波が遮蔽されており、直接届く場合の距離が L1、建物を反射して届いた距離が L2 の場合、NLOS マルチパス誤差 ϵ_{NLOS} は

$$\epsilon_{NLOS} = L2 - L1$$

となる。都市部では NLOS マルチパス誤差は 100m を越える値となり、影響が大きいため RTK-GNSS においては除去することが望ましい。

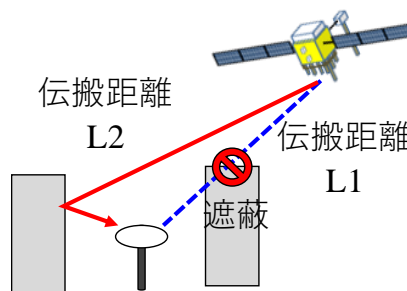


図 2-9 擬似距離に含まれる NLOS マルチパス誤差

2.3.4. GNSS における測位

GNSS による測位には擬似距離、搬送波位相などの衛星と受信機間の測距情報が使用される。

2.3.4.1. 単独測位

単独測位では観測情報は擬似距離を用いる。

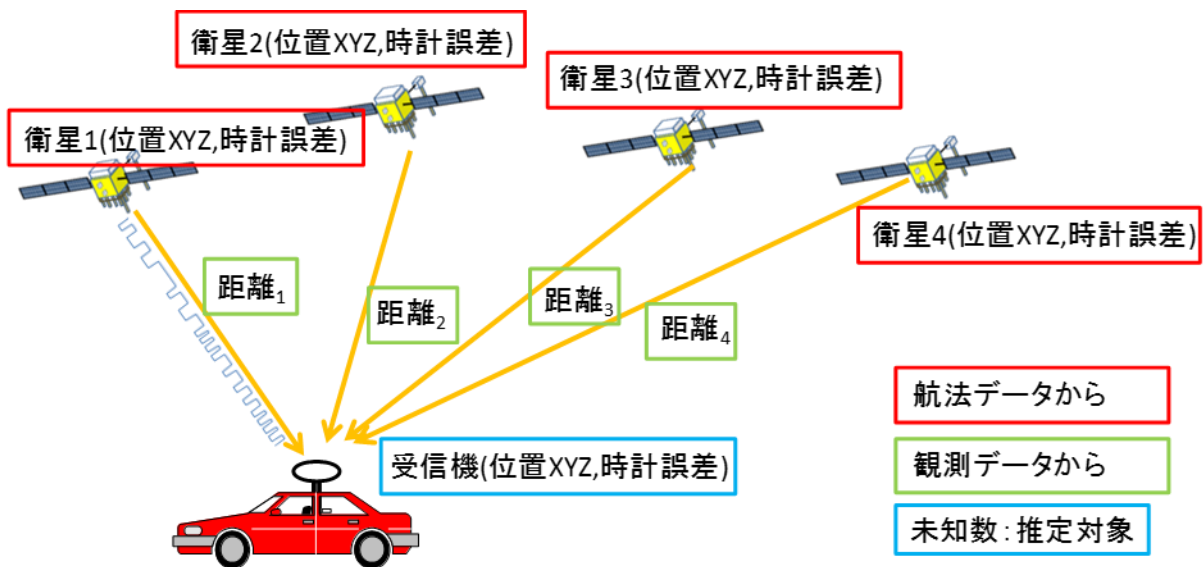


図 2-10 単独測位の概要

受信機を r ，衛星 s として擬似距離観測量は

$$P_r^s = \rho_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s + \delta r^s) + I_r^s + T_r^s + \epsilon_r^s \quad (4)$$

である。衛星の位置とクロック誤差は航法メッセージより推定され、大気圏誤差、電離層誤差、相対論的誤差はモデル式により補正される。この観測値を連立し、受信機の3次元位置とクロック誤差を推定する。未知数は4つとなるため、少なくとも4機の衛星の観測情報が必要である。4機を越える衛星の観測情報が利用出来る場合、最小二乗法などにより受信機の位置を推定する。複数のGNSSを併用する場合、衛星システム間の時計の差が未知数となるため、衛星システム数に応じて必要な衛星数が増える。

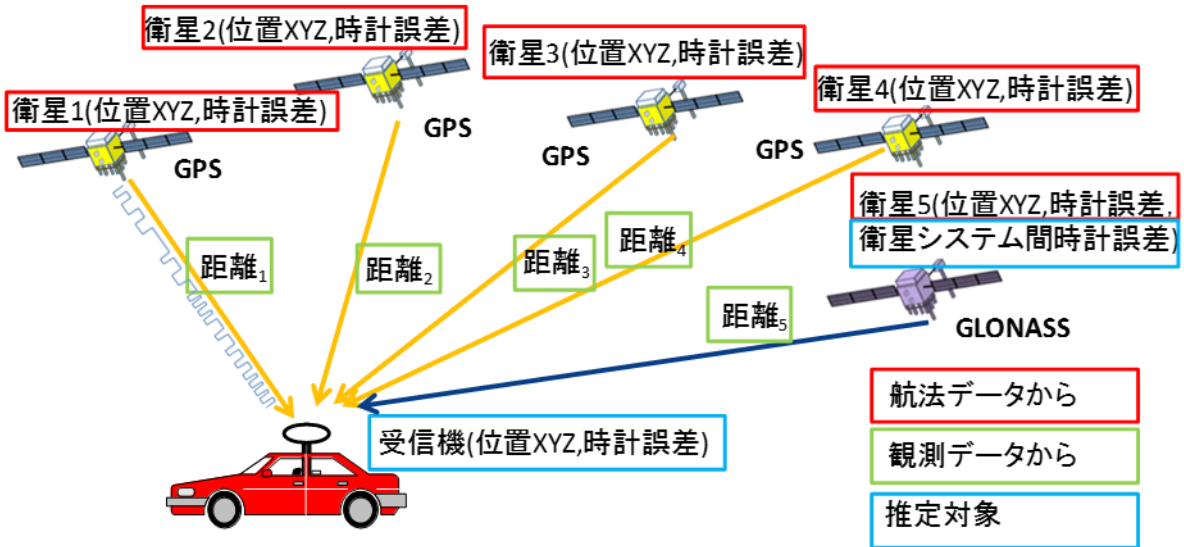


図 2-11 単独測位 (マルチ GNSS) の概要

2.3.4.2. 相対測位 (DGNSS)

相対測位は既知点に基準局を設置し、移動局は基準局の観測情報を受け取り測位に利用する。

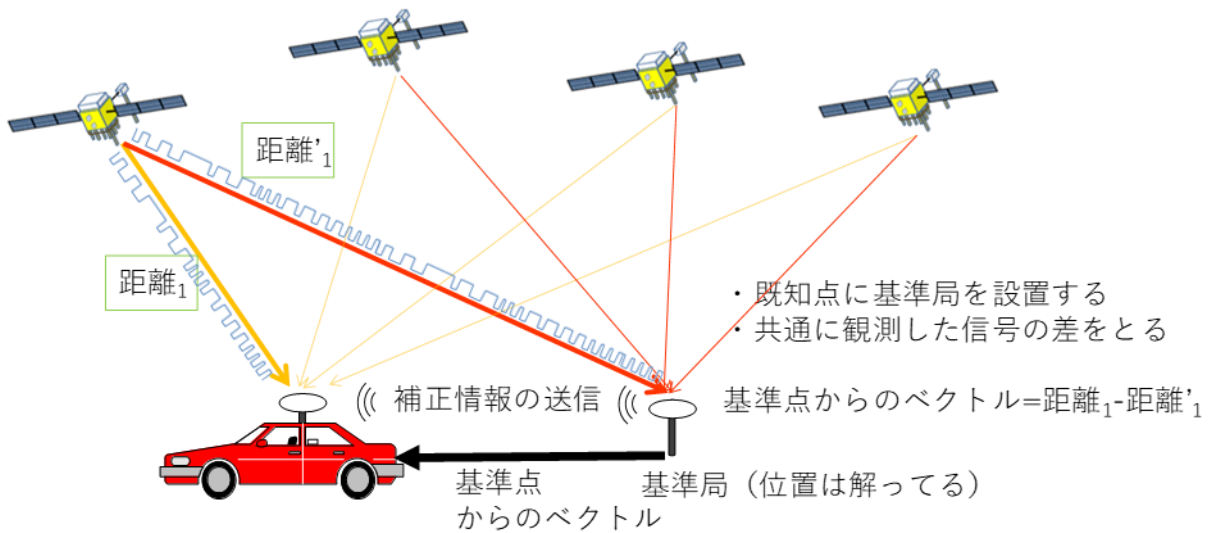


図 2-12 相対測位 (DGNSS) の概要

移動局受信機を rr 、基準局受信機を rb として、衛星 s の擬似距離観測量は

$$P_{rr}^s = \rho_{rr}^s + c(\delta t_{rr} - \delta t^s + \delta r^s) + I_{rr}^s + T_{rr}^s + \epsilon_{rr}^s \quad (5)$$

$$P_{rb}^s = \rho_{rb}^s + c(\delta t_{rb} - \delta t^s + \delta r^s) + I_{rb}^s + T_{rb}^s + \epsilon_{rb}^s \quad (6)$$

である。(5)と(6)の差分を取り

$$P_{rr}^s - P_{rb}^s = \rho_{rr}^s - \rho_{rb}^s + c(\delta t_{rr} - \delta t_{rb}) + I_{rr}^s - I_{rb}^s + T_{rr}^s - T_{rb}^s + \epsilon_{rr}^s - \epsilon_{rb}^s \quad (7)$$

となる。ここで、移動局と基準局の距離が近い場合

$$I_{rr}^s \cong I_{rb}^s$$

$$T_{rr}^s \cong T_{rb}^s$$

であり、基準局を屋上など見通しの良い位置に設置した場合

$$\epsilon_{rb}^s \cong 0$$

となるため、共通に観測された誤差が相殺され、差分の観測量は以下となる。

$$P_{rr}^s - P_{rb}^s = \rho_{rr}^s - \rho_{rb}^s + c(\delta t_{rr} - \delta t_{rb}) + \epsilon_{rr}^s \quad (8)$$

この差分の観測量より最小二乗法などを用いて、基準局からの相対位置を算出する。

2.3.4.3. 相対測位 (RTK-GNSS)

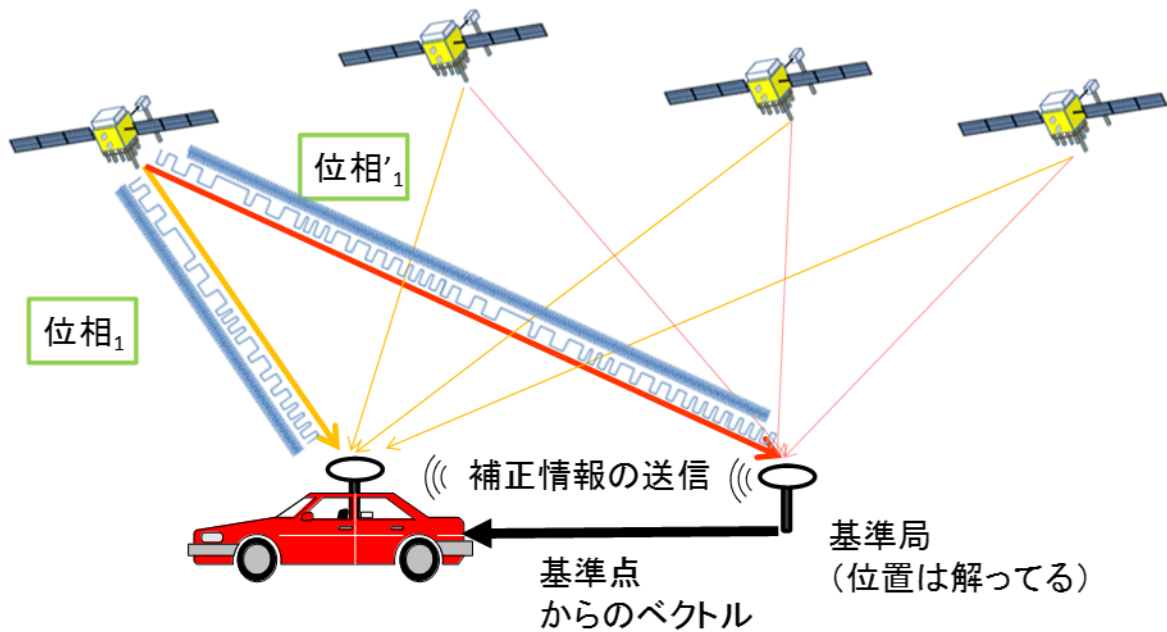


図 2-13 相対測位 (RTK-GNSS) の概要

RTK-GNSS では DGNS と同様に、既知点に基準局を設置し、移動局は基準局の観測情報を受け取り測位に利用する。

移動局受信機を rr, 基準局受信機を rb として, 衛星 s1 と衛星 s2 の擬似距離観測量は

$$P_{rr}^{s1} = \rho_{rr}^{s1} + c(\delta t_{rr} - \delta t^{s1} + \delta r^{s1}) + I_{rr}^{s1} + T_{rr}^{s1} + \epsilon_{rr}^{s1} \quad (9)$$

$$P_{rb}^{s1} = \rho_{rb}^{s1} + c(\delta t_{rb} - \delta t^{s1} + \delta r^{s1}) + I_{rb}^{s1} + T_{rb}^{s1} + \epsilon_{rb}^{s1} \quad (10)$$

$$P_{rr}^{s2} = \rho_{rr}^{s2} + c(\delta t_{rr} - \delta t^{s2} + \delta r^{s2}) + I_{rr}^{s2} + T_{rr}^{s2} + \epsilon_{rr}^{s2} \quad (11)$$

$$P_{rb}^{s2} = \rho_{rb}^{s2} + c(\delta t_{rb} - \delta t^{s2} + \delta r^{s2}) + I_{rb}^{s2} + T_{rb}^{s2} + \epsilon_{rb}^{s2} \quad (12)$$

であり, 搬送波位相観測量は

$$\Phi_{rr}^{s1} = \rho_{rr}^{s1} + c(\delta t_{rr} - \delta t^{s1} + \delta r^{s1}) - I_{rr}^{s1} + T_{rr}^{s1} + \lambda B_{rr}^{s1} + d_{rr}^{s1} + \epsilon \phi_{rr}^{s1} \quad (13)$$

$$\Phi_{rb}^{s1} = \rho_{rb}^{s1} + c(\delta t_{rb} - \delta t^{s1} + \delta r^{s1}) - I_{rb}^{s1} + T_{rb}^{s1} + \lambda B_{rb}^{s1} + d_{rb}^{s1} + \epsilon \phi_{rb}^{s1} \quad (14)$$

$$\Phi_{rr}^{s2} = \rho_{rr}^{s2} + c(\delta t_{rr} - \delta t^{s2} + \delta r^{s2}) - I_{rr}^{s2} + T_{rr}^{s2} + \lambda B_{rr}^{s2} + d_{rr}^{s2} + \epsilon \phi_{rr}^{s2} \quad (15)$$

$$\Phi_{rb}^{s2} = \rho_{rb}^{s2} + c(\delta t_{rb} - \delta t^{s2} + \delta r^{s2}) - I_{rb}^{s2} + T_{rb}^{s2} + \lambda B_{rb}^{s2} + d_{rb}^{s2} + \epsilon \phi_{rb}^{s2} \quad (16)$$

である. 以降, 移動局受信機 rr, 基準局受信機 rb, 衛星 s1, 衛星 s2 の観測情報の二重差分を以下のように示す.

$$P_{rrrb}^{s1s2} = P_{rr}^{s1} - P_{rb}^{s1} - (P_{rr}^{s2} - P_{rb}^{s2}) \quad (17)$$

(9), (10), (11), (12)の二重差分を取ること, 共通に観測された誤差が相殺されるため擬似距離の差分の観測量は以下となる.

$$P_{rrrb}^{s1s2} = \rho_{rrrb}^{s1s2} + \epsilon_{rr}^{s1s2} \quad (18)$$

同様に(13), (14), (15), (16)の二重差分を取ること, 共通に観測された誤差が相殺されるため搬送波位相の差分の観測量は以下となる.

$$\Phi_{rrrb}^{s1s2} = \rho_{rrrb}^{s1s2} + N_{rrrb}^{s1s2} + d_{rrrb}^{s1s2} + \epsilon \phi_{rrrb}^{s1s2} \quad (19)$$

ここで、擬似距離観測値の二重差分(18)と搬送波位相二重差分(19)の差をとり

$$P_{rrrb}^{s1s2} - \Phi_{rrrb}^{s1s2} = \epsilon_{rr}^{s1s2} - N_{rrrb}^{s1s2} + d_{rrrb}^{s1s2} + \epsilon\phi_{rrrb}^{s1s2} \quad (20)$$

を得る。左辺は観測値より算出出来る値であり、右辺は整数アンビギュイティに誤差が加わった値である。このような擬似距離の二重差と搬送波位相の二重差を多くの衛星のペアで作り、最小二乗法により確からしい整数アンビギュイティを推定する。実数値で整数アンビギュイティが算出された状態が RTK-GNSS における、FLOAT 解であり、整数値で整数アンビギュイティが算出された状態が FIX 解である。FIX 解を算出するための解の探索範囲を狭める手法として、ラムダ法などがよく使われる。また FIX 解の検定として Ratio テストなどが行われるが、RTK-GNSS の性能は実装に依存する。本研究ではオープンソースで提供されており、広く使われている RTKLIB[31] を RTK-GNSS に使用する。

2.4. 高精度測位に関する現状

RTK-GNSS を始めとする高精度測位は比較的空が開けたエリアにおいて、測量、ドローン、農業や土木などに利用されている。一方、都市部においては建物による信号の反射や遮蔽などの影響により、搬送波位相を継続的に観測することが難しく、都市部の建設現場や自動走行への適用は実用化されていない。

図 2-14 に都市部における RTK-GNSS 測位結果を示す。表 2-3 に測定条件を示す。2020 年 5 月 30 日、2020 年 6 月 1 日に東京駅周辺の建物が高いエリアにおいて車両を走行させ、RTK-GNSS を実施した。受信機には u-blox F9P[31] を用いた。u-blox F9P は上空が開けた環境においては、ほぼ全ての時刻において FIX 解が得られる。測位手法には RTKLIB を用いた。仰角に応じた信号対雑音比 (SNR) マスクを 31~40dB-Hz、仰角 5 度以下では 31dB、15 度では 33dB、25 度では 34dB、35 度では 37dB、45 度では 39dB、55 度以上では 40dB の範囲で使用した。

表 2-3 測定環境

項目	値
衛星システム	GPS, GLONASS, BDS, QZSS, Galileo L1/L2
評価時間	2020 年 5 月 30 日 1:29:53~1:52:31 2020 年 6 月 1 日 8:09:59~8:34:14
基準局	東京海洋大学(基線長 2.6km)
測位手法	RTLIB 2.4.3b33 L1/L2 kinematic continuous 仰角に応じた SNR マスク
GNSS 受信機	u-blox ZED-F9P 1Hz(5 月 30 日) u-blox ZED-F9P 5Hz(6 月 1 日)

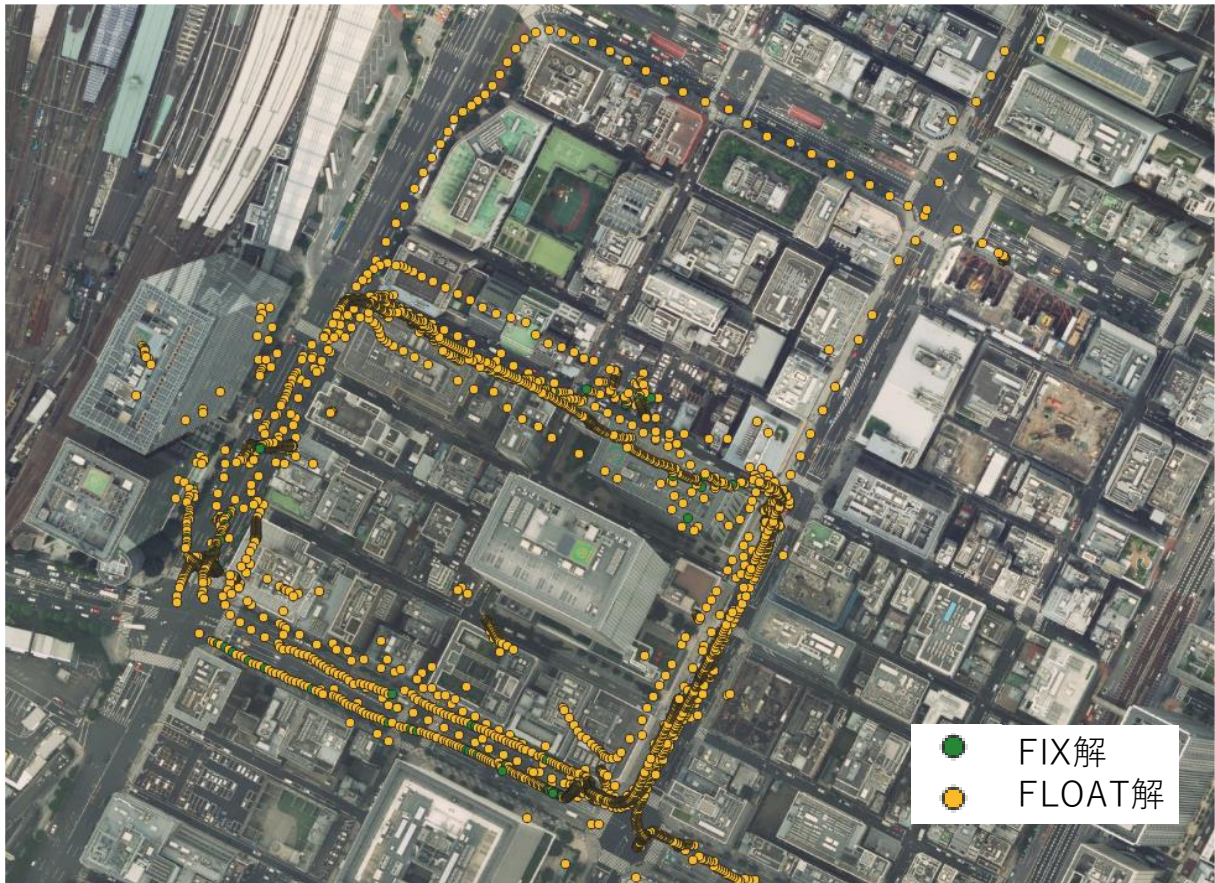


図 2-14 東京駅周辺における RTK-GNSS

RTK-GNSS の測位解として、5/30 は 0%，6/1 は 2%の FIX 解が得られたが、FIX 解は全てミス FIX 解であった。水平プロットより非常に誤差が大きい結果であることが分かる。西側に高い建物があり、西側の建物による反射波である NLOS 信号を多く受信すると想定される環境では、50m ほどの誤差が生じている。本測位では SNR マスクを適用しているが、SNR マスクでは NLOS 衛星が完全には取り除けていないことがわかる。本研究ではこの様に、NLOS 信号が多く RTK-GNSS が困難なエリアを対象に評価を行う。

2.5. 高精度測位の精度向上手法に関する手法

A) カイ二乗検定による衛星選択

熱雑音や受信機のノイズなどの誤差は正規分布になると考えられる。そのため、測位演算により収束した残差の量は正規分布になると推定される。残差が正規分布にならない解は大きな誤差を含んだ解と推定出来るため、排除することで正しくない測位解を除去出来る。RTKLIB[32] に実装されている。

B) 仰角マスクを用いた手法

大気圏誤差，電離層誤差，マルチパス誤差は低仰角の衛星ほど大きい傾向がある．そのため，仰角の低い衛星を取り除くことで，潜在的な誤差要因を取り除く．

C) 信号強度マスクを用いた手法

オープンスカイ環境であれば，衛星の送信電力，送信アンテナ利得，伝搬距離に応じた自由空間減衰，受信機のアンテナ利得およびアンプにより，受信機が受信する信号強度は決まる．建物や構造物などの遮蔽がある環境では，受信機が観測する信号強度は下がる．その信号強度を下回る衛星を排除することで，潜在的な誤差要因を取り除く．衛星の送信電力および仰角による伝搬距離に応じて，あるべき信号強度は異なるため，RTKLIB では仰角に応じて，信号強度マスクを設定できる．

D) 3D マップを用いた手法

受信機の概算位置と周辺の建物の三次元形状が格納された 3D マップを用いて，衛星の LOS, NLOS や電波の伝搬経路を推定する．3D マップを用いることで，本研究の対象となる都市部において，NLOS 衛星を推定し除外することが可能である．本研究では 3D マップの活用を検討する．

2.6. 高精度測位の精度向上手法に関する技術課題

都市部の建物が多いマルチパス環境においては，カイ二乗検定を実施すると測位解が大幅に減り位置が分からなくなる．仰角マスクは有効であるが，高い建物が多いエリアにおいては建物により遮蔽される衛星を全て除外することは難しい．図 2-15 に日比谷における交差点にて撮影した建物を示す．方角により，建物の遮蔽となる衛星の仰角は異なり，一様な仰角マスクにより衛星の除外を行うことは難しいことが分かる．図 2-16 に東京駅周辺における建物の写真を示す．建物全面がガラス張りとなっており，GNSS 衛星の電波を反射させる建物も多い．このような建物により鏡面反射をした信号は，強い信号強度で受信機に届くため，強度マスクにより除外することが難しい．これらは 3D マップを用いることで推定することが可能である．推定方法は第 3 章にて述べる．



図 2-15 日比谷周辺における建物



図 2-16 東京駅周辺における建物

2.7. まとめ

本章では各国が運用する測位衛星システム、観測量、誤差要因とその特徴、測位手法および高精度測位とその課題について述べた。

第3章 3D マップを用いた GNSS シミュレーション

3.1. 概要

本章では3D マップ、3D マップを用いた GNSS シミュレーション、3D マップを用いた GNSS 信号エミュレーションについて述べる。第4章以降の評価で利用しなかった手法についても、検討を行った手法については述べる。

3.2. 3D マップ

3D マップは航空写真、衛星写真やレーザー測量により作成される。日本国内の3D マップは市販されており、建物の形状および高さの精度により価格が異なる。建物の形状情報は国土地理院の基盤地図情報の基本項目として無償で入手することが出来る[33]。しかしながら、建物の高さの情報が含まれないため衛星測位のシミュレーションに使用するためには別途高さを与える必要がある。日本全国の建物の高さの情報は、JAXA 地球観測センターが30m メッシュの解像度の Digital Surface Model(DSM)を配布している[34]。この DSM の高さ情報を基盤地図情報の建物形状と組み合わせることにより、日本全国の3D マップを無償で作成することが出来る。しかし、メッシュが粗く、建物の高さが30m メッシュの範囲に従い平均化されるため誤差が大きく、有効性の検討が必要である。

図 3-17 に市販されている3D マップの種類を示す。図 3-17 の(a)はゼンリンの Zmap AreaII[35]などの建物の高さとして階高情報が格納されたデータを元に作成されたもの相当の精度である。市販されている3D マップのうち最も安価であるが、建物の高さは、一階あたりの高さと階高の積により設定する必要があり、一階あたりの高さは経験的に決められる。天井の高い建物や、高層建物など階数が多い建物では、高さ方向の誤差が大きくなる。そのため衛星測位のシミュレーションでは誤差となりやすい。

図 3-17 の(b)は航空写真や衛星写真より作成された建物データである。建物の高さの精度は標準偏差が±1.5m程度に収まる。NTTデータのAW3D[36]やNTT空間情報のGEOSPACE 3D[23]が該当する。こういった3D マップは建物の高さ方向の形状が一様であり、建物において最も高い地点まで全体が引き上げられた形状となる。この3D マップは複雑な形状の建物が少ないエリアにおいては、形状の誤差が少ないが、屋上に塔がある場合などに建物の高さが塔を含めた高さとなり誤差となる傾向がある。図 3-17 の(c)建物の高さが正確であり、高さ方向の形状も実際の建物に合わせて作成されたデータである。3D レーザースキャナーで測定し作成したモデルや、(b)のモデルを別途修正したものが販売されている。なお、図 3-17(b)は GEOSPACE 3D であり、(a)および(c)は GEOSPACE 3D を編集して作成したイメージ図である。

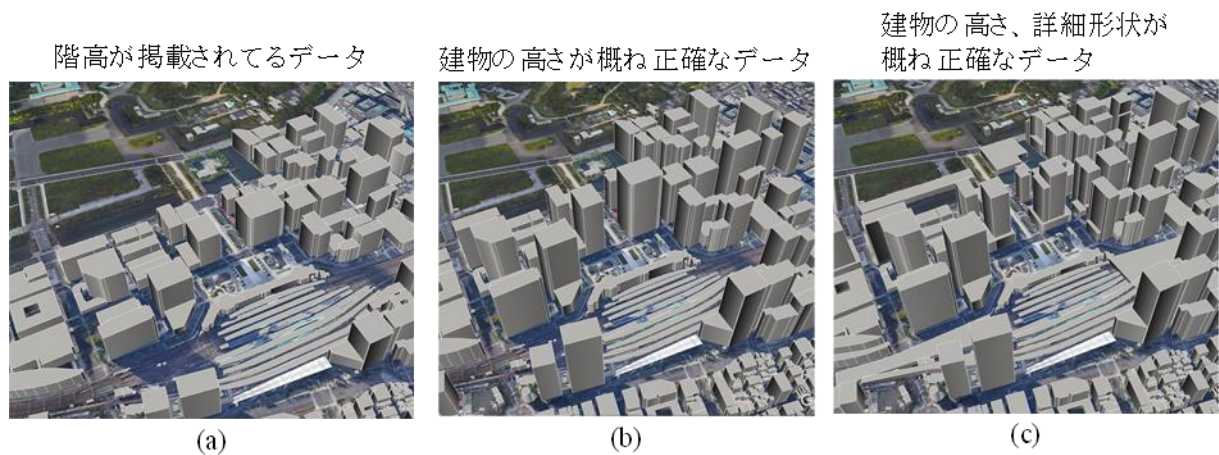


図 3-17 3D マップの種類
(航空写真出典：国土地理院地図 地図タイル)

本研究では図 3-17 (b)に相当する 3D マップを図 3-18 の様に修正し使用する。NTT 空間情報の GEOSPACE 3D およびそれを編集した建物モデルを使用する。鉄道や道路の陸橋は含まれていないが、航空写真を参照して可能な範囲で作成する。また測定時に周辺の建物を現地調査で確認し、工事が行われ取り壊されている建物などについては可能な範囲で現地に合わせて修正した。

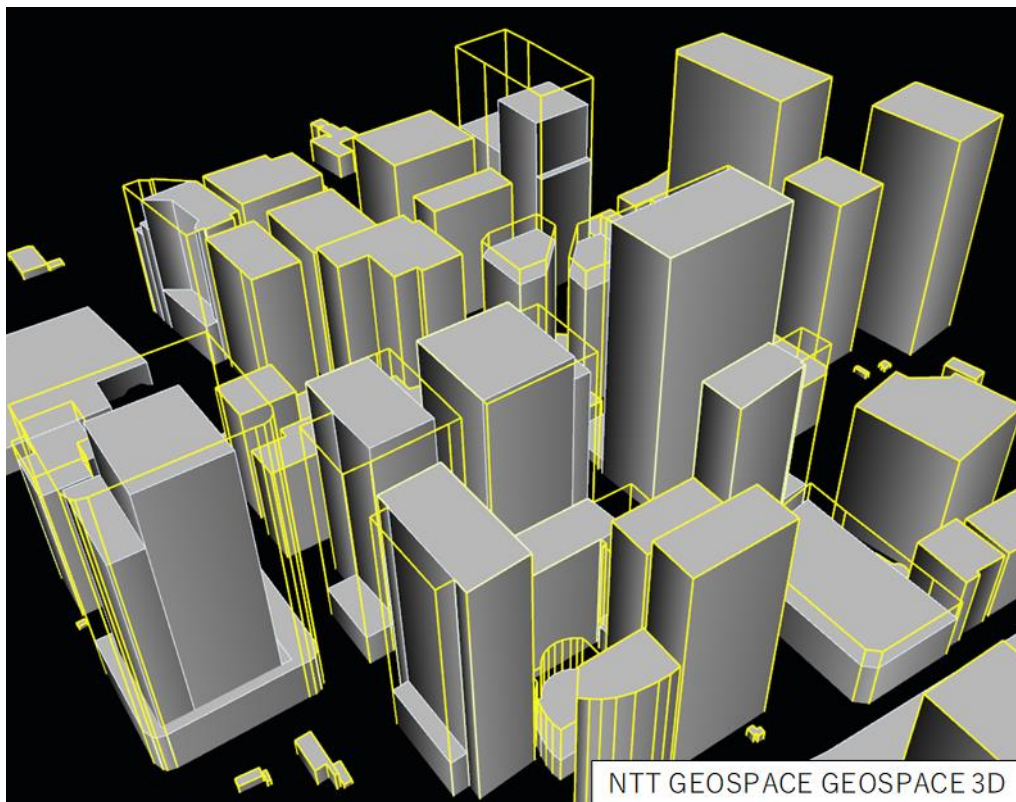


図 3-18 3D マップの形状修正

図 3-17 は東京駅の西側付近の抜粋であり、黄色のワイヤーフレーム形状が図 3-17 (b)に該当する調達時の 3D マップであり、グレーのポリゴンが図 3-17 (c)に該当する形状を編集した 3D マ

ップである。

3.3. GNSS シミュレーション

GNSS シミュレーションでは評価対象の位置・日時における、衛星の位置を算出し、3D マップを用いて衛星と受信機間の伝搬路を推定することで、観測衛星の信号品質を推定する。受信信号強度が高いと推定される衛星や見通しがある衛星は信号品質が良いため、測位に利用可能と推定する。受信信号強度が低く、見通しがない衛星は信号品質が悪く測位に利用出来ない。衛星選択では除外すべき対象である。第 4 章以降の評価では、3.3.1 で述べるエフェメリスを用いた衛星位置の推定、3.3.2.1 で述べるレイトレーシング法による伝搬路の推定を用いた。見通し判定においてもレイトレーシング法による伝搬路の推定時の LOS 判定を用いた。

3.3.1. 衛星位置の推定

本研究における GNSS シミュレーションでは、GNSS 衛星の位置の算出には、Receiver INdependent EXchange(RINEX)形式[37] で配布されている各衛星の軌道情報(エフェメリス)を用いる。軌道情報は NASA の CDDIS などが、インターネット上で公開している。エフェメリスの有効期限は 2 時間であり、より新しい軌道情報を使用して衛星の位置を算出することが望ましい。有効期限内の軌道情報よりケプラー方程式を解き、衛星の位置を算出した場合、誤差 2~10m で衛星の位置が推定される。3.4 および第 4 章の評価においては、該当する日時のエフェメリスを用いてが過去の評価を行った。

未来の日時の予測を行った場合を想定し、表 3-4 に有効期限外のエフェメリスを用いて、将来の GPS 衛星の位置を算出した場合の衛星位置の推定精度を示す[38]。2018 年 1 月 4 日のエフェメリスを用い、有効期限内のエフェメリスで推定した衛星の位置との差異を集計した。60 日後において、仰角方向の推定誤差は 0.2 度、方位角の推定精度は 0.3 度であり、この誤差は 3D マップの高さ方向の精度と比べ小さいため、エフェメリスを用いて、3D マップを用いた衛星の見通しや電波伝搬の将来の予測は可能である。

表 3-4 エフェメリスを用いた場合の位置推定誤差

推定時期	推定精度	
	仰角 [deg]	方位角 [deg]
1 日後	0.001	0.0003
15 日後	0.05	0.07
30 日後	0.1	0.2
60 日後	0.2	0.3

3.3.2. 見通しと電波伝搬経路の推定

3.3.2.1. レイトレーシング法

レイトレーシング法は3次元の Computer Graphics において一般的に使われる手法であり，都市部における電波の伝搬推定にも利用される[40]．図 3-19 に示す様に，衛星を電波の送信点，受信アンテナを電波の受信点として，周辺の建物による反射や回折の影響をレイトレーシング法により推定する．電波の伝搬パスの検索手法にはイメージング法を用い，送信点・受信点間のパスを，すべての建物の面において取りうる正規反射，全ての建物のエッジにおける全ての角度への回折を考慮して検索する．電波の伝搬パスに沿って伝搬する際の，距離による減衰は自由空間減衰モデル[41]，建物の反射・回折による減衰はUTD(Uniform Theory of Diffraction)[42]により算出し，送信点から受信点までの区間における損失は，伝搬による減衰，反射，回折による減衰を加算したものと推定する．推定された全てのパスに対して，電力，振幅，位相，遅延を求め，合算することで，SNRを推定する．

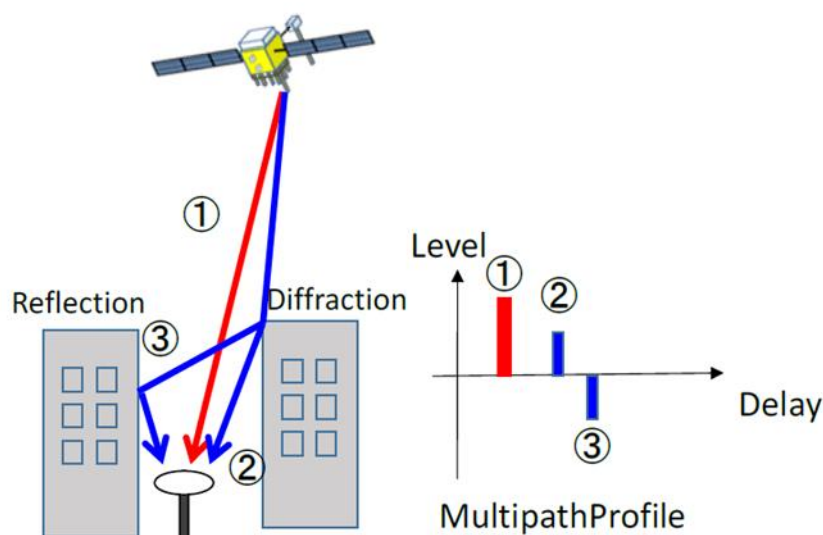


図 3-19 レイトレーシング法による電波伝搬推定

ここで，自由空間損失 L は距離 d [m]，周波数 f [Hz]，光速 c [m/s]として

$$L[\text{dB}] = 20\log d + 20\log f + 20\log\left(\frac{4\pi}{c}\right)$$

である．衛星の信号送信電力は文献[43]を参考として 30W とし，仰角に応じた送信電力を模擬するため，仰角依存のアンテナ利得を加えた．送信信号は右旋円偏波とし，シミュレーションでは建物の壁面等での反射による偏波面の回転を考慮した．シミュレーション上の受信機のアンテナは右旋円偏波を受信する想定し作成した．図 3-20 に本研究で使用した，シミュレーション上の受信機のアンテナパターンを示す．一般的な GNSS アンテナと同様に天頂方向のアンテナ利得を大きく，仰角が下がるに従い利得を小さくした．水平偏波の θ 成分と ϕ 成分の天頂角における正規化利得を示す．

θ 成分の位相は 0[deg] , ϕ 成分の位相は-90[deg]である. アンテナ最大利得は 5[dBi], 方位角方向のアンテナパターンは一定とした. 詳細なアンテナ利得値は付録[A]に示す.

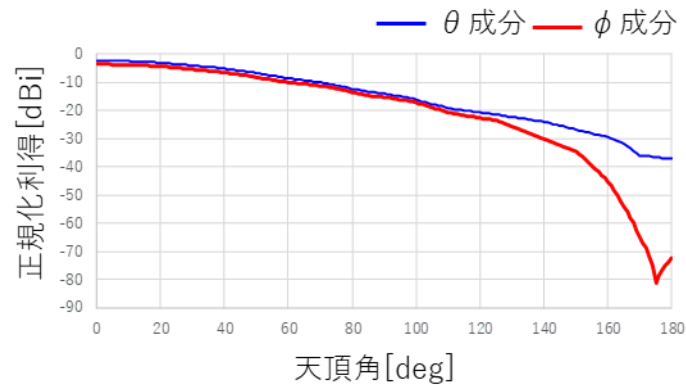


図 3-20 受信機のアンテナ利得

なお, 本研究において実施したシミュレーションでは天候は考慮していない. シミュレータでは雪のポリゴンを作成し適切な透過率と伝搬遅延を考慮することにより, 影響を推定することは可能である. 文献[44] では積雪をモデル化し伝搬遅延を考慮したモデル化を行うべきであると報告されている.

3.3.2.2. 見通し判定の高速化手法の検討

3D マップを用いたレイトレーシング法は計算対象となる建物の面線数に大きく依存するため, 計算対象エリアが広く, 小規模な建物が多い地域や, 複雑な形状の建設物が多い地域では計算時間が多く掛かる. 本節では見通し判定の高速化の検討について述べる. 見通しは受信機より目視で見える範囲の建物のみが影響する. そのため 3D マップ上において受信機の位置から周辺の全天球画像を作成し, 建物が遮蔽する方位角毎の仰角を数値データとして保持し, 衛星配置と比較することで見通し判定が行える. 衛星の位置の計算負荷は低いため, 建物遮蔽角のデータを事前に用意し, 衛星配置から見通しを推定することで, 高速に見通しシミュレーションが実現される [45]. 図 3-21 に示す様に, 任意の地点の上空の建物遮蔽状況画像を生成し, 45 度の方位角(①~⑧)毎に仰角方向の建物遮蔽角度を求める. 画像において青い領域が空であり, 灰色の領域が建物遮蔽角で遮蔽される範囲である.

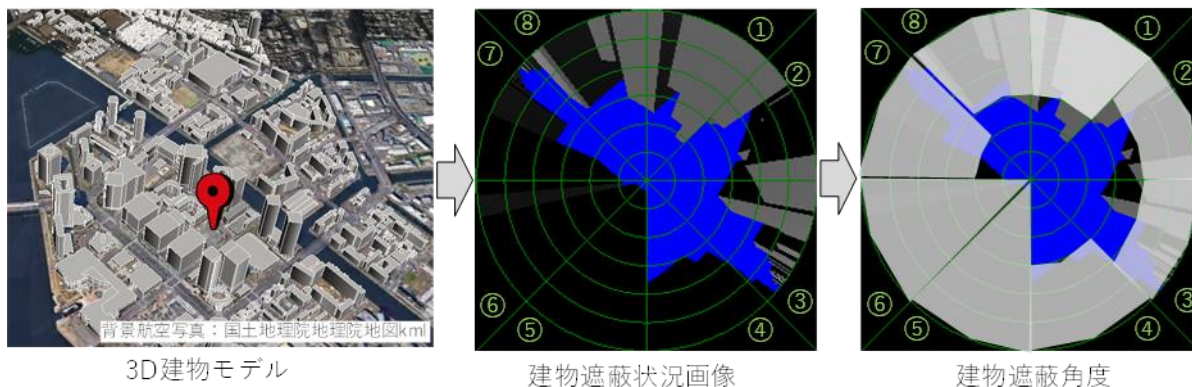


図 3-21 作成するマスク画像のイメージ

図 3-22 に評価エリアと 3D マップを示す。幅約 220m，奥行き約 370m の 1m 間隔で建物と重ならない地点 71800 点を建物遮蔽評価地点とした。全地点において建物遮蔽角度を算出し，建物遮蔽評価地点の座標をキーとした建物遮蔽角データを保持した。建物遮蔽角データの作成に掛かった計算時間は約 1 時間であり計算時間は建物の建設状況の変化の頻度とくらべ十分に短い。見通し判定速度の評価のため，表 3-5 に示すシナリオを表 3-6 に示す計算機で実行し処理時間を評価した。



図 3-22 評価エリアと 3D マップ
(航空写真出典：国土地理院地図 地図タイル)

表 3-5 シナリオの設定

項目	値
----	---

衛星システム	GPS, GLONASS, BEIDOU, QZS
衛星配置	2018年07月10日08:30:00 2018年07月10日09:30:00
評価地点数	71800点

表 3-6 計算機の諸元

項目	値
CPU	Core i7 3770K
Memory	DDR3 12GB
OS	Windows 7 64bit

見通し判定を行う衛星配置は2種類とし、評価地点は建物遮蔽評価地点と同じ位置としたが、評価地点毎に計算済みの全建物遮蔽評価地点より最近傍の地点の建物遮蔽角度データを取得する。衛星の方位角より該当する建物遮蔽角を参照し衛星の仰角が上回ればLOSとし、下回ればNLOSとした。71800点に対し2つの衛星配置の見通し判定を行い計算時間は1431秒であった。1地点辺りの処理時間は平均約10msecであり十分速い結果となった。

3.4. GNSS の信号エミュレーション

3.4.1. 概要

市販の GNSS 受信機はアルゴリズムが公開されていないため、特定の受信機が特定の場所において発揮する性能を予測することは難しい。3D マップとソフトウェア無線機による信号生成を組み合わせることにより、マルチパス信号を模擬し市販の受信機のマルチパス環境における性能を予測する検討を行った[46]。

図 3-23 に示すように GNSS シミュレーションにより伝播パスを推定する。推定した遅延プロフィールにおける各パスの振幅、遅延と位相を考慮し信号を合成することで、マルチパス環境において受信機に届く GNSS 信号の模擬が可能である。マルチパス環境における遅延プロフィールを考慮した GNSS 信号を合成し、出力する機器を安価に実現するため、ソフトウェア無線機を使用した。マルチパス環境における遅延を考慮した GNSS の IQ 信号をデジタル信号合成し、その信号をソフトウェア無線機の RF より出力した。ソフトウェア無線機は nuand 社の Blade RF 40[47] を使用し、GNSS の IQ 信号を生成するソフトウェアはオープンソースソフトウェアである GPS-SDR SIM[48] を使用し、3D マップにより推定した遅延プロフィールを読み込めるように拡張した。

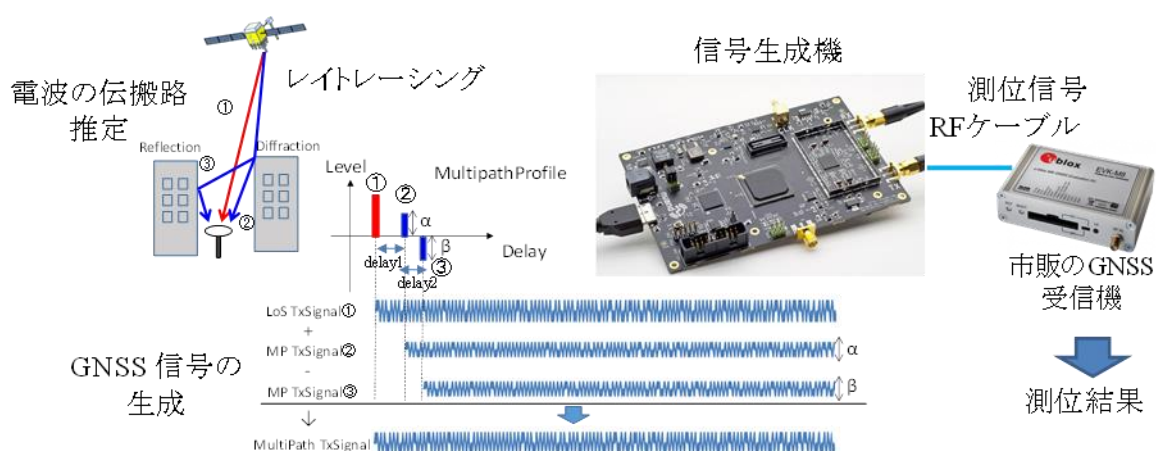


図 3-23 3D マップとソフトウェア無線機を用いた GNSS 信号エミュレーション

3.4.2. GNSS 信号エミュレーションの妥当性評価（静止点）

生成した信号の妥当性の評価を行った。本研究では搬送波を用いる RTK-GNSS の性能評価と性能改善を研究対象としているため、搬送波位相の生成精度は重要である。そのため初期検討として、静止点における GNSS の L1 信号を生成し、RTK-GNSS ができる品質の信号が出力されているか検討した。表 3-7 に評価シナリオを、表 3-8 にソフトウェア無線機の設定を示す。

表 3-7 シナリオの設定

項目	値
衛星システム	GPS+QZS L1
評価時間	1 時間
受信機位置	固定
マルチパス誤差	なし
測位手法	RTK continuous (RTKLIB v2.4.2p11)
GNSS 受信機	u-blox NEO-M8T

表 3-8 信号生成器の設定

項目	値
周波数	1.575 [GHz]
RF Frontend	Blade RF x40
サンプリングレート	26 [MHz]
Dynamic Range	12bit
OS	Windows 10 64bit
CPU	Core i7 7700
GPU	NVIDIA GeForce GTX1080

図 3-24 に評価結果として、時系列の RTK-GNSS の結果を示す。RTK-GNSS の FIX 率は 60% であり、ミス FIX 解も多く見られた。ソフトウェア無線機のクロックが安定していないため、基準局用信号・移動局用信号それぞれにクロック誤差が含まれることが原因と考えられる。そのため、静止点の信号においても、GNSS 衛星の搬送波位相のエミュレーションに十分な精度は得られなかった。

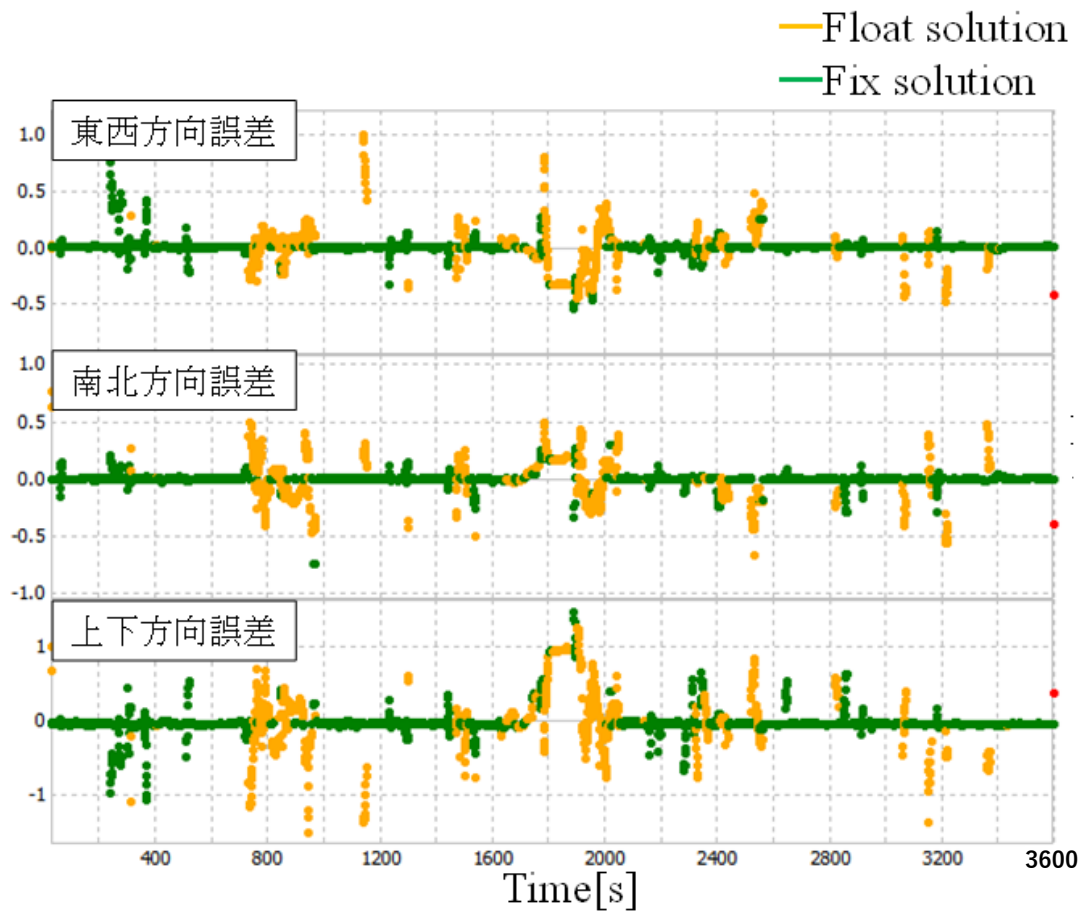


図 3-24 ソフトウェア無線を用いた信号による RTK-GNSS

3.4.3. 信号エミュレーションの妥当性評価（移動体）

マルチパス環境における信号強度の模擬精度の検証のため、車両が日比谷を走行したシナリオを作成し、実測と比較し評価を行った。評価時の設定を表 3-9 に、走行ルートを図 3-25 に示す。衛星配置を図 3-26 に示す。

表 3-9 シナリオの設定

項目	値
衛星システム	GPS+QZS L1
評価時間	30 分間
受信機位置	走行データ
マルチパス誤差	あり
GNSS 受信機	u-blox NEO-M8T

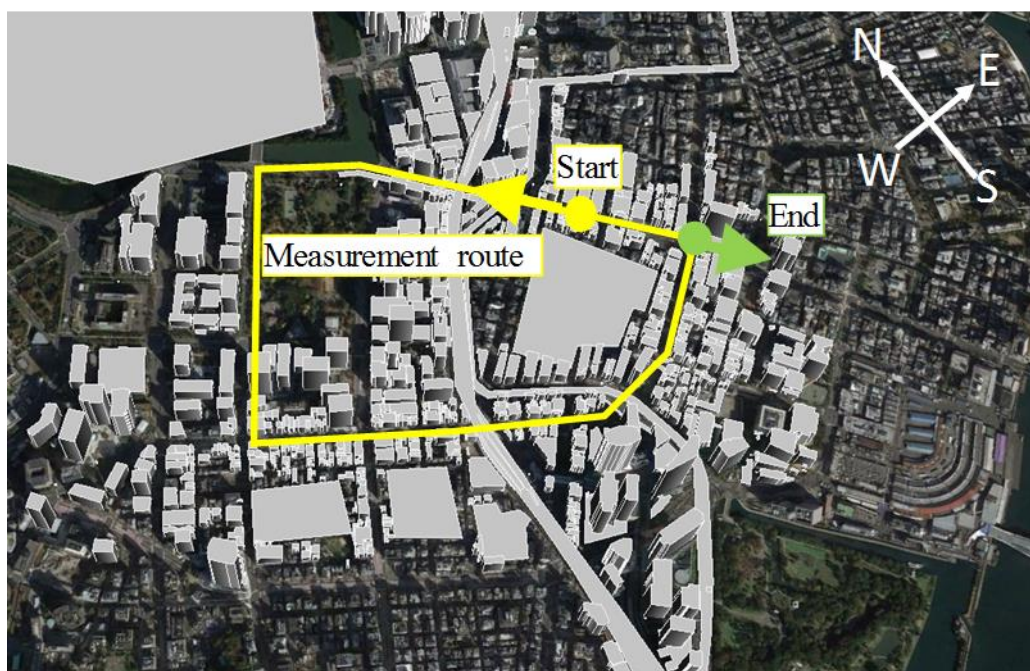


図 3-25 シミュレーションに用いた 3D マップと走行コース
(航空写真出典：国土地理院地図 地図タイル)

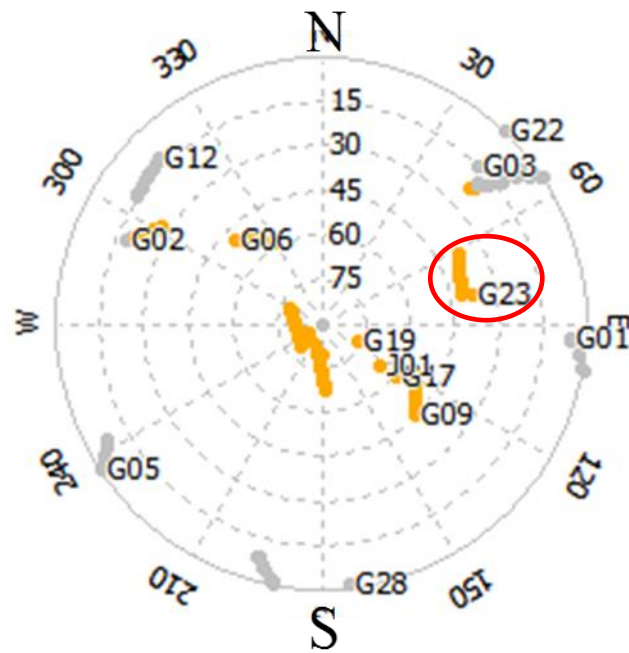


図 3-26 評価時の衛星配置

LOS および NLOS が多く切り替わる衛星 G23 について、図 3-27 に 3D マップを用いたレイトレースとソフトウェア無線機を用いて生成した信号と実信号の比較を示す。図 3-28 に 3D マップから推定した遅延プロファイルの妥当性確認のため GNSS シミュレーションによるレイトレースで推定した SNR と実信号の SNR の比較を示す。

ソフトウェア無線を使った信号生成では NLOS になった際の信号の落ち込みは模擬出来ているが、信号強度の変化が離散的であり細かな変動が模擬できていない。レイトレースでは細かな信号の落ち込みについても模擬出来ているが、樹木による減衰はモデルに含まれていないため、模擬出来ていない。

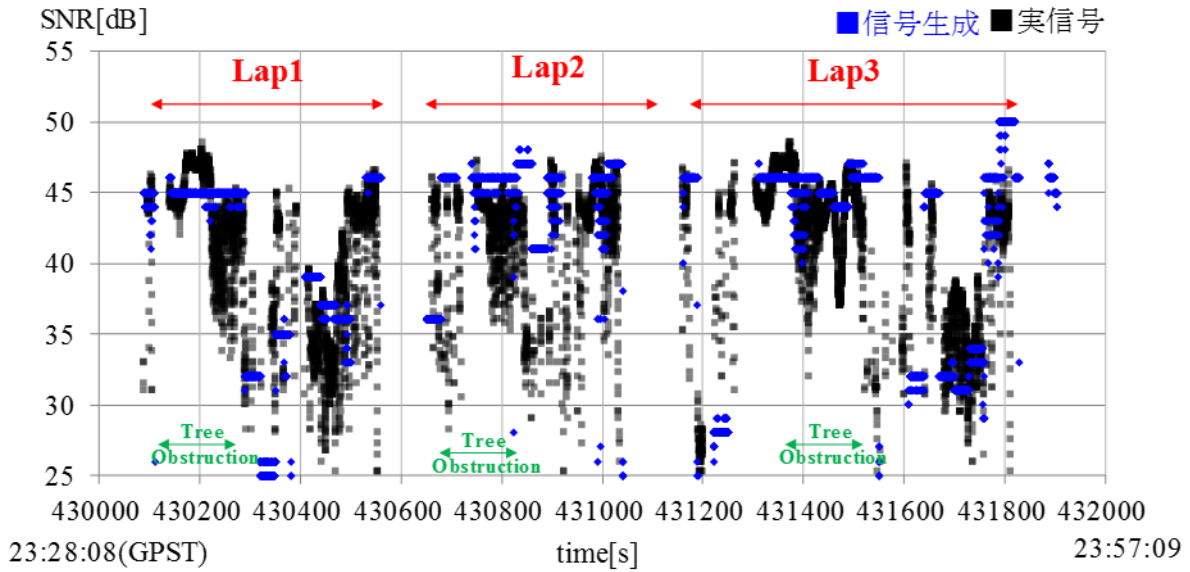


図 3-27 SDR による信号精製と実信号の比較

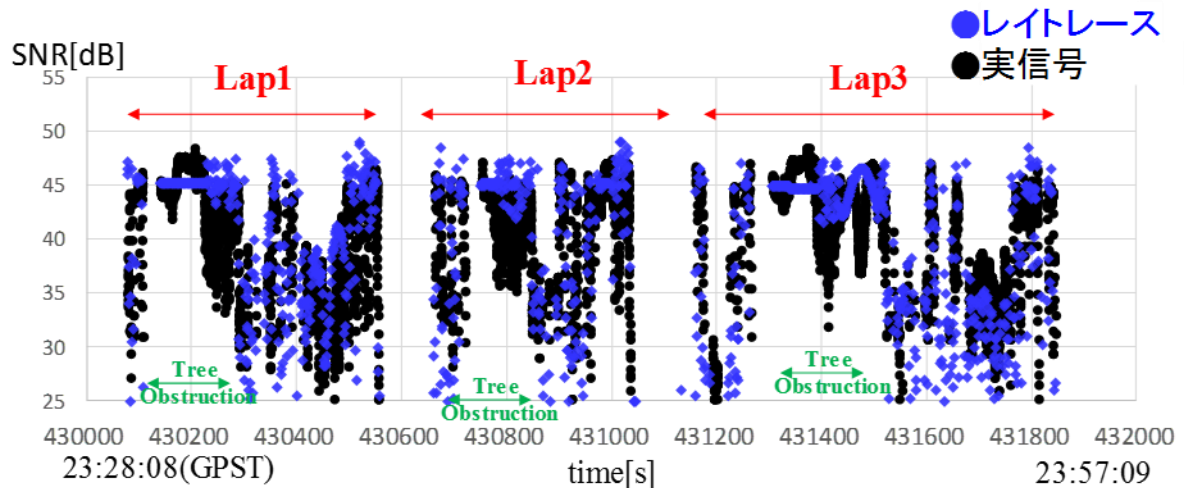


図 3-28 レイトレース法と実信号の比較

ソフトウェア無線機を使った評価において、信号強度の変化が離散的である原因は、RF のダイナミックレンジが足りず、強い信号と弱い信号がある場合に、同時に出力することが出来ていないためだと考えられる。

3.4.4. 信号エミュレーションのまとめ

3D マップとソフトウェア無線により実装する信号生成機を用いた手法の課題として、以下が分かった。信号生成機のクロックの性能が搬送波の品質に関わるため、安価な市販のソフトウェア無線機では RTK-GNSS の評価に適した実験は行えなかった。また、マルチパス誤差を模擬した信号を生成するためには、広いダイナミックレンジを持ったフロントエンドが必要であり、また、周波数が異なる複数の衛星システムの信号を出力するためには、出力する衛星システム数分の RF

が必要となる。観測情報を生成するためには、実際の受信機が評価地点の数だけ必要である。観測情報を生成するために、評価対象の期間と同じだけ測定時間が掛かる。GNSS シミュレーションと同様に、3D マップを用いたシミュレーションが必要であり、3D マップのコストと計算時間が掛かる。また、3D マップに存在しない樹木や建物などは考慮されない。これらの課題から、本研究で構築した 3D マップとソフトウェア無線を用いた信号のエミュレーションは、RTK-GNSS の研究には適しておらず、第 4 章以降の評価では利用しなかった。

一方、GPS 受信機の動作確認として、信号偽装耐性の評価、測位アルゴリズムの検証、マルチパス耐性の評価には利用出来ると考えられる。将来的に 3D レイトレースの計算時間の改善、ソフトウェア無線機の性能向上により、搬送波位相の生成精度が向上し、複数の衛星システムの信号が出力可能となることで、RTK-GNSS の研究に活用出来ると思われる。

3.5. まとめ

本章では 3D マップを用いた衛星測位のシミュレーションについて述べた。最初に 3D マップについて述べた。次に GNSS のシミュレーションについて、衛星位置の推定手法、見通しと電波伝搬経路の推定手法とその高速化を述べた。次に GNSS の信号エミュレーションについて述べた。

第4章 3D マップを用いた衛星測位の性能予測

4.1. 概要

本章では前章で述べた 3D マップを用いたシミュレーションを用い、シミュレーションの妥当性の検証および衛星測位の状況予測を行う手法について述べる。まず妥当性の検証の前提として、衛星の信号の品質検証方法について述べる。次に衛星測位の性能予測手法について述べ、3D マップを用いた衛星測位の性能予測の実験を行った評価について述べる。

4.2. 衛星の信号品質の検証手法

本研究ではシミュレーションにより予測した衛星の信号品質の妥当性の検証のため、二周波観測データと擬似距離残差を用いた。

4.2.1. 二周波観測データによる品質検証

シミュレーションにより予測した衛星の信号品質の検証のため、実測データにおける信号品質の良い衛星の推定を行う。ここでは、測量級の多周波・マルチ GNSS 用高精度受信機の観測値の出力状況により、衛星の信号品質を推定し判別する。RTK-GNSS に対応した高精度 GNSS 受信機は搬送波位相観測値を出力するが、信号品質が悪化すると搬送波位相を追尾することが出来ないため、搬送波位相観測値が出力されなくなる。GNSS 信号の周波数が異なる場合、建物による反射・回折の特性が変わるため、マルチパス伝搬により生じる遅延波の遅延時間や振幅が異なる。そのため両方の周波数において搬送波位相観測値が出力されることを確認することで、信号品質の確認をある程度行うことができる。実験に用いた高精度 GNSS 受信機が、各衛星に対し L1, G1, B1 信号, L2, G2, B2 信号の擬似距離及び、搬送波位相観測値を全て出力していた場合、その衛星の信号品質が良好であったと判定する。

4.2.2. 擬似距離残差による品質検証

擬似距離の残差はマルチパス誤差とほぼ同等である。そのため実測した観測値の擬似距離残差と 3D マップを用いた衛星の信号品質の評価を比較することで、3D マップを用いた衛星の信号品質評価の妥当性の検証ができる。擬似距離の観測情報には、2章で述べたように、受信機クロック誤差、衛星クロック誤差、エフェメリスの推定誤差、電離層誤差、対流圏誤差、マルチパス誤差、熱雑音などの誤差が含まれる。正確なアンテナ位置と幾何学的距離が既知である場合、予測される擬似距離は推定可能である。受信機クロック誤差とマルチパス誤差と熱雑音以外の誤差は、合計数メートル以内の誤差でモデル化することが可能である。また、熱雑音は小さい。擬似距離の残差としてマルチパス誤差を求めるには、受信機クロック誤差を推定する方法が必要である。高層ビル街などの衛星測位が困難なエリアでは、マルチパス誤差と同様に、受信機クロック誤差が数十メートルにわたってジャンプしたり、シフトすることがある。高層ビル街において、受信機ク

ロック誤差の推定には、QZS などの高い仰角に位置し擬似距離に含まれるマルチパス誤差が小さい衛星を使用する。仰角の高い準天頂衛星などを用いて受信機クロック誤差の前処理を行い、これらの推定された受信機クロック誤差を他の衛星に適用した。これにより、各衛星の残差の推定値を生成し評価に用いた。

4.3. 3D マップを用いた衛星測位の性能予測手法の提案

4.3.1. 3D マップによる伝搬経路種別判定と継続的見通し

本研究では 3D マップを用いた GNSS シミュレーションを使用する。2.3.3 で述べた通り、NLOS の衛星は、大きな NLOS マルチパス誤差を含むため、信号品質が悪く、RTK-GNSS では除去することが望ましい。また、2.3.4.3 で述べたとおり、RTK-GNSS には擬似距離と搬送波位相を使用する。搬送波位相は信号品質が悪く、NLOS 相当の信号が弱い場合出力されない傾向がある。搬送波位相の出力には BPSK で変調されている航法メッセージの符号であるハーフサイクルアンビギュイティが判明している必要がある。そのため GNSS 受信機が NLOS にあり、搬送波位相の位相ロックが外れている場合、LOS が一定期間継続しないと搬送波位相のハーフサイクルを得ることができない。ハーフサイクルアンビギュイティを得るためには、ナビゲーションメッセージの先頭で位相が正か負かを判断する必要がある。この航法メッセージの先頭が到達する期間は、2.2 で述べたとおり、GPS、準天頂衛星、BeiDou、GALILEO では 6 秒、GLONASS では 2 秒である。したがって、GNSS 受信機が良好な信号品質で搬送波位相観測を出力するためには、一定時間の安定した LOS を持つ信号が必要となる。4.4 の評価では、LOS の持続時間を GNSS 信号品質の評価に利用する。図 4-29 に示すように、LOS の信号が一定時間以上継続して受信されている場合には、その衛星を LOS 継続衛星と定義する。一度継続衛星と判定された衛星は、NLOS になるまで LOS 継続衛星とする。

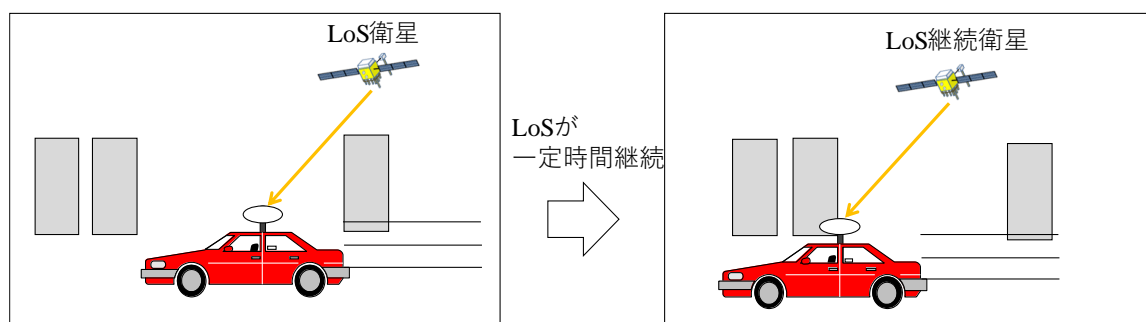


図 4-29 LOS 継続衛星

4.3.2. RTK-GNSS の性能予測

GNSS の測位精度は信号品質の良い衛星の数に依存する。また、RTK-GNSS の FIX 率と測位精度も、信号品質の良い衛星の数に依存する。そのため、衛星の信号品質をシミュレーションし、信号品質の良い衛星の数を予測することで、RTK-GNSS の FIX 状況を予測することができると考えられる。RTK-GNSS に必要な最小限の衛星数は GPS のみ利用する場合、5 機であるが、利用する衛星システムの数が増えると増加する。本研究では測位環境の傾向を知ることを目的として、見通し衛星や LOS 継続衛星の数が 9 機以上の場合に RTK-GNSS が FIX すると仮定する。図 4-30 にある時刻において、RTK-GNSS が FIX するか予測するフローを示す。

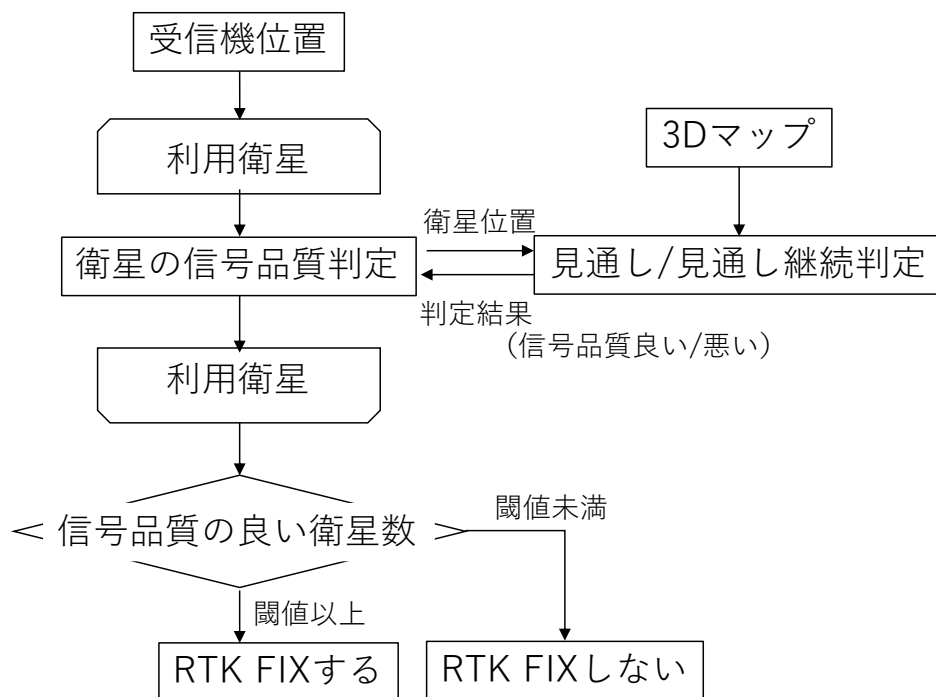


図 4-30 3D マップを用いた RTK-GNSS の予測

実環境において RTK-GNSS に必要な衛星数は、受信機や RTK-GNSS の測位のアルゴリズムの実装に依存する。そのため、RTK-GNSS の正しい FIX 解を得るために必要な衛星数は機器により異なってくる。また、2.3.3 で述べたとおり、NLOS 衛星による観測値に対する誤差は大きい。NLOS 衛星を強い反射波として受信した場合 SNR マスクにより除去することは困難であり、また、オフセット誤差は擬似距離と搬送波位相の二重差により整数アンビギュイティを推定するときに除去出来ない誤差として残る。そのため、見通し衛星や LOS 継続衛星の数が多い場合においても、NLOS 衛星が多い場合 RTK-GNSS は FIX が困難となる。4.5 では LOS 継続衛星の数のみから RTK-GNSS が FIX する可能性がある時間を推定しているが、推定精度を上げるためには、NLOS 衛星数による FIX 解が得られなくなる現象も考慮が必要である。また、RTK-GNSS が FIX するには、解が収束するまで継続的に搬送波位相が観測される時間を考慮する必要

がある。本研究では評価を行わなかったが、今後の RTK-GNSS の予測の高度化として信号品質の良い衛星数と継続時間を検討するべきである。

4.4. 3D マップを用いた衛星測位の性能予測の実験評価

4.4.1. 日比谷における信号品質予測

4.4.1.1. 評価環境

本章では検証のため、実環境における測定データと衛星測位シミュレーションにより推定した結果を比較する[49]。実環境による測定データの取得のため、車両に高精度 GNSS 受信機である Trimble 社製 Net R9[50] とリファレンス位置取得のための POSLV(Positioning Land Vehicle)[51] を搭載し、東京都の日比谷周辺を走行し、約 30 分間の観測データを取得した。

表 4-10 に評価シナリオを、表 4-11 にシミュレーション諸元を示す。図 4-31 に走行コースおよびシミュレーションに用いた建物を示す。

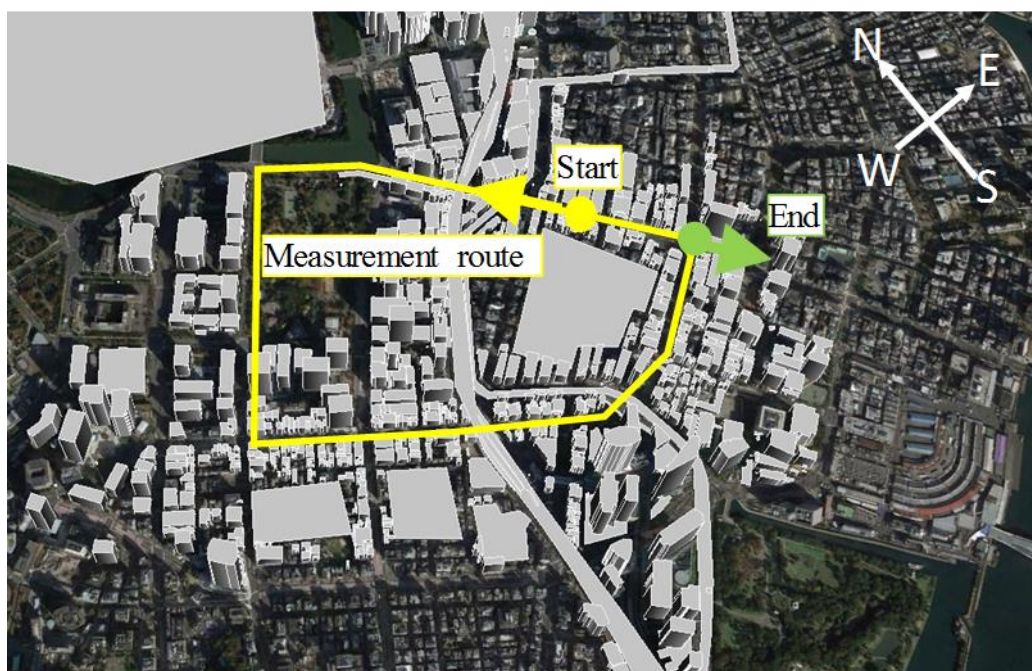


図 4-31 シミュレーションに用いた 3D マップと走行コース
(航空写真出典：国土地理院地図 地図タイル)

図中の黄色は走行コースであり、Start を起点に反時計回りに 2 周回走行し、3 周回目は東部の交差点にて右折し、End まで走行した。測定時には道路の交通状況及び信号に従い走行しているため、各周回において速度は一定ではなく、また走行位置及び車線も完全に一致してはいないが、シミュレーションでは各周回における走行位置を再現して計算を実施している。航空写真上に重

ねて表示す。灰色のポリゴンが計算で考慮した建物である。市販の 3D マップ[23] から計算に影響が無いと思われる建物を除去した。鉄道・道路の高架は使用した市販の 3D マップに含まれていないため、航空写真を参考とし、GIS ソフトウェア(QGIS)[52] を用いて作成し追加した。計算速度向上のため建物モデルの面や線の簡易化も行った。シミュレーションでは地形の起伏は考慮しておらず、建物は建物モデルの最も南西の点における標高を基準とする平面上に配置した。レイトレースの計算対象とする建物は、図 4-31 中の灰色のポリゴンで表示された建物のうち、各時刻において、受信機から半径 600m に建物の重心が含まれるものとした。シミュレーションにおける受信機の緯度と経度は POSLV で取得した座標としたが、高さはシミュレーション上の平面より 1.5m とした。シミュレーション対象の衛星システムは GPS, GLONASS, QZS, BeiDou とした。表 1 にシミュレーションの計算諸元を示す。オープンスカイにおいて実測された観測データの SNR とシミュレーションによる SNR の推定値から、受信電力-170dBm を SNR0dBHz 相当とするオフセット値を加え、シミュレーションによる SNR の推定値を算出した。

表 4-10 評価シナリオ

項目	値
衛星システム	GPS, GLONASS, QZS, BeiDou
評価時間	30 分
衛星位置	エフェメリス
受信機位置	POSLV によるリファレンス位置

表 4-11 シミュレーション諸元

諸元	設定値
建物物性値	コンクリート(比誘電率6.76 導電率 $2.3e-3$, 厚さ0.1m)
周波数	各衛星システムの送信信号の中心周波数に、衛星のドップラ周波数を加えた
レイトレーシング法の電波伝搬経路検索条件	2回反射, 最大1回回折, 1回反射&1回回折, 1回反射, 直接波
受信電力の閾値	-170dBm
計算レート	1Hz

4.4.1.2. 評価結果

A) SNR による評価

計算結果の一例として、図 4-32 に G02 の SNR の実測値とシミュレーションによる推定値、シミュレーションによる見通しおよび信号品質推定結果を示す。

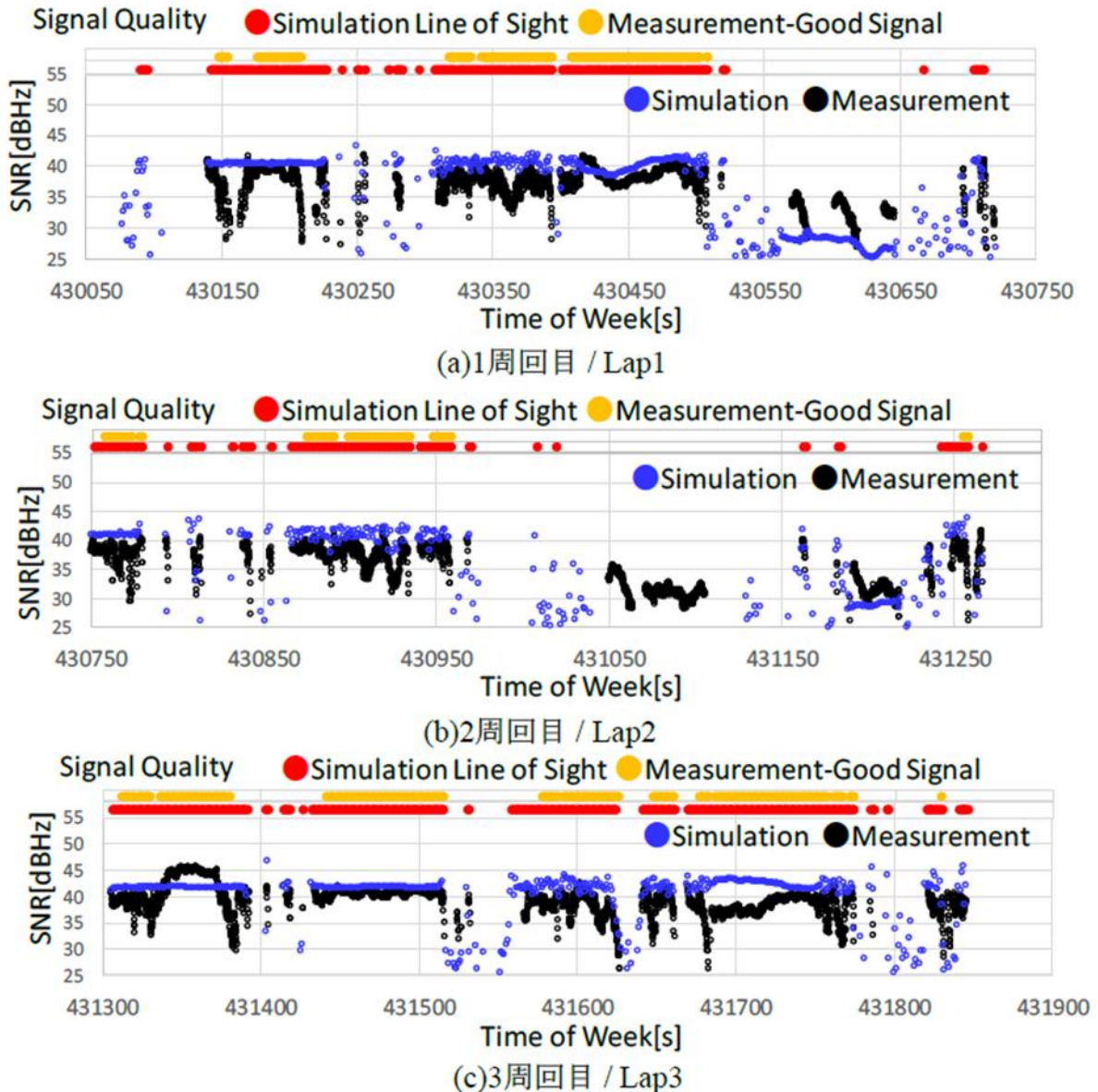


図 4-32 G02 における SNR, 見通し, 信号品質判定結果

実測データは 10Hz で測定し、シミュレーションとの比較では 1 Hz に間引いた。430150 秒から 430200 秒付近において、実測値の SNR は大きな落ち込みが観測されているが、シミュレーションでは LOS であり安定した SNR となっている。測定地点は図 4-33 に示したように、測定コース北西部から南方向に左折する直前であり、衛星は仰角 19 度、北西方向に位置していたため、構造物による遮蔽ではなく、周辺車両の影響によるものだと考えられる。

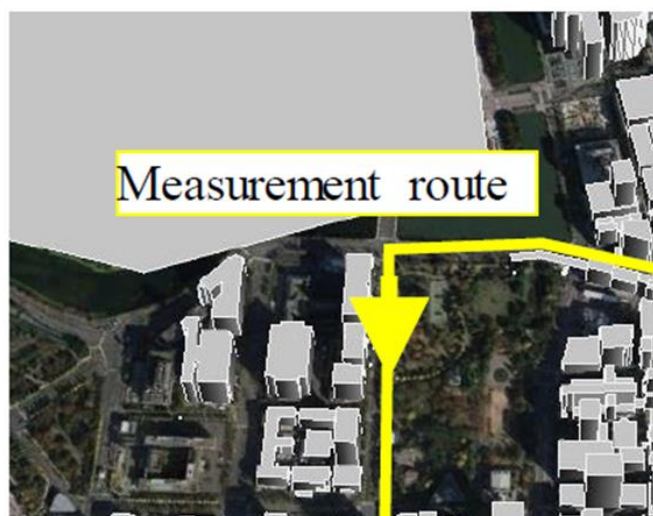


図 4-33 シミュレーションに用いた建物と走行コース抜粋
(航空写真出典：国土地理院地図 地図タイル)

LOS の区間においても，実測値は 10dB 前後のフェージングがみられる傾向がある．シミュレーションにおいて使用している 3D マップは，実環境よりも形状が簡易化されていることや，道路上を走行する別の車両が無いこと，看板，街路樹等がモデルに含まれないこと，シミュレーションの建物の材質は全てコンクリートとしているが，実際の建物では金属やガラスなどが含まれることから，位相が異なる強い反射波の重ね合わせによる変動が生じ易いことが差異の原因と考えられる．南東方向からの信号では樹木による遮蔽が生じるが，3D マップには含まれないため本評価では考慮されていない．樹木による遮蔽では[53] において，全体的に 6dB ほど SNR が下がり，方角によっては 20dB ほど下がることも報告している．そのため，シミュレーション精度の向上のためには，樹木による遮蔽などについても評価を行うべきである．実測の SNR とシミュレーションによる SNR には差異があるが，文献[54] の研究で示されているように建物の遮蔽などが正しく反映されていれば，SNR の傾向は推定されると考えられる．また，シミュレーションにより推定した SNR は概ね実信号より高い信号強度となっていることが分かり，今後シミュレーションの精度を向上させることで Spoofing 対策としても利用が期待出来ることが確認出来た．

シミュレーションによる SNR の推定による信号品質の推定の検証のため，全エポックに対して，シミュレーションによる各衛星の SNR 推定結果が 40 dBHz 以上で，実測値において搬送波位相が追尾出来ていた場合と，シミュレーションによる各衛星の SNR 推定結果が 40 dBHz 未満で，実測において搬送波位相が追尾出来なかった場合を全てカウントした．例えばある衛星に対するカウント数が 800 回で，全エポック数が 1000 回の場合，その一致率は 80%となる．これを全ての衛星について評価すると，この走行ルートにおいて一致率は 82%であり，信号品質の傾向の推定は可能であることが解った．なおこの閾値は経験的に決めた値である．図 4-32 の上部に，信号品質の推定結果を合わせて示した．実測で信号品質が良好であった信号はシミュレーションで

LOSだと判定されている区間に含まれていた。また、LOSになった後に信号品質が良好になるには若干の遅延があり、NLOSとなったタイミングで信号品質が悪くなる傾向が見られた。

B) 見通しによる評価

図 4-34 に全衛星のシミュレーションで推定した LOS の衛星と、実測データより信号品質が良好であると判定された衛星の比較を示す。全エポックに対して、各衛星に対し、シミュレーションによる推定結果が LOS であり、実測値より推定した信号品質が良好であった場合および、シミュレーションによる推定結果が NLOS であり、実測値より推定した信号品質が良好でなかった割合を一致率として集計したところ、この走行ルートにおいて一致率は 81%であった。

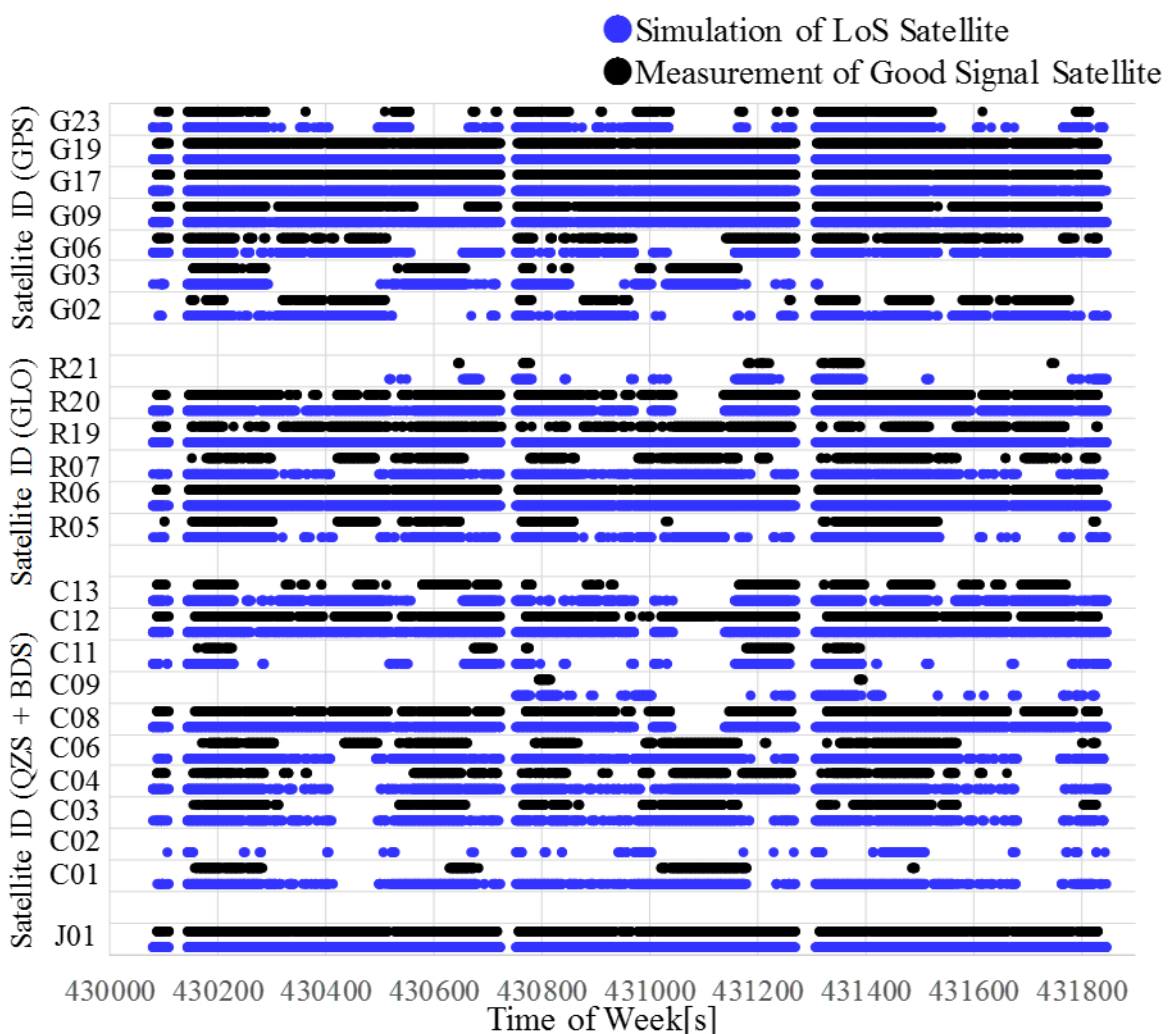


図 4-34 LOS 衛星と信号品質の良い衛星の比較

C) 見通し継続による評価

本評価における、見通しの継続時間を決定するため、シミュレーションによる LOS の継続時間を調整し、一致率の評価を行った。信号品質が良いデータが観測されており、LOS の継続時間を越えていたエポックおよび、信号品質が悪いデータが観測されており、LOS の継続時間を下回っていたエポックの観測時間に占める割合を一致率として集計した。図 4-35 に結果を示す。横軸は LOS が継続した回数であり、1Hz でシミュレーションしたため、LOS と判定された秒数と等しい。一致率は衛星システム毎に異なるが、GPS、GLONASS、QZS においては 3 秒から 6 秒ほどで最大の一致率になるが、BDS は傾向が異なり、15 秒まで LOS の継続時間を増やすほど、一致率が徐々に上昇している。BDS の傾向が異なる原因は C01 と C02 において、LOS がある状態においても、断続的に信号品質の悪い状況が発生しているからであると考えられる。なお C02 については、文献[55] において、マルチパス誤差の推定結果が大きく、除外することで測位が安定することが述べられている。衛星システム毎に LOS の継続時間を調整し、GPS、GLONASS、QZS を 6 回、BDS を 15 回として、RTK-GNSS の予測に利用した。

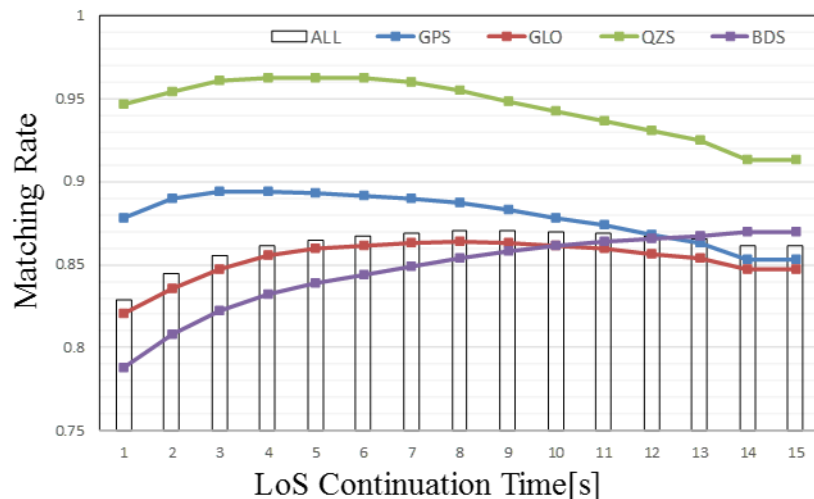


図 4-35 LOS の継続時間と信号品質の良い衛星の一致率

図 4-36 に、全衛星の見通継続衛星と、実測データより信号品質が良好であると判定された衛星の比較を示した。見通継続時間は調整した値を用いた。LOS の継続時間を調整することで、シミュレーションで推定した LOS 継続衛星と実測値より推定した信号品質が良い衛星の一致率は 87.8%となり、レイトレース法により、電波伝搬シミュレーションを行った結果を上回った。

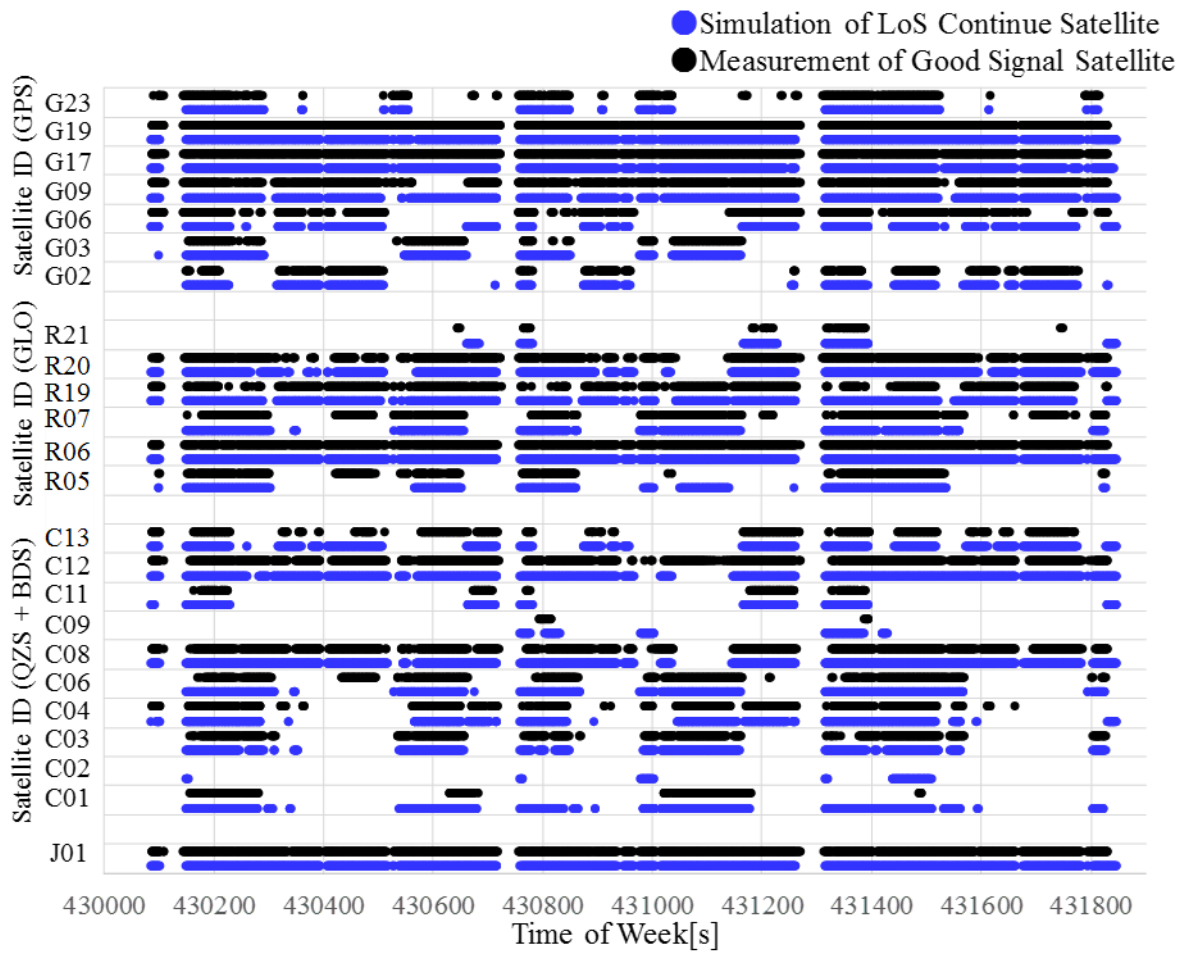


図 4-36 LOS 継続衛星と信号品質の良い衛星の比較

4.5. 日比谷における RTK-GNSS の FIX 状況の予測

図 4-37 に実測における信号品質の良い衛星数と LOS 継続衛星数および実測において RTK-GNSS が FIX されていた時間の時系列変化を示した。シミュレーションと実測共に RTK-GNSS が FIX すると想定した箇所および FIX しないと想定した箇所が概ね一致していることが分かる。RTK-GNSS の FIX 解が得られるためには、信号品質の良い衛星数に依存するため、実測データにおいて RTK-GNSS が FIX すると想定しているときには信号品質の良い衛星数が多く、シミュレーションにおいても同様の傾向がある。信号が遮断され復帰されたタイミングにおいて、シミュレーションでは急峻に LOS 継続衛星が増えるが、実測では徐々に信号品質の良い衛星数が増えていく傾向がある。430800 秒付近等の実測における衛星数が 20 機を越えるタイミングにおいて、大きな乖離が生じている箇所もあるが、信号品質の良い衛星数の傾向を推定することが出来た。RTK-GNSS が FIX していない時間の多くは信号が遮断されている期間でもあり、LOS 継続衛星の判定から推測出来ている

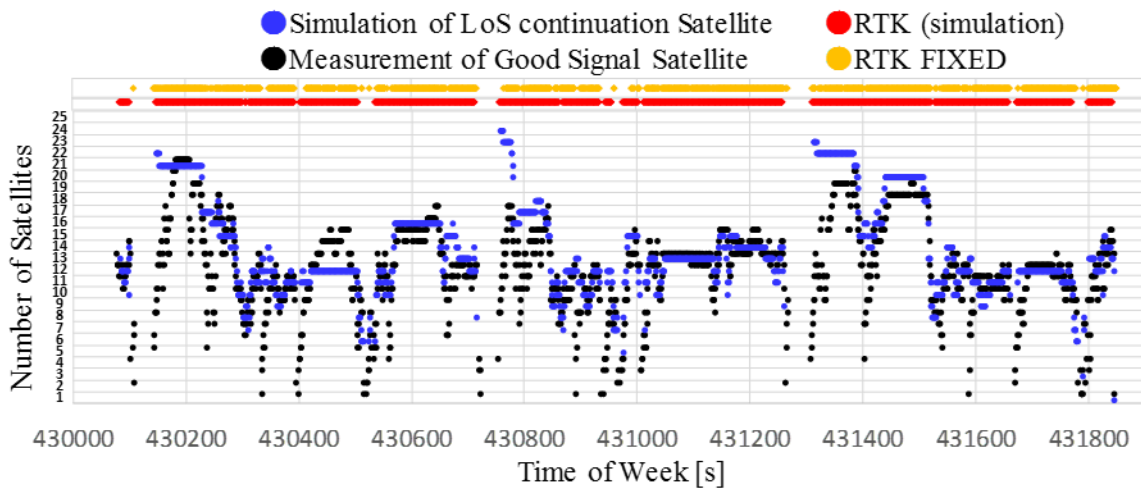


図 4-37 信号品質の良い衛星数と LOS 継続衛星数の時系列化および RTK の推定

表 4-12 に、ある時刻の LOS 継続衛星数を閾値とし、閾値とした LOS 継続衛星数を超えており RTK-GNSS が FIX すると想定した場合および、LOS 継続衛星数を下回っており RTK-GNSS が FIX していなかった場合を一致したとし、全時刻中の一致率を集計した結果を示した。一致率が最も高い結果となったのは LOS 継続衛星を 9 機とした場合であり、RTK-GNSS が FIX すると想定した時間を 83.9%の精度で予測出来た。

表 4-12 LOS 継続衛星数と RTK 実施時の一致率

見通し継続衛星数	一致率	見通し継続衛星数	一致率
5	82.5%	11	81.8%
6	82.6%	12	78.1%
7	83.1%	13	66.6%
8	83.5%	14	58.5%
9	83.9%	15	52.5%
10	83.5%	-	-

本評価は 4.3.2 で述べた通り，GNSS 受信機の性能および RTK-GNSS の実装による差異は考慮していない。また，NLOS 衛星の増加による FIX 解が得られなくなる状況も考慮していない。実際の受信機の出力を予測するためにはデータと分析が必要である。また，今後の課題として，一致しなかった場合の分析が考えられる。見通し継続衛星数より RTK が FIX すると推定したが，実測の 2 周波観測衛星より RTK が FIX すると推定されなかった場合，見通し継続衛星数より RTK が FIXしないと推定したが，実測の 2 周波観測衛星より RTK が FIX すると推定された場合の二者があり，分類を行う。

図 4-38 に，LOS 継続衛星 9 機以上の場合に RTK-GNSS が FIX すると推定し，走行ルート上にプロットした地点を RTK-GNSS の FIXED(simulation)として示し，実測において，RTK-GNSS により実際に FIX 解が得られていた地点を RTK-GNSS の FIXED(measurement)として示した。

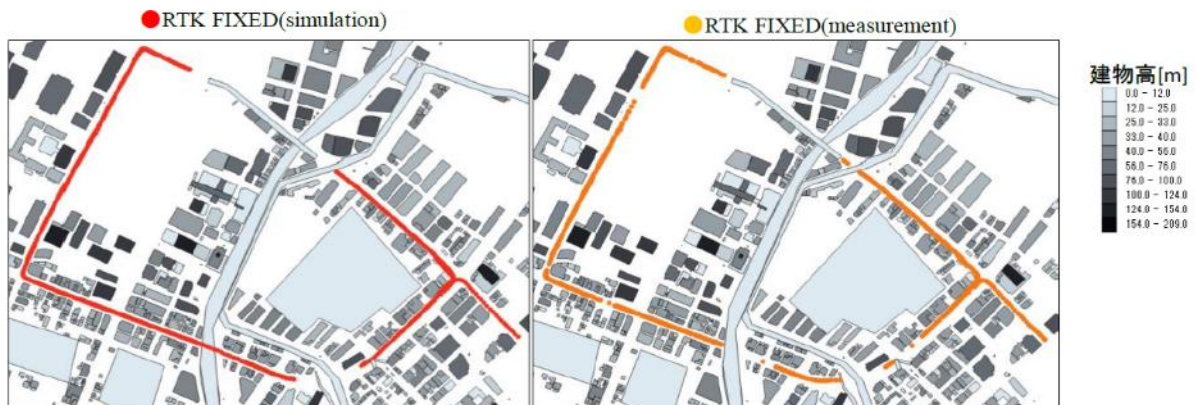


図 4-38 11 RTK-GNSS の FIX 地点と LOS 継続衛星による RTK-GNSS の FIX 予測地点

図 4-37 と同様にシミュレーションと実測共に RTK-GNSS が FIX すると想定した箇所および FIX しないと想定した箇所が概ね一致していることが分かる。一致していない箇所として、南部の高架通過時にシミュレーションでは RTK-GNSS が FIX すると想定しているが、実測では FIX しないと想定された。この原因は計算対象とする建物を、移動する車両を中心とした半径 600m 以内に重心が入る建物として、計算時に動的に調整したことにより、南部の高架通過時に高架が含まれなかったためである。そのため、計算対象とする建物の判定アルゴリズムを調整することで、シミュレーションにおいても RTK-GNSS が FIX しないと想定されるように改善できる。

4.6. まとめ

本章では、衛星の信号の品質検証方法について述べた。次に衛星測位の性能予測手法を述べた。次に 3D マップを用いた RTK-GNSS の性能予測の実験評価として、日比谷における信号品質予測および日比谷における RTK-GNSS の FIX 状況の予測を検証した。LOS 継続衛星により信号品質が良い衛星を 87.8%の精度で推定し、RTK-GNSS が FIX すると想定した時間を 83.9%の精度で推定することが出来た。受信機のアルゴリズムの考慮や、NLOS 衛星数の考慮は本検討では対象としなかったため検討が必要である。

第5章 3Dマップを用いた衛星測位の性能向上

5.1. 概要

本章では、3Dマップを用いた衛星測位の性能向上について述べる。まず、3Dマップを用いた衛星測位の性能向上手法について述べる。次に、3Dマップを用いた衛星測位の性能向上の実験評価について、東京駅付近における静止点実験および東京駅付近における走行実験により示す[56]。

5.2. 3Dマップを用いた衛星測位の性能向上手法の提案

信号品質の悪い衛星の観測値を使用すると、搬送波位相観測値の整数アンビギュイティが求まらないため、RTK-GNSSのFIX率は低下する。そのため、RTK-GNSSには信号品質の良い衛星を選択的に使用することが重要である。図5-39に、3Dマップによる衛星選択を用いた測位を行う手順を示す。受信機位置とGNSS観測データが入力であり、3Dマップと受信機位置よりLOS衛星やLOS継続衛星などの信号品質の良い衛星を推定し、GNSS観測データより信号品質の悪いと推定された衛星を取り除く。信号強度マスクを用い3Dマップにより取り除けなかった信号品質の悪い衛星を取り除き、測位を行う。算出された測位解を最終解とするか、再度受信機概算位置として、3Dマップによる衛星選択を行う。測位演算にはRTKLIBを用いる。

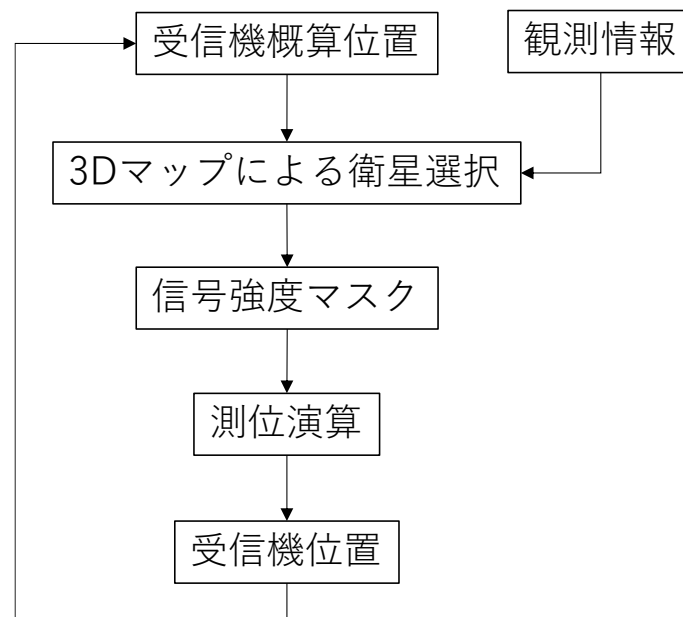


図 5-39 3Dマップを用いた衛星選択を用いた測位

受信機の概算位置が真値に近い場合、3Dマップによる見通し判定により選択された衛星と観測衛星に共通の衛星が多くなり、RTK-GNSSの正しい測位解が出やすい。受信機の概算位置が真値から遠い場合、LOS判定により選択された衛星と観測衛星に共通の衛星が少なくなり、RTK-GNSSの測位解が出にくい。そのため、概算位置周辺に複数の候補地点を面的に設けて、各候補

地点で衛星選択をおこない RTK-GNSS の FIX 解が算出された結果を統合することが有効であると考えられる。リアルタイム処理では、3.3.2.2 で述べたように、事前に 3D マップによる衛星選択の結果を保持しておき、結果を参照することで高速に見通し判定をおこなう。

5.3. 3D マップを用いた衛星測位の性能向上の実験評価

本節では東京駅周辺において、静止点および移動体を対象として 3D マップを用いた衛星選択を行った結果について述べる。

5.3.1. 東京駅付近における静止点評価(評価環境その 1)

5.3.1.1. 評価環境

表 5-13 に測定シナリオを示す。2020 年 4 月 3 日 8:15:00 GPS 時間 (GPST) から 30 分間、高い建物が多い東京駅近くの路上で、GPS, GLONASS, BDS, QZSS, Galileo のデータを記録した。低価格の 2 周波数受信機である u-blox F9P を使用して、1Hz で記録した。

表 5-13 評価シナリオ

項目	値
衛星システム	GPS, GLONASS, BDS, QZSS, Galileo L1/L2
評価時間	2020 年 4 月 3 日 8:15:00 ~2020 年 4 月 3 日 8:35:00
衛星位置	エフェメリス
受信機位置	固定
レイトレース条件	反射 2 回, 反射 1 回&回折 1 回, 反射 1 回, 回折 1 回,
測位手法	RTK continuous (RTKLIB v2.4.3b31)
GNSS 受信機	u-blox ZED-F9P 1Hz

電波伝搬推定の条件として、反射と回折の最大数は最大 2 回に制限した。受信機の真の位置は測定時の目視および RTK-GNSS の FIX 解により推定した。妥当性の評価における残差の算出には推定した真の位置を使用した。図 5-40 の左側に、2020 年 4 月 3 日 8:25:00 (GPST)の衛星配置と、3D マップから推定した衛星と受信機との LOS と疑似距離観測値の残差が 15m 以内にあるかを示す。図 5-40 の右側に、測定場所、周辺環境、3D マップの一部と建物の高さを示す。

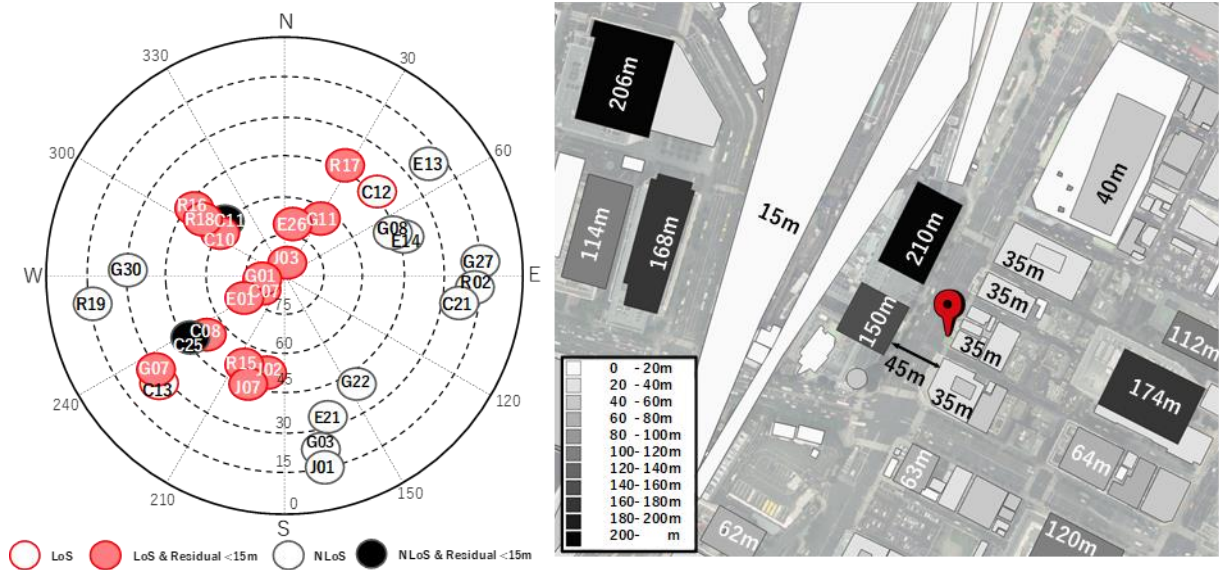


図 5-40 衛星配置と測定位置および周辺の建物環境

5.3.1.2. 擬似距離残差と伝搬経路種別の評価

評価環境における 3D マップを用いた衛星の信号品質推定の妥当性を検証するために、3D マップから推定した電波の伝搬経路の種類と擬似距離の残差を比較した。図 5-41 に電波伝搬経路の分類を示す。LOS のうち正規反射波がないものを LOS、正規反射波があるものを LOS+Reflection とした。LOS のデータにおいては 2 回反射が発生した衛星はなかった。分類の結果、LOS と分類された衛星の方が NLOS と分類された衛星よりも残差が小さいことがわかった。高層ビルの近くでは、NLOS は大きな残差を有するため妥当な結果である。例えば、図 5-40 で示した 2020 年 4 月 3 日 8:25:00 (GPST) では、31 機の衛星が観測され、LOS 衛星が 17 機でありそのうち残差が 15m 未満の衛星は 16 機だった。NLOS 衛星が 14 機であり、そのうち残差が 15m 以上の衛星は 12 機だった。表 5-14 にそれぞれでの伝搬経路の種類と擬似距離残差 10m 未満、20m 未満、20m 以上の衛星を分類した結果を示す。

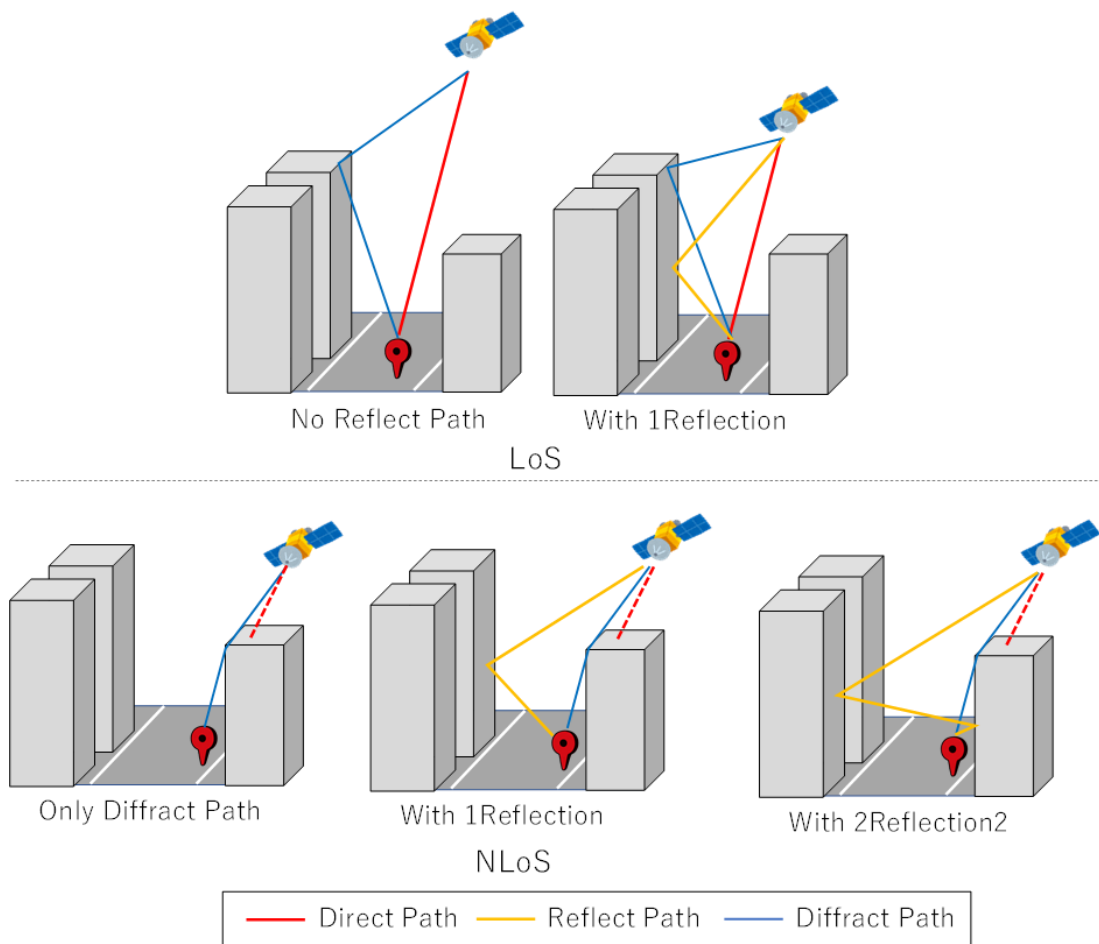


図 5-41 電波伝搬経路の種類

表 5-14 電波伝搬経路の種類と擬似距離の残差

ID	Path type	Rate	Pseudo-range residuals		
			below 10 m	below 20 m	over 20 m
1	LOS	43.4%	73.9 %	97.2 %	2.8 %
2	LOS + 1 Reflection	2.7%	22.7 %	22.7 %	77.3 %
3	NLOS	16.9%	18.0 %	34.3 %	65.7 %
4	NLOS + 1 Reflection	30.0%	16.0 %	18.0 %	82.0 %
5	NLOS + 2 Reflections	7.0%	1.7 %	3.0 %	97.0 %

反射のない LOS の場合、信号の 97.2%が 20m 未満の残差であり、73.9%の信号も 10m 未満の残差だった。一方、LOS+1 回反射の場合、77.3%の信号が 20m 以上の残差であり、10m 未満の残差は 22.7%であった。同じ LOS であっても、正規反射波があるものは、残差が大きく信号品質が

下がる傾向があることが分かった。また、NLOS の場合、LOS と比べて残差が大きい傾向がある。反射波が含まれる場合、残差が 20m を越える割合が 1 回反射波の場合 82%、2 回反射波の場合 97% であり非常に高い結果であった。これは、安価な受信機が狭い帯域幅を使用しており、可能性があり、強い反射を伴う LOS 信号に対して耐性がないことに起因していると考えられる。

5.3.1.3. 静止点における真値を前提としない衛星選択を用いた RTK-GNSS の評価

ここでは、3D マップを用いた RTK-GNSS の性能を評価する。図 5-42 に道路上に設けた評価地点を示す。赤いピンの位置が位置の真値である。



図 5-42 道路上に設けた評価地点と位置の真値

3D マップを用いた衛星選択を行う場合、真の位置は不明な状態から始まる。3D マップを用いた RTK-GNSS の性能評価では、道路上の進行方向と区画が既知であることを前提として、道路上のいずれかの候補位置に受信機がいたと仮定して、それぞれの評価点で衛星選択を行った。評価地点は道路の各車線の中心線に沿い約 5m 間隔で地点 1~36 まで配置した。衛星の位置と電波の伝搬経路は 30 秒ごとに計算し、1Hz の観測データの衛星選択に利用した。つまり 30 秒間は衛星選択の組み合わせは変わらない。RTK-GNSS には RTKLIB version2.4.3 beta33 の continuous モードを使用した。この環境では、観測誤差が正規分布であるという仮定が有効ではないため、

カイ二乗検定は使用しなかった。仰角に応じた信号対雑音比 (SNR) マスクを 31~40dB-Hz, 仰角 5 度以下では 31dB, 15 度では 33dB, 25 度では 34dB, 35 度では 37dB, 45 度では 39dB, 55 度以上では 40dB の範囲で使用した。また, 仰角マスク角度を 10° とした。図 5-43 に 3D マップを用いた衛星選択により, 見通し衛星に限定した場合の RTK-GNSS の FIX 率を示す。FIX 率は 1800 エポック中, 整数アンビギュイティが正しく解けた割合である。

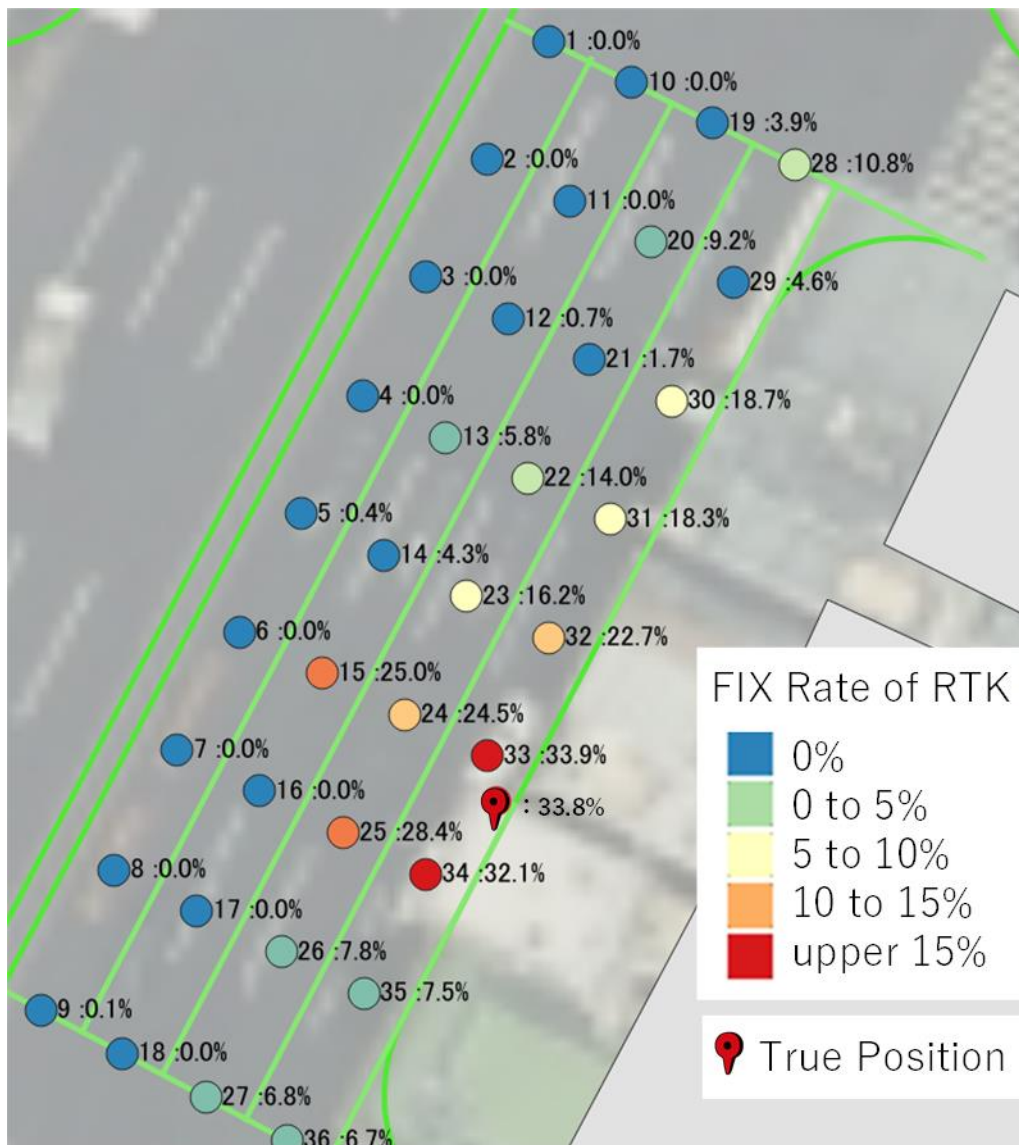


図 5-43 3D マップにより LOS 衛星を選択した場合の各評価地点の RTK-GNSS の FIX 率

3D マップによる衛星選択をしない場合は, 全ての地点において FIX 解は得られなかった。3D マップによる衛星選択により LOS 衛星に限定することで, 真値においては 33.8% の FIX 解が得られた。各点のうち真値に最も近い地点 33 では FIX 率は 33.9% であった。真値より 10m ほど離れた地点においても 7~20% の FIX 率が得られており, 正確な位置を利用しなくても 3D マップによる衛星選択は有効に働くことが分かる。また, 真値から離れるにつれて徐々に FIX 率が下がる傾向が分かる。

図 5-44 の左側に衛星選択により，見通し衛星に限定し，反射が含まれる衛星を取り除いた場合の RTK-GNSS の FIX 率を示す．この手法では，地点 15 の FIX 率が最も高く，真値に最も近い地点 33 が二番目に高い FIX 率であった．

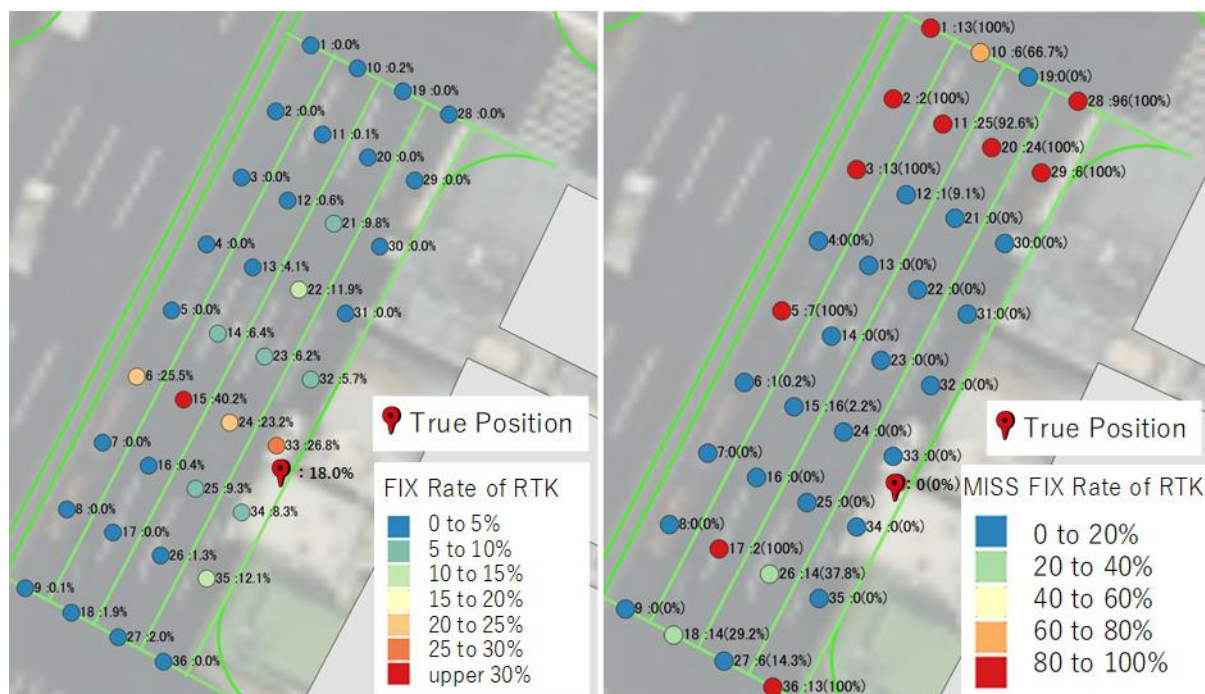


図 5-44 3D マップにより LOS 衛星(反射波除去)を選択した場合の各評価地点の RTK-GNSS の FIX 率とミス FIX 率

図 5-44 の右側に RTK-GNSS でミス FIX 解が算出された回数と割合を示す．真値より離れるに従いミス FIX 解が増えているが，真値から 5m ほどの範囲ではミス FIX 解がないことが分かる．五箇所で 20%を越える FIX 率が得られ，真値では 18%の FIX 解が得られ，ミス FIX 解はなかった．真値が最も高い FIX 率になるとは限らないが，真値付近の地点は高い FIX 率が得られる傾向があった．地点 15 は 40.2%の FIX 率であり，地点 33 よりも高い FIX 率であった．

反射波を除外することにより，真値における RTK-GNSS の FIX 率が低下している要因として，利用可能な衛星数が減っていることが原因と考えられる．移動局の各エポックにおける平均観測衛星数は 35.9 機であった．図 5-45 に各地点にて衛星選択を行った場合の，移動局の各エポックにおける平均観測衛星数を示す．見通し衛星に限定することにより，平均観測衛星数は最大 17 機ほどに限定され，反射波を除去することで最大 15 機ほどになり，全体的に利用できる衛星数が減っていることが分かる．なお，この平均観測衛星数は SNR マスクを掛ける前の時点の衛星数であり，実際に RTK-GNSS に使用された衛星数は更に少ない．

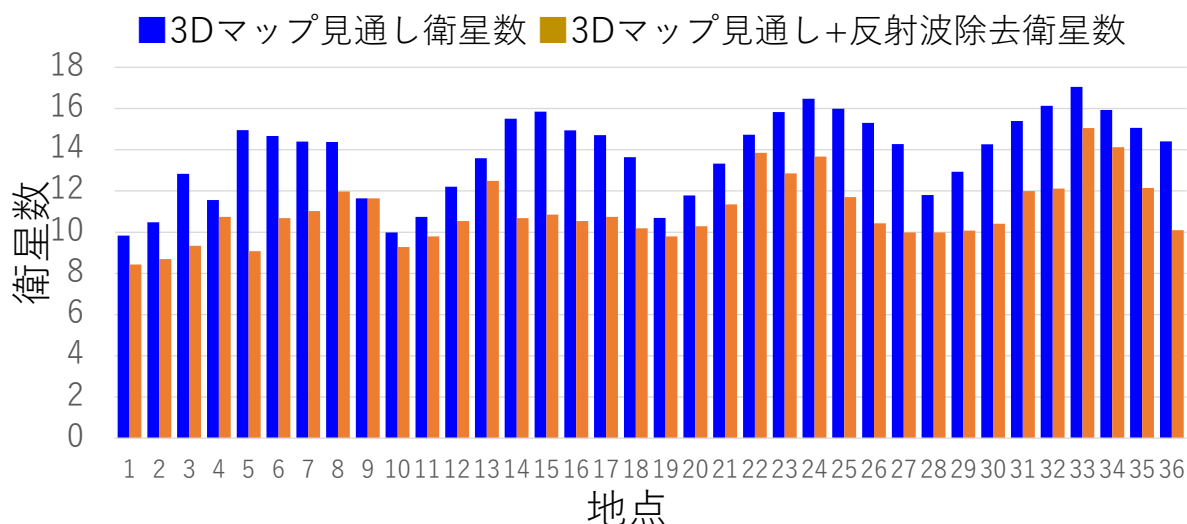


図 5-45 3D マップにより LOS 衛星, LOS 衛星(反射波除去)を選択した場合の各評価地点の衛星数

図 5-46 に地点 15 と地点 33 の比較を示す. 図の上部に RTK-GNSS が FIX していた時間を示す. 図の下部の線は 3D マップによる衛星選択と信号強度マスクにより使用する衛星に選択されていたかを示しており, 網掛けは観測データの残差が 10m 未満だったかを示している. 図の上部の RTK-GNSS の FIX していた時間の比較より, 地点 15 と地点 33 は異なったタイミングで FIX 解を得ていたことがわかる. また, 地点 15 が高い FIX 率を得た理由は 30700 秒以降の衛星選択によるものであることが分かる. 30700 秒以降の地点 15 の FIX 解が得られている時間における, 衛星選択の差異は地点 33 は C25 と G07 を使用していたことである. この衛星はどちらも 10m を越える残差を観測しており, FIX 解が得られない原因となったと考えられる. 地点 15 では西側の建物の遮蔽により, C25 と G07 は観測されなかったが, 地点 33 では遮蔽される判定とならなかった. 3D マップに含まれない看板や樹木などの影響, 3D マップの形状の誤差や観測時におきていた周辺の車両や人などの影響により, 真値において最も高い FIX 率になるとは限らない. しかし, 真値付近では, 妥当な衛星群が選択されるため, 高い FIX 率となり易い. 真値より遠く離れた場所では, 実際には建物により遮蔽されている衛星が選択されることも多い. 建物により遮蔽されている衛星は信号強度が低いため, SNR マスクにより排除され測位に利用する衛星数が足りなくなる. そのため, 真値から離れた場所では RTK-GNSS の FIX 解が得られにくい傾向がある. 本評価の結果より, 3D マップを用いた衛星選択をする際には, 真値でなくとも残差が小さい妥当な衛星が選択されることが重要であることが分かった.

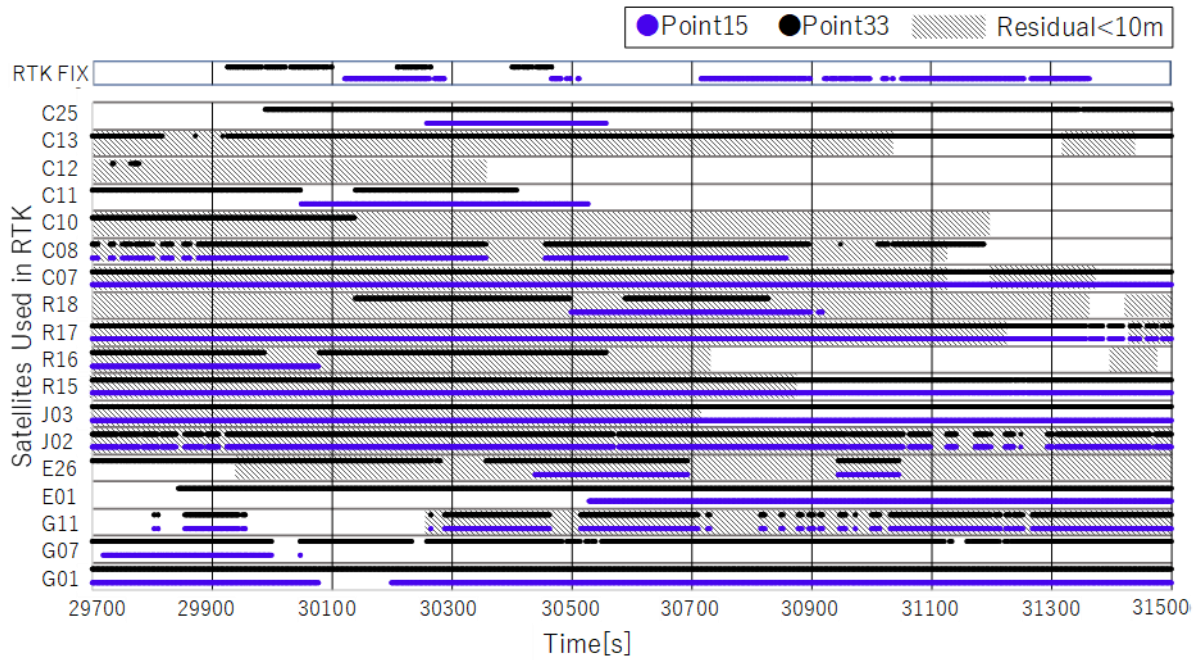


図 5-46 地点 15 と地点 33 の RTK-GNSS における使用衛星と FIX 時間の比較

図 5-47 に各地点で得られた FIX 解を示す。道路上にある FIX 解だけに絞り込み、FIX 解の重心を算出した結果、真値から 5cm の距離の位置が算出された。これらの結果から、真の位置を使用しない場合でも、3D マップを用いた RTK-GNSS では正しい衛星を選択すれば十分であることが示された。

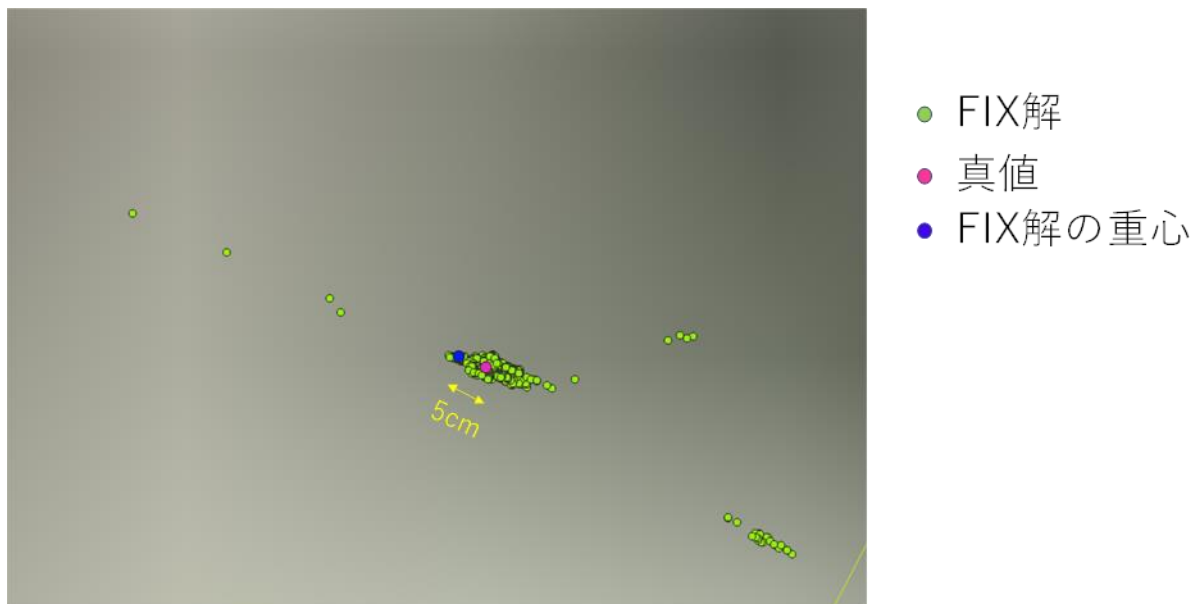


図 5-47 各地点で算出された RTK-GNSS の Fix 解の重心と真値

5.3.2. 東京駅付近における静止点評価(評価環境その2)

5.3.2.1. 評価環境

3D マップを用いた衛星選択手法の妥当性の検証のため,異なる日時における評価を行う.表 5-13 に測定シナリオを示す.2020年6月23日8:15:00GPS時間(GPST)から20分間,高い建物が
多い東京駅近くの路上で,GPS, GLONASS, BDS, QZSS, Galileo のデータを記録した.低価
格の2周波数受信機である u-blox F9P を使用して,5Hz で記録した.

表 5-15 評価シナリオ

項目	値
衛星システム	GPS, GLONASS, BDS, QZSS, Galileo L1/L2
評価時間	2020年6月23日7:06:00 ~2020年6月23日7:26:00
衛星位置	エフェメリス
受信機位置	固定
レイトレース条件	反射2回, 反射1回&回折1回, 反射1回, 回折1回,
測位手法	DGNSS (RTKLIB v2.4.3b31)
GNSS 受信機	u-blox ZED-F9P 5Hz

電波伝搬推定の条件として,反射と回折の最大数は最大2回に制限した.受信機の真の位置は測
定時の目視およびRTK-GNSSのFIX解により推定した.妥当性の評価における残差の算出には
推定した真の位置を使用した.図 5-40 に,測定場所,周辺環境,3Dマップの一部と建物の高
さを示す.



図 5-48 測定位置および周辺の建物環境

5.3.2.2. 静止点における真値を前提としない衛星選択を用いた DGNSS の評価

RTK-GNSS に限らない 3D マップを用いた衛星選択による測位精度向上の検証のため、DGNSS の性能を評価する。図 5-42 に道路上に設けた評価地点を示す。赤いピンの位置が位置の真値である。評価地点は真値周辺に東西南北 3m ごとの間隔で配置した。道路の車線に沿った配置とはせず、概ね車道である領域に対して等間隔に配置した。5.3.1 と同様に、3D マップには道路上の車両や看板などは含まれない。

観測データを用い

- (1) 仰角に応じた SNR マスクを適用した DGNSS
- (2) 仰角に応じた SNR マスクと 3D マップによる見通し衛星選択を適用した DGNSS
- (3) 仰角に応じた SNR マスクと 3D マップによる見通し衛星選択および反射波を受信している衛星の除外を適用した DGNSS

の精度を評価した。仰角に応じた SNR マスクは 5.3.1 と同様の設定を用いた。仰角に応じた SNR マスクのみを用いた DGNSS の測位解の水平方向の RMS 誤差は 35.7m であった。

図 5-50 に仰角に応じた SNR マスクのみを用いた DGNSS の測位解, 真値付近の地点 10 にて 3D マップによる見通し衛星選択を適用した DGNSS の測位解, 真値付近の地点 10 にて 3D マップによる見通し衛星選択および反射波を受信している衛星の除外を適用した DGNSS の測位解を示す。

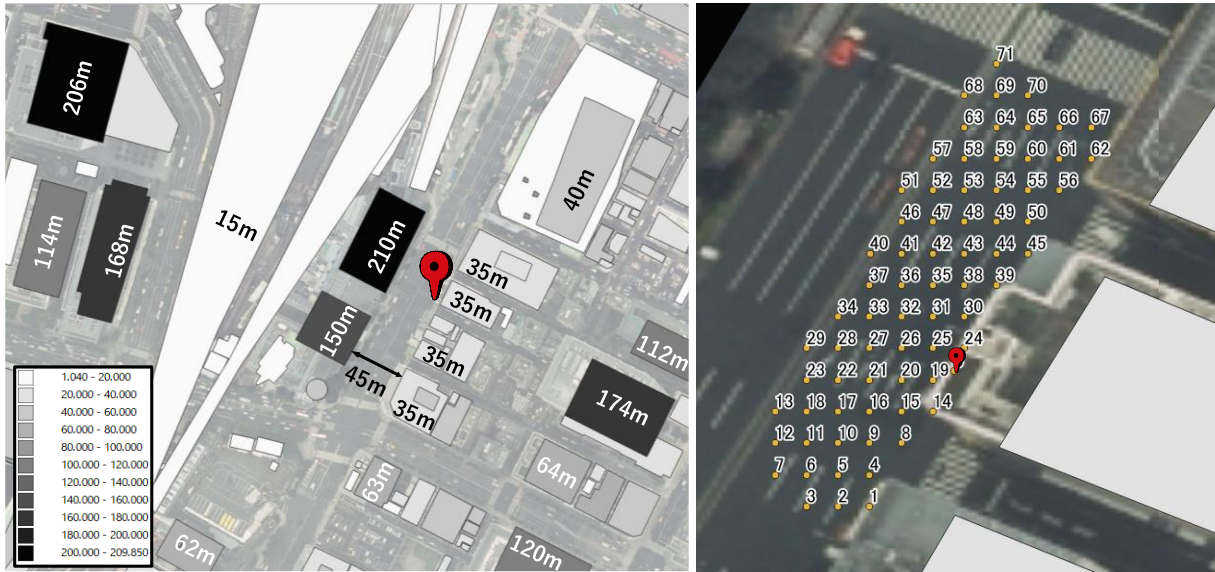


図 5-49 道路上に設けた評価地点と位置の真値

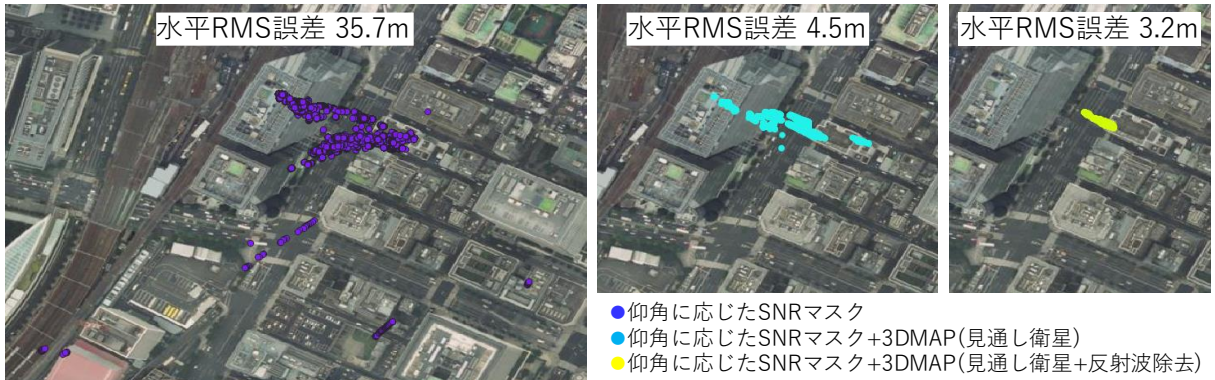
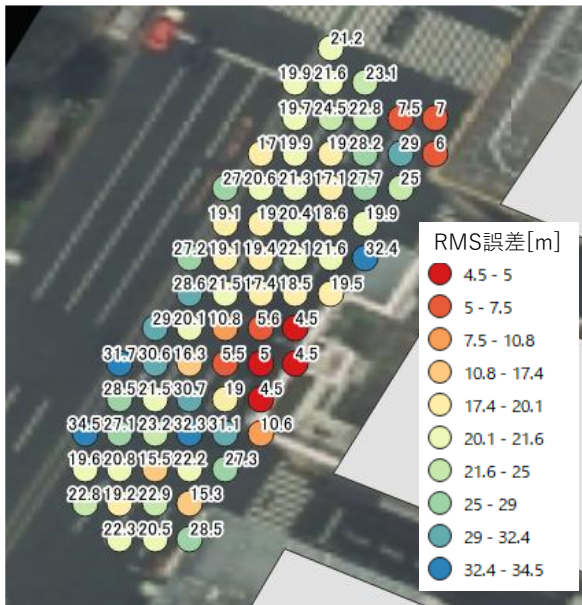


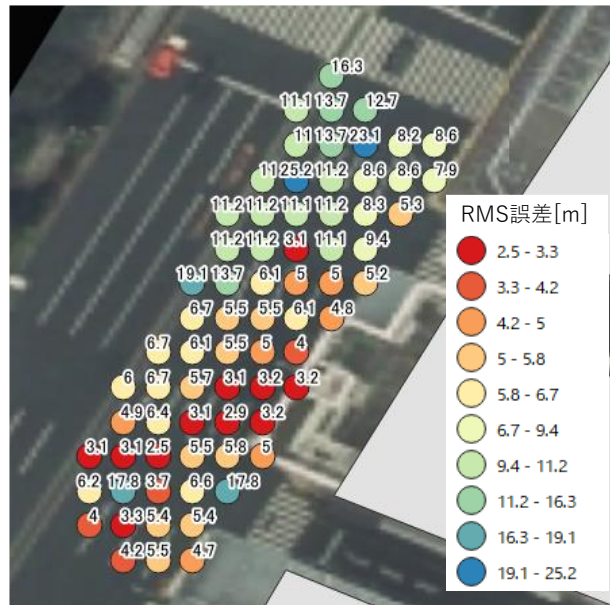
図 5-50 各測位手法の RMS 誤差(地点 19)

3D マップを用いた衛星選択により DGNSS の水平方向の誤差の範囲が縮小していることが分かる。また、反射波を除去することで水平方向の誤差の範囲がより縮小していることが分かる。図 5-51 に全地点における DGNSS の測位解の水平 RMS 誤差を示す。図 5-51(a)は 3D マップを用いた衛星選択を適用した場合であり、全地点で 3D マップを用いない場合より水平 RMS 誤差が小さくなっており、真値付近において最も誤差が小さくなっている傾向が分かる。図 5-51(b)は反射波である衛星の除去を適用した場合であり、全地点で 3D マップを用いない場合より水平 RMS 誤差が小さくなっており、図 5-51(c)よりほぼ全地点で反射波である衛星の除去をおこなうことで誤差が大幅に減少していることが分かる。最も精度が高い地点は真値付近よりずれた位置であるが、5.3.1 と同様に、実測時には 3D マップに含まれない周辺の車両や看板などの影響や 3D マップの形状の誤差により、結果として良い衛星が選択され、真値付近よりも良い測位精度となったことが考えられる。

地点 67 付近は精度が高くなっているが、東側の建物の形状が真値付近と似ているため、結果として衛星選択が真値と似たためである。



(a) 3DMAP(見通し衛星)
+仰角に応じたSNRマスク



(b) 3DMAP(見通し衛星+反射波除去)
+仰角に応じたSNRマスク

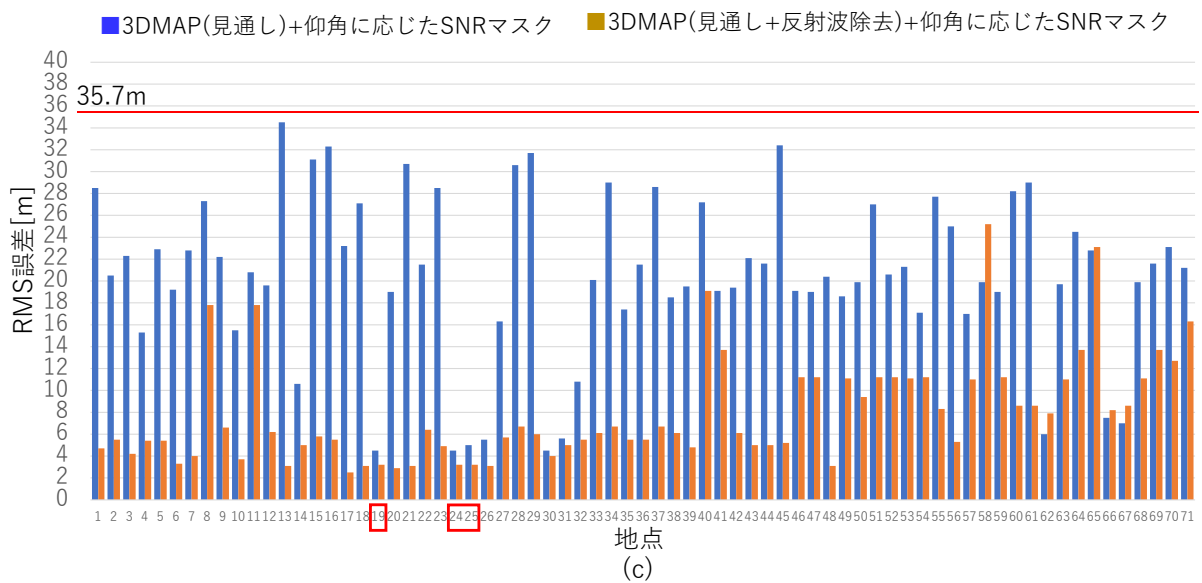


図 5-51 各測位手法の RMS 誤差(全地点)

本結果より、静止点において、概算位置を与え、仰角に応じた SNR マスクと 3D マップによる見通し衛星選択および反射波を受信している衛星の除外を適用した DGNSS を行うことで、概算位置周辺の道路上においては精度が大幅に向上し、概算位置が真値より 10m ほどの範囲であれば水平 RMS 誤差が 35.7m から約 5m に向上することが確認出来た。

5.3.3. 東京駅付近における走行評価（評価環境その3）

5.3.3.1. 評価環境

表 5-16 に測定シナリオを示す。2018年11月16日 2:58:00 から約18分間、高い建物が多い東京駅近くの路上を走行し、GPS, GLONASS, BDS, QZSS, Galileo のデータを記録した。低価格の2周波数受信機である u-blox F9P を使用して、5Hz で記録した。POSLV を車両に搭載し高精度な自己位置推定を行った。図 5-52 に車両の走行コース、測定場所、周辺環境、3D マップを示す。

表 5-16 評価シナリオ

項目	値
衛星システム	GPS, GLONASS, BDS, QZSS, Galileo L1/L2
評価時間	2018年11月16日 2:58:00 ～2018年11月16日 3:16:00
衛星位置	エフェメリス
受信機位置	走行データ POSLV
測位手法	RTLIB 2.4.3b33 Kinematic L1 continuous
GNSS 受信機	u-blox ZED-F9P 5Hz

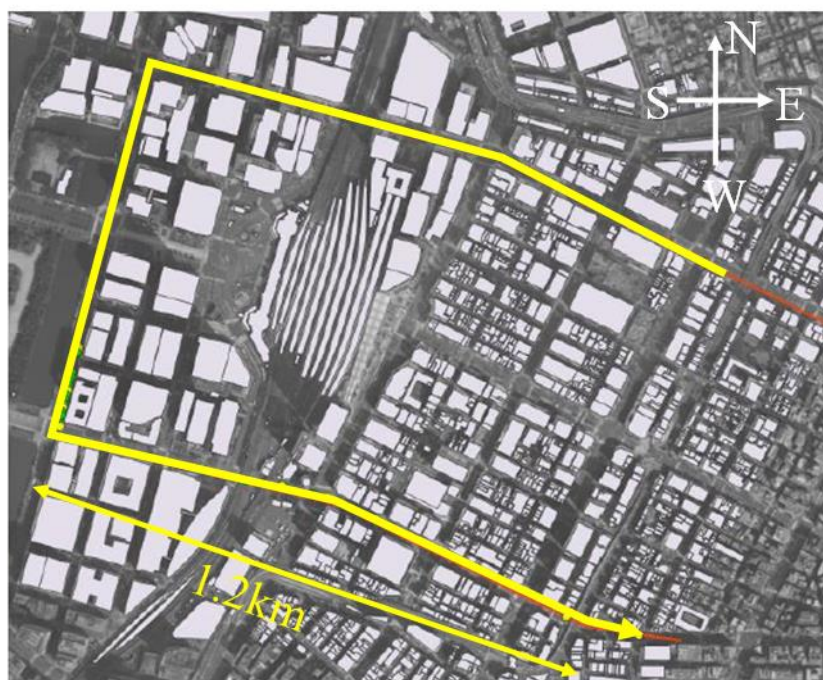


図 5-52 シミュレーションに用いた 3D マップと走行コース

5.3.3.2. 評価結果

図 5-53 の左側に仰角マスクのみ使用した RTK-GNSS の結果を、右側に仰角マスクと 3D マップにより LOS 継続衛星を選択して測位に使用した RTK-GNSS の結果を示す。3D マップを用いなかった RTK-GNSS の解が算出された割合は 2.5%であり、FIX 率は 1.2%であった。3D マップにより LOS 継続衛星のみを使用した RTK の解が算出された割合は 38.4%に増加し、FIX 率も 7.7%となった。この評価においては、L1 の観測データのみ使用したため、FIX 率は非常に低い。3D マップの使用により RTK-GNSS の測位性能が改善されたことが確認出来た[57]。

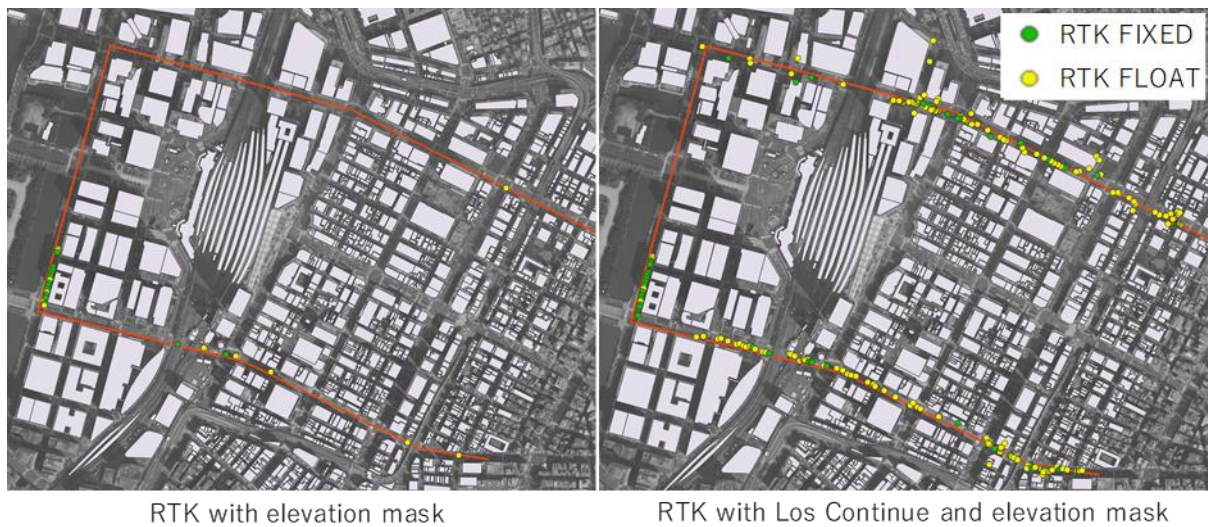


図 5-53 従来手法と LOS 継続衛星を用いた RTK-GNSS の結果比較

5.3.4. 東京駅付近における走行評価（評価環境その4）

5.3.4.1. 評価環境

表 5-17 に測定シナリオを示す。評価環境その3のうち、より厳しい環境である、東京駅西側の走行区間を2018年11月16日3:03:19から約8分間を抜粋した。評価環境その3では衛星選択を行うとL1観測情報のみが利用出来たが、本節では二周波の観測値を用いたRTK-GNSSに対応し、その結果を評価する。図 5-54 に車両の走行コース、測定場所、周辺環境、3Dマップを示す。

表 5-17 評価シナリオ

項目	値
衛星システム	GPS, GLONASS, BDS, QZSS, Galileo L1/L2
評価時間	2018年11月16日3:03:19 ~2018年11月16日3:11:19
衛星位置	エフェメリス
受信機位置	走行データ POSLV
測位手法	RTLIB 2.4.3b33 Kinematic L1+L2 instantaneous
GNSS 受信機	u-blox ZED-F9P 5Hz

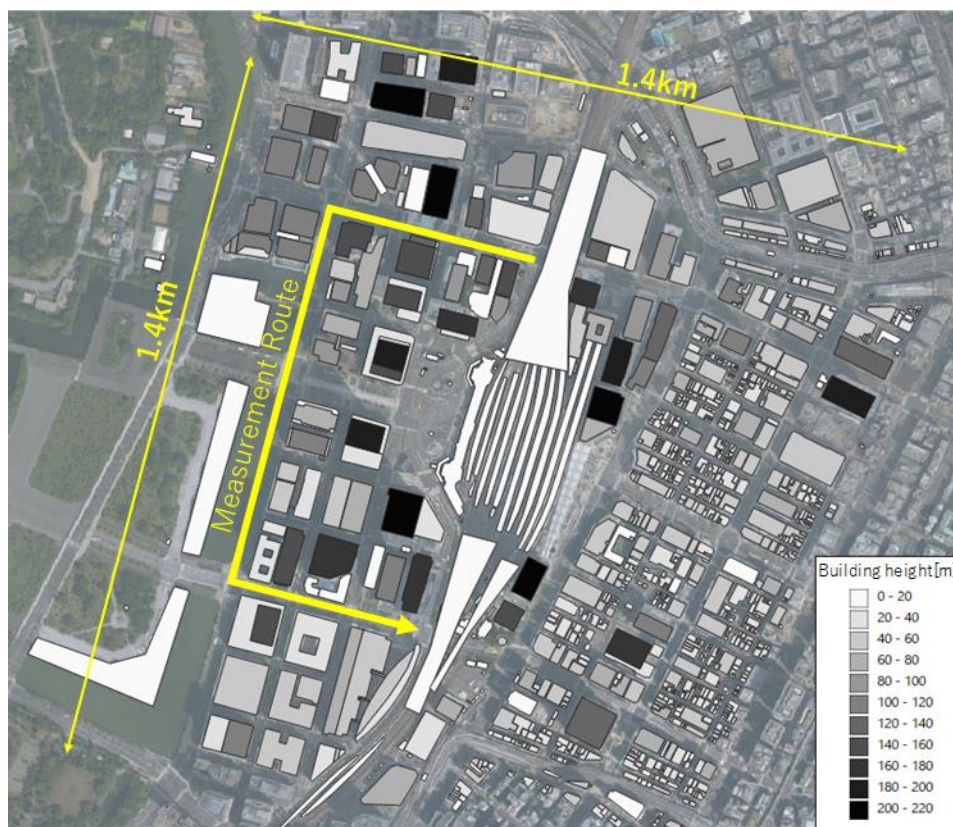


図 5-54 シミュレーションに用いたシミュレーションに用いた 3D マップと走行コース

5.3.4.2. 評価結果

図 5-55 に、シミュレーションにより推定された LOS 衛星と、実測により信号品質が良いと判断された衛星との比較を示す。測定した衛星と予測した衛星のうち、信号品質が良いと判断された衛星の一致率は 73.7%であった。

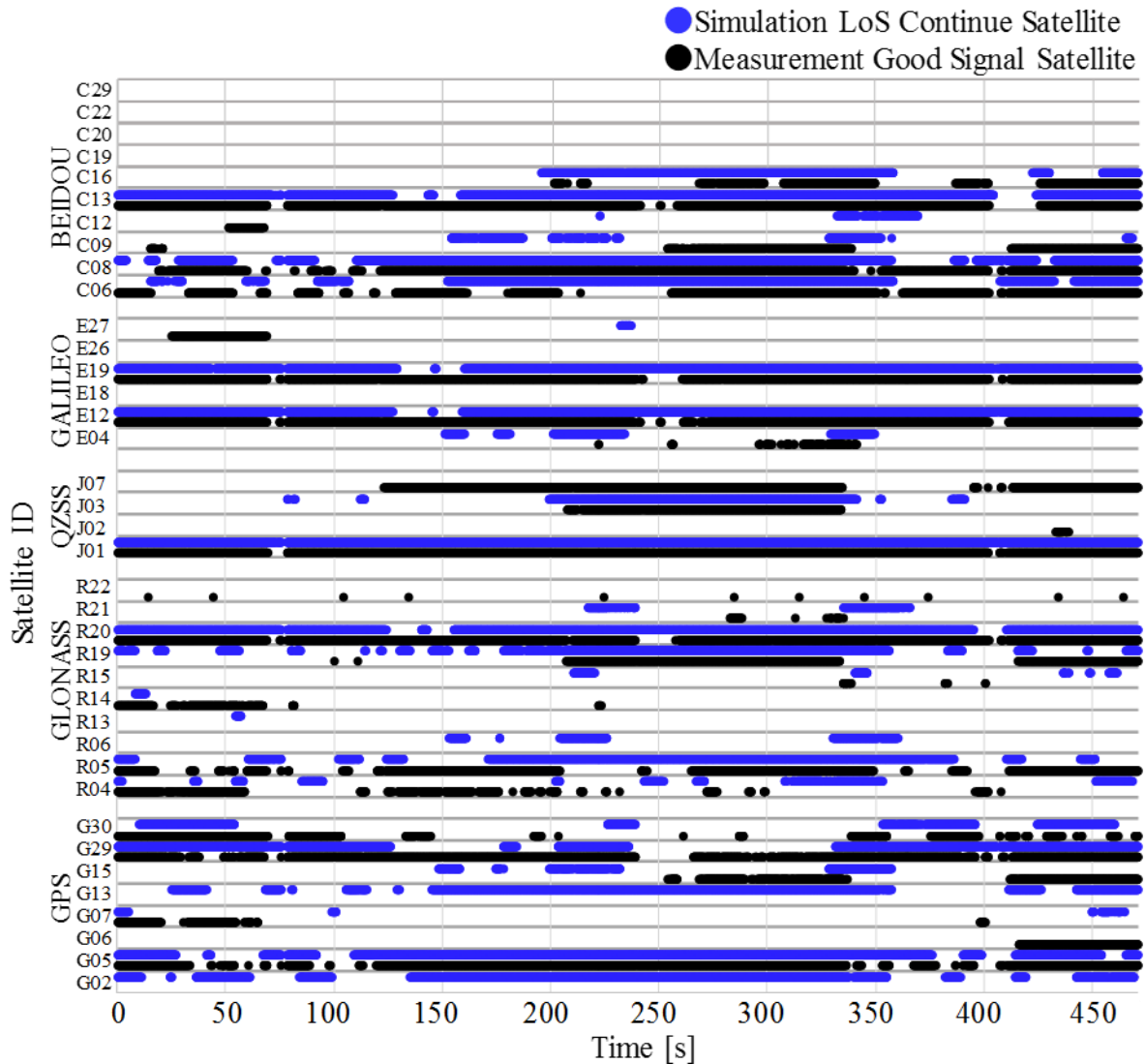


図 5-55 LOS 継続衛星と二周波観測データが出力されている衛星の比較

図 5-56 に RTK-GNSS の測位結果を示す。衛星選択を行わない場合 RTK-GNSS の FIX 率は 3.4% である。3D マップを用いて LOS 継続衛星を選択することにより、RTK-GNSS の FIX 率は 4.1% に増加する。40dB の SNR マスクを使用すると RTK-GNSS の FIX 率は 9.6% に増加する。3D マップを用いて LOS 継続衛星の選択と 40dB の SNR マスクを併用する場合、RTK-GNSS の FIX 率は 10.1% に増加する。

また、SNR マスクのみを用いた場合と、3D マップを用いた LOS 継続衛星を用いた場合では、RTK-GNSS の FIX 解が出る位置が異なる傾向がある。これら 2 つの手法より算出された FIX 解を両方用いると、FIX 解の割合は 14.5%に増加する。この評価から、厳しい環境下では 3D マップによる衛星選択のみでは、RTK-GNSS の性能向上が限定的である場合においても、他の方法と組み合わせることで測位性能の向上につながる可能性があることがわかった。

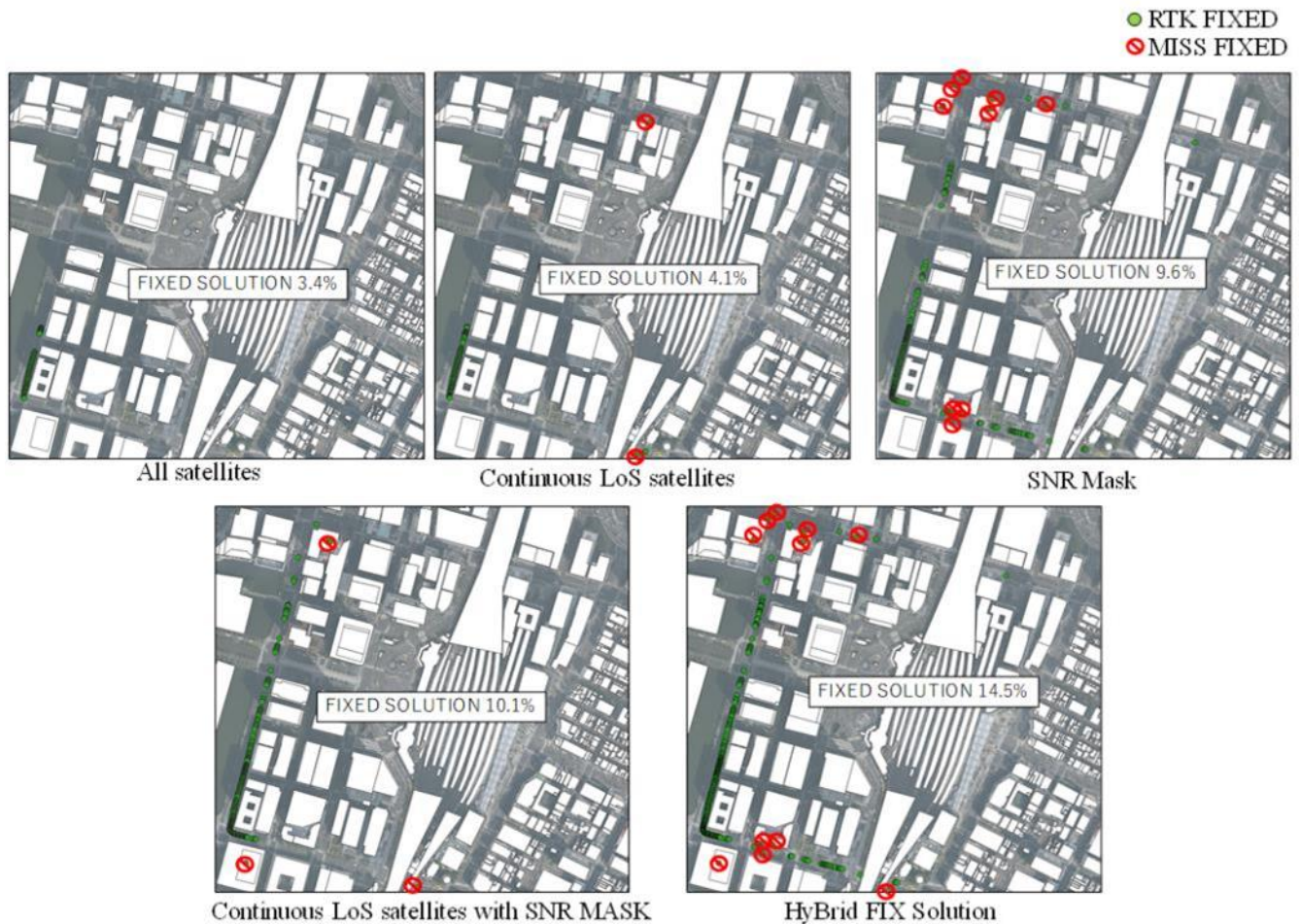


図 5-56 従来手法と 3D マップを用いた場合の RTK-GNSS の FIX 解の比較

この評価環境において、信号品質の予測精度が低い理由と、3D マップを用いた場合の課題について述べる。この走行コースでは新しい建物が多く、ガラス張りの建物など、GNSS 信号を強く反射する建物が多い。電波伝搬シミュレーションでは、材質に応じた比誘電率や透磁率を 3D マップに適用することで、反射波の信号強度をシミュレーションすることができるが、市販の 3D マップには建物の材料情報が含まれていない。そのため、材質を考慮したシミュレーションを行うことは困難である。今回の評価では、受信機の位置から衛星の見通しはないが二周波の搬送波位相を出力するエポックが 12.9%あった。見通しがいい信号では、正しい搬送波位相を出力できないため、高精度な測位ができない。

図 5-57 に、実際には GPS 衛星 G07 の見通しがなかったが搬送波位相が出力された受信機の位置と、電波伝搬シミュレーションを用いて衛星からの信号の伝搬経路を推定した結果を示す。図において赤線は直接波、緑の線は回折波、青線は回折と反射の両方を含む経路を示す。衛星は赤点線の方向に位置しており、直接波の伝搬経路は、東側の建物の影に隠れている。そのため、受信機は回折波と反射波のみを受信していることがわかる。

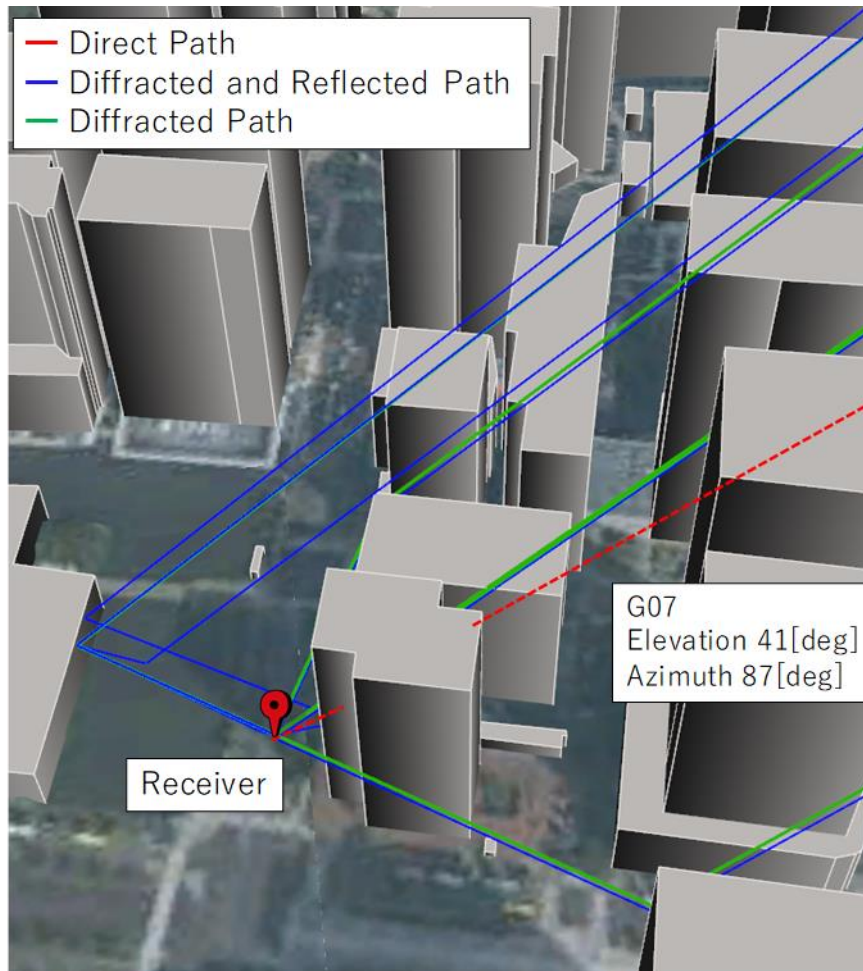


図 5-57 NLOS 衛星を受信し二周波の搬送波位相が出力されていた場合の電波伝搬経路

これらのエポックは GNSS の見通しシミュレーションでは推定できず、マッチング率の評価では誤差となり、衛星選択においても誤った選択を起こす。4.4 の評価で使用した Trimble 社の高精度 GNSS 受信機 NetR9 は、信号品質の良い搬送波位相のみを出力している。そのため、2 周波の搬送波位相が出力されていることと、信号品質が良い状態が一致した。一方、本評価で使用した安価な二周波受信機の信号品質評価においては、明らかに直接波が受信出来て居ない状況においても 2 周波の搬送波位相を出力している状況が観測されたため、擬似距離残差を信号品質の指標として用いることが望ましいと考えられる。

5.3.5. 東京駅付近における走行評価（評価環境その5）

本節では、走行中の車両の概算位置より 3D マップによる見通し衛星の選択を行い、RTK-GNSS の性能向上の検証を行う。

5.3.5.1. 評価環境

東京の丸の内にて車両に低コスト 2 周波受信機 u-blox F9P を搭載し、走行時の GNSS の観測データを記録した。表 5-18 に測定シナリオを示す。

表 5-18 評価シナリオ

項目	値
衛星システム	GPS, GLONASS, BDS, QZSS, Galileo L1/L2
評価時間	2020 年 5 月 30 日 1:30:00-1:50:00
衛星位置	エフェメリス
受信機位置	概算位置
測位手法	RTLIB 2.4.3b33 DGNSS
GNSS 受信機	u-blox ZED-F9P 1Hz(5 月 30 日)



図 5-58 シミュレーションに用いた 3D マップと走行コース

図 5-58 に車両の走行コース、測定場所、周辺環境、3D マップを示す。本評価では走行ルート上に予め 3D マップによる衛星の見通し選択の結果が保持されており、概算位置を元に 3D マップによる見通し衛星選択を参照するケースを想定する。図 5-59 に 3D マップを用いた衛星選択の

評価地点を示す。走行車線上に 3m 間隔でグリッド状に評価地点を設けた。本評価では受信機の概算位置から、近傍の評価点は測位結果を中心として東西南北それぞれ 6m ずつの範囲に、3m 毎に評価地点の検索基準地点を設け各グリッドで衛星選択を行い測位解を得る。近傍の地点における衛星選択の結果を集計し測位解とする。

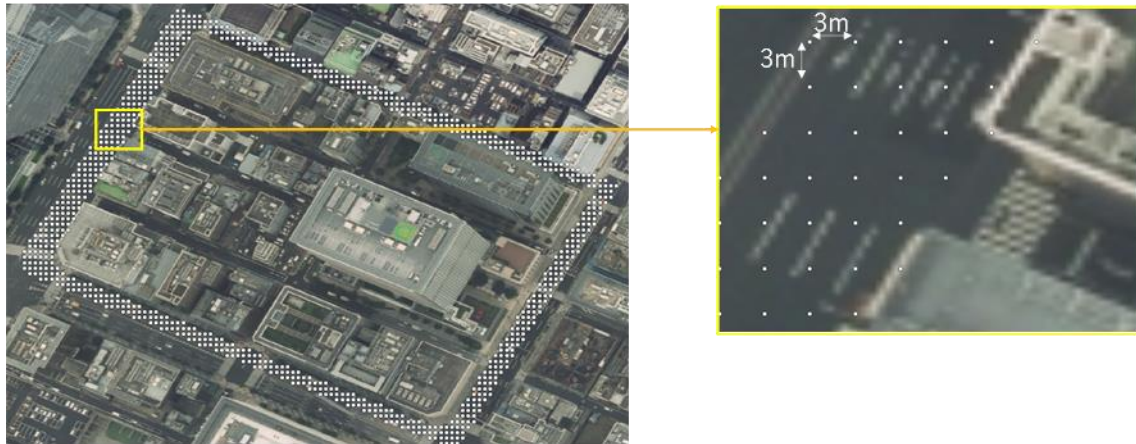


図 5-59 走行経路上に配置した評価地点

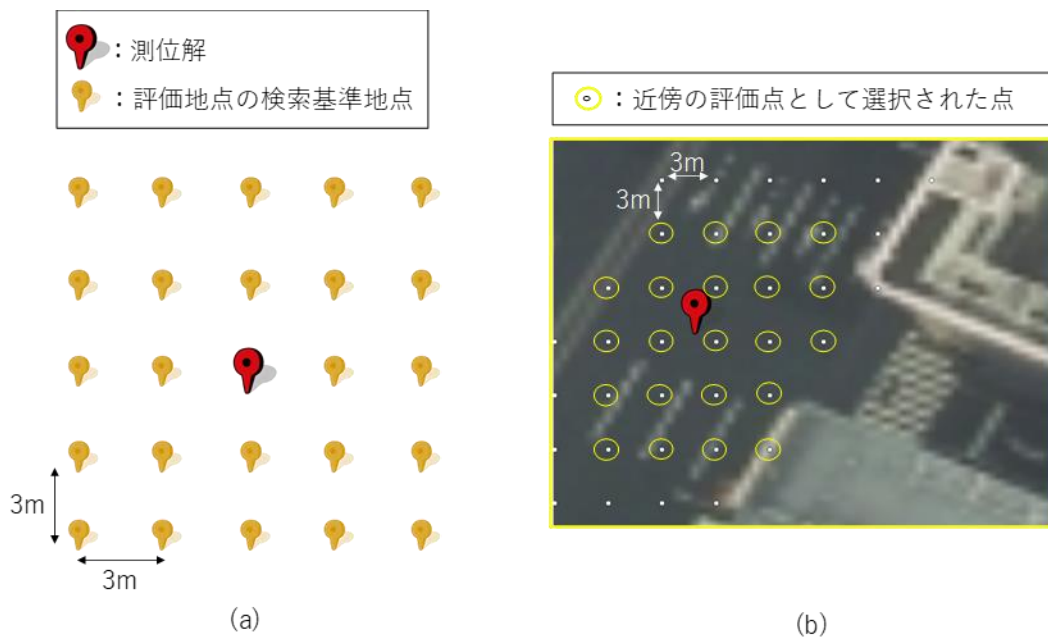


図 5-60 近傍の評価地点の選定

従来手法を用いた測位結果として、仰角に応じた信号対雑音比（SNR）マスクを 31～40dB-Hz、仰角 5 度以下では 31dB、15 度では 33dB、25 度では 34dB、35 度では 37dB、45 度では 39dB、55 度以上では 40dB の範囲で使用し、また、仰角マスク角度を 10° とした。図 5-61 に SNR マスクを用いた DGNSS の結果を示す。5/30 の観測データを用いた DGNSS では道路上となる測位解は 37.3%であり、道路外の測位解は除外して表示している。

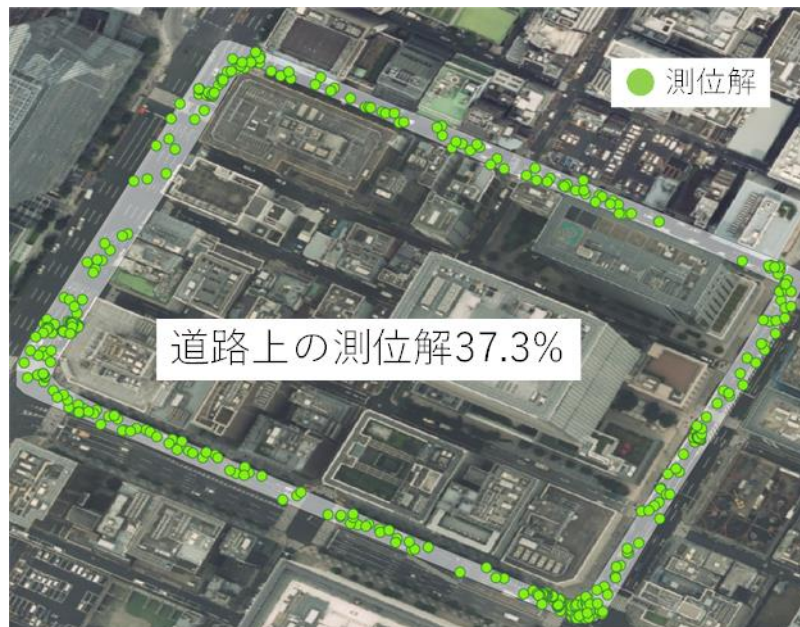


図 5-61 SNR マスクを用いた DGNSS 測位解 (5/30)

5.3.5.2. 走行データにおける高精度な概算位置を前提とする衛星選択の評価

図 5-62 に RTK-GNSS と IMU などを用いた場合を想定した、走行軌跡を示す。

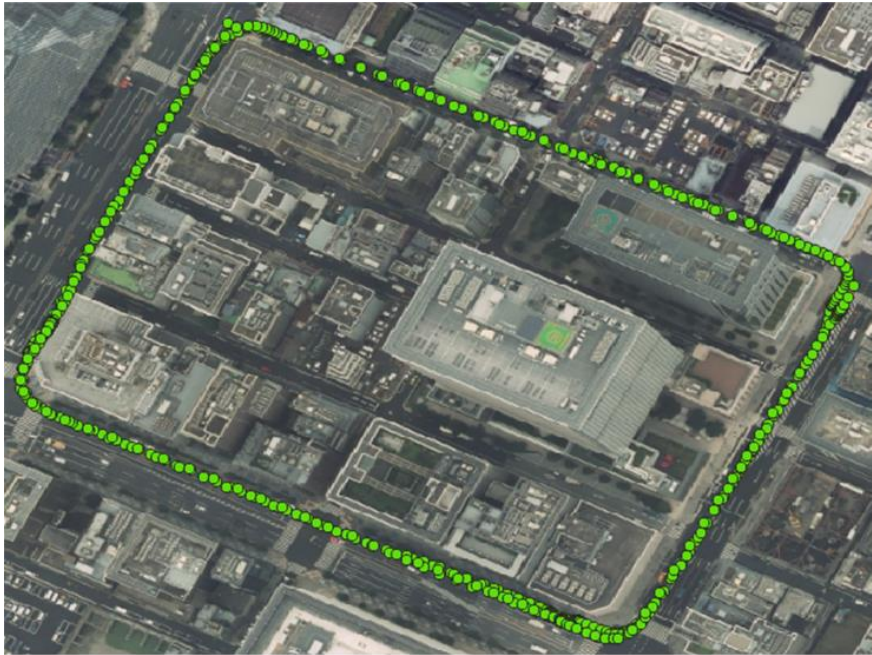


図 5-62 RTK-GNSS と IMU などを用いた走行軌跡 (5/30)

図 5-63 にこの走行軌跡より、近傍の評価地点にて衛星選択を行い、DGNSSS を行った結果を示す。近傍の評価地点より、算出された測位解より道路の中心位置に近い解を選択的に使用している。

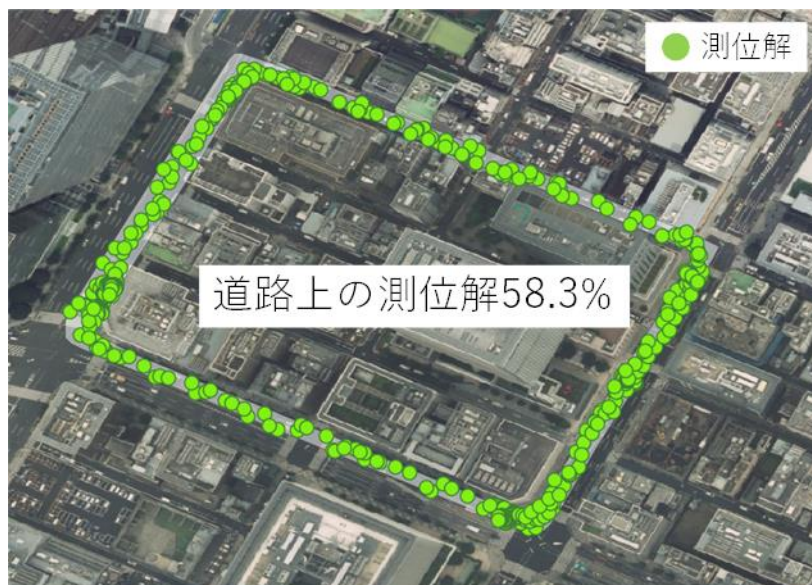


図 5-63 3DMAP と SNR マスクを用いた DGNSSS 測位結果 (5/30)

58.3%の解が道路上となり，SNR マスクのみを用いた測位解よりも性能が向上した。

5.4. まとめ

本章では 3D マップを用いた衛星選択による測位精度の向上実験を示した。東京駅付近における静止点評価では電波伝搬パス種別と擬似距離残差との関連を示した。また，静止点において位置の真値を用いずとも，正しい衛星を選択することで RTK-GNSS の FIX 率は 0%から 34%に増加し 3D マップによる測位精度向上が有効に働くことを示した。DGNSSS においては水平 RMS 誤差が 35.7m から約 3m 程度に向上し，3D マップによる測位精度向上が有効に働くことを示した。同様に走行データにおいて，位置の真値を与えた場合と概算位置を与えた場合の両方において，3D マップによる測位精度の向上が有効に働くことを示した。RTK-GNSS の FIX 率は 3D マップを用いない場合 3.4%であったのに対し，3D マップを用いた場合 10.1%に向上した。また，事前に道路上をグリッド状に区切り，各点において 3D マップによる見通し判定を事前に行い，受信機の測位解を用いてデータを参照した結果，DGNSSS において道路を走行した車両の測位解が道路上となる割合は 3D マップを用いない場合 37.3%であったのに対し，IMUなどを搭載した受信機相当の測位解を初期位置として 3D マップを用いる場合 58.3%に向上した。IMUなどを搭載した受信機においても，3D マップを用いた衛星測位と連携することで，更に高い測位精度が得られる可能性があると考えられる。

第 6 章 結論

6.1. まとめ

本論文では、都市部における RTK-GNSS の性能を予測する手法を確立すること、都市部における RTK-GNSS の性能を向上させる手法を確立することを目的として、3D マップを用いた GNSS シミュレーションを利用した、RTK-GNSS の性能予測手法および RTK-GNSS の性能向上の評価を行った。

RTK-GNSS の性能予測手法では、3D マップを用いた見通しが継続する場合信号品質が良いことに着目し、検証を行った。高精度受信機を用いた日比谷を走行した車両走行により取得した GNSS の観測データの処理結果および、3D マップを使用したシミュレーションにより、信号品質の良い衛星数を推定し比較を行い、RTK-GNSS で FIX 解が得られるか否かを推定した。ハーフサイクルアンビギュイティの推定にかかる時間を考慮し、見通し判定と遅延を考慮する手法を併用した結果、信号品質の良い衛星を約 88%の精度で推定することができ、レイトレース法による SNR の推定を行った場合を上回った。また、シミュレーションにより推定した LOS 継続衛星数により RTK-GNSS で FIX 解が得られるか推定した場合、約 84%の精度で予測出来ることがわかった。

RTK-GNSS の性能向上手法の評価では、3D マップを用いて、車両走行やシミュレーションにより得られた GNSS 観測データの処理結果と、信号品質の良い衛星数を推定した静止点において、位置の真値を与えなくとも道路上という仮定をおき、3D マップを用いた衛星選択を行うことで、RTK-GNSS の FIX 率が 0%から 34%に向上した。同様に DGNSS において、概算位置を与え、仰角に応じた SNR マスクと 3D マップによる見通し衛星選択および反射波を受信している衛星の除外を適用した DGNSS を行うことで、概算位置周辺の道路上においては精度が大幅に向上し、概算位置が真値より 10m ほどの範囲であれば水平 RMS 誤差が 35.7m から約 5m に向上することを確認した。さらに、走行データに対し、測位解を用いて 3D マップによる見通し衛星の衛星選択を行うことで、RTK-GNSS FIX 率が 3.4%から 10.1%に向上することを確認した。また、DGNSS において道路を走行した車両の測位解が道路上となる割合は、3D マップを用いない場合 37.3%であったのに対し、3D マップを用い衛星選択を行った場合 58.3%に向上した。

以上の検証により、提案手法による都市部における 3D マップを用いた RTK-GNSS の性能の予測および 3D マップを用いた RTK-GNSS の性能向上を実証した。本研究の成果が、RTK-GNSS の利便性の向上に繋がり、RTK-GNSS の普及と自動運転への活用の拡大、今後の労働人口が減少した社会への貢献がなされれば、本望である。

6.2. 今後の課題と問題点

本研究では 3D マップを用いた測位精度の予測および測位性能の向上について示したが、今後の課題として以下が挙げられる。

A) 将来予測の評価

第 4 章と第 5 章の評価において、評価対象のシナリオに適したエフェメリスを用いて、RTK-GNSS の性能予測および性能の向上の評価を行った。RTK-GNSS の性能予測では将来の評価が重要である。3.3.1 で述べたとおり、エフェメリスの利用期間を拡張し将来の衛星配置は予測可能であるが衛星の位置に誤差を含むため、性能評価が課題である。

B) 見通し継続時間の調整

第 4 章の評価において、見通し継続時間は観測データより推定し決定した。見通し継続時間は理論上のハーフサイクルアンビギュイティを推定するために必要な時間より、長い時間となった。汎用的に利用するためには、測定環境による変化を検討することが課題である。

C) RTK-GNSS の性能予測精度向上

第 4 章の評価において、RTK-GNSS を予測するうえで受信機の性能と RTK-GNSS の実装および観測データに含まれる NLOS 衛星数は考慮していない。また、一致しなかった場合について、予測と実測のどちらが FIX しておりどちらが FIX しないとされたのか、詳細の検討が必要である。RTK-GNSS の FIX 状況の予測の精度を上げるためには検討が必要であり、今後の課題である。

D) RTK-GNSS 予測時の必要衛星数の調整

第 4 章の評価において、RTK-GNSS の FIX に必要な衛星数は仮に 9 機とした。受信機の性能や RTK-GNSS の実装に依存するが、汎用的に使える衛星数を検討することが課題である。

E) 多様な場所における評価

第 4 章と第 5 章の評価において、東京駅周辺の高い建物が多く厳しい環境において評価を行った。本評価においては、全ての環境において 3D マップを使用する効果は見られたが、改善が少ないことも見られた。より多くの場所で評価を行い定量的に性能評価を行うことが課題である。定量的な性能評価を行う際には、建物の属性として建坪率や道路幅などを用い、どのような属性の場所における評価が行えており、またどういった属性の場所における評価が行えてないか明確にすることが重要である。

F) オンライン処理の検討

第 4 章と第 5 章の評価において、取得したデータをオフライン処理して用いた。3.3.2.2 において高速な見通し判定処理の実現方法を検討し、5.3.5 では事前計算した見通し判定をデータに適用する評価を実施したが、実用化に向けてはそれらをオンライン処理することが課題である。

G) 3D マップの調達

第 4 章と第 5 章の評価において、市販の 3D マップを加工したものを用いた。3D マップを用いた手法を広く利用するためには安価に 3D マップを調達する必要がある。3.2 で触れたとおり、国土地理院基盤地図情報の建物形状データと JAXA の DSM データを組み合わせることで日本全国の 3D マップを無償で調達することが可能であるが、DSM データは 30m メッシュデータであるため、高さ方向の精度が 30m ごとに平均化され、市販の 3D マップと比べ粗くなる。そのため、生成される 3D マップを使用した場合の性能評価が必要であり課題である。

第 7 章 謝辞

本論文を執筆するのにあたり，多大なる助力をいただきました指導教官である東京海洋大学の久保信明教授に感謝いたします。2012 年に GPS の研究を始めた頃より，的確なご指導を頂きました。

副査の電子航法研究所坂井丈泰様，東京海洋大学の渡部大輔准教授には本研究に対し，的確な多くのご指摘を頂き，本博士論文においてもご指摘の点を反映させて頂きました。ご指摘により研究内容が洗練されたことを感謝致します。

東京海洋大学の情報工学研究室の学生の皆様および事務の吉原様には様々な相談に乗って頂き感謝致します。株式会社 構造計画研究所の電波技術部，通信システム部，IoE ビジネス部の皆様には研究を進めるのにあたり多大なるご協力を頂き感謝いたします。

国際会議 Institute of Navigation International Technical Meeting 2020 への投稿，および電子情報通信学会の論文誌 Communication express に投稿する際に，多くの助言を頂きました Curtin 大学の Ahmed El-Mowafy 氏に感謝致します。

中部大学の海老沼先生には，GNSS 信号エミュレーションの構築に関して，多大な助力を頂き感謝いたします。なお，GNSS 信号エミュレーションにより RTK-GNSS の評価が行えなかった原因は，利用したハードウェアの制約と私の技術力不足であることはここに明記させて頂きます。

また，本研究の一部として掲載している成果は，JSPS 科研費 JP16K0532 の助成を受けました。

第8章 参考文献

8.1. 参考論文等リスト

- [1] 衛星測位活用検討コンソーシアム, “自動走行システムの実現に向けた諸課題とその解決の方向性に関する調査・検討における衛星測位活用に向けた基礎評価に関する調査 H27 報告書,” 経済産業省, July.2016.
- [2] 国土交通省, ”TS・GNSS を用いた盛土の締固め管理要領,” Mar.2012.
- [3] 工藤 新一, 河野 浩之, 秤谷 嘉明, 江森 洋都, 古川 玲, 吉敷 由起子, “山間部建設現場における衛星測位シミュレーション (その1) —ダム建設現場におけるレイトレース解析—,” 土木学会全国大会, VI-990, Sept.2019.
- [4] “Softbank, “ichimill,” <https://www.softbank.jp/biz/iot/service/ichimill/>, July,15,2020.
- [5] “docomo, “IoT 高精度 GNSS 位置情報サービス,” https://www.nttdocomo.co.jp/biz/service/highprecision_gnss_positioning/, July,15,2020.
- [6] “Taro Suzuki, “GNSS Radar,” <http://www.taroz.net/GNSS-Radar.html>, July,15,2020.
- [7] 村木 広和,北川 悦司,田中 成典,古田 均,野中 一希, “3次元衛星電波経路シミュレーションに関する研究開発,” 土木情報システム論文集, no.13, pp87-94, Oct.2004. DOI: 10.2208/journalac2003.13.0_87
- [8] 徐庸鉄, ”3次元 GIS を用いた衛星測位サービスの利用可能性評価のためのシミュレーションシステムの開発,” 東京大学, 2005, 博士論文.
- [9] K. Hunerbein, G. Moura, “A new tool for simulation of geospecific multipath and obscuration of GPS/GNSS signals with relation to realistic 3Dcity models,” 2014, Conference Proceedings of the European Telemetry Conference, Nurnberg,3rd-5th June, 2014.
- [10] Sven Bauer, Marcus Obst, Robin Streiter, Gerd Wanielik, “Evaluation of Shadow Maps for Non-Line-of-Sight Detection in Urban GNSS Vehicle Localization with VANETs—The GAIN Approach,” Proceedings of the 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference, Dresden, Germany, June.2013. DOI: 10.1109/VTCspring.2013.6692555
- [11] Chapuis, Thierry, Bonhoure, Bernard, Rougerie, Sébastien, Lacoste, Frédéric, Grelier, Thomas, Lapeyre, Didier, Noirat, Pierre, “SPRING: A Powerful 3D GNSS Simulator for Constraint Environment,” Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014) , pp.454-465, Tampa, Florida, September 2014.
- [12] S. Komatsu, A. Nagao, T. Suzuki, and N. Kubo, “Positioning Simulation Using a 3D Map and Verification of Positional Estimation Accuracy in Urban Areas Using Actual Measurement,” SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems, vol.9, no.1, pp.171-179, Mar.2016.
- [13] S. Miura, S. Hisaka and S. Kamijo, “GPS Positioning with Multipath Detection and Rectification using 3D Maps,” International Journal of Automotive Engineering, vol. 5, no.1, pp.23-29, Mar.2016. DOI: 10.1109/ITSC.2013.6728447
- [14] Suzuki, T., Kubo, N., “Correcting GNSS multipath errors using a 3D surface model and particle filter,” In 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation,” Proceedings of the ION GNSS 2013, Vol. 2, pp.1583-1595, Sept,2013.
- [15] Hsu L., Gu, Y. Huang, Y. Kamijo, S., “Urban Pedestrian Navigation Using Smartphone-Based Dead Reckoning and 3-D Map-Aided GNSS”, Vol 16 , Issue: 5, pp1281-1293. , March.2016. DOI: 10.1109/JSEN.2015.2496621
- [16] Hsu, L., et al., “NLoS Correction/Exclusion for GNSS Measurement Using RAIM and City Building Models,” Sensors (Basel, Switzerland) vol. 15,7 17329-49. 17 Jul. 2015, doi:10.3390/s150717329
- [17] Ivan S, Mohammad R, Richard B, “Resilient multipath prediction and detection architecture for low-cost navigation in challenging urban areas”, *Journal of the Institute of navigation*, vol.67, issue.2, pp397-409, June.2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/navi.362>
- [18] Aude Bourdeau, Mohamed Sahnoudi, Jean-Yves Tourneret, “Constructive use of GNSS NLoS-multipath: Augmenting the navigation Kalman filter with a 3D model of the environment,” 15th International Conference on Information Fusion, Singapore, Singapore, August, 2012.
- [19] Groves, PD. Adjrjad M., “Performance assessment of 3D - mapping-aided GNSS part 1: Algorithms, user equipment, and review,” *Journal of the Institute of navigation*, vol.66, issue.2, pp341-362, Mar.2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/navi.288>

- [20] Groves,PD. Adjrad M., “Performance assessment of 3D - mapping - aided GNSS part 2:Environment and mapping,” *Journal of the Institute of navigation*, vol.66, issue.2,pp363-383,Mar.2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/navi.289>
- [21] 平山 検士, et al., “準天頂衛星システム導入効果推定のための RTK-GNSS シミュレーション方法の構築,” *応用測量論文集*, Vol.21, pp.11-18, 2010
- [22] 福森秀晃, 佐田達典, 清水哲也, 村山盛行, 石坂哲宏, “移動体における RTK-GNSS の測位解予測手法に関する研究,” *土木情報利用技術論文集 2010 年第 19 回*,pp.133-140, Sept, 2010.
- [23] “NTT GEOSPACE Co., Ltd, “GEO SPACE 3D,” <https://www.ntt-geospace.co.jp/geospace/3d.html>, Mar.2020.
- [24] “National Aeronautics and Space Administration, “CDDIS NASA’s Archive of Space Geodesy Data Broadcast ephemeris data,” https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/broadcast_ephemeris_data.html, July,15,2020
- [25] “IS-GPS-200K,” <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200K.pdf>, July,15,2020
- [26] “GLONASS INTERFACE CONTROL DOCUMENT General Description of Code Division Multiple Access Signal System Edition 1.0,” <http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD-GLONASS-CDMA-General.-Edition-1.0-2016.pdf>, July,15,2020
- [27] “Cabinet Office, “IS-QZSS-PNT-003, (November 5, 2018),” <https://qzss.go.jp/en/technical/download/pdf/ps-is-qzss/is-qzss-pnt-003.pdf>, July,15,2020
- [28] “European GNSS (Galileo) open service signal-in-space interface control document,” <https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SIS-ICD.pdf>, July,15,2020
- [29] “BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signals B1C and B2a (Test Version),” <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/201806/P020180608522414961797.pdf>, July,15,2020
- [30] Pratap Misra,Per Enge, 測位航法学会訳, “精説 GPS(改訂第二版),” p.168, (社) 測位航法学会, 東京, 2010.
- [31] U-blox., “ZED-F9P module,” <https://www.u-blox.com/en/product/zed-f9p-module>, Mar.2020.
- [32] “RTKLIB,” <https://www.rtklib.com/>, July,15,2020
- [33] “The Geospatial Information Authority of Japan, “Download page of Basic geographic data of Japan,” <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>, Mar.2020.
- [34] “JAXA 地球観測センター, “ALOS 全球数値地表モデル (DSM) "ALOS World 3D,” https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/aw3d30/index_j.htm
- [35] “ZENRIN Co., Ltd, “Zmap-AREA II,” <http://www.zenrin.co.jp/product/gis/zmap/zmaparea.html>, Mar.2020.
- [36] “NTT-DATA Co., Ltd, “AW3D,” <https://www.aw3d.jp/en/>, Mar.2020.
- [37] “IGS, “RINEX The Receiver Independent Exchange Format Version 3.02,” <ftp://igs.org/pub/data/format/rinex302.pdf> July,15,2020
- [38] 江森洋都, 古川 玲, 吉敷由起子, 有効期間外のエフェメリスを用いた衛星測位予報におけるシミュレーション精度の検証,電子情報通信学会ソサイエティ大会 2018, B-2-25,Sept.2018.
- [39] Pratap Misra,Per Enge, 測位航法学会訳:“精説 GPS(改訂第二版),” pp.145-146, (社) 測位航法学会, 東京, 2010.
- [40] Imai, T. “A Survey of Efficient Ray-Tracing Techniques for Mobile Radio Propagation Analysis,” *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol. E100.B Issue 5, pp.666–679, May. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1587/transcom.2016EBI0002>
- [41] 細矢良夫, “電波伝搬ハンドブック編集委員会, “電波伝搬ハンドブック, “リアライズ理工センター, pp.234-241, 東京, 1994.
- [42] R.G. Kouyoumjian,P.H. Pathak, “A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface,” *Proc. IEEE*, vol. 62, pp.1448–1461, (Nov 1974). DOI: 10.1109/PROC.1974.9651
- [43] Pratap Misra,Per Enge, “測位航法学会訳:精説 GPS(改訂第二版),” p. 369, (社) 測位航法学会, 東京, 2010.
- [44] 吉原 貴之, 本吉 弘岐, 毛塚 敦, 齋藤 享, 山口 悟, “積雪底面で受信した GNSS 信号の積雪伝搬遅延量の解析,” *雪氷研究大会 2016 年 9 月*, A-5-5, https://doi.org/10.14851/jesir.2016.0_121
- [45] 古川 玲, 江森洋都, 吉敷由起子, “3D マップによる上空遮蔽画像を用いたリアルタイム衛星測位シミュレーション構築の検討,” *電子情報通信学会ソサイエティ大会 2018 9 月*, B-2-26
- [46] Furukawa,R. Kubo,N., “Framework and Performance Evaluation of a Ray Tracing-Software Defined Radio Method for GNSS Positioning in an Urban Canyon Environment,” *The International Technical Symposium on Navigation and Timing(ITSNT) 2017*, Toulouse, France, Nov.2017.

- [47] nuand, “BlaseRF x40,” <https://www.nuand.com/product/bladerf-x40/>, July,15,2020
- [48] “OSQZSS, “GPS-SDR SIM,” <https://github.com/osqzss/gps-sdr-sim>, July,15,2020
- [49] 古川 玲, 久保 信明, “電波伝搬シミュレーションによるマルチパス環境における RTK-GNSS 測位の FIX 状況予測,” 測位航法学会論文誌, 2019 年,10 巻,2 号 ,pp. 13-22, Aug.2019. DOI:<https://doi.org/10.5266/ipntj.10.13>
- [50] “Trimble Inc., “Trimble Net R9,” <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/r9s>, July,15,2020.
- [51] “Applanix, “Applanix POS LV,” <https://www.applanix.com/products/poslv.htm>, July,15,2020.
- [52] “QGIS,” <https://www.qgis.org/ja/site/forusers/download.html>, July,15,2020.
- [53] 古川玲, 江森洋都・吉敷由起子, 久保信明, “GNSS 観測における樹木による遮蔽の影響の検討,” “電子情報通信学会総合大会, B-2-3, 2019 年.
- [54] 久保信明, “GPS 測位におけるマルチパス誤差の低減化と高精度測位の可能性について,” 東京大学, 2005, 博士論文.
- [55] 国土地理院, “マルチ GNSS 解析技術等の開発に向けた衛星系の組み合わせに関する技術開発業務,” 2.2 章, pp.38-41, Apr.2014.
- [56] Furukawa,R, Kubo,N; Ahmed,El. “Verification of GNSS Multipath and Positioning in Urban Areas Using 3D maps, IEICE Communication Express, 2020XBL0096, <https://doi.org/10.1587/comex.2020XBL0096>
- [57] Furukawa,R. Kubo,N, Ahmed,El, “Prediction of RTK-GNSS Performance in Urban Environments Using 3D Model and Continuous LoS Method,” Proceedings of the 2020 International Technical Meeting of The Institute of Navigation,2020,San Diego.Jan,2020. DOI: <https://doi.org/10.33012/2020.17176>

8.2. 業績リスト

学術論文誌掲載	古川 玲, 久保 信明, “電波伝搬シミュレーションによるマルチパス環境における RTK-GNSS 測位の FIX 状況予測,” 測位航法学会論文誌 10 (2), 13-22, Aug.2019.
学術論文誌掲載	<u>Furukawa,R</u> , Kubo,N; Ahmed,El. “Verification of GNSS Multipath and Positioning in Urban Areas Using 3D maps, IEICE Communication Express, 2020XBL0096, https://doi.org/10.1587/comex.2020XBL0096
国際会議発表 (査読付き)	<u>Furukawa,R</u> , Kubo,N, Ahmed,El, “Prediction of RTK-GNSS Performance in Urban Environments Using 3D Model and Continuous LoS Method,” Proceedings of the 2020 International Technical Meeting of The Institute of Navigation,2020,San Diego,Jan.2020.
国際会議発表	<u>Furukawa,R</u> . Kubo,N “Framework and Performance Evaluation of a Ray Tracing-Software Defined Radio Method for GNSS Positioning in an Urban Canyon Environment,” The International Technical Symposium on Navigation and Timing(ITSNT) 2017, Toulouse,Nov.2017.
国内会議発表	古川玲, 江森洋都, 吉敷由起子, “3D マップモデルによる上空遮蔽画像を用いたリアルタイム衛星測位シミュレーション構築の検討,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会,B-2-26, 2018 年.
	古川玲, 江森洋都, 吉敷由起子, “アーバンキャニオン環境における衛星測位の品質分析に向けた 観測情報可視化の検討,” “GPS/GNSS シンポジウム 2017, 2017 年.
	古川玲, 江森洋都, 吉敷由起子, “2 行軌道要素(TLE)を用いた衛星測位天気予報におけるシミュレーション精度の検証,” 電子情報通信学会総合大会, B-2-9, 2018 年.

	古川玲, 江森洋都・吉敷由起子, 久保信明, “GNSS 観測における樹木による遮蔽の影響の検討,” 電子情報通信学会総合大会, B-2-3, 2019 年.
--	---

付録[A] 受信アンテナの利得

天頂角[Deg]	方位角[Deg]	θ 成分の 正規化利得[dBi]	θ 成分の 位相[Deg]	ϕ 成分の 正規化利得[dBi]	ϕ 成分の 位相[Deg]	天頂角[Deg]	方位角[Deg]	θ 成分の 正規化利得[dBi]	θ 成分の 位相[Deg]	ϕ 成分の 正規化利得[dBi]	ϕ 成分の 位相[Deg]
0	0	-2.166852833	0	-3.290031577	-90	45	0	-5.823954613	0	-7.255568532	-90
1	0	-2.221979823	0	-3.355580604	-90	46	0	-5.980909054	0	-7.419161171	-90
2	0	-2.277064493	0	-3.421184572	-90	47	0	-6.137850513	0	-7.58277189	-90
3	0	-2.332106502	0	-3.486844061	-90	48	0	-6.294778938	0	-7.746400788	-90
4	0	-2.387105502	0	-3.552559658	-90	49	0	-6.451694278	0	-7.910047963	-90
5	0	-2.442061147	0	-3.618331957	-90	50	0	-6.608596484	0	-8.07313515	-90
6	0	-2.444588766	0	-3.615438682	-90	51	0	-6.807042644	0	-8.275553214	-90
7	0	-2.447105502	0	-3.612559658	-90	52	0	-7.005485502	0	-8.477397545	-90
8	0	-2.4496114	0	-3.609694809	-90	53	0	-7.20392505	0	-8.67924652	-90
9	0	-2.452106502	0	-3.606844061	-90	54	0	-7.402361283	0	-8.881100153	-90
10	0	-2.454590852	0	-3.60400734	-90	55	0	-7.600794192	0	-9.082958457	-90
11	0	-2.510860297	0	-3.668267677	-90	56	0	-7.785485502	0	-9.257397545	-90
12	0	-2.567105502	0	-3.732559658	-90	57	0	-7.970147026	0	-9.431878435	-90
13	0	-2.62326319	0	-3.796883534	-90	58	0	-8.154778938	0	-9.606400788	-90
14	0	-2.679522601	0	-3.861239557	-90	59	0	-8.339381409	0	-9.780964265	-90
15	0	-2.735694199	0	-3.925627983	-90	60	0	-8.523954613	0	-9.955568532	-90
16	0	-2.794412554	0	-3.987098037	-90	61	0	-8.654512558	0	-10.06313526	-90
17	0	-2.853128144	0	-4.048571729	-90	62	0	-8.784914235	0	-10.17091814	-90
18	0	-2.911840964	0	-4.11004907	-90	63	0	-8.915161775	0	-10.2789131	-90
19	0	-2.970551008	0	-4.171530068	-90	64	0	-9.045257283	0	-10.38711619	-90
20	0	-3.029258271	0	-4.233014734	-90	65	0	-9.175202843	0	-10.49552351	-90
21	0	-3.125363314	0	-4.337490834	-90	66	0	-9.346388226	0	-10.64251995	-90
22	0	-3.221443122	0	-4.442000292	-90	67	0	-9.517383483	0	-10.78977265	-90
23	0	-3.317497544	0	-4.546543375	-90	68	0	-9.688191611	0	-10.93727618	-90
24	0	-3.413526427	0	-4.651120352	-90	69	0	-9.858815567	0	-11.08502526	-90
25	0	-3.509529617	0	-4.755731493	-90	70	0	-10.02925827	0	-11.23301473	-90
26	0	-3.602810752	0	-4.863493393	-90	71	0	-10.22584849	0	-11.39399739	-90
27	0	-3.696019371	0	-4.971352234	-90	72	0	-10.42197982	0	-11.5555806	-90
28	0	-3.789154747	0	-5.079309318	-90	73	0	-10.61766414	0	-11.71774419	-90
29	0	-3.88221615	0	-5.187365963	-90	74	0	-10.81291305	0	-11.88046872	-90
30	0	-3.975202843	0	-5.295523511	-90	75	0	-11.00773792	0	-12.0437355	-90
31	0	-4.069537906	0	-5.402123112	-90	76	0	-11.26094765	0	-12.31139231	-90
32	0	-4.163824297	0	-5.508788867	-90	77	0	-11.51406834	0	-12.57916253	-90
33	0	-4.258061628	0	-5.615521489	-90	78	0	-11.76709888	0	-12.84704795	-90
34	0	-4.352249511	0	-5.722321703	-90	79	0	-12.02003818	0	-13.11505039	-90
35	0	-4.446387557	0	-5.829190241	-90	80	0	-12.2728851	0	-13.38317168	-90
36	0	-4.558989429	0	-5.957873125	-90	81	0	-12.47829731	0	-13.6197784	-90
37	0	-4.671512041	0	-6.086665391	-90	82	0	-12.68332632	0	-13.85688353	-90
38	0	-4.783954613	0	-6.215568532	-90	83	0	-12.88796275	0	-14.09450308	-90
39	0	-4.896316357	0	-6.344584061	-90	84	0	-13.09219702	0	-14.33265359	-90
40	0	-5.008596484	0	-6.473713515	-90	85	0	-13.29601937	0	-14.57135223	-90
41	0	-5.171694278	0	-6.630047963	-90	86	0	-13.43465233	0	-14.71293575	-90
42	0	-5.334778938	0	-6.786400788	-90	87	0	-13.57328235	0	-14.8545232	-90
43	0	-5.497850513	0	-6.94277189	-90	88	0	-13.71190943	0	-14.99611461	-90
44	0	-5.660909054	0	-7.099161171	-90	89	0	-13.85053357	0	-15.13770998	-90

天頂角[Deg]	方位角[Deg]	θ成分の 正規化利得[dBi]	θ成分の 位相[Deg]	φ成分の 正規化利得[dBi]	φ成分の 位相[Deg]	天頂角[Deg]	方位角[Deg]	θ成分の 正規化利得[dBi]	θ成分の 位相[Deg]	φ成分の 正規化利得[dBi]	φ成分の 位相[Deg]
90	0	-13.98915475	0	-15.27930932	-90	135	0	-23.0611284	0	-27.79723681	-90
91	0	-14.15465233	0	-15.43293575	-90	136	0	-23.23987776	0	-28.19921106	-90
92	0	-14.32010294	0	-15.58662522	-90	137	0	-23.41579762	0	-28.61005555	-90
93	0	-14.48550696	0	-15.74037707	-90	138	0	-23.58881814	0	-29.03049487	-90
94	0	-14.65086475	0	-15.89419063	-90	139	0	-23.75886973	0	-29.46133583	-90
95	0	-14.81617668	0	-16.04806526	-90	140	0	-23.92588321	0	-29.90348017	-90
96	0	-15.06584849	0	-16.23399739	-90	141	0	-24.2055585	0	-30.36479486	-90
97	0	-15.31408375	0	-16.4218098	-90	142	0	-24.48397739	0	-30.83130013	-90
98	0	-15.56094765	0	-16.61139231	-90	143	0	-24.76112285	0	-31.30329919	-90
99	0	-15.80650288	0	-16.80264188	-90	144	0	-25.03697803	0	-31.78112038	-90
100	0	-16.05080959	0	-16.9954621	-90	145	0	-25.31152623	0	-32.26511992	-90
101	0	-16.3850288	0	-17.38264188	-90	146	0	-25.58715742	0	-32.68474193	-90
102	0	-16.72094765	0	-17.77139231	-90	147	0	-25.86219554	0	-33.10740453	-90
103	0	-17.05408375	0	-18.1618098	-90	148	0	-26.13663578	0	-33.5332836	-90
104	0	-17.38584849	0	-18.55399739	-90	149	0	-26.41047339	0	-33.96238208	-90
105	0	-17.71617668	0	-18.94806526	-90	150	0	-26.68370364	0	-34.39498307	-90
106	0	-17.97190943	0	-19.25611461	-90	151	0	-26.9689992	0	-35.29471682	-90
107	0	-18.22668721	0	-19.56544768	-90	152	0	-27.24603693	0	-36.5332836	-90
108	0	-18.48047537	0	-19.87612784	-90	153	0	-27.51461086	0	-37.27452526	-90
109	0	-18.73323825	0	-20.18822208	-90	154	0	-27.77452678	0	-38.38058292	-90
110	0	-18.98493913	0	-20.50180117	-90	155	0	-28.02560368	0	-39.58891941	-90
111	0	-19.18381916	0	-20.74701826	-90	156	0	-28.30384987	0	-40.56757047	-90
112	0	-19.38211101	0	-20.9930784	-90	157	0	-28.57818693	0	-41.61232141	-90
113	0	-19.57979985	0	-21.24001245	-90	158	0	-28.84857476	0	-42.7368751	-90
114	0	-19.77687053	0	-21.48785257	-90	159	0	-29.11497648	0	-43.95958805	-90
115	0	-19.97330762	0	-21.73663228	-90	160	0	-29.37735854	0	-45.30584909	-90
116	0	-20.1022144	0	-21.89024176	-90	161	0	-29.81006408	0	-46.70782502	-90
117	0	-20.2309813	0	-22.04406237	-90	162	0	-30.24023224	0	-48.23492715	-90
118	0	-20.35960675	0	-22.19809774	-90	163	0	-30.66785122	0	-49.92420362	-90
119	0	-20.48808914	0	-22.35235154	-90	164	0	-31.09291065	0	-51.83190946	-90
120	0	-20.61642689	0	-22.50682756	-90	165	0	-31.51540165	0	-54.04961354	-90
121	0	-20.77266192	0	-22.71646168	-90	166	0	-32.39034968	0	-55.91097236	-90
122	0	-20.92829875	0	-22.92703181	-90	167	0	-33.26473608	0	-57.89959238	-90
123	0	-21.08332404	0	-23.13857095	-90	168	0	-34.13856029	0	-60.05321813	-90
124	0	-21.23772426	0	-23.35111352	-90	169	0	-35.01182183	0	-62.42932499	-90
125	0	-21.39148569	0	-23.5646954	-90	170	0	-35.88452026	0	-65.12183422	-90
126	0	-21.58064693	0	-23.91652813	-90	171	0	-36.01610275	0	-66.83598678	-90
127	0	-21.76520482	0	-24.27624897	-90	172	0	-36.14739766	0	-68.90461875	-90
128	0	-21.94490398	0	-24.64463873	-90	173	0	-36.2784049	0	-71.53372927	-90
129	0	-22.1194806	0	-25.02257459	-90	174	0	-36.40912441	0	-75.1857943	-90
130	0	-22.2886629	0	-25.41104569	-90	175	0	-36.53955613	0	-81.33653813	-90
131	0	-22.45929331	0	-25.85016569	-90	176	0	-36.63941798	0	-88.51393136	-90
132	0	-22.62227964	0	-26.30599741	-90	177	0	-36.73923378	0	-96.43098057	-90
133	0	-22.77720081	0	-26.78069419	-90	178	0	-36.83900353	0	-104.7879003	-90
134	0	-22.92362832	0	-27.27677998	-90	179	0	-36.93872724	0	-113.43679486	-90