

幾何学モデルを用いた NLOS 信号排除による測位精度改善に関する考察

A Study on Positioning Accuracy Enhancement with NLOS Signal Rejection based on Geometric Model

高山 洋史^{†‡}, 浦久保 孝光[‡], 富永 貴樹[†], 玉置 久[‡]

[†] 古野電気株式会社

[‡] 神戸大学大学院

Yoji Takayama^{†‡}, Takateru Urakubo[‡], Takaki Tominaga[†] and Hisashi Tamaki[‡]

[†] FURUNO ELECTRIC CO.,LTD.

[‡] Graduate School of System Informatics, Kobe University

Abstract The NLOS(Non-Line-Of-Sight) signal rejection method that we have proposed in [1] for automotive positioning can improve GNSS/INS positioning accuracy in dense urban environments. In this paper, we investigate and verify the effectiveness of the rejection method by analyzing in detail positioning results and pseudo-range innovations which are obtained in dense urban environments. The proposed method removes biased pseudo-range innovations that are caused by NLOS signals from the measurements in Kalman filter, and prevents large errors in position estimate.

1 はじめに

都市部における NLOS(Non-Line-Of-Sight) 信号は、自動車の測位手法の一つである GNSS/INS の測位精度を劣化させる要因になっている。NLOS 信号は、衛星からの電波が建物等により遮蔽され、反射・回折した電波のみを受信した信号である。NLOS 信号による擬似距離の観測誤差は、正にバイアスしており数十メートルから数百メートルにも及ぶと言われている。都市部では NLOS 信号によって、場所や測位手法にもよるが 100[m] を超える位置誤差が生じる場合がある。

現在、GPS(米) 以外にも GLONASS(露), Galileo(欧), BeiDou(中) そして QZSS(日) と、複数の衛星測位システムが配備されており、それらを併用することで NLOS 信号と疑わしい信号を排除しても測位に必要な観測数の数は充足することが多い。NLOS 信号を検出および排除することで測位精度を改善する手法がこれまでに多く提案されている。魚眼カメラを使った画像処理により衛星の可視・不可視を判定する手法 [3, 4] や、3 次元地図を用いたレイトレース法による観測誤差の見積もりにもとづいて排除する手法 [5] などがある。これらの手法は、排除のための新たなセンサ・リソースを必要とし、コスト面で課題があると考えられる。

我々は、都市部における GNSS/INS の測位精度を改善するために、幾何学モデルを用いて GNSS 衛星からの NLOS 信号を追加センサなしで排除するアルゴリズムを提案 [1] している。本論文では、高層ビル街での走行データを用いて、提案アルゴリズムによる測位結果を詳細に調べ、その有効性について考察する。NLOS 信号から得られる擬似距離は正に大きくバイアスしており測位結果に大きな誤差を蓄積させる傾向にあるが、高層ビル付近の走行時に提案アルゴリズムによって NLOS 信号が排除され位置誤差の蓄積が抑制されていることが確認される。

2 NLOS 信号排除を加えた GNSS/INS

2.1 測位手法概要

GNSS/INS では、拡張カルマンフィルタ (EKF) による測位が用いられることが多い。拡張カルマンフィルタでは、観測誤差の平均が 0 を仮定しており、NLOS 信号から得られた擬似距離等を観測に用いることで推

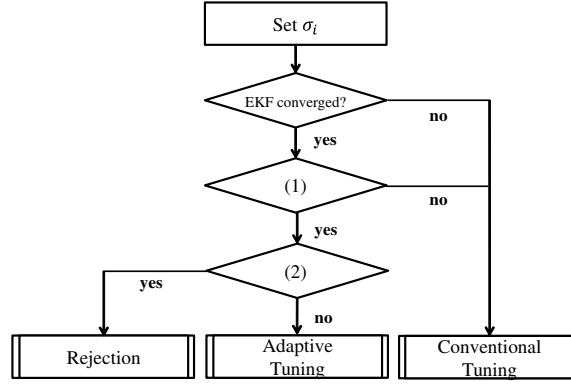


図 1: A-EKF に NLOS 信号排除を加えたフローチャート

定位置がバイアスすることが懸念される。よって、NLOS 信号は測位に用いずに排除することが望ましい。

我々は、NLOS 信号排除を加えた GNSS/INS の測位手法を提案し、都市部での測位精度改善結果を報告している [1]。2 節では、文献 [1] で提案した測位手法について簡単に記述する。GNSS からは各衛星との擬似距離および擬似距離の変化量に相当するドップラー周波数が観測として得られる。自動車には 6 軸慣性センサと車速センサが搭載されており、このセンサから車体座標系における加速度ベクトル、角速度ベクトル、進行方向の速度が得られる。推定姿勢を用いた INS によりこれらを局地水平座標系の速度ベクトルに座標変換する。各衛星の信号から観測した擬似距離、ドップラー周波数、INS による速度ベクトルを観測ベクトルとして、Tightly Coupling 手法による拡張カルマンフィルタで受信機の位置ベクトル、速度ベクトル、クロックバイアス、クロックドリフト (クロックバイアスの時間変化) を推定する。観測ベクトルは各要素が独立であると仮定し、観測ベクトルの要素ごとに観測更新を行う。なお、複数の衛星測位システムを併用する場合、システム間のクロックバイアス (ISB) に伴う観測誤差が生じるが、本研究では、航法メッセージから取得可能な補正値を使ってこの観測誤差が十分に低減されていると仮定し、ISB については考慮しないものとした。

[1] で提案した測位手法は、この拡張カルマンフィルタの枠組みに、Adaptive Extended Kalman Filter (A-EKF) と NLOS 信号排除アルゴリズムを組込んだ手法であり、図 1 に示すフローに基づき動作する。図中の (1) 式および (2) 式は次式のように表され、擬似距離のイノベーションの値に応じてフローを分岐させる条件式となっている。

$$|z_i|^2 > \mathbf{H}_i \mathbf{P} \mathbf{H}_i^T + \sigma_i^2 \quad (1)$$

$$z_i > \varepsilon_i \wedge \varepsilon_i^2 > \mathbf{H}_i \mathbf{P} \mathbf{H}_i^T + \sigma_i^2 \quad (2)$$

ここで z_i は i 番衛星の信号から観測した擬似距離のイノベーションであり、擬似距離の観測値と観測更新直前での推定値との差である。 \mathbf{H}_i は i 番衛星の観測方程式のヤコビ行列、 \mathbf{P} は状態変数の共分散行列である。また、 σ_i^2 は観測誤差の分散とし、次式で求める [2]。

$$\sigma_i = 0.64 + 784e^{-0.142s_i} \quad (3)$$

s_i は i 番衛星の信号の信号レベル (SNR) である。 σ_i は一般に受信機やアンテナに依存し、ここでは GNSS 受信機 (Furuno GN-8720) およびアンテナ (Taoglas AA.171.301111) に対するものである。 ε_i は信号排除のための閾値であり、(2) 式の詳細や閾値の与え方については 2.2 節で記述する。

図 1 中の Rejection は、そのイノベーションを観測更新に用いずに排除することを意味し、Adaptive Tuning は [2] の手法で動的に推定した分散を用いて観測更新を行うことを意味している。Conventional Tuning は (3) 式による観測誤差の分散 σ_i^2 を用いて観測更新を行う。(2) 式に従い信号を排除する部分が提案の NLOS

信号排除アルゴリズムである。EKF の収束状態を判断した後、いずれの処理を行うかを決定する。収束は、状態変数の位置ベクトルに対応する分散と観測更新を行ったステップ数に基づいて判断する。なお、(2) 式の閾値 ε_i は 2.2 節に述べるように周辺環境のシンプルモデルにもとづき評価されており、NLOS 信号排除アルゴリズムは NLOS 信号の高精度な検出と排除を行うものではない。よって、排除されない NLOS 信号も観測に含まれる可能性があるが、この場合は A-EKF によりその影響が低減される。

2.2 NLOS 信号排除のための閾値設定

NLOS 信号のイノベーションは、正の大きな値を取ることが知られている [2]。そこで (2) 式の第 1 式では、NLOS 信号と疑わしい信号の検出を目的として、幾何学的な見積もりにもとづきイノベーションに対する閾値 ε_i を設けている。ただし、この閾値 ε_i が小さい場合は、相対的に信号レベルによる観測のバラつきの方が大きく排除対象ではないと考えられる。第 2 式は、このような信号が排除されることを防ぐことを目的としている。

NLOS 信号排除のための閾値 ε_i について記述する。NLOS 信号の伝播経路長は、構造物による反射、回折で直接届く信号と比較して長くなる。本研究では、周辺環境のシンプルモデル (図 2) にもとづき伝搬経路長増分を幾何学的に見積もり [6]、閾値 ε_i を決定する。具体的に、衛星、反射・回折点、受信機が同一平面にあると仮定すると、経路長増分は次式で見積もられる。

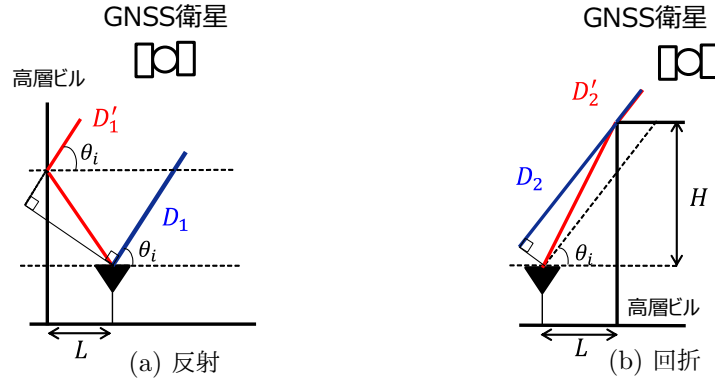


図 2: NLOS 信号の幾何学モデル

$$e_1 = D'_1 - D_1 = 2L \cos \theta_i \quad (4)$$

$$e_2 = D'_2 - D_2 = \sqrt{L^2 + H^2} - L \cos \theta_i - H \sin \theta_i \quad (5)$$

ただし、反射の場合は、信号の入射角、反射角が同一の角度であると仮定し、回折の場合は、構造物のエッジで全方位に信号が回折するものとした。ここで、 L は受信機から構造物までの水平距離、 H は受信機から構造物エッジまでの高さである。これらの増分を使って閾値を次式で設定する。

$$\varepsilon_i = \min(e_1, e_2) - \sigma_i \quad (6)$$

ここで、NLOS 信号と疑わしい信号は、なるべく排除したいことから、 e_1 、 e_2 のうち小さい方を選択する。また、NLOS 信号にも信号レベルによる観測のバラつき (分散 σ_i^2) が存在すると考えられるので、さらにこのバラつきを減算する。閾値は (L, H) の値に依存するが、文献 [1] での事前検討によれば $(L, H) = (10, 150)$ とすることで、様々な環境において測位精度改善が期待される。詳細は文献 [1] を参照されたいが、20[m] 程度程度以上の観測誤差を含む NLOS 信号を排除できれば、位置の推定精度向上に効果があると考えられ、 ε_i が最大 20[m] 程度となる (L, H) を採用している。なお、 θ_i は既知である。

3 都市部における評価実験

文献 [1] では、2 節に示した NLOS 信号排除アルゴリズムを用いることで測位精度が改善することを、NLOS 信号が生じやすい環境である東京都庁付近の周回コース（1 周約 4.6km）における走行実験結果によって示した。4 節では、周回コースの中から測位精度改善が見られる走行区間に着目し、具体的にどのような観測値が排除され測位精度改善につながったのかを詳細に解析する。このため本節では、実験の概要および着目区間における測位結果を示す。

3.1 実験の概要

2018 年 10 月 18 日 JST 17 時ごろに東京都庁付近の周回コースで収録したデータを使って評価実験を行う。データには、GPS、QZSS の L1C/A、GLONASS L1OF の擬似距離、ドップラー周波数、エフェメリス、および車速センサ（車両から得られる車速パルス）、慣性センサの出力値が含まれている。データ収録には、安価な 1 周波 GNSS 受信機（Furuno GN-8720）、MEMS 慣性センサ（Bosch SMI130）を用いている。また同時に高精度 GNSS 受信機（Applanix POS-LV 520）のデータを収録しており、このデータを測位精度評価の際のリファレンスとして採用する。東京都庁付近には高層ビルが立ち並んでおり、収録したデータには NLOS 信号からの観測値が多数含まれることが期待される。

これらのデータを使った評価方法を図 3 に示す。収録したデータを測位手法が実装された後処理測位プログラムに入力し、1Hz の測位結果を生成する。

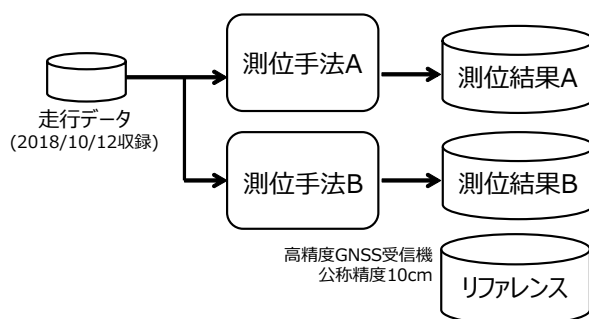


図 3: 後処理による評価

図 3 に示すように NLOS 信号排除アルゴリズムの有効性を調べるため、測位結果の生成は 2 つの測位手法に対して行う。測位手法 A は文献 [1] による測位手法から NLOS 信号排除アルゴリズムを削除した手法、すなわち図 1 の (2) 式による条件分岐を排除し、(1) 式を満たせば常に Adaptive Tuning により観測更新を行うようにした手法である。測位手法 B は [1] による測位手法とする。測位結果 A および B にはそれぞれの測位手法による測位結果とともに、拡張カルマンフィルタの演算過程で得られた擬似距離のイノベーションを含めて記録している。

3.2 測位結果

ここでは、測位結果 A と B において明らかな差異が見られた走行区間の 1 つに着目して、その測位結果を示す。図 4 は新宿中央公園沿いの道路を走行中の測位結果を GoogleEarth に重畳したものである。図中には、測位結果 A (NLOS 信号排除なし) を青色、測位結果 B (NLOS 信号排除あり) を橙色、リファレンス位置を緑色でプロットしている。測位結果 A においては、車両が進行するに伴い、リファレンスに対して大きなバイアスが生じている。一方、測位結果 B においては、リファレンスに対して一時的に大きなバイアスが生じるが、その後バイアスは減少している。

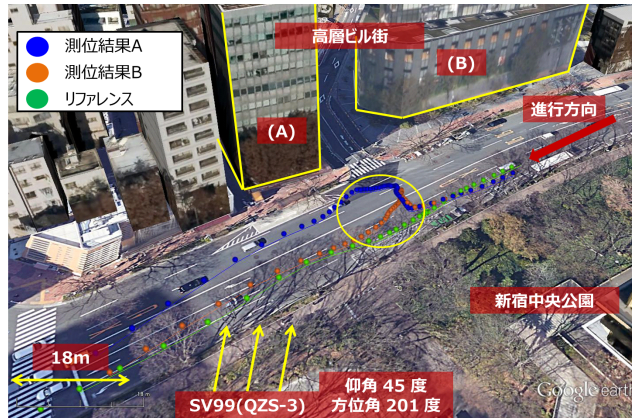


図 4: 新宿中央公園沿いの道路での測位結果

図 4 の黄色の円で囲った時間帯の測位結果についてさらに詳細に確認する。この時間帯において、測位結果 A, B とも高層ビル街側に徐々にバイアスするが、その後、測位結果 B ではバイアスが減少している。高層ビル街側へのバイアスは、測位結果 A では平均 8[m]、測位結果 B では平均 4[m] となっている。この差異、および、図 4 中に示した構造物 (A), (B), SV99(QZS-3 号機) に関する考察は、4 節において述べる。

4 考察

本節では、3 節で得られた図 4 の測位結果に対して、測位使用衛星数、擬似距離のイノベーション、具体的な排除衛星に対する経路長増分の観点で考察を行う。

4.1 測位使用衛星数

図 4 に示した走行区間中に測位手法 A および B において測位に使用された衛星数を図 5 に示す。全時間帯

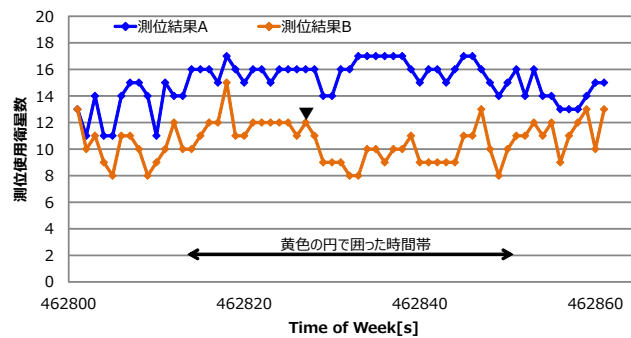


図 5: 測位使用衛星数

にわたって、NLOS 信号排除を伴う測位手法 B において使用衛星数が少なくなっており、提案の信号排除が測位精度向上に寄与していると考えられる。

さらに図 4 の黄色の円の時間帯においては、図 5 に下三角で示した時刻より測位手法 B における使用衛星数が 3, 4 個減少していることが分かる。この時刻は、黄色の円内で、測位手法 A および B の測位結果がともにリファレンスから徐々にバイアスした後、それらの差異が大きくなり始めた時刻に対応する。測位結果に誤差を蓄積させるような複数の信号が、この時刻から条件式 (2) 式によって排除され、測位手法 B における測位誤差抑制につながったと考えられる。

4.2 擬似距離のイノベーション

4.1 節に示した NLOS 信号排除による使用衛星数の低減によって、使用衛星の擬似距離のイノベーションの分布がどのように変化したかを確認する。測位手法 A および B のそれぞれにおいて、図 4 の走行区間中に測位に使用したすべての擬似距離イノベーションの度数分布を求めたのが図 6 である。度数分布の階級は 5[m]

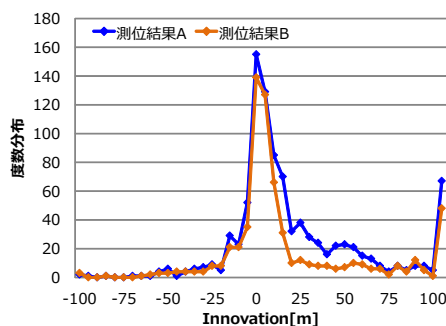


図 6: 擬似距離のイノベーションの度数分布

間隔としている。測位手法 A による度数分布 (図 6 中の青プロット) を見ると、20[m] 以上のイノベーションの度数は -20 [m] 以下のイノベーションの度数と比較して明らかに多い。中央値を求めると約 6.7[m] であり、正にバイアスしたイノベーションと言える。

次に測位手法 B によるイノベーションの度数分布 (図 6 中の橙プロット) を見ると、測位手法 A と比較して、20[m] 以上のイノベーションの度数が減少していることがわかる。測位手法 B で用いたイノベーションの中央値は約 1.6[m] であり、NLOS 信号排除によりイノベーションの正のバイアスが軽減されていることが確認できる。

ただし、測位手法 B の度数分布においても正の大きなイノベーションを完全に排除できていない。これは、排除条件 (2) 式の第 2 式により、閾値 ϵ_i が小さくなるときに排除が抑制されているためと考えられる。すなわち、実環境では、2.2 節に示した幾何モデルで表される NLOS 信号だけを外れ値として受信するとは限らず、その他の外れ値が生じた場合には条件 (2) 式では排除できない。

また、負の外れ値として測位手法 B における -20 [m] 以下の度数を合計して、その割合を求めると約 5.6[%] であった。負の外れ値が生じる原因としては、信号レベルによる観測のバラつきや直接波と同時にその逆相となる反射・回折波を受信したことなどが考えられる。2.2 節で想定した NLOS 信号以外の外れ値を考慮し信号排除条件を見直すことで、測位精度をさらに改善できる可能性があり、今後の課題である。

4.3 幾何学的な経路長増分の見積もりとイノベーションの比較

図 4 中の黄色の円で囲った時間帯において継続して測位から排除されていた信号の一つが QZS-3 号機の信号であった。QZS-3 号機は、図 4 中の矢印の方向に位置する衛星 (仰角 45 度、方位角 201 度) である。この衛星の信号は、周辺の状況から考えて NLOS 信号であった可能性が高い。すなわち、受信機への直接波は新宿中央公園の樹木で遮蔽され、道路を挟んで反対側の高層ビル街で反射した反射波が受信機に受信されると考えられる。そこで、QZS-3 号機の擬似距離に着目し、2.2 節の幾何モデルによる見積もりと比較する。

まず、幾何モデルによる見積もりにおいて、信号が反射するためには建造物の高さ H が $H > L \tan \theta_i$ を満たす必要がある。図 4 に示した環境において、自車に近い建造物の中でこの条件を満たすのはビル (A)、(B) であった。また、幾何モデルにおいては反射点、受信機、衛星がビルと地面 (水平面) に垂直な同一平面上にあると仮定しているが、必ずしもこの仮定は成り立たない。とくにビル (A) においてはビルと地面に垂直な

平面から衛星までの方位角 ϕ_i を考慮することでより正確な見積もりができると考えられる。この ϕ_i を考慮した幾何学的な見積もりは $2L \cos \theta_i \cos \phi_i$ となる。図 4 や Google Earth から ϕ_i を概算すると $\phi_i = 33[\text{deg}]$ となる。同様に、ビル (A), (B) の反射が起こりうるであろう面から受信機までの距離を Google Earth から見積もるとそれぞれ $(L_A, L_B) = (22, 47)[\text{m}]$ であった。この値を使って幾何学的な見積もりは、

$$\begin{aligned} e &= 2L \cos \theta_i \doteq 14.1 \\ e_A &= 2L_A \cos \theta_i \cos \phi_i \doteq 26.9 \\ e_B &= 2L_B \cos \theta_i \doteq 62.2 \end{aligned} \quad (7)$$

として求められる。 e は、閾値設定に用いた $L = 10$ のときの (4) 式の値で、 e_A, e_B はそれぞれ (A)(B) で反射したと仮定したときの幾何学的な見積もりとなる。

図 4 の走行区間において測位手法 B で得られた QZS-3 号機の擬似距離イノベーションと (6) 式により計算された閾値 ε_i を時系列にしたグラフを図 7 に示す。図 7 において、NLOS 信号排除アルゴリズムは、イノ

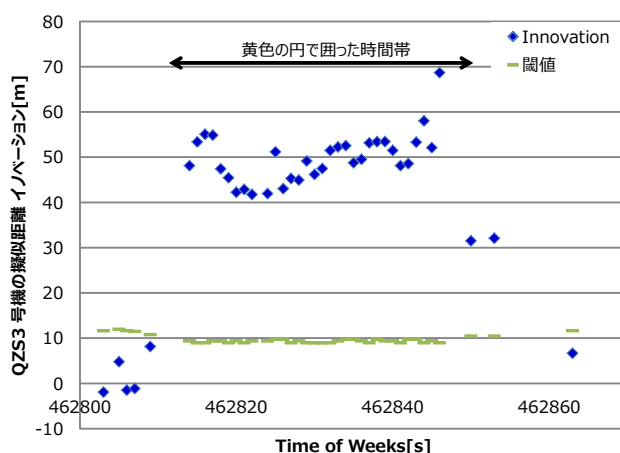


図 7: QZS-3 号機のイノベーションと閾値

ベーションが閾値を超えた場合に、その信号を測位に用いず排除している。黄色の円で囲った時間帯においては、イノベーションが正の方向に $40[\text{m}] \sim 60[\text{m}]$ 程度バイアスしており、この信号が排除されていることが分かる。この時間帯では、車両は低速走行または停車しており、周辺環境変化が少なかったことから NLOS 信号が継続して受信されていたと考えられる。その前後の時間帯では、走行に伴う環境変化に伴いイノベーションが閾値以下へと急激に減少している。黄色の時間帯のイノベーションに最も近い幾何学的な経路長増分は e_B である。実際の反射は反射面の素材等に影響を受けるため、(A) による反射波が受信できなかったことも考えられる。(4) 式に示した反射による経路長増分 e_1 は、受信機から構造物までの距離 L に応じて増大する。よって、 L_A, L_B のように排除条件 (4) 式で設定した $L = 10[\text{m}]$ よりも大きな水平距離を持つ構造物による反射は排除できる可能性が高い。このような提案アルゴリズムの特性に従い QZS-3 号機の信号も排除され、測位精度向上が達成されたと考えられる。

5 まとめと今後の課題

本論文では、文献 [1] で提案した測位手法による測位精度改善について、実際の走行実験における NLOS 信号の排除、それに伴うイノベーション分布の変化などを詳細に調べ、この測位手法の有効性や特性について考察した。擬似距離のイノベーションに対する度数分布から、NLOS 信号排除によってイノベーションのバイアスが低減されていること、衛星信号を詳細に確認することで設定した閾値により反射による NLOS 信号と疑われる信号が実際に排除されていることが確認された。これらによって、文献 [1] での測位手法においては、

NLOS 信号による測位誤差の蓄積が避けられ、測位精度向上が実現されていると考えられる。ただし、4.3 節に述べたように、さらなる測位精度向上に向けて、想定した NLOS 信号以外の外れ値にも対応できるように信号排除条件を見直すことが今後の課題である。

参考文献

- [1] 高山 洋史, 浦久保 孝光, 富永 貴樹, 玉置 久: 幾何学モデルを用いた NLOS 信号排除による都市部における GNSS/INS の測位精度改善, システム制御情報学会論文誌, Vol. 34, No. 2, 2021 (掲載予定).
- [2] T. Tominaga et al.: Adaptive Estimation of Measurement Noise to Improve the Performance of GNSS Single Point Positioning in Dense Urban Environment, *Journal of IPNT*, Vol. 8, No. 1, pp. 001–008, 2017.
- [3] 吉田 明宏, 堀出 健太, 久保 幸弘: 魚眼カメラを用いた NLOS 衛星推定とその活用, 第 62 回システム制御情報学会研究発表講演会論文集, 323-4, 2018.
- [4] T. Suzuki and N. Kubo: NLOS GNSS Signal Detection Using Fish-Eye Camera for Vehicle Navigation in Urban Environments, *Proc. of ION GNSS+ 2014*, pp. 1897–1906, 2014.
- [5] N. Kbayeret et al.: Robust GNSS Navigation in Urban Environments by Bounding NLOS Bias of GNSS Pseudoranges Using a 3D City Model, *Proc. of ION GNSS+ 2015*, pp. 2410-2420, 2015.
- [6] S. Byun et al.: Development and Application of GPS Signal Multipath Simulator, *Radio Science*, Vol. 37, No. 6, pp. 001–023, 2002.