



Accurate GNSS Positioning in Urban Canyons with Extended Kalman Filter

高山, 洋史

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2023-03-25

(Date of Publication)

2025-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8654号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100482402>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式 3)

論文内容の要旨

氏 名 _____ 高山 洋史 _____

専 攻 _____ 情報科学専攻 _____

論文題目 (外国語の場合は, その和訳を併記すること。)

Accurate GNSS Positioning in Urban Canyons with
Extended Kalman Filter

拡張カルマンフィルタによる都市部での GNSS 高精度測位

指導教員 _____ 浦久保 孝光 _____

Inaccuracy in urban canyons has been a persistent and lingering problem for the Global Navigation Satellite System (GNSS). This thesis reports the results of a study on performance improvement of the extended Kalman filter (EKF) to obtain more accurate positions in urban canyons.

GNSS is a system that provides positioning on a global basis. GNSS receivers on the ground measure distance to satellites based on the time of flight of satellite signals. And then they determine their positions based on trilateration. GNSS positioning accuracy depends on signals' propagation delay due to, e.g., the troposphere and ionosphere. GNSS can achieve accuracy within ten meters with no objects in the lines of sight of satellites. The areas with no objects in the lines of sight of satellites are referred to as open sky areas.

One last great unsolved GNSS problem is inaccuracy in urban canyons. Positioning with GNSS in urban canyons suffers from significant position errors due to Non-Line-Of-Sight (NLOS) reception. NLOS reception occurs where the direct signal is blocked, and the signal is received only via reflection or diffraction. Measurement errors due to NLOS reception are characterized by their sign and size. Since signals via reflection or diffraction arrive later than (blocked) signals via direct paths, measurement errors due to NLOS reception are always positive. Furthermore, their errors depend on their path delays and are potentially unbounded. They can be over a hundred meters and outliers that can degrade position accuracy significantly.

Because of the low computational cost, almost all GNSS receivers employ the extended Kalman filter to determine their positions. The EKF performance is highly dependent on the accuracy of measurement and the setting of parameters in the EKF. Inaccurate and biased measurements due to NLOS reception can reduce the estimation accuracy of the EKF. This research aims to achieve a few meters of accuracy in urban canyons by removing outliers and choosing parameters in the EKF according to remained measurements. The enhanced EKF performance will benefit our society.

This research solves the problem of inaccuracy in urban canyons in two stages. The first stage is to develop a method to reject outliers due to NLOS reception from the computation of the EKF. This stage begins with introducing the model that represents the surrounding environments, e.g., buildings, of a GNSS receiver to compute path delays geometrically due to reflection or diffraction. Since measurement errors in NLOS signals depend heavily on path delays due to reflection or diffraction, computed path delays using the geometric model can predict measurement errors. Based on the predicted values, the method can improve position accuracy by detecting and rejecting

outliers due to NLOS reception.

However, removing outliers decreases the number of measurements and may cause poor satellite geometry. Poor satellite geometry means a biased distribution of satellites as seen by a GNSS receiver. As positioning accuracy highly depends on satellite geometry, it is necessary to show how poor satellite geometry affects the EKF performance.

Therefore, the second stage begins with numerical examples to point out the problem caused by poor satellite geometry. These examples illustrate that a fictitious noise approach, which can avoid filter divergence by adding fictitious noise to process noise heuristically, results in excessive inflation of the estimation error covariance matrix in the EKF with poor satellite geometry. Further, this stage provides a theoretical analysis of the sensitivity of the estimation error covariance matrix varying on process noise in the EKF. From the examples and the theoretical analysis, a process noise model that chooses fictitious noise based on satellite geometry is proposed in this stage. The proposed process noise model can suppress inflation of the estimation error covariance matrix when satellite geometry is poor. To our best knowledge, the proposed model in the second stage is the first to choose process noise depending on satellite geometry.

The key findings of this research are twofold and come from each of the stages described above. The first is the performance improvement in urban canyons by removing outliers and demonstrated through driving tests in Shinjuku, Tokyo, known for NLOS reception. The second is also performance improvement in urban canyons by avoiding unintentional inflation of the estimation error covariance matrix. It is revealed through theoretical and experimental results. In addition, the process noise model proposed in the second stage can be applied to applications with a generic EKF other than GNSS. Numerical simulations in robot localization show that the proposed model improves localization performance.

Chapter 1 introduces the background and the main issue of this research. The background begins with the current GNSS status from the point of view of accuracy to define the main issue of this research, which is inaccuracy in urban canyons. And then, this chapter refers to some studies related to this research's main issue to show the difference between the studies and this research. The difference would show our contribution that represents an advance in current knowledge in the GNSS field. Further, this chapter summarizes the main results of this thesis through overviews of each chapter. Finally, three background materials and a mathematical introduction to

the EKF are given in this chapter that would be needed in later chapters. Three materials are the single point positioning with the EKF, measurement errors in urban canyons, and the role of satellite geometry in positioning.

Chapter 2 is devoted to developing a method to detect and reject outliers due to NLOS reception. This chapter begins with a review of the adaptive extended Kalman filter proposed in previous studies to deal with measurement outliers in urban canyons. The adaptive EKF can determine the appropriate noise input level in real time with innovations or residuals of measurements. Although the adaptive EKF reduces the impacts of NLOS reception on estimates, measurement errors due to NLOS reception may make biased position errors because they are always positive. Thus, the adaptive EKF should not use measurements due to NLOS reception, even with the adjustment of noise input level.

This chapter proposes a method to reject outliers from the adaptive EKF to reduce biased position errors, introducing a model that represents the surrounding environments in urban canyons to predict path delays of signals due to NLOS reception. Since measurement errors due to NLOS reception depend on path delays of reflected or diffracted signals to direct signals, measurement errors can be predicted geometrically using the model. The proposed method has a threshold to detect signals whose path delay is nearly equal to or longer than the predicted values of path delays. The threshold is chosen as a smaller predicted value so that it can detect NLOS signals as much as possible. Removing measurements whose path delays are too long can reduce biased position errors. Note that the prediction of path delays with the geometric model is sometimes inaccurate. And some NLOS signals might be accepted and used in the computation of the EKF. Since the adaptive EKF can determine the appropriate noise input level for accepted NLOS signals, it can reduce the impacts of the accepted NLOS signals on state estimates. The results of experiments in urban canyons show the performance improvement of the adaptive EKF with the proposed method.

Chapter 3 begins with numerical examples to highlight the problem caused by fictitious noise for avoiding filter divergence. The problem is that estimation errors by adding fictitious noise to process noise can be distributed more widely in a particular direction determined by satellite geometry. Since the estimation error covariance matrix in the EKF varies depending on fictitious noise, the sensitivity analysis of the matrix due to fictitious noise can explain the cause of the problem. From the sensitivity analysis, the variation of the estimation error covariance matrix depends on measurement matrices, that is, satellite geometry. This analysis and numerical

examples indicate that fictitious noise may result in excessive inflation in a particular direction of the estimation error covariance matrix and eventually degrade filter performance.

Based on the results of numerical examples and the sensitivity analysis, this chapter presents a process noise model that varies depending on satellite geometry. The process noise model can suppress the inflation of the estimation error covariance matrix due to poor satellite geometry by choosing a small or zero fictitious noise in a particular direction. The improvement of position accuracy due to the proposed model is demonstrated through experiments of stationary GNSS positioning with poor satellite geometry.

Chapter 4 presents a process noise model extended from the proposed model in Chapter 3. As stated earlier, the proposed model in Chapter 3 is derived based on the sensitivity analysis of the estimation error covariance matrix under some assumptions. Although one of the assumptions is that the state transition matrix is an identity matrix, the assumption does not often hold in the EKF for GNSS positioning. This explains that the proposed model in Chapter 3 should be extended.

This chapter begins with a sensitivity analysis of the estimation error covariance matrix without the assumptions introduced in Chapter 3. From this analysis, fictitious noise varies the estimation error covariance matrix. Keeping this in mind, let fictitious noise be chosen so that the variation of the estimation error covariance matrix will be a given value. For this purpose, the value is designed in two ways later described.

Since the size of the estimation error covariance matrix is usually large, it is difficult to determine appropriate values for all elements. Therefore, the value should be constrained in some way to be able to determine. Recall that unintentional inflation of the estimation error covariance matrix may degrade filter performance, as Chapter 3 pointed out. This indicates that the directions exist such that inflation in the estimation error covariance matrix is unnecessary. Based on the consideration, the constraint by measurement matrices can be effective in forming the value.

In the first design, the value is chosen through a trial-and-error process. In the second design, the value is chosen to minimize the sum of the square of measurement residuals. In the sense of minimization, the value is referred to as a decision variable. Position accuracy improvement is demonstrated through stationary GNSS positioning for the first choice and in GNSS/INS positioning for the second choice.

Moreover, the extended process noise model can be applied to applications other than GNSS and GNSS/INS. For example, robot localization is one important system to

determine the robot's position with range and vision sensors, such as LiDAR devices and cameras. It tends to suffer from unexpected dynamics errors in the prediction of robot motion. Furthermore, the information from these sensors often degenerates, for example, when the robot moves along the wall. This indicates that using the extended process noise model may improve the EKF performance by varying fictitious noise based on measurement matrices. Numerical simulations in robot localization show the improved performance of the EKF for the localization system.

Chapter 5 concludes this thesis. This chapter begins with a brief revisit of the contents of each chapter and the key findings of this thesis. And then, it states the importance and significance of those findings compared with previous studies. Further, this chapter refers to possible applications to other areas with the proposed process noise model and the possibility of expanding the proposed process noise model to other nonlinear filters. Finally, future work on obtaining more accurate positions in urban canyons is presented.

氏名	高山 洋史		
論文 題目	Accurate GNSS Positioning in Urban Canyons with Extended Kalman Filter 拡張カルマンフィルタによる都市部での GNSS 高精度測位		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教 授	玉置 久
	副 査	教 授	滝口 哲也
	副 査	教 授	羅 志偉
	副 査	准教授	浦久保 孝光
	副 査		
要 旨			
<p>GPS を代表とする GNSS(Global Navigation Satellite System)は、スマートフォン、カーナビゲーションシステムなどの多様な機器に受信機が搭載され、各機器の測位に利用されている。複数の人工衛星から送信される信号を各機器上の受信機が受信し、三角測量の原理にもとづき受信機位置が推定される。自動運転車両、ドローンなどの屋外移動ロボットの測位にも利用され、今後さらに利用が広がると期待される。ただし、都市部の高層ビル街においては、低迎角の衛星からの信号は建物等の構造物によって遮られ、測位精度が大幅に劣化することが知られている。この精度劣化を和らげ測位精度を保つ技術の確立が求められている。</p> <p>GNSS 受信機における測位演算では、比較的少ない計算量で測位が可能な拡張カルマンフィルタが用いられることが多い。都市部における測位精度劣化の問題は、拡張カルマンフィルタにおいて、1) 構造物によって反射、回折した信号を受信することによる観測の外れ値、2) 可視衛星が減少することによる観測情報の減少および退化、の 2 点が生じることに起因する。1) の外れ値については、衛星から受信機に直接到達する LOS (Line-Of-Sight) 信号に対して、反射、回折を経て到達する NLOS (Non-Line-Of-Sight) 信号は、信号の到達時刻が大幅に遅れることになる。これは衛星と受信機間の距離に対応する擬似距離と呼ばれる観測量を大幅に正にバイアスさせるものとなり、精度劣化を招く。この外れ値の除去には、魚眼カメラや詳細な周辺環境の 3 次元モデルを用いて NLOS 信号を予測する手法などが多く提案されているが、コストや計算量の増加を伴うため、普及には至っていない。2) の観測情報の減少および退化については、可視衛星が減少することによって、衛星の幾何学的な配置に偏りが生じ、三角測量ができない、もしくは、その誤差が増大することとなる。拡張カルマンフィルタにおいては、観測行列のランクが低下し、一時的に可観測性が失われる状況に対応する。GNSS 測位の分野では、2) に対して、従来 DOP (Dilution Of Precision) として精度劣化度を評価しているが、精度劣化を緩和する体系的な手法は見当たらない。ロボット工学の分野では、2) に対して、GNSS に限らず観測情報の退化が起こる場合に精度劣化緩和の手法が検討されているが、事例への対応にとどまるものが多い。</p> <p>このような背景のもと、本研究では、都市部における GNSS 測位精度向上を図ることを目標として、拡張カルマンフィルタにおける観測の 1) 外れ値、2) 情報の減少および退化、のそれぞれに対応する新たな手法の提案を行っている。1) 外れ値 に対応する手法は、周辺環境の簡単なモデル化にもとづき安価な GNSS 受信機でも実装可能な計算量の少ないものとなっている。2) 情報の減少および退化 に対応する手法は、観測行列を用いて、拡張カルマンフィルタにおけるプロセスノイズ共分散を調整するものである。従来、観測値を用いた適応フィルタが提案されているが、この手法は観測値ではなく観測行列を用いた新しいタイプの適応フィルタとなっている。</p> <p>まず、第 1 章では、本研究の背景と目的が論じられている。都市部における GNSS 測位精度劣化の問題について述べられた後、その劣化が NLOS 信号および衛星配置の偏りにより生じること、それに対応する従来手法の課題点がまとめられている。</p>			

第2章では、NLOS信号によって発生する観測の外れ値に対して、少ない計算量でその除去を行う手法が提案されている。自動車が都市部の高層ビル街を走行する状況を想定して、構造物による反射、回折が生じた際の擬似距離を、構造物の高さ、自動車から構造物までの水平距離の2つをパラメータとして、衛星の仰角ごとにモデル化している。モデル化された擬似距離から観測のイノベーションに対する閾値を設定し、拡張カルマンフィルタ内で実際の観測から算出されるイノベーションが閾値を超えた場合に、その観測を外れ値として除去している。いくつかのシミュレーションにより、高さ、水平距離のパラメータをそれぞれ150[m]、10[m]と設定することで、都市部で想定されるNLOS信号の多くが排除できることを確認している。提案の外れ値除去手法を、実際に都市部を自動車にて走行した際のデータに適用し、RMS (Root Mean Square) 値、P-P (Peak-to-Peak) 値のいずれの誤差評価においても、従来手法に比べて提案手法により測位精度の向上を実現している。

第3章では、NLOS信号を除去することで衛星配置に偏りが生じた場合を想定して、衛星配置に応じて拡張カルマンフィルタのプロセスノイズ共分散を調節する手法を提案している。不可避なモデル化誤差に対応するため、プロセスノイズ共分散を公称モデルから大きくすることが一般に行われるが、衛星配置が偏り観測情報が退化する状況では、拡張カルマンフィルタ内の推定誤差共分散がある方向に非常に大きくなってしまい、推定精度劣化を招くことを数値例によって指摘している。この現象を、単純化したシステムモデルに対してではあるが、プロセスノイズ共分散の変化に対する推定誤差共分散の感度解析を行い解析的に説明している。そして、解析結果にもとづきプロセスノイズ共分散を衛星配置、すなわち、観測行列に応じて決定する手法を提案している。数値例によって提案手法による推定誤差共分散の変化を確認した後、構造物に囲まれた屋外で取得したGNSSデータに対して提案手法を適用し、測位精度向上を確認している。

第4章では、第3章で提案されたプロセスノイズ共分散の調整手法を、システムモデルが一般の線形近似システムである場合に拡張している。この拡張においては、一般の線形近似システムに対して、第3章と同様にプロセスノイズ共分散の変化に対する推定誤差共分散の感度解析を行っている。さらに、プロセスノイズ共分散を決定変数として観測残差の二乗和の期待値を最小化する問題を考え、プロセスノイズ共分散の解空間を制限した上ではあるが、その解として提案手法によるプロセスノイズ共分散調整が得られることを明らかにしている。このとき、公称モデルに付加されるプロセスノイズ共分散は、観測行列の行空間にもとづく行列の形を持ち、その大きさは最小化の結果として観測行列に依存した値として決定される。提案手法は、LiDARによる移動ロボットの測位、GNSSによる定点測位、GNSSとINS (Inertial Navigation System) による自動車の測位の3つの例に適用され、それぞれにおいて測位精度の向上が確認される。

第5章では、結論として本論文のまとめが述べられている。プロセスノイズ共分散を観測行列に応じて適応的に調整する提案手法は、アンセンテッドカルマンフィルタやパーティクルフィルタなど拡張カルマンフィルタ以外の非線形フィルタに適用できる可能性があることを今後の研究課題の一つとして指摘している。さらに、第4章の最小化問題におけるプロセスノイズ共分散の解空間に対する制約の緩和、LiDAR、カメラなどの他のセンサとGNSSの統合による測位精度向上等を研究課題として挙げている。

本研究は拡張カルマンフィルタによる都市部でのGNSS高精度測位について、観測の外れ値ならびに観測情報の減少や退化の下での位置推定法を研究したものであり、観測量の特性にもとづく拡張カルマンフィルタの構成法について重要な知見を得たものとして価値ある集積である。提出された論文はシステム情報学研究科学学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の高山洋史は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。