

GNSS Odometry の高精度化に向けた Time Differenced Carrier Phase の誤差解析と既存補正手法の比較

Error Analysis and Comparison of Existing Correction Methods for Time-Differenced Carrier Phases toward High-Accuracy GNSS Odometry

新美大樹 藤野杏 鈴木太郎 目黒淳一
Daiki Niimi An Fujino Taro Suzuki Junichi Meguro

名城大学 理工学研究科メカトロニクス工学専攻
Meijo University, Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Science and Technology
千葉工業大学未来ロボット技術研究センター
Chiba Institute of Technology, Future Robotics Technology Center

1. はじめに

近年、Time Differenced Carrier Phase (TDCP) を利用し、単一の受信機で高精度な軌跡を推定する手法が研究されている[1]。TDCP は Global Navigation Satellite System (GNSS) から得られる搬送波位相の二時刻間における時間差分であり、利点として搬送波位相に含まれる主要な誤差の影響を消去できる点がある。具体的には、時間間隔が 1 秒以下である場合、衛星軌道・時計誤差、電離層遅延、対流圏遅延の時間変動は微小であるため、時間差分により概ね除去できる。加えて、サイクルスリップが発生しなければ、整数アンビギュイティは不変であるため、その影響も消去できる。

従来手法[1]では、Factor Graph Optimization (FGO) の枠組みで TDCP をタイトカップリングし、通常の連続する状態間だけでなく、1 秒以上離れた状態間を TDCP によって拘束することで、移動量の積算による累積誤差を低減し、高精度な軌跡推定を実現した。ここで、この手法では長時間 TDCP による拘束を最大 60 秒に設定している。これは、時間間隔の拡大に伴う各種誤差の蓄積が TDCP の精度を劣化させるためである。

そこで、本研究では 60 秒を超える長時間 TDCP における誤差の低減により、従来手法[1]の更なる高精度化を図る。この目的を達成するために、まず長時間 TDCP に対する衛星軌道・時計誤差、電離層遅延、対流圏遅延のバジェットを詳細に解析し、既存の補正手法の寄与を定量評価する。

2. 誤差の解析方法と既存補正手法

従来から衛星軌道・時計誤差、電離層遅延、対流圏遅延の大きさを算出するまたは、誤差を補正する手法が提案されている。ここで、表 1 に各誤差の理論値の算出方法と、比較評価の対象とする既存補正手法の分類を示す。本研究では、表 1 に示す手法に基づき、長時間 TDCP の誤差解析と補正手法の比較を行う。衛星軌道・時計誤差については、International GNSS Service (IGS) が提供する精密暦を利用する。放送暦を用いて計算した TDCP と、精密暦を用いて計算した TDCP との差分を、放送暦に起因する誤差量として解析する。補正手法としては、この精密暦の適用を評価対象とする。電離層遅延については、二周波観測値から幾何学フリー線形結合を算出し、その時間差分を電離層遅延の誤差量として解析する。補正手法としては、Klobuchar モデルと電離層フリー線形結合の 2 種類を比較評価する。対流圏遅延については、観測値から誤差量を算出する方法が存在しない。そこで本研究では、補正手法の一つでもある天頂全遅延 (ZTD) を推定し、マッピング関数で写像する手法を最も精度の高いモデルと仮定し、これを対流圏遅延の誤差量として扱う。比較対象の補正手法としては、標準的

な経験モデルである Saastamoinen モデルを用いる。本研究では、以上の定義に基づき、まず各誤差要因の長時間 TDCP に対する誤差バジェットを定量的に解析する。その上で、表 1 に示す各既存補正手法を適用した場合に、TDCP から計算した移動量がどのように変化するかを評価する。

表 1 各種誤差の理論値計算方法と既存補正手法

	理論値の計算方法	補正方法
衛星軌道誤差	精密軌道 SP3ファイル (IGSなどが提供) を利用	
衛星クロック誤差	精密クロック CLKファイル (IGSなどが提供) を利用	
電離層遅延	・幾何学フリー線形結合	・Klobucharモデル ・電離層フリー線形結合
対流圏遅延		・Saastamoinenモデル ・ZTDをマッピング関数で写像

3. 評価試験

評価試験では、オープンスカイの環境で取得した静止データを利用し、最大 1000 秒間の各時間間隔における TDCP を計算する。まず、図 1 に誤差バジェットの解析結果を示す。図では、TDCP の各時間差に対する各種誤差の理論値の RMS をプロットしている。図 1 より、長時間 TDCP の誤差は対流圏遅延が最も支配的であり、次いで電離層遅延、衛星軌道・時計誤差の順に影響が大きいことが確認できる。次に、図 2 に既存補正を種々に組み合わせて TDCP に適用し、そこから推定した移動量の RMS を比較した結果を示す。図 2 より、対流圏遅延および電離層遅延の経験モデルによる補正では不十分であることが確認できる。さらに、より長い時間の TDCP の高精度化には、精密軌道・精密時計を導入し、ZTD および水平勾配を用いて対流圏遅延の補正したうえで、IF 線形結合の搬送波位相から TDCP を算出する構成が有効であることがわかる。

今後は、以上の解析結果を基に誤差補正を組み込んだ新たな FGO により、高精度な軌跡推定を実現する予定である。

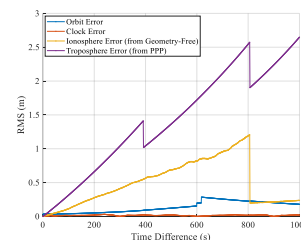


図 1 各種誤差のバジェット

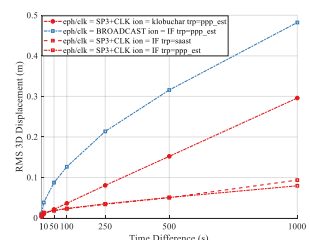


図 2 移動量推定誤差の比較

参考文献

- [1] T. Suzuki, "GNSS Odometry: Precise Trajectory Estimation Based on Carrier Phase Cycle Slip Estimation," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 7, no. 3, pp. 7319-7326, July 2022.