

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06609

研究課題名(和文) 複数のGNSSアンテナによる超高精度測位法と応用技術の開発

研究課題名(英文) Very Precise Point Positioning by Using Multiple Antennas and Applications

研究代表者

杉本 末雄 (Sugimoto, Sueo)

立命館大学・理工学部・授業担当講師

研究者番号：70093424

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：GNSS回帰モデルを用いて、複数の安価なGNSSアンテナによる超精密単独測位(VPPP)アルゴリズムを導出し、同時に複数アンテナを活用する、GNSSジャイロ理論[アンテナ間の基線ベクトルを推定し、オイラー角(ヨー、ピッチ、ロール角)を高精度に推定する理論]を導出した。GNSS測位データの衛星間、受信機間の2重差をとり、誤差要因が消滅し、アンテナ間の距離の拘束条件により、VPPP測位アルゴリズムと整数値バイアスを決定する新しい手法の開発により、10秒間(10 epochs)の1周波のGPS測位データにより、RMS誤差は50cm以下、オイラー角の精度は0.2度以下となることを実証した。

研究成果の概要(英文)：We have developed new VPPP algorithms and attitude estimation algorithms (so-called; GNSS GYRO) using multiple low cost single frequency antennas based on GNSS Regression measurement models (GR models). By using the double differences for GNSS observables by multiple antennas with constraints of solid geometrical distances among antennas, we developed new Kalman filtering algorithms of all antennas' positions as well as the baseline vectors among antennas. Then using the geometric constraints for all antennas' positions, the updated algorithms of estimated antennas' positions and integer ambiguities by developing new Kalman filter based on the ambiguity resolution methods are derived. Experimental results by using real GNSS data for only ten seconds (10 epochs) from low-cost L1 receivers without using any external transmitted information show that less than 50cm RMS positioning errors and less than 0.2 degree errors of Euler's angles for the attitude estimation are achieved.

研究分野：確率システム制御、信号画像処理

キーワード：超精密測位(VPPP) 精密測位(PPP) カルマンフィルタ GNSSジャイロ 複数のGNSS受信機 受信機間距離拘束 GNSS回帰モデル オイラー角

1. 研究開始当初の背景

GNSS(Global Navigation Satellite System) は、米国の GPS(Global Positioning System) に代表される人工衛星を用いた衛星測位システムの総称である。GPS 以外では、ロシアの GLONASS が既に運用されており、また欧州の「Galileo」、中国の「北斗(コンパス)」等の衛星測位システムが整備されつつある。また、わが国では、QZSS の第 1 号機(愛称: みちびき)が 2010 年 9 月に打ち上げられ実証実験が行われており、最終的に 7 機の衛星、当面は 4 機の衛星による実用測位システムを構築することが決定され、開発が進められていた。GNSS は、自動車、航空機、船舶、携帯電話におけるナビゲーションや、測地・測量、時刻同期、地殻変動の観測など広範囲に利用されているため、一種の社会インフラとして認知されていた。

確率システム理論からの研究アプローチ

本研究代表者は研究生活の開始以来 50 年近く、確率システムの解析・制御および信号処理・画像処理アルゴリズムの開発に携わっていた。GNSS の初期段階である 1990 年頃の GNSS 分野に対する研究主体は、土木、測量、航法学等の分野で行われていたが、確率システム制御理論からの異なった視点からの研究アプローチを行い、特にカルマンフィルタを用いた測位計算アルゴリズムの研究を行っていた。GNSS 測位では、同じ受信機で、同じ観測値を得ても、測位ソフトウェアの良否によって測位精度は大きく異なるという特徴がある。したがって、GNSS 測位では、「数理解析力」、「知恵の力」の側面が強いといわれていた。この視点からは、当時我が国の研究・開発力は発展途上にあり、必ずしも国際競争力は高いとはいえなかった。本研究の代表者と研究分担者は、我が国から世界に発信できる測位アルゴリズムの開発を目指し、多くの研究成果を得ていた。

GNSS 回帰モデル

2004 年 8 月に発明考案した GNSS 回帰モデルは、システム制御理論での状態空間モデルに相当するものである。測位データと測位位置、電離層遅延など各種誤差との回帰モデルを構築することにより、高精度単独測位(PPP; Precise Point Positioning)・相対測位(Relative Positioning)、電離層遅延補正に関する研究、サイクルスリップ、マルチパス等の異常データ検出、低減に関する研究の業績があった。またわが国では最初となる GPS の学術的な解説書を刊行した(GPS ハンドブック: 杉本・柴崎 共編, 2010 年)。本 VPPP 関連研究プロジェクトは世界に発信できる測位技術となり得る可能性が高いものであった。

本研究代表者は、2012 年 3 月末に立命館大学を 65 歳の定年退職し、引き続き特任教授(特別任用教授)として在籍し、研究・教育

活動の最終局面を迎えていた。

2. 研究の目的

衛星測位システム(GNSS)は、測位のみならず、応用領域が益々拡大し、重要な社会基盤システムとなっている。我が国の準天頂衛星(QZSS)は実用化段階となっており、日本版 GNSS として発展させることが計画されている。このような背景の下、研究代表者および分担者らが現在まで蓄積してきた技術と研究成果を用いて、本研究では確率システム理論に立脚した、高精度測位法を確立することを目的としている。このために、研究代表者および分担者が提案した GNSS 回帰モデル(2004 年)を用いて、(T1) 複数の GNSS アンテナ(Multiple GNSS Antennas)による、超高精度単独測位法(Very Precise Point Positioning)の導出と、同時に (T2) 複数アンテナを活用する、GNSS ジャイロの理論と計算処理法などの応用技術の開発を行うことが目的である。本研究では、安価な GNSS 受信機(アンテナ)を複数個用いることに T1-T2 を実現することを目指した。すなわち、1 周波数(L1 波のみ)の安価な受信機を用いることにしている。

3. 研究の方法

初年度、平成 27 年度では、(T1) 複数受信機を用いた超高精度単独測位(VPPP)アルゴリズムの確立と実装化の検討を行い、過去に行った精密単独測位(PPP)に関する研究成果を発展させ、複数アンテナ(受信機)を利用した PPP の基礎理論、および基礎的なアルゴリズムの導出を行った。

平成 27 年度までの研究によって構築されたアルゴリズムおよびソフトウェアに対する実証実験のため、下記の図 1 のような u-block 社製アンテナ 4 個と NovAtel 社製アンテナ 1 個(中央)を設置し、データ収集を行い (T1)、(T2)の理論と計算処理アルゴリズムの実証実験を行った。

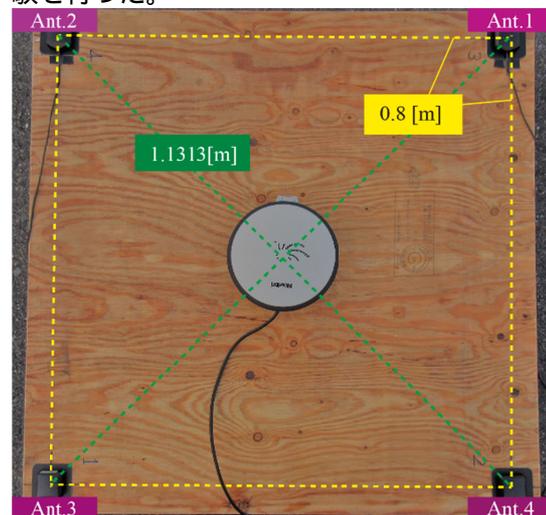


図 1 マルチアンテナの設置

なお、(テーマ1,2)に共通する問題点として、都市部などで上空視界が狭まることによる衛星数の減少、マルチパス、サイクルスリップの影響等がある。これらの現象への対処や、異常データの検出、除去を効果的に行うことが、測位の高精度化に必要な。本研究の申請者および分担者は、これらの分野においても多数の研究成果があり、これらの研究成果を考慮して、本研究でのアルゴリズムの開発を行った。

研究体制

本研究の遂行にあたり、研究代表者および分担者の役割は以下の通りであった。

研究代表者(杉本末雄)は、各研究テーマの核となる基礎理論、およびデータ処理アルゴリズムの研究・考案を行うとともに、各研究テーマの進捗を把握し各テーマ間の円滑な連携、統合を行った。また研究分担者(久保幸弘)は、研究代表者との連携の下、考案されたアルゴリズムの実装(ソフトウェア作成)、実験・実証方法の立案および遂行を担当した。また研究分担者の研究室に所属する大学院生(修士課程および博士課程)の協力のもと、本研究を通じて、社会人博士1名、修士2名が学位を取得している。

研究成果の発信については、雑誌論文、学会発表を各年度において行い、研究成果は国内外において、国際化を念頭に置き、英文での学会発表、雑誌論文などでの発表を多数行った(本報告書以下の、5.主な発表論文等を参照)。

4.研究成果

本研究課題の目的は、複数の安価なGNSS受信機を用いた超精密なGNSS測位アルゴリズム、およびGNSSジャイロを開発することである。

このために、GNSS回帰モデルを用いて、(テーマ1)複数のGNSSアンテナ(Multiple GNSS Antennas)による、超精密単独測位(Very Precise Point Positioning: VPPP)アルゴリズムの確立と、同時に(テーマ2)複数アンテナを活用する、GNSSジャイロ理論(すなわちアンテナ間の基線ベクトルを精密に推定し、オイラー角である、ヨー、ピッチ、ロール角を高精度に推定する理論)の確立と具体的な計算処理アルゴリズムの開発を行うことにある。

(テーマ1)に関しては、GNSS測位データの衛星間、受信機間の2重差をとることにより、ほとんどの誤差要因が消滅することから、新たな精密単独測位アルゴリズムを導出し、アンテナ間の距離が既知であるとの拘束条件

を用いて、外部からの補正情報を全く必要としない超精密単独測位(VPPP)アルゴリズムを導出し、2重差の整数値バイアスをフィックスする新しい手法を用いることにより、1分間(60 epochs)の1周波のGPS測位データにより、RMS誤差は50cm以下となることを実データにより検証した。この研究成果は、2017年9月に開催されたION GNSS+ 2017で発表を行った。また、MADOKA、CLASなどによる補正情報を用いることにより、10cm以下の測位精度の達成を検討中である。

また(テーマ2)については、(テーマ1)の研究成果と、従来のGNSSジャイロ理論で用いられているオイラー角を求めるために、最小二乗法を適用することにより、従来の決定論的手法による結果を大幅に改善することができた。また、自動車の動きのモデルについて、拡張Singerモデルの導出を行った。

5.主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計13)

Hirokazu Hasegawa, Goshi Okuda, Yukihiro Kubo, Sueo Sugimoto, A New GNSS Relative Positioning Algorithm Based on Alternative Use of the Positions of Reference Receivers, 査読有, Proc. of the 49th ISICIE Int. Symp. on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS'17), Vol. 1, 2018, pp. 131-136.

Koji Abe, Yuma Arakawa, Yukihiro Kubo, Sueo Sugimoto, GNSS Integer Ambiguity Resolution Methods Applied by Kalman Filter - the Review and Comparison, 査読有, Proc. of the 49th ISICIE Int. Symp. on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS'17), Vol. 1, 2018, pp. 137-141.

Toma Onishi, Ryo Sugiura, Yukihiro Kubo, Sueo Sugimoto, INS/GNSS/Vehicle Speed Integration for Land Vehicles with Utilizing Zero-Velocity Information, 査読有, Proc. of the 48th ISICIE Int. Symp. on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS'16) Vol. 2017, 2017, pp. 63-69.
<https://doi.org/10.5687/sss.2017.63>

Atsushi Mouri, Goshi Okuda, Sueo Sugimoto and Yukihiro Kubo, VPPP Algorithms of Baseline Vector Estimation among Multiple Antennas, 査読有, Proc. of

the 48th ISCIE Int. Symp. on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS'16) Vol. 2017, 2017, pp. 174-181.
<https://doi.org/10.5687/sss.2017.174>

Atsushi Mouri, Goshi Okuda, Yukihiro Kubo and Sueo Sugimoto, Novel VPPP Algorithms with Multiple Antennas and Attitude Estimation, 査読有, Proc. of the Inst. of Navigation 2017 Int. Tech. Meeting (ITM 2017), Vol. 1, 2017, pp. 474-491.

Goshi Okuda, Atsushi Mouri, Hirokazu Hasegawa, Yuma Arakawa, Yukihiro Kubo and Sueo Sugimoto, VPPP Algorithms with Multiple Antennas and Highly Accurate Attitude Estimation by Ambiguity Resolution Methods, 査読有, Proc. of the 30th Int. Tech. Meeting of the Satellite Div. of Inst. of Navigation, (ION GNSS+ 2017), Vol. 1, 2017, pp.2244-2262.

Atsushi Mouri, Yukihiro Kubo, Sueo Sugimoto and Masaharu Ohashi, Detection and Correction of Doppler Outliers in Kalman Filter-based Positioning, 査読有, Trans. of the Inst. of Systems, Control and Information Engineers, Vol. 29, No. 1, 2016, pp. 18-28.
<https://doi.org/10.5687/iscie.29.18>

Masaharu Ohashi, Akihiro Yamada, Yuki Yamamoto, Yukihiro Kubo and Sueo Sugimoto, Estimation Methods of Spherical Cap Harmonic Models Based on Kalman Filter for Regional Ionospheric Delays, 査読有, Proc. of the 29th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the Inst. of Navigation (ION GNSS+ 2016), 2016, pp. 3365-3371.

Ryo Sugiura, Yusuke Nakai, Yukihiro Kubo, Sueo Sugimoto, Shintato Mizukami, Tsunehiko Imamura and Hideo Kumagai, A Low Cost INS/GNSS/Vehicle Speed Integration Method for Land Vehicles, 査読有, Proc. of the 29th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of The Inst. of Navigation (ION GNSS+ 2016), 2016, pp. 1163-1169.

Atsushi Mouri, Yoshifumi Karatsu, Goshi Okuda, Sueo Sugimoto and Yukihiro Kubo, New PPP/VPPP Algorithms by using Multiple Antennas, 査読有, Trans. of the

Inst. of Systems, Control and Inf. Eng., Vol. 29, No. 12, pp. 525-534, 2016.

Yoshifumi Karatsu, Masahiro Ozaki, Yukihiro Kubo and Sueo Sugimoto, Further Studies on the VPPP Algorithms by using Multiple Antennas, 査読有, Proc. of the 46th ISCIE Int. Symp. on Stochastic Systems Theory and Its Applications, Vol. 2015, 2015, pp. 171-179.
<https://doi.org/10.5687/sss.2015.171>

Masaharu Ohashi, Yutaro Sato, Akihiro Yamada, Yukihiro Kubo and Sueo Sugimoto: Modeling and Prediction of Regional Ionospheric VTEC for Japanese Region by Spherical Cap Harmonic Analysis, 査読有, Proc. of The 28th Int. Tech. Meeting of the Satellite Div. of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2015), Vol. 28, 2015, pp.1115-1122.

Yoshifumi Karatsu, Atsushi Mouri, Yukihiro Kubo and Sueo Sugimoto: Further Developments of VPPP Algorithms with Multiple Antennas, 査読有, Proc. of the 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2015), Vol. 28, 2015, pp. 1181-1192.

〔学会発表〕(計 14 件)

① 長谷川弘和, 奥田 剛士, 三村 大, 久保幸弘, 杉本末雄, GNSS 測位における自動車の統計学的動的モデル, 第 62 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI '18) 2018.

阿部 宏司, 荒川 侑摩, 宮迫 厚志, 久保 幸弘, 杉本末雄, 収束速度の向上を目的とした GNSS 測位における整数値バイアス部分推定の活用, 第 62 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI '18), 2018.

奥田剛士, 長谷川弘和, 毛利篤史, 久保幸弘, 杉本末雄, 複数の GNSS 受信機による VPPP 測位と姿勢推定, 第 61 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI '17), 2017.

荒川侑摩, 阿部宏司, 久保幸弘, 杉本末雄, GNSS 測位における整数値バイアスの部分推定とその実用化手法, 第 61 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI '17), 2017.

大西透馬, 榎原拓美, 杉浦 諒, 久保幸弘, 杉本末雄, 都市部におけるINS/GPS/Vehicle Speed 複合航法, 第61回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI '17), 2017.

西浦伸弥, 久保幸弘, 杉本末雄, スマートフォンを用いた都市部での精密単独測位, 第61回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI '17), 2017.

山田晃寛, 佐藤優太郎, 久保幸弘, 杉本末雄, Global Ionosphere Maps を活用した日本上空における電離圏遅延モデルの構築手法, 第60回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI '16), 2016.

毛利篤史, 唐津祥史, 奥田剛士, 久保幸弘, 杉本末雄, 複数アンテナによる超精密GNSS測位アルゴリズム, 第60回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI '16), 2016.

三木 大輔, 西川憲太郎, 久保幸弘, 杉本末雄, GNSS 測位における高精度補正情報を適用した整数値バイアスの推定手法, 第60回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI '16), 2016.

荒川侑摩, 宝満正聡, 久保幸弘, 杉本末雄, 高精度補正情報および整数値バイアスの部分推定を適用した GNSS 移動体測位に関する研究, 第60回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI '16), 2016.

大橋正治, 佐藤優太郎, 山田晃寛, 久保幸弘, 杉本末雄, 球冠調和関数による日本上空に適した電離圏遅延モデルの考察, 第59回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI '15), 2015.

西川憲太郎, 宝満正聡, 久保幸弘, 杉本末雄, GNSS 測位における高精度補正情報を適用した整数値バイアスの推定手法, 第59回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI '15), 2015.

唐津祥史, 毛利篤史, 久保幸弘, 杉本末雄, 複数アンテナを用いたGNSS測位の高度化, 第59回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI '15), 2015.

宝満正聡, 阪井拓未, 久保幸弘, 杉本末雄, GPS観測の線形結合に対する整数値バイアスの部分推定, 第59回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI '15), 2015.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉本 末雄 (SUGIMOTO, Sueo)
立命館大学・理工学部・授業担当講師
研究者番号: 70093424

(2) 研究分担者

久保 幸弘 (KUBO, Yukihiro)
立命館大学・理工学部・教授
研究者番号: 00388125