

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360422

研究課題名（和文） GNSS 回帰モデルに基づく測位アルゴリズムの開発

研究課題名（英文） Positioning Algorithms Based on GNSS Linear Regression Models

研究代表者

杉本 末雄 (SUGIMOTO SUEO)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：70093424

研究成果の概要（和文）：

GNSS 回帰モデルに基づき、(1)電離層遅延誤差などの GNSS 測位のための補正情報の作成アルゴリズム、(2)マルチパス、サイクルスリップの検出アルゴリズムと少ない GNSS 衛星下での測位アルゴリズム、(3) GNSS を融合したマルチ衛星系を用いた測位アルゴリズム、(4)GNSS/INS 複合測位アルゴリズム、の開発を行った。

研究成果の概要（英文）：

In this research project, we have developed mainly four algorithms related to GNSS positioning: (1) estimation algorithm of ionospheric path delay of GNSS signals, (2) detection of cycle slips as well as multipath, and positioning under few observable GNSS satellites, (3) multi GNSS positioning, and (4) new nonlinear filters for GNSS/INS positioning, based on GNSS linear regression models developed by us in 2004.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2010 年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2011 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
総計	8,300,000	2,490,000	10,790,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学、航空宇宙工学

キーワード：GPS・GNSS・衛星測位・カルマンフィルタ・非線形フィルタ・測位アルゴリズム・慣性航法

## 1. 研究開始当初の背景

カーナビ、精密測量などの分野で米国 GPS (Global Positioning System) を用いた測位が高い注目が集まっていたが、我が国のこの方面での研究はあまり活発ではなかった。研究開発当初、米国以外にもロシアの GLONASS、欧州の Galileo、中国の北斗 (Compass)、などの GNSS (Global Navigation Satellite System) が開発する機運があった。我が国、

独自の GNSS である QZSS (Quasi Zenith Satellite System: 準天頂衛星システム) の打ち上げ計画の詳細も未確定の状況にあり GNSS の開発気運が不活発な時期であった (昨年 2011 年 9 月には、QZSS について明確な開発計画が閣議決定された)。

本研究は、従来ブラックボックスのまま導入されていた衛星測位アルゴリズム、また精密測位では必要となる電離層遅延誤差、対流

圏遅延誤差、衛星軌道誤差の推定法を、研究代表者のグループが提案しているGRモデル(GNSS Regression Model: GNSS 回帰モデル)を用いて体系的に考察し、従来のブラックボックス的ソフトウェアをホワイト化し、日本発の新たな測位アルゴリズムの開発を行おうとしたものである。

## 2. 研究の目的

本研究は、精密な単独測位や新たな相対測位アルゴリズムの導出、および日本上空での電離層遅延誤差、対流圏遅延誤差、衛星軌道誤差などを推定し、測位の補強データを利用者に提供するシステムの構築を試みることを目的としている。このために、GRモデルを用いることにより以下のテーマの研究を行うことを目的とした。

(テーマ1) 広範囲、多利用者を対象とした誤差補正情報作成システムの開発

上記誤差を高精度に推定するシステムを構築する。この誤差情報を何らかの通信手段により既存の測位アルゴリズム(利用者の受信機)に伝達すれば、簡便に誤差を補正でき、高精度な測位システムが形成できる。具体的には、現在、国土地理院が全国に展開している電子基準点網でのGPS連続観測データに基づいて誤差補正情報の作成を行う

(テーマ2) マルチパスの検出および除去アルゴリズムの開発

マルチパス、サイクルスリップの影響を迅速に検出し、除去するアルゴリズムを開発する。最終的には、テーマ1で作成される誤差補正情報と、テーマ2で導出されるマルチパス除去アルゴリズムを適用することにより、日本国内における利用者が常に誤差1[m(2drms)]程度の高精度測位が可能となるシステムの構築を目的とした。

(テーマ3) 多周波数帯観測データ、マルチGNSSに基づく、測位アルゴリズムと誤差補正情報作成アルゴリズムの開発

今後、ロシアのGLONASS、欧州のGalileo、中国の北斗(Compass)、我が国のQZSS(Quasi Zenith Satellite System: 準天頂衛星システム)など多数のGNSSが開発されはじめている。近い将来には、多数の異なる衛星測位システムからの測位信号を受信することができ、受信可能な衛星数は増加する。このような状況下で、これらの新QZSSと、既存のGPSを融合した、より高精度な測位アルゴリズムと、誤差補正情報の作成アルゴリズムの開発を行う。

(テーマ4) GPS/GNSSとINS複合測位アルゴリズムの開発

実用的な測位・航法として、トンネル内や市街地での衛星電波の遮蔽に対応するため、上記テーマ1~3の研究に加えて、慣性航法装置(INS)を複合した測位アルゴリズムを

非線形フィルタ理論に基づき導出し、その具体的な信号処理ソフトウェアを開発する。

## 3. 研究の方法

(テーマ1)~(テーマ4)の各々のテーマについて、計算処理アルゴリズム構築、ソフトウェア作成、実験、実験データ整理等は研究代表者(杉本)が統括し、その研究室の大学院生、杉本および研究分担者、久保幸弘、が研究開発を行った。

(テーマ1)

現在開発済みの測位用ソフトウェア(単独・相対測位)を活用し、様々な条件下での測位を行い、各測位方式における誤差要因の解析を行った。

各誤差要因を除去、抑制するための既存の手法を調査し、誤差量の推定に適用可能な数学モデルを確立し、その計算アルゴリズムを開発した。

開発済みの測位ソフトウェアに対し、上記で開発した誤差量推定アルゴリズムを統合し、測位精度の向上が実現可能であることを確認した。

(テーマ2)

マルチパスの影響を検出、除去するアルゴリズムを開発し、市街地を走行している車両の実データにより、実際の測位環境下においてどの程度のマルチパス、サイクルスリップが存在するかを確認した。

開発したサイクルスリップ検出手法とマルチパス検出手法を適用し、測位精度への影響を検証した。

(テーマ3)

新GNSSシステムに関しては不確定要素も多いため、実用可能時期、受信機メーカーの対応等に関して継続して調査を進めた。

マルチGNSSを融合した測位アルゴリズムの開発を、現時点で実用化している、ロシアのGLONASSと米国のGPSを用いた測位アルゴリズムの導出を試みた。

(テーマ4)

非線形フィルタを用いた複合アルゴリズムの開発を行い、シミュレーションによりその精度の検証を行った。

上記の研究計画を、実データを用いて検証するために、立命館大学建物屋上に設置している基準局以外のデータ入手のため、国土地理院設置の電子基準点網のデータを入手した。また既設の2周波受信機2台を用いて移動時(キネマティック時)の搬送波位相積算データ、

擬似距離データの採取を行った。

#### 4. 研究成果

上記の研究テーマについての研究成果を得た。

##### (テーマ1)

多数の電子基準点における GPS 観測データに基づいて、測位誤差の要因である日本上空の電離層、対流圏の影響を推定するためのモデルを提案した。特に球冠調和関数を用いたモデルに基づく補正情報を利用することで、より精度の高い測位が実現できることを示した。また、測位演算と同時に電離層や対流圏遅延の影響を推定するアルゴリズムを提案し、100km 以上の長基線長における測位において有効な測位アルゴリズムとなることを確認した。

##### (テーマ2)

特に実用的なGNSS測位を行うという見地からGNSS受信機で観測されるコード擬似距離や搬送波位相観測量に含まれるサイクルスリップ、マルチパス、観測データの欠損などの異常データ検出アルゴリズムとそのデータの棄却を行う測位計算処理アルゴリズムを導出した。また、異常データが正常に復帰したかどうかの判定処理と、復帰に伴う測位計算処理アルゴリズムを導出した。これらは、基本的に測位演算で用いられるカルマンフィルタやガウスサムフィルタのイノベーション過程に対する仮説検定に基づく方法であり、走行中の自動車で受信した実観測データを用いて、導出したアルゴリズムの有効性を検証した。その結果、上記のような異常データが頻出する厳しい受信環境においても測位精度改善が確認できた。マルチパス、サイクルスリップ等の異常データ検出アルゴリズムの開発：観測量に含まれる異常値を、カルマンフィルタのイノベーション過程に対するカイ二乗検定や尤度比検定等の統計的検定手法を用いて検出するアルゴリズムを提案し、自動車走行中の実観測データを用いてその有効性を示した。また、市街地での高精度な測位を目指して、少ない衛星数でも測位可能な手法を、高度の情報を拘束条件として用いる方法を開発し、測位精度を検証している。

##### (テーマ3)

異なる仕様のシステムからの測位信号を融合させるためには、時刻系の一致、衛星の位置座標系の一致など、単独のGNSS測位システムを利用する場合より、より深化した測位アルゴリズムの開発が必要となることが分かった。このため、本研究では、ロシアのGLONASSシステムと米国のGPSを複合させた

測位アルゴリズムを導出し、実データを使用して、その有効性を検証した。

##### (テーマ4)

慣性航法 (INS) と GNSS との複合システムの構築には、非線形システムの状態推定を行う必要があり、本研究では各種の非線形フィルタや、それらを融合したフィルタを導出し、複合航法における有用性を検証した。特にこの目的を遂行するために、新たな非線形フィルタを開発することができた。この新しい非線形フィルタは、我が国で主に開発された等価線形化法とガウス和フィルタを組み合わせた手法であり、計算効率と推定精度の両面から非常に優れた非線形フィルタといえる。また無線電波強度による屋内測位アルゴリズムを最尤推定法に基づき提案し、INSのみならずその他のセンサネットワークを利用したシームレスな測位方法についての研究成果を得た。

#### 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31件)

著者名: Y. Kubo, H. Tanaka, M. Ohashi, S. Sugimoto, 論文標題: Long Baseline GNSS Relative Positioning with Estimating Ionospheric and Tropospheric Delays and their Gradients, 雑誌名: Int. J. of Innovative Computing, Information and Control, 査読: 有, 巻: 8, 発行年: 2012, ページ: 2375-2388

著者名: M. Tanikawara, K. Ohba, Y. Kubo, S. Sugimoto, 論文標題: The Rice Distribution and ML Positioning Using Received Signal Powers in Sensor Network, 雑誌名: Int. J. of Innovative Computing, Information and Control, 査読: 有, 巻: 8, 発行年: 2012, ページ: 2359-2374

著者名: S. Otsuki, M. Kamimura, M. Ohashi, Y. Kubo, S. Sugimoto, 論文標題: Local Models for Ionospheric VTEC Estimation Based on GR Models and Spherical Cap Harmonic Analysis, 雑誌名: Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation, 査読: 有, 巻: 8, 発行年: 2012, ページ: 1-7

著者名: M. Ohashi, S. Otsuki, N. Okano, Y. Kubo, S. Sugimoto, 論文標題: Local Models for Ionospheric VTEC Estimation Based on GR Models with Multi-Layer Model, 雑誌名: Proc. ION-GNSS 2011, 査読: 有, 発行年: 2011,

ページ：2588-2594

著者名：M. Kamimura, R. Tomita, T. Nagano, A. Chabata, Y. Kubo, S. Sugimoto、論文標題：Detection of Cycle Slips and Multipath in GNSS RTK Precise Point Positioning、雑誌名：Proc. ION-GNSS 2011、査読：有、発行年：2011、ページ：1056-1067

著者名：Y. Kubo、Y. Matsunaga, N. Munetomo, S. Fujita, K. Ohta, S. Sugimoto、論文標題：Gaussian Sum Filters and Its Applications to GNSS Positioning、雑誌名：Proc. ION-GNSS 2011、査読：有、発行年：2011、ページ：2105-2112

著者名：S. Sugimoto、Y. Kubo、N. Munetomo、論文標題：A Quasi-Linear Filter with Conditional Gaussian Sum Distributions for Nonlinear Dynamical Systems、雑誌名：Preprints of the 18th IFAC World Congress、査読：有、発行年：2011、ページ：7797-7802

著者名：M. Tanikawara, K. Ohba, Y. Kubo、S. Sugimoto、論文標題：Statistical Models and ML Positioning Using Received Signal Powers in Sensor Networks、雑誌名：Proc. of the 412nd ISCIE Int. Symp. on Stochastic Systems Theory and Its Applications、査読：有、発行年：2010、ページ：184-189

著者名：Y. Kubo、N. Munetomo, Y. Matsunaga、S. Sugimoto、論文標題：GNSS Positioning Algorithms by Gaussian Sum Filtering Methods、雑誌名：Proc. of the 412nd ISCIE Int. Symp. on Stochastic Systems Theory and Its Applications、査読：有、発行年：2010、ページ：222-227

著者名：Y. Kubo, H. Tanaka, M. Ohashi, S. Sugimoto、論文標題：Long Baseline GNSS Relative Positioning with Estimating Ionospheric and Tropospheric Delays and their gradients、雑誌名：Proc. of the 412nd ISCIE Int. Symp. on Stochastic Systems Theory and Its Applications、査読：有、発行年：2010、ページ：228-235

著者名：杉本末雄、論文標題：GPS から学んだこと、雑誌名：建設の施工計画、査読：無、巻：No.728、発行年：2010、ページ：5

著者名：杉本末雄、久保幸弘、論文標題：GPS 測位を巡って、雑誌名：建設の施工計画、査読：無、巻：No. 728、発行年 2010、ページ：53-57

著者名：T. Yanase, H. Tanaka, M. Ohashi, Y. Kubo、S. Sugimoto、論文標題：Long

Baseline Relative Positioning with Estimating Ionosphere and Troposphere Gradients、雑誌名：Proc. of the 23rd Int. Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation(ION GNSS 2010)、査読：有、発行年：2010、ページ：196-206

著者名：Y. Kubo、N. Munetomo, S. Takehara, Y. Matsunaga, S. Sugimoto、T. Tsujii, T. Fujiwara, H. Tomita、論文標題：Integration Algorithms of Single Frequency Precise Point Positioning and INS --Flight Test、雑誌名：Proc. of the Int. Symp. on GPS/GNSS 2010 (IGNSS 2010)、査読：有、発行年 2010、ページ：217-222

著者名：S. Otsuki, M. Kamimura, M. Ohashi, Y. Kubo、S. Sugimoto、論文標題：Local Models for Ionospheric VTEC Estimation Based on GR Models and Spherical Cap Harmonic Analysis、雑誌名：Proc. of the Int. Symp. on GPS/GNSS 2010 (IGNSS 2010)、査読：有、発行年 2010、ページ：445-450

著者名：杉本末雄、論文標題：GPS 測位アルゴリズムと回帰モデル - 衛星測位の頭脳を解明する -、雑誌名：電気学会論文誌、査読：有、巻：C 部門誌 130、発行年：2010、ページ：110-115

著者名：M. Tanikawara, Y. Kubo、S. Sugimoto、論文標題：Modeling of Sensor Error Equations for GPS/INS Hybrid Systems、雑誌名：International Journal of Innovative Computing, Information and Control (IJICIC)、査読：有、巻：6、発行年：2010、ページ：127-138

著者名：S. Fujita, H. Yamamoto, T. Iura, Y. Kubo、S. Sugimoto、論文標題：Modeling Ionosphere VTEC over Japan Based on GNSS Regression Models and GEONET、雑誌名：IJICIC、査読：有、巻：6、発行年：2010、ページ：155-169

著者名：T. Aoki, S. Sugimoto、論文標題：Dynamical Models for Automobile Movements、雑誌名：IJICIC、査読：有、巻：6、発行年：2010、ページ：3-14

著者名：Y. Kubo、T. Yanase, S. Otsuki、S. Sugimoto、論文標題：Estimation Methods of Satellite Orbit and Clock Errors Based on GNSS Regression Models、雑誌名：Proc. of 2009 Int. Symp. on GPS/GNSS、査読：有、発行年：2009、ページ：paper No.FB3-2

21 著者名：T. Yanase, S. Fujita, H. Tanaka、Y. Kubo、S. Sugimoto、論文標題：Long Baseline GNSS Relative Positioning with Estimating Zenith

Delays of Ionospheric and Tropospheric Delays、雑誌名：Proc. of 2009 Int. Symp. on GPS/GNSS、査読：有、発行年：2009年、ページ：paper No. FB3-3

- 22 著者名：S. Sugimoto, Y. Kubo, M. Tanikawara、論文標題：A Review and Applications of the Nonlinear Filters to GNSS/INS Integrated Algorithms、雑誌名：Proc. of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2009)、査読：有、発行年：2009、ページ：3101-3113
- 23 著者名：K. Nishikawa, S. Fujita, Y. Kubo, S. Sugimoto、論文標題：PPP based on GR Models with Estimating Tropospheric and Ionospheric Delays、雑誌名：Proc. of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2009)、査読：有、発行年：2009、ページ：2496-2507

〔学会発表〕(計 36 件)

発表者名：上村雅弥、服部泰輔、久保幸弘、杉本末雄、発表標題：高精度単独測位でのサイクルスリップの検出、学会名：第 55 回 システム制御情報学会、発表年月日：2011 年 5 月 17 日、発表場所：京都リサーチパーク(京都府)

発表者名：大槻真一、大橋正治、久保幸弘、杉本末雄、発表標題：多層モデルを用いた日本上空の電離層 TEC 推定、学会名：第 55 回 システム制御情報学会、発表年月日：2011 年 5 月 17 日、発表場所：京都リサーチパーク(京都府)

発表者名：井浦努、大槻真一、久保幸弘、杉本末雄、発表標題：球冠調和関数を用いた日本上空の電離層 TEC 推定、学会名：第 54 回 システム制御情報学会、発表年月日：2010 年 5 月 21 日、発表場所：大阪大学コンベンションセンター(大阪府)

発表者名：石丸祐介、田中久弥、久保幸弘、杉本末雄、発表標題：GNSS 高精度単独測位法における観測量の異常値検出、学会名：学会名：第 54 回 システム制御情報学会、発表年月日：2010 年 5 月 21 日、発表場所：大阪大学コンベンションセンター(大阪府)

〔図書〕(計 1 件)

杉本末雄，柴崎亮介(編著)：GPS ハンドブック，朝倉書店，総ページ数：492，2010.

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・教授  
研究者番号：7 0 0 9 3 4 2 4

(2)研究分担者

久保 幸弘 (KUBO YUKIHIRO)  
立命館大学・理工学部・准教授  
研究者番号：0 0 3 8 8 1 2 5