

博士論文概要

論文題目

複数衛星測位システムの複合による
都市部での測位精度・利用率向上手法の研究

Accuracy and Availability Enhancement of Positioning
in Urban Environment by Multi-Global Navigation Satellite System

申請者

北村	光教
Mitsunori	KITAMURA

機械科学専攻 動力・エネルギー工学研究

2015年2月

高度に情報化した現代では、位置情報に関する重要性が高まりつつある。位置情報とは、利用者がいつ、どこにいるかを記述する情報であり、身近な利用法としては、自動車の運転において目的地までの経路選択を支援するカーナビゲーションシステムや、歩行者を対象として携帯端末等のパーソナルデバイスを用いたパーソナルナビゲーションシステムが一般的である。また、特に高精度な位置情報は、測量や情報化施工（IT 施工）、自動計測等のインフラストラクチャ（インフラ）整備の分野で重要である。これらの位置情報の取得方法として、従来、米国の GPS（Global Positioning System）等の全地球航法衛星システム（GNSS: Global Navigation Satellite Systems）が広く利用されている。GNSS は位置情報を、地球を基準とした絶対位置として取得することが可能であり、また、広範囲かつ高精度な位置計測が可能であるため、インフラ整備等の分野で有用である。

しかしながら、上記のインフラ整備の分野は人口の集中から都市部において需要が高いのに対して、GNSS は都市部での高精度な測位が困難であるという課題がある。この課題の大きな原因は、主に衛星から配信されている信号が建物等の障害物によって遮蔽されることにより発生する衛星数の不足であり、このような障害物に遮蔽された衛星は NLOS（Non-Line-of-Sight）衛星と呼ばれる。また、回折・反射した信号を受信する事によって発生するマルチパス誤差と呼ばれる測位誤差も GNSS が都市部で高精度な測位が困難である重大な原因である。また、NLOS 衛星は特に大きなマルチパス誤差を持つことが明らかにされている。

そこで従来、赤外全周カメラと呼ばれる特殊なカメラでアンテナ天頂方向の障害物情報を取得し、高精度測位で問題となる GPS の NLOS 衛星を判別する手法が提案されている。この手法では、判別した NLOS 衛星を測位演算から棄却することで、都市部における GPS 測位精度の向上を実現している。しかしながらこの手法では、NLOS 衛星の棄却によって衛星数が減少するため、衛星数の不足によってかえって測位精度が低下する可能性があることが課題として挙げられている。また、この手法で用いられる赤外全周カメラは特殊なセンサであるため、一般的に利用が困難であることも課題として挙げられる。

また近年、米国の GPS に加えて、露国の GLONASS（Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema）や欧州の Galileo、中国の北斗衛星導航系統（BeiDou: BeiDou Navigation Satellite System）、日本の準天頂衛星システム（QZSS: Quasi-Zenith Satellites System）等、複数の GNSS を複合的に利用して測位を行う、マルチ GNSS 測位と呼ばれる測位技術に関する研究が活発である。マルチ GNSS 測位は、複数の GNSS を複合的に利用するため、測位に利用可能な衛星を増加させることが可能である。そのため、都市部の様な衛星が遮蔽されやすい環境における測位の利用性と精度の向上が期待されている。

しかしながら、従来のマルチ GNSS 測位は、複数の GNSS を利用することによって得られる衛星数の増加効果を十分に利用することができないという課題があ

る。これは、複数のシステムを利用する際に問題となるシステム間の差を除去することを目的として、従来のマルチ GNSS 測位では、各 GNSS にそれぞれ 1 基ずつ主衛星と呼ばれる、基準とする衛星を定めているためである。つまり、主衛星として定義された衛星は測位に利用することができないため、結果的にマルチ GNSS 複合によって増加する衛星は減少する。例として、GPS と GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS を利用するマルチ GNSS 測位について考えると、QZSS はその特性から GPS と同一のシステムであるとみなせるので、主衛星は GPS と GLONASS, Galileo, BeiDou のそれぞれで 1 基ずつ定義される。そのため従来のマルチ GNSS 測位では、合計 4 基の衛星が測位に利用することができない。都市部のような衛星が遮蔽されやすく、利用可能な衛星数が少ない環境では、4 基もの衛星が利用できなくなることは重大な問題である。

以上をふまえて本研究では、都市部における衛星測位の高精度化と利用性の向上を目的とする。具体的には、従来主衛星を各 GNSS にそれぞれ 1 基ずつ定義することによって衛星数の増加効果が十分得られていないマルチ GNSS 測位に対して、本研究では、QZSS をただ一つの主衛星として利用する新しい測位手法を提案する。これにより、マルチ GNSS 測位の衛星数増加効果の向上を図り、都市部における測位の利用性と精度の向上の実現を目指す。加えて本研究では、測位精度を更に向上することを目的として、NLOS 衛星の判別を行う。ここで、従来提案されている赤外全周カメラによる NLOS 衛星判別手法では、GPS のみを利用した測位に対して NLOS 衛星判別を行っているため、衛星数の過剰な減少が課題として挙げられている。そこで本研究では、NLOS 衛星判別手法をマルチ GNSS 測位に適用し、測位衛星の絶対数を増加させた上で、NLOS 衛星を判別し測位を行うことの有効性を再評価する。また、赤外全周カメラは 2 枚の反射型光学系を利用しているため、カメラの天頂付近に副鏡が存在し、仰角 70[deg]以上の高い仰角に位置する NLOS 衛星を判別することが不可能であるという特徴がある。本研究では、対象とする都市部は仰角 70[deg]を超える障害物が多く存在するため、赤外全周カメラを NLOS 衛星判別に用いることは不適切である。加えて赤外全周カメラは特殊なセンサであるため、一般的に利用が困難であることも課題である。そこで本研究では、仰角 70[deg]以上が観測可能であり、より一般的なセンサである可視光魚眼カメラを用いて NLOS 衛星を判別する手法を提案することで、仰角 70[deg]を超える障害物が多数存在する都市部環境下でより正確な NLOS 衛星の判別を行い、高精度な測位の実現を目指す。

本論文の構成として、第 1 章では序論として、衛星測位アプリケーションと、都市部における衛星測位の現状を紹介している。そして、都市部における高精度測位に関する従来研究として、NLOS 衛星を判別する手法やマルチ GNSS 測位について紹介し、最後に、本論文の目的、方針および構成について述べている。

第 2 章では、本論文が対象とする衛星測位システムについて紹介している。ま

ずは衛星測位の概要として、広く利用されている単独測位と相対測位と呼ばれる測位手法を紹介する。ここで本論文は、特に相対測位を対象として議論を進めるため、本研究の相対測位で利用する技術として、局所的最小値探索（LMS: Local Minima Search）法とワイドレーン法について紹介する。次に、マルチ GNSS 測位で利用する衛星システムについてそれぞれ紹介し、更にマルチ GNSS 測位で問題になるシステム間バイアス（ISB: Inter System Bias）について紹介する。

第 3 章と第 4 章では、本研究の提案手法について具体的に述べている。まず第 3 章では、赤外全周カメラによる NLOS 衛星判別手法をマルチ GNSS に適用した場合の効果について述べる。その後、魚眼カメラを用いた NLOS 衛星判別手法を提案する。赤外全周カメラを用いた NLOS 衛星判別手法では、反射型光学系による NLOS 衛星の判別不能領域の存在と、特殊なカメラを用いているため、利用性の低さが課題である。そこで本手法では、利用が容易な一般的な魚眼カメラを利用する NLOS 衛星判別手法を提案する。魚眼カメラを用いる本手法は、赤外全周カメラと異なり、カメラ画像上から建物等の障害物を識別する必要がある。そこで本手法では、K-means 法を用いたカメラ画像の色情報に基づくクラスタリングと、SIFT 特徴点の追跡による移動量識別を行う。つまり、クラスタリングによって画像を大まかに領域分割し、カメラの移動に対して視線移動の大きなクラスタを障害物クラスタとして識別する。そして、識別した魚眼カメラ画像上の障害物の位置と、衛星の位置の関係から、NLOS 衛星を判別する。評価試験では、市街地において実際に車両に魚眼カメラを搭載し、障害物領域の抽出を行う。この時合わせて従来手法で利用されている赤外全周カメラを用いて障害物情報の抽出を行い、本手法の障害物情報抽出のリファレンスとして評価を行う。

次に第 4 章では、準天頂衛星を用いたマルチ GNSS 測位の効果的な測位手法の提案について述べている。従来マルチ GNSS 測位は、システム間の誤差を除去することを目的として、各 GNSS にそれぞれ 1 基ずつ主衛星を定義している。そのため、測位に利用可能な衛星数が減少してしまうという課題がある。そこで本研究では、QZSS を唯一の主衛星とする測位手法を提案することで、主衛星定義による衛星数の減少を低減し、測位の利用性向上を図る。加えて、QZSS の一重差アンビギュイティの決定に、QZSS の LEX 信号を利用する新しいワイドレーン法を提案することで、測位精度の向上を図る。加えて静止による評価試験を行い、本提案手法による衛星数の増加効果や測位の利用性と精度の向上効果を評価する。

第 5 章では、結論として、本論文で提案する魚眼カメラによる NLOS 衛星判別手法と、QZSS を利用したマルチ GNSS の測位手法についてまとめ、得られた知見とその成果、それらを踏まえた今後の課題と展望について述べている。

以上により、本論文では都市部における測位の利用性と精度の向上を目的とし、NLOS 衛星判別の有効性と QZSS を利用した新しい測位手法の有効性について、実環境試験により示している。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 北村 光教 印

(2014年 11月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
1. 論文	○Improvement of GPS and GLONASS Positioning Accuracy by Multipath Mitigation Using Omnidirectional Infrared Camera, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 23 No. 6, pp. 1125-1131, 2011, <u>Mitsunori Kitamura</u> , Taro Suzuki, Yoshiharu Amano, and Takumi Hashizume
論文	High-Accuracy GPS and GLONASS Positioning by Multipath Mitigation using Omnidirectional Infrared Camera, Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 311-316, May 2011, Taro Suzuki, <u>Mitsunori Kitamura</u> , Yoshiharu Amano, and Takumi Hashizume,
論文	○Evaluation for vehicle positioning in urban environment using QZSS L1-SAIF augmentation, Proceedings of SICE Annual Conference (SICE) 2011, pp. 491-494, 13-18 September 2011, <u>Mitsunori Kitamura</u> , Taro Suzuki, Yoshiharu Amano, and Takumi Hashizume
論文	Multipath Mitigation Using Omnidirectional Infrared Camera for Tightly Coupled GPS/INS Integration in Urban Environments, Proceedings of the 24th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2011), Portland, OR, pp. 2914-2922, September 2011, Taro Suzuki, <u>Mitsunori Kitamura</u> , Yoshiharu Amano, and Takumi Hashizume
論文	○Evaluation for Vehicle Positioning in Urban Environment Using QZSS Enhancement Function, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 24 No. 5, pp. 894-901, 2012, <u>Mitsunori Kitamura</u> , Taro Suzuki, Yoshiharu Amano, and Takumi Hashizume
論文	GNSS マルチパス波判別を複合した精密単独測位による屋外移動ロボットの位置推定, 計測自動制御学会論文集, Vol. 48, No. 7, pp. 399-405, July 2012, 鈴木太郎, <u>北村光教</u> , 天野嘉春, 橋詰匠
論文	○Path Planning for Autonomous Vehicles Using QZSS and Satellite Visibility Map, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 25 No. 2, pp. 400-407, 2013, <u>Mitsunori Kitamura</u> , Yoichi Yasuoka, Taro Suzuki, Yoshiharu Amano, and Takumi Hashizume
論文	○ Improving Availability and Accuracy of Multi-GNSS Positioning Using QZSS, Proceedings of the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014), Tampa FL., September 2014, <u>Mitsunori Kitamura</u> , Teppei Ota, Yoshiharu Amano, and Takumi Hashizume

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
2. 講演	○環境の三次元地図と赤外全周カメラを用いたパーティクルフィルタによる屋外位置推定, 第 28 回日本ロボット学会学術講演会, 2010/09, <u>北村 光教</u> , 鈴木 太郎, 天野 嘉春, 橋詰 匠
講演	赤外全周カメラを用いたマルチパス削減による GPS/GLONASS 複合測位の高精度化, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010 講演論文集, 1A1-D19, 2010/05, 鈴木 太郎, <u>北村 光教</u> , 天野 嘉春, 橋詰 匠
講演	○準天頂衛星(みちびき)を利用した都市部環境下における移動体測位精度評価, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 2A1-M01, 2011/05, <u>北村 光教</u> , 鈴木 太郎, 天野 嘉春, 橋詰 匠
講演	○三次元地図と赤外全周カメラを用いた屋外環境における車両の三次元位置姿勢推定, 第 16 回ロボティクスシンポジア, 2011/03, <u>北村 光教</u> , 鈴木 太郎, 天野 嘉春, 橋詰 匠
講演	GNSS マルチパス波判別を複合した精密単独測位による屋外移動ロボットの位置推定, 第 16 回ロボティクスシンポジア予稿集, 2011/03, 鈴木 太郎, <u>北村 光教</u> , 天野 嘉春, 橋詰 匠
講演	マルチパス判別を複合したタイトカップリング GPS/INS 複合航法による移動体位置推定, 第 29 回日本ロボット学会学術講演会 講演予稿集, 3I2-6, 2011/09, 鈴木 太郎, <u>北村 光教</u> , 天野 嘉春, 橋詰 匠
講演	GPS と GLONASS 複合による移動体測位の信頼性の向上に関する研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, 2P1-R09, 2012/05, 大西 正光, <u>北村 光教</u> , 鈴木 太郎, 天野 嘉春, 橋詰 匠, 金子 幸司
講演	複数の一周期 GPS 受信機を用いた小型 UAV の高精度姿勢計測, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 講演論文集, 1A2-B08, 2012/05, 鈴木 太郎, 間野 直哉, <u>北村 光教</u> , 天野 嘉春, 橋詰 匠
講演	○準天頂衛星と可視衛星数地図を用いた自律移動システムの経路計画, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 講演論文集, 1A2-F10, 2012/05, <u>北村 光教</u> , 安岡 洋一, 鈴木 太郎, 天野 嘉春, 橋詰 匠
講演	○準天頂衛星の L1-SAIF を利用した GPS 単独測位の高精度化, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 講演論文集, 2A1-J09, 2012/05, <u>北村 光教</u> , 鈴木 太郎, 天野 嘉春, 橋詰 匠
講演	○つくばチャレンジ 2013 における自律移動ロボットの開発, 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会 SI2013, 1A1-4, 神戸, 2013/12, <u>北村 光教</u> , 太田 哲平, 渡邊 研, 明比 建, 天野 嘉春

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	稜線画像と数値標高モデルを用いたスカイラインマッチングによるローバの自己位置同定手法, 第13回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, A02, 2013/08, 太田 哲平, <u>北村 光教</u> , 石川 貴一朗, 天野 嘉春
講演	小型 UAV における GPS ジャイロ/IMU 複合を用いた姿勢計測手法の構築, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集, 1P1-H02, 筑波, 2013/05, 渡邊 研, 太田 哲平, <u>北村 光教</u> , 天野 嘉春, 橋詰 匠
講演	○準天頂衛星 LEX 信号を用いたタイトカップリング型 GNSS/IMU 複合航法の構築, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集, 1P1-H04, 筑波, 2013/05, <u>北村 光教</u> , 渡邊 輝, 天野 嘉春, 橋詰 匠
講演	○樹木隣接環境下における GPS マルチパス誤差調査に関する研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 講演論文集, 1P1-H05, 筑波, 2013/05, <u>北村 光教</u> , 竹下 知宏, 大西 正光, 天野 嘉春, 橋詰 匠
講演	○早稲田大学 天野研究室 つくばチャレンジ 2013 における自律移動ロボットの開発, つくばチャレンジシンポジウム 2013, 筑波, 2014/1, <u>北村 光教</u> , 太田 哲平, 渡邊 研, 明比 建, 天野 嘉春
講演	○準天頂衛星を利用した都市部環境下における マルチ GNSS 複合測位の利用性向上, 平成 26 年度 測位航法学会 全国大会, 2014/04, <u>北村 光教</u> , 渡邊 研, 太田 哲平, 天野 嘉春
講演	GPS 不可視衛星棄却のための可視光魚眼カメラ画像を用いた障害物抽出, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集, 1P1-W08, 2014/05, 渡邊 研, 太田 哲平, <u>北村 光教</u> , 天野 嘉春
講演	スカイラインマッチングによる方位角推定を用いた惑星探査ローバの自己位置補正, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集, 1P2-L06, 2014/05, 明比 建, <u>北村 光教</u> , 大津 恭平, 大槻 真嗣, 正 天野 嘉春