

博士論文審査報告書

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

近年、位置情報に関する重要性が高まっている。位置情報を利用したアプリケーションとしては、自動車運転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）整備の分野でも活用されている。これらの位置情報の取得方法として、従来から、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 は位置情報を広範囲かつ高精度に計測することが可能であるため、重要なインフラとなっている。

しかしながら、人口が集中する都市部で特に高精度かつ広範囲な測位需要が存在するにもかかわらず、GNSS を利用した測位は、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。この原因は、主に衛星から配信されている信号が、受信機に到達するまでに存在する建物等の障害物による電波の遮蔽にある。遮蔽物の多い都市部環境では、直達波を受信できる衛星数が不足するため測位精度の悪化を招くこととなる。このような障害物に遮蔽された、直達波が届かない衛星を NLOS（Non-Line-of-Sight）衛星と呼ぶ。NLOS 衛星から、障害物によって回折・反射した信号を受信すると、特に大きなマルチパス誤差と呼ばれる測位誤差を持つことが明らかにされており、GNSS の測位精度が大幅に悪化する要因となっている。

そこで従来、赤外全周カメラと呼ばれる特殊なカメラで受信機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、安定した測位に必要な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た。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実用化を妨げる要因の一つであった。

一方、近年、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、いわゆるマルチ GNSS 測位と呼ばれる測位技術に関する研究に注目が集まっている。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が増加する。これを利用して、都市部の様な衛星が遮蔽されやすい環境でも、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った。すなわち、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

不確かさを除去するため、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。これにより、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くなり、結果的にマルチ GNSS 複合によって増加する衛星は常にシステム数分だけ減少してしまう。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、主衛星の定義によって数基の衛星が利用できなくなることは重大な問題である。

以上の状況を踏まえて本研究では、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している。具体的には、システム毎に主衛星を利用することによって測位に利用可能な衛星数が低減していた従来のマルチ GNSS 測位手法に対して、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している。これにより、マルチ GNSS 測位における測位利用可能な衛星数低減を避け、都市部における測位の利用性向上の実現を目指している。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、マルチ GNSS に対する NLOS 衛星判別の、より簡易な画像センサを利用した手法の有効性を検証している。従来、天空画像を直接取得することで、衛星配置情報を重畳し NLOS 衛星を判別する方法がよく知られているが、特殊な赤外全周カメラを用いること、および、GPS のみを利用した測位に対して NLOS 衛星判別を行っていたため、結果として測位利用可能な衛星数がかえって減少し、十分な測位精度を得られない状況が多かったことが課題として挙げられている。そこでまず本研究では、NLOS 衛星判別手法をマルチ GNSS 測位に適用し、衛星数を増加させた上で、その有効性を再評価している。また、赤外全周カメラは天頂方向に反射鏡を付帯している光学系の特性から、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った。しかし、都市部では仰角 70[deg]を超える障害物が多く存在するため、赤外全周カメラによる NLOS 衛星判別のための天空画像取得の適用範囲が限られていた。そこで本研究では、仰角 70[deg]以上が観測可能であり、またより一般的かつ簡易な構造からなる画像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している。

本論文は以下のように構成されている。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 衛星判別手法やマルチ 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。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 測位に適用した場合の効果について述べている。その後、提案する可視光魚眼カメラを用いた NLOS 衛星判別手法について述べている。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っている。同時に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を抽出し、本手法の障害物情報抽出のリファレンスとして評価している。

第 4 章では、QZSS 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。すなわち、QZSS を唯一の主衛星とする測位手法を提案している。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っている。最後に、評価試験により、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が得られることを明らかにしている。

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 GNSS 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を開発し、実環境試験によりその有効性を明らかにしている。ここで得られた成果は、都市部における測位精度および利用率を向上させる一般性を有した技術を提供するものであり、将来的には全世界での利用を可能とするものである。よって本論文は、衛星測位技術の更なる発展に多大な貢献をするものであり、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2015 年 2 月

審査員（主査） 早稲田大学教授 博士（工学）（早稲田大学） 天野 嘉春
早稲田大学名誉教授 工学博士（早稲田大学） 河合 素直
早稲田大学准教授 工学博士（早稲田大学） 武藤 寛
東京海洋大学准教授 博士（工学）（東京大学） 久保 信明