

## 論文の内容の要旨

氏名：池田 隆博

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：高精度移動測位のための位相差によるマルチパス検知手法を用いた衛星選択に関する研究

運転支援システムの開発において車両周囲の情報取得は重要な要素であるが、車線維持制御など、走行位置に応じたシステムの実現には、高精度な車両の位置情報が不可欠である。位置情報の取得手段としては、カーナビゲーション等に用いられる GPS (Global Positioning System) を中心とした衛星測位システムがある。中でも、干渉測位方式の一種である RTK (Real-time Kinematic) 法は、移動体をリアルタイムに cm オーダーの精度で測位可能な手法であり、高精度な車両位置情報の取得に適している。

GPS をはじめとする衛星測位システムは、将来的には現状よりも多くの衛星が利用可能になるものと想定される。既に GPS のほか、ロシアが運用する GLONASS (Global Navigation Satellite System) は全世界で実用可能な衛星数に達しており、日本、欧州なども自国の衛星測位システムの開発が進行している。衛星測位では、測位方式に関わらず 4 機以上の衛星電波を受信する必要があるが、このような複数の衛星系から電波を受信できる場合、利用可能な衛星数が飛躍的に増加し、上空が開けていない場所でも測位の可能性が高まる。上空視界を十分に確保できない場所は、都市部の道路上などで頻繁に見受けられるが、複数衛星系の併用により、このような場所でも利用可能率の向上が期待できる。

しかし、衛星数が増加しても解決できない問題として、衛星から直接届く電波の他に、建物の壁面等に当たって反射した電波、建物を回折した電波が届く現象であるマルチパスがある。マルチパスの影響により、干渉測位方式による高精度な測位手法でも数 cm オーダーの誤差を生じることがあり、状況によっては、m オーダーの誤差を生じる場合がある。ゆえに、複数衛星系の併用による衛星数増加の効果を最大限に生かすには、マルチパスによる誤差の低減が不可欠であることは明らかである。

そこで本論文は、高精度測位における利用可能性低下の主要因である、マルチパスの影響を受ける受信電波を検知する手法を提案し、反射波と回折波を含む受信電波の排除を目的とした衛星選択効果を受信アンテナの静止時と移動時で検討した。その結果を基に、提案した衛星選択手法によって、どのような効果が得られるのかを明らかにした。

本論文は、8 章から構成されており、各章の内容は次の通りである。

「第 1 章 序論」では、本研究の背景と目的、本論文の構成を述べた。

「第 2 章 衛星測位システムの概要と測位技術」では、衛星測位システムとその測位技術について整理し、衛星測位における基本的な誤差要因をまとめた。まず、現在運用されている GPS と GLONASS の特徴について整理し、送信される電波について調べた。次に、干渉測位方式の原理について調べ、mm オーダーの精度が得られる要因を確認するとともに、本方式に含まれる各々の測位法の特徴について整理した。衛星測位における誤差要因については、電波が大気中を伝搬している間に受ける電離層と対流圏による遅延誤差について整理し、衛星電波の周波数と伝搬距離に依存することを確認した。また、受信機雑音とマルチパスによる測定値誤差について整理し、マルチパスによる距離測定値誤差は、反射波の強さと直接波に対する反射波の遅延に依存することを確認した。

「第 3 章 衛星測位におけるマルチパス誤差とその削減」では、第 2 章で述べたマルチパスの既存の削減技術について整理し、本研究の位置付けを明らかにした。まず、受信機内部の相関処理によるマルチパス抑制技術について整理を行った。衛星電波捕捉時の相関処理によって、受信電波に含まれる反射波の影響を m オーダーまでは抑制できることを確認し、衛星からの直接波が受信できない不可視衛星からの回折波等については抑制が困難であることを指摘した。次に、受信機から出力される観測値に含まれる信号強度を用いたマルチパス検知手法について整理した。マルチパスの影響を受ける受信電波の信号強度は直接波よりも弱まるため、この特性を用いることで回折波の検知が可能となる。しかし、直接波と反射波が含まれる可視衛星からの受信電波については、双方の電波が同位相、逆位相による受信により強度の増減が生じ、反射波の位相によっては、直接波の信号強度と同値となることを指摘した。また、受信機からの観測値を用いない手法として、衛星位置と地物位置から衛星の可視条件を判断してマルチパスを推定する手法を整理した。不可視衛星からの受信電波は、回折波と反射波で構成され、衛星の可視性からマルチパス

を推定できる。しかし、可視衛星からの反射波の状況が考慮できないため、可視性のみでマルチパスを判断することは困難であることを指摘した。

上記の内容より、マルチパスの検知について、不可視衛星からの回折波等については検知が可能であるものの、直接波が届く可視衛星からの反射波については、電波伝搬の特性から検知することは困難であるといえる。干渉測位による高精度測位では、mm～cm オーダーで衛星と受信機間の距離算出を行うため、可視衛星からの反射波の検知は不可欠である。よって、本論文ではマルチパスを含む受信電波の観測値に着目し、従来手法とは異なるマルチパス検知手法を提案することとした。

「第4章 提案するマルチパス検知手法」では、衛星電波の周波数の違いによりマルチパスの影響が異なる点に着目し、受信機による搬送波測定値の位相差からマルチパスを検知する手法を提案した。GPSとGLONASSは、周波数の異なる2種類の電波を送信しており、本論文では、双方の衛星に対応した2周波受信機を用いて、マルチパスの影響を含む観測値と含まない観測値を同時取得した。マルチパスの影響を含む観測値では、受信した反射波、回折波の位相により異なる測定誤差が得られることから、周波数の異なるL1波とL2波では搬送波位相の変化量に差が生じるものと考えられる。取得した双方の観測値から位相変化量の差(DPC: Difference of Phase Change)を算出し、マルチパスの影響を受ける環境で異なる傾向が得られるか確認した。可視衛星の受信電波に反射波が含まれる場合、双方の観測値で得られたDPCが異なる結果を示し、不可視衛星からの受信電波についても同様の傾向が確認された。本章では、このDPCを用いて新たなマルチパス検知手法の考え方を示し、マルチパスの影響を受ける受信電波の削減効果を確認した。

「第5章 マルチパス検知手法の検証」では、第4章の結果を基に、具体的なマルチパス検知手法を構築した。移動局の観測値から得られた信号強度とDPCについて、基準局の観測値から得られた同データの差を求めることで、信号強度の差(DSS: Difference of Signal Strength)と位相変化量の差の較差(DDPC: Double Difference of Phase Change)によるマルチパス検知指標を構築し検証を行った。まず、DSSによるマルチパス検知を検証した。その結果、不可視衛星からの受信電波については、DSSの低下を確認し、直接波と反射波を同時受信する可視衛星からの受信電波については、DSSの上下動が0dBHzを中心に生じることを確認した。この傾向は、第3章で示した信号強度の傾向と一致しており、DSSを用いることで、不可視衛星からの回折波等を検知できることを確認した。次に、DDPCによるマルチパス検知を検証した。その結果、不可視衛星からの受信電波、直接波と反射波を含む可視衛星からの受信電波について、指標値が0mmから離れることがわかった。この結果は、回折波と反射波の双方のマルチパスに対応できることを示しており、前述の電波を検知する上で有効な手法であると結論付ける。

「第6章 静止時における衛星選択の効果」では、第5章で述べたマルチパス検知手法を基に使用する衛星の選択を行い、基線解析で得られた結果から衛星選択効果を検証した。衛星選択後、基線解析に必要な衛星数が得られる場合、全観測衛星を使用した場合よりも、基準座標からの誤差が20mm以内となる高精度解が増加し、測位精度が改善できることを示した。また、本研究で提案したDDPCによる指標を含めて衛星の選択を行うことで、基線解析に必要な衛星数を確保できる場合、測位精度がさらに改善できることを示した。このことから、DDPCによるマルチパス検知手法は、高精度な測位解を安定して取得する上で有効な手法であると結論付ける。

「第7章 移動時における衛星選択の効果」では、車両の移動時に得られた観測値に対して、マルチパス検知指標に基づく衛星の選択を行い、基線解析で得られた解の軌跡を確認した。その結果、基線解析に必要な衛星数が得られる場合、正確な走行軌跡を再現できる割合が増加することを確認した。DSSとDDPCを合わせて衛星の選択に用いることで、特に周囲を高層建物で囲まれマルチパスが発生しやすい環境において顕著に高精度解の取得率を改善できることから、移動測位への高精度化に寄与するものと考えられる。

「第8章 結論」では、搬送波の位相差を用いてマルチパスを検知する手法を提案し、実際に取得した観測値に適用した結果、反射波と回折波の双方の電波に対して検知できることを述べた。また、信号強度による手法と組み合わせることで、静止時、移動時を問わず高精度測位時の精度を改善することが可能となり、提案手法は高精度移動測位において衛星選択指標の一つになりえることを述べた。本論文の成果を受けて、マルチパス検知による衛星選択手法の有効性が確認されたことで、移動体測位の高精度化に大きく前進すると考える。