

論文審査の結果の要旨

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

審査委員：（主査） 教授 佐田 達典

（副査） 教授 福田 敦 教授 轟 朝幸

東京大学教授 清水 英範

自動車の運転支援システム開発において、車線維持制御や走行操作補助など走行位置に応じたシステムの実現には、高精度な3次元道路地図データ基盤と車両の高精度測位技術が不可欠である。例えば、除雪車が安全に走行するために運転支援を行うには数 cm の誤差でリアルタイムに車両位置を求めることが必要とされている。そのための技術として GPS (Global Positioning System) 等による衛星測位技術が有力であるが、カーナビゲーション等で用いられている単独測位方式は m オーダーの精度であるため適用できない。そこで、干渉測位方式の一つである RTK (Real-time Kinematic) 法の応用が考えられる。RTK 法はリアルタイムに 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。

RTK 法を安定して適用するには4機以上の衛星からの電波を連続して受信することが必要である。上空が開けた測位環境ではこの条件を満たすため、RTK 法は農地における農業機械の自動運転、土工事での建設機械の誘導、制御に利用されている。ところが、建物等で上空視界が遮られ衛星電波が遮蔽される環境ではこの条件を満たされない場合が多く、現状では RTK 法を都市部の道路で走行支援へ適用することは難しい。

しかしながら、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。2020 年には合計で 100 機以上の衛星が配備される予定である。こうした複数の衛星系を併用した測位ができれば、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 RTK 法の利用可能率の向上が想定される。都市部の道路上など上空視界を十分に確保できない場所においても、複数衛星系の併用により RTK 法の安定した適用が期待できる。

しかし、衛星数増加によっ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等がアンテナに届くマルチパスの問題がある。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 cm オーダーから m オーダーの誤差を生じることがあり、状況によっては測位そのものが不能となる場合がある。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。

本論文は、こうした状況に鑑み、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検証を行った上で、マルチパスの影響を受けていると判別された受信電波のデータを排除して測位計算を行うという、衛星選択による測位精度の向上を受信アンテナの静止時と移動時で検討している。その結果を基に、提案したマルチパス検知手法により衛星を選択することによって、どのような効果が得られるのかを明らかにしている。

これらの内容を本論文では8章で構成しており、それぞれの内容と評価は次の通りである。

「第1章 序論」では、本研究の背景と目的が述べられている。

「第2章 衛星測位システムの概要と測位技術」では、現在運用されている GPS と GLONASS の主要な特徴、RTK 法で採用している干渉測位方式の原理、衛星測位における誤差要因について整理を行っている。その結果、電波が大気中を伝搬している間に受ける電離層、対流圏による遅延誤差は衛星電波の周波数と伝搬距離に依存すること、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などを示している。

「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、既存のマルチパスによる誤差の削減技

術について整理して分析している。受信機が衛星電波を捕捉した時の相関処理によって、直接波と反射波による誤差はある程度抑制できるが、 m オーダーの誤差は残ること、直接波が含まれ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ている。次に、マルチパスを排除するためにマルチパスを検知する手法を整理している。電波の信号強度を用いたマルチパス検知手法では、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という特性を用いて、不可視衛星からの回折波の検知が可能となるが、可視衛星から直接波と反射波を同時受信する場合には、双方の電波の干渉により安定した検知はできないことを指摘している。また、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検知する手法では、不可視衛星からの受信電波は回折波と反射波であるため、衛星の可視性からマルチパスを検知できる。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の有無を判断することは困難であることを指摘している。以上、既存のマルチパス検知技術の整理を行い、不可視衛星からの回折波や反射波に対しては検知技術が有効であるものの、可視衛星からの反射波に対しては直接波を同時受信するため有効に検知できる手法が確立されていないことを示し、 cm オーダーで測位を行う RTK 法等の干渉測位方式では、可視衛星からの反射波の検知が不可欠であることを明らかにして、研究の位置付けとしている。

「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ている。衛星から送信される周波数帯の異なる2種類の電波の位相変化量の差 (DPC : Difference of Phase Change) を指標として提案し、マルチパスの影響がない場合とある場合の受信データから DPC の値を算出し、指標としての有効性を分析している。その結果、マルチパスの影響がない環境下での DPC の値に対して、可視衛星からの反射波によるマルチパスの影響がある場合は DPC が異なる値を示すこと、不可視衛星からの回折波、反射波についても同様に異なる値を示すことを明らかにしている。この DPC は著者の独創であり、DPC を用いてマルチパス検知手法の考え方を示し、実際に基線解析を行いマルチパスの影響を含む受信電波の削減効果を確認したことは、本研究の大きな成果である。

「第5章 マルチパス検知手法の検証」では、DPC に加え信号強度を用いた具体的なマルチパス検知手法を構築し検証している。その結果、基準局と移動局の信号強度の差 (DSS : Difference of Signal Strength) と位相変化量の差の較差 (DDPC : Double Difference of Phase Change) によってマルチパスが検知できることを明らかにしている。DSS は不可視衛星からの受信電波に対しては値が低下することを利用して、不可視衛星からの回折波、反射波を検知できること、DDPC は不可視衛星からの受信電波、および可視衛星からの直接波と反射波を同時受信する環境において指標値が $0mm$ から離れることを利用して、回折波と反射波の双方に対応できることを明確に示していることは評価できる。

「第6章 静止時における衛星選択の効果」では、提案した DSS と DDPC を用い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ている。その結果、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、高精度解が増加し、測位精度が改善できることを示している。特に、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ったところ、DSS のみの場合に比較して測位精度がさらに改善できることを明らかにしている。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ている。

「第7章 移動時における衛星選択の効果」では、車両が移動する時の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分析している。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えていることを示している。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を示していることは本研究の大きな成果である。

「第8章 結論」では、本研究の成果を総括して結論を述べるとともに、今後の課題を提示している。

以上の結果、搬送波の位相差を用いてマルチパスを検知する手法を新たに提案し、回折波および反射波の双方に対して検知できることを検証し、衛星測位におけるマルチパス対策に有用な知見を与えている。また、信号強度による手法と組み合わせて衛星を選択することにより、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ることを示すなど、示唆に富む論文としてまとめられている。提案している手法のマルチパス検知による衛星選択手法としての有効性が確認されたことで、運転支援や自動運転への適用に向けた移動体測位の高精度化に大きく寄与する非常に有用な論文と考えられる。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、またはその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成26年2月13日