

論文の内容の要旨

氏名：浅野 晃

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：列車保安制御システムへの全球測位衛星システム（GNSS）利用に関する研究

米国の GPS (Global Positioning System: 全地球測位システム), ロシアの GLONASS (GLObal Navigation Satellite System), そして日本の準天頂衛星 (QZSS: Quasi-Zenith Satellite System) などを総称して, 全球測位衛星システム (GNSS: Global Navigation Satellite System) と称する. GNSS は, 世界共通の社会インフラとして利用されている. この状況を踏まえ, 産業界では準天頂衛星を含めた GNSS による衛星測位技術を利用した応用システムの研究開発が進んでいる. 本論文は 6 章から成り, 鉄道の列車保安制御に GNSS 技術導入に関する研究成果を述べたものである. 以下, 本論文の章立てにしたがって論文の要旨を述べる.

第 1 章は序論であり, 研究の背景や目的を述べ, 各章の概要を紹介している.

わが国の鉄道においては, 過疎化・少子化やモータリゼーションなどの影響により, 地方鉄道の利用者は減少の一途にあり経営状態は厳しい. このため, 鉄道の運行をより柔軟で経済性の高いものに变革していく努力が求められている.

今日の列車制御システムは, 地上主体型と呼ばれ, 地上の軌道沿線に列車位置を検知する軌道回路を中心に, 地上から車上へ制御情報を伝達する地上子, 踏切制御を行うための踏切制御子など多くの地上装置が点在している. これら地上装置と制御装置間はケーブルを用いており, 設備コストのみならず保守・運用などのコストも大きなものとなっている. これに対し, 鉄道の運行をより柔軟で経済性の高いものに变革していく技術開発として, 車上で位置検知を行いその情報を基に列車を制御する, 無線式の列車制御システム CARAT (Communication And Radio Aided Train Control system) の研究成果を基に ATACS (Advanced Train Administration and Communications System) が東日本旅客鉄道によって開発され, 2011 年 10 月に仙石線に導入された. 無線式列車制御システムは, 一般に CBTC (Communications Based Train Control) システムと呼ばれる. CBTC は, 列車と地上の拠点制御装置間を直接無線で接続し, 列車が車上位置検知システムで得た列車位置情報を拠点制御装置に送信する一方, 拠点制御装置は, 列車へ安全な走行が可能な限界地点情報を送信して列車制御を行うものであり, 多くの地上設備と膨大なケーブルを削減することができる. これにより, 導入コスト, 保守コスト, 運転コストの削減を行うと共に, 列車運行形態も柔軟に変化できるものとして期待されている. CBTC の実現には車上で安定した位置検知技術が不可欠になり GNSS の利用が注目されている. GNSS は絶対位置を提供してくれるほか, 低コストで連続した位置検知が行えるなどの利点が認められているものの, トンネル区間など受信できないエリアが存在することや, 予期せぬ誤差が不可避であるため, これまで列車保安制御への利用は困難視されてきた. 申請者は豊富な現場試験のデータを下に, 「列車保安制御に許容できる誤差を想定し, 想定した測位誤差を超えた場合を測位異常と判定し, その際の測位情報を利用しないフィルタリング技術」を導入することにより, 列車保安制御への有効利用が可能であるとの考えの下, その方法論を明らかにし実証したものである.

第 2 章は, 列車保安制御と列車位置検知と題して, 既存の列車制御システムを紹介し, その中で列車位置情報が重要な役割を果たしていることを説明している.

既存列車制御システムは, 閉そく機能と連動機能を基本にしている. 両機能の使命は, 車両相互の衝突や追突といった重大事故の回避である. そしてその原理は, 列車の在線する区間には入れないし, いったん設定された進路上には他の列車の進路を設定させないことで, 列車を他の車両との接触をなくするという排他制御を基本にしている. そして, これら排他制御の基本となるのが軌道回路によって検知された列車位置情報である.

一方, 鉄道の近代化の有力な手段として期待される CBTC がある. 本章では CBTC を紹介し, その中で列車位置検知情報の重要性を説明する. 既存の CBTC における車上位置検知システムは, 車輪に接

続した TG (Tachometer Generator : 速度発電機) を用いている。TG の利用には、車輪の滑走、空転が課題であり様々な補正手段が講じられている。また、TG を利用した車上位置検知システムでは、絶対位置を与えるトランスポンダが地上設備として必要になっている。

第 3 章は、鉄道における GNSS 利用の現状と課題についてまとめている。まず、GNSS に対する基本的な原理と誤差要因について触れ、本格運用を前にした準天頂衛星が稼動した際の精度向上効果について紹介している。GNSS は、鉄道においても数々の利用実績があるものの、安全性に対する懸念から支援装置にとどまり、国内での列車保安制御システムへの利用実績はない。GNSS 情報を利用する上での安全性に対する懸念事項は、①GNSS は、恣意的な誤差付加、使用停止の懸念、②測位情報は、連続的に受信できるわけではない、③GNSS 受信機の測位アルゴリズムがブラックボックス、④測位情報は、確定値ではなく誤差を含む、といったものであった。この課題に対しては「GNSS 測位技術を列車保安制御へ利用するには、列車保安制御に許容できる誤差を想定し、想定した測位誤差を超えた場合を測位異常と判定し、その際の測位情報を利用しないフィルタリング技術の導入が有効」との考えで対応したが、その詳細については第 4 章以降で述べている。

第 4 章は、列車保安制御システムへの GNSS 利用と題して具体的な方法論を詳述している。

フィルタリング技術は、GNSS 受信機の性能確認後、試験列車と営業列車での基礎データを基に提案する。その後、営業列車での長期試験によって動作状態を確認する。

GNSS 受信機の性能確認試験は、GNSS 受信機を固定して 9 ヶ月、営業列車に搭載して 15 ヶ月実施して実動作と沿線の電波状況を確認した。この試験データを基にして、次に示す 8 手法のフィルタリング手法を提案する。①軌道からの離隔検定、②アンテナ間離隔検定、③方向検定、④軌道曲率半径による検定、⑤軌道カーブ長による検定、⑥S 字カーブ変化点による検定、⑦TG 速度情報による検定、⑧加減速度を利用した検定。

これらフィルタリング手法について、17 ヶ月にわたる長期試験を実施し、以下の結論を得た。フィルタリング①から③は、GNSS を列車保安制御に利用するための基本フィルタリングと位置付けた。位置精度の要求仕様を $\pm 13\text{m}$ と定めて実施した結果、要求仕様に合格した 66,762 件のデータ全てが $\pm 10\text{m}$ 未満に収まった。GNSS の速度情報は、設定した区間を走行したときの区間距離の誤差として評価したが、 $\pm 1.5\%$ 未満に収まり、既設の TG のみで列車位置検知するよりも 0.5% 改善できた。この試験には電波状態の悪い区間も含まれており、安定した列車位置検知が可能であることを示している。フィルタリング④から⑥は、精度向上の補助手段と位置付けた。

GNSS を列車保安制御システムに利用するために、GNSS と TG (速度発電機) によるハイブリッド位置検知を提案した。ハイブリッド位置検知は、フィルタリングにより正常判定した GNSS の位置と速度の情報を TG と組み合わせることにより高精度の列車位置情報を取得し、軌道回路に匹敵する信頼度を確保する。フィルタリングで想定した誤差は、制御時における列車間の間隔に加える余裕距離等に反映し、システム的に確実な安全性を保障する。

GNSS の高精度な時刻情報を利用したシステムの時刻同期も有効に利用できる。時刻同期を利用し、システム内の情報伝達遅れを是正して、より正確な列車位置情報を算出する。この考え方を応用して CBTC の無線回線に携帯電話回線を利用する方法と、無遮断を防止できる踏切制御法を提案した。

第 5 章は、GNSS 利用列車制御システムのケーススタディについて報告している。第 4 章までの研究成果を基にして GNSS の位置、速度、時刻を有効利用した新たな列車保安制御システム (試験システム) を開発した。試験システムと既設備との接点は、車両の速度計のみで独立している。試験システムは、出庫から入庫までの動作に加え、分割・併合など既存の列車保安制御システムの機能はすべて包含している。試験では、これら機能を既設システムと比較しながら確認し、試験システムが機能的にも経済的にも優れており、地方交通線に対しても導入可能であることを実証した。

第 6 章は、結論として、本論文の各章についてそれぞれ成果をまとめている。また、GNSS と並んでハイブリッド位置検知に利用できる速度測定センサとして、申請者が別途研究に取り組んでいる加速度センサやドップラレーダ速度計技術の可能性についても言及し、今後の課題としている。

鉄道は、運行をより柔軟で経済性の高いものへと変革するために、地上主体型列車制御システムから車上主体型列車制御システムへと移行しつつある。ここで重要となるのが地上の軌道回路に代わって車上で列車位置を検知する車上位置検知システムである。本論文は、安全性に対する懸念から列車保安制御システムに利用されたことのなかった GNSS に対し、フィルタリング技術による解決策を生みだし、実車試験で有効性を実証した成果についてまとめたものである。得られた成果は、2017 年 4 月末に制定された「鉄道における GNSS 利活用ガイドライン」(第 1.0 版) 検討時の貴重な資料として参照され、最も安全性が要求される利活用分野の水準(レベル 4) に対する要求条件の中に反映された。本論文で示した成果は、産業界に対しても一定の貢献をしている。

これら研究成果を足がかりに、GNSS 技術による位置検知を TG の補助装置として実用化し、その実績を踏まえるなら、将来的には車上位置検知の主装置として GNSS が利用できるのではと考えている。そしてその暁に、より経済的でより柔軟に運転できる鉄道が出現し、社会の交通手段の核として位置づけられ、地方、都市圏を問わず交通が平等に享受できる社会の到来に貢献できることを願っている。