

速度発電機と慣性センサを併用した高精度列車位置検知システム

信号・情報技術研究部 列車制御研究室
研究員 祇園 昭宏

1. はじめに

現在、列車の在線を軌道回路等により検知する従来の地上位置検知に代わり、より細かい単位で列車を検知する車上位置検知手法が、移動閉そく等の新しい列車制御システムでの位置検知の方法として利用されている。既に実用化されている車上位置検知の方式として、地上子の情報受信により絶対位置を取得し、速度発電機という車輪の回転を検出する装置の出力から相対位置を算出した位置を検知する方法がある。しかし、得られた相対位置には車輪径の誤差や車輪の滑走・空転に起因する誤差が含まれている。これは、速度発電機を非駆動軸に取付けてブレーキ力を弱めることで影響を低減できるが、短編成ではブレーキ距離を確保するために設定出来ない場合がある。また、累積誤差の補正のために地上子を一定間隔で設置する必要がある。

そこで鉄道総研では、慣性センサと速度発電機を併用する車上位置検知システムを検討してきた。この方式では、滑走・空転の検知・補正による相対位置精度の高精度化と、軌道の曲率や勾配変化を利用した絶対位置検知を実現する。本発表では、提案システムを用いた現車試験について、その内容と結果を報告する。

2. 車上位置検知手法

車上位置検知手法には、列車位置を絶対位置として認識する方法と、連続的な相対位置として認識する方法があり、列車位置は連続的な絶対位置によって、あるいは離散的な絶対位置と相対位置の組み合わせにより認識される。主な車上位置検知手法を表1に示す。

本検討に当たっては、航空宇宙用途での位置検知手法に用いられる慣性航法に着目し、速度発電機と地上子による一般的な車上位置検知手法に慣性センサを組み合わせることで、高精度な車上位置検知を実現する方法について開発を進めた。

表 1 主な車上位置検知手法

位置検知装置	検知情報	設置箇所	主な課題
1 速度発電機	相対位置	車上	滑走・空転 車輪径誤差
2 交差誘導線	相対位置	地上・連続	コスト、断線
3 地上子	絶対位置	地上・離散	受信不能 (空振り)
4 GNSS	絶対位置	車上	不感帯・妨害 マルチパス
5 慣性センサ	相対位置	車上	累積誤差
6 ミリ波 (ドップラ)	相対位置	車上	速度誤差累積

3. 慣性航法の概要と課題

慣性航法の基本的な考え方は、対象の運動加速度を積分することによって速度や位置を求めることである。慣性航法は、対象の加速度と角速度を検出する慣性センサを用いて、図1のような演算を行うことで位置を求める。慣性航法では、移動方向と移動量を求めるために姿勢演算を行う。これは、慣性センサが検出する加速度は対象の運動加速度成分と重力加速度成分を合成したものであることから、重力加速度成分を姿勢角から推定するためである。

慣性航法の演算は、現在の姿勢・速度・位置にセンシング情報を適用して次の状態を求めることを繰り返すため、演算誤差が累積する課題がある。また、慣性センサの検出値にも誤差が含まれている。慣性センサの主な検出値の誤差は、ノイズ、スケールファクタ、バイアスの三つである。特に、バイアスの時間変動であるドリフトが慣性航法演算の誤差に大きく影響する。ノイズとバイアスを含むセンサの誤差モデルを図2に示す。そのため、慣性航法での位置精度向上には、姿勢や速度の誤差を累積させない仕組みやセンサの誤差を補正する仕組みが必要となる。一般的な慣性航法システムでは、①高精度かつ高安定なセンサを用いる、②適切なフィルタ処理により擬似的に高精度・高安定化する、③正確な姿勢や速度を与えて累積誤差を解消するといった方法が用いられる。その結果、慣性航法は高価なシステムとなっている。

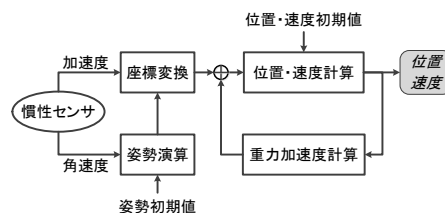


図1 慣性航法の演算フロー

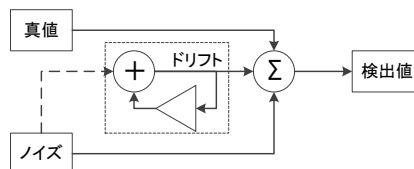


図2 慣性センサの誤差モデル

4. 鉄道向け慣性航法の検討

慣性航法を鉄道に適用するにあたっては、コストを抑えつつ精度を確保することが求められる。慣性航法ではセンサ性能および処理性能がコストとトレードオフとなることから、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)と呼ばれる小型で比較的廉価なセンサで実現可能なシステムを目標として、処理の簡略化と精度確保を図った。まず、処理の簡略化のため、鉄道環境は車両の移動が前後方向のみであること、また車両の姿勢が軌道に拘束されることを制約条件とした。また、精度確保のために、速度発電機などの既存設備の情報を活用することによる慣性航法の演算とは独立した姿勢角推定手法を開発した。

姿勢角推定手法は、車輪の回転運動と車両の前後運動が一致することを利用して、速度発電機の出パルスから運動加速度を求め、慣性センサの検出加速度との差分を重力加速度成分と見なして車両のピッチ角(以下、TG 推定ピッチ角)を推定する手法である。このTG 推定ピッチ角は、慣性航法演算におけるピッチ角とは独立して求まるため、慣性航法での課題であった誤差の累積やバイアスドリフトの影響を受けないという特徴がある。

この手法を実現するにあたっては、高精度な加速度検出が課題となる。現在、速度発電機から速度を算出する方法として広く使われている、一定時間内のパルス数を計数するダイレクトカウント方式では、計数範囲でパルスタイミングの揺らぎが誤差要因となっており、加速度の分解能が低い^[4]。そこで、計測機器で広く使われるパルス幅から周波数を求めるレシプロカル方式による速度および加速度の算出を行う。

また、この姿勢角推定は滑走・空転の影響を受ける。滑走・空転時のTG 推定ピッチ角は、滑

走・空転による見かけの加速度を姿勢角とするため、バイアスドリフトの変化許容値および軌道の勾配条件で検定することにより、滑走・空転の検知に利用できる。

5. 高精度位置検知システムの概要

慣性航法を位置検知へ適用するのにあたっては、車上で認識する位置が実際と乖離していないことが求められる。慣性航法では、姿勢角の推移は高精度に求まるものの、運動加速度の積分で求めた速度・位置には誤差が累積する。

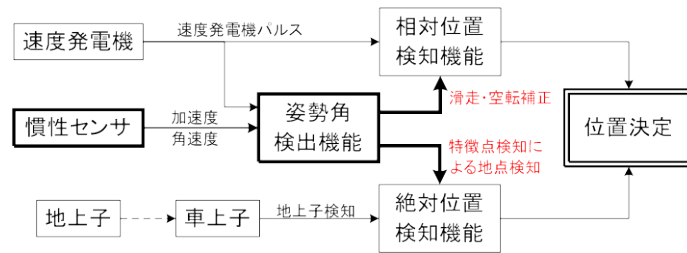


図3 慣性センサの位置検知への適用

そこで、図3のように慣性航法で求めた相対速度変化および姿勢角推移を、相対位置検知と絶対位置検知を利用することで、速度発電機による相対位置検知と地上子による離散的な絶対位置検知で構成される既存の位置検知の枠組みについて、高精度化を図った。

(1)相対位置検知

速度発電機による相対位置検知は、滑走・空転が大きな誤差要因となる。そのため、既存の方式では最大加速度・減速度を閾値とした判定と安全側に見積もった補正がおこなわれている。本システムでは、加速度を用いた姿勢角推定と検定により滑走・空転を検知して、相対位置精度の向上を図る。この補正では、滑走・空転前の速度と再粘着後の速度および速度差に慣性航法による速度変化推定を適用することにより相対位置を求める。滑走および空転の検知・補正は図4のようなフローとなる。

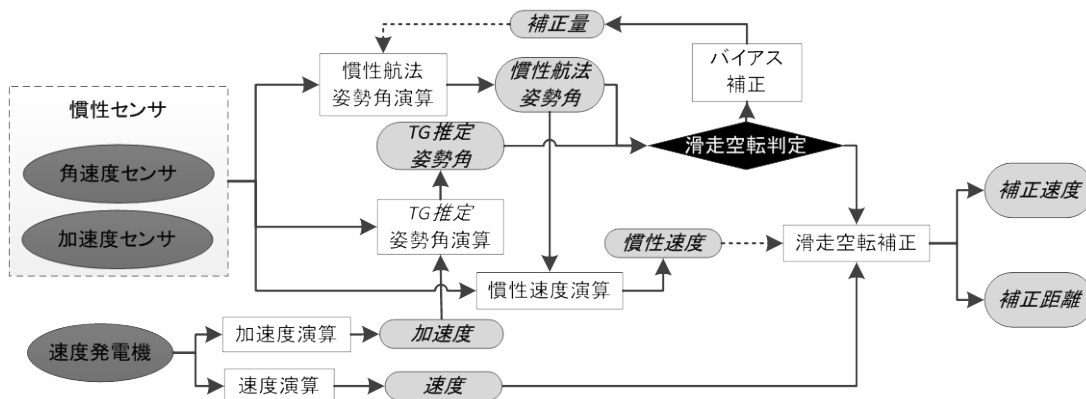


図4 滑走および空転の検知・補正の流れ

(2)絶対位置検知

本システムでは、姿勢角変化に基づき曲率や勾配変化の特徴点（ピーク点）を離散位置として検知することにより、駅中間での地上子による位置補正を補う。位置検出に姿勢角を用いるのは、曲率の相関による連続位置検知を行う振り子制御²⁾と同様である。本システムでは検知精度と誤検知防止が重要となるため、離隔検定が可能で、検出誤差の影響を受けにくいピーク検知とした。絶対位置検知を誤った場合に危険側となるが、複数の特徴点との離隔を検定することにより誤検知を防ぎ、安全を確保する。

6. 現地試験結果

慣性センサおよび速度発電機のパルス取得を行うデータ記録装置を試作し、試験線、営業線等でデータを取得し、相対位置検知のアルゴリズム、絶対位置検知について取得データ上での確認をおこなった。

相対位置検知のアルゴリズム検証については、地上子間隔と検出距離を比較することにより確認した。検出距離と速度推移を図5に示す。絶対位置については、測定データの特徴点を定めて、走行試番間で特徴点離隔を比較した。検出した特徴点と離隔を図6および表2に示す。

相対位置および絶対位置ともに、取得データに対してアルゴリズムが適用可能であり、高い精度が得られることが分かった。

この検証に基づき、実時間処理による相対位置検知装置を試作し、検証試験を実施した。試験では滑走・空転は発生しなかったが、速度発電機のパルス振幅が小さい低速領域を、滑走として検知しており、補正距離に異常は見られなかった。

7. まとめ

慣性センサと速度発電機を併用する車上位位置検知システムについて、滑走および空転の検知・補正による相対位置精度の高精度化と、姿勢角を用いた絶対位置検知について検討した。また、相対位置検知について装置を試作して営業線において動作することを確認した。今後は、絶対位置検知についても装置とデータベースを試作し、実用化に向けた開発を進めていきたい。

参考文献

- [1]渡邊朝紀, 他: 高性能速度センサの開発, 鉄道における国際サイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, 1988
- [2]真木康隆, 他: GPS と線形情報を併用した地点検出システム, 鉄道総研報告, Vol.17, No. 4, 2003

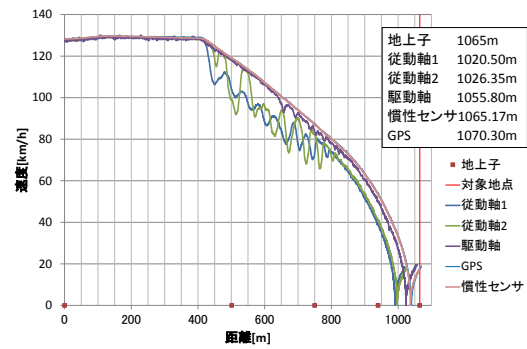


図5 速度距離推移

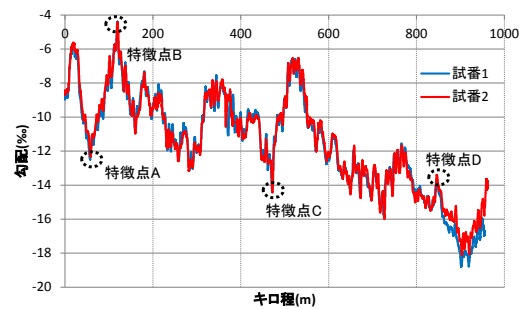


図6 勾配推移と特徴点

表2 特徴点離隔

	試番1	試番2	試番1-2
AB間距離	62.65m	62.69m	-4cm
BC間距離	361.32m	361.17m	+15cm
CD間距離	375.22m	375.37m	-15cm
BD間距離	736.54m	736.54m	±0cm
AD間距離	799.19m	799.23m	-4cm