

講演5. 列車制御システムにおける衛星測位利用に関する取組

交通システム研究部

※工藤 希 長谷川 智紀 竹内 俊裕 廣瀬 道雄
篠田 憲幸 (客員専門調査員)

1. はじめに

鉄道ではこれまで位置検知に軌道回路及び地上子等を用いることで鉄道の安全を守ってきた。一方、衛星測位は、良好な受信状態のもとでは、常時、位置検知が可能なシステムである。特に平成30年度から4機体制でのサービスが予定されている準天頂衛星の活用により一層の位置検知精度向上が見込まれるため、様々な分野への展開が期待されている。

鉄道においても衛星測位を利用した位置検知が期待されるものの、このような新しい技術を鉄道の列車制御システムに適用するためには、既存システムと同等の高い安全性・信頼性を確保しなければならないという課題がある。

今回、列車制御システムにおける衛星測位利用の課題を整理し、その対策について交通研の取り組みを紹介する。

2. 鉄軌道に関連する状況

鉄道は大量輸送に向いている一方、線路を始めとする設備の更新や維持管理などの固定コストが大きい。そのため、日本においては昨今の鉄道利用者の減少に鑑み、鉄道では安全を確保できる範囲で設備の省力化が望まれている。安全な列車運行のための基本的な設備である信号設備においても、地上設備を減らし車上主体のシステムが検討されている。

また、路面電車においては通常、架線に設置したトロリーコンタクト(トロコン)にパンタグラフが接触することによって電車の位置を検知している。昨今、バッテリー技術の進展に伴い、架線からの電力供給ではなくバッテリー等で走行する架線レストラムの研究が進んでいることから、トロコンによらない位置検知を検討する必要がある。

海外では、軌道回路を用いない無線列車制御システム(CBTC: Communication Based Train Control)

の導入が進んでいる。同じく無線を使った列車制御システムとして、JR東日本のATACS(Advanced Train Administration and Communications System)¹⁾がある。どちらも連続的な位置検知と他の列車との双方向通信によって閉そくを確保するものである。

このような状況の中で、交通研では、地方鉄道を対象として低コストで導入、運用が可能な信号システムを構築することにより、地方鉄道を維持、活性化することを目標に、カーナビなどで広く使用されている衛星測位技術を使った位置検知を検討している。

3. 衛星測位

3. 1. 衛星測位

衛星測位は、図1に示すように衛星から電波を受信し、そこから衛星までの距離(R1、R2、...)を求め、全ての距離が一致する点として現在地を計算するものである。計算には、原理的には3機、時刻の補正を含めると4機の衛星を捕捉することが必要である。

位置測位のための衛星(航法衛星)には有名なものとしてアメリカの全地球測位システム(GPS: Global Positioning System)、ロシアのGLONASS(GLObal NAvigation Satellite System)がある。それぞれ32機、24機が稼働しており、これら双方の衛星を受信することができる受信機も増えている。

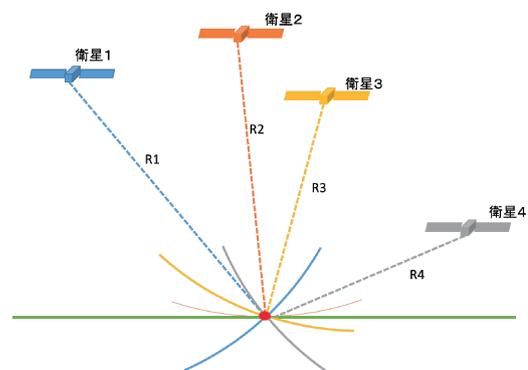


図1 衛星測位の原理

これまでの研究成果から、衛星による単独測位での精度は数十 m であることが分かっている²⁾。誤差要因には、電離層を通過するときの誤差などの自然的なもの、マルチパスと言われる衛星から送信された電波が受信されるまでの間に反射することによるものがある。マルチパスの発生はその性質上、周辺環境と衛星の位置との関係によるため誤差の量が推定しづらい。マルチパスの影響を少なくするためには、建物などに遮られにくい高仰角の衛星を多く捕捉することが有効となる。そのため、日本では準天頂衛星システムが計画された。

3. 2. 準天頂衛星

準天頂衛星は日本の上空で衛星測位を高精度で利用するため内閣府が打ち上げる衛星で、平成 22 年に初号機である「みちびき」が打ち上げられた。内閣府によると、平成 30 年までに 4 機体制になる予定である。さらに、持続測位が可能となる 7 機体制の確立のために必要となる追加 3 機についても、平成 29 年度をめどに開発に着手するとのことである³⁾。

準天頂衛星は上述の GPS 等の全地球航法衛星システムとは異なり、日本及びオーストラリア周辺の上下非対称の 8 の字の軌道をとる。準天頂衛星が 3 機以上の体制となれば、東京上空では常に 70 度以上の高仰角な衛星を 1 機は見通せるようになる。

これにより、常にマルチパスの影響を受けにくい天頂方向に衛星を 1 機確保できることになるため、GPS 等の衛星と合わせて測位することで精度向上が見込める。さらに、準天頂衛星は独自の補強情報をもつため、これを利用することによっても位置検知精度の向上が期待できる。また、日本独自の衛星であることから、受信した情報を安心して利用できることも利点としてあげられる。

4. 鉄道における衛星測位利用

4. 1. 衛星測位を利用している例

鉄道における衛星測位利用の取り組みとしては、ロケーションシステム等の旅客サービス用や、保線作業用の列車位置検知・通報システムは多数実用化されている。一方、列車制御システムとしては、研究開発として平成 19 年頃から、「次世代運転管理システムに関する技術開発」や、「ATP (Automatic Train Protection) 閉そくシステム」の検討がされてきているが、実験は行っているものの、国内では実用化されているものはない。

4. 2. 交通研でのこれまでの取組

交通研では、地方鉄道向けの省コストな列車制御システムに関する検討を進めてきている。2. で述べた ATACS など既に実用化されている無線列車制御システムも存在するが、これらのシステムは設備も比較的大規模となっている。交通研では、地方中小鉄道での活用を念頭に、可能な限り設備を軽量化する観点から、鉄道で保守するインフラをできるだけ減らし、汎用の GPS 受信機による衛星測位と汎用無線を用いたシステムを提案してきた。

さらに、衛星測位の精度向上の取り組みとして、予めわかっている沿線の障害物の位置と自列車の位置との関係から、低い仰角の衛星を測位計算に用いないようにマスクする「仰角マスク」を動的に制御し、条件のよい衛星を選択的に利用することによって精度を向上することを提案した（特許出願済）。この精度向上策は、既知の線路上のみを走行する鉄道の特性を生かした方策といえる。また、鉄道信号システムに求められる安全性の指標である SIL 4 (Safety Integrity Level。4 段階あり SIL 4 は単位時間当たりの危険側故障確率 10⁻⁹/h 以下) を確保するためには、位置検知に誤差を見込んだ余裕を持たせる必要があるが、ある路線においては±17m の検知誤差を見込めば安全に支障ない制御が可能という結果を得た²⁾。

なお、衛星測位を信号設備に利用する場合、転てつ器や踏切の制御のためには、地上一車上間の通信手段が必要となる。これまでの研究で、通信には汎用無線を想定しているが、本稿ではその信頼性については言及しない。

4. 3. 列車制御システムに衛星測位を利用する場合の課題

高い安全性、信頼性が求められる列車制御に衛星測位を利用する場合の課題を考える。点制御 ATS (Automatic Train Stop) 相当、連続速度照査相当のそれぞれにおいて、測位の補完に必要な技術を整理したものを表 1 に示す。

今回、地方鉄道向けのシステムとして点制御 ATS 相当の場合を検討した。衛星測位は跨線橋など列車の上空を覆われると測位が途切れてしまうことから、衛星測位を単独で連続した位置検知は難しい。しかし、点制御 ATS 相当であれば、連続した位置検知は必要条件とはならないと考える。

衛星測位の信頼性向上の方策は、以下の二点がある。一点目は、衛星測位そのものの精度の向上である。衛星測位が何らかの原因で急に誤った測位をした場合に、安全に制御することが必要である。このため、信頼性を向上させる技術として既存研究では、2つの受信機を用いて測位し、その結果を比較して検定を行うことや、測位結果を線路上にマッチングさせるとともに、直前の測位結果と比較して連続性を確保できない場合は測位不能と判断し測位結果を採用しないなどの制御をしている。また、準天頂衛星の補完・補強情報の活用や、仰角マスクの利用も有効であると考えられる。

表1 衛星測位を利用する場合の技術的アプローチ

検知	点制御ATS相当	連続速度照査相当
	必要な地点(分岐器、信号機等)のみの点検知	常時検知(速度制限等)
技術的アプローチ	【測位の信頼性を向上させる技術】 <ul style="list-style-type: none"> 衛星測位の精度向上 2受信機による精度検定 準天頂衛星の補完・補強情報活用 仰角マスク 衛星測位を補完 <ul style="list-style-type: none"> 地上子 RFIDタグ TG 等 	【衛星測位を連続的に活用する技術】 <ul style="list-style-type: none"> 衛星測位の位置情報に加え、速度情報を活用 TG レーザー Doppler ジャイロ 等

二点目は、衛星測位以外の手段による補完である。単独測位の精度が十数 m であるため、隣接する線路との区別がつかない可能性や、位置情報を絶対位置でリセットする必要から、特定の箇所では地上子、RFID (Radio Frequency IDentification) などによる絶対位置の補正、走行中は TG (Tachogenerator : 速度発電機) による補正が有効であると考えられる。

5. 衛星測位による位置検知試験

5. 1. 試験構成

衛星測位の検討のため、試験を行った結果を紹介する。実験は、山形鉄道(株)フラワー長井線において実施した。装置構成を図2、設置状況を図3に示す。受信機には JAVAD GNSS 社 Alpha-G3T を用いた。また、絶対位置の検出の例として、工場での作業員管理などで使われているアクティブ型の RFID タグを駅や線路近傍に設置し、その受信状況を確認した。

5. 2. 試験結果

測位結果を図4に示す。全線にわたり衛星による測位を確認した。跨線橋などの上空が開けていない特定の箇所以外の場所においては、約 3m の誤差で測定が可能であることを確認した。また、駅での測位結果の拡大図を図5に示す。本試験結果においては、受信環境が良い条件のもとでは、衛星測位のみで明確に隣の線と区別できることが確認できた。なお、凡例は「走行試験回数 アンテナの設置場所(上り方、下り方)」

で示した。また、跨線橋により測位が出来ない箇所(図6)、森林等によりマルチパスの影響を受けやすい箇所(図7)においては、10m 程度の差が生じる結果となっている。

RFID タグによる位置検知については、アクティブ型の RFID タグを駅構内の4カ所に設置し、4回走行した結果、16回中15回(93.8%)で停車中に1回以上、車両内で受信できることを確認した。試行回数を増やして信頼性を検討していく必要があるが、このような衛星測位を補完する機能との組合せも重要であると考えられる。

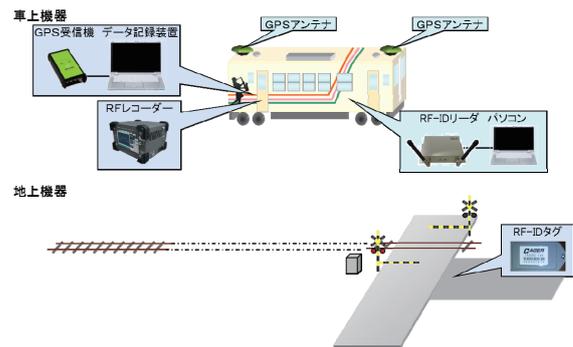


図2 装置の構成

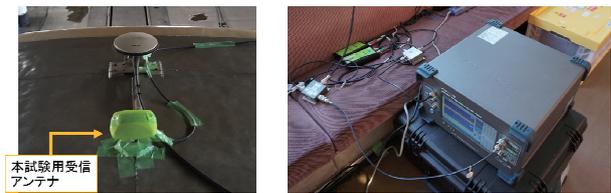


図3 車上装置の設置状況

(左：列車屋根上、右：受信機と記録装置)

5. 3. 試験結果のまとめ

以上より、列車制御システムとして必要な機能を整理する。点制御 ATS 相当のシステムを目指すのであれば、全線に渡る連続検知は必要条件ではない。試験結果からも、跨線橋直下などの一部区間を除けば測位誤差は 3m 程度であることが分かっている。そのため、測位が良好に行われると予想できる箇所を特定し、その場所で測位した情報から進路をとることができれば、安全の余裕距離を ±17m よりも小さくできる可能性がある。

位置情報の正確さは、既存研究のとおり、2受信機の検定と連続性のチェックで確認することができる。

一方、衛星測位は外部からの電波を受信するため、受信機の双方が同時に誤る可能性も考えられる。また、測位精度が良くない箇所を検知範囲外とした際には、再び測位が可能であることを確認する必要がある。

る。これらのためには、衛星測位を補完するシステムとして、地上子やRFIDタグ、TGなどを併用する必要がある。

今回、市販のRFIDタグによる試験を実施し、試行回数は少ないものの、衛星測位の補完として利用できる可能性があることを確認した。地上子やTGは実績のあるシステムであるため今回は試験していないが、これらを含め信頼性やコストなどを含めた検討が今後必要である。なお、TGは連続する位置検知が可能であるが、車輪径によって誤差が蓄積するため、その管理も含めて運用方法を検討する必要がある。

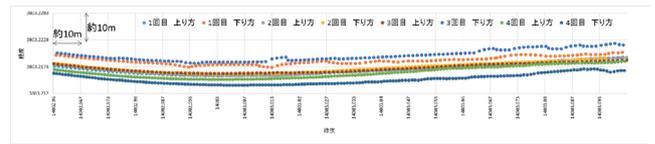


図7 測位結果（森林）

6. トロコンの代替に向けた検討

路面電車においては、架線レス車両の開発が進んでいる。その実用のためには、トロコンにより行っている列車位置検知を他の手段により行う必要がある。一方、衛星測位情報については、現時点では進路制御及び電停で待つ人向けの案内（ロケーションシステム）として利用している例がある。位置検知にはトロコンの他に軌道回路や地上子によるものもあり、一部区間で実際に利用されているが、道路に敷設するため設置及び保守コストが増える。また、トロコンは、機械的機構に起因した故障の発生も見られる。このため、新しい技術として衛星測位利用が期待されている。

路面電車特有の検討課題としては以下の二点が考えられる。一点目は、路面電車は市街地を走るため、マルチパスが多い可能性がある。この対策には、準天頂衛星の整備による精度向上又は補強情報の利用並びに上述の仰角マスクが有効と考えられる。二点目は、路面電車は鉄道に比べ電停が多く、かつ道路信号でも停車するため、停車回数が多いことである。衛星測位は停車中に位置がばらつくことが多いこともふまえて、衛星測位の補完として、鉄道と同様にRFIDタグ等による絶対位置検出などの手段との併用が考えられる。また、画像解析の積極的な利用も考えられる。

7. おわりに

鉄道の列車制御システムにおける新技術への対応として、衛星測位利用の可能性について、現状の把握と、課題について述べた。今後は、衛星測位及び補完システムを用いた安全性の確保方法について検討を進めたい。

参考文献

- 1) 樋浦, “無線を用いた列車制御システム ATACS の概要”, 電気設備学会誌, Vol. 33, No. 5, pp.326-329 (2013)
- 2) 田中他, ”鉄軌道における衛星測位の活用技術に関する研究”, 交通研フォーラム 2015 講演概要集, pp.121-124 (2015)
- 3) 内閣府, “宇宙基本計画”, p.16 (2016)



図4 測位結果（全体）

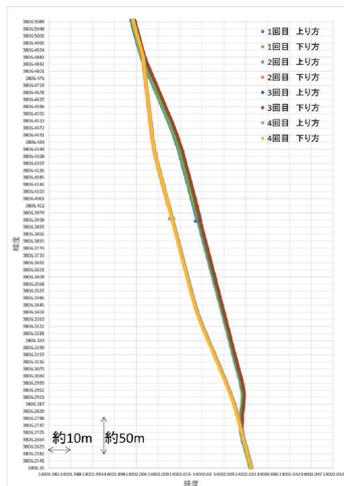


図5 測位結果（駅）

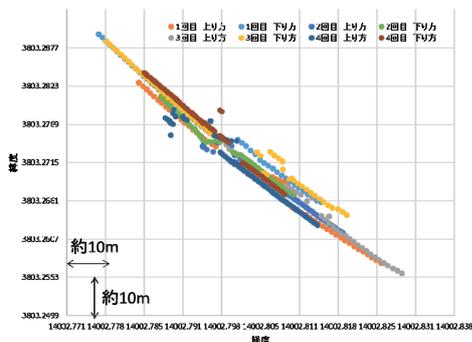


図6 測位結果（跨線橋付近）