

講演 1. 衛星測位による列車位置検知の地上の定点を基準とする測位精度評価手法の検討

交通システム研究部 ※山口 大助 工藤 希 竹内 俊裕 長谷川 智紀

1. はじめに

鉄道ではこれまで地上主体の設備である軌道回路等を用いて列車の位置検知を正確に行う列車制御システムによって安全を確保してきたが、地方鉄道等ではその維持や更新に係るコストが大きな負担となっている。これを解決する手段として、軌道回路によらない車上主体型の列車位置検知システムが期待されており、速度発電機と位置補正用地上子を組み合わせたものが実用化されている¹⁾ほか、交通安全環境研究所では米国の GPS (Global Positioning System) や日本の準天頂衛星 (QZSS; Quasi-Zenith Satellite System) 等の衛星測位システム (GNSS; Global Navigation Satellite Systems) の活用に関する研究に取り組んできた²⁾。

衛星測位は衛星から発信される複数の電波を受信して現在位置を算出³⁾するが、トンネル等の電波受信が難しい場所では測位できず、高層ビル等が密集する場所では建物に反射した電波を受信すること (マルチパス) で測位精度の低下が懸念される。そのため、衛星測位の利活用にあたっては、当該路線での測位精度の事前評価が必要である。

例えば踏切の制御において踏切の作動開始点/終了点 (地上側) での列車通過の検知に車上での衛星測位の利用を想定する場合、踏切の作動時間を最適にするためには、列車上で得た衛星測位結果が地上に対してどの程度の誤差を生じているかを事前に評価する必要がある。踏切制御用の地上子 (軌道) 側をマーカとして利用し、車上子 (地上子と情報をやりとりする車両側の装置) が地上子通過を検知して衛星測位の精度を評価する手法⁴⁾が考案されているが、地上子及び車上子は列車の安全運行に係る保安装置で取り扱いが容易でないため、簡便な評価手法が求められる。

そこで、筆者らは地上子とは異なる定点を基準とし、列車上で得た衛星測位結果が地上に対してどの程度の誤差を生じているかを評価する手法を本稿で提案する。

2. 衛星測位による列車位置検知の地上の定点を基準とする測位精度評価手法

筆者らの提案手法では下記の①～④を行う。

- ① 定点の設定及び定点での高精度測位の実施
- ② 定点通過の検知
- ③ 車上での衛星測位による列車走行位置の測定
- ④ 時刻同期と測位誤差の算出

以下に各々の詳細を述べる。

2. 1. 定点の設定及び定点での高精度測位の実施

地上側で絶対位置を確実に測定できる箇所を定点として設定する。この定点において高精度測位を行い、定点の絶対位置を示す緯度と経度を事前に取得し、精度評価の基準とする。本稿では踏切の端を定点とする。

2. 2. 定点通過の検知

後述の測位誤差を算出するためには、列車が定点を通過した瞬間とそのときの時刻を記録する必要がある。前者を記録するため、レーザ光を対象物に照射し、その反射を利用して変位を検出するレーザ変位計を走行中の車両～まくらぎ (またはバラスト) 間の高さが測定できるように車両側に取り付ける。踏切内はレール頭頂面と道路面が一致することから、踏切通過中は車両～道路面間の変位を測定することになり、車両～まくらぎ間よりも変位が小さくなる。この変位の変化はレーザ変位計の出力の変化として現れる。踏切の端を定点とすれば、レーザ変位計の出力の変化点が踏切の端に相当するため、定点通過の検知を容易に行うことができる。なお、定点の設定やレーザ変位計の車両取付位置によって踏切の進入時を検知する場合と進出時を検知する場合に分かれるため、注意が必要である。

2. 3. 車上での衛星測位による列車走行位置の測定

衛星測位によって列車の走行位置を車上で逐次算出するため、衛星からの電波を確実に受信できるようにアンテナを可能な限り車両屋根上に設置する。また、受信した電波を利用して現在位置を算出する受信機と

受信機から出力される測位結果を記録するパソコンを車上側に設置する。車上での測位結果はアンテナの取付位置に該当する。測位精度を的確に評価するためにはレーザ変位計とアンテナの取付位置は線路長手方向において一致していることが望ましい。

2. 4. 時刻同期と測位誤差の算出

2.2 節で述べたように、測位誤差を算出するためには列車が定点を通過したときの時刻を記録する必要がある。これはレーザ変位計の出力と同時に UTC (協定世界時)の時刻も記録することで可能となる。GNSS は UTC に同期するように運用されており、車上での衛星測位の結果にも UTC の時刻が記録される。時刻の照合によって定点通過時点の車上側の測位結果 (測位点) を抽出でき、測位点と定点の間の距離を算出することができる。提案手法ではこの距離を「測位誤差」と定義し、測位誤差の大きさによって地上の定点 (基準) に対する車上側の衛星測位の精度を評価する。

上述した提案手法の概略を図 1、測位誤差の定義を図 2 にそれぞれ示す。

レーザ変位計とアンテナの取付位置が線路長手方向において一致している場合 (図 2 中の $d=0$ に相当) のほか、レーザ変位計とアンテナの間の離隔 (同 d) が小さい場合は両者の取付位置は一致しているものと見なすことができるが、離隔が大きい場合は注意を要する。測位誤差を大きめに見積もると安全側になると考えられることから、線路長手方向のレーザ変位計とアンテナの取付位置の離隔が大きい場合は、この離隔を測位誤差に加算して評価することが妥当といえる。

3. 提案手法の妥当性を検証する実験

提案手法の妥当性を検証するため、実列車の走行による実験を実施した。

3. 1. 機材の設置

レーザ変位計、アンテナ、受信機、パソコンを車上に設置した。図 3 に示すように、レーザ変位計は乗務員室への乗降時に使用するステップに固定した。アンテナは車両屋根上の車体幅に対してほぼ中央に設置した。屋根上の既設装置やレーザ変位計の固定方法等の都合により、レーザ変位計とアンテナの取付位置は線路長手方向において 0.8m の離隔となった。

3. 2. 定点での高精度測位

ネットワーク型 RTK 測位を利用し、踏切の端において 2本のレール間の中央付近で高精度測位を実施し

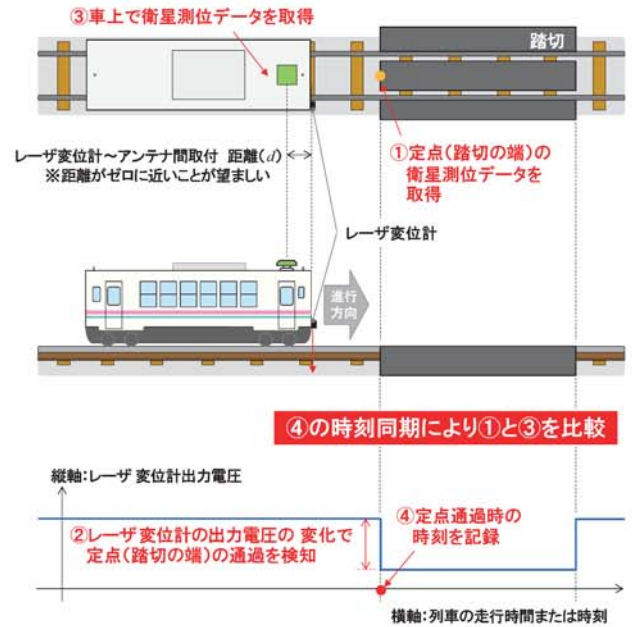


図 1 提案手法の概略

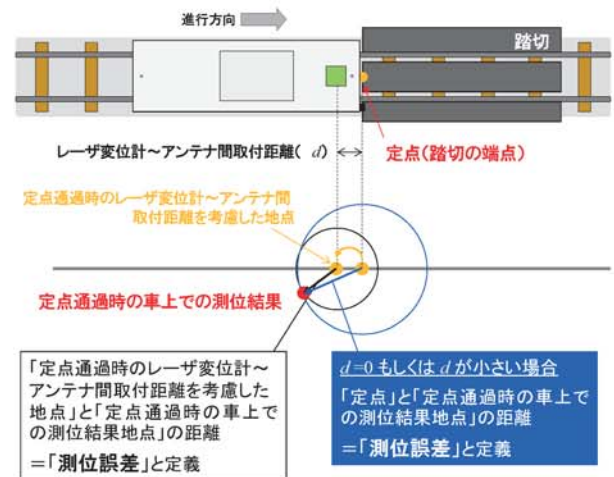


図 2 測位誤差の定義

た。その様子を図 4 に示す。本実験では踏切の下り方面の端を定点に設定した。

3. 3. 車上での衛星測位による列車走行位置の測定

測位に使用する GPS、QZSS 等の衛星の種類、コード測位や搬送波測位等の測位方法⁴⁾、測位精度を高めるための補強信号⁴⁾⁵⁾の使用の有無等により評価対象の衛星測位の条件は異なる。本実験では下記の 2 条件 I)及び II)を設定した。

- I) GPS、QZSS のほか、GLONASS (ロシア)、Galileo (EU) の各衛星からの電波を利用した衛星測位
- II) ネットワーク型 RTK 測位

両条件で異なる受信機を使用した。測位結果を出力する周期に該当するサンプリング周波数は、条件 I)

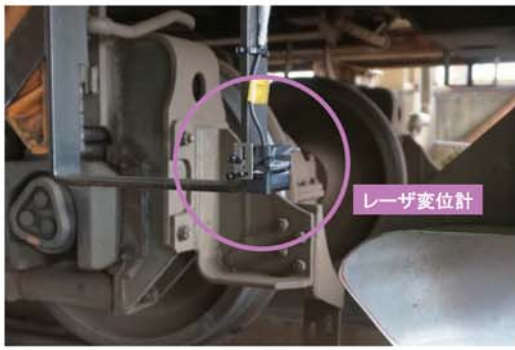


図3 車両へのレーザー変位計の取り付け



図4 踏切端点（定点）での高精度測位の様子

が5Hz、条件II)が10Hzである。これよりも高いサンプリング周波数を設定すると、測位結果を継続的に出力できない状況が見られた。

3. 4. 測位誤差の算出結果

本実験は2020年3月に実施し、試運転列車が同一区間を2往復走行した。測定回数は上りと下り合わせて4回である。実験区間内の2箇所の踏切（踏切A、B）を対象に、車上の衛星測位データから測位誤差を算出した。その結果を表1に示す。表中の「高精度測位」は定点での衛星測位の結果（基準）、「1回目」と「2回目」は1往復目、「3回目」と「4回目」は2往復目で、「MGNSS」は前節の衛星測位の条件I)、「NRTK」は同条件II)を指す。「速度」は衛星測位の情報から得られた定点通過時の走行速度を指す。

本表より、各測定回ともに提案手法により測位誤差を算出できており、提案手法の妥当性を確認できる。また、2往復目の方が測位誤差は大きい傾向が見られる。2箇所の踏切ともに周囲の開けた場所であることから、衛星配置の違いが測位誤差の傾向の違いに現れたものと考えられる。1回目（10時台）と3回目（12時台）の踏切A上空の衛星配置を図5に示す。仰角 θ の高いところ（図中の円の中央）に衛星が多いと測位精度が高くなる傾向にあるといわれており、本図より1回目の方が仰角の高い衛星が多いことが分かる。

表1 列車走行実験における測位誤差の算出結果
(a) 踏切A

踏切A	緯度			経度			測位誤差 [m]	速度 [km/h]	
	度	分	秒	度	分	秒			
高精度測位	38	8	42.06592	140	2	22.22527	—	—	
1回目	MGNSS	38	8	42.3177	140	2	22.299	7.968	58.5
	NRTK	38	8	42.28302	140	2	22.29387	6.899	
2回目	MGNSS	38	8	41.8836	140	2	22.1733	5.762	55.7
	NRTK	38	8	41.87212	140	2	22.16617	6.146	
3回目	MGNSS	38	8	42.4536	140	2	22.4148	12.814	59.5
	NRTK	38	8	42.51352	140	2	22.36747	14.229	
4回目	MGNSS	38	8	41.5497	140	2	22.0464	17.851	62.3
	NRTK	38	8	41.54662	140	2	22.06026	16.508	

(b) 踏切B

踏切B	緯度			経度			測位誤差 [m]	速度 [km/h]	
	度	分	秒	度	分	秒			
高精度測位	38	7	21.77958	140	1	56.61002	—	—	
1回目	MGNSS	38	7	22.0038	140	1	56.6682	7.057	57
	NRTK	38	7	21.96147	140	1	56.66502	5.766	
2回目	MGNSS	38	7	21.5907	140	1	56.5527	5.989	56.2
	NRTK	38	7	21.56498	140	1	56.53992	6.834	
3回目	MGNSS	38	7	22.2246	140	1	56.8134	14.588	56.6
	NRTK	38	7	22.27997	140	1	56.76642	15.892	
4回目	MGNSS	38	7	21.3282	140	1	56.5194	14.092	56.7
	NRTK	38	7	21.38438	140	1	56.48492	12.56	

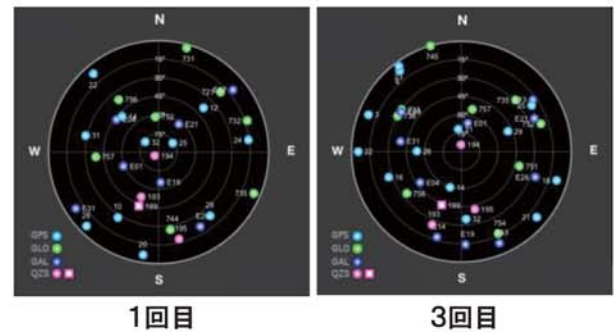


図5 踏切A上空の衛星配置
(内閣府提供アプリ「GNSS View」より作成)



図6 踏切Aにおける衛星測位結果のプロット

踏切Aを対象に、各回の測位結果をGoogle社の「Google Earth」上にプロットしたものを図6に示す。本図より、車上で衛星測位の結果は列車の進行方向に対して定点よりも後方の位置であることが分かる。踏切Bについても測位結果をプロットしたところ、図6とほぼ同様になることを確認した。このことから、列車走行中の衛星測位の結果は実際の走行位置よりも

後方の位置を示す傾向にあることが示唆される。言い換えると、これは列車が衛星測位の結果よりも実際には前方に位置することを指し、危険側となる。この理由として主に次の二つが考えられる。

受信機には測位結果の精度向上を図るための計算上の工夫が採り入れられていることが多い⁶⁾。その一例として、過去の測位結果等も活用して現在位置を算出する手法があるが、過去の結果を現在の測位計算に反映している最中も列車は走行し、現在位置が逐次変化する。このことが測位結果に影響を及ぼすと考えられる。本実験で使用した受信機にも同様の計算手法が実装されている可能性がある。

また、条件 II) は受信機による測位情報が逐次外部サーバへ送信され、多数の電子基準点での観測データを基にこのサーバ上で行われた誤差補正計算の結果を受信機が受信して現在位置が確定する仕組みである。受信機とサーバの間は携帯電話回線等で通信されるが、通信に遅延が生じることが指摘されており⁷⁾、この遅延が測位結果に影響を及ぼしている可能性がある。

ところで、列車速度と衛星測位データ取得のサンプリング周波数の関係について以下の式を導出できる。

$$D_j = 1000v / 3600f_s \quad \dots(1)$$

ここで、 $D_j[m]$ は1サンプリング間の走行距離、 $v[km/h]$ は列車速度、 $f_s[Hz]$ はサンプリング周波数である。

式(1)より列車速度に応じて測位精度の分解能が変化する。衛星測位条件 I)と II)のサンプリング周波数を踏まえると、踏切通過時の列車速度 $v=60km/h$ では条件 I) $D_j=3.33m$ 、条件 II) $D_j=1.67m$ 程度となり、この速度における測位精度の分解能に相当する。

本実験における線路長手方向のレーザ変位計とアンテナの取付位置の離隔 $0.8m$ は、 $v=60km/h$ 程度のときは上記の分解能よりも小さいため、表 1 ではレーザ変位計とアンテナの取付位置は同一と見なして測位誤差を示している。一方、条件 I) $v=14.4km/h$ 未満、条件 II) $v=28.8km/h$ 未満になると、分解能が $0.8m$ よりも小さくなり、注意を要する。このような場合は先述の通り、レーザ変位計とアンテナの取付位置の離隔を測位誤差に加算して精度を評価することが妥当といえる。

4. おわりに

本稿では、定点及び定点での高精度測位による精度評価の基準を設定し、定点通過検知と時刻同期に基づき定点に対する測位誤差を算出して、列車上で得た衛

星測位結果が地上に対してどの程度の誤差を生じているかを評価する手法を提案した。

提案手法の妥当性を検証するため、実列車の走行による実験を実施したところ、提案手法に基づいて測位誤差が算出されていること、列車走行時間帯によって測位誤差の傾向に違いが見られることを確認した。また、列車速度とサンプリング周波数の関係から測位精度の分解能に変化が生じ、注意を要することも述べた。

更に、実験結果から、列車走行中の衛星測位の結果は実際の走行位置よりも後方の位置を示す傾向にあることが示唆された。

本稿で報告した実験では走行速度が最高で $60km/h$ 程度であったが、今後はより高速域における提案手法の妥当性について検討を進めていきたい。

一方、3.4 節にて衛星配置による測位誤差の傾向の違いを述べたが、衛星の故障が測位結果に影響を及ぼすことも知られている⁸⁾。衛星測位の利活用にあたっては、測位精度もさることながら、衛星の健全性（正常に動作していること）や信頼性の評価も必要と考えており、これについても今後検討を進めていきたい。

謝辞

3章で述べた列車走行実験は山形鉄道株式会社のご協力を得て実施しました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 馬場ほか、“無線による列車制御システム(ATACS)”、JR EAST Technical Review, No.5, pp.31-38, (2003)
- 2) 例えば、工藤ほか、“列車制御システムにおける衛星測位利用に関する取組”、交通研フォーラム 2016 講演概要集、pp.65-68
- 3) 神宮ほか、“携帯電話回線を利用した列車制御システム(ATP 閉そくシステム)の開発”、JREA, Vol.63 No.3, pp.43900-43903, (2020)
- 4) 例えば、磯部ほか、“センチメートル級衛星測位サービスの開発”、JREA, Vol.63 No.3, pp.43904-43907, (2020)
- 5) 内閣府みちびき (準天頂衛星システム) 公式サイト
- 6) 久保幸弘、“衛星測位技術へのカルマンフィルタの応用”、システム/制御/情報, Vol.64 No.1, pp.33-38 (2020)
- 7) 伊勢嶋ほか、“RTK-GPS 測位における伝送遅延に関する研究”、日本航海学会論文集, Vol.119, pp.205-211, (2008)
- 8) 坂井丈泰、“衛星航法システム MSAS の導入”、第 50 回自動制御連合講演会論文集、pp.723-726, (2007)