

講演5. 衛星測位による列車位置検知の精度の評価に向けた取組

交通システム研究部 ※山口 大助 工藤 希 長谷川 智紀 一柳 洋輔

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、全球測位衛星システムともいう)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。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ため、筆者らはこれまでに「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」を提案した³⁾。本手法は定点を多く設定することで詳細な評価が可能となる一方、定点の数だけ現地での高精度測位作業の工数が必要となる。

そこで、この手法に加え、列車上で得た衛星測位の結果にどの程度の誤差を生じているかを地上の定点によらず連続的に評価する手法を提案する。

2. 車上測位精度評価手法

2. 1. 車上での衛星測位による列車走行位置の測定

列車上で得た衛星測位の精度を連続的に評価するため、図1に示す構成により車上で衛星測位を行う。

本稿で提案する「衛星測位による列車位置検知の車上での測位精度評価手法」(以下、車上測位精度評価手法)は土木の高精度測量等に用いられるRTK (Real Time Kinematic) 測位⁴⁾の結果を基準とし、図中の受信機①の測位結果を基準と比較することを基本とする。車両屋根上に設置したアンテナで受信した電波を分配器により受信機①とRTKの受信機に等しく分配する。これによって両受信機に入力される電波が全く同一の条件となり、受信機同士で時刻 (GPS 時刻) の同期を取ることができ、車上測位精度評価手法を実現している。受信機①には評価したい項目 (どの衛星の電波を使用するか、補強情報の有無など) に対応したものを接続する。評価したい項目の数だけ電波を分配して評価できるが、筆者らは最大で4分配 (RTKを含む) までとしている。RTKには局所的に基準局を設置してローカルに測定する場合と基準局に電子基準点や仮想基準点を利用する場合の二つがあるが、鉄道では長距離の路線も数多くあるため、後者の特に仮想基準点を利用する方式で基準を測定している。

2. 2. 車上測位精度評価手法での測位誤差の定義

前述の通り受信機①とRTK受信機で時刻同期が取れていることから、測位時刻ごとに両受信機の測位結果 (緯度と経度で表記される点を「測位点」とする) が得られる。そこで、測位時刻ごとに両受信機の測位点間の距離を算出する。この距離が短くなるほど受信機①の測位点が基準であるRTKの測位点に近づくことから、測位結果の精度が高いと見なすことができ

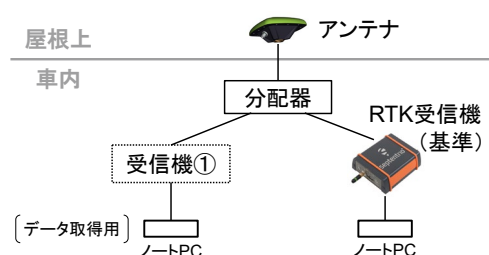


図1 車上での衛星測位の測定機器構成

る。車上測位精度評価手法ではこの 2 点間の距離を「測位誤差」と定義する。車上測位精度評価手法の概略を図 2 に示す。RTK は搬送波測位（干渉測位）⁴⁾ によって高精度の測位結果である FIX 解を得られることから、車上測位精度評価手法では RTK の FIX 解を得られたときのみ測位誤差を算出する。

交通安全環境研究所では、測位点から軌道に向けて下ろした垂線と軌道の交点を軌道上の測位点とするマップマッチングと呼ばれる方法を利用して軌道方向の測位誤差を評価する手法を考案し、その有用性を確認している⁵⁾。この手法では垂線を導くために軌道方向の方位角の把握が必要となるが、特に曲線部ではこの把握が複雑になる。そこで、図 3 に示すように、評価したい項目（受信機①）の測位点は基準に対してどの方角にも均等に現れるものと想定し、方角によらず測位点間の距離のみで測位誤差を定義することとした。マップマッチングの方法は図 3 中の実際よりも前方（安全側）または後方（危険側）のどちらの位置を検知しているかを把握できる利点はあるが、車上測位精度評価手法では算出した測位誤差が安全側、危険側のどちらにも生じる可能性があるものとして、容易に測位精度の評価を行えるようにしている。

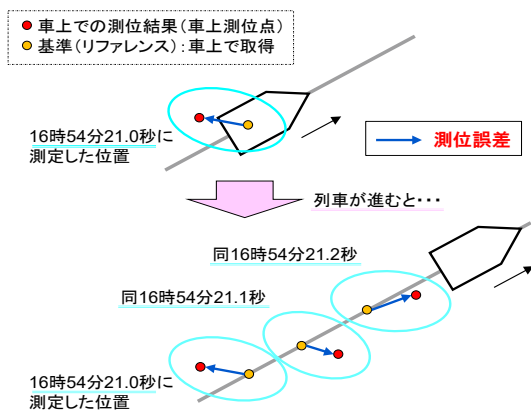


図 2 車上測位精度評価手法の概略

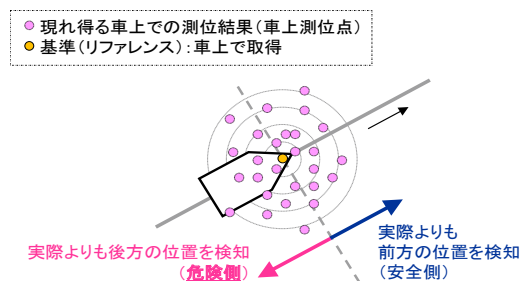


図 3 想定する測位点の出現

3. 列車走行時の測位精度評価

A 鉄道及び B 鉄道において試運転列車走行時に車上で衛星測位を行い、車上測位精度評価手法によって測位結果の精度を評価した。

3. 1. A 鉄道

A 鉄道では評価したい測定項目を以下の二つとし、受信機は各々に対応するものを使用した。

I) GPS、QZSS の各衛星からの電波を利用した測位（単独測位⁴⁾（コード測位⁴⁾）

II) 上記 I) に加えて QZSS 独自のサービスであるセンチメートル級測位補強サービス信号（CLAS: Centimeter Level Augmentation Service）⁶⁾ を利用した測位（精密単独測位型 RTK）

車上測位精度評価手法に基づく測位誤差の算出結果を図 4 に示す。図中の横軸は測定時間（単位：秒、測定開始時をゼロ）、縦軸は測位誤差（単位：m）である。II について、水色は CLAS を利用して得られた高精度の FIX 解の測位結果、紫色は FIX 解よりもやや精度が劣る FLOAT 解⁴⁾の測位結果、赤色は単独測位（コード測位）による測位結果をそれぞれ表す。

初めに、本図より測位誤差を算出できている様子を確認できる。次に、本図と路線周辺環境から以下のことが推測される。

- 測定項目 I では全体的に 1m 程度の測位誤差が生じている
- 測定項目 II では FIX 解を得られたときの測位誤差が小さく、CLAS の特徴である高精度測位の様子を確認できる
- 60 秒付近で測位誤差の不算出が見られるが、これは列車が立体交差下を通過中で、基準である RTK も含め衛星からの電波の受信が一時的に遮断されたためである
- 90 秒付近で測位誤差の不算出が見られ、その後測定項目 I では測位誤差の大きい傾向にあるが、これは列車がトラス橋梁を通過中で、RTK も含め衛星からの電波を受信し難い状態が続いたためである
- 測定項目 I で 570 秒付近と 900 秒付近、II では 900 秒付近に測位誤差が大きい傾向にあるが、いずれも線路脇に 250m 程度の防風林が存在する駅で、電波を受信し難い状態が続いたためである
このように、車上測位精度評価手法によって当該路線における衛星測位の精度評価が可能となる。

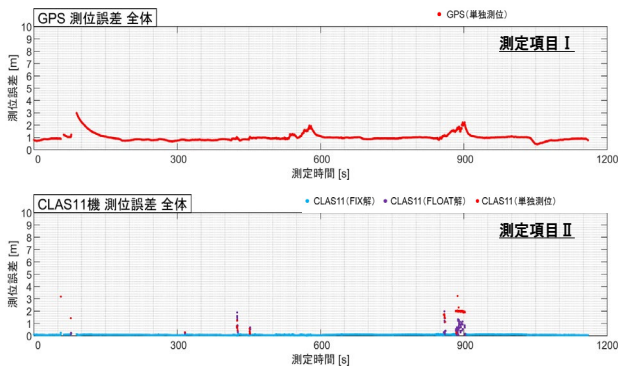


図4 測位誤差の算出結果 (A 鉄道)

ところで、A 鉄道では測定区間内の複数の踏切の定点を対象に「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」の妥当性を検証した³⁾。このうち踏切 A での結果の一例に着目すると、踏切 A 内の定点通過時の測定項目 I と II の測位誤差はそれぞれ I: 0.856m、II: 0.016m であった。一方、踏切 A 内の定点通過時に基準となる RTK は地上に対して 6.899m の測位誤差を生じ、RTK の測位点は実際の列車の位置よりも後方を示した。これらのことから、測定項目 I は 7.755m 程度、II は 6.915m 程度の地上に対する車上の測位誤差を生じ、実際よりも後方の位置を示す可能性があるものと推測される。

3. 2. B 鉄道

B 鉄道では同一区間を複数の時期に分けて測定した。評価したい測定項目を以下の三つとし、受信機は各々に対応するものを使用した。

D) GPS、QZSS の各衛星からの電波を利用した測位 (単独測位 (コード測位))

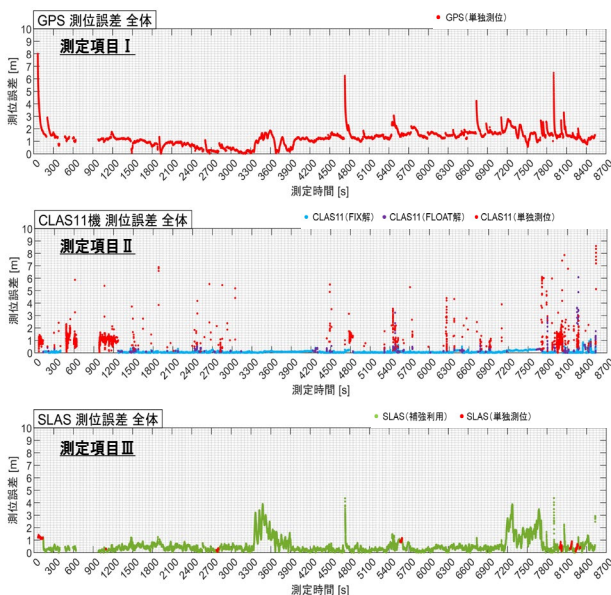


図5 測位誤差の算出結果 (B 鉄道、測定 1 回目)

II)上記 I に加えて CLAS を利用した測位 (精密単独測位型 RTK)

III)上記 I に加えて QZSS 独自のサービスであるサブメータ級測位補強サービス信号 (SLAS: Submeter Level Augmentation Service)⁶⁾を利用した測位 (相対測位⁴⁾ (コード測位))

車上測位精度評価手法に基づく測位誤差の算出結果について、測定 1 回目を図 5、2 回目を図 6 にそれぞれ示す。両者は 4 週間離れている。測定項目 I と II のグラフは 3.1 節と同様である。III について、緑色は SLAS を利用して得られた測位結果、赤色は単独測位 (コード測位) による測位結果をそれぞれ表す。本図と路線周辺環境から以下のことが推測される。

- 特に測定項目 I と III は時期によって測位誤差の傾向に違いが見られる
- 測定項目 II では時期によらず FIX 解を得られたときの測位誤差は小さく、CLAS の特徴である高精度測位の様子を確認できる
- SLAS の利用によって測定項目 III は I と比べて測位精度が高くなる場面が見られる
- 試運転列車起点駅は上屋に覆われているために出発時は RTK も含め衛星からの電波を受信し難い状態で、出発後に程なくして測位開始となるが、しばらくは測位誤差が大きい傾向にある
- 300~900 秒の間は長いトンネルが複数存在し、トンネル走行中は RTK も含め衛星からの電波を受信できないため、測位誤差は不算出となるほ

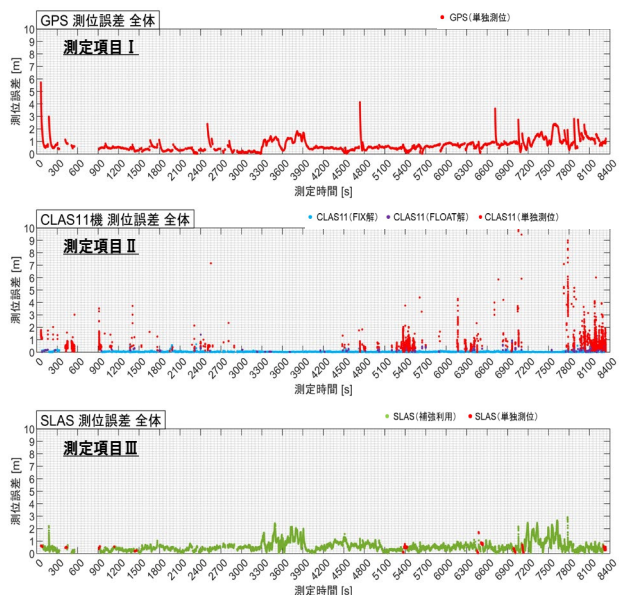


図6 測位誤差の算出結果 (B 鉄道、測定 2 回目)

か、トンネル同士の間で測位できた場合も測位誤差は大きい傾向にある

- 7800 秒付近から試運転列車終点駅到着までの区間は都市部につき立体交差や高層建物が多く存在し、これらによる電波の一時的な遮断やマルチパスの影響で測位誤差が大きい傾向にある
- 3300～3900 秒付近及び 7200～7680 秒付近は試運転列車が駅に長時間停車している状況で、測定項目 I と III では測位誤差が 2～4m 程度生じているのに対して II では測位誤差が小さいことから、CLAS の利用によって駅内での当該列車の停車番線を精度よく検知できる可能性がある

算出された測位誤差について 95 パーセンタイル値 (percentile) を求めたところ、表 1 に示す値がそれぞれ得られた。測定項目 II は CLAS の FIX 解で測位結果が得られたとき、III は SLAS によって測位結果が得られたときを対象としている。95 パーセンタイル値とはデータを小さい順に並べたときに初め (最小値) から数えて全体の 95% に位置する値のことを指し、この値が小さいと測位誤差が全体的に小さいといえる。本表より測定項目 II の値が最も小さく、このことから CLAS の特徴である高精度測位によって測位誤差は小さい傾向にあることを確認できる。

ところで、B 鉄道ではトンネルや立体交差が多く存在し、電波を受信し難い状況もあった。試運転列車での測定時間 (約 2 時間 20 分) のうち、例えば測定項目 II の CLAS の FIX 解は測定 1 回目では約 78%、2 回目では約 79% の時間帯でそれぞれ得られた。これは測定時間全体に対する衛星測位結果の取得の割合に相当し、「有効測位率」と定義する。試運転列車のダイヤは同一であることから、先述の駅での長時間停車を差し引くと当該測定区間での CLAS の FIX 解の有効測位率は概ね 75% 前後と推測される。測定項目 I、II、III の有効測位率を表 2 にまとめる。本表から測定項目によって値に違いが見られるが、これは測定項目によって測位計算の方法が大きく異なること (特に I 及び III と II) と、受信機メーカーによって測位計算のチューニングが異なることによるためと考えられる。

4. おわりに

列車上で得た衛星測位の結果がどの程度の誤差を生じているかを地上の定点によらず連続的に評価する手法を提案した。また、列車走行時の衛星測位につ

表 1 測位誤差 95 パーセンタイル値 (B 鉄道)

	測位誤差 95パーセンタイル値	
	測定1回目	測定2回目
測定項目 I (単独測位)	2.18m	1.56m
測定項目 II (CLASのFIX解)	0.20m	0.07m
測定項目 III (SLAS補強利用)	1.85m	1.36m

表 2 有効測位率 (B 鉄道)

	測定モード	有効測位率	
		測定1回目	測定2回目
測定項目 I	単独測位	95.12%	95.01%
	(測位不能)	4.88%	4.99%
測定項目 II	CLASのFIX解	77.58%	78.95%
	CLASのFLOAT解	5.34%	5.35%
	単独測位	9.06%	7.77%
	(測位不能)	8.01%	7.94%
測定項目 III	SLAS補強利用	91.05%	89.93%
	単独測位	3.96%	4.93%
	(測位不能)	4.99%	5.13%
RTK (基準)	FIX解	86.54%	83.44%
	FLOAT解	2.43%	5.40%
	相対測位	1.59%	1.32%
	単独測位	4.18%	4.51%
	(測位不能)	5.26%	5.32%

いて提案手法に基づき測位精度評価を行い、その結果を示した。

今後は本提案手法ならびに文献 3)での提案手法を活用した列車位置検知の測位精度の総合的な評価手法について検討を進めていきたい。

謝辞

本稿の一部は国土交通省鉄道局からの受託調査の成果によるものです。試運転列車における測定は山形鉄道株式会社、北海道旅客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) 山口ほか、“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” 交通研フォーラム 2020 講演概要集、pp.3-6
- 4) 例えば、谷口功、“位置情報の基本と技術”、翔泳社
- 5) 吉永ほか、“鉄道におけるマルチ GNSS 測位の利活用技術”、交通研フォーラム 2014 講演概要集、pp.45-48
- 6) 内閣府みちびき (準天頂衛星システム) 公式サイト