

列車位置検知への GNSS 測位技術適用に関する基礎研究

根橋 壮* 星谷 直哉 長坂 雄一 (東日本旅客鉄道株式会社)

北村 光教 吉原 貴之 (国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所)

Application of GNSS positioning technology to Train detection

Tsuyoshi Nehashi*, Naoya Hoshiya, Yuichi Nagasaka (East Japan Railway Company)

Mitsunori Kitamura, Takayuki Yoshihara (National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology)

The purpose of this study is conducted to apply Global Navigation Satellite System (GNSS) positioning technology to train detection devices, with a view to contributing to labor saving in local railway lines. To ensure safety, we applied a method (Protection Level) proven in the field of aviation, and verified the improved method for the railway environment with data measured on actual trains. As a result, good results were not obtained in areas where the GNSS reception environment was poor, and although there are still many issues remaining for practical use, the expected results were obtained in areas where the reception environment was good.

キーワード : 列車検知、GNSS、保護レベル

(Key Words, Train detection, GNSS, Protection level)

1. はじめに

少子高齢化やコロナを契機とした鉄道事業者を取り巻く経営環境の変化により、特に地方線区においては今後メンテナンスの省力化および設備のライフサイクルコストの低減が求められている。特に踏切制御子や軌道回路に代表される列車検知装置のメンテナンスや取替に要するコストが地方線区における課題となっている。

上記の課題を踏まえて本研究では、信号設備の簡素化を図るための要素技術として、全球測位衛星システム (GNSS) による測位技術の列車位置検知への適用可能性について、基礎検討を行った。

2. 列車位置検知への GNSS 測位技術の適用

2.1 列車位置検知に求められる安全性

鉄道分野への GNSS による測位技術の適用例としてまず挙げられるのは、列車位置の検知である。列車位置情報の用途のうち、本研究では高い安全性を要求される運転保安設備としての適用を目的としており、既存の軌道回路と同等以上の安全性を、測位システムが担保する必要がある。その安全性担保の手法として、航空分野で実用化されている「保護レベル⁽¹⁾ (以下、PL : Protection Level)」の概念を用いることを考えた。PL の考え方について次節で述べる。

2.2 航空分野における保護レベルの考え方

航空分野における PL の考え方とは、GNSS 測位結果に対し、測位誤差を包含する信頼限界を図 1 に示す円筒形として定め、その確率で円筒内に存在することを保証するというものである。航空分野ではこのことをインテグリティ (完全性) という。インテグリティ要件は飛行フェーズによって規定されており、例えば巡航フェーズの場合では測位解が円筒外に逸脱している確率が $1.0 \times 10^{-7}/h$ 以下で表されるということである。

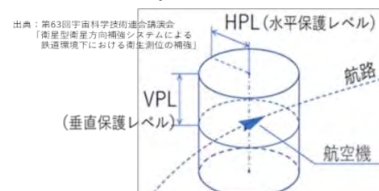


図 1 保護レベルのイメージ

2.3 鉄道分野における保護レベルの考え方

前節で述べた確率は、鉄道分野では危険側故障率に値する。すなわちインテグリティの値は (1-危険側故障率) として示される。PL は測位解と同様、測位システムの毎サイクル算出される動的な値であるが、一般的な GNSS 測位システム同様、鉄道環境においても測位誤差の扱いが大きな課題となる。

3. 鉄道環境を考慮した測位解および PL の算出手法開発と評価

3.1 鉄道における電波受信環境の特徴

航空分野では一般的に、位置および PL の算出において衛星型衛星航法補強システム (以下、SBAS : Satellite-based augmentation system) が用いられている。SBAS は静止衛星による位置補強システムであり、GNSS とは独立して、静止衛星から GNSS の補正情報、および異常な GNSS の情報を放送することで、高範囲な補強が実現される。SBAS では、放送される各衛星の補正值の分散モデル (σ^2) が放送され、衛星毎の SBAS 補正後の残差 σ_i は以下で表される。

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,DFC}^2 + \sigma_{i,UIRE}^2 + \sigma_{i,tropo}^2 + \sigma_{i,air}^2$$

σ_i^2 : i 番目の衛星の補正後のすべての残差
 $\sigma_{i,DFC}^2$: 衛星位置・クロックに関する残差
 $\sigma_{i,UIRE}^2$: 電離圏に関する残差
 $\sigma_{i,tropo}^2$: 対流圏に関する残差
 $\sigma_{i,air}^2$: 受信機ノイズ・マルチパスに関する残差

この $\sigma_{i,air}^2$ (マルチパス誤差) について、航空分野では複数の航空機による実測結果により定めた値が用いられるが、鉄道では線路やホーム周辺の建物等の影響により電波受信環境が航空機とは大きく異なることから、鉄道に適したモデルを検討する必要がある。

3.2 開発した算出手法の概要

前節の鉄道環境に適したモデルを検討する上で、今回マルチパス誤差および受信機誤差のトータル量を求める手法を開発した。この手法を踏まえ、鉄道環境における測位解および PL 算出手法の処理の基本的な流れを、図 2 に示す。

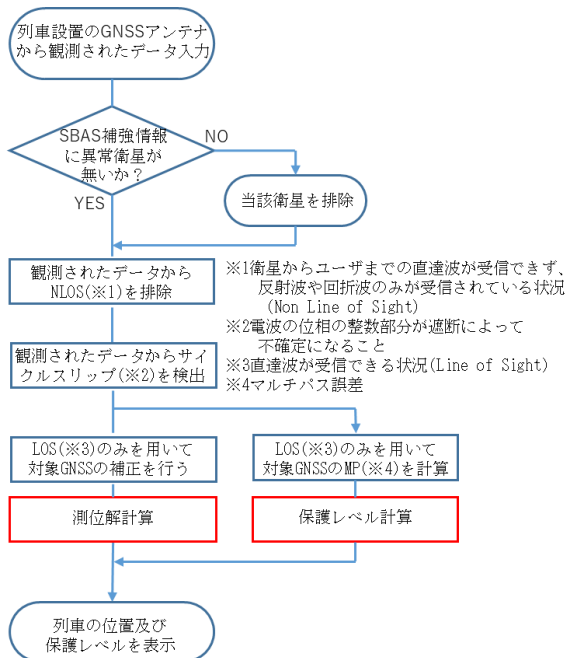


図 2 鉄道における測位解および PL 算出手法

3.3 実測データを用いた評価

前節で開発した手法の有効性を、以下表 1 に示すとおり、列車走行時の GNSS 受信データを用いて、測位解と PL をそれぞれ算出することで、評価した。測位解は、現車に GNSS 受信機 (アンテナ) を仮設して採取した実測データと、走行経路上の線路中心の実座標値との差で示される測位誤差で、評価した。また、PL は図 1 の水平方向の PL である「HPL」の値で、評価した。

表 1 現車による GNSS データ実測の概要

試験日	2018年12月5日、19日、2019年1月16日、23日 ただし、今回の算出は12月5日のデータを使用
走行経路	南古谷～大宮～(武蔵野線経由)～立川～甲斐大和 (往復)
受信機位置	1号車 (川越方の車両) の屋根上に前後 2 基のGNSS用アンテナを設置 (以降、川越方をFront、大宮方をRearとする)
取得データ	・GNSSによる位置データ (GPS, GLONASS, QZSS) ・位置補正データ (SBAS) なお、今回の算出では、位置データにGPSデータを使用
データ蓄積周期	1 Hz なお、今回の算出ではRFレコーダにより20Hzで取得したデータを使用

3.4 開発手法による算出結果

図 3 に開発手法による走行経路全域の測位結果を示す。地図上にプロットした測位位置における PL の大きさを色で表している。プロットの無い箇所は、主にトンネル内や駅構内等で測位解が得られなかった。



図 3 Google Earth による測位結果 (走行経路全域)

3.5 測位誤差と PL の算出結果の評価

図 4 は開発手法による往路の走行全区間での算出結果として、測位解を算出できた地点における測位誤差と HPL の関係を表したものである。ただし、今回の PL の計算では SBAS のマルチパス誤差モデルを用いた。それらは全て $HPL \geq$ 測位誤差を満たしており、危険側故障 ($HPL <$ 測位誤差) となっていない結果が得られた。これらのことより、開発手法は鉄道環境においてもインテグリティが保証され、有効に機能すると考える。なお、ここで算出される値の危険側故障率は、航空分野で精密進入の飛行フェーズ (滑走路面から 60m の高さまで誘導) に用いられる $2 \times 10^{-7}/\text{approach}$ であるが、鉄道分野では IEC61508 の SIL4 ($1 \times 10^{-9}/\text{h}$) が要求される。

また測位解が得られなかった箇所の中には、電波遮蔽物が明らかに存在しない箇所もあった。これは「キャリアスムージング」と呼ばれる、搬送波位相によるコード疑似距離の平滑化時定数 (航空分野では 100 秒) が、大きく影響したと考えられる。

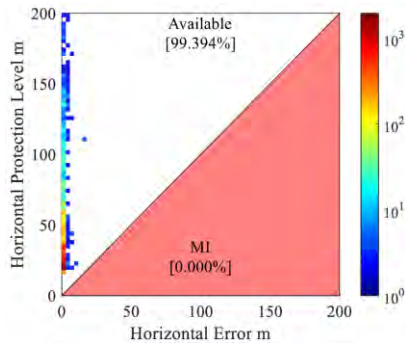


図 4 水平方向の PL と測位誤差の関係

4. 改良手法の提案と評価

4.1 キャリアスムージング処理の平滑化手法の改善

3.5 節での平滑化時定数の影響を改善するため、観測周期を 1Hz から 20Hz に変更したことに加え、開発手法の SBAS 方式によるスムージングフィルタに対する改良手法として、時変平滑化方式およびカルマンフィルタ (KF) 平滑化方式のスムージングフィルタを開発した。KF とは線形統計フィルタの一種であり、搬送波の情報を用いて次の測位値を推測しながら算出する手法である。なお、次節以降では SBAS 方式を便宜上「時不変平滑化方式」と呼ぶことにする。

4.2 改良手法による算出例

図 5 および 6 に時不変平滑化方式と時変平滑化方式の算出結果を地図上にプロットし比較した結果を示す。図 6 の方が左下の高架橋を抜けた後の保護レベル値が小さく (青色) になっており、図 5 よりも PL 値が改善されたことがわかる。改良手法における走行全区間における算出結果は次節で示す。

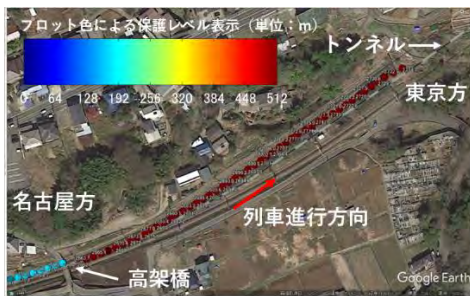


図 5 時不変平滑化方式の測位結果 (四方津駅付近)

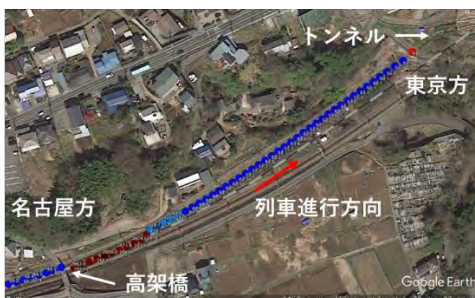


図 6 時変平滑化方式の測位結果 (四方津駅付近)

4.3 3手法による算出結果

3.3 節で採取したデータを用いて、時変平滑化方式および KF 平滑化方式の測位解と PL を算出した。時不変平滑化方式も加えた 3 手法の算出結果について、測位誤差を昇順に並べ、全測位箇所数の上位 95% 目となる値 (95%Err) を表 2 に示す。さらに表 3 に、同様に全測位箇所数の上位 99% 目となる PL の値 (99%PL) を示す。

表 2 より、測位可能であった箇所の殆どは、測位誤差が概ね 5 m 以内に収まることがわかる。また表 3 より、PL の値は、時変平滑化方式および KF 平滑化方式においては、時不変平滑化方式よりも小さく、概ね 400m 以下であった。

表 2 測位箇所の 95%Err の算出結果

単位 : m

		時不変平滑化	時変平滑化	KF平滑化
往路	Front	5.19	4.72	4.25
	Rear	4.61	4.38	3.97
復路	Front	2.21	2.06	2.01
	Rear	2.62	2.28	2.23

表 3 測位箇所の 99%PL の算出結果

単位 : m

		時不変平滑化	時変平滑化	KF平滑化
往路	Front	690.3	453.4	377.0
	Rear	3587.0	350.4	353.5
復路	Front	350.6	149.1	133.9
	Rear	503.7	150.5	138.6

5. 運転保安設備に保護レベルを適用するための目標値の検討

前章で算出した PL の値が、運転保安設備としての実用に耐えるかを評価するため、本章では PL の具体的目標値を検討した。

5.1 測位解と保護レベルの位置関係のイメージ

図 7 に、実際の列車位置と測位解および PL の関係を示す。以降では、測位誤差を「P.E (Positioning Error)」、垂直方向の保護レベルを「VPL (Vertical Protection Level)」、水平方向の保護レベルを「HPL (Horizontal Protection Level)」とし、座標軸は x を列車進行方向、y を線路の並び方向、z を列車垂直方向とする。PL は、測位誤差の分だけ図 7 の太枠線の中心がずれるイメージとなる。

PL 算出時、 $HPL < P.E$ となるケースは、インテグリティを保証する範囲 (航空業界では $1 \cdot 2 \times 10^{-7} / \text{approach}$) から逸脱していることになるため、以降の検討は $HPL \geq P.E$ の前提とする。なお、列車垂直方向の c は便宜上 0 m として検討した。

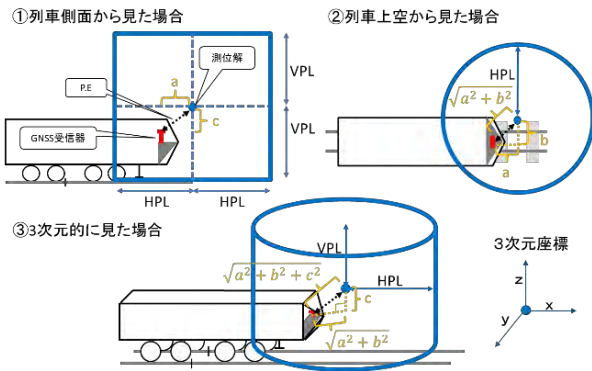


図 7 PL の占有するエリアのイメージ

5.2 列車占有範囲

運転保安設備への PL 適用の検討に当たり、「列車占有範囲」というエリアを、以下の図 8 のように定める。列車占有範囲とは、自列車の前方に在線する先行列車最後尾との相対距離を把握し、自列車の走行可能距離を車上装置で計算する制御に用いる列車長である。GNSS 受信器は前方および最後方の運転台に 1 台ずつ設置する前提とする。

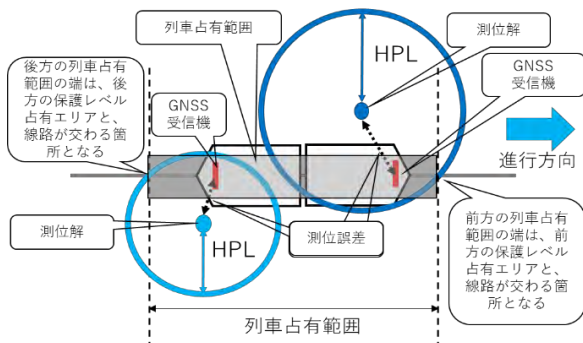


図 8 列車占有範囲のイメージ

5.3 保護レベルの目標値の検討

前節の制御を適用することを念頭に、自列車と先行列車との列車間隔において、許容される PL の最大値を検討した。そのイメージを以下の図 9 に示す。余裕距離 200m は、仙石線の無線式列車制御システム (ATACS) の「先行列車の最後尾から停止限界点までの距離」を参考にして定めた。自列車前方と先行列車後方の列車占有範囲が余裕距離内に収まり、かつ各々の列車占有範囲が接触しない PL の最大値として 50m と定めた。

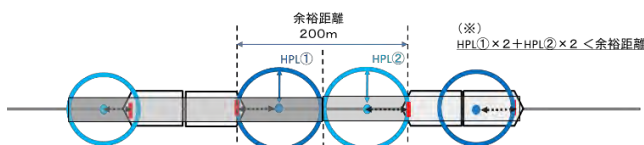


図 9 列車間隔制御における余裕距離と PL の最大値のイメージ

5.4 PL 算出結果の目標値に対する評価

以上より、4.3 節で算出した PL の値が 50m 以下を満たす割合を、表 4 に示す。その結果、この目標値を満たすのは時変平滑化方式および KF 平滑化方式においても、全測位箇所 の 7 ~ 8 割に過ぎず、測位環境が良好でなければ目標値を達成することができないと言える。

表 4 50m 以下の PL となる箇所数が全測位箇所数 (測位可能であった箇所に限る) に占める割合

単位 : %

		時不変平滑化	時変平滑化	KF 平滑化
往路	Front	61.9	71.0	71.7
	Rear	63.3	73.4	74.2
復路	Front	70.2	80.1	81.4
	Rear	68.6	80.2	81.5

6. まとめ

本研究では、GNSS 測位技術の高い安全性が要求される運転保安設備への応用に関する基礎研究として、航空分野で実績のある PL を列車位置検知に適用することを検討した。鉄道環境を考慮して PL を算出する手法を開発し、現車による実測で得た GNSS データを用い検証を行った。また、既存の列車制御システムにおける PL の目標値を定め、算出した値を評価した。

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 開発手法により得られた測位誤差の平均は、上位 95% 値で約 2 ~ 5 m となり、一般的に GNSS 測位環境が良好な箇所でのレベルと同等であると考えられる。
- (2) 算出した PL のうち、運転保安設備への適用にあたり定めた目標値を満たせるのは、測位環境が良好な箇所の算出値だけであった。
- (3) 上記 (1) および (2) より、測位環境が悪い箇所においては、本算出手法の適用は現状困難であり、鉄道環境におけるさらなる精度向上を検討する必要がある。
- (4) 特に、今回の算出で採用した危険側故障率は、航空分野で一般的に用いられる 2×10^{-7} /approach であるため、鉄道で要求される IEC61508 の SIL4 (1×10^{-9} /h) の値を採用した算出を行う必要がある。

今回得られた知見をもとに、GNSS 測位技術を使った鉄道分野への応用について、今後も検討を行っていく。

参考文献

- (1) 北村 光教, 吉原 貴之, 坂井 丈奏: 衛星型衛星航法補強システムによる鉄道環境下における衛星測位の補強, 第 63 回宇宙科学技術連合講演会, 2019