

リアルタイム列車位置の衛星測位精度向上技術の開発

[電] ○吉永 純 [電] 水間 毅 (交通安全環境研究所)

清野 憲二 (株式会社日立産機システム)、小椋 善春 (株式会社日立ケーイーシステムズ)

Development of Reliability Improvement Algorithm of Satellite Positioning
by Real-time Multipath Detecting

○Jun Yoshinaga, Takeshi Mizuma

(National Traffic Safety and Environment Laboratory)

Kenji Seino (Hitachi Industrial Equipment Systems Co., Ltd)

Yoshiharu Ogura (Hitachi Keiyo Engineering & Systems, Co., Ltd)

Reliability improvement is indispensable to use satellite positioning for railway position detection system.

This paper describes the algorithm that mitigates the multipath influence by pseudo range correction method etc. concerning railway vehicle position, and describes railway on-board running test results.

キーワード：衛星測位, マルチパス, 列車位置検知

Key Words : Satellite Positioning, multipath, Railway vehicle position detection

1. はじめに

GPSを用いた位置検知による列車制御が可能となれば、軌道回路等の固定設備が少ない低コストな運営が可能となると考えられる。しかし信号保安設備としての利用は世界的に見ても端緒についたばかりである。これは列車位置を確実に検知する性能が現状では担保されていない脆弱性が普及を妨げる一因と考えられる。

最近各社が開発を進めている地上設備を用いずに無線を使用して列車位置を把握する新たな信号システム開発においても、列車を確実に検知するために、さまざまな工夫や検証試験が行われている⁽¹⁾。現状の地上設備を用いた列車位置検知では、1m弱から駅間が分かる程度の数キロメートル単位のものまで必要な保安度に応じて作られているが、衛星測位のもつ脆弱性が解決されれば、通信機能等と組み合わせることにより、列車制御、走行履歴管理、速度監視、異常状況の通報などさまざまなITSサービスが可能となり、安全性向上、高度化に資すると考えられる⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。

本稿では、衛星測位が持つ脆弱性を克服するための技術開発の一つとして、移動体上に特有の現象である周辺の建物等の影響により位置精度が悪化するマルチパス現象について、移動体上でマルチパスによる測位精度悪化状況の発生を検知し、マルチパスの除去、さらには本来の衛星信号の推定を行うことで測位精度の向上を図るソフトウェアの

開発を行い、性能評価のための列車走行試験を行ったことから、その結果を報告する。

2. 衛星測位の信頼性についての対策

衛星と地上の移動体との間における誤差要因としては、電離層遅延誤差、対流圏遅延誤差、マルチパス誤差が知られている。

このうち、電離層遅延誤差、対流圏遅延誤差については、座標が既知の点で測位した測位結果から誤差を補正するためのデータを製作し、放送するサービスが電子航法研究所等により研究されており、補正が可能である。

他方、マルチパス誤差は、移動体周辺の建物等の反射等の影響による不正な信号の混入による局所的な現象であり、移動体においては刻々と変化するためにD-GPSのような2地点測位結果を利用する手法では除去は難しい。またランダムに発生することから、GPSに求められる精度を、求められる地点で発揮するためには解決手段が必要となる。カーナビゲーションシステムでは、移動体は多くの場合道路上にいるものと看做しマップマッチングを用いて補正する方法や、ジャイロを併用しGPSを補完する手法が一般に用いられている。

また、脆弱性をカバーするための方策について、速度発電機等との併用、列車前後へのGPSアンテナの設置等の対策も研究されている⁽⁵⁾。

3. 技術開発

3. 1 測位精度劣化衛星の判定手法

3. 1. 1 疑似距離の変化量

マルチパス誤差を減少させるためには、マルチパスを含む衛星信号を測位演算に利用しないことが有効と考えられることから、マルチパスによる測位精度劣化衛星を移動局において判定する技術が必要である。

GPS 衛星は、数分程度の短時間での地上からみた衛星の移動速度、すなわち疑似距離の変化はほぼ一定と考えられる。しかし、マルチパス発生時は図 1 に示す移動体上での試験結果に見られるように、疑似距離が大きく変化する現象が見られる。

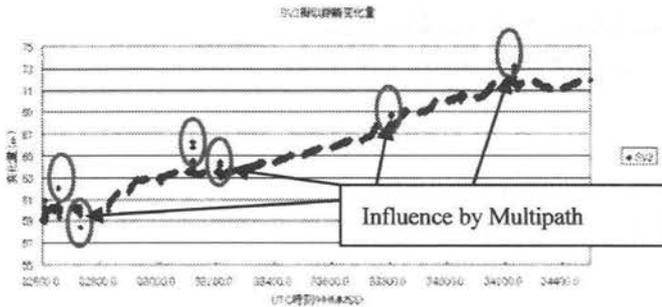


図 1 移動状態での疑似距離変化量の推移 (SV3)
Fig1. Change of Pseudorange of SV3 at moving point

3. 1. 2 判定方法

図 2 に、マルチパスの影響を受け測位精度が劣化している衛星を検出する概念を示す。疑似距離の単位時間当たりの変化量は、衛星高度により異なっていることから、直近の疑似距離の変化量の平均値を絶えず更新し、その値との比較を行うこととした。

平均値の取得間隔は、マルチパスによる短時間の変動に対応させるため、過去 5 エポック (データ取得周期 5Hz × 5 点 = 1 秒間) における平均を利用することとした。

以下にそれぞれの定義を示す。疑似距離の変化量が設定した閾値を超える場合にマルチパスの影響を受けている衛星と判定する。閾値は列車による走行試験結果への試行して適切な値を決めることとする (4.4 節に後述している)。疑似距離の変化量の平均値は、一定間隔毎に更新することで、マルチパスの影響区間を超えたことの検知も可能である⁽⁶⁾。

疑似距離の瞬時変化量 $D(x) = |Pd(x) - Pd(x-1)|$
 疑似距離の瞬時変化量の平均値 $d_n = \sum D(x) / n$
 (単に平均値、と呼ぶ)
 平均値を取得する時間範囲 $n = 5$ エポック
 疑似距離の変化量 $Pc(x) = |D(x) - d_n|$

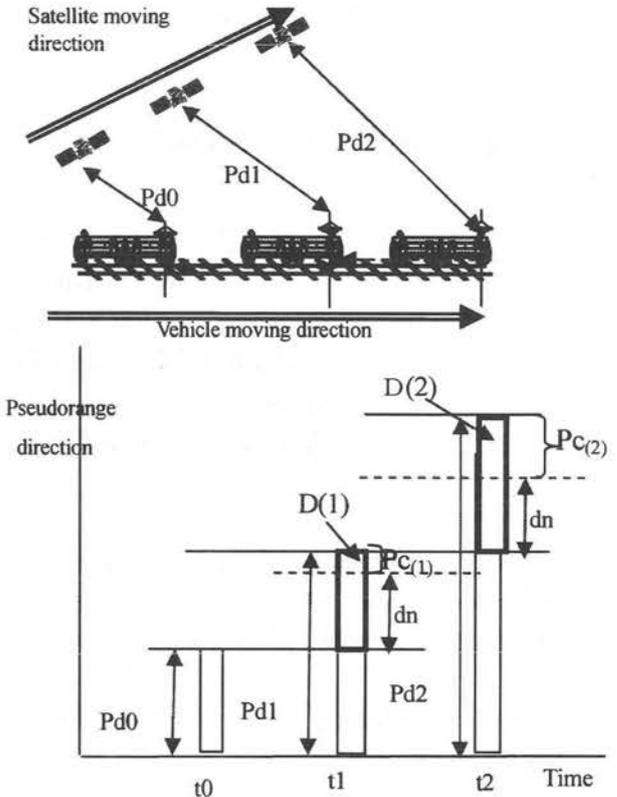


図 2 疑似距離の変化量の概念
Fig 2. Concept of the Change of Pseudorange

3. 2 衛星補間技術の開発

マルチパスを含む衛星は測位演算に用いられなくなるため、衛星数不足により測位不可能となる可能性がある。そのため、図 3 のように、急激な疑似距離の変化が見られる衛星については疑似距離の平均値を利用して移動体上において正しい疑似距離を推定し、測位演算を行う手法によるソフトウェア (マルチパス判定ソフトウェア) を開発した。同図では、pd2 の疑似距離については急激な変化が見られるものとして正しい疑似距離 Pd2' を (Pd1 + d_n) と考え、受信した C/A コードの書き換えを行うことを模式的に示している。

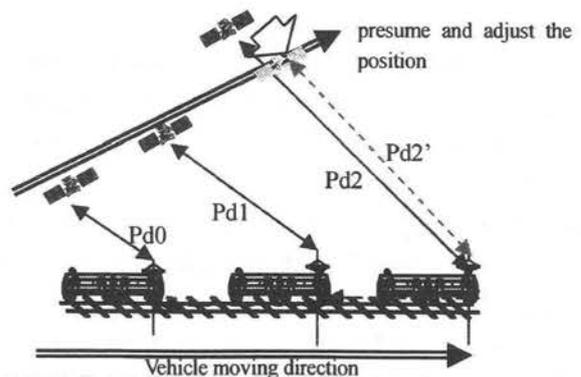


図 3 衛星補間方法の概念
Fig.3 Concept of adjustment of satellite position

4. 実証試験

4.1 試験の概要

都市部の鉄道事業者の協力を得て、線路周辺に建築物の多数存在する都市部の路線において、2007年12月6日及び7日に、試験区間(片道12.3km)往復する試験を行った。本稿では、解析を行った計3往復(6走行)について記述する。図4に列車屋根上に搭載したGPSアンテナ、図5にGPS受信機本体、図6に移動局上試験装置

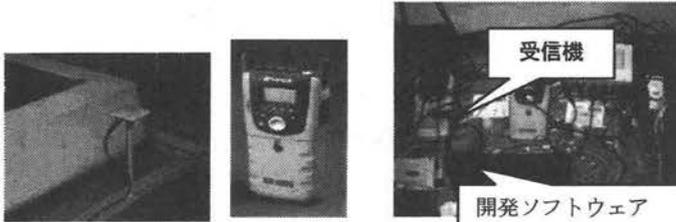


図4 GPSアンテナ 図5 受信機 図6 移動局上試験装置

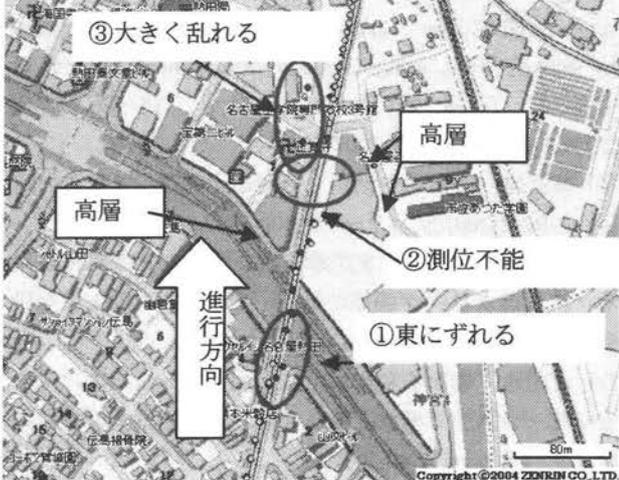
測位精度の検証方法については、比較用データ(線路位置情報)からの直線距離を算出し、下記項目の比較を行うことにより行った。また、目視しやすいように電子地図上へのプロットも行った。

- 平均誤差、-偏差値、-最大誤差値、-最小誤差値

4.2 衛星除去による測位精度向上結果

特にマルチパスの影響と思われる測位精度悪化箇所についての試験結果を述べる。なお、地図プロットについては、すべて削除前のデータによるDGPS測位演算した位置データは赤色(濃色)の点、マルチパス衛星を削除処理後の位置データは水色(淡色)の点として表示している。地図はすべて上方向が北であり、試験列車は南側から北側に向けて移動している。

図7は、高層の建築物に線路両側を囲まれている区間を走行した際の測位位置を示したものである。1秒間に5エポック取得を行っている。衛星配置状況は図8のように、天頂付近にSV3、SV19のみ、準天頂付近には、SV11、SV16、SV25が存在し、4~8個の衛星を捕捉しているが構造物の影響を受けやすい状況である。



(許諾番号Z08BD-第033号)

図7 衛星除去技術による試験結果
Fig.7 Test result by removal method

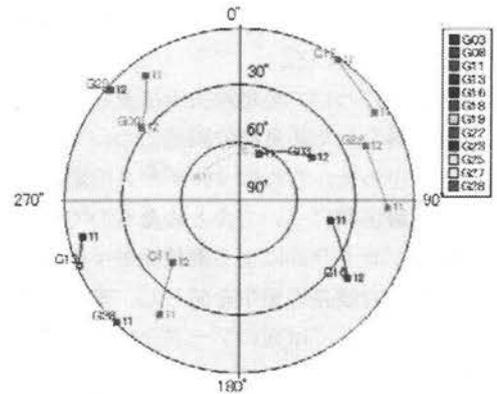


図8 GPS衛星配置状況(時刻11:00-12:00)

Fig.8 Location of GPS satellites

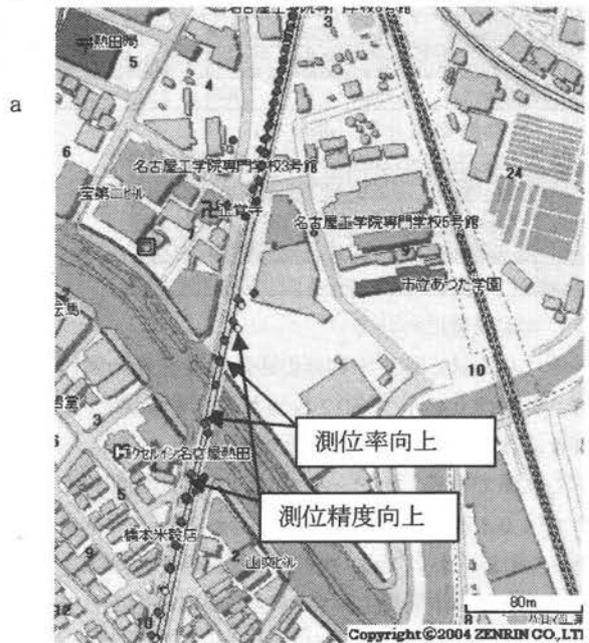
鉄道は高架であり、線路と交差する道路は線路の下側となっているため、衛星信号を遮蔽する主要なものとしては、線路周辺の建築物のみと言える。

図7中①、②の高層建築物の間を通過する地点では、測位不能点が発生しており、その直後には大きく測位精度が悪化し迷走する現象まで見られる。

マルチパス判定ソフトウェアによる処理後においては、測位率では数点欠落し悪化しているものの測位精度としては改善し、大きく逸れる箇所が無くなり安定しており、改善効果がみられる。

4.3 衛星補間技術による測位精度向上試験結果

次に、図7に示した場所について、衛星補間技術を適用した結果を図8に示す。桃色のプロット(図7と比較し増加している各点)が、補間した結果である。



(許諾番号Z08BD-第033号)

図8 衛星補間技術による試験結果
Fig.8 Test result by adjustment method

上図では左上から下にX字型に道路と交差している箇所

付近を中心に、測位率が改善している。測位精度も高層の建物付近で向上している。

試験区間全体について衛星除去手法及び衛星補間技術を適用した結果得られた衛星測位誤差については表1及び表2のとおりとなった。これはマルチパスの影響の無い箇所も含めた全試験区間についてまとめたものである。マルチパス判定除去プログラムによる衛星除去手法では、図7では見られた大きな誤差の発生を減らし、安定化させる効果はあるが、全体としては元のデータと比較して測位精度が悪化し測位率も低下している。

衛星補間技術については、測位精度の改善効果は高くすぐれた手法であることがわかる。ただし測位率については当初期待した測位率低下防止効果はまったく見られなかった。原因としては、衛星信号のうちC/Aコードの疑似距離の推定・補完のみ実施しており、他のC/A(ドップラー、キャリアフェイズ)の補完は実施していないため、DGPS演算部が有効に演算出力できないケースが存在したためと推測される。

表1 試験結果まとめ(測位精度)

Table 1. Test result of position accuracy [m]

Test No.	1	2	3	4	5	6
Average Original	2.580	2.663	2.817	2.630	2.072	2.790
# Remove	3.108	2.265	2.323	2.578	2.589	2.813
# Adjust	2.060	1.867	2.225	2.618	2.294	1.982
Maximum Original	119.658	22.146	100.909	212.536	25.121	107.391
# Remove	13.891	12.583	17.424	20.528	17.082	32.875
# Adjust	19.040	14.228	23.193	17.930	16.115	17.329
Minimum Original	0.052	0.075	0.002	0.056	0.033	0.006
# Remove	0.047	0.079	0.039	0.004	0.085	0.569
# Adjust	0.098	0.028	0.015	0.001	0.065	0.021
Standard Deviation Original	3.968	2.242	4.588	5.0964	2.601	3.969
# Remove	3.027	1.788	2.990	2.598	2.470	2.186
# Adjust	2.924	1.725	2.841	2.920	2.314	1.646

表2 試験結果まとめ(測位率)

Table 2. Test result of Location fixation rate [m]

Test No.	1206	1206	21206	31206	41207	1207	2
Original	97.434	98.036	97.157	96.313	93.858	96.410	
Remove	95.665	94.415	94.965	92.120	90.304	95.060	
Adjustment	94.304	94.954	94.309	91.023	90.034	95.070	

4. 4 判定閾値について

マルチパス衛星と判定する疑似距離の変化量の閾値については、今回は0.45m(※0.2秒当たり)を設定した。4.2及び4.3節の結果はこの値による。

今回の試験で取得したデータでは、比較的低仰角な衛星については0.4程度が適切な値と見られるが、中仰角(60度付近)の衛星においては、0.4とした場合には削除される衛星が多く、その結果測位率が80%程度まで低下してしまうため、もっとも結果の良かった0.45mとした。

ただし、極めて低仰角の衛星(地平線近く)については、疑似距離の変化が大きいため、設定した閾値に0.3を上積みする機能を作成し、判定精度向上を図った。

5. まとめ

衛星測位精度の向上のため、移動体上においてマルチパスを含んだ衛星を判定する手法として、疑似距離の変化量を利用する技術を開発し、マルチパス判定ソフトウェアを製作した。また、疑似距離の変化量から本来の衛星信号を推定する衛星補間技術を開発した。

これら技術の機能を実際に実証するために列車走行試験を実施した。列車上及び設置した基準局においては衛星測位データを取得し、検証を行った。

マルチパス判定ソフトウェアによる衛星除去による測位精度の向上効果は、元のデータより悪化するケースもみられたが、著しい位置の乱れを生じていた区間に対しては誤差を補正し安定させる顕著な効果がみられ、全体を通しては安定的な測位精度が得られることを確認した。

測位率については全体としては低下する傾向を示したが、測位精度の向上効果とはトレードオフ関係とならずほとんど低下しないことを確認できた。

衛星補間技術については、衛星除去手法と比較し、測位精度の改善効果が高いことを確認することができた。マルチパスによる誤差の除去を行うためには十分な効果があるものとする。

6. 課題

衛星補間技術による場合であっても、受信機内部での測位演算結果が出力されないケースがみられ、残念ながら元のデータと比較して、全体的には測位率が低下する結果となっている。

また、GPS受信機の機種の違いにより、判定に用いるべき閾値は今回用いた値と異なっている可能性がある。より合理的な閾値の定め方についても今後検討する必要がある。

参考文献

- (1) 八木他, Control System by Radio Ranging Technology and Safety-Fundamental Ideas of CBTC moving block train control system, 電子情報通信学会 信頼性研究会, SSS2007-24, pp21-2, 2007.10
- (2) 水間他, The Study of Railroad crossing accident preventive device using Location management function of GPS, 電子情報通信学会 DC研究会, DC2007-64, pp25-28, 2007.12
- (3) 梶原他, 「GPSを活用した運転士支援システムの開発」, J-RAIL2007, S7-4-1, pp397-400, 2007.12
- (4) 吉永他, 「運転状況記録装置を利用した列車運転異常状況モニタリング機能の検討(第一報)」, 電気学会研究会資料, TER-07-24LD-07-20, pp8-9, 2007.7
- (5) 水間他, 「衛星を利用した鉄道用保安システムに関する研究—システム構成と簡易実験—」, 交通安全環境研究所フォーラム, pp37-40, 2007.11
- (6) 吉永他, 「リアルタイムでのマルチパス検出技術を用いた衛星測位の信頼性向上技術の開発」, 電気学会研究会資料, TER-08-45ITS-08-28, 2008.11