

三次元線路マップを利用した衛星測位による列車位置計測

山本 春生* 菅原 宏之**
高須 知二*** 久保 信明***

Satellite based Train Positioning Using Three-Dimensional Track Map

Haruo YAMAMOTO Hiroyuki SUGAHARA
Tomoji TAKASU Nobuaki KUBO

In order to apply the satellite positioning to train control, an algorithm of the positioning with the one-dimensional constraint condition using line coordinate data and the multipath error reduction using the default value, the different physical phenomenon, and the satellite redundancy was developed. The positioning performance was evaluated using the positioning satellite observational data acquired on operating lines, and as a result, it was confirmed that large errors were reduced and degradations of the positioning rate which were the side effect of the error reduction were also few. In addition, the algorithm was ported to the embedded system and it was confirmed that 10 Hz real-time positioning could be performed.

キーワード：運転保安，列車位置検出，衛星測位，マルチパス誤差，準天頂衛星システム

1. はじめに

近年，路線上の位置を列車自身が検出するとともに，ICTを活用して列車運行の安全確保の方法を根本から変える無線式列車制御システムが導入されつつある。これらのシステムでは，列車位置検出のために地上子を設置しており，安全の要となる列車位置を，例えば，1km間隔で設置された地上子のIDおよび2軸の車輪回転による積算距離を路線情報と対応付ける等，複数のセンサ・手法を組み合わせて連続的に検出する。地上側で列車を検出する設備は基本的に不要であるが，車輪の空転・滑走および誤差の蓄積を考慮すると，地上子の削減は困難である。しかし，この地上子による地点検知を，今後発展の見込まれる衛星測位に置き換えることができれば，地上設備の削減をより一層進めることができる。衛星測位は，近い将来世界の複数システム（GPS（米），GLONASS（露），Galileo（欧）など）が利用可能なマルチGNSS（Global Navigation Satellite System）の時代となり，さらに我が国では，2018年から準天頂衛星システム（QZSS；Quasi-Zenith Satellite System）が利用できるように，測位可能領域の拡大と測位の信頼性，精度の改善が見込まれる。しかし，地上子を利用する場合は地点検知誤差が小さく，その量も検出範囲の拡がりおよび検出遅延から推定できるのに対して，衛星測位を利用する場合は様々な要因，特にマルチパス（衛星からの電

波が反射・回折して複数の伝搬経路から受信される現象）の影響により誤差が拡大することがあり，その量の推定も容易ではない。信頼できる誤差を推定できないと，列車を安全に制御できない。

以上のような背景から，筆者らは，衛星測位を列車保安制御に適用することを目標として，沿線の地形，建物等のほか，鉄道自身の近接した構造物，設備による衛星電波の反射，散乱，回折，遮蔽が避けられない中で，一定以上の測位のクオリティを維持できるように，鉄道環境での運用に耐え，かつ信頼性の高い新しい測位手法の開発に共同で取り組んでいる。本稿では，開発中のシステムの概要，検証実験および組込みシステム実装の結果，安全に制御するために必要な機能の検討状況について述べる。なお，本研究における準天頂衛星システムの適用性評価はJAXAとの共同研究により実施し，実験ではJAXAの機材を使用している。

2. 開発システムの概要

2.1 構成

列車保安制御システムは高い安全性が要求されるため，その制御装置には2つのCPUの処理をクロックレベルで比較して正当性をチェックする等，安全性に配慮したハードウェア（保安処理装置）等が用いられる。実装するソフトウェアのテストも厳重に行われる。このような背景から，従来はGNSS受信機内でブラックボックスとなっていた測位計算機能を保安処理装置へ実装することとし，受信系を二重化して鉄道環境での運用に耐

* 信号・情報技術研究部
** 信号・情報技術研究部 列車制御研究室
*** 東京海洋大学 大学院海洋科学技術研究所

特集：信号通信技術

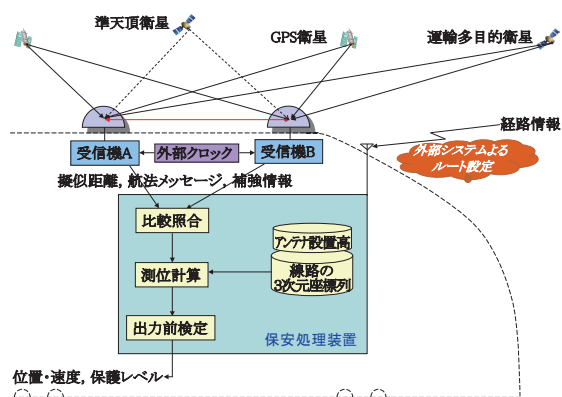


図1 機能ブロック

え、かつ信頼性を高める測位手法を開発している（図1）。本手法の特徴は以下の4点であり、2.2から2.5でそれらの概要を述べる。

- ・ 三次元線路マップを利用する一次元拘束条件付き測位
- ・ アンテナ、受信機およびアルゴリズムによるマルチパス誤差低減
- ・ 残存誤差を考慮し線路前後方向の最大測位誤差を推定する保護レベル計算
- ・ 干渉測位によるシステム立ち上げ時の在線線路判定

2.2 一次元拘束条件付き測位

「列車は路線上の指定された走行許可区間を走る」という特性を利用し、三次元線路マップによる一次元拘束条件付き測位を行う。列車は線路の連続する座標を直線で結んだ軌跡上に必ず存在するため、①どの座標間に存在するか（区間検索）、②その座標からどの程度離れているか（一次元拘束条件付き測位）、が分かれば列車の位置を特定できる。

(1) 三次元線路マップ

線路の軌道中心線の三次元座標列データおよび曲線に関する属性情報が必要である。座標列データは測量等により作成するが、鉄道事業者が近年構築しつつある電子線路平面図データも利用できる。座標間隔は、直線区間で数十m、曲線区間では座標間を直線補間した際の線路延長および弦の中央における乖離を抑制するため数m以下が一般的と考えられる。なお、測位には、軌道中心座標列と属性情報をもとに、屋根上アンテナの軌跡を曲線区間における車両の傾き等も考慮して求めた推定アンテナ軌跡座標列を用いる。

(2) 区間検索方法

測位演算を効率化するため、推定アンテナ軌跡座標列のどの座標間に位置するか事前に検索する。衛星から各アンテナ軌跡座標までの距離と観測値を比べ、最も残差の小さい座標が観測点に近いと予想される。衛星位置とアンテナ軌跡座標は既知、擬似距離（伝搬時間の差から測定した時計の誤差を含む仮の距離）の誤差項である衛星クロック誤差、電離層遅延、対流圏遅延は予測可能であるが、受信機クロック誤差は予測できないため、衛星

間1重差を利用してこれを消去する。検索したアンテナ軌跡座標の前後2区間ずつを選定する。

(3) 一次元拘束条件付き測位手法

前項で検索した座標間において、一次元拘束条件付き測位を行う。拘束条件は、列車のアンテナが座標間の線分上にのみ存在することである。

図2より列車のアンテナ位置を R 、座標点を r_i 、 r_{i+1} からの距離を d 、単位ベクトルを e_i とすると、 R は

$$R = r_i + de_i$$

と表せるので、 d と受信機クロック誤差を最小二乗法で推定することによって測位を行う。これにより、原理的には2衛星での測位が可能である。

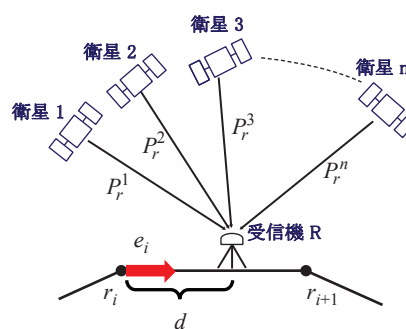


図2 拘束条件下での列車の関係図

2.3 マルチパス誤差低減

マルチパス波の影響を低減可能なアンテナと受信機を用いる。低減しきれずマルチパス波の影響を受けた観測データについては、以下の方針に基づき保安処理装置のアルゴリズムによって棄却する。

- ①マルチパス波の影響を受けた衛星の観測データは、各種検定によって測位計算を行う前に極力排除する。
- ②前項で排除しきれなかったものは、測位計算の過程で検出、排除する。
- ③影響が避けられなかった測位解を検定により排除する。

以下に、保安処理装置のアルゴリズムによるマルチパス誤差低減手法を示す。

(1) 信号強度が低下した衛星の棄却

衛星から送信された電波が周辺の地形、構造物、設備等で反射、回折すると信号対雑音比（SNR; signal-to-noise ratio）が低下するため、SNRに閾値を設けて一定値以下の低品質な信号を排除する。但し、低仰角衛星はSNRが低く変動幅も大きいため、高仰角衛星に合わせて閾値を高く設定すると、マルチパスの影響を受けていない低仰角の衛星まで棄却され、アベイラビリティが低下する。そのため、低仰角衛星に対して閾値を下げられるように、仰角別に閾値を設定するものとした。

なお、SNRは、仰角特性がアンテナ依存、計測方法自体が受信機依存のため、使用するアンテナ・受信機の組み合わせにより大きく異なる。そのため、使用するア

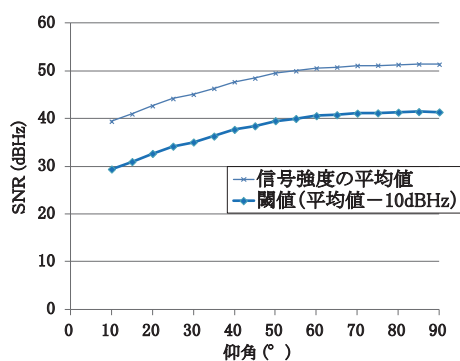


図3 SNRの仰角特性および閾値

ンテナ・受信機により、予めオープンスカイの静止点で一日程度実際に計測し、仰角別のSNR平均値を求め、測位精度とアベイラビリティが両立するようにより低いところに閾値を定める(図3)。

本手法により、測位計算を行う前に劣化した信号だけを排除できるため、測位率の低下を抑制しつつ測位誤差を低減することができる。

(2) 搬送波の信号ドップラ周波数による擬似距離の検定
異なる物理現象の計測値を利用する。エポック(観測データの取得間隔)が短時間であれば、この間の衛星と列車の移動は等速直線運動と見なせるため、「両観測時のドップラシフトの平均×エポック×波長」は視線方向の移動量となり、擬似距離変化量とほぼ一致する(図4)。ドップラ周波数は擬似距離よりもマルチパスの影響を受け難いため、この差を検査すれば擬似距離におけるマルチパスの影響の有無を判定できる。

所内試験線において検定性能を確認したところ、閾値を1.5mとしても測位率の低下は僅かであったことから、マルチパスが多い環境において1.5m以上の擬似距離異常を排除できる可能性がある。

本検定により、測位計算を行う前にマルチパス波の影響を受けた衛星観測データだけを排除できるため、測位率の低下を抑制しつつ測位誤差を低減することができる。

(3) アンテナ設置間隔に基づく擬似距離の検定

2つのアンテナで観測した同一衛星の擬似距離の差が、アンテナ設置位置の違いに見合うかどうか検査する。理想的な擬似距離差は、アンテナ設置間隔と対象衛星の仰角および車体との方位差から定まる(図5)。2つのアンテナで観測した対象衛星の擬似距離の差がこれと一致しない場

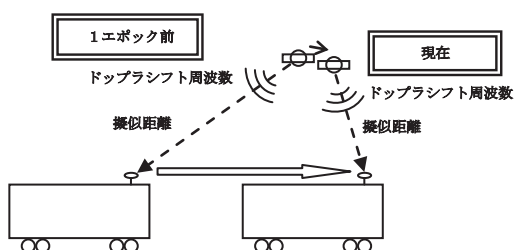


図4 擬似距離と搬送波の信号ドップラ周波数の変化

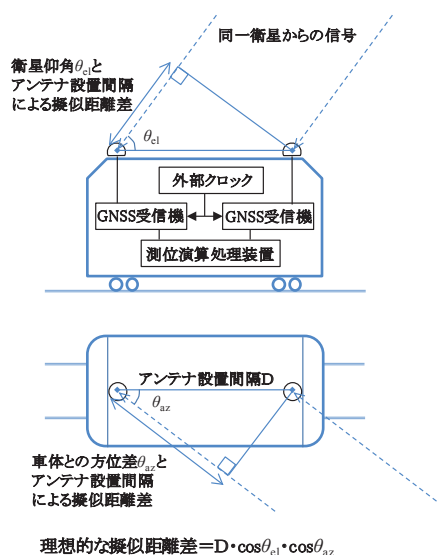


図5 衛星とアンテナの位置関係により生ずる擬似距離の差

合、擬似距離観測値にマルチパス誤差が含まれていると判断し、棄却することができる。実際には、線路の勾配、車体の動揺、三次元線路マップの誤差により、取り付ける車体とアンテナ設置間隔にもよるが、衛星仰角 θ_{cl} について $\pm 3^\circ$ 、車体との方位差 θ_{az} について $\pm 3.5^\circ$ 程度の誤差を見込む必要があると考えられ、アンテナ設置間隔が18.2mの場合、約1.1m以下のマルチパス誤差は検出できない。

なお、本検定を実施するには、2台の受信機のクロックバイアスを一致させるため、共通の外部クロック(基準周波数信号)および、外部クロック入力、1秒パルス信号入力に対応した受信機が必要である。

本検定により、測位計算を行う前にマルチパス波の影響を受けた衛星観測データだけを排除できるため、測位率の低下を抑制しつつ測位誤差を低減することができる。

(4) 冗長な衛星を利用した信号の完全性の監視・判断

測位計算の過程で、冗長な衛星を利用して擬似距離の整合性を検査し、整合しない衛星を切り離す(RAIM; Receiver Autonomous Integrity Monitoring)。GPSで稀に発生する異常データ(衛星系のシステムの異常、電離層の異常)を検出、排除して信頼性を確保するための機能であり、本来の目的はマルチパス対策ではないが、大きなマルチパス誤差を排除することもできる。

RAIMはアベイラビリティの観点から1衛星排除が一般的であるが、本開発では、以下の理由から処理時間も考慮して2衛星まで排除可能とした。

- ・過去の営業路線観測データによる検証では、1衛星を排除してもなおFD(Fault Detection:故障探知)による棄却が発生
- ・次元拘束条件付き測位は通常より少ない衛星数で測位可能なため、アベイラビリティ面の課題が緩和
- ・今後マルチGNSSになれば、アベイラビリティ低下

特集：信号通信技術

の懸念は不要

また、閾値以上の誤差が認められる衛星のみ排除するアルゴリズムとした。本検定では、現実的には異常衛星を排除できれば良く、1衛星の異常を仮定した場合、擬似距離残差が他の衛星の残差よりも1～2桁大きいケースがほとんどと考えられるため、100m程度の閾値を設定すれば十分である。

(5) 2つの測位解とアンテナ設置間隔の照合

本手法は、測位計算によって得られた2つの独立した測位解の相対距離を既知のアンテナ設置間隔と照合し、測位解（座標）の妥当性を検査するものである。2つの測位解が揃う必要があるため測位率は低下するものの、誤差の大きな測位解の排除が可能である。

2.4 保護レベル計算

2.2および2.3の測位機能を実装した列車保安制御システムが、常に測位誤差を上回る余裕距離を設定して安全制御できるように、測位誤差の推定（保護レベル計算）を行う必要がある。我が国では、SBAS (Satellite Based Augmentation System) 規格に準拠したMSAS (MTSAT Satellite-based Augmentation System) が整備され、そのサービスエリアは日本全土をカバーしているため、MSASの利用を前提として保護レベルを計算するものとした。従って、GPS信号およびMSASのディファレンシャル補正情報に基づいて列車の位置を計算し、同時にMSASのインテグリティ情報（GPSの不具合情報、補正後に残る可能性のある誤差の最大値）に基づき、真の位置と計算による位置の差（誤差）が最大でどの程度になる可能性があるかを推定する。しかし、鉄道環境ではマルチパスが多発し、前節の手法によりその影響を低減することから、航空機の方法をそのまま適用することはできない。基本的には、SBAS対応受信機の満たすべき性能等が記述されたRTCA/DO-229Dに準拠するが、以下の3点を変更するものとした。

- ・ 鉄道環境におけるマルチパス誤差低減後の誤差モデルを使用
- ・ 認証されたSBAS受信機を使用しないため受信機ノイズの誤差モデルを変更
- ・ 測位解が線路上にのみ得られるため線路前後方向の保護レベルとして計算

RTCA/DO-229Dへの準拠を基本とする場合、測位システムの危険率は $1 \times 10^{-7}/h$ 以下がベースとなる。但し、基準ではSBAS利用時にRAIMを機能させないのに対し、開発手法では常時併用するため、RAIMにおける許容可能な誤警報および検出見逃し確率を適切に設定することにより、RAIM・MSAS複合による危険率の引き下げが可能と考えられる。列車保安制御のための車上位位置検出機能としては、GNSS以外のセンサ、外部システムと組み合わせることで、鉄道信号の要求 $1 \times 10^{-9} \sim 10^{-10}/h$ 以下の実現を目指す。

保護レベル計算については、開発方針および手順を定めた段階であり、誤差モデルの構築手順については後述する。

2.5 在線線路判定

列車は、外部システム（進路制御機能）から、ポイントの転換方向が反映された進路情報等を受けてから走行する。一次元拘束条件付き測位は、この性質を利用して、停止限界点に至る線路が1本に定まっていることを前提としている。しかし、外部システムが必要とする当該列車の現在位置を知る手段もまた車上における測位である。このようなシステムでは、最初（運転区所等におけるシステムの立ち上げ、本線上における異常時の再立ち上げ）にどの線路に在線しているか判別する機能が必要になる。在線線路判定は、これを車両自身で行おうとするものである。

在来線の線間距離は最小3.6mである。信頼性の高い判定を行うには、基本的には通常のコード測位における水平保護レベルが1.8m以下で得られなければならないが、MSASの現状からこれだけの性能は期待できない。一方、干渉測位によればcm級の測位精度は得られるが、搬送波の位相を観測するため $2n\pi$ (n は整数)の不確実性があり、信頼性は低い。しかし、この判定は、走行中ではなく停止中に、しかも、瞬時ではなく時間を掛けて行うことができる。また、干渉測位の信頼性の課題は、様々な制約条件に基づく検定を重ねることによって解決できる可能性がある。

在線線路判定については、開発方針を定めた段階であり、今後、リアルタイムキネマティック測位の可能性を確認するため、鉄道環境における基本的な性能を確認する。

3. 試験線における検証実験

2.2および2.3で述べた測位機能を実装した評価システムを開発し、鉄道総研の所内試験線において検証実験を行った。

3.1 データ整備

(1) 推定アンテナ軌跡座標列

所内試験線の三次元線路マップは、GPS測量によって求めた基準点座標とトータルステーションによる細部測量および線路の線形情報等のデータをもとに作成した。このマップデータに基づいて、アンテナ軌跡座標列を推定した。この推定では、測定車両の2つの台車中心が軌道中心線上にあるとして、2つの台車位置におけるカント量による測定車両の傾きを考慮して、屋根上アンテナの台車中心からの乖離（水平距離）およびレール踏頂面からの高さに基づいて、軌道中心線に対応するアンテナ軌跡を求めている。作成した推定アンテナ軌跡座標列の概要を図6、表1に示す。なお、測位計算において扱う高さは楕円体高であるため、国土地理院刊行の「数

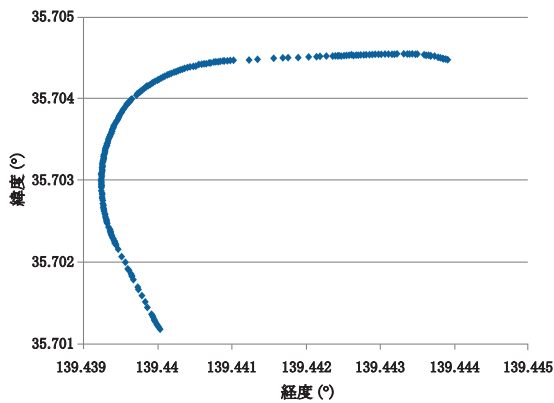


図6 所内試験線の推定アンテナ軌跡座標列

表1 所内試験線の推定アンテナ軌跡座標列の概要

延長		約 756m
座標数		189
座標間隔	曲線区間	2 ~ 3m
	直線区間	最長約 20m

値データ 2km メッシュ (ジオイド高)」により各軌道中心線座標におけるジオイド高を求め、標高に加算した。

(2) レファレンス位置

測位精度を検証するため、同時刻の干渉測位結果のうち精度が良いものをアンテナ軌跡上にマッチングさせ、レファレンス位置として使用した。干渉測位結果が得られない時刻は、車軸パルスに基づく走行距離によって補間した。

3.2 一次元拘束条件付き測位手法の検証実験

静止状態において、区間検索能力、2 衛星時・3 衛星時の測位性能を調査した。一次元拘束条件付き測位手法では、理論上 2 衛星での測位が可能である。しかし、実験の結果、急曲線により短距離で線路の方位が大幅に変わる線形では、区間検索を誤る可能性が明らかになった。よって、現段階での 2 衛星測位は行わないこととした。

また、表 2 の実験条件により、2 往復走行した際の測位精度を調査した。その結果、水平位置誤差が、単独測位よりも減少することを確認した (図 7)。

3.3 準天頂衛星システムの利用実験

開発システムにおいて QZSS の期待できる効果は以下の 3 点である。

- ・レンジング機能による天頂付近に測位衛星が 1 機増える効果 (測位精度, 測位率の改善)
- ・L1-SAIF (L1 Submeter-class Augmentation with Integrity Function) 補強信号による広域 DGPS 補正効果 (測位精度の改善) (但し、補正情報に QZS 自身が含まれていないため、対象衛星は GPS のみ)
- ・遮断されることが少ない天頂付近からの L1-SAIF 補強信号受信による広域 DGPS 補正および信頼度推定

表 2 実験環境

計測時間 (GPS 時)	2010/8/19 05:14:30 ~ 05:27:04
間隔	0.2s
受信機	FURUNO GW-10 II
アンテナ	NovAtel GPS702
レファレンス用受信機	NovAtel OEM IV (移動局/基準局とも)

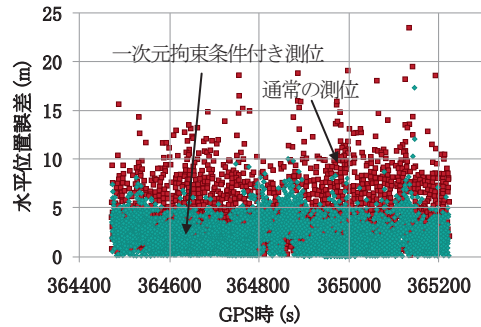


図7 水平位置誤差の時間変化 (仰角マスク 30°)

のアベイラビリティ向上

これらの適用効果を検証するため、表 3 の条件により実験を実施した。QZS の仰角は、評価対象走行試番を通して 80 ~ 88° と好条件であった。

評価では、以下の条件により、測位精度と測位率を確認した。

- ・仰角マスク： 20°
- ・検定機能『2 つの測位解とアンテナ設置間隔の照合』の閾値： ± 5m

なお、一次元拘束条件付き測位手法における測位誤差は、線路方向の前方/後方にしか発生しない。誤差の出方は場所や方向に支配されると考えられるため、線路の方向について+/-を定義して整理した。

表 4 に、レファレンス位置データを整備できた全試番についての測位率、測位精度の集計結果を示す。また、一例として、上り走行時における GPS のみの場合、GPS + QZS の場合、L1-SAIF による DGPS の場合の測位誤差の変動を示す (図 8, 対応する線路位置および走行時の衛星配置を併記)。表 4, 図 8 に示すように、レンジング機能による天頂付近に測位衛星が 1 機増える効果については、解析した範囲では殆ど認められなかった。L1-

表 3 実験環境

計測時間 (UTC)	2011/12/06 01:27:00 ~ 07:16:30 2011/12/07 01:10:00 ~ 07:05:30 2011/12/08 00:54:30 ~ 06:56:00 2011/12/12 01:00:00 ~ 05:19:00
間隔	0.1s
受信機	JAVAD Delta-G3T 2 台
アンテナ	JAVAD GrANT-G3 2 台
アンテナ間隔	18.14m
レファレンス位置 用基準局	移動局と同一 (受信機: JAVAD Delta-G3T, アンテナ: JAVAD GrANT-G3)

特集：信号通信技術

表4 測位率および測位精度

	測位率 (%)	平均 (m)	標準偏差 (m)
GPSのみ	99.09	+2.14	1.98
GPS+QZS	99.15	+1.97	1.99
L1-SAIFによるDGPS	96.41	+0.88	1.83

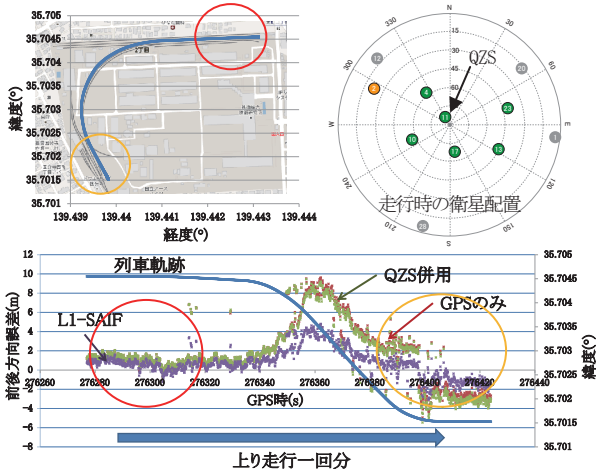


図8 測位誤差の変動の一例

SAIF 補強信号による広域 DGPS 補正効果については、測位率が低下するものの測位精度は改善されることが判った。但し、L1-SAIF 利用時に 6 機の衛星を捕捉していながら 3 機を棄却する等、測位に用いる衛星数が減少することも確認できた。補正データが全可視衛星分揃っておらず、補正データがない衛星が測位に使われなかったものと予想される。補正データが可視衛星をカバーすれば、測位率と測位精度がさらに向上すると考えられる。

4. 営業路線における観測データの取得

以下の 3 点を目的として、営業路線において実環境データを取得した。

- ・ 一次元拘束条件付き測位および各種マルチパス誤差低減手法の性能確認
- ・ 開発手法における QZSS 適用効果の検証
- ・ 保護レベル計算機能の開発および在線線路判定手法の検討に資するデータ取得

4.1 データ取得

(1) 測定区間

JR 西日本の協力を得て、在来線技術試験車 U@tech を使用し、JR 京都駅から四方へ延びる 4 路線計 171km で観測データを収集した。測位環境としては、ビルの谷間のような箇所を含む都市部、郊外の上空が開けた平野部から山間部まで多様である。いずれも直流 1,500V の電化区間であるため、線路上空に架線が切れ目なく存在し、これを支持するピームと架線柱がほぼ一定間隔で存在する。トンネルも一部に存在する。測定は 2012 年 12 月から 2013 年 2

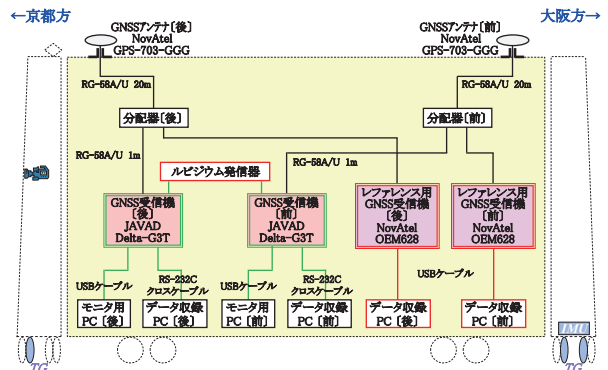


図9 移動局の機材構成 (試験走行時間帯)

表5 実験環境

測定区間	試験走行時間帯：0.1s, 留置中：1s
受信機	JAVAD Delta-G3T 2台
アンテナ	NovAtel GPS-703-GGG 2台
アンテナ間隔	18.21m
ルビジウム発信器	Stanford Research Systems FS725
レファレンス位置用移動局	受信機：NovAtel OEM628 2台
レファレンス位置用基準局 (1箇所)	受信機：JAVAD Delta-G3T アンテナ：JAVAD GrANT-G3

月にかけて実施し、走行距離は延べ 2,000km に及んだ。

(2) 測定機材と配置

試験走行時間帯のほか、運転区所で留置中の観測データも収集した (図 9, 表 5)。機材の構成と実験環境を図 9, 表 5 に示す。

(3) 提供を受けたデータ

①電子基準点 1Hz データ

レファレンス位置用基準局データとして、国土地理院およびジェノバから、移動局で観測データを収集した時間帯の沿線 11 箇所のデータ提供を受けた。

②電子線路平面図データ

本線の線路については、JR 西日本が GIS として電子線路平面図を整備している。軌道中心線は三次元の座標列であり、その精度は以下の通りである。

- ・ 500 分の 1 のオルソ航空写真 (10cm/pixel) から座標を得ているため、平面誤差は 30cm, 高さ方向の誤差はその 2 倍程度
- ・ 曲線区間の座標間隔を 8m 以下とすることで、座標間を直線補間する際の弦の中央における乖離を 30cm 以下に維持本測定に際して、ジェイアール西日本コンサルタンツより、試験車が走行した線路の軌道中心座標列に曲線諸元を関連付けたデータの提供を受けた。

4.2 データ整備

(1) 推定アンテナ軌跡座標列

提供された線路データを各測定試番の走行ルート別に繋ぎ合わせ、その線路上を測定車両が走行する際のアンテナ

ナ軌跡を推定した。軌道中心線座標へのジオイド高の加算、アンテナ軌跡座標列の推定方法は、3.1 (1) の通りである。

電子線路平面図データが整備されていない運転区所構内と出入区線のアンテナ軌跡座標列は、干渉測位結果のうち精度が良いものから作成した。

(2) レファレンス位置

同時刻の干渉測位結果のうち精度が良いものをアンテナ軌跡上にマッチングさせ、レファレンス位置として使用した。干渉測位結果が得られない時刻は、前後2系統のGNSSドップラ速度、同時計測した1軸分の車軸パルス、慣性センサ2台分の前後方向加速度に基づく走行距離により補間した。

5. 測位アルゴリズムの性能評価

一次元拘束条件付き測位手法とマルチパス誤差低減手法による測位性能を確認するため、表6に示す条件により測位精度と測位率について評価した。なお、測位誤差は、3.3と同様に線路の前後方向について+/-を定義(終点側を+/起点側を-)して整理し、比較用に求めた通常の測位手法による測位解についても、マップマッチングが行われるものとして推定アンテナ軌跡上の最近傍点における前後方向の誤差のみを求めて比較した。

観測データは、準天頂衛星が日中高仰角に位置していた2012年12月走行分のうち、営業路線3線区のそれぞれ走行距離が長い試番、および営業路線に沿った約0.9kmの吹田総合車両所構内試験線の1日分を評価対象とした。これは、全取得データの24%にあたる100240データ、走行距離145.2km分である。

図10にMSAS利用時のトンネルがない区間の前後方向誤差の変動の一例を、図11に評価対象データ全体の前後方向誤差の範囲を示す。一次元拘束条件付き測位+各種検定により、誤差は若干拡大するが、大きな誤差を抑制できることがわかる。本開発手法が利用したいMSASによる広域DGPS補正時は、最大誤差を65.8mから10.2mに抑制できた。但し、準天頂衛星を併用した場合(+QZS)に約66mの誤差が残存したため、引き続き改良が必要である。

また、図10と同じトンネルがない線区の測位率を確認した。通常の測位の86.7%に対して一次元拘束条件付き測位+各種検定は84.6%と僅かな低下にとどまり、最大誤

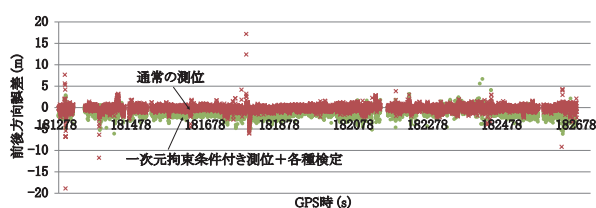


図10 前後方向誤差の一例 (MSAS 利用時)

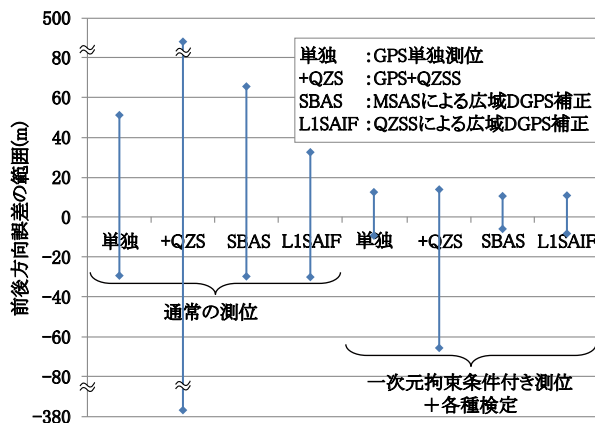


図11 評価対象全体の前後方向誤差の範囲

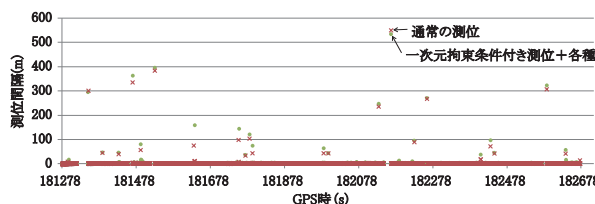


図12 測位間隔の一例 (MSAS 利用時)

差抑制効果の副作用は抑えられている。実際の利用場面では、測位率よりも測位間隔(測位地点の間隔)が重要となるが、最大測位間隔が伸びることも殆どなかった(図12)。

6. 組み込みシステム実装

測位機能は、列車制御システムの車上装置として保安処理装置への実装を想定しているため、組み込みシステム実装が容易で組み込み用途のCPUでも実時間動作が可能であることを示す必要がある。そこで、評価システムの測位機能の組み込みシステムへの移植を試み、試験により処理時間を計測した。なお、本試験で用いた受信機(NovAtel OEMStar)は外部クロック入力および1PPS信号入力に対応していないため、『アンテナ設置間隔に基づく擬似距離の検定』は機能させていない。ター

ゲットシステムは、SH-4A SH7764(動作周波数 最大324MHz)を搭載した汎用CPUボードで、リアルタイムOSはTOPPERS/ASPカーネルを使用した。

移植に際して、以下の5点の変更が必要となった。

- ・ Windows アプリケーションのスレッ

表6 解析時の条件

共通	仰角マスク	20°
	最低信号強度	30dBHz
開発手法における各種検定の閾値	信号強度が低下した衛星の棄却	仰角特性平均 - 10dBHz
	搬送波の信号ドップラ周波数による擬似距離の検定	± 1.5m
	アンテナ設置間隔に基づく擬似距離の検定	± 5m
	冗長な衛星を利用した信号の完全性の監視・判断	FDE 2SAT, 100m ²
	2つの測位解とアンテナ設置間隔の照合	± 5m

特集：信号通信技術

- ド関数としての動作から周期呼出しに変更
- 確保すべきスタック領域の見積りが困難なことから、サイズの大きなローカル変数をグローバル変数に変更
- ヒープ領域からのメモリ割当てをスタック領域からの割当てに変更
- 各種ファイル読み込みをテーブル（メモリ領域）からの読み込みに変更
- 測位解をファイル書出しから電文出力に変更

処理時間については、試験により概ね40ms以内に収まり、目標とする10Hzのリアルタイム測位ができることを実証した（図13）。但し、測位不能状態が比較的長く続いたあと測位を再開した場合に約4倍の時間を要することがあり、引き続き原因究明と改良が必要である。

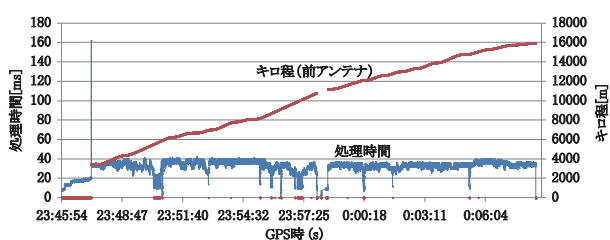


図13 ボードコンピュータにおける処理時間の変動

7. マルチパス誤差モデルの構築手順の検討

2.4で述べた保護レベル計算は、受信機ノイズを含む、鉄道環境におけるマルチパス誤差低減後の誤差モデルを必要とする。しかし、鉄道環境におけるマルチパスの発生状況が解らないため、誤差モデルは実測データから作成するしかない。そこで、4章で述べた実環境データから、以下の手順によりモデル化すべき誤差成分（残存マルチパス+受信機ノイズ）を抽出することとした（図14）。

- ①車上観測データにMSASによる広域DGPS補正を加え、開発システムによるマルチパス誤差低減の検定を実施
- ②衛星・基準位置間距離に受信機クロックバイアス推定値を加えた“基準の擬似距離”を①から差し引き
- ③最寄りの電子基準点観測データから推定した衛星および受信機上空までの伝搬経路の残存誤差成分を②から差し引き

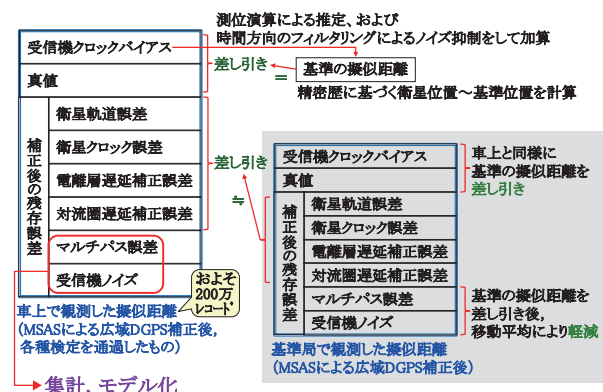


図14 マルチパス誤差モデルの構築手順案

残った成分を集計し衛星の仰角、車体との方位差等の関数としてモデル化する。保護レベルは、この誤差モデルとRTCA/DO-229Dの高速/長期補正誤差、電離層遅延補正誤差、対流圏遅延補正誤差の各モデルから計算できる。なお、①で検定を加えずに③を求めると鉄道環境におけるマルチパスの発生状況が把握でき、さらに前述の抽出分を差し引けばマルチパス誤差低減検定の性能を定量化できると考えられる。

一方課題もある。RTCA/DO-229Dが前提とする機上受信機は、干渉に対し誤差の規定を満たすとされる。前記実環境データ取得時に鉄道環境で想定しうる最大の干渉が発生していたとは限らないため、検討が必要である。

8. おわりに

衛星測位を列車保安制御に適用することを目標として測位アルゴリズムの開発に取り組み、路線座標データを利用する次元拘束条件付き測位、ならびに既定値、異なる物理現象および衛星の冗長性を利用するマルチパス誤差低減手法を開発した。営業路線で取得した走行距離2,000kmに及ぶ測位衛星観測データの一部により測位性能を評価したところ、大きな誤差を排除できることを確認した。また、組み込みシステム実装を試み、目標とする10Hzのリアルタイム測位が可能であることを確認した。さらに、MSASの利用を前提とする保護レベル計算方法を検討し、鉄道環境で発生し開発手法により低減後のマルチパス残存誤差を主成分とする誤差モデルを構築するため、走行中の実測データからモデル化すべき誤差成分のみ抽出する手順を定め、必要なデータを整備した。

しかし、保護レベル計算について課題が残る限り、所期の目的である列車保安制御システムへの適用は難しい。今後は、大きな誤差を抑制可能な測位システムとして部分的に実用化できるように、次元拘束条件付き測位手法およびマルチパス誤差低減手法の改良を急ぐ。在線線路判定についても検討を深度化する。保護レベル計算については改めて他の方法の可能性についても検討する。

謝辞

機材を提供頂いた（独）宇宙航空研究開発機構、データ取得に協力頂いた西日本旅客鉄道株式会社、ジェイアール西日本コンサルタンツ株式会社、国土地理院、株式会社ジェノバの関係各位、データ解析に協力頂いた前東京海洋大学の中曽根隆太氏、民間航空分野の衛星航法の国際標準について解説頂いた（独）電子航法研究所の坂井丈泰氏、ならびに検討に際し助言頂いた東京海洋大学の安田明生名誉教授、北條晴正前客員教授に謝意を表す。