

閑散線区向け列車制御システムへの GPS の適用

山本 春生* 佐々木 達也* 菅原 宏之*

Application of GPS to Train Control System for Secondary Lines

Haruo YAMAMOTO Tatsuya SASAKI Hiroyuki SUGAHARA

In order to lower the cost for the on-board location and velocity detection function of the train control system using radio communications for secondary lines, the GPS positioning performance in the case of the joint use of MSAS (MTSAT Satellite-based Augmentation System) was investigated, and the applicability was examined. From the results of the test carried out on the test track in the premises of the Railway Technical Research Institute, it was shown that there was a possibility of locating the position of the vehicle on the track in case it is running under the open sky, by using horizontal protection level. As a result, we have had the prospect that the system equipped only with the on-board function, but without using the ground installations, could be built.

キーワード：閑散線区，無線式列車制御，車上位置検出，低コスト，GPS，MSAS

1. はじめに

国鉄末期に導入された電子閉そく装置が更新時期を迎えつつある閑散線区を対象として、急曲線部などの速度制限箇所の防護も可能な列車制御システムの開発に取り組んでいる。地上設備を削減可能な無線式の列車制御を閑散線区向けとして低コストに実現するため、地上・車上間の制御情報伝送は駅や踏切など必要な箇所でのみ行うこととし、その手段や車上位置検出への汎用無線技術の適用可能性を検討した。当初想定していた列車制御システムのイメージを図1に示す。

このシステムでは連続的な車上位置検出を行う。そのための実績あるセンサは保安装置用の速度発電機であるが、少ない両数で運転されることの多い閑散線区では、列車全体のブレーキ力への影響から弱め軸の設定が困難なうえ、速度発電機を駆動軸に設置せざるを得ないことも考えられる。複数軸に設置したとしても、検出する位置、速度は、幹線の場合よりも同時滑走／空転の影響を受ける確率が高まる。より高精度な位置検出のため、車軸回転による方法以外の位置・速度検出手段との併用が望まれた。

GPS（全地球測位システム：Global Positioning System）はその候補の一つである。地方閑散線区は、沿線に建築物が少ないことから山間地でなければ上空が開けていることが多く、GPSを利用しやすい環境にある。そこで、GPSに保安装置用の速度発電機と同等の位置・速度検出機能を担わせるための検討を行った。本報告ではその検討結果について述べる。

* 信号通信技術研究部（列車制御）

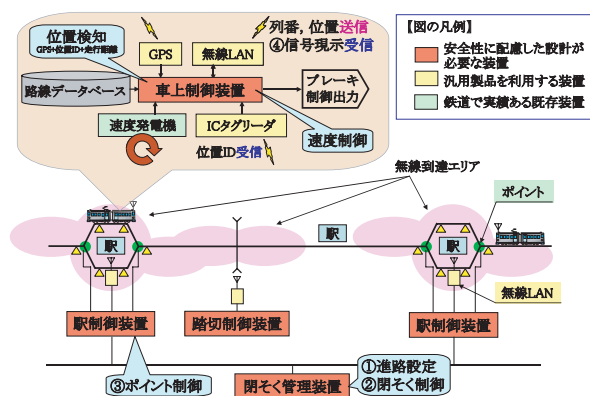


図1 閑散線区向け列車制御システムのイメージ

2. GPS と周辺システムの動向

2.1 GPS について

GPSを代表とする衛星測位システムは、重要な社会基盤として認知されつつある。GPSは、米国の国防総省と運輸省により管理・運用されているシステムで、現在は32機の測位衛星が地球を周回している。GPS受信機で4機以上のGPS衛星からの信号を受信できれば、静止点、移動体を問わず、3次元の絶対位置（緯度、経度、高度）を高精度かつリアルタイムに計測でき、同時に正確な時刻を得ることができる。衛星から送信される信号がマイクロ波であるため受信アンテナは小さくて済み、受信機本体の小型化や高感度化も進み、最近では携帯電話をはじめ様々な機器に組み込まれている。

GPSが完成したとされているのは1993年末で、米国は民生利用を無料で認めたため、様々な産業分野で利用

特集：信号通信技術

が進められ、測量、カーナビゲーション、船舶の航法などGPSを利用する多くのシステムが実用化された。米国政府は今後とも継続的に全世界に開放することを公表している。また、日本は1998年9月の日米GPS共同声明によりGPSを一つの世界標準として利用促進協力する立場にある。2000年5月にSA (Selective Availability: 米国の国防上の安全性への配慮から施されていた精度劣化操作) が解除されたため、測位精度は約15m (公称値) と大幅に改善された。その後も、地上制御施設を増やすなどにより精度改善が進んでおり、さらに民生用として現行のL1信号に加え複数の信号を利用可能とする近代化計画が推進されている。近い将来、GPSのほか、ロシアのGLONASS、欧州のGalileoなど複数の衛星測位システムが利用できるようになり、測位の信頼性は大幅に改善される見込みである。

2.2 MSAS について

我が国は世界一のGPS利用国であり、海上保安庁と国土交通省航空局は、航行支援のためそれぞれ国際標準のGPS補強システムを運用している。これらによって、GPS単独では不足する測位精度と信頼性を、それぞれ所要の性能まで引き上げて利用する。航空局が運用するMSAS (運輸多目的衛星用航法補強システム: MTSAT Satellite-based Augmentation System) は、GPSを民間航空の航法システムとして用いるための補強システムであり、SBAS (静止衛星型衛星航法補強システム: Satellite-Based Augmentation System) 受信機でGPS信号と同時にMSAS信号を受信することにより、高信頼なGPS測位が行える。なお、MSAS信号は同一周波数のためGPSアンテナで受信できる。

MSASの併用により、GPSの不具合情報や軌道誤差、クロック誤差、電離層遅延誤差等の補正值が提供され、水平方向の測位誤差が数メートル以内に改善されるほか、99.99999%の確率で保証される誤差範囲情報(保護レベル)が得られる。また、MSAS信号を放送するMTSAT (運輸多目的衛星: Multi-functional Transport Satellite) をGPSと同等の測位衛星として利用できる。MTSATは静止衛星であるため仰角は高くはないが、例えば東京では仰角48°程度に位置し、周回するGPS衛星とは異なり国内では常時利用可能である。MTSATは2機体制で、これらをコントロールする地上の航空衛星センターも国内2箇所に設置され、厳格に運用されている等システムの信頼性は高い。また、使用料も発生しない。

3. MSAS 併用時のGPS 測位性能

閑散線区向け列車制御システムの車上位置・速度検出

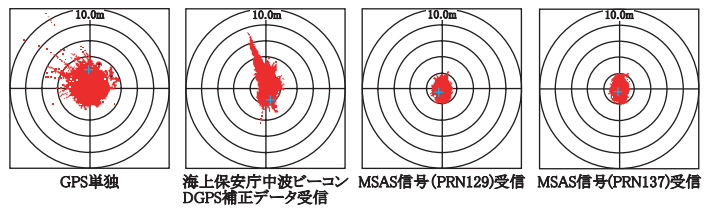


図2 7日間連続測位結果の一例

機能を低コストかつ高信頼に実現するため、GPSとMSASの適用可能性について検討した。但し、MSASは航空向けのシステムであり、鉄道環境のように測位衛星からの信号がトンネル内で全く受信できなかつたり、沿線の地形や建物による遮断や反射等により激しく変動する状況での利用を想定していないと考えられる。そこで、MSAS併用時のGPS測位性能を確認するため、上空が開けた固定点と列車上においてそれぞれ測定を行った。

3.1 上空が開けた固定点における測位性能

MSASの効果を確かめるため、上空が開けた固定点におけるGPS測位の長期測定を実施した。試験は、MSASが運用を開始した2007年9月以降半年間継続して実施した。図2に、一例として7日間連続測定時の一秒毎の測位座標の分布を示す。条件の良い場所でMSASの信号を受信できれば、誤差は概ね2m程度まで改善されることが判る。一方、水平保護レベルは、衛星配置等の条件により14m以上で概ね100mまでの間で変動した。図2の測定期間中の24時間の変動状況の一例を図3に示す。なお、異常によりインテグリティを維持できない状況は、同時に出力される情報により識別可能であり、その場合は水平保護レベルも拡大する。また、MTSATが軌道修正等のメンテナンス等を受けている場合も異常として識別できるが、この場合は前述のようにもう一方の系の利用が可能である。

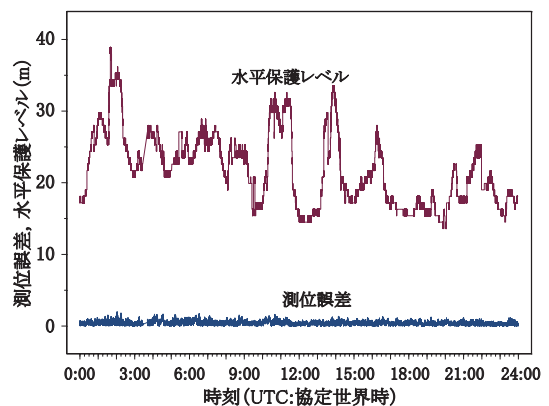


図3 水平保護レベル変動の一例 (PRN129)

3.2 列車上における測位性能

列車走行におけるMSAS併用時のGPS測位による位置、速度の検出誤差を把握することを目的として、鉄道総研の所内試験線において、R291系試験車両による実

車試験を実施した。試験では、走行区間約620mの軌道上に静的な応動距離が約0.5mの無線ICタグを8箇所配置し、走行中は、0.2秒毎に出力されるSBAS受信機のデータを記録する一方、無線ICタグからの受信情報と非駆動軸に取り付けられた速度発電機（AG-48）のパルスを、GPS受信機の1秒パルスにより毎分修正された時計の時刻とともにそれぞれ記録した（図4）。そして、8箇所無線ICタグ設置箇所の測量成果とその通過時刻、軌道中心線の測量成果および速度パルスから走行毎の位置、速度を特定し、これを基準位置・速度として、SBAS受信機から出力される位置、速度の精度を評価した。

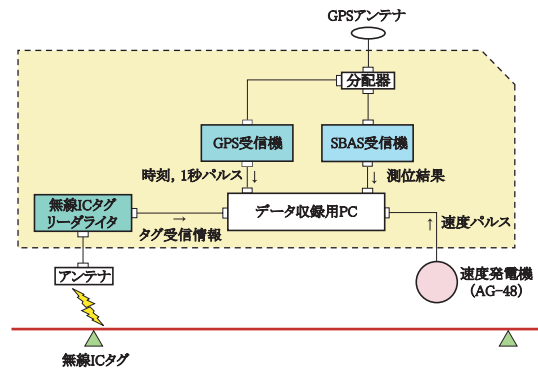


図4 測定システムの構成

試験結果の一例を図5に示す。試験線周辺には実験棟等の建物が散在し、特に本走行の到着側は樹木が近接するなど受信状況が良くない箇所である。このような箇所では、測位誤差が増大し、水平保護レベルも著しく拡大する。一方、速度情報は、受信側の移動に伴うGPS信号のドップラ効果を利用して求められるため、マルチパスの影響を受け難く、同じく0.2秒毎に出力される測位座標から求めた移動速度と比較すると精度は極めて良いことが判る（図6）。また、到着側における測位誤差と水平保護レベルの変動時も、速度情報は比較的安定している。

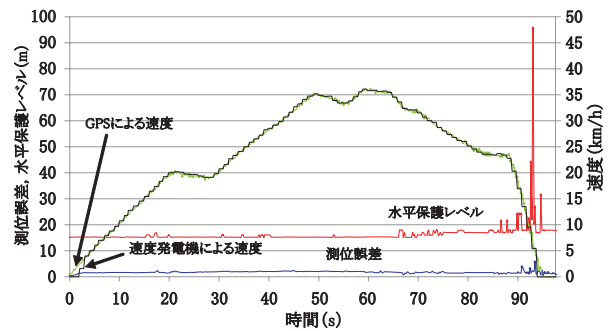


図5 走行時の測位誤差、水平保護レベル、速度の一例

実車試験におけるMSAS正常時の全データの測位誤差と水平保護レベルの関係を図7に示す。前述のように試験線周辺には受信状況が良くない箇所があること、また、車両電源の投入後SBAS受信機が測位可能となる前に走行を開始したことが原因で、捕捉衛星数が少なく衛星配置が良好ではない測位結果が多く含まれる等の理由から、走行中の水平保護レベルは最大526m、測位誤差は最大41mが記録されたが、測位誤差が水平保護レベルを超えることはなかった。

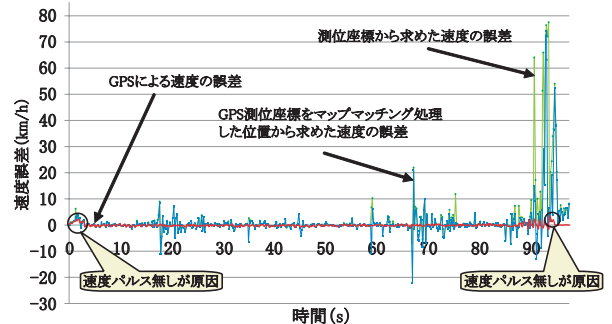


図6 GPSによる速度の誤差の一例

4. 車上位位置検出への適用検討

前章で述べたとおり、試験した範囲ではあるが、MSASの水平保護レベルは測位誤差を包含することから、MSAS併用時のGPS測位結果と水平保護レベルを在線位置情報として利用できる可能性がある。そこで、閑散線区向け列車制御システムの車上位位置・速度検出にGPSとMSASを適用する場合の実現方式について検討した。

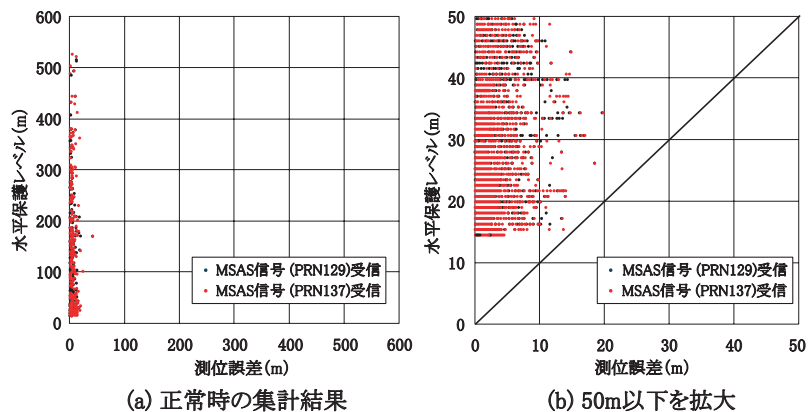


図7 走行中のMSAS水平保護レベル性能

4.1 機能要求

在線位置検出の精度上の要求は、在線する線路を複数の線路から判別できることと、在線位置を誤差数m以下で連続的に検出できることである。また、安全性に関す

る要求として、誤った位置情報による列車の衝突や脱線避ける必要から、危険側故障率が $10^{-9}/h$ 以下と高い安全性が求められる。なお、許容誤差については適用線区の位置検出要件に応じて緩和できる。

特集：信号通信技術

4.2 安全性確保の考え方

MSASはGPSとは別系のシステムである。衛星から地上に至る電波の伝搬経路上における測距誤差や障害の要因は共通であるが、異常はMSASの地上システムで判定され、ユーザ側で把握できるため問題はない。受信機は一体であるため共通原因故障として扱う必要がある。保護レベルをはじめとするMSASの機能は航空保安用として十分検証されているので、その説明を受け理解できれば信頼して用いて良いと考える。これをベースとすると、列車保安制御システムに適用する上で検討が必要となるのは、航空保安との精度と安全性への要求の違いと受信環境が良くないことへの対策である。まず、線間を識別するには精度が不足するため、分岐方向など線路を特定するための情報を得る必要がある。また、安全性確保の観点から、測位結果について、路線情報やセンサ等別手段による裏付けが必要である。受信環境については、受信状態の良い測位結果を選別するための判定論理を検討する必要がある。以上の3点を解決すれば、列車制御システムの車上位置検出機能を実現できると考える。

4.3 位置・速度の検出方法

4.3.1 機器構成

無線式列車制御システムCARAT¹⁾の位置・速度検出では、複数の速度発電機と地点検知装置を基本とし、位置検出要件に応じて慣性センサとGPSを補助的に用いることとしていた。しかし、検討する位置・速度検出機能は、閑散線区を対象とすることからコスト低減要求が厳しい。そのため、図1で示した位置補正用の地点検知装置は、特段の位置検出精度が要求される場合に追加するものとして、基本方式としては必須とはしない。また、車両の機装に関しても、保安装置用の速度発電機を追設するのではなく、速度計用に設置されているものを流用できるように考慮することとした。以上によれば、基本的には地上設備が不要で、車体への機装は制御装置を除くと屋根上のGPSアンテナのみとなるため、導入コストを抑制でき、メンテナンスも軽減できる。

4.3.2 基本方式

図8に、位置・速度検出のブロック図を示す。本方式では以下の3点を基本とする。

- (1) 速度発電機に基づく速度検出および走行距離積算
- (2) 単軸加速度計の前後方向加速度に基づく車輪の滑走・空転時における速度、走行距離の補正
- (3) MSAS併用時のGPSに基づく絶対位置検出(位置補正、初期位置検出)および速度の校正

位置・速度検出の主体は1つの速度発電機であり、車輪の空転滑走の影響を受けない単軸加速度計によりこれを補強する。速度計は許容誤差として概ね±2～3km/h以内で調整されており、また、既設の速度計用の速度発

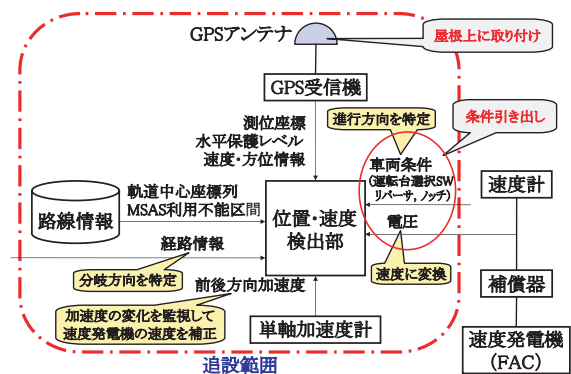


図8 位置・速度検出ブロック図

電機が電圧を出力するタイプである場合は、パルスカウンタと比較して走行距離積算精度が劣る。そのため、上空が開けた箇所にて、MSAS併用時のGPS測位結果に基づいて頻りに位置補正を行うとともに、距離積算精度を改善するため、走行中のGPSによる速度情報を、速度計用の速度発電機に基づく検出速度の校正に用いる。トンネルなどGPSとMSASが利用できない箇所では、単軸加速度計により補強された速度発電機に基づく校正済みの速度が頼りとなるが、路線上のGPSとMSASが利用できる箇所は事前に把握可能である。

4.3.3 路線情報

車上位置・速度検出機能のための路線情報は、CARATと同様に、システム区間内の線路配線を表すため分岐・合流部、車両接触限界位置などで区切った線路ブロックと、その接続関係や長さなどの情報を備える方式を基本とする。これに、単軸加速度計で計測する前後方向加速度の補正用の、線路ブロック内位置に対応付けられた線路勾配と、GPS測位を適用するための、線路ブロック内位置に対応付けられた軌道中心座標を追加する(図9)。なお、軌道中心座標としては、少なくとも緯度、経度が必要であるが、さらに標高を含むものであることが望ましい。

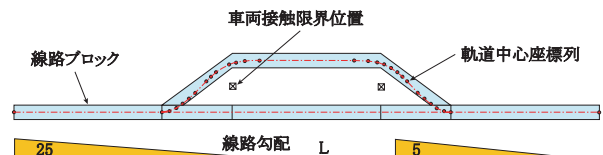


図9 路線情報の概念

4.3.4 在線位置の検出

(1) 上空が開けた箇所

本方式では、絶対位置検出にSBAS受信機により得られる測位座標と水平保護レベルを用い、軌道中心座標列と組み合わせて、列車長を含む在線範囲を決定するものとする(図10)。測位誤差により測位座標が線路横断方向にずれるほど、逆に在線範囲が狭まることとなると不合理であるが、測位誤差の増大に伴って水平保護レベルも拡大するはずであり、問題はない。但し、3.2節で述べ

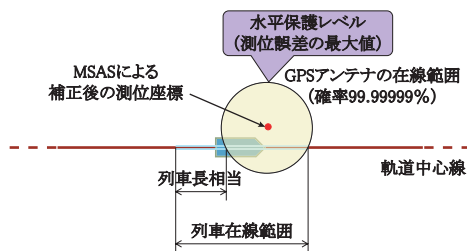


図10 在線範囲の特定方法

たように、上空が開けていない等の状況では、測位誤差の増大とともに水平保護レベルが著しく拡大するため、位置補正の機能自体を果たすことができない。そこで、水平保護レベルが在線位置検出の精度要求を満たす場合に、位置補正に用いることとする。なお、その際には、鉄道車両の移動の特徴（必ず連続する線路上を走行する、高さ方向の変動が小さい）およびドップラ効果から求まる速度・方位情報に基づく合理性チェックを行い、測位誤差が少ないデータに絞り込んで採用することによって位置補正精度を高める。3.2節で述べた実車試験のデータについて、仮に水平保護レベル80m以下、HDOP（Horizontal Dilution Of Precision）2以下、高さ変動3m以下、マップマッチング時の線路横断方向の修正量2m以下、マップマッチング後の移動距離が方位変動 $\pm 15^\circ$ 以下のGPS速度で想定される誤差の範囲内（ $\pm 5\text{km/h}$ 以下）として絞り込んだ場合、測位頻度は17%低下するものの、線路長手方向の誤差の最大値は固定点におけるのと同等の2.0m以下に改善された。なお、現時点のMSASの性能では、水平保護レベル20m以下を継続して期待することは困難であるが、性能向上が計画されているのでその成果に期待したい。

また、GPSの速度情報により、速度計用の速度発電機に基づく検出速度を校正するため、惰行中の速度発電機出力とGPSの速度情報の関係を記憶、蓄積しておく。

(2) 上空が開けていない箇所

単軸加速度計により補強された速度発電機に基づく速度により、前回の在線位置からの推測航法を行う。装置立ち上げ後、前述の校正情報（速度発電機出力とGPS速度情報の関係）が蓄積され確定するまでは、速度計における入力電圧から速度への変換定数を用いて速度を求める。この場合の速度誤差は $\pm 2\sim 3\text{km/h}$ と見積もられ、校正情報確定後はさらに精度が高まる。推測航法により決定する在線範囲は、走行に伴い蓄積する誤差を見込んで、最後の位置補正実施箇所からの走行距離に比例して拡大した長さを、位置補正時に決定された在線範囲長に加算することにより、速度誤差に対する安全性を確保する。

なお、MSASが利用できない区間を予め定義しておき、推測航法によりその区間の進出を監視し、MSASが利用できるはずの区間で測位座標と水平保護レベルが得られない場合は、装置故障扱いとして位置不定状態とする。

5. システム検討

前章の検討結果に従い、想定する閑散線区向け無線式列車制御システムの車上位置・速度検出機能に適用する場合のシステム案として、列車の出区から入区に至る各ケースにおける在線位置決定方法について述べる。なお、列車長情報の管理は、編成毎の列車長情報の管理と併せ、指令所等に設置される閉そく管理装置が担い、列車長情報の完全性が担保されていることを前提とする。

(1) 初期位置検出

初期位置検出は、運転区所、留置線等から本線への進入時に行う。運転区所、留置線等は、通常の運転が行われないため制御対象とはせず、その線路を包含する非制御エリアとして定義しておく。この非制御エリアから本線へ進入する線路は、閑散線区では通常1線であるので、その線路上に制御境界を設ける（図11）。車上制御装置は、以下の手順を踏むことによって、非制御エリアから制御境界へ到達したと判断し、制御境界として定義された位置を列車の初期位置として決定する。但し、少なくとも、制御境界から一定範囲内の非制御エリアでは、GPSとMSASが利用できることが前提である。

- (a) 車上制御装置の電源投入後、地上装置と交信のうえ運行許可を受信
- (b) 水平保護レベルが在線位置検出の精度要求を満たす場合に、MSAS併用時のGPS測位結果と非制御エリアとの重なりをチェック
- (c) 移動により制御境界位置の一定範囲以内に到達

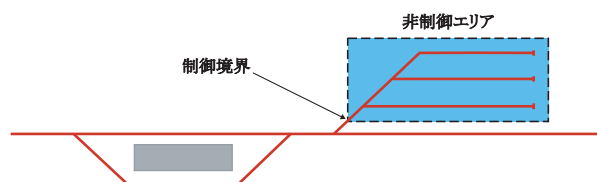


図11 非制御エリアと制御境界

以上によれば、地上装置は運行許可を出す前に、把握する当該編成の入出区情報等との照合が行える。また、MSAS併用時のGPS測位結果と非制御エリアとの重なりをチェックできる。さらに、制御境界へ移動中のGPS測位結果を、単軸加速度計により補強された速度発電機に基づく速度および方向、GPS信号のドップラ効果から求められる速度・方位により連続的にチェックできる。測位結果に対するこれらの裏付けと、制御境界への接近に伴い1線に絞り込まれる線路配線上の制約のもとで、制御境界位置の一定距離以内に到達したことをもって初期位置を決定する。なお、初期位置検出時は、運転台選択スイッチ、リバーサ、ノッチ等の条件と、単軸加速度計の設置方向から、路線に対する車両の在線方向および運転方向も決定できる。当該列車の初期位置検出により、地上装置は

特集：信号通信技術

当該列車の追跡を開始して停止限界と経路情報を送信し、その受信により通常の位置・速度検出状態へと移行する。

この手順によれば、適用線区に初期位置検出の必要がある箇所が複数存在するとしても、在線位置検出の精度要求以上離れていれば問題ない。なお、本線上で滞泊する場合は、電源断直前の在線位置情報を地上装置が記憶し、電源投入直後の車上制御装置へ伝達する必要がある。

初期位置検出は、本システムが線区の一部区間に適用される場合は、非導入区間から導入区間への進入時にも行う必要がある。前述の運転区所、留置線等と同様に1線の箇所で行うが、通常の運転中に行う必要から、非制御エリアを広く設定するとともに、初期位置決定のための制御境界位置への到達範囲チェックを緩和するなど高速走行への対応を考慮する。また、初期位置検出ができなかった列車の進入を許してはならないため、非導入区間側の運転保安システムとの連動が必要である。

(2) 走行中の位置の更新

初期位置検出後は、線路配線を表す線路ブロック情報と、地上装置から停止限界とともに指示される経路情報により、走行する線路が1本に限定されるため、その線路上で位置補正および推測航法を行う。万が一、分岐箇所の停止限界を冒進した場合は位置不定状態とする。

(3) 折り返し

運転台の交換により、それまで稼働していた車上制御装置の電源が断たれるため、在線位置情報を新たに稼働する車上制御装置へ引き継ぐ必要がある。そのため、地上装置が、運転台選択スイッチが扱われ新たに電源が投入された車上制御装置と交信し、同一列車の先頭であることを確認した上で、在線位置と列車長を伝達する。なお、1両の場合は車上単独で運転方向の変更が可能である。

(4) 分割・併合

分割に際しては、元の列車の列車長の変更とともに、発生する列車への在線位置と列車長の設定が必要となる。これらは、地上装置が、運転台選択スイッチが扱われ新たに電源投入された車上制御装置と交信し、元の列車から分割されたことを確認した上で行う。

併合に際しては、併合する側とされる側の車上制御装置が各々地上装置と交信しているため、地上装置は、被併合列車の運転台選択スイッチが扱われ電源断となったことをもって追跡を止め、併合列車へ新たな列車長を伝達する。

(5) 制御区間からの進入

通常制御状態の列車が、制御境界を越え非制御エリアへ進出したことをもって、地上装置は当該列車の追跡を止め、当該エリア内で滞泊または導入区間内に在線しないものとして扱う。

(6) 位置不定状態からの復帰

本システムによる制御範囲である本線上で在線位置が不定となると、通常の列車制御が行えないため、速やか

に位置検出状態へ復帰する必要がある。復帰は、前述のような線路の特定と別手段による裏付けを本線上で行うことによるが、線路が1線か否かと地上装置との交信の可否によって手順が異なる。図1に示したように、対象線区は単線で、想定する列車制御システムでは少なくとも駅構内をカバーするように無線通信エリアが設定されるため、以下のように整理できる。

(a) 駅およびその周辺（交信可能）

装置再立ち上げ後、地上装置が記憶する位置不定となる直前の在線位置、停止限界および経路についての情報支援を受ける。これが線路の特定と裏付けのための情報である。停止限界までの範囲で移動している可能性があるため、位置補正が行えた時点で復帰する。

(b) 駅間（1線、交信不能）

システム非導入区間から導入区間への進入時の初期位置検出に準じた方法による。装置再立ち上げ後、駅間のGPSとMSASが利用できる箇所を移動中にMSAS併用時のGPS測位結果をチェックしておき、次駅手前で地上装置から停止限界と経路情報を受信することにより復帰する。

なお、地上装置や無線装置の同時故障時は、情報による支援が行えない。システムで対応することも考えられるが、複雑化を招きコストアップ要因となるため、人間系による介入を前提とすることが望ましい。

6. MSAS を利用する上での課題

4.2節で触れたように、MSASを列車保安制御システムのベースとして利用するには、ユーザとして、運用側からMSASの機能、性能についての説明を受け、理解しておくことが重要である。また、認証された航空用のSBAS受信機は非常に高価であることが予想される。今回の測定で用いたような、規格には準拠するが未認証の受信機を使用すれば、受信機の価格の問題は回避できる。しかし、保護レベルなどのMSASの機能が認証機器と同等に実現されるかどうかの検証は必要である。汎用無線技術を適用してコストを下げるといふ開発コンセプトにたち帰れば、規格に準拠した未認証の受信機を用いる方向が妥当であろう。

7. まとめ

閑散線区向け無線式列車制御システムの車上位置・速度検出機能を低コストに実現するため、MSAS併用時のGPS測位性能を調査し、その適用可能性について検討した。所内試験線の結果から、上空が開けた線区では、水平保護レベルを利用することで、走行中の在線位置を特定できる可能性があり、その特長を利用したシステム検討により、地上設備を必要としない車上機能のみによるシステムを構築できる見通しを得た。

文献

- 1) 山本春生, 西堀典幸: CARAT, RRR, Vol.56, No.9, pp.8-9, 1999