

無線通信による列車制御用車上データベースの更新技術

藤田 浩由* 新井 英樹*
 杉本 経嗣** 小野 雄人*

Update Method of On-board Database for ATP system with Radio Communication

Hiroyuki FUJITA Hideki ARAI
 Keiji SUGIMOTO Yuto ONO

Recently, ATP (Automatic Train Protection) systems under which the database installed in the on-board equipment is used have been developed and operated. Updating the on-board database spends much time and labor because the database is updated one by one using a recording medium such as a CF (Compact Flash) card in the present conditions. Thus, the authors developed an update method of the on-board database with radio communication for the purpose of labor saving. The radio communication is applying 5.6 GHz band radio, for which the license is not required. In this paper, the authors report on the specifications of this system and the functional field test results.
 キーワード：無線通信，車上データベース，列車制御，更新技術，ATS，ATC

1. はじめに

近年，地上設備位置や車両性能を車上データベース（以下，車上DB）として登録し，列車制御に活用する運転保安システムが開発，導入されている。現状，車上DBの更新は，CFカード等の記録媒体を用い，装置単体で行われているため，多大な時間と労力を要している。そこで，更新時の省力化を目的として，無線通信を活用した車上DBの更新技術を開発し，プロトタイプを用いた検証試験を行った。なお，無線通信による車上DB更新の対象例として，現在JR北海道ならびにJR九州で運用されているATS-Dx¹⁾を選定し，更新システムのプロトタイプを開発した。

本稿では，車上DBの概要と，開発した無線更新技術について更新時のデータ正当性確認手法およびセキュリティ手法について述べると共に，検証試験結果について報告する。併せて，車上DB更新技術の将来像についても報告する。

2. 列車制御用車上DBの概要

車上DBを有する運転保安システムは，近年開発，導入が進んでおり，新幹線のデジタルATCをはじめ，山手線，京浜東北線のD-ATC，京王線ATC，ATS-Dx等が挙げられる。いずれの装置も車上DBに地上設備位置等の線路データや車両性能等を登録することで，地上

設備の削減や細かな速度制限設定および車両性能に応じた最適な速度照査を実現している。本章では，車上DBの構成とそれに基づく速度照査パターンの制御について，ATS-Dxを例に記載する。

2.1 車上DBの構成

ATS-Dxの車上DBは，車両最高速度やブレーキパターン等の車両の基本性能を登録する車両性能DB，および地上子位置や速度制限位置等を登録する線路DBから構成される^{1) 2)}。

(1) 車両性能DB

車両性能DBは，図1に示すように搭載車両に対応する車両基本性能データならびにブレーキパターンテーブルより構成される。

(2) 線路DB

線路DBは，図2に示すように区間境界（基本的に連動駅間を1区間としている）に設置される絶対位置確定用地上子から受信した情報を元に，線路データ参照先を確定するための絶対位置データと，地上子位置や信号機位置，曲線や分岐等の速度制限情報を列車の進行順に登録した線路データより構成される。

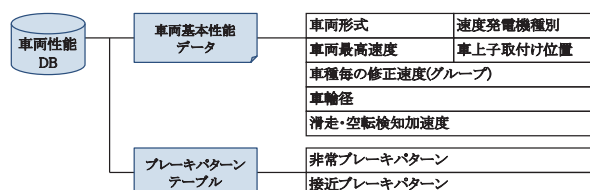


図1 車両性能DB登録内容

* 信号・情報技術研究部 信号システム研究室
 ** 信号・情報技術研究部 信号システム研究室
 (現 株式会社三工社)

特集：輸送計画・情報技術

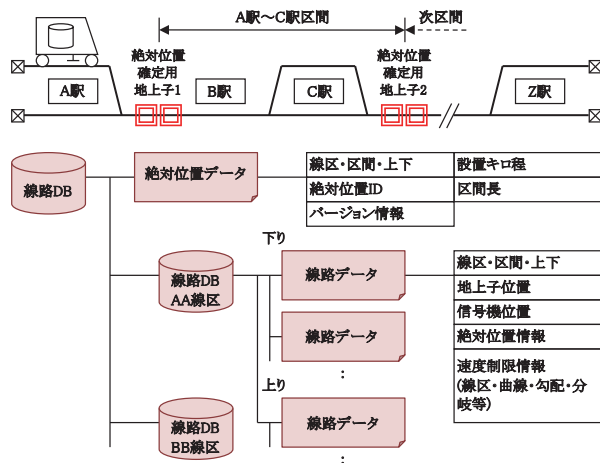


図2 線路DB登録内容

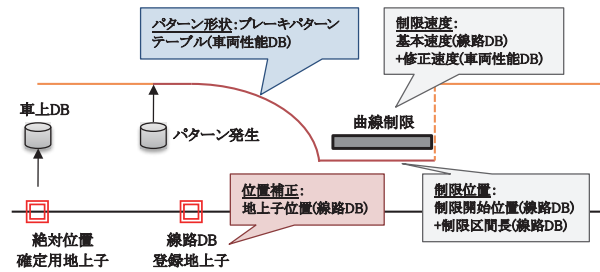


図3 曲線制限に対する速度照査パターン作成例

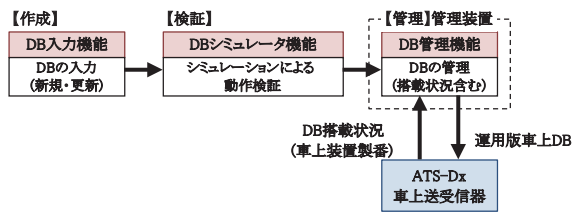


図4 車上DB作成からインストールまでの流れ

2.2 車上DBによるパターン制御例

車上DBに基づく速度照査パターン制御について、曲線速度制限を例として図3に示す。車上DBは、絶対位置確定用地上子からの情報を受信することで、保有する線路DBの参照先を確定する。車上では線路DBの参照先確定（位置確定）後、速度発電機からの信号に基づく距離積算情報により、自列車位置を常に認識しているため、曲線に対して任意の地点で速度照査パターンを車上DBより発生する。このとき発生するパターンは、図3に示す通り、車両性能DBと線路DBの両者の情報を参照して作成される。なお、線路DBに登録された地上子を通過するごとに位置補正を行うことで、自列車位置の認識精度、つまり速度照査パターンの位置精度の向上を図っている。また、進路に応じたパターン制御が必要な分岐速度制限では、パターンの作成については曲線速度制限と同様であるが、パターンの継続・消去については地上子からの情報に基づき制御が行われる。

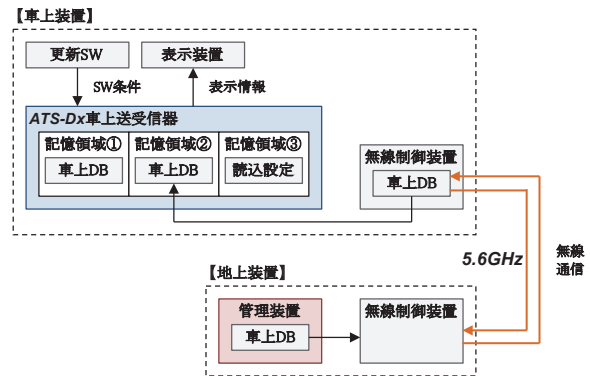


図5 プロトタイプ構成および仕様

2.3 車上DBの作成・管理

車上DBに登録されるデータは、前述の通り速度照査パターン作成に直接使用されることから、データの安全性確保は、重要な要件となる。このため、車上DBの構築にあたっては、図4に示すようにDB入力機能、DBシミュレータ機能、DB管理機能の3種類の機能により、DBの作成、検証、管理を行い、安全性に配慮することとしている。特に管理装置は、車両基地等に設備されており、十分に検証されたデータが車上送受信器にインストールされるような仕組みとしている。

3. 無線通信による車上DB更新技術

3.1 システム構成

2章で述べたように、車上DBの登録データを元に運転保安装置が動作するため、誤ったデータが登録された場合、危険側動作となる可能性がある。それゆえ、車上DBの更新においては、高い安全性が要求される。今回、著者らはATS-Dxを対象例として無線通信による車上DB更新システムを開発した。また、プロトタイプ装置を開発するにあたり、極力、現状のATS-Dx車上送受信器のハードウェア改修が生じないよう配慮した。システム構成を図5に示す。

車上装置は、ATS-Dx車上送受信器と無線制御装置、更新対象車両であることを設定するための更新スイッチ（以下、更新SW）、音声の鳴動やLED表示を行う表示装置から構成される。一方、地上装置は、車上DBを管理する管理装置と無線制御装置から構成される。

車上送受信器は、8MByteの記憶領域を保有しているが、現行は4MByteのみを使用している。このため、本開発では記憶領域を分割し、旧DBと新DBの両方を保持できるよう、車上DBを保存する記憶領域①と記憶領域②、車上送受信器が読み込む車上DBを設定する記憶領域③に分割するソフト改修を行った。

また、プロトタイプ装置における地上および車上の無線制御装置は汎用の無線モデムおよびパソコン（PC）

での構成とし、地上に設置される管理装置も PC にて構成した³⁾。なお、実用システムにおいて、管理装置にはフェールセーフ性が要求される。

3.2 更新プロトコル

(1) 更新処理

開発した更新プロトコルを図6に示す。Phase 1では、更新SWが扱われた条件をトリガに、ATS-Dx 車上送受信器が車上DBの更新専用モード（以下、更新モード）に移行し、無線通信を開始する。更新SWは、更新または通常の2つの状態をとり、更新側であることを車上送受信器が検知すると、更新モードへ移行する。更新モードでは、車上送受信器が非常ブレーキを出力し、車上DB更新中における車両の移動を防止する。

Phase 2では、更新対象の車上送受信器を管理装置で選択し、任意の車上DBを送信する。ヒューマンエラーを防止するため、更新SWを扱った車上送受信器のみが管理装置の画面に表示され、選択可能とした。また、車上送受信器に既に搭載されている車上DBよりバージョンが古いものでの更新は行えないこととした。車上DBの送信が完了すると、Phase 3に移行する。Phase 3では、送信した新DBの正当性確認を行う。詳細は、3.3節で述べる。新DBの正当性が確認されると、Phase 4に移行する。Phase 4では、車上送受信器から通信の終了要求を送信し、要求を受信した管理装置が応答を返信することで、通信を終了する。通信終了の手順が正常に終了すると、車上送受信器が起動時に読み込む記憶領域番号を記憶領域③に設定する。

(2) 記憶領域の構成

本システムの記憶領域は、旧DBと新DBをそれぞれ保持するため、車上DBを保存する記憶領域①と記憶領域②、車上送受信器が読み込む車上DBを設定する記憶領域③の3領域で構成される。また、新旧DBはそれぞれ制御情報を2面分保持できるようにしており、基本的に新DBは現状使用しているバージョン（地上設備変更前）と変更後のバージョンを保持する。旧DBと新DBの切替は、車上送受信器の起動時に読み込む車上DBを記憶領域③で指定する方式とした。記憶領域の切替方法を図7に示す。車上送受信器が更新モードに移行すると、記憶領域③で指定されていない記憶領域を消去し、その記憶領域を新DBの保存領域として使用する。新DBの正当性が確認され、通信が正常に終了すると、記憶領域③の内容を変更する。更新終了後、車上送受信器を再起動すると、新DBで動作する。万一、更新に失敗した場合は、記憶領域③の内容が変更されないため、旧DBで起動する。

上記のような記憶領域の構成ならびに切替方法は、ATS-Dx システムで実施されている地上設備の工事等の切替に伴った車上DBの切替を行う仕組みに影響を与えないように配慮したものである^{1) 2) 3)}。

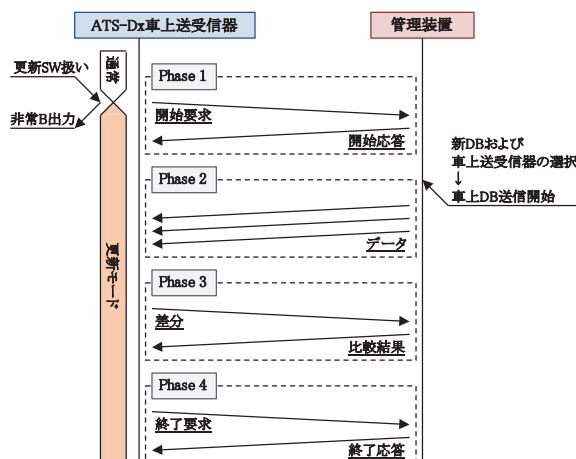


図6 開発した更新プロトコル

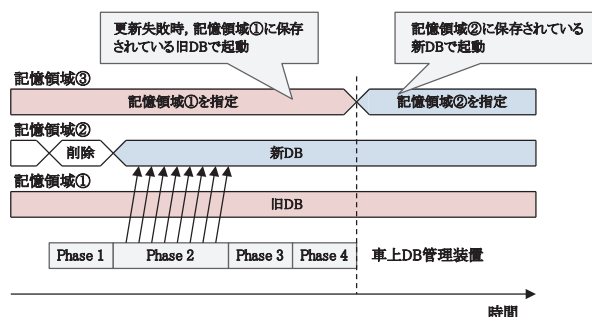


図7 記憶領域の切替方法

3.3 車上DBの正当性確認

車上DBを更新する際、誤ったデータで車上DBが更新されると運転保安装置の安全が担保できないため、受信したデータの正当性を確認する必要がある。

一般には、伝送データの正当性確認方法として、受信データを返送し、送信データと返送されたデータの一致を確認する方法が用いられている。ただし、この方法では、車上DBの全データを送信するため、データ伝送量が大きくなるとともに、同じ無線伝送品質の条件下ではデータ伝送量が大きくなる分だけの車上DB更新時間が長くなる。また、新DBと旧DBは、広域かつ大規模な線形変更が実施されない限り、同一の制御情報が数多く登録されている特徴を持っている。そこで、車上DB更新時間の短縮を図るため、データ伝送量を小さくする手法として、旧DBと新DBとの差分を車上装置と地上装置とでそれぞれ独立して算出し、地上装置内で、車上装置から送信された差分データと地上装置で算出した差分データを比較することとした。差分の比較で誤りがある場合には、地上装置から新DBの使用が許可されないようにした。図8に無線伝送により更新された車上DBの正当性の確認手法の概念を示す。

なお、本手法は、高い安全性を実現するため、フェールセーフCPUを搭載した地上装置と車上装置で、独立して算出した差分情報を比較することを基本としている。

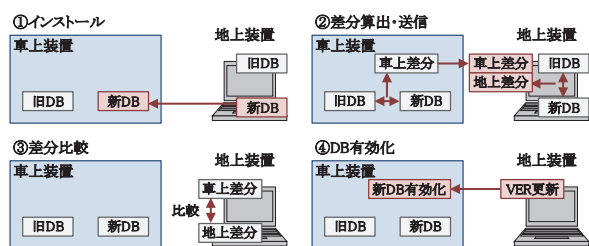


図8 差分方式による正当性確認の概要

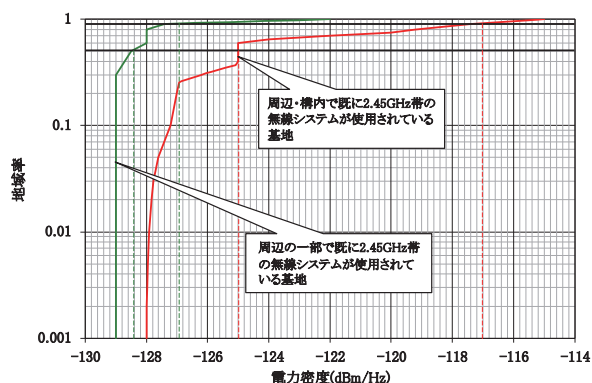


図9 電波環境測定結果

3.4 無線通信におけるセキュリティ対策

(1) 無線仕様

無線制御装置は、導入のしやすさを考慮し、無線免許が不要な汎用品を使用することとした。屋外での使用が認められている2.45GHz帯と5.6GHz帯の無線LANを候補とし、車両基地内での電波環境測定を実施した。図9に車両基地における、2.45GHz帯の電波環境測定結果として、電力密度に対する地域率で表わしたものを示す。車両基地によっては、2.45GHz帯の使用が困難であったため、5.6GHz帯の無線LAN (IEEE802.11a) を使用することとした。

(2) セキュリティ対策

汎用無線規格を用いてデータ伝送を行う場合、保安情報の伝送に関する鉄道向け国際規格 IEC62280 に従ったセキュリティ対策を実施することが求められている⁴⁾。IEC62280では、無線LANをType 5のオープントランスマッションシステム(特性が未知・可変であり、かつ使用者が特定できない)と位置付けており、7つの脅威を定義し、8つの防護手段を挙げている。各脅威に対し、有効とされる対策の関係を表1に示す。本システムで採用した対策は、表1中で網掛けした7つである。重複、削除、挿入、順序誤りに対する対策は、シーケンス番号を付加し、検知することとしている。また、破壊に対しては、セーフティコードと暗号化技術による2重の対策を実施し、より信頼性の高いデータ伝送を可能としている。伝送パケットには、メッセージ認証コード(Message Authentication Code, MAC)を付加し、分割したデー

表1 セキュリティ対策

脅威	対策							
	シーケンス番号	タイムスタンプ	タイムアウト	送信ID	フィードバック	端末認証	セーフティコード	暗号化技術
重複	○	○						
削除	○							
挿入	○			△	△	△		
順序誤り	○	○						
破壊							○	○
遅延		○	○					
なりすまし					△	△		○

※○：脅威に対し有効な対策、△：条件により○相当の対策

タ毎に巡回冗長検査 (Cyclic Redundancy Check, CRC) の付加を行うことで見逃し誤り率を低減している。さらに、遅延に対しては、無線通信に伝送周期を設け、伝送周期に応じたタイムアウトを設定し、タイムアウトを検知すると、送信装置は再送処理を行い、再送処理を行ってもデータが伝送できない場合、伝送異常とし更新処理を終了する仕様とした。なりすまし対策は、暗号化を使用し、暗号化方式は、共通鍵方式で堅牢な暗号方式として知られるAES (Advanced Encryption Standard) を使用した。暗号化は送信電文全体に対して行い、その後変調を行う。なお、車上および地上無線制御装置のIDを登録しており、異なるIDは認めないこととしている。

4. 検証試験

開発した無線更新技術について、無線特性ならびに機能検証のための試験を実施した。各検証試験について以下に述べる。

4.1 無線特性試験

無線特性を把握するため、鉄道総研構内において、減衰特性および通信距離特性試験を実施した。

減衰特性試験では、無線制御装置の基本的な性能指標であるC/N(搬送波電力対雑音比)と電文の伝送成功率との関係を確認するため、図10に示す構成にて試験を行った。上記の関係は、無線制御装置間をステップアッテネータを介して同軸ケーブルで接続し、受信レベルを可変させることでC/Nを任意に変化させて測定した。伝送品質や受信レベルは、プロトタイプで使用した無線制御装置のモニタ機能で測定した。ステップアッテネータによって設定したC/Nに対するパケット送信成功率およびスループットを図11に示す。図11より、20Mbps以上のスループットを得るためには、C/Nで30dBを確保する必要があると言える。なお、スペクトラムアナライザによる受信レベル測定も同時に実施し、無線制御装置での測定結果が妥当であることを確認した。

また、通信距離特性試験では、通信距離と受信レベルの関係把握し、通信性能を確認するため、無線制御装

置間の距離に対する伝送レートを測定した。スループットおよび受信レベルは、無線制御装置親機を固定側とし、子機を移動させることで測定した。無線制御装置子機の受信結果を図12に示す。図12より、20Mbpsのスループットを得るためには、無線制御装置間距離を150m以下とする必要がある。このとき、450mまでのパケット送信成功率も問題ないレベルであった。なお、距離に対するスループット、受信レベルがリニアに低下していないが、350m地点で持ち上がっている。これは、垂直偏波の大地への干渉の影響であることを確認している。

一方、伝送品質の試験は、JR九州南福岡車両区にて実施した。パケット送信成功率の時間推移を日中帯の2日間観測したところ、目立った特徴は見られず、5.6GHz体の無線通信によるデータ伝送の信頼性に関して問題ない結果が得られた。

4.2 機能検証試験

伝送品質試験と同様にJR九州南福岡車両区にて、車上装置のプロトタイプを現車に搭載し、車上DB更新の機能検証試験を実施した。試験構成を図13に、試験時の設置状況を図14に示す。

(1) 正常動作の確認

更新用DBとして、約700kByteの制御情報を送信し、更新時間ならびに更新動作について、検証を行った。無線伝送のスループットは、21.5Mbpsであり、更新にかかる時間は、正当性確認の結果を管理装置が送信するまでに3分12秒であった。更新中、ATS-Dx車上送受信器が非常ブレーキを出力することを確認した。また、正当性確認後、車上送受信器は、記憶領域を切替え、再度電源を投入すると新DBで動作することを確認した。これらは、いずれも仕様通りの動作であり、問題なく更新されることが確認できた。

さらに、車上装置2台(図13中の車上装置1および2)に対して更新を行い、同時更新可能なことを確認した。これは、従来のCFカードによる単体毎の更新と比較して、効率向上に寄与することを示している。

(2) 異常発生時の動作確認

本システムによる車上DB更新を実施する上で、異常と考えられる状況を抽出し、異常発生時の動作について検証した。無線伝送上の異常として、他車両による遮蔽、無線通信の断絶および妨害波印加、人間系の異常として、更新データ誤りおよび更新SW誤扱いについて動作確認を行った。無線通信の断絶においては、管理装置側でタイムアウトを検知し、通信異常として車上DBの更新を中断した。また、更新データ誤りの検証においては、異常データとして1bitのPN符号誤りがある車上DBを用いて更新を行った。その際、車上装置側でデータ異常を検知し、更新を中断することを確認した。なお、その他の異常時の動作にお

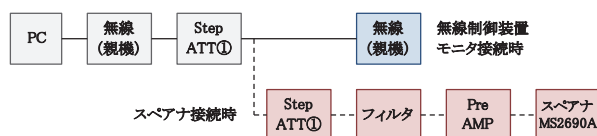


図10 減衰特性試験構成

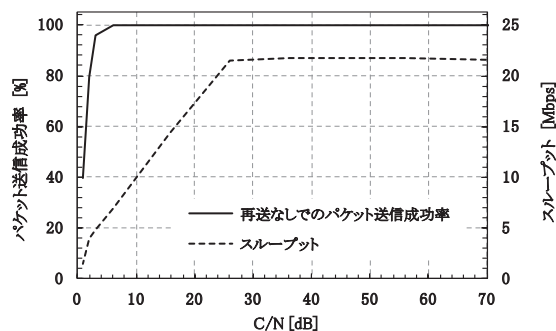


図11 無線制御装置のC/N特性

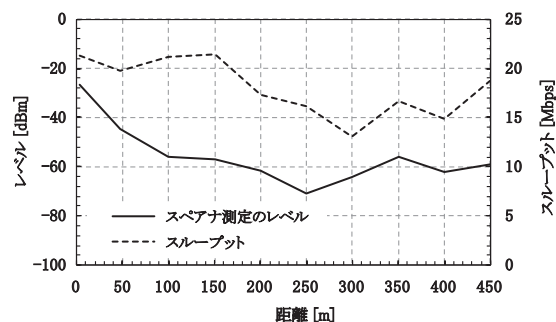


図12 無線制御装置の距離特性

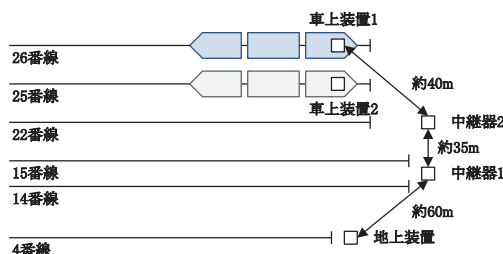


図13 機能検証試験構成図

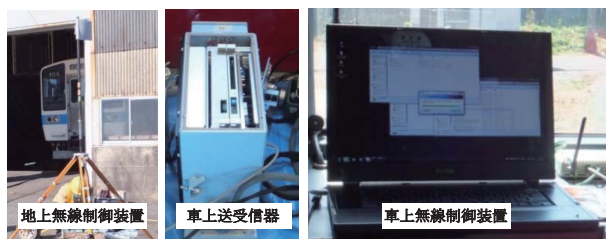


図14 試験時の設置状況

いても、仕様通りであることが確認できた。

以上より、プロトタイプによる機能検証試験の結果、従来と同等の正当性を確保したまま複数台の同時更新が可能であり、単体毎の更新と比較して効率的に車上DBを更新できることを確認した。

5. 無線 DB 更新技術の将来像

今回開発したシステムは、ATS-Dx を対象にハードウェア構成を極力変更しない前提としたため、更新開始時に車上で更新 SW を扱う必要がある等の制約が生じていた。本章では、新たに無線を利用した車上 DB 更新を行う車上保安装置の開発にあたっての将来システム像について述べる。

システムの前提として、プロトタイプと同様に車両基地の地上装置から無線を用いて車上 DB 更新を行い、一方で地上側の作業員のみで更新可能なものとした。将来システムとして具備すべき要件を以下に整理する。

(1) 車上装置のハードウェア構成

車上装置内のハードウェア構成を図 15 に示す。車上装置は、保安制御部と無線制御部で構成され、無線制御部は、無線モジュールを内蔵し、車上アンテナにコネクタ接続する構成とする。無線制御部は、高速な無線通信でダウンロードしたデータを一時的に蓄えるものとし、保安制御部へインストール用データの引渡しを行う。また、乗務員による車両電源断の影響を受けずにデータ更新を行うため、バッテリー等を設ける必要がある。

(2) データ管理

現状、地上装置によるデータ管理は、車両基地毎の管理となっているが、各管理装置間で同期をとることで、更新対象車両の所属基地にとらわれない、車上 DB 更新ならびにバージョン管理を可能とする。また、車両基地内では、頻りに車両移動があるため、走行中にデータ更新を行えるようにすることが理想である。地上および車上無線制御装置間のダウンロード時間に比べて、車上無線制御装置と運転保安装置間のインストールには時間がかかることから、図 15 の構成において、ダウンロードされたデータを無線制御部のダウンロードメモリに格納し、データ選択回路により保安制御部で使用していない側のデータベースおよびプログラムメモリにインストールを行う仕組みとする。これにより、本線走行中であっても運転保安装置の動作に影響を与えることなく、より早くデータ更新を行うことができる。

(3) 使用無線

現在、無線局免許が不要で、屋外で使用可能な汎用無線 LAN の最大速度は 1Gbps 超 (IEEE802.11ac) である。実環境でのスループットを考慮しても、高い伝送速度が得られる可能性があるため、さらに大容量のデータベースの伝送にも対応できると考えられる。また、局所的な範囲での通信とするのであれば、ミリ波周波数帯等を使用した高速通信も使用可能である。

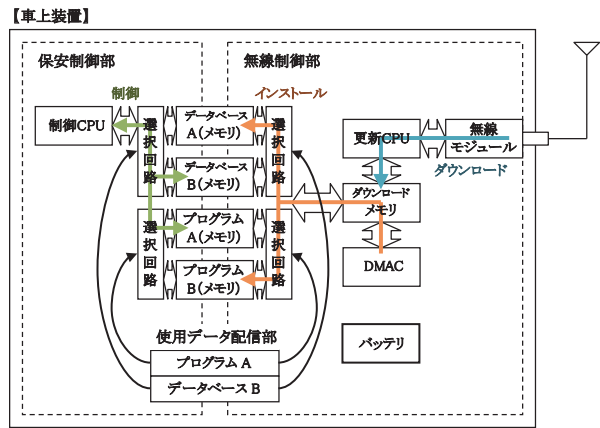


図 15 将来システムのハードウェア構成

6. おわりに

本稿では、車上 DB の概要と、開発した無線更新技術について更新時のデータ正当性確認手法およびセキュリティ手法について述べると共に、検証試験結果について述べた。また、車上 DB 更新技術の将来像について述べた。

無線更新技術として、免許が不要な汎用無線 LAN を選定し、IEC62280 の要件である 7 つの脅威に対応できる伝送フォーマットの策定を行った。また、地上装置、車上装置での新旧データの差分比較による DB 更新の安全性確保技術を開発した。さらに、プロトタイプ装置を用いた検証試験を実施し、無線による車上保安装置用 DB 更新の基本機能に問題がないと共に、従来と同等の正当性を確保したまま複数台の同時更新が可能であり、単体毎と比較して効率的に車上 DB を更新できることを確認した。本システムの開発で得られた知見や技術は、今後の車上 DB を保有する運転保安装置における車上 DB 更新作業の効率化に寄与するものである。

最後に、本システムの開発にあたり、ご協力いただいた関係各位に深く感謝する。

文献

- 1) 藤田浩由, 新井英樹, 佐藤和敏, 門脇雅明, 貞苺路也: 車上データベースを用いた ATS-Dx の開発, 鉄道総研報告, Vol.24, No.3, pp.5-10, 2010
- 2) 藤田浩由, 会津知見, 森田隼史, 相馬清高: ATS-Dx の車上 DB 管理システムの開発, 第 48 回鉄道サイバネ・シンポジウム, No.608, 2011
- 3) 小関泰二, 森田隼史, 新井英樹, 杉本経嗣, 三浦泰久, 森下隼人: 無線による車上データベース更新技術の開発, 第 51 回鉄道サイバネ・シンポジウム, No.529, 2014
- 4) 川崎邦弘: 安全関連伝送に関する国際規格 IEC62280, 鉄道総研報告, Vol.27, No.2, pp.41-44, 2013