

無線と有線を組み合わせた車両間情報伝送システム

竹内 恵一* 流王 智子* 岩澤 永照*
 岩本 功貴* 川村 智輝**

Information Transmission System among Vehicles Combining Wireless Transmission and Wired Transmission

Keiichi TAKEUCHI Satoko RYUO Nagateru IWASAWA
 Koki IWAMOTO Tomoki KAWAMURA

On the abnormal condition detected on the vehicle, by transmitting the information to the driver as soon as possible, we expect that the train will operate more safely and stably than ever before. Therefore, a communication method among vehicles is studied for vehicles without transmission lines dedicated to information transmission. This paper describes a method of transmitting information by wire, using an existing service line for control signal transmission. Next, a communication method that combines wireless transmission and wired transmission is proposed. Finally, the result of a functional test is shown, which uses a prototype of an information transmission system that implements the proposed method.

キーワード：引き通し線，車両間情報伝送，車両状態情報，SHDSL 伝送，920MHz 帯無線

1. はじめに

近年，編成内の各車両の状態情報を運転台まで伝送することを目的とした専用の伝送路が設置され，編成内の各車両の様々な情報を運転台の乗務員が確認できるシステムを搭載した車両の導入が進んでいる^{1) 2)}。一方，情報伝送用の伝送路が設置されていない車両は，伝送路の確保が課題となり，編成内の各車両からの情報を先頭車両の運転台まで有線で伝送するシステムの導入は進んでいない。そこで，車両で検知された異常情報を可能な限り早く運転台の乗務員に伝達することにより，列車のさらなる安全・安定運行の実現が期待される。

これまで，鉄道総研では，車両の状態監視を目的として，新たな専用の有線伝送路の設置を必要としない無線伝送に着目して，920MHz 帯無線を用いた車両間ネットワークの構成手法を提案し，プロトタイプ装置の製作および機能確認を行った³⁾。しかし，近年の ICT の急激な進展に伴い，編成内の各車両でセンサ等により取得した様々な情報を先頭車両の運転台へ伝送する需要がさらに増えると推測される。このような対象に対して，先行研究で提案した無線伝送方式単独での情報伝送では，伝送の確実性や伝送速度の確保などが課題となる。

本稿では，情報伝送用の伝送路が設置されていない車両を対象として，まず，車両の制御信号伝送用の既設の

引き通し線を使用した，有線による車両間情報伝送についての検討結果について述べる。次に，伝送速度の速い有線伝送と先行研究で提案した無線伝送を組み合わせることで，有線伝送が不可能な場合にも無線伝送で重要な情報を伝送可能な，ハイブリッド型の車両間通信手法を提案する。最後に，提案した手法を実装した車両間情報伝送システムのプロトタイプシステムによる機能検証試験の結果を報告する。

2. 有線による車両間情報伝送の要求事項

2.1 車両間情報伝送システムの要求事項

車両間情報伝送システムの要求事項を明らかにするためには，先頭車両の運転台に伝送される各車両の情報を把握する必要がある。特に，伝送システムに要求される性能や機能の検討に必要な情報の特性を表す項目は，目的，情報の内容，情報形式と情報量，許容遅延時間，伝送頻度，重要度，用途などがある。

各車両から先頭車両へ伝送する情報は，車両の状態を示すもの，乗車するお客様のサービスのための情報など多くのものがある。特に車両の状態に関しては，近年，多くのセンサ等が車両に設置されるようになってきており，様々な情報を把握することが可能となっている。そこで，取得できる様々な情報の中でも，運転台に伝送することで，列車の安全・安定運行に寄与すると想定される情報について，上で述べた情報の特性を表す項目毎に整理した。表 1 に車両間伝送システムにより伝送される代表的な情報の想定例を示す。重要度の欄の「A」は安

* 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室

** 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室 (現電力中央研究所)

全に関わるもので、運転台において緊急の対応が必要な情報を示し、「B」は状態把握やメンテナンスに活用する情報として分類した。

なお、表1に示した各情報は、情報の内容によっては各車両の複数箇所（例えば車輪状態は各車輪）から先頭車両に伝送されることを考慮する必要がある。また、1両単位の増解結に対応可能な車両間伝送システムとすることで、伝送システムの構成による車両運用上の制約を避けることができる。

表1 車両間伝送システムで伝送される情報の想定例

目的	情報の内容	情報形式と情報量	許容遅延時間	伝送頻度	重要度	用途
異常検知	脱線検知	Ior0 (1bit)	1秒以内	検知時	A	運転台 モニタ表示 (車両の制御)
	異常動揺	Ior0 (1bit)	1秒以内	検知時	A	運転台 モニタ表示 (車両の制御)
車両の状態情報	車輪状態 (備、フラット)	8 bytes	-	1/数分	B	ログ装置 (メンテナンス)
	ブレーキ温度	8 bytes	-	1/数分	B	ログ装置 (メンテナンス)
	車両制御装置	8 bytes	-	1/数分	B	ログ装置 (メンテナンス)

2.2 有線による車両間伝送システムの構成

先頭車両と編成内の各車両間での情報伝送を有線伝送により実現する車両間伝送システムは、図1に示す2つの構成が考えられる。図1構成(a)は、先頭車両から順番に車両2両間で1対向の伝送路を構成し、最後尾の車両まで段数を重ねる構成である。もう1つの図1構成(b)は、先頭車両の伝送装置と最後尾まで各車両の伝送装置が並列に接続される構成である。

構成(a)の主なメリットは、車両数の増加に伝送距離が影響されないという点である。伝送は必ず隣接する車両に搭載された伝送装置との間で行われるため、伝送装置間の伝送距離は車両1両分程度（標準的な在来線車両の場合20m）となる。一方、構成(b)のメリットは、構成(a)に対して伝送装置の台数が半分で済む点にある。

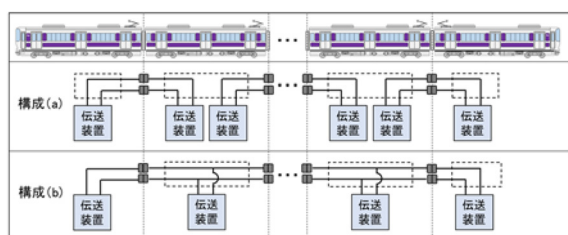


図1 有線伝送による車両間伝送システムの構成

2.3 有線伝送方式の検討

本研究では、既設の引き通し線を使用した有線伝送による車両間通信の構築を目標としている。既設の引き通し線の空き心線を利用して情報伝送を実現するためには、伝送に必要な心線は可能な限り少ない方が、導入の際の制約条件が少なくなる。そこで、2心線で情報伝送が可能な有線伝送の主な方式に関して得失を整理し、引

き通し線を使用した車両間伝送システムへの適用を検討した。検討した結果を表2に示す。

この検討の結果、先頭車両と後続の車両との間で情報を伝送するシステムを構築する伝送方式として、RS-485方式もしくはxDSL方式を候補とした。RS-485方式は、同種の用途について先行の検討事例がある⁴⁾。また、双方向伝送が可能な方式を用いることで、様々なケースで使用が可能になると想定される。そこで、本研究ではxDSL方式（構成(a)）を伝送方式の候補にすることとした。また、xDSL方式には複数の方式が存在するが、ペア線で10Mbps以上の対称伝送が可能な方式としてSHDSL方式を選定した。

表2 伝送方式の選定

通信方式	システム構成(図1)	伝送速度又は伝送可能な情報量	特徴	適用	備考
電圧印加	-	ON・OFF (2bit相当)	メリット デメリット	○	△
RS-232	a	160kbps程度	メリット	○	
			デメリット		
RS-485 (EIA-485)	b	最大10Mbps程度 (伝送距離による)	メリット	○	検討例あり ⁴⁾
			デメリット		
xDSL	a	最大10Mbps程度 (伝送距離による)	メリット	○	
			デメリット		
Ethernet	b	100Mbps (理論値)	メリット	○	×
			デメリット		

3. 引き通し線の特性

3.1 引き通し線とは

引き通し線は、制御信号の車両間伝送を主な用途として車両に設置された電線路を複数本束ねたものである。運転台から各車両への制御情報は、引き通し線に流れるDC電圧のON・OFFにより各車両の車両制御装置にその情報が伝送される⁶⁾。

本研究では、ブレーキ指令信号の伝送などに使用される鉄道車両用600V架橋ポリエチレン電線（心線断面積：3.5mm²）⁷⁾を複数本まとめて電線管に収容した引き通し線の予備心線を用いた情報伝送を検討することとした。

引き通し線は、車両の連結面にあるジャンパ栓とジャンパ栓受に接続されている。このジャンパ栓およびジャンパ栓受を介して、連結された車両間の引き通し線が接続され、先頭車両の運転台からの制御信号が、最後尾の車両まで伝送される仕組みとなっている。

3.2 情報伝送に関わる引き通し線の特性

電線の電気的特性には様々な項目が存在するが、情報伝送に大きな影響を与える項目として、伝送信号がどの程度減衰するかを示す減衰特性と、情報伝送に用いるペア線を通る信号が同一の電線管に収容された引き通し線の他のペア線に与える影響を示す漏話特性がある。そ

それぞれの特性の傾向を把握するため、実車での測定を実施した。なお、連結箇所におけるジャンパ栓の接続の影響を把握するため、車両1両のみの場合と車両2両を連結した場合で測定を実施し、比較した。

3.2.1 減衰特性

情報伝送に使用する引き通し線のペア線の減衰特性について、単車と2両連結における実測値を1km相当に換算した値と、鉄道沿線に敷設された通信ケーブル（心線外径0.9mm：1km）の減衰量を図2に示す。図2より、引き通し線は周波数が高くなると減衰量が大きくなる傾向を示した。また、2両連結の場合は、1MHzから2MHz周波数帯域の一部において1MHz以下の周波数帯とは異なり、周波数が高くなると減衰量が小さくなる傾向が見られた。これは、ジャンパ栓の接続による影響と推測される。さらに、通信ケーブルの減衰量と比較すると、100kHz以下の周波数帯の減衰量に大きな差はないが、100kHz以上の周波数帯では、周波数が高くなるほど減衰量が大きくなる傾向が見られた。

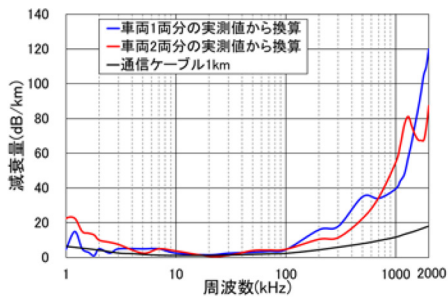


図2 引き通し線の減衰特性（1km相当に換算）

3.2.2 漏話特性

情報伝送に使用する引き通し線のペア線と、同一の電線管に収容された引き通し線の他のペア線との間の近端漏話減衰量を図3に示す。なお、図3には、比較のため、鉄道総研内に仮設した試験用通信ケーブル（心線外径0.9mm）の近端漏話減衰量の実測値を合わせて記載した。その結果、近端漏話減衰量は周波数700kHz付近までは周波数が高くなると小さくなる傾向であり、また、100kHz以下では通信ケーブルと比較して大きな差がなかった。

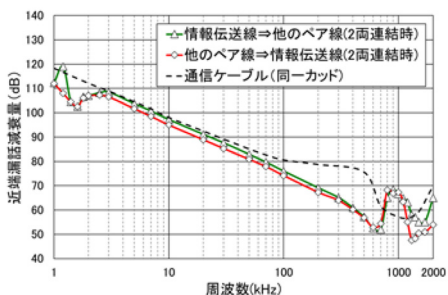


図3 引き通し線の近端漏話特性の実測例

3.2.3 車両制御用の信号の影響

先頭車両の運転台で乗務員がノッチやブレーキの操作を行うと、それぞれの操作に対応して引き通し線にDC電圧が印加される。本研究では、車両制御用信号として引き通し線にDC100Vが印加される車両を対象として、運転台での操作により同一電線管内の制御線にDC100Vが印加された瞬間に、情報伝送で使用する心線（以下、情報伝送線）に発生する電圧の測定を実施した。実測例として、非常ブレーキ操作時に引き通し線に発生する対地電圧の測定結果を図4に示す。また、図4には、情報伝送に影響を与える線間電圧を情報伝送線の心線の対地電圧の差から算出した結果も示した。図4より、先頭車両の運転台での操作により、対応する引き通し線に車両制御用信号が印加されると、情報伝送線には最大40V程度の対地電圧が発生することを確認した。また、情報伝送線の線間電圧は、最大で10V程度になる場合があることを確認した。本測定結果を基に、車両間伝送システムの伝送装置に要求される耐電圧や、情報伝送時に考慮すべき線間電圧などについての検討が可能となる。

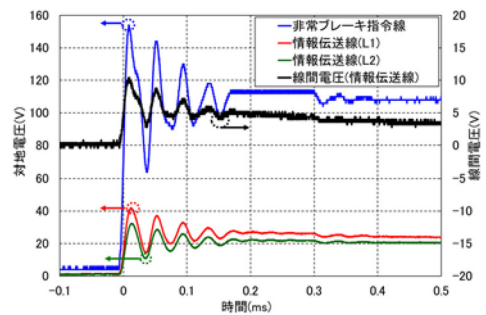


図4 情報伝送線に印加される電圧の例（非常ブレーキ操作時）

4. 引き通し線による車両間通信

4.1 伝送速度との検討

車両間通信では、複数の用途や目的の様々な情報が各車両から先頭車の運転台に伝送される。さらに将来的には、表1に示した以外の情報の伝送が追加されることが予想される。日本国内で車両間情報伝送システムとして導入事例が多いARCNET方式は、最大で10Mbps程度の伝送速度である^{2) 5)}。ARCNET方式と同程度の伝送速度が確保できれば、専用の情報伝送線を設備した車両と同程度の情報伝送が可能となる。そこで伝送速度10MbpsのSHDSL方式により有線伝送を行うこととした。

また、SHDSL方式を含む高速デジタル伝送の伝送可否の検討については、鉄道沿線の通信ケーブルを対象とした、導入可否の評価手法⁸⁾を提案しており、この手法を活用することで、計画段階における導入可能な伝送方式や伝送速度の検討が可能である。

4.2 情報伝送への影響

先頭車両の運転台でのノッチやブレーキの操作により、情報伝送線に電圧が誘起されることを図4で確認した。この誘起された電圧が情報伝送へ与える影響を把握するため、30秒間の情報伝送時に運転台でのノッチやブレーキの操作を1回行う試験を、運転台での操作条件を変えて複数回実施した。なお、試験時は先頭車両と連結された2両目と3両目の車両間で情報伝送を実施した。測定の結果、運転台での操作により、情報伝送において 10^{-4} 程度の割合でパケット損失が発生した。実測例として、非常ブレーキ操作を行う試験を4回実施した際のパケット送信数と損失パケットの合計と、パケット損失率を表3に、非常ブレーキ操作時の制御信号電圧と情報伝送における1秒毎のパケット損失数の変化を図5に示す。

以上のように引き通し線を用いた情報伝送が可能なことを確認したが、図5のように運転台での操作によりパケット損失が発生することから、引き通し線を用いた有線伝送において、確実に先頭車両まで伝送しなければならない情報（例えば脱線検知など）については、情報の到達確認や再送などにより、伝送の確実性を確保する必要があるといえる。

表3 運転台での操作時のパケット損失率の実測例

運転台での操作条件	非常ブレーキ
実施試番数	4
パケット送信数	102042
損失パケット	60
パケット損失率	5.8×10^{-4}

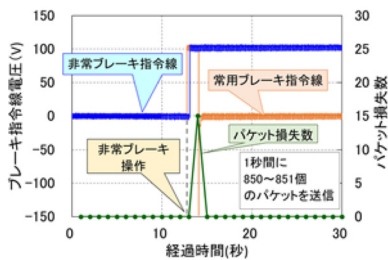


図5 ブレーキ操作とパケット損失率の時間変化（非常ブレーキ操作時）

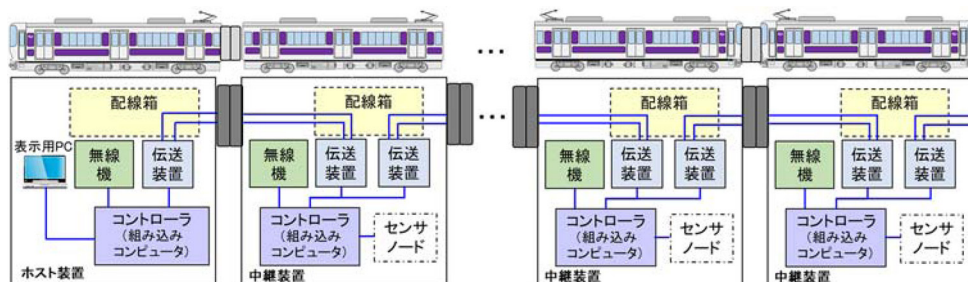


図6 ハイブリッド型車両間通信手法の装置構成

5. 無線と有線による車両間情報伝送システム

前章において、既設の引き通し線を使用した有線伝送が可能であることを確認した。しかし、有線伝送の場合には、伝送路となる引き通し線が断線した際に、必要な情報が伝送できなくなるという課題がある。特に、安全に関わる重要な情報の伝送を行うことを考慮すると、伝送路の冗長性の確保が必要となる。そこで、先行研究で提案した無線伝送による車両状態監視向け車両間ネットワーク³⁾と、本研究で提案した有線伝送とを併用したハイブリッド型の車両間通信手法を提案し⁹⁾、提案手法を実装した車両間情報伝送システムを構築した。また、ハイブリッド型車両間通信手法は、各駅において編成内の車両の連結順を予め車両の運用管理システムなどから取得できることを前提としている。そのため、途中駅での増解結時にも、既に保有している編成情報をもとに、ネットワークを再構築することが可能である。

5.1 ハイブリッド型車両間通信手法の装置構成

ハイブリッド型車両間通信手法を構成する装置は次の通りとする。各車両の状態情報を取得する装置を「センサノード」、先頭車両において各車両のセンサノードからデータを収集して表示および蓄積する装置を「ホスト装置」と呼ぶ。各車両でセンサノードの情報を収集し、ホスト装置までデータ伝送を行う装置を「中継装置」と呼ぶ。有線伝送を行う装置を「伝送装置」、無線伝送を行う装置を「無線機」、これらを制御する装置を「コントローラ」と呼ぶ。ホスト装置と中継装置は、伝送装置、無線機、コントローラから構成される。また、ホスト装置には、コントローラへ命令を出したり、コントローラの処理を表示したりする「表示用PC」を搭載する。これらの装置を用いた、ハイブリッド型車両間通信手法の装置構成を図6に示す。

5.2 ハイブリッド型車両間通信手法

ハイブリッド型車両間通信手法では、まず有線伝送による通信ネットワークの構築を行う。ホスト装置は、運用管理システムなどから事前に取得した車両の連結順

に対応する中継装置の並び順の「リスト」を、ホスト装置から一番遠い中継装置に送信する。中継装置はリストを受信後、ホスト装置にACK（受信確認）を返す。ホスト装置はACK受信後、一つ手前の中継装置に対してリストの送信を行い、順にこれを繰り返して全中継装置にリストを配信する。一方、ホスト装置が中継装置からACKを受信できなかった場合、ホスト装置は当該中継装置との有線伝送に問題があると判断し、リストから当該中継装置を消去して新たなリストを作成して、一つ手前の中継装置に送信する。以上を繰り返すことにより、伝送装置の故障や有線伝送回線の断線を考慮した有線伝送の通信ネットワークを構成できる。

有線伝送の通信ネットワーク構成後、無線伝送の通信ネットワークを構成する。無線伝送の通信ネットワークは、無線による車両間の伝送の可否を1,0で表現した「通信行列」を用いて表す。ホスト装置と中継装置、中継装置間において、通信確認を行い、最新の通信状況を反映した無線伝送のネットワークを構成する。

なお、提案する車両間ハイブリッド通信手法では、無線伝送の通信ネットワーク構成時に、既に構成済みの有線伝送の通信ネットワークを可能な限り用いることとする。したがって、ホスト装置と中継装置は、有線伝送可能な中継装置のリストと通信行列を保有し、これらに基づいて有線もしくは無線で伝送を行う。

先頭車両の後ろに10両連結された11両編成の列車において、先頭車両はホスト装置が、1両目以降の各車両には中継装置が設置され、8両目までの有線伝送が可能であり、残り2両の車両が無線伝送のみ可能な場合の例を図7に示す。また、通信行列で示されるホスト装置と直接無線伝送が可能な中継装置は4両まで、中継装置間で直接無線伝送が可能な両数は3両までとする。さらに、ホスト装置から最後尾の10両目の中継装置に伝送を行う場合、8両目までは有線伝送を用い、以降は無線伝送を用いる。一方、10両目の中継装置からホスト装置まで伝送を行う場合、通信行列に従い、7両目にある中継装置に無線で伝送を行う。7両目にある中継装置は、有線伝送が可能であるため、ホスト装置まで有線伝送を用いる。無線伝送では中継装置を経由する数は処理時間に大きく影響するため、有線伝送を用いることで中継装置の経由数を軽減することで、伝送時間を大幅に短縮することが可能となる。



図7 ハイブリッド型車両間通信手法の伝送手順

5.3 プロトタイプシステムによる評価

提案したハイブリッド型車両間通信手法を実装した、車両間情報伝送システムのプロトタイプを製作し、機能検証を実施した。

5.3.1 プロトタイプシステムの製作

ホスト装置及び中継装置の構成部品として、伝送装置はメタル線2心を利用し最大15.2Mbpsのデータ伝送が可能なSHDSL伝送装置、無線機は免許不要で利用可能な920MHz帯の無線モジュール（伝送速度：100kbps）とした。これらを制御するためのコントローラは小型なマイコンボードを採用した。なお、プログラムはC言語を使用した。製作した車両間情報伝送システムのプロトタイプを図8に示す。

製作したプロトタイプシステムでは、有線のみ、無線のみ、ハイブリッドの3種類の中からネットワーク構築手法を1つ選択してプログラムがスタートする。また、データ収集の収集回数と収集間隔をあらかじめ設定する。プログラムがスタートすると、選択した方法でネットワークを構築し、最初のデータ収集を行う。ネットワーク構築後は、設定した周期によりデータ収集を行う。さらに、各車両に設置されたセンサ等で検知した異常なデータの送信に対応するため、中継装置から先頭車にデータを伝送するプッシュ通信機能を備えている。

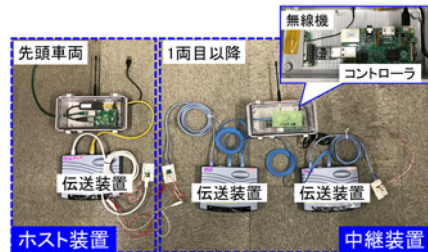


図8 車両間情報伝送システムのプロトタイプシステム

5.3.2 検証試験の条件

先頭車両の後ろに10両連結された11両編成の列車を想定し、①有線のみでネットワークを構築する場合、②無線のみでネットワークを構築する場合、③有線と無線のハイブリッド（有線伝送は全ての車両間で使用可能な状態）でネットワークを構築する場合の3つの構成方法のネットワーク構成時間とデータ収集時間を比較した（試験条件1）。試験時の無線伝送において、ホスト装置と中継装置間は4両、中継装置間は3両まで直接伝送可能とする通信行列を与えた。

次に、有線伝送が不可能な場合と有線伝送が可能な車両数が2, 5, 8両目までの場合の4パターンで試験を行い、無線のみで構築する場合とハイブリッドで構築する場合におけるネットワーク構成時間とデータ収集時間の比較を行った（試験条件2）。

5.3.3 検証試験の結果

試験条件1におけるネットワーク構成時間とデータ収集時間の試験結果を表4に示す。表4の結果は、3回実施した平均値を示している。無線のみの場合とハイブリッドの場合のネットワーク構成時間を比較すると、ハイブリッドの方が約1.5秒早くネットワークを構成しており、提案したハイブリッド型車両間通信手法により、無線部のネットワーク構成時間が短縮できることを確認した。また、①有線のみでネットワークが構成できる場合には、先頭車両の後ろに10両連結した編成において0.2秒以内でデータ収集が行えることを確認した。

試験条件2におけるネットワーク構成時間の結果を図9に、データ収集時間の結果を図10に示す。図9より、有線伝送が可能である両数が多いほど、ネットワーク構成時間が短縮され、車両数に対するネットワーク構成時間は線形に増加する傾向がみられた。また、図10より、有線伝送が使用できない車両以降のデータ収集は時間が延びることが分かる。さらに、有線伝送可能な両数が2両目までであっても、すべて無線で構成した場合に比べて0.5秒程度短縮しており、提案手法により有線伝送が可能である車両が存在する場合はデータ収集時間の短縮効果が期待できることを確認した。

表4 試験結果（試験条件1）

	ネットワーク構成	データ収集
①有線のみ	0.18秒	0.16秒
②無線のみ	12.51秒	4.50秒
③ハイブリッド	10.95秒	0.16秒

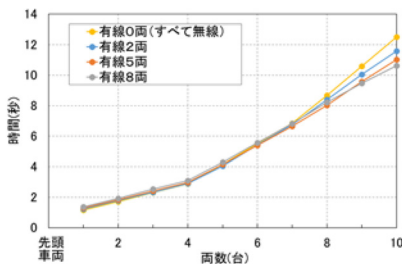


図9 ネットワーク構成時間（試験条件2）

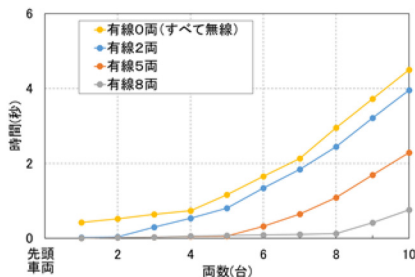


図10 データ収集時間（試験条件2）

6. まとめ

本稿では、専用の情報伝送路が設置されていない車両を対象とした車両間の情報伝送システムの検討を実施した。まず、車両の制御信号伝送用の既設の引き通し線を伝送路としたSHDSL方式による有線伝送を提案し、運転台の操作時に 10^4 程度のパケット損失が発生するものの、10Mbps程度の情報伝送が可能であることを確認した。次に、先行研究で提案した無線伝送による車両状態監視向け車両間ネットワークと有線によるネットワークを組み合わせたハイブリッド型の車両間通信手法を提案し、提案手法を実装した車両間情報伝送システムのプロトタイプを製作した。さらに、製作したプロトタイプシステムを用いた検証試験により、11両編成でのデータ収集時間が0.2秒程度であることや、ハイブリッド型通信手法により無線伝送のみの場合に比べて情報収集時間が短縮することなど、車両間情報伝送システムの機能を確認した。

今後は、安全運行に関わる重要度が高い情報の再送や有線伝送が途絶した場合に無線により伝送する情報の選択手法を検討していくとともに、実車への導入に向けて、各車両におけるセンサ側とのインタフェースや車両搭載の電子機器への各種規格への適合などについても検討していく予定である。

文献

- 1) 新井静男, 白樫智也: 列車情報管理装置 (TIMS) の10年と今後の取り組み, サイバネティクス, Vol.12, No.1, pp.25-32, 2007
- 2) 川崎淳司, 菅谷誠, 祖父江昭彦, 星野健太郎, 佐藤春雄: 次世代車両制御システム (INTEROS) の開発, JR EAST Technical Review, No.36, pp.43-50, 2011
- 3) 流王智子, 岩澤永照, 川村智輝, 羽田明生, 川崎邦弘: 車両状態監視向け車両間ネットワークの構成手法, 鉄道総研報告, Vol.31, No.3, pp.41-46, 2017
- 4) 今井一富: コンテナ貨車状態監視装置の開発, R&M, Vol.22, No.6, pp.19-24, 日本鉄道車両機械技術協会, 2014
- 5) 鉄道車両における情報技術調査専門委員会: 鉄道車両とIT, 電気学会技術報告, 第886号, 2002
- 6) 落合統: 列車内制御情報技術と国際規格(1), 鉄道車両と技術, No.156, pp.2-7, レールアンドテック出版, 2009
- 7) 鉄道車両-架橋ポリエチレン電線, JRIS J 1001, 日本鉄道車輛工業会, 2005
- 8) 竹内恵一, 中村一城, 川崎邦弘, 山口大介: メタル通信回線による鉄道用長距離高速データ伝送方式の導入評価手法, 鉄道総研報告, Vol.26, No.7, pp.41-46, 2012
- 9) 流王智子, 竹内恵一, 岩澤永照, 菅原章博: 鉄道車両における有線/無線ハイブリッド通信ネットワークの提案, 電気学会通信研究会, CMN-20-024, 2020