

# 車両状態監視向け車両間ネットワークの構成手法

流王 智子\* 岩澤 永照\* 川村 智輝\*  
羽田 明生\*\* 川崎 邦弘\*

Network Formation Method and Transmission System among Vehicles for Condition Monitoring

Satoko RYUO Nagateru IWASAWA Tomoki KAWAMURA  
Akio HADA Kunihiro KAWASAKI

The wireless sensor network has been applied to the condition monitoring of various railway facilities in recent years. In this paper, we focus on the wireless sensor network for train condition monitoring. To aggregate the measurement data from the sensor installed on each vehicle, it is required that the network is formed among vehicles and the sensor data is transmitted to the aggregation device via an appropriate route. However, there is an issue of the change in the network due to the coupling or decoupling. For this issue, we propose a network system consisting of an inner vehicle network and an outer vehicle network, and also develop a method of forming the outer vehicle network. In this paper, we report the test result from a prototype system and the simulation result of our proposed method.

キーワード：車両状態監視，車両間ネットワーク，無線センサーネットワーク，プロトタイプシステム

## 1. はじめに

鉄道では、構造物などの設備や鉄道車両の機器といった対象物ごとに周期を定めて点検を行う時間基準保全が主流である。このような点検や検査を実施する上で、さらにセンサー技術を用いて、設備の劣化や損傷などの経時変化をより定量的かつ高頻度に把握することができれば、危険事象の早期検知や費用対効果の高い保全計画に基づく状態監視保全が実現しやすくなることが期待される。

現在、一部の鉄道車両では、状態監視システムが搭載されており、インバーター、ブレーキ、ドアなどの様々な機器の状態を先頭車両のモニターで監視することができる。このような車両用の状態監視システムは、各車両に伝送端末を有しており、伝送端末が各機器と通信することにより、機器の状態を収集する。一方、伝送端末に集められた情報は、車両間の有線のネットワークを通じて、先頭車両にある中央装置に送られる。このネットワークは、伝送の信頼性を保つためリング状もしくは、はしご状の構成となっている<sup>1)</sup>。

近年、ICTの発展に伴い、無線センサーネットワーク（以下、WSN）を鉄道設備の状態監視に適用する研究が進められている<sup>2) 3)</sup>。WSNは監視対象物のデータを取得するためのセンサーノード、データを集約するための

コンセントレーター、センサーノードとコンセントレーターが直接通信できない場合にデータを中継するリレーから構成される。車両の状態監視において、WSNを活用すると、伝送用のケーブルを省略することができ、車両全体の軽量化や新しいセンサー導入時のケーブルレス化といったメリットが期待される。そこで本研究では、車両の状態監視システムに対してWSNを適用し、車両に設置されたセンサーノード、コンセントレーター、リレーとでネットワークを自動的に構成し、センサーノードのデータをコンセントレーターまでを収集する車両間ネットワークの構成手法を提案した。

## 2. WSNを用いた車両状態監視システム

本章では、車両の状態監視にWSNを適用する場合の課題を示し、それを解決するための車両状態監視システムの構成を示す。

### 2.1 車両の状態監視に対するWSNの課題

センサーノード、コンセントレーターとリレーを用いてWSNを構成する場合、各装置が同じネットワークグループの中に存在することを把握している必要がある。1日を通して1編成の運用が固定であるならば、その編成に設置された装置に、共通するグループIDを事前に登録することにより、1編成の装置間でネットワークを構成することができる。しかしながら、車両の運用

\* 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 総務部)

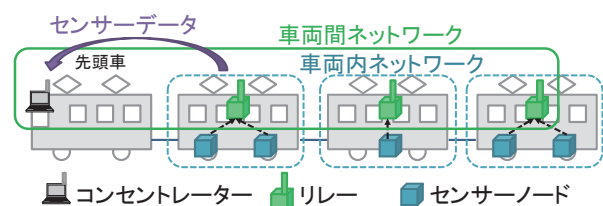


図1 システムの全体構成

上、途中駅にて増解結が発生する編成も存在する。例えば、貨車の運用では駅において貨車の増解結が発生するため、出発駅ごとに編成が変化する。編成が変化すると、それに付随するセンサーノードやリレーが変化するため、新しい編成に設置された装置に対してネットワークのグループを再設定しなければならない。前述したグループIDを各装置に事前に登録する場合、増解結の前後のグループIDも登録しなければならない。その登録作業が煩雑化すると考えられる。また、急な編成の変更が発生した場合、手作業でグループIDの変更を行う必要があり、グループIDの事前登録手法は実用的でないと考えられる。

## 2.2 システムの構成

増解結の情報を含む車両の編成は事前に計画されているため、指令やデータセンターでは、各駅における編成情報を把握することができる。そこで、コンセントレーターが編成情報を把握することができれば、車両に設置された各装置とネットワークを構成することが可能となる。また、各車両においてコンセントレーターと通信をする装置を一台にすることによって、車両間のネットワークはシンプルなものとなるため、本研究では、ネットワークを車両内ネットワークと車両間ネットワークの二つで構成するマルチレイヤ構造を適用した(図1)。ここで、車両内ネットワークは、データを取得するための複数のセンサーノードとそれらのデータを集約する1台のリレーから構成される。車両内ネットワークを一単位として構成することにより、急な編成の変更にも柔軟に対応することが可能となる。車両間ネットワークは、各車両のリレーと、リレーからデータを集約する1台のコンセントレーターから構成される。マルチレイヤ構造では、各レイヤで異なる周波数帯や通信方式を採用できるため、相互の干渉を避けることができ、一般的なWSNと比較してスループットの向上が期待できる<sup>4)</sup>。

本研究で提案する車両状態監視システムにおいて、車両内ネットワークでは、センサーノードとリレー間との距離は最大で車両長であるため、20m程度の通信距離を想定すればよい。したがって、センサーノードとリレー間で直接通信を行うことのできる無線モジュールの中で、安価に入手可能な2.45GHz帯を使用することとした。

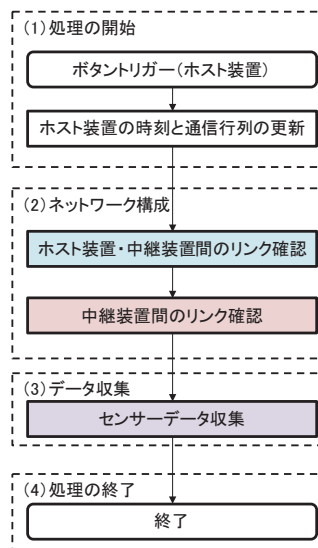


図2 車両間ネットワークの処理フロー

一方、車両間ネットワークの通信距離は、編成長程度の通信距離を想定しなければならない。また、車両間で通信を行うため、周辺からの影響も考慮しなければならない。そこで、2.45GHz帯と比較して、伝送距離が長い920MHz帯を車両間ネットワークに使用する。920MHz帯は、電波の回折性が高いため、障害物を回りこんで通信でき、またチャンネルの選択肢も多く干渉源を回避しやすいという特徴がある。

また、車両間ネットワークにおいて伝送距離が長い場合、コンセントレーターとリレーが直接通信できず、中継をすることによって、ネットワークを構成する。リレーやセンサーノードがバッテリーにより駆動されている場合、なるべく少ない電力でネットワークを構成できる手法が求められる。そこで、本研究では、各中継装置の伝送回数が少なくなるような伝送手順を用いて、車両間ネットワークを自動的に構成する手法を提案した。

## 3. 車両間ネットワークの構成

車両間ネットワークの全体の処理フローは、処理の開始、ネットワーク構成、データ収集、処理の終了の4つに分けられる(図2)。本章では、車両間ネットワーク構成の際に使用する各装置の機能を説明し、データの伝送手順を示す。また、ネットワーク構成で行う通信行列の更新に対して、二つの手法を提案する。

### 3.1 各装置の機能

以降では先頭車両に搭載するコンセントレーターを「ホスト装置」と呼び、各車両に搭載するリレーを「中継装置」と呼ぶ。本研究で提案するホスト装置の機能は以下のとおりである。

- ・ 車両間ネットワークの構成開始のトリガ入力を備える

	中継 1	中継 2	中継 3	中継 4	中継 5
ホスト	1	1	1	0	0
中継 1	-	1	1	1	0
中継 2	-	-	1	1	0
中継 3	-	-	-	1	1
中継 4	-	-	-	-	1

図3 通信行列の例

	通信状況	
ホスト	1	上り経路表
中継1	1	
中継2	-	
中継3	1	下り経路表
中継4	1	
中継5	0	

図4 通信行列(図3)に対応する中継装置2の経路表

- ・ 編成情報と時刻情報を取得する
  - ・ 各中継装置からセンシングデータの収集を行う
- 中継装置の機能は以下である。
- ・ 車両内のセンシングデータを集約する
  - ・ ホスト装置にセンシングデータを伝送する
  - ・ ホスト装置に直接通信できない中継装置からのデータを中継する。

次に、車両間ネットワークを構成する際に使用する用語を説明する。「通信行列」とは、各装置間(ホスト装置・中継装置間、中継装置間)のリンクの使用可否を定めたものであり、ホスト装置が保有する情報である。また、各中継装置は通信行列の一部を「経路表」として保持する。図3に通信行列の例を示す。ホスト装置の行(図3では「ホスト」)に着目すると、中継装置1, 2, 3(図3では「中継1」「中継2」「中継3」)の列に対して1、中継装置4, 5の列(図3では「中継4」「中継5」)に対して0が入力されているため、ホスト装置と中継装置1, 2, 3の間のリンクは使用可能であるが、ホスト装置と中継装置4, 5の間のリンクの使用は不可である。なお、ここでの通信行列では、通信の対称性を仮定し、下三角部分は使用しない。「経路表」とは、中継装置と他の装置間におけるリンクの使用可否を定めたものであり、中継装置が保有する情報である。中継装置自身を起点とし、上側に位置する装置に対する経路を「上り経路表」、下側に位置する装置に対する経路を「下り経路表」と呼ぶ。図3に示した通信行列に対応する中継装置2の経路表を図4に示す。

### 3.2 データ伝送手順

ホスト装置と中継装置は、通信行列や経路表に基づい

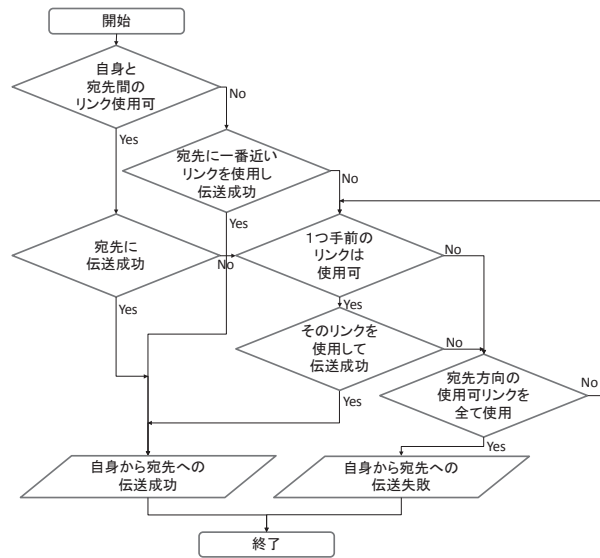


図5 伝送手順のフロー

てデータの伝送を行う。また、ホスト装置と中継装置は、宛先に対して直接伝送ができない場合、他の中継装置を経由させて、データを伝送する。この時、中継を行う中継装置も電力を消費する。したがって、中継を行う中継装置の数が少なければ、全体的な電力消費を抑えることが可能となる。

本研究ではデータ伝送を行う際に、経路表の中で宛先に一番近い位置にある中継装置を優先することとした。宛先に一番近い位置にある中継装置への伝送が失敗した場合、その一つ手前の中継装置に伝送を行う。図5にデータ伝送手順のフローを示す。図5にある「リンク使用可」の判定は、ホスト装置は通信行列、中継装置は経路表に基づいて、対応する要素の値が1であれば「Yes」と判定し、0であれば「No」と判定する。

### 3.3 通信行列の更新<sup>5)</sup>

図2の「(2) ネットワーク構成」における通信行列の更新手法に対して、実際の電波環境を反映した通信行列を作成する手法と、あらかじめ作成した通信行列を用いる手法の二つを提案した。前者を「通信行列更新シーケンス」と呼び、後者を「通信行列保持シーケンス」と呼ぶ。

#### 3.3.1 通信行列更新シーケンス

通信行列更新シーケンスは、ホスト装置が通信状態に応じて通信行列を更新していく手法である。ホスト装置は中継装置との通信の可否を確認し、その結果からホストの行に対応する通信行列を更新する。その後、中継装置に対して、各中継装置との通信の可否を確認するように要求し、各中継装置はその結果をホスト装置にデータとして伝送する。ホスト装置は、受け取ったデータに基づき通信行列を更新する。各装置間の伝送は前節で示した伝送手順のフローに基づいて行われる。

特集：信号通信技術

通信の可否を確認する手段として、ホスト装置から送信されたリンク確認要求に対して、中継装置がホスト装置に返したACKの数をカウントし、その成功率から通信状況を判定する方法が考えられる。中継装置間の通信の可否の確認も同様に行い、確認が終わったら、その結果をホスト装置に送信する。

3.3.2 通信行列保持シーケンス

通信行列保持シーケンスは、通信の可否が記載された通信行列をホスト装置があらかじめ保持する手法である。通信行列は、無線機の仕様や通信環境などからホスト装置と中継装置間、中継装置間で通信可能な両数を算出し、作成する。

あらかじめ保持している通信行列を用いて、各装置の伝送が行われるため、通信の可否にかかわらず、通信行列が1である装置を用いて伝送を行う。

4. 提案手法の確認と評価

本研究で提案した車両間ネットワークの構成手法を搭載したプロトタイプを製作し、その機能確認を行った。また、プロトタイプでは製作台数が限られるため、シミュレーションを用いて台数を増やした結果について確認と評価を行った。それぞれに対して、以下の項目について評価をする。

- ・ ネットワーク構成時間
- ・ データ収集時間

ネットワーク構成時間とは、処理を開始してからセンサーデータ収集を開始する前までの時間である。データ収集時間とは、センサーデータを収集するのに要した時間である。

4.1 プロトタイプによる評価

提案した車両間ネットワークの構成手法を搭載したプロトタイプを表1に示すスペックの機器を使用して、ホスト装置2台、中継装置6台を製作した(図6)。機能確認試験としてホスト装置1台と中継装置6台におけるネットワークの評価を実施した。また、中継装置の電源を意図的に落とし、バッテリー切れや故障を模擬した試験も行った。

まず、中継装置を1～6台に変化させた時の二つの車両間ネットワーク構成手法に対するネットワーク構成時間とデータ収集時間を比較する。通信行列保持シーケンスでは、ホスト装置から中継装置間の伝送は2両、中継装置間の伝送は3両を仮定した通信行列を与えた。機能確認試験は5回実施した。

図7にネットワーク構成時間、図8にデータ収集時間を中継装置の台数を1～6台に変化させて行った結果を示す。図中のマーカーは5回実施した平均値を表す。

表1 機器のスペック表

装置	機器	スペック
ホスト装置	920MHz帯無線モジュール	準拠規格：ARIB STD-T108 送信出力：1, 10, 20mW 外部I/F：UART1系統
	制御用PC	CPU：Intel Core i5 メモリ：8GB
中継装置	920MHz帯無線モジュール	ホスト装置と同スペックのものを使用
	制御用PC	CPU：ARM Cortex-A7 メモリ：1GB



図6 製作したプロトタイプ

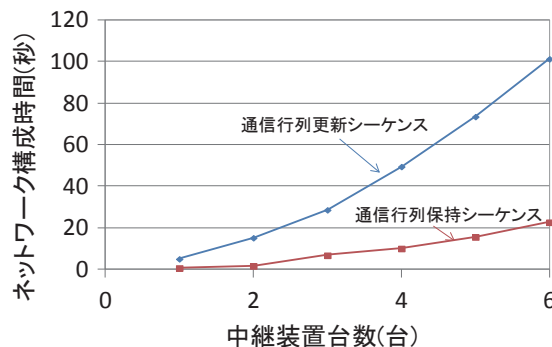


図7 各シーケンスにおける平均ネットワーク構成時間

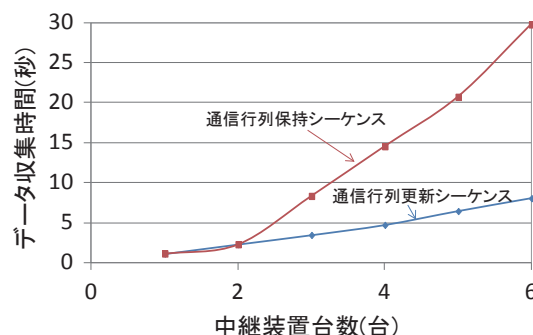


図8 各シーケンスにおける平均データ収集時間

表2 シーケンスごとの平均処理時間（秒）

	通信行列更新		通信行列保持	
	A	B	A	B
① 全て ON	73.6	6.4	9.4	10.4
② 3両目 OFF	110.8	5.0	20.9	19.6

お、平均値の他に標準偏差も算出したところ、最大の標準偏差でも1秒以下に収まっていたため、実験の最悪値でなく平均値を表すこととした。図7から、両シーケンスともにネットワーク構成に要する処理時間が、台数に比例して増加することが確認された。通信行列更新シーケンスは、すべての中継装置に対して通信の可否を確認するのに対して、通信行列保持シーケンスはあらかじめ作成された通信行列を使用するため、台数が増加すると両シーケンスのネットワーク構成時間の差が大きくなることが分かった。

この試験では、通信行列更新シーケンスの通信行列は、全てホスト装置と通信できる行列となった。一方、通信行列保持シーケンスでは、前述したとおり、中継装置間の伝送は2両、中継装置間の伝送は3両を仮定した通信行列を与えている。したがって、通信行列保持シーケンスでは、中継装置の台数が増加すると、中継を行う中継装置の台数が増加する。図7に示したデータ収集時間の結果から、ホスト装置と全ての中継装置が直接通信できた通信行列更新シーケンスと比較して、中継を行う中継装置の台数が増える通信行列保持シーケンスの方がデータ収集に時間を要することが分かった。

次に、ホスト装置1台と中継装置5台の編成において、3両目の中継装置の電源をOFFした状態（表2②）の試験を実施し、全ての電源がONである状態（表2①）との比較を行った。二つの車両間ネットワーク構成手法に対するネットワーク構成時間（A）とデータ収集時間（B）の比較結果を表2に示す。表内の数値は、確認試験を5回実施した平均値である。

表2から、ネットワーク構成時間に着目すると、電源をOFFした中継装置があると、全ての電源がONである場合と比較して、通信行列更新シーケンスでは処理時間が約1.5倍、通信行列保持シーケンスでは処理時間が約2.2倍増加していることが分かる。一方、データ収集時間に着目すると、通信行列更新シーケンスでは、①と比較して②の処理時間が短くなっていることが分かる。これは、通信行列を更新していく際に、電源がOFFになった中継装置に対応する行列が0となり、ホスト装置からその装置へデータ収集を要求しなくなるため、データを収集する中継装置の台数が1台減るためである。一方、通信行列保持シーケンスでは、通信行列の更新が行われなため、電源がOFFである中継装置に対しても、データ収集を要求する。したがって、データ収集要求に

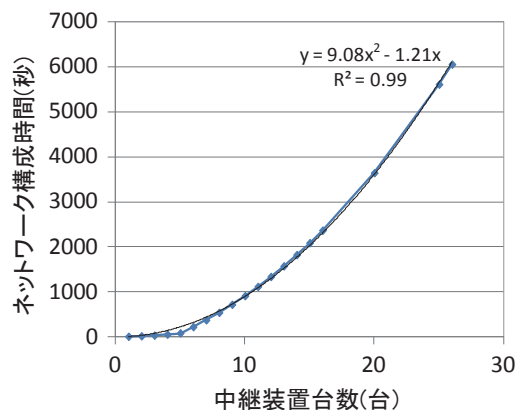


図9 通信行列更新シーケンスのネットワーク構成時間

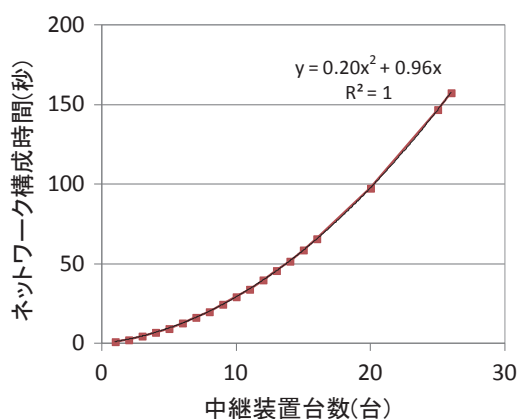


図10 通信行列保持シーケンスのネットワーク構成時間

対するタイムアウトが発生する時間が再送回数分発生するため、①と比較して②の処理時間が増加している。

#### 4.2 シミュレーションによる評価

プロトタイプを用いた機能確認試験では、製作台数に限りがあったため、最大の中継装置が6台であった。しかし、車両の編成は、旅客列車においては最大で17両、貨物列車においては26両連結する。そこで、シミュレーションでは、中継装置の台数を1～26台まで変化させ、ネットワーク構成とデータ収集の処理時間の変化を把握した。シミュレーターにはOMNeT++を用いた。本シミュレーションでは、理想的な環境における処理時間の比較を実施したため、パケットロスはない設定とした。また、各装置間の伝送処理時間は、プロトタイプを用いた機能確認試験で得られた実測値の平均値を用いた。

図9、10に中継装置の台数を増やした際のネットワーク構成時間を示す。図9から通信行列更新シーケンスでは、中継装置の台数が増えると、二乗に比例する形で構成時間が増えることが分かった。通信行列保持シーケンスにおいても、中継装置の台数が増えると、二乗に比例する形で構成時間が増えるが、その増加の程度はゆるやかであることが図10から分かった。図9、10ともに、

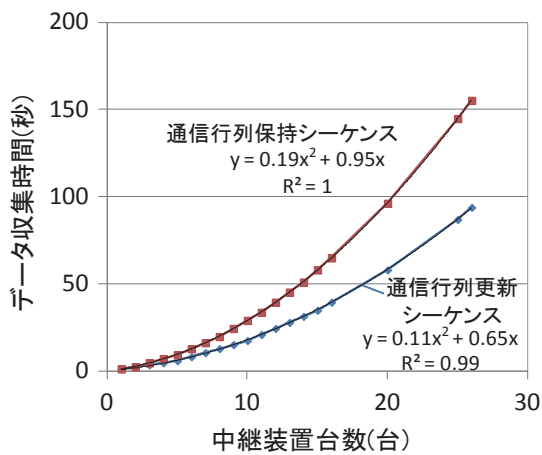


図 11 各シーケンスのデータ収集時間

シミュレーションで得られた数値に対して、二次の近似曲線でフィッティングをすると、非常にあてはまりがいいことが分かる。図 9 から通信行列更新シーケンスにおいては、中継装置の台数が 26 台になると約 100 分の処理時間がかかり、運用する上では現実的な時間でないことが分かった。一方、通信行列保持シーケンスでは、中継装置の台数が 26 台になってもネットワーク構成時間が 3 分以内におさまることを確認し、運用面でも現実的な数値を得られることが分かった。

図 11 に中継装置の台数を増やした際のデータ収集時間を示す。データ収集時間においても両シーケンスともに、中継装置の台数が増えると、二乗に比例する形で構成時間が増えることが分かった。また、二次の近似曲線のフィッティングをするとあてはまりが非常にいいことが分かる。シミュレーション結果においても、プロトタイプでの確認結果と同様に、通信行列更新シーケンスと比較して、通信行列保持シーケンスの方がデータ収集に時間を要することが分かった。

#### 4.3 確認評価結果のまとめ

プロトタイプを用いた機能確認試験とシミュレーションによるネットワーク構成とデータ収集時間の処理時間の評価の結果、通信行列更新シーケンスは、ネットワーク構成に時間を要するが、構成される通信行列の信頼性が高いため、データ収集時間が短縮できることが分かった。一方、通信行列保持シーケンスは、ネットワーク構成時間が短いというメリットはあるが、保持している通信行列と実際の電波環境を反映できていない場合に、データ収集に時間を要することが分かった。

今後は、ネットワーク構成の時間を短縮するために、通信行列保持シーケンスのように通信行列をあらかじめ

保持させておき、実際の電波環境を反映するために、保持している通信行列が 1 である中継装置に通信の可否を行うシーケンスを開発する予定である。シミュレーションにおいては、通信状態が理想的な環境を想定した動作確認を行ったが、今後はパケットロスなども考慮する予定である。

また、プロトタイプを用いた確認試験で得られる処理時間の数値は、プロトタイプの中の制御用 PC にシーケンスを実装する際に用いたプログラミング言語に依存するものである。今回は、簡易に実装可能なスクリプト言語を用いて開発を行ったが、実用化において処理速度の速いコンパイラ言語を用いて開発することにより、処理時間の更なる高速化は可能となると考えられる。

#### 5. おわりに

本稿では、車両の状態監視に WSN を適用した車両間ネットワークの構成手法を提案した。また、ネットワーク構成手法の有効性を確認するために、プロトタイプを製作し、またシミュレーションを実装することにより、その確認評価を行った。

今後は、ネットワーク構成時間とデータ収集時間を短縮するための車両間ネットワーク構成手法の研究を進める予定である。また、本提案手法は停車駅での通信を前提としているが、走行を考慮した手法についても検討を進めていく。

#### 文献

- 1) 廿日出悟：鉄道車両の状態をモニタリングする，RRR, Vol.66, No.2, pp.2-5, 2009
- 2) 阿部慶太・神田政幸・羽田明生・岩澤永照・関口琢己・諸橋由治・王林：「列車通過時加速度振幅比と傾斜角を用いた鉄道橋梁橋脚の状態監視手法」，第 18 回鉄道技術連合シンポジウム (2014)
- 3) 城取岳夫・安永年広：台車振動加速度による状態監視手法，鉄道総研報告，Vol.25, No.8, pp.17-22, 2011
- 4) 中川善継・入月康晴：レイヤ構造無線センサネットワークの効率的な伝送制御手法，電子情報通信学会大会講演論文集，ROMBUNNO. B-18-21 (2015)
- 5) 岩澤永照，羽田明生，流王智子，川村智輝，野末道子，川崎邦弘：車両の増解結を考慮した無線センサネットワーク構成手法，電気学会全国大会講演論文集，Vol.5, pp.297-298 (2016)