

ハイブリッドシミュレータにより 車両運動を解析する

佐々木 君章
車両構造技術研究部 (部長)



ささき きみあき

はじめに

鉄道車両を開発するには、性能を確かめ、改良点を調べるための走行試験が欠かせません。しかし、鉄道車両は高速走行する上に、構造上急カーブを曲がるのが苦手なので、十分な速度で走行試験を行うには長大な線路が必要です。

図1はアメリカにある専用試験線を東京の上に重ねてみたものです。山手線の2/3が収まるほどの巨大な施設ですが、新幹線の速度ではこれでも十分ではありません。

日本にはこのような施設が無いので、走行試験は夜間に営業列車が終わった後の線路を使って行われるのが普通です。従って、試験の実施にあたっては、万が一にも営業列車に支障しないための配慮が求められ、試験走行の回数や試験条件の設定に制限を受けます。また、営業線を利用するための準備も非常に大変で、数時間走るために半年準備するという事もしばしばあります。

このように労力もお金もかかる走行試験ですが、これで得られるデータは、安全で性能の良い車両を開発するために不可欠です。

一方、自動車の開発では実時間で動作するコンピュータシミュレーションと実物の評価対象を組み合わせ、実際の走行状態をベンチ試験で作り出して、動作を評価するHILS (Hardware In the Loop Simulation) と呼ばれる手法が用いられるようになってきています。この手法は大きな費用と時間を要する走行試験をかなりの部分で置き換えるものと期待され、自動車では特にエンジンや変速機制御¹⁾、ブレーキ制御など²⁾の開発の重要なツールになりつつあります。

鉄道車両は自動車以上に走行試験実施のハードルが高いため、走行試験をベンチ試験で置き換えて、十分な評価・改良が行えるようになることは、開発工程の短縮、品質・安全性の向上につながる大きな可能性を持っていると考えられます。このような観点からHILS技術をベースとして、分散型実時間シミュレータ、多自由度試験装置、車両試験装置を有機的に組み合わせて仮想走行試験環境を作る研究を進めてきました。ここではこのシステムの概要とこれによる仮想走行試験について紹介します。

HILSとは？

例えば、「新型空気ばねの実走行時の乗り心地を調べ、改良する」という要求があったとします。図2のように台

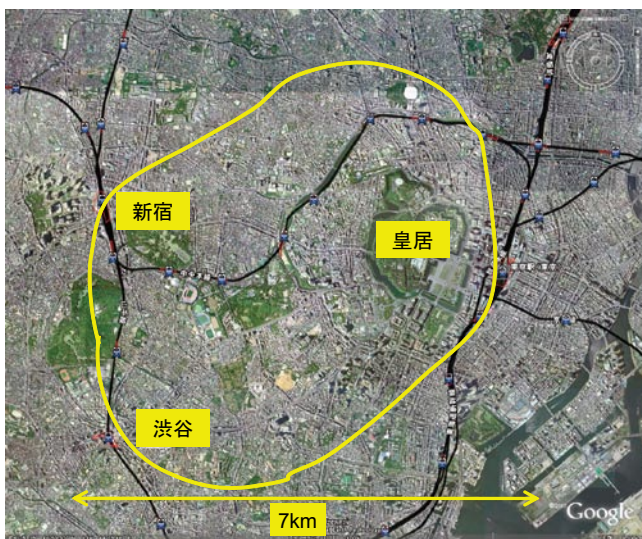


図1 専用走行試験線の例

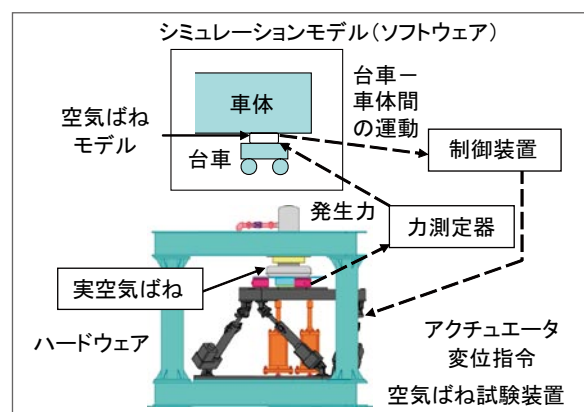


図2 HILSの原理

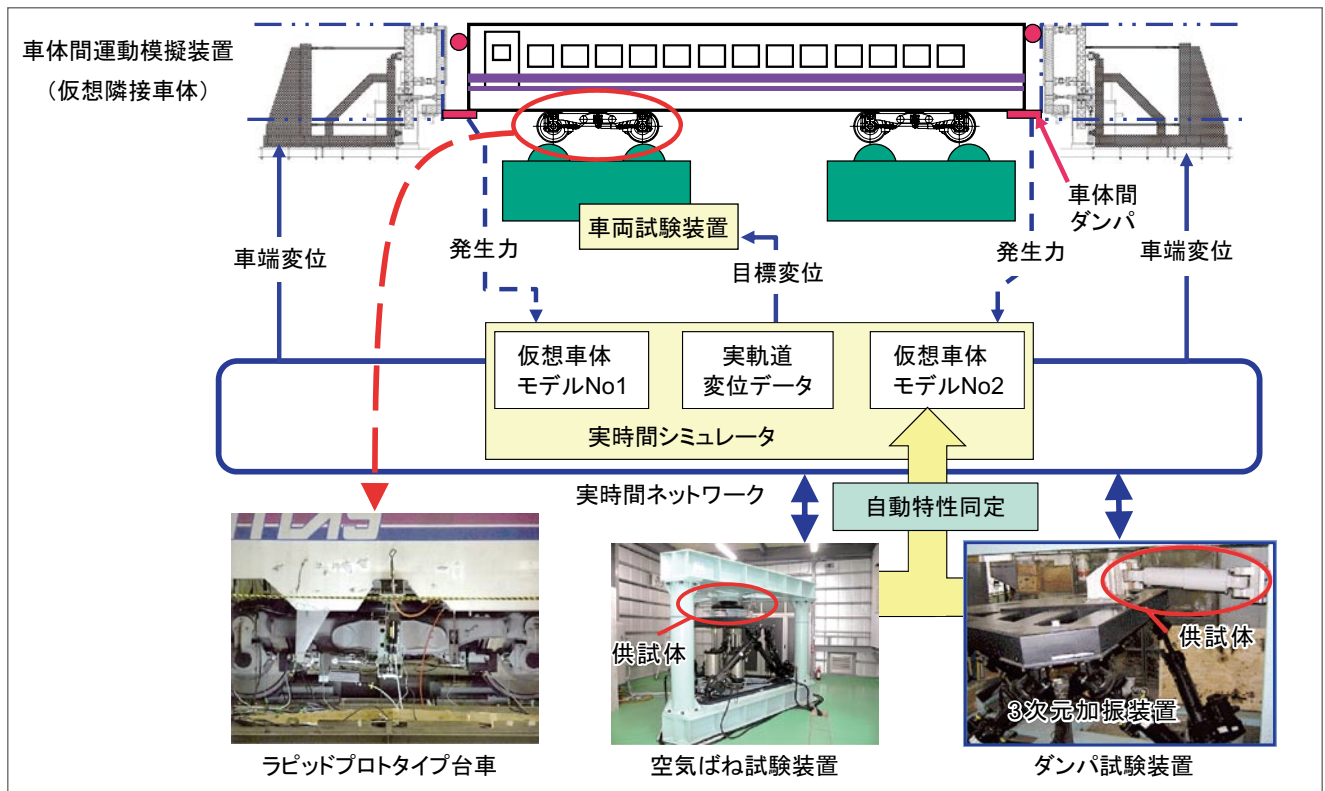


図3 鉄道総研の仮想走行試験環境

車と車体との間の相対運動を忠実に再現できる試験装置の上
に評価対象の空気ばねを置き、車両の運動を表すシミュ
レーションモデルが計算した車体-台車間の相対運動を試
験装置で再現すると、この動きによって空気ばねが反力を
発生します。この力を測定器で測定し、車両に作用してい
る力として車両のシミュレーションモデルに戻して次の時
刻の車両状態を計算します。

このようにすると、コンピュータ上のシミュレーション
と実物のハードウェアが連動して運動を再現することにな
ります。このシステムをHILSシステムと呼びます。HILS
システムでは評価対象については実物を用いるので、通常
のシミュレーションで問題になるような評価対象のモデル
化誤差が問題にならず、車両運動を高精度に計算できま
す。従ってモデル化の難しい対象でも高精度に評価できま
す。また、実物が動作しているため、自由に評価対象の状
態を測定することができ、改良点の調査に役立てることが
できます。これは、ハードウェアとソフトウェアの得意な
点を組み合わせた、一種のハイブリッドシミュレータと見
ることができます。通常のシミュレーションでは実現象の
時間とシミュレーションの実行時間は関係がないので、時
間をかけて計算できますが、HILSのシミュレーションは
実際の物理現象と同期して実行しなければなりません。こ
のようなシミュレーションを実時間シミュレーションとい
い、非常に高速な計算が必要になります。

鉄道車両の仮想走行試験

このシステムを実現するためには①大規模な実時間シ
ミュレーションを可能にする高速演算、②汎用性のある実
時間シミュレーションモデルおよび非線形性を含む機器特
性自動同定手法、③実車と同じ多自由度に対応可能な試験
装置など、広範な技術開発が必要になります。

鉄道総研で開発中の仮想走行試験環境の全体構成を図3
に示します。主な装置は2つの実験棟に分かれて設置され、
実時間シミュレーション用の計算機と、それぞれが計算・
判断能力を持つ試験装置制御装置を実時間ネットワークで
接続する構成となっています。

シミュレーションプログラム

本システムのシミュレーションプログラムは、ばねやダ
ンパなどの「部品」単位に入出力機能と動特性を持つ小さ
なシミュレーションプログラム(以下ブロックと呼ぶ)を
作成し、専用のエディタでブロック間を接続して入出力の
関係を定義することにより構成します。

各ブロックの入出力を統一し、互換性を持たせた構成に
することで、それぞれのブロックを独立して扱えるよう
になり、以下のメリットが得られます。

- ①計算処理をブロック単位に分割できるため、複数の
CPUを同期して行う分散処理を容易に実現できる。
- ②部品や車体など、実物の形式番号ごとにブロックを作成す

ることでデータベース化が容易になり、車両部品を変えた場合のシミュレーションなどを簡単に行うことができる。

- ③HILS対応試験装置の入出力仕様をソフトウェアの部品ブロックと共通化することにより、供試部品のモデルを試験装置の制御ブロックと置き換えるだけで、簡単にシミュレーションとHILSシステムの変換ができる。

要素試験装置

要素試験装置は実時間シミュレーションと連動して、評価対象機器の走行状態の特性を試験する装置です。シミュレーションによる車両の運動を目標値として評価対象機器を実際に動かし、その結果発生した力を測定してシミュレータにフィードバックすることで、車両と評価対象との相互作用を含む走行状態を模擬します。

また、後述の自動同定システム用試験装置として単独使用も可能なように考慮しています。

これには、①ダンパ試験装置、②空気ばね試験装置があり、この外観を図3下部に示します。電動式の加振装置を用い、走行時に発生する3次元運動の模擬が可能です。

アダプタの交換により、現行の鉄道車両に使われる全種類のダンパや空気ばねに対応できる仕様になっています。

また、ダンパ試験装置はゴムブッシュやアクチュエータなどの試験にも用いることができます。

図3下部のラピッドプロトタイプ台車とは、ばねやダンパをアクチュエータで模擬することにより、制御で自由に特性を変えられるようにした試験用台車です。これを用いると、設計した台車を試作する前に特性を模擬した試験が可能になり、結果を設計にフィードバックすることで、開発効率と品質の向上を図ることができます。

自動同定システム

前述のように、本システムのシミュレーションプログラムは部品単位のブロックで構成されています。このため、評価対象機器の入力(相対運動)と出力(発生力)の関係を表す高精度なモデルが得られれば、これをブロックとしてシミュレーションプログラムに組み込み、精度を向上することが可能です。さらに、このような精度を確認した部品ブロックをデータベースに蓄積していくことにより、シミュレーション精度を継続的に向上させていくことができます。

入力と出力の関係を示すモデルを求める作業を「システム同定」と呼びますが、上記のような方法で精度向上を図

るためには、この同定作業を能率的に行う方法が欠かせません。このため、「ニューラルネットワークによる自動同定法」を開発しました。ニューラルネットワーク(以降NNと表記)は神経細胞の働きをモデルに作られた情報処理モデルで、与えられた入力データと出力データ(教師信号)の間の関係を学習し、自分の入出力関係を教師信号と同じになるように変えていく機能を持ちます。このため、評価対象機器の入出力関係を教師信号として学習させたNNは、非線形特性を含めて元の評価対象機器と同じ応答特性を持つようになります。この学習後のNNを部品ブロックに変換すると、高精度の部品ブロックが得られます。

ただし、このモデルは入出力関係だけを対象としているものであり、評価対象の内部状態を知ることはできません。従って、機器の改良のために必要な内部状態は「測定」で得る必要があり、実物の観測が行えるHILS対応要素試験装置と自動同定手法は相互補完的な関係にあります。

強い非線形特性を持つダンパの特性を同定した例を図4に示します。NNによる結果は実測値と良く一致しています。この例では、一般的な線形同定法であるARXモデルによる同定結果と比較して平均誤差2乗和が76%改善され、良好な推定がなされることを確認しました。

また、この同定結果は自動的に部品ブロックに変換され、シミュレーションモデルに導入可能です。

車両試験装置上の編成運動模擬

車両試験装置は軌条輪と呼ばれる断面がレールの形をした円盤の上に車両を載せ、軌条輪の回転により走行状態を模擬しながら加振する装置で、走行時の車両の運動特性をベンチ試験で評価する重要な手段です。

軌道不整の再現などは従来の試験装置においても一定の範囲で可能でしたが、基本的には1両の試験装置であり、車両同士が連結された状態の編成運動再現は不可能でした。

このため、車両試験装置をHILSシステムと連動し、隣接車両の車端部の運動を模擬する装置を設けることにより、従来は困難だった編成状態の運動再現を可能にしました。この装置を「車体間運動模擬装置」と呼びます。図3上段に車体間運動模擬装置を示しました。

本装置は模擬車端部を5本の電動アクチュエータの協調制御により、上下、左右、ロール、ヨーの4自由度で動作させます。このとき、車体間ダンパなどが発生する反力はシミュレーションモデルにフィードバックされ、仮想的な隣接車両との相互作用を実現して、編成運動を再現します。

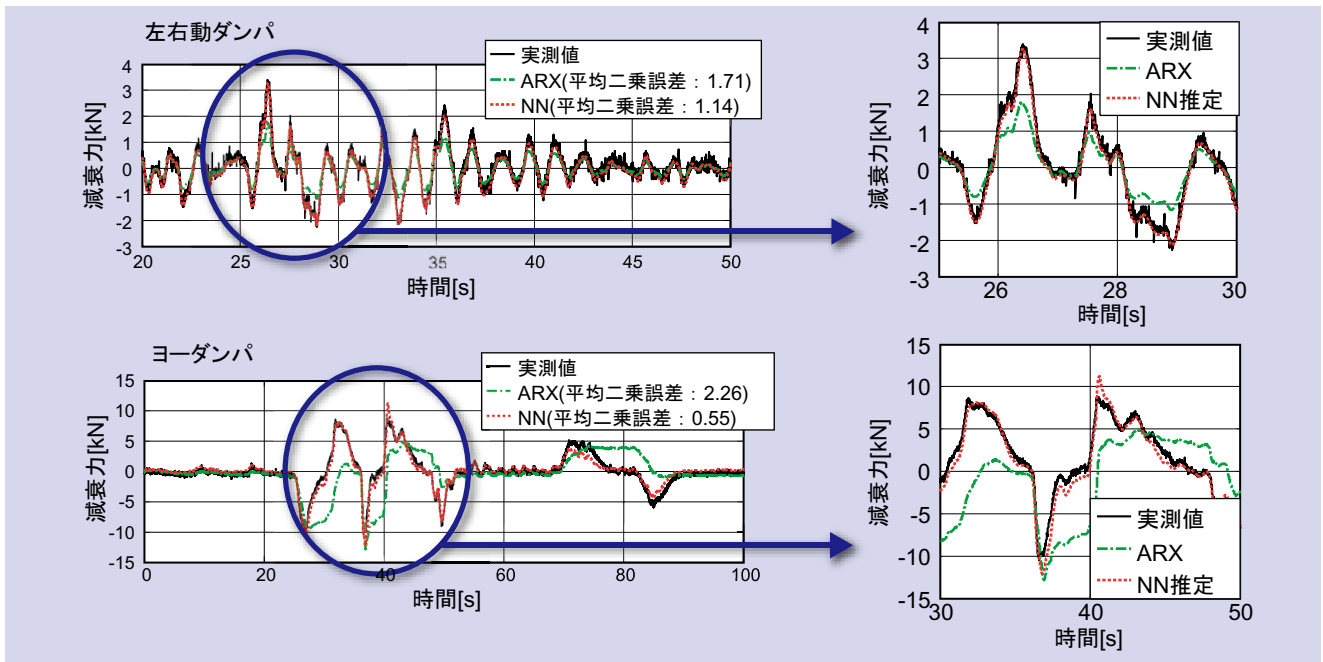


図4 ニューラルネットワーク(NN)によるダンパの自動特性同定

これは車両全体を供試対象物とする巨大なHILSシステムといえます。

車両試験装置での試験

本装置を用いた編成運動模擬試験を実施し、車両試験装置上で中間車両を含む編成運動の再現が可能であることを確認しました。

図5はシミュレーションモデルの信頼性を確認するために、シミュレーションと車両試験装置の実測値を比較した例(車体上下変位)で、両者は良く一致しています。次に、このモデルを隣接車両の運動モデルとして、供試車両を中間に置き、仮想的な3両編成の走行試験を行いました。この結果の例を図6に示します。単車と中間車では主体ヨー角の振幅に大きな差が出ていることが分かります。

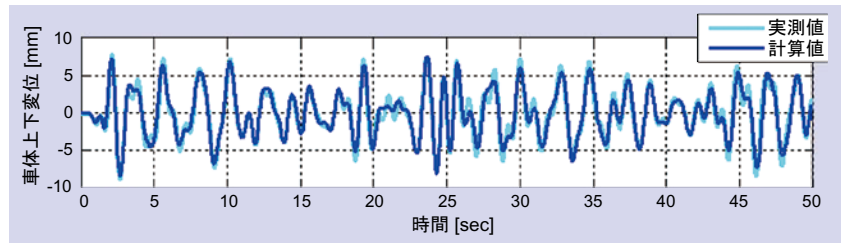


図5 1両モデル シミュレーションと実験の比較

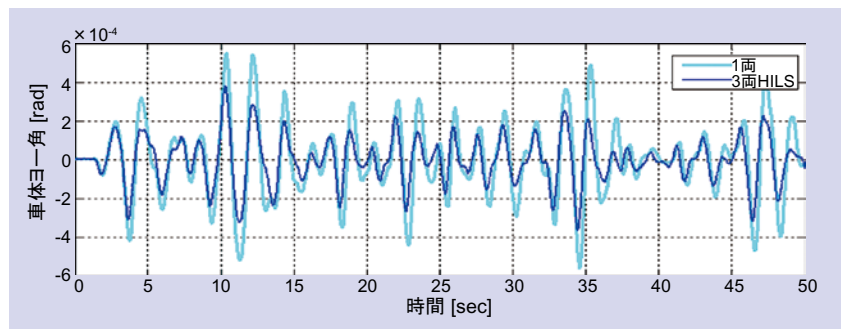


図6 単車走行と編成走行(3両中間車)の比較

おわりに

鉄道総研が現在開発を進めているハイブリッドシミュレータによる車両運動特性評価・解析の概要を紹介しました。走行時特性の十分な試験・評価は車両技術開発の基本ですが、専用試験線のない日本では走行試験の実施に強い制約があります。HILSを応用した試験・評価システムは、従来の車両開発の手順を変え、車両の品質を高める可能性を持つと考えられます。

このシステムの開発自体、広範かつ難度の高い技術開発

要素を含んでおり、他分野への波及効果も期待できます。この評価手法を鉄道車両開発の新しいインフラとして社会に受け入れられるものに育てていきたいと考えています。

本研究は国土交通省の補助金を受けて実施しました。RRR

文献

- 1) 荻原顕治, 寺山哲, 竹田洋平, 依田公: 自動変速制御システム開発へのHILSの適用, 自動車技術, Vol.56, No.9, p64-69, 2002.9
- 2) 鈴木万治, 稲葉康弘, 鈴木伸彦: DSP-SIT (Alpha-combo) およびveDYNAを用いた車両シミュレータ, デンソーテクニカルレビュー, Vol.5, No.2, 2000.2