

## ハードウェアシミュレータを用いた機器故障検出手法の評価環境 Evaluation Environment for Device Fault Detection Method based on Hardware Simulator

大貫 智洋†  
Tomohiro Onuki

徳永 雄一†  
Yuichi Tokunaga

### 1. はじめに

鉄道車両や自動車などの移動体では、機器が故障した場合に、運行障害や事故に至ることがある。突然の故障を防ぐために、機器の異常特性を早期に検出し、故障に至る前に対処する予防保全技術が必要とされている。近年の車載ネットワークによる情報収集能力の向上、地車間通信網の整備により、車両と地上の情報連携が実現しつつあることを踏まえ、車両内部で収集した機器データを地上で解析して異常を検出する手法を検討している。

機器故障の事前検出を実現するためには、各故障要因に対し、異常発生から故障に至るまでの状態変化の流れを把握し、故障前に検出するための監視箇所、監視方法、検出条件を導出する必要がある。我々は、鉄道車両の駆動部を構成するインバータ回路を対象に、モータ電流の波形パターン解析によって特性変化を検出する異常検出手法を提案した[1][2]。

本稿では、提案手法を導出するために構築した評価環境について報告する。本評価環境では、電子制御装置に実機を用いる一方、制御対象のインバータ回路をハードウェアシミュレータ（以下、H/Wシミュレータ）で置き換えて故障時の動作を模擬する。これにより、制御対象装置の実機では予め準備することが困難な故障状態を再現することや、測定困難なポイントの機器データを収集することを可能とする。

本環境を構築する上で、故障モデルの作成方法、制御対象機器の実機とモデルの差分確認方法など幾つかの課題があるなかで、本稿では電子制御装置の実機動作に追従するためのH/Wシミュレータの高速性実現に取り組む。必要となる演算性能の見積もりやI/O数を限定した基板設計、高速な信号変換の実装により、評価に必要な20 $\mu$ 秒のステップサイズを実現した。

### 2. 背景

#### 2.1 異常監視システム

本稿で扱う異常検出手法は、鉄道車両や自動車など移動体向けの異常監視システムで利用することを想定している。図1に異常監視システムの運用イメージを示す。走行中の移動体の機器データを車上サーバが収集し、地上システムに送信する。地上システムでは機器データを解析し、異常特性を検出して保守員に報せる。

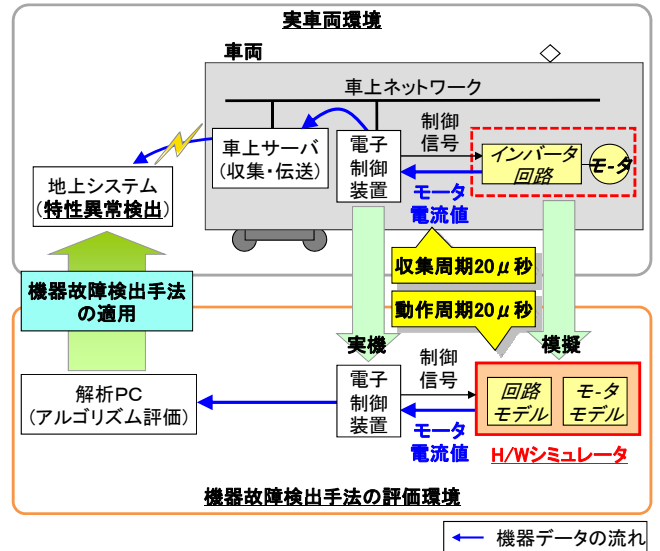


図1 実車両環境および機器故障検出手法の評価環境

#### 2.2 提案手法の概要

これまでに、鉄道車両の駆動部を構成するインバータ回路を対象に回路の異常を検出する手法を提案した[1][2]。

インバータ回路は、電子制御装置から受信する制御信号とモータの回転状態、運転速度をもとに、適切なモータ電流を生成する役割を担う。インバータ回路においてセンサの劣化や断線などが生じると、制御バランスが崩れ、モータ電流波形の変化となって現れる。そこで、モータ電流波形を収集し、波形パターンが正常時と異なる変化を示した場合に、故障であると判定する。

### 3. H/Wシミュレータの必要性と課題

一般に、駆動時の車両モニタリングデータを実機から収集する機会は少なく、さらに特定の故障前後のモニタリングデータを収集することはさらに難しいため、シミュレーションによる評価環境が必要となる。電子制御装置とインバータ回路のモデルをコンピュータ上で動作させ、モータ電流値の演算結果を解析する方法が考えられるが、電子制御装置の動作は非常に複雑であり、モデルで表すことは困難である。

そこで我々は、電子制御装置の実機とインバータ回路を模擬するH/Wシミュレータを組み合わせた評価環境を構築することとした(図1下段)。

†三菱電機(株) 情報技術総合研究所  
Mitsubishi Electric Corp. Information Technology R&D Center

異常時の波形パターンの変化は、微細な変化として現れることもあるので、電子制御装置が機器データを収集する周期と同じ速度で制御対象機器の動作を模擬することが課題となる。インバータ回路の場合では、電子制御装置が約  $20\mu$  秒周期でモータ電流値を収集するので、H/W シミュレータにも  $20\mu$  秒以下の周期でモータ電流値を演算することが求められる。開発する H/W シミュレータの課題を前記のリアルタイム性実現に置き、課題対策および評価を行った。

## 4. H/W シミュレータを用いた提案手法の評価環境

### 4.1 H/W シミュレータの開発

#### 4.1.1 H/W シミュレータとは

H/W シミュレータは、制御対象をシミュレーションモデルで記述し、これを高速 H/W 上でリアルタイム処理させるものである。一般的に、制御装置の検証工程で実機組合せ時の動作を確認するために用いられる。実機動作が難しい制御対象を模擬することや、実機では触れることができない測定ポイントの動作を PC 上でモニタすることができるといった利点がある。モデルは一般的に MATLAB/Simulink で記述し、モータモデルなど汎用的なモデルが開発されている。

#### 4.1.2 H/W シミュレータの原理

H/W シミュレータの原理を図 2 に示す。まず外部（本環境では電子制御装置）から入力値を取得する。デジタル入力信号の場合はレベル変換し、アナログ入力信号の場合は A/D コンバータにて演算に利用できる数値情報に変換する。変換後の入力信号の値を制御ロジック内で参照する入力値として代入し、演算する。出力値として引き出す信号を、外部信号に合わせてレベル変換、D/A 変換する。これを演算リソースの実行速度で繰り返す。この 1 ループの処理時間をステップサイズと称し、ステップサイズ(時間)が短い程、制御対象の出力を忠実に表現できることになる。

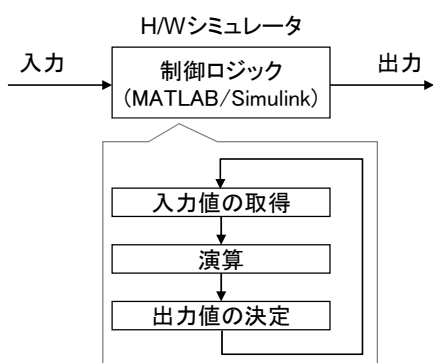


図 2 H/W シミュレータの原理

#### 4.1.3 H/W シミュレータの要件の特定

H/W シミュレータの開発にあたり、次の項目を要件とした。

##### (1) リアルタイム性

インバータ回路の場合では、電子制御装置が約  $20\mu$  秒周期でモータ電流値を収集する。これに対し、異常時の波形パターンの変化は、微細な変化として現れることもあるので、電子制御装置が機器データを収集する周期と同じステップサイズで制御対象機器の動作を模擬することを要件とした。

##### (2) 可搬サイズ

すでに搭載されている制御装置に対して故障モデルのデータ取得を行う状況を想定し、車両現地に持ち運べ、実行できることを要件とした。

##### (3) アクセラレータの不使用

H/W シミュレータの高速化は、FPGA を使ったアクセラレータによって行うことが一般的である。この場合、モデルの特性変更はパラメータの入力範囲に限られ、モデル自体の改造はできない。我々は、モデルを改造して多種の故障モデルを構築するので、アクセラレータを使わず、ソフトウェアモデルのみで実行することを要件とした。

#### 4.1.4 実現方法

我々は、前項の要件を満たす H/W シミュレータを独自開発した。高い演算性能と可搬サイズを実現するうえで鍵となる CPU の選定方針、および I/O ボードの設計方針について説明する。

##### (1) CPU の選定

CPU の選定にあたり、次の 2 つの項目を条件とした。

##### モデル開発環境への適合

MATLAB/Simulink で作成した制御対象機器モデルを CPU で処理可能な実行コードに変換する必要がある。従って、第一の条件として MATLAB/Simulink のコード生成機能に対応している品種であることが CPU の条件となる。

##### 演算性能

制御対象機器モデルの演算時間と I/O 処理時間を合わせ、目標とするステップサイズ内（ハンダクラックでは  $20\mu$  秒）で 1 周期の実行を完了する必要がある。目標ステップサイズから I/O のリード/ライトの見積もり時間を引き、残りの時間内でモデルの実行を完了できる性能であることが条件となる。

上記 2 つの条件を満たす CPU として、Texas Instruments 社の DSP “TMS320C6455” を選定した。同社の C6000 シリーズは MATLAB/Simulink モデルの実装デバイスとして長い実績がある。TMS320C6455 は、シリーズの中でも最高クラスの 1.2GHz で動作するため、これを選定した。

## (2) I/O ボードの設計

**I/O 数の限定**

汎用的な H/W シミュレータでは、様々なシミュレーションに適用できるように、カードスロットに機能をアドオンするものがある。カード間の PCI バスなどで生じるレイテンシがステップサイズのボトルネックとなる。そこで我々は、用途をインバータ回路模擬に限定し、PCI バス接続を排除することで性能を向上させた。

**信号変換の速度**

入力、出力にアナログ信号を扱う場合、A/D、D/A 変換を高速に行う必要がある。我々の扱う H/W シミュレータでは、デジタル信号の入力に GPIO を使う一方、モータ電流の出力には高速 D/A 変換 IC を用いた。6 ポートの出力信号の変換処理に費やす時間は約  $3\mu$  秒で、ステップサイズの残り約  $17\mu$  秒をモデル演算に確保した。

**可搬サイズ**

鉄道車両や自動車内の限られたスペースにも設置できるよう、メイン基板は長辺の幅が 30cm 程度に収まるサイズとした。H/W シミュレータの筐体を含めた外観を図 3 に示す。I/O ボードの長辺は約 25cm で、筐体含め 30cm に収まるサイズである。

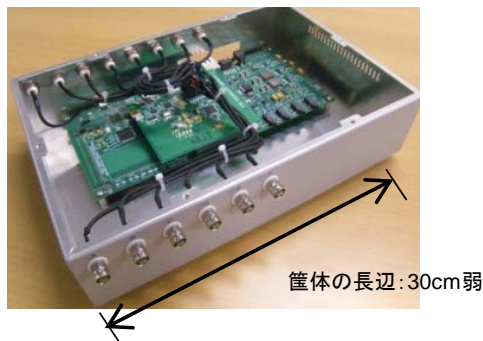


図 3 I/O ボードおよび H/W シミュレータの全体の外観

**5. H/W シミュレータの評価**

H/W シミュレータの性能を評価するにあたって、インバータ回路の異常特性の導出フローに基づき、評価を行った。

**5.1 システム構成**

H/W シミュレータを評価するシステム構成を図 4 に示す。図 1 の構成に記載していない要素について以下に説明する。

**・運転指令制御 PC**

実車両環境では、運転台の操作に基づく運転指令が電子制御装置に与えられる。評価環境では、PC に実装したソフトウェアで運転指令を再現し、電子制御装置に送信する。また、機器データ管理データベースの管理もあわせて行う。

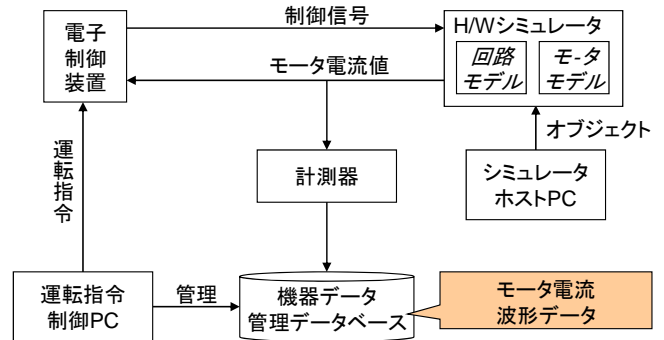


図 4 H/W シミュレータ評価のためのシステム構成

**・シミュレータホスト PC**

H/W シミュレータに搭載するモデルの開発と実行ファイルの生成、シミュレータへの実行ファイル転送を行う。モデルの開発には MathWorks 社の MATLAB/Simulink、C コードの生成には同社の Embedded Coder を用いる。生成した C コードを DSP 開発環境でビルドし、オブジェクトファイルを DSP に転送する。

**・機器データ管理データベース**

一度の解析で収集する機器データは、ステップ数にして数千～数万に及ぶため、データベースで管理する。データベースは解析 PC 上に実装する。

**5.2 評価手順****(1) 故障モードの特定**

はじめに、機器の故障モードを特定する。FTA, FMEA 手法により制御対象機器の故障モードを洗い出し、これまでの故障実態や安全面の重要性、フェールセーフ機構が取れない等の構造的なウィークポイントなどの情報をもとに監視すべき故障モードを特定する。我々は、インバータ回路の故障モードとしてハンダクラックを特定した[2]。

**(2) 故障モデルの作成**

制御対象機器のモデルに、故障モデルを埋め込む。完全故障であればオープンやショートといったモデルとなるが、その予兆として抵抗の増減などが発生する。ハンダクラックの場合は、完全に切断され回路がオープンモードになる前に数  $10m\Omega$  の抵抗増加が発生することが知られているので、抵抗成分をモデルに加え、抵抗値をパラメータとする。

**(3) シミュレーションの実行**

故障モデルを加えた制御対象機器のモデルを H/W シミュレータに搭載し、電子制御装置と接続してシミュレーション実行する。同じ運転条件下で、正常モデルおよびパラメータの設定を変更した故障モデル（ハンダクラックの例で言えば抵抗値）を動作させ、機器データを取得する。

### 5.3 評価結果

機能および性能について評価した結果をまとめる。

#### (1) 機能評価

H/W シミュレータが制御対象機器モデルを正しく実行していることを確認するため、同一の正常モデルを MATLAB/Simulink で実行した結果と、H/W シミュレータで実行した結果を比較した。両者の実行結果として得られた波形を図5に示す。左が MATLAB/Simulink の結果、右が H/W シミュレータの結果である。破線で示すとおり、両者のモータ電流値は各点で等しく、波形が一致していることが分かる。

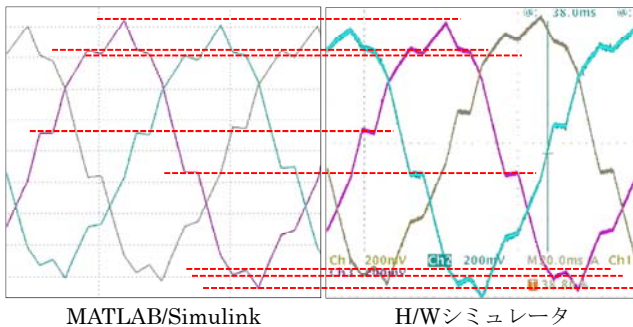


図5 MATLAB/Simulink および H/W シミュレータのシミュレーション結果

#### (2) 性能評価

H/W シミュレータのステップサイズを計測するために、1ステップに1回の頻度で計測用の信号を出力し、計測器で信号間隔を計測した。その結果、H/W シミュレータは約20 $\mu$ 秒のステップサイズでモデルを実行していることが分かった。図6は、H/W シミュレータで正常モデルと故障モデルを実行した結果を重ねて示したものである。モータ電流波形の1周期に対して十分に短いステップサイズで動作するため、正常時と故障時のわずかな波形の変化を再現することが出来ている。この結果から、本 H/W シミュレータは波形パターンの変化を検知する手法の評価に適していると結論付ける。

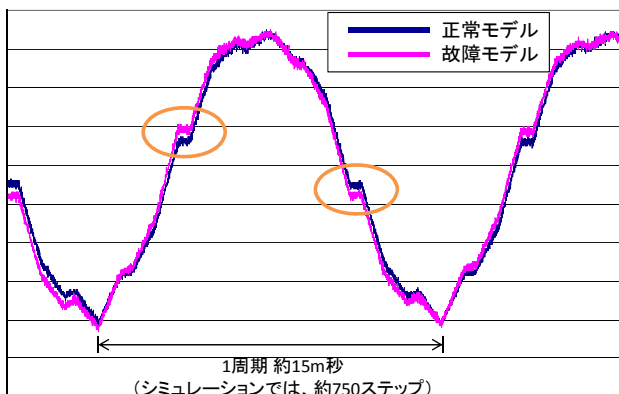


図6 正常モデルと故障モデルのシミュレーション結果

### 5.4 今後の展望

これまでに、評価環境の中心となる H/W シミュレータの開発、評価を行った。今後は、制御装置実機と H/W シミュレータを接続し、評価環境全体での動作確認を進める。

### 6. おわりに

本稿では、我々の開発する機器故障検出手法の評価環境について報告した。特に、評価環境の中心となる H/W シミュレータについてリアルタイム性などの要件を明確にし、要件を実現するための設計方針をまとめた。そして、開発した H/W シミュレータに機能および性能を評価したところ、H/W シミュレータは目標とする20 $\mu$ 秒のステップサイズでモデルを実行し、正常時と異常時のわずかな波形の変化を再現できることが分かった。この結果から、本 H/W シミュレータは波形パターンの変化を検知する手法の評価に適していると結論付けた。

今後は、制御装置実機と H/W シミュレータを接続し、評価環境全体での動作確認を進める。

#### 参考文献

- [1] 横倉, 浜田, 福田, 徳永, 藤野, 石田: “主回路制御装置のモニタリングデータを活用した機器異常の把握に関する研究”, 第48回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 論文番号518, 2011.
- [2] 毛利, 徳永, 福田: “車載機器の異常把握を実現する判定・可視化フレームワークの提案”, 情報処理学会 研究報告コンシューマ・デバイス&システム (CDS), Vol. 2012-CDS-4, No.4, pp.1-7, 2012.