

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

毛利 寿志^{1,a)} 徳永 雄一¹ 福田 司朗²

概要: 自動車や鉄道車両などの車載機器の保守技術として、駆動中の車載機器の計測情報をネットワーク経由で収集、解析することにより車載機器の劣化度合いを把握する異常監視が研究されている。故障の種類や部位などによって計測情報は微妙に変化するため、特定部位毎に最適な監視方法を検討する必要があるが、車載機器の中心部の1つである駆動装置に対する適切な遠隔保守技術は未だ確立されていない。本稿では、駆動中の車載機器の計測情報から異常の候補となる波形パターンを切り出し、その波形パターンがどの程度正常時から逸脱しているかを可視化することにより、正常・異常の判定を容易にするフレームワークを提案する。さらに、実車のデータフローや異常のある車載機器の挙動を再現するため、実機とシミュレータを組み合わせた評価環境を構築し、評価環境上で提案手法を評価することにより、計測情報から異常判定が可能であることを示す。

キーワード: 異常監視システム, 特異値分解, マハラノビス距離解析, HILS

A New Framework for Condition Monitoring of On-Board Devices and Its Evaluation

MOHRI HISASHI^{1,a)} TOKUNAGA YUICHI¹ FUKUTA SHIRO²

Abstract: In this paper, a new condition monitoring framework for on-board devices is proposed. This framework extracts analog signals that may indicate false condition from on-board devices data, analyzes difference between the signals and preassigned normal condition data, and visualizes results to easily decide whether the devices false or not. Furthermore, equipments including software models simulating data-flow of a current on-board system with / without false are also shown, then it is also shown by using the equipments that the framework alerts when on-board devices indicate false condition.

Keywords: condition based maintenance, singular value decomposition, Mahalanobis distance, Hardware in the Loop Simulation

1. はじめに

近年、3G, WiMAX, WLAN などの広域無線網の普及と産業用ネットワークによる機器間情報連携の普及、さらには VPN による手軽なセキュリティ設定の組合せにより、

様々な情報を安全に収集出来るようになってきている。特に、自動車、鉄道車両などの移動体においては、地上からの運転状況のモニタリング、故障時の詳細状況データの収集などが実現でき、それにより適切な処置を指示することが出来るようになってきている。このようなシステムで注目されているのが、保守への活用である [2], [4], [5], [6], [8]。機器からの計測情報を元に状態変化を検出することで、状態に応じた検査時期の調整、部品交換の要否決定、予備部品の在庫低減により、保守コストを削減出来る効果がある。車両駆動の中心機器の1つに、交流モータ及びそれを制

¹ 三菱電機(株)情報技術総合研究所
Mitsubishi Electric Corporation, Information Technology
R&D Center

² 三菱電機(株)伊丹製作所
Mitsubishi Electric Corporation, Itami Works

a) Mori.Hisashi@cw.MitsubishiElectric.co.jp

御するモータパルス制御回路からなるインバータ回路がある。モータパルス制御回路が生成するゲートパルス信号に従って交流モータ電圧及び周波数を制御することにより、モータの特性に合わせてモータを任意の速度、回転数で動作させる。これら車載装置は、近年電子制御化の方向にある。例えば鉄道車両では、モータパルス制御回路に相当するゲート制御装置（以降、GCU と略）の電子制御化により、交流モータの高効率運転が可能になり、また信頼性向上及び保守省力化が促進された。しかし、使用環境条件の変化や経年変化などの原因から故障は 0 ではない。電子制御化はそれまでの保守経験を活かして保守を行うことが出来ず、また外観からの異常・故障の発見が難しいため、適切な保守方法の確立や故障防止対策などが課題になっている [11]。

本稿では、現車から実際に取得可能な種々の計測情報を基に、データパターンの変化から機器異常を把握する方法について検討する。まず、膨大な計測情報から特徴のある（異常の候補となる）波形パターンを切り出し、その波形パターンがどの程度正常時から逸脱しているかを可視化するフレームワークを提案する。さらに、ケーススタディとして鉄道車両向けインバータ回路を例題に挙げ、現車のデータフローや、異常のあるインバータ回路の挙動を Hardware in the Loop Simulation (HILS と略) により再現し、異常のあるインバータ回路を模擬したシミュレーションデータの異常判定が可能であることを示す。

2. 背景

2.1 想定するアーキテクチャ；車載機器向け異常監視システム

本研究で想定するアーキテクチャを、図 1 に示す。図 1 に示すアーキテクチャは、自動車向け異常監視 [2][6] や、鉄道車両向け異常監視システム [4] を想定している。走行中の移動体（自動車、鉄道車両など）上の車載機器の計測情報をゲートウェイが収集し、地上サーバに送信する。計測情報を取得した地上サーバでは、機器情報を元に分析、機器の状態を監視することで、地上にて機器の劣化度合いを把握し、適切な処置を指示することが可能となる。ここで、移動体 - 地上サーバ間は、3G 回線や WLAN を通じて情報収集することが考えられる。また、車載機器の情報収集は、車内ネットワーク、自動車であれば Controller Area Network (CAN と略)[2] を通じて、鉄道車両の場合は Train Communication Network (TCN と略)[3] を通じて行われるとする。

2.2 監視対象；インバータ回路

自動車や鉄道車両などは、数多くの車載機器から成り立っており、特に鉄道車両では各 부품の劣化や故障が車両全体の運行に影響するため、保守方法や故障対策が課題と

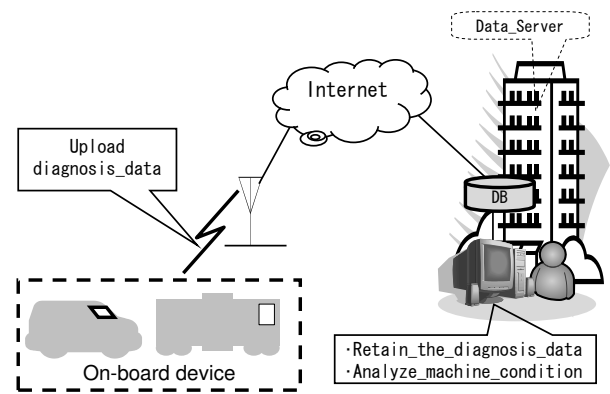


図 1 車両機器向け異常監視システムの運用イメージ

なる。

一般に、車載機器のうち制御装置には、異常時に機器が制御不能に陥ることを避けるため、制御装置に各種センサを取り付け、明らかに正常と異なる値を示した時はフェールセーフ制御することが出来るような構造となっている。本研究では、これら既設の各種センサから取得可能な情報を用いて機器の状態を把握することを試みる。ケーススタディとして、鉄道車両の駆動モータにおけるインバータ回路の異常監視を挙げる。インバータ回路は、高電圧を扱うため、その動作状態をセンサ値によって監視し、過電流等の異常検出時には保護動作に移行するとともに、異常検出前後のセンサ値を計測情報として記録している。異常検出前後のセンサ値は、故障原因解析に用いることを目的とし、10～数 10 マイクロ秒周期の高速サンプリングレートでセンサのアナログ値を記録する。蓄積したセンサ値は、車両モニタからネットワーク経由で収集することができる [14]。

2.3 関連研究と課題

機器の遠隔監視や遠隔保守のアーキテクチャに関する研究では、テレマティクスシステムに基づくリモート診断手法 [2][6] や、風力原動機 [8][7]、工場 [5]、回転機械 [12][13] 等に対する保守アーキテクチャなどがある。また、監視対象から収集した保守データの分析や可視化に関する研究として、監視対象の点検・整備計画作成機能、点検実績・故障実績一覧表示機能、管理指標作成機能を備える監視ツール [12] や、監視対象の計測情報を加工・可視化するツール [13] 等が提案されている。

しかし、車載用インバータ回路を対象とした異常監視手法に関する研究はまだ無く、異常監視のフレームワーク構築や、車載用インバータ回路に関する各種既設センサ値の分析から故障判定・可視化を実現する手段が課題となっている。また、特に鉄道車両向け車載用インバータ回路のようなインフラ設備では、実機の実データ収集が困難であり、故障や正常を把握出来るほどの計測情報が開示されていないことも課題の 1 つである。

3. モニタリングデータによる機器異常の把握

本研究では、車載用インバータ回路の故障時の計測情報について、状態情報としての有効性に着目し、これを異常時だけでなく、平常時にも収集、解析することで、機器状態の変化により、故障に至る前に異常を把握する監視フレームワークの構築を目指す。そのために、ターゲットとすべきセンサを特定し、そのセンサ値（以降、モニタリングデータと呼ぶ）のパターンの変化から異常を把握するための判定・可視化フレームワークを検討する。

3.1 準備

蓄積されたモニタリングデータを元に、特徴のあるパターンを特定するアルゴリズムは多種あるが、本研究では、それらのうち特異値分解及びマハラノビス解析に注目する。本節では、それぞれについて概要を述べる。

3.1.1 特異値分解

特異値分解 (Singular Value Decomposition, SVD と略) とは、信号処理や統計学で用いられる、行列分解の一手法である。特異値分解を用いることにより、多次元の数値データの各軸を合成して、特性をよく反映する、より次元数の少ない特徴空間を算出できる。一般に、入力となる行列 SP 、 SP の i 行目のデータ SP_i 、特異値 σ 、特異ベクトル係数 u 、特異ベクトル v と置いたとき、次の関係が成り立つ。

$$SP_i = \sum_{j=1}^{j=n} \sigma_{ij} u_{ij} v_{ij}^T \quad (1)$$

本研究では、特異ベクトル v_i を特徴空間上の座標とし、第一特徴量と第二特徴量の二次元で評価する。

SVD の実装方式は幾つかの方法が知られているが、本研究では、Brand による DynamicSVD [1] を用いる。DynamicSVD は、元データが一部追加や削除により更新された場合に、それらの増分差分のみから特異値分解の結果 (特徴空間) を高速に更新する手法である。この手法は、一定期間のデータについて少しずつ期間をずらしながら分析するような場合に適している [9]。なお、DynamicSVD の計算手法やその効果など詳細については、原著文献 [1] を参照されたい。

3.1.2 マハラノビス解析

マハラノビス距離 (Mahalanobis Distance) は、統計学で用いられる一種の距離である。一般的な重心からの距離 (ユークリッド距離) では、グループの分散の仕方が反映されないため、例えば大きな範囲に分散しているグループと、小さな範囲に分散しているグループが、両方とも同じ重心である場合は、新たな標本の距離はユークリッド距離では同じ判定結果になるのに対し、マハラノビス距離では大きな範囲に分散しているグループとは近い関係であると

いう判定になる。

$A(x1, y1)$ の既存集合に対し、未知の点 (x, y) のマハラノビス距離 d は、以下の手順で求められる。

- (1) A の各平均値 $\bar{x1}, \bar{y1}$ を計算
- (2) $x1, y1$ のそれぞれの不偏分散 $Vx1, Vy1$ を計算 (ここで、 $n =$ 標本数)

$$Vx1 = \frac{\sum(\bar{x1} - x1_i)^2}{n-1}, Vy1 = \frac{\sum(\bar{y1} - y1_i)^2}{n-1} \quad (2)$$

- (3) 共分散 $Sx1y1$ を計算

$$Sx1y1 = \frac{\sum(\bar{x1} - x1_i)(\bar{y1} - y1_i)}{n-1} \quad (3)$$

- (4) 共分散行列 S_{x1y1} を計算

$$S_{x1y1} = \begin{bmatrix} Vx1 & Sx1y1 \\ Sx1y1 & Vy1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

- (5) 共分散行列の逆行列 S_{x1y1}^{-1} を元に、未知の点 (x, y) のマハラノビス距離 d を計算

$$M = (x - \bar{x1}, y - \bar{y1}) \times S_{x1y1}^{-1} \times \begin{bmatrix} x - \bar{x1} \\ y - \bar{y1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.2 機器異常把握のための判定及び可視化

3.2.1 機器状態判定方法

本研究では、予め取得した教師データと状態判定の対象となる機器データを Dynamic-SVD の入力とし、特異値分解によって算出された第一、第二特徴量をさらにマハラノビス解析の入力として得られたマハラノビス距離を比較することにより、機器異常把握を判定する手法を提案する。特異値分解による特徴量には単位がなく、その絶対値には意味がないため、値の大きさで異常を判断することはできない。例えば、監視対象の波形データの特徴量が大きな値を示したとしても、正常時の波形データ群個々の特徴量も大きな値であれば、どの波形も似ていないということになり、異常の判断はできない。異常を判断するためには、正常時の波形群の特徴量分布に対し、監視対象の波形がその分布領域からどの程度逸脱しているかを評価する必要がある。そこで、特異値分解による特徴量をマハラノビス距離に変換することで、監視対象の波形の特徴量が離れ、グループ外とみなせる場合、マハラノビス距離は大きな値を示し、波形異常と判定する。

機器異常の把握にあたり、機器状態を示すセンサ値として、モータ電流波形に着目する。インバータ回路の目的は、ステアリング制御と現在の速度、モータの回転状態から、適切なモータ電流を生成することにある。従って、センサの劣化や断線、ゲート制御装置の異常動作が発生す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。すなわち、モータ電流波形をモニタリングし、波形パターンの正常時とは異なる変化を抽出することで、さまざまな原因による機器異常を網羅的に把握できると考える。

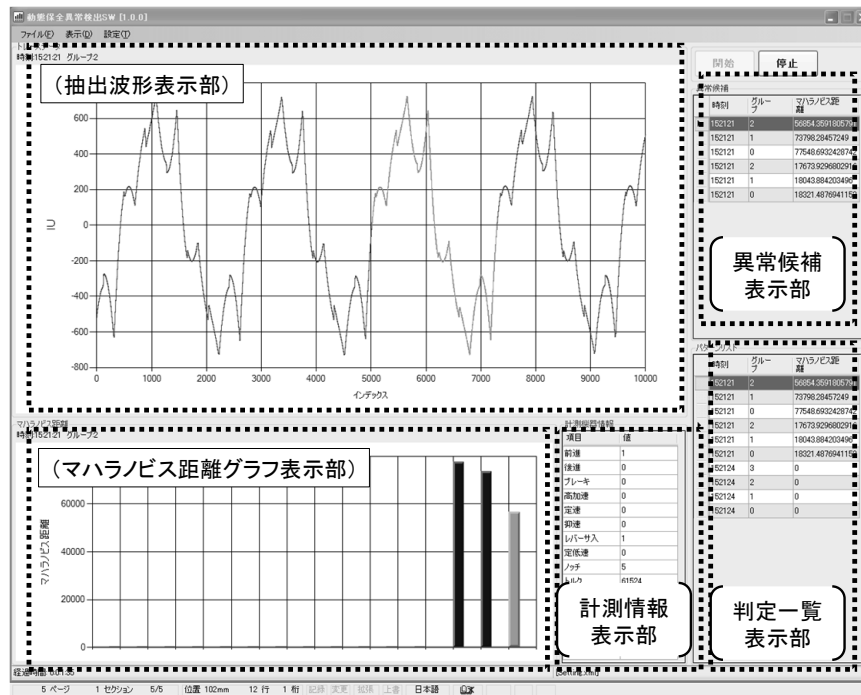


図 2 可視化ツール GUI

3.2.2 機器異常の可視化

上記の手法を実現・可視化する GUI ツールを提案する。本ツールは、現状 Windows OS 上で動作する。演算部は、以下の処理を自動で行う。

- (1) 監視対象から定期的に出力されるモニタリングデータをリアルタイムで読み込む。
- (2) モニタリングデータの特定の値（電流値、車両速度、時間など）が予め定めた値（以降、これを抽出条件と呼ぶ）に合致したとき、条件に合致したモニタリングデータの波形部分を抽出し、教師データと共に Dynamic-SVD の入力として特異値分解を演算した結果、第一特徴量、第二特徴量を得る。
- (3) 第一特徴量及び第二特徴量をマハラノビス演算の入力とし、演算結果のマハラノビス距離を比較することにより、監視対象が予め定めた閾値を超えたかを基準として正常か異常かを判定する。

GUI 部は、図 2 及び以下に示す通り、五つの描画部分に分かれる。

- 計測情報表示部 読み込んだモニタリングデータに含まれる情報（計測時間、車両速度、トルク、温度、湿度など）を表示する。モニタリングデータを読み込む度に自動更新される。
- 抽出波形表示部 読み込んだモニタリングデータに含まれる情報が、予め定めた抽出条件に合致したときのモータ電流波形 1msec 分を表示する。
- マハラノビス距離グラフ表示部 抽出波形表示部に表示されたモータ電流波形と、教師データを入力として

演算した結果であるマハラノビス距離を棒グラフ化して表示する。自動で棒グラフ状に表示することにより、演算自体の専門知識を持たない保守員に対しても視覚的に正常・異常の判定を容易にする。

- 判定一覧表示部 抽出条件に合致したモータ電流波形の演算結果の履歴を一覧表示する。右上ボタン停止時には、判定一覧から 1 つを選択することで、その計測情報、抽出波形、マハラノビス距離グラフの表示に切り替わる。これにより、計測開始からの演算結果の推移の確認を容易にする。
- 異常候補表示部 抽出条件に合致したモータ電流波形の演算結果のうち、予め定めた閾値を超えた履歴を異常候補として一覧表示する。右上ボタン停止時には、判定一覧から 1 つを選択することで、その計測情報、抽出波形、マハラノビス距離グラフの表示に切り替わる。これにより、異常候補の演算結果の推移の確認を容易にする。

4. 評価

4.1 評価環境の実装

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、さらに特定の故障や異常の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、正常及び異常時のモニタリングデータの収集自体が 1 つの課題となっている。そこで、本研究では、評価に必要なモニタリングデータを収集するため、専用のハードウェア装置上で動作させることでモータ実機と同じ実時間での計算

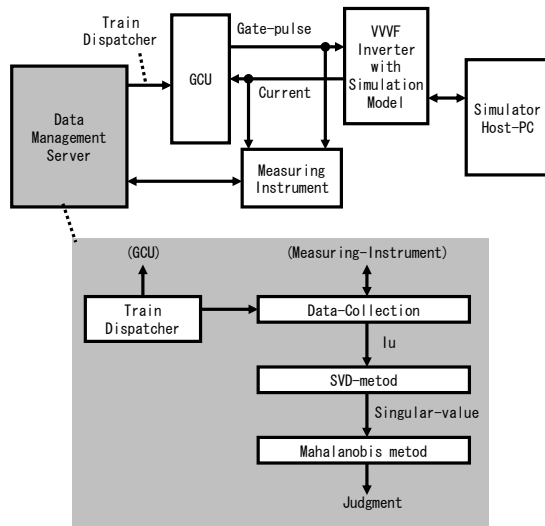


図 3 検証環境

結果の出力が可能となる Hardware in loop simulation (以降, HILS と略) に着目し, HILS に基づくシミュレーション環境を構築する。さらに, 2.2 節で挙げた鉄道車両向けインバータ回路を例題とし, 提案手法の評価を行う。

鉄道車両向けインバータ回路は, GCU と, 交流モータを含む主回路からなる。本研究では, GCU の実機と, 主回路のシミュレータで評価環境を構築する。交流モータの演算シミュレーションソフトウェアには, 交流モータの入出力及び演算が含まれており, 演算部(以降, モデルと呼ぶ)は MATLAB/simulink モデルを用いて作成する。演算に関わる MATLAB/simulink モデルを C 言語に変換し, 専用のハードウェア装置上で動作させることで, モータ実機と同じ実時間で計算結果の出力が可能となる。

評価環境の動作手順について説明する。まず, データ管理装置が, GCU に対し運転指令を送信する。次に, 特定の抽出条件下でアナログ計測器から GCU の既設センサ値と同じサンプリングレート, データフォーマットでモータ電流波形を収集し, SVD およびマハラノビス距離変換処理を行い, 結果を GUI に表示する(図 3)。

4.2 評価方法

まず通常運転域全体に対し, 定期的にモータ電流波形を収集, 特異値分解し, 正常時のモータ電流波形パターンの特徴量変化の軌跡を把握する。その上で分布域が小さく連続性の高い運転域を特定し, 特定した運転域での正常時のモニタリングデータを教師データとしたとき, 同じ条件で収集した異常時のモニタリングデータが確かに異常と判断されるかを評価する。

通常運転域全体の事前の計測により, 分布域が小さく連続性の高い運転域の 1 つとして, 車両速度が 54km/h まで減速した瞬間があることが解っている。そこで, モニタリングデータの抽出条件を, 車両速度が 54km/h まで減速し

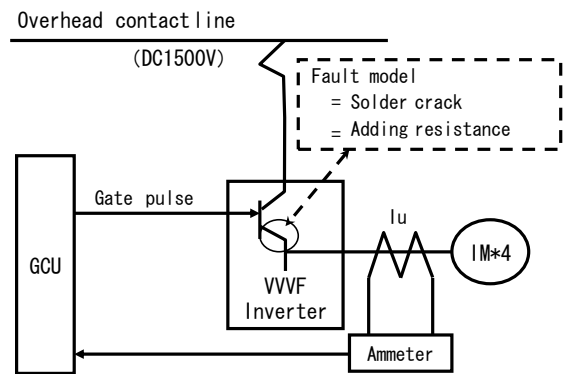


図 4 機器異常の模擬

た瞬間と定義する。

本研究では, 主回路のシミュレータについて MATLAB/simulink モデルを正常モデルと異常モデルの二種類用意する。正常モデルとは, GCU の入力に対し, 理想的な演算結果を出力する MATLAB/simulink モデルと定義する。すなわち, 正常モデルを実行して取得したモニタリングデータを教師データとする。対して, 異常モデルとは, 特定の故障を模擬し, 故障独特の演算結果を出力する MATLAB/simulink モデルとする。一例として, 主回路のハンダクラックを想定する。ハンダクラックが発生すると, 主回路内の IGBT のコレクタエミッタ間主端子電圧が上昇する。例えば, 普段はある電流を流して 1 V の上記電圧が, 劣化が始まってくると 1.1V になり, 劣化度合いに従って電圧が上昇する。このハンダクラックによる障害を模擬するため, 本評価では, 故障モデルを正常モデルに対して抵抗成分を挿入したものと定義する(図 4)。

なお, 教師データ自体に偏りが内包することを避けるため, 教師データは, 車両速度が 54km/h まで減速した瞬間とその前後(55km/h まで減速, 53km/h まで減速), 及びモニタリングデータの演算の一部を MATLAB/simulink モデルでは無く専用ハードウェアで実装し, 実行したモニタリングデータ(55km/h まで減速, 54km/h まで減速)の計五種類とする。一方, 評価対象となる故障モデルは, 全て MATLAB/simulink モデルで作成し, 抽出条件を定義通り車両速度が 54km/h まで減速した瞬間として評価する。

4.3 評価結果

4.3.1 モータ電流波形による比較

正常モデル及び異常モデルのモータ電流波形を図 5 に示す。正常モデルと異常モデルの波形パターン変化は, 波形の一部にわずかな電流値の変化がみられるだけであり, モータ電流波形のグラフのみから保守員が正常と異常の判定を行うのは困難であることが分かる。

4.3.2 提案手法を用いた解析結果による比較

次に, 異常モデル時のモータ波形を提案手法により解析した結果を, 図 6 に示す。この図は, 提案手法である GUI

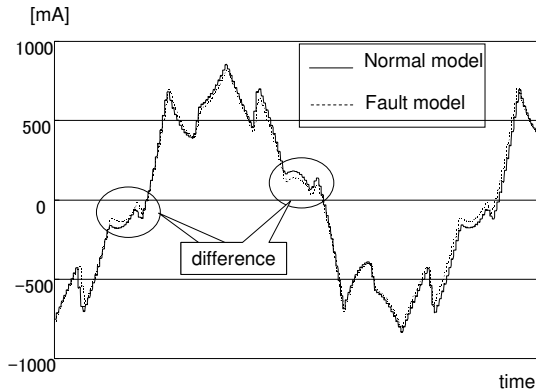


図 5 モータ電流の比較

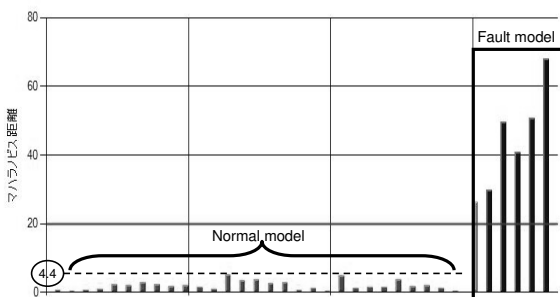


図 6 提案手法を用いた解析結果による比較

ツールのうち、マハラノビス距離グラフ表示部の出力のみを表示したものである。正常モデルで取得した五種類の教師データと、評価対象である異常モデルのモニタリングデータを提案手法により演算した結果がグラフで示されている。SVD 及びマハラノビス演算は、教師データまたはモニタリングデータに含まれるモータ電流一波毎に出力されるため、教師データ分で 29 種類、モニタリングデータで 6 種類と、計 35 種類の演算結果が表示されている。

正常モデルのモータ電流波形のうち、マハラノビス距離が最大でも 4.4 であるのに対し、異常モデルのモニタリングデータではすべて 20 以上となった。すなわち、正常モデルと異常モデルで、解析結果に大きく隔たりがあり、モータ電流波形の比較に比べ、正常・異常の判定が容易であることが分かった。この結果から、提案手法による解析・可視化により、視覚的に容易な異常検出が可能であることが示された。

5. まとめ

車載用インバータ回路を対象に、機器異常を把握するための判定・可視化フレームワークを検討した。機器異常を正常と明確に区別するため、既設センサ値であるモニタリングデータのうちモータ電流波形に着目し、SVD により波形パターンの特徴を抽出し、さらにマハラノビス距離により正常波形群とのグループ相関を評価する方法を提案した。また、実機を模擬した HILS 環境を構築し、ハンダク

ラック進行の異常モデルで試行した結果、異常モデルによるモータ電流のわずかなパターンの変化を異常値として識別できることを確認した。

今後、他の異常モデルに対しての有効性を引き続き評価するとともに、実車データを用いて提案手法を評価し、異常把握の実用性を検証する予定である。また、より提案手法の有効性を示すため、適切な正常・異常判定アルゴリズムの考察や、正常・異常判定の閾値導出手法について研究を進める予定である。

参考文献

- [1] M. Brand: "Incremental Singular Value Decomposition of Uncertain Data with Missing Values," European Conference on Computer Vision (ECCV), Lecture Notes in Computer Science Vol.2350, pp.707-720, 2002.
- [2] L. Liyuan, Q. Guihe, and Z. Jindong: "Remote Diagnosis System of Vehicle Based on Telematics," IEEE International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE), Vol.4, pp.217-220, 2010.
- [3] J. C. Moreno, E. Laloya, and J. Navarro: "A Link-Layer Slave Device Design of the MVB-TCN Bus (IEC 61375 and IEEE 1473-T)," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.56(6), pp.3457-3468, 2007.
- [4] T. Nieva, A. Fabri, and A. Benammour: "Jini Technology Applied to Railway Systems," IEEE International Symposium on Distributed Objects and Applications, pp.251-259, 2000.
- [5] F. Salavadori, M. de Campos, P. S. Sausesn, R. F. de Camargo, C. Gehrke, C. Rech, M. A. Spohn, and A. C. Oliveira: "Monitoring in Industrial Systems Using Wireless Sensor Network With Dynamic Power Management," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.58(9), pp.3104-3111, 2009.
- [6] T. Schlage, and J. Lunze: "Modelling of Networked Systems for Remote Diagnosis," IEEE Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol), pp.795-800, 2010.
- [7] Z. Tian, T. Jin, B. Wu, and F. Ding: "Condition Based Maintenance Optimization for Wind Power Generation Systems under Continuous Monitoring," International Journal of Renewable Energy, Vol.43(5), pp.1502-1509, 2011.
- [8] W. Yang, P. J. Tavner, C. J. Crabtree, and M. Wilkinson: "Cost-Effective Condition Monitoring for Wind Turbines," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.57(1), pp.263-271, 2010.
- [9] 藤野, 菅野: "鉄道車両の走行時振動解析への特異値分解の適用," 電子情報通信学会総合大会講演論文集, 情報シ

ステム (1), 57, D-4-18, 2008.

- [10] 福田, 奥村: “車載用電子機器の更なる信頼性向上への取り組み,” Railway Research Review, Vol.68, No.7, pp.6-9, 2011.
- [11] 福田, 奥村, 宮部, 渡邊: “鉄道車載電子器の更なる高信頼化に向けた調査研究,” 電気学会産業応用部門大会講演会論文集, No.3-71, pp.III-345-III-346, 2011.
- [12] 一志, 藤川: “保全ガイダンス機能と設備カルテ機能による CBM の実現 (設備管理・保全の今日的課題の解決に向けて-設備管理保全システム & 機器)” 計装, 工業技術社, Vol.54, No.4, pp.37-41, 2011.
- [13] 田邊: “状態監視に関する国際規格と最新型ポータブル診断システム (設備管理・保全の今日的課題の解決に向けて-設備管理保全システム & 機器)” 計装, 工業技術社, Vol.54, No.4, pp.42-44, 2011.
- [14] 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.