

鉄道構造物の状態監視データ間の関係性を用いた 状態変化の予測手法

川村 智輝* 羽田 明生*
岩澤 永照* 川崎 邦弘*

**A Prediction Method of Status Change Based on the Dependencies
between the Condition Monitoring Data of Railway Facilities**

Tomoki KAWAMURA Akio HADA
Nagateru IWASAWA Kunihiko KAWASAKI

Recently, a method of detecting the status change of facilities utilizing the dependencies between the measurement data has been developed. The method does not necessarily require the knowledge on physical characteristics of facilities. Thus the method has attracted attention as a versatile method. However, the existing methods have been used for detecting the symptom of status change which actually occurred, and the examples of their application to the prediction are few. In this paper, we propose a method of predicting the status change of railway facilities by using the dependencies between the measurement data.

キーワード：状態監視データ，ヘルスマonitoring，無線センサネットワーク，データマイニング

1. はじめに

近年、無線センサネットワーク等を用いた設備状態監視に関する検討が進められており、設備の状態に関する膨大な監視データを収集できる環境が整いつつある¹⁾。このような大量のデータから設備の状態を把握するための手法として、データ間の関係性に注目し、その変化から設備の状態変化を検出する手法が開発されている²⁾。このような複数のデータ間の関係性に着目した手法では、測定された監視データ全体を考慮して対象設備の状態変化を見ることができると、特定のデータに着目して状態の変化を検出する従来の手法では見ることができなかった状態変化の検出が期待できる。加えて、設備に関する専門的な知見を必要としないことから、汎用性の高い手法として近年注目を集めている。

しかし、データ間の関係性を用いた既存の状態変化検出手法では、顕在化した状態変化の検出は可能であるが、発生していない状態変化の予兆を検出することは難しいという課題がある。

そこで本稿では、鉄道構造物に代表されるような膨大な状態監視データが得られる鉄道設備を対象に状態監視データ間の関係性から状態変化の予兆を検出する手法を提案し、実データによる試行結果を報告する。さらに、状態監視データの関係性の変化を可視化するシステムのプロトタイプについても紹介する。

* 信号・情報技術研究部 ネットワーク・通信研究室

2. 既存手法の課題

設備の状態変化を検出するための手法は、対象とする設備に関する知見を活用するか否かで大きく分けることが出来る。

監視設備に関する知見を活用する手法では、監視対象とする設備の物理的な特性などの知見に基づいて、状態監視データと設備の状態との間の物理的なモデルを構築することにより、状態監視データから直接的に設備の状態変化を検出することを目的としている¹⁾。しかし、このような手法では物理的なモデルに関わるもの以外のデータが対象設備の状態変化に影響を与える場合に、それによる状態変化を検出することが難しい。加えて、物理的なモデルを構築するためには対象設備に関する知見が必要であり、このような知見が十分でない設備への適用は難しい。

一方、監視設備に関する知見を活用しない手法では、監視対象設備の物理的な特性などを使わずに、得られた状態監視データのみを使用して状態の変化を検出することを目的としている。中でも複数のセンシングデータ間の関係性に着目した手法²⁾は、状態監視データ全体を考慮して対象設備の状態変化を監視することができるため、検出可能な状態変化の種別が知見に基づく手法よりも多くなることが期待できる。加えて、設備に関する知見を必要としないことから、ノウハウや経験に依らない汎用性の高い手法として近年注目を集めている。しかし、データ間の関係性を用いた既存の状態変化検出手法

特集：輸送計画・情報技術

では、取得される状態監視データの関係性を随時算出し、その変化を監視することで状態変化の発生を検出する。そのため、これら既存手法では発生していない状態変化の予兆の検出を行うことは難しいという課題がある。

3. 提案する状態変化予兆の検出手法

3.1 提案手法の概略

傾斜角や変位量など、設備の状態監視データは、時々刻々と観測量が変動している。そのため、状態監視データ間の関係性は常に変動しており、状態変化が発生する前の状態監視データ間の関係性は、検出すべき状態変化の種類ごとに異なるものと考えられる。状態変化の種類とは、例えばトンネルにおけるひび割れや変形等のような対象設備の物理的な状態変化の種類を意味する。同種の状態変化であればその状態変化発生前の状態監視データ間の関係性の推移は同様の傾向を示すことが推察される。そこで、ここでは、検出すべき状態変化発生前の状態監視データ間の関係性の推移を用いて状態変化の予兆の検出を行うことを考える。つまり、入力された状態監視データに対する関係性を常に監視し、過去の状態変化前に観察された状態監視データ間の関係性の推移と比較することにより、その状態が変化する予兆を検出する手法を提案する。

提案する状態監視データ間の関係性に基づく状態変化予兆の検出手法³⁾の実行ステップの概略を以下に示す。
 STEP1. 全ての状態監視データ間の関係性を算出する。
 STEP2. STEP1で算出した全ての状態監視データ間の関係性をデータベースに蓄積する。ここで、ある状態変化が観測された場合は、その状態変化の発生前の状態監視データ間の関係性の推移と状態変化の種類を対応付けて、新たな状態変化パターンとしてデータベースに蓄積する。
 STEP3. 状態変化発生前に観測された過去の状態監視データ間の関係性の推移とSTEP1のものを比較検討し、予兆確認の有無を判定する。

上記提案手法全体のイメージを図1に示す。上記提案手法を実行するためには、状態監視データ間の関係性の算出方法、複数の状態監視データ間の関係性の推移の比較方法、データベースの構築方法を定義する必要がある。そこで次節からは、これらの方法を定義するための考え方と概要について説明する。

3.2 状態監視データ間の関係性の算出 (STEP1)

ここでは、上記のSTEP1で状態監視データの関係性を算出する方法の考え方と概要を説明する。図2に状態監視データ間の関係性の算出イメージを示す。データ間の関係性を算出する手法としては、MT法 (Mahalanobis

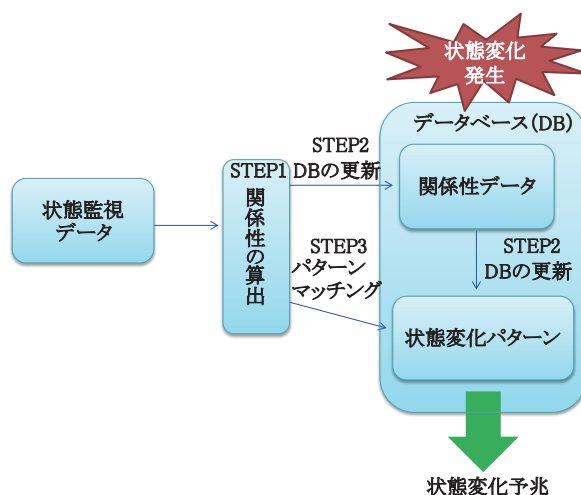
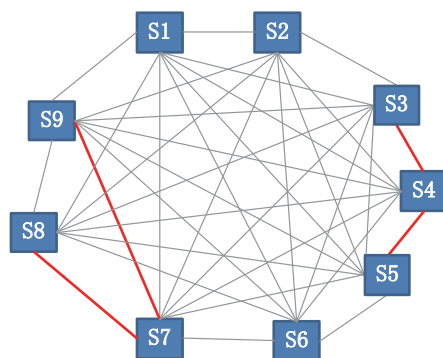


図1 提案手法全体のイメージ

Taguchi method)^{4) 5)}や相関分析といったように汎用的なものが既に複数存在するので、これらの手法を活用する。提案手法の枠組みでは、データ間の関係性同士の比較により状態変化の予兆の検出を行うことから、関係性の形式によらずに予兆の検出に用いることが出来る。そのため、関係性の算出については特定の手法にとらわれない。

3.3 データベースの更新 (STEP2)

提案手法では、検出すべき状態変化が発生する前の状態監視データ間の関係性の推移を用いて、状態変化の予兆を検出することを目的としている。このためには、状態監視データ間の関係性の推移を後から遡って確認できること、過去に起こった検出すべき状態変化の種類とその発生前の状態監視データ間の関係性の推移が対応付けられて保存されていることが必要となる。そこで、以下の2つのデータベースを用意して蓄積していく枠組みを考えた。



S1～S9: センサデータ

— : 関係性の变化を算出するデータ対

— : 関係性の变化が大きいデータ対

図2 データ間の関係性の算出イメージ

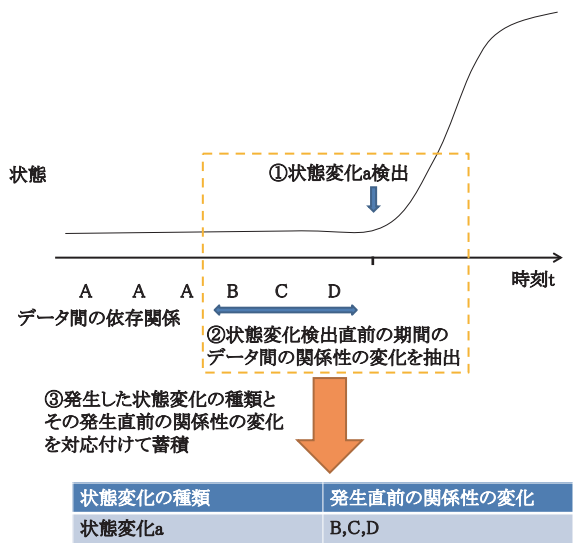


図3 関係性の推移の抽出イメージ

- ① 関係性データベース：図1のように、状態監視データが取得される度にSTEP1の手順で状態監視データ間の関係性が算出されることになるが、ここで算出した関係性を随時関係性データベースに蓄積する。このように、関係性を随時蓄積することで、検出すべき状態変化が発生した際に、その発生前の関係性の推移を遡って抽出することができる。
- ② 状態変化パターンデータベース：検出すべき状態変化が発生した際に、その発生前の関係性の推移を関係性データベースから抽出するとともに、どのような状態変化が起こったのかという状態変化の種類と対応付けて状態変化パターンデータベースに蓄積する。図3に関係性の推移を抽出する際の動作イメージ

ジを示す。今、状態変化aという種類の状態の変化を検出したとし、その発生前のデータ間の関係性がA, B, C, Dというように変化していたとする。この際、まず状態変化発生前の特定の期間（図3の場合は3期間）の関係性の推移（B, C, D）を抽出する。その後、抽出した関係性の推移と発生した状態変化の種類（この場合は状態変化a）の2つを対応付けて、状態変化パターンデータベースに蓄積する。このように、状態変化の種類とその発生前の関係性の推移を対応付けて蓄積し、現在の関係性と随時パターンマッチングを行うことにより、後から類似した関係性の推移が発生した際に、事前に状態変化の予兆を検知することが可能になると考えられる。加えて、モデル化が困難な対象に関する新たな知見の獲得も期待できる。

3.4 関係性を用いたパターンマッチング（STEP3）

ここでは、STEP2で蓄積した状態変化パターンデータベースに基づいて、パターンマッチングにより状態変化の予兆の検出を行う。図1のように、状態監視データが取得される度にSTEP1の手順で状態監視データ間の関係性が算出されることになるが、算出した関係性とSTEP2の状態変化パターンデータベースの中に蓄えられた関係性の推移をパターンマッチングによって随時比較する。状態変化パターンデータベースには、状態変化の種類とその発生前の関係性の推移が対応付けられて蓄積されている。そのため、蓄積した関係性のパターンと類似のパターンが発生したことをパターンマッチングにより検知することで、そのパターンに対応付けられた種類の状態変化の予兆を事前に検出できると期待される。

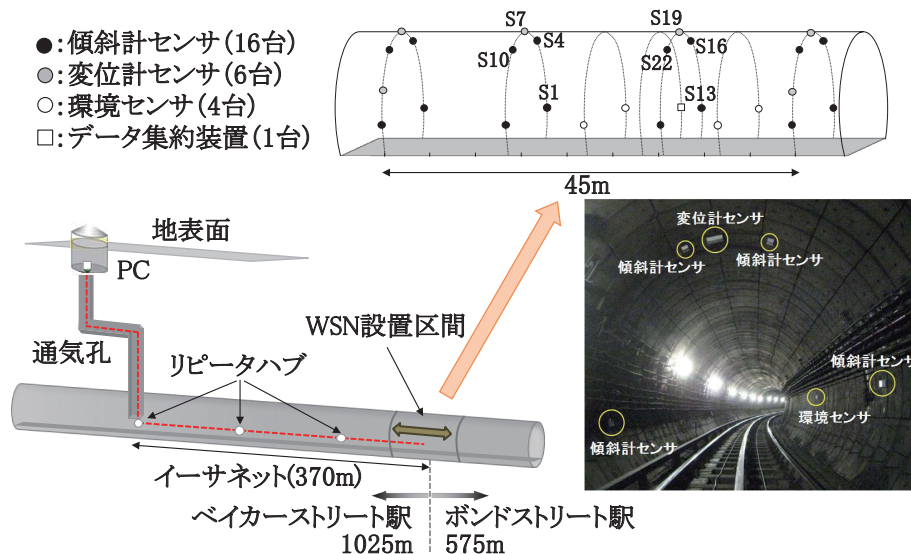


図4 ロンドン地下鉄における状態監視システム^{6) 7)}

4. 提案手法の試行

図1に示した手順で状態変化を検出するための第一の課題は、実際に状態変化の発生前にSTEP1で関係性の変化が現れるかどうかである。

そこで、提案手法の適用の前段階として、状態変化の発生前にSTEP1で状態監視データ間の関係性の変化が現れることを確認するために、実データを用いて数値実験を試行した³⁾。

4.1 試行条件

ロンドン地下鉄は世界でも最も広範囲に老朽化が進んでいる地下鉄の一つである。ロンドン地下鉄ジュビリー線の一部区間に、トンネルの経時変化を監視するための無線センサネットワークが2007年に設置された。この設置作業はケンブリッジ大学主導のプロジェクトで実施され、鉄道総研も共同研究の一環として参加した。図4に、ロンドン地下鉄に設置された無線センサネットワークの構成を示す。本稿では、このロンドン地下鉄における状態監視データの一部を用いて数値実験を行った。具体的には、図4の中に示す傾斜計6個(=S1, S4, S10, S13, S16, S22)、加速度計2個(=S7, S19)の合計8個のセンサがあり、上記の各センサにはそれぞれ温度計と湿度計が付いている。今回の試行では、これらを合わせたセンサ1～センサ24(S1～S24)の計24個のセンサデータを用いた。なお、各センサデータは1日毎のデータであり、217日分のデータを用いた。

4.2 使用した手法

データ間の関係性の変化を検出する代表的な手法にMT法がある。MT法では、データ間の相関性を考慮した多次元の距離であるマハラノビス距離を用いて、データ間の関係性の変化を検出することができる。マハラノビス距離は、関係性の変化の判断基準とするデータ群(=単位空間)と判断対象とするサンプルを正規化した値を用いて次の(1)式で求めることができる。

$$D = \sqrt{X \cdot A \cdot X^t} \quad (1)$$

D：マハラノビス距離

X：正規化した判断対象サンプル

A：単位空間の相関行列の逆行列

マハラノビス距離は、一般的に用いられる固定的な距離と比較するとデータ間の相関性を適切に考慮できることが知られている。例えば、一般的な距離を用いる場合には、図5に示すように基準となるデータ群(図5のオレンジ色で示した領域)の中心からの純粋な距離で変化を判別することになる。そのため、データの傾向からの

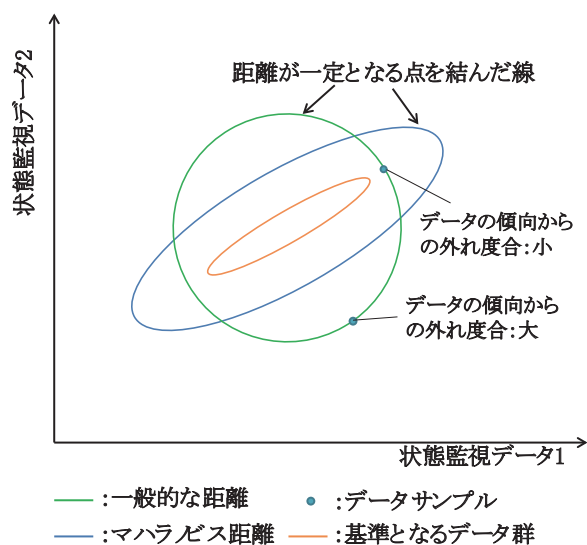


図5 一般的な距離とマハラノビス距離(2変数の場合)

外れ度合に依らず、基準となるデータ群の中心からの距離が同一であれば同様の変化をしたと判別されることになり、関係性の変化を判別するのは難しい。これに対して、マハラノビス距離では相関性を考慮して距離を定義するため、相関関係の変化を容易に判別することができる。このことから、今回は状態監視データ間の関係性を算出する手法としては、MT法を活用した。

4.3 試行結果

上記の条件と手法に基づいて実際に状態変化の予兆としてSTEP1で状態監視データ間の関係性の変化が現れるかどうかの検討を行った。具体的には、使用したセンサの中でデータの変化に特徴があった傾斜計(S22)のデータに着目し、その値が急激に変化する点について変化の発生前の関係性の変化を算出することで、事前に関係性の変化が状態変化の予兆として現れるかどうかの検証を行った。

今回データ間の関係性の変化を簡易的に見るために、MT法を用いて関係性の変化が大きいセンサ対の算出を行った。図6にMT法による状態監視データ間の関係性の変化を算出した結果と傾斜計(S22)のデータの変動イメージを示す。

また、今回は2つのセンサデータ間の関係性の変化を算出しており、図6の中の(a)～(c)の図は関係性の変化が大きいセンサ対を直線で結んだ結果を表している。例えば、S3とS9間の直線は、S3とS9のデータ間の関係性が変化したことを表す。また、図6の(c)はS22のデータが急激に変化する時点でのデータ間の関係性の変化を表しており、(b)はその1日前の時点での、(a)はその2日前の時点での関係性の変化を表している。

図6の(c)の段階でS22の傾斜計データに急激な変

動が発生するが、それが関係性の変化にも現れており、MT法により変動の発生が捉えられていることがわかる。また、図6の(a)と(b)の結果より、変動の発生の前日、前々日の段階で状態監視データ間の関係性の変化が発生していることがわかる。具体的には、温度に関するデータ間の関係性の変化が事前に現れており、温度の変化が傾斜計の変化に密接に関わってくることを推察される。実際に、S22の傾斜計データと温度計データを比較してみたところ、温度の変化に応じて傾斜角も変化するという関係が見て取れ、温度の変化が傾斜角の変化の予兆として現れていることが観察された。

このことから、提案手法を用いることで傾斜角に関しては変化の予兆を事前に検出できる可能性があることがわかった。加えて、今回の傾斜角と温度の関係のように、単一のデータを見ているだけでは捉えられない変化の予兆についても、関係性の変化を見ることで捉えられることが確認できた。また、今回の傾斜角と同様に、状態変化の予兆として関係性の変化が現れてくるものについては、提案手法により事前に検出できる可能性があると考えられる。

5. 今後の課題

前章でも述べたように、図1の枠組みを実行するために最も重要なことは、状態変化の予兆として3章のSTEP1で算出する状態監視データ間の関係性の変化が

現れるかどうかということである。そのため、4章で行ったように状態変化の予兆として関係性の変化が現れるかを分析することが、提案手法の適用可能性を見る意味でも重要となる。また、4章で行ったような分析をする上では、関係性を可視化して視覚的にどのように変化するかを把握できることが望ましい。

そこで、今回提案手法の適用可能性を分析するためのシステムとして、MT法により関係性の変化を可視化するシステムのプロトタイプを構築した。本システムの画面表示例を図7に示す。

本システムでは、下記のパラメータを指定して、結果を表示させることができる。

- ・ 対象データ：関係性の変化の算出に使用するデータ
- ・ 単位空間：MT法による関係性の変化の判断の基準とするデータ群
- ・ 判断対象サンプル：関係性の変化の可視化を行うサンプル
- ・ MT法の閾値：MT法による関係性の変化の判断の閾値

関係性の変化を表示する画面では、円で各センサーデータをノードとして表示し、センサーデータ間の関係性に变化のあった場合にノード間をアークで結んで表示する。

今後は、本可視化システムを用いて提案手法の適用可能な範囲の分析を進めていくとともに、3章のSTEP2

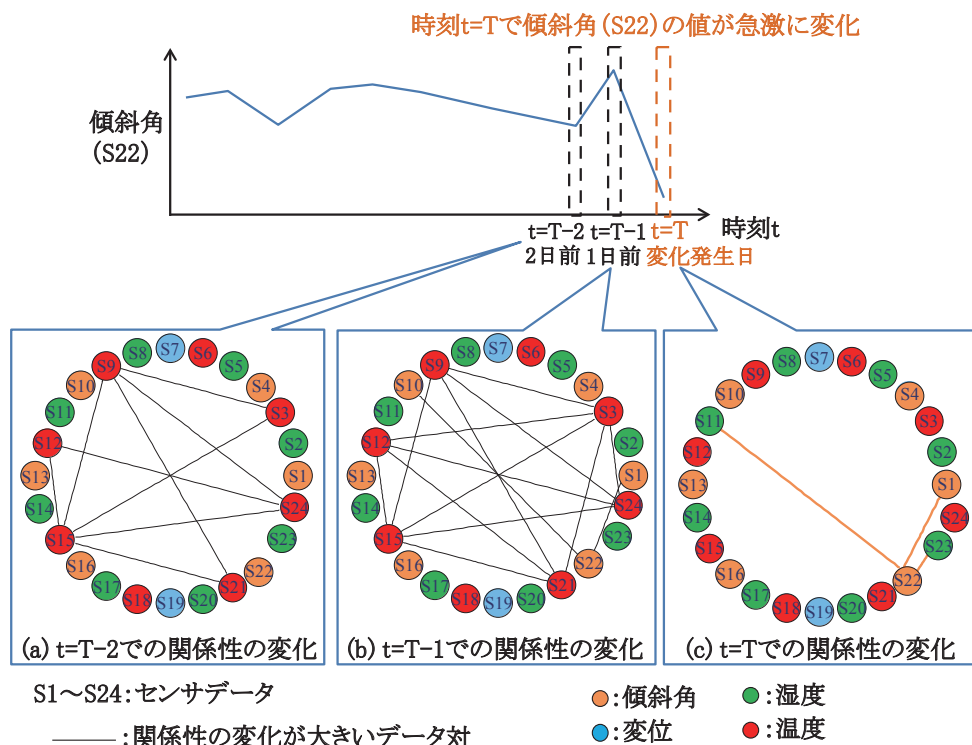


図6 S22のデータの変化時の関係性の変化算出結果

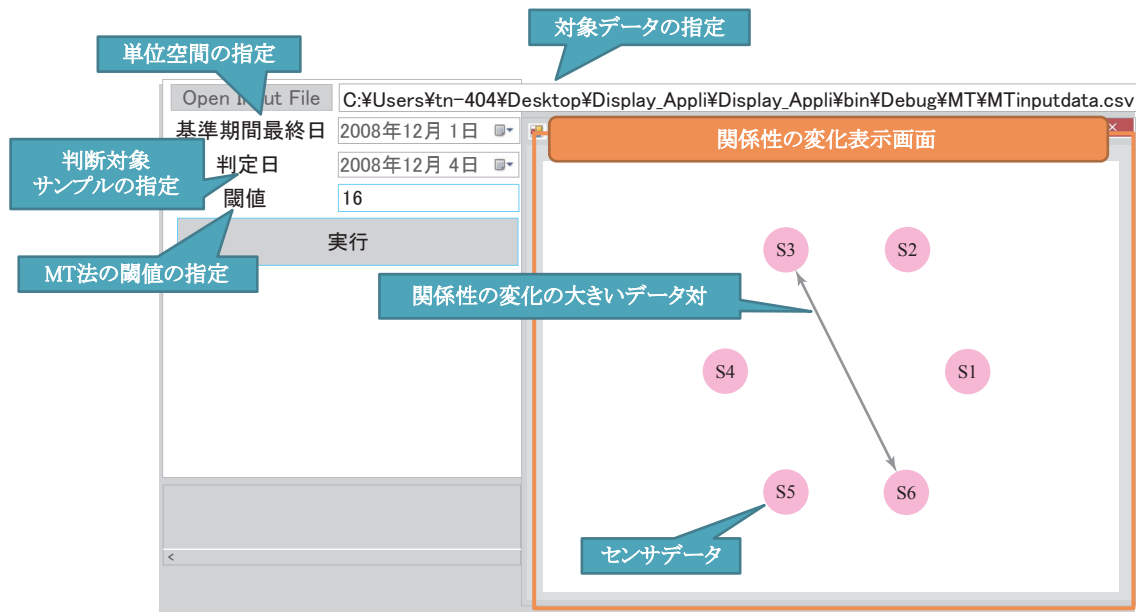


図7 関係性の変化可視化システム画面

と STEP3 の開発にも活用していく予定である。また、最終的に手法が確立した段階で本システムへの機能の追加や UI（ユーザーインターフェース）の改善等を行い、将来的には鉄道現場へ展開していきたいと考えている。

6. おわりに

本稿では、鉄道構造物を対象に状態監視データ間の関係性から状態変化の予兆を検出する手法を提案した。また、提案手法の枠組みの中で最も重要である状態監視データ間の関係性の推移から状態変化の予兆を検出できるかどうかについて、実データを用いた数値実験を試行することによって確認した。試行の結果、状態変化の予兆として関係性の変化が現れている様子が見取れ、提案手法によって鉄道構造物の状態変化の予兆を早期に検出できる可能性があることが確認できた。

また、状態監視データの関係性の変化を可視化するシステムのプロトタイプについても紹介した。

今回、状態監視データ間の関係性を導出する手法は MT 法を用いて数値実験を行ったが、今後はどのような手法が適切かを比較検討していく予定である。また、パターンマッチングによる状態変化予兆の検出についても実データによる検証を進めていく予定である。加えて、今回紹介した可視化システムを用いて提案手法の適用可能な範囲の分析を進めていくとともに、パターンマッチング機能の追加や UI の改善等を行っていく予定である。

文献

- 1) 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, 2014.7
- 2) 井出剛: 潜在的ダイナミクスと異常検知, 電子情報通信学会誌, Vol.97, No.5, 2014
- 3) 川村智輝, 羽田明生, 岩澤永照, 川崎邦弘: 状態監視データ間の依存関係に基づく状態変化予兆の早期検出手法, 第 21 回鉄道技術・政策連合シンポジウム, 2014.12
- 4) Genichi Taguchi, Rajesh Jugulum: The Mahalanobis-Taguchi Strategy: A Pattern Technology System, Wiley, 2002.
- 5) 田村希志臣: よくわかる MT システム—品質工学によるパターン認識の新技术, 日本規格協会, 2009
- 6) Peter J. Bennett, et al.: Wireless Sensor Networks for Underground Railway Applications: Case Studies in Prague and London, Smart Structures and Systems, Vol. 6, No.5-6, pp.619-639, 2010.
- 7) 羽田明生, 廣瀬壮一, 小西真治: 鉄道構造物ヘルスマニタリングにおける無線センサネットワークの総費用最小化計画, オペレーションズ・リサーチ, Vol.57, No.9, pp.518-523, 2012