

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月27日現在

機関番号：	15501
研究種目：	挑戦的萌芽研究
研究期間：	2011～2012
課題番号：	23656290
研究課題名（和文）	橋梁ヘルスマニタリングのための革新的損傷検知手法の開発と実証
研究課題名（英文）	A NEW DAMAGE DETECTION METHOD FOR BRIDGE CONDITION ASSESSMENT IN STRUCTURAL HEALTH MONITORING
研究代表者	
	宮本 文穂 (MIYAMOTO AYAHO)
	山口大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：	10093535

研究成果の概要（和文）：本研究では、橋梁などに生じる損傷検知法の論理展開とその体系化のアイデアを、種々提案されている従来法の実用性の面からの比較を精査するとともに、新たに提案するノンパラメトリック手法の定式化、解法の手順などをフィンランド研究者と綿密に議論した。これに基づいて、既に先行的に検討してきたお互いの数学的展開アイデアを持ち寄り、数値検証を実行した。また、両機関で有している模型橋梁および実橋梁の両方を利用したヘルスマニタリングシステムに改良を加えて組込んだ。その結果、（1）原理の確立、（2）ツール化、（3）特徴抽出および状態評価手法の確立、（5）論理検証および実証実験の実行、および（6）実用化の検討の成果が得られた。

研究成果の概要（英文） This study tried to challenge the establishment of a newly proposed “State Representation Methodology (SRM)” and its application to bridge condition assessment based on the bridge monitoring data. The SRM is a novel tool that can provide some ideas and algorithms for data mining in the bridge monitoring system. The state of a system such as bridge structure can be obtained by a state variable that calculate from a State Representation Equation (SRE). A Kernel function method which plays an important role in the Support Vector Machines (SVM) is applied to get solutions of the SRE. In the computation of the SRE, it needs to be changed into a Large-Scale Linear Constraint Problem (LSLCP). A new compatible algorithm is therefore proposed for solving technique of the LSLCP. Before using the SRM, it is necessary that the system features need to extract from the complex responses observed data in the system. Consequently, a new time-frequency analysis tool, called Frequency Slice Wavelet Transform (FSWT), will be able to powerfully reveal a change of the characteristics in vibration signal. The FSWT produces five new properties in contrast with the traditional wavelet transform. Therefore, the paper will show the new method that can be used widely in signal processing. In this paper, it will also be introduced a general theory for the non-parametric description of the infrastructure system’s state and will demonstrate how to apply the SRM to practical problems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目： 土木工学、構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：長寿命化、モニタリング、解析・評価、ノンパラメトリック状態式、損傷検知

1. 研究開始当初の背景

世界各国が共通して直面している地球環境問題、老朽化する社会基盤施設の維持管理問題、防災問題に遠隔ヘルスマonitoring (SHM)を適用してリアルタイムに観測・予測する試みが増えている。特に橋梁の場合は、道路網の基幹であるため長寿命化技術が国際的な関心事である。遠隔ヘルスマonitoringでは、日々大量に収集されるモニタリングデータの管理とともに、いかに高精度で経済的・定量的に状態評価を行って早期の予防保全に反映させるかが重要となる。

本研究では、状態評価に焦点を当てたこれまでに無い革新的ないくつかの数学的手法を提案し、倍率を変えて初期段階の損傷検知から終局状態に至る損傷検知を統一的に評価し、効率的な長寿命化を実現することによって上述の課題に応えるものである。

2. 研究の目的

橋梁など社会基盤構造物の長寿命化には、その健康状態（健全度）の把握が必要不可欠となる。そのため、遠隔ヘルスマonitoring (SHM)システムなどで時々刻々収集される膨大なデータから効率的に状態評価を行う手法の開発が、先進国、開発途上国を問わず共通の緊急性の高い課題になっている。本研究では、従来より国内外で数多く提案されている手法と異なる革新的な概念に基づくノンパラメトリック方程式とカーネル学習法を組み合わせる状態確率で状態評価を行う手法の開発と実証を行うことを目的とする。そのため、大量に収集されるモニタリングデータの処理に適した Frequency Slice Wavelet Transform (FSWT) を提案し、これより得られる特徴ベクトルを構成し、特徴抽出する。この結果を既知の損傷を導入した橋梁モデル桁で実証する。

3. 研究の方法

初年度は、これまで暖めてきた損傷検知法の論理展開とその体系化のアイデアを、種々提案されている従来法の実用性の面からの比較を精査するとともに、新たに提案するノンパラメトリック手法の定式化、解法の手順などをフィンランド研究者と綿密に検討を加える。これに基づいて、既に先行的に検討してきたお互いの数学的展開アイデアを持ち寄り、関連する要素ごとのツール（アルゴリズム）化を行い相互に交換することによって数値検証を繰り返す。また、両機関で有しているモデル橋梁および実橋梁の両方を利用してヘルスマonitoringシステムに改良を加えて組み込むことを試みる。その際、損傷の位置、程度、種類を人工的に自由に変化させることができる装置を開発する。そのため、

初年度は具体的に以下の項目の検討を行う：

(1) 原理の確立：ノンパラメトリック方式でシステム状態を表現する新しい手法の原理を確立する。すなわち、システムの状態を状態変数とし、状態方程式で表わし、カーネル関数法と大型線形拘束問題の解に統計的手法を適用した状態評価計算法と評価指数を提案する。

(2) ツール化1：一般的な拘束条件の下で、多項式～時間問題の高性能で効率のよい計算手法の考案、ツール化する。例えば、ヒルベルトマトリクス問題のような極端に非論理的な条件においても、十分有効となるような革新的なツールを提供する。

(3) ツール化2：新しい時間周波数解析のツールとして、原信号は周波数スライス関数を適用する手法 (FSWT) を提案する。これは、従来のウェーブレット変換に比べて多くの有利な特性を有する。例えば、時間周波数ウィンドの中心は信号観察の中心となり、自由に信号の周波数解像度にコントロールすることができる。また、提案手法の良好なフィルター特性を利用してノイズ除去が可能となることが期待できる。

(4) 特徴抽出および状態評価手法の確立：ランダム減衰技術と統計的推定法の組み合わせを応用して、モード分離と減衰特性識別に高精度推定の周波数スライス計算法を提案する。この結果を利用し、瞬間減衰パラメータを構造システム特徴パラメータとして利用できることを検証する。これは自由減衰応答に適用できるだけでなく、直接ランダム衝撃応答信号にも応用できることより、非常に良いフィルターであることが保証される。これらの結果を、既存の橋梁モデル桁を利用して加速度波形を対象に実証を試みる。

2年目(最終年度)は、初年度で論理展開とその体系化を完了した解法、ツールなどを統合してシステム化するとともに、人工的な損傷を導入したモデル橋梁を利用した実用化のための実証実験を繰り返す。具体的な項目は以下に示す通りである：

(1) 論理検証および実証実験の実行：数値シミュレーションによる解析結果を図表化して提案手法の全体的なロジックの最終検証を行う。また、人工的な損傷を導入できる橋梁モデル桁を利用した綿密な室内実験を繰り返して実施し、本提案手法で新たに開発したカーネル関数法、多スケール概念、FSWT および統計確率検証法を組み合わせた橋梁の状態評価を妥当性、精度、安定性などを明らかにする。

(2) 実用化の検討：2年間にわたる研究成果を、日本およびフィンランド両国のモデル橋梁、実橋梁に適用して実用化のための各種検証試験を行い、国内外での利用を促進する。

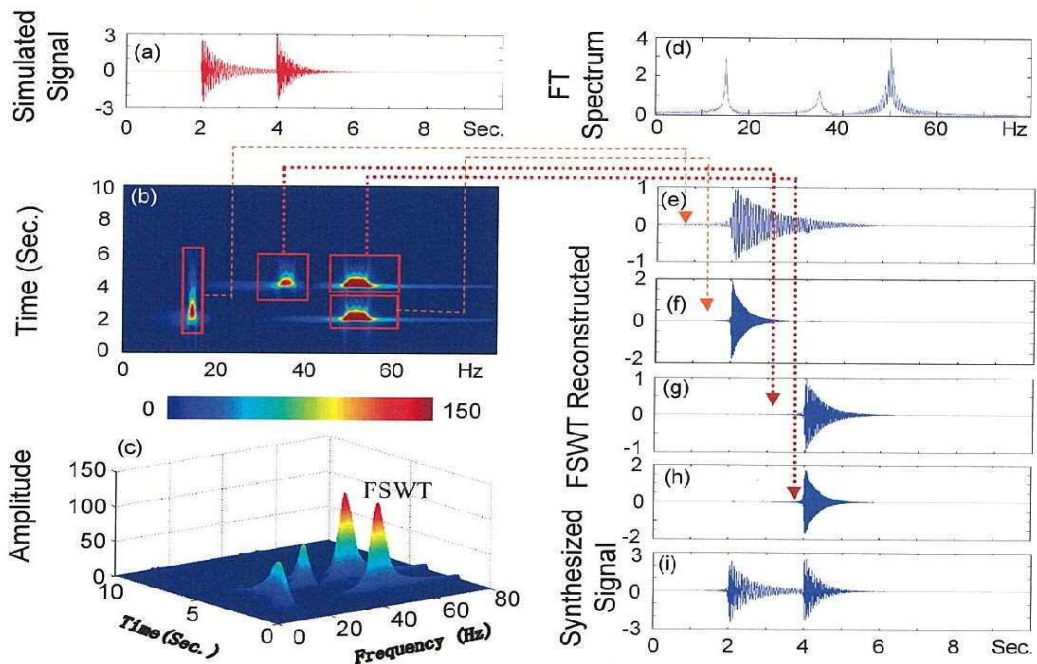


図-1 本提案手法の特徴比較の例

4. 研究成果

(1) FSWT による時間-振動数空間解析手法の特徴とツール化

本研究では、一般的な振動情報からより多次的に減衰の情報を抽出することを考慮し、時間-振動数空間上の任意の減衰パラメータを抽出し、時々刻々の振動の変化に伴う減衰パラメータの変化量に着目した。ここで、図-1 に示すような振動情報から時間-振動数空間解析を行う方法については、提案した FSWT の他、短時間フーリエ変換 (STFT)、連続ウェーブレット変換 (CWT)、ウィグナー分布 (WVD) に示す手法があり、図-1 中にその特徴を比較する。この特徴解析をツール化し、簡単なインパクトハンマー試験で計測された加速度データに対して FSWT を適用した時間-周波数解析結果例を図-2 にまとめて示す。

(2) モニタリングデータの SRM への適用結果

構造物の状態を評価するためには、構造物の特性を示すパラメータを抽出する必要がある。SRM では、振幅の包絡線 $x = Ae^{-\alpha t}$ の係数 α を求め、特徴量とした。係数 α は、FSWT による変換を行ったデータに対して Modal Damping Function (MDF) を用いることにより任意の時間-周波数の範囲のみ計算できる。ここで、特徴を抽出する範囲を特徴ブロック (FB) とし、特徴ベクトル x を作成する。このような特徴ベクトルを利用して構造物の状態変化を求める一連の流れの概要を図-3 に示す。

(3) 橋梁模型による実証実験結果

実証実験では、図-4 に示すような橋梁模型桁に加速度計を設置し、インパクトハンマーで加振して橋梁模型桁の振動データを計測した。得られた結果の一例を図-5 に示す。

図-3 に従って、実験データ群より特徴ベクトルを算出して状態変数を求め、これより状態確率分布に変換して図示したものの一例を、模型橋梁各部位の損傷導入前後で比較した結果を図-6 にまとめて示す。これより、以下のことが明らかとなる：

① 模型桁橋を用いて行ったインパクトハンマー試験および移動荷重実験において計測した加速度データに対し、提案した FSWT による時間一周波数解析を行い、損傷度やその位置の変化に伴う状態変化に対応した固有振動数などの変化が明らかとなる。

② FSWT の結果に対し、特徴を抽出する範囲を特徴ブロック数として設定し、MDF を用いた特徴抽出を行った。このように抽出した特徴を用い、ガウシアンカーネルを利用した SRM に適用することで既存橋梁の状態変化をヒストグラムによって視覚化出来る。

③ SRM 解析の結果を相対比較することで、橋梁部材の損傷の範囲およびその程度によりヒストグラムの移動が大きくなるという結果が得られた。すなわち、既存橋梁の損傷に対応する剛性低下による固有振動数の変化が、SRM のヒストグラムの変化として表示されることで、橋梁構造物の損傷検知に有効となる。

今後の課題として挙げられることは、①計測センサ位置の最適化、②各損傷位置および損傷程度などの違いによるヒストグラム変化の検証、③特徴抽出における加速度以外の

データの検討および特徴抽出の範囲などの最適化などである。

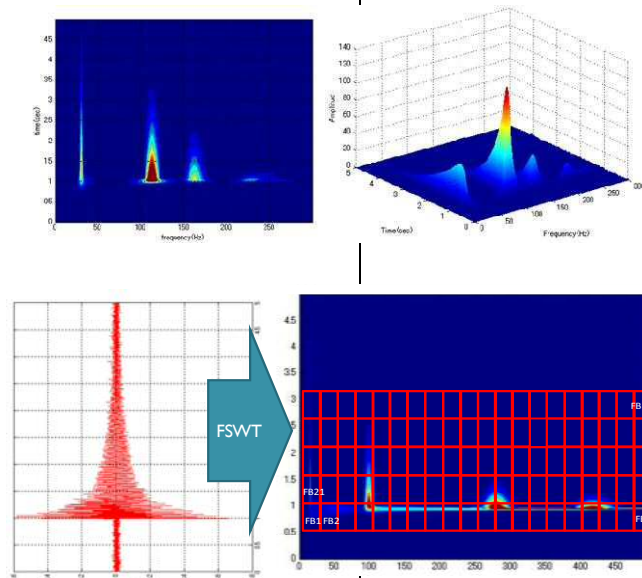


図-5 実証実験より得られたデータの時間-周波数解析結果の例

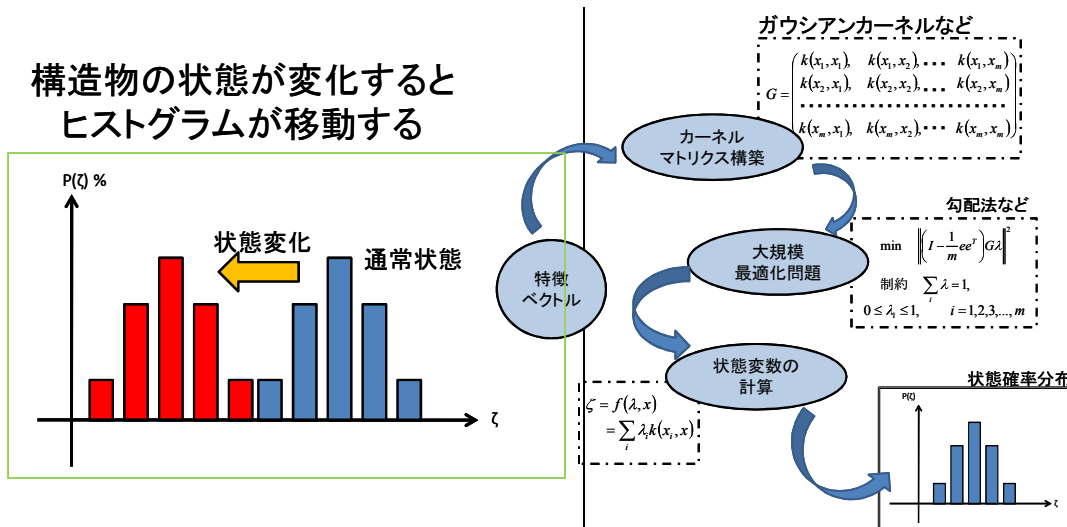


図-3 SRM 解析による状態変化導出の流れ

FSWTによる時間-周波数解析

インパクトハンマー試験

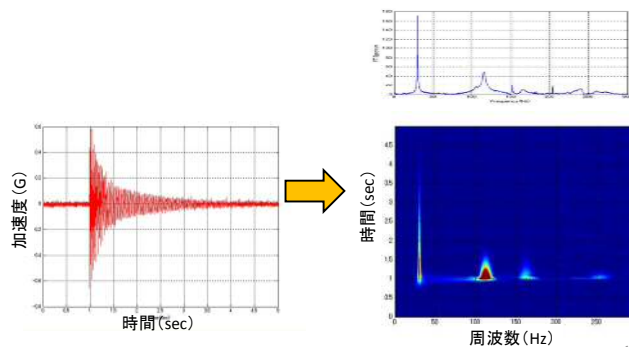
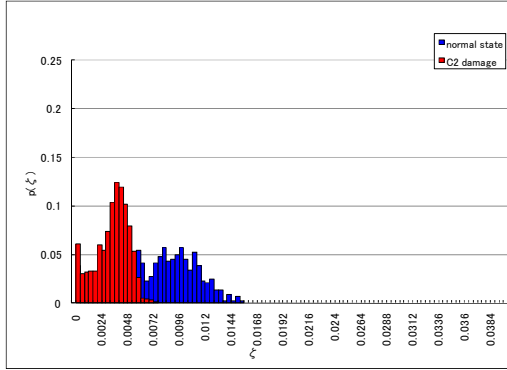
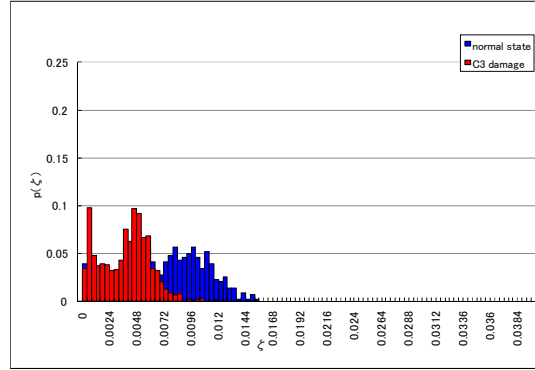


図-2 FSWT を適用した時間-周波数解析結果の例

上述のような課題を克服し、本提案手法が実用化すると、日々収集される膨大な SHM データから高精度な損傷検知を可能となり、学問的インパクトのみならず、先進諸国が直面している同様な問題に先鞭をつけ、当該プロジェクトの成果を他分野に広げることが可能となる。



健全時およびC2損傷時の比較



健全時およびC3損傷時の比較

図-6 SRM 解析を適用した損傷前後での状態変化の例



- サンプリングレート:1000Hz
- 計測時間:5秒
- インパクト箇所:B1~D3
- インパクト回数:10回
- 加速度を計測

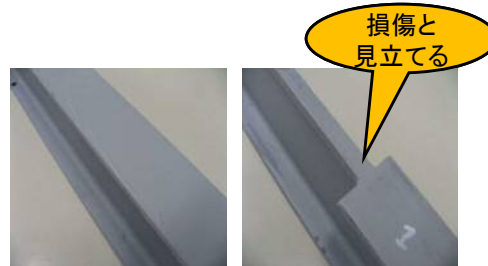
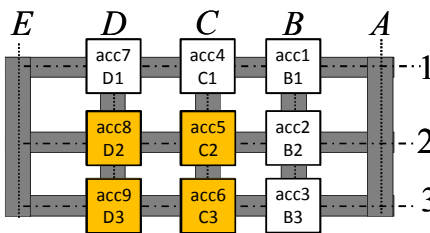


図-4 橋梁模型桁による実証実験の概要

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

1. Ayaho Miyamoto, Akito Yabe, State Representation Methodology (SRM) for Bridge Condition Assessment in SHM, Journal of Civil Engineering and Architecture, 査読有, 6, 2012, pp.433-443 (ISSN 1934-7359).
2. Ayaho Miyamoto, Akito Yabe, Development of Practical Health Monitoring System for Short-and Medium-span Bridges Based on Vibration Responses of City Bus, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 査読有, 2, 2012, pp.47-63 (10.1007/s13349-012-0017-0).
3. Ayaho Miyamoto, A New Damage Detection Method for Bridge Condition Assessment in Structural Health Monitoring, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 査読有, 3, 2012, pp.1-25 (10.1007/s13349).
4. Ayaho Miyamoto, Satoshi Isoda, Sensitivity Analysis of Mechanical Behaviors for Bridge Damage Assessment Structural Engineering and Mechanics, Techno-Press, Korea 査読有, 41(4), 2012, pp.539-558. (ISSN: 1225-4568).
5. Ayaho Miyamoto, Akito Yabe, Bridge Condition Assessment based on Vibration Responses, Journal of Physics, 査読有, 305, 2011, pp.1-10. (10.1088/1742-6596/305/1/01210).

[学会発表] (計6件)

1. Ayaho Miyamoto, A New Damage Detection Method for Bridge Condition Assessment in Structural Health Monitoring, The 1st Joint Symposium between Chungbuk National University and Yamaguchi University (招待講演), 2012.5.25, Chunbuk, Korea.
2. Akito Yabe, Ayaho Miyamoto, Bridge Condition Assessment for Short and Medium Span Bridges by Vibration Responses for City Bus, Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability (IABMAS' 12), 2012.7.8-12, Maggiore, Italy.
3. Ayaho Miyamoto, A New Damage Detection Method for Bridge Condition Assessment in Structural Health Monitoring, Civil Structural Health Monitoring Workshop

(CSHM-4), 2012.11.6 ~ 8, Berlin, Germany.

4. Ayaho Miyamoto, Akito Yabe, Development of Practical Health Monitoring System for Short and Medium Span Bridges based on Vibration Responses of City Bus, 2nd MEMSCON Workshop on Towards Intelligent Civil Infrastructure, 2012.3.29, Athens, Greece.
5. Ayaho Miyamoto, Satoshi Isoda, Sensitivity Analysis of Mechanical Behaviors for Bridge Damage Assessment, The 2011 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM 2011 Plus), 2011.9.18-22, Seoul, Korea.
6. 矢部明人・磯田聡史・宮本文穂, たわみ特性値を利用した既存橋梁の変状検知手法の開発—解析的検討—, 土木学会第66回年次学術講演会, 2011.9.7-9, 愛媛大学(愛媛県松山市).

[図書] (計2件)

1. Ayaho Miyamoto, Akito Yabe, VTT Technical Research Center of Finland(SITUEL Seminar), A Practical Health Monitoring System for Short-and Medium-span Bridges based on Public Bus Vibration, 2012, 1-37.
2. 宮本文穂・矢部明人・磯田聡史, 山口大学大学院理工学研究科安全環境研究センター(RCES), 路線バスを利用した中小スパン橋梁の簡易健康診断, 社会基盤マネジメントシリーズNo.16), 2011, 1-63.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮本文穂 (MIYAMOTO AYAHO)

山口大学大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 10093535

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: