

令和元年6月13日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06460

研究課題名(和文)位相空間での軌跡形状変化に着目した構造物の特性変化・異常検知手法の構築

研究課題名(英文) Development of a phase space topology based analysis method for detection of structural characteristic changes of structures

研究代表者

佐々木 栄一 (Sasaki, Eiichi)

東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授

研究者番号：40311659

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、構造物のモニタリングにより得られる時系列データから、構造物の構造的な特性変化を捉える手法を構築することを目的として、時系列データから形成される位相空間上での軌跡形状の変化に着目した、新しいモニタリングデータ分析手法を提案したものである。本研究では当該手法を、構造物の地震時シミュレーション解析結果や実大実験データ、実橋梁での長期モニタリングデータへ適用し、その適用性を確認している。本手法は、出力データのみにより分析できる利点があり、画期的なデータ分析方法として今後適用が期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、構造物の安全性確保、状態把握のため、構造物に設置したセンサから得られる動的な時系列データから構造物の特性変化を捉える手法を構築することを目的として、時系列データから構成した位相空間上での軌跡形状の変化に着目した、新しいデータ分析手法を提案したものであり、実際に、提案手法を構造物の地震時シミュレーション解析結果や実大実験データ、実橋梁での長期モニタリングデータへ適用し、その有効性を確認したものである。

研究成果の概要(英文)：In this study, in order to establish a method to detect the structural characteristic changes of structures, a new data analysis method considering phase space topology changes constructed from monitoring data measured in actual structures was proposed. The proposed analysis method was applied to seismic simulation analysis data, experimental data obtained using actual structural members, and long term monitoring data obtained in a actual steel bridge to verify its applicability. As the applicability was confirmed in the research work, it can be said that the proposed method is one of promising methods to analyze the present structural conditions of structures.

研究分野：構造工学

キーワード：構造モニタリング 特性分析

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

米国におけるトラス橋梁の崩落事故や、我が国におけるトラス主要部材の破断などに代表されるように、世界各国で橋梁の壊滅的損傷が発生しており、公共構造物の安全性が問われる事態となっている。今後、同様の損傷を防止するため、点検手法の高精度化、高度化が不可欠とされるが、現状の点検手法では、点検者の目視や診断が基本となっているため、見落としや客観性の欠如、目視困難部位への対応などの課題があり、点検技術者の能力確保のための資格制度の導入が進められる一方、構造物に各種センサ（加速度計など）を設置し、そこから得られるデータを分析することで客観的な処理により定量的に不具合を検出しようというセンシング技術開発の試みが世界的な動きとして活発に進められている。しかしながら、センシング技術において心臓部とも言える、取得したデータから構造物の特性変化や異常を捉える手法はこれまで確立されているとは言い難い。

構造物の特性変化や異常は、発生までの時間に着目すると、長時間を要して徐々に変化する劣化現象と、地震等による突発的な損傷・破壊現象（突発的異常と呼ぶ）によるものがあると考えられる。センシングにより得られた加速度等の動的な時系列データから長期的な特性変化および突発的異常を同時に分析可能な手法は、これまで実現できておらず、早期の確立が望まれている。

これまで構造物のセンシング技術開発のコンセプトとしては、構造物を「システム」として捉え、温度や風、地震などの自然環境、人間活動に伴う重交通などの作用を「入力」とし、それらの作用に対する構造物の応答を「出力」と考え、「入力」と「出力」の関係から、構造物の仕組み・内部の不具合・劣化をシステム同定しようとする考え方がベースとなっていると考えられる。これまで構造物の不具合を検出する方法としては、「入力」と「出力」の関係に含まれる非線形性（Nonlinearity）の発現を検出する手法などが示されている。しかしながら、この手法では、材料非線形、摩擦、破壊等、複数の非線形要因が混在した場合にその個別要因を特定するには更なる工夫が必要であることが明らかとなった。加えて、「出力」は加速度計などにより比較的容易に計測可能であるが、構造物に作用する「入力」を正確に取得することは地震時等必ずしも容易であるとは限らないという点も課題として挙げられた。そこで、申請者は、別の視点からセンシングデータを捉え、「入力」の影響を含むと考えられる「出力」データのみから、構造物に生じる長期的な特性変化および突発的異常を情報として取得する方法を考えることとした。

近年、delay coordinate embedding と呼ばれる考え方により、1つの時系列データから複数の座標を定義して位相空間を構成する手法が注目を集めている。通常時のデータと損傷が発生した場合のデータでは、位相空間においては、軌跡の大きさと形状が異なるなどの違いが顕われている。軌跡の大きさは、入力の強さの影響を強く受けていると考えられ、軌跡の大きさの変化では特性の変化や異常の発生とは結びつけにくい。軌跡の形状は特性の変化や異常の発生との結びつきが強いものと考えられ、位相空間における軌跡形状変化に着目した分析を進める必要があると考えた。また、位相空間におけるデータには、長期的な特性、入力特性など幾つかの特性を含有しているものと考えられ、これらをモードとして分解し、トレンド成分等を分離する手法も試みられており、本研究では、それに軌跡形状変化に着目する考え方を導入して、新しい長期的な特性変化および突発的異常の検知手法として構築する。

### 2. 研究の目的

本研究では、構造物のセンシングから得られる動的な時系列データから、構造物の長期的特性変化や突発的異常を捉える手法として、位相空間でのデータの軌跡形状変化に着目した新たなデータ分析手法を提案することを目的としている。提案する手法は、計測データ（出力）のみを用いて、delay coordinate embedding の考え方に基づき、位相空間を構成し位相空間内のデータの軌跡形状を定量的に表現する方法を示したうえで、そこに含まれるトレンドや変化等を分析してその時系列変化・特性を求めるものであり、微小な特性変化を検出することを目指したものである。本研究では、提案手法を実施するための分析環境を整備するとともに、提案手法を実験および解析シミュレーション、実大構造物を対象としたセンシングデータへの適用することによりその妥当性の検証を行うこととした。

### 3. 研究の方法

本研究では、構造物のセンシングから得られる動的な時系列データから、構造物の長期的特性変化や突発的異常を捉える手法として、位相空間でのデータの軌跡形状変化に着目した新たなデータ分析手法を提案するため、delay coordinate embedding の考え方に基づき位相空間での軌跡形状変化を定量的に扱うデータ分析プログラムの構築、長期的特性変化を想定した鋼部材実験とその実験データへの提案手法の適用、構造物の地震時損傷シミュレーションによる提案手法の有効性検証、実大構造物・実橋梁の実験データへの適用、非線形指標と組み合わせたデータ分析方法の検討、モニタリングシステムへの実装検討を行うこととした。

#### 4. 研究成果

本研究では、平成 28 年度から平成 30 年度までの 3 年間の研究期間で、上記テーマ から対象として、以下のような検討を行った。

##### 1) データ分析プログラムの構築(テーマ )

建造物のセンシングから得られる加速度等の動的な時系列データから、delay coordinate embedding の考え方に基づき位相空間を構成し、その後、位相空間におけるデータの軌跡形状を定量的に取り扱うためのプロセスを経て、軌跡形状に含まれる成分をモードとして分解する。それを窓関数を用いて時系列データについて時間に沿って行うことで、モード分解時に得られる成分の特性値、特性ベクトルの時間的変化を取得するプログラムを構築した。位相空間における軌跡形状の定量評価方法として、位相空間の極座標変換を行い、複数角度区分内での RMS 等を用いて軌跡形状を定量的に表現し、その後モード分解を行うといった手法を構築するとともに、軌跡形状変化を基準となる軌跡形状からの移動量として捉える方法、さらには、その移動量のばらつきに着目したインデックスを評価する方法などを構築した。

##### 2) 長期的特性変化を想定した鋼部材実験データに基づく検証(テーマ )

本研究で構築する手法は、位相空間における軌跡形状に着目することで、ゆっくりとした長期的な特性変化やトレンド等を微小な変化として動的な時系列データから取得することを目指したものであり、データ分析手法の確認のため、鋼部材の疲労き裂損傷を対象として検討を行うべく、溶接継手の疲労試験を行い、徐々にき裂進展するなかでの時系列的なひずみ等の動的データを取得した。その結果、軌跡形状を定量的に表現し、そのモード分解を行う手法で亀裂進展に伴うひずみの時々刻々の変化を捉えることが可能であることを確認した。

##### 3) 複数の非線形要因を有する橋梁の地震時損傷シミュレーション(テーマ )

建造物における突発的異常として、橋梁の地震時損傷を取り上げ、免震支承、部材の弾塑性挙動といった複数の非線形性要因を有し、複雑な応答挙動、損傷を呈すると考えられる橋梁モデルを選定し、FEM 動的弾塑性解析により地震時損傷シミュレーションを実施した。そのうえで、シミュレーションの結果得られる様々な位置における加速度波形に対して、位相空間における軌跡形状の変化に着目した分析を行い、様々な非線形要因による軌跡形状変化の特徴の違いやインデックス変化について明らかにした。

##### 4) 実大建造物実験データ・実橋梁でのモニタリング実験結果への適用(テーマ )

実大実験データとして、実際に実橋梁で用いられその後撤去された実大プレストレストコンクリート桁の破壊実験データを対象として検討を行った。破壊実験では徐々に PC 鋼材を破断させ、イベントごとに振動計測を行う形で加速度計測を行い、取得したデータを位相空間による分析手法に適用した。その結果、プレストレストコンクリート桁の損傷の進行を、提案手法により、より早期に検知できる可能性を示した。さらに、実鋼箱桁橋梁で計測した地震時を含む長期モニタリングデータに対して、提案手法を適用し、温度による橋梁の振動数変化に伴い、徐々に変化する傾向を捉えるとともに、突発的な地震時のデータにも適用し、地震前後で特性変化がないことを確認した。加えて、実橋梁においては、非線形要因として発生し得る支承部の拘束にとまらぬ非対称変形現象を想定した、実大実験を行うとともに、その FEM シミュレーションを実施して、その際の加速度特性の変化を提案手法によっても検出できることを示した。特に、軌跡形状変化を基準となる軌跡形状からの移動量のばらつきに着目し、新たに提案したインデックスの有効性を確認した。

##### 5) 非線形指標と組み合わせたデータ分析方法の検討(テーマ )

これまで申請者は建造物における非線形性発現に着目したデータ分析方法の構築も試みており、非線形指標の時系列として変化を捉えることで、建造物のどの位置でどの程度の損傷がどの時点で発生したかなどを把握する方法について検討している。本研究で構築する位相空間における解析手法と組み合わせて、同じ時系列データに適用することでより高度な情報を取得することを目指し検討を行った。実橋梁で得られた地震時のモニタリングデータに対して、非線形指標と提案手法を適用することでダメージの有無などの情報についてより多角的な情報を得ることが可能となった。

##### 6) モニタリングシステムへの実装(テーマ )

本研究で提案するデータ分析手法をこれまでに申請者が開発してきた実橋梁を対象としたモニタリングシステムへの実装するための検討を行った。実際に、継続的に計測した実橋梁におけるモニタリングデータに対して、提案手法を継続的に適用し、通常時の分析データから季節変動などの各建造物の“個性”を示す、特性カルテとして定量的に提示するとともに、特性変化や異常発生の様子も随時インデックス分析できるようなシステムとして構築できることを確認した。現場装置への分析機能のインストールなどの検討につなげられるものと考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 1 件)

Porjan Tuttipongsawat, Eiichi Sasaki et al: PC tendon damage detection based on change of phase space topology, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.16, pp. 416-428, 2018. (査読有り)

[学会発表](計 3 件)

Eiichi Sasaki, Porjan Tuttipongsawat, Sinsamutpadung Natdanai, Hideshi Nishida, Kazuo Takase:

Development of a Remote Monitoring System with Wireless Power-saving Sensors for Analyzing Bridge Conditions, 6th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2018), 2018.

Eiichi Sasaki: Development and Application of A Remote Bridge Monitoring System Using Wireless Sensors, 8th Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering (RSID2018), 2018.

Porjan Tuttipongsawat, Eiichi Sasaki et al: Change of Phase Space Topology Due to Tendon Damages of A Prestressed Concrete Girder, International Summer Symposium, JSCE, 2018.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。