

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15072

研究課題名（和文）道路橋の遠隔モニタリングを目的とした異常検知技術の開発

研究課題名（英文）Investigation of anomaly detection method for remote monitoring of highway bridges

研究代表者

五井 良直 (Goi, Yoshinao)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：30831359

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：長期計測時の統計定期異常検知を目的とした機械学習について、事後確率を利用した特徴抽出に主眼をおいた異常検知を実施した。温度変化については、事後確率により変動の不確実性を再現する学習を試みた。損傷に伴う振動特性の変動の傾向や規模などを把握するうえでの知見を、鋼トラス橋、鋼桁橋、標識柱、鋼箱桁などの現場実験を通じて蓄積した。また、計測値から振動特性の不確実性を定量化する方法を提案した。データ収集方法の提案と検証については概ね当初の予定通り進行した。また、必要な計算手順を明記したフロー図を作成し第三者が提案手法を適用できる基礎づけを行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

振動特性に基づく異常検知の試みは既往の研究において数多くなされてきたが、特性を推定しそれらと比較する過程で技術者の経験が求められ、その手順は十分に一般化されてこなかった。このため、異常検知の可否は構造同定や統計の手法に依存する結果となり、これまで実務での振動モニタリングの利用は限定的であった。本研究の成果により異常検知の手順を一般化することで、主観的な判断に基づく誤検出および見落としを避けやすくなると期待される。また、自動化により多数の橋梁についてスクリーニングを実施することが可能となる。以上より異常検知技術の社会実装において意義のある研究成果が得られたと考えられる。

研究成果の概要（英文）：This study proposed machine learning to detect anomalies in long-term measurements, focusing on feature extraction using posterior probabilities. For temperature change, we attempted to evaluate the uncertainty of fluctuation by the posterior probability. Knowledge of modal property fluctuation caused by damage was accumulated through field experiments on steel truss bridges, steel girder bridges, signposts, steel box girders, and so on. A method was also proposed to quantify the uncertainty in the vibration characteristics based on the measured data. The data collection method and validation proceeded with the cloud server. In addition, a flow diagram was created to provide a basis for third parties to apply the proposed method.

研究分野：構造工学

キーワード：構造物ヘルスマニタリング 損傷検知 ベイズ統計

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

高度経済成長期を中心に建設された数多くの社会基盤施設は、経年劣化のため適切な維持管理を必要とする。特に全国に約 70 万橋存在する道路橋については損傷の見落としが修繕費用の増大や重大事故の要因となりうるため、損傷の早期発見および予防保全を目的として我が国では近接目視による定期点検を行うことが定められている。その一方で、社会基盤を取り巻く環境は限られた人材や予算の中で厳しい状況が続いており、橋梁を管理する企業・自治体においては点検・修繕計画の策定や定期点検後の経過観察の方法など、実務上の課題が生じていた。これらの現状から、人的・経済的な負担を要する近接目視点検の補完を目的として、簡易に橋梁の状態を把握するためのモニタリング技術の開発が望まれた。

### 2. 研究の目的

応募者はベイズ統計を応用した方法により、計測された加速度波形から振動特性の変動を自動的に検知する方法を研究開始当初の時点で開発していた。本研究では上記研究成果に立脚したうえで常時振動計測による異常検知に焦点を絞り、当該手法の実践的拡張を主眼とした。以上の観点に基づき、橋梁の遠隔的異常検知について、情報集約および意思決定の過程を最適化し実践的な事例研究を行うことを本研究の目的とした。

### 3. 研究の方法

上述の研究目的に基づき、本研究では現地計測から遠隔地での意思決定にいたる過程において解決すべき課題を図 1 に総括した。また図中に記載した課題 から課題 について本研究の方策を次のように提案した。

課題 : 長期計測時の統計的異常検知を目的とした機械学習技術の開発

- a) 部分空間法を拡張した振動特性のベイズ的推定手法を考案する。この推定手法に仮設検定手法を応用し、異常の生じた振動特性を自動的に判別する損傷指示指標を構築する。
- b) 気温の温度変化による振動特性の変動について、自律的な機械学習を行う方法を検討する。まず課題 - a)において検討された線形回帰モデルを拡張し気温の影響を考慮した基底関数を構成することで計算負荷の少ない機械学習を目指す。上記の試みが失敗した場合は、気温による影響を誤差項とする回帰モデルを構成する。

課題 : 現地実験および有限要素解析に基づく振動特性と損傷形態との対応付け

- a) ベイズ統計を応用した粒子フィルタによるデータ同化技術により、過去の損傷実験における対象橋梁の有限要素モデルを作成する。上記有限要素モデル上で損傷実験を再現し、固有振動モードが実験の結果と一致することを確認する。
- b) 課題 - a)の有限要素モデル上で、実橋梁において想定される橋梁形態の再現を行い、橋梁の剛性および境界条件と振動特性との関係性に関する感度解析を行う。
- c) 課題 - b)において提案された損傷指示指標と課題 - b)において検討された損傷形態との対応付けを行い、この手法の実務的な適用範囲を検討する。上記検討については必要に応じて室内実験による検証を加える。

課題 : 通信技術の制約を考慮したデータ集約方法の検討

- a) 既往の通信技術を用いた計測現場からのデータ集約を念頭に置いたデータ圧縮技術を開発する。
- b) 課題 - b)の結果をもとに、課題 - a)の方法で圧縮された統計量から効率的に異常を検知する方法を検討する。そのうえで必要に応じて課題 - a)の方法に変更を加える。

課題 : 異常検知システムの開発および実橋梁における検証試験

- a) 先行研究において既に計測機器類の設置が完了している桁橋に簡易的な情報処理端末を実証試験機として追加設置し、提案した方法論の有用性を検証する。また、課題 および課題 の成果を踏まえてこの実証試験機の機能を適宜更新する。
- b) 以上の研究成果を総括し道路橋の常時振動を利用した遠隔的異常検知についての運用指針をまとめたガイドラインを作成する。

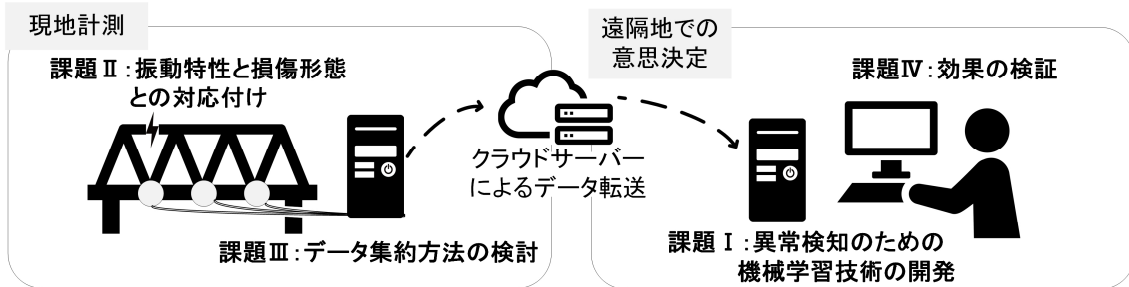


図1：本研究の目標とする異常検知技術の概念図および解決すべき課題

#### 4. 研究成果

上記の各課題について得られた成果を以下に列記する。

##### 課題：

長期計測時の統計定期異常検知を目的とした機械学習について、当初は部分空間法の拡張を予定していたが、実装の結果十分な精度が得られなかった。一方、事後確率を利用した特徴抽出を発展させた方法からは部分空間法に依る結果を上回る効果が示された。このため、本研究では事後確率による特徴抽出に主眼をおいた異常検知を実施することとした。

温度変化については、事後確率により変動の不確実性を再現する学習を試みた。ただし、本研究では時不変的なモデルを用いているため、気温の変動による振動特性の変動は過小評価される傾向にある。今後は多クラス分類により気温変動を伴う橋梁の特性を複数のモデルで再現したうえで、それらの事後確率を重ね合わせる方法を検討する予定である。

##### 課題：

当初予定したデータ同化によっては、橋梁の特性を定量的に把握するうえでモデルに十分な再現性が得られなかった。一方で、損傷に伴う振動特性の変動の傾向や規模などを把握するうえでの定性的な知見は、鋼トラス橋、鋼桁橋、標識柱、鋼箱桁などの現場実験を通じて蓄積されている。モデル構築においては、各種物理量の不確実性をどのように実況の挙動の再現に活かすかという課題が残されている。本研究においては計測値から振動特性の不確実性を定量化する方法を提案し、上記の課題へのアプローチを行ったが、当初予定したモデルの構築法の提案には至らなかった。

##### 課題：

データ収集方法の提案および検証については概ね当初の予定通り進行した。クラウドサーバによるデータ収集については斜張橋、吊橋などの事例で実施した。また、大学のサーバシステムを利用して汎用的にデータ収集を行う手順を提案し、現在も引き続き複数の計測現場で実用性を検証している。ただし、データ解析用の実証試験機の現場への導入はコロナ禍のため実施できなかった。代わりに現場から加速度などの生データを収集し、信号処理はサーバ上で実施している。

##### 課題：

予定していた検証実験はコロナ禍のため実現できなかったが、幸い現場からのデータ収集および関係者からの意見聴取は制約の多い中でもある程度実施できた。特に異常指示指標により検出された異常の具体的な内容について興味を持たれることが多く、これは今後手法を改善するうえでの課題となる。本研究期間中に運用指針の策定には至らなかったが、必要な計算手順を明記したフロー図を作成し第三者が提案手法を適用できる基礎づけを行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 GOI Yoshinao, KIM Chul-Woo	4. 巻 78
2. 論文標題 STOCHASTIC DAMAGE DETECTION OF BRIDGES USING CHARACTERISTIC POLYNOMIALS OF AUTO-REGRESSIVE MODELS	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics (AM))	6. 最初と最後の頁 11~22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.78.1_11	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Xin Zhou, Feng-Liang Zhang, Yoshinao Goi, Chul-Woo Kim	4. 巻 31
2. 論文標題 Bayesian model update for damage detection of a steel plate girder bridge	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Smart Structures and Systems	6. 最初と最後の頁 29-43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.12989/sss.2023.31.1.029	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 尾中 貴輝、金 哲佑、五井 良直、河邊 大剛	4. 巻 69A
2. 論文標題 EFl法により最適化したセンサ配置を用いた鋼板桁橋のバイズ異常検知	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 構造工学論文集 A	6. 最初と最後の頁 318~331
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.69a.318	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 市川 凌大、五井 良直、河邊 大剛、高瀬 和男、足立 幸朗、杉浦 邦征	4. 巻 69A
2. 論文標題 実物大標識柱室内実験における振動データを用いた疲労き裂検知の検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 構造工学論文集 A	6. 最初と最後の頁 467~474
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.69a.467	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhao Lei、Kim Chul-Woo、Goi Yoshinao、Takemura Kohei	4. 巻 7
2. 論文標題 Vibration-Based Damage Detection for a Prestressed Concrete Box Girder by Means of Subspace Analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1061/AJRUA6.0001185	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kim Chul-Woo、Zhang Feng-Liang、Chang Kai-Chun、McGetrick Patrick John、Goi Yoshinao	4. 巻 26
2. 論文標題 Ambient and Vehicle-Induced Vibration Data of a Steel Truss Bridge Subject to Artificial Damage	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Bridge Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1061/(asce)be.1943-5592.0001730	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Jiang Wen-Jie、Kim Chul-Woo、Goi Yoshinao、Zhang Feng-Liang	4. 巻 8
2. 論文標題 Data Normalization and Anomaly Detection in a Steel Plate-Girder Bridge Using LSTM	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1061/AJRUA6.0001203	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Chul-Woo Kim; Feng-Liang Zhang; Kai-Chun Chang; Patrick John McGetrick; Yoshinao Goi	4. 巻 -
2. 論文標題 Ambient and vehicle-induced vibration data of a steel truss bridge subject to artificial damage	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Bridge Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Zhang Feng Liang, Kim Chul Woo, Goi Yoshinao	4. 巻 28
2. 論文標題 Efficient Bayesian FFT method for damage detection using ambient vibration data with consideration of uncertainty	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Structural Control and Health Monitoring	6. 最初と最後の頁 e2659
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/stc.2659	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 河邊大剛, 五井良直, 金哲佑	4. 巻 43
2. 論文標題 供用下のPC橋梁におけるベイズ異常検知法の適用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 五井良直, 金哲佑	4. 巻 75
2. 論文標題 ベイズ推論を用いた橋梁の振動特性推定に伴う不確実性の定量化手法の提案	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_647-I_657
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.75.2_I_647	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 Yoshinao Goi
2. 発表標題 Unsupervised Change Detection in Modal Properties of Steel Structures using Bayesian Hypothesis Testing
3. 学会等名 German-Japanese Workshop on Research Frontiers in Structural (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshinao Goi
2. 発表標題 Bayesian Damage Detection Combined with Modal Identification
3. 学会等名 The 20th Working Conference of the IFIP Working Group 7.5 Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshinao Goi
2. 発表標題 Unsupervised Machine Learning for Long-term Bridge Health Monitoring
3. 学会等名 13th Taiwan-Japan Workshop on Structural and Bridge Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 D. Kawabe, C.W. Kim, Y. Goi
2. 発表標題 Bayesian damage detection on full-scale pole structure with anchor bolt tension loosening
3. 学会等名 Bridge Safety, Maintenance, Management, Life-Cycle, Resilience and Sustainability (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshinao Goi
2. 発表標題 Prompt modal identification with quantified uncertainty of modal properties
3. 学会等名 International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshinao Goi and Chul-Woo Kim
2. 発表標題 Time-domain modal identification of bridges based on uncertainty quantification
3. 学会等名 Life-Cycle Sustainability and Innovations, 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 五井良直
2. 発表標題 高力ボルト打撃時の母材振動応答を利用した残存軸力推定の試み
3. 学会等名 次世代構造技術者のWork in Progress 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshinao Goi and Chul-Woo Kim
2. 発表標題 Investigation of efficient modal identification of bridges using bayesian inference
3. 学会等名 EURODYN, 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Goi Y., Kim C.W.
2. 発表標題 Time-domain modal identification of bridges based on uncertainty quantification
3. 学会等名 IABMAS2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 金哲佑
2. 発表標題 Vibration-Based Damage Detection of Steel Bridges Using Bayesian Hypothesis Testing
3. 学会等名 ESREL2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 五井良直
2. 発表標題 INVESTIGATION OF EFFICIENT MODAL IDENTIFICATION OF BRIDGES USING BAYESIAN INFERENCE
3. 学会等名 EURODYN2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 五井良直
2. 発表標題 Time-domain modal identification of bridges based on uncertainty quantification
3. 学会等名 IABMAS2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 五井良直
2. 発表標題 Bayesian Damage Detection for Bridges under Noisy Condition
3. 学会等名 ICASP13 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 五井良直
2. 発表標題 ANOMALY DETECTION OF BRIDGES UNDER VARYING TEMPERATURE USING BAYESIAN HYPOTHESIS TESTING
3. 学会等名 ISRERM2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金哲佑
2. 発表標題 Damage experiment on a steel plate girder bridge and vibration based damage detection
3. 学会等名 SEMC2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金哲佑
2. 発表標題 Damage experiment on a steel plate girder bridge and local damage detection utilizing traffic-induced vibration
3. 学会等名 SMAR2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 五井良直
2. 発表標題 ベイズ統計を用いた橋梁の振動モード同定の効率化に関する検討
3. 学会等名 応用力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------