

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04583

研究課題名(和文) センサーデータに機械学習の方法を適用した構造物の損傷検知に関する基礎的検討

研究課題名(英文) Fundamental study on structural damage detection applying machine learning methods to sensor data

研究代表者

三神 厚 (Mikami, Atsushi)

東海大学・建築都市学部・教授

研究者番号：10262122

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,400,000円

研究成果の概要(和文)：構造物に設置されたセンサーによって構造物の振動応答データが得られることを想定して、そのデータに機械学習の方法として、教師なし学習の1つであるオートエンコーダを適用することで構造物の損傷検知を自動かつ即時に行うことが可能であった。具体的には、構造物の損傷を剛性低下で模擬し、損傷なしの応答の学習から損傷ありの応答の検知を試みた。さらなる適用例として、強震計が設置されている構造物において、日常的に発生する中小の地震動による応答を学習させておき、その上で、巨大地震発生時の構造物の非線形応答にオートエンコーダを適用することで、その構造物の供用を即時に注すべきか、などの判断基準が得られる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

構造物の損傷検知の必要性は、インフラメンテナンスのように、損傷が徐々に進行する場合と、例えば、地震などの災害時に急激に進行する場合が考えられるが、いずれの場合においても対応する技術者が不足する今日の状況の中、本研究成果を適用することで、自動、かつ、即時に損傷検知が可能となる。本研究は構造物の損傷を検知し、次の詳細検査段階へと進めるための1次スクリーニング手法として有益であると考えられ、これにより、技術者不足の問題の解消につながる事が期待される。

研究成果の概要(英文)：Assuming that structural response data (vibration data) is obtained by instrumented sensors, it is possible to automatically and immediately detect damage to structures by applying autoencoders as a machine learning method.

Specifically, damage to the structure was simulated by reducing stiffness, and an attempt was made to detect responses with damage from learning responses without damage. As a further application, it was shown that it is possible to obtain criteria for determining whether a structure should be immediately taken out of service by having a structure equipped with a strong motion seismometer learn the response to small and medium earthquake motions that occur sometimes, and then applying an autoencoder to the nonlinear response of the structure when a large earthquake occurs.

研究分野：地震工学・構造工学

キーワード：損傷検知 機械学習 センサーデータ オートエンコーダ 振動実験

### 1. 研究開始当初の背景

高度経済成長期に建設された膨大な数のインフラが老朽化を迎えている。国土交通省は、橋梁点検五ヵ年計画を策定したが、技術者不足により思ったように進んでいない。1つの改善策は、低廉化が進んでいるセンサーを構造物に設置して得られる振動応答データの分析から、自動的に損傷（異常）を検知する方法を補完的に用いることである。

### 2. 研究の目的

本研究はセンサーデータに機械学習の方法を適用することで構造物の損傷検知を自動化し、インフラ点検技術者不足の問題に寄与することを最終目標としている。その前段階で解決すべき諸問題として、①センサーデータの種類に応じた損傷検知手法の選択や②センサーデータの前処理の手法を検討し、実用化につなげることが挙げられる。多自由度振動系モデルを用いた数値実験や模型実験によって提案する方法論の有効性を確認し、方法論をマニュアル化することも併せて目指している。以下に研究開始当初に設定した目的の詳細を具体的に記述する。

本研究では、構造物や地盤に設置されたセンサーから得られた振動データに機械学習の方法を適用し、損傷（異常）を検知する方法を確立することを主目的とするが、その応用として、地震動や微動データを用いた構造物特性や地盤特性の推定や地殻変動データを用いた地震の予兆検知など、構造工学・地震工学に関連する問題にも応用範囲を広げていく。その際、いずれにも共通する問題として、時系列データの処理に関する以下の問題をクリアすることを課題として設定している。

- ①用いるセンサーデータとしては振動データに加え、地殻変動データも用いる。時系列と、その類型化を図る。
- ②類型化されたセンサーデータごとに、適切な前処理の方法を検討し、今後、センサーデータを用いた構造物の損傷検知を行うエンジニアにとって有益な指針を示す。
- ③様々な機械学習の手法を用いた損傷検知結果の比較を通じて、各手法の長所・短所や適用の限界を示す。

### 3. 研究の方法

オートエンコーダを多自由度振動系に適用するに先立ち、まずは予備検討として、簡単な時刻歴信号（正弦波）に適用し、活性化関数や隠れ層の次元について検討するとともに、1サンプル（部分時系列）のデータ個数、時刻歴信号の振幅や周期の変化、バイアス（右上がり／右下がり）を異常と捉えるか等について検討する。機械学習は、教師あり学習と教師なし学習に分けられるが、ここで用いるオートエンコーダとは、教師なし学習の1つで、正常データのみから異常（損傷）を検知できるという特長がある。図1に示すオートエンコーダの入力層に正常データ（損傷なし）を入力し、出力層で同じものが再構成されるようネットワークを学習させるため、入力層に異常データ（損傷あり）を入力すると出力層では入力データと異なるものが再構成されることになる。そのため、それらの差である「再構成誤差」が大きくなり、異常と判断するしくみである。異常検知（損傷検知）の分野では、そもそも損傷データの数が少ないということから、正常データのみから異常を検知できる本手法は、大変有益な手法である。

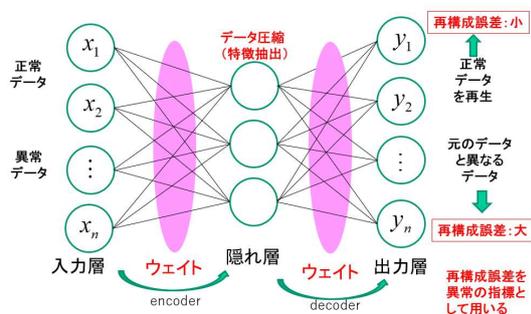


図1 オートエンコーダ

予備検討の結果を踏まえ、構造物の損傷検知に取り組む。具体的には、Kanai-Tajimi モデルに基づく定常地震動に地震動の包絡曲線をかけて非正常性を考慮した地震動（模擬地震動）を用意し、1自由度あるいは多自由度振動系モデルに対する入力とし（図2）、構造物モデルとしては、「損傷ありモデル」と「損傷なしモデル」を用意する。構造物の損傷は、モデルの剛性（ヤング係数）を損傷がない場合の50%に低下させることで便宜的に考慮する。得られた応答時刻歴のうち、損傷なしモデルの地震応答をオートエンコーダに学習させた後、位相を変化させた入力に対する損傷ありと損傷なしモデルの時刻歴応答を用いて検証した。このような数値実験を通じて、センサーデータにオートエンコーダを用いた損傷検知手法の方法論を確立する。

構造物の損傷検知の必要性は、インフラメンテナンスのように、損傷が徐々に進行する場

合と、例えば、地震などの災害時のように急激に構造物の損傷が進行する場合は考えられるが、後者の場合においては、構造物の剛性の時間変化を考慮した非線形解析を行い、構造物の損傷データを用意する必要がある。本研究では、このようなケースへの適用例として、以下を検討した。すなわち、観測される頻度が比較的高い中小地震による構造物の地震応答（線形応答）を学習させた上で、構造物に損傷が生じる程度の大地震による応答（非線形応答）を幾つか用意し、オートエンコーダを適用し、損傷検知の可能性を検討した。

以上に加え、時系列データに適用可能な機械学習手法として、LSTM (Long-Short Time Memory) も検討に加えた。

機械学習を用いた構造物の損傷検知について、以上の検討では数値実験的に発生させた損傷データを用いて妥当性を確認するが、実データへの適用を考えると、ノイズや様々なバイアスの影響を受ける可能性がある。そこで、振動実験も併せて実施し、得られるデータへ機械学習の方法を適用し、構造物模型の損傷検知を試みる。

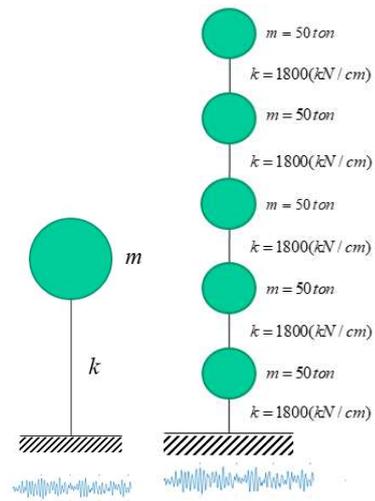


図2 構造物のモデル

#### 4. 研究成果

##### (1) 予備検討

多自由度振動系に関する数値実験を通じて、センサーデータにオートエンコーダを用いた損傷検知手法の方法論の確立を目指すにあたり、まずセンサーデータ信号の前処理について予備的な検討を行った。具体的には、構造物の応答信号として正弦波を用意し、一部を学習用、全長を検証用として用いた場合に、その部分時系列の取り方の違いや活性化関数の選択によって、オートエンコーダによる機械学習の成否が分かれることや、応答振幅や周波数変化の違いを「異常」と捉えること、またその異常検知は、応答にある程度のノイズの影響があった場合でも可能であることを示した。さらに信号にバイアスの影響がある場合には、その影響を受けることやオートエンコーダの隠れ層のサイズについても検討を加えた。ページ制限の関係で、ここでは、正弦波信号の振幅が途中で変化する（大きくなる）場合の異常検知（再構成誤差の変化）について図3に示すとともに、右上がりのバイアスの影響を受けている場合の異常検知とその対処方法として標準化を行った場合の結果を図4に示す。図4より、データの標準化を行うことにより、信号の再構成が良好に行われたことがわかる。

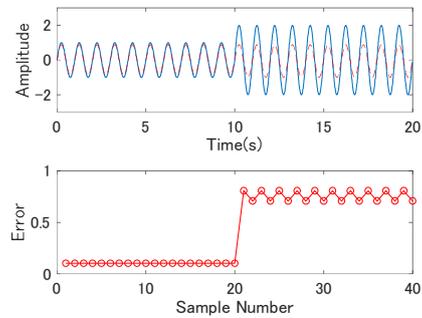
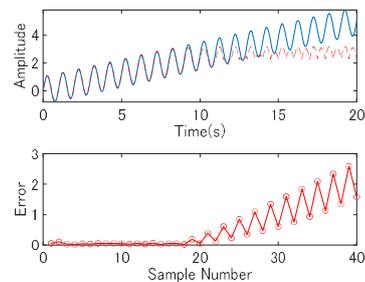


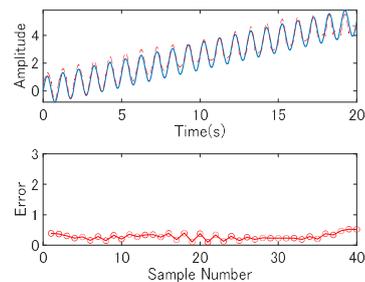
図3 振幅変化に伴う再構成誤差の変化

##### (2) 1自由度および多自由度振動系への適用

以上の予備検討結果をもとに、多自由度振動系を用いた検討に取り組んだ。構造物に対する入力として、非正常性を考慮した模擬地震動入力と考え、「損傷なしモデル」と「損傷ありモデル」とを用意し、損傷検知性能について数値実験的に比較した。検討の結果、損傷検知は可能であるが、損傷レベルが小さくなるに従い、損傷の検知は困難になることや、多自由度系においては、損傷部材の位置によって、検知性能が低下することなどがわかってきた。図5は多自由度系モデルについて損傷検知を試みたもので、図5(a)が損傷あり／なしのそれぞれについての応答再現状況、図5(b)は再構成誤差である。損傷ありの場合の方が、異常の指標である再構成誤差の値が大きくな



(a) 標準化なし



(b) 標準化あり

図4 バイアスに伴う再構成誤差の変化

っていることがわかる。研究成果の一部は、第39回地震工学研究発表会で発表した。

### (3) 構造物の損傷の時間変化検知の取り組み

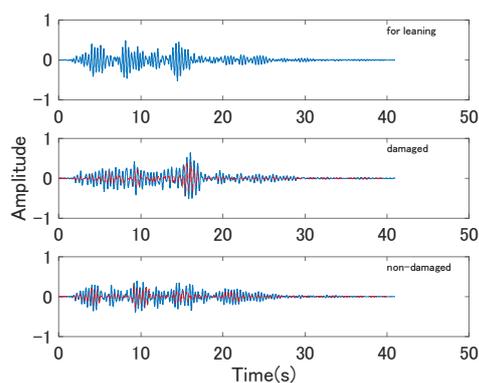
センサーデータの種類として、構造物に設置された強震計を想定し、それに、機械学習の方法であるオートエンコーダを適用し、損傷の有無のみならず、損傷の程度を評価する可能性を検討した。すなわち、構造物の非線形が時間とともに進行するような難解な問題に適用の幅を広げていった。具体的な方法は以下の通りである。すなわち、観測される頻度が比較的高い小地震による構造物応答（線形応答）を学習させた上で、構造物に損傷が生じる程度の地震に対する応答（非線形応答）に学習済みのオートエンコーダを適用することを想定した。異常検知手法であるオートエンコーダを適用するにあたり、構造物に対する様々な大きさの地震動入力を考えることで、構造物に異なる損傷（非線形）が生じるような時刻歴応答を得た。損傷（異常）の指標として再構成誤差を使用し、損傷の有無や程度と再構成誤差との関係を考察した。これにより、強震計が設置されている構造物の地震被害の有無や被害の程度を即時に推定できる可能性を示した。そのために、構造物の非線形モデルを導入した。図6はここで考慮した非線形1自由度系モデル復元力特性を示す。オートエンコーダを適用する具体的な方法については、エルセントロ地震波と八戸波を用意し、片方の最大加速度を50galにスケールリングして学習用に用い、他方を50, 200, 800, 1600galにスケールリングして検証用に用いた。これを相互に行うことで、検討ケースを増やした。これにより、異なる周波数特性を考慮した上で、構造物に対する様々な大きさの地震動入力考えることができた。図7に一例として、八戸波を1600galにスケールリングし構造物に入力した場合の変位応答と復元力曲線を示す。

損傷（異常）の指標として再構成誤差を使用し、損傷の有無や程度と再構成誤差との関係を考察した。これにより、強震計が設置されている構造物の地震被害の有無や被害の程度を即時に推定できる可能性を示した。図8は1自由度非線形モデルについて、エルセントロ波を50galにスケールリングして計算された線形応答を学習した上で、様々な大きさにスケールリングした八戸波を入力した場合の線形／非線形応答にオートエンコーダを適用したものである。図8(a)がそれぞれの地震動強度に対する変位応答とその再構成結果で図8(b)は再構成誤差の値である。入力に用いた地震動の強度が大きいくほど再構成誤差が大きくなる傾向にはあり、非線形（損傷）の程度に応じて再構成誤差の値も大きくなっていることがわかる。一方で、八戸波を50gal, 200galにスケールリングした場合については、2つとも線形応答となるが、その場合には、再構成誤差の値に変化がない（両者とも損傷していないため）ことは合理的な結果であると言える。

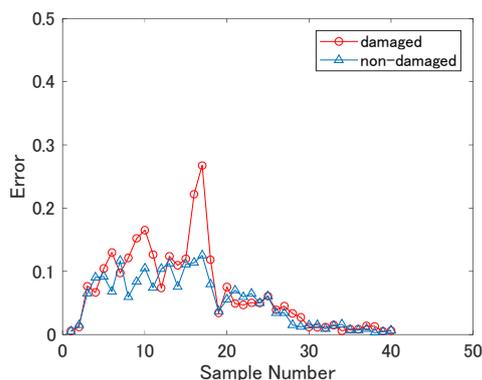
センサーデータとして強震記録を考え、日常的に得られる中小地震による構造物の応答の学習から、大地震時の構造物の損傷を検知しようとする一連の研究について、これまでの成果をまとめた論文が土木学会論文集に採択された。

### (4) 様々な機械学習手法の検討

様々な機械学習手法について検討することを課題として挙げていた。そこで、センサーデータに適用できそうな手法として、ニューラルネットワークに記憶の機能を持たせ時系列データの適用を可能にした Recurrent Neural Network に着目したが、時系列データのパターン分類の手法



(a) 構造物の変位応答



(b) 再構成誤差（剛性 50%）

図5 多自由度系構造物の損傷検知

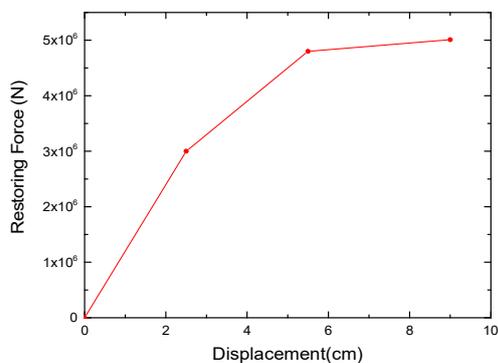
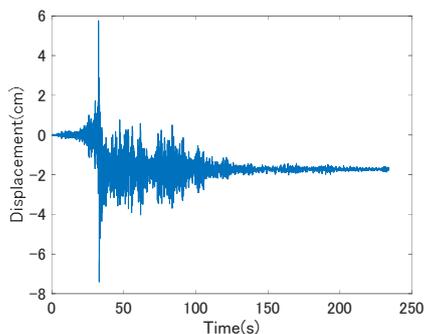
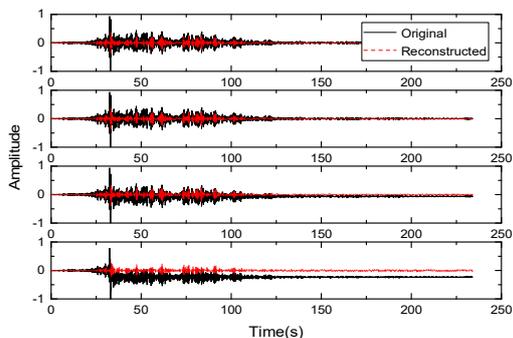


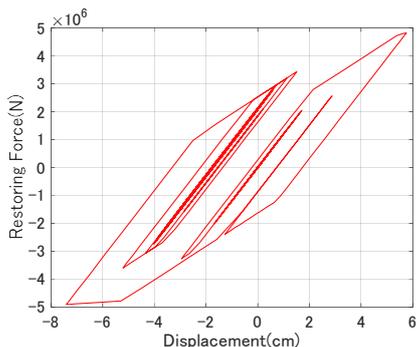
図6 非線形構造物の復元力特性



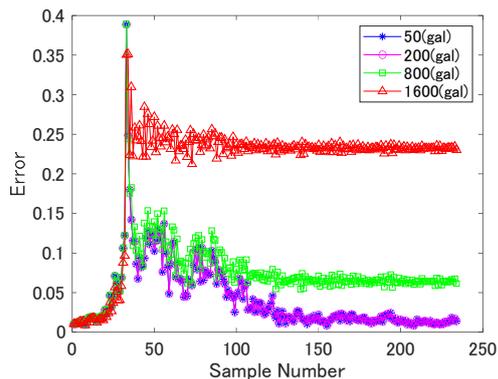
(a) 構造物の変位応答



(a) 再現波形と元波形の比較



(b) 復元力と変位曲線



(b) 再構成誤差

図7 非線形構造物の復元力特性

図8 エルセントロ波学習，八戸波検証の  
場合の損傷検知（振幅調整あり）

として、近年、LSTM (Long Short-Term Memory) なる手法が着目されていることを知るに至り、その導入に向けて検討を進めた。LSTM は予測や分類の問題に適用できるが、まずは予測の問題を取り上げ、取り扱う時系列データに含まれるノイズ処理の問題や前処理として、データの標準化の効果に関する基礎的な検討を行った。

#### (5) 振動データ以外の時刻歴データへの適用

以上に加えて、本手法を地殻変動データに適用し、火山噴火の予兆検知を試みた。具体的には、近年の火山噴火として、御嶽山、箱根山、本白根山を取り上げ、噴火地点を取り囲む GPS 観測点の記録を用い、それから、地盤要素のひずみ時系列を算出した。それに本手法を適用することで、箱根山については予兆検知の可能性を示すことができた。

#### (6) 振動実験

実データへの適用を考えると、機械学習を適用する構造物の応答データはノイズや様々なバイアスの影響を受ける可能性があるため、振動実験についても実施した。2 自由度系モデルを考え、損傷のない健全なモデルと損傷を考慮したモデルの両方の自由振動データに機械学習の方法としてオートエンコーダを適用した。結果を土木学会関東支部技術研究発表会で 2024 年 3 月に発表を行った。

#### <引用文献>

- ① 三神 厚：時刻歴応答にオートエンコーダを適用した構造物の損傷検知に関する基礎的検討，第 39 回地震工学研究発表会講演論文集，講演番号 B13-1502，2019.
- ② 三神 厚：異常検知や予測の問題における時系列信号のノイズの影響や標準化の効果に関する基礎的検討，土木学会関東支部第 49 回関東支部技術研究発表会，講演番号 I-32，2022.
- ③ 三神 厚：中小地震による構造物応答の機械学習に基づく大地震時の即時損傷検知の検討，土木学会論文集，Vol.79，No.13，22-13013，2023.
- ④ 三神 厚，神山真：地殻変動データに機械学習の方法を適用した火山噴火予兆検知の試み，JSCE 令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次講演会，講演番号 CS9-14，2022.9.15.
- ⑤ 三神 厚：振動実験データに機械学習を適用した構造物の損傷検知の試み，土木学会関東支部第 51 回関東支部技術研究発表会，講演番号 I-6，2024.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 三神厚	4. 巻 1
2. 論文標題 中小地震による構造物の応答の機械学習に基づく大地震時の即時損傷検知の試み	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第42回地震工学研究発表会講演論文集	6. 最初と最後の頁 講演番号：C11-61
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 無
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 三神厚	4. 巻 1
2. 論文標題 構造物の非線形地震応答に対するオートエンコーダの適用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第41回地震工学研究発表会講演論文集	6. 最初と最後の頁 論文番号 2336
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 無
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 三神厚	4. 巻 39
2. 論文標題 時刻歴応答にオートエンコーダを適用した構造物の損傷検知に関する基礎的検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第39回地震工学研究発表会講演論文集	6. 最初と最後の頁 講演番号B13-1502
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 無
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 三神厚	4. 巻 79
2. 論文標題 中小地震による構造物応答の機械学習に基づく大地震時の即時損傷検知の検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 土木学会論文集	6. 最初と最後の頁 n/a ~ n/a
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscej.22-13013	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 Atsushi Mikami	4. 巻 1
2. 論文標題 Fundamental Study on Damage Detection of Civil Structures Modeled as MDOF System Based on Machine Learning	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 STRUCTURAL HEALTH MONITORING 2023 Designing SHM for Sustainability, Maintainability and Reliability	6. 最初と最後の頁 1489-1496
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 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 三神厚, 神山真
2. 発表標題 地殻変動データに機械学習の方法を適用した火山噴火予兆検知の試み
3. 学会等名 令和4年度 土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三神厚
2. 発表標題 異常検知や予測の問題における時系列信号のノイズの影響や標準化の効果に関する基礎的検討
3. 学会等名 第49回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Atsushi Mikami
2. 発表標題 Fundamental Study on Damage Detection of Civil Structures Modeled as MDOF System Based on Machine Learning
3. 学会等名 14th International Workshop on Structural Health Monitoring (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三神 厚
2. 発表標題 振動実験データに機械学習を適用した構造物の損傷検知の試み
3. 学会等名 土木学会関東支部第51回関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2024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