

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K21013

研究課題名（和文）移動型加振源とレーザー振動計を用いた鉄道構造物の高速検査技術

研究課題名（英文）Vehicle vibration inspecting method for high-speed railway structures

研究代表者

内藤 英樹（Naito, Hideki）

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50361142

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、加振源と加速度センサを移動体に組み込み、構造物の上を走行しながら内部のひび割れや劣化を高精度に検査できる自走式点検ロボットを試作した。点検ロボットは走行機能と加振器・センサの昇降機能によって、道路、鉄道、港湾や空港などの上を走行しながら、一定間隔で加振器とセンサを構造物表面に接触させて局所振動試験データを自動取得することを目的とする。取得された加速度センサによる点検データは機械学習に適したデータセットに変換され、機械学習のひとつであるオートエンコーダによる異常検知を行うことにより、目に見えない構造物内部の異常箇所を推定できることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

社会インフラの点検効率化は時宜を得たテーマであり、ロボットやAIの活用が期待されている。本研究は、自走式ロボットによる構造物の自動点検と、AIによる健全性診断を合わせて検討した。研究成果として、自走式点検ロボットに必要な性能と実現するための機構を示した。また、良品学習による高精度の健全性診断手法を提案し、転移学習によって汎用性を付与できることも示した。これらの研究成果は、道路、鉄道、港湾や空港などの社会インフラ施設への適用を想定しており、今後もこれらの現場実証試験を進めていく。また、本手法は土木構造物のみならず、他分野の様々な診断への応用と波及が期待される。

研究成果の概要（英文）：An automatic inspection robot was built for detecting internal cracks within civil structures (e. g. roads, railways, ports, and airfields). The robot was composed of a running device and lifting device of the vibrator and sensor. It collects a large amount of inspection data in through-thickness vibration testing on the structures. Inspection data obtained by the acceleration sensor was converted into a dataset for machine learning. An anomaly detection method using a neural network autoencoder detected invisible cracks within structural concrete. It was shown that the autoencoder model was sensitive to shear cracks, causing serious damage in structural performance of concrete structures.

研究分野：構造工学

キーワード：コンクリート構造物 非破壊検査 点検・診断 ロボット 機械学習

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

リニア中央新幹線やカリフォルニア高速鉄道の整備が進められるなど、国内外での高速鉄道の需要が高まっている。新幹線は1964年の開業以来、安全性と快適性を実現するために、車両、軌道、構造物の検査・維持管理に努力と技術が注がれてきた。新幹線電気軌道総合試験車(通称ドクターイエロー)は、最高時速270kmでの走行中に、レールのゆがみ等を検査する。しかし、ドクターイエローでは、軌道スラブやてん充層、コンクリート路盤の内部までは検査できない。近年、軌道構造内部のひび割れやてん充層の空洞化などの劣化損傷事例が増加しており、その早期発見と早期対策のために、非破壊検査の精度向上と作業の省力化が強く望まれている。

2. 研究の目的

本研究は、次世代型検査車両の基礎を築く。鉄道の他にも、道路、港湾、空港を対象にし、走行車両によってこれらの構造物内部のひび割れ、剥離、空隙などの劣化・損傷を検査する。この目的に対して、(1) 加振器を用いた走行式点検装置の開発、(2) AIを用いた構造物の健全性診断、(3) 構造物の劣化・損傷状態の可視化/数値化に取り組む。

3. 研究の方法

上記2.に示した項目(1)-(3)について、研究の方法を列挙する。

- (1) 励振器(e.g. 小型加振器、ハンマリング装置)と加速度センサを用いたコンクリート構造物の局所振動試験法を開発する。さらに励振器とセンサを移動体に組み込み、構造物上を走行しながら局所振動試験データを取得するロボット/装置を開発する。
- (2) 項目(1)の点検データに対して、機械学習による異常検知手法を提案する。さらに提案手法によって評価される異常度と構造物の劣化・損傷状態との対応を整理する。
- (3) 構造物の劣化・損傷を模擬したコンクリート試験体を製作し、項目(1),(2)の手法によって試験体の劣化箇所と劣化程度を可視化/数値化する。また、実際の構造物を対象とした現場実証試験に取り組み、項目(1),(2)の課題抽出と解決を図る。

4. 研究成果

上記2.と3.に示した項目(1)-(3)について、研究成果を列挙する。

- (1) 加振器と加速度センサを用いたコンクリート構造物の局所振動試験法を開発した。そして安価かつシンプルなデバイス構成による振動試験システムを構築した。これにより振動試験装置の小型化と軽量化に成功し、励振器と加速度センサをロボットに組み込むことができた。開発した点検ロボットは走行機能と加振器・センサの昇降機能によって、道路、鉄道、港湾構造物などの上を走行しながら、一定間隔で加振器とセンサを構造物表面に接触させて局所振動試験データを自動取得することを目的とする。
- (2) 項目(1)の自走式点検ロボットによって取得されたデータを分析し、機械学習に適したデータセットに変換するプログラムコードを開発した。本コードは、加速度センサによる時系列データを高速フーリエ解析し、周波数応答関数の平均化および正規化処理を行って、機械学習に適したデータセットに変換する。そして、このデータセットに対して、オートエンコーダによる異常検知を行うことにより、目に見えない構造物内部の異常箇所を推定できることが示唆された。一般ユーザーの取り扱いを容易とするために、データ分析、波形処理、機械学習をPythonによってひとつのプログラムコードとして実装している。
- (3) 鉄筋コンクリートはり試験体を製作し、荷重によって試験体に曲げひび割れとせん断ひび割れを与えた。項目(1),(2)の局所振動試験と機械学習により、構造物上から内部のひび割れ箇所を推定できることが示唆された。特に、本手法は構造上重大なせん断ひび割れに対して敏感であることが示された。この他にも、項目(1)のロボット開発と並行して、点検員の手支持による局所振動試験の高度化に取り組んだ。高速道路の橋梁床版調査では、試行的に20橋程度の現場試験を実施し、項目(2)の機械学習による健全性診断の適用可能性を確認した。

以上のように、本研究では自走式点検ロボットの仕組みとデータの評価方法を考案し、試作機を製作することができた。今後は、実構造物に対して加振器・センサの接触特性や測定データの精度検証するステージに進んでいく。なお、本研究成果は鉄道のみならず、道路、港湾、空港にも適用可能であり、幅広い社会インフラ施設の管理者から早期の社会実装への期待が寄せられている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Inaba Kohko, Tanigawa Hikaru, Naito Hideki	4. 巻 145
2. 論文標題 Improvement of impact acoustic inspection for high-speed railway track slabs using time frequency analysis and non-defective machine learning	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 NDT and E International	6. 最初と最後の頁 103125 ~ 103125
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ndteint.2024.103125	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 Inaba Kohko, Tanigawa Hikaru, Naito Hideki	4. 巻 373
2. 論文標題 A study on evaluating supporting condition of railway track slab with impact acoustics and non-defective machine learning	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Construction and Building Materials	6. 最初と最後の頁 130905 ~ 130905
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.conbuildmat.2023.130905	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 Ryu Hashimoto, Hideki Naito, Sonoko Ichimaru, John. E. Bolander	4. 巻 2
2. 論文標題 Damage Evaluation of RC Structures Using Simplified Wave Propagation Analysis and Machine Learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2nd International Conference on Structural Damage Modelling and Assessment	6. 最初と最後の頁 97-109
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 該当する
1. 著者名 Yusuke Fujisaku, Hideki Naito, Yu Shirai, Takuya Maeshima, Sonoko Ichimaru, John E. Bolander	4. 巻 2
2. 論文標題 Detecting Delamination of Pavement Layers in Airfield Runways Using Local Vibration Testing and Machine Learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2nd International Conference on Structural Damage Modelling and Assessment	6. 最初と最後の頁 83-95
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 該当する

1. 著者名 Tatsuro Murakawa, Hideki Naito, Yusuke Fujisaku, Kohko Inaba, Takatada Takahashi	4. 巻 2
2. 論文標題 A Portable Scanning Device for Local Vibration Testing of Concrete Structures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2nd International Conference on Structural Damage Modelling and Assessment	6. 最初と最後の頁 71-82
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 稲葉紅子, 高橋貴蔵, 淵上翔太, 桃谷尚嗣, 内藤英樹	4. 巻 78
2. 論文標題 打音法による新幹線用軌道スラブ-てん充層間の空隙検知方法に関する研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集E1	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejpe.78.1_1	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 稲葉紅子, 高橋貴蔵, 淵上翔太, 内藤英樹	4. 巻 57 (2)
2. 論文標題 打音法と教師あり機械学習を用いた新幹線用軌道スラブ-てん充層間の空隙検知に関する基礎的研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 舗装	6. 最初と最後の頁 32-37
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 Tatsuro Murakawa, Hideki Naito, Yusuke Fujisaku, Kohko Inaba, Takatada Takahashi	4. 巻 2
2. 論文標題 A Portable Scanning Device for Local Vibration Testing of Concrete Structures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2nd International Conference on Structural Damage Modelling and Assessment (SDMA 2021)	6. 最初と最後の頁 1-12
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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 橋本龍、内藤英樹
2. 発表標題 コンクリート構造物におけるひび割れ周りの弾性波伝搬特性の評価モデル
3. 学会等名 土木学会全国大会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤咲友輔、内藤英樹、白井悠、前島拓
2. 発表標題 機械学習を用いた空港滑走路アスファルト舗装の層間剥離評価手法の検討
3. 学会等名 土木学会全国大会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 牛山琉就、藤咲友輔、内藤英樹、稲葉紅子
2. 発表標題 局所振動試験および機械学習を用いたRC はりにおけるひび割れ検知
3. 学会等名 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村川達郎、藤咲友輔、内藤英樹、稲葉紅子、高橋貴蔵
2. 発表標題 機械学習によるコンクリート構造物内部の空隙箇所の判定
3. 学会等名 土木学会東北支部技術研究発表会
4. 発表年 2021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
研究 分担者	運上 茂樹 (Unjoh Shigeki) (60355815)	東北大学・工学研究科・教授 (11301)	
研究 分担者	木本 智幸 (Kimoto Tomoyuki) (30259973)	大分工業高等専門学校・電気電子工学科・教授 (57501)	

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		
米国	University of California, Davis		