

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02220

研究課題名(和文)複数車両・複数道路橋を対象とした移動センシング技術の基盤的研究

研究課題名(英文) Drive-by Sensing for multiple vehicles and multiple bridges

研究代表者

山本 亨輔 (Yamamoto, Kyosuke)

筑波大学・システム情報系・助教

研究者番号：80635392

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、車両振動・位置データから、車両・橋梁の質量・減衰・剛性および橋梁振動、路面凹凸を同時に推定する方法を考案した。本手法は、車両・橋梁パラメータをランダムに変化させながら、車両入力推定と橋梁動的応答シミュレーションを実施して路面凹凸を推定し、残差が最小となるパラメータを探索することで実現される。本手法が成立することは、数値シミュレーションにより確認された。また、パラメータ探索では、Nelder-Mead法やMonte-Carlo Markov chain法などが有効であることも確認した。但し、推定結果はノイズに影響されやすく、精度を改善するために複数車両・複数回走行が有効である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本技術は、車載振動センサを用いた橋梁診断技術を提案するもので、橋梁点検の低コスト化と省力化に繋がると期待される。つまり、本研究によって、橋梁スクリーニングの実現可能性が高まったことで、優先順位に基づく合理的かつ戦略的な橋梁維持管理が構想でき、持続可能な道路インフラの実現に近付いたと言える。また、車両は多体系、橋梁は連続体系でモデル化されており、多体系と連続体系によって構成される非線形力学系を、一部の情報から再構成した例と捉えることができ、学術的価値も高い。本研究で開発されたGPS時刻同期型振動センサは、これまで困難であった車両-橋梁同時振動計測を実現しており、工学的な価値も高い。

研究成果の概要(英文)：In this research, we devised a method to simultaneously estimate the mass, damping, and stiffness of vehicle and bridge systems, bridge vibration, and road surface irregularities only from vehicle vibration and position data. This method is realized by performing vehicle input estimation and bridge dynamic response simulation while randomly changing vehicle and bridge parameters, estimating road unevenness, and searching for parameters that minimize the residual error of the estimated road unevenness. Numerical simulation confirmed that this method works well. The simulation result suggests that the Nelder-Mead method and the Monte-Carlo Markov chain method are effective in parameter search. However, the estimation results are easily affected by noise, and multiple vehicles and multiple runs are effective to improve the accuracy.

研究分野：土木-構造力学

キーワード：車両振動モニタリング 橋梁点検 橋梁スクリーニング 車両-橋梁相互作用系

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

橋梁が一斉に老朽化する中で、その維持管理コストの増大が大きな社会問題となっている。道路維持管理の人員・予算は限られているため、スクリーニングによって優先度の高い橋梁を抽出し、人員・予算を重点的に配置するスキームが求められてきた。これを実現できる方法に、車両振動データに基づく橋梁の動的特性推定技術が挙げられる。

本研究開始時点で、橋梁スクリーニングに応用可能な車両振動分析技術は、SSMA (Spatial Singular Mode Angle: 空間特異モード角) 法であった。SSMA は、車両振動データのみから推定される橋梁構造の特徴量であり、橋梁損傷に対して優れた感度を示す。しかし、損傷検知に用いるには、健全時と損傷時の SSMA を比較する必要がある。比較用の健全時データを収集しながら、SSMA 法の有効性を実証するには、データ蓄積期間が必要であり、実用化には時間が必要となる。

そこで、車両振動データから、橋梁の現有性能を直接、推定する方法を開発し、データ蓄積を進めることを考えた。現有性能を推定できる方法があれば、SSMA の実証を待たずに、技術の社会実装が可能となり、データ蓄積を進めることができる。

ただし、車両振動データから、橋梁の現有性能を直接推定する方法はこれまで存在しなかった。そこで、本研究では、複数車両と複数橋梁の力学モデルを組み合わせ、相互に共通項目を推定しながら、橋梁パラメータを推定するアルゴリズムの構築を目指した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、車両振動データから、橋梁パラメータを推定する方法を考案し、数値シミュレーションおよび模型実験によってその有効性を明らかとする。

3. 研究の方法

車両と橋梁は、車両システムの入力には橋梁振動が含まれ、車両振動が出力となる一方、橋梁システムの入力には車両振動が含まれ、橋梁振動が出力されるように、互いの出力を入力として必要とする相互作用系を形成している。加えて、車両・橋梁をそれぞれ線形システムでモデル化した場合でも、車両-橋梁相互作用系は、車両移動に伴ってシステムパラメータが時間変化する非線形力学系である。そこで、本研究では、この非線形力学系に対応したシミュレーション・コードを作成し、車両が橋梁上を走行する時の車両と橋梁の動的挙動を再現する。

次に、橋梁パラメータ推定アルゴリズムを考案し、数値シミュレーションによって得られた車両の加速度振動データに適用して、正解値と比較することで推定精度を検証する。

また、実車走行が可能な橋梁模型において、車両と橋梁の振動データを同時計測する。考案したアルゴリズムによって、車両振動データから橋梁振動を推定し、実測値と比較して精度検証を行う。ここで、車両と橋梁の同時振動計測を実現するため、GPS 時刻同期型振動センサを開発する。これらの計測装置を用いて、実車・実橋での実証試験も行う。

4. 研究成果

本研究では、車両振動データに基づいて橋梁パラメータを推定する新しいアルゴリズムとして、VBISI (Vehicle-Bridge Interaction system identification) 法を考案した。この方法は先ず、計測した車両振動データと、ランダムに仮定した車両・橋梁パラメータを、車両-橋梁相互作用系の運動方程式に代入し、路面凹凸を推定する。ここで、前輪と後輪で推定される路面凹凸が一致するまで、ランダム仮定を繰り返し、最終的に最適な車両・橋梁パラメータを得る方法である。ランダム仮定は、MCMC (Monte Carlo Markov chain) モデルによって探索しても良いが、計算コストを下げるため、Adaptive Nelder-Mead 法のような高速探索アルゴリズムを適用することもできる。

VBISI 法のアルゴリズムは、複数車両・複数橋梁での共通データ抽出を必要とせず、一車両と一橋梁の組み合わせにおいて、1 回分の走行データを計測すれば、実行可能である。したがって、当初の構想よりも優れたアルゴリズムを発見することができた。

また、VBISI 法は、橋梁パラメータだけでなく、車両パラメータやエンジン振動、路面凹凸も正確に推定することができる。これによって、事前のキャリブレーションも不要となり、省力性に優れた技術だと期待できる。

数値シミュレーションによって、VBISI 法が精度良く、車両・橋梁パラメータと路面凹凸を推定できることが示された。また、路面凹凸の差分は概ね凸形状をしており、最適化アルゴリズム

に高速な勾配法を用いることも可能である。但し、一部のパラメータについては、勾配が非常に平らなため、最適解に収束が難しくなる場合もある。また、観測ノイズを考慮すると、最適解が正解値から離れることも示された。

VBISI法の推定精度が観測ノイズに強く影響される理由として、入力推定プロセスに数値積分が含まれていることが挙げられる。よって、これを安定的に解くために、Kalman Filterを導入することを考えた。Kalman Filterは入力推定時の不安定化をよく抑制することができるが、目的関数の形状を変化させることも確認された。よって、勾配法の適用による不安定化が予測されるため、探索効率に優れ、目的関数の勾配を用いない方法としてAdaptive Nelder-Mead法を適用した。これにより、強い観測ノイズを想定しても、VBISI法が高精度に車両・橋梁パラメータを推定できることが、数値シミュレーションにより明らかとなった。

そこで、本研究では、VBISI法を実車走行実験にも適用した。本実験では、車両だけでなく橋梁にも振動センサを設置し、GPS時刻同期法によって、同時に振動計測を行った。VBISI法はパラメータだけでなく橋梁振動も推定できるため、計測値と推定値を比較することで、本手法の適用性を検証した。実験結果からは、数値シミュレーションのような良い結果が得られなかった。この原因として、車両振動データには白色の観測ノイズだけでなく、モデル化誤差に起因する物理的で非白色性の強いノイズ（車体の回転など）が含まれるためであると考えられる。

そこで、この問題を解決するため、複数回走行による結果を用いて、VBISI法の精度改善に取り組んだ。具体的には、VBISI法の目的関数を、前輪と後輪での推定路面凹凸の残差ではなく、全計測データにおける路面凹凸平均との残差として最小化するパラメータを探索するようにアルゴリズムを変更した。数値シミュレーションにより、本手法の精度検証を行った所、精度が大幅に改善することが明らかとなった。

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 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shin Ryota, Okada Yukihiro, Yamamoto Kyosuke	4. 巻 22
2. 論文標題 Application of C-LSTM Networks to Automatic Labeling of Vehicle Dynamic Response Data for Bridges	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 3486 ~ 3486
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s22093486	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 -
1. 著者名 Shin Ryota, Inoue Jun, Okada Yukihiro, Kyosuke Yamamoto	4. 巻 1
2. 論文標題 Numerical Study of the Effect of Measurement Noise on the Accuracy of Bridge Parameter Estimation in VBI System Identification	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Proc. of World Congress on Engineering 2021 in London	6. 最初と最後の頁 7 ~ 15
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 Shin Ryota, Okada Yukihiro, Kyosuke Yamamoto	4. 巻 1
2. 論文標題 Field Experiments and Predicting using C-LSTM Networks of Bridge Position Estimation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Proc. of World Congress on Engineering 2021 in London	6. 最初と最後の頁 351 ~ 355
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 TSUKADA Kento, SHIN Ryota, YAMAMOTO Kyosuke	4. 巻 79
2. 論文標題 A NUMERICAL STUDY ON THE APPLICABILITY OF VBI SYSTEM IDENTIFICATION USING VEHICLE VIBRATION DATA FROM MULTIPLE RUNS	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of JSCE	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.22-15010	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 Yamamoto Kyosuke, Shin Ryota, Mudahemuka Eugene	4. 巻 13
2. 論文標題 Numerical Verification of the Drive-By Monitoring Method for Identifying Vehicle and Bridge Mechanical Parameters	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 3049 ~ 3049
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app13053049	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 Yamamoto Kyosuke, Shin Ryota, Sakuma Katsuki, Ono Masaaki, Okada Yukihiko	4. 巻 23
2. 論文標題 Practical Application of Drive-By Monitoring Technology to Road Roughness Estimation Using Buses in Service	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 2004 ~ 2004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s23042004	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 Shin Ryota, Okada Yukihiko, Yamamoto Kyosuke	4. 巻 23
2. 論文標題 Discussion on a Vehicle?Bridge Interaction System Identification in a Field Test	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 539 ~ 539
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s23010539	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 YAMAMOTO KYOSUKE, FUJIWARA SACHIYO, TSUKADA KENTO, SHIN RYOTA, OKADA YUKIHIKO	4. 巻 -
2. 論文標題 NUMERICAL STUDIES ON BRIDGE INSPECTION USING DATA OBTAINED FROM SENSORS ON VEHICLE	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Structural Health Monitoring 2021	6. 最初と最後の頁 756~763
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.12783/shm2021/36324	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9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 秦涼太
2. 発表標題 Field Experiments and Predicting using C-LSTM Networks of Bridge Position Estimation
3. 学会等名 World Congress on Engineering 2021 in London (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秦涼太
2. 発表標題 Numerical Study of the Effect of Measurement Noise on the Accuracy of Bridge Parameter Estimation in VBI System Identification
3. 学会等名 World Congress on Engineering 2021 in London (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Eugene Mudahemuka
2. 発表標題 VEHICLE-BRIDGE INTERACTION SYSTEM: AN EXTENSION OF 1D TO 3D MODEL FOR BRIDGE DESIGN AND MAINTENANCE
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 秦涼太
2. 発表標題 移動センシングを用いたシステム同定において計測ノイズが車両パラメータの推定精度に及ぼす影響の数値的検討
3. 学会等名 第24回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本亨輔
2. 発表標題 車両・橋梁同時計測のためのGPS時刻同期型振動計測システムの開発
3. 学会等名 サービス学会 第10回国内大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村上翔
2. 発表標題 粒子群最適化に基づく複数車両の振動データを用いた車両・橋梁・路面のパラメータ同定
3. 学会等名 土木学会全国大会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村上翔
2. 発表標題 粒子群最適化に基づく車両振動データを用いた車両・橋梁・路面のパラメータ同定
3. 学会等名 第22回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kyosuke Yamamoto
2. 発表標題 The behavior analysis of Spatial Singular Mode Angle due to addition of noise to the data in an actual bridge experiment
3. 学会等名 10th European Workshop on Structural Health Monitoring (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kyosuke Yamamoto
2. 発表標題 The application of the SVD-FDD hybrid method to bridge mode shape estimation
3. 学会等名 10th European Workshop on Structural Health Monitoring (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

筑波大学山本研究室Website-論文List https://www.kz.tsukuba.ac.jp/~yamamoto_k/list.html 筑波大学山本研究室 http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~yamamoto_k/index.html 筑波大学山本研究室 http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~yamamoto_k/index.html
--

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	岡田 幸彦 (Okada Yukihiko) (80432053)	筑波大学・システム情報系・准教授 (12102)	
研究分担者	善甫 啓一 (Zempo Keiichi) (70725712)	筑波大学・システム情報系・助教 (12102)	
研究分担者	フン・ドック トゥアン (Tuan Phun Doc) (20633465)	筑波大学・システム情報系・准教授 (12102)	

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
---------	---------