

実測データによる車両橋梁相互作用システム同定手法：松美橋における事例

筑波大学大学院 学生会員 ○秦 涼太
筑波大学大学院 学生会員 酒井 真清
筑波大学大学院 学生会員 佐久間活機

筑波大学大学院 学生会員 金子 直樹
筑波大学システム情報系
筑波大学人工知能センター 正会員 山本 亨輔

1. はじめに

交通・物流ネットワークは、インフラ構造物に支えられている。インフラ構造物は、日常的な利用により劣化し、適切な維持管理が行われなければ、構造的損傷に至る。構造的損傷は経済的な影響が大きく、時に人命にかかわる。そのため、構造的損傷を未然に防ぐための目視点検が重要である。目視点検は、健全性診断の判定区分に基づいて橋梁の状態を評価する。しかし、点検実施者の経験や技量によって評価結果にばらつきが生じることがあり、計測データを用いた定量的な補助手法の開発が望まれている。目視点検を効果的かつ効率的に実施するため、損傷度の高い橋梁を事前に検知可能な簡易手法の開発を行う。

2. 目的

振動センサを搭載した車両で、橋梁上を走行した際に得られたデータから、橋梁の構造特性や車両の動的特性の推定を行う。長山ら¹は計測された車両振動から、ハーフカーモデルの動的パラメータと路面凹凸を同時に推定しており、フィールド実験においても、高い精度が確認された。Yamamoto et al.²は、車両振動から橋梁の構造特性、車両の動的特性、路面凹凸を同時に推定する方法である車両橋梁相互作用システム同定を提案している。数値実験において、車両振動にノイズが含まれる場合においても高い精度で推定可能であることが示唆されたが、フィールド実験において、精度は十分でない³。そこで、本研究はフィールド実験における複数回計測された加速度振動に対し、車両-橋梁相互作用システム同定手法を行い、推定精度低下の要因を考察する。

3. 車両-橋梁相互作用システム同定手法

車両が橋梁上を通過する際に、車両は橋梁を揺らし、車両は橋梁によって揺らされる。この現象を、車両-橋梁相互作用⁴と呼ぶ。車両-橋梁相互作用システム同定手法とは、車両-橋梁相互作用システムの運動

方程式に、車両振動データとランダム仮定したパラメータを代入して、橋梁振動と路面凹凸を求め、前輪と後輪で推定された路面凹凸が一致するまで、パラメータのランダム仮定値を更新することで、車両(質量・減衰・剛性やエンジン振動・風荷重など)・橋梁(質量分布・曲げ剛性分布・橋梁振動など)・路面を同時同定する手法である。

4. フィールド実験

2022年5月26、27日に茨城県つくば市の松美橋において、車両の加速度振動計測を行った。橋長さは30.88mであり、幅員は12.98mである。主桁はPC箱桁であり、アスファルト舗装がなされている。橋梁の前後には、温度変化などによる橋桁の伸び縮みに対応するため、伸縮装置がある。車両センサは、3軸の加速度振動を10点計測可能であり、測定範囲は $\pm 8G$ 、サンプリングレートは300Hz、分解能は20bitsである。車両のセンサ設置は秦ら³に示す。計測された車両振動(ばね上前輪、ばね上後輪、ばね下前輪、ばね下後輪)データは、図1に示す。また、車両の前軸と後軸が橋梁に進入・退出したタイミングも示す。橋梁に進入・退出したタイミングで観測される車両振動のピークは、伸縮装置上を走行時に得られる。

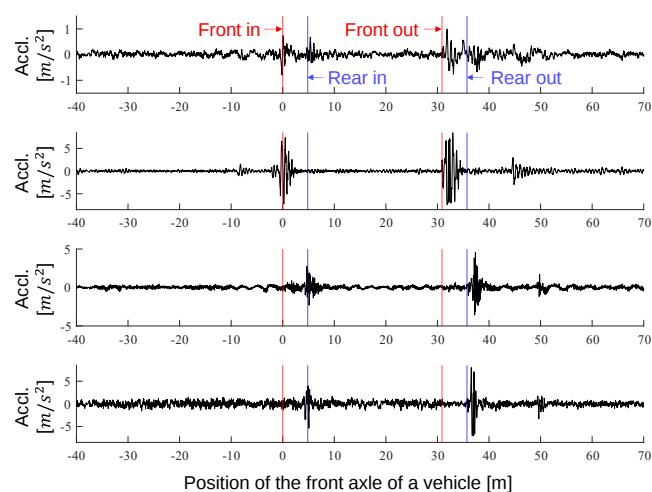


図1：計測された車両振動

キーワード 構造ヘルスマニタリング、車両橋梁相互作用、システム同定、フィールド実験
連絡先 〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1

5. 結果

車両-橋梁相互作用システム同定手法を実施するための車両と橋梁のパラメータは, McGetrick⁵をもとに, 実測されたデータから推定した. また, 計測された車両振動データは, 静定状態において計測された値をもとに, 鉛直方向の角度補正を実施しており, センサ取り付けによるノイズの影響は少ない. 図2は, 計測されたデータに車両-橋梁相互作用システム同定手法を実施した結果を示す. 図3は, ロードプロファイルで計測された値と推定結果を比較する. また, 複数回計測されたデータに提案手法を実施し, 得られた結果を表1にまとめる.

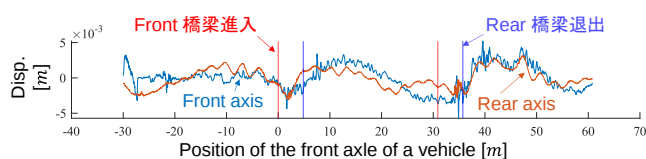


図2：推定された路面凹凸

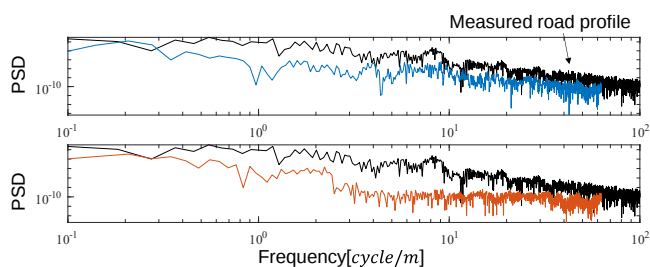


図3：測定値と推定値の路面凹凸の
パワースペクトル密度の比較

表1：推定されたパラメータの基本統計量[N=24]

	Assumed	Mean	Std
車両重心位置	2.18	0.67	0.13
前輪ばね上減衰	7.2×10^4	0.79	0.30
後輪ばね上減衰	8.6×10^4	0.84	0.29
前輪ばね上剛性	1.0×10^6	0.97	0.30
後輪ばね上剛性	1.3×10^6	0.80	0.28
前輪ばね下質量	7.0×10^3	1.09	0.15
後輪ばね下質量	1.1×10^4	1.06	0.16
前輪ばね下剛性	3.0×10^6	0.88	0.13
後輪ばね下剛性	1.1×10^7	0.91	0.22
橋梁単位質量	1.8×10^4	0.95	0.13
橋梁減衰係数	0.7024	1.00	0.18
[レイリー減衰]	0.0052	0.97	0.15
橋梁曲げ剛性[中央]	5.5×10^{10}	0.93	0.17

6. 考察

本研究の車両-橋梁相互作用システム同定手法は, 路面と橋梁が車両に影響を与えると仮定している.

そのため, 橋梁上を走行していない場合, 前輪と後輪で推定される路面凹凸は, 一致するはずである. しかし, 図2に示されるように, 車両の両軸が橋梁上にならない場合においても, 推定値に差が生じている. これは, 本研究で想定していないエンジン振動やロール回転, 橋梁前後にある坂道の影響を受けていると考えられる. 加えて, 図3で示されるように, 車両重心と車軸の位置が離れるほど推定精度が低下している. また, 表1に示されるように, 車両-橋梁相互作用システム同定手法による推定値は, 先行研究⁵に基づく仮定値に近いものの, 標準偏差が大きい. 様々なノイズ除去手法によって路面凹凸の推定精度を向上させることが可能であるが, 推定されるパラメータは真値から差が生じるトレードオフが存在する. そのため, 可能な限り力学モデルを高度化するもしくは, 統計的处理によるパラメータの推定精度を向上が今後の課題である.

謝辞

本論文は, 科研費基盤研究(B): 19H02220 及び(財)昭瀝記念財団 2021 年度研究助成金, 特別研究員奨励費: 22J10994 を用いて実施した研究の一部を発表したものである.

参考文献

1. 長山智則, 趙博宇, 薛凱: 走行時の車体振動を利用したハーフカーモデルの同定と路面縦断形状の推定, 土木学会論文集 E1, 75(1), pp.1-16, 2019.
2. Yamamoto, K., Murakami, K., Shin, R., Okada, Y.: Application of Particle Swarm Optimization method to On-going Monitoring for estimating vehicle-bridge interaction system. arXiv preprint arXiv:2201.08014, 2022.
3. Shin, R., Okada, Y., Yamamoto, K.: Discussion on a Vehicle-Bridge Interaction System Identification in a Field Test, Sensors, 23(1), 539, 2023.
4. Yang, Y. B., Lin, C. W., Yau, J. D.: Extracting bridge frequency from the dynamic response of a passing vehicle, Journal of Sound and Vibration, 272, pp.471-493, 2004.
5. McGetrick, P., Kim, C. W., González, A.: Dynamic axle force and road profile identification using a moving vehicle. International Journal of Architecture, Engineering and Construction, 2(1), pp.1-16, 2013.