

# 複数回走行時の車両振動データを用いた VBI システム同定の適用性に関する数値的検討 A Numerical Study on the Applicability of VBI system Identification Using Vehicle Vibration Data from Multiple runs

塚田 健人 (筑波大・理)

藤原 幸代 (筑波大・工)

秦 涼太 (筑波大・理)

山本 亨輔 (筑波大・工)

Kento Tsukada, Tsukuba University  
Sachiyo Fujiwara, Tsukuba University  
Ryota Shin, Tsukuba University  
Kyosuke Yamamoto, Tsukuba University  
E-mail: s2120873@u.tsukuba.ac.jp

Securing engineers and budgets is a challenge for local governments to sustainably maintain and manage infrastructure. One method for efficiently inspecting infrastructure is the simultaneous inspection of vehicle, bridge, and road surfaces. Previous studies on this method have proposed various methods for estimating road surface irregularities and bridge feature from vehicle vibration data. However, in the presence of noise, the estimation accuracy of the mechanical parameters is low. Therefore, in this study, we attempt to improve the estimation accuracy against noise by estimating mechanical parameters using vehicle vibration data from multiple runs of a single vehicle. The results obtained showed that the use of multiple run data did not improve the results. On the other hand, averaging of vehicle vibration data can show good results.

## 1. はじめに

インフラ構造物を持続的に維持管理していく上で、技術者と予算の確保が地方自治体の課題となっている。そこで、少ない人員と限られた予算で、インフラを効率よく点検できる技術が求められている。

その一つとして、車両・橋梁・路面の同時点検技術が期待できる。本手法は、車両に加速度センサを設置し、得られた振動から車両と橋梁の力学的パラメータ（質量・減衰・剛性）と路面凹凸を同時に推定する。車両を走行させるだけで、車両・橋梁・路面の状態を定量的に評価できるので、維持管理効率の改善が期待できる。

既に、車両振動データから、路面凹凸や橋梁の特徴量を推定する方法が多く提案されている。たとえば、長山<sup>1)</sup>は、カルマンフィルタを用いて、車両振動から車両の力学的パラメータと路面縦断形状を同時推定する手法を提案している。また、村上<sup>2),3)</sup>は、長山らの手法を拡張し、車両だけでなく橋梁の力学的パラメータの推定にも成功している。村上法では、まず、車両・橋梁の力学的パラメータをランダムに仮定する。ランダム仮定したパラメータと車両振動の計測データを VBI (Vehicle-Bridge Interaction: 車両-橋梁相互作用) システムの運動方程式に代入すれば、前輪と後輪に入力された路面凹凸がそれぞれ推定できる。空間同期すると、両者は本来、一致するはずなので、その差を

最小化するように仮定パラメータを更新すれば良い。このような手法を VBISI (VBI System Identification: VBI システム同定) 法と呼ぶ。村上らは、数値的に車両振動データを再現し、VBISI 法が車両・橋梁・路面の同定に有効であることを示した。但し、車両振動に観測ノイズが含まれる場合、推定精度が大きく低下する。

井上<sup>4)</sup>は、この VBISI 技術を用いて、エンジン振動など外乱の影響を考慮したモデルを構築し、計測ノイズが各パラメータ推定値に与える影響を求め、目的関数の形状を明らかにした。その結果、観測点数を増やすことで推定精度が改善すると共に、エンジン振動を推定できることを示した。さらに、秦<sup>5)</sup>は、入力推定プロセスにカルマンフィルタを用いてロバスト性を高めつつ、パラメータ更新に効率の良い Adaptive Nelder-Mead 法を用いた VBISI 法を提案している。ノイズ無しであれば、本手法の推定値はほぼ正解値に一致することを確認した。但し、ノイズを考慮すると推定精度は低下することも併せて確認された。実計測においては、様々なノイズが含まれると考えられ、よりロバストなモデルを構築する必要がある。

そこで、複数回走行時の車両振動データに対して車両・橋梁・路面を推定するアルゴリズムを新たに提案し、精度改善効果を検証する。用いる計測データは数値シミュレーションによって生成する。

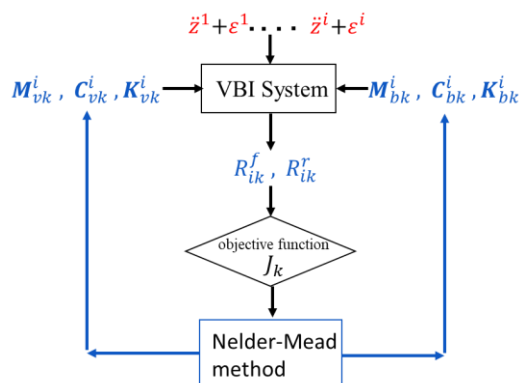


Fig. 1 Parameter identification flow in this research

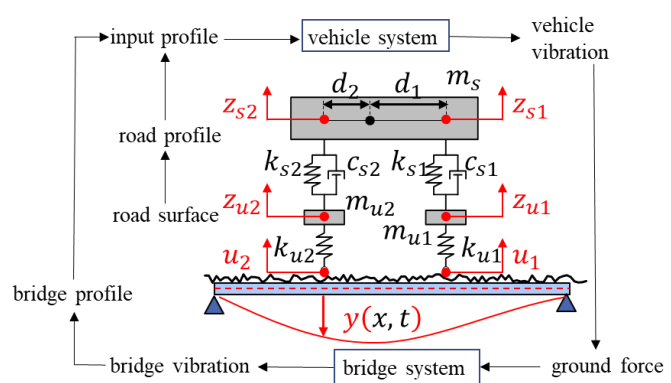


Fig. 2 Vehicle-Bridge interaction system

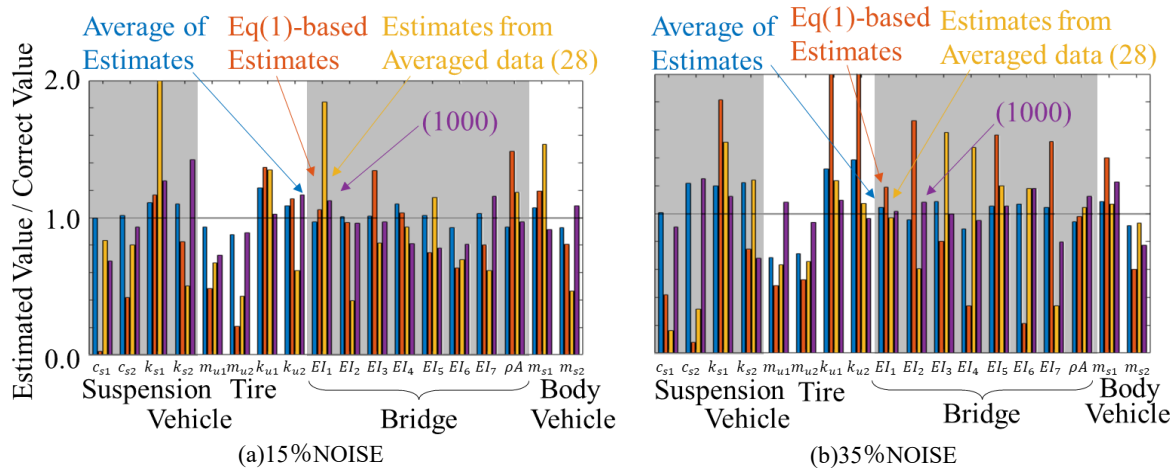


Fig. 3 Comparison of estimated parameters for vehicle and bridges

## 2. 提案手法

計測データとして1台の車両が28回走行した時の車両加速度振動が得られたものとする。車両振動データとランダム仮定した車両・橋梁パラメータをVBIシステムに代入すると、路面プロファイルが求められる。前輪と後輪それぞれで路面プロファイルを位置同期する。本検討では、28回分の前輪と後輪、計56種類の路面凹凸が得られる。車両が同じ路面凹凸上を走行していると仮定し、計56種類の路面凹凸の二乗誤差を最小化するようにランダム仮定したパラメータを更新していく。パラメータ更新はNelder-Mead<sup>7)</sup>法を用いて、十分に収束した時の値を車両と橋梁の力学的パラメータ推定値とする (Fig. 2)。計56個の路面凹凸と平均差をとり、その総和を目的関数として、1つに集約し、パラメータを更新する。以下に目的関数を示す。

$$J_k = \sum_i \left\{ (R_{ik}^f - \bar{R})^2 + (R_{ik}^r - \bar{R})^2 \right\} \quad (1)$$

ここで $k$ はパラメータの組み合わせ番号、 $i$ は走行回、上添字の $f$ は前輪、 $r$ は後輪を表す。 $\bar{R}$ は平均値である。

なお、比較のため、まず28回分の車両振動データを平均化し、1つの車両振動データとして、VBISI法を適用してパラメータ推定した結果も併せて示す。

車両モデルは、ハーフカーモデルを採用し、橋梁を十分に加振できるように18tトラックを想定した。橋梁は1次元オイラー・ベルヌーイ梁とした (Fig. 2)。計測ノイズは、エンジン振動等を想定して、RMS値が観測データ比15%および35%となる白色ガウスノイズを用いた。

## 3. 結果と考察

VBISI法の適用結果をFig. 3に示す。パラメータ推定を28回行い、平均をとったもの (青色の棒グラフ、従来の方法に相当する)、28回の走行時車両振動データに式(1)を用いてパラメータ推定を行ったもの (赤色の棒グラフ、本研究の提案手法)、VBIシステムに入力する前に28回の車両振動データを平均化し、パラメータ推定を行ったもの (黄色の棒グラフ)、同様に1000回の車両振動データを平均化して推定したもの (紫色の棒グラフ) をそれぞれ表す。

Fig. 3より、28回の走行データを用いた今回の手法による改善は見られなかった。これは、28個の車両振動データから、路面凹凸を推定し、1つの目的関数としているため、

Nelder-Mead法による更新がどの車両振動データに対しても良い値を探しきれず、探索を終了したためだと考えられる。また、車両振動データの平均化は、1000回の走行データを用いれば、推定精度の改善は見られる。これは、白色ガウスノイズが平均ゼロという性質を持っているため、実環境では必ずしも同様の結果が得られるとは限らない。

## 4. まとめと今後の課題

本研究では、複数回走行時の車両振動データに対応した推定アルゴリズムを提案し、推定精度の改善効果を数値実験によって検証した。Nelder-Mead法により、車両・橋梁パラメータを同定した結果、全体として推定精度の改善効果は得られなかった。一方、車両振動データの平均化は良好な結果を示し得ることが分かったが、ノイズ特性に依存すると考えられ、今後も検討が必要である。ノイズに対する頑健性のあるモデルは、社会実装する上では必要不可欠となるため、継続して今後の技術的課題となる。

## 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) 村上翔: 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, 筑波大学, 卒業論文, 2019
- 3) 村上翔: 車両振動へのカルマンフィルタ適用によるVBIシステム同定の可能性に関する数値的検討, 筑波大学, 修士論文, 2021
- 4) 井上潤: 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各パラメータの推定精度に及ぼす影響の数値的検討, 筑波大学, 修士論文, 2021
- 5) 秦涼太, 岡田幸彦, 山本亨輔: 移動センシングを用いたシステム同定におけるパラメータ推定精度の数値的検討, 構造工学論文集 Vol. 68A, 2022
- 6) Kalaman, R. E.: A new approach to linear filtering and prediction problem. Journal of basic Engineering, Vol.82, No.1, pp.35-45, 1960
- 7) Nelder, J. A., & Mead, R.: A simplex method for function minimization. The computer journal, 7(4), 308-313, 1965.