

# 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 Numerical Verification of Noise Influence on Vehicle Parameter Estimation Accuracy of System Identification by On-going Monitoring

秦 涼太 (筑波大・社会工) 井上 潤 (筑波大・工) 岡田 幸彦 (筑波大・社会工) 山本 亨輔 (筑波大・工)  
SHIN Ryota, University of Tsukuba  
INOUE Jun, University of Tsukuba  
OKADA Yukihiro, University of Tsukuba  
YAMAMOTO Kyosuke, University of Tsukuba  
E-mail: yamamoto\_k@kz.tsukuba.ac.jp

In this study, we devise a technology to simultaneously inspect vehicles, bridges, and road surfaces from vibration data of traveling vehicles at the same time. To estimate the parameters of vehicles, bridges and road surfaces by convergent computation, the shape of the objective function is important because it affects not only the accuracy but also the efficiency. As a result of numerical calculation, it was found that the objective function is always convex downward, even under the influence of measurement noises. This result suggests that the optimal solution can be searched by a simple method such as gradient descent.

## 1. はじめに

道路交通インフラは人・物の移動を支え、生活に必要なものだが、全ての橋梁・路面を日常的に点検するとコストが膨大になる。そこで、走行する車両の振動データ等から、車両・橋梁・路面を同時に点検する技術を考案する。信号を用いたインフラモニタリング手法として、Yang<sup>1)</sup>によって車両応答分析が提案された。山本<sup>2)</sup>は走行車両の振動応答に基づき橋梁のモード形状を推定する手法を提案した。また、長山<sup>3)</sup>は車両応答から路面縦断形状を推定し、ハーフカーモデルの車両パラメータを同定する手法を提案している。さらに、村上<sup>4)</sup>は、粒子群最適化に基づき、複数車両の振動データから、車両・橋梁・路面を同時に推定している。これは、ランダムに仮定された車両・橋梁パラメータと計測された車両振動データを組み合わせ、その内で最も尤もらしい路面凹凸を推定できたパラメータを採用するという手法である。これにより、車両振動データさえ取得できれば、車両・橋梁・路面が全て推定できる可能性が高まった。しかし、これまで、本手法はクォーターカーモデルでの検証に留まっており、ハーフカーモデルやエンジン振動などの外乱や計測ノイズがパラメータ推定値に与える影響は調査されていない。

そこで、本研究では、エンジン振動の影響を考慮したハーフカーモデルを構築し、村上モデル<sup>4)</sup>を拡張する。また、路面凹凸の誤差関数の形状を明らかにすることに加えて、計測ノイズが各パラメータ推定値に与える影響を調査する。

## 2. 数値実験

提案手法では、車両振動から、車両・橋梁・路面凹凸を推定する。今回は、走行中の車両振動データを数値的に再現し、提案手法によって、車両・橋梁・路面凹凸が推定できるか検討する。本研究で使用する VBI システムの概要を Fig.1 に示す。車両はハーフカーモデルを採用し、橋梁は曲げのみを考慮した 1 次元単純梁とした。数値実験では、車両モデルと橋梁モデルを分離し、Newmark- $\beta$  法と繰り返し法を用いてそれぞれの入力を求める。

車両の運動方程式は、

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{K}_v \mathbf{z}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (1)$$

と表すことができる。ここで、

$$\mathbf{M}_v = \begin{bmatrix} \frac{d_2 m_s}{d_1 + d_2} & \frac{d_1 m_s}{d_1 + d_2} \\ \frac{I}{d_1 + d_2} & -\frac{I}{d_1 + d_2} \\ & m_{u1} \\ & m_{u2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{C}_v = \begin{bmatrix} c_{s1} & c_{s2} & -c_{s1} & -c_{s2} \\ d_1 c_{s1} & -d_2 c_{s2} & -d_1 c_{s1} & d_2 c_{s2} \\ -c_{s1} & 0 & c_{s1} & 0 \\ 0 & -c_{s2} & 0 & c_{s2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{K}_v = \begin{bmatrix} k_{s1} & k_{s2} & -k_{s1} & -k_{s2} \\ d_1 k_{s1} & -d_2 k_{s2} & -d_1 k_{s1} & d_2 k_{s2} \\ -k_{s1} & 0 & k_{s1} + k_{u1} & 0 \\ 0 & -k_{s2} & 0 & k_{s2} + k_{u2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{z}(t) = [z_{s1}, z_{s2}, z_{u1}, z_{u2}]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{f}(t) = [f, d_3 f, k_{u1} u_1, k_{u2} u_2]^T \quad (6)$$

$\mathbf{M}_v$ ,  $\mathbf{C}_v$ ,  $\mathbf{K}_v$  はそれぞれ車両の質量、減衰、剛性マトリクスである。 $\mathbf{f}(t)$  は外力項であり、エンジン振動による加振力  $f$  とタイヤに入力される入力変位  $u$  の影響からなる。

車両振動データが計測されたものとして、ランダムに車両システム・パラメータの初期値を仮定する。Newmark- $\beta$  法により、車両の運動方程式の左辺を全て求めることがで

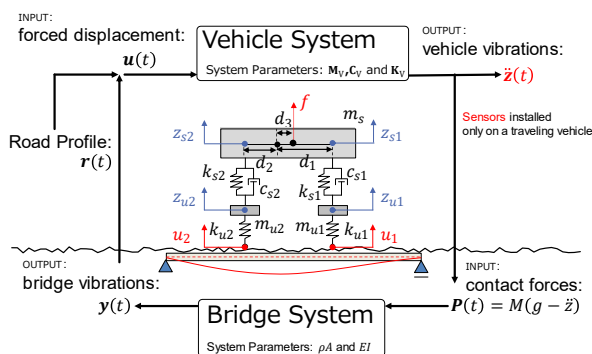


Fig.1 Vehicle and bridge models and VBI systems

きるので、荷重  $\mathbf{f}(t)$  が求まり、エンジン振動  $f$  及び入力プロファイル  $\mathbf{u}(t)$  が推定される。次に、ランダムに仮定した橋梁システム・パラメータと車両による接地力  $\mathbf{P}(t)$  を用いて、橋梁振動  $\mathbf{y}(t)$  を求めることができる。

$$\mathbf{M}_B \ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{C}_B \dot{\mathbf{y}} + \mathbf{K}_B \mathbf{y} = \mathbf{L}(t) \mathbf{P}(t) \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{M}_B$ 、 $\mathbf{C}_B$ 、 $\mathbf{K}_B$  は橋梁の質量・減衰・剛性行列で  $\mathbf{L}(t)$  は等価節点力配分マトリクスある。接地力は以下である。

$$\mathbf{P}(t) = \begin{Bmatrix} -\frac{d_2}{d_1 + d_2} m_s (g - \ddot{z}_{s1}) + m_{u1} (g - \ddot{z}_{u1}) \\ -\frac{d_1}{d_1 + d_2} m_s (g - \ddot{z}_{s2}) + m_{u2} (g - \ddot{z}_{u2}) \end{Bmatrix} \quad (8)$$

先に求めた入力変位  $\mathbf{u}(t)$  から橋梁振動成分  $\tilde{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{L}^T \mathbf{y}$  を差し引くと、路面応答  $\mathbf{r}(t)$  が推定できる。ここで、路面凹凸  $\mathbf{r}_i(t)$  を車軸位置  $x_i(t)$  で位置同期し、路面凹凸  $R_i(x)$  ( $R_i(x_i(t)) = r_i(t)$ ) とする。車両が直進する時、前輪と後輪は同じ経路を進むため、路面凹凸  $R_1(x)$ 、 $R_2(x)$  は等しくなるはずである。しかし、車両・橋梁パラメータがランダム仮定したものなので、 $R_1(x)$  と  $R_2(x)$  の値は異なる。そこで、両者の二乗誤差を最小化する最適化問題を考え、最小化するパラメータ組み合わせを推定値とする。目的関数は

$$J = \sum |R_1(x) - R_2(x)|^2 \quad (9)$$

である。ランダム仮定のパラメータが全て正解値ならば、算出した2つの路面凹凸は一致する。したがって、算出する路面凹凸が一致するようにパラメータを更新できれば、最終的にパラメータも正解値に近づくことが期待できる。このようなパラメータ同定手法を「VBI システム同定」と呼ぶこととする。但し、目的関数の形状は不明であり、前輪と後輪で推定した路面凹凸が一致する時の、車両と橋梁のシステム・パラメータの組み合わせが必ず1組のみ存在するとは限らない。そこで、パラメータの一つを選び、値を変化させることで目的関数の形状を確認する。各パラメータの探索範囲は極小の値から正解値の2倍までの範囲としている。この検討は、システム同定の総当たり式に相当するので、計算コストは大きい。正解値の組み合わせを探索する方法としては確実であり、目的関数の形状を知ることが出来る。

### 3. 結果と考察

VBI システム同定を用いた車両・橋梁パラメータ探索手法の各パラメータおよびノイズの影響を検討し、さらに勾配降下法を用いて VBI システム同定を行った。以下表示する図は、全て縦軸を前輪と後輪で求めた路面凹凸の推定誤差  $J$  とし、横軸を各パラメータの値とした。

車両のパラメータ  $m_{u1}$  を変化させた場合に得られた誤差関数の結果を Fig.2 に示す。赤い点線がそれぞれのパラメータの正解値の位置であり、赤丸が誤差関数の最小値、つまり総当たり式で求めた際の最適解の位置である。他の車両パラメータでも同様に下に凸で放物線に似た形状となっていることが分かり、多峰性はほとんど見られなかった。次に車両振動にノイズを加えた場合の検討を行う。

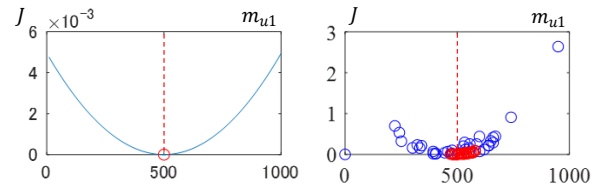


Fig.2 Objective function shape

Fig.3 Result of adding noise

本研究でのノイズは、エンジン振動や観測ノイズを想定しているので、全てのセンサーに同じ大きさのノイズが乗ると想定される。そこで、より振幅の大きいばね下の車両振動の最大振幅に対して 1.0、5.0% のノイズ(一様乱数を用いたもの)を加えた場合の最適解を求めた。50 回試行した結果を Fig.3 に示す。ノイズを加えても同様に下に凸の放物線に似た形状であり、 $m_{u1}$  の結果を見ると 5.0% ではばらつきは大きい。1.0% では正解値の周辺に分布する。但し、他の車両パラメータ  $k_{s1}$  と  $c_{s1}$  は 1.0% ノイズの場合でもばらつきが大きいことも分かっており、正解値の周辺に分布しない。質量の推定精度は悪くないが、速度振動・変位振動のような数値積分結果に影響されやすいパラメータ(減衰や剛性)はノイズによる影響で推定精度が下がることを確認した。これはノイズの影響が数値積分によって蓄積されるためであると考えられる。

### 4. まとめと今後の課題

本研究では外乱を考慮したモデルを構築し、VBI システム同定において計測ノイズが各パラメータ推定値に与える影響を目的関数の形状から明らかにした。

数値シミュレーションによってパラメータを総当たり式に求めた結果、目的関数は下に凸で放物線に似た形状となり、ノイズが無ければ頂点が正解値と一致することがわかった。また、多くは多峰性も見られなかった。これらから、パラメータ推定の高速化が可能である。一方、車両振動にノイズを加えた場合は目的関数の形状は変わらないものの、推定値は正解値からずれ、パラメータによってその誤差も異なることがわかった。これは、車両振動の数値積分の影響が減衰項や剛性項に顕著なため、ノイズの影響を受けやすいパラメータと受けにくいパラメータがあるためだと考えられる。

今回使用したノイズは一様乱数だが、実際のノイズには様々な外乱が含まれるため、他のノイズでも検討する必要がある。また、ノイズによって正解値と推定値との間に誤差が生じてしまうため、この誤差の影響を緩和する、もしくは誤差分をシフトさせて正解値に補正する手法を研究する必要がある。

### 参考文献

- 1) Y.B. Yang, C.W. Lin and J.D. Yau: Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle, Journal of Sound and Vibration, 272(3-5), pp.471-493, 2004.
- 2) 山本亨輔, 大島義信, 杉浦邦征, 川野広隆: 車両応答に基づく橋梁のモード形状推定法, 構造工学論文集 A1, 67, pp.242-257, 2011.
- 3) 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.
- 4) 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, 学士論文, 2018.