

## 異なる車両モデルが VBI システム同定の推定精度に与える影響の数値的検証

筑波大学大学院システム情報工学研究科 学生会員 ○秦 涼太  
 筑波大学大学院システム情報工学研究科 学生会員 井上 潤  
 筑波大学システム情報系 非正会員 岡田 幸彦  
 筑波大学システム情報系 正会員 山本 亨輔

## 1. 研究背景

インフラ構造物の老朽化に伴い、効率的な維持管理に関心が寄せられている。信号を用いた橋梁モニタリング手法に車両応答分析がある<sup>1)</sup>。村上<sup>2)</sup>は車両と橋梁のシステム・パラメータと路面凹凸を2台の車両で得られる車両振動から同時に推定する方法を提案した。このようなパラメータ同定手法を「VBI(Vehicle-Bridge Interaction)システム同定」と呼ぶこととする。車両重量の増加に伴い、橋梁のたわみは増加する。橋梁のたわみの大きさは、推定される路面凹凸に影響を与えるため、村上モデルを用いたパラメータ推定精度は変化することが想定される。そのため、本研究では車両重量が推定パラメータにどのような影響を与えるのかを数値実験により明らかにする。

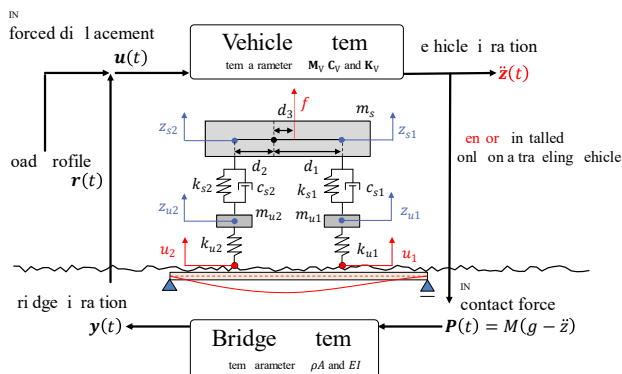


図-1: 車両モデル(Half-car)

## 2. シミュレーションモデル概要

本研究の目的は、異なる車両重量によって VBI システム同定のパラメータ推定精度がどのように変化するか明らかにすることである。今回は、ノイズを含む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・橋梁パラメータがどの程度分

散するか検証する。本研究で使用する VBI システムの概要を図-1 に示す。車両は Half-Car 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-β 法と繰り返し法を用いてそれぞれの入力を求める。車両システムと橋梁システムはそれぞれ運動方程式で表される。車両重量は González ら<sup>3)</sup>を参考に、ばね上質量 $m_s$ を 3400, 7,600, 16,600 [kg]とし、4.8t, 9t, 18t の車両を想定している。車両と橋梁のパラメータを表-1 と表-2 に示す。

表-1 車両システム・パラメータ

ばね上減衰: $c_{s1}, c_{s2}$	$1.00 \times 10^3$	[kg/s]
ばね上剛性: $k_{s1}, k_{s2}$	$4.00 \times 10^5$	[kg/s <sup>2</sup> ]
ばね下質量: $m_{u1}, m_{u2}$	$7.00 \times 10^2$	[kg*m <sup>2</sup> ]
ばね下剛性: $k_{u1}, k_{u2}$	$3.50 \times 10^6$	[kg/s <sup>2</sup> ]
車軸間距離: $d_1 + d_2$	3.75	[m]

表-2 橋梁システム・パラメータ

橋梁長	30	[m]
要素数	6	
各要素の質量: $\rho A$	3,000	[kg/m]
各要素の曲げ剛性: $EI$	$1.56 \times 10^{11}$	[N*m <sup>2</sup> ]

## 3. パラメータ同定方法

車両振動データが計測されたとして、ランダムに車両・橋梁システムパラメータを仮定すると、解析的に前輪と後輪位置における路面凹凸を推定することができる。車両が直進する時、前輪と後輪は同じ経路を進むため、与えたパラメータが正解値であれば、推定される前輪と後輪位置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最適化することで、パラメータの正解値を同定することができる。本研究では、目的関数を前輪と後輪位置の路面凹凸の二乗誤差としている。 $\rho A$ の

**Keywords: structure health monitoring vehicle response analysis vehicle-bridge Interaction System**

〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1 筑波大学  
 e-mail : r\_ota\_hin0731@gmail.com

表-3 ノイズを付与したときの各推定パラメータの平均値と標準偏差

諸元	4.8 t		9 t		18 t	
	Noi e 1%	Noi e 5%	Noi e 1%	Noi e 5%	Noi e 1%	Noi e 5%
ばね上減衰： $c_{s1}$	0.94,0.29	0.79,0.68	0.95,0.26	0.92,0.61	0.93,0.53	0.96,0.74
ばね上剛性： $k_{s1}$	0.71,0.52	0.60,0.71	0.78,0.50	0.70,0.76	0.77,0.48	0.72,0.70
ばね下重量： $m_{u1}$	1.00,0.07	0.99,0.05	0.99,0.05	1.00,0.05	0.99,0.05	1.00,0.05
ばね下剛性： $k_{u1}$	1.05,0.12	1.40,0.52	1.04,0.11	1.31,0.52	0.91,0.26	1.10,0.22
橋梁重量： $\rho A$	1.00,0.70	1.03,0.73	0.80,0.71	1.08,0.71	0.81,0.68	0.94,0.68
曲げ剛性： $EI_1$	0.87,0.87	1.03,0.86	0.87,0.82	0.96,0.82	0.95,0.85	1.06,0.80
曲げ剛性： $EI_3$	1.00,0.84	0.91,0.83	0.92,0.84	0.78,0.77	0.87,0.79	1.20,0.81

目的関数は多峰性を持つが、それ以外の各パラメータの目的関数の形状は下に凸であり、放物線に似ている。そのため、ほとんどのパラメータはノイズ無しであれば、勾配降下法を用いることで正解値にたどり着く。しかし、勾配がなだらかになるパラメータにおいては、計算コストが大きくなる。そのため、本研究では更新点を中点とする局所探索法を用いた。まず、ランダムにパラメータを2点生成する。生成されたパラメータのうち小さい方から $P_1, P_2$ とする。 $P_1, P_2$ の間に極値がない場合、極値から遠いパラメータを再度ランダムに生成する。 $P_1, P_2$ の間に極値がある場合は、 $P_1$ と $P_2$ の中点を $P_1$ に代入し、再度を $P_1, P_2$ の間に極値があるかどうかを検討する。これを5回繰り返し、最終的に得られた $P_1$ を最適推定値とした。

#### 4. 提案手法の適用検証とまとめ

本研究で想定するノイズは、エンジン振動や観測振動を想定しているため、計測される加速度に同じ大きさのノイズを付与した。そこで、ばね下の車両振動の最大振幅に対して1%と5%のノイズを与えた場合の推定値をそれぞれ50回計算し、その平均値と標準偏差を表-3に示す。車両のパラメータは前輪と後輪のそれぞれで得られるが、本実験では結果に大きな差が見られないため、今回は前輪のみの結果を示す。また、橋梁のパラメータである曲げ剛性に関しても同様に、 $EI_1, EI_3$ のみの結果を示す。また、推定結果は正解値が1となるように正規化しており、各パラメータの初期値は1から正解値の2倍の範囲でランダムに与えている。

得られた結果では、 $c_{s1}$ は推定値の平均値は車両重量やノイズの影響によりあまり変化しないが、ノイ

ズにより標準偏差は大きくなる。 $k_{s1}$ はノイズの影響により推定誤差が大きくなるものの、車両重量が比較的軽量でないほうが推定精度が良い。 $m_{u1}$ については車両重量量、ノイズの大きさによらず高い精度で推定可能であることが示唆された。 $k_{u1}$ は高重量車両でないほうが推定精度が高いが、ノイズの影響を受けやすいことが示唆された。 $\rho A$ はノイズによらず、軽量車両のほうが推定精度が高いが、目的関数が多峰性を持つため、確率的勾配降下法等を用いた追加的検証が必要である。また、 $EI_1$ はノイズが大きいが推定精度が高い傾向を示した。 $EI_3$ はノイズにより推定精度が低くなり、比較的軽量車両のほうが精度が高くなることが示唆された。

本研究により、車両重量によってパラメータによって推定精度に違いが出るということが明らかとなった。今後は複数車両から推定されるパラメータを用いて、より精度の高いパラメータ推定法の開発や、損傷検知への応用が期待される。

#### 参考文献

- 1) Y.B. Yang, C.W. Lin and J.D. Yau Extracting ridge frequency from the dynamic response of a vibrating vehicle, Journal of Sound and Vibration, 272(3-5), 471-493, 2004.
- 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, 学士論文, 2018.
- 3) González, A., Brien, E. J., and McGettrick, . Detection of ridge dynamic parameter using an instrumented vehicle. In 5th World Conference on Structural Control and Monitoring, 12th-14th Jul, Tokyo, Japan. World Conference on Structural Control and Monitoring. 2010.