

(28) 橋梁振動を用いた車両橋梁相互作用 システム同定における有効性の数値的検証

秦 涼太¹・岡田 幸彦²・山本 亨輔³

¹正会員 筑波大学 理工情報生命学術院博士後期課程 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

E-mail: shin.ryota.sp@alumni.tsukuba.ac.jp

²非正会員 筑波大学准教授 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

E-mail: okayu@sk.tsukuba.ac.jp

³正会員 筑波大学助教 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

E-mail: yamamoto_k@kz.tsukuba.ac.jp

本研究では、インフラ点検を効率化するための事前スクリーニング技術として、車両応答分析に着目した。走行中の車両振動から、車両・橋梁の力学的パラメータと路面凹凸を同時同定する手法である Vehicle-Bridge Interaction(VBI)システム同定に対して、力学的パラメータの推定精度向上と計算コスト減少を目的として、橋梁振動を用いた方法を提案する。得られた結果は、車両振動のみを用いた手法と比べて、同程度にパラメータを推定することが可能であり、計算時間は半分程度となった。今後の課題として、橋梁振動のみを用いた VBI システム同定手法の構築と、状態空間モデリングでの検証が考えられる。

Key Words: vehicle response analysis, vehicle-bridge interaction system, parameter identification, bridge vibration, numerical simulation

1. はじめに

効率的なインフラ構造物の点検として、移動計測車両を用いた方法がある。道路舗装やトンネルの点検として MMS(Mobile Mapping System)やレーザースキャナ等で計測された点群データ¹⁾²⁾、カメラ³⁾⁴⁾、加速度計⁵⁾⁶⁾で計測されたデータを用いた方法がこれまで提案されている。

しかし、路面性状測定車や MMS を用いたインフラ構造物の日常的モニタリングは費用的負担が大きいため、自治体によっては活用が難しい。そこで、今井ら⁷⁾が提案するように、簡易的な事前スクリーニングを行い、損傷可能性の高い箇所に対して詳細点検を行うことで、限りあるリソースを有効活用することができる。

このような事前スクリーニングを可能とする手法として車両応答分析がある。これは、走行する車両で計測される振動から路面や橋梁の特徴を推定する。これまで、富山ら⁸⁾により、道路舗装のひび割れ損傷箇所および、その類似箇所の検出が検証されている。また、長山ら⁹⁾によって路面縦断形状の推定が行われており、実用化もされている。一方、橋梁上を走行する車両振動から橋梁の固有振動数を推定する Indirect Approach が提案されている¹⁰⁾。橋梁上を走行する際に得られる車両振動は、車両

-橋梁相互作用(Vehicle-Bridge Interaction : VBI)によって起こる橋梁応答の成分を含んでいる。車両と橋梁の固有振動数が異なるため、その2つは簡易に区別することができる。他にも、VBI を橋梁の損傷検知に応用した指標に SSMA(Spatial Singular Mode Angle)がある¹¹⁾⁻¹⁵⁾。これは車両振動から橋梁のモード形状を推定したもので、局所損傷に対して高い感度を示すことが明らかになっている。これらのことから、車両応答分析は路面と橋梁の事前スクリーニングに活用することが可能である。

これまで車両応答分析を用いたインフラスクリーニングでは、車両の力学的パラメータを事前に校正するか、何らかの仮定によって車両の力学的パラメータが未知でも、路面や橋梁が推定できる手法が提案されてきた。但し、このような方法は、精度に限界がある。この問題に対して、村上¹⁶⁾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、計測された車両振動とランダムに仮定された車両と橋梁のパラメータから走行した路面凹凸を推定する。通過した路面凹凸が等しいと仮定すれば、各車両で推定された路面凹凸の誤差を目的関数とし、その値が最小となるような車両と橋梁の力学的パラメータの組み合わせを求めることができる。村上¹⁶⁾によると、この最適解は

正解値またはその等倍になることが分かっている。つまり、力学的パラメータの内、一つが既知であれば車両・橋梁のすべての力学的パラメータが同定できる。この方法を「VBI システム同定」と呼ぶことにする。VBI システム同定は損傷指標の変化に着目するような従来の診断手法と異なり、力学的パラメータを直接推定することができるため、過去の健全時データを必要とせず、実用性が高いと考えられる。著者ら¹⁷⁾は、これをハーフカーモデルに拡張し、力学パラメータ毎に目的関数の形状を確認した。橋梁の質量分布を除く全てのパラメータにおいて、目的関数の形状は下に凸であった。また、ノイズが含まれない場合、最適解は正解値に一致し、そのときの目的関数の値もゼロとなる。しかし、車両振動にノイズが含まれる場合、目的関数の形状は変化しないが、最適解は正解値からずれ、目的関数の値もゼロにはならない。VBI システム同定は、車両の加速度応答を数値積分するプロセスを含んでおり、その誤差は直接、目的関数に影響を与え、力学的パラメータの推定精度を低下させる。

実環境における車両振動の計測は、必ず計測ノイズを含む。また、その大きさはほとんど不明であるため、ノイズを減少させることには限界があり、複数回走行や異なる複数車両での計測データを統合するなどの精度向上を図る必要がある。一方、車両振動だけでなく、橋梁振動も用いることで、VBI システム同定の精度と計算コストを改善する方法も考えられる。そこで本研究では、車両振動に加え、橋梁振動を用いた VBI システム同定を提案し、数値実験によりその精度と計算コストを評価する。本手法では、車両振動から橋梁振動を推定する必要がないため、精度と計算コストの改善が見込まれる。

2. 数値実験

本研究では、橋梁上を走行するときの車両と橋梁の振動データを車両-橋梁相互作用を用いて、数値的に再現する(図-1)。その後、得られた振動データから、車両の力学的パラメータと路面凹凸を推定する。

(1) 車両-橋梁相互作用システム

VBI は走行する車両が橋梁上を走行した際に起きる現象である。具体的には、車両の接地力と橋梁のたわみ振動がそれぞれ橋梁システムと車両システムに入力されることを指す。車両システムには、各車軸位置における路面凹凸と橋梁振動が入力される。これらをそれぞれ路面プロファイル、橋梁プロファイルと呼称し、その和は入力プロファイルと呼ぶことにする。車両システムには、他にエンジン振動が入力され、車両振動が出力される。

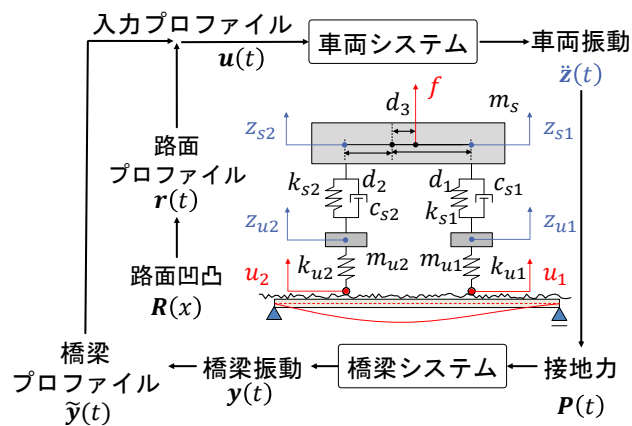


図-1 車両モデルと橋梁モデル、VBI システム

表-1 車両パラメータ(\$i\$は各車軸位置 1:前輪 2:後輪)

車体質量	m_s	$9.00 \times 10^3 [\text{kg}]$
ばね下質量	m_{ui}	$5.00 \times 10^2 [\text{kg}]$
ばね上サス減衰	c_{si}	$2.00 \times 10^3 [\text{kg/s}]$
ばね上サス剛性	k_{si}	$4.50 \times 10^3 [\text{N/m}]$
ばね下タイヤ剛性	k_{ui}	$6.00 \times 10^4 [\text{N/m}]$
車軸間距離	$d_1 + d_2$	$3.0 [\text{m}]$
エンジン位置	d_3	$1.0 [\text{m}]$

表-2 橋梁パラメータ

スパン長	L	$30 [\text{m}]$
要素数		6
曲げ剛性	EI	$1.56 \times 10^{10} [\text{Nm}^3]$
単位長さあたり質量	ρA	$3.0 \times 10^3 [\text{kg/m}]$
レイリー減衰 α		7.0×10^{-2}
レイリー減衰 β		1.0×10^{-4}

一方、橋梁システムの入力は、車両振動から求められる接地力であり、出力は橋梁振動である。つまり、車両により橋梁振動が励起され、橋梁により車両が加振される関係にあり、VBI システムは非線形性を持つ。

そこで、数値シミュレーションでは、車両と橋梁の挙動を別々に Newmark- β 法で求め、収束するまで相互に代入を繰り返す。時間刻みは $1.0 \times 10^{-3} [\text{s}]$ とし、収束判定は、橋梁加速度振動の更新量をマトリクス化し、その一次ノルムが十分に小さい時点とした。車両と橋梁の力学的パラメータは表-1 と表-2 に示す。

a) 車両モデル

車両はハーフカーモデルを採用する。車両振動は、前軸と後軸位置におけるばね上とばね下にセンサを取り付け、測定された鉛直方向の加速度と仮定する。

車両の運動方程式は、

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

と表すことができる。ここで、

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

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

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

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

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

である。\$\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}_v(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プロファイル\$\mathbf{u}\$の影響からなる。車両振動が計測された仮定し，ランダムに力学的パラメータを推定することによって，入力プロファイル\$\mathbf{u}\$を推定する事ができる。

b) 接地力

橋梁への入力である接地力は，タイヤ剛性の復元力である。なお，車両の運動方程式は釣り合い位置基準であるため，重力項が消えているが，接地力の弾性力の計算では，自然長位置を基準とするため，重力の影響を考慮する必要がある。

$$\mathbf{P}(t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{d_2}{d_1 + d_2} m_s (g - \ddot{z}_{s1}) + m_{u1} (g - \ddot{z}_{u1}) \\ \frac{d_1}{d_1 + d_2} m_s (g - \ddot{z}_{s2}) + m_{u2} (g - \ddot{z}_{u2}) \end{array} \right\} \quad (7)$$

c) 橋梁モデル

橋梁は曲げのみを考慮し，橋梁振動においては，Hermite 補間関数を用いた一次元有限要素梁モデルを適用する。橋梁の運動方程式は，重み付き残差法とレイリー減衰項の導入により，有限要素式として

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}_b \mathbf{y}(t) = \mathbf{F}_b(t) \quad (8)$$

と与えられる。\$\mathbf{M}_b, \mathbf{C}_b, \mathbf{K}_b\$はそれぞれ橋梁の質量，減衰，剛性マトリクスを示している。\$\mathbf{y}(t)\$は各節点におけるたわみとたわみ角を成分とする変形量ベクトルであり，\$\mathbf{F}_b(t)\$は各節点における集中外力と力のモーメント荷重を成分とする外力ベクトルである。

d) 入力プロファイル

本研究における入力プロファイル\$\mathbf{u}(t)\$は路面プロフ

ファイル\$\mathbf{r}(t)\$と橋梁プロファイル\$\mathbf{y}(t)\$の和で与えられる。

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{r}(t) + \mathbf{y}(t) \quad (9)$$

(2) VBI システム同定

先に求めた入力変位\$\mathbf{u}(t)\$から橋梁振動成分\$\mathbf{y}(t) = \mathbf{L}^T \mathbf{y}\$を差し引くと，路面プロファイル\$\mathbf{r}(t)\$が推定できる。ここで，路面プロファイル\$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，力学的パラメータが全て正解値であれば，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・橋梁パラメータはランダムに仮定したため，一致しない。そこで，前軸位置と後軸位置で推定された路面凹凸の誤差を以下のように目的関数とする。

$$J = \sum |R_1(x) - R_2(x)|^2 \quad (10)$$

目的関数を最小化するようにパラメータを更新すれば，最適解が正解値付近に得られると期待できる。

本研究では，車両振動と時刻同期された橋梁振動を用いて，VBI システム同定における橋梁プロファイルの計算を効率化する。車両振動のみを用いる場合には，接地力と橋梁の運動方程式から橋梁振動を推定するが，計測された橋梁振動を用いるため，この推定プロセスを省略することができる。

3. 結果と考察

車両振動に加えて，橋梁振動も用いた場合のVBI システム同定の力学的パラメータ推定精度と計算速度の向上を検証するため，車両振動のみを用いた場合と比較する。車両振動のみの場合とパラメータの推定精度に違いがあるのかを調べるため，対象となるパラメータ以外を正解値とし，振動にノイズが付与されたときの最適解のばらつきを求める。探索範囲は，正解値の1/50から2倍までとし，最適解を推定値とした。ノイズは，車両振動と橋梁振動の加速度応答に，それぞれ最大振幅に対する1%のホワイトノイズを付与する。

得られた結果は，橋梁振動を用いた場合であっても，車両振動のみを用いた場合と同程度の推定精度であることが明らかとなった。しかし，ばね下タイヤ剛性と重心から前軸位置の距離の推定は，車両加速度応答の数値積分による誤差が目的関数に与える影響により，橋梁振動を用いた場合であってもパラメータは推定が難しかった。一方，計算速度は車両振動のみの場合と比べて半分程度の時間となった。

これは橋梁振動を用いることで、橋梁プロファイルの推定精度がより高くなるため、入力プロファイルにおける車両振動ノイズの影響が路面プロファイルに残ったと考えられる。

4. まとめと今後の課題

本研究では、橋梁振動を用いた VBI システム同定のパラメータ推定精度向上と計算効率化について、数値シミュレーションを用いた検討を行った。得られた結果では、車両振動のみを用いた手法と同程度の精度で車両の力学的パラメータを推定可能であり、計算時間は約半分となった。

今後の課題として、橋梁振動のみを用いた VBI システム同定によって、橋梁パラメータの推定精度がどの程度向上するのかを検討する必要がある。計測された橋梁振動を用いることで、特に橋梁の単位長さあたり質量の推定精度向上が期待される。また、ノイズの影響を抑えるため、状態空間モデルの導入などが考えられる。これにより、車両振動ノイズの影響を緩和することができれば、ばね下タイヤ剛性と重心から前軸位置の距離の推定も可能になる。

謝辞：本論文は、科研費基盤研究(B)：19H02220 を用いて実施した研究の一部を発表したものであり、ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 今村一紀, 佐田達典, 江守央: MMS による 3 次元点群データを用いた道路構造物抽出に関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), No.71/V-2, pp.106-113, 2015.
- 2) 間野耕司, 井関禎之, 森田真一, 橋菊生, 西山哲: 移動計測車両による河川堤防高把握の検討, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), No.73/V-2, pp.53-64, 2017.
- 3) 高橋元気, 増田宏: 移動計測車両に搭載されたレーザスキャナによる蓋付き U 字溝の自動抽出, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), No.76/V-1, pp.63-73, 2020.
- 4) 笹野拓海, 藤村大輔, 山口裕哉, 白石宗一郎, 岩上弘明, 佐田達典, 江守央: MMS によるトンネル天井を想定した上部空間の計測精度に関する基礎的研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), No.77/V-2, pp.42-49, 2021.

- 5) 藤村大輔, 笹野拓海, 山口裕哉, 白石宗一郎, 岡本直樹, 岩上弘明, 佐田達典, 江守央: 位相差方式レーザスキャナ搭載型 MMS による円盤層厚検出精度に走行速度と測位衛星補正が及ぼす影響の検証, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), No.77/V-2, pp.23-33, 2021.
- 6) 塩崎正人, 河村圭, 西山哲: 地方自治体の道路維持管理を効率化する走行型計測システムの開発, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), No.73/V-2, pp.141-146, 2017.
- 7) 今井龍一, 中村健二, 塚田義典, 伊藤大悟, 栗原哲彦: ドライブレコーダ画像を用いた深層学習による道路舗装のひび割れ評価手法に関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), No.77/V-2, pp.67-76, 2021.
- 8) 富山和也, 川村彰, 石田樹: クォーターカーアルゴリズムを用いた舗装モニタリングにおける路面損傷の検出方法, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), No.68/V-2, pp.127-134, 2012.
- 9) 中野徹也, 吉武俊章, 宮本文穂: 舗装路面簡易評価システムの路面損傷検出精度向上に関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), No.70/V-2, pp.272-282, 2014.
- 10) 今井龍一, 松島敏和, 松井晋, 池本智, 中西良成: カーブローブデータを用いた道路舗装点検の効率化手法の提案, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), No.75/V-2, pp.40-47, 2019.
- 11) 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, No.75/V-1, pp.1-16, 2019.
- 12) Yang Y.B., Lin C.W. and Yau J.D.: Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 272, Pt. 3-5, pp.471-493, 2004.
- 13) Yamamoto K. and Ishikawa M.: Numerical Verification of Bridge Screening Technology based on Vehicle Vibration, *Proc. of World Congress on Engineering 2016*, Vol. 2, pp.933-938, London, U.K., June 29-July 1, 2016.
- 14) Yamamoto K. and Takahashi Y.: Experimental Validation of Bridge Screening Method based on Vehicle Response Analysis, *Proc. of World Congress on Engineering 2017*, Vol.2, pp.928-933, London, U.K., July 5-7, 2017.
- 15) Takahashi Y. and Yamamoto K.: The application of drive-by bridge damage detection based on continuous SSMA to the field experimental data, *International Journal of Lifecycle Performance Engineering*, Vol.3, No.3/4, pp.310-330, 2019.
- 16) 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.
- 17) 秦涼太, 井上潤, 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, 第 24 回応用力学シンポジウム, オンライン発表, 2021.