

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・路面パラメータ同定

Parameter identification of vehicles, bridge and road profile using vibration data of multiple vehicles based on Particle Swarm Optimization

村上 翔

Kakeru MURAKAMI

(指導教員 山本 亨輔)

Abstract – On-going methods have been intensively studied in these several decades. In previous studies, however, either bridge parameters or road profile is estimated. Thus, this study proposes a method to identify all parameters of the vehicle, bridge and road surface. This method uses residual error between the estimations of road profiles from two vehicles' vibration data, as the object function to be minimized. Particle Swarm Optimization method is applied to minimize it. To examine the efficiency of this method, numerical experiments based on vehicle-bridge interaction model is carried out. An obtained result shows that this method can accurately estimate all parameters of vehicle, bridge and road surface, if the prior information is precise. The wider distributions affect on the accuracy, because of existence of local solutions.

1 はじめに

現在、我が国には既設の橋梁が約 70 万基存在する。それらの多くが高度経済成長期に建設されたため、老朽化が懸念されている。そこで、5年に1度の近接目視点検が義務付けられている。しかし、熟練技術者や、費用を必要とする。橋梁を管理する各自治体において、財政・人的リソースの不足から補修を必要とする橋梁に十分な点検を行うことができなくなる危険性がある。よって、この問題を解決するため、低コストに実施できる橋梁点検技術の開発が喫緊の課題である。

橋梁のような構造物にセンサを設置して得られる振動データなどから、構造物の健全性を評価する構造ヘルスマモニタリングが注目を集めている。橋梁においては、損傷の影響が振動特性の変化として現れることから、振動特性を推定し、損傷を検知する手法が有用であると考えられる。Vehicle Bridge Interaction (VBI) モデルを用いて、得られた振動データから橋梁特性を把握する研究が盛んである。しかし、橋梁・車両振動には車両のタイプや車両速度、路面凹凸など様々な要因が関与するので、そこから車両や橋梁の特性を直接、把握するのは困難である。そこで、既往の研究では、橋梁振動

や車両振動から各特性を推定するための様々な手法が提案されている。Cai ら[1]は橋梁振動から遺伝的アルゴリズムを用いて車両のパラメータを推定している。また、Nagayama ら[2]は車両振動に粒子フィルタを用いて、車両のパラメータを推定している。これらのように、観測データを用いて、最適化問題として構造物のパラメータを推定する研究が行われてきた。

そこで、本研究では、推定手法として、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・路面パラメータの推定手法を提案する。本研究の特徴としては、1) 橋梁振動を用いず車両振動のみを用いていること、2) 車両パラメータだけでなく、橋梁のパラメータや路面凹凸も同時に推定すること、が挙げられる。既往の研究では、橋梁振動を得るため、各橋梁にセンサを直接、設置しなければならず、多大の費用が見込まれる。一方で、車両振動のみからパラメータが推定できれば、車両にのみセンサを設置すればよいため、低コスト化が期待できる。また、橋梁のパラメータや路面凹凸が推定できることで橋梁の損傷検知に繋がることが期待できる。

以下、2章で車両振動の再現に用いたシミュレーションモデルについて説明し、3章で得られた振動データから各パラメータを推定するための手法について説明す

る。そして、4章で提案手法の精度を検証し、有効性を示す。

2 シミュレーションモデルの概要

2.1 車両・橋梁モデル

本研究では、車両はクォーターカーモデルを採用する。このモデルの運動方程式は

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

と表せる。ここで

$$\mathbf{M}_v = \begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_u \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{C}_v = \begin{bmatrix} c_s & -c_s \\ -c_s & c_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{K}_v = \begin{bmatrix} k_s & -k_s \\ -k_s & k_s + k_u \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{Z} = [z_s \quad z_u]^T, \quad \mathbf{P} = [0 \quad k_u h]^T \quad (5)$$

ここで、 \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。 $\mathbf{P}(t)$ は車両への強制入力であり、 $\mathbf{Z}(t)$ は車両応答である。各マトリクス内のパラメータを図1に示す。

橋梁は曲げのみを考慮した1次元単純梁とする。

このモデルの運動方程式は

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{K}_b \mathbf{Y}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (6)$$

ここで、 \mathbf{M}_b , \mathbf{C}_b , \mathbf{K}_b はそれぞれ橋梁の全体質量、減衰、

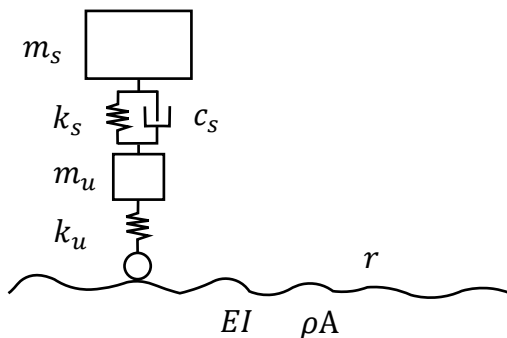


図1 車両モデル

剛性マトリクスを用いた。

車両と橋梁の振動はそれぞれの運動方程式(1), (6)から Newmark- β 法を用いて数値積分して求めている。

$$\ddot{\mathbf{u}}_k = \left(\mathbf{M} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{C} + \frac{(\Delta t)^2}{4} \mathbf{K} \right)^{-1} (\mathbf{P}_k + \mathbf{C} \mathbf{B}_c + \mathbf{K} \mathbf{B}_k) \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_k = \dot{\mathbf{u}}_{k-1} + \frac{\ddot{\mathbf{u}}_{k-1} + \ddot{\mathbf{u}}_k}{2} \Delta t \quad (8)$$

$$\mathbf{u}_k = \mathbf{u}_{k-1} + \dot{\mathbf{u}}_{k-1} \Delta t + \frac{\ddot{\mathbf{u}}_{k-1} + \ddot{\mathbf{u}}_k}{4} (\Delta t)^2 \quad (9)$$

ここで、 \mathbf{u}_k は橋梁または車両の変位応答であり、 Δt は時間刻みである。式の \mathbf{B}_c , \mathbf{B}_k は次式で表される。

$$\mathbf{B}_c = -\dot{\mathbf{u}}_{k-1} - \frac{\ddot{\mathbf{u}}_{k-1}}{2} \Delta t \quad (10)$$

$$\mathbf{B}_k = -\mathbf{u}_{k-1} - \dot{\mathbf{u}}_{k-1} \Delta t - \frac{\ddot{\mathbf{u}}_{k-1}}{4} (\Delta t)^2 \quad (11)$$

ここで、本実験で扱う車両・橋梁のパラメータは表1, 表2, 表3のようになっている。

車速はともに10[m/s]であり、6秒間走行する。橋梁の長さは30[m]であり、両端はピン支持である。車両

表1 車両1のパラメータ

m_{s1} [kg]	2.0×10^3
m_{u1} [kg]	2.0×10^2
c_{s1} [kg/s]	1.0×10^4
k_{s1} [N/m]	1.0×10^6
k_{u1} [N/m]	3.0×10^6

表2 車両2のパラメータ

m_{s2} [kg]	1.0×10^4
m_{u2} [kg]	2.0×10^2
c_{s2} [kg/s]	1.0×10^4
k_{s2} [N/m]	1.0×10^6
k_{u2} [N/m]	3.0×10^6

表3 橋梁パラメータ

EI [Nm ³]	1.56×10^{10}
ρA [kg/m]	3.0×10^3

のスタート地点を 0[m]地点とすると、橋梁は 10 [m]～40[m]地点である。

2.2 車両-橋梁相互作用

一般的に、車両と橋梁の応答は、その 2 つの複雑な相互作用によって非線形性を持つ。この相互作用を考慮した数値シミュレーションを実現するために、反復法[3]が用いられている。その過程を図 2 に示す。

はじめに、車両振動を路面プロファイルのみを用いて計算する。そして、計算した車両振動と路面プロファイルから橋梁振動を計算する。この橋梁振動を路面プロファイルに足し合わせて再度同じ工程を繰り返す。この反復過程は 1 サイクル前との算出結果の差がある規定値より小さくなった時に終了する。

2.3 数値シミュレーションの妥当性検証

作成したシミュレーションモデルの妥当性を確認するために、単純梁について数値計算を行った。単純梁の中央部に 10[kN]の静的荷重を加えたときの中央部の変位の結果を図 3 に示す。単純梁の平衡状態時の変位は

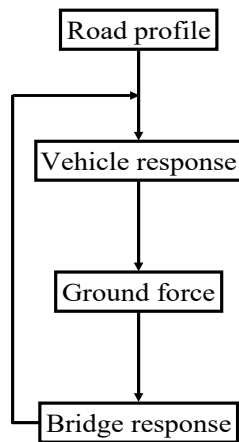


図 2 車両-橋梁相互作用

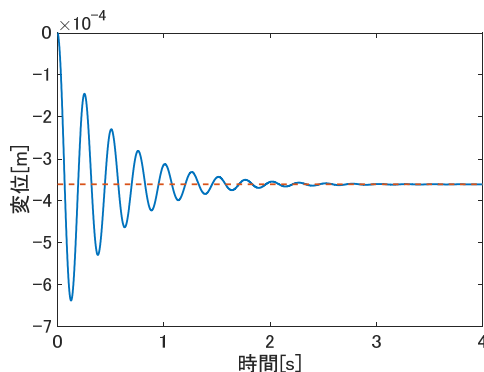


図 3 荷重実験の結果

3.605×10^{-4} [m]となり、解析解と一致することが確認できた。

3 パラメータ同定手法

3.1 パラメータ同定フロー

数値実験により、異なる 2 台の車両を別々に、同一の橋梁に走らせる。その際に、各車両のバネ下から加速度振動データを得る。各加速度振動データと推定したパラメータから解析的に路面凹凸を算出する。同一の橋梁を走行しているので、与えたパラメータが正解値ならば、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。同定フローの概略図を図 4 に示す。

3.2 路面凹凸の算出手順

バネ下の車両加速度振動からバネ上の車両加速度を算出する。バネ下の車両加速度振動を \dot{s}_k とすると、

$$\dot{s}_k = \dot{s}_{k-1} + \frac{\ddot{s}_{k-1} + \ddot{s}_k}{2} \Delta t \tag{12}$$

$$s_k = s_{k-1} + \dot{s}_{k-1} \Delta t + \frac{\ddot{s}_{k-1} + \ddot{s}_k}{4} (\Delta t)^2 \tag{13}$$

式(12)と式(13)を式(14)に代入する。

$$m_s \ddot{z}_s + c_s \dot{z}_s + k_s z_s = c_s \dot{z}_u + k_s z_u \tag{14}$$

式(14)より、バネ上の車両振動を得る。バネ下とバネ上の車両加速度振動を式(15)に代入すれば、強制入力 u が算出できる。

$$m_u \ddot{z}_u - c_s (\dot{z}_s - \dot{z}_u) + k_s (z_s - z_u) = k_u (u - z_u) \tag{15}$$

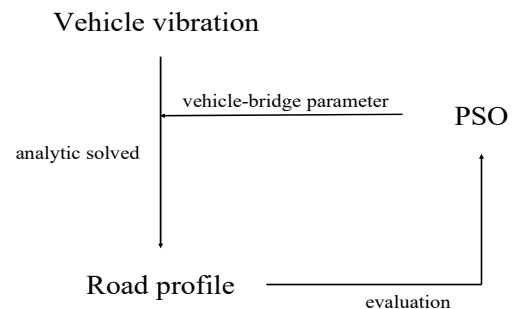


図 4 パラメータ同定フロー

次に、接地力から橋梁振動を算出する。車両から橋梁への接地力は、式(16)で表される。

$$\mathbf{P} = (m_s + m_u)\mathbf{g} + k_u(\mathbf{z}_u - \mathbf{u}) \quad (16)$$

橋梁の運動方程式は、式(17)のように表される。

$$\mathbf{M}_b\ddot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{C}_b\dot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{K}_b\mathbf{Y}(t) = \mathbf{P} \quad (17)$$

式(17)に式(16)を代入すれば、橋梁振動が得られる。強制入力と橋梁振動から、路面凹凸が求められる。

$$\mathbf{r} = \mathbf{u} - \mathbf{Y} \quad (18)$$

このようにしてバネ下の車両振動から路面凹凸を解析的に算出した。

3.3 パラメータ最適化

3.3.1 粒子群最適化

粒子群最適化 (Particle Swarm Optimization [4]) は、最適化問題を解く際のメタヒューリスティクス手法の 1 つである。1995 年に J.Kennedy と R.C.Eberhart らによって提案された。粒子群最適化は解空間に粒子を複数配置し、それらの粒子は他の粒子と相互に情報交換を行い、解空間を探索することで最適化問題の近似解を発見することのできる手法であり、群知能の 1 つである。各粒子は速度と位置を持っており、それぞれの更新は以下の式で行われる。

$$v_{ij}^{t+1} = w v_{ij}^t + c_1 r_1 (pb_{ij}^t - x_{ij}^t) + c_2 r_2 (gb_j^t - x_{ij}^t) \quad (19)$$

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1} \quad (20)$$

ここで、 w は慣性速度定数、 c_1, c_2 は加速度係数、 r_1, r_2 は[0,1]の一様乱数である。また、 pb は自身の探索過程における最良の位置ベクトル、 gb は粒子群の探索過程における最良の位置ベクトルである。

この時に最終的な gb を最適解の近似解とみなす。

3.3.2 本研究への適用

本研究では、ブラックボックス最適化問題であり、目的関数がどのような形状になっているのかが不明であるため、微分による勾配を用いない手法である PSO を導入する。さらに、多様性のある探索を行うため、PSO に動的な近傍構造を導入した Independent-minded PSO

(IPSO) [5]を採用する。この手法は各粒子が確率的に他の粒子と情報交換するかどうかを決定する手法である。

粒子群内での i 番目の粒子を $x^{(i)}$ とすると、

$$x^{(i)} = \begin{pmatrix} m_{s1}, m_{u1}, c_{s1}, k_{s1}, k_{u1}, \\ m_{s2}, m_{u2}, c_{s2}, k_{s2}, k_{u2}, EI, \rho A \end{pmatrix}^{(i)} \quad (21)$$

で表される。

3.2 より示した手順に従って、 x_i から各車両の路面プロファイル r_{1i}, r_{2i} を算出する。

本研究の最適化問題の目的関数 $F(x_i)$ は次式のように定める。

$$F(x_i) = \sum (r_{1i} - r_{2i})^2 \quad (22)$$

目的関数が最小となる値を探索する。

4 提案手法の適用検証

4.1 提案手法の導入によるパラメータ推定の結果と考察

粒子群最適化による同定プロセスを以下に従って、行う。

- Step1. 規定した空間に式(21)で表される粒子を N 個発生させる。
- Step2. 粒子ごとに、3.2 に従って路面凹凸を算出し、式(22)によって目的関数の値を得る。
- Step3. 式(19)、式(20)に従って各粒子の位置、速度の更新を行う。
- Step4. 指定した試行回数 Step2 に戻り、同じ工程を繰り返す。

4.1.1 全パラメータ推定 (正確な事前情報あり)

各パラメータについて、正確な事前情報がある場合を推定して提案手法を適用した。

各パラメータの設定した分布範囲を表 4、表 5、表 6 に示す。全パラメータについて、上下限は正解値の 90[%]~110[%]とした一様分布にしている。今回は、この分布を正確な事前情報があるとして設定した。

各パラメータの推定結果を図 5 に示し、路面凹凸の推定結果を図 6 に示す。全パラメータを見ても、誤差率が最大で 6%程度であり、全てのパラメータを精度よく推定できているのが分かる。また、路面凹凸もかなり

精度が良いことがわかる。誤差が生じた原因として、本推定手法が高次元空間を探索しきれていないことが挙げられる。本研究で用いた PSO は初期収束性が高く、探索の多様性に乏しい[6]。したがって、PSO の改良手法を適用し高次元空間をより多様に探索することができれば、各パラメータの推定精度向上が期待できる。また、今回は各パラメータの設定した分布の平均値を正解値にしているため、探索空間の中心が正解値となっ

ている。このような理想的な条件であったことが高い推定精度となったことに関係していることも考えられる。したがって、様々な条件で本手法を適用することで適用限界を見つけることが必要である。

4.1.2 全パラメータ推定（正確な事前情報なし）

各パラメータについて、正確な事前情報がない場合を推定して提案手法を適用した。

表 4 車両 1 の一様分布範囲

	正解値	下限値	上限値
m_{s1} [kg]	2.0×10^3	1.8×10^3	2.2×10^3
m_{u1} [kg]	2.0×10^2	1.8×10^2	2.2×10^2
c_{s1} [kg/s]	1.0×10^4	0.9×10^4	1.1×10^4
k_{s1} [N/m]	1.0×10^6	0.9×10^6	1.1×10^6
k_{u1} [N/m]	3.0×10^6	2.7×10^6	3.3×10^6

表 5 車両 2 の一様分布範囲

	正解値	下限値	上限値
m_{s2} [kg]	1.0×10^4	0.9×10^4	1.1×10^4
m_{u2} [kg]	2.0×10^2	1.8×10^2	2.2×10^2
c_{s2} [kg/s]	1.0×10^4	0.9×10^4	1.1×10^4
k_{s2} [N/m]	1.0×10^6	0.9×10^6	1.1×10^6
k_{u2} [N/m]	3.0×10^6	2.7×10^6	3.3×10^6

表 6 橋梁の一様分布範囲

	正解値	下限値	上限値
EI [Nm ³]	1.560×10^{10}	1.404×10^{10}	1.716×10^{10}
ρA [kg/m]	3.0×10^3	2.7×10^3	3.3×10^3

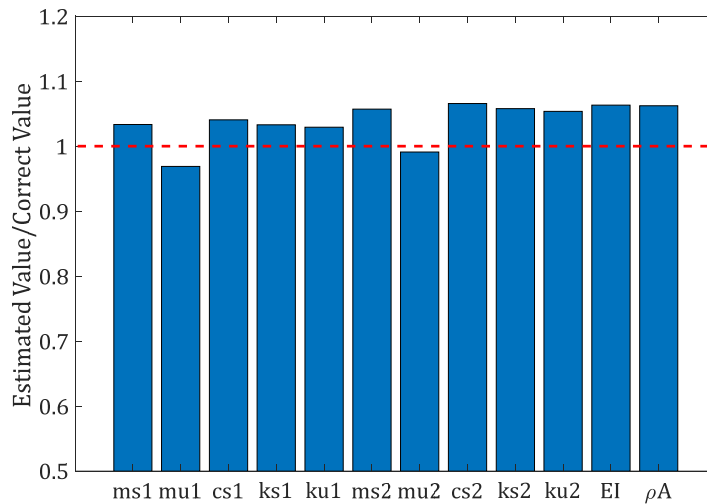


図 5 各パラメータの推定結果

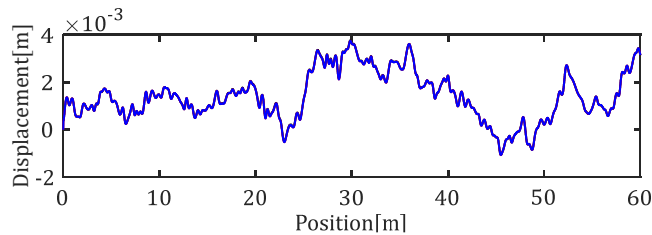


図 6 路面凹凸の推定結果

各パラメータの分布範囲を表7, 表8, 表9に示す。ここで、全パラメータについて、上下限は正解値の100[%]~120[%]の範囲における一様分布と定めた。

各パラメータの推定結果を図7に示す。全パラメータが誤差率10%付近で推定しており、パラメータの推定精度は低い。原因として、推定したパラメータ値が局所解となっていることが考えられる。本研究で探索する空間は高次元空間であり、どのような形状にな

っているかを知るの難しい。しかし、図8を見ると、推定した路面凹凸がとても一致していることから、局所解に陥ったことが分かる。

次に、EIについて上下限を正解値の100[%]-180[%]とした一様分布とした。各パラメータの設定した分布の範囲を表7, 表8, 表10に示す。各パラメータの推定結果を図9に示す。全パラメータが誤差率10%付近で推定しており、パラメータの推定精度は低い。しか

表7 車両1の一様分布範囲

	正解値	下限値	上限値
m_{s1} [kg]	2.0×10^3	2.0×10^3	2.4×10^3
m_{u1} [kg]	2.0×10^2	2.0×10^2	2.4×10^2
c_{s1} [kg/s]	1.0×10^4	1.0×10^4	1.2×10^4
k_{s1} [N/m]	1.0×10^6	1.0×10^6	1.2×10^6
k_{u1} [N/m]	3.0×10^6	3.0×10^6	3.6×10^6

表8 車両2の一様分布範囲

	正解値	下限値	上限値
m_{s2} [kg]	1.0×10^4	1.0×10^4	1.2×10^4
m_{u2} [kg]	2.0×10^2	2.0×10^2	2.4×10^2
c_{s2} [kg/s]	1.0×10^4	1.0×10^4	1.2×10^4
k_{s2} [N/m]	1.0×10^6	1.0×10^6	1.2×10^6
k_{u2} [N/m]	3.0×10^6	3.0×10^6	3.6×10^6

表9 橋梁の一様分布範囲

	正解値	下限値	上限値
EI [Nm ³]	1.560×10^{10}	1.560×10^{10}	1.872×10^{10}
ρA [kg/m]	3.0×10^3	3.0×10^3	3.6×10^3

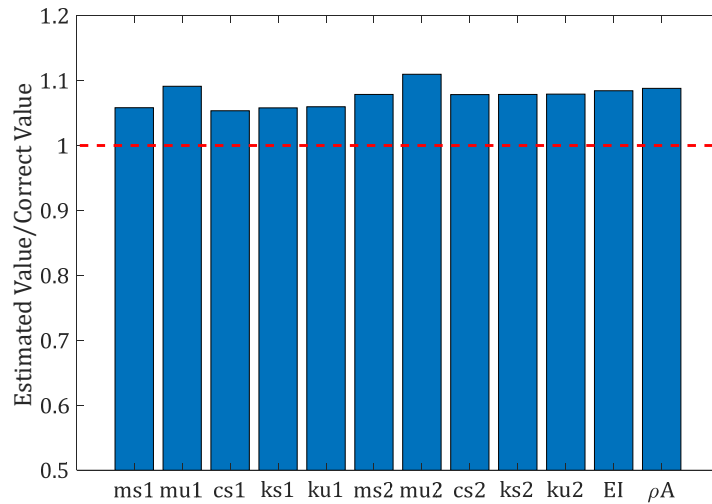


図7 各パラメータの推定結果

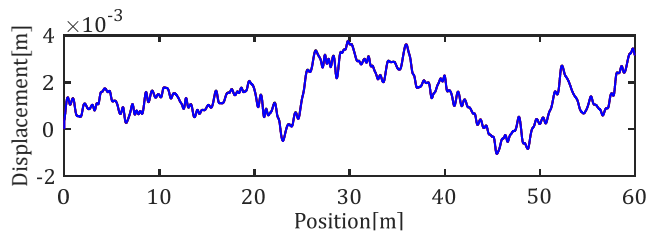


図8 路面凹凸の推定結果

し、 EI に着目すると分布の範囲を変えたにも関わらず誤差率の変動していない。これは、 EI が他のパラメータの値に影響を受けたことが原因と考えられる。他のパラメータの分布の上下限が正解値の 100[%]~120[%]であることで EI の推定値もその範囲で推定された。全パラメータの推定精度が低い原因は、先ほどと同様に局所解に陥ったからと考えられる。

4.1.3 車両 2 のみの推定

車両 1 と橋梁のパラメータが既知であるとして車両 2 のパラメータ推定を行った。車両 2 については正確な事前情報がないとし、車両 2 の全パラメータについて、上下限は正解値の 100[%]~180[%]とした一様分布とした。各パラメータの設定した分布の範囲を表 11 に示す。

各パラメータの推定結果を図 10 に示す。全体的に高精度にパラメータを推定できている。理由として 2 つのことが考えられる。1 つ目は、車両 2 のパラメータのみの推定であったため、探索空間の次元が落ちたことで探索精度が上がったこと。2 つ目は、車両 1 と橋梁のパラメータを既知としたことで局所解に陥らなかったことである。したがって、事前情報を得ることで、探索空間の次元を下げることであれば推定精度が向上することがわかる。

c_{s2} の推定精度が他のパラメータと比べて低いことがわかる。この理由として、 c_{s2} が形状関数の値に影響を与えにくいことが考えられる。そのため、 c_{s2} の精度を上げるためには、推定手法を改良し、感度の低いパラメータに対しても高精度に推定できるようにすることが必要となる。

4.2 各パラメータの特徴

各パラメータの値に対する目的関数の値について調べた。各パラメータについて、他のパラメータを誤差率 -10[%], 0[%], 10[%]の値でそれぞれ定め、誤差率を変えていったときの目的関数の値を調べた。

m_{s1} に対する目的関数を図 11 に示す。誤差率が他のパラメータの誤差率より高いときの方が目的関数に対する感度が高いことが分かる。図 12 より、 m_{s2} でも m_{s1} と同様の傾向を示しているが、目的関数に対する感度がかなり高いことがわかる。よって、車重が大きいかほど目的関数に対する感度が高くなることが分かる。

m_{u1} , m_{u2} に対する目的関数をそれぞれ図 13, 図 14 に示す。 m_{u1} と m_{u2} はどちらも同様の傾向を示すが、 m_{s1} に比べて目的関数に対する感度が非常に低いことがわかる。また、 c_{s1} , c_{s2} に対する目的関数をそれぞれ図 15, 図 16 に示す。 c_{s1} , c_{s2} も m_{u1} , m_{u2} と同程度の感度の低さであることがわかる。

表 10 橋梁の一様分布範囲

	正解値	下限値	上限値
$EI[Nm^3]$	1.560×10^{10}	1.560×10^{10}	2.808×10^{10}
$\rho A[kg/m]$	3.0×10^3	3.0×10^3	3.6×10^3

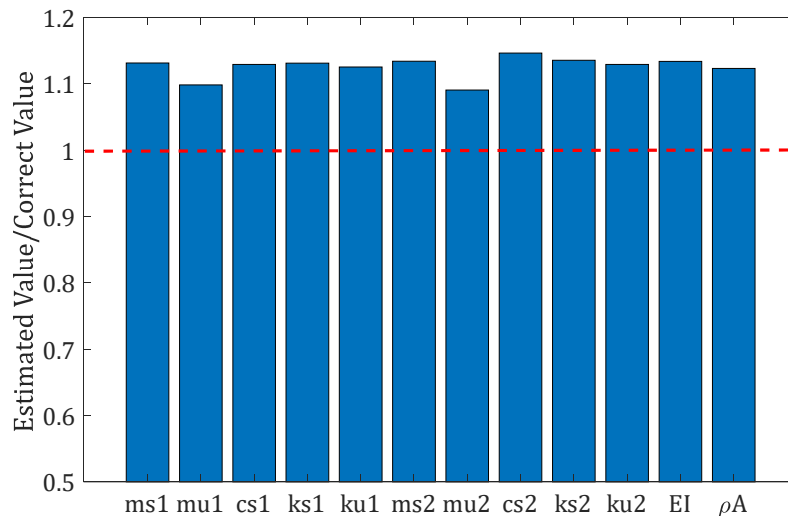


図 9 各パラメータの推定結果

表 11 車両 2 の一様分布範囲

	正解値	下限値	上限値
m_{s2} [kg]	1.0×10^4	1.0×10^4	1.8×10^4
m_{u2} [kg]	2.0×10^2	2.0×10^2	3.6×10^2
c_{s2} [kg/s]	1.0×10^4	1.0×10^4	1.8×10^4
k_{s2} [N/m]	1.0×10^6	1.0×10^6	1.8×10^6
k_{u2} [N/m]	3.0×10^6	3.0×10^6	5.4×10^6

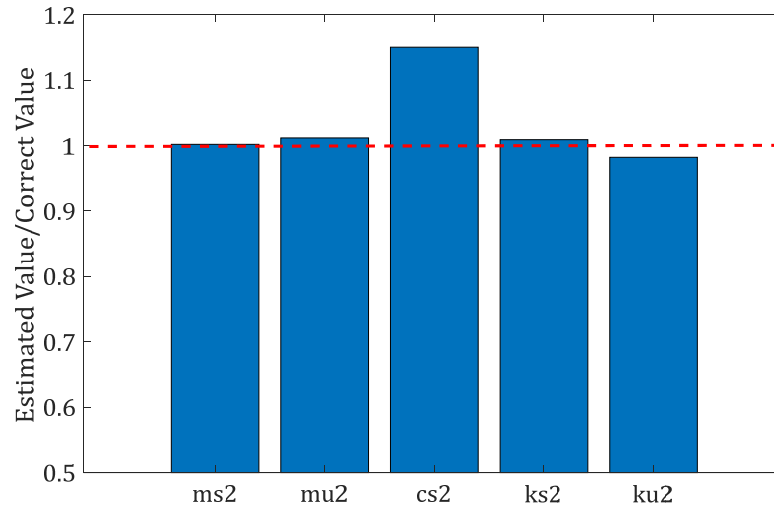


図 10 各パラメータの推定結果

k_{s1} , k_{s2} に対する目的関数をそれぞれ図 17, 図 18 に示す. k_{s2} が k_{s1} に比べて感度が高いことが分かる. k_{s1} と k_{s2} で値は等しいので, これは車重の違いが原因であると考えられる. また, 目的関数に対する感度は m_{s1} や m_{s2} と同程度であることがわかる.

k_{u1} , k_{u2} に対する目的関数をそれぞれ図 19, 図 20 に示す. 傾向は k_{s1} , k_{s2} と同様である. しかし, ともに目的関数に対する感度は低いことがわかる.

EI に対する目的関数を図 21 に示す. 目的関数に対する感度が非常に高い. また, 他のパラメータの誤差率よりも低い誤差率のときに感度がより高くなる傾向がある. このことから, 橋梁の剛性は, 他のパラメータの事前情報があればかなり高精度に推定できると予想される.

ρA に対する目的関数を図 22 に示す. 目的関数に対する感度が非常に低いことがわかる. また, 他のパラメータの誤差率よりも低い誤差率のときに感度がより高くなる傾向がある.

全パラメータにおいて, 他のパラメータとの誤差率が等しいときに目的関数の値を最も低くすることがわかる. したがって, 今回定義した目的関数ではすべての

パラメータの誤差率が等しいときに等しく最適解であり, 正解値のみが最適解ではないことが分かった.

4.3 提案手法を用いた橋梁の損傷検知

橋梁の損傷を, 橋梁の剛性低下として表現することとする. 表 4, 表 5, 表 6 の分布を用い, 橋梁の剛性 EI の正解値を下げていった際の EI の推定値を図 23 に示す. 橋梁の剛性の低下に対して, 推定パラメータが低下している傾向が見て取れる. これは形状関数に対する EI 感度が高いことで推定しやすかったことが挙げられる. このように, 他のパラメータに対して正確な事前情報があり, 適切な一様分布を設けることができれば, 橋梁の損傷を検知できることがわかる.

5 まとめと今後の課題

数値実験により, 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を行った.

- 1) 今回設定した目的関数では, 全パラメータが同

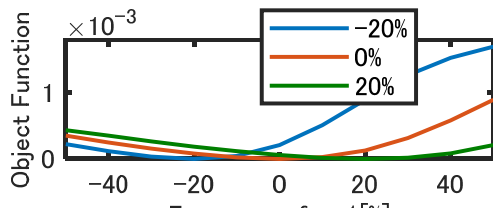


図 11 m_{s1} に対する形状関数

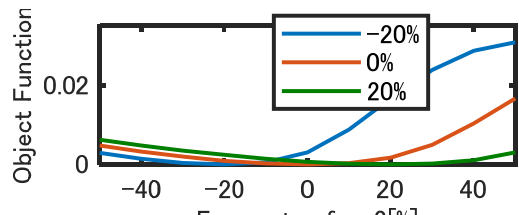


図 12 m_{s2} に対する形状関数

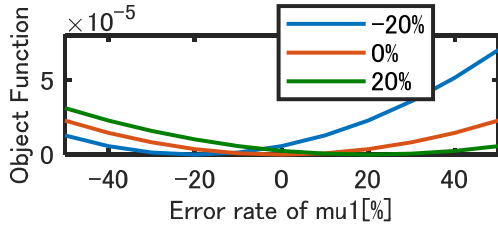


図 13 m_{u1} に対する形状関数

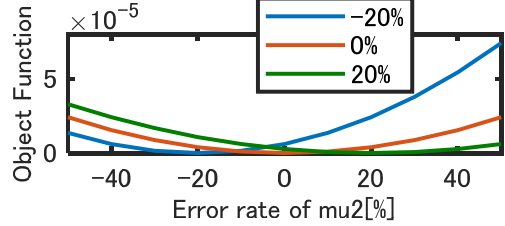


図 14 m_{u2} に対する形状関数

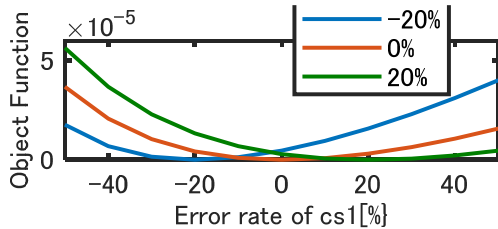


図 15 c_{s1} に対する形状関数

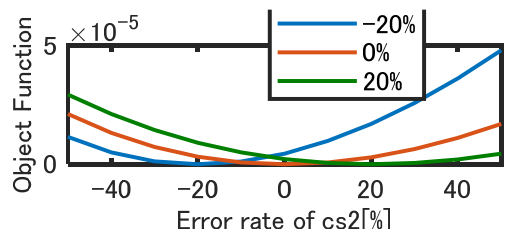


図 16 c_{s2} に対する形状関数

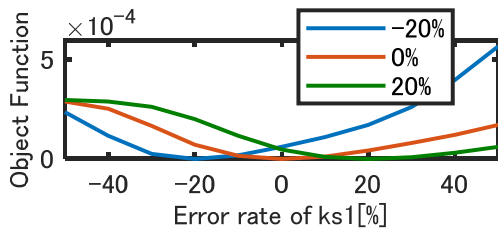


図 17 k_{s1} に対する形状関数

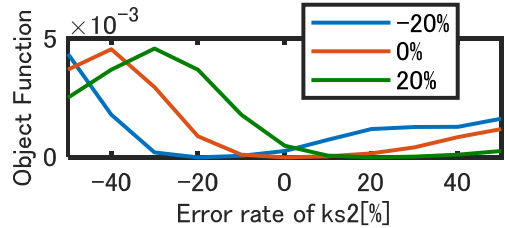


図 18 k_{s2} に対する形状関数

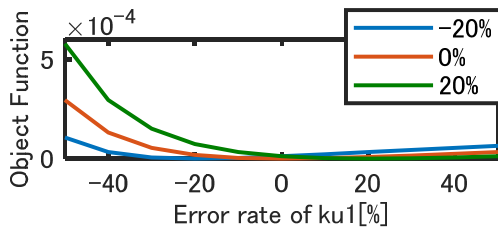


図 19 k_{u1} に対する形状関数

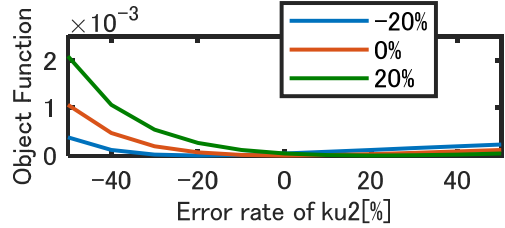


図 20 k_{u2} に対する形状関数

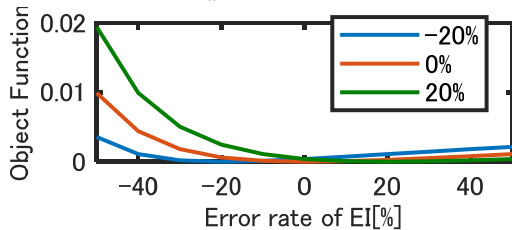


図 21 EI に対する形状関数

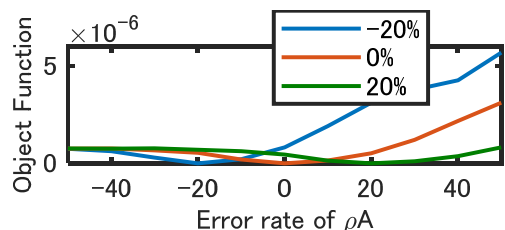


図 22 ρA に対する形状関数

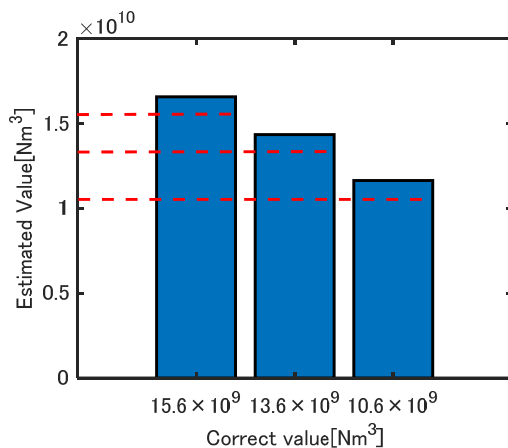


図 23 EI低下時の推定結果

じ誤差率のときに等しく最適解となるため、正解値を推定するには適切に分布を与える必要がある。

- 2) 事前情報により、探索空間の次元数を減らすことができれば、パラメータを精度よく推定することができる。
- 3) 橋梁健全時にEIを推定できる条件下で、橋梁の損傷を推定パラメータによって検知できることが分かった。

今後の課題として、適用限界を広げ、パラメータの推定精度を上げる必要がある。また、本実験は数値実験であり、測定ノイズを考慮していないため、実車両・実橋梁に適用するのは至っていない。こうした課題を克服できる改良手法を考える必要がある。

参考文献

- [1] L.Deng, C.S.Cai, "Identification of parameters of vehicles moving on bridges," *Engineering Structures* 31(2009),pp.2474-2485
- [2] Haoqi Wang, Tomonori Nagayama, Boyu Zhao, Di Su, "Identification of moving parameters using bridge responses and estimated bridge pavement roughness," *Engineering Structures* 153(2017),pp.57-70
- [3] M.F.Green, D.Cebon, "Dynamic interaction between heavy vehicles and highway bridges," *Computers & Structures* 62(1997),pp.253-264
- [4] J.Kennedy, R.C.Eberhart, "Particle swarm optimization," *in Proc. of IEEE Int.Conf.on Neural*

Networks,pp.1942-1948,1995

- [5] H.Matsushita, Y.Nishio and T.Saito, "Particle swarm optimization with novel concept of complex network", *in Proc. of NOLTA*,pp.197-200,2010.
- [6] P.J.Angeline, "Evolutionary optimization vessus particle swarm optimization : philosophy and performance differences," *in Proc. of 7th Annu. Conf. Evolutionary Programming VII*,pp.601-610,1998

謝辞

本研究に際して、丁寧なご指導をいただきました山本亨輔先生と松島亘志先生に深謝いたします。加えて、研究の相談に乗ってくださった研究室のみなさんには感謝の念に堪えません。そして生活を支えてくれた家族に心からお礼を申し上げます。

