

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

橋梁加速度振動を用いた
車両重量推定法に関する実験的検証

宮本 陸

修士（工学）

（構造エネルギー工学専攻）

指導教員 松島亘志

2020年 3月

概要

我が国には長さ 2.0m 以上の橋梁が約 71 万基存在する。老朽橋梁の増加に伴い、維持管理の効率化は喫緊の課題である。道路構造物の定期点検が法律で義務付けられたことにより、地方公共団体の負担が増加したことで、維持管理業務の効率化に対する大きな需要が見込まれる。

本研究では橋梁振動に着目し、車両が通行した際の橋梁振動と粒子群最適化法を用いることで車両重量を簡易に推定し、維持管理業務の中でも重要な通行車両の重量把握の効率化を目指す。

提案手法の適用性検証として、まず数値シミュレーション上で車両と橋梁のモデルを作成し、得られた加速度振動から車両重量推定の精度検証を行った。また、実車両と実橋梁を用いて同様の検討を行い、提案手法の適用性を検証した。

目次

| | | |
|-------|-------------------------|----|
| 第1章 | はじめに | 4 |
| 1.1 | 橋梁の点検・診断需要の増大とその対応策について | 4 |
| 1.2 | 既往の研究 | 4 |
| 第2章 | シミュレーションモデルの概要 | 6 |
| 2.1 | 車両・橋梁モデル | 6 |
| 2.2 | 車両・橋梁相互作用 | 7 |
| 2.3 | 数値シミュレーションモデルの検証 | 8 |
| 第3章 | 車両重量推定手法 | 9 |
| 3.1 | 車両重量推定フロー | 9 |
| 3.2 | 橋梁振動算出手順 | 10 |
| 3.3 | パラメータ最適化 | 11 |
| 第4章 | 提案手法の適用検証 | 12 |
| 4.1 | 提案手法での車両重量推定の結果と考察 | 12 |
| 第5章 | 提案手法の実実験への適用 | 15 |
| 5.1 | 実験概要 | 15 |
| 5.1.1 | 対象橋梁 | 15 |
| 5.1.2 | 加速度振動計測 | 16 |
| 5.1.3 | 対象車両 | 17 |
| 5.1.4 | 路面凹凸の計測 | 18 |
| 5.2 | 実車両への提案手法の適用 | 19 |
| 5.3 | 実車両の車両重量推定結果と考察 | 20 |
| 第6章 | まとめ | 22 |
| | 謝辞 | 23 |
| | 参考文献 | 24 |

図目次

| | |
|--------------------------------------|----|
| 図 2-1 本研究で用いた車両モデルの概要..... | 6 |
| 図 2-2 車両-橋梁相互作用システムの解法..... | 7 |
| 図 2-3 静的荷重を与えた際の単純梁のたわみ..... | 8 |
| 図 3-1 パラメータ同定フローの概略図..... | 9 |
| 図 4-1 正解値の 75%~125%を与えたときの推定結果..... | 12 |
| 図 4-2 正解値の 50%~150%を与えたときの推定結果..... | 13 |
| 図 4-3 正解値の 50%~150%を与えたときの推定結果..... | 13 |
| 図 4-4 加速度振動の観測値と推定値の比較..... | 14 |
| 図 5-1 松美橋..... | 15 |
| 図 5-2 松美橋の断面図と平面図..... | 16 |
| 図 5-3 橋梁への MEMS センサの取り付けと概観..... | 17 |
| 図 5-4 対象車両外観図..... | 18 |
| 図 5-5 3m プロファイルメーターの外観図..... | 18 |
| 図 5-6 計測した路面凹凸..... | 19 |
| 図 5-7 進入・退出部分の加速度波形..... | 19 |
| 図 5-8 各パラメータの推定結果..... | 21 |
| 図 5-9 橋梁中央部での観測値と推定値の加速度振動波形の比較..... | 21 |

第1章 はじめに

1.1 橋梁の点検・診断需要の増大とその対応策について

現在我が国には橋長 2.0m以上の橋梁が約 71 万基存在する^[1]。2019 年時点で建設後 50 年が経過した橋梁は全体の 27%に及び、10 年後の 2029 年にはその割合が 52%に達すると見込まれている^[2]。このような社会的背景があり、橋梁を含む社会資本の戦略的維持管理は喫緊の課題として取り組まれてきた^[3]。平成 24 年には道路構造物の定期点検の法定化が進み、橋梁は 5 年に一度の近接目視点検が義務付けられた^[4]。しかし、その結果多くの橋梁を抱える地方公共団体は橋梁点検費用増加という負担を抱えることとなった^[5]。以上のことから橋梁の維持管理業務の効率化に対する需要は高いといえる。

橋梁の維持管理業務の効率化についての取り組みとして大きく分けて 2 種類ある。

1 つは事後保全の効率化である。現在の主な点検方法は近接目視点検である。近接目視点検の精度は点検技術者の練度に依存している。しかし、今後老朽化橋梁の数が増加していく中で、技術者の確保はますます困難が予想される。また、近接目視点検は橋梁 1 基あたりの点検コストが高いため、すべての橋梁に近接目視点検を実施するためには莫大な予算が必要となる。したがって低コストかつ点検技術者の練度に依存しない客観的な点検手法の開発が求められている。

もう 1 つは予防保全の効率化である。限られた予算の中で現在ある橋梁などの資本ストックを維持していくためには、修繕や架替えに大規模な予算が必要となるため、そもそも損傷が起きないように予防保全を施すことは重要であることがわかる。

予防保全を施すためには、橋梁を走行する大型車両の重量の把握や、交通頻度の把握が重要である。そのため交通流を乱すことなく、簡便に走行車両の重量を計測する技術として WIM (Weight-In-Motion) の研究が数多く行われてきている^[6]。しかし、WIM では橋梁の下フランジにひずみゲージを設置する必要があり、設置にかかるコストが大きい。そのためすべての橋梁で車両重量の計測を行うことは難しく、更に低コストで車両重量を推定するような技術が必要であると考えられる。

そこで本研究では、計測がひずみよりも容易な橋梁振動に着目し、橋梁振動から走行車両の重量を推定することを目的とする。また、加速度振動を計測するセンサには、1 台あたりの製作コストが低く、設置が容易な MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) センサを用いる。MEMS は半導体製造技術やレーザー加工技術等、各種の微細加工技術を応用し、微小な電気要素を一つの基板上に組み込んだシステムである。MEMS 技術の活用によりセンサの小型化および低コスト化が期待できる。自律的ないし独立して振動計測が可能な MEMS センサ・システムを構築することで、コストと労力を低減することが可能である。本研究では、独立したセンサ間で時刻同期を得るために GPS (Global Positioning System) を用いる。

1.2 既往の研究

1970 年代初頭に Fred Moses^[7]らによって橋梁を「はかり」とみなし、車両が走行する際の部材に発生する応答から車両重量を推定する BWIM (Bridge-Weight-In-Motion) が提唱された。また関屋^[8]らにより MEMS センサを用いて計測して得られた加速度応答を数値積分することで橋梁の変位応答を算出し、その変位応答から走行車両重量を推定する PWIM

(Portable-Weight-In-Motion) が提唱された。しかしこれらの技術でも車両重量を誤差なく推定することは難しいとされている。

一方で橋梁振動や車両振動から各パラメータを推定するための様々な手法が提案されている。Cai ら^[9]は橋梁振動へ遺伝的アルゴリズムを用いることで車両のパラメータを推定している。また、長山ら^[10]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。以上のように観測データを用い、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。

本研究では車両重量の推定手法として粒子群最適化法を用いる。粒子群最適化法は組合せ最適化問題の近似解を求めるアルゴリズムの一つであり、本研究で用いる手法では、車両・橋梁のパラメータの最適な組み合わせを探索する必要があるため、採用した。村上ら^[11]は複数車両の車両振動へ粒子群最適化を適用することで、車両や橋梁のパラメータ推定の可能性を示した。

本研究ではこれらの技術を適用することで、橋梁の加速度応答から車両重量を推定することを目的とする。

第2章 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、数値シミュレーション上で橋梁・車両モデルを作成し、車両を走行させた際に得られた橋梁の加速度振動データを用いて、提案手法の検討を行う。今回使用した橋梁-車両モデルを図 2-1 に示す。車両はハーフカーモデル^[12]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。このとき橋梁の運動方程式は

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}_b \mathbf{y}(t) = \mathbf{L}(t) \mathbf{P}(t) \quad (1)$$

と表される。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、剛性のマトリクスを表している。本研究では、 $\ddot{\mathbf{y}}(t)$ を観測値として Newmark- β 法を用いて数値積分することで $\mathbf{y}(t)$ $\dot{\mathbf{y}}(t)$ を求めた。Newmark- β 法については 3 章で触れる。また、 $\mathbf{P}(t)$ は橋梁への強制入力であり、

$$\mathbf{P}(t) = \mathbf{M}_p (\mathbf{g} - \ddot{\mathbf{Z}}(t)) \quad (2)$$

と表される。 \mathbf{M}_p は接地力に対する全体質量マトリクスであり、 \mathbf{g} は重力加速度、 $\ddot{\mathbf{Z}}(t)$ は車両の加速度振動である。

ここで、車両の運動方程式は

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{Z}}(t) + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{Z}}(t) + \mathbf{K}_v \mathbf{Z}(t) = \mathbf{C}_p \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}_p \mathbf{u}(t) \quad (3)$$

と表すことができる。ここで、 \mathbf{M}_v \mathbf{C}_v \mathbf{K}_v はそれぞれ車両の質量、減衰、剛性のマトリクス、 \mathbf{C}_p \mathbf{K}_p はそれぞれ外力に対する車両の減衰と剛性である。それぞれのマトリクスの要素を表 2.1 に示す。 $\mathbf{Z}(t)$ $\dot{\mathbf{Z}}(t)$ はそれぞれ車両の変位、速度である。また $\mathbf{u}(t)$ は

$$\mathbf{u}(t) = \Phi(t) \mathbf{q}(t) + \mathbf{r}(t) \quad (4)$$

と表せる。 $\Phi(t)$ $\mathbf{q}(t)$ は橋梁のモード形状行列とモード応答ベクトルで、 $\mathbf{r}(t)$ は路面の凹凸を表している。

車両と橋梁の加速度振動はそれぞれの運動方程式(1),(3)から Newmark- β 法を用いて数値積分して求めた。

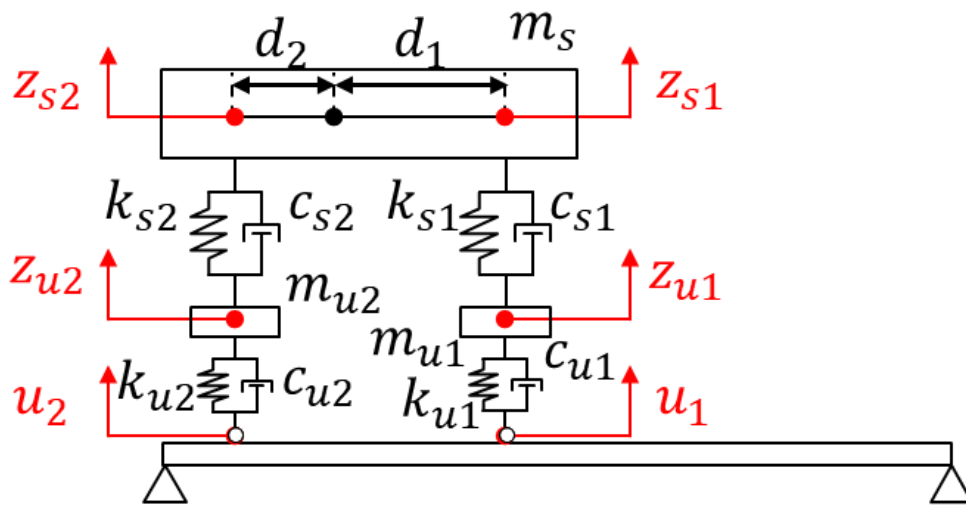


図 2-1 本研究で用いた車両モデルの概要

表 2-1 各マトリクスの要素

| | $[]_v$ | $[]_p$ |
|-----|--|--|
| M | $\begin{bmatrix} \frac{d_2 m_s}{d_1 + d_2} & 0 & \frac{d_1 m_s}{d_1 + d_2} & 0 \\ \frac{I_s}{d_1 + d_2} & 0 & -\frac{I_s}{d_1 + d_2} & 0 \\ 0 & m_{u1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{u2} \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} \frac{d_2 m_s}{d_1 + d_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{u1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{d_1 m_s}{d_1 + d_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{u2} \end{bmatrix}$ |
| C | $\begin{bmatrix} c_{s1} & -c_{s1} & c_{s2} & -c_{s2} \\ d_1 c_{s1} & -d_1 c_{s1} & -d_2 c_{s1} & d_2 c_{s2} \\ -c_{s1} & c_{s1} + c_{u1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_{s2} & c_{s2} + c_{u2} \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{u1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{u2} \end{bmatrix}$ |
| K | $\begin{bmatrix} k_{s1} & -k_{s1} & k_{s2} & -k_{s2} \\ d_1 k_{s1} & -d_1 k_{s1} & -d_2 k_{s1} & d_2 k_{s2} \\ -k_{s1} & k_{s1} + k_{u1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_{s2} & k_{s2} + k_{u2} \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{u1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{u2} \end{bmatrix}$ |

$$\mathbf{Z}(t) = \{z_{s1}(t) \ z_{u1}(t) \ z_{s2}(t) \ z_{u2}(t)\}^T$$

2.2 車両-橋梁相互作用

車両と橋梁の応答は、その 2 つの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^[13]が用いられている。その過程を図 2-2 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。

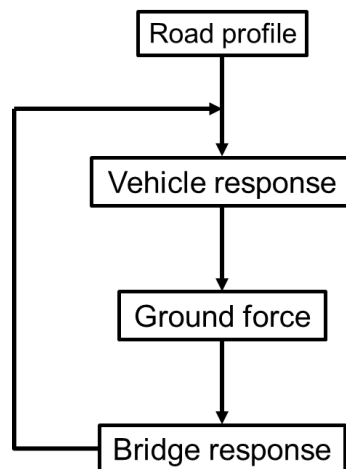


図 2-2 車両-橋梁相互作用システムの解法

2.3 数値シミュレーションモデルの検証

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、解析解のよく知られた単純梁について数値計算を行い解析解と比較する。

単純梁の中央部に 50[kN]の静的荷重を加えたときの中央部の変位の結果を図 2-3 に示す。単純梁の平衡状態時の変位は 1.8×10^{-3} [m]となり、解析解と一致することが確認できた。

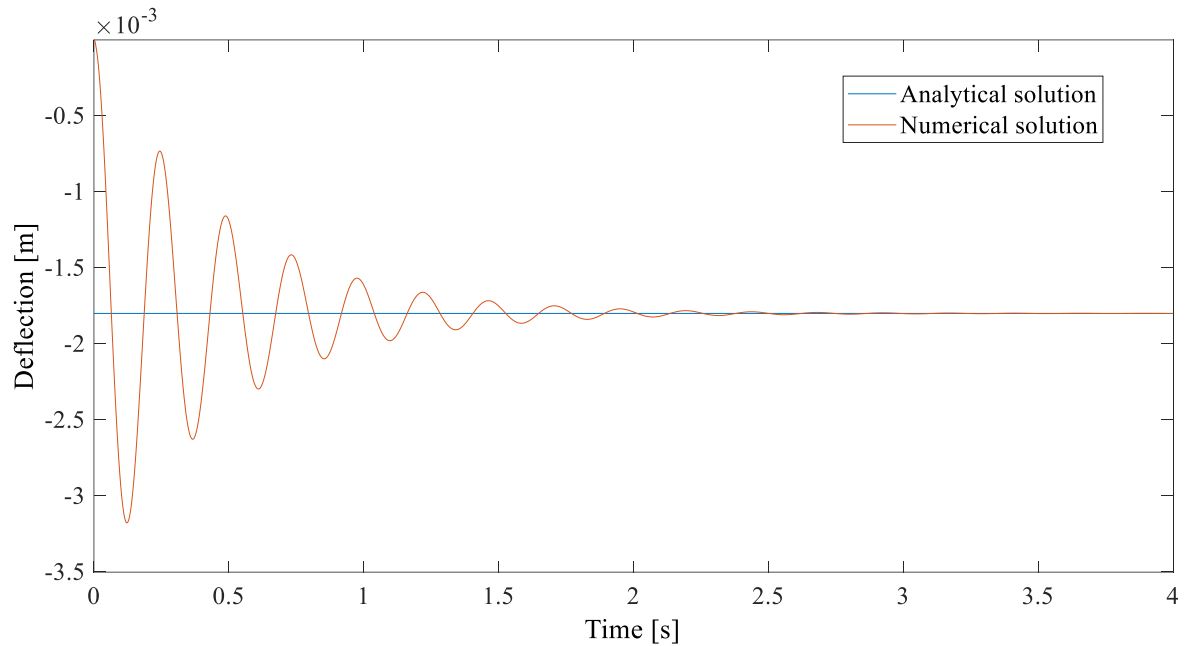


図 2-3 静的荷重を与えた際の単純梁のたわみ

第3章 車両重量推定手法

3.1 車両重量推定フロー

数値シミュレーションにより橋梁上を車両が走行した際の運動を再現する。この際路面には路面凹凸を与えた。走行させた際に橋梁の6等分点での橋梁の加速度振動データを得る。また、橋梁と車両のパラメータは乱数で発生させて仮定する。橋梁の各加速度振動データと路面凹凸、ランダムに仮定したパラメータを用いて、再度車両についての数値シミュレーションを行い車両の加速度振動を計算する。更に、その得られた車両の加速度振動とランダムで与えた各パラメータを用いて、橋梁についての数値シミュレーションを行うことで橋梁の加速度振動を計算する。

こうして得られた橋梁の加速度振動は与えたパラメータが正解値ならばはじめに観測値として使用した橋梁の加速度振動と一致するはずである。つまり、推定する橋梁の加速度振動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推定することが可能である。本研究ではパラメータの最適化手法として粒子群最適化^[14] (Particle Swarm Optimization 以下 PSO 法) を用いる。

パラメータ同定フローの概略図を図 3-1 に示す。

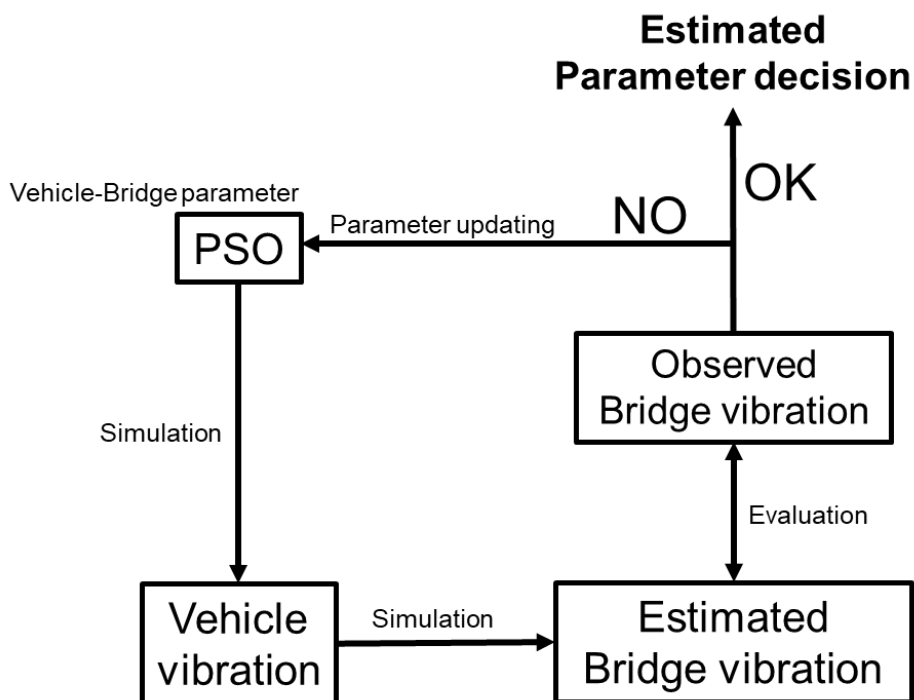


図 3-1 パラメータ同定フローの概略図

本研究で用いた数値シミュレーションでの車両と橋梁のパラメータを表 3-1、表 3-2 に示す。

表 3 1 車両のパラメータ

| | | | |
|---|-------|-------------------------------|-------------------|
| バネ上質量 ms [kg] | 7800 | バネ定数(上) $ks1, ks2$ [N/m] | 1.0×10^6 |
| バネ下質量 $mu1, mu2$ [kg] | 1100 | バネ定数(下) $ku1, ku2$ [N/m] | 3.5×10^6 |
| 断面二次モーメント I_V [kg m ²] | 65000 | 減衰係数 (上) $cs1, cs2$ [kg/s] | 1.0×10^4 |
| 前軸から重心位置までの 距離 $d1$ [m] | 1.875 | 減衰係数(下) $cu1, cu2$ [kg/s] | 3.0×10^4 |
| 後軸から重心位置までの 距離 $d2$ [m] | 1.875 | 車両速度 v [m/s] | 10 |

表 3 2 橋梁パラメータ

| | |
|----------------------------|------------------------|
| 橋長 [m] | 30 |
| 要素数 | 6 |
| 要素の長さ[m] | 5 |
| 剛性 EI [Nm ³] | 1.560×10^{10} |
| 単位長さあたりの質量 ρA [kg/m] | 3.0×10^3 |

3.2 橋梁振動算出手順

式(3)において $\mathbf{u}(t)$, $\dot{\mathbf{u}}(t)$ は

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{r}(t) + \mathbf{Y}(t) \quad (5)$$

$$\dot{\mathbf{u}}(t) = \dot{\mathbf{r}}(t) + \dot{\mathbf{Y}}(t) \quad (6)$$

と表され, ここで $\mathbf{r}(t)$ は路面凹凸であり, $\dot{\mathbf{r}}(t)$, $\dot{\mathbf{Y}}(t)$ は計算することができる. (5) (6)を(3)へ代入すると,

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{Z}}(t) + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{Z}}(t) + \mathbf{K}_v \mathbf{Z}(t) = \mathbf{C}_p(t) \{\dot{\mathbf{r}}(t) + \dot{\mathbf{Y}}(t)\} + \mathbf{K}_p \{\mathbf{r}(t) + \mathbf{Y}(t)\} \quad (7)$$

と表せる. この式に Newmark- β 法を適用し $\ddot{\mathbf{Z}}(t)$, $\dot{\mathbf{Z}}(t)$, $\mathbf{Z}(t)$ を求める.

$$\ddot{\mathbf{Z}}_k = \left(\mathbf{M} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{C} + \frac{(\Delta t)^2}{4} \mathbf{K} \right)^{-1} (\mathbf{P}_k + \mathbf{C} \mathbf{B}_c + \mathbf{K} \mathbf{B}_k) \quad (8)$$

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

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{Z}_{k-1} + \dot{\mathbf{Z}}_{k-1} \Delta t + \frac{\ddot{\mathbf{Z}}_{k-1} + \ddot{\mathbf{Z}}_k}{4} (\Delta t)^2 \quad (10)$$

ここで \mathbf{Z}_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. また上の式の \mathbf{B}_c , \mathbf{B}_k は以下の式で表される.

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

$$\mathbf{B}_k = -\mathbf{u}_{k-1} - \dot{\mathbf{u}}_{k-1}\Delta t - \frac{\ddot{\mathbf{u}}_{k-1}}{4}(\Delta t)^2 \quad (12)$$

得られた車両の加速度応答 $\ddot{\mathbf{Z}}(t)$ を式(2)に代入して、 $\mathbf{P}(t)$ を求める。式(1)に式(2)を代入して、

$$\mathbf{M}_b\ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{C}_b\dot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}_b\mathbf{y}(t) = \mathbf{L}(t)\mathbf{M}_p(\mathbf{g} - \ddot{\mathbf{Z}}(t)) \quad (13)$$

式(13)に Newmark- β 法を用いて、 $\ddot{\mathbf{Y}}(t)$ を求める。

3.3 パラメータ最適化

PSO 法は解空間の中に粒子を複数配置し、それらの粒子が相互に情報交換を行うことで、解空間を探索し、最適化問題の近似解を得る事のできる手法であり、群知能の 1 つである。1995 年に J.Kennedy と R.C.Eberhart ら^[14]によって提案された。各粒子は速度と位置を持っており、それぞれ i 番目の粒子の $t + 1$ 回目の更新は以下の式で行われる。

$$v_i^{t+1} = wv_i^t + c_1r_1(P_i^t - x_i^t) + c_2r_2(G - x_i^t) \quad (14)$$

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1} \quad (15)$$

ここで、 w は慣性速度定数、 c_1, c_2 は加速度定数、 r_1, r_2 は $[0,1]$ の一様乱数である。また、 P は自身の探索過程における最良の位置ベクトル、 G 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、最終的な G を最適解の近似解とみなすことができる。

また、粒子群内での i 番目の粒子を $x^{(i)}$ とすると、

$$x^{(i)} = \{m_s, m_{u1}, m_{u2}, I_V, c_{s1}, c_{s2}, k_{s1}, k_{s2}, c_{u1}, c_{u2}, k_{u1}, k_{u2}, EI, \rho A\}^{(i)} \quad (16)$$

で表される。

はじめに観測した橋梁の振動 $\dot{\mathbf{y}}(t)$ を $\ddot{\mathbf{y}}(t)$ とおくと、2つの振動の誤差は

$$F(x_i) = \sum (\ddot{\mathbf{y}}(t) - \dot{\mathbf{y}}(t))^2 \quad (17)$$

と表すことができる。本研究ではこの式(14)を目的関数とし、目的関数が最小となるような車両-橋梁パラメータを探索する。

第4章 提案手法の適用検証

PSO 法による車両重量の推定プロセスを以下に示す。

- [1] 規定した空間に式(16)で表される粒子をN個発生させる。
- [2] 粒子ごとに、3.2 に従って橋梁振動を算出し、式(17)によって目的関数の値を得る。
- [3] 式(14)、式(16)に従って各粒子の位置、速度の更新を行う。
- [4] 指定した試行回数[2]に戻り、同じプロセスを繰り返す。

$$v_i^{t+1} = wv_i^t + c_1r_1(P_i^t - x_i^t) + c_2r_2(G - x_i^t) \quad (14)$$

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1} \quad (15)$$

$$x^{(l)} = \{m_s, m_{u1}, m_{u2}, I_V, c_{s1}, c_{s2}, k_{s1}, k_{s2}, c_{u1}, c_{u2}, k_{u1}, k_{u2}, EI, \rho A\}^{(l)} \quad (16)$$

$$F(x_i) = \sum (\ddot{\mathbf{y}}(t) - \dot{\mathbf{y}}(t))^2 \quad (17)$$

4.1 提案手法での車両重量推定の結果と考察

各パラメータにおいてある程度の情報がある場合を想定し、全パラメータを表 3-1、表 3-2 に示す正解値の 75%~125%で与え提案手法を適用し車両重量を推定した。また、粒子の数と粒子の位置の更新回数は 100 とした。また、式(17)で目的関数の値を計算する際には、橋梁を 6 等分し、ピン支持されている 2 点を除いた 5 点分の加速度振動の誤差の和としている。

全パラメータの推定結果をそれぞれの正解値で除し、百分率で図 4-1、に示す。また、 M 、 m_s 、 m_{u1} 、 m_{u2} の推定結果を表 4-1 に示す。

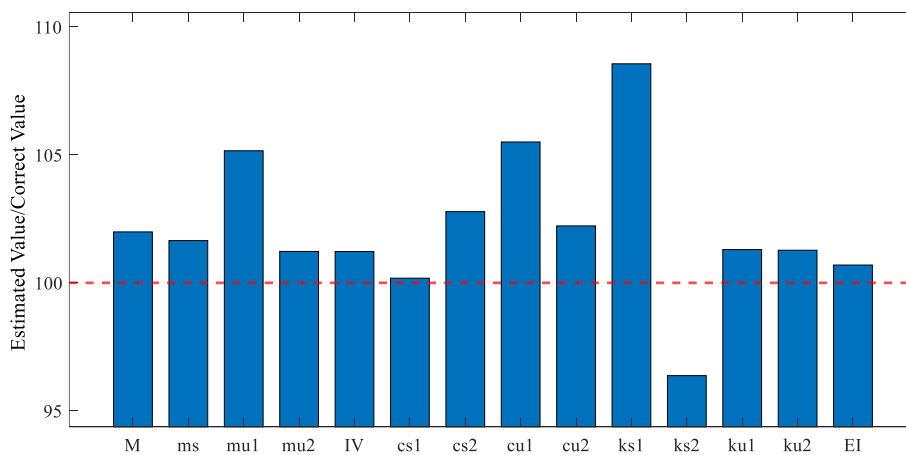


図 4-1 正解値の 75%~125%を与えたときの推定結果

表 4-1

M 、 m_s
 m_{u1} 、 m_{u2} の
推定結果 1

| | |
|--------------|-------|
| M [%] | 102 |
| m_s [%] | 101.6 |
| m_{u1} [%] | 101.2 |
| m_{u2} [%] | 105.2 |

ここで M は m_s と m_{u1} 、 m_{u2} を足した車両の総重量である。 M 、 m_s 、 m_{u1} 、 m_{u2} の推定結果を表 4-1 に示す。誤差は 1%~5%程度であり概ね車両重量は推定できている。しかし、今回の場合では探索範囲がそこまで広くないため、ある程度の精度を出せた可能性があるため、次に全パラメータを正解値の 50%~150%で与え本手法を適用した。粒子数、更新回数はいずれも 100 のままとした。パラメータの与える範囲が広がったが粒子数、更新回数を変更していない

め、精度が下がることが予想される。全パラメータの推定結果を図 4-2 に示す。また、 M , m_s , m_{u1} , m_{u2} の推定結果を表 4-2 に示す。

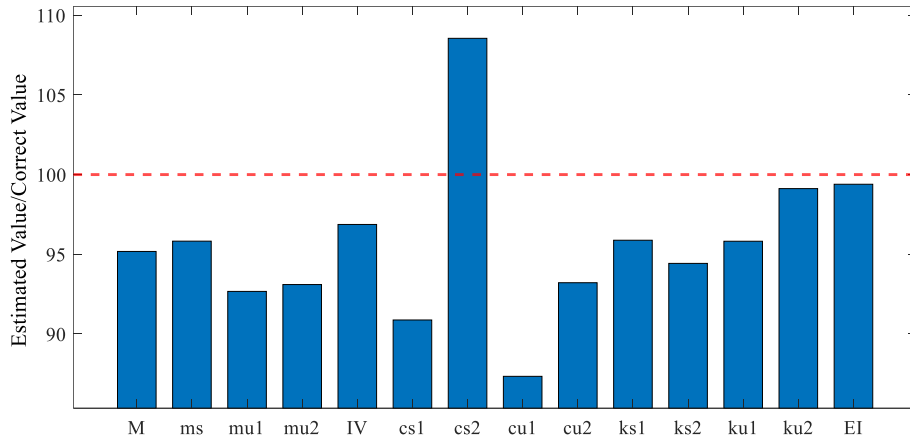


図 4-2 正解値の 50%~150%を与えたときの推定結果①

表 4-2

M , m_s
 m_{u1} , m_{u2} の
推定結果 1

| | |
|--------------|------|
| M [%] | 95.1 |
| m_s [%] | 95.8 |
| m_{u1} [%] | 96.9 |
| m_{u2} [%] | 92.7 |

それぞれのパラメータの推定精度が前回のパターンよりも低くなっていることを確認できた。これは、探索範囲に対して粒子数が少ないことに起因していると考えられるため、次に、パラメータの与え方はそのまま粒子数と更新回数を増加させ推定精度を上げることができるとどうか検証する。図 4-3 に全パラメータの推定結果を、表 4-3 に M , m_s , m_{u1} , m_{u2} の推定結果を示す。

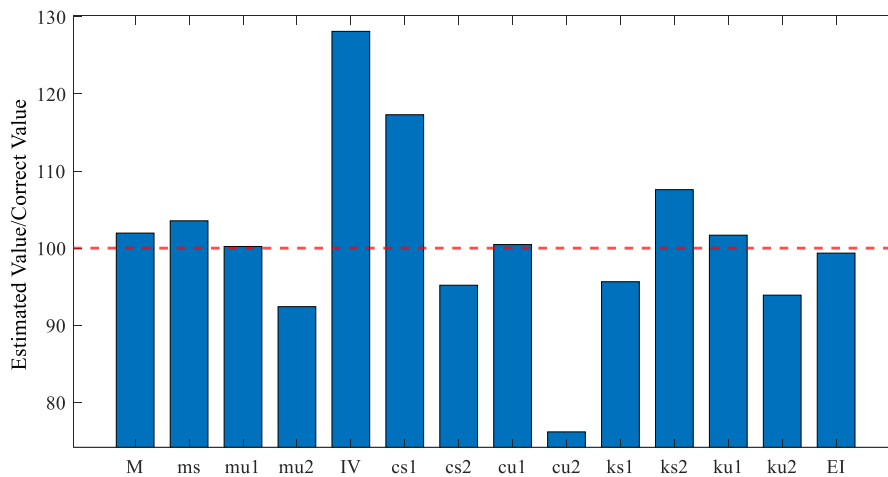


図 4-3 正解値の 50%~150%を与えたときの推定結果②

表 4-3

M , m_s
 m_{u1} , m_{u2} の
推定結果 1

| | |
|--------------|-------|
| M [%] | 101.9 |
| m_s [%] | 103.5 |
| m_{u1} [%] | 100.2 |
| m_{u2} [%] | 92.4 |

粒子数と更新回数を上げることで車両重量の推定精度を上げることができた。いずれの場合も車両の剛性や減衰の推定精度よりも車両重量の推定精度が高い原因としては、車両重量が橋梁の振動へ与える影響が大きいため、粒子の車両重量方向への感度が高くなり正解値へたどり着くことができたのではないかと考えた。

また図 4-3 での橋梁中央部分の加速度振動波形の観測値と正解値の比較を図 4-4 に示す。多少の誤差はあるもの概ね良好な一致が見られる。

以上のことから提案手法での車両重量推定の可能性が示唆された。次章では実環境実験での提案手法の適用性を検証する。

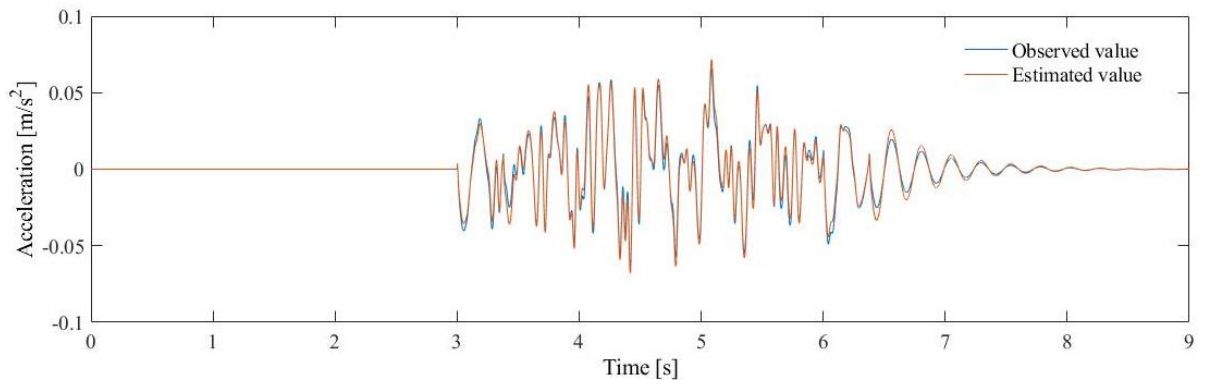


図 4-4 加速度振動の観測値と推定値の比較

第5章 提案手法の実実験への適用

5.1 実験概要

5.1.1 対象橋梁

本章では提案手法を実橋梁へ適用し，得られたデータから走行車両の車両重量の推定を試みた．橋梁は，茨城県道 24 号線にかかる，筑波大学内道路かえで通り内の陸協である松美橋（図 5-1）を対象橋梁とした．松美橋は全長約 31m の箱桁橋である．断面図と平面図を図 5-2 に示す．平面図中の赤点は今回の実験でのセンサ取り付け位置を表し，青の矢印は車両の走行方向を表している．センサ設置位置は橋梁全スパンを 6 等分した 5.28m ごとの 5 点に設置し，車両が橋梁へ入退出する時刻を計測するために橋梁ジョイント部分の橋梁進入側と退出側の 2 点にもセンサを設置し加速度振動を計測した．



図 5-1 松美橋

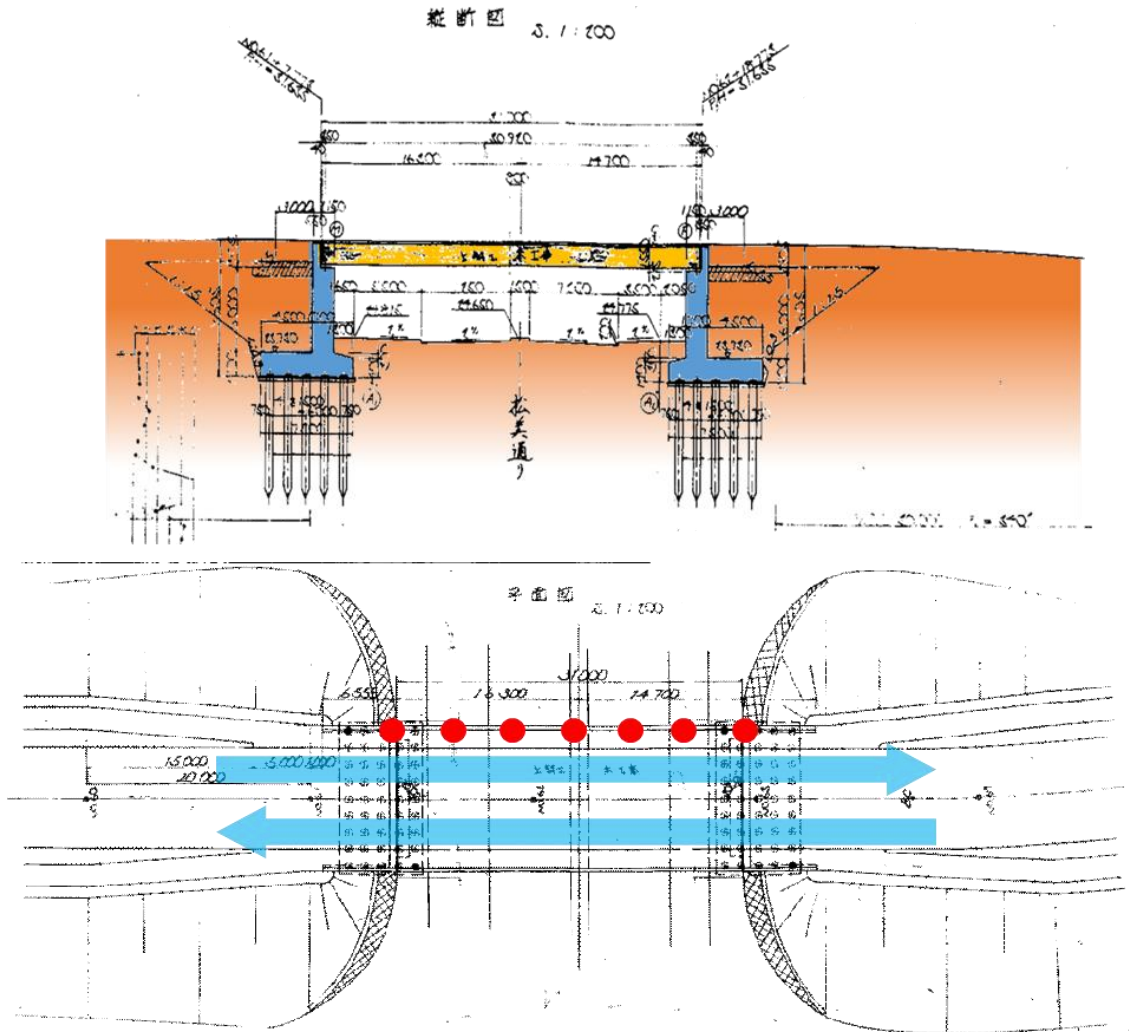


図 5-2 松美橋の断面図と平面図

5.1.2 加速度振動計測

本研究では設置が容易かつ、安価な MEMS センサを開発し、車両通行時の橋梁加速度振動を計測した。センサはサンプリング周波数 300Hz で加速度振動を取得した。今回使用したシステムはすべての MEMS センサが PC と無線で接続されており、PC からの計測開始時刻を MEMS センサ側に送信しそれぞれの MEMS センサが、その時刻から計測を開始するため、加速度振動データはすべて時刻同期が行われたデータである。実験時の MEMS センサの橋梁への設置の様子と MEMS センサの詳細を図 5-3 に示す。橋梁への設置は建材用両面テープを使用した。それぞれの MEMS センサの電源はモバイルバッテリーを使用した。

計測したデータは SD カードに記録される。また図 5-3 の赤い丸で囲った部分は加速度センサ部分であり、黄色い四角で囲った部分は GPS 取得用のパーツである。マイコン側の基盤は市販の GR-PEACH を用い、加速度センサや、GPS 用のパーツなどを取り付けるための基盤は、著者らが独自に開発した。本研究で使用した MEMS センサ部品の一覧を表 5-1 に示す。

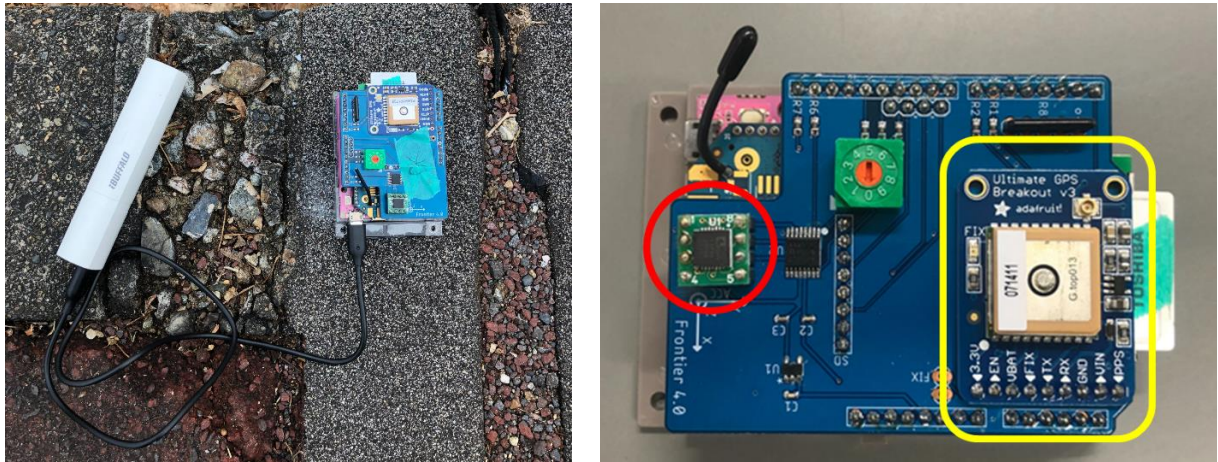


図 5-3 橋梁への MEMS センサの取り付けと概観

表 5-1 使用した MEMS センサ部品一覧

| | |
|-----------|---|
| センサ基盤 | GR-PEACH (C1S15380000025) |
| 加速度センサ | 3 軸加速度センサモジュール(KXR94-2050) |
| GPS モジュール | Adafruit Ultimate GPS Breakout 66 channel w/10 Hz updates -Version 3 (MTK3339) |
| 無線モジュール | XBEE ZB S2C モジュール ワイヤーアンテナタイプ (XB24CZ7WIT-004) |

5.1.3 対象車両

本研究の対象車両として、筑波大学内を循環する路線バスとした。バスの外観を図 5-4 に示す。対象車両をバスにした理由としては、重量が十分大きいため橋梁の加速度振動成分が励起されやすく、加速度波形の切り出しが容易であることがあげられる。

また車両の型番は QPG-LV234N3^[15]であり、型番から車両重量は 10190kg、軸間距離は 5.3 m と把握することができたため今回はこの値を用いた。



図 5-4 対象車両外観図

5.1.4 路面凹凸の計測

本研究での提案手法では、橋梁とその付近の路面凹凸を既知として扱っているため、実際に路面凹凸を計測した。計測機器は、八千代製作所の 3m プロフィールメーターを使用した。計測機器の外観を図 5-5 に示す^[16]。本計測機器は、路面の平坦性を測定するもので、前後の基本台車を 1 本の基準台枠で連結し、中央部に路面の凹凸により上下する走狗低車輪がありこの動きを記録計に導くことで路面凹凸波形を記録することができる。



図 5-5 3m プロフィールメーターの外観図

実際に計測された路面凹凸を図 5-6 に示す。

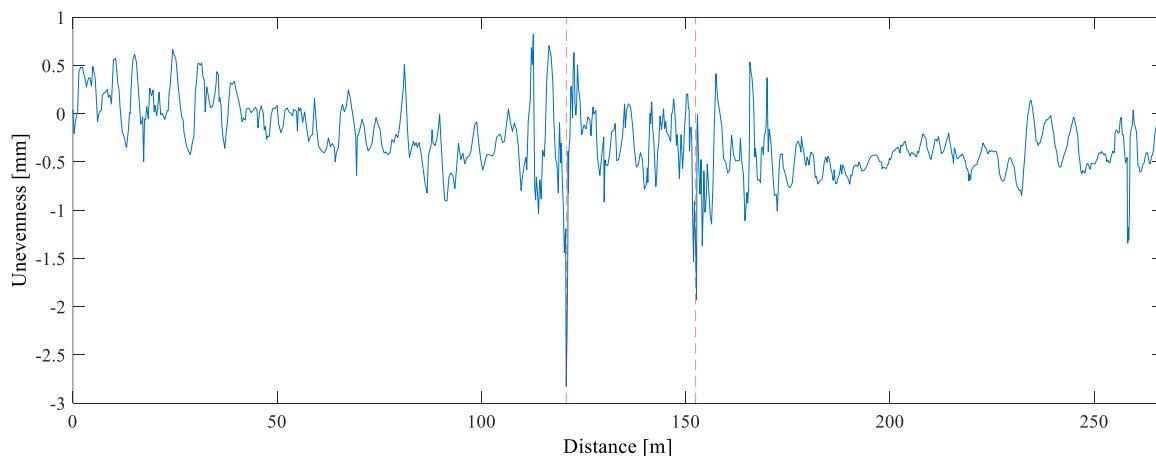


図 5-6 計測した路面凹凸

図の赤の点線は、橋梁に進入する部分と退出する部分を表しており、橋梁のジョイント部である。本章では得られたこれらの路面凹凸データを車両への強制変位入力として与えた。

5.2 実車両への提案手法の適用

本研究では、車両の速度と位置を既知として扱うため、それらの情報を得る必要がある。そのため、橋梁の進入部分と退出部分に MEMS センサを設置し、得られた加速度波形から車両が橋梁へ進入時と退出時の時刻を計測し、そこから車両の走行速度を計算した。計測したジョイント部分の加速度データの中で、バスが橋梁を通過した範囲を切り出したものを図 5-7 に示す。

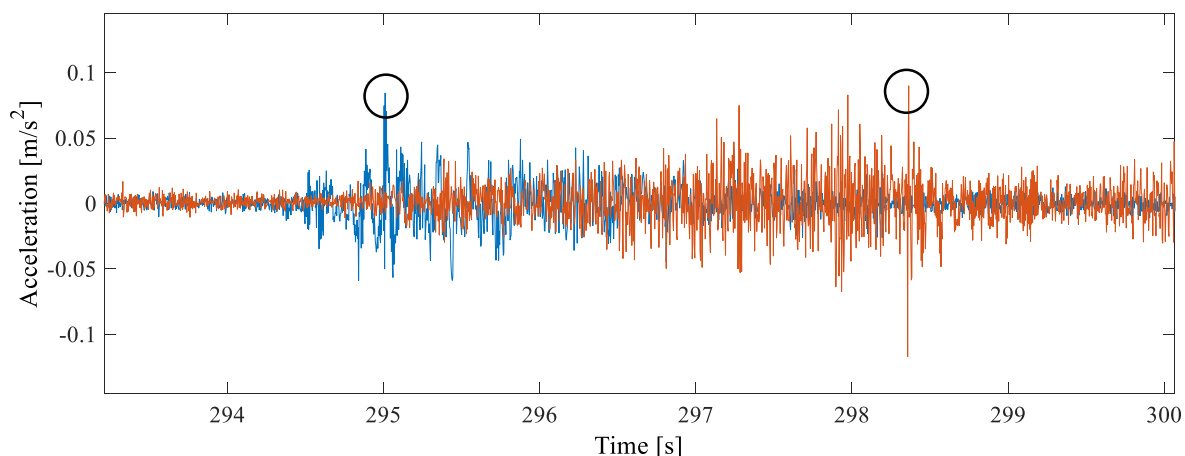


図 5-7 進入・退出部分の加速度波形

青線が橋梁進入側においた MEMS センサの加速度振動波形であり、赤線が退出側の加速度振動波形である。本研究では、図中の丸で示した部分をバスの後軸の橋梁への進入・退出の時刻とした。理由としては路線バスなどでは前軸重と比較して後軸重が大きいことが知られており、後軸が橋梁のジョイントを超えた際に加速度振動が卓越すると考えたためである。得られたデータからバスの速度を計算すると $9.45[\text{m/s}]$ であることがわかった。これは時速 $34.03[\text{km/h}]$ であり、極めて妥当な数字と言える。バスは等速で移動していると仮定し、橋梁

へ進入した時刻とバスの速度から、各時刻でのバスの前後輪の位置を算出した。これにより本手法の適用へ必要な、時刻データ、橋梁の振動データ、車両の位置データ、路面凹凸が揃った。

5.3 実車両の車両重量推定結果と考察

本章で正解値として与えた車両・橋梁の各パラメータを表 5-2, 表 5-3 に示す。ms, mu1, mu2の合計値が 10190[kg]となるようにした。

表 5-2 車両のパラメータ

| | | | |
|---|-------|-------------------------------------|-------------------|
| バネ上質量 m_s [kg] | 7990 | バネ定数(上) k_{s1}, k_{s2} [N/m] | 1.0×10^6 |
| バネ下質量 μ_1, μ_2 [kg] | 1100 | バネ定数(下) k_{u1}, k_{u2} [N/m] | 3.5×10^6 |
| 断面二次モーメント I_V [kg m ²] | 65000 | 減衰係数 (上) c_{s1}, c_{s2} [kg/s] | 1.0×10^4 |
| 前軸から重心位置までの 距離 d_1 [m] | 3.18 | 減衰係数(下) c_{u1}, c_{u2} [kg/s] | 3.0×10^4 |
| 後軸から重心位置までの 距離 d_2 [m] | 2.12 | 車両速度 v [m/s] | 9.45 |

表 5-3 橋梁パラメータ

| | |
|----------------------------|------------------------|
| 橋長 [m] | 31.68 |
| 要素数 | 6 |
| 要素の長さ[m] | 5.28 |
| 剛性 EI [Nm ³] | 1.560×10^{10} |
| 単位長さあたりの質量 ρA [kg/m] | 3.0×10^3 |

本章ではパラメータの正確な正解値がわからないため与える範囲を 50%~150%と広めにり、粒子数・更新回数とともに 200 とすることで探索可能範囲を広げ、本来の正解値へとたどり着くことが可能なようにした。

得られた各パラメータの推定結果を図 5-8 に示す。

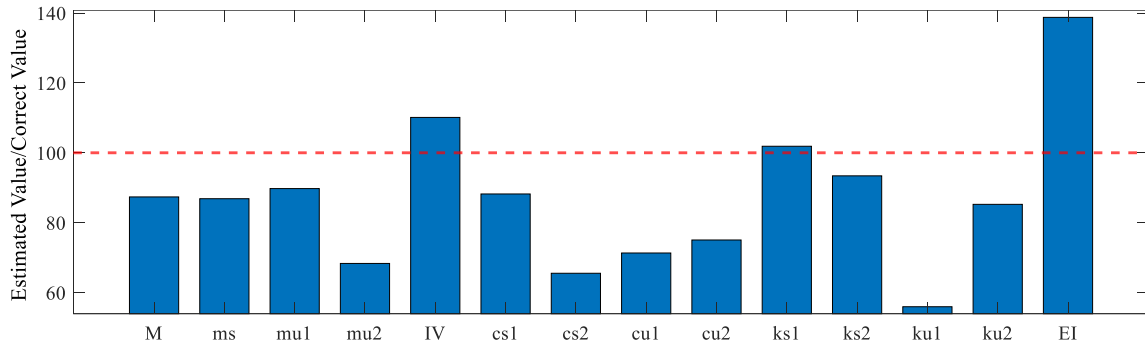


図 5-8 各パラメータの推定結果

シミュレーション時と比較して推定精度が低いことがわかる。推定した橋梁加速度振動と計測した車両振動を比較した図を図 5-9 に示す。2 つの加速度振動波形の一致度はかなり低く、また、観測した加速度振動と比較して推定した加速度振動は振動数が低く、また波の振幅も小さいことがわかった。この原因としては推定する際に考えている橋梁のモデルが 1 次元の梁要素モデルであることが考えられる。モデルをより現実の橋梁近づけることで推定加速度振動波形を観測した波形に近づけられる可能性がある。また、今回の実験において加速度を計測した点が欄干の下であったことも原因として考えられる。計算時には橋梁が下にたわむことで発生する加速度振動のみ考慮しているが、実際には橋梁の左車線を通行するバスにより橋がねじれることによって加速度振動が発生する。これは橋長と比べて橋幅が短いのでたわみの振動よりもねじれによる振動数が高いことが考えられる。

以上のことからパラメータの一致度、つまり加速度振動波形の一致度を高めるためには、モデルの拡張や、詳細設計などが必要になってくるのではないかと考える。

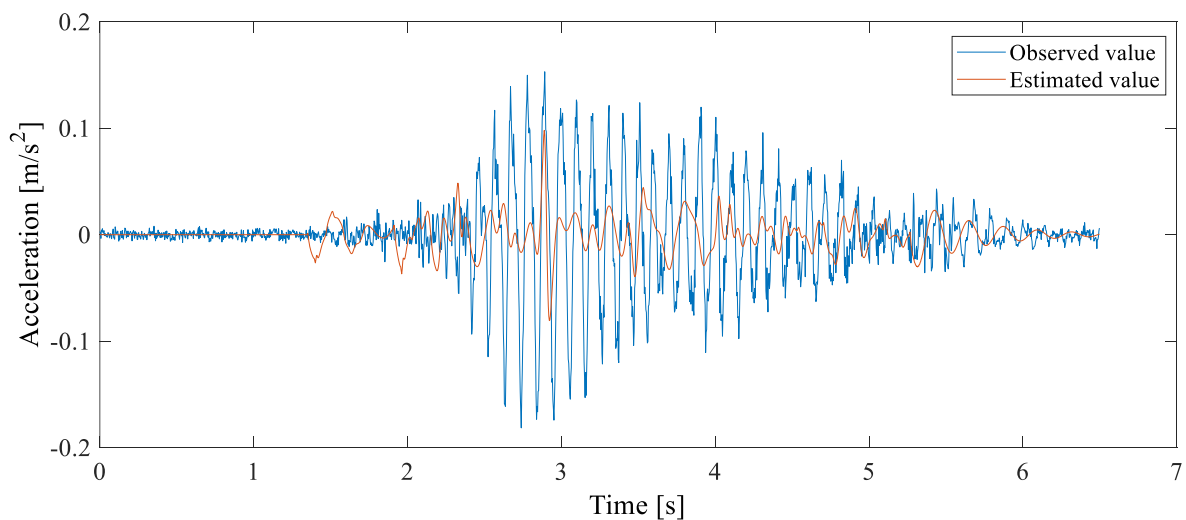


図 5-9 橋梁中央部での観測値と推定値の加速度振動波形の比較

第6章 まとめ

本研究では、まず提案した車両重量推定手法の適用性検証を数値シミュレーション上で行った。次に実橋梁と、実車両において MEMS センサにより得られた加速度振動による車両重量推定を試みた、得られた知見を以下にまとめる。

1. 1次元の梁要素の橋梁モデルとハーフカーモデルを採用した数値シミュレーションによって得られた橋梁の加速度振動を用いて、ある程度各パラメータの事前情報があると仮定した場合、PSO法により正解値の車両重量を精度良く推定することができた。
2. 事前情報がないとしてパラメータの与える範囲を広くした場合でも、粒子数と更新回数を増やすことで、車両重量の推定を精度良く行うことができた。
3. 実橋梁と実車両において提案手法の検討を行ったが車両重量の推定精度は低く、本研究で用いた車両-橋梁モデルでは推定が難しいことがわかった。加速度振動の推定精度を上げるためには、更にモデルを現実に近いものにする必要があると考えられる。

謝辞

本研究に際して、丁寧なご指導を頂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。特に山本先生には学内の研究だけでなく、国外の活動にも挑戦する機会をいただき、研究以外の面でも成長することができました。実験にご協力いただきました山本研究室の皆様、日々の生活から研究までお世話になったフロンティア工学研究グループの皆様に心よりお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 国土交通省, 道路メンテナンス年報データ集 (集計表), 2018
- [2] 国土交通省, 老朽化の現状・老朽化対策の課題
- [3] 尾藤文人, 阪井暖子, 田中文夫, 社会資本の維持管理・更新のための主体間関係に関する調査研究 (中間報告) 国土交通政策研究所報第 56 号, 2015 年春季, pp.48-67
- [4] 国土交通省道路局, 道路橋定期点検要領, 2014
- [5] 川西寛, 丸山收, 三木千壽, 市町村の橋梁点検業務の費用分析と対策について, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.459-471, 2016
- [6] 小林裕介, 三木千壽, 田辺篤史: リアルタイム全自動処理 Weigh-In-Motion による長期交通荷重モニタリング, 土木学会論文集 No.773/I-69, pp.99-111,
- [7] Fred Moses (1979). Weight in Motion System Using Instrumented Bridges, *Transportation Engineering, Proceeding of ASCE*.Vol.105, No. TE3, pp233-249
- [8] 関屋英彦, 小西拓洋, 木ノ本剛, 三木千壽, "MEMS 加速度センサを用いた変位計測に基づく Portable-Weight-In-Motion システム" の提案, 土木学会論文集 A1 (構造地盤工学), Vol.72,No.3,364-379,2016.
- [9] L.Deng, C.S.Cai,"Identification of parameters of vehicles moving on bridges," *Engineering Structures* 31(2009),pp.2474-2485
- [10] 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
- [11] 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・路面パラメータ同定" 2019
- [12] Kyosuke Yamamoto," Bridge Damage Identification Using Vehicle Response",2012
- [13] M.F.Green, D.Cebon,"Dynamic interaction between heavy vehicles and highway bridges," *Computers & Structures* 62(1997),pp.253-264
- [14] J.Kennedy, R.C.Eberhart,"Particle swarm optimization,"in *Proc. of IEEE Int.Conf.on Neural Networks*,pp.1942-1948,1995
- [15] http://www.env.go.jp/air/car/vehicles2014/LEV_chapter2-7.pdf
- [16] <https://www.ywco.co.jp/uploads/KKY3A.pdf>