

橋梁・車両振動を用いた橋梁のパラメータ推定 Parameter identification of bridge utilizing bridge and vehicle vibration

大村 怜

Rey OHMURA

(指導教員 山本 亨輔)

ABSTRACT – There are around 700,000 bridges in Japan and there is a large demand for new ways of inspecting these bridges in a cost-efficient manner. While bridge screening methods based on vehicle response has been intensively studied, there is more room for improvement in the accuracy of the estimation. In this study, both the acceleration response of the car and the bridge was measured in order to increase the number of the known values. A new MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) sensor was designed featuring a wireless control function and a time synchronization function. To estimate the flexural rigidity distribution of the bridge as well as the car's profile, Particle Swarm Optimization method is applied. Parameters are optimized to reduce the difference between the road profile estimated from each axle. The results show good match between each estimated profile and a likely distribution in flexural rigidity, but the several technical issues still remain.

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^[1]。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。そこで国土交通省により、5 年に 1 度の近接目視点検が義務付けられている^[2]。しかし近接目視点検をすべての橋梁に対して実施するには熟練技術者の数が不足しており、また多大な費用を必要とする。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の技術開発が課題である。

既往の研究では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ニタリングが行われている^[3]。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。また 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^[4]。しかし、中小スパンの橋梁は交通による振動が卓越しており、これらの振動は遷移応答であるため管理された外力を用いないとパラメータ推定ができないという問

題がある。また、橋梁・車両振動には車両の種類や車両速度、路面プロファイルなど様々な要因が関与するため、車両や橋梁の特性を直接、橋梁のみの振動から把握するのは困難であった。

そこで、本研究では橋梁と同時に車両の振動も計測して、得られたデータをもとに車両が橋梁に及ぼす影響を算出しながら橋梁のパラメータ推定を行うことを目標とする。そのためには車両と橋梁上で計測される加速度がすべて時刻同期している必要があり、さらに得られたデータをもとに車や橋梁のパラメータを推定する手法が必要とされる。

本研究で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) センサを用いた。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 センサとその制御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。橋梁上に 12 点、車両内に 4 点設置されたセンサはすべて無線通信規格 ZigBee を通じて制御用の PC に接続され、計測開始時

刻の同期を GPS モジュールから得られる時刻情報をもとに行われた。

既往の研究では、橋梁振動や車両振動から間接的に各橋梁の特性や状態を推定するための様々な手法が提案されている。Cai ら^[5]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、村上ら^[6]は車両振動に PSO(Particle Swarm Optimization)法を用いて、車両と橋梁のパラメータとともに路面プロファイルを推定している。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車両と橋梁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、橋梁振動に加えて時刻同期のとれた車両振動を用いていることが挙げられる。橋梁のパラメータや路面プロファイルが推定できることにより、橋梁の損傷検知に繋がるのが期待できる。

以下、2 章では車両と橋梁の力学的モデルと、橋梁のパラメータ推定に用いられた PSO 法、実橋試験に用いられた新しく開発された MEMS センサの計測システムについて解説する。3 章で本手法の妥当性を検証するために行った数値実験について説明し、4 章で実橋試験を通じて提案手法の精度を検証する。

2 基礎理論

2.1 車両・橋梁の力学モデル

(1) 車両と橋梁の運動方程式

本研究では、走行車両にハーフカーモデルを採用する。ハーフカーモデルとは図に示すような 4 自由度の車両運動モデルで、サスペンション上下の質量を分けてモデル化するため一般的な乗用車と同様の応答を持つ。このモデルの運動方程式は以下のように表せる。

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

ここで

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

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

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

$$\mathbf{Z}(t) = \begin{bmatrix} z_{s1} \\ z_{s2} \\ z_{u1} \\ z_{u2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{K}_U \mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} k_{u1} u_1(t) \\ k_{u2} u_2(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

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り、 $\mathbf{Z}(t)$ は車両応答である。 $\mathbf{K}_U \mathbf{u}(t)$ は車両への強制入力であり、 $\mathbf{u}(t)$ とは車両のばね下の変位を表す。 $\mathbf{u}(t)$ は以下の式のように車軸直下の路面プロファイルと橋梁の変位の和で表せる。

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{r}(t) + \tilde{\mathbf{y}}(t) \quad (7)$$

本論文で用いられる路面プロファイルという用語は路面上の凹凸を指す。

各マトリクス内のパラメータを図-1 に示す。

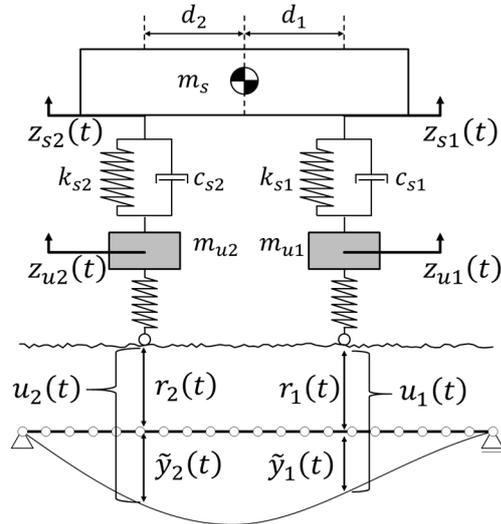


図-1 車両・橋梁モデル

橋梁は曲げのみを考慮した 1 次元単純梁とする。

$\mathbf{Y}(t)$ を橋梁の応答とすると、このモデルの運動方程式は以下の様に表せる。

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

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, 剛性マトリクスを用いた。また, 式(8)での $\mathbf{F}(t)$ は,

$$\mathbf{F}(t) = \mathbf{L}(t)\mathbf{M}_v(\mathbf{g} - \ddot{\mathbf{Z}}(t)) \quad (9)$$

と表される。ここで、 \mathbf{g} は重力加速度, $\ddot{\mathbf{Z}}(t)$ は車両の加速度振動である。また, $\mathbf{L}(t)$ は等価節点力分配マトリクスである。

さらに, 車両と橋梁の運動方程式を一つの式にまとめると, 以下のようになる。

$$\mathbf{M}(t)\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}(t)\mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (10)$$

ただし,

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_v & \\ \mathbf{L}(t)\mathbf{M}_v & \mathbf{M}_b \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_v & \\ & \mathbf{C}_b \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_v & \mathbf{K}_v\mathbf{L}(t) \\ & \mathbf{K}_b \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{f}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{P}(t) \\ \mathbf{L}(t)\mathbf{M}_v \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{Z} \\ \mathbf{Y} \end{bmatrix} \quad (15)$$

である。

(2) 車両-橋梁振動の相互作用システムの解法

車両と橋梁の振動は相互に影響するため直接に解析することは困難である。(10)式から示されるようにこの相互作用は非線形性を持つため反復法を用いてシミュレーションする。その工程のフローチャートを図-2に示す。

はじめに, 入力された路面プロファイルプロファイルのみから車両振動を Newmark- β 法を用いて計算する。計算された車両振動をもとに車両が橋梁に及ぼす力が導かれ, この接地点力をもとに橋梁の振動が計算される。再度, 路面プロファイルに橋梁振動が足しあわされた状態で上の工程が繰り返される。新しいサイクルで更新された振動と1サイクル前の振動があらかじめ決められた規定値より小さい差となった時に結果が収束したとみなして計算が終了する。

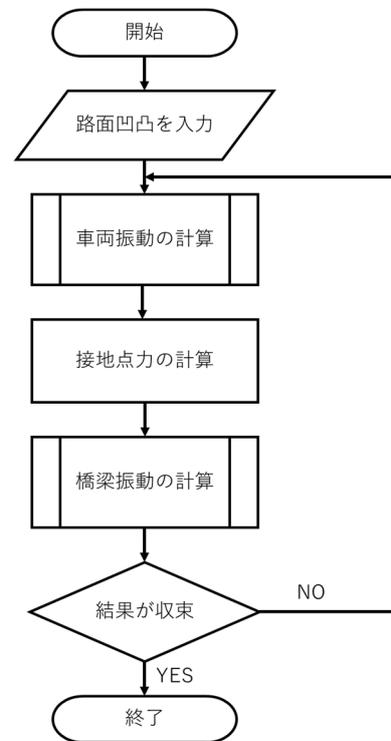
2.2 振動モニタリングへの PSO 法の適用

本節では橋梁の加速度振動, 車両の位置と加速度振動を既知として扱った際に橋梁の路面プロファイルを算出する手法について説明する。これらに加えて橋梁と車両のパラメータを仮定して与えて計算される

路面プロファイルは前後輪で一致しないため, 本研究では PSO 法を用いて前後輪から推定される路面プロファイルの一致度が高い組み合わせを探索する。

本研究では橋梁と車両のパラメータを推定する手法として PSO 法を採用した。粒子群最適化 (Particle Swarm Optimization^{[7])} 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 つであり, 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。

図-2 車両-橋梁相互作用のフローチャート



(1) Newmark- β 法

本研究では以下の式(10)と(11)に示される Newmark- β 法を用いて車両と橋梁の振動を加速度の値から数値積分して得る。

$$\dot{\mathbf{x}}_{k+1} = \dot{\mathbf{x}}_k + \Delta t(1 - \gamma)\ddot{\mathbf{x}}_k + \Delta t\gamma\ddot{\mathbf{x}}_{k+1} \quad (16)$$

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \Delta t\dot{\mathbf{x}}_k + \frac{(\Delta t)^2}{2}(0.5 - \beta)\ddot{\mathbf{x}}_k + \frac{(\Delta t)^2}{2}\beta\ddot{\mathbf{x}}_{k+1} \quad (17)$$

ここで, \mathbf{x}_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。

なお, 本研究では $\beta = 1/6$, $\gamma = 1/2$ の定数を用いた。

(2) $\tilde{\mathbf{y}}$ の導出

前述したように、(7)式の $\tilde{\mathbf{y}}(t)$ とは車軸の直下における橋梁の振動を表す。 $\dot{\mathbf{Y}}(t)$ をNewmark- β 法により積分した値 $\mathbf{Y}(t)$ は各計測地点における橋梁の変位を意味するため、車両の走行位置における変位に変換する必要がある。本研究ではこれを正確に推定するために橋梁のモード形状を用いた。

橋梁の曲げ剛性 EI と単位長さあたりの質量 ρA をもとに幾何剛性マトリクス \mathbf{K} と質量マトリクス \mathbf{M} がもたらまる。式(11)のように $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}$ マトリクスを固有値分解したときに、 $\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}$ の固有ベクトルを列にもつ \mathbf{V} マトリクスは橋梁のモード形状を表す。

$$\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} = \mathbf{V}\mathbf{S}\mathbf{V}^{-1} \quad (18)$$

得られたモード形状の次数が低いものから順に、 x 軸の位置 $x = 0, x = L$ が橋梁の両端となるようにスプライン補完したものをモード形状関数 $\varphi_k(t)$ とする。次元橋梁における車軸直下の変位 $\tilde{\mathbf{y}}(t)$ は、モード形状関数 $\varphi_k(t)$ と規準座標 $\mathbf{q}_k(t)$ の積和で以下のように表される。

$$\tilde{\mathbf{y}}(t) = \sum_{k=1}^n \varphi_k(t) \mathbf{q}_k(t) \quad (19)$$

$$\tilde{\mathbf{y}}(t) = \begin{bmatrix} \varphi_1(x_1) & \cdots & \varphi_n(x_1) \\ \varphi_1(x_2) & \cdots & \varphi_n(x_2) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{pmatrix} \quad (20)$$

(3) \mathbf{r} の導出

式(1)において、下2行について取り出して、 $\mathbf{r}(t)$ について整理すると以下の式(21)のようになる

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{K}_{U1}(\mathbf{M}_U \dot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{C}_U \dot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{K}_{U2} \mathbf{z}(t) - \tilde{\mathbf{y}}(t)) \quad (21)$$

ここで

$$\mathbf{K}_{U1} = \begin{bmatrix} 1/k_{u1} & \\ & 1/k_{u2} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{M}_U = \begin{bmatrix} m_{u1} & \\ & m_{u2} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\mathbf{C}_U = \begin{bmatrix} c_{s1} & \\ & c_{s2} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\mathbf{K}_{U2} = \begin{bmatrix} k_{s1} + k_{u1} & \\ & k_{s2} + k_{u2} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} z_{u1} \\ z_{u2} \end{bmatrix} \quad (26)$$

である。ここで算出される $\mathbf{r}(t)$ は時刻の関数であるため、橋梁内の x 座標について一次線形補間を施し、路面プロファイルを得る。

(4) パラメータの最適化

前節で述べたように橋梁と車両振動から橋梁の路面プロファイルが前後輪それぞれについて逆算されることが分かった。本研究ではPSO法を用いて前後輪の振動から推定された路面プロファイルの差が最小になるパラメータを探索する。

粒子群内での i 番目の粒子を $\mathbf{x}^{(i)}$ とすると、その位置は

$$\mathbf{x}^{(i)} = \{m_{u1}, m_{u2}, c_{s1}, c_{s2}, k_{s1}, k_{s2}, k_{u1}, k_{u2}, EI\}^{(i)} \quad (27)$$

で表される。ここで、 EI は橋を6等分した要素それぞれの曲げ剛性を示す。

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。

$$v_{ij}^{t+1} = w v_{ij}^t + c_1 r_1 (pb_{ij}^t - x_{ij}^t) + c_2 r_2 (gb_j^t - x_{ij}^t) \quad (28)$$

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1} \quad (29)$$

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 $[0,1]$ の一樣乱数である。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 は粒子群全体の探索過程における最良の位置ベクトルである。最終的な gb の値を最適解の近似解とみなす。

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、目的関数が最小となる値を探索する。

$$F(x_i) = \sum (r_{1i} - r_{2i})^2 \quad (30)$$

2.3 GPS時刻同期型センサ

本研究では実橋試験において車両と橋梁の振動をそれぞれ時刻同期したうえで計測するためのMEMSセンサを用いた計測システムを開発した。既往の研究でもMEMSセンサを用いた加速度計測のシステムは開発されていたが、それぞれが独立して動作するスタンドアローン型であったため計測の開始同期や計測中の動作状況の把握が困難であった⁸⁾。それらの問題を解決するためにメッシュ型ネットワークにより制御される加速度センサが開発された。センサの構成は以下の表-1の通りである。

以下に計測システムの詳細な仕組みを無線センサと制御 PC に分けて説明する。

(1)センサ

各センサはバッテリーに繋がれて電源が入ると、GPS モジュールが自己位置を正確に捕捉するまで待機する。複数の衛星からの測位が確認されると、制御 PC から Xbee(無線インターフェース)を通じて計測開始の指示が送られるまでさらに待機する。計測開始の指示には計測を開始する時刻のデータも送られるため、それぞれ計測開始時刻になると測定を始める。加速度の計測は 300 [Hz]で行われ、データが既定の行数に達すると自動的に計測が終了する。加速度計測の前後に GPS モジュールの測定した位置情報も記録する。

(2)制御用 PC

制御 PC ではビジュアルデザイン用のプログラミング言語「Processing」を用いて開発されたセンサの制御用の GUI アプリケーションが実行される。各センサからは個体識別番号、電源ステータス、GPS 測位ステータス、計測ステータス、エラーの有無の情報が Xbee を通じて送信される。PC 上の GUI では各センサのステータスを表示し、すべてのセンサが GPS 測位でき次第スタートの指示が送ることができる。スタートの指示には PC の時刻をもとに算出される計測開始時刻も含まれ、各センサはこのデータをもとに計測開始時刻の同期をとる。また、不測の事態に備えて全センサを遠隔でリセットする機能も実装されている。

部品名 (型番)	表-1 使用した MEMS センサ部品一覧 基本性能	説明
マイコンボード (GR-PEACH)	がじえつとルネサス社製のマイコンボード。Renesas Electronics 社製の MPU を搭載し、10MB の RAM と最大 400MHz の動作周波数を持つ。	Mbed の開発環境に対応しているためオンラインコンパイラが使用可能。AD コンバータとは SPI、GPS センサと Xbee モジュールとは UART で通信する。
加速度センサ (KXR94-2050)	Kionix 社製の 3 軸加速度センサ。アナログ出力で測定レンジは±2G。	本研究では橋梁と車両ばね上では鉛直方向のみを計測、車両ばね下は 3 軸とも計測。
AD コンバータ (ADS1220)	TI 社製の AD コンバータ。入力は 4Ch、分解能は 24bit で測定周期は最大で 2000SPS。	本研究では高分解能の加速度計測が重要であるためマイコン搭載の AD コンバータではなく専用のものを使用。
リニアレギュレータ (ADP150)	Mouser Electronics 社製の LDO リニアレギュレータ。入力電圧 2.2V~5.5V で動作し、出力電流は最大 150mA。	AD コンバータと加速度センサに十分安定した電力を供給するために実装。
GPS センサ (Adafruit Ultimate GPS)	Adafruit 社製の GPS センサ用ブレイクアウトボード。搭載チップは MTK3339 で更新レートの最大値は 10Hz。	衛星内の原子時計をもとに発せられる正確な 1Hz のパルスを出力する 1PPS 機能付き。
SD カードソケット (K-05818)	計測データを SD カードに保存するために使用。	マイコンに micro SD ソケットが搭載されているが Flash Air を使用するため実装。
SD カード (Flash Air)	容量は 16GB、クラス 10。計測データを保存するために使用。	無線 LAN 機能とマイコンを内蔵するためデータ集積などのタスクが自動化可能。
無線 IF (Xbee ZB S2C)	低電力、低損失な無線プロトコル「ZigBee」でのマイコン間の通信を可能にする。	制御 PC に接続されたモジュールを中心とした Xbee のメッシュネットワークを構築して使用。
ロータリースイッチ (42J02GB-GR)	0~9 の数字を設定できる 10 ポジションのロータリースイッチ。	デバッグ作業やセンサの入れ替えによるセンサの識別番号の割り当てを効率化するために実装。

3 検証

3.1 数値実験の概要

以下の表-2 と表-3 のような特性を持つ車両と橋梁のモデルを用いて、車両が橋梁上を走行した際の橋梁と車両の振動をシミュレーションした。

表-2 車両のパラメータ

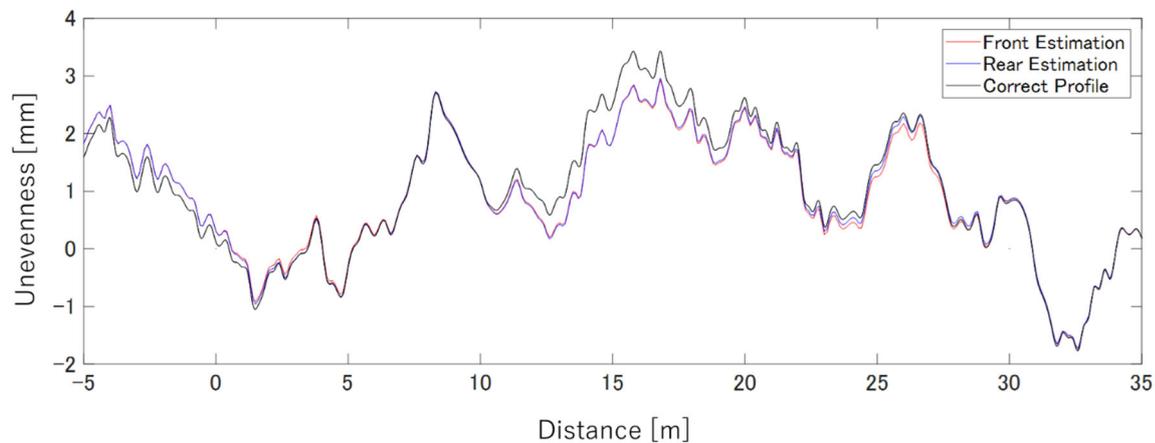
ばね上質量 m_s [kg]	9.0×10^3
ばね下質量 m_{u1}, m_{u2} [kg]	5.0×10^2
減衰定数 c_{s1}, c_{s2} [kg/s]	2.0×10^3
ばね定数(上) k_{s1}, k_{s2} [N/m]	4.5×10^3
ばね定数(下) k_{u1}, k_{u2} [N/m]	6.0×10^4
車軸の重心からの距離 d_1, d_2 [m]	1.75
車両速度 v [m/s]	10.0

表-3 橋梁のパラメータ

橋長 L [m]	30
曲げ剛性 EI [$N \cdot m^2$]	1.56×10^{11}
1メートルあたりの重量 ρA [kg/m]	3.0×10^3
節点数	5
要素数	6
各要素の長さ [m]	5

3.2 数値実験の結果

シミュレーションに用いた表-2 と表-3 のパラメータからなるハーフカーモデルの前後輪から推定された路面プロファイルと車両応答のシミュレーションに用いた正解値との比較を以下の図-3 に示す。橋梁は図の 0[m]~30[m] の範囲内である。橋梁の部分本手法では、 $\tilde{y}(t)$ の推定に橋のたわみ角を用いていないため多少の誤差はあるが、十分実用的な範囲内で推定できていると考えられる。



4 実橋試験

4.1 実橋試験の概要

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の橋梁のパラメータ推定を試みた。対象橋梁は、茨城県道 24 号線にかかる、筑波大学内道路かえて通り内の陸橋である松美橋とした。松美橋は全

長約 31[m] の箱桁橋である。平面図を図-4 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ている。センサ設置位置は橋梁全長を 6 等分した点ごとの 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。橋梁への設置は建材用両面テープ

を使用した。また試験用車両にはスバル社のフォレスターを用いた。前輪後輪のサスペンション下計測点としてアクスルシャフトのハウジングに加速度センサを固縛して取り付けた。サスペンション上の計測点としてはダッシュボードの助手席側とトランクルームのリアショックマウント位置に建材用両面テープで固定した。以上に加えて、車の GPS 位置を取得するデバイスも開発され、計測中の GPS 位置は一秒おきに保存された。車両の走行距離は、この GPS センサから得られる緯度経度情報に式(29)に示すヒュベニの公式を適応して求められた。2 点の緯度の

差を Dy 、経度の差を Dx 、子午線曲率半径を M 、卯西線曲率半径を N 、緯度の平均を P すると、GPS の計測された 2 点間の距離 D は

$$D = \sqrt{(DyM)^2 + (DxN \cos P)^2} \quad (31)$$

とあらわされる。ヒュベニの公式は地球の断面が真円ではなく楕円であることを加味して二点間の距離を計算する。また、正解値として使われている路面プロファイルは八千代製作所製の 3m プロフィールメータを使用した^[9]。

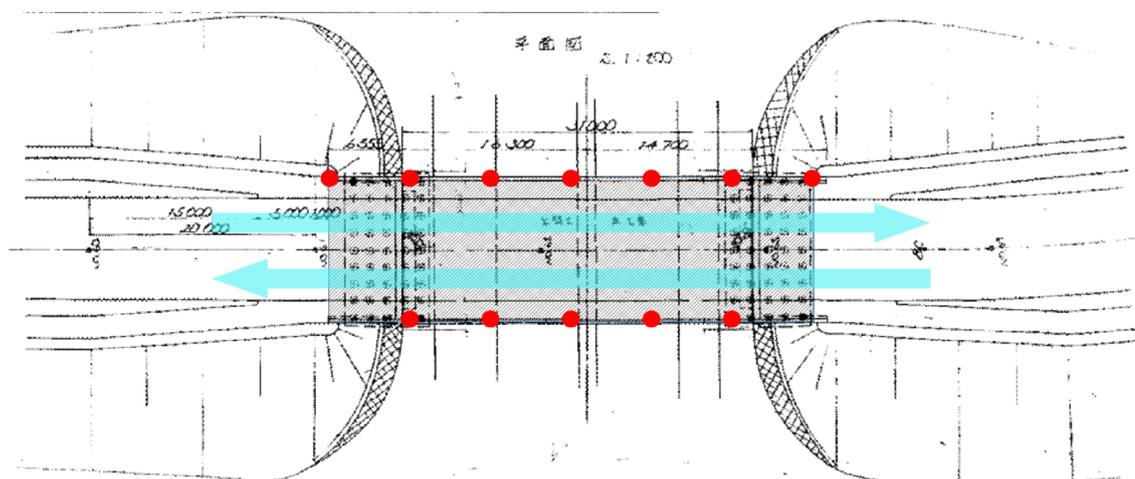


図-4 松美橋の平面図とセンサ配置

4.2 結果と考察

2 種類の走行ケースから得られた加速度波形をもとに路面プロファイルを推定した。これらの走行ケースは共に同条件の橋梁と車両を用いて計測されたもので、できる限り速度は一定となるように走行して得られたデータである。また、入力される車両重量などのパラメータは車検証に記載されている重量や装着されているホイールのカタログ値を参考にした。以下の表-5 に各粒子の初期パラメータの中央値と各ケースの最終パラメータを示す。各粒子の初期パラメータは中央値の 50[%]~150[%]の範囲の一様分布を設定したし、橋梁の 1 メートルあたりの重量を 3000[kg/m]一定とした。また、PSO 法の粒子数は 100

個、試行回数は 30 回とした。結果より、各ケースとも前後輪から推定される路面プロファイルは十分近いと考えられる。しかし、実際の路面プロファイルとの一致度は位置によってまばらである。2.2 節で説明したように、運動方程式から推定される路面プロファイルはもともと時間の関数であるため、各時刻での車両の位置をもとに線形補完を行っている。この際、車両の位置が正確に計測できていないと推定される路面プロファイルに大きく影響が出てしまう。例えばケース 2 について、橋梁の終わりにかけて前後輪にて推定されている約 1[mm]のピークは橋梁のジョイント部であると考えられる。これらのケースから推定された各要素の剛性は近い値を示すものも

あるが、推定精度が低いことがわかる。特に、車両が橋梁から退出する要素 6 の推定結果が最も誤差が大きかった。

表-5 各パラメータの中央値とケースごとの収束値

パラメータ		中央値	ケース 1	ケース 2
目的関数			3.319×10^{-05}	3.901×10^{-05}
EI [N·m ²]	要素 1	1.56×10^{11}	1.263×10^{11}	1.358×10^{11}
	要素 2		1.473×10^{11}	1.633×10^{11}
	要素 3		1.870×10^{11}	1.539×10^{11}
	要素 4		1.482×10^{11}	1.952×10^{11}
	要素 5		1.684×10^{11}	1.456×10^{11}
	要素 6		1.721×10^{11}	1.100×10^{11}
m_{u1} [kg]		2.5×10	1.812×10^2	0.841×10^2
m_{u2} [kg]		6.0×10^2	2.612×10^2	2.581×10^2
c_{s1} [kg/s]		1.5×10^3	1.386×10^3	1.625×10^3
c_{s2} [kg/s]		2.0×10^2	2.206×10^2	1.577×10^2
k_{s1} [N/m]		4.5×10^3	2.432×10^3	6.607×10^3
k_{s2} [N/m]		4.5×10^3	2.638×10^3	2.550×10^3
k_{u1} [N/m]		6.0×10^4	8.846×10^4	7.739×10^4
k_{u2} [N/m]		6.0×10^4	7.690×10^4	7.126×10^4

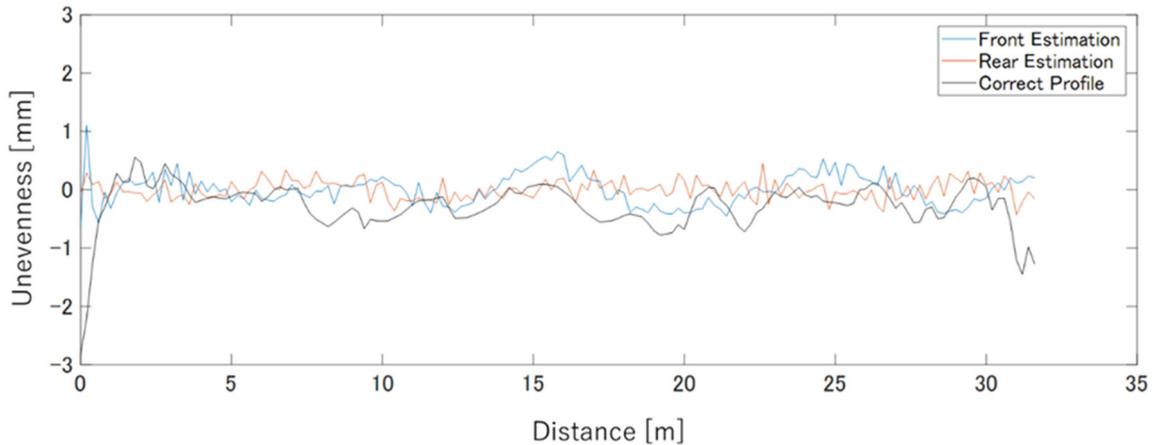


図-5 路面プロファイルの推定値と正解値の比較(ケース 1)

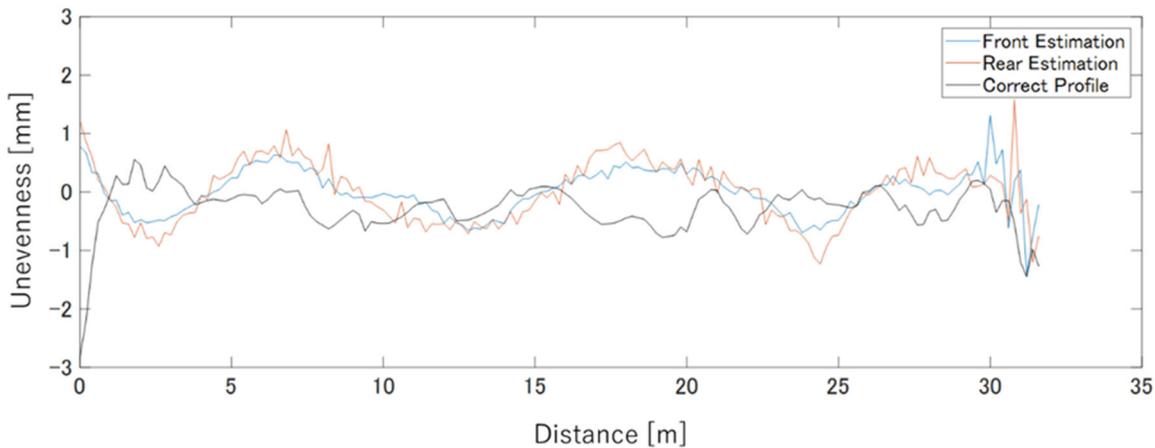


図-6 路面プロファイルの推定値と正解値の比較(ケース 2)

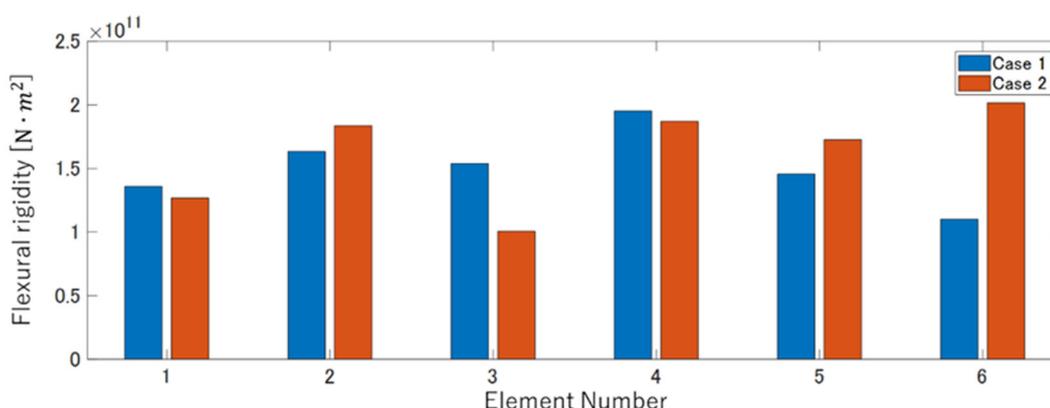


図-7 推定された各要素の曲げ剛性

5 まとめと今後の課題

実橋試験のデータをもとに、車両と橋梁の振動データから橋梁のパラメータの推定を試みた。結果から以下のことが分かった。

(1)橋梁と車両の振動データのみから橋梁の路面プロファイルは推定可能であるが、要求される橋梁上での車両位置の精度が高いことが分かった。

(2)前後輪から観測される路面プロファイルの一致度のみを目的関数に設定すると、実際の路面プロファイルとの一致度が低い粒子を中心に局所解に陥る可能性がある。

本研究では解空間の次元を下げるためにばね上重量とばね上振動を使わずに路面プロファイルを算出する手法を採用した。この手法は局所解への陥りやすさを低減することに貢献したが、車両と橋梁を合わせたモデルを考える際にすべてのパラメータが考慮されることが好ましい。これらのパラメータはばね下の振動からエンジン振動の影響を打ち消すためなどに利用できると考えられる。

また、実測値として得られるデータの種類と精度を上げるためにもセンサの機能拡張が必要である。本研究では車両の位置の算出はGPSデータのみをもとに行われていたためGPSの測位誤差由来の推定誤差が多く見られた。より高精度なGPSモジュールや、ジャイロセンサなどを追加することで橋のたわみ角

を算出するのに用いる、もしくは相関フィルタを用いてより高精度にセンサの姿勢推定ができるようになると考えられる。さらに、橋梁上のセンサも定期的にGPS情報を記録し、車両用のGPSセンサとの相対距離を高頻度で算出することで車両位置の特定精度を上げる手法も考えられる。

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] 国土交通省道路局, 道路橋定期点検要領, 2014
- [3] 古川愛子, 大塚久哲, 梅林福太郎: マイクロ起振器を用いた振動実験による鋼トラス橋の損傷同定, 応用力学論文集, Vol. 9, pp. 1103-1110, 2006
- [4] Kyosuke Yamamoto, Mikio Ishikawa, "Numerical Verification of Bridge Screening Technology based on Vehicle Vibration", *Proceedings of the World Congress on Engineering 2016 Vol II WCE*, 2016
- [5] L.Deng, C.S.Cai, "Identification of parameters of vehicles moving on bridges," *Engineering Structures* 31(2009), pp.2474-2485

- [6] 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
- [7] J.Kennedy, R.C.Eberhart, ”Particle swarm optimization, “*in Proc. of IEEE Int.Conf.on Neural Networks*,pp.1942-1948,1995
- [8] 毛利宏輔:GPS 同期型 MEMS センサの橋梁モニタリングへの適用, 筑波大学工学システム学類卒業論文 2016
- [9] <https://www.ywco.co.jp/uploads/KKY3A.pdf>

謝辞

本研究に際して、研究室のゼミで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。特に山本先生には研究室に配属される前から短期雇用生として早く研究に触れられる機会をいただき、デバイス開発や信号分析について様々なことを勉強させていただきました。実験にご協力いただきました山本研究室の皆様、そして普通より長い大学生活をさせてくれた両親に心よりお礼申し上げます。