

## 車載センサから得られた3軸加速度データの補正法に関する提案

### Proposal of a Correction Method for 3-Axis Acceleration Data Obtained from Vehicle-mounted Sensors

金子 直樹 (筑波大) 秦 涼太 (筑波大・社会工) 岡田 幸彦 (筑波大・社会工) 山本 亨輔 (筑波大・工)  
 KANEKO Naoki, University of Tsukuba  
 SHIN Ryota, University of Tsukuba  
 OKADA Yukihiro, University of Tsukuba  
 YAMAMOTO Kyosuke, University of Tsukuba  
 E-mail: yamamoto\_k@kz.tsukuba.ac.jp

This study proposes a method to automatically estimate the angles and calibration coefficients of the on-vehicle sensors from their acceleration vibration data. The angles and coefficients, in the proposed method, are searched by PSO (particle swarm optimization) method to match all corrected acceleration vibrations in the travel- and lateral-directions, respectively. This idea can improve the practicality of vehicle response analysis.

#### 1. はじめに

現在、全ての橋梁は目視により定期的な点検が義務化されている。一方、人的資源や公共投資の減少傾向が続いており、継続的な詳細点検は困難である。この問題を解決するため、低コストかつ短時間に橋梁モニタリングを行うことができる車両応答分析<sup>1)</sup>を開発中である。これは車両にセンサを設置し、計測された車両応答から橋梁の特徴を推定する方法である。橋梁の損傷検知や路面の舗装状態を推定できると期待されている。車両応答分析を用いたモニタリング技術の概念図をFig.1に示す。

車両振動計測では3軸加速度センサの利用を想定している。しかし、実環境において加速度センサの3つの軸を車両の進行方向、水平方向、鉛直方向を正確に一致させながら設置することは難しい。実際に、車両にセンサを設置した時の様子をFig.2に示す。この問題のため、計測されたデータをそのまま分析に利用することができない。そこで、計測された車両振動データを進行・横・鉛直方向に変換する補正操作が必要である。加えて各センサはケーブル長などの影響で個性が生じ、校正係数が異なる。本研究では、計測方向の変換に加えて、校正係数の比率についても自動的に補正を行う手法を提案する。

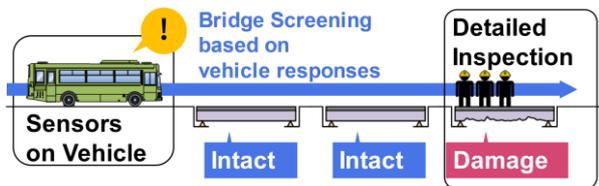


Fig.1 Conceptual diagram of bridge monitoring by vehicle response analysis



Fig.2 An accelerometer installed under the rear wheel spring of a vehicle

#### 2. 方法

車両振動計測では、加速度センサの電圧をADコンバータで読み取り、デジタルデータ化する。この電圧値を加速度に変換することで、分析に利用可能となる。しかし、ADコンバータによって得られた加速度データは、電圧変動の影響によりトレンドを含んでおり、分析するにはトレンド除去の処理を行うことが想定される。また、車両が振動していない停止時における振動データに対して平均ゼロ化処理を行うことで基準線を生成できると考えられるが、この処理により重力加速度の影響が消えると考えられる。つまり、軸および校正係数の補正方法として、重力加速度を用いることはできない。

一方、走行実験では一つの車両に複数の加速度センサを設置する (Fig.3 参照)。各センサは3軸計測されており、もし、正しく傾斜を推定することができれば、進行方向や横方向の加速度は一致するものと予測される。進行方向の加速度は車両の加減速であり、横方向の加速度はカーブ走行時に発生する。したがって、進行方向および横方向の加速度が一致するように補正マトリクスを最適化できれば、3軸加速度データが補正できると言える。

そこで、補正後加速度データの一致度を元にパラメータ最適化を行うことを考えるが、目的関数の形状が不明であるため、最適解の探索方法として、粒子群最適化 (Particle Swarm Optimization; PSO)<sup>2)</sup>を採用することとする。

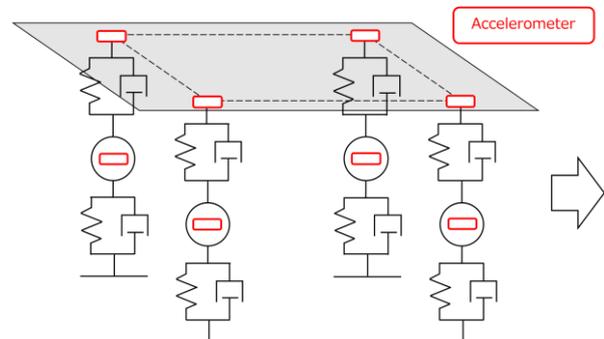


Fig.3 Location of the accelerometers to be installed in this research group

#### 2.1 各センサの補正方法

センサ $i$ における正確な進行方向・横方向・鉛直方向の車両加速度を $\ddot{x}_i(t)$ ,  $\ddot{y}_i(t)$ ,  $\ddot{z}_i(t)$ とする。一方、実際に計測さ

れる3軸加速度データは、 $\dot{X}_i(t)$ ,  $\dot{Y}_i(t)$ ,  $\dot{Z}_i(t)$ とする。この値はトレンド除去および平均ゼロ化処理が行われているものとする。両者の関係は

$$\begin{Bmatrix} \ddot{x}_i \\ \ddot{y}_i \\ \ddot{z}_i \end{Bmatrix} = \mathbf{R}_i \mathbf{C}_i \begin{Bmatrix} \dot{X}_i \\ \dot{Y}_i \\ \dot{Z}_i \end{Bmatrix} \quad (1)$$

と書ける。ここで $\mathbf{R}_i$ は回転行列、 $\mathbf{C}_i$ は校正係数行列である。 $\mathbf{C}_i$ の非対角成分はゼロで、対角成分にセンサ $i$ の各軸の電圧と加速度の変換係数を持つ。

## 2.2 回転行列

$X_i$ ,  $Y_i$ ,  $Z_i$ 軸をそれぞれ $\psi_i$ ,  $\theta_i$ ,  $\phi_i$ だけ回転させる場合を考える。 $X_i$ 軸回りに $\psi_i$ 回転させた時の回転行列 $\mathbf{R}_{X_i}$ は

$$\mathbf{R}_{X_i}(\psi_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi_i & \sin \psi_i \\ 0 & -\sin \psi_i & \cos \psi_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

となる。同様に、 $Y_i$ 軸回りに $\theta_i$ 回転させた時の回転行列 $\mathbf{R}_{Y_i}$ は

$$\mathbf{R}_{Y_i}(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & 0 & -\sin \theta_i \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_i & 0 & \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

$Z_i$ 軸回りに $\phi_i$ 回転させた時の回転行列 $\mathbf{R}_{Z_i}$ は

$$\mathbf{R}_{Z_i}(\phi_i) = \begin{bmatrix} \cos \phi_i & \sin \phi_i & 0 \\ -\sin \phi_i & \cos \phi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

となる。これらから回転行列 $\mathbf{R}_i$ は、以下の式で表される。

$$\mathbf{R}_i(\psi_i, \theta_i, \phi_i) = \mathbf{R}_{X_i}(\psi_i) \mathbf{R}_{Y_i}(\theta_i) \mathbf{R}_{Z_i}(\phi_i) \quad (5)$$

## 2.3 校正係数行列

校正係数行列 $\mathbf{C}_i$ は以下の式で表される。

$$\mathbf{C}_i = \begin{bmatrix} C_{X_i} & 0 & 0 \\ 0 & C_{Y_i} & 0 \\ 0 & 0 & C_{Z_i} \end{bmatrix} \quad (6)$$

## 2.4 目的関数

センサ $i$ と $j$ を考え、補正後加速度データ $\ddot{x}_i$ と $\ddot{x}_j$ の二乗誤差および $\ddot{y}_i$ と $\ddot{y}_j$ の二乗誤差を目的関数とする。

$$J = \sum_{\substack{i,j,k \\ (i \neq j)}} \left( (\ddot{x}_i(k\Delta t) - \ddot{x}_j(k\Delta t))^2 + (\ddot{y}_i(k\Delta t) - \ddot{y}_j(k\Delta t))^2 \right) \quad (7)$$

ここで、 $k$ は計測ステップ番号、 $\Delta t$ は計測間隔を表す。

## 2.5 PSO 法によるパラメータ同定手法

本手法では、パラメータ $\mathbf{p}_i = [\psi_i, \theta_i, \phi_i, C_{X_i}, C_{Y_i}, C_{Z_i}]^T$ をPSO法によって推定する。但し、センサ数が $n$ の時、対象となる全パラメータをまとめると $\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1^T \dots \mathbf{p}_n^T]^T$ となっており、 $6n$ 個のパラメータ推定となる。例えば、計測点数を8とすると推定パラメータ数は48個となり、相当の計算負荷が予測される。

ここで、PSO法では同時に複数の推定候補を用意する。候補番号を $s$ 、更新回数を $t$ として、パラメータ推定値を $\mathbf{P}_{s,t}$ と書くことにする。 $s$ を固定して過去の更新の中で目的関数を最小にした $\mathbf{P}_{s,t}$ を $\mathbf{L}_{s,t}$ （ローカル最適）とし、過去の更新中、全候補の中で目的関数を最小にした $\mathbf{P}_{s,t}$ を $\mathbf{G}_t$ （グローバル最適）とする。パラメータ更新値 $\Delta \mathbf{P}_{s,t+1} (= \mathbf{P}_{s,t+1} - \mathbf{P}_{s,t})$ は以下の式で与えられる。

$$\Delta \mathbf{P}_{s,t+1} = w_1 \Delta \mathbf{P}_{s,t} + R_2 w_2 (\mathbf{L}_{s,t} - \mathbf{P}_{s,t}) + R_3 w_3 (\mathbf{G}_t - \mathbf{P}_{s,t}) \quad (8)$$

ここで、 $w_1$ は慣性速度係数、 $w_2$ および $w_3$ は加速度係数、 $R_2$ ,  $R_3$ は $[0, 1]$ の1様乱数である。十分に収束した時の $\mathbf{G}_t$ を推定パラメータとする。

## 3. まとめと今後の課題

本稿では、TRL (Technology Readiness Level) : 1~2程度で車載の3軸振動センサ・データから鉛直加速度振動データを抽出する方法を考案した。提案方法では、PSO法に基づいてセンサの設置角を求め、補正操作を行う。但し、更新する変数が $6n$ 個であり、PSO法ではかなりの高負荷が予想される。また、全ての校正係数行列を等倍しても、設置角の結果とは独立しているため、校正係数の内ひとつは基準として固定する必要がある。

上記課題の解決方法として、回転行列と校正係数行列を個別に推定する2段階方式の採用が考えられる。つまり、まず、目的関数を $\ddot{x}_i$ と $\ddot{x}_j$ の相関係数および $\ddot{y}_i$ と $\ddot{y}_j$ の相関係数の和と定義して、設置角のみをPSO法で求め、次に振幅が一致するように校正係数の比率を再度、PSO法で求める。どの方法が適切かは数値実験および実車走行実験による検証が必要である。

また、車体の回転（ロール・ピッチ・ヨー）が無視できない場合、 $\ddot{x}_i$ と $\ddot{y}_i$ は設置角を正確に求めても一致しない。そこで、車体回転の影響も考慮したモデルの構築も今後の課題である。

今後の研究においては、数値シミュレーションにより計測データを模擬・再現し、本手法の設置角推定精度を確かめる。さらに、実車に取り付けたセンサの設置角を計測した上で、振動データに本手法を適用し、推定設置角と比較を行う予定である。

## 参考文献

- 1) Y. B. Yang, C.W. Lin and J. D. Yau: Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle, *Journal of Sound and Vibration*, 272(3-5), pp.471-493, 2004.
- 2) J. Kennedy, R.C. Eberhart: Particle swarm optimization, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Neural Networks*, pp.1942-1948, 1995.