第 I 部門　　移動車両橋梁点検手法を用いた実橋梁の路面形状同定精度の向上

京都大学工学部　学生員　○藤士　尚也　京都大学大学院工学研究科　正会員　張　凱淳
京都大学大学院工学研究科　学生員　中嶌　俊祐　京都大学大学院工学研究科　正会員　金　哲佑

1. 序論

近年，効率的な橋梁の点検手法の 1 つとして，移動車両点検手法が注目されている．これは，加速度計を設置した車両で橋梁上を走行することにより様々な橋梁特性を同定しようとする手法であり，長所として時間とコストの節約となること，持ち運びが可能であることが挙げられる．一方短所としては精度が低いことが挙げられ，その原因の 1 つに，計測される加速度のほとんどを路面凹凸に起因するものが占めており，橋梁振動の抽出が困難となっていることがある．よって，正確な橋梁特性の同定のためには正確な路面形状の同定が必要である．先行研究 [1]において，移動車両点検手法によってある程度の正確さで路面形状の同定が可能とされているが，その精度が課題となっている．よって本研究では，路面形状同定精度の向上を目的とし，センサー傾きの補正に着目する．計測ではセンサーはいくらか傾きを有しており，路面凹凸による加速度が鉛直方向に正確に計測されず，補正が必要となる．

2. 理論背景

本研究では車両モデルとして，2 自由度（車両の重心の鉛直変位と重心周りの回転）のハーフカーモデルを考慮している．路面形状同定手法としては先行研究 [2]のものを用いており，最小二乗法によって，加速度の計測値と計算値との差を最小とする，車輪と路面間の最適な動的接地力を求めることによって路面形状を同定している．センサー傾きθの補正は，θを推定し，計測した水平，鉛直方向加速度を実際の両方向に分解，合成することによって行う．しかし，θを直接計測することは困難であるため，本研究では推定可能な計測開始時の傾きθ_0と，初期からの相対的な傾きθ_iの和としてθを推定する．まずθ_0に関して，本研究では先行研究 [3]を参考とし，計測した両方向加速度に対して最小二乗法による直線近似を行い，その傾きを$\tan\theta_0$と見なすことにより推定を行う．次にθ_iに関して，ジャイロスコープによって角速度を計測し，その積分により推定を行う．

3. センサー初期傾き推定法に関する考察

実際の水平，鉛直方向加速度 a，b が傾きθを有するセンサーによって計測され，計測される水平，鉛直方向加速度が$\ddot{x}$，$\ddot{z}$となったとする．このとき，Fig. 1 のように，$\begin{bmatrix}\ddot{x}\\ \ddot{z}\end{bmatrix}$は$\begin{bmatrix}a\\ b\end{bmatrix}$を$\theta$回転させたものとなり，$\ddot{x}$と$\ddot{z}$に対する近似直線の傾きから$\theta$を推定することができる．しかし，直線近似による推定の信頼性が高いのは，Fig. 1 のように，$\ddot{x}$が$\ddot{z}$より大きな範囲となる，つまり大きく加減速されているときのみであり，そうでない場合，推定の信頼性は低いと考えられる．よって車両の加減速と路面凹凸やノイズ等による振動を考慮した仮想的な両方向加速度 a と b を以下のように設定し，検証を行う．

$a = A\sin\omega t + random$（標準偏差 0.1 の正規分布）

$b = random$（標準偏差 0.15 の正規分布）

$A\sin\omega t$によって車両の加減速を，random 変数によって振動を考慮しており，振幅の比 1 : 1.5 は後述の現場実験の値を参考にしている．そして，A=0, 0.1, …, 1 のそ

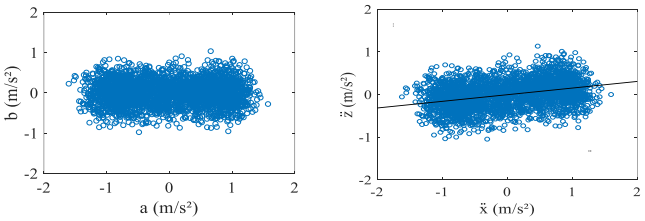

Fig. 1 Scatter plot : (a) a and b, (b) $\ddot{x}$ and $\ddot{z}$

Table 1 Result of estimating inclination

A	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Estimated inclination (degree)	-11.3	-10.29	-4.08	0.54	1.94	2.53	5.07	7.46	7.27	7.82	8.85

Naoya TOSHI, Syunsuke NAKAJIMA, Kai-Chun CHANG, and Chul-Woo KIM
kim.chulwoo.5u@kyoto-u.ac.jp

れぞれの場合で $\theta = 10°$ として$\ddot{x}$, $\ddot{z}$を計算し，それらに対する近似直線からθの推定を行う．その結果を Table1 に示す．これにより加減速の度合いが大きいほどθ推定の信頼性が高いことがわかる．よって，Fig. 2 に示すように，信頼性は$\ddot{x}$と$\ddot{z}$の標準偏差の比$\sigma_{\ddot{x}}/\sigma_{\ddot{z}}$と相関係数 R によって評価でき，信頼性が高いのは$\sigma_{\ddot{x}}/\sigma_{\ddot{z}} > 1$かつ R が比較的大きい場合のみだと考えられる．

4. 現場実験における結果と考察

現場実験では，京都府宇治市にある単純桁橋において，60 回の走行を行った．また，路面性状測定車により正確な路面形状も合わせて計測した．同定した路面形状の精度の評価のため，本研究では IRI（国際ラフネス指数）を用い，補正による精度向上度を補正前の IRI 誤差（%）と補正後の IRI 誤差（%）の差とした．まずθ_0のみの補正に関して，3 章と同様にθ推定の信頼性の評価を行うため，$\sigma_{\ddot{x}}/\sigma_{\ddot{z}}$と R に着目し，それらの関係を Fig. 3 に示す．$\sigma_{\ddot{x}}/\sigma_{\ddot{z}} < 1$のケースにおける最大の R を閾値とし，R が閾値以下のケースには信頼性が低いものが多いと考えられる．Fig. 4 に示すように，R が，得られた閾値 0.12 以下の場合は精度が悪化したものが多く，閾値以上の場合は向上したものが多いことがわかる．本実験では 56%のケースで精度が悪化しており，信頼性の高いもののみ補正した方がよいといえる．次にθ_iのみの補正に関して，本実験では全てのケースでθ_iが 1.5° を超えることはなく，補正の影響はほとんど見られなかった．よって，補正すべき根拠もそうでない根拠もえられなかったが，理論的妥当性から，補正した方がよいといえる．そこで，θ_0はθ推定の信頼性の高いもの（R が上記の閾値以上のもの）のみ補正し，θ_iは全ての場合で補正を行う手法を提案する．提案した補正法に基づき補正を行った場合，73%のケースで精度が向上した．また，補正によって路面形状のトレンドが除去され，形状が正確な路面形状に近づいたものを Fig. 5 に示す．

5. 結論

本研究の結論として，センサー初期傾き推定法に関して，推定の信頼性を$\sigma_{\ddot{x}}/\sigma_{\ddot{z}}$と R によって評価する必要があった．また，現場実験の結果から，θ_0はθ推定の信頼性の高いもののみ補正し，θ_iは全ての場合で補正を行う手法を提案し，その有用性が示された．

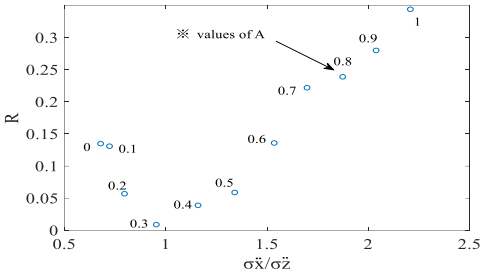

Fig. 2 The relation of $\sigma_{\ddot{x}}/\sigma_{\ddot{z}}$ and R

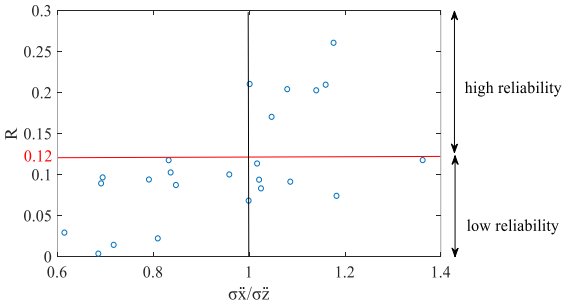

Fig. 3 The cases of high and low reliability

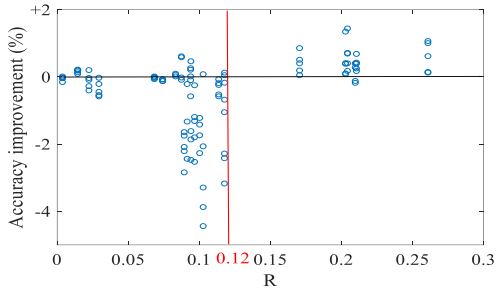

Fig. 4 The relation of R and accuracy improvement

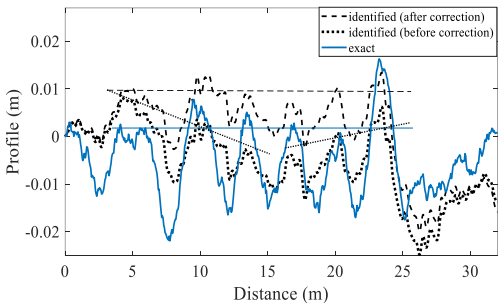

Fig. 5 Comparison of road profiles

【参考文献】

1) Hasegawa, S., その他 4 人: Experiment investigation of the feasibility of drive-by pavement roughness and bridge vibration monitoring. Proceedings of the 8th international conference of structural health monitoring of intelligent infrastructure, 2017.

2) McGetrick, P.J., その他 3 人: Dynamic axle force and road profile identification using moving vehicle, International Journal of Architecture, Engineering and Construction, 2(1), 1-16, 2013.

3) 八木浩一：自動車のばね上観測加速度からの路面プロファイルの推定とその精度向上，土木学会論文集（舗装工学），69(3), I_1-I_7, 2013.