走行車両の加速度計測による路面形状の同定

京都大学工学部　学生会員　○長谷川　聡一朗
京都大学大学院　正会員　金　哲佑
Queen's University Belfast　正会員　P.J. McGetrick
京都大学大学院　学生会員　井上　真一

1. はじめに

道路橋の安全性や機能性を再確認するための点検項目の一つに路面形状がある．路面形状が悪化すると車両－橋梁間に働く動的接地力を増幅させ，橋梁の機能低下を招く恐れがある．そのため路面形状の計測が重要視されている．特に開発途上国においては計測機器の不足などの理由から路面管理は適切に行われていないのが現状である．路面形状計測には市販のプロフィルメーターや高価であるが計測速度が早い Traffic Speed Deflectometer[1] などが用いられる．一方，計測の効率化や経済性を念頭に走行車両の加速度に着目する路面凹凸の IRI に着目する手法 [2]と路面形状同定 [3] が報告されている．このような走行車両の加速度のみに着目する手法は，他の高価な手法に比べ経済的であり開発途上国にも容易に適用できる技術である．また路面形状は走行車両の乗心地や走行車両に起因する環境振動などの検討にも有用である．本研究では加速度計を取り付けた走行車両による路面形状同定手法 [3]の可能性に関する模型桁車両走行実験（以下，模型実験と称する）による検討結果を報告する．

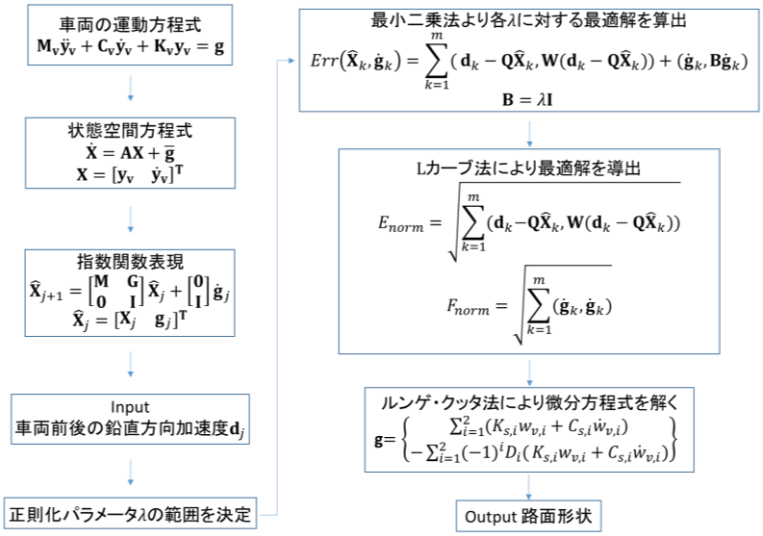

Fig.1 Flowchart of algorithm.

2. 路面形状同定アルゴリズム

本研究では前述した走行車両の加速度のみに注目した路面形状同定手法の模型実験により同定精度の検証を行う．本研究で使用する路面形状同定手法では，入力情報として車両の前軸・後軸部で計測した鉛直加速度を使用する．まず，2自由度系車両モデルの運動方程式を状態空間表現に変換し，さらに指数関数表現に変換する．本アルゴリズムでは，逆解析を行うために一次正則化を行っており，先に正則化パラメータの範囲を決定し，次に各正則化パラメータについて移動荷重同定アルゴリズム [4]によって逆解析を行う．具体的には，移動荷重同定アルゴリズムによって得られた加速度ベクトルと計測加速度についての最小二乗法によって，車両モデルの変位と慣性力を導出している．次に最適な正則化パラメータ

Table 1 Nomenclature.

$\mathbf{M_v}$	車両モデルの質量マトリクス
$\mathbf{C_v}$	車両モデルの減衰マトリクス
$\mathbf{K_v}$	車両モデルの剛性マトリクス
$\mathbf{y_v}$	車両モデルの変位ベクトル
$\mathbf{g}$	車両モデルの慣性力ベクトル
$\bar{\mathbf{g}}$	$\bar{\mathbf{g}} = \begin{bmatrix}\mathbf{0}\\ \mathbf{M_v}^{-1}\mathbf{g}\end{bmatrix}$
$\mathbf{A}$	$\mathbf{A} = \begin{bmatrix}\mathbf{0} & \mathbf{I}\\ -\mathbf{M_v}^{-1}\mathbf{K_v} & -\mathbf{M_v}^{-1}\mathbf{C_v}\end{bmatrix}$
$\mathbf{M}$	$\mathbf{M} = e^{\mathbf{A}h}$　(hは時間の刻み幅)
$\mathbf{G}$	$\mathbf{G} = \left(\mathbf{A}^{-1}(\mathbf{M} - \mathbf{I})\right)\begin{bmatrix}\mathbf{0}\\ \mathbf{M_v}^{-1}\mathbf{I}\end{bmatrix}$
$\mathbf{Q}$	$\mathbf{d}_j$ と$\hat{\mathbf{X}}_j$ との関係を表すマトリクス
$\mathbf{W}$	$(m \times m)$ の単位行列
m	測定器数
$K_{s,i}$	車軸i におけるサスペンションの剛性マトリクス ($i = 1$が前軸，$i = 2$が後軸)
$C_{s,i}$	車軸i のサスペンションにおける減衰係数
$w_{v,i}$	車輪i 下部における総合変位

キーワード　路面形状同定，加速度，橋梁，逆解析，PSD，模型実験
連絡先　〒615-8540 京都市西京区京都大学桂　工学研究科社会基盤専攻　TEL 075- 383-3421

をLカーブ法によって決定し，最適な正則化パラメータについての車両モデルの変位と慣性力が出力される．最後にこのようにして得られる車両モデルの慣性力から，慣性力と路面形状の関係を表す微分方程式を解くことで主力として路面形状を導出する．このアルゴリズムのフローチャートを **Fig.1** に示し，使用される記号の意味を **Table 1** に示す．

3. 車両および橋梁モデル

本研究の模型実験に使用する車両モデルの諸元と物理定数を **Table 2** に示し，橋梁モデルの諸元と物理定数を **Table 3** に，模型実験の概略図を **Fig.2** に示す．車両モデルは2自由度ハーフカーモデル，橋梁モデルは単純梁の有限要素モデルである．車両の減衰係数と橋梁の減衰比は自由振動実験により導出した．

4. 模型車両走行実験による路面形状同定結果

模型実験による，走行速度 S1=0.55(m/s)，S2=1.05(m/s)，S3=2.45(m/s)での同定結果をそれぞれ **Fig.3**，**Fig.4**，**Fig.5** に示す(破線が同定結果)．相対的なずれは生じているが，速度が大きいほど路面形状の概形はよく同定されている．また，S3=2.45(m/s)の際の同定結果のPSDを **Fig.6** に示すが(破線が同定結果)，PSDについても真値と近い値となっている．一方で，上述のアルゴリズムにより橋梁の路面形状を同定した場合，同定結果に路面凹凸だけではなく，車両走行時の橋梁変位成分も含まれる．そのため純粋な路面形状同定の精度は下がることになるが，逆にこれを利用して同定結果から橋梁変位成分を抽出することができれば，橋梁の損傷検知に応用できると考えられる．

5. まとめ

本研究の模型実験結果から，加速度のみに注目した路面形状同定手法によっておよその路面凹凸形状を把握できる可能性が高いことが確認された．次の課題としては，実寸大車両による路面形状同実験や，速度によって同定精度が異なる原因の究明が挙げられる．また，第4章で述べたように橋梁路面において，アルゴリズムによる同定結果から橋梁変位を抽出することができるかを検討することも課題となる．

Table 2 Vehicle model properties.

Mass (kg)		Spring constant (N/m)		Damping constant (N.s/m)	
front axle	rear axle	front axle	rear axle	front axle	rear axle
9.18	10.49	3067	3507	14.72	16.22

Table 3 Bridge model properties.

Span length (m)	5.4
Moment of inertia (m^4)	11.37×10^{-7}
Elastic modulus (N/m^2)	2.1×10^{11}
Mass per unit length (kg/m)	54.91
Damping ratio	0.008
Frequency of 1st bending mode (Hz)	3.47

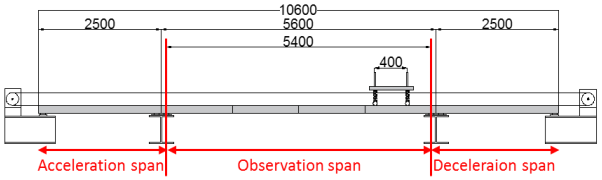

Fig.2 Schematic of bridge model.

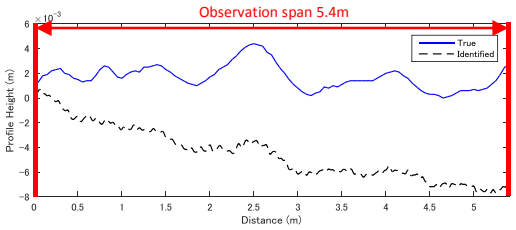

Fig.3 Identified road profile by experiment(S1).

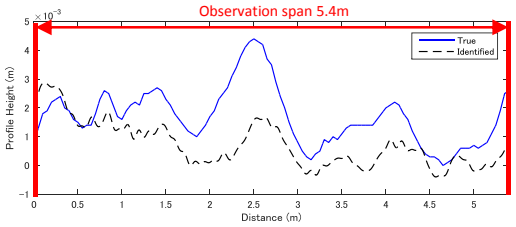

Fig.4 Identified road profile by experiment(S2).

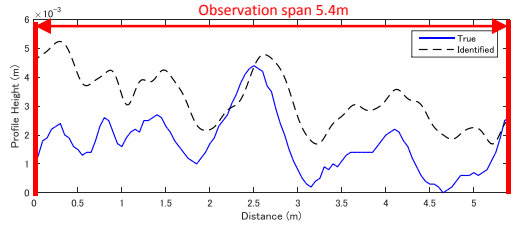

Fig.5 Identified road profile by experiment(S3).

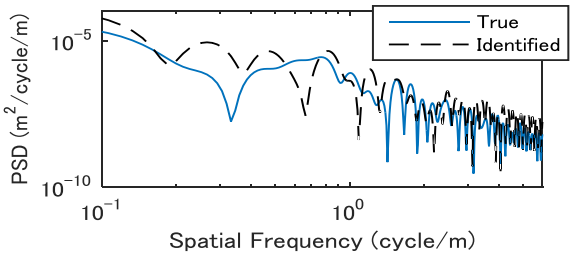

Fig.6 PSD of identified road profile by experiment(S3).

【参考文献】1) Baltzer, S., Pratt, D., Weligamage, J., Adamsen, J. and Hildebrand, G.: Continuous bearing capacity profile of 18,000 km Australian road network in 5 months, 24th ARRB Conference – Building on 50 years of road and transport research, Melbourne, Australia 2010．2) 長山智則，藤野陽三: 路面モニタリングシステムの開発　車両応答を利用した簡易路面モニタリングシステムの開発，舗装，43(6), pp.3-5，2008.6. 3) McGetrick, P.J., González, A., Kim, C.W. and OBrien, E.J.: Dynamic axle force and road profile identification using a moving vehicle. Int. J. of Architecture, Engineering and Coustruction, Vol.2, No. 1, pp.1-16, 2013. 4) McGetrick, P.J., Kim, C.W., Gonzalez, A. and OBrien, E.J.: Experimental validation of a drive-by stiffness identification method for bridge monitoring, *Structural Health Monitoring*, Vol.14, No.4, pp.317-331, 2015.