

## QC モデルにおけるカルマンフィルタを用いた内部パラメータと路面形状推定

長岡技術科学大学 正会員 ○宮下 剛  
 東京大学 正会員 長山智則  
 京都大学 正会員 大島義信  
 長崎大学 正会員 西川貴文

### 1. はじめに

車載加速度計を用いて IRI (国際ラフネス指標) を算出し, 路面性状を評価する方法がある<sup>1),2)</sup>. IRI は Quarter Car (QC) モデルのバネ上・バネ下質量の相対速度積分値として定義され, 対象路面の形状が必要とされるが, 簡易測定は難しい. そこで, 本文では QC モデルのバネ上質量の加速度応答のみから, カルマンフィルタを用いて QC シミュレーションにおける内部パラメータと路面形状を推定する方法の取り組みについて述べる.

### 2. 路面プロファイルの推定方法

#### (1) QC モデルの状態空間表示

図 1 に示す QC モデルが路面プロファイル (舗装路面の凹凸)  $h$  を入力として, 車速  $V$  で右側に進行する際の状態方程式と観測量をバネ上加速度とした観測方程式は, 次のように表される.

$$\dot{\mathbf{Z}} = \mathbf{AZ} + \mathbf{Bu} \tag{1a}$$

$$\ddot{z}_s = \mathbf{CZ} + \mathbf{Du} \tag{1b}$$

ここで, 上式の行列とベクトルは,

$$\mathbf{Z} = \{\mathbf{z} \quad \dot{\mathbf{z}}\}^T = \{z_s \quad z_u \quad \dot{z}_s \quad \dot{z}_u\}^T, \quad \mathbf{z} = \{z_s \quad z_u\}^T, \quad \mathbf{u} = \{0 \quad k_t h\}^T$$

$$\mathbf{A}_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 0_{2,2} & \mathbf{I}_{2,2} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_u \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_2_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} c_s & -c_s \\ -c_s & c_s \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} k_s & -k_s \\ -k_s & k_s + k_t \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{4 \times 2} = \begin{bmatrix} 0_{2,2} \\ \mathbf{M}^{-1} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_{1 \times 4} = [-k_s/m_s \quad k_s/m_s \quad -c_s/m_s \quad c_s/m_s], \quad \mathbf{D}_{1 \times 2} = [0_{1,2}]$$

であり, 式内の記号の意味を図 1 に記す.  $0_{m,n}$ ,  $\mathbf{I}_{m,n}$  は  $m, n$  を自然数として  $m$  行  $n$  列の零行列と単位行列を表す.

#### (2) カルマンフィルタを用いたパラメータ推定

内部パラメータの一例として車体サスペンションの減衰係数  $c_s$  を採る. そして, バネ上加速度  $\ddot{z}_s$  を計測値とし, カルマンフィルタを用いたパラメータ推定を行う. これに向け, 式(1)を拡大系表示する.

$$\dot{\mathbf{Z}}_a = \mathbf{f}(\mathbf{Z}_a) + \bar{\mathbf{B}}\mathbf{u} \tag{2a}$$

$$\ddot{z}_s = \mathbf{g}(\mathbf{Z}_a) + \mathbf{D}\mathbf{u} \tag{2b}$$

ここで,

$$\mathbf{Z}_a = \{\mathbf{z} \quad \dot{\mathbf{z}} \quad c_s\}^T, \quad \mathbf{f}_{5 \times 1}(\mathbf{Z}_a) = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{Z}_a, \quad \mathbf{g}_{1 \times 5}(\mathbf{Z}_a) = \bar{\mathbf{C}}\mathbf{Z}_a, \quad \bar{\mathbf{A}}_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} 0_{2,2} & \mathbf{I}_{2,2} & 0_{2,1} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}_2 & 0_{2,1} \\ 0_{1,2} & 0_{1,2} & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{B}}_{5 \times 2} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0_{1,2} \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{C}}_{1 \times 5} = [\mathbf{C} \quad 0]$$

であり, 非線形システムとなる. 非線形変換では確率変数の正規性が保存されないため, フィルタリングに近似法を導入する必要がある. この代表的なものとして拡張カルマンフィルタ (EKF) と Unscented Kalman Filter (UKF) がある. EKF では非線形システムを各時刻で線形化するため, 微分ができない不連続な非線形性には対応が難しい. 一方, UKF では標準偏差に対応するシグマポイントと呼ばれる少数個のサンプル点を選び, 集合平均的に確率分布を近似して非線形性に対応する<sup>3)</sup>. そこで, 本研究では UKF を用いる.

キーワード カルマンフィルタ, 舗装, 入力推定, 加速度, QC モデル

連絡先 〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1 長岡技術科学大学 環境・建設系 TEL0258-47-9641

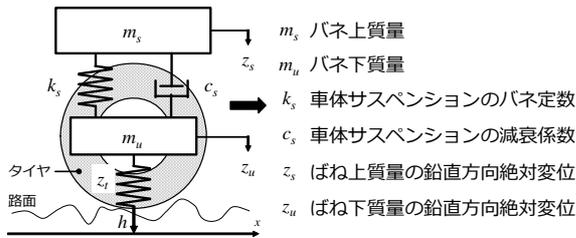


図1 QCモデル

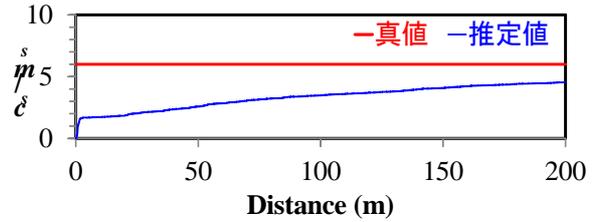


図2 減衰係数の同定結果

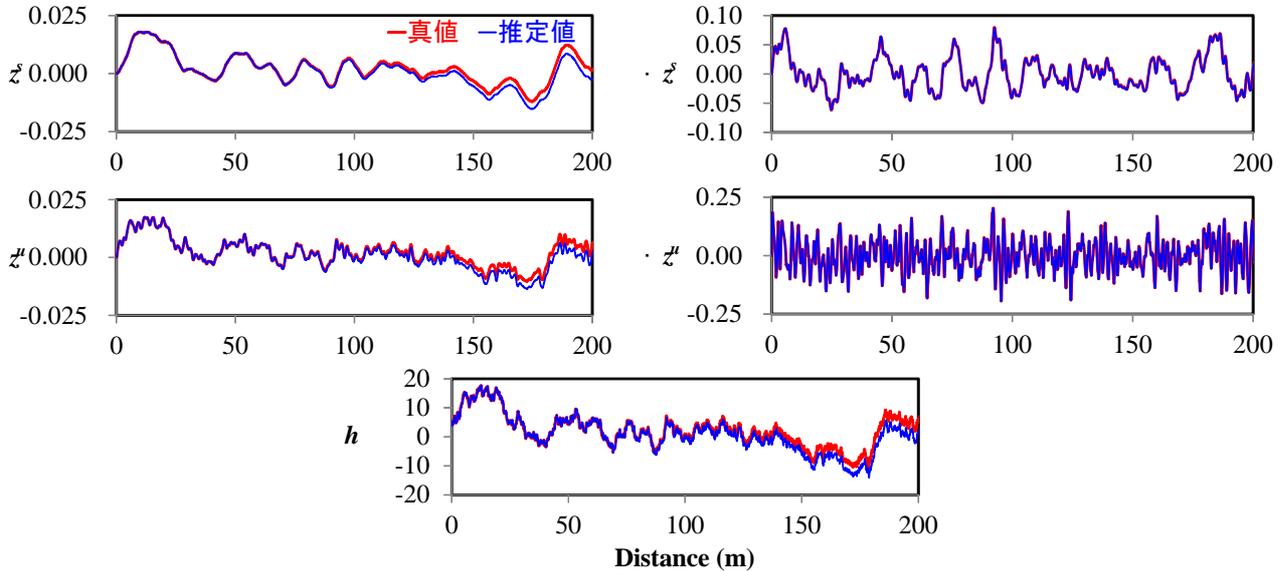


図3 状態量と路面形状の同定結果

**(3) カルマンフィルタを用いた路面形状推定**

式(1)において路面形状  $h$  を状態量として、式(2)のように表すと、次のようになる。

$$\mathbf{Z}_a = \{\mathbf{z} \quad \dot{\mathbf{z}} \quad h\}^T, \quad \bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} 0_{2,2} & \mathbf{I}_{2,2} & 0_{2,1} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}_2 & k_t/m_u \\ 0_{1,2} & 0_{1,2} & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{B}} = \mathbf{0}_{5,2}, \quad \bar{\mathbf{C}} = [\mathbf{C} \quad 0]$$

**3. 推定結果**

QCモデルのパラメータとして、基準QCモデルのものを用いる ( $k_s/m_s = 63.3$ ,  $k_t/m_s = 653$ ,  $c_s/m_s = 6.0$ ,  $m_u/m_s = 0.15$ )。車速は 80 km/h, 走行距離は 200 m とする。路面形状は文献 4)の方法でモデル化した。初めに、式(1)を用いて順解析からバネ上加速度  $\ddot{z}_s$  を得る。次に、観測ノイズを加えた  $\ddot{z}_s$  を計測値として、UKFを用いて式(2)から  $\mathbf{Z}_a$  を推定する。観測ノイズは  $\ddot{z}_s$  の振幅の 1/100 程度となるような正規分布とし、UKF で必要となる誤差共分散行列などは文献 3)のものを用いた。時刻 0 における推定値の初期値は路面形状のみを既知としてそれ以外を全て 0 とした。時間ステップは 0.005 s である。図 2 に、減衰係数  $c_s$  の同定結果を示す。減衰の真値への収束性は文献 5)でも指摘されているように良くない。次いで、図 3 に、路面形状の同定結果を状態量の推定値と合わせて示す。本解析では走行距離が 100 m を超えると、誤差の蓄積によって路面形状の推定値が真値から乖離する。評価距離と同定精度の関係性については、IRI 推定で必要となる周波数帯域と蓄積誤差の関係性もふまえた上で、さらなる検討が必要ではあるものの、本文の検討を通じて、実車両に対応した QC モデルの内部パラメータが同定されれば、バネ上加速度の応答値のみを用いて路面形状を同定できる可能性が示された。

**謝辞：**本研究は VIMS コンソーシアム<sup>6)</sup>における取り組みの一環として行いました。

**参考文献** 1) 坂田ら：速度変化に対応した時間-空間周波数の変換を含む非定常振動データのリアルタイム処理法の提案, 日本機械学会論文集(C編), Vol.79, No.801, pp.1602-1615, 2013., 2) 朝川ら：一般車両の走行時動的応答を利用した舗装路面の簡易状態評価システムの開発, 土木学会論文集 E1, Vol.68, No.1, pp.20-31, 2012., 3) 足立修一, 丸田一郎：カルマンフィルタの基礎, 東京電機大学出版局, 2012., 4) 本田ら：道路橋の路面凹凸パワースペクトル密度に関する調査, 土木学会論文報告集, Vol.315, pp.149-155, 1981., 5) 松岡ら：逐次データ同化を利用した列車走行時の橋梁加速度応答に基づく変位応答推定, 土木学会論文集 A1, Vol.69, No.3, pp.527-542, 2013., 6) <http://vims.sakura.ne.jp/>