

複数観測量に基づく車両応答型路面プロファイル推定手法の開発

東京大学大学院工学系研究科 修士2年 正会員 高田 修太
 准教授 正会員 長山 智則
 博士1年 正会員 ○趙 博宇

1. 背景・目的

DRIMSをはじめとする、簡易な路面性状評価手法が開発されているが、その多くが車両の加速度応答を簡易な2自由度系である¹⁾クォーターカー(QC)モデルを利用しており、IRI(国際ラフネス指標)等の区間平均指標の算出にとどまっている。また、QCモデルでは車両や走行速度の補正精度も限定的である。そこで、車両応答の再現性がより高いと考えられるハーフカー(HC)モデルを採用し、加速度・角速度の複数観測量をKalman Filterと組み合わせることで、センサー設置位置の違いや走行速度変化が補正可能な、車両パラメータ推定および路面プロファイル推定手法を提案する。

2. 手法

簡易な路面形状推定を目的としているため、車両改造を要さず、センサー位置の違いを考慮できる手法を提案する。試験時はダッシュボード上にスマートフォンを設置し加速度とピッチ方向の角速度を観測する。

(1) 車両キャリブレーション

車両をハーフカー(HC)モデル(図1)で構築するために、20km/hで高さ5cmの可搬ハンプを乗り越えた応答を観測し、パラメータを推定する。HCモデルが走行する際の状態方程式と、加速度と角速度を観測量とした観測方程式を立て、未知車両パラメータを状態ベクトルの成分として状態空間表現を拡張する。すなわち、式(1)の状態方程式における状態ベクトルは式(2)から式(3)に拡張される。しかし、式(2)における車両の各パラメータはいずれも未知数であるため、拡張された状態方程式は非線形となる。ゆえに、本手法では非線形に対応したUnscented Kalman Filter(UKF)を用いる。なお、ハンプ形状は既知であるため、状態方程式の入力は既知として扱う。また、UKFを1回のみ適用した場合推定値が収束しないため、Extended Kalman filterを用いた²⁾Hoshiyaらの手法に基づき、推定値と初期値の差が一定の値以下となるまで、複数回UKFを適用する。

(2) 路面プロファイル推定

実際の路面は未知であるため、前後輪位置における路面形状、 y_f, y_r をそれぞれ状態ベクトルに含める。従って式(2)から式(4)へ拡張される。このとき、状態方程式は線形となるため、Kalman Filterを用いて y_f, y_r を推定する。

3. 車両キャリブレーション手法の検証

試験車両において、ホイールベース(L_f+L_r)とセンサー位置(d)は実測値を用い、車両総重量も使用車両諸元より得た

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_s \mathbf{x} + \mathbf{B}_s \mathbf{u} \quad \mathbf{A}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{4 \times 4} & \mathbf{I}_{4 \times 4} \\ -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{C} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{4 \times 4} \\ \mathbf{M}^{-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & y_f k_{yf} & y_r k_{yr} \end{bmatrix}^T \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_H & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_r \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_f + c_r & L_r c_r - L_f c_f & -c_f & -c_r \\ L_r c_r - L_f c_f & L_f^2 c_f + L_r^2 c_r & L_f c_f & -L_r c_r \\ -c_f & L_f c_f & c_f & 0 \\ -c_r & c_r & 0 & c_r \end{bmatrix} \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_f + k_r & L_r k_r - L_f k_f & -k_f & -k_r \\ L_r k_r - L_f k_f & L_f^2 k_f + L_r^2 k_r & L_f k_f & -L_r k_r \\ -k_f & L_f k_f & k_f + k_r & 0 \\ -k_r & -L_r k_r & 0 & k_r + k_r \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x & \theta & x_f & x_r & \dot{x} & \dot{\theta} & \dot{x}_f & \dot{x}_r \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

$$\mathbf{x}_a = \begin{bmatrix} x & \theta & x_f & x_r & \dot{x} & \dot{\theta} & \dot{x}_f & \dot{x}_r & k_r & k_f & c_r & c_f & k_{rf} & k_{yf} & L_r & m_f & m_r & I \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

$$\mathbf{x}_p = \begin{bmatrix} x & \theta & x_f & x_r & \dot{x} & \dot{\theta} & \dot{x}_f & \dot{x}_r & y_f & y_r & \dot{y}_f & \dot{y}_r \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

x : ばね上質量の鉛直方向絶対変位
 x_f : 前ばね下質量の鉛直方向絶対変位
 x_r : 後ばね下質量の鉛直方向絶対変位
 θ : 車体のピッチング角
 m_H : ばね上質量
 m_f : 前ばね下質量
 m_r : 後ばね下質量
 c_f : 前サスペンション減衰係数
 c_r : 後サスペンション減衰係数
 k_f : 前サスペンションばね定数
 k_r : 後サスペンションばね定数
 k_{rf} : 前輪ばね定数
 k_{yf} : 後輪ばね定数
 y_f : 前輪路面プロファイル (路面変位入力)
 y_r : 後輪路面プロファイル (路面変位入力)
 I_z : 車体の慣性モーメント
 L_f : 重心から前方車軸までの距離
 L_r : 重心から後方車軸までの距離

図1: HCモデル

キーワード 路面プロファイル, IRI, 車両応答, カルマンフィルタ

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学橋梁研究室 TEL 03-5841-6099

値を用い、既知とする。従って未知パラメータは 10 個であり、これらを式(3)と同様に状態変数に含めた。ハンプを越える際の加速度と角速度を計測し、カットオフ周波数 20Hz のローパスフィルタを適用した。また、加速度と角速度の観測値の時間のずれやハンプ乗り越え時の走行速度を正確に推定するためハンプ乗り越え時における加速度・角速度時刻歴の再現残差を最適化関数とした Genetic Algorithm を解いている。また、角速度を観測することで、使用する観測データの切り出しを容易に行うことができる。その後、観測値と似た応答を示す車両パラメータを初期値とし(図 3), UKF を 20 回適用することで車両パラメータを推定する。図 4 は推定値で再現された応答であり、応答が再現できていることが確認できる。この推定値を元に HC モデルを構築し、路面プロファイル推定に使用した。

4. 路面プロファイル推定手法の検証

ハンプ形状を未知として、プロファイル推定を行った。ハンプの走行方向幅が 300mm と短いため、走行速度は 10km/h とし、結果は図 5 の通りである。横軸で 27[s]付近から始まる部分が、ハンプの再現にあたる。なお、サンプリングレートは 100Hz である。高さは 50mm にもかかわらず、結果は約 40mm 程度となっているが、これはローパスフィルタが原因と考えられる。また、プロファイルが大きく負の値となっている。本試験を実施した際、ハンプ直前の路面にクラックが存在したが、クラックと考えられる変位も確認できる。再現度は限定的ではあるが、局所変位を推定可能であることが示された。また、60km/h から 90km/h の走行速度で 800m 程度のコースを走行した場合、

図 6 の結果となり、走行速度によらない再現性が確認できる。しかし、低速時は推定精度が低く、IRI の値も高くなってしまったため、今後の改良が必要である。

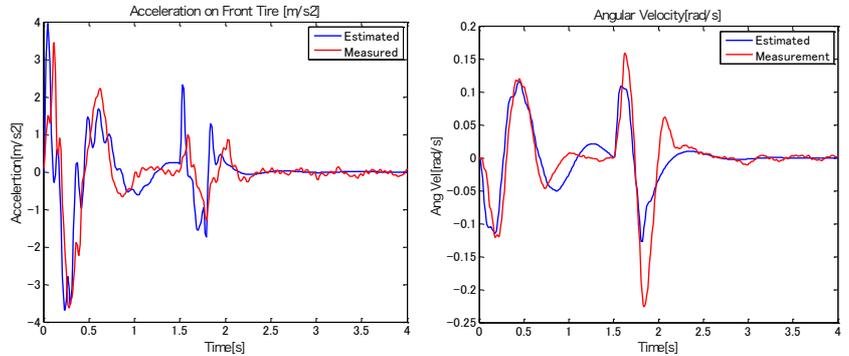


図 3: 初期値による応答再現 左 加速度・右 角速度

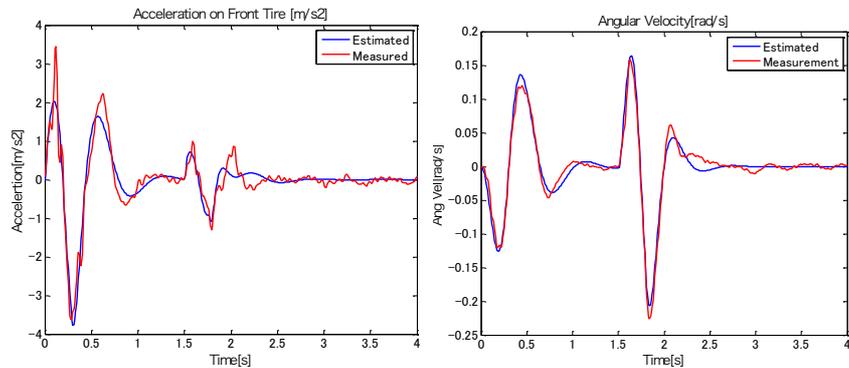


図 4: 推定値による応答再現 左 加速度・右 角速度

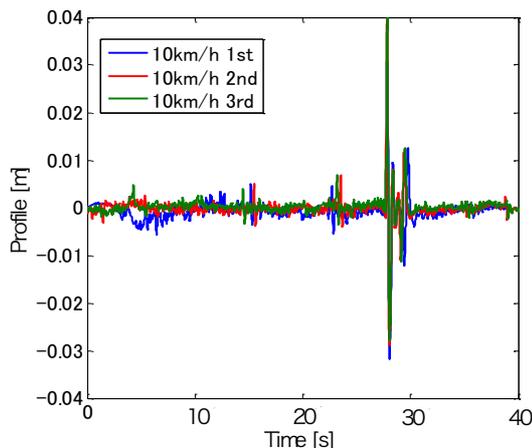


図 5: ハンプ形状の再現

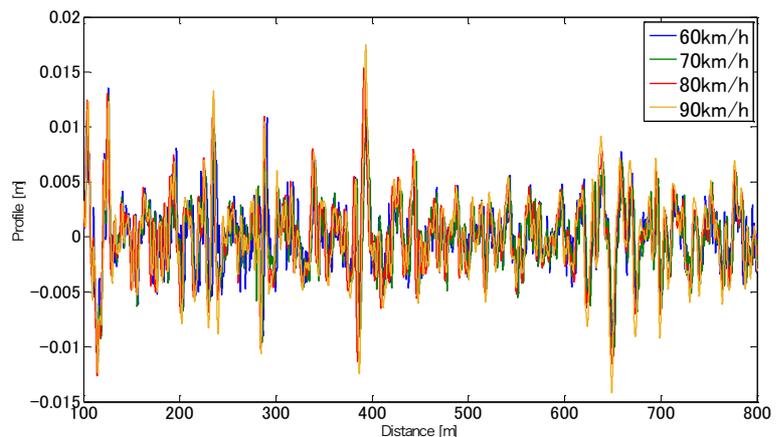


図 6: 長距離プロファイルの再現

5. 結論

車両の加速度・角速度のみから、HC モデルに基づくパラメータ同定と、カルマンフィルタによる状態推定を組み合わせ、路面形状を推定する手法を提案した。

参考文献 1)宮下剛, 長山智則, 大島義信, 西川貴文, 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, 第 69 回土木学会年次学術講演会概要集(CD-ROM), 2014, 2) M. Hoshiya, E. Saito, Structural identification by extended Kalman filter, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 110: 1757-1770, 1984.