

7 自由度車両モデルの同定と Vehicle Intelligent Monitoring System キャリブレーションへの応用

東京大学 学生会員 ○矢野 圭二郎
 東京大学 フェロー会員 藤野 陽三
 東京大学 正会員 長山 智則
 東京大学 正会員 西川 貴史

1. はじめに

東京大学橋梁研究室では安価かつ高頻度の路面モニタリングを可能にするシステムである Vehicle Intelligent Monitoring System (以下, VIMS) を開発している. これは加速度計, GPS, PC を搭載した車両が定速で走行する際の車両応答から路面のラフネスを International Roughness Index (以下, IRI) によって推定するものである.

既往の研究により, 計測車両をランドクルーザー, 走行速度を 60km/h と設定した場合, VIMS が実際の路面モニタリングに適用できる精度を持つことが明らかになっている¹⁾. また, 計測車両, 走行速度が規定のものとは異なる場合でも正確に IRI を推定するためのキャリブレーション手法についても研究が進められている.

本研究では計測車両を 7 自由度車両モデルにモデル化し, そのモデルと IRI の算定に用いる Quarter-Car モデルとの伝達関数を導出することで, 任意の条件での IRI 推定を可能にする手法を提案する.

2. 7 自由度車両モデル

車両応答は車体の上下の並進運動だけでなく, 前後, 左右の回転運動にも影響を受ける. そこで, 本研究ではそれらの運動を表現することが可能な 7 自由度車両モデルを用いる. 7 自由度車両モデルを図-1 に示す. また, 運動方程式を式(1)~(7)に示す. なお, タイヤの減衰係数は 0 として扱い, 運動方程式中のタイヤ減衰に係る項は省略した.

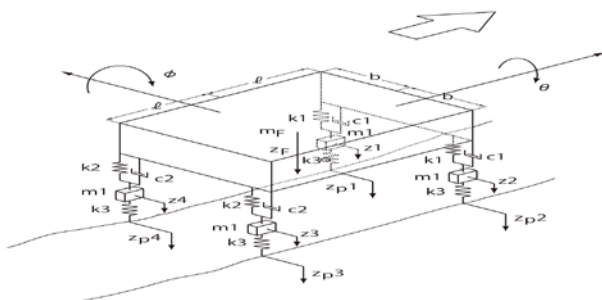


図-1 7 自由度車両モデル

$$m_F \ddot{z}_F + c_1(2\dot{z}_F - \dot{z}_1 - \dot{z}_2) + c_2(2\dot{z}_F - \dot{z}_3 - \dot{z}_4) + k_1(2z_F - z_1 - z_2) + k_2(2z_F - z_3 - z_4) = 0 \quad (1)$$

$$m_1 \ddot{z}_1 + c_1 \{ \dot{z}_1 - (\dot{z}_F - b\dot{\theta} - l\dot{\phi}) \} + k_1 \{ z_1 - (z_F - b\theta - l\phi) \} + k_3 z_1 = k_3 z_{p1} \quad (2)$$

$$m_1 \ddot{z}_2 + c_1 \{ \dot{z}_2 - (\dot{z}_F + b\dot{\theta} - l\dot{\phi}) \} + k_1 \{ z_2 - (z_F + b\theta - l\phi) \} + k_3 z_2 = k_3 z_{p2} \quad (3)$$

$$m_1 \ddot{z}_3 + c_2 \{ \dot{z}_3 - (\dot{z}_F + b\dot{\theta} + l\dot{\phi}) \} + k_2 \{ z_3 - (z_F + b\theta + l\phi) \} + k_3 z_3 = k_3 z_{p3} \quad (4)$$

$$m_1 \ddot{z}_4 + c_2 \{ \dot{z}_4 - (\dot{z}_F - b\dot{\theta} + l\dot{\phi}) \} + k_2 \{ z_4 - (z_F - b\theta + l\phi) \} + k_3 z_4 = k_3 z_{p4} \quad (5)$$

$$I_a \ddot{\theta} + c_1(2b^2\dot{\theta} + b\dot{z}_1 - b\dot{z}_2) + c_2(2b^2\dot{\theta} - b\dot{z}_3 + b\dot{z}_4) + k_1(2b^2\theta + bz_1 - bz_2) + k_2(2b^2\theta - bz_3 + bz_4) = 0 \quad (6)$$

$$I_b \ddot{\phi} + c_1(2l^2\dot{\phi} + l\dot{z}_1 + l\dot{z}_2) + c_2(2l^2\dot{\phi} - l\dot{z}_3 - l\dot{z}_4) + k_1(2l^2\phi + lz_1 + lz_2) + k_2(2l^2\phi - lz_3 - lz_4) = 0 \quad (7)$$

ここで, m_F :ばね上質量, m_1 :ばね下質量, I_a :車体ローリング方向慣性モーメント, I_b :車体ピッチング方向慣性モーメント, z_F :ばね上質量の絶対変位, $z_{1\sim4}$:ばね下質量の絶対変位, $z_{p1\sim4}$:路面変位入力, b :トレッド幅/2, l :ホイールベース/2, θ :車体ローリング角, ϕ :車体ピッチング角, c_1 :前ダンパ減衰係数, c_2 :後ダンパ減衰係数, k_1 :前サスペンションばね定数, k_2 :後サスペンションばね定数, k_3 :タイヤばね定数である.

3. パラメータ同定

車両モデルに入力する変数のうち, ばね下質量, 慣性モーメント, ダンパ減衰係数, サスペンションばね定数については計測車両ごとに適切な値を推定する必要がある. 本研究ではそれらのパラメータ同定手法としてハンプ走行試験の車両応答を利用した遺伝的アルゴリズム(以下, GA)を用いる. 以下にその手順を示す.

実車の車両応答に関しては, なるべく凹凸の少ない路面を選定し, ハンプを設置する. ここで車両を 20km/h 定速で走行させ, ハンプを乗り越えた際の加速度データを計測する. シミュレーションによる車両応答に関しては, まず, 路面の縦断プロファイルを作成する. 本研究では鉛直方向の変位が 0 で表される完全に平坦な路面上に, ハンプ形状を再現することで仮想的な路

キーワード VIMS, 移動体モニタリング, IRI, 車両・速度キャリブレーション, 7 自由度車両モデル

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 FAX 03-5841-7454

面を作成した．この仮想的な路面に対し，式(1)~(7)の運動方程式を4次のRunge-Kutta法により計算し，加速度データを算出する．

次に，以上の方法で得た加速度データに20Hzでローパスフィルタを適用し，ハンプ乗り越え前後1秒分を切り取り，パワースペクトルを算出する．このカットオフ周波数により車両のばね上，ばね下質量の振動のみを対象とすることが可能となる．

計測によって求めた実車の車両応答とシミュレーションによって算出した車両応答が一致するように車両モデルのパラメータを推定する．本研究では，目的関数を式(8)とし，これを最小化する最適解を計測車両のパラメータとして採用する．

$$f(x_i) = \sum_{\omega} \sqrt{\{PSD_{car}(\omega) - PSD_{sim}(\omega)\}^2} \quad (8)$$

ここで， x_i ：パラメータ， PSD_{car} ：実車の加速度パワースペクトル， PSD_{sim} ：シミュレーションの加速度パワースペクトルである．

この最適化問題の解法としてGAを用いる．本研究で用いるのは単純GAであり，GAのパラメータは，初期集団の個体数を100，交叉方式を2点交叉，交叉確率を90%，突然変異確率を0.5%，終了条件を世代交代数1000回とする．

セレナによるハンプ走行試験の車両応答と以上に述べた同定手法で同定したパラメータをモデルに入力した場合の車両応答を図-2に示す．本同定手法によりハンプ走行試験の車両応答を精度良く再現するパラメータを同定できることが確認された．

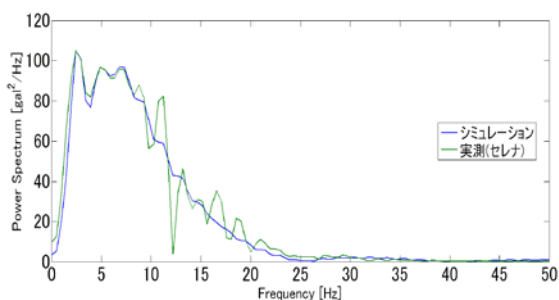


図-2 ハンプ走行試験の応答

4. キャリブレーション手法の検証

ランドクルーザー，セレナによる埼玉県吉川市の一一般道でのハンプ走行試験と同一一般道および首都高速道路小松川線でのラフネス計測の結果を用いて，本キャリブレーション手法の検証を行う．

(1) 車両キャリブレーション

セレナが規定速度60km/hで小松川線を走行した際の計測データをキャリブレーションした結果を図-3に示す．キャリブレーション前の結果はランドクルーザーによる推定結果(IRI)と大きく異なるが，キャリブレーション後の結果はIRIに近いものとなっている．

これはセレナ以外の車両についても同様であるが，その精度に関しては車両ごとに相違が見られる．キャリブレーション手法の精緻化に向け，更なる検証が求められる．

(2) 速度キャリブレーション

セレナが40km/hで一般道を走行した際の計測データをキャリブレーションした結果を図-4に示す．キャリブレーション前の結果はランドクルーザーが規定速度60kmで走行した際の推定結果(IRI)と大きく異なるが，キャリブレーション後の結果はIRIに近いものとなっている．なお，本キャリブレーション手法を走行速度が80km/hの場合に適用した結果，推定したIRIが過小評価になることが確認されている．走行速度が規定速度より高速の場合については改良が必要である．

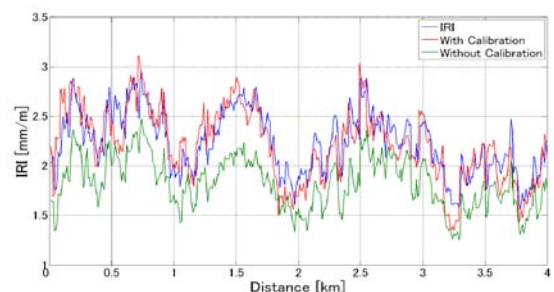


図-3 車両キャリブレーション検証結果

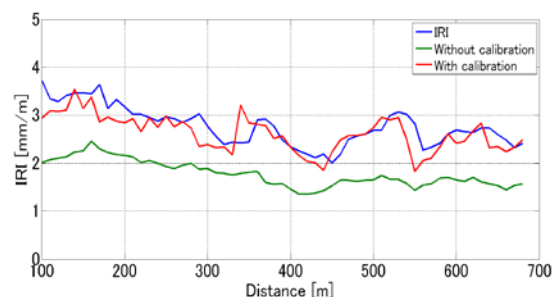


図-4 速度キャリブレーション検証結果

5. 結論

任意の計測車両，走行速度でのVIMSによるIRI推定を可能にするため，計測車両を7自由度車両モデルによってモデル化し，計測結果を換算するキャリブレーション手法を提案した．計測車両のモデル化にあたり，ハンプ走行試験の車両応答を利用したGAにより，車両応答を精度良く再現するパラメータを同定できることが確認された．

参考文献

- 1) 朝川皓之：Vehicle Intelligent Monitoring Systemの実用化へ向けた汎用性向と性能分析～海外での適用事例を踏まえて～，東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻修士論文，2009.3