

## 車両動揺解析による路面評価のための軸距・センサ位置および走行速度の推定

東京大学 学生会員 ○垣内 優希  
 東京大学 正会員 長山 智則  
 東京大学 正会員 薛 凱

### 1. 目的

近年はスマートフォンを車両に搭載し動揺を解析することで路面縦断形状と IRI を高精度に推定することが可能になった<sup>1)</sup>。その過程でハーフカーモデルのパラメータ (図 1) を推定するが、軸距・センサ位置は自動推定することができず、計測の必要がある<sup>1)</sup>。また、GPS 不良個所では走行速度情報が得られないため、IRI を推定することができず、ビッグデータ解析の支障になる。

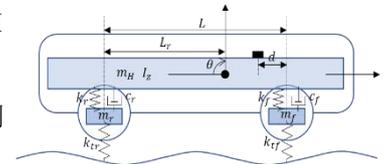


図 1 ハーフカーモデル

そこで、本研究の目的を車両動揺解析による軸距の推定、車両動揺解析とパラメータ最適化によるセンサ位置の推定、前後輪路面プロファイル時刻歴と進行方向加速度による走行速度の推定の 3 点に設定する。

### 2. 軸距推定

車両運動には回転運動と上下運動の 2 種類があり、路面波長が特定の値の場合片方のみが卓越する (表 1)。したがって、軸距  $L$  は、走行速度  $v$ 、上下運動が卓越するときの波長  $\lambda_n$ 、周波数  $f_n$  として式 1 のように推定できる。

$$L = \lambda_n n = \frac{v}{f_n/n} (n = 1, 2) \quad (1)$$

表 1 路面波長と車両運動の関係

	軸距=波長×整数	軸距=波長×(整数+0.5)
概要図		
卓越運動	上下運動	回転運動
角速度	小	大

マルチボディシミュレーション (MBS) と実データそれぞれ角速度パワースペクトル密度関数を図 2 に示す。

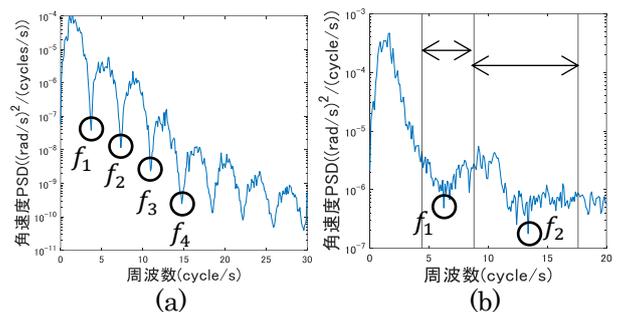


図 2 ピッチング角速度 PSD (a) MBS (b) 実データ

ここで、上下運動のみに該当する角速度極小周波数  $f_n$  が等間隔に並んでおり、実データで鮮明な 1 つ目と 2 つ目の極小周波数から軸距を推定する。一般的な車両の軸距は 2.2m から 4.4m であることを考慮して、極小周波数の探索範囲を設定する。また、信頼性を向上させるために、ローリング動揺が基準値以下、一定走行速度、極小周波数が等

間隔に並ぶ、走行速度別に 10 データを重ね合わせるなどデータ抽出・作成処理を行っている。

軸距の推定結果を表 2 に示す。高精度で推定できていることが分かる。

表 2 軸距推定結果

	乗用車 1	乗用車 2	乗用車 3
真値 (m)	2.8	2.55	2.52
推定値 (m)	2.79 (-0.4%)	2.56 (0.4%)	2.46 (-2.5%)

### 3. センサ位置推定

鉛直加速度と角加速度について式 2 の関係があると考えられる (図 3)。したがって、ピッチング角加速度  $\dot{\omega}_y$  に対する鉛直加速度  $\dot{v}_z$  のコヒーレンス関数が最大になる回転運動のみ周波数  $f_0$  について、重心鉛直加速度  $\dot{v}_{z, cen}$  が無視できるため前後方向腕の長さに対応するセンサ距離  $d_x$  は式 3 で求められる。

$$\dot{v}_z = \dot{v}_{z, cen} + \dot{\omega}_y d_x + \dot{\omega}_x d_y \quad (2)$$

$$d_x = T_{\dot{v}_z \dot{\omega}_y} \Big|_{f=f_0} \quad (3)$$

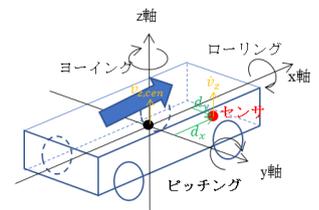


図 3 車体の回転運動

キーワード 路面評価, IRI, 路面縦断形状, 軸距, センサ位置, 走行速度  
 連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学 TEL 03-5841-6097

この方法で推定したセンサ距離 $d_{x,pre}$ を表3に示す。また、センサが回転中心前後いずれにあるかは位相で判断する。伝達関数の絶対値は不安定であり、推定値が真値と大きく外れる場合があるため、この方法によってセンサ距離の範囲を軸距の30%程度の誤差を許容するように決定し、遺伝的アルゴリズムによるハーフカーモデルパラメータの最適化を行うことでセンサ距離 $d_x$ 、ハーフカーモデルのパラメータを推定する。遺伝的アルゴリズムの目的関数は前後輪路面プロファイルのパワースペクトルの差とする<sup>1)</sup>。推定結果を表3に示す。このとき、最適化を5回行い4章で述べる走行速度の推定精度が最も高いものを採用した。また、ハーフカーモデルのパラメータの推定結果については既往研究と同等の精度であったため省略する。

表3 センサ位置推定結果

	乗用車1	乗用車2	乗用車3
真値(m)	0.70	0.71	-0.74
最適化前推定値(m)	0.59(-15.7%)	0.76(7.0%)	-1.19(-60.8%)
センサ位置範囲(m)	0以上1.1以下	0.2以上1.3以下	-1.6以上-0.5以下
最適化後推定値(m)	0.83(18.6%)	0.68(4.2%)	-0.66(10.8%)

表3より、遺伝的アルゴリズムによる最適化を行うことでセンサ位置推定精度が同程度または向上したことが分かる。

また、図4に乗用車3について、センサ位置真値・最適化前のセンサ位置（各3回）、最適化後のセンサ位置（5回）と、それらを利用して推定したIRIの推定精度の関係を示す。ただし、それぞれ適切なハーフカーモデルのパラメータを利用している。最適化を行うことでIRI推定精度も同様に向上したことが分かる。

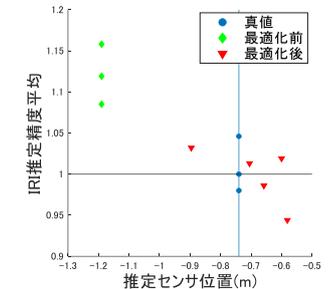


図4 推定センサ位置と推定IRIの関係

#### 4. 走行速度推定

路面のある一点を前輪と後輪が通過する時間差 $t$ は式4のように走行速度 $v$ と軸距 $L$ に依存する。

$$t = \frac{v}{L} \quad (4)$$

そこで、車両応答から推定される前後輪路面プロファイル時刻歴<sup>1)</sup>（図5）に生じる時間差を利用して走行速度を推定する。1秒おきに前後数秒間のデータを利用して速度を推定した結果を図6に示す。このとき両プロファイル間の相関が小さいものは除外する。時間歴が長い方が時間差の推定精度は高いものの除外される場合が多い。そこで、長さ30秒のデータにより速度を推定し、推定速度が得られない場合は20秒、10秒データの順に短くして速度を推定する。

提案手法では停車時の速度推定が難しいため、前後方向加速度標準偏差と左右方向加速度標準偏差が閾値以下の場合に、速度0と判断する。

次に、プロファイル時間差から求めた走行速度と進行方向加速度を観測量とするカルマンフィルタ・RTS平滑化を適用し、状態変数として走行速度を得る。なお、速度急変等の理由により推定速度が常に得られない時間ステップでは、進行方向加速度のみが観測量となる。

図6に走行速度の推定結果を示す。参考として進行方向加速度積分による走行速度推定結果も示している。路面プロファイル時刻歴と加速度を統合することで高精度に速度推定できている。

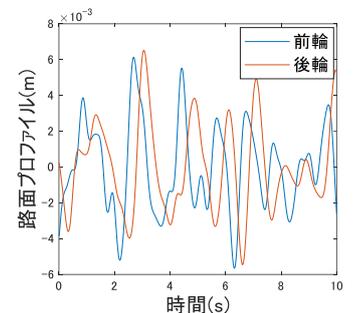


図5 プロファイル時刻歴

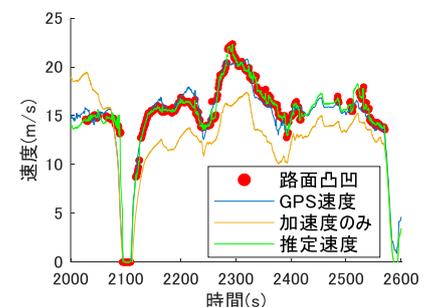


図6 速度推定結果

#### 5. 結論

ピッチング角速度応答から軸距を、また、車両動揺解析とパラメータ最適化によりセンサ位置を推定することができた。さらに、前後輪路面プロファイル時刻歴と進行方向加速度より走行速度を推定することができた。

#### 参考文献

1) 長山智則、趙博宇、薛凱：走行時の車体振動を利用したハーフカーモデルの同定と路面縦断形状の推定、土木学会論文集 E1（舗装工学），vol. 75, No. 1, 1-16, 2019.