

高精度物体追跡を利用した走行車両のモード同定と重量推定

東京大学大学院 学生会員 ○石井 敦
 東京大学大学院 正会員 薛 凱、長山 智則、蘇 迪

1. 背景 交通荷重を頻繁に受ける舗装道路は損傷を受けやすく、維持管理が重要である。路面の損傷に大きく寄与する過積載車両の取り締まりや、車両重量分布のモニタリングのために従来、WIM(Weigh-In-Motion)が提案されてきた。例えば、路面に重量計を埋め込む方法や、道路橋の振動応答から走行車両の重量を推定する手法が提案されている。高精度な実装も可能であるが、導入の費用や手間の観点で適用性に欠ける。そこで、画像認識と物体追跡を利用し走行車両の鉛直振動を抽出し、モード同定・重量推定を行う新しい手法を提案する。

2. 提案手法 提案手法は2段階に分けられる。まず、1)走行車両を横から動画で撮影し、高精度な物体追跡により、車両上の代表点の位置を各時刻で推定、2)その位置座標からモード同定法により固有振動数とモード形を得る。さらに、ハーフカーの状態空間モデルを利用して行列の固有値分解から重量を逆推定する。

(1) 物体追跡による車両のモード同定

図-1のように、車体の代表点前後各1点、タイヤの中心各1点を抽出し、それらを時刻歴で追跡する。

・タイヤの中心の抽出

各時刻歴においてタイヤの中心の座標を求める。

図-2のように、まず YOLOv5 物体検出器を適用し(2000枚のラベル付き画像により学習済み)、車両と車輪を検出する。1ピクセル単位での精度を必要とするため、さらにその後、大津の2値化によりホイール部分のみを抽出、境界を取ることで円の外接四角形と中心を得る。

・車体の代表点の抽出

タイヤ直上における車体の輪郭線の頂点を代表点として定義する。タイヤ中心位置を取得後、図-3の手順で輪郭線頂点の座標をサブピクセル単位で得る。輪郭検出には Sobel フィルタを適用した。



図-1 車両の代表点のトラッキングのイメージ

(1) 車両検出→車輪検出(YOLOv5)



(2) 閾値処理 (3) 境界と中心を取得



図-2 タイヤの中心位置の同定方法

(1) ホイールの直上を切り取り、フィルタを適用。

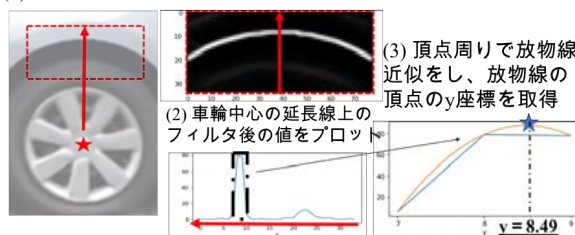


図-3 車体の点の位置の同定方法

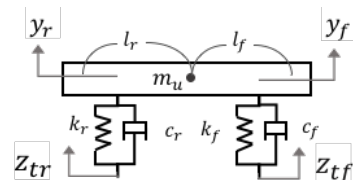


図-4 車体のハーフカーモデル

特に2軸車を対象とし、車両のモード同定では以下の図のようなハーフカーモデルを仮定し、タイヤの直上の車体の点の位置を y_f , y_r 、タイヤの中心点の位置を z_{tf} , z_{tr} と定義する。システムの入力と出力がそれぞれ z_{tf} , z_{tr} と y_f , y_r に対応し、時間領域モード同定法である SRIM (System Realization using Information Matrix)¹⁾を適用することで車体の固有振動数とモード形を推定した。

(2) 車両の重量推定

(1)で得られた車体の固有振動数($\lambda_1, \lambda_1^*, \lambda_2, \lambda_2^*$)とモード形($\phi_1, \phi_1^*, \phi_2, \phi_2^*$)を用いて、図-2における

キーワード 物体追跡, モード同定, 車両重量推定, SRIM(System Realization using Information Matrix)

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 TEL:03-5841-6098

車体の重量 m_u を推定する。ハーフカーの運動方程式は以下のように記述される。出力 $\mathbf{x} = (y_c, \theta)^T$ は y_f , y_r と重心位置 l_f , l_r によって表せる。

$$M\ddot{\mathbf{x}} + C\dot{\mathbf{x}} + K\mathbf{x} = K\mathbf{z}$$

$$M = \begin{pmatrix} m_u & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix}, \mathbf{x} = \begin{pmatrix} y_c \\ \theta \end{pmatrix}, \mathbf{z} = \begin{pmatrix} z_{tf} \\ z_{tr} \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} c_f + c_r & l_r c_r - l_f c_f \\ l_r c_r - l_f c_f & l_f^2 c_f + l_r^2 c_r \end{pmatrix}, K = \begin{pmatrix} k_f + k_r & l_r k_r - l_f k_f \\ l_r k_r - l_f k_f & l_f^2 k_f + l_r^2 k_r \end{pmatrix}$$

以下のように状態空間方程式に直せる。

$$\dot{\mathbf{X}} = A\mathbf{X} + P\mathbf{z}$$

$$A = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{E} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{pmatrix}, \mathbf{X} = \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \dot{\mathbf{x}} \end{pmatrix}$$

ここで、固有値分解の定義より、(1) で得られた車体の固有振動数・モード形を用いて行列 $\hat{\mathbf{A}}$ を表せる。

$$\hat{\mathbf{A}} = \Phi_X \Lambda \Phi_X^{-1}$$

$$\Phi_X = \begin{pmatrix} \phi_1 & \phi_1^* & \phi_2 & \phi_2^* \\ \lambda_1 \phi_1 & \lambda_1^* \phi_1^* & \lambda_2 \phi_2 & \lambda_2^* \phi_2^* \end{pmatrix}$$

$$\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_1^*, \lambda_2, \lambda_2^*)$$

以上から、行列 $\hat{\mathbf{A}}$ が推定でき、 $\hat{\mathbf{A}}$ が以下のような形で表せるので、左下の部分を取り、既知である K を用いて $\hat{M}$ を求めることができる。

$$\hat{\mathbf{A}} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{E} \\ A_k & A_c \end{pmatrix}, \hat{M} = -KA_k^{-1}, \hat{M} = \begin{pmatrix} \hat{m}_u & 0 \\ 0 & \hat{I} \end{pmatrix}$$

1成分目から 推定重量 $\hat{m}_u$ を得られる。

3. 結果 (1) トラッキングとモード同定

様々な車両に対して、検知アルゴリズムを適用した。図-5 に6車種に対するタイヤと車体の点の検出結果を示す。また、日産マーチを走行し、iPhone12 を用いて 120fps, 1-2 秒間撮影した。動画を分析し、固有振動数の推定を行った。iDrims³⁾ による計測を同時に行うことで固有振動数の真値と比較した。



図-5 様々な車種に対する点の検知

	日産マーチ
推定固有振動数(Hz)	1.6, 2.1
真値(Hz)	1.6, 2.2
精度 (%)	100, 95

表-1 固有振動数同定結果

(2) 重量推定

図-6 は固有振動数のみを利用した重量推定手法²⁾と、モード形も用いる本提案手法をシミュレーションに適用し、重心位置 l_f の推定値と重量の推定誤差の関係を表す。提案手法では重心の推定誤差に関わらず重量を推定できる。また、真値の l_f が M 行列の非対角項 (f_1, f_2) の二乗和 $f_1^2 + f_2^2$ を最小とするため、これを利用した重心位置や軸重の推定も可能である。

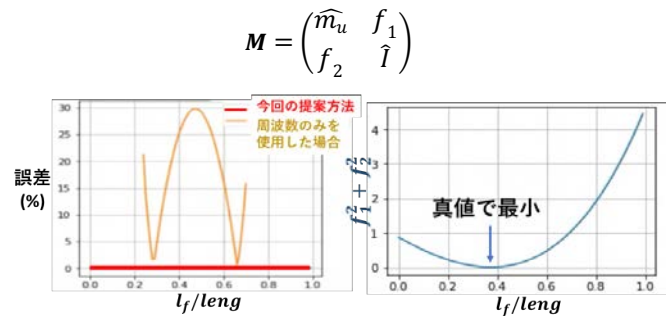


図-6 重心と推定誤差(左)と M の非対角項 2 乗和(右) 以上のアルゴリズムを用いて実車両(日産マーチ)に錘をのせ、様々なケースで重量・軸重推定を行った。表-2 はその結果を示す。

表-2 車両重量推定結果

	0.90 t	1.025 t	1.15 t	1.4 t
測定時間(秒)	2.0	1.0	1.8	1.3
推定重量(t)	0.8	1.2	1.0	1.4
精度 (%)	89	83	87	100
軸重(前後)(t)	0.48, 0.32	0.6, 0.6	0.4, 0.6	0.56, 0.84

4. 結論 画像処理を用いた車両のトラッキングでは、ロバスト性と精度を両立するために、物体検出とフィルタ、2 値化を組み合わせた手法を提案した。重量推定では、車両の固有振動数に加えてモード形を考慮し、行列の対角化を適用することで、重心位置の情報なしに総重量を推定できる。さらに、行列 M の非対角項の二乗和を最小とすることで重心位置を推定できた。これにより、総重量に加えて軸重も推定できる。

参考文献 1) D.Siringoringo and Y. Fujino, "Yokohama-bay bridge response characteristics in the 2011 Great-East Japan earthquake," *Assessment, Upgrad. Refurb. Infrastructures*, no. May, 2013, doi: 10.2749/ 222137813806501542.

2) 杉町敏之ら “車両の固有振動数を用いた車両重量推定に関する基礎検討,” 生産研究, 67(2), pp. 149-151, 2015.

3) 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, 75(1), pp. 1-16, 2019