

重量の異なる2車両走行時の軌道形状推定結果の比較による浮きまくらぎ検出

東京大学 学生会員 ○増田 大地 正会員 北原 優
正会員 薛 凱 正会員 趙 博宇
正会員 長山 智則 正会員 蘇 迪

1. はじめに

浮きまくらぎは、列車走行に伴って道床バラストが局所的に沈下し、まくらぎ底面と道床面との間に隙間が生じた状態である。浮きまくらぎは、列車通過時に顕在化するため、徒歩巡視等の目視で発見することは難しい場合がある。浮きまくらぎを放置すれば深刻な動的不安定へと発展していくため、早期検出・補修を行うことが重要である。

浮きまくらぎ検出の既往研究として、楠田ら¹⁾は、軌道検測車により軌道形状を測定し、軌道の2次元有限要素モデルを用いてまくらぎの浮き量を算出し、浮きまくらぎ箇所を検出した。しかし軌道検測車を保有する路線は限られるため、全ての営業路線で軌道形状の測定を高頻度を実施することは困難である。

一方、道路インフラの分野では、車両を4自由度ハーフカーモデルで表現し、スマートフォン等により計測された車両応答から路面縦断形状を推定する簡易手法が提案されている²⁾。そこで本研究では、この手法を鉄道のバラスト軌道に応用することで、列車走行時の車両振動を利用した軌道形状の推定および浮きまくらぎの検出を検討する。浮きまくらぎ検出には、重量の異なる2車両がそれぞれ通過する際のまくらぎ沈下量の差を利用する。

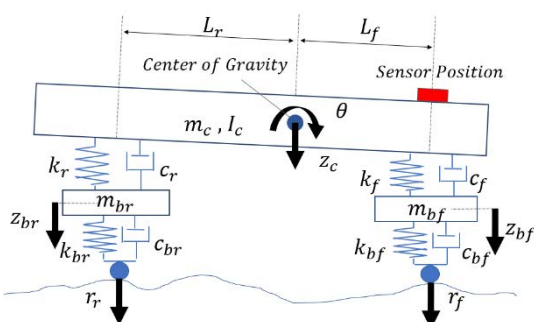


図-1 ハーフカーモデル

2. 軌道形状推定の概要

軌道形状推定では、図-1に示すハーフカーモデルを用い、その運動方程式は式(1)で与えた。

$$M\ddot{\mathbf{z}}(t) + C\dot{\mathbf{z}}(t) + K\mathbf{z}(t) = D\mathbf{r}(t) + E\dot{\mathbf{r}}(t) \quad (1)$$

ここに、 M, C, K はそれぞれ質量、減衰、剛性行列、 $\mathbf{z}(t)$ は各自由度の上下変位である。各台車の2つの輪軸を1輪軸としてモデル化しており $\mathbf{r}(t)$ はこの仮想的な輪軸位置における軌道形状である。 D, E はそれぞれ $\mathbf{r}(t)$ と $\dot{\mathbf{r}}(t)$ の係数行列を表す。離散時間の状態空間モデルを作成し、カルマンフィルタを適用することによって²⁾、各台車2つの車軸位置における軌道形状の平均値を推定する。

ハーフカーモデルの M, C, K は、12の未知パラメータ θ から構成される（表1）。前後台車位置における軌道形状推定量 $\hat{r}_f, \hat{r}_r$ は位置座標に違いはあるものの同一物理量に対する推定量であること、およびそのパワースペクトル密度関数（PSD）が両対数軸上でほぼ直線上となると考えられることから、以下の目的関数を最小化する θ を遺伝的アルゴリズムにより同定した。

$$F(\theta) = w \left[\frac{\int_{\omega'_a}^{\omega'_b} |P_{r_f}(\omega') - P_{r_r}(\omega')| d\omega'}{\int_{\omega'_a}^{\omega'_b} \frac{P_{r_f}(\omega') + P_{r_r}(\omega')}{2} d\omega'} \right] - (1-w) |(1-R_f^2)(1-R_r^2)| \quad (2)$$

ただし、空間周波数 ω について $\omega' = \log_{10}\omega$ である。ここに、 $P_{r_f}(\omega'), P_{r_r}(\omega')$ はそれぞれ前後台車位置で求めた軌道形状のPSDの対数値、 ω'_a, ω'_b は積分の上下限、 R_f^2, R_r^2 はそれぞれ $P_{r_f}(\omega')$ および $P_{r_r}(\omega')$ を線形回帰したときの決定係数、 w は重み係数である。

3. 数値シミュレーションによる検証

マルチボディー解析（商用ソフト Simpack）により生成した列車の動的応答データを用いて、軌道形状の推定精度を検証したところ、提案手法はクォータカーモデルを用いる従来の手法³⁾と比べ、精度よく推定できた（図-2）。

キーワード 軌道形状推定、浮きまくらぎ、ハーフカーモデル、カルマンフィルタ、システム同定
連絡先 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学工学系研究科 TEL 03-5841-6098

表-1 ハーフカーモデルのパラメータ同定結果

パラメータ	l_c	m_{bf}	m_{br}	k_f	k_r	k_{bf}	k_{br}	c_f	c_r	c_{bf}	c_{br}	L_f
推定値 / 真値	1.08	0.67	0.62	2.04	0.79	0.24	0.48	1.91	1.93	0.82	1.52	0.63

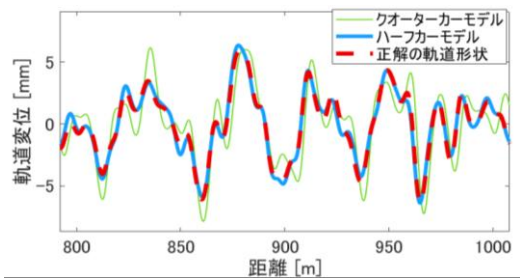


図-2 軌道形状推定精度

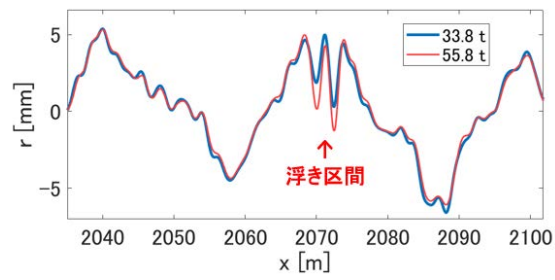


図-3 軽・重の推定軌道形状の比較

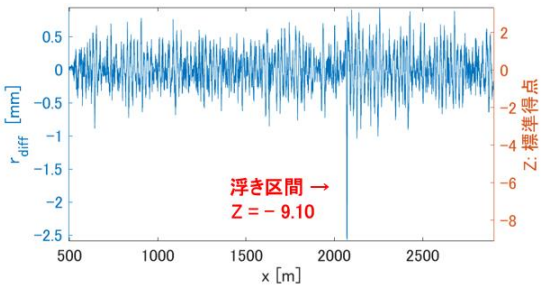


図-4 軽・重の推定軌道形状間の差分

表-2 提案手法のノイズに対するロバスト性

ノイズレベル	標準得点 Z_r	検出
0%	-9.10	○
3%	5.32	○
5%	3.79	△
10%	2.93	×

次に、総重量 33.8 ton と 55.8 ton の 2 車両（4 軸車両に換算して軸重 8.5ton,14.0ton）が、延長 3 m（まくらぎ 6 本分）の浮きまくらぎ区間を 2200 m 地点付近に有する 3000 m の軌道を走行した際の車両応答を生成した。2 車両各々について遺伝的アルゴリズムによるハーフカーモデルのパラメータ同定および軌道形状推定を実施した。推定結果 $\hat{r}$ を図- 3 に示す。健全区間では 2 車両の軌道形状推定結果は一致しているのに対して、浮きまくらぎ区間では重車両の沈下量が大きくなっている。また、2 車両の推定軌道形状の差分値 r_{diff} を図- 4 に示す。浮きまくらぎ発生区間では、健全区間と比べて r_{diff} が著しく大きく、提案手法により浮きまくらぎ区間を適切に検出することができた。

4. 検出能力の定量評価

位置 x における軽重車両間の差分値 $r_{diff}(x)$ を求め、その標準得点を次式により算出する。

$$Z_r(x) = \frac{r_{diff}(x) - \mu}{\sigma}$$

(3)

ここに、 μ 、 σ はそれぞれ r_{diff} の平均および標準偏差である。 $|Z_r| \geq 5$ となる区間を浮きまくらぎ区間と判定することとした。観測値の 0 %、3 %、5 %、10 % の標準偏差を持つ観測ノイズが付加された際の Z_r を調べた結果を表- 2 に示す。提案する浮きまくらぎ検出手法は 3 % 程度の観測ノイズまではロバストであることが分かった。

5. 結論

本研究では、列車走行時の車両振動を利用したハーフカーモデルによる動的軌道形状の推定手法と、車両重量差を考慮した浮きまくらぎ検知手法を構築し、数値シミュレーションを用いてその有用性を示した。今後は営業路線で実際にスマートフォン等で取得した車両応答データを用いて、本手法の妥当性を検討する予定である。

謝辞 鉄道総合技術研究所の田中博文氏には、貴重なご意見を賜りました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

1) 楠田将之, 松本麻美, 片岡宏夫: 軌道変位データに基づく浮きまくらぎ検出手法, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 74, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 21), I_543-I_551, 2018.

2) 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.

3) 中村俊敬: レール継ぎ目を考慮したマルチボディシミュレーションによる浮きまくらぎ検知手法の開発, 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻修士論文, 2022.