

車体振動加速度を用いたデータ駆動型軌道不整推定に関する研究

日大生産工(院) ○大木 廣也 日大生産工 綱島 均

1. 緒言

鉄道を安全かつ快適に走行させる為には軌道の維持管理及び予防保全が必用である。軌道に生じる異常は軌道不整、波状摩耗、継ぎ目落ちなどがあり、特に軌道に生じる数ミリの上下の歪みである軌道不整は、鉄道車両の乗り心地と安全性に密接に関係する。

軌道不整の検測に軌道検測車を用いる鉄道事業者は多いが、人員及び財源の少ない地方鉄道事業者では十分な検査が行えていないという問題がある。この問題に対し、営業列車に車体動揺計測装置を搭載し、車体振動加速度を常時計測することで軌道状態を診断する軌道状態診断システムが開発された¹⁾。この論文では、車体の上下振動加速度に対して時間周波数解析の手法の一つであるヒルベルト変換を行うことで、軌道の高低不整、継ぎ目落ちが診断可能であることが示されている。しかし、この方法は、車体の上下振動加速度を直接評価しているため、mm単位で管理されている軌道の管理基準値との対応が不明確であり、実際の保線において適用することが困難であるという問題点があった。また、カルマンフィルタを用いて車体上下振動加速度から軌道形状を逆問題として求める方法も提案されている²⁾が、鉄道事業者が日常に実施できる解析方法ではない。

そこで本研究では、車両走行シミュレーションによって得られた車体上下振動加速度と走行速度、軌道の高低不整のデータから、ガウス過程回帰³⁾を用いて、軌道不整を推定する方法を提案する。また、地方鉄道で計測した実車両の車体上下振動加速度に対して、提案の方法を適用し、有効性の検証を行う。本研究における軌道状態の診断手順を図1に示す。

2. 車両走行シミュレーション

2.1 シミュレーション概要

列車が軌道を走行すると、軌道形状に対応した振動が発生する。そこで本研究では、車体上下振動加速度と高低不整の関係を検証し、実車両の車体上下振動加速度から実軌道の高低不整を推定するため、シミュレーションを

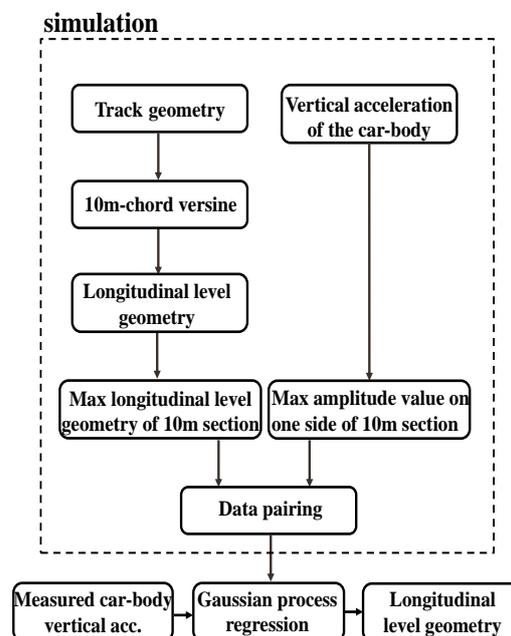


Fig.1 Diagnostic procedure

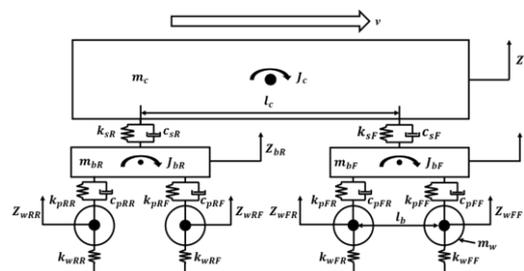


Fig.2 10-DOF vehicle model

用いて軌道異常を再現し、車体の上下振動加速度を算出する。

2.2 車両モデル

シミュレーションに使用した車両モデルを図2に示す。車両モデルは車体1、台車2、輪軸4の計7剛体で構成される。車体と台車はそれぞれ上下動とピッチの2自由度、輪軸は上下動1自由度とした¹⁾。車両のパラメータは、地方鉄道車両の実計測データのパワースペクトル密度から、試行錯誤的に決定した。

2.3 シミュレーション条件

軌道の不整量を統計的に変化させた直線軌道用意し、一定速度で車両を 5000m 走行させて、振動加速度と高低不整量のデータを取得した。車両走行速度は 20km/h から 80km/h として、10km/h ごとに速度を変化させて計算を行った。

2.4 軌道モデルの生成

軌道不整実形状データのスペクトル分析により求められるパワースペクトル密度(PSD)は、空間周波数 Ω [1/m] に対する統計的平均量として不整量の波長特性を表す。軌道状態なり線路等級を代表するものとして定式化が行われている⁴⁾。高低不整のモデルを下記に示す。

$$S(\Omega) = \frac{A\Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_r^2)(\Omega^2 + \Omega_c^2)} \quad (1)$$

重み係数 A を $A = 0.3 \times 10^{-5}$ から $A = 50 \times 10^{-5}$ まで変化させて、不整量の異なる軌道を 31 本生成した。また、カットオフ周波数 $\Omega_c = 1[1/m]$, $\Omega_r = 0.01[1/m]$ とした。

$A = 0.3 \times 10^{-5}$, $A = 3 \times 10^{-5}$, $A = 50 \times 10^{-5}$ の場合の軌道のパワースペクトル密度を図3(a)に示す。それぞれの重み係数に応じた軌道形状を図3(b)に示す。

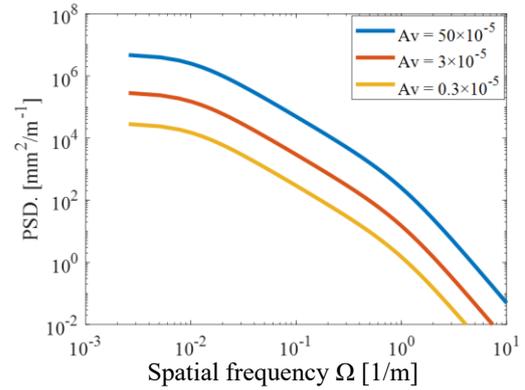
2.5 車体上下振動加速度

標準軌道形状を図4(a)に示す。60km/h で走行したときの車体上下振動加速度を図4(b)に示す。また、2021年2月26日に地方鉄道で計測した車体上下振動加速度を図4(c)に示す。

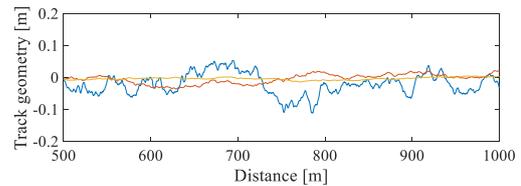
図5にシミュレーションで計算した車体上下振動加速度のパワースペクトル密度と、地方鉄道で計測した車体上下振動加速度のパワースペクトル密度を示す。診断上、重要となる 1Hz から 10Hz の特性が一致していることから、設定したパラメータの妥当性を確認した。

2.6 車体上下振動加速度と高低不整の関係

車両走行シミュレーションにより車体上下振動加速度を生成し、10m 毎の片側最大振幅値を算出した。また、10m ごとの 10m 弦正矢法による高低不整最大値を算出し、データをペアリングした。ペアリングした結果を図6に示す。

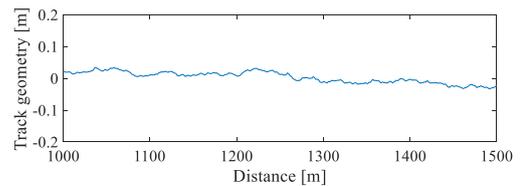


(a) PSD of track

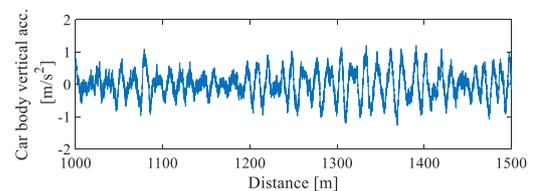


(b) Track geometry

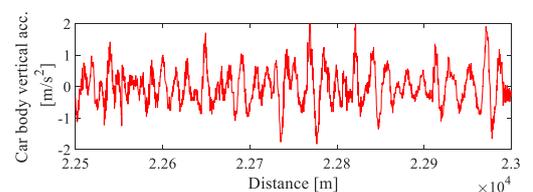
Fig.3 Track model



(a) Track geometry of normal track



(b) Simulated car-body vertical acceleration



(c) Measured car-body vertical acceleration in a regional railway line

Fig.4 Modelled track geometry, simulated car-body vertical acceleration and measured car-body vertical acceleration in 26 February 2021.

2.7 10m弦正矢法

一般に、軌道不整は 10m 弦正矢の振幅により計測・管理されている。そこで軌道形状を推定した後、10m 弦正矢による高低不整に換算し評価を行う。10m 弦正矢法とは、10m の糸をレールに張り、その中央でのレールと糸の離れを測定する方法である。軌道形状から高低不整を計算する式を以下に示す。a(x) は 10m 弦正矢による高低不整、b(x) は軌道形状である。

$$a(x) = b(x) - \frac{b(x-5) + b(x+5)}{2} \quad (2)$$

3. ガウス過程回帰を用いた車体上下振動加速度と高低不整の回帰分析

3.1 ガウス過程回帰

ガウス過程回帰は回帰分析手法の一つで、出力の期待値（平均）と分散を求めることが可能であり、非線形な関係に対しても対応が可能である。ガウス過程回帰は

1. 入力 x と出力 y のペアからなる学習データ $\{(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)\}$

2. 入力 x と入力 x' の間の類似度であるガウス分布の共分散を与えるカーネル関数 $k(x, x')$

の二つで定義される。学習データ $X = (x_1, \dots, x_N)$ および $y = (y_1, \dots, y_N)$ が与えられたとき、テストデータの新しい入力に対する出力は以下の式で表される。

$$p(y^* | x^*, X, y) = N(k_*^T K^{-1} y, k_{**} - k_*^T K^{-1} k_*) \quad (3)$$

カーネル関数は最も一般的に使用される関数の一つである動径基底関数(RBF)カーネルを用いた。動径基底関数(RBF)カーネルを下記に示す。

$$k(x, x') = \theta_1 \exp\left(-\frac{|x - x'|^2}{\theta_2}\right) \quad (4)$$

3.2 ガウス過程回帰結果

車体上下加速度の 10m 毎の片側最大振幅値と 10m 弦正矢による高低不整最大値をペアリングした結果に対してガウス過程回帰を用いて、走行速度に対応した応答曲面を求めた。60km/h で走行した際の車体上下振動加速度と高低不整のガウス過程回帰結果を図 7(a)

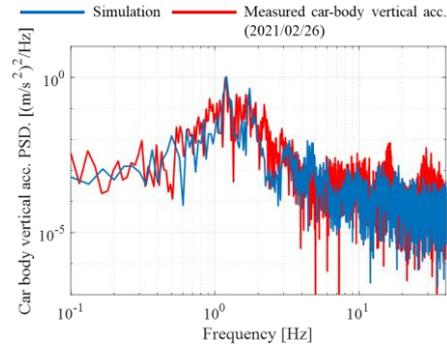


Fig.5 Comparison of PSD

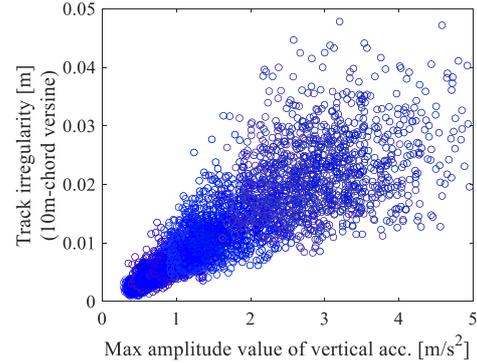
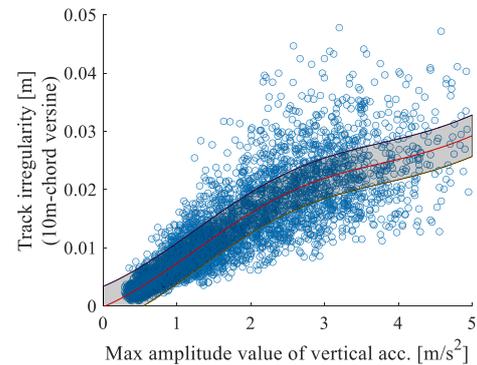
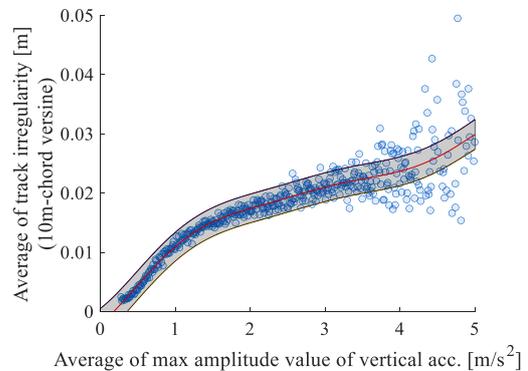


Fig.6 Corellation between vertical acc. and track irregularity



(a) Gaussian process regression by all data



(b) Gaussian process regression by average data

Fig.7 Response surface obtained by Gaussian process regression.

に示す。しかし、大量のデータから応答曲面を算出するには計算時間が多く必要である。その為ペアリングしたデータの高低不整最大値を車体上下振動加速度 $0.01[m/s^2]$ の範囲で平均化し、ガウス過程回帰を用いて応答曲面を求めた。結果を図 7(b) に示す。図 7(a), (b) の赤い実線は分布の平均、黒枠の部分はガウス事後分布の誤差範囲を示している。図 7(a) と図 7(b) を比較すると、両者の応答曲面はほぼ一致していることから、データを平均化した後にガウス過程回帰を行っても問題ないことがわかった。

4. 実測した車体上下加速度データを用いた高低不整推定

図 8(a) に地方鉄道において計測した車体上下振動加速の 10m 区間の最大値を算出し、色付けを行い作成した軌道状態図を示す。この図は片側最大振幅値が $1[m/s^2]$ 以上を $0.5[m/s^2]$ 感覚で色付けしている。

次に図 7(b) に示した応答曲面を利用して、地方鉄道において計測した車体上下振動加速度から、軌道高低不整を推定した。推定結果を図 8(b) に示す。図 8(b) は異なる日の地方鉄道路線の高低不整の推定結果を表している。高低不整 $5[mm]$ 刻みで色付けを変えている。このようにして、車体振動加速を基にした軌道状態図を、軌道管理を行いやすい $[mm]$ 単位の軌道不整状態図に変換することが可能になる。

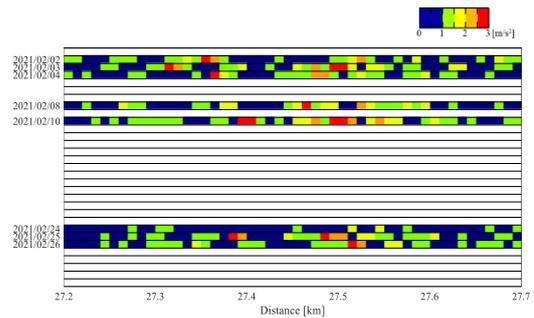
図 8(a) と図 8(b) を比較すると車体上下振動加速度が $2[m/s^2]$ 以上が計測されているキロ程 $27.3\sim 27.4km$ では、高低不整が $20[mm]$ であると推定できる。管理目標値が $19[mm]$ であることから、今後の軌道補修を計画する必要がある区間であることがわかった。

一方、車体上下振動加速度が $1.5[m/s^2]$ 以上計測されたキロ程 $27.5\sim 27.6km$ において、高低不整は $10mm$ 程度であると推定される箇所があった。これは、軌道不整の影響でより、走行速度の影響が大きいためであると考えられる。このように、提案の方法は速度の影響も考慮した軌道不整推定が可能である。

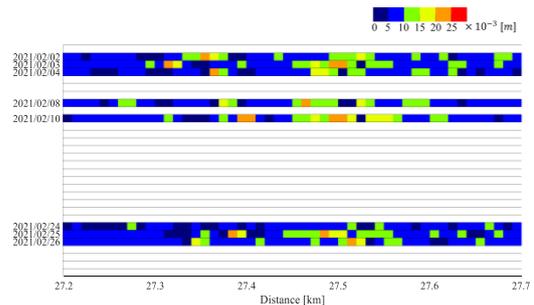
5. まとめ

本研究では、車両走行シミュレーションによって得られた車体上下振動加速度と走行速度、軌道の高低不整のデータからガウス過程回帰を用いて軌道不整を推定する方法を提案した。

得られた応答曲面を用いて、地方鉄道で計測した実車両の車体上下振動加速度、走行速度か



(a) Track condition diagram based on vertical acc.



(b) Estimate of track irregularity

Fig.8 Track condition diagram (sections from 25.5 to 26.0 km in a regional railway line).

ら軌道不整の推定を行った。その結果、軌道異常が発生している箇所を明確化することができた。今後は他の診断区間にも同様の解析を行い、検討をしていく予定である。

参考文献

- 1) Tsunashima, H. and Hirose, R. “Condition monitoring of railway track from car-body vibration using time frequency analysis”, Vehicle System Dynamics, DOI:10.1080/00423114.2020.1050808 (2020)
- 2) Odashima, M. et al., “Track geometry estimation of a conventional railway from car-body acceleration measurement”, Mechanical Engineering Journal, 2017, Vol. 4, Issue 1, (2017) page 16-00498
- 3) Gaussian Process Regression From First Principles(2021), <https://towardsdatascience.com/gaussian-process-regression-from-first-principles-833f4a5f842/>(参照2021-09-24)
- 4) Madamila DUMITRIU “Method to synthesize the track vertical irregularities”, Scientific Bulletin of the „Petru Maior”Vol.11(XXVIII)no.2,2014