

営業列車の車体振動加速度を用いた軌道状態の監視に関する研究

日大生産工(院) ○小田嶋 舞 日大生産工 綱島 均
交通安全環境研究所 森 祐貴 京三製作所 浅野 晃

1 まえがき

鉄道の安全性向上のためには、軌道状態を監視し、その状態に応じて適切な保守を行うことが必要である。現在行われている軌道不整の計測方法として、軌道検測車によるものや保守係員によるものがある。しかし、コストの問題から地方鉄道では費用の確保が難しく、これらの手法を使って十分な検査が行えない事業者も少なくない。永沼らは、新幹線の営業列車を用いた軌道状態監視の実現を目的として、カルマンフィルタを用いて車体動揺から軌道不整を推定する手法の開発を行っている¹⁾。この手法は営業列車に簡易な計測装置を載せて計測を行う為、安全性やメンテナンス性が高いだけでなく導入コストを低くすることが出来る。従って在来線や地方鉄道における軌道状態監視の実現に対しても有効な手法であると考えられる。

本稿では地方鉄道事業者協力の元、車体動揺の計測を行い、計測した車体上下加速度のRMS値が著大となった箇所の軌道不整を推定した結果について述べる。

2 軌道不整推定手法

2.1 車両モデル

本研究で使用する車両モデルをFig.1に示す。モデルは車体2自由度（上下動、ピッチ）、各台車（上下動、ピッチ）の合計6自由度を考慮した。ここで、 Z_c は車体の上下動、 Z_{a1} は前台車、 Z_{a2} は後台車の上下動を表す。また、 θ_c は車体のピッチ角、 θ_{a1} は前台車、 θ_{a2} は後台車のピッチ角を表す。 r_{1a} , r_{1b} , r_{2a} , r_{2b} は各輪軸に与えられる軌道不整による鉛直方向の入力である。車両モデルの各パラメータは一般的な在来線の車両を想定し設定した。

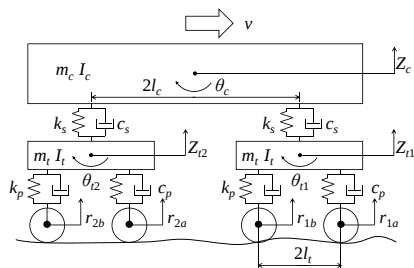


Fig.1 Linear vehicle model

2.2 推定のための状態空間モデル

本研究では、軌道不整の推定に先行研究で考案されたカルマンフィルタを用いた推定手法を使用する。高低不整推定の為の状態方程式と観測方程式を次式に示す。

状態方程式

$$\begin{bmatrix} x_n \\ x_{n-1} \\ \vdots \\ x_{n-L+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 1 & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{n-1} \\ x_{n-2} \\ \vdots \\ x_{n-L} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} (u_n + w_n) \quad (3)$$

観測方程式

$$y_n = [h(0) \ h(1) \ \cdots \ h(L)] \begin{bmatrix} x_n \\ x_{n-1} \\ \vdots \\ x_{n-L+1} \end{bmatrix} + v_n \quad (4)$$

ここで、 x_n は軌道形状、 y_n は車体上下加速度、 v_n は観測ノイズである。通常、外部入力である軌道形状 u_n は既知の確定入力として扱われるので、これを求めることはできない。そこで、(3)式のように軌道形状を u_n とシステムノイズ w_n を加算してランダムウォークで表現した。車両モデルは、(4)式のようにインパルス応答を用いた畳み込み積分を観測方程式で表現した。 h は軌道形状に対する車体上下加速度の単位インパルス応答、 L はその総数である。このインパルス応答は一定速度範囲毎に切り替えることで走行速度の変化に対応する²⁾。本研究では、車両モデルを用いて前台車直上のインパルス応答を走行速度1km/h毎にあらかじめ計算し、走行速度に対応するものを解析に用いた。例として、走行速度60km/h時のインパルス応答をFig.2に示す。以上の状態空間モデルによって、カルマンフィルタを用いた軌道不整の推定が可能となり、車体上下加速度から軌道形状を未知の状態変数の一成分として逐次推定する。

3 実証実験

3・1 車体動揺の計測

地方鉄道事業者協力のもと、2016年5月24日に先行研究で開発された小型レール診断装置^{3,4)}を先頭車両の運転室横の空きスペースに設置し、実車走行試験を実施した(Fig.3)。この実車走行試験によって得られた車体上下加速度を用いて、軌道不整の項目の一つである高低不整の推定を行う。また、軌道検測車によって計測された高低不整は2015年5月30日に計測されたものである。



Fig.3 Measurement of car-body acceleration using on-board sensing device

3・2 推定結果

上下加速度のRMS値が著大となった箇所についてカルマンフィルタを用いて高低不整を推定した。推定におけるシステムノイズおよび観測ノイズの分散はそれぞれ $\sigma_w^2 = 1.00 \times 10^{-1} \text{ m}^2$, $\sigma_v^2 = 5.00 \times 10^{-3} (\text{m/s}^2)^2$ とした。推定した高低不整は左右レールの平均値である。推定に用いた走行速度を(a)、車体上下加速度を(b)としてFig.4に、推定を行った箇所のRMS値、推定した高低不整と軌道検測車の計測による高低不整をFig.5に示す。

Fig.5からRMS値が著大となった箇所について、高低不整の推定結果からも13.76[km]地点に25[mm]程の著大となる箇所を確認することができる。また、推定した高低不整は軌道検測車の計測による高低不整と近い値を示していることから、高低不整量が大きい箇所については良好な精度で推定することができていることを確認した。

以上の結果から、RMS値が著大となる箇所と推定した高低不整量が大きくなる箇所が一致することが分かり、今後注意が必要となる箇所について、軌道保守の基準となる高低不整の値による評価が可能であると考えられる。

4 まとめ

本稿では、地方鉄道事業者協力の元、車体動揺の計測を行い、計測した車体上下加速度のRMS値が著大となった箇所の軌道不整を推定した。その結果、RMS値が著大となる箇所と推定した高低不整量が大きくなる箇所が一致することを確認できた。また、推定結果については推定精度が良好であることを確認した。

本研究は、JSPS 科研費26420182「可搬型プローブ装置を活用したレール状態常時監視システムの開発（綱島 均）」の助成を受けたものであり、ここに謝意を表す。

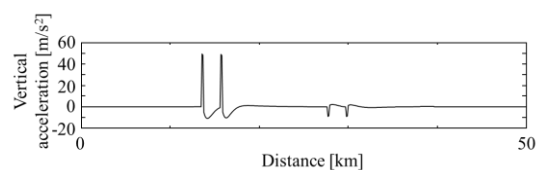
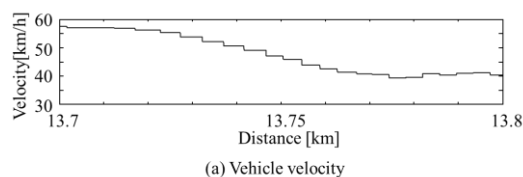
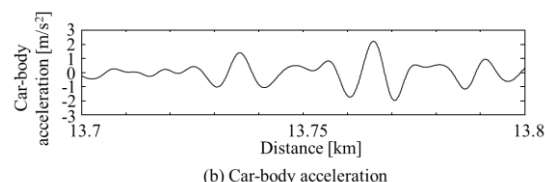


Fig.2 Impulse response(60km/h)



(a) Vehicle velocity



(b) Car-body acceleration

Fig.4 Measured data

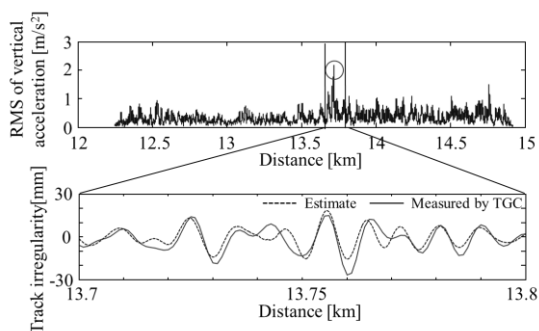


Fig.5 Estimation result

「参考文献」

- 1) 永沼泰州, 小林尊仁, 綱島均, 状態空間モデルを用いた軌道の状態監視, 機械学会関東支部第18期総会講演会, (2012)pp.381-382.
- 2) 浅見祥平, 永沼泰州, 綱島均, 車体振動加速度を用いた軌道狂いの状態監視に関する研究(車両走行速度の変化に対応した推定手法の開発), 第21回鉄道技術・政策連合シンポジウム, No.15-63(2014)
- 3) 小島崇, 綱島均, 松本陽, 水間毅, 車上測定データによる軌道の異常検出(第2報, プローブシステムの開発と検証), 日本機械学会論文集C編, 75巻754号, (2009)pp.264-271.
- 4) 荻野誠之, 綱島均, 柳沢一機, 他, 小型レール診断装置を用いた軌道の状態診断装置ソフトの開発, 電気学会論文誌D(産業応用部門誌), Vol.135, No.4, (2015)pp.395-402.