車体振動加速度を用いた地方鉄道の軌道不整推定に関する研究

日大生産工(院)	○浅見 祥平	日大生産工	綱島 均
交通研	森 裕貴	日大生産工(院)	荻野 誠之
京三製作所	浅野 晃		

1 まえがき

鉄道車両を安全かつ快適に走行させるため には, 軌道不整の計測と補修による維持管理が 必要不可欠であり, 軌道不整の計測は高頻度で 行うことが望ましい.現在,軌道不整は「軌道 検測車」と「保線係員の巡回」によりの計測が 行われているが,運用コストや人員などの問題 から、計測頻度が制限されている.この軌道不 整の計測を営業列車から取得したデータを用 いて行うことができれば、より高頻度で軌道不 整を監視することが可能となる12).筆者らは, 営業列車を用いた軌道状態監視の実現を目的 に、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を開発中である3)4)5).こ の手法は車体に簡易な計測装置を搭載して行 うことから,安全性やメンテナンス性が高いだ けでなく、導入コストが低いため、在来線や地 方鉄道などにおける軌道状態監視の実現に対 して有効な手法であると考えられる(Fig.1).

本稿では、考案した推定手法について、在来 線や地方鉄道を想定した模擬データを用いた シミュレーションにより、車体振動加速度から 高低不整を推定する理論検討を行った結果に ついて紹介する.また、鉄道事業者協力のもと 実車走行試験を実施し、計測した車体振動加速 度を用いて高低不整の推定を行った結果も紹 介する.

なお,本稿では,軌道の実形状を「軌道形状」, 10m弦正矢法で計測されるものを「高低不整」 呼ぶ.

2 軌道不整推定手法

2.1 使用する車両モデルの構築

本検討で使用する車両モデルをFig.2に示す. モデルは、車体2自由度(上下動,ピッチ), 各台車2自由度(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,Z₁ は前台車,Z₂は後台車の上下動を表す.また, θ_{c} は車体のピッチ角、 θ_{t1} は前台車、 θ_{t2} は後 台車のピッチ角を表す. $r_{la}, r_{lb}, r_{2a}, r_{2b}$ 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 Track irregularity estimation from car-body acceleration



Fig.2 Linear vehicle model

2.2 推定のための状態空間モデル

車体振動加速度は営業列車による計測が容 易だが、その計測波形は走行速度の影響を受け、 高低不整波形とは異なる.よって、車体振動加 速度を軌道状態監視に用いるためには、その計 測波形から高低不整を推定する手法が必要と なる.本研究では、車体振動加速度から高低不 整の推定に代表的な状態推定手法であるカル マンフィルタを用いる.カルマンフィルタを用 いて高低不整を推定するための状態空間モデ ルを次式に示す^{34,5}.

Track irregularity estimation from car-body acceleration for local railway line

Shohei AZAMI, Hitoshi TSUNASHIMA, Hirotaka MORI, Masayuki OGINO and Akira ASANO



 $y_n = \begin{bmatrix} h(0) & h(1) & \cdots & \cdots & h(L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{n-1} \\ \vdots \\ \vdots \\ x_{n-L+1} \end{bmatrix} + v_n$ (2)

ここで, xnは軌道形状, ynは車体振動加速度, vnは観測ノイズである.通常,外部入力である 軌道形状un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、 (1)式のように軌道形状をunとプロセスノイズ w』を加算してランダムウォークで表現した.車 両モデルは、(2)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する. hは軌道形状に対する車体振動加速度の単位イ ンパルス応答,Lはその総数である.このイン パルス応答は走行速度の変化に対応するため に一定速度範囲毎に切り替える(Fig.3).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毎に計算し、数値 シミュレーションに用いた.例として、走行速 度60km/h時のインパルス応答をFig.4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高低不整の推定が可能となり、 車体振動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.カルマンフィ ルタのアルゴリズムを式(3)~(7)に示す.

一期予測
$$x_{n|n-1} = Fx_{n-1|n-1} + Gu_{n-1}$$
 (3)

$$\boldsymbol{P}_{n|n-1} = \boldsymbol{F} \boldsymbol{P}_{n-1|n-1} \boldsymbol{F}^{T} + \boldsymbol{G} \boldsymbol{Q} \boldsymbol{G}^{T}$$
(4)

$$\frac{\mathcal{T} \mathcal{T} \mathcal{T} \mathcal{T}}{K_n = P_{n|n-1} H^T (HP_{n|n-1} H^T + R)^{-1}}$$
(5)

$$\boldsymbol{x}_{n|n} = \boldsymbol{x}_{n|n-1} + \boldsymbol{K}_n(\boldsymbol{y}_n - \boldsymbol{H}\boldsymbol{x}_{n|n-1})$$
(6)

$$\boldsymbol{P}_{n|n} = \boldsymbol{P}_{n|n-1} - \boldsymbol{K}_n \boldsymbol{H} \boldsymbol{P}_{n|n-1} \tag{7}$$

ここで,**Q**はプロセスノイズ,**R**は観測ノイズ の共分散行列である.



Fig.3 Generation of impulse response



Fig.4 Impulse response (60km/h)

- 3 模擬データを用いたシミュレーション
- 3.1 理論検討の手順

本研究では、車体振動加速度から高低不整を 推定する理論検討を以下(1)~(5)に示す手順で 行った.

- (1) 2階の微分方程式で表される車両モデルの 運動方程式を離散化し、状態方程式を求める.
- (2) 実際の軌道と列車の運転を模擬した軌道 形状データ(波長6.00m以上)と速度データ を作成する.
- (3) (2)の軌道形状データと速度データを(1)の 車両モデルに入力し、前台車直上の車体振動加速度を計算する.この車体振動加速度 に正規分布ノイズを加え、観測値とする.
- (4) カルマンフィルタを用いて、(3)で観測値と した車体振動加速度から軌道形状を推定す る.
- (5) (2)の軌道形状と(4)で推定した軌道形状を 10m弦正矢による高低不整に換算し,推定 精度の評価を行い,本研究における推定手 法の有効性を確認する.

3.2 車体振動加速度の計算

車体振動加速度から高低不整の推定を行う 理論検討として、本来、センサで計測する車体 振動加速度には車両モデルから計算した車体 振動加速度にノイズを加えたものを使用し、数 値シミュレーションを行う.Fig.5に車両モデル に入力した軌道形状,Fig.6に車体振動加速度の 計算時における走行速度,Fig.7に計算した車体 振動加速度を示す.軌道形状と速度曲線は在来 線や地方鉄道の1駅区間分を想定し設定した. また、計算した車体振動加速度を観測値として 用いるために加えた正規分布ノイズの標準偏 差は1.00×10⁻³ m/s²とした.



3. 3 シミュレーション

一般に,高低不整は10m弦正矢の振幅により 計測・管理されている^の.そこで本研究では, 軌道形状を推定した後,10m弦正矢による高低 不整に換算して推定結果の評価を行った.換算 に用いる式を以下に示す. *a*(*x*)は10m弦正矢に よる高低不整,*b*(*x*)は軌道形状となる.

$$a(x) = b(x) - \frac{b(x+5) + b(x-5)}{2}$$
(8)

カルマンフィルタを用いて車体振動加速度 から軌道形状と高低不整を推定した結果を Fig.8に示す.推定におけるシステムノイズwn および観測ノイズ v_n 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. Fig.8より,軌道形状は長波長成分が推定できないことによる差異が見られたが,これは在来線や地方鉄道を想定し,設定した走行速度では車体振動加速度に軌道形状まで推定するための長波長成分が含まれないためであると考えられる.一方で,軌道の管理に用いられている10m弦正矢の振幅による高低不整は推定誤差が約2.00mm以下であり,良好な精度の推定結果が得られた.この結果により,カルマンフィルタを用いた推定手法の軌道状態監視への有効性が確認された.



Fig.8 Simulation results with the proposed method

4 実測の車体振動加速度による推定

鉄道事業者協力のもと実車走行試験を実施 し,計測装置を先頭車両の運転室横の空きスペ ースに設置することで,車体振動加速度,角速 度の計測を行った. Fig.9に営業列車で計測した 車体振動加速度,Fig.10に計測を行ったときの 走行速度を示す.使用した計測データは直線区 間500mを用いた.カルマンフィルタを用いて 実測の車体振動加速度から推定した高低不整 をFig.11(a), 実測の10m弦正矢による高低不整 をFig.11(b)に示す. 推定した高低不整は左右レ ールの高低不整の平均値である. 推定における システムノイズwnおよび観測ノイズvnの分散 はそれぞれ $\sigma_w^2 = 1.00 \times 10^{-1} \,\mathrm{m}^2$, $\sigma_v^2 = 5.00 \times 10^{-3}$ (m/s²)²とした. Fig.11より, 推定した高低不整 は実測の軌道不整と比較して差異は見られる が,実測の高低不整において高い値を示す箇所 はおおよそ推定できていると考えられる. 営業 列車を用いた高頻度計測により,高低不整の変 化を監視することを考えると,実測データにお いても有効であることが期待できる.



Fig.9 Measured car-body acceleration







(a) Estimated track irregularity



(b) Weasured track inegularity

Fig.11 Estimation results with the proposed method

5 まとめ

本稿では、営業列車での計測が容易な車体動 揺を用いた軌道状態監視手法の実現を目的と して、カルマンフィルタを用いた軌道不整推定 手法を考案し、車体振動加速度から高低不整を 推定する検討を行った.本研究で得られた結果 を以下に示す.

(1)車両に対する入力である軌道形状をラン ダムウォークモデルで表現し、状態方程式 に組み込むことで、カルマンフィルタによ る逐次推定を可能にした.また、車両モデ ルは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、インパルス応答を 一定速度範囲毎に切り替えることで走行速 度の変化に対応した.

- (2) 在来線や地方鉄道を想定した模擬データ を用いたシミュレーションの結果、車体振 動加速度から、軌道の管理に用いられてい る10m弦正矢の振幅による高低不整を良好 な精度で推定することができた.
- (3) 鉄道事業者協力のもと実車走行試験を実施し、計測を行った車体振動加速度を用いて高低不整を推定した.その結果、推定した高低不整は、実測の高低不整量が大きい場所については、良好な精度で推定することができた.

本研究の成果から、考案した軌道不整推定手 法が営業列車を用いた軌道状態監視に有効で あることが期待できる。今後は車体振動加速度 の計測を継続し、軌道不整の変化を監視してい く.また、推定に用いるインパルス応答を計算 する車両モデルの同定について検討すること で、推定精度の向上に取り組みたい。

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,ここに謝意を表する.

「参考文献」

1) 中川正樹, 三輪昌弘, 高見沢実, 営業 列車を用いた軌道の状態監視, 第63回土木 学会年次学術講演会 (2008), pp. 79-80. 2) 荻野誠之, 綱島均, 柳澤一機, 森裕貴, 浅野晃, 若井翔平, 小型レール診断装置を 用いた軌道状態診断システムの開発, 電気 学会論文誌D(産業応用部門誌), Vol.135, No.4 (2015), pp. 395-402.

3) 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).

4) Tsunashima, H., Naganuma, Y. and Kobayashi, T, Track geometry estimation from car-body vibration, Vehicle System Dynamics, Vol. 52, No.4 (2014).

5) 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 (2014).

6) 吉村彰芳, 軌道狂い原波形の復元に関 する理論的基礎とその応用,鉄道技術研究 報告, No.1336 (1987).