

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

日大生産工 (院)
日大生産工

○小林 尊仁 日本機械保線 永沼 泰州
綱島 均

1. 緒言

鉄道車両を安全でかつ快適に走らせるためには、軌道状態の維持管理が不可欠であり、高頻度で軌道の状態監視をすることが望ましい。現在、新幹線の軌道は、軌道検測車と複数の営業車両によって状態監視が行われている。軌道検測車による検測は精密な軌道測定が可能になっているものの、コストや維持管理などの点から走行頻度は10日に1回程度に留まる。これを補完するため、複数編成の営業車両に搭載した自動動揺測定装置（車体振動加速度および軸箱加速度計）を用いて1日に数回、軌道状態の監視が行われる¹⁾。もしも将来、全列車に装置を搭載して軌道状態を常時監視できるなら、適切な保全時期、保全内容の計画によってより確実な予防保全の実現が期待できる²⁾。そこで著者らは、安価かつシンプルな軌道状態監視装置の実現を目指し、測定が容易な車体振動加速度を用いて軌道狂いを推定する手法を開発中である。先行研究³⁾において、定速走行中の車体振動加速度から高低狂いを推定する理論検討が行われ、良好な精度で高低狂いが推定できることを確認した。

本稿では、速度変化に対応できる逆解析手法に、カルマンフィルタを用いた結果と精度の評価について紹介する。

2. 車両モデルの構築と妥当性の検証

2.1. 車両モデルと状態方程式

本研究で用いる車両モデルを図1、パラメータを表1に示す。モデルは直線走行（270km/h）を想定した1車両の線形モデルとし、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）を考慮した計6自由度モデルを使用した。ここで、 Z_b は車体の上下動、 Z_{t1} は前台車、 Z_{t2} は後台車の上下動を表す。また、 θ_b 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_{1a} , r_{1b} , r_{2a} , r_{2b} は各輪軸に与えられる鉛直方向の入力である。車両モデルに高低狂いを強制変位として入力した場合の運動方程式は(1)式となる。

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

ここで、 $\mathbf{Z}^T(t)=[Z_b \ l_b\theta_b \ Z_{t1} \ l_t\theta_{t1} \ Z_{t2} \ l_t\theta_{t2}]$, $\mathbf{r}^T(t)=[r_{1a} \ r_{1b} \ r_{2a} \ r_{2b}]$ となる。車両運動シミュレーションなどの時系列解析の問題は、状態空間モデルを用いることによって状

態推定の問題として定式化できる。(1)式をニューマークβ法 ($\gamma=1/2$, $\beta=1/6$) を用いてデータ間隔 d で離散化すれば、状態方程式と観測方程式が得られる。

$$\mathbf{x}_n = \mathbf{F}\mathbf{x}_{n-1} + \mathbf{G}\mathbf{u}_n + \mathbf{w}_n \quad (2)$$

$$\mathbf{y}_n = \mathbf{H}\mathbf{x}_n + \mathbf{v}_n \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{x}_n$ は状態ベクトル、 $\mathbf{u}_n$ は入力ベクトル、 $\mathbf{y}_n$ は出力ベクトルであり、 $\mathbf{w}_n$ はシステムノイズ、 $\mathbf{v}_n$ は観測ノイズである。また、 $\mathbf{F}$ は状態遷移行列、 $\mathbf{G}$ は入力行列、 $\mathbf{H}$ は観測行列である。状態遷移行列 $\mathbf{F}$ と入力行列 $\mathbf{G}$ は、以下の行列 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ を用いて $\mathbf{F}=\mathbf{B}/\mathbf{A}$, $\mathbf{G}=\mathbf{C}/\mathbf{A}$ となる。

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} & -\beta d^2 \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} & -0.5d \\ \mathbf{K} & \mathbf{C} & \mathbf{M} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \mathbf{I} & d & (0.5-\beta)d^2 \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} & 0.5d \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{E} & \mathbf{D} \end{pmatrix} \quad (4)$$

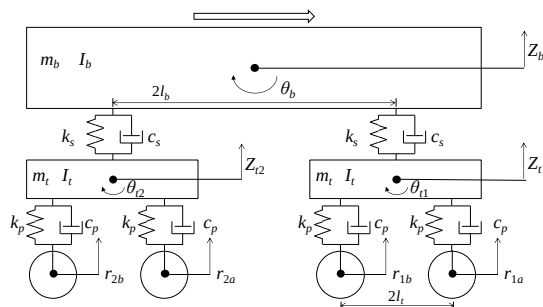


Fig.1 Linear vehicle model

Table.1 Vehicle parameters

Symbol	Description	Value	Unit
m_b	Car-body mass	26514	kg
m_t	Bogie mass	3005	kg
I_b	Car-body pitch inertia	1400000	kgm ²
I_t	Bogie pitch inertia	4695.3	kgm ²
$2l_b$	Car-body base	17.5	m
$2l_t$	Wheel base	2.5	m
k_p	Primary suspension vertical stiffness	2488	kN/m
k_s	Secondary suspension vertical stiffness	620	kN/m
c_p	Primary suspension vertical damping	170	kNs/m
c_s	Secondary suspension vertical damping	30	kNs/m

Estimation of Track Irregularity Using Car-body Vertical Acceleration

Takahito KOBAYASHI, Hitoshi TSUNASHIMA and Yasukuni NAGANUMA

2.2. 車両特性の推定とシステム同定

走行中の車両を動的なシステムとみなすと、入力はその大半が軌道変位であり、出力は車体動揺等の車両運動と考えられる。これらの入出力関係が線形システムとして近似されるならば、周波数応答を考える事ができ、車両の振動現象を見通しよく把握することが可能となる⁴⁾。

軌道検測車により実測した高低狂いと、営業車両により実測した車体上下加速度のコヒーレンスを図2、周波数応答関数を図3に示す。図3には車両モデルにより算出した理論値を併記した。図2よりコヒーレンスは一部を除いて高い値を示しており、車体上下加速度はそのほとんどが高低狂いに起因し、入出力の関係はほぼ線形であることが確認できた。図3(a)(b)より同定したパラメータを使用した理論値は振幅、位相とも推定値をよく再現している。図4に車両モデルを用いて算出した車体上下加速度と、営業車両で実測した車体上下加速度を示す。図4より車両モデルと同定したパラメータの妥当性を示している。

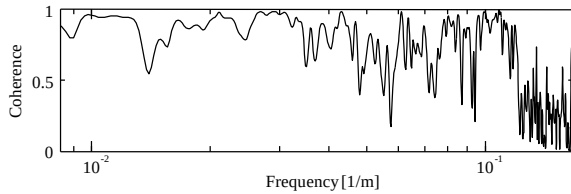
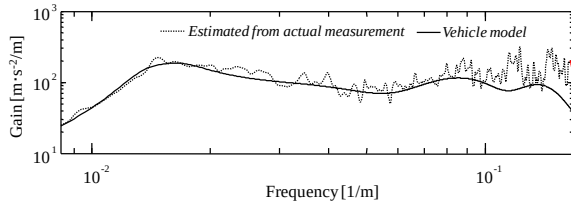
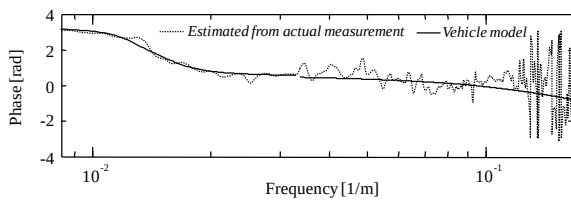


Fig.2 Coherence between input (track irregularity) and output (car-body acceleration)



(a) Gain characteristics



(b) Phase characteristics

Fig.3 Frequency response

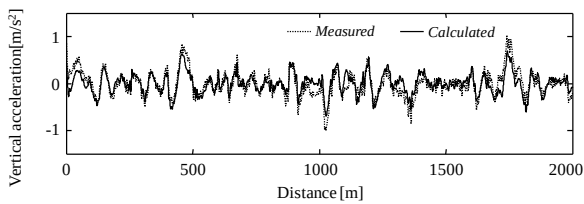


Fig.4 Measured and calculated car-body acceleration

3. 逆解析による高低狂いの推定

3.1. 車速変化時における車体上下加速度の算出

速度変化時における車体上下加速度は、車両モデルから算出した値を用いる。図5に高低狂い、図6に走行速度、図7に得られた車体上下加速度を示す。走行速度は、ステップ状に変化した場合を仮定している。本研究では、算出された車体上下加速度(図7)に白色ノイズを与えた値を観測値として扱う。

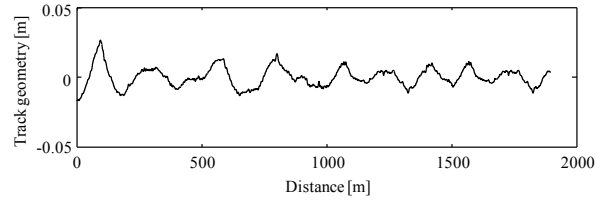


Fig.5 Track irregularity

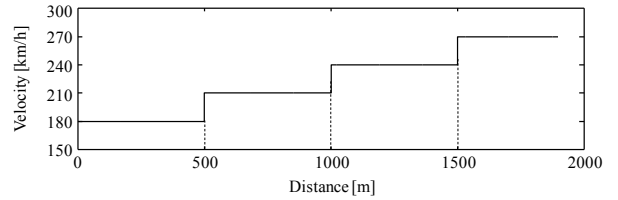


Fig.6 Vehicle velocity

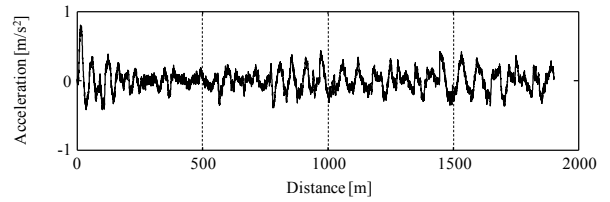


Fig.7 Car-body acceleration

3.2. 入力推定への応用

本研究では、車体上下加速度から高低狂いを推定する、いわゆる逆問題に、代表的な状態推定手法であるカルマンフィルタを利用する。逆解析のための状態空間モデル(状態方程式と観測方程式)を次式に示す。

状態方程式

$$\begin{bmatrix} x_n \\ x_{n-1} \\ \vdots \\ x_{n-L+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 1 & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{n-1} \\ x_{n-2} \\ \vdots \\ \vdots \\ x_{n-L} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} (u_n + w_n) \quad (5)$$

観測方程式

$$\begin{bmatrix} y_n \\ y_{n-1} \\ \vdots \\ y_{n-L+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h(L) & h(L-1) & \cdots & \cdots & h(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ x_{n-1} \\ \vdots \\ \vdots \\ x_{n-L+1} \end{bmatrix} + v_n \quad (6)$$

ここで、 x_n は高低狂い、 y_n は車体上下加速度の観測値、 v_n は観測ノイズである。

通常のカルマンフィルタでは、外部入力である高低狂い 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、(5)式のように高低狂いをランダムウォークで表現した。そのためシステムノイズは外部入力 u_n とプロセスノイズ w_n を加算して構築する。観測行列 h は、図1のモデルに単位インパルス波の高低狂いを入力した場合の車体振動加速度である。 L は単位インパルス応答の総数を示す。カルマンフィルタのアルゴリズムを式(7)~(11)に示す。

一期先予測

$$\mathbf{x}_{n|n-1} = \mathbf{F}\mathbf{x}_{n-1|n-1} + \mathbf{G}\mathbf{u}_{n-1} \quad (7)$$

$$\mathbf{P}_{n|n-1} = \mathbf{F}\mathbf{P}_{n-1|n-1}\mathbf{F}^T + \mathbf{G}\mathbf{Q}\mathbf{G}^T \quad (8)$$

フィルタ

$$\mathbf{K}_n = \mathbf{P}_{n|n-1}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{P}_{n|n-1}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (9)$$

$$\mathbf{x}_{n|n} = \mathbf{x}_{n|n-1} + \mathbf{K}_n(\mathbf{y}_n - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_{n|n-1}) \quad (10)$$

$$\mathbf{P}_{n|n} = \mathbf{P}_{n|n-1} - \mathbf{K}_n\mathbf{H}\mathbf{P}_{n|n-1} \quad (11)$$

ここで $\mathbf{Q}$ はプロセスノイズ、 $\mathbf{R}$ は観測ノイズの共分散行列である。上式のアロリズムによって推定した高低狂い x_n は、状態変数の推定値の一成分として逐次的かつ安定的に与えられる。

3.3. インパルス応答の生成

走行速度は、車両特性に大きな影響を与えることが知られている（図8）。そのため速度変化に対応するには、速度変化毎にインパルス応答を切り替える必要がある。理論上、全速度のインパルス応答を用意することで速度変化に対応できるが、非現実的である。そこで本研究では、各輪軸のインパルス応答の組み合わせから、一車両（4輪軸）のインパルス応答を構築する。車両寸法やサンプリング周波数、走行速度に応じて各輪軸の応答をずらすことで、様々な速度に対応したインパルス応答を再現する（図9）。

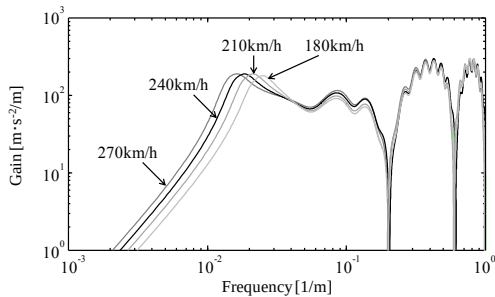


Fig.8 Changes in vehicle characteristics (Vertical direction)

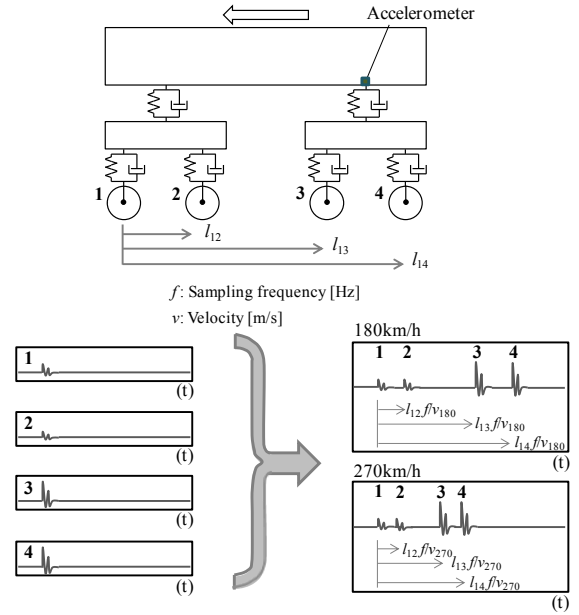


Fig.9 Construction of impulse response due to velocity change

4. 高低狂いの推定結果

4.1. 評価波形

軌道の状態監視をする上での目的から考えると、必ずしも完全な高低狂い原波形が得られなくても、主に走行安全性に影響を与える波長帯域について、求めることができれば、大量・高頻度データの取得を前提とした軌道状態監視の目的は十分達せられると考えられる⁵⁾。

そこで本研究では、高低狂い原波形を推定した後、走行安全性に影響を与える 10m 波長付近の高低狂い（10m 弦高低狂い）に着目して比較と評価を行った。10m 弦高低狂いは下記の式によって求められる。

$$a(x) = b(x) - \frac{b(x+5) + b(x-5)}{2} \quad (12)$$

ここで、 $a(x)$ は 10m 弦高低狂い、 $b(x)$ は高低狂い原波形となる。

4.2. 推定結果

カルマンフィルタにより求めた 10m 弦高低狂いの推定結果を図10に示す。図中には軌道検測車により実測したデータを併記した。システムノイズ w_n および観測ノイズ v_n の分散はそれぞれ $\sigma_w^2 = 0.00006$ 、 $\sigma_v^2 = 0.07$ とした。

図10より、速度変化後（図中の破線）の 40m 区間において過渡応答が発生していることが確認された。これは、急激な速度変化による影響だと考えられる。過渡応答を除く区間においては精度良く推定出来ており、安定した解を得ることが出来た。このことから、速度変化後も軌道を管理する上で十分な状態監視を行えることが可能と考えられる。

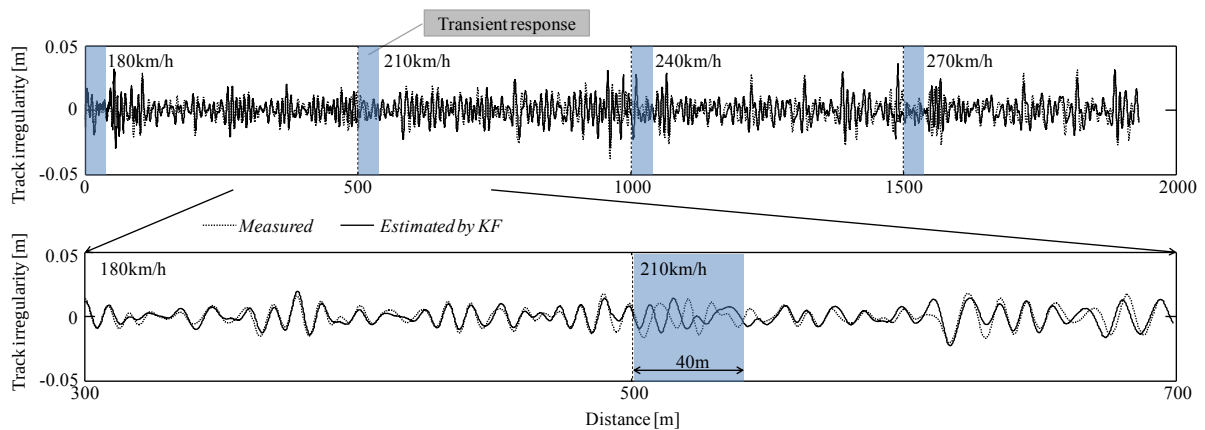


Fig.10 Simulation result

5. 推定結果の評価

本章では、各速度域の推定結果をもとに推定精度の評価を行う。評価方法として RMSE (Root Mean Square Error)と MPC metrics⁶⁾を用いる。速度変化後 40m の区間（過渡応答区間）については評価の対象外とする。

5.1. RMSE (Root Mean Square Error)

RMSE は、実測値と推定値の差に着目し推定精度の評価を行う手法である。20m の区間代表値を用いて RMSE を算出した結果を図 11 に示す。図 11 より、過渡応答を除く区間においては、各速度域とも近い値となり、速度変化後も一定精度で推定出来ていることが分かる。

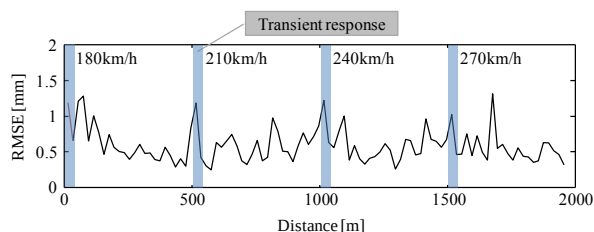


Fig.11 RMSE of estimation result

5.2. MPC metrics

MPC metrics 法は波形の振幅と位相に着目して、2つの波形の相関性を評価する手法である。算出方法と結果を表 2 に示す。ここで、 e は推定値、 m は実測値となる。各値は 0 に近いほど相関性が高いことを示す。表 2 より、各速度域とも 0 に近い値となり、速度変化後も実測値と高い相関性があると分かる。

Table.2 MPC metrics

	Maginitude	Phase	Combination
Equations	$M = \sqrt{\frac{\sum e_i^2}{\sum m_i^2} - 1}$	$P = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \frac{\sum e_i m_i}{\sqrt{\sum e_i^2 \sum m_i^2}}$	$C = \sqrt{M^2 + P^2}$
180km/h	0.086	0.075	0.114
210km/h	0.072	0.068	0.099
240km/h	0.065	0.063	0.091
270km/h	0.082	0.072	0.109

6. 結言

本研究では、測定が容易な車体上下加速度（出力）による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た高低狂い（入力）推定を試みた。高低狂いをランダムウォークモデルで表現し、これを状態方程式に組み込むことでカルマンフィルタによる逆解析に適用可能とした。その結果、ノイズを含む車体上下加速度から高低狂いの推定が可能となり、軌道を管理する上で十分な推定が行えることが分かった。また、速度変化後も一定の精度で推定でき、実測値と高い相関性があると分かった。

今後は、速度変化時の実データを用いてその有効性を確認するとともに、水準狂いなど他の軌道狂い推定にも取り組みたい。

参考文献

- 1) 永沼泰州, 小林幹人, 奥村隆之: 新幹線営業列車を用いた軌道状態監視のための慣性測定演算法, 第 12 回鉄道力学シンポジウム論文集, (2008)
- 2) 網島均, 松本陽, 水間毅, 中村英夫: プローブ車両による軌道の状態診断, 営業車両による軌道状態の常時監視システムの開発, 検査技術, Vol.12, No.5, pp.50-55, (2007)
- 3) 永沼泰州, 小林尊仁, 網島均: 車体振動加速度を用いた軌道狂い推定に関する理論検討, 第 19 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, No.12-79, pp.187-190, (2012)
- 4) 永沼泰州, 高井秀之: 新幹線車両の動特性を考慮した軌道管理手法, 鉄道総研報告, Vol.9, No.12, pp.37-42, (1995)
- 5) 吉村彰芳: 軌道狂い原波形の復元に関する理論的基礎の確立とその応用, 鉄道技術研究報告, No.1336, (1987)
- 6) Ray, M.H, Anghileri, M. and Mongiardini, M. : Comparison of validation metrics using repeated Full-scale automobile crash tests, WCCM 8, (2008)