

2202 新幹線車両モデルを用いた軌道の状態監視

学〔機〕 ○小林 尊仁 (日本大学大学院)

正〔機〕 永沼 泰州 (日本機械保線)

正〔機〕 綱島 均 (日本大)

Condition monitoring of tracks using Sinkansen vehicle model

Takahito KOBAYASHI, Nihon University, 1-2-1, Izumi-cho, Narashino City, Chiba

Yasukuni NAGANUMA, Nippon Kikai Hosen KK.

Hitoshi TSUNASHIMA, Nihon University

As track irregularity deteriorates ride comfort and running safety, track condition monitoring for maintenance is one of the most important tasks for railway companies. In general, track irregularity is measured several times a month by a specially designed track geometry car. In 2009, the track condition monitoring system called RAIDARSS started operation in the Tokaido Shinkansen line. Inertial measurement devices are mounted on six N700 Shinkansen train set and they measure the track several times a day. But RAIDARSS needs high frequent maintenance because accelerometers are mounted on axle-boxes of vehicles. This study proposes track irregularity estimation techniques from a car-body acceleration of vehicle body. An inverse analysis technique is applied to estimate the track irregularity. This technique is frequently utilized to determine unknown input signal (track irregularity) from a known output signal (car-body acceleration). As the different option, a kalman filter is used to estimate the track irregularity from observed car-body acceleration. It can be concluded that the track irregularity estimation in vertical direction is possible with acceptable accuracy for real use.

Keywords : Condition monitoring, Track irregularity, Car-body acceleration, Inverse analysis, Kalman filter, Smoothing

1. 緒言

鉄道車両を安全でかつ快適に走らせるためには、万全な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⁾²⁾。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³⁾。そこで著者らは、安価かつシンプルで省メンテナンス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。

本稿では、車体上下加速度(出力)から高低狂い(入力)を推定する逆解析手法に、固定平滑化カルマンフィルタを用いた結果と推定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

車両モデルは直線走行(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)を考慮した合計6自由度モデルを使用した(図1)。ここで、 z_b は車体の上下変位、 z_{t1} は前台車、 z_{t2} は後台車の上下変位を表す。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。

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狂いであり、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には車両モデルの理論値を併記した。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。また、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おり、理論モデルと同定したパラメータの妥当性を示している。

3. カルマンフィルタによる高低狂いの推定

3.1 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、車両モデルを状態空間モデルで表現して状態推定を行う。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

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

観測方程式

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

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、(1) 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。車両モデルは観測方程式で表現される。観測行列中の h は図 1 のモデルに単位インパルスの高低狂いを入力した場合の車体振動加速度（図 4）である。 L は単位インパルス応答の総数を示す⁵⁾。

カルマンフィルタのアルゴリズムを式 (3) ～(7) に示す。

一期先予測

$$\mathbf{x}_{n+1|n} = \mathbf{F}_n \mathbf{x}_{n|n} + \mathbf{G}_n \mathbf{u}_n \quad (3)$$

$$\mathbf{P}_{n+1|n} = \mathbf{F}_n \mathbf{P}_{n|n} \mathbf{F}_n^T + \mathbf{Q} \quad (4)$$

フィルタ

$$\mathbf{K}_n = \mathbf{P}_{n|n-1} \mathbf{H}_n^T (\mathbf{H}_n \mathbf{P}_{n|n-1} \mathbf{H}_n^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (5)$$

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

$$\mathbf{P}_{n|n} = \mathbf{P}_{n|n-1} - \mathbf{K}_n \mathbf{H}_n \mathbf{P}_{n|n-1} \quad (7)$$

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。上式のアルゴ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成分として逐次的かつ安定的に与えられる。

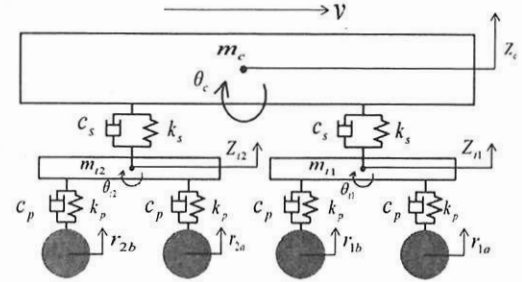


Fig.1 Vehicle model

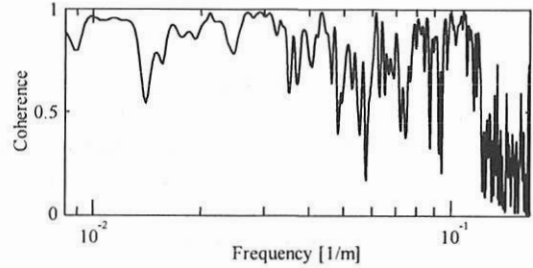
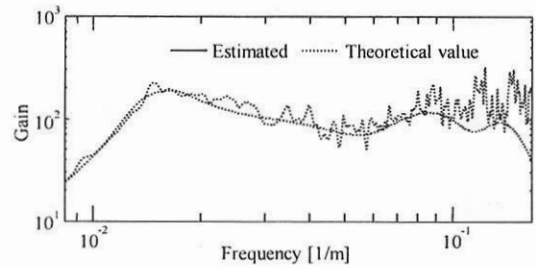
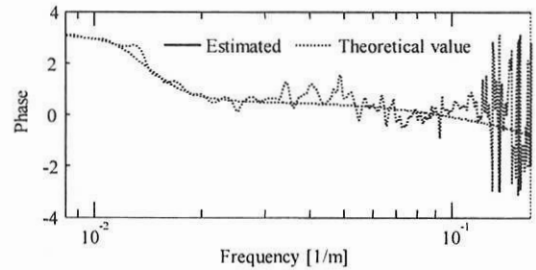


Fig.2 Coherence



(a) Gain



(b) Phase

Fig.3 Frequency response functions

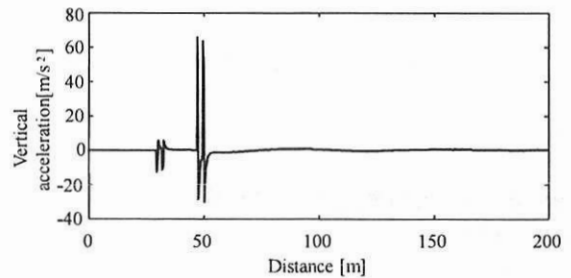


Fig.4 Impulse response

3.2 固定区間平滑化

今回、カルマンフィルタを用いた逆解析に、固定区間平滑化と呼ばれる平滑化法を用いた。フィルタが時刻 n までの観測値だけを用いて $\mathbf{x}_n$ を推定しているのに対し、固定区間平滑化のアルゴリズムは得られている全ての観測値を用いて推定を行う。したがって、平滑化処理を行えばフィルタよりも精度の良い状態推定が実現できる。固定区間平滑化のアルゴリズムを式 (8) ~ (10) に示す。

固定区間平滑化

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

$$\mathbf{x}_{n|N} = \mathbf{x}_{n|n} + \mathbf{A}_n (\mathbf{x}_{n+1|N} - \mathbf{x}_{n+1|n}) \quad (9)$$

$$\mathbf{P}_{n|N} = \mathbf{P}_{n|n} + \mathbf{A}_n (\mathbf{P}_{n+1|N} - \mathbf{P}_{n+1|n}) \mathbf{A}_n^T \quad (10)$$

平滑化を行うためには、まずカルマンフィルタによって $\mathbf{x}_{n-1|n}$, $\mathbf{x}_{n|n}$, $\mathbf{P}_{n-1|n}$, $\mathbf{P}_{n|n}$ を求めた後、上式のアルゴリズムによって時間的に逆方向に $\mathbf{x}_{n|N}$, $\mathbf{P}_{n|N}$ を順次計算する。ここで、 $\mathbf{x}_{n|N}$ は平滑化処理された状態量（高低狂い）となる。

4. 軌道狂いの推定結果

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⁶⁾。

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 弦正矢）に着目して比較と評価を行った。10m 弦正矢は下記の式によって求められる。

$$x(i) = y(i) - \frac{y(i+5) + y(i-5)}{2} \quad (11)$$

ここで、 $x(i)$ は 10m 弦正矢、 $y(i)$ は高低狂い原波形となる⁷⁾。図 5 に評価のフローを示す。

4.2 推定結果

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 $\sigma_w^2 = 0.0004$, $\sigma_v^2 = 0.12$ とした。

図 6 (a) にカルマンフィルタ平滑化により推定した結果、図 6 (b) に先行研究で提案された逆フィルタを用いた高低狂いの推定結果⁸⁾を表記する。図中には軌道検測車の実測データを併記した。図 6 (a) より、振幅の小さい所では局所的に実測値と異なる波形が観測されるが、全体的には軌道を管理する上で十分な推定が出来ていると考えられる。また、図 6 (a), (b) を比較すると、カルマンフィルタ平滑化で推定した結果の方が実測値を良く再現していることが分かる。

5. 推定結果の評価

本章では、10m 弦正矢の推定結果を元に推定精度の評価を行う。評価方法として 20m ロット代表値と MPC metrics⁹⁾を用いる。

推定精度の比較対象として、逆フィルタを用いた高低狂いの推定結果を比較対象とする。

5.1 20m ロット代表値

本節では、20m ロット代表値を用いて検出率の算出を行う。これは、区分けした各ロットにおける実測値の最大値が閾値を超えた時に、同ロットで推定値の最大値が閾値を超えていれば検出できていることになり、推定値と実測値が合致しているか否かを判定する手法である（図 7）。

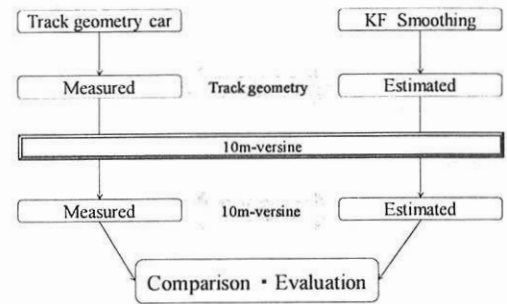
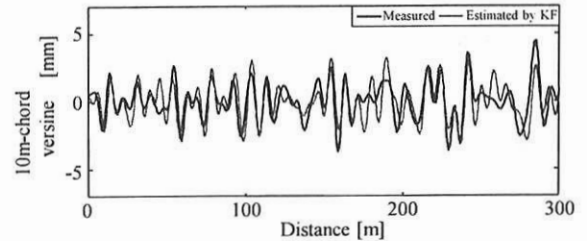
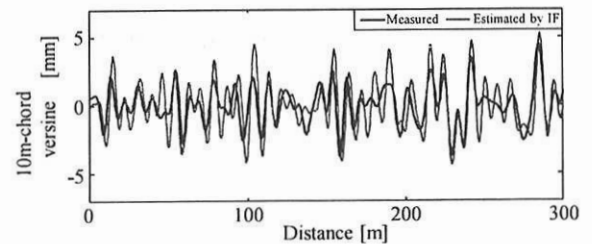


Fig.5 Signal-processing method



(a) Kalman filter smoothing



(b) Inverse filter

Fig.6 Simulation result

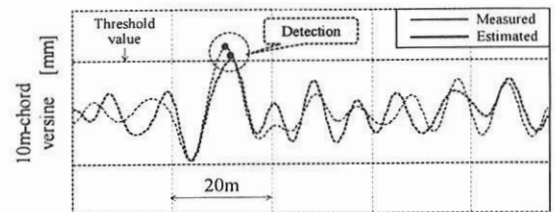


Fig.7 Detection method

閾値を 3mm とした時の検出率を算出し、その結果を表 1 に示す。表 1 より閾値を 3mm とした時の検出率は、逆フィルタを用いたとき 88%、カルマンフィルタ平滑化を用いたとき 79%となった。

本研究では、営業車両による高頻度で定量的な状態監視システムとしての利用を前提としているため、79%程度の検出精度でも実務への応用は十分可能であると考えられる。

5.2 MPC metrics

本節では、Sprague & Geers Metrics を用いて推定結果の評価を行う。本手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、カルマンフィルタ平滑化による推定結果の方が逆フィルタを用いた時より、実測データと高い相関があることが分かる。

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、カルマンフィルタ平滑化を用いた逐次的な高低狂い（入力）推定を試みた。インパルス応答を用いて状態空間モデルを逆解析に適用させた結果、先行研究で提案された手法より高精度で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。

本手法によれば、速度変化の度にインパルス応答を再計算することで原理的には車速変化にも対応できるが、計算負荷を考えると現実的ではない。今後は、速度変化に対応できる実用的な軌道状態監視手法を開発する必要がある。

Table 1 Detection rate

	Detection rate [%]
Inverse filter	88
Kalman filter Smoothing	79

Table 2 MPC metrics

	Magnitude	Phase	Combination
Equations	$M = \sqrt{\frac{\sum e_i^2}{\sum m_i^2} - 1}$	$P = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \frac{\sum e_i m_i}{\sqrt{\sum e_i^2 \sum m_i^2}}$	$C = \sqrt{M^2 + P^2}$
Inverse filter	0.2592	0.2506	0.3605
Kalman filter Smoothing	0.0015	0.2761	0.2761

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
- 2) 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
- 3) 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, pp50-55, 2007
- 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, pp37-42, 1995
- 5) 永沼泰州, 小林尊仁, 網島均 : 状態空間モデルを用いた軌道の状態監視, 日本機械学会関東支部第 18 期総会講演会講演論文集, No.120-1, pp381-382, 2011
- 6) 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
- 7) Yasukuni, N., Akiyoshi, Y. : Reconstruction and estimation of railway track geometry using regularization methods, Proceedings of IAVSD, 2009
- 8) Takahito, K., Yasukuni, N., Hitoshi, T. : Condition Monitoring of Shinkansen Tracks Based on Vehicle Model, The 6th International Symposium on Speed-up, Safty and Service Technology for Railway and Maglev Systems, 2012
- 9) Ray, M.H, Anghileri, M. and Mongiardini, M. : Comparison of validation metrics using repeated Full-scale automobile crash tests, WCCM 8, 2008