

2104 車両異常検知システムに関する基礎検討

A fault-detection-and-isolation system for railway vehicles

正 [機] ○合田 憲次郎 (株) 日立製作所 機械研究所)

Roger Goodall (英国 Loughborough 大学)

Kenjiro GODA, Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.,
502 Kandatsu, Tsuchiura, Ibaraki
Roger Goodall, Loughborough University

To detect suspension faults and changes in the wheel-rail condition, a fault-detection-and-isolation system for a railway vehicle bogie – based on a model-based estimation method using a Kalman-Bucy filter and isolation scheme – was developed. The advantage of this system is that many faults can be detected by a small number of sensors. Time-history simulations were carried out to investigate the performance of the new system. The simulation results show that faults in the suspensions and changes in the wheel-rail interface can be detected from the residual given by the Kalman-Bucy filter. They also show that each fault can be identified by the fault-isolation scheme. It is thus concluded that the developed model-based estimation method using a Kalman-Bucy filter and isolation scheme provides an effective basis for a fault-detection-and-isolation system for a railway vehicle bogie.

Keyword:: fault detection & isolation, railway vehicle, model-based estimation, Kalman filter,

1. まえがき

近年、世界各国において高速車両の開発が活発に行われてきている。こうした高速車両では、高速運転時の安全性を確保することが重要である。また、高速走行では、車両の振動が大きくなるため、アクティブ・セミアクティブサスペンションサスペンションを用いて、振動を低減することが必須であり、これらの制御システムにおいて故障・異常が発生した場合のフェールセーフ系を備えることが必要である。このように走行安全性を確保し、また、制御システムの信頼性を確保するために、高速走行時の車両の故障・異常を迅速に検知するシステムが必要である。

一方、近年、鉄道交通システムコストの大部分を占めるメンテナンスコストの低減に対する要求が強く、これを実現するコンディションベースメンテナンスの必要性が高まっている。コンディションベースメンテナンスでは、車両や軌道の状態を逐次検査・監視し、初期故障・異常を発見し、効率的なメンテナンスを行うことにより、メンテナンスの無駄を無くし、過剰な投資を削減するものである。また、初期故障・異常をいち早く発見することにより、重大事故が発生するのを回避することが可能である。コンディションベースメンテナンスでは、車両と軌道の状態を監視し、車両と軌道を保守管理するための情報を逐次取得するシステムが必要である。

以上のように高速車両の安全性・信頼性確保とコンディションベースメンテナンスのために、車両と軌道の状態をセンシング・モニタリングする手段として、走行中に車両と軌道の状態の情報を取得する車両異常検知システムに対するニーズが高まってきている。

そこで、本研究では、モデル規範型推定法を鉄道車両の

ダイナミクスシステムに適用した車両異常検知システムを考案した。線形シミュレーションを行い、考案した異常検知システムの成立性を検討した結果について報告する。

2. 車両異常検知システム

2.1 車両異常検知システム概要

図1に本研究で考案した車両異常検知システムの概要を示す。本システムは、平面左右系ダイナミクスに注目したシステムであり、だ行動、左右異常振動等が扱う現象となる。このシステムでは、車体・台車・輪軸に設置した加速度センサ、ジャイロセンサより左右加速度、ヨー角速度を測定し、異常検知コントローラへの入力とする。異常検知コントローラでは、モデル規範型推定と呼ばれる推定手法を用いて、推定値とセンサ信号の差である残差信号を算出し、この信号を用いて異常の検知および異常分別・異常箇所の判定を行う。このシステムでは、ヨーダンパ、左右動ダンパ等のサスペンションの異常を検知し、踏面勾配変化等の車輪・レール間の状態監視をすることができる。本研究では、モデル規範型推定法の一つとして成熟したカルマンフィルタを鉄道車両に適用した。カルマンフィルタは、航空機の姿勢推定等を目的として開発されたパラメータの同定・推定法である。カルマンフィルタにより、ランダム信号、ノイズの影響を受けるシステムのパラメータを同定できる。

従来の異常検知システムは、本システムと異なり、センサにより異常を直接検出するセンサをベースとしたシステムである。従来の異常検知システムでは、台車枠、軸受け、アクチュエータ、ブレーキ、車輪などの台車および軌道のローカルな部位の異常を、振動、音、温度、応力、画像信号として、専用のセンサで検出し、センサ信号の変動を異

常として検知する。従来のシステムの特長は、異常が想定される部分にセンサを取り付けるため、異常箇所を確実に推定できる点である。しかしながら、個々の異常に対して専用のセンサが必要のため、センサ数が多くなる問題がある。また、異常によるセンサ値の変動が小さい場合、異常をセンサ変動という形で捕らえることができないため、異常を検知できない可能性が大きくなる課題がある。これに対して、本研究で開発する車両異常検知システムは、センサ情報に加えて、車両ダイナミクスモデルを用いた推定を行うことで、異常検知の精度を向上し、直接検出できない状態を推定できるシステムである。だ行動、脱線といったクリティカルな現象に対して、複数のセンサとコントローラを用いて、システムの異常をダイナミクスシステムの変動として捕らえる。このため、従来のシステムに比べて、クリティカルな現象をより確実に検知でき、さらに、少ないセンサ・コントローラシステムにより、複数の異常を検知できる特長がある。

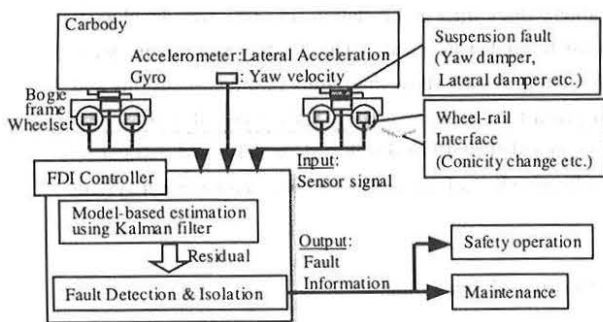


Fig.1 Fault-detection and isolation system for railway vehicles

2.2 車両とセンサのモデル化

本研究では、カルマンフィルタを鉄道車両台車に適用するために、以下に示すモデル化を行った。まず、車両モデルとして、制御およびコントローラを簡略化するために、XY平面内の運動を考慮した4軸車両モデルを採用した。図2に車両モデルを示す。車両モデルは、1車体、2台車、4輪軸、合計7剛体から構成され、各剛体が左右、ヨーの2自由度を有し、車両全体で14自由度を持つ。

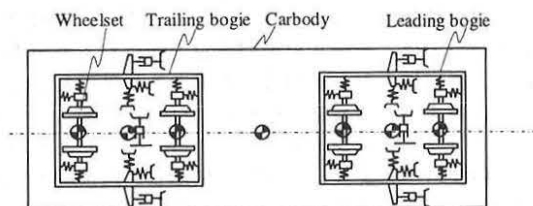


Fig.2 Vehicle model

この車両モデルを、カルマンフィルタに対応する状態方程式の形式に表現したものを式(1)に示す^{(1),(2)}。

$$\dot{x} = A \cdot x + G \cdot w \quad \dots (1)$$

ここで、 x は状態ベクトル、 w はシステムノイズである。ここでは、軌道不整をシステムノイズとして考慮した。

センサとして、7つの加速度センサと7つのジャイロセンサを用いて、合計14のセンサにより、車両状態を検出するものとした。加速度センサで剛体の左右加速度を、ジャイロセンサで剛体のヨー角速度を測定するものとした。

センサによる出力方程式を式(2)に示す。

$$y = C \cdot x + v \quad \dots (2)$$

ここで、 y はセンサからの出力ベクトル、 v は測定ノイズである。ここでは、センサのノイズを測定ノイズとして考慮した。

2.3 異常検知アルゴリズム

式(1)の状態ベクトル x 、式(2)の出力ベクトル y を推定するために、式(3)に示すカルマンフィルタを用いた。

$$\hat{x} = A \cdot \hat{x} + K \cdot (y - \hat{y}) \quad \dots (3)$$

ここで、 $\hat{x}$ は状態推定ベクトル、 y は出力推定ベクトル(推定値)である。 K は時間とともに成分が変化しない一定行列のゲインである。このゲインは通常、カルマン・ブッシーフィルタ(Kalman-Bucy filter)⁽³⁾のゲインとして知られる。

カルマンフィルタを用いた異常検知コントローラの構成を、図3に示す。異常検知コントローラは「推定部」と「後処理」、「異常判定部」の3つで構成されている。

「推定部」は、モデル規範型推定法として成熟した推定方法であるカルマンフィルタにより構成した。カルマンフィルタを用いて、「推定部」では実システムからのセンサ信号 y から内部モデルを用いて、推定値 $\hat{y}$ を算出する。そして、2つ信号の差である残差信号 $y - \hat{y}$ を算出する。「後処理部」では、異常をより確実に検出するために、ローパスフィルタと実効値分析により、残差信号の処理を行う。まず、残差信号をローパスフィルタで処理し、異常により変化する周波数域の残差信号の抽出を行う。実効値分析部では、振動的な残差信号波形の平滑化・平均化処理を行い、閾値処理が容易な形式に信号を変換する。「異常判定部」では、後処理により加工された信号に対しての異常の判定を行う。まず、閾値比較部で、閾値との大小関係より「異常が発生したかどうか」の異常発生を検知をする。次に、残差信号が変化したパターンと異常のパターンが記述されたロジック表を比較・参照して、「どんな異常がどこで発生したかどうか」の異常分別、異常箇所の特定を行う。

本コントローラの特徴は、センサ信号を直接利用するのではなく、残差信号を用いてシステムの異常を判定する点であり。これにより異常をより確実に検知できる。また、異常発生を検知のみでなく、異常の種類の分別・異常箇所を特定できる点が本コントローラの特徴である。

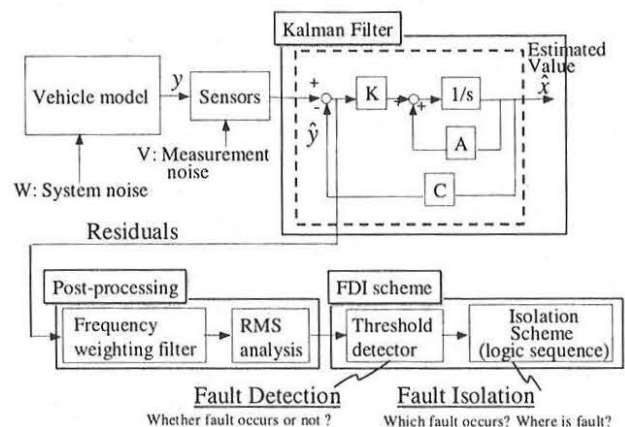


Fig.3 Block diagram for Fault-detection and isolation system with Kalman-Bucy filter

3. 解析結果

考案した車両異常検知システムの成立性を評価するために、時刻歴シミュレーションを実施した。

3.1 解析条件

(1) 解析モデル・諸元

381系試験車両をベースとした車両諸元⁽⁴⁾を用いた。走行速度は、在来線最高速度130 km/hとした。

車両への入力となる軌道不整は、式(4)に示す常磐線の通り狂いPSD⁽⁵⁾を用いた。

$$PSD = 1.2 \times 10^{-7} / F^2 \quad (\text{m}^2/(\text{cycle}/\text{m})) \quad \dots (4)$$

この通り狂いPSDより軌道不整時刻歴波形を生成し、これを車両モデルに対する入力とした。

センサノイズに関しては、センサノイズの大きさが、センサノイズがない状態でのセンサ信号値の実効値の4%であるものと仮定した。

(2) 異常条件

以下に示す3種の異常を仮定して時刻歴シミュレーションを実施した。サスペンション異常として、ヨーダンパフェールと左右動ダンパフェールの二つを、車輪-レール間の状態変化として、路面勾配変化を仮定した。

ヨーダンパフェール、左右動ダンパフェールに関しては、ダンパの油漏れ、取り付け部の損傷等により、ダンパの減衰力が正常時の5%に急激に低下するものとした。

路面勾配に関しては、路面勾配が急激に0.15から0.2に変化するものとした。本報では、路面勾配変化の検知の可能性を評価するために、短時間の時刻歴波形において路面勾配が急激に変化するものとしたが、実際には経年変化により車輪-レール間の状態が徐々に変化する。実際の異常検知システムでは、車輪-レール間の状態変化を日々測定し、蓄積したデータを比較することにより、状態変化を判定することになると思われるが、本報告ではこの部分については記述を省略する。

(3) 評価項目

以下に示す2つのコントローラの性能を評価した。

(a) 異常発生時の検知機能 (Detection 機能):

「異常が発生したか」を検知する

(b) 異常分別・異常箇所の特特定機能 (Isolation 機能):

「どんな異常が、どこで異常が発生したか」を評価する

3.2 異常検知性能の評価

時刻歴シミュレーションにより、異常に起因するモデルパラメータの変動が、残差とセンサ信号の変化に与える影響を算出することにより、異常発生時の検知機能の評価した。

(1) ユーダンパフェール

時刻10秒に前台車の2本のヨーダンパの内、1本のヨーダンパのみに異常が発生し、ヨーダンパの減衰力が低下するものとした。

図4に、異常発生後の残差信号の変化が大きい前台車のヨー角速度の残差信号の時刻歴波形と、その時のセンサ信号の時刻歴波形を示す。本シミュレーションでは、ヨーダンパ異常は1本のみであるため、異常発生後の状態変化は小さい。このため、センサ信号を用いる場合はセンサ信号の変動は小さく、異常発生時の検知は難しく、誤検知の可能性が大きくなる。これに対して、モデル規範型推定では、異常発生後の残差信号が大きく変化する。残差信号の変動は大きいため、閾値の設定が容易であり、異常発生時の検知は可能である。車両から得られる残差信号の中で、異常発生後の残差信号変化の大きい前台車のヨー角速度の残差信号に注目し、この信号の変化を監視することにより、ヨーダンパ異常1本のみをわずかな変化・異常の発生をより確

実に検知できる。

(2) 左右動ダンパフェール

時刻10秒に前台車の1本の左右動ダンパに異常が発生し、左右動ダンパの減衰力が低下するものとした。

図5に、異常発生後の残差信号の変化が大きい車体の左右加速度の残差信号の時刻歴波形と、そのときのセンサ信号の時刻歴波形を示す。センサ信号を用いる場合は、異常発生後のセンサ信号の変動は小さいため、異常発生時の検知は難しく、誤検知の可能性が大きくなる。これに対して、モデル規範型推定では、異常発生後の残差信号が大きく変化する。残差信号の変動は大きいため、異常発生時の検知は可能である。車両から得られる残差信号の中で、異常発生後の残差信号変化の大きい車体の左右加速度の残差信号に注目し、この信号の変化を監視することにより、異常の発生をより確実に検知できる。

(3) 路面勾配変化

時刻10秒に、車輪-レール間の接触状態が変化し、路面勾配が0.15から0.2に変化するものとした。

図6に、異常発生後の残差信号の変化が大きい前台車の左右加速度の残差信号の時刻歴波形と、そのときのセンサ信号の時刻歴波形を示す。センサ信号を用いる場合は、異常発生後のセンサ信号の変動は小さいため、誤検知の可能性が大きい。これに対して、モデル規範型推定では、残差信号の変動は大きいため、異常の発生を検知できる。

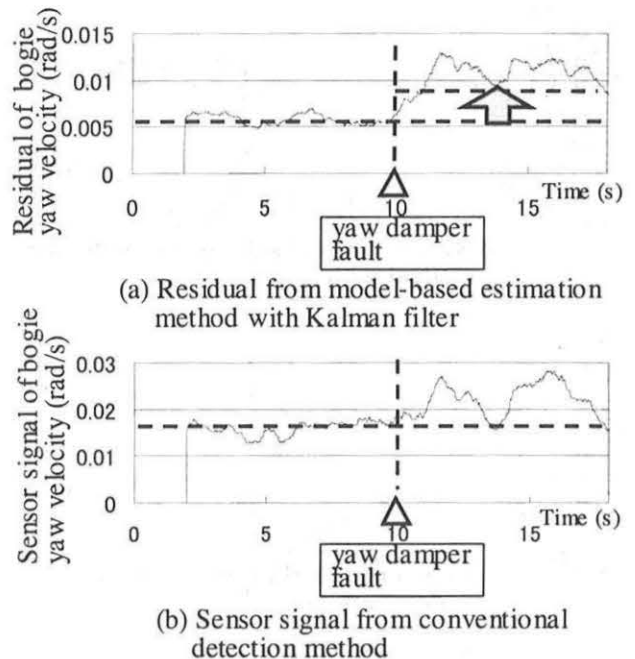


Fig. 4 Time history of bogie yaw velocity in the case of a yaw-damper fault

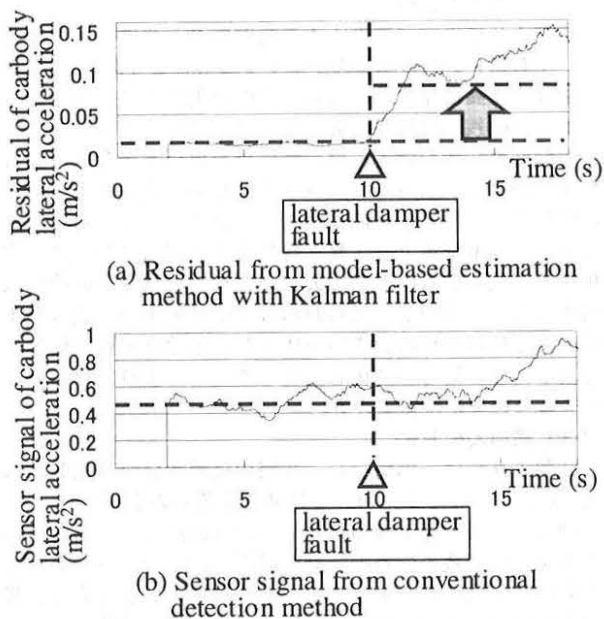


Fig. 5 Time history of carbody lateral acceleration in the case of a lateral-damper fault

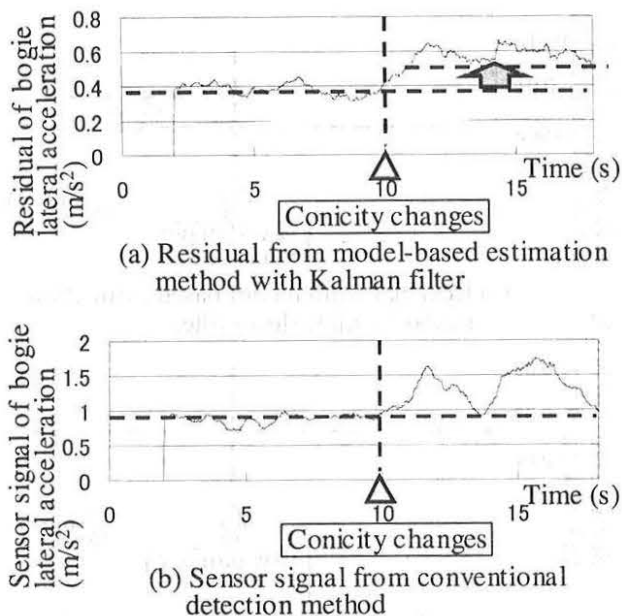


Fig. 6 Time history of carbody lateral acceleration in the case of conicity changes

3.3 異常分別性能の評価

前節で想定したヨーダンパフェール、左右動ダンパフェール、踏面勾配変化の3種の異常を分別し、異常箇所を特定する機能の評価を行った。

表1にロジック表を示す。ロジック表では、想定される異常パターンと残差信号が変化するセンサの関係が記述されており、表中、○が異常発生後の残差変化が大きいセンサ成分を示している。

異常の種類により、残差信号が変化するセンサの組み合わせが異なる。これにより、異常に対して残差信号が変動するセンサの組み合わせパターンをあらかじめロジック表

に記録し、異常発生時にこのロジック表を参照することにより、どんな異常が、どこで発生したかどうかの異常分別・異常箇所の特定が可能であると言える。

Table 1 Logic sequence for detection and isolation

	Lateral acceleration							Yaw velocity						
	c	bf	br	w1	w2	w3	w4	c	bf	br	w1	w2	w3	w4
Yaw damper fault														
Lateral damper fault	○	○						○						
Conicity change		○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○

C: carbody; Bf, Bt: leading bogie, trailing bogie; w*: wheelset 1~4

以上のようにモデル規範型推定法により、想定したヨーダンパフェール、左右動ダンパフェール、踏面勾配変化の異常の発生が検出でき、さらに、異常分別・異常箇所の特定ができることを確認した。これにより、考案した車両異常検知システムが成立する見通しを得た。

4. まとめ

高速車両の安全性・信頼性確保とメンテナンスコストの低減を目的とした車両異常検知システムの成立性に関する基礎検討を行い、以下に示す結論を得た。

(1) センサ情報に加えて、車両ダイナミクスモデルを併用することにより、少ないセンサにより、複数の異常をより確実に検出できるモデル規範推定法を鉄道車両に適用した車両異常検知システムを考案した。

(2) 考案した車両異常検知システムを組み込み、異常検知性能を評価するシミュレーションを行った。その結果、考案したシステムにより、鉄道台車のヨーダンパフェール、左右動ダンパフェール等のサスペンション異常あるいは踏面勾配変化等の車輪-レール間の状態変化を検出できることを確認した。

(3) さらに、異常により残差信号が変化するセンサの組み合わせが記述されたロジック表を作成し、ヨーダンパフェール、左右動ダンパフェール、踏面勾配変化の3種の異常を分別し、異常発生箇所を特定できることを確認した。

以上より、モデル規範型推定法による車両異常検知システムが成立する見通しを得た。

参考文献

- 1) Mei, T.X. etc: Kalman Filter for the State Estimation of a 2-Axle Railway Vehicle: 5th European Control Conference 99, CA-10-F812, Aug-Sep 1999
- 2) Li, H. etc: Fault-Tolerant sensing for rail vehicle: Proc. 14th Int. Conf. on System Engineering, ICSE2000, pp381-385 Sep 2000
- 3) Kalman, R.E., Bucy, R.S.: "New Results in Linear Filtering and Prediction Theory" Transactions ASME, Journal Basic Engineering, Series 83D, pp95-108, Mar 1961
- 4) 日本機械学会編: 鉄道車両のダイナミクス: (株) 電気車研究会 pp30
- 5) 高井 他1名: 在来線の長波長軌道狂い管理、鉄道総研報告 Vol.4, No4, pp27-34, 1990.4