

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月15日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560249

研究課題名（和文） 多重モデル法を用いた鉄道の状態診断に関する研究

研究課題名（英文） Study on railway condition monitoring using multiple-model approach

研究代表者

綱島 均（TSUNASHIMA HITOSHI）

日本大学・生産工学部・教授

研究者番号：30287594

研究成果の概要（和文）：

鉄道における検査・保守は事故を未然に防ぎ安全を保証する重要な業務であり、定期的に行われている。車両の検査は、重大な事故を防ぐために特に重要である。検査時に故障が検出できない場合には故障が走行中に重大な事故を引き起こす可能性がある。本研究では多重モデル法を用いて、鉄道車両サスペンションの状態監視を行う方法を開発した。さらに、軌道の予防保全を行うために、可搬型プローブ装置を用いて、長期間の定期的な計測を行い軌道状態の変化の検出を行った。

研究成果の概要（英文）：

Condition monitoring of railway tracks are essential in ensuring the safety of railways. This study developed the condition monitoring system of track and vehicle suspension from on-board measurement data. The IMM method has been applied for detecting faults in vehicle suspension systems in a simulation study. Simulation results indicate that the algorithm effectively detects on-board faults of railway vehicle suspension systems in realistic situation. Furthermore, the condition monitoring of tracks is evaluated based on long term measurement using on-board prove system.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
21年度	900,000	270,000	1,170,000
22年度	700,000	210,000	910,000
23年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：機械力学・制御

キーワード：鉄道，軌道，車両，状態監視，多重モデル

1. 研究開始当初の背景

鉄道の施設や車両においては、定期的な検査や現場の巡回、監視などにより、必要な状態が保全され、列車運転の安全性が確保されているが、専用の車両や保守員による計測作業は装置や人件費等の負担が大きい上、計測の頻度には限界がある。営業車両が走行して

得られる車両の振動を常時測定、分析できれば、レール状態の常時監視が可能となる。これは、営業車両自体をセンサとして使用しようという発想である。このような車両をプローブ車両と呼んでいる。申請者は、営業車両の客室内へ簡単に設置してレールの状態診断を行うために、可搬型プローブシステムを

開発した。営業路線における検証実験の結果、車内騒音からレールの頭頂部に発生する周期的な摩耗（波状摩耗）や車体振動加速度および車体傾斜角度からレールのゆがみやまくらぎの異常を検出できることがわかった。現在、実用化のための検証が行われているが、診断精度の向上が今後の課題となっている。

一方、車両の振動を常時測定することにより、車両の異常を検出することも可能になる。申請者は、複数の車両モデルを用いて車両の異常を検出する方法を提案している。本研究では、複数の車両の運動モデルを確率的に結合して、車体の振動加速度および傾斜角度などからレールの状態および車両の状態を推定する方法を開発し、すでに開発済みの可搬型プローブ装置に搭載し、実車走行実験によりその有効性を検証する。

2. 研究の目的

本研究では、複数の車両の運動モデルを確率的に結合して、車体の振動加速度および傾斜角度などからレールの状態および車両の状態を推定する方法を開発し、すでに開発済みの可搬型プローブ装置に搭載し、実車走行実験によりその有効性を検証する。

3. 研究の方法

年度ごとの研究方法は下記の通りである。

(1) 平成 21 年度：多重モデル法を用いた車両およびレール診断アルゴリズムの構築とマルチボディダイナミクスソフトを用いたアルゴリズムの有効性の検証

多重モデル法はターゲットトラッキング等の分野において用いられている適応推定法の一つである。この方法は、モデルのパラメータだけでなく構造的変動にも対応することが可能であり、様々な分野への応用が可能である。多重モデル法では、システムの挙動は、複数のモデルのうちの 1 つに従うと考える。状態推定理論を適用することにより、車両の運動の予測値と実際の観測値との誤差（観測残差）から、各モデルの確からしさを時々刻々計算する。平成 21 年度は、多重モデル法を用いて、複数の車両運動モデルから車両およびレールの状態を推定するアルゴリズムを開発する。さらに、実際の鉄道車両の運動を模擬できるシミュレーションソフトウェアである SIMPACK を使用して、構築した推定アルゴリズムの検証を行う。推定に用いる車両運動モデルの構築にあたっては、この分野で実績のある Roger Goodall 教授（英国 Loughborough 大学）、Stefano Bruni 教授（ミラノ工科大学）の協力を得る。また、（独）交通安全環境研究所および（財）鉄道総合技術研究所から専門知識の提供を受け

る。

(2) 平成 22 年度：多重モデル法を用いた車両・軌道状態監視システムの開発

平成 21 年度は、多重モデル法において、推定モデルを適応的に更新する推定アルゴリズムを独自に開発し、その有効性をシミュレーションにより検証した。平成 22 年度は、まず、実路線においてレールの上下変位と車両の振動加速度を計測し、平成 21 年度に開発した推定アルゴリズムを、実車に適用するための推定モデルを構築する。次に、推定アルゴリズムを実測データに適用して、車両・軌道系の状態診断を実施する。さらに、結果を鉄道事業者において評価し、評価をもとに、診断精度向上のための車両運動モデルの変更、シミュレーションの実施などを適宜行う。

(3) 平成 23 年度：

①多重モデル法を用いた車両状態監視技術の深度化

車両のダイナミクスの中でも特に重要な車輪・レール間のクリープ力を車両運動から推定する方法を検討した。

②可搬型プローブ装置を用いたレール状態診断の実施

可搬型プローブ装置を用いて、鉄道事業者の路線において、レールの状態診断を実施し、定期的にデータを収集し状態診断を実施した。

4. 研究成果

(1) セルフチューニング型多重モデル法の開発

多重モデル法はターゲットトラッキングの分野で提案された適応推定の手法の一つである。この手法は、モデルパラメータだけでなく、モデル構造が変化する場合においても適応可能である。先行研究において、多重モデル法の一つである IMM 法を用いて、車体台車間左右動ダンパの故障検知が可能であることが示されている。しかし、推定用のモデルが低次の場合、複数個用意する推定用モデルがいずれも実際に発生する故障を表現できていない場合には、著しく検出精度が低下することが考えられる。この問題を解決するため、用意した複数の低次推定モデル群から新しい推定モデル群を構成する方法を提案する。この方法をモデル更新と呼ぶことにする。

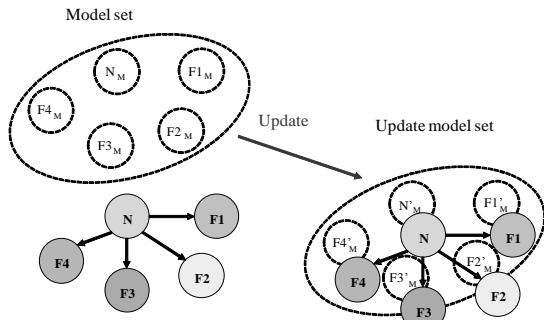


図1 セルフチューニング型多重モデル法

図1を用いてモデル更新の方法を説明する。Nは正常状態、F1~F4はそれぞれ異なる故障状態とする。NMは正常状態を表現するモデル、F1M~F4MはF1~F4の故障を表現するためのモデルとする。正常状態Nが正常推定モデルNMによって十分に表現できる場合は問題ないが、NMによって十分表現できない場合は、その正常モデルから構成される故障モデルF1M~F4Mは実際の故障状態F1~F4と大きく異なることになり、この場合は良好な推定が行えないことは明らかである。(図1左図)そこで、当初のモデル群(NM, F1M~F4M)から正常時の状態を表現できる新しいモデルN'Mを再構成する。(図1右図)新しく再構成された正常モデルN'Mをもとに、故障モデルF1'M~F4'Mを構築することにより、実際の故障状態F1~F4にモデル群を近づけることができ、推定精度の向上を図ることができると考えられる。この方法をセルフチューニング型多重モデル推定方法と呼ぶことにする。

(2) 鉄道車両サスペンションの状態監視

図2にセルフチューニング型多重モデル推定方法を用いた車両の故障検知の概要を示す。本研究では、車体・台車間のサスペンションの機械的な故障を対象とする、ばね故障、ダンパ故障、センサ故障などに対応するモデルを準備し、それらのモデルの確からしさ(生起確率)をもとに、故障の種類と程度を判定する。

(3) シミュレーション

SIMPACKによるマルチボディシミュレーションにより提案する故障検出方法の妥当性を検証する。図3に構築したフルビークルモデルを示す。このモデルは輪軸、台車、車体の自由度を考慮した34自由度モデルである。本研究では、通り狂いのある直線軌道を走行中の車両において、車体台車間左右動ダンパおよびヨーダンパの故障検出シミュレーションを行った。

4に車体台車間左右動ダンパの粘性係数の推定結果を示す。モデル更新を行わない場

合は、正しい値を推定できていないのに対して、モデル更新を行った場合は、良い推定結果が得られていることがわかる。

また、ヨーダンパについても、走行速度200[km/h]、シミュレーション開始5[s]後に粘性係数が正常値の70[%]へ減少する条件において、良好な推定が行えることが確認できた。

さらに、車両のダイナミクスの中でも特に重要な車輪・レール間のクリープ力を車両運動から推定する方法を検討した。車体、台車、輪軸のどの情報から、クリープ力が有効に推定できるか検討した。その結果、台車の運動からクリープ力を推定できることを確認した。

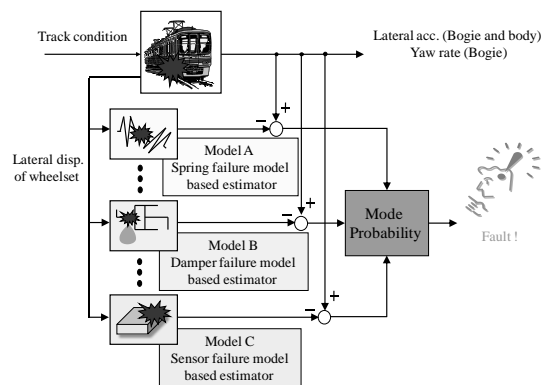


図2 鉄道車両サスペンションの状態監視

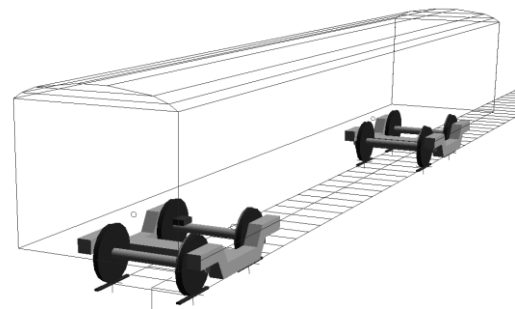


図3 フルビークルモデル

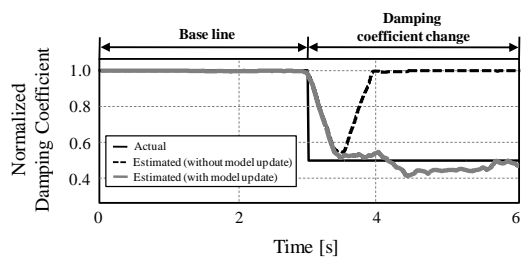


図4 左右動ダンパの状態監視

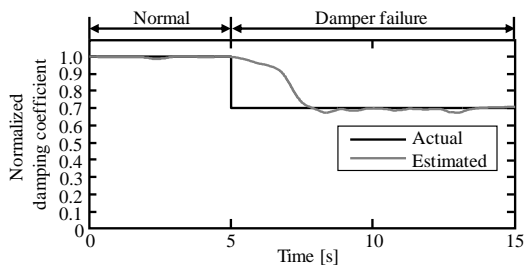


図5 ヨーダンパの状態監視

(4) 営業路線における走行試験

試験方法：車室内において、台車から伝わる振動を測定する好ましい位置は台車直上の床面であるが、実用性を考慮し、構築したプローブ装置を乗務員室内の運転台の近くに設置した。GPS 受信機を窓枠に固定し、営業路線を走行した。列車ダイヤは、試運転であるが、営業運転と同様の運転パターンとし、営業運転に使用されている一般の車両を使用した。

試験結果：比較的大きな車体上下加速度 RMS 値を計測した区間に対する軌道の状態診断を実施した。マルチプルタイタンパによる補修作業を行う前後の 2009 年 12 月 13 日と 2010 年 1 月 13 日の測定結果、補修作業を行った後の 2010 年 1 月 13 日と 2010 年 7 月 28 日の測定結果を比較すると、補修後の RMS 値が小さくなっていることが確認できた。また、補修を行った後とそこから約 6 ヶ月後の RMS 値を比較すると、補修から約 6 ヶ月後の RMS 値が補修前と同じ箇所でも軌道状態が悪化していることがわかった。そこで、RMS 値が顕著に確認できた 5.7km において軌道の状態診断を 22 ヶ月間にわたって実施した (図 6)。網掛けの区間は、それぞれマルチプルタイタンパによる補修作業と砕石補充と突き固め作業の期間を表している。これにより、軌道の状態監視が実路線で実施できることを確認した。

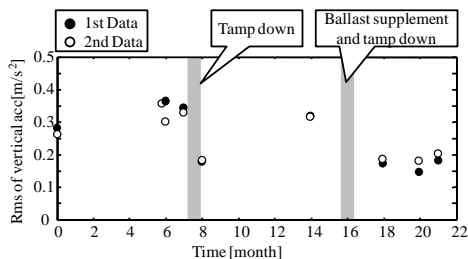


図6 レールの状態監視

(5) まとめ

本論文では、多重モデル法の一つである IMM 法により、鉄道車両サスペンションの故障を検出する方法を提案し、以下の結論を得

た。

①低次元の推定モデルを用いても良好な推定精度を確保するために、複数の低次推定モデル群から新しい推定モデル群を構成する方法を提案した。

②モデル更新を行う IMM 法を用いて、鉄道車両サスペンションの故障を推定するアルゴリズムを開発した。

③開発した推定アルゴリズムの有効性を確認するために、マルチボディダイナミクス SIMPACK を用いて、車体台車間左右動ダンパ、ヨーダンパの故障検出シミュレーションを行った。故障検出シミュレーションの結果、提案の方法により、検出精度が大幅に向上する事が明らかになった。

④軌道の予防保全を行うために、可搬型プローブ装置を用いて、長期間の定期的な計測を行い軌道状態の変化の検出を行った。その結果、上下加速度 RMS 値から、軌道保守による軌道の状態変化を定量的に評価できることを実証した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① 綱島 均, 鉄道における状態監視の現状と課題, J R E A, 査読無, 55 巻 1 号, pp. 36526-36528 (2012)
- ② 森 裕貴, 綱島 均, 多重モデル法を用いた鉄道車両の状態診断, 日本機械学会論文集 C 編, 査読有, 第 76 巻第 770 号, pp. 2364-2371 (2010), <http://ci.nii.ac.jp/naid/110007817347>
- ③ Hiroataka MORI and Hitoshi TSUNASHIMA: Condition Monitoring of Railway Vehicle Suspension Using Multiple Model Approach, Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, 査読有, Vol. 3, No. 1, pp. 243-258 (2010), DOI: <http://dx.doi.org/10.1299/jmtl.3.243>
- ④ Hiroataka MORI, Hitoshi TSUNASHIMA, Takashi KOJIMA, Akira MATSUMOTO and Takeshi MIZUMOTO: Condition Monitoring of Railway Track Using In-service Vehicle, Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, 査読有, Vol. 3, No. 1, pp. 154-165 (2010), DOI: <http://dx.doi.org/10.1299/jmtl.3.154>
- ⑤ 綱島 均: 鉄道における状態監視技術の現状と課題, 鉄道車両と技術, レールアンドテック出版, 査読無, No. 151, pp. 2-8 (2009)

[学会発表] (計9件)

- ① 原久純, 綱島均, 松本陽, 水間毅, 森裕貴, プローブ車両による軌道の状態監視, ADVANTY 2011, 2011-11/19 (京都)
- ② H. Tsunashima, Y. Naganuma, A. Matsumoto, T. Mizuma and H. Mori, JAPANESE RAILWAY CONDITION MONITORING OF TRACKS USING IN-SERVICE VEHICLE, The 5th IET conference on Railway Condition Monitoring and Non-Destructive Testing, 2011-11/29 (UK)
- ③ HITOSHI TSUNASHIMA and HIROTAKA MORI, Condition Monitoring of Railway Vehicle Suspension Using Adaptive Multiple Model Approach, IAVSD2011, 2011-8/17 (UK)
- ④ 原久純, 綱島均, 松本陽, 水間毅, 森裕貴, プローブ車両による軌道の状態監視 第17回鉄道技術連合シンポジウム, 2010-12/15 (東京)
- ⑤ 綱島均, プローブ車両によるメンテナンスの革新 (基調講演)., 第17回鉄道技術連合シンポジウム, 2010-12/15 (東京)
- ⑥ 森裕貴, 緒方正剛, 水間毅, 綱島均, 可搬型プローブ装置の運転状況記録装置への適応, 第19回交通・物流部門大会, 日本機械学会, 2010-12/11 (川崎), (日本機械学会交通・物流部門優秀講演論文賞受賞論文)
- ⑦ HITOSHI TSUNASHIMA and HIROTAKA MORI, Condition Monitoring of Railway Vehicle Suspension Using Adaptive Multiple Model Approach, International Conference on Control, Automation and Systems 2010 (ICCAS2010), 2010-10/27 (Korea)
- ⑧ Akira Matsumoto, Hitoshi Tsunashima and Takashi Kojima: DETECTION METHODS OF RAIL CORRUGATION FROM VIBRATION OR NOISE IN PASSENGER CABIN, 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems(CM2009), 2009-9/15 (Italy)
- ⑨ 森裕貴, 綱島均, 多重モデル法を用いた鉄道車両の状態診断 (マルチボディシミュレーションによる検証), 第18回交通・物流部門大会 (TRANSLOG2009), 日本機械学会, 2009-12/11 (川崎)

[図書] (計1件)

- ① Hitoshi Tsunashima, Yasukuni Naganuma, Akira Matsumoto, Takeshi Mizuma and Hirotaka Mori (2012). Condition Monitoring of Railway Track Using In-Service Vehicle, Reliability and Safety in Railway, Dr. Xavier

Perpinya(Ed.),

ISBN: 978-953-51-0451-3, InTech, pp. 333-356, Available from:

<http://www.intechopen.com/books/reliability-and-safety-in-railway/condition-monitoring-of-railway-track-using-in-service-vehicle>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

綱島均 (TSUNASHIMA HITOSHI)

日本大学・生産工学部・教授

研究者番号: 30287594