

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420182

研究課題名(和文)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

研究課題名(英文)Development of railway track condition monitoring system using portable sensing device

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：鉄道の安全性向上のためには、軌道状態を監視し、その状態に応じて適切な保守を行う必要がある。軌道不整は車両の振動による乗り心地の悪化とともに脱線の危険を増大させるため、重要な項目であると言える。しかし、コストの問題から地方鉄道では、十分な検査が行えない事業者も少なくない。本研究では、地方鉄道の軌道状態の常時監視を目的として、営業車両の車体振動加速度から、軌道変位を推定する逆問題を解くアルゴリズムを考案し軌道状態の診断を行った。その結果、高低不整量の大きい箇所については良好な精度で推定できていることが確認し、本研究で開発したアルゴリズムを搭載したレール状態常時監視システムの有効性を実証した。

研究成果の概要(英文)：This study proposes a track condition monitoring technique using car-body acceleration that can be easily measured by an in-service vehicle for the sake of an increase in safety of railway transportation. This study demonstrates the possibility of estimating track irregularities of conventional railway tracks using car-body acceleration only. The methodology proposed uses inverse dynamics to estimate track irregularity from car-body acceleration, applying a Kalman filter to solve this problem. This technique estimates the track irregularity in the longitudinal plane. The Kalman filter is able to apply to inverse analysis by expressing track geometry as a random walk model, and incorporating the model in an equation of state. Estimation results in simulation and full scale tests revealed that the proposed estimation technique is effective for track condition monitoring with acceptable accuracy for conventional railways.

研究分野：機械力学・制御工学

キーワード：鉄道 安全性 状態監視 軌道 カルマンフィルタ 推定

## 1. 研究開始当初の背景

車輪がレールで案内されて走行する鉄道にとって、軌道の安全管理は重要である。その状況を把握し、事故に至る前に補修していく予防保全が不可欠である。そのためには、軌道の状態を常時あるいは高頻度で監視することが望ましい。しかし、軌道検測車やレール探傷車などの検査用車両の走行により精密な軌道検査が可能になっているものの、コストや要員などの点から走行頻度は非常に制限される。さらに地方鉄道では、施設の経年劣化が著しい一方で、費用の確保や技術力の維持が難しく、十分な検査が行えない事業者も少なくない。

このような問題に対して、営業車両を用いて軌道状態の常時監視と診断が可能になれば、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。申請者は、車体の振動データから軌道の状態をリアルタイムに診断するプロトタイプの可搬型プローブ装置を開発した。（特許：第4521524号、軌道状態解析方法及び軌道状態解析装置並びに軌道状態解析プログラム：綱島 均、小島 崇、松本 陽、緒方 正剛）

その後、(独) 科学技術振興機構研究成果最適展開支援プログラムの補助によって、信号機器の大手メーカーである京三製作所が、日本大学、交通安全環境研究所と共同で、客室内に置くだけで軌道の状態診断が可能になる可搬型プローブ装置を製品化した。

本装置は、処理ユニット、センサユニット、電源ユニット、通信ユニットから構成されている。バッテリー駆動（車上 AC 電源により常時設置も可能）で6時間の連続計測が可能であり、また携帯電話を利用して計測データを伝送する機能も有している。また、騒音計を装置に取り付けることにより、車内騒音から波状摩耗の状態を診断することも可能になっている。

本装置を使用することにより、常時無人で計測を実施し、データを診断センターに送ることにより、軌道の管理を適切に行うことが可能になる（図2）。一方、このシステムを実現、運用するためには、保守管理に直接利用できるレール変位を、車体動揺データから推定することが必要になる。

これまで、振動加速度の大きさと軌道不整の相関が大きいことから、振動加速度のRMS値を参考値として保守を行う事例があったが、どの事業者でも共通する管理値としては、軌道不整の変位量が必要である。また、これらの推定値の信頼性を向上させるための統計データの作成と提示方法の検討、さらには、適切な常時観測データの回収方法と分析周期の検討も必要となっている。

## 2. 研究の目的

鉄道の安全性向上のためには、軌道状態を監視し、その状態に応じて適切な保守を行うことが必要である。検査項目の中でも軌道不

整は車両の振動による乗り心地の悪化とともに脱線の危険を増大させるため、重要な項目であると言える。

営業列車に簡易なセンサを置くことで車体動揺を計測し、計測データから軌道状態を診断する軌道状態診断システムの開発が行われている。また、新幹線の軌道状態監視を目的として、カルマンフィルタを用いて車体動揺から軌道形状を推定する手法の開発が行われている。これらの手法を組み合わせることによって低コストで高頻度な軌道状態の監視の実現が期待できる。

## 3. 研究の方法

本研究では、地方鉄道の軌道状態の常時監視を目的として、営業車両の車体振動加速度から、軌道状態の診断を行った結果について述べる。また、診断結果を軌道検測車によって計測された軌道不整と比較した結果についても述べる。

### (1) 軌道状態診断システム

軌道状態診断システムは、動揺計測部と解析部に分けられる。動揺計測部は、小型レール診断装置を営業車両に設置することで車体動揺の計測を行う。解析部では、診断ソフトを用いて、計測したデータから必要な情報を抽出し、評価値の算出を行うことで、軌道の状態を診断する。また、計測データは携帯電話回線の利用や外部メディアへの書き出しによって解析部へ転送されることで迅速な解析が可能である。診断結果は鉄道事業者のもとへフィードバックされ、この情報を保守計画に役立てることができる。本診断システムで軌道状態の常時監視を行うことにより、軌道の劣化や異常を早期発見でき、鉄道事業者は効率的な保守作業を行うことが可能である。

診断システムにおいて使用される小型レール診断装置は、軌道異常を検出するための3軸加速度センサおよびレートジャイロ、列車位置や走行速度を検出するためのGPS受信機、各センサの信号をコンピュータに入力するセンサインターフェースで構成される。バッテリー駆動で6時間まで連続計測をすることができるため、車内に置くだけで車体動揺の計測が可能である。また、携帯電話回線を利用して、計測データを自動的にサーバに転送する機能、microSDカードなどの記録メディアへ書き出す機能を有している。さらに、車両から電源を供給することで、常時計測への対応も可能である。

本研究では、営業路線の軌道状態診断を以下に示す手順で行った。

- ・地方鉄道事業者協力のもと、小型レール診断装置を営業列車に設置し車体動揺を計測する。

- ・計測した上下加速度からRMS値を求め、最も大きな値のある駅間を抽出する。

- ・抽出した駅間について、計測した車体上下

加速度から軌道不整を推定する。

・推定した軌道不整を軌道検測車の計測による軌道不整と比較する。

## (2) 軌道不整推定手法

高低不整の推定で使用するモデルを図1に示す。モデルは車体2自由度（上下動，ピッチ），各台車（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， $Z_{t1}$ は前台車， $Z_{t2}$ は後台車の上下動を表す。また， $\theta_c$ は車体のピッチ角， $\theta_{t1}$ は前台車， $\theta_{t2}$ 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。

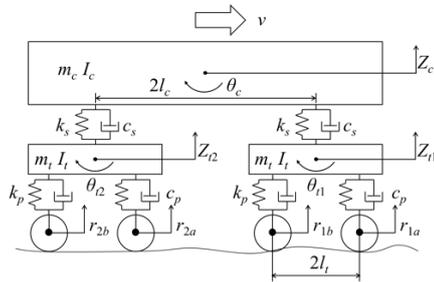


図1 車両モデル

本研究では，小型レール診断装置で計測した車体上下加速度から高低不整を推定するため，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。

## 状態方程式

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

## 観測方程式

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

ここで  $x_n$  は軌道形状， $y_n$  は車体上下加速度， $v_n$  は観測ノイズである。通常，外部入力である  $u_n$  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)式のように軌道形状  $u_n$  とシステムノイズ  $w_n$  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した。 $h$  は軌道形状に対する車体上下加速

度のインパルス応答， $L$ 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する(5)。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 毎にあらかじめ計算し，走行速度に対応するものを推定に用いた。

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，車体上下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。

## (3) 地方鉄道における軌道状態の診断

地方鉄道事業者のもと，2016年5月20日，6月24日に小型レール診断装置を先頭車両の運転室横の空きスペースに設置し，実車走行試験を実施した(図2)。本研究ではこの実車走行試験によって得られた車体上下加速度を用いて軌道状態の評価を行った。また，軌道検測車によって計測された高低不整は2015年5月30日に計測されたものである。



図2 小型レール診断装置

## 4. 研究成果

### (1) 要注意区間の抽出

全区間の車体上下加速度のRMS値から，最も著大となった箇所を含む区間を要注意区間として抽出する。図3に全区間の車体上下加速度，図4に車体上下加速度のRMS値を示す。抽出の結果，要注意区間となった駅間はG駅H駅間となった。

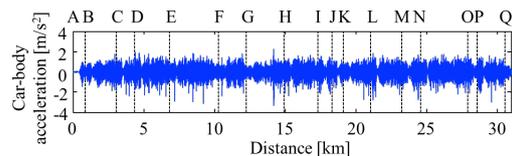


図3 計測した車体上下加速度

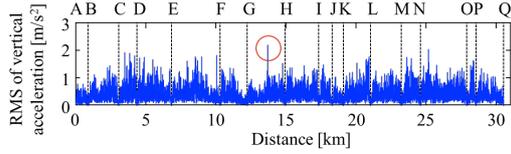


図4 計測した車体上下加速度のRMS値

要注目区間となったG駅H駅間のうち、上下加速度のRMS値が著大となった箇所についてカルマンフィルタを用いて高低不整を推定した。推定を行った区間のRMS値、推定した高低不整を図5に示す。

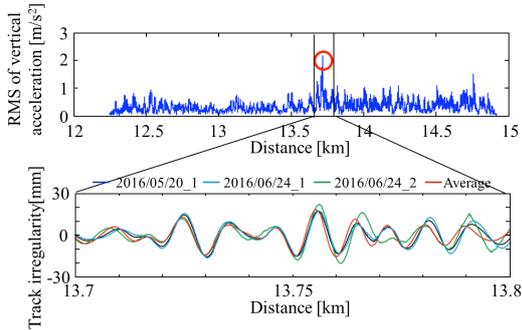


図5 推定した高低不整

3走行分の計測した走行速度、車体上下加速度に大きな差は見られなかった。また、図5より3走行分の推定結果にも大きな差は見られなかった。以上のことから再現性は十分であると言えます、推定結果を平均化することで推定精度の向上が期待できる。

また、RMS値が著大となった箇所について、高低不整も13.76[km]地点に25[mm]程度の著大となる箇所を確認することができる。この結果からRMS値による評価と高低不整推定による評価が一致することが分かり、2つの手法を組み合わせることで軌道保守の基準となる10m弦正矢による高低不整での評価が可能であると考えられる。

推定した高低不整と軌道検測車の計測による高低不整を比較し、推定精度を評価するためにMPC metricsを用いた。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。各指標を算出する式を以下に示す。

$$M = \sqrt{\frac{\sum e_i^2}{\sum m_i^2}} - 1 \quad (3)$$

$$P = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \frac{\sum e_i m_i}{\sqrt{\sum e_i^2 \sum m_i^2}} \quad (4)$$

$$C = \sqrt{M^2 + P^2} \quad (5)$$

ここで、 $e$ は推定値、 $m$ は実測値である。推定値は3走行分の推定の平均値である。各値は0に近いほど相関性が高いことを示す。高低不整の推定結果にMPC metrics法を適用した結果を表1に示す。

表1から、振幅、位相に相関性があることがわかる。また、図6からも推定した高低不整の平均値は軌道検測車の計測による高低不整と近い値を示していることがわかる。このことから、高低不整量が大きい箇所については良好な精度で推定することができていることを確認した。一方、軌道検測車の計測と大きな差異がある部分も確認できる。これは、噴泥などによる路盤の影響によるものと考えられるが、今後、詳細な現地調査が必要である。

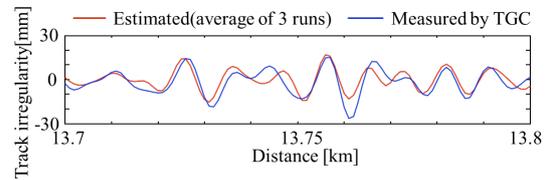


図6 推定した高低不整（3走行平均）と軌道検測車による測定結果の比較

表1 MPCによる評価

	Magnitude	Phase	Combination
	$M$	$P$	$C$
First run (2016/05/20)	-0.2199	0.2320	0.3196
Second run (2016/06/24)	-0.1338	0.2071	0.2466
Third run (2016/06/24)	-0.2200	0.1877	0.2892
Average	-0.1957	0.1981	0.2785

本研究では、地方鉄道の軌道状態の常時監視を目的として、営業車両の車体振動加速度から、速度に依存する車両動揺データから軌道変位を推定する逆問題を、精度良く、安定的に解くアルゴリズムを考案し、軌道状態の診断を行った。

その結果、RMS値による評価と高低不整推定による評価が一致することが確認できた。さらにMPC metrics法を用いて、推定した高低不整の平均値と軌道検測車の計測による高低不整を比較し、推定精度を評価した結果、2つの波形には相関性があり、高低不整量の大きい箇所については良好な精度で推定できていることが確認できた。

これらの結果から、本研究で開発したアルゴリズムを搭載したレール状態常時監視システムの有効性を実証した。

## 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3件)

① Mai ODASHIMA, Shohei AZAMI, Yasukumi NAGANUMA, Hirotaka MORI and Hitoshi TSUNASHIMA, Track geometry estimation of a conventional railway from car-body acceleration measurement, Mechanical Engineering Journal, The Japan Society of Mechanical Engineers, pp.1-12, 2017

DOI: 10.1299/mej.16-00498

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. 135-4, pp.395-402, 2015

DOI: 10.1541/ieejias.135.395

③ TAKAHITO KOBAYASHI, YASUKUNI NAGANUMA and HITOSHI TSUNASHIMA, Condition Monitoring of Shinkansen Tracks based on Inverse Analysis, International Journal of Performability Engineering, Vol. 10-5, pp.443-452, 2014

[学会発表] (計20件)

① 小田嶋舞, 綱島均, 森裕貴, 浅野晃, 営業車の車体振動加速度を用いた軌道の状態監視に関する研究, NU-Rail2017, 2017年03月23日, 千葉工業大学, 習志野市

② Hitoshi Tsunashima, Railway Condition Monitoring in Japan, Trends and Future Prospects, Training Workshop on Railway Structural Health Monitoring (RSHM), 2017/3/7, Bangkok(Thai) (基調講演)

③ 小田嶋舞, 綱島均, 森裕貴, 浅野晃, 営業列車の車体振動加速度を用いた軌道の状態監視に関する研究, 第23回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2016), 2016年12月14日, 代々木青少年センター, 東京都港区

④ Hitoshi Tsunashima, Railway Condition Monitoring, Present and Future, 1st International Workshop on Structural Health Monitoring for Railway Systems (IWSHM-RS 2016), 2016/10/13, 青島(中国), (基調講演)

⑤ H. Tsunashima, H. Mori, M. Ogino, S. Azami and A. Asano, The Application of an On-board Track Condition Monitoring System for Local Railways, THE THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON RAILWAY TECHNOLOGY: RESEARCH, DEVELOPMENT AND MAINTENANCE, 2016/4/06, Cariari(Italy)

⑥ Hitoshi Tsunashima, Condition Monitoring in Railways, Present and Future, Nihon-Rangsit Symposium on Railway System Technology, 2016/03/14, Bangkok(Thai) (基調講演)

⑦ 荻野誠之, 綱島均, 森裕貴, 浅野晃, 地方鉄道用レール状態診断システムの開発と診断事例, 第22回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2015), 2015年12月10日, 東大生研, 東京都港区

⑧ 浅見祥平, 綱島均, 森裕貴, 荻野誠之, 浅野晃, 車体振動加速度を用いた在来線の軌道不整推定に関する研究, 第22回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2015), 東大生研, 2015年12月9日, 東京都港区

⑨ 小田嶋舞, 浅見祥平, 荻野誠之, 綱島均, 森裕貴, 浅野晃, 車体振動加速度の実測データによる在来線の軌道不整の推定, 日本機械学会第24回交通・物流部門大会, 2015年12月9日, 東大生研, 東京都港区

⑩ H. Mori, Y. Sato, H. Ohno, M. Ogino, H. Tsunashima and A. Asano, CONDITION DIAGNOSIS OF RAILWAY TRACKS BY A COMPACT SIZE ONBOARD DEVICE, 7th International Symposium on Speed-up and Sustainable Technology for Railway and Maglev Systems (STECH2015), 2015/11/11, Chiba(Japan)

⑪ Y. Naganuma, S. Azami and H. Tsunashima, TRACK GEOMETRY ESTIMATION FROM CAR-BODY MOTIONS OF SHINKANSEN VEHICLES, 7th International Symposium on Speed-up and Sustainable Technology for Railway and Maglev Systems (STECH2015), 2015/11/11, Chiba(Japan)

⑫ S. Azami, Y. Naganuma and H. Tsunashima, TRACK GEOMETRY ESTIMATION OF RAILWAY FROM CAR-BODY ACCELERATION, 7th International Symposium on Speed-up and Sustainable Technology for Railway and Maglev Systems (STECH2015), 2015/11/11, Chiba(Japan)

[図書] (計1件)

① Hitoshi Tsunashima, Hirotaka Mori, Masayuki Ogino and Akira Asano, Development of Track Condition Monitoring System Using On-board Sensing Device, RAILWAY RESEARCH - SELECTED TOPICS ON DEVELOPMENT, SAFETY AND TECHNOLOGY, InTech, ISBN: 978-953-51-2235-7, 2015-11

## 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