

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06240

研究課題名(和文) 機械学習を用いた軌道予防保全システムの構築と評価

研究課題名(英文) Development and evaluation of a track condition monitoring system using a machine learning technique

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) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：営業車両に設置した加速度センサ類、GPSなどで構成された車体動揺計測装置を用いることで、安価かつ常時軌道状態の診断ができる軌道状態診断システムが開発されている。営業列車から取得できる大量のデータを効率よく計算処理するためには、軌道状態の診断・予測の自動化が必要となる。本研究では、車体の上下加速度、左右加速度、ロール角速度のRMS値から構成される特徴空間から、機械学習の手法であるサポートベクターマシンを用いて軌道の状態を判別するアルゴリズムを構築し、軌道の状態を自動化に診断するシステムを開発した。地方鉄道における実証実験の結果、軌道異常を実用上十分な精度で診断できることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地方鉄道では、十分な軌道検査が行えない事業者も少なくない。このような問題を解決するためには、地方鉄道の営業車両の走行データを一括収集・管理し、軌道の状態を診断・予測するセンターが有効であると考えられ、多くの地方鉄道事業者における軌道保守に関する問題を解決できるものと考えられる。本研究の成果は、このデータセンター(令和元年12月開設済み)における診断業務に活用され実績をあげている。

研究成果の概要(英文)：A track condition monitoring system that uses a compact on-board sensing device has been developed and applied for track condition monitoring of regional railway lines in Japan. Monitoring examples show that the system is effective for regional railway operators. A classifier for track faults has been developed to detect track fault automatically. Simulation studies using SIMPACK and field tests were carried out to detect and isolate the track faults from car-body vibration. The results show that the feature of track faults is extracted from car-body vibration and classified from proposed feature space using machine learning techniques.

研究分野：機械力学・制御工学

キーワード：鉄道 軌道 状態監視 振動 機械学習 安全性

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 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。さらに、団塊の世代の大量退職時代を迎え、軌道の保守に関する専門的な経験、知識が十分伝承されず、鉄道の安全性の低下が懸念されている。このような問題を解決するためには、多くの地方鉄道の営業車両の走行データを一括収集・管理し、軌道の状態を診断・予測するセンタが有効であると考えられる。これにより、多くの地方鉄道事業者における軌道保守に関する負担を大きく軽減できるものと考えられる。

申請者は、無人で車両の動揺データを計測し軌道の状態を診断するシステムを、交通安全環境研究所、(株)京三製作所と共同で開発した。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を有している。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。本装置は、現在、山形鉄道に常設されており、車両が走行した場合の動揺データが携帯電話回線で常時伝送されている。

開発したシステムにおいては、解析で扱うことができるデータの量が限られるため、多くの鉄道事業者に対応することが困難である。多くの鉄道事業者に対応するためには、大量のデータを効果的に解析・診断する自動化システムの開発が不可欠である。機械学習を用いて大量のデータを分析し、その結果を蓄積することにより軌道の診断精度を高めることができる。

### 2. 研究の目的

鉄道において軌道とは、列車荷重を支持・案内し、列車を円滑に走行させるための重要な要素である。鉄道を安全かつ快適に走行させるためには、軌道の維持管理および予防保全が重要であり、高頻度で監視する事が望ましい。軌道に生じる異常は軌道不整、波状摩耗、継目落ちなどがあり、特に軌道に生じる数ミリの上下左右の歪みである軌道不整は、鉄道車両の乗り心地と安全性に密接に関係する。軌道不整の検測に専用検測車を用いる鉄道事業者は多いが、費用や人員の理由により、十分な検査を行えない地方鉄道事業者も多い。

そのため、軌道状態を安価で常時診断ができる軌道状態診断システムが開発されている。軌道状態診断システムの概要をFig. 1に示す。本システムはセンサ類、GPSなどで構成された車体動揺計測装置と軌道状態を診断する診断ソフトで構成される。車体動揺計測装置は営業車両に設置し車体動揺を自動で計測する。測定データを携帯電話回線によりサーバーに転送され、解析ソフトにより軌道状態に関する評価値を算出することで診断を行う。しかし、営業列車の車体動揺データは毎日自動で収集されるため、取り扱うデータ量が膨大となる。そのため、収集した計測データを効率よく計算処理するために、軌道状態の診断を自動化することが必要不可欠である。

本研究では、軌道不整に関する異常の検出および種別の自動化を目的として、機械学習を導入することで車体動揺から軌道状態を自動的に診断する自動診断アルゴリズムを構築した。また、鉄道走行シミュレーションを用いて、構築したアルゴリズムの検証を行った。さらに、実際の地方鉄道路線に適用して軌道状態の診断可能性を検討した。

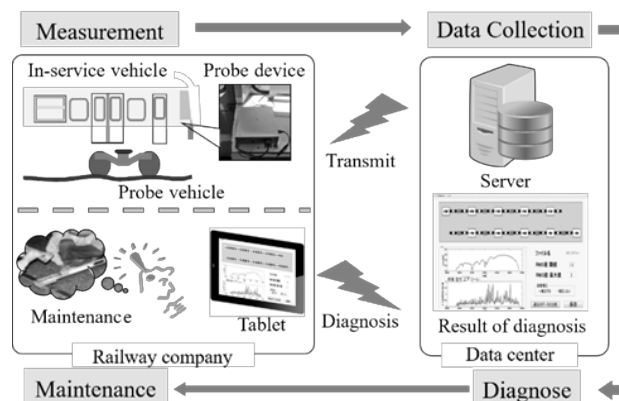


Fig.1 Track condition monitoring system

### 3. 研究の方法

#### 3.1 走行シミュレーションによる車体振動加速度データの取得

車体動揺から軌道状態を診断するアルゴリズムを構築するためには、軌道不整が車体動揺に及ぼす影響を解析する必要がある。本研究では、マルチボディダイナミクス解析ソフト (SIMPACK4) を用いた鉄道車両走行シミュレーションにより、車体挙動解析を行った。車両モデルは1車両とし、一般的な在来線の車両を模擬した。鉄道車両は車体1、台車2、輪軸4の計7剛体で構築されており、それぞれの剛体に6自由度を有しているため、シミュレーションで使用する車両モデルは計42自由度である。また、車体、台車、輪軸の間にはバネ・ダンパ要素により連結および支持されている。これにより鉄道車両の3次元運動に対応したシミュレーションが可能である。この車両モデルを用いて、前台車中心直上の車体の上下、左右加速度およびロール角速度を算出した。

#### 3.2 自動診断アルゴリズムの構築

##### 3.2.1 車体動揺から特徴量を抽出

軌道状態を管理する指標として軌道不整がある。その種類としては、レールの上下方向の変位を表す高低不整、レールの左右方向の変位を表す通り不整、左右レールの高低差を表す水準不整がある。これらの軌道不整と車体動揺には高い相関があるため、車体動揺の大きさは軌道状態を知るには有効な手段である。また、軌道状態診断システムの車体動揺計測装置は高低、通り、水準不整などの軌道状態診断を目的として、営業車両が走行した際の車体の上下、左右加速度およびロール角速度の自動収集が可能である。

軌道の異常を機械学習によって診断するためには、それぞれの軌道不整について、異常がある軌道を走行した際の車体動揺から特徴量を抽出する必要がある。この特徴量を教師データとして学習することで学習モデルが構築され、未知の車体動揺データを入力すると軌道不整に関する異常の有無と種類について識別を行うことができる。

本研究では、車体動揺から軌道異常を種別する特徴量の抽出を目的として、SIMPACKを用いた鉄道走行シミュレーションを行い、軌道不整上を走行した際の車体動揺を算出した。高低、通り、水準不整の大きさと車体動揺の関係性を解析するために、地方鉄道を想定した基準となる軌道形状と軌道不整が増大した軌道形状を生成した。ここで、軌道不整が増大した時の軌道形状の変位は標準偏差を基準の2倍とすることで模擬した。本シミュレーションは、高低、通り、水準不整が全て標準的な軌道と各軌道不整の種類の内、1つのみが劣化した状態の軌道で行った。また、シミュレーション距離は1000m、走行速度は地方鉄道の運転速度を想定して60km/hとした。

走行シミュレーションによって各軌道不整が増大した時の車体動揺を算出し、算出した車体動揺からRMS値を算出し、10m間ごとの最大値を3次元空間にプロットした特徴空間を図2に示す。Fig. 2より、正常な軌道、高低不整が異常、通り不整が異常、水準不整が異常の4つのクラスターが特徴空間内に生成されることがわかる。このような特徴空間を教師データとして利用することで、機械学習による軌道状態の識別が可能になると考えられる。

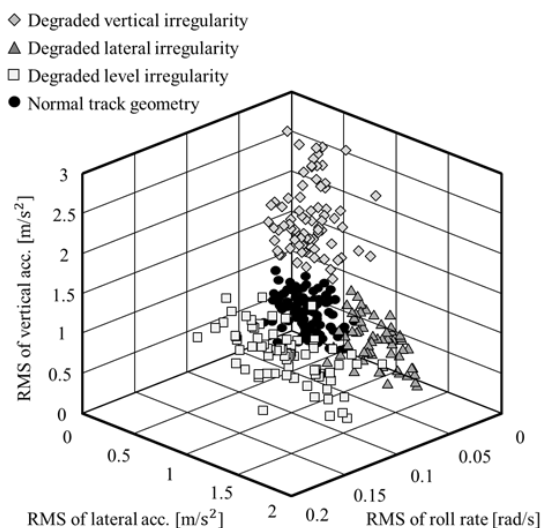


Fig. 2 Feature space

##### 3.2.2 機械学習を用いた軌道状態の診断方法

本研究では、2クラスの分類問題を解くために作られた機械学習アルゴリズムであるサポートベクターマシン (SVM) を用いる。SVMは2つのグループ間の最も離れた箇所 (最大マージン) を見つけ出し、その中心に境界を引くことで識別する。このマージンを最大化することによって高

い汎化能力が得られるという特徴がある。

SVMを用いた軌道状態の分類は次の手順で診断する。初めにSVMで行う識別は「高低不整が異常」または「それ以外の状態」の2択問題として取り扱い識別する。次に、通り不整、水準不整の順で識別し、軌道状態を診断する。以上の診断を軌道10mごとに行い、異常がある箇所とその種類を推定する。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 シミュレーションを用いた自動診断アルゴリズムの検証

本章では SIMPACK を用いた走行シミュレーションを行い、一部区間で軌道不整が進展した軌道を走行した際の車体動揺を算出した。この車体動揺から自動診断アルゴリズムを使って不整進展箇所の異常を検出および種別が可能であるか検証を行った。

軌道異常は基準となる軌道形状と同程度の軌道不整量を1.5倍、2倍にすることで作成した。シミュレーションに用いる軌道形状は、軌道異常を基準の軌道形状に付加することで生成した。軌道形状の距離は5000mとし、高低、通り、水準不整の異常をそれぞれ100箇所ずつ、複合しない様に設けた。本シミュレーションでは、基準の軌道形状および、軌道異常が1.5倍、2倍と進展した軌道形状を、計3回走行し、車体の上下、左右加速度およびロール角速度を算出した。ここで、車両の走行速度は60km/hとした。

次に、構築した自動診断アルゴリズムを用いて、軌道異常を付加した箇所について異常診断を行った。自動診断アルゴリズムの教師データはFig. 2の特徴空間を使用し、識別結果は「正常な軌道」、「高低不整が異常」、「通り不整が異常」、「水準不整が異常」の4通りとした。また、アルゴリズムの検証のため、診断結果から正答率を算出した。軌道異常を付加した区間において、基準の軌道形状であるとき診断結果が「正常な軌道」と診断されるか、または軌道不整の変位が1.5倍、2倍に増大したとき異常が診断されたら正解とした。正答率は各軌道異常を付加した100箇所の内、正解数の割合とした。Table 1に軌道異常を付加した箇所を自動診断アルゴリズムにより診断した結果の正答率を示す。

Table 1 Correct rate of detection

	Point of degraded track geometry		
	Longitudinal level irregularity	Alignment irregularity	Cross level irregularity
Normal track	92%	82%	88%
1.5 times large	86%	56%	62%
2.0 times large	100%	94%	82%

Table1より、基準の軌道を診断した場合および、軌道不整の変位を2倍にした場合は正答率が80%以上の精度で診断可能であることを示した。特に高低不整は高い精度で検出が可能であることがわかった。一方、通り通り不整、水準不整については、高低不整に比べて基準の1.5倍程度の中間的な異常に対しては、検出精度が低いことがわかった。しかしながら、地方鉄道における軌道異常は、ほとんどが高低不整であることが指摘されており、本研究の自動診断アルゴリズムは有効であると考えられる。

##### 4.2 地方鉄道の軌道状態診断への適用

本章では、3章において検討した自動診断アルゴリズムの有用性を検証するために、地方鉄道において実際に計測した車体動揺データから、軌道の状態診断を行った。車体動揺は、3軸加速度センサおよびレートジャイロ、GPS受信機などで構成された車体動揺計測装置（当該地方鉄道車両に常設）を用いて測定を行った。

教師データは2016年10月に高低不整の補修があった一駅区間を2016年1月、2月、5月、6月、7月、11月に測定した車体動揺データを用いて作成した。教師データのクラスターは以下のように車体動揺を抽出して作成した。

1. 高低不整の異常は上下加速度が $1.0[m/s^2]$ 以上
2. 通り不整の異常は左右加速度が $1.1[m/s^2]$ 以上かつロール角速度 $0.05[rad/s]$ 以下
3. 水準不整の異常はロール角速度が $0.05[rad/s]$ 以上
4. 正常な軌道状態のクラスターは高低不整の補修が行われた直後の2016年11月に測定した車体動揺データ

本アルゴリズムは軌道距離10mごとに診断を行うことで、軌道に異常がある場所と種類を検出する。本研究では未知データである2018年5月1日の教師データと同じ区間の軌道状態を診断し、アルゴリズムの検証を行った。Fig. 3に診断した区間について測定した車体動揺をRMS値に算出したグラフおよび、アルゴリズムにより高低不整の異常、通り不整の異常、水準不整の異常が検出された結果を示す。

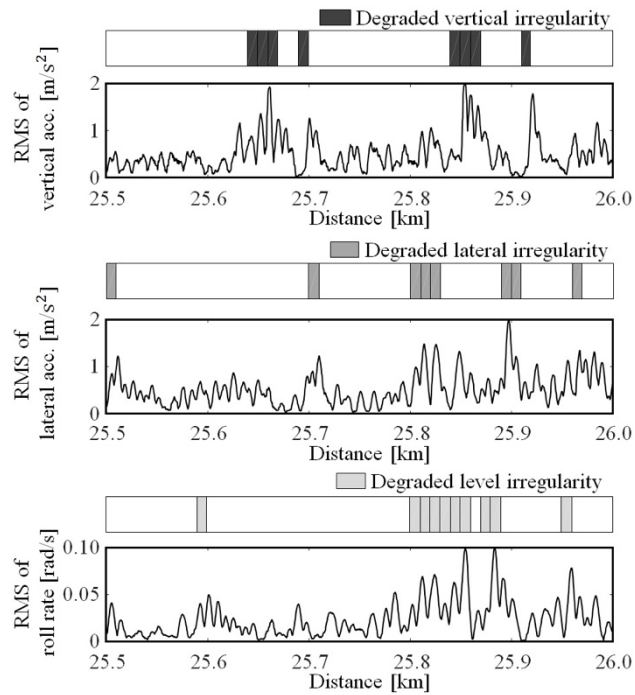


Fig. 3 RMS of measured car-body accelerations and detection results in the field test

Fig. 3より上下、左右加速度およびロール角速度のRMS値グラフが大きい箇所において、それぞれ高低、通り、水準不整の異常と診断された。また、25.8[km]から25.9[km]地点では、複数の軌道異常を検出したことから、複合した軌道異常の診断が可能である。以上より、軌道に異常が生じている可能性がある場所とその種類の特定において、機械学習を用いた軌道状態の診断可能性を示した。

本研究ではSIMPACKを用いた鉄道走行シミュレーションにより、軌道不整の進展が車体動揺に及ぼす結果を解析し、特徴量を抽出することで、機械学習を用いた自動診断アルゴリズムを構築した。自動診断アルゴリズムを用いて、シミュレーションにより生成した車体動揺から軌道異常検出を行なった。さらに、実際の地方鉄道の軌道状態の診断可能性を検討した。その結果、自動診断アルゴリズムによって、実測の車体動揺から高低不整、通り不整、水準不整について、異常を自動的に検出できることを示した。

今後の課題としては、異常の程度について評価するアルゴリズムの構築、および診断結果と実際の軌道を詳細に突き合わせた上での有効性の評価と機能性の改良が必要であると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hitoshi Tsunashima	4. 巻 9-13
2. 論文標題 Condition Monitoring of Railway Tracks from Car-Body Vibration Using a Machine Learning Technique	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Science	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/app9132734	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 4件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 綱島 均
2. 発表標題 鉄道における状態監視の現状と展望
3. 学会等名 交通ビジネス塾（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 綱島 均
2. 発表標題 時間周波数解析を用いた軌道状態診断に関する研究
3. 学会等名 NU-Rai I2019（鉄道分野の新技术に関するシンポジウム）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 綱島 均
2. 発表標題 営業列車を活用した軌道の評価に関する研究
3. 学会等名 第25回 鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL2018）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 網島 均
2. 発表標題 機械学習を用いた軌道の状態診断に関する研究
3. 学会等名 第25回 鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 網島 均
2. 発表標題 車体振動加速度を用いた軌道異常の検出
3. 学会等名 第25回 鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Tsunashima
2. 発表標題 Track Condition Monitoring Using Machine Learning Technique for Regional Railways
3. 学会等名 2nd Asian Conference on Railway Engineering and Transportation (ART 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Tsunashima
2. 発表標題 Development and operation of a track condition monitoring system for regional railway
3. 学会等名 Fourth International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance (Railways2018 and STECH2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 林田悠一, 綱島均, 小田嶋舞
2. 発表標題 機械学習を用いた軌道の状態監視に関する研究
3. 学会等名 NU-Rail 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hitoshi Tsunashima, Yuichi Hayashida, Mai Odashima
2. 発表標題 Track Condition Monitoring using Machine Learning Technique for Regional Railways
3. 学会等名 Transportation and Electric Railway Technical Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 綱島均
2. 発表標題 営業車両の車体動揺による軌道状態のモニタリング
3. 学会等名 第12回 J S C M 講習会「車両・軌道系のモニタリング技術の最前線」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 林田悠一, 綱島均, 小田嶋舞
2. 発表標題 機械学習を用いた軌道の状態診断に関する研究
3. 学会等名 第24回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL2017)
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 HITOSHI TSUNASHIMA
2. 発表標題 FEATURE EXTRACTION AND CLASSIFICATION OF TRACK CONDITION FROM CAR-BODY VIBRATION
3. 学会等名 25th International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 綱島 均
2. 発表標題 鉄道における状態監視の現状と展望
3. 学会等名 第26回 交通・物流部門大会 (TRANSLOG2017) (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 綱島 均
2. 発表標題 鉄道における状態監視技術の現状と地方鉄道への展開
3. 学会等名 平成29年度交通安全環境研究所フォーラム2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----