

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630210

研究課題名(和文) 中小鉄道を対象としたGPSに依存しない簡易軌道異常検知システムの構築

研究課題名(英文) Simple fault detection system of railway tracks independent of GPS for medium-sized railway companies

研究代表者

蘇 迪 (Su, Di)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：40535796

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、全国120社の地方中小鉄道を対象として、近年急速に進歩した携帯情報端末を用いて営業車両の振動応答を観測し軌道異常を早期検知する、簡便かつ高頻度な常時モニタリングシステムを構築する。

まず、列車走行時のレール継目による高周波パルス信号を自動抽出し、加速度積分を相互補完によって、高精度の列車位置同定を実現する。次に、車両力学モデルを用いた振動応答による軌道変状の分析技術の向上を図って、特定軌道構造における変状の発生原因を特定する。さらに、可観測性分析によって、実車で計測可能な変状種類とセンサ配置案を提案し、携帯情報端末のみで前述した応答データ取得及び変状情報把握可能なシステムを実現する。

研究成果の概要(英文)：In this study, a simple fault detection system of railway track independent of GPS is developed, which works for early detection of the track abnormality from vibration responses of the commercial trains by using smart phones progressed rapidly in recent years. It is aimed to propose an inexpensive portable constantly monitoring system in track management for 120 medium-sized railway companies in Japan.

First, a method of train localization through the mutual correction of acceleration and interior sound is proposed and implemented with smart phones. Then, by improving the train-track interaction analysis techniques the vibration response is obtained to identify the cause of the specific irregularity in a particular track structure. In addition, the observability analysis helps to propose a practical onboard measurement scheme including the required measured parameters and sensor arrangement. Only the smart phones can realize a simple onboard fault detection system of train tracks.

研究分野：土木工学

キーワード：携帯情報端末 中小鉄道 軌道異常検知

## 1. 研究開始当初の背景

鉄道インフラにおける自然災害や事故の発生は、人命のみならず莫大な経済・社会的損失をもたらすため、異常を早期に発見することが重要である。地方中小鉄道は、それぞれの沿線地域住民の日常生活の足として通勤通学等に大きな役割を果たしている。しかし、近年その多くは経営環境が厳しく、老朽化が進む施設に対して技術者不足や財政難により十分な維持管理が行われていない状況にあり、安全性の低下が危惧されている。そのため、中小鉄道に対する安価で信頼性の高い施設健全性評価技術、とりわけ軌道の健全性評価技術の提供が期待されている。

代表研究者等は、上述の問題を解決するために、営業車両に加速度計と GPS、小型 PC を組み合わせた簡易な計測システムを搭載し、車両の振動から軌道の異常を検知する軌道モニタリングシステム (Train Intelligent Monitoring System, TIMS) の開発に取り組んできた。しかし、車両の走行位置同定は GPS に依存することから位置検出精度に課題が残るとともに、山間部やトンネル内等の GPS 不感区間で利用不可になるという問題を有している。また、特殊な計測機器を必要とするとともにデータ処理にも高度な専門技術者を必要とする等、中小鉄道事業者に広く利用される簡易で安価なシステムには達していない。

近年急速に進歩したスマートフォンをはじめ、携帯情報端末の普及により、列車の振動応答データの取得が容易な環境となっている。そのため、専門知識がない鉄道従業者でも特殊な機器を必要とせず、軌道状態を頻りに計測することが可能である。加えて、計測データの自動処理を一体化することにより軌道の現状を常時評価することが期待できる。これにより、GPS に依存する走行位置同定問題も解決し、計測環境に関わらず管内の全線路の健全性を評価できる監視システムの開発が可能と考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、全国 120 社の地方中小鉄道を対象として、近年急速に進歩した安価な携帯情報端末を用いて営業車両の振動応答を観測し軌道異常を早期検知する、簡便かつ高頻度な常時モニタリングシステムを構築する。

(1) 現在広く普及している携帯端末 (iPod Touch) を利用し、列車位置同定は GPS 信号に依存しないため、レール継目による高周波パルス信号等の特異信号を抽出することにより、加速度と車内音の計測およびデータ解析を通して列車の位置同定を行う手法を提案する。

(2) 車両と軌道構造物間での相互作用を考慮したモデルを構築し、2 つの防振軌道におけ

る実現象の振動特性の再現を行い、50 Hz 以上の高周波領域における軌道構造が振動特性に与える影響を評価し、軌道振動の対策工を考察する。

(3) 中小鉄道で出現し易い軌道変状に着目し、開発した車両力学モデルを用いて、振動応答に基づく軌道変状の逆解析手法を改良する。列車サスペンションシステムによる振動の減衰効果を考慮し、実車で計測可能な変状種類とセンサ配置案を提案する。

## 3. 研究の方法

### (1) 加速度と車内音の相互補正による鉄道車両の位置同定手法

#### ① 手法の概要

GPS 電波の利用できない区間においても、正確な位置同定を行う手法として、レール継目部で生じる衝撃応答を用いる手法がある。本手法では、車上で計測されたデータにおいて、レール継目部通過時の衝撃応答の時間差から車両速度を推定し (図-1)、積分から位置同定を行う。この手法は、GPS が使えない地下やトンネルでも適用可能であるほか、車両上に計測機器を設置するだけでよいので、モニタリングシステムのコスト抑制に有効であると考えられる。本研究では多重解像度解析またはスパース表現を用いて車内音データから背景雑音を除去し、抽出されたレール継目音から推定される車両速度を用いて進行方向加速度データの積分による速度データを補正することにより、より正確な車両速度を求めた。最終的にこの速度データを積分することで車両の位置を求めることができ、位置同定精度の向上が期待される。

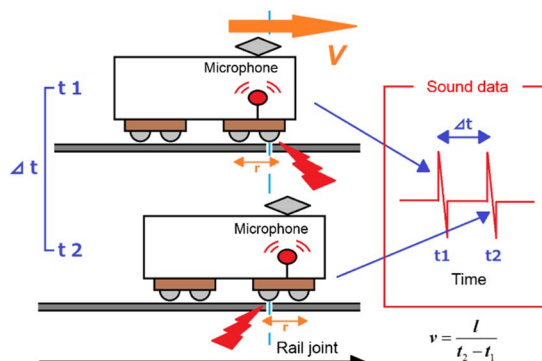


図-1 車内音を用いた速度推定手法の概要

#### ② 速度推定の解析手法

図-2 に示す車両速度推定および位置同定のデータ処理フローを開発した。iPod Touch で測定された車内音データと 3 方向加速度データから、速度積分する前の最終的な推定速度である推定速度 3 を求めるまでの解析手法を提案した。以下③-⑤に中心的な手法を説明する。

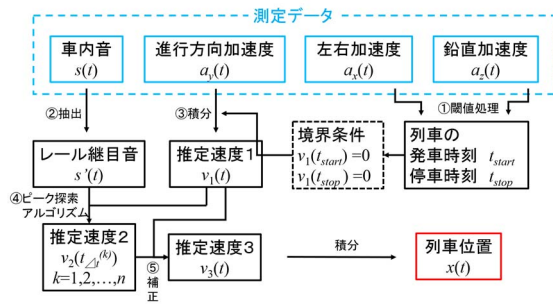


図-2 車両位置同定のデータ処理フロー

### ③ 車両の発車時刻と停車時刻の導出

iPod Touch で測定された車両の鉛直加速度と左右加速度を用いて、車両の発車時刻および停車時刻を推定する。本研究では、車両が走行状態にあるのか停止状態にあるのかを判断するための指標として、閾値より大きい60秒間以上連続で満たすの区間を走行状態と推定する。

### ④ レール継目音の抽出

測定された車内音には、対象とする信号であるレール継目音の他に、不要となる雑音が入混している。背景雑音を除去し、可能な限りノイズが除去されたレール継目音を抽出するための解析手法として、多重解像度解析による手法とスパース表現による手法を利用する。

レール継目音は、デルタ関数状の局所的な非定常信号である。それゆえ、時間領域で局所的な基底関数系をもつ1次元離散ウェーブレット変換によって、多重解像度解析 (Multiresolution Analysis) を行うことにより、レール継目音を抽出することが可能であると考える。デジタル信号は、離散ウェーブレット変換によって、低周波成分である近似係数と高周波成分である詳細係数とに分解することができる。このプロセスを原信号から得られた近似係数に段階的に適応し、多段階の周波数帯域成分に分解することを、多重解像度解析と呼ぶ (図-3)。

また、背景雑音が完全に切り除かれた理想的なレール継目音の信号は時間領域において少数の非零要素をもち、時間領域で局所的な有限個の基底関数によって表現できると考える。これらの信号がスパース表現 (sparse representation) とよばれる信号処理方法によって表現される可能性があることを示している。スパース表現とは、少数の基底関数によって信号を表現する信号処理の考え方である。一般に最適解を求めるのが非常に困難であると考えられるが、実際に信号にスパース表現を適用する際には、制約条件を緩和した等価な最小化問題を考える。

### ⑤ 継目音から速度の推定

定の際には、レール継目音データ中の前輪通過時と後輪通過時のピークペアが必要となる。ピーク探索においては、レール継目音の

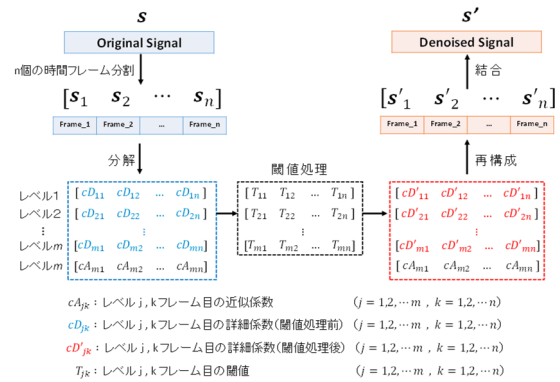


図-3 多重解像度解析の手順

パルスの時間幅を0.4sに対し、データの絶対値の最大値を基準としてピークの時刻を探している。探索されたピークを速度推定に用いるかどうかの判断には、レール継目音データから導出された閾値を用いる。レール継目音の大きさは、時間的に変化する車両速度に依存するため、閾値を時間に応じて変化させている。

### (2) 車両との動的相互作用を考慮した異なる軌道構造の振動特性評価

近年都市鉄道に設けられたフローティングスラブ軌道で外軌側に約30cmという長波長の波状摩耗が報告されている。この区間で連続した防振まくらぎ直結軌道区間では同様の摩耗が発生しておらず、軌道構造が発生に影響していると考えられる。観測の列車走行時の加速度応答スペクトルでは2つの軌道構造の間で差があり、フローティングスラブ軌道では60Hz付近に振動のピークが卓越することが明らかになった。

本研究では車両と軌道構造物間での相互作用を考慮したモデルを構築し、2つの軌道における実現象の振動特性の再現を行い、50Hz以上の高周波領域における軌道構造が振動特性に与える影響を評価し、軌道振動の対策工を考察する (図-4)。

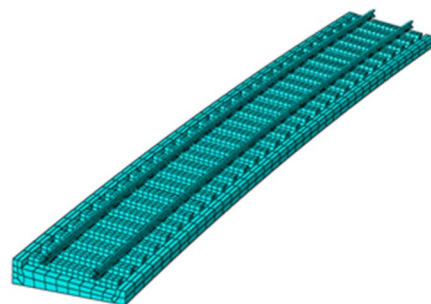


図-4 曲線軌道モデルの概観図

軌道モデルは2つの寸法・構造の違いを考慮してFEMを構築した。このモデルではレールパッドやコイルばねといった2つの軌道に特有の要素を導入したため、この部分のパラメータを変えることで振動特性の変化を評価することが可能である。周波数応答解析によ

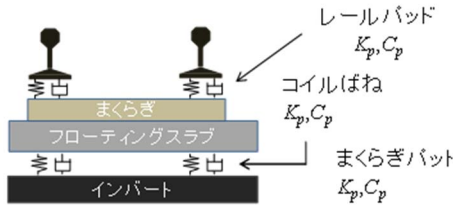


図-5 各軌道要素の位置関係とモデリング

って防振まくらぎ直結軌道におけるまくらぎと路盤コンクリート間の振動遮断と、フローティングスラブ軌道におけるレールとまくらぎ間での振動遮断が確認できた。鉄道車両は27自由度の曲線走行時に車体に働く遠心力やカントによる輪重・横圧の分配を考慮したモデルを構築した。

### (3) 車両振動応答に基づく軌道変状の可観測性分析

移動体中計測のため、加速度計・ジャイロ等による記録と位置同定、車両応答値からの軌道不整、構造物の変状の状況逆解析精度の問題等、解明すべき点は多いが、計測される物理量と設置場所は実車で計測可能なセンサ配置を決まる。

入力変数  $x$ , 出力変数  $y$ ,  $n$  個の状態変数  $u$  の状態空間表現の一般形は次のようになる。

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (2)$$

可観測性 (observability) とは、システムの外部出力を観測することでシステムの内部状態を推測可能かどうかの尺度である。システムの可観測性と可制御性は数学的な双対である。連続時不変状態空間モデルが観測可能

(observable) であるとは、次が成り立つ場合である。

$$\text{Rank} \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{N-1} \end{bmatrix} = n \quad (3)$$

この可観測性チェックを列車モデルに適用し、車両振動応答に基づく軌道変状の逆解析において、計測が必要な物理量と設置場所についてを確認する (図-6)。

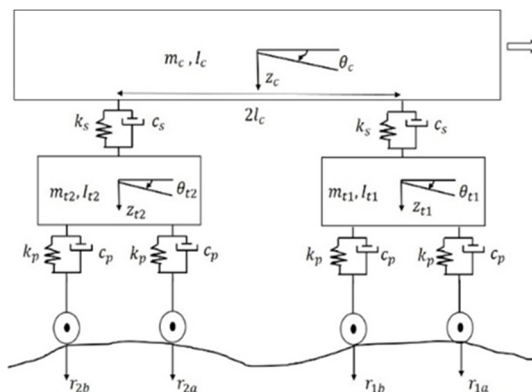


図-6 自由度半車モデル

## 4. 研究成果

### (1) 加速度と車内音の相互補正による鉄道車両の位置同定

多重解像度解析による手法 (図-7) とスパース表現による手法 (図-8) は背景雑音除去できた。音データと加速度データの相互補正によって車両位置を同定することに成功した。これにより、GPS を使用できない地下区間やトンネル区間においても、車両改造を必要としない簡易な手法で車両位置を同定することが可能となる。

車内音データから、多重解像度解析あるいはスパース表現による手法でレール継目音を抽出することに成功した。さらに、逐次的なアルゴリズムを作成することにより、レール継目音から自動的に速度推定することに成功した。

進行方向加速度データを積分して得られる速度に対し、レール継目音から得られる速度情報を用いて補正することで、速度推定の精度向上に寄与した。また、全 60 パターンの位置同定結果中、58 のパターンにおいて、加速度と車内音を併用した場合の方が、加速度のみを用いた場合に比べ位置同定精度が向上し、併用することは有効であると考えられる。

全 20 の計測ケースについて、多重解像度解析を用いる手法とスパース表現を用いる手法を比較した結果、スパース表現を用いた方が、若干、位置同定精度が優れていることがわかった。その際の位置同定誤差の精度は 1~10% 程度であり、平均すると約 5% 程度である。本手法単独で 5% 程度の位置同定精度であれば、駅停車情報によって駅間距離の累積誤差を排除できており、現状でも十分に実用的であると考えられる。

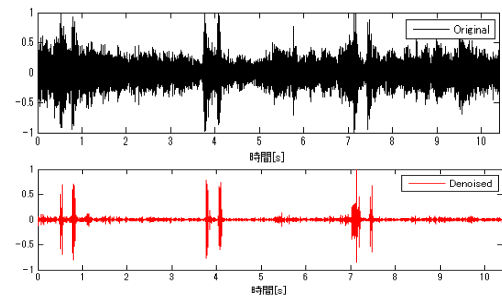


図-7 多重解像度解析処理結果の一例

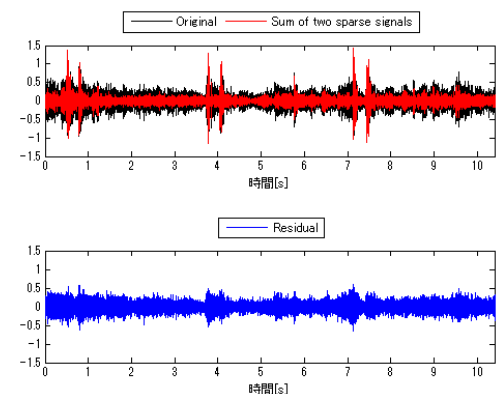


図-8 スパース表現処理結果の一例

## (2) 異なる軌道構造の振動特性評価

図-9にシミュレーション結果のうち外軌側軌道各部の振動加速度スペクトルを示す。上下方向は60 Hz付近に大きなピークを確認することが出来る。これらのピークはまくらぎ・スラブ板も大きく振動していることから、軌道全体が振動しているモードであると推測され、実現象との一致が確認された。

卓越周波数の抜本的な変化を目的とし、スラブ板の単位長さを半分の10mにして解析を行った結果が図-10である。60Hz付近でのピークを顕著に低減しており、振動系を変える対策工の有効性が確認できた。

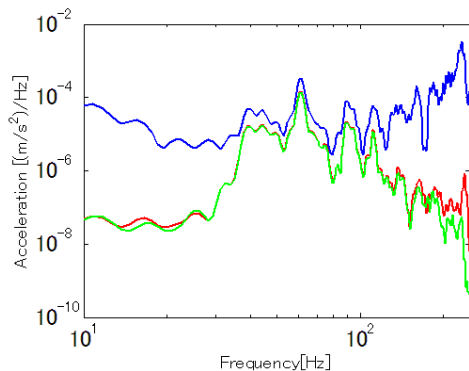


図-9 フローティングスラブ軌道における加速度スペクトル

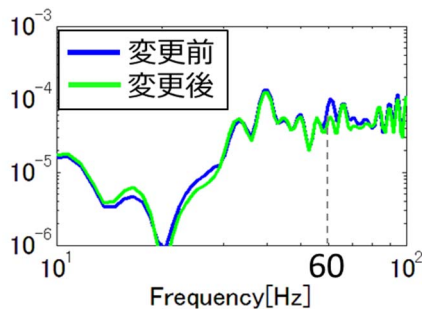


図-10 スラブ板長さを変化させた解析結果

## (3) 車両振動応答に基づく軌道変状の可観測性分析

計測センサは軸箱に設置しない限り、車体と台車の振動応答から軌道変状の可観測性がないことを解明した。本研究の目的は、車体に携帯端末に設置により軌道変状を検出するため、2つ解決案を提案した。

一つアプローチは軌道プロファイルの二次導関数を用いて状態ベクトルを追加し、二次導関数を推定することである。プロファイルは二重積分として推定される。もう一つアプローチは状態ベクトルの一次微分を新しい状態ベクトルとすることによって、状態空間モデルを変更することである。静的成分を状態ベクトルから除外されつつ、動的成分が考慮される。

いずれの場合も軌道の状態は可観測になって、携帯情報端末から列車の振動応答データの取得によって、軌道状態を頻繁に計測する

ことが可能である。

## 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 1 件)

[1] 蘇迪, 佐野聡, 田中博文, 長山智則, 水谷司: 加速度と車内音の相互補正による鉄道車両の位置同定手法, 構造工学論文集, vol. 62, pp. 571-584, 2016.

[学会発表] (計 5 件)

[1] T. Jothi Saravanan, Zhao BoYu, Di Su and Tomonori Nagayama: An observability analysis for profile estimation through vehicle response measurement, in Proceedings of The 12th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology (ANCRiSST2016), Cambridge (United Kingdoms), 2016.

[3] 中田雄大, 蘇迪, 田中博文: 携帯情報端末による車両位置同定手法の営業路線への適用, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 東北大学 (宮城県・仙台市), 2016.

[3] Di Su, Satoshi Sano, Tomonori Nagayama, Hirofumi Tanaka, Tsukasa Mizutani: Train localization by mutual correction of acceleration and interior sound, in Proceedings of The Joint 6th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering (6AESE) and 11th International Workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology (11ANCRiSST), Champaign (United States), 2015. [http://sstl.cce.illinois.edu/papers/aeseancrisst15/233\\_Su\\_Train.pdf](http://sstl.cce.illinois.edu/papers/aeseancrisst15/233_Su_Train.pdf)

[4] 蘇迪, 新井進太郎, 田中博文: フローティングスラブ軌道における車両走行シミュレーション, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 岡山大学 (岡山県・岡山市), 2015.

[5] 佐野聡, 蘇迪, 長山智則, 水谷司, 田中博文: 加速度と車内音の相互補正による列車位置同定手法の提案, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 岡山大学 (岡山県・岡山市), 2015.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

蘇迪 (SU DI)

東京大学・大学院工学系研究科・特任講師  
研究者番号: 40535796