

論文の内容の要旨

氏名：森 裕貴

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：営業列車を活用した軌道状態監視システムの構築に関する研究

鉄道は大量性、高速性等に優れる交通機関であり、従来から陸上交通において基幹的な交通機関として重要な役割を果たしている。しかし、軌道で案内されていることによる特徴である、大量性・高速性といった長所は、一方で軌道の異常による脱線等のリスクを生じさせ、一つの事故が甚大な被害に繋がる短所ともなり得る。また、大規模な事故とならない場合も、脱線が生じた際は一定期間の運休が生じ、利用者の利便性を著しく損なう等社会的な影響が大きいため、適切な軌道保守の実施等を含めた鉄道の安全性の向上が求められている。

実際の軌道保守については、予防保全の考え方のもと定期検査結果に基づく軌道保守計画の実施により安全性が担保されている。しかし、財政基盤の貧弱な地方路線ほど検査頻度が低下しているのが現状であり、定期検査の間は保守員の目視等に頼っているが、徒歩による巡回は路線が長い事業者ほど困難であり、多くの人員を必要とする。

鉄道軌道の保守方法については、計測方法の違いがあるものの、いずれも 10m 弦正矢法と呼ばれる考え方に基づいて計測される軌道の変位量を管理している。そのため、軌道の変位量に基づく軌道保守基準としては、省令に定められた基準範囲内において各事業者による自主基準が設けられているが、定期検査時において自主基準を超える軌道不整が確認される等、軌道を要因とする脱線リスクが顕在化した例も確認されている。軌道を要因とした脱線事故が今なお発生していることから、定期検査周期より短い期間で軌道状態が変化していることを示唆しており、定期的な検査のみでなく高頻度な軌道監視の重要性は明らかである。

これまでの軌道の状態監視に関する取り組みは、軌道検測車や専用台車による計測や、測定環境の厳しい輪軸や台車へ計測センサ取り付けて監視を行う方式が主流であり、計測装置の導入コストや維持管理等の費用が増大する傾向にあった。しかし、現実問題として地方鉄道においてそのような軌道監視システムを導入出来る事業者は少なく、全線を徒歩で計測する簡易型軌道検測装置による軌道検測といった、保守員に多くの負担が係る軌道検査が常態化している。このような問題に対して、簡便な方法により軌道状態が監視可能になり、軌道異常を早期に検知できれば、適切な軌道保全を遂行でき、より確実な事故防止の実現が期待できる。これを実現する一つの方法として、一般の営業車両を用いて軌道状態の監視を行う方法が考えられる。

営業車両に設置が容易なセンサ類や GPS を取り付け、自らが走行して得られる車両動揺等の状態を検出、分析する車両をプローブ車両と呼んでいる。このようなプローブ車両が実現されると、既存の保全形態が大幅に変貌するばかりでなく安全な輸送システム実現にも寄与できる可能性がある。プローブ車両による状態監視について、軌道監視に着目して実現可能性を検討すると、プローブ車両を特に必要とする地方鉄道において、設置されるセンサ類の初期コストやメンテナンス費用が著大となるようでは、導入及び普及が困難となる。そのため、地方鉄道におけるプローブ車両については、雨や粉塵等の影響が少なく、振動等の測定環境が良好な車室内に設置されることが望まれる。

容易に計測が可能な車室内の状態量（加速度、角速度、騒音等）と、実際の保守に使用されている管理データの間に相関性が認められれば、軌道の保守に活用可能なプローブ車両が実現すると考える。先行研究では、シミュレーションにおいて車体状態量から軌道異常を検出する手法について検証し、測定装置を試作し営業路線での実証試験を実施している。しかしながら、測定データによる軌道状態の評価は机上検討にとどまり、検出された軌道異常に保守が必要かといった評価には至っていない。

そこで本研究では、プローブ車両による軌道の状態監視について着目し、その実現のため以下の 3 つの目標を設定した。

- (1) 車室内にて比較的容易に測定可能な状態量から、的確に軌道異常を検出し、実環境における軌道

保守に活用可能な軌道の評価手法を提案する。

- (2) 軌道異常を検知するために必要な車体の状態量を的確かつ、簡易に測定可能な測定装置の仕様を整理し、実用化及び広域への普及を目指した測定装置を開発する。
- (3) 開発した測定装置を使用した軌道状態監視システムを構築し、鉄道事業者と連携して実環境において軌道保守に活用可能か検証する。

本論文は、全5章から構成される。

1章では、軌道検査と軌道保守の現状について概説した上でその問題点を提起し、軌道の安全性を担保する上で軌道監視システムの必要性を述べ、本研究の目的と位置づけを示した。

2章では、車室内にて比較的容易に測定可能な状態量から、検出可能な軌道異常について整理し、実環境における軌道保守に活用可能なデータへ変換するための軌道評価指標を提案する。(1)RMS (Root Mean Square) 値による軌道異常の検出、時間一周波数解析の中でも広い周波数帯を観測することに優位性を持つ(2)ウェーブレット変換による軌道異常種別の判定について、その評価手法の概略について述べた後に、シミュレーションによる検証を実施した。また、(3)逆解析による軌道不整推定手法について、推定アルゴリズムを説明し、シミュレーションにおいてその推定精度を検証した。その結果、以下の結論を得た。

(1) RMS 値による軌道異常の検出

著大な高低不整、波状摩耗、レール継目部の段差といった軌道異常を想定した軌道入力を与えたシミュレーション結果を検討した結果、高低不整については、RMS 値による検出が十分に可能であることが確認された。しかしながら、波状摩耗や段差については、検出が困難であることが明らかになった。

(2) ウェーブレット変換による軌道異常種別の判定

(1)と同様の条件で実施されたシミュレーションにおいて、連続ウェーブレット変換及び離散ウェーブレット変換を用いて解析を実施した結果、どちらの結果においても、著大な高低不整、波状摩耗、レール継目部の段差といった軌道異常が、それぞれ特定可能であることを確認し、RMS 値による評価では判別が困難である軌道異常についても判別可能であることを示した。

(3) 逆解析による軌道不整推定

地方鉄道を想定した走行シミュレーションにおいて、提案するアルゴリズムの推定精度を検証した。その結果、軌道管理の指標とされる 10m 弦正矢法における軌道不整においては、推定誤差は最大で 2mm 以下となり、軌道保守に活用するデータとしての有用性を示した。

また、本計測装置においては膨大な計測データが蓄積される一方、ビッグデータを扱うため手動による解析作業には限界がある。そこで、計測データを効率的に取り扱うため Graphical User Interface を活用したレール診断ソフトを開発した。その結果、RMS 値及びウェーブレット変換による評価について、複数計測のデータを効率的に取り扱うことが可能であることを確認し、軌道監視結果を速やかに、かつ視覚的に分かりやすく鉄道事業者へフィードバックできる診断ソフトであることを示した。

3章では、営業車両での長期間の計測を前提とし、車両の大幅な改造を伴わず簡易に設置でき、低コストで軌道の状態監視を実施するための計測装置を開発した。開発された計測装置は、以下の性能を有し、実用化及び広域への普及を目指した製品水準に到達していることを確認した。

- (1) 小型の計測装置で、運転席下のスペースや機器箱の中等様々な場所へ設置可能
- (2) 自動または簡単なスイッチ操作にて測定が開始され、専門の測定員が不要
- (3) 計測データを携帯電話回線による自動転送または microSD により回収することが可能

4章では、2章における軌道状態の評価指標と3章で開発された計測装置を統合し、軌道状態監視システムを構築し、鉄道事業者協力のもと3路線において営業列車における定期計測を実施した。その結果以下の結論を得た。

- (1) 車体上下加速度については、長期間測定においても高い再現性を確認し、実路線における高低不整の著大区間、継目落ち（浮きまくらぎ）発生箇所といった軌道異常を検出可能である。
- (2) 軌道状態が悪化した区間では RMS 値が増大し、軌道保守を実施後に RMS 値が減少するといった相関関係が確認され、RMS 値による軌道状態の評価が可能であることを示した。
- (3) ウェーブレット変換による評価において、踏切、軌道不整、継目落ち等の軌道異常が周波数帯域によって異なる特徴を有していることを説明し、軌道異常の特定手法として有用であることを確認した。
- (4) 逆解析による高低不整の推定について、実路線データを用いて検証した結果、高低不整が大きい場所については、十分な精度での推定が可能であり、軌道保守に有用なデータとなる可能性を示した。

5 章は結論であり、本研究で得られた知見を示す。本論文では営業車両において比較的容易に計測可能な車体の状態量から、的確に軌道異常を検出する 3 つの評価手法について提案し、実路線において提案した評価手法が有用であることを示すため、必要な車体状態量を的確かつ簡易に計測可能な小型の計測装置を開発、その成果を統合し軌道状態監視システムを構築した。構築したシステムを地方鉄道における長期間計測により評価した結果、実路線において軌道異常を特定、該当区間の経年変化データを鉄道事業者へフィードバックし保守計画へ反映させる等、営業車両を活用した軌道診断サイクルを実現し、その有用性を示した。

以上、本論文は、軌道状態監視システムを構築し、その有効性を具体的な適用事例において示したものであり、鉄道軌道の適切な保守を通じて鉄道の安全性向上に大きく貢献するものであると考える。