

京都大学	博士 (工学)	氏名	長谷川 聡一朗
論文題目	Drive-by road profile identification and bridge damage detection (移動点検車両による路面形状同定および橋梁異常検知)		
(論文内容の要旨)			
<p>本研究では、道路および道路橋の効率的な維持管理の方法として、走行車両または点検車両の振動情報の活用に着目し、「移動点検車両による路面形状同定および橋梁異常検出 (Drive-by road profile identification and bridge damage detection)」を可能とする逆解析手法を提案している。移動点検車両を用いた手法は、振動センサーを橋梁に直接設置する従来の手法と比較して、センサー設置にかかる労力・費用が極めて少ないことが大きな利点である。一方、十分な精度を得るのが難しい点が課題である。本研究では、移動点検車両を用いた手法の実用性と精度向上に着目している。提案手法の精度と特性を明らかにするために、数値シミュレーション、室内実験、および実地実験を通して検討を行った研究内容をまとめている。本論文は6章で構成される。</p> <p>第1章は序論であり、路面形状同定および橋梁異常検知の既往研究と、移動車両の振動を活用した移動車両橋梁点検に関する既往の研究を紹介した上で、本研究の目的を説明している。</p> <p>第2章では、車両に加わる慣性力を同定し、次に慣性力を道路形状に変換する従来の2段階法の問題点を明らかにし、その改善方法について述べている。すなわち、疑似逆行列を用いた正則化最小二乗法により、計測された車両加速度を用いて道路の路面形状を直接同定する道路形状同定法を提案している。提案手法の精度をシミュレーションと実地実験の両方で検証し、従来研究の2段階法と比較している。シミュレーションの結果、提案手法は既存の2段階法よりも精度が高いことが示されている。車両速度が10km/h程度での実車両走行実験においても同様の傾向が得られることを示している。</p> <p>第3章では、第2章で提案した路面形状同定手法において、疑似逆行列を用いる代わりに、動的計画法を用いて正則化最小二乗最小化法 (Regularized Least Squares minimization with Dynamic Programming: RLSDP) を解くことを提案している。近年、カルマンフィルタ (Kalman Filter: KF) による路面形状同定も有効であると報告されているため、はじめにカルマンフィルタと正則化最小二乗法の理論的な関係性を数式により明らかにし、カルマンフィルタを用いることは、状態ベクトルの初期値のみを未知パラメータとする正則化最小二乗最小化法を時間ごとに繰り返し解くことと理論的に等価であることを証明している。続いて、実車両走行実験によってRLSDPとカルマンフィルタの同定精度を確認し、RLSDPとカルマンフィルタは最適なハイパーパラメータが用いられた場合には同等の精度となること、RLSDPは国際的に用いられている路面粗さの指標であるIRI (International Roughness Index) の観点から高い精度で道路形状を同定できることを示している。また、RLSDPによる同定では、疑似逆行列を用いた正則化最小二乗最小化法に比べ、数値計算時間を1/6に短縮できることを明らかにしている。特に、KFの適用において、超パラメータである状態方程式および観測方程式の共分散行列の設定が難しいが、提案のRLSDPはLカーブによる超パラメータのセミオートメーションができる点を明らかにしている。</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	長谷川 聡一郎
<p>第4章では、第3章で提案したRLSDPによる路面形状同定手法の精度を、高速道路における新たな実車両走行実験によって検証を行った結果について述べている。第2章および第3章で行った実地実験は10km/h程度の低車両速度での実験であったが、実用化には、高速走行による路面形状同定のニーズが高い。第4章では70km/h程度の早い車両速度での、提案手法のRLSDPによる路面同定検討結果をまとめている。走行実験は2台の車両を用いて行われ、そのうち片方の同定結果では、パワースペクトル密度 (Power Spectral Density: PSD) の観点で十分に許容できる同定精度が得られていることを示している。また、RLSDPではIRIが常に過大に推定される傾向があるため、推定されたIRIに補正係数を適用し、IRI推定精度を向上させることを提案している。その結果、適切な補正係数を適用することにより、IRI同定精度が飛躍的に向上し、2台の車両の前後車軸それぞれにおいてIRI誤差平均値が20%以下となることを示している。また、加速度計を車体重心から離れた位置に設置することが望ましいことを明らかにしている。</p> <p>第5章では、車両振動の事前測定値と再測定値の減算を用いた橋梁の簡易異常検知法を提案している。入力信号として、車両加速度、車両加速度のPSD、車両加速度から推定される接地点変位 (Contact-point 変位: CP 変位) の3種類を用い、室内実験によって比較検証している。特に、CP変位とは、タイヤと路面の接地点の鉛直方向変位を表し、路面変位と橋梁変位の和である。実験の結果、車両加速度を用いるのが3種類の信号の中で最も精度が高いことを示している。さらに、事前測定時・再測定時での走行路面の劣化による変化、走行位置のずれ、車両走行速度のずれが異常検知精度に大きな影響を及ぼすことを数値シミュレーションにより確認を行なっている。これを踏まえ、3つのパラメータ (車両加速度の差、走行速度の差、推定されるCP変位の差) から計算されるマハラノビス距離 (MD) を損傷指標として用いることを提案している。数値シミュレーションの結果、3つのパラメータから算出されるMDが、車両加速度のみの1つのパラメータから算出されるMDと比較して有効であることを示している。</p> <p>第6章は結論であり、本論文で得られた成果について簡潔に述べ、移動点検車両による路面形状同定と橋梁異常検知の両者について、今後の課題を整理している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本研究は、道路および道路橋の効率的な維持管理の手法として、走行車両（点検車両）の振動情報を活用する逆解析手法を提案している。移動点検車両の振動に着目する提案手法は、従来の橋梁振動を直接計測する手法と比較して、高速で点検ができる点、センサー設置にかかる労力や費用が少ないという利点がある。しかしながら、高い検知精度を得るのが難しいという課題もある。本研究は、検知精度の向上を目指し、改良した状態方程式の提案、数値シミュレーション、室内実験、および実地実験を通して得られた知見をまとめている。主な研究成果は、以下のとおりである。

1. 路面形状に関する状態方程式を提案し、計測された車両加速度を基に直接道路形状を直接同定する道路路面形状の同定法を提案した。車両振動から車両に加わる慣性力を同定し、次に慣性力を道路形状に変換する従来の2段階法に比べ、提案手法のアルゴリズムが簡素化され、同時に同定精度向上にもつながっている。
2. 提案した直接路面形状同定手法の同定精度は確認されたものの、走行車両から実時間で得られる振動の実時間処理には向いていないことを明らかにした。そこで、路面形状の実時間逐次同定を可能にするために、動的計画法を用いて正則化最小二乗最小化法 (Regularized Least Squares minimization with Dynamic Programming: RLSDP) を提案した。提案手法の特性を明らかにするために、代表的な逐次同定法の一つであるカルマンフィルタとの理論的な関係性を検討し、RLSDP とカルマンフィルタは理論的に等価であることを証明した。ただし、RLSDP はカルマンフィルタに比べて、最適なハイパーパラメータの選定が容易であり効率的であることを示している。また、RLSDP は、擬似逆行列を用いた正則化最小二乗最小化法に比べ、数値計算時間を1/6に短縮できることを示している。高速道路での実車両走行実験を行った結果、70km/h程度の高速走行でも、路面の凹凸に関するパワースペクトル密度関数の観点から見て、十分に許容できる同定精度が得られることを明らかにした。
3. 走行車両の振動データから、橋梁の異常を検知する簡易橋梁異常検知法を提案している。異常検知においては、車両加速度の差、車両加速度のパワースペクトル密度の差、および車両加速度から推定される接地点変位 (Contact Point 変位: CP 変位) の差の3つの特徴量に着目している。損傷発生による特徴量の変化を強調するために、マハラノビス距離 (Mahalanobis Distance: MD) を損傷指標として採用している。数値シミュレーションの結果、3つのパラメータから算出されるMDが損傷検知に有効であることが示された。

以上のように、本論文は、橋梁上を走行する車両振動から道路舗装状態や損傷による橋梁の曲げ剛性の低下を間接的に同定しようとする、道路および道路橋の効率的な維持管理につながる、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年8月9日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。