

氏名	高橋 悠太		
学位の種類	博士（工学）		
学位記番号	博甲第9023号		
学位授与年月日	平成31年3月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	システム情報工学研究科		
学位論文題目	空間特異モード角に基づく道路インフラ点検技術の適用性に関する実験的検証		
主査	筑波大学 教授	博士（工学）	松島 亘志
副査	筑波大学 教授	工学博士	境 有紀
副査	筑波大学 准教授	博士（商学）	岡田 幸彦
副査	筑波大学 助教	博士（工学）	善甫 啓一
副査	筑波大学 助教	博士（工学）	山本 亨輔

論文の要旨

本研究では、移動センシング技術を用いて、近年、急速に増加中の老朽化橋梁をスクリーニングするための社会実装化技術の開発を行った。ここで、社会実装における課題は、営業運転中の物流車両など一般車両に搭載可能なセンシング・デバイスを開発し実証試験を行うことと、得られた車両振動データからボルトの緩みなどの軽度な損傷を識別するための高度な分析技術を開発することである。センシング・デバイスの開発においては、工業製品としての組み立てが容易なシンプルな構造設計を採用すると共に、安価で安定して作動する周辺機器の利用を提案している。同時に、実際の点検において課題となるサンプリング周波数や時刻同期についても考慮している。従来、計測機を用いた橋梁検査手法は高価で高精度なセンサを利用することがほとんどで、ノイズへの耐性も低いことが多かったが、本研究では、ノイズ耐性が高く、感度も良好な SSMA (Spatial Singular Mode Angle: 空間特異モード角) を用いることで、センサの要求性能を下げ、コストダウンに成功している。本研究で開発した計測システムは、自動的に搭載車両のエンジン始動を検知して、計測を開始する。今回は、実際に営業運転中の物流車両に搭載してデータ取得に成功した。

技術の有効性を明らかにするため、実際の自動車が行く可能な鋼製橋梁模型を建設して実験を行った。実際の運用条件に近い環境で、軽微な頻発損傷を検知できるか、検証を行っている。また、同様の幾何・物理パラメータを設定した数値計算モデルを作り、有限要素法による数値検討も併せて行っている。SSMA の速度依存性により、速度—SSMA 分布を統計的に分析することで、軽微な頻発損傷の検知を試みた。Mahalanobis 距離を用いることで、健全状態と軽度な損傷が発生した場合の速度—SSMA 分布を分析したところ、それぞれの橋梁状態のデータのみで得られた場合の結果に対して、有意な変化を得られた。

審査の要旨

【批評】

老朽化橋梁は急速に増加中であり、喫緊の社会的課題である。この社会問題を解決するために、近年、移動センシング技術の開発が急がれてきたが、本研究は既往の研究では触れられてこなかった「社会実装」をテーマとして要素技術の開発を進め、以下の成果を得ている。

- ① 営業運転中の一般物流車両で利用可能かつ低コストなセンシング装置
- ② 実際の橋梁で頻発している軽度損傷（ボルト緩みなど）を検知するための分析手法
- ③ 実証実験に必要となる類似環境実験設備（鋼製橋梁模型）

本研究が着目した橋梁損傷検知指標である SSMA は、先行研究において、損傷感度が高いことや走行速度に依存性があることが示されていた。ただし、ドラス部材の破断といった重篤な損傷を対象としたものが多く、実際に現場で見られるボルトの緩みや副構造部の脱落といった現象に対して、SSMA が有効であるかは分かっていなかった。このようなディテール部に発生する損傷に対する精度を検証するためには、ディテール部を再現した実験や数値シミュレーションが必要である。

本研究では、鋼製模型実験や紙製模型実験において、これらのディテール部を再現し、軽度損傷の検知実験を行った。結果、SSMA に基づく損傷検知は速度依存性によって困難であるが、MD を用いた統計分析を行えば可能であることを示した。この結果は、先行研究でも見られない成果である。一方で、数値シミュレーションは簡易なモデルでの検討に留まっており、SSMA および速度から求めた MD が軽度損傷に反応する力学的メカニズムを解明したとは言い難い。今後、軽度損傷を再現可能な数値モデルを構築して、同様の検討を行うことが望ましいと考えられる。

また、MD については、SSMA と走行速度のみを用いた二次元情報の共分散構造を利用しているに留まっている。今後、環境情報（気温や連行車両など）を加えて、次元を高めることや、データ量を増やすことで、MD 利用のメリットを最大化することも考えられる。

今回の実験では、汎用性の高いセンシング装置の開発に成功しているが、さらに低コスト化・省力化にも成功しており、社会実験への応用が期待される。一方で、実際に営業運転中の物流トラックから得られているデータは現時点で少なく、今後、データ蓄積をしながら、デバイスの完成度を高める必要が感じられる。

【最終試験の結果】

平成 31 年 2 月 8 日、システム情報工学研究科において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。