

京都大学	博士（工学）	氏名	Jiang Wenjie
論文題目	Ambient-vibration-based Long-term SHM of Bridges Using Two-stage Output-only System Identification (二段階出力のみのシステム同定による常時振動に基づく橋梁の長期モニタリング)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本研究は、常時振動計測による橋梁の長期ヘルスマニタリング（長期 BSHM）の実用化に向けて、モニタリングにおける不確定性の定量化と季節や供用中変動の抽出法を提案し、長期変動や計測ノイズを低減した橋梁の異常検知法の有効性について検討を行なった結果を取りまとめたものである。本論文は、7章からなっている。</p> <p><b>第1章</b>は序論であり、長期 BSHM における重要な課題として「同定における不確定性 (Identification Uncertainty: IU)」と「特徴量の経時変化に潜む環境および運用上の変数 (Environmental and Operational Variables: EOVs)」に関する既往の研究をレビューしたうえで、長期 BSHM における課題を整理し、本研究の背景と目的について述べている。</p> <p><b>第2章</b>では、ベイズ推論に基づくモード特性同定における不確定性の定量化について述べている。また、同定振動数の確率分布に基づく、ケーブル張力のベイズ推定法を提案している。</p> <p><b>第3章</b>では、長期 BSHM における第2段階の出力のみのシステム同定論を提案している。具体的には、長期変動の予測確率モデルとして、連続時系列データの線形回帰モデルを紹介し、各々の予測モデルの特徴について概説している。また、長期 BSHM におけるデータ欠損による不連続な時系列データや、長期変動要因と特徴量との間の非線形な関係（非線形性）に対処できる非パラメトリックの予測確率モデルについても概説している。さらに、短期周期性の不確定性を含むノイズに対するフィルタとしての Singular Spectrum Analysis (SSA)と、EOVs に対するフィルタとしての Kernel Principal Component Analysis (KPCA)の組み合わせを提案している。関連して、本研究で適用しているガウスカーネルの最適パラメータの決定方法についてもまとめている。</p> <p><b>第4章</b>では、線形回帰に基づく長期 BSHM の有効性について、撤去前の鋼鉄桁橋で実施した長期モニタリングおよび損傷実験データを用いて検討を行った結果をまとめている。具体的にベイズ実稼動モード解析を行い特徴量として着目している振動数の不確定性と EOVs の影響について議論している。また、ベイズ線形回帰、ガウス過程回帰、SARIMA (Seasonal AutoRegressive Integrated Moving Average) および Long Short-Term Memory (LSTM) による予測性能の検討を行い、回帰モデルの中でも LSTM は高い予測性能を持つものの、回帰モデルは長期 BSHM に起こりえる不連続な時系列データへの適用が難しいことを明らかにしている。</p> <p><b>第5章</b>では、非線形性をもつ不連続な時系列データの予測を可能とする SSA-KPCA ベースの Multivariate Stochastic Process Control (MSPC)を用いたPC橋の長期 BSHM の可能性について検討した結果をまとめている。4つのモード周波数を特徴量とし、特徴量への IU と EOVs の影響を評価し、予測確率モデルを用いて大域的な変動を調べている。特に、対象橋の振動数と温度との関係には非線形が存在し、その理由として、PC 橋のコンクリートに含まれている水分が凍結する零度以下には PC 橋の振動数が、零度以上の振動数より大きくなることを明らかにしている。また、SSA-KPCA に基づく MSPC による損傷検出について検討を行った結果、EOVs の干渉が少ない残差部分空間が損傷検出に有利であることから、残差部分空間を用いることを推奨している。</p> <p><b>第6章</b>では、本研究で提案している SSA-KPCA ベースの MSPC を用いた斜張橋の長期 BSHM についてまとめている。提案のケーブル張力のベイズ推定法により同定したケーブル張力の確率分布を特徴量とし、同定ケーブル張力の IU と EOVs の影響について検討を行った。対象橋のケーブル張力確率分布が多峰性の分布を示すことから、混合ガウスモデルで確率分布をモデル化している。また、ケーブル張力の長期モニタリングにおいても SSA と KPCA の組み合わせが必要であることと、提案の SSA-KPCA ベース MSPC の異常検知性能が卓越することを明らかにしている。</p> <p><b>第7章</b>では、本論文で得られた知見と成果についての総括に加え、残された課題、特に構造同定における最適パラメータの選定法についての検討の必要性について論じている。</p>			

氏名	Jiang Wenjie
----	--------------

(論文審査の結果の要旨)

橋梁の長期ヘルスマニタリング (長期 BSHM) を実現する際に最も重要な課題は、モニタリング対象の特微量の変化が劣化によるものなのか、あるいは季節変動や供用中の外部要因による変動による変化なのかを区別することである。経年劣化に着目した長期 BSHM の重要性が高まる一方、体系化された関連研究はほとんど見当たらない現状である。本研究は、橋梁の長期常時振動モニタリングによる長期 BSHM 実現に向けた特微量の長期変動や同定過程の不確定性の定量化とモデル化を体系的に整理・検討し、長期変動による長期トレンドと計測ノイズを除去した異常検知についてまとめている。本論文において得られた主な研究成果は、以下のとおりである。

- ① 実践的な長期 BSHM 手法として、常時振動計測に着目した出力情報のみの 2 段階の確率構造同定法を提案している。第 1 段階の確率構造同定法として、今までの短期常時振動モニタリングの考えを踏襲し、常時振動から特微量の確率分布を同定するベイズ同定法を提案している。第 2 段階の確率構造同定法として、長期常時振動モニタリングにおける長期トレンドの除去に着目し、特微量の経時変化に潜む環境および運用上の変数 (EOVs) の同定法を提案している。また、異常検知には、2 段階同定で構築される健全時の EOVs 誘発変動のモデルと、新たに観測される特微量との残差に注目した残差部分空間での異常検知法を提案している。
- ② EOVs と特微量の非線形的な関係性を考慮するために、観測した特微量の長期にわたる経時的な構造を LSTM (Long Short-Term Memory) ネットワークでモデル化し、鋼鉄桁橋の長期計測データを用い、従来の回帰ベースのアプローチであるベイズ線形回帰、ガウス過程回帰および SARIMA (Seasonal AutoRegressive Integrated Moving Average) と比較し、その有効性を示している。ただし、LSTM のようなパラメトリック時系列モデルは高い予測性能を持つものの、長期 BSHM に起こりえる不連続な時系列データへの適用が難しいことを明らかにした。
- ③ 不連続な時系列データへの適用とともに、非線形的な EOVs と特微量との関係性およびノイズのような低い SN 比のデータへ対応するために、非パラメトリック時系列モデルである KPCA (Kernel Principal Component Analysis) と SSA (Singular Spectrum Analysis) との組み合わせモデルを提案している。すなわち、まず KPCA を適用し、長期トレンド成分を抽出・除去し、次に SSA を適用しノイズを抽出・除去することで、橋梁本来の物理的な情報だけを残す方法を提案している。また、PC 橋と斜張橋の長期 BSHM に適用し、提案手法の有効性を確認している。
- ④ LSTM の残差列や SSA-KPCA ベースの MSPC (Multivariate Stochastic Process Control) の残差部分空間を用いた残差に基づく損傷検出法を提案し、実橋の長期 BSHM および損傷実験データを用いてその有効性を確認している。すなわち、ノイズフィルタリングの前処理として SSA を組み合わせれば、ノイズレスの KPCA の残差部分空間が得られることから、損傷検出の性能が大幅に向上することを示している。

以上のように本論文は、長期 BSHM における長期変動の抽出や不確定性の定量化を組み合わせた汎用的な新しい長期 BSHM 手法を提案しており、実橋でその有効性を検証した実践的な研究である。また、長期変動や不確定性モデル化は、信頼性工学の観点でも意義がある。以上の成果を踏まえ、本論文は学術上および實際上寄与するところが少なくないことから、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 5 年 8 月 21 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、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。