



Title	画像計測の現地適応性と不確実性を踏まえた変位モニタリングに関する研究
Author(s)	四井, 陽貴
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/105475
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 （ 四 井 陽 貴 ）

論文題名 画像計測の現地適応性と不確実性を踏まえた変位モニタリングに関する研究

論文内容の要旨

社会基盤構造物に対するモニタリング技術は、生産年齢人口の減少という社会的背景のもと、維持管理の省人化や省力化を実現する技術として実用化が期待されている。ただし、供用中の構造物では現地状況が計測可否に大きく影響する点が課題となっており、計測技術自体は開発されていても、現地状況に適応するような計測データの処理手法や、意思決定を含むマネジメントサイクルの存在を前提としたモニタリングデータの活用手法は十分検討されていない。本研究では、構造物の代表的な評価指標である変位を対象としたモニタリングにおいて、高密度かつ高頻度計測の実現が可能な画像計測手法に着目し、現地計測に起因する不確実性を踏まえたデータ処理手法を開発した。さらに、不確実性を踏まえてマネジメントサイクルの循環においてモニタリングデータを活用するための方法論を検討した。

第1章では、近年の社会基盤構造物の維持管理に関わる社会的背景と変位モニタリングに関する既往研究を整理した。また、モニタリングデータが果たす役割として、変位が特異的に増大するような「外れ値」に相当する箇所の抽出や状態評価の重要性が高いことを指摘したうえで、その実現には画像計測手法が特に有効であることを示した。

第2章では、橋りょう上で変位が増大する箇所に対応する浮きまくらぎを抽出するための画像計測データ処理手法を構築した。デジタル画像相関法による変位計測手法を用いることで列車通過時の複数のまくらぎ挙動を一括して把握できる可能性があるものの、計測対象に正対する撮影が困難であるために変位の実寸値への変換倍率が未知となるという課題があった。これに対して、画像変換手法であるホモグラフィ変換により変換倍率を一樣にした画像に対してデジタル画像相関法を適用することで複数地点の変位を一括推定する手法を構築した。本手法で得られた桁とまくらぎの列車通過時の変位波形を用いて桁に対するまくらぎの最大下側変位の比を算出し、閾値を現地実測値および統計的検定結果により検証した結果、最大下側変位の比が1.5以上の場合に浮きまくらぎに対応していることを示した。

第3章では、橋りょう・橋台・橋台裏盛土という構造物境界で軌道変位が増大する要因となる浮きまくらぎ箇所を抽出するためのデータ処理手法を構築した。このような広範囲を計測するには単一のカメラの画角では対応できないことから、複数カメラで得られた変位データを融合する手法を検討した。この場合には、カメラごとに異なる計測誤差とカメラ間の時刻同期誤差が課題となった。そこで、レール上にカメラ間で重複撮影される計測点を設定して得られた列車通過時の多点変位データを入力とする多変量状態空間モデルを定式化し、計測誤差を定量化したうえで状態推定値としてレール変位分布を推定した。推定結果を用いて、フレーム単位以下の時刻同期誤差の補正効果と、計測値で確認された構造物境界特有の現象である1mm程度のアップリフトが統計的にも有意であることを示した。

第4章では、継続的なモニタリングを見据えた同一構造物を複数時点で計測したデータの活用手法として、共振現象により変位が増大した橋りょうに対する構造モデルのパラメータ更新手法を検討した。共振橋りょうでは通過列車の速度によって応答が著しく変化するため、列車速度のばらつきと応答自体のばらつきを考慮したモデル更新手法が必要となる。このような不確実性を考慮して計測値に対して安全側評価が可能なモデルパラメータを推定するには、パラメータを確率分布として推定するベイズ推定を導入して同時確率分布の裾を推定する必要が生じた。本検討では、ベイズ推定においてMCMC (Markov Chain Monte Carlo) 法とREMC (Replica Exchange Monte Carlo) 法の2段階推定法を導入することで、既存手法のMCMC法のみでは推定が困難だった確率分布の裾の推定を実現した。提案手法の優位性をパラメータ推定結果から算出されたモデル応答を用いて考察した。

第5章では、モニタリングデータをマネジメントサイクルに活用するための方法論として、計測に労力を要する舗装たわみ量調査の優先度が高い箇所を路面性状のデータを用いて抽出する手法を検討した。具体的には、混合マルコフ劣化ハザードモデルとランダムフォレストを用いた異質性モデリングの2段階で劣化要因を考慮して、予測残差が大きい箇所をたわみ量調査の優先箇所として抽出した。抽出結果をたわみ量の実測値と比較することで、調査優先度の高い箇所の効率的な抽出が実現できていることを示した。また、モデル化の仮定と異なる結果が得られた箇所に対して事後の現地調査を実施することで、舗装内部への水分の浸入を示唆する当該箇所固有の劣化要因を解明した。

第6章では、結論として本研究で得られた成果をまとめるとともに、今後の研究の展望について示した。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (四 井 陽 貴)			
論文審査担当者	(職) 氏 名		
	主 査	教授	貝戸 清之
	副 査	教授	乾 徹
	副 査	教授	鎌田 敏郎

論文審査の結果の要旨

社会基盤構造物に対するモニタリング技術は、生産年齢人口の減少という社会的背景のもと、維持管理の省人化や省力化を実現する技術として実用化が期待されている。ただし、供用中の構造物では現地状況が計測可否に大きく影響する点が課題となっており、計測技術自体は開発されていても、現地状況に適応するような計測データの処理手法や、意思決定を含むマネジメントサイクルの存在を前提としたモニタリングデータの活用手法は十分検討されていない。本研究では、構造物の代表的な評価指標である変位を対象としたモニタリングにおいて、高密度かつ高頻度計測の実現が可能な画像計測手法に着目し、現地計測に起因する不確実性を踏まえたデータ処理手法を開発している。さらに、不確実性を踏まえてマネジメントサイクルの循環においてモニタリングデータを活用するための方法論を検討している。

第 1 章では、近年の社会基盤構造物の維持管理に関わる社会的背景と変位モニタリングに関する既往研究を整理している。また、モニタリングデータが果たす役割として、変位が特異的に増大するような「外れ値」に相当する箇所抽出や状態評価の重要性が高いことを指摘し、その実現には画像計測手法が特に有効であることを示している。

第 2 章では、橋りょう上で変位が増大する箇所に対応する浮きまくらぎを抽出するための画像計測データ処理手法を構築している。デジタル画像相関法による変位計測手法を用いることで列車通過時の複数のまくらぎ挙動を一括して把握できる可能性があるものの、計測対象に正対する撮影が困難であるために変位の実寸値への変換倍率が未知となるという課題がある。これに対して、画像変換手法であるホモグラフィ変換により変換倍率を一様にした画像に対してデジタル画像相関法を適用することで複数地点の変位を一括推定する手法を構築している。本手法で得られた桁とまくらぎの列車通過時の変位波形を用いて桁に対するまくらぎの最大下側変位の比を算出し、閾値を現地実測値および統計的検定結果により検証した結果、最大下側変位の比が 1.5 以上の場合に浮きまくらぎに対応していることを示している。

第 3 章では、橋りょう・橋台・橋台裏盛土という構造物境界で軌道変位が増大する要因となる浮きまくらぎ箇所を抽出するためのデータ処理手法を構築している。このような広範囲を計測するには単一のカメラの画角では対応できないことから、複数カメラで得られた変位データを融合する手法を検討している。この場合には、カメラごとに異なる計測誤差とカメラ間の時刻同期誤差が課題となる。そこで、レール上にカメラ間で重複撮影される計測点を設定して得られた列車通過時の多点変位データを入力とする多変量状態空間モデルを定式化し、計測誤差を定量化したうえで状態推定値としてレール変位分布を推定している。推定結果を用いて、フレーム単位以下の時刻同期誤差の補正効果と、計測値で確認された構造物境界特有の現象である 1mm 程度のアップリフトが統計的にも有意であることを示している。

第 4 章では、継続的なモニタリングを見据えた同一構造物を複数時点で計測したデータの活用手法として、共振現象により変位が増大した橋りょうに対する構造モデルのパラメータ更新手法を検討している。共振橋りょうでは通過

列車の速度によって応答が著しく変化するため、列車速度のばらつきと応答自体のばらつきを考慮したモデル更新手法が必要となる。このような不確実性を考慮して計測値に対して安全側評価が可能なモデルパラメータを推定するには、パラメータを確率分布として推定するベイズ推定を導入して同時確率分布の裾を推定する必要が生じる。本検討では、ベイズ推定において MCMC (Markov Chain Monte Carlo) 法と REMC (Replica Exchange Monte Carlo) 法の 2 段階推定法を導入することで、既存手法の MCMC 法のみでは推定が困難だった確率分布の裾の推定を実現している。提案手法の優位性をパラメータ推定結果から算出されたモデル応答を用いて考察している。

第 5 章では、モニタリングデータをマネジメントサイクルに活用するための方法論として、計測に労力を要する舗装たわみ量調査の優先度が高い箇所を路面性状のデータを用いて抽出する手法を検討している。具体的には、混合マルコフ劣化ハザードモデルとランダムフォレストを用いた異質性モデリングの 2 段階で劣化要因を考慮して、予測残差が大きい箇所をたわみ量調査の優先箇所として抽出している。抽出結果をたわみ量の実測値と比較することで、調査優先度の高い箇所の効率的な抽出が実現できていることを示している。また、モデル化の仮定と異なる結果が得られた箇所に対して事後の現地調査を実施することで、舗装内部への水分の浸入を示唆する当該箇所固有の劣化要因を解明している。

第 6 章では、結論として本研究で得られた成果をまとめるとともに、今後の研究の展望について示している。

以上のように、本論文では実測データに特有となる現地適応性と不確実性を踏まえて、データ処理手法とデータ活用手法の両面について検討しており、画像計測手法を用いた変位モニタリングの実用化に寄与する研究成果を示している。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。