

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 小林 真輝人

構造物にセンサを設置し状態を把握する構造ヘルスマニタリング (SHM)が、運用・保守・設計を合理化し安全性を高める技術として注目されている。SHM では構造物の外力・変形・応力といった健全性に関わる状態量監視が重要であるが、広範囲で直接計測することは困難である。

本研究では、実構造物での計測例が多いひずみを起点とし、形状センシングによって変形推定し、さらに非計測部も含む領域で応力や外力を推定する一貫した手法を提案・検証することを目指した。

まず、形状センシングを幅広い構造物に適用するため、橋梁・船舶・翼構造などの微小変形が主体の **stiff structure** を対象にした逆有限要素法(iFEM)とケーブル・ライザーなどの大変形を伴う **flexible structure** を対象にしたマルチコアファイバ(MCF)形状センシングの 2 つのアプローチを提案した。

次に、iFEM によって精度よく変形を推定できることがシミュレーションと実験により確かめられた。複雑な形状・様式を持つ構造に対してより少ない計測情報から推定するために、有限要素モデル上の距離に基づいたひずみ補間手法を提案し、iFEM に対する有効性を示した。さらに、社会適用に向けたデジタルツインプラットフォームの開発に取り組んだ。

MCF 形状センシングでは、様々な性能・特徴を持つひずみ分布計測器、MCF に適用できるように定式化、アルゴリズム構築を行い、効率的に性能を探索できるシミュレータを開発した。高空間分解能のひずみ分布計測と新しく開発した太径 MCF との組み合わせにより、曲率の小さい形状の推定を従来よりも高い精度で実現できることをシミュレーションと実験で示した。さらに体系的な失敗モード分析に基づいて精度向上のための基盤を構築した。

加えて、推定変形に基づいた応力・外力の推定手法を提案した。応力推定では、推定変形を強制変位として有限要素モデルに与え応力を推定する手法を提案し、シミュレーションで有効性を示した。外力推定では、滑らかな分布荷重に対して適用できる荷重推定手法を提案し、シミュレーションで良好な精度と効率性を示した。

これらの成果をまとめた本論文は以下の 7 章から構成されている。

緒言の第 1 章では、本研究の目的である形状センシングによる SHM システムの提案にあたり、構造物の破壊リスクの存在や既存の対応策を示し、構造物の運用・保守・設計の合理化と安全性の向上の重要性を主張し、本研究の目的について述べている。

第 2 章では、形状センシングの先行研究について整理し、本研究で取り組む形状センシングの位置づけが示されている。

第 3 章では、iFEM を用いた形状センシングについて述べている。先行研究の整理、誤差に関する定性的な分析、定式化がなされている。CFRP サンドイッチパネル、海流発電ブレードを対

象としたシミュレーション、光ファイバセンサやモーションキャプチャなどを利用した実験検証を通して、本研究の手法の有効性が示されている。さらに、複数の解析手法を統合するためのデジタルツインプラットフォームの必要性和設計・開発について述べられている。

第4章では、MCF形状センシングについて先行研究を整理し、より適用範囲の広い定式化とシミュレータの開発がなされている。また Failure Mode and Effects Analysis(FMEA)によって失敗モードを体系的に分析し、4つの主要失敗モードに関してシミュレーションと光ファイバセンサを用いた実験によって検討・検証され、精度向上を果たした。また、海洋構造物への適用要件について考察し課題と対策が示されている。

第5章では、構造健全性評価において重要な状態量である応力に対して、開発した形状センシングと組み合わせた推定手法を提案している。提案手法により平板と丸棒における応力集中が再現できることがシミュレーションで示されている。

第6章では、外力が設計や制御において重要な状態量であることを示し、開発した形状センシングと組み合わせた推定手法を提案した。平板に対する複数パターンの荷重を精度良く推定できることがシミュレーションで示されている。

結言の第7章では、本研究の内容の今後の展開について総括している。

第3章の内容は、荻野、Burman、和田、井川、村山との共著論文として Composite Structures に投稿されている。また第4章の技術は発明者として半澤、松井、中島、村山、和田と特許出願されている。それぞれにおいて主体的または重要な役割を果たしている。

以上の通り、本論文では、ひずみ計測に基づいた形状センシングによる構造物の変形推定手法、さらに推定変形に基づいた統合的な SHM システムのコンセプトを示した。これらの推定手法の基盤技術を独自に提案し、適用性を明らかにした。特に、適用範囲の広いシミュレーション技術を開発したことで、複数の要素からなるシステムの特性・性能を高い精度で再現でき、新しい手法や改良の検証が効率的にできるようになったことの価値は大きい。加えて、光ファイバセンサを用いた難易度の高い実験的検証、社会適用に向けた考察を行っており、構造ヘルスマモニタリング分野における完成度の高い成果を示している。

よって本論文は博士（環境学）の学位請求論文として合格と認められる。