



Title	Extended Isogeometric Analysis for Structure Sensing and Anisotropic Hardening Material Model
Author(s)	Thein Lin, Aung
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/93056">https://doi.org/10.18910/93056</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

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

The University of Osaka

## Abstract of Thesis

Name (THEIN LIN AUNG)	
Title	Extended Isogeometric Analysis for Structure Sensing and Anisotropic Hardening Material Model (構造センサーリングと異方硬化材料モデリングへ適用するアイソジオメトリック解法の拡張開発)
<p>Abstract of Thesis:</p> <p>Isogeometric analysis (IGA) is a computational method that uses the same basis functions for both geometry and analysis. Non-uniform rational B-Spline (NURBS) functions which are common in computer-aided design (CAD), are used to represent the solution fields. This allows for a seamless transfer of geometry data to numerical analysis. First invented by Hughes et al. in 2005, IGA has been widely applied in various engineering fields such as structural analysis, fluid dynamics and electromagnetism due to its high efficiency. But the study and application of IGA in the field of structural health monitoring (SHM) is still in its infancy.</p> <p>In the Chapter 1, the background and necessities of extended development of IGA are introduced. The structures of this doctoral dissertation is described.</p> <p>Chapter 2 gives a theoretical background on isogeometric analysis method and necessary formulae. Specifically, it covers the main aspects of geometry representation, basis functions, IGA mesh generation, multi-patch coupling, Jacobians and numerical integration. This chapter also serves as the theoretical introduction for the in-house IGA code 'JWRIAN-IGA'.</p> <p>Chapter 3 presents the development of a fiber mesh model which is a first step to integrate IGA and strains from DFOS (Distributed Fiber Optic Sensing). The proposed fiber model is used with linear elastic IGA to simulate DFOS measurements. The properties of the model and their effects on the measurability are studied and numerically computed fiber strains are compared with experiment data. Finally, a case study on estimating unknown loadings on a structure is illustrated.</p> <p>In the Chapter 4, the formulation of inverse IGA is derived from the least-squares functional and minimum strain energy principle. The resulting equations are used to solve unknown displacement and stress fields from measured fiber strains for linear elastic structures. A detailed literature review on the existing inverse finite elements is given and the differences with the proposed method are explained. The developed method is validated with simulated examples, and sensitivity to practical DFOS parameters is studied. Then, the inverse IGA-DFOS is applied to estimate the deformation of a rotating impeller plate from the experimentally measured fiber strains.</p> <p>Chapter 5 presents the experimental findings of anisotropic hardening behavior of prestrained high strength steel and formulation of a mathematical model for the observed phenomena. Specifically, the mechanical response of high strength steel DP980 after it was subjected to prestrain is experimentally studied. The observed history-dependent anisotropic hardening behavior is modelled with an empirical formula and implemented as a constitutive model in IGA. The model is validated with numerical simulations and comparison with experiment data. The proposed methodologies in this thesis are implemented in the in-house IGA code JWRIAN-IGA as well as the commercial software LS-DYNA.</p> <p>Chapter 6 summarizes the main outcomes of the research and gives an outlook on the future research directions.</p>	

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( THEIN LIN AUNG )			
論文審査担当者	(職)	氏 名	
	主 査	教授	麻 寧緒
	副 査	教授	大沢 直樹
	副 査	教授	飯島 一博

**論文審査の結果の要旨**

アイソジオメトリック解析 (IGA : Iso-Geometric Analysis) は、有限要素法 (FEM : Finite Element Method) に代って、CAD (Computer Aided Design) の形状関数を構造変位場の形状関数に直接活用する、構造力学の次世代数値解析手法である。米国の Hughes らは、2005 年に CAD 形状関数の一つである NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) 関数を用いた IGA を発明した。その後、米国および欧州の研究者を中心に IGA の拡張が進められ、現在は、構造力学のみならず、電磁学および流体・構造連成などの解析分野に適用されるに至っている。しかし、計測技術との連携など、構造健全性モニタリングの分野における IGA の研究と応用は見られなかった。そこで、本研究では、光ファイバーで計測したひずみ分布のデータや薄板高張力鋼板の異方硬化の計測データをそれぞれ用いて、逆解析を含む変位場・応力ひずみ場の IGA 解法や異方硬化材料モデルに適用する IGA 解法を開発することを目的としている。

本論文は、以下の 6 章から構成される。

第 1 章では、従来 FEM の課題と IGA の特徴を紹介し、IGA に関する社会ニーズや拡張開発の必要性ならびに博士論文の構成について説明している。

第 2 章では、IGA 解析手法とその理論的背景を説明している。具体的には、CAD 形状に用いる基底関数、IGA メッシュと制御点、複数 CAD 形状の結合、ローカルとグローバルの座標変換、応力ひずみを評価するための数値積分法などを数式に展開している。このような定式化に基づき、日本初の構造解析用 IGA プログラム「JWRIAN-IGA」を開発している。

第 3 章では、IGA と分布型光ファイバーセンシングシステム (DFOS : Distributed Fiber Optical System) を用いて計測した 3 次元空間でのひずみ成分を IGA ひずみとするファイバーメッシュモデルを開発している。さらに仮想の DFOS ひずみとファイバーモデルを、線形弾性 IGA に適用する数値試験を行っている。最後に DFOS 測定ひずみデータを、弾性プログラム「JWRIAN-IGA」に入力して、測定対象であるパイプの変位場を算出し、未知の荷重分布を推定できることを示している。

第 4 章では、DFOS ひずみと IGA ひずみの誤差を最小とする方法と最小ひずみエネルギー原理を用いて、逆解析 (インバース) IGA の基礎式を導出し、インバース IGA プログラム「JWRIAN-invIGA」を開発している。さらに矩形板の曲がり問題や半球形の内圧負荷問題に適用し、インバース IGA による変位場、応力ひずみ場を再現し、DFOS 計測誤差を考慮して精度検証を行っている。最後に、DFOS 計測ひずみデータをインバース IGA プログラム「JWRIAN-invIGA」に入力して、回転するブレードの変形を高い精度で再現している。

第 5 章では、予ひずみを有する高張力鋼板 DP980 の異方性硬化挙動に関する実験結果を分析し、異方硬化材料構成式を提案し、非線形異方性を表現できる IGA プログラム「JWRIAN-aniIGA」を開発している。提案した異方硬化材料モデルは、車体衝突安全性の評価に向けた商用ソフトウェア LS-DYNA にも実装されている。

第 6 章では、本研究の主な成果を要約し、さらなる研究の方向性や実用性および展望を示している。

以上のように、本論文では、IGA 解法と分布型光ファイバーセンシング技術を統合する日本初の構造解析用 IGA プログラムが開発されるとともに、提案したインバース IGA 手法と非線形異方性材料モデルの構成式を IGA に適用して、構造物健全性へのモニタリングや損傷解析へ拡大利用する可能性を明らかにしている。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。