

論文の内容の要旨

論文題目 ひずみ計測に基づく構造物の形状センシングとその応用
(Shape sensing based on strain measurements and its applications)

氏 名 小林 真輝人

1. 序論

船舶や航空機などの輸送機器, 風力発電機やライザー, パイプラインなどのエネルギー関連設備, トンネルや橋梁などの社会インフラなどの構造物は破壊のリスクを抱えている. 2013 年に発生したコンテナ船 MOL COMFORT の破断・沈没事故[1]のように, 構造物の破壊により重大な被害が発生した事例が世界中に存在している.

構造物の破壊リスクを低減するために, 構造力学や CAE (Computer Aided Engineering) の研究が進められてきた. 応力-強度モデルでは, 構造物に生じた応力が構造物の強度を上回ると破壊が生じる. 応力や強度には不確実性があるため, 多くの構造で経験的に定めた安全率によって過剰な強度を持たせ安全を保証してきた. 安全率が大きいほど安全性は高まるが, 経済性や性能は低下する. 構造物に生じる繰り返し応力が蓄積し破壊に至る疲労破壊が知られている. 運用環境が一定でなく不確実性の高い荷重下にある構造物の寿命を正確に把握することは困難であり, 定期的な保守点検により健全性が評価されているが, 点検コストが課題になっている.

生物における神経のように構造物にセンサを設置し, 構造物の状態を把握する SHM (Structural Health Monitoring) は, 橋梁や風力発電などの分野で積極的に活用されてきた. SHM は自動制御, 疲労推定, 安全率の見直しなど構造物の運用・保守・設計のそれぞれのステージへの貢献が期待されている. さらに, デジタル空間上に構造物の「双子」を作り出すデジタルツインの開発が世界的に進められており, 効率的に開発を進めるプラットフォームの開発が重要である. 例えば, デジタルツインシミュレーションのためのエコシステムとして OSP (Open Simulation Platform) は 2018 年から海事産業関係者によって共同開発された[2].

SHM にとって外力・変形・応力は重要な物理量である. 形状センシングは構造物に設置したセンサから, 構造物の形状(変形)を推定する技術であり, 構造物の全体変形が推定できれば, 未計測部の応力を解析する, 変形の原因となった外力を逆解析によって推定するといったことが可能になると期待できる. 比較的容易に計測可能なひずみを計測し, 形状を同定する研究が行われている. 中でも iFEM (inverse Finite Element Method)[3, 4]や MCF (MultiCore Fiber) を用いた手法[5]は事前実験なしにリアルタイムに形状を推定できる.

本研究の目的は, 構造物に設置したセンサの計測量から構造物の状態量を同定し, それをモニタリング・蓄積することによって, データに基づく合理的・効率的な運用・保守・設計を実現し, 構造物の安全性・信頼性を高めることに貢献することである. 本研究では, 以下の手法の提

案・検証を行い，広範な構造物を対象に変形・外力・応力推定を可能にすることを目標とする．

- iFEM を用いて構造物に設置したセンサの計測ひずみから構造物の全体変形を推定する
- MCF の計測ひずみから，MCF の形状を推定し大変形する線状構造体の変形を推定する
- 推定変形を強制変位として与えることで詳細な応力の解析を行う(Re-FEM)
- 推定変形を用いて適切な制約の下で剛性方程式を解くことで荷重を推定する(ext-iFEM)

iFEM を用いた形状センシング

iFEM は最小二乗法で FEM の逆問題を解き要素ひずみから節点変位を計算する手法で，Tessler と Spangler によって SHM に適用された[3]. Kefal らは iFEM をバルクキャリアモデルに適用し，構造の部分的なひずみから重みづけによって構造全体の変形を同定した[4].

iFEM では，構造を有限要素モデルによって離散化し，節点変位から計算する要素ひずみと計測ひずみの差を最小二乗法によって最小化し，要素に関する線形連立方程式を得る．各要素で立てた式を構造全体で統合し変位拘束に注意して解いて，節点変位ベクトル \mathbf{u} を求める．

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{f}, \quad (1)$$

ここで， \mathbf{K} , \mathbf{f} は全体節点ベクトルの係数と切片を構造全体で統合した行列とベクトルである． \mathbf{K} は構造モデルに特有の値で事前に計算しておくことが可能である．

iFEM の入力とするひずみを事前に補間することにより，より少ないセンサ点から形状を推定することが可能になる[6]. 本研究では，より少ないセンサ点から複雑な構造のひずみを補間するために，有限要素モデルから作成したグラフ構造上の距離を用いて構造上の経路を近似し，RBF (Radial Basis Function)補間によってひずみを補間する手法を提案する．

$$y_i = \sum_{k=1}^n w_k \phi(x_{ik}), \quad (2)$$

ここで， ϕ は RBF であり， (x_i, y_i) がデータ点， x_{ik} がデータ点と補間点の距離， w_k が重みである．

本研究では，実験的検証が十分でない iFEM を，サンドイッチパネルを対象に数値的・実験的に検証した．実験的検証では，モーショキャプチャで計測した変位と iFEM で計算した変位はよく一致した (Fig. 1). また，海流発電ブレードモデルを対象に，有限要素モデル上の距離に基づいた補間手法と iFEM を適用した．実験的検証では，変形の複雑さに対して十分な数の計測点のひずみから精度よく変形を推定することに成功した．さらに，iFEM 形状センシングを社会実装するための取り組みとして，デジタルツインプラットフォーム i-SAS の設計・開発を行った．

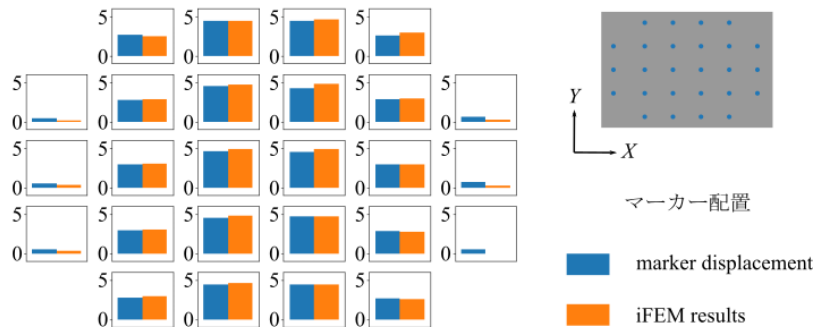


Fig. 1 サンドイッチパネル曲げ試験の iFEM による形状推定結果

MCF 形状センシング

MCF は 1 つのクラッドに複数のコアを持つ光ファイバであり、コア間が堅いガラスで満たされているため、変形（曲率）とひずみの間に線形性が成り立つ。これを利用し、光ファイバセンサによって MCF の各コアのひずみを計測し曲率と曲げ角度を計算、弧長に沿って積分することで形状を求める。Lally らはコアを螺旋状に配置することで MCF のねじれを計測し、MCF がねじれた場合においても形状を推定する手法を提案した[5]。さらに、医療機器への適用の研究開発が実施されている[7]が、大規模な線状構造体への適用は技術的難易度が高く進んでいない。

MCF 形状センシングは、基準形状の計測、未知形状の計測、曲線パラメータの算出、形状同定の 4 つのステップからなる。光ファイバセンサを用いたひずみの分布計測によって、光ファイバセンサの伸縮（ひずみ）を分布的に計測することができる。計測器のひずみの計測誤差、空間分解能、読取分解能などのパラメータはトレードオフの関係があり、MCF 形状センシングの結果に大きく影響する。そのため目的に合った計測器の選定が重要である。

ある形状で計測されたコア i の弧長 s における真のひずみ ε_i を、コア i の残留ひずみ $\varepsilon_i^{\text{rsd}}$ 、コア i の軸ひずみ $\varepsilon_i^{\text{axl}}$ 、コア i の曲げひずみ $\varepsilon_i^{\text{bnd}}$ 、コア i のねじりひずみ $\varepsilon_i^{\text{tw}}$ の重ね合わせとしてモデル化する。ここで、曲げひずみが曲線パラメータ（曲率 κ と曲げ角度 β ）の情報を含む。

$$\varepsilon_i^{\text{bnd}}(\kappa, \beta) = -k_{1,i} r_i \kappa \cos(\omega_i - \beta), \quad (3)$$

ここで、 $k_{1,i}$ はコアの長手方向角度に関する比例定数、 r_i は MCF 中心とコア i の間の距離、 ω_i は弧長におけるコア i の角度である。断面を共有する各コアで式(6)が成り立ち、非線形連立方程式を解くことで曲率 κ と曲げ角度 β を求める。フレネ・セレの公式を離散化し、接線ベクトルについて積分することによって得る位置ベクトルに関する漸化式を用いて、曲線パラメータから形状を同定する。計測器に接続した端部の境界条件の下で、この漸化式によって先端に向かって順に形状が求まる。

MCF 形状センシングシステムを構成する計測器・MCF・アルゴリズムの様々なパラメータによって、形状センシングの精度が変化する。本研究では精度向上を目指し、形状センシングの失敗モードを FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) によって、体系的に整理した。その上で代表的な失敗モードについて、シミュレーターを作成しシミュレーションと実験で検証した。特に、位置を用いた形状の補正により、形状センシングの精度を向上させることが可能なことを実験的に示した(Fig. 2)。

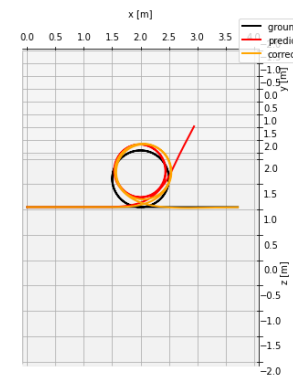


Fig. 2 実験の補正結果

応力解析

応力は構造物の健全性を評価する上で最も重要な物理量の一つであるが、応力集中を超苦節計測することは困難である。形状センシングによって求めた変位を構造物の有限要素モデルに強制変位として与えることで、非計測部の応力集中を解析する手法を提案する。本研究では、シミュレーション上で、平板モデルで解析した変位を穴あき平板の詳細モデルに与えることによ

って、円孔部周辺の応力集中を推定することに成功した。さらに、パイプ構造を対象に MCF 形状センシングで推定した形状から応力分布を再現した。

荷重推定

外力は設計や制御にとって重要な物理量である。形状センシングによって求めた変位を剛性方程式に代入することによって外力が計算できるが、変位の誤差に対して解が安定しない。本研究では、荷重の方向とグラフフーリエ変換を用いて定義した荷重分布の滑らかさに関する制約を与える手法を提案した。単純支持平板に複雑さの異なる 4 つの分布荷重を与えた問題についてシミュレーション上で提案手法を適用し、荷重分布を精度よく推定することに成功した。

結論

本論文全体を通じて、iFEM を用いた形状センシングと MCF 形状センシングによって、幅広い構造物を対象にひずみ計測に基づいた形状センシングを適用し、形状センシングの結果に基づいて Re-FEM や ext-iFEM を適用することにより、SHM にとって重要な物理量である変位・応力・外力を導出する SHM システムのコンセプトを示すとともに、それを実現するための基盤技術を提案しその適用性を明らかにした。このシステムは、運用中の構造物の変位・応力・外力といった物理量をモニタリングすることを可能にし、そこで収集されたデータは、構造物の運用・保守・設計を効率化・合理化することにも貢献する。

参考文献

- [1] コンテナ運搬船安全対策検討委員会. コンテナ運搬船安全対策検討委員会最終報告書. 国土交通省, 2015.
- [2] OPEN SIMULATION PLATFORM, <https://www.dnvgl.com/feature/open-simulation-platform-osp.html>, accessed on September 30th, 2021
- [3] Tessler, Alexander, and Jan L. Spangler. "Inverse FEM for full-field reconstruction of elastic deformations in shear deformable plates and shells." (2004).
- [4] Kefal, Adnan, et al. "Three dimensional shape and stress monitoring of bulk carriers based on iFEM methodology." Ocean Engineering 147 (2018): 256-267.
- [5] Lally, Evan M., et al. "Fiber optic shape sensing for monitoring of flexible structures." Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2012. Vol. 8345. International Society for Optics and Photonics, 2012.
- [6] Kefal, Adnan, et al. "A smoothed iFEM approach for efficient shape-sensing applications: Numerical and experimental validation on composite structures." Mechanical Systems and Signal Processing 152 (2021): 107486.
- [7] Megens, Mischa, et al. "Shape accuracy of fiber optic sensing for medical devices characterized in bench experiments." Medical Physics (2021)