

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	破壊力学の先験情報を導入したベイズ推定によるき裂の同定と進展予測
Title(English)	
著者(和文)	葉名紀彦
Author(English)	Norihiko Hana
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12853号, 授与年月日:2024年9月20日, 学位の種別:課程博士, 審査員:宮崎 祐介,天谷 賢治,倉林 大輔,轟 章,水谷 義弘
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12853号, Conferred date:2024/9/20, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	システム制御 システム制御	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	葉名 紀彦		審査員主査： Chief Examiner	宮崎 祐介 准教授

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

発電プラントや社会インフラなどを長期間にわたって安全に使用するには定期的な検査が必要である。検査する損傷として金属部材のき裂がある。検査対象が大型のため、高所や狭所で簡便に検査できる技術が求められている。さらに、検査対象を長期間で使用制限するのが難しく、検査頻度の適切化も課題である。

従来の検査技術では、検査装置の小型化や検査方法に課題があり、高所や狭所で簡便な検査が難しかった。高所や狭所における簡便な検査方法としてカメラによる外観検査が考えられる。画像で取得した表面の変化から見えないき裂を予測できれば簡便に検査できる。き裂による変化として表面の変形があり、汎用カメラの画像からデジタル画像相関法(DIC 法)で求められる。DIC 法で求めた変形からき裂を推定するには、変形へのき裂の影響の減衰と計測誤差が課題になる。表面の変形からき裂を推定する従来法には、事前に表面の変形とき裂の関係を用意する方法や、トポロジー最適化で離散的に表現したき裂形状を予測する方法がある。従来手法では計測誤差、事前データの準備やトポロジー最適化に要する計算コストが課題で、簡便な解析が難しい。

き裂の進展を予測するには、進展する対象の材料物性、き裂の大きさ以外に、加わる荷重、き裂周囲の構造の情報が必要である。発電プラントや社会インフラでは、計測したき裂の大きさは誤差を含み、実際に加わる荷重を正確に把握するのは難しく、き裂が進展する領域の寸法も寸法公差や組立誤差で不確実である。不確実な情報に基づいてき裂の進展寿命を予測する従来研究はあるが、簡便な計測結果で不確実な情報を更新して予測精度を向上し、適切な計測間隔を決めている研究は少ない。

これまでに、実問題として構造物に生じるき裂の形状推定および進展予測の問題をとりあげ簡便な計測、情報収集、解析のもとで社会実装が可能な技術の確立が重要であると問題を提起した。さらに、効率化を図ると情報不足と不確実さのため問題が悪条件となることに問題の焦点を当てた。この問題を克服するために先験情報の有効な活用とあいまい性を合理的に取り扱うことに着目した。以上より、本論文では破壊力学の先験情報を導入したベイズ推定により構造物のき裂の形状推定および進展予測を効率的に行う技術を開発することを目的とした。本論文で得られた成果は以下である。

まず、デジタル画像相関法で得られた構造物表面のひずみ分布から内部き裂の位置および形状を推定する逆問題を従来法の 0-1 組み合わせ最尤推定問題で解くには、計算コストの増加と逆問題の悪条件の克服が難しい。0-1 組み合わせ最尤推定問題から境界条件を分離して、き裂面の変位分布を状態量とする問題へ緩和した線形推定問題を設定した。

設定したき裂面の変位分布を状態量とする線形推定問題を、分離した境界条件であるき裂面の変位および表面力に対するクロススパス条件を先験情報としたベイズ推定で解く方法を提案した。提案手法では、さらに、き裂領域はまとまっているという性質を Grabcut 法のエネルギー関数において考慮し解を探索した。平板の表面のひずみ分布から裏面のき裂を推定する検証実験で、従来法と本手法の同定の精度を比較し、本手法の優位性を示した。

次に、デジタル画像相関法で得られた構造物表面のひずみ分布から内部き裂の位置および形状を推定する逆問題における過剰適合を抑制するために、破壊力学に基づくき裂の候補形状を先験情報とするベイズ推定で適切化した。想定されるき裂の候補形状を先験情報としてベイズ推定の 1 つである EAP 推定の枠組みの中に取り込んだ。進展を判定する基準を緩和して、リガメントの荷重分布に基づいてき裂を拡げていくだけの効率的なシミュレーションでき裂の候補形状を作成し、先験情報の計算コストを少なくした。平板の表面のひずみ分布から裏面のき裂を推定する検証実験で本手法の有効性を示した。

そして、実製品の不確実な荷重範囲、構造寸法を、き裂の長さの計測毎に逐次ベイズ推定し、進展寿命の精度を向上した。逐次ベイズとしてアンサンブルカルマンフィルターを使用し、検査ごとの計測情報を合理的に統合するために Paris 則を状態方程式に導入した。本手法の有効性を CT 試験片のき裂進展の計測結果に基づいたシミュレーションデータを用いて検証した。

さらに、アンサンブルカルマンフィルターの予測の過程で得られる進展予測から、信頼度に基づいて合理的な測定間隔を決定する方法を提案した。進展予測から破壊に至らない限界き裂長さに到達する寿命分布を、3 母数ワイブル分布で近似して、破壊に至らない寿命信頼度に基づき検査間隔を設定した。提案した検査間隔を設定する方法の有効性を、CT 試験片のき裂進展の計測結果に基づいたシミュレーションデータで検証した。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	システム制御 システム制御	系 コース	申請学位 (専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	葉名 紀彦		審査員主査： Chief Examiner	宮崎 祐介 准教授

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

It is essential to conduct regular inspections over time to ensure the safe and reliable operation of power plants and social infrastructure. The inspection will focus on identifying cracks in metal components. Given the size of the inspection target, a straightforward inspection at elevated or narrow points is essential. Furthermore, the inability to halt the inspection object promptly necessitates a suitable inspection frequency.

This thesis presents a method to improve the accuracy of inspections at high and narrow locations. The method combines non-contact deformation measured by a digital image correlation method and Bayesian estimation with physical prior information.

First, we are pleased to present the method that introduces a cross-sparsity condition between the displacement and the force at the crack and ligament. This is based on fracture mechanics, which we believe to be valuable physical a priori information.

The next method, which uses a candidate crack shape based on fracture mechanics as a priori information, further reduces the risk of overfitting.

Validation experiments were conducted to estimate cracks on the back surface from the strain distribution on the surface of a flat plate, and the results demonstrated the effectiveness of the two methods.

Furthermore, a method to predict crack propagation was developed. This method combines a physical model of crack propagation and sequential Bayesian estimation. The sequential Bayesian estimation was conducted using an ensemble Kalman filter. The Paris' law was incorporated into the equation of the state of the ensemble Kalman filter as a crack propagation model. The purpose is to set the inspection frequency appropriately based on uncertain in-use loads, shape changes, and measured cracks. The efficacy of the proposed method for determining inspection intervals was validated using simulation data based on actual crack propagation in CT specimens.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).