

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K12006

研究課題名（和文）デジタル画像相関法を用いた有限要素解析モデルのデータ同化に関する研究

研究課題名（英文）A Study on Data Assimilation of Finite Element Analysis Models Using the Digital Image Correlation Method

研究代表者

秋田 剛 (Akita, Takeshi)

千葉工業大学・工学部・准教授

研究者番号：20405343

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではデジタル画像相関（Digital Image Correlation, DIC）法から求められる多数の変位計測データを使って計測情報のみでは把握できない状態量を有限要素解析モデルの逐次データ同化から取得する技術を開発した。特に構造物の状態監視を効果的に行う技術を開発した。本研究では有限要素ごとの剛性パラメータを推定対象とした逐次データ同化を行い、損傷に伴う局所的な剛性低下を監視する方法を考案した。またカメラの振動などの計測点に共通する誤差を変位差分により除去して逐次データ同化を行う方法を考案した。これらの方法について数値実験及び実データを使った実験により有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

デジタル画像相関法による計測技術は構造物の状態監視や損傷検知に有効な技術であるが、計測から得られる情報は、撮影領域の変位場、またその勾配から得られるひずみ場のみとなり、物性値や損傷度合いを評価するためには別途評価式を用いる必要があった。本研究は逐次データ同化技術を適用することで、デジタル画像相関法の計測情報のみでは把握できない状態量を、解析モデルを援用して取得する方法を提示するものである。本研究で得られた成果は、画像計測技術や損傷同定技術の分野の高度化において有用であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a technique for effective condition monitoring of structures by performing a sequential data assimilation of finite element analysis models using many displacement measurement data obtained from the Digital Image Correlation (DIC) method. In this technique, the stiffness parameters in each finite element of the models are estimated as a state vector in the sequential data assimilation where the stiffness parameter distributions estimated over finite element model are utilized to detect regions damaged. In addition, we considered an efficient estimation technique by using the observation equation for displacement differences to remove errors common to the observation. Numerical experiments and experiments with real data validated the effectiveness of these technique presented in this study.

研究分野：Computational Mechanics

キーワード：Data Assimilation Inverse Problem Finite Element Method Kalman Filter Damage Detection

## 1. 研究開始当初の背景

近年、デジタル画像相関 (Digital Image Correlation, DIC) 法を用いた物体の変位計測技術が大きな注目を集めている。DIC 法では、ランダムパターンが塗布された物体表面を撮影し、画像内の微小なサブセットに対して変形前後の輝度値の相関を用いてサブセットの変位量を算出する。DIC 法による計測は、高解像度のデジタルカメラを用いることで、ひずみゲージやレーザ変位計などに比べて物体の撮影領域に対する多数の変位計測データを容易に取得することができるため、構造物の状態監視や損傷検知に効果的に利用可能であると考えられている。一方で、計測から得られる情報は、撮影領域の変位場、またその勾配から得られるひずみ場のみとなり、物性値や損傷度合いを評価するためには別途評価式を用いる必要がある。

機械設計において、運用状態での挙動を予測するために有限要素解析が活用されている。有限要素解析では、物体の変形やひずみ量などを詳細に求めることができる一方で、解析結果には対象物の物性値の誤差や周辺環境の不確定性などに起因する誤差が含まれる。一般には検証試験で取得される計測データから解析モデルを修正して、解析の予測精度を向上させる。近年、逐次データ同化と呼ばれる計測データと解析モデルを統計的に融合する技術が提案されている<sup>2)</sup>。逐次データ同化では、計測情報を反映した解析を実行できるため、計測点以外の様々な情報を解析結果として取得することが可能となる。例えば、DIC 法による変位計測情報を使って対象物の逐次データ同化を行うことができれば、撮影領域の変位場やひずみ場だけでなく、計測情報を反映した解析結果から様々な評価量を取得可能であると考えられる。これまで構造解析分野での逐次データ同化の適用例は比較的小規模なモデルを対象としたものが多く、DIC 法による多数の変位計測データを用いた逐次データ同化の有効な利用法がほとんど考えられていなかった。本研究では、DIC 法を使った逐次データ同化の有効な利用法として、対象物の状態監視を効果的に行う方法を考える。

## 2. 研究の目的

本研究は、DIC 法から求められる多数の変位計測データを使って有限要素解析モデルの逐次データ同化を行い、計測情報のみでは把握できない状態量を、解析モデルを援用して取得する技術を開発することを目的とする。特に構造物の状態監視を効果的に行う技術を開発する。逐次データ同化では、推定するモデルパラメータの設定が重要となる。本研究では DIC 法で計測される変位計測データを使って有限要素ごとの剛性パラメータを推定対象とした逐次データ同化を行い、損傷に伴う局所的な剛性低下を監視する方法を考案する。また DIC 法で取得される計測データにはカメラの振動などのランダム誤差以外の誤差成分が含まれることが多いため、変位データの差分を観測量とした簡便な定式化で計測点に共通する誤差を除去して逐次データ同化を行う方法を考える。

## 3. 研究の方法

### (1) DIC 法による計測

本研究では、株式会社ディテクト社製のソフトウェア DIPP-Motion V を用いて DIC 法による変位場計測を行った。供試体に艶なしスプレーを使ってランダムパターンを塗布し、計測を行った。研究期間を通して引張や圧縮を受ける板材、せん断を受ける薄膜<sup>3)</sup>、曲げ部材の横断面、など様々な計測対象を考え、逐次データ同化の適用を検討してきたが、最終的に板材を対象にした逐次データ同化の適用実験において有効性を検証した。

### (2) 逐次データ同化の定式化

本研究では有限要素ごとの剛性パラメータを推定対象とした逐次データ同化を考えた。研究当初は逐次データ同化法として、アンサンブルカルマンフィルタを使った方法<sup>4)</sup>を考えたが、計算コストが高く大規模問題への適用が難しかったため、拡張カルマンフィルタを使った方法<sup>5)</sup>を適用した。

## 4. 研究成果

### (1) DIC 法の変位計測データを用いた逐次データ同化による損傷同定技術の構築

本研究では要素剛性比をモデルパラメータに設定し、DIC 法の変位計測データを用いた逐次データ同化による損傷同定技術を構築した。

#### ① 実験方法

検証実験では損傷を与えた試験片に対して引張または圧縮試験を行い、DIPP-MOTION V を用いて DIC 法による変位計測を行った。計測された変位を用いて試験片と同じ寸法を持つ板材の有限要素解析モデルに対して逐次データ同化を行った。この際、要素剛性比の推定を行い、試験片の損傷同定を行った。試験では最大 2 mm の強制変位を与えた。図 1 に引張試験に用いた供試体 A を示す。供試体 A は厚さ 0.3 mm、長さ 75 mm、幅 20 mm の試験片を市販品のプラスチック板から切り取ることで作製した。供試体 A の右辺を下辺から 30 mm に内側に 2 mm の切り欠

き状の損傷を与えた。図2に圧縮試験に用いた供試体Bを示す。供試体Bは厚さ2mm、長さ75mm、幅20mmの試験片を市販品のプラスチック板から切り取ることで作製した。供試体Bの左辺を下辺から30mm、右辺から5mmの地点に直径5mm、深さ1.85mmの窪み状の損傷を付与した。この損傷は撮影面の裏面に与えた。DIPP-MOTION Vを用いてDIC法の測定点をそれぞれの試験の供試体の撮影領域に縦41点、横21点の合計882点を配置した。撮影領域は、供試体Aでは上下対称に長さ45mm、幅20mmの領域に、供試体Bでは上下対称に長さ37mm、幅20mmの領域に設定した。撮影は解像度を2592×2048、FPSを30に設定して行った。ピクセル間距離は0.043mmである。

逐次データ同化に用いる有限要素解析モデルをそれぞれの供試体で撮影領域の計測点と節点が一致するように2次元アイソパラメトリック要素で幅方向に20分割、長さ方向に40分割して作成した。図3に作成した有限要素解析モデルを示す。図の上下の要素の大きさが他の部分と異なるが、これは上下端の計測点とチャック部に設定した節点で要素を作成したためである。今回の実験では、測定データとして882個の変位データを用いて逐次データ同化を行い各要素の要素剛性比を推定した。

## ② 実験結果

供試体Aに対する逐次データ同化結果を図4に示す。図は0.65mmまで引張の強制変位を与えた際のDIC法計測データを用いて推定した要素剛性比のコンター図を示している。図から試験片の損傷を与えた領域で推定される要素剛性比が明確に低下することがわかる。この結果から、

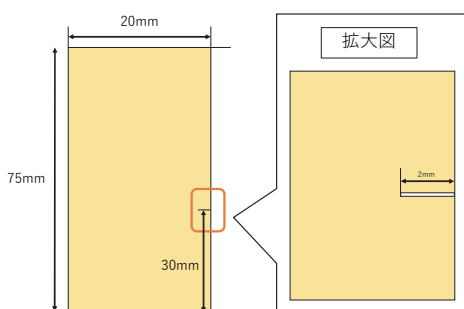


図1 切り欠き状の損傷を有する供試体A

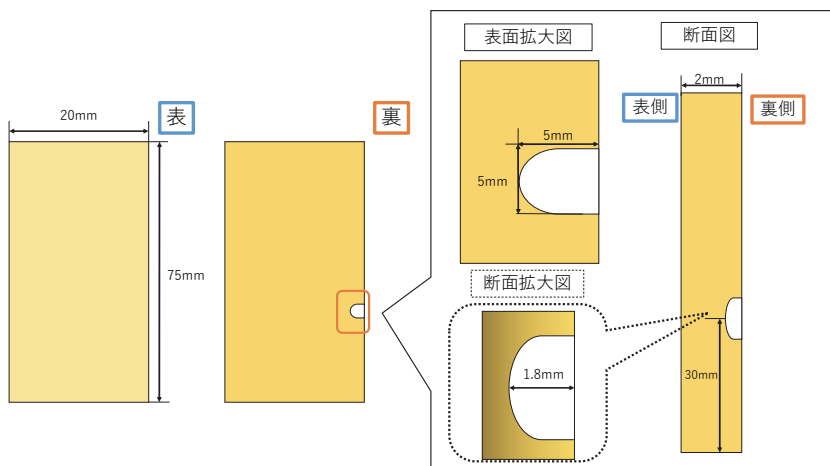


図2 窪み状の損傷を有する供試体B

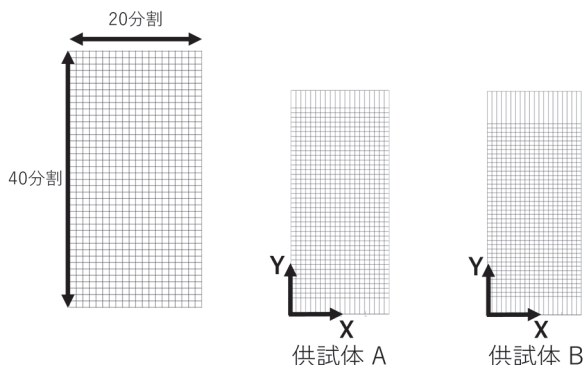


図3 有限要素解析モデル

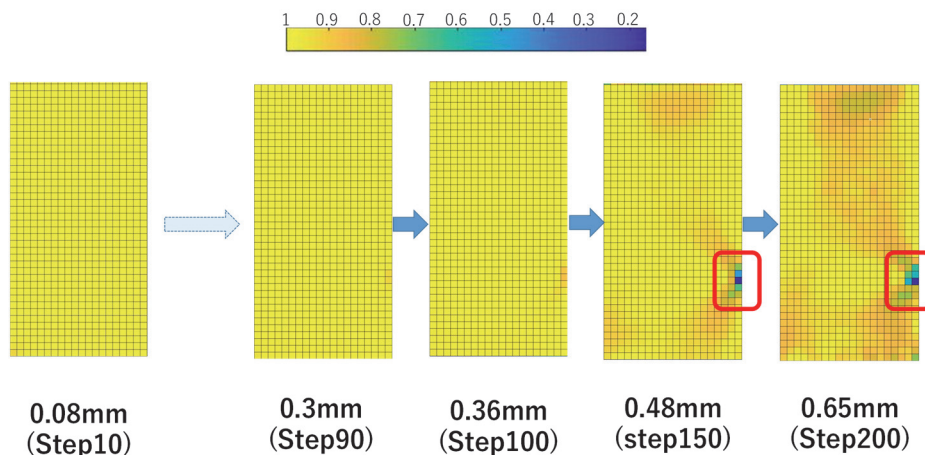


図 4 供試体 A の推定結果

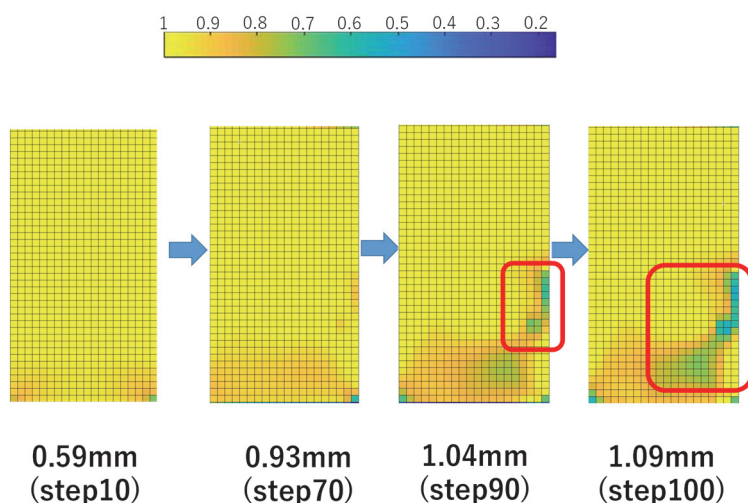


図 5 供試体 B の推定結果

供試体 A のような明確な損傷を有する部材に対して、本研究による推定法で損傷箇所の同定が可能であると考えられる。図 5 に供試体 B に対する逐次データ同化結果を示す。図は 1.09 mm まで圧縮の強制変位を与えた際の DIC 法計測データを用いて推定した要素剛性比のコンター図を示している。図から損傷の周辺の領域で要素剛性比が大きく低下していることがわかる。ただし供試体 A のように明確に損傷領域を特定することはできない。供試体 B の窪み状の損傷は撮影領域の裏側に設置されており損傷を目視で確認できないが、本手法である程度の損傷箇所の同定が可能であると考えられる。

#### (2) 計測誤差の軽減技術

一般に逐次データ同化では、計測誤差を白色雑音としてフィルターを設計する。しかし、DIC 法の計測データにはカメラの振動などのランダム誤差以外の誤差成分が含まれることも多い。デジタル画像相関法から求められる変位データを変位の微分量であるひずみデータに変換してバイアス成分を除去してから逐次データ同化を行うこともできるが、一般的な有限要素解析モデルは節点変位を状態量として解析を行うため、ひずみと変位を関連づける定式化が複雑になる<sup>7)</sup>。本研究では、有限要素解析モデルの節点変位と基準節点の差分変位を観測量とすることで、簡便な定式化で振動誤差やバイアス誤差を除去して逐次データ同化を行う方法を提案し、その有効性を検証した。

実験検証に用いる計測データを取得するため、板材（全長 75 mm、幅 20 mm、厚さ 0.3 mm のプラスチック板）に対して引張試験を行い、デジタル画像相関法を用いて変位データを求めた。縦 34 点、横 21 点の計 714 点の画像計測点を設置し、DIC 法により変位計測を行った。意図的にカメラに振動誤差を与えられるようにカメラと同じ机上加振機を設置した。計測の際に振動の影響が少ない場合、加振機を動作させて振動の影響を受ける場合、の 2 通りの実験を設定した。図 6 に加振機を OFF にした状態と ON にした状態での変位計測結果の一例を示す。図は左辺の上下端の計測点の引張方向の変位とその差分変位を示している。図から差分を取ることで振動の影響が除去されることがわかる。



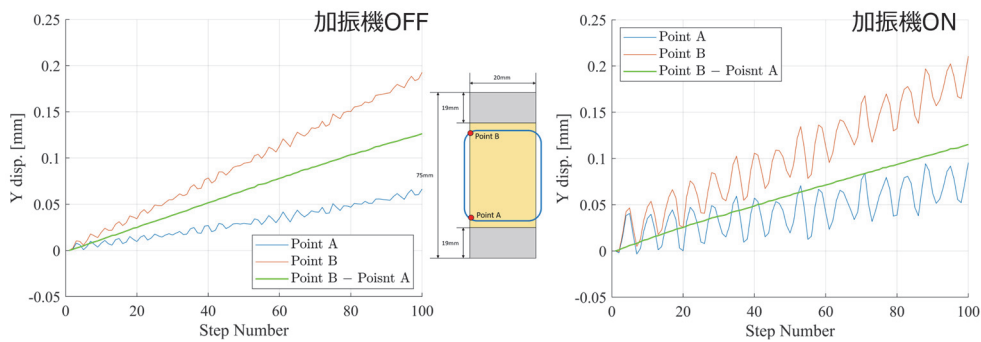


図 6 実験データの一例

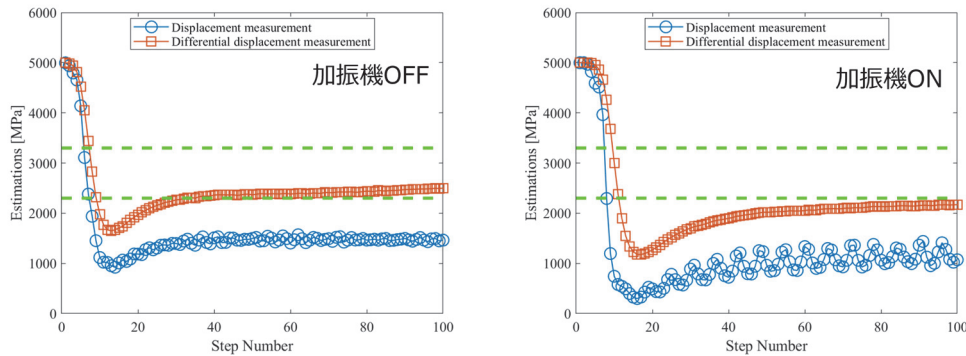


図 7 加振機 ON/OFF におけるヤング率推定値の比較

逐次データ同化に用いる有限要素解析モデルを測定領域の節点と測定点とが一致するように 2 次元アイソパラメトリック要素で横に 20 分割、縦に 33 分割して作成した。解析モデルのヤング率の逆数を逐次データ同化の推定対象とした。測定データとして、節点に一致する 714 点の変位を使用した。

逐次データ同化におけるヤング率の初期値を 5000 MPa と設定した。図 7 に DIC 法による計測の際に、加振機を OFF にした状態と ON にした状態の推定結果をそれぞれ示す。横軸がステップ数、縦軸がヤング率を示しており、青い線が変位量を用いた観測方程式の推定結果、オレンジの線が変位差分を用いた観測方程式の推定結果を示している。またプラスチック板の物性値表にあるヤング率の範囲を点線で示している。図よりどちらのケースでも両者の推定値に差があることがわかる。これは、今回の実験では振動の有無によらず計測値にバイアス誤差が含まれていたためと考えられる。変位差分を行うことでバイアス誤差が除去され、変位量を用いた観測方程式よりも正確な推定結果が求められていると考えられる。また、変位差分を用いた場合、計測値に含まれるカメラの振動誤差が除去されるため、推定値の変動が押さえられることがわかる。以上の結果より、変位差分を用いた逐次データ同化は DIC 法に対して有効であると考えられる。

#### <引用文献>

- 1) Sutton, M. A., et. Al., Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements, Springer, 2009.
- 2) 樋口知之, 上野玄太, 中野慎也, 中村和幸, 吉田 亮, データ同化入門一次世代のシミュレーション技術一, 朝倉書店, 2011.
- 3) 秋田 剛, 膜面の面内変位分布に基づく張力場モデルの許容圧縮応力の設定に関する一計算例, 膜構造ジャーナル, Vol. 1, pp. 45~51, 日本膜構造協会, 2022.
- 4) 秋田 剛, アンサンブルカルマンフィルタを用いた要素剛性の逐次推定と損傷同定への適用, JCOSSAR 2019 論文集 (A 論文), Vol.9, pp. 494-499, 2019.
- 5) 秋田 剛, 拡張カルマンフィルタを用いた平面応力モデルの要素剛性比をモデルパラメータとした逐次データ同化と損傷同定への適用, 日本計算工学会論文集, Vol. 2020, No. 20200018, 2020.
- 6) 山川宏, 最適化デザイン, 培風館, 1993.
- 7) 綿引 壮真, 佐々木 健吾, デジタル画像相関法を用いた逐次データ同化による材料パラメータ推定, 日本機械学会関東支部総会講演会講演論文集, 19C01, 2019.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 秋田 剛	4. 巻 1
2. 論文標題 膜面の面内変位分布に基づく張力場モデルの許容圧縮応力の設定に関する一計算例	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 膜構造ジャーナル	6. 最初と最後の頁 45-51
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 秋田 剛	4. 巻 2020
2. 論文標題 拡張カルマンフィルタを用いた平面応力モデルの要素剛性比をモデルパラメータとした逐次データ同化と損傷同定への適用	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本計算工学会論文集	6. 最初と最後の頁 20200018
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11421/jsces.2020.20200018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 秋田 剛	4. 巻 9
2. 論文標題 アンサンブルカルマンフィルタを用いた要素剛性の逐次推定と損傷同定への適用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JCOSSAR 2019 論文集（A論文）	6. 最初と最後の頁 494-499
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 秋田 剛, 茅 大河
2. 発表標題 デジタル画像相関法による変位の差分を用いた板材の逐次データ同化実験
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第29期総会・講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 茅 大河, 秋田 剛
2. 発表標題 デジタル画像相関法を用いた変位差分を観測量とした逐次データ同化法の検討
3. 学会等名 第35回計算力学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋田 剛
2. 発表標題 デジタル画像相関法を用いた部分的な変位場計測に基づく損傷部材の逐次データ同化実験
3. 学会等名 第35回計算力学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋 光弥, 秋田 剛, 岩佐 貴史
2. 発表標題 しわを生じる膜面の面内変位分布を用いた張力場モデルの許容圧縮応力評価法に関する検討
3. 学会等名 第35回計算力学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷村昭彦, 秋田剛
2. 発表標題 画像計測を用いた損傷部材の逐次データ同化に関する検討
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

特になし

--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------