

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11859

研究課題名（和文）画像ディープデータ同化法の開発と切削加工への応用

研究課題名（英文）Development of Image-based Deep Data Assimilation Method and Application to Metal Cutting Simulation

研究代表者

三坂 孝志（Misaka, Takashi）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員

研究者番号：20645139

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、DNNを実加工画像で学習して実画像に似せたFEM結果の実画像との類似度を判断させる処理と、実画像に似せたFEM結果でDNNを学習して実加工画像を検出させる処理に関する研究を行った。前者はFEM疑似画像の類似度に応じてFEMの不確かなパラメータを推定するデータ同化的処理であり、後者はFEM疑似画像の学習時にFEMで得られる未計測量を関連づけておくことで実画像の検出時に対応する未計測量を呼び出す、いわゆる、サロゲートモデルの処理である。これらの手法の検証を切削加工および渦励振動する円柱周りの流れに関して行って有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実加工映像から深層ニューラルネットワークが認識した情報でCAE解析を改善するようなデータ同化が可能になれば、実験と計算を比較するためにデータ同化において必要となるコスト関数の自由度を向上させることができる。すなわち、本研究ではピクセルレベルで厳密に画像を比較することなく、これまでデータ同化に利用するのが難しかった切削加工映像のような情報でデータ同化を行うことができる。近年のサイバー空間とフィジカル空間の融合により生産性革命を目指すインダストリー4.0などの取り組みではデータ取得や分析に留まっている場合があるが、本研究では真の融合を実現する事例を提示することができたと考えている。

研究成果の概要（英文）：In this research, we investigated two processes: one is to train a DNN with real machining images to determine the similarity of FEM results to real images, and the other is to train a DNN with FEM results that resemble real images to detect real machining images. The former is a data assimilation process that estimates the uncertain parameters of the FEM according to the similarity of the FEM pseudo-images, while the latter is a surrogate model process that relates unmeasured quantities obtained by the FEM to the FEM pseudo-images during training and recalls the corresponding unmeasured quantities when detecting real images. The validity of these methods was verified for metal cutting in turning and flow around a circular cylinder in vortex-induced vibration.

研究分野：計算科学

キーワード：データ同化 ディープラーニング 特徴データ同化 加工画像 切削FEM 後流画像 渦励振動

### 1. 研究開始当初の背景

本研究で扱う切削加工は切削理論により体系化されているものの、切削工具の異常摩耗やびり振動など製造現場においては課題が残っており、加工状態のより詳細な把握が望まれている。近年、計測データなどフィジカル空間の情報とサイバー空間のモデルを融合したサイバーフィジカル製造システム (CPPS) を用いてこれらの課題に取り組む機運が高まっている。CPPS では近年よく用いられる機械学習で構築したモデルを利用することもできるが、得られたデータの信頼性を保証し、さらに現象の「予測」を行うためには、物理的知識に基づいた「モデル」との組み合わせが必要である。

計測データと有限要素法 (FEM) などの数値シミュレーションを融合する手法としてデータ同化があり、実現象を計算機内に再構成した、いわゆるデジタルツイン構築の一手法となりうる。データ同化は数値シミュレーションの不確定要因 (初期・境界条件、モデルパラメータ) を観測値に基づくベイズ統計により推定する方法であり、数値気象予測に用いられている。近年異分野への応用が進み、コンピューター援用工学 (CAE) と Internet of Things (IoT) 計測とのギャップを埋める鍵として、製造分野でもその有効性が期待されている。しかしながら、図 1 に示す旋削加工を例に考えると、被加工部材は高速で回転し、切削工具は交換式の小さな金属部品であり、加工状態に影響する接触部分の局所的な応力や温度を計測することがそもそも難しい。

一方で、FEM による切削加工解析は計測不可能な応力などの状態量を得る手段として有力であるものの、加工時の高圧・高温状態や切りくずの複雑な形態など、切削の FEM モデリングは依然として難しい課題である。計測値による FEM 改善として、試験片変形時のずれを画像処理で検出するデジタル画像相関法 (DIC) の結果を用いた FEM 構成式のチューニングも行われているが、DIC および FEM 結果の相関をとる際に正確な位置合わせや較正が必要となるため単純化した形状への適用に限定され、実加工状態に適用するのは困難である。

上記のような加工状態計測および切削 FEM の困難を緩和しつつ切削 FEM デジタルツインを構築する方法として、本研究では深層ニューラルネットワーク (DNN) に注目する。DNN は自動運転で用いられているように、複雑でノイズを多く含む画像から注目すべき物体の検出や分類を行う能力に秀でており、本研究で扱う切削加工映像への適用可能性も期待できる。本研究はこのような DNN の能力を FEM などの CAE のデータ同化に利用できるかどうかを探り、切削加工を例として DNN を用いたデータ同化の手法を確立するものである。

### 2. 研究の目的

切削加工中の映像から切削 FEM デジタルツインを改善するようなデータ同化を実現するために、実加工映像とそれを模擬し FEM で生成した疑似加工画像の類似度、すなわち FEM 生成画像の尤度を、実加工映像で学習した深層ニューラルネットワークに特徴空間で判断させ、その尤度から FEM モデルの不確かなパラメータを推定する手法を開発する。DNN を用いることで、切削加工映像のように余分な情報やノイズを含む画像からデータ同化で必要となる尤度関数 (コスト関数) を評価する点が核心部分である。また、加工映像取得と同時に加速度センサーによる振動計測を同時に行い、本推定手法の検証を行う。

### 3. 研究の方法

通常、データ同化では計測データと対応する数値シミュレーション結果の差が数値として明示的に定義され、その差に基づき数値シミュレーションの変数やパラメータが修正される。一方、近年の深層学習による特徴認識は人間を上回る能力を示しており、ここではそれを活かして、計測データと数値シミュレーションを特徴情報に基づき緩やかに連携するアプローチとなる。

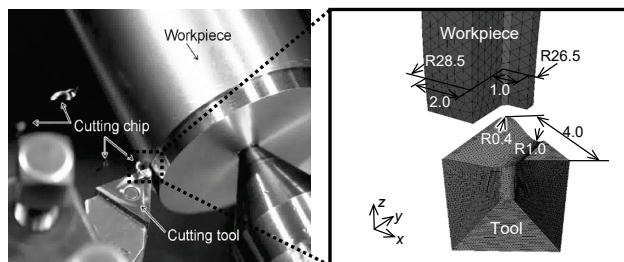


図 1 切削加工映像と対応する切削 FEM モデル

被加工部材を回転させ、切削工具を移動させつつ除去加工を行う旋削の FEM 解析は、計測が難しい加工部の物理量を調べるために用いられている。しかしながら、高圧・高温の加工状態の物理モデル (構成方程式や摩擦係数など) には不確かな要因も多く、計測データを用いた不確かさの低減が考えられる。加工部ではセンサーを設置するような接触計測は困難なため、計測デー

タと数値シミュレーションの連携により切削デジタルツインを経由した間接的な情報取得が期待される。

ここでは図1に示す実加工画像とFEMで生成された疑似加工画像をDNNによって連携する。切削加工時に発生する切りくずの形態（厚み、丸まり具合など）は加工条件や応力状態によって変化することが知られているため、加工画像内の切りくず形態の特徴に注目する。本研究では図2のようなシステムを考え、DNNを実加工画像で学習して実画像に似せたFEM結果の実画像との類似度を判断させる処理①と、実画像に似せたFEM結果でDNNを学習して実加工画像を検出させる処理②を考える。前者はFEM疑似画像の類似度に応じてFEMの不確かなパラメータを推定するデータ同化的処理であり、後者はFEM疑似画像の学習時にFEMで得られる未計測量を関連づけておくことで実画像の検出時に対応する未計測量を呼び出す、いわゆる、サロゲートモデル的処理である。

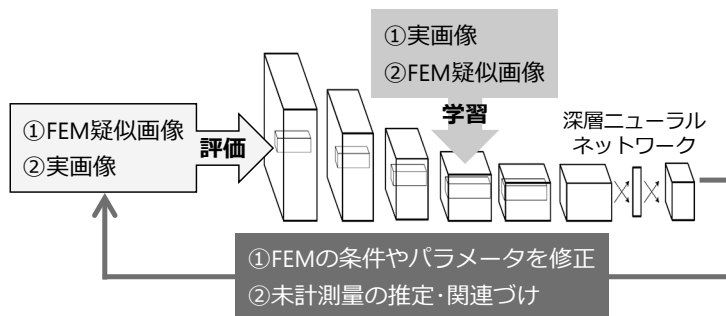


図2 DNNを経由した実画像とFEMの連携

#### 4. 研究成果

上記①の例として、図3(a)に切削FEMに含まれる2つのパラメータ（加工硬化指数および静摩擦係数）と、DNNから得られる確信度（ここではパラメータ推定における尤度として利用）に関する応答曲面を示す。また、いくつかの条件において切削FEMで生成した切りくずも示す。尤度の応答曲面となっているため、この応答曲面上で確信度が最も高い点に相当するパラメータが求めるべきパラメータである。数値シミュレーションを行う際には結果を実験結果と見比べつつ、その妥当性確認を行う場合があるが、処理①はそれをDNNに代行させるような形となっている。この処理①ではFEMの計算コストが大きくリアルタイムで実行するのは難しい。

一方、処理②の例を図3(b)に示す。これは加工条件の異なるFEMの疑似加工画像と未計測の物理量を対応づけて学習したデータベースであり、実加工画像はその未計測物理量を呼び出すためのクエリとなっている。DNNの高速さにより実加工画像に基づく未計測の呼び出しは高速に実行される。ただし、ここで構築したのはあくまでもサロゲートモデルであるため、支配方程式に基づく数値シミュレーションのような外挿能力はあまり期待できない。

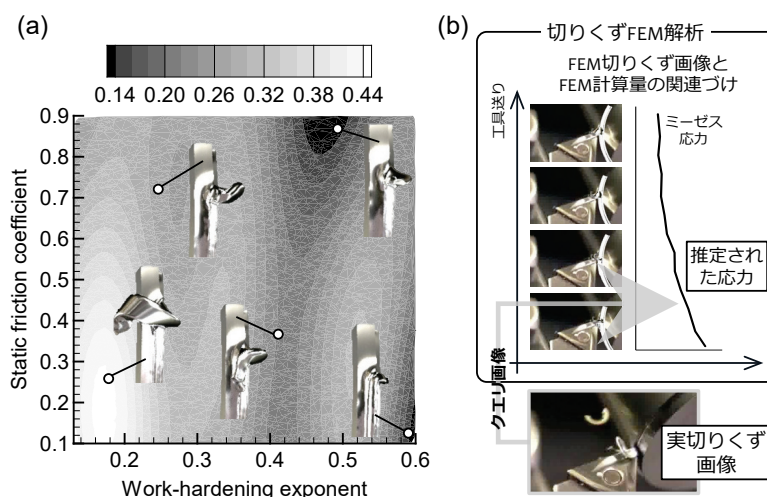


図3 (a)切りくず類似度の応答曲面と(b)DNN画像データベース

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Misaka Takashi, Herwan Jonny, Ogura Ichiro, Furukawa Yoshiyuki	4. 巻 104
2. 論文標題 Turning Process Monitoring with Deep Neural Network Trained by FEM Simulation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Procedia CIRP	6. 最初と最後の頁 376 ~ 380
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.procir.2021.11.063	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Misaka Takashi	4. 巻 143
2. 論文標題 Estimation of Vortex-Induced Vibration Based on Observed Wakes Using Computational Fluid Dynamics-Trained Deep Neural Network	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ASME, Journal of Fluids Engineering	6. 最初と最後の頁 104501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/1.4050974	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 TANAKA Hiroto, MISAKA Takashi, FUJITA Koji, NAGAI Hiroki	4. 巻 87
2. 論文標題 Thermal state estimation based on Assisted Ensemble Kalman Filter	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 00010-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.21-00010	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 三坂 孝志	4. 巻 31
2. 論文標題 実画像を用いた特徴情報に基づくデータ同化	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 応用数理	6. 最初と最後の頁 19 ~ 22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11540/bjsiam.31.2_19	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 三坂 孝志	4. 巻 41
2. 論文標題 データ同化によるサイバーフィジカル同期	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 可視化情報学会誌	6. 最初と最後の頁 99 ~ 100
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 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 大林 茂、千葉 一永、下山 幸治、三坂 孝志	4. 巻 56
2. 論文標題 機械工学とインフォマティクス (設計情報学, 代替モデリング, データ同化からの概観)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 設計工学	6. 最初と最後の頁 539 ~ 544
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 無
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 三坂 孝志、大林 茂	4. 巻 73
2. 論文標題 データ同化技術の工学設計への応用 - その1 -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 機械の研究	6. 最初と最後の頁 329 ~ 333
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 無
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 三坂 孝志、大林 茂	4. 巻 73
2. 論文標題 データ同化技術の工学設計への応用 - その2 -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 機械の研究	6. 最初と最後の頁 413 ~ 421
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 無
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 Misaka Takashi, Herwan Jonny, Kano Seisuke, Sawada Hiroyuki, Furukawa Yoshiyuki	4. 巻 107
2. 論文標題 Deep neural network-based cost function for metal cutting data assimilation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 385 ~ 398
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00170-020-04984-w	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 Misaka Takashi	4. 巻 62
2. 論文標題 Image-based fluid data assimilation with deep neural network	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Structural and Multidisciplinary Optimization	6. 最初と最後の頁 805 ~ 814
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00158-020-02537-z	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 Hokpunna Arpiruk, Misaka Takashi, Obayashi Shigeru, Wongwises Somchai, Manhart Michael	4. 巻 423
2. 論文標題 Finite surface discretization for incompressible Navier-Stokes equations and coupled conservation laws	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 109790 ~ 109790
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2020.109790	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 該当する

1. 著者名 Sawada Shoko, Itoh Takayuki, Misaka Takashi, Obayashi Shigeru, Czauderna Tobias, Stephens Kingsley	4. 巻 3
2. 論文標題 Streamline pair selection for comparative flow field visualization	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s42492-020-00056-8	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 該当する

1. 著者名 NAKAZAWA Takashi、MISAKA Takashi、POIGNARD Clair	4. 巻 16
2. 論文標題 Shape optimization for suppressing coherent structure of two-dimensional open cavity flow	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁 2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jfst.2021jfst0002	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 該当する

1. 著者名 三坂孝志	4. 巻 56
2. 論文標題 解析と実験をつなぐデータ同化	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本設計工学会誌『設計工学』	6. 最初と最後の頁 125 ~ 132
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 無
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13件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 三坂 孝志
2. 発表標題 Leveraging ensemble-based data assimilation: particle simulation example
3. 学会等名 RIMS Workshop: Mathematical methods for the studies of flow, shape, and dynamics (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三坂 孝志
2. 発表標題 DNNを用いた数値シミュレーションと計測データの連携
3. 学会等名 日本応用数理学会 数理設計研究部会 第23回研究集会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三坂 孝志
2. 発表標題 データ同化の基礎と流体応用の考え方
3. 学会等名 混相流レクチャーシリーズ46 情報科学の混相流への適用 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三坂 孝志、Herwan Jonny、小倉 一朗、古川 慈之
2. 発表標題 Turning Process Monitoring with Deep Neural Network Trained by FEM Simulation
3. 学会等名 54th CIRP Conference on Manufacturing Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奈良 祥太郎、高橋 俊、三坂 孝志、杉山 直輝、蔵本 結樹、川本 裕樹、小原 昭、菊池 飛鳥、落合 成行、野原 徹雄、大角 和生、石川 直也
2. 発表標題 DDM-アンサンブルカルマンフィルタによる3次元粒子分布の高精度予測
3. 学会等名 日本機械学会 2021年度 年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永井 大樹、田中 寛人、三坂 孝志
2. 発表標題 Establishment of High-accuracy Analysis Method of Spacecraft Thermal System using Data Assimilation (3)
3. 学会等名 Eighteenth International Conference on Flow Dynamics (ICFD2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 大林 茂、三坂 孝志、菊地 亮太、焼野 藍子
2. 発表標題 Digital-Twin Fluid Engineering
3. 学会等名 5th IEEE International Conference on Cybernetics (CYBCONF) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中澤嵩, 三坂孝志
2. 発表標題 2次元Jet-In-Cross-Flowの時間変動場制御を目的とした形状最適化
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三坂孝志
2. 発表標題 深層学習を用いた実画像からの渦励振動の推定
3. 学会等名 流体力学講演会 / 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウムオンライン2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三坂孝志
2. 発表標題 深層学習を用いた実画像からの渦励振動の推定
3. 学会等名 大阪大学MMDSワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三坂孝志
2. 発表標題 画像ベースのあいまいデータ同化による複雑現象へのアプローチ
3. 学会等名 実験家のためのデータ駆動科学オンラインセミナー（招待講演）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 大林 茂、千葉 一永、三坂 孝志、阿部 圭晃、村井 祐一	4. 発行年 2021年
2. 出版社 日経印刷株式会社	5. 総ページ数 670
3. 書名 研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野，担当：2.1.18 計算工学	

1. 著者名 大林 茂、三坂 孝志、加藤 博司、菊地 亮太	4. 発行年 2021年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 288
3. 書名 データ同化流体科学 流動現象のデジタルツイン	

〔産業財産権〕

〔その他〕

産業技術総合研究所・個人ウェブサイト <a href="https://staff.aist.go.jp/takashi.misaka/Researchmap">https://staff.aist.go.jp/takashi.misaka/Researchmap</a> <a href="https://researchmap.jp/takashi.misaka">https://researchmap.jp/takashi.misaka</a>
--

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
研究分担者	古川 慈之  (Furukawa Yoshiyuki)  (20392657)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・チーム長    (82626)	
研究分担者	HERWAN JONNY  (Herwan Jonny)  (80868969)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究員    (82626)	

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