

# 微細凹凸を認識するためのロボットビジョンシステムの開発

湯川 千尋・小田 哲也\*・豊島 恭平・長井 祐樹

岡山理科大学大学院工学研究科情報工学科

\*岡山理科大学工学部情報工学科

(2022年10月31日受付、2022年12月5日受理)

## 1. はじめに

製造業では、Industry 4.0により、生産工程の効率化・高速化を目的としたセンサモジュールや AI を用いた自動化が進められている。そのため、一手法として、機械による任意の対象表面の微細凹凸の測定が検討されている。しかし、微細凹凸表面の測定には多くの時間を要し、計測機械の導入コストが高いなどの問題が存在する。

また、微細な凹凸に関わる加工技術・計測技術の多くは、長年の経験で身につけた職人による手作業で行われてきた歴史がある。さらに、微細凹凸表面に関連する技術は、産業界の発展のためにも次世代への技術継承が必要不可欠である。職人の技術習得には多大な時間と経験が必要になるため、若い世代からの継続的な雇用が求められている。しかし、現代の問題として職人の人材不足が存在する。職人になりたいという人が少ないため、若者を雇うことが難しいことで、慢性的な人手不足に陥っており、技術継承が難しくなっている。

一方、職人の技術は、現在の機械技術や制御技術を応用することで、技術的に再現することが可能である。また、匠の技を知的アルゴリズムで模倣することで、ロボットによる自動化が可能になると考えられている。現在、産業において検査・検品の自動化のためにロボットビジョンを用いた検査・検品の研究が盛んになっている。

そこで本稿では、任意の表面上の微細な凹凸を認識するための知的アルゴリズムに基づくロボットビジョンシステムを提案する。提案システムは、安価で迅速な計測が可能であり、自律的に微小凹凸を認識することができるため、生産プロセスの効率化・自動化を図ることができる。

本稿の構成は以下の通りである。第2章では、提案システムの概要を述べる。第3章では、提案システムの実験結果について述べる。最後に、第4章で結論と今後の課題を述べる。

## 2. 提案システム

### 2.1 システム概要

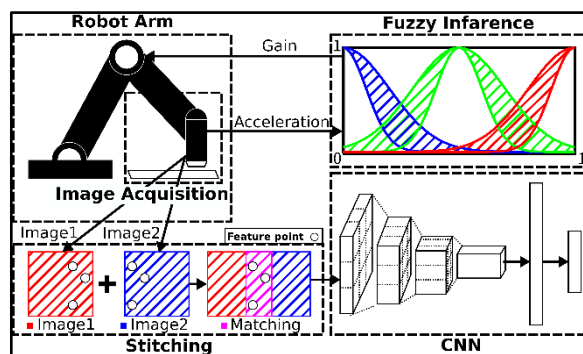


図1 提案システム

図1に、任意の微細凹凸表面を認識するためのロボットビジョンシステムを示す。提案システムは、4自由度を用いて様々な角度から画像を撮像することを考慮する。ロボットアームには、ファジィ推論に基づく振動抑制手法を提案し、微細凹凸の認識率を向上させる。また、ロボットアームの端部には微細凹凸表面を撮像するためのデジタル顕微鏡が取り付けられている。電子顕微鏡で撮像した画像は、スティッチングにより1枚の高解像度画像に繋ぎ合わせる。そして、スティッチングされた画像は、Conventional Neural Network (CNN) によって物体検出を行う。

### 2.2 振動抑制手法

ロボットアームの動作精度は非常に低い。そこで、ロボットアームの振動を抑制し、認識率を向上させる。本研究では、センシング、ファジィ推論、サーボモータ制御によってロボットアームの振動を抑制し、微細凹凸の認識率を向上させる手法を提案する。センシングは、ロボットアームの端部に取り付けられた加速度センサ GY-521 から X 軸、Y 軸、Z 軸の加速度値をシリアル通信で Jetson に送信する。ファジィ推論では、加速度の誤差とロボットアームの動作角度の値が入力される。加速度の誤差は X 軸、Y 軸、Z 軸の 2 乗平均誤差であり、真値は現在までに加速度センサから受け

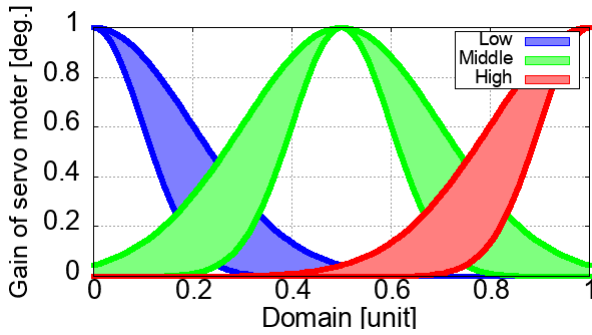


図2 IT2FSのメンバーシップ関数

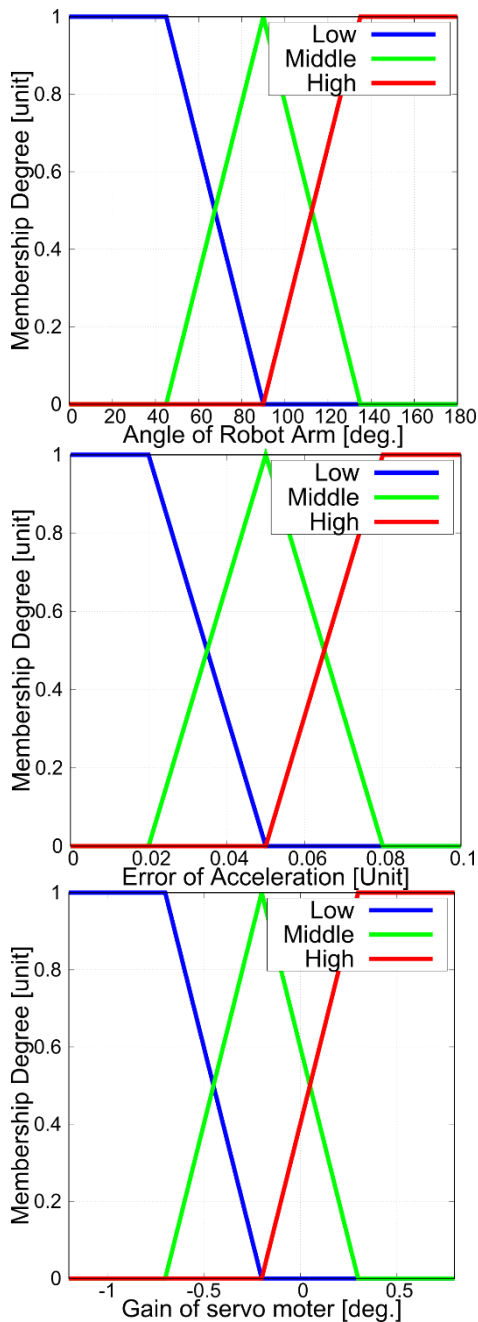


図3 T1FSのメンバーシップ関数

取った加速度の平均値である。ファジィ推論は Type-1 Fuzzy Set (T1FS) と Interval Type-2 Fuzzy Set (IT2FS) [1] を使用し、IT2FS の出力は EIASC (Enhanced Iterative Algorithm with Stop Condition) [2] によって出力の近似解で決定される。ファジィ推論の出力はサーボモータのゲインである。IT2FS のメンバーシップ関数を図 2 に、T1FS のメンバーシップ関数を図 3 に示す。また、表 1 にファジィルールベースを示す。ゲインはサーボ機構の応答性に影響する。サーボモータ制御はファジィ推論出力のゲインをもとに角度を決定する。振動抑制方式では、振動を抑制するために、開始位置から指定した角度までゲインを徐々に下げていき、ロボットアームのゲインを開始位置から徐々に小さくしていく。

表1 ファジィルールベース

動作角度	加速度の誤差	サーボモータのゲイン
High	High	High
High	Middle	High
High	Low	Low
Middle	High	High
Middle	Middle	Middle
Middle	Low	Low
Low	High	Middle
Low	Middle	Middle
Low	High	Low

2.3 ステッチング

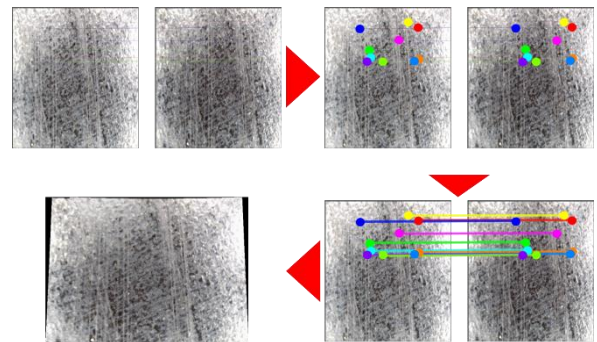


図4 ステッチングのイメージ

ステッチングでは、電子顕微鏡により複数の画像から特徴点を検出し、その特徴点に基づいてマッチングを行う。ステッチングのイメージを図 4 に示す。各画像をステッチングすることで取得物体全体の 1 枚の高解像度画像を得ることが可能である。ステッチングによって生成された 1 枚の画像を認識することで、対象表面の微細な凹凸の重複認識を防ぐことができ、物体検出の予測時間を短縮することができる。

## 2.4 物体検出

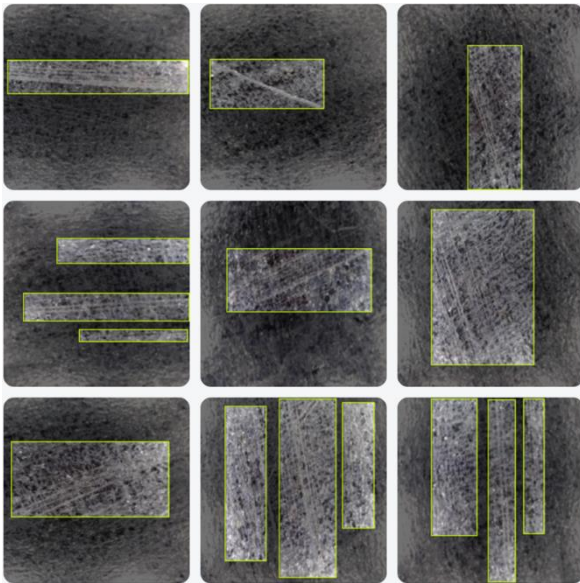


図5 データセット

提案システムでは、YOLOv5により表面の微細な凹凸を認識する。物体検出とクラス分類を行うことができるディープラーニングモデルを使用する。モデルの学習には、微細な凹凸を含む大量の画像が必要である。しかし、微細な凹凸を処理する工場などの生産現場は少ないため、モデル学習に使用できる画像はごくわずかだと考えられる。そこで、YOLOv5の学習用に微小凹凸を含む画像のデータセットを作成する。データセットを図5に示す。また、微小凹凸の認識率を向上させ、学習時間を短縮するために、既に別の問題で学習させたモデルを転用する手法である転移学習[3]を検討する。

## 3. 実験結果

### 3.1 実験環境

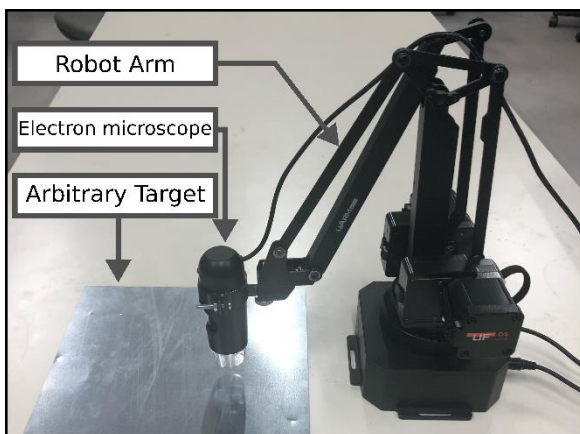


図6 実験環境

実験環境を図6に示す。実験は金属表面に対して行う。ロボットアームはuArm Swift Pro Standard 4 Degree of Freedomを、顕微鏡は5MP Digital Microscope USB 2.0を使用した。

### 3.2 振動抑制の実験結果

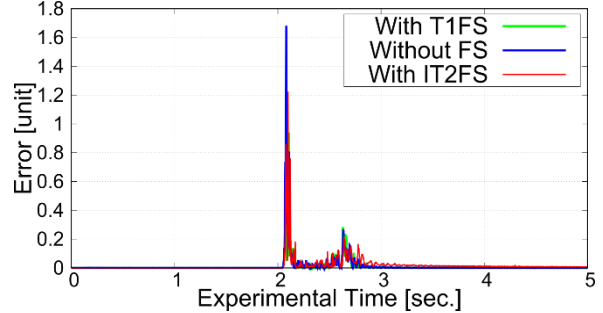


図7 振動抑制結果

本実験では、ファジィ推論を用いない場合と、ファジィ推論を用いた場合のロボットアームの振動低減を比較する。また、T1FSとIT2FSの比較も行う。ファジィ推論は、表1のファジィ規則ベースと、図2、図3の各メンバーシップ関数を用いている。振動低減実験では、測定開始後約2[s]でサーボモータを90[deg]動かした。振動低減の結果を図7に示す。2[sec.]付近の誤差は動き始めの振動である。また、2.5[sec.]付近の誤差は、画像の揺れの原因になる振動である。2.5[sec.]付近の加速度はIT2FSにより低減され、ファジィ推論を用いない場合に比べて誤差が小さくなっていることがわかる。また、IT2FSはT1FSよりも性能が良いことがわかる。

### 3.3 スティッチングの実験結果

As-Projective-As-Possible (APAP) [4]とElastic Local Alignment (ELA) [5]のスティッチング結果を比較する。金属表面の微細な凹凸を撮影した10組の画像を用いて、スティッチングを行う。スティッチングの結果を図8に示す。APAPは8枚スティッチングができ、ELAではスティッチングができなかった。ELAと一部のAPAPでは、スティッチングに失敗しているものがある。これは、特徴点が少なく、特徴点同士のマッチングができなかったためだと考えられる。

### 3.4 物体検出の実験結果

物体検出実験では、金属表面の微細な凹凸をターゲットとして認識する。90個の学習データと10個のテストデータを用い、また、YOLOv5の学習には転移学習を行った。学習結果を図9に示す。物体検出の評価指標であるmean Average Precision50 (mAP50)はアノ

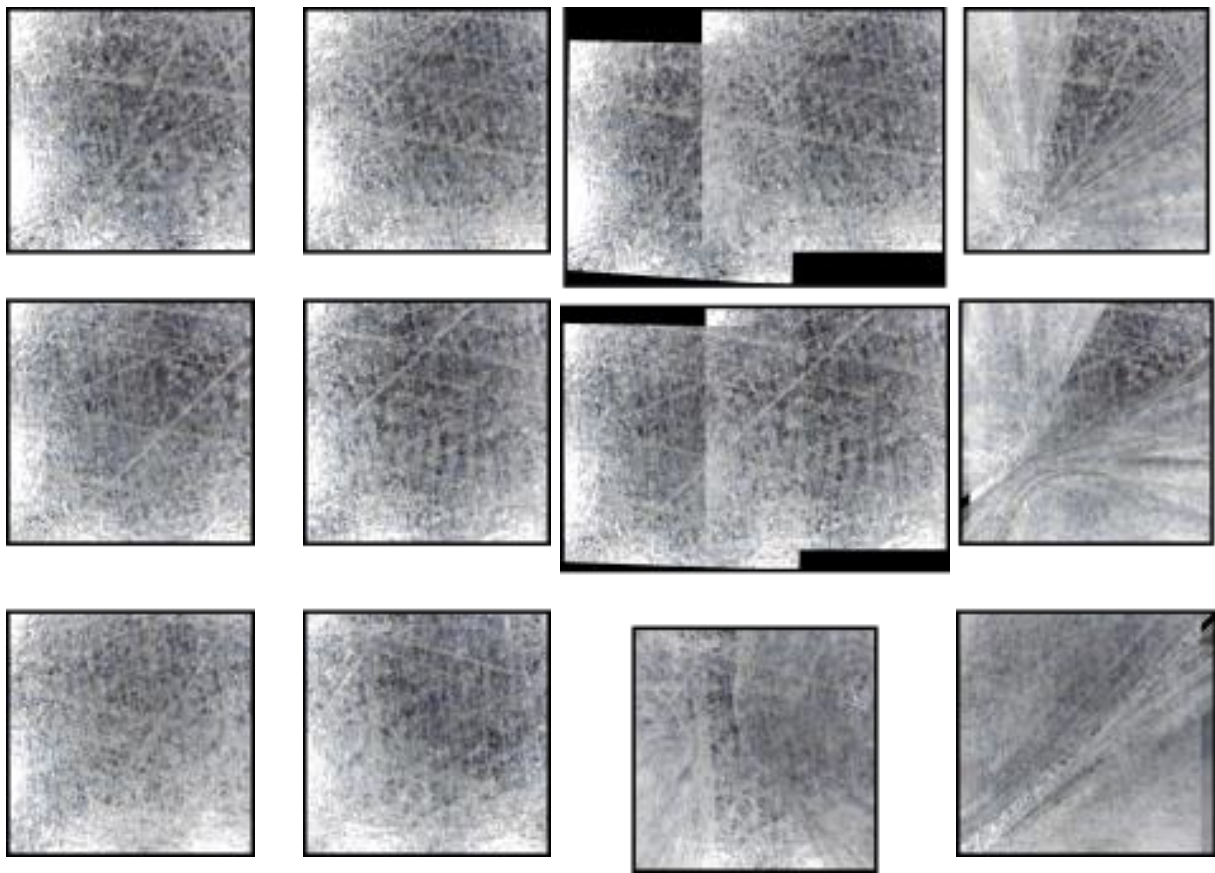


図 8(a) 元画像 1

図 8(b) 元画像 2

図 8(c) APAP 結果

図 8(d) ELA 結果

図 8 スティッチングの実験結果

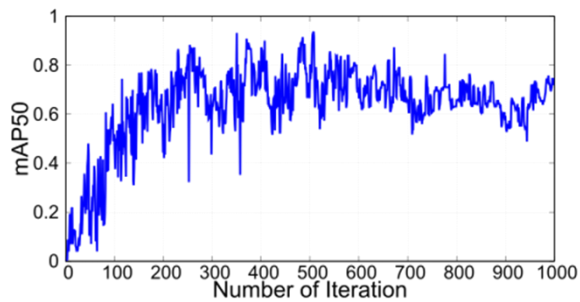


図 9 微細凹凸の学習結果

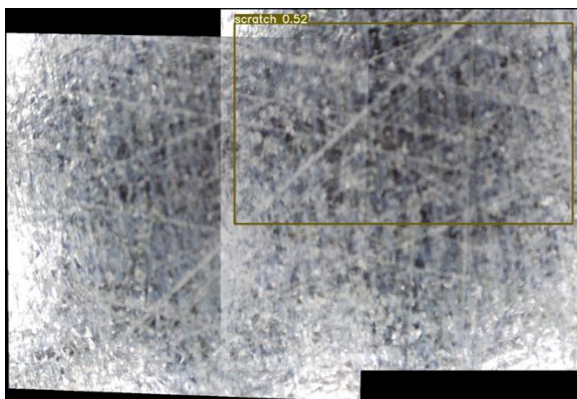


図 10 微細凹凸の検出結果

テーションデータと認識矩形の重なり具合で決まり、50 [%] 以上重なりがあれば、検出できているとみなす。微小凹凸の mAP50 は最大で 93.86 [%] である。また、500 回程度の繰り返しで最大値となり、その後減少した。これは学習データ不足によるオーバーフィッティングが原因であると考えられる。図 10 に、APAP を用いたスティッチング画像の微小凹凸の認識結果を示す。提案システムでは、電子顕微鏡で撮影した各画像では認識できないエッジも、スティッチングを行うことで認識することができる。

#### 4. まとめ

本論文では、任意の表面上の微小凹凸を認識するための知的アルゴリズムに基づくロボットビジョンシステムを提案した。実験により、提案システムは IT2FS を用いることにより、サーボモータの振動を低減できることを示した。また、YOLOv5 を用いて対象物体の表面を電子顕微鏡で撮影した画像から微細凹凸を認識することができる。今後の課題としては、転移学習によって認識率を向上させていく予定である。

## 参考文献

- 1) Liang, et. al., "Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems: Theory and Design", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 8, No. 5, pp. 535-550, 2000.
- 2) W. Dongrui, et. al., "Comparison and Practical Implementation of Type-reduction Algorithms for Type-2 Fuzzy Sets and Systems.", 2011 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2011), pp. 2131-2138.
- 3) J. Yosinski, et. al., "How Transferable are Features in Deep Neural Networks?.", arXiv preprint arXiv:1411.1792, 2014.
- 4) Zaragoza, et. al., "As-projective-as-possible image stitching with moving DLT.", Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, pp. 2339-2346, 2013.
- 5) J. Li, et. al., "Parallax-tolerant image stitching based on robust elastic warping.", IEEE Transactions on multimedia, Vol. 20, No. 7, pp. 1672-1687, 2017.

# Design of Robot Vision for Micro-roughness Recognition

Chihiro Yukawa, Tetsuya Oda\*, Kyohei Toyoshima and Yuki Nagai

*Graduate school of Engineering,*

*\*Department of Information and Computer Engineering,*

*Okayama University of Science,*

*1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama 700-0005, Japan*

(Received October 31, 2022; accepted December 5, 2022)

The goals of Industry 4.0 are to achieve a higher level of operational efficiency and productivity, as well as a higher level of automatization. Also, the measurement at the nano-level on the surface of the target object by a machine has been considered for automation, but there are problems such as the need for high cost and a large amount of time for measurement. In this paper, we propose a robot vision system based on an intelligent algorithm for recognizing micro-roughness on arbitrary surfaces. The proposed system is inexpensive, make quick measurement and is capable of autonomously recognizing micro-roughness to improve the efficiency of production processes.

**Keywords:** Robot Vision; Fuzzy Inference; Image Stitching; Deep Neural Network.