

## 1. 緒論

### 1.1 レーザ加工の焦点調整

近年、レーザー加工は高精度な切断や彫刻を可能とする加工技術として注目されている。レーザー加工は、レーザー光線を照射し、加工物の所定部分を融解及び蒸発させる加工法である。加工品質や効率は、レーザー光の焦点調整精度に大きく依存する。しかしながら、多くのレーザー加工機が手動による焦点調整に依存しており、調整作業には時間と熟練を要する。

Xuら<sup>1)</sup>は、レーザー光を試料に照射し、回折パターンを解析する画像処理を用いた焦点検出手法を提案している。また、Polatら<sup>2)</sup>は、レーザー集光点の回折パターン画像を、“畳み込みニューラルネットワーク”で分類することにより、焦点位置を特定する手法を報告している。これらは高い精度を誇る検出手法である一方、高精度な光学系や高性能GPU、大容量データ（膨大な画像データセット）を必要とする。

### 1.2 レーザ加工における熱加工

レーザー加工には、穴あけ、切断、トリミングなどの除去加工から、溶接や肉盛りなどの付着加工などの多様な種類がある。

レーザーを材料表面に照射すると、照射部分は光エネルギーを吸収してその温度が上昇し、格子活動が活発になる。温度が融点以上に達すると、材料は熔融・蒸発し、熔融池内では気泡崩壊によって液体状態で飛散し除去される。十分に強いレーザー光を照射された部分は、昇華によって除去される。これが一般的なレーザー加工原理であり、レーザー熱加工と呼ばれる。

### 1.3 レーザの種類

レーザーは、発振媒体（レーザーの光を生み出す物質）によって「気体レーザー」「固体レーザー」「半導体レーザー」「液体レーザー」の4種類に分類される。それぞれの特徴は以下の通りである。

気体レーザーは、気体を媒質とするレーザーであり、出力が安定していて大面積の加工に向いている。代表的なものとして、炭酸ガス（CO<sub>2</sub>）レーザーとエキシマレーザーがある。固体レーザーでは達成できない波長域でのレーザー発振が可能であり、波長変換にも適している。CO<sub>2</sub>レーザーは高出力が得られ、エキシマレーザーは短波長で高精細な加工が可能である。また、装置が比較的簡単な構造でありながら、高出力エネルギーや高平均出力の発振が可能であるという利点を持つ。

固体レーザーは、固体の結晶やガラスを媒質とするレーザーであり、高出力かつ高エネルギー密度を持つことが特徴である。特に微細加工や精密マーキングに適しており、YAGレーザーはCW（連続発振）とパルス発振の両方が可能である。これにより、幅広い加工用途に対応できる。

半導体レーザー（ダイオードレーザー）は、半導体材料を媒質とするレーザーであり、最も小型で省エネルギーである。発振効率が高く、電流を流すだけで高効率に発振するため、シンプルな駆動

で動作する。さらに、発振波長がある程度可変であり、直接変調（高速 ON/OFF）が可能なため光通信やバーコードスキャナなどの応用にも適している。小型で持ち運びが容易であり、量産性や信頼性も高いため、幅広い用途で使用されている。

液体レーザは、有機染料を溶かした溶液を媒質とするレーザであり、発振波長を可変にできることが特徴である。また、小型で発振が比較的容易なため、科学研究や分光分析などの分野で活用されることが多い。このように、レーザはそれぞれの媒質によって特性が異なり、用途に応じて適切な種類が選択される。

#### 1.4 レーザ加工の特徴

レーザ光は、可干渉性と指向性という二つの大きな特徴を持つ。

可干渉性は、レーザ光の波の位相がそろっており、干渉現象を引き起こしやすい性質のことである。可干渉性によって、レーザのエネルギーが特定の位相で揃っているため、非常に小さなスポットサイズ（焦点径）を実現できる。これにより、エネルギーを小さな領域に集中させやすく、金属やセラミックスのような硬い材料も効率的に加工できる。

指向性は、レーザ光が特定の方向に強く進む性質のことである。普通の光源（白熱電球やLED）は全方向に光を放出するが、レーザ光はほぼ平行なビームとして進む。

#### 1.5 研究目的

市販のレーザ彫刻機には、2つの赤色レーザの交点から焦点位置を確認する仕組みが搭載されているものがある。これは、あくまで手動調整を補助する仕組みであり、自動化に至っていない。本研究の目的は、赤色レーザの交点を撮影し、AIによる画像分類を適用することで焦点距離を判断することである。これにより、複雑な形状の対象物に対するレーザ加工が自動化できると期待される。本研究では、クラウドベースで画像分類するサービス（Azure AI Custom Vision）を使用しており、計算コストが低く、低スペックPCでも実現可能である。

## 2. 実験装置と焦点距離の異常検出手法

### 2.1 実験装置

図1に実験装置の概要、表1に実験条件を示す。この実験装置では、タイミングベルト駆動の1軸ステージ（オリジナルマインド社製、L80）によりステンレス板を上下に往復させながら、レーザ彫刻機（LaserBird社製、LaserPecker 4）から照射される焦点距離の目安（赤色レーザの照射点）を動画で撮影する。撮影には、USB顕微鏡（サンワサプライ社製、400-CAM106）を使用し、撮影角度は水平面に対して約45°とした。この顕微鏡は4Kの高画質に対応したデジタル顕微鏡であり、最大390倍まで観察可能である。レーザ彫刻機の焦点距離は150mmであり、図2のように2点の照射点が重なるような位置で焦点が合う。レーザ照射の対象とする材料は、汎用性が高い金属材料とし、一般的なステンレス材料であるSUS304とした。

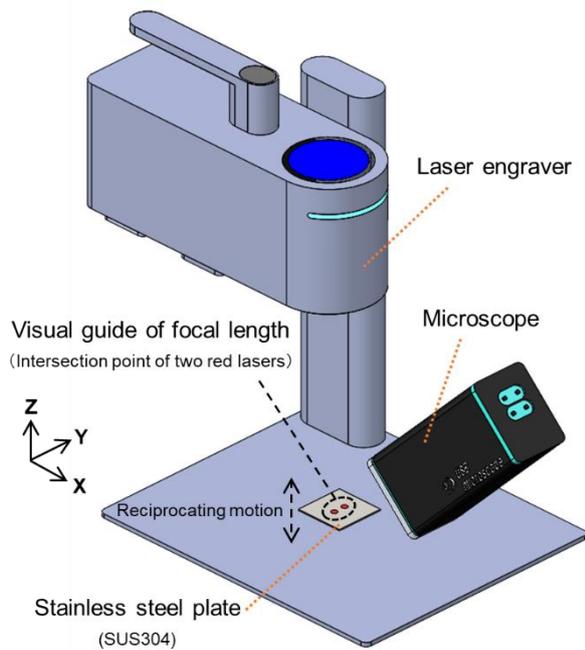


図1 実験装置の概要

表1 実験条件

Target material	SUS304
Irradiation laser type	Red diode laser
Focal point distance	150 mm
Oscillation form	Continuous wave

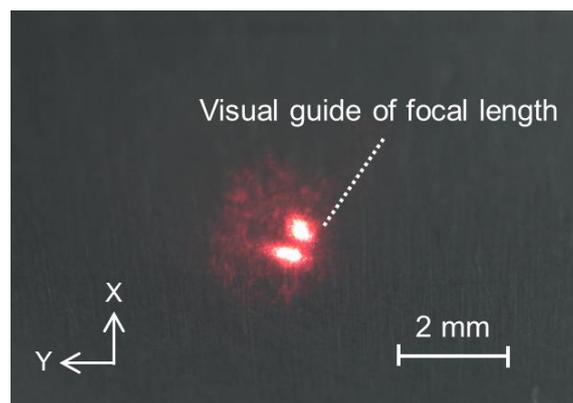


図2 焦点位置における赤色レーザーの交点

## 2.2 焦点距離の異常検出手法

本研究では、Microsoft Azure が提供する機械学習サービスの Azure AI Custom Vision を使用し、画像分類することで焦点距離の異常を判断する。

Azure AI Custom Vision による画像分類について、ねじのサンプルデータを例にとって説明する。図3は、異常なねじ画像である「Bad」画像を23枚、正常なねじ画像である「Good」画像を320枚として構築した画像分類モデルである。さらに、ねじの画像を図3のモデルによって判定した結果を図4に示す。

図3を見ると、Precision（適合率）、Recall（再現率）、AP（適合率と再現率のバランスを取った指標）すべてがハイスコアであり、概ね良好となっている。しかし、図中の赤い点線の枠内における Image count をクリックすると、画像が50枚以上必要であるとの注意喚起が表示される。要するに、「Bad」画像が少ないという注意喚起を受けており、最低でも50枚の画像を要する。図

4(b)の結果は、異常なねじの画像を 65 %の確率で不良と判定している。このように、Azure AI Custom Vision 上で構築した画像分類モデルによって不良を検出できる。本研究では、実用上を考慮して Good 及び Bad の画像枚数を 50 枚とする。Azure AI Custom Vision の内部構造は明示されていないものの、Microsoft の公式ドキュメントや関連研究から、画像分類・物体検出においては畳み込みニューラルネットワーク (CNN: Convolutional Neural Network) を基盤としたディープラーニングモデルが採用されていると推察される。

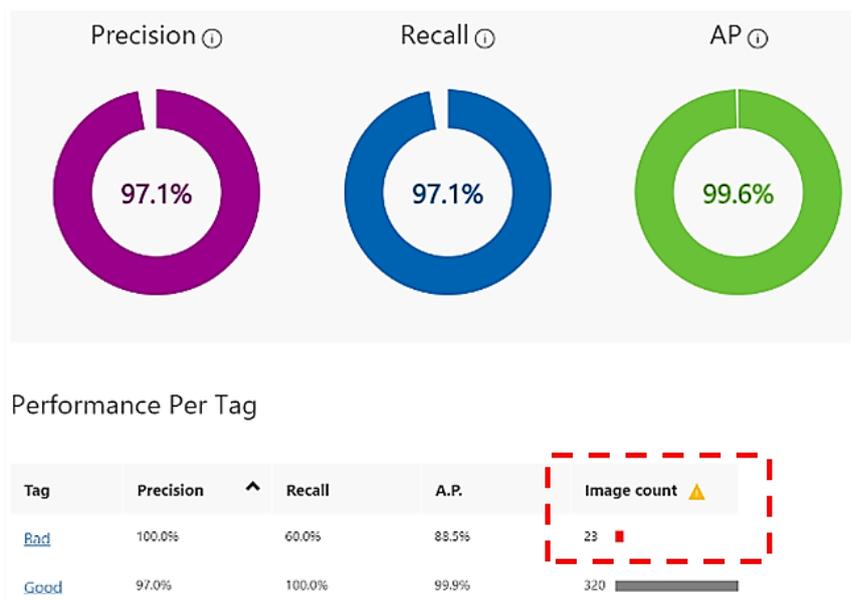
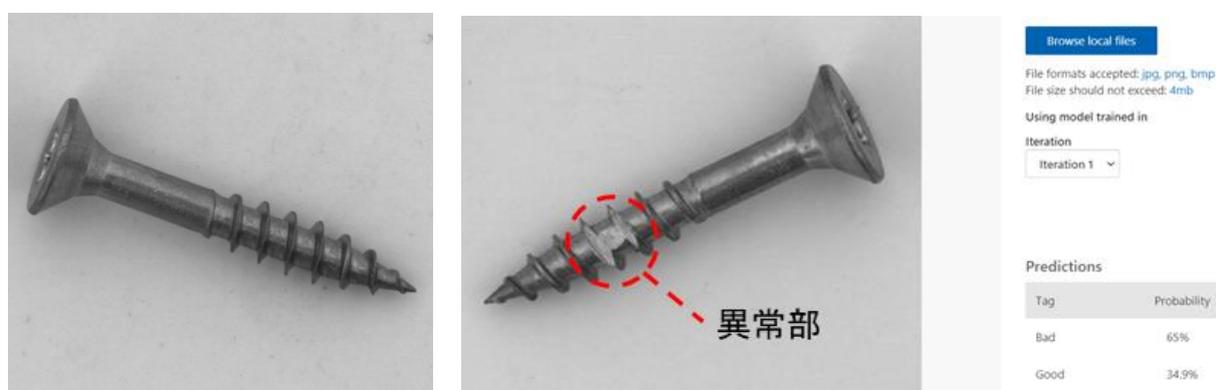


図 3 画像分類モデルの評価結果



(a) 正常なねじの画像 (Good)

(b) 異常なねじの画像 (Bad) の判定結果

図 4 ねじの画像と画像分類モデルによる判定結果

レーザ彫刻機 (LaserPecker 4) は、電動昇降スタンドの上昇ボタンおよび下降ボタンを操作し、ユーザーが彫刻対象物表面を焦点位置に合わせる仕様である。各ボタンは、短押しで 0.5 mm 上昇・下降する。したがって、レーザ彫刻機の取扱いにおいては、焦点距離の精度が実質的に 0.5 mm となる。よって、本研究では焦点位置から  $\pm 0.5$  mm の範囲を焦点位置が合っているものとする。また、焦点位置  $+0.5$  mm  $\sim +10.0$  mm および焦点位置  $-0.5$  mm  $\sim -10.0$  mm の範囲を焦点位置が合っていないものとして扱う。本研究における焦点距離の異常検出手順を以下に示す。

### [異常検出手順]

- ① 図1の装置で図5(a)のように板を往復させ、正常な焦点距離の画像 (In-focus) を取得する。  
※往復させる際の速度は0.04 mm/sとし、1往復あたり50枚の画像を抽出する。
- ② 図5(b)のように+側と-側で板を往復させ、異常な焦点距離の画像 (Out-of-focus) を得る。  
※往復速度は0.76 mm/sとし、それぞれ1往復で25枚の画像を抽出して50枚の画像を得る。
- ③ Azure AI Custom Visionへ動画から抽出した画像を送信し、画像分類モデルを構築する。
- ④ 正常な焦点距離あるいは異常な焦点距離の画像をモデルへ入力し、2クラス分類する。
- ⑤ 出力結果に基づき、焦点距離の異常検出可否を検討する。

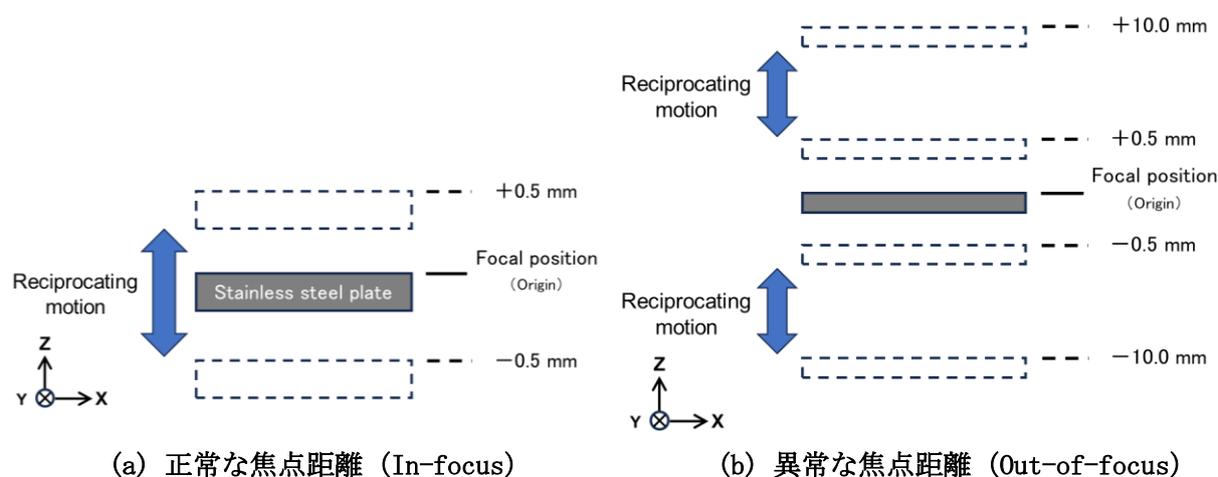


図5 焦点距離における良否の範囲

### 3. 対象物表面の位置が検出率に及ぼす影響

±0.5 mmを正常な焦点距離 (In-focus)、+0.5 mm～+10.0 mmと-0.5 mm～-10.0 mmの範囲を異常な焦点距離 (Out-of-focus) として構築した画像分類モデルの評価結果を図6に示す。また、図6のモデルにより、各対象物表面の位置を分類した結果を図7に示す。

本研究では実用性を考慮し、Quick Training (短時間・低コストでモデルを学習するモード)により、モデルをGeneral (compact) [S1] (汎用用途の軽量版モデル (第1世代))として構築した。Generalはモデルの種類を意味し、一般用途向けの画像分類モデルである。そして、compactは軽量化モデルを意味し、モバイルやエッジデバイスに載せて実行できるように設計されている。S1は、最初の世代のcompact generalモデルである。

図6を見ると、すべての評価項目が100%を示しており、前章の図3よりも良いモデルであるように思われる。しかしながら、データが「ほぼ同じ」あるいは「完全に同じ」場合に生じる過学習の可能性がある。この場合、未知の画像に対して精度が落ちる。100%の精度は、「偏った小さなデータセット上でのみ」達成されている可能性があり、データの多様性不足が懸念される。100%は一見素晴らしく見えるものの、過学習やデータ不足のシグナルであることも多い。

図7より、0 mmにおいて90%以上の確率で正常な焦点距離であると判断されている。また、0 mmの周辺において極端に正常な焦点距離である確率が減少しており、理想的な結果が得られてい

る。したがって、未知の画像に対して精度が落ちる懸念があるものの、焦点距離を判断できていると考えられる。今後の課題としては、汎用性のある学習モデルを構築することが挙げられる。

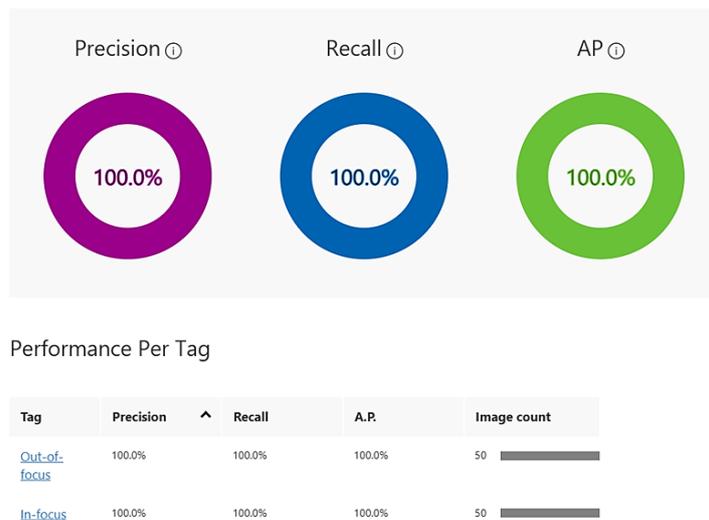


図 6 本研究における画像分類モデルの評価結果

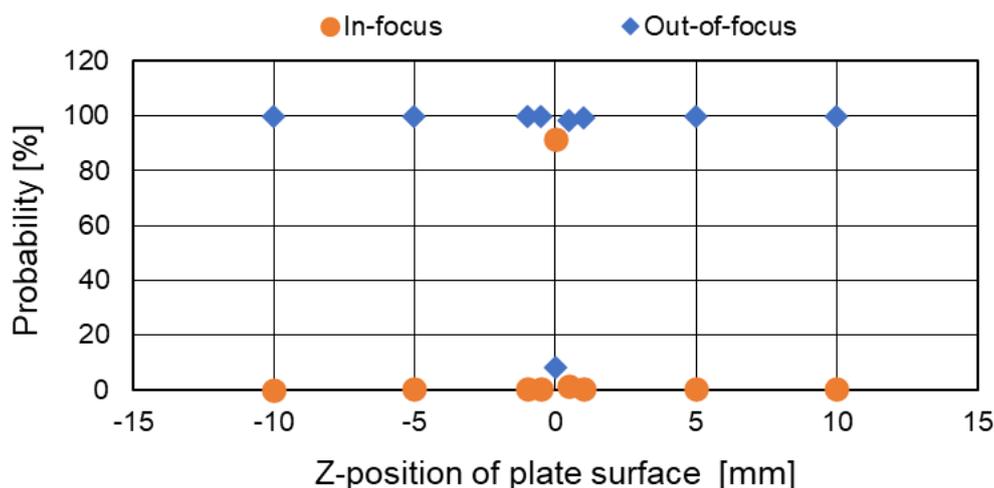


図 7 対象物表面の位置と検出率の関係

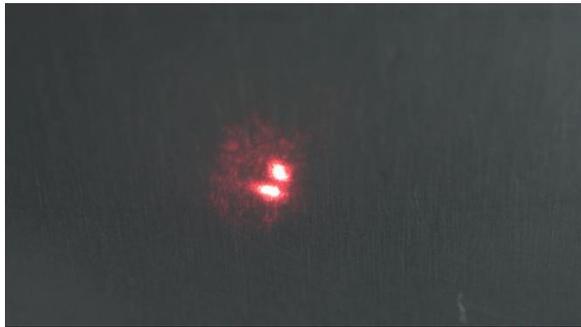
#### 4. オクルージョン解析による画像分類モデルの検証

前章のように焦点距離を判断できた要因をオクルージョン解析に基づいて調査する。オクルージョン解析とは、ディープラーニングのモデルが入力画像のどの部分を重要視して予測をしているかを調べる手法である。オクルージョン解析の感度マップでは、青から赤に近づくほどモデルが注目する領域であることを示している。オクルージョン解析の基本的な考え方を以下に示す。

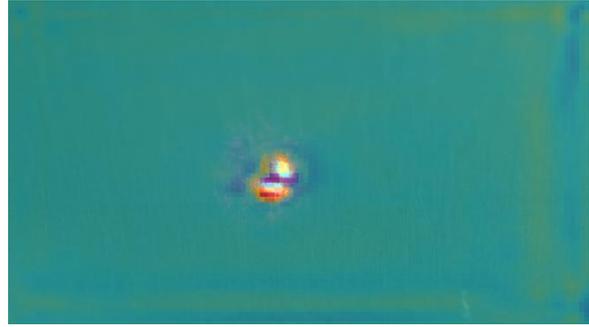
<基本的な考え方>

- ① 入力画像の一部（小さな領域）をマスク（隠す／黒塗りなど）する。
- ② そのマスクを画像の中で少しずつ位置をずらしながら、モデルに入力する。
- ③ マスクしたときのモデルの出力（クラス確率やスコア）の変化を記録する。
- ④ 出力が大きく変化した部分は、モデルにとって重要な領域と判断できる。

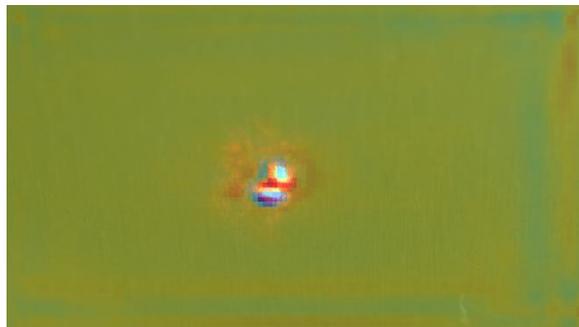
前章の図 6 に示す画像分類モデルに対し、対象物表面の位置が 0 mm、5.0 mm、10.0 mm の画像を入力した際のオクルージョン解析結果をそれぞれ図 8～図 10 に示す。



(a) 入力画像



(b) In-focus のオクルージョン感度マップ

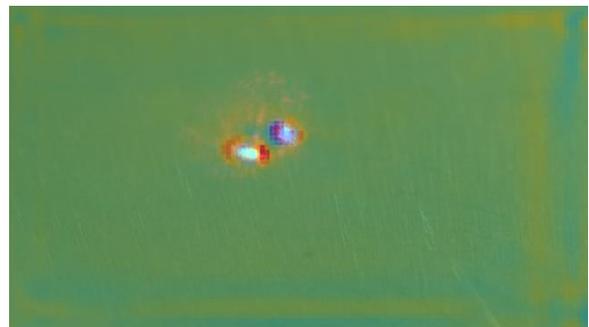


(c) Out-of-focus のオクルージョン感度マップ

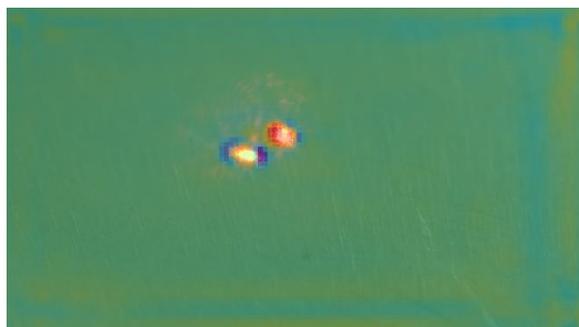
図 8 対象物表面の位置 0 mm のオクルージョン解析結果



(a) 入力画像



(b) In-focus のオクルージョン感度マップ

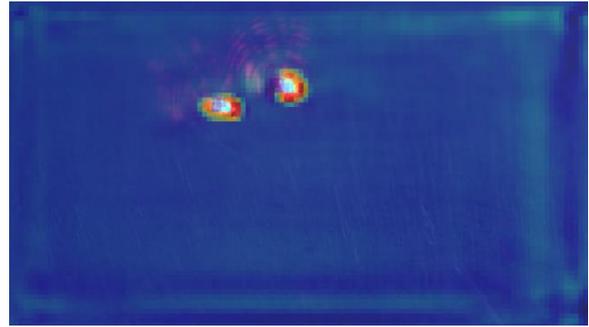


(c) Out-of-focus のオクルージョン感度マップ

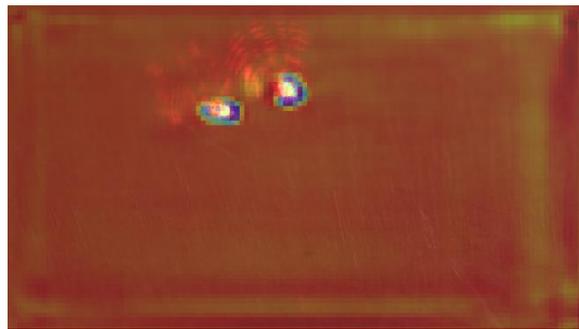
図 9 対象物表面の位置 5.0 mm のオクルージョン解析結果



(a) 入力画像



(b) In-focus のオクルージョン感度マップ



(c) Out-of-focus のオクルージョン感度マップ

図 10 対象物表面の位置 10.0 mm のオクルージョン解析結果

図 8～図 10 に共通する点は、In-focus のオクルージョン感度マップにおいて、モデルが赤色レーザー照射点の境界に注目していることである。本研究で使用しているレーザー彫刻機は、2 つの赤色レーザー照射点の距離が近い位置が焦点位置となる。したがって、画像分類モデルが「2 つのレーザー照射点の距離に着目できていない」ことは、汎用性を高めるうえで今後の鍵となりうる。その一方で、いずれの感度マップも分布が大きく異なっており、この分布の違いが焦点距離を判断する精度に寄与しているものと考えられる。特に、図 10(c)のように、レーザーの照射点以外の対象物表面をモデルが重視していることは特筆すべきである。

本研究の成果として、焦点距離の良否を AI による画像分類で高精度に判定できることが明らかとなった。今後の改善策としては、対象物の材質を変えて学習データを取得し、多様性を持たせることで汎用的な学習モデルの構築を目指すことが挙げられる。対象物の材質としては、市販されているレーザー彫刻機によって加工できる MDF (木質ボード) や紙、革、アクリル等を検討している。

## 5. 結論

以下に本研究の実験条件において得られた結論を示す。

- (1) 本手法は学習データが限定的であり、構築した画像分類モデルに過学習が懸念される。
- (2) AI による画像分類を用いることで、レーザー彫刻機の焦点位置を 90 %以上の確率で判断できる結果を得られた。

## 参考文献

- 1) S. -J. Xu, Y. -Z. Duan, Y. -H. Yu, Z. -N. Tian, and Q. -D. Chen: Machine vision-based high-precision and robust focus detection for femtosecond laser machining, *Optics Express*, Vol. 29, No. 19, pp. 30952-30960, 2021.
- 2) C. Polat, G. N. Yapici, S. Elahi, and P. Elahi: High-precision laser focus positioning of rough surfaces by deep learning, *Optics & Lasers in Engineering*, Vol. 168, Article 107646, 2023.



佐藤 敦  
(さとう あつし)

<略歴>

- 2015年 3月 東京農工大学大学院 工学府 機械システム工学専攻 博士前期課程 修了
- 2015年 4月 J-POWER 電源開発株式会社 入社
- 2017年 9月 J-POWER 電源開発株式会社 退社
- 2017年 10月 東京農工大学大学院 工学府 機械システム工学専攻 博士後期課程 入学
- 2021年 12月 東京農工大学大学院 工学府 機械システム工学専攻 博士後期課程 修了
- 2022年 1月 岐阜工業高等専門学校 着任
- 2025年 3月 岐阜工業高等専門学校 退職
- 2025年 4月 大和大学 着任
- 現在に至る

<受賞歴>

- 2016年 6月 一般社団法人 電気加工学会 論文賞
- 2021年 5月 公益財団法人 マザック財団 優秀論文賞

<研究歴>

- 2010年～2013年 CO<sub>2</sub> ガスを用いた GHTA 溶接によるアルミニウム合金の突合せ
  - 2013年～2015年 電極材料が吸引式工具を用いた領域限定電解めっき膜形成に及ぼす影響
  - 2017年～2018年 電解液吸引工具による3次元形状創成の試み
  - 2018年～2019年 電解液吸引工具を用いた電解放電加工によるガラス加工
  - 2019年～2021年 電解液吸引工具を用いた局部電解めっきによる形状創成の研究
  - 2022年～2024年 永久磁石付属工具を用いた局所電解加工の研究
  - 2024年～現在 火星移住に向けた可視光半導体レーザーによる玄武岩加工の研究
- ※2015年4月から2017年9月まで社会人として働いており、研究活動を中断している。

<勤務校> 学校名 大和大学

住所 〒564-0082 大阪府吹田市片山町2丁目5-1