

# 機械学習による収差補正を用いた高精度フェムト秒レーザー加工

## High-precision femtosecond laser processing using aberration compensation

### based on machine learning

宇都宮大<sup>1</sup> ○長谷川 智士, 早崎 芳夫

Utsunomiya Univ., °Satoshi Hasegawa, Yoshio Hayasaki

E-mail: hasegawa\_s@cc.utsunomiya-u.ac.jp

収差補正のための補償光学は、光波面の検出による収差計測と空間光変調素子(SLM: spatial light modulator)による波面のフィードバック制御から構成される。その補償光学において、波面検出は重要であり、これまでにシャックハルトマン波面センサーや、繰り返し計算法を含む位相回復アルゴリズムが提案されてきた。近年の機械学習アルゴリズムの進展や、GPUを用いた高速計算の実現を背景として、機械学習を用いた波面検出が報告された<sup>1)</sup>。機械学習を用いた方法は、従来型のイメージセンサーを用いた単純な光学系で実装される。また、複数回の撮影や繰り返し計算が不要なため、シングルショット計測が可能である。本研究では、機械学習による収差補正をフェムト秒レーザー加工に応用した<sup>2)</sup>。製造現場に設置されるレーザー加工機は、一般に、外部振動による光学配置のズレや、空気ゆらぎによる外乱を含むため、必ずしも静粛とは言えない。そのような環境下で生じる収差は、集光ビームの品質を著しく劣化させる。よって、収差補正は、レーザー加工の高精度化において重要である。

Fig. 1 は実験光学系を示す。光源から出射されたビーム(中心波長 800nm, パルス幅 50fs, 繰り返し周波数 1kHz)は SLM に照射された。光学系に任意の収差を与えるために SLM に収差画像が表示された。SLM のフーリエ面において、歪んだ集光ビーム(点拡がり関数: PSF)画像がイメージセンサーにより撮影された。その PSF は十分に訓練された畳み込みニューラルネットワーク(CNN)に入力され、収差が予測された。予測収差の位相共役を再び SLM に表示することで収差補正が行われた。補正されたビームは、対物レンズ( $\times 50$ , NA = 0.55)で構成される縮小光学系を介してサンプル(石英ガラス)に照射された。

Fig. 2(a), 2(b)は、それぞれ、収差補正前後での SLM 上の収差画像と、その PSF を示す。収差予測に必要な時間は 36ms であった。補正によって収差は最大で 1/10 に低減された。Fig. 2(c)は、レーザー加工における照射エネルギーに対する作製された構造の直径の縦横比を示す。結果より、本手法を用いたフェムト秒レーザー加工の高精度化が実証された。

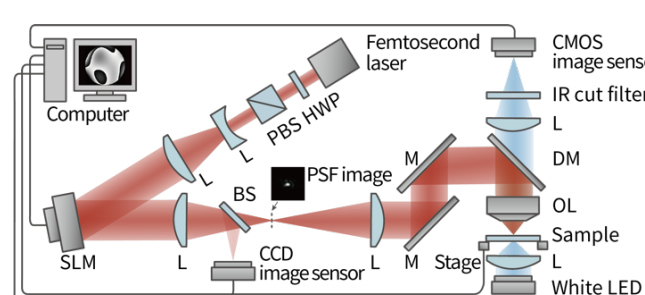


Fig. 1 Experimental setup.

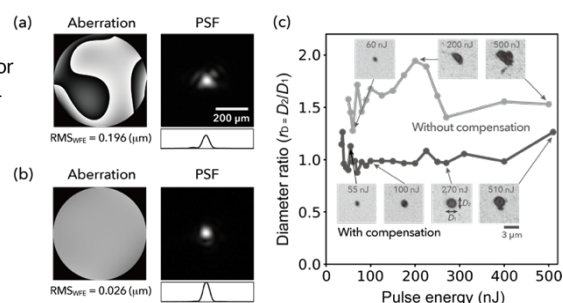


Fig. 2 (a) Aberration and PSF image in the cases (a) without and (b) with the compensation. (c) Diameter ratio of the processed structure without and with the aberration compensation versus the pulse energy.

1) Y. Nishizaki et al., "Deep learning wavefront sensing," Opt. Express, **27**, 240 (2019).

2) S. Hasegawa and Y. Hayasaki: "Femtosecond laser processing with adaptive optics based on convolutional neural network", Opt. Lasers Eng., **141**, 106563 (2021).