

令和2年6月15日

自己修復するレーザー加工装置の開発

新開発したレーザー加工装置は、内的・外的要因によって生じたズレを自動的に修復する機能を備えています。一般に、レーザー加工装置は、工場現場で用いられ、その設置環境は静粛とは言えません。また、装置内の光学部品が加工用高強度レーザー光によって劣化します。空間光制御技術とデジタルフィードバック制御技術を組み合わせる事で、そのような状況下でも、長期的に安定なレーザー加工を実現します。

本研究成果は、6月15日にアメリカ光学会(The Optical Society (OSA))が出版する論文誌 Optics Letters 誌に掲載されます。

ポイント

- 新開発のレーザー加工装置には、レーザービーム形状を自在に整形できる空間光制御技術が実装されている。空間光制御技術とは、1本のレーザービームを1000本に分岐したり、円形ビームを四角形ビームにするなど、レーザー加工の高速化や高効率化に有効な産業技術として利用されつつある。
- そのキーデバイスである液晶空間光変調素子(LCOS-SLM: liquid-crystal spatial light modulator)は、計算機ホログラム(CGH: computer-generated hologram)を表示するために最適化されているが、プロジェクタに使われている液晶ディスプレイと同様にビデオ信号で画像表示される。
- 宇都宮大学オプティクス教育研究センター・情報フォトンクス研究室の早崎教授と長谷川助教、張博士課程大学院生は、ホログラフィックレーザー加工と呼ばれる、計算機ホログラムを用いたレーザー加工の研究を行ってきた。
- 本研究では、IMRA AMERICA 高橋氏、浜松ホトニクス豊田氏と協力して、空間光制御とデジタルフィードバック制御とを統合した、新しいレーザー加工法を開発した。
- その方法は、LCOS-SLM 上に表示された CGH の再生像を加工対象に照射すると同時に、カメラで観測し、その観測画像から CGH を再計算する。これを連続的に繰り返すことで、レーザー加工装置は、外乱による光学系の変動や部品の経年劣化を自動的に修復しながら、ホログラフィックレーザー加工を実行する。
- 現在、戦略的イノベーション創出プログラム(SIP)第2期「光・量子を活用した Society5.0 実現化技術(空間光制御技術に係る研究開発)」の下、製造における国際競争の激化や生産者人口の減少の課題の解決手段の1つである、製造のスマート化に向けて、浜松ホトニクス株式会社に協力して、国内外における空間光制御技術の社会実装を目指している。
- 開発技術は、所望の加工パターンを自動生成するため、空間光変調技術に詳しくないユーザーでも、高速・高効率なホログラフィックレーザー加工を実行可能とし、レーザー加工や光技術に非専門な研究者・技術者や中小企業における生産等、その利用機会の拡大に資する。

(送付枚数：本紙を含め6枚)

<問合せ先>

国立大学法人宇都宮大学

オプティクス教育研究センター

副センター長/教授 早崎 芳夫 (はやさき よしお)

TEL : 028-689-7114

E-mail : hayasaki@cc.utsunomiya-u.ac.jp

発表論文

Honghao Zhang, Satoshi Hasegawa, Hidetomo Takahashi, Haruyoshi Toyoda, Yoshio Hayasaki, "In-system optimization of hologram for high-stability parallel laser processing," *Optics Letters* Vol. 45, No 12 (15 June 2020).

著者所属

Honghao Zhang¹, Satoshi Hasegawa¹, Hidetomo Takahashi², Haruyoshi Toyoda³, Yoshio Hayasaki¹
¹Center for Optical Research and Education (CORE), Utsunomiya University, 7-1-2 Yoto, Utsunomiya, 321-8585, Japan, 宇都宮大学オプティクス教育研究センター
²TMRA America, Inc, Headquarters and Manufacturing, 1044 Woodridge Ave. Ann Arbor, MI 48105, USA, イムラアメリカ株式会社
³Central Research Laboratory, Hamamatsu Photonics K.K. 5000 Hirakuchi, Hamakita-ku, Hamamatsu, Shizuoka 434-8601, Japan, 浜松ホトニクス株式会社

謝辞

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「光・量子を活用したSociety 5.0 実現化技術」(管理法人:QST)の研究テーマの一つ「レーザー加工/空間光制御技術に係る研究開発」の研究課題名「高精度・高スループットレーザー加工のための実用化プラットフォームの構築と運用」によって実施された。

開発したレーザー加工装置の特徴

- 所望の加工パターンを加工光学系内で自動的に生成する。
- 加工パターンは、液晶空間光変調素子(LCOS-SLM)に表示した計算機ホログラフィ(CGH)を用いて任意の形状に設計できる。例えば、強度の異なる複数のビーム、100本の多数ビーム、方形フラットビーム、ドーナツビーム等、事前にホログラムを用意しておけば、命令1つで実行可能である。
- 外部振動や空気ゆらぎなどの外乱による加工システムの変化に対応して安定的にパターンを生成する。その対応できる繰り返しは、LCOS-SLMの速度に依存する。
- 経年劣化やレーザーによるダメージによる加工システム内光学素子の性能劣化を補償して安定的に加工パターンを生成する。
- ユーザーは、加工システム内の個々の光学素子の性能を知る必要は無い。高いユーザビリティを有する。
- ユーザーは、光学の回折理論、フーリエ光学、空間光変調技術、計算機ホログラフィ、それらの計算機プログラミング等の光学的原理の修得やその計算機への実装技術がなくても、空間光制御技術を用いたレーザー加工システムを簡単に利用できる。

研究の詳細説明 (現在、動画作成中、他のデモも実施中)

研究目的

ホログラフィックレーザー加工の加工精度は、SLMに表示されるCGHの再生精度によって決まる。計算機内では、CGHの再生は、回折効率99%以上、再生目標達成度99%と極めて高い。しかし、実際の加工光学系内では、その多様な不完全性により、CGHの再生品質は低下する。その不完全性が、SLMの応答時間よりも十分に遅い変化の静的不完全性、例えば、レーザービームの空間分布、空間光変調素子の位相変調特性の位置依存性、微小なミスアライメント、収差(典型的には、屈折率ミスマッチングに由来する球面収差)等である場合、光学系中でCGHを設計するインシステム最適化により、それらを補正して、高品質な加工パターンを生成した。その成果は、*Opt. Lett.* 34, 22 (2009), *Opt. Lett.* 36, 2943 (2011), *Opt. Express* 24, 18513 (2016)の論文に発表した。しかし、レーザーのポインティングや光強度分布の揺れ、空間光変調素子の特性のゆらぎ、外部振動による光学部品の動き等の動的な不完全性を補償することはできなかった。

本研究では、産業におけるスマート製造を想定し、事前に想定できない、突然の外部動乱に対応でき、より高い堅牢性を加工システム与える動的な不完全性の補償を試みた。

実験システム

図1は実験システムを示す。レーザーパルスは、フェムト秒ファイバレーザー (IMRA America, FCPA μ Jewel D-1000) から中心波長 $\lambda=1041\text{nm}$, 出力 1W, 繰り返し 100kHz, パルス幅 $\sim 550\text{fs}$ で発生され、半波長板(HWP: half-wave plate)と偏光ビームスプリッタ(PBS: polarized beam splitter)で構成される光強度調整器で調整され、ビームエキスパンダー(Thorlabs, GBE02-B)によりビーム直径 12mm にコリメートされ、入射角度 10 度で LCOS-SLM(Hamamatsu Photonics, X10468-03) に入射された。LCOS-SLM に表示された CGH により回折された光は、ビーム縮小光学系と 50 \times 対物レンズ(Mitutoyo, Apo NIR HR)(NA=0.65)により、自動ステージ(AEROTECH, ANT95-50-XY-MP)上に固定された加工サンプル上に照射された。一部の光は、対物レンズ導入前に配置されたビームサンプラーにより取り出され、CCD イメージセンサー (Imaging Source, DMK23U274)(画素数 1600 \times 1200, 画素サイズ 4.4 $\mu\text{m}\times 4.4\mu\text{m}$, 8-bit A/D 変換)上に再生された。その再生像はコンピュータに伝送された。コンピュータは、CGH のインシステム最適化を実行するために、その再生像から CGH を再計算して、LCOS-SLM に表示した。

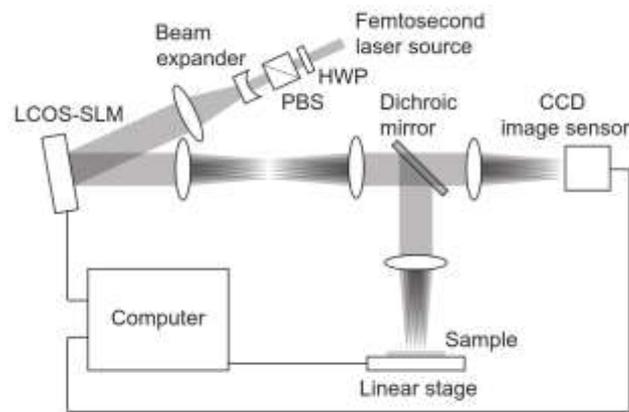


図1 CGH の動的インシステム最適化を有するホログラフィックフェムト秒レーザー加工装置。

図2は、CGH のインシステム最適化のシステム構成と信号フローを示す。まず、コンピュータから LCOS-SLM に CGH が与えられる。CGH は加工工学系の中で再生され、その再生像はイメージセンサーで観測される。イメージセンサーの観測像は、コンピュータに送られる。

N 個の回折点の n 番目の回折点に対して、その目標振幅 $a_T(n) = I_T(n)^{1/2}$ と計測された光強度から得られた振幅値 $a_M(n) = I_M(n)^{1/2}$ から、荷重フーリエ反復法における荷重 $w(n)$ を

$$w(n) = \left[\frac{a(n)}{a_M(n)} \right]^\alpha$$

で計算する。ここで、 α は係数である。この $w(n)$ を用いて、再生面での各回折点での振幅を $w(n)a_T(n)$ と置き換えて、逆 FFT を行い、新しい CGH を得る。この過程を繰り返すことで、最適な CGH を得る。 α が大きいほど、最適化回数が少なくなるが、 α が大きすぎると収束しない。

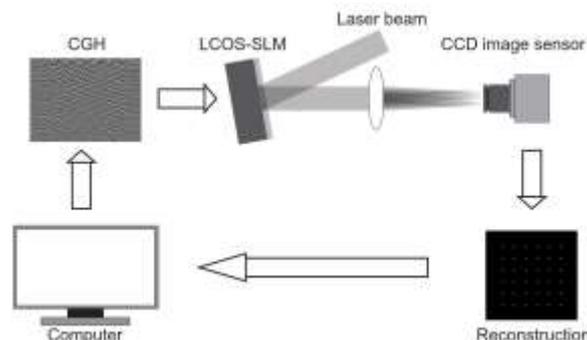


図2 インシステム最適化の構成と信号フロー。

実験結果

36の回折点を生成するCGHの最適化過程

図3は、インシステム最適化されたCGHによる36回折スポットの生成とその最適化過程を示す。図3(a)は、1回目の最適化されたCGHを示す。この像は、LCOS-SLMに入力された位相をグレースケールで表示する。黒で表示されたグレースケール0は位相 0π を表し、白で表示されたグレースケール255は、位相 $2\pi \times 255/256$ を表す。図3(b)は、CCDイメージセンサーで取得された光学再生像である。回折スポット間の間隔は、イメージセンサー上で $392\mu\text{m}$ 、サンプル面状で $7.9\mu\text{m}$ であった。図3(c)と図3(d)は、それぞれ、最適化されたCGHとその光学再生像である。回折効率は、86.6%であった。図3(e)は36回折スポットの最適化過程を示す。各スポットの光強度とそれらの均一性が示される。光強度の均一性 U_I は、全ての回折スポットの中で最小光強度と最大光強度をそれぞれ、 I_{\min} と I_{\max} と与えられるとき、 $U_I = I_{\min}/I_{\max}$ と定義される。赤点、黒点、青点は、WGS法のパラメータである α が1/2, 1/3 および 1/4 時の均一性の変化を示す。大きな α は短い最適化時間を与えた。その均一性は、初期値の0.27から0.98に達した。

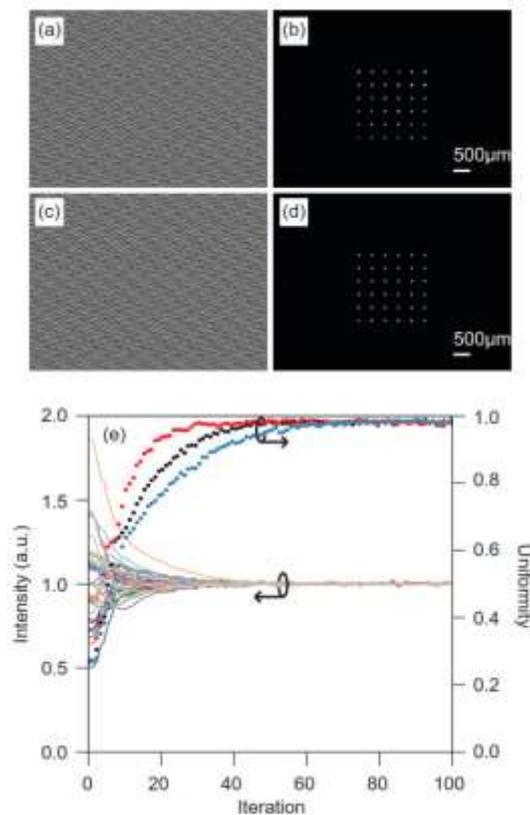


図3 (a)最適化1回目のCGHと(b)再生像、(c)最適化後のCGHと(d)再生像。(e)最適化回数に対するそれぞれの回折点の光強度とその光強度の均一性。赤点、黒点、青点は、WGS法のパラメータ α が1/2, 1/3 および 1/4 時の均一性の変化を示す。

動的インシステム最適化によるホログラフィックレーザー加工

図4は、CGHのインシステム最適化を実行しながらホログラフィックレーザー加工を実行した結果を示す。1列に並べられた7並列ビームが、ガラスサンプル（スーパーホワイトクラウンガラス、Schott, B270）表面に照射された。図4(a)は、7並列ビームの光強度変化とそれらの均一性の変化を示す。並列ビームが、徐々に均一化した。図4(b)、図4(c)、図4(d)は、それぞれ、CGHのインシステム最適化の5回目、50回目、100回目時の加工の電子顕微鏡像である。5回目では、線状加工の幅は $0.80\mu\text{m}$ から $1.19\mu\text{m}$ 、50回目では、 $1.15\mu\text{m}$ から $1.19\mu\text{m}$ 、100回目

では、 $0.98\ \mu\text{m}$ から $0.99\ \mu\text{m}$ となり、均一性は、それぞれ、 $0.67, 0.97, 0.99$ と並列ビームの光強度の均一性と同様に、最適化の繰り返しの伴って向上した。

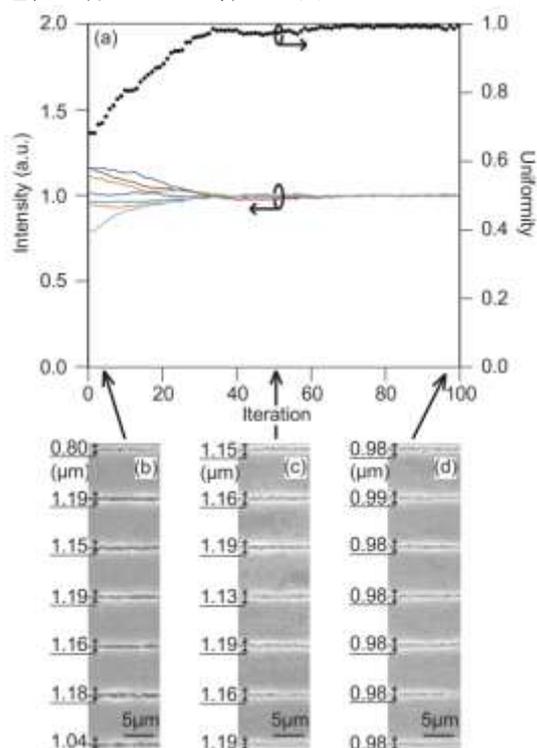


図 4 CGH の動的最適化された並列ライン加工。

機械的衝撃を与えられたホログラフィックレーザー加工システム

図 5(a)は、レーザー加工機への機械的衝撃を与えたときの CGH のインシステム最適化を示す。その機械的衝撃は、最適化回数 40 回目と 80 回目あたりで LCOS-SLM を固定するブレッドボードに与えられた。衝撃を与えられた後、並列ビームの回折光にバラツキが現れ、それに伴って均一性が低下した。その後、最適回数 10 回程度で、並列ビームは再度均一化された。図 5(b)は、機械的衝撃後の CGH のインシステム最適化の有無による均一性の変化を示す。赤点と黒点は、それぞれ、インシステム最適化を行った場合とそうでない場合を示す。当然、インシステム最適化が適用されなかった場合には、並列ビームの均一性が復活されることは無い。これらの結果からも、ホログラフィックレーザー加工システムの自動修復機能は、事前に予想できない機械的衝撃が与えられることで加工品質の低下を引き起こすことを想定できる、実際のレーザー加工の現場における、長期安定性の向上に極めて有効である。

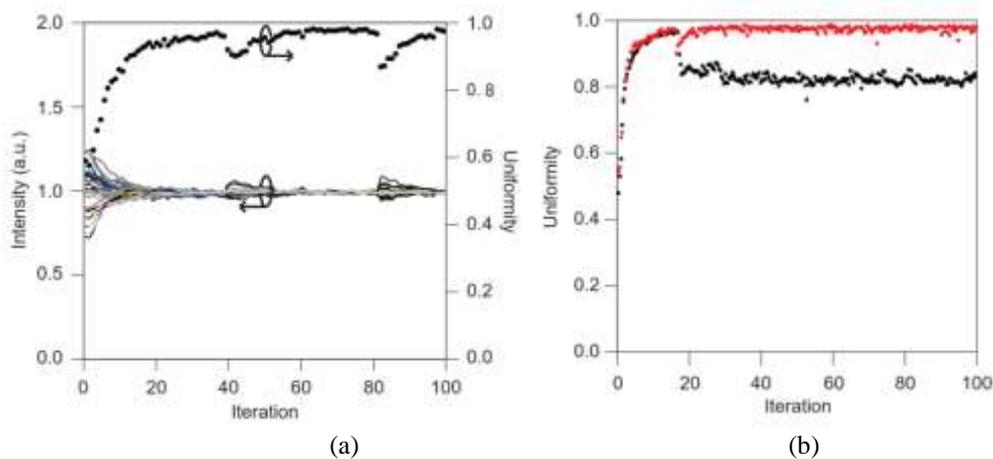


図5 レーザー加工システムに与えられた機械的衝撃に対する挙動. (a) インシステム最適化を常時実行で衝撃が与えられた場合. (b) インシステム最適化を停止後に衝撃が与えられた場合.

今後の展開

- LCOS-SLM とイメージセンサーを一体化したインシステム最適化を行う装置をモジュール化し、ユーザーの装置配置を容易にする.
- ユーザーが利用し易いソフトウェアを提供する.
- 共同研究している企業に導入すると共に、応用にあわせて、ハードウェアやソフトウェアの改良し、速度やビーム品質を向上する.
- 複雑な2次元ビーム成形や3次元ビーム成形をできるように拡張する.