

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2019-141902

(P2019-141902A)

(43) 公開日 令和1年8月29日 (2019.8.29)

(51) Int.Cl. F 1 テーマコード (参考)
B 2 3 K 26/00 (2014.01) B 2 3 K 26/00 P 4 E 1 6 8
B 2 3 K 26/36 (2014.01) B 2 3 K 26/36

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 12 頁)

(21) 出願番号 特願2018-30874 (P2018-30874)
 (22) 出願日 平成30年2月23日 (2018.2.23)

特許法第30条第2項適用申請有り 発行者名 公益社
 団法人 応用物理学会 発行物名 2017年 第78
 回応用物理学会秋季学術講演会 [講演予稿集] DVD
 発行年月日 平成29年8月25日 集会名 201
 7年第78回応用物理学会秋季学術講演会 開催日 平
 成29年9月5日-平成29年9月8日 集会名 修士
 論文発表会 開催日 平成30年2月6日

(出願人による申告) 平成28年度 国立研究開発法人
 新エネルギー・産業技術総合開発機構 業務委託研究、
 開発項目「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」、
 産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願

(71) 出願人 504137912
 国立大学法人 東京大学
 東京都文京区本郷七丁目3番1号
 (74) 代理人 110000017
 特許業務法人アイテック国際特許事務所
 (72) 発明者 小林 洋平
 東京都文京区本郷七丁目3番1号 国立大
 学法人東京大学内
 (72) 発明者 谷 峻太郎
 東京都文京区本郷七丁目3番1号 国立大
 学法人東京大学内
 (72) 発明者 青柳 弓槻
 東京都文京区本郷七丁目3番1号 国立大
 学法人東京大学内

最終頁に続く

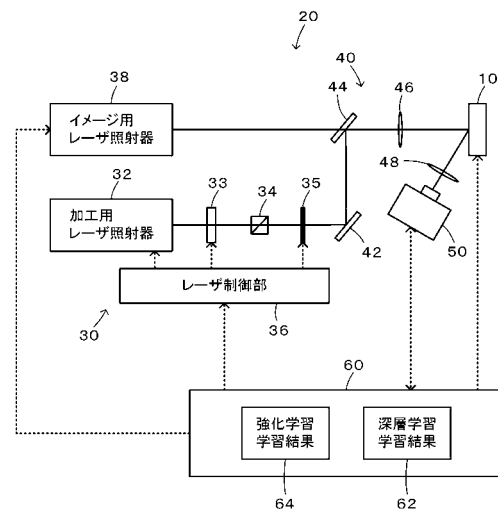
(54) 【発明の名称】 レーザ加工システム

(57) 【要約】

【課題】 レーザ照射によるアブレーション加工の最中に
 極めて短時間にアブレーション体積を求める。

【解決手段】 レーザ加工システムは、加工対象物に加工
 用レーザー光を照射してアブレーション加工を行なう加工
 用レーザー光照射装置を備える。加工対象物の加工用レー
 ザ光による加工の最中に加工対象物の加工部における散
 乱光に基づいて加工部のアブレーションイメージを取得し、
 アブレーションイメージとアブレーション体積との
 関係を深層学習して得られた学習結果に取得したアブ
 レーションイメージを適用してアブレーション体積を推定
 する。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

加工対象物に加工用レーザ光を照射してアブレーション加工を行なう加工用レーザ光照射装置を備えるレーザ加工システムであって、

前記加工対象物の前記加工用レーザ光による加工の最中に前記加工対象物の加工部における散乱光に基づいて前記加工部のアブレーションイメージを取得する加工部イメージ取得部と、

アブレーションイメージとアブレーション体積との関係を学習する深層学習により得られた学習結果を前記加工部イメージ取得部により取得されたアブレーションイメージに適用してアブレーション体積を推定するアブレーション体積推定部と、

を備えることを特徴とするレーザ加工システム。

【請求項 2】

請求項 1 記載のレーザ加工システムであって、

前記深層学習は、レーザ加工において連続する複数のアブレーションイメージを入力データとする学習である、

レーザ加工システム。

【請求項 3】

請求項 1 または 2 記載のレーザ加工システムであって、

前記深層学習は、アブレーション体積と相関関係を有するパラメータまたはアブレーション加工の際に測定可能なパラメータが含まれる加工パラメータを用いてアブレーションイメージと加工パラメータとの関係を学習し、学習により得られたアブレーションイメージと加工パラメータとの関係に前記相関関係を用いてアブレーションイメージとアブレーション体積との関係としたものを前記学習結果とする、

レーザ加工システム。

【請求項 4】

請求項 3 記載のレーザ加工システムであって、

前記加工パラメータは、前記加工部に対する加工開始から照射した前記加工用レーザ光の総エネルギーに関連するパラメータを含む、

レーザ加工システム。

【請求項 5】

請求項 1 ないし 4 のうちのいずれか 1 つの請求項に記載のレーザ加工システムであって

、
前記アブレーションイメージを取得するために前記加工部に前記加工用レーザ光とは異なる波長のイメージ用レーザ光を照射するイメージ用レーザ照射装置、

を備えるレーザ加工システム。

【請求項 6】

請求項 1 ないし 5 のうちのいずれか 1 つの請求項に記載のレーザ加工システムであって

、
前記加工部イメージ取得部は、所定時間毎にアブレーションイメージを取得する、

レーザ加工システム。

【請求項 7】

請求項 6 記載のレーザ加工システムであって、

前記加工用レーザ光照射装置は、前記加工用レーザ光としてパルス幅がフェムト秒オーダーのパルスレーザ光を出力して前記アブレーション加工を行ない、

前記加工部イメージ取得部は、各パルスレーザ光の照射毎に又は複数のパルスレーザ光毎に前記アブレーションイメージを取得し、

前記アブレーション体積推定部は、前記加工用レーザ光照射装置による次の加工用レーザ光の照射の前までに前記アブレーション体積を推定する、

レーザ加工システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、レーザ加工システムに関し、詳しくは、加工対象物に加工用レーザ光を照射してアブレーション加工を行なう加工用レーザ光照射装置を備えるレーザ加工システムに関する。

【背景技術】

【0002】

従来、この種のレーザ加工システムとしては、反射光量を測定するための反射光検出部の出力データを含むレーザ装置の状態量を観測する状態量観測部と、レーザ発振器から出力されたレーザ光による加工開始の成否の結果を取得する動作結果取得部と、状態量観測部および動作結果取得部からの出力を受取り、光出力指令データを、レーザ装置の状態量および加工開始の成否の結果に関連付けて学習する学習部と、学習部が学習した光出力指令データを参照して、光出力指令データを決定する意思決定部とを含む機械学習装置を有するものが提案されている（特許文献1参照）。このシステムでは、反射光量が第1所定レベルより高く設定された第2所定レベルを上回らない条件を充たしながら、所定時間内に、加工対象物に対して加工を開始するための光出力指令データを学習する。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】特開2017-131937号公報

20

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

レーザ加工システムでは、レーザ照射による加工部のアブレーション加工の進捗程度を逐次把握してレーザ照射の制御に用いることが望まれている。アブレーション加工の進捗程度はアブレーション体積や加工部の深さなどによって示すことができるが、アブレーション体積の測定は、3次元レーザ顕微鏡や白色干渉顕微鏡などによって加工部を撮像して演算する必要から10秒程度の時間を要するため、レーザ加工を中止する必要性が生じ、レーザ加工中に撮像できない。このため、レーザ照射の制御に用いるには不向きである。

【0005】

30

本発明のレーザ加工システムは、レーザ照射によるアブレーション加工の最中に極めて短時間にアブレーション体積を求めることを主目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0006】

本発明のレーザ加工システムは、上述の主目的を達成するために以下の手段を採った。

【0007】

本発明のレーザ加工システムは、

加工対象物に加工用レーザ光を照射してアブレーション加工を行なう加工用レーザ光照射装置を備えるレーザ加工システムであって、

前記加工対象物の前記加工用レーザ光による加工の最中に前記加工対象物の加工部における散乱光に基づいて前記加工部のアブレーションイメージを取得する加工部イメージ取得部と、

40

アブレーションイメージとアブレーション体積との関係を学習する深層学習により得られた学習結果を前記加工部イメージ取得部により取得されたアブレーションイメージに適用してアブレーション体積を推定するアブレーション体積推定部と、

を備えることを特徴とする。

【0008】

この本発明のレーザ加工システムでは、加工対象物の加工用レーザ光による加工の最中に加工対象物の加工部における散乱光に基づいて加工部のアブレーションイメージを取得し、アブレーションイメージとアブレーション体積との関係を学習する深層学習により得

50

られた学習結果を取得したアブレーションイメージに適用してアブレーション体積を推定する。ここで、アブレーションイメージは、加工部の表面の凹凸からの散乱光を撮像した画像を意味している。加工部イメージ取得部としては高速カメラを用いて散乱光を撮像することによりアブレーションイメージを取得することができるから、このために要する時間は極めて短時間となる。また、アブレーションイメージとアブレーション体積との関係を深層学習して得られた学習結果を取得したアブレーションイメージに適用してアブレーション体積を推定するから、このために要する時間は極めて短時間となる。これらの結果、極めて短時間にアブレーション体積を求めることができる。ここで、アブレーションイメージはアブレーション加工による加工部の表面の凹凸からの散乱光を撮像した画像であるが、この加工部の表面の凹凸とアブレーション体積とに相関があり、アブレーション体積は加工部全体の形状に置き換えることができる。したがって、アブレーションイメージからアブレーション体積を推定することは、アブレーションイメージから加工部全体の形状を推定していることになる。このため、レーザ加工中に加工部全体の形状を推定し、その後の加工の制御、即ち、加工用レーザ光照射装置による加工用レーザ光の制御（例えば加工用レーザ光の強度やパルス幅などの設定）に用いることにより、より適正なレーザ加工を行なうことができる。なお、アブレーションイメージ（加工部の表面の凹凸からの散乱光を撮像した画像）とアブレーション体積との相関については、加工形状の表面のパターン変化率の積算値とアブレーション体積との相関として実験により確かめた。ここで、パターン変化率は、加工用レーザ光の照射の前後に撮像した2つのアブレーションイメージにおける画像の明るさの平均に対する画像の明るさの差分の二乗平均平方根 { (画像の差分の二乗平均平方根) / (明るさの平均) } として定義した。

【0009】

本発明のレーザ加工システムにおいて、前記深層学習としては、レーザ加工において連続する複数のアブレーションイメージを入力データとする学習であるものとしてもよい。こうすれば、より精度の高い学習結果を用いることができる。

【0010】

本発明のレーザ加工システムにおいて、前記深層学習は、アブレーション体積と相関関係有するパラメータまたはアブレーション加工の際に測定可能なパラメータが含まれる加工パラメータを用いてアブレーションイメージと加工パラメータとの関係を学習し、学習により得られたアブレーションイメージと加工パラメータとの関係に前記相関関係を用いてアブレーションイメージとアブレーション体積との関係としたものを前記学習結果とするものとしてもよい。こうすれば、アブレーションイメージとアブレーション体積との関係を直接学習する場合に比して、より精度の高い学習結果やより容易に学習結果を得ることができる。ここで、加工パラメータとしては、加工部に対する加工開始から照射した加工用レーザ光の総エネルギーに関連するパラメータ、例えば、加工用レーザ光の光強度と照射数や、加工用レーザ光の光強度と加工対象の掃引速度、加工用レーザ光のフルエンスと加工対象の掃引速度、プラズマ発光強度、音圧などを挙げることができる。

【0011】

本発明のレーザ加工システムにおいて、前記アブレーションイメージを取得するために前記加工部に前記加工用レーザ光とは異なる波長のイメージ用レーザ光を照射するイメージ用レーザ照射装置を備えるものとしてもよい。こうすれば、イメージ用レーザ光として所望の波長をもちいることができる。

【0012】

本発明のレーザ加工システムにおいて、前記加工部イメージ取得部は、所定時間毎にアブレーションイメージを取得するものとしてもよい。こうすれば、所定時間毎にアブレーション加工によるアブレーション体積を求めることができ、所定時間毎により適正な加工用レーザ光照射装置による加工用レーザ光の制御を行なうことができる。この場合、前記加工用レーザ光照射装置は前記加工用レーザ光としてパルス幅がフェムト秒オーダーのパルスレーザ光を出力して前記アブレーション加工を行ない、前記加工部イメージ取得部は各パルスレーザ光の照射毎に又は複数のパルスレーザ光毎に前記アブレーションイメージ

を取得し、前記アブレーション体積推定部は前記加工用レーザ光照射装置による次の加工用レーザ光の照射の前までに前記アブレーション体積を推定するものとしてもよい。こうすれば、パルスレーザ光を照射する毎に又は複数のパルスレーザ光を照射する毎にアブレーション体積を求めることができ、パルスレーザ光を照射する毎に又は複数のパルスレーザ光を照射する毎に、より適正な加工用レーザ光照射装置による加工用レーザ光の制御を行なうことができる。

【図面の簡単な説明】

【0013】

【図1】本発明の一実施例としてのレーザ加工システム20の構成の概略を示す構成図である。

10

【図2】加工部の表面のパターン変化率の積算値とアブレーション体積とフルーエンスとの関係の一例を示す説明図である。

【図3】パルスレーザ光を加工対象物10の加工部に $m-1$ 回、 m 回、 $m+1$ 回だけ照射したときの加工部の状態とアブレーションイメージの一例を示す説明図である。

【図4】実施例で用いる深層学習の一例を示す説明図である。

【図5】学習結果62により推定されたアブレーション体積と実際のアブレーション体積との関係の一例を示す説明図である。

【図6】異なるフルーエンスの新規データに関する予測結果の一例を示す説明図である。

【図7】連続する3つのアブレーションイメージを入力データとした学習結果と連続する2つのアブレーションイメージを入力データとした学習結果の一例を示す説明図である。

20

【発明を実施するための形態】

【0014】

次に、本発明を実施するための形態を実施例を用いて説明する。

【実施例】

【0015】

図1は、本発明の一実施例としてのレーザ加工システム20の構成の概略を示す構成図である。実施例のレーザ加工システム20は、図示するように、加工用レーザ光を出力する加工用レーザ照射装置30と、加工用レーザ光とは波長の異なるイメージ用レーザ光を出力するイメージ用レーザ照射器38と、加工用レーザ光およびイメージ用レーザ光を加工対象物10の加工部に導くと共にイメージ用レーザ光の加工対象物10への照射による散乱光を高速カメラ50に導く光学系40と、イメージ用レーザ光の加工対象物10への照射による散乱光に基づいて加工部の表面の凹凸のイメージ（アブレーションイメージ）を撮像する高速カメラ50と、システム全体を制御するシステム制御装置60と、を備える。

30

【0016】

加工用レーザ照射装置30は、加工用レーザ光を出力する加工用レーザ照射器32と、加工用レーザ光の偏光方向を調整する1/2波長板33と、加工用レーザ光のS偏光を反射すると共にP偏光を透過する偏光ビームスプリッタ34と、レーザ加工の開始時に開成し終了時に閉成するシャッター35と、加工用レーザ照射器32や1/2波長板33、シャッター35を制御するレーザ制御部36と、を備える。加工用レーザ照射器32は、例えば波長が800nm、パルス幅が35fs、繰り返し周波数が1kHz、フルーエンス（単位面積当たりのパルスエネルギー）が0.1~1.0J/cm²の加工用レーザ光（パルスレーザ光）を出力可能なチタンサファイアレーザ照射器として構成されている。レーザ制御部36は、CPUを中心とするマイクロコンピュータとして構成されており、システム制御装置60からの制御信号に基づいて加工用レーザ照射器32のフルーエンスや1/2波長板による偏光方向、シャッター35の開閉タイミングを制御する。

40

【0017】

イメージ用レーザ照射器38は、例えば波長が633nm、パルス幅が500μsのイメージ用レーザ光を出力可能なレーザ照射器として構成されている。高速カメラ50は、例えば繰り返し周波数が1kHzで撮像可能な高感度CMOSカメラとして構成されてい

50

る。

【0018】

光学系40は、加工用レーザ照射装置30からの加工用レーザ光を導くミラー42と、ミラー42からの加工用レーザ光を反射して加工対象物10に導くと共にイメージ用レーザ照射器38からのイメージ用レーザ光を透過して加工対象物10に導くハーフミラー44と、加工用レーザ光およびイメージ用レーザ光を加工対象物10の加工部に焦点を合わせるレンズ46と、イメージ用レーザ光の加工対象物10への照射による散乱光を集光するレンズ48と、を備える。

【0019】

システム制御装置60は、図示しないが、CPUを中心とするマイクロコンピュータとして構成されており、CPUの他にROMやRAM、フラッシュメモリ、GPU（Graphics Processing Unit）、入出力ポートなどを備え、深層学習によって得られたアブレーションイメージとアブレーション体積との関係の学習結果62と、強化学習によって得られたアブレーション体積に対する最適な加工用レーザ光の照射の学習結果64とを記憶している。システム制御装置60は、高速カメラ50により撮像されたアブレーションイメージを入力ポートを介して入力している。また、システム制御装置60は、イメージ用レーザ照射器38への制御信号や、加工用レーザ照射装置30のレーザ制御部36への制御信号、高速カメラ50への制御信号、載置された加工対象物10を3方向（XYZ方向）に移動させる図示しないステージへの駆動信号などを出力ポートを介して出力している。

【0020】

実施例のレーザ加工システム20では、システム制御装置60からの制御信号により加工用レーザ照射器32から波長が800nm、パルス幅が35fs、繰り返し周波数が1kHz、フルエンスが0.1~1.0J/cm²の加工用レーザ光（パルスレーザ光）が出力される。加工用レーザ光は、1/2波長板33、偏光ビームスプリッタ34、シャッター35を介してミラー42およびハーフミラー44で反射され、レンズ46により焦点が合わされて加工対象物10の加工部に照射される。一方、システム制御装置60からの制御信号によりイメージ用レーザ照射器38から波長が633nm、パルス幅が500μs、繰り返し周波数が1kHzのイメージ用レーザ光を加工用レーザ光の出力タイミングに僅かに遅れて出力される。イメージ用レーザ光は、ハーフミラー44を透過してレンズ46により焦点が合わされて加工対象物10の加工部に照射される。イメージ用レーザ光は加工用レーザ光に僅かに遅れて出力されるから、加工用レーザ光の加工対象物10の加工部への照射によるアブレーション加工が行なわれた直後にイメージ用レーザ光が照射されるようになる。システム制御装置60からの制御信号によりイメージ用レーザ光の加工対象物10の加工部への照射による散乱光が高速カメラ50で撮像されるように高速カメラ50を制御する。このため、高速カメラ50は、散乱光に基づく加工部の表面の凹凸に応じたイメージ（アブレーションイメージ）をアブレーション加工の直後に撮像し、撮像したアブレーションイメージをシステム制御装置60に出力する。システム制御装置60は、高速カメラ50により撮像されたアブレーションイメージを入力すると、入力したアブレーションイメージを深層学習による学習結果62に適用してアブレーション体積を求める。そして、求めたアブレーション体積を強化学習による学習結果64に適用して次に照射する加工用レーザ光の最適値を求め、これを加工用レーザ照射装置30のレーザ制御装置36に出力する。これにより、システム制御装置60は、加工用レーザ照射装置30による加工対象物10のレーザ加工を最適化する。

【0021】

次に、実施例で用いる深層学習による学習結果62について説明する。なお、強化学習による学習結果64については本発明の中核をなさないから、これ以上の詳細な説明は省略する。

【0022】

図2は、加工部の表面のパターン変化率の積算値とアブレーション体積とフルエンスとの関係の一例を示す説明図である。パターン変化率は、実施例では、パルスレーザ光の

照射の前後に撮像した2つのアブレーションイメージにおける画像の明るさの平均に対する画像の明るさの差分の二乗平均平方根{(画像の差分の二乗平均平方根)/(明るさの平均)}として定義されるものである。図示するように、加工部の表面のパターン変化率の積算値とアブレーション体積とは相関が認められるが、フルーエンスが異なるとその相関が異なるものとなる。加工部の表面のパターン変化率の積算値は、パターン変化率の定義からアブレーションイメージに反映されるから、アブレーションイメージとアブレーション体積との関係の学習は困難なものとなる。図3は、加工用レーザ光としてパルス幅が35fsでフルーエンスが0.46J/cm²のパルスレーザ光を加工対象物10の加工部にm-1回、m回、m+1回だけ照射したときの加工部の状態とアブレーションイメージの一例を示す説明図である。図示するように、照射パルス数が増加するに従って加工部の加工が進捗し、加工部の表面の凹凸(アブレーションイメージ)が変化する。また、同一の照射パルス数でもフルーエンスが異なれば加工部の加工の程度も異なるものとなり、加工部の表面の凹凸(アブレーションイメージ)も異なるものとなる。これらのことを考慮すると、アブレーションイメージとフルーエンス及び照射パルス数との関係を深層学習により得ることができると考えられる。一方、フルーエンスと照射パルス数は、アブレーション体積に相関を有するから、深層学習により得られるアブレーションイメージとフルーエンス及び照射パルス数との関係にフルーエンス及び照射パルス数とアブレーション体積との相関を反映させれば、アブレーションイメージからアブレーション体積を求めることができる。実施例では、フルーエンスFと照射パルス数nを加工パラメータとし、深層学習により得られるアブレーションイメージと加工パラメータとの関係に加工パラメータとアブレーション体積との相関を反映させたものを学習結果62とした。

【0023】

図4は、実施例で用いる深層学習の一例を示す説明図である。実施例で用いる深層学習では、基本的には、アブレーションイメージ(F, n)を入力し、未知数としての学習パラメータWのニューラルネットワークを用いて加工パラメータとしてのフルーエンスF'と照射パルス数n'を推定する。そして、推定したフルーエンスF'と照射パルス数n'と実際の値としてのフルーエンスFと照射パルス数nとに基づいて損失を求め、損失が最小となるように学習パラメータWを調整する。損失を求める損失関数としては、推定値と実際値との二乗平均誤差や交差エントロピーを用いることもできるが、加工パラメータとしてのフルーエンスFと照射パルス数nの寄与を均一にするために、フルーエンスFについては次式(1)に示すようにf(F)に変換し、照射パルス数nについては式(2)に示すようにg(n)に変換し、損失としては式(3)に示すように変換したf(F)とg(n)の二乗平均誤差とした。ここで、式(1)中、C1は定数であり、F_{min}はアブレーション加工を行なうことが可能な最小のフルーエンスである。式(2)中、C2は定数であり、n_{max}は学習における照射パルス数の最大値である。これらの式(1)(2)は、発明者らの試行錯誤の結果として得られたものである。

【0024】

【数1】

$$F \rightarrow f(F) = C1 \log(F/F_{min}) \quad (1)$$

$$n \rightarrow g(n) = C2\sqrt{n/n_{max}} \quad (2)$$

$$L = \frac{\sum [(\Delta f(F))^2 + (\Delta g(n))^2]}{N} \quad (3)$$

【0025】

実施例では、畳み込みニューラルネットワークを用い、フルーエンス毎に連続する3つの照射パルス数の3つのアブレーションイメージを入力データとし、15万の入力データ

数を用い、式（３）の損失関数を用いて学習パラメータWを求めた。

【００２６】

図５は、学習結果６２により推定されたアブレーション体積と実際のアブレーション体積との関係の一例を示す説明図である。図中、上段の（a）はフルーエンスFが 0.20 J/cm^2 のときの関係を示し、中段の（b）はフルーエンスFが 0.50 J/cm^2 のときの関係を示し、下段の（c）はフルーエンスFが 1.0 J/cm^2 のときの関係を示す。図中、４５度の右上がりの直線は、実際のアブレーション体積を示す。図示するように、ある程度のバラツキがあり、フルーエンスFが大きくなるほど且つアブレーション体積が大きくなるほど推定されるアブレーション体積は実際の体積より小さくなる傾向があるものの、学習結果６２を用いてアブレーション体積を求めることができるのが解る。

10

【００２７】

図６は、異なるフルーエンスの新規データに関する予測結果の一例を示す。図中、直線は実際の値を示す。推定される照射パルス数は、フルーエンスに拘わらず、誤差率３０％ほどの範囲内であった。一方、推定されるフルーエンスは、フルーエンスが大きいほど実際の値との乖離が大きくなるものの、同じフルーエンスに対しては同じ程度の値を推定している。これらのことから、今後の研究により精度を高めることが望まれるものの、学習結果６２を用いてアブレーション体積を求めることができるのが解る。

【００２８】

以上説明した実施例のレーザ加工システム２０では、加工用レーザ照射器３２から加工用レーザ光を出力して加工対象物１０の加工部に照射してアブレーション加工を行なう。一方、イメージ用レーザ照射器３８からイメージ用レーザ光を加工用レーザ光の出力タイミングに僅かに遅れて出力して加工対象物１０の加工部に照射し、加工部からの散乱光に基づいて加工部の表面の凹凸をアブレーションイメージとして高速カメラ５０により撮像する。そして、撮像したアブレーションイメージを深層学習による学習結果６２に適用してアブレーション体積を求める。高速カメラ５０により極めて短時間にアブレーションイメージを撮像し、システム制御装置６０により撮像したアブレーションイメージを深層学習による学習結果６２に適用して極めて短時間にアブレーション体積を求める。この結果、加工用レーザ光の照射によるアブレーション加工の最中に極めて短時間にアブレーション体積を求めることができる。また、求めたアブレーション体積を強化学習による学習結果６４に適用して次に照射する加工用レーザ光の最適値を求め、加工用レーザ照射装置３０を制御する。これにより、加工用レーザ照射装置３０による加工対象物１０のレーザ加工を最適化することができる。

20

30

【００２９】

実施例のレーザ加工システム２０では、畳み込みニューラルネットワークを用い、フルーエンス毎に連続する３つの照射パルス数の３つのアブレーションイメージを入力データとし、加工パラメータとしてのフルーエンスFと照射パルス数nを用い、損失関数として式（３）を用いることにより、深層学習による学習結果６２をより推定精度の高いものとすることができる。

【００３０】

実施例のレーザ加工システム２０では、畳み込みニューラルネットワークを用いるものとしたが、畳み込みを行なわないニューラルネットワークを用いるものとしてもよい。

40

【００３１】

実施例のレーザ加工システム２０では、フルーエンス毎に連続する３つの照射パルス数の３つのアブレーションイメージを入力データとしたが、フルーエンス毎に連続する２つの照射パルス数の２つのアブレーションイメージを入力データとしたり、フルーエンス毎に連続する４つ以上の照射パルス数の４つ以上のアブレーションイメージを入力データとしたり、フルーエンス毎の各照射パルス数毎のアブレーションイメージを入力データとしたりしてもよい。なお、図７に示すように、連続する３つのアブレーションイメージを入力データとした方が、連続する２つのアブレーションイメージを入力データとした場合に比して、深層学習による学習結果６２をより推定精度の高いものとすることができる。

50

【0032】

実施例のレーザ加工システム20では、加工パラメータとしてのフルーエンスFと照射パルス数nを用いたが、加工パラメータとしては加工部に対する加工開始から照射した加工用レーザ光の総エネルギーに関連するパラメータであればよく、例えば、加工用レーザ光の光強度と加工対象の掃引速度を用いたり、加工用レーザ光のフルーエンスと加工対象の掃引速度を用いたり、プラズマ発光強度を用いたり、音圧を用いたりしてもよい。また、加工パラメータを用いずに、アブレーションイメージとアブレーション体積との関係を直接求めるものとしてもよい。

【0033】

実施例のレーザ加工システム20では、損失関数として式(3)を用いるものとしたが、フルーエンスと照射パルス数との寄与の均一化を図ることができるものであれば、他の如何なる損失関数を用いるものとしても構わない。また、加工パラメータとしてフルーエンスおよび照射パルス数とは異なるパラメータを用いる場合には、パラメータの特性に応じて損失関数を定めればよい。

【0034】

実施例のレーザ加工システム20では、加工用レーザ光としてパルスレーザ光を用いるものとしたが、連続照射するレーザ光を用いて加工を行なうものとしてもよい。この場合、アブレーション体積を求めるのに要する時間だけ加工に対する制御遅れが生じるものとなる。

【0035】

実施例のレーザ加工システム20では、波長が633nm、パルス幅が500μsのイメージ用レーザ光を出力可能なイメージ用レーザ照射器38からのイメージ用レーザ光の加工対象物10からの散乱光に基づいてアブレーションイメージを撮像するものとしたが、633nmとは異なる波長、500μsとは異なるパルス幅のレーザ光を出力するレーザ照射器からのレーザ光の加工対象物10からの散乱光に基づいてアブレーションイメージを撮像するものとしてもよい。例えば、加工用レーザ照射器32からの加工用レーザ光の加工対象物10からの散乱光に基づいてアブレーションイメージを撮像するものとしてもよい。この場合、イメージ用レーザ照射器38は不要となる。

【0036】

実施例のレーザ加工システム20では、波長が800nm、パルス幅が35fs、繰り返し周波数が1kHz、フルーエンスが0.1~1.0J/cm²のパルスレーザ光を出力するチタンサファイアレーザ照射器を用いるものとしたが、加工用のレーザ光を出力することができるものであればよいから、800nmとは異なる波長、35fsとは異なるパルス幅、1kHzとは異なる繰り返し周波数、0.1~1.0J/cm²とは異なるフルーエンスのレーザ光を出力するレーザ照射器を用いるものとしてもよい。

【0037】

実施例のレーザ加工システム20では、強化学習による学習結果64を用いるものとしたが、最適化を行なう如何なる学習を用いるものとしてもよい。

【0038】

以上、本発明を実施するための形態について実施例を用いて説明したが、本発明はこうした実施例に何等限定されるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲内において、種々なる形態で実施し得ることは勿論である。

【産業上の利用可能性】

【0039】

本発明は、レーザ加工システムの製造産業などに利用可能である。

【符号の説明】

【0040】

20 レーザ加工システム、30 加工用レーザ照射装置、32 加工用レーザ照射器、33 1/2波長板、34 偏光ビームスプリッタ、35 シャッター、36 レーザ制御部、40 光学系、42 ミラー、44 ハーフミラー、46 レンズ、48 レン

10

20

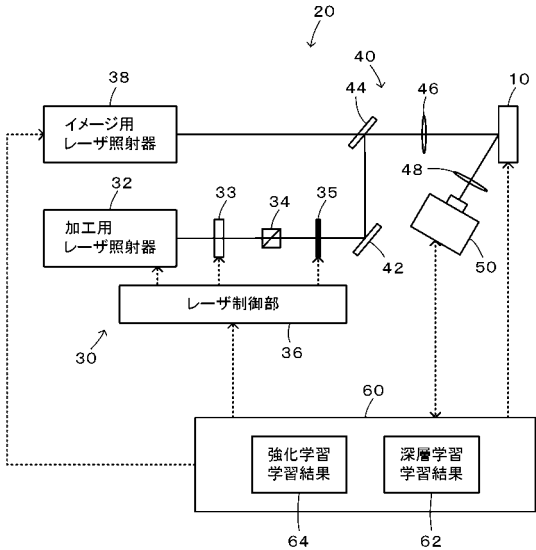
30

40

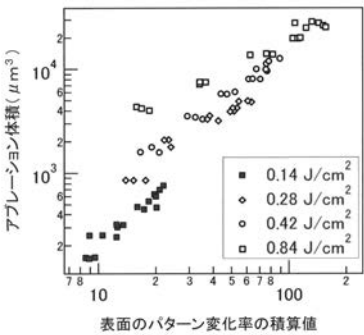
50

ズ、50 高速カメラ、60 システム制御装置、62 学習結果（深層学習）、64 学習結果（強化学習）。

【図 1】



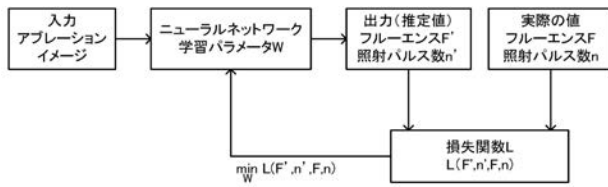
【図 2】



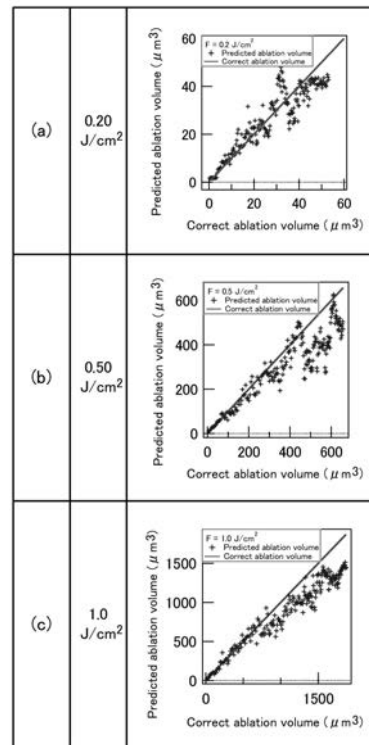
【図 3】

照射 パルス数	加工部の状態	アブレーションイメージ
m-1		
m		
m+1		

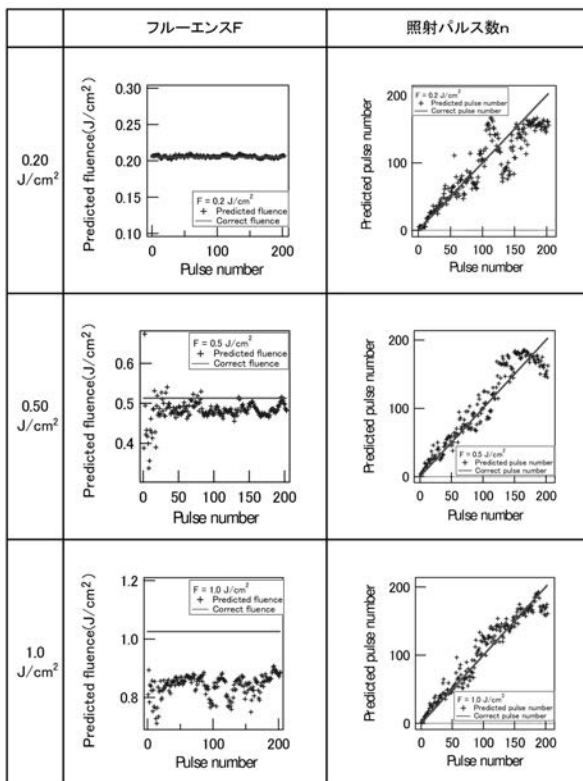
【図 4】



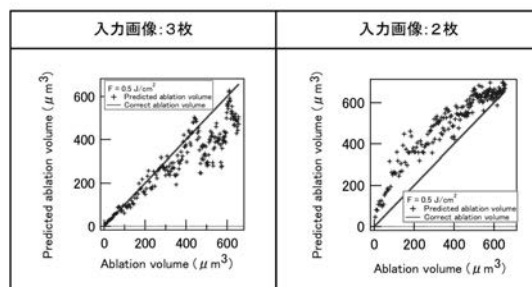
【図 5】



【図 6】



【図 7】



フロントページの続き

Fターム(参考) 4E168 AD18 CA05 CA06 CA07 CB07 DA27 DA40 DA42 DA47 DA60
EA20