

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6795567号
(P6795567)

(45) 発行日 令和2年12月2日(2020.12.2)

(24) 登録日 令和2年11月16日(2020.11.16)

(51) Int. Cl.	F I
B 2 3 K 26/00 (2014.01)	B 2 3 K 26/00 M
B 2 3 K 26/08 (2014.01)	B 2 3 K 26/08 H
B 2 3 K 26/03 (2006.01)	B 2 3 K 26/00 N
	B 2 3 K 26/03

請求項の数 16 (全 48 頁)

(21) 出願番号	特願2018-204157 (P2018-204157)	(73) 特許権者	390008235
(22) 出願日	平成30年10月30日(2018.10.30)		ファナック株式会社
(65) 公開番号	特開2020-69492 (P2020-69492A)		山梨県南都留郡忍野村忍草字古馬場358
(43) 公開日	令和2年5月7日(2020.5.7)		〇番地
審査請求日	令和2年3月23日(2020.3.23)	(74) 代理人	100106002
早期審査対象出願			弁理士 正林 真之
		(74) 代理人	100165157
			弁理士 芝 哲央
		(74) 代理人	100160794
			弁理士 星野 寛明
		(72) 発明者	望月 樹也
			山梨県南都留郡忍野村忍草字古馬場358
			〇番地 ファナック株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 加工条件設定装置及び三次元レーザ加工システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

少なくとも熱伝導率と比熱と密度とを含む熱物性が定義された材質情報を含むワークの三次元CADデータと、少なくとも加工ヘッドの外形形状と前記加工ヘッドから出射されるレーザ光の光軸の前記加工ヘッドの前記外形形状に対する相対位置の情報を含む前記加工ヘッドの三次元CADデータと、を使用して、仮想空間内において、前記ワークの前記三次元CADデータによって定義される前記ワークの加工表面と前記加工ヘッドの前記光軸との交点を加工点として、前記加工ヘッドが、前記仮想空間内を、前記ワークに対して相対的に移動した時の前記加工点の軌跡として設定された加工線に沿って、前記加工ヘッドの前記光軸が前記加工点を通る前記加工表面に垂直な法線と前記加工線とに対して所定の角度を保ち、かつ、前記加工ヘッドのレーザ光出射側端面と前記加工点との間の距離を所定の距離に保った状態で、前記ワークに対して相対的に移動する条件において、少なくとも前記加工ヘッドの前記ワークに対する相対的位置や相対的移動速度の時間変化の状態を含む前記加工ヘッドの移動状態をシミュレーションする移動状態シミュレーション部と、

10

レーザ光を出射している前記加工ヘッドの移動によって変化する少なくとも前記ワークの一部を含む領域の温度分布を求めるための非常熱流体シミュレーションを実施する熱流体シミュレーション部と、

前記移動状態シミュレーション部と前記熱流体シミュレーション部とによるシミュレーション結果に基づいて、実際のレーザ加工前に、少なくとも前記加工ヘッドの相対的移動

20

条件とレーザー光出力条件を含むレーザー加工条件とを予め設定する加工条件設定部と、
を備える、加工条件設定装置。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の加工条件設定装置と、

少なくとも一つのレーザー発振器と、前記レーザー発振器にレーザー発振のための電力を供給する電源部と、前記レーザー発振器から出射されたレーザー光を前記加工ヘッドに伝播するためのレーザー光学系と、前記レーザー光学系を伝搬する前記レーザー発振器からのレーザー出力光と前記レーザー光学系を前記レーザー出力光と反対方向に伝播する戻り光との少なくとも一方の光を検出可能な少なくとも一つの光検出手段と、少なくとも前記加工条件設定部と前記光検出手段とからの出力信号を受け取り、少なくとも前記電源部への電力出力指令を含む制御信号を出力する制御部と、を有するレーザー装置と、

10

前記制御部からの制御信号を受け取り、前記ワークに対して前記加工ヘッドを相対的に移動させる駆動装置と、

を備える、三次元レーザー加工システム。

【請求項 3】

前記戻り光を検出可能な前記光検出手段を少なくとも一つ備えており、

前記光検出手段によって検出された前記戻り光の検出結果から、前記制御部が前記戻り光の光量を抑制する必要があると判定した場合に、前記加工条件設定部によって予め設定されたレーザー加工条件を少なくとも一時的に変更して、前記レーザー光出力条件と前記加工ヘッドの前記ワークに対する前記相対的移動速度との両方のレーザー加工条件を変更して、前記加工点の温度あるいは前記加工点の近傍の前記ワークの温度が、目標温度に近い温度に維持できる条件を満たすように、前記制御部から前記電源部と前記駆動装置とに前記制御信号を出力する、請求項 2 に記載の三次元レーザー加工システム。

20

【請求項 4】

更に、前記加工ヘッドの前記レーザー光出射側端面と前記加工点との間の距離を測定可能な測距手段を備え、

前記制御部は、実際にレーザー加工を行っている時に、前記測距手段による測定結果に基づいて、前記移動状態シミュレーション部による前記加工ヘッドの移動状態のシミュレーション結果に基づいて予め設定した前記レーザー加工条件のうちの少なくとも前記加工ヘッドの前記相対的移動条件を補正する機能を有する、請求項 2 又は 3 に記載の三次元レーザー加工システム。

30

【請求項 5】

更に、レーザー加工時に前記加工線に沿って移動する前記加工点の温度と前記加工点の近傍の前記ワークの表面温度との少なくとも一方の温度を検出可能な温度検出手段を備え、

前記制御部は、前記加工条件設定装置によって設定された前記レーザー加工条件で前記ワークをレーザー加工中のある時点で、前記温度検出手段によって検出された検出温度と、前記加工条件設定装置によって設定された前記レーザー加工条件に対する前記シミュレーション結果に含まれている前記ある時点に対応した時点の対応する位置に対して予測された予測温度と、の間に温度差が生じた場合には、前記温度差に応じて、前記加工条件設定装置によって設定された前記レーザー加工条件の少なくとも一部を補正する機能を有し、

40

前記レーザー装置は、補正されたレーザー加工条件でレーザー加工を継続する、請求項 2 ~ 4 のいずれか 1 項に記載の三次元レーザー加工システム。

【請求項 6】

前記熱流体シミュレーション部は、前記ワークに対する前記加工ヘッドからのレーザー光の照射効果を、前記ワークへの入熱による前記ワークの温度上昇だけとして、前記ワークが相遷移しないという仮定に基づいて、前記非定常熱流体シミュレーションを実施する、請求項 2 ~ 4 のいずれか 1 項に記載の三次元レーザー加工システム。

【請求項 7】

前記加工条件設定装置は、前記加工線のうちの少なくとも一部の加工区間については、前記加工ヘッドが前記ワークに対して相対的に移動している前記相対的移動速度に関わら

50

ず、前記加工点の温度と前記加工点の近傍の温度との少なくとも一方の温度が所定温度になるというシミュレーション結果が得られるレーザ加工条件を設定する、請求項6に記載の三次元レーザ加工システム。

【請求項8】

前記熱流体シミュレーション部には、前記加工条件設定部によって設定された前記レーザ加工条件に対する前記シミュレーション結果に含まれている前記加工点あるいは前記加工点の近傍の温度と、前記レーザ加工条件で実際にレーザ加工を行った時に測定された対応する位置の温度と、の相関関係を表す相関データが記録されており、

前記熱流体シミュレーション部は、前記相関データを参照して、実際のレーザ加工において目標とする前記所定温度に対して、前記非定常熱流体シミュレーションにおいて目標とする置換所定温度を決定して、前記非定常熱流体シミュレーションを実施する、請求項7に記載の三次元レーザ加工システム。

【請求項9】

前記加工条件設定装置は、更に、加工条件記録部を備え、

前記加工条件記録部には、レーザ加工の種類毎に、少なくとも板状ワークの材質と厚さとを含むワーク条件に対して、少なくともレーザ光出力と、加工点の前記板状ワークに対する前記相対的移動速度と、前記加工ヘッドの前記レーザ光出射側端面と前記加工点との間の距離と、をレーザ加工条件として含む実質的に最適な既得最適レーザ加工条件が記録されており、

前記加工条件設定部は、前記ワークに設定された前記加工線のうち、前記加工線が直線状であり、前記加工線に沿った前記ワークの肉厚が一定である区間のうちの少なくとも一部の特定区間については、前記加工条件記録部に記録されている前記既得最適レーザ加工条件からワーク条件が一致するか略一致する略最適レーザ加工条件に設定し、前記特定区間以外の前記加工線の区間のうち、少なくとも前記特定区間に隣接した加工線の区間の少なくとも一部分の区間については、前記特定区間について設定した前記略最適レーザ加工条件に対する前記シミュレーション結果として得られた前記加工点あるいは前記加工点の近傍の温度を前記所定温度として、前記非定常熱流体シミュレーションによって求まる前記加工点あるいは前記加工点の近傍の温度が前記特定区間と同じ前記所定温度になるレーザ加工条件に設定する、請求項7に記載の三次元レーザ加工システム。

【請求項10】

更に、レーザ加工時に前記加工線に沿って移動する前記加工点の温度と前記加工点の近傍の前記ワークの表面温度との少なくとも一方の温度を検出可能な温度検出手段を備え、

前記制御部は、前記加工条件設定装置によって設定された前記レーザ加工条件で前記ワークをレーザ加工中のある時点で、前記温度検出手段によって検出された検出温度と、前記加工条件設定装置によって設定された前記レーザ加工条件に対する前記シミュレーション結果に含まれている前記ある時点に対応した時点の対応する位置に対して予測された予測温度と、の間に温度差が生じた場合には、前記温度差に応じて、前記加工条件設定装置によって設定された前記レーザ加工条件の少なくとも一部を補正する機能を有し、

前記レーザ装置は、補正されたレーザ加工条件でレーザ加工を継続する、請求項6～9のいずれか1項に記載の三次元レーザ加工システム。

【請求項11】

更に、温度検出手段と、第1機械学習装置と、を備え、

前記温度検出手段は、レーザ加工時に前記加工線に沿って移動する前記加工点の温度と前記加工点の近傍の前記ワークの表面温度との少なくとも一方の温度を検出可能であり、

前記第1機械学習装置は、

少なくとも、前記加工条件設定部によって設定された前記レーザ加工条件と、設定された前記レーザ加工条件に対する前記シミュレーション結果を含む前記三次元レーザ加工システムの状態データと、が入力データとして入力される第1状態観測部と、

前記温度検出手段によって検出された前記温度の時間変化データを正解データであるラベルとして取得するラベル取得部と、

10

20

30

40

50

前記入力データと前記ラベルとのペアが多数入力されることによって、前記入力データと前記ラベルとの関係を学習する第1学習部と、を有し、

前記第1学習部は、学習結果を用いて、新たに入力された入力データに対して、前記温度検出手段によって検出される前記温度の時間変化データを予測し、

前記加工条件設定装置は、前記第1学習部が予測した前記温度の時間変化データを参照して、前記レーザ加工条件を修正する、請求項6に記載の三次元レーザ加工システム。

【請求項12】

前記制御部は、前記第1学習部が予測した前記温度の前記時間変化データを参照して、前記加工条件設定装置によって修正された前記レーザ加工条件で前記ワークをレーザ加工中のある時点で、前記温度検出手段によって検出された検出温度と、修正された前記レーザ加工条件に対する前記シミュレーション結果に含まれている前記ある時点に対応した時点の対応する位置に対して予測された予測温度と、の温度差が所定温度差より大きくなると、前記温度差に応じて、前記加工条件設定装置によって修正された前記レーザ加工条件の少なくとも一部を補正する機能を有し、

10

前記レーザ装置は、補正されたレーザ加工条件でレーザ加工を継続する、請求項11に記載の三次元レーザ加工システム。

【請求項13】

更に、上位コンピュータと、上位ネットワークと、下位ネットワークと、を備え、

前記第1機械学習装置と複数の前記レーザ装置とが前記下位ネットワークを介して接続されることにより製造セルを構成しており、

20

複数の前記製造セルと前記上位コンピュータとが前記上位ネットワークを介して接続され、

前記上位コンピュータは、前記加工条件設定装置のうちの少なくとも前記熱流体シミュレーション部として機能し、

少なくとも前記熱流体シミュレーション部による前記非定常熱流体シミュレーションのシミュレーション条件である前記レーザ加工条件と、少なくとも前記非定常熱流体シミュレーションのシミュレーション結果の一部である前記温度検出手段で検出されると予測される温度の時間変化データとが、前記上位ネットワークと前記下位ネットワークとを經由して、前記第1機械学習装置の前記第1状態観測部に入力され、

前記温度検出手段によって検出された前記温度の時間変化データが、前記下位ネットワークを經由して前記第1機械学習装置の前記ラベル取得部に入力され、

30

前記上位ネットワークと前記下位ネットワークとを介して複数の前記第1学習部間で前記学習結果である学習モデルが共有される、請求項11又は12に記載の三次元レーザ加工システム。

【請求項14】

更に、少なくとも一つ以上のインライン画像モニタリング装置と、第2機械学習装置と、を備え、

前記インライン画像モニタリング装置は、前記ワークのレーザ加工中の部分とレーザ加工直後の部分との少なくともいずれかの部分の前記ワークの表面あるいは前記ワークの内部の二次元的形状あるいは三次元的形状を表す画像データを取得可能であり、

40

前記第2機械学習装置は、

少なくとも、前記加工条件設定部によって設定された前記レーザ加工条件と、設定された前記レーザ加工条件に対する前記シミュレーション結果として前記画像データに対応する前記ワークの形状データを含む、前記三次元レーザ加工システムの内外の状態を観測して状態データとして出力する第2状態観測部と、

前記インライン画像モニタリング装置によって得られた時系列的な画像データを取得して、予め記録しておいた評価点が付いたサンプル画像データとの比較結果を判定データとして出力する判定データ取得部と、

前記第2状態観測部と前記判定データ取得部からの出力を受け取る第2学習部と、

前記第2学習部の学習結果である価値関数をもとに、前記第2学習部から出力されるレ

50

ーザ加工条件を決定する意志決定部と、を有し、

更に、前記第2学習部は、

前記判定データから報酬を計算する報酬計算部と、

前記報酬をもとに前記価値関数を逐次更新する価値関数更新部と、を有し、

前記第2学習部は、前記意志決定部から出力されたレーザ加工条件を、前記第2状態観測部から入力された前記状態データと前記判定データ取得部から入力された前記判定データとに関連付けて、前記判定データをもとに各状態における最適なレーザ加工条件を試行錯誤的に学習する、請求項2～4のいずれか1項に記載の三次元レーザ加工システム。

【請求項15】

前記制御部は、前記第2機械学習装置から出力された前記レーザ加工条件で、前記ワークをレーザ加工中に、前記判定データ取得部が、前記インライン画像モニタリング装置で撮像された前記画像データと評価点が付いた前記サンプル画像データとを比較して、前記インライン画像モニタリング装置で撮像された前記画像データの評価点が所定点より低いという判定データを出力すると、前記第2機械学習装置から出力された元の前記レーザ加工条件の少なくとも一部を補正する機能を有し、

前記レーザ装置は、補正されたレーザ加工条件でレーザ加工を継続する、請求項14に記載の三次元レーザ加工システム。

【請求項16】

更に、上位コンピュータと、上位ネットワークと、下位ネットワークと、を備え、

前記第2機械学習装置と複数の前記レーザ装置とが前記下位ネットワークを介して接続されることにより製造セルを構成しており、

複数の前記製造セルと前記上位コンピュータとが前記上位ネットワークを介して接続され、

前記上位コンピュータは、前記加工条件設定装置のうちの少なくとも前記熱流体シミュレーション部として機能し、

少なくとも前記熱流体シミュレーション部による前記非定常熱流体シミュレーションのシミュレーション条件である前記レーザ加工条件と、少なくとも前記非定常熱流体シミュレーションのシミュレーション結果の一部である前記画像データに対応する前記ワークの前記形状データとが、前記上位ネットワークと前記下位ネットワークとを経由して、前記第2機械学習装置の前記第2状態観測部に入力され、

前記インライン画像モニタリング装置によって撮像された前記画像データが、前記下位ネットワークを経由して前記第2機械学習装置の前記判定データ取得部に入力され、

前記上位ネットワークと前記下位ネットワークとを介して複数の前記第2学習部間で前記価値関数が共有される、請求項14又は15に記載の三次元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、加工条件設定装置及び三次元レーザ加工システムに関する。詳しくは、三次元形状を備えた被加工対象物（ワーク）に対して、熔接や切断等の加工を行うためのレーザ加工システムにおいて、ワークに対する加工ヘッドの相対的移動条件と、ワークに対する加工ヘッドの相対的移動と連動した少なくともレーザ光出力条件と、を含むレーザ加工条件をレーザ加工前に設定する加工条件設定装置、及び、設定したレーザ加工条件に基づいてレーザ加工を行う三次元レーザ加工システムに関する。

【背景技術】

【0002】

三次元形状を備えたワークにレーザ加工を行う場合は、ワークの加工表面に対して、例えばロボットハンドに把持された加工ヘッドの先端を所定の距離（ギャップ）に保つと共に、加工ヘッドの姿勢を変えて、加工ヘッドの軸を所定の角度に保つ必要がある。このようなレーザ加工を行う場合、当初は加工ヘッドを実際に移動しながらティーチングを行う等の方法が採られてきたが、条件設定に非常に多くの工数を要する。そのため、ワークや

10

20

30

40

50

レーザ加工機のCADデータを利用して動作シミュレーションを行うことにより、動作プログラムを設定することも行われるようになった。

【0003】

しかし、三次元形状を備えたワークにレーザ加工を行う場合は、加工ヘッドの姿勢変化も含めて、ワークに対する加工ヘッドの相対的移動速度は様々に変化し、ワークの加工表面上の加工点の移動速度も様々に変化する。ワークの加工表面上の加工点の移動速度が変化すれば、レーザ光出力等も連動して変化させないと適切な加工結果が得られなくなることは明らかである。更に、三次元形状を備えたワークにおいては、加工点によってワークの肉厚等も変化する。即ち、ワークの肉厚の厚い部分では、ワーク自身の熱伝導によりレーザ光照射によって入熱した熱が拡散して放熱されるので加工点の温度が低下し易い等という熱特性条件もレーザ加工結果に影響を与える。そのため、ワークに対する加工ヘッドの相対的移動条件とワークの肉厚やワークの熱伝導率等の熱特性条件とを考慮して、レーザ光出力を含む適切なレーザ加工条件を求めることは容易ではない。この場合は、何度か試加工を行って加工データを蓄積してから本加工を行うといったことが必要になり、特に少量多品種のワークに対して効率的にレーザ加工が行えないという問題があった。

10

【0004】

従来、三次元形状を備えたワークに対してレーザ加工を行う三次元レーザ加工システムに関連した技術については、既に種々の技術が報告されている。

例えば、特許文献1には、X、Y、Z軸の直角座標系と、軸の姿勢軸とで制御される加工ヘッドの先端に、ノズルを光軸方向に移動自在に設け、このノズル先端とワークとの間のギャップ量を検出するギャップセンサにより、上記ギャップ量を一定に保持するようにノズルの移動量を制御するギャップコントロール手段を設けた三次元レーザ加工機において、加工ヘッドのノズル先端をワーク表面の教示点に対しほぼ法線方向に向けるように位置決めし、この時のX、Y、Zの座標データおよび、の姿勢データを基に、上記教示点を囲む教示点付近の3点を算出して、加工ヘッドをその3点到順次移動させ、このときのノズルとワークとの間の距離を一定に保つ位置で、教示点付近のワーク表面における3点の座標を検出し、この3点で形成される平面に対する法線ベクトルを求め、この法線ベクトルにノズル姿勢を一致させるように加工ヘッドの姿勢データを演算し、この姿勢データに基づいて加工ヘッドを上記教示点において姿勢制御することを特徴とする三次元レーザ加工機における法線検出方法が開示されている。

20

30

【0005】

特許文献2には、三次元方向に相対的に移動自在且つ所望の溶接姿勢が可能なレーザ加工ヘッドによりワークに三次元レーザ加工を行うに先立って行われるYAGレーザ加工機のティーチング方法(教示方法)において、前記レーザ加工ヘッドに設けられた撮像手段により前記ワークを少なくともX軸、Y軸、Z軸方向から撮影し、前記ワークの三次元図形を作成し、この三次元図形に大まかなティーチングポイントおよび溶接姿勢を入力し、前記三次元図形および前記溶接姿勢からマスタJOBを作成し、前記各ティーチングポイントにおける詳細データにより前記マスタJOBを補正する補正JOBを作成すること、を特徴とするYAGレーザ加工機のティーチング方法が開示されている。

【0006】

特許文献3には、互に直交するX、Y、Z軸方向へ移動可能なZ軸コラムに設けた検出ヘッドを、Z軸と平行なA軸回りに回転自在かつ当該A軸に対して直交するB軸回りに回転自在に設け、上記検出ヘッドは、当該検出ヘッドの軸心を通過してワークへ照射されたレーザ光の反射光を受光する複数の光位置検出器を、受光平面に対称配置関係に備えた構成である三次元レーザ加工機のティーチング方法において、CADデータからのX軸、Y軸データによってX軸、Y軸のティーチングポイントを指定して、そのティーチングポイントに前記検出ヘッドを移動せしめると共に、このティーチングポイントにおいて前記検出ヘッドの軸心を通過してワークへ照射されたレーザ光の反射光を前記複数の光位置検出器によって検出し、この複数の光位置検出器の検出値に基づいてワークと検出ヘッドとの間の距離、ワークの表面に対する検出ヘッドの傾きを演算し、上記距離及び傾きがそれぞれ

40

50

予め設定されている最適設定値となるように前記検出ヘッドの姿勢を制御してZ、A、B軸の各座標データを演算し、ティーチングポイントのX軸、Y軸データ及び演算されたZ、A、B軸データに基づいて加工軌跡の加工プログラムを生成することを特徴とする3次元レーザ加工機用ティーチング方法が開示されている。

【0007】

特許文献4には、3次元レーザ加工機と、作業対象物体に対応するデータを蓄積し、グラフィックディスプレイ上に表示し、更に作成された動作プログラムにより上記3次元レーザ加工機及び作業対象物体の動作のシミュレーションを行なうCADシステムと、上記CADシステムで作成された動作プログラムを所望のNC言語の文法に従ったプログラムに変換する手段と、上記CADシステム上の作業対象物体の位置・姿勢データと、実際の作業対象物体の位置、姿勢との間のずれを補正する手段と、を備えたシステムに用いられ、上記CADシステム上の作業対象物体情報に基づいてレーザの焦点が滑らかに移動していく円弧動作データを作成することを特徴とする3次元レーザ加工機のオフライン教示方法が開示されている。

10

【0008】

特許文献5には、3次元レーザ加工システムではなく、板金加工統合支援システムであるが、工作機に対する制御用データである加工情報および該加工情報に関連する加工支援情報を含む板金加工情報の管理を行う板金加工統合支援システムであって、加工側における実加工の際の実加工情報および/または該実加工情報の基礎とされた固有属性情報を収集し、収集された前記実加工情報および前記固有属性情報を前記板金加工情報に帰還することを特徴とする板金加工統合支援システムが開示されている。

20

【0009】

特許文献6には、ロボットの動きに沿ってレーザ光を照射し、3次元形状のワークの加工を施すレーザ加工方法において、前記ワークの加工個所での前記ロボットの軌跡速度を事前に、或いはリアルタイムに計測し、前記軌跡速度に合わせてレーザ光の出力を制御することを特徴とするレーザ加工方法が開示されている。また、ここには、具体的なレーザ光の出力を制御する方法として、樹脂製構造体の表面に設定された照射軌跡に沿ってレーザ光を照射し、樹脂製構造体を部分的に溶融させ、その後再度硬化させる樹脂製構造体の製造方法において、照射軌跡に沿った前記レーザ光の軌跡速度に応じて前記レーザ光の出力を比例的に制御することを特徴とする樹脂製構造体の製造方法も開示されている。

30

【先行技術文献】

【特許文献】

【0010】

【特許文献1】特開平8-300171号公報

【特許文献2】特開2000-117466号公報

【特許文献3】特開平2-104490号公報

【特許文献4】特開平5-80831号公報

【特許文献5】特開2001-219341号公報

【特許文献6】特開2005-329436号公報

【発明の概要】

40

【発明が解決しようとする課題】

【0011】

しかしながら、特許文献1～6に記載の技術では以下の問題がある。

即ち、特許文献1に記載の技術では、加工ヘッドのノズル先端をワーク表面の教示点に対し略法線方向に向けるように位置決めする等、実際に加工ヘッドを移動させて教示を行っている。そのため、教示に非常に工数を要するという問題がある。

【0012】

特許文献2に記載の技術では、撮像手段により撮影したワークの三次元図形を利用してマスタJOBを作成している。しかし、各ティーチングポイントにおける詳細データによりマスタJOBを補正しているため、教示にかなりの工数を要するという問題がやはり存

50

在する。

【0013】

特許文献3に記載の技術では、CADデータを使用しているが、ティーチングポイントの指定に使用しているだけである。この技術では、そのティーチングポイントに検出ヘッドを移動して、検出ヘッドの軸心を通過してワークへ照射されたレーザー光の反射光を複数の光位置検出器によって検出して、ワークと検出ヘッドとの距離やワーク表面に対する検出ヘッドの傾きを演算して加工軌跡の加工プログラムを生成している。そのため、やはり教示にかなりの工数を要するという問題が残っている。

【0014】

特許文献4に記載の技術では、CADシステムで三次元レーザー加工機及び作業対象物体の動作のシミュレーションを行なっており、CADシステム上の作業対象物体の位置・姿勢データと、実際の作業対象物体の位置、姿勢との間のずれの補正も行っている。この技術によれば、教示に要する時間の短縮は可能と思われるが、熱流体シミュレーション等を行っておらず、レーザー光出力等を適切に設定するには試行錯誤が必要である。そのため、レーザー加工条件全体の設定に工数を要するという問題は依然残っている。

【0015】

特許文献5に記載の技術は、加工シミュレーションに言及している。しかし、この技術は、曲げ加工を主とする板金加工が対象であり、前加工として記述されているレーザー加工において、加工点によってワークの厚さ等が変化して放熱特性が変化するという問題がないこともあり、加工シミュレーションにおいて熱流体シミュレーションに言及していない。そのため、特許文献5は、三次元レーザー加工システムで問題になる、ワークに対する加工ヘッドの相対的移動条件とワークの肉厚等の熱特性条件とを考慮してレーザー光出力を含む適切なレーザー加工条件を求めることは容易ではないという前述の課題に対する解決策を開示していない。

【0016】

特許文献6に記載の技術では、前述のように、ワークの肉厚等の熱特性条件を考慮してレーザー光出力を設定する必要があり、レーザー光の軌跡速度に応じて前記レーザー光の出力を比例的に制御するだけでは適切な加工結果を得るためには不十分である。

【0017】

以上のように、三次元形状のワークに対する熔接や切断などの三次元レーザー加工においては、適切なレーザー加工を行うことが可能な条件範囲内で、加工時間短縮のために、ワークの加工面におけるレーザー光の照射スポットである加工点をできるだけ高速で移動する加工条件を選択することが望ましい一方、ワークの加工面に対する加工ヘッドの移動姿勢や移動方向を変える必要がある。加工ヘッドの移動姿勢や移動方向を急に变える場合は、加工ヘッドの移動速度を減速することが不可欠であるため、ワークの加工面における加工点の移動速度も一定でなく、変化させざるを得ない。ワークの加工面における加工点の移動速度が変化すると、良好な加工結果が得られるレーザー光出力等も変わってくる。更に、ワークの肉厚が変わると、ワーク自身の熱伝導等によって、同じレーザー光パワーで加工点を照射しても、加工点の温度は変化するので、やはり良好な加工結果が得られるレーザー光出力等も変わってくる。

【0018】

ギャップセンサでワーク表面と加工ヘッドの相対的位置関係を検出して、検出結果をフィードバックし、ワーク表面と加工ヘッドとの距離やワーク表面に対する加工ヘッドの姿勢を制御したり、赤外センサ等で加工点の温度を検出して、検出結果をフィードバックし、レーザー光出力を制御したりすることも考えられる。しかし、ワークの加工面上の加工点の移動速度が速く、かつ移動速度が変化する場合は、通常のフィードバック制御では、制御の遅れが発生して良好な加工結果が得られないという問題が発生する。

【0019】

そこで、本発明の課題は、以上のような状況を鑑み、三次元形状を備えたワークの加工面に対して、所定の角度と所定のギャップを保った状態で、ワークに対して相対的に移動

10

20

30

40

50

する加工ヘッドの移動条件と、加工ヘッドの移動における速度変化に伴うワーク表面上の加工点の移動速度の変化と、ワークの肉厚等の加工点の移動に伴う加工点の熱特性条件の変化に伴って変化する良好な加工結果を得るための加工条件の変化と、を考慮したレーザー光出力条件を含む最適なレーザー加工条件を設定可能な加工条件設定装置及び三次元レーザー加工システムを提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0020】

本発明は、熱伝導率と比熱と密度等の熱物性が定義されたワークの三次元CADデータと加工ヘッドの外形の三次元CADデータとを使用して、加工ヘッドが、ワークの三次元CADデータで設定された加工線に沿って、ワークの加工面に対して所定の角度と所定のギャップを保った状態でワークに対して相対的に移動する加工ヘッド移動シミュレーションと、加工ヘッドの移動に連動したワークを含む領域の温度分布の変化を算出する非定常熱流体シミュレーションとを実施して、両シミュレーションの結果に基づいて、実際のレーザー加工前に時系列的な一連のレーザー加工条件を予め設定するものである。

10

【0021】

即ち、本発明は、上記課題を解決するために以下の手段を有する。

(1) 本発明に係る加工条件設定装置(例えば、後述の加工条件設定装置4)は、少なくとも熱伝導率と比熱と密度とを含む熱物性が定義された材質情報を含むワーク(例えば、後述のワーク8)の三次元CADデータと、少なくとも加工ヘッド(例えば、後述の加工ヘッド9)の外形形状と前記加工ヘッドから出射されるレーザー光の光軸の前記加工ヘッドの前記外形形状に対する相対位置の情報を含む前記加工ヘッドの三次元CADデータと、を使用して、仮想空間内において、前記ワークの前記三次元CADデータによって定義される前記ワークの加工表面と前記加工ヘッドの前記光軸との交点を加工点として、前記加工ヘッドが、前記仮想空間内を、前記ワークに対して相対的に移動した時の前記加工点の軌跡として設定された加工線に沿って、前記加工ヘッドの前記光軸が前記加工点を通る前記加工表面に垂直な法線と前記加工線とに対して所定の角度を保ち、かつ、前記加工ヘッドのレーザー光出射側端面と前記加工点との間の距離を所定の距離に保った状態で、前記ワークに対して相対的に移動する条件において、少なくとも前記加工ヘッドの前記ワークに対する相対的位置や相対的移動速度の時間変化の状態を含む前記加工ヘッドの移動状態をシミュレーションする移動状態シミュレーション部(例えば、後述の移動状態シミュレーション部16)と、レーザー光を出射している前記加工ヘッドの移動によって変化する少なくとも前記ワークの一部を含む領域の温度分布を求めるための非定常熱流体シミュレーションを実施する熱流体シミュレーション部(例えば、後述の熱流体シミュレーション部17)と、前記移動状態シミュレーション部と前記熱流体シミュレーション部とによるシミュレーション結果に基づいて、実際のレーザー加工前に、少なくとも前記加工ヘッドの相対的移動条件とレーザー光出力条件を含むレーザー加工条件とを予め設定する加工条件設定部(例えば、後述の加工条件設定部18)と、を備える。

20

30

【0022】

上記(1)に記載の構成によれば、三次元形状を備えたワークの加工面に対して、所定の角度と所定のギャップを保った状態で、ワークに対して相対的に移動する加工ヘッドの移動条件と、加工ヘッドの移動における速度変化に伴うワーク表面上の加工点の移動速度の変化と、ワークの肉厚等の加工点の移動に伴う加工点の熱特性条件の変化に伴って変化する良好な加工結果を得るための加工条件の変化と、を考慮したレーザー光出力条件を含む最適なレーザー加工条件を設定可能な加工条件設定装置を提供できる。即ち、物性が定義された材質情報を含むCADデータに基づいて、自動的に、加工ヘッドの位置や姿勢の速度変化を含む加工ヘッド移動条件と、レーザー出力条件を含むレーザー加工条件との両方を予め設定でき、フィードバック制御のような制御遅れによる加工不良の発生を防止することができる。目標とする非定常熱流体シミュレーション結果になるように、レーザー出力条件等を変えて繰り返し非定常熱流体シミュレーションを行うことが必要であり、非定常熱流体シミュレーションは通常時間を要するが、人間が介在せずに自動的に予め行うことができ

40

50

るので工数は発生しない。

【 0 0 2 3 】

(2) 本発明に係る三次元レーザ加工システム(例えば、後述の三次元レーザ加工システム1、100、200、300、400、500)は、(1)に記載の加工条件設定装置(例えば、後述の加工条件設定装置4)と、少なくとも一つのレーザ発振器(例えば、後述のレーザ発振器5)と、前記レーザ発振器にレーザ発振のための電力を供給する電源部(例えば、後述の電源部6)と、前記レーザ発振器から出射されたレーザ光を前記加工ヘッドに伝播するためのレーザ光学系(例えば、後述のレーザ光学系10)と、前記レーザ光学系を伝搬する前記レーザ発振器からのレーザ出力光と前記レーザ光学系を前記レーザ出力光と反対方向に伝播する戻り光との少なくとも一方の光を検出可能な少なくとも一つの光検出手段(例えば、後述の光検出手段11)と、少なくとも前記加工条件設定部と前記光検出手段とからの出力信号を受け取り、少なくとも前記電源部への電力出力指令を含む制御信号を出力する制御部(例えば、後述の制御部12)と、を有するレーザ装置(例えば、後述のレーザ装置2)と、前記制御部からの制御信号を受け取り、前記ワークに対して前記加工ヘッドを相対的に移動させる駆動装置(例えば、後述の駆動装置3)と、を備える。

10

【 0 0 2 4 】

上記(2)に記載の構成によれば、三次元形状を備えたワークの加工面に対して、所定の角度と所定のギャップを保った状態で、ワークに対して相対的に移動する加工ヘッドの移動条件と、加工ヘッドの移動における速度変化に伴うワーク表面上の加工点の移動速度の変化と、ワークの肉厚等の加工点の移動に伴う加工点の熱特性条件の変化に伴って変化する良好な加工結果を得るための加工条件の変化と、を考慮したレーザ光出力条件を含む最適なレーザ加工条件を設定可能な三次元レーザ加工システムを提供できる。即ち、物性が定義された材質情報を含むCADデータに基づいて、自動的に、加工ヘッドの位置や姿勢の速度変化を含む加工ヘッド移動条件と、レーザ出力条件を含むレーザ加工条件との両方を予め設定でき、フィードバック制御のような制御遅れによる加工不良の発生を防止することができる。目標とする非定常熱流体シミュレーション結果になるように、レーザ出力条件等を変えて繰り返し非定常熱流体シミュレーションを行うことが必要であり、非定常熱流体シミュレーションは通常時間を要するが、人間が介在せず自動的に予め行うことができるので工数は発生しない。

20

30

【 0 0 2 5 】

(3) (2)に記載の三次元レーザ加工システムにおいて、前記戻り光を検出可能な前記光検出手段を少なくとも一つ備えており、前記光検出手段によって検出された前記戻り光の検出結果から、前記制御部が前記戻り光の光量を抑制する必要があると判定した場合に、前記加工条件設定部によって予め設定されたレーザ加工条件を少なくとも一時的に変更して、前記レーザ光出力条件と前記加工ヘッドの前記ワークに対する前記相対的移動速度との両方のレーザ加工条件を変更して、前記加工点の温度あるいは前記加工点の近傍の前記ワークの温度が、目標温度に近い温度に維持できる条件を満たすように、前記制御部から前記電源部と前記駆動装置とに前記制御信号を出力するものでもよい。

【 0 0 2 6 】

上記(3)に記載の構成によれば、例えば、レーザ光出力を下げると同時に加工ヘッドの相対的移動速度も下げる等の方法で、加工点の温度や加工点の近傍のワークの温度を目標温度に近い温度に維持することによって、戻り光によるレーザ光学系やレーザ発振器の損傷を防止しながら、加工不良の発生確率を低減できる。

40

【 0 0 2 7 】

(4) (2)又は(3)に記載の三次元レーザ加工システムにおいて、更に、前記加工ヘッドの前記レーザ光出射側端面と前記加工点との間の距離を測定可能な測距手段(例えば、後述の測距手段25)を備え、前記制御部は、実際にレーザ加工を行っている時に、前記測距手段による測定結果に基づいて、前記加工ヘッド移動シミュレーションの結果に基づいて予め設定した前記レーザ加工条件のうちの少なくとも前記加工ヘッドの前記相

50

対的移動条件を補正する機能を有するものでもよい。

【0028】

上記(4)に記載の構成によれば、予め設定した加工ヘッドの移動条件で実際にレーザ加工を行った場合、ワークの形状精度、ワークの保持精度、ワークの熱変形等によるワークの三次元CADデータと実際のワークとの形状や位置の僅かな差異によって生じる加工ヘッドのレーザ光出射側端面と加工点の間との距離の所定の距離からのずれを補正できる。僅かな差異の補正なので補正遅れによる加工不良は発生しにくい。

【0029】

(5) (2)~(4)のいずれかに記載の三次元レーザ加工システムにおいて、更に、レーザ加工時に前記加工線に沿って移動する前記加工点の温度と前記加工点の近傍の前記ワークの表面温度との少なくとも一方の温度を検出可能な温度検出手段(例えば、後述の温度検出手段26)を備え、前記制御部は、前記加工条件設定装置によって設定された前記レーザ加工条件で前記ワークをレーザ加工中のある時点で、前記温度検出手段によって検出された検出温度と、前記加工条件設定装置によって設定された前記レーザ加工条件に対する前記シミュレーション結果に含まれている前記ある時点に対応した時点の対応する位置に対して予測された予測温度と、の間に温度差が生じた場合には、前記温度差に応じて、前記加工条件設定装置によって設定された前記レーザ加工条件の少なくとも一部を補正する機能を有し、前記レーザ装置は、補正されたレーザ加工条件でレーザ加工を継続するようにしてもよい。

【0030】

上記(5)に記載の構成によれば、非定常熱流体シミュレーションの誤差等によって、予め設定したレーザ加工条件では、加工点や加工点の近傍の温度が目標温度からずれている場合に、温度のずれを低減でき、レーザ加工品質を安定させることができる。

【0031】

(6) (2)~(4)のいずれかに記載の三次元レーザ加工システムにおいて、前記熱流体シミュレーション部は、前記ワークに対する前記加工ヘッドからのレーザ光の照射効果を、前記ワークへの入熱による前記ワークの温度上昇だけとして、前記ワークが相遷移しないという仮定に基づいて、前記非定常熱流体シミュレーションを実施するようにしてもよい。

【0032】

上記(6)に記載の構成によれば、レーザ加工時においては、ワークの加工点では、ワークの温度が上昇して、ワークが固体から液体や気体、あるいは更に電離した気体に相当するプラズマに相遷移するが、熔融部における液相の流れやプラズマの発生等を考慮した厳密な非定常熱流体シミュレーションは非常に計算負荷が大きいため、ワークが相遷移しないと仮定した非定常熱流体シミュレーションに置換えることで比較的容易にシミュレーション結果が得られるようになる。

【0033】

(7) (6)に記載の三次元レーザ加工システムにおいて、前記加工条件設定装置は、前記加工線のうちの少なくとも一部の加工区間については、前記加工ヘッドが前記ワークに対して相対的に移動している前記相対的移動速度に関わらず、前記加工点の温度と前記加工点の近傍の温度との少なくとも一方の温度が所定温度になるというシミュレーション結果が得られるレーザ加工条件を設定するようにしてもよい。

【0034】

上記(7)に記載の構成によれば、ワークの表面が直角に曲がっており、その外側の面をレーザ加工する場合等、加工ヘッドの姿勢を変える間は加工点が移動しないよう場合でも、加工点やその近傍の温度が上昇し過ぎないようにレーザ光出力を制御するレーザ加工条件が設定できる。また、厚み等が変化しているワークに対しても加工点やその近傍の温度が一定になるように制御することができる。なお、レーザ加工中は実際には相遷移する加工点ではなく、固体の状態が維持される加工点の近傍の温度をレーザ加工条件設定の指標にすることによって、相遷移を無視することによる非定常熱流体シミュレーションの誤

10

20

30

40

50

差を低減できる。

【 0 0 3 5 】

(8) (7) に記載の三次元レーザ加工システムにおいて、前記熱流体シミュレーション部には、前記加工条件設定部によって設定された前記レーザ加工条件に対する前記シミュレーション結果に含まれている前記加工点あるいは前記加工点の近傍の温度と、前記レーザ加工条件で実際にレーザ加工を行った時に測定された対応する位置の温度と、の相関関係を表す相関データが記録されており、前記熱流体シミュレーション部は、前記相関データを参照して、実際のレーザ加工において目標とする前記所定温度に対して、前記非定常熱流体シミュレーションにおいて目標とする置換所定温度を決定して、前記非定常熱流体シミュレーションを実施するようにしてもよい。

10

【 0 0 3 6 】

上記(8) に記載の構成によれば、ワークが相遷移しないと近似した非定常熱流体シミュレーションでは、シミュレーションで算出された加工点あるいは加工点の近傍の温度と、実際のレーザ加工において対応する温度とは、ある程度の乖離は避けられない。しかし、収集した相関データを利用して、目標とする加工点あるいは加工点の近傍の温度を補正して非定常熱流体シミュレーションを行うことによって、実際のレーザ加工において、加工点あるいは加工点の近傍の温度を目標とする温度に近付けることができる。

【 0 0 3 7 】

(9) (7) に記載の三次元レーザ加工システムにおいて、前記加工条件設定装置は、更に、加工条件記録部(例えば、後述の加工条件記録部 2 4)を備え、前記加工条件記録部には、レーザ加工の種類毎に、少なくとも板状ワークの材質と厚さを含むワーク条件に対して、少なくともレーザ光出力と、加工点の前記板状ワークに対する前記相対的移動速度と、前記加工ヘッドの前記レーザ光出射側端面と前記加工点との間の距離と、をレーザ加工条件として含む実質的に最適な既得最適レーザ加工条件が記録されており、前記加工条件設定部は、前記ワークに設定された前記加工線のうち、前記加工線が直線状であり、前記加工線に沿った前記ワークの肉厚が一定である区間のうちの少なくとも一部の特定区間については、前記加工条件記録部に記録されている前記既得最適レーザ加工条件からワーク条件が一致するか略一致する略最適レーザ加工条件に設定し、前記特定区間以外の前記加工線の区間のうち、少なくとも前記特定区間に隣接した加工線の区間の少なくとも一部分の区間については、前記特定区間について設定した前記略最適レーザ加工条件に対する前記シミュレーション結果として得られた前記加工点あるいは前記加工点の近傍の温度を前記所定温度として、前記非定常熱流体シミュレーションによって求まる前記加工点あるいは前記加工点の近傍の温度が前記特定区間と同じ前記所定温度になるレーザ加工条件に設定するようにしてもよい。

20

30

【 0 0 3 8 】

上記(9) に記載の構成によれば、良好な加工結果を得るために設定する必要があるレーザ加工条件は、レーザ光出力、加工ヘッドのレーザ光出射側端面と加工点の間との距離(レーザ光の焦点とワークの加工面との位置関係)、加工ヘッドのワークに対する相対的移動速度等以外に、シールドガスやアシストガスの条件等もあり、多岐に亘るため、最適なレーザ加工条件の決定は容易ではないが、切断や溶接等のレーザ加工の種類毎に、またワークの材質毎に、ワークの肉厚が一定で、ワーク表面が平坦であるという限られたワーク条件と、かつ加工線が直線であるという限られた加工線形状条件を満たす加工線の区間については、記録しておいた略最適なレーザ加工条件を適用することで、確実に良好な加工結果を得ることができると共に、ワーク条件が近い隣接区間についても、良好な加工結果を得られる可能性の高いレーザ加工条件を容易に設定できるようになる。

40

【 0 0 3 9 】

(1 0) (6) ~ (9) のいずれかに記載の三次元レーザ加工システムにおいて、更に、レーザ加工時に前記加工線に沿って移動する前記加工点の温度と前記加工点の近傍の前記ワークの表面温度との少なくとも一方の温度を検出可能な温度検出手段(例えば、後述の温度検出手段 2 6)を備え、前記制御部は、前記加工条件設定装置によって設定され

50

た前記レーザ加工条件で前記ワークをレーザ加工中のある時点で、前記温度検出手段によって検出された検出温度と、前記加工条件設定装置によって設定された前記レーザ加工条件に対する前記シミュレーション結果に含まれている前記ある時点に対応した時点の対応する位置に対して予測された予測温度と、の間に温度差が生じた場合には、前記温度差に応じて、前記加工条件設定装置によって設定された前記レーザ加工条件の少なくとも一部を補正する機能を有し、前記レーザ装置は、補正されたレーザ加工条件でレーザ加工を継続するようにしてもよい。

【0040】

上記(10)に記載の構成によれば、非定常熱流体シミュレーションの誤差によって、予め設定したレーザ加工条件では、実際の加工点や加工点の近傍の温度が、非定常熱流体シミュレーションの結果に含まれる予測温度、言い換えれば、目標温度からずれている場合に、温度のずれを低減でき、レーザ加工品質の低下を低減できる。

【0041】

(11) (6)に記載の三次元レーザ加工システムにおいて、更に、温度検出手段(例えば、後述の温度検出手段26)と、第1機械学習装置(例えば、後述の第1機械学習装置28)と、を備え、前記温度検出手段は、レーザ加工時に前記加工線に沿って移動する前記加工点の温度と前記加工点の近傍の前記ワークの表面温度との少なくとも一方の温度を検出可能であり、前記第1機械学習装置は、少なくとも、前記加工条件設定部によって設定された前記レーザ加工条件と、設定された前記レーザ加工条件に対する前記シミュレーション結果を含む前記三次元レーザ加工システムの状態データと、が入力データとして入力される第1状態観測部(例えば、後述の第1状態観測部29)と、前記温度検出手段によって検出された前記温度の時間変化データを正解データであるラベルとして取得するラベル取得部(例えば、後述のラベル取得部30)と、前記入力データと前記ラベルとのペアが多数入力されることによって、前記入力データと前記ラベルとの関係を学習する第1学習部(例えば、後述の第1学習部31)と、を有し、前記第1学習部は、学習結果を用いて、新たに入力された入力データに対して、前記温度検出手段によって検出される前記温度の時間変化データを予測し、前記加工条件設定装置は、前記第1学習部が予測した前記温度の時間変化データを参照して、前記レーザ加工条件を修正するようにしてもよい。

【0042】

上記(11)に記載の構成によれば、第1学習部が機械学習によって学習を進めることによって、加工条件設定装置が設定したレーザ加工条件に対して、温度検出手段によって検出される温度の時間変化データを正確に予測できるようになるので、加工条件設定装置は、温度の時間変化データが目標通りになるようにレーザ加工条件を修正でき、複雑な形状を持つようなワークに対しても、加工点や加工点の近傍の温度を目標温度に維持しながらレーザ加工を行うことが可能になる。また、レーザ加工条件とそのレーザ加工条件に対するシミュレーション結果の両方を状態データとして観測することによって、シミュレーション結果がヒントになるので、新たなレーザ加工条件に対して温度検出手段によって検出される温度の時間変化データを予測できるようになるための学習を比較的容易に進めることができる。

【0043】

(12) (11)に記載の三次元レーザ加工システムにおいて、前記制御部は、前記第1学習部が予測した前記温度の前記時間変化データを参照して、前記加工条件設定装置によって修正された前記レーザ加工条件で前記ワークをレーザ加工中のある時点で、前記温度検出手段によって検出された検出温度と、修正された前記レーザ加工条件に対する前記シミュレーション結果に含まれている前記ある時点に対応した時点の対応する位置に対して予測された予測温度と、の温度差が所定温度差より大きくなると、前記温度差に応じて、前記加工条件設定装置によって修正された前記レーザ加工条件の少なくとも一部を補正する機能を有し、前記レーザ装置は、補正されたレーザ加工条件でレーザ加工を継続するようにしてもよい。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 4 】

上記(12)に記載の構成によれば、第1学習部の学習が不十分であったり、第1学習部の学習が充分であっても、レーザ加工中に、レーザ装置や駆動装置の周辺状態が変化したり、ワークの表面状態がばらついていたりすると、第1学習部から入力された予測された温度の時間変化データを参照して修正した後に決定したレーザ加工条件で加工していても、温度検出手段で検出される温度が予測した温度と異なってくる可能性があるが、レーザ加工条件を補正することによって、加工不良の発生を抑制できる。

【 0 0 4 5 】

(13) (11)又は(12)に記載の三次元レーザ加工システムにおいて、更に、上位コンピュータ(例えば、後述の上位コンピュータ34)と、上位ネットワーク(例えば、後述の上位ネットワーク35)と、下位ネットワーク(例えば、後述の下位ネットワーク36)と、を備え、前記第1機械学習装置と複数の前記レーザ装置とが前記下位ネットワークを介して接続されることにより製造セル(例えば、後述の製造セル37、370)を構成しており、複数の前記製造セルと前記上位コンピュータとが前記上位ネットワークを介して接続され、前記上位コンピュータは、前記加工条件設定装置のうちの少なくとも前記熱流体シミュレーション部として機能し、少なくとも前記熱流体シミュレーション部による前記非定常熱流体シミュレーションのシミュレーション条件である前記レーザ加工条件と、少なくとも前記非定常熱流体シミュレーションのシミュレーション結果の一部である前記温度検出手段で検出されると予測される温度の時間変化データとが、前記上位ネットワークと前記下位ネットワークとを經由して、前記第1機械学習装置の前記第1状態観測部に入力され、前記温度検出手段によって検出された前記温度の時間変化データが、前記下位ネットワークを經由して前記第1機械学習装置の前記ラベル取得部に入力され、前記上位ネットワークと前記下位ネットワークとを介して複数の前記第1学習部間で前記学習モデルが共有されるようにしてもよい。

【 0 0 4 6 】

上記(13)に記載の構成によれば、温度検出手段によって検出された温度の時間変化データであるラベルをリアルタイムで処理して学習を進める必要がある第1機械学習装置は、数台から数十台のレーザ装置が接続されたフォグネットワークとも言われている下位ネットワークに接続し、リアルタイム性がそれほど要求されないが計算負荷の非常に大きい非定常熱流体シミュレーションは、上位ネットワークに接続されたクラウドサーバなどの上位コンピュータで行うことによって、要求される処理のリアルタイム性と大規模処理能力を両立させることができる。

【 0 0 4 7 】

(14) (2)~(4)のいずれかに記載の三次元レーザ加工システムにおいて、更に、少なくとも一つ以上のインライン画像モニタリング装置(例えば、後述のインライン画像モニタリング装置38)と、第2機械学習装置(例えば、後述の第2機械学習装置39)と、を備え、前記インライン画像モニタリング装置は、前記ワークのレーザ加工中の部分とレーザ加工直後の部分との少なくともいずれかの部分の前記ワークの表面あるいは前記ワークの内部の二次元的形状あるいは三次元的形状を表す画像データを取得可能であり、前記第2機械学習装置は、少なくとも、前記加工条件設定部によって設定された前記レーザ加工条件と、設定された前記レーザ加工条件に対する前記シミュレーション結果として前記画像データに対応する前記ワークの形状データを含む、前記三次元レーザ加工システムの内外の状態を観測して状態データとして出力する第2状態観測部(例えば、後述の第2状態観測部40)と、前記インライン画像モニタリング装置によって得られた時系列的な画像データを取得して、予め記録しておいた評価点が付いたサンプル画像データとの比較結果を判定データとして出力する判定データ取得部(例えば、後述の判定データ取得部41)と、前記第2状態観測部と前記判定データ取得部からの出力を受け取る第2学習部(例えば、後述の第2学習部42)と、前記第2学習部の学習結果である価値関数をもとに、前記第2学習部から出力されるレーザ加工条件を決定する意志決定部(例えば、後述の意志決定部43)と、を有し、更に、前記第2学習部は、前記判定データから報酬

10

20

30

40

50

を計算する報酬計算部（例えば、後述の報酬計算部 44）と、前記報酬をもとに前記価値関数を逐次更新する価値関数更新部（例えば、後述の価値関数更新部 45）と、を有し、前記第 2 学習部は、前記意志決定部から出力されたレーザ加工条件を、前記第 2 状態観測部から入力された前記状態データと前記判定データ取得部から入力された前記判定データとに関連付けて、前記判定データをもとに各状態における最適なレーザ加工条件を試行錯誤的に学習するようにしてもよい。

【0048】

上記（14）に記載の構成によれば、第 2 学習部が機械学習によって学習を進めることによって、インライン画像モニタリング装置で撮像した時系列的な画像データが、良好なレーザ加工結果に直結する高い評価点が付いたサンプル画像データに一致するようなレーザ加工条件を出力できるようになる。また、レーザ加工条件と、そのレーザ加工条件に対するシミュレーション結果として前記画像データに対応する前記ワークの形状データと、を含む状態データを観測することによって、レーザ加工条件のどの条件を変えると、どのようにレーザ加工時あるいはレーザ加工直後のワーク形状が変化するかというシミュレーション結果がヒントになるので、各状態における最適なレーザ加工条件の学習を効率的に進めることができる。

10

【0049】

（15）（14）に記載の三次元レーザ加工システムにおいて、前記制御部は、前記第 2 機械学習装置から出力された前記レーザ加工条件で、前記ワークをレーザ加工中に、前記判定データ取得部が、前記インライン画像モニタリング装置で撮像された前記画像データと評価点が付いた前記サンプル画像データとを比較して、前記インライン画像モニタリング装置で撮像された前記画像データの評価点が所定点より低いという判定データを出力すると、前記第 2 機械学習装置から出力された元の前記レーザ加工条件の少なくとも一部を補正する機能を有し、前記レーザ装置は、補正されたレーザ加工条件でレーザ加工を継続するようにしてもよい。

20

【0050】

上記（15）に記載の構成によれば、第 2 学習部の学習が不十分であったり、第 2 学習部の学習が充分であっても、レーザ加工中に、レーザ装置や駆動装置の周辺状態が変化したり、ワークの表面状態がばらついていたりすると、第 2 機械学習装置から出力されたレーザ加工条件で加工中に、画像データが評価点の高いサンプル画像データから僅かに乖離してくる可能性があるが、レーザ加工条件を補正することによって、加工不良の発生を抑制できる。

30

【0051】

（16）（14）又は（15）に記載の三次元レーザ加工システムにおいて、更に、上位コンピュータ（例えば、後述の上位コンピュータ 34）と、上位ネットワーク（例えば、後述の上位ネットワーク 35）と、下位ネットワーク（例えば、後述の下位ネットワーク 36）と、を備え、前記第 2 機械学習装置と複数の前記レーザ装置とが前記下位ネットワークを介して接続されることにより製造セル（例えば、後述の製造セル 37、370）を構成しており、複数の前記製造セルと前記上位コンピュータとが前記上位ネットワークを介して接続され、前記上位コンピュータは、前記加工条件設定装置のうちの少なくとも前記熱流体シミュレーション部として機能し、少なくとも前記熱流体シミュレーション部による前記非定常熱流体シミュレーションのシミュレーション条件である前記レーザ加工条件と、少なくとも前記非定常熱流体シミュレーションのシミュレーション結果の一部である前記画像データに対応する前記ワークの前記形状データとが、前記上位ネットワークと前記下位ネットワークとを介して、前記第 2 機械学習装置の前記第 2 状態観測部に入力され、前記インライン画像モニタリング装置によって撮像された前記画像データが、前記下位ネットワークを介して前記第 2 機械学習装置の前記判定データ取得部に入力され、前記上位ネットワークと前記下位ネットワークとを介して複数の前記第 2 学習部間で前記価値関数が共有されるようにしてもよい。

40

【0052】

50

上記(16)に記載の構成によれば、インライン画像モニタリング装置によって得られた時系列的な画像データと評価点が付いたサンプル画像データとの比較をリアルタイムに行い、その判定結果を判定データとして第2学習部へ出力し、第2学習部はリアルタイムで判定データから報酬を計算して価値関数を更新して学習を進める必要がある第2機械学習装置は、数台から数十台のレーザ装置が接続されたフォグネットワークとも言われている下位ネットワークに接続し、リアルタイム性がそれほど要求されないが計算負荷の非常に大きい非定常熱流体シミュレーションは、上位ネットワークに接続されたクラウドサーバなどの上位コンピュータで行うことによって、要求される処理のリアルタイム性と大規模処理能力を両立させることができる。

【発明の効果】

10

【0053】

本発明によれば、三次元形状を備えたワークの加工面に対して所定の角度と所定のギャップを保った状態でワークに対して相対的に移動する加工ヘッドの移動条件と、加工ヘッドの移動における速度変化に伴うワーク表面上の加工点の移動速度の変化と、ワークの肉厚等の加工点の移動に伴う加工点の熱特性条件の変化に伴って変化する良好な加工結果を得るための加工条件の変化と、を考慮したレーザ光出力条件を含む最適なレーザ加工条件を設定可能な加工条件設定装置及び三次元レーザ加工システムを提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0054】

【図1】本発明の第1実施形態の三次元レーザ加工システムの概念的な構成を示すブロック図である。

20

【図2】本発明の第1実施形態の三次元レーザ加工システムにおける移動状態シミュレーション結果を加工ヘッドの動きで模擬的に表した例を示す図である。

【図3】本発明の第1実施形態の三次元レーザ加工システムにおける移動状態シミュレーション結果を加工点の移動速度の時間変化で表した例を示すグラフである。

【図4】本発明の第1実施形態の三次元レーザ加工システムにおける非定常熱流体シミュレーション結果をレーザ光出力の時間変化で表した例を示すグラフである。

【図5】ワークに照射されるレーザ光の入射エネルギー密度の空間的な分布例を示すグラフである。

【図6】ワークに照射されるレーザ光の入射エネルギー密度の空間的な他の分布例を示すグラフである。

30

【図7】本発明の第1実施形態の三次元レーザ加工システムにおける移動状態シミュレーション結果を加工ヘッドの動きで模擬的に表した他の例を示す図である。

【図8】本発明の第1実施形態の三次元レーザ加工システムにおける移動状態シミュレーション結果を加工ヘッドの動きで模擬的に表した更に他の例を示す図である。

【図9】本発明の第1実施形態の三次元レーザ加工システムにおける非定常熱流体シミュレーション結果をレーザ光出力の時間変化で表した他の例を示すグラフである。

【図10】本発明の第1実施形態の三次元レーザ加工システムにおける非定常熱流体シミュレーション結果をレーザ光出力の時間変化で表した更に他の例を示すグラフである。

【図11】本発明の第1実施形態の三次元レーザ加工システムにおいて使用する加工点の近傍のシミュレーション結果温度と加工点の近傍の測定温度との相関データの例を示すグラフである。

40

【図12A】本発明の第1実施形態の三次元レーザ加工システムの動作の一例を示す第一のフローチャートである。

【図12B】本発明の第1実施形態の三次元レーザ加工システムの動作の一例を示す第二のフローチャートである。

【図13】本発明の第2実施形態の三次元レーザ加工システムの概念的な構成を示すブロック図である。

【図14A】本発明の第2実施形態の三次元レーザ加工システムの動作の一例を示す第一のフローチャートである。

50

【図 1 4 B】本発明の第 2 実施形態の三次元レーザ加工システムの動作の一例を示す第二のフローチャートである。

【図 1 5】本発明の第 3 実施形態の三次元レーザ加工システムの概念的な構成を示すブロック図である。

【図 1 6 A】本発明の第 3 実施形態の三次元レーザ加工システムの動作の一例を示す第一のフローチャートである。

【図 1 6 B】本発明の第 3 実施形態の三次元レーザ加工システムの動作の一例を示す第二のフローチャートである。

【図 1 6 C】本発明の第 3 実施形態の三次元レーザ加工システムの動作の一例を示す第三のフローチャートである。

10

【図 1 6 D】本発明の第 3 実施形態の三次元レーザ加工システムの動作の一例を示す第四のフローチャートである。

【図 1 7】本発明の第 4 実施形態の三次元レーザ加工システムの概念的な構成を示すブロック図である。

【図 1 8】本発明の第 5 実施形態の三次元レーザ加工システムの概念的な構成を示すブロック図である。

【図 1 9 A】本発明の第 5 実施形態の三次元レーザ加工システムの動作の一例を示す第一のフローチャートである。

【図 1 9 B】本発明の第 5 実施形態の三次元レーザ加工システムの動作の一例を示す第二のフローチャートである。

20

【図 1 9 C】本発明の第 5 実施形態の三次元レーザ加工システムの動作の一例を示す第三のフローチャートである。

【図 1 9 D】本発明の第 5 実施形態の三次元レーザ加工システムの動作の一例を示す第四のフローチャートである。

【図 2 0】本発明の第 6 実施形態の三次元レーザ加工システムの概念的な構成を示すブロック図である。

【発明を実施するための形態】

【0055】

以下、本発明に係る三次元レーザ加工システムの実施形態を、図面を参照して説明する。各図面において、同じ部材には同じ参照符号を付している。また、異なる図面において同じ参照符号が付されたものは、同じ機能を有する構成要素であることを意味するものとする。なお、これらの図面は見易くするために、縮尺を適宜変更している。

30

< 第 1 実施形態 >

図 1 は、本発明の第 1 実施形態の三次元レーザ加工システムの概念的な構成を示すブロック図である。本実施形態の三次元レーザ加工システム 1 は、大きく分けると、レーザ装置 2、駆動装置 3、加工条件設定装置 4 の 3 つの装置から構成されている。

【0056】

レーザ装置 2 は、単体でも使用可能な通常のレーザ装置と同様の構成を備えている。レーザ装置 2 は、少なくとも一つのレーザ光を出射するレーザ発振器 5 と、レーザ発振器 5 にレーザ発振のための電力を供給する電源部 6 と、レーザ発振器 5 から出射したレーザ光を、光ファイバ 7 を経由して、レーザ加工対象物であるワーク 8 に照射するための加工ヘッド 9 を含むレーザ光学系 10 と、レーザ光学系 10 を伝播する光を検出する光検出手段 11 と、少なくとも、電源部 6 に光出力指令に対応した電力出力指令を出力し、光検出手段 11 による検出結果が入力される制御部 12 と、を備えている。

40

【0057】

なお、単体で使用する場合に必要となるレーザ出力条件等を入力する入力部は図示していない。また、図 1 では、レーザ光学系 10 と共に、加工ヘッド 9 や光ファイバ 7 も図示しているが、本明細書では、特に断らない限り、「レーザ光学系」という用語は、加工ヘッド 9 や光ファイバ 7 等を含んだ意味で使用している。従って、本実施形態のように複数のレーザ発振器 5 からのレーザ光を合波する合波器や、図 1 には図示していないが、1 本

50

の光ファイバの端面から出射したレーザ光を他の光ファイバの端面に入射させるファイバカプラや、レーザダイオードモジュールを励起光源とするレーザ発振器の場合は、増幅用光ファイバ等の光増幅媒体やレーザ光を光増幅媒体に入射させるための光学系や、レーザダイオードモジュールをレーザ光源とするレーザ発振器の場合は、レーザダイオードモジュールからのレーザ光を合波する合波器等もレーザ光学系に含まれるものとして記述している。

【0058】

レーザ光学系10は、制御部12からの指令で焦点距離等の光学特性が制御できるようになっていてもよい。また、光検出手段11は、レーザ発振器5から出射されたレーザ光を検出する光検出手段に加えて、加工ヘッド9から出射されたレーザ光がワーク8の表面で反射した反射光等、レーザ光学系10内をレーザ発振器5から出射されたレーザ光と逆方向に伝播する戻り光を検出する光検出手段を備えていることが望ましい。なお、図1において、白抜き矢印はレーザ光を模擬的に示し、実線の矢印は信号線等とその信号の方向を模擬的に示している。図1以降の概念的な構成を示すブロック図においても同様である。

10

【0059】

駆動装置3は、ワーク8の加工面に対して、加工ヘッド9の姿勢を含む加工ヘッド9の位置を移動させるための装置という意味で使用している。本実施形態では、駆動装置3は、ロボット13とロボット制御部14とから構成されており、加工ヘッド9は、ロボット13のハンドに取付けられている。

20

【0060】

ロボット13は、制御部12からの加工ヘッド駆動指令を受けたロボット制御部14からの制御信号によって、加工ヘッド9からのレーザ光出力に同期して、加工ヘッド9を加工ヘッド駆動指令に従った姿勢や位置に移動させる。なお、ワーク8は、保持機構部15によって保持されている。この保持機構部15にもリアモータ等を備えて、駆動装置3の役割を分担させてもよい。保持機構部15に駆動装置3の役割を分担させる場合は、保持機構部15からワーク8の保持状態を示す信号をロボット制御部14あるいは制御部12に出力するだけでなく、ロボット制御部14あるいは制御部12から保持機構部15に保持機構部駆動指令が出力される。

30

【0061】

加工条件設定装置4は、移動状態シミュレーション部16と、熱流体シミュレーション部17と、加工条件設定部18と、加工条件設定制御部19と、指令入力部20と、データ取得部21と、CADデータ記録部22と、表示部23と、から構成されている。

【0062】

指令入力部20にレーザ加工条件を設定するように指令が入力されると、指令入力部20からの指令を受けて、加工条件設定制御部19は、データ取得部21に三次元CADデータを読み込み、CADデータ記録部22に記録するように指令する。上記三次元CADデータは、少なくとも熱伝導率と比熱と密度とを含む熱物性が定義されたワーク8の三次元CADデータと、加工ヘッド9の三次元CADデータとを含む。これらの三次元CADデータは、加工条件設定装置4の外部からデータ取得部21に読み込まれる。

40

【0063】

次に、移動状態シミュレーション部16は、加工条件設定制御部19からの指令を受けて、CADデータ記録部22に記録されているワーク8の三次元CADデータと加工ヘッド9の三次元CADデータを使用して、加工ヘッド9の移動状態をシミュレーションする。加工ヘッド9の移動状態とは、加工ヘッド9が、ワーク8の上記三次元CADデータに設定されている加工線に沿って、ワーク8の加工面に対して所定の角度と所定のギャップを保った状態でワーク8に対して相対的に移動することである。なお、加工線とは、加工ヘッド9がワーク8に対して相対的に移動した時の加工点の軌跡である。加工点とは、ワーク8の加工表面と加工ヘッド9の光軸との交点である。

【0064】

50

加工ヘッド9の移動状態をシミュレーションするに当たっては、加工ヘッド9の位置を移動させる駆動装置3の性能や仕様等から、加工ヘッド9の取り得る姿勢や加工ヘッド9の姿勢の変化を含む加工ヘッド9の移動速度の設定可能範囲を考慮しながら、仮想三次元空間において、加工ヘッド9をワーク8の加工線に沿って、ワーク8の加工面に対して所定の角度と所定のギャップを保った状態でワーク8に対して相対的に移動させることによって行うことが望ましい。

【0065】

図2と図3は、移動状態シミュレーションの一部の具体例を示している。図2と図3において、 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_{19}$ は、加工ヘッド9がワーク8の加工面に対してレーザ加工を行う等間隔の時間を表している。図2に示すように、ワーク8の加工面は直角に変化している。このようにワーク8の加工面が急に変化している場合、加工ヘッド9がワーク8に対して姿勢を変える間は、加工ヘッド9から出射したレーザ光がワーク8の加工面を照射している点、すなわち加工点は、図2中のA点に静止した状態になる。そのため、加工点がA点に近付くと、図3に示すように、ある位置から加工ヘッド9の移動速度は減速する必要がある。

10

【0066】

できるだけ加工時間を短縮するためには、加工ヘッド9の位置制御が安定にできる範囲で、加工点ができるだけA点に近付いてから減速することが望ましい。そのため、駆動装置3の性能等を考慮して、加工ヘッド9の移動速度の減速を開始する位置を決定することになる。

20

【0067】

加工ヘッド9がワーク8に対して姿勢を変える速度も、加工ヘッド9の姿勢制御が安定にできる範囲でできるだけ速いことが望ましい。従って、加工ヘッド9がワーク8に対して姿勢を変え終わると、加工ヘッド9のワーク8に対する移動速度は、加工ヘッド9の位置制御が安定にできる範囲で、できるだけ大きく加速することが望ましい。

【0068】

これらの加工ヘッド9の姿勢変更加速度や移動加速度も、駆動装置3の性能等を考慮して決定することになる。しかし、レーザ装置2が出力可能なレーザ光出力範囲等を考慮すると、加工点の移動速度が大き過ぎると、良好な加工結果が得られない場合もあり得る。そのため、移動状態シミュレーション結果は、可能な速度や加速度の上限を示すものと考えて、最終的な加工ヘッド9のワーク8に対する移動条件を決定することになる。

30

【0069】

図2及び図3に示す移動状態シミュレーションの例では、加工点が t_6 の時点から加工ヘッド9の水平方向の移動速度の減速が始まり、加工点がA点に達した t_8 の時点から加工ヘッド9の姿勢が 90° 傾き終わる t_{12} の時点まで加工点の移動速度は0である。また、加工点が t_{12} の時点から加工ヘッド9の垂直方向の移動速度の加速が始まり、 t_{14} の時点で元の速度に復帰している。

【0070】

このような移動状態シミュレーションの結果は、ワーク8と加工ヘッド9を含む三次元画像の動画として、表示部23に表示させて、シミュレーション結果を確認できるようにしてもよい。その場合、シミュレーション結果を確認し易いように、動画の再生速度や視点は自由に変えられるようにすることが望ましい。なお、移動状態シミュレーションの結果、加工ヘッド9がワーク8等と干渉して、目的とするレーザ加工が実施できない場合は、加工ヘッド9が干渉するのでレーザ加工が実施できないことを表示部23に表示するようにしてもよい。

40

【0071】

熱流体シミュレーション部17は、移動状態シミュレーション部16による移動状態シミュレーション結果に従って、加工ヘッド9がワーク8に対して相対的に移動した時に、加工ヘッド9の移動によって変化する少なくともワーク8の一部を含む領域の温度分布を算出する非定常熱流体シミュレーションを実施する。

50

【 0 0 7 2 】

例えば、加工ヘッド9が図2及び図3に示したように移動する場合、加工ヘッド9が姿勢を変えるために、加工ヘッド9の移動速度が減速して、ワーク8の加工面上の加工線に沿って移動する加工点の移動速度が遅くなると、加工ヘッド9から出射されるレーザー光出力が同じであれば、単位時間当たり加工点に照射されるレーザーエネルギーは増加するため、加工点及び加工点の近傍のワーク8の温度が過剰に上昇して、最適なレーザー加工条件からずれてしまう。そのため、例えば、レーザー加工の種類が切断であれば、ワーク溶融幅が広がり過ぎて切断面が平滑にならない等の加工不良が発生し、レーザー加工の種類が熔接であれば、ポロシティの増加等の加工不良が発生する。

【 0 0 7 3 】

加工不良が発生しないようにするには、加工点の加工線に沿った移動速度が低下するタイミングに合わせて、例えば図4に示すように、レーザー光出力を絞る必要がある。どれだけレーザー光出力を絞れば良いか等、加工点の加工線に沿った移動状態に合わせて、どのようにレーザー光出力等のレーザー加工条件を制御すればよいかを求めるために、非定常熱流体シミュレーションが行われる。基本的には、良好なレーザー加工結果が得られるというシミュレーション結果が得られるまで、シミュレーション結果をフィードバックしてレーザー加工条件を変えながら、非定常熱流体シミュレーションが繰り返されることになる。レーザー光出力を加工点の加工線に沿った移動速度に比例させるというような従来報告されているような制御方法では、例えば図2や図3に示したように、加工ヘッド9が移動する場合、加工ヘッド9が姿勢を変える間は、加工点の加工線に沿った移動速度は0 (m / s) なの

【 0 0 7 4 】

なお、本実施形態の三次元レーザー加工システム1は、移動状態シミュレーション部16と熱流体シミュレーション部17とによるシミュレーション結果に基づいて、加工条件設定部18によって、実際のレーザー加工前に、少なくとも加工ヘッド9の相対的移動条件とレーザー光出力条件とを含むレーザー加工条件を予め設定してレーザー加工を開始することになるが、光検出手段11によって検出された戻り光の検出結果から、制御部12が戻り光の光量を抑制する必要があると判定した場合には、加工条件設定部18によって予め設定されたレーザー加工条件を少なくとも一時的に変更することが望ましい。すなわち、レーザー光出力条件と加工ヘッド9のワーク8に対する相対的移動速度との両方のレーザー加工条件を、例えば、レーザー光出力を下げると同時に加工ヘッド9の相対的移動速度も下げる等、加工点の温度あるいは加工点の近傍のワーク8の温度を目標温度に近い温度に維持できるレーザー加工条件に変更することにより、戻り光によるレーザー光学系10やレーザー発振器5の損傷を防止しながら、加工不良の発生確率を低減できる。

【 0 0 7 5 】

また、図1には示していないが、加工ヘッド9のレーザー光出射側端面と加工点との間の距離を、例えばワーク8に対して非接触で測定することができるレーザー距離センサ等の測距手段を加工ヘッド9等に取り付け、実際にレーザー加工を行っている時に、制御部12が、測距手段による測定結果に基づいて、加工ヘッド移動シミュレーションの結果に基づいて予め設定したレーザー加工条件のうちの少なくとも加工ヘッド9の移動条件を補正することが望ましい。これにより、ワーク8の形状精度、ワーク8の保持精度、ワーク8の熱変形等によるワーク8の三次元CADデータと実際のワーク8との形状や位置の僅かな差異によって生じる加工ヘッド9のレーザー光出射側端面と加工点との間の距離の所定の距離からの僅かなずれを補正して、加工ヘッド9のレーザー光出射側端面と加工点との間の距離の所定の距離からのずれに起因する加工不良が発生しないようにすることができる。僅かな差異の補正なので、補正遅れによる加工不良が発生することはない。

【 0 0 7 6 】

図1には同じく示していないが、レーザー加工時に加工線に沿って移動する加工点の温度と加工点の近傍のワーク8の表面温度との少なくとも一方の温度を、ワーク8に非接触で

10

20

30

40

50

検出可能なサーモグラフィのような温度検出手段を、加工ヘッド 9 等に取り付けてもよい。このとき、制御部 12 は、加工条件設定装置 4 によって設定されたレーザ加工条件でワーク 8 をレーザ加工中のある時点で、温度検出手段によって検出された検出温度と、加工条件設定装置 4 によって設定されたレーザ加工条件に対するシミュレーション結果に含まれている上記ある時点に対応した時点の対応する位置に対して予測された予測温度と、の間に温度差が生じた場合に、その温度差に応じて、加工条件設定装置 4 によって設定されたレーザ加工条件の少なくとも一部を補正する機能を有することが望ましい。これにより、補正されたレーザ加工条件でレーザ加工を継続するようにして、非定常熱流体シミュレーションの誤差等によって、予め設定したレーザ加工条件では、加工点や加工点の近傍の温度が目標温度からずれてきた場合に、温度のずれを低減して、レーザ加工品質を安定させてもよい。例えば、制御部 12 は、温度検出手段によって検出された検出温度が、予測温度や目標温度より下がってくれば、レーザ光出力を増加させ、予測温度や目標温度を上回ってくれば、レーザ光出力を低減する等の補正を行えばよい。

10

【0077】

なお、加工ヘッド 9 の移動によって変化する少なくともワーク 8 の一部を含む領域の温度分布を算出する非定常熱流体シミュレーションについては、ワーク 8 へのレーザ照射によって、レーザ光が電子に吸収されて電子の温度が上がり、その後、クーロン衝突によって原子の格子振動やイオン温度上昇を経て、ワーク 8 の熔融、蒸発、プラズマ化、再凝固等の相遷移や、熔融液の対流や蒸発してガス化した物質の流れ等の複雑な物理現象が引き起こされるので、全ての現象を忠実にシミュレーションして、レーザ加工の結果を含むシミュレーション結果を求めることも考えられる。しかし、全ての現象を忠実にシミュレーションしようとする、計算負荷が膨大になり、シミュレーション結果の精度も充分とは言えないという問題がある。そのため、比較的容易にシミュレーション結果が得られるように、近似的なシミュレーション方法として、ワーク 8 に対する加工ヘッド 9 からのレーザ光の照射効果を、ワーク 8 への入熱によるワーク 8 の温度上昇だけとして、ワーク 8 が相遷移しないというという仮定に基づいて、非定常熱流体シミュレーションを実施してもよい。

20

【0078】

レーザ光の照射効果を、ワーク 8 への入熱によるワーク 8 の温度上昇だけとして、ワーク 8 が相遷移しないというという仮定に基づいて、非定常熱流体シミュレーションを実施する場合、ワーク 8 に対するレーザ光照射の効果を、次の数式 1 のように、レーザ光のワーク 8 への入射エネルギーと、ワーク表面におけるスポット径と、レーザ照射位置のワーク 8 の反射率と、ワーク 8 によるレーザ光の吸収率とだけで近似して、非定常熱流体シミュレーションを行ってもよい。

30

【数 1】

(数式 1)

$$Q(x, y, z, t) = (1 - R) I_0(x, y, t) \exp(-\alpha z)$$

40

【0079】

ここで、 $Q(x, y, z, t)$ は、レーザ照射によるワーク 8 への入熱量を表し、 x と y は、ワーク 8 の加工点における加工面を含む平面の座標を表し、 z は、加工点を通りワーク 8 の加工点における加工面を含む平面に垂直な方向の座標を示している。加工点の座標は、 $x = y = z = 0$ に設定してもよい。また、 t は時間を表し、 R は反射率、 α は吸収率、 $I_0(x, y, t)$ は入射光強度を表している。

【0080】

また、入射光強度は、次の数式 2 のように、ワーク 8 の加工面上の入熱プロファイルを表す空間関数 $f(x, y)$ と、ワーク 8 への入射レーザ光のピーク入射エネルギー密度 I

50

$p(t)$ [W/m²] との積で表すことができる。

【数 2】

(数式 2)

$$I_o(x, y, t) = f(x, y) I_p(t)$$

【0081】

ここで、ピーク入射エネルギー密度 $I_p(t)$ [W/m²] は時間の関数であり、空間関数 $f(x, y)$ は、図 5 に示すように、入射エネルギー密度分布がガウス分布であれば、次の数式 3 で表すことができる。

10

【数 3】

(数式 3)

$$f(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r^2}\right)$$

【0082】

ここで、 r は、入射レーザー光のワーク表面における照射半径であり、スポット径の 1/2 である。また、図 6 に示したように、入射エネルギー密度分布が、トップハット型であれば、空間関数 $f(x, y)$ は、次の数式 4 で近似的に表すことができる。

20

【数 4】

(数式 4)

$$f(x, y) = \begin{cases} 1 & (x^2 + y^2 \leq r^2 \text{ の場合}) \\ 0 & (x^2 + y^2 > r^2 \text{ の場合}) \end{cases}$$

30

【0083】

入射エネルギー密度分布がガウス分布であっても、トップハット型であっても、次の数式 5 に示したように、数式を x と y で重積分すれば、レーザー光のワーク 8 への入射エネルギー $r^2 I_p(t)$ [W] になる。空間関数 $f(x, y)$ は、上記のガウス分布やトップハット型に限定されず、実際の強度分布を測定して求めた空間関数等を使用してもよい。

【数 5】

(数式 5)

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) I_p(t) dx dy = \pi r^2 I_p(t)$$

40

【0084】

上記のように、ワーク 8 に対するレーザー照射の効果をも、レーザー光のワーク 8 への入射エネルギーとワーク表面におけるスポット径と、レーザー照射位置のワーク 8 の反射率と、ワーク 8 によるレーザー光の吸収率とだけで近似して、相遷移を考慮しないと、非定常熱流

50

体シミュレーションを行うことは比較的容易である。

【0085】

但し、ワーク8によるレーザ光の吸収率やワーク8の反射率は、ワーク8の熱伝導率や比熱や密度等の物性値と同様に、入熱によるワーク8の温度上昇や相変化により変化するので、正確な物性値を得ることは困難である。そのため、非定常熱流体シミュレーションにおいては、固相に対して利用可能な最も高温における物性値を使用する、固相に対して温度依存性が分かっている場合はより高温まで外挿した温度依存性を考慮した物性値を使用する、形状がシンプルな実験用ワークで実際にレーザ加工を試行して実験結果に合うような物性値を使用する、等の方法を採用してもよい。

【0086】

なお、反射率については、できれば入射角度依存性を考慮することが望ましい。一方、ワーク8が金属の場合、固体におけるレーザ光の吸収率は大きいので、全てワーク8の表面でレーザ光が吸収されると近似してもよい。

【0087】

また、レーザ加工条件に含まれるシールドガスあるいはアシストガスは、本来の役割に加えて、ワーク表面を冷却する効果も大きい。シールドガスあるいはアシストガスは、高速でワーク8に吹き付けられてかなり圧縮されている領域があることから、そのガスによる影響をできるだけ正確に反映させるために、圧縮性気体として非定常熱流体シミュレーションを行うことが望ましい。

【0088】

ワーク8が相遷移しないというという仮定に基づいて、移動状態シミュレーション部16による移動状態シミュレーションの結果に従って、非定常熱流体シミュレーションを実施する場合、加工線のうちの少なくとも一部の加工区間については、加工ヘッド9がワーク8に対して相対的に移動している相対的移動速度に関わらず、加工点の温度と加工点の近傍の温度の少なくとも一方の温度が一定の所定温度になるというシミュレーション結果が得られるレーザ加工条件に設定することを目標とすることができる。なお、レーザ加工中は、実際には相遷移する加工点ではなく、固体の状態が維持される加工点の近傍の温度をレーザ加工条件設定の指標にした方が、相遷移を無視することによる非定常熱流体シミュレーションの誤差が低減できると考えられる。なお、本明細書において、加工点の近傍という言葉は、いずれにおいても、加工点から所定の方向に所定の距離だけ離れたある特定の点あるいは位置という意味で使用している。

【0089】

加工点の温度と加工点の近傍の温度の少なくとも一方の温度が一定の所定温度になるレーザ加工条件に設定することを目標とする場合、移動状態シミュレーション部16による移動状態シミュレーションの結果を踏まえて、熱流体シミュレーション部17が、非定常熱流体シミュレーションを繰り返して、加工点や加工点の近傍の温度が上記所定温度になると推定されるレーザ加工条件を導出する。言い換えれば、加工区間全体について、シミュレーション結果による温度と上記所定温度との差が所定値以下になるまで、非定常熱流体シミュレーションを繰り返すことになる。

【0090】

このようにして、実際のレーザ加工前に、加工条件設定部18が、移動状態シミュレーション部16と熱流体シミュレーション部17のシミュレーション結果に基づいて、加工ヘッド9の移動条件を含むレーザ加工条件を予め設定して、レーザ加工条件を制御部12に出力し、制御部12は、レーザ加工条件に沿った光出力指令や加工ヘッド駆動指令等をレーザ装置2や駆動装置3の各部に出力して、レーザ加工を実行する。

【0091】

上記のように、加工点や加工点の近傍の温度が所定温度になると推定されるレーザ加工条件でレーザ加工を行うことによって、例えば図2に示したように、ワーク8の表面が直角に曲がっており、その外側の面をレーザ加工する場合等、加工ヘッド9の姿勢を変える間は加工点が移動しないよう場合でも、加工点や加工点の近傍の温度が上昇し過ぎないよ

10

20

30

40

50

うにレーザ光出力を制御するレーザ加工条件が設定できる。

【0092】

また、非定常熱流体シミュレーションによって導出された加工点の温度が所定温度になると推定されるレーザ加工条件で加工することによって、厚み等が変化しているワーク8に対しても加工点や加工点の近傍の温度が一定になるように制御することができる。例えば、ワーク8が、図2に示したワーク8から、図7や図8に示したように厚みが変わっているワーク8に変わった場合、図3に示した移動状態シミュレーションの結果は変わらない。しかし、非定常熱流体シミュレーション結果として導出されるレーザ光出力の時間変化は、図4から、それぞれ図9と図10に示すように変わる。

【0093】

すなわち、図7に示すワーク8の場合では、図9に示すように、加工点がA点に近付くと、図2に示したワーク8の場合に比較して、ワーク8の熱伝導による加工点からの放熱量が増加する。そのため、レーザ加工条件は、加工点の温度を所定温度に保つために、レーザ光出力が増加する条件になっている。一方、図8に示すワーク8の場合では、図10に示すように、図2に示したワーク8の場合に比較して、加工点がA点に近付いた時点からワーク8の厚い部分の熱伝導によって放熱量が増加し、ワーク8の厚い部分に対応した位置に加工点が移動すると、放熱量が増加した状態が続く。そのため、レーザ加工条件は、加工点の温度を所定温度に保つために、 t_4 時点あたりからレーザ光出力が増加し始め、その時点以降もレーザ光出力が増加した状態が継続する条件になっている。

【0094】

以上のように、移動状態シミュレーション部16による移動状態シミュレーションの結果に従って、熱流体シミュレーション部17によって非定常熱流体シミュレーションを行うことによって、表面が直角に曲がったワーク8の外面をレーザ加工する場合等、加工ヘッド9の姿勢を変える間は加工点が移動しない場合等でも、加工点の温度が上昇し過ぎないようにレーザ光出力を制御するレーザ加工条件が設定できるだけでなく、厚み等が変化しているワーク8に対しても、加工点の温度が一定になるようにレーザ光出力を制御できる。

【0095】

なお、レーザ光出力を変えるに当たっては、レーザ光出力のピーク値を変える代わりに、パルス出力のデューティを変えて平均レーザ光出力を変えてもよいし、レーザ光出力のピーク値とパルス出力のデューティとの両方を変えてもよいことは言うまでもない。また、レーザ装置2の性能等からレーザ光出力を増加させることができない場合等は、レーザ光出力を増加させる代わりに、加工点の移動速度を低下させてもよい。但し、時系列的な一連のレーザ加工条件が複数設定可能な場合は、加工時間が最短のレーザ加工条件を選択して設定することが望ましい。

【0096】

また、図2、図7及び図8では、ワーク8の一部しか示しておらず、非定常熱流体シミュレーションは少なくともワーク8の一部を含む領域について行うと説明したが、その領域にはワーク8の全体を含んでもよいし、計算負荷が増えるが、ワーク8から保持機構部15に流れる熱エネルギー等も考慮するために、上記領域に保持機構部15の少なくとも一部が含まれるようにしてもよい。その場合は、少なくとも領域内については、保持機構部15についても熱物性が定義された三次元CADデータをデータ取得部21から取得して、非定常熱流体シミュレーションに使用することが望ましい。

【0097】

上記のように、非定常熱流体シミュレーションを行うことは有効ではあるが、非定常熱流体シミュレーションに使用するワーク8の物性値に、高温まで外挿した温度依存性を考慮した物性値を使用していることや、ワーク8の相遷移を考慮しないことから、非定常熱流体シミュレーションで算出された加工点や加工点の近傍の温度と実際のレーザ加工中の加工点や加工点の近傍の温度とは、ある程度の乖離が避けられない。そこで、実際のレーザ加工において、加工点あるいは加工点の近傍の温度を目標温度に近づけるために、図1

10

20

30

40

50

1に示すように、ワーク8の材質毎に、加工条件設定部18によって設定されたレーザ加工条件に対するシミュレーション結果に含まれている加工点あるいは加工点の近傍の温度と、レーザ加工条件で実際にレーザ加工を行った時に測定された対応する位置の温度との相関関係を示すデータを収集した相関データを熱流体シミュレーション部17に記録しておき、熱流体シミュレーション部17が、記録している相関データを参照して、実際のレーザ加工において目標とする所定温度に対して、非定常熱流体シミュレーションにおいて目標とする置換所定温度を決定して、非定常熱流体シミュレーションを実施するようにしてもよい。

【0098】

相関データを収集するためにレーザ加工中の加工点や加工点の近傍の温度を測定する温度センサは、図示していないが、前述のような加工ヘッド9に取付けたサーモグラフィーのような温度検出手段でもよいが、固定されたサーモグラフィーのような温度検出手段でもよいし、ワーク8に熱的に接触しているサーミスタのような温度センサでもよい。

【0099】

また、上記のような非定常熱流体シミュレーションの結果や加工条件設定部18で設定した結果の三次元画像や動画も表示部23に表示させて、シミュレーション結果や設定したレーザ加工条件を確認できるようにしてもよい。この場合は、ワーク8や加工線の温度分布をカラーバーと共にカラーの差で表示してもよい。

【0100】

次に、図12A及び図12Bを用いて、第1実施形態の三次元レーザ加工システム1の具体的な動作の一例について説明する。図12A及び図12Bは、本発明の第1実施形態の三次元レーザ加工システム1の動作の一例を示すフローチャートである。

まず、図1に示した三次元レーザ加工システム1が起動され、動作が開始されると、三次元レーザ加工システム1は、加工条件設定装置4の指令入力部20にレーザ加工条件設定指令があるか否かを判定する(ステップS101)。

【0101】

ここで、レーザ加工条件設定指令がある場合は、加工条件設定制御部19に、主にレーザ装置2の制御部12からレーザ加工条件を設定する対象のレーザ装置2や駆動装置3の性能や仕様等の装置情報を読み込むと共に、指令入力部20から指令のあったレーザ加工内容を読み込み(ステップS102)、次いで、加工条件設定制御部19の指令により、データ取得部21に材質の熱物性が定義されたワーク8の三次元CADデータと、加工ヘッド9の三次元CADデータとをCADデータ記録部22に読み込む(ステップS103)。

【0102】

加工条件設定制御部19は、読み込んだ装置情報やレーザ加工内容とCADデータ記録部22に記録された三次元CADデータとから、装置やワークやレーザ加工内容が全く同じ条件のレーザ加工条件を以前に既に設定して記録しているか否かを判定する(ステップS104)。その結果、未設定の場合は、加工条件設定制御部19からの指令により、まず、移動状態シミュレーション部16が、加工条件設定制御部19が読み込んだ装置情報やレーザ加工内容とCADデータ記録部22に記録されている三次元CADデータとを使用して、ワーク8に対する加工ヘッド9の相対的な移動状態のシミュレーションを実施して、最も短時間でレーザ加工を終了できる加工ヘッド9の相対的移動条件を求める(ステップS105)。

【0103】

次いで、加工条件設定制御部19は、移動状態シミュレーションの結果、加工ヘッド9がワーク8に干渉すること無く移動できるか否かを判定する(ステップS106)。ここで、干渉する場合は、表示部23に加工ヘッド9がワーク8に干渉するので、加工条件設定制御部19は、指令されたレーザ加工は実行できないことを警告表示する(ステップS107)。その後、ステップS101に戻り、新しいレーザ加工条件設定指令が入力されるまで待機する。

10

20

30

40

50

【 0 1 0 4 】

ステップ S 1 0 6 で、加工ヘッド 9 がワーク 8 に干渉せずに移動できると判定された場合は、加工条件設定制御部 1 9 は、熱流体シミュレーション部 1 7 に、該当するワーク 8 の材質について、あるレーザ加工条件で、実際にレーザ加工を行った時に測定された加工点あるいは加工点の近傍の温度と、同じレーザ加工条件で非定常熱流体シミュレーションの結果として得られた対応する位置の温度との相関関係を示す相関データが記録されている否かを判定する（ステップ S 1 0 8 ）。

【 0 1 0 5 】

ステップ S 1 0 8 で相関データが記録されていると判定された場合は、熱流体シミュレーション部 1 7 は、その相関データを参照して、実際のレーザ加工において目標とする所定温度を、非定常熱流体シミュレーションにおいて目標とする所定温度（置換所定温度）に置換え（ステップ S 1 0 9 ）、移動状態シミュレーション部 1 6 によって求めた相対的移動条件を考慮して、レーザ加工条件を仮設定し（ステップ S 1 1 0 ）、非定常熱流体シミュレーションを行う（ステップ S 1 1 1 ）。一方、ステップ S 1 0 8 で相関データが記録されていないと判定された場合は、直接ステップ S 1 1 0 に進む。

10

【 0 1 0 6 】

ステップ S 1 1 1 における非定常熱流体シミュレーションの結果、加工条件設定制御部 1 9 は、加工区間全体について、シミュレーション結果温度と所定温度との差が所定差以下であるか否かを判定する（ステップ S 1 1 2 ）。その結果、所定差以下でなければ、加工条件設定制御部 1 9 は、シミュレーション結果温度が所定温度に比べて低い加工区間については、レーザ光出力を高くする、加工ヘッド 9 のワーク 8 に対する相対的移動速度を低減する等、レーザ加工条件を修正し（ステップ S 1 1 3 ）、ステップ S 1 1 1 に戻る。

20

【 0 1 0 7 】

ステップ S 1 1 2 で、加工区間全体について、シミュレーション結果温度と所定温度との差が所定差以下であると判定されると、加工条件設定部 1 8 が、移動状態シミュレーション部 1 6 と熱流体シミュレーション部 1 7 のシミュレーション結果に基づいて、加工ヘッド 9 の移動条件を含むレーザ加工条件を予め設定し（ステップ S 1 1 4 ）、制御部 1 2 は、レーザ加工の開始を指示する指令があるか否かを判定する（ステップ S 1 1 5 ）。なお、先のステップ S 1 0 4 で、装置やワークやレーザ加工内容が全く同じ条件のレーザ加工条件を以前に既に設定して記録していると判定された場合は、直接、ステップ S 1 1 5 に進む。

30

【 0 1 0 8 】

ステップ S 1 1 5 において、レーザ加工の開始を指示する指令があると判定されると、制御部 1 2 は、加工条件設定部 1 8 から予め設定されたレーザ加工条件を読み込み、読み込んだレーザ加工条件に基づいて、レーザ装置 2 と駆動装置 3 の各部に指令を出力し、レーザ装置 2 は、レーザ加工を開始する（ステップ S 1 1 6 ）。レーザ加工が開始されると、制御部 1 2 は、光検出手段 1 1 による戻り光の検出結果から、戻り光の光量を抑制する必要があるか否かを監視する（ステップ S 1 1 7 ）。

【 0 1 0 9 】

ステップ S 1 1 7 で、戻り光の光量が許容レベルを超えたと判定された場合は、例えば、制御部 1 2 は、戻り光の光量を下げするためにレーザ光出力を下げると共に、加工ヘッド 9 のワーク 8 に対する相対移動速度も下げて、加工点あるいは加工点の近傍の温度をできるだけ所定温度に維持する等のレーザ加工条件の補正を行い（ステップ S 1 1 8 ）、その後、ステップ S 1 1 7 に戻る。

40

【 0 1 1 0 】

一方、ステップ S 1 1 7 で、戻り光の光量が許容レベルを超えていない判定された場合は、制御部 1 2 は、測距手段によって測定された加工ヘッド 9 のレーザ光出射側端面から加工点までの距離が、予め設定したレーザ加工条件から見て正常か否かを判定する（ステップ S 1 1 9 ）。ステップ S 1 1 9 で、正常でないと判定されると、制御部 1 2 は、所定の距離になるように、測距手段による測定結果に基づいて、加工ヘッド 9 の相対的移動条

50

件を補正し（ステップS120）、ステップS117に戻る。また、ステップS119で、正常であると判定されると、制御部12は、温度検出手段で検出された加工点の温度あるいは加工点の近傍の表面温度が、予め設定されたレーザ加工条件に対するシミュレーション結果に含まれている対応する位置に対して予測されている温度、すなわち、所定温度からずれておらず正常か否かを判定する（ステップS121）。

【0111】

ステップS121で、検出された温度が正常でないと判定された場合は、制御部12は、例えば検出された温度が所定温度より低い場合は、レーザ光出力を上げるか、加工ヘッド9のワーク8に対する相対移動速度を下げる等、予め設定されたレーザ加工条件の少なくとも一部を補正し（ステップS122）、ステップS117に戻る。

10

【0112】

一方、ステップS121で、検出された温度が正常であると判定された場合は、制御部12は、指令されたレーザ加工が終了したか否かを判定する（ステップS123）。その結果、終了していないと判定された場合は、制御部12は、ステップS117に戻って、レーザ加工を継続する。一方、終了したと判定された場合は、制御部12は、三次元レーザ加工システム1に対して動作を停止する指令が出ているか否かを判定する（ステップS124）。ここで、停止指令が出ていない場合は、制御部12は、ステップS101に戻って、次のレーザ加工条件設定指令が入力されるのを待ち、停止指令が出ている場合は、三次元レーザ加工システム1の動作を終了させる。

【0113】

20

以上のように、第1実施形態の三次元レーザ加工システム1が、ステップS101からステップS124のステップに従って動作することによって、例えば複雑な三次元構造を持つようなワーク8に対しても、人間が介在することなく、良好な加工結果が期待できるレーザ加工条件を設定すると共にレーザ加工を実行する三次元レーザ加工システム1が実現できる。

【0114】

<第2実施形態>

図13は、本発明の第2実施形態の三次元レーザ加工システムの概念的な構成を示すブロック図である。

図13に示す第2実施形態の三次元レーザ加工システム100が、図1に示す第1実施形態の三次元レーザ加工システム1と異なるのは、加工条件記録部24を新たに備えている点と、図1では図示していなかった測距手段25と温度検出手段26とが、加工ヘッド9に取付けられている点である。

30

【0115】

加工条件記録部24は、レーザ加工の種類毎に、少なくとも板状ワークの材質と厚さとを含むワーク条件に対して、少なくともレーザ光出力、加工点の板状ワークに対する相対的移動速度、加工ヘッド9のレーザ光出射側端面と加工点との間の距離をレーザ加工条件として含む、実質的に最適な既得最適レーザ加工条件を記録している。

【0116】

測距手段25は、前述したように、加工ヘッド9のレーザ光出射側端面と加工点との間の距離を、例えばワーク8に対して非接触で測定可能なレーザ距離センサ等からなる。また、温度検出手段26は、前述したように、レーザ加工時に加工線に沿って移動する加工点の温度と加工点の近傍のワーク8の表面温度との少なくとも一方の温度を、例えばワーク8に対して非接触で検出可能なサーモグラフィ等からなる。

40

【0117】

ところで、レーザ加工は極めて多くのパラメータが関係している。パラメータとしては、波長、出力、モード、ビーム品質、パルス発振の場合の出力波形や周波数やデューティ等のレーザの発振条件のパラメータ、集光光学系のF値、レーザ光焦点と加工面の位置関係、レーザ光の加工面への照射角度、パワー密度、パワー密度分布、アシストガスやシールドガスの噴出条件等の照射条件のパラメータ、加工速度、加工雰囲気、ワーク材質等の

50

加工条件のパラメータ、ワーク、切断、熔接、焼入れ、クラディング、ブレイジング、ピアッシング、マーキング等のレーザ加工の種類や方法等のパラメータが存在する。そのため、第1実施形態の三次元レーザ加工システム1のように、関連データ等だけから、全てのパラメータが最適化されたレーザ加工条件に設定することが困難な場合がある。

【0118】

そこで、本実施形態においては、レーザ加工の種類毎に、また、板状ワークの材質毎に、異なる板状ワークの厚さについて、実質的に全てのパラメータが最適化されたレーザ加工条件を加工条件記録部24に記録しておく。加工条件設定部18は、ワーク8に設定された加工線のうち、加工線が直線状であり、加工線に沿ったワーク8の肉厚が一定である区間のうちの少なくとも一部の特定区間については、加工条件記録部24に記録されている最適レーザ加工条件から、レーザ加工の種類とワーク条件が一致する最適レーザ加工条件を設定する。これによって、加工条件設定部18は、少なくとも該当する特定区間については、それまで知られている最適のレーザ加工条件を設定することができる。

10

【0119】

なお、加工条件記録部24に記録されているレーザ加工条件とワーク8の厚さが異なる等、条件が完全に一致する最適レーザ加工条件が記録されていない場合は、記録されている最適レーザ加工条件のうち、最も条件に近い2つの最適レーザ加工条件から、内挿法あるいは外挿法で、略最適レーザ加工条件を求めて、その略最適レーザ加工条件で特定区間をレーザ加工してもよい。

【0120】

20

特定区間以外の加工線の区間については、特定区間について設定した最適レーザ加工条件あるいは略最適レーザ加工条件でレーザ加工を行った条件での非定常熱流体シミュレーションの結果として求められた加工点あるいは加工点の近傍の温度を所定温度として、非定常熱流体シミュレーションを繰り返すことによって、加工点あるいは加工点の近傍の温度が所定温度になるというシミュレーション結果が得られるレーザ加工条件を求めて、そのレーザ加工条件を設定することによって、特定区間以外の区間についても良好なレーザ加工結果が得られることを期待することができる。なお、最適加工条件の異なる複数の特定区間がある場合には、2つの特定区間に挟まれている区間のレーザ加工条件は、一方の特定区間の最適レーザ加工条件から他方の特定区間の最適レーザ加工条件へ、加工点の移動と共に連続的に変化する条件を設定してもよい。

30

【0121】

また、本実施形態においても、レーザ加工時に加工線に沿って移動する加工点の温度と加工点の近傍のワーク8の表面温度の少なくとも一方の温度を、例えばワーク8に対して非接触で検出可能な温度検出手段26を備え、加工条件設定装置4によって設定されたレーザ加工条件で、ワーク8をレーザ加工中のある時点で、温度検出手段26によって検出された検出温度と、設定されたレーザ加工条件に対するシミュレーション結果に含まれている対応する位置に対して予測された予測温度と、すなわち本実施形態では所定温度と、の間に所定差以上の温度差が生じた場合には、その温度差に応じて、制御部12からの指令により、加工条件設定装置4によって設定されたレーザ加工条件の少なくとも一部を補正したレーザ加工条件でレーザ加工を継続してもよい。

40

【0122】

次に、図14A及び図14Bを用いて、第2実施形態の三次元レーザ加工システム100の具体的な動作の一例について説明する。

図14A及び図14Bは、第2実施形態の三次元レーザ加工システム100の動作の一例を示すフローチャートである。図14A及び図14Bに示すフローチャートが、図12A及び図12Bに示すフローチャートと異なっている点は、図12AのフローチャートのステップS108からステップS110が、図14Aでは、ステップS208からステップS211に置き換わっている点である。従って、図14A及び図14BにおけるステップS201からステップS207と、ステップS212からステップS225とは、図12A及び図12BにおけるステップS101からステップS107と、ステップS111

50

からステップS124と同じである。

【0123】

すなわち、図12AのフローチャートにおけるステップS108からステップS110の動作は、次の通りである。加工条件設定制御部19は、熱流体シミュレーション部17に相関データが記録されているか否かを判定する(ステップS108)。相関データが記録されている場合は、加工条件設定制御部19は、相関データを参照して、実際のレーザ加工において目標とする所定温度を非定常熱流体シミュレーションにおいて目標とする所定温度(置換所定温度)に置き換え(ステップS109)、移動状態シミュレーション部16によって求めた相対的移動条件を考慮して、レーザ加工条件を仮設定する(ステップS110)。ステップS108で相関データが記録されていないと判定された場合は、直接ステップS110に進む。

10

【0124】

これに対し、図14AのフローチャートにおけるステップS208からステップS211の動作は、次の通りである。まず、加工条件設定制御部19は、加工条件記録部24に、レーザ加工の種類とワーク条件の両条件が一致する最適レーザ加工条件が記録されているか否かを判定する(ステップS208)。その結果、両条件が一致する最適レーザ加工条件が記録されている場合は、加工条件設定制御部19は、特定区間にレーザ加工の種類とワーク条件が一致する最適レーザ加工条件を設定し(ステップS209)、レーザ加工条件が設定されていない非特定区間にレーザ加工条件を仮設定する(ステップS211)。一方、ステップS208で両条件が一致する最適レーザ加工条件が記録されていないと判定された場合は、加工条件設定制御部19は、上記のように、記録されている最適レーザ加工条件のうち、最も条件に近い2つの最適レーザ加工条件から、内挿法あるいは外挿法で求めた略最適レーザ加工条件を特定区間に設定する(ステップS210)。その後、ステップS211に進む。

20

【0125】

第2実施形態の三次元レーザ加工システム100が、ステップS201からステップS225のステップに従って動作することによって、第1実施形態の三次元レーザ加工システム1の効果に加えて、加工条件記録部24に記録されている最適レーザ加工条件と条件が一致する部分については、より確実に良好な加工結果を得ることができると共に、ワーク条件が近い隣接区間についても、良好な加工結果を得られる可能性の高いレーザ加工条件を容易に設定できるようになる効果が得られる。

30

【0126】

<第3実施形態>

図15は、本発明の第3実施形態の三次元レーザ加工システムの概念的な構成を示すブロック図である。

第3実施形態の三次元レーザ加工システム200は、図1に示す第1実施形態の三次元レーザ加工システム1に対して、更に、測距手段25と、温度検出手段26と、第1機械学習装置28とを備えている。

【0127】

測距手段25は、前述したように、加工ヘッド9のレーザ光出射側端面と加工点との間の距離を、例えばワーク8に対して非接触で測定可能なレーザ距離センサ等からなる。また、温度検出手段26は、前述したように、レーザ加工時に加工線に沿って移動する加工点の温度と加工点の近傍のワーク8の表面温度との少なくとも一方の温度を、例えばワーク8に対して非接触で検出可能なサーモグラフィ等からなる。

40

【0128】

第1機械学習装置28は、少なくとも、第1状態観測部29と、ラベル取得部30と、第1学習部31と、を備える。第1状態観測部29は、加工条件設定部18によって設定されたレーザ加工条件と、設定されたレーザ加工条件に対するシミュレーション結果を含む、三次元レーザ加工システム200の状態データが入力データとして入力される。ラベル取得部30は、温度検出手段26によって検出された温度の時間変化データを、正解デ

50

ータであるラベルとして取得する。第1学習部31は、上記入力データと上記ラベルのペアが多数入力されることによって、入力データとラベルとの関係を学習する。

【0129】

第1学習部31は、例えば、誤差計算部32と、学習モデル更新部33と、を備える。誤差計算部32は、上記入力データに対する学習モデルからの出力と上記ラベルとの誤差を計算する。学習モデル更新部33は、誤差計算部32が計算した誤差に応じて、学習モデルを更新する。これにより、第1学習部31は学習を進めることができる。第1学習部31は、学習が進むと、学習結果を用いて、新たに入力された入力データに対して、温度検出手段26によって検出される温度の時間変化データを予測することが可能になる。第1学習部31が予測した温度の時間変化データは、加工条件設定装置4の加工条件設定制御部19に入力される。これにより、加工条件設定装置4は、第1学習部31が予測した温度の時間変化データを参照して、レーザ加工条件を修正する。

10

【0130】

次に、図16A～図16Dを用いて、第3実施形態の三次元レーザ加工システム200の具体的な動作の一例について説明する。

図16A～図16Dは、図15に示した三次元レーザ加工システム200の動作の一例を示すフローチャートである。

三次元レーザ加工システム200が起動されると、加工条件設定制御部19は、レーザ加工を実施する指令が出ているか否かを判定する(ステップS301)。レーザ加工実施指令が出ると、加工条件設定制御部19は、主にレーザ装置2の制御部12からレーザ加工条件を設定する対象のレーザ装置2や駆動装置3の性能や仕様等の装置情報を読み込むと共に、指令入力部20から指令のあったレーザ加工内容を読み込む(ステップS302)。

20

【0131】

加工条件設定制御部19の指令により、材質の熱物性が定義されたワーク8の三次元CADデータと加工ヘッド9の三次元CADデータとが、データ取得部21からCADデータ記録部22に読み込まれる(ステップS303)。次いで、加工条件設定制御部19からの指令により、まず、移動状態シミュレーション部16が、加工条件設定制御部19に読み込まれた装置情報やレーザ加工内容と、CADデータ記録部22に記録されているワーク8と加工ヘッド9の三次元CADデータとを使用して、ワーク8に対する加工ヘッド9の相対的な移動状態のシミュレーションを実施して、最も短時間でレーザ加工を終了できる加工ヘッド9の相対的な移動条件を求める(ステップS304)。

30

【0132】

移動状態シミュレーションの結果、加工条件設定制御部19は、加工ヘッド9がワーク8に干渉することなく移動できるか否かを判定する(ステップS305)。ステップS305で、加工ヘッド9がワーク8に干渉すると判定された場合は、加工条件設定制御部19は、表示部23に加工ヘッド9がワーク8に干渉するので指令されたレーザ加工は実行できないことを表示して(ステップS306)、その後、ステップS301に戻り、新しいレーザ加工実施指令が入力されるまで待機する。

【0133】

一方、ステップS305で、加工ヘッド9がワーク8に干渉せずに移動できると判定された場合は、熱流体シミュレーション部17は、非正常熱流体シミュレーションを実施する(ステップS307)。熱流体シミュレーション部17は、レーザ加工の実行中に、温度検出手段26によって検出される温度の時間変化が目標温度変化になるレーザ加工条件、すなわち、本実施形態では、レーザ加工の実行中に、温度検出手段26によって検出される温度が各加工区間において所定温度に近い温度になるというシミュレーション結果が出るまで、非正常熱流体シミュレーションを繰り返して、レーザ加工条件を仮決定する(ステップS308)。

40

【0134】

次に、加工条件設定制御部19は、加工条件設定制御部19に記録されている学習済み

50

フラグがOFFの状態か否かを判断することによって、第1学習部31の学習が充分進んだ状態か否かを判定する(ステップS309)。学習済みフラグがOFFの状態であれば、第1学習部31の学習が未だ不十分ということであり、制御部12からの指令によりレーザ装置2は、シミュレーション結果から加工条件設定部18によって仮決定されたレーザ加工条件で、レーザ加工を開始する(ステップS310)。

【0135】

レーザ加工を実行中は、光検出手段11等によって異常な信号が検出されていないかが常に監視されて判定される(ステップS311)。ここで、異常信号が検出された場合は、制御部12は、レーザ加工条件を補正して(ステップS312)、レーザ加工を継続する。このステップS311とステップS312は、詳細に記載すれば、図12BのフローチャートにおけるステップS117からステップS122、あるいは、図14BのフローチャートにおけるステップS218からステップS223のようになるが、図16A~図16Dのフローチャートでは、同様の動作が3箇所(ステップS311とステップS312、ステップS333とステップS334、ステップS343とステップS344)に出て来るので、ここでは2ステップに簡略化して記載している。

10

【0136】

レーザ加工を実行中、第1状態観測部29は、加工条件設定部18によって設定されたレーザ加工条件と、設定されたレーザ加工条件に対するシミュレーション結果を含む、三次元レーザ加工システム200の状態データを観測する(ステップS313)。次いで、第1状態観測部29は、観測した状態データを入力データとして第1学習部31に出力する(ステップS314)。ラベル取得部30は、温度検出手段26によって検出された温度の時間変化データを正解データとして取得し(ステップS315)、更に、ラベル取得部30は、正解データを第1学習部31にラベルとして出力する(ステップS316)。

20

【0137】

次に、第1学習部31は、入力データからラベルを表現するための関数である学習モデルを既に構築済みか否かを判定する(ステップS317)。ここで、学習モデルが構築済みであると判定された場合、誤差計算部32は、例えば、加工区間毎に、入力データに対する学習モデルからの出力とラベルとの誤差を計算し(ステップS318)、学習モデル更新部33が、誤差計算部32が計算した誤差に応じて、学習モデルを更新する(ステップS320)。

30

【0138】

次に、加工条件設定制御部19は、誤差計算部32で計算された誤差の移動平均値が目標値より小さいか否かを判定する(ステップS321)。ここで、誤差の移動平均値が目標値より小さいと判定された場合は、第1学習部31による学習は充分進んだと判断され、加工条件設定制御部19は、記録されている学習済みフラグをONに切り換える(ステップS322)。続いて、制御部12は、指令されたレーザ加工が終了したか否かを判定する(ステップS323)。レーザ加工が終了していない場合は、ステップS311に戻ってレーザ加工を継続し、レーザ加工が終了している場合は、制御部12は、三次元レーザ加工システム200に対して動作停止指令が出ているか否かを判定する(ステップS346)。動作停止指令が出ている場合は、制御部12は、三次元レーザ加工システム200の動作を終了し、動作停止指令が出ていない場合は、ステップS301に戻り、指令入力部20に新しいレーザ加工実施指令が入力されるまで待機する。

40

【0139】

ステップS317で学習モデルが未構築と判定された場合は、第1学習部31は、入力データとラベルの関係を観察して学習モデルの初期モデルを構築し(ステップS319)、ステップS323に進む。また、ステップS321で、誤差計算部32で計算された誤差の移動平均値が目標値より大きいと判定された場合も、直接ステップS323に進む。

【0140】

以上のように、学習済みフラグがONの状態になるまでは、ステップS301からステップS321までの動作を繰り返す。この動作の繰り返しによって、第1学習部31は学

50

習を進める。

【0141】

ステップS309で、学習済みフラグがONの状態になっていると判定されると、学習結果を用いて、新たに入力された入力データに対して正解データを予測する過程に進み、第1状態観測部29が、加工条件設定部18が設定したレーザ加工条件と、設定されたレーザ加工条件に対するシミュレーション結果を含む、三次元レーザ加工システムの状態データを観測する(ステップS324)。次いで、第1状態観測部29が、観測した状態データを入力データとして第1学習部31に出力する(ステップS325)。

【0142】

第1学習部31は、学習結果である学習モデルを用いて、レーザ加工条件でレーザ加工を実行した場合に、温度検出手段26によって検出される温度の時間変化データを予測する(ステップS326)。加工条件設定制御部19は、第1学習部31によって予測された温度の時間変化データと、良好なレーザ加工結果を得るための目標温度の時間変化データとを、加工区間毎に比較して、予測温度と目標温度との差が所定差より小さいか否かを判定する(ステップS327)。

【0143】

全ての加工区間について、予測温度と目標温度の差が所定差より小さいと判定された場合は、加工条件設定制御部19は、加工条件設定部18が設定したレーザ加工条件を実際にレーザ加工に適用するレーザ加工条件に決定する(ステップS328)。一方、予測温度と目標温度との差が所定差より大きい加工区間があると判定された場合は、加工条件設定制御部19は、第1学習部31によって予測された温度の時間変化データを参照して、レーザ加工条件を修正する(ステップS329)。熱流体シミュレーション部17は、修正されたレーザ加工条件で非定常熱流体シミュレーションを行い(ステップS330)、その後、ステップS324に戻る。そのため、全ての加工区間について、予測温度と目標温度との差が所定差より小さいレーザ加工条件が設定できるようになる。

【0144】

ステップS328で、レーザ加工条件が決定されると、次に、第1学習部31において予測精度向上のために学習を継続する指令の有無が判定される(ステップS331)。

ここで、学習継続の指令が出ていると判定された場合は、制御部12によるステップS332からステップS334までの動作と、第1機械学習装置28によるステップS335からステップS340の動作を実行することによって、第1学習部31の学習結果を用いてレーザ加工条件を決定し、レーザ加工を行いながら、第1学習部31は学習を継続することができる。なお、ステップS332からステップS340は、先のステップS310からステップS320のうちから、学習モデルの構築に関するステップS317とステップS319だけを抜いた動作に相当する

【0145】

ステップS340で、学習モデル更新部33が、誤差計算部32が計算した誤差に応じて学習モデルを更新した後、続いて、制御部12は、指令されたレーザ加工が終了したか否かを判定する(ステップS341)。レーザ加工が終了していないと判定された場合は、ステップS333に戻ってレーザ加工を継続し、レーザ加工が終了していると判定された場合は、制御部12は、三次元レーザ加工システム200に対して動作停止指令が出ているか否かを判定する(ステップS346)。動作停止指令が出ていると判定された場合は動作を終了し、動作停止指令が出ていないと判定された場合は、ステップS301に戻り、指令入力部20に新しいレーザ加工実施指令が入力されるまで待機する。

【0146】

ステップS331で、学習継続の指令が出ていないと判定された場合は、制御部12からの指令によって、レーザ装置2は、レーザ加工を開始する(ステップS342)。レーザ加工の開始後、光検出手段11等によって異常な信号が検出されていないかが常に監視される(ステップS343)。異常信号が検出されると、レーザ加工条件が補正され(ステップS344)、ステップS345で、指令されたレーザ加工が終了したと判定される

10

20

30

40

50

まで、ステップS343に戻って、レーザ加工を継続する。ステップS343で異常信号が検出されない場合は、次のステップS345で指令されたレーザ加工が終了したと判定された後、制御部12は、三次元レーザ加工システム200に対して動作停止指令が出ているか否かを判定する(ステップS346)。動作停止指令が出ている場合は動作を終了し、動作停止指令が出ていない場合は、ステップS301に戻り、指令入力部20に新しいレーザ加工実施指令が入力されるまで待機する。

【0147】

以上のように、ステップS327で、全ての加工区間について、予測温度と目標温度との差が所定差より小さくなるまで非定常熱流体シミュレーションを繰り返すことによって、加工条件設定装置4は、温度の時間変化データが目標通りになるようにレーザ加工条件を修正できる。そのため、本実施形態の三次元レーザ加工システム200は、複雑な形状を持つようなワーク8に対しても、加工点や加工点の近傍の温度を目標温度に維持しながらレーザ加工を行うことが可能になる。本実施形態の第1機械学習装置28は、レーザ加工条件と、そのレーザ加工条件に対するシミュレーション結果との両方を状態データとして観測することによって、シミュレーション結果がヒントになるので、シミュレーション結果を状態データとして観測しない場合に比べて、新たなレーザ加工条件に対して温度検出手段26によって検出される温度の時間変化データを予測できるようになるための学習を比較的容易に進めることができる。

【0148】

なお、本実施形態において、異常信号を検出した時にレーザ加工条件を補正する動作(ステップS311とステップS312、ステップS333とステップS334、ステップS343とステップS344)は、前述のように簡略化して記載しているが、本実施形態においても、図12BのフローチャートにおけるステップS117からステップS122の動作、あるいは、図14BのフローチャートにおけるステップS218からステップS223の動作と同様に、レーザ加工中に、光検出手段11によって検出された戻り光の光量が許容レベルを超えたと判定された場合や、測距手段25によって測定された加工ヘッド9と加工点との間の距離が所定の距離からずれた場合や、温度検出手段26で検出された加工点の温度あるいは加工点の近傍の表面温度がシミュレーション結果から予測されている温度からずれた場合は、予め設定されたレーザ加工条件の少なくとも一部を補正して、補正されたレーザ加工条件でレーザ加工を継続することが望ましい。

【0149】

温度検出手段26で検出される加工点の温度あるいは加工点の近傍の表面温度については、第1学習部31が予測した温度の時間変化データを参照して修正した後に決定したレーザ加工条件で加工していても、予測した温度と異なってくる可能性がある。これは、第1学習部31の学習が不十分である場合や、第1学習部31の学習が充分進んでいても、レーザ加工中にレーザ装置2や駆動装置3の周辺状態が変化した場合や、ワーク8の表面状態がばらついていたりする場合に発生する。しかし、加工点の温度あるいは加工点の近傍の表面温度が予測した温度と異なっても、本実施形態の三次元レーザ加工システム200によれば、レーザ加工条件を補正することによって、加工不良の発生が抑制できる。但し、第1学習部31が学習中にレーザ加工条件を補正した場合は、補正したレーザ加工条件も状態データとして観察して学習を進めることが望ましい。

【0150】

なお、図16A～図16Dのフローチャートを見れば明らかなように、ステップS319で学習済みフラグがONになり、学習を継続する必要がなくなると、ラベル取得部30からラベルを取得する必要がなくなるので、ラベル取得部30を取り外すことも可能である。

【0151】

<第4実施形態>

図17は、本発明の第4実施形態の三次元レーザ加工システムの概念的な構成を示すブロック図である。

10

20

30

40

50

第4実施形態の三次元レーザ加工システム300は、第3実施形態の三次元レーザ加工システム200に対して、更に、上位コンピュータ34と、上位ネットワーク35と、下位ネットワーク36とを備えている。レーザ装置2、駆動装置3及び第1機械学習装置28は、それぞれ複数台含まれている。一つの第1機械学習装置28と複数のレーザ装置2とが下位ネットワーク36を介して接続されることにより、一つの製造セル37が構成される。レーザ装置2は、それぞれに少なくとも一つのレーザ発振器5と、制御部12と、レーザ発振器5からのレーザ出力を出射する少なくとも一つの加工ヘッドと、を備えている。

【0152】

また、複数の製造セル37と上位コンピュータ34とが上位ネットワーク35を介して接続される。上位コンピュータ34が、加工条件設定装置4のうちの少なくとも熱流体シミュレーション部17として機能し、少なくとも熱流体シミュレーション部17による非定常熱流体シミュレーションのシミュレーション条件であるレーザ加工条件と、少なくとも非定常熱流体シミュレーションのシミュレーション結果の一部である温度検出手段で検出されると予測される温度の時間変化データとが、上位ネットワーク35と下位ネットワーク36とを經由して、第1機械学習装置28の第1状態観測部29に入力される。本実施形態では、上位コンピュータ34は、熱流体シミュレーション部17と移動状態シミュレーション部16との機能を果たす構成を有している。

10

【0153】

温度検出手段によって検出された温度の時間変化データは、下位ネットワーク36を經由して第1機械学習装置28のラベル取得部30に入力される。これにより、上位ネットワーク35と下位ネットワーク36を介して複数の第1学習部31間で、学習モデルが共有されるようになっている。

20

【0154】

なお、図の複雑化を避けるために、図17においては、レーザ装置2について、制御部12とレーザ発振器5以外の機能ブロックは省略されている。加工条件設定装置4についても、加工条件設定制御部19、移動状態シミュレーション部16、熱流体シミュレーション部17、加工条件設定部18以外の機能ブロックは省略されている。

【0155】

温度検出手段によって検出された温度の時間変化データであるラベルをリアルタイムで処理して学習を進める必要がある第1機械学習装置28は、数台から数十台のレーザ装置2が接続されたフォグネットワークとも言われている下位ネットワーク36に接続され、リアルタイム性がそれほど要求されないが計算負荷の非常に大きい非定常熱流体シミュレーションは、上位ネットワーク35に接続されたクラウドサーバなどの上位コンピュータ34で行うことによって、要求される処理のリアルタイム性と大規模処理能力を両立させることができる。

30

【0156】

<第5実施形態>

図18は、本発明の第5実施形態の三次元レーザ加工システムの概念的な構成を示すブロック図である。

40

第5実施形態の三次元レーザ加工システム400は、図1に示した第1実施形態の三次元レーザ加工システム1に対して、更に、インライン画像モニタリング装置38と、第2機械学習装置39と、を備えている。三次元レーザ加工システム400は、加工ヘッド9に、図1には示されていない測距手段25も有している。

【0157】

インライン画像モニタリング装置38は、ワーク8の画像データを取得可能な装置である。ワーク8の画像データとは、ワーク8のレーザ加工中の部分とレーザ加工直後の部分との少なくともいずれかの部分のワーク8の表面あるいはワーク8の内部の二次元的形状あるいは三次元的形状を表す画像データである。

【0158】

50

具体的には、インライン画像モニタリング装置 38 は、デジタル二次元撮像装置、CCD 測定顕微鏡、白色干渉計、レーザ顕微鏡（形状測定マイクロスコプ）、非接触三次元測定装置、光源と赤外線カメラから構成される光励起非破壊検査装置、超音波探傷試験装置、誘導加熱式非破壊検査装置、X線透過撮像装置、放射線透過撮像装置、アコースティックエミッション試験装置等であり、レーザ加工中に、レーザ照射による溶融池（溶融部と固体部分の固液界面）、溶融池内の気泡、キーホール、レーザ誘起ブルーム、レーザ誘起プラズマ等の形状をリアルタイムでモニタリングする。

【0159】

レーザ加工の種類が切断の場合には、インライン画像モニタリング装置 38 は、レーザによる切断面の平滑度あるいは面粗度、切断部近傍表裏面の数珠状付着物（ドロス）の単位切断長さ当たりの体積、裏面の単位面積当たりのスパッタ付着量、切断面のスケール（酸化物）色濃度、切断寸法・形状精度、切断面の垂直度等、レーザ加工の結果を示す形状をモニタリングするためにも使用される。また、レーザ加工の種類が熔接の場合には、インライン画像モニタリング装置 38 は、レーザによる熔接部のクラック、ポロシティ、ブローホール、ピンホール、溶け込み不良、融合不良、アンダーカット・オーバーラップ、ハンピング等のレーザ加工の結果を示す形状をモニタリングするためにも使用される。

【0160】

第2機械学習装置 39 は、第2状態観測部 40 と、判定データ取得部 41 と、第2学習部 42 と、意志決定部 43 と、を備える。第2状態観測部 40 は、少なくとも、加工条件設定部 18 によって設定されたレーザ加工条件と、設定されたレーザ加工条件に対するシミュレーション結果として画像データに対応するワーク 8 の形状データを含む、三次元レーザ加工システム 400 の内外の状態を観測し、状態データとして出力する。判定データ取得部 41 は、インライン画像モニタリング装置 38 によって得られた時系列的な画像データを取得して、取得した画像データと、予め記録しておいた評価点が付いたサンプル画像データとの比較結果を判定データとして出力する。第2学習部 42 は、第2状態観測部 40 と判定データ取得部 41 からの出力を受け取る。意志決定部 43 は、第2学習部 42 の学習結果である価値関数をもとに、第2学習部 42 から出力するレーザ加工条件を決定する。

【0161】

また、第2学習部 42 は、判定データから報酬を計算する報酬計算部 44 と、計算された報酬をもとに、価値関数を逐次更新する価値関数更新部 45 とを備える。第2学習部 42 は、意志決定部 43 から出力されたレーザ加工条件を、第2状態観測部 40 から入力された状態データと判定データ取得部 41 から入力された判定データとに関連付けて、判定データをもとに各状態における最適なレーザ加工条件を試行錯誤的に学習する。

【0162】

次に、図 19A ~ 図 19D を用いて、第5実施形態の三次元レーザ加工システム 400 の具体的な動作の一例について説明する。図 19A ~ 図 19BD、第5実施形態の三次元レーザ加工システム 400 の動作の一例を示すフローチャートである。

三次元レーザ加工システム 400 が起動されると、加工条件設定制御部 19 は、レーザ加工を実施する指令が出ているか否かを判定する（ステップ S401）。レーザ加工実施指令が出ると、加工条件設定制御部 19 は、主にレーザ装置 2 の制御部 12 から、レーザ加工条件を設定する対象のレーザ装置 2 や駆動装置 3 の性能や仕様等の装置情報を読み込むと共に、指令入力部 20 から指令のあったレーザ加工内容を読み込む（ステップ S402）。

【0163】

次に、加工条件設定制御部 19 の指令により、データ取得部 21 に材質の熱物性が定義されたワーク 8 の三次元 CAD データと加工ヘッド 9 の三次元 CAD データとが、CAD データ記録部 22 に読み込まれる（ステップ S403）。その後、加工条件設定制御部 19 からの指令により、まず、移動状態シミュレーション部 16 が、加工条件設定制御部 19 が読み込んだ装置情報やレーザ加工内容と、CAD データ記録部 22 に記録されている

ワーク 8 と加工ヘッド 9 との三次元 CAD データを使用して、ワーク 8 に対する加工ヘッド 9 の相対的な移動状態のシミュレーションを実施し、最も短時間でレーザ加工を終了できる加工ヘッド 9 の相対的移動条件を求める (ステップ S 4 0 4)。

【 0 1 6 4 】

移動状態シミュレーションの結果、加工条件設定制御部 1 9 は、加工ヘッド 9 がワーク 8 に干渉することなく移動できるか否かを判定する (ステップ S 4 0 5)。その結果、干渉すると判定された場合は、加工条件設定制御部 1 9 は、表示部 2 3 に、加工ヘッド 9 がワーク 8 に干渉するので指令されたレーザ加工は実施できないことを表示し (ステップ S 4 0 6)、その後、ステップ S 4 0 1 に戻り、新しいレーザ加工実施指令が入力されるまで待機する。一方、ステップ S 4 0 5 で、加工ヘッド 9 がワーク 8 に干渉せずに移動できると判定された場合、熱流体シミュレーション部 1 7 は、加工条件設定制御部 1 9 によって仮設定されたレーザ加工条件で非定常熱流体シミュレーションを実施し (ステップ S 4 0 7)、非定常熱流体シミュレーションを行ったレーザ加工条件をレーザ加工条件として仮決定する (ステップ S 4 0 8)。

【 0 1 6 5 】

なお、本実施形態の三次元レーザ加工システム 4 0 0 は、加工条件設定制御部 1 9 によるレーザ加工条件の仮設定のために、第 2 実施形態の三次元レーザ加工システム 1 0 0 のように、レーザ加工の種類毎に、板状ワークの材質と厚さを含むワーク条件に対して実質的に最適な既得最適レーザ加工条件を記録した加工条件記録部を備え、加工条件記録部に記録されている既得最適レーザ加工条件を参照するようにしてもよい。

【 0 1 6 6 】

続いて、第 2 状態観測部 4 0 は、加工条件設定部 1 8 によって仮決定されたレーザ加工条件と、仮決定されたレーザ加工条件に対するシミュレーション結果として画像データに対応するワーク 8 の形状データを含む、三次元レーザ加工システム 4 0 0 の内外の状態を観測する (ステップ S 4 0 9)。第 2 状態観測部 4 0 が観測した状態データは、第 2 学習部 4 2 に出力される (ステップ S 4 1 0)。第 2 学習部 4 2 は、第 2 状態観測部 4 0 から入力された状態データに対して、第 2 学習部 4 2 の学習結果である価値関数をもとに、予め記録しておいた評価点が付いたサンプル画像データを参照して、インライン画像モニタリング装置 3 8 によって得られる時系列的な画像データが評価点の高い画像データになると推定されるレーザ加工条件を予測する (ステップ S 4 1 1)。その後、意志決定部 4 3 は、出力するレーザ加工条件を決定し、その決定されたレーザ加工条件を、加工条件設定制御部 1 9 を経由して制御部 1 2 に出力し、レーザ加工が開始される (ステップ S 4 1 2)。

【 0 1 6 7 】

レーザ加工が開始されると、レーザ加工中は、制御部 1 2 が光検出手段 1 1 による戻り光の検出結果から戻り光の光量を抑制する必要があるか否かを監視している。ステップ S 4 1 4 で、戻り光の光量が許容レベルを超えたと判定された場合は、例えば、制御部 1 2 からの指令により、戻り光の光量を下げするためにレーザ光出力を下げると共に、加工ヘッド 9 のワーク 8 に対する相対移動速度も下げて、加工点あるいは加工点の近傍の温度をできるだけ所定温度に維持する等のレーザ加工条件の補正を行い (ステップ S 4 1 5)、その後、ステップ S 4 1 6 に進む。

【 0 1 6 8 】

ステップ S 4 1 4 で、戻り光の光量が許容レベルを超えていない判定された場合は、直接ステップ S 4 1 6 に進む。ステップ S 4 1 6 では、制御部 1 2 は、測距手段 2 5 によって測定された加工ヘッド 9 のレーザ光出射側端面から加工点までの距離が、予め設定したレーザ加工条件から見て正常か否かを判定する。その結果、正常でないと判定された場合は、制御部 1 2 は、加工ヘッド 9 のレーザ光出射側端面から加工点までの距離が所定の距離になるように、測距手段 2 5 による測定結果に基づいて、加工ヘッド 9 の相対的移動条件を補正し (ステップ S 4 1 7)、その後、ステップ S 4 1 8 に進む。ステップ S 4 1 6 で、正常であると判定された場合は、直接ステップ S 4 1 8 に進む。

【 0 1 6 9 】

ステップ S 4 1 8 では、加工条件設定制御部 1 9 は、加工条件設定制御部 1 9 に記録されている学習済みフラグが O F F の状態か否かを判定する。学習済みフラグが O F F の状態であれば、未だ第 2 機械学習装置 3 9 は学習中であり、判定データ取得部 4 1 が、レーザ加工中にインライン画像モニタリング装置 3 8 によって得られた時系列的な画像データを取得し、予め記録しておいた評価点が付いたサンプル画像データと比較して評価する（ステップ S 4 1 9）。その後、判定データ取得部 4 1 は、ステップ S 4 1 9 で得られた時系列的な画像データの評価点を、第 2 学習部 4 2 に判定データとして出力する（ステップ S 4 2 0）。

【 0 1 7 0 】

続いて、第 2 学習部 4 2 は、判定データとして第 2 学習部 4 2 に入力された画像データの評価点が、予め設定された合格点より高いか否かを判定する（ステップ S 4 2 1）。その結果、評価点が合格点より高い場合は、報酬計算部 4 4 は、評価点と合格点との差に応じて、差が大きい程、大きなプラスの報酬を計算する。一方、評価点が合格点より低い場合は、制御部 1 2 がリアルタイムでレーザ加工条件を補正する（ステップ S 4 2 3）。その後、報酬計算部 4 4 は、評価点と合格点との差に応じて、差が大きい程、大きなマイナスの報酬を計算する。

【 0 1 7 1 】

報酬が計算されると、価値関数更新部 4 5 は、計算された報酬をもとに、逐次価値関数を更新する（ステップ S 4 2 5）。なお、制御部 1 2 によってレーザ加工条件が一時的に補正された場合は、制御部 1 2 によって補正されたレーザ加工条件でレーザ加工が行われた加工区間に対応した画像データについては、報酬を計算する対象から除くことが望ましい。

【 0 1 7 2 】

続いて、報酬計算部 4 4 が算出した最新の所定個数の報酬の平均値である報酬の移動平均値が、予め設定された目標値より大きいと判定される（ステップ S 4 2 6）。その結果、報酬の移動平均値が目標値より大きいと判定された場合は、第 2 学習部 4 2 による学習は充分進んだと判断され、加工条件設定制御部 1 9 は、加工条件設定制御部 1 9 に記録されている学習済みフラグを O N に切り換える（ステップ S 4 2 7）。続いて、制御部 1 2 は、指令されたレーザ加工が終了したか否かを判定する（ステップ S 4 2 8）。ここで、レーザ加工が終了していないと判定された場合は、ステップ S 4 1 4 に戻ってレーザ加工を継続する。一方、レーザ加工が終了していると判定された場合は、制御部 1 2 は、三次元レーザ加工システム 4 0 0 に対して動作停止指令が出ているか否かを判定する（ステップ S 4 2 9）。動作停止指令が出ていると判定された場合は動作を終了し、動作停止指令が出ていないと判定された場合は、ステップ S 4 0 1 に戻り、指令入力部 2 0 に新しいレーザ加工実施指令が入力されるまで待機する。

【 0 1 7 3 】

以上のように、学習済みフラグが O N の状態になるまで、ステップ S 4 0 1 からステップ S 4 2 9 までの動作を繰り返すことによって、第 2 学習部 4 2 は、意志決定部 4 3 から出力したレーザ加工条件を、第 2 状態観測部 4 0 から入力された状態データと判定データ取得部 4 1 から入力された判定データとに関連付けて、判定データをもとに各状態における最適なレーザ加工条件を試行錯誤的に学習する。

【 0 1 7 4 】

第 2 学習部 4 2 が機械学習によって学習を進めることによって、インライン画像モニタリング装置 3 8 で撮像した時系列的な画像データが、良好なレーザ加工結果に直結する高い評価点が付いたサンプル画像データに一致するようなレーザ加工条件が出力できるようになる。また、レーザ加工条件とそのレーザ加工条件に対するシミュレーション結果として画像データに対応するワーク 8 の形状データを含む状態データを観測することによって、レーザ加工条件のどの条件を変えると、どのようにレーザ加工時あるいはレーザ加工直後のワーク形状が変化するかというシミュレーション結果がヒントになるので、各状態に

10

20

30

40

50

おける最適なレーザ加工条件の学習を効率的に進めることができる。

【0175】

なお、ステップS418で、学習済みフラグがONであると判定された場合は、直接、ステップS428に進むようにして、判定データ取得部41による判定データの取得や、報酬計算部44による報酬の計算を行わないようにしても良いが、学習済みであっても、インライン画像モニタリング装置38によって得られた時系列的な画像データに基づいて、レーザ加工条件を補正する機能を継続させてもよい。

【0176】

その場合、ステップS418で、加工条件設定制御部19は、学習済みフラグがONであると判定すると、画像データに基づくレーザ加工条件の補正機能を継続するかどうかの指令が出ているか否かを判定する(ステップS430)。その結果、補正機能を継続するかどうかの指令が出ている場合は、継続して、判定データ取得部41が、レーザ加工中にインライン画像モニタリング装置38によって得られた時系列的な画像データを取得し、予め記録しておいた評価点が付いたサンプル画像データと比較して評価し(ステップS431)、時系列的な画像データの評価点を、最終的には制御部12に入力されるよう出力する(ステップS432)。次いで、制御部12は、画像データの評価点が合格点より低いかなかを判定する(ステップS433)。評価点が合格点より低いと判定された場合は、リアルタイムでレーザ加工条件を補正し(ステップS434)、その後、ステップS428に進むようにしてもよい。ステップS433で、画像データの前記評価点が合格点より高いと判定された場合は、直接ステップS428に進む。

【0177】

なお、画像データの評価点によってレーザ加工条件を補正するか否かの判断基準として、本実施形態では、評価点を合格点と比較して、その大小関係で判定している。しかし、レーザ加工条件を補正するか否かの判断をするために評価点と大小を比較する点数は、学習済みか否かを判定する際の合格点と一致させる必要はなく、例えば、学習済みか否かを判定する際の合格点より低い点数に設定してもよい。

【0178】

画像データに基づいてレーザ加工条件を補正する機能を継続させることによって、第2学習部42の学習が不十分であったり、第2学習部42の学習が充分であっても、レーザ加工中にレーザ装置2や駆動装置3の周辺状態が変化したり、ワーク8の表面状態がばらついていたりすると、第2機械学習装置39から出力されたレーザ加工条件で加工中に、画像データが評価点の高いサンプル画像データから僅かに乖離してくる可能性があるが、レーザ加工条件を補正することによって、加工不良の発生は抑制できる。

【0179】

また、レーザ加工条件を補正する場合、例えば、レーザ光出力を上げるべきなのか、下げるべきなのかを判定できるように、第2学習部42の学習結果を参照してもよいし、温度検出手段を備えて、その検出結果を参考にするようにしてもよい。また、例えば、プラズマ光検出手段を新たに備えて、検出されたプラズマの強度を参考に、レーザ加工条件を補正するようにしてもよい。

【0180】

なお、本実施形態においては、最適なレーザ加工条件を決定する過程で、第3実施形態の三次元レーザ加工システム200に比べて、非定常熱流体シミュレーションを実施する回数が少なくなるようにしている理由は、ワーク8の温度が上昇して、ワーク8が固体から液体や気体、あるいは更に電離した気体に相当するプラズマに相遷移するが、熔融部における液相の流れやプラズマの発生等を考慮した厳密な非定常熱流体シミュレーションでは、非常に計算負荷が大きいためである。

【0181】

<第6実施形態>

図20は、本発明の第6実施形態の三次元レーザ加工システムの概念的な構成を示すブロック図である。

10

20

30

40

50

第6実施形態の三次元レーザ加工システム500は、第5実施形態の三次元レーザ加工システム400に対して、更に、上位コンピュータ34と、上位ネットワーク35と、下位ネットワーク36とを備えている。レーザ装置2、駆動装置3及び第2機械学習装置39は、それぞれ複数台含まれている。一つの第2機械学習装置39と複数のレーザ装置2とが下位ネットワーク36を介して接続されることにより、一つの製造セル370が構成される。レーザ装置2は、それぞれに少なくとも一つのレーザ発振器5と、制御部12と、レーザ発振器5からのレーザ出力を出射する少なくとも一つの加工ヘッドと、を備えている。

【0182】

また、複数の製造セル370と上位コンピュータ34とが、上位ネットワーク35を介して接続される。上位コンピュータ34は、加工条件設定装置4のうちの少なくとも熱流体シミュレーション部17として機能する。少なくとも熱流体シミュレーション部17による非定常熱流体シミュレーションのシミュレーション条件であるレーザ加工条件と、少なくとも非定常熱流体シミュレーションのシミュレーション結果の一部である画像データに対応するワーク8の形状データとが、上位ネットワーク35と下位ネットワーク36とを經由して、第2機械学習装置39の第2状態観測部40に入力される。本実施形態では、上位コンピュータ34は、熱流体シミュレーション部17と移動状態シミュレーション部16の機能を果たす構成を有している。

10

【0183】

インライン画像モニタリング装置によって撮像された画像データは、下位ネットワーク36を經由して第2機械学習装置39の判定データ取得部41に入力され、上位ネットワーク35と下位ネットワーク36を介して複数の第2学習部42間で価値関数が共有されている。

20

【0184】

なお、図の複雑化を避けるために、図20においては、レーザ装置2については、制御部12とレーザ発振器5以外の機能ブロックを省略している。また、加工条件設定装置4についても、加工条件設定制御部19、移動状態シミュレーション部16、熱流体シミュレーション部17、加工条件設定部18以外の機能ブロックを省略している。

【0185】

インライン画像モニタリング装置によって撮像された時系列の画像データを、リアルタイムで判定データに加工して、必要があればレーザ加工条件を補正し、報酬計算部で報酬を計算して、報酬に応じて価値関数を更新する必要がある第2機械学習装置39は、数台から数十台のレーザ装置2が接続されたフォグネットワークとも言われている下位ネットワーク36に接続し、リアルタイム性がそれほど要求されないが計算負荷の非常に大きい非定常熱流体シミュレーションは、上位ネットワーク35に接続されたクラウドサーバなどの上位コンピュータ34で行うことによって、要求される処理のリアルタイム性と大規模処理能力を両立させることができる。

30

【符号の説明】

【0186】

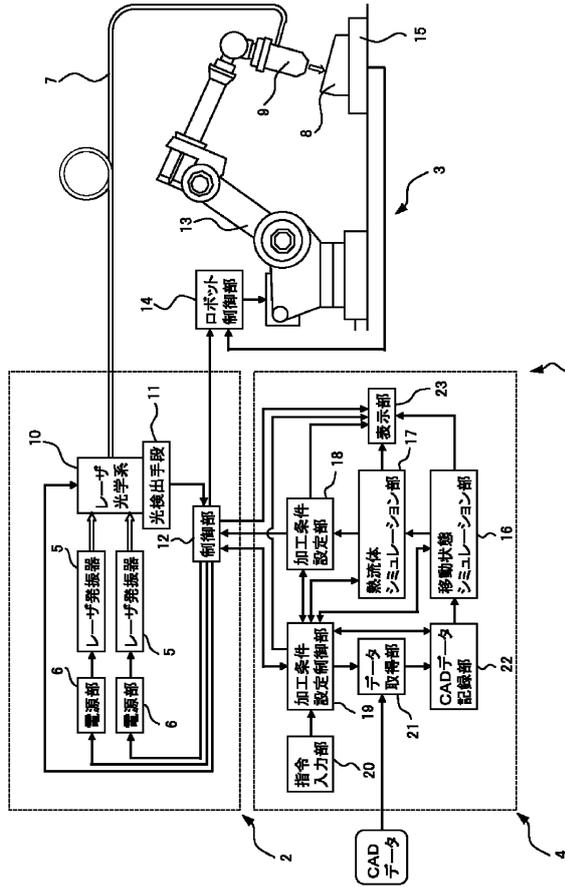
- 1, 100, 200, 300, 400, 500 三次元レーザ加工システム
- 2 レーザ装置
- 3 駆動装置
- 4 加工条件設定装置
- 5 レーザ発振器
- 6 電源部
- 7 光ファイバ
- 8 ワーク
- 9 加工ヘッド
- 10 レーザ光学系
- 11 光検出手段

40

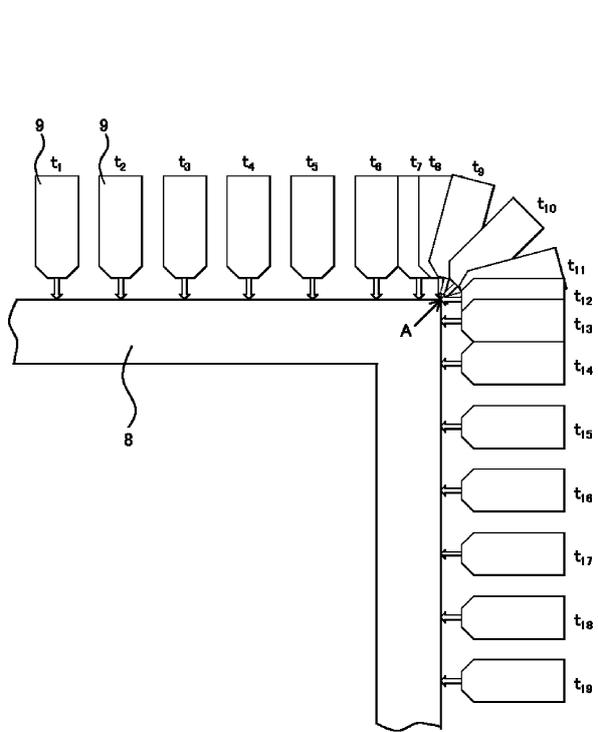
50

1 2	制御部	
1 3	ロボット	
1 4	ロボット制御部	
1 5	保持機構部	
1 6	移動状態シミュレーション部	
1 7	熱流体シミュレーション部	
1 8	加工条件設定部	
1 9	加工条件設定制御部	
2 0	指令入力部	
2 1	データ取得部	10
2 2	C A D データ記録部	
2 3	表示部	
2 4	加工条件記録部	
2 5	測距手段	
2 6	温度検出手段	
2 8	第 1 機械学習装置	
2 9	第 1 状態観測部	
3 0	ラベル取得部	
3 1	第 1 学習部	
3 2	誤差計算部	20
3 3	学習モデル更新部	
3 4	上位コンピュータ	
3 5	上位ネットワーク	
3 6	下位ネットワーク	
3 7 , 3 7 0	製造セル	
3 8	インライン画像モニタリング装置	
3 9	第 2 機械学習装置	
4 0	第 2 状態観測部	
4 1	判定データ取得部	
4 2	第 2 学習部	30
4 3	意志決定部	
4 4	報酬計算部	
4 5	価値関数更新部	

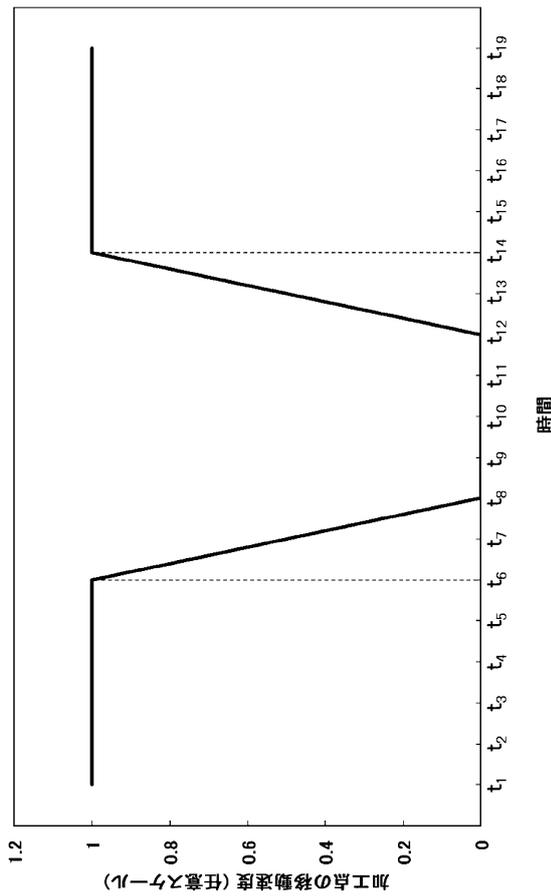
【図1】



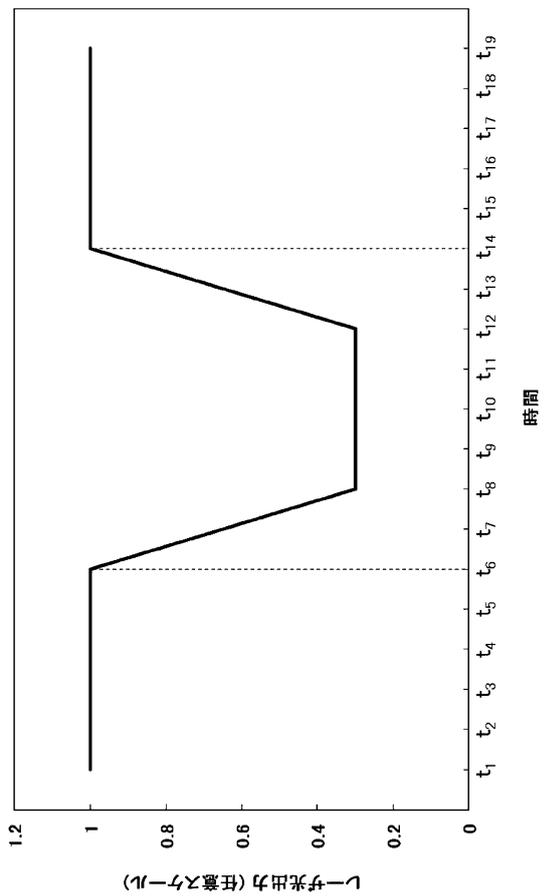
【図2】



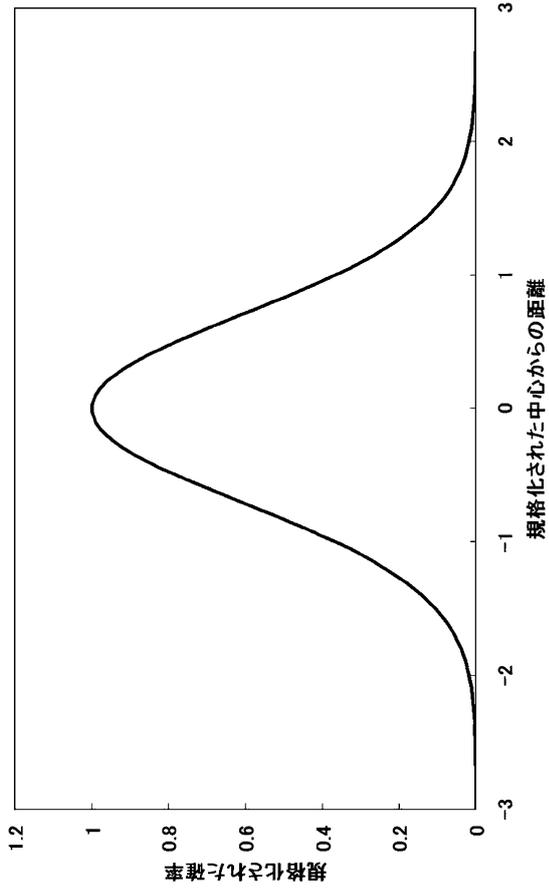
【図3】



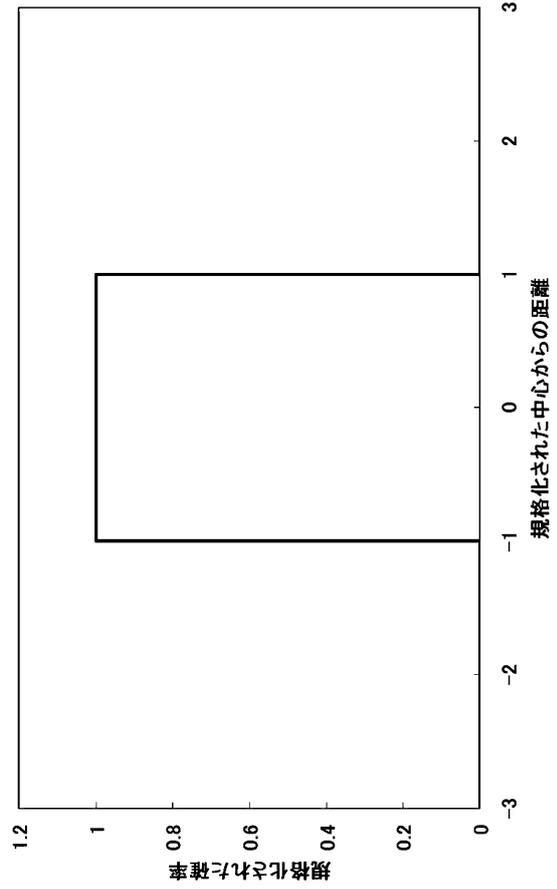
【図4】



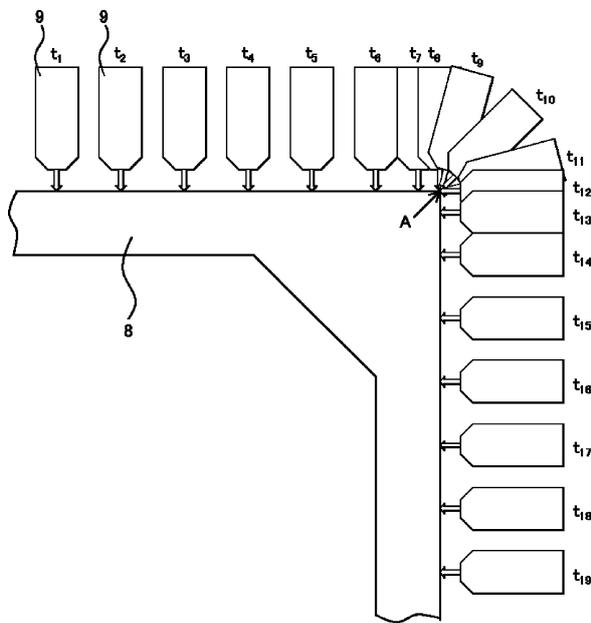
【図5】



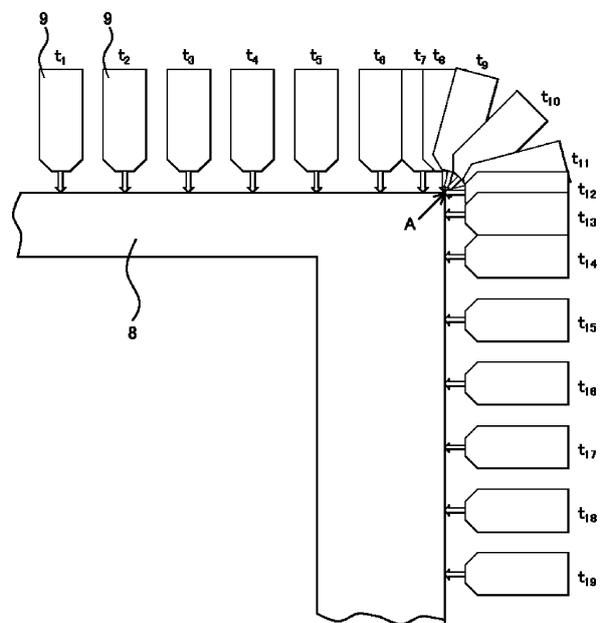
【図6】



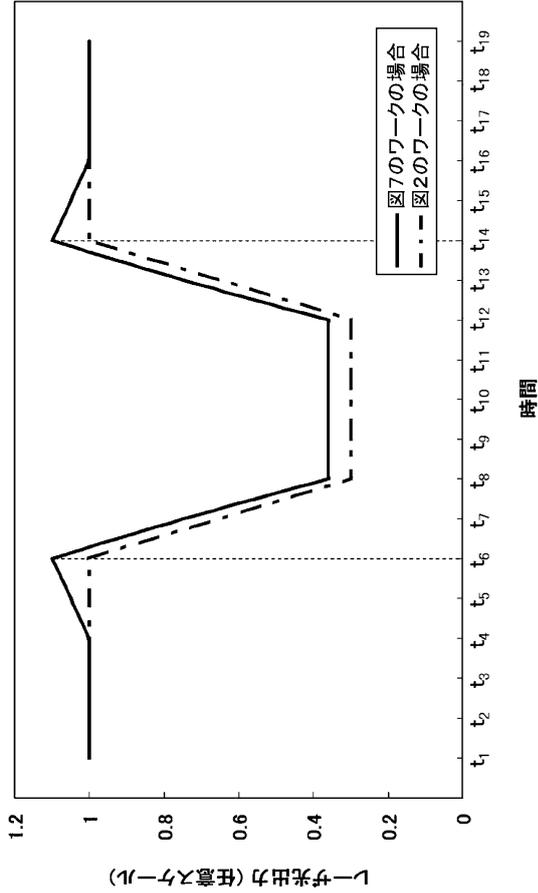
【図7】



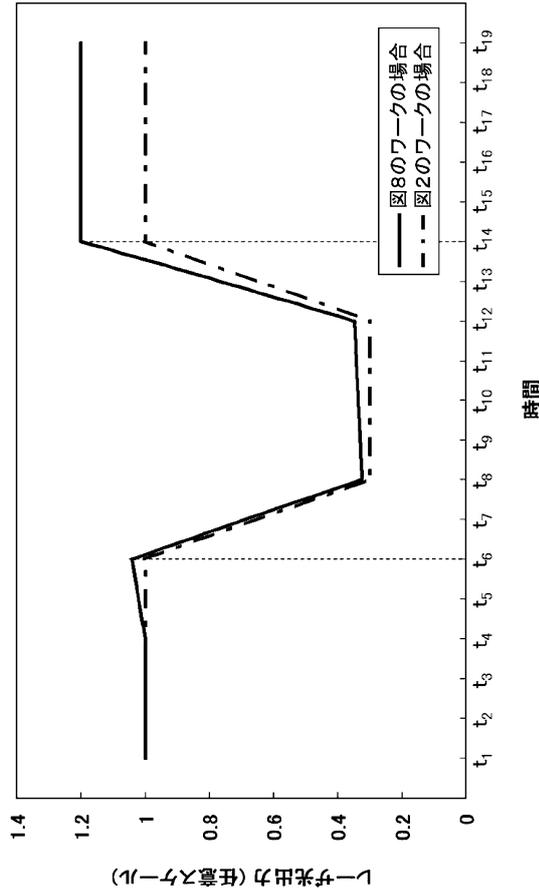
【図8】



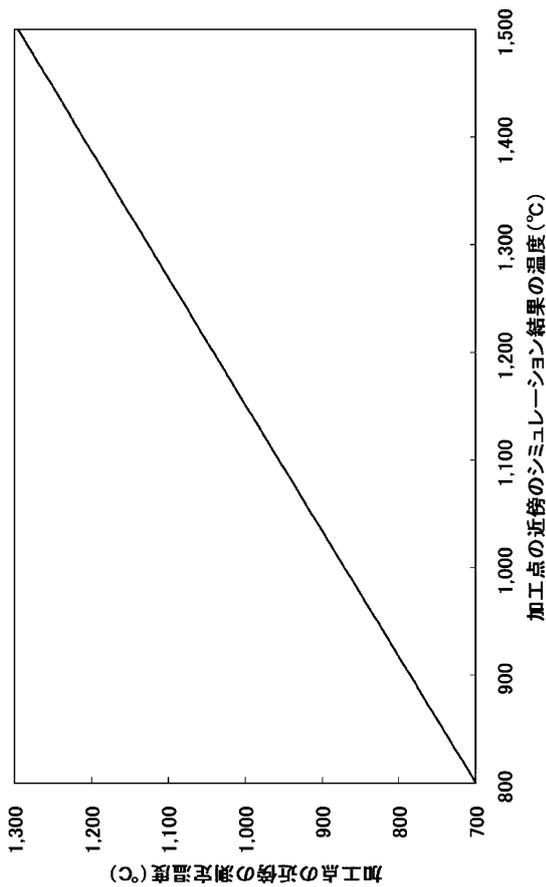
【図9】



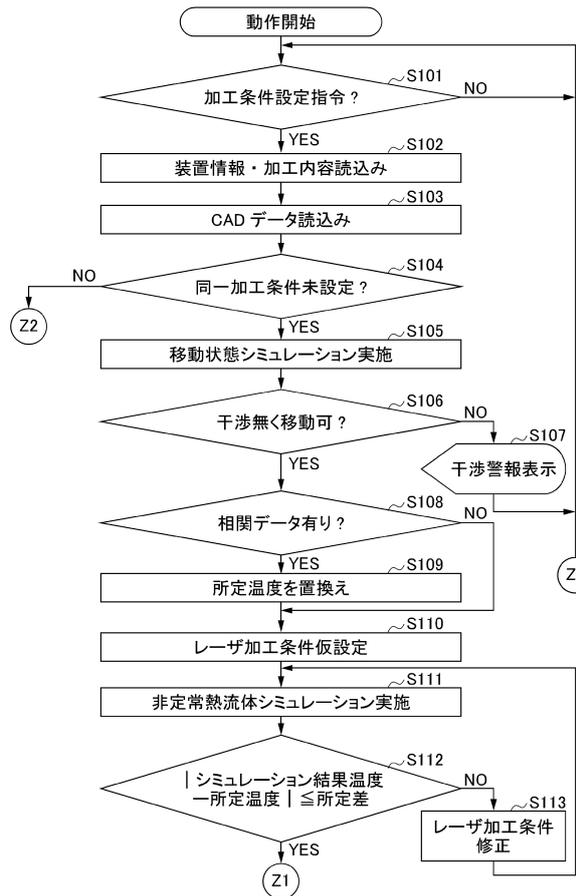
【図10】



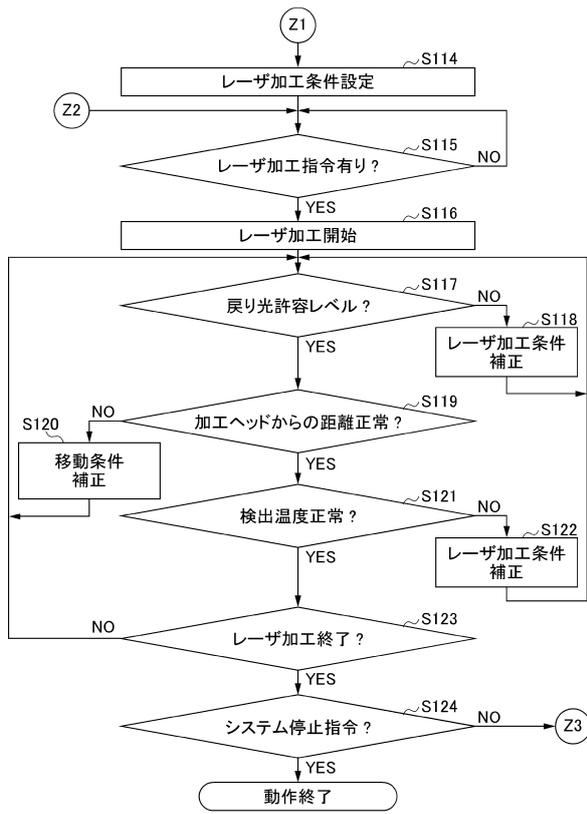
【図11】



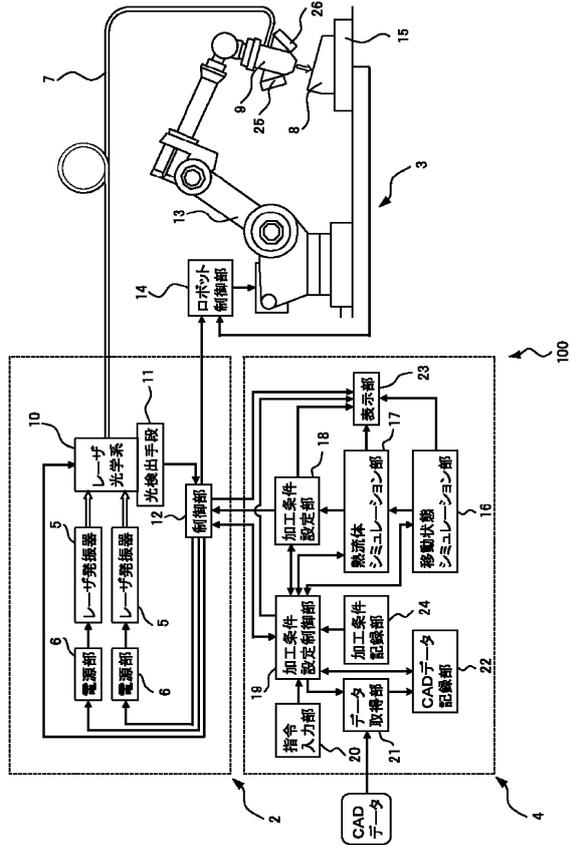
【図12A】



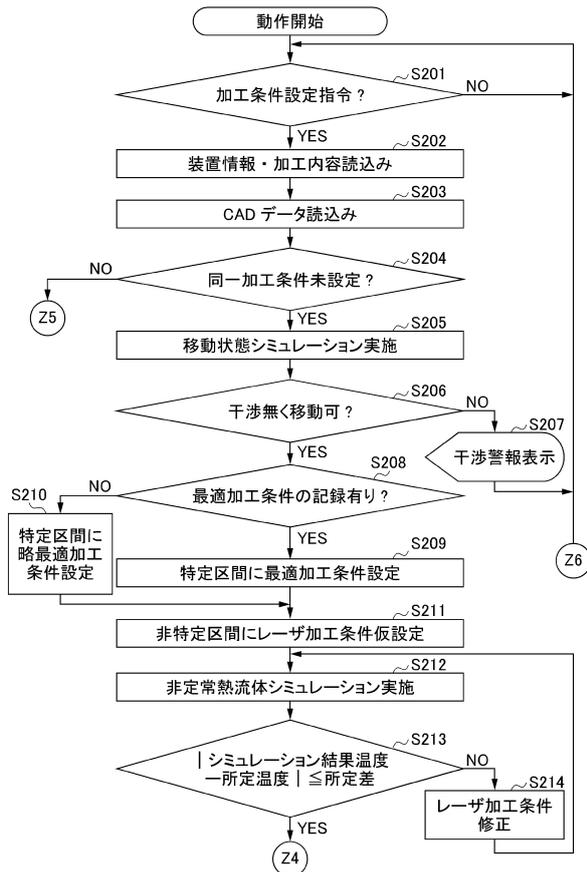
【図12B】



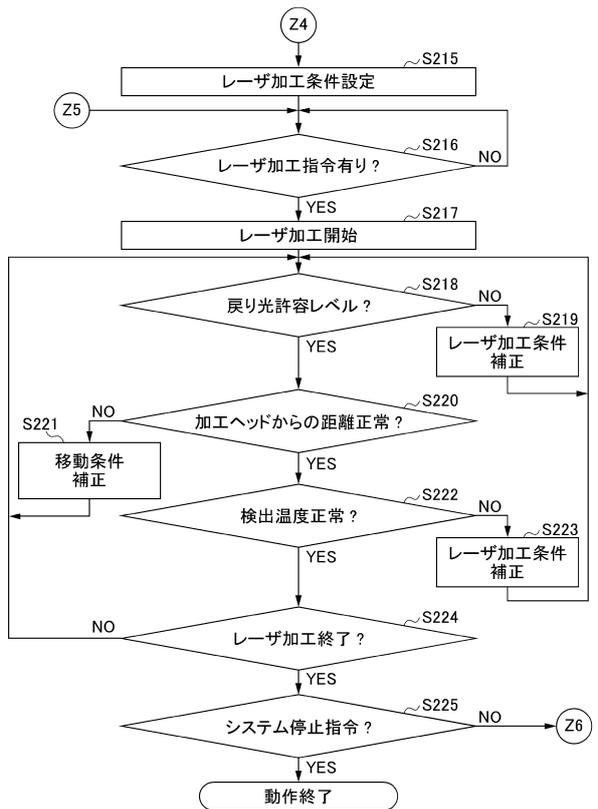
【図13】



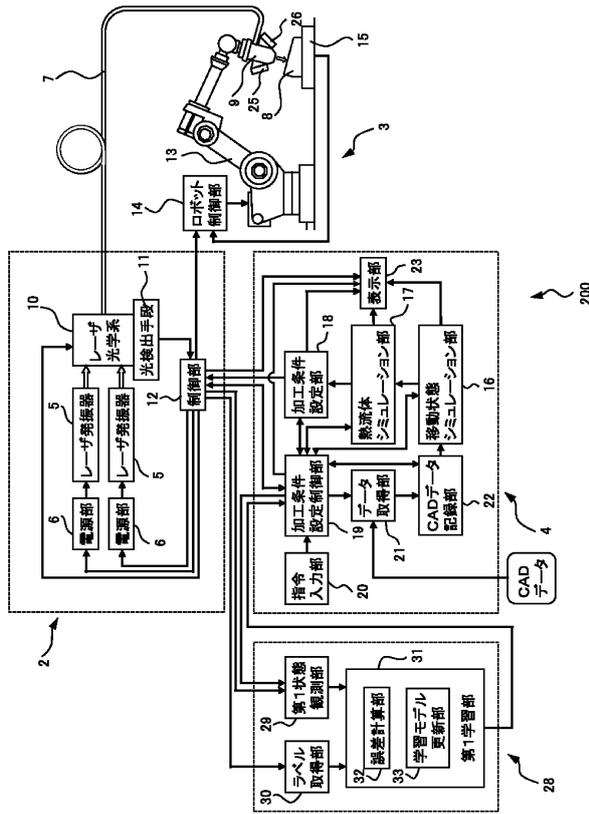
【図14A】



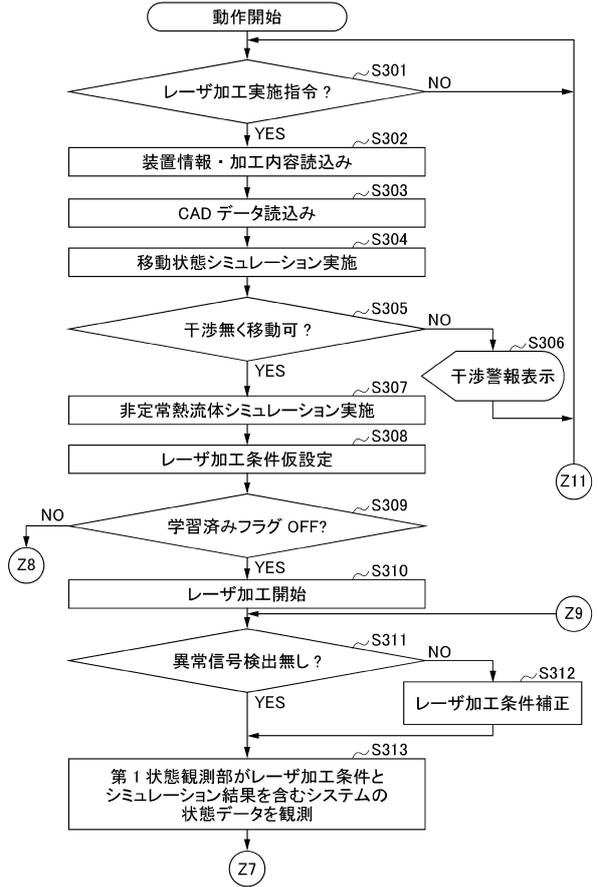
【図14B】



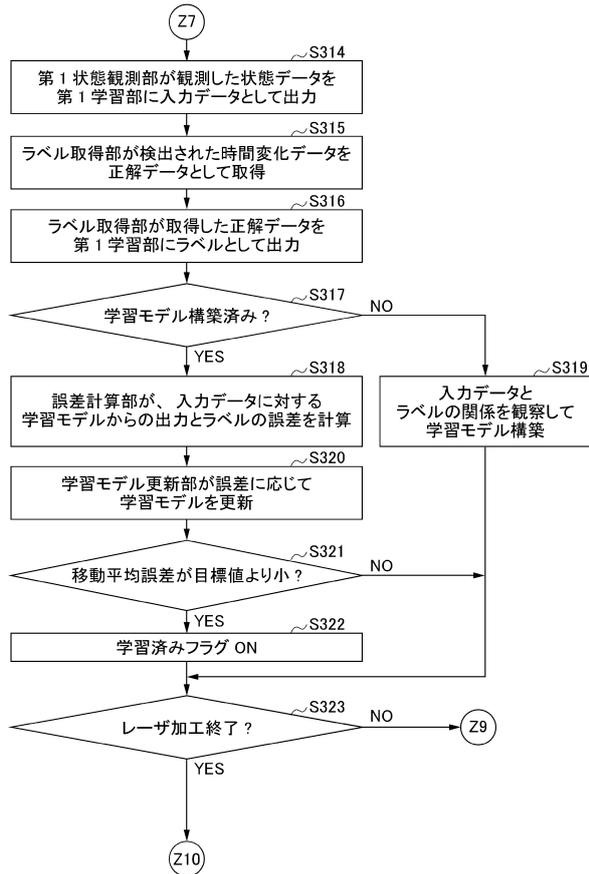
【図15】



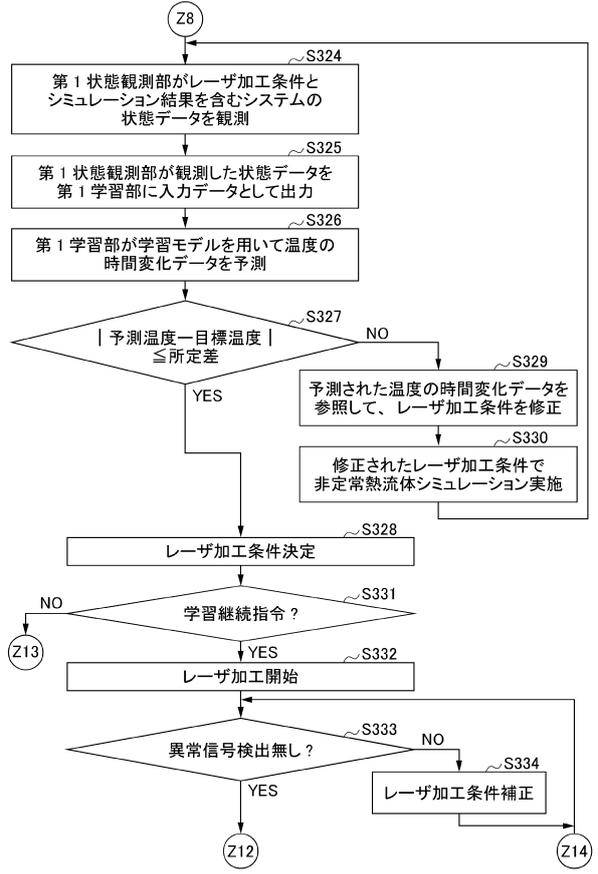
【図16A】



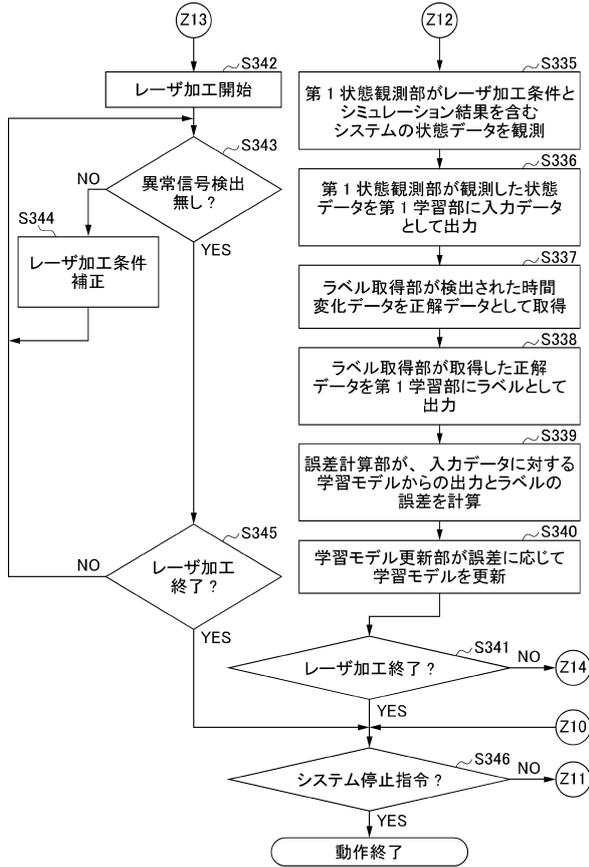
【図16B】



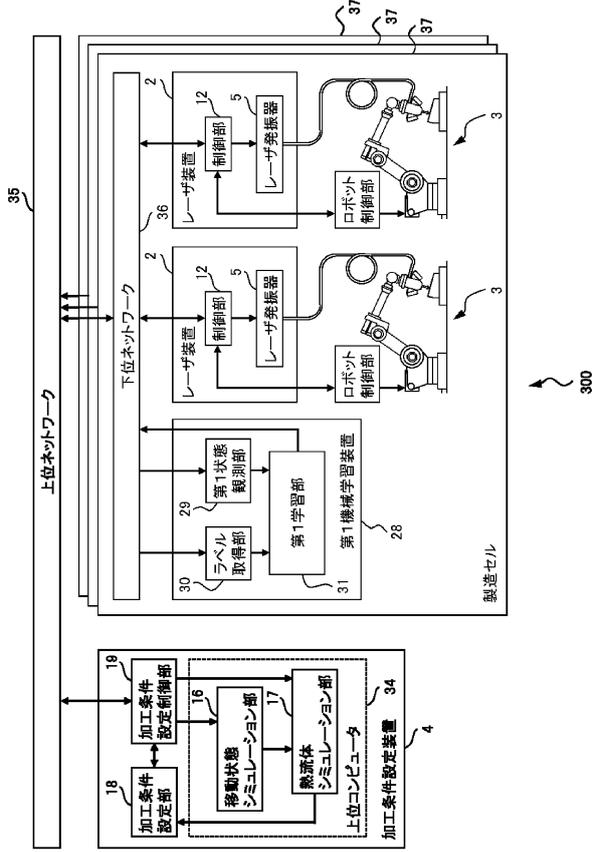
【図16C】



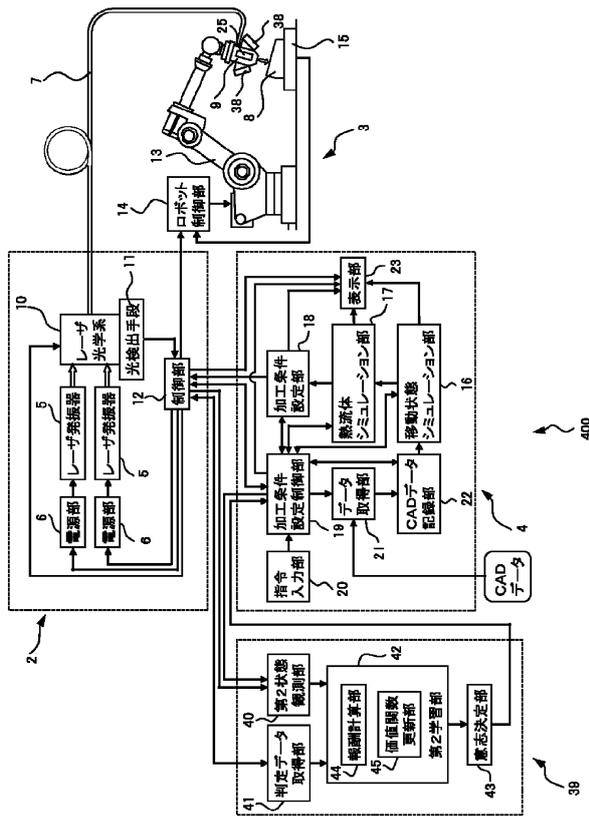
【図16D】



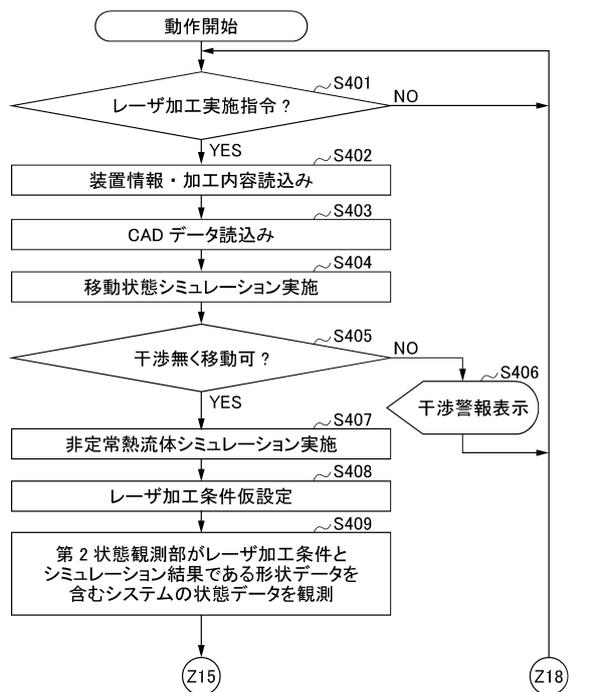
【図17】



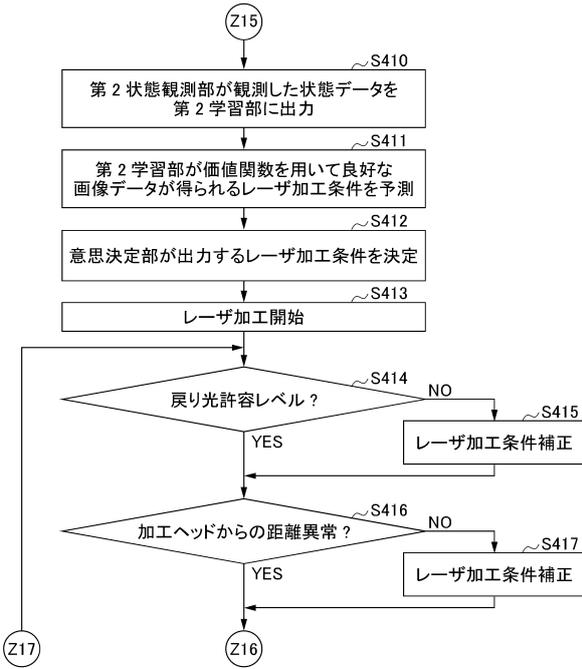
【図18】



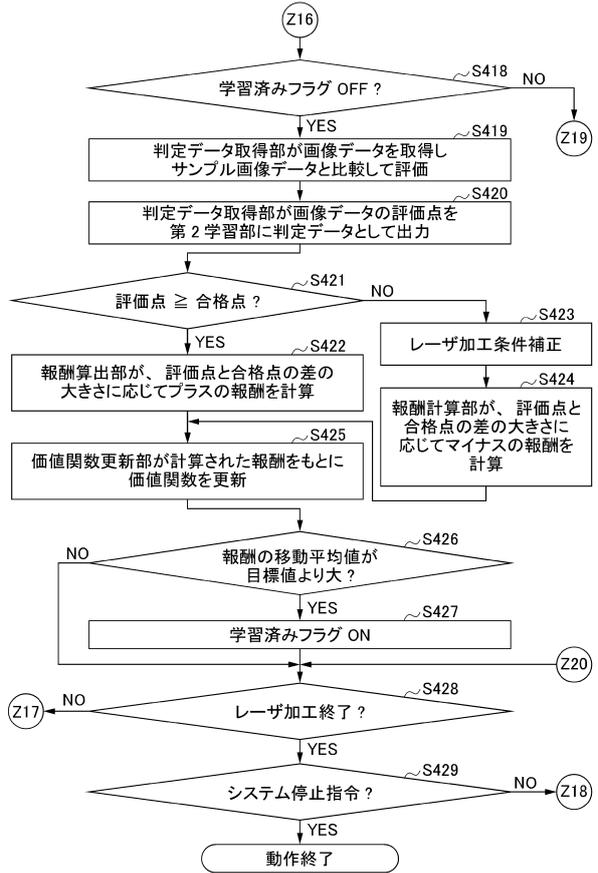
【図19A】



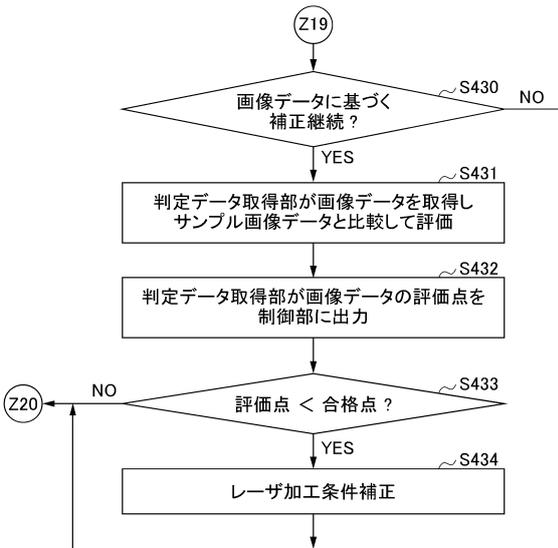
【図19B】



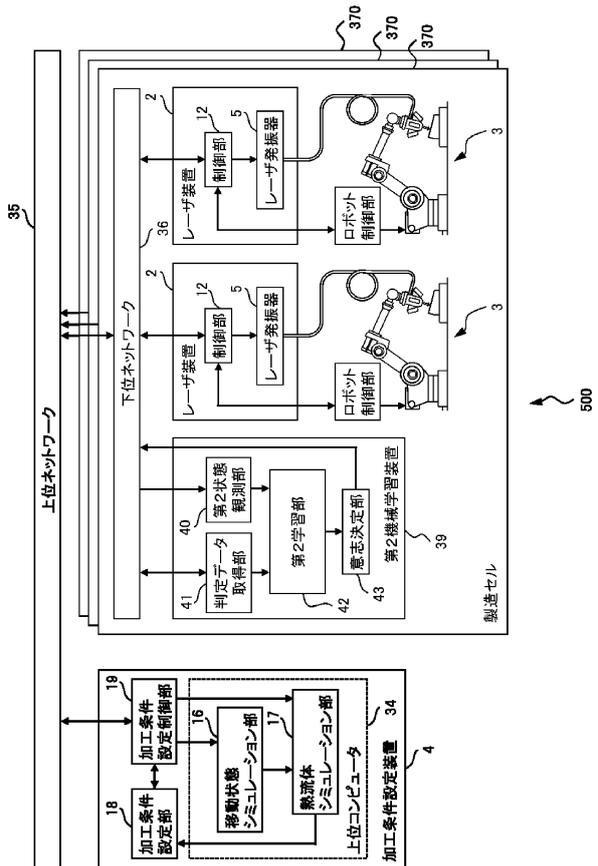
【図19C】



【図19D】



【図20】



フロントページの続き

(72)発明者 瀧川 宏

山梨県南都留郡忍野村忍草字古馬場3580番地 ファナック株式会社内

審査官 藤田 和英

(56)参考文献 特開2010-162548(JP,A)

特開2014-018858(JP,A)

特開2017-164801(JP,A)

特開2017-191833(JP,A)

特開2018-082045(JP,A)

米国特許出願公開第2011/0042363(US,A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

B23K 26/00 - 26/70