

(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2017-164801

(P2017-164801A)

(43) 公開日 平成29年9月21日 (2017.9.21)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
B 2 3 K 26/00 (2014.01)	B 2 3 K 26/00 M	3 C 2 6 9
B 2 3 K 26/03 (2006.01)	B 2 3 K 26/03	4 E 1 6 8
B 2 3 Q 15/00 (2006.01)	B 2 3 K 26/00 Q	
G O 5 B 19/4155 (2006.01)	B 2 3 Q 15/00 3 O 1 H	
	G O 5 B 19/4155 V	

審査請求 有 請求項の数 16 O L (全 28 頁)

(21) 出願番号 特願2016-54190 (P2016-54190)
 (22) 出願日 平成28年3月17日 (2016.3.17)

(71) 出願人 390008235
 ファナック株式会社
 山梨県南部留郡忍野村忍草字古馬場358
 〇番地
 (74) 代理人 100099759
 弁理士 青木 篤
 (74) 代理人 100102819
 弁理士 島田 哲郎
 (74) 代理人 100123582
 弁理士 三橋 真二
 (74) 代理人 100112357
 弁理士 廣瀬 繁樹
 (74) 代理人 100157211
 弁理士 前島 一夫

最終頁に続く

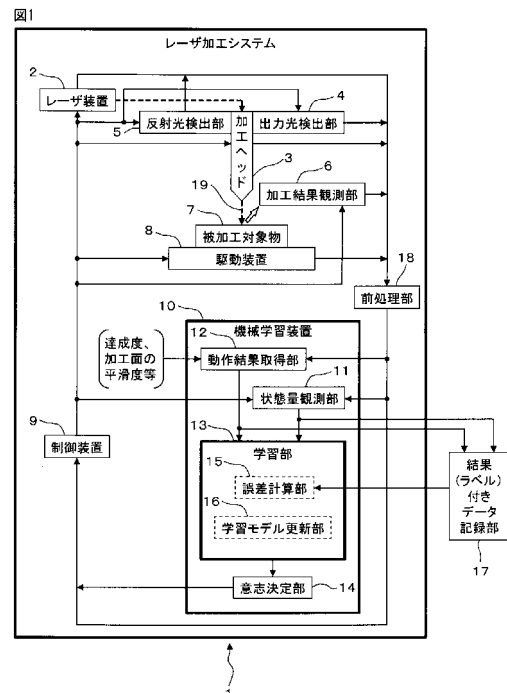
(54) 【発明の名称】 機械学習装置、レーザ加工システムおよび機械学習方法

(57) 【要約】

【課題】最適な加工結果が得られるレーザ加工条件データを決定する。

【解決手段】レーザ加工システム(1)のレーザ加工条件データを学習する機械学習装置(10)は、レーザ加工システムの状態量を観測する状態量観測部(11)と、レーザ加工システムによる加工結果を取得する動作結果取得部(12)と、状態量観測部からの出力および動作結果取得部からの出力を受け取り、レーザ加工条件データを、レーザ加工システムの状態量および加工結果に関連付けて学習する学習部(13)と、学習部が学習したレーザ加工条件データを参照して、レーザ加工条件データを出力する意思決定部(14)とを含む。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

少なくとも一つのレーザ発振器を備えた少なくとも一つのレーザ装置(2)と、
前記レーザ装置からのレーザ光を被加工物(7)に出射する少なくとも一つ以上の加工ヘッド(3)と、

該加工ヘッドから出射されるレーザ光の光量を検出する少なくとも一つ以上の出力光検出部(4)と、

前記加工ヘッドから出射されて前記被加工物の表面あるいは表面近傍で反射して前記加工ヘッド内の光学系を経由して前記レーザ装置に向かって戻ってくる反射光を検出する少なくとも一つ以上の反射光検出部(5)と、

レーザ加工の途中およびレーザ加工後のうちの少なくとも一方における前記被加工物の加工状態および加工結果のうちの少なくとも一方を観測する少なくとも一つ以上の加工結果観測部(6)と、

前記加工ヘッドと前記被加工物の相対的位置関係を変更する少なくとも一つ以上の駆動装置(8)と、を備えたレーザ加工システム(1)のレーザ加工条件データを学習する機械学習装置(10)であって、該機械学習装置は、

前記レーザ加工システムの状態量を観測する状態量観測部(11)と、

前記レーザ加工システムによる加工結果を取得する動作結果取得部(12)と、

前記状態量観測部からの出力および前記動作結果取得部からの出力を受け取り、前記レーザ加工条件データを、前記レーザ加工システムの前記状態量および前記加工結果に関連付けて学習する学習部(13)と、

前記学習部が学習した前記レーザ加工条件データを参照して、レーザ加工条件データを出力する意思決定部(14)と、を備える、ことを特徴とする機械学習装置。

【請求項 2】

前記学習部は、或るレーザ加工条件データに基づいて前記被加工物を加工中に、前記反射光検出部で検出された反射光の光量が、前記加工ヘッド、前記レーザ装置、前記加工ヘッドと前記レーザ装置間のレーザ光伝搬用光学部品の内、少なくともいずれか一つが前記反射光により損傷を受ける警報レベルより低く設定された第1所定レベルより更に低く設定された第2所定レベルを越えると、

前記学習部は、学習された前記レーザ加工条件データを参照して、前記反射光検出部で検出される前記反射光の光量が前記第2所定レベルを越えることなしに、前記或るレーザ加工条件データによる加工結果に近い加工結果が得られると予測されるレーザ加工条件データを出力することを特徴とする請求項1に記載の機械学習装置。

【請求項 3】

前記状態量観測部が観測する状態量には、前記レーザ装置のための光出力指令と前記レーザ装置から実際に出射される光出力との関係を示す前記レーザ装置の光出力特性、前記レーザ装置から出射される光出力、前記レーザ装置からの光出力に対する前記加工ヘッドから出射される光出力の比率、前記レーザ発振器に熱的に接続している部分の温度、前記レーザ装置内のレーザ発振に伴って温度が変化する部品を含む各部の温度、前記加工ヘッドの温度、レーザ光を前記レーザ装置から前記加工ヘッドに伝搬する光学系の温度、前記駆動装置の温度、前記加工ヘッドや前記駆動装置を支持している構造部品の温度、前記レーザ発振に伴って温度が上昇する部品を冷却するための流体の種類、温度および流量、前記レーザ装置内の空気の状態および湿度、前記レーザ装置周辺の環境温度および湿度、前記駆動装置の駆動用電動機の実電流、前記駆動装置の位置検出部からの出力、ならびに前記被加工物の厚さを含むサイズ、材質、比熱、密度、熱伝導率、温度および表面状態の内の少なくとも一つ以上が含まれていることを特徴とする請求項1または2に記載の機械学習装置。

【請求項 4】

前記意思決定部が出力するレーザ加工条件データには、各前記レーザ装置から出射するレーザ光の光出力、光出力波形、ビームモード、レーザ波長、レーザ光を出射する光学系

10

20

30

40

50

の焦点距離、F 値、透過率、前記被加工物に出射されるレーザ光の焦点と前記被加工物の加工面との時間変化を含む相対的位置関係、前記被加工物に出射されるレーザ光の前記被加工物の加工面におけるスポットサイズ、パワー密度、パワー密度分布、前記加工ヘッドと前記被加工物との時間変化を含む相対的位置関係、レーザ光の光軸と前記被加工物の加工面との成す角度、加工速度、アシストガスの種類と流量あるいは供給圧力の内の少なくとも一つ以上が含まれていることを特徴とする請求項 1 から 3 のいずれか 1 項に記載の機械学習装置。

【請求項 5】

前記学習部は、レーザ加工の内容に応じて異なるレーザ加工条件データを学習する学習モデルを備え、

前記動作結果取得部が取得した加工速度あるいは所定の加工に要する時間を含むレーザ加工結果とそれぞれのレーザ加工の内容毎に設定されている加工速度あるいは所定の加工に要する時間を含む略理想的な加工結果あるいは目標とする加工結果との間の誤差を計算する誤差計算部（15）と、

前記誤差に応じて前記学習モデルを更新する学習モデル更新部（16）とを備えることを特徴とする請求項 2 に記載の機械学習装置。

【請求項 6】

前記学習部は、前記或るレーザ加工条件データに基づいて前記被加工物を加工中に、前記反射光検出部で検出された反射光光量が、前記第 2 所定レベルを越えると、前記誤差計算部は、前記レーザ加工条件データの加工結果に所定の誤差が生じたとする計算結果を出力し、該計算結果に応じて前記学習モデルを更新することを特徴とする請求項 5 に記載の機械学習装置。

【請求項 7】

前記学習部は、レーザ加工の内容に応じて異なっていてレーザ加工条件データの価値を定める価値関数を有し、

前記学習部は、さらに、前記動作結果取得部が取得した加工速度あるいは所定の加工に要する時間を含むレーザ加工結果とそれぞれのレーザ加工の内容毎に設定されている加工速度あるいは所定の加工に要する時間を含む略理想的な加工結果あるいは目標とする加工結果との間の差異が小さい場合にはその差異に応じてプラスの報酬を与え、前記差異が大きい場合にその差異に応じてマイナスの報酬を与える報酬計算部（20）と、

前記報酬に応じて前記価値関数を更新する価値関数更新部（21）を備えることを特徴とする請求項 2 に記載の機械学習装置。

【請求項 8】

前記学習部は、或るレーザ加工条件で前記被加工物を加工中に、前記反射光検出部で検出された反射光光量が、前記第 2 所定レベルを越えると、前記報酬計算部は、所定のマイナス報酬を与え、前記所定のマイナス報酬に応じて前記価値関数を更新することを特徴とする請求項 7 に記載の機械学習装置。

【請求項 9】

請求項 1 から 8 のいずれか 1 項に記載の機械学習装置を備えたレーザ加工システム（1）であって、

前記レーザ装置と、前記加工ヘッドと、前記出力光検出部と、前記反射光検出部と、前記加工結果観測部と、前記駆動装置とをそれぞれ少なくとも一つ以上備えると共に、

前記レーザ装置と、前記加工ヘッドと、前記出力光検出部と、前記反射光検出部と、前記加工結果観測部と、前記駆動装置とを制御する制御装置を少なくとも一つ以上備えることを特徴とするレーザ加工システム。

【請求項 10】

前記反射光検出部が検出した反射光の光量が前記第 1 所定レベルを越えた場合は、前記制御装置が、前記機械学習装置からの次のレーザ加工条件データが出力するのを待たずに、前記レーザ装置からの光出力を遮断あるいは所定の割合まで減じることを特徴とする請求項 9 に記載のレーザ加工システム。

10

20

30

40

50

【請求項 1 1】

前記レーザ装置あるいは前記制御装置に、前記制御装置からの光出力指令と前記レーザ装置から実際に出射される光出力との間の関係を示す前記レーザ装置の光出力特性を記憶しており、

所定のスケジュールに沿って、前記光出力特性を測定し、測定した結果で前記レーザ装置の前記光出力特性を更新することを特徴とする請求項 9 または請求項 1 0 に記載のレーザ加工システム。

【請求項 1 2】

前記加工結果観測部の少なくとも一つが、デジタル二次元撮像装置、CCD測定顕微鏡、接触式表面粗さ・形状測定装置、白色干渉計、レーザ顕微鏡、非接触三次元測定装置のいずれか一つであり、

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、切断面の酸化物色濃度、切断寸法・形状精度、切断面の垂直度の観測結果データの内、少なくとも一つ以上のデータが、前記レーザ加工条件データの結果として、前記加工結果観測部から前記動作結果取得部へ出力されることを特徴とする請求項 9 から 1 1 のいずれか 1 項に記載のレーザ加工システム。

【請求項 1 3】

前記加工結果観測部の少なくとも一つが、デジタル二次元撮像装置、CCD測定顕微鏡、レーザ顕微鏡、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、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のいずれか一つであり、

レーザによる溶接部のクラック、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、ハンピングの観測結果データの内、少なくとも一つ以上のデータが、前記レーザ加工条件データの結果として、前記加工結果観測部から前記動作結果取得部へ出力されることを特徴とする請求項 9 から 1 1 のいずれか 1 項に記載のレーザ加工システム。

【請求項 1 4】

前記レーザ加工システムが、複数存在し、前記レーザ加工システム毎にそれぞれ設けられた複数の前記機械学習装置が、通信媒体を介して相互にデータを共有または交換するようになっていることを特徴とする請求項 9 から 1 3 のいずれか 1 項に記載のレーザ加工システム。

【請求項 1 5】

前記機械学習装置を、通信媒体を介して複数の前記レーザ加工システムで共有することを特徴とする請求項 1 4 に記載のレーザ加工システム。

【請求項 1 6】

レーザ加工システム(1)の制御装置へ出力するレーザ加工条件データを学習する機械学習方法であって、

少なくとも一つ以上のレーザ装置(2)からの出力データと、少なくとも一つ以上の加工ヘッド(3)からの出力データと、加工ヘッドと被加工物(7)の相対的位置関係を変えるための少なくとも一つ以上の駆動装置(8)からの出力データとを含むレーザ加工システムの状態量を観測し、

レーザ装置に戻ってくる反射光を検出する少なくとも一つ以上の反射光検出部(5)からの出力データと、レーザ加工の途中およびレーザ加工後のうちの少なくとも一方における前記被加工物の加工状態および加工結果のうちの少なくとも一方を観測する少なくとも一つ以上の加工結果観測部(6)からの出力データとをレーザ加工条件データの結果として受取り、

前記レーザ加工条件データを前記レーザ加工システムの前記状態量および前記レーザ加工条件データの結果に関連付けて学習することを特徴とする機械学習方法。

【発明の詳細な説明】

10

20

30

40

50

【技術分野】

【0001】

本発明は、レーザ発振器に供給される駆動電力データを含むレーザ加工条件データを学習する機械学習装置、レーザ加工システムおよび機械学習方法に関する。

【背景技術】

【0002】

被加工物に対して、切断や溶接等の加工を行うためのレーザ加工システムにおいては、加工精度や加工品質が高い加工結果が高速で得られるように、最適なレーザ加工条件で加工するのが望ましい。

【0003】

加工条件を探索するあるいは学習させる種々の技術が存在している。例えば特許文献1には、「工作物に関するデータ、工具に関するデータ、機械に関するデータを記憶した属性データ記憶手段と、前記属性データ記憶手段に記憶されたデータを入力とし、数値制御工作機械による加工条件を決定するための演算式における内部定数を出力とするニューラルネットワークと、前記属性データ記憶手段に記憶されたデータと前記内部定数とから加工条件を求める加工条件演算手段と、前記加工条件を修正したとき、その加工条件の修正値に応じて関連する前記内部定数を修正する内部定数修正手段と、前記内部定数修正手段により修正された内部定数が修正前と同じ入力に対して得られるように前記ニューラルネットワークのウェイトを修正するウェイト修正手段とを備えたことを特徴とする加工条件自動決定装置」が開示されている。

【0004】

さらに、特許文献2には「加工条件生成部と、前記加工条件の生成に必要な特性データを格納する加工条件特性データ部と、学習機能に基づいて前記加工条件の最適化を行う学習部と、を備えた加工条件生成装置において、前記加工条件の変更内容を格納するための変更データ部を設け、前記変更内容に従って前記加工条件を変更すると共に、前記学習部は、前記変更内容に基づいて前記加工条件生成部又は前記加工条件特性データ部のうちの少なくとも一方を最適化することを特徴とする加工条件生成装置」が開示されている。

【0005】

さらに、特許文献3には「レーザ加工の加工条件パラメータに対する推論値を人工知能機能により生成する推論値生成手段と、前記推論値生成手段により生成される推論値を表示するための表示手段と加工状態を評価する評価パラメータを入力するための入力手段を備え、かつ、前記推論値生成手段は、前記評価パラメータに応じて、現在加工状態を修正するために最も効果のある加工条件パラメータを選択するための加工条件パラメータ選択手段を備えたレーザ加工機用支援装置」が開示されている。

【0006】

さらに、特許文献4には「実験加工条件発生部と、前記実験加工条件発生部から出力された加工条件で加工を行い、実加工結果を出力する加工機と、実加工結果に基づいて、所定の加工条件が入力された場合の最適加工条件である加工特性モデルを生成する加工特性モデル部とを備え、前記実験加工条件発生部は、前記加工特性モデルを用いて実験加工条件を発生させることを特徴とする加工条件探索装置」が開示されている。

【0007】

さらに、特許文献5には、「加工条件と加工結果の関係を示す加工特性モデルを用いて、実験加工条件を生成する実験加工条件生成手段と、上記実験加工条件生成手段により生成された実験加工条件にしたがって実験加工の加工結果を収集し、上記加工結果と上記実験加工条件の組を実験加工データとして蓄積する加工結果収集手段と、実験加工データを用いて新たに生成した加工特性モデルを上記実験加工条件生成手段に出力する第1の加工特性モデル生成手段と、実験加工データ毎に、当該実験加工データ内の加工結果に含まれている加工良否評価を1つずつ変更しながら、変更後の加工良否評価が反映されている新たな加工特性モデルを生成する第2の加工特性モデル生成手段と、上記第2の加工特性モデル生成手段により生成された新たな加工特性モデルを合成する加工特性モデル合成手段

10

20

30

40

50

と、上記加工特性モデル合成手段により合成された加工特性モデルから最適な加工条件を生成する最適加工条件生成手段とを備えた加工条件探索装置」が開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0008】

【特許文献1】特開平4-75108号公報

【特許文献2】特開平4-354653号公報

【特許文献3】特開平11-85210号公報

【特許文献4】特開2008-36812号公報

【特許文献5】特開2012-236267号公報

10

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

レーザ加工における加工条件には、発振条件としての、光出力、モード、波形、および波長等、出射条件としての、集光光学系、パワー密度、パワー密度分布、およびアシストガス等がある。さらに、その他の加工条件として、加工速度、加工雰囲気等の多くのパラメータが存在する。

【0010】

また、レーザ加工の加工結果に影響する可能性のあるレーザ加工システムの状態量についても、レーザ発振器や光学系や加工ヘッドや被加工物を支持する構造部品等の温度、レーザ発振器等を冷却する冷却システムの状態などがある。さらに、被加工物も広義のレーザ加工システムの構成部品であると解釈した場合には、レーザ加工システムの状態量には、レーザ加工によって変化する被加工物の温度や表面状態等が含まれる。

20

【0011】

そのため、加工条件に加えてレーザ加工システムの状態量も考慮しつつ、高速で高品質かつ高精度な加工結果を得るために最適なレーザ加工条件データを決定することは非常に困難であった。

【0012】

さらに、前述した従来技術においては、加工結果を加工機械の状態量と関連付けていない。このため、従来技術には、加工機械の状態量が変わると最適な加工条件に設定されないという問題がある。

30

【0013】

また、例えば、レーザ加工で切断した被加工物の切断部近傍の表裏面には、数珠状付着物(ドロス)が形成される。ドロスの量等を含む加工結果を定量的に評価することが容易でないので、加工結果をフィードバックしたとしても、最適なレーザ加工条件データを把握することは困難である。

【0014】

上記のように、レーザ加工条件はパラメータが多く、レーザ加工装置の状態が加工結果に及ぼす影響についても不明確な点が多く、定量的評価が行われていない加工結果も多い。従来では、過去の経験や加工実績、実験結果等に基づいて加工条件を決定してきた。しかしながら、決定された加工条件が本当に最適であるか否かは明確でない。また、加工条件の決定は、操作者の経験や技量に影響を受ける。更には、加工条件の決定に時間や工数を要するという問題があった。

40

【0015】

従って、本発明の目的は、以上のような状況を鑑み、多数のレーザ加工条件パラメータ、ならびにレーザ加工結果に影響を与える可能性のあるレーザ加工システムの多数の状態量が存在する場合であっても、レーザ加工システムの状態がレーザ加工の結果に及ぼす影響も考慮して高速で高品質かつ高精度な加工結果を得るために最適あるいは略最適な加工結果が得られるレーザ加工条件データを決定することができる機械学習装置、この機械学習装置を備えたレーザ加工システムおよび機械学習装置の機械学習方法を提供することに

50

ある。

【課題を解決するための手段】

【0016】

前述した目的を達成するために1番目の発明によれば、少なくとも一つのレーザ発振器を備えた少なくとも一つのレーザ装置と、前記レーザ装置からのレーザ光を被加工物に出射する少なくとも一つ以上の加工ヘッドと、該加工ヘッドから出射されるレーザ光の光量を検出する少なくとも一つ以上の出力光検出部と、前記加工ヘッドから出射されて前記被加工物の表面あるいは表面近傍で反射して前記加工ヘッド内の光学系を經由して前記レーザ装置に向かって戻ってくる反射光を検出する少なくとも一つ以上の反射光検出部と、レーザ加工の途中およびレーザ加工後のうちの少なくとも一方における前記被加工物の加工状態および加工結果のうちの少なくとも一方を観測する少なくとも一つ以上の加工結果観測部と、前記加工ヘッドと前記被加工物の相対的位置関係を変更する少なくとも一つ以上の駆動装置と、を備えたレーザ加工システムのレーザ加工条件データを学習する機械学習装置であって、該機械学習装置は、前記レーザ加工システムの状態量を観測する状態量観測部と、前記レーザ加工システムによる加工結果を取得する動作結果取得部と、前記状態量観測部からの出力および前記動作結果取得部からの出力を受け取り、前記レーザ加工条件データを、前記レーザ加工システムの前記状態量および前記加工結果に関連付けて学習する学習部と、前記学習部が学習した前記レーザ加工条件データを参照して、レーザ加工条件データを出力する意思決定部と、を備える、ことを特徴とする機械学習装置が提供される。

10

20

2番目の発明によれば、1番目の発明において、前記学習部は、或るレーザ加工条件データに基づいて前記被加工物を加工中に、前記反射光検出部で検出された反射光の光量が、前記加工ヘッド、前記レーザ装置、前記加工ヘッドと前記レーザ装置間のレーザ光伝搬用光学部品の内、少なくともいずれか一つが前記反射光により損傷を受ける警報レベルより低く設定された第1所定レベルより更に低く設定された第2所定レベルを越えると、前記学習部は、学習された前記レーザ加工条件データを参照して、前記反射光検出部で検出される前記反射光の光量が前記第2所定レベルを越えることなしに、前記或るレーザ加工条件データによる加工結果に近い加工結果が得られると予測されるレーザ加工条件データを出力する。

30

3番目の発明によれば、1番目または2番目の発明において、前記状態量観測部が観測する状態量には、前記レーザ装置のための光出力指令と前記レーザ装置から実際に出射される光出力との関係を示す前記レーザ装置の光出力特性、前記レーザ装置から出射される光出力、前記レーザ装置からの光出力に対する前記加工ヘッドから出射される光出力の比率、前記レーザ発振器に熱的に接続している部分の温度、前記レーザ装置内のレーザ発振に伴って温度が変化する部品を含む各部の温度、前記加工ヘッドの温度、レーザ光を前記レーザ装置から前記加工ヘッドに伝搬する光学系の温度、前記駆動装置の温度、前記加工ヘッドや前記駆動装置を支持している構造部品の温度、前記レーザ発振に伴って温度が上昇する部品を冷却するための流体の種類、温度および流量、前記レーザ装置内の空気の状態および湿度、前記レーザ装置周辺の環境温度および湿度、前記駆動装置の駆動用電動機の実電流、前記駆動装置の位置検出部からの出力、ならびに前記被加工物の厚さを含むサイズ、材質、比熱、密度、熱伝導率、温度および表面状態の内の少なくとも一つ以上が含まれている。

40

4番目の発明によれば、1番目から3番目のいずれかの発明において、前記意思決定部が出力するレーザ加工条件データには、各前記レーザ装置から出射するレーザ光の光出力、光出力波形、ビームモード、レーザ波長、レーザ光を出射する光学系の焦点距離、F値、透過率、前記被加工物に出射されるレーザ光の焦点と前記被加工物の加工面との時間変化を含む相対的位置関係、前記被加工物に出射されるレーザ光の前記被加工物の加工面におけるスポットサイズ、パワー密度、パワー密度分布、前記加工ヘッドと前記被加工物との時間変化を含む相対的位置関係、レーザ光の光軸と前記被加工物の加工面との成す角度、加工速度、アシストガスの種類と流量あるいは供給圧力の内の少なくとも一つ以上が含

50

まれている。

5番目の発明によれば、2番目の発明において、前記学習部は、レーザ加工の内容に応じて異なるレーザ加工条件データを学習する学習モデルを備え、前記動作結果取得部が取得した加工速度あるいは所定の加工に要する時間を含むレーザ加工結果とそれぞれのレーザ加工の内容毎に設定されている加工速度あるいは所定の加工に要する時間を含む略理想的な加工結果あるいは目標とする加工結果との間の誤差を計算する誤差計算部と、前記誤差に応じて前記学習モデルを更新する学習モデル更新部とを備える。

6番目の発明によれば、5番目の発明において、前記学習部は、前記或るレーザ加工条件データに基づいて前記被加工物を加工中に、前記反射光検出部で検出された反射光光量が、前記第2所定レベルを越えると、前記誤差計算部は、前記レーザ加工条件データの加工結果に所定の誤差が生じたとする計算結果を出力し、該計算結果に応じて前記学習モデルを更新する。

10

7番目の発明によれば、2番目の発明において、前記学習部は、レーザ加工の内容に応じて異なっていてレーザ加工条件データの価値を定める価値関数を有し、前記学習部は、さらに、前記動作結果取得部が取得した加工速度あるいは所定の加工に要する時間を含むレーザ加工結果とそれぞれのレーザ加工の内容毎に設定されている加工速度あるいは所定の加工に要する時間を含む略理想的な加工結果あるいは目標とする加工結果との間の差異が小さい場合にはその差異に応じてプラスの報酬を与え、前記差異が大きい場合にその差異に応じてマイナスの報酬を与える報酬計算部と、前記報酬に応じて前記価値関数を更新する価値関数更新部を備える。

20

8番目の発明によれば、7番目の発明において、前記学習部は、或るレーザ加工条件で前記被加工物を加工中に、前記反射光検出部で検出された反射光光量が、前記第2所定レベルを越えると、前記報酬計算部は、所定のマイナス報酬を与え、前記所定のマイナス報酬に応じて前記価値関数を更新する。

9番目の発明によれば、1番目から8番目のいずれかの機械学習装置を備えたレーザ加工システムであって、前記レーザ装置と、前記加工ヘッドと、前記出力光検出部と、前記反射光検出部と、前記加工結果観測部と、前記駆動装置とをそれぞれ少なくとも一つ以上備えると共に、前記レーザ装置と、前記加工ヘッドと、前記出力光検出部と、前記反射光検出部と、前記加工結果観測部と、前記駆動装置とを制御する制御装置を少なくとも一つ以上備えることを特徴とするレーザ加工システムが提供される。

30

10番目の発明によれば、9番目の発明において、前記反射光検出部が検出した反射光の光量が前記第1所定レベルを越えた場合は、前記制御装置が、前記機械学習装置からの次のレーザ加工条件データが出力するのを待たずに、前記レーザ装置からの光出力を遮断あるいは所定の割合まで減じる。

11番目の発明によれば、9番目または10番目の発明において、前記レーザ装置あるいは前記制御装置に、前記制御装置からの光出力指令と前記レーザ装置から実際に出射される光出力との間の関係を示す前記レーザ装置の光出力特性を記憶しており、所定のスケジュールに沿って、前記光出力特性を測定し、測定した結果で前記レーザ装置の前記光出力特性を更新する。

12番目の発明によれば、9番目から11番目のいずれかの発明において、前記加工結果観測部の少なくとも一つが、デジタル二次元撮像装置、CCD測定顕微鏡、接触式表面粗さ・形状測定装置、白色干渉計、レーザ顕微鏡、非接触三次元測定装置のいずれか一つであり、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、切断面の酸化物色濃度、切断寸法・形状精度、切断面の垂直度の観測結果データの内、少なくとも一つ以上のデータが、前記レーザ加工条件データの結果として、前記加工結果観測部から前記動作結果取得部に出力される。

40

13番目の発明によれば、9番目から11番目のいずれかの発明において、前記加工結果観測部の少なくとも一つが、デジタル二次元撮像装置、CCD測定顕微鏡、レーザ顕微鏡、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、

50

誘導加熱式非破壊検査装置、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のいずれか一つであり、レーザによる溶接部のクラック、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、ハンピングの観測結果データの内、少なくとも一つ以上のデータが、前記レーザ加工条件データの結果として、前記加工結果観測部から前記動作結果取得部に出力される。

14番目の発明によれば、9番目から13番目のいずれかの発明において、前記レーザ加工システムが、複数存在し、前記レーザ加工システム毎にそれぞれ設けられた複数の前記機械学習装置が、通信媒体を介して相互にデータを共有または交換するようになっている。

15番目の発明によれば、14番目の発明において、前記機械学習装置を、通信媒体を介して複数の前記レーザ加工システムで共有する。

16番目の発明によれば、レーザ加工システムの制御装置に出力するレーザ加工条件データを学習する機械学習方法であって、少なくとも一つ以上のレーザ装置からの出力データと、少なくとも一つ以上の加工ヘッドからの出力データと、加工ヘッドと被加工物の相対的位置関係を変えるための少なくとも一つ以上の駆動装置からの出力データとを含むレーザ加工システムの状態量を観測し、レーザ装置に戻ってくる反射光を検出する少なくとも一つ以上の反射光検出部からの出力データと、レーザ加工の途中およびレーザ加工後のうちの少なくとも一方における前記被加工物の加工状態および加工結果のうちの少なくとも一方を観測する少なくとも一つ以上の加工結果観測部からの出力データとをレーザ加工条件データの結果として受取り、前記レーザ加工条件データを前記レーザ加工システムの前記状態量および前記レーザ加工条件データの結果に関連付けて学習することを特徴とする機械学習方法が提供される。

【発明の効果】

【0017】

1番目の発明においては、レーザ加工条件データを、レーザ加工システムの状態量と加工結果観測部から出力される加工結果に関連付けて機械学習させる。これにより、人間の介在無しに、あるいは最小限の人間の介在だけで、レーザ加工システムの状態に関わらず、常に略最適なレーザ加工条件で加工を行うことが可能になる。このため、安定的に高品質な加工結果を得ることができる。なお、レーザ加工システムの状態量は、レーザ光の射出によってレーザ加工中に変化する状態量も含む。

2番目の発明においては、反射光のレベルが警報レベルに達する前に、学習部の学習結果を参照して、現在のレーザ加工条件を、反射光が減少し且つ略同等の加工結果が得られると予測されるレーザ加工条件に切替えている。このため、レーザ装置や加工ヘッド等の損傷を回避しながら、加工を継続することができる。

3番目の発明においては、レーザ加工システムの状態を表す多くの状態量を観測することでレーザ加工システムの状態の差によって生じる加工結果の差を看過することなく学習できる。また、レーザ加工中に発熱等によってレーザ加工システムの状態が変化した場合であっても、その変化も取り入れて略最適なレーザ加工条件データを出力することができる。このため、加工精度や加工品質の低下を防ぐことができる。

4番目の発明においては、多くの加工条件パラメータを制御することによって、略理想的な加工結果あるいは目標とする加工結果に近い加工結果を得ることができる。略理想的な加工結果あるいは目標とする加工結果に近い加工結果を得るために、レーザ加工条件データに、波長やビームモードの異なる複数のレーザ装置や加工ヘッドの中から最適なレーザ装置や加工ヘッドを選択する指令を含めてもよい。

5番目の発明においては、機械学習の結果、レーザ加工の内容に関わらず、それぞれのレーザ加工の内容で、加工速度を含めてほぼ最適なレーザ加工条件データを出力できるようになる。レーザ加工の内容は切断、溶接、マーキング、表面改質、光造形等でありうる。

6番目の発明においては、学習部が、反射光光量が第2所定レベルを越えないレーザ加工条件データを後述する教師あり学習で学習できる。

10

20

30

40

50

7番目の発明においては、教師あり学習を用いて充分事前学習した後で、強化学習を行う。強化学習は未知の学習領域を開拓するという特徴があるので、従来全く知られていなかった条件領域に目的とするレーザ加工に適したレーザ加工条件がさらに見出される可能性がある。なお、レーザ加工の内容は切断、溶接、マーキング、表面改質、光造形などでありうる。

8番目の発明においては、学習部は、反射光の光量が第2所定レベルを越えないレーザ加工条件データを後述する強化学習で学習できる。

9番目の発明においては、機械学習装置を備えたレーザ加工システムにより、レーザ装置や加工ヘッドやレーザ光学系等の損傷を回避しながら、最適なレーザ加工条件でレーザ加工を行うことができるようになる。

10番目の発明においては、反射光の光量が警報レベルに近い第1所定レベルを越えると、その時のレーザ加工条件データに代わる次のレーザ加工条件データが機械学習装置から出力される前に、光出力を直ちに遮断するか所定の割合で減じるようにする。これにより、レーザ装置等の損傷が回避できる。

11番目の発明においては、光出力特性を更新し、その結果をレーザ加工システムの状態量の一部として状態量観測部に取り込むようにする。従って、仮にレーザ装置の劣化等により光出力特性が変化したとしても、光出力指令に対して指令通りの光出力を出力できるようになる。

12番目の発明においては、レーザ加工条件データの結果として、切断面の加工精度や加工品質等の評価結果が、人間を介さずに取得でき、機械学習装置が、人間を介さずにレーザ加工条件データを学習できる。

13番目の発明においては、レーザ加工条件データの結果として、溶接部の加工精度や加工品質等の評価結果が人間を介さずに取得でき、機械学習装置が、人間を介さずにレーザ加工条件データを学習できる。

14番目の発明においては、各レーザ加工システムが取得した学習結果を含むデータを共有することによって、より短時間により精度の高い学習効果が得られる。従って、複数のレーザ加工システムが、より適切なレーザ加工条件データを出力できるようになる。

15番目の発明においては、学習効果を共有できるだけでなく、データを集中管理すると共に、大規模な高性能プロセッサを利用して学習することが可能になり、学習速度、学習の精度が向上し、より適切なレーザ加工条件データが出力できる。また、出力するレーザ加工条件データの決定に要する時間も短縮できる。また、機械学習装置はクラウドサーバ上に存在しても良い。

16番目の発明においては、レーザ加工条件データを、レーザ光の出射によってレーザ加工中に変化するレーザ加工システムの状態量も含めたレーザ加工システムの状態量と加工結果観測部から出力される加工結果に関連付けて機械学習する。このため、人間の介在無しに、あるいは最小限の人間の介在だけで、レーザ加工システムの状態に関わらず、常に略最適なレーザ加工条件で加工を行うことが可能になり、安定的に高品質な加工結果を得ることができるようになる。

【0018】

添付図面に示される本発明の典型的な実施形態の詳細な説明から、本発明のこれら目的、特徴および利点ならびに他の目的、特徴および利点がさらに明解になるであろう。

【図面の簡単な説明】

【0019】

【図1】本発明の一実施形態の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2】反射光光量によってレーザ加工条件データが切替わり、光出力波形が変化する状態を模式的に例示したタイムチャートである。

【図3A】図1に示す機械学習装置の動作の一例を示す第一のフローチャートである。

【図3B】図1に示す機械学習装置の動作の一例を示す第一のフローチャートである。

【図4】本発明の他の実施形態の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

10

20

30

40

50

ある。

【図 5 A】図 4 に示す機械学習装置の動作の一例を示す第一のフローチャートである。

【図 5 B】図 4 に示す機械学習装置の動作の一例を示す第二のフローチャートである。

【図 6】反射光光量によってレーザ加工条件データが切替わるまでの間、制御装置によって光出力が低減されている状態を模式的に例示したタイムチャートである。

【図 7】ニューロンのモデルを模式的に示す図である。

【図 8】図 7 に示すニューロンを組合せて構成した 3 層のニューラルネットワークを模式的に示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0020】

10

以下、本発明に係る機械学習装置、レーザ加工システムおよび機械学習方法の実施例を、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。

【0021】

20

図 1 は、本発明の一実施形態のレーザ加工システム 1 の概念的な構成を示すブロック図である。本実施形態のレーザ加工システム 1 は、少なくとも一つのレーザ発振器を備えた少なくとも一つのレーザ装置 2 と、レーザ装置 2 からのレーザ光 19 を被加工物に出射するための少なくとも一つ以上の加工ヘッド 3 と、出力されるレーザ光 19 の光量を検出する少なくとも一つ以上の出力光検出部 4 と、加工ヘッド 3 から出射されて被加工物 7 の表面あるいは表面近傍で反射して加工ヘッド 3 内の光学系を経由してレーザ装置 2 に向かって戻ってくる反射光を検出する少なくとも一つ以上の反射光検出部 5 と、レーザ加工中および/またはレーザ加工後の被加工物 7 の加工状態および/または加工結果を観測する少なくとも一つ以上の加工結果観測部 6 と、加工ヘッド 3 と被加工物 7 の相対的位置関係を変えるための少なくとも一つ以上の駆動装置 8 と、機械学習装置 10 とを備える。ここで、機械学習装置 10 は、状態量観測部 11 と、動作結果取得部 12 と、学習部 13 と、意思決定部 14 とを備える。

【0022】

30

機械学習装置 10 の学習部 13 は、レーザ加工システム 1 の状態量を観測する状態量観測部 11 からの出力およびレーザ加工システム 1 による加工結果を取得する動作結果取得部 12 からの出力を受け取り、レーザ加工条件データを、レーザ加工システム 1 の状態量および加工結果に関連付けて学習する。そして、意思決定部 14 が、学習部 13 が学習したレーザ加工条件データを参照して、レーザ加工条件データを決定して制御装置 9 に出力する。

【0023】

40

なお、加工結果観測部 6 が、例えば、非接触三次元測定装置等の評価装置であった場合等、加工結果観測部 6 からの出力データをそのまま機械学習装置 10 に入力するのではなく、図 1 に示したように前処理部 18 で処理してもよい。例えば、前処理部 18 は、観察面に対して斜めから取得した三次元形状を観察面に対して垂直な方向から見た三次元形状に変換するとか、凸状異物を三次元形状データから凸状異物の体積データに変換するとか、機械学習装置 10 で利用しやすいデータに変換しても良い。

【0024】

前処理部 18 の設置位置は図 1 に示した位置には限定されない。例えば、加工結果観測部 6 からの出力データを前処理したい場合は、加工結果観測部 6 の出力信号ラインだけが通る位置に前処理部 18 を設けても良い。また、前処理部 18 は動作結果取得部 12 や状態量観測部 11 が同様の前処理機能を備えていれば、特に設けなくても良い。なお、状態量観測部 11 および動作結果取得部 12 は、機能的なブロックであり、一つのブロックにより両者の機能を達成するものとして捉えることもできる。

【0025】

50

また、加工結果観測部 6 は、基本的には、人間が介在することなく、自動的にレーザ加工中および / またはレーザ加工後の被加工物 7 の加工状態および / または加工結果を観測するものであることが望ましい。ただし、自動化が困難な場合や高額な費用が必要な場合等は、加工結果観測部 6 を人間が操作して観測し、人間が観測結果を入力しても良い。

【 0 0 2 6 】

また、駆動装置 8 は、上記のように、加工ヘッド 3 と被加工物 7 の相対的位置関係を変えるためのものである。このため、図 1 のように駆動装置 8 を被加工物 7 側に設けても良いし、加工ヘッド 3 側に設けても良いし、被加工物 7 側と加工ヘッド 3 側の両方に設けても良い。

【 0 0 2 7 】

駆動装置 8 としては、一般的はリニアモータ等を使用した駆動装置 8 が考えられる。ただし、駆動装置 8 は、被加工物 7 を加工ベッドに移動したり、加工済みの切断面を観測し易いように加工結果観測部 6 の方向に向けたりするためのロボットであっても良い。被加工物 7 が平板でなく、立体的な形状をしている場合等は、ロボットのハンドに加工ヘッド 3 を取付けても良い。なお、図 1 では、駆動装置 8 と被加工物 7 や加工ヘッド 3 との間に介在する加工ベッドやロボットハンドは省略している。駆動装置 8 や加工ヘッド 3 を支持する構造物も省略している。

【 0 0 2 8 】

加工結果観測部 6 によって、レーザ加工中および / またはレーザ加工後の被加工物 7 の加工状態および / または加工結果を観測する。そして、レーザ加工条件データを、レーザ光 1 9 の出射によってレーザ加工中に変化するレーザ加工システム 1 の状態量も含めたレーザ加工システム 1 の状態量およびレーザ加工の加工結果に関連付けて機械学習させる。これにより、人間の介在無しに、あるいは最小限の人間の介在だけで、レーザ加工システム 1 の状態に関わらず、常に最適あるいは略最適なレーザ加工条件で加工を行うことが可能になり、安定的に高品質な加工結果を得ることができるようになる。

【 0 0 2 9 】

レーザ加工システム 1 は、少なくとも一つ以上のレーザ装置 2 を備え、レーザ装置 2 は少なくとも一つ以上のレーザ発振器を備えている。レーザ発振器の種類は限定されず、炭酸ガスレーザであっても良いし、YAG 結晶等を励起媒体とする固体レーザでも良いし、光ファイバを励起媒体とするファイバレーザでも良いし、レーザダイオードからのレーザ光 1 9 をそのまま利用するダイレクトダイオードレーザでも良い。制御装置 9 は、レーザ装置 2 の電源部に、それぞれのレーザに適した駆動電流あるいは駆動電力をレーザ発振器に供給するように指令を出す。なお、電源部は、本明細書では、レーザ装置 2 内に備えられたとして、図 1 には明示していない。ただし、電源部がレーザ装置 2 内に備えられることを限定するものではない。

【 0 0 3 0 】

図 1 において、破線の矢印はレーザ光 1 9 の光線を模擬的に表しているが、空間を伝搬する光線に限定されず、例えば、光ファイバ内を伝搬する光線等も含めて模擬的に示している。加工ヘッド 3 は、加工ヘッド 3 から出射されたレーザ光 1 9 が被加工物 7 の略表面に焦点を結ぶように構成された光学系を備えていることが好ましい。

【 0 0 3 1 】

また、図 1 では、反射光検出部 5 は加工ヘッド 3 に設けられているが、レーザ装置 2 内の光伝搬経路のいずれかに設けても良く、加工ヘッド 3 とレーザ装置 2 内の光伝搬経路の両方に設けても良い。光が空間を伝搬している場合は、例えばハーフミラーで分岐させた光を反射光検出部 5 が検出してもよく、光が光ファイバ内を伝搬している場合は、例えば光分岐器を使用して分岐した光ファイバの終端からの光を反射光検出部 5 が検出したり、光ファイバのクラッドからの漏れ光を反射光検出部 5 が検出したりしてもよい。これらは、反射光検出部 5 への反射光の入射方法を限定するものではない。

【 0 0 3 2 】

また、図 1 には図示していないが、レーザ装置 2 が複数存在する場合、光結合器で複数

10

20

30

40

50

のレーザー光 19 を合波しても良い。レーザー装置 2 内に複数のレーザー発振器が存在する場合も光結合器で合波して 1 本のレーザーとして出力して良い。

【0033】

また、図 2 は反射光光量によってレーザー加工条件データが切替わり、光出力波形が変化する状態を模式的に例示したタイムチャートである。図 2 に例示したように、学習部 13 は、或るレーザー加工条件データ 1 に基づいて被加工物 7 を加工中に、動作結果取得部 12 からの出力の一つとして受け取った反射光検出部 5 で検出された反射光光量が、反射光により、加工ヘッド 3、レーザー装置 2、加工ヘッド 3 とレーザー装置 2 間のレーザー光伝搬用光学部品の内、少なくともいずれか一つが損傷を受ける可能性のある警報レベルより低く設定された第 1 所定レベルより更に低く設定された第 2 所定レベルを越えると、学習部 13 が学習したレーザー加工条件データを参照して、他のレーザー加工条件データ 2 に変える。

10

【0034】

他のレーザー加工条件データ 2 は、反射光検出部 5 で検出される反射光光量が第 2 所定レベルを越えずに、前述した或るレーザー加工条件データ 1 による加工結果に可能な範囲で近い加工結果が得られると予測されるレーザー加工条件データであるのが好ましい。

【0035】

図 2 に示される例では、CW 光から CW 光にパルス光が重畳したような出力波形に切替わっている。ただし、レーザー加工条件データの切替え前後におけるレーザー光 19 の出力波形は、図 2 の場合に限定されない。また、レーザー加工条件データとしての出力波形を変更する代わりに、被加工物 7 の表面からレーザー光 19 の焦点位置を離間させても良いし、レーザーの出力波形とレーザー光 19 の焦点位置の両方を変更しても良い。制御可能なレーザー加工条件のいずれを変更しても良い。

20

【0036】

被加工物 7 の表面からの反射光のレベルが警報レベルに達する前に、学習部 13 の学習結果を参照して、反射光が減少し、かつ略同等の加工結果が得られると予測されるレーザー加工条件に切替えているので、レーザー装置 2 や加工ヘッド 3 等の損傷を回避しながら、加工を継続することができる。

【0037】

また、状態量観測部 11 が観測する状態量に、制御装置 9 からの光出力指令に対してレーザー装置 2 から実際に出射される光出力との関係を示すレーザー装置 2 の光出力特性、レーザー装置 2 から出射される光出力、レーザー装置 2 からの光出力に対する加工ヘッド 3 から出射される光出力の比率（透過率）、レーザー装置 2 内のレーザー発振器に熱的に接続している部分の温度、レーザー装置 2 内のレーザー発振に伴って温度が変化する部品を含む各部の温度、加工ヘッド 3 の温度、レーザー光 19 をレーザー装置 2 から加工ヘッド 3 に伝搬する光学系の温度、駆動装置 8 の温度、加工ヘッド 3 や駆動装置 8 を支持している構造部品の温度、レーザー発振に伴って温度が上昇する部品を冷却するための流体の種類、温度、流量、レーザー装置 2 内の空気の温度、湿度、レーザー装置 2 周辺的环境温度、湿度、駆動装置 8 の駆動用電動機の実電流、駆動装置 8 の位置検出部からの出力、被加工物 7 の厚さを含むサイズ、材質、比熱、密度、熱伝導率、温度、表面状態の内の少なくとも一つ以上を含むことができる。

30

40

【0038】

レーザー装置 2 から出射される光出力は、出力光検出部 4 からの出力によって得ることができるが、出力光検出部 4 は、図 1 に示したように、加工ヘッド 3 に設置するものとは限定されない。出力光検出部 4 をレーザー装置 2 内部あるいはレーザー装置 2 と加工ヘッド 3 の途中に設置することもできる。出力光検出部 4 を、光結合器で合波したレーザー光 19 の光量を検出する場所に設けてもよい。また、独立して駆動可能なレーザー発振器が複数存在する場合には、それぞれのレーザー発振器の光出力特性が同時に測定できるように、それぞれのレーザー発振器に対して出力光検出部 4 を設けることが望ましい。

【0039】

また、各部の温度や湿度、流量は、それぞれ温度検出器や湿度検出器、流量計等で観測

50

することができる。駆動装置 8 の駆動用電動機の実電流、駆動装置 8 の位置検出部からの出力を観測することで、急激な加速や減速時のオーバーシュート等の少ない精度の良い駆動を行うための駆動条件データを含むレーザ加工条件データを学習することができる。

【0040】

また、被加工物 7 の厚さを含むサイズ、材質、比熱、密度、熱伝導率等は、人間が介在してデータを入力してもよく、あるいは、必要な情報を記録したバーコードを自動的に読込んで入力することも可能である。被加工物 7 の厚さは厚さ測定器で自動的に測定することも可能である。また、レーザ加工中のプラズマ光をプラズマ分光分析機によって分析して被加工物 7 の材質を推定してもよい。

【0041】

被加工物 7 の比熱、密度、熱伝導率等の熱特性は、レーザ光 19 等でパルス的に加熱して温度の変化や熱の広がりを赤外線撮像装置で観察して推定することも可能である。被加工物 7 の温度や表面状態も、赤外線撮像装置等で観測することが可能である。さらに、レーザ加工開始前における被加工物 7 の温度だけでなく、レーザ加工中の加工部の温度や加工部近傍の温度をレーザ加工システム 1 の状態量の一つとして取得することも可能である。

【0042】

本発明では、レーザ加工システム 1 の状態を表す多くの状態量を観測することでレーザ加工システム 1 の状態の差による加工結果の差を見逃すことなく学習できる。また、レーザ加工中に発熱等によってレーザ加工システム 1 の状態が変化した場合に、その変化も取り入れて略最適なレーザ加工条件データを出力することができるので、レーザ加工システム 1 の状態の変化による加工精度や加工品質の低下を防ぐことができる。

【0043】

また、意志決定部が出力するレーザ加工条件データは、各レーザ装置 2 から出射するレーザ光 19 の光出力、光出力波形、ビームモード、レーザ波長、レーザ光 19 を出射する光学系の焦点距離、F 値、透過率、被加工物 7 に出射されるレーザ光 19 の焦点と被加工物 7 の加工面との時間変化を含む相対的位置関係、被加工物 7 に出射されるレーザ光 19 の被加工物 7 の加工面におけるスポットサイズ、パワー密度、パワー密度分布、加工ヘッド 3 と被加工物 7 との時間変化を含む相対的位置関係、レーザ光 19 の光軸と被加工物 7 の加工面との成す角度、加工速度、アシストガスの種類と流量あるいは供給圧力の内の少なくとも一つ以上を含んでもよい。

【0044】

レーザ波長については、波長可変型のレーザ装置 2 の使用も考えられるが、波長の異なる複数のレーザ装置 2 が存在し、使用するレーザ装置 2 を選択することでレーザ波長を変更することもできる。また、複数のレーザ装置 2 や複数の加工ヘッド 3 から適宜選択することによりビームモードを変えることも可能であり、モード可変光学系を用いてビームモードを変更してもよい。

【0045】

さらに、加工ヘッド 3 内のズームレンズ系の焦点距離の変化や A O (アダプティブオプティクス) の曲率変化等により、レーザ光 19 を出射する光学系の焦点距離や F 値を変更することができる。また、被加工物 7 に出射されるレーザ光 19 の焦点と被加工物 7 の加工面の時間変化を含む相対的位置関係は、加工ヘッド 3 の移動によって変えることもでき、さらに、上記のように光学の焦点距離を変化させることによって変えることもできる。

【0046】

被加工物 7 に出射されるレーザ光 19 の被加工物 7 の加工面におけるスポットサイズ、パワー密度、パワー密度分布は、上記のようにビームモードや、光学系の焦点距離や F 値、レーザ光 19 の焦点と被加工物 7 の加工面との相対的位置関係を変えることによって変えることができる。

【0047】

また、これらのレーザ加工条件データは、時間的に固定した値に限定されず、時間的に

10

20

30

40

50

変化するデータでも良い。例えば、上記のように、加工ヘッド3の移動や加工ヘッド3内のズームレンズ系の焦点距離の変化やAO（アダプティブオプティクス）の曲率変化等により、加工対象物表面とレーザ光焦点との距離を時間と共に変化させながらレーザ加工を行っても良い。

【0048】

加工ヘッド3と被加工物7の相対的位置関係の時間変化である加工速度についても、一定の速度に限定されず、加速度を伴うベクトルとしての加工速度を与えても良い。例えば、急峻に加工方向が変わるような角部分の加工を行う場合に、角近傍では加工速度を変化させるといような指令を含むレーザ加工条件データを出力することもできる。多くの加工条件パラメータを制御することによって、略理想的な加工結果あるいは目標とする加工結果に近い加工結果を得ることができる。

10

【0049】

学習部13は、切断、溶接、マーキング、表面改質、光造形(Additive Manufacturing)等のレーザ加工の内容によって、異なるレーザ加工条件データを学習する学習モデルを備えている。そして、学習部13は、動作結果取得部12が取得した加工速度あるいは所定の加工に要する時間を含むレーザ加工結果とそれぞれのレーザ加工内容毎に設定されている加工速度あるいは所定の加工に要する時間を含む略理想的な加工結果あるいは目標とする加工結果との間の誤差を計算する誤差計算部15と、誤差に応じて学習モデルを更新する学習モデル更新部16を備えている。

20

【0050】

或るレーザ加工条件データに基づいて被加工物7を加工中に、動作結果取得部12からの出力の一つとして受け取った反射光検出部5で検出された反射光光量が、第2所定レベルを越えると、誤差計算部15は、レーザ加工条件データの加工結果に所定の誤差が生じたとする計算結果を出力する。そして、学習モデル更新部16は該計算結果に応じて学習モデルを更新する。

【0051】

他の加工結果が同等である場合には、加工速度が大きいか、あるいは所定の加工工程の完遂に要した加工時間が短い方が望ましい。このため、加工速度あるいは所定の加工に要する時間を含むレーザ加工結果とそれぞれのレーザ加工内容毎に設定されている略理想的な加工結果あるいは目標とする加工結果との間の誤差を計算して、誤差が小さくなるように、学習モデルを更新する。これにより、レーザ加工内容に関わらず、それぞれのレーザ加工内容について、加工速度あるいは所定の加工に要する時間を含めて最適あるいは略最適なレーザ加工条件データを教師あり学習で学習することができる。本発明では、入力（レーザ加工条件データとレーザ加工システム1の状態量）と出力（レーザ加工による加工結果）をペアで与えることができるので、教師あり学習が適している。ただし、本発明では、学習方法を教師あり学習に限定するものではない。具体的な他の学習方法については後述する。

30

【0052】

なお、加工速度が小さいか、あるいは所定の加工に要した時間が長い時の誤差の配分を大きく設定すると、加工速度重視のレーザ加工条件データを学習する。これに対し、加工速度が小さいか、あるいは所定の加工に要した時間が長い時の誤差の配分を小さく設定すると、加工品質重視のレーザ加工条件データを学習する。このため、同じ加工内容に対しても加工速度あるいは所定の加工に要した時間に対する誤差配分の異なる複数の学習モデルを備えるようにしても良い。

40

【0053】

また、反射光光量が第2所定レベルを越えると、誤差計算部15は、レーザ加工条件データの加工結果に所定の誤差が生じたとする計算結果を出力する。これにより、学習部13は、反射光光量が第2所定レベルを越えないレーザ加工条件データを学習できる。

【0054】

次に、本実施形態のレーザ加工システム1に備わる機械学習装置10の動作の一例を説

50

明する。図3Aおよび図3Bは、図1に示す機械学習装置10の動作の一例を示すフローチャートである。

【0055】

図3Aおよび図3Bに示されるように、図1に示す機械学習装置10において、学習動作（学習処理）が開始すると、まず、レーザ加工システム1へのレーザ加工指令がある否かを判定し（ステップS101）、レーザ加工指令がある場合は、機械学習装置10は、加工内容が切断か溶接か等、加工内容を確認する（ステップS102）。次いで、レーザ加工内容毎に設定された略理想的な加工結果あるいは目標とする加工結果を読み出し（ステップS103）、状態量観測部11から受取ったレーザ加工システム1の最新の状態量とレーザ加工内容に合った学習モデルを参照して、レーザ加工条件データを決定して出力する（ステップS104）。そして、レーザ加工条件データに基づいて、制御装置9は、レーザ装置2への光出力指令を含むレーザ加工システム1の各部への制御信号を出力し、レーザ装置2からレーザ光19が射出されてレーザ加工が実行される（ステップS105）。

10

【0056】

レーザ加工中においては、リアルタイムでフィードバックされてくる加工結果として、反射光検出部5で反射光光量を観察し、検出された反射光光量が第2所定レベルを越えないかを監視している（ステップS106）。機械学習部13が出力したレーザ加工条件データの実行が終了したか否かを判断して（ステップS107）、レーザ加工条件データの実行が終了するまではステップS105に戻ってレーザ光19を射出し続けてレーザ加工を継続する。

20

【0057】

これに対し、レーザ加工条件データの実行が終了と判断された場合は、加工結果観測部6から出力されたレーザ加工の加工結果を受取る（ステップS108）。次いで、誤差計算部15で、加工結果観測部6から取得した加工速度あるいは所定の加工に要する時間を含む加工結果と加工速度あるいは所定の加工に要する時間を含む略理想的な加工結果あるいは目標とする加工結果との間の誤差を計算する（ステップS109）。続いて、誤差の計算結果に応じて学習モデルを更新して（ステップS110）、ステップS101に戻り、再度、ステップ101以降のフローを実行する。

【0058】

なお、ステップS106において、反射光光量が第2所定レベルを越えたと判定された場合は、誤差計算部15から所定の誤差が生じたと計算結果が出力されて（ステップS111）、その誤差に応じて学習モデルを更新して（ステップS112）、ステップS104に戻って、次のレーザ加工条件データを出力する。

30

【0059】

以上のステップS101～S112を繰り返すことにより、学習部13は、学習モデルの更新を継続して、レーザ加工条件データを学習する。なお、略理想的な加工結果あるいは目標とする加工結果の代わりに許容可能な加工品質を設定して、許容可能な加工品質以上であれば、加工品質については、誤差がないと計算して、許容可能な加工品質以上の範囲内で、できるだけ加工速度が大きいレーザ加工条件データを学習させることもできる。前述したように、学習モデルは1種類に限定されない。

40

【0060】

また、図4は本発明の他の実施形態の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4に示したように、学習部13は、報酬計算部20と、報酬に応じて価値関数を更新する価値関数更新部21とを備えている。切断、溶接、マーキング、表面改質、光造形(Additive Manufacturing)等のレーザ加工の内容によって、レーザ加工条件データの価値を定める価値関数が、それぞれのレーザ加工内容毎に異なる内容で備えられている。

【0061】

報酬計算部20は、動作結果取得部12が取得した加工速度あるいは所定の加工に要す

50

る時間を含むレーザ加工結果とそれぞれのレーザ加工内容毎に設定されている加工速度あるいは所定の加工に要する時間を含む略理想的な加工結果あるいは目標とする加工結果との間の差異が小さい場合はその小ささに応じてプラスの報酬を与え、差異が大きい場合にその大きさに応じてマイナスの報酬を与える。

【0062】

また、この場合、或るレーザ加工条件で被加工物7を加工中に、動作結果取得部12からの出力の一つとして受け取った反射光検出部5で検出された反射光光量が、第2所定レベルを越えると、報酬計算部20は、所定のマイナス報酬を与え、価値関数更新部21は所定のマイナス報酬に応じて価値関数を更新することが好ましい。

【0063】

図4は、強化学習教師を適用したレーザ加工システム1の例を示している。図1の比較から明らかなように、図4に示す強化学習を適用したレーザ加工システム1は、結果(ラベル)付きデータ記録部17は備えていない。また、強化学習を適用したレーザ加工システム1における機械学習装置10は、状態量観測部11と、動作結果取得部12と、学習部13と、意思決定部14とを備えており、学習部13は、報酬計算部20と、価値関数更新部21とを含んでいる。

【0064】

教師あり学習の場合と同様に、他の加工結果が同等なら、加工速度が大きい、あるいは所定の加工工程の完遂に要した加工時間が短い方が望ましい。このため、加工速度あるいは所定の加工に要する時間を含むレーザ加工結果とそれぞれのレーザ加工内容毎に設定されている略理想的な加工結果あるいは目標とする加工結果との間の差異が小さい場合はその小ささに応じてプラスの報酬を与え、差異が大きい場合にその大きさに応じてマイナスの報酬を与える。これにより、レーザ加工内容に関わらず、それぞれのレーザ加工内容で、加工速度あるいは所定の加工に要する時間を含めて最適あるいは略最適なレーザ加工条件データを強化学習で学習することができる。

【0065】

前述のように、本発明の機械学習装置10の学習方法は、入力と出力のペア(ラベル付きデータ)が大量に与えられる教師あり学習が適している。ここで、強化学習は未知の学習領域を開拓するという特徴がある。このため、充分学習した段階で、強化学習を行うことによって、従来全く知られていなかった条件領域に更に目的とするレーザ加工に適したレーザ加工条件が見出される可能性がある。

【0066】

なお、加工速度が大きいか、あるいは所定の加工に要した時間が短い時の報酬を大きく設定すると、加工速度重視のレーザ加工条件データを学習する。これに対し、加工速度が小さい、あるいは所定の加工に要した時間が長い時のマイナス報酬を小さく設定すると加工品質重視のレーザ加工条件データを学習する。このため、同じ加工内容に対しても加工速度あるいは所定の加工に要した時間に対する報酬の異なる複数の価値関数を備えるようにしても良い。

【0067】

また、反射光光量が、第2所定レベルを越えると、報酬計算部20が、所定のマイナス報酬を与える。このため、学習部13は、反射光光量が第2所定レベルを越えないレーザ加工条件データを学習できる。

【0068】

図5Aおよび図5Bは、図4に示す機械学習装置10の動作の一例を示すフローチャートである。図5Aおよび図5Bに示されるように、図4に示す機械学習装置10において、学習動作(学習処理)が開始すると、まず、レーザ加工システム1へのレーザ加工指令がある否かを判定し(ステップS201)、レーザ加工指令がある場合は、機械学習装置10は、加工内容が切断か溶接か等、加工内容を確認する(ステップS202)。次いで、レーザ加工内容毎に設定された略理想的な加工結果あるいは目標とする加工結果を読み出し(ステップS203)、状態量観測部11から受取ったレーザ加工システム1の最新の

10

20

30

40

50

状態量とレーザ加工内容に合った学習モデルを参照して、レーザ加工条件データを決定して出力する（ステップS204）。さらに、レーザ加工条件データに基づいて、制御装置9は、レーザ装置2への光出力指令を含むレーザ加工システム1の各部への制御信号を出力し、レーザ装置2からレーザ光19が射出されてレーザ加工が実行される（ステップS205）。

【0069】

レーザ加工中においては、リアルタイムでフィードバックされてくる加工結果として、反射光検出部5で反射光光量を観察し、検出された反射光光量が第2所定レベルを越えないかを監視している（ステップS206）。機械学習部13が出力したレーザ加工条件データの実行が終了したか否かを判断して（ステップS207）、レーザ加工条件データの

10

【0070】

これに対し、レーザ加工条件データの実行が終了と判断された場合は、加工結果観測部6から出力されたレーザ加工の加工結果を受取る（ステップS208）。次いで、加工結果観測部6から取得した加工速度あるいは所定の加工に要する時間を含む加工結果と加工速度あるいは所定の加工に要する時間を含む略理想的な加工結果あるいは目標とする加工結果との間の差異を判定する（ステップS209）。そして、報酬計算部20は、加工結果観測部6から取得した加工速度あるいは所定の加工に要する時間を含む加工結果と加工速度あるいは所定の加工に要する時間を含む略理想的な加工結果あるいは目標とする加工結果との間の差異が小さい場合には、差異の小ささに応じてプラスの報酬を与える（ステップS210）。これに対し、差異が大きい場合は、差異の大きさに応じてマイナスの報酬を与える（ステップS211）。次いで、報酬に応じて価値関数更新部21において、価値関数を更新して（ステップS212）、ステップS201に戻り、再度、ステップ201以降のフローを実行する。

20

【0071】

なお、ステップS206において、反射光光量が第2所定レベルを越えたと判定された場合は、報酬計算部20は、マイナスの報酬を与えて（ステップS213）、その報酬に応じて価値関数更新部21において、価値関数を更新する（ステップS214）。その後、ステップS204に戻って、次のレーザ加工条件データを出力する。

30

【0072】

以上のステップS201～S214を繰返すことにより、学習部13は、価値関数あるいは後述の行動価値テーブルの更新を継続して、レーザ加工条件データを学習する。なお、略理想的な加工結果あるいは目標とする加工結果の代わりに許容可能な加工品質を設定して、許容可能な加工品質以上であれば、加工品質については、一定のプラスの報酬を与え、許容可能な加工品質以上の範囲内で、できるだけ加工速度が大きいレーザ加工条件データを学習させることもできる。繰返しになるが、価値関数は1種類に限定されない。

【0073】

上記のような機械学習装置10を備えたレーザ加工システム1においては、機械学習装置10から出力されたレーザ加工条件データに基づいて、制御装置9が、それぞれ少なくとも1つ以上備えられているレーザ装置2、加工ヘッド3、出力光検出部4、反射光検出部5、加工結果観測部6、駆動装置8等のレーザ加工システム1の各部を制御して、レーザ加工を行う。これにより、反射光によるレーザ装置2や加工ヘッド3やレーザ光学系等の損傷を回避しながら、高速で高品質かつ高精度な加工結果を得るのに最適なあるいは略最適なレーザ加工条件でレーザ加工を行うことができる。

40

【0074】

レーザ加工システム1は、反射光によるレーザ装置2や加工ヘッド3やレーザ光学系等の損傷をより確実に回避するのが好ましい。ここで、図6は反射光光量によってレーザ加工条件データが切替わるまでの間、制御装置によって光出力が低減されている状態を模式的に例示したタイムチャートである。図6に示したように、反射光検出部5が検出した反

50

射光光量が第2所定レベルよりも警報レベルに近い第1所定レベルを越えた場合は、制御装置9が、機械学習装置10からの次のレーザ加工条件データが出力されるのを待たずに、レーザ装置2からの光出力を遮断あるいは所定の割合まで減じるようにしても良い。これにより、次のレーザ加工条件データを出力するために必要な処理時間が多少長くなったとしても、レーザ装置2等の損傷が確実に回避できる。

【0075】

また、反射光検出部5を複数備えていてもよい。そして、例えば、それぞれの反射光検出部5が、伝搬経路の異なる反射光の光量を検出して、反射光量の比率等の反射光の特徴を抽出する。そのような反射光の光量を、動作結果取得部12を経由して、レーザ加工条件データにフィードバックするようにしても良い。また、複数の反射光検出部5を設けた場合、それぞれの反射光検出部5に対して、第1所定レベルや第2所定レベルを個別に設定しても良い。

10

【0076】

また、レーザ加工システム1は、レーザ装置2あるいは制御装置9に、制御装置9からの光出力指令に対してレーザ装置2から実際に射出される光出力との関係を示すレーザ装置2の光出力特性を記憶している。所定のスケジュールに沿って、光出力特性を測定し、測定した結果に基づいてレーザ装置2の光出力特性を更新することが好ましい。

【0077】

そして、レーザ装置2の光出力特性を更新し、その結果をレーザ加工システム1の状態量の一部として状態量観測部11に取り込むようにする。これにより、仮にレーザ装置2が劣化等により、光出力特性が変化した場合にも、光出力指令に対して指令通りの光出力を出力できるようになる。なお、前述のように、レーザ発振器が複数存在する場合には、出力光検出部4は、光結合器で合波したレーザ光の光量を検出する場所に設けるようにする。独立して駆動可能なレーザ発振器が複数存在する場合には、それぞれのレーザ発振器の光出力特性が同時に測定できるように、それぞれのレーザ発振器に対しても出力光検出部4を設けることが望ましい。

20

【0078】

また、レーザ加工システム1の加工結果観測部6の少なくとも一つが、デジタル二次元撮像装置、CCD測定顕微鏡、接触式表面粗さ・形状測定装置、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のいずれか一つとすることができる。そして、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、切断面の垂直度の観測結果データの内、少なくとも一つ以上のデータを、レーザ加工条件データの結果として、加工結果観測部6から動作結果取得部12に出力することができる。

30

【0079】

上記の加工結果観測部6によるレーザ切断加工による加工結果の取得は、通常は、レーザ加工条件データに基づいたレーザ加工が終了した後に行われる。例えば、駆動装置8の具体例であるロボット等によって、レーザ加工後の被加工物7あるいは上記測定装置を移動させ、それにより、レーザ加工による被加工物7の切断面等が上記の測定装置によって観測可能なようにする。これにより、自動的に加工結果を取得できる。

40

【0080】

従って、レーザ加工条件データの結果としての、切断面の加工精度や加工品質等の評価結果が、人間を介さずに取得できる。その結果、機械学習装置10が、人間を介さずにレーザ加工条件データを学習できる。しかし、前述のように、加工結果の取得に人間の介在を全く排除するものではない。

【0081】

また、反射光検出部5による反射光光量の観測結果は、レーザ加工中にリアルタイムで取得して動作結果取得部12経由でフィードバック可能なレーザ加工条件データの加工結果とすることができる。中間的な加工結果の観測としては、デジタル二次元撮像装置やC

50

C D測定顕微鏡等で加工直後の切断線形状を観測して、例えば、切断幅の安定性、直角切断部の加工精度等を加工結果として取得して動作結果取得部12経由でフィードバックしても良い。

【0082】

また、レーザ加工システム1の加工結果観測部6の少なくとも一つが、デジタル二次元撮像装置、C D測定顕微鏡、レーザ顕微鏡(形状測定マイクロスコプ)、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、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のいずれか一つとすることができる。そして、レーザによる溶接部のクラック、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、ハンピングの観測結果データの内、少なくとも一つ以上のデータを、レーザ加工条件データの結果として、加工結果観測部6から動作結果取得部12に出力することができる。

10

【0083】

レーザ切断加工結果の取得と同様に、上記の加工結果観測部6によるレーザ溶接の加工結果の取得は、通常は、レーザ加工条件データに基づいたレーザ加工が終了した後に行われる。例えば、駆動装置8の具体例であるロボット等によってレーザ加工後の被加工物7あるいは上記測定装置を移動させ、それにより、レーザ加工による溶接部等が上記の測定装置によって観測可能なようにする。これにより、自動的に加工結果を取得することができる。

【0084】

従って、レーザ加工条件データの結果としての、溶接部の加工精度や品質等の評価結果が、人間を介さずに取得できる。その結果、機械学習装置10が、人間を介さずにレーザ加工条件データを学習できる。しかし、前述のように、加工結果の取得に人間の介在を全く排除するものではない。

20

【0085】

また、反射光検出部5による反射光光量の観測結果は、レーザ加工中にリアルタイムで取得して動作結果取得部12経由でフィードバック可能なレーザ加工条件データの加工結果とすることができる。中間的な加工結果の観測としては、デジタル二次元撮像装置やC D測定顕微鏡等で加工直後の溶接部形状を観測して、例えば、アンダーカット・オーバーラップ、ハンピングの観測結果等を加工結果として取得して動作結果取得部12経由でフィードバックしても良い。

30

【0086】

なお、上述した実施形態のレーザ加工システム1は、図1や図4に示されるように1つのレーザ加工システム1に対して1つの機械学習装置10を備えたものである。しかし、本発明においては、レーザ加工システム1および機械学習装置10の各々の数は1つに限定されない。レーザ加工システム1が、複数存在し、レーザ加工システム1毎にそれぞれ設けられた複数の機械学習装置10が、通信媒体を介して相互にデータを共有または交換することが好ましい。各レーザ加工システム1が取得した学習結果を含むデータを共有することによって、より短時間により精度の高い学習効果が得られ、より適切なレーザ加工条件データが出力できるようになる。

40

【0087】

更に、機械学習装置10は、レーザ加工システム1内に在っても、レーザ加工システム1外に在っても良い。また、通信媒体を介して、単一の機械学習装置10を複数のレーザ加工システム1で共有しても良い。更には、機械学習装置10がクラウドサーバ上に存在しても良い。

【0088】

その結果、学習効果を共有できるだけでなく、データを集中管理すると共に、大規模な高性能プロセッサを利用して学習することが可能になる。それゆえ、学習速度、学習の精度が向上し、より適切なレーザ加工条件データを出力できる。また、出力するレーザ加工条件データの決定に要する時間も短縮できる。これらの機械学習装置10には、汎用の計

50

算機もしくはプロセッサを用いても良いが、G P G P U (General-Purpose computing on Graphics Processing Units) や大規模 P C クラスタ等を用いると、より高速に処理することができる。

【0089】

最後に、図1や図4に示した機械学習装置10の学習方法について述べる。機械学習装置10は、機械学習装置10に入力されたデータの集合の中にある有用な規則、ルール、知識表現、判断基準などを解析により抽出し、その判断結果を出力するとともに、知識の学習を行う機能を備えている。

【0090】

機械学習には、教師あり学習、教師なし学習、強化学習などのアルゴリズムがあり、更に、これらの手法を実現するうえで、特徴量そのものの抽出を学習する、「深層学習(ディープラーニング: Deep Learning)」と呼ばれる手法がある。

【0091】

教師あり学習とは、ある入力と結果(ラベル)のデータの組を大量に機械学習装置10に与えることで、それらのデータセットにある特徴を学習し、入力から結果を推定するモデル、すなわちその関係性を帰納的に獲得するものである。教師あり学習は、学習のための適切な入力データと出力データのペアが与えられることによって、比較的容易に学習を進めることができる。

【0092】

教師なし学習とは、入力データのみを大量に学習装置に与えることで、入力データがどのような分布をしているか学習し、対応する教師出力データを与えなくても、入力データに対して圧縮・分類・整形などを行う装置で学習する手法である。「出力すべきもの」が予め決まっていないという点で教師有り学習とは異なる。データの背後に存在する本質的な構造を抽出するために用いられる。

【0093】

強化学習とは、判定や分類だけではなく、行動を学習することにより、環境に行動が与える相互作用を踏まえて適切な行動を学習、すなわち将来的に得られる報酬を最大にするための学習する方法を学ぶものである。強化学習では、行動が引き起こす結果を全く知らない、または、不完全にしか知らない状態から学習を開始するが、教師あり学習で事前学習を行って、事前学習した状態を初期状態として、条件の良いスタート地点から強化学習をスタートさせることもできる。強化学習には、未知の学習領域を開拓していく行動と、既知の学習領域を利用して行く行動とをバランスよく選択できるという特徴があり、従来全く知られていなかった条件領域に更に目的とするレーザ加工に適したレーザ加工条件が見出される可能性がある。また、レーザ加工条件データの出力により、レーザ発振器や被加工物7の温度等が変化する、すなわち、行動が環境に影響を与えるので、強化学習を適用する意義はあると考えられる。

【0094】

図1は、教師あり学習の機械学習装置10を備えたレーザ加工システム1の例を示し、図4は、強化学習の機械学習装置10を備えたレーザ加工システム1の例を示している。

【0095】

まず、教師あり学習による学習方法について述べる。教師あり学習では、学習のための適切な入力データと出力データのペアが与えられ、入力データとそれに対応すべき出力データを写像する関数(学習モデル)を生成する。

【0096】

教師あり学習を行う機械学習器の動作は学習段階と予測段階の2つの段階がある。教師あり学習を行う機械学習器は、学習段階において、入力データとして用いられる状態変数(説明変数)の値と、出力データとして用いられる目的変数の値とを含む教師データを与えると、状態変数の値が入力された時に、目的変数の値を出力することを学習し、このような教師データをいくつも与えることにより、状態変数の値に対する目的変数の値を出力するための予測モデルを構築する。そして、教師あり学習を行う機械学習器は、予測段階

10

20

30

40

50

において、新しい入力データ（状態変数）が与えられたとき、学習結果（構築された予測モデル）に従って、出力データ（目的変数）を予測して出力する。ここで、結果（ラベル）付きデータ記録部 17 は、それまでに得られた結果（ラベル）付きデータを保持し、結果（ラベル）付きデータを誤差計算部 15 に提供することができる。あるいは、レーザ装置 2 の結果（ラベル）付きデータを、メモリカードや通信回線等により、そのレーザ装置 2 の誤差計算部 15 に提供することも可能である。

【0097】

教師あり学習を行う機械学習器の学習の一例として、例えば以下の式（1）に示すような予測モデルの回帰式を設定し、学習の過程において各状態変数 x_1, x_2, x_3, \dots が取る値を回帰式に当てはめた時に、目的変数 y の値が得られるように、各係数 $a_0, a_1, a_2, a_3, \dots$ の値を調整することにより学習が進められる。なお、学習の方法はこれに限られるものではなく、教師あり学習のアルゴリズムごとに異なる。

10

【数 1】

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots + a_nx_n$$

【0098】

教師あり学習のアルゴリズムとしては、ニューラルネットワーク、最小二乗法、ステップワイズ法など様々な方法が周知となっており、本発明に適用する方法としていずれの教師あり学習アルゴリズムを採用しても良い。なお、それぞれの教師あり学習アルゴリズムは周知なので、本明細書における各アルゴリズムの詳細説明は省略する。

20

【0099】

次に、強化学習による学習方法について述べる。強化学習の問題設定は次のように考えられる。

- ・レーザ装置 2 の機械学習部 13 は、レーザ装置 2 の状態を含む環境の状態を観測し、行動（レーザ加工条件データの出力）を決定する。
- ・環境は、何らかの規則に従って変化し、更に、行動が、環境に変化を与えることもある。
- ・行動する度に、報酬信号が帰ってくる。
- ・最大化したいのは、将来にわたっての報酬の合計である。
- ・行動が引き起こす結果を全く知らない、または、不完全にしか知らない状態から学習を開始する。

30

【0100】

強化学習の代表的な手法としては、Q 学習や TD 学習が知られている。以下、Q 学習の場合で説明するが、Q 学習に限定されるものではない。

Q 学習は、或る環境状態 s の下で、行動 a を選択する価値 $Q(s, a)$ を学習する方法であって、ある状態 s のとき、価値 $Q(s, a)$ の最も高い行動 a を最適な行動として選択すれば良い。しかし、最初は、状態 s と行動 a との組合せについて、価値 $Q(s, a)$ の正しい値は分かっていないので、エージェント（行動主体）は、ある状態 s の下で様々な行動 a を選択し、その時の行動 a に対して、報酬が与えられる。それにより、エージェントは、より良い行動の選択、すなわち、正しい価値 $Q(s, a)$ を学習していく。

40

【0101】

更に、行動の結果、将来にわたって得られる報酬の合計を最大化したいので、最終的に $Q(s, a) = E[(\gamma^t) r_t]$ となるようにすることを目指す。ここで $E[\]$ は期待値を表し、 t は時刻、 γ は後述する割引率と呼ばれるパラメータ、 r_t は時刻 t における報酬、 γ^t は時刻 t による合計である。この式における期待値は、最適な行動に従って状態変化したときについてとるものとし、それは、分かっていないので、探索しながら学習する

50

ことになる。このような価値 $Q(s, a)$ の更新式は、例えば、下記の式 (2) により表すことができる。

【0102】

即ち、価値関数更新部 21 は、下記の式 (2) を用いて価値関数 $Q(s_t, a_t)$ を更新する。

【数 2】

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha (r_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t))$$

10

【0103】

ここで、 s_t は、時刻 t における環境の状態を表し、 a_t は、時刻 t における行動を表す。行動 a_t により、状態は s_{t+1} に変化する。 r_{t+1} は、その状態の変化により得られる報酬を表している。また、 \max の付いた項は、状態 s_{t+1} の下で、その時に分かっている最も Q 値の高い行動 a を選択した場合の Q 値に α を乗じたものになる。ここで、 α は、 $0 < \alpha < 1$ のパラメータで、割引率と呼ばれる。また、 γ は、学習係数で、 $0 < \gamma < 1$ の範囲とする。

【0104】

20

上述した式 (2) は、試行 a_t の結果、帰ってきた報酬 r_{t+1} を元に、状態 s_t における行動 a_t の評価値 $Q(s_t, a_t)$ を更新する方法を表している。すなわち、状態 s における行動 a の評価値 $Q(s_t, a_t)$ よりも、報酬 r_{t+1} と行動 a による次の状態における最良の行動 \max_a の評価値 $Q(s_{t+1}, \max_a a_{t+1})$ の合計の方が大きければ、 $Q(s_t, a_t)$ を大きくし、反対に小さければ、 $Q(s_t, a_t)$ を小さくすることを示している。つまり、ある状態におけるある行動の価値を、結果として即時帰ってくる報酬と、その行動による次の状態における最良の行動の価値に近付けるものである。

【0105】

ここで、 $Q(s, a)$ の計算機上での表現方法は、すべての状態行動ペア (s, a) に対して、その値を行動価値テーブルとして保持しておく方法と、 $Q(s, a)$ を近似するような関数を用意する方法がある。後者の方法では、前述の式 (2) は、確率勾配降下法などの手法で近似関数のパラメータを調整していくことにより、実現することができる。

30

なお、近似関数としては、ニューラルネットワークを用いることができる。

上記のように、教師あり学習の学習アルゴリズムや、強化学習での価値関数の近似アルゴリズムとして、ニューラルネットワークを用いることができるので、機械学習装置 10 は、ニューラルネットワークを有することが好ましい。

【0106】

図 7 は、ニューロンのモデルを模式的に示す図であり、図 8 は、図 7 に示すニューロンを組み合わせ構成した三層のニューラルネットワークを模式的に示す図である。ニューラルネットワークは、図 7 に示すようなニューロンのモデルを模した演算装置およびメモリ等で構成される。ニューロンは、複数の入力 x に対する出力 (結果) y を出力するものである。各入力 x ($x_1 \sim x_3$) には、この入力 x に対応する重み w ($w_1 \sim w_3$) が掛けられ、ニューロンは、以下の式 (3) により表現される結果 y を出力する。なお、入力 x 、結果 y および重み w は、すべてベクトルである。

40

【0107】

【数 3】

$$y = f_k \left(\sum_{i=1}^n x_i w_i - \theta \right)$$

ここで、 θ は、バイアスであり、 f_k は、活性化関数である。

【0108】

10

図 8 に示したように、ニューラルネットワークの左側から複数の入力 x ($x_1 \sim x_3$) が入力され、右側から結果 y ($y_1 \sim y_3$) が出力される。入力 $x_1 \sim x_3$ は、3 つのニューロン $N_{11} \sim N_{13}$ の各々に対して、対応する重みが掛けられて入力される。これらの入力に掛けられる重みは、まとめて w_1 と表記している。

【0109】

ニューロン $N_{11} \sim N_{13}$ は、それぞれ、 $z_{11} \sim z_{13}$ を出力する。図 8 において、これら $z_{11} \sim z_{13}$ は、まとめて特徴ベクトル z_1 と表記され、入力ベクトルの特徴量を抽出したベクトルと見なすことができる。この特徴ベクトル z_1 は、重み w_1 と重み w_2 との間の特徴ベクトルである。 $z_{11} \sim z_{13}$ は、2 つのニューロン N_{21} および N_{22} の各々に対して、対応する重みが掛けられて入力される。これらの特徴ベクトルに掛けられる重みは、まとめて w_2 と表記されている。ニューロン N_{21} 、 N_{22} は、それぞれ z_{21} 、 z_{22} を出力する。図 8 において、これら z_{21} 、 z_{22} は、まとめて特徴ベクトル z_2 と表記されている。この特徴ベクトル z_2 は、重み w_2 と重み w_3 との間の特徴ベクトルである。 z_{21} 、 z_{22} は、3 つのニューロン $N_{31} \sim N_{33}$ の各々に対して、対応する重みが掛けられて入力される。これらの特徴ベクトルに掛けられる重みは、まとめて w_3 と表記している。

20

【0110】

最後に、ニューロン $N_{31} \sim N_{33}$ は、それぞれ、結果 $y_1 \sim$ 結果 y_3 を出力する。ニューラルネットワークの動作には、学習モードと価値予測モードがあり、学習モードにおいて、学習データセットを用いて重み w を学習し、そのパラメータを用いて予測モードにおいて、レーザ加工条件データの出力の行動判断を行う。ここで、予測モードで実際にレーザ加工条件データの出力を行い、得られたデータを即時学習し、次の行動に反映させるオンライン学習も、予め収集しておいたデータ群を用いてまとめた学習を行い、以降はずっとそのパラメータで検知モードを行うバッチ学習も行うこともできる。ある程度データが溜まるたびに学習モードを挟むということも可能である。

30

【0111】

また、重み $w_1 \sim w_3$ は、誤差逆伝播法 (Backpropagation) により学習可能である。なお、誤差の情報は、右側から入り左側に流れる。誤差逆伝播法は、各ニューロンについて、入力 x が入力されたときの出力 y と真の出力 y (教師) との差分を小さくするように、それぞれの重みを調整 (学習) する手法である。

【0112】

40

図 8 のニューラルネットワークの中間層 (隠れ層) は一層だが、2 層以上にすることも可能であり、中間層が 2 層以上の場合は深層学習と呼ばれている。

以上、教師あり学習と強化学習の学習方法について簡単に述べたが、本発明に適用される機械学習方法は、これらの手法に限定されず、機械学習装置 10 で用いることが出来る手法である「教師あり学習」、「教師なし学習」、「半教師あり学習」および「強化学習」等といった様々な手法が適用可能である。

【0113】

典型的な実施形態を用いて本発明を説明したが、当業者であれば、本発明の範囲から逸脱することなしに、前述した変更および種々の他の変更、省略、追加を行うことができるのを理解できるであろう。

50

【符号の説明】

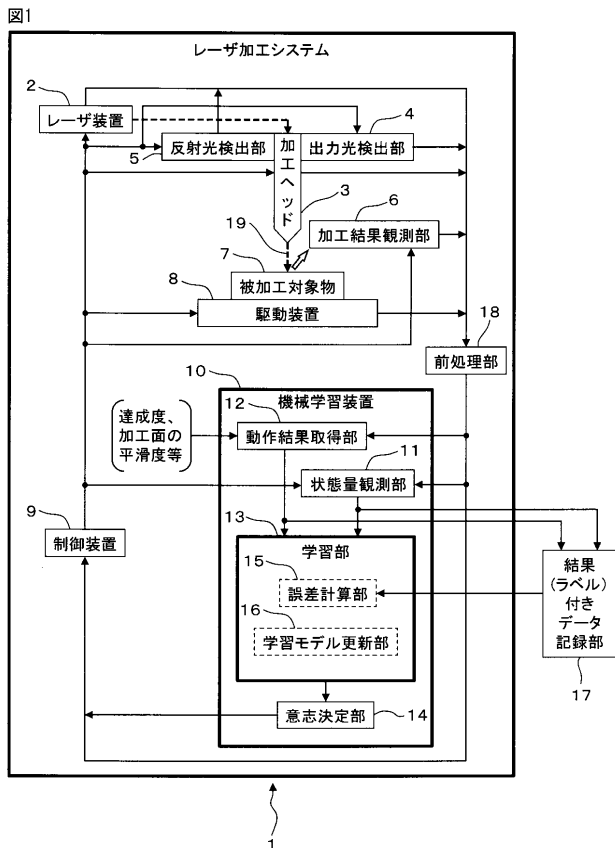
【0114】

- 1 レーザ加工システム
- 2 レーザ装置
- 3 加工ヘッド
- 4 出力光検出部
- 5 反射光検出部
- 6 加工結果観測部
- 7 被加工物
- 8 駆動装置
- 9 制御装置
- 10 機械学習装置
- 11 状態量観測部
- 12 動作結果取得部
- 13 学習部
- 14 意志決定部
- 15 誤差計算部
- 16 学習モデル更新部
- 17 結果(ラベル)付きデータ記録部
- 18 前処理部
- 19 レーザ光
- 20 報酬計算部
- 21 価値関数更新部

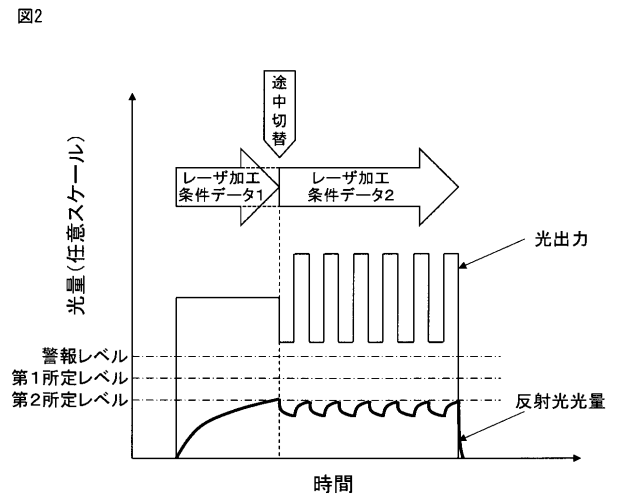
10

20

【図1】

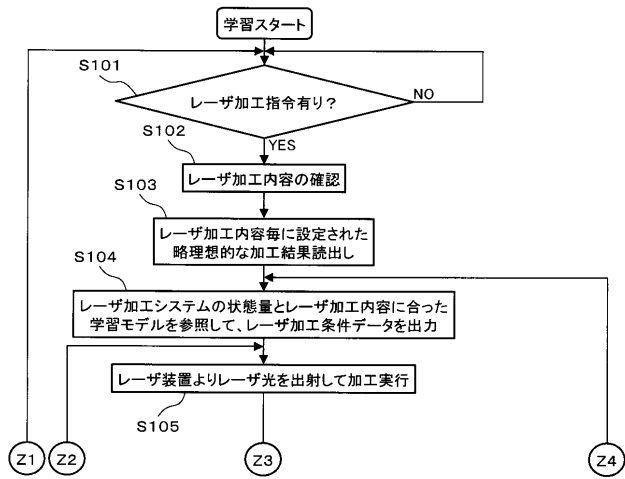


【図2】



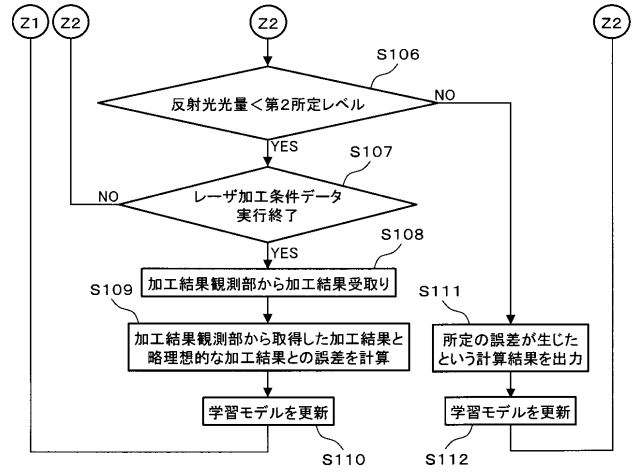
【 図 3 A 】

図3A



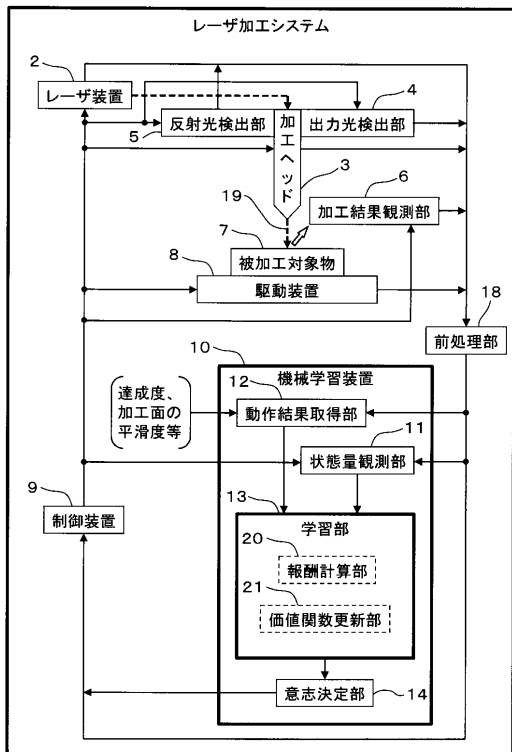
【 図 3 B 】

図3B



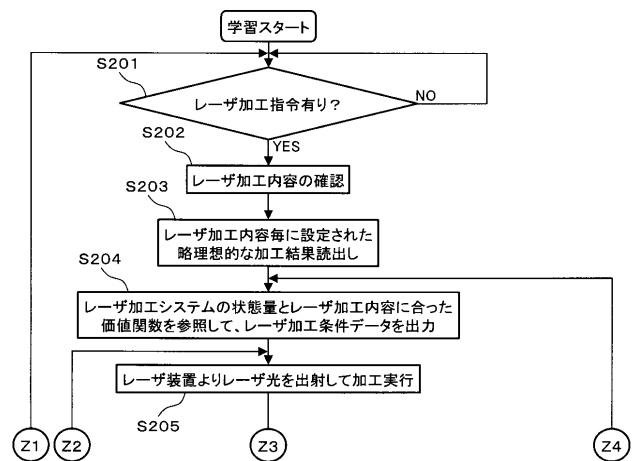
【 図 4 】

図4



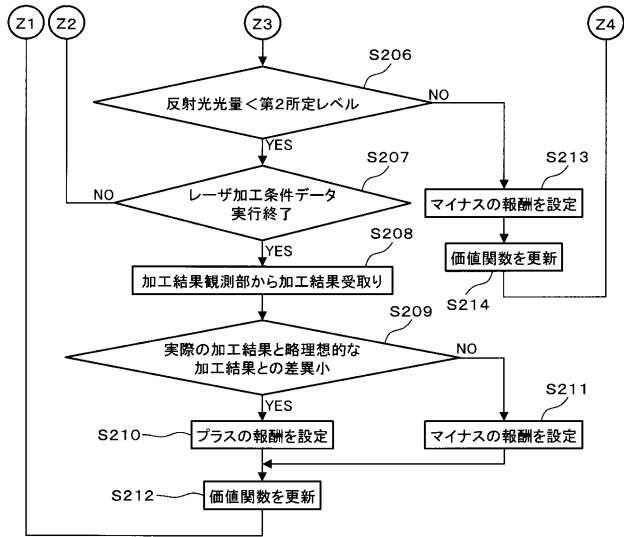
【 図 5 A 】

図5A



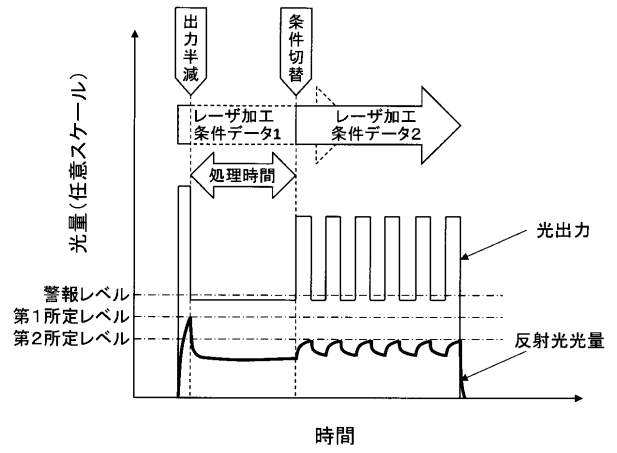
【 図 5 B 】

図5B



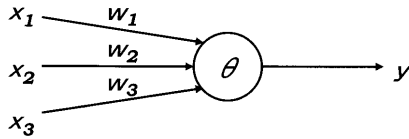
【 図 6 】

図6



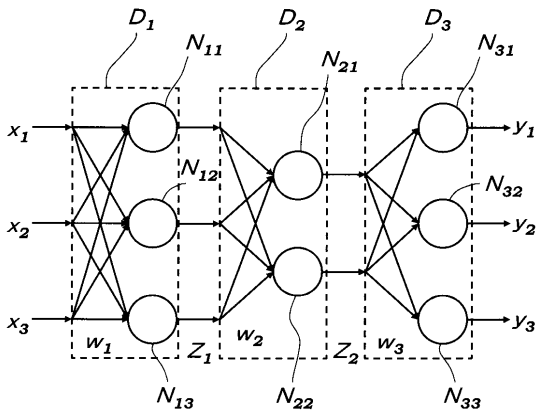
【 図 7 】

図7



【 図 8 】

図8



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

(72)発明者 大山 昭憲

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

Fターム(参考) 3C269 AB11 BB03 BB11 EF23 MN44

4E168 AA00 AD07 BA00 CA00 CA02 CA03 CA05 CA06 CA11 CB00

CB03 CB07 CB08 CB22 CB24 DA13 DA23 DA24 DA26 DA28

EA18 GA03 KA15