

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B1)

(11)特許番号
特許第7250231号
(P7250231)

(45)発行日 令和5年3月31日(2023.3.31)

(24)登録日 令和5年3月23日(2023.3.23)

(51)国際特許分類 F I
B 2 3 K 26/0622(2014.01) B 2 3 K 26/0622

請求項の数 23 (全37頁)

(21)出願番号	特願2023-504596(P2023-504596)	(73)特許権者	000006013 三菱電機株式会社 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号
(86)(22)出願日	令和4年9月15日(2022.9.15)	(74)代理人	100118762 弁理士 高村 順
(86)国際出願番号	PCT/JP2022/034581	(72)発明者	山本 達也 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内
審査請求日	令和5年1月23日(2023.1.23)	(72)発明者	田所 譲 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内
早期審査対象出願		(72)発明者	石川 恭平 東京都千代田区丸の内二丁目7番3号 三菱電機株式会社内
		審査官	山下 浩平

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 レーザ装置、レーザ加工装置、学習装置、推論装置、レーザ加工システムおよびレーザ加工方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

パルスレーザ光を発生させるQスイッチレーザ発振器と、
前記パルスレーザ光を増幅する増幅器と、
前記Qスイッチレーザ発振器と前記増幅器との間の光路上に配置された光スイッチング素子と、
前記Qスイッチレーザ発振器が前記パルスレーザ光を発生させる時間間隔の特徴を示すパルス特性時間に基づいて、前記光スイッチング素子の透過率を変調させる制御装置と、
を備える
ことを特徴とするレーザ装置。

【請求項2】

前記制御装置は、
前記Qスイッチレーザ発振器が発生させる複数の前記パルスレーザ光の間の時間間隔、
または、前記Qスイッチレーザ発振器が発生させる複数の前記パルスレーザ光の間の時間間隔の移動平均を前記パルス特性時間として求め、
前記時間間隔が短いほど前記透過率を高く、且つ、前記増幅器から出射される複数の前記パルスレーザ光の間のエネルギーの変動が予め定められた値よりも小さくなるように前記透過率を制御する
ことを特徴とする請求項1に記載のレーザ装置。

【請求項3】

10

20

学習装置をさらに備え、

前記学習装置は、

前記レーザ装置が前記パルスレーザ光を発生させる時間間隔を示す間隔情報と前記パルスレーザ光の増幅後のパルスエネルギーとを含む状態量と、前記光スイッチング素子の透過率と、を含む学習用データを取得する学習用データ取得部と、

前記学習用データを用いて、前記状態量から、増幅後の前記パルスエネルギーが目標値となる前記光スイッチング素子の透過率を推論するための学習済モデルを生成するモデル生成部と、

を有する

ことを特徴とする請求項 1 に記載のレーザ装置。

10

【請求項 4】

前記光スイッチング素子の透過率を推論する推論装置をさらに備え、

前記推論装置は、

前記パルスレーザ光を発生させる時間間隔を示す間隔情報と、前記パルスレーザ光の増幅後のパルスエネルギーの目標値とを含む状態量を取得する推論用データ取得部と、

前記状態量から増幅後の前記パルスエネルギーが目標値となる前記光スイッチング素子の透過率を推論するための学習済モデルを用いて、前記推論用データ取得部で取得した前記状態量から前記透過率を推論する推論部と、

を有し、

前記制御装置は、前記推論装置が推論した前記透過率を用いて、前記光スイッチング素子を制御する

20

ことを特徴とする請求項 1 に記載のレーザ装置。

【請求項 5】

前記光スイッチング素子の透過率を推論する推論装置をさらに備え、

前記推論装置は、

前記パルスレーザ光を発生させる時間間隔を示す間隔情報と、前記パルスレーザ光の増幅後のパルスエネルギーの目標値とを含む状態量を取得する推論用データ取得部と、

前記状態量から増幅後の前記パルスエネルギーが目標値となる前記光スイッチング素子の透過率を推論するための学習済モデルを用いて、前記推論用データ取得部で取得した前記状態量から前記透過率を推論する推論部と、

30

を有し、

前記制御装置は、前記推論装置が推論した前記透過率を用いて、前記光スイッチング素子を制御する

ことを特徴とする請求項 3 に記載のレーザ装置。

【請求項 6】

前記間隔情報は、前記 Q スイッチレーザ発振器の発生させる前記パルスレーザ光の前記パルス特性時間と、前記 Q スイッチレーザ発振器の発生させる前記パルスレーザ光のエネルギーと、前記 Q スイッチレーザ発振器の発生させる前記パルスレーザ光の波形と、前記増幅器による増幅後の前記パルスレーザ光の波形と、前記 Q スイッチレーザ発振器および前記増幅器の駆動電流または放電電力と、のうち少なくとも 1 つを含む

40

ことを特徴とする請求項 3 から 5 のいずれか 1 項に記載のレーザ装置。

【請求項 7】

前記レーザ装置は、レーザ媒質が気体であるガスレーザであり、

前記状態量は、前記 Q スイッチレーザ発振器または前記増幅器の冷却水温度と、前記 Q スイッチレーザ発振器または前記増幅器のガス温度と、前記 Q スイッチレーザ発振器または前記増幅器のガス圧と、前記 Q スイッチレーザ発振器または前記増幅器の連続放電時間と、前記 Q スイッチレーザ発振器または前記増幅器の電極温度と、前記 Q スイッチレーザ発振器または前記増幅器の光学部品交換時からの総放電時間と、のうち少なくとも 1 つをさらに含む

ことを特徴とする請求項 3 から 5 のいずれか 1 項に記載のレーザ装置。

50

【請求項 8】

前記パルス特性時間は、前記Qスイッチレーザ発振器の有する放電電極のガスが流れる方向の長さである電極幅をガス流速で除算した値以下である

ことを特徴とする請求項 1 から 5 のいずれか 1 項に記載のレーザ装置。

【請求項 9】

前記制御装置は、1つの前記パルスレーザ光が前記光スイッチング素子を透過する間に前記透過率を経時変化させる

ことを特徴とする請求項 1 から 5 のいずれか 1 項に記載のレーザ装置。

【請求項 10】

前記モデル生成部は、前記状態量から、1つの前記パルスレーザ光が前記光スイッチング素子を透過する間に経時変化する前記透過率を推論するための学習済モデルを生成することを特徴とする請求項 3 に記載のレーザ装置。

10

【請求項 11】

パルスレーザ光を発生させるQスイッチレーザ発振器と、前記パルスレーザ光を増幅する増幅器と、前記Qスイッチレーザ発振器と前記増幅器との間の光路上に配置された光スイッチング素子と、前記Qスイッチレーザ発振器が前記パルスレーザ光を発生させる時間間隔の特徴を示すパルス特性時間に基づいて、前記光スイッチング素子の透過率を変調させる制御装置と、を有するレーザ装置と、

前記増幅器から出力された前記パルスレーザ光を偏向する偏向素子と、

前記偏向素子からの前記パルスレーザ光を集光または転写して加工対象物に照射する対物光学系と、

20

を備え、

前記制御装置は、前記パルスレーザ光によって前記加工対象物に穴あけ加工を行うときの加工経路上に含まれる加工穴の特性を示す加工穴特性値に応じて前記透過率を制御し、前記加工穴の間隔が短いほど前記透過率を高く、且つ、複数の前記加工穴の形状のばらつきを示す値が予め定められた値よりも小さくなるように、前記透過率を制御する

ことを特徴とするレーザ加工装置。

【請求項 12】

前記加工穴特性値は、前記加工経路の上の複数の前記加工穴の間隔、または、複数の前記加工穴の間隔の移動平均を示す値である

30

ことを特徴とする請求項 11 に記載のレーザ加工装置。

【請求項 13】

前記Qスイッチレーザ発振器は、共振器を構成する全反射ミラーとして再帰反射ミラーを有する

ことを特徴とする請求項 11 または 12 に記載のレーザ加工装置。

【請求項 14】

請求項 1 に記載のレーザ装置の前記光スイッチング素子の透過率を学習する学習装置であって、

前記パルスレーザ光を発生させる時間間隔を示す間隔情報と前記パルスレーザ光の増幅後のパルスエネルギーとを含む状態量と、前記光スイッチング素子の透過率と、を含む学習用データを取得する学習用データ取得部と、

40

前記学習用データを用いて、前記状態量から、前記パルスエネルギーが目標値となる前記光スイッチング素子の透過率を推論するための学習済モデルを生成するモデル生成部と、を備える

ことを特徴とする学習装置。

【請求項 15】

請求項 11 に記載のレーザ加工装置の前記レーザ装置が有する前記光スイッチング素子の透過率を学習する学習装置であって、

前記パルスレーザ光を発生させる時間間隔を示す間隔情報と前記パルスレーザ光を用いて加工した加工穴の形状を示す形状情報とを含む状態量と、前記光スイッチング素子の透

50

過率と、を含む学習用データを取得する学習用データ取得部と、

前記学習用データを用いて、前記状態量から、前記加工穴の形状が目標形状となる前記光スイッチング素子の透過率を推論するための学習済モデルを生成するモデル生成部と、
を備える

ことを特徴とする学習装置。

【請求項 16】

前記間隔情報は、前記Qスイッチレーザ発振器の発生させる前記パルスレーザ光の前記パルス特性時間と、前記Qスイッチレーザ発振器の発生させる前記パルスレーザ光のエネルギーと、前記Qスイッチレーザ発振器の発生させる前記パルスレーザ光の波形と、前記増幅器による増幅後の前記パルスレーザ光の波形と、前記Qスイッチレーザ発振器および前記増幅器の駆動電流または放電電力と、のうち少なくとも1つを含む

10

ことを特徴とする請求項 14 または 15 に記載の学習装置。

【請求項 17】

前記レーザ装置は、レーザ媒質が気体であるガスレーザであり、

前記状態量は、前記Qスイッチレーザ発振器または前記増幅器の冷却水温度と、前記Qスイッチレーザ発振器または前記増幅器のガス温度と、前記Qスイッチレーザ発振器または前記増幅器のガス圧と、前記Qスイッチレーザ発振器または前記増幅器の連続放電時間と、前記Qスイッチレーザ発振器または前記増幅器の電極温度と、前記Qスイッチレーザ発振器または前記増幅器の光学部品交換時からの総放電時間と、のうち少なくとも1つをさらに含む

20

ことを特徴とする請求項 14 または 15 に記載の学習装置。

【請求項 18】

請求項 1 または 2 に記載のレーザ装置の有する前記光スイッチング素子の透過率を推論する推論装置であって、

前記パルスレーザ光を発生させる時間間隔を示す間隔情報を含む状態量と、前記パルスレーザ光の増幅後のパルスエネルギーの目標値とを取得する推論用データ取得部と、

前記状態量および前記目標値から前記光スイッチング素子の透過率を推論するための学習済モデルを用いて、前記推論用データ取得部で取得した前記状態量および前記目標値から前記透過率を推論する推論部と、

を有する

30

ことを特徴とする推論装置。

【請求項 19】

請求項 11 または 12 に記載のレーザ加工装置の前記レーザ装置が有する前記光スイッチング素子の透過率を推論する推論装置であって、

前記パルスレーザ光を発生させる時間間隔を示す間隔情報を含む状態量と、前記パルスレーザ光を用いて加工する加工穴の目標形状を示す形状情報とを取得する推論用データ取得部と、

前記状態量および前記形状情報から前記光スイッチング素子の透過率を推論するための学習済モデルを用いて、前記推論用データ取得部で取得した前記状態量および前記目標形状から前記透過率を推論する推論部と、

40

を有する

ことを特徴とする推論装置。

【請求項 20】

パルスレーザ光を発生させるQスイッチレーザ発振器と、

前記パルスレーザ光を増幅する増幅器と、

前記Qスイッチレーザ発振器と前記増幅器との間の光路上に配置された光スイッチング素子と、

前記増幅器から出力された前記パルスレーザ光を偏向する偏向素子と、

前記偏向素子からの前記パルスレーザ光を集光または転写して加工対象物に照射する対物光学系と、

50

前記パルスレーザー光によって前記加工対象物に穴あけ加工を行うときの加工経路上に含まれる加工穴の特性を示す加工穴特性値に応じて前記光スイッチング素子の透過率を制御し、前記加工穴の間隔が短いほど前記透過率を高く、且つ、複数の前記加工穴の形状のばらつきを示す値が予め定められた値よりも小さくなるように、前記透過率を制御することによって前記透過率を変調させる制御装置と、

を備える

ことを特徴とするレーザー加工システム。

【請求項 2 1】

前記パルスレーザー光を発生させる時間間隔を示す間隔情報を含む状態量と、前記パルスレーザー光を用いて加工した加工穴の形状を示す形状情報と、を含む学習用データを取得する学習用データ取得部と、

10

前記学習用データを用いて、前記状態量から、前記加工穴の形状が目標形状となる前記光スイッチング素子の透過率を推論するための学習済モデルを生成するモデル生成部と、を有する学習装置、

をさらに備える

ことを特徴とする請求項 2 0 に記載のレーザー加工システム。

【請求項 2 2】

前記パルスレーザー光を発生させる時間間隔を示す間隔情報を含む状態量と、前記パルスレーザー光を用いて加工する加工穴の目標形状を示す形状情報とを取得する推論用データ取得部と、

20

前記状態量および前記形状情報から前記光スイッチング素子の透過率を推論するための学習済モデルを用いて、前記推論用データ取得部で取得した前記状態量および前記目標形状から前記透過率を推論する推論部と、

を有する推論装置、

をさらに備える

ことを特徴とする請求項 2 0 または 2 1 に記載のレーザー加工システム。

【請求項 2 3】

パルスレーザー光を発生させるステップと、

前記パルスレーザー光を透過させる光スイッチング素子の透過率を設定するステップと、

設定された透過率の前記光スイッチング素子に前記パルスレーザー光を入射することで前記パルスレーザー光のパルスエネルギーを変化させるステップと、

30

前記パルスレーザー光を増幅するステップと、

増幅後の前記パルスレーザー光を偏向することによって、前記パルスレーザー光が加工対象物に照射される位置を調整するステップと、

偏向後の前記パルスレーザー光を集光または転写して前記加工対象物に照射するステップと、

を含み、

前記パルスレーザー光のパルスエネルギーを変化させるステップでは、前記パルスレーザー光を発生させる時間間隔の特徴を示すパルス特性時間に基づいて、前記光スイッチング素子の透過率を変調させる

40

ことを特徴とするレーザー加工方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本開示は、レーザー加工用のレーザー装置、レーザー加工装置、学習装置、推論装置、レーザー加工システムおよびレーザー加工方法に関する。

【背景技術】

【0 0 0 2】

高出力のパルスレーザー光が必要な場合、必要とされるレーザー出力よりも低出力のパルスレーザー光を発生させた後、パルスレーザー光を増幅器で増幅させる構成が採用される。この

50

ような構成において、パルスレーザー光を発生させる時間間隔であるパルス周期が一定でない場合、増幅器にパルスレーザー光を入射する時間間隔が変化し、増幅器のゲインがパルスレーザー光ごとに変化するため、増幅器から出力されるパルスレーザー光のパルスエネルギーにばらつきが生じる。

【0003】

特許文献1には、パルス周期が一定でないパルスレーザー光を増幅器で増幅させる場合に、主信号の他に、主信号と異なる波長の二次信号を増幅器に入射することによって、増幅器にパルスレーザー光が入射される時間間隔の変化を抑制し、増幅器のゲインの変動を抑制するパルスレーザーシステムが開示されている。このパルスレーザーシステムでは、増幅器の出力から二次信号を取り除いて主信号をレーザー出力として取り出している。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【文献】特表2018-531524号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかしながら、上記従来技術によれば、所望のパルス周期が長い場合、増幅後に取り除く二次信号が多くなる。このため、投入電力のうちの多くの部分が主信号ではなく二次信号に使われ、エネルギー効率が低下するという問題があった。

20

【0006】

本開示は、上記に鑑みてなされたものであって、投入電力からレーザー出力への変換効率の低下を抑制しつつ、パルス周期が変化する場合であっても増幅後のパルスエネルギーの変動を抑制することが可能なレーザー装置を得ることを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0007】

上述した課題を解決し、目的を達成するために、本開示のレーザー装置は、パルスレーザー光を発生させるQスイッチレーザー発振器と、パルスレーザー光を増幅する増幅器と、Qスイッチレーザー発振器と増幅器との間の光路上に配置された光スイッチング素子と、Qスイッチレーザー発振器がパルスレーザー光を発生させる時間間隔の特徴を示すパルス特性時間に基づいて、光スイッチング素子の透過率を変調させる制御装置と、を備えることを特徴とする。

30

【発明の効果】

【0008】

本開示によれば、投入電力からレーザー出力への変換効率の低下を抑制しつつ、パルス周期が変化する場合であっても増幅後のパルスエネルギーの変動を抑制することが可能なレーザー装置を得ることができるという効果を奏する。

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1】実施の形態1にかかるレーザー装置の構成を示す図

40

【図2】実施の形態1にかかるレーザー装置の詳細な構成の一例を示す図

【図3】実施の形態1にかかるレーザー装置をレーザー光源として用いたレーザー加工装置の構成を示す図

【図4】電子基板に形成する穴の目標形状の一例を示す図

【図5】電子基板に加工する加工穴のパターンおよび加工経路の一例を示す図

【図6】図5に示すパターンの加工穴を加工するときのパルスレーザー光の波形の時間変化を示す図

【図7】レーザー装置の効果の説明図

【図8】実施の形態2にかかるレーザー加工装置の制御動作を説明するためのフローチャート

【図9】実施の形態3にかかるレーザー加工装置の制御動作を説明するためのフローチャート

50

- 【図 1 0】実施の形態 4 にかかる学習装置の構成を示す図
- 【図 1 1】3 層のニューラルネットワークの一例を示す図
- 【図 1 2】学習装置の学習処理を説明するためのフローチャート
- 【図 1 3】レーザ装置に関する推論装置の構成図
- 【図 1 4】推論装置を使って透過率を得るための処理を説明するためのフローチャート
- 【図 1 5】実施の形態 5 にかかる学習装置の構成を示す図
- 【図 1 6】レーザ加工装置に関する推論装置の構成図
- 【図 1 7】パルス間隔が異なるパルスレーザ光の波形の一例を示す図
- 【図 1 8】透過率をパルス時間内で経時変化させる例の説明図
- 【図 1 9】実施の形態 7 にかかる透過率の制御についての説明図
- 【図 2 0】実施の形態 8 にかかるレーザ装置の電極間の部分構成を示す図
- 【図 2 1】図 2 0 に示す構成のレーザ装置の電極間の定常状態の利得分布を示す図
- 【図 2 2】実施の形態 9 にかかるレーザ装置の内部構成を示す図
- 【図 2 3】レーザ装置の電極間の定常状態の温度分布を示す図
- 【図 2 4】実施の形態 1 0 にかかるレーザ加工装置の動作を説明するためのフローチャート
- 【発明を実施するための形態】

10

【 0 0 1 0 】

以下に、本開示の実施の形態にかかるレーザ装置、レーザ加工装置、学習装置、推論装置、レーザ加工システムおよびレーザ加工方法を図面に基づいて詳細に説明する。

【 0 0 1 1 】

20

実施の形態 1 .

図 1 は、実施の形態 1 にかかるレーザ装置 5 0 0 の構成を示す図である。レーザ装置 5 0 0 は、Q スイッチのようなシャッター機能を有する素子を用いてパルスレーザ光を発生させる Q スイッチレーザ発振器 1 0 0 と、Q スイッチレーザ発振器 1 0 0 が発生させたパルスレーザ光を増幅する増幅器 2 0 0 と、Q スイッチレーザ発振器 1 0 0 と増幅器 2 0 0 との間の光軸 2 上に配置された光スイッチング素子 2 6 と、制御装置 3 5 と、情報処理装置 3 6 とを有する。

【 0 0 1 2 】

Q スイッチレーザ発振器 1 0 0 が発生させたパルスレーザ光は、光スイッチング素子 2 6 に入射され、設定された透過率で光スイッチング素子 2 6 を透過した後、光軸 2 に沿って増幅器 2 0 0 に入射する。光スイッチング素子 2 6 の透過率は、制御装置 3 5 からの信号に従って変調される。なお、「透過率を変調する」とは、透過率を経時的に変化させることを指す。光スイッチング素子 2 6 は、例えば、音響光学素子、電気光学素子などである。

30

【 0 0 1 3 】

制御装置 3 5 は、光スイッチング素子 2 6 の透過率の制御と並行して、Q スイッチレーザ発振器 1 0 0 がパルスレーザ光を発振する時間間隔であるパルス周期、パルス幅、Q スイッチレーザ発振器 1 0 0 および増幅器 2 0 0 のそれぞれへの投入電力などを制御する。

【 0 0 1 4 】

情報処理装置 3 6 は、Q スイッチレーザ発振器 1 0 0 および増幅器 2 0 0 内に設置した図示していないセンサが取得する情報に基づいて、パルスレーザ光の発振間隔に応じた光スイッチング素子の制御信号を計算し、制御装置 3 5 に計算結果を含む情報を送る。

40

【 0 0 1 5 】

センサが取得する情報は、例えば、パルスレーザ光のパルスエネルギー、パルスレーザ光の波形、レーザ装置 5 0 0 の温度情報などである。制御装置 3 5 は、情報処理装置 3 6 からの情報に基づいて、光スイッチング素子 2 6 等に制御信号を送ることで、レーザ装置 5 0 0 の動作を制御する。

【 0 0 1 6 】

光スイッチング素子 2 6 を透過して増幅器 2 0 0 に入射したパルスレーザ光は、増幅器 2 0 0 で増幅された後、光軸 3 に沿って射出される。光スイッチング素子 2 6 は、連続し

50

てパルスレーザ光を発生させるときに増幅器 200 を射出後にパルスレーザ光のパルスエネルギーの変動が小さくなるように制御される。なお、図 1 では、レーザ装置 500 が有する光スイッチング素子 26 は 1 つであるが、レーザ装置 500 は、複数の光スイッチング素子 26 を有していてもよい。

【0017】

また、図 1 では、Q スイッチレーザ発振器 100 と増幅器 200 とはそれぞれ個別の装置である場合を示したが、以下に示すように、Q スイッチレーザ発振器 100 と増幅器 200 とが 1 つの筐体内に構成された 1 つの装置であってもよい。

【0018】

なお、制御装置 35 および情報処理装置 36 の機能は、処理回路を用いて実現される。これらの処理回路は、専用のハードウェアにより実現されてもよいし、CPU (Central Processing Unit) を用いた制御回路であってもよい。

10

【0019】

処理回路が専用のハードウェアである場合、例えば、単回路、複合回路、プログラム化したプロセッサ、並列プログラム化したプロセッサ、ASIC (Application Specific Integrated Circuit)、FPGA (Field Programmable Gate Array)、またはこれらを組み合わせたものが用いられる。

【0020】

上記の処理回路が、CPU を用いた制御回路で実現される場合、制御回路は、プロセッサと、メモリとを備える。プロセッサは、CPU であり、処理装置、演算装置、マイクロプロセッサ、マイクロコンピュータ、DSP (Digital Signal Processor) などとも呼ばれる。メモリは、例えば、RAM (Random Access Memory)、ROM (Read Only Memory)、フラッシュメモリ、EPROM (Erasable Programmable ROM)、EEPROM (登録商標) (Electrically EPROM) などの不揮発性または揮発性の半導体メモリ、磁気ディスク、フレキシブルディスク、光ディスク、コンパクトディスク、ミニディスク、DVD (Digital Versatile Disk) などである。

20

【0021】

上記の処理回路が CPU を用いた制御回路により実現される場合、プロセッサがメモリに記憶された、制御装置 35 および情報処理装置 36 の処理に対応するプログラムを読み出して実行することにより実現される。また、メモリは、プロセッサが実行する各処理における一時メモリとしても使用される。

30

【0022】

図 2 は、実施の形態 1 にかかるレーザ装置 500 の詳細な構成の一例を示す図である。図 2 では、レーザ装置 500 の内部の構成を斜視図で示している。レーザ装置 500 は、例えば、三軸直交型炭酸ガスレーザである。また、レーザ装置 500 は、一酸化炭素レーザ、エキシマレーザなどであってもよい。

【0023】

図 2 に示す構成において、図 1 に示すレーザ装置 500 の Q スイッチレーザ発振器 100 と増幅器 200 とを構成する部分は、同じ筐体 300 に格納されている。

【0024】

筐体 300 内には、レーザガスが封印されている。レーザ装置 500 は、筐体 300 内に送風機 40, 41 と、一对の電極 11 および一对の電極 12 と、熱交換器 42, 43 とを有する。レーザガスは、送風機 40, 41 によって、それぞれ矢印で示されるガス流方向 13, 14 に流れる。レーザガスは、その後、電極 11, 12 の電極間を通過する。電極 11, 12 には、放電制御装置 44 の制御に従って高周波電力が印加され、電極間に無声放電が発生する。この放電によりレーザガスが励起される。その後、レーザガスは、矢印で示されるガス流方向 15, 16 に沿って流れ、熱交換器 42, 43 によって冷却される。

40

【0025】

また、レーザ装置 500 は、全反射ミラー 21 と部分反射ミラー 24 とを有する。全反

50

射ミラー 2 1 と部分反射ミラー 2 4 とは共振器を構成しており、共振器の光軸 1 が、レーザガスが励起される放電空間内に位置するように、全反射ミラー 2 1 および部分反射ミラー 2 4 は配置されている。ただし、レーザガスは放電空間を通過した後も一定時間励起された状態を保つため、光軸 1 は放電空間から外れた位置を通過してもよい。

【 0 0 2 6 】

レーザ装置 5 0 0 は、さらに、Qスイッチ 2 2 を有する。Qスイッチ 2 2 は、共振器の光軸 1 上に配置され、共振器の Q 値を制御することによりパルス発振をさせてパルスレーザ光が発生する。Qスイッチ 2 2 は、例えば、音響光学素子や電気光学素子であってもよい。

【 0 0 2 7 】

共振器を構成する全反射ミラー 2 1 は、ほとんどの光を反射するが、わずかに光を透過させるようにしてあり、透過した光が入射する位置に光センサ 5 0 が配置されている。光センサ 5 0 は、共振器が発振させるパルスレーザ光のパルス波形、パルスエネルギーなどを測定する。レーザ装置 5 0 0 は、さらに、筐体 3 0 0 内のレーザガスと外気とを遮断するウィンドウ 2 3 を有している。図 2 に示す例では、全反射ミラー 2 1、Qスイッチ 2 2 および光センサ 5 0 は、筐体 3 0 0 の外部に配置されており、ウィンドウ 2 3 は、レーザガスの筐体 3 0 0 からの漏出を防ぐと共に、部分反射ミラー 2 4 からの光を全反射ミラー 2 1 に向けて筐体 3 0 0 の外部に通している。部分反射ミラー 2 4 は、筐体 3 0 0 内のレーザガスと外気とを遮断する役割も担っている。光センサ 5 0 から光軸 1 に沿って部分反射ミラー 2 4 までの間に配置された素子が、Qスイッチレーザ発振器 1 0 0 を構成する部分となる。

【 0 0 2 8 】

上記では、Qスイッチ 2 2 は、大気中に設置されることとしたが、Qスイッチ 2 2 を筐体 3 0 0 内に設置して、ウィンドウ 2 3 の代わりに全反射ミラー 2 1 で筐体 3 0 0 内のレーザガスと外気とを遮断するようにしてもよい。また、ウィンドウ 2 3 から全反射ミラー 2 1 までの間に 1 枚以上のミラーを設置してもよい。

【 0 0 2 9 】

発振器の部分反射ミラー 2 4 から射出されたパルスレーザ光は、ミラー 2 5 を介して光スイッチング素子 2 6 , 2 7 に入射し、光スイッチング素子 2 6 , 2 7 を透過したパルスレーザ光は、ミラー 2 8 を介してウィンドウ 2 9 から光軸 2 に沿って再び筐体 3 0 0 内に入射する。このとき、共振器の部分反射ミラー 2 4 からウィンドウ 2 9 までの光路上にレンズ、曲率ミラーなどを用いてパルスレーザ光のビーム径を調整してもよい。ウィンドウ 2 9 から筐体内に入射したパルスレーザ光は、励起されたレーザガス内を通過し、増幅された後、ミラー 3 0 によって反射されて、再度、励起されたレーザガス内に入射する。その後、励起されたレーザガス内を通過し増幅された後、ミラー 3 1 に反射され再度励起されたレーザガス内に入射する。その後、励起されたレーザガス内を通過し増幅された後、ミラー 3 2 に反射され再度励起されたレーザガス内に入射する。その後、励起されたレーザガス内を通過して増幅された後、ウィンドウ 3 3 から増幅後のパルスレーザ光が筐体 3 0 0 の外部に出力される。増幅後のパルスレーザ光は、光軸 3 に沿って部分反射ミラー 3 4 により反射されて、レーザ出力として出力される。部分反射ミラー 3 4 により一部透過した光は、光センサ 5 1 に入射する。光センサ 5 1 は、レーザ出力として出力されるパルスレーザ光のパルス波形、パルスエネルギーなどを測定する。

【 0 0 3 0 】

ウィンドウ 2 9 から筐体内に入射したパルスレーザ光が筐体 3 0 0 内の励起されたレーザガス内を通過して部分反射ミラー 3 4 から出力されるまでと、光センサ 5 1 とを含んだ部分が、増幅器 2 0 0 を構成する部分である。

【 0 0 3 1 】

図 2 に示すレーザ装置 5 0 0 は、Qスイッチレーザ発振器 1 0 0 と増幅器 2 0 0 とが 1 つの筐体 3 0 0 内に構成され、Qスイッチレーザ発振器 1 0 0 および増幅器 2 0 0 の光軸が少なくとも 1 つの連続した放電空間内を通る一体型の M O P A (Master Oscillator

10

20

30

40

50

Power Amplifier)構成となっている。ここで、筐体300内の各ミラーの反射面と放電空間との間に、図示していないアパーチャを配置して、光の通過する範囲を制限してもよい。

【0032】

レーザ装置500は、連続的に放電させておき、Qスイッチ22で共振器のQ値を急激に変化させることによってパルス発振を行うことができる。

【0033】

制御装置35は、Qスイッチ22および光スイッチング素子26, 27および放電制御装置44に接続されており、これらを制御する。

【0034】

情報処理装置36は、光センサ50, 51からの情報を受け取る。また、情報処理装置36は、制御装置35から光スイッチング素子26, 27の制御信号および放電電流の制御信号を受け取ってもよい。情報処理装置36は、パルスレーザ光のパルス波形からパルスレーザ光のパルスエネルギーを演算してもよい。

【0035】

また、情報処理装置36は、図示していないセンサから、レーザガスの温度、ガス圧、レーザ装置500の温度、冷却水の温度、その他、経時的に変化する情報であって、レーザ装置500の状態を示す情報を受け取ってもよい。また、以下に説明するように、レーザ装置500が、レーザ加工装置のレーザ光源として使用される場合、レーザ加工装置から、レーザ発振のタイミングを示す情報、レーザ加工装置に搭載されたガルバノミラーの整定時間、静止時間、整定時間および静止時間を含む位置決め時間などの情報を受け取ってもよい。

【0036】

情報処理装置36は、受け取った情報に基づいて、Qスイッチ22、光スイッチング素子26, 27および放電制御装置44の制御に必要な情報を演算し、制御装置35に送る。

【0037】

図3は、実施の形態1にかかるレーザ装置500をレーザ光源として用いたレーザ加工装置510の構成を示す図である。レーザ加工装置510は、レーザ装置500と、穴あけ加工機400とを有する。穴あけ加工機400は、レーザ装置500が出力するパルスレーザ光を用いて、穴あけ加工を行う装置であり、例えば、電子基板に穴あけ加工を行うことができる。穴あけ加工機400は、パルスレーザ光が電子基板の所定の位置に照射されるように、ガルバノミラー403のような位置決め機構を用いて位置決めされる。

【0038】

レーザ装置500が出力するパルスレーザ光は、穴あけ加工機400に入射する。パルスレーザ光は、穴あけ加工機400のミラー401, 402を介してガルバノミラー403に照射される。なお、ガルバノミラー403は、パルスレーザ光を偏向することによって、加工対象物405上のパルスレーザ光の照射位置を調整する偏向素子の一例である。なお、パルスレーザ光が穴あけ加工機400に入射してからガルバノミラー403に照射されるまでの光路上には、図示していないレンズ、球面ミラーなどのビーム径を調整するための光学素子が配置されてもよいし、ビームプロファイルを整形するためのマスクが配置されてもよい。また、図3では1枚のガルバノミラー403を示しているが、2枚のガルバノミラー403を用いて2軸とし、平面をスキャンできるようにしてもよい。

【0039】

ガルバノミラー403に照射されたパルスレーザ光は、対物光学系であるレンズ404を介して加工対象物405上に照射される。上記のマスクを使用した場合は、マスクで成形されたパルスレーザ光を加工対象物405上に転写する転写光学系としてもよい。加工対象物405は、直交する3軸方向に可動するテーブル上に設置してもよい。

【0040】

加工対象物405上のパルスレーザ光が照射される位置は、ガルバノミラー403の角度を調整することによって位置決めされる。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 1 】

ガルバノミラー 4 0 3 によって位置決めされた位置に、パルスレーザ光が 1 ショット或いは複数ショット照射され、次に、別の位置にガルバノミラー 4 0 3 によって位置決めされた後、次のパルスレーザ光が照射される。このような処理を繰返し連続的に行うことによって、加工対象物 4 0 5 上に多数の穴が加工される。

【 0 0 4 2 】

ガルバノミラー 4 0 3 が位置決めに要する時間は、電子基板に加工する穴の目標形状、つまり、穴の加工パターンに依存する。図 4 は、電子基板に形成する穴の目標形状の一例を示す図である。図 4 の矢印は穴の加工経路を示しており、以下の説明では、加工経路に付された数字によって、各加工経路を特定する。加工経路 # 1、加工経路 # 2、加工経路 # 3 . . . と数字の順番に穴の加工を行う場合、電子基板の穴の間隔が短い部分、例えば、加工経路 # 1、加工経路 # 4、加工経路 # 6、加工経路 # 7 などでは、ガルバノミラー 4 0 3 が位置決めにかかる時間は短くなり、穴の間隔が離れている部分、例えば、加工経路 # 3、加工経路 # 5、加工経路 # 8 などでは、ガルバノミラー 4 0 3 が位置決めにかかる時間は長くなる。このため、電子基板に複数の穴を連続的にあける場合、それぞれの穴を加工する際のガルバノミラーの位置決め時間は一定ではなく、時間的に変動する。

10

【 0 0 4 3 】

パルスレーザ光は、ガルバノミラー 4 0 3 の位置決めが完了したタイミングで照射されるため、レーザ装置 5 0 0 からパルスレーザ光が射出するタイミングも時間的に変動することになる。Q スイッチ発振では、パルスレーザ光の発振タイミングが時間的に変化すると、パルスレーザ光毎に利得の蓄積時間が変化するため、発振するパルスレーザ光のパルスエネルギーも時間的に変化してしまう。このため、Q スイッチレーザ発振器 1 0 0 が発振したパルスレーザ光をそのまま増幅器 2 0 0 で増幅すると、パルスレーザ光のパルスエネルギーも時間的に変化してしまう。この場合、穴あけ加工機 4 0 0 では、加工穴毎にパルスレーザ光のパルスエネルギーが変化してしまうことになる。この様子を図 5 および図 6 に示す。

20

【 0 0 4 4 】

図 5 は、電子基板に加工する加工穴のパターンおよび加工経路の一例を示す図である。図 6 は、図 5 に示すパターンの加工穴を加工するときのパルスレーザ光の波形の時間変化を示す図である。図 5 に示すように、加工穴 # 1、加工穴 # 2、加工穴 # 3、加工穴 # 4 の順番に穴加工を行う場合、Q スイッチ発振によるパルスレーザ光の波形は、図 6 に示すようになる。図 6 の横軸は、時間を示しており、横軸に付した数字は、図 5 の各加工穴に付した数字に対応している。加工穴 # 1 および加工穴 # 2 に比較して、加工穴 # 3、加工穴 # 4 では、穴間隔が長い。このため、加工穴 # 1 および加工穴 # 2 を加工する際に照射されるパルスレーザ光よりも、加工穴 # 3 および加工穴 # 4 では、パルスエネルギーが高くなる。この場合、加工穴毎に加工に使用されるパルスレーザ光のパルスエネルギーのばらつきが生じるため、加工品質が安定しない恐れがある。

30

【 0 0 4 5 】

このため、レーザ装置 5 0 0 では、穴あけ加工機 4 0 0 に入射するパルスレーザ光毎のパルスエネルギーのばらつきを抑制するために、Q スイッチレーザ発振器 1 0 0 から出射されたパルスレーザ光が光スイッチング素子 2 6 を透過する際の透過率を、パルスレーザ光毎に調整して、増幅器 2 0 0 に入射するパルスレーザ光のパルスエネルギーのばらつきを抑制している。

40

【 0 0 4 6 】

図 7 は、レーザ装置 5 0 0 の効果の説明図である。図 7 (a) は、Q スイッチレーザ発振器 1 0 0 が発振するパルスレーザ光の波形を示している。図 7 (b) は、光スイッチング素子 2 6 の透過率を示している。図 7 (c) は、増幅器 2 0 0 に入力されるパルスレーザ光の波形を示している。図 7 (d) は、増幅器 2 0 0 から出力されるパルスレーザ光の波形を示している。

【 0 0 4 7 】

50

Qスイッチレーザ発振器100で発振タイミングが一定の周期でなく、パルス周期が変化する場合、Qスイッチレーザ発振器100から出力されるパルスレーザ光のパルスエネルギーは、前回の発振タイミングからの時間間隔が長いほど大きくなる。例えば、前回のパルスレーザ光との間隔の長さは、長い方から順に、パルスレーザ光#3、パルスレーザ光#4、パルスレーザ光#1であり、パルスレーザ光#1およびパルスレーザ光#2は同一であるとした場合、Qスイッチレーザ発振器100から出力されるパルスレーザ光のパルスエネルギーは、大きい方から順にパルスレーザ光#3、パルスレーザ光#4、パルスレーザ光#1の順であり、パルスレーザ光#1およびパルスレーザ光#2は同一となる。

【0048】

また、増幅器200においては、同一のパルスエネルギーのパルスレーザ光が入力された場合、前回のパルスレーザ光との時間間隔が長いほど、出力されるパルスレーザ光のパルスエネルギーは大きくなる。このため、パルスレーザ光の時間間隔が長いほど増幅器200に入射されるパルスレーザ光のパルスエネルギーが小さくなるように、光スイッチング素子26の透過率をパルスレーザ光の時間間隔が長いほど小さく制御する。図7の例では、増幅器200に入射されるパルスレーザ光のパルスエネルギーが、小さい方から順に、パルスレーザ光#3、パルスレーザ光#4、パルスレーザ光#1の順であり、パルスレーザ光#1およびパルスレーザ光#2は同一となるように、透過率は、小さい方から順に、パルスレーザ光#3、パルスレーザ光#4、パルスレーザ光#1の順であり、パルスレーザ光#1およびパルスレーザ光#2は同一とする。これにより、増幅器200から出射されるパルスレーザ光のパルスエネルギーは均一に近づき、ばらつきが抑制される。

【0049】

パルスレーザ光とパルスレーザ光との間の時間間隔は、例えば、パルス波形に基づいて検知し、検知した値を用いて、透過率の制御を行うことができる。フォトディテクタ、フォトチューブなどのパルスレーザ光の光強度の時間依存性を計測することができるセンサの測定電圧に基づいて、パルス波形の特徴的な形状から、そのパルスレーザ光の発生時刻を特定し、パルスレーザ光の間の時間間隔を定義することができる。例えば、パルスのピーク時刻を発生時刻としてもよいし、パルスのピークに対して光強度が予め定められた割合まで立ち上がった時刻を発生時刻としてもよいし、パルスがピークまで立ち上がった後、ピークに対して光強度が予め定められた割合まで低下した時刻を発生時刻としてもよい。

【0050】

レーザ装置500は、Qスイッチレーザ発振器100がパルスレーザ光を発生させる時間間隔の特徴を示すパルス特性時間に基づいて、パルスレーザ光毎に光スイッチング素子26の透過率を変調させる。パルス特性時間は、例えば、Qスイッチレーザ発振器100が発生させる複数のパルスレーザ光の間の時間間隔、または、Qスイッチレーザ発振器100が発生させる複数のパルスレーザ光の間の時間間隔の移動平均であってよい。レーザ装置500は、パルス特性時間が示す時間間隔が短いほど透過率を高く、且つ、パルスレーザ光の間のエネルギーの変動が予め定められた値よりも小さくなるように光スイッチング素子26の透過率を制御する。

【0051】

なお、図2に示すように、レーザ装置500が複数の光スイッチング素子26、27を有する場合、レーザ装置500は、複数の光スイッチング素子26、27を合わせた透過率が、上記の条件を満たすように制御する。

【0052】

以上説明したように、実施の形態1にかかるレーザ装置500は、パルスレーザ光を発生させるQスイッチレーザ発振器100と、パルスレーザ光を増幅する増幅器200と、Qスイッチレーザ発振器100と増幅器200との間の光路上に配置された光スイッチング素子26と、Qスイッチレーザ発振器100がパルスレーザ光を発生させる時間間隔の特徴を示すパルス特性時間に基づいて、光スイッチング素子26の透過率を変調させる制御装置35と、を備える。透過率を変調させるとは、透過率の値を経時的に変化させることを示す。具体的には、実施の形態1において、制御装置35は、透過率の値を、光スイ

10

20

30

40

50

ツチング素子 26 に入射するパルスレーザー光毎に変化させる。これにより、Qスイッチレーザー発振器 100 がパルスレーザー光を発生させる時間間隔が変化し、Qスイッチレーザー発振器 100 が発生させるパルスレーザー光のパルスエネルギーがパルスレーザー光毎に異なり、増幅器 200 の増幅率が変動してしまう場合であっても、増幅後のパルスエネルギーの変動を抑制することが可能である。また、このとき、主信号の他に、二次信号を増幅器に入射することによって増幅器にパルスレーザー光が入射される時間間隔の変化を抑制する方法では、二次信号を取り除いて主信号をレーザー出力として取り出すために生じる投入電力からレーザー出力への変換効率の低下は抑制される。したがって、投入電力からレーザー出力への変換効率の低下を抑制しつつ、パルス周期が変化する場合であっても増幅後のパルスエネルギーの変動を抑制することが可能になる。

10

【0053】

また、制御装置 35 は、Qスイッチレーザー発振器 100 が発生させる複数のパルスレーザー光の間の時間間隔、または、Qスイッチレーザー発振器 100 が発生させる複数のパルスレーザー光の間の時間間隔の移動平均をパルス特性時間として求め、時間間隔が短いほど光スイッチング素子 26 の透過率を高く、且つ、増幅器 200 から出射される複数のパルスレーザー光の間のエネルギーの変動が予め定められた値よりも小さくなるように光スイッチング素子 26 の透過率を制御する。ここで、増幅器 200 から出射される複数のパルスレーザー光の間のエネルギーの変動が予め定められた値よりも小さくなるように、とは、例えば、図 7 の例では、図 7 (d) に示すパルスレーザー光 # 1 ~ # 4 の間のパルスエネルギーの差が予め定められた値よりも小さくなるように制御することを指す。これにより、投入電力からレーザー出力への変換効率の低下を抑制しつつ、パルス周期が変化する場合であっても増幅後のパルスエネルギーの変動を抑制することが可能になる。

20

【0054】

なお、上記では、パルスレーザー光は、ガルバノミラー 403 の位置決めが完了したタイミングで照射されることとしたが、ガルバノミラー 403 の位置決め時間が短すぎる場合は Qスイッチレーザー発振器 100 で発振を止めている間に蓄積されるゲインが小さすぎて、増幅器 200 から出力されるパルスレーザー光のパルスエネルギーが所望の値よりも小さくなる場合も想定される。この場合、増幅後に必要なパルスエネルギーが得られるまでガルバノミラー 403 を止めておき、必要なパルスエネルギーが得られた時点でパルスレーザー光を照射するという制御を行ってもよい。

30

【0055】

実施の形態 2 .

実施の形態 2 では、レーザー装置 500 のレーザー出力を電子基板の穴あけ加工機 400 に用いるレーザー加工装置 510 の制御フローを説明する。

【0056】

図 8 は、実施の形態 2 にかかるレーザー加工装置 510 の制御動作を説明するためのフローチャートである。レーザー装置 500 の制御装置 35 は、まず、穴あけ加工機 400 が加工する電子基板の穴あけパターンを示すデータを取得する (ステップ S101)。例えば、穴あけパターンを示すデータは、加工する電子基板の穴の位置情報が含まれていてよい。

【0057】

続いて制御装置 35 は、取得した穴あけパターンを示すデータから、電子基板の穴あけ経路を計算する (ステップ S102)。その後、制御装置 35 は、それぞれの加工穴を加工するために Qスイッチレーザー発振器 100 がパルスレーザー光を発生させる時間間隔であるパルスレーザー光の発振間隔を算出する (ステップ S103)。

40

【0058】

制御装置 35 は、パルスレーザー光の発振間隔に応じたパルスレーザー光毎の光スイッチング素子 26 の透過率の初期値を算出する (ステップ S104)。制御装置 35 は、上記で算出したパルスレーザー光の発振間隔および光スイッチング素子 26 の透過率のデータを、例えば制御装置 35 内のメモリに保存し、パルスレーザー光毎の光スイッチング素子 26 の透過率を設定する (ステップ S105)。

50

【 0 0 5 9 】

制御装置 3 5 は、算出したパルスレーザ光の発振間隔と、算出した光スイッチング素子 2 6 の透過率とを用いて、Q スイッチレーザ発振器 1 0 0 および光スイッチング素子 2 6 の制御を行い、Q スイッチレーザ発振器 1 0 0 にレーザ発振を行わせる（ステップ S 1 0 6 ）。

【 0 0 6 0 】

また、制御装置 3 5 は、情報処理装置 3 6 を介して、光センサ 5 1 が取得した、増幅後のパルスレーザ光のパルスエネルギーを取得する（ステップ S 1 0 7 ）。なお、ステップ S 1 0 6 でレーザ発振を行う回数は、例えば、電子基板の 1 枚分の穴の数と同数であってもよいし、電子基板の 1 枚分を複数回に分けてもよい。ここで発振されるパルスレーザ光は、電子基板には照射されず、未だ穴あけ加工は行わない。

10

【 0 0 6 1 】

制御装置 3 5 は、ステップ S 1 0 7 で取得された増幅後の複数のパルスレーザ光のパルスエネルギーのばらつきを示す値が閾値以下であるか否かを判断する（ステップ S 1 0 8 ）。パルスエネルギーのばらつきが閾値以下でない場合（ステップ S 1 0 8 : N o ）、制御装置 3 5 は、増幅後のパルスレーザ光毎のパルスエネルギーのばらつきから、パルスエネルギーのばらつきが閾値以上となったパルスレーザ光を発振時の光スイッチング素子 2 6 の透過率を補正し（ステップ S 1 0 9 ）、ステップ S 1 0 5 の処理に戻る。したがって、レーザ装置 5 0 0 は、補正後の透過率を設定し、補正後の透過率を用いて光スイッチング素子 2 6 を制御した状態で、再び、レーザ発振を行わせ、増幅後のパルスエネルギーを取得することになる。

20

【 0 0 6 2 】

パルスエネルギーのばらつきが閾値以下である場合（ステップ S 1 0 8 : Y e s ）、レーザ加工装置 5 1 0 は、電子基板の穴あけ加工を開始する（ステップ S 1 1 0 ）。このような処理を行うことで、レーザ装置 5 0 0 は、レーザ発振を行って測定した増幅後のパルスエネルギーのばらつきが閾値以下となるまで、光スイッチング素子 2 6 の透過率の補正を繰り返すことになる。

【 0 0 6 3 】

制御装置 3 5 は、例えば、P I D（Proportional Integral Differential）制御などを用いて、透過率を補正することができる。また、後述する機械学習により透過率を決定してもよい。

30

【 0 0 6 4 】

光スイッチング素子 2 6 の透過率の初期値として設定した値で、パルスエネルギーのばらつきが所定の範囲内に収まっていることが予め分かっている場合、パルスエネルギーの取得やパルスエネルギーのばらつきの補正などの処理は省略して、そのまま加工を実施してもよい。つまり、加工時にはフィードバック制御は不要としてもよい。また、パルスエネルギーの取得やパルスエネルギーのばらつきの補正は、加工を実施しながら行っても、つまり、フィードバック制御であってもよい。

【 0 0 6 5 】

なお、制御装置 3 5 と情報処理装置 3 6 との機能の分担は一例であって、上記で制御装置 3 5 の機能として記述した処理を情報処理装置 3 6 で行ってもよいし、情報処理装置 3 6 の機能として記述した処理を制御装置 3 5 で行ってもよい。例えば、電子基板の穴あけパターンのデータの取得、電子基板の穴あけ経路の計算、パルスレーザ光の発振間隔の算出、光スイッチング素子 2 6 の透過率の初期値の算出、パルスエネルギーのばらつきを示す値の算出、光スイッチング素子 2 6 の透過率の補正量の算出などを情報処理装置 3 6 で行ってもよい。

40

【 0 0 6 6 】

以上説明したように、実施の形態 2 にかかるレーザ加工方法は、制御装置 3 5 が Q スイッチレーザ発振器 1 0 0 を制御することによってパルスレーザ光を発生させるステップと、制御装置 3 5 が、パルスレーザ光を透過させる光スイッチング素子 2 6 の透過率を設定

50

するステップと、設定された透過率の光スイッチング素子 2 6 にパルスレーザー光を入射することでパルスレーザー光のパルスエネルギーを変化させるステップと、増幅器 2 0 0 によってパルスレーザー光を増幅するステップと、ガルバノミラー 4 0 3 が増幅後のパルスレーザー光を偏向することによって、パルスレーザー光が加工対象物 4 0 5 に照射される位置を調整するステップと、偏向後のパルスレーザー光を集光または転写して加工対象物 4 0 5 に照射するステップと、を含み、パルスレーザー光のパルスエネルギーを変化させるステップでは、パルスレーザー光を発生させる時間間隔の特徴を示すパルス特性時間に基づいて、光スイッチング素子 2 6 の透過率を変調させる。

【 0 0 6 7 】

実施の形態 3 .

実施の形態 2 では、パルスレーザー光のパルスエネルギーのばらつきが予め定められた範囲内となるように制御したが、加工した穴の形状のばらつきが予め定められた範囲におさまるように制御してもよい。

【 0 0 6 8 】

図 9 は、実施の形態 3 にかかるレーザー加工装置 5 1 0 の制御動作を説明するためのフローチャートである。ステップ S 1 0 1 からステップ S 1 0 6 の処理は、図 8 と同様であるためここでは説明を省略する。

【 0 0 6 9 】

ステップ S 1 0 6 でレーザー発振させるとレーザー加工装置 5 1 0 は、レーザー装置 5 0 0 が出力するパルスレーザー光を用いて、電子基板の穴あけ加工を開始する（ステップ S 1 2 1）。穴あけ加工を行った後、レーザー加工装置 5 1 0 は、加工後の加工穴の形状を取得する（ステップ S 1 2 2）。加工穴の形状は、例えば、カメラなどを用いて取得した画像により取得してもよいし、プローブレザを用いた距離センサで加工面上をスキャンすることにより取得してもよい。パルスレーザー光を発振させる回数は、電子基板の 1 枚分の穴の数と同数であってもよいし、1 枚の電子基板を複数回に分けてもよい。

【 0 0 7 0 】

制御装置 3 5 は、加工穴の形状のばらつきを示す値を計算し、加工穴の形状のばらつきは予め定められた範囲内であるか否かを判断する（ステップ S 1 2 3）。

【 0 0 7 1 】

ここで、加工穴の形状のばらつきは、複数の加工穴のそれぞれの特徴を示す値の変動の幅である。加工穴の特徴を示す値は、複数の加工穴のそれぞれを計測した計測結果を示す値であってもよいし、計測結果から算出した値であってもよい。加工穴の特徴を示す値の一例としては、穴径、穴の縦横比、穴の面積、穴の深さ、穴の底面の凹凸、穴周辺の飛散物の量などを挙げることができる。また、加工穴の形状は、個別の穴の形状について規定するだけでなく、穴の配置、すなわち、穴がどの位置に、いくつ配置されるかなどについても、加工プログラム、指令などに記述されていてもよい。また、複数の加工穴の間の相互の位置関係について規定してもよい。

【 0 0 7 2 】

加工穴の形状のばらつきが予め定められた範囲内でない場合（ステップ S 1 2 3 : N o）、制御装置 3 5 は、加工穴の形状のばらつきから、光スイッチング素子 2 6 の透過率を補正し（ステップ S 1 2 4）、ステップ S 1 0 5 の処理に戻る。ここで、透過率は、各パルスレーザー光に対応して設定されるが、補正対象となる透過率は、加工穴の形状を示す値の基準値からの差が予め定められた範囲内でない加工穴を加工するパルスレーザー光に対応する透過率である。

【 0 0 7 3 】

加工穴の形状のばらつきが予め定められた範囲内である場合（ステップ S 1 2 3 : Y e s）、設定された透過率で電子基板の穴あけ加工を実施する（ステップ S 1 2 5）。穴あけ加工の実施に使用する透過率が決定するまでの間は、調整用の電子基板サンプルが用いられてもよい。

【 0 0 7 4 】

10

20

30

40

50

制御装置 35 は、例えば、PID 制御などを用いて、透過率を補正することができる。また、後述する機械学習により透過率を決定してもよい。

【0075】

なお、実施の形態 3 においても、制御装置 35 と情報処理装置 36 との機能の分担は一例であって、上記で制御装置 35 の機能として記述した処理を情報処理装置 36 で行ってもよいし、情報処理装置 36 の機能として記述した処理を制御装置 35 で行ってもよい。例えば、電子基板の穴あけパターンのデータの取得、電子基板の穴あけ経路の計算、パルスレーザー光の発振間隔の算出、光スイッチング素子 26 の透過率の初期値の算出、加工穴形状の取得、加工穴形状のばらつきを示す値の算出、光スイッチング素子 26 の透過率の補正量の算出などを情報処理装置 36 で行ってもよい。

10

【0076】

以上説明したように、実施の形態 3 にかかるレーザー加工装置 510 は、レーザー装置 500 と、増幅器 200 から出力されたパルスレーザー光を偏向する偏向素子であるガルバノミラー 403 と、ガルバノミラー 403 からのパルスレーザー光を集光または転写して加工対象物 405 に照射する対物光学系であるレンズ 404 と、加工対象物 405 を移動させる移動機構とを有する。制御装置 35 は、パルスレーザー光によって加工対象物 405 に穴あけ加工を行うときの加工経路上に含まれる加工穴の特性を示す加工穴特性値に応じて透過率を制御し、加工穴の間隔が短いほど透過率を高く、且つ、複数の加工穴の形状のばらつきを示す値が予め定められた値よりも小さくなるように、透過率を制御する。レーザー装置 500 が穴あけ加工に用いられる場合には、加工穴の間隔が長いほど、パルス特性時間も長くなるため、加工穴特性値に応じて透過率を制御することによっても、パルス特性時間に基づく透過率の制御を行うことができ、さらに、加工穴の形状を均質化することができる。

20

【0077】

なお、加工穴特性値は、加工経路の上の複数の加工穴の間隔、または、複数の加工穴の間隔の移動平均を示す値である。

【0078】

実施の形態 4 .

実施の形態 2 , 3 では、電子基板の穴あけパターンが予め分かっている場合を示したが、電子基板の穴数が非常に多い場合、それぞれの穴に対する透過率をデータとして保存しておく必要があり、メモリリソースが圧迫される。また、パルスレーザー光の発振タイミングも予め決めておく必要がある。

30

【0079】

実施の形態 4 では、電子基板の穴あけパターンやパルスレーザー光の発振タイミングが予め分かっていない場合でも適用することができる制御方法を示す。

【0080】

図 10 は、実施の形態 4 にかかる学習装置 60 の構成を示す図である。学習装置 60 は、レーザー装置 500 に関する機械学習を行う。学習装置 60 は、学習に使用するデータである学習用データを取得する学習用データ取得部 61 と、学習用データを用いて、光スイッチング素子 26 の透過率を推論するための学習済モデルを生成するモデル生成部 62 とを有する。モデル生成部 62 は、生成した学習済モデルを学習済モデル記憶部 70 に記憶させる。

40

【0081】

学習用データ取得部 61 は、レーザー装置 500 がパルスレーザー光を発生させる時間間隔を示す間隔情報とパルスレーザー光の増幅後のパルスエネルギーとを含む状態量と、光スイッチング素子 26 の透過率と、を学習用データとして取得する。間隔情報は、パルスレーザー光を発生させる時間間隔を示す情報であれば、どのような情報であってもよい。間隔情報は、例えば、上述のパルス特性時間と、Q スイッチレーザー発振器 100 の発生させるパルスレーザー光のエネルギーと、Q スイッチレーザー発振器 100 の発生させるパルスレーザー光の波形と、増幅器 200 による増幅後のパルスレーザー光の波形と、Q スイッチレーザー発

50

振器 100 および増幅器 200 の駆動電流または放電電流と、のうち少なくとも 1 つを含む情報である。学習装置 60 は、例えば、パルスレーザー光を発生させる時間間隔と、光スイッチング素子 26 の透過率とを、様々な値に変化させたときの増幅後のパルスレーザー光のパルスエネルギーを取得し、そのときの間隔情報と増幅後のパルスエネルギーとを含む状態量と、設定した透過率と、を学習用データとして取得する。

【0082】

なお、レーザー装置 500 が、レーザー媒質が気体であるガスレーザーの場合、学習用データ取得部 61 が取得する状態量は、Qスイッチレーザー発振器 100 または増幅器 200 の冷却水温度と、Qスイッチレーザー発振器 100 または増幅器 200 のガス温度と、Qスイッチレーザー発振器 100 または増幅器 200 のガス圧と、Qスイッチレーザー発振器 100 または増幅器 200 の連続放電時間と、Qスイッチレーザー発振器 100 または増幅器 200 の電極温度と、Qスイッチレーザー発振器 100 または増幅器 200 の光学部品交換時からの総放電時間と、のうち少なくとも 1 つをさらに含んでもよい。

10

【0083】

モデル生成部 62 は、学習用データ取得部 61 から出力される間隔情報およびレーザー装置 500 が発生させるパルスレーザー光の増幅後のパルスエネルギーを含む状態量と、光スイッチング素子 26 の透過率との組み合わせに基づいて作成される学習用データに基づいて、光スイッチング素子 26 の透過率を学習する。具体的には、モデル生成部 62 は、レーザー装置 500 の状態量から増幅後のパルスエネルギーが目標値となる光スイッチング素子 26 の透過率を推論するための学習済モデルを生成する。ここで、学習用データは、状態量と光スイッチング素子 26 の透過率とを互いに関連付けたデータである。

20

【0084】

モデル生成部 62 が用いる学習アルゴリズムは教師あり学習、教師なし学習、強化学習等の公知のアルゴリズムを用いることができる。一例として、ニューラルネットワークを適用した場合について説明する。

【0085】

モデル生成部 62 は、例えば、ニューラルネットワークモデルに従って、いわゆる教師あり学習により、光スイッチング素子 26 の透過率を学習する。ここで、教師あり学習とは、入力と結果（ラベル）とのデータの組を学習装置 60 に与えることで、それらの学習用データにある特徴を学習し、入力から結果を推論する手法をいう。

30

【0086】

ニューラルネットワークは、複数のニューロンからなる入力層、複数のニューロンからなる隠れ層である中間層、および複数のニューロンからなる出力層で構成される。中間層は、1層であってもよいし、2層以上であってもよい。

【0087】

図 11 は、3層のニューラルネットワークの一例を示す図である。例えば、図 11 に示すような 3層のニューラルネットワークであれば、複数の入力が入力層（ X_1 X_3 ）に入力されると、その値に重み W_1 （ w_{11} w_{16} ）を掛けて中間層（ Y_1 Y_2 ）に入力され、その結果にさらに重み W_2 （ w_{21} w_{26} ）を掛けて出力層（ Z_1 Z_3 ）から出力される。この出力結果は、重み W_1 および重み W_2 の値によって変わる。

40

【0088】

実施の形態 4 において、ニューラルネットワークは、学習用データ取得部 61 によって取得される状態量および透過率の組合せに基づいて作成される学習用データに従って、いわゆる教師あり学習により、透過率を学習する。

【0089】

すなわち、ニューラルネットワークは、入力層に増幅後のパルスエネルギーの目標値を含む状態量を入力して出力層から出力された結果が、増幅後のパルスエネルギーが目標値となるような光スイッチング素子 26 の透過率に近づくように重み W_1 および重み W_2 を調整することで学習する。

【0090】

50

モデル生成部 62 は、以上のような学習を実行することで学習済モデルを生成し、学習済モデル記憶部 70 に出力する。

【0091】

学習済モデル記憶部 70 は、モデル生成部 62 から出力された学習済モデルを記憶する。

【0092】

次に、図 12 を用いて、学習装置 60 が学習する処理について説明する。図 12 は、学習装置 60 の学習処理を説明するためのフローチャートである。

【0093】

学習用データ取得部 61 は、状態量および透過率を含む学習用データを取得する（ステップ S201）。なお、ここでは状態量と透過率とを同時に取得するものとしたが、状態量および透過率を関連付けて入力できればよく、状態量と透過率とをそれぞれ別のタイミングで取得してもよい。

10

【0094】

モデル生成部 62 は、学習用データ取得部 61 によって取得される状態量および透過率の組合せに基づいて作成される学習用データに従って、いわゆる教師あり学習により、増幅後のパルスエネルギーが目標値となるような透過率を学習する学習処理を行うことによって、学習済モデルを生成する（ステップ S202）。

【0095】

学習済モデル記憶部 70 は、モデル生成部 62 が生成した学習済モデルを記憶する（ステップ S203）。

20

【0096】

図 13 は、レーザ装置 500 に関する推論装置 80 の構成図である。推論装置 80 は、推論用データ取得部 81 と、推論部 82 とを備える。

【0097】

推論用データ取得部 81 は状態量を推論用データとして取得する。状態量は、上述の間隔情報と、増幅後のパルスエネルギーの目標値とを含む。なお、レーザ装置 500 が、レーザ媒質が気体であるガスレーザの場合、推論用データ取得部 81 が取得する状態量は、Qスイッチレーザ発振器 100 または増幅器 200 の冷却水温度と、Qスイッチレーザ発振器 100 または増幅器 200 のガス温度と、Qスイッチレーザ発振器 100 または増幅器 200 のガス圧と、Qスイッチレーザ発振器 100 または増幅器 200 の連続放電時間と、Qスイッチレーザ発振器 100 または増幅器 200 の電極温度と、Qスイッチレーザ発振器 100 または増幅器 200 の光学部品交換時からの総放電時間と、のうち少なくとも 1 つをさらに含んでもよい。

30

【0098】

推論部 82 は、学習済モデルを利用して得られる透過率を推論する。すなわち、推論部 82 は、学習済モデル記憶部 70 に記憶された学習済モデルに推論用データ取得部 81 で取得した推論用データを入力することで、状態量から推論される、増幅後のパルスエネルギーが目標値となるような透過率を出力することができる。

【0099】

なお、推論装置 80 が用いる学習済モデルは、推論装置 80 の推論対象であるレーザ装置 500 から取得した学習用データで学習した学習済モデルであってもよいし、推論装置 80 の推論対象であるレーザ装置 500 とは異なる他のレーザ装置 500 等の外部から学習済モデルを取得して用いてもよい。

40

【0100】

次に、図 14 を用いて、推論装置 80 を使って透過率を得るための処理を説明する。図 14 は、推論装置 80 を使って透過率を得るための処理を説明するためのフローチャートである。

【0101】

推論用データ取得部 81 は、推論用データを取得する（ステップ S301）。

【0102】

50

推論部 8 2 は学習済モデル記憶部 7 0 に記憶された学習済モデルに状態量を入力し（ステップ S 3 0 2）、透過率の推論結果をレーザ装置 5 0 0 に出力する（ステップ S 3 0 3）。

【0103】

レーザ装置 5 0 0 は、出力された透過率の推定結果を用いて、光スイッチング素子 2 6 を制御する（ステップ S 3 0 4）。

【0104】

例えば、図 3 に示したような穴あけ加工機 4 0 0 において、電子基板の穴あけ加工を実施する際、制御装置 3 5 は、ガルバノミラー 4 0 3 の位置決めが終わってからパルスレーザ光が加工対象物 4 0 5 に照射されるように、Q スイッチレーザ発振器 1 0 0 にパルスレーザ光の出力指令を出す。または、制御装置 3 5 は、指令信号の遅延による時間ロスを低減するために、ガルバノミラー 4 0 3 の位置決め時刻を予想して、位置決めが終わった直後にパルスレーザ光が加工対象物 4 0 5 に照射されるように、ガルバノミラー 4 0 3 の位置決めが終わる前に Q スイッチレーザ発振器 1 0 0 にパルスレーザ光の出力指令を出す。いずれにしても、パルスレーザ光の発生時刻は、ガルバノミラー 4 0 3 の位置決め時間に依存している。このとき、上記の学習装置 6 0 で得られた学習済モデルを用いることで、推論装置 8 0 は、パルスレーザ光を発生させる時間間隔を示す間隔情報および増幅後のパルスエネルギーの目標値を含む状態量から、光スイッチング素子 2 6 の透過率を決定することができる。したがって、学習済モデルを用いることで、パルスレーザ光の発生間隔が予め決まっていなくても、パルスレーザ光毎に、光スイッチング素子 2 6 の透過率を決定することができ、増幅後のパルスエネルギーを制御することができる。

【0105】

なお、本実施の形態では、モデル生成部 6 2 が用いる学習アルゴリズムに教師あり学習を適用した場合について説明したが、これに限られるものではない。学習アルゴリズムについては、教師あり学習以外にも、強化学習、教師なし学習、又は半教師あり学習等を適用することも可能である。

【0106】

また、モデル生成部 6 2 は、複数のレーザ装置 5 0 0 に対して作成される学習用データに従って、透過率を学習するようにしてもよい。なお、モデル生成部 6 2 は、同一のエリアで使用される複数のレーザ装置 5 0 0 から学習用データを取得してもよいし、異なるエリアで独立して動作する複数のレーザ装置 5 0 0 から収集される学習用データを利用して透過率を学習してもよい。また、学習用データを収集するレーザ装置 5 0 0 を途中で対象に追加したり、対象から除去することも可能である。さらに、あるレーザ装置 5 0 0 に関して透過率を学習した学習装置 6 0 を、これとは別のレーザ装置 5 0 0 に適用し、当該別のレーザ装置 5 0 0 に関して透過率を再学習して更新するようにしてもよい。

【0107】

また、モデル生成部 6 2 に用いられる学習アルゴリズムとしては、特徴量そのものの抽出を学習する、深層学習（Deep Learning）を用いることもでき、他の公知の方法、例えば遺伝的プログラミング、機能論理プログラミング、サポートベクターマシンなどに従って機械学習を実行してもよい。

【0108】

なお、学習装置 6 0 および推論装置 8 0 は、レーザ装置 5 0 0 の有する光スイッチング素子 2 6 の透過率を学習するために使用されるが、例えば、ネットワークを介してレーザ装置 5 0 0 に接続され、このレーザ装置 5 0 0 とは別個の装置であってもよい。また、学習装置 6 0 および推論装置 8 0 は、レーザ装置 5 0 0 またはレーザ加工装置 5 1 0 に内蔵されていてもよい。例えば、学習装置 6 0 および推論装置 8 0 の少なくとも一方が制御装置 3 5 または情報処理装置 3 6 の機能の一部であってもよい。さらに、学習装置 6 0 および推論装置 8 0 は、クラウドサーバ上に存在していてもよい。

【0109】

また、上記では光スイッチング素子 2 6 の透過率を制御することによって増幅後のパル

10

20

30

40

50

スエネルギーを安定化していたが、光スイッチング素子 26 の透過率とともに放電駆動電流または放電電力を制御することによって、増幅後のパルスエネルギーを安定化してもよい。

【0110】

また、実施の形態 1 に示したように、ガルバノミラー 403 の位置決め時間が短すぎて、増幅器 200 から出力されるパルスエネルギーが所望の値よりも小さくなる場合は、増幅後に必要なパルスエネルギーが得られるまでガルバノミラー 403 を止めておき、必要なパルスエネルギーが得られた時点でパルスレーザー光を照射するといった制御を行ってもよい。

【0111】

例えば、CO2 レーザでは、ガス温度、ガス圧によって発振効率が変化する。このためガス温度、ガス圧によるパルスエネルギーの変化や、光スイッチング素子 26 の透過率を補正するために、これらのパラメータを機械学習の状態量として用いてもよい。また、連続的に放電を行うとレーザーガスの劣化によりパルスエネルギーが低下する場合もある。このため、レーザー装置 500 の連続放電時間を機械学習の状態量として用いることで、光スイッチング素子 26 の透過率、パルスエネルギーとの依存性を算出し、光スイッチング素子 26 の透過率またはパルスエネルギーの補正に利用してもよい。さらに、光学部品交換時からの総放電時間は、光学部品の劣化状態の指標となる。光学部品が劣化すると、その反射率や透過率の低下によりパルスエネルギーが変化する場合がある。このため、光学部品交換時からの総放電時間を、機械学習の状態量として用いてもよい。

【0112】

以上説明したように、実施の形態 4 にかかるレーザー装置 500 は、学習装置 60 をさらに備えることができる。学習装置 60 は、レーザー装置 500 がパルスレーザー光を発生させる時間間隔を示す間隔情報とパルスレーザー光の増幅後のパルスエネルギーとを含む状態量と、光スイッチング素子 26 の透過率と、を含む学習用データを取得する学習用データ取得部 61 と、学習用データを用いて、状態量から、増幅後のパルスエネルギーが目標値となる光スイッチング素子 26 の透過率を推論するための学習済モデルを生成するモデル生成部 62 と、を有する。

【0113】

また、実施の形態 4 にかかるレーザー装置 500 は、推論装置 80 をさらに備えることができる。推論装置 80 は、パルスレーザー光を発生させる時間間隔を示す間隔情報と、パルスレーザー光の増幅後のパルスエネルギーの目標値とを含む状態量を取得する推論用データ取得部 81 と、状態量から増幅後のパルスエネルギーが目標値となる光スイッチング素子 26 の透過率を推論するための学習済モデルを用いて、推論用データ取得部 81 で取得した状態量から透過率を推論する推論部 82 と、を有する。制御装置 35 は、推論装置 80 が推論した透過率を用いて、光スイッチング素子 26 を制御する。

【0114】

なお、学習装置 60 および推論装置 80 のそれぞれが用いる間隔情報は、例えば、Q スイッチレーザー発振器 100 の発生させるパルスレーザー光のパルス特性時間と、Q スイッチレーザー発振器 100 の発生させるパルスレーザー光のエネルギーと、Q スイッチレーザー発振器 100 の発生させるパルスレーザー光の波形と、増幅器 200 による増幅後のパルスレーザー光の波形と、Q スイッチレーザー発振器 100 および増幅器 200 の駆動電流または放電電力と、のうち少なくとも 1 つを含む情報であってもよい。

【0115】

また、レーザー装置 500 がガスレーザーである場合、学習装置 60 および推論装置 80 のそれぞれが用いる状態量は、Q スイッチレーザー発振器 100 または増幅器 200 の冷却水温度と、Q スイッチレーザー発振器 100 または増幅器 200 のガス温度と、Q スイッチレーザー発振器 100 または増幅器 200 のガス圧と、Q スイッチレーザー発振器 100 または増幅器 200 の連続放電時間と、Q スイッチレーザー発振器 100 または増幅器 200 の電極温度と、Q スイッチレーザー発振器 100 または増幅器 200 の光学部品交換時からの総

10

20

30

40

50

放電時間と、のうち少なくとも1つをさらに含む情報であってもよい。

【0116】

また、この学習装置60および推論装置80は、レーザ装置500とは別体の装置であってもよい。レーザ装置500とは別体の装置である学習装置60および推論装置80の少なくとも1つを備えるレーザ加工システムを構成することもできる。

【0117】

実施の形態5 .

実施の形態4では、増幅後のパルスエネルギーが目標値となるような光スイッチング素子26の透過率を学習することとしたが、レーザ装置500の出力するパルスレーザ光が電子基板の穴あけ加工に用いられる際には、加工形状が安定していることがより望ましい。

10

【0118】

このため、実施の形態5では、加工後の加工穴の形状が目標形状となるような透過率を学習する方法について説明する。

【0119】

図15は、実施の形態5にかかる学習装置60aの構成を示す図である。学習装置60aは、例えば、図3に示すようなレーザ加工装置510に関する機械学習を行う。学習装置60aは、学習に使用するデータである学習用データを取得する学習用データ取得部61aと、学習用データを用いて、光スイッチング素子26の透過率を推論するための学習済モデルを生成するモデル生成部62aとを有する。モデル生成部62aは、生成した学習済モデルを学習済モデル記憶部70aに記憶させる。

20

【0120】

学習用データ取得部61aは、レーザ加工装置510のレーザ装置500がパルスレーザ光を発生させる時間間隔を示す間隔情報とレーザ加工装置510による加工後の加工穴の形状を示す形状情報とを含む状態量と、光スイッチング素子26の透過率と、を学習用データとして取得する。間隔情報は、パルスレーザ光を発生させる時間間隔を示す情報であれば、どのような情報であってもよい。間隔情報は、例えば、上述のパルス特性時間と、Qスイッチレーザ発振器100の発生させるパルスレーザ光のエネルギーと、Qスイッチレーザ発振器100の発生させるパルスレーザ光の波形と、増幅器200による増幅後のパルスレーザ光の波形と、Qスイッチレーザ発振器100および増幅器200の駆動電流または放電電流と、のうち少なくとも1つを含む情報である。学習装置60aは、例えば、パルスレーザ光を発生させる時間間隔と、光スイッチング素子26の透過率とを、様々な値に変化させたときに加工された加工穴の形状を示す形状情報を取得し、そのときの間隔情報と形状情報を含む状態量と、設定した透過率と、を学習用データとして取得する。

30

【0121】

なお、レーザ装置500が、レーザ媒質が気体であるガスレーザの場合、学習用データ取得部61aが取得する状態量は、Qスイッチレーザ発振器100または増幅器200の冷却水温度と、Qスイッチレーザ発振器100または増幅器200のガス温度と、Qスイッチレーザ発振器100または増幅器200のガス圧と、Qスイッチレーザ発振器100または増幅器200の連続放電時間と、Qスイッチレーザ発振器100または増幅器200の電極温度と、Qスイッチレーザ発振器100または増幅器200の光学部品交換時からの総放電時間と、のうち少なくとも1つをさらに含んでもよい。

40

【0122】

モデル生成部62aは、学習用データ取得部61aから出力される間隔情報およびレーザ加工装置510により加工された加工穴の形状を示す形状情報を含む状態量と、光スイッチング素子26の透過率との組み合わせに基づいて作成される学習用データに基づいて、光スイッチング素子26の透過率を学習する。具体的には、モデル生成部62aは、レーザ加工装置510の状態量から加工後の加工穴の形状が所望の形状となる光スイッチング素子26の透過率を推論するための学習済モデルを生成する。ここで、学習用データは、状態量と光スイッチング素子26の透過率とを互いに関連付けたデータである。

【0123】

50

モデル生成部 6 2 a が用いる学習アルゴリズムは教師あり学習、教師なし学習、強化学習等の公知のアルゴリズムを用いることができる。一例として、ニューラルネットワークを適用した場合について説明する。

【 0 1 2 4 】

モデル生成部 6 2 a は、例えば、ニューラルネットワークモデルに従って、いわゆる教師あり学習により、光スイッチング素子 2 6 の透過率を学習する。ここで、教師あり学習とは、入力と結果（ラベル）のデータの組を学習装置 6 0 a に与えることで、それらの学習用データにある特徴を学習し、入力から結果を推論する手法をいう。

【 0 1 2 5 】

ニューラルネットワークは、複数のニューロンからなる入力層、複数のニューロンからなる隠れ層である中間層、および複数のニューロンからなる出力層で構成される。中間層は、1層であってもよいし、2層以上であってもよい。実施の形態 4 と同様に、図 1 1 に示すようなニューラルネットワークを用いることができる。

10

【 0 1 2 6 】

実施の形態 5 において、ニューラルネットワークは、学習用データ取得部 6 1 a によって取得される状態量および透過率の組合せに基づいて作成される学習用データに従って、いわゆる教師あり学習により、加工穴の形状が所望の形状となるような透過率を学習する。

【 0 1 2 7 】

すなわち、ニューラルネットワークは、入力層に増幅後のパルスエネルギーの目標値を含む状態量を入力して出力層から出力された結果が、増幅後のパルスエネルギーが目標値となるような光スイッチング素子 2 6 の透過率に近づくように重み W_1 および重み W_2 を調整することで学習する。

20

【 0 1 2 8 】

モデル生成部 6 2 a は、以上のような学習を実行することで学習済モデルを生成し、学習済モデル記憶部 7 0 a に出力する。

【 0 1 2 9 】

学習済モデル記憶部 7 0 a は、モデル生成部 6 2 a から出力された学習済モデルを記憶する。

【 0 1 3 0 】

学習装置 6 0 a が学習する処理の流れは、実施の形態 4 にかかる学習装置 6 0 と同様であるため、ここでは説明を省略する。

30

【 0 1 3 1 】

図 1 6 は、レーザ加工装置 5 1 0 に関する推論装置 8 0 a の構成図である。推論装置 8 0 a は、推論用データ取得部 8 1 a と、推論部 8 2 a とを備える。

【 0 1 3 2 】

推論用データ取得部 8 1 a は状態量を推論用データとして取得する。状態量は、上述の間隔情報と、加工後の加工穴の目標形状とを含む。なお、レーザ装置 5 0 0 が、レーザ媒質が気体であるガスレーザの場合、推論用データ取得部 8 1 a が取得する状態量は、Qスイッチレーザ発振器 1 0 0 または増幅器 2 0 0 の冷却水温度と、Qスイッチレーザ発振器 1 0 0 または増幅器 2 0 0 のガス温度と、Qスイッチレーザ発振器 1 0 0 または増幅器 2 0 0 のガス圧と、Qスイッチレーザ発振器 1 0 0 または増幅器 2 0 0 の連続放電時間と、Qスイッチレーザ発振器 1 0 0 または増幅器 2 0 0 の電極温度と、Qスイッチレーザ発振器 1 0 0 または増幅器 2 0 0 の光学部品交換時からの総放電時間と、のうち少なくとも 1 つをさらに含んでもよい。

40

【 0 1 3 3 】

推論部 8 2 a は、学習済モデルを利用して得られる透過率を推論する。すなわち、推論部 8 2 a は、学習済モデル記憶部 7 0 a に記憶された学習済モデルに推論用データ取得部 8 1 a で取得した推論用データを入力することで、状態量から推論される、加工穴の形状が目標形状となるような透過率を出力することができる。

【 0 1 3 4 】

50

なお、推論装置 80 a が用いる学習済モデルは、推論装置 80 a の推論対象であるレーザ装置 500 から取得した学習用データで学習した学習済モデルであってもよいし、推論装置 80 a の推論対象であるレーザ装置 500 とは異なる他のレーザ装置 500 等の外部から学習済モデルを取得して用いてもよい。

【0135】

推論装置 80 a の推論動作の流れは、実施の形態 4 にかかる推論装置 80 と同様であるため、ここでは説明を省略する。

【0136】

例えば、図 3 に示したような穴あけ加工機 400 において、電子基板の穴あけ加工を実施する際、制御装置 35 は、ガルバノミラー 403 の位置決めが終わってからパルスレーザ光が加工対象物 405 に照射されるように、Q スイッチレーザ発振器 100 にパルスレーザ光の出力指令を出す。または、制御装置 35 は、指令信号の遅延による時間ロスを低減するために、ガルバノミラー 403 の位置決め時刻を予想して、位置決めが終わった直後にパルスレーザ光が加工対象物 405 に照射されるように、ガルバノミラー 403 の位置決めが終わる前に Q スイッチレーザ発振器 100 にパルスレーザ光の出力指令を出す。いずれにしても、パルスレーザ光の発生時刻は、ガルバノミラー 403 の位置決め時間に依存している。このとき、上記の学習装置 60 a で得られた学習済モデルを用いることで、推論装置 80 a は、パルスレーザ光を発生させる時間間隔を示す間隔情報および加工穴の目標形状を含む状態量から、光スイッチング素子 26 の透過率を決定することができる。したがって、学習済モデルを用いることで、パルスレーザ光の発生間隔が予め決まっていなくても、パルスレーザ光毎に、光スイッチング素子 26 の透過率を決定することができる。増幅後のパルスエネルギーを制御することができる。

【0137】

なお、本実施の形態では、モデル生成部 62 a が用いる学習アルゴリズムに教師あり学習を適用した場合について説明したが、これに限られるものではない。学習アルゴリズムについては、教師あり学習以外にも、強化学習、教師なし学習、又は半教師あり学習等を適用することも可能である。

【0138】

また、モデル生成部 62 a は、複数のレーザ装置 500 に対して作成される学習用データに従って、透過率を学習するようにしてもよい。なお、モデル生成部 62 a は、同一のエリアで使用される複数のレーザ装置 500 から学習用データを取得してもよいし、異なるエリアで独立して動作する複数のレーザ装置 500 から収集される学習用データを利用して透過率を学習してもよい。また、学習用データを収集するレーザ装置 500 を途中で対象に追加したり、対象から除去することも可能である。さらに、あるレーザ装置 500 に関して透過率を学習した学習装置 60 a を、これとは別のレーザ装置 500 に適用し、当該別のレーザ装置 500 に関して透過率を再学習して更新するようにしてもよい。

【0139】

また、モデル生成部 62 a に用いられる学習アルゴリズムとしては、特徴量そのものの抽出を学習する、深層学習を用いることもでき、他の公知の方法、例えば遺伝的プログラミング、機能論理プログラミング、サポートベクターマシンなどに従って機械学習を実行してもよい。

【0140】

なお、学習装置 60 a および推論装置 80 a は、レーザ装置 500 の有する光スイッチング素子 26 の透過率を学習するために使用されるが、例えば、ネットワークを介してレーザ装置 500 に接続され、このレーザ装置 500 とは別個の装置であってもよい。また、学習装置 60 a および推論装置 80 a は、レーザ装置 500 に内蔵されていてもよい。さらに、学習装置 60 a および推論装置 80 a は、クラウドサーバ上に存在していてもよい。

【0141】

また、上記では光スイッチング素子 26 の透過率を制御することによって増幅後のパル

10

20

30

40

50

スエネルギーを安定化していたが、光スイッチング素子 26 の透過率とともに放電駆動電流または放電電力を制御することによって、増幅後のパルスエネルギーを安定化してもよい。

【0142】

また、実施の形態 1 に示したように、ガルバノミラー 403 の位置決め時間が短すぎて、増幅器 200 から出力されるパルスエネルギーが所望の値よりも小さくなる場合は、増幅後に必要なパルスエネルギーが得られるまでガルバノミラー 403 を止めておき、必要なパルスエネルギーが得られた時点でパルスレーザー光を照射するといった制御を行ってもよい。

【0143】

例えば、CO2 レーザでは、ガス温度、ガス圧によって発振効率が変化する。このためガス温度、ガス圧によるパルスエネルギーの変化や、光スイッチング素子 26 の透過率を補正するために、これらのパラメータを機械学習の状態量として用いてもよい。また、連続的に放電を行うとレーザーガスの劣化によりパルスエネルギーが低下する場合もある。このため、レーザー装置 500 の連続放電時間を機械学習の状態量として用いることで、光スイッチング素子 26 の透過率、パルスエネルギーとの依存性を算出し、光スイッチング素子 26 の透過率またはパルスエネルギーの補正に利用してもよい。さらに、光学部品交換時からの総放電時間は、光学部品の劣化状態の指標となる。光学部品が劣化すると、その反射率や透過率の低下によりパルスエネルギーが変化する場合がある。このため、光学部品交換時からの総放電時間を、機械学習の状態量として用いてもよい。

【0144】

以上説明したように、実施の形態 5 にかかる学習装置 60a は、レーザー加工装置 510 のレーザー装置 500 が有する光スイッチング素子 26 の透過率を学習する学習装置 60a であって、パルスレーザー光を発生させる時間間隔を示す間隔情報とパルスレーザー光を用いて加工した加工穴の形状を示す形状情報とを含む状態量と、光スイッチング素子 26 の透過率と、を含む学習用データを取得する学習用データ取得部 61a と、学習用データを用いて、状態量から、加工穴の形状が目標形状となる光スイッチング素子の透過率を推論するための学習済モデルを生成するモデル生成部 62a と、を有する。このような構成を有することによって、加工後の加工穴の形状を均質化するような透過率と状態量との関係を学習することが可能になる。

【0145】

また、実施の形態 5 にかかる推論装置 80a は、レーザー加工装置 510 のレーザー装置 500 が有する光スイッチング素子 26 の透過率を推論する推論装置 80a であって、パルスレーザー光を発生させる時間間隔を示す間隔情報を含む状態量と、パルスレーザー光を用いて加工する加工穴の目標形状を示す形状情報とを取得する推論用データ取得部 81a と、状態量および形状情報から光スイッチング素子の透過率を推論するための学習済モデルを用いて、推論用データ取得部 81a で取得した状態量および目標形状から透過率を推論する推論部 82a と、を有する。このような推論装置 80a を用いることによって、加工後の加工穴の形状を均質化するような透過率を推論することが可能になる。

【0146】

学習装置 60a および推論装置 80a についても、レーザー装置 500 またはレーザー加工装置 510 に内蔵されていてもよいし、レーザー装置 500 およびレーザー加工装置 510 とは別体の装置であってもよい。また、学習装置 60a および推論装置 80a の少なくとも 1 つを備えるレーザー加工システムを構成することもできる。

【0147】

実施の形態 6 .

実施の形態 1 では、パルスレーザー光毎に光スイッチング素子 26 の透過率を決定しており、ひとつひとつのパルスレーザー光発生時の透過率は一定としていた。

【0148】

しかしながら、Q スイッチレーザー発振器 100 でパルス間隔が異なるパルスレーザー光を

10

20

30

40

50

発生させたときパルス波形は、相似形ではない場合がある。図 17 は、パルス間隔が異なるパルスレーザ光の波形の一例を示す図である。

【0149】

図 17 (a) は、Qスイッチレーザ発振器 100 が発振するパルスレーザ光の波形を示している。図 17 (b) は、光スイッチング素子 26 の透過率を示している。図 17 (c) は、増幅器 200 に入力されるパルスレーザ光の波形を示している。図 17 (d) は、増幅器 200 から出力されるパルスレーザ光の波形を示している。

【0150】

図 17 (a) に示すように、Qスイッチレーザ発振器 100 が出力するパルスレーザ光の波形は、パルス間隔が異なるパルスレーザ光を発生させたとき、相似形ではなく、パルス先頭部分のピーク値と、パルス後方部分の定常値との強度比率が異なっている場合がある。例えば、パルスレーザ光 # 2 のピーク値 p_2 と、パルスレーザ光 # 3 のピーク値 p_3 とは大きく異なっているのに対して、パルスレーザ光 # 2 の定常値 c_2 と、パルスレーザ光 # 3 の定常値 c_3 とはほぼ同じ値となっている。このような場合、実施の形態 1 と同様の方法で、図 17 (b) に示すように、パルスレーザ光毎に一定の透過率とする制御を行うと、図 17 (d) に示すように、増幅後のパルスレーザ光は、パルスエネルギーは等しくても、波形が異なったものになる。ここで、図 17 (c) は、増幅器 200 に入射するレーザパルス光の波形である。

10

【0151】

このように、Qスイッチレーザ発振器 100 が発生させる複数のパルスレーザ光の波形が相似形とならない場合、図 18 に示すように、光スイッチング素子 26 の透過率を、ひとつのパルス時間内で変化させることにより、パルスエネルギーだけでなく波形も均質化することができる。

20

【0152】

図 18 は、透過率をパルス時間内で経時変化させる例の説明図である。図 18 (a) は、Qスイッチレーザ発振器 100 が発振するパルスレーザ光の波形を示している。図 18 (b) は、光スイッチング素子 26 の透過率を示している。図 18 (c) は、増幅器 200 に入力されるパルスレーザ光の波形を示している。図 18 (d) は、増幅器 200 から出力されるパルスレーザ光の波形を示している。

【0153】

なお、このような透過率の設定を機械学習を用いて行う場合、状態量として、Qスイッチレーザ発振器 100 がパルスレーザ光を発生させるタイミングと、パルスレーザ光のパルスエネルギー、パルス先頭部分のパルスピーク値、および、パルス後方部分のパルス定常値の少なくともひとつと、のうち少なくともひとつをさらに含んでもよい。また、学習結果である透過率は、パルスレーザ光毎に一定の値ではなく、ひとつのパルスレーザ光を透過させる間に経時変化する値とすればよい。

30

【0154】

以上説明したように、実施の形態 6 にかかるレーザ装置 500 は、ひとつのパルスレーザ光が光スイッチング素子 26 を透過する間に透過率を経時変化させる。これにより、増幅後のレーザパルス光の波形を均質化することが可能になる。また、機械学習を用いて透過率を設定する場合、学習装置 60, 60 a のモデル生成部 62, 62 a は、状態量から、ひとつのパルスレーザ光が光スイッチング素子 26 を透過する間に経時変化する透過率を推論するための学習済モデルを生成することもできる。

40

【0155】

実施の形態 7 .

パルスレーザ光を発生させる間隔が短い場合、1つ前までのパルスレーザ光の間隔だけでなく、複数のレーザパルス光の履歴が影響する場合がある。この場合、実施の形態 4 から 6 に示す状態量に含まれる間隔情報は、対象のパルスレーザ光と1つ前のパルスレーザ光との間の時間間隔だけでなく、一定時間に含まれる複数のパルスレーザ光についての複数の時間間隔を示す情報としてもよい。

50

【 0 1 5 6 】

図 1 9 は、実施の形態 7 にかかる透過率の制御についての説明図である。図 1 9 (a) は、Q スイッチレーザー発振器 1 0 0 が発振するパルスレーザー光の波形を示している。図 1 9 (b) は、光スイッチング素子 2 6 の透過率を示している。図 1 9 (c) は、増幅器 2 0 0 に入力されるパルスレーザー光の波形を示している。図 1 9 (d) は、増幅器 2 0 0 から出力されるパルスレーザー光の波形を示している。

【 0 1 5 7 】

図 1 9 (a) に示すように、パルスレーザー光 # 1 ~ # 6 が一定時間間隔で発振される場合であっても、時間間隔が短い場合、各パルスレーザー光 # 1 ~ # 6 が、直前のパルスレーザー光の影響だけでなく、複数のパルスレーザー光の影響を受ける場合がある。この場合、パルスレーザー光 # 1 ~ # 6 のように一定の間隔で発振されていても、影響を受ける期間長を T L とした場合、パルスレーザー光 # 1 では、パルスレーザー光 # 1 の発生時刻以前の T L の期間に 1 つのパルスレーザー光を含むのに対して、パルスレーザー光 # 3 ではパルスレーザー光 # 3 の発生時刻以前の T L の期間に 2 つのパルスレーザー光 # 1 ~ # 2 を含む。また、パルスレーザー光 # 4 では、パルスレーザー光 # 4 の発生時刻以前の T L の期間に 3 つのパルスレーザー光 # 1 ~ # 3 を含む。パルスレーザー光 # 5 , # 6 についてもパルスレーザー光 # 4 と同様に、各パルスレーザー光の発生時刻以前の T L の期間に 3 つのパルスレーザー光を含む。したがって、パルスレーザー光 # 1 ~ # 4 ではパルスエネルギーが変化し、パルスレーザー光 # 4 ~ # 6 ではパルスエネルギーは一定である。この場合、パルスレーザー光が影響を受ける T L の期間内のパルスレーザー光の間の時間間隔の合計値つまり移動平均値に基づいて、図 1 9 (b) に示すように透過率を制御すると、図 1 9 (d) に示すように、増幅後のパルスエネルギーのばらつきを抑制することができる。

【 0 1 5 8 】

なお、T L の値はパルス出力等の条件によって異なるため、実施の形態 4 , 5 で示したように、機械学習を用いる場合には、T L の値も変化させて様々な条件でデータを取得し、T L の値を状態量に含めて機械学習を行い、最適な範囲を得てもよい。

【 0 1 5 9 】

実施の形態 8 .

パルスレーザー光を発生させる間隔が十分に長い場合、放電電力を変化させてもよい。例えば、レーザー装置 5 0 0 が三軸直交型 C O 2 レーザである場合、放電開始から利得が立ち上がるまで一定の時間がかかる。

【 0 1 6 0 】

図 2 0 は、実施の形態 8 にかかるレーザー装置 5 0 0 の電極 1 1 間の部分構成を示す図である。簡単のため、図 2 0 では電極 1 1 の部分のみを示しており、電極 1 2 については示していない。

【 0 1 6 1 】

図 2 0 は、図 2 に示すレーザー装置 5 0 0 の電極 1 1 間の放電空間を光軸方向から見た図である。図 2 0 において、V g はガス流速、D w d は、ガス流方向 1 3 の電極 1 1 の電極幅である。

【 0 1 6 2 】

図 2 1 は、図 2 0 に示す構成のレーザー装置 5 0 0 の電極 1 1 間の定常状態の利得分布を示す図である。放電開始から定常状態の利得分布になるまでに電極 1 1 の幅方向であるガス流方向 1 3 において、電極 1 1 の端から端までレーザーガスが流れる分だけの時間がかかる。つまり、放電開始から利得分布が定常状態になるまでの時間を t とすると、 $t = D w d / V g$ となる。例えば、ガス流速 $V g = 8 0 \text{ m / s}$ 、電極幅 $D w d = 4 0 \text{ mm}$ の場合、 $t = 0 . 5 \text{ m s e c}$ となる。つまり、パルスレーザー光を発生させる時間間隔が上記の t よりも長い場合、電力消費を抑制するために放電を止めて、次のパルスレーザー光を発生させる時刻の t だけ前に放電を開始するようにしてもよい。また、パルスレーザー光を発生させる時間間隔が上記の t よりも短い場合でも、パルスエネルギーが大きすぎるときは放電電力を落とすような制御をしてもよい。このようにすると、パルス周波数が低い場合でもエネ

10

20

30

40

50

ルギー効率をよくすることができる。また、 よりも長い時間は、前のパルスレーザー光の影響を受けないため、実施の形態7で説明したTLの値を としてもよい。

【0163】

以上説明したように、実施の形態8にかかるレーザー装置500では、パルス特性時間は、Qスイッチレーザー発振器100の有する放電電極である電極11, 12のレーザーガスが流れる方向の長さである放電電極の電極幅Dwdをガス流速Vgで除算した値以下である。これにより、増幅器200から出力するパルスレーザー光のパルスエネルギーを安定化させることができ、このレーザー装置500を用いて行う加工の加工形状を均質化させることができる。

【0164】

実施の形態9 .

図22は、実施の形態9にかかるレーザー装置500aの内部構成を示す図である。レーザー装置500aは、共振器を構成する部分の構成の一部がレーザー装置500と異なる。具体的には、レーザー装置500aでは、全反射ミラー21の代わりに全反射ミラー54を有し、全反射ミラー54は、互いに法線が直交する2つの平面ミラーを組み合わせたものである。このとき、2つの法線は電極面と平行、つまりXZ平面と平行である。したがって、全反射ミラー54は、XZ平面方向の再帰反射ミラーとなる。

【0165】

図22に示すレーザー装置500aの電極11間の放電空間を光軸方向から見ると、図20に示す状態と同様になる。また、図23は、レーザー装置500aの電極11間の定常状態の温度分布を示す図である。

【0166】

レーザーガスが、ガス流の上流側つまりX軸のプラス方向から下流側つまりX軸のマイナス方向に向けて流れる間、連続的に放電によって電力が投入される。このため、ガス流方向13に温度分布が生じ、上流側よりも下流側の方がレーザーガスの温度が高くなる。このため、電極11間のレーザーガスに屈折率分布が生じ、この部分を伝搬する光はわずかに光軸が曲がることになる。通常の凹面ミラー対を用いた共振器では、この場合、ガス流の上流側に光軸が移動し、場合によっては発振が止まる。実施の形態9では、再帰反射ミラーである全反射ミラー54を用いて共振器を構成しているため、共振条件は、再帰反射ミラーの2枚のミラーの接線上に光軸位置が限定されるようになる。つまり、再帰反射ミラーを用いる場合、ガス流方向に温度分布が生じて光軸の移動が制限され、安定して発振させることができる。この場合、発振器のパルスエネルギーおよびパルス波形は、共振器を出力した後のミラーを、レーザー装置500におけるミラー25の代わりに部分反射ミラー55とし、一部の透過光を光センサ50で観測してもよい。図22では、部分反射ミラー24と、再帰反射ミラーである全反射ミラー54とが直線上に配置されているが、部分反射ミラー24と全反射ミラー54との間に折り返しミラーを配置してもよい。

【0167】

以上説明したように、実施の形態9にかかるレーザー装置500aのQスイッチレーザー発振器100は、共振器を構成する全反射ミラー54として、再帰反射ミラーを有する。これにより、ガス流方向に温度分布が生じた場合であっても安定した発振を実現することができる。

【0168】

実施の形態10 .

図2に示すレーザー装置500では、Qスイッチレーザー発振器100と増幅器200とが同じ筐体300内に收容され、レーザー媒質を共有している。このため、Qスイッチレーザー発振器100のパルスエネルギーから、増幅器200の利得の状態が推測できる。例えば、レーザーガスが劣化して発振段のパルスレーザー光のパルスエネルギーが低下しているときは、増幅段の利得も低下していることがわかる。増幅器200における利得の状態と、Qスイッチレーザー発振器100におけるパルスエネルギーとの関係をモデル化しておき、そのモデルから光スイッチング素子26の透過率を補正することにより、増幅後のパルスエ

10

20

30

40

50

エネルギーを安定化することができ、その結果、このパルスレーザー光を用いたレーザー加工の加工形状を均質化することができる。

【0169】

図24は、実施の形態10にかかるレーザー加工装置510の動作を説明するためのフローチャートである。ステップS101～ステップS104については、図8などと同様のため、ここでは説明を省略する。

【0170】

制御装置35は、算出した光スイッチング素子26の透過率のデータを、例えば制御装置35内のメモリに保存し、パルスレーザー光毎の光スイッチング素子26の透過率を設定する(ステップS131)。

10

【0171】

制御装置35は、ステップS103で算出したパルスレーザー光の発振間隔と、ステップS131で設定した光スイッチング素子26の透過率とを用いて、Qスイッチレーザー発振器100および光スイッチング素子26の制御を行い、Qスイッチレーザー発振器100に1パルス分だけレーザー発振を行わせる(ステップS132)。

【0172】

また、制御装置35は、情報処理装置36を介して、光センサ50が取得した、Qスイッチレーザー発振器100のパルスレーザー光のパルスエネルギーを取得する(ステップS133)。

【0173】

レーザー加工装置510は、レーザー装置500が発振させたパルスレーザー光を用いて、電子基板の穴あけ加工を1穴分だけ行うと(ステップS134)、ステップS132の処理に戻る。また、この穴あけ加工の実施と並行して、制御装置35は、モデルに基づき次のパルスレーザー光のパルスエネルギーを算出する(ステップS135)。ここで使用するモデルは、上述した、増幅器200における利得の状態と、Qスイッチレーザー発振器100におけるパルスエネルギーとの関係を示すモデルである。制御装置35は、モデルに基づいて算出した次のパルスレーザー光のパルスエネルギーに基づいて、光スイッチング素子26の透過率を補正し(ステップS136)、ステップS131の処理に戻る。

20

【0174】

上記のような処理を行うことにより、1パルス発振するごとに、発振段のパルスエネルギーを取得して、次のパルスレーザー光を発振するまでに、モデルに基づいた光スイッチング素子の透過率の補正を行うことができる。

30

【0175】

このとき、モデルの作成は、機械学習によって行ってもよい。

【0176】

以上の実施の形態に示した構成は、一例を示すものであり、別の公知の技術と組み合わせることも可能であるし、実施の形態同士を組み合わせることも可能であるし、要旨を逸脱しない範囲で、構成の一部を省略、変更することも可能である。

【0177】

例えば、上記の実施の形態1～10では、レーザー装置500、500aは、レーザー媒質が気体であるガスレーザーであることとしたが、パルスレーザー光の発振間隔を変化させたときのQスイッチレーザー発振器100の発振時におけるパルスエネルギーの変動は、固体レーザーなどでも同様の影響がある。したがって、上記に示したガスレーザーに特有の部分を除けば、上述の構成は、固体レーザーなどに対しても適用することができ、同様の効果が期待できる。

40

【0178】

なお、上記では、主に、光スイッチング素子26の透過率を制御する例について説明したが、図2に示すように、レーザー装置500が複数の光スイッチング素子26、27を有する場合、複数の光スイッチング素子26、27を合わせた透過率が上述の条件を満たすように制御すればよい。

50

【符号の説明】

【0179】

1, 2, 3 光軸、11, 12 電極、13, 14, 15, 16 ガス流方向、21, 54 全反射ミラー、22 Qスイッチ、23, 29, 33 ウィンドウ、24, 34, 55 部分反射ミラー、25, 28, 30, 31, 32, 401, 402 ミラー、26, 27 光スイッチング素子、35 制御装置、36 情報処理装置、40, 41 送風機、42, 43 熱交換器、44 放電制御装置、50, 51 光センサ、60, 60a 学習装置、61, 61a 学習用データ取得部、62, 62a モデル生成部、70, 70a 学習済モデル記憶部、80, 80a 推論装置、81, 81a 推論用データ取得部、82, 82a 推論部、100 Qスイッチレーザ発振器、200 増幅器、300 筐体、400 穴あけ加工機、403 ガルバノミラー、404 レンズ、405 加工対象物、500, 500a レーザ装置、510 レーザ加工装置。

10

20

30

40

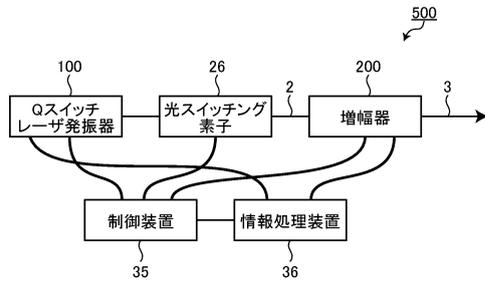
50

【要約】

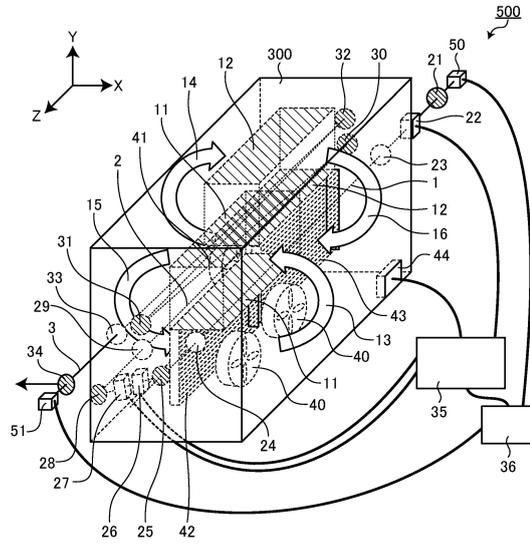
レーザ装置（500）は、パルスレーザ光を発生させるQスイッチレーザ発振器（100）と、パルスレーザ光を増幅する増幅器（200）と、Qスイッチレーザ発振器（100）と増幅器（200）との間の光路上に配置された光スイッチング素子（26）と、Qスイッチレーザ発振器（100）がパルスレーザ光を発生させる時間間隔の特徴を示すパルス特性時間に基づいて、光スイッチング素子（26）の透過率を変調させる制御装置（35）と、を備えることを特徴とする。

【図面】

【図 1】



【図 2】



10

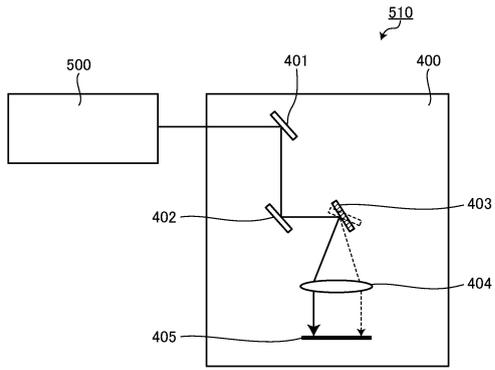
20

30

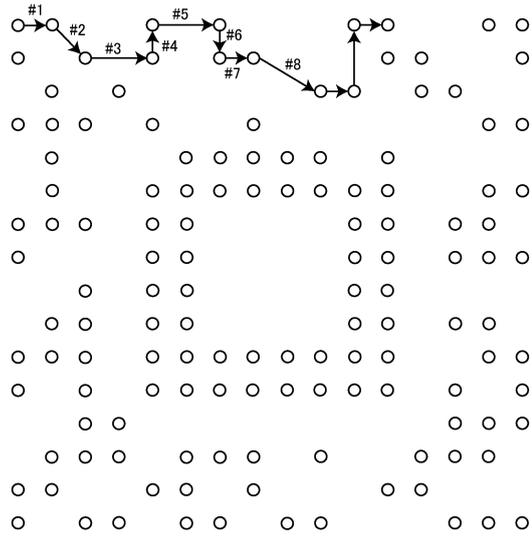
40

50

【 図 3 】



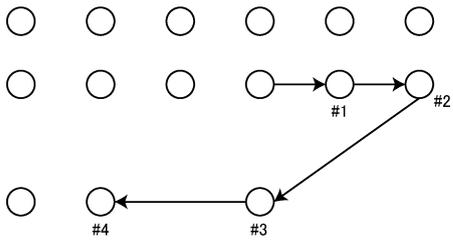
【 図 4 】



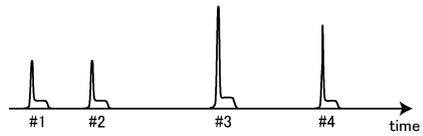
10

20

【 図 5 】



【 図 6 】

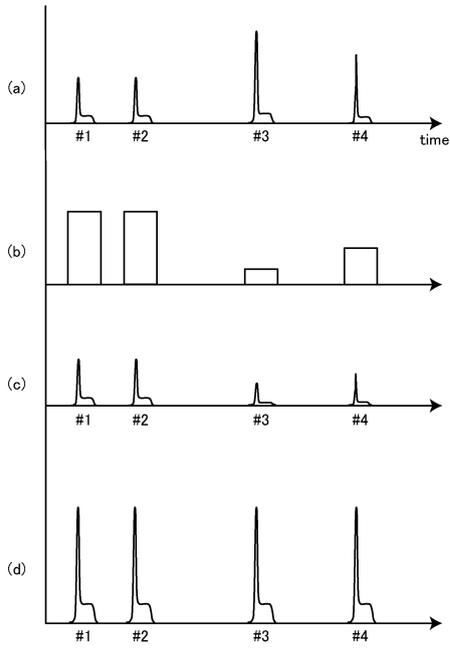


30

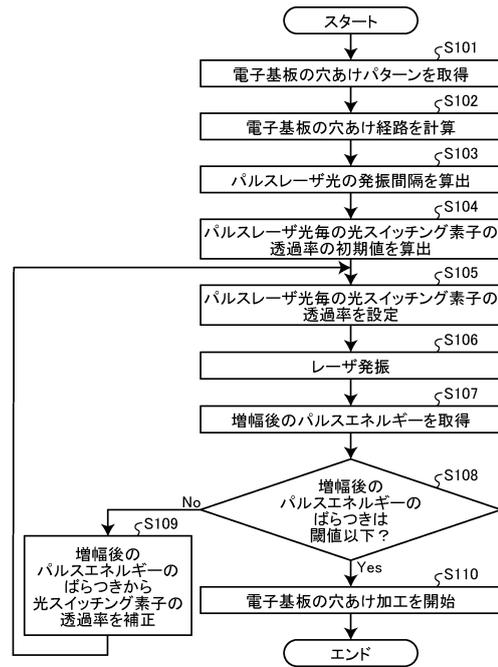
40

50

【 図 7 】



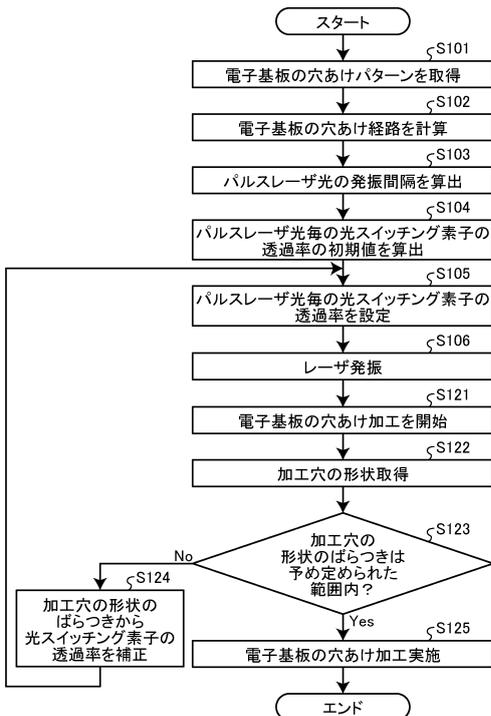
【 図 8 】



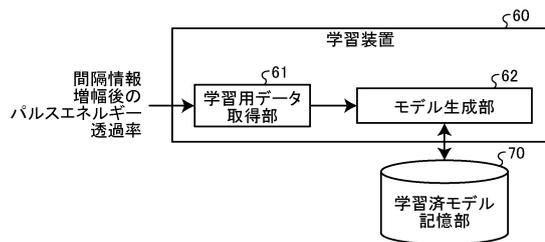
10

20

【 図 9 】



【 図 10 】

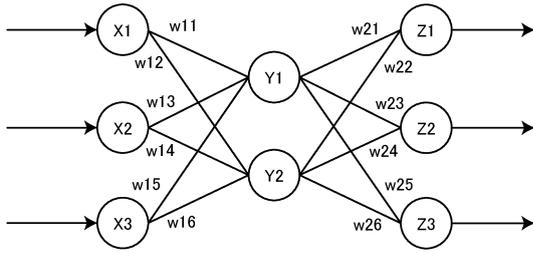


30

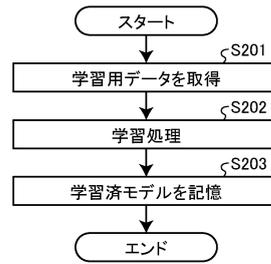
40

50

【図 1 1】

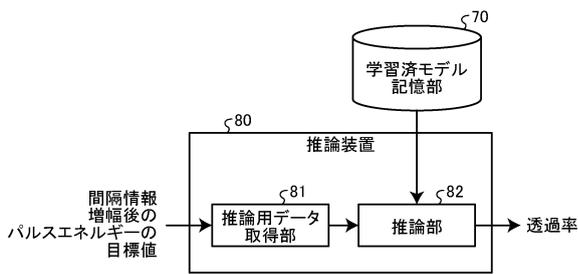


【図 1 2】

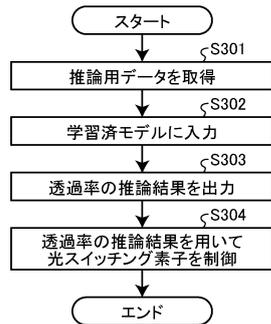


10

【図 1 3】



【図 1 4】



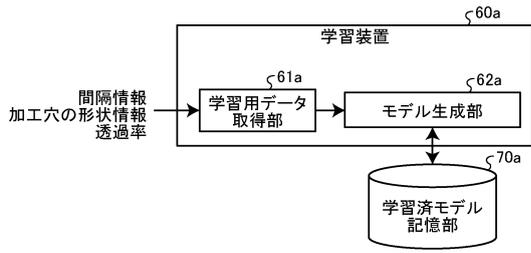
20

30

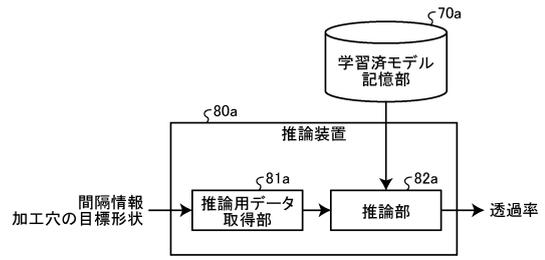
40

50

【 図 1 5 】



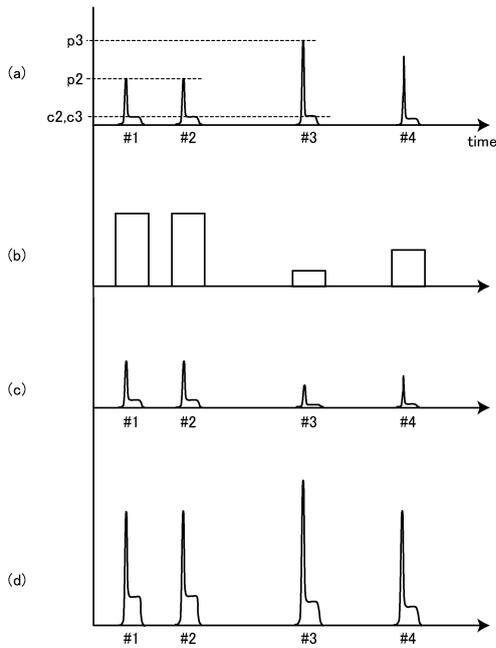
【 図 1 6 】



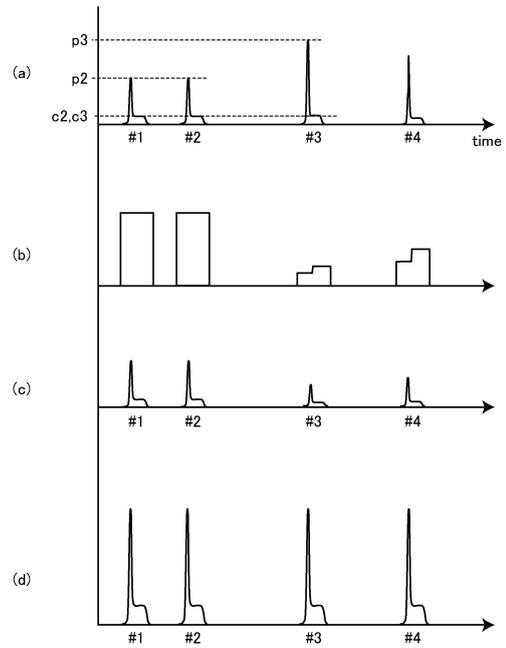
10

20

【 図 1 7 】



【 図 1 8 】

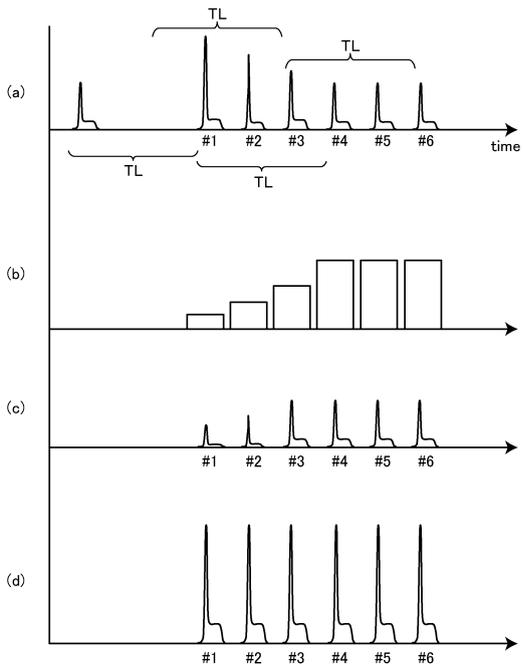


30

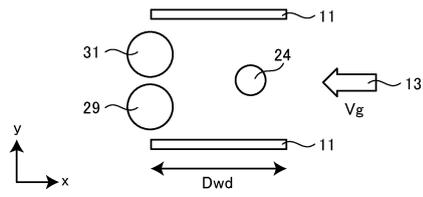
40

50

【 図 1 9 】



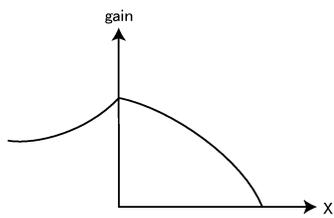
【 図 2 0 】



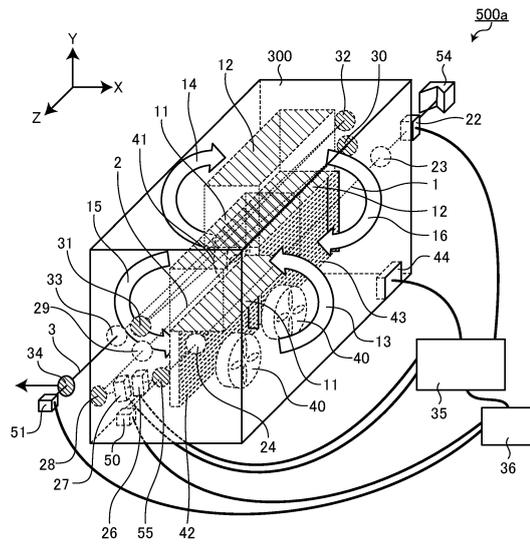
10

20

【 図 2 1 】



【 図 2 2 】

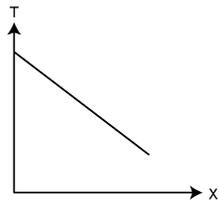


30

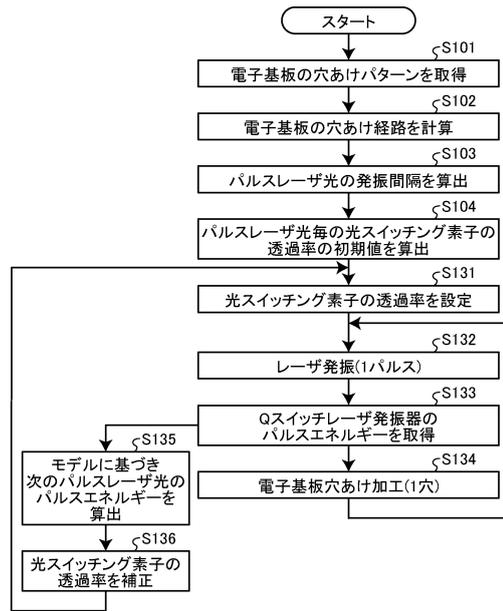
40

50

【 図 2 3 】



【 図 2 4 】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

- (56)参考文献 特開平 1 - 1 0 4 4 8 6 (J P , A)
特開平 1 0 - 1 9 0 1 1 7 (J P , A)
特開 2 0 1 6 - 1 8 7 8 3 0 (J P , A)
特開 2 0 0 2 - 4 0 6 2 7 (J P , A)
特表 2 0 1 2 - 5 0 2 8 0 5 (J P , A)

(58)調査した分野 (Int.Cl. , D B 名)

B 2 3 K 2 6 / 0 0 - 2 6 / 7 0
H 0 1 S 3 / 0 0 - 3 / 0 2、3 / 0 4 - 3 / 0 9 5 9、3 / 0 9 8 - 3 / 1 0 2、
3 / 1 0 5 - 3 / 1 3 1、3 / 1 3 6 - 3 / 2 1 3、3 / 2 3 - 4 / 0 0