

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6046033号
(P6046033)

(45) 発行日 平成28年12月14日(2016.12.14)

(24) 登録日 平成28年11月25日(2016.11.25)

(51) Int.Cl.

F I

B 2 3 K 26/08 (2014.01)

B 2 3 K 26/08 H

B 2 3 K 26/042 (2014.01)

B 2 3 K 26/042

B 2 3 K 26/082 (2014.01)

B 2 3 K 26/082

B 2 3 K 26/00 (2014.01)

B 2 3 K 26/00 N

B 2 3 K 26/352 (2014.01)

B 2 3 K 26/00 M

請求項の数 15 (全 29 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2013-504895 (P2013-504895)
 (86) (22) 出願日 平成23年3月3日(2011.3.3)
 (65) 公表番号 特表2013-525113 (P2013-525113A)
 (43) 公表日 平成25年6月20日(2013.6.20)
 (86) 国際出願番号 PCT/US2011/026949
 (87) 国際公開番号 W02011/129921
 (87) 国際公開日 平成23年10月20日(2011.10.20)
 審査請求日 平成26年2月24日(2014.2.24)
 (31) 優先権主張番号 61/342,578
 (32) 優先日 平成22年4月16日(2010.4.16)
 (33) 優先権主張国 米国(US)
 (31) 優先権主張番号 12/945,713
 (32) 優先日 平成22年11月12日(2010.11.12)
 (33) 優先権主張国 米国(US)

(73) 特許権者 507155948
 メタル インブルーメント カンパニー
 エルエルシー
 METAL IMPROVEMENT C
 OMPANY LLC
 アメリカ合衆国 ニュージャージー州 O
 7652、パラマス、フォレスト アベニ
 ユー 10
 (74) 代理人 100114476
 弁理士 政木 良文
 (72) 発明者 デーン, プレント, シー.
 アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94
 551 リバーモア、クレーン アベニ
 ユー、678

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 高出力レーザシステムの為のフレキシブルビーム供給システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

工作物のターゲット面上のプロセス領域にレーザエネルギーを供給する方法であって、
 受光装置とビーム整形光学装置とスキャナを備える光学組立品を、レーザソースからレ
 ーザエネルギーを受け取る位置に配置する工程と、

前記光学組立品の位置を変えことなくレーザエネルギーを前記受光装置に向けるとと
 もに、前記スキャナを用いて前記レーザエネルギーを、パターンに従って、前記プロセス
 領域内の公称形状及び位置を有する複数の衝撃領域に向ける工程と、

前記プロセス領域内の位置毎に、前記スキャナから出力された前記レーザエネルギーの
 方向、分散、偏光、回転、アスペクト比を設定して、前記プロセス領域内の各衝撃領域上
 における前記レーザエネルギーの偏光、形状、位置を制御する工程と、を有し、

前記パターン内の前記レーザエネルギーの前記衝撃領域が、表面の局所的な方向につい
 ての情報を含む公称表面法線ベクトルによって特徴付けられ、

前記偏光を制御する工程が、対応する前記衝撃領域の前記公称表面法線ベクトルに対し
 て前記レーザエネルギーがP偏光を有するように、前記偏光を回転させることを含むこと
 を特徴とするレーザエネルギーの供給方法。

【請求項 2】

前記レーザエネルギーは複数の偏光したレーザパルスを含み、

前記プロセス領域に充填流体を流す工程と、

前記複数のレーザパルスのレーザパルス毎に、前記スキャナから出力された前記レーザ

10

20

パルスの方向、分散、偏光、回転、アスペクト比を設定して、前記プロセス領域内のパルスパターン内の各衝撃領域上における対応する前記レーザパルスの偏光、形状、位置を制御する工程と、を有し、

前記パルスパターンは、プロセスの許容範囲内で互いに隣接して配置された前記衝撃領域の配列を備え、前記複数のレーザパルスに対する前記プロセス領域内の前記衝撃領域の前記公称形状が、均一で、長方形又は正方形であることを特徴とする請求項 1に記載の方法。

【請求項 3】

前記光学組立品上に搭載されたカメラ、トレーサビーム、前記工作物上の複数の登録マークを用いて、前記光学組立品の前記位置を基準とした前記ターゲット面上の前記プロセス領域のジオメトリを校正する工程と、

前記ジオメトリを、前記パターン内のパルス毎に方向、分散、偏光、回転、アスペクト比に関する校正されたパラメータに変換する工程を有することを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の方法。

【請求項 4】

工作物のターゲット面上のプロセス領域にレーザエネルギーを供給する方法であって、受光装置とビーム整形光学装置とスキャナを備える光学組立品を、レーザソースからレーザエネルギーを受け取る位置に配置する工程と、

前記光学組立品の位置を変えずにレーザエネルギーを前記受光装置に向けるとともに、前記スキャナを用いて前記レーザエネルギーを、パターンに従って、前記プロセス領域内の公称形状及び位置を有する複数の衝撃領域に向ける工程と、

前記プロセス領域内の位置毎に、前記スキャナから出力された前記レーザエネルギーの方向、分散、偏光、回転、アスペクト比を設定して、前記プロセス領域内の各衝撃領域上における前記レーザエネルギーの偏光、形状、位置を制御する工程と、

前記光学組立品上に搭載されたカメラ、トレーサビーム、前記工作物上の複数の登録マークを用いて、前記光学組立品の前記位置を基準とした前記ターゲット面上の前記プロセス領域のジオメトリを校正する工程と、

前記ジオメトリを、前記パターン内のパルス毎に方向、分散、偏光、回転、アスペクト比に関する校正されたパラメータに変換する工程を有することを特徴とするレーザエネルギーの供給方法。

【請求項 5】

前記レーザエネルギーは複数のレーザパルスを有し、

前記パターンは、レーザエネルギーの各パルスに対応して、プロセスの許容範囲内で互いに隣接して配置された前記衝撃領域の配列を備え、

前記複数のレーザパルスに対する前記プロセス領域内の前記衝撃領域の前記公称形状が、均一で、長方形又は正方形であることを特徴とする請求項 1 ~ 4 の何れか 1 項に記載の方法。

【請求項 6】

前記光学組立品の前記位置に対してコントローラを校正する工程を有し、

前記コントローラは、前記光学組立品の前記位置に対し、前記レーザエネルギーを前記プロセス領域に向け、前記パターン内の衝撃領域毎に、方向、分散、偏光、回転、アスペクト比に関する校正されたパラメータを提供するよう、光学部品をコントロールすることを特徴とする請求項 1 ~ 5 の何れか一項に記載の方法。

【請求項 7】

前記レーザソースが、伝送ミラーを備え、

前記受光装置が、受光ミラーを備え、

前記光学組立品上の前記受光装置に前記レーザエネルギーを向けるように、前記伝送ミラーを調節する工程と、

前記光学組立品上の制御可能な偏光部品、制御可能なアスペクト比部品、制御可能な分散部品、及び、制御可能なスキャン光学装置を通過する光学経路区間上で前記レーザエネ

10

20

30

40

50

ルギーを反射させるように、前記受光ミラーを調節する工程を有することを特徴とする請求項 1 ~ 6 の何れか1項に記載の方法。

【請求項 8】

前記パターン内の前記レーザエネルギーの前記衝撃領域が、表面の局所的な方向についての情報を含み、且つ前記スキャナからの線に対して傾いた公称表面法線ベクトルによって特徴付けられ、

前記プロセス領域内の少なくとも 2 つの前記衝撃領域の前記公称表面法線ベクトルの前記傾きが 60 度以上異なることを特徴とする請求項 1 ~ 7 の何れか1項に記載の方法。

【請求項 9】

前記パターン内の前記レーザエネルギーの前記衝撃領域が、表面の局所的な方向についての情報を含み、且つ前記スキャナからの線に対して傾いた公称表面法線ベクトルによって特徴付けられ、

前記プロセス領域内の少なくとも 2 つの前記衝撃領域の前記公称表面法線ベクトルの前記傾きが 90 度以上異なることを特徴とする請求項 1 ~ 8 の何れか1項に記載の方法。

【請求項 10】

工作物のターゲット面上のプロセス領域にレーザエネルギーを供給する装置であって、受光装置と、偏光コントローラ、分散コントローラ、及び、アスペクト比コントローラを含むビーム整形光学装置と、スキャナとを備える、マウント上の光学組立品と、

レーザエネルギーを生成するように構成されたレーザシステムと、
前記レーザシステムからのレーザエネルギーを前記光学組立品上の前記受光装置に向けてるビーム供給システムと、

前記レーザシステムと前記スキャナ間の光学経路内に設けられた回転コントローラと、
前記レーザシステム、前記光学組立品、前記ビーム供給システムと連携する制御システムを備え、

前記制御システムは、

前記レーザシステムからのレーザエネルギーを前記ビーム供給システムを介して受け取る位置に前記光学組立品を配置し、

前記光学組立品の位置を変えことなく、前記スキャナを用いて、前記レーザエネルギーを、パターンに従って、前記プロセス領域内の公称形状及び位置を有する複数の衝撃領域に向け、

前記プロセス領域内の各衝撃領域上における前記レーザエネルギーの偏光、形状、位置を制御するために、前記パターン内の衝撃領域毎に、前記スキャナから出力される前記レーザエネルギーの方向、分散、偏光、回転、アスペクト比を設定するようにプログラムされ、

前記パターン内の前記レーザエネルギーの前記衝撃領域が、表面の局所的な方向についての情報を含む公称表面法線ベクトルによって特徴付けられ、

対応する前記衝撃領域の前記公称表面法線ベクトルに対して、前記レーザエネルギーが P 偏光を有するように、前記制御システムが、前記偏光を回転させるようにプログラムされていることを特徴とするレーザエネルギーの供給装置。

【請求項 11】

前記ターゲット面に焦点を合わせるように構成可能な前記光学組立品上のカメラと、
較正モードにおいて、前記ターゲット面上にトレーサービームスポットを当てるように配置されたトレーサービームソースと、

前記スキャナを前記ターゲット面の像と前記トレーサービームスポットに応じて制御可能とし、前記トレーサービームスポットを前記ターゲット面上の一組の登録スポット上に配置して、スキャナパラメータを保存するためのユーザインターフェースと、

前記スキャナパラメータを前記ビーム整形光学装置と前記スキャナに関して較正されたパラメータに変換するプロセッサとを備えることを特徴とする請求項 10 に記載の装置。

【請求項 12】

工作物のターゲット面上のプロセス領域にレーザエネルギーを供給する装置であって、

受光装置と、偏光コントローラ、分散コントローラ、及び、アスペクト比コントローラを含むビーム整形光学装置と、スキャナとを備える、マウント上の光学組立品と、

レーザエネルギーを生成するように構成されたレーザシステムと、

前記レーザシステムからのレーザエネルギーを前記光学組立品上の前記受光装置に向けるビーム供給システムと、

前記レーザシステムと前記スキャナ間の光学経路内に設けられた回転コントローラと、

前記レーザシステム、前記光学組立品、前記ビーム供給システムと連携する制御システムを備え、

前記制御システムは、

前記レーザシステムからのレーザエネルギーを前記ビーム供給システムを介して受け取る位置に前記光学組立品を配置し、

前記光学組立品の位置を変えることなく、前記スキャナを用いて、前記レーザエネルギーを、パターンに従って、前記プロセス領域内の公称形状及び位置を有する複数の衝撃領域に向け、

前記プロセス領域内の各衝撃領域上における前記レーザエネルギーの偏光、形状、位置を制御するために、前記パターン内の衝撃領域毎に、前記スキャナから出力される前記レーザエネルギーの方向、分散、偏光、回転、アスペクト比を設定するようにプログラムされ、

前記ターゲット面に焦点を合わせるように構成可能な前記光学組立品上のカメラと、

較正モードにおいて、前記ターゲット面上にトレーサービームスポットを当てるように配置されたトレーサービームソースと、

前記スキャナを前記ターゲット面の像と前記トレーサービームスポットに応じて制御可能とし、前記トレーサービームスポットを前記ターゲット面上の一組の登録スポット上に配置して、スキャナパラメータを保存するためのユーザインターフェースと、

前記スキャナパラメータを前記ビーム整形光学装置と前記スキャナに関して較正されたパラメータに変換するプロセッサとを更に備えることを特徴とするレーザエネルギーの供給装置。

【請求項 13】

前記レーザエネルギーは、複数のレーザパルスを備え、

前記パターンは、レーザエネルギーの各パルスに対応して、プロセスの許容範囲内で互いに隣接して配置された前記衝撃領域の配列を備え、

前記プロセス領域内の前記衝撃領域の前記公称形状が、均一で、長方形又は正方形であることを特徴とする請求項 10 ~ 12 の何れか 1 項に記載の装置。

【請求項 14】

前記システムは、表面の局所的な方向についての情報を含み、且つ前記スキャナからの線に対して傾いた公称表面法線ベクトルによって特徴付けられる前記パターン内の前記衝撃領域に前記スキャナを用いて前記レーザエネルギーを向けるように調節可能であり、

前記プロセス領域内の少なくとも 2 つの前記衝撃領域の前記公称表面法線ベクトルの前記傾きが 60 度以上異なることを特徴とする請求項 10 ~ 13 の何れか 1 項に記載の装置。

【請求項 15】

前記システムは、複合曲率を有するプロセス領域用に構成されていることを特徴とする請求項 10 ~ 14 の何れか 1 項に記載の装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【 0 0 0 1 】

本発明は、高エネルギーレーザシステム、ビーム供給システム、及び、対象物が静止している場合の使用に適したレーザピーニングシステムに関する。

【 背景技術 】

【 0 0 0 2 】

金属形成及びその表面特性を改良するために機械的衝撃を与えるという方法が従来起用されてきた。現在の産業の実際場面においては、ほとんどの場合、金属表面のピーニング処理は高速ショットを使用して行われている。この処理は表面特性を改良し、多くの用途に対して特に重要なことには、金属疲労欠陥及び腐食欠陥に対する耐性に一部大幅な改善が見られたことがある。航空宇宙産業や自動車産業において、多岐に渡る工作物に対して、このショット・ピーニング法が用いられてきた。しかしながら、多くの用途において、このショット・ピーニング法では、十分に強い又は深い処理が実現できない、或いは、強度又は深さの十分な制御が提供できない、或いは、表面仕上げへの悪影響があるために使用できないということがあった。

10

【 0 0 0 3 】

レーザの発明により、ピーニングに必要とされる強い衝撃が、レーザ駆動の高密度プラズマという手法により達成されることが急速に認識されるようになった。B・P・フェアランド他、「7075アルミニウムにおけるレーザ・ショットによるミクロ組織及びメカニカル特性の変化」(Journal of Applied Physics, Vol. 43, No. 9, 3893頁, 1972年9月)。典型的には、高エネルギー密度(約200 J/cm²)で短いパルス長(10~30ナノ秒)のレーザにより10kBから30kBのプラズマ衝撃が金属表面で生成される。金属表面のメタルテープ、黒塗装、又は、他の吸収材の薄膜層が、金属の磨耗を防ぐ衝撃吸収体として使用される場合もある。例えば、水のような、封止或いは充填物質が、強化された強い衝撃を提供して表面層をカバーする。これらの衝撃は、通常のショット・ピーニング法より深く強い圧縮応力を与えることが示されている。試験において、この処理は、金属疲労及び腐食欠陥に対して工作物を強化する点で優越していることが示されている。レーザピーニングは表面形成及び表面テクスチャリングにも用いられる。

20

【 0 0 0 4 】

この目的で利用されてきたあるレーザシステムについては、本願出願人の先願米国特許第5,239,408号「高出力・高品質ビーム再生増幅器」に開示されている。該特許に記載のレーザシステムは、誘導ブリリュアン散乱(SBS)位相共役器/ミラーシステムに基づく波面補償構成を用いて、10~30ナノ秒以下オーダーのパルス幅のパルス当り20ジュールより大きな出力パルスを発生可能なマスタオシレータ/パワーアンプ(MOPA)構成の高出力アンプからなる。

30

【 0 0 0 5 】

現在商用化されているほとんどの高エネルギーレーザピーニングプロセスでは、レーザビームは固定された場所に保持されている。望ましい入射角、スポットサイズ、及び方向を維持しながら、処理対象の工作物をレーザビーム線に応じて移動させ、照射されたスポットのパターンを形成する。このため、工作物を掴み、プログラムされた複数の位置へ移動させるための自動装置、及び、工作物の保持固定具が必要となる。この方法はコストがかかるだけでなく、工作物の固有性が高くなり、新しい工作物のためのプロセスの開発に相当な工学技術が必要となる。また、工作物のサイズが、利用できる自動化装置の持ち上げ能力、及び、取り扱い能力によって限定される。工作物の構成が、自動化装置の取り扱い能力を上回る(例えば、1m超、かつ/又は、100kg超)場合は、従来の移動方法ではレーザピーニングができない。

40

【 0 0 0 6 】

フレキシブルビーム供給システムでは、光ファイバーが使用されることが多い。しかし、グラスファイバーの透過性が通常程度に高い波長においても、レーザピーニングで使用する非常に高いパルスエネルギーと高ピーク出力がファイバーにダメージを与え、ファ

50

イバーの効果を損ねる可能性がある。例えば、25 J のパルスは、1 mm のマルチモードのファイバーを介して供給することのできる最大パルスエネルギー (250 mJ) の100倍である。典型的なレーザピーニング用途で用いられるような単一周波数ビームに対して、グラスファイバーの損傷閾値はかなり低い。Dane 他による「空気中を通る可変光学経路区間を備えたアクティブビーム供給システム」と題する米国特許第7,718,921号(2006/0102602A1として2006年5月18日公開)は、レーザピーニングに必要なレーザパルスが表面に正確に供給される間に対象物を静止させることが可能な、工業環境でのレーザピーニングに利用されるフレキシブルビーム供給システムについて述べている。

【0007】

10

該特許のシステムは、ジンバルマウントの伝送ミラーを用いて、出力ビームを自由空間経路を経てレーザ供給ツールに向ける。レーザ供給ツールは、産業ロボットによって支持された光学組立品(ここでは「スティングー」と称する)を備える。スティングーの受光ジンバルが、スティングーの光軸に対してレーザビームのアライメントを維持することで、プロセスロボットがスティングーを工作物の表面全体に向けてスキャンし、レーザピーニングスポットの明確に定義されたパターンを生成する。これは既に稼働中のシステムとして成功しており、商用航空用のエンジンのファンの羽根や、発電用の蒸気タービンの羽根、航空機用の大型のブリスク等の部品の加工に用いられている。しかしながら、その設計には多くの不都合な点があり、例えば次のようなものが挙げられる。

1. スティングーのポインティング精度が、ロボット軸、特に、ロボットの手首の軸の絶対精度に依存する。これにより、しばしば、スポットパターンの配置に誤差が生じ、複数回の繰り返しが必要な工程において手動で訂正を行わなければならない、これに何時間、何日、時には何週間もかかることがある。しかし、幸い、一度パターンが確立されるとロボットの動きは非常に安定するため、工作物においてこのアライメント作業をそう長く繰り返す必要はなく、ロボットは固定される。

20

2. ロボットは、工作物上の新たなスポットに向けるためにレーザパルス毎にスティングーを再配置しなければならないため、ロボットの動作速度によってパルス繰り返し周波数(Pulse Repetition Frequency: PRF)が制限される。スティングー位置毎に1以上のパルスを印加するという案が該特許の第11欄48行目~第12欄12行目に述べられている。しかしながら、そこで述べられている方法の有効性は、利用可能なスキャン範囲が小さいために限定され、表面が複雑な場合には効果的でない。

30

3. 軸外のピーニング時にスポットの伸長を訂正するためのアスペクト比の制御が行われない。このことは、ビームの入射が法線でない場合、スポットの形状が、(表面法線から測定される)70度の入射角の近くで3:1という高いアスペクト比を有する(正方形でない)長方形となることを意味する。小さなスポット領域については、狭い足跡型のビームとなる。スポットの大きさが大きいほど、金属で生じる衝撃波に対してより平坦な波面が生成されるため、ピーニングの効率は高くなる。そのため、足跡型の狭いビームはピーニングの効率を低下させる。

4. 貴重な工作物に近接してロボットが活発に動作すると、ロボットが衝突したり、顧客部分が損傷する可能性が高くなる。

40

5. スティングーの最後の光学装置と処理面との間のスタンドオフ距離は、法線に近い入射で工作物の平行でない異なる面に達するために必要なロボットの動きの量を最小にするため、できる限り短く保つ必要がある。

6. スティングーに内蔵されるエネルギー及びビームプロファイル診断装置の較正は、レーザ出力とスティングー間のビーム供給経路におけるビームの偏光解消に対して影響を受けやすい。

7. 偏光制御が制限される。該特許では、ビームの偏光は、スティングーの方向に対して固定されている。該特許のシステムでは、空気圧式の台によって出力ビームの内外に移動が可能な90度の合成石英回転子が用いられているが、それでも工作物に対して任意の角度に偏光を設定することはできない。このことは、軸外のピーニングでは、ピーニングの

50

衝撃波に変換されるはずのレーザ光が充填用の水流面で反射し、出力の重大な損失となるため、特に重要である。

８．ステインガー上の診断ビームスプリッタは、弱い光学ゴーストの発生に影響を受け易く、この弱い光学ゴーストはアライメントカメラとエネルギー測定器にスプリアス信号を起こす虞がある。

９．工業用のステインガーは、堅固なアルミニウム製の回路部品板と、標準的な既成のマウントで保持された光学部品を備えた従来の機械設計を用いる。このため、ステインガーを保持する加工ロボットの推奨される積載量を超えた、重い組立部品となる。

１０．ステインガーの光学筐体が密封されていないと、光学面が頻繁に汚染されることになる。これにより、光学面上の塵や破片は重大なレーザの損傷につながり得るため、光学部品の定期的な検査、清掃の必要性が増加する。

10

【 0 0 0 8 】

該特許のシステムの一適用例では、比較的平坦なパネルをレーザピーニングするために用いられている。この平坦なパネルシステムは、ステインガーの１つの受光ジンバル位置から $48 \times 48 \text{ in}^2$ までのプロセス領域全体に対してレーザピーニングパルスをスキャンする固定された加工セルである。この平坦なパネルシステムは、スポットを処理面全体にわたって動かすために、電動式ジンバルマウントに搭載されたスキャンミラーを用いる。ジンバルの位置を１つにすると、ビームは一辺が４フィートの領域をスキャンするに際し、プロセス領域における入射角の範囲のために問題が生じる。したがって、パネル形成工程では、正確に配置され、回転され、成形され、サイズが決められたスポットを、パネル上の位置に関わらず、いかに維持するかが克服すべき課題となる。

20

【 0 0 0 9 】

レーザビームは工作物の表面に到達する途中で収束するため、ビームの指す位置がパネルの中心から離れるにつれて伝播距離が延びるとレーザビームは収縮を起こす。入射角が法線でない場合、ビームが入射面に沿って表面上で伸長される。最終的に、スキャンジンバル上の入射面が正方形のビームに対して垂直でないと、工作物の表面上のスポットが回転してしまう。

【 0 0 1 0 】

こうした歪曲収差を解決するために、フラットパネルシステムは、ビームの分散角を調節するためにズーム望遠鏡、及び、アスペクト比を事前に調節するためにチルト式望遠鏡レンズを使用する。フィールド回転子は、ターゲット上のビームプロファイルを回転させて、面外 (out-of-plane) ジンバルミラー反射を補償するために使用される。これにより、図１Ａ～１Ｅにおいて、プロセスフィールドの例に関して示されているように、正方形のスポットの均一なパターンが、工作物上に正確に配置されることが可能となる。

30

【 0 0 1 1 】

図１（ａ）は、フィールド内の異なる位置に対応するスポット位置Ａ～Ｉを示しており、Ｅは、法線入射角で、正方形の中心スポットである。収束するレーザビームは、工作物の表面から６６インチの固定されたジンバル位置から、４８インチ平方の処理フィールド全体に向けられる。角のスポットＡ，Ｃ，Ｉ，Ｇは、ジンバルから７４．２インチの位置にある。また、各辺のスポットＢ，Ｆ，Ｈ，Ｄは工作物の表面から７０．２インチの位置にある。補正がない場合、伝播距離が長く、法線でない入射角が中心から離れるに伴って、図１（ｂ）に示されたスポット形状及びスポットサイズを生むと思われる。ジンバルよりも前にフィールド回転子を用いてスポットを回転させることで、図１（ｃ）に示す対称なパターンが生まれる。ズーム望遠鏡を用いて出力の分散を調節することによって、スポットの面積を、図１（ｄ）に示すような均一な面積にすることができる。最後に、ズームレンズ素子を傾けることによって、図１（ｅ）に示すようにスポットの均一なパターンが生成されるように、相対的な水平及び垂直方向の分散が制御される。このフラットパネルシステムは、前記パターンのスポットに関してパネル上の入射角の範囲が比較的小さく、大型の基本的に平坦なプロセス領域全体にパルスを供給する場合に適している。しかしながら、このフラットパネルシステムは、産業用のレーザピーニングシステムで見られる、

40

50

複雑な表面形状で利用可能な多用途のシステムの実現に関して、上記で概略を述べた問題に対処していない。

【 0 0 1 2 】

従って、航空機の修理工場での航空機や航空機の部品、パイプ作業場での巨大な石油掘削部品のように、巨大な工作物、及び、顧客の設備の本来の位置にある工作物の取り扱いを可能とする十分な柔軟性を備えたシステム、及び、上記の問題の 1 又は複数を克服するシステムを提供することが望ましい。

【発明の概要】

【 0 0 1 3 】

工作物上の 1 又は複数のターゲット面に対して、衝撃領域及び偏光が正確に制御される高出力レーザエネルギーの供給を可能とするビーム供給システム及びビーム供給方法について述べる。ここでターゲット面は、単一の平面にあってもなくても良く、対象面の夫々は、単曲率又は複合曲率（すなわち、1 次元以上の曲率を有する非平面状の面）を有していても良い。例えば、受光装置、ビーム整形光学装置、スキャナを搭載する光学組立品（ここでは「スティンガー」と称する）を、レーザソースからレーザエネルギーを受け取る位置に配置する工程によって、レーザエネルギーを、工作物のターゲット面上の複合曲率を有するプロセス領域に供給することができる。スティンガーの位置は変わらない一方で、レーザエネルギーは受光装置に供給され、パターンに従って、プロセス領域内の公称形状及び位置を有する衝撃領域にスキャナを用いて向けられる。ここに述べるビーム供給技術は、プロセス領域内の位置毎に、スキャナから出力されるレーザエネルギーの方向、分散、偏光、フィールド回転、アスペクト比を設定して、各衝撃領域上のレーザエネルギーの偏光、形状及び位置を制御することが可能である。レーザピーニングのようなプロセスでは、レーザエネルギーは、プロセスの許容範囲内で互いに隣接して配置された複数の衝撃領域の配列全体に分配される、複数のレーザパルスから構成される。該複数のレーザパルスに対して、プロセス領域内の公称形状及び衝撃領域は、均一であり、正方形又は長方形である。ここに述べるビーム供給技術は、実際の衝撃領域がプロセスの許容範囲内でアライメントされ、所望する正方形又は長方形の形状を維持するような、レーザパルスの供給を可能とする。

【 0 0 1 4 】

スティンガーの光学部品を制御してレーザエネルギーをプロセス領域に向けるコントローラの較正技術について述べる。スティンガーの所定の位置に対して、較正の結果、方向、分散、偏光、フィールド回転、アスペクト比の較正されたパラメータが、パターン内の各衝撃領域に提供される。この較正工程では、スティンガーに搭載されたカメラを用いて、工作物上の登録マークを用いてトレーサビームをアライメントする工程を行うことができる。次に、当該アライメント工程から得られた設定は、工作物のジオメトリの定義に用いられ、当該ジオメトリは較正されたパラメータに変換される。

【 0 0 1 5 】

ここに述べる実施形態では、レーザエネルギーのソースは、スティンガー上の受光装置にレーザエネルギーを向けるように調節が可能なミラー等の反射光学装置を備える。当該光学装置及びその調節手段を備える組立部品のことを、光学伝送装置と称する。本実施形態では、受光装置は、制御可能な偏光部品、制御可能なアスペクト比部品、制御可能な分散部品、及び、スティンガー上のスキャナによって、光学経路区間上にレーザエネルギーを反射するように、光学伝送装置と連携して調節可能な受光ミラーを備える。

【 0 0 1 6 】

出力ビームの偏光が重要となり得る各実施形態に関して、衝撃領域は、プロセッサによって、公称表面法線ベクトルを用いて特徴付けられ、偏光は、レーザエネルギーが対応する衝撃領域の公称表面法線ベクトルに対して P 偏光を有するように、スティンガーにおいてビームの偏光を回転させることにより制御される。

【 0 0 1 7 】

スキャナからの線に対して傾いた公称表面法線ベクトルによって特徴付けられる面を有

10

20

30

40

50

する工作物に対して、パターン内の衝撃領域へレーザエネルギーの供給をサポートする技術について述べる。当該技術では、スティンガーの1つの位置によって提供されるプロセス領域内の少なくとも2つの衝撃領域に関する公称表面法線ベクトルの傾きが、最大60°まで異なり、実施形態によっては90°以上異なる。

【0018】

更に、偏光非依存のビームスプリッタを利用する方法で、スティンガーに供給される偏光されたレーザエネルギーの出力を検知する技術について述べる。

【0019】

レーザエネルギーを供給する装置について述べる。当該装置は、ロボット或いは他のマウントに搭載されたスティンガーを備え、当該ロボット或いは他のマウントは、当該スティンガーの位置を維持又は確立するために用いられ、当該スティンガーは、上述したような、受光装置、ビーム整形光学装置、スキャナを備える。当該装置は、ビーム供給システムと共に、レーザエネルギーを生成するよう構成されたレーザシステムを備え、当該レーザシステムからのレーザエネルギーをスティンガー上の受光装置に向ける。スキャナとレーザシステム間の光学経路内の回転コントローラは、スポット毎にレーザエネルギーのフィールド回転を調節するように制御可能である。また、制御システムが備えられており、この制御システムは、レーザシステム、ロボット、スティンガー、ビーム供給システムに連結されており、ビーム供給システムを介してレーザシステムからレーザエネルギーを受け取る位置にスティンガーを配置し、スティンガーの位置は変えずに、パターンに従って、プロセス領域内の公称形状及び位置を有する複数の衝撃領域にスキャナを用いてレーザエネルギーを向けるようにプログラムされている。パターン内の衝撃領域毎に、当該コントローラは、各衝撃領域上のレーザエネルギーの偏光、形状、位置が制御されるように、スキャナから出力されるレーザエネルギーの方向、分散、偏光、回転、アスペクト比を設定することが可能である。

【0020】

本ビーム供給システムの他の実施例及び利点については、以下の図面、詳細な説明、及び、請求の範囲の項を参照して明らかにされる。

【図面の簡単な説明】

【0021】

【図1】レーザパルスを平面に供給するためのラストミラーの使用に起因するスポットの歪曲収差、及び、当該歪曲収差の修正を示す図

【図2】工作物をレーザピーニングするために構成されたここに記載のレーザビーム供給システムを示す図

【図3】図2に示すようなエネルギー供給システムの入力光学装置及び伝送ミラーを示す図

【図4】図3のシステムと連携して用いる為の、受光ミラー、ビーム整形光学装置、診断部品を備えるロボット搭載スティンガーを示す図

【図5】図4の組立部品で使用されているような、入力レンズを調節する為のリニアトランスレーションステージを備えたズーム望遠鏡を示す図

【図6】図5に示すようなズーム望遠鏡において、ビームの分散を調節する為のリニアトランスレーションステージの使用に起因するスポットの歪曲収差のイメージを示す図

【図7】レーザピーニング工程で用いられる充填流体等の材料の表面上におけるレーザビームのP偏光成分及びS偏光成分に関する、反射率対入射角を示すグラフ

【図8】先行技術のシステムにおいて公知なビームスプリッタの構成を示す図

【図9】図4に示すようなシステムで使用可能な偏光非依存ビームスプリッタを示す図

【図10】図9に示すようなシステムに関して、偏光回転子が有る場合と無い場合の、反射率対入力偏光角度を示すグラフ

【図11】登録マークが付加されたオーバーレイマスクを含む、複合表面を有する工作物の一部を示す図

【図12】図に示すリブ(rib)の機尾(aft)側、髭(beard)側、及び、前方側のプロセス領域におけるレーザパルスの長方形又は正方形の衝撃領域の配列からなるパターンを示

10

20

30

40

50

す図

【図 1 3】ここで述べたようなビーム供給光学装置を較正するために用いられるコンピュータシステムのユーザインターフェースのイメージ

【図 1 4】複合表面を有する工作物上で図 1 2 と同様のパターンを生成するビーム供給光学装置を較正するプロセスのジオメトリを示す図

【図 1 5】光学部品を制御する為の較正パラメータの生成に使用可能な、ここに述べるようなビーム供給システム上の光学部品の位置と工作物上のプロセス領域の空間的關係を示す図

【図 1 6】ここに述べるビーム供給技術を用いたレーザピーニングプロセスの簡略化したフローチャート

【図 1 7】反射鏡を含む、他のシステムの簡略図

【発明を実施するための形態】

【0022】

図 1 から図 1 6 を夫々参照しつつ、本発明の実施形態の詳細について説明する。

【0023】

レーザピーニング時のロボットの動きを最小限に抑える移動式ビーム供給システムについて述べる。この移動式ビームシステムは、これらに限定はされないが、レーザコーティング除去、レーザ熱処理、及び、レーザピーニングを含む広範囲の製造プロセスにおいて使用可能なツールを提供する。

【0024】

ここで述べる実施形態に代表されるような移動式ビーム供給システムを用いることによって、以下のことが可能となる。単一のスティンガー／ロボット位置から、複合表面を有する工作物全体に対して、レーザピーニングパターンのかなりの部分を適用することができる。正方形（或いは低アスペクト比の長方形）の衝撃領域を、公知の複雑な形状の処理面上のプロセス領域に配置するために、レーザスポットサイズ、スポット回転、アスペクト比、及び、分散を訂正する。レーザスポット毎のロボットの動きを、高速な光学調節及びジンバルミラービームスキャンで置き換えることによって、レーザ繰り返し周波数を増加させることができる。実際のレーザビーム（トレーサ）を用いる正確なパターン登録方法を組み込むことができ、数分で完了させることができる。固定された位置から（或いは単純なリニアステージ上で）スティンガーを操作することができ、場合によってはロボットの操縦者が不要になる。工作物での偏光制御が連続的に調節可能となる。スティンガー診断において、偏光解消の訂正を行うことができ、エネルギー調整及び近視野での結像を改善できる。トレーサビーム検知システム及びエネルギーメータシステムにおける光学ゴーストの数を減らすことができる。スティンガー組立部品の全体の重量を減らすことができ、ビーム整形光学部品を外部の汚染に対して密封することができる。

【0025】

図 2 は、レーザピーニングシステムの概略図である。この図は、実際のシステムの比例尺の設計図を表しているのではなく、基本的な部品とそれらの配置を図解している。図 2 のシステムは、参照によってここに援用される米国特許第 7,718,921 号に記載されているようなマスタオスシレータ／パワーアンプ構成、或いは、その他のレーザエネルギーソース内にレーザ 100 を備え、好ましいシステムにおいて偏光した単一の周波数の出力パルスを提供する。レーザ 100 は、安定したレーザテーブル 101 上に設置されている。レーザエネルギーソースからの出力は、入力光学装置 102 に入力される。入力光学装置 102 は、ビームがリレー望遠鏡 103 を経て、伝送ミラージンバル 105 上に搭載された伝送ミラー 105A に供給されるようビームを調整するための部品を備える。他の光学伝送部品も同様に用いることができる。正確に制御された伝送ミラー 105A は、同様に正確な制御下で操作されたスティンガー上の受光ミラージンバル 106 に搭載された受光ミラー 106A（或いは他の光学装置）に向けてビームを反射する。受光ミラージンバル 106 上の受光ミラー 106A は、ロボット搭載スティンガー 107 の一部であり、同様にロボット 108 によって位置決めされる。ロボット 108 は、例えば、7 軸の

10

20

30

40

50

正確な位置制御を有する精密ロボットとすることができる。スティンガー 107 は、ビーム整形及び診断部品を封止された筐体内に備える。ビームはこの筐体を通してスキャナに向けられ、この例では、スティンガー上の正確に制御されたジンバル 117 に搭載された、ビームを工作物 109 の表面上のターゲット位置に向けるための（ミラー等の）スキャナ光学装置 117 A によって実現される。本実施形態では、工作物 109 は、航空機の翼或いは他の大型の機械等の大型の製品の部分であり、複合表面を備えるプロセス領域を含む。ロボット 108 は、例えば、工作物の操作範囲内に配置されるように、空気ベアリングを備えた可搬パレット上に搭載される。或いは、工作物は、回転可能部品ホルダー上に搭載されるか、或いは、加工のためにロボット 108 の付近に配置される。ここで述べる各実施形態のスティンガー 107 は、スティンガー 107 は固定されたまま、位置の配列に対してレーザパルスを向けるのを補助するラスタ光学装置を備える。レーザパルスをターゲットに当てる際のスティンガーの位置決めは、実現可能な出力方向の範囲次第で容易になる。設定によっては、ここで述べる構成のスティンガーは、所定の領域におけるスティンガー 107 の動きをサポートするため、7 軸の運動を可能とする複雑なロボットではなく、垂直運動機構有り又は無しの X - Y ステージ上に搭載することができる。特定の設定に合わせて、レーザシステム伝送光学装置に対する正確な配置座標を維持するためのスティンガーのマウントとして機能する、他のスティンガー配置システムを配置することもできる。

【0026】

水供給ロボット 111 も同様に工作物 109 付近に配置され、レーザピーニング用途で充填する流体供給用の容器 111 A を備える。当該技術の各実施形態のロボット 111 は、必要に応じて、レーザピーニング処理で用いられる（例えばレニショー式型の）座標測定用タッチプローブの配置を制御することも可能である。水供給ロボット 111 は、透明充填層を処理対象部品の表面に供給するために用いられる。水供給容器をロボット搭載スティンガー 107 と共にロボット 108 に統合してシステムを構成することも可能である。

【0027】

本実施例における制御システムは、ロボット 111 のコントローラ 112、ロボット 108 のコントローラ 113、及び、各ロボット、ビーム供給システムとレーザ 100 の調整可能な部品、及び、その他制御可能な部品とを連携して動作させるコントローラ 114 として構成された複数のコンピュータを備える。前記制御システムは、1 又は複数のプログラムによって制御されるプロセッサを用いて実現できる。この 1 又は複数のプログラムには、数的な制御プログラムとロボットの較正及び配置、工作物の 3D コンピュータ支援の設計 CAD モデルに基づいた光学部品の較正及び制御、及び、ロボットの空間配置等のための他のプログラムが含まれる。

【0028】

入力光学装置 102 からターゲットの工作物までの基本的な光学経路は、本実施形態では、3 つの主な方向の変化により理解され、これらの全ては、高速かつ高分解能のジンバルを用いて制御される。光学経路には伝送ミラー 105 A 及び受光ミラー 106 A の間に区間 120 がある。この区間 120 は基本的に直線であり、空气中を変更可能な長さで、伝送ミラージンバルの角度設定によって定義される変更可能な方向に延伸している。区間 120 の長さは、スティンガー 107 の位置決めに基づいてロボット 108 によって制御される。同様に、区間 102 の方向は、スティンガー 107 の配置に基づいてジンバル 105、106 によって設定される。図示されている実施形態では、区間 120 は、管のような物に囲まれずに自由空間中に延伸している。他の実施形態として、十分に調節が可能であれば、伸縮可能な管やその他の囲いを用いることも可能である。光学経路は、また、スティンガー 107 の筐体内のビーム整形及び診断部品を介して、受光装置 106 A からスキャナ光学装置 117 A に至る第 2 区間 121 を備える。前記光学経路は、スキャナ光学装置 117 A からターゲット表面に至る最終区間 122 を備える。カメラ等のイメージセンサ 125 は、スキャナ光学装置に隣接して搭載されており、光学部品の所定の設定

によってヒットされる衝撃領域の位置付近のターゲットのイメージを提供するように配置されている。センサ 1 2 5 は、以下で述べる複雑なターゲット表面用のシステムの較正に用いることができる。

【 0 0 2 9 】

加工チャンバーは、技術者用の入口、部品ホルダーへのアクセス用入口、レーザ放射を行うためのシャッターを備えて実現される。加工チャンバーによって、ロボット 1 0 8 を操作するための制御環境の構築が可能となる。加工チャンバーは、土台又は移動可能な厚板等の基台の上に搭載可能であり、伝送ミラージンバル 1 0 5、ロボット搭載ステインガー 1 0 7 を備えるロボット 1 0 8、ロボット 1 1 1、及び、部品ホルダーは全て、基台の上に、固定された空間関係で搭載されている。レーザ 1 0 0 と入力光学装置 1 0 2 は、別々の台に備えられており、加工チャンバーと密接に連携させることが可能である。入力光学装置 1 0 2 の望遠鏡は、加工チャンバーの隣接領域における空間的制限から必要であれば、レーザテーブル 1 0 1 と加工チャンバーの間に、数百フィートのビーム伝播を提供するように構成することが可能である。

【 0 0 3 0 】

図 4 は、二重ジンバルステインガー (D G S) の基本的な構成を示している。上記の移動式ビームシステムと同様に、二重ジンバルステインガーは、伝送ジンバルを用いて、高エネルギーレーザビームを、自由空気経路を越えて、加工ロボットに保持されているステインガー上の受光ジンバルに供給する。閉ループ制御システムは、高エネルギーのパルスビームと互いに正確にアライメントされた低出力の連続波 (C W) トレーサビームを用いて、ステインガーを介した正確なアライメントを維持する。図 4 に示すように、D G S によって、ステインガーの出力上に第 2 ジンバルが追加され、これにより、固定されたステインガー位置から処理面へビームのスキャンが可能になる。ステインガーに含まれる整形光学装置は、ビームの分散、ビームの形状、偏光を訂正し、工作物上に正方形のスポットの均一なパターンを実現する。D G S には、ビームプロファイルとレーザパルスエネルギーを測定するための診断センサーも含まれる。

【 0 0 3 1 】

D G S を保持する加工ロボットは、空気ベアリングを備えたパレット上に搭載されているため、必要に応じて、作業セル内の異なる位置に容易に移動させることができる。上述した通り、他の D G S を搭載した技術も同様に使用することができる。

【 0 0 3 2 】

図 3 は、同図中 M 5 5 で示された伝送ミラーに至るまでの入力光学装置に関するレイアウトを示している。当該伝送ミラーは、図 2 の伝送ミラー 1 0 5 A に対応している。レーザソース 3 0 0 は、光学経路の第 1 区間を定義する線 3 0 1 上に出力ビームを提供する。この出力ビームは、断面が正方形であり、偏光されている。ミラー M 5 0 は、光学経路の第 2 区間を定義する線 3 0 2 上のビームを反射して、アライメントレーザ A L 5 0、半波長板 W P 5 0、レンズ L 5 0、偏光子 P 5 0、レンズ L 5 1、カメラ C 5 0 を備えるアライメント光学装置を活性化させる。偏光子 P 5 0 を経て伝播するビームは、線 3 0 3 に沿った光学経路の第 3 区間上を、波長板 W P 5 1 を経て、ミラー M 5 1、ミラー M 5 2、ミラー M 5 3 を備えるフィールド回転子光学装置まで進む。ミラー M 5 3 から、回転したビームは、線 3 0 4 上の光学経路の第 4 区間上を、ミラー M 5 4 まで伝播する。ミラー M 5 4 は、ジンバル搭載の伝送ミラー M 5 5 までの線 3 0 5 に沿った光学経路の第 5 区間上で、ビームを、レンズ L 5 2 及び L 5 3 を備えるビーム搬送望遠鏡 (リレー望遠鏡とも呼ばれる) に向ける。窓 W 5 0 及び W 5 1 は、望遠鏡に対して、ビームが焦点を經過もたらされる真空室 (図示せず) の入出力を定義している。伝送ミラー M 5 5 は、線 3 0 6 上の光学経路の第 6 区間に沿った可変の角度でビームを向け、当該ビームは、可変長の空気を経て、上述のロボット搭載ステインガー上の受光ミラーに向けられる。

【 0 0 3 3 】

一実施形態において、アライメントレーザ A L 5 0 は、アライメントが正確であるかを検証し、レーザショット間のアライメントのフィードバック調整を可能とし、更に、以下

で説明する較正工程のための連続波（CW、すなわちパルス無しの）レーザを備える。このレーザの出力は、トレーサビームと称される。一実施形態において、アライメントレーザAL50は比較的出力パワーの低い（500mW未満）ダイオード励起Nd：YLFレーザを備える。アライメントレーザAL50は、ピーニングレーザソース300と同じ或いは類似の波長であるか、もしくは、光学装置の全てを通過するアライメントビームの反射特性と集光特性を高出力ビームのアライメントに確実に用いることができるように構成されている。

【0034】

アライメントレーザAL50（500mW未満）から分散する出力はレンズL50によって平行化され、偏光ビームスプリッタP50において高出力ビーム経路と結合される。1/2波長板WP50を用いて、アライメントレーザがビーム線303上の偏光子で反射するように、アライメントレーザの偏光をS偏光に設定する。P偏光で伝送された高出力ビームのごく一部は偏光子P50で反射され、アライメントビームのごく一部は偏光子P50を経てカメラC50に伝送される。診断カメラC50はアライメントビームと高出力ビームの位置を検知し、相互の正確なアライメントを行うためにフィードバックを提供する。カメラは、レンズL51の焦点に配置する。偏光子P50の表面から僅かに反射された高い出力のビームの遠視野（焦点）が、偏光子P50を透過する一部のアライメントビームの焦点と正確に重なると、相互のアライメントが確認される。波長板WP50は、偏光子P50を透過するアライメントビームの透過率を調節するように回転が可能である。

【0035】

図3のビーム経路305が図4のM56とM80間のビーム経路と平行でないことによるビームの断面の回転は、フィールド回転子光学装置において補われる。例えば、レーザピーニングシステムでは、ビーム断面は正方形もしくは長方形が望ましい。ジンバル搭載伝送ミラーM55上の入射ビームと反射ビームを含む平面と、ジンバル搭載受光ミラーM56（ミラーM56は図4に示されている）上の入射ビームと反射ビームを含む平面との間の相対角度に基づいて、正方形のビームはロボット搭載スティンガーの座標に対して回転する。フィールド回転子光学装置は、所望するスポットの配向がターゲット面に伝播されるように、ビーム断面を事前に回転させる。フィールド回転子光学装置は、3つのミラーM51～53から成り、これらのミラーは共通の構造物に堅固に搭載されており、遠隔制御される回転台で入力ビーム軸の周りを回転することが可能である。反射回数が奇数（3）であるため、この3つのミラー部を回転させることによって、正方形のビームは2倍の回転率で回転することになる。例えば、45度でミラー部が回転すると、ビームは90度回転する。正方形のビームの場合、フィールド回転子を±22.5度回転することによって、全てのビームを所望する配向にすることができる。フィールド回転には、他の構成の光学装置を用いても構わない。フィールド回転素子は比較的大きい為、ロボット上のスティンガーに搭載するのではなく、入力光学装置に搭載するのが望ましい。しかし、他の実施形態では、フィールド回転素子をビーム線上の他の位置に配置することも可能である。

【0036】

図4のビームスプリッタWS58及びWS68からの光学的損失を最小限に抑えるため、DGSに入力されるビームはP偏光していることが望ましい。図3の偏光回転子WP51は、光学システムにおけるその時点での正方形のビームの配向に関わらず、WS58におけるP偏光を維持するためのフィールド回転角度とは独立して、ビーム偏光角度を調節するために用いられる。

【0037】

レンズL52及びL53から成る輸送望遠鏡は、正方形ビームを拡大し、自由伝播経路を通じてロボット搭載スティンガーを備える加工ヘッドへ光学像をリレーする。一実施形態においては、この望遠鏡を介してビームは23mm角の公称寸法から32.5mm角に、約1.4倍に拡大される。この望遠鏡には3つの機能がある。1つ目は、伝送ミラー及び受光ミラーでビーム面積を2倍増加させる機能で、これにより光学破損の危険性が減少

する。2つ目は、望遠鏡のリレー距離を倍率の2乗で増加させて(すなわち2倍)、離れた処理平面に明確なビーム画像を提供することができる機能である。3つ目は、ビームを拡大することによって、(共焦点パラメータの2倍として定義される)レイリー範囲を、倍率の1.4倍の2倍に増加させる機能で、これによりビームの自由空気伝播特性が向上する。加工ヘッドの光学リレー望遠鏡とビーム供給望遠鏡が単一の伝播距離に最適化されるため、この第3の機能は重要である。しかし、加工ヘッドは ± 45 度の範囲の加工立体角で操作されるため、ジンバル間の実際の伝播距離は ± 1 m分まで変化し得る。この変化は、図2に示した、巨大な部品を本来の場所でレーザーピーニングを行う構成にした場合よりもずっと大きくなる可能性がある。

【0038】

本システムの一実施形態では、伝送ジンバルと受光ジンバルは設計、仕様ともに同じである。代表的なシステムでは、各軸のモーターは、 $25 \mu\text{rad}$ (5.2 arcsec)の分解能、 $50 \mu\text{rad}$ (10.3 arcsec)の再現性、及び、 $100 \mu\text{rad}$ (20.6 arcsec)の絶対精度を有する。これらの仕様は、実際の反射されたビームに対する値で、ミラー角度に対する値は、ミラーの方向にもよるが、これらの半分である。代表的な実施例では、伝送ミラーと受光ミラーの直径は4インチであり、 $15 \sim 55$ 度の範囲の入射角に対してビームを効果的に反射する高損傷閾値コーティングを有する。

【0039】

図4は、支持構造50上に搭載されたDGS内の光学部品とビーム経路の概略図である。支持構造50は、正確な方向でロボットに同様に搭載されている。入射するレーザービームは、図の下部に示されている受光ジンバルミラーM56から反射される。DGSの筐体の入力上の保護窓W57と出力上の保護窓W39は、光学部品にとって密封された清潔な環境を生み出す。制御システムは、入射するビームについて、第1のコーティングされていないビームスプリッタWS58からの反射が0.6%となるように、P偏光を常に維持する。反射されたビームは、90度の石英回転子WP59によってS偏光に回転され、その8%が校正されたエネルギーメータEM61に向けられた次のビームスプリッタWS60で反射される。エネルギーメータEM61は、焦電センサか、他のタイプのエネルギー又はパワーセンサを備えることができる。エネルギーメータスプリッタWS60を通過したビームは、エネルギーメータスプリッタWS60によるオフセット角、ビーム変位 (beam displacement)、ビーム形状の変化を相殺する光学くさびを有する別の補償スプリッタWS62を通過する。次に、ビームは、別のビームスプリッタWS63によって、間にビームスプリッタWS66を挟むレンズL64及びL65を備える診断望遠鏡に反射される。診断望遠鏡は、ほぼレーザーシステムの出力開口にある画像面から、ビームプロファイルを記録するビームプロファイルカメラC67に、ビームの画像を向ける。

【0040】

高エネルギービームスプリッタWS58を通過した後、次に、主要なビームは、トレーサビームスプリッタWS68に到達する。このスプリッタWS68は、高エネルギービームスプリッタWS58からのオフセット角、ビーム変位、ビーム形状の変化を相殺する光学くさびを有する。トレーサビームスプリッタWS68の第1面は、高エネルギーパルスビームの0.3%未満を反射するが、S偏光したトレーサビームの16%を反射する。サンプルされたビームは、別のビームスプリッタWS69によって、間にビームスプリッタWS73を挟んでレンズL70及びL71を備え、更に2つのカメラを備える診断望遠鏡に向けられる。2つのカメラとは、ビームスプリッタWS73で反射されるビームの経路内にあるトレーサビームポインティングカメラC74と、出力レンズL71の焦点にあるトレーサビームセンタリングカメラC84である。センタリングカメラC84は、受光ジンバルミラーM56の表面上のトレーサビームの像を記録し、ポインティングカメラは、望遠鏡入力レンズL70の焦点(遠視野)の像を見ることで、ビームの指している方向を測定する。これら2つのカメラC74及びC84からの情報は、伝送ジンバル及び受光ジンバルの能動的制御によってスティングアーを介したビームのアライメントの維持に使用される。この望遠鏡に内蔵された高速シャッターS72は、各高エネルギーレーザーパルス(

10

20

30

40

50

の印加)時にこれらのカメラを保護するために使用される。

【0041】

トレーサビームスプリッタW S 6 8の後、高エネルギービームは、正確に制御された1/2波長板W P 7 5を通過する。1/2波長板W P 7 5は、P偏光されたビームを、工作物の表面の軸外ピーニングに最適な有効性を提供するために必要とされる偏光が如何なるものであろうと、当該必要とされる偏光状態に回転させるために用いられる。次の部品であるストークスのレンズペアS P 7 6は、屈折力が等しいが逆の2つの円筒状のレンズからなる。これらの円筒の曲面が回転対称にアライメントされている場合、これらは相殺され、伝送されたビームに変化は起こらない。しかし、1つのレンズが他方に対して回転している場合、ビームは1つの軸で発散し、他方に収束する。このアナモフィックな屈折力を、出力ビームに対して任意の方向に向かせるために、両レンズは一對として回転させることができ、これによって、工作物の表面上のビームのアスペクト比が訂正される。

10

【0042】

D G Sの最後のレンズは、ズーム望遠鏡を構成するネガティブレンズL 7 7とポジティブレンズL 7 8である。ネガティブレンズL 7 7は、レンズ間の間隔を変更するために光学伝播軸に沿って移動させることが可能である。これにより、スティンガーから出射されるビームの分散角が変更され、ターゲット上のスポットサイズが効果的に変更される。D G Sの最後の能動部品は、レーザピーニングされる部品の表面に向けて出力ビームをスキャンする、ラストジンバルミラーM 8 0である。最後に、較正用カメラC 8 1が組立部品上に搭載されており、トレーサビーム又は作業ビームの位置の工作物の像を提供するように配置されている。較正用カメラC 8 1は、独自のパン/チルトマウント、及び、ズーム/フォーカス制御を有し、トレーサビーム又は作業ビームの位置の工作物の近赤外像を提供するように配置されている。

20

【0043】

図4に示された光学部品は、二重ジンバルスティンガー(D G S)と称される組立部品に搭載されている。二重ジンバルスティンガーは、能動的に調節可能な光学装置を組み込んだ、ビームスキャン機能及びビーム整形機能を追加する。スティンガー上の能動的なビーム整形部品には、ビームの出力の分散をスポット毎に能動的に調節するズーム望遠鏡L 7 7/L 7 9、アスペクト比の制御に対して大きな調節範囲を提供する、屈折力は等しいが逆の1対の円筒状のレンズ(ストークス・ペアS P 7 6と称する)、及び、スティンガーからの偏光を任意の角度に回転させることのできる、回転可能な1/2波長(1/2)板W P 7 5或いはその他の偏光コントローラがある。

30

【0044】

二重スティンガー設計に伴う懸念の一つは重さである。以前の移動式ビームシステムと比べて、第2ジンバル、波長板用の電動駆動部、ストークス・ペア、及び、ズーム望遠鏡が追加されているため、かなりの量の付加質量が追加される。これに対処するために、支持構造50用の主な構造材料として炭素繊維複合材を用いた。

【0045】

ビーム形状を訂正することによって、固定されたスキャンミラー位置から複雑なパターンのスポットを供給することが可能となるが、このビーム形状の訂正は、個々のレーザパルスに対して行う必要がある。組立装置上の能動的な光学部品は、動的な調節を行うために、正確に移動させなければならない。上述したように、受光ジンバルミラーM 5 6は、受光ジンバル方位軸及び受光ジンバル仰角軸に関する較正パラメータに基づいて正確な制御を有するジンバル上に搭載されている。受光ジンバルは、閉ループ制御下にあり、スティンガー上の光学装置を介して正確に向けられるビームを維持する。ビームのアライメントは、各ショットについて検証され、(必要に応じて)訂正される。精密回転台は、較正されたパラメータに基づき、1/2波長板W P 7 5(偏光回転子)の調整に使用される。ストークス・ペアを構成する2つの円筒状のレンズは、これも、較正されたパラメータに基づき、アスペクト比の調節に使用される独立した精密回転台によって調節される。ズーム望遠鏡上の入力レンズL 7 7は、200mmの高速リニア台上に搭載され、この高速リ

40

50

ニア台は、ターゲット上のスポットサイズを制御するためにズーム望遠鏡からの出力ビームの分散を調節するために用いられる。最後に、ラストジンバルミラー M 8 0 は、正確な制御が可能なスキャナミラーの方位角軸及びスキャナミラーの仰角軸を有する出力ラストジンバル上に搭載され、較正されたパラメータに基づき工作物の表面上の各スポットにレーザービームを当てる。

【 0 0 4 6 】

【表 1】

代表的な光学部品の説明

項目 #	説明
M56	4インチジンバルミラー35~55°
W57	5インチ保護ウィンドウ
WS58	4x3インチくさび型スプリッタ
WS68	4x3インチくさび型スプリッタ
WP69	3インチ1/2波長板
SP76	(第1レンズ)3インチネガティブ円筒形レンズ
SP76	(第2レンズ)3インチポジティブ円筒形レンズ
L77	3インチネガティブズームレンズ
L78	4インチポジティブズームレンズ
W79	5インチ保護ウィンドウ
M80	4インチジンバルミラー15~42°
WP59	3インチ90° 石英回転子
EM61	焦電エネルギーメータ
WS62	4x3インチくさび型スプリッタ
WS63	4x3インチくさび型スプリッタ
WS69	4x3インチくさび型スプリッタ
L64	(第1レンズ)3インチ診断ダブレットレンズ1
L64	(第2レンズ)3インチ診断ダブレットレンズ2
S72	高速シャッター
WS73	1. 5インチ角のスプリッタ
C74	CCDカメラ
L71	1インチ診断平行レンズ
C84	デジタルカメラ
WS63	4x3インチくさび型スプリッタ
L64	(第1レンズ)3インチ診断ダブレットレンズ1
L64	(第2レンズ)3インチ 診断ダブレットレンズ2
WS66	1. 5インチ角のスプリッタ
L65	1インチ診断平行レンズ
C67	デジタルカメラ
C81	デジタルカメラ

10

20

30

【 0 0 4 7 】

本 D G S 光学システムは、衝撃領域において 3 ~ 5 mm の範囲の正方形のスポットサイズをサポートするように設計した。しかし、当然、更に大きいスポットでも、良好なスポット形状の制御が可能であることが期待される。他のスポットの仕様に関しては勿論のこと、スティングアーの異なる実施形態についても、異なる光学部品が使用可能である。

【 0 0 4 8 】

図 5 は、通常の入射におけるターゲット上の 3 mm 角の正方形のスポットに関して 3 つの異なる動作点 (L 7 7 - a 、 L 7 7 - b 、 L 7 7 - c) において、ネガティブレンズ素子 L 7 7 を備えたズーム望遠鏡システムを示している。動作点 L 7 7 - a から L 7 7 - c まで、ネガティブレンズ L 7 7 の 1 0 0 mm の移動によって、ネガティブレンズ L 7 7 とポジティブレンズ L 7 8 間のビームの分散を変化させることができ、 3 mm の像となるポイントが、最後のラストジンバルミラー M 8 0 から 4 2 インチの距離から、 6 2 インチの距離に移動する。

40

【 0 0 4 9 】

ここでは、ズーム望遠鏡の実施例を用いてレーザーピーニング処理面が、公称画像面が 5 4 インチ (1 3 7 0 mm) に位置する場合に、 3 mm のスポットに関して 4 8 . 5 インチから 6 2 . 5 インチ (1 2 3 0 ~ 1 5 9 0 mm) の間で調節可能である。 5 mm スポット

50

については、スタンドオフ範囲は、46.5インチから59.5インチ(1180~1510mm)である。

【0050】

ズーム望遠鏡に関する動作範囲は、トランスレーション台により実現可能な経路長変化に依存する。代表的な例においては、ネガティブレンズに搭載されたりニア台は、合計で200mmの経路長の変更が可能である。しかし、100mmの調節を超える動作は、スポット形状が、理想的な正方形から劣化してしまう虞がある。この劣化は主に、糸巻き型の歪みのレベルが増加することによって特徴付けられる。図6(a)~6(c)は、画像システムを不連続に光線追跡した分析の結果を示しており、スポット品質の変化をズームレンズ位置の関数として示している(図6(a)-樽型歪み、図6(b)-歪み無し、図6(c)-糸巻き型歪み)。±4%のスポット形状の歪み(樽型歪みから針刺し型歪み)の限界が、適切な設計目標である。より複雑なレンズ設計、特に、追加の移動素子を取り入れたものを用いれば、正方形のスポットの画像性能を改善することは可能であると考えられる。しかし、高エネルギーで高出力のレーザービームと共に使用する光学システムの設計を成功させることは、反射防止コートされたレンズ面から生じる弱い反射があるため、非常に厳しい。こうした意図しない、発散或いは収束した反射したビーム(一般にゴーストと呼ばれる)は、一連の光学部品(optical train)の他の部分に焦点が合い、多くの場合、レーザー供給システムの全く異なる部分に光学損傷を引き起こす虞がある。最適な設計とは、多数の第1及び第2反射の管理及び方向付けが十分にできる程度にシンプルで、システム内の他の光学部品の不具合を防ぐものでなければならない。当然、新たな表面損失が生じると、ビーム経路全体の透過も低下し、ターゲット上に同じエネルギーを生成するために、レーザーがより高い出力エネルギーで操作されることが求められる。最後に設計で検討すべきことは、画像システムがより複雑でより正確になると、通常、介在するレンズ部品上のスポットサイズは、入力ビームサイズよりもかなり小さくなるということである。これもまた、起こり得る高いレーザー出力密度による光学損傷から保護するために避けなければならない。

【0051】

図7は、石英や水等の材料への入射角に対する反射率を示すグラフで、実線はP偏光したビームの反射率を、破線はS偏光したビームの反射率を示している。レーザーピーニング動作において、水等の充填流体は、工作物の表面全体を薄膜として流れる。水からのレーザーパルスの反射率は、レーザーピーニングに必要な衝撃波を引き起こすのに利用されるエネルギーを減少させる。上述したように、ここでは、システムはアクティブビーム整形を提供し、複合表面を備えた工作物に対してパルスを印加するために設計されている。したがって、所定のプロセス領域内において、個々のスポットに関する衝撃領域は、角度が60度以上にわたって変化する面上にあることができるが、ある例では90度以上も変化する面上にあり、単一のプロセス領域内のパルスの入射角に著しい差が生じる。

【0052】

システムにおけるレーザーパルスは偏光しているため、入射角の変化が反射率の実質的な差を引き起こす。水を例にとると、約30度の入射角は、S偏光ビームとP偏光ビームの反射率に実質的な差を生じさせる。スティンガーの偏光回転子WP75によって、衝撃面に対してほぼP偏光となるように偏光をアライメントするために、偏光をスポット毎に個別に設定することが可能となる。当該偏光は、レーザーパルス毎に、衝撃領域に対して公称表面の法線ベクトルを数値的に決定し、偏光回転子WP75によって、当該公称表面の法線ベクトルに対してP偏光に合致する偏光を設定することによって定義できる。これらの偏光の値は、後述する較正段階における3Dモデリングを用いて較正することが可能である。

【0053】

上述したように、スティンガーは、一方のポジティブレンズと他方のネガティブレンズからなる整合した円筒状の一組のレンズからなるストークス・ペアSP76を備える。このストークス・ペアレンズは、それらの軸が揃っている場合は屈折力を持たない。しかし

、これらが反対の方向に回転させられると、円筒状の屈折力が、ビーム経路 (beam train) に導入される。ポジティブ円筒波面は一方の軸に導入され、ネガティブ円筒波面は他方の軸に導入される。これにより、ターゲット上のビームがある方向において縮小し、他方の方向では拡大する。軸外ピーニングでは多くの場合、ゼロでない入射角を補償するために、1つの軸のみに沿ってスポットを縮小することが目標となる。このため、補正には、長い方の軸が一定の長さで維持されるように、全体のスポットサイズを縮小するために、ズーム望遠鏡のレンズの間隔に対する調節も必要である。

【0054】

スポット形状を補正する工程は、スポットの一次元 (直角) に平行な軸に沿った補正に関しては最も容易に視覚化される。しかし、アナモフィックな補正は、入射する正方形のレーザビームに対して如何なる角度にも回転させることができるため、複合曲率を持つ表面形状を正方形のスポットで埋めることができる。フィールド回転子 (図3のM52~M53) は、スポットに必要なフィールド回転を提供するために用いられる。

【0055】

一般に、高エネルギーレーザシステムを用いる用途では、パルスエネルギー、パルス幅、及び、ビームプロファイル等のビーム特性を監視する必要がある。これは、ビームスプリッタを用いたビームの弱いサンプルを採取すること、或いは、高反射率のミラーコーティングの低レベルな透過を監視することによって行うことができる。ビームスプリッタ用の光学コーティングは、高エネルギービームのごく一部を反射するように設計することができる。或いは、ミラー用には、高エネルギービームのごく一部を透過するように設計することもできる。しかしながら、メインとなるビームのエネルギー又は出力を監視する目的で、非常に安定した、較正済みのサンプルが必要な場合は、これらの方法のどちらにも問題がある。高損傷閾値誘電体光学コーティングの正確な反射率は、温度、湿度等の環境条件の関数となることが多く、角度に対して非常に左右される。例えば、高品質なミラーコーティングは、99.5%の反射率を有する。もし仮に、環境条件、損傷、或いは高出力レーザビームからの熱が原因で、反射率が99.4%に落ちたとしても、それは非常に良いミラーであることには変わりがない。しかし、光学制御システムが0.5%の透過ビームに依存してメインビームのエネルギーを判定すると、この0.1%の変化が20%という容認し難い大きな較正誤差を引き起こすことになる。同様の事が、反射防止 (A/R) コーティングから反射したビームの使用に対しても言える。

【0056】

上記の光学コーティングからの透過又は反射の較正による落とし穴を避けるために、レーザ及びビーム供給システムは、コーティングされていない光学面のみを用いて高出力ビームをサンプリングする。これらの面からの反射率は、レーザ波長における光学基板 (ガラス) の屈折率、入射角、ビーム偏光によって決まる。最初の2つのパラメータは容易に制御され、レーザ設計の出力に関して、偏光は非常に安定している。図8は、P偏光ビームに対して45度の入射角で方向付けられた溶融石英くさび351を用いたビームスプリッタを示している。くさび351に関して、合計の透過率98.8%に対し、スプリッタの各面からの反射率 (フレネルの反射率と呼ばれる) はわずか0.6%である。典型的には、ビームスプリッタは0.5~1.0度のくさびを備えて作製されており、これにより、前後の光学面からビームを空間的に分離させ、サンプリング率を変化させる虞のある光学干渉効果を抑制する。線355上の第1面の反射は、較正されたエネルギーの測定に使用される。典型的なA/Rコーティングは、この場合のコーティングされていない面の0.6%を大きく下回らない程度の反射率となることが多いが、くさび351の第2面は、メインビームに対する全体の挿入損失を減らすために反射防止コーティングを施される場合もある。レーザピーニングに使用されるレーザシステムからの15~20Jのパルスの内0.6%である反射された成分は、典型的な焦電エネルギーメータにとってやはりエネルギーが強すぎるため、通常、図8に示すように、サンプリングされたビームを更に弱めるために、第1くさび351の後に第2くさび350を設置する。

【0057】

図 8 に示すこのコーティングされていないビームスプリッタ方法は、レーザシステムの十分に偏光された出力には効果があるが、可動式のビームスティングー上のエネルギー測定システムとして設置された場合にはあまり効果がない。レーザシステムからの正方形のビーム（及びその偏光）は、スティングー内、及び、工作物の表面上で正しく方向付けされたスポットとなるように、レーザの出力において異なる方向に回転されなければならない。誘電体光学コーティングされたミラーでレーザビームが反射する時、偏光の方向が純粋な S 又は P 偏光である限り、すなわち、入射面に対して平行又は垂直である限り、偏光は全く変わらない。しかし、ビームが非直交性の偏光を有する場合、僅かな偏光解消の誤差によって、ビーム偏光の僅かな変化、及び、偏光コントラストの低下を生むことになる。任意の方向に向けられたビームがレーザシステムの出力と可動式ビームスティングー間の様々なミラーで反射するにつれて、こうした偏光解消の誤差は蓄積される。誤差の合計は、軸外レーザピーニングの性能を低下させる程ではないが、図 8 に示す二重ビームスプリッタペアに対する反射率に重大な変化をもたらす虞がある。例えば、偏光解消状態が表面の反射率を 0.25% 変化させただけでも、2つのビームスプリッタの反射の後の光のレベルが2倍増加することになる。これは、ターゲット面に供給されるエネルギー及び偏光においてはほとんど取るに足らない変化（偏光においては、数度の回転）であるが、測定されるエネルギーにおいては2倍の誤差が生じる。

【0058】

偏光の誤差に左右されないビームスプリッタシステムを図 9 に示す。また、それをスティングーにおいて実施した図を図 4 に示す。図 9 のシステムでは、2つのコーティングされていないビームスプリッタ 401 及び 400 が、間に 90 度の回転子 402 を挟んで配置されている。結果として、経路 405 上の分割されたビームは、偏光誤差に対して完全に左右されなくなっている。図 9 に示す例では、ビームスプリッタくさび 401 は、高エネルギーレーザビームの経路 420 に配置されている。ビームのサンプルは、経路 404 上のスプリッタくさび 401 の入力面で反射する。経路 404 上のサンプルは、経路 420 上のレーザエネルギーの 2つの直交する偏光状態（すなわち S 偏光及び P 偏光）からなる成分を含み、それらの相対的な大きさは、上述したように入力された偏光によって決まる。石英回転子 402 は、経路 404 上の透過ビームの両成分の偏光を、ビームの偏光状態に関わらず、一定の角度（この場合は 90 度）で回転させる。回転後、線 404 からのビームのサンプルは経路 405 上のスプリッタくさび 400 の入力面で反射する。2つのビームスプリッタくさび 401 及び 400 は、ビーム経路 420 及び 404 夫々に合った入射角（例えば 45 度）を持つように配置されている。しかし、2つのビームスプリッタの夫々における角度が等しい限り、この設計はどんな入射角にも対応する。偏光の回転及び整合した入射角によって、2つのビームスプリッタ 401 及び 400 の表面の反射率は、2つの直交する偏光状態の反射率の積となり、一定となる。これで、経路 420 上のレーザエネルギーの偏光解消の誤差は、2回の反射を経て経路 405 上に供給されるメインビームのエネルギーの割合には何ら影響を及ぼさず、偏光に依存しない診断ビームが得られる。

【0059】

図 10 は、この偏光非依存を実験的に実演したグラフである。これらの測定に対して 2つのビームスプリッタ構成を用意した。偏光によって引き起こされる反射率の誤差を強調するため、入射角として図 9 に示した 45 度ではなく 72 度を選択した。トレース 450 は、偏光回転子が無い場合の構成についての点を示し、黒塗りの菱形の点は測定値を、実線は完全な 360 度の偏光スキャンに対する反射率の理論上の値を示しており、著しく変動している。ここで注目すべきは、測定された信号が入力された偏光に対して強く依存していることである。トレース 451 は、90 度の石英回転子をスプリッタの間に挿入した後の構成についての点を示しており、白塗りの菱形の点は測定値を示し、破線は完全な 360 度の偏光スキャンに対する反射した割合の理論値を示している。ここに示された非常に急激な偏光の変化に対しても、トレース 451 に見て取れるようにサンプリングされた割合は一定のままである。

【 0 0 6 0 】

上記のビームスプリッタくさびについての説明で指摘した通り、ビームスプリッタの両面から生成される反射ビームが存在するため、これらを分離する必要がある。図9に示すように、経路420上のレーザエネルギーの大半は、スプリッタくさび401の入力面では反射されず、スプリッタを通じて僅かに回折し、経路435上の出力面から出力される。しかし、出力面において、ビームの一部は経路422へ反射される。このビームスプリッタを適用する上で重要なことは、出力面で反射されたビームの部分が、診断部品に供給される、経路404上のビームの部分から分離されることである。この分離は、典型的には、図8と同様にビームスプリッタ内で行われ、前面と裏面の間に光学くさびを導入することで、2つのビームを互いに発散させることができる。これは、0.5度のくさび角度、及び、入力面に反射するビームの発散に対するスプリッタ301の出力面から反射したビームの僅かな発散を参照することで、図8において確認することができる。このくさびのサイズは、透過ビームの屈折による再ポインティング (refractive repointing) を最小限にするため、及び、光学入射面でのビームのサイズの変化を避けるために、通常は小さく設定されている。2つのビーム間の角度が完全に分岐するように2つのビームを十分遠く伝播させることによって、或いは、撮像望遠鏡の焦点における視野絞り (field-stop) を用いることによって、診断装置による使用の目的に応じて2つのビームを分離することができる。これらの方法はどちらも、可動式のビームスティンガー、或いは、その他レーザシステム用のコンパクトな診断装置の用途に適用することは難しい。ここに述べたロボット搭載スティンガーのように、空間の限られた環境では、不要なビームをブロックできる点までビームを十分に発散させるための十分な空間が光学筐体にはない。サンプルビームが、光学的追跡 (optical tracking) のような診断プロセスに用いられるシステムでは、センタリング/ポインティング望遠鏡での視野絞りが、第2のビームをブロックするために用いられることもある。しかし、こうした視野絞りは、光学的追跡時の、軸外のビームの検知を妨げる可能性もある。

【 0 0 6 1 】

図9に示す構成では、不要な裏面のビームスプリッタの反射 (ゴーストと称する) を抑えるために、ここで述べる実施形態では、十分大きくくさび角度が用いられ、ビームスプリッタくさびの第2面から反射された経路422、423上のビームが、内部全反射によって光学素子の内部で捕獲されるようになっている。このためには、内部の光学入射角が全反射の臨界角よりも大きい必要がある。溶融石英基板でレーザ波長が1053nmの場合、この臨界角は43.6度である。図9に示すように、外面上の入射角が45度の場合、これは、ビームスプリッタくさびの角度を7.5度にすることで容易に実現できる。図9に示すように、2つのビームスプリッタを経た後のサンプリングされたビームの数は、図8に示す従来の場合の4つのビームから、図9のくさびを用いることで線405上の1つのクリーンなビームに減少する。内部で反射した光は、スプリッタ内部を跳ね返って、基板の光学的に荒いグラウンドエッジで散乱され失われる。線421及び425上のビームは、望ましいビームサンプルに対して角度が大きいためにブロックすることができる。

【 0 0 6 2 】

上で述べたように、図9のくさび401及びくさび400のようなビームスプリッタくさびは、透過ビームの強い再ポインティングを引き起こし、ビームの幅が減少する (図示したケースの場合、7.5度の再ポインティングと23%の幅の減少が見られる)。しかし、この影響は、図9に示すように、出力ビーム線内に、第1ビームスプリッタくさびとは方向を逆にした第2ビームスプリッタくさび403を設置することによって完全に除去することが可能である。経路435上のレーザエネルギーは、くさび403によって屈折し、経路430上に出力される。これにより、経路420と430が平行になるように元のポインティング方向が回復する。また、第1スプリッタくさび401から正しい距離にスプリッタ403を設置することにより、ビームのずれが解消でき、ビーム経路420及びビーム経路430がアライメントされる。結果として、経路430上の高出力ビームは、経路420上のビームに対して、方向、変位、幅は変化しない。二重ビームスプリッ

タセットの4つのコーティングされていない面によって引き起こされる光学的損失の合計は、P偏光の場合、僅か1.8%である。更に、図4のスティンガーは、第2補償くさび403の第1面を用いて、図4に示すように、センタリングカメラC74及びポインティングカメラC84の方向に、S偏光のトレーサビームの経路424上のサンプルを向ける。

【0063】

図4に示すように、ゴーストの発生しないビームスプリッタを用いて、主要な高エネルギービームからビームサンプルを収集し、第2サンプルを校正されたエネルギーメータに向け、診断撮像望遠鏡の夫々にビームを反射する。したがって、組み合わせとして、偏光非依存のエネルギーメータが提供される。また、偏光非依存の診断システムが提供される。

10

【0064】

二重ジンバルスティンガーを用いることにより、表面全体でレーザビームをスキャンするためにラスタジンバルを用いて、工作物上でスポットパターンの配置を非常に正確にすることが可能である。調節可能な光学装置によって、偏光、スポット方向、サイズ、アスペクト比が訂正される。ラスタジンバルを用いることで、各ショット間で加工ロボットを動かす必要がなくなり、スポット配置の正確性と全体の正確性の両方を向上することが可能である。

【0065】

しかし、これを実現するには、工作物上のパターンを登録し、パルス別の制御のために校正されたパラメータを生成する良い方法が必要となる。上で説明したように、その目的は、スポットパターンを新たな場所に配置する時間を、数日或いは数週間ではなく数分に短縮して、素早く完遂できる方法である。

20

【0066】

このプロセスの第1ステップは、コンピュータ支援設計CADシステムで工作物のソリッドモデルからもたらされるレーザピーニングスポットの望ましいパターンを設計することである。

【0067】

図11に示す航空機部品510のような、複合表面を備える工作物の場合、レーザパルス毎の衝撃領域は、著しく異なる入射角を有することが考えられる。図11に示す工作物は、底面側501と、リブ510が取り付けられた外面502を備える航空機製品の部品である。リブは、下側503、機尾側504、及び、前方側505を有する。非常に高い寸法安定性を有するマイラー(Mylar)等の材料から成るオーバーレイマスク511は、工作物の表面に合うように、また、技術者によって迅速、容易、正確に配置が可能なエッジを備えた構造上に配置される構成となっている。オーバーレイマスク511は、構造物の機尾側の2つの追加されたマークに加えてマーク512、及び、下側の2つの追加されたマークに加えてマーク513等の、複数組の登録マークを有する。

30

【0068】

図12は、リブの面503上の下側パターン553、リブの面504上の機尾パターン554、面505上の前方パターン555からなる、図11の部品の3つのパターンについて、プロセス領域における公称形状及び位置の一例を示している。各スポットは、サイズ、その中心の3次元の位置、表面上のスポット方向を定義する回転ベクトル、空間内の表面の局所的な方向についての情報を含む(公称面法線ベクトルに基づく)法線ベクトルによって定義される衝撃領域を有する。スポットは約4.5mm角の正方形であり、プロセス領域を覆う配列として、プロセスの許容範囲内で、アライメントされ、互いに隣接している。

40

【0069】

ビーム供給システムを工作物に対して校正する方法は、高出力のパルスビームと互いにアライメントされる連続波(CW)赤外トレーサビームに依存する。これは、移動式ビームシステムに対して、伝送ジンバル及び受光ジンバルの閉ループアライメント制御を維持

50

するために使用されるビームと同じビームとなる。一実施形態において、寸法の安定したマイラー製表面オーバレイマスク 5 1 1 は、工作物に適合するように形成され、容易に認識される幾何学的形状（エッジ、角、穴等）により印が付けられた工作物に、手動で適用することができる。当該マスクは、各パターン領域上の図 1 1 に示されるような一組の登録マークを有する。この登録マークは、ターゲットの 3 D ソリッドモデルの対応する位置と相互に関連付けられ、プロセス領域空間の較正に用いられる。マスクのレーザピーニングの実施形態における指針は、工作物上の最もクリティカルで高ストレスな特徴部分に対して、レーザピーニングパターンの正確なアライメント（0 . 5 mm 未満、0 . 0 2 0 インチ）を提供することである。他の例では、工作物自体の特徴（例えば、角、エッジ、穴等）を、較正プロセス用の登録マークとして用いることができる。

10

【 0 0 7 0 】

図 1 1 に示す例として、プロセス領域に対応するアライメントマスク上の各領域は、レーザターゲットとして用いられる 3 つの登録マークを含んでいる。3 つのターゲットの夫々の位置は、図 1 2 に分かり易くするために示されているような、既に生成されたスポットパターンに対して正確に定義されている。パターン較正手順は、例えば 0 . 1 mm の精度で 3 つの登録マークの夫々にトレーサビームをアライメントする工程と、位置毎にラスタジナル M 8 0 に関する方位角及び仰角を記録する工程とから成る。このとき、入力ジナル M 5 6 は固定されたままである。この手順は、図 2 に示すような、スティンガーのラスタエンド上に設けられた遠隔制御されるカメラシステム等のセンサー 1 2 5 を用いて実現される。これは同様に図 4 のカメラ C 8 1 に対応している。センサー 1 2 5 は、照射されたターゲットだけでなく、赤外トレーサビームスポットの鮮明な像も生成しなければならないため、可視光線ブロックフィルターを備えている。これにより、センサー 1 2 5 は、9 4 0 nm の別の拡散赤外光源によって照射される登録マークに対して、高エネルギー加工に使われる 1 0 5 3 nm のレーザ波長で正確に焦点を当てることが可能となる。これらの波長は十分に接近しているため、オペレータは、ビームと登録マークの両方に関して十分に焦点が絞られた像を見ることができる。

20

【 0 0 7 1 】

図 1 3 は、較正プロセス時にオペレータによって用いられ、レーザターゲットの 1 つにアライメントされたトレーサビームの画面イメージを含む、オペレータ用の制御盤のグラフィックインターフェースを簡略化した図である。オペレータは、スポットを登録地点まで移動させるために、ラスタジナルを制御しながら、工作物上に現れる照明を視認する。或いは、オペレータが介入することなく、コンピュータ化されたパターン認識を用いて、各ターゲットの中心を自動的に配置することも可能である。各登録地点で、ラスタジナルミラー M 8 0 に関する方位角及び仰角が記録される。半透明のマイラー膜によるレーザの散乱及びスペckle (speckle) の発生を減らすために、各レーザターゲットの位置で紙製のオーバーレイをマイラー膜上に被せ、像を向上させる。

30

【 0 0 7 2 】

プロセス領域用の空間を較正するために、2 つの異なるスティンガーの位置から、3 つのレーザターゲットの夫々の位置を決める工程が繰り返され、これにより、工作物上の登録マークの合成された立体画像が、写真測量法で適用される技術と同様の技術を用いて構成される。図 1 4 に見られるように、線 6 1 0、6 1 1、6 1 2 が位置 6 0 0 にあるラスタジナルミラー M 8 0 から、対応する登録マーク（例えば、工作物上のマーク 5 1 2）まで延伸している場合、第 1 スティンガー位置 6 0 0 からの、線 6 1 0、6 1 1、6 1 2 に関する方位角及び仰角が決定される。次に、スティンガーが、垂直に、或いは、第 2 位置 6 0 1 に向かって移動させられる。2 つの異なるラスタミラー位置から 3 つのマスクターゲットの位置を決めることで、数値が正確に適合する。ある例では、ラスタミラーを、第 1 位置 6 0 0 から第 2 位置 6 0 1 まで垂直な軸に沿って、6 0 cm (23 . 6 インチ) 移動させた。上側の位置は、高エネルギーレーザピーニングに用いられるラスタミラー位置を表している。線 6 2 0、6 2 1、6 2 2 が位置 6 0 1 にあるラスタジナルミラー M 8 0 から、工作物上の登録マークまで延伸している場合、第 2 位置 6 0 1 からの、線 6 2

40

50

0、621、622に関する方位角及び仰角が決定される。このデータにより、工作物の表面を、スティンガーのラストジンバルに対して基準となる座標フレーム内に配置することが可能となり、ミラーと工作物間の距離、及び、3次元(3D)空間におけるその方向について正確な情報が提供される。レーザスポットパターンに対するアライメントされたマスクの登録マークの位置が分かっているため、各レーザスポットは、パルス毎に、制御システムによって、処理面上でのサイズ、形状、方向付けが正確に決定される。

【0073】

較正プロセスの最後のステップは、スティンガーの座標フレームに対して、ターゲット面上のプロセス領域の座標フレームを決定することであり、パルスパターンのパルス毎に、ジオメトリを、方向、分散、偏光、回転、アスペクト比に関する較正パラメータに変換する。この座標変換は、パターンにおいて既に定義されたレーザスポット(衝撃領域)の夫々を、当てられたスポット毎の12のサーボモーター光学ポジショナーの夫々の位置に関する較正されたパラメータを含むプロセスファイルに変換するために適用される。夫々の指示されたスポット位置は、以下のサーボモーター位置によって生成される。

1. レーザ偏光回転子
2. レーザフィールド回転子(正方形スポット回転子)
3. 伝送ジンバル方位軸
4. 伝送ジンバル仰角軸
5. 受光ジンバル方位軸
6. 受光ジンバル仰角軸
7. スティンガー偏光回転子
8. ストックスレンズ#1
9. ストックスレンズ#2
10. スティンガーズーム望遠鏡台
11. ラスタジンバル方位軸
12. ラスタジンバル仰角軸

【0074】

図15は、位置600にあるスティンガーについて、図12の工作物上の機尾プロセス領域650の3つのアライメントターゲット位置(例えば登録マーク512)と関係付けられたスポットパターンを示している。3つのプロセス領域の夫々は、異なる複数のスティンガー位置から、別々に較正し、ピーニングすることができる。或いは、1つのスティンガー位置で複数のスポットパターンを適用できるように、スティンガー位置を選択できる。このアライメントの結果、当該部品のフィレット全体を包むスポットのパターンが生成される。ビームは、パターン毎に1つのスティンガー位置から供給されたため、入射角は、パターン的一方における45度から、フィレットの中心における0度(法線入射)を経て、パターンの他方における-45度まで推移する必要があった。この部品形状にも拘わらず、ここに述べた技術を用いることで、レーザスポットは、対応する衝撃領域の公称表面の法線ベクトルに対してP偏光面に合致する偏光で、工作物の表面上において、正方形のまま、サイズ、方向、位置が正確に保たれるように個別に制御することが可能である。

【0075】

図16は、工作物の表面上のプロセス領域内の衝撃領域のパターンで複数のレーザパルスを供給するために、プロセッサによって実行されるアルゴリズムに関して簡略化したフローチャートである。簡略化したプロセスのフローは、ビーム供給システムに用いられる制御システムに1又は複数のパターンを記憶することから始まる(700)。次に、工作物の表面に一連のパルスを供給するのに適した相対的な位置に、スティンガーを支えるロボットが位置決めされるか、或いは、工作物がロボットに隣接して位置決めされるか、或いは、両方が位置決めされる(701)。一組のプロセス領域(1又は複数のメンバーからなる)に用いられる各スティンガー位置に使用可能な、次のステップにおいて、ラスタパターン(i, j)が、ターゲットの3D面(x, y, z)の全域にわたるパターンに対

してスポット毎に較正された２次元のプロセス領域上のパターンを定義する（７０２）。フローチャートに示されるこの較正ステップは、ロボット又は工作物の位置を固定し、工作物とロボットの相関位置を確立した後に行われ、恐らくは１以上のスティンガー位置を用いてロボットと工作物の固定された配置で生成されたすべてのパターンに対して１回実行されるか、或いは、一つのスティンガー位置が使用される一組のパターンにおけるスポットに対する較正されたパラメータを生成するために、使用されるスティンガー位置毎に１回実行することが可能である。正確なアライメントのために、工作物とスティンガーを支えるロボットが加工に適した位置についた後、コントローラは、スキャンに使われる固定されたスティンガー位置毎に較正される。或いは、較正ステップは、レーザ加工が適用される環境に基づいて、必要に応じて実行することができる。

10

【００７６】

次に、プロセス領域毎に、スティンガーは、現在のパターンについてロボットによって位置決めされ、伝送ジンバルと受光ジンバルは、レーザエネルギーがスティンガー上の光学部品に供給可能となるように設定される（７０３）。次に、プロセス領域上の所定のパターンについてスキャンプロセスが実行される（７０４）。スキャンプロセスでは、プロセス領域内のスポット（ i, j ）毎に、ビーム整形・供給光学装置における光学部品は、出力パルス毎に、方向、フィールド回転、分散、アスペクト比、偏光を確立するように設定される（７０４）。スポット毎に較正されたパラメータを使って光学部品を設定したうえで、レーザパルスは、レーザピーニング用途において、充填流体と共に適用される（７０５）。プロセッサは、パターン内の最後のスポットが供給されたかどうかを判断する（７０６）。もしされていないならば、次のスポットが定義され（７０７）、プロセッサは、ステップ７０２に（或いは、較正されたパラメータが既に生成済みである場合はステップ７０３に）戻る。ステップ７０６で最後のスポットが供給されていれば、プロセッサは、現在のパターンの組の内、最後のパターンが処理されたかどうかを判断する（７０８）。もし未だであれば、プロセッサによって次のパターンが認識され（７０９）、プロセッサは、ステップ７０２に戻る（ここで、ロボットが次のパターン又は次のパターンの組を実行するために再配置される必要がある場合は、プロセッサは、ステップ７０１の実行を待ってもよい）。ステップ７０８で最後のパターンが処理されると、プロセスは終了する（７１０）。尚、図１６のフローチャートによって示されたステップの順番は、プロセスの所定の内容に合うように変更しても構わない。

20

30

【００７７】

図１７は、図２と同様に、レーザピーニングシステムの簡略化した図である。同様の部品には参照番号が同様に付与されており、部品の中には省略しているものもある。図２と同様に、線１２０からのレーザビームはＤＧＳ１０７の受光ジンバル１０６上のミラー１０６Ａで反射される。当該ビームは、線１２１に沿ってラスタジンバル１１７上のラスタジンバルミラー１１７Ａに向けられる。アライメントカメラ１２５は、ビームが向けられるターゲット位置を撮像するように構成されている。この例における複雑なターゲット１０９は、ＤＧＳ１０７を用いて直接照射（strike）するには難しい、或いは、実際的でないと思われる表面（不図示）を含む。この表面に到達するために、反射鏡９００は、ピーニング対象の面を有する部品の近く、或いは、その上に設置することができる。リレーミラーと呼ばれることもある、この反射鏡は、例えば、５インチの平らなミラーであり、用いられる全ての波長（較正画像化（imaging）、アライメント、出力）に対して、線１２２上のビームを、線９０１の角に沿って、複雑なターゲットの表面に向けることができる。ＤＧＳのスキャン機能は、上記の処理された較正を用いて、到達困難な表面に、固定されたミラーを用いてビームを向けることを可能とする。例えば、工作物自体に支持されているか、或いは、外部手段によって支持されている個別のリレーミラーを静止位置に配置して複雑な部分をレーザピーニングする場合、ラスタリングジンバル１１７との間で直接視線が届くことがない、レーザピーニング対象の当該部分上の領域をピーニングすることが可能である。ＤＧＳを用いれば、較正及びその後続くレーザピーニングを、高出力ピーニングビームだけでなく較正用の部分の赤外画像やトレーサビームを反射するリレーミ

40

50

ラーを使うだけで、反射鏡 900 がある場合と無い場合とで同じように正確に実行することができる。隠れたスポットに向かってビームを角で曲がらせることができても、スティンガー全体には適合させることができない場合がある。図 17 は、レーザピーニング時に工作表面に対して流体充填層を供給するために使われる従来の水供給ロボット 111 を示している。工作面へ直接の視線を確立することができないために、ロボット制御される水ノズルで工作面に到達することが難しい場合がある。この場合、工作物に直接取り付けられた固定の水ノズルが、充填層の提供に用いられる。個別のコンピュータ制御の下、複数のノズルが大きく複雑なピーニング領域をカバーするために用いられる。

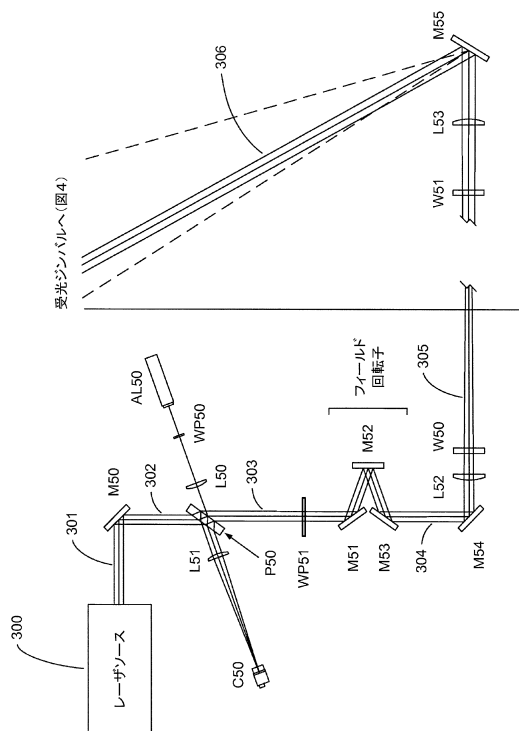
【0078】

上記の技術の代表的な使用例には、大小の工作物及び構造物に対するレーザピーニング、レーザピーニングによる成形、及び、熱処理、テクスチャリング、切断、溶接といったその他の表面加工のためのレーザビームの供給がある。本システムは、レーザエネルギーを用いた材料加工の際のビーム供給に適用可能である。尚、ここでの材料加工の例としては、超塑性成形、塗装又は他のタイプの塗装除去、エッチング、彫刻、刻印等を含むが、これらだけには限らない。

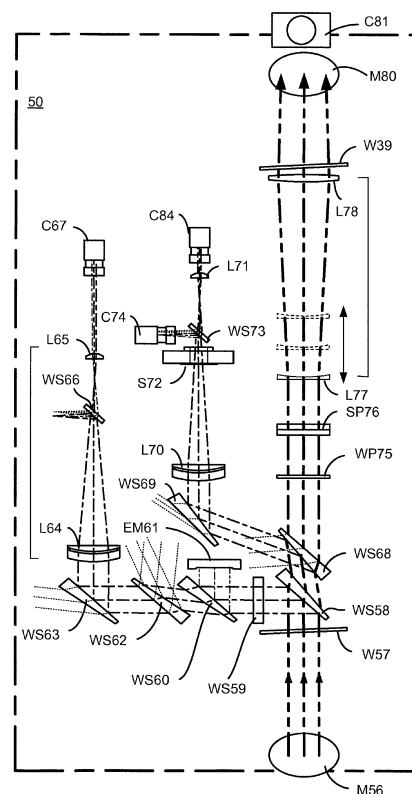
【0079】

本発明は、上述の詳細な好適実施例及び具体例を参照して示されたが、これら実施例は、限定的な意味ではなく説明のためのものと理解されるべきである。種々の変更及び組み合わせは当業者において容易に想到するものと考えられ、また、かかる変更及び組み合わせは、本発明の趣旨及び特許請求の範囲内に含まれる。

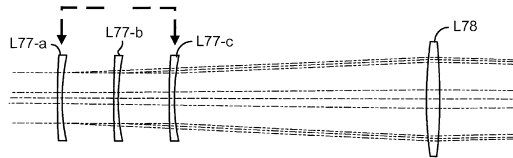
【図 3】



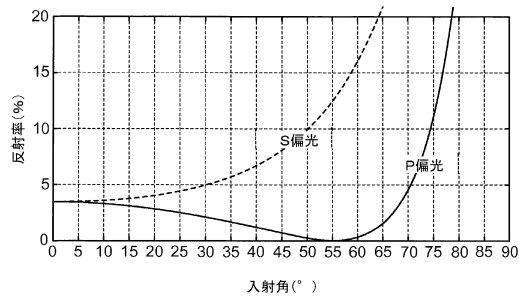
【図 4】



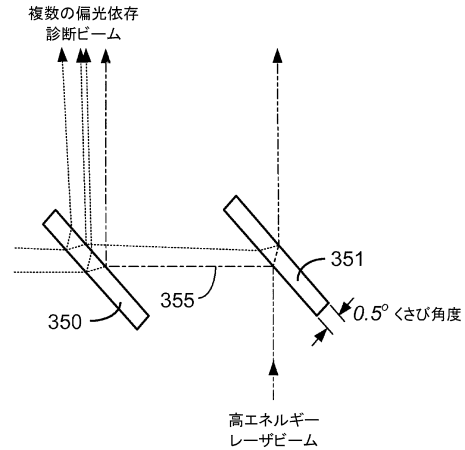
【図 5】



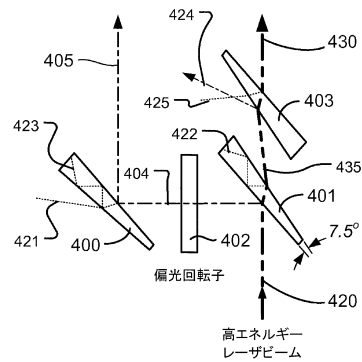
【図 7】



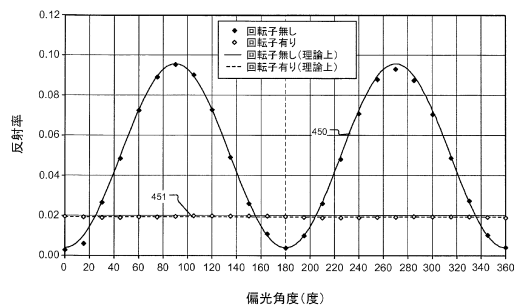
【図 8】



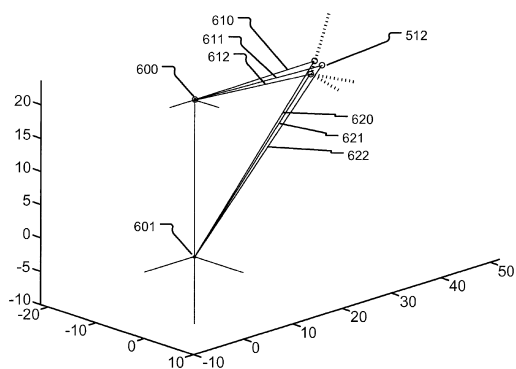
【図 9】



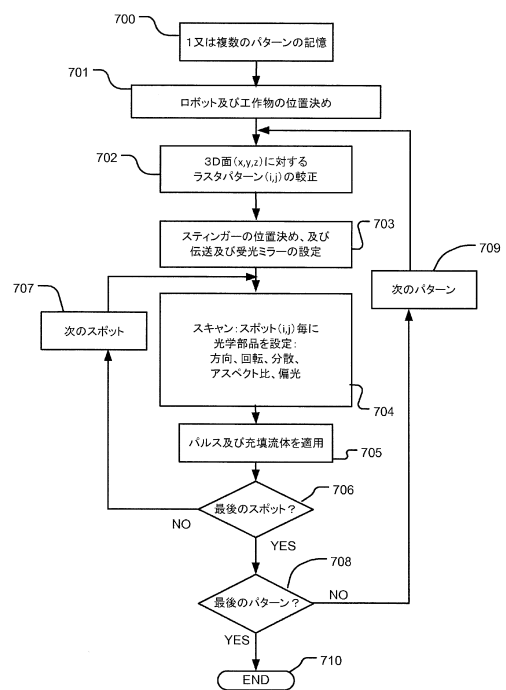
【図 10】



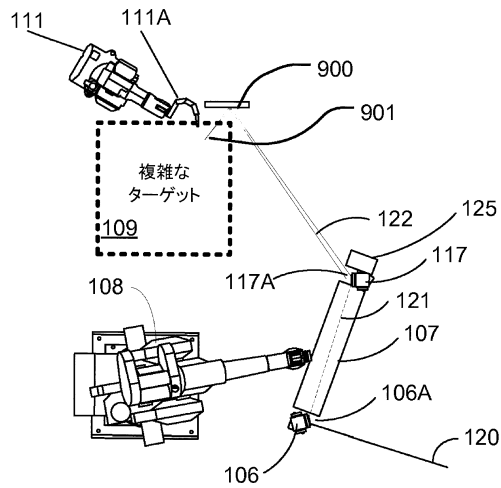
【図 14】



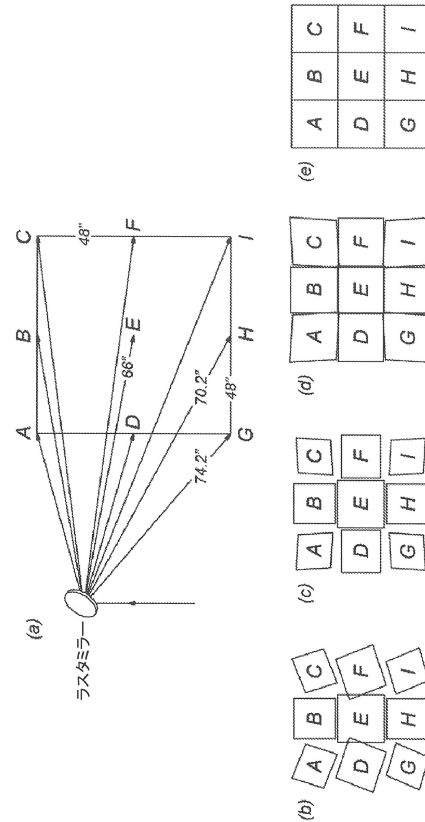
【図 16】



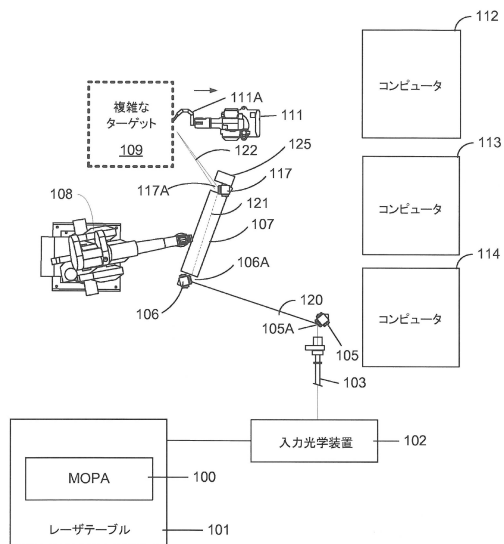
【図 17】



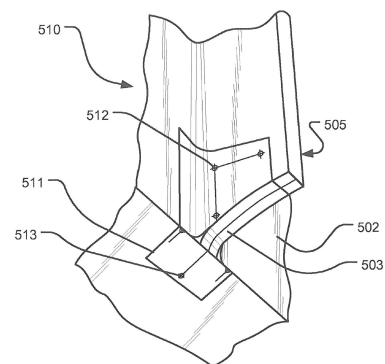
【図 1】



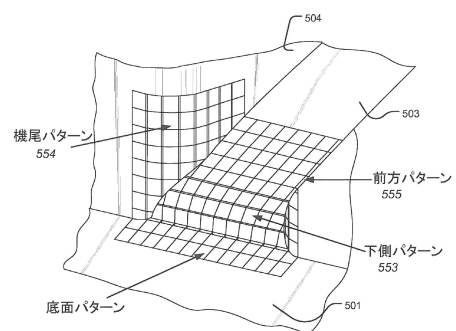
【図 2】



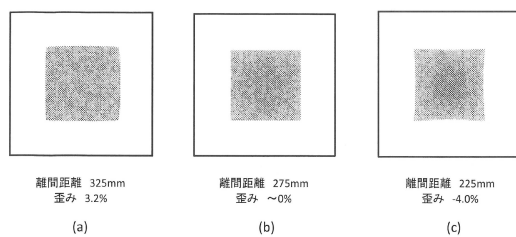
【図 11】



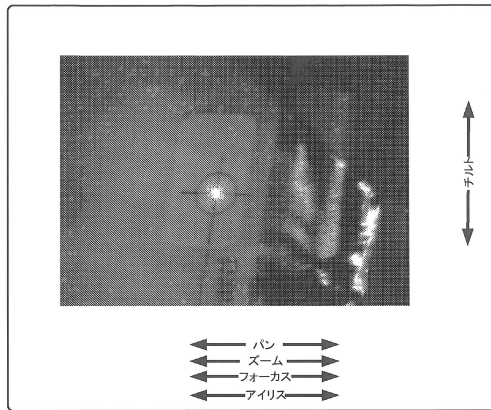
【図 12】



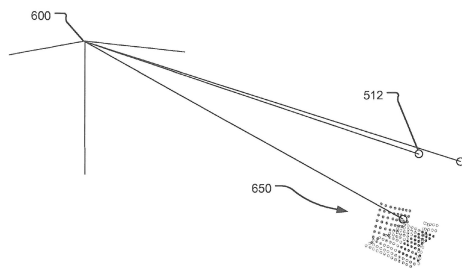
【図 6】



【図 13】



【図 15】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
B 2 3 K 26/352

- (72)発明者 ラオ, エドワード, ダブリュー., エイチ.
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 9 4 1 1 2 サンフランシスコ、 ニュートン ストリート
、 6 5
- (72)発明者 ハリス, フリッツ, ビー. ジュニア.
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 9 5 6 7 7 ロックリン、 ハイブンハースト サークル、
5 4 3 2
- (72)発明者 ハード, ランドール, エル.
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 9 5 3 7 7 トレーシー、 デールハースト レーン、 4
1 6 9
- (72)発明者 ランキン, ジョン, イー.
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 9 4 5 6 8 ダブリン、 ベトレン ドライブ、 1 1 6 7
0
- (72)発明者 フォックス, スコット, エヌ.
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 9 4 5 5 1 リバーモア、 セントラル アベニュー、 7
6 7

審査官 青木 正博

- (56)参考文献 特開2010-052014(JP,A)
特開2004-174709(JP,A)
特開平09-314361(JP,A)
特開2010-051999(JP,A)
特開2007-050504(JP,A)
特開2002-038222(JP,A)
特表2008-520439(JP,A)
特開2004-297058(JP,A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
B 2 3 K 2 6 / 0 0 - 2 6 / 7 0