

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6862255号  
(P6862255)

(45) 発行日 令和3年4月21日 (2021.4.21)

(24) 登録日 令和3年4月2日 (2021.4.2)

(51) Int. Cl.

F I

H O 4 N 5/232 (2006.01)

H O 4 N 5/232

G O 3 B 15/00 (2021.01)

G O 3 B 15/00 U

G O 1 C 3/06 (2006.01)

G O 3 B 15/00 R

G O 1 S 17/89 (2020.01)

G O 1 C 3/06 1 2 O Q

H O 4 N 5/225 (2006.01)

G O 1 C 3/06 1 4 O

請求項の数 17 (全 19 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2017-79119 (P2017-79119)  
 (22) 出願日 平成29年4月12日 (2017.4.12)  
 (65) 公開番号 特開2018-182521 (P2018-182521A)  
 (43) 公開日 平成30年11月15日 (2018.11.15)  
 審査請求日 令和2年3月30日 (2020.3.30)

(73) 特許権者 000001007  
 キヤノン株式会社  
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号  
 (74) 代理人 100110412  
 弁理士 藤元 亮輔  
 (74) 代理人 100104628  
 弁理士 水本 敦也  
 (74) 代理人 100121614  
 弁理士 平山 倫也  
 (72) 発明者 増村 考洋  
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キ  
 ヤノン株式会社内

審査官 ▲徳▼田 賢二

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 撮像装置、撮像方法および撮像プログラム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

光源から被写体に向かう光の波面を成形する空間光変調手段と、  
 前記被写体の撮像を行って画像データを生成する撮像手段と、  
前記光源から前記光が出射してから前記撮像手段に撮像を行わせるまでの遅延時間を設定する制御手段とを有し、

前記制御手段は、前記画像データにおける前記被写体に対応するターゲット領域の輝度値に基づいて設定された目的関数の値が最大値又は最小値に近づくように、前記空間光変調手段の最適化制御を行うことを特徴とする撮像装置。

【請求項 2】

前記制御手段は、前記画像データに対して画像処理を行うことで前記ターゲット領域を抽出することを特徴とする請求項 1 に記載の撮像装置。

【請求項 3】

前記画像処理は、2 値化処理、エッジ処理、及びフィルタ処理の少なくとも一つを含むことを特徴とする請求項 2 に記載の撮像装置。

【請求項 4】

前記目的関数は、前記ターゲット領域における少なくとも一部の輝度値の平均値又は和であることを特徴とする請求項 1 から 3 のいずれか一項に記載の撮像装置。

【請求項 5】

前記目的関数は、前記画像データにおける前記ターゲット領域及び該ターゲット領域以

10

20

外の領域のそれぞれの輝度値から算出されるコントラスト値であることを特徴とする請求項 1 から 4 のいずれか一項に記載の撮像装置。

【請求項 6】

前記制御手段は、基底パターンに基づく前記光の位相変調又は振幅変調を行うように前記空間光変調手段を制御することを特徴とする請求項 1 から 5 のいずれか一項に記載の撮像装置。

【請求項 7】

前記最適化制御は、第 1 の基底パターンを用いる第 1 の制御と、前記ターゲット領域及び前記目的関数を再設定して前記第 1 の基底パターンよりも空間周波数が高い第 2 の基底パターンを用いる第 2 の制御とを含むことを特徴とする請求項 1 から 6 のいずれか一項に記載の撮像装置。

10

【請求項 8】

前記制御手段は、複数の前記ターゲット領域を設定し、互いの距離が基準距離よりも長い二つのターゲット領域については互いに異なる前記目的関数を設定し、互いの距離が前記基準距離より短い二つのターゲット領域については共通の前記目的関数を設定することを特徴とする請求項 1 から 7 のいずれか一項に記載の撮像装置。

【請求項 9】

前記制御手段は、大気屈折率の構造定数に基づいて前記基準距離を設定することを特徴とする請求項 8 に記載の撮像装置。

【請求項 10】

20

前記制御手段は、前記被写体に対する前記光の照射角度を変えながら前記撮像手段に撮像を行わせることを特徴とする請求項 1 から 9 のいずれか一項に記載の撮像装置。

【請求項 11】

前記制御手段は、前記目的関数の値が所定値を下回ることに応じて前記最適化制御を繰り返すことを特徴とする請求項 1 から 10 のいずれか一項に記載の撮像装置。

【請求項 12】

光源から被写体に向かう光の波面を成形する第 1 ステップと、  
遅延時間を設定し、前記光源から前記光が出射してから該遅延時間が経過したタイミングで前記被写体の撮像を行って画像データを生成する第 2 ステップと、

前記画像データにおける前記被写体に対応するターゲット領域の輝度値を用いて設定された目的関数の値が最大値又は最小値に近づくように、前記第 1 ステップの最適化を行う第 3 ステップとを有することを特徴とする撮像方法。

30

【請求項 13】

光源から被写体に向かう光の波面を成形する空間光変調手段と、  
前記被写体の撮像を行って画像データを生成する撮像手段と、  
前記光源から前記光が出射してから前記撮像手段に撮像を行わせるまでの遅延時間を設定する制御手段とを有し、

前記制御手段は、

前記空間光変調手段により複数の基底パターンを用いて波面が成形された前記光のうち前記被写体を介した光の波面に基づいて透過行列を生成し、

40

前記光の波面が、前記画像データにおける前記被写体に対応するターゲット領域と前記透過行列とに基づいて得られた変調波面となるように前記空間光変調手段を制御することを特徴とする撮像装置。

【請求項 14】

前記制御手段は、前記ターゲット領域に対応するベクトルと前記透過行列の転置共役との積に基づいて前記変調波面を算出することを特徴とする請求項 13 に記載の撮像装置。

【請求項 15】

前記制御手段は、前記透過行列の固有値の分布に基づいて大気散乱又は揺らぎに起因するノイズ成分の波面に関する統計的性質を推定し、該統計的性質に基づいて前記基底パターンの種類、数、及び空間周波数範囲を設定することを特徴とする請求項 13 又は 14

50

に記載の撮像装置。

【請求項 16】

光源から被写体に向かう光の波面を成形する第 1 ステップと、  
遅延時間を設定し、前記光源から前記光が出射してから該遅延時間が経過したタイミングで前記被写体の撮像を行って画像データを生成する第 2 ステップと、  
前記第 1 ステップにより複数の基底パターンを用いて波面が成形された前記光のうち前記被写体を介した光の波面に基づいて透過行列を生成する第 3 ステップと、  
前記光の波面が、前記画像データにおける前記被写体に対応するターゲット領域と前記透過行列とに基づいて得られた変調波面となるように前記第 1 ステップの変更を行う第 4 ステップと  
を有することを特徴とする撮像方法。

10

【請求項 17】

請求項 12 又は 16 に記載の撮像方法をコンピュータに実行させることを特徴とする撮像プログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、撮像技術に関する。

【背景技術】

【0002】

20

大気中に存在する霧や煙等の微粒子や、大気による空間の屈折率の揺らぎ等に起因して生じる光の散乱の影響を低減することにより、被写体像の歪み成分を低減して撮像を行うことが可能な撮像装置が知られている。特許文献 1 および非特許文献 1 は、撮像装置として、光を被写体に向けて照射し、光が被写体で反射して戻ってきた瞬間のみ撮像を行う G A I (Gated Active Imaging) 装置を開示している。霧等の散乱体により散乱した光と被写体で反射された光とでは撮像装置に戻ってくる時間が異なるため、光を発してから撮像を行うまでの遅延時間を適切に制御することで、散乱光による歪み成分を低減した撮像を行うことができる。

【0003】

ただし、大気中の微粒子の濃度が高く光が散乱される量が多いと、被写体からの反射光 (信号光) が微弱になり、反射光と同じ遅延時間で入射する散乱光も増加するため、撮像画像の S N (Signal-to-Noise ratio) が劣化する。この問題に対して特許文献 2 は、被写体からの反射光と参照光を干渉させて測定したホログラムから反射光の波面を算出し、その位相共役波を空間光変調器によって生成し、位相共役波の時間反転性を利用してこれを散乱体越しに被写体に照射する手法を開示している。

30

また、非特許文献 2 は、蛍光顕微鏡において、散乱体に入射する光の波面を最適化処理を用いて空間光変調器により成形して、散乱体越しに蛍光サンプルに光を照射することで、位相共役波を用いる場合と同様の効果を得る方法を開示している。

【先行技術文献】

【特許文献】

40

【0004】

【特許文献 1】特開平 11 - 102001 号公報

【特許文献 2】米国特許出願公開第 2014 / 0268096 号

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献 1】Benjamin Gohler and Peter Lutzmann, "SWIR laser gated-viewing at Fraunhofer IOSB", Proc. of SPIE Vol. 9649 964902 (2015)

【非特許文献 2】I.M.Vellekoop and C. M. Aegerter, "Scattered light fluorescence microscopy: imaging through turbid layers", Optics Letters Vol.35, No.8 (2010)

【発明の概要】

50

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0006】

しかしながら、特許文献2が開示する方法は、参照光を用いてホログラムを計測するために、複雑な光学系を設ける必要があり、また振動等のノイズに弱い。

## 【0007】

一方、非特許文献2が開示する方法は、最適化処理を行う際の最適化のターゲット（目的関数）として、散乱光に対して容易かつ明確に区別できる蛍光の強度を用いることができる。しかし、この方法をGAI装置に適用しようとしても、蛍光のように散乱光と明確に区別できる光がないため、目的関数をどのように設定するかが課題となる。

## 【0008】

本発明は、簡易な構成で、散乱が強い条件下でも高SNで被写体を撮像することが可能な撮像装置等を提供する。

## 【課題を解決するための手段】

## 【0009】

本発明の一側面としての撮像装置は、光源から被写体に向かう光の波面を成形する空間光変調手段と、該被写体の撮像を行って画像データを生成する撮像手段と、光源から光が出射してから撮像手段に撮像を行わせるまでの遅延時間を設定する制御手段とを有する。制御手段は、画像データにおける写体に対応するターゲット領域の輝度値に基づいて設定された目的関数の値が最大値又は最小値にするように空間光変調手段の最適化制御を行うことを特徴とする。

## 【0010】

また、本発明の他の一側面としての撮像方法は、光源から被写体に向かう光の波面を成形する第1ステップと遅延時間を設定し、光源から光が出射してから該遅延時間が経過したタイミングで該被写体の撮像を行って画像データを生成する第2ステップと、該画像データにおける該被写体に対応するターゲット領域の輝度値を用いて設定された目的関数の値が最大値又は最小値に近づくように、第1ステップの最適化を行う第3ステップとを有することを特徴とする。

## 【0011】

また、本発明の他の一側面としての撮像装置は、光源から被写体に向かう光の波面を成形する空間光変調手段と、該被写体の撮像を行って画像データを生成する撮像手段と、光源から光が出射してから撮像手段に撮像を行わせるまでの遅延時間を設定する制御手段とを有する。制御手段は、空間光変調手段により複数の基底パターンを用いて波面が成形された光のうち被写体を介した光の波面に基づいて透過行列を生成し、該光の波面が、画像データにおける被写体に対応するターゲット領域と透過行列とに基づいて得られた変調波面となるように空間光変調手段を制御することを特徴とする。

## 【0012】

また、本発明の他の一側面としての撮像方法は、光源から被写体に向かう光の波面を成形する第1ステップと、遅延時間を設定し、光源から光が出射してから該遅延時間が経過したタイミングで該被写体の撮像を行って画像データを生成する第2ステップと、第1ステップにより複数の基底パターンを用いて波面が成形された光のうち該被写体を介した光の波面に基づいて透過行列を生成する第3ステップと、該光の波面が、該画像データにおける該被写体に対応するターゲット領域と透過行列とに基づいて得られた変調波面となるように第1ステップの変更を行う第4ステップとを有することを特徴とする。

## 【0013】

なお、コンピュータに上記撮像方法に従う処理を実行させるコンピュータプログラムとしての撮像プログラムも、本発明の他の一側面を構成する。

## 【発明の効果】

## 【0014】

本発明によれば、簡易な構成で、散乱が強い条件下でも高SNで被写体を撮像することができる。

## 【図面の簡単な説明】

## 【 0 0 1 5 】

【図 1】本発明の実施例 1 であるゲーテッドイメージング装置の構成を示す図。

【図 2】実施例 1 における測定処理を示すフローチャート。

【図 3】実施例 1 における ( a ) 被写体、( b ) 波面成形前のゲーテッドイメージング装置、( c ) 2 値化されたターゲット領域、( d ) 波面成形後の G A I 装置を示す図。

【図 4】実施例 1 における波面成形処理を示すフローチャート。

【図 5】実施例 1 における基底パターンを示す図。( a ) セグメントを用いたパターン、( b ) ランダムパターンおよび ( c ) アダマール基底を示す。

【図 6】実施例 1 における複数のターゲット領域を示す図。

【図 7】実施例 1 における照射光のスキャンを示す図。

【図 8】本発明の実施例 2 であるゲーテッドイメージング装置の構成を示す図。

【図 9】図 8 の構成の一部を示す図。

## 【発明を実施するための形態】

## 【 0 0 1 6 】

以下、本発明の実施例について図面を参照しながら説明する。

## 【実施例 1】

## 【 0 0 1 7 】

図 1 は、本発明の実施例 1 である、撮像装置としてのゲーテッドイメージング装置の構成を示している。ゲーテッドイメージング装置 1 0 0 は、光源部 1 1 0、カメラ部 1 2 0、制御・処理部 1 3 0 および表示部 1 4 0 から構成される。カメラ部 1 2 0 が撮像手段に相当し、制御・処理部 1 3 0 が制御手段に相当する。

## 【 0 0 1 8 】

ゲーテッドイメージング装置 1 0 0 は、大気中の散乱体 2 0 0 越しに被写体 3 0 0 を撮像する。散乱体 2 0 0 は、霧、靄、煙、スモッグ、大きさがマイクロメートルサイズの土壌や粉塵等の大気中に浮遊する微粒子である。また、散乱体 2 0 0 として、雪、雨および大気温度分布のむらによる屈折率の揺らぎ等も含まれる。

## 【 0 0 1 9 】

光源部 1 1 0 は、主にレーザ光源 1 1 1 と空間光変調器 ( Spatial Light Modulator : 空間光変調手段に相当し、以下 S L M という ) 1 1 3 とから構成される。レーザ光源 1 1 1 は、一般的にアイセーフレーザ ( eye-safe laser ) と呼ばれる波長が  $1.4 \sim 1.8 \mu\text{m}$  である短波赤外 ( Short-Wavelength Infrared : S W I R ) のパルス光ビーム ( 以下、単にパルス光という ) を放出する。本実施例では、波長  $1.5 \mu\text{m}$ 、パルス幅  $1 \sim \text{数 } 10 \text{ nsec}$  のパルス光である。ただし、撮像条件によっては、上記以外の波長帯域およびパルス幅であってもよい。また、パルスの繰り返し周波数は、例えば、数  $\text{Hz} \sim \text{数 } 100 \text{ kHz}$  の範囲で任意に選択することができる。

## 【 0 0 2 0 】

レーザ光源 1 1 1 からコリメートされて放出されたパルス光は、ミラー 1 1 2 で反射されて S L M 1 1 3 に入射する。パルス光のビームサイズは、S L M 1 1 3 の有効変調領域 ( 位相変調が可能な全画素領域 ) に収まるように設定されている。S L M 1 1 3 は、例えば、Liquid Crystal on Silicon ( L C O S ) や、Digital Mirror Device ( D M D ) を用いることができる。また、S L M 1 1 3 として透過型の液晶を用いたデバイスであってもよい。S L M 1 1 3 が偏光依存性のあるデバイスである場合には、S L M 1 1 3 に入射する光の偏光方向を、S L M 1 1 3 にて位相変調が行われる偏光方向と一致するように調整される。

## 【 0 0 2 1 】

S L M 1 1 3 は、後述する最適化制御 ( 最適化処理 ) が行われることによって画素ごと又は後述するセグメント領域ごとに入射したパルス光の位相を変調する。S L M 1 1 3 にて位相変調され、かつ反射したパルス光 1 6 0 は、光学系 1 1 4 を通ってビームサイズや照射方向が調整されて光源部 1 1 0 から出射する。この際、必要に応じて、ガルバノミラ

10

20

30

40

50

ーを用いてパルス光 160 を走査してもよい。パルス光 160 の出力強度は、被写体（人等の生物か無生物か）や被写体までの距離等の条件に応じて適切に調整される。例えば、出力強度は数 10 ～ 数 100 mJ の範囲である。

#### 【0022】

光源部 110 から発せられたパルス光 160 が大気中の散乱体 200 を通過する際にはその一部が散乱光 161 となり、残りの光が被写体 300 まで伝搬する。さらに、被写体 300 で反射したパルス光が再び散乱体 200 を通過する際にその一部が散乱光 171 となり、残りの光がカメラ部 120 に戻ってくる。被写体 300 は、例えば 100 m ～ 数 10 km の遠方に存在する。本実施例では、被写体 300 に向けて照射するパルス光 160 を、上述した SWIR 帯域の光とする。これは、可視光よりも散乱を抑えられ、かつ被写体 300 が人物の場合でも、安全基準上、可視光に比べて強い強度で照射できるからである。

10

#### 【0023】

カメラ部 120 は、波長 1.5  $\mu$ m の光を十分透過するカメラレンズ（撮像光学系）120a と、同波長に感度を有するアレイセンサ 120b と、画像生成部 120c とにより構成される。カメラレンズ 120a は、被写体 300 からのパルス光（反射光としての被写体光）を結像させる。カメラレンズ 120a の焦点距離は、被写体 300 までの距離に応じて適宜選択される。被写体 300 が上述した遠方に位置する場合は、例えば焦点距離 1000 mm 以上の望遠レンズが用いられる。アレイセンサ 120b としては、SWIR 帯域に感度を有する InGaAs を用いたイメージセンサであり、カメラレンズ 120a により形成された被写体像を光電変換（撮像）する。アレイセンサ 120b におけるシャッタ時間（ゲート時間）は、例えば、数 10 nsec ～ 数  $\mu$ sec の範囲で選択される。画像生成部 120c は、被写体像を光電変換したアレイセンサ 120b から出力された撮像信号を用いて撮像画像（画像データ）を生成する。

20

#### 【0024】

カメラ部 120 で生成された画像データは、制御・処理部 130 に転送される。パーソナルコンピュータ等のコンピュータにより構成される制御・処理部 130 は、後述する測定処理を行って光源部 110 やカメラ部 120 を制御する。また、制御・処理部 130 は、後述する波面成形処理において、光源部 110 から被写体 300 に向けて照射されるパルス光 160 の波面を最適化するように SLM 113 の最適化制御を行う。表示部 140 は、撮像画像を表示する。また、表示部 140 は、測定処理の途中での撮像により生成された画像データや波面成形処理の経過を表示してもよい。

30

#### 【0025】

図 2 のフローチャートは、制御処理としての測定処理（ゲーテッドイメージング方法）の流れを示している。制御・処理部 130 は、コンピュータプログラムとしてのゲーテッドイメージングプログラムに従って本処理を実行する。以下の説明において、S はステップを意味する。

#### 【0026】

S100 において、制御・処理部 130 は、光源部 110 からパルス光 160 を被写体 300 に向けて照射させ、この照射の時刻から以下に説明する遅延時間を経過したタイミングにおいてカメラ部 120 に撮像（以下、遅延撮像という）を行わせる。遅延時間は、光源部 110 からのパルス光 160 の照射時刻から被写体 300 で反射した反射光がカメラ部 120（アレイセンサ 120b）に到達する時刻までの時間 [sec] である。大気中の光速を  $c$  とすると、カメラ部 120 は、ゲーテッドイメージング装置 100 からの距離（撮像距離） $L = c / 2$  [m] に位置する被写体 300 からの反射光を撮像することになる。

40

#### 【0027】

撮像距離  $L$  に撮像対象である被写体 300 が存在しない場合は、被写体 300 に関連する有意な撮像信号を取得することができない。例えば、撮像距離  $L$  に大気中の散乱体 200 以外にパルス光を反射する物体が存在しない場合は、撮像画像には散乱によるフレアシ

50

か写らない。また、撮影距離  $L$  に被写体 300 以外の別の物体が存在する場合には、その物体が撮像される。このため、S100では、制御・処理部130は、被写体300までの撮像距離  $L$  が事前に分かっている場合には、その撮像距離  $L$  に対応する遅延時間を設定してカメラ部120に遅延撮像を行わせる。この際、被写体像またはその一部に対応する撮像信号のうち最も信号強度（輝度値）が高くなる又は最もコントラスト（輝度値の差）が高くなる新たな遅延時間がある場合には、設定した遅延時間をその新たな遅延時間に変更してもよい。すなわち、事前の撮像により得られた輝度値に基づいて遅延時間を調整してもよい。また、被写体300が事前に明確でない場合は、遅延時間を徐々に変更しながらカメラ部120に遅延撮像を行わせ、得られた複数の撮像画像中に有意な信号が確認できた時点で、それを被写体300に対応する撮像信号として、以降の処理を実行してもよい。

10

#### 【0028】

本実施例においては、まずS100において、被写体300からの反射光を撮像して被写体像（被写体光）に対応する撮像信号を得ることが必要である。この被写体像に対応する撮像信号（以下、被写体観測信号という）被写体観測信号は、大気中の散乱や屈折率の揺らぎによって歪められた被写体像またはその一部に対応するものであってもよい。

#### 【0029】

図3(a), (b)は、本実施例における測定処理をシミュレーションした結果得られた撮像画像を示す。図3(a)は、収差（散乱による劣化）のない理想的な被写体像の撮像画像を示している。図3(b)は、散乱によって歪んだ被写体像の撮像画像を示している。

20

#### 【0030】

撮像画像から被写体観測信号の領域を判定する条件としては、その領域の輝度値が所定の判定閾値（所定値）以上であること又は被写体像の特徴的な形状が確認できること等が設定される。撮像画像に対してエッジ処理やフィルタ処理を行うことで特徴的な形状を抽出してもよい。または、予め様々な散乱条件下で撮像した人工物や人物等の物体の画像を学習しておき、その特徴量を参考として被写体観測信号の領域を判定することも可能である。

#### 【0031】

次にS200において、制御・処理部130は、S300の波面成形処理における最適化制御のターゲットとなる目的関数を設定する。S100において被写体観測信号を取得しているのでこれを利用して目的関数を設定する。

30

#### 【0032】

具体例として、まずS100で得た撮像画像のうち被写体観測信号（図3(b)）の領域に対して、ある2値化閾値を設定して2値化処理を行い、その結果から抽出した領域全体を図3(c)に示すようにターゲット領域とする。2値化閾値は、撮像画像の輝度値のヒストグラムを参考として決定してもよい。また、ターゲット領域が極端に小さくならないように、できるだけ2値化閾値を大きく設定することが望ましい。これにより、2値化処理によって被写体観測信号に付随して取得された散乱光成分等のノイズ成分を除去することができるためである。

40

#### 【0033】

そして、このターゲット領域内の被写体観測信号（画素）の輝度値の平均値または総和を目的関数として設定する。また、ターゲット領域内の任意の1画素以上の部分領域における輝度値の和を目的関数としてもよい。部分領域とは、撮影者が注目する任意の領域として設定することができる。

#### 【0034】

また、ターゲット領域が複数に分かれていても、上記のように目的関数を設定すればよい。もしくは、後述するように、ターゲット領域ごとに目的関数を設定して、それぞれ独立にS300の波面成形処理を行ってもよい。さらに、撮像画像におけるターゲット領域の輝度値とその周辺（近傍）の非ターゲット領域の輝度値とから算出される画像のコント

50

ラスト値を目的関数としてもよい。このように、S 2 0 0においては、S 1 0 0での撮像（測定）で得られた被写体観測信号に基づいて最適化制御における目的関数の設定に用いる信号（輝度値の平均値、総和またはコントラスト値）を取得する。

#### 【0035】

本実施例のように撮像画像に基づく最適化処理によって波面を成形する場合には、目的関数を設定する位置や領域を明確に決めておく必要がある。この目的関数は、S 1 0 0の結果に基づいて撮影者が任意に設定してもよいし、制御・処理部130が自動的に設定してもよい。すなわち、S 1 0 0の結果に基づいて目的関数が設定（用意）されればよい。また、被写体300について何らかの事前情報がある場合には、その事前情報に基づいてターゲット領域および目的関数を設定してもよい。

10

#### 【0036】

次にS 3 0 0では、制御・処理部130は、S 2 0 0で設定した目的関数の値が最大になるように、光源部110から被写体300に向けて照射されるパルス光160の波面を最適解としての最適波面に近づけるようにS L M 1 1 3の最適化制御を行う。この最適化制御（最適化処理）では、まず任意の波面（例えば平面波）が成形されたパルス光160を光源部110から被写体300に向けて照射し、遅延時間 だけ遅れたタイミングでカメラ部120に撮像を行わせて得られた目的関数の値を評価する。制御・処理部130は、これら波面成形、パルス光照射、遅延撮像および目的関数の値の評価を反復して目的関数の値が向上する、すなわち最大により近づくように波面を最適化する。反復は、予め設定した反復回数または所定の目的関数の値に達するまで行う。

20

#### 【0037】

次にS 4 0 0では、制御・処理部130は、光源部110にS 3 0 0で波面が最適化されたパルス光160を被写体300に向けて照射させ、カメラ部120に遅延時間 だけ遅れたタイミングで遅延撮像を行わせて図3（d）に示す最終的な撮像画像を取得する。S 3 0 0の処理によって、被写体300にパルス光160をより効果的に照射することが可能となり、この結果、カメラ部120は、散乱体200越しの被写体300を高S Nで撮像することができる。

#### 【0038】

次に、図4を用いて、S 3 0 0の最適化処理についてより具体的に説明する。まずS 3 1 0において、制御・処理部130は、評価条件を設定する。すなわち、評価条件として、最適化のアルゴリズムを選択し、反復回数Nその他の最適化の収束条件を設定し、位相変調を行う基底パターンを設定し、位相変調する際の位相のステップサイズ（更新量）

30

やステップ回数（更新回数）Kを設定する。さらに、評価条件として、目的関数の値を複数の撮像画像の輝度値の平均値を用いて評価する場合には、その撮像画像数Pを設定する。

#### 【0039】

最適化のアルゴリズムとしては、I.M.Vellekoop, A.P.Mosk, “Phase control algorithms for focusing light through turbid media”, Optics Communications, 281 (2008) 3071-3080が開示している、シーケンシャル法（stepwise sequential algorithm）や、パーティショニング法（partitioning algorithm）を用いることができる。また、D.B.Conk ey et al., “Genetic algorithm optimization for focusing through turbid media in noisy environments”, Optics Express, Vol.20, No.5, 4840-4849 (2012)が開示している遺伝的アルゴリズムを用いてもよい。

40

#### 【0040】

反復回数Nについては、Nを直接設定してもよいし、目的関数の目標値を設定して、目的関数の値がその目標値に到達するまで反復を繰り返すように設定することもできる。最適化のアルゴリズムとしてシーケンシャル法を用いる場合には、図5（a）に示すS L M 1 1 3の有効変調領域内において黒で示す複数のセグメント領域411（ $j = 1, 2, 3, \dots, N$ ）に分割してもよい。この場合、波面成形処理では、位相変調を行うセグメント領域（位相変調領域）411と位相変調を行わない非位相変調領域410を順次変えなが

50



らそれぞれのセグメント領域 4 1 1 が独立かつ一様に位相変調を行うように S L M 1 1 3 を制御する。なお、セグメント領域 4 1 1 は有効変調領域の全域において順次変更される。このため、変更されるセグメント領域 4 1 1 の数が反復回数 N になる。セグメント領域 4 1 1 のサイズは、任意に設定することが可能であり、最小サイズは S L M 1 1 3 の画素サイズとなる。

#### 【 0 0 4 1 】

また、最適化のアルゴリズムとしてパーティショニング法を用いる場合には、図 5 ( b ) に示すランダムな基底パターンや図 5 ( c ) に示すアダマール基底の基底パターンを順次変更して位相変調を行う。これらの基底パターン ( 位相変調パターン ) は、S L M 1 1 3 の有効変調領域に、図中に黒で示す位相変調領域 4 2 1 , 4 3 1 と図中に白く示す非位相変調領域 4 2 0 , 4 3 0 とを設定する。S L M 1 1 3 は、各基底パターンに従う位相変調領域に入射した光の位相のみを変調する。変更される基底パターンの数が反復回数 N として設定される。

#### 【 0 0 4 2 】

なお、基底パターンを S 3 1 0 の時点で計算して生成してもよいし、予め生成されて制御・処理部 1 3 0 内のメモリに保存されているものを読み出して用いてもよい。その他、測定時間等の装置側の設定や撮影者の要求に応じて反復回数 N を設定してもよい。

#### 【 0 0 4 3 】

位相のステップサイズ  $\Delta\phi$  は、 $0 \sim 2\pi$  までの位相を M 分割して、 $\Delta\phi = 2\pi / M$  とする。位相変調において位相はステップ回数 K だけ位相が  $\Delta\phi$  ずつインクリメントされる。したがって、位相を 0 から変調した場合には、 $2\pi K / M$  まで位相を変調する。また、撮像画像の平均化は、目的関数の値がノイズに強く影響されるような場合に有効である。

#### 【 0 0 4 4 】

以下では、最適化のアルゴリズムとしてシーケンシャル法を用いる場合について、S 3 2 0 以降の波面成形処理を説明する。

#### 【 0 0 4 5 】

S 3 2 0 では、制御・処理部 1 3 0 は、実際の反復回数 j が、S 3 1 0 で設定した反復回数 N に到達したか否かを判定する。制御・処理部 1 3 0 は、j = N であれば本処理を終了し、j < N の場合は S 3 3 0 に進む。S 3 3 0 では、制御・処理部 1 3 0 は、S L M 1 1 3 に位相変調する j 番目のセグメント領域を設定する。

#### 【 0 0 4 6 】

次に S 3 4 0 において、制御・処理部 1 3 0 は、S L M 1 1 3 にセグメント領域 j での位相変調を行わせる。ここでは、セグメント領域 j の位相  $\phi(x, y)$  を、

$$\phi_k(x, y) = \phi_{k-1}(x, y) + \Delta\phi_k$$
 と設定する。x, y は S L M 1 1 3 の画素の座標であり、 $\phi_k(x, y)$  は k 回目の処理後の位相である。 $\Delta\phi_k$  は k 回目の位相のステップサイズであり、 $\Delta\phi_k = k \times \Delta\phi$  ( k = 1 ~ K ) である。制御・処理部 1 3 0 は、セグメント領域 j の位相を更新した後にレーザ光源 1 1 1 にパルス光を放射させる。これにより、S L M 1 1 3 にて位相変調されたパルス光 1 6 0 が光源部 1 1 0 から被写体 3 0 0 に向けて照射される。この光源部 1 1 0 からのパルス光 1 6 0 の照射時刻を t 1 とする。

#### 【 0 0 4 7 】

次に S 3 5 0 では、制御・処理部 1 3 0 は、t 1 から S 1 0 0 で被写体観測信号を取得したときの遅延時間  $\tau$  が経過したタイミング t 2 において、カメラ部 1 2 0 に遅延撮像を行わせる。これにより、被写体 3 0 0 からの反射光により形成された被写体像が撮像される。また、制御・処理部 1 3 0 は、目的関数の値を複数の撮像画像の輝度値の平均値を用いて評価するために設定された撮像画像数 P に応じた回数のパルス光照射と遅延撮像とを行わせる。

#### 【 0 0 4 8 】

次に S 3 6 0 では、制御・処理部 1 3 0 は、カメラ部 1 2 0 により生成された撮像画像を用いて S 2 0 0 で設定した目的関数の値を評価する。評価した目的関数の値は、位相

( $x, y$ ) の値とともに、制御・処理部 130 内のメモリに保存する。

【0049】

次に S370 では、制御・処理部 130 は、実際の位相のステップ回数  $k$  が設定されたステップ回数  $K$  を超えたか否かを判定する。制御・処理部 130 は、 $k < K$  である場合は S371 に進み、 $k$  をインクリメント ( $k \leftarrow k + 1$ ) してセグメント領域  $j$  の位相 ( $x, y$ ) を更新する。そして制御・処理部 130 は、この更新された位相に対して S340 ~ S360 を再度行う。このようにステップ回数  $K$  だけレーザ光源 111 からのパルス光放射、SLM113 による位相変調、カメラ部 120 による遅延撮像および目的関数の値の評価を繰り返す。

【0050】

10

S370 で  $k = K$ 、すなわちステップ回数  $K$  の処理が完了すると、制御・処理部 130 は S380 に進む。S380 では、制御・処理部 130 は、メモリに保存された目的関数の値の評価結果から、目的関数の値が最大となる位相を読み出し、セグメント領域  $j$  の位相に設定する。ここまでの S320 ~ S380 の処理が、1 つのセグメント領域に対して行われる処理である。

【0051】

S390 では、制御・処理部 130 は、次のセグメント領域で同様に S320 ~ S380 の処理を反復し、目的関数の値が向上するようにパルス光 160 の波面を最適化する。この最適化処理によって撮像画像における被写体像に対応する撮像信号 (被写体観測信号) の強度が高くなり、この結果、波面成形処理を行わない場合に比べて高 SN な撮像画像を取得することが可能になる。なお、図 4 に示した波面成形処理は例に過ぎず、使用する最適化アルゴリズムに応じて異なる波面成形処理を行ってもよい。

20

【0052】

SLM113 として DMD を用いる場合には、位相変調ではなく振幅変調によってパルス光 160 を変調することもできる。例えば、DMD の画素のうちオンとなることで目的関数の値が向上する (最大により近づく) 画素をオンとし、目的関数の値が低下する (最大から離れる) 画素をオフにすることで、バイナリの振幅変調を行ってもよい。また、A. M. Caravaca-Aguirre, et al., "Real-time resilient focusing through a bending multi mode fiber", Optics Express, Vol.21, No.10, 12881-12887 (2013) が開示しているように、バイナリの振幅変調用の DMD を用いて、位相変調を行うこともできる。SLM113 はできるだけ高速で応答するものが望ましいため、LCOS よりも応答速度が高速な DMD を用いる方が望ましい。

30

【0053】

また、位相変調による目的関数の値の変化が微小である場合やノイズの影響が大きい場合には、パーティショニング法や遺伝的アルゴリズムを用いた最適化処理が有効である。また、シーケンシャル法を用いて最初に大きなセグメント領域で最適化処理を行い、目的関数の値が向上した後により小さなセグメント領域で最適化処理を行ってもよい。

【0054】

例えば、図 5 (a) に示すセグメント領域 411 のサイズを大きく設定し、SLM113 の最適化制御として、制御・処理部 130 は目的関数が最大になるように最適化処理を実行する。この第 1 の最適化処理 (第 1 の制御) の終了後に、セグメント領域 411 のサイズを小さく設定して第 2 の最適化処理 (第 2 の制御) を実行する。このとき、第 1 の最適化処理の結果得られた位相分布を第 2 の最適化処理時における初期値として用いる。このように、ノイズ成分の影響を考慮して最適化処理 (最適化制御) を調整するとよい。

40

【0055】

波面成形処理は、散乱が強い場合には反復回数  $N$  を増やすほど波面成形による効果が大きくなり、目的関数の値も向上する。ただし、反復回数  $N$  を増やすと、より長い測定時間を要する。この長い測定時間中に散乱が変化すると、波面成形の効果が小さくなる。一方、散乱が小さい場合には、散乱が強い場合に比べて反復回数  $N$  が少なくても波面成形による効果がある。したがって、波面成形による効果と測定時間とのバランスを考慮して反復

50

回数Nを設定するとよい。例えば、S 1 0 0での被写体観測信号の取得において、被写体像の歪みが小さい（散乱が小さい）場合であれば、空間周波数が低い基底パターン（または大きなセグメント領域サイズ）を用いて、少ない反復回数Nの処理を行うようにしてもよい。散乱光の影響は、S 1 0 0で被写体観測信号を取得する際に、ターゲット領域以外の領域に発生しているフレア量を評価することで見積もってもよい。

#### 【 0 0 5 6 】

また、測定時間を短くするためには、反復回数Nを小さくするだけでなく、S 3 4 0 ~ S 3 7 0の処理時間を短くすればよい。これには、パルス光放射から位相変調、パルス光照射および遅延撮像のそれぞれに要する時間が短縮できればよい。このため、パルス光源 1 1 1の繰り返し周波数、S L M 1 1 3のリフレッシュレートおよびカメラ部 1 2 0での撮像フレームレートは高速であることが望ましい。例えば、撮像に用いられる画素数を抑えることで、撮像フレームレートを上げることができる。このため、波面成形処理 S 3 0 0（またはS 1 0 0 ~ S 3 0 0）において、カメラ部 1 2 0（アレイセンサ 1 2 0 b）における撮像画素数をビニングによって抑えることで撮像フレームレートを高速化してもよい。さらに、撮像画像中のターゲット領域をR O I（Region Of Interest）として設定し、そのR O Iのみを撮像することで、撮像画素数を抑えて撮像フレームレートを高速化することも可能である。波面成形処理後におけるS 4 0 0での遅延撮像では、ビニングはせずに通常通りの撮像画素数での撮像を行えばよい。

#### 【 0 0 5 7 】

また、被写体 3 0 0までの撮像距離Lや、ゲーテッドイメージング装置 1 0 0および被写体 3 0 0の周囲の風速や気温等の気象条件を考慮して上記評価条件を決めてもよい。

#### 【 0 0 5 8 】

このように本実施例は、遅延撮像により得られた撮像画像から被写体観測信号が得られる領域としてのターゲット領域を特定する。そして、該ターゲット領域の輝度値を用いて目的関数を設定し、光源部 1 1 0から出射するパルス光 1 6 0の波面を目的関数が最大となる最適波面に近づけるように成形する最適化処理（S L M 1 1 3の最適化制御）を行う。

#### 【 0 0 5 9 】

次に、S 2 0 0において2値化処理によりターゲット領域が複数に分割されて抽出され、それぞれを別のターゲット領域として互いに独立に目的関数を設定して波面成形処理を行う場合について説明する。図6は、S 1 0 0において撮像画像 5 0 0に対して2値化処理を行うことにより抽出されたターゲット領域 5 0 1, 5 0 2, 5 0 3を模式的に示す。このように3つのターゲット領域 5 0 1, 5 0 2, 5 0 3が存在する場合には、前述したようにこれら3つをまとめて1つのターゲット領域とし、ターゲット領域 5 0 1, 5 0 2, 5 0 3の輝度値の総和を目的関数として設定することができる。

#### 【 0 0 6 0 】

一方、ターゲット領域 5 0 1, 5 0 2, 5 0 3を別々のターゲット領域として扱う場合は、以下の2つの方法がある。1つ目の方法は、単純にターゲット領域 5 0 1, 5 0 2, 5 0 3に対して互いに独立に目的関数を設定する方法である。この場合、ターゲット領域 5 0 1内にある輝度値の和を目的関数としてS 2 0 0 ~ S 4 0 0の処理を行う。同様にターゲット領域 5 0 2およびターゲット領域 5 0 3についてもS 2 0 0 ~ S 4 0 0の処理を行う。S 4 0 0では、取得した複数の撮像画像を、必要に応じて一部重複を許して繋ぎ合わせて最終的な1つの撮像画像を生成することができる。

#### 【 0 0 6 1 】

2つめの方法は、ターゲット領域 5 0 1, 5 0 2, 5 0 3を所定の基準に基づいてグループ分けし、そのグループごとに目的関数を設定する方法である。例えば、図6に示すように、ターゲット領域 5 0 1, 5 0 2, 5 0 3のおおよその中心（または重心）の位置間の距離をターゲット領域相互間の距離dとして算出する。そして、算出距離dと所定の基準距離d<sub>r</sub>とを比較して、算出された距離dが基準距離d<sub>r</sub>より長ければ、該距離dだけ離れた2つのターゲット領域を互いに独立したターゲット領域として扱い、ターゲット領

10

20

30

40

50

域ごとに目的関数を設定する。また、算出された距離  $d$  が基準距離  $d_r$  以下であれば、該距離  $d$  だけ離れた 2 つのターゲット領域を 1 つのターゲット領域として扱い、1 つの目的関数を設定する。

【 0 0 6 2 】

図 6 では、ターゲット領域 5 0 1 を他のターゲット領域 5 0 2 , 5 0 3 から独立したターゲット領域として扱い、このターゲット領域 5 0 1 には個別の目的関数を設定する。また、ターゲット領域 5 0 2 , 5 0 3 を 1 つのターゲット領域として扱い、これらに対して共通の 1 つの目的関数を設定する。ターゲット領域 5 0 2 , 5 0 3 に対する目的関数は、該ターゲット領域 5 0 2 , 5 0 3 の輝度値の和とすればよい。基準距離  $d_r$  は、例えば次式 ( 1 ) から算出される大気による波面の揺らぎの形状が同一であると見なせる角度 ( isoplanatic angle ) に基づいて算出してもよい。

10

【 0 0 6 3 】

【数 1】

$$\theta = (1.09k^2 C_n^2 L^{8/3})^{-3/5} \quad (1)$$

【 0 0 6 4 】

$k$  は波数、 $C_n^2$  は大気の屈折率の構造定数、 $L$  は光路長である。これを用いて、基準距離  $d_r$  を次式 ( 2 ) を用いて、

【 0 0 6 5 】

20

【数 2】

$$d_r = L \tan \theta \quad (2)$$

【 0 0 6 6 】

のように算出することができる。ただし、 $d_r$  はカメラ部 1 2 0 のカメラレンズ 1 2 0 a の倍率から、アレイセンサ 1 2 0 b の撮像面上の距離に換算する。また、構造定数  $C_n^2$  は、別途測定しておくか、何等かの事前情報や前提に基づいて算出する等しておく必要がある。また、S 1 0 0 の処理を行う前に行った複数回の撮像により得られた複数の撮像画像から散乱波面の相関長を算出し、その相関長に基づいて基準距離  $d_r$  を決めてもよい。なお、複数のターゲット領域を 1 つのターゲット領域に統合して波面成形処理を行っても目的関数が十分に向上しない場合は、これらターゲット領域を分けてそれぞれに対して独立に波面成形処理を行ってもよい。

30

【 0 0 6 7 】

また S 4 0 0 の処理の後に、図 7 に示すように、S 3 0 0 で成形された波面 1 6 1 を有するパルス光を被写体 3 0 0 上のターゲット領域 3 0 1 , 3 0 2 に対してその照射角度を変えながら照射して ( 被写体 3 0 0 をスキャンしながら ) 遅延撮像を行ってもよい。被写体 3 0 0 上のターゲット領域 3 0 1 , 3 0 2 は、撮像画像におけるターゲット領域に対応する領域である。

【 0 0 6 8 】

このときのスキャン量 3 1 0 は、例えば S L M 1 1 3 にスキャン量に応じた線形の位相シフト量を、S 3 0 0 で得られた位相分布 ( S L M 1 1 3 の位相変調パターン ) に足し合わせて設定してもよい。また、スキャン光学系を別途設けて、これを用いてスキャンを行ってもよい。このスキャンは、散乱の相関が保持される範囲で行われる。被写体 3 0 0 におけるパルス光の照射領域 ( つまりはパルス光の入射角度 ) を変えても散乱に相関がある範囲では、S 3 0 0 による波面成形の効果が保持されるため、この効果を利用してターゲット領域の近傍をイメージングすることも可能である。スキャンの範囲は、式 ( 1 ) を用いて設定してもよいし、照射角度を変えて撮像した結果から S 2 0 0 で設定した目的関数をモニタすることで設定してもよい。例えば、目的関数が S 3 0 0 の処理の初期値より大きい範囲であればよい。

40

【 0 0 6 9 】

50

さらに、上述したようにパルス光による被写体 300 のスキャンを行った結果、撮像画像中の被写体像の輝度値が低下したと判定した場合には、再度、波面成形処理を行ってもよい。この場合、前回の波面成形処理による効果が消滅する前に再度の波面成形処理を行うことが望ましい。すなわち、前回の波面成形処理の効果によって被写体像の輝度値がその波面成形処理の前よりも大きくなった状態で、再度、S300 の波面成形処理を含む S100 ~ S400 の測定処理を行う。前回の波面成形処理の効果が残っているために、全く最初から再度の波面成形処理を行うよりも短時間で S/N がより良好な撮像画像が得られる。

#### 【0070】

例えば、パルス光により被写体をスキャンしながら遅延撮像を行う過程で目的関数の値をモニタし、モニタ値が前回の波面成形処理で得られた値に対して所定値（例えば、半分の値）を下回ることに応じて再度、波面成形処理を行う。この際、モニタするのは、被写体 300 の一部の輝度値であってもよい。また、波面成形処理（最適化処理）の初期値の波面は、前回の波面成形処理で得られた波面とする。このように、パルス光による被写体 300 のスキャンとパルス光の波面成形とを繰り返しながら、より広い画角範囲に対して高 S/N の遅延撮像を行うことも可能である。最終的には、それぞれの波面成形処理で取得された撮像画像を繋げて表示部 140 に表示すればよい。

#### 【0071】

本実施例では、光源部 110 とカメラ部 120 とが一体化されたゲーテッドイメージング装置 100 と被写体 300 とが一直線上に位置する line-of-sight（または mono-static）の構成でイメージングを行う場合について説明した。これに対して、非特許文献 1 が開示しているように、光源部とカメラ部とがそれぞれ別々の離れた位置にあり、光源部と被写体とカメラ部とがある角度をもった位置関係で撮像を行うような bi-static の構成であってもよい。この場合も、光源部とカメラ部とを有するゲーテッドイメージング装置であることには変わりはない。上記角度は 0 ~ 180 度の間で任意に選択可能である。該角度が 180 度である場合は、透過光測定を行う配置となる。透過光測定を行う配置であっても、本実施例にて説明した波面成形処理を適用することが可能である。また、本実施例は、100 m ~ 数 10 km の遠方の被写体を監視する撮像システム等に適用することができる。

#### 【0072】

また、本実施例では、目的関数の値を最大とするように波面を成形する最適化処理を行う場合について説明したが、目的関数の設定に応じてその値を最小とするように波面を成形する最適化処理を行ってもよい。

#### 【実施例 2】

#### 【0073】

図 8 は、本発明の実施例 2 であるゲーテッドイメージング装置の構成を示している。基本的構成は、図 1 に示した実施例 1 の装置の構成と同様である。本実施例のゲーテッドイメージング装置 600 は、光源・撮像部 610、制御・処理部 630 および表示部 640 により構成される。光源・撮像部 610 に撮像手段が含まれ、制御・処理部 630 が制御手段に相当する。

#### 【0074】

光源・撮像部 610 においてレーザ光源 611 からは可視 ~ 近赤外の波長域（例えば波長 400 nm ~ 1100 nm）のパルス光が放射される。波長以外のパルス光の条件は、実施例 1 と同様である。レーザ光源 611 からコリメートされて放射されたパルス光は、ミラー 612 で反射され、ビームスプリッタ 614 を透過して SLM 613 に入射する。SLM 613 で波面が成形されたパルス光 660 は、ビームスプリッタ 614 で反射され、光学系 617 を通って光源・撮像部 610 から出射する。光学系 617 は、可視 ~ 近赤外の波長帯域用に設計されている。

#### 【0075】

光源・撮像部 610 から発せられ、不図示の被写体で反射されて光源・撮像部 610 に

10

20

30

40

50

戻ってきたパルス光（反射光としての被写体光）670は、光学系617およびビームスプリッタ614を透過してカメラ620に入射する。カメラ620に入射したパルス光は、カメラレンズ620aにより結像されてアレイセンサ620bに到達する。カメラ620内の画像生成部620cは、被写体像を光電変換したアレイセンサ620bから出力された撮像信号を用いて撮像画像（画像データ）を生成する。

【0076】

制御・処理部630は、この反射光のアレイセンサへの到達タイミング（遅延時間だけ遅れたタイミング）でカメラ620に遅延撮像を行わせる。アレイセンサは、ゲート機能を有するCMOSセンサにより構成されている。ただし、通常のCCDやCMOSセンサにイメージンテンシファイアを組み合わせたアレイセンサを用いてもよい。この場合、

10

【0077】

本実施例において、制御・処理部630は、基本的に実施例1において図2および図4に示した測定処理および波面成形処理と同様な処理を行う。すなわち、制御・処理部630は、S100において被写体観測信号を取得し、S200でターゲット領域を設定する。ただし、本実施例では、ターゲット領域の輝度値から目的関数を設定してS300の波面成形処理において最適化処理を行うのではなく、透過行列（transmission matrix）を利用した処理を行う。透過行列 $t$ は、散乱体に入力される電場を $E_a$ とし、散乱体から出力（透過）される電場を $E_b$ とすると、次式（3）に示すように線形的な入出力応答として定義される。

20

【0078】

【数3】

$$E_b = t E_a \quad (3)$$

【0079】

式（3）に基づいて様々な入力（基底、すなわちSLM613の位相変調パターン）の $E_a$ に対して出力（遅延撮像により取得された反射光の波面） $E_b$ を測定することで、透過行列 $t$ を得ることができる。この透過行列を利用してパルス光660の波面を適切に成形することで、実施例1と同様に、散乱体越しの被写体を高SNでイメージングすることができる。

30

【0080】

図9は、SLM613の有効変調領域を示している。制御・処理部630は、SLM613の有効変調領域内に、図中にチェッカー模様で示す位相変調を行う位相変調領域615と、その外側において位相変調を行わない非位相変調領域616とを設定する。制御・処理部630は、位相変調領域615に基底のパターン（ $E_a$ ）を描画し、位相変調領域615と非位相変調領域616との間に位相差を与えながら位相シフト法を行うことで、出力 $E_b$ を測定する。この場合、被写体に照射するパルス光とは異なる参照光用の光路を別途設ける必要がないので、装置構成を簡略化することができる。

【0081】

制御・処理部630は、位相シフト法を、基底のパターン数 $N$ だけ反復し、それぞれの基底で測定した波面を列ベクトルとして行列にスタックすることで、透過行列 $t$ を生成する。すなわち、複数の基底パターンを用いてSLM613で波面を成形して反射光の波面を測定した結果に基づいて透過行列 $t$ を生成する。

40

【0082】

$N$ 個の基底について $M$ 画素のアレイセンサにより反射光の波面を測定した場合には、 $M$ 行 $N$ 列の透過行列 $t$ が得られる。このとき、透過行列 $t$ の $j$ 列目の成分は、 $j$ 番目の基底で測定した波面に対応する。基底のパターンとしては、アダマール基底の基底パターン、ランダムな基底パターン、ツェルニケ多項式を用いて生成した基底パターン等を用いることができる。

【0083】

50

制御・処理部 630 は、透過行列  $t$  を生成（測定）した後、この透過行列  $t$  を用いて SLM 613 にパルス光 660 の波面を成形させる。ここでは、S200 で設定したターゲット領域を用いる。例えば、図 3（c）に示した 2 値化処理により抽出されたターゲット領域を、透過行列  $t$  を用いて再生する電場の振幅分布  $E_{\text{target}}$  として設定する。位相についての設定は任意である。制御・処理部 630 は、この  $E_{\text{target}}$  を用いて、パルス光 660 の変調波面としての  $E_a$  を次式（4）から算出する。

【0084】

【数 4】

$$E_a = t^\dagger E_{\text{target}} \quad (4)$$

10

【0085】

$\dagger$  は転置共役を示す。式（4）は、変調波面（ $E_a$ ）を、ターゲット領域に対応するベクトル（ $E_{\text{target}}$ ）と透過行列  $t$  の転置共役  $\dagger$  との積を用いて算出することを示している。式（4）で表現される  $E_a$  は、カメラ 620 のアレイセンサの撮像面で測定した被写体からの反射光の波面の位相共役波を表す。

【0086】

ただし、透過行列  $t$  を生成した際に用いた基底パターンによっては、式（4）で得られた  $E_a$  に対して、さらに基底の変換が必要である。具体的には、図 5（b）、（c）に示した基底パターンは、図 5（a）に示したセグメント領域ベースのパターンとは異なり、SLM 613 の座標と対応していない。したがって、制御・処理部 630 は、式（4）で算出した  $E_a$  を SLM 613 の座標に対応する基底パターンに変換する処理を行う。これは、式（4）で算出されたベクトルと、これに対応する基底パターンとの線形結合を求めればよい。なお、カメラ 620 の撮像面と SLM 613 とは被写体までの光路長が等しくなるように調整されている。

20

【0087】

上述したように式（4）で算出された  $E_a$ （変調波面）は、被写体からの反射光の波面の位相共役波に相当する。したがって、 $E_a$  を有するパルス光を被写体に向けて照射する、言い換えれば被写体に向けて照射されるパルス光の波面を変調波面で変調するように SLM 613 を制御することで、実施例 1 と同様に散乱体越しの被写体を高 SN でイメージングすることができる。

30

【0088】

さらに、取得した透過行列  $t$  を特異値分解することで、透過行列  $t$  の固有値の分布を解析することができる。固有値は、固有空間における透過率（透過固有値）を表す。したがって、透過固有値が小さい固有ベクトルは本測定における信号強度への寄与が小さい。例えば、透過行列  $t$  の全体の透過率がいくつかの固有ベクトルの透過固有値の和でほぼ近似できる条件では、それら固有ベクトルのみを用いてパルス光 660 の波面を成形してもよい。それ以外の固有ベクトルは信号強度にほとんど寄与しないために無視してよい。

【0089】

また、透過行列  $t$  の固有値を解析し、該固有値の分布から、大気散乱または揺らぎに起因するノイズ成分の波面に関する統計的性質を推定し、該統計的性質に基づいて、基底パターンの種類、基底パターンの空間周波数範囲および基底パターン数を設定してもよい。また、信号強度に主に寄与する固有ベクトルの空間周波数を解析し、測定される散乱波面の周波数成分の上限または周波数範囲を推定し、この推定結果に基づいて上述した基底パターンを生成してもよい。例えば、図 2 に示す測定処理の前段に、プレ測定として上記固有ベクトルの解析までを行い、波面成形に用いる基底パターンの種類、基底パターンの空間周波数範囲および基底パターン数  $N$  を設定することも可能である。プレ測定時には、少し多めの基底パターン数  $N$  で高空間周波数の基底パターンについてまで測定しておいてもよい。また、基底パターンを変えながら複数の条件で測定し、波面成形処理においてどの基底パターンを用いるかの指標にしてもよい。

40

50

## 【 0 0 9 0 】

プレ測定後は、このプレ測定の解析結果を利用して、本実施例の測定処理を行ってもよいし、実施例 1 で説明した最適化処理による波面成形にこの解析結果を適用してもよい。散乱波面は、ある相関時間以上経過すれば、異なる波面になる。一方で、散乱波面の統計的性質は、相関時間ほどの短時間では変化しないと考えてもよい。したがって、プレ測定の解析結果は、図 2 に示した測定処理を繰り返す間等、所定時間の間（例えば、大気の屈折率の構造定数  $C_n^2$  が大きく変化するまで）利用することが可能である。

## 【 0 0 9 1 】

本実施例は、可視～近赤外帯域の光を用いた近距離（数 m ～ 1 0 0 m 程度）の被写体を監視する撮像システム等に適用可能である。

10

## 【 0 0 9 2 】

また、本発明は、ゲート撮像装置以外にも、T O F（Time-of-Flight；飛行時間）測定可能なエリアセンサを搭載した撮像装置にも適用可能である。T O F 測定可能なエリアセンサとは、各画素単位で、光源部から照射されたパルス光を T O F ごとに時間分解して撮像可能なアレイセンサである。例えば、S W I R 帯域では、I n G a A s で構成される A P D（Avalanche PhotoDiode）アレイを用いることができる。また、単一素子の A P D センサを 2 次元平面に並べたものであってもよい。さらに、周波数領域で T O F 測定可能なアレイセンサであってもよい。例えば、可視・近赤外帯域で、ロックイン検出可能なロックイン C M O S センサなども適用できる。この場合、照射するビームはパルス光でなく、強度をある周波数の正弦波で変調した強度変調光であってもよい。光源を変調している変調信号と、被写体から反射・透過してくる変調光の変調信号との位相差から、T O F 測定することができる。これら T O F 測定可能なアレイセンサは、ゲート撮像装置と同様に、ある遅延時間で撮像装置に到達する光強度分布を選択的に撮像することができる。このように任意の遅延時間の光強度分布を選択的に測定できるエリアセンサを用いた撮像装置であれば本発明の実施例に含まれる。

20

## 【 0 0 9 3 】

以上説明したように、各実施例は、遅延撮像により得られた撮像画像から被写体に対応する信号（被写体観測信号）を特定し、該信号の強度が増加するように、被写体に向けて照射される光の波面を成形する。そして、被写体からの反射光（または透過光）に対する遅延撮像を行うことで、散乱体越しの被写体を高 S N で撮像することができる。

30

なお、各実施例で説明した撮像装置の構成、波面を成形するための最適化処理の方法および透過行列の生成方法は例にすぎず、他の構成や方法を用いることができる。

（その他の実施例）

本発明は、上述の実施形態の 1 以上の機能を実現するプログラムを、ネットワーク又は記憶媒体を介してシステム又は装置に供給し、そのシステム又は装置のコンピュータにおける 1 つ以上のプロセッサがプログラムを読み出し実行する処理でも実現可能である。また、1 以上の機能を実現する回路（例えば、A S I C）によっても実現可能である。以上説明した各実施例は代表的な例にすぎず、本発明の実施に際しては、各実施例に対して種々の変形や変更が可能である。

40

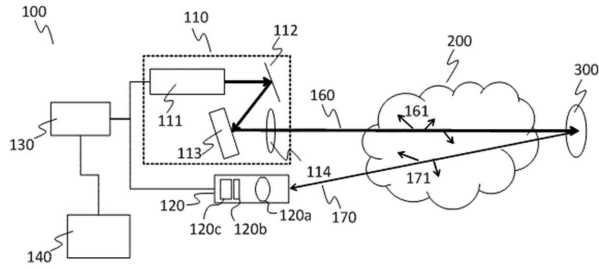
## 【 符号の説明 】

## 【 0 0 9 4 】

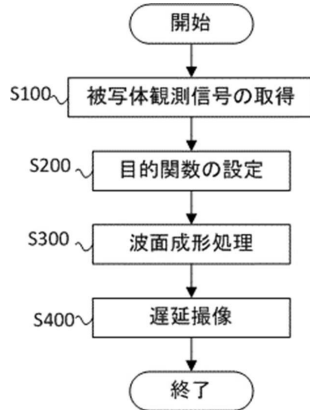
- 1 1 0 光源部
- 1 1 3 , 6 1 3 空間光変調器
- 1 2 0 カメラ部
- 1 3 0 , 6 3 0 制御・処理部
- 6 1 0 光源・撮像部



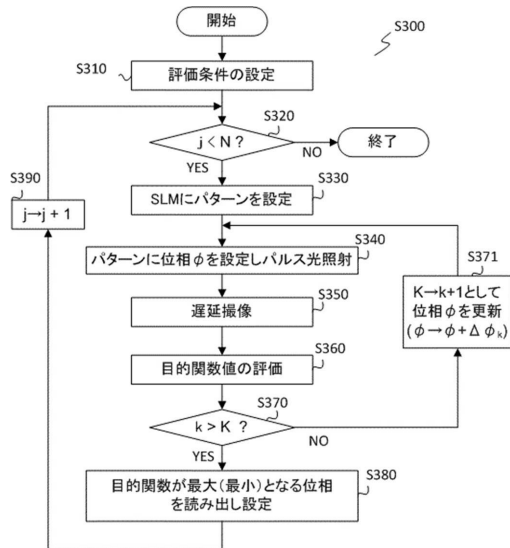
【図 1】



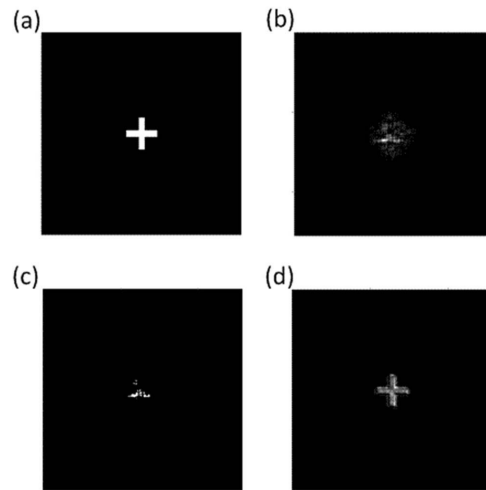
【図 2】



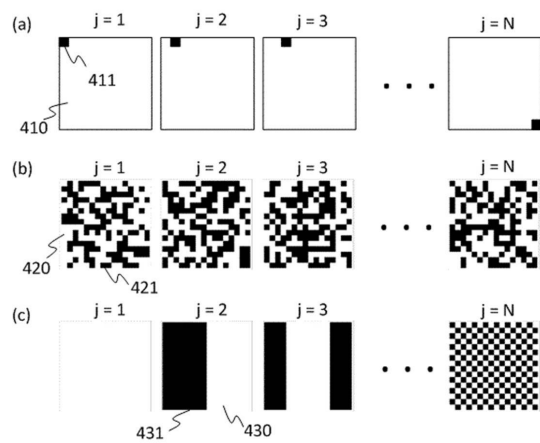
【図 4】



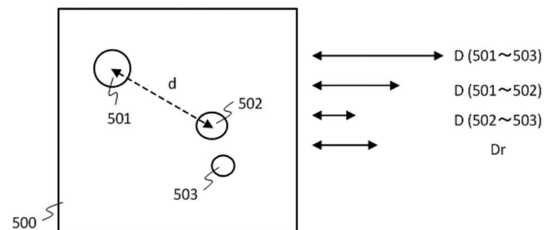
【図 3】



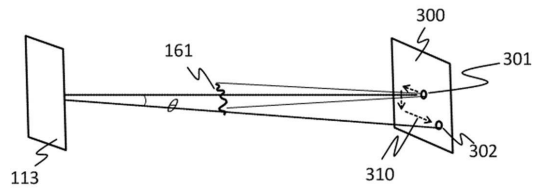
【図 5】



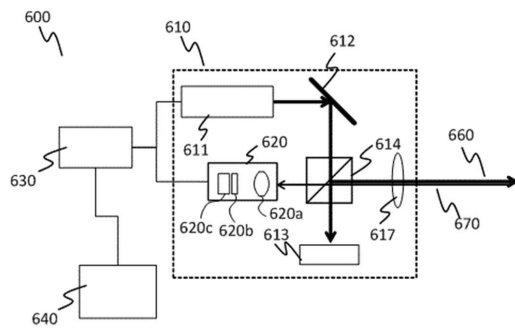
【図 6】



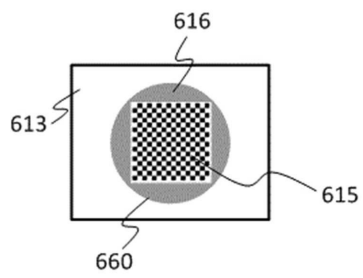
【図 7】



【図 8】



【図 9】



---

フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I  
G 0 1 S 17/89  
H 0 4 N 5/225 6 0 0

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

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)  
H 0 4 N 5 / 2 3 2  
G 0 1 C 3 / 0 6  
G 0 1 S 1 7 / 8 9  
G 0 3 B 1 5 / 0 0  
H 0 4 N 5 / 2 2 5