

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号  
特許第7676201号  
(P7676201)

(45)発行日 令和7年5月14日(2025.5.14)

(24)登録日 令和7年5月2日(2025.5.2)

(51)国際特許分類 F I  
G 0 1 M 11/02 (2006.01) G 0 1 M 11/02 B

請求項の数 13 (全15頁)

(21)出願番号	特願2021-65697(P2021-65697)	(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
(22)出願日	令和3年4月8日(2021.4.8)	(74)代理人	100110412 弁理士 藤元 亮輔
(65)公開番号	特開2022-161124(P2022-161124 A)	(74)代理人	100104628 弁理士 水本 敦也
(43)公開日	令和4年10月21日(2022.10.21)	(74)代理人	100121614 弁理士 平山 倫也
審査請求日	令和6年3月29日(2024.3.29)	(72)発明者	杉本 智洋 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	小野寺 麻美子

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 波面計測装置、波面計測方法、並びに、光学系および光学素子の製造方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

被検物に向けて第1の光を発する第1の光源部と、  
前記被検物を通過した前記第1の光を導光する光学系と、  
前記被検物と前記光学系とを通過した前記第1の光を受光する受光部と、  
第2の光を発する第2の光源部と、  
前記第1の光の光路において前記光学系と前記受光部との間に配置され、前記第2の光を前記光学系へ反射させる第1の反射部と、  
前記第1の光の光路において前記第1の光源部と前記光学系との間に配置され、前記第2の光を前記受光部へ反射させる第2の反射部と、  
前記受光部によって前記第2の光に基づいて出力される第2信号に基づいて参照データを算出し、前記受光部によって前記第1の光に基づいて出力される第1信号と該参照データとに基づいて前記被検物の波面を算出する算出部と、を有することを特徴とする波面計測装置。

【請求項2】

前記第1の光の光路における前記光学系と前記第1の反射部との間に配置され、前記第1の反射部からの前記第2の光を前記受光部へ反射させる第3の反射部を更に有し、  
前記算出部は、前記受光部から出力される前記第3の反射部を通過した前記第2の光に対応する信号に基づいて、前記参照データを算出することを特徴とする請求項1に記載の波面計測装置。

## 【請求項 3】

前記受光部は、前記第 1 の反射部を透過した前記第 2 の光を受光することを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の波面計測装置。

## 【請求項 4】

第 3 の光を発する第 3 の光源部と、

前記第 1 の光の光路における前記光学系と前記第 1 の反射部との間に配置され、前記第 3 の光を前記受光部へ反射する第 4 の反射部とを更に有し、

前記算出部は、前記受光部から出力される前記第 3 の光に対応する信号に基づいて、前記参照データを算出することを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか一項に記載の波面計測装置。

10

## 【請求項 5】

前記受光部は、マイクロレンズアレイを有することを特徴する請求項 1 乃至 4 のいずれか一項に記載の波面計測装置。

## 【請求項 6】

前記受光部は、ハルトマンマスクを有することを特徴する請求項 1 乃至 5 のいずれか一項に記載の波面計測装置。

## 【請求項 7】

前記受光部は、イメージセンサであることを特徴とする請求項 1 乃至 6 のいずれか一項に記載の波面計測装置。

## 【請求項 8】

前記参照データは、前記受光部における複数の点像の位置に関する情報であることを特徴とする請求項 1 乃至 6 のいずれか一項に記載の波面計測装置。

20

## 【請求項 9】

前記第 1 の反射部は、着脱可能であることを特徴とする請求項 1 乃至 8 のいずれか一項に記載の波面計測装置。

## 【請求項 10】

前記第 2 の光源部は、着脱可能であることを特徴とする請求項 1 乃至 9 のいずれか一項に記載の波面計測装置。

## 【請求項 11】

第 1 の光源部から射出された第 1 の光を被検物と光学系とを介して、受光部により受光する第 1 受光ステップと、

30

第 2 の光源部から射出され、前記第 1 の光の光路において前記光学系と前記受光部との間に配置された第 1 の反射部及び前記第 1 の光の光路において前記第 1 の光源部と前記光学系との間に配置された第 2 の反射部にて反射した第 2 の光を受光する第 2 受光ステップと、  
前記受光部から出力される前記第 2 の光に対応する信号に基づいて参照データを算出する第 1 算出ステップと、

前記第 1 の光に対応する信号と前記参照データに基づいて前記被検物の波面を算出する第 2 算出ステップと、を有することを特徴とする波面計測方法。

## 【請求項 12】

光学系を組み立てるステップと、

40

請求項 11 に記載の波面計測方法を用いて、組み立てられた前記光学系の波面を計測することにより、該光学系の光学性能を評価するステップと、を有することを特徴とする光学系の製造方法。

## 【請求項 13】

光学素子を加工するステップと、

請求項 11 に記載の波面計測方法を用いて、加工された前記光学素子の波面を計測することにより、該光学素子の光学性能を評価するステップと、を有することを特徴とする光学素子の製造方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

50

## 【 0 0 0 1 】

本発明は、光学系の透過波面を計測する波面計測装置に関する。

## 【 背景技術 】

## 【 0 0 0 2 】

従来、光学系や光学素子などの被検物の性能を評価するため、波面センサを用いたシングルパス透過波面計測が利用されている。被検物の透過波面を高精度に計測するには、波面計測装置のシステムエラーを校正する必要がある。

## 【 0 0 0 3 】

特許文献 1 には、被検光学系の複数の物体高座標の透過波面を計測し、波面データから所定の収差成分を抽出し、所定の収差成分と偏心収差感度とを用いて、システムエラーを分離して被検光学系の偏心量を計測する偏心量計測装置が開示されている。特許文献 2 には、被検光学系と計測装置との相対位置関係を変化させて被検光学系の透過波面を計測し、波面データと相対位置関係とを用いてシステムエラーを校正して被検光学系の波面を計測する波面計測装置が開示されている。

10

## 【 先行技術文献 】

## 【 特許文献 】

## 【 0 0 0 4 】

【 文献 】特許第 6 0 7 2 3 1 7 号公報

【 文献 】特開 2 0 0 6 - 3 0 0 1 6 号公報

## 【 発明の概要 】

## 【 発明が解決しようとする課題 】

## 【 0 0 0 5 】

しかしながら、特許文献 1 に開示された偏心量計測装置は、複数の軸外波面計測が必要となるため、システムエラーの校正に時間を要する。また、被検物が大口径レンズの場合、偏心量計測装置が大型化する。

20

## 【 0 0 0 6 】

特許文献 2 に開示された波面計測装置は、被検光学系と計測装置との相対位置関係を変化させたとき、被検光学系や計測装置の内部の光学素子の状態が変化しないことを前提としてシステムエラーを校正する。しかしながら、被検光学系や計測装置の光軸が水平方向を向いている場合、相対位置関係の変化（光軸に関する回転）に伴って自重変形が発生し、内部の光学素子の状態が変化するため、システムエラーの校正精度が低下する。

30

## 【 0 0 0 7 】

そこで本発明は、短時間かつ高精度でシステムエラーを校正することが可能な小型の波面計測装置、波面計測方法、光学系の製造方法、および、光学素子の製造方法を提供することを目的とする。

## 【 課題を解決するための手段 】

## 【 0 0 0 8 】

本発明の一側面としての波面計測装置は、被検物に向けて第 1 の光を発する第 1 の光源部と、前記被検物を通過した前記第 1 の光を導光する光学系と、前記被検物と前記光学系とを通過した前記第 1 の光を受光する受光部と、第 2 の光を発する第 2 の光源部と、前記第 1 の光の光路において前記光学系と前記受光部との間に配置され、前記第 2 の光を前記光学系へ反射させる第 1 の反射部と、前記第 1 の光の光路において前記第 1 の光源部と前記光学系との間に配置され、前記第 2 の光を前記受光部へ反射させる第 2 の反射部と、前記受光部によって前記第 2 の光に基づいて出力される第 2 信号に基づいて参照データを算出し、前記受光部によって前記第 1 の光に基づいて出力される第 1 信号と該参照データとに基づいて前記被検物の波面を算出する算出部と、を有する。

40

## 【 0 0 0 9 】

本発明の他の目的及び特徴は、以下の実施例において説明される。

## 【 発明の効果 】

## 【 0 0 1 0 】

50

本発明によれば、短時間かつ高精度でシステムエラーを校正することが可能な小型の波面計測装置、波面計測方法、光学系の製造方法、および、光学素子の製造方法を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0011】

【図1】実施例1における波面計測装置の概略構成図である。

【図2】実施例1における波面計測方法のフローチャートである。

【図3】実施例1におけるハーフミラーと波面センサで発生するシステムエラーの計測配置図である。

【図4】実施例2における波面計測装置の概略構成図である。

10

【図5】実施例3における波面計測装置の概略構成図である。

【図6】光学系の製造方法の製造工程図である。

【図7】光学素子の製造方法の製造工程図である。

【発明を実施するための形態】

【0012】

以下、本発明の実施例について、図面を参照しながら詳細に説明する。

【実施例1】

【0013】

まず、図1を参照して、本発明の実施例1における波面計測装置について説明する。図1は、本実施例における波面計測装置1の概略構成図である。

20

【0014】

波面計測装置1は、光源10、11、ファイバ20、21、ハーフミラー40、60、リレー光学系（光学系）50、コリメータレンズ70、波面センサ（シャックハルトマンセンサなどの受光部）80、コンピュータ（算出部）90を備えて構成されている。このような構成において、波面計測装置1は、被検物30の透過波面を計測する。本実施例において、被検物30は、複数のレンズを組み合わせて構成された光学系（例えば、大口径の超望遠レンズ）である。

【0015】

図1(A)は、被検物30を透過する被検光の光路を示している。光源10は、例えば、半導体レーザやLEDであり、ファイバ（シングルモードファイバ）20を介して第1の光（発散光）1000を射出する。本実施例において、光源10およびファイバ20は、第1の光源系（第1の光源部）100を構成する。

30

【0016】

被検物30に入射して透過した第1の光1000は、大きな光束の略平行光となり、ハーフミラー（第2の反射部）40に入射する。ハーフミラー40の一方の面は、反射防止膜が形成されたオプティカルフラットで、他方の面は一部の光を透過し、残りを反射するオプティカルフラット（反射面）である。反射面は、高い平面度（例えば  $\lambda/20$ ）を有する。

【0017】

ハーフミラー40を透過した第1の光1000は、リレー光学系50において適切なサイズの光束に縮小され、ハーフミラー60を透過し、波面センサ80で受光される。波面センサ80で受光された第1の光1000の信号は、コンピュータ（算出部）90に送られる。

40

【0018】

図1(B)は、被検物30を透過（通過）しない参照光の光路を示している。光源11は、ファイバ21を介して、光源10と略同一の波長の第2の光（発散光）2000を射出する。第2の光2000は、コリメータレンズ（例えば対物レンズ）70を通過して、略無収差の略平行光となる。なお、略平行光となった第2の光2000の光束サイズは、波面センサ80に入射する第1の光1000の光束サイズと同じ、または第1の光1000の光束サイズよりも大きい。本実施例において、光源11、ファイバ21、およびコリメ

50

ータレンズ70は、第2の光源系(第2の光源部)200を構成する。

【0019】

第2の光源系200から射出された第2の光2000は、ハーフミラー(第1の反射部)60で反射され、第1の光1000の進行方向と反対方向に進行する第2の光2000Aとなる。第2の光2000Aは、リレー光学系50で拡大し、ハーフミラー(第2の反射部)40に入射する。第2の光2000Aは、ハーフミラー40で反射され、第1の光1000の進行方向と同じ方向に進行する第2の光2000Bとなる。

【0020】

第2の光2000Bは、リレー光学系50で縮小され、ハーフミラー60を透過し、波面センサ80で受光される。なお、波面センサ80に入射した第2の光2000Bの光束サイズは、波面センサ80に入射した第1の光1000の光束サイズと同じ、または第1の光1000の光束サイズよりも大きい。波面センサ80で受光された第2の光2000Bの信号は、コンピュータ90に送られる。コンピュータ90は、第2の光2000Bの信号から参照データを算出し、第1の光1000の信号と、参照データに基づいて被検物30の透過波面を算出する。

10

【0021】

本実施例では、シャックハルトマンの原理を利用して波面を算出する。すなわち波面センサ80は、マイクロレンズアレイを備えたシャックハルトマンセンサである。波面収差の無い平行光がシャックハルトマンセンサに入射すると、マイクロレンズアレイの周期と同じ周期のスポット配列像が撮像される。一方、波面収差の有る光がシャックハルトマンセンサに入射すると、スポット配列像のそれぞれのスポット位置が各マイクロレンズに入射した光の波面の傾きに比例してシフトする。このスポット位置のシフト量に基づいて波面が算出される。

20

【0022】

次に、図2を参照して、本実施例における被検物30の透過波面の計測手順(波面計測方法)について説明する。図2は、波面計測方法のフローチャートである。

【0023】

まず、ステップS10において、第1の光源系100から被検物30へ向けて発し、被検物30とリレー光学系50を1回透過(シングルパス)した第1の光1000を波面センサ80で受光する(第1受光ステップ)。このとき、第2の光源系200から射出する光が混入しないように、第2の光源系200の電源をOFF、または、第2の光2000を遮光しておく。波面センサ80で受光した第1の光1000の信号 $W_{meas}$ は、被検物30の透過波面 $W_{sample}$ だけでなく、波面計測装置1のシステムエラー $W_{REF}$ を含む。システムエラー $W_{REF}$ とは、リレー光学系50の透過波面 $W_{relay}$ とハーフミラー60の透過波面 $W_{HMT}$ と波面センサ80で発生する検出誤差 $W_{SHS}$ との和である。なお、第1の光源系100から射出した光自体は、ファイバ20の空間フィルタ効果により、略無収差である。第1の光1000の信号 $W_{meas}$ は、以下の式1で表される。

30

【0024】

【数1】

$$W_{meas} = W_{sample} + (W_{relay} + W_{HMT} + W_{SHS}) = W_{sample} + W_{REF} \dots (1)$$

40

【0025】

続いてステップS20において、第2の光源系200から射出し、ハーフミラー60とハーフミラー40を介して、リレー光学系50を2回透過(ダブルパス)した第2の光2000Bを波面センサ80で受光する(第2受光ステップ)。このとき、第1の光源系100から射出する光が混入しないように、第1の光源系100の電源をOFF、または、第1の光1000を遮光しておく。波面センサ80で受光した第2の光に対応する信号 $W_{ref1}$ は、波面計測装置1のシステムエラーを構成する3つの要素(リレー光学系50の透過波面 $W_{relay}$ 、ハーフミラー60の透過波面 $W_{HMT}$ 、波面センサ80の検出誤差

50

$W_{SHS}$ ) の情報を含む。なお、第 2 の光源系 200 から射出した光自体は、ファイバ 21 から射出し、収差補正されたコリメータレンズ 70 でコリメートされているため、略無収差である。ハーフミラー 40 における反射波面も無視できるほど小さい。信号  $W_{ref1}$  は、ハーフミラー 60 の反射波面  $W_{HM_r}$  の情報を含む。すなわち、第 2 の光 2000B の信号  $W_{ref1}$  は、以下の式 (2) で表される。

【0026】

【数 2】

$$W_{ref1} = 2W_{relay} + W_{HM_t} + W_{SHS} + W_{HM_r} \dots (2)$$

10

【0027】

続いてステップ S30 において、コンピュータ 90 は、第 2 の光 2000B の信号  $W_{ref1}$  に基づいて、システムエラーに相当する参照データ  $W_{REF}$  を算出する (第 1 算出ステップ)。通常、ハーフミラー 60 の透過波面  $W_{HM_t}$ 、反射波面  $W_{HM_r}$ 、および波面センサ 80 で発生する検出誤差  $W_{SHS}$  は、無視できるほど小さく、 $W_{HM_t} \sim W_{HM_r} \sim W_{SHS} \sim 0$  である。すなわち、参照データ (システムエラー)  $W_{REF}$  は、実質的にはリレー光学系 50 の透過波面  $W_{relay}$  に相当するため、以下の式 (3) で表される。

【0028】

【数 3】

$$W_{REF} \approx W_{relay} \cong \frac{W_{ref1}}{2} \dots (3)$$

20

【0029】

仮に、ハーフミラー 60 と波面センサ 80 由来のシステムエラーが無視できない量の場合、次のような方法で計測することができる。図 3 は、ハーフミラー 60 と波面センサ 80 で発生するシステムエラーの計測配置図である。

【0030】

図 3 (A) に示されるように、波面計測装置 1 において、リレー光学系 50 とハーフミラー 60 との間に、高い平面度を有するミラー (第 3 の反射部) 43 を挿入する。第 2 の光源系 200 から射出してハーフミラー 60 で反射した第 2 の光 2000A は、ミラー 43 で反射され、第 1 の光 1000 の進行方向と同じ方向に進行する第 2 の光 2000C となる。第 2 の光 2000C は、ハーフミラー 60 を透過し、波面センサ 80 で受光される。波面センサ 80 で受光された第 2 の光 2000C の信号  $W_{ref2}$  は、以下の式 (4) で表される。なお、ミラー 43 における反射波面は無視できる。

30

【0031】

【数 4】

$$W_{ref2} = W_{HM_t} + W_{SHS} + W_{HM_r} \dots (4)$$

40

【0032】

一般的に、ハーフミラーの反射面は高い平面度を有するため、反射波面は無視できるほど小さい。一方、ハーフミラーの透過波面 (特にハーフミラーがキューブ型ビームスプリッタの場合) は、無視できないことがある。すなわち、 $W_{HM_t} \gg W_{HM_r} \sim 0$  となる。よって、参照データ (システムエラー)  $W_{REF}$  は、式 (1)、式 (2)、および式 (4) より、以下の式 (5) のように表される。

【0033】

【数 5】

50

$$W_{REF} = W_{relay} + W_{HMT} + W_{SHS} \approx \frac{W_{ref1} + W_{ref2}}{2} \dots (5)$$

## 【0034】

仮に、ハーフミラー60の反射波面 $W_{HMT}$ も校正したい場合、図3(B)のような系を組む。すなわち、リレー光学系50とハーフミラー60との間から、第1の光1000の進行方向と同じ方向に、第1の光の波長と略同一の波長の第3の光3000を波面センサ80に向けて射出する。そして、ハーフミラー60を透過し、波面センサ80で受光された第3の光3000の信号を取得する。

10

## 【0035】

図3(B)では、リレー光学系50とハーフミラー60の間に、高い平面度を有するミラー(第4の反射部)75を配置し、第3の光源系(第3の光源部)300からの第3の光3000を横から導光している。第3の光源系300は、光源12、ファイバ22、およびコリメータ71で構成される。第3の光3000の信号は、波面計測装置1を組み立てる前に取得しておいてもよい。ミラー75を用いる代わりに、リレー光学系50を取り外し、リレー光学系の代わりに第3の光源系300を第1の光1000の光路上に配置してもよい。第3の光源系300の代わりに第2の光源系200を配置し、第2の光源系200から射出する光を第3の光3000として利用してもよい。波面センサ80で受光した第3の光3000の信号 $W_{ref3}$ は、以下の式(6)で表される。

20

## 【0036】

## 【数6】

$$W_{ref3} = W_{HMT} + W_{SHS} \dots (6)$$

## 【0037】

参照データ(システムエラー) $W_{REF}$ は、式(1)、式(2)、式(4)、および式(6)より、以下の式(7)のように表される。

## 【0038】

## 【数7】

$$W_{REF} = W_{relay} + W_{HMT} + W_{SHS} = \frac{W_{ref1} + 2W_{ref3} - W_{ref2}}{2} \dots (7)$$

30

## 【0039】

最後に、ステップS40において、コンピュータ90は、第1の光1000の信号 $W_{meas}$ と参照データ $W_{REF}$ とに基づいて、被検物30の透過波面 $W_{sample}$ を算出する(第2算出ステップ)。被検物30の透過波面 $W_{sample}$ は、式(1)と式(3)、または式(1)と式(5)、または式(1)と式(7)を用いて、以下の式(8)のように表される。

## 【0040】

## 【数8】

$$W_{sample} = W_{meas} - W_{REF} \dots (8)$$

40

## 【0041】

波面センサ80で受光したそれぞれの信号 $W_{meas}$ 、 $W_{ref1}$ 、 $W_{ref2}$ 、 $W_{ref3}$ を前述の式に代入するときのデータの形式は、波面の2次元配列でもよいし、波面を特定の関数(例えばゼルニケ関数)でフィッティングしたときの係数でもよい。または、波面センサ(シャックハルトマンセンサ)の各スポット位置(複数の点像の位置に関する情報)でもよい。通常、シャックハルトマンセンサは、無収差光が入射したときのスポット位

50

置を基準に被検光の波面を解析する。本実施例では、その代わりに、参照データ（システムエラー） $W_{REF}$ のスポット位置を基準に第1の光1000のスポット位置 $W_{meas}$ のシフト量を算出することで、システムエラー校正済みの被検物30の透過波面が得られる。以上の構成により、本実施例では、波面計測装置1のシステムエラーを校正して、被検物30の透過波面を計測することができる。

#### 【0042】

以上のように、本実施例において、波面計測装置1は、第1の光源部（第1の光源系100）、光学系（リレー光学系50）、受光部（波面センサ80）、および算出部（コンピュータ90）を有する。また波面計測装置は、第2の光源部（第2の光源系200）、第1の反射部（ハーフミラー60）、および第2の反射部（ハーフミラー40）を有する。第1の光源部は、第1の光1000を被検物30に向けて発する。光学系は、被検物を介した第1の光を導光する（光路および光束径を調整する）。受光部は、光学系からの第1の光を受光する。算出部は、受光部から出力される第1の光に対応する信号と、参照データとに基づいて、被検物の波面を算出する。第2の光源部は、第2の光2000を発する。第1の反射部は、第1の光の光路における光学系と受光部との間に配置され、第2の光を光学系に向けて反射する。第2の反射部は、第1の光の光路における第1の光源部と光学系との間に配置され、光学系からの第2の光を受光部に向けて反射する。算出部は、受光部から出力される第2の光に対応する信号に基づいて、参照データを算出する。好ましくは、参照データは、受光部における複数の点像の位置に関する情報である。

10

#### 【0043】

好ましくは、波面計測装置は、第1の光の光路における光学系と第1の反射部との間に配置され、第1の反射部からの第2の光を受光部に向けて反射する第3の反射部（ミラー43）を有する。算出部は、受光部から出力される第3の反射部を介した第2の光に対応する信号に基づいて、参照データを算出する。また好ましくは、受光部は、第1の反射部を透過した第2の光を受光する。

20

#### 【0044】

好ましくは、波面計測装置は、第3の光3000を発する第3の光源部（第3の光源系300）、および、第1の光の光路における光学系と第1の反射部との間に配置され、第3の光を受光部に向けて反射する第4の反射部（ミラー75）を有する。算出部は、受光部から出力される第3の光に対応する信号に基づいて、参照データを算出する。

30

#### 【0045】

一般的なシングルパス波面計測装置では、被検光と同じ光路を通り、かつ、被検光の光束サイズと同じ、または被検光の光束サイズよりも大きい光束を有する略無収差光（参照光）を用いて、波面計測装置のシステムエラーを校正する。しかしながら、大口径の被検物の場合、その口径以上の光束の略無収差光を準備することが難しい。そこで本実施例では、その代わりに、被検光の光束が小さくなる波面センサの近傍から、被検光と逆方向に向けて、被検光の光束サイズと同じ、または被検光の光束サイズよりも大きい光束の略無収差光を射出する。そして、被検物直前に配置されたハーフミラーで反射して、被検光と同じ光路を通る参照光を生成する。また、シングルパス（被検光）とダブルパス（参照光）との不整合を演算により補正する。本実施例は、小さい光束であれば略無収差光を準備することは容易であること、また、大口径でも高い平面度の反射面であれば簡単に準備することができることを利用している。

40

#### 【0046】

また本実施例では、被検物を回転させて複数の波面を計測する必要がない。第2の光源系は小さい光学素子のみで構成できるため、波面計測装置のサイズを抑制することができる。以上のように、本実施例を用いれば、波面計測装置の大きさを抑制しつつ、短い計測時間で波面計測装置のシステムエラーを校正することができる。

#### 【0047】

本実施例の計測フローでは、被検物の透過波面の情報を含む第1の光1000の信号を取得してから、システムエラーの情報を含む第2の光2000Bの信号を取得するが、順

50

番は逆でもよい。システムエラーの経時変化が小さい場合、事前にステップ S 2 0 とステップ S 3 0 を実施して参照データを取得しておけば、計測フローの中ではステップ S 2 0 とステップ S 3 0 を省略してもよい。

#### 【 0 0 4 8 】

本実施例では、第 2 の反射部としてのハーフミラー 4 0 を常設している。ただし、その代わりに、着脱可能なミラーを第 2 の反射部として準備し、ステップ S 2 0 のときだけに装着してもよい。また本実施例では、ハーフミラー 6 0 や第 2 の光源系 2 0 0 を常設しているが、その代わりに、着脱可能なハーフミラー 6 0 や第 2 の光源系 2 0 0 を準備し、ステップ S 2 0 のときだけに装着してもよい。また本実施例では、収差補正されたコリメータレンズ 7 0 として対物レンズを採用している。その代わりに、大口径のレンズ（例えば超望遠レンズ）を準備し、その近軸領域の小さい光束だけ取り出して、第 2 の光 2 0 0 0 としてもよい。近軸領域の波面は、略無収差とみなすことができる。また本実施例では、第 1 の光源系 1 0 0 の光源 1 0 と第 2 の光源系 2 0 0 の光源 1 1 とを別々に準備している。その代わりに、1 つの光源（例えば光源 1 0）からファイバ 2 0、2 1 それぞれに光を分岐することで、光源 1 1 を省略してもよい。

10

#### 【 0 0 4 9 】

本実施例では、波面センサ 8 0 として、マイクロレンズアレイを備えた Shack-Hartmann センサを用いているが、これに限定されるものではない。それに代えて、波面センサ 8 0 は、Hartmann マスクを備えたシアリング干渉計（タルボ干渉計）を用いてもよい。Hartmann マスクは、2 次元位相型回折格子または 2 次元吸収型回折格子のいずれでもよい。シアリング干渉計では、Hartmann マスクの後方にできる自己像の歪みから、フーリエ変換法によって波面を算出することができる。または Hartmann マスクとして、ピンホールアレイ（1 つのピンホールを透過した光と隣接するピンホールを透過した光との干渉が無視できるほどピンホール同士が離れているアレイ）を用いて、Shack-Hartmann センサと同様の原理で波面を回復してもよい。

20

#### 【 0 0 5 0 】

または、本実施例において、被検光の強度情報を用いて波面を算出する方法を採用してもよい。この方法は、以下のとおりである。すなわち、直進ステージ上にイメージセンサ（マイクロレンズアレイや Hartmann マスクを含まない）を固定したものを波面センサ 8 0 として配置する。そして、直進ステージを駆動しながら像を複数撮像する。コンピュータ 9 0 は、撮像された像に基づいて、被検物 3 0 の透過波面を算出する。像から波面を算出する算出方法は、強度輸送方程式を用いた方法や、特定の波面の初期値に基づいて最適化計算を行う方法でもよい。または、波面と像との関係を機械学習させた人工知能（A I）を用いて波面を算出してもよい。

30

#### 【 実施例 2 】

#### 【 0 0 5 1 】

次に、図 4 を参照して、本発明の実施例 2 における波面計測装置について説明する。図 4 は、本実施例における波面計測装置 2 の概略構成図である。

#### 【 0 0 5 2 】

図 4 (A) は、被検物 3 0 を透過した第 1 の光 1 0 0 0 の波面を計測する配置を示す図である。波面計測装置 2 は、第 1 の光源系 1 0 0、回折素子 1 1 0、レンズ 1 5 0 a、1 5 0 b、1 5 1 b、1 5 2 b、ミラー 1 2 0、1 2 2、波面センサ 8 0、8 1、8 2、およびコンピュータ 9 0 を有する。また波面計測装置 2 は、着脱可能な第 2 の光源系 2 0 0、ミラー 4 1 およびハーフミラー（ペリクルビームスプリッタ）6 1 を有する。被検物 3 0 は、複数のレンズを組み合わせて構成された光学系である。第 1 の光源系 1 0 0 は、光源 1 0、1 1、1 2 とピンホールアレイ 2 5 とにより構成されており、被検物 3 0 の複数の像高から被検光を出射する。波面計測装置 2 は、上記複数の像高から出て被検物 3 0 を透過した複数の被検光の波面を計測する。

40

#### 【 0 0 5 3 】

光源 1 0、1 1、1 2 から出射した光はそれぞれ、ピンホールアレイ 2 5 の複数のピン

50

ホールを透過して発散波としての複数の第1の光1000、1001、1002となり、被検物30に入射する。被検物30を透過した複数の第1の光1000、1001、1002はそれぞれ、回折素子110において-1次回折光1000、0次回折光1001、+1次回折光1002となって出射する。

【0054】

第1の光1000、1001、1002は、レンズ150aを透過した後の集光点付近にて互いに分離する。第1の光1001は、そのまま直進し、レンズ151bを通過して波面センサ81にて受光される。一方、第1の光1000、1002はそれぞれ、集光点付近に配置されたミラー120、122により反射され、レンズ150b、152bを通過して波面センサ80、82にて受光される。第1の光1000に対して、レンズ150a、ミラー120、レンズ150bがリレー光学系に相当する。同様に、第1の光1001に対して、レンズ150aとレンズ151bがリレー光学系に相当し、第1の光1002に対して、レンズ150a、ミラー122、レンズ152bがリレー光学系に相当する。

10

【0055】

第1の光1000、1001、1002をそれぞれ受光した波面センサ80、81、82から第1の光1000、1001、1002に対応する信号がコンピュータ90に出力される。コンピュータ90は、複数の第1の光1000、1001、1002に対応する信号と複数の参照データを用いて、被検物30を透過した複数の像高の第1の光1000、1001、1002の波面を算出する。複数の参照データは次のように事前に計測しておく。

20

【0056】

本実施例では、被検物30の複数の像高それぞれに対応する参照データを1像高ずつ計測していく。図4(B)は、第1の光1000に対応する参照データを計測するための配置図である。被検物30と回折素子110との間にミラー(第2の反射部)41が挿入され、レンズ50bと波面センサ80との間にハーフミラー(第1の反射部)61が挿入される。第2の光源系200は、ハーフミラー61の近傍に設置される。ミラー41は、反射面の法線の方向が第1の光1000の進行方向と一致するように角度を調整する。

【0057】

第2の光源系200は、光源10と略同一の波長の光を射出する光源13、ピンホール26、および収差補正されたコリメータレンズ70で構成されており、略無収差かつ略平行の第2の光2000を射出する。第2の光源系200から射出された第2の光2000の光束サイズは、波面センサ80に入射する第1の光1000の光束サイズと同じ、または第1の光1000の光束サイズよりも大きい。第2の光源系200から射出された第2の光2000は、ハーフミラー61で反射され、第1の光1000の進行方向と反対方向に進行する第2の光2000Aとなる。第2の光2000Aは、リレー光学系(レンズ150b、ミラー120、レンズ150a)で拡大し、ミラー41に入射する。

30

【0058】

第2の光2000Aは、ミラー41で反射され、第1の光1000の進行方向と同じ方向に進行する第2の光2000Bとなる。なお、第2の光2000Bの進行方向と第1の光1000の進行方向とが一致するように、第2の光源系200およびハーフミラー61の位置を調整しておく。第2の光2000Bは、リレー光学系で縮小され、ハーフミラー61を透過し、波面センサ80で受光される。波面センサ80で受光された第2の光2000Bの信号は、コンピュータ90に送られる。コンピュータ90は、第2の光2000Bの信号から参照データを算出する。

40

【0059】

第1の光1001、1002に対しても、ミラー41、ハーフミラー61、および第2の光源系200をそれぞれ適切に配置して、それぞれの参照データを取得する。

【実施例3】

【0060】

次に、図5を参照して、本発明の実施例3における波面計測装置について説明する。図

50

5 は、本実施例における波面計測装置 3 の概略構成図である。

【0061】

波面計測装置 3 は、第 1 の光源系 100、第 2 の光源系 200、リレー光学系 53、ハーフミラー（キューブ型ビームスプリッタ）62、波面センサ 80、およびコンピュータ 90 を有する。また波面計測装置 3 は、第 2 の反射部として、着脱可能な球面ミラー 42 を有する。本実施例において、被検物 31 は、モールドレンズ（光学素子）である。第 1 の光源系 100 は、光源 10 およびファイバ 20 で構成されている。第 2 の光源系 200 は、光源 10 およびファイバ 21 で構成されており、第 1 の光源系 100 と光源 10 を共有している。

【0062】

図 5（A）は、被検物 31 を透過した第 1 の光 1000 の波面を計測する配置を示す図である。光源 10 からファイバ 20 を介して射出した第 1 の光（発散光）1000 は、被検物 31 を透過して収束し、リレー光学系 53 を透過して略平行光となる。第 1 の光 1000 は、ハーフミラー 62 を透過して波面センサ 80 で受光される。第 1 の光 1000 を受光した波面センサ 80 から第 1 の光に対応する信号がコンピュータ 90 に出力される。コンピュータ 90 は、第 1 の光に対応する信号と参照データを用いて、被検物 31 を透過した第 1 の光 1000 の波面を算出する。参照データは次のように計測する。

【0063】

図 5（B）は、参照データを計測する配置を示す図である。第 1 の光源系 100、リレー光学系 53 の間に球面ミラー 42 を挿入する。光源 10 からファイバ 21 を介して射出した第 2 の光（発散光）2000 は、コリメータレンズ 70 で略平行光となり、ハーフミラー 62 で反射され、第 1 の光 1000 の進行方向と反対方向に進行する第 2 の光 2000A となる。第 2 の光 2000A は、リレー光学系 53 を透過し、球面ミラー 42 に入射する。

【0064】

第 2 の光 2000A は、球面ミラー 42 で反射され、第 1 の光 1000 の進行方向と同じ方向に進行する第 2 の光 2000B となる。第 2 の光 2000B は、リレー光学系 53、ハーフミラー 62 を透過し、波面センサ 80 で受光される。波面センサ 80 で受光された第 2 の光 2000B の信号は、コンピュータ 90 に送られる。コンピュータ 90 は、第 2 の光 2000B の信号から参照データを算出する。

【実施例 4】

【0065】

次に、図 6 を参照して、本発明の実施例 4 における光学系の製造方法について説明する。図 6 は、本実施例における光学系の製造方法を示すフローチャートである。実施例 1 の波面計測装置 1、実施例 2 の波面計測装置 2、または実施例 3 の波面計測装置 3 を用いて計測された波面の結果を、光学系（被検物 30）の製造方法にフィードバックすることが可能である。

【0066】

まずステップ S101 において、光学素子を用いて光学系を組み立て、各素子の位置を調整する（光学系組立調整）。続いてステップ S102 において、組立調整された光学系の光学性能（光学精度）を評価する。ここで、光学系の光学性能の評価は、実施例 1 の波面計測装置 1 または実施例 2 の波面計測装置 2 を用いて計測された波面の結果を用いて行う。ステップ S102 にて光学性能が不足する場合、ステップ S101 へ戻り、再度、光学系の組立調整を行う。一方、ステップ S102 にて光学性能を充足する場合、光学系の製造方法に関する本フローを終了する。

【0067】

図 7 は、モールド加工を利用した光学素子の製造方法を示すフローチャートである。光学素子は、光学素子の設計工程（ステップ S201）、金型の設計工程（ステップ S202）、および、設計された金型を用いた光学素子のモールド工程（ステップ S203）を経て製造される。モールドされた光学素子は、その形状精度が評価（ステップ S204）

10

20

30

40

50

される。精度不足である場合、金型を補正して（ステップ S 2 0 7）、再度モールドを行う。一方、形状精度が良好である場合、光学素子の光学性能が評価（ステップ S 2 0 5）される。光学性能が低い場合、光学面を補正し（ステップ S 2 0 8）、光学素子を設計し直す。一方、ステップ S 2 0 5 にて光学性能を充足する場合、光学素子の量産（ステップ S 2 0 6）工程に移行する。ステップ S 2 0 5 の光学性能の評価に実施例 3 の波面計測装置 3 を利用することができる。なお本実施例における光学素子の製造方法は、モールドによらず、研削、研磨による光学素子の製造にも適用できる。

【 0 0 6 8 】

各実施例によれば、短時間かつ高精度でシステムエラーを校正することが可能な小型の波面計測装置、波面計測方法、光学系の製造方法、および、光学素子の製造方法を提供することができる。

10

【 0 0 6 9 】

以上、本発明の好ましい実施形態について説明したが、本発明はこれらの実施形態に限定されず、その要旨の範囲内で種々の変形及び変更が可能である。

【 符号の説明 】

【 0 0 7 0 】

1 波面計測装置

4 0 ハーフミラー（第 2 の反射部）

5 0 リレー光学系（光学系）

6 0 ハーフミラー（第 1 の反射部）

20

8 0 波面センサ（受光部）

9 0 コンピュータ（算出部）

1 0 0 第 1 の光源系（第 1 の光源部）

2 0 0 第 2 の光源系（第 2 の光源部）

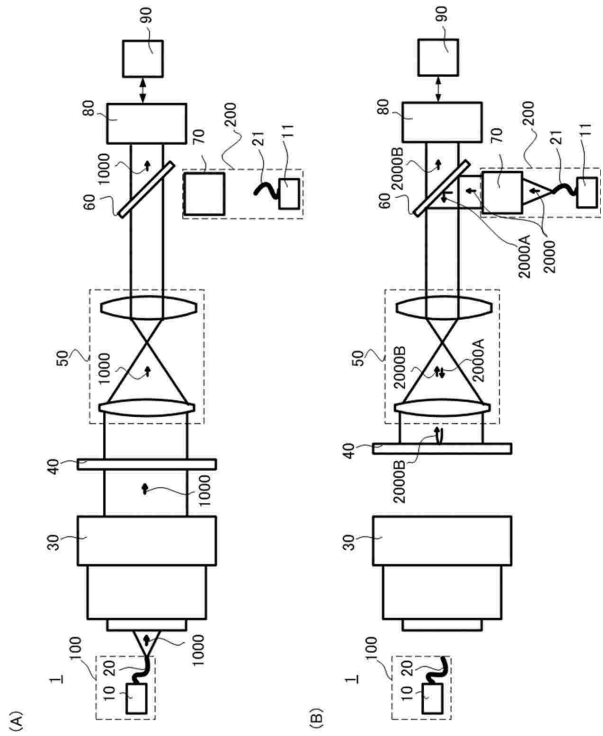
30

40

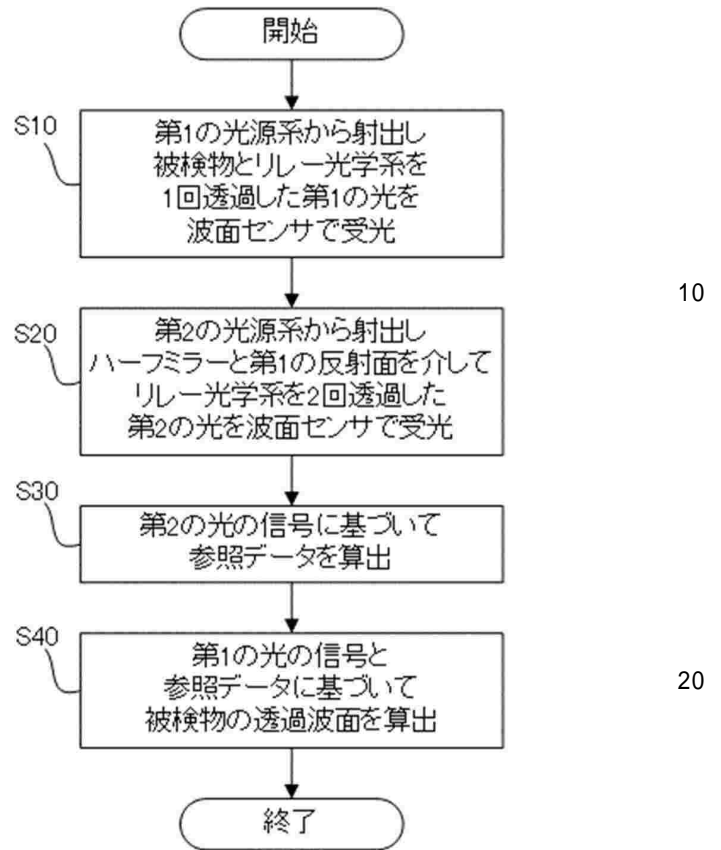
50

【図面】

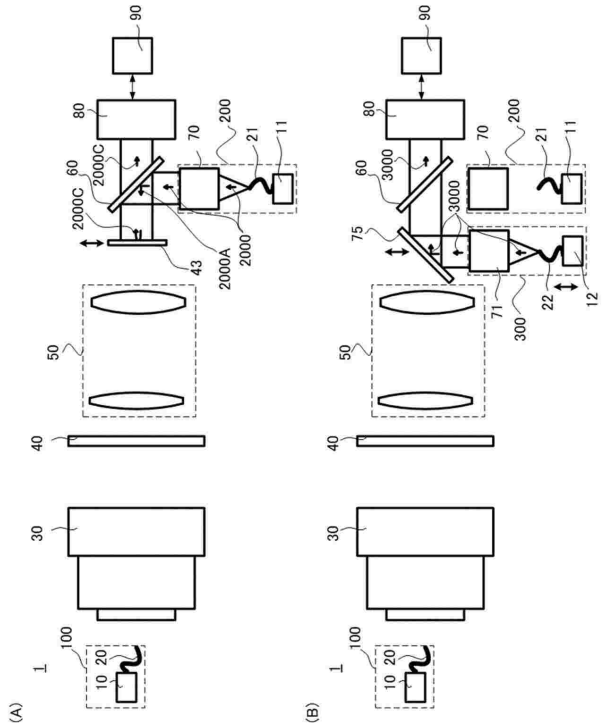
【図 1】



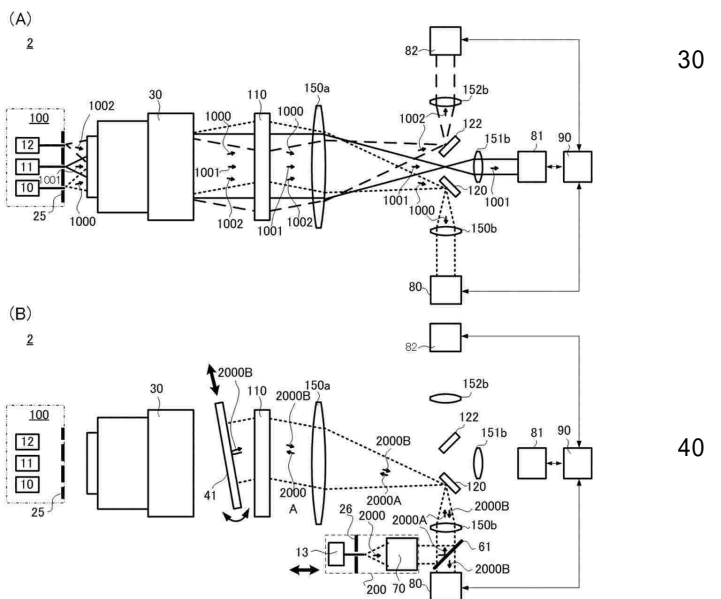
【図 2】



【図 3】



【図 4】



10

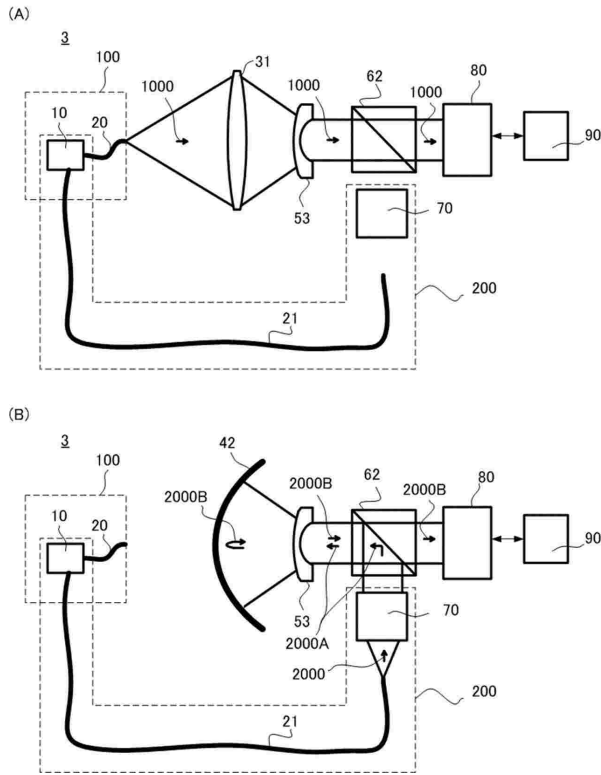
20

30

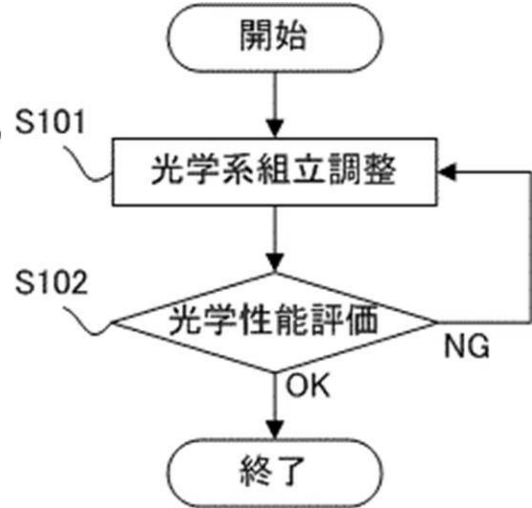
40

50

【図5】



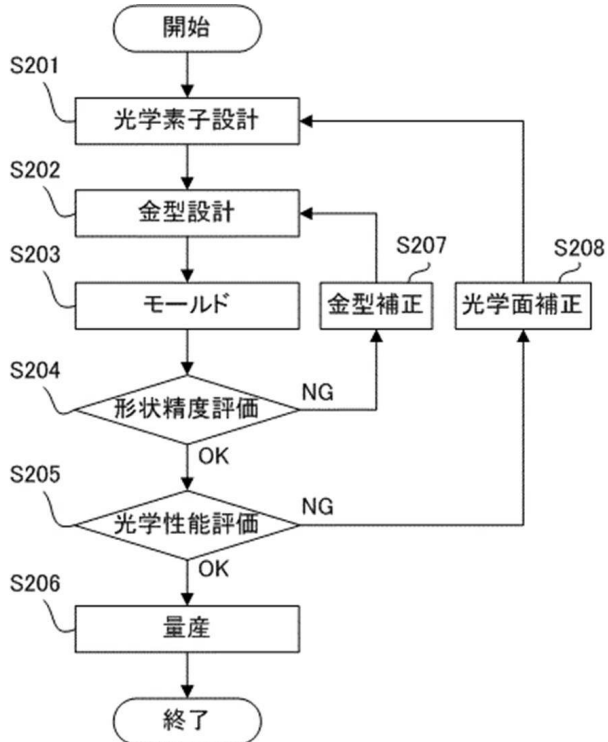
【図6】



10

20

【図7】



30

40

50

---

フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2003-322590(JP,A)  
特開2006-030016(JP,A)  
特開2019-100724(JP,A)  
特開2008-277632(JP,A)  
国際公開第2012/132930(WO,A1)  
特開2002-162317(JP,A)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)  
G01M 11/00 - G01M 11/08