

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2014-113326

(P2014-113326A)

(43) 公開日 平成26年6月26日(2014.6.26)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
A 6 1 B 3/10 (2006.01)	A 6 1 B 3/10	M
A 6 1 B 3/12 (2006.01)	A 6 1 B 3/10	R
	A 6 1 B 3/12	E

審査請求 未請求 請求項の数 11 O L (全 13 頁)

(21) 出願番号	特願2012-269787 (P2012-269787)	(71) 出願人	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	平成24年12月10日 (2012.12.10)	(74) 代理人	100076428 弁理士 大塚 康德
		(74) 代理人	100112508 弁理士 高柳 司郎
		(74) 代理人	100115071 弁理士 大塚 康弘
		(74) 代理人	100116894 弁理士 木村 秀二
		(74) 代理人	100130409 弁理士 下山 治
		(74) 代理人	100134175 弁理士 永川 行光

最終頁に続く

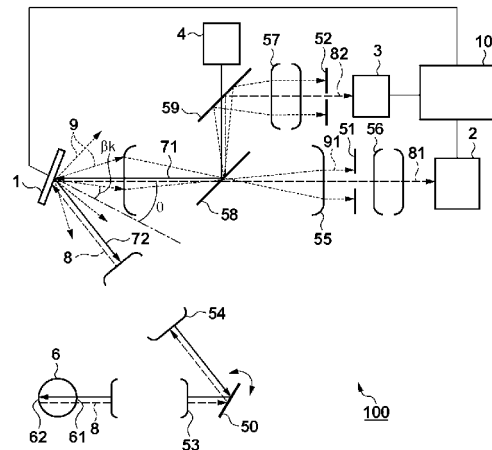
(54) 【発明の名称】 補償光学装置及び画像取得装置

(57) 【要約】

【課題】 光が収差補正器に照射した際に発生する回折光による波面検出への影響を低減すること。

【解決手段】 補償光学装置が、光を照射した被検査物からの戻り光により収差補正手段において発生する回折光を遮光する遮光手段と、前記遮光手段における開口部を通過した前記戻り光の収差を検出する検出手段と、前記検出手段による検出結果に基づいて前記収差補正手段を制御する制御手段と、を備える。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

光を照射した被検査物からの戻り光により収差補正手段において発生する回折光を遮光する遮光手段と、

前記遮光手段における開口部を通過した前記戻り光の収差を検出する検出手段と、
前記検出手段による検出結果に基づいて前記収差補正手段を制御する制御手段と、
を備えることを特徴とする補償光学装置。

【請求項 2】

前記被検査物は、被検眼であり、
前記収差補正手段は、前記被検眼の前眼部に対して光学的に略共役な位置に配置され、
前記遮光手段は、前記被検眼の網膜に対して光学的に略共役な位置に配置されることを特徴とする請求項 1 に記載の補償光学装置。 10

【請求項 3】

前記開口部の長さが、前記遮光手段における前記回折光の位置と、前記遮光手段における前記戻り光の位置との距離よりも短いことを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の補償光学装置。

【請求項 4】

前記被検査物の画像を取得するための光を発生させる光源と、前記収差を検出するための光を発生させる光源とを兼用することを特徴とする請求項 1 乃至 3 の何れか 1 項に記載の補償光学装置。 20

【請求項 5】

前記光を隣接する回折光の間から前記収差補正手段に照射するように構成することを特徴とする請求項 1 乃至 4 の何れか 1 項に記載の補償光学装置。

【請求項 6】

前記開口部の大きさを変更する変更手段と、
前記検出手段による検出結果に基づいて前記変更手段を制御する制御手段と、
をさらに備えることを特徴とする請求項 1 乃至 5 のいずれか 1 項に記載の補償光学装置。

【請求項 7】

前記制御手段が、前記検出された収差量が閾値未満の場合に前記開口部の大きさを小さくなるように、前記変更手段を制御することを特徴とする請求項 6 に記載の補償光学装置。 30

【請求項 8】

前記収差補正手段は、液晶を用いた空間光変調器、または、複数の微小ミラーを有する形状可変ミラーであることを特徴とする請求項 1 乃至 7 の何れか 1 項に記載の補償光学装置。

【請求項 9】

前記収差補正手段は、2次元マトリクス構造を有する波面補正器であり、
前記2次元マトリクス構造の周期構造のピッチをP、前記光の波長を λ 、前記波面補正器への前記光の入射角を θ 、前記遮光手段の前記戻り光を通過させる前記開口部の径をr、
前記波面補正器と前記遮光手段との間の光学系の焦点距離をf、nを整数とした場合、 40

$$\left| \theta - \sin^{-1}(n \cdot \lambda / P - \sin \theta) \right| \cdot f > r$$

という関係を満たすことを特徴とする請求項 1 乃至 8 の何れか 1 項に記載の補償光学装置。

【請求項 10】

請求項 1 乃至 9 の何れか 1 項に記載の補償光学装置と、
前記補償光学装置を介した、前記被検査物からの戻り光を測定する測定手段と、
前記測定した戻り光に基づいて、前記被検査物の画像を取得する画像取得手段と、 50

を備えることを特徴とする画像取得装置。

【請求項 11】

前記収差補正手段は、前記画像取得手段により前記画像が取得される間においても、前記被検査物からの戻り光の収差を補正することを特徴とする請求項 10 に記載の画像取得装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、補償光学装置及び画像取得装置に関し、特に被検査物で発生する収差を補正する補償光学装置及び画像取得装置に関する。

10

【背景技術】

【0002】

近年、アクティブな光学素子を用いて、高次の波面収差まで補正する補償光学 (Adaptive Optics: AO) の技術が実用化され、様々な分野で適用されている。これは、測定対象自身が持つ特性や測定環境の変動などで発生する、プローブ光や信号光の波面収差を波面センサで逐次測定し、形状可変ミラー (Deformable Mirror: 以下、「DM」) や、空間光変調器 (Spatial Light Modulator: 以下、「SLM」) などの波面補正器で補正する技術であり、特に眼の網膜の検査システムの分野で注目されている。

【0003】

20

このような眼科機器としては、眼底カメラの他に、網膜の 2 次元像を取得する SLO (Scanning Laser Ophthalmoscope: レーザー検眼鏡) や、網膜の断層像を取得する OCT (Optical Coherence Tomography: 光学的干渉断層計) が知られている。SLO と OCT は、光ビームを走査手段により網膜上において 1 次元または 2 次元に走査し、網膜からの反射・後方散乱光を受光して、網膜の 2 次元画像や 3 次元画像を取得する。

【0004】

特許文献 1 では、光源からの光を走査手段により網膜において 2 次元走査しながら、波面検出器により網膜から反射した戻り光の一部を受光して波面を検出し、収差補正器により被検眼に照射する光の波面と戻り光の波面とを補正して、戻り光の一部を受光して画像形成する SLO が開示されている。

30

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献 1】特許 4157839 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

ここで、波面収差を補正する収差補正器として、一般的に、複数の微小ミラーが周期的に 2 次元配列されて構成されているタイプの DM や、複数の微小な画素が周期的に 2 次元マトリクス状に配列されている液晶型 SLM が用いられる。これらの収差補正器は、複数の画素間に隙間が周期的に離散する構造を有するため、光が収差補正器に照射した際に回折光が発生してしまう。回折光が波面検出器に照射すると、精密な波面検出に影響を及ぼして収差補正の精度が低下するため、取得される画像の画質も低下する可能性がある。

40

【0007】

上記の課題に鑑み、本発明は、光が収差補正器に照射した際に発生する回折光による波面検出への影響を低減することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

上記の目的を達成する本発明に係る補償光学装置は、

50

光を照射した被検査物からの戻り光により収差補正手段において発生する回折光を遮光する遮光手段と、

前記遮光手段における開口部を通過した前記戻り光の収差を検出する検出手段と、

前記検出手段による検出結果に基づいて前記収差補正手段を制御する制御手段と、を備える。

【発明の効果】

【0009】

本発明によれば、光が収差補正器に照射した際に発生する回折光を波面検出器の前段で遮光することができる。このため、この回折光による波面検出への影響を低減することができる。

10

【図面の簡単な説明】

【0010】

【図1】第1実施形態に係る補償光学装置の構成例を示す図。

【図2】第1実施形態に係る反射型液晶SLMで発生する各回折光の回折角の特性の説明図。

【図3】第1実施形態に係る最適な入射角の条件の説明図。

【図4】第2実施形態に係る補償光学装置の一部の構成例を示す図。

【図5】第3実施形態に係る補償光学装置の一部の構成例を示す図。

【発明を実施するための形態】

【0011】

以下、添付の図面を参照しながら、本発明の実施の形態を説明する。

20

【0012】

(第1実施形態：収差補正手段で発生する回折光を遮光する遮光部)

SLO (Scanning Laser Ophthalmoscope：レーザー検眼鏡) や、OCT (Optical Coherence Tomography：光学的干渉断層計) は、光ビームを偏向器によって網膜上に1次元または2次元に走査し、網膜からの反射・後方散乱光を同期計測して、網膜の2次元画像や3次元画像を取得する。

【0013】

取得した画像の、網膜の面方向(横方向)の空間分解能(以下、「横分解能」)は、基本的に網膜上で走査されるビームスポット径で決まるが、網膜上に集光されたビームスポット径を小さくするためには、眼に入射するビームの径を太くすればよい。しかし、眼球で主に屈折の作用を受け持つ角膜や水晶体の曲面形状や屈折率の一意性は不完全であり、これらは透過光の波面に高次の収差を発生させるため、太いビームを入射しても、網膜上のスポットは所望の径には集光できずに、むしろ広がってしまう。この結果、取得される画像の横分解能は低下し、共焦点光学系では取得される画像信号のS/Nも低下することになる。従って、従来は眼光学系の持つ収差の影響を受けにくい1mm程度の細いビームを入射させ、網膜上には20 μ m程度のスポットを形成するのが一般的であった。

30

【0014】

これに対して近年では補償光学技術が導入されつつある。この技術を用いることで、7.5mm程度の太いビームを眼球に入射しても、波面補償により網膜上で回折限界に近い2 μ m未満にまで集光でき、高解像度のSLOやOCTの画像を取得することが可能になっている。

40

【0015】

(補償光学装置の構成)

図1は、第1実施形態に係る補償光学装置100の構成例を示す。なお、補償光学機能を有するSLOをAO-SLOとも言う。照射部として機能する光源4から射出された波長(840nm)の光71は、ビームスプリッタ(BS)59でその一部が透過し、ビームスプリッタ(BS)58で更にその一部が反射されて、光学系55の一部を介し、収差補正手段の一例である反射型液晶SLM1に照射光として入射角 θ で照射し、反射光として反射される。その後、光学系54を介して走査手段の一例であるガルバノミラーやポ

50

リゴンミラー等の偏向器50で偏向反射される。なお、入射角は、反射型液晶SLM1の反射面の垂線に対する照射光の角度のことである(図4の一点鎖線)。また、偏向器50からの光は、光学系53を介して被検査物の一例である被検眼6に入射し、網膜62上を走査される。ここでは、被検眼を照明する光を実線の矢印で示してある。

【0016】

なお、被検査物としては、被検眼以外に、例えば、皮膚等の被検体が考えられる。また、本実施形態に係る補償光学装置は、眼科装置以外にも、例えば、内視鏡に適用することができる。また、収差補正手段としては、SLMでも良いし、DMでも良い。また、SLMとしては、反射型でも良く、透過型でも良く、また、液晶型にも限らない。収差補正手段としては、複数の画素間に隙間が周期的に離散する構造を有し、光が波面補正器に照射した際に回折光が発生してしまうような構成であれば、何でも良い。例えば、複数の微小ミラーが周期的に2次元配列されて構成されているタイプのDMや、複数の微小な画素が周期的に2次元マトリクス状に配列されている液晶型SLMがある。

10

【0017】

ここで、DMは、一般に、蒸着膜を最適化すれば、広い波長帯域に対して特性が波長に依存しないため、広く使用できるが、補正值の算出に必要な擬似逆行列の設定など計算が複雑であること、価格が非常に高価であるという特徴がある。一方、液晶型SLMは、液晶材料が持つ波長分散特性や、回折効率の波長依存性を有し、更に一方の偏光成分は補正できるが他方の偏光成分は補正できないが、DMに比べて非常に安価であること、測定した波面収差形状をそのまま表示すればよいため、制御が平易であるという特徴がある。なお、被検査物を撮像している際に液晶SLMによりリアルタイムで収差補正を行う場合、液晶SLMは波長依存性があるため、撮像用の光の波長と収差補正用の光の波長とを同一の波長で構成することが好ましい。例えば、撮像用の光源と収差補正用の光源とを共通の光源とすることが考えられる。もちろん、波長毎に異なる液晶SLMを用いれば、これらの光の波長を異なる波長としても良い。

20

【0018】

網膜62で拡散反射された戻り光8は、被検眼を照明する光の光路を逆に伝播する。そして、戻り光8の一部は、BS58を透過して、ピンホール板51の開口部を通過した後、光学系56を介して、検出手段の一例である波面センサ2に波面検出光81として照射する。また、戻り光8の一部は、BS58で反射した後、その一部がBS59で更に反射され、光学系57、ピンホール板52の開口部を通過して、画像信号光82として測定手段として機能する光検出器3に照射する。ここで、被検眼からの戻り光8は破線の矢印で示されている。なお、ピンホール板51の役割については後述する。また、波面検出光81や画像信号光82を、「戻り光」とも表現する。

30

【0019】

波面センサ2は、マイクロレンズアレイと2次元撮像素子で構成されたシャック・ハルトマン型のセンサであり、得られたハルトマン像の各スポットの変位量から波面収差を検出して、制御部の一例であるコンピュータ10へ伝送する。光検出器3はフォトダイオードもしくは光電子増倍管であって、照射した画像信号光82を測定して電気信号に変換し、コンピュータ10へ伝送する。この電気信号は、偏向器50からの同期信号に同期されて、画像取得装置として機能するコンピュータ10により2次元の画像情報が形成される。

40

【0020】

このとき、被検眼6に入射した光72は、前眼部61に照射する際のビーム径が6mmに設定されており、眼光学系が無収差であれば、網膜上では約3 μ mに集光される。しかし、実際には眼光学系が持つ不完全性によって収差が加えられ、網膜62上では乱れたスポットになっている。また、網膜62からの戻り光8も、同様に収差が加えられており、網膜62と光学的に略共役な位置に設置されているピンホール板52上で、同様に乱れてボケたスポットになり、光検出器3で検出される信号強度は弱くなっている。

【0021】

50

ここで、波面センサ 2 により検出された波面収差の検出結果データに基づき、コンピュータ 10 で、波面収差補正用の指示値データが形成されて、反射型液晶 S L M 1 に送られ、反射型液晶 S L M 1 は、その指示値データに従って液晶パネル上に補正画面を表示する。これにより、反射型液晶 S L M 1 で反射された光 7 2 には、眼光学系が持つ収差と逆の符号を持つ収差が与えられる。この光 7 2 は、被検眼 6 に入射したときに波面収差が相殺（補正）され、良好な球面波となって、理想的に網膜 6 2 上に集光される。逆に拡散反射された戻り光 8 は、被検眼 6 から射出された際に収差が加えられるが、反射型液晶 S L M 1 で補正され、反射した際には良好な波面を持って伝播し、ピンホール板 5 2 上で理想的に集光され、その殆どがピンホール板 5 2 の開口部を通過して、光検出器 3 で強い画像信号として検出される。以上のように、被検眼 6 が持つ収差は補償光学機能によって補正され、明るく解像度の高い画像が得られることになる。

10

【 0 0 2 2 】

（光が収差補正手段に照射した際に発生する回折光）

このとき、反射型液晶 S L M 1 は微小な画素が 2 次元マトリクス構造で周期的に配列されている画素周期構造を持つために、光 7 1 が照射、反射される際に、複数の回折光群 9 が発生する。なお、回折光は、光源から射出されて被検眼へ入射する光（往路）だけでなく戻り光（復路）によっても液晶 S L M において発生しうが、主に光源から射出されて被検眼へ入射する光（往路）に起因しており、戻り光（復路）に起因して液晶 S L M において発生する回折光のオーダーよりも大きい。ここでは、各回折光は点線の矢印で示されている。各次数の回折角（反射型液晶 S L M 1 面の法線方向からの角度） n は、反射型液晶 S L M 1 の画素ピッチを P 、照射光の波長を λ 、反射型液晶 S L M 1 への照射光の入射角を θ 、 n を整数としたとき、以下の式（1）のような関係となる。

20

【 0 0 2 3 】

【数 1】

$$\beta n = \sin^{-1}(n \cdot \lambda / P - \sin \theta) \dots (1)$$

【 0 0 2 4 】

例えば、波長 λ が 840 nm、画素ピッチ P が 20 μ m、入射角 θ が 5 度のとき、各回折光は、図 2 のような角度で発生する。ここで、図 2 は、本実施形態に係る反射型液晶 S L M で発生する各回折光の回折角の特性を表しているグラフである。なお、横軸の角度は、光 7 2 である反射光（ゼロ次の回折光）の反射角をゼロ度として表示している。従って、光 7 1 の角度は 10 度にあたる。なお、光源の波長 λ と反射型液晶 S L M 1 の画素ピッチ P とにより回折光同士の角度が決まり、入射角 θ により回折光の角度が決まる。

30

【 0 0 2 5 】

この回折光のうちの一つが照射する光 7 1 の角度に近い角度、すなわち k 次の回折角 k が θ に近い角度になると（図 2 の例では、4 次の回折光が照射光に対して 0.5 度差程度と近い角度になっている）、複数の回折光のうち一部の回折光は波面センサ 2 に入射してしまい、正しい波面検出ができなくなる。また、複数の回折光のうち一部の回折光が光検出器 3 に照射されると、常に一定の信号が上乘せされることにより、コントラストの低い画像が得られることになってしまう。

40

【 0 0 2 6 】

（収差補正手段で発生する回折光を遮光する遮光部）

回折光による波面検出への影響を低減するために、光が収差補正器に照射した際に発生する回折光を波面検出器の前段で遮光する。

【 0 0 2 7 】

まず、反射型液晶 S L M 1 と波面センサ 2 との間に、回折光を遮光する遮光部の一例であるピンホール板 5 1 を配置する。また、ピンホール板 5 1 は、波面検出光 8 1 を遮ることなく通過させるために、開口部の一例であるピンホールがあいている。また、この目的から、ピンホール板 5 1 の開口部は、波面検出光 8 1 が集光される位置に設けられること

50

が好ましい。具体的には、ピンホール板 5 1 は、網膜 6 2 に対して光学的に略共役な位置に配置されることが好ましい。これにより、波面検出光 8 1 が遮光部に照射する位置と、回折光が遮光部に照射する位置とをできるだけ離すことができる。

【 0 0 2 8 】

また、複数の回折光のうち、波面検出光 8 1 に隣接する次数の回折光 9 1 が、ピンホール板 5 1 を通らないような条件にする必要がある。具体的には、ピンホール板 5 1 の開口部の長さ（大きさ）が、複数の回折光のうち、波面検出光 8 1 に隣接する次数の回折光がピンホール板 5 1 に照射される位置（遮光部における回折光の位置）と、波面検出光 8 1 がピンホール板 5 1 に照射される位置（遮光部における戻り光の位置）との距離よりも短い（小さい）必要がある。例えば、ピンホール板 5 1 の開口部の半径を r としたとき、ピンホール板 5 1 面上での両者の距離 d は、式（ 2 ）を満たさなければならない。

【 0 0 2 9 】

【 数 2 】

$$|d| > r \dots (2)$$

【 0 0 3 0 】

反射型液晶 S L M 1 は、瞳共役の位置（前眼部に対して光学的に略共役な位置）、ピンホール板 5 1 は像面共役の位置にそれぞれ配置されているため、両者の間の光学系 5 5 の焦点距離を f とし、 k を整数とすれば、距離 d は、式（ 3 ）のように表される。

【 0 0 3 1 】

【 数 3 】

$$d = (\theta - \beta k) \cdot f \dots (3)$$

【 0 0 3 2 】

式（ 1 ）及び式（ 3 ）により、式（ 2 ）は、式（ 4 ）のようになる。

【 0 0 3 3 】

【 数 4 】

$$\left| \theta - \sin^{-1} \left(k \cdot \lambda / P - \sin \theta \right) \right| \cdot f > r \dots (4)$$

【 0 0 3 4 】

与えられた θ 、 P 、 f 、 r に対して、光の反射型液晶 S L M 1 への入射角 θ を式（ 4 ）の条件を満たすように設定すれば、回折光はピンホール板 5 1 で遮られ、波面センサ 2 に照射することがなくなり、不要光のない良好なハルトマン像が得られることになる。これにより、精度の高い安定した波面検出が可能になる。なお、式（ 4 ）の左辺がゼロになる場合、回折光と戻り光とが同じ角度になるため、ピンホールの大きさに関係なく、回折光が波面センサ 2 に照射されてしまうことを意味する。

【 0 0 3 5 】

例えば、光学系 5 5 の焦点距離 f が - 8 0 mm、ピンホール板 5 1 の開口部の半径 r が 0.5 mm である場合、光 7 1 の入射角 θ は、図 3 に示されるグラフにおいて、回折光の位置 d が 0.5 mm を上回る範囲（ 0 ~ 約 1.6 度、約 2.2 ~ 約 3.9 度、約 4.7 ~ 約 6.3 度、約 7.1 ~ 約 8.8 度、・・・）に設定すればよいことになる。

【 0 0 3 6 】

なお、画像取得用の光検出器 3 にも回折光が照射しないことが求められるが、共焦点光学系を形成するためのピンホール板 5 2 の開口部の半径は、画像の分解能を確保するために、この位置での画像信号光 8 2 のビームスポットのエアリーディスク径に近いオーダーになっている。すなわち、式（ 4 ）を適用させたときの半径 r は非常に小さい。波面センサ 2 側のピンホール板 5 1 の開口部の半径は、収差がある場合の波面検出光 8 1 も通過させる必要があり、波面検出光 8 1 のスポットのエアリーディスク径よりも十分に大きくなっているため、ピンホール板 5 1 に関して式（ 4 ）を満たしていれば、ピンホール板 5 2

10

20

30

40

50

を回折光が通過することはない。

【 0 0 3 7 】

以上により、波面検出と画像取得用の光を同じ波長の光で兼用し、かつ光を波面補正器である反射型液晶SLMを介して検査対象物に照射する構成において、反射型液晶SLMからの回折光を除去し、良好な波面検出と、光利用効率の高い画像取得とを行うことができる。これにより、波面検出用の光源や光学系が不要になり、光学系全体をコンパクトに保ち、かつコストを削減することが可能になる。波面補正器として、微小ミラーを多数周期的に配置したタイプの形状可変ミラーを用いた場合にも、以上の構成を適用し、同様の効果を得ることができる。

【 0 0 3 8 】

特に、液晶SLMを波面補正器として用いる場合は、波面検出用の光として別の波長の光を用いて、この光を液晶SLMを介さずに被検眼に入射させ、波面検出光路を分岐するために、波長選択して反射させるダイクロイックミラーを用いる方法も考えられる。これにより、別の波長である画像取得用の光の、液晶SLMからの回折光が波面検出器に照射することを防ぐことができる。

【 0 0 3 9 】

ただし、この場合は、液晶SLMの特性が波長依存性を持つため、波面検出用の光の波長において波面収差を補正しても、画像取得用の光の波長に関しては、収差を持った状態になる。従って、両波長の光に対して同時に波面収差補正制御を行うことができないため、画像取得時に同時に波面検出を行って、随時波面収差を補正し続けるという制御ができなくなる。よって、このような場合には先に波面検出用の光を照射して、この波長の光で波面検出、波面収差補正の制御を行い、波長比の係数を与えた補正指示値（固定値）で液晶SLMを動作させ、光を画像取得用の波長の光に切り替えて画像取得を行わなければならない。この場合、画像取得時に波面収差の補正をやり直すことができないので、眼が動いたり涙膜の状態が変わったりすると、波面収差補正が適切に行われず、画質が低下する。

【 0 0 4 0 】

一方、本実施形態の構成であれば、波面検出用の光が、画像取得用の光と同じ波長の光であるため、上述のような問題は発生せず、画像取得中にも眼の状態の変化に応じて波面補正、波面収差補正を行うことができるので、波面収差補正動作が安定して行われ、高画質の画像を安定して取得することが可能になる。

【 0 0 4 1 】

一方、回折光の波面検出器への照射を避けるために、波面検出用の光として、画像取得用の光と異なる波長の別の光を用いるという方法もある。画像取得用の光はSLMを介して眼に入射させ、波面検出用の光はSLMよりも眼側から入射させる。更に画像取得用の検出器への光路と、波面検出器への光路とを分岐する部材を、ビームスプリッタではなく、ダイクロイックミラーなどの波長分岐部材を用いれば、画像取得用の光がSLMで回折されて戻る不要光が、波面検出器に照射することを防止できる。

【 0 0 4 2 】

しかし、液晶型SLMを波面補正器として用いた場合、この構成では画像取得中にも随時波面を計測しながら補正を続けるということができなくなる。液晶は、その出力特性が波長に依存するため、波長が異なるとSLMに送るべき補正指示値が異なるからである。波面検出用の光の波長に対して波面を補正している状態では、画像取得用の光の波長に対しては収差を持つ状態となる。すなわち、両波長に対して収差を最小化するということが同時に満足することができないので、異なる波長を波面検出光として用いる場合には、以下のような複雑な手順を経なければならない。

【 0 0 4 3 】

まず波面検出用の光で波面を検出して、SLMでフィードバック制御を行い、収差を補正する。次にこのときの補正指示値に、画像取得用の光の波長との比の分だけ係数を掛けた補正指示値をSLMに送り直す。この状態で補正制御を止めたままで、光を画像取得用

10

20

30

40

50

の光に切り替えて画像を取得する。

【0044】

すなわち、画像取得中には波面検出も補正のやり直しもできないため、もし眼の位置が動いたり、涙膜の状態が変わったりして収差の状態が変わったときには対応できず、良好な画像を安定して取得することが困難になる。また、2次元配列された微小ミラーからなる形状可変ミラーにおいては、両方の光の波長差の問題は発生しないが、別の光源や、そのための別の光路を形成する光学系などが必要になり、複雑な構成を伴ってコストアップの要因になり得る。

【0045】

これに対して、本実施形態の構成によれば、このような複雑な手順を回避することができる。

10

【0046】

以上説明したように、本実施形態によれば、複雑な手順を経ることなく、簡易な構成で、波面補正器により発生する回折光による波面検出への影響を低減することができる。

【0047】

なお、本実施形態では、液晶SLMを介して光を照射する構成を説明したが、必ずしも液晶SLMを介する必要はない。例えば、対物レンズの近くから収差測定用の光を照射する構成であってもよい。

【0048】

また、以上の説明では反射型液晶SLMを例に挙げたが、透過型液晶SLMにおいても本発明を適用できる。透過型液晶SLMにおいても全てが透過するわけではなく一部が液晶面で反射しうる。そのため、反射した光が収差補正用の光や画像取得用の光として取得されてしまうと、反射型液晶SLMと同様の問題を生じる恐れがある。反射型、透過型の種類に限定されず広くSLMに本発明を適用することで、簡易な構成で、波面補正器により発生する回折光による波面検出への影響を低減することができる。

20

【0049】

(第2実施形態：波面補正器に対する入射角)

図4を参照して、第2実施形態に係る補償光学装置の一部の構成を説明する。第1実施形態では、波面検出光81に隣接する次数の回折光91がピンホールに照射する位置と、波面検出光81がピンホール板に照射する位置との距離dが、ピンホール板の開口部の半径rよりも大きくなるように、光の入射角を設定した。この場合、式(4)を満たしている。このとき、ピンホール板の開口部の半径rを比較的小さくできる場合、或いは、SLM1の画素ピッチが比較的小さいために回折光同士の角度が比較的大きい場合、波面検出光81がピンホール板に照射する位置と回折光がピンホール板に照射する位置との距離が比較的大きい。このため、光がSLM1に照射する入射角の自由度は比較的大きくなる。一方、ピンホール板51の開口部の半径rが比較的大きい場合、或いは、SLM1の画素ピッチが比較的大きいために回折光同士の角度が比較的小さい場合、波面検出光81がピンホール板に照射する位置と回折光がピンホール板に照射する位置との距離が比較的小さい。このため、光がSLM1に入射する入射角の自由度が比較的小さくなる。

30

【0050】

そのための条件とは、光71を、図4に示すように、隣接する次数の回折光であるn次の回折光と(n+1)次の回折光との間からSLM1に照射するように構成することである。すなわち、n次の回折角を β_n 、(n+1)次の回折角を β_{n+1} とすると、光の入射角が、式(5)の関係を満たせばよい。

40

【0051】

【数5】

$$\theta = \beta_n + (\beta_{n+1} - \beta_n) / 2 = (\beta_{n+1} + \beta_n) / 2 \cdots (5)$$

【0052】

従って、 $\sin 2\theta = \sin(\beta_{n+1} + \beta_n)$

50

$$\begin{aligned}
&= \sin(\theta_{n+1}) \cdot \cos(\theta_n) + \cos(\theta_{n+1}) \cdot \sin(\theta_n) \\
&= \{ (n+1) \cdot \lambda/P - \sin(\theta_n) \} \cdot \cos(\theta_n) \\
&+ \cos(\theta_{n+1}) \cdot (n \cdot \lambda/P - \sin(\theta_n)) \\
&= \{ (n+1) \cdot \lambda/P - \sin(\theta_n) \} \cdot \sin(\theta/2 + \theta_n) \\
&+ \sin(\theta/2 + \theta_{n+1}) \cdot (n \cdot \lambda/P - \sin(\theta_n)) \\
&= \{ (n+1) \cdot \lambda/P - \sin(\theta_n) \} \cdot \{ n \cdot \lambda/P - \sin(\theta/2 + \theta_n) \} \\
&+ \{ (n+1) \cdot \lambda/P - \sin(\theta/2 + \theta_n) \} \cdot (n \cdot \lambda/P - \sin(\theta_n)) \\
&= (n+1) \cdot \lambda/P \cdot n \cdot \lambda/P - (n+1) \cdot \lambda/P \cdot \sin(\theta/2 + \theta_n) \\
&- \sin(\theta_n) \cdot n \cdot \lambda/P + \sin(\theta_n) \cdot \cos(\theta_n) \\
&+ (n+1) \cdot \lambda/P \cdot n \cdot \lambda/P - (n+1) \cdot \lambda/P \cdot \sin(\theta/2 + \theta_n) \\
&- \sin(\theta/2 + \theta_n) \cdot n \cdot \lambda/P + \cos(\theta_n) \cdot \sin(\theta_n) \\
&= 2 \cdot n \cdot (n+1) \cdot (\lambda/P)^2 - (n+1) \cdot \lambda/P \cdot \sin(\theta/2 + \theta_n) \\
&+ \sin^2(\theta_n) - (2n+1) \cdot \lambda/P \cdot \sin(\theta/2 + \theta_n) \\
&- \sin(\theta/2 + \theta_n) \cdot n \cdot \lambda/P
\end{aligned}$$

10

となる。ゆえに、

$$\begin{aligned}
&2 \cdot n \cdot (n+1) \cdot (\lambda/P)^2 - (n+1) \cdot \lambda/P \cdot \cos(\theta_n) \\
&- (2n+1) \cdot \lambda/P \cdot \sin(\theta/2 + \theta_n) - \cos(\theta_n) \cdot n \cdot \lambda/P = 0 \\
&2 \cdot n \cdot (n+1) \cdot (\lambda/P)^2 - (n+1) \cdot \lambda/P \cdot \cos(\theta_n) \\
&- (2n+1) \cdot \lambda/P \cdot \sin(\theta/2 + \theta_n) - n \cdot \lambda/P \cdot \cos(\theta_n) = 0 \\
&2 \cdot n \cdot (n+1) \cdot (\lambda/P)^2 - (2n+1) \cdot \lambda/P \cdot \cos(\theta_n) \\
&- (2n+1) \cdot \lambda/P \cdot \sin(\theta/2 + \theta_n) = 0 \\
&2 \cdot n \cdot (n+1) \cdot (\lambda/P)^2 - (2n+1) \cdot \lambda/P \cdot \cos(\theta_n) \\
&- (2n+1) \cdot \lambda/P \cdot \sin(\theta/2 + \theta_n) = 0 \\
&2 \cdot n \cdot (n+1) \cdot (\lambda/P)^2 - (2n+1) \cdot \lambda/P \cdot (\cos(\theta_n) + \sin(\theta/2 + \theta_n)) = 0
\end{aligned}$$

20

となる。したがって、

【0053】

【数6】

$$\cos\theta + \sin\theta = 2 \cdot n \cdot (n+1) / (2n+1) \cdot \lambda/P \dots (6)$$

30

【0054】

という条件を満たすように光学系を配置することが好ましい。これにより、回折光がピンホール板に照射する位置を波面検出光81がピンホール板に照射する位置から比較的遠くに離すことができる。このため、回折光を遮光する効果を高くすることができる。

【0055】

(第3実施形態：戻り光を通過させる開口部の大きさを変更する変更手段)

図5を参照して、第3実施形態に係る補償光学装置の一部の構成例を説明する。ここでは、SLMや偏向器、光源、光検出器等は省略してある。第1及び第2実施形態では、ピンホール板51の開口部の大きさは、SLMからの回折光を遮断できる大きさに固定としていた。本実施形態では、ピンホール板51は、開口部の大きさを変更する機構(変更手段の一例)で構成されている。これにより、角膜やレンズ等の光学系の要素からの反射光である不要光を可能な限り波面センサ2に入り込まないように構成することができる。

40

【0056】

ここで、これらの不要光を除去する効果を高めるためには、できるだけピンホール板51の開口部の半径は小さい方がよい。しかし、収差が補正されない状態では、あまりにピンホール板51の開口部の半径が小さいと、本来検出の対象となる、網膜62からの戻り光も遮ってしまい、正しく収差を検出できなくなる。例えば、図5(a)のように、被検眼6が近視の場合、網膜62とピンホール板51は光学的に共役でなくなるため、図5のように、中間結像点はピンホール板51よりも被検眼6側にシフトする。そのため、ピン

50

ホール板 5 1 ではボケてスポットが大きくなる。

【 0 0 5 7 】

ここでは、ピンホール板 5 1 の開口部の大きさを変更する機構（変更手段の一例）を設けている。そして、制御部の一例であるコンピュータ 1 0 が、初回の波面検出開始時には、網膜 6 2 からの戻り光が遮られないように、ピンホール板 5 1 の開口部の半径 r を大きくするように、変更手段を制御する。ただし、開口部を大きくし過ぎると、SLMからの回折光がピンホール板 5 1 を通過して波面センサ 2 に照射されてしまうため、開口部の半径 r は、式（4）を満たす値（例えば r_0 ）に調整される必要がある。

【 0 0 5 8 】

この状態で、波面センサ 2 により波面検出光 8 1 の収差を検出し、そのデフォーカス成分を算出する。このデフォーカス成分に応じて、光学系の中に設置したフォーカスレンズ 5 3 1 を図 5（b）に示されるように移動させて、デフォーカス量が略ゼロになるように調整する。ピンホール板 5 1 は、網膜に対して光学的に略共役な位置に設けられるため、波面検出光 8 1 はピンホール板 5 1 の開口部の近傍に集光される。なお、デフォーカス量が閾値未満になるように調整しても良いし、検出された収差が閾値未満になるように調整しても良い。

10

【 0 0 5 9 】

この状態（例えば、検出された収差が閾値未満）になったら、制御部の一例であるコンピュータ 1 0 が、ピンホール板 5 1 の開口部の半径を r_0 よりも小さく調整し（例えば r_1 ）、波面センサ 2 で検出した収差の値に基づいて、図示していない SLM によって波面収差を補正する。なお、可変のピンホール板 5 1 の開口部の半径を絞る前に、乱視の成分もトライアルレンズなどで補正してもよいし、高次の収差を含めて全体の収差を SLM によって補正しながら、収差量に応じて徐々にピンホール径を絞ってもよい。

20

【 0 0 6 0 】

また、本実施形態では、ピンホール板 5 1 の開口部の半径 r を可変にしているが、異なる大きさの複数のピンホール板のいずれかを光路に対して挿脱する構成等であっても同様の効果が得られる。

【 0 0 6 1 】

これにより、様々な要因で発生する不要光の影響を抑え、精密な波面検出が行えるので、結果として良好な波面補正が可能であり、画質を向上させることができる。

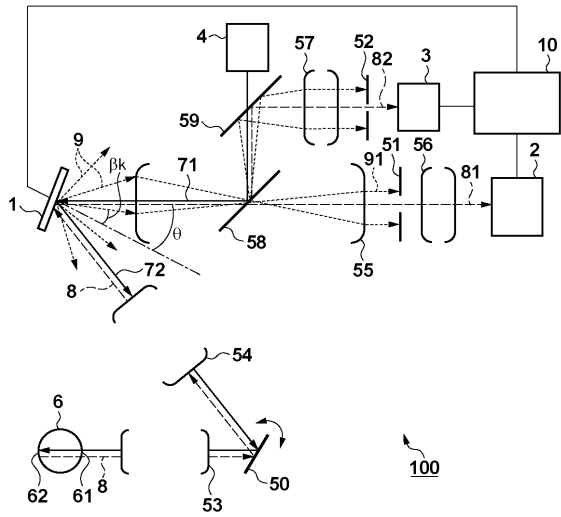
30

【 0 0 6 2 】

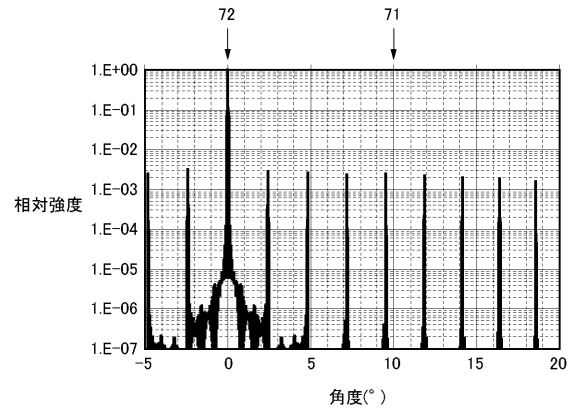
（その他の実施形態）

また、本発明は、以下の処理を実行することによっても実現される。即ち、上述した実施形態の機能を実現するソフトウェア（プログラム）を、ネットワーク又は各種記憶媒体を介してシステム或いは装置に供給し、そのシステム或いは装置のコンピュータ（または CPU や MPU 等）がプログラムを読み出して実行する処理である。

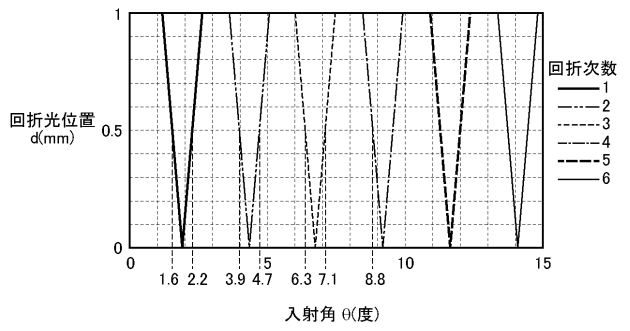
【 図 1 】



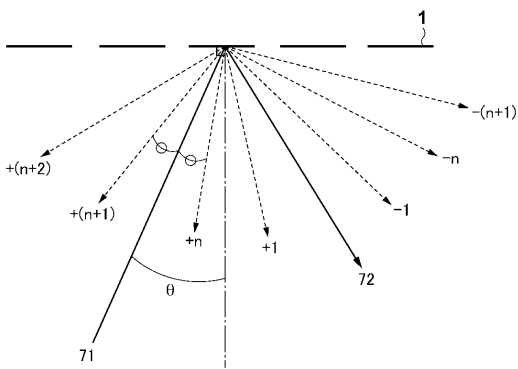
【 図 2 】



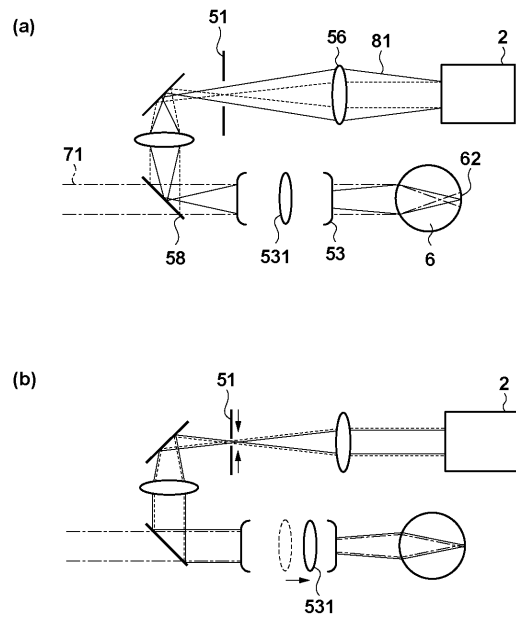
【 図 3 】



【 図 4 】



【 図 5 】



フロントページの続き

(72)発明者 斉藤 賢一

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