

(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2008-220770

(P2008-220770A)

(43) 公開日 平成20年9月25日(2008.9.25)

(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	Z
A 6 1 B 3/14 (2006.01)	A 6 1 B 3/14	A

審査請求 未請求 請求項の数 12 O L (全 26 頁)

(21) 出願番号 特願2007-65524 (P2007-65524)
 (22) 出願日 平成19年3月14日 (2007.3.14)

(出願人による申告) 本出願は、独立行政法人科学技術振興機構より委託された平成18年度先端計測分析技術・機器開発事業「高分解能眼底顕微鏡」の成果である。

(71) 出願人 000220343
 株式会社トプコン
 東京都板橋区蓮沼町75番1号
 (74) 代理人 100082670
 弁理士 西脇 民雄
 (72) 発明者 齋藤 紀子
 東京都板橋区蓮沼町75番1号 株式会社トプコン内
 (72) 発明者 小林 亮夫
 東京都板橋区蓮沼町75番1号 株式会社トプコン内
 (72) 発明者 川島 浩幸
 東京都板橋区蓮沼町75番1号 株式会社トプコン内

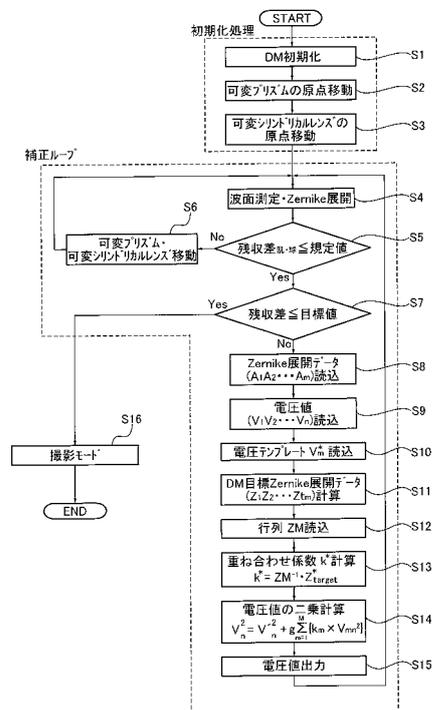
(54) 【発明の名称】 波面収差補正装置

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 波面収差を補正する際、電圧を印加する電極数が多い可変形状ミラーを用いたとしても、応答良く短時間にて残収差を小さく抑える補正を達成する。

【解決手段】 電極 9 e ... に印加された電圧値 V_n に応じて形状を変化させる薄膜ミラー 9 b を有する可変形状ミラー 9 と、収差補正対象と可変形状ミラー 9 を経由した光束を受光して波面収差を測定する波面センサ 1 4 と、波面収差の多項式による電圧テンプレート V_m^* を記憶しておく電圧テンプレート記憶手段と、波面センサ 1 4 で得られた波面収差が所望の収差になるように各展開モードの重ね合わせ振幅を決定し、電圧テンプレート V_m^* より電極 9 e ... のそれぞれに印加する電圧値 V_n を演算する電極印加電圧演算手段と、波面センサ 1 4 により測定される光束の波面収差を抑制するように、可変形状ミラー 9 のミラー形状の補正を繰り返す制御を行う可変形状ミラー制御手段と、を有する。

【選択図】 図 6



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

複数の電極と、該複数の電極に印加された電圧値に応じて形状を変化させる薄膜ミラーを有し、入射した光束の波面収差を補正する可変形状ミラーと、

前記可変形状ミラーが設けられた光学系に収差補正対象を含み、該収差補正対象と可変形状ミラーを経由した光束を受光して該光束の波面収差を測定する波面センサと、

波面収差の多項式による展開モード毎に、それぞれの展開モードを誘起する電極の電圧配列データである電圧テンプレートを記憶しておく電圧テンプレート記憶手段と、

前記波面センサで得られた波面収差が所望の収差になるように各展開モードの重ね合わせ振幅を決定し、前記電圧テンプレート記憶手段で記憶している電圧テンプレートより前記複数の電極のそれぞれに印加する電圧値を演算する電極印加電圧演算手段と、

前記電極印加電圧演算手段により演算した電圧値に基づき、前記波面センサにより測定される光束の波面収差を抑制するように、前記可変形状ミラーのミラー形状の補正を繰り返す制御を行う可変形状ミラー制御手段と、

を有することを特徴とする波面収差補正装置。

【請求項 2】

請求項 1 に記載された波面収差補正装置において、

前記可変形状ミラーは、薄膜ミラーの変位量を初期変位量とするべく全電極に初期電圧を印加した後、複数の電極に対して作り出された電圧パターンによる薄膜ミラーの歪み形状を、収差補正対象を経由して入射される光束の波面収差形状を打ち消す形状に制御することで、ミラー反射後の光束に含まれる波面収差を小さく抑えることを特徴とする波面収差補正装置。

【請求項 3】

請求項 1 又は請求項 2 に記載された波面収差補正装置において、

前記波面センサは、マイクロレンズが格子状に配列されたハルトマンプレートと、二次元電荷結合素子とから構成され、収差補正対象に点光源を投影し、収差補正対象及び前記可変形状ミラーを経由した反射光を、前記ハルトマンプレートで多数の光束に分割し、それぞれの光束による点像位置を二次元電荷結合素子で測定し、収差補正を要しない理想収差補正対象の場合の点像位置と比較することにより、収差補正対象の波面収差を測定することを特徴とする波面収差補正装置。

【請求項 4】

請求項 1 乃至請求項 3 の何れか 1 項に記載された波面収差補正装置において、

前記電圧テンプレート記憶手段は、波面収差のゼルニケ多項式による展開モードのうち補正対象とする展開モードについて、展開モード毎に、それぞれの展開モードを誘起する電極の電圧配列データである電圧テンプレートを用意し、これを記憶することを特徴とする波面収差補正装置。

【請求項 5】

請求項 1 乃至請求項 4 の何れか 1 項に記載された波面収差補正装置において、

前記電極印加電圧演算手段は、波面収差補正後の残収差のゼルニケ展開データにより、各展開モードでの振幅値を読み込み、各電極に印加されている電圧値を前回の電圧値として読み込み、予め記憶されている各展開モードを誘起する電圧テンプレートを読み込み、可変形状ミラーの目標ゼルニケ展開データを計算し、予め計算された各電圧テンプレートに対応する波面形状データを並べた行列を読み込み、目標ゼルニケ展開データと行列により計算した重ね合わせ係数を各展開モードの重ね合わせ振幅として算出し、前記電圧テンプレートと重ね合わせ振幅と前回の電圧値とフィードバックゲインにより、前記複数の電極それぞれに対し今回印加する電圧値を演算することを特徴とする波面収差補正装置。

【請求項 6】

請求項 1 乃至請求項 4 の何れか 1 項に記載された波面収差補正装置において、

前記電極印加電圧演算手段は、波面収差補正後の残収差のゼルニケ展開データにより、各展開モードでの振幅値を読み込み、各電極に印加されている電圧値を前回の電圧値とし

10

20

30

40

50

て読み込み、予め記憶されている各展開モードを誘起する電圧テンプレートを読み込み、各電圧テンプレートに対応する波面形状データに対する各展開モードの波面形状データの比を各展開モードの重ね合わせ振幅として算出し、前記電圧テンプレートと重ね合わせ振幅と前回の電圧値とフィードバックゲインにより、前記複数の電極それぞれに対し今回印加する電圧値を演算することを特徴とする波面収差補正装置。

【請求項 7】

請求項 1 乃至請求項 4 の何れか 1 項に記載された波面収差補正装置において、

前記電極印加電圧演算手段は、波面収差補正後の残収差のゼルニケ展開データにより、各展開モードでの振幅値を読み込み、各電極に印加されている電圧値を前回の電圧値として読み込み、予め記憶されている各展開モードを誘起する電圧テンプレートを読み込み、前記各展開モードの振幅値の正負符号を反転させた値を各展開モードの重ね合わせ振幅とし、前記電圧テンプレートと重ね合わせ振幅と前回の電圧値とフィードバックゲインにより、前記複数の電極それぞれに対し今回印加する電圧値を演算することを特徴とする波面収差補正装置。

10

【請求項 8】

請求項 1 乃至請求項 7 の何れか 1 項に記載された波面収差補正装置において、

前記波面センサと前記電極印加電圧演算手段と前記可変形状ミラー制御手段は、波面収差補正後の残収差が、設定倍率により収差補正対象を観察や撮影する際に鮮明な画像が得られる許容波面収差に基づき決定された目標値以下になるまで、波面収差測定と印加電圧演算と可変形状ミラー制御を繰り返すループ補正制御を行うように構成したことを特徴とする波面収差補正装置。

20

【請求項 9】

請求項 1 乃至請求項 8 の何れか 1 項に記載された波面収差補正装置において、

前記収差補正対象が被検眼であり、該被検眼の屈曲特性を原因として発生する波面収差のうち、球面度数成分と乱視度数成分を補正する低次波面収差補正手段を設け、

前記電極印加電圧演算手段及び前記可変形状ミラー制御手段は、前記低次波面収差補正手段による低次波面収差補正後に残った波面収差成分と、低次波面収差補正の対象となる次数より高次の波面収差成分を、可変形状ミラーを変形させて補正することを特徴とする波面収差補正装置。

【請求項 10】

請求項 9 に記載された波面収差補正装置において、

前記低次波面収差補正手段は、波面収差の測定に基づき、波面収差のうち、球面度数成分をオートフォーカス系の合焦機構で調整し、乱視度数成分を乱視補正用レンズで調整し、収差補正後の残収差が、ゼルニケ多項式による展開モードで 2 次を考慮して決められた規定値以下となるまで、波面収差測定とレンズ移動を繰り返すことを特徴とする波面収差補正装置。

30

【請求項 11】

請求項 9 又は請求項 10 に記載された波面収差補正装置において、

前記波面センサと前記電極印加電圧演算手段と前記可変形状ミラー制御手段は、前記低次波面収差補正手段による波面収差補正に続いて、波面収差測定と各電極への印加電圧の演算に基づく可変形状ミラーの歪み変形制御を開始し、収差補正後の残収差が、ゼルニケ多項式による展開モードで少なくとも 6 次までを考慮して決められた目標値以下となるまで、波面収差測定と印加電圧演算と可変形状ミラー制御を繰り返すことを特徴とする波面収差補正装置。

40

【請求項 12】

請求項 1 乃至請求項 11 の何れか 1 項に記載された波面収差補正装置において、

被検眼の眼底観察及び眼底撮影を行う眼科装置の光学系に装備し、

前記可変形状ミラー制御手段は、収差補正後の残収差が目標値以下になると、被検眼の眼底撮影モードに移行することを特徴とする波面収差補正装置。

【発明の詳細な説明】

50

【技術分野】

【0001】

本発明は、被検眼等の収差補正対象を高倍率にて観察したり撮影したりする際、画像の鮮明さを決める要因となる波面収差を小さく抑える収差補正を行う波面収差補正装置に関するものである。

【背景技術】

【0002】

従来から、照明された眼底からの反射光束により眼底像を結像させて、眼底の観察及び撮影を行う眼底カメラが知られている。しかしながら、この種の眼底カメラでは、眼底からの反射光束は、角膜・水晶体・ガラス体等からなる眼光学系を経由するため、その眼光学系の収差の影響で、高い分解能の眼底像を得ることができない。つまり、高倍率にて眼底の観察や撮影を試みようとしても鮮明な眼底像を得ることができない、という問題点を有していた。ちなみに、眼光学系は、理想的な光学素子とは程遠く、近視や乱視等、多種の収差発生原因となる光学的屈折特性を有していて、眼底からの反射光束による波面は歪みを持っている。

10

【0003】

これに対し、被検眼の光学収差を測定するための収差測定部と、収差測定部からの信号に基づき被検眼の光学収差により生じる反射光束の波面の歪みを補正するために、可変形状ミラー(Deformable Mirror)による収差補正部を設け、倍率を上げた場合でも鮮明な眼底像を得ることが可能な装置が提案されている(例えば、特許文献1参照。)

20

【特許文献1】特開2005-224328号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

しかしながら、従来装置にあっては、可変形状ミラーを用いて波面収差を補正するに際し、可変形状ミラーを調整するために複数種類の電圧変化テンプレート(同心円テンプレート、対称テンプレート、非対称テンプレート)を用意しておき、測定した波面収差に基づき電圧変化テンプレートを選択し、選択した電圧変化テンプレートにより各電極の電圧値である1つの電圧パターンを決定し、これを繰り返して可変形状ミラーを用いた波面収差の補正を行っている。

30

【0005】

一般に、テンプレートを用いた波面収差補正の演算処理方式にあっては、1つの電極に電圧を掛けたときに発生する歪みをインフルエンス関数として持ち、この各電極に対応するインフルエンス関数を重ね合わせて、目標形状に対応した電圧配列データを算出する。すなわち、テンプレートの単位が電極になったのと等価なため、電極数に依存して計算量が多くなる。

【0006】

また、従来技術のように、3種類のテンプレートを持つものについても、波面収差のうち補正対象となる各展開モードへの一致性は3種類で得ることができず、上記同様に、特定の電極に電圧を掛けたときに発生する歪みをインフルエンス関数として持ち、この特定の電極に対応するインフルエンス関数を重ね合わせる際の重ね合わせ係数を計算する必要があり、この重ね合わせ係数の計算に時間を要する。このため、通常、テンプレートを用いた波面収差補正の演算処理方式は、電極数が多い可変形状ミラーには向かないといわれている。

40

【0007】

また、眼の波面収差と可変形状ミラーで補正される収差との差である残収差の目標値を大きな値に設定すると、電圧パターンの繰り返し補正回数は少なくなり、眼底撮影時に撮影開始から撮影終了までに要する時間が短時間で済む。しかし、高倍率とした場合に鮮明な画像で撮影できない。

【0008】

50

一方、残収差の目標値を小さな値に設定すると、高倍率としても鮮明な画像で撮影することができる。しかし、電圧パターンの繰り返し補正回数が増大し、眼底撮影時に撮影開始から撮影終了までに要する時間として長時間を要する。

【0009】

ここで、可変形状ミラーの制御は、薄膜ミラーが目標形状に近づくように繰り返して電圧パターンを補正してゆくこととされる理由を説明する。

まず、可変形状ミラーは、薄膜ミラーの背面に所定の間隔で配置した複数の電極のそれぞれに電圧を印加し、引っ張り力（静電力）のみにより薄膜ミラーを変形させる。また、可変形状ミラーの薄膜ミラーは連続体であるため、薄膜ミラーの形状変形に対し各電極を独立に扱うことができない。したがって、1つの電極により薄膜ミラーの1点を引っ張ると、1つの電極に対応する薄膜ミラーの部分が大きく変形すると同時に、他の電極に対応する薄膜ミラーの部分まで変形してしまうというように、その影響はミラー全面に及ぶことによる。

【0010】

次に、被検眼の眼底を撮影する際を例にとると、良い状態で眼を開いていられる継続時間が人により異なるが、短い人では数秒となる。このため、波面収差の補正開始から撮影までを数秒間で終了するためには、できるだけ少ない補正回数で、目標とする波面収差に到達するのが重要である。

【0011】

また、被検眼の眼底を撮影する際を例にとると、検査精度を上げるために眼底の視細胞レベルまで確認できるように、高倍率で鮮明な画像により撮影したいという要望がある。これに対し、眼の波面収差と可変形状ミラーで補正される収差との差である残収差が小さいほど、画像の鮮明さを保ちながら、倍率を高くすることができるため、電圧を印加する電極数が多い可変形状ミラーを用い、収差補正限界を高める必要がある。

【0012】

したがって、可変形状ミラーの制御では、電圧を印加する電極数が多い可変形状ミラーを用いたとしても、波面センサで測定した収差形状データから、少ない補正回数で目標とする波面収差に到達するため、波面収差を補正する形状を作るための電圧パターンをどのように予想するか、というのが未だ解決し得ない課題として残っている。

【0013】

本発明は、上記問題点に着目してなされたもので、波面収差を補正する際、電圧を印加する電極数が多い可変形状ミラーを用いたとしても、応答良く短時間で残収差を小さく抑える補正を達成し、高倍率としてもきわめて鮮明な画像を得ることができる波面収差補正装置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】

【0014】

上記目的を達成するため、本発明の波面収差補正装置では、複数の電極と、該複数の電極に印加された電圧値に応じて形状を変化させる薄膜ミラーを有し、入射した光束の波面収差を補正する可変形状ミラーと、前記可変形状ミラーが設けられた光学系に収差補正対象を含み、該収差補正対象と可変形状ミラーを経由した光束を受光して該光束の波面収差を測定する波面センサと、波面収差の多項式による展開モード毎に、それぞれの展開モードを誘起する電極の電圧配列データである電圧テンプレートを記憶しておく電圧テンプレート記憶手段と、前記波面センサで得られた波面収差が所望の収差になるように各展開モードの重ね合わせ振幅を決定し、前記電圧テンプレート記憶手段で記憶している電圧テンプレートより前記複数の電極のそれぞれに印加する電圧値を演算する電極印加電圧演算手段と、前記電極印加電圧演算手段により演算した電圧値に基づき、前記波面センサにより測定される光束の波面収差を抑制するように、前記可変形状ミラーのミラー形状の補正を繰り返す制御を行う可変形状ミラー制御手段と、を有することを特徴とする。

10

20

30

40

50

【発明の効果】

【0015】

よって、本発明の波面収差補正装置にあつては、電極印加電圧演算手段において、波面センサで得られた波面収差が所望の収差になるように各展開モードの重ね合わせ振幅を決定し、電圧テンプレート記憶手段で記憶している電圧テンプレートより複数の電極のそれぞれに印加する電圧値が演算され、可変形状ミラー制御手段において、演算した電圧値に基づき、波面センサにより測定される光束の波面収差を抑制するように、可変形状ミラーのミラー形状の補正を繰り返す制御が行われる。

すなわち、波面センサで得られる薄膜ミラーの解析エリア内における波面測定データは、波面収差の多項式により展開された各展開モードでの振幅として表される。一方、各展開モードの形状を得る電圧テンプレート（電圧配列データ）を用意し、それらを重ね合わせ、目標形状に対応した電圧配列データを算出する。この際、重ね合わせの振幅は、各展開モードでの振幅に等しいとして算出することが可能である。

このように、波面収差多項式の展開モード毎に、それぞれの展開モードを誘起する電圧テンプレートを用意し、重ね合わせの振幅を各展開モードでの振幅と等しいとして算出できる展開モード毎のテンプレート方式を採用したものである。このため、例えば、1つの電極に1つの電圧値を印加した場合の薄膜ミラー面の全体形状を記憶しておき、それらを重ね合わせ形状が最も目標形状と近くなるように、各電極の電圧値を決定する従来のテンプレート方式に比べ、各展開モードでの振幅さえ分かれば、計算量は非常に少なくなるので、1回の補正処理に要する時間が少なくて済む。

また、電圧テンプレートの数は、電極の数に依存することなく、展開モードの数に依存するものとなり、電圧を印加する電極数が多い可変形状ミラーを用いても、計算量は非常に少なくなる。言い換えると、電圧を印加する電極数を増大させても計算量はそれほど多くなるらない。

さらに、各展開モードを誘起する電圧テンプレートを用いることで、低次波面収差を補正する補正開始域において、波面収差が一気に目標値に近づくと、高い初期応答による波面収差の補正制御ができる。

このように、短時間にて可変形状ミラーが目標形状に到達する電圧パターンの補正アルゴリズム（展開モード毎のテンプレート方式）を採用することで、波面収差を補正する際、電圧を印加する電極数が多い可変形状ミラーを用いたとしても、応答良く短時間にて残収差を小さく抑える補正を達成し、高倍率としてもきわめて鮮明な画像を得ることができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0016】

以下、本発明の波面収差補正装置を実現する最良の形態を、図面に示す実施例1及び実施例2に基づいて説明する。

【実施例1】

【0017】

まず、構成を説明する。

図1は、実施例1の波面収差補正装置を適用した眼科装置を示す全体図である。なお、波面収差補正装置は、補償光学システム、あるいは、AOシステム（アダプティブ・オプティクス・システム）とも呼ばれ、可変形状ミラーにより波面収差を打ち消す機能を持つことで実現されるシステムをいう。

【0018】

実施例1の眼科装置は、図1に示すように、被検眼の眼底を撮影する眼底撮影系と、該眼底撮影系に組み込まれた可変形状ミラーを用いて波面収差を補正する波面制御系と、を備えている。

【0019】

はじめに、眼底撮影系の説明をする。

被検眼Eの眼底Efを撮影する眼底撮影系は、半導体レーザ光源1と、ビームスプリッタ2

10

20

30

40

50

と、可変シリンドリカルレンズ 3 (乱視補正用レンズ) と、第 1 レンズ 4 と、第 1 ミラー 5 と、可動プリズム 6 (合焦機構) と、第 2 ミラー 7 と、第 2 レンズ 8 と、可変形状ミラー 9 と、ダイクロイックミラー 10 と、高感度 CCD カメラ 11 と、を備えている。

【0020】

前記半導体レーザ光源 1 からの波長 633nm の半導体レーザ光は、ビームスプリッタ 2 及び任意の乱視度数に設定することのできる可変シリンドリカルレンズ 3 を通り被検眼 E に入射し、眼底 Ef を照明する。眼底 Ef からの反射光は、被検眼 E の乱視度数に応じて設定された可変シリンドリカルレンズ 3 で乱視の影響を軽減する。そして、ビームスプリッタ 2 を透過し、第 1 レンズ 4、第 1 ミラー 5、可動プリズム 6、第 2 ミラー 7、第 2 レンズ 8 で構成されるオートフォーカス系に入射する。そして、被検眼 E の球面度数に対応してオートフォーカス系の可動プリズム 6 が図 1 の矢印方向に駆動され、光路長を変化させることで、近視や遠視の影響を軽減する。このオートフォーカス系からの光束は、ほぼ平行光となる。この平行光は、可変形状ミラー 9 にて反射し、ダイクロイックミラー 10 で方向を変え、眼底撮影用の高感度 CCD カメラ 11 に入射し、高感度 CCD カメラ 11 の結合素子上に眼底像を結像する。

10

【0021】

続いて、波面制御系を説明する。

眼底撮影系に組み込まれた可変形状ミラー 9 を用いて波面収差を補正する波面制御系は、半導体レーザ光源 12 (SLD でもよい) と、ビームスプリッタ 13 と、波面センサ 14 と、パーソナルコンピュータ 15 と、ドライバー 16 と、を備えている。なお、眼底撮影系の可変形状ミラー 9 を共通の構成とする。

20

【0022】

前記半導体レーザ光源 12 からの波長 840nm の半導体レーザ光は、ビームスプリッタ 13 を反射し、ダイクロイックミラー 10、可変形状ミラー 9、オートフォーカス系、ビームスプリッタ 2、可変シリンドリカルレンズ 3 を通り被検眼 E に入射し、眼底 Ef に結像する。眼底 Ef からの反射光は、可変シリンドリカルレンズ 3、ビームスプリッタ 2、オートフォーカス系、を通過し、その形状を制御した可変形状ミラー 9 を反射し、波面が補正される。そして、可変形状ミラー 9 にて補正しきれなかった波面収差、すなわち、可変形状ミラー 9 を反射した光束の収差から目標収差を引いた残収差を含んだ状態で、ダイクロイックミラー 10、ビームスプリッタ 13 を透過し、ハルトマンプレート 14 a と二次元 CCD 14 b から構成された波面センサ 14 に入射され、波面情報を画像として検出する。波面センサ 14 からの CCD 画像はパーソナルコンピュータ 15 で画像処理され、残収差が計算される。パーソナルコンピュータ 15 では、可変形状ミラー 9 の薄膜ミラー形状を補正する電圧データを、後述する補正アルゴリズムを用いて算出し、ドライバー 16 で駆動する補正処理を、計算された残収差が目標値以下となるまで繰り返す。

30

【0023】

この波面制御系は、クローズドループになっており、残収差が小さくなるように制御され、目標値以下まで残収差が小さくなった時点で眼底撮影系の高感度 CCD カメラ 11 により、高倍率にて眼底 Ef が撮影される。

【0024】

次に、前記可変形状ミラー 9 の構成を説明する。

図 2 は、実施例 1 の眼底撮影系と波面制御系に共有された可変形状ミラーの一例を示す図であり、(a) は平面図を示し、(b) は A - A 線断面図を示す。図 3 は、可変形状ミラーの薄膜ミラーと電極を示す断面図である。図 4 は、可変形状ミラーの電極の配置例を示す平面図である。

40

【0025】

前記可変形状ミラー 9 は、図 2 に示すように、ミラー枠 9 a と、薄膜ミラー 9 b と、スペーサー 9 c と、電極基板 9 d と、電極 9 e と、を備えている。

【0026】

前記薄膜ミラー 9 b は、図 3 に示すように、ミラー枠 9 a に張設されていて、光路側の

50

アルミニウムミラー91と、電極側のシリコン薄膜92による2層構造により構成されている。前記アルミニウムミラー91は、反射膜であり、反射率の高い材料をシリコン薄膜92に蒸着して形成される。前記シリコン薄膜92は、可撓性を有しており、例えば、厚さ4 μ m程度の厚みを有している。

【0027】

前記スペーサー9cは、薄膜ミラー9bと電極9eとのギャップ長を所定値に保持するために用いられるもので、例えば、剛性が高い球等が用いられる。

【0028】

前記電極9eは、電極基板9dの上に多数配置されるもので、図4に示すように、同心円状で、かつ、放射状に並べて85個に分割して配列されている。なお、図4の1点鎖線は波面測定データから波面を再生する解析エリアを示す。

10

【0029】

前記各電極9e... (電極1~電極n)を個別に電圧駆動する回路として、図2(b)に示すように、前記ドライバー16が設けられていて、図3に示すように、各電極9e...に対応して薄膜ミラー9bの変形が生じるように、各電極9e...に静電電圧値($V_1 \sim V_n$)が印加される。

【0030】

次に、前記波面センサ14の構成を説明する。

図5は、実施例1の撮影制御系の波面センサ14を示す説明図である。

【0031】

前記波面センサ14は、図5に示すように、マイクロフレネルレンズが格子状に配列されたハルトマンプレート14aと、該ハルトマンプレート14aから所定間隔を介して平行配置された二次元CCD14b(二次元電荷結合素子)と、から構成される。

20

【0032】

この波面センサ14bによる波面収差の測定は、被検眼Eの眼底Ef(網膜)上に点光源を投影し、眼底Efで反射された反射光をハルトマンプレート14aで多数の光束に分割し、それぞれの光束による点像位置を二次元CCD14bで測定する。そして、測定した点像位置と、無収差眼の場合の点像位置と比較すると、波面収差は、二次元CCD14bにおいて、各点像の変位量(x, y)は、波面収差形状の傾きであり、変位量から波面収差を復元する。この各点像の変位量(x, y)をもって波面収差とする。したがって、格子状に配列されたマイクロフレネルレンズのレンズ数設定と、二次元CCD14bの素子数設定により、高精度に波面収差を測定することができる。

30

【0033】

この波面センサ14により、補正前の初期波面収差および繰り返し補正毎の残収差が測定され、この測定結果が、可変形状ミラー9を波面とは逆位相形状に変形させる高次波面収差の補正アルゴリズムの入力情報として用いられる。なお、波面センサ14による収差測定結果は、被検眼Eの屈曲特性を原因として発生する波面収差のうち、球面度数成分と乱視度数成分を補正する低次波面収差補正での入力情報としても用いられる。

【0034】

図6は、実施例1の波面制御系のパーソナルコンピュータ15にて実行される波面収差補正制御処理の流れを示すフローチャートであり、以下、各ステップについて説明する。この波面収差補正制御処理は、検眼者による高倍率による眼底像の観察・撮影の開始操作により起動される。

40

【0035】

ステップS1は、可変形状ミラー9の全電極9e...に初期電圧V0を印加することで、DM初期化(Deformable Mirror初期化)を行うステップである。

すなわち、可変形状ミラー9の薄膜ミラー9bは、薄膜ミラー9bと電極9eの間隔が2/3になる電圧Vpを超えると不安定になり、電極9eと薄膜ミラー9bが接触してしまう(プルイン現象)。そこで、DM(可変形状ミラー)の初期化では、全電極に同じ電圧を印加した場合、プルインを起こす電圧Vpより若干低い値に初期電圧V0を設定する。これによ

50

って、以降の可変形状ミラー制御では、平均値が初期電圧 V_0 に固定され、プルインは起きず、かつ、電圧の制御レンジが大きくとれ、また、球面度数成分 $(n,m) = (2,0)$ 成分の変動が抑制される。

【0036】

ステップS2は、ステップS1でのDM初期化に続き、波面収差のうち、球面度数成分（近視、遠視等）を修正するオートフォーカス系の可動プリズム6を初期位置（原点）に移動させるステップである。

【0037】

ステップS3は、ステップS2での可動プリズム6の原点移動に続き、波面収差のうち、乱視度数成分を修正する可変シリンダリカルレンズ3を初期位置（原点）に移動するステップである。なお、ステップS1～ステップS3は、初期化処理ステップである。

10

【0038】

ステップS4は、ステップS3での可変シリンダリカルレンズの原点移動、または、ステップS6での可変プリズム・可変シリンダリカルレンズ移動、または、ステップS15での電圧値出力に続き、ゼルニケ多項式による各展開モードについて、波面センサ14からの信号に基づいて波面収差を測定するステップである。

ゼルニケ多項式による各展開モードについて説明する。被検眼Eの波面収差と補正される波面収差との差（残収差）は、下記のようにゼルニケ展開される。

$$W(r, \theta) = \sum_m \{ A_m \times Z_m(r, \theta) \}$$

ここで、 $W(r, \theta)$ は残収差、 $Z_m(r, \theta)$ は展開モードmのゼルニケ多項式、 A_m は各ゼルニケ多項式による展開モードmの振幅値である。なお、展開モードmは、図7に示す各次数 $n(0 \sim 10)$ と各モード態様 $m(-10 \sim 0 \sim 10)$ に対し、低次モード側から順次、 $m = 1 \sim m = M$ （高次モードの最大値）までの番号をふっている。

20

また、「ゼルニケ多項式による各展開モード」とは、光学分野でよく使われるゼルニケ多項式により波面収差を分解したとき、各ゼルニケ多項式により展開されるモードをいい、各展開モードは、独立した波面の形（モード）に対応する。

図7は0次～10次のゼルニケ多項式による各展開モードを示す図であり、それぞれが古典的な波面収差にも対応しており、収差成分を知ることができる。

【0039】

ステップS5は、ステップS4での波面測定・ゼルニケ展開に続き、残収差（乱・球）が規定値以下か否かを判断するステップである。

30

ここで、「規定値」は、ゼルニケ多項式による展開モードで、2次を考慮して決められる。具体的には、例えば、図7に記載した枠内の6つの低次モードを考慮して決めたものである。なお、6つの低次モードを次数 n とモード態様 m の関係でいうと、 $(n,m) = (0,0)$ 、 $(1,-1)$ 、 $(1,1)$ 、 $(2,-2)$ 、 $(2,0)$ 、 $(2,2)$ であらわされる。なお、 $n = 0$ は0次の位相、1次はチルトであり、画像のぼけには無関係である。

このステップS5で、Noと判断されたときは、ステップS6へ移行し、Yesと判断されたときは、ステップS7へ移行する。

【0040】

ステップS6は、ステップS5での残収差（乱・球）>規定値との判断に続き、波面収差のうち球面度数成分 $(n,m) = (2,0)$ を、オートフォーカス系の可動プリズム6を移動させることで調整し、波面収差のうち乱視度数成分 $(n,m) = (2,-2)$ 、 $(2,2)$ を、可変シリンダリカルレンズ3を移動させることで調整するステップである。

40

この低次波面収差の補正は、波面収差のうち球面度数成分と乱視度数成分を減少させる方向に調整する補正であり、具体的には、波面センサ14により検出された近視度合いや遠視度合いや乱視度合いに応じ、めがねレンズやコンタクトレンズ等で矯正するように、可動プリズム6とシリンダリカルレンズ3を移動させることで行われる。

なお、ステップS5→ステップS6→ステップS4へと進む低次波面収差補正ループは、ステップS5において、残収差（乱・球）>規定値と判断されるまで繰り返される。

【0041】

50

ステップS7は、ステップS5での残収差（乱・球）規定値との判断に続き、残収差が目標値以下か否かを判断するステップである。

ここで、「目標値」は、設定倍率により収差補正対象である眼底Efを観察や撮影する際に鮮明な画像が得られる許容波面収差に基づき決定される。例えば、ゼルニケ多項式による展開モードで、少なくとも6次までを考慮して決められる。なお、より高倍率要求があるときには、ゼルニケ多項式による展開モードで倍率に応じ6次～10次程度までを考慮して決められる。

具体的には、眼底Efの視細胞（2～5 μm）の撮影を目標としているため、これを観測するには、本光学系の場合、解析エリア内の波面収差はRMS（Root Mean Squareの略）の実測値で0.05 μm未満であり、このRMS実測値に基づいて決定される。

ここで、「RMS」とは、波面収差指標の1つであり、自乗平均平方根の略で、理想波面と実際の波面の標準偏差（分散の平方根）をいう。

このステップS7において、Noと判断されたときは、ステップS8へ移行し、Yesと判断されたときは、ステップS16へと移行する。

【0042】

ステップS8は、ステップS7での残収差 目標値であるとの判断に続き、ステップS4にて計算した残収差のゼルニケ多項式の展開データより、各モードにおける振幅値($A^* = A_1 A_2 \dots A_m$)を読み込むステップである。

以下、右上付きの「*」は、ベクトルを表す。

【0043】

ステップS9は、ステップS8での各モードにおける振幅値($A^* = A_1 A_2 \dots A_m$)の読み込みに続き、そのとき各電極9 e ... に印加されている電圧値($V^* = V_1 V_2 \dots V_n$)を読み込むステップである。

この電圧値($V^* = V_1 V_2 \dots V_n$)は、1回前の制御に使用した電圧値であり、最初の制御の際にはステップS1で述べた初期電圧V0の値になる。

【0044】

ステップS10は、ステップS9での電圧値($V^* = V_1 V_2 \dots V_n$)の読み込みに続き、予め実験結果により定められた電圧テンプレート Vm^* を記憶しておき（電圧テンプレート記憶手段）、記憶されている電圧テンプレート Vm^* から今回の演算処理に用いる電圧テンプレート Vm^* を読み込むステップである。

ここで、「電圧テンプレート Vm^* 」とは、例えば、図8に示すように、波面収差のゼルニケ多項式による展開モード毎に、それぞれの展開モードを誘起する電極の電圧配列データである。また、「電圧テンプレート Vm^* 」としては、上記低次波面収差の対象とされている4つの低次モード $(n,m) = (0,0), (1,-1), (1,1), (2,0)$ を除き、低次モードから補正対象とする高次モード（6次以上）までの各展開モードについてそれぞれ用意する。

【0045】

ステップS11は、ステップS10での電圧テンプレート Vm^* の読み込みに続き、可変形状ミラー9で作られる目標形状である目標ゼルニケ展開データ Z^*_{target} を、 $Z^*_{target} = (Z_{t1} Z_{t2} Z_{t3} Z_{t4} \dots Z_{tm})$ として計算するステップである。

すなわち、可変形状ミラー9を経由した光束の残収差は、 $A^* + Z^*_{target}$ となる。よって、可変形状ミラー9を経由した光束の残収差を無くすように可変形状ミラー9を制御したいときは、 $Z^*_{target} = -A^*$ となる。

【0046】

ステップS12は、ステップS11での可変形状ミラー9における目標ゼルニケ展開データ Z^*_{target} の計算に続き、予め計算してある行列ZMを読み込むステップである。

ここで、「行列ZM」とは、特定のゼルニケ展開モードmを誘起する電圧テンプレート Vm^* の電圧を、複数の電極9 e ... に印加した際に生じる実際の波面収差の振幅ベクトルデータを行列形式で並べたものであり、実験結果によって決定する。理想的には、単一ゼルニケ展開モードのみが生じるはずであるが、実際には他のゼルニケ展開モードも混ざってしまう（テンプレートの不完全性）。これを考慮するために、行列ZMを設定する。

10

20

30

40

50

行列ZMは、上述したように、

【 0 0 4 7 】

【 数 1 】

$$ZM = \begin{pmatrix} Z_{1,1} & Z_{2,1} & \dots & Z_{m,1} \\ Z_{1,2} & Z_{2,2} & & Z_{m,2} \\ \vdots & & & \vdots \\ Z_{1,m} & Z_{2,m} & \dots & Z_{m,m} \end{pmatrix}$$

10

と定義されるが、簡略化して演算のスピードを上げるために、

【 0 0 4 8 】

【 数 2 】

$$ZM \approx \begin{pmatrix} Z_{1,1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Z_{2,2} & & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Z_{m,m} \end{pmatrix} \dots (1)$$

20

としても良い。

また、この電圧テンプレートを規格化し、Z_{m,m}を1とする、

【 0 0 4 9 】

【 数 3 】

$$ZM \approx \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} \dots (2)$$

30

の式により、演算フローを進めてゆくこともできる。

【 0 0 5 0 】

ステップS 1 3は、ステップS 1 2での行列ZMの読み込みに続き、重ね合わせ係数k^{*}を、k^{*} = ZM⁻¹ · Z_{target}^{*}の式により計算するステップである。

上記k^{*} = ZM⁻¹ · Z_{target}^{*}の式は、Z_{target}^{*} = ZM · k^{*}となるようなk^{*}を求めるための式である。

ここで、テンプレートの不完全性を無視する上記式(1)のときは、

【 0 0 5 1 】

【 数 4 】

$$k^* = \begin{pmatrix} \frac{Z_{t1}}{Z_{1,1}} & \frac{Z_{t2}}{Z_{2,2}} & \dots & \frac{Z_{tm}}{Z_{m,m}} \end{pmatrix}$$

40

となる。

よって、上記式(2)のときで、かつ、可変形状ミラー9で収差を無くすように設定するときは、k^{*} = -A^{*}となる。

【 0 0 5 2 】

ステップS 1 4は、ステップS 1 3での重ね合わせ係数k^{*}の計算に続き、収差を無くす可変形状ミラー9の薄膜ミラー9bの形状を得るための電圧値Vnの二乗値Vn²を、電圧

50

の二乗は変位量にほぼ比例することから決められた下記式で計算するステップである。

$$V_n^2 = V_n'^2 + g \{ k_m \times V_{mn}^2 \}$$

ここで、ステップ S 9 にて読み込んだ V_n は、1 回前の制御周期における V_n' に置き換えている。また、 g は実験で定められたフィードバックゲイン（補正係数）であり、高次波面収差補正が発散することなく、しかも、応答良く少ない補正ループの繰り返し回数により残収差が目標値以下となる値とされる。

【 0 0 5 3 】

ステップ S 1 5 は、ステップ S 1 4 での電圧値の二乗計算に続き、ステップ S 1 4 で求めた電圧二乗値 V_n^2 により、電圧値 V_n を決定し、決定した電圧値 V_n を各電極 9 e ... に印加する駆動指令をドライバー 1 6 に出力するステップである。このステップ S 1 5 からは、

10

【 0 0 5 4 】

ステップ S 1 6 は、ステップ S 7 での残収差 目標値との判断に続き、眼底 Ef の高倍率撮影を行う撮影モードに入るステップである。

なお、図 6 のフローチャートにおいて、ステップ S 1 ~ ステップ S 6 は、低次波面収差補正手段に相当し、ステップ S 8 ~ ステップ S 1 4 は、電極印加電圧演算手段に相当し、ステップ S 4 , ステップ S 5 , ステップ S 7 ~ ステップ S 1 5 は、可変形状ミラー制御手段に相当する。

【 0 0 5 5 】

次に、作用を説明する。

20

以下、実施例 1 の波面収差補正装置による作用を、[低次波面収差の補正制御作用]、[高次波面収差の補正制御作用]、[可変形状ミラーと実施例 1 の補正アルゴリズムを用いた波面収差補正作用] に分けて説明する。

【 0 0 5 6 】

[低次波面収差の補正制御作用]

波面収差補正制御が開始されると、図 6 のフローチャートにおいて、ステップ S 1 ステップ S 2 ステップ S 3 へと進み、ステップ S 1 にて、DM 初期化が行われ、ステップ S 2 及びステップ S 3 にて可動プリズム 6 の初期位置移動と可変シリンドリカルレンズ 3 の初期位置移動という初期化処理が行われる。

【 0 0 5 7 】

30

ここで、ステップ S 1 にて、全電極 9 e ... に初期電圧 V_0 を印加し、薄膜ミラー 9 b の初期変位量に近い変位状態にて DM 初期化を行うのは、後述する可変形状ミラー 9 を用いた波面収差補正において、電極 9 e により薄膜ミラー 9 b の引っ張り力を減じる方向のみの変形モードとすることにより、制御ハンチングを抑えつつ、目標波面収差への収束応答を高めるためである。

【 0 0 5 8 】

ステップ S 3 からは、ステップ S 4 ステップ S 5 へと進み、ステップ S 5 において、残収差（乱・球） 規定値と判断されるまで、ステップ S 5 ステップ S 6 ステップ S 4 へと進む流れが繰り返される。

すなわち、ステップ S 5 において、残収差（乱・球） > 規定値と判断されると、ステップ S 6 において、波面収差のうち球面度数成分を、オートフォーカス系の可動プリズム 6 を移動させることで調整し、波面収差のうち乱視度数成分を、可変シリンドリカルレンズ 3 を移動させることで調整し、ステップ S 4 において、調整後の波面収差を測定するという流れが繰り返される。

40

【 0 0 5 9 】

そして、ステップ S 5 において、残収差（乱・球） 規定値と判断されると、ステップ S 5 ステップ S 6 ステップ S 4 へと進む流れの繰り返しによる低次波面収差補正ループを終了し、ステップ S 7 以降の高次波面収差補正処理へと進む。

【 0 0 6 0 】

このように、被検眼 E の屈曲特性を原因として発生する波面収差のうち、球面度数成分

50

と乱視度数成分を補正する低次波面収差補正ループ（ステップ S 4 , S 5 , S 6 ）を設けた。このため、後述する高次波面収差補正ループでは、低次波面収差補正ループによる低次波面収差補正後に残った波面収差成分と、低次波面収差補正の対象となる次数より高次の波面収差成分を、可変形状ミラー 9 を変形させて補正することになる。

したがって、高次波面収差補正ループでの波面収差補正負担が大幅に軽減され、残収差が目標値以下となるまでの収束応答性が高まり、高次波面収差補正ループでの繰り返し補正回数を低減できる。

【 0 0 6 1 】

[高次波面収差の補正制御作用]

ステップ S 5 にて残収差（乱・球）規定値と判断されると、図 6 のフローチャートにおいて、ステップ S 5 からステップ S 7 ステップ S 8 ステップ S 9 ステップ S 1 0
ステップ S 1 1 ステップ S 1 2 ステップ S 1 3 ステップ S 1 4 ステップ S 1 5 へと進む。

10

【 0 0 6 2 】

すなわち、ステップ S 8 では、残収差のゼルニケ多項式の展開データより、各モードにおける振幅値 ($A^* = A_1 A_2 \dots A_m$) が読み込まれ、ステップ S 9 では、そのとき各電極 9 e ... に印加されている電圧値 ($V^* = V_1 V_2 \dots V_n$) が読み込まれ、ステップ S 1 0 では、今回補正しようとするゼルニケ展開モード m に対応する電圧テンプレート Vm^* が読み込まれる。そして、ステップ S 1 1 では、目標ゼルニケ展開データ Z^*_{target} が、 $Z^*_{target} = (Z_{t1} Z_{t2} Z_{t3} Z_{t4} \dots Z_{tm})$ の式により計算され、ステップ S 1 2 では、予め計算してある行列 Z M が読み込まれる。そして、ステップ S 1 3 では、重ね合わせ係数 k^* が計算され、ステップ S 1 4 では、目標とするミラー変形を得るための電圧値 Vn の二乗値 Vn^2 が計算される。そして、ステップ S 1 5 では、電圧二乗値 Vn^2 により電圧値 Vn を決定し、決定した電圧値 Vn を各電極 9 e ... に印加する駆動指令がドライバー 1 6 に出力される。

20

【 0 0 6 3 】

そして、ステップ S 1 5 での電圧値出力に続き、ステップ S 4 へ戻り、ステップ S 4 では、今回の演算処理により決定した電圧値 Vn を各電極 9 e ... に出力した後の波面収差が測定され、ステップ S 5 ステップ S 7 へと進む。そして、ステップ S 7 において、残収差 > 目標値と判断される限り、図 6 のフローチャートにおいて、ステップ S 8 ステップ S 9 ステップ S 1 0 ステップ S 1 1 ステップ S 1 2 ステップ S 1 3 ステップ S 1 4
ステップ S 1 5 ステップ S 4 ステップ S 5 ステップ S 7 へと進む流れが繰り返される。つまり、残収差 > 目標値と判断される間、高次収差補正の補正ループが構成される。

30

【 0 0 6 4 】

そして、ステップ S 7 において、残収差 目標値と判断されると、ステップ S 7 からステップ S 1 6 へと進み、ステップ S 1 6 では、眼底 Ef の高倍率撮影を行う撮影モードに入ることになる。

【 0 0 6 5 】

したがって、実施例 1 の波面収差補正装置にあっては、ステップ S 8 ~ ステップ S 1 4 において、波面センサ 1 4 で得られた波面収差が所望の収差になるように各展開モードの重ね合わせ係数 k^* を計算し、記憶している電圧テンプレート Vm^* より複数の電極 9 e ... のそれぞれに印加する電圧値 Vn が演算され、高次収差補正の補正ループにおいて、演算した電圧値 Vn に基づき、波面センサ 1 4 により測定される光束の波面収差を抑制するように、可変形状ミラー 9 のミラー形状の補正を繰り返す制御が行われる。

40

【 0 0 6 6 】

[可変形状ミラーと実施例 1 の補正アルゴリズムを用いた波面収差補正作用]

まず、可変形状ミラー 9 の構造と可変形状ミラー 9 の制御電圧の算出方法について説明する。

可変形状ミラー 9 は、接地した導電性の薄膜ミラー 9 b に対向して電極 9 e を配置し、電極 9 e に電圧を印加することで静電力により薄膜ミラー 9 b が歪む。薄膜ミラー 9 b を凹

50

ませたい場所の下に電圧を印加すると、薄膜ミラー 9 b が凹む。このとき、歪量は電圧の二乗にほぼ比例する。

【 0 0 6 7 】

可変形状ミラー 9 で作ることができる形状は、電極 9 e の配列パターン、電極 9 e の個数、電極 9 e にかかる電圧の大きさで決まる。すなわち、電極 9 e の数を増やせば作れる形状が多様になるが、電圧を算出するには非常に時間がかかるため、リアルタイム補正を行う場合、補正形状の多様性と処理スピードはトレードオフの関係になる。

【 0 0 6 8 】

また、測定された波面収差を補正するような可変形状ミラー 9 形状を作るための制御電圧の算出は、非常に難しい。特に、薄膜ミラー 9 b は 1 つの連続体であるため、1 つの電極 9 e に電圧を掛けると電圧の付近が凹むだけでなく、その影響はミラー全面に及ぶ。そのため、従来は、一つの電圧を印加した場合のミラー面全体の形状を記録しておき、それらの重ね合わせがもっとも目標形状と近くなるように、各電極の電圧を決定する方式を採用していた。

10

【 0 0 6 9 】

実施例 1 の波面収差補正装置では、可変形状ミラー 9 は、図 4 に示すように、合計 85 個と非常に多くの電極 9 e ... を有する。このため、従来の駆動電圧算出方法では時間がかかるため、高速で駆動電圧を算出する簡便な方法（補正アルゴリズム）を考案した。

【 0 0 7 0 】

まず、電極毎に電圧テンプレートを用意した従来の補正アルゴリズムについて説明する。

20

1 つの電極 n にのみ電圧を印加するような電圧配列（以下、電圧テンプレート）として、

【 0 0 7 1 】

【数 5】

$$V_1^* = \begin{pmatrix} V & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ & & & & & \vdots \end{pmatrix}$$

$$V_i^* = \begin{pmatrix} 0 & \dots & V & \dots & 0 & 0 \\ & & & & & \vdots \end{pmatrix}$$

$$V_n^* = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & V \\ & & & & & \vdots \end{pmatrix}$$

30

を用意する。これと同時に、この電圧テンプレート V_n^* の電圧を印加した場合の波面形状データ配列 Z_n^* を電極数分記録しておく。 Z_n^* のデータは、通常、波面データをゼルニケ多項式により展開し、各展開モード m の振幅データを用いる。よって、ここではゼルニケ多項式により展開した際の振幅データ $Z_{n,m}$ を利用して説明する。なお、 $Z_{n,m}$ は他の多項式展開や実際の測定点変位データなどでもよい。

【 0 0 7 2 】

この 1 つの電極のみ駆動した場合の各電圧テンプレート V_n^* に対する、波面データ Z_n^* をインフルエンスペクトルと呼ぶと、このインフルエンスペクトル Z_n^* は、

40

【 0 0 7 3 】

【数 6】

$$Z_1^* = \begin{pmatrix} Z_{1,1} & Z_{1,2} & Z_{1,3} & Z_{1,4} & \dots & Z_{1,m} \\ & & & & & \vdots \end{pmatrix}$$

$$Z_i^* = \begin{pmatrix} Z_{i,1} & Z_{i,2} & Z_{i,3} & Z_{i,4} & \dots & Z_{i,m} \\ & & & & & \vdots \end{pmatrix}$$

$$Z_n^* = \begin{pmatrix} Z_{n,1} & Z_{n,2} & Z_{n,3} & Z_{n,4} & \dots & Z_{n,m} \\ & & & & & \vdots \end{pmatrix}$$

50

となる。そして、このインフルエンスベクトル Z_n^* を、電圧テンプレートの数だけ並べたものをインフルエンス行列 ZM と呼ぶと、インフルエンス行列 ZM は、

【 0 0 7 4 】

【 数 7 】

$$ZM = \begin{pmatrix} Z_{1,1} & Z_{2,1} & \cdots & Z_{n,1} \\ Z_{1,2} & Z_{2,2} & & Z_{n,2} \\ \vdots & & & \vdots \\ Z_{1,m} & Z_{2,m} & \cdots & Z_{n,m} \end{pmatrix}$$

10

となる。可変形状ミラーで作られる目標形状を、 $Z_{target}^* = (Z_{t1} Z_{t2} Z_{t3} Z_{t4} \dots Z_{tm})$ とすると、インフルエンス関数の線形結合が目標形状に近くなるような値を見つけられればよい。

【 0 0 7 5 】

線形結合の際の重ね合わせ係数を、 $k^* = (k_1 k_2 \dots k_n)$ とすると、

【 0 0 7 6 】

【 数 8 】

$$Z_{target}^* \approx ZM \cdot k^*$$

20

$$\begin{pmatrix} z_{t1} \\ z_{t2} \\ \vdots \\ z_{tm} \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} Z_{1,1} & Z_{2,1} & \cdots & Z_{n,1} \\ Z_{1,2} & Z_{2,2} & & Z_{n,2} \\ \vdots & & & \vdots \\ Z_{1,m} & Z_{2,m} & \cdots & Z_{n,m} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_n \end{pmatrix}$$

と書くことができる。

上記式で右辺の計算結果と左辺の結果の誤差がもっとも小さくなるような k^* を求める。この k^* の値を使い、実際に電圧テンプレートを重ね合わせ、補正電圧 V^* を求める。重ね合わせは、変位が電圧の二乗に比例することを考慮して以下のように重ね合わせる。

30

【 0 0 7 7 】

【 数 9 】

$$\begin{pmatrix} V_1^2 \\ V_2^2 \\ \vdots \\ V_n^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & V^2 & & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & V^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_n \end{pmatrix}$$

以上が電極毎に電圧テンプレートを用意した従来の補正アルゴリズムによる収差補正電圧の計算である。

40

【 0 0 7 8 】

この計算において、計算に時間がかかるのが重ね合わせ係数 k^* の算出であるが、電極数 n が増えると非常に計算に時間がかかるのが問題であり、リアルタイムでの制御を行う場合、電極数が多いとネックとなる。

【 0 0 7 9 】

次に、本研究での、電圧算出方法について説明する。

本研究の場合、特定のゼルニケ展開モードを誘起するような電圧テンプレート V_m^* を用いる。補正対象とするゼルニケ展開モード数を m とすると、 m 個の電圧テンプレート V_m^* を作ることになる。

50

【 0 0 8 0 】

【 数 1 0 】

$$V_1^* = (V_{1,1} \quad V_{1,2} \quad \cdots \quad V_{1,n})$$

$$\vdots$$

$$V_m^* = (V_{m,1} \quad V_{m,2} \quad \cdots \quad V_{m,n})$$

各電圧テンプレート V_m^* に対応する、波面形状データ Z_m^* (前記インフルエンスベクトルに相当)と、そのデータを並べた行列 ZM は、

10

【 0 0 8 1 】

【 数 1 1 】

$$Z_1^* = (Z_{1,1} \quad Z_{1,2} \quad \cdots \quad Z_{1,m})$$

$$\vdots$$

$$Z_m^* = (Z_{m,1} \quad Z_{m,2} \quad \cdots \quad Z_{m,m})$$

$$ZM = \begin{pmatrix} Z_{1,1} & Z_{2,1} & \cdots & Z_{m,1} \\ Z_{1,2} & Z_{2,2} & & Z_{m,2} \\ \vdots & & & \vdots \\ Z_{1,m} & Z_{2,m} & \cdots & Z_{m,m} \end{pmatrix}$$

20

となる。

【 0 0 8 2 】

また、重ね合わせ係数 k^* は電圧テンプレート V_m^* の数で決まるので、要素数が n 個(電極数)から m 個(補正対象の展開モード数)になる。

このため、 $Z_{\text{target}}^* = ZM \cdot k^*$ の式により重ね合わせ係数 k^* を求める場合の計算量は、電極数 n でなく、補正対象の展開モード数 m で決まることになり、可変形状ミラー9として電極数が多いデバイスを用いた場合、計算時間を大幅に削減できる。

30

【 0 0 8 3 】

また、各展開モードの波面形状データは、主成分以外は小さく、近似的にそれらを見捨てることにより以下のように書ける。

【 0 0 8 4 】

【 数 1 2 】

$$Z_1^* \approx (Z_{1,1} \quad 0 \quad \cdots \quad 0)$$

$$Z_2^* \approx (0 \quad Z_{2,2} \quad \cdots \quad 0)$$

$$\vdots$$

$$Z_m^* \approx (0 \quad 0 \quad \cdots \quad Z_{m,m})$$

40

すると、インフルエンス行列 ZM は、

【 0 0 8 5 】

【数 1 3】

$$ZM \approx \begin{pmatrix} Z_{1,1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Z_{2,2} & & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Z_{m,m} \end{pmatrix}$$

となる。この式を用いると、補正電圧の精度は落ちるが、重ね合わせ係数 k^* は簡単に求めることができ、電極が多いデバイスを用いたリアルタイム補正の高速化が図れる。

10

【0086】

具体例について説明する。

1. 眼底を高倍率でみる

眼底 E_f を高倍率で観察した場合、観察できる、観察できないは、撮影した画像の鮮明さ（ボケ具合）で決まる。このボケは、回折限界（光学系に依存）と波面収差で決まる。現在、眼底 E_f の視細胞（2～5 μm ）の撮影を目標としており、これを観測するには、本光学系の場合、解析エリア内の波面収差をRMS（収差量）の実測値で0.05 μm 未満は必須である。

2. 繰り返し補正回数

被検眼 E の眼底 E_f を撮影する際に、良い状態で眼を開いていられるのが、人により異なり、短い人では数秒となる。このため、調整から撮影までを数秒間で終了するためには、できる限り少ない補正回数で、図9に示す波面 B の状態から目標とする波面収差による波面 A に到達するのが重要である。

20

【0087】

これに対し、実施例1の電圧パターンの補正アルゴリズム（展開モード毎のテンプレート方式）を採用した場合、残収差が飽和するまでの回数（これ以上残収差が動かなくなる回数）は、5回～10回であり、きわめて少ない繰り返し補正回数で目標とする波面収差に到達することが判明した。

【0088】

そして、残収差の目標値をRMS実測値で0.05 μm とする実験では、図10に示すように、5回～10回の繰り返し補正回数 N により残収差が目標値以下となり、2.2倍の倍率（実験装置の光学系の都合により設定した倍率）により、鮮明な眼底画像を得ることができ条件である残収差がRMSで0.05 μm 以下を達成した。

30

さらに、残収差の目標値をRMS実測値で0.05 μm 未満としても、5回～7回程度までの繰り返し補正回数により残収差が目標値以下となることが判明し、上記1.及び2.の要求を満たす収差補償システムであることが証明された。

【0089】

次に、効果を説明する。

実施例1の波面収差補正装置にあっては、下記に列挙する効果を得ることができる。

【0090】

40

(1) 複数の電極 $9e \dots$ と、該複数の電極 $9e \dots$ に印加された電圧値 V_n に応じて形状を変化させる薄膜ミラー $9b$ を有し、入射した光束の波面収差を補正する可変形状ミラー 9 と、前記可変形状ミラー 9 が設けられた光学系に収差補正対象を含み、該収差補正対象と可変形状ミラー 9 を経由した光束を受光して該光束の波面収差を測定する波面センサ 14 と、波面収差の多項式による展開モード毎に、それぞれの展開モードを誘起する電極 $9e \dots$ の電圧配列データである電圧テンプレート V_m^* を記憶しておく電圧テンプレート記憶手段と、前記波面センサ 14 で得られた波面収差が所望の収差になるように各展開モードの重ね合わせ振幅を決定し、前記電圧テンプレート記憶手段で記憶している電圧テンプレート V_m^* より前記複数の電極 $9e \dots$ のそれぞれに印加する電圧値 V_n を演算する電極印加電圧演算手段と、前記電極印加電圧演算手段により演算した電圧値 V_n に基づき、前記波面センサ

50

14により測定される光束の波面収差を抑制するように、前記可変形状ミラー9のミラー形状の補正を繰り返す制御を行う可変形状ミラー制御手段と、を有するため、波面収差を補正する際、電圧を印加する電極数が多い可変形状ミラー9を用いたとしても、応答良く短時間にて残収差を小さく抑える補正を達成し、高倍率としてもきわめて鮮明な画像を得ることができる。

【0091】

(2) 前記可変形状ミラー9は、薄膜ミラー9bの変位量を初期変位量とすべく全電極9e...に初期電圧 V_0 を印加した後、複数の電極9e...に対して作り出された電圧パターンによる薄膜ミラー9bの歪み形状を、収差補正対象を經由して入射される光束の波面収差形状を打ち消す形状に制御することで、ミラー反射後の光束に含まれる波面収差を小さく抑えるため、予め初期変位量を与えるという可変形状ミラー9の初期化処理および、電極9eの平均電圧を初期電圧に固定することで、可変形状ミラー9を用いた波面収差補正制御において、制御ハンチングを抑えた高応答で収束性の高い波面収差補正制御を行うことができる。加えて、初期変位量をプルインが起きない程度に大きくすることで、補正のダイナミックレンジを大きくすることができる。

10

【0092】

(3) 前記波面センサ14は、マイクロレンズが格子状に配列されたハルトマンプレート14aと、二次元CCD14bとから構成され、収差補正対象に点光源を投影し、収差補正対象及び前記可変形状ミラー9を經由した反射光を、前記ハルトマンプレート14aで多数の光束に分割し、それぞれの光束による点像位置を二次元CCD14bで測定し、収差補正を要しない理想収差補正対象の場合の点像位置と比較することにより、収差補正対象の波面収差を測定するため、高精度による高次波面収差補正を行う際に必須とされる高い波面収差測定精度要求に応えることができる。

20

【0093】

(4) 前記電圧テンプレート記憶手段は、波面収差のゼルニケ多項式による展開モードのうち補正対象とする展開モードについて、展開モード毎に、それぞれの展開モードを誘起する電極の電圧配列データである電圧テンプレート V_m^* を用意し、これを記憶するため、ゼルニケ多項式により展開された各展開モードは、独立した波面の形(モード)に対応するものとなり、各展開モードの低次側から順次電圧テンプレート V_m^* を用いて補正してゆくことで、有効に残収差を目標値に収束させることができる。

30

【0094】

(5) 前記電極印加電圧演算手段は、波面収差補正後の残収差のゼルニケ展開データにより、各展開モードでの振幅値 A_m を読み込み(ステップS8)、各電極9e...に印加されている電圧値 V_n を前回の電圧値 V_n' として読み込み(ステップS9)、予め記憶されている各展開モードを誘起する電圧テンプレート V_m^* を読み込み(ステップS10)、可変形状ミラー9の目標ゼルニケ展開データ Z_{target}^* を計算し(ステップS11)、予め計算された各電圧テンプレート V_m^* に対応する波面形状データ Z_m^* を並べた行列 ZM を読み込み(ステップS12)、目標ゼルニケ展開データ Z_{target}^* と行列 ZM により計算した重ね合わせ係数 k^* を各展開モードの重ね合わせ振幅として算出し(ステップS13)、前記電圧テンプレート V_m^* と重ね合わせ係数 k^* と前回の電圧値 V_n' とフィードバックゲイン g により、前記複数の電極9e...それぞれに対し今回印加する電圧値 V_n を演算する(ステップS14)ため、各ゼルニケ展開モードで生じるべき単一展開モード以外の他の展開モードが混じるというテンプレートの不完全性の影響が是正された高精度による高次波面収差補正を行うことができる。

40

【0095】

(6) 前記波面センサ14と前記電極印加電圧演算手段と前記可変形状ミラー制御手段は、波面収差補正後の残収差が、設定倍率により収差補正対象を観察や撮影する際に鮮明な画像が得られる許容波面収差に基づき決定された目標値以下になるまで(ステップS7)、波面収差測定(ステップS4)と印加電圧演算(ステップS8~ステップS14)と可変形状ミラー制御(ステップS15)を繰り返すループ補正制御を行うように構成したた

50

め、設定倍率の大小にかかわらず、収差補正対象を観察や撮影する際に鮮明な画像を得ることができる。

【0096】

(7) 前記収差補正対象が被検眼Eであり、該被検眼Eの屈曲特性を原因として発生する波面収差のうち、球面度数成分と乱視度数成分を補正する低次波面収差補正手段(ステップS4~ステップS6)を設け、前記電極印加電圧演算手段及び前記可変形状ミラー制御手段は、前記低次波面収差補正手段による低次波面収差補正後に残った波面収差成分と、低次波面収差補正の対象となる次数より高次の波面収差成分を、可変形状ミラー9を変形させて補正するため、被検眼Eを収差補正対象とする眼科装置において、可変形状ミラー9の変形による高次波面収差補正での収差補正負担を軽減することができる。

10

【0097】

(8) 前記低次波面収差補正手段(ステップS4~ステップS6)は、波面収差の測定に基づき、波面収差のうち、球面度数成分をオートフォーカス系の可動プリズム6で調整し、乱視度数成分を可変シリンドリカルレンズ3で調整し、収差補正後の残収差が、ゼルニケ多項式による展開モードで2次を考慮して決められた規定値以下となるまで、波面収差測定とレンズ移動を繰り返すため、光路中のレンズを用い、短時間にて低次波面収差である球面度数成分と乱視度数成分を打ち消すことができる。

【0098】

(9) 前記波面センサ14と前記電極印加電圧演算手段と前記可変形状ミラー制御手段は、前記低次波面収差補正手段(ステップS4~ステップS6)による波面収差補正に続いて、波面収差測定と各電極への印加電圧の演算に基づく可変形状ミラーの歪み変形制御を開始し、収差補正後の残収差が、ゼルニケ多項式による展開モードで少なくとも6次までを考慮して決められた目標値以下となるまで、波面収差測定と印加電圧演算と可変形状ミラー制御を繰り返すため、被検眼Eを収差補正対象とする眼科装置において、可変形状ミラー9の変形による高次波面収差補正にて6次までの残収差まで取り除かれ、視細胞レベルを観察可能な高倍率により鮮明な眼底画像を得ることができる。また、目標値をゼルニケ多項式による展開モードで、6次~10次程度まで考慮して決定すれば、より高い倍率が要求されても対応可能である。

20

【0099】

(10) 被検眼Eの眼底観察及び眼底撮影を行う眼科装置の光学系に装備し、前記可変形状ミラー制御手段は、収差補正後の残収差が目標値以下になると、被検眼Eの眼底撮影モードに移行するため、光学系に波面収差の発生原因となる被検眼Eが存在しても、短時間にて波面収差を小さく抑え、高倍率で鮮明な画像により、被検眼Eの眼底観察及び眼底撮影を行うことができる。

30

【実施例2】

【0100】

実施例2は、各展開モードの重ね合わせ振幅の算出法を簡略化し、演算処理のスピードを上げるようにした例である。

なお、システム構成としては、実施例1の波面収差補正装置と同様であるため、図示並びに説明を省略する。

40

【0101】

図11は、実施例2の波面制御系のパーソナルコンピュータ15にて実行される波面収差補正制御処理の流れを示すフローチャートであり、以下、各ステップについて説明する。なお、図6のフローチャートのステップS11~ステップS13を省略したものである。そして、図11のフローチャートのステップS21~ステップS31,ステップS35,ステップS36の各ステップは、図6のフローチャートのステップS1~ステップS11,ステップS15,ステップS16の各ステップと同じ処理を行うステップであるので、説明を省略する。

【0102】

ステップS34は、ステップS30での電圧テンプレート V_m^* の読み込みに続き、収差

50

を無くす可変形状ミラー 9 の薄膜ミラー 9 b の形状を得るための電圧値 V_n の二乗値 V_n^2 を、電圧の二乗は変位置にほぼ比例することから決められた下記式で計算するステップである。

$$V_n^2 = V_n'^2 + g \{ (Z_{tm}/Z_{m,m}) \times V_{mn}^2 \} \quad (3)$$

または、規格化された V_m を使い、

$$V_n^2 = V_n'^2 + g \{ -A_m \times V_{mn}^2 \} \quad (4)$$

すなわち、実施例 1 のステップ S 1 2 の説明において、行列 ZM の正確な定義に対し、 Z_{mm} のみを残し他を 0 とする簡略化した式 (1) を用いる場合には、上記式 (3) を用いて電圧値 V_n の二乗値 V_n^2 を計算する。

また、実施例 1 のステップ S 1 2 の説明において、行列 ZM の簡略化した式 (1) に対し、さらに、電圧テンプレートを規格化し、 $Z_{mm} = 1$ として簡略化した式 (2) を用いる場合には、上記式 (4) を用いて電圧値 V_n の二乗値 V_n^2 を計算する。

なお、作用については、実施例 1 での重ね合わせ係数 k^* の計算処理を省略したため、計算スピードを上げることができるという点のみ、実施例 1 における作用と相違する。

【 0 1 0 3 】

次に、効果を説明する。

実施例 2 の波面収差補正装置にあっては、実施例 1 の (5) を除く効果に加え、下記に列挙する効果を得ることができる。

【 0 1 0 4 】

(11) 前記電極印加電圧演算手段は、波面収差補正後の残収差のゼルニケ展開データにより、各展開モードでの振幅値 A_m を読み込み (ステップ S 2 8)、各電極 9 e ... に印加されている電圧値 V_n を前回の電圧値 V_n' として読み込み (ステップ S 2 9)、予め記憶されている各展開モードを誘起する電圧テンプレート V_m^* を読み込み (ステップ S 3 0)、各電圧テンプレート V_m^* に対応する波面形状データ $Z_{m,m}$ に対する各展開モードの波面形状データ Z_{tm} の比 $(Z_{tm}/Z_{m,m})$ を各展開モードの重ね合わせ振幅として算出し、前記電圧テンプレート V_m^* と重ね合わせ振幅 $(Z_{tm}/Z_{m,m})$ と前回の電圧値 V_n' とフィードバックゲイン g により、前記複数の電極 9 e ... それぞれに対し今回印加する電圧値 V_n を演算する (ステップ S 3 4) ため、各ゼルニケ展開モードで生じるべき単一展開モード以外の他の展開モードが混じるというテンプレートの不完全性のうち、波面形状データ $Z_{m,m}$ に対してテンプレートの主成分による影響を排除するという精度を保ちながら、計算処理スピードを上げて高次波面収差補正を行うことができる。

【 0 1 0 5 】

(12) 前記電極印加電圧演算手段は、波面収差補正後の残収差のゼルニケ展開データにより、各展開モードでの振幅値 A_m を読み込み (ステップ S 2 8)、各電極 9 e ... に印加されている電圧値 V_n を前回の電圧値 V_n' として読み込み (ステップ S 2 9)、予め記憶されている各展開モードを誘起する電圧テンプレート V_m^* を読み込み (ステップ S 3 0)、前記各展開モードの振幅値 A_m の正負符号を反転させた値 $-A_m$ を各展開モードの重ね合わせ振幅とし、前記電圧テンプレート V_m^* と重ね合わせ振幅 $-A_m$ と前回の電圧値 V_n' とフィードバックゲイン g により、前記複数の電極 9 e ... それぞれに対し今回印加する電圧値 V_n を演算する (ステップ S 3 4) ため、各ゼルニケ展開モードで生じるべき単一展開モード以外の他の展開モードが混じるというテンプレートの不完全性の影響を無視しつつも、計算処理スピードを著しく上げて高次波面収差補正を行うことができる。

【 0 1 0 6 】

以上、本発明の波面収差補正装置を実施例 1 及び実施例 2 に基づき説明してきたが、具体的な構成については、これらの実施例に限られるものではなく、特許請求の範囲の各請求項に係る発明の要旨を逸脱しない限り、設計の変更や追加等は許容される。

【 0 1 0 7 】

実施例 1, 2 では、可変形状ミラー 9 として、合計 8 5 個の電極 9 e ... を有する例を示したが、合計 8 5 個以上の電極を有する可変形状ミラーとしても良いし、また、合計 8 5 個未満の電極を有する可変形状ミラーとしても良い。要するに、可変形状ミラーの電極の

数は実施例 1, 2 の数に限られるものでなく、要求倍率や残収差の目標値の大きさ等に応じて適宜変更することができる。また、電極の配置パターンは、ゼルニケ多項式の展開モードに対応する波面が得易い配列とするのが好ましいが、これも波面収差の補正次数の最大次数に大きく依存するものであり、実施例 1, 2 のパターンに限られるものではない。

【0108】

実施例 1, 2 では、収差補正対象を被検眼 E としたことに伴い、被検眼 E の屈曲特性を原因として発生する球面度数成分と乱視度数成分を補正する低次波面収差補正手段を設けた例を示したが、収差補正対象が被検眼 E 以外のもの、例えば、光路中に存在する高次の波面収差を持つレンズである場合、低次波面収差補正を行うことなく、直ちに、可変形状ミラーを用いた波面収差補正を行うようにしても良い。

10

【0109】

実施例 1 及び実施例 2 には、眼底観察及び眼底撮影を行う眼科装置の光学系に装備した波面収差補正装置を記載したため、目標値を鮮明な眼底画像が得られる許容波面収差に基づき決定したが、特定の収差が得られるように目標値を決定しても良い。これによって、模型眼に特定の収差を持たせることもできる。

【産業上の利用可能性】

【0110】

実施例 1, 2 では、本発明の波面収差補正装置を眼底の観察・撮影を行う眼科装置へ適用する例を示したが、本発明の波面収差補正装置は、眼科装置以外に、ヘッドアップディスプレイ、天体望遠鏡、レーザ照射装置、顕微鏡、露光装置、光ディスク装置（光ピックアップ）、微細加工装置等のように、波面収差の補正を要する収差補正対象を光学系に有する様々な装置に適用することができる。

20

【図面の簡単な説明】

【0111】

【図 1】実施例 1 の波面収差補正装置を適用した眼科装置を示す全体図である。

【図 2】実施例 1 の眼底撮影系と波面制御系に共有された可変形状ミラーの一例を示す図であり、(a) は平面図を示し、(b) は A - A 線断面図を示す。

【図 3】可変形状ミラーの薄膜ミラーと電極を示す断面図である。

【図 4】可変形状ミラーの電極の配置例を示す平面図である。

【図 5】実施例 1 の撮影制御系の波面センサ 14 を示す説明図である。

30

【図 6】実施例 1 の波面制御系のパーソナルコンピュータ 15 にて実行される波面収差補正制御処理の流れを示すフローチャートである。

【図 7】0 次～10 次のゼルニケ多項式による各展開モードを示す図である。

【図 8】実施例 1 の波面収差補正装置で用いた各モードでの電圧テンプレートの一例を示す図である。

【図 9】可変形状ミラーでの波面収差の補正作用を示す説明図である。

【図 10】実施例 1 の補正アルゴリズムによる可変形状ミラーを用いた波面収差補正での繰り返し補正回数と残収差との関係特性図である。

【図 11】実施例 2 の波面制御系のパーソナルコンピュータ 15 にて実行される波面収差補正制御処理の流れを示すフローチャートである。

40

【符号の説明】

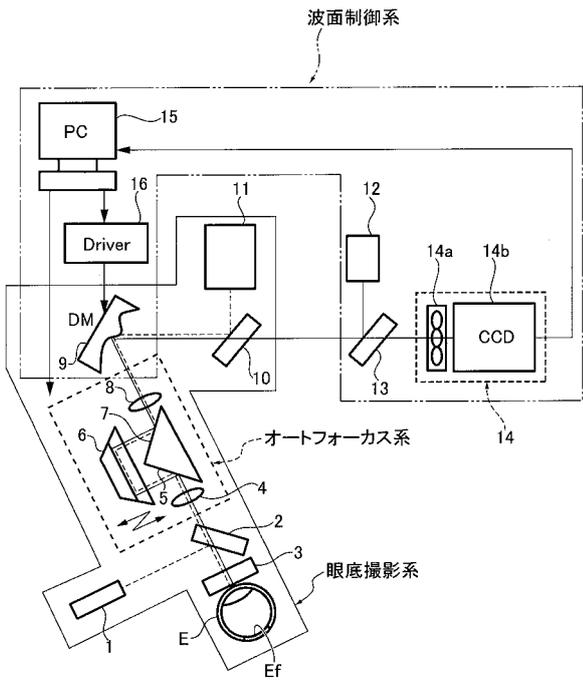
【0112】

- 1 半導体レーザ光源
- 2 ビームスプリッタ
- 3 可変シリンダリカルレンズ（乱視補正用レンズ）
- 4 第 1 レンズ
- 5 第 1 ミラー
- 6 可動プリズム（合焦機構）
- 7 第 2 ミラー
- 8 第 2 レンズ

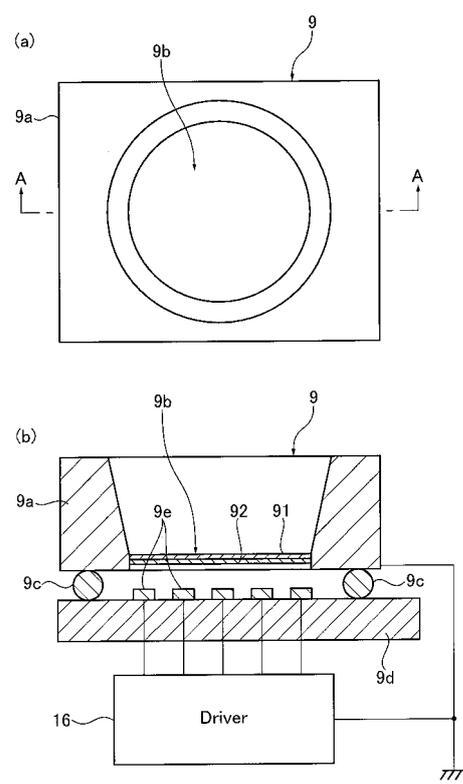
50

- 9 可変形状ミラー
- 9 a ミラー枠
- 9 b 薄膜ミラー
- 9 c スペーサー
- 9 d 電極基板
- 9 e 電極
- 10 ダイクロイックミラー
- 11 高感度CCDカメラ
- 12 半導体レーザ光源
- 13 ビームスプリッタ
- 14 波面センサ
- 14 a ハルトマンプレート
- 14 b 二次元CCD (二次元電荷結合素子)
- 15 パーソナルコンピュータ
- 16 ドライバー
- E 被検眼
- Ef 眼底

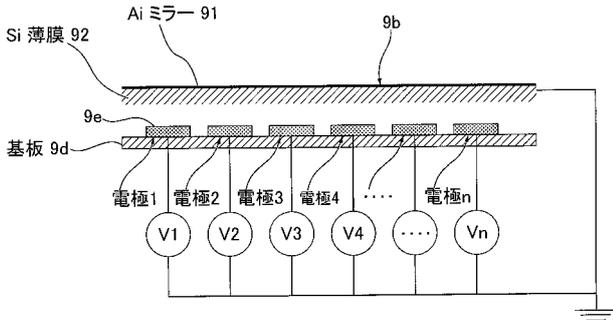
【 図 1 】



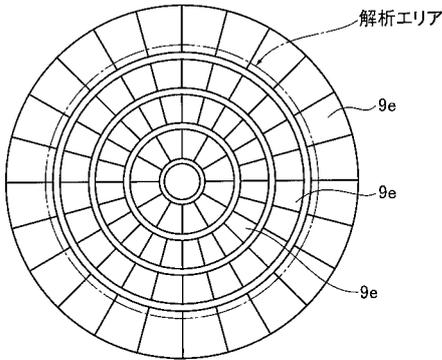
【 図 2 】



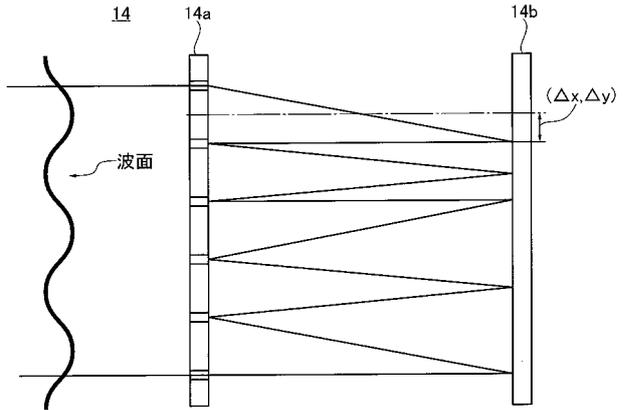
【 図 3 】



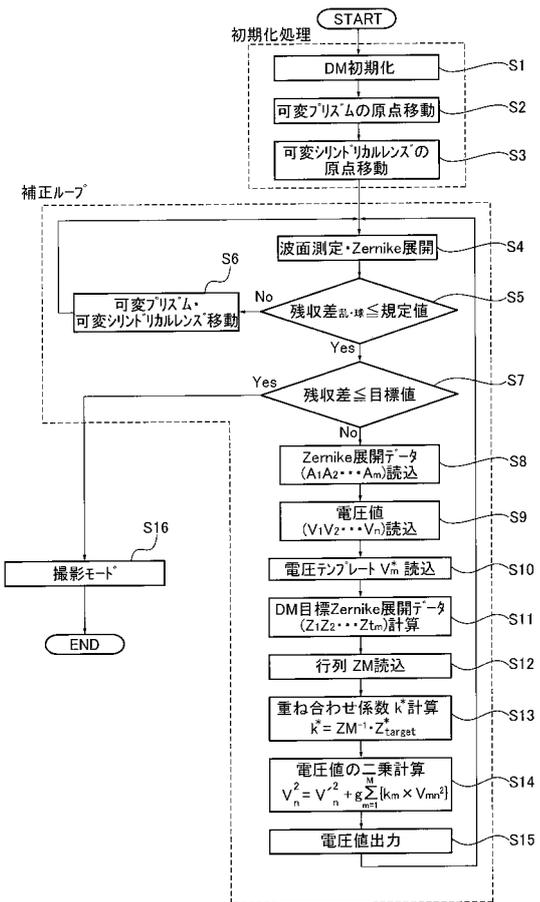
【 図 4 】



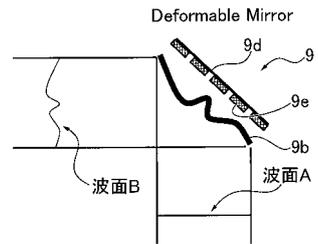
【 図 5 】



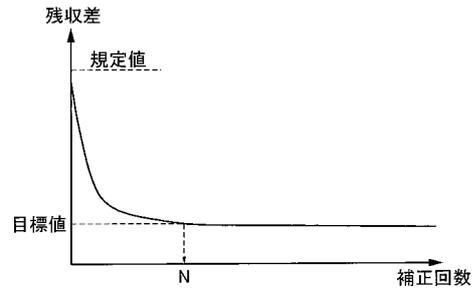
【 図 6 】



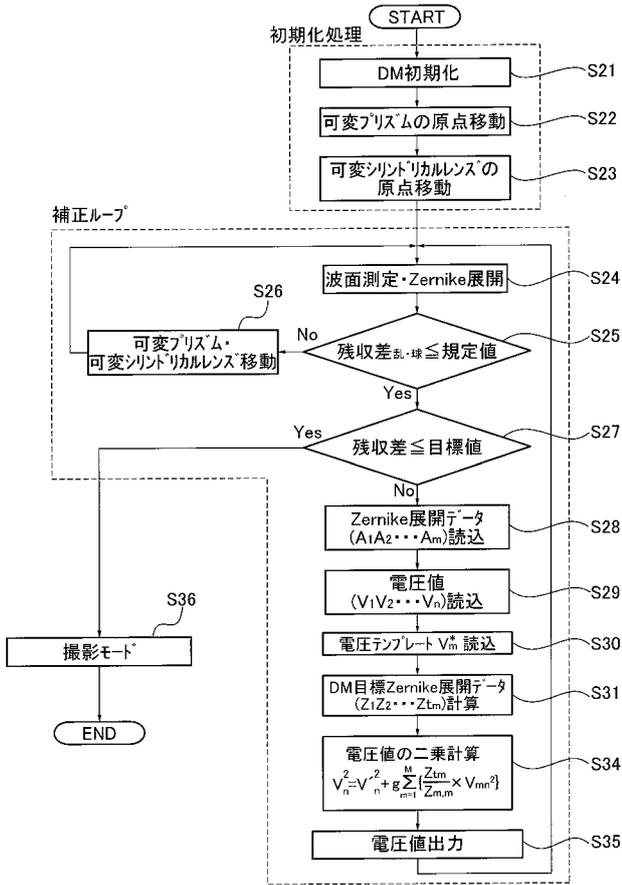
【 図 9 】



【 図 10 】

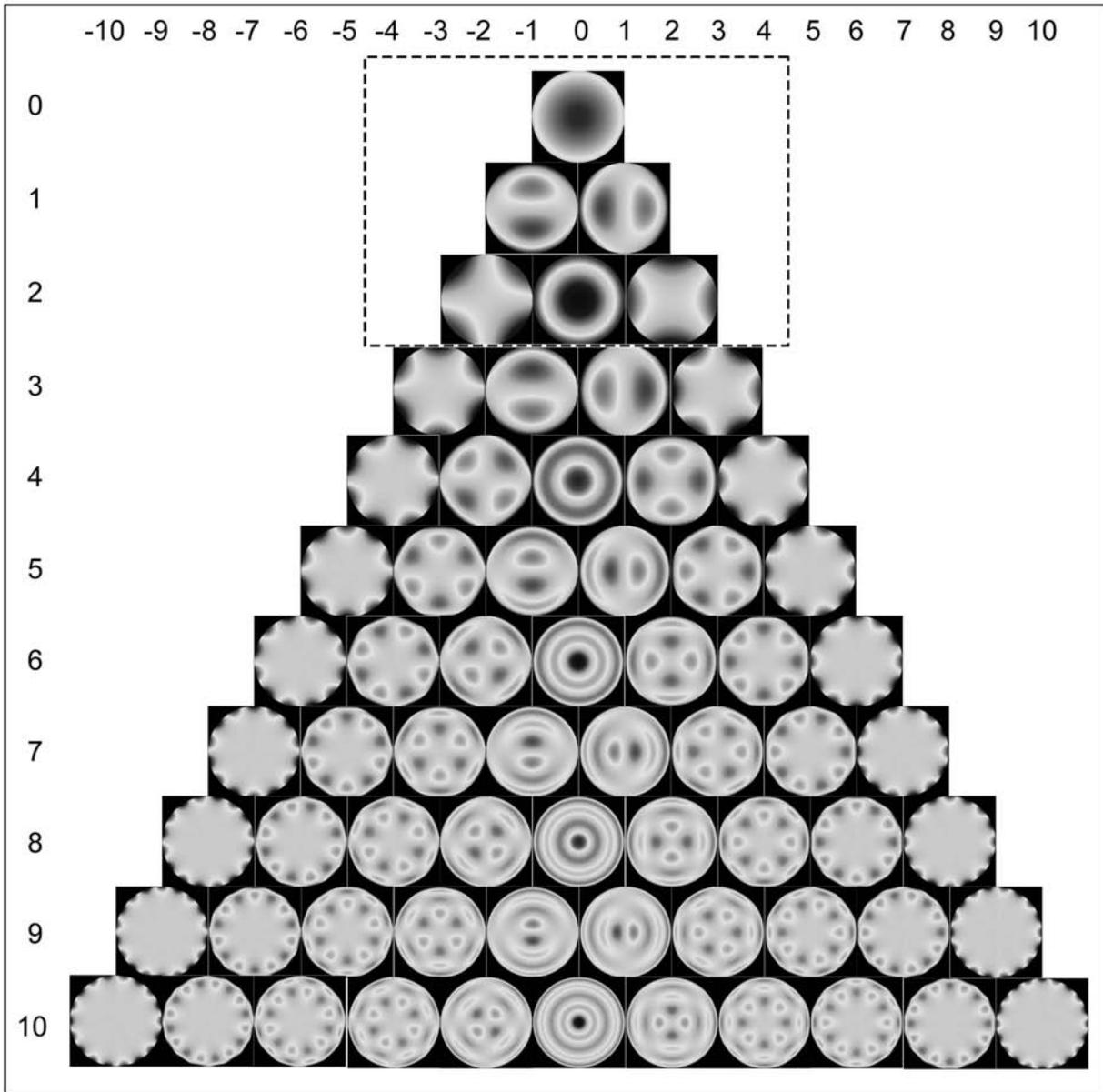


【 図 1 1 】



【 図 7 】

Zernike Mode



【 図 8 】

