

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4510534号
(P4510534)

(45) 発行日 平成22年7月28日(2010.7.28)

(24) 登録日 平成22年5月14日(2010.5.14)

(51) Int.Cl.

F 1

A 6 1 B 3/10 (2006.01)

A 6 1 B 3/10 Z

A 6 1 B 3/12 (2006.01)

A 6 1 B 3/12 E

請求項の数 20 (全 30 頁)

(21) 出願番号 特願2004-183389 (P2004-183389)
 (22) 出願日 平成16年6月22日(2004.6.22)
 (65) 公開番号 特開2006-6362 (P2006-6362A)
 (43) 公開日 平成18年1月12日(2006.1.12)
 審査請求日 平成19年5月24日(2007.5.24)

(73) 特許権者 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 100107010
 弁理士 橋爪 健
 (72) 発明者 山口 達夫
 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 三橋 俊文
 東京都板橋区蓮沼町75番1号 株式会社
 トプコン内
 審査官 宮川 哲伸

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光学特性測定装置及び眼底像観察装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

被検眼前眼部を照明するための前眼部照明光源と、
 照明された被検眼前眼部からの反射光を受光し、被検眼の前眼像を形成するための前眼部観察部と、

形成された前眼像に基づき、光軸と被検眼とのずれを示す被検眼の変位を測定する移動量演算部と、

与えられる制御信号に従い、反射又は透過する光束の波面を補正するための波面補正素子と、

波面測定のための光束を被検眼眼底に投影し、被検眼眼底からの反射光束を上記波面補正素子を介して受光する波面測定部と、

上記移動量演算部により測定された被検眼の変位と、上記波面測定部による受光信号とに基づき、被検眼の波面収差を測定する収差演算部と、

上記移動量演算部で測定された被検眼の変位に応じて、上記波面補正素子を、被検眼眼底からの反射光束の光軸に対して横切る方向又は上記波面補正素子の法線に垂直な平面方向に移動させるためのステージと、

上記収差演算部により測定された波面収差に基づき、収差が小さくなるように波面補正のための制御信号を形成し、形成された制御信号を上記波面補正素子に出力して波面を補正させる波面補正素子制御装置と
 を備え、

10

20

上記収差演算部は、波面補正のための制御信号に応じた上記波面補正素子の補正量と、上記移動量演算部で測定された被検眼の変位と、上記波面補正素子により波面が補正され上記波面測定部により受光された受光信号とに基づき、被検眼の光学特性を測定する光学特性測定装置。

【請求項 2】

上記ステージは、上記移動量演算部で測定された被検眼の変位が、予め定められた所定値範囲内となるように移動し、

上記波面補正素子制御装置は、上記ステージの移動後、上記収差演算部で測定された波面収差に基づいて、上記波面補正素子による波面補正のための制御信号を出力するように構成されていることを特徴とする請求項 1 に記載の光学特性測定装置。

10

【請求項 3】

上記波面測定部は、

波面測定用光源を含み、波面測定用の光束を被検眼眼底に投影するため点像投影光学系と、

上記波面補正素子が配置され、及び、上記波面補正素子を介した被検眼眼底からの反射光束を複数の光束に分割する分割素子を含み、被検眼眼底からの反射光束を受光するための受光光学系と、

上記波面補正素子及び上記分割素子を介した被検眼眼底からの反射光束を受光する波面イメージセンサと

を有する請求項 1 に記載の光学特性測定装置。

20

【請求項 4】

上記収差演算部は、上記移動量演算部で測定された被検眼の変位に基づき、被検眼眼底からの反射光束を受光する波面イメージセンサの座標原点を瞳中心又は角膜頂点に設定し、

上記波面補正素子制御装置は、上記収差演算部により座標原点が設定された座標系における波面収差又は波面収差の変化量に応じて、上記波面補正素子による波面補正のための制御信号を形成するように構成されていることを特徴とする請求項 1 に記載の光学特性測定装置。

【請求項 5】

上記波面補正素子は、その法線方向が被検眼眼底からの反射光束の光軸に対して所定角度傾斜して設けられ、

30

上記前眼部観察部における被検眼前眼部からの反射光を受光する前眼部イメージセンサは、被検眼前眼部からの反射光の光軸に対して、上記波面補正素子の法線方向と光軸とがなす上記所定角度と同一又は略同一の角度、傾斜して設けられたことを特徴とする請求項 1 に記載の光学特性測定装置。

【請求項 6】

上記前眼部観察部は、

被検眼前眼部からの反射光の光軸に対して所定角度傾斜して配置され、被検眼前眼部からの反射光を受光して前眼像を形成するための前眼部イメージセンサを有し、

上記移動量演算部は、

40

上記前眼部イメージセンサから前眼像を取得し、

取得された前眼像から瞳のエッジを複数検出して、各エッジの座標を求め、

求められた各エッジの座標と、上記前眼部イメージセンサの傾斜角とに基づき、求められた各エッジの座標について上記前眼部イメージセンサの傾斜を補正し、

補正された各エッジの座標に基づき楕円又は円の中心を求め、

求められた楕円又は円の中心に、瞳と上記前眼部イメージングセンサとの予め定められた倍率を乗じて、瞳と光軸のずれを示す被検眼の変位を求めることを含む請求項 1 に記載の光学特性測定装置。

【請求項 7】

被検眼の瞳輪部付近の所定領域に光を照射するための複数の輪部検出用光源と、

50

上記輪部検出用光源からの光が被検眼の瞳付近で反射された反射光を受光するための、
上記輪部検出用光源に対応した複数の輪部検出受光部と、

上記輪部検出受光部の受光信号に基づき、瞳と光軸のずれを求める輪部検出信号演算部
と
をさらに備え、

上記輪部検出信号演算部は、

上記輪部検出受光部それぞれの受光信号に基づき、上記輪部検出受光部で受光された反
射光の光量をそれぞれ測定し、

測定された各光量の総和を求め、

上記輪部検出用光源による各入射光の前眼部位置と測定された各光量と光量の総和とに
基づき、被検眼の変位を求めること
を含む請求項 1 に記載の光学特性測定装置。 10

【請求項 8】

上記輪部検出信号演算部は、上記輪部検出用光源による各入射光の前眼部位置 x_i 、 y_i
と測定された各光量 W_i と光量の総和 W_{ALL} とに基づき、次式に従い被検眼の変位 X_d 、 Y_d
を求める請求項 7 に記載の光学特性測定装置。

【数 1】

$$X_d = \frac{1}{W_{ALL}} \sum_{i=1}^m \gamma_i W_i x_i$$

$$Y_d = \frac{1}{W_{ALL}} \sum_{i=1}^m \gamma_i W_i y_i$$

20

ここで、 γ_i は、上記輪部検出受光部及び／又は測定条件に基づく予め定められた補正值
、 m は、上記輪部検出受光部又は上記輪部検出用光源の数

【請求項 9】

上記収差演算部は、

上記波面測定部による受光信号から、所定数 n の点像の重心点座標 x_i 、 y_i ($i = 1$ 30
～ n の整数) を求め、求められた重心点座標 x_i 、 y_i と、測定された被検眼の変位 X_d
、 Y_d とに基づき、次式に従い点像のずれ量 Δx_i 、 Δy_i を求め、

求められた点像のずれ量 Δx_i 、 Δy_i に基づき、被検眼の光学特性を求める請求項 1
に記載の光学特性測定装置。

【数 2】

$$\Delta x_i = (x_i - X_c - x_{o_i})\beta' - X_d / \beta'$$

$$\Delta y_i = (y_i - Y_c - y_{o_i})\beta' - Y_d / \beta'$$

$$(i = 1 \sim n)$$

40

ここで、 x_{o_i} ：分割素子の i 番目のレンズアレイの無収差時の x 座標、 y_{o_i} ：分割素
子の i 番目のレンズアレイの無収差時の y 座標、 X_c ：波面イメージセンサが光軸と交わ
る x 座標、 Y_c ：波面イメージセンサが光軸と交わる y 座標、 β' ：波面イメージセンサ
と瞳の倍率

【請求項 10】

被検眼前眼部を照明するための前眼部照明光源と、

照明された被検眼前眼部からの反射光を受光し、被検眼の前眼像を形成するための前眼
部観察部と、 50

形成された前眼像に基づき、光軸と被検眼とのずれを示す被検眼の変位を測定する移動量演算部と、

与えられる制御信号に従い、反射又は透過する光束の波面を補正するための波面補正素子と、

波面測定のための光束を被検眼眼底に投影し、該光束による被検眼眼底からの第1の反射光束を上記波面補正素子を介して受光する波面測定部と、

上記移動量演算部により測定された被検眼の変位と、上記波面測定部による受光信号とに基づき、被検眼の波面収差を測定する収差演算部と、

眼底観察のための光束を被検眼眼底上の所定の領域に照明するための眼底照明系と、

上記眼底照明系からの照明による被検眼眼底からの第2の反射光束を、上記波面補正素子を介して受光し、眼底像を形成するための眼底観察系と、

上記眼底観察系で形成された眼底像を取得し、眼底像を表示させ又は出力するための眼底像形成部と、

上記移動量演算部で測定された被検眼の変位に応じて、上記波面補正素子を、第1及び／又は第2の反射光束の光軸に対して横切る方向又は上記波面補正素子の法線に垂直な平面方向に移動させるためのステージと、

上記収差演算部により測定された波面収差に基づき、収差が小さくなるように波面補正のための制御信号を形成し、形成された制御信号を上記波面補正素子に出力して波面を補正させる波面補正素子制御装置と

を備え、

前記眼底像形成部は、上記ステージが移動され及び上記波面補正素子により補正された眼底像を取得する眼底像観察装置。

【請求項11】

上記ステージは、上記移動量演算部で測定された被検眼の変位が、予め定められた所定値範囲内となるように移動し、

上記波面補正素子制御装置は、上記ステージの移動後、上記収差演算部で測定された波面収差に基づいて、上記波面補正素子による波面補正のための制御信号を出力するように構成されていることを特徴とする請求項10に記載の眼底像観察装置。

【請求項12】

上記波面測定部は、

波面測定用光源を含み、波面測定用の光束を被検眼眼底に投影するための点像投影光学系と、

上記波面補正素子が配置され、及び、上記波面補正素子を介した第1の反射光束を複数の光束に分割する分割素子を含み、光束が投影された被検眼眼底からの第1の反射光束を受光するための受光光学系と、

上記波面補正素子及び上記分割素子を介した第1の反射光束を受光する波面イメージセンサと

を有する請求項10に記載の眼底像観察装置。

【請求項13】

上記収差演算部は、上記移動量演算部で測定された被検眼の変位に基づき、第1の反射光束を受光する波面イメージセンサの座標原点を瞳中心又は角膜頂点に設定し、

上記波面補正素子制御装置は、上記収差演算部により座標原点が設定された座標系における波面収差又は波面収差の変化量に応じて、上記波面補正素子による波面補正のための制御信号を形成するように構成されていることを特徴とする請求項10に記載の眼底像観察装置。

【請求項14】

上記波面補正素子は、その法線方向が第1及び第2の反射光束の光軸に対して所定角度傾斜して設けられ、

上記前眼部観察部における被検眼前眼部からの反射光を受光する前眼部イメージセンサは、被検眼前眼部からの反射光の光軸に対して、上記波面補正素子の法線方向と光軸とが

10

20

30

40

50

なす上記所定角度と同一又は略同一の角度、傾斜して設けられたことを特徴とする請求項 10 に記載の眼底像観察装置。

【請求項 15】

上記眼底観察系は、角膜反射除去ミラー又は角膜反射除去パターンを有する請求項 10 に記載の眼底像観察装置。

【請求項 16】

上記眼底観察系は、

第 2 の反射光束を受光するための眼底イメージセンサと、

第 2 の反射光束を偏光する波長板と、

第 2 の反射光束に対して、角膜からのノイズをカットするための穴あきミラーと、

上記波面補正素子で変調された第 2 の反射光束を上記波長板及び上記穴あきミラーへ導き、及び、上記波長板で偏光され及び上記穴あきミラーで反射して戻ってきた光束を上記眼底イメージセンサに導くための偏光ビームスプリッタとを有する請求項 10 に記載の眼底像観察装置。

【請求項 17】

上記前眼部観察部は、

被検眼前眼部からの反射光の光軸に対して所定角度傾斜して配置され、被検眼前眼部からの反射光を受光して前眼像を形成するための前眼部イメージセンサを有し、

上記移動量演算部は、

上記前眼部イメージセンサから前眼像を取得し、

取得された前眼像から瞳のエッジを複数検出して、各エッジの座標を求め、

求められた各エッジの座標と、上記前眼部イメージセンサの傾斜角とに基づき、求められた各エッジの座標について上記前眼部イメージセンサの傾斜を補正し、

補正された各エッジの座標に基づき楕円又は円の中心を求め、

求められた楕円又は円の中心に、瞳と上記前眼部イメージングセンサの予め定められた倍率を乗じて、瞳と光軸のずれを示す被検眼の変位を求めることを含む請求項 10 に記載の眼底像観察装置。

【請求項 18】

被検眼の瞳輪部付近の所定領域に光を照射するための複数の輪部検出用光源と、

上記輪部検出用光源からの光が被検眼の瞳付近で反射された反射光を受光するための、上記輪部検出用光源に対応した複数の輪部検出受光部と、

上記輪部検出受光部の受光信号に基づき、瞳と光軸のずれを求める輪部検出信号演算部とをさらに備え、

上記輪部検出信号演算部は、

上記輪部検出受光部それぞれの受光信号に基づき、上記輪部検出受光部で受光された反射光の光量をそれぞれ測定し、

測定された各光量の総和を求め、

上記輪部検出用光源による各入射光の前眼部位置と測定された各光量と光量の総和とに基づき、被検眼の変位を求めることを含む請求項 10 に記載の眼底像観察装置。

【請求項 19】

上記輪部検出信号演算部は、上記輪部検出用光源による各入射光の前眼部位置 x_i 、 y_i と測定された各光量 W_i と光量の総和 W_{ALL} とに基づき、次式に従い被検眼の変位 X_d 、 Y_d を求める請求項 18 に記載の眼底像観察装置。

【数 3】

$$X_d = \frac{1}{W_{ALL}} \sum_{i=1}^m \gamma_i W_i x_i$$

$$Y_d = \frac{1}{W_{ALL}} \sum_{i=1}^m \gamma_i W_i y_i$$

10

ここで、 γ_i は、上記輪部検出受光部及び／又は測定条件に基づく予め定められた補正值、 m は、上記輪部検出受光部又は上記輪部検出用光源の数

【請求項 20】

上記収差演算部は、

上記波面測定部による受光信号から、所定数 n の点像の重心点座標 x_i 、 y_i ($i = 1 \sim n$ の整数) を求め、求められた重心点座標 x_i 、 y_i と、測定された被検眼の変位 X_d 、 Y_d とに基づき、次式に従い点像のずれ量 Δx_i 、 Δy_i を求め、

求められた点像のずれ量 Δx_i 、 Δy_i に基づき、被検眼の光学特性を求める請求項 10 に記載の眼底像観察装置。

【数 4】

20

$$\Delta x_i = (x_i - X_c - x_{o_i})\beta' - X_d / \beta'$$

$$\Delta y_i = (y_i - Y_c - y_{o_i})\beta' - Y_d / \beta'$$

$$(i = 1 \sim n)$$

ここで、 x_{o_i} : 分割素子の i 番目のレンズアレイの無収差時の x 座標、 y_{o_i} : 分割素子の i 番目のレンズアレイの無収差時の y 座標、 X_c : 波面イメージセンサが光軸と交わる x 座標、 Y_c : 波面イメージセンサが光軸と交わる y 座標、 β' : 波面イメージセンサと瞳の倍率

30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光学特性測定装置及び眼底像観察装置に係り、特に、波面補正素子により波面を補正して被検眼の光学特性及び眼底像を得るための光学特性測定装置及び眼底像観察装置に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、医学用に用いられる光学機器は、特に、眼科では、眼の屈折、調節等の眼機能、眼球内部の検査を行う光学特性測定装置として普及している。例えば、被検眼の屈折力と角膜形状とを求めるフォトレフラクトメータという装置が存在する。また、従来の眼底観察においては、眼の収差の影響を極力少なくなるように調整して眼底が観察されていた。

40

また、被検眼の前眼部を観察することにより、被検眼に対する装置光学系のアライメントを可能とする装置が開示されている（例えば、特許文献 1 及び 2 参照）。特許文献 1 には、例えば、アライメント検出センサーにより、角膜で反射される輝点像の XY 方向の位置座標が検出され、また、 XY 方向の位置情報に基づきモーターが駆動されて装置全体が移動することが開示されている。これにより、装置光学系の光軸と被検眼の眼球光軸の位置合わせが行われ、アライメントを行っている。

一方、特許文献 2 には、例えば、 XY 方向アライメント検出センサーの検出信号から、

50

アライメント輝点像がオート撮影可能エリアの中心に向かうようにモーターを駆動制御して、装置本体をX Y方向に移動制御することが開示されている。また、一度アライメントした後に被検眼の複数箇所を連続して撮影できることが開示されている。

【特許文献1】特開平5-212002号公報

【特許文献2】特開平9-94230号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0003】

Adaptive Optics（補償光学）において、人眼の収差補正を目的として波面補正素子を使う場合の課題の一つとして、瞳の位置が移動してしまうことが挙げられる。これまでは、瞳の移動に対しては、例えば歯科医で使用するバイトバーを噛む等して、瞳の位置をできる限り固定していた。しかし、この方法では被検者に負担が大きく、しかも瞳の位置を固定するという課題の根本的な解決にはなっていなかった。また、特許文献1及び2に記載の装置は、装置本体自体を移動させるものであり、例えば倍率の高い場合には適していない。

10

本発明は、以上の点に鑑み、瞳が移動しても安定した波面補正を行い、光学特性を測定する又は眼底像を形成する光学特性測定装置及び眼底像観察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】

【0004】

20

本発明の第1の解決手段によると、

被検眼前眼部を照明するための前眼部照明光源と、

照明された被検眼前眼部からの反射光を受光し、被検眼の前眼像を形成するための前眼部観察部と、

形成された前眼像に基づき、光軸と被検眼とのずれを示す被検眼の変位を測定する移動量演算部と、

与えられる制御信号に従い、反射又は透過する光束の波面を補正するための波面補正素子と、

波面測定のための光束を被検眼眼底に投影し、被検眼眼底からの反射光束を上記波面補正素子を介して受光する波面測定部と、

30

上記移動量演算部により測定された被検眼の変位と、上記波面測定部による受光信号とに基づき、被検眼の波面収差を測定する収差演算部と、

上記移動量演算部で測定された被検眼の変位に応じて、上記波面補正素子を、被検眼眼底からの反射光束の光軸に対して横切る方向又は上記波面補正素子の法線に垂直な平面方向に移動させるためのステージと、

上記収差演算部により測定された波面収差に基づき、収差が小さくなるように波面補正のための制御信号を形成し、形成された制御信号を上記波面補正素子に出力して波面を補正させる波面補正素子制御装置と

を備え、

上記収差演算部は、波面補正のための制御信号に応じた上記波面補正素子の補正量と、上記移動量演算部で測定された被検眼の変位と、上記波面補正素子により波面が補正され上記波面測定部により受光された受光信号とに基づき、被検眼の光学特性を測定する光学特性測定装置が提供される。

40

【0005】

本発明の第2の解決手段によると、

被検眼前眼部を照明するための前眼部照明光源と、

照明された被検眼前眼部からの反射光を受光し、被検眼の前眼像を形成するための前眼部観察部と、

形成された前眼像に基づき、光軸と被検眼とのずれを示す被検眼の変位を測定する移動量演算部と、

50

与えられる制御信号に従い、反射又は透過する光束の波面を補正するための波面補正素子と、

波面測定のための光束を被検眼眼底に投影し、該光束による被検眼眼底からの第1の反射光束を上記波面補正素子を介して受光する波面測定部と、

上記移動量演算部により測定された被検眼の変位と、上記波面測定部による受光信号とに基づき、被検眼の波面収差を測定する収差演算部と、

眼底観察のための光束で被検眼眼底上の所定の領域を照明するための眼底照明系と、

上記眼底照明系からの照明による被検眼眼底からの第2の反射光束を、上記波面補正素子を介して受光し、眼底像を形成するための眼底観察系と、

上記眼底観察系で形成された眼底像を取得し、眼底像を表示させ又は出力するための眼底像形成部と、

上記移動量演算部で測定された被検眼の変位に応じて、上記波面補正素子を、第1及び／又は第2の反射光束の光軸に対して横切る方向又は上記波面補正素子の法線に垂直な平面方向に移動させるためのステージと、

上記収差演算部により測定された波面収差に基づき、収差が小さくなるように波面補正のための制御信号を形成し、形成された制御信号を上記波面補正素子に出力して波面を補正させる波面補正素子制御装置と

を備え、

前記眼底像形成部は、上記ステージが移動され及び上記波面補正素子により補正された眼底像を取得する眼底像観察装置が提供される。

【発明の効果】

【0006】

本発明によると、瞳が移動しても安定した波面補正を行い、光学特性を測定する又は眼底像を形成する光学特性測定装置及び眼底像観察装置を提供することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0007】

1. ハード構成

図1は、眼底観察装置の構成図である。眼底観察装置は、波面補正系1と、眼底照明系2と、眼底観察系3と、前眼部観察系4と、前眼部照明用光源45と、固視系5と、補償光学部70と、モーター制御回路16と、瞳移動量演算部14-2と、眼底像形成部14-3とを備える。

波面補正系1は、第1照明光学系11、第1受光光学系12、第2受光部13を備える波面測定系10と、収差量測定補正量計算用演算装置（収差演算部、以下演算装置と記す）14-1と、波面補正素子制御装置15とを有する。なお、演算装置14-1と、瞳移動量演算部14-2と、眼底像形成部14-3は、例えばひとつ又は複数のコンピュータ14に備えることができる。被検眼60については、図中、網膜（眼底）61、角膜（前眼部）62が示されている。

第1照明光学系（点像投影光学系）11は、例えば第1光源部（例えば、波面測定用光源）17を備え、第1光源部17からの光束で被検眼眼底上で微小な領域（又はターゲット）を照明するためのものである。また、第1照明光学系11は、例えば、集光レンズ、リレーレンズを備える。

第1光源部17は、空間コヒーレンスが高く、時間コヒーレンスは高くないものが望ましい。ここでは、一例として、第1光源部17には、SLD（スーパーluminescenceダイオード）が採用されており、輝度が高い点光源を得ることができる。なお、第1光源部17は、SLDに限られるものではなく、レーザーの様に空間、時間ともコヒーレンスが高いものでも、回転拡散板などを挿入することにより、適度に時間コヒーレンスを下げることと利用できる。そして、LEDの様に、空間、時間ともコヒーレンスが高くないものでも、光量さえ充分であれば、ピンホール等を光路の光源の位置に挿入することで、使用可能になる。また、照明用の第1光源部17の第1波長は、例えば、赤外域の波長、例えば780nmを使用することができる。

【0008】

第1受光光学系（点像受光光学系）12は、例えば、被検眼網膜から反射して戻ってきた光束を受光し、第1受光部（例えば、波面イメージセンサ）13に導くためのものである。第1受光光学系12は、リレーレンズと、ビームスプリッタと、反射光束を少なくとも17本のビームに変換するための変換部材（分割素子、例えばハルトマン板）とを備える。ビームスプリッタは、第1光源部17からの光束を反射し、被検眼60の網膜で反射しアフォーカルレンズ81を介して戻ってくる反射光束を透過するミラー（例えば、偏光ビームスプリッタ）で構成されている。変換部材は、反射光束を複数のビームに変換する波面変換部材である。なお、変換部材には、光軸と直交する面内に配置された複数のマイクロフレネルレンズを用いることができる。眼底61からの反射光は、変換部材を介して第1受光部13上に集光する。

10

第1受光部13は、変換部材を通過した第1受光光学系12からの光を受光し、第1信号を生成するためのものである。なお、アフォーカルレンズ81の前側焦点は、被検眼60の瞳孔と略一致している。

第1照明光学系11と第1受光光学系12とは、第1光源部17からの光束が集光する点で反射されたとして、その反射光による第1受光部13での信号ピークが最大となる関係を維持して、第1受光部13での信号ピークが強くなる方向にプリズム72が移動し、強度が最大となる位置で停止することができる。この結果、第1光源部17からの光束が、被検眼上で集光することとなる。

【0009】

20

第2照明光学系（眼底照明系）2は、例えば、第2光源部（眼底照明系光源）21と、視野絞り22と、開口絞り23と、集光レンズと、ビームスプリッタとを備え、第2光源部21からの第2光束で被検眼網膜（眼底）上の所定の領域を照明するためのものである。第2光源部21は、例えば波長630nmの第2波長の赤色の光束を発する。第2光源部21は、眼底61への点光源又は面光源で、赤色領域とすることができる。また、例えば、ハルトマン測定用の第1光源部17の波長が840nm、前眼部照明用光源45の波長が赤外又は近赤外光である850～930nm（現状では、例えば、860～880nm）等の適宜の波長を選択することができる。ビームスプリッタは、例えば、第2光源部21からの光束を反射し、被検眼60で反射して戻ってくる光束を透過するようなビームスプリッタを用いることができる。

30

図1のように、瞳の内側から入射光を入れ、角膜及び水晶体の共役点に光を遮る板（例えば、図では穴あきミラーを使用）等を挿入し、角膜等のノイズ（有害反射）をカットできる。また、眼底照明系2の開口絞り23は、瞳との共役点付近に配置し、ノイズ光を後述する角膜反射除去ミラーで除去できるような光学系にすることができる。視野絞り22は、眼底の共役点に配置する。これにより細胞等を観察する場合でも集中して光を当てることができ、被検者への負担が少なくできる。

【0010】

なお、穴あきミラーを用いる場合は、角膜頂点での反射を防ぐため、穴あきミラーと瞳を共役関係にする。その他にも、リング状絞りの中心を100%透過とし、その周辺の透過率を例えば10%程度とし、周辺が眼底61の全体を照明してもよい。

40

眼底観察系3は、第2受光光学系31と、第2受光部（例えば、眼底イメージセンサ）32とを有する。第2受光光学系（眼底画像形成用光学系）31は、例えば、アフォーカルレンズ81と、ビームスプリッタと、集光レンズと、角膜反射除去ミラー33とを備える。第2受光光学系31は、眼底61で反射した第2波長の光を、補償光学部70を介して第2受光部32に導く。ビームスプリッタは、例えば、第1波長の光束を反射し、第2波長の光束を通過するダイクロイックミラーで構成されている。第2受光部32は、第2受光光学系31で形成された眼底像を受光し、第2信号を生成する。また、第2受光部32は、第2波長（赤色光）に感度を有する受光素子で形成することができる。

角膜反射除去ミラー33は、瞳を共役にするため浅い角度で使用するのが望ましい。なお、後述する第2の眼底観察系のような光学系を用いるのも有益な方法のひとつである。

50

また、本実施の形態において、アフォーカルレンズ 8 1、ビームスプリッタ等は、便宜上第 2 受光光学系 3 1 に備えられるものとしているが、第 1 受光光学系 1 2 に備えられるものとしても同様である。

補償光学部 7 0 は、測定光の収差を補償する適応光学系（アダプティブオプティクス、Adaptive Optics）などの波面補正素子 7 1 と、光軸方向に移動して球面成分を補正する移動プリズム 7 2 及び／又は球面レンズと、モーター付ステージ 7 3 とを有する。補償光学部 7 0 は、第 1 及び第 2 受光光学系 1 2 及び 3 1 中に配置され、例えば、被検眼 6 0 から反射して戻ってくる反射光束の収差を補償する。また、補償光学部 7 0 は、第 1 光源部 1 7 から発した光束に対して収差を補償し、収差補償された光束で被検眼眼底上の微小な領域を照明するようにしてもよい。

10

波面補正素子 7 1 としては、例えば、可変形鏡（ディフォーマブルミラー、可変鏡）や液晶等の空間光変調器を用いることができる。なお、その他、測定光の収差を補償可能な適宜の光学系を用いてもよい。可変形鏡は、鏡の内部に備えられたアクチュエーターによって鏡を変形させることで、光束の反射方向を変化させる。また、静電容量によって変形させる方法や、ピエゾを用いて変形させる方法等もあるが、これ以外にも適宜の方法を用いることができる。液晶空間光変調器は、液晶の配光性を利用して位相を変調させるもので、鏡と同様に反射させて使用する場合が多い。なお、液晶空間変調器を用いる場合、光路の途中で偏光子が必要な場合がある。また、波面補正素子 7 1 は、反射させて使用するもの以外に、透過型の光学系を用いてもよい。波面補正素子 7 1 は、波面補正素子制御装置 1 5 からの出力に従い、例えば変形等することで収差を補償する。

20

【0011】

なお、これら波面補正素子 7 1 には、それに限られるわけではないが、平行光束を入射させるようにしたほうがよい。例えば、被検眼 6 0 が無収差の場合、波面補正素子 7 1 には被検眼 6 0 の網膜からの反射光束が平行光として入射する。また、例えば、第 1 光源部 1 7 からの光束は平行光として波面補正素子 7 1 に入射するようになっている。

移動プリズム 7 2 は、コンピュータ 1 4 からの出力に基づき光軸方向に移動する。例えば、移動プリズム 7 2 は、適宜の駆動部により駆動される。移動プリズム 7 2 が移動することで球面成分の補償を行うことができる。なお、移動プリズム 7 2 を移動させる以外にも球面レンズを用いて補償することもできる。

モーター付きステージ 7 3 は、瞳の移動に追従して、モーター制御回路 1 6 の出力に応じて波面補正素子 7 1 を移動させる。これにより、波面補正素子 7 1 のある一点（例えば中心）が、瞳のある一点（例えば瞳中心）と常に共役となり、安定した波面補正を行うことができる。

30

前眼部照明用光源 4 5 は、被検眼 6 0 の前眼部を照明する。例えば、プラチドリング又はケラトリング等を用いて前眼部を所定パターンで照射してもよい。ケラトリングの場合、ケラト像により角膜の曲率中心付近だけのパターンを得ることができる。なお、前眼部照明用光源 4 5 から発せられる光束の波長は、例えば、第 1 波長（ここでは、780 nm）と異なると共に、長い波長を選択できる（例えば、940 nm）。

【0012】

前眼部観察系 4 は、集光レンズと、前眼部イメージセンサ 4 1 とを備える。前眼部観察系 4 は、前眼部照明用光源 4 5 から発せられ被検眼 6 0 の角膜 6 2 から反射して戻ってくる光束を前眼部イメージセンサ 4 1 に導く。なお、光源部としては、前眼部照明用光源 4 5 以外にも被検眼 6 0 を照明する適宜の光源を用いても良い。また、前眼部観察系 4 は、被検眼 6 0 に照明された適宜のパターン（例えば、プラチドリング）が、被検眼 6 0 の前眼部又は角膜 6 2 から反射して戻ってくる光束を、前眼部イメージセンサ 4 1 に導くこともできる。この時、前眼部イメージセンサ 4 1 は、前眼部像を得ることができる。なお、前眼部観察系 4 は、アライメントに用いることもできる。アライメントに使用する光束の波長は、例えば、第 1 波長（ここでは、780 nm）と異なる長い波長を選択できる（例えば、940 nm）。

40

第 3 照明用光学系（固視系）5 は、例えば、被検眼 6 0 の固視や雲霧をさせる為の視標

50

を投影する光路を含むものであって、第3光源部（例えば、ランプ）51、固視標52、リレーレンズを備える。第3光源部51からの光束で固視標を眼底61に照射することができ、被検眼60にその像を観察させる。

波面補正素子制御装置15は、コンピュータ14からの出力に基づいて波面補正素子71を変形させる。波面補正素子制御装置15は、例えば、演算装置14-1により測定された波面収差に基づき、又は、演算装置14-1により求められた補正量に基づき、波面補正素子71の各素子を変形させるための制御信号（例えば、電圧値など）を形成し、形成された制御信号を波面補正素子71に出力して波面を補正させる。また、波面補正素子制御装置15は、コンピュータ14からの出力に基づき移動プリズム72を光軸方向に移動させる。移動プリズム72を移動させることにより、球面成分を補正することができる。

10

【0013】

モーター制御回路16は、瞳移動量演算部14-2で測定された被検眼変位に基づき、モーター付きステージ73のモーターを駆動して、モーター付きステージ73及び波面補正素子71を光軸に対して横切る方向、又は、法線に垂直な平面方向に移動させる。

演算装置14-1は、第1受光部13からの出力に基づき、被検眼60の高次収差を含む光学特性を求める。なお、演算装置14-1は、第1受光部13からの出力以外にも、少なくとも被検眼60の波面収差を示す波面測定データを受け取り、光学特性を求めても良い。また、演算装置14-1は、求められた光学特性に基づき、波面補正素子の補正量を決定して、補正量を波面補正素子制御装置15に出力する。

20

瞳移動量演算部14-2は、前眼部イメージセンサ41で形成された前眼像から被検眼の変位（例えば、瞳の移動量）を測定する。なお、瞳移動量演算部14-2は、被検眼の変位として瞳中心の移動量を求めることができるが、これに限らず、例えば角膜頂点等の被検眼の適宜の位置の移動量を求めてもよい。眼底像形成部14-3は、第2受光部32で形成された眼底像を取得し、眼底像を表示又は出力する。

図2は、コンピュータ14の構成例である。演算装置14-1と、瞳移動量演算部14-2と、眼底像形成部14-3は、例えばひとつ又は複数のコンピュータ14に備えることができる。コンピュータ14は、メモリ14-4と、表示部14-5とをさらに有する。また、コンピュータ14は、装置全体を制御する。

【0014】

30

メモリ14-4は、例えば形成された眼底像を記憶する。また、メモリ14-4は、予め定められた適宜のパラメータ、求められた光学特性等を記憶する。表示部14-5は、例えば形成された眼底像を表示する。

（共役関係）

被検眼60の眼底61、固視系5の固視標52、第1光源部17、第1受光部13が共役である。また、被検眼60の眼の瞳（虹彩）、第1受光光学系12の変換部材（ハルトマン板）が共役である。第2光源部21は、瞳と共役であり（瞳で結像）、眼底61の大部分を全体的に一様に照明可能である。

【0015】

（アライメント調整）

40

次に、アライメント調整について説明する。アライメント調整は、例えば、前眼部観察系4により実施されることができる。

まず、光源部からの光束は、集光レンズ、ビームスプリッタ、アフォーカルレンズ81を介して、対象物である被検眼60を平行な光束で照明する。被検眼60の角膜62で反射した反射光束は、あたかも角膜62の曲率半径の1/2の点から射出したような発散光束として射出される。この発散光束は、アフォーカルレンズ81、ビームスプリッタ及び集光レンズを介して、前眼部イメージセンサ41にスポット像として受光される。

ここで、この前眼部イメージセンサ41上のスポット像が光軸上から外れている場合、眼底観察装置本体を、上下左右に移動調整し、スポット像を光軸上と一致させる。このように、スポット像が光軸上と一致すると、アライメント調整は完了する。なお、アライメ

50

ント調整は、被検眼 60 の角膜 62 を照明する図示しない光源部による被検眼 60 の像が前眼部イメージセンサ 41 上に形成されるので、この像を利用して瞳中心が光軸と一致するようにしてもよい。

【0016】

(波面補正素子 71)

図 3 に、波面補正素子 71 の構成図を示す。可変形鏡を用いる場合、例えば、複数の素子が並んでおり、これらがそれぞれアクチュエ이터により変動することで可変形鏡が変形する。各素子には、例えば各素子を識別するための素子番号が予め割り当てられている。波面補正素子制御装置 15 は、演算装置 14-1 が出力した補正量に従い、例えば、補正量に対応する各素子毎の変形量（又は電圧値）を求め、各アクチュエ이터によって各素子を駆動する。なお、素子の数は、図に示す数に限られるものではなく、適宜の数を用いることができる。素子番号は、図に示す以外にも適宜割り当てることができる。また、素子番号は、番号以外にも文字、座標等、各素子を識別可能な適宜の識別情報を用いることができる。

図 4 は、波面補正素子の説明図である。

波面補正素子 71 は、反射型の場合、図 4 (a) に示すように波面補正素子 71 の法線方向が光軸に対して所定角度 θ_c だけ傾いて設けられる。図 4 (b) に示すように、波面補正素子 71 に入射する光束の径を、瞳径 $\phi_e \times \alpha'$ とすると、傾斜した方向（波面補正素子の X 軸方向 X_e ）の波面補正素子 71 の必要径は、 $\phi_e \times \alpha' \div \cos \theta_c$ となる。ここで、 α' は、瞳と波面補正素子 71 の倍率であり、予め定められた値とすることができる。瞳が移動した場合、波面補正素子の X 軸方向の移動量は、波面補正素子 71 が傾斜していることを考慮して、瞳の移動量に対応した量とする。

図 5 は、前眼部イメージセンサの説明図である。

前眼部イメージセンサ 41 は、前眼部イメージセンサ 41 の法線方向が、光軸に対して所定角度 θ_e だけ傾いて設けられることができる。前眼部イメージセンサ 41 の垂線と光軸との角度 θ_e 、図 4 に示す波面補正素子 71 の垂線と光軸との角度 θ_c を同じ値又はほぼ同じ値にすると、計算量が減少し、フィードバックの速度を向上させることができる。

【0017】

(光学系の変形例)

図 6 は、眼底観察系 3 の変形例 (1) (第 2 の眼底観察系) である。

図 1 に示す光学系中にある眼底観察系 3 を、図 6 (a) に示すような第 2 の眼底光学系 3-2 に入れ替えることも可能である。第 2 の眼底光学系 3-2 は、眼底イメージセンサ 32 と、角膜反射除去パターン 34 とを備える。図 6 (a) には、図 1 の眼底観察系 3 の点線枠に対応する部分のみ示すが、他の装置全体の構成は図 1 と同様である。

第 2 の眼底観察系 3-2 では、瞳と共役の位置に角膜反射除去パターン 34 を挿入することにより、角膜からのノイズをカットでき像質を向上することができる。角膜反射除去パターン 34 の一例を図 6 (b) に示す。図 1 に示す眼底観察系 3 は反射型であるが、第 2 の眼底光学系 3-2 は透過型であるので、光路を直線にできる。

図 7 は、眼底観察系 3 の変形例 (2) (第 3 の眼底観察系) である。

図 1 に示す光学系中にある眼底観察系 3 を、図 7 に示すような第 3 の眼底光学系 3-3 に入れ替えることも可能である。照明光に偏光特性がある場合、第 3 の眼底観察系 3-3 のような配置にすると、光量を極力ロスすることなくノイズのみカットできる。図 7 に示す例は、波面補正素子で変調をかける光の偏光方向が P の場合の例である。ここで、P とは、光の偏光方向が入射面に対し平行な場合である。

第 3 の眼底観察系 3-3 は、偏光ビームスプリッタ 35 と、穴あきミラー 36 と、 $\lambda/4$ 板 (波長板) 37 とを有する。ここで、 λ は波長を示す。なお、図 7 には、図 1 の眼底観察系 3 の点線枠に対応する部分のみ示すが、他の装置全体の構成は図 1 と同様である。第 3 の眼底観察系 3-3 は、穴あきミラー 36 を瞳の共役点におき、角膜からのノイズをカットする。図 1 に示す眼底観察系 3 は、穴あきミラー 33 が斜めであるが、例えば図 7

のような配置の第3の眼底光学系3-3にすると、穴あきミラー36を光軸に対し垂直におけるので、ノイズ光のカットをほぼ理想的に行うことができる。

偏光ビームスプリッタ35は、波面補正素子71で変調された被検眼からの光束を通過させてλ/4板37及び穴あきミラー36に導き、一方、λ/4板37で偏光され及び穴あきミラー36で反射して戻ってきた光束を、反射して眼底イメージセンサ32に導く。偏光ビームスプリッタ35を使うことにより、補正されていない余計な光も除去できる。

【0018】

2. ゼルニケ解析

次に、ゼルニケ解析について説明する。一般に知られているゼルニケ多項式からゼルニケ係数 c_{i^2j-i} を算出する方法について説明する。ゼルニケ係数 c_{i^2j-i} は、例えば、ハルトマン板などの変化部材を介して第1受光部13で得られた光束の傾き角に基づいて被検眼60の光学特性を把握するための重要なパラメータである。

被検眼60の波面収差 $W(X, Y)$ は、ゼルニケ係数 c_{i^2j-i} 、ゼルニケ多項式 Z_{i^2j-i} を用いて次式で表される。

【0019】

【数1】

$$W(X, Y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^i c_{i^2j-i} Z_{i^2j-i}(X, Y)$$

10

20

ただし、 (X, Y) はハルトマン板の縦横の座標である。

また、波面収差 $W(X, Y)$ は、第1受光部13の縦横の座標を (x, y) 、ハルトマン板と第1受光部13の距離を f 、第1受光部13で受光される点像の移動距離を $(\Delta x, \Delta y)$ とすると、次式の関係が成り立つ。

【0020】

【数2】

$$\frac{\partial W(X, Y)}{\partial X} = \frac{\Delta x}{f},$$

$$\frac{\partial W(X, Y)}{\partial Y} = \frac{\Delta y}{f}$$

30

ここで、ゼルニケ多項式 Z_{i^2j-i} は、以下の数式で表される（より具体的な式は、例えば特開2002-209854を参照）。

【0021】

【数3】

$$Z_n^m = R_n^m(r) \left\{ \frac{\sin}{\cos} \right\} \{m\theta\}$$

$$\begin{aligned} m > 0 & \quad \sin \\ m \leq 0 & \quad \cos \end{aligned}$$

40

【0022】

【数 4】

$$R_n^m(r) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} (-1)^s \frac{(n-S)!}{S! \left\{ \frac{1}{2}(n-m) - S \right\}! \left\{ \frac{1}{2}(n+m) - S \right\}!} r^m$$

なお、ゼルニケ係数 c_{i^2j-i} は、以下の数式で表される自乗誤差を最小にすることにより具体的な値を得ることができる。

【0023】

10

【数 5】

$$S(x) = \sum_{i=1}^{\text{data number}} \left[\left\{ \frac{\partial W(X_i, Y_i)}{\partial X} - \frac{\Delta x_i}{f} \right\}^2 + \left\{ \frac{\partial W(X_i, Y_i)}{\partial Y} - \frac{\Delta y_i}{f} \right\}^2 \right]$$

ただし、 $W(X, Y)$ ：波面収差、 (X, Y) ：ハルトマン板座標、 $(\Delta x, \Delta y)$ ：第1受光部13で受光される点像の移動距離、 f ：ハルトマン板と第1受光部13との距離。

コンピュータ14は、ゼルニケ係数 c_{i^2j-i} を算出し、これを用いて球面収差、コマ収差、非点収差等の眼光学特性を求める。また、コンピュータ14は、ゼルニケ係数 c_{i^2j-i} を用いて次式により収差量 RMS_{i^2j-i} を算出する。

20

【0024】

【数 6】

$$RMS_i^{2j-i} = \sqrt{\frac{\varepsilon_i^{2j-i}}{2(i+1)}} c_i^{2j-i}$$

$$(\varepsilon_i^{2j-i} = 2 (2j=i), \varepsilon_i^{2j-i} = 1 (2j \neq i))$$

30

【0025】

3. フローチャート

本実施の形態では、眼の移動に波面補正素子71の中心を一致させ、波面イメージセンサ13からの出力信号に基づき、波面補正素子71の補正量・移動量を加味する。例えば、瞳と共役の位置に波面補正素子71を置き、瞳の移動に追従して波面補正素子71を、光軸に対して横切る方向（又は波面補正素子71の法線と垂直な平面方向）に動かす。これにより波面補正素子71の所定の一点が瞳の所定の一点と常に共役となり、安定した波面補正を行うことができる。

40

図8は、本実施の形態における補正素子移動アダプティブ光学の全体フローチャートである。図9は、波面補正素子71の移動の説明図である。

まず、コンピュータ14は、前眼部観察系の光軸を、前眼部イメージセンサ41の原点とする（S101）。例えば、前眼部観察系の光軸は、模型眼などを用いて予め測定しておくことができる。コンピュータ14は、予め測定されメモリ14-4に記憶された、光軸と前眼部イメージセンサ41とが交わる原点位置を読み出し、これを原点とする。例えば、図9(a)に示すように、前眼部イメージセンサ41の原点が設定される。なお、コンピュータ14は、前眼部照明用光源45を予め点灯しておく。

次に、モーター制御回路16は、モーター付きステージ73のモーターを駆動してモーター付きステージ73及び波面補正素子71を移動させて、波面補正素子71の中心を光

50

軸に移動する（S103）。例えば、図9（d）に示すように、波面補正素子71の中心と、光軸（図中「+」で示す）が一致するように、波面補正素子71を移動する。また、演算装置14-1は、波面補正素子71の中心（ X_c 、 Y_c ）を設定する。

次に、コンピュータ14は、波面補正素子71の初期位置を設定する（S105）。例えば、波面補正素子71の移動座標 X_{m0} 、 Y_{m0} を、 $X_{m0}=0$ 、 $Y_{m0}=0$ とする。また、コンピュータ14は、波面補正素子71の各素子の変形量を初期値（例えば、ゼロ）に設定し、及び、ずれ量 h の閾値 h_{max} の値を設定する（S107）。ずれ量 h の閾値 h_{max} は、波面補正素子71を構成する各素子のアクチュエ이터間の距離の約半分を用いることができるが、素子により適宜変更しても良い。

【0026】

コンピュータ14は、眼のアライメントをする（S109）。眼のアライメントには、別光源でアライメント用のスポットを用いても良い。本実施の形態では、例えば、前眼部に投影した光束の反射光束を前眼部イメージセンサ41に入射させ、前眼部の中心が前眼部イメージセンサ41の原点となるように、操作者により装置全体又は眼を移動させ、眼のアライメントを行う。なお、眼のアライメントは、適宜のタイミングで行ってもよい。

次に、瞳移動量演算部14-2は、瞳移動量演算処理を実行する（S111）。例えば、瞳移動量演算部14-2は、前眼部観察系の前眼部イメージングセンサ（例えばCCD）からのデータに基づき、瞳中心の光軸からのずれ位置（被検眼の変位、例えば x 方向のずれ X_d 及び y 方向のずれ Y_d ）を検出する（図9（b）、（c））。また、瞳移動量演算部14-2は、検出したずれ位置に基づき、移動位置補正ずれ量 h を求める。なお、瞳移動量演算処理の詳細は後述する。

瞳移動量演算部14-2は、求められた移動位置補正ずれ量 h が、設定された閾値 h_{max} よりも小さい（ $h < h_{max}$ ）か判断する（S113）。なお、閾値 h_{max} 以下か判断する以外にも、移動位置補正ずれ量 h が予め定められた所定値範囲内にあるかを判断してもよい。移動位置補正ずれ量 h が、閾値 h_{max} よりも小さくないと判断された場合（S113）、瞳移動量演算部14-2は、波面補正素子71移動処理を実行する（S115）。例えば、瞳移動量演算部14-2は、瞳の共役点におかれた波面補正素子71の移動座標（ X_{m0} 、 Y_{m0} ）を決定し、その座標をモーター制御回路16に伝える。

モーター制御回路16は、移動座標（ X_{m0} 、 Y_{m0} ）を入力し、その座標と波面補正素子71の中心座標が一致するようにモーター付きステージ73を駆動し、その後ステップS111の処理へ戻る。例えば、図9（e）に示すような位置に瞳の中心がある場合、移動座標（ X_{m0} 、 Y_{m0} ）が瞳中心位置に対応する座標に決定され、図9（f）に示すように波面補正素子71が移動される。本実施の形態は、このように補償光学部70の一部の要素である波面補正素子71を移動させる点、及び、その移動方法に特徴のひとつがある。なお、波面補正素子71移動処理の詳細は後述する。

【0027】

一方、移動位置補正ずれ量 h が、閾値 h_{max} よりも小さいと判断された場合（S113）、演算装置14-1は、波面測定用光源を点灯させて、その光源からの光束を被検眼に入射する（S117）。

次に、演算装置14-1は、シフト計算波面測定処理を実行する（S119）。例えば、演算装置14-1は、波面イメージセンサからの像に基づき、ゼルニケ係数、全収差量 R などの光学特性を求める。なお、シフト計算波面測定処理の詳細は後述する。

演算装置14-1は、収差が十分小さいか判断する（S121）。例えば、演算装置14-1は、求められた収差量 R が、予め定められた閾値より小さいか判断する。収差が十分小さくないと判断された場合（S121）、演算装置14-1は、波面補正素子制御装置15により波面補正素子71を変形させる（S123）。例えば、演算装置14-1は、求められた光学特性に基づき波面補正素子の補正量を決定して、補正量を波面補正素子制御装置15に出力する。ここで、補正量は、測定された収差を打ち消すように決定することができる。また、波面収差の変化量に応じて補正量を決定してもよい。波面補正素子制御装置15は、演算装置14-1からの補正量に従い制御信号を形成し、波面補正素子

10

20

30

40

50

71を構成する素子の各アクチュエ이터を駆動して波面補正素子71を変形させる。

一方、収差は十分小さいと判断された場合(S121)、演算装置14-1は、波面測定用光源を消灯する(S125)。波面入射用光源を、以下に示す眼底像取得前に消すことにより、ノイズとなる光を遮ることで像のノイズを減らすことができる。同様に、ステップS117~S125の処理の間は、眼底照明用光源は消灯しておくことができる。なお、ステップS125の処理は省略してもよい。また、本実施の形態において、光源の消灯及び点灯する代わりに、光路に照明を遮る適宜のものを挿入し又は取り出すようにしてもよい。

【0028】

次に、眼底像形成部14-3は、眼底照明用光源を点灯させ、その光源からの光束を被検眼60に入射する(S127)。なお、眼底照明用光源は予め点灯しておいてもよく、この場合ステップS127の処理を省略してもよい。眼底像形成部14-3は、被検眼眼底で反射した光束を受光した前眼部イメージセンサ41から、眼底像を取得する(S129)。

また、取得された眼底像を表示部14-5に表示する(S131)。本フローチャートのようなループを使用することにより、波面補正中のときでも以前の眼底像を表示できるため、常に補正しているシャープな像を測定者に提供できる。眼底像形成部14-3は、取得された眼底像を記憶部にセーブ(記憶)する(S133)。

コンピュータ14は、処理を終了するか判断する(S135)。例えば、コンピュータ14は操作者による指示を適宜の入力部から入力し、処理を終了するか判断することができる。処理を終了しないと判断された場合(S135)、眼底像形成部14-3は、眼底照明用光源を消灯し(S137)、ステップS111の処理に戻る。なお、ステップS137の処理は、省略することもできる。一方、処理を終了すると判断された場合には(S135)、コンピュータ14は処理を終了する。

【0029】

(瞳移動量演算処理)

図10に、瞳移動量演算処理の詳細フローチャートを示す。

まず、瞳移動量演算部14-2は、前眼部イメージセンサ41から前眼部像を入力し、瞳と光軸とのずれ(Xd、Yd)をエッジ検出、光学的検出などにより算出する(S201)。

図11は、エッジ検出の詳細フローチャートである。また、図12は、エッジ検出の説明図である。ここで、瞳と光軸とのずれ(Xd、Yd)の算出について、エッジ検出の例を説明する。なお、光学的検出については後述する。

まず、瞳移動量演算部14-2は、前眼部の像をCCD等の前眼部イメージセンサ41から取得する(S501)。図12(a)に、取得された前眼部像の概略を示す。図12(a)の内側の楕円が瞳を示す。

次に、瞳移動量演算部14-2は、前眼部像のデータから、少なくとも5個のエッジ(X_i , Y_i)を検出する(S503)。例えば、瞳移動量演算部14-2は、画像処理の手法により、取得した前眼部像の光量の変化(画像上の濃淡)を検出し、瞳孔のエッジ上の点を求めることができる。ここで、 X_i 、 Y_i は*i*番目のエッジの座標(*i*は適宜の識別子、例えば*i*=1~*n*)、*n*は検出エッジ数である。なお、検出するエッジ数は、予め定められていてもよいし、最小値及び／又は最大値が予め定められ、所定範囲数のエッジを検出してもよい。図12(b)に、検出されるエッジの例を示す。なお、瞳移動量演算部14-2は、所定数のエッジが得られない場合には、ステップS501に戻り、再度前眼部像を取得してエッジを検出するようにしてもよい。

次に、瞳移動量演算部14-2は、検出したエッジのx座標(X_i)を、次式に従い変換する(S505)。

$$X_i = X_i \times \cos(\theta_e) \quad (i = 1 \sim n)$$

ここで、 θ_e は前眼部イメージセンサ41と光軸との傾きである。前眼部イメージセンサ41が上述のようにx座標方向に傾斜して設けられている場合、上式により傾斜による座

10

20

30

40

50

標への影響を取り除く。

瞳移動量演算部 14-2 は、検出され及び変換された n 個のエッジのデータ (X_i、Y_i) を、以下の楕円方程式の (x、y) にそれぞれ代入し、例えば最小自乗近似して楕円の中心座標 (α、β) の値を求める (S507)。

【0030】

【数7】

$$\frac{\{(x-\alpha)\cos\theta-(y-\beta)\sin\theta\}^2}{a^2} + \frac{\{(x-\alpha)\sin\theta+(y-\beta)\cos\theta\}^2}{b^2} = 1$$

10

ここで、θ は、楕円の楕円角であり、a、b は、定数である。なお、最小自乗近似以外にも、適宜の手法により a、b を求めることもできる。図 12 (c) に、求められる楕円中心の概略を示す。

次に、瞳移動量演算部 14-2 は、求められた楕円の中心 (α、β) に基づき、瞳と光軸のずれ X_d、Y_d を求める (S509)。例えば、瞳移動量演算部 14-2 は、次式に従い瞳と光軸のずれ X_d、Y_d を求める。

$$X_d = M \times \alpha$$

$$Y_d = M \times \beta$$

ここで、M は瞳と前眼部イメージングセンサの倍率であり、予めメモリ 14-4 に記憶されることができる。また、瞳移動量演算部 14-2 は、エッジ検出の処理を終了し、例えばステップ S203 の処理へ移る。

20

図 10 に戻りステップ S203 では、瞳移動量演算部 14-2 は、求められた瞳と光軸のずれ (X_d、Y_d) に基づき、次式に従い X_e、Y_e を計算する (S203)。

$$X_e = X_d - X_{m0} / \alpha'$$

$$Y_e = Y_d - Y_{m0} / \alpha'$$

ここで、α' は、瞳と波面補正素子 71 の倍率であり、予めメモリ 14-4 に記憶されることができる。なお、X_e、Y_e は、例えば波面補正素子 71 が既に移動した分 (X_{m0}、Y_{m0}) を差し引いた値であり、瞳の中心位置と波面補正素子 71 の中心のずれに対応する。

30

瞳移動量演算部 14-2 は、次式に従い、移動位置補正ずれ量 h を求める (S205)。

【0031】

【数8】

$$h = \sqrt{X_e^2 + Y_e^2}$$

(波面補正素子移動処理)

図 13 に、波面補正素子 71 移動処理の詳細フローチャートを示す。

40

まず、瞳移動量演算部 14-2 は、次式に従い波面補正素子 71 の移動座標 (X_{m0}、Y_{m0}) を求める (S301)。

$$X_{m0} = \alpha' \times X_d \div \cos(\theta_c)$$

$$Y_{m0} = \alpha' \times Y_d$$

ここで、θ_c は、波面補正素子 71 の法線と光軸とのなす角であり、予めメモリ 14-4 に記憶されることができる。

次に、瞳移動量演算部 14-2 は、求められた座標 (X_{m0}、Y_{m0}) に応じて、その座標に波面補正素子 71 を移動するための信号を、モーター制御回路 16 に送る (S303)。

モーター制御回路 16 は、波面補正素子 71 を移動させるための信号を瞳移動量演算部

50

14-2から入力し、入力した信号に従いモーター付きステージ73のモーターを駆動し、例えば座標(X_{mo} 、 Y_{mo})と波面補正素子71の中心が一致するように波面補正素子71を移動させる(S305)。

【0032】

(シフト計算波面測定処理)

図14に、シフト計算波面測定処理の詳細フローチャートを示す。

まず、演算装置14-1は、波面イメージセンサでの測定像を取得する(S401)。次に、演算装置14-1は、測定像の点像の重心点を求め、重心点の個数 n 及び座標(x_i 、 y_i)($i=1\sim n$)を計算する(S403)。

演算装置14-1は、瞳と光軸のずれ(X_d 、 Y_d)、点像の重心点座標(x_i 、 y_i)に基づき、次式に従い点像の移動量 Δx_i 、 Δy_i を求める(S405)。

【0033】

【数9】

$$\begin{aligned}\Delta x_i &= (x_i - X_c - x_{o_i})\beta' - X_d/\beta' \\ \Delta y_i &= (y_i - Y_c - y_{o_i})\beta' - Y_d/\beta' \\ &\quad (i=1\sim n)\end{aligned}$$

20

ここで、 x_{o_i} ：分割素子の i 番目のレンズアレイの無収差時の x 座標、 y_{o_i} ：分割素子の i 番目のレンズアレイの無収差時の y 座標、 X_c ：波面イメージセンサが光軸と交わる x 座標、 Y_c ：波面イメージセンサが光軸と交わる y 座標、 β' ：波面イメージセンサと瞳の倍率である。

なお、瞳中心がずれると(被検眼がずれると)、瞳中心に相応する点からの反射光が波面イメージセンサ13と交わる点もずれるため、被検眼眼底からの反射光束を受光する波面イメージセンサ13の座標原点を、瞳中心に設定する。上述の式では、 X_d/β' 、 Y_d/β' の項がこれに相当する。なお、座標原点を瞳中心に設定する以外にも、角膜頂点等の被検眼の適宜の位置に設定してもよい。

30

演算装置14-1は、求められた Δx_i 、 Δy_i をゼルニケの微分式に代入して最小自乗近似し、ゼルニケの係数 c_i^{2j-i} を求める(S407)。ここで、ゼルニケの微分式は、次式で表される。

【0034】

【数10】

$$\frac{\partial W(X,Y)}{\partial X} = \frac{\Delta x}{f}, \quad \frac{\partial W(X,Y)}{\partial Y} = \frac{\Delta y}{f}$$

演算装置14-1は、全収差量 R を求める(S409)。例えば、収差量 R_i^{2j-i} は、次式で求めることができる。

【0035】

40

【数 1 1】

$$R_i^{2j-i} = \frac{\varepsilon_i^{2j-i}}{2(i+1)} (c_i^{2j-i})^2$$

$$(\varepsilon_i^{2j-i} = 2 (2j=i), \varepsilon_i^{2j-i} = 1 (2j \neq i))$$

演算装置 14-1 は、求められたゼルニケ係数、収差量等と、波面補正素子 71 の補正量とに基づき、被検眼 60 の光学特性をさらに求めてもよい。ここで、波面補正素子 71 の補正量は、例えば、演算装置 14-1 が波面補正素子制御装置 15 に出力した補正量、又は、波面補正素子制御装置 15 が波面補正素子 71 に出力する制御信号に応じた補正量などを用いることができる。また、波面補正素子 71 の補正量を光学的に測定し、測定された補正量を用いてもよい。

【0036】

4. 瞳と光軸のずれの光学的検出

図 15 は、光学的瞳検出をするための眼底観察装置の構成図である。瞳と光軸のずれは、上述のステップ S201 のようにエッジ検出を用いる以外にも、光学的に検出することもできる。

眼底観察装置は、波面補正系 1 と、眼底照明系 2 と、眼底観察系 3 と、前眼部観察系 4 と、前眼部照明用光源 45 と、固視系 5 と、補償光学部 70 と、モーター制御回路 16 と、瞳移動量演算部 14-2 と、眼底像形成部 14-3 とを備える。また、眼底観察装置は、輪部検出用光源 91 と、輪部検出受光部 92 と、輪部検出信号演算部 14-6 14-4 とをさらに備える。なお、図 1 と同様の構成については、図 1 と同じ符号を付してその詳細な説明を省略する。

輪部検出用光源 91 は、被検眼 60 の瞳輪部付近に光を照射するための光源である。例えば、輪部検出用光源 91 は複数備えられ、被検眼 60 の予め定められた箇所に光を照射する。輪部検出用光源 91 としては、例えば 940nm の LED を用いることができるが、これに限らず適宜の光源を用いてもよい。

輪部検出受光部 92 は、輪部検出用光源 91 からの光が被検眼 60 の瞳付近で反射された反射光を受光する。例えば、輪部検出受光部 92 は、輪部検出用光源 91 に対応して複数備えられる。輪部検出用受光部としては、例えばフォトダイオードを用いることができるが、これに限らず適宜の受光デバイス、受光部等を用いてもよい。なお、輪部検出用光源 91 及び受光部は、それぞれ最低 2 個あればよいが 4 個以上が望ましい。輪部検出信号演算部 14-6 は、輪部検出受光部 92 から受光信号を入力し、受光信号に基づき光量を求める。また、輪部検出信号演算部 14-6 は、瞳のずれ量を計算する。

【0037】

図 16 は、光学的瞳検出の概略を示す説明図である。

図 16 に示す例は、輪部検出用光源 91 及び輪部検出受光部 92 をそれぞれ 4 つずつ備える例である。輪部検出用光源 91 は、例えば図 16 (a) に示すように、瞳の輪部付近を照射する。

図 16 (c) のような瞳のずれのない状態において、輪部検出受光部 92 で受光される光の光量（初期検出光量）を W_1 とすると、図 16 (d) のように、瞳が輪部検出用光源 91 から照射される光軸の方向（図の例では上方向）に移動した場合、輪部検出受光部 92 での検出光量 W は、 W_1 よりも小さくなる ($W < W_1$)。一方、図 16 (e) のように、瞳が光軸と反対方向（図の例では下方向）に移動した場合、輪部検出受光部 92 での検出光量 W は、 W_1 よりも大きくなる ($W > W_1$)。

このように、瞳の移動によって輪部検出受光部 92 での検出光量が変化するので、輪部検出用光源 91 と輪部検出受光部 92 を適宜備えることにより、検出光量に基づいて瞳の

10

20

30

40

50

中心、及び／又は、瞳のずれ量を求めることができる。

図16(b)は、瞳が点線位置から網掛け実線位置に移動した例である。瞳が移動すれば輪部検出受光部92の検出光量に変化する。例えば、図16(b)に示す4つの照射光のうち、左と下の照射光を受光する輪部検出受光部92では検出光量が大きくなり、一方、上と右の照射光を受光する輪部検出受光部92では検出光量が小さくなる。

例えば、瞳が図16(b)の右方向へ移動量すると、右側の照射光の領域と瞳とが重なる範囲は大きくなるため、図の右側の照射光を受光する輪部検出受光部92の光量は、瞳の移動量に応じて小さくなる。また、左側の照射光の領域と瞳とが重なる範囲は小さくなるため、左側の照射光を受光する輪部検出受光部92の光量は瞳の移動量に応じて大きくなる。なお、上下方向についても同様である。

10

図17は、光学的瞳検出のフローチャートである。図17のフローチャートは、例えば、上述のステップS201の詳細フローチャートである。

まず、輪部検出信号演算部14-6は、初期設定をする(S601)。例えば、輪部検出信号演算部14-6は、パラメータ*i*を*i*=1とし、光量の総和 W_{ALL} を $W_{ALL}=0$ とする。次に、輪部検出信号演算部14-6は、*i*番目の輪部検出用光源91を点灯させ、被検眼60に光を入射する(S603)。なお、輪部検出信号演算部14-6は、他の輪部検出用光源91が点灯されている場合には、これらを消灯するようにしてもよい。

また、輪部検出信号演算部14-6は、入射光の前眼部位置(x_i 、 y_i)を求める(S605)。例えば、各輪部検出用光源91に対応して入射光の前眼部位置(x_i 、 y_i)が予めメモリ14-4に記憶され、輪部検出信号演算部14-6は、メモリ14-4を参照して点灯させた光源に対応する入射光の前眼部位置(x_i 、 y_i)を取得する。また、輪部検出信号演算部14-6は、取得された入射光の前眼部位置(x_i 、 y_i)を適宜メモリ14-4に記憶してもよい。

20

【0038】

輪部検出信号演算部14-6は、*i*番目の輪部検出用受光部の光量 W_i を測定する(S607)。例えば、輪部検出信号演算部14-6は、点灯させた輪部検出用光源91に対応する輪部検出受光部92から受光信号を入力し、受光信号に基づいて光量を検出する。

輪部検出信号演算部14-6は、検出された光量 W_i を、光量の総和 W_{ALL} に加算する(S609)。

$$W_{ALL} = W_{ALL} + W_i$$

30

また、輪部検出信号演算部14-6は、パラメータ*i*が、輪部検出用光源91及び輪部検出受光部92の個数*m*より小さい($i < m$)か判断する(S611)。なお、個数*m*は予めメモリ14-4に記憶されておくことができる。

輪部検出信号演算部14-6は、パラメータ*i*が個数*m*より小さいと判断された場合(S611)、パラメータ*i*を例えば1増加し(S613)、ステップS603以降の処理を繰り返す。なお、本フローチャートでは、パラメータ*i*に対応する輪部検出用光源91及び輪部検出受光部92についてステップS603～S611の処理を直列的に順次実行しているが、各ステップにおいて、全ての輪部検出用光源91及び輪部検出受光部92についての処理を実行してもよい。

一方、輪部検出信号演算部14-6は、パラメータ*i*が個数*m*より小さくないと判断された場合(S611)、入射光の前眼部位置(x_i 、 y_i)と、測定された光量 W_i と、光量の総和 W_{ALL} とに基づいて、瞳と光軸のずれを求める(S615)。例えば、輪部検出信号演算部14-6は、次式に従い瞳と光軸のずれ(X_d 、 Y_d)を求める。

40

【0039】

【数 1 2】

$$X_d = \frac{1}{W_{ALL}} \sum_{i=1}^m \gamma_i W_i x_i$$

$$Y_d = \frac{1}{W_{ALL}} \sum_{i=1}^m \gamma_i W_i y_i$$

ここで、 γ_i は、輪部検出受光部 9 2 や測定条件による補正值であり、予めメモリ 1 4 - 4 に記憶されることができる。これは、重心を求める式と同一で光量の重みをかけることで中心を算出する。輪部検出信号演算部 1 4 - 6 は、光学的瞳検出の処理を終了し、例えば、ステップ S 2 0 3 の処理へ移る。

10

【0 0 4 0】

5. 表示例

図 1 8 は、眼底像（細胞観察）の表示例である。図 1 8 左側に、波面補正素子 7 1 を移動させない場合における眼底像を示す。また、図 1 8 右側に本実施の形態における波面補正素子 7 1 を移動させた場合の眼底像を示す。図中上段は、瞳中心が光軸に固定されているときの眼底像を示し、下段は、瞳中心が光軸から 0.1 mm 移動したときの眼底像を示す。波面補正素子 7 1 を移動させない場合は、瞳の移動により眼底像がぼけるのに対して、本実施の形態のように波面補正素子 7 1 を移動させた場合は、瞳が移動しても鮮明な眼底像が得られることが示される。

20

なお、眼底像は、例えば、図 1 8 に示すような細胞が観察可能な像の他、眼底全体又は所定領域が観察可能な像であってもよい。また、例えば、図 1 8 に示す像よりも拡大又は縮小された像、図 1 8 に示す像とは分解能の異なる像、倍率の異なる像などであってもよい。

【産業上の利用可能性】

【0 0 4 1】

本発明は、例えば、眼の光学特性及び眼底画像を測定する装置に関する産業に利用可能である。

30

【図面の簡単な説明】

【0 0 4 2】

【図 1】眼底観察装置の構成図。

【図 2】コンピュータの構成例。

【図 3】波面補正素子の構成図。

【図 4】波面補正素子の説明図。

【図 5】前眼部イメージセンサの説明図。

【図 6】眼底観察系の変形例（1）（第 2 の眼底観察系）。

【図 7】眼底観察系の変形例（2）（第 3 の眼底観察系）。

【図 8】補正素子移動アダプティブオプティクス全体フローチャート。

40

【図 9】波面補正素子の移動の説明図。

【図 1 0】瞳移動量演算処理の詳細フローチャート。

【図 1 1】エッジ検出の詳細フローチャート。

【図 1 2】エッジ検出の説明図。

【図 1 3】波面補正素子移動処理の詳細フローチャート。

【図 1 4】シフト計算波面測定処理の詳細フローチャート。

【図 1 5】光学的瞳検出をするための眼底観察装置の構成図。

【図 1 6】光学的瞳検出の概略を示す説明図。

【図 1 7】光学的瞳検出のフローチャート。

【図 1 8】眼底像の表示例。

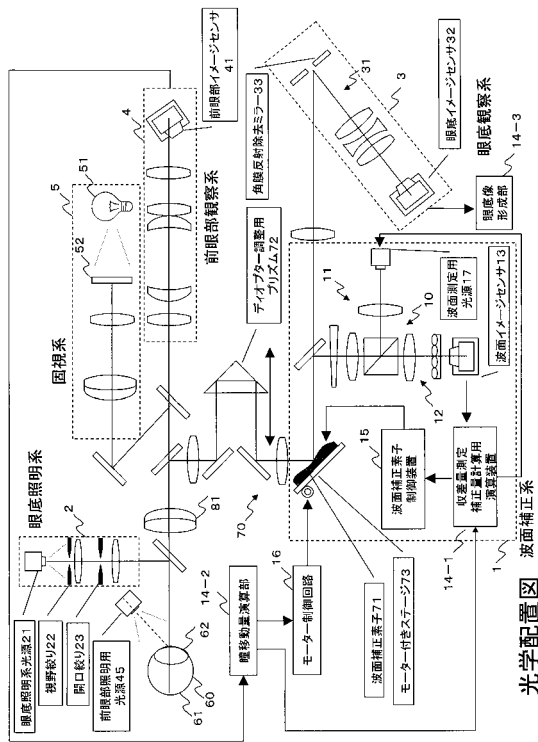
50

【符号の説明】

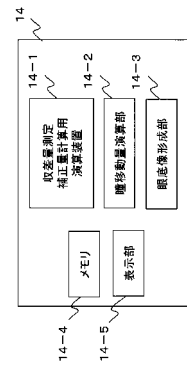
【0043】

1	波面補正系	
2	眼底照明系（第2照明光学系）	
3	眼底観察系	
4	前眼部観察系	
5	固視系	
11	第1照明光学系	
12	第1受光光学系	
13	第1受光部（波面イメージセンサ）	10
14	コンピュータ	
14-1	収差量測定補正量計算用演算装置（演算装置）	
14-2	瞳移動量演算部	
14-3	眼底像形成部	
14-4	メモリ	
14-5	表示部	
14-6	輪部検出信号演算部	
15	波面補正素子制御装置	
16	モーター制御回路	
21	第2光源部（眼底照明系光源）	20
22	視野絞り	
23	開口絞り	
31	第2受光光学系	
32	第2受光部（眼底イメージセンサ）	
33	角膜反射除去ミラー	
34	角膜反射除去パターン	
35	偏光ビームスプリッタ	
36	穴あきミラー	
37	$\lambda/4$ 板	
41	前眼部イメージセンサ	30
45	前眼部照明用光源	
51	ランプ	
52	固視標	
60	被検眼	
61	網膜（眼底）	
62	角膜（前眼部）	
70	補償光学部	
71	可変形鏡（波面補正素子）	
72	移動プリズム	
73	モーター付きステージ	40
91	輪部検出用光源	
92	輪部検出受光部	

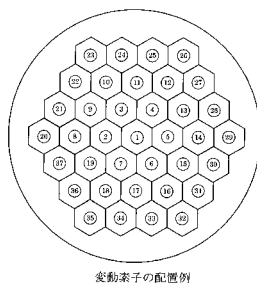
【図 1】



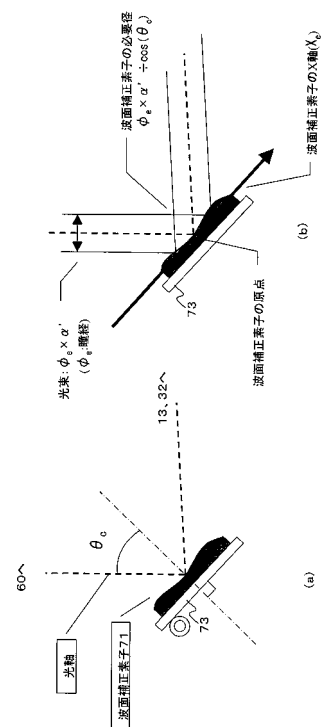
【図 2】



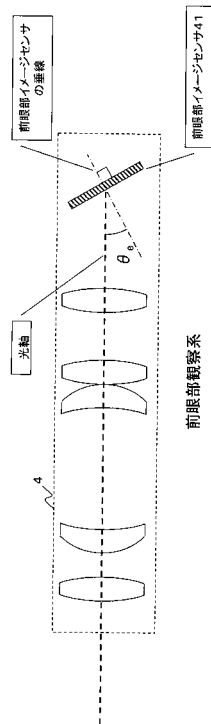
【図 3】



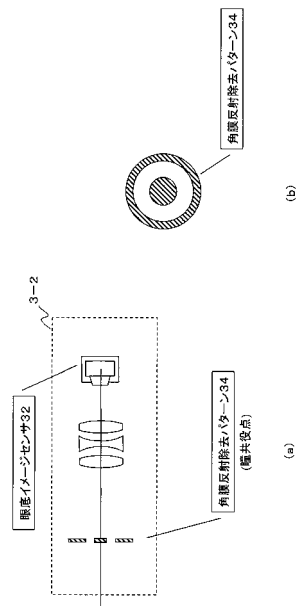
【图 4】



【図 5】

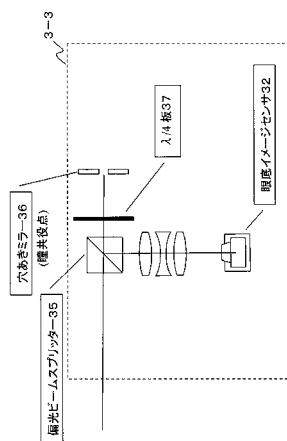


【図 6】



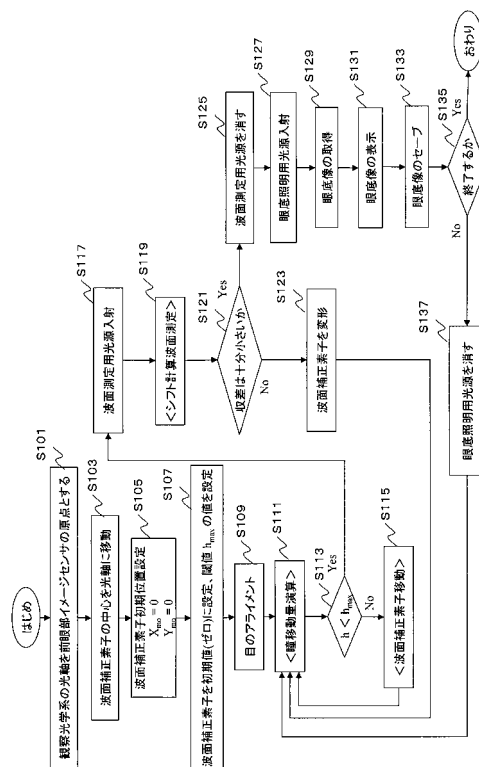
第2の眼底観察系

【图 7】



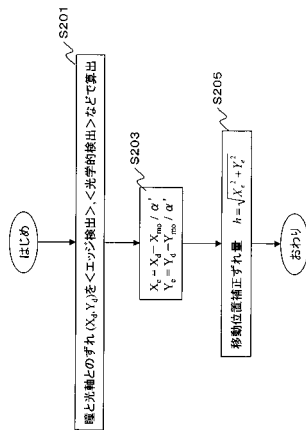
第3の眼底観察系

【图 8】



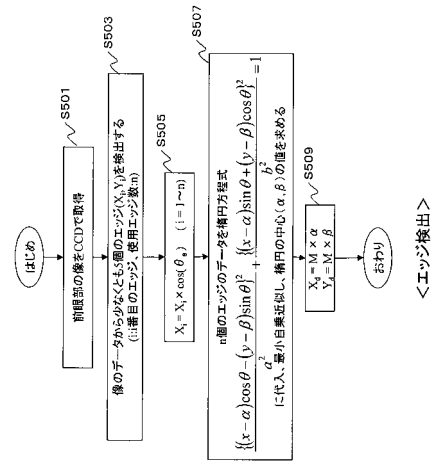
補正素子移動アダプティブオプティクス 全体フローチャート

【図 10】



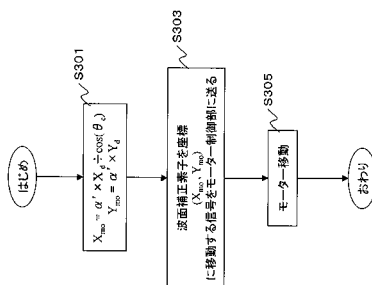
<瞳移動量演算>

【図 11】



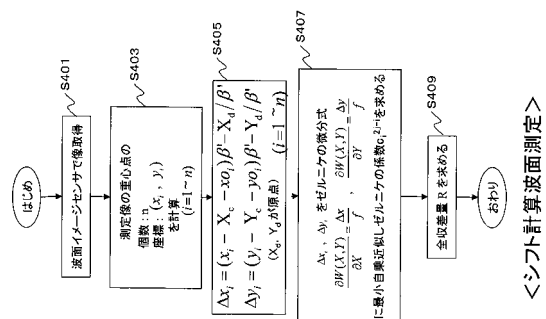
<エッジ検出>

【図 13】



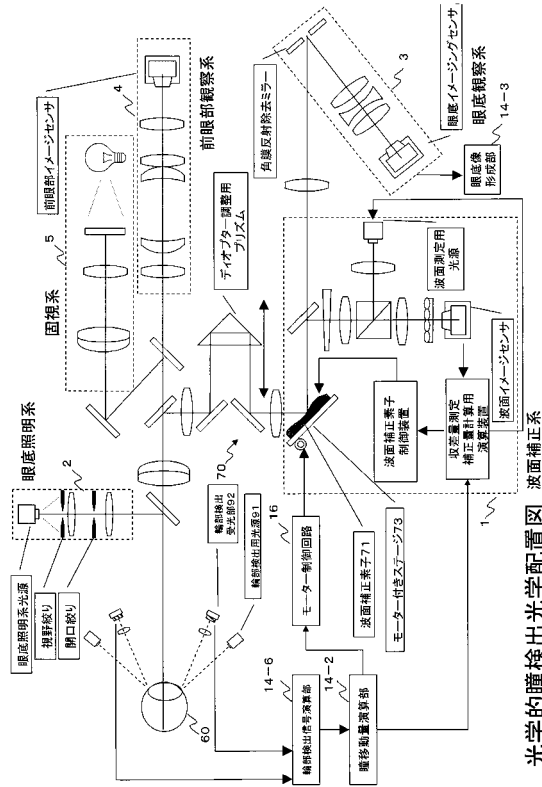
<波面補正素子移動>

【図 14】



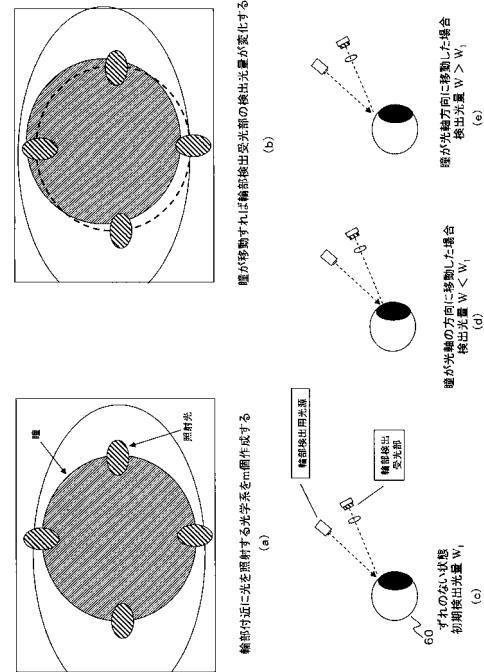
<シフト計算波面測定>

【図15】



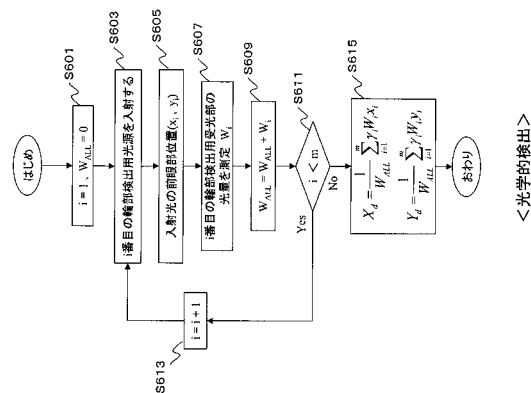
光学的瞳孔検出光学配置図 波面補正系

【図16】



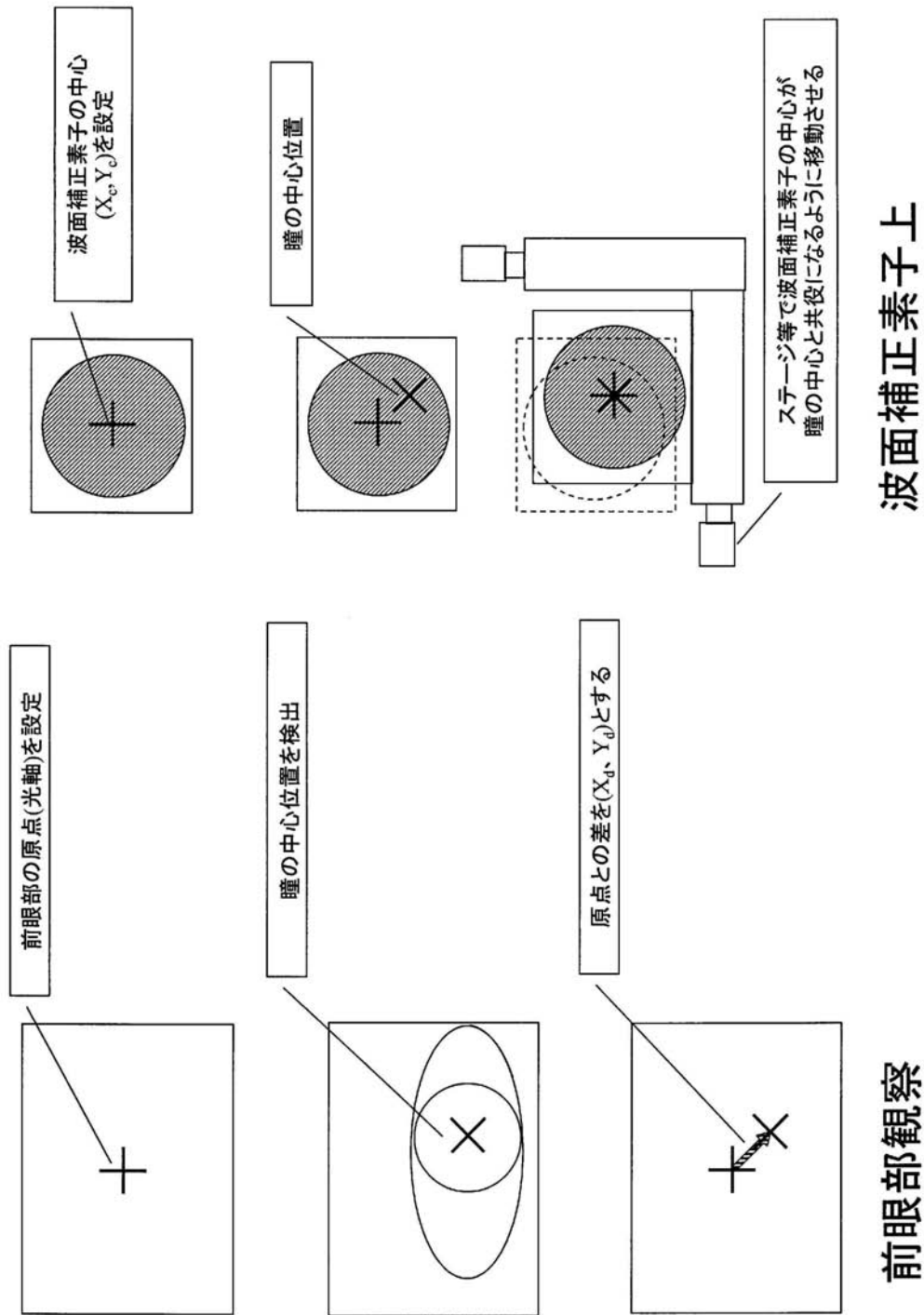
光学的瞳孔検出概要

【図17】

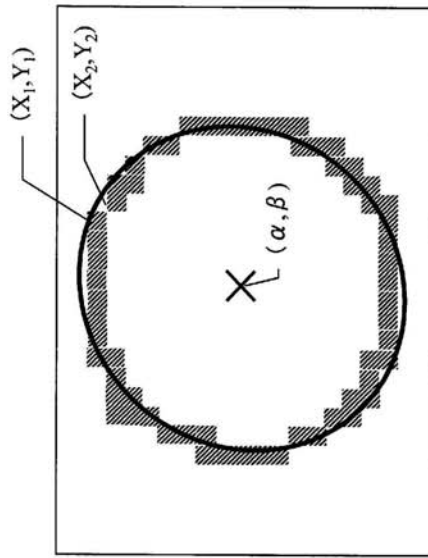


< 光学的検出 >

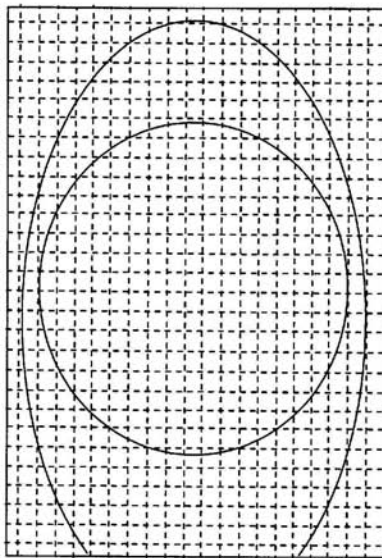
【図 9】



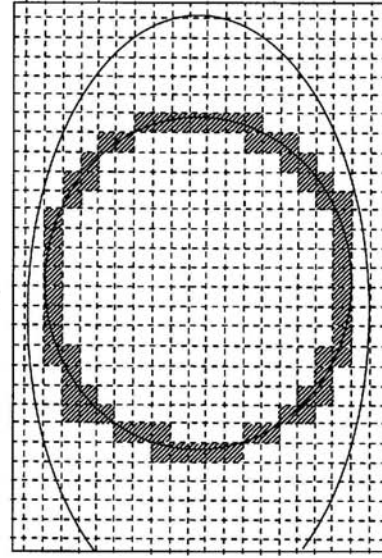
【図 12】



(c) 楕円の方程式に最小自乗近似することで
楕円の中心座標を算出する



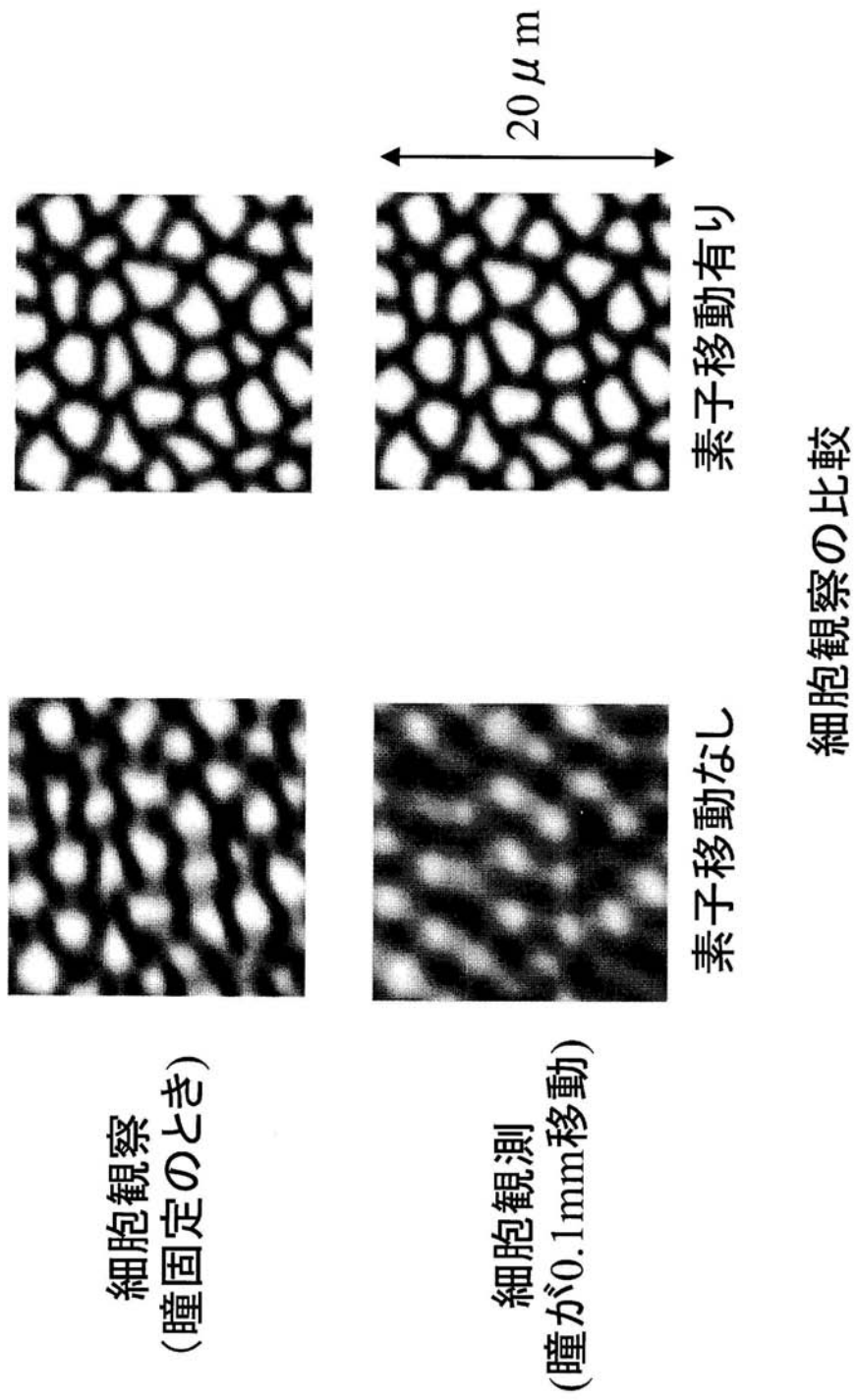
(a) 前眼部イメージングセンサで前眼部像を取得する



(b) エッジ検出

エッジ検出概要

【図 18】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2004-159784 (JP, A)
特開2004-159779 (JP, A)
国際公開第2003/053230 (WO, A1)
特表2001-507258 (JP, A)
特表2001-519196 (JP, A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
A 61 B 3/10
A 61 B 3/12