

(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2008-264048

(P2008-264048A)

(43) 公開日 平成20年11月6日(2008.11.6)

(51) Int.Cl.

A61B 3/12 (2006.01)

F I

A61B 3/12

E

テーマコード (参考)

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 18 頁)

(21) 出願番号 特願2007-107777 (P2007-107777)
 (22) 出願日 平成19年4月17日 (2007.4.17)

(71) 出願人 304021831
 国立大学法人 千葉大学
 千葉県千葉市稲毛区弥生町1番33号
 (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 100081411
 弁理士 三澤 正義
 (72) 発明者 大沼 一彦
 千葉県千葉市稲毛区弥生町1番33号 国立大学法人 千葉大学内
 (72) 発明者 岡崎 芳郎
 東京都板橋区蓮沼町75番1号 株式会社トプコン内

最終頁に続く

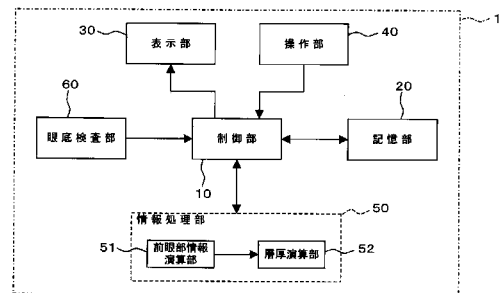
(54) 【発明の名称】 眼底検査装置

(57) 【要約】

【課題】 視神経線維層の厚さを容易にかつ高精度で計測できる眼底検査装置を提供する。

【解決手段】 ストークスペクトル演算部53は、眼底検査部60により得られた信号に基づいてストークスペクトルを求める。位相差分布演算部54は、このストークスペクトルに基づいて、眼底の特定領域(ヘンレ線維層)による眼底反射光の位相差分布を求める。前眼部遅相軸演算部55と前眼部位相差演算部56は、この位相差分布に基づいて、前眼部成分(前眼部の遅相軸、前眼部に起因する位相差)を求める。NFL成分抽出部57は、この前眼部成分に基づいて、NFL成分を眼底反射光の偏光状態から抽出する。NFL厚演算部58は、このNFL成分に基づいて視神経線維層の厚さを演算する。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

被検眼に円偏光の照明光を投射する照明光学系と、前記被検眼による前記照明光の眼底反射光を受光する受光光学系と、前記受光された眼底反射光の偏光状態に基づいて前記眼底の視神経乳頭領域の視神経線維層の厚さを演算する演算手段とを有する眼底検査装置であって、

前記演算手段は、前記眼底の特定領域による照明光の眼底反射光の偏光状態に基づいて前記被検眼の前眼部の偏光特性を演算し、該演算された前眼部の偏光特性と前記視神経乳頭領域による照明光の眼底反射光の偏光状態とに基づいて前記視神経線維層の厚さを演算する、

ことを特徴とする眼底検査装置。

【請求項 2】

前記演算手段は、前記演算された前眼部の偏光特性に基づいて前記視神経乳頭領域による照明光の眼底反射光の偏光状態に含まれる前記前眼部に起因する成分を特定し、前記特定された成分に基づいて前記視神経線維層に起因する成分を該眼底反射光の偏光状態から抽出し、前記抽出された成分に基づいて前記視神経線維層の厚さを演算する、

ことを特徴とする請求項 1 に記載の眼底検査装置。

【請求項 3】

前記受光光学系は、進相軸方向が互いに異なる 4 つの位相板からなる複数の位相板群が二次元的に配列された位相板アレイと、前記位相板アレイを透過した眼底反射光の特定方向の偏光成分を透過させる偏光板と、前記位相板アレイの各位相板群の 4 つの位相板に対応する位置に 4 つの受光素子からなる受光素子群が設けられ、前記偏光板を透過した偏光成分の強度を検出する受光手段とを含み、

前記演算手段は、前記位相板アレイの各位相板群の各位相板を透過した前記特定領域による眼底反射光の強度に基づいて当該位相板群を透過した該眼底反射光のストークスベクトルを演算し、該演算されたストークスベクトルに基づいて前記特定領域による眼底反射光の位相差分布を演算し、該演算された位相差分布に基づいて前記前眼部の偏光特性を演算する、

ことを特徴とする請求項 1 に記載の眼底検査装置。

【請求項 4】

前記演算手段は、前記演算された位相差分布に基づき、前記前眼部の偏光特性として、前記前眼部の遅相軸方向と前記前眼部に起因する位相差とを演算する、

ことを特徴とする請求項 3 に記載の眼底検査装置。

【請求項 5】

前記演算手段は、前記位相差分布に基づいて前記特定領域による眼底反射光の位相差の最大値及び最小値を求め、前記最大値及び前記最小値に基づいて前記前眼部に起因する位相差を演算する、

ことを特徴とする請求項 4 に記載の眼底検査装置。

【請求項 6】

前記特定領域は、前記眼底の中心窩を含み、

前記位相差分布は、前記眼底の中心窩を略中心とする円周上における位相差の分布である、

ことを特徴とする請求項 3 ~ 請求項 5 のいずれか一項に記載の眼底検査装置。

【請求項 7】

前記特定領域は、前記眼底の中心窩の周辺領域に位置するヘンレ線維層である、

ことを特徴とする請求項 1 ~ 請求項 6 のいずれか一項に記載の眼底検査装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は、被検眼の眼底を検査するための眼底検査装置に関し、特に、眼底の層組織

10

20

30

40

50

の厚さを計測する技術に関するものである。

【背景技術】

【0002】

眼底には、網膜、脈絡膜、強膜等の層組織が存在する。更に、網膜は、視神経線維層、視細胞層、網膜色素上皮層等の層組織を含んで形成されている。なお、視神経線維層は、網膜神経線維層、神経線維層、視神経線維束などとも呼ばれる。

【0003】

これらの層組織の厚さ情報は、眼科分野における重要な診断材料である。たとえば、緑内障の眼においては、眼圧の増大に伴い視神経乳頭が圧迫され、その周囲の視神経線維層が薄くなることが知られている。この知識を利用し、視神経乳頭の周囲における視神経線維層の厚さ情報は、緑内障の診断材料として用いられている。

10

【0004】

眼底の層組織（特に視神経線維層）の厚さを計測する手法には、偏光を利用する手法や、OCT (Optical Coherence Tomography) を利用する手法などがある。前者の手法は、たとえば特許文献1に開示されている。また、後者の手法は、たとえば特許文献2に開示されている。

【0005】

眼底の層組織の厚さ計測は上記のように有用であるが、特許文献1、2に記載の装置は一般に高価であるため、これを導入できない医療機関も多数有るとされる。このような事情に対応し、より安価に提供可能な装置が特許文献3に提案されている。

20

【0006】

特許文献3の眼底検査装置は、円偏光の照明光を眼底に照射し、その眼底反射光の偏光特性を解析してストークスベクトル（ストークスパラメータ）を取得することにより、視神経線維層の厚さを求めるものである。この眼底検査装置は、通常の眼底カメラと類似の構成を有しており、特許文献1、2の装置と比較して少なくとも価格面において優位性を持つ。

【0007】

この眼底検査装置は、眼底カメラとコンピュータを含んで構成される。図6及び図7は、眼底カメラの光学系の構成を表している。眼底カメラは、照明光学系120と受光光学系121を有する。照明光学系120には、キセノンランプ122とハロゲンランプ123が設けられている。キセノンランプ122とハロゲンランプ123は、それぞれ、ハーフミラー124に対して共役な位置に配置されている。

30

【0008】

キセノンランプ122から出力された照明光は、コンデンサレンズ125によりリング状絞りXの近傍にリレーされる。同様に、ハロゲンランプ123から出力された照明光は、コンデンサレンズ126によりリング状絞りXの近傍にリレーされる。

【0009】

リング状の絞りXを通過した照明光は、リレーレンズ127、全反射ミラー128A、リレーレンズ128、穴空きミラー129、対物レンズ130を經由して被検眼Eに入射し、眼底Efを照明する。

40

【0010】

リレーレンズ128と穴空きミラー129との間の光路中には、偏光ユニット137が挿入される。偏光ユニット137は、照明光の偏光特性を変換する。偏光ユニット137は、グリーンフィルター（又は干渉フィルター）138、直線偏光特性を有する偏光フィルター139、及び、1/4波長板140を含んで構成される。このような構成により、偏光ユニット137は、照明光を円偏光に変換するように作用する。偏光ユニット137は、眼底Efを観察するときには光路から退避される。

【0011】

受光光学系121は、照明光の眼底反射光PをCCDカメラ135や写真フィルム136に導く。受光光学系121は、対物レンズ130、穴空きミラー129、合焦レンズ1

50

32、リレーレンズ133、クイックリターンミラー134、CCDカメラ135、写真フィルム136を有する。CCDカメラ135は、撮像面135aに投影された像を撮影する。なお、CCDカメラ135に代えて、同様のCMOSカメラを用いることができる。写真フィルム136と撮像面135aは、それぞれクイックリターンミラー134に対して共役な位置に配置される。

【0012】

クイックリターンミラー134は、光路に対して挿入/退避される。それにより、眼底反射光Pの受光媒体が写真フィルム136とCCDカメラ135とに切り替えられる。

【0013】

CCDカメラ135の撮像面135aには、図7に示すように、多数の受光素子 G_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$)が二次元的に配設されている。受光素子 G_{ij} は、互いに直交する二方向(横方向及び縦方向)に沿ってマトリクス状に配列されている。

10

【0014】

撮像面135aには、偏光板143の一面が接触配置されている。更に、偏光板143の他面には、位相板アレイ142の一面が接触配置されている。

【0015】

位相板アレイ142は、眼底反射光Pの位相状態を変化させる。位相板アレイ142は、図7に示すように、縦横に二次元的に(マトリクス状に)配設された複数の微小な位相板144を有している。複数の位相板144は、縦横それぞれ2つずつ配列された合計4つのグループ(たとえば位相板144a~144d)を単位として機能する。位相板アレイ142は、このように4つの位相板144からなる位相板群U1が縦横に配列されたものと考えられることができる。

20

【0016】

位相板群U1の位相板144a~144dは、進相軸の角度が互いに異なっている。なお、角度は、反時計回り方向を正方向とする。

【0017】

偏光板143は、偏光軸AR1を有する。偏光板143は、偏光軸AR1の方向に振動する偏光成分のみを透過させる。

【0018】

CCDカメラ135の受光素子 G_{ij} は、縦横それぞれ2つずつ配列された合計4つのグループ(たとえば受光素子Ga~Gd)を単位として機能する。撮像面135aは、このように4つの受光素子 G_{ij} からなる受光素子群U2が縦横に配設されたものと考えられることができる。

30

【0019】

受光素子群U2の受光素子Ga~Gdは、図7に示すように、対応する位置の位相板群U1の位相板144a~144dを通過した光をそれぞれ受光する。すなわち、眼底反射光Pは、各位相板144a~144dにより位相状態が変化され、偏光板143により偏光方向が揃えられて各受光素子 G_{ij} により受光される。

【0020】

CCDカメラ135は、各受光素子 G_{ij} による受光結果に基づく信号をコンピュータに入力する。コンピュータは、この信号を解析し、眼底反射光Pに基づくストークスベクトルを求め、眼底Efの視神経線維層の厚さを算出する。

40

【0021】

【特許文献1】特表平8-508903号公報

【特許文献2】特表2004-502483号公報

【特許文献3】特開2006-204517号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0022】

50

ところで、生体被検眼の眼底の層組織の厚さを計測するには、角膜側から眼底に向かって照明光を投射する必要がある。すなわち、照明光は、角膜や水晶体を通過して眼底で反射され、再び水晶体や角膜を通過して被検眼から射出する。したがって、眼底反射光には、層組織の厚さ計測に必要な情報とともに、角膜等の光学特性の影響が含まれている。この角膜等の影響は、層組織の厚さ計測の確度を劣化させる原因の一つとなっている。

【0023】

特許文献2や特許文献3の技術では、角膜等の影響を除去することは困難である。一方、特許文献1の装置には、角膜等の影響を相殺するための構成が設けられている。しかし、そのための検出を行う光学系が別途に必要であり、更にその検出結果に基づくフィードバック制御を実行する必要がある。そのため、特許文献1の装置を実現するには、複雑な構成が要求される。また、特許文献1の装置では、上記検出を有効に行うための準備(装置の設定)を精緻に行う必要もある。

10

【0024】

この発明は、以上のような問題を解決するためになされたもので、その目的は、視神経線維層の厚さを容易にかつ高確度で計測できる眼底検査装置を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0025】

上記目的を達成するために、請求項1に記載の発明は、被検眼に円偏光の照明光を投射する照明光学系と、前記被検眼による前記照明光の眼底反射光を受光する受光光学系と、前記受光された眼底反射光の偏光状態に基づいて前記眼底の視神経乳頭領域の視神経線維層の厚さを演算する演算手段とを有する眼底検査装置であって、前記演算手段は、前記眼底の特定領域による照明光の眼底反射光の偏光状態に基づいて前記被検眼の前眼部の偏光特性を演算し、該演算された前眼部の偏光特性と前記視神経乳頭領域による照明光の眼底反射光の偏光状態とに基づいて前記視神経線維層の厚さを演算する、ことを特徴とする。

20

【0026】

また、請求項2に記載の発明は、請求項1に記載の眼底検査装置であって、前記演算手段は、前記演算された前眼部の偏光特性に基づいて前記視神経乳頭領域による照明光の眼底反射光の偏光状態に含まれる前記前眼部に起因する成分を特定し、前記特定された成分に基づいて前記視神経線維層に起因する成分を該眼底反射光の偏光状態から抽出し、前記抽出された成分に基づいて前記視神経線維層の厚さを演算する、ことを特徴とする。

30

【0027】

また、請求項3に記載の発明は、請求項1に記載の眼底検査装置であって、前記受光光学系は、進相軸方向が互いに異なる4つの位相板からなる複数の位相板群が二次元的に配列された位相板アレイと、前記位相板アレイを透過した眼底反射光の特定方向の偏光成分を透過させる偏光板と、前記位相板アレイの各位相板群の4つの位相板に対応する位置に4つの受光素子からなる受光素子群が設けられ、前記偏光板を透過した偏光成分の強度を検出する受光手段とを含み、前記演算手段は、前記位相板アレイの各位相板群の各位相板を透過した前記特定領域による眼底反射光の強度に基づいて当該位相板群を透過した該眼底反射光のストークスペクトルを演算し、該演算されたストークスペクトルに基づいて前記特定領域による眼底反射光の位相差分布を演算し、該演算された位相差分布に基づいて前記前眼部の偏光特性を演算する、ことを特徴とする。

40

【0028】

また、請求項4に記載の発明は、請求項3に記載の眼底検査装置であって、前記演算手段は、前記演算された位相差分布に基づき、前記前眼部の偏光特性として、前記前眼部の遅相軸方向と前記前眼部に起因する位相差とを演算する、ことを特徴とする。

【0029】

また、請求項5に記載の発明は、請求項4に記載の眼底検査装置であって、前記演算手段は、前記位相差分布に基づいて前記特定領域による眼底反射光の位相差の最大値及び最小値を求め、前記最大値及び前記最小値に基づいて前記前眼部に起因する位相差を演算する、ことを特徴とする。

50

【 0 0 3 0 】

また、請求項 6 に記載の発明は、請求項 3 ~ 請求項 5 のいずれか一項に記載の眼底検査装置であって、前記特定領域は、前記眼底の中心窩を含み、前記位相差分布は、前記眼底の中心窩を略中心とする円周上における位相差の分布である、ことを特徴とする。

【 0 0 3 1 】

また、請求項 7 に記載の発明は、請求項 1 ~ 請求項 6 のいずれか一項に記載の眼底検査装置であって、前記特定領域は、前記眼底の中心窩の周辺領域に位置するヘンレ線維層である、ことを特徴とする。

【 発明の効果 】

【 0 0 3 2 】

この発明の眼底検査装置によれば、眼底の特定領域による反射光の偏光状態に基づいて前眼部の偏光特性を演算し、この前眼部の偏光特性と視神経乳頭領域による反射光の偏光状態とに基づいて視神経線維層の厚さを演算するように構成されているので、前眼部の影響を除去して高確度で視神経線維層の厚さを計測することができる。

【 0 0 3 3 】

また、この発明の眼底検査装置は、演算処理によって前眼部の影響を除去するようになっているので、従来のような複雑な構成は不要であり、精緻な設定を行う必要もない。よって、視神経線維層の高確度の厚さ計測を容易に行うことが可能である。

【 発明を実施するための最良の形態 】

【 0 0 3 4 】

この発明に係る眼底検査装置の実施形態の一例について、図面を参照しながら詳細に説明する。

【 0 0 3 5 】

この実施形態の眼底検査装置は、上記特許文献 3 と同様の方式で眼底の視神経線維層の厚さを計測する装置である。更に、この眼底検査装置は、眼底の特定領域による眼底反射光に基づいて角膜等の前眼部の偏光特性による影響を求め、この影響を考慮して視神経線維層の厚さを求めるものである。

【 0 0 3 6 】

ここで、前眼部とは、眼底の前方（角膜側）に存在する被検眼の部位を意味する。したがって、角膜や水晶体のように、照明光ないしその眼底反射光の光路上に存在する部位は前眼部に含まれる。なお、この実施形態では、特に角膜の影響について説明する。

【 0 0 3 7 】

また、偏光特性とは、物体（物質）が有する特性であり、その物体を透過する光の偏光状態に影響を与える特性を意味する。角膜や眼底の層などの物体は、複屈折性を有している。複屈折は、その物体に入射した光を、互いに直交する振動方向を持つ二つの光に分離する性質である。分離後の二つの光は位相差を有する。相対的に位相が進む方向は進相軸と呼ばれ、位相が遅れる方向は遅相軸と呼ばれる。

【 0 0 3 8 】

以下、この実施形態における視神経線維装置の厚さの計測原理を説明し、その後、この計測原理を利用した眼底検査装置について説明する。

【 0 0 3 9 】

[計測原理]

この実施形態では、円偏光の照明光を被検眼に投射する。この照明光は、前述のように、前眼部を通過し、眼底に到達して反射される。この眼底反射光は、再び前眼部を經由して被検眼から射出する。眼底反射光は楕円偏光を有する。これは、角膜や視神経線維層等の複屈折によるものである。また、眼底反射光には散乱成分も含まれている。これは、視神経線維層より深部の層による散乱に起因する。なお、散乱成分は一般に微小であるので、この実施形態では無視する。

【 0 0 4 0 】

光の偏光状態は、ストークス (S t o k e s) ベクトルにより表される。ストークスベ

10

20

30

40

50

クトルは、光の偏光状態を4つの成分で表現する。ストークスベクトルを $S = (s_0, s_1, s_2, s_3)^T$ とすると (T はベクトルの転置)、 s_0 は平均強度、 s_1 は x 軸、 y 軸方向の直線偏光成分、 s_2 は 45 度、 135 度方向の直線偏光成分、 s_3 は円偏光成分を表す。散乱成分が存在するときには、 $s_0 > (s_1^2 + s_2^2 + s_3^2)^{1/2}$ となる。なお、 x 軸と y 軸は、それぞれ光の進行方向 (z 軸) に直交する座標軸である。 xyz 座標系は、三次元の直交座標系を定義する。

【0041】

図4に示す状況を考える。 xyz 座標系は上記の直交座標系である。複屈折物質 O は、(z 方向に) 厚さ d を有し、進相軸 F と遅相軸 S を有する。進相軸 F 方向の屈折率を n_1 とし、遅相軸 S 方向の屈折率を n_2 とする。また、 x 軸に対する進相軸 F の角度を θ とする。 x 軸と y 軸は直交し、進相軸と遅相軸とは直交しているので、角度 θ は、複屈折物質の遅相軸と y 軸とが成す角度でもある。なお、角度 θ は、 z 方向に向かって反時計回り方向を正方向とする。

10

【0042】

複屈折物質 O に入射した光のストークスベクトルは、式(1)に示すように、ミュラー (*Mueller*) 行列 $T \cdot C \cdot T^T$ にしたがって変化する。

【0043】

【数1】

$$\begin{pmatrix} s_0' \\ s_1' \\ s_2' \\ s_3' \end{pmatrix} = T_\theta C_\alpha T_{-\theta} \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

20

【0044】

右辺の $(s_0, s_1, s_2, s_3)^T$ は、複屈折物質 O に入射する光のストークスベクトルであり、左辺の $(s_0', s_1', s_2', s_3')^T$ は、複屈折物質 O を通過した光のストークスベクトルである。

【0045】

また、行列 T 、 C は、それぞれ、式(2)に示す行列である。角度 θ は、複屈折物質 O の進相軸 F と x 軸とが成す角度である。

30

【0046】

【数2】

$$T_\theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & -\sin 2\theta & 0 \\ 0 & \sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad C_\alpha = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \Gamma & \sin \Gamma \\ 0 & 0 & -\sin \Gamma & \cos \Gamma \end{bmatrix} \quad (2)$$

40

【0047】

ここで、 Γ は、式(3)に示すように、複屈折物質 O の厚さ d と、進相軸 F の屈折率 n_1 及び遅相軸 S の屈折率 n_2 の差 $(n_1 - n_2)$ と、光の波長 λ によって決まる位相差である。

【0048】

【数3】

$$\Gamma = \frac{d(n_1 - n_2)}{\lambda} 2\pi \quad (3)$$

50

【 0 0 4 9 】

式(1)に示すミューラー行列を $T \quad C \quad T \quad = M$ とおくとともに、角膜によるミューラー行列を M_c 、視神経線維層のミューラー行列を M_r とおく。更に、位相を保持しつつ光を反射する鏡を網膜に配置したモデルを考慮する。このとき、右円偏光の光が入射されたと仮定すると、式(1)を次の式(4)のように変形できる (Knighton RW、Huang RN、Greenfield DS: Analytical Model of Scanning Laser Polarimetry for Retinal Nerve Fiber Layer Assessment: Investigative Ophthalmology & Visual Science、February Vol. 43、No. 2 383 - 392 (2002))。

10

【 0 0 5 0 】

【数4】

$$\begin{pmatrix} s_0' \\ s_1' \\ s_2' \\ s_3' \end{pmatrix} = M_c M_r M_r M_c \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

【 0 0 5 1 】

20

ここで、網膜では、偏光状態を維持したままで光が反射すると仮定している。式(4)の右辺の行列の積を次の式(5)のように表す。

【 0 0 5 2 】

【数5】

$$M_t = M_c M_r M_r M_c \quad (5)$$

【 0 0 5 3 】

式(4)の左辺のストークスペクトルを取得すると、その s_3 の値から、角膜と視神経線維層を一つの複屈折物質をみなしたときの、厚さ d に対応する位相差 を演算できる。この位相差 は、次の式(6)のように表される。

30

【 0 0 5 4 】

【数6】

$$\Gamma = \cos^{-1} s_3' \quad (6)$$

【 0 0 5 5 】

角膜の影響が小さいと仮定できれば式(6)の位相差 で十分だが、この実施形態では、この角膜の影響を除去することにより確度の向上を図る。

【 0 0 5 6 】

また、角度 は次の式(7)により演算できる。

【 0 0 5 7 】

40

【数7】

$$\theta = 0.5 \tan^{-1} \left(-\frac{s_1'}{s_2'} \right) \quad (7)$$

【 0 0 5 8 】

次に、角膜の影響の除去について説明する。式(5)の行列 M_t から式(6)の位相差 を演算して画像化すると、眼底の黄斑部領域に特徴的なパターンが得られる。これは、黄斑部のヘンレ線維層 (Henle's outer fiber layer) の複屈折と角膜の複屈折によるものである。ヘンレ線維層は、中心窩 (黄斑部内に位置する) を中心として放射状に線維が走行した組織である。

50

【 0 0 5 9 】

図 5 は、角膜 C と ヘレン線維層 H の状態を表している。角膜 C は、進相軸 F_c と遅相軸 S_c を有する。ヘレン線維層 S は、中心窩を中心として放射状に配列された複数の遅相軸 S_{h1} 、 S_{h2} 、 S_{h3} 、 \dots を有している。中心窩を中心とする任意の半径の円 Q 上において、ヘレン線維層 H の厚さはほぼ一定である。すなわち、ヘレン線維層 H は、中心窩からの距離に応じてほぼ同心円状に厚さが変化する組織である。

【 0 0 6 0 】

図 5 から分かるように、角膜 C の遅相軸 S_c とヘレン線維層の遅相軸 S_{hi} ($i = 1, 2, \dots$ のうちのの一つ) とが一致する方向では、双方による位相の遅れが加算され、位相の遅れが大きくなる。一方、これに直交する方向では、位相の遅れと位相の進みが打ち消しあって位相差が小さくなる。

【 0 0 6 1 】

そこで、たとえば位相差 Γ_c の画像に基づいて、位相の遅れが大きい方向を特定することにより、角膜 C の遅相軸 S_c を求めることができる。

【 0 0 6 2 】

また、たとえば円 Q 上における位相差 Γ_c の最大値 Γ_{max} と最小値 Γ_{min} とを求めて次の式 (8) に代入することにより、角膜 C による位相差 Γ_c を取得できる。

【 0 0 6 3 】

【 数 8 】

$$\Gamma_c = \frac{1}{2}(\Gamma_{max} \pm \Gamma_{min}) \quad (8)$$

【 0 0 6 4 】

なお、式 (8) の「 \pm 」は、ヘレン線維層による位相の変化が角膜による位相の変化よりも大きい場合には「 $-$ 」が選択され、その逆の場合には「 $+$ 」が選択される。いずれかの場合を仮定することにより、角膜 C のミューラー行列 M_c を一意的に決定できる。

【 0 0 6 5 】

決定された角膜 C のミューラー行列 M_c の逆行列を式 (5) の両辺に左右方向から掛けることにより、次の式 (9) が得られる。

【 0 0 6 6 】

【 数 9 】

$$M_c^{-1} M_r M_c^{-1} = M_r M_r \quad (9)$$

【 0 0 6 7 】

行列 M_t は眼底反射光の検出結果から取得でき、また角膜 C のミューラー行列 M_c は上記演算で決定されるので、式 (9) により、視神経線維層のミューラー行列 M_r を演算でき、視神経線維層による位相差 Γ_r と、視神経線維層の進相軸や遅相軸の角度 (x 軸や y 軸に対する角度) θ_r を求めることができる。

【 0 0 6 8 】

なお、以上に説明した手法で解析的に演算を行ってもよいし、シミュレーションの手法 (最適化処理) を用いて演算を行ってもよい。後者の例としては、式 (5) に角膜のミューラー行列 M_c の値を代入し、視神経線維層のミューラー行列 M_r の位相差 Γ_r の値と角度 θ_r の値を変化させて、式 (5) を満足する最適な Γ_r 、 θ_r の値を探索する手法がある。

【 0 0 6 9 】

[構成]

この実施形態の眼底検査装置は、以上に説明した計測原理を利用して視神経線維層の厚さを求める。図 1 ~ 図 3 は、この実施形態に係る眼底検査装置の構成の一例を表している。

【 0 0 7 0 】

10

20

30

40

50

この眼底検査装置 1 は、たとえば特許文献 3 の眼底検査装置と同様に、眼底カメラとコンピュータを含んで構成される。このコンピュータは、たとえば汎用のコンピュータであり、マイクロプロセッサ、RAM、ROM、ハードディスクドライブ、表示デバイス、操作デバイス、通信インターフェイス等を有する。

【0071】

眼底検査装置 1 は、図 1 に示すように、制御部 10、記憶部 20、表示部 30、操作部 40、情報処理部 50 及び眼底検査部 60 を備える。

【0072】

〔眼底検査部〕

眼底検査部 60 は、上記眼底カメラを含んで構成される。眼底検査部 60 は、従来と同様の光学系を備える（図 6、図 7 を参照）。この光学系は、被検眼に円偏光の照明光を投射する照明光学系と、被検眼の眼底による照明光の反射光を受光する受光光学系を含んでいる。なお、〔計測原理〕の説明にあったように、照明光は右円偏光とするが、左円偏光の照明光を用いる構成も適用できる。

10

【0073】

眼底検査部 60 を構成する眼底カメラは、無散瞳タイプでも散瞳タイプでもよい。この眼底カメラは、照明光の眼底反射光を受光する受光手段として CCD カメラを備える。CCD カメラは、各受光素子による受光結果に基づく信号をコンピュータに入力する。なお、受光手段は CMOS カメラ等でもよい。なお、受光手段としては、受光素子が二次元的に配列された二次元光センサアレイを用いることが望ましい。

20

【0074】

また、CCD カメラの前側には、従来と同様に、位相板アレイと偏光板が設けられている。位相板アレイは、進相軸の角度が互いに異なる 4 つの位相板からなる位相板群が縦横に配列されたものである。偏光板は、偏光軸の方向に振動する偏光成分のみを透過させる偏光フィルターである。

【0075】

図 3 には、位相板アレイの一つの位相板群 70 と、偏光板（の一部）80 と、CCD カメラの一つの受光素子群 90 が示されている。位相板群 70 には、4 つの位相板 71、72、73、74 により構成される。受光素子群 90 は、4 つの受光素子 91、92、93、94 により構成される。符号 P は、照明光の眼底反射光である。受光素子 91、92、93、94 は、それぞれ、対応する位置の位相板 71、72、73、74 を通過した眼底反射光 P を受光する。受光素子 91、92、93、94 は、それぞれ、受光した眼底反射光 P の強度 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 を表す信号を出力する。

30

【0076】

〔制御部〕

制御部 10 は、眼底検査装置 1 の各部を制御する。また、制御部 10 は、眼底検査部 60 から入力される信号を受信する。また、制御部 10 は、各種の画像や情報を表示部 30 に表示させる。また、制御部 10 は、操作部 40 を用いて操作がなされたときに、その操作内容に応じた処理を眼底検査装置 1 に実行させる。また、制御部 10 は、記憶部 20 に記憶された情報を読み出す処理や、記憶部 20 に情報を記憶させる処理を行う。制御部 10 は、コンピュータ 10 のマイクロプロセッサや通信インターフェイスを含んで構成される。

40

【0077】

〔記憶部〕

記憶部 20 は、眼底検査装置 1 を制御するためのコンピュータプログラムや、各種の情報を記憶する。記憶部 20 は、ハードディスクドライブを含んで構成される。なお、RAM や ROM を含んでいてもよい。

【0078】

〔表示部〕

表示部 30 は、制御部 10 により制御されて情報を表示する表示デバイスである。表示

50

部 30 は、たとえば液晶ディスプレイ等のフラットパネルディスプレイや、CRTディスプレイなどにより構成される。

【0079】

〔操作部〕

操作部 40 は、眼底検査装置 1 を操作するときや、眼底検査装置 1 に情報を入力するときなどにオペレータにより操作される。操作部 40 は、オペレータによる操作に応じた信号を制御部 10 に入力する。制御部 10 は、この信号に基づいて眼底検査装置 1 を動作させる。操作部 40 は、たとえばキーボード、マウス、トラックボール、ジョイスティック、専用のコントロールパネルなどを含んで構成される。

【0080】

なお、表示部 30 と操作部 40 は、それぞれ個別のデバイスから構成されている必要はない。たとえば、タッチパネル式の液晶ディスプレイのように、表示デバイスと操作デバイスを一体化した装置を用いることも適宜に可能である。

【0081】

〔情報処理部〕

情報処理部 50 は、眼底検査部 60 により取得された情報に対して各種の処理を施す。情報処理部 50 は、マイクロプロセッサを含んで構成される。情報処理部 50 は、この発明の「演算手段」の一例である。情報処理部 50 には、前眼部情報演算部 51 と層厚演算部 52 が設けられている。

【0082】

〔前眼部情報演算部〕

前眼部情報演算部 51 は、眼底の特定領域による照明光の反射光の偏光状態に基づいて、前眼部の偏光特性を演算する。この演算処理を行うために、前眼部情報演算部 51 は、ストークスベクトル演算部 53、位相差分布演算部 54、前眼部遅相軸演算部 55 及び前眼部位相差演算部 56 を含んで構成される。

【0083】

なお、眼底の特定領域は、複屈折性を有しかつ進相軸や遅相軸の方向が既知である組織を含むことが望ましい。この実施形態では、特定の領域として、ヘンレ線維層を含む眼底の領域を適用する。

【0084】

〔ストークスベクトル演算部〕

ストークスベクトル演算部 53 は、眼底検査部 60 の CCD カメラから出力された信号に基づいてストークスベクトルを求める。この処理の具体例を以下に説明する。

【0085】

位相板群 70 の各位相板 71、72、73、74 による位相差を Δ とする。位相板 71、72、73、74 の進相軸の x 軸に対する角度をそれぞれ ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 、 ϕ_4 とする。眼底反射光 P のストークスベクトルを $S = (s_0, s_1, s_2, s_3)^T$ とする。受光素子群 90 の 4 つの受光素子 91、92、93、94 により検出される眼底反射光 P の強度を $I = (I_1, I_2, I_3, I_4)^T$ とする。このとき、次の式 (10) が成り立つ。

【0086】

【数 10】

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 - (1 - \cos \Delta) \sin^2 2\phi_1 & (1 - \cos \Delta) \sin 2\phi_1 \cos 2\phi_1 & -\sin \Delta \sin 2\phi_1 \\ 1 & 1 - (1 - \cos \Delta) \sin^2 2\phi_2 & (1 - \cos \Delta) \sin 2\phi_2 \cos 2\phi_2 & -\sin \Delta \sin 2\phi_2 \\ 1 & 1 - (1 - \cos \Delta) \sin^2 2\phi_3 & (1 - \cos \Delta) \sin 2\phi_3 \cos 2\phi_3 & -\sin \Delta \sin 2\phi_3 \\ 1 & 1 - (1 - \cos \Delta) \sin^2 2\phi_4 & (1 - \cos \Delta) \sin 2\phi_4 \cos 2\phi_4 & -\sin \Delta \sin 2\phi_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix}$$

(10)

10

20

30

40

50

【 0 0 8 7 】

ストークスベクトル演算部 5 3 は、眼底検査部 6 0 の C C D カメラにより得られた眼底反射光 P の強度 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 を式 (1 0) の左辺に代入し、右辺の行列の逆行列を左側から作用させることにより、眼底反射光 P のストークスベクトル $S = (s_0, s_1, s_2, s_3)^T$ を求める。

【 0 0 8 8 】

ストークスベクトルは、各受光素子群毎に演算される。各受光素子群に対応するストークスベクトルには、C C D カメラの撮像面における当該受光素子群の位置情報 (座標情報) が付与される。

【 0 0 8 9 】

なお、位相板群 7 0 と受光素子群 9 0 との位置ズレを考慮し、式 (1 0) の右辺の行列を予め求めておくことが望ましい。この行列は、たとえば、既知の偏光状態の光を入射させ、その受光結果に基づいて各行列成分を算出することで得られる。

【 0 0 9 0 】

(位相差分布演算部)

位相差分布演算部 5 4 は、ストークスベクトル演算部 5 3 により演算されたストークスベクトル $S = (s_0, s_1, s_2, s_3)^T$ に基づいて、眼底の特定領域による眼底反射光の位相差分布を求める。

【 0 0 9 1 】

そのために、位相差分布演算部 5 4 は、まず、ストークスベクトル演算部 5 3 により得られた複数 (受光素子群の個数) のストークスベクトルに基づいて、前述した位相差の画像を形成する。

【 0 0 9 2 】

次に、位相差分布演算部 5 4 は、この位相差の画像中における、眼底の特定領域に対応する画像領域を特定する。その特定手法は、オペレータによる指定を受けて行うものであってもよいし、位相差分布演算部 5 4 が自動的に行うものであってもよい。

【 0 0 9 3 】

前者の特定手法の例を説明する。制御部 1 0 は、位相差の画像を表示部 3 0 に表示させる。オペレータは、この画像を観察して、前述の特徴的なパターンを探す。この特徴的なパターンは、黄斑部領域のヘンレ線維層と角膜に起因するものである。オペレータは、操作部 4 0 を操作して、この特徴的なパターンの画像領域を指定する。この指定操作は、たとえばマウスのドラッグ操作により行うことができる。位相差分布演算部 5 4 は、眼底の特定領域に対応する画像領域として、オペレータが指定した画像領域を採用する。

【 0 0 9 4 】

後者の特定手法を説明する。記憶部 2 0 には、上記の特徴的なパターンのテンプレート画像が予め記憶されている。位相差分布演算部 5 4 は、このテンプレート画像を用いたマッチング処理を実行して、このテンプレート画像との相関が大きい画像領域を位相差の画像中から特定する。特定された画像領域を、眼底の特定領域に対応する画像領域として採用する。なお、後者の特定手法においては、テンプレート画像を用いる手法だけでなく、所定パターンの画像領域を特定するための任意の画像処理技術を適用できる。

【 0 0 9 5 】

なお、この実施形態では、眼底の特定領域としてヘンレ線維層を採用している。ヘンレ線維層は、前述のように、中心窩を中心として放射状に遅相軸が配置されており、更に、中心窩を中心とする円上における厚さがほぼ一定である。したがって、この場合には、眼底の特定領域に対応する画像領域として、中心窩を中心とする円上における位相差分布を求めれば十分である。

【 0 0 9 6 】

そのために、位相差分布演算部 5 4 は、たとえば、位相差の画像における中心窩の位置を特定し、この特定位置を中心とする円上における位相差分布を取得する。この場合においても、中心窩の位置は、オペレータが指定するようにしてもよいし、画像処理により

10

20

30

40

50

自動検出するようにしてもよい。

【0097】

また、中心窩の位置の特定を省き、直接に円の位置を特定するようにしてもよい。この場合にも、オペレータが円の位置を位相差の画像上に指定してもよいし、画像処理により円の位置を自動的に特定してもよい。

【0098】

このようにして位相差の画像から得られた画像領域は、眼底の特定領域による眼底反射光の位相差分布を表す画像である。位相差の画像から得られる画像領域は、前述のように、二次元の画像領域（位相差の二次元的な分布）であってもよいし、一次元の画像領域（位相差の一次元的な分布；たとえば円など）であってもよい。

10

【0099】

（前眼部遅相軸演算部）

前眼部遅相軸演算部55は、位相差分布演算部54により取得された眼底の特定領域における位相差分布に基づいて、前眼部の遅相軸（の方向）を求める。

【0100】

眼底の特定領域としてヘンレ線維層を適用する場合、前述のように、角膜Cの遅相軸 S_c とヘンレ線維層の遅相軸 S_{hi} とが一致する方向では位相の遅れが加算され、位相の遅れが大きくなる。

【0101】

これを利用し、前眼部遅相軸演算部55は、位相差分布演算部54により得られたヘンレ線維層に対応する画像領域に基づいて、位相の遅れが大きい方向（たとえば位相の遅れが最大となる方向）を特定し、この特定方向を角膜Cの遅相軸 S_c の方向として採用する。

20

【0102】

このとき、中心窩を中心とする円上の位相差分布について、位相差が最大となる方向を求めて角膜の遅相軸とすることができる。また、2次元的な位相差分布を解析し、中心窩を中心とする所定半径の円上において位相差が最大の方角を求め、これを角膜の遅相軸とすることもできる。

【0103】

（前眼部位相差演算部）

前眼部位相差演算部56は、位相差分布演算部54により取得された眼底の特定領域における位相差分布に基づいて、前眼部に起因する位相差を求める。

30

【0104】

前眼部位相差演算部56は、たとえば、この位相差分布における最大値 m_{max} と最小値 m_{min} を求める。そして、最大値 m_{max} と最小値 m_{min} を式(8)に代入することにより、角膜による位相差 c を算出する。

【0105】

なお、式(8)においては、ヘンレ線維層による位相変化と角膜による位相変化の大小関係に応じて「+」と「-」のいずれかが適用される。前眼部位相差演算部56は、たとえば一般的な臨床データや当該被検眼に対する検査結果などに基づいて、「+」と「-」を選択的に適用する。この選択は、オペレータが行ってもよいし、自動的に行ってよい。

40

【0106】

また、「+」と「-」の双方の場合について角膜による位相差を算出してもよい。その場合、層厚演算部52により双方の場合について層の厚さを演算して適当な値が選択されることになる。

【0107】

前眼部情報演算部51は、以上のようにして、前眼部の偏光特性として、角膜の遅相軸と、角膜による位相差とを求める。それにより、式(2)に示すように、角膜のミュラー行列 M_c が得られる。

50

【0108】

式(4)から分かるように、角膜のミューラー行列 M_c は、視神経線維層による眼底反射光の偏光状態に対応するミューラー行列 $M_c M_r M_r M_c = M_t$ に含まれる角膜に起因する成分である。このようにして、視神経乳頭領域による眼底反射光の偏光状態(M_t)に含まれる角膜に起因する成分(M_c)が特定される。このように特定される成分を前眼部成分と呼ぶことにする。なお、視神経乳頭領域とは、視神経乳頭の少なくとも一部を含む領域であり、たとえば視神経乳頭のディスク領域やカップ領域やこれらを含む領域などがある。

【0109】

(層厚演算部)

層厚演算部52は、前眼部情報演算部51により取得された前眼部の偏光特性と、眼底の視神経乳頭領域による眼底反射光の偏光状態とに基づいて、視神経線維層の厚さを演算する。そのために、層厚演算部52には、NFL成分抽出部57とNFL厚演算部58が設けられている。なお、NFLとは、(Optic) Nerve Fiver Layer、すなわち視神経線維層の略である。

10

【0110】

層厚演算部52は、視神経乳頭領域についてのみ視神経線維層の厚さを演算してもよいし、より広い領域について視神経線維層の厚さを演算してもよい。厚さを求める領域は、オペレータが指定してもよいし、自動的に指定するようにしてもよい。後者の場合、公知の画像処理技術を用いて視神経乳頭領域の検出を行う。

20

【0111】

(NFL成分抽出部)

NFL成分抽出部57は、前眼部情報演算部51により特定された前眼部成分に基づいて、視神経線維層に起因する成分(NFL成分)を眼底反射光の偏光状態から抽出する。

【0112】

そのためにまず、NFL成分抽出部57は、ストークスペクトル演算部53により演算されたストークスペクトルを式(4)の右辺に代入して、角膜と視神経線維層の双方の影響を表すミューラー行列 $M_c M_r M_r M_c = M_t$ を求める。

【0113】

角膜のミューラー行列 M_c は、前述のように前眼部情報演算部51により取得されている。NFL成分抽出部57は、角膜のミューラー行列 M_c の逆行列 M_c^{-1} を演算し、この逆行列 M_c^{-1} とミューラー行列 M_t を式(9)に代入して行列 $M_r M_r$ を求め、更に視神経線維層のミューラー行列 M_r を求める。

30

【0114】

それにより、視神経線維層による位相差 δ_r と、視神経線維層の進相軸や遅相軸の角度 θ_r が得られる。NFL成分抽出部57は、前述のシミュレーションの手法により位相差 δ_r と角度 θ_r を求めてもよい。

【0115】

ミューラー行列 M_r (位相差 δ_r 、角度 θ_r)は、NFL成分に相当する。NFL成分は、上記のように角膜の複屈折に起因する前眼部成分を取り除いて得られるもので、視神経線維層の複屈折に起因する成分である。

40

【0116】

(NFL厚演算部)

NFL厚演算部58は、NFL成分抽出部57により抽出されたNFL成分に基づいて、視神経線維層の厚さを演算する。

【0117】

NFL厚演算部58は、従来と同様に、NFL成分に基づいて楕円偏光の扁平度合いを求め、この扁平度合いに基づいて視神経線維層の厚さを演算する。なお、扁平度合いの指標としては、たとえば扁平率や離心率を用いることができる。

【0118】

50

制御部 10 は、NFL 厚演算部 58 により取得された視神経線維層の厚さを表示部 30 に表示させる。その表示態様としては、たとえば、オペレータが操作部 40 で指定した位置の厚さを数値で表示させてもよいし、厚さの分布を表す画像を表示させてもよい。後者の画像としては、たとえば、視神経線維層の厚さを色分けしたものや、等高線のように同じ厚さの部分を線で結んだものなどを用いることができる。

【0119】

[作用・効果]

以上のように構成された眼底検査装置 1 の作用と効果を説明する。

【0120】

眼底検査装置 1 によれば、視神経線維層の厚さを求めるときに、前眼部の偏光特性の影響を除去することができるので、視神経線維層の厚さを高い確度で計測することが可能である。

10

【0121】

また、眼底検査装置 1 は、従来の眼底カメラとほぼ同様の構成を有し、更に、演算処理によって前眼部の影響を除去することができるので、従来のような複雑な構成は不要であり、精緻な設定を行う必要もない。したがって、眼底検査装置 1 によれば、視神経線維層の厚さ計測を容易に行うことができる。

【0122】

[変形例]

以上に説明した実施形態は、この発明の眼底検査装置の一例に過ぎない。したがって、この発明の要旨の範囲内における任意の変形を適宜に施すことが可能である。

20

【0123】

たとえば、眼底の特定領域に対する検査と、視神経乳頭領域に対する検査は、同時に行ってもよいし、別々に行ってもよい。同時に行う場合には、特定領域と視神経乳頭領域の双方を同時に照明可能な照明光を適用する。

【図面の簡単な説明】

【0124】

【図 1】この発明に係る眼底検査装置の実施形態の構成の一例を表す概略ブロック図である。

【図 2】この発明に係る眼底検査装置の実施形態の構成の一例を表す概略ブロック図である。

30

【図 3】この発明に係る眼底検査装置の実施形態の光学系の構成の一例を表す概略図である。

【図 4】この発明に係る眼底検査装置の実施形態の計測原理を説明するための概略説明図である。

【図 5】この発明に係る眼底検査装置の実施形態の計測原理を説明するための概略説明図である。

【図 6】従来の眼底検査装置における眼底カメラの光学系の構成の一例を表す概略図である。

【図 7】従来の眼底検査装置における眼底カメラの光学系の構成の一例を表す概略図である。

40

【符号の説明】

【0125】

1 眼底検査装置

10 制御部

50 情報処理部

51 前眼部情報演算部

52 層厚演算部

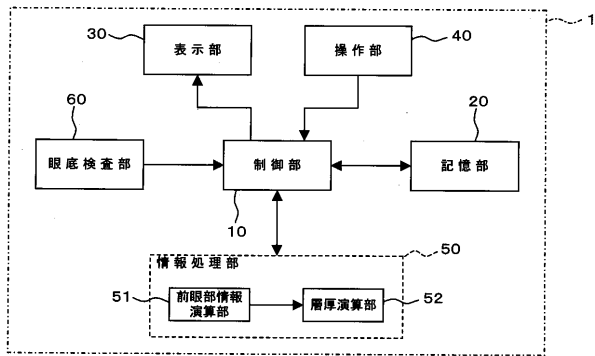
53 ストークスペクトル演算部

54 位相差分布演算部

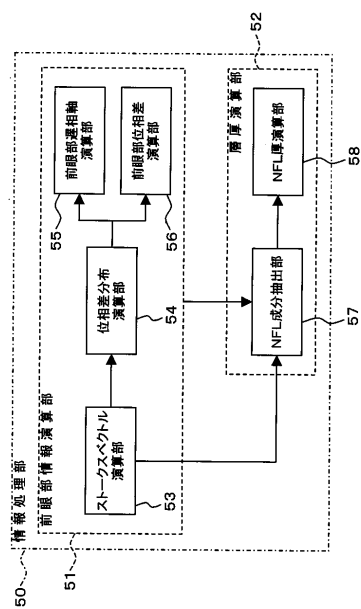
50

- 5 5 前眼部遅相軸演算部
- 5 6 前眼部位相差演算部
- 5 7 NFL成分抽出部
- 5 8 NFL厚演算部
- 6 0 眼底検査部
- 7 0 位相板群
- 7 1、7 2、7 3、7 4 位相板
- 8 0 偏光板
- 9 0 受光素子群
- 9 1、9 2、9 3、9 4 受光素子
- C 角膜
- H ヘンレ線維層

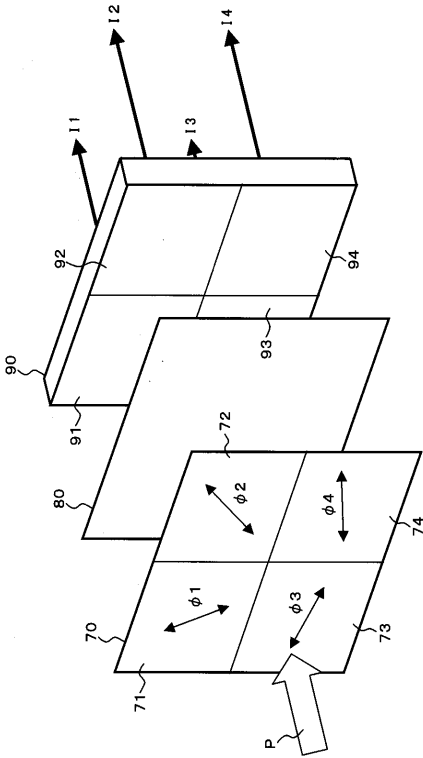
【図1】



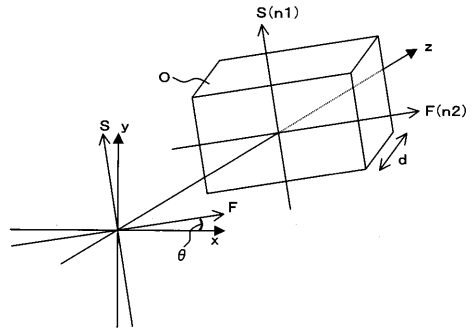
【図2】



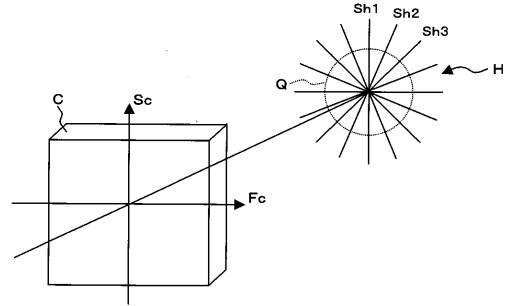
【 図 3 】



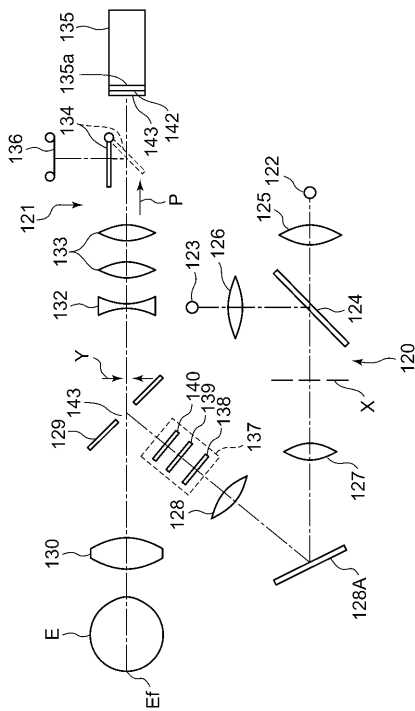
【 図 4 】



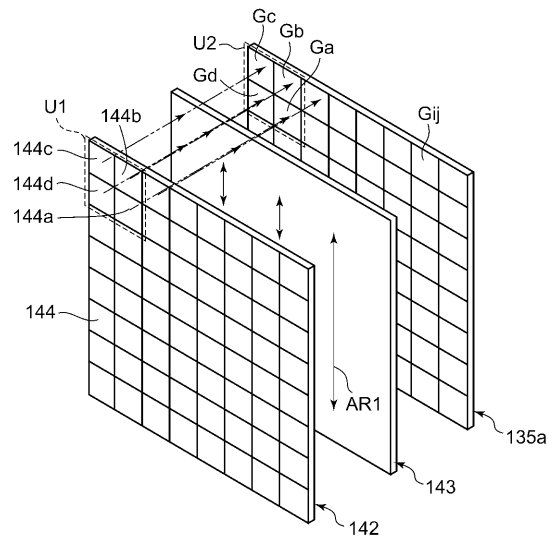
【 図 5 】



【 図 6 】



【 図 7 】



フロントページの続き

- (72)発明者 福間 康文
東京都板橋区蓮沼町7 5 番 1 号 株式会社トプコン内
- (72)発明者 塩入 隆
東京都板橋区蓮沼町7 5 番 1 号 株式会社トプコン内