



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102551660 B

(45) 授权公告日 2015. 08. 05

(21) 申请号 201110430451. 5

(22) 申请日 2011. 12. 20

(30) 优先权数据

2010-283728 2010. 12. 20 JP

(73) 专利权人 佳能株式会社

地址 日本东京都大田区下丸子 3 丁目 30 番
2 号

(72) 发明人 野里宏治

(74) 专利代理机构 北京魏启学律师事务所

11398

代理人 魏启学

(51) Int. Cl.

A61B 3/14(2006. 01)

A61B 3/12(2006. 01)

(56) 对比文件

US 2008/0225230 A1, 2008. 09. 18,

US 2008/0225230 A1, 2008. 09. 18,

US 2008/0218694 A1, 2008. 09. 11,

US 2010/0097572 A1, 2010. 04. 22,
JP 特开 2004-113405 A, 2004. 04. 15,
JP 特开 2004-59779 A, 2004. 02. 26,
CN 101869466 A, 2010. 10. 27,
CN 1245406 A, 2000. 02. 23,

审查员 张雯

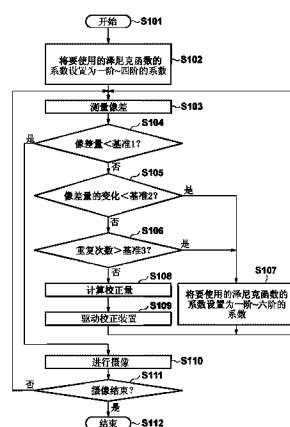
权利要求书3页 说明书12页 附图8页

(54) 发明名称

眼底摄像方法和眼底摄像设备

(57) 摘要

本发明涉及一种眼底摄像方法和眼底摄像设备。该眼底摄像设备包括：像差测量单元，用于测量通过利用测量光照射被检体所获得的反射光的像差；像差校正单元，用于根据测量出的像差来校正光的像差；控制单元，用于对像差测量单元和像差校正单元所进行的处理进行重复控制；以及改变单元，用于根据像差测量单元所获得的测量结果和控制单元所获得的控制结果的至少之一，将表示像差的预定阶次的第二函数改变为包括比预定阶次高的阶次的第二函数。像差校正单元校正由第二函数所表示的像差。



1. 一种眼底摄像设备的眼底摄像方法,所述眼底摄像设备包括:像差测量单元,用于测量通过利用测量光照射被检体所获得的反射光的像差;像差校正单元,用于根据所测量出的像差来校正光的像差;以及控制单元,用于对所述像差测量单元和所述像差校正单元所进行的处理进行重复控制,所述眼底摄像方法包括如下步骤:

第一判断步骤,用于判断所述像差测量单元所测量出的反射光的像差量是否小于第一基准值;

选择步骤,用于根据所述像差测量单元所获得的测量结果和所述控制单元所获得的控制结果的至少之一,来选择表示所述像差的包括预定阶次的第一函数和包括比所述预定阶次高的阶次的第二函数的其中之一;以及

像差校正步骤,用于基于所述选择步骤的结果来校正由所述第一函数或所述第二函数所表示的像差,

其特征在于,在开始所述处理时,所述第一判断步骤判断所述像差测量单元所测量出的反射光的、由所述第一函数所表示的像差量是否小于所述第一基准值,并且在所述第一判断步骤中判断为所述第一函数所表示的像差量小于所述第一基准值的情况下,在所述选择步骤中选择所述第一函数而不选择所述第二函数,所述眼底摄像设备基于校正后的由所述第一函数所表示的像差来对所述被检体进行摄像。

2. 根据权利要求1所述的眼底摄像方法,其特征在于,所述像差测量单元所获得的测量结果包括以下内容的至少之一:所测量出的像差量;以及从之前测量出的像差量和所测量出的像差量之间的差所获得的像差量的变化,以及

所述控制单元所获得的控制结果是以下内容的其中之一:所述处理的重复次数;以及表示从开始所述处理起所经过的时间的重复时间。

3. 根据权利要求1所述的眼底摄像方法,其特征在于,还包括:

第二判断步骤,用于在所述像差量不小于所述第一基准值时,判断所述像差量的变化是否小于第二基准值,

其中,如果判断为所述像差量的变化小于所述第二基准值,则在所述选择步骤中选择所述第二函数。

4. 根据权利要求3所述的眼底摄像方法,其特征在于,还包括第三判断步骤,所述第三判断步骤用于在所述像差量的变化不小于所述第二基准值时,判断所述像差校正单元所进行的处理的重复次数是否超过第三基准值,

其中,如果判断为所述像差校正单元所进行的处理的重复次数超过所述第三基准值,则在所述选择步骤中选择所述第二函数。

5. 根据权利要求1所述的眼底摄像方法,其特征在于,在将所述处理重复了预定重复次数或者从开始所述处理起经过了预定重复时间之后,在所述选择步骤中,根据所述像差测量单元所获得的测量结果来选择所述第二函数。

6. 根据权利要求1所述的眼底摄像方法,其特征在于,还包括计算步骤,所述计算步骤用于计算用于校正所述选择步骤中选择的函数所表示的像差的校正量。

7. 根据权利要求1所述的眼底摄像方法,其特征在于,所述像差校正单元包括第一像差校正单元和第二像差校正单元,

所述控制单元对以下处理的其中之一进行重复控制:所述像差测量单元和所述第一像

差校正单元所进行的处理；以及所述像差测量单元、所述第一像差校正单元和所述第二像差校正单元所进行的处理，

所述像差校正步骤包括以下步骤：

第一像差校正步骤，用于如果在所述选择步骤中选择所述第二函数，则使所述第一像差校正单元对由所述选择步骤中选择的所述第二函数所表示的像差中具有所述预定阶次的像差进行校正；

第二像差校正步骤，用于如果在所述选择步骤中选择所述第二函数，则使所述第二像差校正单元对由所述选择步骤中选择的所述第二函数所表示的像差中具有比所述预定阶次高的阶次的像差进行校正；以及

第三像差校正步骤，用于如果在所述选择步骤中选择所述第一函数，则使用于校正所述预定阶次的像差的所述第一像差校正单元对由包括所述预定阶次的所述第一函数所表示的像差进行校正。

8. 根据权利要求 7 所述的眼底摄像方法，其特征在于，所述第一像差校正步骤包括第一计算步骤，所述第一计算步骤用于计算所述第一像差校正单元对由所述选择步骤中选择的所述第二函数所表示的像差进行校正所利用的校正量，

所述第二像差校正步骤包括第二计算步骤，所述第二计算步骤用于计算所述第二像差校正单元对由所述选择步骤中选择的所述第二函数所表示的像差进行校正所利用的校正量，以及

所述第三像差校正步骤包括第三计算步骤，所述第三计算步骤用于计算所述第一像差校正单元对由包括所述预定阶次的所述第一函数所表示的像差进行校正所利用的校正量。

9. 根据权利要求 1 所述的眼底摄像方法，其特征在于，所述第一函数和所述第二函数是泽尼克函数。

10. 一种眼底摄像设备，包括：

像差测量单元，用于测量通过利用测量光照射被检体所获得的反射光的像差；

像差校正单元，用于根据所测量出的像差来校正光的像差；

控制单元，用于对所述像差测量单元和所述像差校正单元所进行的处理进行重复控制；

第一判断单元，用于判断所述像差测量单元所测量出的反射光的像差量是否小于第一基准值；以及

选择单元，用于根据所述像差测量单元所获得的测量结果和所述控制单元所获得的控制结果的至少之一，来选择表示所述像差的包括预定阶次的第一函数和包括比所述预定阶次高的阶次的第二函数的其中之一，

其中，所述像差校正单元基于所述选择单元的选择来校正由所述第一函数或所述第二函数所表示的像差，

其特征在于，在开始所述处理时，所述第一判断单元判断所述像差测量单元所测量出的反射光的、由所述第一函数所表示的像差量是否小于所述第一基准值，并且在所述第一判断单元判断为所述第一函数所表示的像差量小于所述第一基准值的情况下，所述选择单元选择所述第一函数而不选择所述第二函数，所述眼底摄像设备基于校正后的由所述第一函数所表示的像差来对所述被检体进行摄像。

11. 根据权利要求 10 所述的眼底摄像设备,其特征在于,所述像差测量单元所获得的测量结果包括以下内容的至少之一:所测量出的像差量;以及从之前测量出的像差量和所测量出的像差量之间的差所获得的像差量的变化,以及

所述控制单元所获得的控制结果是以下内容的其中之一:所述处理的重复次数;以及表示从开始所述处理起所经过的时间的重复时间。

12. 根据权利要求 10 所述的眼底摄像设备,其特征在于,还包括:

第二判断单元,用于在所述像差量不小于所述第一基准值时,判断所述像差量的变化是否小于第二基准值,

其中,如果判断为所述像差量的变化小于所述第二基准值,则所述选择单元选择所述第二函数。

13. 根据权利要求 12 所述的眼底摄像设备,其特征在于,还包括第三判断单元,所述第三判断单元用于在所述像差测量单元所测量出的反射光的像差量的变化不小于所述第二基准值时,判断所述像差校正单元所进行的处理的重复次数是否超过第三基准值,

其中,如果判断为所述像差校正单元所进行的处理的重复次数超过所述第三基准值,则所述选择单元选择所述第二函数。

14. 根据权利要求 10 所述的眼底摄像设备,其特征在于,在将所述处理重复了预定重复次数或者从开始所述处理起经过了预定重复时间之后,所述选择单元根据所述像差测量单元所获得的测量结果,来选择所述第二函数。

眼底摄像方法和眼底摄像设备

技术领域

[0001] 本发明涉及眼底摄像方法和眼底摄像设备。

背景技术

[0002] 近来,作为眼科摄像设备,开发了如下这样一种 SLO(扫描激光检眼镜),该 SLO 利用激光束二维地照射眼底,接收反射光并对该光进行成像。另外,作为眼科摄像设备,开发了使用低相干光干涉的摄像设备。将使用低相干光干涉的摄像设备称为 OCT(光学相干断层成像设备),其中特别地,该 OCT 的目的是用来获得眼底或其邻近区域的断层图像。开发了各种类型的 OCT,包括有 TD-OCT(时域 OCT)和 SD-OCT(谱域 OCT)。近年来,眼科摄像设备的分辨率随着照射激光的 NA 的增大而增大。

[0003] 然而,当对眼底进行摄像时,需要通过诸如角膜和晶状体等的眼睛的光学组织进行摄像。由于该原因,随着分辨率的增大,角膜和晶状体的像差变得极大影响了所拍摄图像的图像质量。

[0004] 在该情况下,对 AO(自适应光学)-SLO 和 AO-OCT 进行了研究,其中在 AO-SLO 和 AO-OCT 中,光学系统包含用于测量眼睛的像差并对其进行校正的 AO 功能。例如,非专利文献 1(Y. Zhang et al, Optics Express, Vol. 14, No. 10, 15 May 2006)公开了 AO-OCT 的例子。这种 AO-SLO 和 AO-OCT 通过夏克-哈特曼(Shack-Hartmann)波前传感器系统来测量眼睛的波前。夏克-哈特曼波前传感器系统被设计为:通过将测量光施加至眼睛并使得 CCD 照相机通过微透镜阵列接收反射光,来测量眼睛的波前。AO-SLO 或 AO-OCT 可以通过驱动可变形镜和空间相位调制器从而校正测量出的波前、并通过可变形镜和空间相位调制器对眼底进行摄像,来进行高分辨率摄像。

[0005] 眼睛的像差的大部分是诸如近视、远视和散光等的低阶像差。然而,像差还包括由于眼睛的光学系统上的细微的凹凸以及泪膜的干扰而引起的高阶像差。在由泽尼克(Zernike)函数系统表示眼睛的像差的情况下,表示像差的泽尼克函数中的大部分是表示近视、远视和散光的泽尼克二阶函数。这些函数所包括的泽尼克三阶函数和泽尼克四阶函数较少,并且所包括的诸如泽尼克五阶函数和泽尼克六阶函数等的高阶函数更少。

[0006] 通常,眼科设备中所使用的自适应光学系统(AO)利用诸如泽尼克函数的函数来对波前传感器所测量出的像差进行模型化,并通过使用该函数来计算波前校正单元的校正量。将通过利用该函数对像差进行模型化而定量获得的量称为像差量。另外,将波前校正单元通过使用该函数对像差进行校正所利用的波前校正值称为校正量。为了校正复杂的形状,需要利用具有许多阶的函数来对像差进行模型化、计算校正量并控制波前校正单元。

[0007] 然而,如果通过利用具有许多阶的函数对像差进行模型化来计算校正量,计算负荷变得非常重,并且计算时间增加,由此带来了严重的问题。特别地,针对眼睛的像差,由于眼泪的状态和屈光度调节的状态总是改变,并且针对断层图像的获取需要快速重复像差校正,因而增大处理速度非常重要。

发明内容

[0008] 本发明是考虑到以上问题而作出的,并且提供了一种能够高速进行像差校正用的运算处理的眼底摄像技术。

[0009] 根据本发明的一个方面,提供一种眼底摄像设备的眼底摄像方法,所述眼底摄像设备包括:像差测量单元,用于测量通过利用测量光照射被检体所获得的反射光的像差;像差校正单元,用于根据所测量出的像差来校正光的像差;以及控制单元,用于对所述像差测量单元和所述像差校正单元所进行的处理进行重复控制,所述眼底摄像方法包括如下步骤:改变步骤,用于根据所述像差测量单元所获得的测量结果和所述控制单元所获得的控制结果的至少之一,将表示所述像差的预定阶次的第一函数改变为包括比所述预定阶次高的阶次的第二函数;以及像差校正步骤,用于校正所述第二函数所表示的像差。

[0010] 根据本发明的另一个方面,提供一种眼底摄像设备,包括:像差测量单元,用于测量通过利用测量光照射被检体所获得的反射光的像差;像差校正单元,用于根据所测量出的像差来校正光的像差;控制单元,用于对所述像差测量单元和所述像差校正单元所进行的处理进行重复控制;以及改变单元,用于根据所述像差测量单元所获得的测量结果和所述控制单元所获得的控制结果的至少之一,将表示所述像差的预定阶次的第一函数改变为包括比所述预定阶次高的阶次的第二函数,其中,所述像差校正单元校正由所述第二函数所表示的像差。

[0011] 根据本发明,可以高速进行像差校正用的运算处理。

[0012] 通过以下(参考附图)对典型实施例的说明,本发明的其它特征将变得明显。

附图说明

[0013] 图1是示出根据第一实施例的基于包括自适应光学系统的SLO的眼底摄像设备的配置的例子图;

[0014] 图2是示出第一实施例的波前校正装置的例子的示意图;

[0015] 图3是示出波前校正装置的配置的另一例子的图;

[0016] 图4A和4B是示出夏克-哈特曼波前传感器的配置的示意图;

[0017] 图5是示出将用于测量波前的光束会聚在CCD传感器上的状态的示意图;

[0018] 图6是示出测量具有球面像差的波前的情况的示意图;

[0019] 图7是示出根据第一实施例的眼底摄像设备中的控制步骤的流程图;

[0020] 图8是示出根据第二实施例的眼底摄像设备中的控制步骤的流程图;

[0021] 图9是示出根据第三实施例的眼底摄像设备中的控制步骤的流程图;

[0022] 图10是示出根据第四实施例的基于包括自适应光学系统的SLO的眼底摄像设备的配置的例子图;以及

[0023] 图11是示出根据第四实施例的眼底摄像设备中的控制步骤的流程图。

具体实施方式

[0024] 以下将参考附图示例性地详细说明本发明的各实施例。这些实施例所述的构成元件仅是示例,并且本发明的技术范围由所附权利要求书来限定,而并不局限于以下所述的各实施例。

[0025] 第一实施例

[0026] 将参考图 1 说明根据本发明的第一实施例的眼底摄像设备的配置。注意,本实施例将举例说明以下情况:作为测量对象的被检体是眼睛,通过自适应光学系统来校正眼睛中发生的像差,并对眼底进行摄像。

[0027] 参考图 1,该设备使用波长为 840nm 的 SLD(超发光二极管)光源作为光源 101。尽管没有具体限制光源 101 的波长,但使用大约 800nm ~ 1,500nm 的波长进行眼底摄像以减轻被检体处的光的炫目并维持分辨率。尽管本实施例使用 SLD 光源,但还可以使用激光等。尽管本实施例针对眼底摄像和波前测量使用相同的光源,但还可以使用不同的光源以构成用于在光路的途中对光进行多路复用的配置。

[0028] 从光源 101 出射的光穿过单模光纤 102,并通过准直器 103 被施加为平行光束(测量光 105)。所施加的测量光 105 透过由分束器构成的光分割单元 104,并被引导至自适应光学系统。自适应光学系统包括光分割单元 106、波前传感器 115、波前校正装置 108 和用于将光引导至上述装置的反射镜 107-1 ~ 107-4。本实施例使用分束器作为光分割单元 106。反射镜 107-1 ~ 107-4 被配置为至少使得眼睛 111 的瞳孔、波前传感器 115 和波前校正装置 108 具有光学共轭关系。

[0029] 透过光分割单元 106 的测量光 105 被反射镜 107-1 和 107-2 反射并入射至波前校正装置 108。由波前校正装置 108 所反射的测量光 105 出射至反射镜 107-3。本实施例使用利用液晶装置的空间相位调制器(反射型液晶光学调制器)作为波前校正装置 108。图 2 是反射型液晶光学调制器的示意图。反射型液晶光学调制器具有使液晶分子密封在由基底部 122 和盖 123 所限定的空间中的结构。基底部 122 具有多个像素电极 124,并且盖 123 具有透明的对向电极(未示出)。在电极之间不存在电压的情况下,液晶分子呈现如“125-1”所示那样的取向状态。当在电极之间施加电压时,液晶分子转变为如“125-2”所示那样的取向状态,并改变相对于入射光的折射率。可以通过控制各像素电极 124 的电压以改变各像素的折射率,来进行空间相位调制。例如,当入射光 126 入射到反射型液晶光学调制器时,穿过液晶分子 125-2 的光示出了相对于穿过液晶分子 125-1 的光的相位滞后。结果,形成了由图 2 的虚线 127 所示那样的波前。通常,反射型液晶光学调制器由几万~几十万个像素构成。另外,反射型液晶光学调制器可以包括偏光单元,该偏光单元用于调整入射光的偏光以具有偏光特性。

[0030] 可以使用可变形镜作为波前校正装置 108 的另一例子。可变形镜可以局部地改变光的反射方向。可以使用各种类型的可变形镜。将可变形镜形成为例如具有图 3 所示的截面的装置,其中该装置包括对入射光进行反射的可变形膜状的镜面 129、基底部 128、夹持在镜面 129 和基底部 128 之间的致动器 130、以及从镜面 129 的周围支撑镜面 129 的支撑部(未示出)。致动器 130 的操作的原理包括使用静电力、磁力或压电效应。致动器 130 根据操作的原理在配置上有所不同。在 x-y 平面内,在基底部 128 上将致动器 130 二维地配置成多个阵列。选择性地驱动致动器 130,使得可以在图 3 的 z 方向上自由地使镜面 129 变形。通常,可变形镜由几十~几百个致动器构成。

[0031] 参考图 1,扫描光学系统 109 一维或二维地扫描由反射镜 107-3 和 107-4 所反射的光。在本实施例中,扫描光学系统 109 包括分别用于主扫描操作(眼底的水平方向)和副扫描操作(眼底的垂直方向)的两个检流计扫描器。针对较快的摄像操作,共振扫描器可

以用于扫描光学系统 109 的主扫描操作。为了将扫描光学系统 109 中的各扫描器设置为光学共轭的状态,扫描光学系统 109 可以具有使用诸如各扫描器之间的镜和透镜等的光学元件的配置。

[0032] 由扫描光学系统 109 进行扫描的测量光 105 穿过目镜 110-1 和 110-2,并入射至眼睛 111。入射至眼睛 111 的测量光 105 由眼底进行反射或散射。调整目镜 110-1 和 110-2 的位置,从而可以根据眼睛 111 的屈光度,利用光来最佳地照射眼睛 111。在该情况下,针对目镜部使用目镜透镜,但也可以使用球面镜等。

[0033] 由眼睛 111 的视网膜所反射或散射的光沿着入射光的路径反向传播。然后,光分割单元 106 将光的一部分反射至波前传感器 115,由此使用该光来测量光束的波前。

[0034] 本实施例使用夏克-哈特曼波前传感器作为波前传感器 115。图 4A 和 4B 是示出夏克-哈特曼波前传感器的示意图。附图标记 131 表示穿过微透镜阵列 132 并会聚在 CCD 传感器 133 上的焦平面 134 上的要测量波前的光束。图 4B 是沿着图 4A 中的线 A-A' 所截取的截面图。微透镜阵列 132 由多个微透镜 135 构成。光束 131 经由各个微透镜 135 而会聚在 CCD 传感器 133 上。结果,将光束 131 分割成与微透镜 135 的数量相对应的光斑,并进行会聚。图 5 示出光如何会聚在 CCD 传感器 133 上。将穿过各个微透镜的光束会聚成光斑 136。然后,波前传感器根据光斑 136 的位置计算所施加的光束的波前。例如,图 6 是示出测量具有球面像差的波前的情况的示意图。通过由虚线 137 所示那样的波前来形成光束 131。微透镜阵列 132 使光束 131 会聚在与波前局部垂直的方向上的位置处。图 6 示出该情况下的 CCD 传感器 133 的聚光状态。由于光束 131 具有球面像差,因而在相对于中间部偏离的状态下会聚成光斑 136。计算该位置使得可以获得光束 131 的波前。本实施例针对波前传感器 115 使用夏克-哈特曼波前传感器。然而,本发明的主旨并不局限于此。例如,可以使用诸如曲率传感器等的其它类型的波前测量单元或者用于通过逆计算根据所形成的点图像获得波前的方法。

[0035] 返回参考图 1,透过图 1 的光分割单元 106 的反射光由光分割单元 104 进行部分反射并通过准直器 112 和光纤 113 被引导至光强度传感器 114。然后,光强度传感器 114 将光转换成电信号。控制单元 117 将信号形成成为眼底图像并将该眼底图像显示在显示单元 118 上。

[0036] 波前传感器 115 连接至自适应光学控制单元 116 以将所接收到的波前传送至自适应光学控制单元 116。波前校正装置 108 也连接至自适应光学控制单元 116 以进行从自适应光学控制单元 116 所指示的调制。自适应光学控制单元 116 基于从通过波前传感器 115 获得的测量结果所获取到的波前,计算用于向着没有像差的波前进行校正用的调制量(校正量)。自适应光学控制单元 116 基于自适应光学控制单元 116 所计算出的调制量(校正量)来指示波前校正装置 108 进行调制。自适应光学控制单元 116 基于波前传感器 115 对波前的测量和根据测量结果所计算出的调制量(校正量),重复指示波前校正装置 108,由此始终进行反馈控制以获得最佳波前。在本实施例中,自适应光学控制单元 116 将测量出的波前模型化为泽尼克函数,并计算应用于函数的各阶的系数。然后,自适应光学控制单元 116 基于这些系数来计算波前校正装置 108 的调制量。当计算调制量时,自适应光学控制单元 116 将所有泽尼克阶次的系数与允许波前校正装置 108 形成各泽尼克阶次的形状的基准调制量相乘,并将所有的积相加,从而获得最终的调制量。本实施例使用具有像素数

为 600×600 的反射型液晶光学调制器作为波前校正装置 108, 因此根据以上计算方法来计算针对 360,000 个像素中的各像素的调制量。当例如使用泽尼克函数的一阶~四阶的系数进行计算时, 本实施例针对 360,000 个像素中的各像素, 将 Z_{1-1} 、 Z_{1+1} 、 Z_{2-2} 、 Z_{2-0} 、 Z_{2+2} 、 Z_{3-3} 、 Z_{3-1} 、 Z_{3+1} 、 Z_{3+3} 、 Z_{4-4} 、 Z_{4-2} 、 Z_{4-0} 、 Z_{4+2} 和 Z_{4+4} 总计 14 个系数与基准调制量相乘。当使用泽尼克函数的一阶~六阶的系数进行计算时, 本实施例针对 360,000 个像素中的各像素, 将 Z_{1-1} 、 Z_{1+1} 、 Z_{2-2} 、 Z_{2-0} 、 Z_{2+2} 、 Z_{3-3} 、 Z_{3-1} 、 Z_{3+1} 、 Z_{3+3} 、 Z_{4-4} 、 Z_{4-2} 、 Z_{4-0} 、 Z_{4+2} 、 Z_{4+4} 、 Z_{5-5} 、 Z_{5-3} 、 Z_{5-1} 、 Z_{5+1} 、 Z_{5+3} 、 Z_{5+5} 、 Z_{6-6} 、 Z_{6-4} 、 Z_{6-2} 、 Z_{6-0} 、 Z_{6+2} 、 Z_{6+4} 和 Z_{6+6} 总计 27 个系数与基准调制量相乘。由于被检眼包括在光学系统的一部分中, 因而光学系统的状态不确定。由于该原因, 通常难以通过一次像差测量和校正来达到具有低像差的波前。因此, 重复像差测量和校正以将像差校正为允许进行摄像操作的程度。

[0037] 如上所述, 眼睛的像差的大多数是低阶像差。由于该原因, 本实施例通过在开始校正时使用泽尼克函数的一阶~四阶的低阶系数来高速进行像差校正反馈 (第一像差校正反馈)。在像差校正的中途, 本实施例通过使用泽尼克函数的一阶~六阶的高阶系数来进行更精确的像差校正反馈 (第二像差校正反馈)。进行这种控制使得可以以相对高的速度进行直到达到低的像差状态为止的像差校正。这可以缩短开始摄像操作的时间。

[0038] 将参考图 7 的流程图来说明根据本实施例的眼底摄像设备中的处理。在步骤 S101 中, 眼底摄像设备开始控制操作。在步骤 S102 中, 该设备设置直到 N 阶 (N 是自然数 (以下类同)) 的系数以通过作为多项式函数的泽尼克函数来表示像差。在本实施例中, 该设备将用于像差校正的泽尼克函数的系数设置为一阶~四阶的低阶系数。然后, 该设备执行 (以下要进行说明的) 步骤 S103 ~ 步骤 S109 的自适应光学系统的基本过程。以下是自适应光学系统的基本过程的概述。在步骤 S103 中, 波前传感器 115 测量像差。在步骤 S108 中, 自适应光学控制单元 116 基于测量结果来计算校正量。在步骤 S109 中, 该设备在自适应光学控制单元 116 的控制下重复驱动波前校正装置 108。

[0039] 接着将说明自适应光学系统的各步骤的内容。在步骤 S103 中, 波前传感器 115 测量像差并获得像差量。在本实施例中, 像差量表示从所获得的像差中获得的波前扰动的总量。然而, 该量还可以表示例如相对于基准波前 (平坦波前) 的总偏移量。在步骤 S104 (第一判断步骤) 中, 自适应光学控制单元 116 判断步骤 S103 中获得的像差量是否小于预定的第一基准值 (基准 1)。第一基准值 (基准 1) 可以是眼底摄像设备固有的值, 或者可以由操作者设置。如果像差量小于第一基准值 (基准 1) (步骤 S104 中为“是”), 则处理进入步骤 S110。如果像差量等于或大于第一基准值 (基准 1) (步骤 S104 中为“否”), 则处理进入步骤 S105 以执行步骤 S105 和随后步骤中的处理。

[0040] 在步骤 S105 (第二判断步骤) 中, 自适应光学控制单元 116 从已测量出的像差量 (例如, 之前测量出的像差量) 和通过当前测量获得的像差量之间的差来获得像差量的变化。然后, 自适应光学控制单元 116 判断像差量的变化是否小于第二基准值 (基准 2)。可以例如使用表示前一像差量和当前像差量之间的差的变化率的值或操作者预先确定出的值作为第二基准值 (基准 2)。如果像差量的变化小于第二基准值 (基准 2) (步骤 S105 中为“是”), 则自适应光学控制单元 116 判断为利用当前所使用的阶次的系数很可能无法进行充分的校正。因此, 处理进入步骤 S107。在步骤 S107 中, 自适应光学控制单元 116 根据测量出的像差量和校正后测量出的像差量之间的变化, 将 N 阶多项式函数改变为包括比 N

阶高的阶次的 M 阶 (M 是满足关系 $M > N$ 的自然数 (以下类同)) 函数。自适应光学控制单元 116 将要用于像差校正的泽尼克函数的系数设置为包括一阶~六阶的高阶次的函数的系数。然后,处理返回至步骤 S103。本实施例举例说明了将一阶~六阶的系数设置为高阶系数。然而,如果将一阶~四阶的系数设置为低阶系数,则高阶系数不限于一阶~六阶的系数。例如,可以设置包括一阶~四阶的系数的一阶~五阶的系数或者一阶~六阶的系数。另外,六阶系数并不被限制为上限系数,并且要使用的系数可以包括更高阶的系数。

[0041] 在步骤 S103 和随后的步骤中,自适应光学控制单元 116 通过使用包括之前执行的步骤 S107 中所设置的高阶系数的函数来进行相同的像差校正处理。

[0042] 如果自适应光学控制单元 116 在步骤 S105 中判断为像差量的变化等于或大于第二基准值 (基准 2) (步骤 S105 中为“否”),则该单元判断为与包括当前使用的阶次的函数相对应的像差校正是充分的。因此,自适应光学控制单元 116 使处理进入步骤 S106 以在不改变当前所使用的阶次的系数的情况下继续进行校正。

[0043] 在步骤 S106 (第三判断步骤) 中,自适应光学控制单元 116 判断从开始像差校正起的校正控制的重复次数是否超过第三基准值 (基准 3)。如果重复次数超过第三基准值 (基准 3) (步骤 S106 中为“是”),则自适应光学控制单元 116 使处理进入步骤 S107。在步骤 S107 中,自适应光学控制单元 116 根据波前传感器 115 所获得的测量结果,将具有预定阶次的函数 (第一函数) 改变为包括比预定阶次高的阶次的函数 (第二函数)。在该情况下,波前传感器 115 所获得的测量结果包括以下的至少之一:波前传感器 115 所测量出的像差量;从已测量出的像差量和波前传感器 115 所测量出的像差量之间的差所获得的像差量的变化。自适应光学控制单元 116 将要使用的泽尼克函数的系数例如改变为阶次包括高阶即一阶~六阶的函数的系数,并使处理返回至步骤 S103。尽管以上说明举例说明了步骤 S106 中自适应光学控制单元 116 使用校正控制的重复次数作为第三基准所获得的控制结果,但本发明的主旨并不局限于此。例如,可以通过使用表示从开始校正控制处理起所经过的时间的重复时间作为第三基准来获得控制结果。自适应光学控制单元 116 包括能够测量从开始处理起所经过的时间的计时单元 (例如,计时器),并判断从开始校正控制处理起是否经过了预定重复时间 (S106)。在从开始处理起经过了预定重复时间之后 (步骤 S106 中为“是”),处理进入步骤 S107。在步骤 S107 中,自适应光学控制单元 116 根据波前传感器 115 所获得的测量结果,执行用于将具有预定阶次的函数 (第一函数) 改变为包括比预定阶次高的阶次的函数 (第二函数) 的处理。

[0044] 如果自适应光学控制单元 116 在步骤 S106 中判断为从开始像差校正起的校正控制的重复次数等于或小于第三基准值 (基准 3) (步骤 S106 中为“否”),则处理进入步骤 S108。在步骤 S108 中,自适应光学控制单元 116 计算用于校正由改变后的函数所表示的像差的校正量。在步骤 S109 中,该设备在自适应光学控制单元 116 的控制下驱动波前校正装置 108,并执行用于校正由改变后的函数所表示的像差的校正处理。然后,处理返回至步骤 S103。该设备重复步骤 S103~步骤 S109 的处理,直到自适应光学控制单元 116 在步骤 S104 中判断为像差量小于第一基准值 (基准 1) 为止。

[0045] 在步骤 S110 中,眼底摄像设备对眼睛的眼底进行摄像,并在步骤 S111 中判断是否终止处理。如果没有输入终止请求 (步骤 S111 中为“否”),则处理返回至步骤 S103 以进行步骤 S103~步骤 S109 的自适应光学系统中的处理并在步骤 S110 中进行摄像。在图 7 所

示的眼底摄像设备的控制操作的例子中,该设备顺次进行用于摄像的处理和用于像差校正的处理。然而,还可以并行进行这两个处理。如果设备在步骤 S111 中确认了终止请求(步骤 S111 中为“是”),则在步骤 S112 中,设备终止控制操作。

[0046] 在像差校正处理中,由于调制量(校正量)的计算时间占据总处理时间的比率非常高,因而计算量的减少在使处理速度加快方面是非常有效的。通过使用泽尼克函数的一阶~四阶的系数计算调制量所花费的时间与通过使用泽尼克函数的一阶~六阶的系数计算调制量所花费的时间相差了几乎两倍。如本实施例那样在开始校正时通过使用泽尼克函数的一阶~四阶的系数进行校正将极大地使处理的速度加快。如果所测量出的像差的大部分是与泽尼克函数的一阶~四阶相对应的像差,则可以通过使用泽尼克函数的一阶~四阶的系数来充分地校正像差。因此,处理从步骤 S104 进入步骤 S110 以允许快速开始摄像。如果通过使用泽尼克函数的一阶~四阶的系数无法进行充分的校正,则该设备通过使用包括泽尼克函数的高阶的阶次的系数来仅对未能校正的残余像差进行处理,因此可以以少的校正次数实现摄像的就绪状态。进行这种处理,从而使得与从开始处理起使用包括高阶系数的系数的重复控制相比,可以更快速地达到允许进行摄像的像差状态。本实施例使用泽尼克函数来对像差进行模型化。然而,同样应用于设备使用其它函数系统的情况。

[0047] 本实施例允许根据校正状态使用适当的校正方法,因此可以使像差校正处理的速度加快并实现高速摄像。

[0048] 第二实施例

[0049] 将参考图 8 的流程图来说明根据第二实施例的眼底摄像设备中的处理。基本设备配置与第一实施例相同。本实施例的特征为:通过使用与被检眼的像差中的较大像差相对应的系数作为像差校正中的支配系数来进行像差校正。在步骤 S201 中,眼底摄像设备开始控制操作。在步骤 S213 中,设备测量校正之前的像差。自适应光学控制单元 116 通过使用泽尼克函数的一阶~六阶来对测量出的像差进行模型化,并检查模型化后的项(阶次)中具有大的系数的项(阶次)。在步骤 S202 中,设备将步骤 S213 中检查到的具有大的值的项(阶次)的系数设置为要用于校正控制的系数。然后,设备执行自适应光学系统中的基本过程。

[0050] 以下是自适应光学系统中的基本过程的概述。在步骤 S203 中,波前传感器 115 测量像差。在步骤 S208 中,自适应光学控制单元 116 基于测量结果来计算校正量。在步骤 S209 中,设备在自适应光学控制单元 116 的控制下重复驱动波前校正装置 108。接着将说明自适应光学系统的各步骤的内容。在步骤 S203 中,波前传感器 115 测量像差并获得像差量。

[0051] 在步骤 S204 中,自适应光学控制单元 116 判断步骤 S203 中获得的像差量是否小于预定的第一基准值(基准 1)。第一基准值(基准 1)可以是眼底摄像设备固有的值,或者可以由操作者设置。如果像差量小于第一基准值(基准 1)(步骤 S204 中为“是”),则处理进入步骤 S210。如果像差量等于或大于第一基准值(基准 1)(步骤 S204 中为“否”),则处理进入步骤 S205 以执行步骤 S205 和随后步骤中的处理。

[0052] 之后,在步骤 S205 中,自适应光学控制单元 116 判断像差量的变化是否超过第二基准值(基准 2)。如果像差量的变化小于第二基准值(基准 2)(步骤 S205 中为“是”),则自适应光学控制单元 116 判断为利用当前使用的阶次的系数很可能无法进行充分的校正。

因此,处理进入步骤 S207。在步骤 S207 中,自适应光学控制单元 116 将要使用的泽尼克函数的系数改变为具有一阶~六阶的高阶次的函数(具有高阶校正系数的函数)的系数,并使处理返回至步骤 S203。在步骤 S203 和随后的步骤中,自适应光学控制单元 116 通过使用步骤 S207 中改变后的具有高阶次的函数来进行相同的像差校正处理。

[0053] 如果自适应光学控制单元 116 在步骤 S205 中判断为像差量的变化等于或大于第二基准值(基准 2)(步骤 S205 中为“否”),则该单元判断为与当前使用的函数的系数相对应的像差校正是充分的。因此,自适应光学控制单元 116 使处理进入步骤 S206 以在不改变当前使用的阶次的系数的情况下继续进行校正。

[0054] 在步骤 S206 中,自适应光学控制单元 116 判断从开始像差校正起的校正控制的重复次数是否超过第三基准值(基准 3)。在该情况下,第三基准值(基准 3)是预定常数 N(N 是等于或大于 2 的自然数)。如果重复次数超过第三基准值(基准 3)(步骤 S206 中为“是”),则自适应光学控制单元 116 使处理进入步骤 S207。在步骤 S207 中,自适应光学控制单元 116 将要使用的泽尼克函数的系数改变为阶次包括高阶即一阶~六阶的系数(高阶校正系数),并使处理返回至步骤 S203。

[0055] 如果自适应光学控制单元 116 在步骤 S206 中判断为从开始像差校正起的校正控制的重复次数等于或小于第三基准值(基准 3)(步骤 S206 中为“否”),则处理进入步骤 S208。在步骤 S208 中,自适应光学控制单元 116 计算校正量。在步骤 S209 中,该设备在自适应光学控制单元 116 的控制下驱动波前校正装置 108。然后,处理返回至步骤 S203。设备重复步骤 S203~步骤 S209 的处理,直到自适应光学控制单元 116 在步骤 S204 中判断为像差量小于第一基准值(基准 1)为止。

[0056] 眼底摄像设备在步骤 S210 中对眼睛的眼底进行摄像,并在步骤 S211 中判断是否终止处理。如果没有输入终止请求(步骤 S211 中为“否”),则处理返回至步骤 S203 以进行步骤 S203~步骤 S209 的自适应光学系统中的处理并在步骤 S210 中进行摄像。在图 8 所示的眼底摄像设备的控制操作的例子中,该设备顺次进行用于摄像的处理和用于像差校正的处理。然而,还可以并行进行这两个处理。如果设备在步骤 S211 中确认了终止请求(步骤 S211 中为“是”),则设备在步骤 S212 中终止控制操作。

[0057] 将开始校正时要校正的阶次限制为像差较大的部分,这使得可以极大地使处理的速度加快。由于像差较大的阶次是校正对象,因而通过校正这些阶次来达到允许进行摄像的像差状态的可能性极高。这使得可以快速开始摄像。即使无法利用初始设置来校正像差,但由于设备仅校正未能校正的残余像差,因而与从开始处理起使用包括高阶次的阶次的系数的重复控制相比,可以更快速地达到允许进行摄像的像差状态。本实施例使用泽尼克函数来对像差进行模型化。同样应用于设备使用其它函数系统的情况。

[0058] 本实施例允许根据被检眼的像差状态来使用适当的校正方法,因此可以使像差校正处理的速度加快并实现高速摄像。

[0059] 第三实施例

[0060] 将参考图 9 的流程图来说明根据第三实施例的眼底摄像设备中的处理。基本设备配置与第一实施例相同。本实施例的特征为:使校正控制的速度加快,以在用于在直到允许进行眼底摄像的像差为止的校正完成之后维持低像差状态的配置中提高维持精度。

[0061] 在步骤 S301 中,眼底摄像设备开始控制操作。在步骤 S302 中,设备设置直到 N 阶

为止的系数以利用作为多项式函数的泽尼克函数来表示像差。在本实施例中,设备将要用于像差校正的泽尼克函数的系数设置为一阶~四阶的低阶系数。然后,设备执行(将在以下进行说明的)步骤 S303~步骤 S309 的自适应光学系统中的基本过程。以下是自适应光学系统中的基本过程的概述。在步骤 S303 中,波前传感器 115 测量像差。在步骤 S308 中,自适应光学控制单元 116 基于测量结果来计算校正量。在步骤 S309 中,设备在自适应光学控制单元 116 的控制下重复驱动波前校正装置 108。

[0062] 接着将说明自适应光学系统的各步骤的内容。在步骤 S303 中,波前传感器 115 测量像差并获得像差量。

[0063] 在步骤 S304 中,自适应光学控制单元 116 判断步骤 S303 中获得的像差量是否小于预定的第一基准值(基准 1)。第一基准值(基准 1)可以是眼底摄像设备固有的值或者可以由操作者来设置。如果像差量小于第一基准值(基准 1)(步骤 S304 中为“是”),则处理进入步骤 S310。如果像差量等于或大于第一基准值(基准 1)(步骤 S304 中为“否”),则处理进入步骤 S305 以执行步骤 S305 和随后步骤中的处理。如第一实施例的步骤 S105 和 S106 中的处理那样,自适应光学控制单元 116 在步骤 S305 和 S306 中判断像差量的变化率和重复次数。然后,自适应光学控制单元 116 将各值与相应的基准值进行比较。如果它们相互一致(步骤 S305 中为“是”以及步骤 S306 中为“是”),则处理进入步骤 S307。在步骤 S307 中,自适应光学控制单元 116 根据所测量出的像差量和校正之后测量出的像差量之间的变化,将 N 阶(N 是自然数)函数改变为包括比 N 阶高的阶次的 M 阶(M 是满足关系 $M > N$ 的自然数)函数。自适应光学控制单元 116 将要使用的泽尼克函数的系数设置为包括一阶~六阶的高阶函数的系数。然后,处理返回至步骤 S303。本实施例举例说明了将一阶~六阶的系数设置为高阶系数。然而,如果将一阶~四阶的系数设置为低阶系数,则高阶系数不限于一阶~六阶的系数。例如,可以设置包括一阶~四阶的系数的一阶~五阶的系数或者一阶~六阶的系数。另外,六阶系数并不被限制为上限系数,并且要使用的系数可以包括更高阶的系数。

[0064] 如果自适应光学控制单元 116 在步骤 S305 和 S306 中与各基准值进行比较时判断为各值与所设置的条件不一致(步骤 S305 中为“否”并且步骤 S306 中为“否”),则处理进入步骤 S308。在步骤 S308 中,自适应光学控制单元 116 计算校正量。在步骤 S309 中,设备在自适应光学控制单元 116 的控制下驱动波前校正装置 108。然后,处理返回至步骤 S303。设备重复步骤 S303~步骤 S309 的处理,直到自适应光学控制单元 116 在步骤 S304 中判断为像差量小于第一基准值(基准 1)为止。

[0065] 眼底摄像设备在步骤 S310 中对眼睛的眼底进行摄像,并在步骤 S311 中判断是否终止处理。如果设备在步骤 S311 中确认了终止请求(步骤 S311 中为“是”),则设备在步骤 S312 中终止控制操作。

[0066] 如果自适应光学控制单元 116 在步骤 S311 中判断为没有输入终止请求(步骤 S311 中为“否”),则处理进入步骤 S314。在步骤 S314 中,自适应光学控制单元 116 选择呈现出相对于测量出的像差存在大的变化(波动)的阶次的系数,并将该阶次的系数设置为要用于校正的系数。可以选择呈现大的波动量的任意数量的系数或与至少预定波动量相对应的阶次的系数作为要用于校正的系数。在测量例如散瞳后的眼睛时,由于眼睛的折射调整总是波动,因而需要跟踪该折射状态以进行具有高的图像质量的摄像。在该情况下,由于

低阶像差极大地波动,因而使用低阶系数进行像差校正提高了跟踪性能。已知高阶像差根据泪液的状态而波动。因此,如果高阶像差极大地波动,则可以通过使用高阶系数来进行像差校正。

[0067] 在设置系数之后,设备在步骤 S303 和随后的步骤中进行自适应光学系统的基本处理,然后在步骤 S310 中进行接下来的摄像操作。在图 9 所示的眼底摄像设备的控制操作的例子中,设备顺次进行用于摄像的处理和用于像差校正的处理。然而,可以并行地进行这两个处理。

[0068] 本实施例提高了连续摄像操作时的像差校正的跟踪性能,因此可以在短时间内拍摄多个高质量图像。

[0069] 第四实施例

[0070] 将参考图 10 来说明根据第四实施例的眼底摄像设备的配置。图 10 所示的基本配置与第一实施例的眼底摄像设备的配置相同,并且相同的附图标记表示相同的构成元件。在根据第四实施例的眼底摄像设备中,波前校正装置 108 由第一波前校正装置 108-1 和第二波前校正装置 108-2 构成。眼底摄像设备包括用于将第一波前校正装置 108-1 与第二波前校正装置 108-2 光学耦合的反射镜 107-5 和 107-6。在该情况下,第一波前校正装置 108-1 被设计为主要校正低阶像差。例如,包括少量元件的可变形镜适于用作该装置。第二波前校正装置 108-2 被设计为校正包括高阶像差的像差。包括大量元件的可变形镜或使用液晶装置的空间相位调制器(反射型液晶光学调制器)适于用作该装置。自适应光学控制单元 116 重复控制波前传感器 115 和第一波前校正装置 108-1 所进行的处理或者波前传感器 115 以及第一和第二波前校正装置 108-1 和 108-2 所进行的处理。

[0071] 将参考图 11 的流程图来说明根据第四实施例的眼底摄像设备中的处理。在步骤 S401 中,眼底摄像设备开始控制操作。在步骤 S402 中,设备设置直到 N 阶(N 是自然数)为止的系数以利用作为多项式函数的泽尼克函数来表示像差。在本实施例中,设备将要用于像差校正的泽尼克系数设置为一阶和二阶的系数。然后,设备执行(将在以下进行说明的)步骤 S403 ~ S409 的自适应光学系统中的基本过程。以下是自适应光学系统中的基本过程的概述。在步骤 S403 中,波前传感器 115 测量像差。在步骤 S408(第一计算步骤)中,自适应光学控制单元 116 基于测量结果来计算第一波前校正装置 108-1 的校正量。注意,在步骤 S408 中,自适应光学控制单元 116 不计算第二波前校正装置 108-2 的校正量。将计算校正量的对象限制为第一波前校正装置 108-1,这使得可以减少计算量并极大地使处理速度加快。在步骤 S409 中,设备在自适应光学控制单元 116 的控制下重复驱动第一波前校正装置 108-1。

[0072] 接着将说明自适应光学系统的各步骤的内容。在步骤 S403 中,波前传感器 115 测量像差并获得像差量。在步骤 S404 中,自适应光学控制单元 116 判断步骤 S403 中获得的像差量是否小于预定的第一基准值(基准 1)。第一基准值(基准 1)可以是眼底摄像设备固有的值或者可以由操作者来设置。如果像差量小于第一基准值(基准 1)(步骤 S404 中为“是”),则处理进入步骤 S410。如果像差量等于或大于第一基准值(基准 1)(步骤 S404 中为“否”),则处理进入步骤 S405 以执行步骤 S405 和随后步骤中的处理。

[0073] 如第一实施例的步骤 S105 和 S106 中的处理那样,自适应光学控制单元 116 在步骤 S405 和 S406 中判断像差量的变化率和重复次数。然后,自适应光学控制单元 116 将各

值与相应的基准值进行比较。如果它们相互一致（步骤 S405 中为“是”以及步骤 S406 中为“是”），则处理进入步骤 S407。在步骤 S407 中，自适应光学控制单元 116 根据所测量出的像差量和校正之后测量出的像差量之间的变化，将 N 阶（N 是自然数）函数改变为包括比 N 阶高的阶次的 M 阶（M 是满足关系 $M > N$ 的自然数）函数。自适应光学控制单元 116 将要使用的泽尼克函数的系数设置为包括一阶～六阶的高阶函数的系数。本实施例举例说明了将一阶～六阶的系数设置为高阶系数。然而，如果将一阶和二阶的系数设置为低阶系数，则高阶系数不限于一阶～六阶的系数。例如，可以设置包括一阶和二阶的系数的一阶～三阶的系数、一阶～四阶的系数以及一阶～五阶或一阶～六阶的系数。另外，六阶系数并不被限制为上限系数，并且要使用的系数可以包括更高阶的系数。作为高阶的 M 阶通常不需要包括作为低阶的 N 阶的所有系数。如果例如将一阶和二阶的系数设置为 N 阶的系数，则可以通过以包括作为 N 阶系数的一部分的二阶系数以及比 N 阶高的阶次（例如，三阶和四阶）的系数的方式设置系数，来定义表示像差的函数的系数。

[0074] 如果自适应光学控制单元 116 在步骤 S405 和 S406 中与各基准值进行比较时判断为各值与所设置的条件不一致（步骤 S405 中为“否”并且步骤 S406 中为“否”），则自适应光学控制单元 116 判断为不改变由具有预定阶次（例如，N 阶）的多项式所表示的函数（第一函数）。

[0075] 处理进入步骤 S408。在步骤 S408（第三计算步骤）中，自适应光学控制单元 116 计算第一波前校正装置 108-1 的校正量。在步骤 S409（第三像差校正步骤）中，设备在自适应光学控制单元 116 的控制下驱动第一波前校正装置 108-1 以基于步骤 S408 中计算出的校正量来校正预定阶次（例如，N 阶）的像差。然后，处理返回至步骤 S403。设备重复步骤 S403～步骤 S409 的处理，直到自适应光学控制单元 116 在步骤 S404 中判断为像差量小于第一基准值（基准 1）为止。

[0076] 眼底摄像设备在步骤 S410 中对眼睛的眼底进行摄像，并在步骤 S412 中终止处理。如第一实施例中的步骤 S111 中那样，设备可以在步骤 S412 之前检查摄像是否终止，并进行连续摄像。

[0077] 在步骤 S407 中，在改变泽尼克系数时，设备将要使用的函数改变为包括比函数（第一函数）的预定阶次（例如，N 阶）高的阶次（例如，M 阶（M 是满足关系 $M > N$ 的自然数））的函数（第二函数）。然后，处理进入步骤 S415。尽管步骤 S415～步骤 S420 的处理与上述自适应光学系统中的基本过程相同，但二者的不同之处在于第一波前校正装置 108-1 和第二波前校正装置 108-2 均是波前校正用的对象。

[0078] 在步骤 S415 中，波前传感器 115 测量像差并获得像差量。在步骤 S416 中，自适应光学控制单元 116 判断步骤 S415 中获得的像差量是否小于预定的第一基准值（基准 1）。如果像差量小于第一基准值（基准 1）（步骤 S416 中为“是”），则处理进入步骤 S410。在步骤 S410 中对眼底进行摄像之后，设备在步骤 S412 中终止处理。

[0079] 如果设备在步骤 S416 中判断为像差量等于或大于第一基准值（基准 1）（步骤 S416 中为“否”），则处理进入步骤 S417 以执行步骤 S417 和随后步骤中的处理。

[0080] 在步骤 S417（第一计算步骤）中，设备通过具有比预定阶次高的阶次的系数的函数来表示所测量出的像差。然后，自适应光学控制单元 116 计算第一波前校正装置 108-1（第一像差校正单元）对函数所表示的像差进行预定阶次的像差校正所利用的校正

量。由于第一波前校正装置 108-1 仅校正低阶像差,因而自适应光学控制单元 116 在步骤 S417 中仅计算针对步骤 S415 中测量出的像差中的低阶像差的校正量。

[0081] 在步骤 S418(第二计算步骤)中,设备通过具有比预定阶次高的阶次的系数的函数来表示所测量出的像差。自适应光学控制单元 116 计算第二波前校正装置 108-2(第二像差校正单元)对函数所表示的像差进行比预定阶次高的阶次的像差校正所利用的校正量。由于第二波前校正装置 108-2 仅校正高阶像差,因而自适应光学控制单元 116 在步骤 S418 中仅计算针对步骤 S415 中测量出的像差中的高阶像差的校正量。

[0082] 在步骤 S419(第一像差校正步骤)中,设备在自适应光学控制单元 116 的控制下驱动第一波前校正装置 108-1 以对由包括改变后的高阶次的系数的函数所表示的像差中预定阶次的像差进行校正。在步骤 S420(第二像差校正步骤)中,设备驱动第二波前校正装置 108-2,以对由包括改变后的高阶次的系数的函数所表示的像差中具有比预定阶次高的阶次的像差进行校正。

[0083] 在步骤 S415 和随后步骤中的处理中,设备被配置为同时控制两个波前校正装置。然而,设备可以被配置为在步骤 S415 和随后步骤中通过仅使用第二波前校正装置来进行像差校正。在该情况下,在步骤 S408 和 S409 中,第二波前校正装置对包括未能由第一波前校正装置充分校正的低阶和高阶像差的像差进行校正。

[0084] 根据本实施例,可以有效控制多个波前校正装置并快速拍摄高质量图像。

[0085] 其它实施例

[0086] 还可以利用读出并执行记录在存储器装置上的程序以进行上述实施例的功能的系统或设备的计算机(或者 CPU 或 MPU 等装置)和通过下面的方法来实现本发明的各方面,其中,系统或设备的计算机通过例如读出并执行记录在存储器装置上的程序以进行上述实施例的功能来进行上述方法的各步骤。由于该目的,例如经由网络或者通过用作存储器装置的各种类型的记录介质(例如,计算机可读介质)将该程序提供给计算机。

[0087] 尽管已经参考典型实施例说明了本发明,但是应该理解,本发明不限于所公开的典型实施例。所附权利要求书的范围符合最宽的解释,以包含所有这类修改、等同结构和功能。

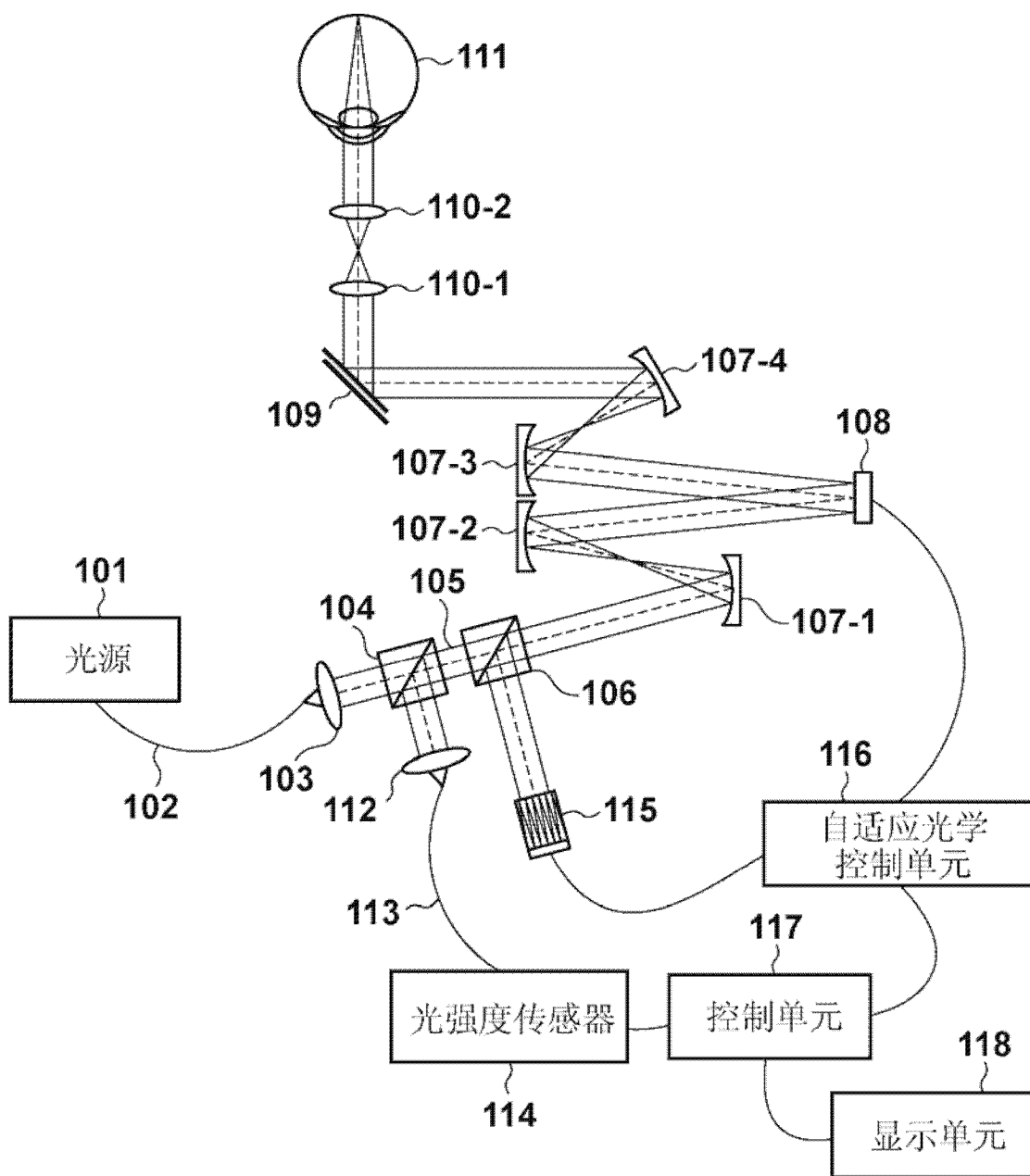


图 1

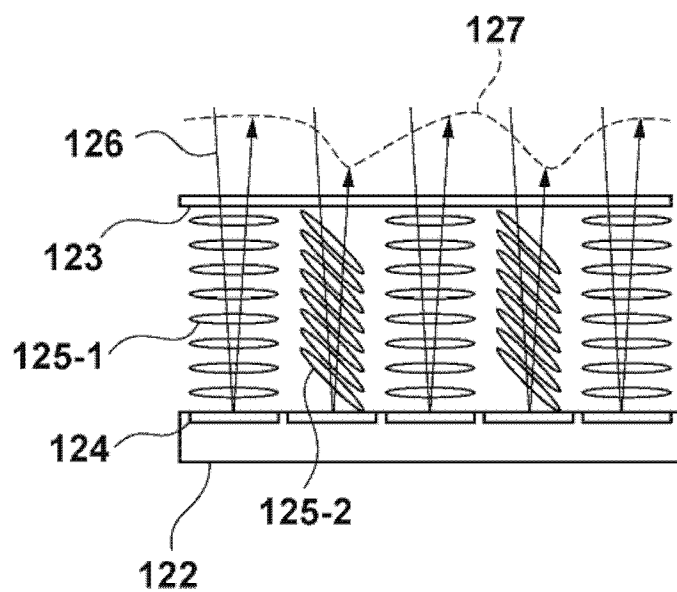


图 2

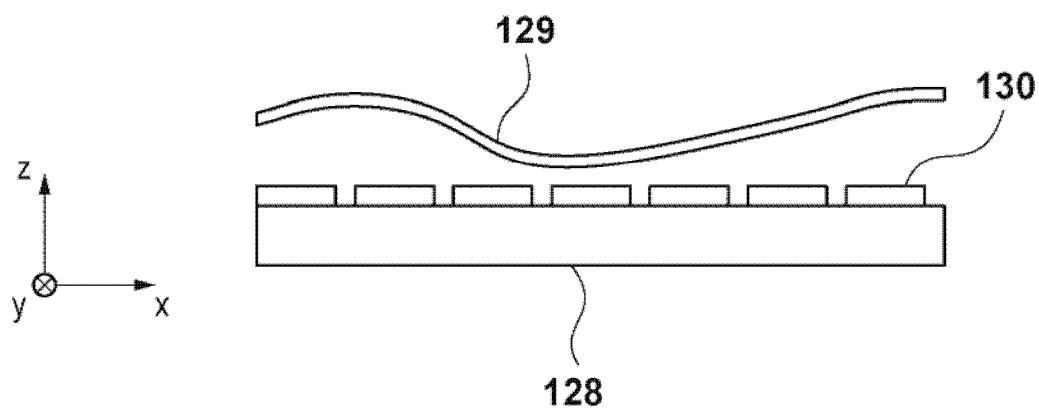


图 3

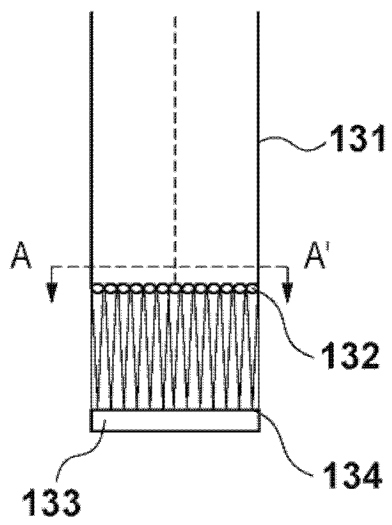


图 4A

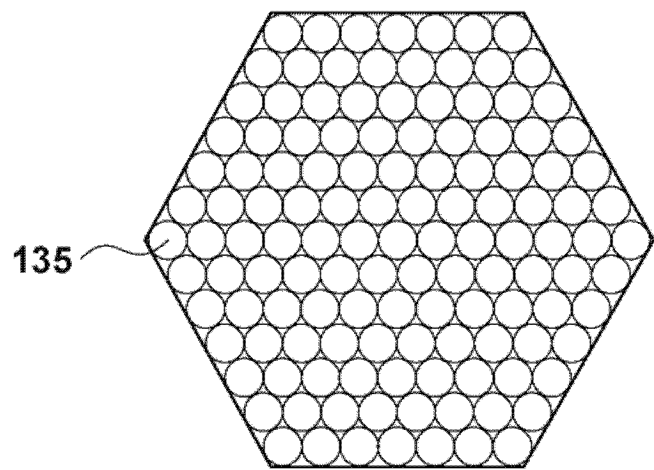


图 4B

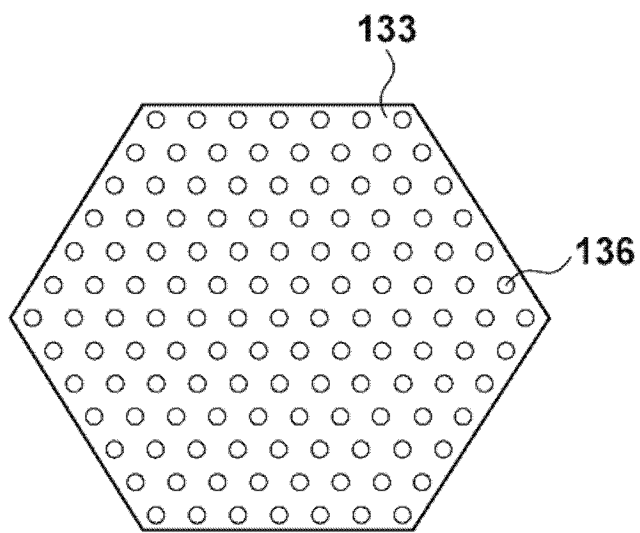


图 5

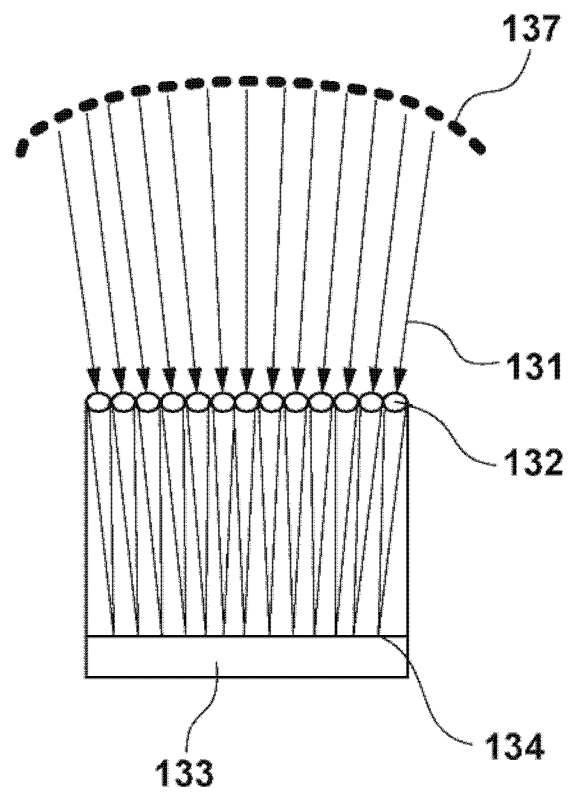


图 6

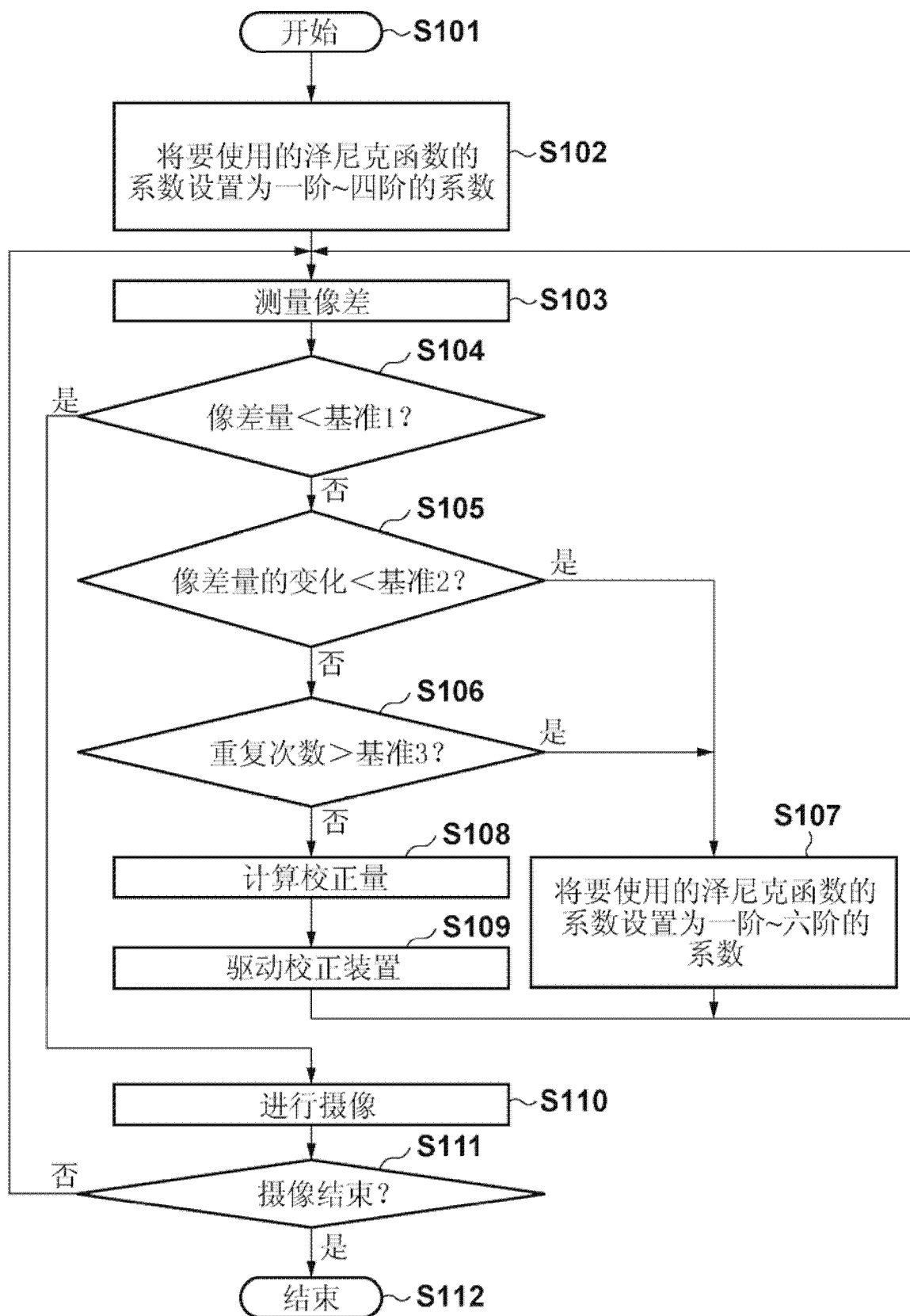


图 7

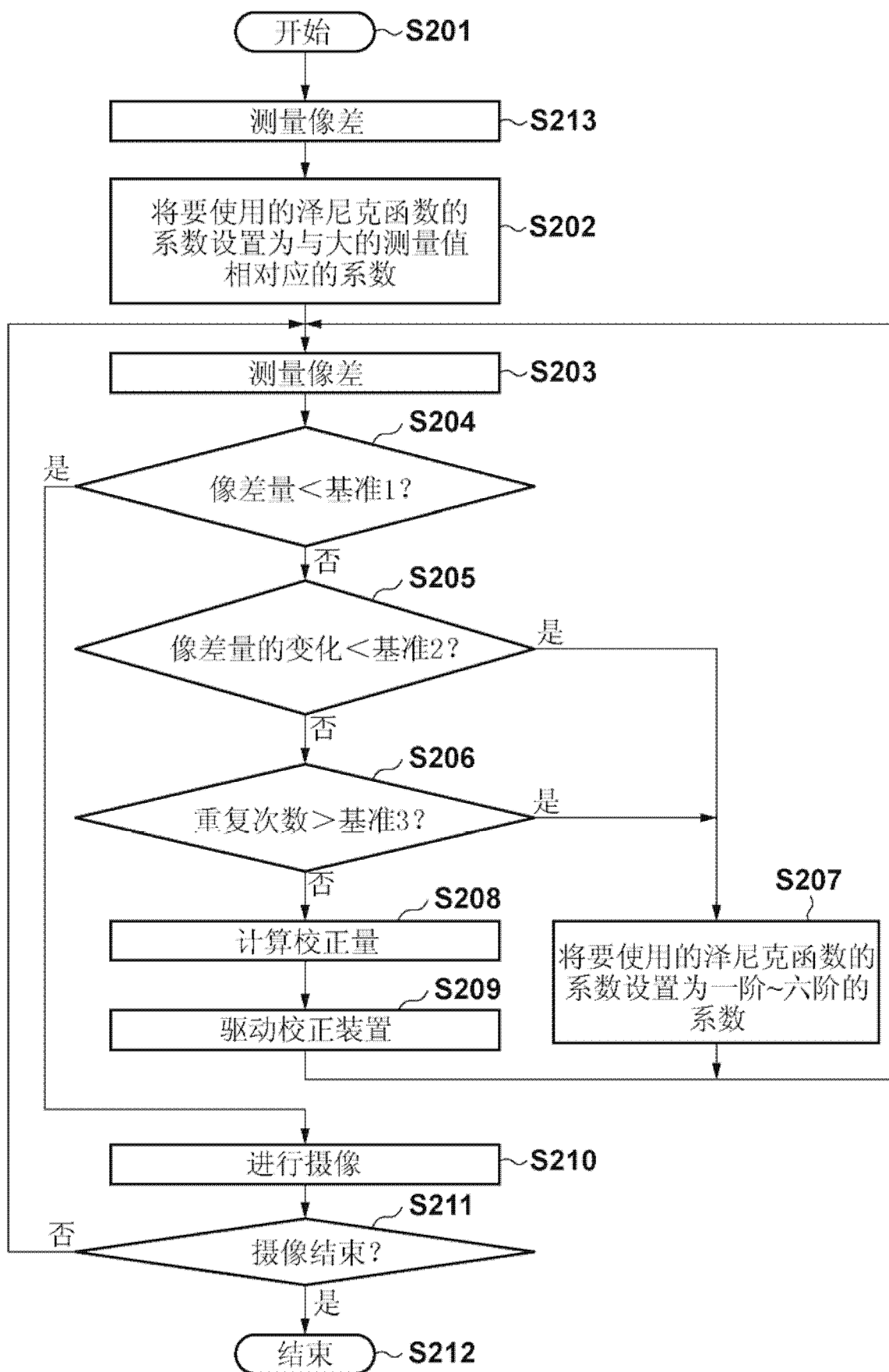


图 8

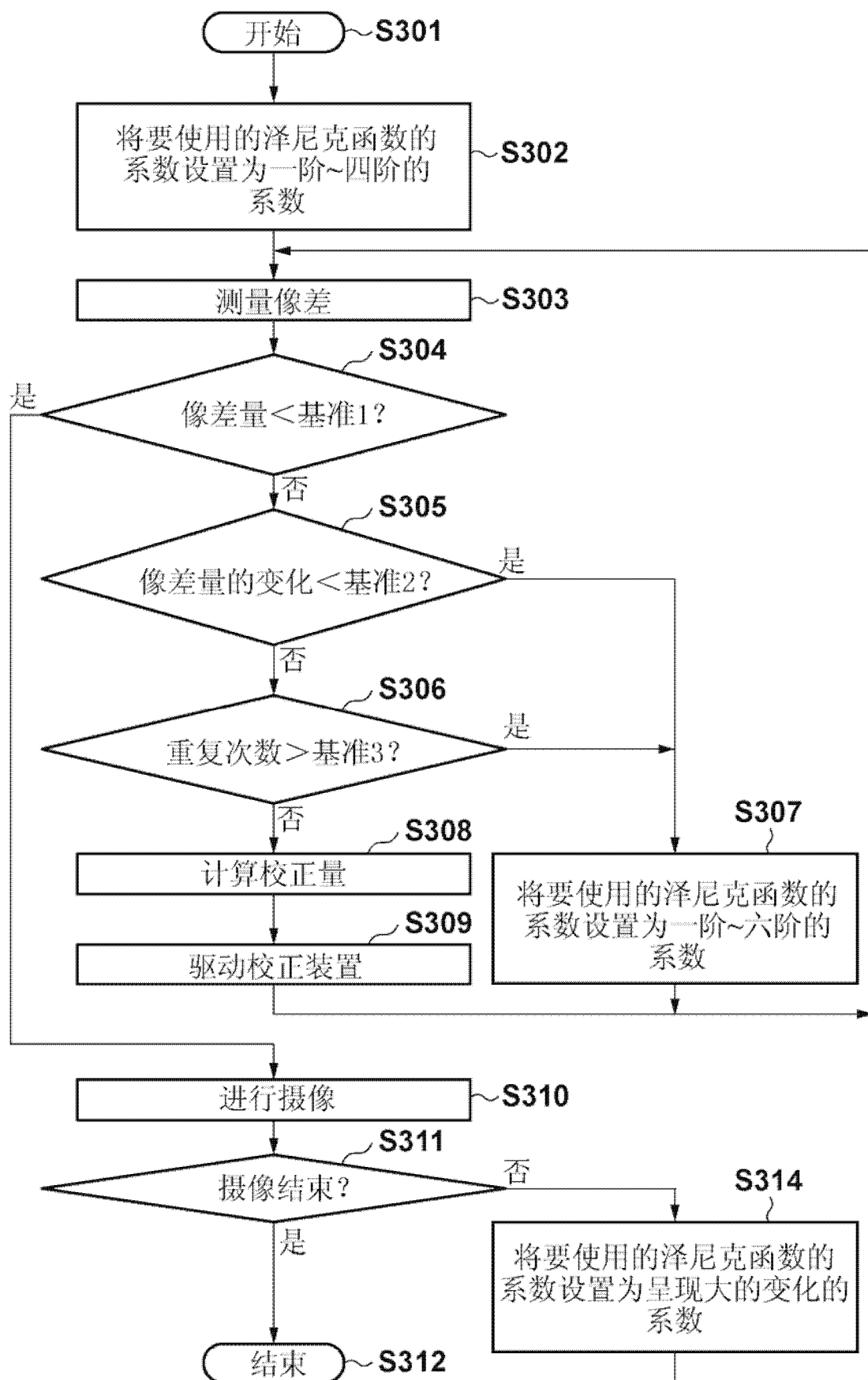


图 9

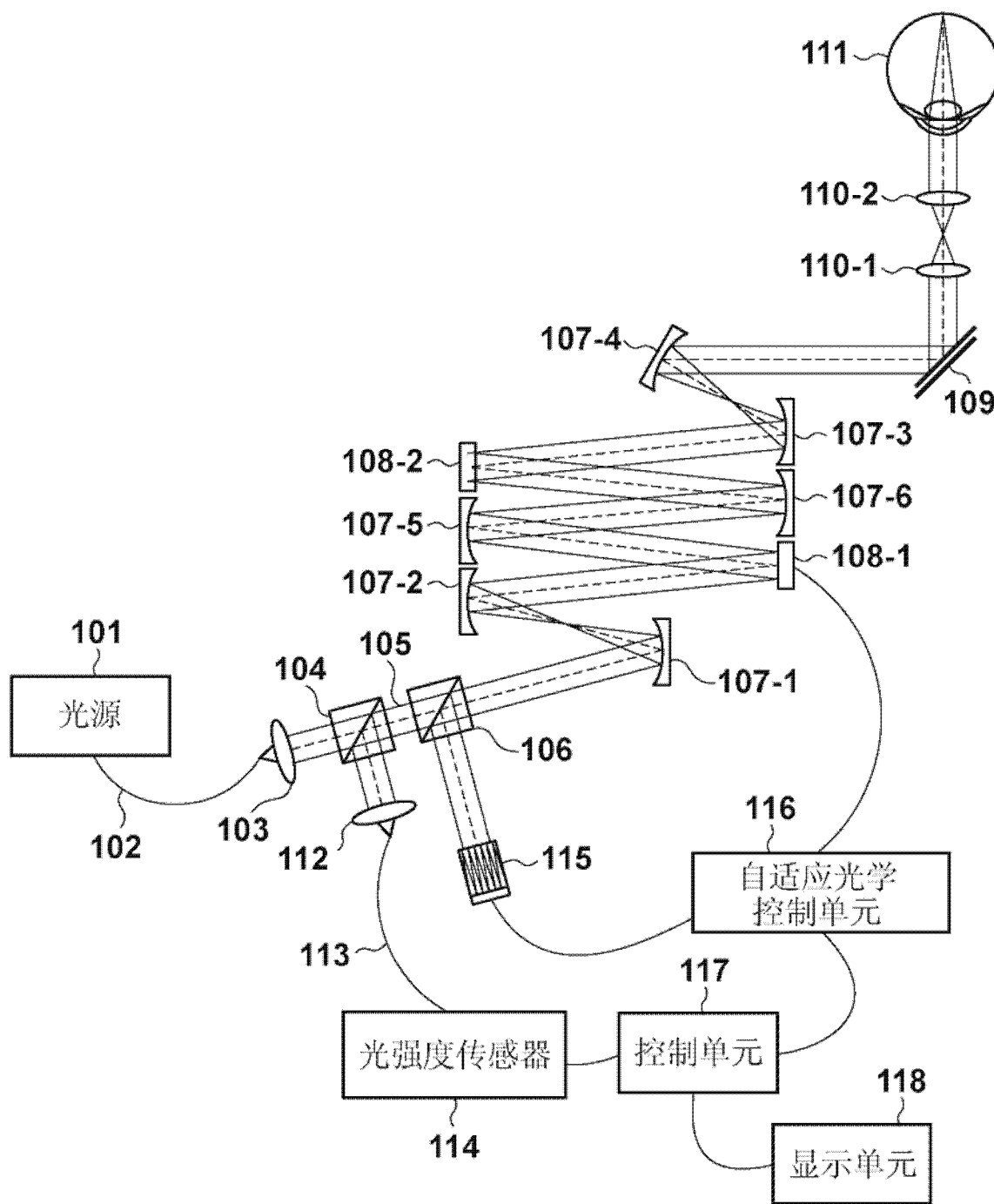


图 10

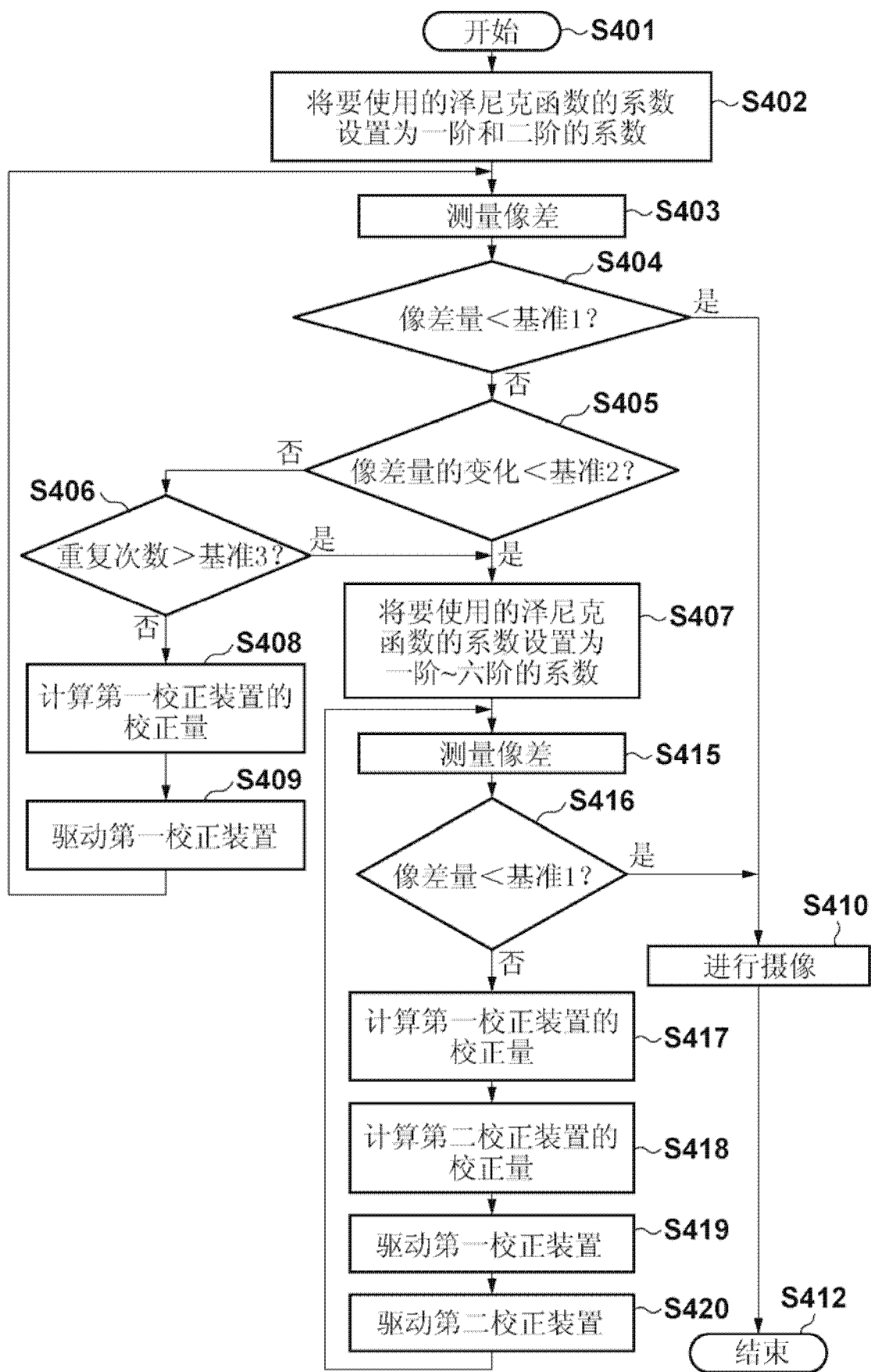


图 11