



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102499633 A

(43) 申请公布日 2012.06.20

(21) 申请号 201110293454.9

A61B 3/12(2006.01)

(22) 申请日 2011.09.30

(71) 申请人 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

地址 130033 吉林省长春市东南湖大路 3888 号

(72) 发明人 宣丽 穆全全 曹召良 李抄 李大禹 夏明亮 孔宁宁 齐岳 胡立发 彭增辉 刘永刚 姚丽双 鲁兴海

(74) 专利代理机构 长春菁华专利商标代理事务所 22210

代理人 南小平

(51) Int. Cl.

A61B 3/14(2006.01)

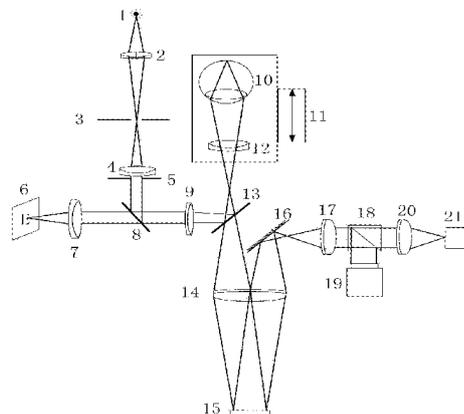
权利要求书 4 页 说明书 6 页 附图 3 页

## (54) 发明名称

大视场液晶自适应光学眼底成像的方法

## (57) 摘要

本发明属于眼底显微成像技术领域，是一种大视场液晶自适应光学眼底成像的方法。在只有一个眼底照明光源的液晶自适应像差校正眼底成像系统中插入电控变径光阑，当光阑处于小孔位置时产生波前探测所需的“点光源”，随即令照明光源发出第一束脉冲光，使波前探测器曝光，然后关闭探测器；然后令光阑切换为大孔以产生成像所需的“面光源”，计算机顺序处理波前探测信号并驱动液晶波前校正器校正波前，随即令照明光源开启第二束脉冲光，即可在成像 CCD 上获得直径为 500 微米的大视场眼底视锥细胞图像。这种孔径切换方法解决了单照明光源系统中波前探测与成像对光源直径要求不同的矛盾。



1. 一种大视场液晶自适应光学眼底成像的方法,其特征是:

在只有一个眼底照明光源的液晶自适应像差校正眼底成像系统中插入电控变径光阑,利用波前探测与眼底成像过程的时序,即时切换眼底被照明视场,既可满足波前探测的点光源要求,又可满足眼底成像视场的面光源要求。所使用的成像系统由照明光源(1)、第一透镜(2)、视场切换光阑(3)、第二透镜(4)、环形光阑(5)、视标点光源(6)、第三透镜(7)、二向色耦合分束器(8)、第四透镜(9)、人眼(10)、线性位移机构(11)、第五透镜(12)、分光棱镜(13)、第六透镜(14)、液晶波前校正器(15)、反射镜(16)、第七透镜(17)、PBS偏振分束器(18)、波前探测器(19)、第八透镜(20)、成像CCD(21)组成;

设置焦距为 $f_1$ 的第一透镜(2)与照明光源(1)相距 $1.1f_1$ ,使照明光源(1)通过第一透镜(2)后在 $11f_1$ 处10倍放大成像,成为尺寸可调的像光源,视场切换光阑(3)置于这个像光源处,通过改变光阑孔径的大小来改变像光源的尺寸;第二透镜(4)和第四透镜(9)组成一对共轭透镜组,使视场切换光阑(3)处的像光源成像为次像光源;分光棱镜(13)与第四透镜(9)的光轴成 $45^\circ$ 角配置,使像光源的光束被反射折轴 $90^\circ$ ,然后经第五透镜(12)后到达眼底;第四透镜(9)和第五透镜(12)通过分光棱镜(13)组成共轭透镜组,第五透镜(12)和人眼(10)组成第二对共轭透镜组,二者被固定在线性位移机构(11)上,调整线性位移机构(11)可使次像光源成像在人眼眼底上;环形光阑(5)紧贴于第二透镜(4)之后,使光束通过环形光阑(5)后变成环形光束入射人眼;在可见光波段、发光波长为 $\lambda'$ 的视标点光源(6),位于第三透镜(7)的焦点处;第三透镜(7)和第四透镜(9)组成共轭透镜组,使视标点光源(6)在人眼眼底成像;

所述的照明光源(1)的波长 $\lambda$ 依据眼底成像组织的特性而定,不同于视标点光源(6)的波长 $\lambda'$ ,即 $\lambda \neq \lambda'$ ;二向色耦合分束器(8)置于视标支路与照明支路的垂直交汇处,在环形光阑(5)之后,并插在第三透镜(7)与第四透镜(9)之间,与两互为垂直的光轴成 $45^\circ$ 角配置;二向色耦合分束器(8)的作用是反射照明光使其折角 $90^\circ$ 、同时透射视标光,形成二光束共光路进入后续系统;

第五透镜(12)到第四透镜(9)的光路长度 $d$ 依赖人眼屈光度数 $D$ 而变化,按公式(1)进行计算,

$$d = (1000 - Df_{12})f_{12}/1000 + f_9 \quad (1)$$

其中, $f_9$ 为第四透镜(9)的焦距, $f_{12}$ 为第五透镜(12)的焦距, $D$ 无单位,且 $D \geq 4$ 、其它参量单位为mm;第五透镜(12)与人眼瞳孔的距离为第五透镜(12)的焦距,液晶波前校正器(15)与第六透镜(14)的距离为第六透镜(14)的焦距,第五透镜(12)和第六透镜(14)组成共轭透镜组,将瞳孔成像于液晶波前校正器(15)上;第六透镜(14)的光轴相对第五透镜(12)的光轴向右侧偏离 $4\text{mm} \sim 6\text{mm}$ ,以使入射和反射出液晶波前校正器(15)的两束光分别左右偏心通过第六透镜(14);

液晶波前校正器(15)校正的偏振方向与PBS偏振分束器(18)的P偏振光对应,从液晶波前校正器(15)反射的光束在到达反射镜(16)时,反射光束与入射光束的光轴间距离为 $8\text{mm} \sim 12\text{mm}$ ,使得只有反射光束被反射镜(16)接收,并被反射镜16折轴 $90^\circ$ 进入第七透镜(17),第七透镜(17)与第六透镜(14)间的光路长度为二者的焦距之和;

第七透镜(17)和第八透镜(20)是共轭透镜组,二者之间的距离为第七透镜(17)的焦距,二者中间放置PBS分束器(18),将此平行光束分成透射P偏振光和反射S偏振光;S偏

振光是未经液晶波前校正器 (15) 校正、携带眼波像差的光, 进入波前探测器 (19), 从而检测出人眼的波前像差; 波前探测器 (19) 到第七透镜 (17) 的光路长度为第七透镜 (17) 的焦距长度, 使经过第六透镜 (14) 和第七透镜 (17) 这对共轭透镜组将液晶波前校正器 (15) 成像于波前探测器 (19) 的孔径位置; P 偏振光是经液晶波前校正器 (15) 校正后的无眼波像差的光, 通过第八透镜 (20) 聚焦在成像 CCD (21) 上, 使眼底被照明区域成像;

建立波前探测器 (19) 对波前校正器 (15) 的响应矩阵 R: 首先将人眼 (10) 用模拟眼替代, 模拟眼由焦距为 20mm 的双胶合透镜和漫反射屏组成, 双胶合透镜放置在原人眼瞳孔所处的位置, 漫反射屏放置在原人眼视网膜所处的位置; 开启照明光源 (1), 在漫反射屏上看到会聚光点; 开启波前探测器 (19) 探测到从模拟眼出射的波前, 前后移动调节漫反射屏直到被测波前上的离焦量最小; 然后开启响应矩阵测量控制软件, 测量前 36 项 Zernike 模式波前的响应矩阵 R; 将响应矩阵 R 存入主控计算机中;

控制程序装在主控计算机中, 线性位移机构 (11)、液晶波前校正器 (15)、波前探测器 (19)、成像 CCD (21)、瞳孔相机 (22) 和视标点光源 (6) 都与主控计算机相连, 受其中的程序控制, 照明光源 (1)、视场切换光阑 (3) 通过单片机控制盒间接与主控计算机相连; 视场切换光阑 (3) 处于小孔位置, 产生波前探测所需的“点光源”; 触发波前探测器 (19) 的曝光快门开启, 随即触发照明光源 (1) 开启, “点光源”发出脉冲光, 波前探测器 (19) 在该时间内持续曝光, 然后关闭快门; 继而令视场切换光阑 (3) 切换为大孔以产生成像所需的“面光源”, 与此同时计算机顺序进行波前处理、向液晶波前校正器 (15) 发送校正信号、等待液晶波前校正器 (15) 响应; 再触发照明光源 (1) 开启, “面光源”发出脉冲光, 同时令成像 CCD (21) 开启快门曝光, 在脉冲结束时关闭成像 CCD (21) 的快门; 最后成像 CCD (21) 将获得的大视场眼底图像传给主控计算机。

2. 根据权利要求 1 所述的大视场液晶自适应光学眼底成像的方法, 其特征是: 视场切换光阑 (3) 置于小孔位置, 照射在人眼 (10) 眼底的光斑直径为  $100+20$  微米, 触发照明光源 (1) 开启, “点光源”发出脉冲光, 脉冲时间为  $5\text{ms} \sim 10\text{ms}$ , 波前探测器 (19) 在该时间内持续曝光, 然后关闭快门; 继而令视场切换光阑 (3) 切换为大孔以产生成像所需的“面光源”, 照射在人眼 (10) 眼底的光斑直径为  $400$  微米  $\sim 600$  微米; 视场切换光阑 (3) 的切换响应时间短于  $30\text{ms}$ ; 与此同时计算机顺序进行波前处理、向液晶波前校正器 (15) 发送校正信号、等待液晶波前校正器 (15) 响应; 再触发照明光源 (1) 开启, “面光源”发出脉冲光, 脉冲持续时间为  $5\text{ms} \sim 10\text{ms}$ , 同时令成像 CCD (21) 开启快门曝光, 在脉冲结束时关闭成像 CCD (21) 的快门。

3. 根据权利要求 1 所述的大视场液晶自适应光学眼底成像的方法, 其特征是:  
分光棱镜 (13) 的透反比为  $9 : 1$ ;

第五透镜 (12) 和第六透镜 (14) 的焦距比等于瞳孔直径与液晶波前校正器 (15) 口径的比值, 使从眼底反射出来的信号光通过分光棱镜 (13) 后被第六透镜 (14) 变成与液晶波前校正器 (15) 孔径匹配的平行光束。

4. 根据权利要求 1 所述的大视场液晶自适应光学眼底成像的方法, 其特征是:

1) 所用照明光源 (1) 为小型半导体激光器, 带有光纤耦合, 纤芯直径  $500 \mu\text{m}$ , 发光波长  $\lambda$  为  $808\text{nm}$ , 输出功率在  $10\text{mW} \sim 20\text{mW}$  范围可调; 紧挨着光纤发射端有一由电机控制连续旋转的毛玻璃, 旋转速率范围  $1000\text{rpm} \sim 2000\text{rpm}$ , 输出激光通过具有  $75\% \sim 80\%$  透过率的毛

玻璃,以消除自相干的散斑;

2) 第一透镜(2)、第二透镜(4)、第三透镜(7)、第四透镜(9)、第五透镜(12)、第六透镜(14)、第七透镜(17)、第八透镜(20)均为双胶合消色差透镜,且表面镀有增透膜,口径依次为:10mm、25mm、25mm、20mm、20mm、40mm、20mm、20mm,焦距依次为:20mm、250mm、250mm、250mm、200mm、250mm、86mm、100mm;

3) 所用视场切换光阑(3)为两叶式电控机械光阑,通电开启为大孔时直径5mm,关闭电源还原为小孔时直径1mm;开启电压12V,开启响应时间26ms;初始处于小孔位置,照射在人眼眼底圆形光斑直径为100微米;探测完毕后切换为大孔,照射在人眼眼底的圆形光斑直径为500微米;

4) 所用环形光阑(5)的外径7.3mm、内径3mm,通过第四透镜(9)、分光棱镜(13)和第五透镜(12)成像到人眼瞳孔位置,其像的外径略小于瞳孔为5.8mm、内径2.4mm;

5) 采用发光波长 $\lambda'$ 为550nm的发光二极管作为视标点光源(6);

6) 所用二向色耦合分束器(8),口径25mm,对 $\lambda = 808\text{nm}$ 波长的眼底照明光具有95%的反射率,对 $\lambda' = 550\text{nm}$ 波长的视标光具有95%的透过率;

7) 被测人眼(10)为500度近视,在较暗环境下使瞳孔直径稳定在6.0mm;

8) 所用的线性位移机构(11)为一维位移器,位移精度0.01mm,行程120mm;

9) 所用的分光棱镜(13)对808nm波长眼底照明光的透反比为9:1。

10) 所用液晶校正器(15),纯位相型反射式LCOS器件,美国BNS公司生产,型号P512-0785,液晶对驱动电压的响应时间为15ms;

11) 所用的反射镜(16)为薄型平面反射镜,面积15mm×15mm,厚度2mm,反射率95%;

12) 所用PBS分束器(18),直径50mm,当808nm波长的眼底照明光透过时分出的P偏振光的消光比为 $1 \times 10^{-3}$ ;

13) 所用波前探测器(19),为哈特曼型,有效微透镜数为233,2.5mm接收孔径,配置的CCD为英国ANDOR公司生产,型号EM-DV897,128×128像素,量子效率在808nm波长处为70%,波前探测速度200Hz,测量误差峰谷值 $0.05\lambda$ ,均方根值 $0.01\lambda$ ;

14) 所用成像CCD相机(21)为高灵敏度科学级CCD,英国ANDOR公司生产,型号EM-DV897,512×512像素;

15) 所用瞳孔相机(22)为COOKE公司生产的CCD相机,型号Pixel FlyQE,1390×1024像素;

16) 所用LED(23)为红外二极管光源,发光波段为830nm~900nm,功率600 $\mu\text{W}$ ;

17) 所用分色片(24),口径25mm,是截止波长为 $\lambda = 830\text{nm}$ 的长波通滤光片,对波长大于830nm的光具有95%的反射率,对波长小于830nm的光具有95%的透过率;

18) 第六透镜(14)的光轴相对第五透镜(12)的光轴向右侧偏离5mm的距离,使入射和反射出液晶波前校正器(15)的两束光分离10mm;调节线性位移机构(11)使第四透镜(9)到第五透镜(12)的光路长度 $d = 250\text{mm}$ ;

19) 开启照明光源(1),在模拟眼的漫反射屏上看到会聚光点;开启波前探测器(19)探测从模拟眼出射的波前,前后移动调节漫反射屏直到被测波前上的离焦量最小;开启响应矩阵测量控制软件,测量前36项Zernike模式波前的响应矩阵R,将响应矩阵R存入主控计算机;

20) 撤掉模拟眼,被测量的人眼(10)瞳孔与入射光轴对准,从主控计算机中调出标记瞳孔位置的圆圈,将其显示在与主控计算机相连的显示屏上;打开视标点光源(6),粗调头托架以使人眼(10)看到视标的像;细调线性位移机构(11)使人眼看到的视标像变得清晰;开启LED(23)和瞳孔相机(22),对人眼瞳孔进行摄像,并使瞳孔像也显示在显示屏上;细调头托架,直到瞳孔像与标记圆圈重合,完成瞳孔与入射光轴的对准;

21) 将视场切换光阑(3)置于小孔位置,点亮视标点光源(6),令人眼(10)主动凝视第四透镜(9)与第五透镜(12)共焦面处的视标像,直到视觉清晰;触发波前探测器(19)的曝光快门开启,随即触发照明光源(1)开启,“点光源”发出10ms的脉冲光,波前探测器(19)接受脉冲曝光;继而令视场切换光阑(3)切换为大孔,切换响应25ms,与此同时计算机顺序进行波前数据处理、向液晶波前校正器(15)发送校正信号、等待液晶波前校正器(15)响应,这三个过程耗时29ms;随即再触发照明光源(1)开启,“面光源”发出8ms的脉冲光,成像CCD(21)接受脉冲曝光,获得大视场视锥细胞成像输入主控计算机。

## 大视场液晶自适应光学眼底成像的方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于眼底显微成像技术领域,涉及眼波像差自适应校正光学成像技术,是一种结构简单、大视场的自适应像差校正眼底成像方法,具体地说是一种大视场液晶自适应光学眼底成像的方法。

### 背景技术

[0002] 眼球是个复杂光学系统,即使是无屈光不正的眼睛也不可避免地存在光学像差,因此采用临床所用的检眼镜很难看清 20 微米以下的血管,更谈不上观察视锥细胞。

[0003] 从上个世纪九十年代起,人们开始探讨变形镜自适应光学校正技术在眼底成像中的应用。但是目前使用的变形镜驱动单元数一般不超过 37 单元,而随屈光不正程度增加或高龄化引入的高阶像差经常超出变形镜所能校正的空间频率。尽管利用微机电技术可以使驱动单元数增加到 2000 单元以上,此时校正量又成为问题,所以变形镜自适应光学校正技术至今未在眼科临床实用。

[0004] 液晶波前校正器具有十万到百万个驱动像素,校正精度高,重复性好,可以进行单次探测的开环校正,最大限度地降低入射人眼的光能使用量,安全程度提高,更利于应用在眼底自适应光学成像系统上。关于液晶自适应光学技术在眼底成像中的应用,已在中国专利公报上公开,如“视度自调节液晶自适应像差校正视网膜成像的光学系统”(公开号 CN101766472A),“能量高效利用的液晶自适应像差校正视网膜成像装置”(公开号 CN101797149A),“普适性液晶自适应像差校正视网膜成像系统”(公开号 CN101791212A),使得该技术具有安全、普适的优势。但是这三个公开的专利申请,没能解决自适应成像视场小的问题,视场直径只有 150 微米~200 微米。

[0005] 眼底自适应成像系统中,波前探测光源需要点光源,这个“点”的直径应该在 80 微米~150 微米,如果探测与成像使用同一光源,势必导致成像视场小的问题。实际上眼底成像视场受人眼等晕角限制,最大直径可达 500 微米,如果眼底照明光斑的直径能够达到 500 微米的话,即可把成像视场直径扩大到 500 微米。为解决探测与成像对光源要求上的矛盾,人们在眼底自适应成像系统中提出双光源的设计,即一个 100 微米直径的细光束作为“点光源”用于波前探测,一个 500 微米直径的粗光束作为“面光源”用于眼底成像。为使两个光源共光路又不至于使波前探测与眼底成像相互影响,两个光源采用不同波段,并在哈特曼探测器与眼底成像相机的分光处采用分色片将两束不同波段的光分开。但由于人眼屈光系统中色差的影响,探测与校正有些分歧,眼底成像效果大受影响,而且双光源结构增加光学系统的复杂性以及成本,不利于临床实用化。

### 发明内容

[0006] 本发明为了克服现有技术存在的缺陷,在只有一个眼底照明光源的液晶自适应像差校正眼底成像系统中插入电控变径光阑,利用波前探测与眼底成像过程的时序,即时切换眼底被照明视场,既可满足波前探测的点光源要求,又可满足眼底成像视场的面光源要

求,目的是提供一种大视场液晶自适应光学眼底成像的方法。

[0007] 为理解本发明,下面详述这种结构简单、大视场自适应像差校正的眼底自适应成像系统设计和成像方法。

[0008] 本发明的光学结构如图1,由照明光源1、第一透镜2、视场切换光阑3、第二透镜4、环形光阑5、视标点光源6、第三透镜7、二向色耦合分束器8、第四透镜9、人眼10、线性位移机构11、第五透镜12、分光棱镜13、第六透镜14、液晶波前校正器15、反射镜16、第七透镜17、PBS偏振分束器(PBS分束器)18、波前探测器19、第八透镜20、成像CCD21组成。

[0009] 其中,照明光源1提供人眼波前探测及眼底成像照明用,发光波长 $\lambda$ 依据眼底成像组织的特性而定。设置焦距为 $f_1$ 的第一透镜2,照明光源1与第一透镜2相距 $1.1f_1$ ,这会使照明光源1的光束通过第一透镜2后在 $11f_1$ 处成像,且像比物放大10倍,成为尺寸可调的新的照明光源,称为像光源。视场切换光阑3置于这个像光源处,该光阑是一个电控变径光阑,可以控制像光源的尺寸。在波前探测时,视场切换光阑3置于小孔位置,使得照射在人眼眼底的光斑直径仅为 $100\pm 20$ 微米,成为眼底处的“点光源”,保证波前探测器19能够接收到纯粹的眼波波前;在校正成像时,视场切换光阑3置于大孔位置,使得照射在人眼眼底的光斑直径为400微米~600微米,成为眼底处的“面光源”,正好与人眼等晕角上限对应,可以获得眼底自适应光学成像的最大视场。由于人眼像差会随时间变化,需要将探测到校正成像过程的时间控制在50ms以内,方可忽略像差变化对校正效果的影响,而探测和成像分别需要10ms曝光,故要求视场切换光阑3的切换响应时间短于30ms。这种孔径切换方法解决了波前探测与成像对光源直径要求不同的矛盾。

[0010] 后续光路中,第二透镜4和第四透镜9组成一对共轭透镜组,使视场切换光阑3处的像光源成像,成为次像光源。分光棱镜13与第四透镜9的光轴成 $45^\circ$ 角配置,使像光源的光束被反射折轴 $90^\circ$ ,然后经第五透镜12后到达眼底。从眼底反射出来的信号光必须透过分光棱镜13才能进入后续光路,为保证眼底信号光的最大利用率,分光棱镜13的透反比为9:1。第五透镜12和人眼10组成第二对共轭透镜组,二者被固定在线性位移机构11上,调整线性位移机构11可使次像光源成像在人眼眼底上。环形光阑5紧贴于第二透镜4之后,使光束通过环形光阑5后变成环形光束入射人眼,直接滤除正入射人眼角膜区域的强反射干扰光,同时控制入眼光束的外直径略小于被测人眼瞳孔的直径。

[0011] 视标点光源6提供人眼凝视的视标光源,发光波长 $\lambda'$ 在可见光波段,不同于照明光源1的波长 $\lambda$ ,即 $\lambda \neq \lambda'$ ,视标点光源6位于第三透镜7的焦点处。第三透镜7和第四透镜9也组成共轭透镜组,使视标点光源6也能在人眼眼底成像,即让人眼看到视标,定位眼底成像区域,如果视标在显示屏上移动,眼球也会相应转动,可以选择成像区域。二向色耦合分束器8置于视标支路与照明支路的垂直交汇处,在环形光阑5之后,并插在第三透镜7与第四透镜9之间,形成与两互为垂直的光轴成 $45^\circ$ 角配置。二向色耦合分束器8的作用是利用照明光源1与视标点光源6的光波长不同,反射照明光使其折角 $90^\circ$ 、同时透射视标光,形成二光束共光路进入后续系统,基于这个设计,才能通过人眼盯视视标点光源6来选择和控制眼底成像区域。第四透镜9和第五透镜12通过分光棱镜13组成共轭透镜组,用于将环形光阑5成像于人眼瞳孔处,调整环形光阑5的外直径使入眼环形光束的外直径略小于被测人眼瞳孔的直径。

[0012] 第五透镜12到第四透镜9的光路长度 $d$ 依赖人眼屈光度数 $D$ 而变化,需按公式

(1) 进行计算,

$$[0013] \quad d = (1000 - Df_{12})f_{12}/1000 + f_9 \quad (1)$$

[0014] 其中,  $f_9$  为第四透镜 9 的焦距,  $f_{12}$  为第五透镜 12 的焦距,  $D$  无单位, 且  $D \geq 4$ 、当近视低于 400 度时  $D = 4$ , 其它参量单位为 mm。通过调节线性位移机构 11 使被测者清晰看到视标点光源 6 的像来保证  $d$  的准确度。

[0015] 第五透镜 12 与人眼瞳孔的距离为第五透镜 12 的焦距, 液晶波前校正器 15 与第六透镜 14 的距离为第六透镜 14 的焦距, 这样的配置, 使第五透镜 12 和第六透镜 14 组成共轭透镜组, 将瞳孔成像于液晶波前校正器 15 上。第五透镜 12 和第六透镜 14 的焦距比等于瞳孔直径与液晶波前校正器 15 口径的比值, 以保证从眼底反射出来的信号光通过分光棱镜 13 后被第六透镜 14 变成与液晶波前校正器 15 孔径匹配的平行光束。第六透镜 14 的光轴相对第五透镜 12 的光轴向右侧偏离 4mm ~ 6mm, 以使入射和反射出液晶波前校正器 15 的两束光分别左右偏心通过第六透镜 14。液晶波前校正器 15 能够校正的偏振方向与 PBS 偏振分束器 (PBS 分束器) 18 的 P 偏振光对应, 从液晶波前校正器 15 反射的光束在到达反射镜 16 时, 这束反射光束与入射光束的光轴间距离为 8mm ~ 12mm, 使得只有反射光束被反射镜 16 接收, 并被反射镜 16 折轴 90° 进入第七透镜 17, 第七透镜 17 与第六透镜 14 间的光路长度为二者的焦距之和, 以使通过第七透镜 17 的光束再次变为平行光。后续的第七透镜 17 和第八透镜 20 是共轭透镜组, 二者之间的距离为第七透镜 17 的焦距, 二者中间放置 PBS 分束器 18, 将此平行光束分成透射 P 偏振光和反射 S 偏振光。S 偏振光是未经液晶波前校正器 15 校正、携带眼波像差的光, 进入波前探测器 19, 从而检测出人眼的波前像差。波前探测器 19 到第七透镜 17 的光路长度为第七透镜 17 的焦距长度, 以保证经过第六透镜 14 和第七透镜 17 这对共轭透镜组将液晶波前校正器 15 成像于波前探测器 19 的孔径位置。P 偏振光是经液晶波前校正器 15 校正后的无眼波像差的光, 通过第八透镜 20 聚焦在成像 CCD21 上, 使眼底被照明区域成像。

[0016] 本发明采用双脉冲触发光源照明, 保证了波前探测与眼底成像时需要的照明光, 而关闭了探测信号被处理时间内的眼底照明, 避免了不必要的光能进入人眼, 有效减少照明光对人眼的危害。由于照明光源 1 的激光器触发需要用 TTL 信号, 另外视场切换光阑 3 一般需要超过 10V 电压驱动, 所以使用单片机控制盒实现对照明光源 1 和视场切换光阑 3 的控制, 单片机控制盒与主控计算机连接, 使用单片机可以控制照明光源 1 和视场切换光阑 3 的触发时刻精确到 1ms。

[0017] 为使瞳孔能便利地与入射光轴对准, 设置一个瞳孔的可视光路对瞳孔位置进行标定, 如图 2: 在人眼前上方 20mm ~ 30mm 距离处放置发光波长 830nm ~ 900nm 的 LED 23, 照明被测者瞳孔, 第五透镜 12 和第四透镜 9 成为共轭透镜组, 使瞳孔成像于第四透镜 9 的左方焦点处; 在第四透镜 9 和二向色耦合分束器 8 之间再插入与二向色耦合分束器 8 垂直的分色片 24, 使波长大于 830nm 的 LED 23 的光束垂直反射出光路, 但不影响波长小于 830nm 的照明与视标光束通过, 在第四透镜 9 的折轴焦点处设置瞳孔相机 22, 瞳孔相机 22 与主控计算机相连。打开照明光源 1 和 LED 23, 开启波前探测器 19 和瞳孔相机 22, 从与主控计算机相连的显示屏上可看到瞳孔的像和波前探测器 19 的光点阵列。利用固定头部的头托架对人眼的位置进行微调, 直到波前像差中无倾斜且整体光点阵列全部呈现在显示屏上; 此时, 瞳孔相机 22 中所拍摄的瞳孔像的位置即为瞳孔与入射光轴对准的位置; 主控计算机以

瞳孔像的中心为圆心,以瞳孔半径 3mm 为半径画一圆圈,作为瞳孔的标准位置,将该圆圈及其坐标系保存到文件,存入主控计算机的控制程序中。

[0018] 建立波前探测器 19 对波前校正器的 15 响应矩阵 R:首先将人眼 10 用模拟眼替代,模拟眼由焦距为 20mm 的双胶合透镜和漫反射屏组成,双胶合透镜放置在原人眼瞳孔所处的位置,漫反射屏放置在原人眼视网膜所处的位置。开启照明光源 1,可以在漫反射屏上看到会聚光点;开启波前探测器 19 可以探测到从模拟眼出射的波前,前后移动调节漫反射屏直到被测波前上的离焦量最小。然后开启响应矩阵测量控制软件,测量前 36 项 Zernike 模式波前的响应矩阵 R。将响应矩阵 R 存入主控计算机中。

[0019] 撤掉模拟眼,使被测量的人眼 10 位于图 2 所示位置处,即可开始像差自适应校正的眼底成像过程。首先使被测者瞳孔对准入射光轴:将主控计算机中的标记瞳孔位置的圆圈显示在显示屏上,被测者头部固定在头托架上;打开视标点光源 6,粗调头托架以使人眼能看到视标的像;细调线性位移机构 11 使人眼看到的视标像变得清晰;开启 LED 23 和瞳孔相机 22,对人眼瞳孔进行摄像,细调头架,直到瞳孔像与标定圆圈重合。

[0020] 控制程序装在主控计算机中,线性位移机构 11、液晶波前校正器 15、波前探测器 19、成像 CCD21、瞳孔相机 22 和视标点光源 6 都与主控计算机相连,受其中的程序控制,照明光源 1、视场切换光阑 3 通过单片机控制盒间接与主控计算机相连。系统工作流程的第一步是令视场切换光阑 3 处于小孔位置,以产生波前探测所需的“点光源”;然后按图 3 所示的流程控制:触发波前探测器 19 的曝光快门开启,随即触发照明光源 1 开启,“点光源”发出脉冲光,脉冲时间为 5ms ~ 10ms,波前探测器 19 在该时间内持续曝光,然后关闭快门;继而令视场切换光阑 3 切换为大孔以产生成像所需的“面光源”,与此同时计算机顺序进行波前处理、向液晶波前校正器 15 发送校正信号、等待液晶波前校正器 15 响应;然后再触发照明光源 1 开启,“面光源”发出脉冲光,脉冲持续时间为 5ms ~ 10ms,同时令成像 CCD21 开启快门曝光,在脉冲结束时关闭成像 CCD21 的快门;最后成像 CCD21 将获得的大视场眼底图像传给主控计算机。

## 附图说明

[0021] 图 1 为本发明的大视场眼底自适应成像光学结构示意图。其中,1 为照明光源、2 为第一透镜、3 为视场切换光阑、4 为第二透镜、5 为环形光阑、6 为视标点光源、7 为第三透镜、8 为二向色耦合分束器、9 为第四透镜、10 为人眼、11 为线性位移机构、12 为第五透镜、13 为分光棱镜、14 为第六透镜、15 为液晶波前校正器、16 为反射镜、17 为第七透镜、18 为 PBS 分束器、19 为波前探测器、20 为第八透镜、21 为成像 CCD。

[0022] 图 2 为在图 1 所示的光学结构中插入瞳孔与入射光轴对准光路的系统示意图。其中 22 为瞳孔相机、23 为发光波长 830nm ~ 900nm 的 LED、24 为分色波长 830nm 的长波通分色片。

[0023] 图 3 为大视场眼底自适应成像的受控工作流程。

[0024] 图 4 为 500 度近视人眼的视网膜视锥细胞图像,其中 (a) 为视场扩大前获得的 100 微米视场图像,(b) 为在本发明系统上获得的 500 微米视场的图像。

## 具体实施方式

[0025] 为了更清楚理解本发明,下面结合实施方式对所做的设计和成像方法进行详细说明。

[0026] 实施例:对 500 度近视人眼的眼底视锥细胞成像

[0027] 1) 所用照明光源 1 为小型半导体激光器,带有光纤耦合,纤芯直径  $500\ \mu\text{m}$ ,发光波长  $\lambda$  为  $808\text{nm}$ ,输出功率在  $10\text{mW} \sim 20\text{mW}$  范围可调;紧挨着光纤发射端有一由电机控制连续旋转的毛玻璃,旋转速率范围  $1000\text{rpm} \sim 2000\text{rpm}$ ,输出激光通过具有  $75\% \sim 80\%$  透过率的毛玻璃,以消除自相干的散斑。

[0028] 2) 第一透镜 2、第二透镜 4、第三透镜 7、第四透镜 9、第五透镜 12、第六透镜 14、第七透镜 17、第八透镜 20 均为双胶合消色差透镜,且表面镀有增透膜。口径依次为:  $10\text{mm}$ 、 $25\text{mm}$ 、 $25\text{mm}$ 、 $20\text{mm}$ 、 $20\text{mm}$ 、 $40\text{mm}$ 、 $20\text{mm}$ 、 $20\text{mm}$ ;焦距依次为:  $20\text{mm}$ 、 $250\text{mm}$ 、 $250\text{mm}$ 、 $250\text{mm}$ 、 $200\text{mm}$ 、 $250\text{mm}$ 、 $86\text{mm}$ 、 $100\text{mm}$ 。

[0029] 3) 所用视场切换光阑 3 为两叶式电控机械光阑,通电开启为大孔,直径  $5\text{mm}$ ,关闭电源还原为小孔,直径  $1\text{mm}$ ;开启电压  $12\text{V}$ ,开启响应时间  $26\text{ms}$ ;初始处于小孔位置,照射在人眼眼底的圆形光斑直径为  $100$  微米;探测完毕后切换为大孔,照射在人眼眼底的圆形光斑直径为  $500$  微米。

[0030] 4) 所用环形光阑 5 的外径  $7.3\text{mm}$ 、内径  $3\text{mm}$ ,紧贴于第二透镜 4 后;通过第四透镜 9、分光棱镜 13 和第五透镜 12 成像到人眼瞳孔位置,其像的外径略小于瞳孔为  $5.8\text{mm}$ 、内径  $2.4\text{mm}$ 。

[0031] 5) 采用发光波长  $\lambda'$  为  $550\text{nm}$  的发光二极管作为视标点光源 6。

[0032] 6) 所用二向色耦合分束器 8,口径  $25\text{mm}$ ,对  $\lambda = 808\text{nm}$  波长的眼底照明光具有  $95\%$  的反射率,对  $\lambda' = 550\text{nm}$  波长的视标光具有  $95\%$  的透过率。

[0033] 7) 被测人眼 10 为  $500$  度近视,在较暗环境下使瞳孔直径稳定在  $6.0\text{mm}$ 。

[0034] 8) 所用的线性位移机构 11 为一维位移器,位移精度  $0.01\text{mm}$ ,行程  $120\text{mm}$ 。

[0035] 9) 所用的分光棱镜 13 对  $808\text{nm}$  波长眼底照明光的透反比约为  $9:1$ 。

[0036] 10) 所用液晶校正器 15,纯位相型反射式 LCOS 器件,美国 BNS 公司生产,型号 P512-0785,液晶对驱动电压的响应时间为  $15\text{ms}$ 。

[0037] 11) 所用的反射镜 16 为薄型平面反射镜,面积  $15\text{mm} \times 15\text{mm}$ ,厚度  $2\text{mm}$ ,反射率  $95\%$ 。

[0038] 12) 所用 PBS 分束器 18,直径  $50\text{mm}$ ,当  $808\text{nm}$  波长的眼底照明光透过时分出的 P 偏振光的消光比为  $1 \times 10^{-3}$ 。

[0039] 13) 所用波前探测器 19,为哈特曼型,有效微透镜数为  $233$ , $2.5\text{mm}$  接收孔径,配置的 CCD 为英国 ANDOR 公司生产,型号 EM-DV897, $128 \times 128$  像素,量子效率在  $808\text{nm}$  波长处为  $70\%$ ,波前探测速度  $200\text{Hz}$ ,测量误差峰谷值  $0.05\lambda$ ,均方根值  $0.01\lambda$ 。

[0040] 14) 所用成像 CCD 相机 21 为高灵敏度科学级 CCD,英国 ANDOR 公司生产,型号 EM-DV897, $512 \times 512$  像素。

[0041] 15) 所用瞳孔相机 22 为 COOKE 公司生产的高灵敏度 CCD 相机,型号 Pixel FlyQE, $1390 \times 1024$  像素。

[0042] 16) 所用 LED 23 为红外二极管光源,发光波段为  $830\text{nm} \sim 900\text{nm}$ 。

[0043] 17) 所用分色片 24,口径  $25\text{mm}$ ,是截止波长为  $\lambda = 830\text{nm}$  的长波通滤光片。对波

长大于 830nm 的光具有 95% 的反射率,对波长小于 830nm 的光具有 95% 的透过率。

[0044] 18) 利用上述元件按照图 2 所示的光路结构搭建大视场液晶自适应像差校正眼底成像光学系统,其中第六透镜 14 的光轴相对第五透镜 12 的光轴向右侧偏离 5mm 的距离,使入射和反射出液晶波前校正器 15 的两束光分离;调节线性位移机构 11 使第四透镜 9 到第五透镜 12 的光路长度  $d = 250\text{mm}$ ;配置自适应控制与信号处理的主控计算机,视标点光源 6、线性位移机构 11、液晶波前校正器 15、波前探测器 19、成像 CCD21 和瞳孔相机 22 均与主控计算机相连,受其控制,照明光源 1、视场切换光阑 3 也通过单片机控制盒与主控计算机连接。

[0045] 19) 建立波前探测器 19 对波前校正器 15 的响应矩阵 R:将人眼 10 用模拟眼替代。开启照明光源 1,在模拟眼的漫反射屏上看到会聚光点;开启波前探测器 19 探测从模拟眼出射的波前,前后移动调节漫反射屏直到被测波前上的离焦量最小。然后开启响应矩阵测量控制软件,测量前 36 项 Zernike 模式波前的响应矩阵 R。将响应矩阵 R 存入主控计算机。

[0046] 20) 撤掉模拟眼,被测量的人眼 10 位于图 2 所示位置处,使瞳孔与入射光轴对准:从主控计算机中调出标记瞳孔位置的圆圈,将其显示在与主控计算机相连的显示屏上;打开视标点光源 6,粗调头托架以使人眼能看到视标的像;细调线性位移机构 11 使人眼看到的视标像变得清晰;开启 LED 23 和瞳孔相机 22,对人眼瞳孔进行摄像,并使瞳孔像也显示在显示屏上;细调头托架,直到瞳孔像与标记圆圈重合,完成瞳孔与入射光轴的对准。

[0047] 21) 开始人眼 10 的自适应像差校正眼底成像过程:将视场切换光阑 3 置于小孔位置,点亮视标点光源 6,令人眼 10 主动凝视第四透镜 9 与第五透镜 12 共焦面处的视标像,直到视觉清晰;触发波前探测器 19 的曝光快门开启,随即触发照明光源 1 开启,“点光源”发出 10ms 的脉冲光,波前探测器 19 接受脉冲曝光;继而令视场切换光阑 3 切换为大孔,切换响应 25ms,与此同时计算机顺序进行波前数据处理、向液晶波前校正器 15 发送校正信号、等待液晶波前校正器 15 响应,这三个过程耗时 29ms;随即再触发照明光源 1 开启,“面光源”发出 8ms 的脉冲光,成像 CCD21 接受脉冲曝光,获得大视场视锥细胞成像;将大视场视锥细胞图像输入主控计算机。

[0048] 22) 分析结果:

[0049] 图 4 所示为同一被测人眼在视场扩大前后的视锥细胞图片,其中 (a) 图的视场为 200 微米,(b) 图为本发明系统中获得的像,视场为 500 微米,清楚显示出本发明的效果。

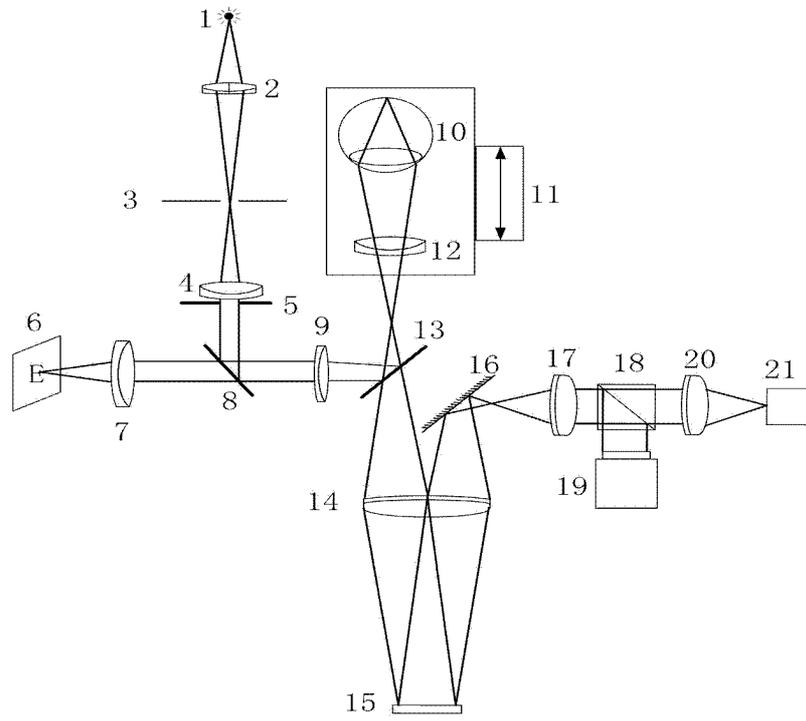


图 1

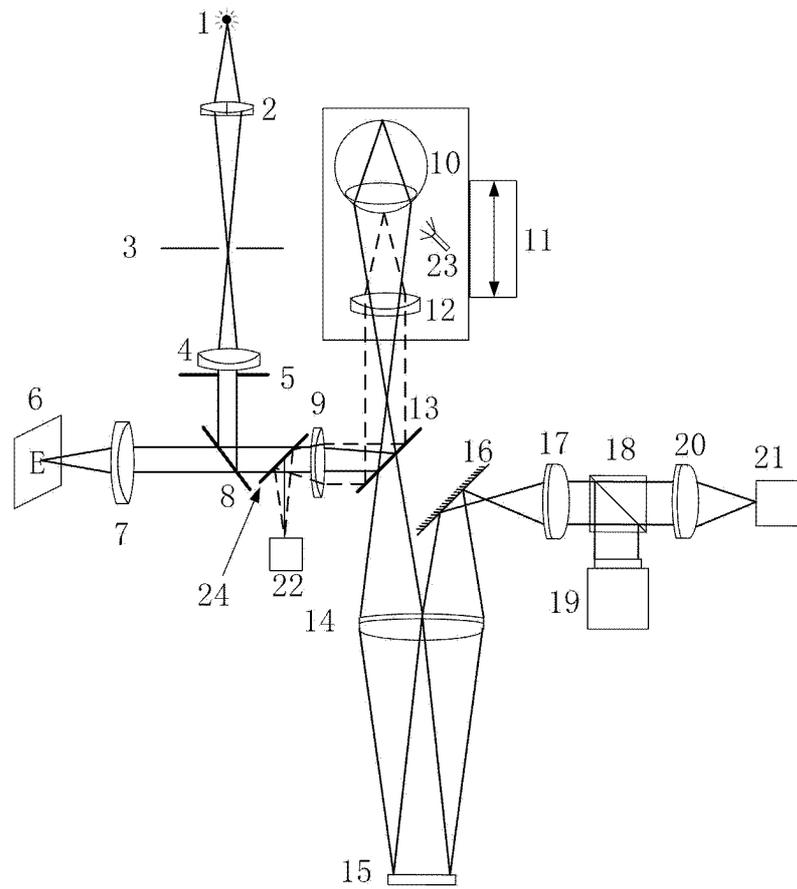


图 2

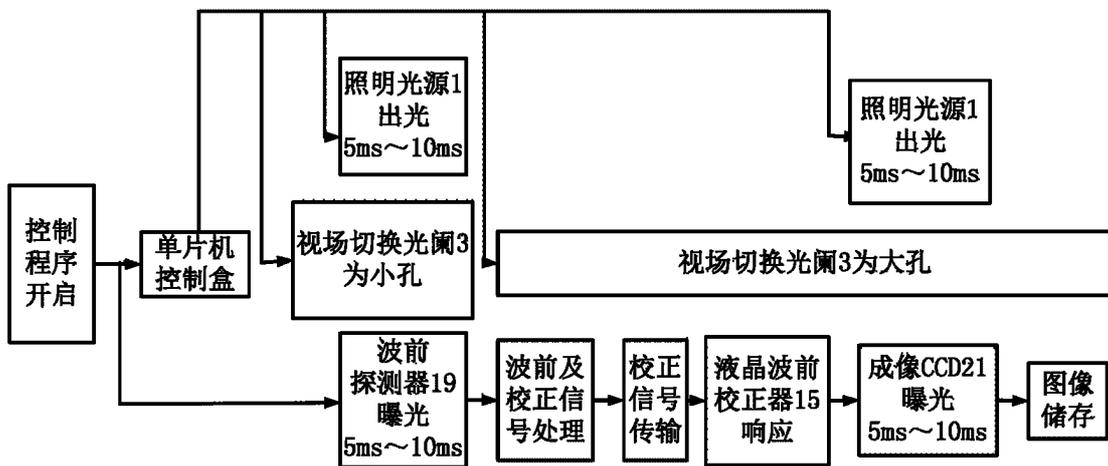


图 3

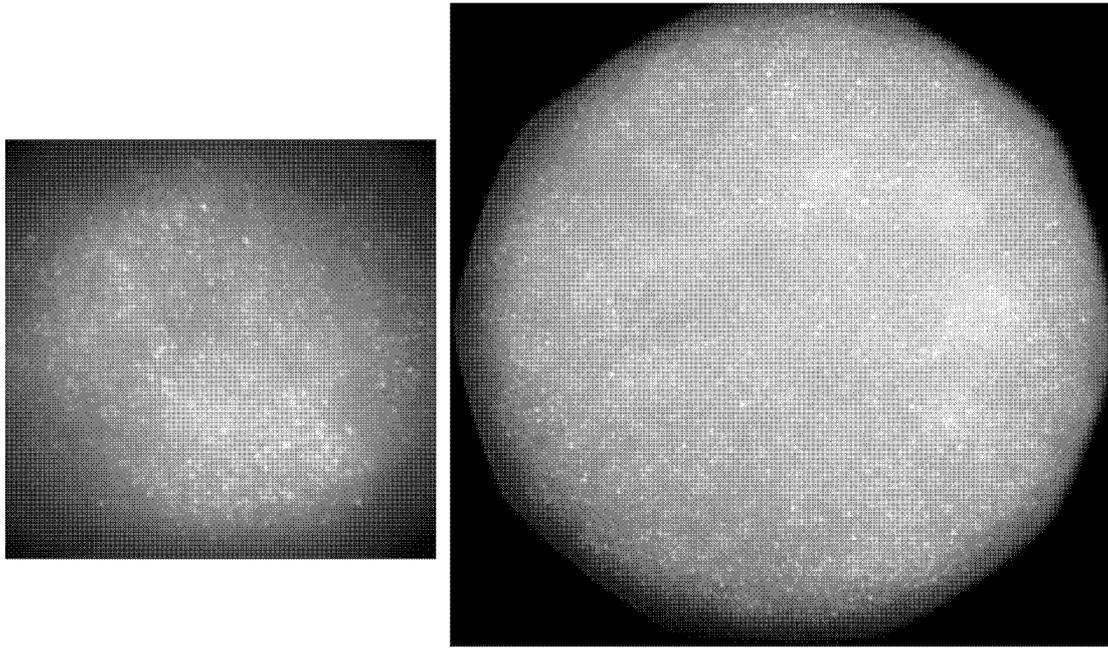


图 4