



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 101791212 A

(43) 申请公布日 2010. 08. 04

(21) 申请号 200910266664. 1

(22) 申请日 2009. 12. 31

(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
胡立发 彭增辉 刘永刚 李大禹
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 3/15(2006. 01)

A61B 3/12(2006. 01)

权利要求书 3 页 说明书 6 页 附图 1 页

(54) 发明名称

普适性液晶自适应像差校正视网膜成像系统

(57) 摘要

本发明属于显微成像技术领域，涉及高度屈光不正人眼的高阶像差校正光学设计，是一种普适性液晶自适应像差校正视网膜成像系统。本发明采用 LCD 屏显示视标点光源，并将视标设计成“E”字，使视度自调节效果加强，同时“E”字的微位移在 LCD 屏上很容易控制，可以定量改变成像区域的位置。通过这几个关键器件的设计，提高了液晶自适应系统在眼底成像中的普适性，能够解决眼底自适应成像技术在 800 度以上近视或 200 度散光条件下清晰成像困难的问题，使该系统能够在 200 度散光的人眼上稳定获得高分辨率视网膜成像。

1. 一种普适性液晶自适应像差校正视网膜成像系统,其特征是由视标点光源(1)、第一透镜(2)、第二透镜(3)、PBS分束器(4)、第三透镜(5)、线性位移机构(6)、人眼(7)、照明光源(8)、第四透镜(9)、旋转毛玻璃(10)、第五透镜(11)、孔径光阑(12)、二向色耦合分束器(13)、第六透镜(14)、液晶波前校正器(15)、反射镜(16)、第七透镜(17)、分光棱镜(18)、波前探测器(19)、第八透镜(20)、成像CCD(21)构成;其中第一透镜(2)和第二透镜(3)组成共轭透镜组,使视标点光源(1)成像;第五透镜(11)与第二透镜(3)通过二向色耦合分束器(13)组成共轭透镜组,二者之间的光路长度为第二透镜(3)的焦距f₃,使照明光源(8)的像与视标点光源(1)的像重合;第二透镜(3)和第三透镜(5)通过PBS分束器(4)组成共轭透镜组,将孔径光阑(12)成像于人眼瞳孔处;第六透镜(14)与第二透镜(3)通过PBS分束器(4)形成共焦面配置,并使其焦点向左侧偏离L距离,L为4mm~6mm,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);第七透镜(17)和第八透镜(20)是共轭透镜组,二者之间的距离为前者的焦距,光束通过共轭透镜组后在成像CCD(21)上成像;波前探测器(19)通过分光棱镜(18)与第七透镜(17)共轭,二者之间的光路长度为第七透镜(17)的焦距长度。

2. 根据权利要求1所述的普适性液晶自适应像差校正视网膜成像系统,其特征是视标点光源(1)位于第一透镜(2)的焦点处,PBS分束器(4)与第二透镜(3)的光轴成45°角配置,使视标点光源(1)的成像光束折轴90°;第三透镜(5)到第二透镜(3)的光路长度d₁由二者的焦距f₅、f₃和人眼屈光度数D来决定,按公式d₁=(1000-Df₅)f₅/1000+f₃进行计算,其中D无单位,其它参量单位为mm;人眼(7)位于可x-y-z三向线性位移的头托架上,x-y平面与光轴垂直,z方向平行于光轴;旋转毛玻璃(10)置于第五透镜(11)和第四透镜(9)的焦面处,孔径光阑(12)紧贴于第五透镜(11)之后,调节孔径控制入眼光束略小于被测人眼瞳孔的直径;二向色耦合分束器(13)置于孔径光阑(12)之后,插在第一透镜(2)与第二透镜(3)之间,形成与两互为垂直的光轴成45°角配置,两互为垂直的光轴是指第四透镜(9)、第五透镜(11)的光轴与第一透镜(2)和第二透镜(3)组成共轭透镜组的光轴垂直;液晶波前校正器(15)置于第六透镜(14)的焦点,其校正偏振方向与P偏振光吻合;反射镜(16)与第六透镜(14)和第七透镜(17)的光轴成45°角放置,将光束折轴;在第七透镜(17)和第八透镜(20)中间放置分光棱镜(18),将平行光束分成互为垂直的两束,垂直向的光束进入波前探测器(19),直向的光束进入置于第八透镜(20)焦点处的成像CCD(21)。

3. 根据权利要求2所述的普适性液晶自适应像差校正视网膜成像系统,其特征是视标点光源(1)提供人眼凝视的视标光源,发光波长在可见光波段,且为单波长λ';调节头托架使瞳孔与入射光束中心对准,调节头托架使人眼(7)的瞳孔到第三透镜(5)的距离为f₅;照明光源(8)为激光点光源,其波长λ依据眼底成像组织的光学特性而定,且λ≠λ';二向色耦合分束器(13)反射端和透射端分别面向孔径光阑(12)和第一透镜(2),分别反射照明光、透射视标光源的光,形成二光束共光路进入后续系统。

4. 根据权利要求3所述的普适性液晶自适应像差校正视网膜成像系统,其特征是视标点光源(1)和照明光源(8)会在第三透镜(5)的前焦点处成虚像,该成像面到被测人眼瞳孔的距离为明视距离;用明视距离处的照明点光源照亮眼底的信号光,从眼底反射出来成为消偏振的球面波,经人眼前角膜出射后携带着前角膜反射干扰光通过第三透镜(5)会聚其焦点处,然后到达PBS分束器(4);在PBS分束器(4)的透射端只有携带眼底信号的P偏

振光出射,滤除掉了角膜反射的 S 偏振干扰光;P 偏振光再经过第六透镜(14)后成为与液晶波前校正器(15)孔径匹配的平行光束,且 P 偏振方向与液晶波前校正器 15 的校正偏振方向一致;投射到液晶波前校正器(15)的眼底信号光束经波前像差校正后反射,再经过第六透镜(14)成为会聚光、并与入射光分离,到达反射镜(16)折轴会聚成像于第七透镜(17)的前焦点处;该像点发出的光经分光棱镜(18)又被分为两束,一束进入波前探测器(19)检测校正后的残余像差,另一束在共轭透镜组第七透镜(17)和第八透镜(20)的作用下将眼底图像成像于成像 CCD(21)。

5. 根据权利要求 3 所述的普适性液晶自适应像差校正视网膜成像系统,其特征是:

所述的视标点光源(1)由 TFT-LCD 屏构成,使 LCD 屏显示出上下尺寸不超过 2mm 的“E”字,“E”作为视标点光源;

所述的液晶校正器(15)为纯位相型反射式液晶波前校正器,位相调制深度为 $0.95\lambda \sim 1.1\lambda$,液晶对驱动电压的响应时间 15ms,像素数 512×512 个,灰度级 50,此处灰度级对应校正器位相调制步长的电压分度值,位相调制步长 $\leq \lambda / 50$;

所述的波前探测器(19)为哈特曼型波前探测器,具有 200 ~ 300 个有效微透镜,2mm ~ 5mm 接收孔径,探测波段以照明光源的光波长为中心,量子效率 $> 50\%$,工作频率 70Hz,测量误差峰谷值 $\leq 0.1\lambda$ 、均方根值 $\leq 0.02\lambda$;

所述的成像 CCD(21),在照明光源的光波长处量子效率 $> 50\%$ 、在读出速率 10MHz 时读出噪声 7 个电子,像素数 512×512 个;

所述的照明光源(8)为单模激光器,出射激光经单模光纤耦合形成点光源,功率在 10mW ~ 20mW 范围;

所述的第一透镜(2)、第二透镜(3)、第三透镜(5)、第四透镜(9)、第五透镜(11)、第六透镜(14)、第七透镜(17)、第八透镜(20)为双胶合消色差透镜;

所述的 PBS 分束器(4)在照明光波长 λ 为中心的波段内以 1×10^{-3} 消光比的偏振特性透过 P 光,对反射光束 S 光的偏振特性没有定量要求;

所述的线性位移机构(6)为一维位移器,位移精度 1mm,行程 80mm;

所述的旋转毛玻璃(10)为一块表面经过磨沙的玻璃片,具有 75% ~ 80% 的透过率,由电机控制连续旋转,旋转速率范围 1000rpm ~ 2000rpm;

所述的孔径光阑(12)为圆形小孔,孔径在 1mm 到 10mm 范围内连续调节;

所述的二向色耦合分束器(13)具有反射波长为 λ 的照明光和透射波长为 λ' 的视标光的能力;

所述的反射镜(16)为薄型平面反射镜,镜面直径或边长为 10mm ~ 15mm,厚度 1mm ~ 2mm;

所述的分光棱镜(18)为普通分光棱镜。

6. 根据权利要求 5 所述的普适性液晶自适应像差校正视网膜成像系统,其特征是当需要改变眼底成像区域时,就在 LCD 屏上移动“E”的位置。

7. 根据权利要求 6 所述的普适性液晶自适应像差校正视网膜成像系统,其特征是 TFT-LCD 屏的发光波长 λ' 在可见光波段,波段宽度不超过 50nm,TFT-LCD 屏的像素尺寸在 $200 \mu m \sim 400 \mu m$ 。

8. 根据权利要求 5 所述的普适性液晶自适应像差校正视网膜成像系统,其特征是:

- 1) 采用 3.5 英寸 TFT-LCD 屏, 像素尺寸 $300 \mu\text{m}$, 前面放置 $510\text{nm} \sim 550\text{nm}$ 的窄带滤光片, 使发光中心波长 λ' 为 530nm , 驱动 LCD 屏使其显示出 1.5mm 的“E”;
- 2) 所用照明光源 (8) 为小型半导体激光器, 纤芯直径 $100 \mu\text{m}$, 发光波长 λ 为 808nm ;
- 3) 第一透镜 (2)、第二透镜 (3)、第三透镜 (5)、第四透镜 (9)、第五透镜 (11)、第六透镜 (14)、第七透镜 (17)、第八透镜 (20) 表面均镀有增透膜, 口径依次为: $20\text{mm}, 25\text{mm}, 25\text{mm}, 10\text{mm}, 20\text{mm}, 40\text{mm}, 20\text{mm}, 20\text{mm}$; 焦距依次为: $150\text{mm}, 250\text{mm}, 200\text{mm}, 30\text{mm}, 50\text{mm}, 250\text{mm}, 86\text{mm}, 100\text{mm}$;
- 4) 旋转毛玻璃 (10) 磨沙薄玻璃片的厚度为 1mm , 眼底照明用激光的透过率为 75% ; 将磨沙薄玻璃片粘贴于电机转轴上, 电机以 1000rpm 的速度旋转;
- 5) 所用孔径光阑 (12), 采用 1mm 到 10mm 连续调节的小孔光阑, 被测的瞳孔直径为 6.0mm , 孔径光阑 (12) 的直径控制到 7.3mm ;
- 6) 所用二向色耦合分束器 (13), 口径 25mm , 对 808nm 波长的眼底照明光具有 95% 的反射率, 对 550nm 波长的视标光具有 95% 的透过率;
- 7) 所用 PBS 分束器 (4), 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 1×10^{-3} ;
- 8) 所用液晶校正器 (15), 纯位相型反射式 LCOS 器件, 位相调制深度为 0.97λ 即 785nm , 像素数 512×512 个, 50 灰度级, 像素面积 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$, 在电场中的响应时间 15ms , 反射率 61% ;
- 9) 所用的反射镜 (16), 面积 $15\text{mm} \times 15\text{mm}$, 厚度 2mm , 反射率 95% ;
- 10) 所用的分光棱镜 (18) 对 808nm 波长眼底照明光的透反比约为 $1 : 1$;
- 11) 所用波前探测器 (19) 有效微透镜数为 $m = 233, 2.5\text{mm}$ 接收孔径, 配置的 CCD 为 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 0.05λ , 均方根值 0.01λ ;
- 12) 所用成像 CCD (21) 为 ANDOR 公司生产, 型号 EM-DV897, 512×512 像素, 曝光时间 15ms 。

普适性液晶自适应像差校正视网膜成像系统

技术领域

[0001] 本发明属于显微成像技术领域,涉及高度屈光不正人眼的高阶像差校正光学设计,具体地说是一种普适性液晶自适应像差校正视网膜成像系统,能够解决眼底自适应成像技术在 800 度以上近视或 200 度散光条件下清晰成像困难的问题。

背景技术

[0002] 视网膜上的血管是人体唯一可以直接看清的小血管,属于终末血管系统,任何病理性的破坏和血管梗阻都能导致组织缺氧坏死或破裂渗漏。因此眼底改变是全身疾病的表 现,临床常用检眼镜观察眼底毛细血管的变化来判断病变的情况,如心脑血管及内分泌失调,动脉硬化、高血压病,中心性浆液性脉络视网膜病变,糖尿病视网膜病变等。自上世纪 60 年代以来,检眼镜采用眼底荧光血管造影术,使微细血管的成像对比度增加,可清晰观察直 径 20 微米以上的血管。但眼球是个复杂光学系统,即使是无屈光不正的眼睛也不可能避免地会 存在光学像差,因此 20 微米以下的血管成像,眼底荧光血管造影术也无能为力,更谈不上观 察视觉细胞。这些像差主要来源于:1、眼内各屈光介质厚度不均匀,表面曲率偏差;2、眼 内各屈光介质折射率不均匀;3、眼内各屈光介质不同轴;4、屈光系统对各色光的折射率 不同等。而为增加成像的光强和提高成像的分辨率,经常需要扩瞳,扩瞳后人眼像差又会加 剧,更加制约了眼底检查的效果和成功率。

[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视网膜成像 中的应用。系统用哈特曼波前传感器测量从眼中出射的波前像差,经过计算机的数据处理,然 后驱动变形镜来补偿像差。变形镜自适应光学校正技术可以在 500 度近视以下的较健康 眼睛上获得 3 微米视觉细胞轮廓的清晰成像,但当近视度超过 500 度时成像效果就显著下 降,即使加入近视镜初步补偿,清晰成像仍很困难。这是因为目前使用的变形镜驱动单元数 一般不超过 37 单元,而随近视度增加引入的高阶像差超出了变形镜所能校正的空间频率,也 称为校正器的空间分辨率。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,所以至今未在临床普及。

[0004] 液晶波前校正器的驱动单元可多达几十万到几百万个,其加工工艺非常成熟,空 间分辨率大大高于传统的变形镜。借助于相息图的衍射光学方法,液晶波前校正器的校正 范围可以扩展至 $5 \mu m \sim 8 \mu m$ 。液晶的响应时间是 10ms 左右,液晶自适应系统的校正频率 很容易达到 20Hz,完全满足眼波前自适应校正频率的要求。另外液晶波前校正器工艺成熟, 加工周期短,成本低,因此液晶自适应光学系统在眼底成像中具有很好的应用前景。

[0005] 有 4 项视网膜自适应校正成像系统的中国发明专利提到系统中的校正器可以 是液晶校正器(张雨东,等,中国发明专利:自适应光学视网膜成像系统, ZL99115053.8, ZL99115054.6, ZL99115051.1, ZL99115052.x),其中两项专利中采用共光路设计,在校正器之 前放置了 1/4 波长板,使入射校正器的光是圆偏振光,事实上液晶校正器是不能在圆偏 振光中工作的;另外两项专利也不是针对液晶校正器的优化设计,置于人眼之前的分束镜 将人眼出射的光强损耗一半,这对于能量损耗较大的液晶校正器的系统来说可能是个致命

缺点。

[0006] 目前只有日本报道了对 700 度近视人眼的视觉细胞成像结果 (“In Vivo measurements of cone photoreceptor spacing in myopic eyes from images obtained by an adaptive optics fundus camera,” Y. Kitaguchi, et. al, Jpn. J. Ophthalmol., Vol. 51, p456–461, 2007), 虽然该报道声称可以校正更高度近视的像差, 但没有给出照片。对于 200 度散光人眼的眼底自适应校正图像至今还没有报道过。这些说明普适性自适应像差校正视网膜成像系统还没有设计出来。

[0007] 很多研究小组使用凹透镜来补偿近视人眼的离焦像差、使用柱透镜补偿散光人眼的像散像差, 但成像的清晰程度仍不够高, 说明随着人眼屈光不正程度的增加, 高阶像差也趋严重, 要想解决这个问题, 需同时增加探测器与校正器的分辨率。

发明内容

[0008] 本发明针对现有技术存在的问题, 基于视度调节功能的液晶自适应像差校正系统的光学设计, 为了适用于 200 度散光及其高阶像差严重人眼的有效校正, 同时可定量移动眼底成像区域, 提供一种普适性液晶自适应像差校正视网膜成像系统。

[0009] 本发明的光学结构如图 1, 由视标点光源 1、第一透镜 2、第二透镜 3、PBS 偏振分束器 (PBS 分束器) 4、第三透镜 5、线性位移机构 6、人眼 7、照明光源 8、第四透镜 9、旋转毛玻璃 10、第五透镜 11、孔径光阑 12、二向色耦合分束器 13、第六透镜 14、液晶波前校正器 15、反射镜 16、第七透镜 17、分光棱镜 18、波前探测器 19、第八透镜 20、成像 CCD 21 组成。其中, 视标点光源 1 提供人眼凝视的视标光源, 发光波长在可见光波段, 且为单波长 λ' , 位于第一透镜 2 的焦点处。第一透镜 2 和第二透镜 3 组成共轭透镜组, 使视标点光源 1 成像。PBS 分束器 4 与第二透镜 3 的光轴成 45° 角配置, 使视标点光源 1 的成像光束折轴 90° 。第三透镜 5 到第二透镜 3 的光路长度 d_1 由二者的焦距 f_5 、 f_3 和人眼屈光度数 D 来决定, 需按公式 (1) 进行计算, 其中 D 无单位, 其它参量单位为 mm。人眼 7 位于可 x-y-z 三向线性位移的头托架上, x-y 平面与光轴垂直, 调节头托架可使瞳孔与入射光束中心对准。z 方向平行于光轴, 调节头托架使人眼 7 的瞳孔到第三透镜 5 的距离为 f_5 。

$$[0010] d_1 = (1000 - Df_5) f_5 / 1000 + f_3 \quad (1)$$

[0011] 照明光源 8 为激光点光源, 其波长 λ 依据眼底成像组织的光学特性而定, 但不同于视标光源的波长 $\lambda \neq \lambda'$ 。旋转毛玻璃 10 置于第五透镜 11 和第四透镜 9 的焦面处。第五透镜 11 与第二透镜 3 通过二向色耦合分束器 13 也组成共轭透镜组, 二者之间的光路长度为第二透镜 3 的焦距 f_3 , 使照明光源 8 的像与视标点光源 1 的像重合。孔径光阑 12 紧贴于第五透镜 11 之后, 其孔径可调节, 以控制入眼光束略小于被测人眼瞳孔的直径。二向色耦合分束器 13 置于孔径光阑 12 之后, 并插入第一透镜 2 与第二透镜 3 之间, 形成与两互为垂直的光轴成 45° 角配置, 两互为垂直的光轴是指第四透镜 9、第五透镜的光轴与第一透镜 2 和第二透镜 3 组成共轭透镜组的光轴垂直, 反射端和透射端分别面向孔径光阑 12 和第一透镜 2。二向色耦合分束器 13 的作用是利用照明光源与视标光源的光波长不同, 分别反射照明光、透射视标光源的光, 形成二光束共光路进入后续系统。第二透镜 3 和第三透镜 5 通过 PBS 分束器 4 组成共轭透镜组, 用于将孔径光阑 12 成像于人眼瞳孔处。第六透镜 14 与第二透镜 3 通过 PBS 分束器 4 形成共焦面配置, 并使其焦点向左侧偏离 L 距离, L 为

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置于第六透镜14的焦点，其校正偏振方向与P偏振光吻合，从液晶波前校正器15反射的光束在到达反射镜16时反射与入射二者的光轴能相隔2L距离，使得只有反射光束被反射镜16接收。反射镜16与第六透镜14和第七透镜17的光轴成45°角放置，将光束折轴。后续的第七透镜17和第八透镜20是共轭透镜组，二者之间的距离为前者的焦距，光束通过共轭透镜组后可在成像CCD21上成像。成像CCD21置于第八透镜20的焦点处。在第七透镜17和第八透镜20中间放置分光棱镜18，将此平行光束分成互为垂直的两束。垂直向的光束进入波前探测器19，波前探测器19为哈特曼波前探测器，其位置须通过分光棱镜18与第七透镜17共轭，故二者之间的光路长度为第七透镜17的焦距长度。

[0012] 在这样设计中，本发明视标点光源1和照明光源8都会在第三透镜5的前焦点处成虚像，该成像面到被测人眼瞳孔的距离为明视距离。人眼凝视明视距离处的视标并达到视觉清晰时，可大幅减少离焦像差。用明视距离处的照明点光源照亮眼底，从眼底反射出来的光成为信号光，且为消偏振的球面波，经人眼前角膜出射后携带着前角膜反射干扰光通过第三透镜5会聚其焦点处，然后到达PBS分束器4。在PBS分束器4的透射端只有携带眼底信号的P偏振光出射，滤除掉了角膜反射的S偏振干扰光。P偏振光再经过第六透镜14后成为与液晶波前校正器15孔径匹配的平行光束，且P偏振方向与液晶波前校正器15的校正偏振方向一致。投射到液晶波前校正器15的眼底信号光束经波前像差校正后反射，再经过第六透镜14成为会聚光，并与入射光分离，到达反射镜16折轴会聚成像于第七透镜17的前焦点处。该像点发出的光经分光棱镜18又被分为两束，一束进入波前探测器19检测校正后的残余像差，另一束在共轭透镜组第七透镜17和第八透镜20的作用下将眼底图像成像于CCD21。

[0013] 为应对人眼的各种高阶像差，并能控制眼底成像区域的位置，达到普适性的像差自适应校正视网膜成像的目的，下面对系统中关键器件的参数进行详细说明。

[0014] 所述的视标点光源1由TFT-LCD屏构成，能够显示上下尺寸不超过2mm的“E”字，“E”即为视标点光源1。当需要改变眼底成像区域时，就在LCD屏上移动“E”的位置即可。为增强凝视效果，TFT-LCD屏的发光波长 λ' 设计在可见光波段，波段宽度不超过50nm。TFT-LCD屏的像素尺寸在 $200\text{ }\mu\text{m} \sim 400\text{ }\mu\text{m}$ 。

[0015] 所述的液晶校正器15为纯位相型反射式液晶波前校正器，位相调制深度为 $0.95\lambda \sim 1.1\lambda$ （ λ 为照明光源的波长），液晶对驱动电压的响应时间 $\leq 15\text{ms}$ ，像素数 $\geq 512 \times 512$ 个，灰度级数 ≥ 50 ，此处灰度级对应校正器位相调制步长的电压分度值，位相调制步长 $\leq \lambda/50$ 。

[0016] 所述的波前探测器19为哈特曼型波前探测器，具有 $200 \sim 300$ 个有效微透镜， $2\text{mm} \sim 5\text{mm}$ 接收孔径，探测波段以照明光源的光波长为中心，量子效率 $> 50\%$ ，工作频率 $\geq 70\text{Hz}$ ，测量误差峰谷值 $\leq 0.1\lambda$ 、均方根值 $\leq 0.02\lambda$ 。

[0017] 所述的成像CCD21，在照明光源的光波长处量子效率 $> 50\%$ 、在读出速率10MHz时读出噪声 ≤ 7 个电子，像素数 $\geq 512 \times 512$ 个。

[0018] 所述的照明光源8为单模激光器，其波长 $\lambda \neq \lambda'$ ，出射激光经单模光纤耦合形成点光源，功率在 $10\text{mW} \sim 20\text{mW}$ 范围。

[0019] 所述的第一透镜2、第二透镜3、第三透镜5、第四透镜9、第五透镜11、第六透镜

14、第七透镜 17、第八透镜 20 为双胶合消色差透镜。

[0020] 所述的 PBS 分束器 4 在照明光波长 λ 为中心的波段内以 1×10^{-3} 消光比的良好偏振特性透过 P 光, 对反射光束 S 光的偏振特性没有定量要求。

[0021] 所述的线性位移机构 6 为一维位移器, 位移精度 1mm, 行程 80mm。

[0022] 所述的旋转毛玻璃 10 为一块表面经过磨沙的玻璃片, 具有 75%~80% 的透过率, 由电机控制连续旋转, 旋转速率范围 1000rpm ~ 2000rpm。

[0023] 所述的孔径光阑 12 为圆形小孔, 孔径可以在 1mm 到 10mm 范围内连续调节。孔径光阑 12 也可以为环形光阑, 产生环形光束入射人眼, 直接滤除人眼角膜正入射区域的强反射干扰光。

[0024] 所述的二向色耦合分束器 13 具有反射波长为 λ 的照明光和透射波长为 λ' 的视标光的能力。

[0025] 所述的反射镜 16 为薄型平面反射镜, 镜面直径或边长为 10mm ~ 15mm, 厚度 1mm ~ 2mm。

[0026] 所述的分光棱镜 18 为普通分光棱镜。

[0027] 在本发明中, 对液晶自适应像差校正视网膜成像系统进行了关键器件的参数设计, 使之不仅能够对 800 度以上单纯近视人眼进行有效校正, 而且可以对 200 度散光及其高阶像差严重的人眼进行有效校正, 形成普适性的液晶自适应光学眼底成像系统。

附图说明

[0028] 图 1 为本发明的光学结构示意图。其中, 1 为视标点光源, 2 为第一透镜, 3 为第二透镜, 4 为 PBS 分束器, 5 为第三透镜, 6 为线性位移机构, 7 为人眼, 8 为照明光源, 9 为第四透镜, 10 为旋转毛玻璃, 11 为第五透镜, 12 为孔径光阑, 13 为二向色耦合分束器, 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 为分光棱镜, 19 为波前探测器, 20 为第八透镜。21 为成像 CCD。视标点光源 1 上的“E”可以移动, 用来改变眼底成像区域。系统中的液晶波前校正器 15 和波前探测器 19 具备很高的分辨率, 可以满足 200 度散光人眼的高阶像差校正要求。

[0029] 图 2 为 200 度散光兼有 200 度近视人眼在本发明系统上获得的视网膜视觉细胞图像, 其中 (a) 为校正前, (b) 为校正后。

具体实施方式

[0030] 1) 采用 3.5 英寸 TFT-LCD 屏, 像素尺寸 $300 \mu\text{m}$, 前面放置 $510\text{nm} \sim 550\text{nm}$ 的窄带滤光片, 使发光中心波长 λ' 为 530nm , 驱动 LCD 屏使其显示出 1.5mm 的“E”作为视标点光源 1。

[0031] 2) 所用照明光源 8 为小型半导体激光器, 带有光纤耦合, 纤芯直径 $100 \mu\text{m}$, 发光波长 λ 为 808nm , 输出功率在 $10\text{mW} \sim 20\text{mW}$ 范围可调。

[0032] 3) 第一透镜 2、第二透镜 3、第三透镜 5、第四透镜 9、第五透镜 11、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: 20mm 、 25mm 、 25mm 、 10mm 、 20mm 、 40mm 、 20mm 、 20mm ; 焦距依次为: 150mm 、 250mm 、 200mm 、 30mm 、 50mm 、 250mm 、 86mm 、 100mm 。

[0033] 4) 选择人眼 7 为 200 度散光兼有 200 度近视, 其明视距离 200mm, 调节线性位移机构 6 使第三透镜 5 到第二透镜 3 的光路长度为 250mm, 在较暗环境下瞳孔直径稳定在 6mm。

[0034] 5) 制做旋转毛玻璃 10, 选取厚度为 1mm 的磨沙薄玻璃片, 眼底照明用激光的透过率为 75%。将磨沙薄玻璃片粘贴于电机转轴上, 电机以 1000rpm 的速度旋转, 从而消除了激光散斑效应。

[0035] 6) 所用孔径光阑 12, 采用 1mm 到 10mm 连续调节的小孔光阑, 紧贴于第五透镜 11 后。由于被测的瞳孔直径为 6.0mm, 故将孔径光阑 12 的直径控制到 7.3mm, 使其共轭像略小于瞳孔。

[0036] 7) 所用二向色耦合分束器 13, 口径 25mm, 对 808nm 波长的眼底照明光具有 95% 的反射率, 对 550nm 波长的视标光具有 95% 的透过率。

[0037] 8) 所用 PBS 分束器 4, 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 1×10^{-3} 。

[0038] 9) 所用液晶校正器 15, 纯位相型反射式 LCOS 器件, 位相调制深度为 0.97λ (785nm), 像素数 512×512 个, 50 灰度级, 像素面积 $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$, 在电场中的响应时间 15ms, 反射率 61%。

[0039] 10) 所用的反射镜 16, 面积 $15\text{mm} \times 15\text{mm}$, 厚度 2mm, 反射率 95%。

[0040] 11) 所用的分光棱镜 18 为普通分光棱镜, 对 808nm 波长眼底照明光的透反比约为 1 : 1。

[0041] 12) 所用波前探测器 19, 哈特曼型, 有效微透镜数为 $m = 233$, 2.5mm 接收孔径, 配置的 CCD 为 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 0.05λ , 均方根值 0.01λ 。

[0042] 13) 所用成像 CCD21, ANDOR 公司生产, 型号 EM-DV897, 512×512 像素, 曝光时间 15ms。

[0043] 14) 利用上述元件按照图 1 所示的光路搭建了视度自调节液晶自适应像差校正视网膜成像光学结构, 配置了自适应控制与信号处理分系统, 形成完整功能的视度自调节自适应像差校正成像系统。

[0044] 15) 为使瞳孔能便利地与入射光轴对准, 设置瞳孔相机对瞳孔位置进行标定: 在人眼前上方 20mm ~ 30mm 距离处放置一红外 LED, 发光波长 830nm ~ 900nm, 照明被测者瞳孔, 使瞳孔成像于第二透镜 3 的焦点处。在第二透镜 3 和二向色耦合分束器 13 之间再插入一分色片, 使红外 LED 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。在第二透镜 3 的折轴焦面处设置瞳孔相机, 在瞳孔的设计位置放置一漫反射屏取代人眼。打开照明光源 8, 反射屏上一圆形区域被照亮, 该亮斑的中心即为瞳孔中心应处的位置。开启瞳孔相机拍摄漫反射屏上的亮斑。以该亮斑中心为圆心, 基本瞳孔半径 3mm 为半径画一圆圈, 作为瞳孔的标准位置, 将该圆圈保存到文件, 存入程序控制计算机中。关闭照明光源 8, 撤出漫反射屏。

[0045] 16) 人眼瞳孔对准入射光轴的步骤: 将上步骤获得的标记瞳孔位置的圆圈附加到瞳孔相机的图像显示区域, 以该圆圈为标准对准瞳孔。打开视标点光源 1, 粗调头架以使人眼能看到视标。开启瞳孔相机, 对人眼瞳孔进行录像, 细调头架, 直到瞳孔像与标定圆圈重合。

[0046] 17) 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 7 用模拟眼替代; 模拟眼由一双胶合透镜和一漫反射屏组成, 其中双胶合透镜的焦距为 20mm, 模拟人眼晶状体, 放置在原人眼瞳孔所处的位置, 漫反射屏模拟视网膜, 放置在原人眼视网膜所处的位置。开启照明光源 8, 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峰谷值最小。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。

[0047] 响应矩阵测量的基本原理: 令 Zernike 多项式每一项前面的系数为 1, 以波长 λ 为单位, 分别解出 36 项 Zernike 项的面形位相数值解; 利用事先测好的液晶波前校正器 15 的位相 - 灰度级响应关系, 依次将每一项 Zernike 多项式 $Z_k(x, y)$ 的面形位相数值转换成液晶校正器 15 上的灰度级分布图形, 然后通过计算机逐个施加到液晶波前校正器 15 上。计算机读出波前探测器 19 对应每项 Zernike 模式的微透镜焦斑阵列在 x 轴和 y 轴上的斜率分布。因为第一项为平移模式可以省略, 所以由这一系列波前斜率组成一个 $2 \times (M-1)$ 行、 $2 \times m$ 列的二维矩阵 R,

$$[0048] R = \begin{bmatrix} R_{x_1Z_2} & \cdots & R_{x_iZ_2} & \cdots & R_{x_mZ_2} & R_{y_1Z_2} & \cdots & R_{y_iZ_2} & \cdots & R_{y_mZ_2} \\ \vdots & \vdots \\ R_{x_1Z_k} & \cdots & R_{x_iZ_k} & \cdots & R_{x_mZ_k} & R_{y_1Z_k} & \cdots & R_{y_iZ_k} & \cdots & R_{y_mZ_k} \\ \vdots & \vdots \\ R_{x_1Z_M} & \cdots & R_{x_iZ_M} & \cdots & R_{x_mZ_M} & R_{y_1Z_M} & \cdots & R_{y_iZ_M} & \cdots & R_{y_mZ_M} \end{bmatrix}$$

[0049] 此处 k 为 Zernike 多项式项序数, k 最大为 M = 36, 故 k = 2...36; m 为哈特曼探测器上的有效微透镜个数, 233 个。这个二维矩阵即为响应矩阵 R。

[0050] 18) 撤掉模拟眼, 被测量人眼 7 位于图 1 所示位置处, 开始人眼眼底的自适应校正成像过程: 首先点亮视标点光源 1, 令人眼主动凝视成像面处的视标, 直到视觉清晰。先后开启旋转毛玻璃 10、成像 CCD21 和照明光源 8, 成像 CCD21 的曝光时间设置为 15ms。波前探测器 19 接收经人眼 7 反射出来的光, 将其波前转化为 2m 列波前斜率向量, 此处 m = 233;

[0051]

$$\varphi = [\varphi_{x_1} \ \cdots \ \varphi_{x_i} \ \cdots \ \varphi_{x_m} \ \varphi_{y_1} \ \cdots \ \varphi_{y_i} \ \cdots \ \varphi_{y_m}]$$

[0052] 则由 $\varphi = aR$ (a 是 Zernike 多项式每一项前面的系数 a_k 构成的向量) 有: $a = \varphi R^{-1}$, 据此式即可得到所探测波前的 Zernike 方程, 解出波前上的位相数值。根据液晶波前校正器 15 的位相与灰度级的关系, 将波前位相数值转换为灰度级反馈给液晶波前校正器 15, 液晶波前校正器 15 进行波前校正。成像 CCD21 一直工作, 记录下校正前后的眼底视网膜图像, 如图 2。

[0053] 19) 分析结果:

[0054] 自适应校正前后拍摄的 200 度散光兼有 200 度近视人眼的视觉细胞图像如图 2(a)、(b) 所示, 看出自适应校正效果显著, 由校正前图 2(a) 什么信息也看不清楚的图片看到像差校正后图 2(b) 清晰的 $3 \mu\text{m}$ 直径的视觉细胞图像。在这样高度散光人眼上获得的视觉细胞图像, 迄今还未见公开发表过, 表明了本发明的普适性效果。

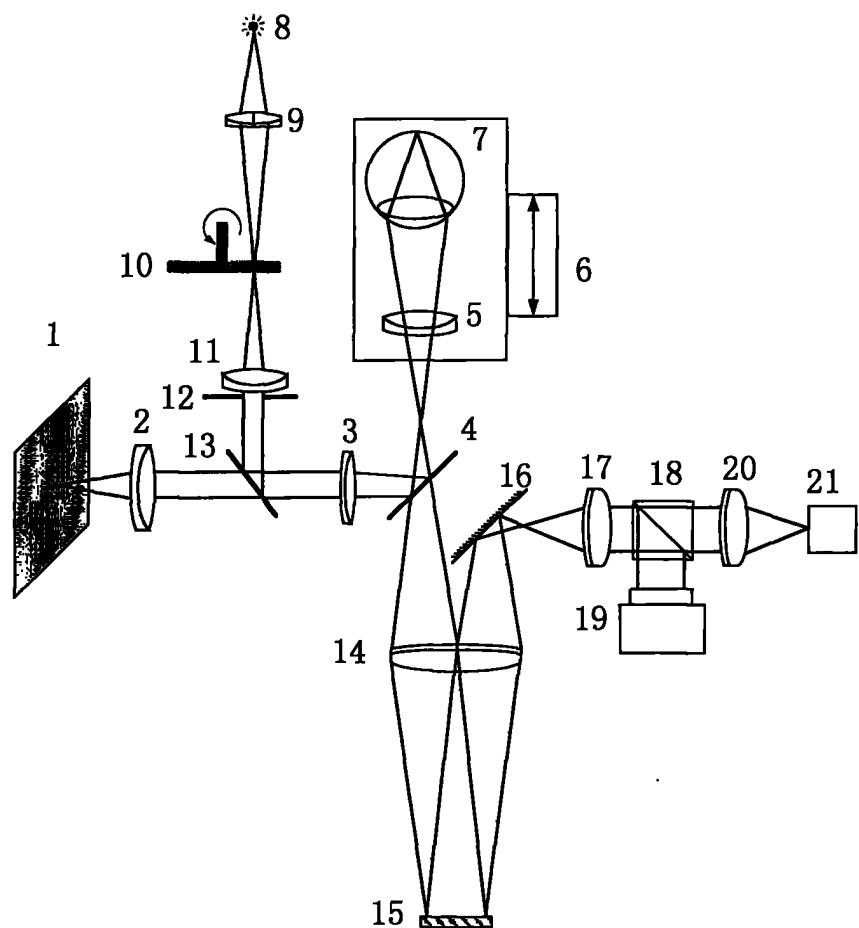


图 1

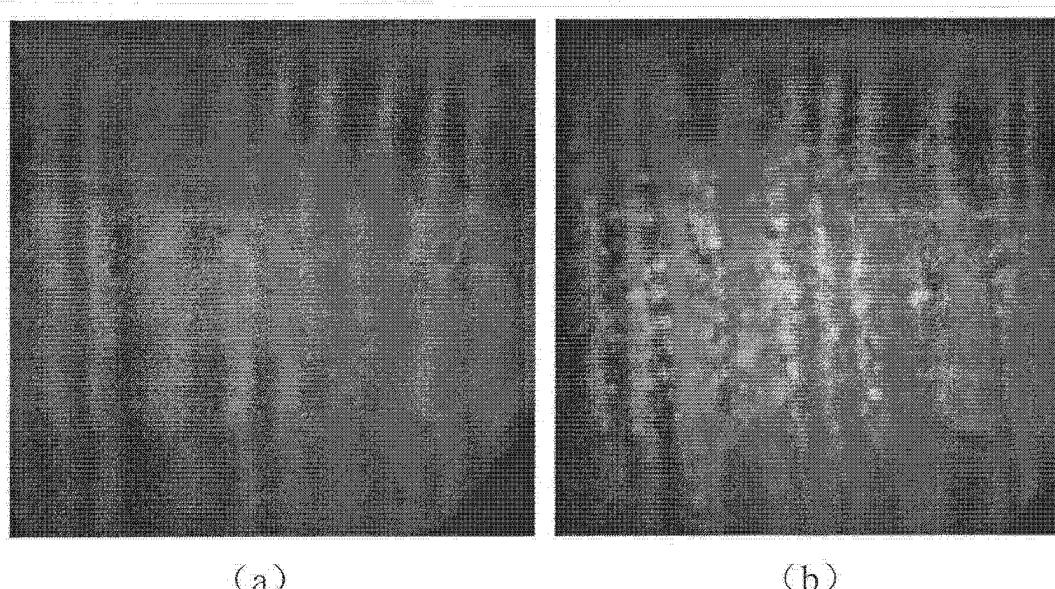


图 2