

## (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 101797149 A

(43) 申请公布日 2010. 08. 11

(21) 申请号 200910215480. 2

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2009. 12. 31

A61B 3/12(2006. 01)

(71) 申请人 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

A61B 3/14(2006. 01)

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

权利要求书 2 页 说明书 6 页 附图 2 页

### (54) 发明名称

能量高效利用的液晶自适应像差校正视网膜成像装置

### (57) 摘要

本发明属于自适应光学成像技术领域，涉及眼底视网膜高分辨率成像的光学设计，是一种能量高效利用的液晶自适应像差校正视网膜成像装置。其特征是将通常置于液晶校正器前光路的偏振分光棱镜移至其后，而在原来偏振分光棱镜的位置上设置一个高透反比的分束镜，再插入环形光阑遮挡住垂直入射人眼的光，使前角膜直接反射的干扰光基本被消除。偏振分光棱镜对应液晶校正器的e光偏振方向放置，将校正后的e光与未校正的o光分开。在后续光路中使e光进入成像CCD相机，o光进入哈特曼波前探测器；控制器依据哈特曼探测的波前，驱动液晶校正器进行像差校正，使CCD中的成像变得清晰。本发明能够使成像与探测的光能利用率均提高近1倍，可以大幅降低成像相机与探测器的成本。

1. 一种能量高效利用的液晶自适应像差校正视网膜成像装置,其特征是由视标点光源(1)、第一透镜(2)、第二透镜(3)、分束镜(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)、环形光阑(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)、偏振分光棱镜(18)、波前探测器(19)、第八透镜(20)、成像CCD相机(21)构成,在第三透镜(5)与第六透镜(14)之间设置一个高透反比的分束镜(4),插入环形光阑(12)遮挡住垂直入射人眼(7)的光,使前角膜直接反射的干扰光被消除;偏振分光棱镜(18)对应液晶校正器(15)的e光偏振方向放置,将校正后的e光与未校正的o光分开;在后续光路中使e光进入成像CCD相机(21),o光进入波前探测器(19)。

2. 根据权利要求1所述的能量高效利用的液晶自适应像差校正视网膜成像装置,其特征是:视标点光源(1)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;分束镜(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)在分束镜(4)与人眼(7)之间;照明光源(8)为激光点光源,位于第四透镜(9)的焦点处;旋转毛玻璃(10)置于第五透镜(11)与第四透镜(9)之间,且在两者的焦面处;第五透镜(11)与第二透镜(3)通过二向色耦合分束器(13)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<sub>3</sub>;第二透镜(3)和第三透镜(5)通过分束镜(4)组成共轭透镜组,用于将环形光阑(12)成像于人眼(7)瞳孔处;环形光阑(12)置于第五透镜(11)与二向色耦合分束器(13)之间,且紧贴于第五透镜(11);二向色耦合分束器(13)与第五透镜(11)和第二透镜(3)组成共轭透镜组的光轴成45°角配置,同时也与第一透镜(2)和第二透镜(3)组成共轭透镜组的光轴成45°角配置;第六透镜(14)与第二透镜(3)通过分束镜(4)共焦面配置,并使其焦点向左侧偏离L长距离,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)的焦点处,其校正偏振方向即e光的偏振方向与后续上透过的P光偏振方向吻合;从液晶波前校正器(15)反射的光束在到达与光轴成45°角放置的反射镜(16)时折轴;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;波前探测器(19)与第七透镜(17)的光路长度为第七透镜(17)的焦距长度,成像CCD相机(21)置于第八透镜(20)的焦点处;在第七透镜(17)和第八透镜(20)中间放置偏振分光棱镜(18),使未被校正的o光折轴进入波前探测器(19)以探测像差,被校正的e光透过进入成像CCD相机(21)而成像。

3. 根据权利要求2所述的能量高效利用的液晶自适应像差校正视网膜成像装置,其特征是:视标点光源(1)在可见光波段,波长为λ';第三透镜(5)和人眼(7)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成90°角,第五透镜(11)与第一透镜(2)和第二透镜(3)组成共轭透镜组的光轴垂直,即成90°角,第一透镜(2)和第二透镜(3)组成共轭透镜组的光轴与第六透镜(14)、第三透镜(5)的光轴垂直;照明光源(8)的波长λ依据眼底成像组织的光学特性而定,λ≠λ';二向色耦合分束器(13)的反射端和透射端分别面向环形光阑(12)和第一透镜(2),分别反射照明光、透射视标光源的光。

4. 根据权利要求3所述的能量高效利用的液晶自适应像差校正视网膜成像装置,其特征是:第三透镜(5)到第二透镜(3)的光路长度d<sub>1</sub>=(1000-Df<sub>5</sub>)f<sub>5</sub>/1000+f<sub>3</sub>,其中D是屈光度数、无单位,且D≥4、当近视度低于400度时D=4,f<sub>5</sub>和f<sub>3</sub>分别为第三透镜(5)和第二

透镜(3)的焦距,单位为mm;人眼(7)位于可位移的头托架上,调节头托架使瞳孔与入射光束中心对准,并使瞳孔到第三透镜(5)的距离为 $f_5$ 。

5. 根据权利要求4所述的能量高效利用的液晶自适应像差校正视网膜成像装置,其特征是:照明光源(8)的功率在10mW~20mW范围;人眼瞳孔处环形光阑(12)的像的内径为2mm~3mm,外径比人眼瞳孔小0.1mm~0.2mm;液晶波前校正器(15)的响应时间≤15ms的;分束镜(4)相对照明光和视标光的透反比为9~4的范围;旋转毛玻璃(10)的透过率为75%~80%,驱动旋转毛玻璃(10)的电机旋转速率1000rpm;波前探测器(19)为哈特曼型波前探测器,对照明光源的量子效率>20%,工作频率70Hz~80Hz;成像CCD相机(21),在照明光源的光波长处量子效率>20%、在读出速率10MHz时读出噪声≤10个电子,像素数512×512~640×512个。

6. 根据权利要求5所述的能量高效利用的液晶自适应像差校正视网膜成像装置,其特征是:

- 1) 视标点光源(1)采用发光波长 $\lambda'$ 为550nm的发光二极管;
- 2) 照明光源(8)为小型半导体激光器,带有光纤耦合,纤芯直径100μm,发光波长 $\lambda$ 为808nm;
- 3) 分束镜(4),对808nm波长眼底照明光的透反比约为4;
- 4) 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:50mm、250mm、200mm、30mm、50mm、250mm、86mm、100mm。
- 5) 旋转毛玻璃(10)是厚度为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;
- 6) 环形光阑(12)的外径7.3mm、内径3mm,紧贴于第五透镜(11)后;通过第二透镜(3)和第三透镜(5)成像到人眼瞳孔位置,其像的外径5.8mm、内径2.4mm;
- 7) 二向色耦合分束器(13)的口径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;
- 8) 反射镜(16),面积15mm×15mm,厚度2mm,反射率95%;
- 9) 偏振分光棱镜(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 $1\times 10^{-3}$ ;
- 10) 波前探测器(19)的波前探测速度70Hz,量子效率在808nm波长处为21%;
- 11) 所用成像CCD相机(21),德国cooke公司生产,型号为pixelfly-QE,像素数640×512,量子效率在808nm波长处为21%,读出噪声在读出速率10MHz时为7个电子,成像曝光时间14ms。

## 能量高效利用的液晶自适应像差校正视网膜成像装置

### 技术领域

[0001] 本发明属于眼底显微成像技术领域,涉及高对比度的眼底自适应校正成像技术,具体地说是一种能量高效利用的液晶自适应像差校正视网膜成像装置。

### 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。自上个世纪60年代以来,检眼镜采用了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;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] 目前,有4项中国发明专利提到视网膜自适应校正成像系统可以用液晶校正器(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射出的光强损耗一半,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] 眼底视网膜相当于光学散射板,采用偏振光入射,反射出来的光会消除大部分偏振特性,因此眼底反射率很低,最多只有入射光的0.1%。从眼睛射出的光能还必须分出一半进入哈特曼波前探测器,这样液晶校正器工作在偏振光条件会有更多光能损失,使得成

像能量不会超过眼底出射光能的 25%。再者视觉系统能够允许入射的光能本来就很低。因此液晶自适应系统的成像能量是非常关键的问题,对相机的灵敏度、即量子效率要求很高。

[0007] 日本报道了采用液晶自适应系统在 700 度近视人眼上获得的视觉细胞成像 (“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, 2007), 实验中使用了量子效率高达 65% 的 EM 相机 C9100-02, 价格高达 20 万元左右。

## 发明内容

[0008] 为了克服现有技术的上述缺点,本发明将通常置于液晶校正器前光路的偏振分光棱镜移至其后,再利用分束镜、环形光阑等元件,目的是提供一种能量高效利用的液晶自适应像差校正视网膜成像装置。

[0009] 本发明将通常置于液晶校正器前光路的偏振分光棱镜移至其后,而在原来偏振分光棱镜的位置上设置一个高透反比的分束镜,再插入环形光阑遮挡住垂直入射人眼的光,使前角膜直接反射的干扰光基本被消除。偏振分光棱镜对应液晶校正器的 e 光偏振方向放置,将校正后的 e 光与未校正的 o 光分开。在后续光路中使 e 光进入成像 CCD 相机,o 光进入哈特曼波前探测器。控制器依据哈特曼探测的波前,驱动液晶校正器进行像差校正,使成像 CCD 相机中的成像变得清晰。

[0010] 本发明的结构如图 1,由视标点光源 1、第一透镜 2、第二透镜 3、分束镜 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、环形光阑 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、偏振分光棱镜 18、波前探测器 19、第八透镜 20、成像 CCD 相机 21 组成。其中,视标点光源 1 提供人眼凝视的光标,以固定成像区域,减小离焦像差,其发光波长  $\lambda'$  设置在可见光波段,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。分束镜 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 在分束镜 4 与人眼 7 之间,第三透镜 5 和人眼 7 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成 90° 角。第三透镜 5 到第二透镜 3 的光路长度 d<sub>1</sub> 由二者的焦距 f<sub>5</sub>、f<sub>3</sub> 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,且 D ≥ 4、当近视低于 400 度时 D = 4,其它参量单位为 mm。人眼 7 位于可位移的头托架上,调节头托架使瞳孔与入射光束中心对准,并使瞳孔到第三透镜 5 的距离为 f<sub>5</sub>,f<sub>5</sub> 为第三透镜 5 的焦距。

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

[0012] 照明光源 8 为激光点光源,其波长  $\lambda$  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,即  $\lambda \neq \lambda'$ ,功率在 10mW ~ 20mW 范围,位于第四透镜 9 的焦点处。旋转毛玻璃 10 置于第五透镜 11 与第四透镜 9 之间,且在两者的焦面处。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<sub>3</sub>。第五透镜 11 与第一透镜 2 和第二透镜 3 组成共轭透镜组的光轴垂直,即成 90° 角。环形光阑 12 置于第五透镜 11 与二向色耦合分束器 13 之间,且紧贴于第五透镜 11。由于人眼前角膜近似为球面,只有在球面顶点处入射光才能垂直入射,因此球面顶点为圆心约 1mm 半径的圆面上反射出来的光会与眼底反射出来的信号光重合,干扰成像光束;环形

光阑 12 正好遮挡住垂直入射人眼的光,使前角膜直接反射的干扰光基本被消除。二向色耦合分束器 13 与第五透镜 11 和第二透镜 3 组成共轭透镜组的光轴成 45° 角配置,同时也与第一透镜 2 和第二透镜 3 组成共轭透镜组的光轴成 45° 角配置,也就是说与两互为垂直的光轴成 45° 角配置。二向色耦合分束器 13 的反射端和透射端分别面向环形光阑 12 和第一透镜 2,分别反射照明光、透射视标光源的光。第二透镜 3 和第三透镜 5 通过分束镜 4 组成共轭透镜组,用于将环形光阑 12 成像于人眼瞳孔处。人眼瞳孔处环形光阑 12 的像的内径为 2mm ~ 3mm,外径比人眼瞳孔小 0.1mm ~ 0.2mm。第六透镜 14 与第二透镜 3 通过分束镜 4 共焦面配置,并使其焦点向左侧偏离 L 长距离,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。第一透镜 2 和第二透镜 3 组成共轭透镜组的光轴与第六透镜 14 和第三透镜 5 的光轴垂直。响应时间≤ 15ms 的液晶波前校正器 15 置于第六透镜 14 的焦点,其校正偏振方向即 e 光的偏振方向与后续偏振分光棱镜 18 上透过的 P 光偏振方向吻合。从液晶波前校正器 15 反射的光束在到达与光轴成 45° 角放置的反射镜 16 时折轴。后续的第七透镜 17 和第八透镜 20 是共轭透镜组,二者之间的距离为第七透镜 17 的焦距。波前探测器 19 与第七透镜 17 的光路长度为第七透镜 17 的焦距长度。成像 CCD 相机 21 置于第八透镜 20 的焦点处。在第七透镜 17 和第八透镜 20 中间放置偏振分光棱镜 18,使未被校正的 o 光折轴进入波前探测器 19 以探测像差,被校正的 e 光透过进入成像 CCD 相机 21 而成像。

[0013] 为高效率利用眼底出射的能量,所述的分束镜 4 相对照明光和视标光的透反比设计为 9 ~ 4 的范围。所述的旋转毛玻璃 10 的透过率为 75% ~ 80%,驱动旋转毛玻璃 10 的电机旋转速率 1000rpm。所述的波前探测器 19 为哈特曼型波前探测器,具有 196 ~ 225 个有效微透镜,2mm ~ 5mm 接收孔径,对照明光源的量子效率> 20%,工作频率 70Hz ~ 80Hz。所述的成像 CCD 相机 21,在照明光源的光波长处量子效率> 20%、在读出速率 10MHz 时读出噪声≤ 10 个电子,像素数 512×512 ~ 640×512 个。

[0014] 在本发明中,对视网膜成像的液晶自适应系统进行高能量利用率的光学设计,使眼底出射的成像光能和探测光能利用率均提高近 1 倍,可以大幅降低成像相机和探测器的成本,解决了视网膜成像系统中对成像相机的灵敏度限制,增大该系统的普适性。

## 附图说明

[0015] 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 为分束镜,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 为环形光阑,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 为偏振分光棱镜,19 为波前探测器,20 为第八透镜,21 为成像 CCD 相机;由于环形光阑 12 的作用,从人眼 7 出射的光束基本不含前角膜反射的干扰光,且以 80% ~ 90% 的透过率通过分束镜 4,使到达波前探测器 19 和成像 CCD 相机 21 的光能量均提高近 1 倍。

[0016] 图 2 为 800 度近视兼有 150 度散光人眼的视网膜视觉细胞图像,其中 (a) 为校正前,(b) 校正后,使用本发明中廉价的成像 CCD 相机(德国 cooke 公司 pixelfly-QE) 拍摄,(c) 校正后,由另外系统使用高档的成像 CCD 相机(英国 ANDOR 公司 EM-DV897,量子效率 70%) 拍摄。表明在本发明的系统上,成像 CCD 相机量子效率从 70% 降至 21% 后仍能获得

同样对比度。

### 具体实施方式

- [0017] 1) 采用发光波长  $\lambda'$  为 550nm 的发光二极管作为视标点光源 1。
- [0018] 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  $\lambda$  为 808nm, 输出功率在 10mW ~ 20mW 范围可调。
- [0019] 3) 所用分束镜 4, 对 808nm 波长眼底照明光的透反比约为 4。
- [0020] 4) 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 :50mm、250mm、200mm、30mm、50mm、250mm、86mm、100mm。
- [0021] 5) 选择人眼 7 为 800 度近视兼有 150 度散光, 其明视距离 125mm, 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  $d_1$  为 130mm ; 在较暗环境下瞳孔直径稳定在 6mm。
- [0022] 6) 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。
- [0023] 7) 所用环形光阑 12, 外径 7.3mm, 内径 3mm, 紧贴于第五透镜 11 后 ; 通过第二透镜 3 和第三透镜 5 成像到人眼瞳孔位置, 其像的外径 5.8mm, 内径 2.4mm, 使瞳孔中心处无照明光通过, 基本消除了前角膜的反射干扰光。
- [0024] 8) 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。
- [0025] 9) 所用液晶校正器 15, 纯位相型反射式 LCOS 器件, 美国 BNS 公司 P512-0785。
- [0026] 10) 所用的反射镜 16, 面积 15mm × 15mm, 厚度 2mm, 反射率 95%。
- [0027] 11) 所用偏振分光棱镜 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  $1 \times 10^{-3}$ 。
- [0028] 12) 所用波前探测器 19, 哈特曼型, 有效微透镜数为  $m = 225$ , 2.5mm 接收孔径, 波前探测速度 70Hz, 量子效率在 808nm 波长处为 21%。
- [0029] 13) 所用成像 CCD 相机 21, 德国 cooke 公司生产, 型号 pixelfly-QE, 像素数  $640 \times 512$ , 量子效率在 808nm 波长处为 21%, 读出噪声在读出速率 10MHz 时为 7 个电子, 成像曝光时间 14ms。
- [0030] 14) 利用上述元件按照图 1 所示的光路结构搭建视度自调节液晶自适应像差校正视网膜成像光路, 同时配置自适应控制与信号处理分系统, 形成完整的视度自调节液晶自适应像差校正视网膜成像装置。
- [0031] 15) 为使瞳孔能便利地与入射光轴对准, 用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。

[0032] 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。

[0033] 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，可以在模拟视网膜的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。

[0034] 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  $\lambda$  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，

$$[0035] R = \begin{bmatrix} R_{x_1 Z_2} & \cdots & R_{x_i Z_2} & \cdots & R_{x_m Z_2} & R_{y_1 Z_2} & \cdots & R_{y_i Z_2} & \cdots & R_{y_m Z_2} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ R_{x_1 Z_k} & \cdots & R_{x_i Z_k} & \cdots & R_{x_m Z_k} & R_{y_1 Z_k} & \cdots & R_{y_i Z_k} & \cdots & R_{y_m Z_k} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ R_{x_1 Z_M} & \cdots & R_{x_i Z_M} & \cdots & R_{x_m Z_M} & R_{y_1 Z_M} & \cdots & R_{y_i Z_M} & \cdots & R_{y_m Z_M} \end{bmatrix}$$

[0036] 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，225 个。这个二维矩阵即为响应矩阵 R。

[0037] 18) 撤掉模拟眼，被测量人眼位于图 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 CCD 相机 21 和照明光源 8，成像 CCD 相机 21 的曝光时间设置为 14ms；波前探测器 19 接收经人眼反射出来的光，将其波前转化为 2m 列波前斜率向量，此处 m = 225：

[0038]

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

[0039] 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 CCD 相机 21 一直工作,记录下校正前后的眼底视网膜图像。

[0040] 19) 分析结果:

[0041] 本发明系统拍摄的 800 度近视兼有 150 度散光人眼的视网膜视觉细胞图像如图 2 所示,其中 (a) 为像差校正前,什么信息也看不清楚,(b) 像差校正后,显示出清晰的  $3 \mu\text{m}$  直径的视觉细胞,(c) 使用本发明之前的系统,采用量子效率高达 70% 的成像 CCD 相机(型号 EM-DV897,英国 ANDOR 公司),对相同眼底拍摄的视觉细胞照片。比较 (b) 与 (c),看出在本发明的系统上,成像 CCD 量子效率从 70% 降至 21% 后仍能获得同样的眼底图像对比度,表明了本发明的效果。

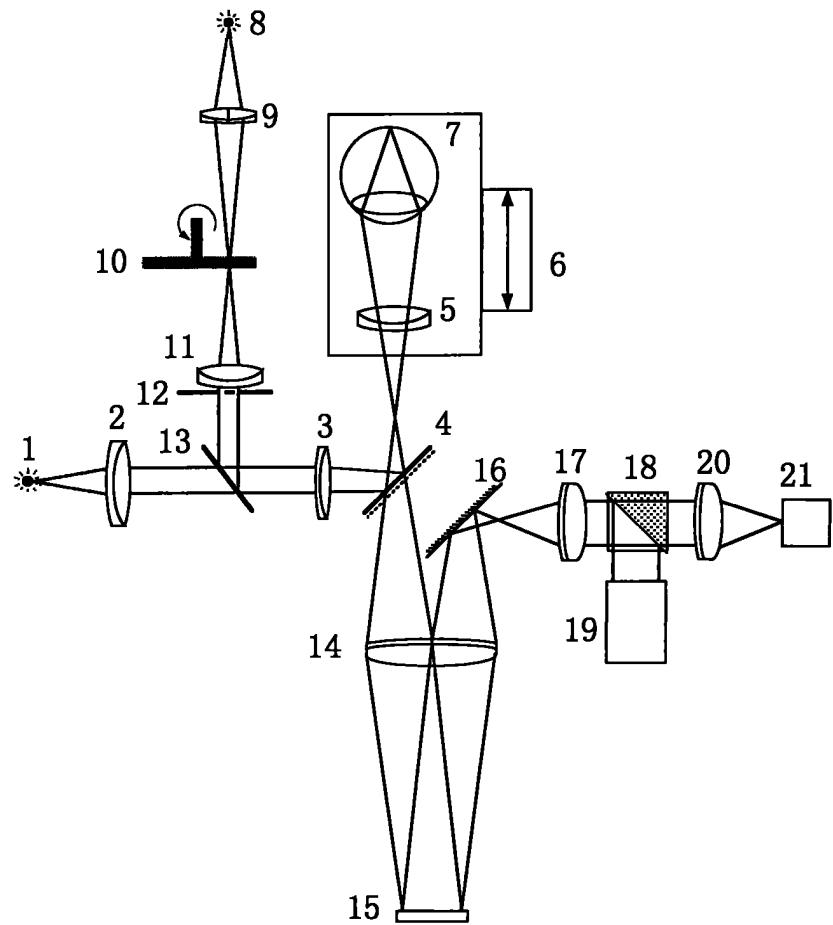
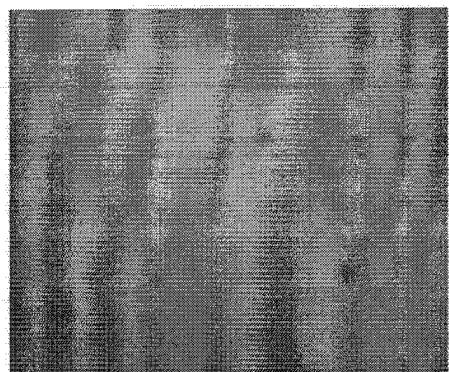
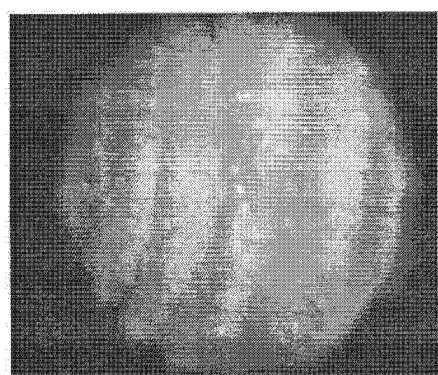


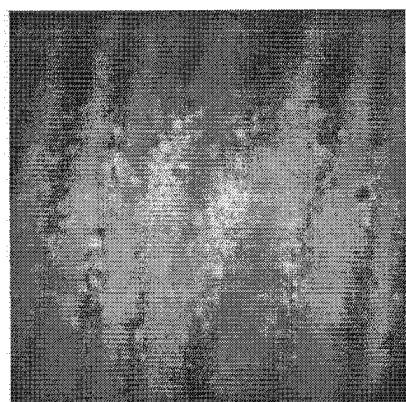
图 1



(a)



(b)



(c)

图 2