

双眼高阶像差校正与视觉分析系统

康健^{1,2,3} 戴云^{1,2*} 梁波^{1,2,3} 赵豪欣^{1,2} 官春林^{1,2} 汤国茂^{1,2} 张雨东^{1,2}

¹中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

²中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 人眼像差对视功能具有重要影响。目前相关研究结果多在单眼条件下获得,为解决双眼像差对双眼视功能的影响等问题,搭建了一套双眼高阶像差校正与视觉分析系统。该系统采用哈特曼波前传感器和37单元变形反射镜对双眼像差进行测量和控制,并通过对控制器增益的优化设计,实现了对双眼像差的稳定闭环控制。视标显示器采用有机发光二极管微型显示器,其视频输入信号直接由计算机产生,可方便地实现多种视功能测试。利用该系统进行了初步的立体视觉实验,展示了该系统在双眼视功能测试方面的巨大潜力。双眼高阶像差校正与视觉分析系统的建立为未来双眼视功能的深入研究提供了必要的技术和设备支持。

关键词 自适应光学; 双眼像差; 高阶像差校正; 视觉分析

中图分类号 TH77; TH74

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1033001

Binocular Higher-Order Aberration Correction and Vision Analysis System

Kang Jian^{1,2,3} Dai Yun^{1,2} Liang Bo^{1,2,3} Zhao Haoxin^{1,2} Guan Chunlin^{1,2}

Tang Guomao^{1,2} Zhang Yudong^{1,2}

¹Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

²Key laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Human aberration plays an important role in visual function. So far, relevant research findings are obtained mainly under monocular viewing conditions. To investigate the effects of binocular aberrations on binocular visual functions, a binocular higher-order aberration correction and vision analysis system is established. The proposed system employs Hartmann wavefront sensors and 37-element deformable mirrors to measure and control binocular aberrations. Through the optimization of the controller gain, it realizes stable closed-loop control of binocular aberrations. The organic light-emitting diodes are used as stimulus display. The input signals are generated directly by computers, making it convenient to implement various visual function tests. Employing the proposed system, a preliminary stereo vision experiment is carried out, its vast potential in binocular visual function testing is demonstrated. The binocular higher-order aberration correction and vision analysis system provides essential technology and equipment support for further binocular visual function research in the future.

Key words adaptive optics; binocular aberrations; higher-order aberration correction; vision analysis

OCIS codes 330.4300; 330.1400; 330.4945

1 引言

人眼屈光系统经过长期的进化已经非常智能,但并不完美,存在多种光学像差和缺陷。1994年 Liang 等^[1]

收稿日期: 2015-05-26; 收到修改稿日期: 2015-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(61378064)、国家863计划(2015AA020510)

作者简介: 康健(1988—),男,博士研究生,主要从事自适应光学在视光学方面的研究。E-mail: lncykj07@163.com

导师简介: 张雨东(1964—),男,博士,研究员,主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: ydzhang@ioe.ac.cn

*通信联系人。E-mail: daiyunqq@163.com

研究发现,人眼除了离焦、像散等低阶像差之外,还存在着许多更加复杂的高阶像差如彗差、球差、三叶草等。人眼像差的存在不但给眼底视网膜高分辨率检查带来困难,同时降低了人眼自身的视觉分辨能力。1997年,Liang等^[2]首次利用自适应光学(AO)技术分析了人眼高阶像差校正对视功能的影响。他们发现,通过静态补偿人眼高阶像差,受试眼的对比敏感度提高了6倍之多,并获得了分辨55 cycle / (°)正弦光栅视标的超视力。随后,国内外多个研究小组建立了各自的人眼高阶像差校正和视觉分析系统,开展了人眼高阶像差及单项像差对视锐度、调节的影响研究,短短十几年时间大量的研究论文在光学及眼科专业刊物上发表。2011年,Roorda^[3]对AO在视光学研究中的应用进行了较为全面的研究综述。

但是,前期研究均为单眼研究,而人类视觉为双眼视觉,并非单眼的简单叠加。双眼像差对双眼视功能的影响以及单眼像差校正下获得的视觉收益是否可以有效转移到双眼视觉条件下等一系列问题值得进一步深入研究。如何有效评价双眼高阶像差对双眼视功能的影响成为单眼像差校正与视功能研究的必然过渡和发展趋势。2009年,Fernández等^[4]基于液晶空间光调制器研制了首套双眼AO视觉仿真器(BAOVS),通过开环校正或叠加泽尼克像差初步研究了单色像差对对比敏感度的影响。但是,采用液晶空间光调制器作为波前校正器要求在单色偏振光情形下使用,限制了其在视觉科学研究中的应用。2012年,Sabesan等^[5]采用大行程变形反射镜搭建了一套双眼AO系统,对比了单眼和双眼条件下不同校正策略对视锐度及对比敏感度的影响,发现对高空间频率视标,校正像差后单眼对比敏感度收益高于双眼,而双眼叠加作用降低。

国内的相关视光学研究较少,尚处于起步阶段^[6-8]。2007年,中国科学院光电技术研究所研制建立了具有校正和产生高阶像差双重功能的单眼高阶像差校正与视觉分析系统^[9],合作开展了人眼高阶像差^[10]、球差^[11]以及硬性角膜接触镜(RGP)佩戴眼残余高阶像差^[12]对视功能的影响等一系列研究。同样,这些工作均在单眼AO视觉分析系统下完成,无法分析和评价双眼像差对双眼视功能的影响。为此,本文在前期工作的基础上,研制建立了一套双眼高阶像差校正与视觉分析系统,为双眼视光学研究提供技术平台。介绍了该系统的工作原理,并在系统研制的基础上对其性能进行了测试。同时,在该系统上开展了初步的双眼像差校正与立体视觉实验研究。

2 双眼高阶像差校正与视觉分析系统

2.1 工作原理

双眼高阶像差校正与视觉分析系统的原理如图1所示。该系统包括左眼和右眼两套完全对称的子系统。图1以左眼子系统为例进行介绍。由半导体激光二极管(LD)发出的905 nm(谱宽2 nm)的信标光,经L₁准

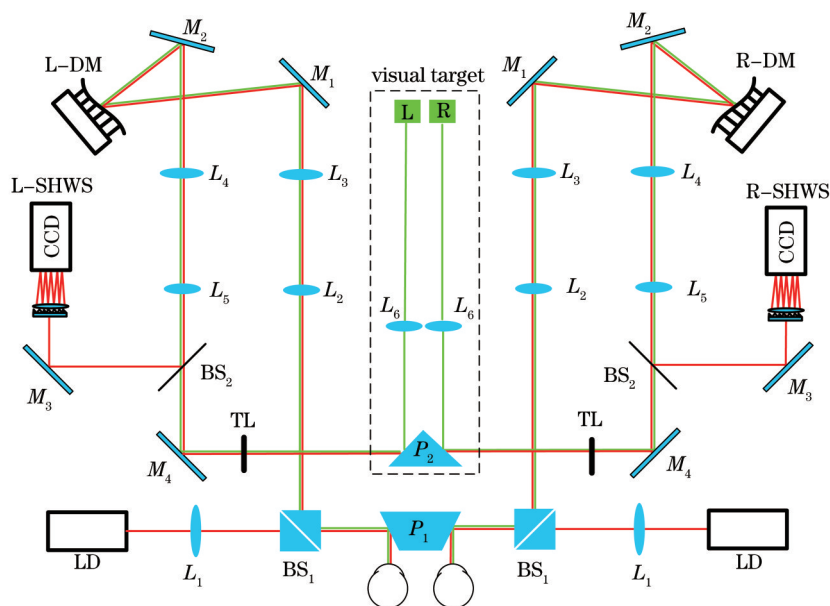


图1 双眼高阶像差控制与视觉分析系统原理图

Fig.1 Schematic of binocular higher-order aberration correction and vision analysis system

直后通过分光镜(BS_1)、反射棱镜(P_1)入射到人眼,并经人眼光学系统会聚后在眼底形成一个光斑。此光斑可视为视网膜上的一个点光源,其反射光经过眼睛的屈光系统后从瞳孔射出。出射光携带人眼像差并经过反射棱镜(P_1)、分光镜(BS_1)、口径匹配系统(L_2, L_3)、平面反射镜(M_1)、变形镜(L-DM)、平面反射镜(M_2)、口径匹配系统(L_4, L_5)、分光镜(BS_2)、平面反射镜(M_3)后进入哈特曼波前传感器(HWS),内含电耦合器件(CCD)。人眼瞳孔、变形镜(DM)以及哈特曼波前传感器的微透镜阵列通过口径匹配系统共轭放置,系统入瞳直径6 mm。哈特曼传感器测量波前斜率数据并将其传送至AO控制计算机(左、右眼子系统共用一台AO控制计算机)。AO控制计算机利用直接斜率算法,一方面重构波前得到像差信息,另一方面控制变形镜L-DM产生相应变形,实现对人眼波前像差的闭环校正或叠加。

人眼像差测量采用近红外光源作为信标光,是由于人眼视网膜感光细胞对红外波段不敏感,信标光对视功能测试的影响很小,从而可以在整个视功能测试过程中对人眼像差进行实时测量和控制。系统中信标光在人眼瞳孔处功率约为10 μ W,远小于由激光产品安全的国际标准[IEC60825-1(A2:2001)]计算得到的最大允许曝光量。

系统中沿用单眼高阶像差校正与视觉分析系统中使用的哈特曼传感器和分立式压电变形反射镜作为波前传感器和校正器^[9],其主要参数如表1所示。AO系统闭环时的工作频率为25 Hz,带宽为1 Hz,能够满足人眼动态像差实时校正的要求^[13]。

表1 哈特曼波前传感器和变形镜的主要参数

Table 1 Main parameters of Hartmann wavefront sensor and deformable mirror

Hartmann wavefront sensor		Deformable mirror	
Microlens array	11×11	actuator number	37
Valid subapertures	97	actuator stroke	$\pm 2 \mu\text{m}$
Microlens diameter	0.4 mm	clear aperture	40 mm
Microlens focal length	4 mm	aberration correction ability	first 20 Zernike terms

在像差控制稳定后,受试眼通过上述AO系统光学元件以及平面反射镜 M_4 、等腰反射棱镜 P_2 和透镜 L_6 观察视标显示器上显示的视标。视标显示器采用有机发光二极管(OLED)显示器(中心波长550 nm,带宽10 nm),其体积小(12 mm×9 mm)、分辨率高(800 pixel×600 pixel),并可直接显示计算机输出视频,因此便于系统集成及视功能测试。视标显示器的视频输入信号由视标控制计算机产生(左、右眼视标显示共用一台控制计算机),初始信号为1600 pixel×600 pixel。采用分屏显示的方法,初始信号通过两个视频图形阵列(VGA)接口分解为两路800 pixel×600 pixel的视频信号,并经过视频转换器分别输入两个视标显示器以显示相应视标。视频转换器用于将每个VGA接口输出的两路8位信号组合为一路14位信号^[14],从而解决了8位信号在显示精细视标时灰度等级不够的问题。通过在视标控制计算机上编写Matlab软件程序,可以很方便地控制视标的类型、大小、亮度和对比度等参数,从而实现视锐度、对比敏感度及立体视等多种视功能的深入测试。

在视功能测试过程中,被试者的下颌和额头被固定在托架上,以防止头位移动或转动。为适应不同被试者的瞳距差异,反射棱镜 P_1 可以前后移动以进行瞳距调节。在系统传递线(TL)处插入离焦补偿片,用于补偿信标光和OLED辐射光的光谱差异引起的人眼轴向色差。

2.2 双眼AO系统控制

人眼AO系统一般采用计算机软件实现对系统的闭环控制。为了满足人眼像差校正对AO系统闭环带宽的要求(大于1Hz),双眼高阶像差校正与视觉分析系统中,两路HWS光斑图像由图像采集卡同时采集,控制软件通过两个独立线程完成所需的计算(波前复原和波前控制)以及控制产生两个DM的驱动电压信号输出,实现双路AO系统的并行控制。

控制算法采用直接斜率法,通过比例-积分控制器实现对人眼像差的闭环控制。为了实现对人眼像差的有效控制,需要对双眼AO系统控制器参数进行优化设计。当采用并行控制,忽略2个线程之间的延时,双眼AO控制系统可以简化为单眼AO系统。图2为左/右眼AO系统控制框图,其中 $X(s)$ 为人眼波前像差, $R(s)$ 为校正后残差, $M(s)$ 为波前控制信号, H_{HWS} 为哈特曼波前传感器的传递函数, H_{Delay} 为哈特曼波前传感器数据读出和斜率计算过程的传递函数,该过程为一延时过程, $H_{Control}$ 为控制器的传递函数, H_{ZOH} 为零阶保持过程的传递函数, H_{HVA} 和 H_{DM} 分别为高压放大器和变形镜的传递函数,高压放大器的带宽和变形镜的谐振频率均远高

于系统的像差采样频率,因此可以认为其传递函数恒等于1。 $s=i2\pi f$ 为拉普拉斯算子, f 为频率, $i^2=-1$ 。

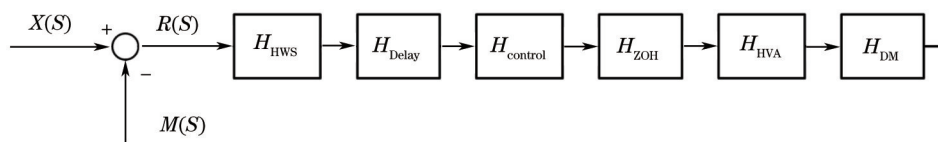


图2 AO系统控制框图

Fig.2 Control diagram of AO system

根据参考文献[15],在确定上述控制流程各环节传递函数的基础上,可以计算得到双眼AO系统的开环传递函数 H_{open} 、闭环传递函数 H_{close} 和误差传递函数 H_{error} :

$$H_{open} = H_{WFS} H_{Delay} H_{Control} H_{ZOH} = \frac{g[1 - \exp(-Ts)]\exp(-\tau s)}{(Ts)^2}, \quad (1)$$

$$H_{close} = \frac{H_{open}}{1 + H_{open}} = \frac{g[1 - \exp(-Ts)]\exp(-\tau s)}{(Ts)^2 + g[1 - \exp(-Ts)]\exp(-\tau s)}, \quad (2)$$

$$H_{error} = \frac{1}{1 + H_{open}} = \frac{(Ts)^2}{(Ts)^2 + g[1 - \exp(-Ts)]\exp(-\tau s)}, \quad (3)$$

式中 T 为哈特曼波前传感器CCD采样周期。 τ 为哈特曼波前传感器数据读出和斜率计算所用的总时间,在两路AO系统同时工作时, τ 约为20 ms。 g 为控制器增益。为了有效校正人眼像差,AO系统闭环带宽要求大于1 Hz,为此分析了不同控制器增益下的闭环带宽。闭环带宽定义为闭环传递函数幅值为-3 dB时对应的频率点 f_{3dB} ,即

$$|H(j2\pi f_{3dB})|^2 = \frac{1}{2}. \quad (4)$$

根据(4)式,表2给出了当控制器增益 g 以0.1为步长由0.1增加到1.0时系统的闭环带宽 f_{close} 。由表2数据可知,在系统中控制器增益 g 在0.2及以上即可满足人眼像差闭环校正的要求。闭环带宽随着增益 g 的增加而增加,当增益 g 高于0.5时,闭环传递函数增益曲线会出现过冲现象,为了保证系统的稳定性,系统闭环增益不宜过高,具体数值由实际人眼像差校正实验确定。

表2 不同控制器增益下的闭环带宽

Table 2 Closed-loop bandwidth at different controller gains

g	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
f_{close}	0.45	1.02	1.81	2.90	4.15	5.23	6.08	6.75	7.30	7.75

3 系统实验

3.1 不同增益条件下的人眼像差校正效果

图3是不同控制器增益下实际人眼像差校正残差的均方根(RMS)曲线。由图3可知,当 $g=0.5$ 时系统出现闭环不稳定现象,残差RMS出现一定程度的波动,而当 $g=0.7$ 时不稳定变得更加严重。当 $g=0.3$ 时系统能够稳定闭环且较0.1和0.2具有更快的收敛速率。因此在实验中选择控制器增益为 $g=0.3$,闭环开始后经过

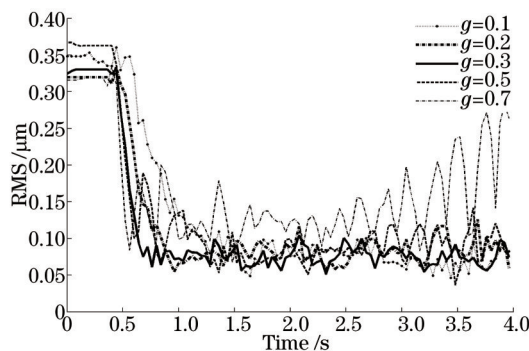


图3 不同控制器增益下实际人眼像差闭环校正残差的RMS曲线

Fig.3 Residual RMS curves of actual human eye closed-loop aberration correction at different controller gains

大约 250 ms 人眼像差校正达到稳定,校正残差 RMS 在 0.1 μm 左右。

3.2 双眼像差测量与校正

图 4 为一名志愿者左、右眼像差中第 6 项到第 20 项的泽尼克系数,数据来源于大约 7000 帧(约 5 min)像差测量结果的平均,其中眨眼数据已经被移除。从图 4 可以看出,像差中的第 8、9 项(彗差、三叶草)和第 12 项(球差)所占比例较高,而且像差中某些显著泽尼克项在双眼中同时存在,说明双眼像差具有一定的相关性^[6]。

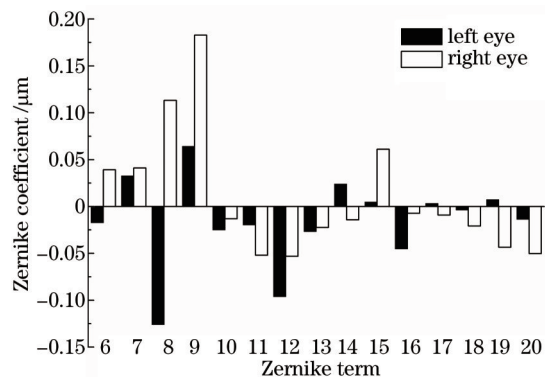


图 4 左、右眼像差中第 6 项到第 20 项的泽尼克系数

Fig.4 6th to 20th Zernike coefficients of left eye and right eye aberrations

图 5 为左、右眼波前像差的二维分布及对应的点扩展函数(PSF),图 6 为左右眼像差经过 AO 校正后残余

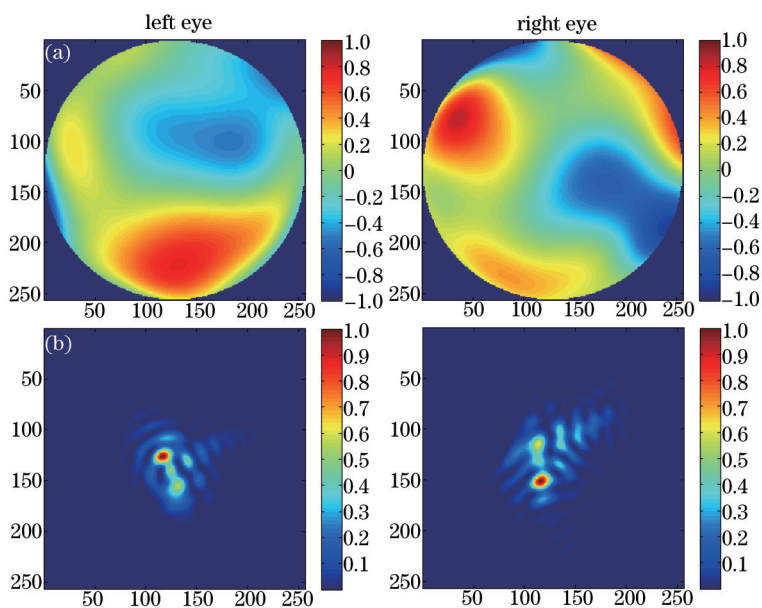


图 5 左、右眼波前像差的(a)二维分布和(b)对应的 PSF

Fig.5 (a) Two-dimensional distribution and (b) corresponding PSF of left eye and right eye wavefront aberrations

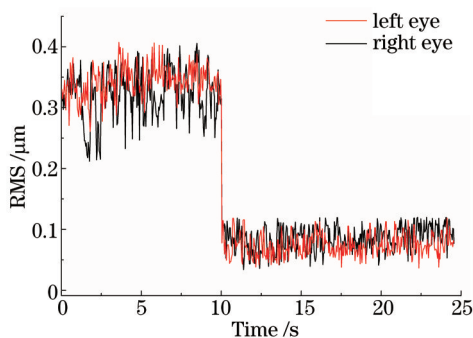


图 6 左、右眼像差经过 AO 校正后残余波前误差 RMS 的变化曲线

Fig.6 Residual wavefront error RMS curves of left eye and right eye aberrations after AO correction

波前误差RMS的变化曲线(其中眨眼时的像差数据已被去除),AO校正后残差RMS均降为0.1 μm左右,说明两路AO系统均具有较好的校正性能。

3.3 立体视觉实验

立体视是指视觉系统通过分析两眼视网膜像的差异(即视差)来获得空间物体相对深度的能力,是双眼视觉最重要的视觉功能。双眼高阶像差对立体视功能的影响是非常值得深入研究的科学问题,研究结果可以为临床双眼屈光矫正及双眼视功能维护提供有益指导,提高视光学认识。立体视功能的好坏可以用立体视锐度来衡量,它是指眼睛能够分辨的最小视差。立体视锐度用视角表示,单位一般为角秒,数值越低代表立体视锐度越好。

基于研制的双眼高阶像差校正与视觉分析系统,初步测试了3名志愿者(DY、HSY和LZH)在高阶像差校正前后的立体视锐度,被试者的低阶像差通过在眼前插入验光片始终被校正。实验前,所有被试者签署了知情同意书。实验中使用复方托吡卡胺滴眼液对被试眼进行散瞳和调节麻痹。

实验采用双线立体图作为视标,如图7所示。该视标为亮背景下的黑线条,背景亮度为107 cd/m²。实验时,左、右眼视标显示器分别显示上下两条竖直的细线。上面的线均在显示器中间,视差为零,双眼融像后形成一条位于显示器屏幕内的线,叫做参考线;下面的线叫做测试线,在两个显示器中的位置不同,且相对参考线分别向相反方向水平平移相同的距离D,形成的视差大小为2D。向内平移时,形成交叉性视差(负值),测试线看起来相对参考线更近一些;向外平移时,形成非交叉性视差(正值),测试线看起来相对参考线更远一些。参考线和测试线对视网膜张角均为25',两者竖直方向间隔为4'。

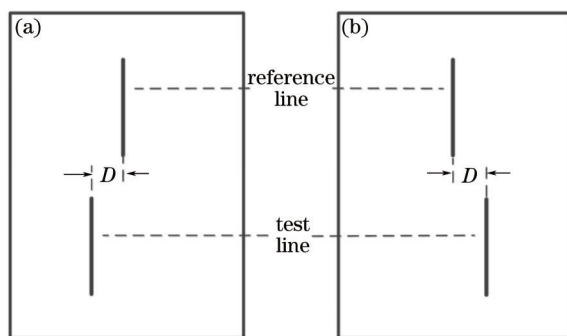


图7 双线立体图。(a) 左眼显示;(b) 右眼显示

Fig.7 Stereograms of double line. (a) Display for left eye;(b) display for right eye

实验时采用心理物理学中的恒定刺激法测量立体视锐度(视差下阈值)。测量的视差为±20", ±80", ±140", ±200"。计算视差阈值所需的心理测量数据分5组获得,每组80次测试,其中8种视差随机等量分布。每次测试过程中,视标显示器的显示时序如图8所示。其中L列为左眼视标,R列为右眼视标,B列为双眼融像后所见视标。测试开始前显示双眼融像视标,被试者按确认键启动测试后,首先显示500 ms的空白延迟,期间有一声短时的声音,提示被试者测试即将开始。然后,两显示器显示用于立体视觉测试的双线立体图,

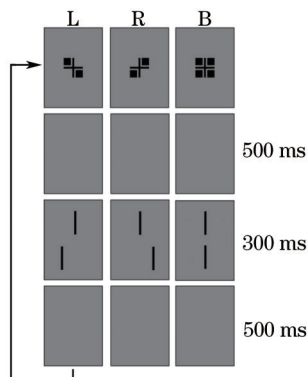


图8 每次测试的视标显示器时序

Fig.8 Time sequence of display in each test

持续 300 ms。接着是另一个 500 ms 的空白延迟(用于消除视觉后像),之后显示器回到双眼融像视标,系统等待被试者按键判断测试线相对参考线是近还是远。

所有测试结束后,每个视差下的视远率(即被试者认为测试线相对参考线远的频率)被计算出来,并拟合为 Logistic 型曲线。设视远率为 p ,视差为 x ,则拟合成 Logistic 函数的形式为

$$p = \frac{1}{1 + \exp[-(\alpha + \beta x)]}, \quad (5)$$

式中 α 和 β 为待定参数。立体视锐度 S 为该曲线的半四分位数距^[17],即

$$S = \frac{1}{2}(x|_{p=0.75} - x|_{p=0.25}). \quad (6)$$

图 9 为 3 名被试者立体视锐度的实验结果及其均值,其中黑色柱状图为高阶像差校正前(AO off)的结果,白色柱状图为高阶像差校正后(AO on)的结果。根据结果可知,3 名被试者的立体视锐度在高阶像差校正后均有提高(视差下阈值减低)。其中,LZH 的立体视锐度提升幅度最大,为 12.4";DY 的立体视锐度提升幅度最小,为 3.2"。三个被试者的平均提升幅度为 8.4"。若高阶像差校正的收益按校正前后立体视锐度的比值来计算,则 DY、HSY 和 LZH 的校正收益分别为 1.14、1.55 和 1.45,其均值为 1.38。

2011 年 Vlaskamp 等^[18]利用相位片对人眼高阶像差进行静态校正,并对比较正前后的立体视锐度变化情况。他们发现,立体视锐度在高阶像差校正前后并无明显差异。本文实验结果与 Vlaskamp 等^[18]的结果并不一致,主要原因应该在于像差校正模式的不同。人眼高阶像差存在动态波动,静态校正只能校正其静态分量,而 AO 系统的引入则可以实现对像差的实时完全校正。结果表明,立体视锐度在人眼高阶像差充分校正后可以得到明显提高。不过,本次实验样本较少,这一结论还需后续进一步的研究来证实。

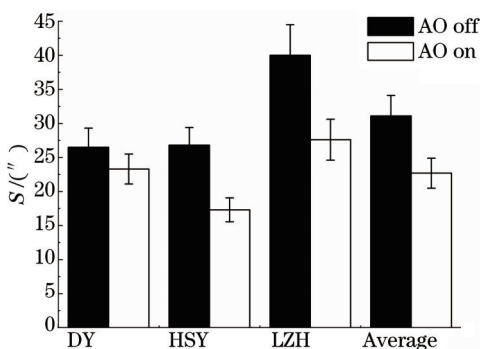


图 9 高阶像差校正前后的立体视锐度实验结果

Fig.9 Stereoacuity experimental result before and after higher-order aberration correction

4 结 论

AO 像差控制技术是研究人眼高阶像差与视功能关系不可或缺的有力工具。双眼像差控制对双眼视功能的影响研究是单眼研究的必然过渡和发展趋势。双眼高阶像差校正视觉分析系统的建立为未来双眼视光学研究提供了必要的技术和设备支持。下一步将利用这一系统,以立体视觉和对双眼视觉形成至关重要的调节反应为研究对象,深入研究不同双眼像差调控下、不同像差组份对调节反应及立体视的影响,加深对双眼视觉形成机理的理解,为优化双目光学校正策略及双眼视功能维护等提供有益指导。

参 考 文 献

- 1 J Liang, B Grimm, S Goelz, *et al.*. Objective measurement of wave aberrations of the human eye with use of a Hartmann-Shack wave-front sensor[J]. *J Opt Soc Am A*, 1994, 11(7): 1949-1957.
- 2 J Liang, D R Williams, D T Miller. Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics[J]. *J Opt Soc Am A*, 1997, 14(11): 2884-2892.
- 3 A Roorda. Adaptive optics for studying visual function: A comprehensive review[J]. *Journal of Vision*, 2011, 11(5): 1-21.
- 4 E J Fernández, P M Prieto, P Artal. Binocular adaptive optics visual simulator[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(17): 2628-2630.
- 5 R Sabesan, L Zheleznyak, G Yoon. Binocular visual performance and summation after correcting higher order aberrations[J]. *Biomedical*

- Opt Express, 2012, 3(12): 3176–3189.
- 6 Zhai Yi, Wang Zhaoqi, Wang Yan, *et al.*. Impact of chromatic and higher-order aberrations of human eyes on vision based on special eye models[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1133001.
翟 奕, 王肇圻, 王 雁, 等. 用特殊眼模型研究人眼像差与色差对视觉的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1133001.
- 7 Wang Bo, Niu Saisai, Wu Weiming. Linear quadratic Gaussian optimal control for human eye aberration correction[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 041102.
王 波, 钮赛赛, 吴卫明. 人眼像差校正线性二次高斯优化控制研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 041102.
- 8 Zheng Xianliang, Liu Ruixue, Xia Mingliang, *et al.*. Temporal properties study of ocular wave aberrations with high frequency sampling [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0733001.
郑贤良, 刘瑞雪, 夏明亮, 等. 高频采样下人眼波像差特性研究[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0733001.
- 9 Xue Lixia, Rao Xuejun, Wang Cheng, *et al.*. Higher-order aberrations correction and vision analysis system for human eye[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(5): 893–897.
薛丽霞, 饶学军, 王 成, 等. 人眼高阶像差校正和视觉分析系统[J]. 光学学报, 2007, 27(5): 893–897.
- 10 S Li, Y Xiong, J Li, *et al.*. Effects of monochromatic aberration on visual acuity using adaptive optics[J]. Optom Vis Sci, 2009, 86(7): 868–874.
- 11 J Li, Y Xiong, N Wang, *et al.*. Effects of spherical aberration on visual acuity at different contrasts[J]. J Cataract Refract Surg, 2009, 35(8): 1389–1395.
- 12 B Yang, B Liang, L Liu, *et al.*. Contrast sensitivity function after correcting residual wavefront aberrations during RGP lens wear[J]. Optom Vis Sci, 91(10): 1271–1277.
- 13 H Hofer, L Chen, G Y Yoon, *et al.*. Improvement in retinal image quality with dynamic correction of the eye's aberrations[J]. Opt Express, 2001, 8(11): 631–643.
- 14 B Liang, R Liu, Y Dai, *et al.*. Effects of ocular aberrations on contrast detection in noise[J]. Journal of Vision, 2012, 12(8): 1–15.
- 15 Li Xinyang. Optimization of Modal Reconstruction Algorithm and Control Algorithm in Adaptive Optics System[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2000: 28–29.
李新阳. 自适应光学系统的模式复原算法和控制算法的优化研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2000: 28–29.
- 16 S S Chin, K M Hampson, E A H Mallen. Binocular correlation of ocular aberration dynamics[J]. Opt Express, 2008, 16(19): 14731.
- 17 R S Harwerth, P M Fredenburg, E L Smith III. Temporal integration for stereoscopic vision[J]. Vision Res, 2003, 43(5): 505–517.
- 18 B N Vlaskamp, G Yoon, M S Banks. Human stereopsis is not limited by the optics of the well-focused eye[J]. J Neurosci, 2011, 31(27): 9814–9818.

栏目编辑: 苏 岑