

旋转双柱面镜矫正人眼散光

应 锐¹, 赵军磊^{2,3,4}, 肖 飞^{2,4}, 李津宇¹, 杨 晨¹, 赵豪欣^{2,4}, 王 成^{2,4}, 戴 云^{2,4}

¹电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054;

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

³中国科学院大学, 北京 100049;

⁴中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209

摘要 如何有效矫正随人群起伏很大的人眼像差, 提高人眼自适应光学系统的人群适用范围是临床应用面临的最大难题。旋转双柱面镜散光补偿技术是一种使用灵活、低成本的散光补偿方法。给出了旋转双柱面镜散光矫正的理论依据, 并搭建了基于远场光斑形态的散光自动补偿实验系统, 验证了旋转双柱面镜散光矫正理论的正确性。在此基础上, 将旋转双柱面镜与人眼自适应光学系统相结合, 利用哈特曼波前测量数据调整双柱面镜, 实现了(-4~0 D_c)散光的全自动补偿, 补偿精度优于 0.1 D_c, 并验证了实际人眼散光补偿效果。该技术结合 Badal 调焦可以为入眼自适应光学系统的大规模人群适用提供一种经济有效的低阶像差补偿方案。

关键词 视觉光学; 自适应光学; 旋转双柱面镜; 散光; 人眼像差

中图分类号 O433 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0633001

Correct Astigmatism Aberration with Rotating Cylinders

Ying Rui¹, Zhao Junlei^{2,3,4}, Xiao Fei^{2,4}, Li Jinyu¹, Yang Chen¹, Zhao Haoxin^{2,4},
Wang Cheng^{2,4}, Dai Yun^{2,4}

¹ School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;

² Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

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

⁴ Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract How to effectively correct ocular aberrations which vary largely from person to person and improve the application scope of adaptive optical system for human retinal imaging is the biggest problem in the clinical application. Rotating cylinders provide a flexible method to correct astigmatism at low cost. This study provides the theoretical basis of rotating cylinders for the astigmatism compensation and an experimental system of automatically correcting astigmatism is established based on the far-field facula analysis to prove the theoretical basis. Then the rotating cylinders are combined with an adaptive optics system and the real-time wavefront is measured by the Hartman-Shack sensor to guide rotating cylinders adjustment. The modified system could compensate the astigmatism aberration automatically from -4 to 0 D_c with residual error lower than 0.1 D_c. Combined with the Badal lens, this system provides an economical and effective method to compensate low aberrations for large-scale clinical applications of adaptive optical system for human retinal imaging.

Key words visual optics; adaptive optics; rotating cylinders; astigmatism; ocular aberration

OCIS codes 330.4300; 010.1080; 330.4460

收稿日期: 2016-11-21; **收到修改稿日期:** 2017-01-30

基金项目: 国家自然科学基金(61378064)、国家 863 计划(2015AA020510)、中国科学院大学生创新实践训练计划资助项目(20150000AO01)

作者简介: 应 锐(1996—), 男, 本科生, 主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: yruetstc13@163.com

导师简介: 戴 云(1976—), 男, 博士, 研究员, 主要从事自适应光学方面的研究。

E-mail: daiyunqq@163.com(通信联系人)

1 引 言

众所周知,人眼屈光系统虽然智能但并不完美,存在多种随时间动态变化的低阶(离焦和散光)和高阶(除离焦和散光之外)光学像差。人眼像差的存在不但会降低人眼自身的视觉分辨能力,同时还给眼底视网膜高分辨率检查带来困难。1997年,美国罗切斯特大学 Liang 等^[1]利用自适应光学(AO)技术矫正人眼低阶和高阶光学像差,首次获得了活体人眼视网膜视细胞和毛细血管高分辨率图像,分辨率接近理论衍射极限。随后,国内外多个研究小组相继开展了活体人眼视网膜高分辨率成像技术研究,发展了 AO 显微成像^[2]、AO 共焦扫描^[3]及 AO 光学相干层析^[4]三种主流的活体人眼视网膜高分辨率成像技术,在实验室获得了从二维到三维的视网膜高分辨率图像。

活体人眼视网膜高分辨率成像技术通过 AO 技术矫正人眼像差实现高分辨率成像,而人眼像差的两个突出特点是人群分散性和像差幅值起伏大,如离焦起伏可达散光 $\pm 5 D_c$ 。如何有效矫正随人群起伏很大的人眼像差,提高视网膜高分辨率成像技术的人群适用范围是临床应用面临的重大难题。现有比较通行的做法是分别矫正低阶像差和高阶像差,以降低视网膜高分辨率成像系统对波前矫正器的指标要求。对于低阶像差,最简单的方式是插入验光片进行补偿,但是补偿片的插入不仅降低了系统的光能利用率,还改变人眼瞳孔与波前传感器和波前矫正器的共轭关系,从而降低了人眼像差测量的准确性和 AO 系统的矫正效果,随着低阶像差变大,这种影响会更加严重。另外,离散度数的验光片无法实现对低阶像差的完全补偿。针对插片补偿的不足,研究人员提出了双波前矫正器的人眼像差矫正方案,对人眼低阶和高阶像差分别采用两个波前矫正器进行矫正^[5-6],获得了较好的矫正效果,但双波前矫正器的使用使得系统复杂、成本较高,不利于视网膜高分辨率成像系统的产业化推广。

Badal 调焦技术^[7]本质上是内调焦技术,既能进行离焦连续补偿又能保持光学系统共轭关系不变,但它无法实现散光补偿。2005年,英国帝国理工大学 Hampson 等^[8]提出了一种低成本的人眼低阶像差矫正方案,采用 Badal 调焦技术补偿离焦,旋转双柱面镜矫正散光,残余低阶和高阶像差由波前矫正器补偿,其散光矫正范围达到 $-6\sim 0 D_c$,适用于大规模人群应用。但是,其双柱面镜的调整是基于验光获得的人眼散光大小和轴向,没有实现对未知散光的全自动补偿,不利于该技术的实际应用。

为了实现对人眼散光的全自动补偿,本文首先给出了旋转双柱面镜散光矫正的理论依据,并搭建了基于远场光斑形态的散光自动补偿实验系统,验证了旋转双柱面镜散光矫正理论的正确性。在此基础上,将旋转双柱面镜与人眼 AO 系统相结合,利用哈特曼波前测量数据调整双柱面镜,实现了 $(-4\sim 0 D_c)$ 散光的全自动补偿,补偿精度优于 $0.1 D_c$,并验证了实际人眼散光补偿效果。旋转双柱面镜结合 Badal 调焦技术可以实现对随人群起伏很大的低阶像差的有效补偿,从而大大降低了人眼 AO 系统对波前矫正器的指标要求,同时降低了系统的复杂性与成本,为人眼视网膜高分辨成像技术的大规模人群适用提供了一种经济有效的低阶像差补偿方案。

2 旋转双柱面镜散光补偿原理

散光是一种常见的光学像差,其特点是在两个相互垂直的轴向上具有不同的屈光度。在临床视光学中,主要考虑散光像差的大小和轴向两个变量,可通过在其垂直的轴向上引入相同大小的散光来达到矫正的目的。旋转双柱面镜装置由两个具有相同屈光度的平凹(或平凸)柱面镜组成,通过调整两个柱面镜的相对角度及整体旋转,提供指定轴向与大小的散光量,以实现对人眼的散光补偿。

Saunders^[9]于 1980 年提出的传统医用表达式离焦 F_s 、散光 F_c 、轴向 a 可用于表示系统的屈光度,也可用于描述透镜的成像效果。单个柱面镜的屈光度可表示为 $F_s, F_c \times a$,其中 $F_s=0, F_c$ 表示单个柱面镜的屈光度大小, a 表示该柱面镜的旋转角度。传统医用表达式常用于临床医学中,但不利于计算屈光度的合成。因此,为了得到合成后旋转双柱面镜的屈光度的传统医用表达式,将柱面镜的传统医用表达式转换为矩阵形式^[10]:

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} F_s + F_c \sin^2 a & F_c \sin a \cos a \\ -F_c \sin a \cos a & F_s + F_c \cos^2 a \end{pmatrix}. \quad (1)$$

矩阵形式下,屈光度的合成可通过单个柱面镜屈光度矩阵直接相加得到,即 $F_D = F_1 + F_2$, F_D 为合成后的屈光度矩阵形式,具体形式如下:

$$F_D = \begin{pmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$F_{11} = F_{S1} + F_{S2} + F_{C1} \sin^2 a_1 + F_{C2} \sin^2 a_2, \quad (3)$$

$$F_{12} = F_{21} = -F_{C1} \sin a_1 \cos a_1 - F_{C2} \sin a_2 \cos a_2, \quad (4)$$

$$F_{22} = F_{S1} + F_{S2} + F_{C1} \cos^2 a_1 + F_{C2} \cos^2 a_2. \quad (5)$$

将双柱面镜的具体参数, $F_{S1} = F_{S2} = 0$, $F_{C1} = F_{C2} = F_C$, 代入(3)~(5)式作化简计算,再进行反变换得到合成后的旋转双柱面镜医用表达式, F_{sf} , $F_{cf} \times \phi$ 具体形式如下:

$$F_{sf} = 2F_C \sin^2 \left(\frac{a_1 - a_2}{2} \right), \quad (6)$$

$$\phi = \frac{a_1 + a_2}{2}, \quad (7)$$

$$F_{cf} = 2F_C \cos(a_2 - a_1). \quad (8)$$

(6)~(8)式即为旋转双柱面镜的散光矫正公式,式中 F_{sf} 表示旋转双柱面镜的离焦分量, ϕ 表示旋转双柱面镜的散光轴向, F_{cf} 表示旋转双柱面镜的散光分量。从理论上建立了双柱面镜旋转角度 a_1 、 a_2 与散光大小,轴向之间的关系。

3 基于远场光斑形态的散光补偿

基于上述旋转双柱面镜散光矫正的原理,搭建了基于远场焦斑形态的散光补偿实验系统,其原理如图 1 所示。波长为 637 nm 的平行光管发出的光穿过验光柱镜片 C,该柱镜片散光为待补偿散光(已知大小为 F_R),透过柱镜片的光进入旋转双柱面镜补偿装置 CP,其后由成像物镜 L 聚焦成像在 CCD 靶面上。计算机采集光斑图像并进行分析,根据焦斑形态确定双柱面镜的旋转角度 a_1 、 a_2 ,经多次旋转后实现对散光的自动补偿,将此时的双柱面镜旋转角度 a_1 、 a_2 代入(6)~(8)式,得到补偿散光的数值 F_E 。将实验所得的补偿散光 F_E 与已知大小的待补偿散光 F_R 进行比较,以验证双柱面镜散光矫正的正确性。

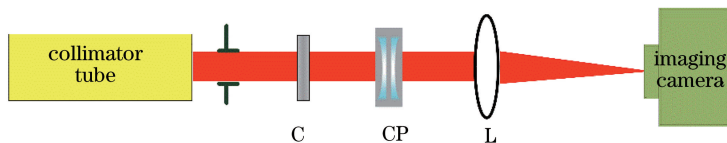


图 1 基于远场焦斑形态的散光补偿实验系统原理图

Fig. 1 Schematic of astigmatism compensation system based on far-field facula

光线传播过程中存在散光像差,意味着其在相互垂直的两个方向上具有不同的屈光度,对应着不同的成像面(前焦面与后焦面),如图 2 所示。散光远场光斑形态由其大小与轴向所决定,图 3 为轴向 60° 的光在前焦面处的远场光斑仿真图像,光斑呈椭圆形分布,光斑长轴与散光轴向一致,光斑长短轴相差越大意味着散

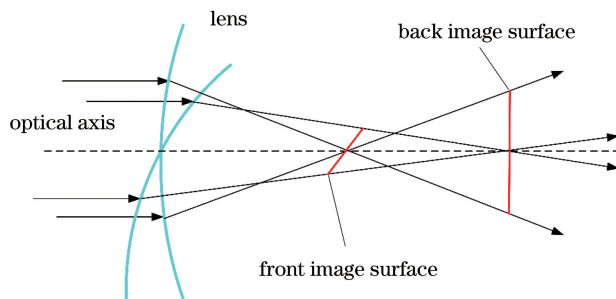


图 2 散光成像的原理分析

Fig. 2 Theoretical analysis of astigmatism imaging

光数值越大,反之越小。矫正散光像差,即消除垂直轴向上屈光度的差值,需在待补偿散光轴向的垂直方向上,提供相同大小的散光。由(6)~(8)式可知屈光度大小、轴向与双柱面镜旋转角度之间的函数关系,因此可通过分析散光的远场光斑形态,调整双柱面镜的旋转角度 a_1 、 a_2 来矫正系统散光。



图 3 60°散光的 PSF 仿真图像
Fig. 3 Simulation image of 60° astigmatism

实验中成像相机在前焦面附近采集远场光斑图像,从光斑图像中提取出待补偿散光的轴向与大小,具体实现流程如图 4 所示。图中 S_{score} 为近圆度评价函数,表达式为 R_{max}/R_{min} ,即散光光斑的长短轴之比,其数值越接近于 1 说明剩余散光像差越少。 T 为评价函数的阈值,当 S_{score} 达到这一要求时散光像差矫正完成。

为了确定散光轴向,采用求解协方差矩阵的最大特征向量的方法。统计学中,高维数据的传播方向常常使用到协方差矩阵进行描述,协方差矩阵的最大特征向量总是指向数据最大方差方向,即数据传播方向。散光光斑形态为任意方向的椭圆,如果将其视为二维空间上的一簇数据点的集合,则椭圆的长轴方向与二维数据的扩散方向相一致,协方差矩阵 C_{xy} 计算公式为

$$C_{xy} = cov(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = E\{[\mathbf{X} - E(\mathbf{X})][\mathbf{Y} - E(\mathbf{Y})]^T\} \quad (9)$$

式中向量 \mathbf{X} 表示数据点的 X 轴坐标,向量 \mathbf{Y} 表示数据点的 Y 轴坐标, E 表示期望,计算 C_{xy} 的特征向量并归一化,得到两个一维向量 e_1 、 e_2 其中最大特征向量 e_1 为椭圆的长轴方向,即为散光轴向。

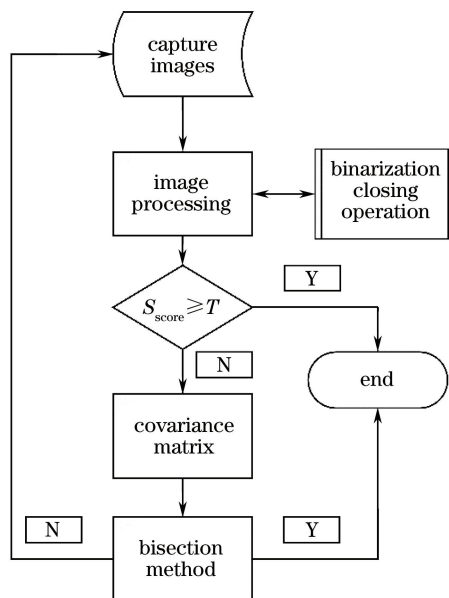


图 4 自动补偿散光算法流程图
Fig. 4 Flowchat of auto astigmatism compensation

按照上述办法求解协方差矩阵得到光斑图像的散光轴向后,通过不断改变双柱面镜相对角度 $|a_1 - a_2|$ 实现散光像差完全矫正。代数学中,二分寻根法可通过不断平分变量区间实现对方程根的求解,是一种简单且常用的求根方法。散光大小在双柱面镜相对角度的区间 $(0^\circ \sim 90^\circ)$ 内连续且递减,因此二分寻根法可用于该函数的求解,即确定待补偿散光的大小。当双柱面镜相对角度的变化区间小于 2° 时,矫正效

果满足要求。

基于图 4 的流程,实验验证了($-4\sim 0 D_c$)共 11 组散光的补偿效果。图 5 给出了验光柱镜片散光标称值与实测值的对比,实验结果表明,实测值与柱镜片标称值基本一致,平均偏差为 $0.104 D_c$,验证了旋转双柱面镜矫正散光原理的正确性,为后续应用提供了实验依据。

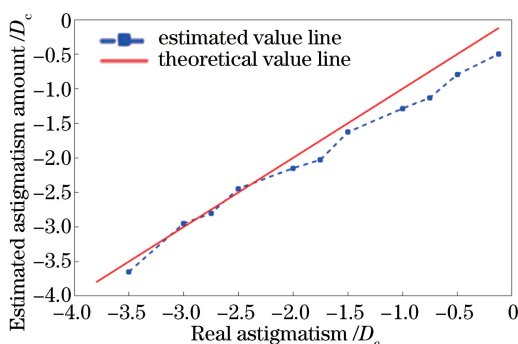


图 5 实验去除大尺度散光量误差

Fig. 5 Deviation of removing large scale astigmatism in the experiment

4 基于哈德曼波前传感器的人眼散光补偿

在原理性验证实验的基础上,将其应用人眼 AO 系统,以评价其对实际人眼散光的补偿效果。由于受到人眼像差及眼内散射的影响,眼底光斑十分弥散且动态变化,因此上述基于远场光斑形态进行散光补偿的方法无法应用于实际人眼。针对这一问题,提出基于哈特曼波前传感器的人眼散光矫正方法。根据哈特曼波前传感器的测量结果计算散光大小和轴向,以此旋转双柱面镜实现对人眼散光的补偿,其系统原理如图 6 所示。

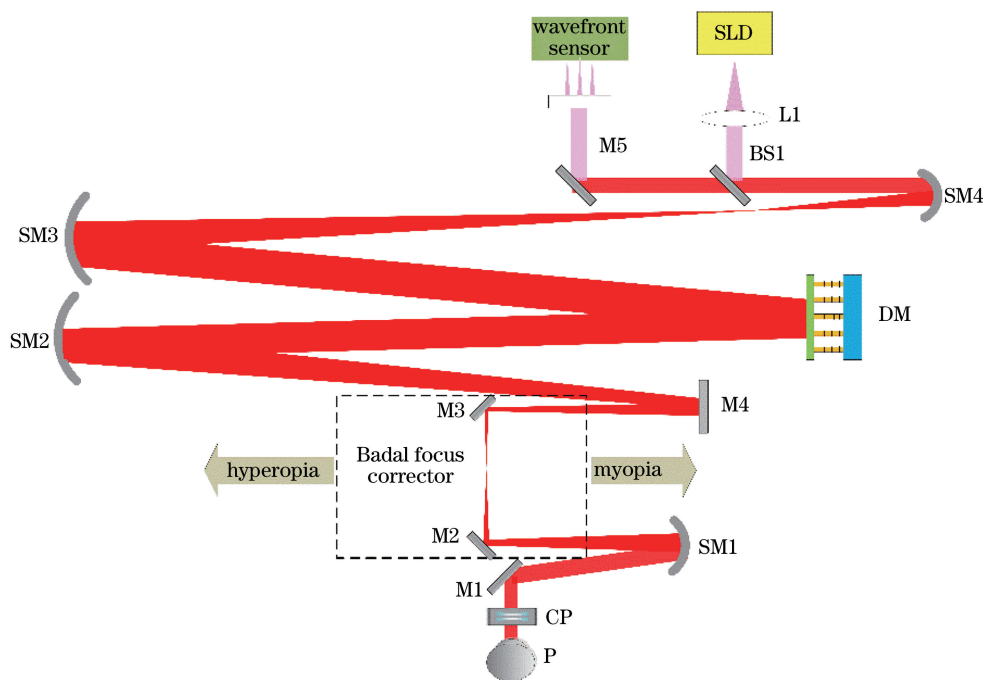


图 6 包含旋转双柱面镜的人眼像差矫正系统光路图

Fig. 6 Optical layout of ocular aberration correction system with rotating cylinders

实验系统主要由旋转双柱面镜, Badal 调焦系统, 信标光源, 变形镜以及哈特曼波前探测器等组成。波长为 795 nm 的超辐射发光二极管 (SLD) 光源发出的光由透镜 L1 准直为平行光, 经分光镜 BS1、球面镜 SM4-SM3、变形镜 DM、球面镜 SM2、反射镜 M4-M2、球面镜 SM1、反射镜 M1、双柱面镜 CP 后进入人眼, 从眼底返回的信标光携带人眼像差沿原光路返回, 经反射镜 M5 反射后进入哈特曼波前传感器, 实时测量人眼

像差。系统中反射镜 M2 和 M3 组成 Badal 调焦系统,用于补偿人眼离焦。哈特曼波前传感器测得的波前数据 $W(x, y)$ 由泽尼克多项式表达求得

$$W(x, y) = \sum_{k=1}^n a_k \cdot Z_k(x, y), \quad (10)$$

式中 a_k 为第 k 项泽尼克多项式的系数, Z_k 表示第 k 项泽尼克多项式,人眼屈光度与泽尼克多项式的 3、4、5 项系数相对应,其中 Z_3 为 Y 方向的散光, Z_4 为离焦量, Z_5 为 X 方向的散光,该三项构成人眼低阶像差:

$$W(x, y) = c_3 Z_3(x, y) + c_4 Z_4(x, y) + c_5 Z_5(x, y). \quad (11)$$

在满足傍轴近似的条件下,屈光度可表示^[11]为

$$P = -\partial^2 W(R\rho, \theta) / (R^2 \partial \rho^2). \quad (12)$$

屈光度 P 展开后可得到离焦 F_s 、散光 F_c 、轴向 a 的具体表达式为

$$F_s = -\frac{4\sqrt{3}c_4}{R^2} + \frac{2\sqrt{6}\sqrt{(c_3)^2 + (c_5)^2}}{R^2}, \quad (13)$$

$$F_c = -4\sqrt{6} \cdot \sqrt{(c_3)^2 + (c_5)^2} / R^2, \quad (14)$$

$$a = 0.5 \cdot \arctan\left(\frac{c_3}{c_5}\right) + \frac{\pi}{2}. \quad (15)$$

式中 R 表示入瞳半径,实验中 $R = 3$ mm。因此在测得系统波前畸变后,由(13)~(15)式可得到系统中的 F_s 、 F_c 、 a ,代入(6)~(8)式即可求解出旋转双柱面镜的旋转角度 a_1 、 a_2 。

在人眼实验前,首先进行了模拟眼实验,通过眼科验光片给模拟眼引入大小分别为 $-0.5 D_c$ 、 $-1.0 D_c$ 、 $-1.5 D_c$ 、 $-2.0 D_c$ 、 $-2.5 D_c$ 、 $-3.0 D_c$ 、 $-3.5 D_c$ 和 $-4.0 D_c$ 的散光。双柱面镜散光补偿前后整个实验系统的低阶像差如表 1 所示,可以看到,旋转双柱面镜散光补偿后,剩余散光大小均低于 $0.05 D_c$ 。需要指出的是,由于系统中哈特曼波前传感器动态范围的限制,当插入 $-3.5 D_c$ 和 $-4.0 D_c$ 散光片后,光斑超出部分子孔径,因此补偿前的离焦和散光无法测量,表 1 中以空表示,此时低阶像差的补偿通过观察光斑形态手动调整的方式完成。同时,由于 Badal 调焦系统补偿范围的限制,旋转双柱面镜散光补偿过程中采用模拟眼调焦和 Badal 调焦系统来联合补偿离焦。

表 1 实验对象散光、离焦补偿前后散光和离焦像差

Table 1 Astigmatism and sphere amount before and after astigmatism and sphere aberration correction of subjects

Cylinder / D_c	Sphere / D_s		Astigmatism / D_c	
	Before	After	Before	After
System aberration	0.30	-0.01	-0.56	-0.02
-0.5	0.26	0.01	-0.83	-0.03
-1.0	0.15	0.02	-1.06	-0.04
-1.5	-0.48	0.01	-1.95	-0.02
-2.0	2.12	0.01	-2.27	-0.03
-2.5	2.71	0.02	-2.77	-0.03
-3.0	3.08	0.01	-3.11	-0.04
-3.5		0.01		-0.03
-4.0		0.01		-0.03

图 7 为离焦、散光补偿前后系统(插入 $-0.5 D_c$ 散光片)前 15 项泽尼克像差系数的变化情况。从图中可以看出,综合 Badal 调焦系统和旋转双柱面镜矫正后,与散光相关的第 3、5 项系数减小接近于零,与离焦相关的第 4 项系数减小接近于零,剩余高阶像差变化很小,说明旋转双柱面镜矫正散光的同时不会引入额外的高阶像差。

在模拟眼实验基础上,进行了实际人眼散光补偿实验。自愿者为男性,25 岁,测试左眼,该眼离焦 $-2 D_s$,散光 $-0.5 D_c$,图 8(a)和(b)为该眼在散光补偿前后的二维波面图,矫正后剩余散光量为 $-0.06 D_c$ 。AO 闭环矫正前像差均方根(RMS)值为 $1.013 \mu\text{m}$,该眼残余像差由变形镜闭环矫正,图 8(c)和(d)显示了使用 AO 系统完全矫正人眼相差后人眼的二维、三维波面图,矫正后像差 RMS 值为 $0.038 \mu\text{m}$ 。

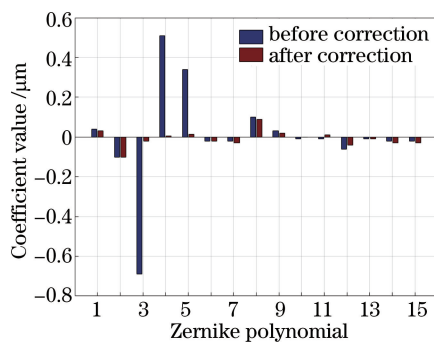


图 7 散光、离焦矫正前后泽尼克前 15 项系数对比

Fig. 7 Comparison of up to 15 items of Zernike coefficients before and after astigmatism correction

人眼离焦和散光分别由 Badal 调焦系统和旋转双柱面镜进行补偿,而剩下的小量残余低阶和高阶像差由变形镜矫正的方式将大大地降低对变形镜的行程要求,大幅提升人眼 AO 系统的人群适用范围,为人眼视网膜成像技术的大规模应用提供了可能。

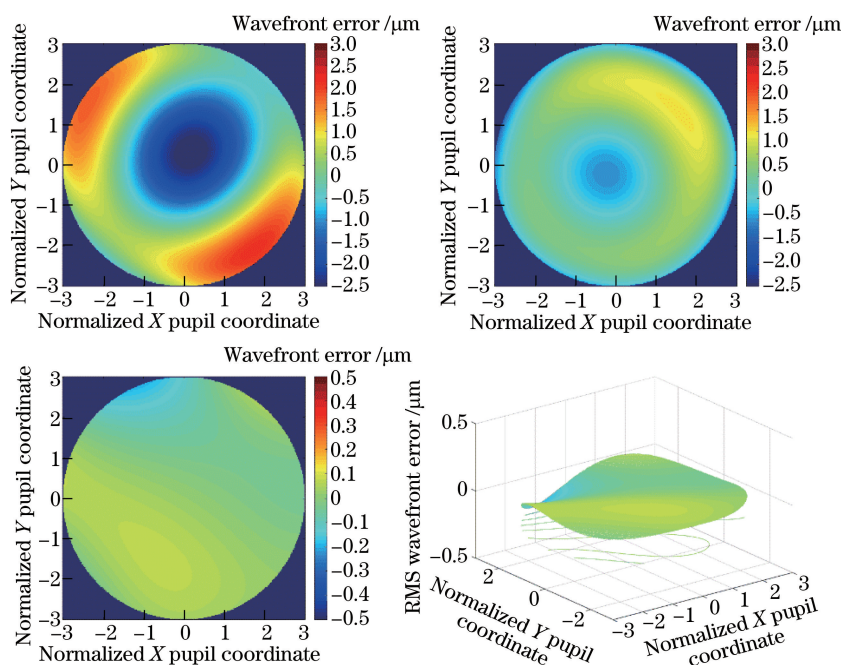


图 8 真实人眼实验结果。(a)散光补偿前;(b)散光补偿后;(c) AO 矫正后二维波面;(d) AO 矫正后三维波面

Fig. 8 Wavefront results of human eye. (a) Before astigmatism correction; (b) after astigmatism correction;

(c) 2D wavefront after AO correction; (d) 3D wavefront after AO correction

5 结 论

如何有效矫正随人群起伏很大的人眼像差,提高人眼 AO 系统的人群适用范围是大规模人群应用面临的重大难题。旋转双柱面镜散光补偿技术是一种使用灵活、低成本的散光补偿方法。首先给出了旋转双柱面镜散光矫正的理论依据,并搭建了基于远场光斑形态的散光自动补偿实验系统,验证了旋转双柱面镜散光矫正理论的正确性。在此基础上,将旋转双柱面镜与人眼 AO 系统相结合,利用哈特曼波前测量数据调整双柱面镜,实现了($-4 \sim 0 D_c$)散光的全自动补偿,补偿精度优于 $0.1 D_c$,并验证了实际人眼散光补偿效果。旋转双柱面镜结合 Badal 调焦技术可以实现对随人群起伏很大的低阶像差的有效补偿,从而大大降低了人眼 AO 系统对波前矫正器的指标要求,同时降低了系统的复杂性与成本,为人眼视网膜高分辨成像技术的大规模人群适用提供了一种经济有效的低阶像差补偿方案。

参 考 文 献

- [1] Liang J, Williams D R, Miller D T. Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics[J]. *J Opt Soc Am A*, 1997, 14(11): 2884-2892.
- [2] Hofer H, Chen L, Yoon G Y, *et al.* Improvement in retinal image quality with dynamic correction of the eye's aberrations[J]. *Optics Express*, 2001, 8(11): 631-643.
- [3] Roorda A, Romero-Borja F, Donnelly I W, *et al.* Adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy[J]. *Optometry & Vision Science Official Publication of the American Academy of Optometry*, 2002, 10(9): 405-12.
- [4] Zhang Y, Rha J, Jonnal R S, *et al.* Adaptive optics parallel spectral domain optical coherence tomography for imaging the living retina[J]. *Optics Express*, 2005, 13(12): 4792-4811.
- [5] Chen D C, Jones S M, Silva D A, *et al.* High-resolution adaptive optics scanning laser ophthalmoscope with dual deformable mirrors[J]. *J Opt Soc Am A*, 2007, 24(5): 1305-1312.
- [6] Xiao Fei, Dai Yun, Zhao Junlei, *et al.* High-resolution retinal imaging system with dual deformable mirrors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0501004.
肖 飞, 戴 云, 赵军磊, 等. 双变形镜人眼视网膜高分辨率显微成像系统[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0501004.
- [7] Guirao A, Gonzalez C, Redondo M, *et al.* Average optical performance of the human eye as a function of age in a normal population[J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 1999, 40(1): 203-213.
- [8] Hampson K M, Dainty C, Munro I, *et al.* Weak correlation between the aberration dynamics of the human eye and the cardiopulmonary system[J]. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*, 2005, 22(7): 1241-1250.
- [9] Saunders H. A method for determining the mean value of refractive errors[J]. *The British Journal of Physiological Optics*, 1980, 34: 1-11.
- [10] Long W F. A matrix formalism for decentration problems[J]. *Optometry & Vision Science*, 1976, 53(1): 27-33.
- [11] Dai G. *Wavefront optics for vision correction*[M]. Bellingham: SPIE Press, 2008.