



DOI: 10.12086/oe.2018.170703

自适应光学人眼像差调控及其应用

戴云^{1,2*}, 肖飞^{1,2}, 赵军磊^{1,2}, 康健^{1,2}, 杨彦荣^{1,2,3}, 赵豪欣^{1,2}, 张雨东^{1,2}¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;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

摘要: 自适应光学技术能够对波前像差进行实时测量及调控。1997年, 该技术被首次成功地应用于活体人眼像差的调控, 并获得了接近衍射极限的高分辨率视网膜视细胞图像和传统低阶像差矫正无法达到的“超视力”。随后自适应光学技术在眼科学研究中得到迅速发展。就研究内容来看, 该领域主要包括视网膜高分辨力成像和人眼像差操控与视功能研究两大方向。美国 Rochester 大学 Williams 教授和加利福尼亚大学 Roorda 教授于 2011 年分别对视网膜高分辨力成像和人眼像差操控与视功能研究方向的研究作了非常全面的综述。1997 年, 光电所在国内率先开展人眼自适应光学技术及其应用研究, 本文在简单介绍人眼自适应光学系统原理的基础上, 报道了光电所在该领域近五年的主要研究进展。

关键词: 人眼像差; 自适应光学; 视觉训练; 视觉仿真器; 人眼散射; 图像复原

中图分类号: TH744

文献标志码: A

引用格式: 戴云, 肖飞, 赵军磊, 等. 自适应光学人眼像差调控及其应用[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 170703

Ocular aberrations manipulation with adaptive optics and its application

Dai Yun^{1,2*}, Xiao Fei^{1,2}, Zhao Junlei^{1,2}, Kang Jian^{1,2}, Yang Yanrong^{1,2,3},Zhao Haoxin^{1,2}, Zhang Yudong^{1,2}¹Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan 610209, China;²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan 610209, China;³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Adaptive optics (AO) techniques allow to measure and manipulate the wavefront aberrations in real time. This technology was first successfully applied to the manipulation of ocular aberrations, and high resolution retinal images and “supernormal vision” were achieved in vivo for the first time in 1997. Subsequently, adaptive optics were developed rapidly in ophthalmology. This field includes two main directions: high resolution imaging of the retina and the research of ocular aberrations manipulation and its influence on visual function. In 2011, professor D. R. Williams from Rochester University and Professor Austin Roorda from California University made two comprehensive overviews on retinal high-resolution imaging and ocular aberrations manipulation and its influence on visual function, respectively. In 1997, researchers in Institute of Optics and Electronics took the lead in developing of adaptive optics technology in China. This article firstly introduces the principle of ocular adaptive optical system briefly, and then reports the main research progress of Institute of Optics and Electronics in this field for the last five years.

收稿日期: 2017-12-20; 收到修改稿日期: 2018-01-31

基金项目: 国家自然科学基金项目; 国家高技术研究发展计划项目; 国家重大科学仪器设备开发专项; 中科院科研装备研制项目

作者简介: 戴云(1976-), 男, 博士, 研究员, 主要从事人眼自适应光学技术的研究。E-mail: daiyun@ioe.ac.cn

Keywords: ocular aberrations; adaptive optics; visual training; vision simulation; intraocular scatter; image restoration

Citation: Dai Y, Xiao F, Zhao J L, et al. Ocular aberrations manipulation with adaptive optics and its application[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170703

1 引言

经过长期的人类进化，人眼屈光系统已经相当完善但并非完美，其性能受瞳孔衍射、光学像差以及眼内散射等因素的影响。生理上，眼球屈光系统存在各部份的位置偏差、各折射面的曲率偏差、表面形状偏差、各折射面的倾斜和偏心以及眼球内容物不均匀而导致的折射率局部偏差等光学缺陷。这些光学缺陷使得通过人眼后的实际波面与理想波面存在偏差，该偏差称为人眼波像差，简称人眼像差。

人眼像差的存在不但降低了人眼自身的视觉功能，同时给眼底视网膜高分辨力成像带来困难。1997年，美国 Rochester 大学的 Liang 和 Williams 等人^[1]在国际上率先采用自适应光学(adaptive optics, AO)技术矫正人眼低阶和高阶像差，首次在活体状态下获得了接近衍射极限的高分辨力视网膜视细胞图像和传统低阶像差矫正无法达到的“超视力(supernormal vision)”，这一开创性工作成为自适应光学在眼科学中应用的开端。随后，国内外多家研究机构相继开展了人眼自适应光学像差矫正技术及其应用研究，取得了一系列重要研究成果，该领域已成为自适应光学最为成

功的民用应用领域。就研究内容来看，该领域主要包括眼底视网膜高分辨力成像和人眼像差操控与视功能研究两大方向。2011年，美国 Rochester 大学 Williams 教授和加利福尼亚大学 Roorda 教授分别对视网膜高分辨力成像和人眼像差操控与视功能研究方向作了非常全面的综述^[2-3]。1997年，中国科学院光电技术研究所在国内率先开展人眼自适应光学技术及其应用研究，本文在简单介绍人眼自适应光学系统原理的基础上，报道了光电所在该领域近五年的主要研究进展。由于篇幅限制，感兴趣的读者可以参考相应引用文献。

2 人眼自适应光学系统原理

人眼自适应光学系统原理如图 1 所示。与典型自适应光学系统类似，该系统主要由波前传感器、波前矫正器、波前控制器组成。最常见的人眼自适应光学系统由哈特曼波前传感器、变形反射镜及控制软件构成。波前传感器实时测量人眼像差，控制系统据此像差数据引导、控制波前矫正器产生相应变化实现对人眼像差的调控。在此基础上，通过眼底照明系统和高灵敏度成像系统实现对视网膜的高分辨力成像，通过视标显示装置以及视功能测试系统研究人眼像差对视

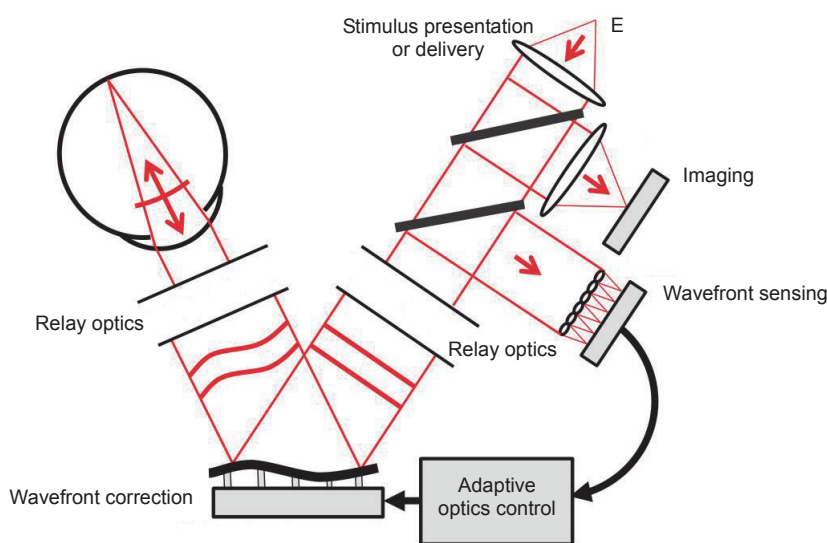


图 1 典型的人眼自适应光学系统原理图^[3]

Fig. 1 Schematic diagram of a typical adaptive optical system for human eye^[3]

功能的影响。在视网膜高分辨力成像时，为了获得近衍射极限的成像分辨力，需要充分矫正人眼低阶和高阶像差；而在视功能研究时，对人眼像差可以是全部矫正、选择矫正甚至叠加特定项像差，以研究不同像差成分对视功能的影响，这也是我们称之为“人眼像差调控而非矫正”的原因。

3 光电所近五年主要研究进展

3.1 人眼像差矫正与视知觉学习训练

从1997年“超视力(supernormal vision)”概念被提出以来，围绕人眼光学像差与视力，国内外多家研究机构开展了广泛深入的研究。但是随着研究的深入，发现矫正人眼光学像差带来的视力提高幅度个体差异较大，并且远没有达到预期的超视力水平。矫正人眼光学系统像差后获得“超常光学(supernormal optics)”能否最终实现“超视力”仍未得出明确结论。

2007年，Rossi等人^[4]分析了正视眼和低度近视眼高阶像差矫正后的视功能，发现对低度近视眼，高阶像差矫正带来的视功能收益低于正视眼，视网膜和大脑皮质因素可能限制了像差对视功能的影响。Li等人^[5]研究发现人眼存在对自身像差的适应性，高阶像差矫正带来神经不适应降低了预期的视觉收益。2009年，Elliott等人^[6]分析了人眼像差在视力随年龄衰老中的作用，发现老年人群矫正高阶像差带来的视力改善明显低于青年人，说明随年龄增加的人眼像差不是老年视力衰退的唯一原因，可能是与神经因素综合作用的结果。这些研究结果提示我们，除了人眼光学像差外，人眼视功能在很大程度上还受到视觉神经系统的限制。

视觉神经系统在出生后存在自然生长和发育的过程，这一过程中外界的视觉刺激至关重要，而视觉刺激的精细程度直接决定了视觉神经系统的发育程度。视觉刺激通过人眼屈光系统获取，在人眼像差、眼内散射和衍射的共同作用下，视觉神经系统不能获得清晰的视觉刺激，进而限制了视觉神经系统的精细发育。通过自适应光学系统矫正人眼像差，为视觉神经系统提供最精细的视觉刺激，在此情形下进行知觉学习训练，是否可以进一步提高视觉神经系统功能？为此，与中科大视觉研究实验室合作，光电所研制了一套人眼高阶像差校正视知觉学习训练实验系统^[7]，其系统原理图如图2所示。

半导体激光器发出的光经过空间滤波、准直后经分光镜入射到人眼内，经人眼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，其后向散射光经过眼睛的屈光系统后从人眼瞳孔射出，携带人眼像差信息，经过变形镜、口径匹配系统，进入哈特曼波前传感器。哈特曼波前传感器对入射波前进行分割采样，通过波前复原获得人眼像差，控制系统据此像差数据引导、控制变形反射镜产生相应变形从而矫正人眼像差。在像差矫正稳定后，被试者通过系统观察显示在视标呈现装置上的光栅条纹并做出判断，受试者的判断由外部设备采集并送入计算机进行分析，系统根据受试者的判断自动调整条纹空间频率或对比度，按照设定的程序模式完成视功能测试或知觉学习训练。

该系统采用37单元变形镜矫正人眼像差，可以对前5阶Zernike像差进行有效矫正。基于该系统，我们实验对比了正常成年人眼在高阶像差矫正与不矫正

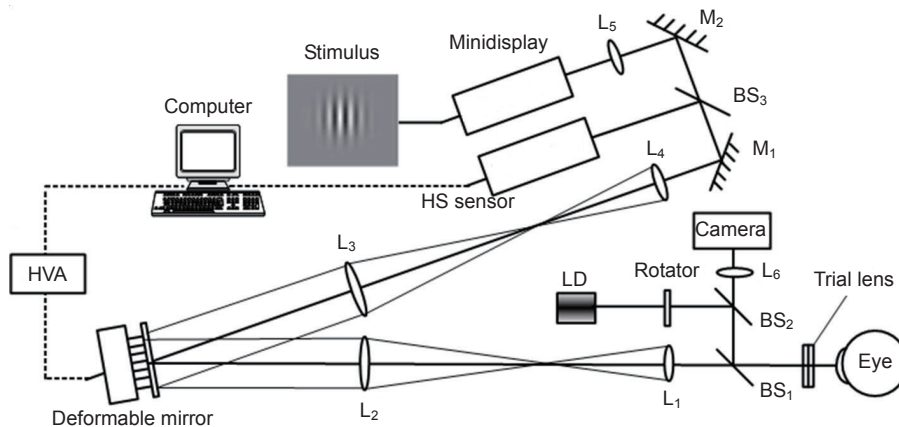


图2 人眼像差自适应光学矫正与视知觉学习训练系统原理图
Fig. 2 Schematic diagram of adaptive optical perceptual learning system

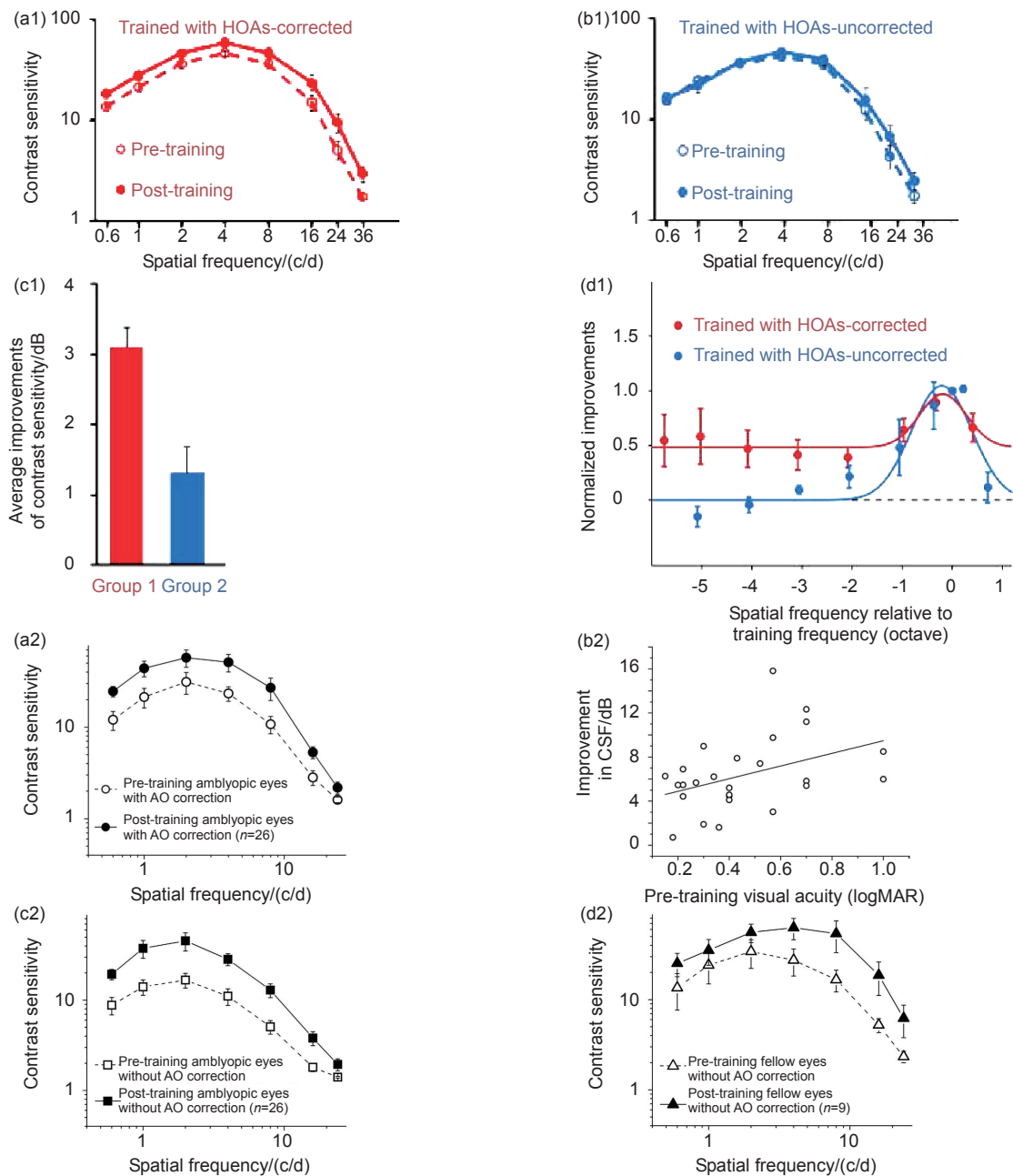


图3 (a1)~(d1) 正常成年人眼在高阶像差校正与不校正下进行知觉学习训练后的对比敏感度及其收益^[8]。(a1) 高阶像差校正下的学习训练结果; (b1) 非高阶像差校正下的学习训练结果; (c1) 两组训练后平均对比敏感度提高的幅度; (d1) 两组训练后不同空间频率下的归一化改善程度。(a2)~(d2) 弱视患者人眼在高阶像差校正与不校正下进行知觉学习训练后的对比敏感度及其收益^[9]。(a2) 高阶像差校正下的学习训练结果; (b2) 高阶像差校正训练后对比敏感度收益与训练前视锐度的函数关系; (c2) 非高阶像差校正下的学习训练结果; (d2) 非高阶像差校正下的学习训练后另一只眼睛的对比敏感度测试结果

Fig. 3 (a1)~(d1) Contrast sensitivity function and its benefit for normal adults pre- and post-training with and without correction of high-order aberrations (HOAs). (a1) Average results trained under the HOAs-corrected condition^[8]; (b1) Average post-and pre-training CSFs without HOAs-corrected; (c1) Average improvements of contrast sensitivity with and without HOAs-corrected; (d1) Average magnitude of contrast sensitivity improvements across observers and spatial frequencies. (a2)~(d2) Improvements in the CSF after perceptual learning for older children and adults with anisometropic amblyopia. (a2) Pre- and post-training CSFs for amblyopic eyes with AO correction^[9]; (b2) Average improvements in CSF with AO correction (dB) as a function of pre-training amblyopic VA (logMAR); (c2) The learning effect with AO correction is maintained under the condition without AO correction for the amblyopic eyes; (d2) The learning effect with AO correction is transferred to the untrained fellow eyes

下进行知觉学习训练后的视功能^[8]。实验结果发现,即便是视觉神经系统发育关键期(8岁前)后的成年人,在高阶像差矫正下进行视知觉学习训练,对比敏感度在较宽空间频率范围内得到了显著提高,表明关键期后视觉神经系统仍具有相当的可塑性。而弱视是一种视觉神经系统发育典型的病例,目前眼科临床对关键期后的弱视治疗效果不理想。在前期研究工作的基础上,光电所与华西医院眼科和四川省人民医院眼科合作,开展了人眼像差矫正与视知觉学习训练方法对关键期后弱视治疗的临床试验^[9]。临床实验表明,该方法可以突破目前临床有关弱视治疗“关键期”的限制,为弱视特别是成人弱视治疗提供有效解决手段。由于人眼普遍存在或多或少的低阶和高阶光学像差,使得正常人眼视觉神经系统无法发育到其生理极限,因此广义的讲,正常人眼也是“弱视”。人眼自适应光学高阶像差矫正下的知觉学习训练有望在一些特殊职业人群(如飞行员)视力维护上发挥重要作用。

3.2 双眼自适应光学视觉仿真器

单眼自适应光学视觉仿真器为揭示人眼像差对部分视功能的影响提供了有力工具,但正常状态下人眼为双眼视觉,双眼视觉并非单眼的简单叠加,与单眼视觉相比,不仅扩大了视野,消除了生理盲点,而且使人具有立体视觉,增强了人对于三维空间的感知能

力,另外双眼叠加作用能够降低视感觉阈值,并使得视功能的诸多方面有所增强。因此,从单眼视觉到双眼视觉的转变是一种必然过渡。双眼自适应光学视觉仿真器是单眼仿真器的拓展和完善。

在前期单眼研究的基础上,2012年光电所研制建立一套双眼自适应光学视觉仿真分析系统^[10],原理图如图4所示,该系统包括左右眼两套自适应光学系统。以左眼系统为例,近红外半导体激光器 LD 发出的光经 L₁ 准直后经分光镜 BS₁ 和棱镜 P₁ 入射到人眼内,经人眼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,其后向散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经过棱镜 P₁、分光镜 BS₁、口径匹配系统(L₄, L₅)、平面发射镜 M₂、变形镜 L-DM、平面发射镜 M₁、口径匹配系统(L₂, L₃)、分光镜 BS₂、平面发射镜 M₃ 后进入哈特曼波前传感器 L-SHWS。由哈特曼传感器测量波前像差,控制系统据此像差数据引导、控制变形反射镜矫正人眼波前像差。人眼像差测量采用人眼不可见近红外光源,消除像差测量和矫正对双眼视功能测试的影响,从而可以在整个测试过程中实现对人眼像差的实时测量和控制。在像差控制的同时,受试眼通过前述光学系统、平面反射镜 M₄、等腰棱镜 P₂ 和透镜 L₆ 观察视标,进行双眼视功能测试。棱镜 P₁ 的前后移动可以实现双眼瞳距调节。

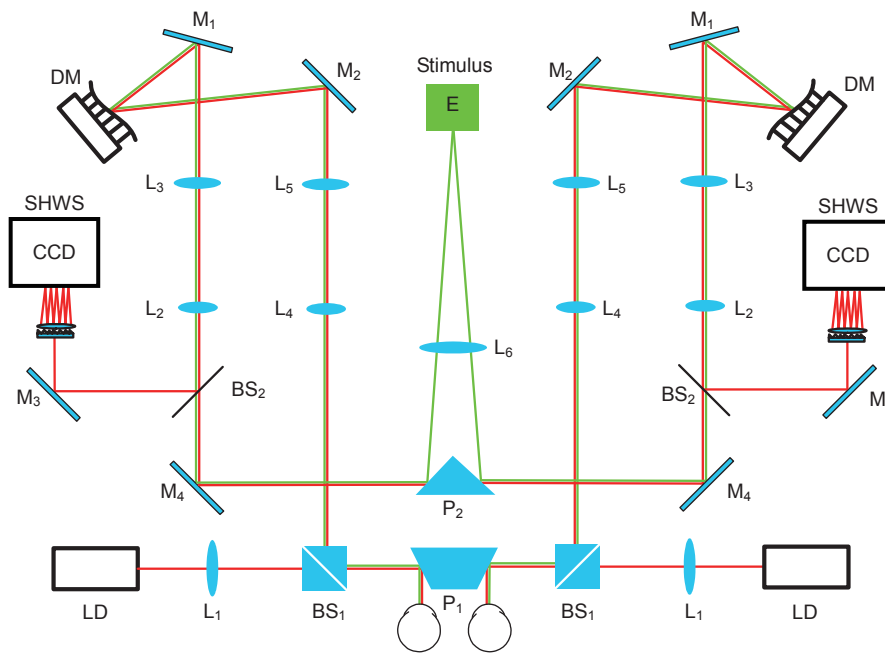


图4 双眼自适应光学视觉仿真分析系统原理图^[10]

Fig. 4 Schematic of binocular adaptive optical visual simulation system^[10]

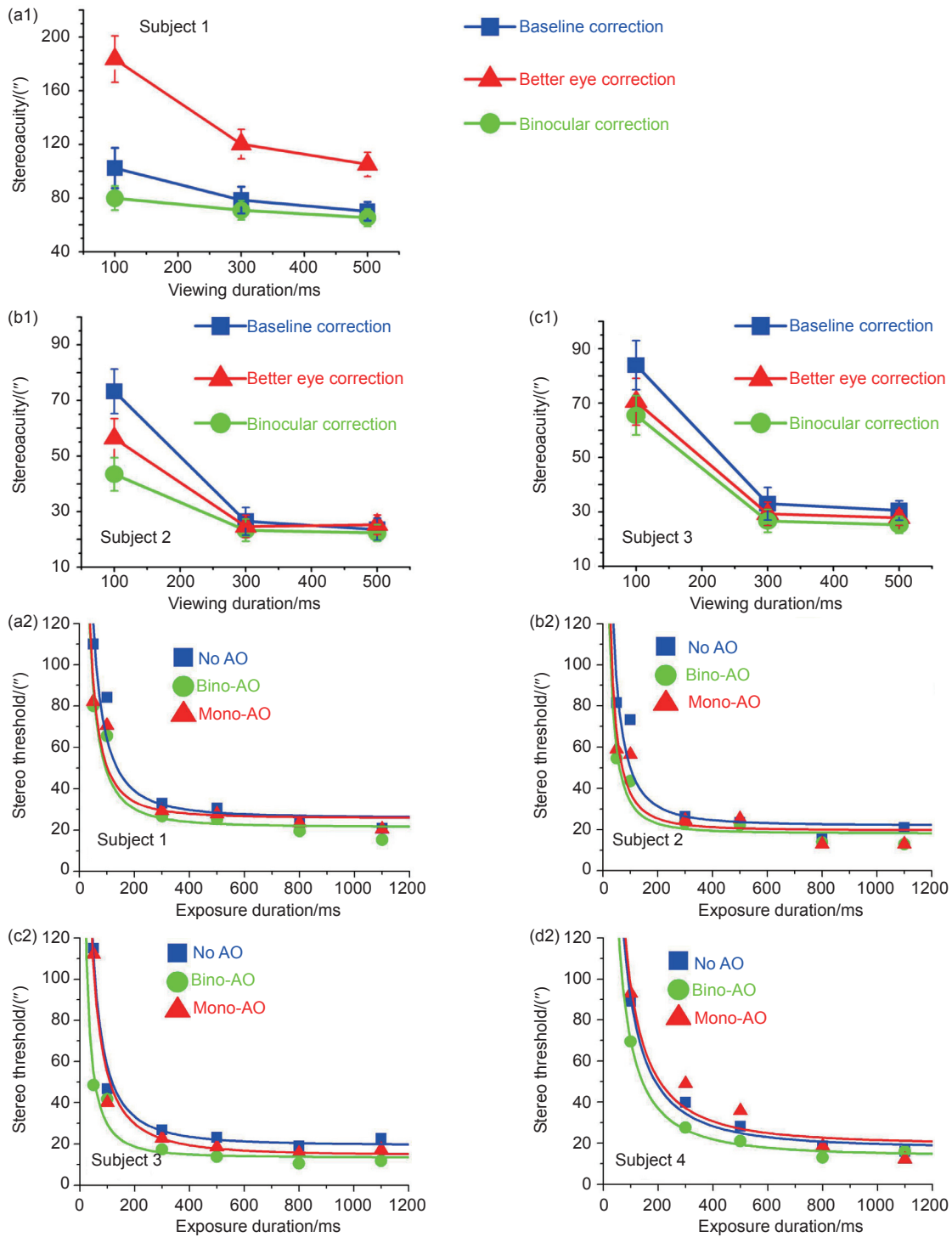


图 5 (a1)~(c1) 不同视标显示时间和像差校正策略下的立体视阈值^[11]。图中 Baseline correction 代表仅校正低价像差的结果; Better eye correction 代表优势眼像差校正的结果; Binocular correction 代表双眼高阶像差校正的结果。(a2)~(d2) 二次叠加模型拟合后的立体视阈值-显示时间曲线^[12]。图中 No AO 代表仅校正低价像差的结果; Bino-AO 代表双眼高阶像差校正的结果; Mono-AO 代表优势眼像差校正的结果

Fig. 5 (a1)~(c1) Stereoacuity versus viewing duration under different optical conditions for the three subjects^[11]. Blue squares represent stereoacuity with baseline correction, green circles and red triangles represent stereoacuity with binocular and better eye correction. (a2)~(d2) Stereo threshold versus exposure duration under different optical conditions for the 4 subjects on linear scales^[12]. The blue squares represent stereoacuity with basic correction of defocus and astigmatism, the green circles and red triangles represent stereoacuity with binocular and better eye correction

在该平台上我们研究了不同亮度条件下人眼高阶像差对双眼对比敏感度和双眼叠加作用的影响以及高阶像差校正对双眼对比敏感度的影响。实验结果表明, 在高阶像差校正后, 对于测试的所有空间频率双眼对比敏感度函数都升高, 且对于两种不同的亮度条件, 双眼和单眼的对比敏感度收益无显著差异^[10]。2015年, 康健等人该平台研究了人眼高阶像差校正对立体视阈值^[11]以及立体视觉时间整合性质^[12]的影响。研究表明, 双眼高阶像差校正后立体视阈值能够显著地降低, 且高阶像差校正后的立体视觉收益与视标显示时间相关, 人眼光学条件对立体视觉的影响随着显示时间的延长逐渐减弱。立体视觉的时间整合性质不受人眼光学像差的影响。2016年, 我们改进了原有的双眼仿真器平台, 使系统的瞳孔直径从 6 mm 调整为 4 mm, 并在该平台上研究了人眼高阶像差对双眼调节反应的影响^[13]。研究表明, 双眼调节反应的滞后、波动幅度和功率谱密度在高阶像差校正前后均没有显著变化。

3.3 基于自适应光学的人眼散射客观评价系统

视觉仿真器为人眼像差对视功能的影响研究提供了有力工具。但是, 除了光学像差之外, 人眼还存在着复杂的散射。人眼散射会随着老龄化^[14]和白内障^[15]

等人眼疾病而增加。人眼散射量在一定程度上可以反映白内障、干眼症等人眼疾病的严重程度。精确评价人眼散射对于白内障等疾病的预防和诊断具有重要的价值。

2004年, Artal 等^[16]首次提出了采用双通成像技术评价人眼散射的思想, 并在一个商业化仪器中实现了该想法。随着该商业化仪器的研制成功, 采用双通成像技术评价人眼散射的方法被广泛应用于白内障^[15]、干眼症^[17]和葡萄膜炎^[18]等病眼的散射测量。双通散射评价技术采用客观散射系数(objective scatter index, OSI)量化人眼散射, 其测量精度会受到人眼像差和瞳孔的影响。现有的技术手段通过补偿低阶像差减小了人眼像差对测量精度的影响, 但其精度依然会受到人眼高阶像差的影响^[19]。另外, 现有的双通系统均采用一个 2 mm 入瞳和一个 4 mm 出瞳组成的非对称瞳面结构^[20]。由于系统孔径较小, 当人眼光学介质的散射源不在入射和出射光路时, 测量精度将会受到影响^[15]。

为了实现大孔径眼内散射测量并消除人眼像差的影响, 2016年我们研制并建立一套基于自适应光学的人眼散射客观评价系统^[21], 原理图如图 6 所示。开始工作时, SLD(super-luminescent diode)发出的信标光经透镜 L_1 准直后由分光镜 BS_1 反射后进入主光路, 经球面反射镜 SM_4 、 SM_3 、145 单元 PZT 变形镜(DM_{145})、

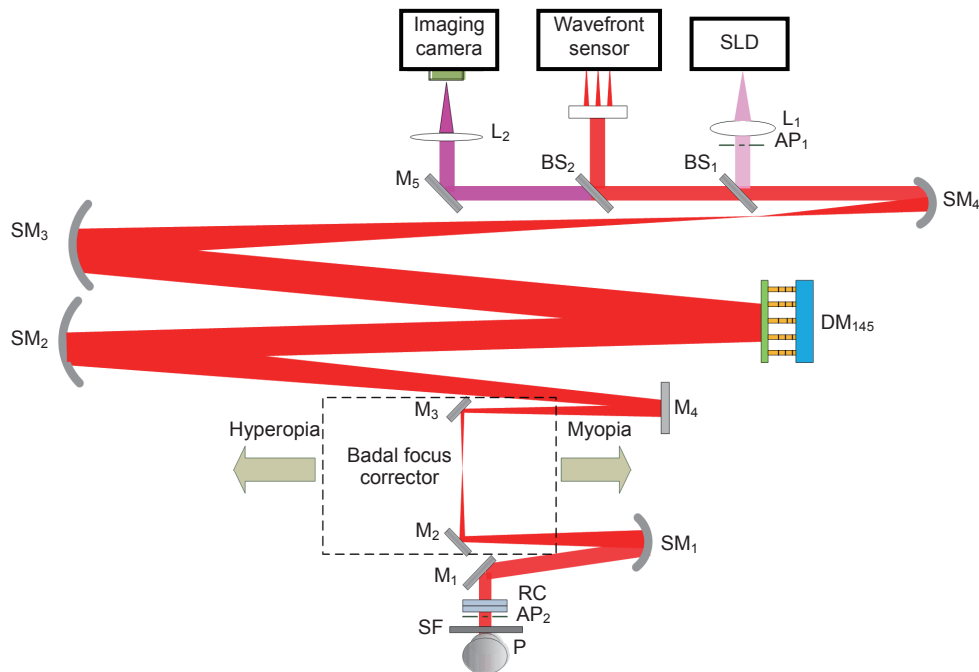


图 6 自适应光学人眼双通 PSF 测量系统^[21]

Fig. 6 Schematic diagram of the adaptive optics double pass PSF measurement system^[21]

SM₂、平面反射镜 M₄、M₃、M₂、SM₁、M₁和旋转柱面镜装置 RC 后进入人眼。携带人眼像差信息的眼底反射光经主光路(RC、M₁、SM₁、M₂、M₃、M₄、SM₂、DM₁₄₅、SM₃、SM₄)，由分光镜 BS₂反射后进入哈特曼波前探测器，探测器实时测量人眼像差，波前控制系统则根据测得的像差斜率信号控制变形镜对像差进行校正。待校正完成后，启动成像相机同步完成人眼双通点扩散函数(point spread function, PSF)图像采集。获得人眼双通 PSF 图像后，根据客观散射系数定义计算得到人眼客观散射系数。该系统采用了 Badal 调焦装置、旋转柱面镜装置与 145 单元 PZT 变形镜相结合的人眼像差校正方案，扩大了像差校正范围，同时降低了成本。

基于以上平台，我们研究了三种不同像差校正策略对人眼散射客观评价的影响^[22](如图 7(a)所示)。实验结果表明，高阶像差严重影响人眼散射的客观测量结果，仅校正低阶像差获得的 OSI 值存在较大误差。在此基础上，我们在系统中增加视功能测试通道，改进后的系统可以同时实现对人眼高阶像差和散射的调控以及视功能测试。基于以上系统，我们研究了人眼散射和高阶像差对对比敏感度的影响^[23](如图 7(b)所

示)。实验结果表明，高阶像差校正后对比敏感度函数显著提高，随着散射量的增加对比敏感度逐渐降低，而且高阶像差和散射对对比敏感度的影响并不是两者单独影响的简单叠加。

3.4 自适应光学客观视力检查

视觉诱发电位(visual evoked potential, VEP)又称视觉诱发反应，是视网膜受闪光或图形刺激后经视路传递，在头颅皮肤面记录到的大脑枕叶视觉中枢的电反应。它主要反映视网膜神经节细胞至视觉中枢的传导功能。大脑皮质视觉中枢 17 区主要接受中央视网膜 10° 以内的神经纤维的投射，且投射区最靠近头皮面，故 VEP 的大部分信息来自黄斑区。VEP 不仅反映枕叶视皮质的功能而且反映视网膜黄斑区及黄斑区神经节细胞到视皮质的传递通道的功能，VEP 是一种重要的视神经功能客观评价检查方法,可以为视神经炎诊断和视神经功能评价提供客观手段，并可实现视力的客观检查。

VEP 是大脑皮质枕叶区对视刺激发生的电反应，是代表视网膜接受刺激，经视路传导至枕叶皮层而引起的电位变化。从视觉诱发电位产生的机理可以看到，

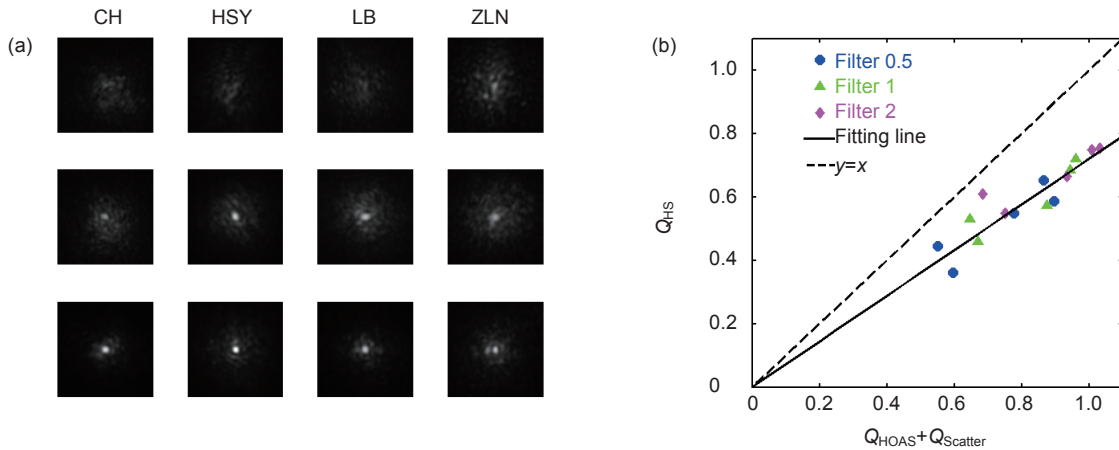


图 7 (a) 四名被试者在三种像差校正策略下的双通 PSF 测量典型结果^[22]，每列对应一个被试者的结果，其中第一行是仅校正低阶像差获得结果，第二行是校正前五阶像差后获得的结果，第三行是校正前八阶像差后获得的结果；(b) 像差和散射同时存在时的影响因子(Q)与两者单独存在时的影响因子(Q)之和的线性拟合结果^[23]，其中三种不同颜色对应的结果分别是采用三种散射滤波片获得的实验结果，拟合结果为 $y=0.73x$ 。

Fig. 7 (a) The typical DP PSF images measured at the fovea for the left eyes of subjects in AO-DPPMS system with different aberration correction strategies^[23]. First row, DP images with defocus and astigmatism corrected in the AO-DPPMS system; second row, DP images with aberrations corrected up to the 5th Zernike order with AO-DPPMS system; third row, DP images with aberrations corrected up to the 8th Zernike order with AO-DPPMS system; (b) Linear fit of impact factor_{HS} (Q_{HS}) versus the sum of impact factor_{HOAS} (Q_{HOAS}) and impact factor_{Scatter} ($Q_{Scatter}$). Each point represent an average value across subjects for a spatial frequency. Blue circles stand for results obtained with filter S0.5; green triangles stand for results obtained with filter S1; magenta diamonds stand for results obtained with filter S2. The solid line represent the fitting line; the dotted line stand for the line $y=x$

无论何种视觉诱发电位, 视网膜接受视觉刺激是第一位的, 而视网膜上的视觉刺激必须经由人眼屈光系统的投射, 人眼光学系统的好坏将直接影响投射到视网膜上的视觉信号的质量。视觉刺激向视网膜上传递除无法避免的人眼瞳孔产生的衍射之外, 光学像差是最主要的影响因素。现有 VEP 检查通过镜片屈光补偿来矫正人眼低阶像差, 离散度数的矫正镜片难以实现对低阶像差的精确补偿。残余低阶像差和人眼高阶像差的存在对低空间频率 VEP 检查影响不大, 但当采用较高空间频率的图形刺激进行 VEP 检查发现存在异常时, 并不能确定认为存在视路异常, 有可能是被检者尚未矫正的光学像差所致。为了研究人眼高阶像差对 VEP 检查的影响, 我们研制建立了一套基于自适应光学人眼像差矫正的客观视力检查系统, 其原理如图 8 所示。该系统基于 3.3 中的 AO 系统, 在此基础上集成 VEP 检查子系统。刺激图形视频信号经刺激处理器 Bits# 显示在 OLED 显示器上, 在图形显示的同时, 刺激处理器发出同步触发信号同时触发 VEP 信号采集系统采集诱发电位信号。

基于该系统, 我们实验研究了人眼高阶像差对 VEP 检查的影响, 图 9 为 12 名被试者分别在低阶像差和高阶像差矫正下 VEP 检查的平均结果, 图中横轴为

刺激图形空间频率, 纵轴从(a)到(f)分别为 N_1 波、 P_1 波、 N_2 波幅值和 N_1 波、 P_1 波、 N_2 波潜伏期。实验结果表明, 矫正高阶像差可以显著提高 VEP 检查 P_1 波和 N_2 波的幅值, 提高幅度随空间频率略有变化。利用配对 t 检验对实验结果进行显著性分析, 结果显示 P_1 波和 N_2 波幅值的提高具有统计上的显著性($p < 0.05$), N_1 波幅值及各波潜伏期在高阶像差矫正前后的变化不具有统计学差异, 实验结果初步证实了人眼高阶像差对 VEP 检查的影响。实验中的被试者均为正常人眼, 高阶像差相对于病眼较小, 高阶像差对临床病眼 VEP 检查的影响可能会更加显著。

3.5 基于卷积神经网络的视网膜图像复原

基于 AO 技术的眼底成像技术能够获得近衍射极限的眼底高分辨力图像, 然而受限于 AO 系统的带宽、波前探测器的探测精度及变形镜的校正能力, 图像仍然被残余像差模糊。同时, 眼内散射、眼球的生理颤动及图像采集过程中的各种噪声进一步降低了图像质量。为了消除残余像差对图像的模糊并提升图像质量, 2017 年我们提出了一种基于深度卷积神经网络的眼底图像复原算法^[24]。

眼底视网膜图像的降质过程可以通过式(1)来描

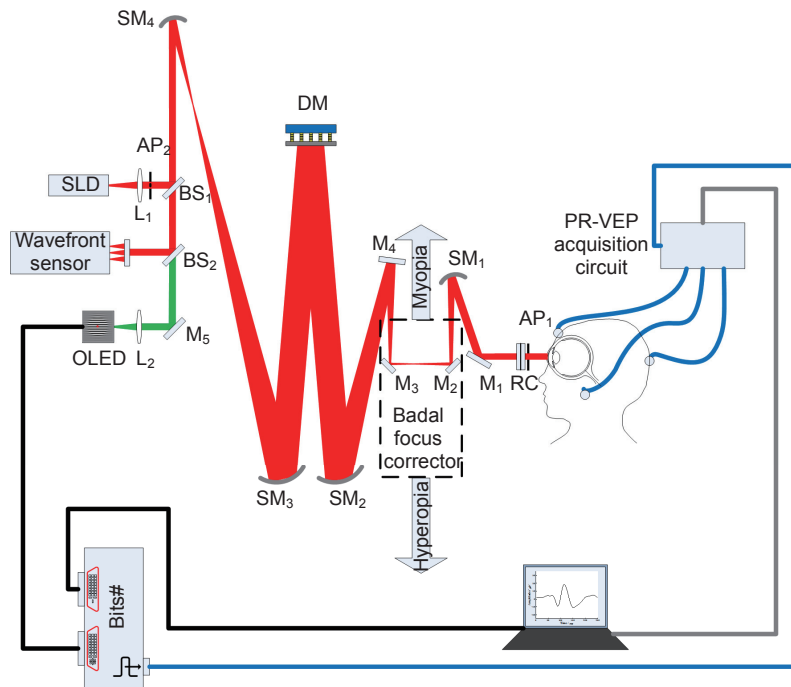


图 8 自适应光学客观视力检查系统原理图

Fig. 8 AO system integrated visual performance evaluation with pattern reversal VEP measurements

述，其中 x 表示真实图像， k 表示残余像差的点扩散函数，“ $*$ ”表示二维的卷积操作， n 表示随机噪声， y 为降质图像。

$$y = x * k + n. \quad (1)$$

与传统算法不同，为了从降质图像 y 中恢复出原始图像 x ，我们将该图像复原过程描述为

$$\hat{x} = F(y, \theta), \quad (2)$$

其中：参数 θ 通过训练数据学习获得，一旦获得了该

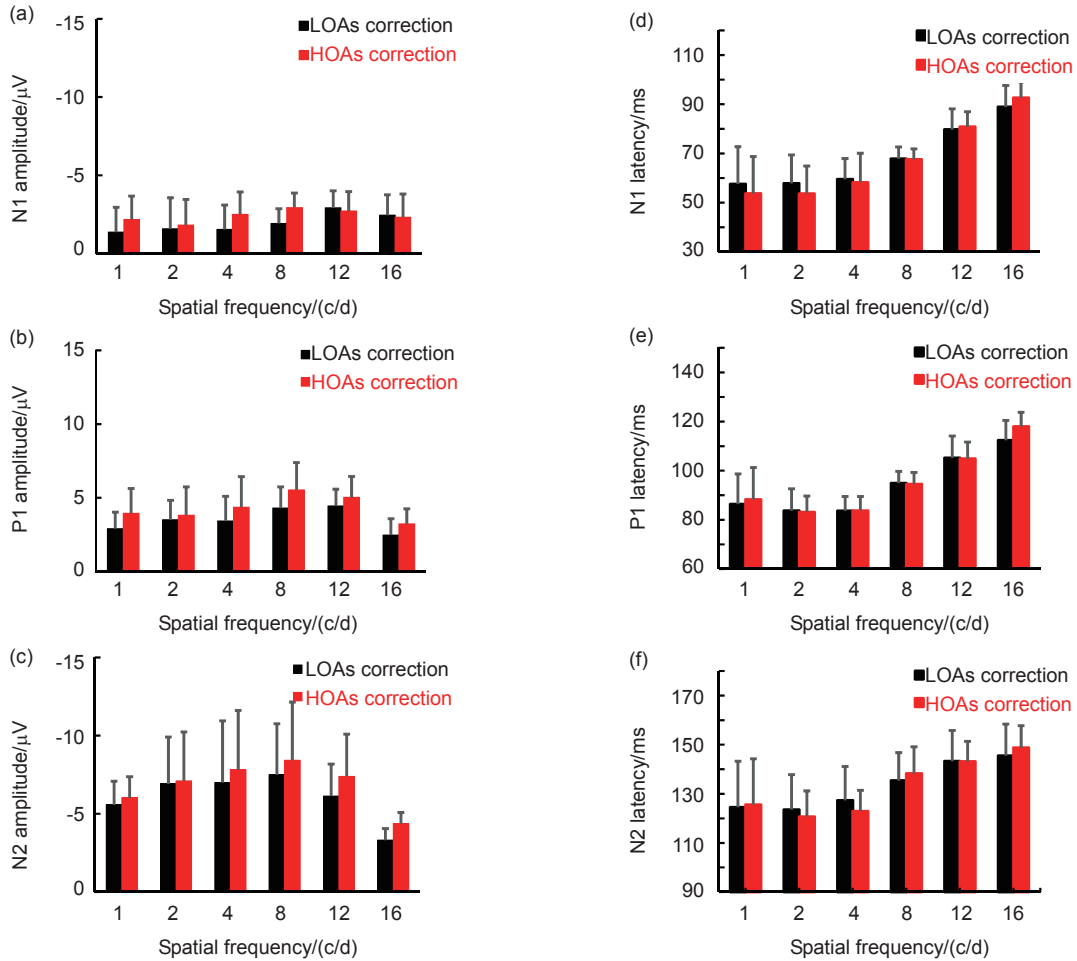


图9 低阶像差和高阶像差矫正下 VEP 检查的平均结果

Fig. 9 Average VEP magnitude with low-order aberrations corrected and with high-order aberrations corrected

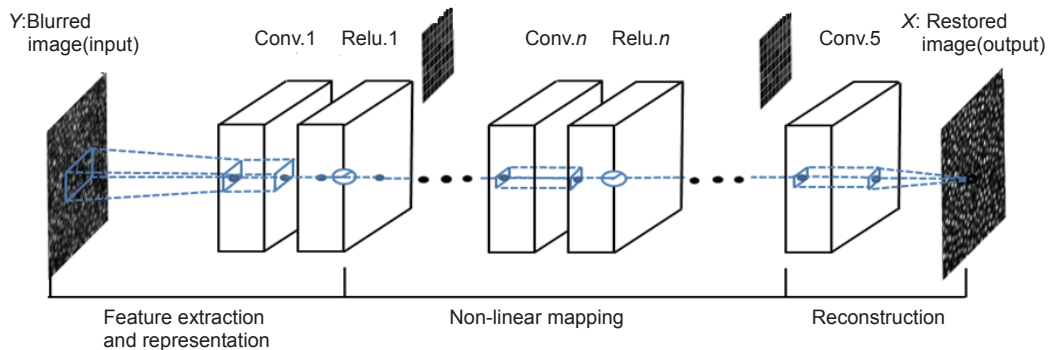


图10 网络结构示意图。降质图像经过网络特征提取、非线性映射及重构后获得复原图像，网络中的参数通过学习获得

Fig. 10 Network structure. A blurred image goes through layers and transforms into a restored one, we use 64 filters for each convolutional layer and some sample feature maps are drawn for visualization

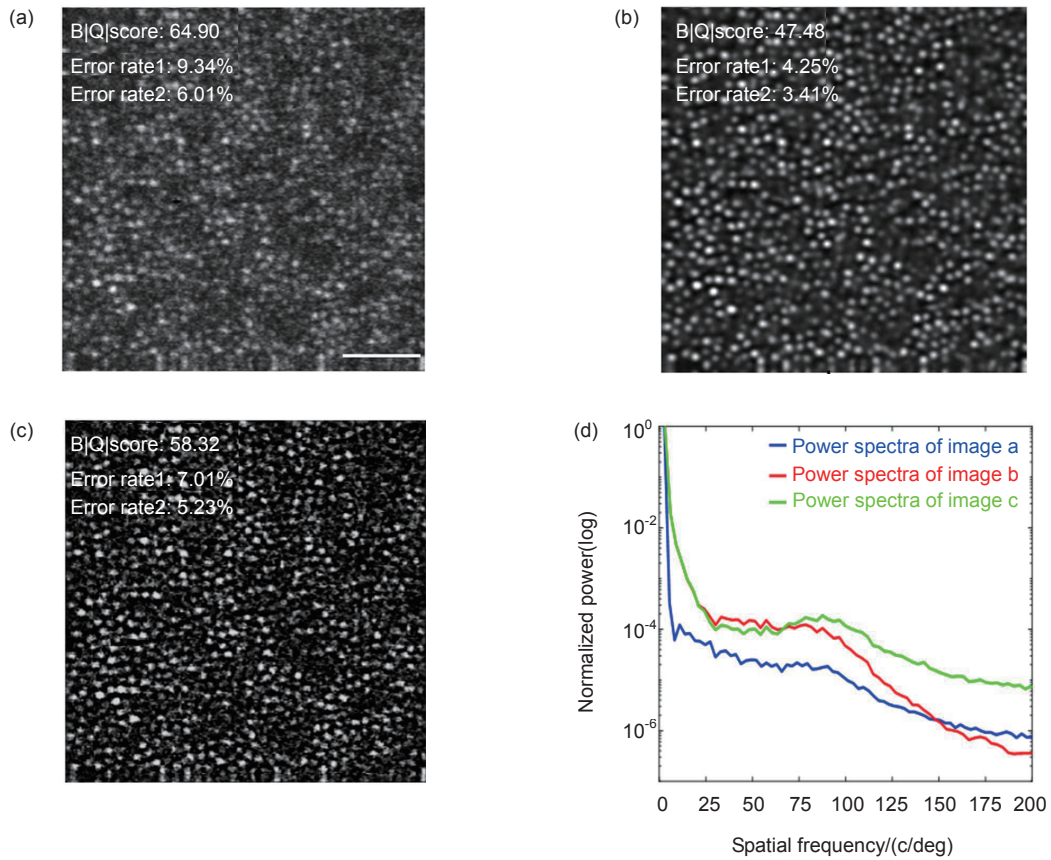


图 11 视网膜图像处理结果。(a) 原始图像; (b) 使用神经网络处理结果; (c) 使用传统盲目反卷积算法处理结果; (d) 相应图像归一化功率谱, 尺度为 $50 \mu\text{m}$

Fig. 11 Deconvolution results of a retinal image captured by AOSLO system. (a) Original image (0.9 mm eccentricity from the foveal center); (b) Restored by the proposed method; (c) Restored by the ALM method; (d) The corresponding normalized image power spectra, the scale bar is $50 \mu\text{m}$

参数, 对于输入的降质图像 y , 通过函数 $F(y, \theta)$ 可以直接获得复原后的图像 x 。具体来说, 基于卷积神经网络的图像复原过程主要包括以下三个步骤: 1) 构建适用于眼底视网膜图像复原的卷积神经网络结构。该网络结构主要由卷积层及非线性映射层组成, 包括特征提取和表示、非线性映射及图像复原三个部分, 网络结构示意图如图 10 所示; 2) 生成训练数据。由于难以直接获取不受残余像差及噪声影响的眼底视网膜图像, 我们采用成熟的算法模拟生成训练图像数据, 该过程主要包括理想眼底视网膜图像生成、人眼残余像差模拟、模糊图像生成及噪声引入四个步骤。通过该过程获取到的一系列理想图像、降质图像将作为训练数据用于神经网络训练; 3) 基于训练数据训练网络, 并利用训练获得的网络结构参数复原降质图像。图 11 显示了利用该算法对获取到的自适应光学眼底视网膜图像处理效果, 图中同时给出了处理前后相应的图像

功率谱。从图中可以看出, 经过该算法处理后, 图像质量获得了显著提升, 有助于自适应光学视网膜高分辨力成像技术的临床应用。

4 总结

通过自适应光学技术可以实现对人眼像差特别是高阶像差的任意调控, 已成为视觉科学研究不可或缺的有力工具。国内外在该领域已开展了全面而深入的研究工作, 获得了一大批创新性研究成果, 极大地拓展了人们对视觉科学的认识。除了应用于基础科学研究, 人眼自适应光学相关研究的现实目的是服务于眼科临床, 提高眼科诊疗水平, 造福人类健康。虽然我们在该领域有近 20 年的研究历程, 取得了一定成绩, 但目前这些研究基本还局限在实验室阶段, 没有商业化的仪器设备进入临床应用, 还需要科技和产业工作者的共同努力。临床应用和产业化推广已成为人眼自

适应光学领域最重要的发展方向。

人眼视网膜高分辨力成像技术可在眼科疾病特别是眼底疾病的发病机理研究、临床疾病的超早期诊断、不同治疗手段和药物疗效评价等方面发挥其独特的作用。而人眼像差与视功能研究进一步加深了人们对人眼像差特别是高阶像差的认识,随着相关技术进步以及光学像差与视觉神经系统的综合研究,必将带来人类视力维护和改善的新突破。

参考文献

- [1] Liang J Z, Williams D R. Aberrations and retinal image quality of the normal human eye[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, **14**(11): 2873–2883.
- [2] Williams D R. Imaging single cells in the living retina[J]. *Vision Research*, 2011, **51**(13): 1379–1396, doi: 10.1016/j.visres.2011.05.002.
- [3] Roorda A. Adaptive optics for studying visual function: A comprehensive review[J]. *Journal of Vision*, 2011, **11**(5): 6.
- [4] Rossi E A, Weiser P, Tarrant J, et al. Visual performance in emmetropia and low myopia after correction of high-order aberrations[J]. *Journal of Vision*, 2007, **7**(8): 14.
- [5] Chen L, Artal P, Gutiérrez D, et al. Neural compensation for the best aberration correction[J]. *Journal of Vision*, 2007, **7**(10): 9.
- [6] Elliott S L, Choi S S, Doble N, et al. Role of high-order aberrations in senescent changes in spatial vision[J]. *Journal of Vision*, 2009, **9**(2): 24.
- [7] Dai Y, Zhao L N, Xiao F, et al. Adaptive optics vision simulation and perceptual learning system based on a 35-element bimorph deformable mirror[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(5): 979–985.
- [8] Zhou J W, Zhang Y D, Dai Y, et al. The eye limits the brain's learning potential[J]. *Scientific Reports*, 2012, **2**: 364, doi: 10.1038/srep00364.
- [9] Liao M, Zhao H X, Liu L Q, et al. Training to improve contrast sensitivity in amblyopia: correction of high-order aberrations[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 35702, doi: 10.1038/srep35702.
- [10] Liang B. Effects of adaptive optics correction of ocular aberrations on binocular summation[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
梁波. 自适应光学像差矫正对双眼叠加作用的影响研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2013.
- [11] Kang J, Xiao F, Zhao J L, et al. Effects of higher-order aberration correction on stereopsis at different viewing durations[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2015, **20**(7): 075005.
- [12] Kang J, Dai Y, Zhang Y D. Temporal integration property of stereopsis after higher-order aberration correction[J]. *Biomedical Optics Express*, 2015, **6**(11): 4472–4482.
- [13] Kang J. Effect of ocular higher-order aberration correction on stereopsis and binocular accommodation[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
康健. 人眼高阶像差校正对立体视觉和双眼调节的影响研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2016.
- [14] IJspeert J K, de Waard P W T, van den Berg T J T P, et al. The intraocular straylight function in 129 healthy volunteers; Dependence on angle, age and pigmentation[J]. *Vision Research*, 1990, **30**(5): 699–707.
- [15] Artal P, Benito A, Pérez G M, et al. An objective scatter index based on double-pass retinal images of a point source to classify cataracts[J]. *PLoS One*, 2011, **6**(2): e16823.
- [16] Güell J L, Pujol J, Arjona M, et al. Optical quality analysis system; instrument for objective clinical evaluation of ocular optical quality[J]. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, 2004, **30**(7): 1598–1599.
- [17] Benito A, Pérez G M, Mirabet S, et al. Objective optical assessment of tear-film quality dynamics in normal and mildly symptomatic dry eyes[J]. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, 2011, **37**(8): 1481–1487.
- [18] Nanavaty M A, Stanford M R, Sharma R, et al. Use of the double-pass technique to quantify ocular scatter in patients with uveitis: A pilot study[J]. *Ophthalmologica*, 2011, **225**(1): 61–66.
- [19] Piñero D P, Ortiz D, Alio J L. Ocular scattering[J]. *Optometry and Vision Science: Official Publication of the American Academy of Optometry*, 2010, **87**(9): E682–E96.
- [20] Artal P, Iglesias I, López-Gil N, et al. Double-pass measurements of the retinal-image quality with unequal entrance and exit pupil sizes and the reversibility of the eye's optical system[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, **12**(10): 2358–2366.
- [21] Zhao J L. Objective assessment of ocular scatter and its influence on visual function[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
赵军磊. 人眼散射客观评价及其对视功能影响研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2017.
- [22] Zhao J L, Xiao F, Kang J, et al. Quantifying intraocular scatter with near diffraction-limited double-pass point spread function[J]. *Biomedical Optics Express*, 2016, **7**(11): 4595–4604.
- [23] Zhao J L, Xiao F, Zhao H X, et al. Effect of higher-order aberrations and intraocular scatter on contrast sensitivity measured with a single instrument[J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, **8**(4): 2138–2147.
- [24] Xiao F, Zhao J L, Zhao H X, et al. Deblurring adaptive optics retinal images using deep convolutional neural networks[J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, **8**(12): 5675–5687.

Ocular aberrations manipulation with adaptive optics and its application

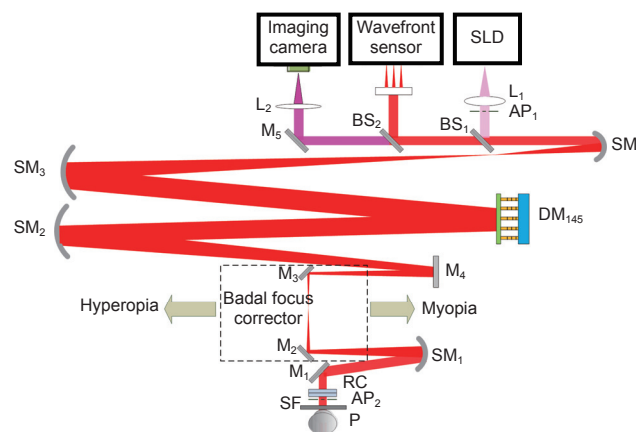
Dai Yun^{1,2*}, Xiao Fei^{1,2}, Zhao Junlei^{1,2}, Kang Jian^{1,2},

Yang Yanrong^{1,2,3}, Zhao Haoxin^{1,2}, Zhang Yudong^{1,2}

¹Key Laboratory of Adaptive Optics, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan 610209, China;

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

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



Schematic diagram of the adaptive optics double pass PSF measurement system

Overview: Adaptive optics (AO) techniques allow to measure and manipulate the wavefront aberrations in real time. In 1997, researchers in Institute of Optics and Electronics (IOE) took the lead in developing of adaptive optics technology in China. This article firstly introduces the principle of ocular adaptive optical system briefly, and then reports the main research progress of IOE for the last five years. In 2012, we measured the effects of perceptual learning on visual sensitivity with and without HOAs-correction both for normal adults, and older child and adult anisometric amblyopes. We found larger and more robust contrast sensitivity improvements when the HOAs were corrected than when they were left uncorrected. In 2014, we investigated the effects of ocular aberrations on the binocular vision functions. Results showed that ocular aberrations had an inequable effect on the different binocular vision functions. In 2016, an adaptive optics double pass (DP) system was designed and developed for ocular scatter estimation. The experimental results showed that this system could improve the accuracy of ocular scatter estimation. Then we investigated the effect of HOAs and intraocular scatter on contrast sensitivity. Quantitative analysis suggested a potential compensatory mechanism between HOAs and intraocular scatter on contrast sensitivity. In 2016, an AO pattern reversal visual evoked potential (PR-VEP) measurement system was established. PR-VEP measurements were performed with HOAs either retained or corrected. The results confirmed the contributions of the HOAs to the alterations in PR-VEP, and suggested that HOAs should be corrected to realize accurate PR-VEP testing. In 2017, we proposed a deep learning method to restore the degraded retinal images. The method directly learned an end-to-end mapping between the blurred and restored retinal images. The mapping was represented as a deep convolutional neural network. This network was validated on synthetically generated retinal images as well as real AO retinal images. The assessment of the restored retinal images demonstrated that the image quality had been significantly improved.

Citation: Dai Y, Xiao F, Zhao J L, *et al.* Ocular aberrations manipulation with adaptive optics and its application[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(3): 170703

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61205202, 61378064), National High Technology Research and Development Program of China (2015AA020510), National Scientific Instruments and Equipment Development Special Foundation of China (2012YQ120080, 2013YQ49085903) and Instrument Developing Project of the Chinese Academy of Sciences (y2010028)

* E-mail: daiyun@ioe.ac.cn