

基于控制信号重置的双变形镜人眼视网膜成像

肖 飞^{1,2} 赵军磊^{1,2} 赵豪欣¹ 戴 云¹ 张雨东¹

¹中国科学院光电技术研究所自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 结合人眼自适应光学系统中无需复原 Zernike 模式系数的特性, 提出基于控制信号重置的双变形镜并行控制的改进算法, 改进后的算法可以减少矩阵运算量, 并能相应地减少存储空间, 使其适宜于人眼自适应光学系统的工作特性。对控制算法进行理论介绍, 通过模拟仿真证明其可行性, 并将算法应用于双变形镜人眼视网膜高分辨率成像系统, 实现了对双变形镜的快速稳定控制, 获得了眼底视网膜高分辨率图像。模拟仿真和实验结果表明, 该算法能够有效地补偿相伴畸变和抑制两个变形镜之间的耦合。

关键词 自适应光学; 双变形镜; 并行控制; 视网膜成像

中图分类号 O439 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.s101007

High-Resolution Retinal Imaging Based on Reset of Control Signals Algorithm

Xiao Fei^{1,2} Zhao Junlei^{1,2} Zhao Haoxin¹ Dai Yun¹ Zhang Yudong¹

¹Key Laboratory on Adaptive Optics, The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract For ocular adaptive optics systems, there is no necessary to calculate Zernike mode coefficients during iterations. A modified algorithm based on reset of control signals is proposed. The modified algorithm is more suitable for ocular adaptive optics because both calculating time and storage space are saved. After principle description and computer simulation, the algorithm is tested on a retinal imaging system which is based on dual deformable mirrors. The two deformable mirror are controlled fast and stably. High resolution retinal images are acquired. Both simulation and experimental results indicate that this algorithm can effectively compensate for phase distortions and significantly suppress the coupling between two deformable mirrors.

Key words adaptive optics; dual deformable mirrors; parallel control; retinal imaging

OCIS codes 010.1080; 090.1000; 330.4300

1 引 言

自 1997 年 Liang 等^[1]率先采用自适应光学(AO)技术校正人眼高阶像差, 获得了接近衍射极限的活体高分辨率视网膜图像以来, AO 技术已被广泛应用于各类眼底成像设备中。变形镜(DM)作为人眼 AO 系统的关键器件之一, 其特性直接影响到整个系统的性能。为了实现对人眼像差的有效校正, 基于不同技术的变形镜, 如分立式压电驱动(PZT)变形镜、微机电系统(MEMS)变形镜、双压电片(Bimorph)变形镜等, 被应用到人眼 AO 系统中。受到各自原理和技术条件的限制, 各类变形镜均有自身的优缺点: PZT 变形镜、MEMS 变形镜虽具有较高的校正精度, 但其校正幅值却比较有限, Bimorph 变形镜虽能够实现大幅值低阶像差校正, 但对高阶像差拟

收稿日期: 2015-01-30; 收到修改稿日期: 2015-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(61378064, 61205202)、国家重大仪器专项(2012YQ120080)

作者简介: 肖 飞(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事人眼自适应光学方面的研究。E-mail: ustcxiaofei@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方面的研究。E-mail: ydzhang@ioe.ac.cn(通信联系人)

合能力较弱。此外,人眼像差特性统计结果表明许多人眼同时包含大幅值、低频率的低阶像差和小幅值、高频率的高阶像差^[2]。对这类人群来说,单一变形镜无法同时实现对低阶和高阶像差的有效补偿。为了解决这一问题,越来越多的人眼 AO 系统采用双变形镜校正方案^[3-5],在这类系统中通常利用大行程、低空间分辨率的变形镜校正人眼低阶像差,利用小行程、高空间分辨率的变形镜校正人眼高阶像差,从而使得系统在现有技术条件下能够充分发挥不同类型变形镜的优势,实现对大动态范围人眼像差的高精度校正。

为了实现对 AO 系统中双变形镜的有效控制,研究者提出了许多不同的控制算法,这些算法主要分为串行控制^[6-7]和并行控制^[8-13]。串行控制先让第一个变形镜(DM1)工作至稳定后再让第二个变形镜(DM2)工作,这种方法能够充分发挥变形镜的拟合能力,但是需要较长的收敛时间,而且需要人为设定 DM1 迭代的次数;并行控制让两个变形镜同时工作,在这种工作模式下系统能够快速收敛,但是需要设计出高效的解耦控制算法,使不同的变形镜仅对特定像差进行补偿,抑制或消除不同变形镜之间的耦合,从而充分发挥出系统的像差校正能力。从原理上分析,实现双变形镜并行控制的解耦算法主要有三种思路:波前斜率分解^[8-10]、重构矩阵改造^[11-12]和控制信号重置^[13]。在波前斜率分解和重构矩阵改造算法中,斜率分解和波前重构的误差以及变形镜影响函数的不正交性均可能导致双变形镜相互耦合,如果耦合误差出现累积,将导致系统的像差校正能力受到严重影响。控制信号重置算法是直接对变形镜的电压控制信号进行整体约束,这种方法只与变形镜自身特性有关,而不受系统波前传感器特性与种类的影响,但是在解耦控制时必须提取出低阶像差模式系数信息。在双变形镜人眼自适应光学系统中,DM1 本身即为低阶像差校正器件,无需单独提取低阶像差模式系数。因此,本文结合人眼自适应光学系统特性,对控制信号重置算法进行改进,使得改进后的算法在保证性能的同时减少矩阵运算量,并能相应减少存储空间,从而适宜于人眼自适应光学系统的工作特性。

本文介绍了控制的重置算法的相关理论,通过数值仿真证明其可行性,并将算法应用于双变形镜人眼视网膜高分辨率成像系统,实现了对系统双变形镜的快速稳定控制,获得了眼底视网膜高分辨率图像。

2 理论分析

典型的双变形镜自适应光学系统结构如图 1 所示,假设当前波前传感器测得的残差波前斜率为 \mathbf{g} ,则斜率 \mathbf{g} 与 Zernike 像差模式系数 \mathbf{a} 之间的关系为

$$\mathbf{g} = \mathbf{Z}\mathbf{a}, \tag{1}$$

式中 \mathbf{Z} 是波前传感器的 Zernike 模式斜率响应矩阵。从(1)式可得到传感器的 Zernike 模式系数为

$$\mathbf{a} = \mathbf{Z}^+ \mathbf{g}, \tag{2}$$

式中 \mathbf{Z}^+ 为矩阵 \mathbf{Z} 的广义逆矩阵。在双变形镜 AO 系统中,根据校正方案的设定,DM1 仅用于校正像差中特定的低阶 Zernike 模式 $\mathbf{a}_w, \mathbf{a}_w$ 可表示为

$$\mathbf{a}_w = \mathbf{I}_w \mathbf{Z}^+ \mathbf{g}, \tag{3}$$

式中 \mathbf{I}_w 是用于模式选择的对角矩阵,与 DM1 需要校正的像差阶次数对应的对角元素为 1,其余矩阵元素为 0。则需要由 DM1 产生的斜率向量 \mathbf{g}_w 可表示为

$$\mathbf{g}_w = \mathbf{Z}\mathbf{a}_w = \mathbf{Z}\mathbf{I}_w \mathbf{Z}^+ \mathbf{g}. \tag{4}$$

设 DM1 的电压控制信号为 \mathbf{v}_w ,斜率响应矩阵为 \mathbf{R}_w ,则由直接斜率法^[14]可知

$$\mathbf{v}_w = \mathbf{R}_w^+ \mathbf{g}_w = \mathbf{D}_w \mathbf{g}, \tag{5}$$

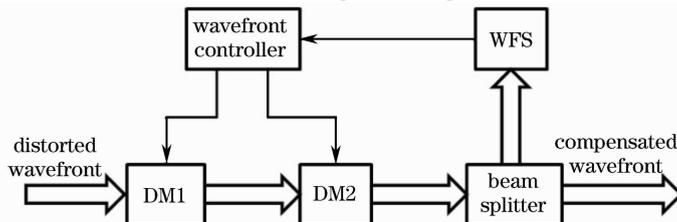


图 1 典型的双变形镜自适应光学系统示意图

Fig. 1 Typical adaptive optics system with dual deformable mirrors

$$\mathbf{D}_w = \mathbf{R}_w^+ \mathbf{Z}_w \mathbf{Z}_w^+, \quad (6)$$

式中 \mathbf{R}_w^+ 为 \mathbf{R}_w 的广义逆矩阵。由(5)式可获得 DM1 的电压控制信号,该信号使 DM1 仅产生特定的低阶像差。由于无需在线复原残差模式系数,且由矩阵乘法的结合律可知矩阵 \mathbf{D}_w 可事先计算得出,对 DM1 控制信号的计算过程仅需一次矩阵乘法完成,计算复杂度和占用存储空间与直接斜率法相当。

在系统闭环控制过程中为了使 DM2 不产生 DM1 负责校正的低阶像差项,而仅仅对剩余的高阶像差进行校正,算法利用斜率分解原则对由波前传感器获取的斜率进行分解,计算出应该施加给 DM2 的控制信号,利用控制信号重置方法^[13]对该控制信号进行重置,进一步消除可能导致系统出现耦合误差的成分。由(1)、(4)式可知,波前残差在经 DM1 校正低阶后剩余波前斜率 \mathbf{g}_t 可表示为

$$\mathbf{g}_t = \mathbf{g} - \mathbf{Z}_w \mathbf{Z}_w^+ \mathbf{g} = (\mathbf{I} - \mathbf{Z}_w \mathbf{Z}_w^+) \mathbf{g}. \quad (7)$$

设 DM2 的电压控制信号为 \mathbf{v}'_t ,用 \mathbf{R}_t 表示 DM2 的斜率响应矩阵,则由直接斜率法可知

$$\mathbf{v}'_t = \mathbf{R}_t^+ \mathbf{g}_t = \mathbf{D}_t \mathbf{g}, \quad (8)$$

$$\mathbf{D}_t = \mathbf{R}_t^+ (\mathbf{I} - \mathbf{Z}_w \mathbf{Z}_w^+), \quad (9)$$

式中 \mathbf{R}_t^+ 为 \mathbf{R}_t 的广义逆矩阵,矩阵 \mathbf{D}_t 仍然可以事先计算获得。虽然 DM2 的电压控制信号 \mathbf{v}'_t 已经由分解后的斜率计算得出,但是由于斜率分解时存在误差,以及变形镜影响函数及其一阶偏导数的不正交性, \mathbf{v}'_t 中依然会存在少量的可能导致变形镜耦合的控制分量,可将 \mathbf{v}'_t 表示为

$$\mathbf{v}'_t = \mathbf{v}_t + \Delta \mathbf{v} \approx \mathbf{I} \mathbf{v}_t, \quad (10)$$

式中 \mathbf{v}_t 表示不会产生耦合的控制分量, $\Delta \mathbf{v}$ 表示会导致耦合的分量。由于 \mathbf{v}'_t 是由去除了 DM1 所校正低阶像差的高阶斜率响应生成,故一般而言, $\Delta \mathbf{v}$ 在数学意义上相对 \mathbf{v}_t 可被视为一个小量。定义矩阵 \mathbf{T}_m 为

$$T_m(i, j) = \frac{\iint V_j(x, y) Z_i(x, y) dx dy}{\iint Z_i(x, y) Z_i(x, y) dx dy}, \quad (11)$$

式中 $T_m(i, j)$ 表示 DM2 各个驱动器影响函数 V_j 中 DM1 负责校正的第 i 阶模式的系数, z_i 为第 i 项 Zernike 像差。由于已限定 \mathbf{v}_t 不产生 DM1 负责校正的低阶模式分量,故矩阵 \mathbf{T}_m 与 DM2 控制信号 \mathbf{v}_t 应满足

$$\mathbf{T}_m \mathbf{v}_t = \mathbf{0}. \quad (12)$$

综合(10)、(12)式有

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}'_t \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_t + \Delta \mathbf{v} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{T}_m \end{bmatrix} \mathbf{v}_t, \quad (13)$$

$$\mathbf{v}_t \approx \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{T}_m \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} \mathbf{v}_t + \Delta \mathbf{v} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{T}_m \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} \mathbf{v}'_t \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} \mathbf{v}'_t \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{T}_m \end{bmatrix}^+, \quad (15)$$

式中矩阵 \mathbf{C} 是实现 DM2 控制信号进行整体约束的重置矩阵。由(14)式可知,通过矩阵 \mathbf{C} 对控制信号进行重置,可以有效消除 DM2 控制信号中可能导致系统出现耦合误差的成分。

通过上面的分析可知,结合(5)、(8)、(14)式便可实现对双变形镜的并行控制,并且能有效抑制双变形镜之间的耦合。使用这种方法进行双变形镜系统的解耦控制,与文献[13]中的方法相比,在 DM1 控制信号计算时能够减少矩阵运算量并能相应减少存储空间。算法计算量的减少有利于系统控制带宽的提高,因此改进后的方法更适宜于人眼自适应光学系统。

3 模拟仿真

为了验证该方法的有效性,对该方法进行了仿真。仿真中使用校正后的残余波前均方根(RMS)值作为校正精度的度量标准,残差 RMS 越小说明校正效果越好。使用 DM1 与 DM2 的耦合系数 r 作为两个变形镜解耦效果的衡量标准,耦合系数 r 定义如下:

$$r = \left| \frac{\iint \mathbf{S}_w \mathbf{S}_t ds}{\left(\sqrt{\iint \mathbf{S}_w \mathbf{S}_w ds} \cdot \sqrt{\iint \mathbf{S}_t \mathbf{S}_t ds} \right)} \right|, \quad (16)$$

式中 \mathbf{S}_w 和 \mathbf{S}_t 分别为 DM1 与 DM2 的像差校正量,耦合系数表征 \mathbf{S}_w 与 \mathbf{S}_t 的相关程度,其取值范围在 0~1

之间,当耦合系数为 0 时说明两者完全正交,没有出现耦合,当耦合系数为 1 时,说明两者在几何学上相似,耦合程度达到最大。

在仿真中使用 35 单元的 Bimorph 变形镜^[15]作为 DM1,145 单元 PZT 变形镜作为 DM2。变形镜驱动器与哈特曼子孔径划分的空间位置关系如图 2 所示。变形镜影响函数由干涉仪测得,待校正波前由符合人眼像差统计规律^[2]的前 35 项 Zernike 像差组成,由于在人眼自适应光学系统中不对倾斜项进行校正,故在仿真中去除倾斜像差。

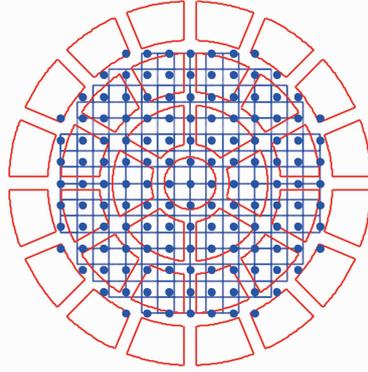


图 2 双变形镜与哈特曼子孔径位置关系示意图

Fig. 2 Layout of the Hartmann sub-apertures and the dual deformable mirrors

图 3(a)~(d)分别表示待校正像差、Bimorph 变形镜拟合像差、PZT 变形镜拟合像差以及双变形镜校正后残余像差的三维波面图。图 4 为待校正像差和由双变形镜分别拟合产生像差的模式系数对比,从图 3 和图 4 可以看出,人眼低阶像差所对应的 3~5 项 Zernike 模式被 Bimorph 变形镜校正,而剩余的像差模式均由 PZT 变形镜校正。图 5(a)为校正过程中残余像差的 RMS 曲线,从图中可以看出算法经过约 40 次迭代后收敛,残余像差 RMS 稳定在 $0.04 \mu\text{m}$ 左右。图 5(b)为校正过程中双变形镜耦合系数 r 的变化曲线,在整个迭代过程中耦合系数 r 均远小于 0.1。从整个仿真结果可以看出,使用此解耦控制算法可以实现对双变形

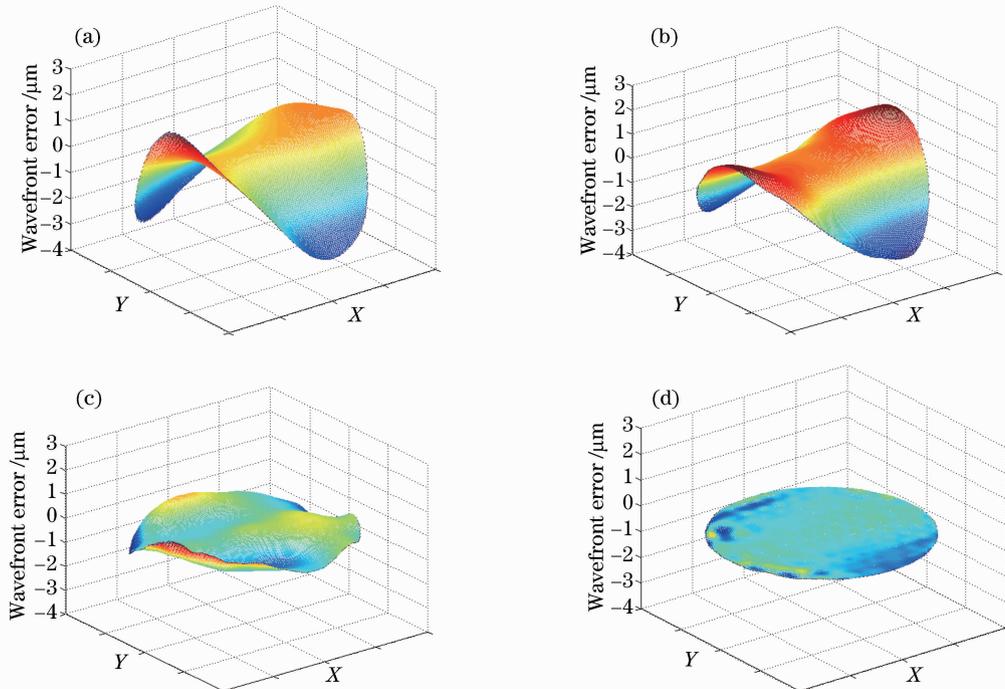


图 3 (a)待校正像差;(b)DM1 拟合像差;(c)DM2 拟合像差;(d)校正后残余像差

Fig. 3 (a) Initial aberrations; (b) aberrations created by DM1; (c) aberrations created by DM2; (d) residual aberrations after correction

镜的并行控制,并且能有效抑制双变形镜之间的耦合。仿真程序在 Matlab 环境下迭代 200 次共用时 5147 ms,与改进前算法的 5436 ms 相比减少了近 300 ms,且存储空间减少了 180 kB 左右。仿真中用于校正低阶像差的 DM1 驱动器单元数较低,故改进算法所获得的性能提升效果不显著。然而,DM1 校正残差主要为高阶像差,故让 DM1 对低阶像差有更高的校正精度对于 DM2 能更好地发挥高阶像差校正能力有重要意义,而对 DM1 校正精度要求的提高,必然导致驱动器单元数的增加,随着驱动器单元数的增加,改进算法的计算量减少及存储空间降低效果将越发显著。

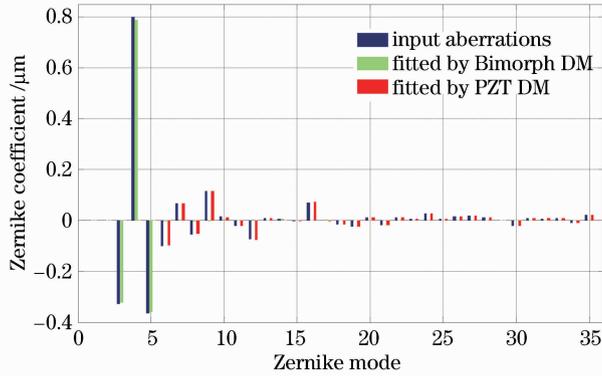


图 4 像差模式系数

Fig. 4 Pattern coefficient of aberration

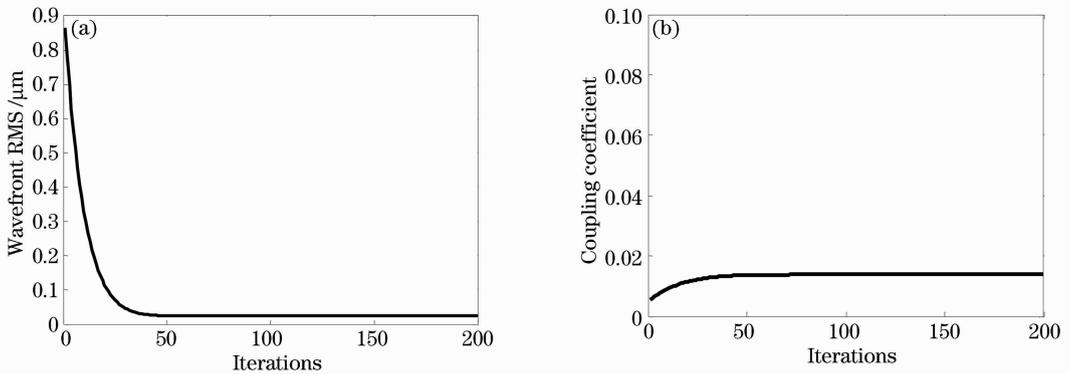


图 5 (a)迭代过程中残余像差 RMS 曲线和(b)双变形镜耦合系数曲线

Fig. 5 (a) RMS curve of the residual aberration in iterative process and (a) coupling coefficient curve of dual deformable mirrors

4 实验验证

本节利用实验室搭建的双变形镜人眼视网膜高分辨率成像系统来验证第 2 节的算法。该系统使用 35 单元的 Bimorph 变形 DM35 镜和 145 单元的 PZT 变形镜 DM169 分别校正人眼低阶和高阶像差,其中两个变形镜驱动器位置与哈特曼子孔径布局关系与仿真中一致,整个系统光学布局如图 6 所示。主光路采用反射式系统,信标光源(SLD)发出的信标光经部分主光路进入人眼,从眼底返回的信标光携带人眼像差信息经过主光路(M1、SM1、SM2、DM35、SM2、M2、SM3、DM169、SM3、SM4,其中 M1、M2 为平面反射镜,SM1、SM2、SM3、SM4 为球面反射镜)后由分光镜 BS2 反射进入哈特曼传感器,实现人眼像差的测量;控制系统根据测得的像差斜率信号控制双变形镜对像差进行校正;待校正完成后,启动照明光源闪光照明眼底,同时触发成像相机同步完成眼底图像采集。在信标支路设置固视目标,用于引导眼球偏转拍摄眼底不同区域图像。系统成像视场为 1° ,入瞳直径为 6 mm,照明光波长为 617 nm。

招募志愿者完成了活体人眼视网膜高分辨率成像实验,所有的实验流程都严格遵照了赫尔辛基声明原则。图 7 为被试 LZH(近视 100° ,散光 50°)在校正前和校正后的像差波面图,校正前像差峰谷值(PV)和 RMS 分别为 $8.06 \mu\text{m}$ 和 $1.44 \mu\text{m}$,校正完成后 PV 和 RMS 相应的降低至 $0.48 \mu\text{m}$ 和 $0.05 \mu\text{m}$ 。图 8 为系统闭环过程中该被试残余波像差 RMS 的变化曲线,从图中可以看出经过 40 次迭代后,RMS 值趋于稳定。

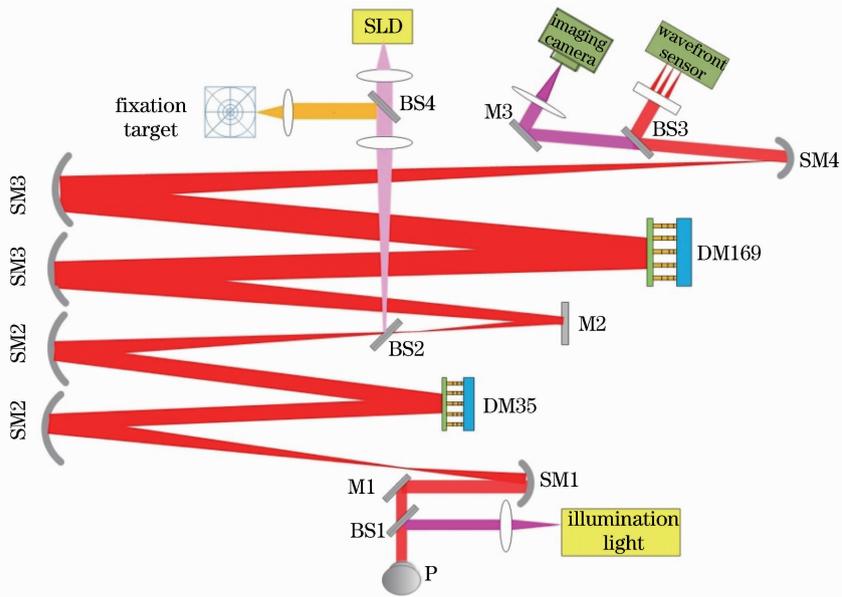


图 6 双变形镜的人眼视网膜高分辨率成像系统布局

Fig. 6 Schematic diagram of the retinal high resolution imaging system based on dual deformable mirrors

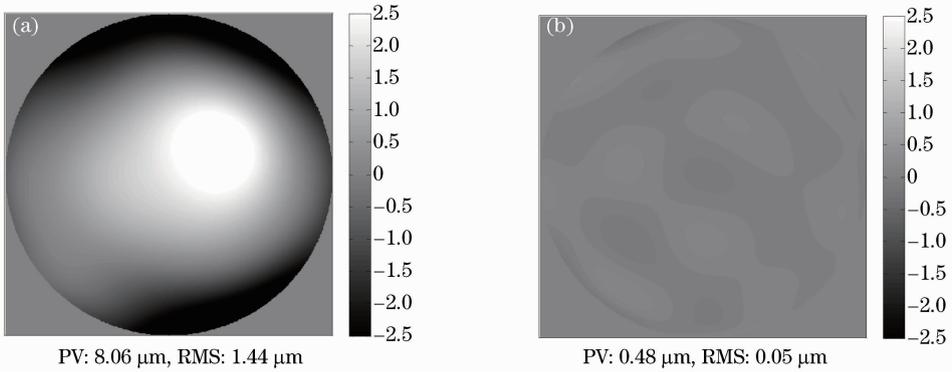


图 7 被试 LZH 的像差波面图。(a) 校正前；(b) 校正后

Fig. 7 Wavefront map of subject LZH. (a) Before correction; (b) after correction

图 9 给出了最后获取的高分辨率视网膜图像，视细胞可以清晰地从图像中分辨出来，该区域视细胞直径约为 $2.5 \mu\text{m}$ 。实验中软件程序使用 C++ 语言编写，在系统实际闭环时除了算法本身计算需要时间外，高压放大器、变形镜等硬件响应也需要额外的时间，故与仿真相比算法迭代一次需要的时间更长。在实验环境下算法迭代 200 次共用时 8024 ms，与改进前算法的 8238 ms 相比减少了近 200ms，且存储空间减少了 180 kB 左右。

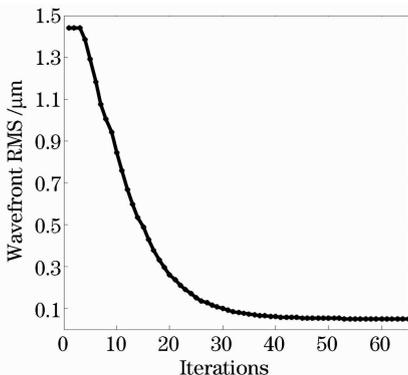


图 8 被试 LZH 残余像差 RMS 曲线

Fig. 8 RMS curve of the residual of subject LZH

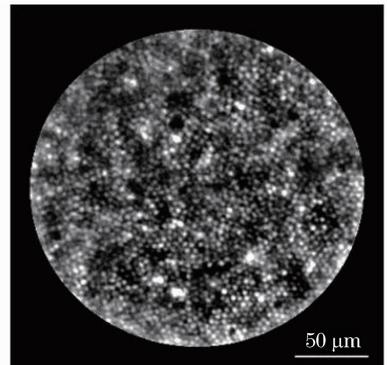


图 9 被试 LZH 的视网膜图像

Fig. 9 Retina image of subject LZH

5 结 论

结合人眼自适应光学系统中无需复原低阶像差模式系数的特性,对基于控制信号重置的双变形镜解耦算法进行改进,改进后的算法可以减少矩阵运算量,并能相应地减少存储空间,使其满足于人眼自适应光学系统的工作特性。随着变形镜驱动器数目的增加,改进算法的计算量减少及存储空间降低效果将越发显著,这对于无须具体像差模式系数但对实时性要求较高的系统具有重要意义。通过模拟仿真和人眼视网膜高分辨率成像实验验证了该算法的有效性。

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 Thibos L N, Bradley A, Hong X. A statistical model of the aberration structure of normal, well-corrected eyes[J]. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 2002, 22(5): 427–433.
- 3 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.
- 4 Zou W, Qi X, Burns S A. Woofer-tweeter adaptive optics scanning laser ophthalmoscopic imaging based on Lagrange-multiplier damped least-squares algorithm[J]. *Biomedical Optics Express*, 2011, 2(7): 1986–2004.
- 5 Zawadzki R J, Cense B, Zhang Y, *et al.*. Ultrahigh-resolution optical coherence tomography with monochromatic and chromatic aberration correction[J]. *Opt Express*, 2008, 16(11): 8126–8143.
- 6 Zawadzki R J, Choi S S, Jones S M, *et al.*. Adaptive optics-optical coherence tomography: optimizing visualization of microscopic retinal structures in three dimensions[J]. *J Opt Soc Am A*, 2007, 24(5): 1373–1383.
- 7 Cense B, Koperda E, Brown J M, *et al.*. Volumetric retinal imaging with ultrahigh-resolution spectral-domain optical coherence tomography and adaptive optics using two broadband light sources[J]. *Opt Express*, 2009, 17(5): 4095–4111.
- 8 Hu S, Xu B, Zhang X, *et al.*. Double-deformable-mirror adaptive optics system for phase compensation[J]. *Appl Opt*, 2006, 45(12): 2638–2642.
- 9 Ye Hongwei, Li Xinyang. The control method of close-loop adaptive optical system with multi-wavefront-correctors[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(s2): 67–72.
叶红卫, 李新阳. 自适应光学系统多变形镜联合闭环控制方法[J]. *中国激光*, 2009, 36(s2): 67–72.
- 10 Conan R, Bradley C, Hampton P, *et al.*. Distributed modal command for a two-deformable-mirror adaptive optics system[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(20): 4329–4340.
- 11 Li C, Sredar N, Ivers K M, *et al.*. A correction algorithm to simultaneously control dual deformable mirrors in a woofer-tweeter adaptive optics system[J]. *Opt Express*, 2010, 18(16): 16671–16684.
- 12 Zou W, Burns S A. High-accuracy wavefront control for retinal imaging with adaptive-influence-matrix adaptive optics[J]. *Opt Express*, 2009, 17(22): 20167–20177.
- 13 Liu W, Dong L, Yang P, *et al.*. A Zernike mode decomposition decoupling control algorithm for dual deformable mirrors adaptive optics system[J]. *Opt Express*, 2013, 21(20): 23885–23895.
- 14 Jiang W, Li H. Hartmann-Shack wavefront sensing and wavefront control algorithm[C]. *International Society for Optics and Photonics*, 1990: 82–93.
- 15 Zhou Hong, Guan Chunlin, Dai Yun. Bimorph deformable mirrors for adaptive optics of human retinal imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0211001.
周虹, 官春林, 戴云. 用于自适应光学视网膜成像系统的双压电片变形反射镜[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0211001.

栏目编辑: 史 敏