

两种可变形反射镜泽尼克系数的生成误差分析

江旻珊 周传清 任秋实

(上海交通大学激光与光子生物医学研究所, 上海 200240)

摘要 可变形反射镜是自适应光学系统的核心组成部分之一,在人眼像差的检测与校正等方面得到了广泛的应用。目前自适应光学系统最常采用的变形镜主要有两种:微加工薄膜变形镜和压电式变形镜。基于两者结构原理的不同,它们在自适应光学系统中的表现也存在着差异。采用 59 通道微加工薄膜变形镜和 37 通道压电式变形镜进行对比实验。利用同一闭环自适应光学系统针对 4 阶以内的常见像差(包括散光、彗差、三叶差、球差)观察两者的泽尼克系数生成情况。结果表明,目标值较小时,微加工薄膜变形镜和压电式变形镜的泽尼克系数实际值误差都比较小;目标值增大时,压电式变形镜可以比微加工薄膜变形镜更接近理想值。

关键词 自适应光学;可变形反射镜;泽尼克系数;微加工薄膜变形镜;压电式变形镜

中图分类号 R778 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS200929s1.0396

Zernike Generation Analysis of Two Deformable Mirrors

Jiang Minshan Zhou Chuanqing Ren Qiushi

(Institute for Laser Medicine and Bio-Photonics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract Deformable mirror (DM) is a main device in adaptive optical systems, which is widely used in wavefront correction of human eye. Micromachined membrane deformable mirror (MMDM) and piezoelectric deformable mirror (PDM) are two types of DM, and they perform differently in adaptive optical system because of their different structure. In this article, a 59-channel MMDM and a 37-channel PDM are compared. Zernike generations of common aberrations (including astigmatism, coma, trefoil and spherical aberration) are observed in a close-loop system. It shows that the results are more effective when the target value is smaller.

Key words adaptive optics; deformable mirror; Zernike; micromachined membrane deformable mirror; piezoelectric deformable mirror

1 引 言

在自适应光学中,作为波前像差补偿系统的重要组成部分,变形镜在天文学方面一直得到广泛的应用。天文工作者们利用变形镜来补偿由于大气扰动而产生的各种波前像差^[1, 2]。J. Liang 等^[3]于 1994 年成功的将变形镜应用于人眼高阶像差的测量与矫正,此后变形镜也开始应用于视光学领域。目前最为普及的则是价格相对低廉的微加工薄膜变形镜和压电式变形镜^[4~7]。

微加工薄膜变形镜(MMDM)的镜面是一层厚度为微米数量级的薄膜,其下有多个电极驱动。压电式变形镜(PDM)的镜面是由玻璃、熔融石英、硅

等材料制成的一层薄板与板下的电极相连。工作时,驱动 MMDM 单个电极不会影响到周围电极,而 PDM 各个电极之间则存在相互影响^[8]。

本文测试了在视觉像差矫正领域较多使用的 59 通道 MMDM 和 37 通道 PDM^[9, 10]在散光、彗差、三叶差、球差这四种像差上的矫正能力。实验结果由 Hartmann-Shack 波前传感器测量比较。

2 实验系统

闭环自适应光学系统如图 1 所示。激光束($\lambda = 830 \text{ nm}$)由空间滤波器和透镜 L_0 准直扩束,经过透镜 L_1 和 L_2 共焦组成的口径匹配系统后被偏光分光

基金项目:上海市重点实验室专项基金(05dz22318, 05dz22325)资助课题。

作者简介:江旻珊(1983—),女,博士研究生,主要从事视光学方面的研究。E-mail: jiangmsc@gmail.com

导师简介:任秋实(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事激光生物医学方面的研究。E-mail: renqsh@sjtu.edu.cn

镜 PBS 分成两束偏振光:p 光入射到变形镜表面并反射,s 光入射到平面镜表面并反射。变形镜及平面镜均与 Hartmann-Shack 波前传感器共轭。两束

反射光重合之后再经过一个口径匹配系统入射到 Hartmann-Shack 波前传感器以重建波形并计算出各阶泽尼克系数^[11]。

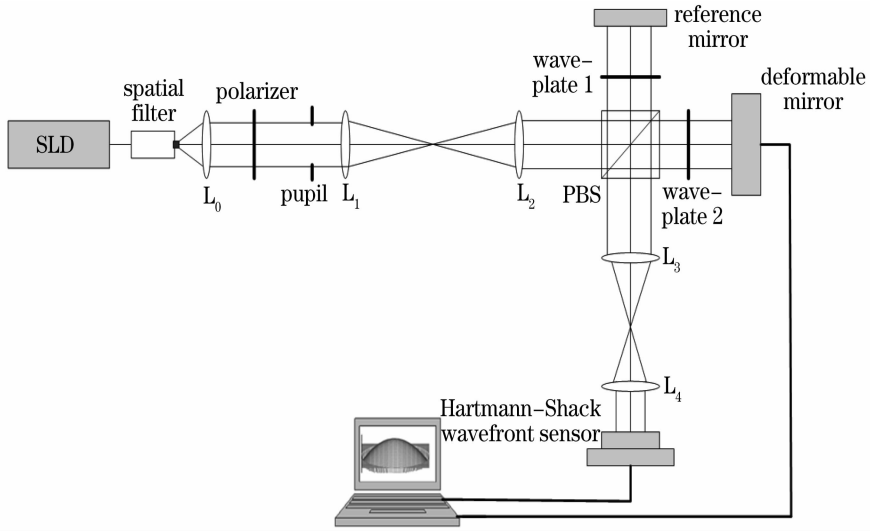


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

实验时,先仅用平面镜进行波前重建。再将平面镜遮住,仅用变形镜,赋予特定的泽尼克系数一个目标值。目标值的取值范围为 $-6 \mu\text{m}$ 到 $+6 \mu\text{m}$,步长为 $0.5 \mu\text{m}$,其他泽尼克系数的目标值设为 0。经闭环系统反馈后测量计算各项泽尼克系数。两结果之差则为利用变形镜生成泽尼克系数的实际值。

3 实验结果

图 2 显示了在 $-6 \mu\text{m}$ 至 $6 \mu\text{m}$ 的范围内,两种变形镜对散光、彗差、三叶差、球差这四种常见像差的生成结果与目标值的比较(红线表示 MMDM,蓝线表示 PDM,黑线表示目标值)。可以看出,对于较低阶的像差如散光,两种变形镜的表现基本相近;而

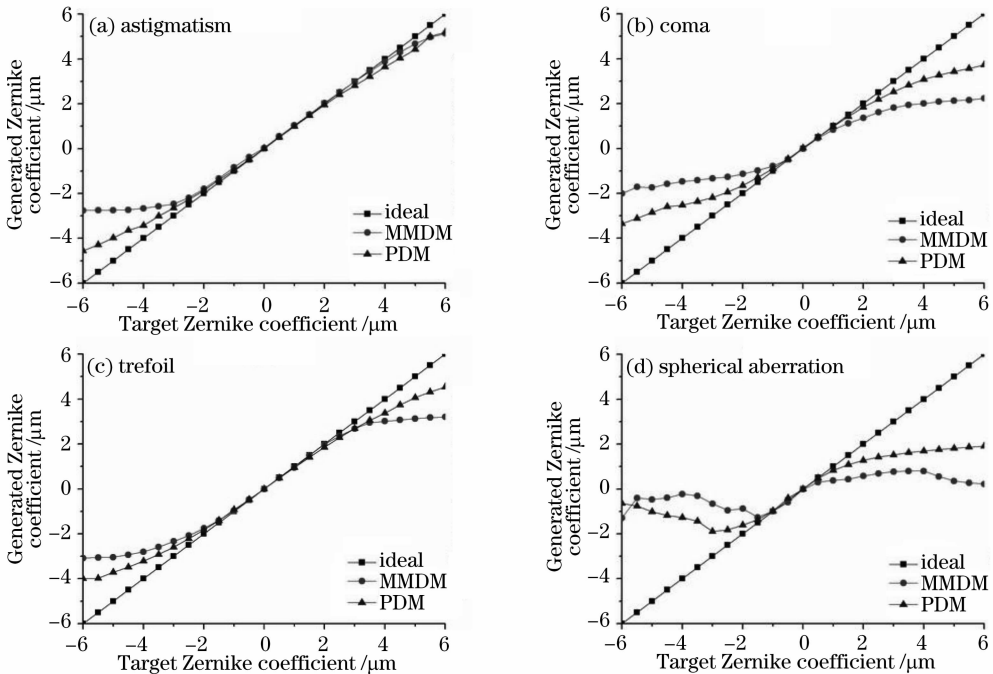


图 2 59 通道 MMDM 与 37 通道 PDM 在 $-6 \mu\text{m}$ 到 $+6 \mu\text{m}$ 范围内生成的泽尼克系数与目标值的比较

Fig. 2 Generated Zernike coefficients of 59ch MMDM and 37ch PDM versus target values from $-6 \mu\text{m}$ to $+6 \mu\text{m}$

对于较高阶的像差,如彗差、三叶差和球差,PDM 的生成结果更为接近目标值。当目标值在 $\pm 1 \mu\text{m}$ 的范围内,MMDM 和 PDM 对于四种像差都能够生成比较准确的结果,而目标值范围扩大时,PDM 的实验结果略好于 MMDM。

若确定目标值的 $\pm \lambda/10$ ($\lambda = 830 \text{ nm}$)为误差允许范围,则相应的 59 通道 MMDM 和 37 通道 PDM 有效泽尼克系数生成范围如表 1 所示。

表 1 59 通道 MMDM 和 37 通道 PDM 的有效泽尼克系数生成范围

Table 1 Generation range of 59ch MMDM and 37ch PDM

Zernike modes	Generation range	
	59ch MMDM	37ch PDM
Astigmatism / μm	-1.5~+4	-3~+3
Coma / μm	-1.5~+1.5	-1~+2
Trefoil / μm	-2~+2	-2~+2
Spherical aberration / μm	-1~+1	-1.5~+1.5

从表 1 可以看出,除散光之外,MMDM 的有效泽尼克系数生成范围是对称的;而除彗差之外,PDM 的有效生成范围也对称。这主要是由于 MMDM 本身含有散光的初始像差,PDM 含有彗差的初始像差^[8]。

4 结 论

综上所述,59 通道的 MMDM 和 37 通道的 PDM 都能够成功的矫正或生成散光、彗差、三叶差、球差这四种基本像差。当泽尼克系数阶数较高或要求生成的泽尼克系数范围较大时,采用 PDM 会比 MMDM 略为精确。需要指出的是 Hartmann-

Shack 波前传感器的性能和算法也会对波前像差的生成结果产生影响。如何改进以获得更为精确的实验结果仍有待进一步探索和研究。

参 考 文 献

- 1 Ellerbroek B. L.. First-order performance evaluation of adaptive-optics systems for atmospheric-turbulence compensation in extended-field-of-view astronomical telescopes[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**: 783~805
- 2 Goncharov A. V., Devaney N., Dainty C.. Atmospheric dispersion compensation for extremely large telescopes[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(4): 1534~1542
- 3 Liang J., Grimm B., Goelz S. *et al.*. Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**: 1949~1957
- 4 Fernández E. J., Iglesias I., Artal P.. Closed-loop adaptive optics in the human eye[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(10): 746~748
- 5 Zhu L., Sun P. C., Bartsch D. U. *et al.*. Adaptive control of a micromachined continuous-membrane deformable mirror for aberration compensation[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(1): 168~176
- 6 Simonov A. N., Hong S., Vdovin G.. Piezoelectric deformable mirror with adaptive multiplexing control[J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**: 070501-1~070501-3
- 7 Perreault J. A., Bifano T. G., Levine B. M. *et al.*. Adaptive optic correction using microelectromechanical deformable mirrors [J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**: 561~566
- 8 OKO. Adaptive Optics Product Guide[J]. 2006. 9~11
- 9 Fernandez E., Artal P.. Membrane deformable mirror for adaptive optics: performance limits in visual optics [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(9): 1056~1069
- 10 Zhu L., Sun P. C., Bartsch D. U. *et al.*. Wave-front generation of Zernike polynomial modes with a micromachined membrane deformable mirror[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(28): 6019~6026
- 11 Luke D. R., Burke J. V., Lyon R. G.. Optical wavefront reconstruction; theory and numerical methods[J]. *SIAM Rev.*, 2002, **44**(2): 169~224