

非均匀光强对曲率型自适应光学系统的影响*

黄盛炆, 习锋杰, 宁禹, 刘长海, 姜宗福
(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 在高斯光强和光强存在正态随机起伏情况下, 研究了一种 37 单元的曲率型自适应光学系统对低阶 Zernike 像差的校正效果, 并和均匀光强时的校正效果进行了比较。光强为高斯分布时, 光强的不均匀性对 Zernike 像差的校正带来了一定的影响, 对于曲率为零的 Zernike 像差影响较小, 对曲率不为零的 Zernike 像差影响较大。光强存在正态随机起伏时, 对各阶 Zernike 像差的校正影响较小, 曲率为零的 Zernike 像差的校正效果好于曲率不为零的 Zernike 像差的校正效果。结果表明在光强起伏不严重的情况下, 该 37 单元曲率型自适应光学系统对低阶 Zernike 像差可以较好地校正。

关键词: 自适应光学; 波前曲率传感器; 曲率型变形镜; 波前复原算法; Zernike 像差

中图分类号: O438 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2012)01-0009-04

Influence of nonuniform intensity on curvature adaptive optics system

HUANG Shengyang, XI Fengjie, NING Yu, LIU Changhai, JIANG Zongfu

(College of Opto-electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: With Gaussian intensity distribution or normal random intensity distribution, the correction of Zernike aberrations by a 37-element curvature adaptive optics system was simulated, and compared to the correction with uniform intensity distribution. In the case of Gaussian intensity distribution, the nonuniform of intensity brings about some influence into the correction of Zernike aberrations. The influence on Zernike aberrations with non-zero curvature is more serious than that to Zernike aberrations with zero curvature. In the case of normal random intensity distribution, the influence on Zernike aberrations is small. The correction of Zernike aberrations with zero curvature is more accurate than that for the non-zero curvature aberrations. The results indicate that the 37-element curvature adaptive optics system can correct low order Zernike aberrations when the nonuniform intensity is not very serious.

Key words: adaptive optics; wavefront curvature sensor; curvature deformable mirror; the reconstruction algorithm of wavefront; Zernike aberrations

在光强均匀分布的假设下, Roddier 指出前后离焦面上归一化光强差和波前曲率成正比, 由此提出了波前曲率传感技术^[1]。由波前曲率传感器和曲率型变形镜构成的曲率型自适应光学系统, 具有较高的控制效率, 已经被运用于天文望远镜系统, 如美国夏威夷大学开发的 Hokupa'a 系统^[2], 欧洲南方天文台采用的 MACAO 系统^[3], 以及日本国家天文台的 Subaru 系统^[4]等。波前曲率传感技术在眼科医学等领域也得到了应用^[5]。在上述应用范围, 光强分布均匀的假设是基本成立的。

当曲率型自适应光学系统应用于激光传输等领域时, 光强均匀分布的假设不再满足。习锋杰等分析了非均匀光强对波前曲率信号探测带来的

影响^[7]。在均匀光强条件下, 我们分析了一种 37 单元的曲率型自适应光学系统对低阶 Zernike 像差的校正效果^[8]。有必要进一步研究光强分布不均匀时整个曲率型自适应光学系统校正效果。在数值模拟了一种 37 单元的曲率型自适应光学系统对低阶 Zernike 像差校正的基础上, 研究了光强为高斯分布和存在正态随机起伏时, 对曲率型自适应光学系统校正效果带来的影响。

1 曲率型自适应光学系统原理介绍

曲率型自适应光学系统由波前曲率传感器、曲率型变形镜以及控制系统组成。由波前曲率传感器测量得到波前曲率信号, 经过控制算法得到控制信号, 驱动曲率型变形镜, 实现畸变波前的校

* 收稿日期: 2011-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60908027)

作者简介: 黄盛炆(1983—), 男, 湖北石首人, 博士研究生, E-mail: syhuang2008@yahoo.com.cn;

姜宗福(通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: jiangzongfu@yahoo.com.cn

正。在光强均匀分布的假设下, Roddier 指出前后离焦面光强的归一化光强差 $S(\mathbf{r})$ 与波前曲率和光瞳边界上法向导数存在如下关系^[1]:

$$S(\mathbf{r}) = \left(\frac{\partial W(\mathbf{r})}{\partial l} \delta_c - P(\mathbf{r}) \nabla^2 W(\mathbf{r}) \right) \Delta z \quad (1)$$

式中: \mathbf{r} 为光瞳面上的坐标矢量, l 为光瞳边界 c 法向矢量, $\partial W(\mathbf{r})/\partial l$ 是待测波前 $W(\mathbf{r})$ 沿法向矢量 l 的方向导数, δ_c 为沿光瞳边界处的 Dirac 函数, $P(\mathbf{r})$ 为光瞳函数, $\nabla^2 W(\mathbf{r})$ 为波前曲率, Δz 为传输长度。

曲率型变形镜是曲率型自适应光学系统的关键器件, 曲率型变形镜的形变服从泊松方程^[9]:

$$\nabla^2 F(r, \theta) = \Gamma V(r, \theta) \quad (2)$$

式中 (r, θ) 为极坐标, $F(r, \theta)$ 表示镜面面形变化, $V(r, \theta)$ 为施加的电压。 Γ 为常数, 与变形镜结构、材料特性等有关, 求解(2)式能够得到变形镜的影响函数。由于曲率传感器能够测量波前的曲率, 而曲率型变形镜的形变服从泊松方程, 两者能够实现较好的匹配, 实现波前畸变的校正。

一种 37 单元的曲率型变形镜, 其电极分布如图 1 所示。具体参数如下: 第一环电极半径 $R_1 = 4\text{mm}$, 第二环电极外半径 $R_2 = 12\text{mm}$, 第三环电极外半径 $R_3 = 20\text{mm}$, 第四环电极外半径 $R_4 = 28\text{mm}$, 变形镜半径 $a = 40\text{mm}$, 并将每一环分别分成若干等份, 构成了环扇形的电极分布。实际光路中只采用中间部分镜面, 如图 1 中虚线所示, 其半径略大于第三环电极的外半径。

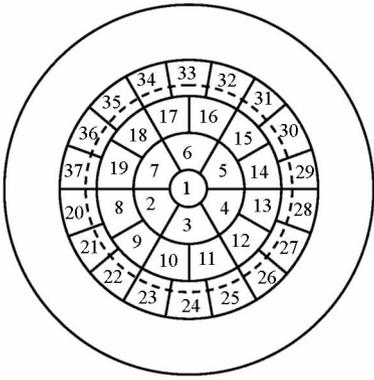


图 1 一种 37 单元曲率型变形镜电极分布

Fig. 1 Electrode distribution of bimorph deformable mirror

波前曲率传感器获取的归一化光强差信号, 通常需要在空间上分区探测。对于 37 单元变形镜, 一般将归一化光强差信号划分成对应的 37 个探测区域, 每个区域对应一个探测器, 探测区域的分布和电极分布相对应, 如图 2 所示, 其中虚线表示光瞳边缘。这样每个探测器得到的信号是在探测区域上的信号平均。

在曲率型自适应光学系统波前复原过程中, 首先需要得到相互作用矩阵, 这是指变形镜的第 j

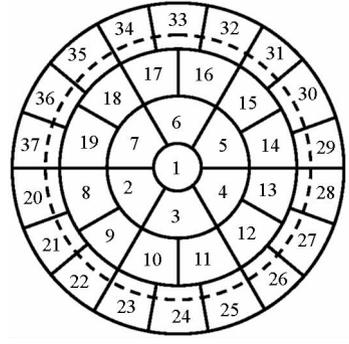


图 2 探测器分布

Fig. 2 The distribution of sensors

个控制电极施加单位电压驱动时, 第 j 个探测器探测到的信号^[10]。探测信号和控制电压通过相互作用矩阵有如下关系

$$\mathbf{S} = \mathbf{M}\mathbf{V} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{S} = [s_1, s_2, \dots, s_N]^T$ 为探测信号构成的矢量, $\mathbf{V} = [v_1, v_2, \dots, v_N]^T$ 为变形镜控制电压矢量, N 为电极与探测器个数, \mathbf{M} 为相互作用矩阵。

由式(3)求逆得到变形镜控制电压

$$\mathbf{V} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{S} \quad (4)$$

于是可以获得变形镜的校正面形 $\tilde{W}(\mathbf{r})$ 为

$$\tilde{W}(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^N v_i F_i(\mathbf{r}) \quad (5)$$

$F_i(\mathbf{r})$ 为第 i 个电极的影响函数, v_i 为第 i 个电极控制电压。由此实现了对畸变波前的校正。

2 数值模拟结果及讨论

我们模拟了 37 单元曲率型自适应光学系统波前复原过程, 对在均匀光强和非均匀光强情况下 Zernike 像差的校正效果进行了比较和分析。文献上 Zernike 像差有多种表达形式, 这里采用径向序数 n 和角向序数 m 表示的 Zernike 像差^[11]:

$$Z_n^m(r, \theta) = \begin{cases} R_n^{|m|}(r) \cos(m\theta); & m \geq 0 \\ -R_n^{|m|}(r) \sin(m\theta); & m < 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中 $R_n^{|m|}(r) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! [(n+|m|)/2 - s]! [(n-|m|)/2 - s]!} r^{n-2s}$ 为径向多项式。

可以看出, $Z_n^{-|m|}$ 和 $Z_n^{|m|}$ 两类 Zernike 像差的径向多项式相同, 仅在角向存在一定角度的旋转。同时某些 Zernike 像差的曲率为零, 这些 Zernike 像差的径向序数 n 和角向序数 m 满足: $n = |m|$, 即

$$\nabla^2 Z_n^{\pm n}(r, \theta) = 0 \quad (7)$$

为了讨论 Zernike 像差的校正效果, 定义复原误差系数 β 为

$$\beta = \left\{ \iint_A [Z_n^m(r, \theta) - \tilde{Z}_n^m(r, \theta)]^2 d\sigma / \iint_A [Z_n^m(r, \theta)]^2 d\sigma \right\}^{1/2} \quad (8)$$

式中: A 表示光瞳面积, $\bar{Z}_n^m(r, \theta)$ 为曲率型自适应光学系统对 Zernike 像差 $Z_n^m(r, \theta)$ 的复原结果。从定义可以知道,复原误差 β 越小,校正的效果越好。复原误差 β 小于 1,则体现了自适应光学系统的校正效果。

2.1 高斯光强分布

当光强分布不均匀时,归一化光强可以表示为^[7]

$$S = \left(\frac{\partial W(\mathbf{r})}{\partial l} \delta_c - \nabla \ln I(\mathbf{r}) \cdot \nabla W(\mathbf{r}) - \nabla^2 W(\mathbf{r}) \right) \Delta z \quad (9)$$

与光强分布均匀相比,对于相同的波前畸变,测量信号还包含了光强对数的梯度与波前梯度的点乘项。光强成高斯分布时,光强可以表示为

$$I(r) = \exp(-2r^2/w_z^2) \quad (10)$$

其中 w_z 为高斯光束的半径。将式 (10) 代入式 (9) 得到^[7]

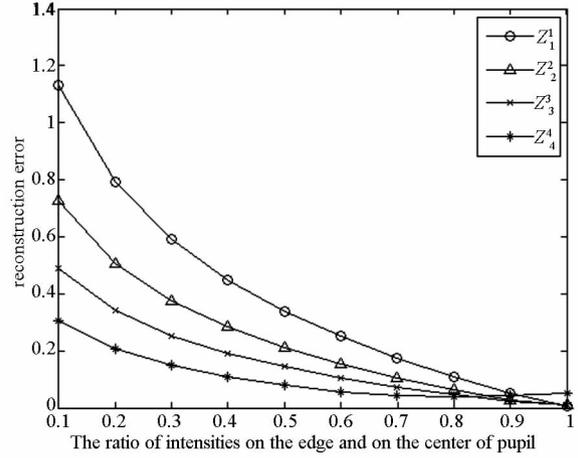
$$S = \left(\frac{\partial W(\mathbf{r})}{\partial l} \delta_c + \frac{4\mathbf{r}}{w_z^2} \cdot \nabla W(\mathbf{r}) - \nabla^2 W(\mathbf{r}) \right) \Delta z \quad (11)$$

从式(9)中可以看出,高斯光束半径越大,点乘项带来的影响越小。这是因为高斯光强半径越大,光强分布越接近于光强均匀分布,得到的结果与均匀光强得到的结果越相近。当高斯光强半径无穷大时,点乘项为零,归一化光强分布结果和光强均匀分布结果相同,这是因为高斯光强半径无穷大时,高斯光强分布已经变成为均匀光强分布。

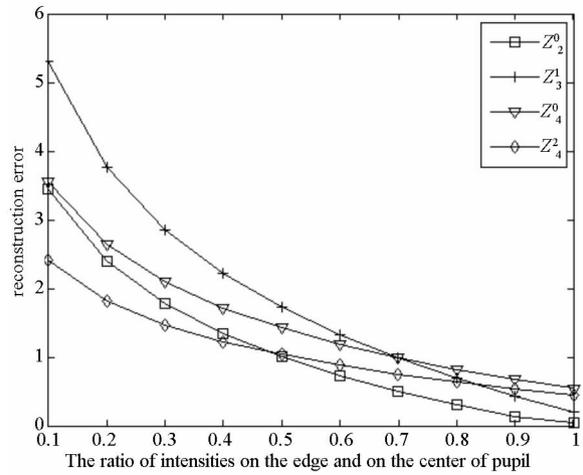
我们将 Zernike 像差分为两类,曲率为零和曲率不为零,分别比较不同高斯光强时的校正效果,并用误差系数来衡量。按 Noll 的排序,前 15 阶 Zernike 像差,去除活塞项 Z_0^0 ,曲率为零的有: Z_1^1 、 Z_1^{-1} 、 Z_2^2 、 Z_2^{-2} 、 Z_3^3 、 Z_3^{-3} 、 Z_4^4 、 Z_4^{-4} ,曲率不为零的有: Z_2^0 、 Z_3^{-1} 、 Z_3^1 、 Z_4^0 、 Z_4^{-2} 、 Z_4^2 。根据对 Zernike 像差的观察可以知道, $Z_n^{-|m|}$ 和 $Z_n^{|m|}$ 两类 Zernike 像差的径向多项式相同,两者面形相同,仅在角向存在一定角度的旋转。我们数值模拟的校正结果也显示对 $Z_n^{-|m|}$ 和 $Z_n^{|m|}$ 两类 Zernike 像差校正的效果基本相同,因此仅需给出对曲率为零的像差 Z_1^1 、 Z_2^2 、 Z_3^3 、 Z_4^4 和曲率不为零的像差 Z_2^0 、 Z_3^1 、 Z_4^0 、 Z_4^2 的校正效果的影响。

我们采用光瞳半径为 21mm,光强为高斯分布,光瞳边缘处光强为中心处的光强的 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%。对应于高斯光强的半径由小到大,表明光强分布由不均匀逐步向均匀光强的变化。当光瞳边界处光强和中心处光强相等时,光强分布变为均匀分布。图 3 给出了对曲率为零的像差 Z_1^1 、

Z_2^2 、 Z_3^3 、 Z_4^4 和曲率不为零的像差 Z_2^0 、 Z_3^1 、 Z_4^0 、 Z_4^2 的校正效果。



(a) 曲率为零的 Zernike 像差



(b) 曲率不为零的 Zernike 像差

图 3 在不同高斯光强分布下对低阶 Zernike 像差校正效果的比较

Fig. 3 The error of reconstruction for low order Zernike aberrations with different Gauss intensity distribution

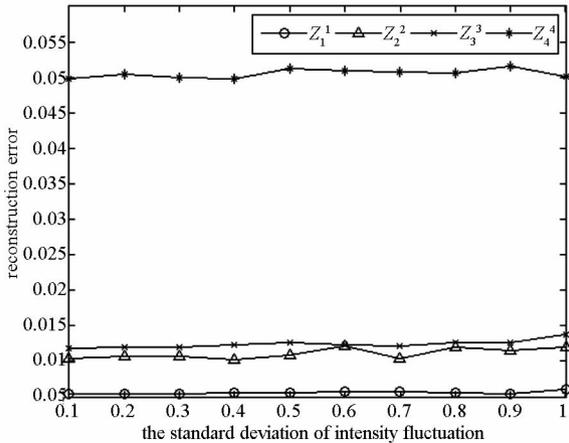
从图 3 可以看出,随着高斯光束边界处光强趋近于中心处光强,即光强分布由不均匀分布趋近于均匀分布,各阶 Zernike 像差的复原误差系数变小,表示校正效果越理想。同时可观察到,在相同高斯光强分布下,曲率为零 Zernike 像差的复原误差系数普遍小于曲率不为零的 Zernike 像差,说明曲率为零 Zernike 像差的校正效果好于曲率不为零的 Zernike 像差,光强分布的不均匀对曲率不为零的 Zernike 像差的影响更大。在光强较均匀的情况下,该 37 单元曲率型自适应光学系统对低阶 Zernike 像差的校正效果是可以接受的。

2.2 光强存在正态随机起伏

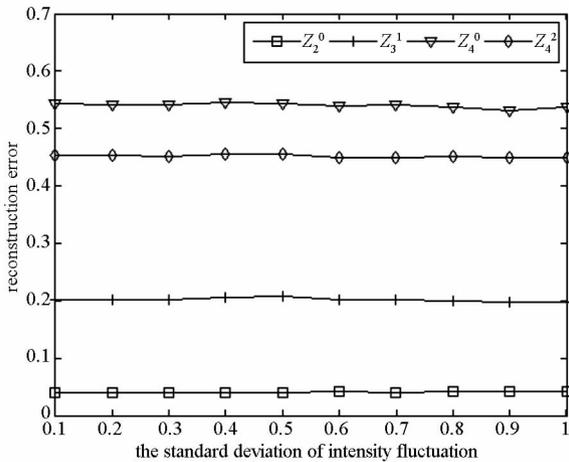
当光强分布为均匀分布,且存在正态随机起伏时,在光瞳上光强起伏服从正态分布,为

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (12)$$

该正态分布期望为 10, 均方差为 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1。对应于光强随机起伏由小到大, 均方差为 0 时, 可以认为对应于光强均匀分布时的情况。图 4 给出对曲率为零的像差 $Z_1^1, Z_2^2, Z_3^3, Z_4^4$ 和曲率不为零的像差 $Z_2^0, Z_3^1, Z_4^0, Z_4^2$ 校正效果的影响。从图 4 中可以看出, 光强存在一定的正态随机起伏, 对各阶 Zernike 像差的校正影响较小, 和光强均匀分布时校正的效果基本相同, 曲率为零的 Zernike 像差的校正效果好于曲率不为零的 Zernike 像差的校正效果。



(a) 曲率为零的 Zernike 像差



(b) 曲率不为零的 Zernike 像差

图 4 光强存在正态随机起伏时对低阶 Zernike 像差校正效果的比较

Fig. 4 The error of reconstruction for low order Zernike aberrations with uniform random intensity distribution

斯分布时, 随着高斯光束光强分布由不均匀分布趋近于均匀分布, 各阶 Zernike 像差的复原误差系数逐步变小, 校正效果越理想。在相同高斯光强分布下, 曲率为零的 Zernike 像差的复原误差系数普遍小于曲率不为零的 Zernike 像差, 说明曲率为零的 Zernike 像差的校正效果好于曲率不为零的 Zernike 像差的校正效果, 光强分布的不均匀对曲率不为零的 Zernike 像差的影响更大。在光强存在一定的正态随机起伏时, 对各阶 Zernike 像差的校正影响较小, 和光强均匀分布时校正的效果基本相同, 曲率为零的 Zernike 像差的校正效果好于曲率不为零的 Zernike 像差的校正效果。在光强较均匀的情况下, 该 37 单元曲率型自适应光学系统对低阶 Zernike 像差能够较好地校正。

参考文献 (References)

- [1] Roddier F. Curvature sensing and compensation; a new concept in adaptive optics [J]. Appl Opt, 1988, 27(7):1223-1225.
- [2] Graves J E, Northcott M J, Roddier F, et al. First light for Hokupa'a; 36-element curvature AO system at UH [C]//Proc of SPIE. 1998, 3353: 34-43.
- [3] Oberti S, Bonnet H, Fedrigo E, et al. Calibration of a curvature sensor / bimorph mirror AO system; interaction matrix measurement on MACAO systems [C]//Proc of SPIE. 2004, 5490:139-150.
- [4] Gaessler W, Takami H, Takato N, et al. First results from the Subaru AO system [C]//Proc of SPIE. 2002, 4494:30-40.
- [5] Díaz-Doutón F, Pujol J, Arjona M, et al. Curvature sensor for ocular wavefront measurement [J]. Opt. Lett., 2006, 31(15): 2245-2247.
- [6] Torti C, Gruppeta S, Diaz-Santana L. Wavefront curvature sensing for the human eye [J]. Journal of Modern Optics, 2008, 55(4): 691-702.
- [7] 习锋杰, 姜宗福, 许晓军. 光强非均匀分布对波前曲率传感器的影响[J]. 光学学报, 2006, 26(9):1293-1296. XI Fengjie, JIANG Zongfu, XU Xiaojun. Influence of nonuniform intensity on wavefront curvature sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(9):1293-1296. (in Chinese)
- [8] 黄盛扬, 姜宗福, 习锋杰, 等. 曲率型自适应光学系统对低阶 Zernike 像差校正能力 [J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(11):2521-2526. HUANG Shengyang, JIANG Zongfu, XI Fengjie, et al. Correction of low order Zernike aberrations by curvature adaptive optics system [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(11):2521-2526. (in Chinese)
- [9] Kokorowski S A. Analysis of adaptive optical elements made from piezoelectric Bimorphs [J]. J Opt Soc Am, 1979, 69(1):181-187.
- [10] Roddier F, Northcott M, Graves J E. A simple low-order adaptive optics system for near-infrared applications [J]. Publ Astron Soc Pac, 1991, 103:131-149.
- [11] Thibos L N, Applegate R A, Schwiegerling J T, et al. Standards for reporting the optical aberrations of eyes [J]. Journal of Refractive Surgery, 2002, 18(5):652-660.

3 结 论

在数值模拟了一种 37 单元的曲率型自适应光学系统波前校正过程的基础上, 研究了光强为高斯分布和光强存在正态分布随机起伏对曲率型自适应光学系统校正效果带来的影响。光强为高