

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0067-06

自适应光学系统多变形镜联合闭环控制方法

叶红卫^{1,2,3} 李新阳^{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 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 提出一种自适应光学(AO)系统单波前传感器多变形镜(DM)闭环控制方法,用单波前传感器测量畸变波前,通过像差解耦控制算法对畸变波前实现特定像差和残余像差的分解,分别控制不同变形镜进行校正。单元数较少的变形镜采用模式法校正特定像差,单元数最多的变形镜采用直接斜率法校正残余像差。对一个 19 单元变形镜、61 单元变形镜和 127 单元变形镜与 96 单元哈特曼传感器(HS)联合工作的自适应光学系统的数值仿真结果表明,这种方法可以实现多变形镜联合闭环工作,可以在现有技术条件下大幅度提高自适应光学校正能力。

关键词 自适应光学;解耦算法;变形镜;计算机仿真

中图分类号 TN012 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s2.0067

The Control Method of Close-Loop Adaptive Optical System with Multi-Wavefront-Correctors

Ye Hongwei^{1,2,3} Li Xinyang^{1,2}

(¹ Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
² Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract The control method of close-loop adaptive optical (AO) system with single wavefront sensor and multi-wavefront-correctors was proposed. The wave aberration was measured using single wavefront sensor. The wavefront aberrance was decomposed to lower rank wave aberrations and higher rank residual error by decoupling method and algorithm of limitative correction. In this way, different types of wave aberrations are corrected by different wavefront correctors respectively. The wavefront correctors with little elements are used to correct low spatial frequency wave aberration using Zernike wavefront modal algorithm. The wavefront corrector with more elements is used to correct the residual high spatial frequency wavefront error using direct gradient wavefront control algorithm. An adaptive optical system using a single Hartman wavefront sensor (HS) with 96 sub-apertures to control 19-element deformable mirror (DM), 61-element deformable mirror and 127-element deformable mirror has been numerical simulated. It is proved that this method can improve the compensation ability of an adaptive optical system.

Key words adaptive optics; decoupling algorithm; deformable mirror; computer analysis

1 引言

自适应光学(AO)系统是一种实时探测和校正随机光学波前像差的系统,它由波前探测器实时探测波前像差信息,并由波前控制器将波前探测器探测得到的信号经过控制算法转化为变形镜(DM)各个驱动器的电压控制信号,电压控制信号驱动变形

镜改变镜面面形,从而实现波前误差的实时校正。

随着自适应光学系统应用目标和环境的变化,一个变形镜在某些场合已经不足以校正大的波前畸变。近年来好多专家学者提出用多个变形镜联合工作提高自适应光学系统性能的方法。Sivokon 等^[1]分析了低空间分辨率系统和高空间分辨率系统联合

基金项目: 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 叶红卫(1972—),男,博士研究生,主要从事自适应光学、大气光学等方面的研究。

E-mail: YHW0310@126.com

导师简介: 李新阳(1971—),男,研究员,博士,主要从事自适应光学,大气光学等方面的研究。E-mail: xyli@ioe.ac.cn

使用,以提高整个系统的空间校正能力。Roggemann 等^[2,3]提出用两个变形镜联合校正激光大气传输中闪烁效应。李新阳等^[4]分析了两个自适应光学系统串联校正以提高整个系统的控制效果的方法。上述学者所述的方法从原理上讲具有可行性。但在实际应用中将极大提高成本,并且使系统变的过于庞大。胡诗杰等^[5]提出的双变形镜自适应光学系统解耦算法,无法扩展到多个变形镜的情况。本文将详细研究用单个波前传感器控制多个变形镜联合工作,通过像差合理分解以稳定控制自适应系统的闭环校正的方法^[6],并用数值仿真验证了这种方法的可行性。

2 变形镜联合校正原理

用变形镜校正波前相位畸变的过程,就是将波前相位畸变 $\Phi(x, y)$ 用变形镜的面形 $\Phi_{DM}(x, y)$ 去补偿^[7]。设输入信号 V_k 为各驱动器控制电压,则有

$$\Phi_{DM}(x, y) = \sum_{k=1}^n V_k \cdot f_k(x, y), \quad (1)$$

式中 n 为变形镜驱动器数; V_k 是加载于第 k 个驱动器上的电压; $f_k(x, y)$ 为驱动器影响函数。变形镜的各个驱动器的控制电压与哈特曼波前探测器(HS)上的波前斜率,可以用矩阵向量形式表示为

$$\mathbf{g} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{V}, \quad (2)$$

其中 $\mathbf{V} = [V_1, V_2, \dots, V_n]^T$ 是变形镜电压向量, $\mathbf{g} = [g_{1x}, g_{1y}, \dots, g_{mx}, g_{my}]^T$ 是哈特曼波前传感器测量的波前斜率向量, m 是波前传感器子孔径数, \mathbf{R} 是 $2m \times n$ 维的驱动器斜率影响函数矩阵。求出斜率响应矩阵 \mathbf{R} 的广义逆 \mathbf{R}^+ , 就可以求出变形镜各驱动器控制电压

$$\mathbf{V} = \mathbf{R}^+ \cdot \mathbf{g}, \quad (3)$$

将得到的驱动器控制电压直接代入公式(1)中,这种方法为直接斜率法校正。

另一种校正方法是模式法校正,由于哈特曼波前传感器测量得到的畸变波前斜率 \mathbf{g} 也可以用 Zernike 模式法来表示为^[8]

$$\mathbf{g} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{a}, \quad (4)$$

其中 \mathbf{Z} 为 n 阶 Zernike 模式波前斜率重构矩阵, \mathbf{a} 为 Zernike 模式像差系数,将(4)式代入(3)式得到模式法校正时电压与波前斜率 \mathbf{g} 间关系为

$$\mathbf{V} = \mathbf{R}^+ \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{a} = \mathbf{R}^+ \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{Z}^+ \cdot \mathbf{g}, \quad (5)$$

令矩阵 $\mathbf{Q} = \mathbf{R}^+ \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{Z}^+$, 矩阵 \mathbf{Q} 综合了系统布局(斜率响应矩阵 \mathbf{R}) 与模式复原(波前重构矩阵 \mathbf{Z}) 两方面的影响。模式法校正对系统布局的依赖小,稳定性好,容易闭环。但与直接斜率法相比较校正精度较差。

3 多变形镜像差解耦控制方法

对于任意一个波前像差都可以用一系列 Zernike 像差之和来描述为

$$\Phi_0(x, y) = \sum_{i=1}^n a_i z_i(x, y) + \Phi_\phi, \quad (6)$$

其中 a_i 为第 i 阶 Zernike 像差系数, $z_i(x, y)$ 为第 i 阶 Zernike 多项式表达式, Φ_ϕ 为其他残余像差。多变形镜联合校正就是用多个变形镜串联代替单个变形镜。原理示意图如图 1 所示,最终校正量为各个变形镜校正量的总和,即为

$$\Phi_0 = \Phi_{DM1} + \Phi_{DM2} + \dots + \Phi_{DMN} + \Phi_{DMH}, \quad (7)$$

因此用多变形镜联合闭环可以极大地改善自适应光学系统的校正能力。

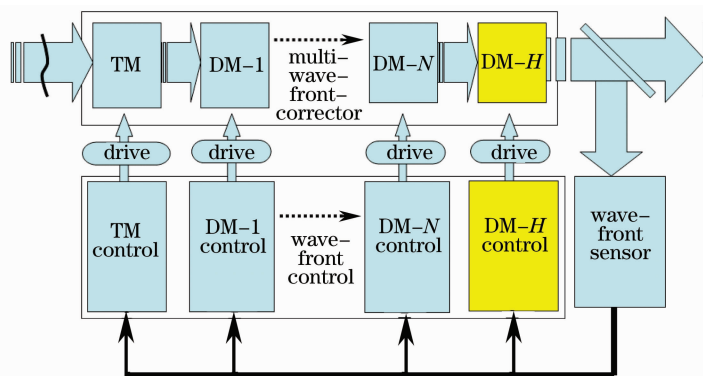


图 1 单波前传感器多变形镜自适应光学系统原理图

Fig. 1 AO system with single wavefront sensor and multi-DM

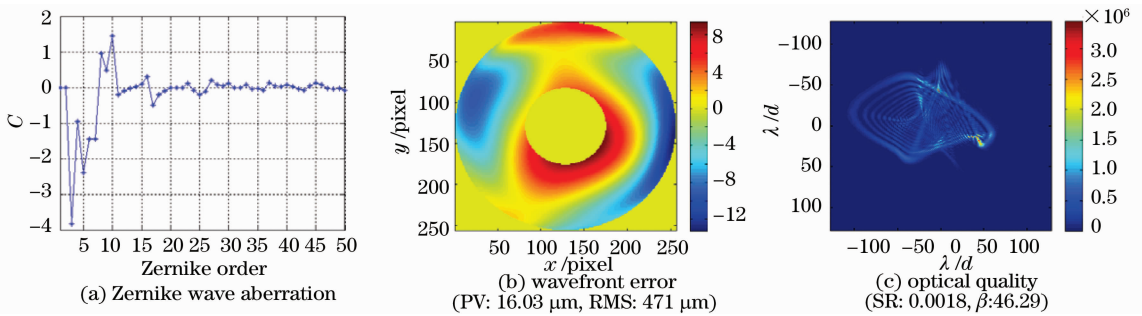


图3 数值仿真中的入射波前畸变

Fig. 3 Input wavefront error in emulation

通过更换三个变形镜的斜率响应矩阵可以进行单变形镜校正和多变形镜联合校正。在三个变形镜单独工作时,由于变形镜空间分辨率和校正电压的限制,均不能对像差进行完全校正。校正结果如图4所示。由于变形镜为反射式校正,因此变形镜校正后的面形为波前畸变0.5倍。当用19单元变形镜单独校正像差后远场光斑如图4(a)图所示,当用61

单元变形镜单独校正像差后远场光斑如图4(b)所示。由于空间分辨率和校正量的限制,校正能力不足,对系统中的高阶像差校正效果较差。用127单元变形镜单独校正像差后远场光斑如图4(c)所示。由于变形镜空间分辨率提高,对高阶像差有很好校正作用,但由于驱动器校正电压的限制,对大像差校正能力不足。

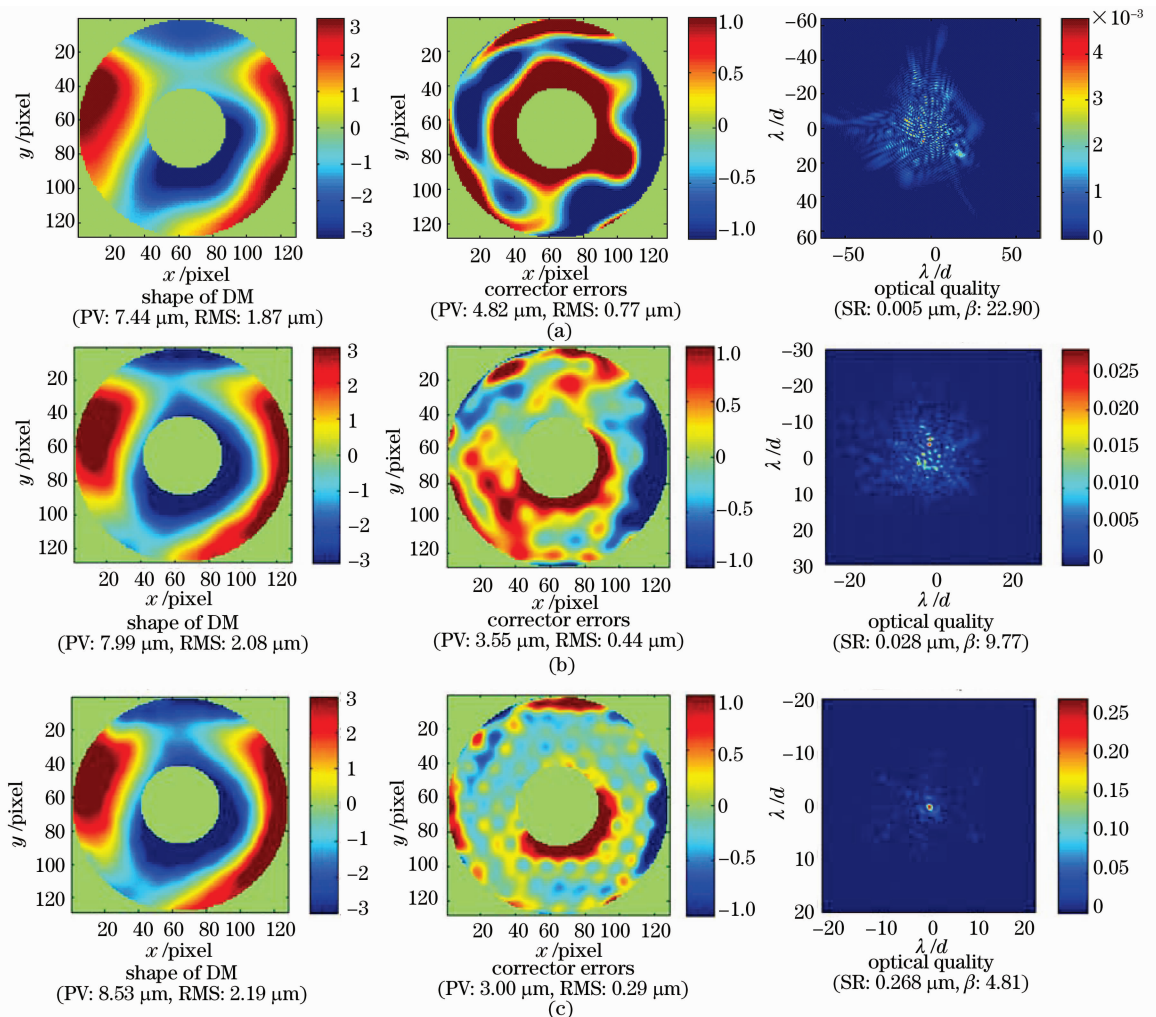


图4 单变形镜校正效果实验(大像差)。(a)19单元变形镜闭环;(b)61单元变形镜闭环;(c)127单元变形镜闭环

Fig. 4 Ability of AO close-loop with single DM. (a) 19DM; (b) 61DM; (c) 127DM

当用多变形镜联合校正像差时,校正结果如图5所示,由于三个变形镜上的面形均在保护电压限定以内,所以联合校正后残差较小,镜面残差PV

值为 $1.9 \mu\text{m}$ 。此时远场光斑中杂散光明显减少,总体校正效果明显。计算得到的SR比为0.577,光束质量 $\beta=1.81$ 。

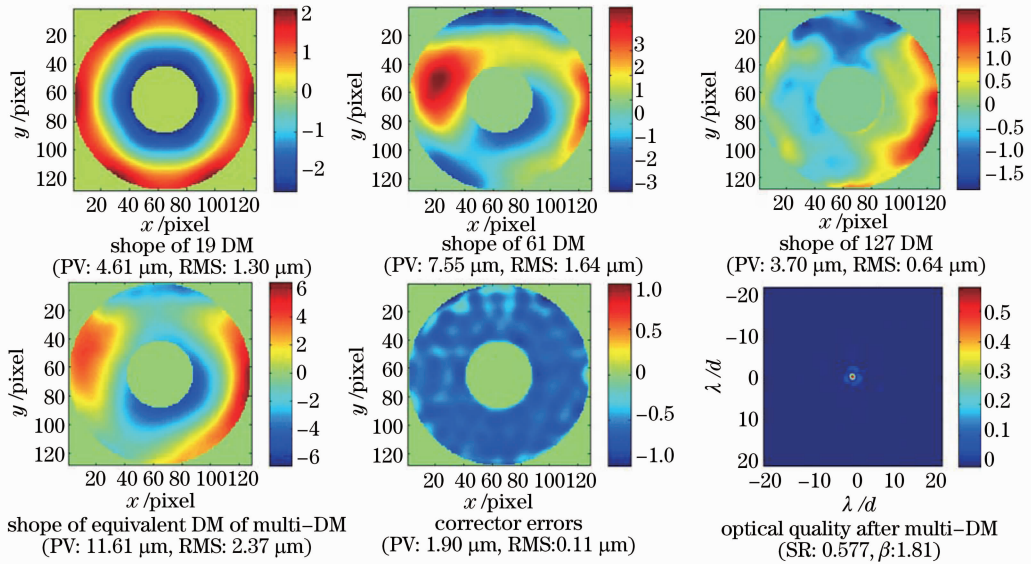


图5 多变形镜联合闭环效果实验

Fig. 5 Ability of AO close-loop with multi-DM

5 单传感器双校正器的系统闭环实验

应用像差解耦控制方法,在实际光学系统中进行了双变形镜联合校正的验证实验,氦氖光源产生有波前畸变的光束,经过倾斜镜、61单元变形镜、127单元变形镜后由哈特曼波前探测器测得其像差,经过像差分解分别控制倾斜镜和两个变形镜校正波前,远场测量系统观察远场光斑的变化情况。

由于待校正的系统像差较少,在自适应光学系统开环时,光学系统的远场光斑形态如图6(a)所示,SR比为0.12;当用双变形镜联合校正像差后远场光斑如图6(b)所示,SR比为0.69。由于像差较小且多为低阶像差,两个变形镜单独工作均可将系

统像差全部校正。经过多次重复实验,实际系统闭环工作状态稳定,重复性较好,证明这种解耦方式可以在实际系统中得到很好的应用。实验验证部分将在随后的文章里进行详细的分析。

6 结 论

提出一种单传感器控制多个变形镜联合校正畸变像差的方法,可以在系统成本提升不多的情况下拓展变形镜的校正精度和校正能力。这种闭环控制算法在计算机仿真中得已验证,同时在实际系统中也进行了详细的实验验证。证明该方法在实际光学系统中可以稳定工作的同时,在计算机仿真和实际实验分析中也发现一些不足,如低单元数校正器只专注校正特定像差,它们的校正能力没有得到充分利用。如何让各个变形镜既充分发挥校正作用又可以稳定工作,还有很多问题有待深入分析研究。

参 考 文 献

- 1 V. P. Sivokon, M. A. Vorontsov. High-resolution adaptive phase distortion suppression based solely on intensity information [J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1998, **15**(1): 234~247
- 2 Michael C. Roggemann, David J. Lee. Two-deformable-mirror concept for correcting scintillation effects in laser beam projection through the turbulent atmosphere [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(21): 4577~4585
- 3 F. Y. Kanev, V. P. Lukin. Amplitude-phase beam control in a two-mirror adaptive system [J]. *J. Atmos. Opt.*, 1991,

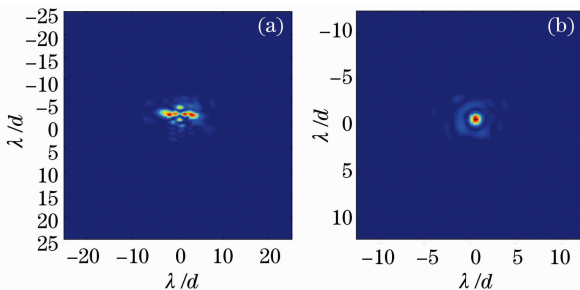


图6 双变形镜联合闭环效果实验。(a) AO系统开环 (SR:0.12);(b)61DM+127DM双联合闭环(SR:0.69)

Fig. 6 Ability of AO close-loop. (a) AO open-loop (SR:0.12);(b) 61DM+127DM close-loop (SR:0.69)

- 4: 1273~1279
- 4 Li Xinyang, Jiang Wenhan. Control performance analysis of the construction of two Adaptive optics system in series[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1059~1064
李新阳,姜文汉. 两个自适应光学系统串联校正的控制性能分析[J]. 光学学报, 2001, **21**(9): 1059~1064
- 5 Hu Shijie, Xu Bing, Wu Jian *et al.*. Aberration decoupling analysis for double deformable mirrors adaptive optics system[J]. *Acta Optics Sinica*, 2005, **25**(12): 1687~1692
胡诗杰,许冰,吴健等. 双变形镜自适应光学系统像差解耦研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(12): 1687~1692
- 6 Thomas J. Karr. Instabilities of atmospheric laser propagation [C]. *SPIE*, 1990, **1221**: 26~57
- 7 Li Xinyang, Wang Chunhong, Xian Hao *et al.*. Modal compensation effect analysis of the direct-gradient wavefront control algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 13~18
李新阳,王春红,鲜浩等. 直接斜率波前控制算法的模式校正效果分析[J]. 光学学报, 2001, **21**(1): 13~18
- 8 Robert J. Noll. Zernike ploynomials and atmospheric turbulence [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, **66**(3): 207~211
- 9 Li Xinyang, Xian Hao, Wang Chunhong *et al.*. Relationship between beam quality factor β and wavefront error[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 798~802
李新阳,鲜浩,王春鸿等. 波像差与光束质量 β 因子的关系[J]. 中国激光, 2005, **32**(6): 798~802
- 10 Ye Hongwei, Li Xinyang, Xian Hao *et al.*. Relationship between beam excursion error and the beam quality factor β of long-term exposure spot[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 809~813
叶红卫,李新阳,鲜浩等. 光束漂移误差与长曝光光斑光束质量 β 因子的关系[J]. 中国激光, 2007, **34**(6): 809~813