

# 两种自适应光学系统中哈特曼波前传感器与变形镜的对准误差

侯 静<sup>1,2</sup> 姜文汉<sup>1</sup> 凌 宁<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)  
(<sup>2</sup> 国防科技大学理学院, 长沙 410073)

**摘要:** 利用直接波前斜率法和变形镜的电压一面响应特性,研究了常规自适应光学系统和共光路/共模块(CP/CM)自适应光学系统中哈特曼波前传感器与变形镜的对准误差。常规自适应光学系统中,可以用重新测量变形镜的影响函数以减小对准误差的影响,虽并不能消除其影响,但系统都会有很大的调整容差;共光路/共模块自适应光学系统中采用不同的双哈特曼数据处理方法,哈特曼波前传感器与变形镜的对准精度对系统校正能力影响是不同的,采用加修正因子斜率融合法和电压融合法由于在数据融合时考虑了两套哈特曼传感器与变形镜对准的差异,所以对准误差的影响与在常规自适应光学中相同,系统都会有很大的调整容差,而采用直接斜率融合法的共光路/共模块系统由于是建立在两套哈特曼传感器完全一致的假设基础上,所以对对准精度的要求是很高的。分析过程中给出了相应的数值计算结果。

**关键词:** 自适应光学; 对准误差; 数值计算; 共光路/共模块; 哈特曼-夏克波前传感器; 变形镜

中图分类号: TP202<sup>+</sup>.7 文献标识码: A

## 1 引 言

在自适应光学系统中,由于变形镜和波前传感器为两个独立的器件,分别位于光路的两端,一般两者的间距还比较大,因为变形镜的驱动器布局和哈特曼传感器的子孔径划分是经优化选择的最佳匹配关系,旋转和平移都将不同程度的改变它们的对应关系,因此二者之间的对准精度对系统的校正能力是有影响的。在实际的系统工作过程中,一旦二者位置调整后,我们会重新测量变形镜的影响函数以减小对准误差的影响,但并不能消除其影响,因此需要进行对准精度对系统校正效果的分析。在共光路/共模块(CP/CM)自适应光学系统<sup>[1~3]</sup>中,由于有两套哈特曼波前传感器、一个变形镜,且两套哈特曼波前传感器的数据融合有直接斜率融合法、加修正因子斜率融合法和电压融合法等多种方法,因此进行对准精度对系统校正效果的分析更为必要。

本文将针对常规的和共光路/共模块自适应光学系统分别进行哈特曼波前传感器与变形镜的对准误差分析,以数值仿真方法研究其对自适应光学系

统像差校正能力的影响,编写了程序模拟两种自适应光学系统工作过程,计算得到了不同对准误差对系统最终校正效果的影响曲线。

## 2 哈特曼波前传感器与变形镜的对准误差分析

我们把哈特曼波前传感器与变形镜的对准误差分为平移和旋转。不同的系统哈特曼波前传感器和变形镜的布局匹配关系不同,这里我们以实际的 61 单元自适应光学系统<sup>[4]</sup>的参量为例来进行分析,哈特曼-夏克(Hartmann-Shack)波前传感器的子孔径和变形镜驱动器的布局如图 1 所示,共有 48 个子孔径,即有 96 个斜率测量数据,变形镜有 61 个驱动器。

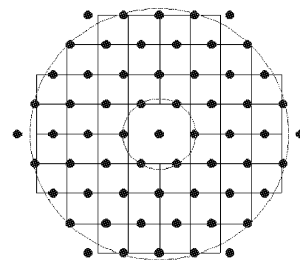


Fig. 1 Configuration of the subapertures of Hartmann wavefront sensor and deformable mirror actuators in 61-element system

E-mail: houjing25@sina.com.cn

收稿日期: 2002-05-13; 收到修改稿日期: 2002-10-31

## 2.1 常规自适应光学系统

比较一下不同的对准条件下的波像差校正效果,校正算法均为实际系统采用的直接斜率法,每当对准关系变化,斜率响应函数矩阵都重新计算,以模拟重新测量变形镜的影响函数这一过程。设 61 单

元自适应光学系统变形镜的驱动器间距为  $d$ 。图 2 (a)为开环远场,图 2(b)为理想闭环结果,图 2(c)为校正残差。图 3 和 4 分别是在水平  $x$  方向上波前传感器与变形镜有  $1/5d$  和  $2/5d$  的相对平移时,系统的相应闭环效果。

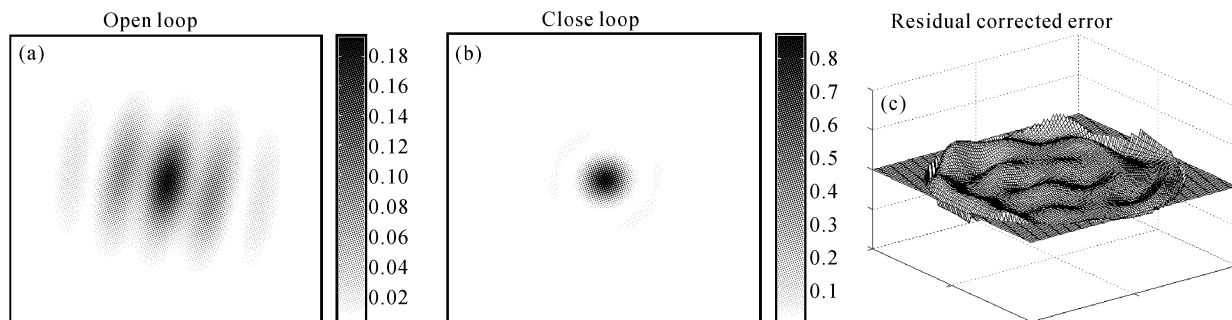


Fig. 2 The compensation performance of adaptive optics system. (a) The farfield focal of open loop, the Strehl ratio is 0.19; (b) The farfield focal of close loop, the Strehl ratio is 0.87; (c) Residual corrected error of wavefront rms: 0.054673, PV: 0.53893

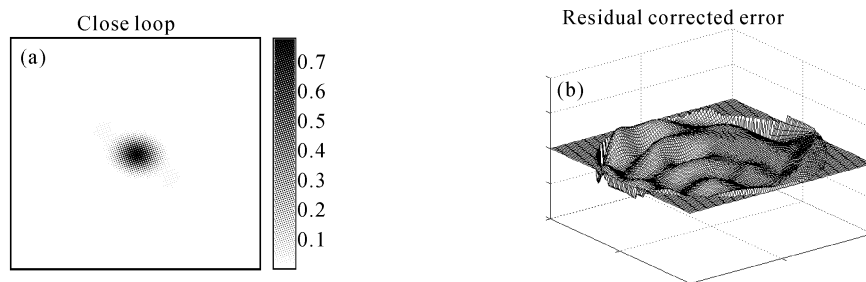


Fig. 3 The compensation performance of adaptive optics system when the Hartmann-Shack wavefront sensor and deformable mirror have  $1/5d$  displacement in  $x$  direction. (a) The Strehl ratio of close loop, the Strehl ratio is 0.77; (b) Residual corrected error of wavefront. rms: 0.093951, PV:0.61124

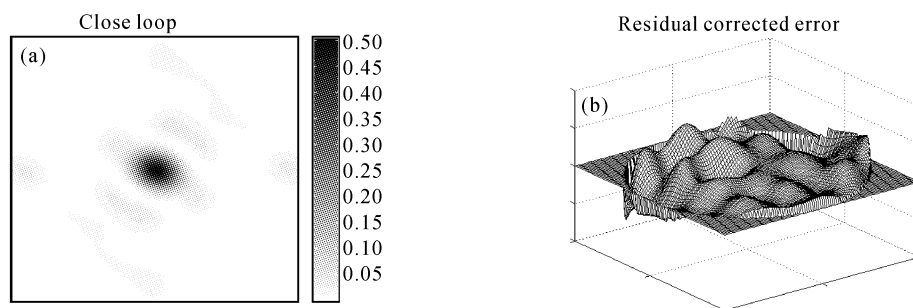


Fig. 4 The compensation performance of adaptive optics system when the Hartmann-Shack wavefront sensor and deformable mirror have  $2/5d$  displacement in  $x$  direction. (a) The Strehl ratio of close loop, the Strehl ratio is 0.50; (b) Residual corrected error of wavefront. rms:0.17439; PV:1.0481

我们又针对不同阶的泽尼克多项式<sup>[5]</sup>的像差,逐一计算了当有  $x$  或  $y$  方向不同平移量以及有旋转误差时,系统的闭环效果,如图 5 所示,图 5(a)为哈特曼传感器与变形镜有  $x$  方向的不同平移量时,系统的斯特列尔比的变化情况;图 5(b)哈特曼传感

器与变形镜有  $y$  方向的不同平移量时,系统的斯特列尔比的变化情况;图 5(c)为有旋转误差时的计算结果。图中每个数值点的得到都是通过了一次对自适应光学系统工作的全过程(包括波前探测、控制电压计算、波前校正和最后的远场计算)的模拟计算。

为了结论的普适性,我们又随机产生了 5 组不同的泽尼克多项式系数,从而有了 5 个不同的组合

像差,针对这些像差同样计算了相应的系统校正结果,如图 6 所示。

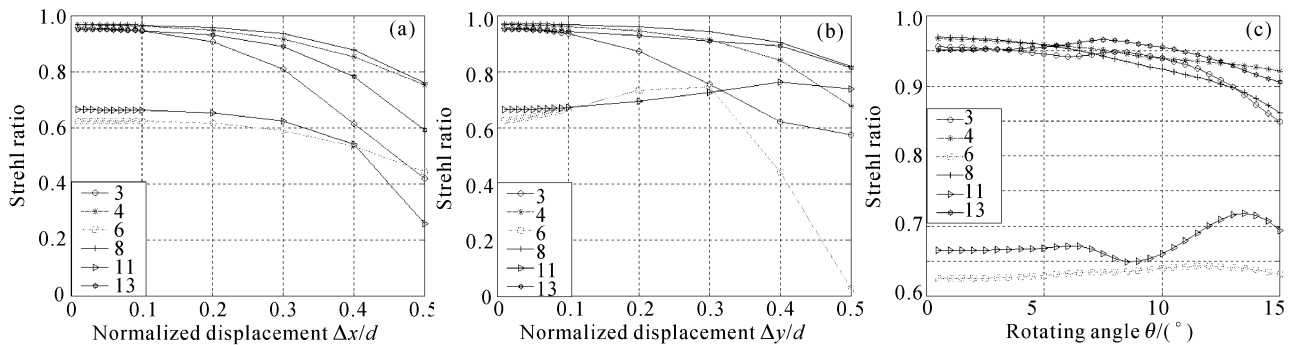


Fig. 5 The Strehl ratio of adaptive optics system correcting Zernike aberration of 3rd, 4th, 6th, 8th, 11st and 13rd order, respectively, when the Hartmann-Shack wavefront sensor and deformable mirror have adjusting error. (a) Displacement at  $x$  direction; (b) Displacement at  $y$  direction; (c) Rotation error

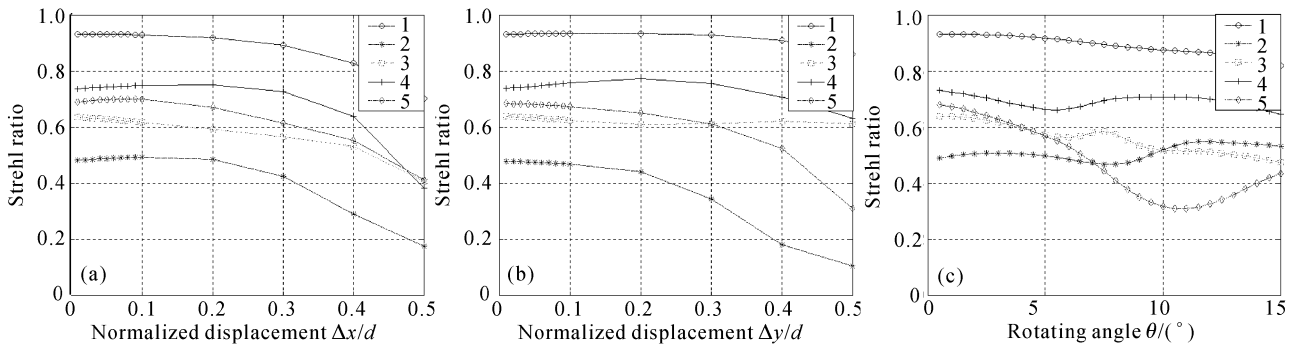


Fig. 6 The Strehl ratio of adaptive optics system correcting five different random aberration, respectively, when the Hartmann-Shack wavefront sensor and deformable mirror have adjusting error. (a) Displacement at  $x$  direction; (b) Displacement at  $y$  direction; (c) Rotation error

对于不同的像差类型,同样的平移或旋转的影响所引起的校正能力的下降程度是不同的,如图 5 和图 6 所示,对于不同阶的泽尼克像差以及任意的组合像差,斯特列尔比的变化曲线是有差别的,甚至趋势都有所不同,在有些像差中,某一方向的平移量会比相同的另一方向的平移量对系统校正能力的影响要大,这是由于像差本身的性质以及变形镜的布局  $x$  和  $y$  方向并不对称所引起的。这说明失调对于系统的影响还与具体系统校正的像差的类型有关,不同像差的影响曲线的变化是有区别的。

旋转失调的曲线变化较为缓慢,且有一定的起伏,这是由于旋转失调过程中,变形镜的各驱动器的位置变化了,但都基本处于哈特曼传感器的有效探测范围内,不会偏离有效探测范围很远,虽然对于大多数的像差类型对应关系不是最优,但通过重新测定斜率响应矩阵,校正过程中得到的变形镜的各驱动器控制电压的控制趋势还是基本正确的,只是校正效果不是最优结果而已。在图 5(c)中对于少数

像差,校正效果曲线随着旋转失调的增大,而略有变好的趋势,说明我们所谓的哈特曼微透镜阵列与变形镜驱动器的最优匹配布局并不是对于每一种像差都成立的,最优布局是在考虑主要像差类型或大多数像差类型的校正效果而选定的。

在平移或旋转量较小的时候,无论是  $x$  还是  $y$  方向斯特列尔比下降都是比较缓慢的,而当误差量变大时, $x$  和  $y$  两条曲线的趋势发生不同变化,因此在一定程度上,对于变形镜和哈特曼传感器两个独立的器件的对准精度系统是有容差的。从图形上看基本平移量小于  $0.2d$  旋转量小于  $5^\circ$  时,可以忽略其影响,认为系统运行良好,这样将实际应用时系统的调整和对准难度降低,所以系统功能的实现并不要求高精度对准,但功能实现的优化,即校正效果达到系统设计的最优,就需要对对准精度提出高要求才可实现。

## 2.2 共光路/共模块自适应光学系统

在共光路/共模块自适应光学系统中,由于有两

套哈特曼波前传感器和一套波前校正器,那么三者的对准精度对系统的性能的影响与常规系统不同,而且与两套哈特曼波前传感器数据采用何种数据融合处理方式<sup>[4]</sup>也有联系,这些融合方式包括直接斜率融合法、加修正因子斜率融合法和电压融合法。哈特曼波前传感器与变形镜的对准误差同样也分为平移和旋转两种对准误差。对三者的对准精度要求会因为数据融合的方式的不同而不同。

对于电压融合法中,对两台哈特曼分别进行斜率响应矩阵的测定,波前复原算法也是分别实施,因此变形镜和某一哈特曼的对准误差只会影响对相应像差源的校正,并且所带来的校正能力的下降规律和常规自适应光学系统中的规律是完全一致的。

对于加修正因子斜率融合法我们曾经证明其和电压融合法的等价性,因此变形镜和哈特曼的对准误差也和常规自适应光学系统中的规律是完全一致的。

在直接斜率融合法中,由于是在斜率层次作融合,且系统斜率响应矩阵是取某一哈特曼和变形镜的实测矩阵,因此理论上要求两个哈特曼与变形镜

的对应关系要一致,三者的对准精度对两个像差源的校正都是有影响的,同样的失调对共光路/共模块的影响会和常规自适应光学系统有所不同,我们需要对其对准误差重新进行分析。

共光路/共模块系统的直接斜率数据融合法中,测定了斜率响应函数的哈特曼波前传感器相应的像差源,校正效果应与在常规自适应光学系统中相同,而另一哈特曼波前传感器相应的像差源的校正效果则是我们需要分析的。由于所用斜率响应函数并不能代表该哈特曼波前传感器与变形镜的对应关系,所以不同失调情况下校正效果会与在常规自适应光学系统中有很大不同。模拟中我们假设情况:

1) 测定斜率响应函数的哈特曼传感器与变形镜失调,而另一哈特曼传感器精确对准

与分析常规自适应光学系统相同,我们针对不同阶的泽尼克多项式的像差,逐一计算了当有  $x$  或  $y$  方向不同平移量以及有旋转误差时,系统的闭环效果,如图 7 所示。我们同样利用随机产生的 5 组不同的组合像差,并计算了相应的结果,如图 8 所示。

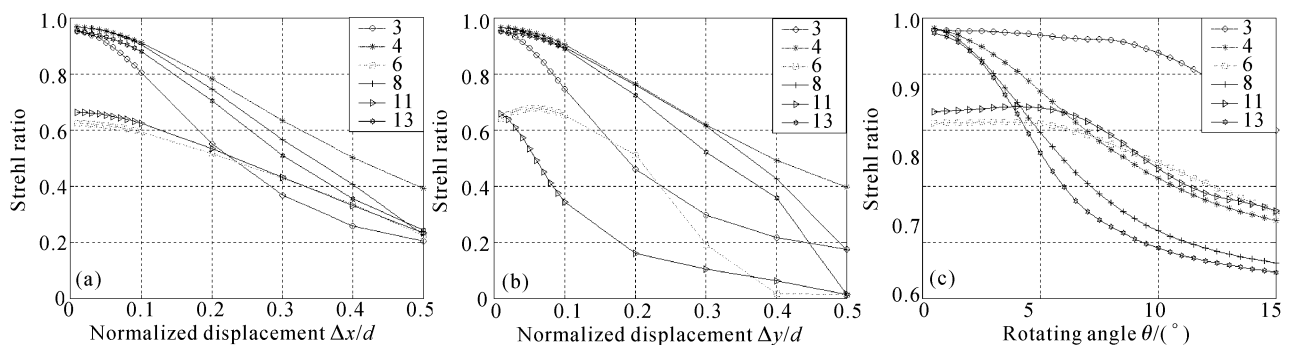


Fig. 7 The Strehl ratio of Common Path/Common Mode adaptive optics system correcting Zernike aberrations of 3rd, 4th, 6th, 8th, 11st and 13rd order, respectively, when the calibrated Hartmann-Shack wavefront sensor and deformable mirror have adjusting error. (a) Displacement at  $x$  direction; (b) Displacement at  $y$  direction; (c) Rotation error

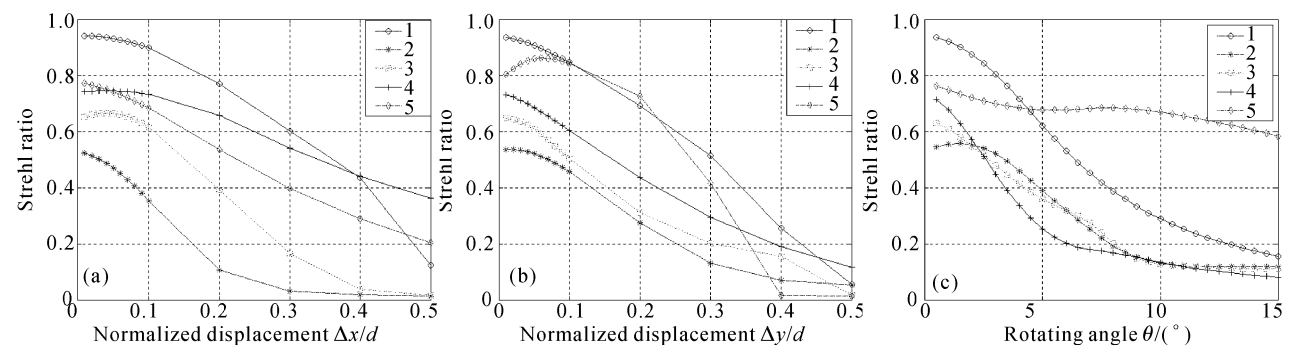


Fig. 8 The Strehl ratio of Common Path/Common Mode adaptive optics system correcting five different random aberrations, respectively, when the calibrated Hartmann-Shack wavefront sensor and deformable mirror have adjusting error. (a) Displacement at  $x$  direction; (b) Displacement at  $y$  direction; (c) Rotation error

2) 测定斜率响应函数的哈特曼传感器与变形镜精确对准, 而另一哈特曼传感器失调。

同样我们针对不同阶的泽尼克多项式的像差, 逐一计算了当有  $x$  或  $y$  方向不同平移量以及有旋

转误差时, 系统的闭环效果, 如图 9 所示。为了结论的普适性, 我们利用随机产生的 5 组不同的组合像差, 并计算了相应的结果, 如图 10 所示。

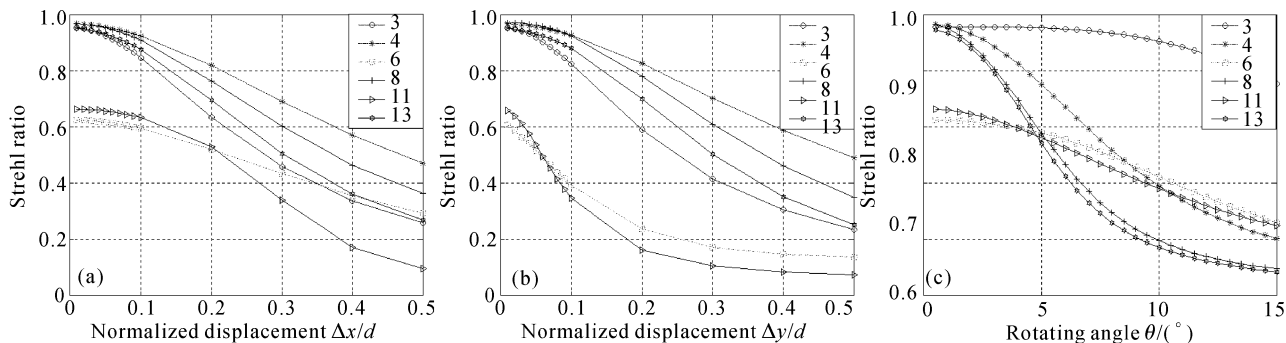


Fig. 9 The Strehl ratio of Common Path/Common Mode adaptive optics system correcting Zernike aberration of 3rd, 4th, 6th, 8th, 11st and 13rd order, respectively, when the non-calibrated Hartmann-Shack wavefront sensor and deformable mirror have adjusting error. (a) Displacement at  $x$  direction; (b) Displacement at  $y$  direction; (c) Rotation error

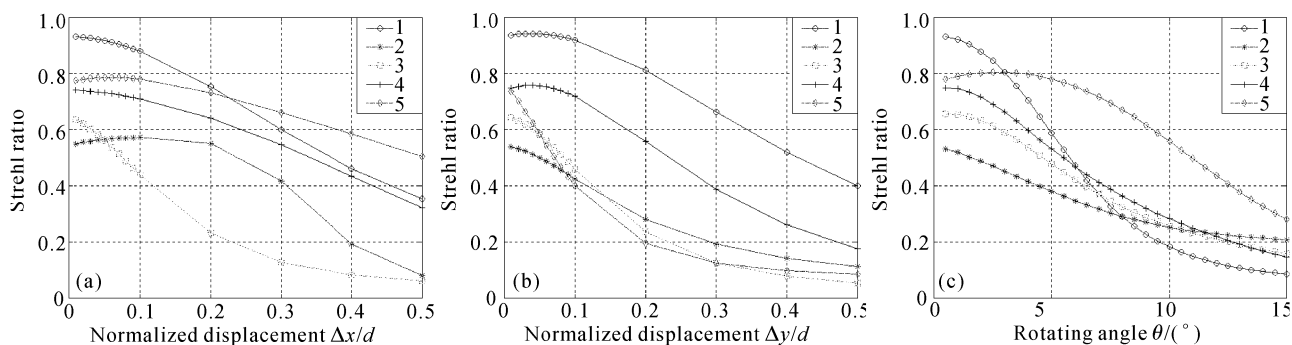


Fig. 10 The Strehl ratio of Common Path/Common Mode adaptive optics system correcting five different random aberrations, respectively, when the non-calibrated Hartmann-Shack wavefront sensor and deformable mirror have adjusting error. (a) Displacement at  $x$  direction; (b) Displacement at  $y$  direction; (c) Rotation error

共光路/共模块系统的直接斜率数据融合法中, 测定了斜率响应函数的哈特曼波前传感器相应的像差源, 校正效果与常规自适应光学系统相同, 而另一哈特曼波前传感器相应的像差源的校正效果如图 7~图 10 所示, 两种情况下相应的像差类型与大小和图 5 和图 6 一致, 可见此时无论是平移还是旋转对于采用直接斜率法的共光路/共模块系统校正能力的影响都是大于在常规自适应光学系统中的, 曲线的下降速度明显快于常规自适应光学系统的结果, 尤其是当失调量较小时, 图中 5 和图 6 有一非常缓慢的变化过程, 而图 7~图 10 中下降过程变得陡直, 缓变过程非常短暂, 这就意味着采用直接斜率融合的共光路/共模块系统对两台哈特曼与变形镜的对准精度要求是很高的, 小的失调都有可能带来系统校正效果的大幅下降。

**结论** 共光路/共模块系统中, 加修正因子斜率融合法和电压融合法对两台哈特曼与变形镜的对准精度没有特殊的要求, 各自失调影响独立, 要求与常规自适应光学系统一致, 例在 61 单元系统中只要两台哈特曼与变形镜的相对位置各自相对平移量小于  $0.2d$ , 旋转量小于  $5^\circ$  时, 可以忽略其影响, 认为系统运行良好; 而在直接斜率融合法中不仅对哈特曼与变形镜的对准精度有要求, 而且对两台哈特曼的对准一致性也有非常高的要求, 例在 61 单元系统中, 调整精度要提高到两台哈特曼的相对差别平移量小于  $0.05d$ , 旋转失调量小于  $1^\circ$ 。

因此, 从调整的容差考虑, 共光路/共模块系统采用加修正因子斜率融合法、电压融合法和波面融合法会给光路调整留下相当大的容差而便于实际操作。

## 参 考 文 献

- 1 Billman K W. Airborne laser system common path/common mode design approach. *Proc. SPIE*, 1999, **3706**: 196~203
- 2 Hou Jing, Jiang Wenhan, Ling Ning. The pseudo phase conjugate fidelity analysis of retroreflector array. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 2001, **13**(3):287~290 (in Chinese)
- 3 Hou Jing, Jiang Wenhan, Ling Ning. Pseudo phase conjugator in adaptive optics. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(11):1326~1330 (in Chinese)
- 4 Li Xinyang. *Optimization of Model Reconstruction Algorithm and Control Algorithm in Adaptive Optics System* (自适应光学系统模式复原算法和控制算法的优化研究) [Ph. D. dissertation]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2000, 34~35 (in Chinese)
- 5 Zhou Renzhong. *Adaptive Optics* (自适应光学). Beijing: Defense Industry Press, 1996

## The Misalignment Errors of Hartmann-Shack Wavefront Sensors and Deformable Mirror in the Two Kinds of Adaptive Optics Systems

Hou Jing<sup>1,2</sup> Jiang Wenhan<sup>1</sup> Ling Ning<sup>1</sup>

( <sup>1</sup> Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209 )  
 ( <sup>2</sup> Science Institute, National University of Defense Technology, Changsha 410073 )

(Received 13 May 2002; revised 31 October 2002)

**Abstract:** The misalignment errors of Hartmann-Shack (H-S) wavefront sensor and deformable mirror in adaptive optics system and Common Path/Common Mode adaptive optics system are studied, by using the directly wavefront slope method and the voltage-surface characteristic of deformable mirror. In the adaptive optics system, re-measurement of the deformable mirror's response functions would decrease the effects of adjustment error and the system has large tolerance; while in the Common Path/Common Mode adaptive optics system, adjustment errors would have different effects on the compensation performance of the system, because different data fusion method is used. Modified slope fusion method and voltage fusion method have taken the difference of the matching relationships of two H-S sensors and deformable mirror into consideration, so the effects of adjustment errors are the same with those of the normal adaptive optics system. The systems have large tolerance too. Higher precision of adjustment is required when the directly slope fusion method is used because it is base on the assumption that the relationships of two H-S sensors and deformable mirror are completely identical. The numerical results are given in the course of analyzing.

**Key words:** adaptive optics; misalignments error; numerical calculation; Common Path/Common Mode; Hartman-Shack wavefront sensor; deformable mirror