

文章编号: 0258-7025(2010)04-0954-05

基于线性相位反演技术的自适应光学动态 像差校正闭环实验研究

李敏^{1,2,3} 陈波^{1,2,3} 李新阳^{1,2} 姜文汉^{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 100049)

摘要 为了研究线性相位反演(LPR)技术在自适应光学系统中的应用,在实验室搭建了一套基于该技术的自适应光学闭环实验系统,利用 19 单元变形镜对动态像差进行了实时闭环实验。实验对由变形镜产生的系统像差定标,得到远场定标图像,利用远场实测图像和定标图像之间的光强分布变化量直接复原出变形镜驱动器电压,控制变形镜校正像差。实验数据表明,基于线性相位反演技术的自适应光学系统可以对一定大小的动态像差进行实时闭环校正,并有较好的校正效果,论证了这种系统的可行性。这种系统硬件结构简单,算法运算量很少,速度很快。

关键词 自适应光学;线性相位反演;闭环;动态像差

中图分类号 TP273 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103704.0954

Close-Loop Experiment of an Adaptive Optics System on the Dynamic Aberrations Based on Linear Phase Retrieval Technique

Li Min^{1,2,3} Chen Bo^{1,2,3} Li Xinyang^{1,2} Jiang Wenhan^{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 100049, China)

Abstract In order to investigate the application of linear phase retrieval sensor in the adaptive optics system, an experiment adaptive optics system was established based on the linear phase retrieval method. The close-loop compensation ability to the dynamic aberrations was investigated and validated by using a 19-element deformable mirror. During the experiment, it was needed to calibrate the system aberration produced by the deformable mirror first and keep its image. And then the voltage of drivers can be retrieved by utilizing the different images between the actual image and calibrated image. Finally, the unknown aberration can be corrected by controlling the deformable mirror. The results indicated that the system can correct certain size aberrations, and it had a fine compensation effect. The adaptive optics system based on the linear phase retrieval method is excellent with simple structure, low calculation cost and high speed.

Key words adaptive optics; linear phase retrieval; close-loop; dynamic aberration

1 引言

自适应光学系统^[1,2]通常用高速倾斜反射镜校正波前整体倾斜像差,用变形反射镜校正其余的高阶像差。其中倾斜镜的信号测量和控制比较简单。目前自适应光学系统通常采用哈特曼型波前传感器^[3],用波前复原算法从哈特曼子孔径斜率信号计算出变形镜各个驱动器控制电压。哈特曼传感器的波前复原可以用线性矩阵运算的快速算法完成,实

时性好,技术比较成熟。但哈特曼传感器这种子孔径分割型的波前传感器存在一个致命弱点,即光能利用率较低。

李新阳等^[4,5]提出了一种线性相位反演(LPR)算法,该算法只需记录 1 帧当前焦平面上的远场强度分布信息,就可以用矩阵运算快速反演出波前相位。在此基础上提出的线性相位反演传感器^[6~8],没有子孔径分割,可以利用全孔径上的入射光能量。

收稿日期: 2009-04-17; 收到修改稿日期: 2009-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(60408005)资助课题。

作者简介: 李敏(1981—),女,博士研究生,主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: limin_alanna@163.com

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

而且这种波前反演算法是近似线性的,可以实现快速实时计算,便于在自适应光学闭环系统上应用。利用这种线性相位反演传感器,与变形反射镜配合,可构成一个自适应光学闭环系统^[9]。本文对这种基于线性相位反演技术的自适应光学系统进行了动态像差闭环实验研究,分析其校正能力和性能等。

2 基于线性相位反演技术的自适应光学闭环原理

基于线性相位反演技术的自适应光学的闭环原理是实时测量一幅焦平面图像,根据焦平面上光强分布的变化量与变形镜的各个驱动器控制电压变化量之间的近似线性关系,计算出变形镜驱动器电压。

根据文献^[9],可以得到成像系统远场光强分布的变化量 ΔI 与施加到变形镜驱动器上的电压变化量 Δv 向量之间的近似线性关系

$$\Delta I = R \cdot \Delta v, \quad (1)$$

式中矩阵 R 称为电压传递矩阵,可以在实际系统中测量得到。那么就可以利用关系式从远场光强的变化量 ΔI 反演出变形镜驱动器上的电压变化量 Δv

$$\Delta v = R^+ \cdot \Delta I, \quad (2)$$

式中 R^+ 是利用奇异值分解法(SVD)得到的矩阵 R 的广义逆矩阵。

实验系统采用经典的比例积分控制算法,计算式为

$$v(t) = v(t-1) + k \cdot \Delta v(t), \quad (3)$$

式中 $v(t)$ 表示当前的校正电压, $v(t-1)$ 表示上一次迭代的校正电压, k 为可调的控制器增益系数, $\Delta v(t)$ 表示根据当前畸变远场图像经过 LPR 算法得到的电压误差量。

3 闭环实验系统

实验构建的自适应光学闭环系统^[10,11]采用 19 单元变形镜,通光口径为 70 mm,具体实验系统示意图和实物图分别如图 1,2(线条代表光路)所示。

表 1 闭环实验装置参数

Table 1 Parameters of close-loop experiment devices

Experiment device	Parameters
Source	532 nm laser
DM	19-element DM, effective calibre is 70 mm, the arrange of driver is hexagon and the space between the drivers is 16.4 mm. It is shown in Fig. 3
Linear phase retrieval sensor	the frequency of Dalsa CCD is 2900 fram/s, prime number is 64×64 , target size is $1.0 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$
D/A card	PCI-6216V

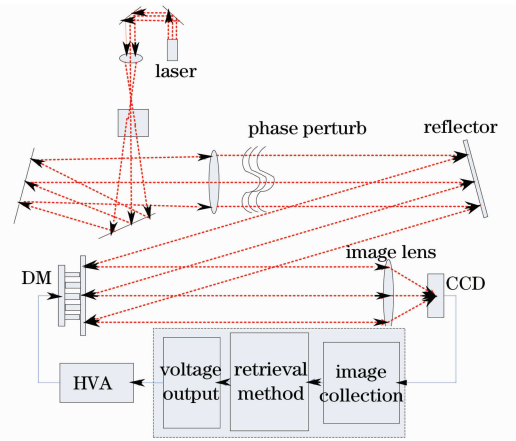


图 1 闭环实验系统示意图

Fig. 1 Closed loop experiment system

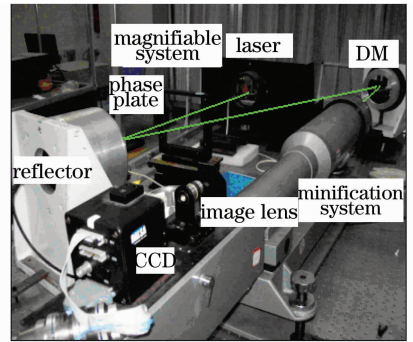


图 2 闭环实验系统实物图

Fig. 2 Photograph of the experiment system

系统主要由半导体激光器及扩束系统,变形镜(DM),缩束系统,成像透镜,CCD 探测器,PC 机和高压放大器组成。光源从激光器发出,经扩束系统扩束为 $\phi 70 \text{ mm}$ 平行光,通过反射镜和变形镜反射后,经缩束系统和成像透镜至 CCD 成像。CCD 相机探测到的光强信号,经过图像采集卡采集到 PC 机内,根据 LPR 算法和控制算法计算出复原电压,电压信号由一个多通道的 PCI 总线 D/A 卡并行输出,经过高压放大驱动变形镜校正像差。像差板放置在 $\phi 70 \text{ mm}$ 的平行光束中。

19 单元变形镜的驱动器位置排布如图 3 所示。闭环实验的具体参数如表 1 所示。

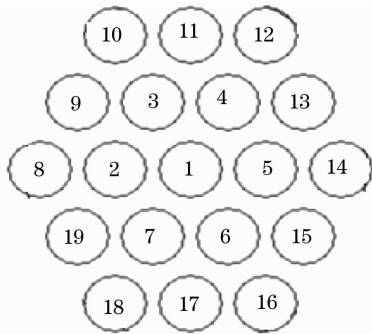


图 3 19 单元变形镜的驱动器位置排布

Fig. 3 Actuator arrangement of the 19-element DM

4 闭环实验算法实现流程

基于线性相位反演技术的 19 单元自适应光学闭环控制流程如下:

1) 初始化图像采集卡和 D/A 卡参数,调整整个光学系统的状态,使其能得到接近衍射极限的成像质量,记录下此时的图像,并计算其 Strehl 比;

2) 根据 CCD 相机靶面大小,由变形镜施加一个固定电压 V_0 ,产生一个合适的离焦像差作为系统像差,并采集 1 帧系统像差基准图像 I_0 ;

3) 保持系统像差的大小和光强不变,通过给变形镜每个驱动器施加小电压,并测量远场光强分布,得到变形镜各个驱动器电压与像面上光强分布的响应矩阵 R ;完成传感器定标和传函定标过程;

4) 开始动态校正迭代过程。首先保持产生系统像差的电压 V_0 不变,采集存在待校正像差时发生变化的远场光强图像,记录为光强分布 I_1 ,并计算远场光强的变化量 $\Delta I = I_1 - I_0$;

5) 去掉系统像差电压 V_0 ,测量并计算此时的远场光斑 Strehl 比。为保持实时闭环速度,每 30 帧记录下一幅远场光斑图像数据;如果变形镜控制回路闭环,测量的就是残差的远场光斑图像的 Strehl 比;如果变形镜控制回路未闭环,测量的就是开环 Strehl 比;

6) 利用(2),(3)式的控制算法求出相应的补偿电压 $v(t)$,将 $v(t)$ 加到变形镜上进行校正像差,完成一次迭代;

7) 当迭代一定次数之后,闭环控制结束。

5 结果与分析

19 单元自适应光学系统中,由于系统像差是对变形镜加特定电压产生的,因此可以方便地利用线性相位反演传感器测量到波前像差的图像,直接通过光斑的远场图像的性能指标,包括 Strehl 比、半峰全宽(FWHM)等,对像差大小和闭环校正能力进行评价。

系统控制由 VC 实现,由于 PC 机的速度限制,采样频率约为 500 frame/s。同时为了消除实际实验中的光斑对准误差和背景噪声的影响,在完成(2)式的实时线性相位反演复原计算过程中将远场光斑图像靶面从 64×64 合并到 16×16 。实验测得 19 单元变形镜的电压响应矩阵的条件数为 20.05,误差传递系数为 0.0036。

无外加像差时得到成像系统的衍射极限光斑如图 4 所示^[12,13]。光斑的半峰全宽为 1.29 倍衍射极限 ($\lambda f/d$),峰值 Strehl 比为 0.416。ADU 表示 AD 变换后的计数,U(unit)是一个量化电平单位。

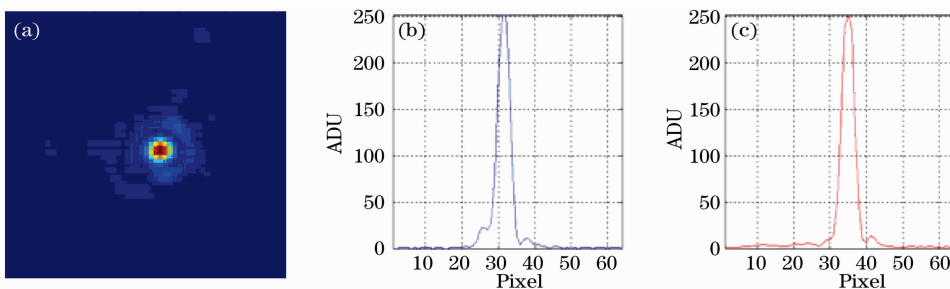


图 4 系统衍射极限光斑和峰值截面

Fig. 4 Diffraction limit facula of imaging system and section of peak value

实验的系统像差由对变形镜施加电压生成离焦像差而产生。用热源产生动态扰动,由像差板产生静态像差。在同时存在静态像差和动态像差的情况下,进行实时闭环实验。

在同样状态下,系统开环和闭环各迭代进行了

1500 帧,随机采集了 50 帧开环远场光斑和 50 帧闭环远场光斑。图 5 分别分析了 50 帧开环和闭环图像的性能指标,其中图 5(a)为开环的 50 帧图像的半峰全宽,其平均值为 1.9 倍衍射极限;图 5(a2)为开环的 50 帧图像的 Strehl 比,其平均值为 0.1,相

对于系统标定的衍射极限的峰值 Strehl 比为 0.24。图 5(b1)为闭环的 50 帧图像的半峰全宽,其平均值为 1.14 倍衍射极限;图 5(b2)为闭环的 50 帧图像的 Strehl 比,其平均值为 0.26,相对于系统标定的衍射极限的峰值 Strehl 比为 0.625。

图 6 为 50 帧图像的长曝光图像,其中图 6(a)为开环长曝光图像,图 6(b)为闭环长曝光图像。开

环时长曝光光斑的半峰全宽为 2.1 倍衍射极限,峰值 Strehl 比为 0.08,相对于系统标定的衍射极限的峰值 Strehl 比为 0.19;闭环后长曝光光斑的半峰全宽为 1.3 倍衍射极限,峰值 Strehl 比为 0.18,相对于系统标定的衍射极限的峰值 Strehl 比为 0.43。

图 7 为动态像差的闭环控制过程。曲线反映的是光斑峰值亮度的变化。

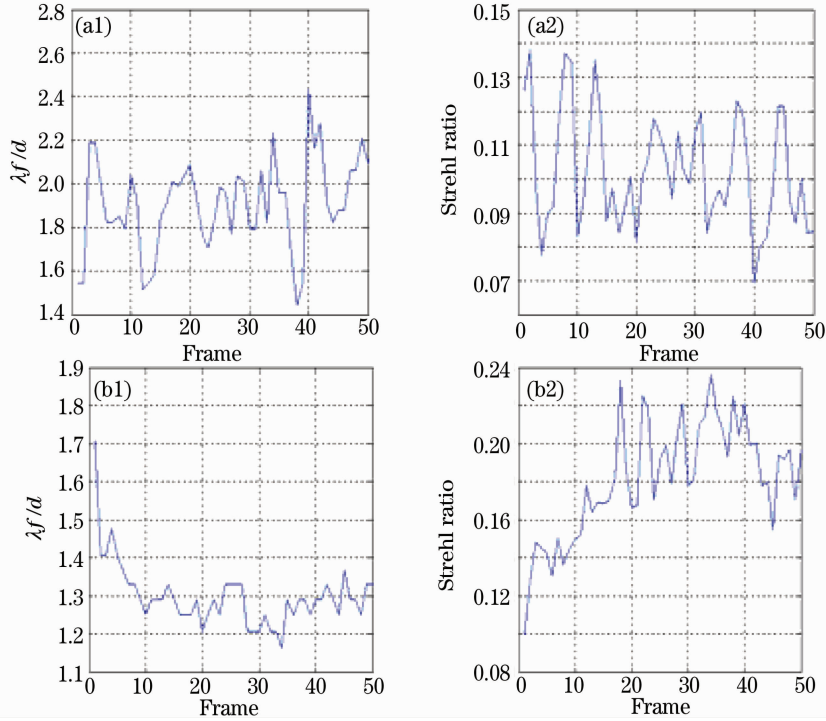


图 5 动态像差开环(a)和闭环(b)远场光斑的性能指标分析

Fig. 5 Performance analysis of the far-field facula of dynamic aberration in the state of open-loop (a) and close-loop (b)

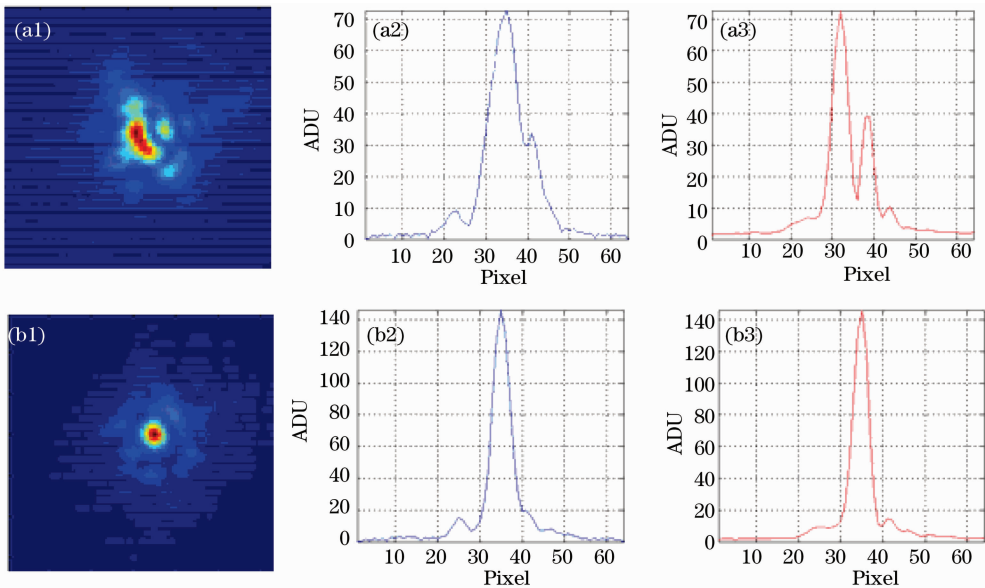


图 6 50 帧动态像差开环(a)和闭环(b)的长曝光远场光斑

Fig. 6 Long exposal far-field facula of 50-frame dynamic aberration in the state of open-loop (a) and close-loop (b)

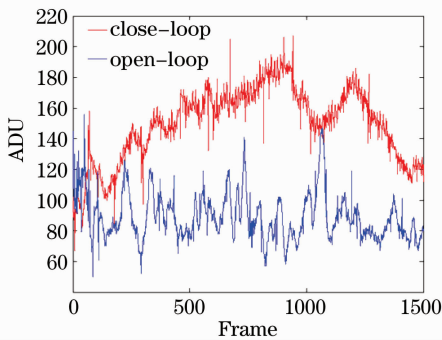


图 7 1500 帧动态像差闭环控制过程

Fig. 7 Close-loop controlling process to 1500-frame dynamic aberration

6 结 论

根据线性相位反演技术,建立了一套基于该技术的自适应光学闭环实验系统。通过对实际动态像差进行实时闭环控制,说明了基于线性相位反演技术的自适应光学系统可以对一定大小的动态像差进行闭环校正,论证了这种系统的可行性。基于线性相位反演技术的自适应光学系统硬件结构简单,算法运算量很少,速度很快,有很好的应用前景。

由于实验条件限制和时间较仓促,仅对动态像差情况进行了初步的闭环实验研究。实验中还存在一些问题,需要对电压传递矩阵 R 的测量误差、噪声对系统的稳定性和校正精度的影响以及性能指标函数的选择等进行更深入的研究,继续开展动态像差的闭环校正实验,对线性相位反演算法在自适应光学中的应用做进一步的研究。

参 考 文 献

- 1 R. K. Tyson. Principles of Adaptive Optics [M]. USA: Academic Press, 1991
- 2 Zhou Renzhong. Adaptive Optics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996
周仁忠. 自适应光学[M]. 北京:国防工业出版社, 1996
- 3 M. A. V. Dam, R. G. Lane. Effect of aperture subdivision on wavefront sensing[C]. SPIE, 2000, **4125**: 53~64

- 4 Li Xinyang, Li Min. Preliminary analysis on principle and performance of a linear phase-retrieval wave front measuring method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1211~1216
李新阳, 李 敏. 一种线性相位反演波前测量方法的原理和性能初步分析[J]. 光学学报, 2007, **27**(7): 1211~1216
- 5 Min Li, Xinyang Li, Wenhan Jiang. Small-phase retrieval with a single far-field image [J]. *Opt. Express*, 2008, **16** (11): 8190~8197
- 6 Li Min, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Experimental research on a new method of linear phase retrieval wavefront measurement[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(4): 611~615
李 敏, 李新阳, 姜文汉. 一种线性相位反演波前测量方法的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(4): 611~615
- 7 Li Min, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Numerical simulation on a kind of linear phase retrieval wavefront measuring method[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19** (7): 1107~1111
李 敏, 李新阳, 姜文汉. 对一种线性相位反演波前测量方法的数值仿真[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(7): 1107~1111
- 8 Li Min, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Experimental comparison between linear phase retrieval sensor and Hartman wavefront sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 619~625
李 敏, 李新阳, 姜文汉. 线性相位反演传感器与哈特曼传感器的实验研究对比[J]. 光学学报, 2008, **28**(4): 619~625
- 9 Chen Bo, Li Min, Li Xinyang *et al.*. Close-loop experiment of an adaptive optics system based on linear phase retrieval technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1633~1637
陈 波, 李 敏, 李新阳等. 基于线性相位反演技术的自适应光学闭环实验研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(9): 1633~1637
- 10 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, 王春鸿, 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
- 11 Li Xinyang, Jiang Wenhan. Analysis of the optimal-gradient reconstruction algorithm used in adaptive optical systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 756~760
李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统的最优斜率复原算法[J]. 光学学报, 2003, **23**(6): 756~760
- 12 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
- 13 Ye Hongwei, Li Xinyang, Xian Hao *et al.*. Relationship between the beam excursion error and the beam quality β factor 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