

DOI: 10.13382/j.jemi.2016.02.004

自适应光学波前处理器的软件测试研究*

王亮^{1,2} 陈涛¹ 贾建禄¹ 林旭东¹ 曹景太^{1,3} 刘欣悦¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033; 2. 中国科学院大学 北京 100049;
3. 吉林大学通信工程学院 长春 130012)

摘要: 自适应光学系统中,由于中间计算结果不易监测,对基于FPGA的波前处理器进行硬件调试比较困难。为了方便硬件调试,也避免硬件调试中的不当输出对精密的波前校正器带来损害,提出了波前处理器的主控计算机软件测试方法。首先,对波前处理器的功能、组成和 workflow 进行了分析,确定了波前处理器的软件测试步骤。然后,采用判断波前处理器回复数据的方法设计了波前处理器的工作模式测试和系统参数测试;采用比较软件模拟计算值和波前处理器上传值的方法分别设计了波前处理器波前斜率计算测试、波前重构测试和波前控制测试。最后,将本文提出的方法用于97单元自适应光学波前处理器的测试,结果表明,波前处理器的硬件调试效率得到较大提高。经过软件测试后的波前处理器在自适应光学实验系统中正常工作,连续校正后系统的残余波前像差的RMS和PV分别为0.034波长和0.392波长。

关键词: 自适应光学; 波前校正; 波前控制; 波前处理器; 软件测试

中图分类号: TN911.74; TH743 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.5015

Software testing research on wavefront processor of adaptive optics

Wang Liang^{1,2} Chen Tao¹ Jia Jianlu¹ Lin Xudong¹ Cao Jingtai^{1,3} Liu Xinyue¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: In an adaptive optics (AO) system, FPGA-based wavefront processor (WFP) suffers from difficulty of hardware debugging, as a result of the inaccessibility of intermediate results. In order to facilitate hardware debugging of WFP, also to avoid unnecessary damages to the precise wavefront corrector caused by incorrect output of WFP during hardware debugging, a method of software test of WFP is proposed and implemented. First, the analysis on the function, composition and working flow of WFP is carried out, and accordingly, the steps of software test are determined. Then, tests of working modes and systematic parameters of WFP are designed by means of comparing the returning data from WFP with the sending data. Further tests of wavefront gradients computation, wavefront reconstruction and wavefront control are developed by comparing the values simulated, by the software with those uploaded and by WFP. Finally, this method is adopted in tests of a 97-element WFP, and it is shown that the efficiency of hardware debugging is improved considerably. The WFP which passes the above tests works well, and root of mean square (RMS) and peak to valley (PV) of the residual aberrations of the experimental adaptive optics system is 0.034 wavelengths and 0.392 wavelengths, respectively, after continuous correction, which proves the effectiveness of this method.

Keywords: adaptive optics; wavefront correction; wavefront control; wavefront processor; software testing

收稿日期: 2015-10 Received Date: 2015-10

* 基金项目: 国家“863”计划(2014AAXX1003X)资助项目

1 引言

自适应光学(adaptive optics ,AO) 是一种实时校正波前畸变的技术^[1]。自适应光学系统早期主要用于空间目标成像和激光束整形,近年来,自适应光学系统也开始应用于太阳观测^[2]、激光通信^[3-4]、人眼视网膜成像^[5]、激光惯性约束核聚变^[6]等领域。自适应光学系统通常包含 3 个主要部分:波前探测器、波前处理器和波前校正器^[7]。波前探测器实时探测波前畸变,常用 Shack-Hartmann(SH) 传感器作为波前探测器。波前处理器对波前探测器的图像进行处理得到波前斜率数据,从而计算波前校正器的校正量。波前校正器根据波前处理器输出的校正量对波前畸变进行实时校正,常用的波前校正器包括变形镜^[8]和液晶校正器^[9]等。

波前处理器对波前斜率计算和校正电压计算的硬件加速对于提高自适应光学系统的闭环带宽具有重要意义。在波前探测器帧频一定的条件下,计算波前校正器的校正量带来的时延直接影响自适应光学系统的闭环带宽^[10]。为了提高波前处理的实时性,自适应光学系统中常常采用软硬件协同形式的波前处理器。常见的波前处理器架构有 GPU 架构、FPGA 架构和 FPGA + DSP 架构。例如:李大禹等人^[11]采用 GPU 架构设计了适用于液晶自适应光学的波前处理器;费玮玮等人^[12]采用 FPGA + DSP 架构研制了太阳观测自适应光学波前处理器。杨海峰等人^[13]研究了 FPGA + DSP 架构的波前处理器的同步开关噪声抑制方法,设计了用于图像数据快速传输的 FPGA 模块^[14]。

2010 年以来,本课题组采用 FPGA 架构开展了波前处理器的研究工作,先后研制了 97 单元、137 单元和 961 单元波前处理器^[15],优化了波前处理器的算法^[16],设计了波前处理器的故障诊断系统^[17]。由于 FPGA 系统存在不易获取中间过程计算结果的问题,波前处理器的调试和硬件测试并不方便。而且,由于波前处理器的输出为精密的波前校正器,调试中出现的错误输出有可能对波前校正器造成损害。为了方便波前处理器的调试和硬件测试,针对文献 [15-18] 中研制的波前处理器,提出了一种波前处理器软件测试的方法。

2 波前处理器的工作原理

2.1 波前处理器的功能

典型的自适应光学系统原理框图如图 1 所示。其中,倾斜镜(tip-tilt mirror , TM) 和变形镜(deformable mirror , DM) 协同实现波前校正的功能。倾斜镜校正波前像差中低阶部分,即倾斜分量;变形镜校正波前像差中去除倾斜分量后的高阶分量。波前处理器根据波前探测器的输出图像计算倾斜分量和高阶分量,分别控制倾斜镜和变形镜。

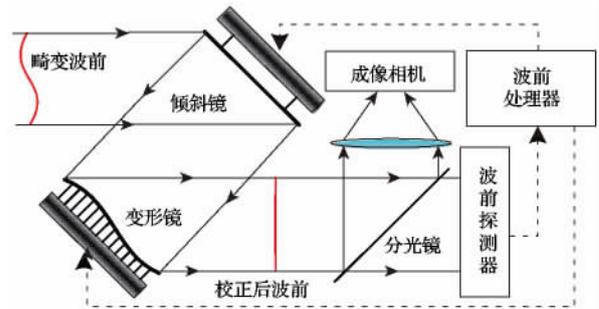


图 1 典型自适应光学系统
Fig. 1 Block diagram of typical AO system

2.2 波前处理器的组成

文献 [15-18] 中研制的波前处理器由主控计算机、一块波前处理主板、一块波前处理子板组成。可以根据自适应光学系统的规模(单元数)对波前处理器进行扩展,安装多块波前处理子板。主控计算机运行上位机软件,实现波前探测器相机控制、自适应光学系统标定、波前处理器的工作状态设置与参数设置、数据加载与存储等功能。本文在上位机软件中进一步实现波前处理器的软件测试。波前处理主板实现波前探测器图像采集、图像预处理、波前斜率计算的功能。波前处理子板实现倾斜镜和变形镜校正量计算、D/A 输出的功能。波前处理器组成如图 2 所示。

2.3 波前处理器的工作流程分析

波前处理器的工作流程如图 3 所示,主要包括以下步骤。

1) 斜率计算:波前处理器从波前探测相机读取图像数据并进行减背景、阈值等预处理,先计算

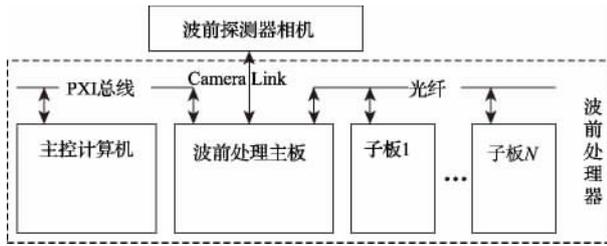


图 2 波前处理器组成

Fig. 2 Block diagram of wavefront processor



图 3 波前处理器工作流程

Fig. 3 Working process of wavefront processor

SH 子孔径质心坐标 r_s ，再按照式 (1) 计算 SH 子孔径质心偏移量 d ，即斜率数据。

$$d = r_s - r_{ref} \quad (1)$$

式中: r_{ref} 为 SH 子孔径参考点坐标向量。

2) 波前重构: 按照式 (2) 和式 (3) 计算 TM 和 DM 促动器的电压校正量 e_i 和 e_d 。

$$e_i = C_i d_i \quad (2)$$

$$e_d = C_d d_d \quad (3)$$

式中: d_i 为 SH 的整体倾斜量, 即各个子孔径的平均质心偏移量, d_d 为质心偏移量 d 去掉子孔径平均偏移量后的剩余偏移量, C_i 和 C_d 分别为采用直接斜率法^[19]获得的 TM 和 DM 标定矩阵。

3) 波前控制: 根据式 (4) 和 (5) 计算 k 次校正时 TM 和 DM 的输出电压 $v_i(k)$ 和 $v_d(k)$ ，这里采用了比例积分控制方法 (proportional-integral, PI)。

$$v_i(k) = v_i(k-1) + (a_{pi} + a_{it}) e_i(k) - a_{pi} e_i(k-1) \quad (4)$$

$$v_d(k) = v_d(k-1) + (a_{pd} + a_{id}) e_d(k) - a_{pd} e_d(k-1) \quad (5)$$

式中: a_{pi} 、 a_{it} 、 a_{pd} 、 a_{id} 分别为 TM、DM 的比例、积分控制参数。经过 D/A 转换, 上面计算出的输出电压转换为模拟量输出给高压放大器。

根据以上分析, 波前处理器的测试应该至少涵盖以上 3 个步骤的输出, 硬件调试时可以根据输出出错的位置判断硬件中错误的位置, 从而为波前处理器的硬件调试提供方便。

3 波前处理器的工作模式和参数测试

波前处理器的工作模式如表 1 所示, 设置工作模式时, 主控计算机软件向波前处理器发送控制命令。波前处理器的主要系统参数如表 2 所示, 设置系统参数时, 主控计算机软件先向波前处理器发送控制命令, 再发送参数。工作模式和系统参数的正确设置是波前处理器正常工作的前提条件, 为了测试设置情况, 采用判断波前处理器回复数据的方法确认设置成功。工作模式和参数设置的测试界面如图 4 所示。如主控计算机软件当前未设置该工作模式或系统参数, 则界面显示为“未设置”; 如波前处理器返回值与设置值相同, 则界面显示为“已设置”; 不同, 界面显示为“故障”。

表 1 波前处理器的工作模式

Table 1 Working modes of wavefront processor

工作模式	控制命令	适用环境
标定	0x0101	计算机控制 TM 和 DM
TM 校正	0x0102	只有 TM 校正
TM + DM 校正	0x0103	TM 和 DM 同时校正

表 2 波前处理器的主要系统参数

Table 2 Main systematic parameters of a wavefront processor

系统参数	控制命令	含义
r_{ref}	0x0201	SH 各个子孔径参考点坐标
I_T	0x0301	阈值图像矩阵
I_B	0x0302	背景图像矩阵
C_i	0x0401	TM 标定矩阵
C_d	0x0402	DM 标定矩阵
a_{pi}	0x0501	TM 比例增益系数
a_{it}	0x0502	TM 积分增益系数
a_{pd}	0x0503	DM 比例增益系数
a_{id}	0x0504	DM 积分增益系数

4 波前处理器的波前斜率计算测试

波前处理器的波前斜率计算由波前处理主板完成。计算过程包含减背景、阈值处理、质心计算和质心偏移量计算等步骤, 计算步骤多且为并行计算, 调试过程比较复杂。为了方便波前处理器调

系统标定	已设置	tm校正	未设置
tm+dm校正	未设置	sh参考点	已设置
阈值图像	已设置	背景图像	已设置
tm标定矩阵	未设置	dm标定矩阵	未设置
tm比例增益	故障	tm积分增益	故障
dm比例增益	未设置	dm积分增益	未设置

图 4 工作模式和参数设置的测试界面

Fig. 4 User interface for test of configuring working modes and parameters

试,可以使主控计算机模拟波前处理器的波前斜率计算过程,再将计算结果与波前处理主板上上传的波前斜率比较。为了方便比较,使用 Zernike 多项式^[20-21]根据斜率计算结果拟合波前,再将波前显示出来。拟合方法如下:

定义 Zernike 导数矩阵 Z_θ 为:

$$Z_\theta = \begin{pmatrix} \frac{\partial Z_1(x_1, y_1)}{\partial x} & \dots & \frac{\partial Z_M(x_1, y_1)}{\partial x} \\ \frac{\partial Z_1(x_1, y_1)}{\partial y} & \dots & \frac{\partial Z_M(x_1, y_1)}{\partial y} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Z_1(x_m, y_m)}{\partial x} & \dots & \frac{\partial Z_M(x_m, y_m)}{\partial x} \\ \frac{\partial Z_1(x_m, y_m)}{\partial y} & \dots & \frac{\partial Z_M(x_m, y_m)}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中: Z_1, \dots, Z_M 为第 1, \dots, M 项 Zernike 多项式; $(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)$ 为 SH 的第 1, \dots, m 个孔径的中心坐标。则 Zernike 系数向量 α 与波前斜率 d 满足:

$$Z_\theta \alpha = sd \quad (7)$$

式中: s 为 SH 微透镜计算因子,定义为:

$$s = \frac{a\delta}{2f\lambda} \quad (8)$$

式中: a 为 SH 光学口径, δ 为 SH 相机像素大小, f 为微透镜焦距, λ 为 SH 探测时使用的波长。利用奇异值分解计算 Z_θ 的伪逆 Z_θ^\dagger ,并在式(7)两端左乘 Z_θ^\dagger 可得:

$$\alpha = sZ_\theta^\dagger d \quad (9)$$

利用 Zernike 系数 α 可以拟合波前 W :

$$W = \sum_{i=1}^M \alpha_i Z_i \quad (10)$$

由于波前处理子板需要利用波前处理主板计

算出的斜率数据 d 进行波前重构,为了测试斜率数据是否正确传输,也将波前处理子板收到的斜率数据上传并拟合波前,再与主控计算机、主板拟合的波前进行比较。

5 波前处理器的波前重构测试

波前处理器的波前重构计算由波前处理子板完成。为了测试波前重构计算结果,仍然采用主控计算机软件模拟计算,再与波前处理子板上传的波前重构数据进行比对的方法。模拟计算时,整体倾斜量 d_t 和去掉平均质心偏移量后的剩余偏移量 d_d 可由波前斜率测试中主控计算机软件模拟计算出的斜率数据 d 得到。

6 波前处理器的波前控制测试

波前处理器的波前控制计算由波前处理子板完成。波前斜率计算和波前重构都是基于单帧 SH 图像,因此可以利用仿真获得图像或者 SH 相机单帧采集获得图像进行主控计算机和波前处理器的比对测试。波前控制是逐次校正的动态过程,进行主控计算机和波前处理器的动态比对测试比较困难。然而,软件测试的目的只是为了验证波前处理器计算过程的正确性,实际上,只需对波前控制的单次计算结果进行比对即可。因此,利用 SH 相机的单帧采集功能,参考式(4)和(5)设计了单次校正测试,计算公式为:

$$v_i(1) = v_i(0) + a_i e_i(1) - b_i e_i(0) \quad (11)$$

$$v_d(1) = v_d(0) + a_d e_d(1) - b_d e_d(0) \quad (12)$$

式中: a_i, b_i, a_d, b_d 为单次校正的控制参数,可以参考式(4)和(5)的控制参数进行选取。波前控制测试时,可以对自适应光学系统的初始像差逐次进行单次校正,并比对主控计算机软件的模拟结果和波前处理子板上传的计算结果。由于波前控制的测试过程需要向波前校正器输出电压,单次校正测试也尽可能减小了硬件调试过程中的不当输出可能对精密的波前校正器带来的损害。

7 波前处理器的测试实验

为了对本课题组研制的 97 单元波前处理器进行调试,在实验室中搭建了如图 5 所示的自适应光学实验系统。波前处理器由一块波前处理主板和

一块波前处理子板构成。波前校正器采用自研的 97 单元连续表面压电变形镜,波前探测器为自研的 97 单元 SH 传感器。

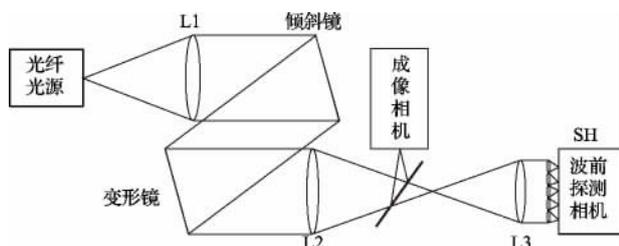


图 5 97 单元自适应光学系统示意

Fig. 5 Schematic diagram of 97-element AO system

在波前处理器的调试过程中,利用本文提出的方法依次进行波前处理器的工作模式和参数测试、波前斜率计算测试、波前重构测试和波前控制测试。测试使用的图像来源于 SH 传感器相机单帧采集获得的图像。图 6 为一组自适应光学实验系统初始像差的波前斜率计算测试结果。图 7 和 8 分别为波前重构计算和波前控制计算的测试结果。自适应光学实验系统中,SH 子孔径数 m 为 97,波前拟合的 Zernike 多项式项数 M 取 35。

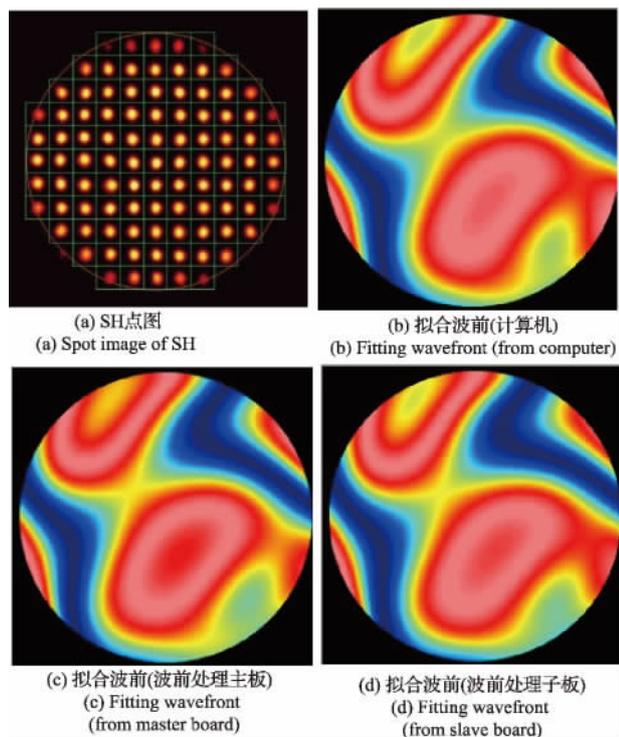


图 6 一组波前斜率计算测试结果

Fig. 6 Testing results for a group of wavefront gradient calculation

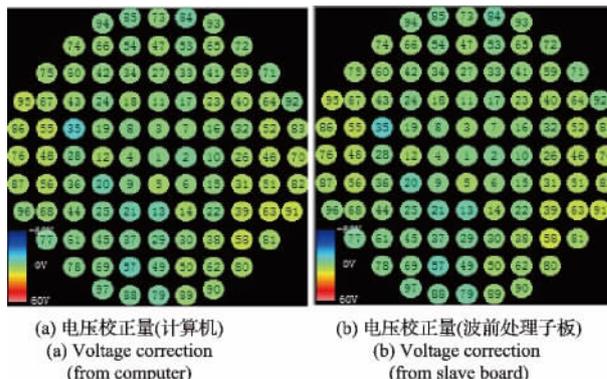


图 7 一组波前重构计算测试结果

Fig. 7 Testing results for a group of wavefront reconstruction calculation

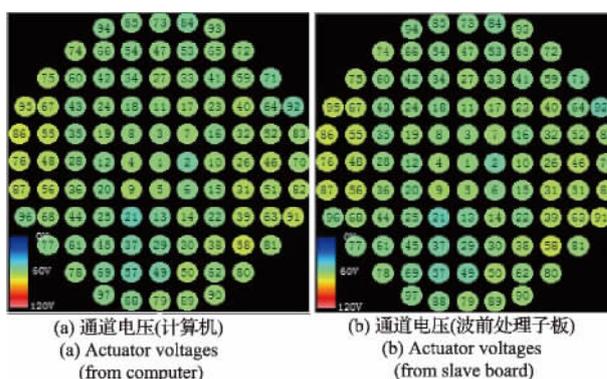


图 8 一组波前控制计算测试结果

Fig. 8 Testing results for a group of wavefront control calculation

为了检验完成测试的波前处理器,使波前处理器对实验系统的初始像差进行连续校正,用 SH 对校正前后的像差进行测量。校正前(如图 6)波前像差的 RMS 为 0.540λ ,PV 为 2.939λ ;校正后(如图 9)波前像差的 RMS 为 0.034λ ,PV 为 0.392λ 。(λ 取 632.8 nm)。

8 结 论

本文提出的波前处理器软件测试方法能够在波前处理器的硬件调试过程中对波前处理器进行测试,为硬件调试提供方便,同时也尽可能减小了硬件调试阶段的不当输出可能对精密波前校正器造成的损害。在本课题组 97 单元波前处理器的硬件调试过程中,利用本文提出的方法逐步进行测试,提高了硬件调试的效率,缩短了硬件调试的时

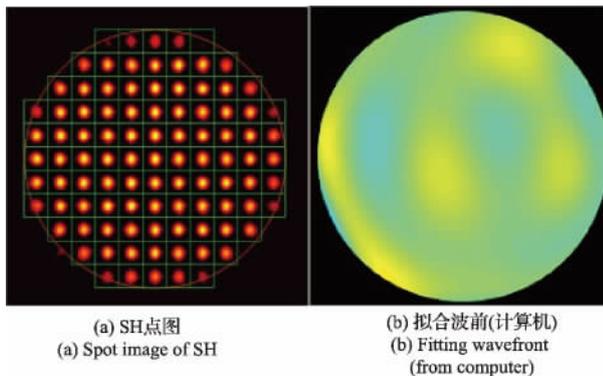


图9 初始像差连续校正结果

Fig. 9 Results of continuous correction to initial aberrations

间。实验表明,通过软件测试的波前处理器可以在自适应光学系统中正常工作,进一步验证了本文提出的方法的有效性。本文提出的方法也可以用于波前处理器故障的诊断,通过各个测试步骤的结果初步定位故障的位置,为波前处理器的故障分析提供辅助手段。

参考文献

- [1] HARDY J W. Adaptive optics for astronomical telescopes [M]. New York, USA: Oxford University Press: 1998: 3-24.
- [2] RAO C, ZHU L, RAO X, et al. 37-element solar adaptive optics for 26-cm solar fine structure telescope at Yunnan astronomical observatory [J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(10): 966-968.
- [3] 刘超, 陈善球, 廖周, 等. 自适应光学技术在通信波段对大气湍流的校正 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(10): 2605-2610.
LIU CH, CHEN SH Q, LIAO ZH, et al. Correction of atmospheric turbulence by adaptive optics in waveband of free-space coherent laser communication [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(10): 2605-2610.
- [4] 黄健, 张鹏, 邓科, 等. 星地相干激光通信中的自适应光学系统边界参数设计 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(5): 1204-1211.
HUANG J, ZHANG P, DENG K, et al. Boundary parameters of adaptive optical system in satellite to ground coherent laser communication system [J]. Optical Precision Engineering, 2014, 22(5): 1204-1211.
- [5] LIANG J, WILLIAMS D R, MILLER D T. Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1997(14): 2884-2892.
- [6] YANG P, LIU Y, YANG W, et al. An adaptive laser beam shaping technique based on a genetic algorithm [J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(9): 497-500.
- [7] 林旭东, 刘欣悦, 王建立, 等. 基于压电陶瓷促动器的连续镜面变形镜研制进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51090003.
LIN X, LIU X, WANG J L, et al. Progress of the continuous surface deformable mirror based on Piezo-Ceramic actuator [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51090003.
- [8] 马剑强, 刘莹, 陈俊杰, 等. 200单元硅基单压电变形镜的设计与测试 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2047-2053.
MA J Q, LIU Y, CHEN J J, et al. Design and performance testing of 200-element silicon unimorph deformable mirror [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(8): 2047-2053.
- [9] 宣丽, 李大禹, 刘永刚. 液晶自适应光学在天文学研究中的应用展望 [J]. 液晶与显示, 2015, 30(1): 1-9.
XUAN L, LI D, LIU Y G. Prospect of liquid crystal adaptive optics in astronomy application [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2015, 30(1): 1-9.
- [10] 贾建禄, 王建立, 赵金宇, 等. 可扩展式自适应光学系统波前处理器的硬件设计 [J]. 液晶与显示, 2011, 26(3): 370-373.
JIA J L, WANG J L, ZHAO J Y, et al. Hardware design for extendible adaptive optics system wavefront processor [J]. Chinese Journal of Liquid Crystal And Displays, 2011, 26(3): 370-373.
- [11] 李大禹, 胡立发, 穆全全, 等. 基于GPU的液晶自适应光学波前重构计算 [J]. 光子学报, 2008, 37(8): 1643-1647.
LI D Y, HU L F, MU Q Q, et al. Wavefront reconstruction calculation of liquid crystal adaptive optics based on GPU [J]. ACTA Photonica Sinica, 2008, 37(8): 1643-1647.
- [12] 费玮玮, 王长清, 刘濮鲲, 等. 应用于低对比度扩展目标观测的大型阵列太阳自适应光学电子系统的设计与实现 [J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2987-2992.
FEI W W, WANG CH Q, LIU P K, et al. The design of large array solar adaptive optics electronic system for observation of low contrast extended object [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(12):

- 2987-2992.
- [13] 杨海峰, 饶长辉, 李梅, 等. 实时波前处理机中同步开关噪声抑制研究[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2014, 41(3): 215-222.
YANG H F, RAO CH H, LI M, et al. Study on suppression of simultaneous switching noise in real-time wavefront processor[J]. Journal of Xidian University, 2014, 41(3): 215-222.
- [14] YANG H, XIA Y, ZHANG H, et al. Efficient and low-latency pixel data transmission module for adaptive optics wavefront processor based on field-programmable gate array[J]. Optical Engineering, 2015, 54(6): 063106.
- [15] 贾建禄, 王建立, 赵金宇, 等. 961 单元自适应光学系统波前处理器[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1387-1393.
JIA J L, WANG J L, ZHAO J Y, et al. 961-element adaptive optical wavefront processor[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(6): 1387-1393.
- [16] 贾建禄, 王建立, 赵金宇, 等. 自适应光学系统波前处理算法的优化[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 1026-1031.
JIA J L, WANG J L, ZHAO J Y, et al. Optimization of adaptive optical wavefront algorithm[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(4): 1026-1031.
- [17] 赵雨菲, 王建立, 贾建禄, 等. 自适应光学波前处理器的故障诊断系统设计[J]. 电光与控制, 2014, 21(4): 69-72.
ZHAO Y F, WANG J L, JIA J L, et al. Fault diagnostic system for adaptive optical wavefront processor[J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(4): 69-72.
- [18] 贾建禄, 王建立, 赵金宇, 等. 基于 FPGA 的自适应光学系统波前处理机[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1716-1722.
JIA J L, WANG J L, ZHAO J L, et al. Adaptive optical wavefront processor based on FPGA[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(8): 1716-1722.
- [19] JIANG W, LI H. Hartmann-Shack wavefront sensing and wavefront control algorithm[C]. Proceedings of SPIE, 1990(1271): 82-93.
- [20] 王亮, 陈涛, 刘欣悦, 等. Zernike 模式快速算法及其在自适应光学中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(11): 1283-1288.
WANG L, CHEN T, LIU X, et al. Fast algorithm of Zernike mode and its application in adaptive optics[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(11): 1283-1288.
- [21] 武国梁, 王刚, 齐荔荔, 等. 基于相位线性展开的波前误差检测与图像复原[J]. 电子测量技术, 2015, 38(5): 50-52.
WU G L, WANG G, QI L L, et al. Wavefront phase error detection and image restoration based on linear expansion[J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(5): 50-52.
- [22] 杨晓霞, 孟浩然, 李玉霞, 等. 具有扰动观测及实时补偿的大型光电望远镜主轴控制技术[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(11): 56-61.
YANG X X, MENG H R, LI Y X, et al. Mount control technology using disturbance observer and compensation for large opto-electronic telescopes[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33(11): 56-61.
- [23] 齐克奇, 向阳. 光刻物镜波像差检测球面波发生装置的研制[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(7): 1518-1524.
QI K Q, XIANG Y. Development of spherical wave generating device for lithographic objective wavefront aberration detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(7): 1518-1524.

作者简介

王亮, 1985 年出生, 2010 年于上海交通大学获硕士学位。现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生。目前主要研究方向为信息光学、数字信号处理等。
E-mail: wangliang.ciomp@foxmail.com

Wang Liang was born in 1985, and received M. Sc. from Shanghai Jiaotong University in 2010. Now, he is a Ph. D. candidate in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences (CIOMP). His present research interests include information optics, digital signal processing and so on.

陈涛, 1965 年出生, 2007 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(中科院长春光机所)获博士学位, 现为中科院长春光机所研究员、博士生导师。目前主要研究方向为光电精密跟踪测量技术。
E-mail: chent@ciomp.ac.cn

Chen Tao was born in 1965, and received Ph. D. from Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences (CIOMP) in 2007. He is a professor and Ph. D. supervisor of CIOMP now. His present research interests include optoelectronic tracking, measurement and so on.