

提高夏克-哈特曼波前传感器光斑质心的定位精度

师亚萍, 刘缠牢

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 提出了一种提高夏克-哈特曼波前传感器光斑质心的定位精度算法,分析了光斑质心的探测误差,采用与光斑尺寸匹配的探测窗口及插值法提高了图像的分辨率,并使用二阶矩算法计算了质心位置。采用该算法对含有噪声的光斑图进行图像处理与计算,并给出了待测件的波前重构示意图。结果表明,相对于传统算法,该算法将质心的探测精度提高了约0.8倍。

关键词 测量; 探测器; 夏克-哈特曼波前传感器; 光斑质心; 质心探测误差; 算法

中图分类号 TH741 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.081201

Positioning Accuracy Improvement of Spot Centroid for Shack-Hartmann Wavefront Sensor

Shi Yaping, Liu Chanlao

School of Photoelectric Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

Abstract An algorithm to improve the positioning accuracy of spot centroid for Shack-Hartmann wavefront sensor is proposed. The detection errors of spot centroid are analyzed. The image resolution is improved by utilizing the detection window whose size is matched with that of spot and using the interpolation method. The centroid position is calculated by the two-order moment algorithm. The proposed algorithm is used to process and calculate the spot images with noise and the wavefront reconstruction diagram of the test component is also presented. The results show that, compared with the traditional algorithm, the proposed algorithm improves the detection accuracy of centroid by about 0.8 times.

Key words measurement; detectors; Shack-Hartmann wavefront sensor; spot centroid; detection error of spot centroid; algorithm

OCIS codes 120.0280; 220.4840; 230.0040

1 引言

随着现代光学技术的迅速发展,哈特曼波前传感器以简单的结构、高光能利用率以及较大的检测动态范围等优点而被广泛应用于自适应光学、高能光束诊断、光学元件面形检测以及眼科治疗等领域中^[1-3]。夏克-哈特曼波前传感器(SHWS)由微透镜阵列和图像传感器(CCD)相机构成,SHWS法的原理是理想波前和畸变波前分别进入SHWS,在CCD靶面上分别呈现出规则和散乱的光斑,这些散乱光斑相对于规则光斑偏移量携带了波前的畸变信息,通过计算偏移量并使用波前重构法即可复原入射波前^[4-5]。

在SHWS法中,影响待测波前精度的主要因素是光斑质心位置的计算精度和波前重构精度^[6]。其中,常用的质心算法为一阶矩算法,而一阶矩算法对距离质心位置较远的噪声较敏感,因此,需先减小由CCD相机引入的离散采样误差、读出噪声等探测误差,以便提高质心的定位精度。目前,学者们已提出多种方法来减小这些误差,夏爱利等^[7]提出了插值法和天津法相结合去除噪声的方法,梁春等^[8]提出了多种方法相结合的自适应质心计算方法,有效提高了质心的定位精度,但这些算法相对复杂。本文提出了一种与光斑尺寸更

收稿日期: 2016-12-08; 收到修改稿日期: 2017-03-21

作者简介: 师亚萍(1990—),女,硕士研究生,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: 564618778@qq.com

导师简介: 刘缠牢(1962—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事测控技术与仪器方面的研究。E-mail: lcl0123@sohu.com

匹配的探测窗口,即采用 Canny 边缘检测法来获取每一个子孔径光斑图的边缘,进而选择合适的窗口,并采用插值法抑制相应噪声,之后采用二阶矩算法来计算质心位置,以提高 SHWS 的质心定位精度。为了避免随机误差对计算结果的影响,本文采用全部子孔径质心的标准差的平均值作为评价标准。结果表明,相对于传统一阶矩算法,本文算法将质心定位精度提高了约 0.8 倍,并且具有较好的稳定性。

2 质心的探测误差

在使用 CCD 采集光斑图时,光斑的探测精度会受到离散采样误差、读出噪声、光子噪声以及背景暗电平噪声等的影响^[9-10]。

由读出噪声和光子噪声造成的质心探测误差可以表示为

$$\sigma_{xc}^2 = \frac{\sigma_A^2}{V} + \frac{\sigma_r^2}{V^2} MN \left(\frac{M^2 - 1}{12} + X_c^2 \right), \quad (1)$$

式中 σ_A 为光斑等效高斯宽度, M 和 N 为探测窗口大小, σ_r^2 为每一个像素的读出噪声方差, V 为探测窗口内总光子数。

在实际探测的过程中,信号 I_{ij} 包括实际光信号 P_{ij} 和暗背景信号 b_{ij} 。下面只讨论 x 方向, y 方向同理可得。质心的横坐标值为

$$X_c = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij} I_{ij}}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_{ij}} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij} P_{ij} + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij} b_{ij}}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P_{ij} + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N b_{ij}} = \frac{S_{SNR}}{1 + S_{SNR}} X_P + \frac{1}{1 + S_{SNR}} X_b, \quad (2)$$

式中 X_{ij} 为探测窗口内单个像素的横坐标值, S_{SNR} 为信噪比, X_P 为实际的光斑质心横坐标值, X_b 为暗背景信号的质心横坐标值, I_{ij} 为该像素输出的灰度值。

质心的平均横坐标值为

$$\overline{X_c} = \frac{S_{SNR}}{1 + S_{SNR}} \overline{X_P} + \frac{1}{1 + S_{SNR}} \overline{X_b}, \quad (3)$$

式中 $\overline{X_P}$ 为实际的光斑质心平均横坐标值, $\overline{X_b}$ 为暗背景信号的质心平均横坐标值。

假设实际光斑质心位置方差 σ_{xp}^2 和背景质心位置方差 σ_{xb}^2 彼此独立,则质心探测误差为

$$\sigma_{xc}^2 = \left(\frac{S_{SNR}}{1 + S_{SNR}} \right)^2 \sigma_{xp}^2 + \left(\frac{1}{1 + S_{SNR}} \right)^2 \sigma_{xb}^2. \quad (4)$$

在不考虑背景噪声时,实际光斑质心位置方差与实际光斑的等效高斯宽度平方成正比,与探测窗口内的实际信号光子数 V_P 成反比:

$$\sigma_{xp}^2 = \frac{\sigma_A^2}{V_P}. \quad (5)$$

在没有光斑信号时,由(2)式可以推导出暗背景和读出噪声引起的质心位置起伏方差为

$$\sigma_{xb}^2 = \frac{\sigma_r^2}{V_n^2} MN \left(\frac{M^2 - 1}{12} + X_b^2 \right), \quad (6)$$

式中 V_n 为探测窗口内读出噪声和暗背景的总和。将(5)式和(6)式代入(4)式可得

$$\sigma_{xc}^2 = \left(\frac{S_{SNR}}{1 + S_{SNR}} \right)^2 \frac{\sigma_A^2}{V_P} + \left(\frac{1}{1 + S_{SNR}} \right)^2 \frac{\sigma_r^2}{V_n^2} MN \left(\frac{M^2 - 1}{12} + X_b^2 \right). \quad (7)$$

通过分析质心的探测误差可知,光子噪声在信号极弱时才会对质心探测精度有影响,故光子噪声可忽略不计。因此,重点考虑 CCD 的离散采样误差、读出噪声和背景暗电平这三方面带来的误差。

3 提高光斑质心定位精度的方法

通过文献[11]知,仅使用一阶矩测光斑质心不能有效提高质心定位精度,需先去除噪声的影响,因此,结合探测窗口和阈值法对光斑图进行去噪处理。首先采用灰度插值法去除离散采样误差带来的影响,之后采

用 Canny 边缘检测法来获取每一个子孔径光斑图的边缘,进而选择合适的探测窗口并进行阈值处理,最后计算光斑质心位置。

3.1 探测窗口的获取

为了获得与光斑匹配的探测窗口,首先采用灰度插值法去除离散采样误差的影响,而常用的灰度插值法有最近邻插值法、双线性插值法和三次内插值法等。分别采用这三种方法处理同一幅图像,第一种方法效果最差,有块状效应;第二种方法虽没有块状效应,但图像较模糊;第三种方法处理的效果最好。故采用三次内插值法对光斑图进行处理。

三次内插值法不仅考虑到待测点的直接相邻点的灰度值对它的影响,还考虑到周围 16 个点对它的影响,其效果要优于双线性插值法,采用 $s(x) = \sin(\pi x) / (\pi x)$ 函数作为基函数来拟合数据。

$s(x) = \sin(\pi x) / (\pi x)$ 可采用以下三次多项式近似:

$$s(x) = \begin{cases} 1 - 2|x|^2 + |x|^3 & |x| > 1 \\ 4 - 8|x| + 5|x|^2 - |x|^3 & 2 > |x| \geq 1, \\ 0 & |x| \geq 2 \end{cases} \quad (8)$$

式中 x 为自变量, $s(x)$ 为因变量。

背景噪声和读出噪声同时受到探测窗口的大小和阈值的影响。当窗口选取过大时,光斑面积相对变小,背景噪声影响较大,故质心探测误差变大;反之,当窗口选取过小时,光斑的有效信息不能完全被包括,致使探测误差变大,因此选取与光斑尺寸匹配的探测窗口能有效提高探测精度。由于 Canny 边缘检测算子相对 Sobel 算子、Log 算子是一种最优检测算子,因此,采用 Canny 边缘检测算子检测出每一个光斑的边缘,根据不同光斑的边缘选择合适尺寸的探测窗口。Canny 算子边缘检测的过程为:首先采用高斯滤波模板与图像进行卷积以平滑图像,然后寻找图像灰度沿 x 和 y 方向上的导数,并求出梯度的幅值和方向,之后采用非最大抑制法对梯度幅值进行边缘细化,最后分别采用高阈值和低阈值法检测强边缘和弱边缘,并将两者连接起来。

由于光电子器件及电子线路引起的读出噪声为高斯噪声,在边缘检测中已对图像进行了高斯滤波与阈值处理,故只需要选择恰当尺寸的探测窗口即可。

3.2 质心算法

在获取光斑质心位置的过程中,质心探测误差和质心算法都会影响质心的定位精度。对每一个子孔径光斑进行降噪后,还需选择恰当的质心算法,常用的质心算法有一阶矩、高阶矩等^[12-14]。在光斑图中越靠近质心位置,CCD 对应像素的灰度值就越大。理论上,靠近质心的位置数据在质心计算时的权重越大,质心定位精度就会越高。同时,随着阶数 α 的增大,光斑质心位置的数据相对于其他位置的数据趋近于无穷大,通过计算得到的质心就越接近于光斑的真实位置。高阶矩质心算法公式为

$$X_c = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij} I_{ij}^\alpha}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_{ij}^\alpha}, Y_c = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N y_{ij} I_{ij}^\alpha}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_{ij}^\alpha}, \quad (9)$$

式中 y_{ij} 为探测窗口内单个像素的纵坐标值, $\alpha = 1, 2, \dots, t, t$ 为高阶矩阶数。当 $\alpha = 1$ 时, (9) 式为一阶矩质心计算公式。

4 实验与分析

根据图 1 所示的光路图,在防震平台上搭建实验并进行非球面面形检测。激光器发出光束经扩束系统和透镜 L1 到达待测面,通过调节待测件下方的导轨使得待测件的顶点曲率中心与透镜 L1 的焦点重合,使携带待测件面形信息的光束反射回来,经分光镜、缩束系统进入 SHWS,进行成像并采集光斑阵列图。为了获得较好的质心偏移测量精度,需先输入标准平行光对 SHWS 进行标定。当标定位置为子孔径的中心时,误差最小,将采集的光斑质心位置与标定位置相比较即可得出质心在坐标轴上的偏移数据。

在实验中,光源选用单色性好、稳定性高的 He-Ne 激光器,其主要参数为:光束直径 0.9 mm,波长 632.8 nm。需要标准的平行光作为 SHWS 的定标光源,但激光器发出的光束不是标准的平行光且直径小,

因此须对光束进行扩束和准直。由于 SHWS 口径比待测件的口径小,经待测件反射回来的光束在进入 SHWS 前须进行缩束,扩束系统与缩束系统相互倒置。分光镜为半反半透镜,经待测件反射回来的光束经透镜 L1 进入 SHWS,则光斑图包含有透镜 L1 的面形误差,需对透镜 L1 采用干涉仪进行标定,其面形精度约为 $\lambda/30$ (λ 为波长)。SHWS 的主要参数为:子孔径总数 185 个,相机分辨率 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$,像元尺寸 $9.9 \mu\text{m} \times 9.9 \mu\text{m}$ 。通过 CCD 采集出图 2(a)所示的光斑阵列图,采用 MATLAB 软件仿真出其余几幅结果图,如图 2(b)~(e)所示。

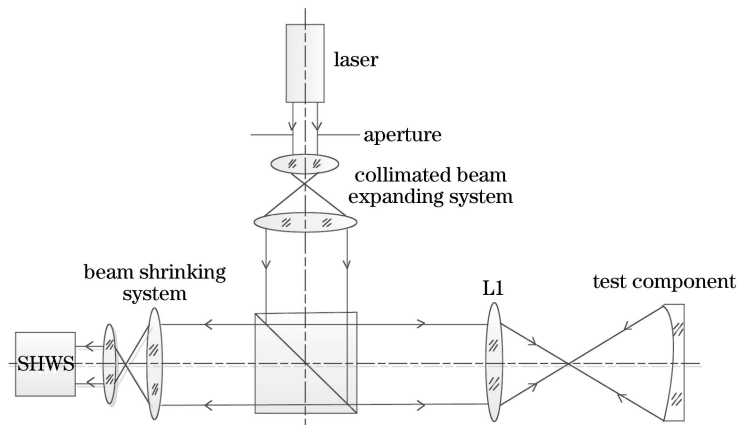


图 1 光路图

Fig. 1 Optical path diagram

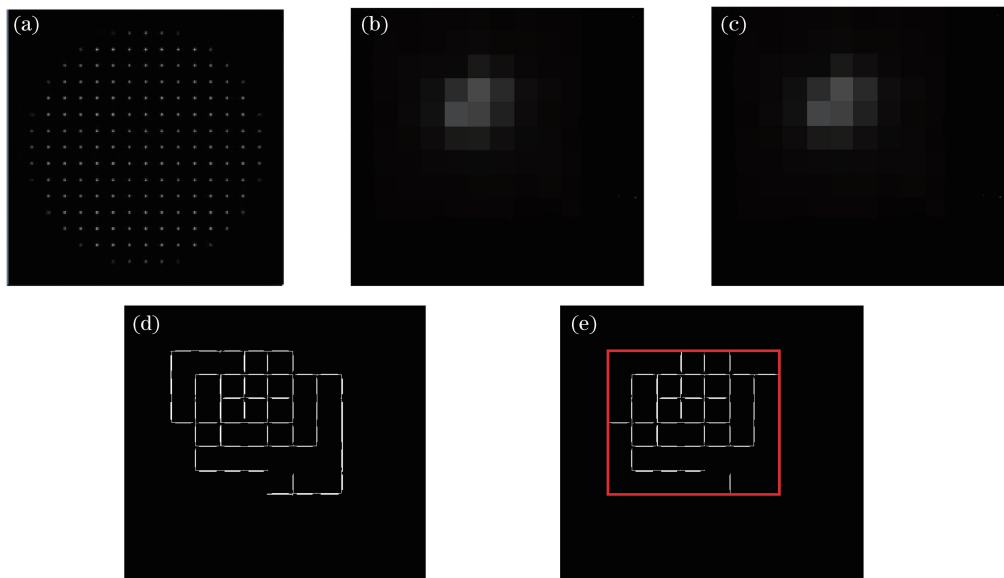


图 2 仿真结果。(a)光斑阵列图;(b)子孔径光斑图;(c)利用三次内插值法处理后的光斑图;
(d)利用 Canny 算子检测边缘;(e)探测窗口

Fig. 2 Simulated results. (a) Diagram of spot array; (b) spot diagram of subaperture; (c) spot diagram processed by three-interpolation method; (d) edge detection based on Canny operator; (e) detection window

图 2 所示的仅是对某一子孔径的处理结果,其余子孔径的处理也是如此。为了避免随机误差对计算结果的影响,对同一幅光斑[图 2(a)]进行 $K=10$ 次采集,以质心的标准差的平均值作为评价标准,其表达式为

$$S = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (x_{jk} - \bar{x}_j)^2}, \quad (10)$$

式中 S 为全部子孔径的质心标准差的平均, N 为子孔径总数, x_{jk} 为第 j 个光斑第 k 次测量的质心坐标值。

对整幅光斑阵列图去噪后,采用质心算法计算每一个光斑的真实位置。由文献[11]可知,一阶矩质心算

法对远离质心的噪声非常敏感,且不能有效突出质心周围数据的权重,因此光斑质心定位精度较差。为了选择合适的阶数,在部分子孔径的同一探测窗口内,结合(9)式与(10)式计算不同阶数下的质心标准差,计算结果如图3所示。

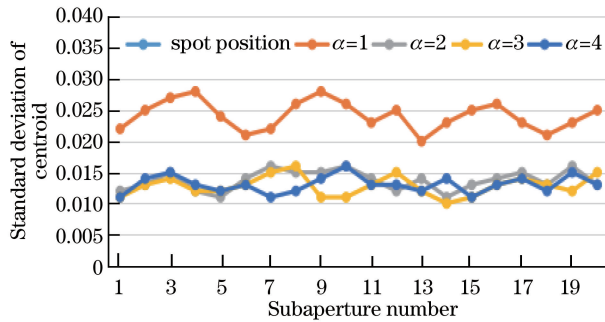


图3 不同阶数的质心标准差

Fig. 3 Standard deviations of centroids under different orders

从图3可看出,在测量的子孔径内,当阶数 $\alpha \geq 2$ 时,光斑质心的标准差逐渐趋于稳定,二阶矩质心算法已能突出光斑的权重,削弱了噪声的影响,三阶及以上算法虽能在一定程度上提高定位精度,但算法相对复杂,因此采用二阶矩质心算法即 $\alpha = 2$ 来计算光斑质心的真实位置。

对采集的图像进行去噪处理(子孔径的位置从左至右,从上至下,以s路线进行),结合(9)式与(10)式计算出部分子孔径质心的平均值,结果见表1。

表1 利用不同算法得出的子孔径质心的平均横坐标值的比较

Table 1 Comparison of average abscissa value of subaperture centroids obtained by different algorithms

Average abscissa value of subaperture centroid / pixel	Value obtained by traditional algorithm	Value obtained by algorithm proposed in this paper
x_5	189.475	189.023
x_{14}	221.320	220.128
x_{27}	384.782	385.112
x_{41}	401.284	399.969
x_{61}	430.736	428.599
x_{83}	251.221	252.421
x_{94}	412.235	414.237
x_{117}	160.009	161.453
x_{139}	412.474	412.951
x_{152}	231.596	229.677
S	0.025	0.014

从表1可以看出,在以质心的标准差为评价标准的基础上,所用的优化算法相对于传统的一阶矩算法在精度上提高了约0.8倍,并且具有较好的稳定性。

根据前文计算的各子孔径质心的真实位置,求出其相对参考位置的偏移量,结合波前重构理论计算出波前斜率矩阵,并采用Zernike多项式模式法进行波前重构,恢复其相位信息。通过软件拟合出图4所示的待测件的波前重构示意图。

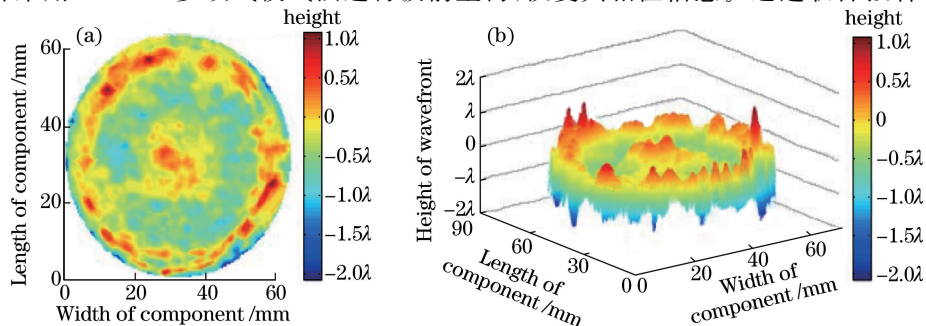


图4 待测件的波前重构示意图。(a)二维;(b)三维

Fig. 4 Diagrams for wavefront reconstruction of test components. (a) Two-dimension; (b) three-dimension

测件的波前重构示意图,得出待测件的波前峰谷值为 2.161λ ,均方根值为 0.523λ 。

5 结 论

在计算哈特曼波前传感器的光斑质心位置时, CCD 的使用引入了多种噪声,传统的一阶矩质心算法已不能满足要求。提出了一种提高质心精度测量的方法,即选取与光斑尺寸匹配的探测窗口,采用二阶矩质心算法计算质心位置。相对于传统一阶矩算法,SHWS 的质心探测精度有了明显的提高,并具有较好的稳定性。

参 考 文 献

- [1] Li Jing, Gong Yan, Hu Xinrong, *et al.* A high-precision centroid detecting method for Hartmann-Shack wavefront sensor[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0316002.
李 晶, 巩 岩, 呼新荣, 等. 哈特曼夏克波前传感器的高精度质心探测方法[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0316002.
- [2] Xie Hongsheng, Yang Lebao, Li Dayu, *et al.* Influence of chromatic aberration on Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 030801.
解洪升, 杨乐宝, 李大禹, 等. 人眼色差对夏克-哈特曼波前探测器的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 030801.
- [3] Zhu X, Hu S, Zhao L. Wafer focusing measurement of optical lithography system based on Hartmann-Shack wavefront testing[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 66: 128-131.
- [4] Li Wenjie, Mu Quanquan, Wang Shaoxin, *et al.* High precision regulating mechanism of Hartmann detector [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(10): 2852-2859.
李文杰, 穆全全, 王少鑫, 等. 哈特曼探测器的高精度调节机构[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(10): 2852-2859.
- [5] Zhang Hao, Yan Feng, Wei Haisong, *et al.* Error analysis of scanning Hartmann wavefront detection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 111203.
张 昊, 闫 锋, 魏海松, 等. 扫描哈特曼波前检测技术的误差分析研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 111203.
- [6] Wang Yanping, Wang Qianqian, Ma Chong. Research on calibration method of Hartmann wavefront analyzer [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0108003.
王艳萍, 王茜倩, 马 冲. 哈特曼波前分析仪校准方法研究[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0108003.
- [7] Xia Aili, Ma Caiwen. High precision measurement of spot centroid based on image processing technology[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2011, 22(10): 1542-1545.
夏爱利, 马彩文. 基于图像处理技术的光斑质心高精度测量[J]. 光电子激光, 2011, 22(10): 1542-1545.
- [8] Liang Chun, Liao Wenhe, Shen Jianxin, *et al.* An adaptive detecting centroid method for Hartmann-Shack wavefront sensor[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(2): 430-434.
梁 春, 廖文和, 沈建新, 等. Hartmann-Shack 波前传感器的自适应质心探测力法[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 430-434.
- [9] Cao G R, Yu X. Accuracy analysis of a Hartmann-Shack wavefront sensor operated with a faint object[J]. Optical Engineering, 1994, 33(7): 2331-2335.
- [10] Shen Feng, Jiang Hanwen. Detection error of wavefront phase of shack Hartmann wavefront sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(5): 666-671.
沈 峰, 姜汉文. 夏克-哈特曼波前传感器的波前相位探测误差[J]. 光学学报, 2000, 20(5): 666-671.
- [11] Yan Peiguo, Liu Shuchang, Wang Xiaoman. Automatic precise positioning of the spot of Hartmann wavefront sensor [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2013, 36(5): 123-126.
颜佩国, 刘树昌, 王晓曼. 夏克-哈特曼波前传感器光斑自动精确定位[J]. 长春理工大学学报, 2013, 36(5): 123-126.
- [12] Ren Jianfeng, Rao Changhui, Li Mingquan. An adaptive threshold selection method for Hartmann-Shack wavefront sensor images[J]. Optoelectronic Engineering Journal, 2002, 29(1): 1-5.
任剑峰, 饶长辉, 李明全. 一种 Hartmann-Shack 波前传感器图像的自适应阈值选取方法[J]. 光电工程, 2002,

29(1): 1-5.

- [13] Zhou Wenchao, Peng Yong, You Anqing. A computational method to improve the centroid detection accuracy of Hartmann wavefront sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 061203.
周文超, 彭 勇, 游安清. 提高哈特曼波前传感器质心探测精度的一种计算方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 061203.
- [14] Xia Aili, Ma Caiwen. Higher order moment method for improving the accuracy of wavefront sensing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 472-477.
夏爱利, 马彩文. 提高波前探测精度的高阶矩方法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(1): 472-477.