

文章编号 1004-924X(2014)06-1494-06

## 利用标记分水岭法实现夏克-哈特曼 波前传感器质心探测

程利群<sup>1</sup>, 王晓曼<sup>2\*</sup>, 景文博<sup>3</sup>

(1. 长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022; 2. 长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;  
3. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 由于光斑质心探测精度直接影响夏克-哈特曼波前传感器的波前探测精度, 本文提出基于标记分水岭法来确定阵列光斑质心探测窗口。首先, 对采集到的夏克-哈特曼阵列光斑图像进行平滑并求出其梯度图像; 然后, 利用大津(OTSU)阈值法在求出的梯度图像上进行目标标记, 最后在标记过的梯度图像上进行分水岭分割, 确定出每个光斑的探测窗口。由于该方法确定的质心探测窗口是对光斑实际大小进行匹配, 故有效地抑制了噪声对质心探测的影响。实验结果表明: 利用该方法确定光斑探测窗口所计算的质心精确度和稳定性均比传统的在子透镜窗口中计算光斑质心的方法要高。统计多幅图像计算得到的窗口质心标准差的平均值为 0.010 9, 比传统法计算出的平均值 0.073 4 提高了 6 倍, 满足哈特曼波前传感器对光斑质心计算稳定性和精确度的要求。

**关键词:** 夏克-哈特曼波前传感器; 质心探测; 探测窗口; 标记分水岭法; 标准差

**中图分类号:** TP212.14; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142206.1494

## Centroid detection of Shack-Hartmann wave-front sensor by marked watershed method

CHENG Li-qun<sup>1</sup>, WANG Xiao-man<sup>2\*</sup>, JING Wen-bo<sup>3</sup>

(1. School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Changchun University  
of Science and Technology, Changchun 130022, China;

3. School of Photo-Electronic Engineering, Changchun University of  
Science and Technology, Changchun 130022, China)

\* Corresponding author, E-mail: wmfytys@126.com

**Abstract:** As the accuracy of wave-front detection of Shack-Hartmann sensors is mainly dependent on the accuracy of centroid detection of a focal spot, this paper proposes a dynamic determination method of array spot centroid detection window based on marked watershed segmentation. This method smoothes the spot image captured by a Shack-Hartmann wave-front sensor based on the marked watershed segmentation and obtains its gradient image, firstly. Then the OTSU method is used to mark

收稿日期: 2013-10-10; 修订日期: 2013-11-25.

基金项目: 吉林省科技发展计划重大项目 (No. 20106012)

the target on the gradient image. Finally, the marked gradient image is segmented by the marked watershed method and the detection window of every spot is determined. Because the detecting window can be matched with the actual size of spot, the affection of the noise on centroid detection is effectively suppressed. The experimental results demonstrate that the precision and stability of centroid detection by this method are higher than that of traditional method. The mean values of standard deviation in every detecting window of statistic multiple images are calculated, which is 0.010 9, 6 times that of the traditional method (0.073 4). It can satisfy the requirement of Shack-Hartmann wave-front sensors for precision and stability of centroid calculation.

**Key words:** Shack-Hartmann wave-front sensor; centroid detection; detection window; marked watershed method; standard deviation

## 1 引言

夏克-哈特曼波前传感器(Shack-Hartmann Wave-front Sensor, SHWS)广泛应用于光学测量、激光大气传输、医学等领域。它是由高精度、高可靠性的 CCD 和微透镜阵列组成的光学波前探测器件<sup>[1]</sup>。其中,微透镜阵列用于将入射波前聚焦到 CCD 的感光面上,形成一幅阵列光斑图像;然后,通过计算探测窗口内光斑质心的偏移量,利用波前重构法得到波前的相位分布。因此,光斑质心的探测和计算会直接影响波像差的探测精度<sup>[2-7]</sup>。由于探测器 CCD 相机在探测时会产生光子噪声、读出噪声和背景噪声,这些噪声都会影响质心探测精度。当质心探测窗口的选取大于光斑尺寸时,噪声会增大;而当质心探测窗口小于光斑尺寸时,质心探测误差会增大。因此,质心探测窗口与光斑大小匹配得越好,质心探测误差就越小。

SHWS 多采用缩小窗口法来进行质心探测,并取得了较好的结果,如 Prieto 等人<sup>[8]</sup>提出了迭代缩小探测窗口尺寸的质心探测方法,通过迭代计算出缩小的探测窗口。夏爱利等人<sup>[9-10]</sup>在探测窗口中先利用一阶矩测得光斑质心,然后以测得的质心为中心建立新的探测窗口。但上述方法均存在窗口大小与实际光斑不匹配的问题。

分水岭算法是一种基于形态学的分割算法<sup>[11]</sup>,它将图像分割成不同的特体来提取图像的边缘。由于该算法要对图像的梯度进行分割,因此会出现过度分割的问题。标记分水岭算法可有

效地解决这个问题,并具有定位精确和对较弱边缘有良好的响应等特点,因此,该算法确定的探测窗口可与每个光斑进行良好的匹配<sup>[12-13]</sup>。本文采用标记分水岭算法对 SHWS 的阵列光斑进行分割,并确定出能与每个光斑良好匹配的探测窗口,从而提高了 SHWS 的质心探测精度。

## 2 探测窗口对质心探测精度的影响

在 SHWS 中,被测波阵面被微透镜阵列分割成子孔径,每个微透镜所对应的子孔径区域称为光斑探测窗口。

光斑质心通常通过一阶矩算法求得,在每个探测窗口内光斑的一阶矩质心计算公式为:

$$x_j = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{nm} I_{nm}}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{nm}}, \quad (1)$$

$$y_j = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N y_{nm} I_{nm}}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{nm}}, \quad (2)$$

式中:  $(x_j, y_j)$  为第  $j$  个子孔径的质心坐标;  $x_{nm}$  为像素点  $(m, n)$  处  $x$  的坐标;  $y_{nm}$  为像素点  $(m, n)$  处  $y$  的坐标;  $I_{nm}$  为像素点  $(m, n)$  处像素的光强值。

SHWS 测量精度的影响因素主要有两个:一是质心探测精度,二是波前复原算法。对于后者,不同的波前复原算法和参数选取所产生的测量误差不同,本文不予讨论。质心探测误差通常包括<sup>[14]</sup>:

(1) CCD 读出噪声,包括 A/D 转换等引起的随机噪声,它是一种符合高斯分布的噪声。

(2) 光子噪声, 由光信号本身存在的光子起伏引起的随机噪声, 符合泊松分布。

(3) CCD 离散采样引起的误差。有研究表明<sup>[15]</sup>, 当光斑尺寸  $\sigma_A$  大于  $0.5a$  ( $a$  为像元尺寸) 时, 质心探测误差的均方根值小于  $0.02\sigma_A$ , 因此可以忽略离散采样误差。

(4) 背景暗电平, 由 CCD 偏置电平带来的噪声, 通常可认为是常数。

(5) CCD 像素响应非均匀的固定形态噪声, 可通过标定来进行补偿。

由读出噪声和光子噪声引起的质心探测误差表示为<sup>[15]</sup>:

$$\sigma_{\text{scr}}^2 = \frac{\sigma_A^2}{V} + \frac{\sigma_r^2}{V^2} ML \left( \frac{L^2 - 1}{12} + X_c^2 \right) p^2, \quad (3)$$

式中:  $\sigma_{\text{scr}}$  为  $x$  方向质心探测方差;  $\sigma_r$  为 CCD 读出噪声的方差;  $V$  为探测到的总光子数;  $M$  和  $L$  为光斑在焦平面上采样窗口的区域;  $X_c$  为  $x$  方向质心坐标;  $p$  为探测窗口内像素的总数。

由式(3)可见, 质心探测误差与光斑所占的像素宽度、每个像素的噪声、入射到子孔径内的光子数、探测窗口内的像素数以及探测窗口大小有关。有研究表明<sup>[16]</sup>, 在探测窗口内设立一个阈值, 窗口内每个像素读出值减去这个阈值, 并将负值置零再计算质心时会提高其精度。但是均匀的噪声存在一定程度的起伏, 如果提高阈值非但不能提高质心精度, 反而可能会降低质心精度。探测窗口的大小是影响质心探测误差的重要因素之一, 如将探测窗口的区域缩小至与每个子光斑的尺寸接近, 那么哈特曼传感器的质心探测精度将会有所提高。

### 3 基于标记分水岭算法确定探测窗口

SHWS 图像具有光斑强度呈准高斯分布、各光斑尺寸相差较大、面积较小等特点。一般情况下 SHWS 图像信号的相对面积小于图像总面积的 20%<sup>[17]</sup>, 当选取的阈值过大时, 会损失部分信号。

根据哈特曼光斑图像的特点, 如果直接采用标记分水岭算法在梯度图像上进行分割, 将会造成定位不准确、过度分割的状况。因此在光斑图像变换为梯度图像之前应对光斑图像进行平滑, 并在变换后的梯度图像上采用合适的阈值法滤除

梯度图像中存在的噪声。

高斯滤波器是一种线性滤波器, 其滤波公式为:

$$g(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_w^2}\right), \quad (4)$$

式中:  $x, y$  分别为图像像素的横坐标与纵坐标;  $\sigma_w$  为高斯函数均方差, 代表高斯函数的宽度。根据式(4) 计算得到  $3 \times 3$  高斯滤波模板形式为:

$$\frac{1}{16} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}.$$

利用这个模板与图像矩阵进行卷积计算, 所得的新图像即为滤波平滑后的图像。

天津(OTSU) 阈值法作为一种广泛使用的自适应阈值方法, 具有较强的自适应性及计算结果稳定等特点, 能良好地滤除光斑图像噪声且分割准确, 其表达式为:

$$\sigma^2 = \omega_0 (\mu_0 - \mu)^2 + \omega_1 (\mu_1 - \mu)^2, \quad (5)$$

式中:  $\omega_0$  代表目标像素所占的比例,  $\mu_0$  为目标像素的灰度均值,  $\omega_1$  为背景像素所占的比例,  $\mu_1$  为背景像素的灰度均值,  $\mu$  为整个图像的灰度均值,  $\sigma^2$  为类间方差。图像共有  $N$  个灰度级, 在  $[0, N-1]$  内依次取  $T$  值, 使  $\sigma^2$  最大的值为 OTSU 的最佳分割阈值。

根据上述分析, 本文采用标记分水岭算法确定探测窗口的具体步骤为: (1) 采用  $3 \times 3$  高斯滤波模板对采集到的 SH 阵列光斑图像进行平滑处理; (2) 对平滑过的图像进行梯度变换; (3) 利用 OTSU 阈值法对梯度图像进行二值化并标记; (4) 在标记过的梯度图像上进行分水岭算法分割, 确定出每个光斑的探测窗口。

### 4 实验与结果分析

SH 波前探测光路系统如图 1 所示, 光束经过小孔光阑进入平行光管得到平行光束, 再经扩束器扩束后垂直入射到哈特曼波前探测器。

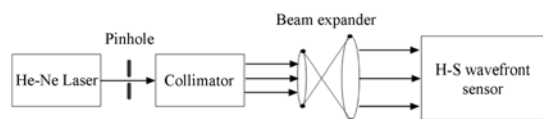


图 1 夏克-哈特曼(SH)波前探测光路

Fig. 1 Beam path of SH wave-front detection

实验中采用 He-Ne 激光器作为光源,波长为 632.8 nm。CCD 相机采用加拿大 Lumenera 公司生产的型号为 Lu165m 的可见光 CCD 相机,分辨率为  $1\ 392 \times 1\ 040$ 。微透镜阵列采用方形布局,微透镜直径为  $150\ \mu\text{m}$ ,焦距为 3.5 mm,阵列数为  $50 \times 48$ ,每个子孔径对应 CCD 上  $27 \times 27$  个像素。图 2 为实验室采集获得的 SH 阵列光斑图像,图 3 为利用标记分水岭方法进行分割后获得的质心探测窗口。由图 3 可见,采用分水岭方法分割的质心探测窗口与实际光斑尺寸非常接近。

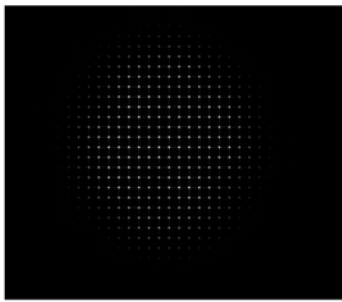


图 2 光斑阵列图像

Fig. 2 Image of spot array

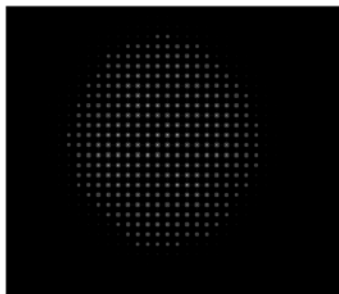


图 3 标记分水岭算法确定的质心探测窗口

Fig. 3 Centroid detecting window of marked watershed segmentation

为了评价此方法的稳定性,实验中保证入射光源不变,多次测量光斑图像,计算光斑质心及质心标准差,并将质心标准差作为评价标准。质心标准差计算公式为:

$$S_j = \left[ \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (x_{j,k} - \bar{x}_j)^2 \right]^{1/2}, \quad (5)$$

式中:  $S_j$  为第  $j$  个探测窗口的标准差。  $K$  为测量总次数,  $x_{j,k}$  为第  $j$  个探测窗口内第  $k$  次测量的光斑质心坐标值,  $\bar{x}_j$  为第  $j$  个探测窗口内测量  $K$  次

光斑质心坐标的平均值。从式中可以看出,  $S_j$  越小,质心重复精度越高,稳定性越好。

测试时,保持 He-Ne 激光器正常工作,由于噪声的影响,连续采取 30 幅光斑图像,分别在传统方法(根据微透镜对应 CCD 感光面位置标定的探测窗口,窗口尺寸根据所选用的微透镜大小确定,为  $27\ \text{pixel} \times 27\ \text{pixel}$ )与分水岭方法探测到的窗口里利用一阶矩来计算光斑质心,并计算每个子孔径质心的标准差。实验中随机抽取 25 个子孔径的标准差值来进行对比。

图 4 为传统算法与分水岭算法计算得到的质心标准差值的对比,可以看出传统方法算得的标准差值波动很大,最大约为 0.14,最小约为 0.02。由此说明,传统方法计算的质心标准差不稳定。标准分水岭方法算得的子孔径的标准差基本保持在 0.02 以下,只有极个别的孔径的标准差值超过了 0.02,较文献[9]中利用一阶矩在缩小窗口内计算得出的质心标准差 0.02 有所提高。由此说明,利用标记分水岭方法确定质心探测窗口的重复精度高,并具有很好的稳定性。

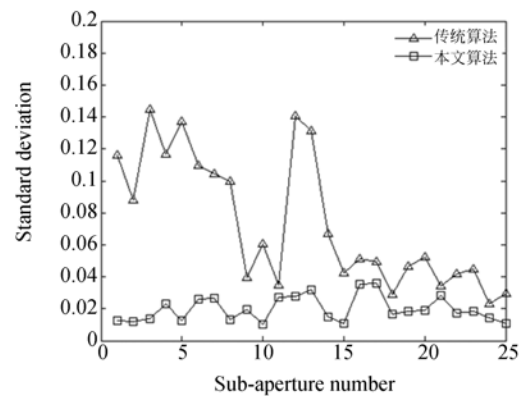


图 4 传统算法与本文算法的标准差值比较

Fig. 4 Comparison of  $S$  values calculated by traditional and watershed methods

根据实测产生的 30 幅光斑图像计算所有子孔径质心标准差并取平均值,结果如表 1 所示。传统算法测得的标准差平均值为 0.073 4,而标记分水岭算法测得的标准差平均值为 0.010 9。上述结果表明,采用分水岭算法计算的标准差  $S$  的平均值较低,从而进一步说明了利用分水岭方法确定质心探测窗口的重复精度高、稳定性好。

表 1 S 的平均值和部分质心的平均值

Tab. 1 Mean values of S and partial centroid coordinates

	传统算法	分水岭算法
$\bar{x}_{21}$	734.924 9	734.706 5
$\bar{x}_{19}$	711.571 9	711.485 3
$\bar{x}_{80}$	688.371 3	688.230 9
$\bar{x}_{115}$	665.097 1	665.012 6
$\bar{x}_{151}$	734.894 8	734.975 2
$\bar{x}_{174}$	711.496 7	711.448 2
S	0.073 4	0.010 9

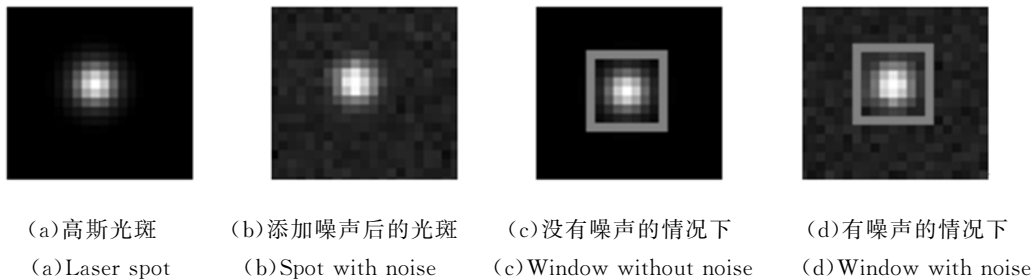


图 5 标记分水岭法获得的单个光斑窗口图

Fig. 5 Centroid calculation of single window by marked watershed method

此外, 实验中还随机生成 25 组噪声分布不同的光斑, 分别利用传统算法与本文算法计算光斑质心。图 6 给出了这两种算法的质心误差。可以

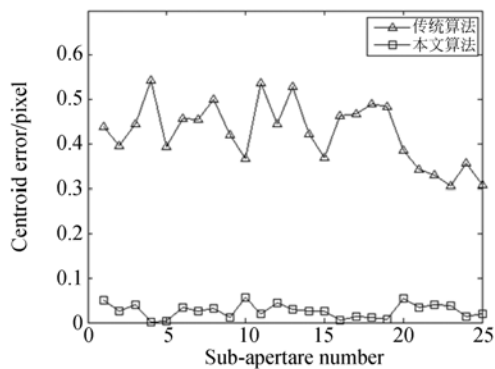


图 6 传统算法与标记分水岭算法的质心误差对比

Fig. 6 Comparison of centroid errors between traditional and marked watershed methods

为了评价光斑质心的探测精度, 实验中仿真一个符合高斯分布的光斑, 其质心位置为 (24.000, 24.000), 之后在光斑图像内加入噪声来模拟实际测量时光斑的随机噪声, 分别如图 5(a)、5(b) 所示。对应上述两种光斑分别采用标记分水岭法确定光斑探测窗口, 结果分别如图 5(c)、5(d) 所示, 质心位置分别为 (24.000, 24.000)、(24.045, 23.988)。

看出, 传统算法的质心误差波动范围较大, 平均值在 0.4 以上; 本文算法的质心误差较为稳定, 平均值为 0.026 4, 较文献[3]中利用幂因子法和窗口法所算得的质心误差也有所提高。

## 5 结 论

本文采用基于标记的分水岭算法进行 SH-WS 光斑质心探测, 并与传统光斑质心探测方法进行了对比。结果表明, 在采用分水岭算法确定的光斑探测窗口里利用一阶矩计算的光斑质心比在采用传统方法利用微透镜大小确定的光斑探测窗口里计算的光斑质心的精确度和稳定性要高, 质心探测误差为 0.026 4, 统计多幅图像计算所有窗口质心标准差的平均值由传统方法的 0.073 4 提高到 0.010 9。

## 参考文献:

- [1] SEIFERT L, LIESENER J, TIZIANI H J. The adaptive Shack-Hartmann sensor [J]. *Optics Communications*, 2003, 216(4): 313-319.
- [2] 夏明亮, 李抄, 刘肇南, 等. Shack-Hartmann 波前传感器图像自适应阈值的选取 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(2): 334-340.

wavefront sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 334-340. (in Chinese)

- [3] 钮赛赛, 沈建新, 梁春, 等. 人眼像差探测哈特曼波前传感器的质心优化 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12): 3016-3024.
- NIU S S, SHEN J X, LIANG CH, *et al.*. Centroid optimization of Hartmann-Shack wave-front sensor for human eye aberration detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 3016-3024. (in Chinese)

- [4] 马晓焯,郑翰清,饶长辉. 自适应系统中哈特曼波前传感器光斑质心的最佳标定位置 [J]. 光电工程, 2009, 36(4): 22-26.  
MA X Y, ZHENG H Q, RAO CH H. Optimal spot centroid position during Shack-Hartmann wavefront sensor calibration in adaptive optics system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(4): 22-26. (in Chinese)
- [5] 梁春,廖文和,沈建新,等. Hartmann-Shack 波前传感器的自适应质心探测方法 [J]. 中国激光, 2009, 36(2): 430-434.  
LIANG CH, LIAO W H, SHEN J X, *et al.*. An adaptive detecting centroid method for Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(2): 430-434. (in Chinese)
- [6] 王薇,陈怀新. 基于优化探测窗口的光斑质心探测方法 [J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(2): 1249-1252.  
WANG W, CHEN H X. New method for centroid detecting of focal spot based on optimizing detecting window [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(2): 1249-1252. (in Chinese)
- [7] 景文博,段锦,王晓曼,等. 夏克-哈特曼阵列光斑质心探测误差比较 [J]. 吉林大学学报:理学版, 2010, 48(6): 1013-1017.  
JING W B, DUAN J, WANG X M, *et al.*. Comparison of Shack-Hartmann array spot centroid detection errors [J]. *Journal of Jilin University: Science Edition*, 2010, 48(6): 1013-1017. (in Chinese)
- [8] PRIETO P M. Analysis of the performance of the Hartmann-Shack sensor in the human eye [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, 17(8): 1388-1398.
- [9] 夏爱利,马彩文. 提高波前探测精度的高阶矩法 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 472-477.  
XIA A L, MA C W. Method for improving wavefront detection accuracy based on high moment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 472-477. (in Chinese)
- [10] 夏爱利,马彩文. 基于图像处理技术的光斑质心高度测量 [J]. 光电子·激光, 2011, 22(10): 1542-1545.  
XIA A L, MA C W. Measurement of focal spot centroid based on image processing [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, 22(10): 1542-1545. (in Chinese)
- [11] VINCENT L, SOILLE P. Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, 13(6): 583-598.
- [12] 王宇,陈殿仁,沈美丽,等. 基于形态学梯度重构和标记提取的分水岭图像分割 [J]. 中国图像图形学报, 2008, 13(11): 2176-2180.  
WANG Y, CHEN D R, SHEN M L, *et al.*. Watershed segmentation based on morphological gradient reconstruction and marker extraction [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(11): 2176-2180. (in Chinese)
- [13] 高丽,杨树元,李海强. 一种基于标记的分水岭图像分割新算法 [J]. 中国图像图形学报, 2007, 12(6): 1025-1032.  
GAO L, YANG SH Y, LI H Q. New unsupervised image segmentation via marker-based watershed [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007, 12(6): 1025-1032. (in Chinese)
- [14] 姜文汉,鲜浩,沈峰. Shack-Hartmann 波前传感器的探测误差 [J]. 量子电子学报, 1998, 15(2): 193-199.  
JIANG W H, XIAN H, SHEN F. The detection error of Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1998, 15(2): 193-199. (in Chinese)
- [15] GAO G R, YU X. Accuracy analysis of a Hartmann-Shack wavefront sensor operated with a faint object [J]. *Optical Engineering*, 1994, 33: 2331-2335.
- [16] 沈峰,姜文汉. 提高 Hartmann 波前传感器质心探测精度的阈值方法 [J]. 光电工程, 1997, 24(3): 1-8.  
SHEN F, JIANG W H. The threshold method improving the centroid detection accuracy of a Hartmann-shack wavefront sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1997, 24(3): 1-8. (in Chinese)
- [17] 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.  
REN J F, RAO CH H, LI M Q. An adaptive threshold selection method for Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, 29(1): 1-5. (in Chinese)

## 作者简介:



程利群(1988—),男,吉林长春人,2012年于长春理工大学获得学士学位,主要从事图像处理,哈特曼波前探测器等方面的研究。E-mail: liquncheng827@126.com

## 导师简介:



王晓曼(1956—),女,吉林长春人,教授,博士生导师,1980年,1983年于长春光学精密机械学院分别获得学士、硕士学位,主要从事光通信、光电信息处理、激光光束质量、哈特曼波前探测器等方面的研究。E-mail: wmfytys@126.com

(本栏目编辑:曹金)

(版权所有 未经许可 不得转载)