

# 光栅型波前曲率传感器光斑自动定位提取算法

徐其峰, 陈波\*

华北理工大学电气工程学院, 河北 唐山 063210

**摘要** 针对光栅型波前曲率传感器, 提出一种基于最大类间方差法和质心法相结合的光斑自动定位提取算法, 并进行了实验验证。使用最大类间方差法对原始光强分布图像进行二值化; 根据质心坐标对二值化图像进行分割, 得到两幅含有单个光斑的二值化图像; 分别计算两幅图像的质心坐标, 作为原始光强图像中的两个光斑中心, 并在原始图像中进行光斑提取。搭建了基于离轴菲涅耳波带片的光栅型波前曲率传感器实验装置, 采用上述方法自动提取光斑, 采用拉普拉斯算子本征模式法进行波前复原, 并与哈特曼波前传感器的测量结果进行了比较。研究结果表明该算法能够自动提取光栅型波前曲率传感器的光斑, 定位误差小于 4 pixel。

**关键词** 自适应光学; 波前曲率传感器; 光斑提取; 最大类间方差法; 质心法

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.220101

## Automatic Spot Location and Extraction Algorithm for Grating Wavefront Curvature Sensor

Xu Qifeng, Chen Bo\*

College of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China

**Abstract** An automatic spot location and extraction algorithm based on the combination of the Otsu method and the centroid method is proposed herein for the grating wavefront curvature sensor and verified through experiments. The original intensity distribution image is first binarized by using Otsu method. Then, the binary image is then segmented into two binary images according to the centroid coordinates such that each binary image contains one spot. Finally, the centroid coordinates of the two images are calculated as two spot centers in the original intensity image, while the two spots in the original image are extracted from the original intensity image. An experimental setup of the grating wavefront curvature sensor is built based on an off-axis Fresnel zone plate to verify the effectiveness of the proposed algorithm. In the experiment, the spots are extracted automatically by using the above algorithm; then, the wavefront is restored by using Laplacian eigenfunctions. The results are compared with those of the Hartmann wavefront sensor. The experimental results demonstrate that the proposed algorithm can extract spots automatically with an error less than 4 pixel.

**Key words** adaptive optics; wavefront curvature sensor; spot extraction; Otsu method; centroid method

**OCIS codes** 010.7350; 230.3720; 050.1950

## 1 引言

波前曲率传感器通过测量两个不同传输距离处的光强信号来复原波前信息<sup>[1]</sup>, 已在天文自适应光学<sup>[2]</sup>、人眼波前像差测量<sup>[3]</sup>、光学检测<sup>[4]</sup>等方面得到广泛的应用和关注。波前曲率传感器的分光方式主要有直接分光式、薄膜振动式和光栅分光式。与其

他方式相比, 基于光栅分光的波前曲率传感器具有全光学实现、结构紧凑、同步测量等特点<sup>[4]</sup>。光栅型波前曲率传感器主要由离轴的非涅耳波带片(FZP)、短聚焦透镜和光电探测器构成<sup>[5-7]</sup>, 位于透镜焦平面上的光电探测器能够同步记录两个不同传输距离处的光强信号, 波前复原时首先需要准确定位并提取两个光强分布(下文称之为光斑)。如果待

收稿日期: 2019-04-18; 修回日期: 2019-05-08; 录用日期: 2019-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(51774139)、河北省高等学校科学研究项目(QN2018039)

\* E-mail: chenbo182001@163.com

测波前存在较大的整体倾斜,探测面上的光斑则会有较大幅度的位移,因此需要实时定位以消除波前整体倾斜的影响。另外,在天文自适应光学系统中,大气扰动引起的波前畸变中倾斜分量较大,实时定位和提取光斑能够使曲率传感器专注于测量高阶波前畸变,并以此计算变形镜的控制信号,从而较好地实现倾斜像差和高阶像差的解耦控制。

目前常用的光斑中心定位方法主要有灰度质心法、曲线拟合法、空间矩法<sup>[8-10]</sup>。灰度质心法简单,运算量少,在光斑形状规则、强度分布均匀时定位精度可达像素级。曲线拟合法的精度与光斑的统计特性有较大关系,当光斑随机分布时,拟合阶次较难选取。空间矩法的精度与光斑边缘特性有较大关系。由于波前扰动的随机特性,波前曲率传感器的光斑分布具有随机特性。因此,本文针对光栅型波前曲率传感器可同步测量两个光斑的特点,以及基于最大类间方差法(Otsu)适用于双峰情况自动求取阈值的特性<sup>[11]</sup>,提出基于Otsu法和质心法相结合的光斑自动定位及提取算法。该算法首先对光斑图像选取合适的阈值进行二值化处理,然后再计算质心位置,进而减小高阶次衍射光斑、探测器噪声以及光强随机分布的影响。

## 2 基本原理

### 2.1 测量原理

光栅型波前曲率传感器主要由离轴的FZP、短聚焦透镜和光电探测器构成<sup>[5]</sup>,如图1所示。只考虑FZP的一对主实、虚焦点,根据其衍射分光特性,入射平行光束经过FZP后会衍射出一束发散的光束和一束会聚的光束。因此入射光束依次通过离轴的FZP、短聚焦透镜后,透镜焦平面上的光电探测器就能够同步记录到焦点前后对称离焦面上的光强信号 $I_1$ 和 $I_2$ 。

从几何光学的角度定性分析,如果入射波前是

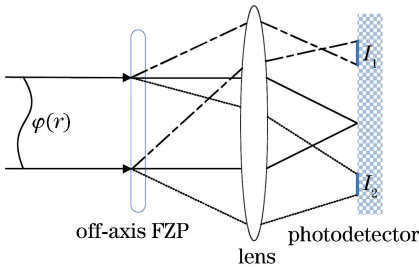


图1 基于菲涅耳波带片的曲率传感器原理  
Fig. 1 Principle of curvature sensor based on Fresnel zone plate

一个理想平面波, $I_1$ 和 $I_2$ 完全相同;如果入射波前有畸变,波前的曲率变化将改变光强分布,即一个面上某点的光强增加,另一个面上对应点的光强减弱,因此两个探测面上对应点的光强差反映了波前的曲率信息<sup>[5]</sup>。从物理光学的角度,可以推导出归一化的光强差和波前曲率以及波前沿光瞳边界法向微分之间的关系满足 Neumann 边界条件下的泊松方程<sup>[1]</sup>,即

$$\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = k \left[ \nabla^2 \varphi(r) - \frac{\partial}{\partial n} \varphi(r) \sigma_c \right], \quad (1)$$

式中: $k$ 是由波带片、透镜焦距等参数决定的常数; $\nabla^2$ 为拉普拉斯算子; $\varphi(r)$ 表示光瞳面上的入射光相位; $n$ 为光瞳边沿处的法向斜率单位矢量大小; $\sigma_c$ 为光瞳区域的边界。因此测得 $I_1$ 和 $I_2$ 后求解上述方程即可复原出待测波前 $\varphi(r)$ 。

### 2.2 光斑自动定位和提取算法

由(1)式可知,复原波前 $\varphi(r)$ 时,首先需要准确定位并提取光电探测器记录的两个光斑 $I_1$ 和 $I_2$ ,在此采用基于Otsu法和质心法相结合的光斑自动定位提取算法,如图2所示。首先采用Otsu法计算阈值,对光电探测器记录的原始图像 $I$ 进行二值化处理;然后计算二值化图像的质心坐标,根据质心坐标将二值化图像分为两幅图像,其中每一幅中均包含一个光斑;接着分别计算两幅二值化图像的质心坐标 $c_1$ 和 $c_2$ ,将其作为原始图像中 $I_1$ 和 $I_2$ 的中心;最后根据传感器参数计算合适的截取直径,以坐标 $c_1$ 和 $c_2$ 为中心从原始图像 $I$ 中截取出波前复原所需的 $I_1$ 和 $I_2$ 。

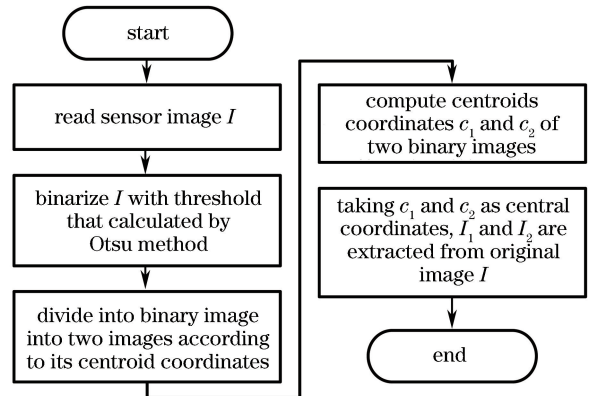


图2 光斑自动定位和提取流程图  
Fig. 2 Flow chart of automatic spot location and extraction algorithm

选取合适的二值化阈值是光斑自动定位的关键。Otsu法是一种基于全局的自适应阈值确定方法<sup>[11-12]</sup>,由日本学者大津提出,又叫大津法。根据图

像的灰度特性,将图像分为前景和背景两个部分,当取最佳阈值  $T$  时两部分之间的差别最大,即最大类间方差。采用遍历灰度级的方法得到使类间方差取最大值的灰度级,即最佳阈值  $T$ 。

光斑自动定位后,需要根据传感器参数计算截取光斑的直径。光栅型波前曲率传感器中 FZP 的一级焦距和短聚焦透镜的焦距分别为  $f_F$  和  $f_1$ ,其中  $f_F$  远大于  $f_1$ ,二者的组合焦距为  $f_F f_1 / (f_F - f_1)$ 。假设入射平行光束直径为  $d_0$ ,不考虑衍射效应,可以计算出探测面上  $I_1$  和  $I_2$  直径  $d \approx d_0 f_1 / f_F$ 。

### 3 实验结果

#### 3.1 实验装置

利用激光器、衰减片、扩束器、光阑、像差片、分光棱镜、相位型菲涅耳波带片、短焦透镜、CMOS 相机、哈特曼波前传感器搭建了如图 3 所示的实验装置,其中波前曲率传感器由菲涅耳波带片、短焦透镜

和 CMOS 相机组成。激光器波长为 635 nm;波带片的一级焦距为 3 m;CMOS 相机选取北京嘉恒中自图像技术有限公司的 OK\_SM5067 型黑白相机,分辨率为 2592 pixel  $\times$  1944 pixel,像元尺寸为 2.2  $\mu\text{m}$ 。哈特曼传感器为 Thorlab 公司的 WFS150-7AR,测量精度为 1/15 波长,有效孔径直径为 4.76 mm,实验中光束直径为 4.6 mm,因此只采用了部分孔径。

激光器的出射光束依次通过衰减片、扩束器、光阑后由分光棱镜分为两束,一束进入波前曲率传感器,另一束进入哈特曼波前传感器。采用上述光斑定位提取算法截取波前曲率传感器的光斑数据,然后采用拉普拉斯算子本征模式法进行波前复原<sup>[6-7]</sup>。实验系统中传感器光斑的真实位置难以直接获得,导致不能较好地评价自动定位算法的可行性和精度,因此将波前曲率传感器与夏克哈特曼传感器的波前复原结果进行比较,由此间接地分析上述光斑自动定位算法的可行性。

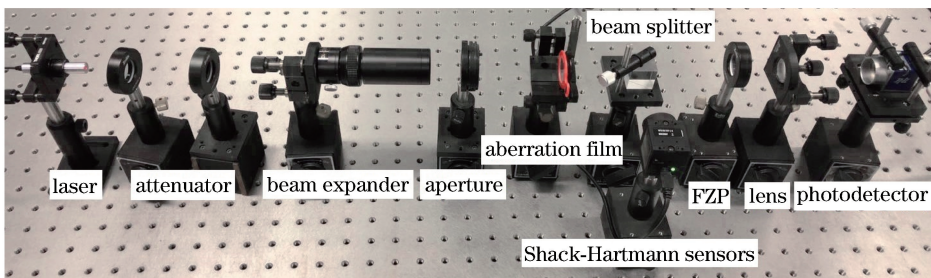


图 3 实验装置图

Fig. 3 Experimental setup

#### 3.2 实验结果及分析

图 4 为不同像差情况下的光斑自动定位提取实验结果,其中第 1 列为波前曲率传感器相机采集到的原始图像;第 2 列为对应的二值化图像,第 3 列和第 4 列为根据质心坐标将二值化图像分割成的两幅图像,其中每一幅中包含一个光斑;第 5 列和第 6 列为提取出的  $I_1$  和  $I_2$ 。根据前面的分析,截取的  $I_1$  和  $I_2$  为 70 pixel  $\times$  70 pixel。由图 4 的第 1 列可以看出,相位光栅型波前曲率传感器的光能利用率高。实验中采用的菲涅耳波带片是二元结构的相位型光栅,根据二元光学衍射效率计算公式可知,  $\pm 1$  级衍射光能占比可达 81%。由图 4 的第 5 列和 6 列可以看出,该算法可以准确地提取波前曲率传感器的光斑数据。

针对图 4 的 4 组测量数据,采用前 20 阶拉普拉斯算子本征模式进行波前复原<sup>[13]</sup>,并与哈特曼

波前传感器的测量结果进行对比。两种传感器的复原波面如图 5 所示,其中第 1 行为波前曲率传感器(CS)的结果,第 2 行为哈特曼波前传感器(HS)的结果,单位为波长;4 组波面数据的均方根值( $d_{\text{pv}}$ )和峰谷值( $W_{\text{rms}}$ )对比如表 1 所示。图 5 中,第 1 列为没有加像差片时两个传感器的复原结果,即实验系统自身的误差,可以看出二者形状有明显差异;从第 2、3、4 列图可以看出两个传感器的复原波面相似。表 1 中,前 3 组数据两个传感器的结果比较接近,波面均方根和峰谷值的差异在 0.025 $\lambda$  和 0.08 $\lambda$  ( $\lambda$  表示激光器波长,即 635 nm)以内,主要原因是波前曲率传感器存在较大的系统误差;第 4 组数据的复原结果差距较大,原因在于待测波前  $W_{\text{rms}}$  较大,超出了曲率传感器的线性范围<sup>[6]</sup>。实验结果验证了上述光斑提取及波前复原的准确性。

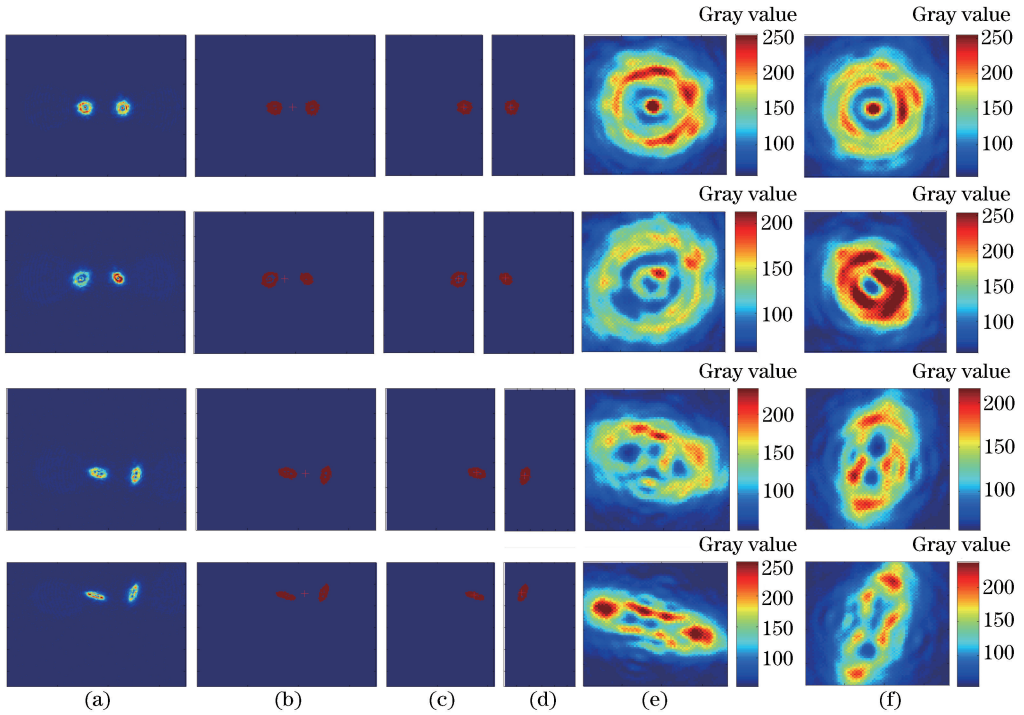


图 4 光斑自动定位提取算法运行效果。(a)原始图像;(b)二值化图像;(c)光斑图像 1;(d)光斑图像 2;(e)目标光斑 1;(f)目标光斑 2

Fig. 4 Experimental results of automatic spot location and extraction. (a) Original image; (b) binary image; (c) spot image 1; (d) spot image 2 (e) target spot 1; (f) target spot 2

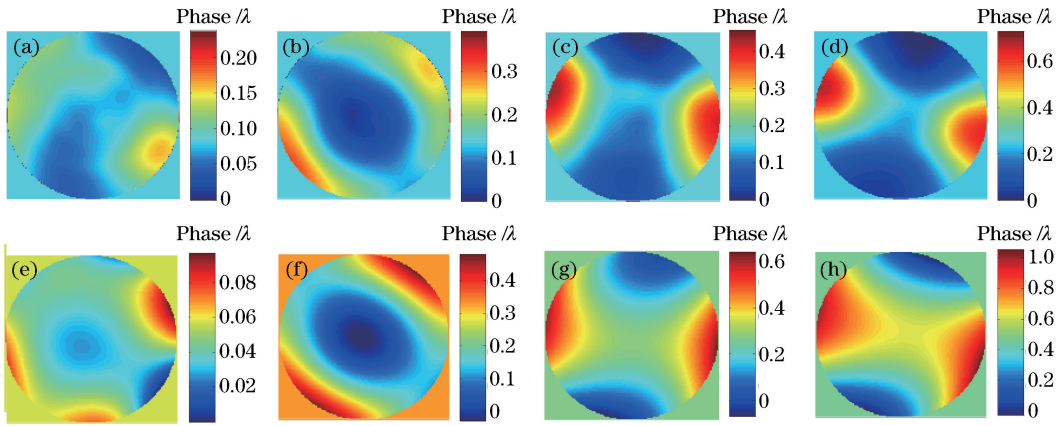


图 5 两种传感器波前复原结果。(a)波前曲率传感器复原波面 1;(b)波前曲率传感器复原波面 2;(c)波前曲率传感器复原波面 3;(d)波前曲率传感器复原波面 4;(e)哈特曼波前传感器复原波面 1;(f)哈特曼波前传感器复原波面 2;(g)哈特曼波前传感器复原波面 3;(h)哈特曼波前传感器复原波面 4

Fig. 5 Wavefront restored by two sensors. (a) Wavefront 1 restored by CS; (b) wavefront 2 restored by CS; (c) wavefront 3 restored by CS; (d) wavefront 4 restored by CS; (e) wavefront 1 restored by HS; (f) wavefront 2 restored by HS; (g) wavefront 3 restored by HS; (h) wavefront 4 restored by HS

表 1 波前曲率传感器和哈特曼波前传感器的测量结果(均方根和峰谷值)对比

Table 1 Comparison of measurement results ( $W_{rms}$  and  $d_{pv}$ ) obtained by CS and HS

$\lambda$

Sensor	$W_{rms}/d_{pv}$			
	Wavefront 1	Wavefront 2	Wavefront 3	Wavefront 4
CS	0.0216/0.1478	0.0965/0.4497	0.0985/0.5613	0.1347/0.6231
HS	0.0131/0.0974	0.1137/0.4959	0.1233/0.6412	0.1846/1.0757

考虑到实验中待测像差数量和种类的限制,为进一步分析光斑自动定位算法的精度,利用 MATLAB 软件建立了与上述实验装置参数一致的数值仿真模型,利用 Harding 等<sup>[14]</sup>的方法生成大气湍流波前畸变,湍流外尺度为 100 m,内尺度为 0.01 m,  $D/r_0$  ( $D$  表示系统孔径大小,  $r_0$  表示大气相干长度) 等于 2, 5, 10, 20 时随机生成的 500 frame 相位屏, 去除其中的整体倾斜, 然后进行

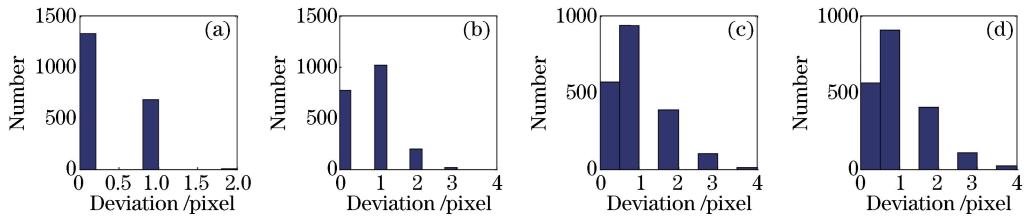


图 6 光斑定位绝对偏差的统计直方图。(a)  $D/r_0=2$ ; (b)  $D/r_0=5$ ; (c)  $D/r_0=10$ ; (d)  $D/r_0=20$

Fig. 6 Absolute deviation histogram of spot location. (a)  $D/r_0=2$ ; (b)  $D/r_0=5$ ; (c)  $D/r_0=10$ ; (d)  $D/r_0=20$

将基于 Otsu 法和质心法相结合的光斑自动定位算法与常用的质心法和曲线拟合法进行对比。针对以上随机相位屏, 采用常规的质心法进行定位, 误差的均值分别为 0.3975, 0.7175, 1.1625, 1.5275 pixel, 与本文方法相比,  $D/r_0$  等于 10, 20 时的定位误差较大。对于曲线拟合法, 数值仿真发现拟合阶次对定位精度的影响较大, 且不易选择。

## 4 结 论

光栅型波前曲率传感器进行波前复原时需要准确定位并提取两个光强分布。对传感器采集到的光强图像, 首先采用最大类间方差法选择合适的阈值进行二值化处理, 在此基础上使用质心法进行光斑中心定位, 定位误差的均值约为 1 pixel, 最大值小于 4 pixel。实时定位和提取光斑能够消除波前整体倾斜的影响, 使曲率传感器专注于高阶波前畸变的测量。

## 参 考 文 献

- [1] Roddier F. Curvature sensing and compensation: a new concept in adaptive optics[J]. Applied Optics, 1988, 27(7): 1223-1225.
- [2] Crass J, King D, MacKay C. The AOLI low-order non-linear curvature wavefront sensor: laboratory and on-sky results[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9148: 91482C.
- [3] Torti C, Gruppeta S, Diaz-Santana L. Wavefront curvature sensing for the human eye[J]. Journal of Modern Optics, 2008, 55(4/5): 691-702.

仿真。500 frame 相位屏的波面均方根均值分别为 0.5427, 1.2726, 2.1107, 3.7120 rad。光斑定位绝对偏差的统计直方图如图 6 所示, 均值分别为 0.3405, 0.7310, 1.0265, 1.0665 pixel, 最大值均小于 4 pixel, 即随着波前畸变的增大, 算法的定位误差随之增大。需要说明的是, 由于光斑提取以像素为单位, 因此对质心运算结果取整, 即直方图中以像素为单位。

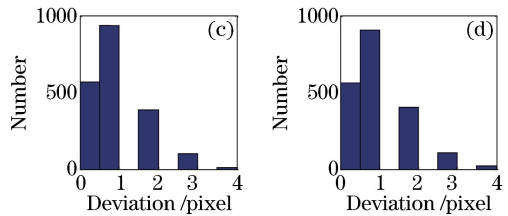


图 6 光斑定位绝对偏差的统计直方图。(a)  $D/r_0=2$ ; (b)  $D/r_0=5$ ; (c)  $D/r_0=10$ ; (d)  $D/r_0=20$

Fig. 6 Absolute deviation histogram of spot location. (a)  $D/r_0=2$ ; (b)  $D/r_0=5$ ; (c)  $D/r_0=10$ ; (d)  $D/r_0=20$

- [4] Jiang Z F, Xi F J, Xu X J, *et al.* Theory and applications of defocus grating wavefront curvature sensing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(1): 205-210.  
姜宗福, 刁锋杰, 许晓军, 等. 光栅型波前曲率传感器原理和应用[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 205-210.
- [5] Blanchard P M, Fisher D J, Woods S C, *et al.* Phase-diversity wave-front sensing with a distorted diffraction grating [J]. Applied Optics, 2000, 39(35): 6649-6655.
- [6] Chen B, Yang J, Li X Y, *et al.* Phase grating wavefront curvature sensor based on liquid crystal spatial light modulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 082301.  
陈波, 杨靖, 李新阳, 等. 基于液晶空间光调制器的光栅型波前曲率传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 082301.
- [7] Chen B, Yang J, Li X Y, *et al.* Modal control technique of adaptive optics with wavefront curvature sensing [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0201002.  
陈波, 杨靖, 李新阳, 等. 波前曲率传感自适应光学的模式型控制技术[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0201002.
- [8] Li C L, Hu X Q. Study on centroid-of-correlation-function approach for estimating sub-image shifts in extended scene Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 0928003.  
李臣亮, 胡新奇. 计算扩展目标夏克-哈特曼波前传感器子图像偏移量的相关函数质心法研究[J]. 光学

- 学报, 2017, 37(9): 0928003.
- [9] Wang L L, Hu Z W, Ji H X. Laser spot center location algorithm based on Gaussian fitting [J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(5): 985-990.  
王丽丽, 胡中文, 季杭馨. 基于高斯拟合的激光光斑中心定位算法 [J]. 应用光学, 2012, 33(5): 985-990.
- [10] Li T T, Yang F, Li S G, *et al.* Extraction method of line-structured light stripe center based on Gauss-Lorenz decomposition peak fitting [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(7): 071201.  
李涛涛, 杨峰, 李石庚, 等. 基于高斯-洛伦兹分峰拟合的线结构光条中心的提取方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(7): 071201.
- [11] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [12] Li Q, Tang H, Chi J N, *et al.* Gesture segmentation with improved maximum between-cluster variance algorithm[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(4): 528-537.  
李擎, 唐欢, 迟健男, 等. 基于改进最大类间方差法的手势分割方法研究 [J]. 自动化学报, 2017, 43(4): 528-537.
- [13] Huang S Y, Xi F J, Liu C H, *et al.* Phase retrieval using eigenfunctions to solve transport-of-intensity equation[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1001002.  
黄盛炆, 习锋杰, 刘长海, 等. 本征函数法求解光强传输方程的相位反演方法 [J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1001002.
- [14] Harding C M, Johnston R A, Lane R G. Fast simulation of a Kolmogorov phase screen[J]. Applied Optics, 1999, 38(11): 2161-2170.