

光纤直径高精度测量中自动对焦窗口选择方法

胡 鹏^{1,2}, 王志斌^{1,2}, 徐美芳², 王冠军², 谭绪祥²

¹中北大学理学院, 山西 太原 030051;

²中北大学电子测试技术重点实验室, 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051

摘要 在显微成像下准确、稳定、高效、实时地对光纤,尤其是抛剥涂覆层的光纤直径进行测量,需要采用优异的自动对焦技术。对焦窗口的选择是自动对焦的前提,为了避免光纤侧面显微成像下中间透光或衍射亮带对对焦窗口的影响,提出了一种改进的定域椭圆取窗方法,并比较了不同窗口形状对清晰度评价和计算速度的影响。将定域椭圆取窗方法应用于125 μm标准光纤的测量,结果表明标准误差在0.3 μm内,测量精度与VM2.22精密测量软件的微米级相比提高了一个数量级。这种定域椭圆取窗方法实用性强,速度快,通用性好,可以作为光纤直径显微测量中一种有效的自动对焦窗口选择法。

关键词 成像系统; 显微成像; 自动对焦; 对焦窗口; 光纤直径测量

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.081101

Window Selection Method of Automatic Focusing in High Precision Measurement of Optical Fiber Diameter

Hu Peng^{1,2}, Wang Zhibin^{1,2}, Xu Meifang², Wang Guanjun², Tan Xuxiang²

¹College of Science, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;

²Engineering Technology Research Center of Shanxi Province for Opto-Electronic Information and Instrument, Key Laboratory of Electronic Testing Technology, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

Abstract Excellent auto-focusing technology is necessary for measuring the diameter of the optical fiber accurately, stably, efficiently and real-time, especially the coating layer peeled optical fiber by microimaging. Focusing window selection is the premise of auto focusing. In order to avoid the influence of the intermediate transmission or the diffraction light band on the optical fiber side imaging, an improved method to select the localized elliptical window is proposed. At the same time, the effects of different window shapes on the clearness evaluation and calculation speed are also compared. By applying the method to the measurement of 125 μm standard optical fiber, we find that the standard error is within 0.3 μm and the measurement accuracy is increased by an order of magnitude compared to the micron scale of the VM2.22 precision measurement software. The method is practical, fast and versatile, and can be used as an effective method for automatic focusing window selection.

Key words imaging systems; microscopic imaging; auto-focusing; focusing window; measurement of fiber diameter

OCIS codes 110.2970; 110.3000; 110.2960

1 引言

显微成像是一种高精度的测量手段,对对焦的要求较高,对焦的好坏是能否获得高精度结果的关键因

收稿日期: 2017-02-24; **收到修改稿日期:** 2017-03-28

基金项目: 国家自然科学基金仪器专项基金(61127015)、国家自然科学基金(61405127)、国家重大科技发展专项(20116YFC0101603)

作者简介: 胡 鹏(1990—),男,硕士研究生,主要从事声光光谱成像方面的研究。E-mail: 445811150@qq.com

导师简介: 王志斌(1967—),男,硕士,教授,硕士生导师,主要从事偏振光谱成像及遥感方面的研究。

E-mail: wangzhibin@nuc.edu.cn(通信联系人)

素^[1]。在光纤直径的测量领域,显微成像技术不可或缺。为了达到优异的聚焦效果,使得成像清晰,在运用灰度差分清晰度评价的前提下,需要对光纤侧面成像对焦窗口进行特殊处理和选择。对焦窗口即为评价函数所计算的区域,在对焦窗口的选择过程中,如果以整幅图片作为对焦窗口,计算量会很大,从而降低对焦速度;另外,背景对图像清晰度评价会有一定影响^[2],从而影响对焦结果。由此可知,对焦窗口的选择是非常重要的,会直接影响对焦的速度和准确度,进而影响测量结果。

常见的窗口选择方法有中央区域取窗、黄金分割点取窗、倒 T 取窗、非均匀采样取窗等^[3-4]。以中央区域取窗为例,该方法将对焦窗口选取为图像的中心区域,使该窗口内目标图像达到最清晰来实现自动调焦,很多场合都可以选用这种方法。但目前大部分文献都是在讨论和改进评价函数^[5-9]及调焦系统^[10],很少涉及聚焦窗口的选择问题。在自动聚焦的研究领域,国外早期的工作也主要针对聚焦评价函数^[11-13],以及聚焦系统的硬件方面^[14]。

针对光纤应用领域对于光纤几何尺寸,特别是抛剥涂覆层光纤直径的高精度测量要求,考虑到光纤直径测量中主要关心的光纤边缘问题,本文提出一种基于边缘检测的定域椭圆窗口选择法,该方法能有效降低图像背景和其他因素对于评价函数的干扰,并且大大提高聚焦速度。

2 光纤直径测量的窗口选择

2.1 光纤显微成像自动对焦存在的问题

为了突出光纤特征,在光纤显微成像过程中一般选用背向照明的方式,在这种照明方式下中间亮带影响尤为突出。图 1 为光纤直径测量部件摆放示意图。

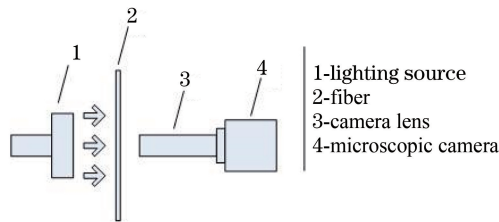


图 1 光纤直径测量部件摆放示意图

Fig. 1 Schematic of fiber diameter measurement

由于剥去涂覆层的光纤中间有一定的透光和衍射作用,所以通过显微摄像头采集到的光纤图像如图 2 所示,中间亮带会对清晰度评价造成严重的影响。

如果采用前面提及的传统取窗方法,自动聚焦很难顺利进行,以最常用的中央取窗为例得到的图像,如图 3 所示。



图 2 采集到的原始图

Fig. 2 Acquired original image

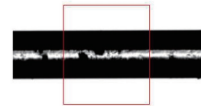


图 3 中央取窗方法获取的图像

Fig. 3 Image obtained by intermediate window selection

运用灰度差分函数作为清晰度评价函数^[15],假设某点 (x, y) 处的灰度值为 $h(x, y)$,则该点处的梯度可以定义为

$$\begin{cases} H_x = h(x, y) - h(x - 1, y) \\ H_y = h(x, y) - h(x, y - 1) \end{cases}, \quad (1)$$

那么,灰度差分的形式可以表示为

$$G = \sum_{(x,y)} (|H_x| + |H_y|). \quad (2)$$

在对焦过程中,离焦情况下图像相对模糊,各像素灰度值变化较为平缓,上述评价函数值较小;当接近正焦时,图像较为清晰,各像素灰度值变化急剧,上述评价函数值较大。根据灰度差分评价函数值的大小就可

以判断对焦情况,在评价函数值最大处基本可以认为正焦。

在整个对焦范围内连续采集图像并编号,然后根据(2)式分别计算其评价函数值,以图像编号为横坐标,归一化的评价函数值为纵坐标绘制曲线图,如图4所示。

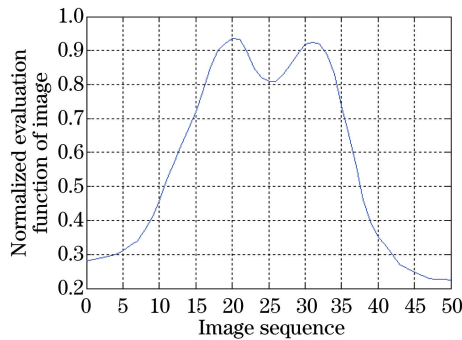


图4 中央取窗评价曲线

Fig. 4 Evaluation curve of intermediate window selection method

通过图4评价曲线可以清楚地看出,在整个对焦范围内评价函数值有2个峰值,进一步分析原因发现,图像中的2个峰值分别对应于中间明亮区域最清晰和边缘最清晰。然而在光纤直径的测量中,人们一般仅关心显微图像中光纤的上下边缘,中间亮带给自动对焦带来了误判,使得自动对焦后往往并非边缘最清晰,而是中间带最清晰。

2.2 改进的定域取窗法

2.2.1 基本原理

为了避开中间亮带给自动聚焦带来的误判,先对图像进行边缘化处理,检测出光纤的上下边缘,然后以此上下边缘作为参考位置取窗,从而避开中间亮带的介入,使得对焦窗口仅以光纤上下边缘为主体。

在边缘处理过程中,借鉴Canny算子^[16-17]的处理过程,先采用二维高斯函数构造平滑滤波器:

$$G(x, y) = \sum_{x-m}^{x+m} \sum_{y-m}^{y+m} \exp \left[-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2} \right], \quad m = \frac{n-1}{2}, \quad (3)$$

然后利用(3)式对原始图像 $f(x, y)$ 进行卷积操作,得到平滑图像

$$I(x, y) = G(x, y) * f(x, y), \quad (4)$$

式中 n 表示高斯滤波器窗口大小, σ 为高斯函数的标准差,用以控制平滑程度。

2×2 邻域一阶偏导为

$$f_x = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}, \quad f_y = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

利用(5)式的有限差分计算平滑后的图像 $I(x, y)$ 的梯度值 $H(x, y)$ 和梯度方向 $D(x, y)$:

$$H(x, y) = \sqrt{i_x^2 + i_y^2}, \quad (6)$$

$$D(x, y) = \arctan \frac{i_x}{i_y}, \quad (7)$$

式中 i_x 和 i_y 分别为 f_x 和 f_y 沿 x 方向和 y 方向作用于 $I(x, y)$ 的结果。然后采用 3×3 窗口沿梯度方向,在8个方向上的邻域对 $H(x, y)$ 的所有元素进行插值。对于每个点,将邻域中心元素 $H(x, y)$ 与沿梯度方向的2个梯度幅值插值的结果进行比较,如果 $H(x, y)$ 的值小于梯度方向上的2个插值结果,就将 $H(x, y)$ 对应的边缘标志位赋予0。最后使用高低阈值处理经过非极大值抑制的梯度幅值,从而得到2个阈值边缘图像 $K(x, y)$ 和 $L(x, y)$,在图像 $L(x, y)$ 中连接边缘轮廓,连接到端点时,在 $K(x, y)$ 中寻找弱边缘点,填补 $L(x, y)$ 图像的边缘空隙。

2.2.2 改进程序流程及验证

Canny 算子边缘化处理的高低阈值是事先设定的,因为环境因素的干扰同一个阈值未必每次都能很好地检测到边缘。为此引入高低阈值可变机制,从而便于边缘检测的完成。定域取窗流程如图 5 所示。

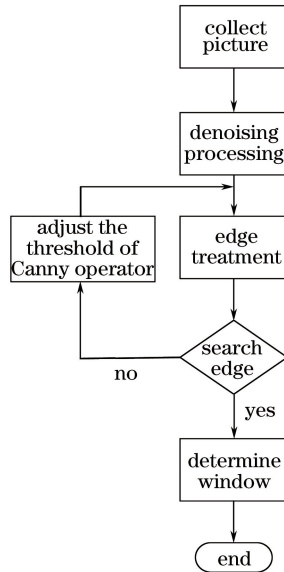


图 5 定域取窗流程

Fig. 5 Process of domain window selection

首先,在非正焦的情形下采集图像,对图像进行去噪和边缘化处理,紧接着分别从图像顶端和底端向中间部分搜索边缘,一旦搜索到图像边缘则以该边缘为矩形短边中线选取一块矩形区域。如果没有顺利搜索到边缘,则说明边缘化处理不当,重新调整 Canny 算子的高低阈值,再次进行边缘检测,直到能够发现边缘。当取窗确定后,因为聚焦过程中光纤固定,所以尽管取窗是在边缘化处理的图像上进行的,但是其与实际图像中边缘位置的对应关系是不变的,之后以该窗口作为灰度评价的计算窗口。同样在整个对焦范围内连续采集图像并编号,然后根据(2)式分别计算其评价函数值并绘制评价曲线,如图 6 所示。通过评价曲线可见,由于中央亮带引起的双峰已经消失,此时已基本满足自动对焦的窗口需要。

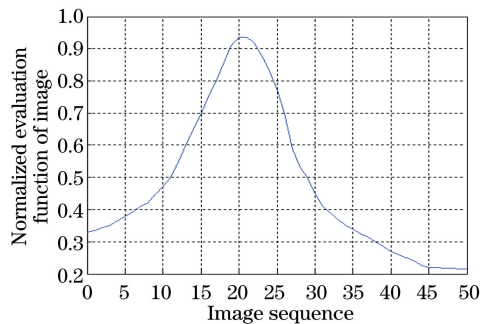


图 6 定域选窗评价曲线

Fig. 6 Evaluation curve of domain window selection method

3 不同窗口形状对评价结果的影响

3.1 不同窗口形状对评价函数值的影响

在选择窗口形状时,应尽量避免图像上下边缘和中间亮带对评价结果的影响,使取图区域尽可能大地包含上下边缘所在区域,即在在这些区域取图面积尽量大,同时又要尽可能使所取区域中的图像上下边缘和中间亮带足够小。因此,椭圆和矩形是较为理想的窗口形状。为此,分别以矩形和椭圆作为对焦评价窗口形状,计算清晰度评价函数值。

矩形取窗表达式为

$$\begin{cases} |x - d_{\text{col}}| \leq \frac{a}{2} \\ |y - d_{\text{row}}| \leq \frac{b}{2} \end{cases}, \quad (8)$$

椭圆取窗表达式为

$$\frac{|x - d_{\text{col}}|^2}{a^2} + \frac{|y - d_{\text{row}}|^2}{b^2} \leq 1, \quad (9)$$

式中点 $(d_{\text{col}}, d_{\text{row}})$ 代表边缘线中点,可以根据需要在边缘线上取任意点, a 和 b 分别表示矩形长和宽或椭圆的长、短轴。根据(2)式,计算矩形窗口与椭圆窗口的评价函数值,评价曲线如图7所示。可以看出,椭圆窗口的最优值较矩形窗口小,且评价值相对更优,更有利于自动搜索算法的执行。

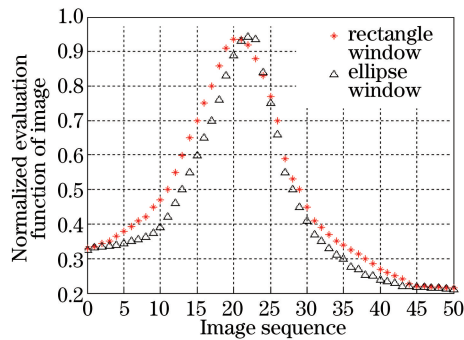


图7 不同窗口的评价曲线

Fig. 7 Evaluation curves of different windows

3.2 不同窗口形状对计算时间的影响

在椭圆长短轴与矩形长宽相等的条件下,椭圆面积较矩形面积小,因此用于评价计算的像素点少,理论上椭圆窗口计算速度较矩形快。硬件选用惠普 CQ-40 笔记本,操作系统选用 Windows 7 旗舰版,椭圆长轴和矩形长选用 100 pixel,椭圆短轴和矩形宽选用 50 pixel,分别测试二者的计算速度,结果如表 1 所示。由表 1 可知,椭圆窗口的计算时间短于矩形窗口,且随着图像数的增加这种优势越来越明显。

表 1 矩形窗口与椭圆窗口计算时间

Table 1 Calculation time of rectangle window and ellipse window

Number of image	Rectangle window /s	Ellipse window /s
1	0.323	0.248
10	3.985	1.968
25	6.075	5.231
50	20.578	17.632

4 测试结果及分析

4.1 实验装置

为了验证这种对焦窗口选择方法的可行性,将该对焦窗口运用于 $125 \mu\text{m}$ 标准光纤的直径测量中,软件开发平台为 Visual 2013 旗舰版,显微相机型号为 SW300E 的 USB2.0 接口工业相机,300 万像素,像素尺寸为 $2.8 \mu\text{m} \times 2.8 \mu\text{m}$,分辨率可设置为 2048×1563 、 1280×1024 、 640×480 、 320×240 ,镜头选用台湾显微科技 SunWayT71AT908 型镜头,照明光源采用普通 LED 环形光源,聚焦运动位移台采用 WN230T100M 电动位移台,运动控制卡采用成都乐创自动化有限公司生产的 MPC08SP 运动控制卡,实验装置如图 8 所示。

4.2 测量结果及分析

在利用本文系统进行直径测量前,首先要对定标系数 C 进行标定, $C = D/(n \times d)$,反映了一个像元与实际尺寸的比例关系,其中 D 为定标物的实际尺寸, n 为标定物所占的像元数, d 为像元尺寸,经计算得

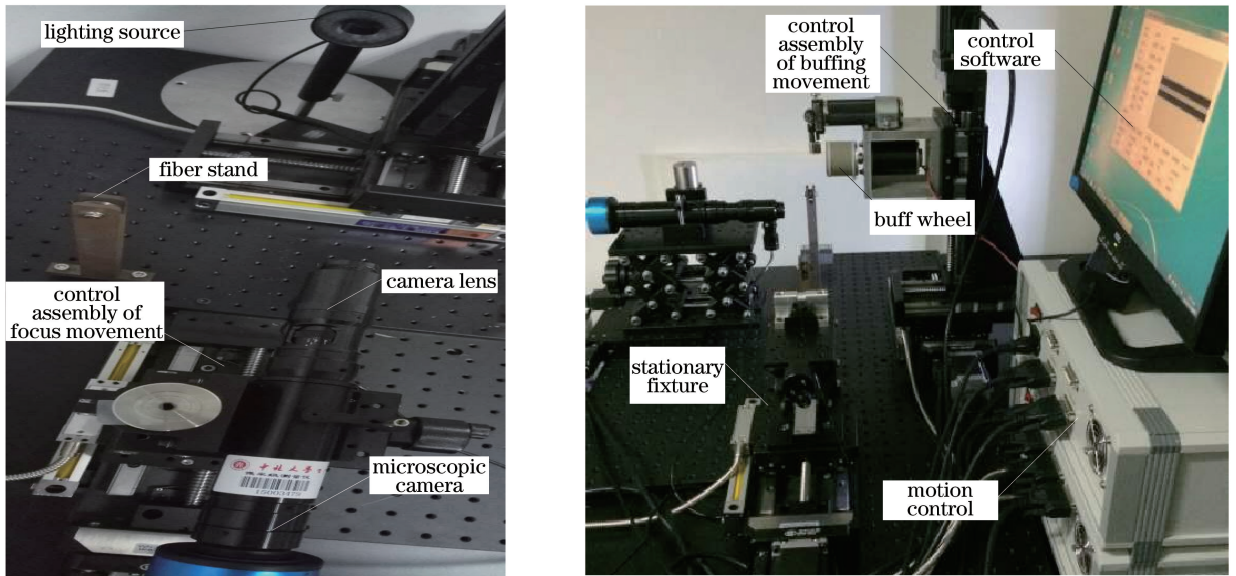


图 8 实验装置

Fig. 8 Experimental installation

$C=1.248 \mu\text{m}$ 。然后利用提出的定域椭圆取窗进行对焦,对焦完成后在光纤上下边缘取点,利用最小二乘法拟合出上下边缘直线 $a_1x + b_1y + c_1 = 0$ 和 $a_2x + b_2y + c_2 = 0$, 在其中一条直线上取 10 个点,坐标记为 $(x_i, y_i) (i=1, \dots, 10)$, 利用点到直线的距离公式 $d_i = |a_1x_i + b_1y_i + c_1| / \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$, 分别计算出各点到另一条直线的距离 d_i , 然后计算光纤直径 $L = (1/N)C \sum_{i=1}^N d_i$, 所得值如表 2 中第 2 列所示, 表 2 中第 3 列为通过 VM2.22 精密测量软件对 $125 \mu\text{m}$ 标准光纤直径的测量结果, 记作 L' 。

表 2 不同测量方式对 $125 \mu\text{m}$ 标准光纤的测量结果Table 2 Measurement results of $125 \mu\text{m}$ -diameter standard fiber obtained by different methods

Number	$L / \mu\text{m}$	$L' / \mu\text{m}$
1	125.25	126.1
2	125.03	125.8
3	125.32	123.9
4	125.13	125.4
5	124.94	127.2
6	125.35	125.3
7	124.83	126.0
8	125.51	125.1
9	125.13	125.3
10	125.32	123.8

从 10 次测量结果可以看出,定域椭圆取窗的测量结果更加稳定,且其标准误差 $0.3 \mu\text{m}$ 明显小于 VM2.22 精密测量软件的标准误差 $1 \mu\text{m}$, 对上述 10 次取平均值发现,通过定域椭圆取窗法对焦后的结果为 $125.18 \mu\text{m}$, 而 VM2.22 精密测量软件的平均结果为 $125.4 \mu\text{m}$, 相比之下定域椭圆取窗法的测量结果更加准确。

5 结 论

通过比较显微成像采用传统取窗和定域取窗测量光纤直径的结果可知,传统取窗难以避开光纤中间亮带对焦带来的影响,而定域取窗能够很好地消除这一不足,且大大缩小对焦窗口的大小,从而加快了评价速度。另外在窗口形状的选择上,定性分析了定域窗口需要满足的条件,得出矩形和椭圆较适合。为进一步比较二者优劣,通过实验数据绘制评价曲线和评价运算时间表,最终得出椭圆窗口在清晰度评价上不仅最优值展宽较矩形窄且计算时间相对于矩形窗口要小得多。这说明椭圆窗口不仅聚焦更加准确,而且计算速度

更快。在此基础上搭建平台实际测量了 $125\ \mu\text{m}$ 标准光纤直径,并与 VM2.22 精密测量软件得到的结果相比较,发现使用定域椭圆取窗的聚焦测量结果不仅稳定性好,且误差更小,同时由于定域取窗的窗口相对较小,运算速度能够得到很大提高。

参 考 文 献

- [1] Li Qi. Studies on the theory and implementation method of digital autofocus technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004: 6-7.
李 奇. 数字自动对焦技术的理论及实现方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004: 6-7.
- [2] Zhu Kongfeng, Jiang Wei, Gao Zan, *et al.* Focusing window choice and parameters determination in automatic focusing system[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(6): 836-840.
朱孔凤, 姜 威, 高 赞, 等. 自动聚焦系统中聚焦窗口的选择及参量的确定[J]. 光学学报, 2006, 26(6): 836-840.
- [3] Yu Yan. Study and implementation on auto-focusing[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014: 20-23.
余 炎. 高灵敏度自动对焦系统的研究与实现[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014: 20-23.
- [4] Li Qi, Feng Huajun, Xu Zhihai. Autofocus system experiment study using variational image-sampling [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(12): 1499-1501.
李 奇, 冯华君, 徐之海. 自动对焦系统中图像非均匀采样的实验研究[J]. 光子学报, 2003, 32(12): 1499-1501.
- [5] Zhu Kongfeng, Jiang Wei, Wang Duanfang, *et al.* New kind of clarity-evaluation-function of image[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(4): 465-468.
朱孔凤, 姜 威, 王端芳, 等. 一种新的图像清晰度评价函数[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4): 465-468.
- [6] Zhuo Ning, Sun Huayan, Zhang Haijiang, *et al.* A new approach for improvement of CCD imaging resolution[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(6): 777-780.
卓 宁, 孙华燕, 张海江, 等. 一种新的提高 CCD 成像分辨率的方法[J]. 光学学报, 2005, 25(6): 777-780.
- [7] Li Qi, Xu Zhihai, Feng Huajun, *et al.* A descriptive method for image stability[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(3): 427-430.
李 奇, 徐之海, 冯华君, 等. 一种图像稳定程度的描述方法[J]. 光学学报, 2004, 24(3): 427-430.
- [8] Wang Yeru, Feng Huajun, Xu Zhihai, *et al.* Autofocus evaluation function based on saturate pixels removing[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1210001.
王焯茹, 冯华君, 徐之海, 等. 基于饱和像素剔除的自动对焦评价函数[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1210001.
- [9] Wang Junqi, Zhang Ligu, Fu Tianjiao, *et al.* Sharpness assessment for remote sensing image based on abstracting the edge image of skeleton[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(9): 091002.
王俊琦, 张立国, 付天骄, 等. 基于骨架边缘提取的遥感图像清晰度评价方法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(9): 091002.
- [10] Wang Zhe, Zhong Haixiu, An Chao, *et al.* Design of auto-focus system based on digital image processing on overlapped sections[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 042801.
王 哲, 钟海秀, 安 超, 等. 基于重叠区图像处理的自动调焦系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 042801.
- [11] Shirvaikar M V. An optimal measure for camera focus and exposure [C]. Proceedings of the 36th Southeastern Symposium on System Theory, IEEE, 2004: 472-475.
- [12] He J, Zhou R, Hong Z. Modified fast climbing search auto-focus algorithm with adaptive step size searching technique for digital camera[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2003, 49(2): 257-262.
- [13] Gao Y, Reeves S J. Optimal sampling in array-based image formation [C]. International Conference on Image Processing, IEEE, 2000, 1: 733-736.
- [14] Subbarao M, Tyan J K. Selecting the optimal focus measure for autofocusing and depth-from-focus [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(8): 864-870.
- [15] Ren Sigang, Li Jianwei, Xie Lili. Automatic focusing technique based on gray scale difference method[J]. Opto-Electronic Engineering, 2003, 30(2): 53-55.
任四刚, 李见为, 谢利利. 基于灰度差分法的自动调焦技术[J]. 光电工程, 2003, 30(2): 53-55.
- [16] Xu Hongke, Qin Yanyan, Chen Huiru. An improved algorithm for edge detection based on Canny [J]. Infrared

Technology, 2014, 36(3): 210-214.

许宏科, 秦严严, 陈会茹. 一种基于改进 Canny 的边缘检测算法[J]. 红外技术, 2014, 36(3): 210-214.

- [17] Hui Xiaowei, Chang Zhengying, Lin Sen, *et al.* Image edge extraction Combined with Predator-Prey-AACO algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(5): 051001.

惠晓威, 常正英, 林 森, 等. 结合 Predator-Prey-AACO 的图像边缘检测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(5): 051001.