

# 基于背景校正和图像分割定量分析光学 元件表面疵病的新算法

张 博<sup>1,2</sup> 倪开灶<sup>2</sup> 王林军<sup>1</sup> 刘世杰<sup>2\*</sup> 吴伦哲<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444

<sup>2</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800

**摘要** 针对基于机器视觉的大口径光学元件表面疵病检测系统在成像过程中存在因照明不均匀等因素造成的图像背景不均匀等问题, 采用了基于形态学的图像背景校正算法, 提出了结合图像梯度和最大类间方差法的图像分割算法, 实验结果表明, 所提算法对于一定模糊程度的疵病图像具有较好的抗噪性能以及较高的提取精度。

**关键词** 成像系统; 表面疵病; 背景校正; 图像梯度; 最大类间方差法

**中图分类号** TP751 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0911004

## New Algorithm of Detecting Optical Surface Imperfection Based on Background Correction and Image Segmentation

Zhang Bo<sup>1,2</sup> Ni Kaizao<sup>2</sup> Wang Linjun<sup>1</sup> Liu Shijie<sup>2</sup> Wu Lunzhe<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** To solve the non-uniform background problem induced by the illumination with uneven light intensity in the system of detecting surface imperfection on large-aperture optical components based on the machine vision, an image background correction method is adopted based on the mathematical morphology. An image segmentation algorithm of image gradient in combination with Otsu method is proposed. The experimental results show that the proposed method has the good anti-noise performance and high extracting accuracy for the blurred images at a certain degree.

**Key words** imaging systems; surface imperfection; background correction; image gradient; Otsu method

**OCIS codes** 100.3008; 140.3330; 110.2960; 110.3000

## 1 引 言

随着光学加工和制造技术的发展以及大口径精密光学元件的大量应用, 光学元件表面质量的高精度检测具有重要意义<sup>[1]</sup>。由于加工技术的限制和搬运过程中的人为因素, 光学元件表面存在各种形貌的疵病, 包括划痕、麻点、气泡等<sup>[2]</sup>。在光学系统(尤其是高功率激光系统)中, 表面疵病会造成不同程度的散射, 增大光能量的损耗, 甚至会引起光学元件的损伤, 影响整个光学系统的运行<sup>[3-7]</sup>。目前, 对于光学元件表面疵病的检测主要有两种方法: 成像法和散射能量分析法<sup>[8]</sup>。成像法包括目视法<sup>[9]</sup>和滤波成像法<sup>[10]</sup>, 散射能量分析法包括散射光能量积分法和散射光能量角分布积分法<sup>[11]</sup>。这些方法各具优点, 但对于大口径光学元件表面疵病检测来说存在检测效率低、无法区分疵病形貌种类以及不能准确测量疵病尺寸等问题。随着机器视觉技术的快速发展, 利用机器视觉相关技术检测表面疵病的研究也越来越多<sup>[12-15]</sup>。典型的基于机器视觉

**收稿日期:** 2016-03-30; **收到修改稿日期:** 2016-05-12

**作者简介:** 张 博(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学元件表面疵病检测方面的研究。E-mail: th\_dw\_zb@163.com

**导师简介:** 刘世杰(1979—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事衍射光学和光学检测方面的研究。

E-mail: shijieliu@siom.ac.cn(通信联系人)

的大口径光学元件表面疵病检测系统主要包括光源照明模块、显微成像模块、运动平台控制模块和图像处理分析模块。利用图像处理技术对表面疵病进行提取是其中的重要环节,提取方法直接影响表面疵病的测量准确度。

在成像过程中,受到照明光源不均匀、离焦以及被检物体表面对光线的吸收率与反射率不同等因素的影响,图像背景会出现不均匀现象,这对后续图像的分割和提取会造成严重影响。针对这一问题,利用基于图像形态学方法对所获取的图像进行背景校正,能够较好地对图像背景进行不均匀性补偿。另外,图像分割是提取疵病形貌的关键环节,在众多分割算法中,阈值分割是普遍使用且简单有效的图像分割方法之一,它实质上是阈值的选取问题<sup>[16]</sup>。在杨甬英等<sup>[15]</sup>研制的基于显微暗场散射成像原理检测光学元件表面疵病系统中,采用标定阈值法对疵病进行了提取。该方法虽简单、易于实现,但需人为选择阈值,受主观因素影响大,容易在测量结果中引入误差。Otsu<sup>[17]</sup>提出的一维最大类间方差(Otsu)法,分割效果较好、适用范围较广、简单且高效,是一种自适应选择阈值算法,能够有效避免定阈值算法的局限性,因此在机器视觉检测领域得到了广泛应用。该方法对于直方图为双峰结构(图像背景和背景明显分离)的图像分割效果最佳。但对于疵病图像来说,因为疵病相较于背景要小得多,即疵病在图像中所占像素数较少,对直方图的贡献可以忽略不计,因此疵病图像直方图大多呈单峰结构,采用传统的 Otsu 法常会造成错误分割。寻找目标和背景间的分界线是图像分割的关键,本文提出了一种结合图像梯度信息和 Otsu 法的改进图像分割算法,利用图像梯度信息可以较好地分辨出目标边缘和背景,克服了传统 Otsu 法对噪声敏感且无法准确分割弱小目标的缺点。所提算法可以较为准确地提取疵病目标,最后通过仿真和实验验证了该算法的稳健性和准确性。

## 2 改进的疵病图像分割算法原理

利用基于机器视觉的表面疵病检测系统拍摄疵病图像时易受到噪声和不均匀光照等因素的干扰,图像背景会产生一定程度的不均匀现象,这给后续疵病轮廓提取带来不良影响,因此首先要对图像进行背景不均匀性补偿;然后利用提出的改进图像分割算法对疵病进行提取,获得疵病形貌;再将分割出的疵病加以标记以区分不同区域的疵病目标;最后计算各个疵病的长度、宽度等信息。算法流程如图 1 所示。

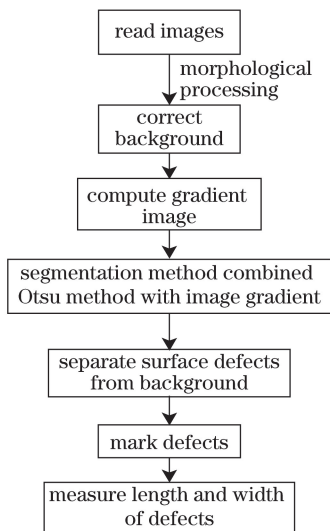


图 1 改进的疵病图像分割算法流程图

Fig. 1 Flow chart of improved algorithm for segmentation of imperfection image

### 2.1 基于图像形态学的背景校正算法

形态学的基本思想是使用具有一定形态的结构元素来匹配图像各个部分的结构特征,以达到对图像进行检测和识别的目的。图像形态学的基本运算主要包括膨胀和腐蚀<sup>[18]</sup>。

利用结构元素  $g(u, v)$  对图像  $f(x, y)$  进行膨胀可表示为

$$f \oplus g = \max_{u,v} [f(x-u, y-v) + g(u, v)], \quad (1)$$

利用结构元素  $g(u, v)$  对图像  $f(x, y)$  进行腐蚀可表示为

$$f \ominus g = \min_{u,v} [f(x+u, y+v) - g(u, v)]. \quad (2)$$

在图像处理中,膨胀和腐蚀常被组合应用,如开操作、闭操作等。一般来说,开操作可以去除图像中小的亮点,同时保证较大的亮区特征不受干扰,而闭操作可以去除比结构元素更小的黑点。在实际获得的表面疵病图像中,受到光照不均匀等因素的影响,容易产生图像背景分布不均匀以及目标信息被噪声干扰等问题。为了后续能够有效地对表面疵病图像进行分割,设计的算子应具有较强的抗噪能力,并且可以有效地对非均匀背景进行补偿。

结合开操作等形态学算子对图像进行不均匀校正和抗噪处理,算子表达式为

$$f_c = f - [(f \ominus g) \oplus g]. \quad (3)$$

为了验证所提算子的有效性,对背景明显不均匀的疵病图像进行背景校正,图像大小为 2048 pixel×2048 pixel,如图 2 所示。由图 2(a)可知,该图像背景外部较暗,中心部位较亮,且有明显噪点,若不对其进行背景校正,则会给后续目标提取带来一定的困难。对于校正前、后图像的光照均匀程度,采用图像的亮度均值、图像细节指标、图像亮度均匀性和图像标准差等作为评价标准<sup>[19]</sup>进行评价。

图像细节指标表达式为

$$f_d = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |[I(i+1, j) - I(i, j)]| / (mn) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |[I(i, j+1) - I(i, j)]| / (mn), \quad (4)$$

式中  $I(i, j)$  为图像中每个像素点的亮度,  $m$  和  $n$  分别为图像的长度和宽度,  $(i, j)$  为像素点坐标位置。

图像亮度均匀性表达式为

$$f_u = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |\bar{w} - I(i, j)| / (mn), \quad (5)$$

式中  $\bar{w}$  为图像背景的亮度均值。

图像标准差表达式为

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}, \quad (6)$$

式中  $x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ,  $n$  为向量  $x_i$  的长度。

表面疵病图像背景校正前、后的图像如图 2 所示。由(5)、(6)式可知,  $f_u$  和  $s$  值越小,图像背景分布越均匀。背景校正前、后的图像评价指标见表 1,由表可见,图像背景经所提算法校正后,其不均匀性得到了较好的改善。相较于原图,  $f_d$  并未出现明显下降,说明校正后的图像较好地保留了图像细节。虽然图像整体亮度变暗,但对后续处理并无影响。

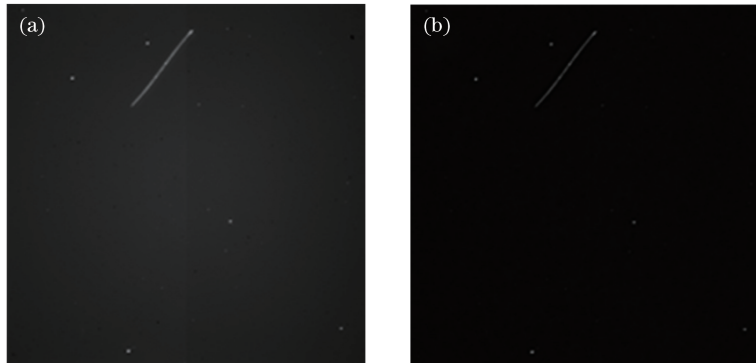


图 2 (a)原图和(b)背景校正后的图像

Fig. 2 (a) Original image and (b) background-corrected image

表 1 背景校正前、后的图像评价指标

Table 1 Evaluation factors of images before and after background correction

Image	Image detail	Luminance uniformity	Luminance mean	Standard deviation
Original image	4.3898	4.2939	34.4857	5.7349
Corrected image	4.3677	0.6414	5.1516	3.2017

## 2.2 结合图像梯度和 Otsu 法的图像分割算法

### 2.2.1 图像梯度求解

图像梯度可以用来表征图像亮度的不连续性,即图像亮度发生陡变时,其梯度增大<sup>[20]</sup>。对于一幅图像,无论目标物体有多小,比如疵病宽度为微米、亚微米量级,在目标物体和背景的边界处的梯度总会较大,因此利用图像梯度信息可以较好地分辨出目标物体与背景。二维函数  $f(x, y)$  的梯度为

$$\nabla f = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中  $g_x$  和  $g_y$  分别表示水平和垂直方向上的梯度强度,在图像处理中通常使用梯度幅值或梯度近似值来代替梯度,梯度幅值计算式为

$$|\nabla f| = (g_x^2 + g_y^2)^{\frac{1}{2}} = \left[ \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

利用一阶导数或者二阶导数可以检测图像亮度的不均匀性进而求得图像梯度,但是二阶导数对噪声较为敏感,并不适于疵病图像的分割,比如拉普拉斯算子。因此,改进算法采用一阶导数 Sobel 算子来计算图像梯度<sup>[21]</sup>。Sobel 算子模板如图 3 所示,其中  $z$  代表亮度。

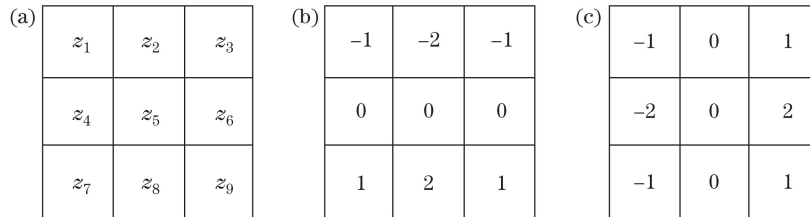


图 3 (a)  $3 \times 3$  大小的邻域;用于计算关于邻域中心点(b)x 和(c)y 方向梯度的 Sobel 模板

Fig. 3 (a) Neighborhood of  $3 \times 3$ ; Sobel templates used to compute gradients along (b)  $x$ - and (c)  $y$ -direction of neighborhood's center

利用 Sobel 算子模板求解图像梯度,表达式为

$$\nabla f = (g_x^2 + g_y^2)^{\frac{1}{2}} = \{ [(z_7 + 2z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3)]^2 + [(z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7)]^2 \}^{1/2}. \quad (9)$$

### 2.2.2 Otsu 法原理

假设图像  $f(x, y)$  包含由灰度值  $(0, 1, \dots, L-1)$  组成的  $L$  个灰度级,  $N$  为图像中像素总数,  $n_i$  是灰度级为  $i$  的像素数,则灰度级为  $i$  的像素出现的概率为

$$p_i = \frac{n_i}{N}. \quad (10)$$

若阈值  $t$  已知,那么图像可以被分为两类:  $C_0$  和  $C_1$ , 其中  $C_0$  是一组灰度级为  $(0, 1, \dots, t)$  的像素,  $C_1$  是一组灰度级为  $(t+1, \dots, L-1)$  的像素。  $C_0$  和  $C_1$  出现的概率  $\omega_0, \omega_1$  和平均值  $\mu_0, \mu_1$  分别为

$$\omega_0 = \sum_{i=0}^t p_i, \quad (11)$$

$$\omega_1 = \sum_{i=t+1}^{L-1} p_i, \quad (12)$$

$$\mu_0 = \frac{\sum_{i=0}^t (ip_i)}{\omega_0}, \quad (13)$$

$$\mu_1 = \frac{\sum_{i=t+1}^{L-1} (ip_i)}{\omega_1}, \quad (14)$$

类间方差  $\sigma_B^2$  和总方差  $\sigma_G^2$  可分别表示为:

$$\sigma_B^2 = \omega_0 (\mu_0 - \mu_T)^2 + \omega_1 (\mu_1 - \mu_T)^2, \quad (15)$$

$$\sigma_G^2 = \sum_{i=0}^{L-1} (i - \mu_T)^2, \quad (16)$$

式中图像的灰度均值  $\mu_T = \sum_{i=0}^{L-1} ip_i$ 。

利用(10)~(16)式得到最佳分割阈值  $t^*$  为

$$t^* = \arg \left[ \max_{0 \leq i \leq L-1} \left( \frac{\sigma_B^2}{\sigma_G^2} \right) \right]. \quad (17)$$

综上所述,图像梯度和 Otsu 法相结合的图像分割算法基本步骤为:

- 1) 通过 Sobel 算子计算  $g_x$  和  $g_y$ , 由(9)式计算得到图像梯度, 产生梯度图像  $g(x, y)$ ;
- 2) 获得梯度图像  $g(x, y)$  的直方图, 估计梯度阈值  $T$ , 使其为梯度图像中较大的值, 这个值发生在接近物体和背景的边界处;
- 3) 利用阈值  $T$  对梯度图像  $g(x, y)$  进行阈值处理, 获得梯度幅值图像  $g_T(x, y)$ , 利用其对原图中的强边缘像素进行标记, 将标记后的图像记为  $g_{\text{label}}(x, y)$ ;
- 4) 计算  $g_{\text{label}}(x, y)$  的直方图, 并通过 Otsu 法分割原图。

图像梯度信息和 Otsu 法相结合的方法对目标物体和背景的相对大小不敏感, 从而可有效避免传统 Otsu 法在分割较小目标时出现的错误。分别利用所提分割算法和传统 Otsu 法对划痕图像进行提取, 分割结果如图 4 所示。其中图 4(b) 为疵病原图的灰度直方图, 可以看出, 直方图是单峰的, 划痕所占像素数比背景像素数少。利用传统 Otsu 法来提取划痕, 会出现严重的过分割现象, 结果如图 4(c) 所示; 对于实验中利用暗场显微成像系统获得的疵病图像, 其直方图分布大多类似于图 4(b) 中显示的直方图特征, 疵病像素占比非常小, 因此仅利用传统 Otsu 法不能准确提取疵病特征。采用所提图像分割方法可准确提取疵病, 图像分割效果较好, 结果如图 4(d) 所示。

### 2.3 疵病长度和宽度的测量方法

在目标物体轮廓已知的情况下, 用外接矩形来描述其基本形状最为简单有效。通常用目标物体最小外接矩形(MER)的长轴和短轴作为目标物体的长度和宽度<sup>[22]</sup>。计算 MER 的方法较多<sup>[23]</sup>, 最常用的方法是将目标的边界在  $90^\circ$  范围内以  $5^\circ$  步长的增量进行旋转, 每次旋转后记录其轮廓在坐标系上的外接矩形特征参数, 当矩形面积最小时, 该外接矩形即为最小外接矩形。对于常见的直划痕来说(如图 2 所示的划痕), 利用 MER 法可以准确获得划痕的长度和宽度, 但是由于光学元件表面划痕的形状大多是不规则的, 一些划痕粗细不均匀且随意弯曲, 利用 MER 法检测得到的划痕宽度会出现较大误差, 如图 5(b) 所示, 外接矩形宽度明显大于实际划痕宽度, 可见 MER 法并不适用于宽度的测量。但是, 由于划痕长度一般较长, 利用 MER 检测出的划痕长度误差较小, 可以准确反映其真实尺寸, 因此采用 MER 法获得划痕的长度。对于弯曲划痕, 提出了一种简单有效的方法来获得划痕区域各个位置的宽度, 具体步骤如下:

- 1) 对已分割出疵病的二值图像进行标记, 其实质是标记图像中各连通区域, 每个单独的连通区域形成一个被标记的块;
- 2) 遍历被标记区域, 记录其中每个像素点的位置;
- 3) 对于各个被标记区域, 计算被标记块中每一行被标记的像素数, 可以获得划痕区域各个位置的宽度, 从而获得划痕的最大宽度。

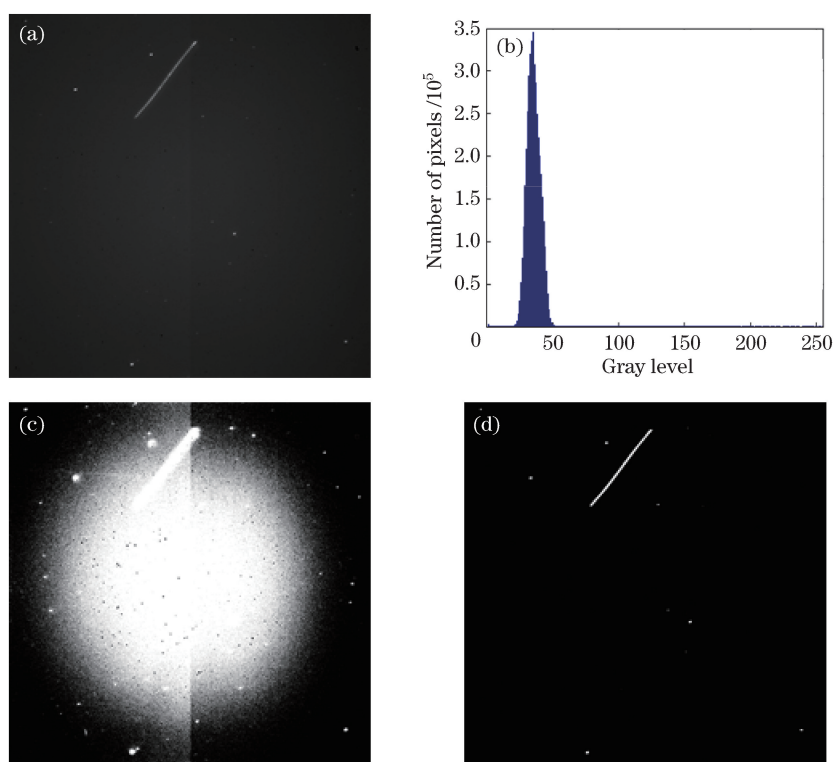


图 4 划痕图像分割结果。(a)原图;(b)灰度直方图;(c)传统 Otsu 法分割结果;(d)所提算法分割结果

Fig. 4 Segmentation results for scratch image. (a) Original image; (b) gray histogram; (c) segmentation result from traditional Otsu method; (d) segmentation result from proposed method

弯曲划痕在图像中表现为一条曲线,为此模拟了一幅包含一条曲线的图像,利用上述方法测量该曲线各个位置的宽度,以说明该方法对于弯曲划痕宽度测量的适用性。图 5(a)所示为模拟图,图像大小为  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ ;图 5(b)所示为获得的最小外接矩形示意图,可见最小外接矩形的短轴宽度明显大于曲线真实宽度,长轴能够较好匹配模拟图;图 5(c)所示为利用所提方法测得的宽度分布曲线,相较于 MER 法具有更好的适用性。

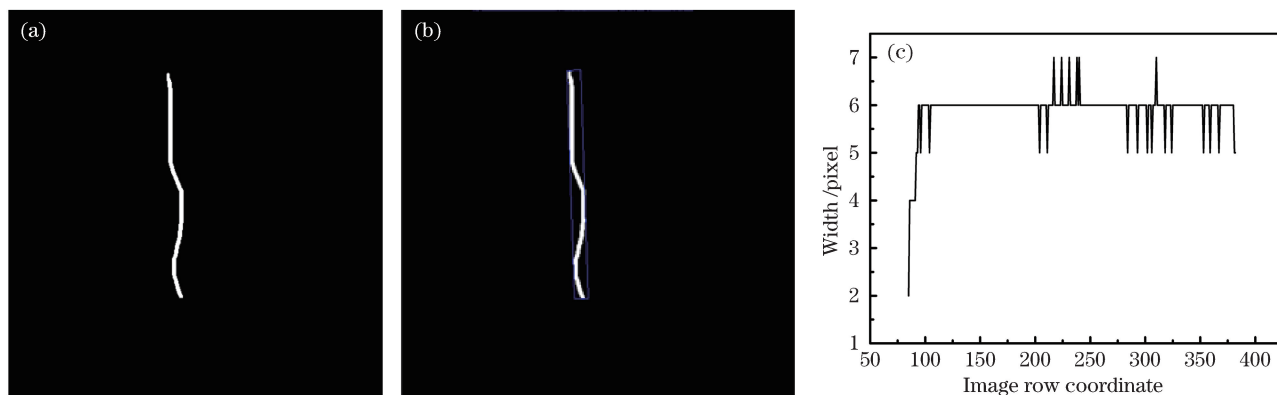


图 5 (a)模拟图;(b)最小外接矩形示意图;(c)宽度分布曲线

Fig. 5 (a) Simulation image; (b) schematic diagram of minimum enclosing rectangle; (c) width distribution curve

### 3 实验及结果分析

在图像处理中,没有任何一种算法适用于所有图像,每种算法都有其局限性。为此,分别从稳健性和准确性两个方面对所提算法进行验证。抗噪性能是衡量一种算法稳健性的标准之一,通过仿真不同噪声强度下的划痕图像,考察该算法的提取效果,探讨其抗噪性及有效性。另外,引入图像清晰度评价函数作为图像

质量评价标准,通过仿真与实验分别验证所提算法对于分割不同清晰度疵病图像的准确性。

### 3.1 稳健性分析

稳健性是衡量算法性能的一个重要指标。实验中模拟了一组标准长划痕的疵病图像,图像大小为  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ ,划痕大小为  $100 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ ,如图 6(a)所示。在图像中分别加入均值  $m$  为 0、均方差为  $\sigma$  (5~25 个灰度级)的高斯噪声,如图 6(b)、(e)所示。对所提算法进行稳健性测试,并传统 Otsu 法进行比较。当噪声较小时,所提方法和传统 Otsu 法均能够准确提取目标,如图 6(c)、(d)所示;随着噪声增大,所提算法表现出较好的抗噪性能,能够较好地提取出目标划痕,结果如图 6(f)所示,说明所提算法具有良好的稳健性;而传统 Otsu 法表现出对噪声较强的敏感性,如图 6(g)所示,背景上的噪声与目标物体混在一起,提取目标失败。

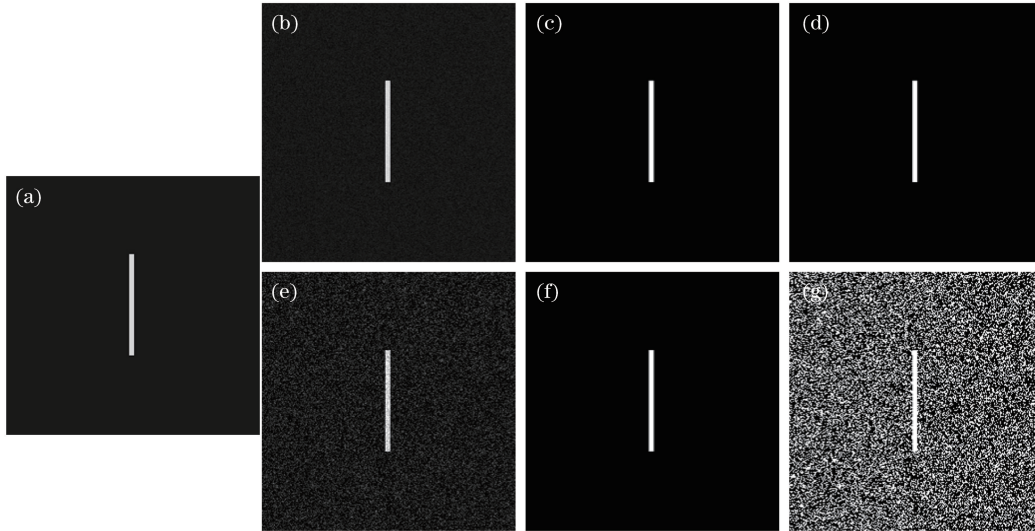


图 6 (a) 未被噪声污染的原图;(b)加入均值为 0、均方差为 5 个灰度级的高斯噪声的图像;(c)利用所提算法和 (d)利用传统 Otsu 法对(b)所提取的结果;(e)加入均值为 0、均方差为 25 个灰度级的高斯噪声的图像;(f)利用所提算法和(g)利用传统 Otsu 法对(e)所提取的结果

Fig. 6 (a) Original image without noise; (b) image with Gaussian noise ( $m=0$  and  $\sigma=5$ ); results extracted by (c) proposed method and (d) traditional Otsu method from (b); (e) image with Gaussian noise ( $m=0$  and  $\sigma=25$ ); results extracted by (f) proposed method and (g) traditional Otsu method from (e)

### 3.2 准确性分析

测量平台的震动、离焦、光照不均匀等因素均会引起图像不同程度的模糊现象,利用图像清晰度评价函数可以对疵病图像的模糊程度进行定量评价。图像清晰度可以从空域、频域、信息熵的角度来分析。实验获得的疵病图像结构相对来说比较简单,基于小波变换的清晰度评价函数<sup>[24]</sup>可以从多尺度分析问题,并且能够在速度和精度之间找到较好的平衡点。

疵病图像的大部分能量集中在低频部分,对应于图像的背景;高频部分对应于图像的细节,通过对图像作快速小波变换,对高频部分取绝对值并求和,计算式为

$$E = \sum_{i,j} (|c_{LH}| + |c_{HL}| + |c_{HH}|), \quad (18)$$

式中  $E$  为图像清晰度, $c_{LH}$ 为图像中竖直方向是高频部分、水平方向是低频部分的小波系数, $c_{HL}$ 为竖直方向是低频部分、水平方向是高频部分的小波系数, $c_{HH}$ 为竖直方向和水平方向都是高频部分的小波系数。 $E$  越大,图像越清晰,反之越模糊。

为了研究图像清晰度与算法提取精度之间的关系,对显微镜的成像过程<sup>[20]</sup>进行模拟,在不同离焦量下得到一系列不同清晰度的直划痕模拟图像,并采用所提算法依次对不同清晰度的划痕模拟图像进行处理。图像大小为  $380 \text{ pixel} \times 120 \text{ pixel}$ ,以标准长矩形来仿真长划痕,划痕大小为  $200 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 。共模拟了 32 幅不同清晰度的图像,图 7(a)所示为其中的第 1,6,16,32 幅图像。第 1 幅为在焦面上获得的清晰图像,之后在不同离焦量下获得不同模糊程度的图像,从第 32 幅图像可见,划痕边缘部分的模糊程度已非常严重。

图 7(b) 为 32 幅图像对应的清晰度评价曲线, 可以看到, 随着离焦量的增大, 划痕模糊程度也越来越严重。图 7(c) 所示为所提算法提取的划痕长度、宽度与  $E$  之间的关系曲线。从图 7(c) 可知, 通过测量获得的划痕宽度均为 5 pixel, 与真值保持一致; 然而当图像清晰度  $E$  小于  $2 \times 10^4$  时, 划痕边缘严重模糊, 提取的长度出现误差, 最大为 5 pixel, 误差率为 2.5%。综上可知, 当待处理图像比较清晰时, 所提算法可以准确地提取目标, 对出现一定模糊的图像也有较好的处理效果。

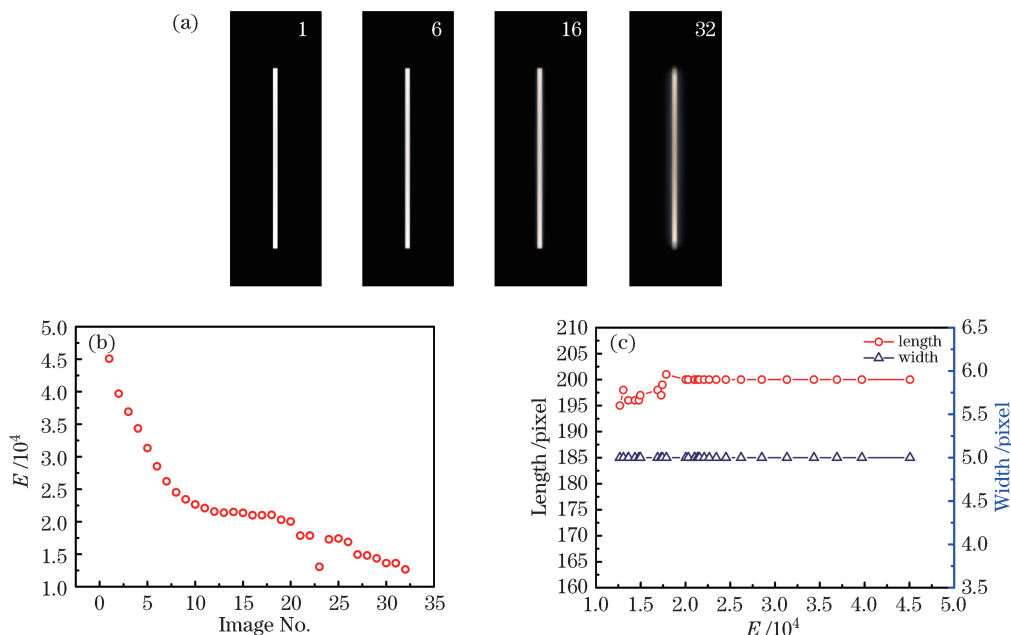


图 7 (a) 不同清晰度图像; (b) 划痕图像对应的清晰度曲线; (c) 利用所提算法提取的划痕尺寸  
Fig. 7 (a) Images with different definitions; (b) definition curve of different scratched images;  
(c) sizes of scratches extracted by proposed method

为了验证以上仿真结果的有效性, 利用显微成像系统获得不同离焦量下的标准疵病板 (ISO 14997) 中标标准划痕 Grade 0.025 的图像, 共获取 11 幅图像, 放大倍数为 200, 图像大小为  $2048 \text{ pixel} \times 2448 \text{ pixel}$ , 像元尺寸为  $0.32485 \mu\text{m}/\text{pixel}$ , 标准划痕尺寸 (宽  $\times$  长) 为  $6.3 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 。分别取第 1, 6, 11 幅图像的局部放大图像, 如图 8(a) 所示, 可以看出随着离焦量增大, 划痕越来越模糊; 图 8(b) 为 11 幅图像对应的清晰度评价曲线,  $E$  值逐渐降低, 趋势与图 7(b) 仿真结果类似。从图 8 测量结果可知, 当划痕图像相对比较清晰时 (本实验中  $E > 2 \times 10^4$ ), 长度测量结果相当准确, 误差范围为 1%~2%; 宽度测量结果误差稍大, 为 3% 左右, 但其精度依然能够满足实际检测要求。另外, 对于在较大离焦量下获得的图像, 如图 8(a) 中第 11 幅图像, 图像严重失真, 模糊程度大, 测量误差大。综上可知, 所提算法对于清晰图像以及具有一定模糊程度的图像, 提取精度较高, 适应性较强。

## 4 结 论

针对所获取的表面疵病图像中出现的问题, 提出了一种可准确提取表面疵病的算法。对于成像过程中由于光照不均匀等因素造成的图像背景不均匀问题, 利用所提出的基于形态学的背景校正算法, 对不均匀背景进行补偿。通过实验证明了所提方法具有较好的补偿效果, 图像背景能够得到较大程度的改善。然后利用图像梯度和 Otsu 法相结合的改进图像分割方法提取疵病目标, 克服了传统 Otsu 法对噪声敏感和无法准确分割弱小目标的缺点。另外, 在有较大强度噪声干扰的情况下, 从稳健性、准确性两个方面分别对所提算法进行了验证, 结果表明所提算法能够满足实际检测要求, 在光学元件表面疵病定量检测方面具有一定的实用价值。



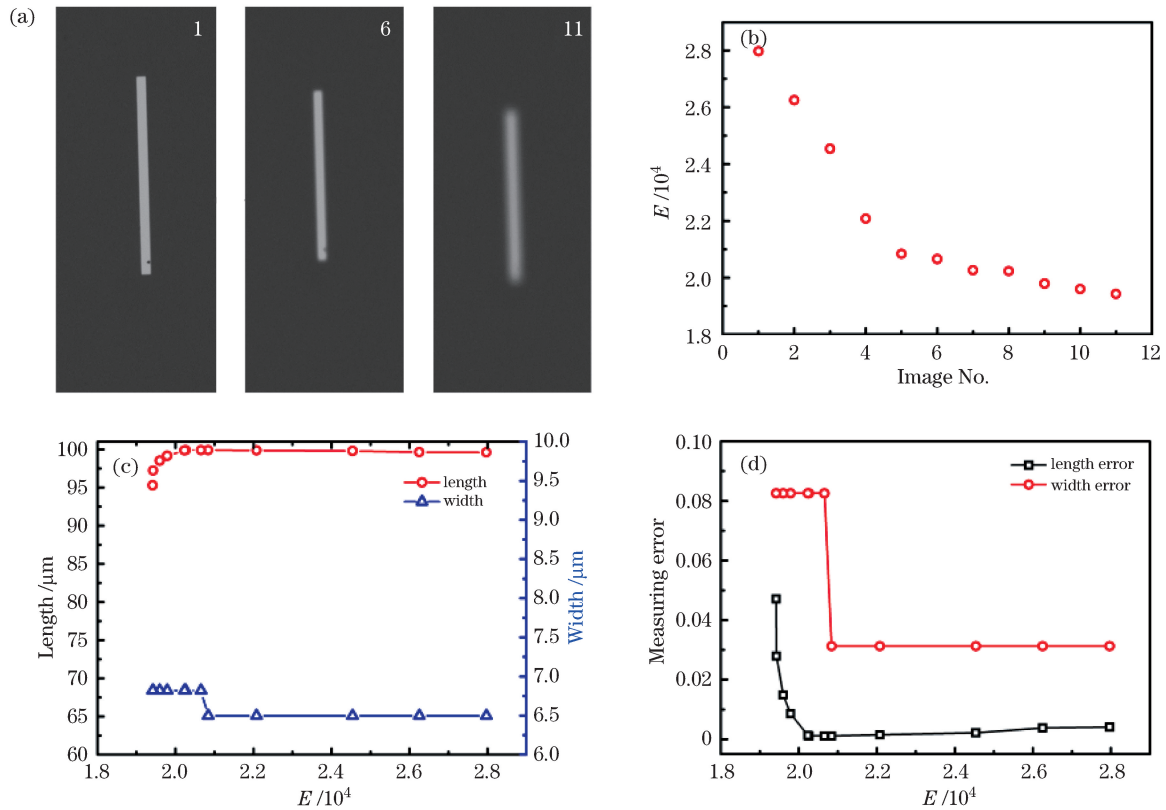


图 8 (a)不同清晰度图像;(b)清晰度曲线;(c)划痕测量值曲线;(d)测量误差曲线

Fig. 8 (a) Images with different definitions; (b) definition curve; (c) measuring value curves of scratches; (d) measuring error curves

## 参 考 文 献

- Xie Shibin, Yang Yongying, Liu Dong, *et al.* Digital evaluation algorithm of American standard in defects inspection of precise surface[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(2): 266-271.  
谢世斌, 杨甬英, 刘东, 等. 精密表面疵病检测美标数字化评价实现算法[J]. 应用光学, 2015, 36(2): 266-271.
- Gomez S, Hale K, Burrows J, *et al.* Measurements of surface defects on optical components[J]. Measurement Science and Technology, 1998, 9(4): 607-616.
- Miller P E, Suratwala T I, Bude J D, *et al.* Initiation of laser damage at surface imperfections on fused silica optics[C]. International Optical Design Conference and Optical Fabrication and Testing, 2010: OWA5.
- Jiao Zhaoyang, Zhang Yanli, Zhang Junyong, *et al.* Influence of phase distortion on near field beam quality in final target system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0502004.  
焦兆阳, 张艳丽, 张军勇, 等. 终端靶场中相位畸变对近场光束质量的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0502004.
- Wang Wei, Zhang Lei, Feng Suyu, *et al.* Using fluorescent microscopy method to study subsurface defects in Nd-doped phosphate laser glasses[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0906001.  
王威, 张磊, 冯素雅, 等. 采用显微荧光法研究掺钕磷酸盐激光玻璃的亚表面缺陷[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0906001.
- You Kewei, Zhang Yanli, Zhang Xuejie, *et al.* Influence of relative position of optical component surface defects on near filed beam quality[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0308004.  
尤科伟, 张艳丽, 张雪洁, 等. 光学元件表面缺陷相对位置分布对近场光束质量的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0308004.
- Wang Shitong, Yang Yongying, Zhao Limin, *et al.* Numerical simulation research on scattering light imaging of surface defects of optical components[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0708005.  
王世通, 杨甬英, 赵丽敏, 等. 光学元件表面缺陷散射光成像数值模拟研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0708005.
- Stolz C J. Status of NIF mirror technologies for completion of the NIF facility[C]. SPIE, 2008, 7101: 710115.

- 9 Thompson C E, Knopp C F, Decker D E. Optics damageinspection for the NIF[C]. SPIE, 1999: 921-932.
- 10 Baker L R. On-machine measurement of roughness, waviness, and flaws[C]. SPIE, 1990: 248-256.
- 11 Wang Chuanke, Kuang Longyu, Wang Zhebin, *et al.* The stimulated Raman scattering from interaction of 351 nm laser light with hohlraum[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2006, 26(4): 310-313.  
王传珂, 况龙钰, 王哲斌, 等. 神光II长脉冲三倍频激光受激 Raman 散射能量角分布测量[J]. 核聚变与等离子体物理, 2006, 26(4): 310-313.
- 12 Mascio L N, Logan C M, Martz H E. Automated defect detection for large laser optics[J]. Engineering Research, Development and Technology, 1997: 25-30.
- 13 Li Aixing, Yang Tianyi, Zhang Ying. Preliminary research of surface defect recognition based on machine vision[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science), 2007, 19(4): 442-445.  
李艾星, 杨天怡, 张 颖. 基于机器视觉的精密光学元件表面疵病识别初步研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2007, 19(4): 442-445.
- 14 Fan Yong, Chen Niannian, Gao Lingling, *et al.* Digital detection system of surface defects for large aperture optical elements[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(7): 1032-1036.  
范 勇, 陈念年, 高玲玲, 等. 大口径精密表面疵病的数字化检测系统[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(7): 1032-1036.
- 15 Yang Yongying, Lu Chunhua, Liang Jiao, *et al.* Microscopic dark-field scattering imaging and digitalization evaluation system of defects on optical devices precision surface[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(6): 1031-1038.  
杨甬英, 陆春华, 梁 蛟, 等. 光学元件表面缺陷的显微散射暗场成像及数字化评价系统[J]. 光学学报, 2007, 27(6): 1031-1038.
- 16 Hu Min, Li Mei, Wang Ronggui. Application of an improved Otsu method in image segmentation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(5): 443-449.  
胡 敏, 李 梅, 汪荣贵. 改进的 Otsu 算法在图像分割中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(5): 443-449.
- 17 Otsu N. A threshold selection method from gray-level Histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- 18 Wang Haihong, Zeng Ni, Lu Wei, *et al.* Edge detection of laser imaging radar based on wavelet transform and mathematical morphology[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(6): 903-906.  
王海虹, 曾 妮, 陆 威, 等. 基于小波变换和数学形态学的激光成像雷达图像边缘检测[J]. 中国激光, 2008, 35(6): 903-906.
- 19 Zhu Kehan, Yang Ming, Jiang Jintao. Correction method for microscope transmittance uneven illumination images[J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(S1): 190-192.  
朱珂汉, 杨 鸣, 蒋金涛. 显微镜透射光照不均匀图像校正方法[J]. 计算机应用, 2013, 33(S1): 190-192.
- 20 Zhao Wenda, Xu Zhijun, Zhao Jian, *et al.* Enhancement of infrared image details based on gradient histogram transform [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(7): 1962-1968.  
赵文达, 续志军, 赵 建, 等. 基于梯度直方图变换增强红外图像的细节[J]. 光学精密工程, 2014, 22(7): 1962-1968.
- 21 Zhu Cong, Yu Guangting, Li Bailin, *et al.* A new algorithm for measuring defects width on precise optics lens surface [J]. Computer Applications and Software, 2014, 31(12): 259-261, 286.  
朱 聪, 于广婷, 李柏林, 等. 一种新的精密光学镜片表面疵病宽度测量方法[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(12): 259-261, 286.
- 22 Tamayo P, Slonim D, Mesirov J, *et al.* Interpreting patterns of gene expression with self-organizing maps: Methods and application to hematopoietic differentiation[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1999, 96(6): 2907-2912.
- 23 Cui hui, Liu Shijie, Zhao Yuan'an, *et al.* Study on total internal reflection microscopy for subsurface damage[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0612004.  
崔 辉, 刘世杰, 赵元安, 等. 全内反射显微技术探测亚表面缺陷新方法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0612004.
- 24 Du Q L, Lan X S, Yuan L, *et al.* An optical imaging simulation method for inverted microscope and its application in automatic cell manipulation[J]. Advanced Materials Research, 2012, 490: 1981-1985.