

多噪声干涉条纹图像的检测方法

梅启升, 王敏*, 周群

医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福建省光子技术重点实验室, 福建 福州 350007

摘要 将条纹骨架级次标定算法,用于实验样本中激光干涉条纹的检测。运用自适应窗口滤波处理不同形态的干涉条纹,同时对实验样本作降噪处理,得到了对比度较高的干涉图像,然后根据完善的样本图像提取干涉条纹并实时标定、检测条纹。结果表明:这种基于多噪声的干涉条纹检测模型能够实现光学元件的实时检测,并有效提高光学元件的检测效率,且能够实现基于 C++ 平台的工业自动化检测。

关键词 干涉条纹; OpenCV 库; 图像处理; 图像降噪

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.121007

Method for Detecting Multi-Noise Interference Fringe Images

Mei Qisheng, Wang Min*, Zhou Qun

Key Laboratory of Opto-Electronic Science and Technology for Medicine of the Ministry of Education,

Fujian Provincial Key Laboratory for Photonics Technology, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China

Abstract A stripe skeleton-level sub-calibration algorithm was used for interference fringe detection. The experimental samples of laser interference fringe were processed. An adaptive window was used to filter the interference fringes of different shapes, and the experimental samples were denoised to obtain the interference images with high contrast. The interference fringe extraction was performed according to the perfect sample images, and the real-time stripe calibration and detection were then performed. The results show that the proposed multi-noise-based interference fringe detection model can realize the real-time detection of optical components and effectively improve their detection efficiency. Moreover it can realize the industrial automation detection based on the C++ platform.

Key words interference fringes; OpenCV; image processing; image denoising

OCIS codes 100.2960; 100.3175

1 引言

在现代化工业的背景下,应用计算机技术进行光学仪器检测变得越来越重要。借助光学干涉条纹图像可以检测待测光学零件的性能、状态,从而判定光学仪器零件是否合格。其中,图像中条纹周期、条纹间隔是重要的判别因素,通过定量级次标定干涉条纹能够很好地将待测光学仪器的面型复原。

干涉条纹是在两个相干光波发生干涉时,产生的变亮或变暗的成像区域而形成的条纹。其图像可以反映被测对象的信息。传统的人工操作方案需要人

眼观察目镜,再根据经验筛选、判定,这种操作非常费时费力,而且极易出现差错^[1]。由于传统图像处理算法对多种噪声的图像处理极不理想,因此干涉条纹检测技术在图像处理方面已成为十分重要的研究方向。

干涉条纹图像的处理方案有很多种,目前最为普遍的是相移法^[2],其算法具有简便、快捷的特点,但是这一算法需要 3 幅以上的干涉条纹图片才能处理,并且抗噪声的能力较弱。因此,作为一种空域图像处理算法,干涉条纹中心线法^[3]具有高效、精确的特点。本文提出了一种多噪声干涉条纹图像的检测方法,用于检测包含噪声干涉条纹中的分割条纹,并

收稿日期: 2018-11-27; 修回日期: 2018-12-07; 录用日期: 2019-01-21

基金项目: 福建省科技厅工业引导性项目(2017H0010)、福建省科技厅引导性项目(2016H0013)

* E-mail: 1134624714@qq.com

自动计算每个干涉的级次信息,该算法能够有效地降低噪声的影响程度,最大程度地提取干涉条纹骨架的信息^[4]并加以标记保存。

本文所提干涉条纹检测模型的意义在于:干涉条纹的周期检测是精密仪器测量中的一个重要的指标,快速地、准确地消除噪声并分析提取出来干涉条纹,提升了工业上光学仪器的检测水平。

本文所提多噪声图像的检测算法结合了图像预处理、条纹中心线提取算法以及级次标定等多种算法。其中,检测算法特点在于:相较于最原始的干涉条纹中心线法,提升了所提总体检测模型和干涉中心线的抗噪声性,并且提出了一种可行的干涉条纹级次标定的思路。

2 干涉条纹检测的理论算法

2.1 干涉条纹处理流程图

多噪声干涉条纹图像的检测方法的流程图如图1所示。

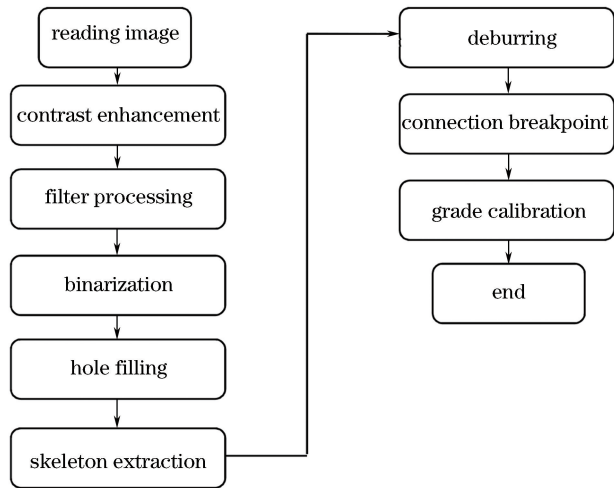


图1 干涉条纹处理流程图

Fig. 1 Flow chart of interference fringe processing

预处理模块主要由读取图像、对比度增强、滤波处理、二值化处理组成,而孔洞填充、骨架提取、去除毛刺、连接断点则属于条纹中心线提取模块。通过这两部分后才能级次标定干涉条纹。

预处理模块的主要目的是降噪。由于算法类型属于干涉条纹中心线法,降低噪声的干扰极为重要。一幅干净整齐的干涉条纹二值图像会给后续的干涉条纹图像检测带来很大的帮助。二值化处理是将灰度图像转换为黑白图像,并在最大程度上进行信息筛选的同时,进一步删除灰度图像中的噪声。孔洞填充修正了干涉条纹图中的误差,骨架提取用于干涉条纹中心线的分割与提取,为干涉条纹级次标定打下基

础,而级次标定则可用于标定和记录干涉条纹。

该算法是基于C++语言平台得以实现的。C++语言不仅拥有计算机高效运行的实用性特征,而且善于面对与对象的编程设计。算法所采用的OpenCV库^[5]和其主要接口均是用C++语言编写,同时保留了大量的C语言接口,非常适合实现干涉条纹图像处理上的算法。

2.2 条纹预处理模块

干涉条纹的预处理^[6]模块包含4个处理步骤:读取图像、对比度增强处理、滤波处理和二值化处理。

1) 利用OpenCV中的imread函数读取图像。

2) 利用OpenCV库中的EqualizeHist函数对图像进行直方图均衡^[7],直方图均衡化可表示为

$$P_s(s) = P_r(r) \left| \frac{\Delta r}{\Delta s} \right|, \quad (1)$$

式中: $P_s(s)$ 为随机变量 s 的概率密度函数; $P_r(r)$ 为随机变量 r 的概率密度函数。采用 r 和 s 的准则为

$$s_i = \text{floor}[(G - 1) \times r], \quad (2)$$

式中: G 为图像的灰度值分布,如8位图像分布对应的 G 为256; i 为随机变量的分布情况; r_i 为原图像概率分布密度; $\text{floor}(X)$ 为对 X 向下取整; s_i 为直方图均衡化后的灰度值分布。根据上述步骤处理基于C++平台实现结果如下图2(a)、(b)所示。

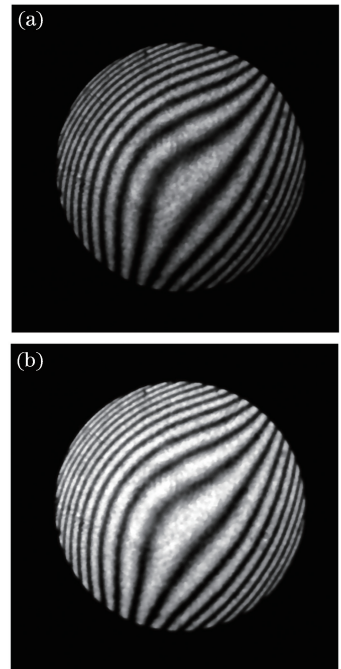


图2 直方图均衡化处理。(a)干涉条纹原图像;
(b)直方图均衡化结果

Fig. 2 Equalization processing of histogram. (a) Original image of interference fringe; (b) equalization result of histogram

3) 自适应窗口滤波根据干涉条纹的特征分析, 采用不同的窗口对不同区域的干涉条纹进行滤波差分处理。滤波模板尺寸大小与即将融入背景的物体尺寸有关, 较小的物体采用小窗口滤波模块, 而较大的物体采用大窗口滤波模块^[8]。

滤波窗口大小 k 设置为

$$k = \begin{cases} 1, 25000 < \left(x - \frac{i_x}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{j_y}{2}\right)^2 \\ 2, 20000 < \left(x - \frac{i_x}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{j_y}{2}\right)^2 \leq 25000 \\ 3, 15000 < \left(x - \frac{i_x}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{j_y}{2}\right)^2 \leq 20000 \\ 5, 12000 < \left(x - \frac{i_x}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{j_y}{2}\right)^2 \leq 15000, \\ 7, 10000 < \left(x - \frac{i_x}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{j_y}{2}\right)^2 \leq 12000 \\ 8, 8000 < \left(x - \frac{i_x}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{j_y}{2}\right)^2 \leq 10000 \\ 10, \left(x - \frac{i_x}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{j_y}{2}\right)^2 \leq 8000 \end{cases} \quad (3)$$

式中: k 为窗口大小; x, y 分别为图像中某点的横、纵坐标; i_x, j_y 为整个图像的分辨率。根据不同窗口进行滤波处理, 分别对干涉条纹图像进行一次、二次滤波并进行差分计算, 差分滤波算法为

$$\begin{cases} g_1(x, y) = \frac{\sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b [\omega(s, t) \times f(x+s, y+t)]}{\sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b \omega(s, t)} \\ g_2(x, y) = \frac{\sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b [\omega(s, t) \times g_1(x+s, y+t)]}{\sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b \omega(s, t)} \\ f_1(x, y) = \Delta(x, y) = g_1(x, y) - g_2(x, y) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\omega(s, t)$ 为滤波窗口; s, t 分别为窗口的横、纵坐标; $2a, 2b$ 分别为选择窗口的宽和高; $f(x, y)$ 为原图像; $g_1(x, y)$ 为第一次滤波后的图像; $g_2(x, y)$ 为第二次滤波后的图像; $\Delta(x, y)$ 为滤波差分处理; $f_1(x, y)$ 为滤波差分后的处理效果图。

4) 二值化图像处理根据差分滤波算法^[9]得出的图像进行二值化处理, 其依据 3) 中的差分滤波算法的值进行二值化处理为

$$f_2(x, y) = \begin{cases} 255, f_1(x, y) < 0 \\ 0, f_1(x, y) \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

根据预处理中的 4 个步骤基于 C++ 平台实现结果如图 3 所示。

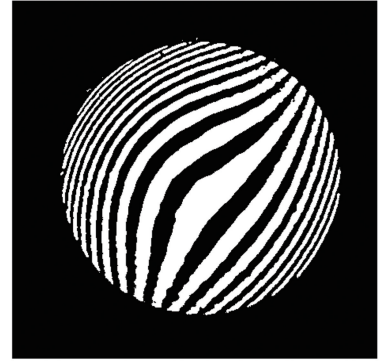


图 3 干涉图像预处理

Fig. 3 Preprocessing of interference image

2.3 条纹中心线提取模块

条纹中心线提取包含 4 个步骤: 孔洞填充、骨架提取、去除毛刺^[10]和连接断点^[11]。

1) 孔洞填充算法步骤流程^[12]如下: 处理二值图像边界, 函数为

$$F_1(x, y) = \begin{cases} 1 - I(x, y), & (x, y) \text{ on boundary of } I \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $I(x, y)$ 为一幅二值图像; $F_1(x, y)$ 为一幅标记图像。原始图像假设为图 4(a), 那么同时取原图像的补集 I^c 可以得到图 4(b), F 表示边界上的点取反得到的图像, 如图 4(c), 利用标记图像 F 进行 3×3 结构元 (SE) 的侵蚀得到图 4(d), 将其与图 4(b) 取交集得到图 4(e), 此处需要进行多次腐蚀操作, 直到图 4(e) 不会改变为止; 根据图 4(e) 取反, 得到孔洞填充图像, 随后将图 4(f) 减去图 4(a) 得到孔的大小, 根据孔的大小确定是否需要填充。

根据孔洞填充算法基于 C++ 语言平台实现结果如图 5 所示。

2) 骨架提取又称干涉条纹中心线提取, 中心线提取采用 Rosen 算法^[13], 而 Rosen 则应用模板匹配的细化算法。该方法利用 Sherman 技术^[14], 将应满足的细化最终结果作为已知信息定义为模板, 然后对干涉二值图进行搜索。

Rosen 准则为: 1) x_0 不是边界点; 2) x_0 是端点或者孤立点; 3) 若删除 x_1, x_3, x_5, x_7, x_9 , 会成为断点; 4) 从上、下、左、右边缘点中保留断点。根据准则定义模板如图 7 所示。

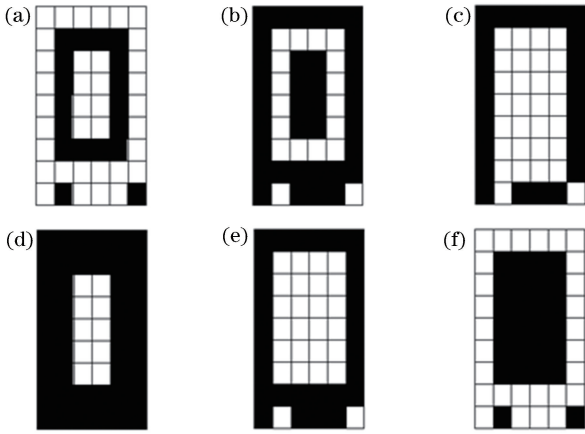


图4 孔洞填充算法。(a)原图;(b)补集图像;(c)边界点取反的图像;(d)侵蚀图像;(e)侵蚀图像与补集图像取交集;(f)填补的孔洞图像

Fig. 4 Hole-filling algorithm. (a) Original image; (b) complementary image; (c) image inverted by boundary point; (d) erosion image; (e) intersection of erosion image and complementary image; (f) filled hole image



图5 孔洞填充效果图

Fig. 5 Effect diagram of hole-filling

X_4	X_3	X_2
X_5	X_0	X_1
X_6	X_7	X_8

图6 Rosen算法模板

Fig. 6 Template of Rosen algorithm

根据 Rosen 算法基于 C++ 语言平台实现结果如图 7 所示。

对比图 6 可以发现,C++ 中实现的 Rosen 算法可以控制阈值并填充一些“孔洞”的误差。

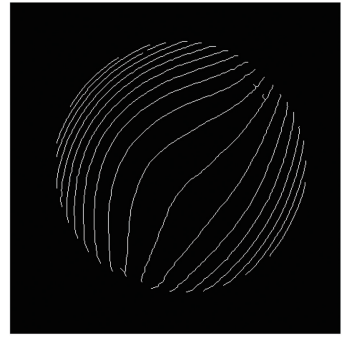


图7 骨架提取算法处理图

Fig. 7 Processing diagram of skeleton extraction algorithm

利用步骤 3) 和 4) 去除“毛刺”并且连接断点^[15]。“毛刺”在干涉条纹图中可以通过全图搜索的方法得到,如果有某个点以射线的方式向 3 个方向延伸,那么该点就作为“毛刺”的可疑点,并且大多数“毛刺”在所有端点形成凸包的内部。根据上述两点特征进行搜查,并且“毛刺”的附近一定存在端点,从端点扫描至“毛刺”根部,并将所有点保存在 C++ 中 VECTOR 类的 Point 中进行灰度翻转,从而去除毛刺。

断点是指本该连接的干涉条纹骨架图出现“断裂”的现象,通过采用断点匹配算法,根据端点的切线斜率进行排序,将斜率和距离上最接近的两个点进行匹配,并画一条“细线”连接。依据这个方案对干涉条纹骨架图像进行修补,其结果如图 8 所示。

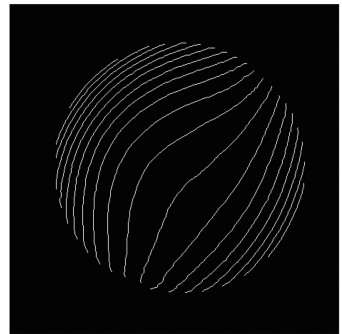


图8 去毛刺效果图

Fig. 8 Effect diagram of deburring

2.4 条纹级次标定

将干涉条纹骨架图的边界点作为特征点^[16],利用 OpenCV 库与 C++ 语言相结合,编写 BwLabel 函数,其目的在于对干涉条纹骨架简单地从左至右排序。该函数的编写过程类似于第 4) 步的孔洞填充算法,选取图像的顶层作为基准,将每个干涉条纹的点进行独立筛选并将其分别保存到 Vector 类 Point 的存储空间^[17]内。通过 BwLabel 函数处理的结果,对干涉条纹的级次标定,选取的方案如下:

1) 顺时针将特征点进行排序; 2) 把将相邻、同一级次的第一个特征点作为第一级次特征点; 3) 将该特征点的条纹的灰度值全部标定为 1, 再根据干涉条纹的特征标定剩下的条纹^[18]。根据上述方案的算法实现结果如图 9 所示。

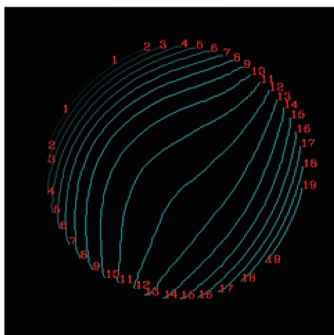


图 9 干涉条纹的级次标定

Fig. 9 Level calibration of interference fringes

3 结果分析

干涉条纹获取的实验条件及方法: 632.8 nm 半导体激光器、扩束镜、偏振元件、分光棱镜、1/4 波片、待测元件、标准样板等, 配合防震平台的使用可以降低震动对干涉系统的影响; 采用工业 CCD 采集干涉图像, 由于拍照曝光时间很短, 可以尽可能降低振动和温度变化对系统造成的影响等。

干涉条纹图像进行干涉条纹检测处理是基于 C++ 平台实现的一种对多噪声干涉图像检测并加以级次标定的处理算法。整体步骤包含 3 大流程: 图像预处理、条纹中心线提取和条纹级次标定。其中包含读取图像、对比度增强、滤波处理、二值化处理、孔洞填充、骨架提取、去除毛刺、连接断点、条纹级次标定等多个算法处理。根据图 10 中的原图像不难看出图像中包含多种噪声, 传统的干涉条纹检测很难检测出完美的干涉条纹效果图。

运用 C++ 平台实现干涉条纹检测算法, 并应用自适应窗口对不同形态的干涉条纹进行滤波差分处理, 同时将干涉条纹进行降噪处理, 得到对比度较高的干涉图像。随后在保证准确性的前提下, 将干涉条纹中心线提取出来, 并加以修正, 再依据干涉条纹中心线进行级次标定处理。

4 结 论

提出了一种多噪声干涉条纹图像的检测方法, 并基于 C++ 语言平台加以实现, 其包含全局与局部相结合的预处理, 能够有效地降低图像噪声, 并且

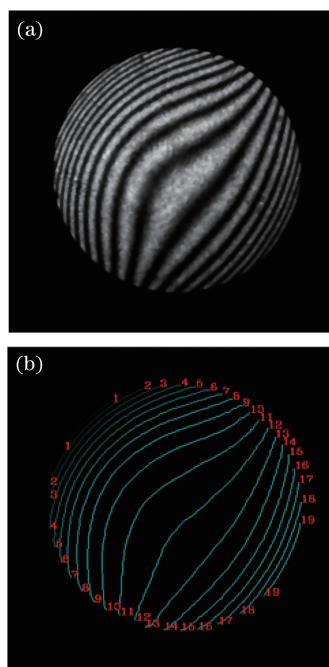


图 10 干涉条纹检测算法的处理结果。

(a) 干涉条纹原图; (b) 处理效果图

Fig. 10 Processing result by interference fringe detection algorithm. (a) Original image of interference fringe; (b) effect diagram of processing

增强了干涉条纹图像的对比度。提出了一种自适应窗口的差分滤波算法, 其非常符合干涉条纹的特征, 可消除多种噪声, 达到降低图像处理的误差、提升整体算法正确性的目的。还提出一种干涉条纹的级次标定算法, 并对普通仪器拍摄的干涉条纹图像进行了实验。实验结果表明: 所提算法能够较好地检测出干涉条纹图像, 并可进行检测和级次标定。然而该种算法包容性可能较低, 后续的工作是提高算法的包容性, 从而提升其正确性与适用性。所提算法也为其他形式的干涉条纹图像提供了一种干涉条纹检测与识别的图像处理方法。

参 考 文 献

- [1] Wang C L, Qiao Y F, Ren D X. A method of interference fringe image processing for checking micro displacement [J]. Intelligent Computer and Applications, 2011, 1(4): 11-13.
王成龙, 乔彦峰, 任德新. 干涉条纹检测微动位移的图像处理方法[J]. 智能计算机与应用, 2011, 1(4): 11-13.
- [2] Liu J. Research on surface testing algorithm based on wavelength-shifting interferometry[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2014: 6-15.
刘剑. 基于变频相移干涉的面形检测算法研究[D].

- 西安: 西安工业大学, 2014: 6-15.
- [3] Wang H T, Luo Q F, Wan M, *et al.* Extracting information of ESPI fringes based on fringe center method [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2010, 42(1): 107-111. 王海涛, 罗秋风, 万敏, 等. 基于条纹中心线法的电子散斑干涉条纹信息提取[J]. *南京航空航天大学学报*, 2010, 42(1): 107-111.
- [4] Jin X F, Rao R L, Lu H W. New extraction method for skeleton lines of electronic speckle fringes [J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(2): 221-225. 金雪峰, 饶芮菱, 鲁怀伟. 电子散斑干涉条纹骨架线提取的新方法[J]. *应用光学*, 2007, 28(2): 221-225.
- [5] Chao Y, Li Z J, Huang S F. Programming and image processing based on the realization OpenCV [J]. *Electronic Design Engineering*, 2013, 21(10): 175-177. 晁越, 李中健, 黄士飞. OpenCV 图像处理编程研究[J]. *电子设计工程*, 2013, 21(10): 175-177.
- [6] Xu J C, Xu Q, Chai L Q, *et al.* A new fringe-pattern preprocess method based on median spin filtering[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(1): 69-72. 徐建程, 许乔, 柴立群, 等. 基于旋滤波法的干涉条纹预处理技术[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(1): 69-72.
- [7] Wu C M. Studies on mathematical model of histogram equalization[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(3): 598-602. 吴成茂. 直方图均衡化的数学模型研究[J]. *电子学报*, 2013, 41(3): 598-602.
- [8] Li H Y, Yun L J, Gao Y. Fog image enhancement algorithm based on boundary-limited weighted least squares filtering [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(3): 0309002. 李红云, 云利军, 高银. 基于边界限制加权最小二乘法滤波的雾天图像增强算法[J]. *中国激光*, 2019, 46(3): 0309002.
- [9] Wang X Q, Zhang L J, Ban B L. Study on the extraction of interference fringes skeleton based on the binarization of the difference between filtering images[J]. *Laser Journal*, 2012, 33(6): 28-29. 王新强, 张丽娟, 班宝龙. 基于滤波图像相减二值化的干涉条纹骨架线提取的研究[J]. *激光杂志*, 2012, 33(6): 28-29.
- [10] Wang Q, Yang Y. Deburr algorithm of binary image based on outline trace[J]. *Journal of Jiangxi Institute of Education*, 2004, 25(6): 32-34. 王琦, 杨勇. 基于轮廓跟踪的二值图像去毛刺算法[J]. *江西教育学院学报*, 2004, 25(6): 32-34.
- [11] Yu G T, Zhu C, Li B L, *et al.* New connecting method for border breakpoints in optical image[J]. *Application Research of Computers*, 2014, 31(4): 1264-1266, 1280. 于广婷, 朱聪, 李柏林, 等. 光学图像中一种新的边界断点连接方法[J]. *计算机应用研究*, 2014, 31(4): 1264-1266, 1280.
- [12] Zhang D C, Zhou C G, Zhou Q, *et al.* Hole-filling algorithm based on contour [J]. *Journal of Jilin University (Science Edition)*, 2011, 49(1): 82-86. 张德才, 周春光, 周强, 等. 基于轮廓的孔洞填充算法[J]. *吉林大学学报(理学版)*, 2011, 49(1): 82-86.
- [13] Han X, Zhang Y M, Liu Y L. Method of the Chinese character recognition and improving of rosen thinning algorithm[J]. *Journal of North China Institute of Technology*, 1997, 18(1): 83-86. 韩燮, 张永梅, 刘幼立. 汉字识别的方法及 Rosen 细化算法的改进[J]. *华北工学院学报*, 1997, 18(1): 83-86.
- [14] Stefanelli R, Rosenfeld A. Some parallel thinning algorithms for digital pictures [J]. *Journal of the ACM*, 1971, 18(2): 255-264.
- [15] Zhang Y S, Yang G W, Wang Q Q, *et al.* Weld feature extraction based on fully convolutional networks [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(3): 0302002. 张永帅, 杨国威, 王琦琦, 等. 基于全卷积神经网络的焊缝特征提取的研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(3): 0302002.
- [16] Zhang B, Chang S, Wang J, *et al.* Feature extraction of laser vision weld seam based on genetic algorithm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0102001. 张斌, 常森, 王桔, 等. 基于遗传算法的激光视觉焊缝特征点提取 [J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0102001.
- [17] Teng J, Wang D L, Wen H Y. Visual C++ digital image processing method based on OpenCV [J]. *Modern Computer*, 2012(4): 70-72. 滕俊, 王弟林, 文汉云. 基于 OpenCV 下的 Visual C++ 数字图像处理方法 [J]. *现代计算机*, 2012(4): 70-72.
- [18] Wang F, Li J H, Fan B Y. Research on digital image processing algorithms of interference fringes [J]. *Microcomputer & Its Applications*, 2015, 34(10): 32-34. 王飞, 李晋惠, 范博洋. 干涉图像的数字化处理算法研究 [J]. *微型机与应用*, 2015, 34(10): 32-34.