

基于 Zernike 矩亚像素的高反光金属工件缺陷检测

刘婷婷¹, 王培光^{1*}, 张娜²

¹河北大学电子信息工程学院, 河北 保定 071002;

²河北大学物理科学与技术学院, 河北 保定 071002

摘要 提出了一种基于 Zernike 矩改进的亚像素边缘提取的工件缺陷检测算法。对图像进行小波分解, 并对分解的各频段信息分别利用不同算法进行预处理, 重构图像后可以有效地滤除图像噪声, 增强目标信息; 利用改进的 Zernike 矩亚像素边缘提取算法定位图像边缘并提取特征信息, 减小了边缘信息误差, 能够更精确地分割出目标轮廓; 通过计算连通区域几何参数及全局信息熵来判断是否存在缺陷。通过实验对算法进行了验证, 结果表明, 提出的算法可以降低金属高光噪声, 有效地提取缺陷边缘, 并且在环境光照变化时具有较强的稳健性, 金属工件的缺陷检测精度得到提高。

关键词 测量; 高光去噪; 缺陷检测; Zernike 矩; 亚像素边缘提取; 三维块匹配滤波算法

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.121203

Subpixel Defect Detection in Highly Reflective Workpieces Based on Zernike Moments

Liu Tingting¹, Wang Peiguang^{1*}, Zhang Na²

¹ College of Electronic Information Engineering, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China;

² College of Physical Science and Technology, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China

Abstract This study proposes a novel subpixel edge extraction algorithm for the detection of defects in workpieces, which is based on Zernike moments. First, the target image is decomposed using a wavelet transform, and the decomposed frequency information is preprocessed by employing different algorithms. After reconstruction, the image noise can be effectively filtered out and the target information can be enhanced. Then, the proposed subpixel edge extraction algorithm is applied to locate the image edges and extract their feature information with the aim to reduce the edge information error and segment the target contour more accurately. Finally, the geometric parameters of the surrounding region and the global information entropy are calculated to determine whether there are defects. The algorithm is verified with an experiment, and the experimental results show that the proposed algorithm can reduce the metal high-light noise and extract the defect edges effectively. Moreover, the algorithm is robust even when the ambient light illumination changes, and thus improves the accuracy of metal-defect detection.

Key words measurement; high-light denoising; defect detection; Zernike moment; subpixel edge extraction; block-matching and three-dimensional filtering algorithm

OCIS codes 150.3040; 150.1835; 150.1135

1 引言

随着工艺水平的不断提高, 人们对工件产品的要求也不断提高, 作为工程应用中的重要组成构件, 工件质量的好坏将会影响到工业产品质量以及机器

的寿命^[1-2]。如在航空零件加工中, 工件任何缺陷都有可能导其机械传动性能下降, 影响产品的使用性和安全性; 在精密电子仪器中, 缺陷零件有可能造成仪器设备度量不精确, 影响使用效果, 甚至会导致重大事故的发生, 因此对工件产品缺陷的精确检测

收稿日期: 2018-11-23; 修回日期: 2018-12-21; 录用日期: 2019-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(11271106)、河北省教育厅青年基金(072135142)

* E-mail: pgwang@hbu.edu.cn

极为重要。高反射率金属工件表面缺陷检测是工件缺陷检测中的一个热门课题,在获取图像过程中,金属工件引入的高光噪声是工件缺陷检测的主要障碍之一^[3]。其镜面反光特性会使捕获的图像中存在部分过饱和的高光区域,同时,在工件表面上反射的周围物体的像也会掩盖一些原图像信息,从而严重影响缺陷检测。

针对高反光金属工件缺陷检测问题,众多学者在以下两方面进行了研究,一方面是改进图像采集系统;另一方面是对检测算法进行改进。苏俊宏等^[4]通过光学系统和机械旋转平台的配合,在旋转中完整采集高反光圆柱型零件的表面图像,先对采集图像进行模糊化滤波,再得到其差值图像的边缘特征几何参数,最后进行缺陷检测。孙阔原等^[5]通过暗视野前向照明利用散射光观察被测轴件的方式获取高对比度图像,采用最大类间方差法进行阈值分割,结合形态学滤波及边缘几何特征对缺陷进行定位检测。姜美华等^[6]基于穹顶状光源,在灯罩内壁上装饰规则同心圆的图案,获取了钢轴承球表面反射图像,采用自适应阈值结合 Canny 算法得到反射图像的边缘信息,通过计算边缘的曲率来判断是否存在缺陷。闵永智等^[7]在采集系统外部装设遮光罩,并采用亮度和照射角度可调的条形发光二极管(LED)辅助光源来减弱自然光的影响,基于图像灰度梯度特征设计了自适应背景平滑滤波器,先对差分图像作阈值分割,再进行连通区域标记,最终实现了钢轨表面缺陷检测。采集系统的改进虽然可以抑制工件表面反光区域点云的部分缺失,但搭建的采集系统复杂,设备的角度位置需要精确调整,并且采集过程中的繁复操作易引入其他噪声,增加后期处理工作。以上改进算法在检测复杂边缘信息时噪声排除不干净,信息保真度不够理想,影响检测精度。

在金属工件缺陷检测中,对获取的图像信息进行有效分割提取是研究的重点,目前常用的目标提取方法包括背景差分法、阈值分割法、形态学处理及边缘检测法等^[8-9]。亚像素边缘检测法可以被用来提高边缘检测精度,通常亚像素边缘点存在于图像中灰度值发生渐变的区域,可以利用基于矩、插值法及拟合等方法^[10-12]获得边缘点的亚像素位置。其中基于矩进行亚像素定位的技术已有深入的研究,先后提出基于差分灰度矩、空间矩、傅里叶梅林矩^[13]及 Zernike 正交矩^[14]等算法。

基于 Zernike 矩的亚像素边缘检测算法,与其他计算复杂度相当的算法相比,检测精度较高,不仅能够快速稳健地估计出边缘法线方向以筛选水平候选点,而且在特定的边缘点上只需使用周围小区域的像素,就可以处理由于整体光照或视野变化和局部反射率变化引起的边缘像素强度的渐变。在此技术上,预处理的效果也很关键。目前图像滤波方法主要基于空域和频域,常用的有各向异性扩散滤波、双边滤波、非局部均值滤波及三维块匹配(BM3D)滤波等。其中,BM3D 滤波具有较高的峰值信噪比,能够较好地在保持边缘信息的同时平滑图像,在图像处理与分析领域得到了广泛应用。

针对高反光金属检测难点,为保证能够精确地提取出图像复杂的边缘信息,本文采用 LED 光源前向照明方式获取金属工件图像,处理图像时结合改进的 BM3D 去噪算法,提出一种基于 Zernike 矩亚像素边缘提取的工件缺陷检测方法。该方法采集图像设备简单,避免过多地引入其他噪声。图像预处理时,采用改进的 BM3D 算法可以有效地滤除高光噪声,保持原图像信息。应用基于 Zernike 矩改进的亚像素边缘提取算法,能够精确地进行边缘定位并提取出图像复杂的边缘信息,最后通过计算边缘信息图像连通区域的几何参数来筛除非缺陷轮廓,计算全局信息熵,判断是否存在缺陷,将缺陷工件检测出来。

2 实验原理及装置

检测系统主要包括照明设备、CCD 摄像机、载物台、计算机等,总体硬件装置设计如图 1 所示,实验选取前向照明方式^[15],通过这种方式可以获取成像清晰、边缘轮廓明显的高对比度图像,适用于高反光金属工件表面缺陷检测。其中光源与检测工件夹

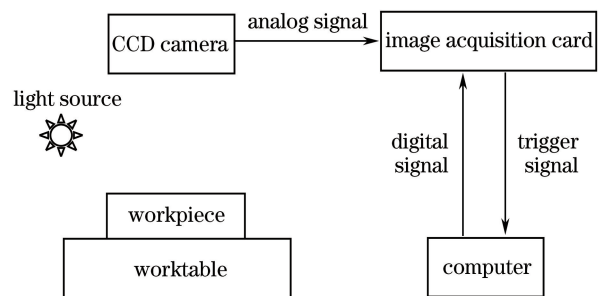


图 1 检测系统总体硬件装置图

Fig. 1 Schematic of overall hardware device in detection system

角为 30° ，相机垂直拍摄工件图像。

本实验对高反光金属工件缺陷检测的整体流程如图 2 所示。1) 经采集系统获取图像工件, 图像传入处理系统后, 先基于 BM3D 算法对原始图像进行初次估计; 2) 进行小波分解并分层进行滤波增强处

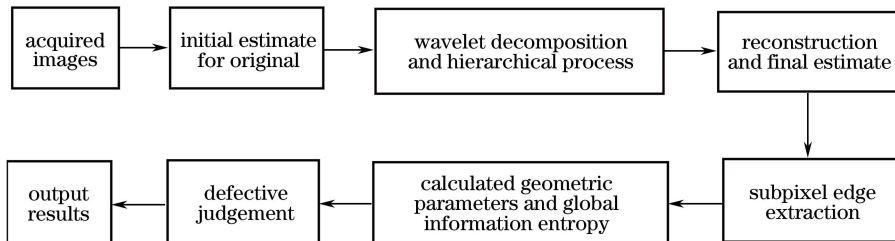


图 2 工件缺陷检测整体流程图

Fig. 2 Overall flow chart of defect detection of workpieces

3 工件缺陷检测

3.1 图像预处理

由 Dabov 等^[16]提出的 BM3D 算法, 结合了空间域中非局部均值滤波的相似块计算方法与频域中小波变换方法, 可获得较高的峰值信噪比, 去噪适用性强, 因此被众多学者广泛应用于图像领域。其中李海洋等^[17]基于 BM3D 算法结合原始噪声图像和去噪图像信息提出了一种渐进式图像去噪算法, 算法流程如图 3 所示, 采用三层两次融合的设计结构, 每层均采用 BM3D 算法, 较传统 BM3D 算法有更好的去噪性能。本文在文献^[17]的基础上对其进行改进, 提出一种基于 BM3D 去噪算法结合非锐化掩模增强及小波分解等算法的预处理方法, 较原方法计算复杂度降低并能保留更多的细节信息, 去噪性能有所提升。

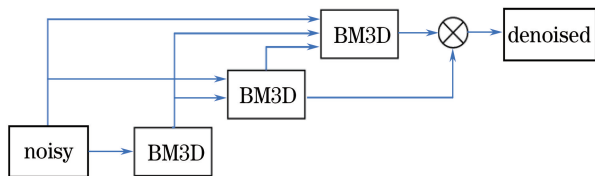


图 3 基于 BM3D 算法的渐进图像去噪算法图

Fig. 3 Schematic of progressive image denoising algorithm based on BM3D

在初始阶段, 高反光工件图像预处理框架如图 4 所示, 基于渐进式 BM3D 滤波方法进行改进, 结合小波分解、非锐化掩模、离散余弦变换 (DCT) 变换和分段线性变换对获取的工件图像进行滤波及增强, 使得带噪图像能够较好地消除高光影响并保留原图像的细节信息。

理, 接下来重构图像并结合原图像信息再次进行估计; 3) 应用改进的 Zernike 矩亚像素边缘提取算法实现边缘特征提取, 计算连通区域几何参数去除干扰信息; 4) 通过计算全局信息熵来确定是否有缺陷; 5) 输出检测结果。

第一步, 对噪声图像进行初始估计, 先聚类分组, 结合硬阈值滤波, 得到相似块权重, 对组内各部分加权平均进行三维反变换后得到初始估计。

第二步, 利用小波分解对初始估计图像进行分层, 分解成边缘层、细节层和基础层, 分别对各部分进行去噪增强处理。高频信息利用改进的自适应非锐化掩模法^[18]滤波处理, 中频信息进行 DCT 变换, 低频信息采用自适应阈值分段线性变换, 同时进行去噪与增强。

第三步, 将处理后的三部分进行小波重构, 对重构后的图像再次进行块匹配估计。应用原噪声图像的结构信息, 将原噪声图像及重构图像与当前图像进行块匹配, 聚类形成两个 3 维数组 (分组), 通过联合维纳滤波后逆变换, 根据所得权重加权平均, 获得最终的估计结果。

3.2 基于 Zernike 矩的亚像素边缘提取

如图 5 所示, 图像数字化和相机透镜的边缘扩展导致像素强度在有限宽度上逐渐变化, 通过对基于矩量的边缘提取技术的研究, 发现当实际图像的边缘逐渐变化时, 简单的阶跃函数模型会在边缘位置引入偏差, 其中 u 、 v 分别代表像素的行、列方向。Lyvers 等^[19]提出一个两级强度函数模型, 试图量化图像数字化带来的偏差, 但仍旧有较大误差, 因此有必要对边缘区域像素强度预测提出一个改进的模型。

假设摄像机边缘扩展函数近似于二维高斯函数, 那么理想的边缘扩展函数应该类似于高斯函数的累积分布函数^[20], 这种边缘模型没有对矩进行合理的分析评估。基于此, 提出一个强度渐变函数 $B(a)$ 来模拟梯度, 表达式为

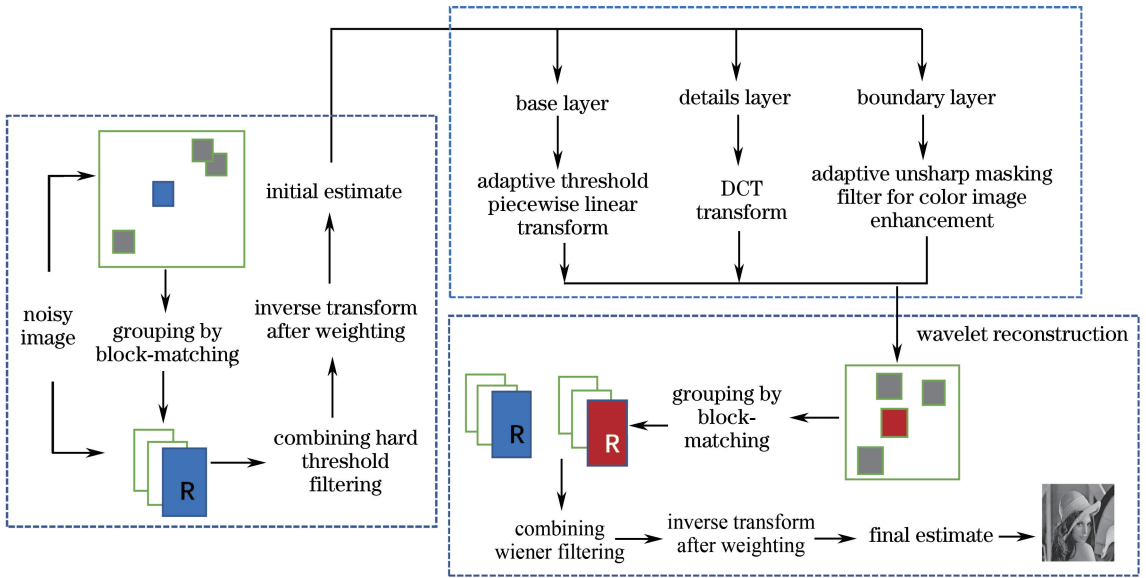


图 4 高反光工件图像预处理算法图

Fig. 4 Schematic of image preprocessing algorithm of highly reflective workpiece

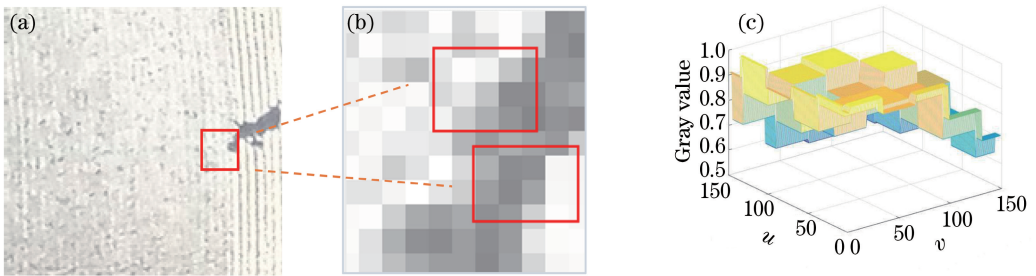


图 5 图像的边缘像素变化。(a)原图像;(b)局部灰度图像的边缘像素;(c)三维图像

Fig. 5 Variation of edge pixels of image. (a) Original image; (b) edge pixels of local gray image; (c) 3D image

$$B(a) = \begin{cases} p, & a \leq r - w \\ p + c [a - (r - w)] / (2w), & r - w < a < r + w \\ p + c, & a \geq r + w \end{cases}, \quad (1)$$

式中: a 为沿着边缘正交轴的位置; r 为到边缘的距离; w 为控制边缘宽度; p 为灰度值; c 为灰度差。

Zernike矩可以较好地提取图像的边缘轮廓,图6(a)为原始边缘位置,图6(b)为将原图绕原点顺时针旋转 α 角度的边缘位置。其中在单位圆中所包含的直线 M 的部分表示真实边缘,在 M 两侧的灰度值分别为 p 和 $p+c$, α 为 r 与横坐标轴的夹角。基于Zernike正交矩的旋转不变特性

$$Z'_{i,j} = Z_{i,j} \exp(-j\alpha), \quad (2)$$

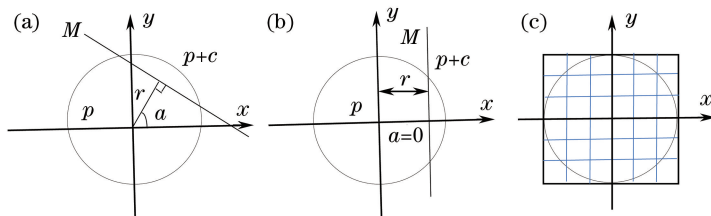


图 6 Zernike 矩的亚像素边缘提取。(a)原始边缘位置;(b)旋转后边缘位置;(c)生成模板图像

Fig. 6 Subpixel edge extraction based on Zernike moment. (a) Original edge position; (b) edge position after rotation; (c) generated template image

式中: $Z_{i,j}$ 为图像的 Zernike 矩; $Z'_{i,j}$ 为图像绕原点顺时针旋转 α 角度后的 Zernike 矩, i 为实轴位置, j 为虚轴位置。图像中相邻像素的 Zernike 矩的相似度与参数 r 有关, 在边缘强度梯度模型中可得

$$r = \frac{1 - \omega^2 - \sqrt{(\omega^2 - 1)^2 - 2\omega^2 Z_{i,j}/Z'_{i+1,j-1}}}{\omega^2}. \quad (3)$$

令图像与 $N \times N$ 的模板卷积结果如图 6(c) 所示, 设 r 的取值范围为 $[-1, 1]$, 可提取出亚像素级精度的边缘信息, 对边缘进行精确定位。

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_j \end{bmatrix} + \frac{Nr}{2} \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: (x_i, y_j) 为图 6(a) 中原始坐标; (x'_i, y'_j) 为最终估计边缘点坐标。边缘像素定位误差的等高线如图 7 所示, 红色表示经典的 Zernike 矩方法, 黑色表示所提出的算法。结果显示, 改进的模型在任何区域误差值都小于 0.015 pixel, 而阶跃函数边缘模型的误差高达 0.35 pixel。与经典的阶跃函数边缘模型相比, 该方法的结果在所有区域上都有一个数量级的改进, 在大多数区域上有多个数量级的改进。

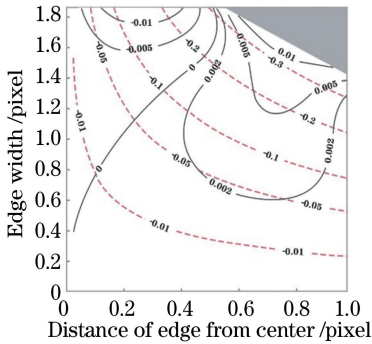


图 7 边缘定位误差的像素等高线

Fig. 7 Pixel contour lines of edge positioning error

3.3 缺陷检测

基于 Zernike 矩亚像素边缘提取算法提取出的边缘特征, 统计二值图像中被标记的区域的面积分布, 设置阈值, 筛除非缺陷干扰信息; 处理后, 计算图像的全局信息熵, 并与正常图像的全局信息熵进行对比, 对比函数的表达式为

$$\eta = \frac{|\xi - \xi^*|}{\xi^*}, \quad (5)$$

式中: ξ 为检测图像信息熵; ξ^* 为无损图像信息熵的平均值。通过对比函数获得对比值来判定检测结果。

4 实验结果及分析

4.1 实验环境

实验采用 Intel Core i5 CPU, 8 G 内存, MATLAB 2016a 编译环境, 对上述算法进行调试分析。选取的待检工件图片包含凹陷、点伤及划痕等缺陷, 类型较复杂。获取图像中目标缺陷受高光噪声影响, 对比度较低, 在此, 除高光外不考虑其他因素的影响; 实验图像来自应用 CCD 摄像机采集的带缺陷的金属工件表面的普通高光图像, 光源为 LED 白炽灯。

4.2 实验结果对比

针对高光工件图像目标特征提取问题, 选取了两种基于当前主流方法改进的算法^[21-22], 与所提算法进行对比实验, 以验证算法的有效性。文献[21]中的算法基于 Canny 算子结合全局阈值最大类间方差法和形态学图像分割法对表面高反光零件进行边缘提取; 文献[22]中的算法通过背景建模差分减弱高铁钢轨表面光照变化反射不均的影响, 再通过阈值分割获取边缘信息。将所提算法与以上两种算法分别应用于获取的图像数据集, 其中包含 60 张缺陷图像, 40 张正常图像, 部分实验结果如图 8 所示。

图 8(a) 第 1 张包含不同程度的擦伤, 在高反光环境下伤痕对比度较低; 图 8(a) 第 2 张包含许多点伤和 2 处大小不同的凹陷, 并且该工件带有凹槽, 边缘有细小螺纹, 在高反光环境下增大缺陷检测难度; 图 8(a) 第 3 张包含碰凹缺陷, 与第 2 张中的破损的凹陷缺陷不同, 此处凹陷含有大量高光噪声, 不易辨别。经过 3 种方案处理后, 从视觉上能明显看出, 基于文献[21]中算法的效果图中噪声滤除不干净, 带入较多杂质信息, 较难分析出是否存在缺陷及缺陷的位置; 基于文献[22]中算法的效果图中噪声滤除不干净并且会过滤掉一些目标信息, 使有些缺陷没有检测出来。相比之下, 所提算法在去噪方面和保真方面都有较好的效果, 并且提取出的边缘信息相对平滑且连续, 减小了与原图的误差, 提高了检测质量。

为了验证所提算法对于环境变化的稳健性, 增加了在不同程度光照下的对比实验, 如图 9 所示。结果显示, 在不同程度的光照环境下, 相比其他两种算法, 所提算法仍旧有较好的效果。

4.3 实验数据分析

为确保检测结果的可靠性, 以此进行量化分析验证, 基于所提算法与其他文献算法在峰值信噪比 (PSNR) 和结构相似性 (SSIM)^[23] 两个参数下进行对比, 图 8 的实验结果参数见表 1。

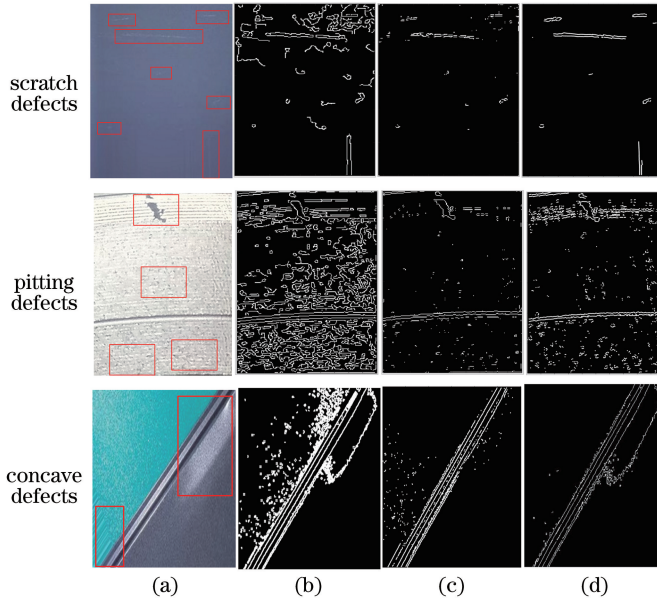


图 8 实验结果。(a)原图;(b)文献[21]中的算法;(c)文献[22]中的算法;(d)所提算法

Fig. 8 Experimental results. (a) Original images; (b) algorithm in Ref. [21]; (c) algorithm in Ref. [22]; (d) proposed algorithm

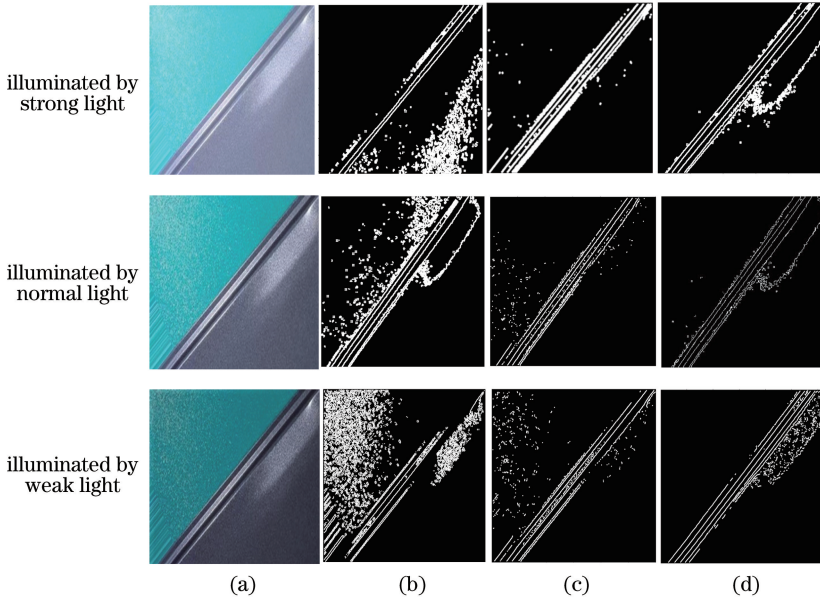


图 9 不同光照下的对比实验结果。(a)不同光照下工件图像;(b)文献[21]中的效果;(c)文献[22]中的效果;(d)所提算法的效果

Fig. 9 Comparative experimental results under different illumination. (a) Workpiece images under different illumination; (b) results of algorithm in Ref. [21]; (c) results of algorithm in Ref. [22]; (d) results of proposed algorithm

PSNR 越大表示去噪效果越好,SSIM 数值在(0,1)之间,越接近 1 说明保真度越好。由表 1 数据分析可得,所提算法在两个指标上均优于其他算法,能够在有效去除高光噪声的同时对图像保留较多的有效信息。经过对工件图片数据集的测试,检测准确率如表 1 所示,所提算法的检测精度均高于前两种算法,验证了该算法有效性。

5 结 论

针对高反光工件的缺陷检测困难及特殊工业零件标准要求高的问题,结合改进的 BM3D 去噪算法,提出一种基于 Zernike 矩的亚像素边缘提取方法。实验过程中通过 CCD 直接获取工件图像,采集过程简单方便。实验结果显示,该算法在金属

表1 3种算法的量化对比

Table 1 Quantitative comparison of three algorithms

Algorithm	In Ref. [21]	In Ref. [22]	Proposed
PSNR	30.24	34.18	42.37
	28.33	31.62	40.58
	30.52	31.06	41.28
SSIM	0.769	0.835	0.902
	0.722	0.785	0.862
	0.734	0.792	0.881
Accuracy /%	86	92	96

工件缺陷检测中去噪性及保真度方面都有较好的表现,能够在消除高光影响的基础上准确地检测出工件缺陷,提升高亮金属工件缺陷检测精度,并且在环境光照变化时,也有较强的稳健性。在后续的研究工作中,将以提高检测算法的实时性为重点,并且会继续扩展算法的通用性。

参 考 文 献

- [1] Lu R S, Wu A, Zhang T D, *et al.* Review on automated optical (visual) inspection and its applications in defect detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815002.
卢荣胜, 吴昂, 张腾达, 等. 自动光学(视觉)检测技术及其在缺陷检测中的应用综述[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0815002.
- [2] Li T T, Yang F, Xu X L. Method of large-scale measurement based on multi-vision line structured light sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1104003.
李涛涛, 杨峰, 许献磊. 基于多视觉线结构光传感器的大尺度测量方法[J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1104003.
- [3] Chen G F, Guan G Y, Wei X. Online stamping parts surface defects detection based on machine vision[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 011501.
陈广锋, 管观洋, 魏鑫. 基于机器视觉的冲压件表面缺陷在线检测研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 011501.
- [4] Su J H, Liu S L. Measure system of surface flaw and morphology analysis of cylindrical high precision parts[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(4): 041202.
苏俊宏, 刘胜利. 圆柱型高精零件表面缺陷检测及形貌分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(4): 041202.
- [5] Sun K Y, Jiang L X, Wang J Y, *et al.* Automatic visual inspection system of shaft part surface [J].

Nondestructive Testing, 2016, 38(6): 53-57, 72.

孙阔原, 蒋理兴, 王俊亚, 等. 轴类工件表面视觉自动检测系统[J]. *无损检测*, 2016, 38(6): 53-57, 72.

- [6] Jiang M H, Fu L H, Wang Z, *et al.* A new method for specular curved surface defect inspection based on reflected pattern integrity [J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2016, 7(3): 221-228.
姜美华, 付鲁华, 王仲, 等. 基于图案完整性的高反射曲面缺陷检测新方法[J]. *测试科学与仪器(英文版)*, 2016, 7(3): 221-228.
- [7] Min Y Z, Yue B, Ma H F, *et al.* Rail surface defects detection based on gray scale gradient characteristics of image [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(4): 220-229.
闵永智, 岳彪, 马宏锋, 等. 基于图像灰度梯度特征的钢轨表面缺陷检测[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(4): 220-229.
- [8] Qiao N S. Edge detection of printed circuit board defect image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(4): 0410001.
乔闹生. 印制电路板缺陷图像边缘检测[J]. *光子学报*, 2016, 45(4): 0410001.
- [9] Guo M, Hu L L, Zhao J T. Surface defect detection method of ceramic bowl based on Kirsch and Canny operator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0904001.
郭萌, 胡辽林, 赵江涛. 基于 Kirsch 和 Canny 算子的陶瓷碗表面缺陷检测方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 0904001.
- [10] Mirzapour F, Ghassemian H. Moment-based feature extraction from high spatial resolution hyperspectral images [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(6): 1349-1361.
- [11] Wang L, Zou L, Zhao S M. Edge detection based on subpixel-speckle-shifting ghost imaging [J]. *Optics Communications*, 2018, 407: 181-185.
- [12] He Y B, Zeng Y J, Chen H X, *et al.* Research on improved edge extraction algorithm of rectangular piece [J]. *International Journal of Modern Physics C*, 2018, 29(1): 1850007.
- [13] Kaur M, Kumar V. Fourier-Mellin moment-based intertwining map for image encryption [J]. *Modern Physics Letters B*, 2018, 32(9): 1850115.
- [14] Nagarathinam K, Kathavarayan R S. Moving shadow detection based on stationary wavelet transform and Zernike moments [J]. *IET Computer Vision*, 2018, 12(6): 787-795.

- [15] Li Z H, Hua Y S. Research on the placement of light source, camera and detected workpiece in surface defect detection [J]. *Electronic Science and Technology*, 2018, 31(5): 66-68, 72.
李智慧, 华云松. 表面缺陷检测中工件与光源相机位置关系研究[J]. *电子科技*, 2018, 31(5): 66-68, 72.
- [16] Dabov K, Foi A, Katkovnik V, *et al.* Image denoising by sparse 3D transform-domain collaborative filtering [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 16(8): 2080-2095.
- [17] Li H Y, Cao W G, Li S R, *et al.* Progressive image denoising algorithm [J]. *Journal of System Simulation*, 2017, 29(2): 282-294.
李海洋, 曹伟国, 李诗锐, 等. 渐进式图像去噪算法[J]. *系统仿真学报*, 2017, 29(2): 282-294.
- [18] Lin S C F, Wong C Y, Jiang G, *et al.* Intensity and edge based adaptive unsharp masking filter for color image enhancement[J]. *Optik*, 2016, 127(1): 407-414.
- [19] Lyvers E P, Mitchell O R, Akey M L, *et al.* Subpixel measurements using a moment-based edge operator[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(12): 1293-1309.
- [20] Wang Y Q, Hui M, Liu M, *et al.* Edge extraction of optical subaperture based on differential box-counting dimension method with window merge replication [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(9): 093107.
- [21] Guo H R, Shao W, Zhou A W, *et al.* Novel defect recognition method based on adaptive global threshold for highlight metal surface [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(11): 2797-2804.
郭皓然, 邵伟, 周阿维, 等. 全局阈值自适应的高亮金属表面缺陷识别新方法[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(11): 2797-2804.
- [22] He Z D, Wang Y N, Liu J, *et al.* Background differencing-based high-speed rail surface defect image segmentation[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(3): 640-649.
贺振东, 王耀南, 刘洁, 等. 基于背景差分的高铁钢轨表面缺陷图像分割[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(3): 640-649.
- [23] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, *et al.* Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.