

低对比度下零件弱边缘提取和缺陷检测研究

陈东,马兆昆,张新伟

青岛科技大学机电工程学院

摘要: 针对低对比度的金属零件弱边缘提取缺失和缺陷漏检等问题,提出了基于分段幂次 Retinex 和含惩罚项自适应鸽群优化的弱边缘提取和缺陷检测两阶段算法。一阶段使用分段幂次 Retinex(PPR)提高弱边缘对比度,构建低通自适应双边滤波抑制和去除无关噪声,使用含惩罚项的自适应鸽群优化分割算法提取边缘;二阶段在提取出的边缘区域内使用不含 PPR 图像增强的滤波和分割等算法来检测划痕和凹洞缺陷。试验结果表明,两阶段算法在增强保护低对比度弱边缘分界信息后,可完整分割提取出零件的轮廓边缘,进而快速检测出不同位置的零件缺陷。

关键词: 边缘提取;分段幂次 Retinex;低通自适应双边滤波;惩罚鸽群优化

中图分类号: TG245;TH161.1;TP391.41 **文献标志码:** A **DOI:**10.3969/j.issn.1000-7008.2022.09.028

Research on Weak Edge Extraction and Defect Detection of Parts under Low Contrast

Chen Dong, Ma Zhaokun, Zhang Xinwei

Abstract: Aiming at the problems of missing weak edge extraction and missing defect detection of low contrast metal parts, a two-stage algorithm for weak edge extraction and defect detection based on piecewise power retinex and adaptive pigeon-inspired optimization with penalty method is proposed. In the first stage, piecewise power retinex (PPR) is used to improve the weak edge contrast, a low-pass adaptive bilateral filter is constructed to suppress and remove irrelevant noise, and an adaptive pigeon-inspired optimization segmentation algorithm with penalty method is used to extract the edge. In the second stage, algorithms such as filtering and segmentation without PPR image enhancement are used to detect scratches and pits in the extracted edge region. The experimental results show that the two-stage algorithm can completely segment and extract the contour edges after enhancing and protecting the boundary information of low contrast and weak edge, and then can quickly detect the defects at different positions.

Keywords: edge extraction; piecewise power retinex; low-pass adaptive bilateral filtering; penalty pigeon-inspired optimization

1 引言

视觉引导分拣和装配零件时,边缘信息是描述

零件尺寸、姿态和位置的基础,缺陷检测是分类优劣零件的前提^[1,2]。在实际工厂环境中,亮度分布不均和零件倒角加工等因素易使零件与背景形成低对比度,导致出现弱边缘提取缺失和缺陷漏检误检等问题^[3]。

基金项目: 山东省重点研发计划项目(218GNC112007)
收稿日期: 2021年9月

- [2] 王小明. 斜齿圆柱齿轮螺旋角的计算与测量[J]. 机械制造, 2000(10): 50-51.
- [3] 石维, 侯宇, 周世凡, 等. 基于机器视觉的斜齿轮螺旋角参数测量方法[J]. 机械传动, 2020, 44(5): 171-175.
- [4] 杜文华, 毕天华, 段能全, 等. 圆柱铣刀刀刃螺旋角视觉测量方法[J]. 制造技术与机床, 2019(8): 122-125.
- [5] 邹永宁, 姚功杰. 自适应窗口形状的中值滤波[J]. 光学精密工程, 2018, 26(12): 3028-3039.
- [6] 郭永芳, 于明, 黄凯. 基于细菌趋药性的 Ostu 双阈值图像分割算法[J]. 计算机工程, 2011, 37(22): 8-11.
- [7] 孔盛杰, 黄翔, 周蒯, 等. 基于机器视觉的齿形结构齿顶圆检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 247-255.
- [8] 梁经伦, 莫锡轩, 黄杰泳, 等. 直齿圆柱齿轮参数视觉测量方法研究[J]. 机械设计与制造, 2018(1): 48-50, 54.

- [9] 李浩然, 高健, 吴田, 等. 基于改进 Canny 算子的绝缘子裂纹检测研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(2): 91-98.

- [10] 曾友, 高健, 岑誉. 贴片元件的海森范式加权最小二乘矩形拟合算法[J]. 机械设计与制造, 2016(4): 28-31.
- 第一作者: 李献, 硕士研究生, 中北大学机械工程学院, 030051 太原市

First Author: Li Xian, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China

通信作者: 杜文华, 博士, 教授, 中北大学机械工程学院, 030051 太原市

Corresponding Author: Du Wenhua, Ph. D., Professor, School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China

为解决上述低对比度下弱边缘提取和缺陷检测的问题,众多学者进行了大量研究。Cao Y. 等^[4]通过构建自适应中值滤波,防止边缘细节被弱化或模糊。王冬云等^[5]使用导向滤波 Retinex 增强处理金属制品图像,以减少局部边缘点的损失。杨武飞等^[6]利用目标先验信息移除低对比度的虚假弱边缘,以法线方向加权值作为轮廓。邵伟等^[7]结合双边滤波和统计灰度网格对工件低对比度缺陷进行识别,但此项改进只适用于直方图有明显波谷的情况。黎浩等^[8]结合使用同态滤波和 OTSU 对低对比度钢件缺陷进行突出显示,由于同态滤波增强能力较弱且 OTSU 未考虑像素间空间相关邻域信息,导致边缘连接抗干扰能力差。赵海峰等^[9]提出使用增强后的图像差值算法完成零件表面的缺陷提取。

上述算法在边缘提取和缺陷检测方面仍存在一定的局限性,因此提出构建基于分段幂次 Retinex 和含惩罚项自适应鸽群优化的弱边缘提取和缺陷检测两阶段算法,该算法能增强弱边缘分界处信息,实现对零件完整轮廓的拟合和准确的中心定位,有效提高多领域内边缘连接能力,保证最优的铸件表面缺陷检出率。

2 两阶段算法研究

低对比度情况下的金属零件的边缘提取和缺陷检测算法主要由交错引用的四个部分组成,原理实现如图 1 所示。在一阶段使用分段幂次 Retinex 增强(PPR)、低通自适应双边滤波(LPABF)、非极大抑制(NMS)和含惩罚项的自适应 PIO 阈值分割(APIO-PF)完成低对比度零件弱边缘提取;二阶段是在一阶段边缘提取的零件区域内,使用 LPABF、NMS 和 APIO-PF 完成零件表面不同位置缺陷的检测。

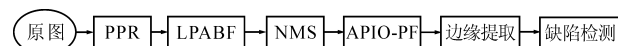


图 1 低对比度情况下的二阶段算法流程

2.1 分段幂次 Retinex 增强(PPR)

经典 Retinex 增强是基于观测图像反射和照明组成的增强方法^[10],HSV 颜色空间的优点是可在内部分量影响较小的情况下进行不同分量调整,而亮度分量 V 恰好是 Retinex 增强所需的最佳处理分量。故提出一种分段幂次 Retinex 增强算法,算法原理如图 2 所示。

2.1.1 分段范围调整

零件图像的低对比度区域主要位于高低灰度交界处,因此使用伽马校正估计照明,然后借助 Ret-

inex 模型实现亮度增强。与使用滤波器校正亮度相比^[5],伽马校正光照可以有效减少运算时间,伽马校正的亮度值的计算式为

$$V_E = \exp(\log V - \log V_1^g) \quad (1)$$

式中, V 为原始像素值; V_1 为低灰度线性增强结果值; g 为伽马校正参数。

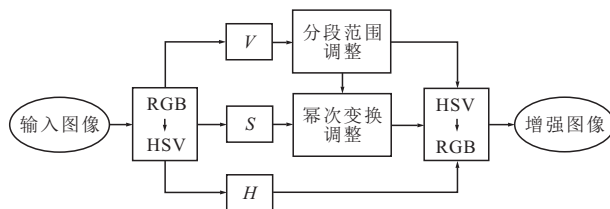


图 2 分段幂次 Retinex 增强算法流程

线性增强亮度后,像素值容易集中在较高的灰度范围内,导致增强图像灰度动态范围变窄,对比度依然较低,可以通过缩放 V_E 分量灰度来调整图像的弱边缘对比度。因此提出采用分段函数拉伸灰度范围,实现动态调整,相应的 V_{EN} 表达式为

$$V_{EN} = \begin{cases} V_E, V_E \geq 0.6 \\ 3V_E^2/2, V_E \leq 0.4 \end{cases} \quad (2)$$

2.1.2 饱和度幂次调整

在分段范围调整亮度分量 V 后,破坏了原有饱和度 S 和亮度 V 两种分量值的平衡,因此需基于新的分量 V 和原有分量 S 之间的平均差对 S 分量值进行相应调整。分量 V 和分量 S 之间的平均差 Δ_{ES} 为

$$\Delta_{ES} = \frac{\sum_0^i V_{EN}(i) \times i - \sum_0^i S(i) \times i}{MN} \quad (3)$$

式中, i 为灰度级; $V_{EN}(i)$ 为灰度级为 i 的像素数; $S(i)$ 为灰度级为 i 的像素数; M 和 N 分别为图像的宽度和长度。

通过平均差值调整分量 S ,进而得到新的色彩饱和度分量 S_N 为

$$S_N = S^{1 + (-1)^{2-n} \times (|\Delta_{ES}|^2 + |\Delta_{ES}|)}, n = \begin{cases} 0, \Delta_{ES} < 0 \\ 1, \Delta_{ES} \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

S_N 值根据平均差值的正负幂次变换大小,动态地与 V 值维持平衡,最终将 H, V_{EN} 和 S_N 三者结合重新输出为增强后的 RGB 颜色空间图像。

2.2 低通自适应双边滤波(LPABF)

双边滤波(BF)是基于高斯模糊(GF)升级的具有降噪和保持边缘的滤波器,在空域和值域上利用输入图像 p 和导向图像 I 之间的局部非线性关系来处理图像。

BF 在图像 (i, j) 位置的加权系数为

$$\omega_{i,j}^{BF}(I) = \frac{1}{N_i} \exp\left(\frac{\|i-j\|^2}{-\sigma_D^2}\right) \exp\left(\frac{\|I_i - I_j\|^2}{-\sigma_r^2}\right) \quad (5)$$

式中, N_i 是归一化因子; σ_D 和 σ_r 分别是空域权重和值域权重。

当 I 过度平滑时, BF 将退化为 GF, 此时将对边缘信息造成破坏。针对 BF 退化问题, 提出一种低通自适应双边滤波, 引入低通导向图像 \bar{I} , 而 \bar{I} 可由输入图像的高斯模糊空间核得到, 故 LPABF 的加权系数为

$$\omega_{i,j}^{LPABF}(p, \bar{I}) = \frac{1}{N_i} \exp\left(\frac{\|i-j\|^2}{-\sigma_D^2}\right) \exp\left(\frac{\|p_i - \bar{I}_j\|^2}{-\sigma_r^2}\right) \quad (6)$$

提出的 LPABF 滤波器优势是将 p 的空间核 $G_s = (i-j)$ 与 \bar{I} 的范围核 $G_r = (p_i - \bar{I})$ 结合, 在自适应平滑图像的同时可防止滤波器退化, 保持图像轮廓清晰。最终得到 LPABF 的表达式为

$$g(i) = \sum_j \omega_{i,j}^{LPABF} \times (p, \bar{I}) \times p_j \quad (7)$$

利用边缘保存引导滤波 (EDGF)^[11]、联合双边滤波 (JBF)^[12]、快速双边滤波 (FBF)^[13] 和 LPABF 对含高斯噪声 Lenna 图像进行平滑处理, 为精确客观衡量滤波质量和防止单一评价标准存在的误差, 采用 PSNR 和 SSIM 进行定量分析, 评价结果如表 1 所示。评价结果数值越大, 代表处理后的图像质量越高。从表 1 可知, 改进自适应双边滤波的 PSNR 值较其他算法提升明显, 可验证改进算法对图像的降噪效果较好, 而 SSIM 值达到 0.9814, 说明与原图相似度高, 区域特征保存完整, 有利于提取出低对比度区域附近更多的边缘点。

表 1 滤波质量评价结果

滤波方式	PSNR (db)	SSIM
EDGF	23.4337	0.9775
JBF	23.3620	0.9649
FBF	22.1691	0.9533
LPABF	25.4477	0.9814

2.3 含惩罚项自适应 PIO 分割 (APIO-PF)

鸽群优化算法是按鸽群利用磁场和标志物分段导航归巢的原理进行优化求解, 其原理简单, 收敛速度快, 适用于求解分割阈值, 但易陷入局部最优^[14,15]。

2.3.1 传统 PIO 算法

无论鸽群按磁场还是标志物进行导航, PIO 算法均按全局最优特性进行迭代, 故第 j 只鸽子在第 $(m+1)$ 代的速度信息更新方法为

$$V_j(m+1) = e^{-R_m} \times V_j(m) + r \times [X_g - X_j(m)] \quad (8)$$

式中, R 是映射因子; X_g 为鸽群当前最佳位置; X_j 为鸽子的当前位置; 随机数 r 的范围是 $(0,1)$ 。

2.3.2 改进 PIO 算法

与固定 R 值相比, 自适应 R_A 更有利于平衡式 (8) 的优化精度和收敛速度。故提出一种自适应更新的 R_A 为

$$R_A(m) = R_{\max} + \frac{(R_{\min} - R_{\max}) [m - (jme)_{\max}]}{[1 - (jme)_{\max}]} \quad (9)$$

式中, R_A 设置的有效范围为 (R_{\min}, R_{\max}) 。在初始状态下, R_{\min} 意味着较好的收敛和搜索能力, 而在迭代过程中, R 值逐渐增加到 R_{\max} 则有助于得到较高的地图搜索效果。

通过引入动态惩罚项 ξ 可进一步改进 PIO 的速度更新模型, 提高解的可变性。提出利用二值图像边缘点的数目和类间方差的阈值作为更新依据, 衡量边缘像素点数不同区域内的速度更新信息, ξ 的具体公式为

$$\xi = \left[\sum_{i=0}^{ln} i \times (|p_i - \mu_k| \geq T) \right] / |n| \quad (10)$$

式中, i 和 k 为像素索引值; p 为输入图像; T 表示每次迭代最优阈值解; μ_k 为领域内的方差; $|n|$ 为邻域内像素个数。

通过引入动态惩罚项, 可在满足最优阈值解的边缘像素点处使用较大惩罚项, 加快速度更新, 反之, 惩罚项较小。

最终结合式 (8) ~ 式 (10), 得到含惩罚项自适应 PIO 算法速度信息更新方式为

$$V_j(m+1) = \xi e^{-R_A(m) \times m} V_j(m) + r [X_g - X_j(m)] \quad (11)$$

2.3.3 APIO-PF 阈值分割

图 3 是将改进 APIO-PF 算法应用于阈值分割的流程。根据灰度直方图设置不同阶段的迭代初始参数; 随机给定鸽群初始速度, 分阶段更新鸽群的速度和位置, 并将鸽群速度作为阈值更新速度; 最终以位置迭代最优解作为最优自适应阈值。

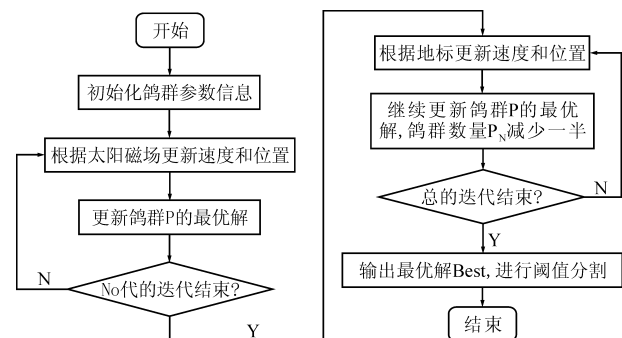


图 3 APIO-PF 阈值分割流程

APIO-PF 算法求解得到的阈值分割结果受噪声影响小,引入动态惩罚项可加快迭代速度,并且不易陷入非边缘领域内的局部最优,进而在多领域内快速判断图像的有效弱边缘,能够保证外边缘整体连接完整性和小范围的缺陷区域检出率。

3 试验与结果分析

选取低对比度下的叶轮铸件和螺母图像作为处理对象,使用不同算法进行对比试验。为验证算法的适用性,叶轮图像由数据集提供,而螺母图像则在实验室内模拟操作环境获得。试验平台选用 MATLAB R2020a 和 VS2019 软件。

3.1 图像增强试验结果

选取螺母为处理对象,使用多种增强算法进行处理,图4是增强图像、三维灰度分布图和灰度直方图的结果对比。可以看出,四种算法都不同程度地提升了螺母零件的亮度。其中直方图均衡化在对全局亮度提升的同时,还增强了与零件无关的点状背景因素,后续将增加连通域判断处理时间;文献[5]的算法对图像全局进行了过度增强,虽然亮度变得均匀且点状背景消失,但造成图像整体泛白,进而削弱了原有边缘处的对比度;文献[8]中的同态滤波性能不稳定,对图像增强幅度过小,因此三维灰度分布和灰度直方图与原图类似。

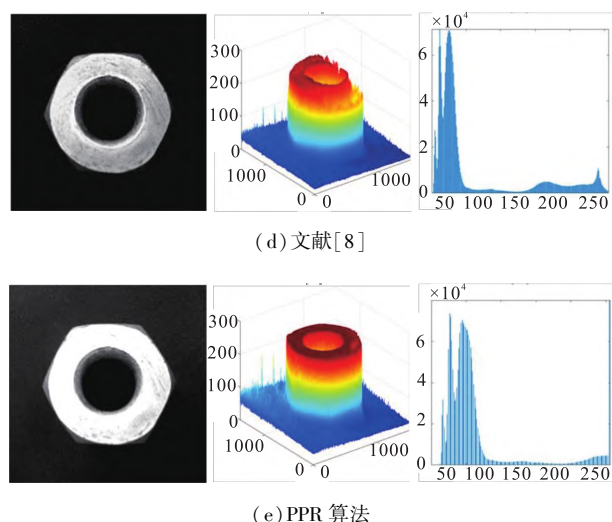
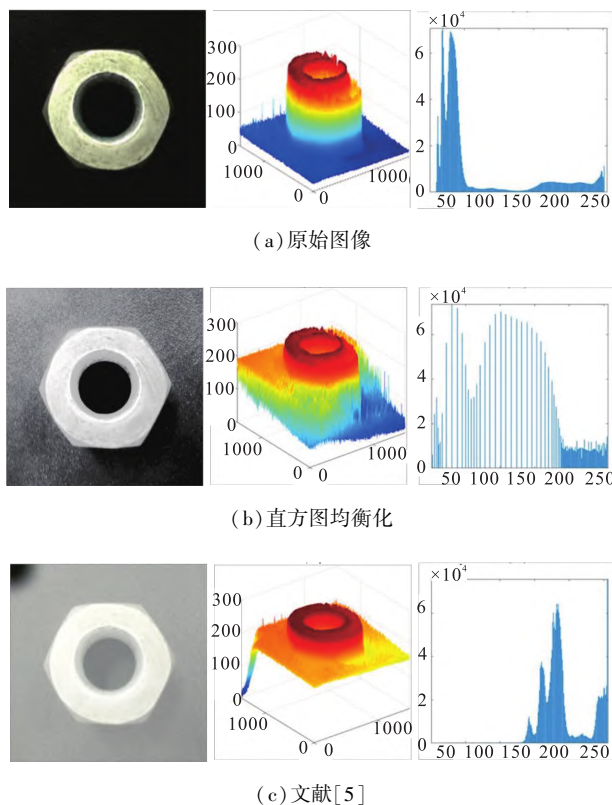


图4 螺母图像增强对比

提出的 PPR 算法小幅度均衡拉伸了直方图分布,避免亮度区域的像素过于集中,螺母表面亮度分布更加均匀,在提升螺母局部亮度的同时,增大了边缘角点区域与背景的对比度,从而在弱边缘处形成明显的梯度跃迁,避免在后续提取过程中出现弱边缘断裂和假边缘检出。

3.2 边缘提取试验结果

为验证一阶段算法在边缘提取中的有效性,使用文献[3]、文献[5]、文献[8]中方法和一阶段算法对叶轮图像和螺母图像进行边缘提取,结果如图5所示。

由图可知,由于倒角加工和光照不均等因素,导致螺母六边形角点处边缘和叶轮上端边缘分别与各自背景过于贴合,而两种零件的完整边缘信息是确定姿态和位置的重要特征。

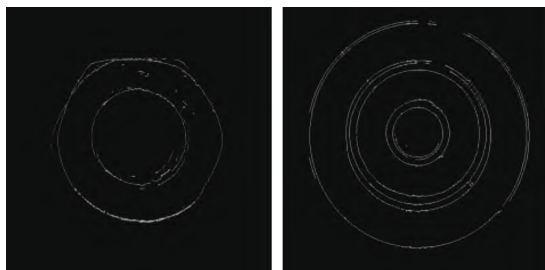
在图5b中,螺母和叶轮内外边缘的连接缺失,这是由于采用没有增强效果的线性滤波导致全局图像过平滑,破坏了边界信息。在图5c中,由于文献[5]算法对图像进行全局过度增强,破坏了螺母和叶轮边缘的连接性,导致零件内外边缘断裂严重。在图5d中,由于文献[8]的同态滤波增强性能较低,无法解决图像亮暗边界的低对比度问题,且未考虑边缘处像素邻域信息,因此对两种零件边缘连接性也较差,与前文分析相符。

一阶段算法使用 PPR 将螺母和叶轮低对比度弱边缘处的对比度重新映射增强,并结合 LAPBF 滤波将表面的缺陷特征和背景区域的点状特征增强剔除(间接验证了不能将一阶段算法应用于缺陷检测),抑制了无关因素对边缘提取的影响,较好地保护了局部弱边缘信息,最后使用 APIO-PF 实现对螺

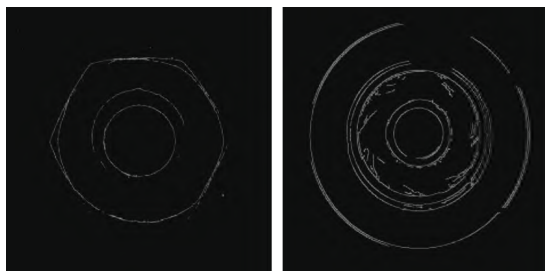
母边缘的完整提取。图 5f 是将一阶段算法提取的叶轮和螺母边缘信息可视化在原图上的结果,由于边界信息提取完整,因此相应的轮廓拟合和形心定位也较为准确。



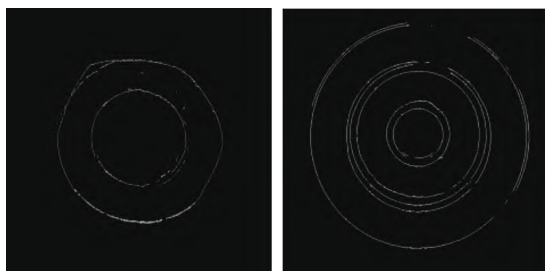
(a) 原始图像



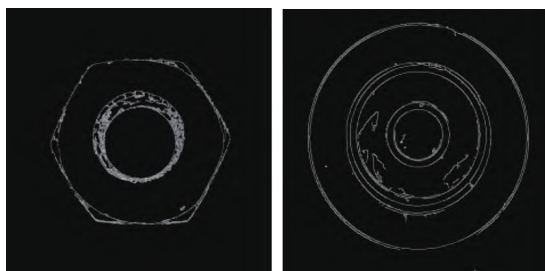
(b) 文献[3]



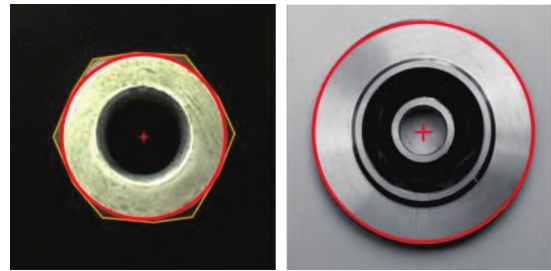
(c) 文献[5]



(d) 文献[8]



(e) 一阶段算法

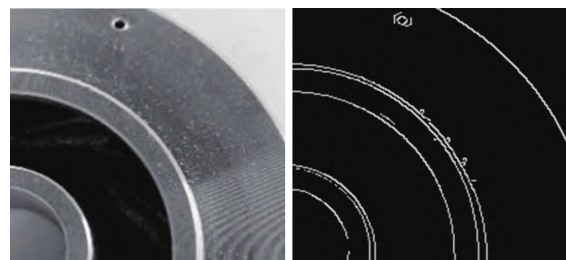


(f) 轮廓查找和形心定位

图 5 螺母和叶轮边缘提取图像

3.3 缺陷检测试验结果

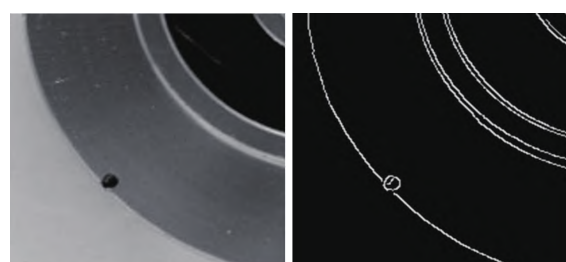
如图 6 所示,使用二阶段算法对含凹洞和划痕缺陷的叶轮数据集图像进行缺陷检测。对比可知,二阶段算法即使没有引用 PPR,也能较好去除金属表面的反光和纹理,排除无用于干扰信息对缺陷检测的影响,进而实现对凹洞和划痕缺陷的全部检出和连接。由图 6a ~ 图 6c 对比可知,算法可以完整检测出叶轮不同位置处的凹洞缺陷,不会因凹洞缺陷与倒角的边缘贴合而导致漏检和误检,进而验证了二阶段算法在零件缺陷检测方面的有效性和鲁棒性。



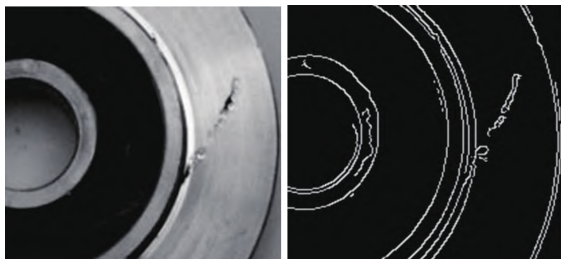
(a) 中部凹洞缺陷



(b) 内边缘凹洞缺陷



(c) 外边缘凹洞缺陷



(d) 划痕缺陷

图6 叶轮缺陷检测结果

4 结语

在低对比度下金属零件边缘提取和缺陷检测过程中,为提高弱边缘提取连接的完整性和不同位置缺陷的检出率,提出一种基于分段幂次 Retinex 和含惩罚项自适应鸽群优化的边缘提取和缺陷检测两阶段算法。在一阶段边缘提取中,将 PPR 与 LPABF 以及 APIO-PF 等结合,提高了螺母和叶轮的弱边缘分界处对比度,解决了因亮度分布不均和倒角加工造成的边缘信息缺失问题;在二阶段缺陷检测中,LPABF 有较好的局部边缘信息保护能力,而 APIO-PF 有较好的邻域判断能力,因此大大提高了不同类型和不同位置的缺陷完整检出率,使算法有较好的鲁棒性。由于边缘提取和缺陷检测的精度只有像素级别,因此该实验为下一步基于亚像素级别进行提取和定位研究提供参考。

参考文献

- [1] Parekh J, Turakhia P, Bhinderwala H, et al. A survey of image enhancement and object detection methods[J]. *Advances in Computer, Communication and Computational Sciences*, 2021, 1158:1035 - 1047.
- [2] Chaudhari C V, Gupta R K, Feagade S A. Steel surface defect detection using glem, gabor wavelet, hog, and random forest classifier[J]. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, 2021, 12 (12): 263 - 273.
- [3] 刘刚, 黄一鸣, 陆雨婷, 等. 机器视觉在螺母定位中的应用[J]. *机电工程技术*, 2018, 47(3): 95 - 97.
- [4] Cao Y, Wu D, Duan Y. A new image edge detection algorithm based on improved Canny[J]. *Journal of Computa-*

- al Methods in Sciences and Engineering*, 2020, 20(2): 629 - 642.
- [5] 王冬云, 唐楚, 鄂世举, 等. 基于导向滤波 Retinex 和自适应 Canny 的图像边缘检测[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(2): 443 - 451.
- [6] 杨武飞, 蒋建军, 陈雪梅, 等. 低对比度图像高精度轮廓三维重建算法研究[J]. *软件导刊*, 2020, 19(6): 223 - 226.
- [7] 邵伟, 彭鹏, 周阿维, 等. 工件表面低对比度缺陷快速准确识别方法[J]. *计量学报*, 2019, 40(5): 793 - 797.
- [8] 黎浩, 汤勃, 孔建益, 等. 基于阈值优化的带钢表面缺陷图像边缘检测研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2020(8): 122 - 125.
- [9] 赵海峰, 郭燕, 崔吉, 等. 基于机器视觉的小微零件缺陷检测技术及装置研究[J]. *工具技术*, 2018, 52(11): 147 - 149.
- [10] Lisani J L, Morel J M, Petro A B, et al. Analyzing center/surround retinex[J]. *Information Sciences*, 2020, 512: 741 - 759.
- [11] Ren L, Pan Z, Cao J, et al. Infrared and visible image fusion based on edge-preserving guided filter and infrared feature decomposition[J]. *Signal Processing*, 2021, 186: 108108.
- [12] Li X, Zhou F, Tan H, et al. Multimodal medical image fusion based on joint bilateral filter and local gradient energy[J]. *Information Sciences*, 2021, 569: 302 - 325.
- [13] Bhargava G U, Gangadharan S V. FPGA implementation of modified recursive box filter-based fast bilateral filter for image denoising[J]. *Circuits Systems and Signal Processing*, 2021, 40(3): 1438 - 1457.
- [14] Duan H, Qiao P. Pigeon-inspired optimization: a new swarm intelligence optimizer for air robot path planning[J]. *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, 2014, 7(1): 24 - 37.
- [15] 胡春鹤, 王依帆, 朱书豪, 等. 基于鸽群优化算法的图像分割方法研究[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2019, 40(4): 42 - 47.

第一作者: 陈东, 博士, 讲师, 青岛科技大学机电工程学院, 266061 山东省青岛市

First Author: Chen Dong, Ph. D., Lecturer, College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266061, China