

# 基于形态学特征的机械零件表面划痕检测

李克斌<sup>1,2\*\*</sup>, 余厚云<sup>1,2\*</sup>, 周申江<sup>1</sup>

<sup>1</sup>南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016;

<sup>2</sup>南京航空航天大学无锡研究院, 江苏 无锡 214187

**摘要** 采用高、低角度光源组合打光方式提取感兴趣区域, 构建划痕形态学的中值滤波核以获取准确的背景图像, 再经背景差分后提取划痕缺陷。采用基于方向梯度的改进区域生长算法实现了同一划痕的有效连通, 降低了划痕缺陷的漏检率。通过对面积、长宽比等主要特征参数的置信度分析, 提出了一种多特征加权融合的划痕判定方法。结果表明, 利用该方法进行划痕检测的正确率达 95.7%, 算法处理时间少于 1.21 s, 达到了工程应用的精度和效率要求。

**关键词** 机器视觉; 划痕检测; 形态学特征; 区域生长; 多特征加权融合

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0815027

## Surface Scratch Detection of Mechanical Parts Based on Morphological Features

Li Kebin<sup>1,2\*\*</sup>, Yu Houyun<sup>1,2\*</sup>, Zhou Shenjiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

<sup>2</sup>Wuxi Institute, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Wuxi, Jiangsu 214187, China

**Abstract** The region of interest (ROI) is first extracted under the combination lighting mode of high and low angle light sources and then the median filter kernel of scratch morphology is constructed to obtain the accurate background images from ROI. The scratches are extracted after the background difference. An improved region growing algorithm based on directional gradient is adopted to achieve an effective connectivity for the same scratch, which reduces the miss rate of scratch detection. By analyzing the confidence of main scratch detection parameters such as area, length-width ratio and so on, a scratch detection method based on weighted fusion of multi-features is proposed. The results show that, for this method, the accuracy of scratch detection is 95.7%, and the processing time is less than 1.21 s, which meets the accuracy and efficiency requirements for the engineering application.

**Key words** machine vision; scratch detection; morphological features; region growth; weighted fusion of multi-features

**OCIS codes** 150.1135; 100.2000; 100.4995

## 1 引 言

随着“中国制造 2025”等制造业国家战略的推出, 机械制造业对产品质量和制造过程的智能化水平提出了更高的要求, 制造业企业面临的市场竞争也日趋激烈。为了提高产品的质量和经济效益, 企业除了采用精密或超精密加工设备外, 还将一些新的高精度测量手段应用于产品的质量检测中, 其中产品表面质量检测是重要的检测内容之一。然而, 目前众多的机械制造业企业仍采用人工手持电筒照

射被测零件、肉眼观察的方式判断零件表面是否存在缺陷。检测人员的劳动强度大、检测精度和效率低, 企业的人员成本也较高。

在机械产品的各种表面缺陷中, 划痕缺陷最为常见。但划痕本身的尺度小、形态差异大, 检测过程又极易受光照影响和背景的干扰, 特征提取非常困难, 因此划痕缺陷检测一直是产品表面质量检测中的难点。为了解决这一问题, 国内外研究人员进行了大量工作。Hu 等<sup>[1]</sup>采用 Contourlet 变换对图像进行分解, 提取不同尺度及方向的均值和方差矩阵

收稿日期: 2018-04-02; 修回日期: 2018-06-07; 录用日期: 2018-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(51575277)

\* E-mail: meehyyu@nuaa.edu.cn; \*\* E-mail: likebin@nuaa.edu.cn

作为特征向量,并通过计算点与统计中心之间的距离来识别划痕。Luo 等<sup>[2]</sup>提出了一种结合灰度共生矩阵和 Curvelet 变换的电池划痕检测算法。Bhuvaneswari 等<sup>[3]</sup>提出了一种使用双边滤波器结合 Haar 小波变换的划痕检测方法,对电池等背景纯净表面的检测效果较好。

上述方法在应用于光照干扰、表面斑纹影响等复杂背景下的划痕检测时,往往容易产生虚检和漏检。为此,Wang 等<sup>[4]</sup>根据划痕的形态特征采用形态学滤波算法来检测金属表面划痕,李晨等<sup>[5]</sup>针对划痕断开问题提出了一种双阈值频域滤波差分算法,均取得了一定效果。此外,基恩士和康耐视等一些主要的视觉检测系统供应商也提供了一些产品外观缺陷检测模块,但考虑到实现难度和成本,目前他们不愿触及机械零件表面划痕检测领域。

本文结合企业实际的技术需求,针对机械产品表面划痕检测的难题,提出了一种基于形态学中值滤波背景差分和多特征加权融合的划痕检测方法。该方法以高、低角度打光结合的方式提取感兴趣区域(ROI),利用基于划痕形态的中值滤波算法得到背景图像并进行背景差分,再对差分图像以划痕连通区域为种子区域进行区域生长,最后根据多个划痕特征的置信度加权判定划痕缺陷。与传统人工目测方法相比,该方法能够实现机械产品表面划痕缺陷的自动高精度检测,提高了检测效率和智能化水平。

## 2 ROI 提取

### 2.1 视觉检测系统

如图 1 所示,表面划痕视觉检测系统由组合光源、电荷耦合器件(CCD)摄像机、工件安装夹具、光学实验架和计算机组成。被测零件为汽车发动机的涡轮壳,检测位置为涡轮壳零件的出气口端面 and 中间壳端面的机加工表面。检测时通过专用夹具将零件装夹定位,安装在光学实验架上的 CCD 摄像机正对着零件被测端面,调整摄像机的安装位置和镜头焦距使端面成像清晰。系统光源由套在摄像机上的高角度环形光源和零件上方的低角度环形光源组合而成,分别用于划痕检测时的 ROI 提取和划痕特征检测。

### 2.2 组合打光下的 ROI 提取

在摄像机采集的原始图像中除了零件被测端面区域外,还包含很多无用特征,若直接进行图像处理,会增加计算成本,增大特征提取的难度,故需要对原始图像进行 ROI 提取<sup>[6]</sup>。

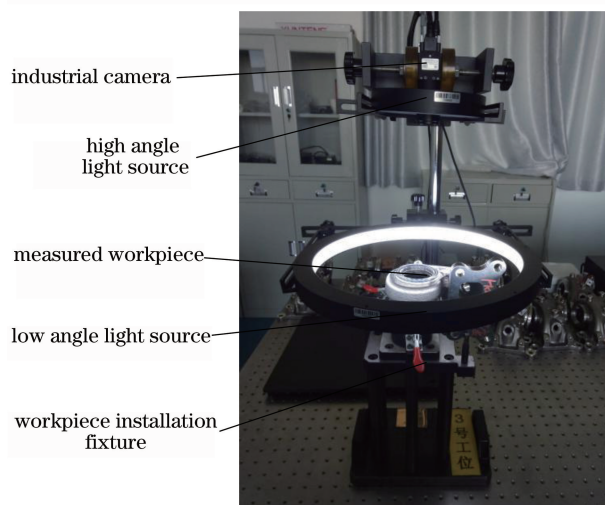


图 1 划痕缺陷检测系统的结构组成

Fig. 1 Structural compositions of scratch defect detection system

根据光照模型,若想有效检测出零件表面的划痕特征,视觉系统应采用低角度打光方式为被测区域作光照补偿。但通过实验发现,若从图 2(a)所示的低角度打光拍摄的原始图像中直接提取 ROI,很容易受区域内划痕的干扰,且低角度打光方式本身也易造成区域的灰度对比不明显,ROI 的提取效果并不理想。

同一块 ROI 在高、低角度光源下呈现的区域范围相差小,而高角度光照下 ROI 具有较高的对比度。因此,系统首先通过高角度打光获得图 2(b)所示的原始图像,在该图像中提取 ROI 的掩模模板,如图 2(c)所示;再利用该模板对图 2(a)中的低角度

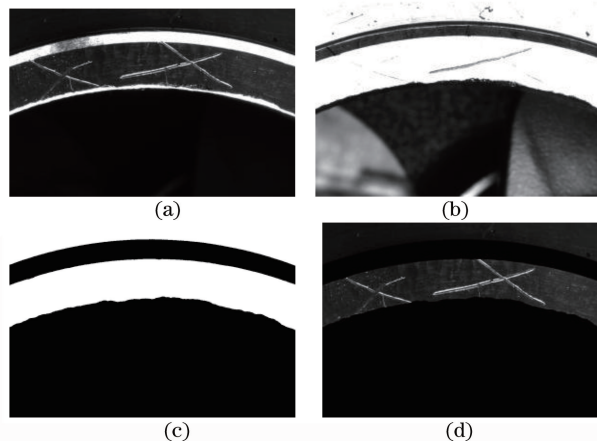


图 2 组合打光模式下提取的划痕检测 ROI 图像。

(a)低角度打光的原始图像;(b)高角度打光的原始图像;(c)掩模模板;(d)ROI 图像

Fig. 2 ROI images extracted under combination lighting mode. (a) Original image with low angle lighting; (b) original image with high angle lighting; (c) mask template; (d) ROI image

光照图像进行掩模计算,最终得到图 2(d)所示的较为理想的 ROI。

### 3 基于形态学中值滤波的背景差分

受被测端面角度变化、光照污染、零件表面加工时遗留的冷却液斑纹等多种因素的影响,图像中存在噪声。若直接从 ROI 内提取划痕,会将光斑和冷却液斑纹等特征也误识别成划痕。为此,提出了一种基于划痕形态的异向多尺度中值滤波算法,从 ROI 中滤除划痕得到背景图像,再将 ROI 图像与背景图像进行差分来提取划痕,该方法有效抑制了背景噪声的干扰。

#### 3.1 形态学滤波核

为了在背景差分时最大限度地提取出划痕,需要从背景图像中尽可能将划痕特征滤除干净,使划痕所在区域的像素值与周围其他区域的接近,然而常用的  $M \times M$  型中值滤波器<sup>[7-9]</sup>无法实现这种选择性滤波。

形态学是一种从集合的角度刻画和分析图像的数学方法,其性能取决于结构元素的选取,即结构元素是否符合待检测目标的结构特征是算法的关键。考虑到零件表面划痕通常呈长条状且具有明显的方向性,因此可以通过实验的方法确定滤波核的方向和尺度,构建长条型滤波核结构来取代  $M \times M$  型中值滤波核。如图 3 所示,设计了  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $135^\circ$  四种不同方向上的多尺度形态滤波核来进行背景图像滤波,其中  $m_j$  ( $j'=1, 2, \dots, 15$ ) 为形态学滤波核结构元素。

#### 3.2 图像背景差分

采用所设计的形态学中值滤波核对图 2(d)所示的 ROI 图像进行滤波,但由于不能确定每个零件上该区域内划痕的具体尺寸及方向,单次滤波无法将背景图像中的划痕特征滤除干净。因此在实际应用中,使用形态中值滤波核对 ROI 图像作多次迭代滤波<sup>[10-11]</sup>,取 4 种不同方向滤波核滤波结果中的最小值作为当前像素点的灰度值。计算当前滤波条件下灰度梯度超过设定阈值  $T$  的像素点个数与图像中像素点总数的比值,当计算结果达到停止条件时,停止迭代滤波,输出背景图像。

图 4(a)、(b)所示分别为采用  $13 \times 13$  中值滤波及形态学中值滤波算法得到的背景图像,对比可以看出,形态学中值滤波更好地滤除了背景图像中的划痕。图 4(c)所示为原始图像与图 4(b)中的背景图像差分后的结果,图 4(d)所示为图 4(c)的二值化

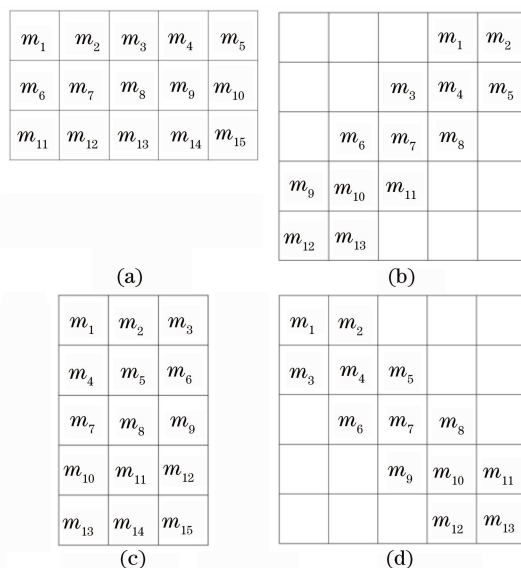


图 3 四种不同方向的形态中值滤波核。  
(a)  $0^\circ$ ; (b)  $90^\circ$ ; (c)  $45^\circ$ ; (d)  $135^\circ$

分割图像。可以看出,采用形态学中值滤波算法可以很好地提取出 ROI 内的划痕特征。

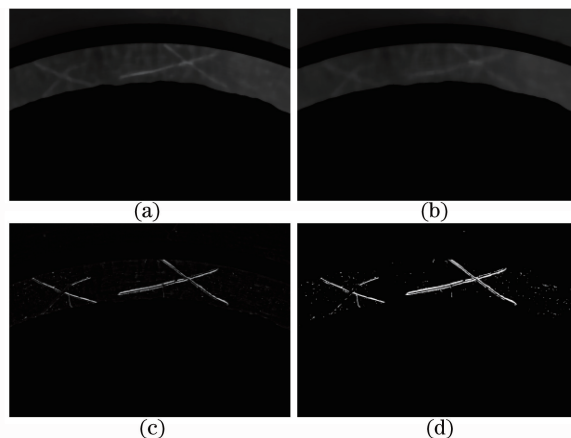


图 4 用于划痕提取的背景差分图像。(a)  $13 \times 13$  中值滤波的背景图像;(b)形态学中值滤波的背景图像;(c)形态学中值滤波的背景差分图像;(d)划痕二值化分割图像

Fig. 4 Background difference images for scratch extraction.  
(a) Background image by  $13 \times 13$  median filter;  
(b) background image by morphological median filter;  
(c) background difference image by morphological median filter; (d) segmentation image of scratch binarization

### 4 基于方向梯度的划痕区域生长

在划痕检测时,划痕本身在各个位置上的深度不均匀,打光和图像处理的效果存在差异,同一条划痕被识别成断断续续的若干段,这时通过统计同一表面上划痕的尺度和数量去判定零件表面合格性可

能会造成误判。因此,在利用形态学背景差分提取出划痕特征后,需要进一步通过区域生长的方法将这些断开的划痕连通起来。

传统的区域生长方法是在种子点像素周围的 4 邻域或 8 邻域内通过对灰度、纹理或颜色等特征的比较,确定是否将邻域内的像素点加入种子点集合并形成新的种子点,依次迭代最终将所有符合条件的像素点生长成为一个连通区域。但通过实验发现,以像素为单位的传统区域生长算法<sup>[12-13]</sup>在处理断开的划痕时效果并不明显。一方面,间距较大的同一条划痕仍无法连通;另一方面,位置接近的不同划痕又会被错误地连通成同一条。事实上,由于划痕通常是由刀具或其他尖锐物划过机械零件表面造成的,其形状呈现明显的长条状且保持很强的方向一致性。因此,提出了一种改进的基于方向梯度的区域生长算法,以划痕区域作为种子点,以划痕方向梯度及不同区域划痕端点间的距离作为生长条件,取得了更好的划痕连通效果。划痕区域生长原理图如图 5 所示。

图像梯度反映了像素点与其邻域像素点之间的灰度变化。划痕特征具有方向性,划痕点与垂直于划痕方向的背景像素点的灰度差异大,而与沿划痕方向的灰度差异小,因此可将划痕灰度梯度变化最小的方向确定为划痕方向,例如图 5 中 *a*、*b*、*c* 分别表示 3 条不同划痕的方向梯度。在图像中像素(*i*, *j*)的梯度表示为

$$\begin{cases} g_x(i, j) = f(i, j) - f(i - 1, j) \\ g_y(i, j) = f(i, j) - f(i, j - 1), \end{cases} \quad (1)$$

式中  $f(i, j)$  为像素点(*i*, *j*)的灰度值,  $g_x(i, j)$  和  $g_y(i, j)$  分别是像素点(*i*, *j*)沿坐标轴 *x*、*y* 方向上的梯度。像素点(*i*, *j*)的梯度方向角和梯度模值分别为

$$\theta = \arctan \frac{g_y(i, j)}{g_x(i, j)}, \quad (2)$$

$$M(i, j) = \sqrt{g_x^2(i, j) + g_y^2(i, j)}. \quad (3)$$

图 5 中的  $\beta$  和  $\gamma$  分别表示两条不同划痕间的梯度方向角。

统计各条划痕的梯度数据,以最小梯度方向作为划痕方向。相邻两段划痕区域归属于同一条划痕的判断条件是它们相互之间的梯度方向差  $k$  满足

$$k = |\tan \theta_1 - \tan \theta_2| < \frac{2\pi}{n}, \quad (4)$$

式中  $\tan \theta_1$  和  $\tan \theta_2$  分别为相邻两段划痕区域的梯度方向,  $n$  为方向准确度。根据神经感知学理论<sup>[14]</sup>

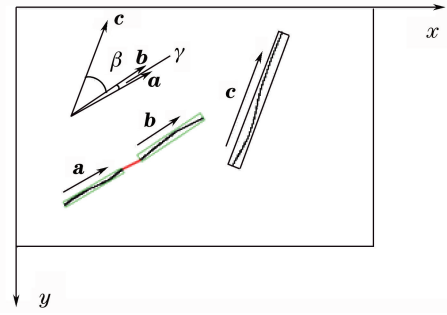


图 5 划痕区域生长原理图

Fig. 5 Schematic of scratch region growing

及实验数据的统计结果,  $n$  取 60。

根据方向梯度可以避免在图像分割时由于划痕深度差异而将同一条划痕误检成断开的若干段,但仅根据(4)式的判断条件也有可能把方向相近的不同划痕误判为同一条。考虑到同一条划痕断开各段的端点之间距离相对较小,可将不同区域划痕端点间距离作为区域生长算法的另一个生长条件。对于任意两个断开的划痕区域,其端点间距离为

$$S = \sqrt{(i_2 - i_1)^2 + (j_2 - j_1)^2}, \quad (5)$$

式中( $i_1, j_1$ )、( $i_2, j_2$ )分别为两个划痕区域的端点在图像平面内的坐标。当两个划痕区域端点间距离  $S$  小于某一给定阈值  $\epsilon$  时,认为该划痕区域满足区域生长条件,将它加入新的种子点。根据零件表面划痕的实际分布情况,取  $\epsilon = 8$ 。

以任一划痕区域作为初始种子点并按划痕梯度方向进行区域生长,即对初始种子点两端的其它划痕区域进行搜索和计算,将与初始种子点区域之间方向夹角和端点间距离分别满足(4)、(5)式的划痕区域纳入到当前种子点区域,从而形成一个新的划痕连通区域;再以新的划痕区域作为种子点重复上述过程,直到找不到新的同时满足(4)、(5)式的其他划痕区域时,结束划痕区域生长,并得到图 6 所示的



图 6 划痕区域生长结果

Fig. 6 Result of scratch region growing

连通的划痕特征。

### 5 基于多特征融合的划痕置信分析

描述划痕的主要特征参数包括划痕的面积、周长、长宽比、圆形度和矩形度等。面积  $S'$  为划痕封闭区域内全部像素的总数, 周长  $P$  为划痕区域边缘上所有像素的总数, 长宽比  $A_r$  等于划痕区域最小外接矩形的长  $L$  与宽  $W$  的比值, 圆形度  $C_y = \frac{L^2}{S'}$ , 矩形度  $R_d = \frac{S'}{LW}$ 。划痕与背景相比, 某项特征的差异越明显, 从背景中提取出划痕就越容易、越准确。

表 1 利用单一特征的划痕检测正确率

Table 1 Scratch detection accuracy based on single feature

Characteristic parameter	Number of false inspections	Number of missed inspections	Correct rate
Area	9	22	73.5%
Perimeter	7	13	82.9%
Aspect ratio	3	5	93.2%
Circularity	4	5	92.3%
Rectangularity	6	12	84.6%

利用面积、周长、长宽比、圆形度和矩形度等特征对 40 件涡轮壳零件出气口端面上的 117 条划痕进行检测的结果见表 1。可以看出, 以任意单一特征为依据均无法很好地识别出划痕缺陷, 且不同特征对判定划痕的贡献度也有所不同。为了弥补通过单一特征检测划痕的局限性, 对利用不同特征参数的划痕检测结果进行了置信度评价, 按置信度高低对各个特征分配权重, 将各特征加权融合<sup>[15-16]</sup>后作为划痕判定的依据, 具体算法流程如图 7 所示。引入参数  $M$  来评判融合检测结果, 当  $M$  值高于给定阈值时判定为划痕。该方法不仅提高了划痕检测的正确率, 而且也有利于定量地表征划痕缺陷。  $M$  的表达式为

$$M = \sum_{f \in \{c_1, c_2, c_3\}} \frac{\omega_f}{\omega_c} M_f, \quad (6)$$

式中  $c_i$  ( $i' = 1, 2, 3$ ) 为根据置信度分析结果选取的单一特征,  $\omega_f$  为第  $i'$  个特征的检测准确率,  $\omega_c$  为根据置信度分析采用的所有特征检测准确率,  $M_f$  为单一特征检测融合基数。

### 6 实验结果

为了验证所提算法的应用效果, 以汽车发动机涡轮壳零件的出气口端面作为被测对象, 进行了划痕提取和检测实验。摄像机使用大恒 MER-503-

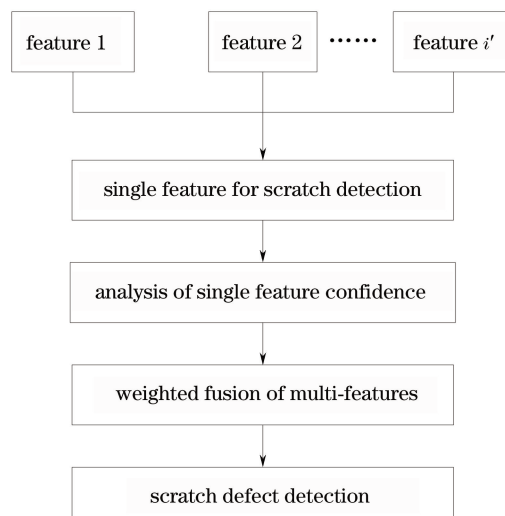


图 7 多特征加权融合的划痕检测流程图

Fig. 7 Flow chart of scratch detection based on weighted fusion of multi-features

20GM 黑白 CCD 摄像机, 远心镜头, 组合光源根据打光实验结果自行研制。软件平台基于 Visual Studio 2010 环境和 Opencv 2.4.9 算法库。

#### 6.1 划痕提取实验

分别采用高斯滤波、中值滤波、巴特沃斯低通滤波以及所提形态学中值滤波算法获取背景图像, 然后通过背景差分后提取划痕区域, 结果如图 8 所示。可以看出, 形态学中值滤波算法对于存在斑纹等影响的复杂背景的划痕提取效果优于空间域线性滤波差分、空间域非线性滤波差分、频域低通滤波背景图差分的, 图像中划痕区域得到了更好的突显。

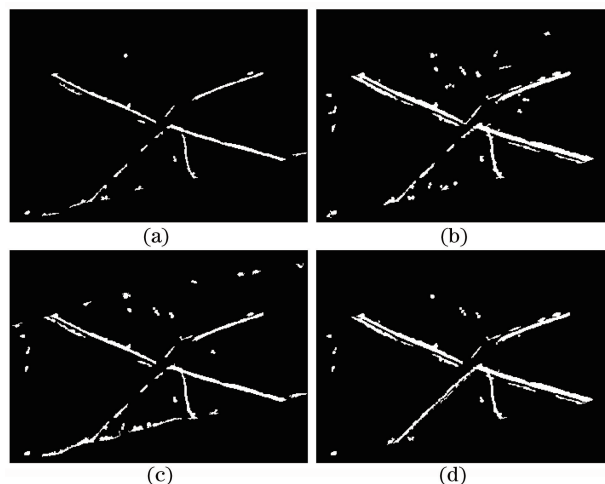


图 8 不同算法提取的划痕图像。(a)高斯滤波; (b)中值滤波; (c)低通滤波; (d)形态学中值滤波

Fig. 8 Scratch images extracted by different algorithms. (a) Gaussian filter; (b) median filter; (c) low-pass filter; (d) morphological median filter

为了定量评价各种算法的划痕提取性能,以人工方式提取的涡轮壳出气口端面划痕作为标准,分别计算上述4种算法背景差分提取的划痕图像与标准图像间的误差,误差图像如图9所示。用于评价结果的错提率  $E_r$  表示为

$$E_r = \frac{W_e}{W_a}, \quad (7)$$

式中  $W_e$  为划痕提取误差图像中像素点的总数,  $W_a$  为整个图像的像素点总数。各算法提取划痕的错提率对比见表2,可以看出,所提算法提取划痕的误差均小于其他三种方法的,证明了所提算法对于存在斑纹影响的复杂背景表面划痕提取效果较优。

表2 不同算法划痕提取的错提率

Table 2 Scratch extraction errors under different algorithms

Experimental algorithm	Image size / (pixel × pixel)	$W_e$ / pixel	$E_r$
Gaussian filter	350 × 250	11279	0.1289
Median filter	350 × 250	4734	0.0541
Low-pass filter	350 × 250	15173	0.1734
Morphology median filter	350 × 250	1277	0.0146

## 6.2 划痕检测实验

采用所提方法对涡轮壳零件出气口端面进行划痕检测的结果如图10所示,划痕以红色标记。将所提方法与文献[4]采用的 Top-hat 检测方法及文献[5]采用的双阈值频域滤波差分方法进行了对比,算法时间和检测正确性的对比结果见表3。

表3 不同方法的划痕检测结果

Table 3 Scratch detection results under different methods

Detection method	Number of false inspections	Number of missed inspections	Correct rate	Detection time / s
Top-hat	6	8	87.3%	0.94
Dual-threshold frequency domain differential	3	5	90.8%	1.61
Proposed method	2	5	95.7%	1.21

由表3中数据可见,所提方法的划痕检测正确率要明显高于其他两种方法的。从检测效率来看,所提方法为了进一步提高划痕检测的正确率,在形态学处理的基础上增加了改进的区域生长和多特征融合这两个算法过程,因此单幅图像的处理时间要略长于 Top-hat 算法的,但还是足以满足工业在线检测的要求。

## 7 结 论

针对机械零件表面划痕视觉检测的难题,采用

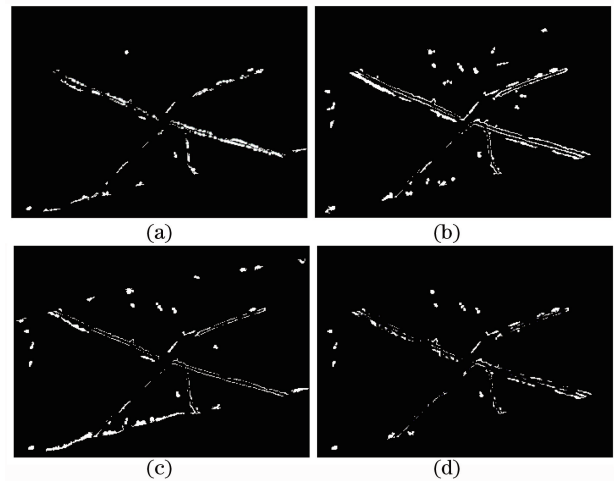


图9 不同算法划痕提取的误差图像。(a)高斯滤波;(b)中值滤波;(c)低通滤波;(d)形态学中值滤波

Fig. 9 Scratch extraction error images obtained by different algorithms. (a) Gaussian filter; (b) median filter; (c) low-pass filter; (d) morphological median filter

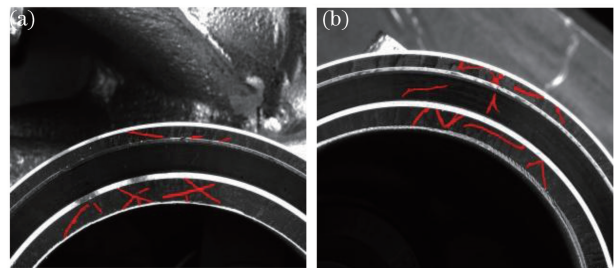


图10 划痕检测实验结果

Fig. 10 Experimental results of scratch detection

高低光组合的方式准确提取 ROI,通过形态学中值滤波与背景差分提取划痕特征,有效降低了光源干扰和冷却液斑纹等复杂背景的影响。采用基于方向梯度的划痕区域生长方法将断开的同一条划痕连通,降低了划痕漏检的可能。在对划痕主要特征参数置信度分析的基础上提出了多特征加权融合的划痕判定方法,进一步提高了划痕检测的正确性。通过与其他划痕检测方法的实验对比发现,所提方法的划痕检测正确率达95%以上,检测时间为1.21 s,综合性能优于其他方法的,较好地解决了机械零件

机加工表面划痕的快速准确检测问题。目前采用的单目视觉二维图像测量方法尚未能解决划痕深度的量化检测问题,后续研究中将尝试采用基于结构光的立体视觉测量技术以及全息摄影测量技术等,力图获得更加全面的划痕三维特征信息。

## 参 考 文 献

- [1] Hu K, Zhang S, Xu J. Scratch detection technology for product surface based on improved contourlet transform[C]//IOP. Materials Science and Engineering Conference Series. London: IOP Publishing Ltd., 2017: 012082.
- [2] Luo J, Lin S Z, Ni J Y, *et al.* Morphology battery scratch detection combining GLCM and CT[J]. Journal of Computational Information Systems, 2011, 7(12): 4343-4350.
- [3] Bhuvaneswari S, Subashini T S. Automatic scratch detection and in painting[C]. IEEE 9th International Conference on Intelligent Systems and Control, 2015: 7282256.
- [4] Wang J G, Gao D Y. Improved morphological TOP-HAT filter optimized with genetic algorithm[C]. International Congress on Image and Signal Processing, 2009: 10955475.
- [5] Li C, Yang Y Y, Xiong H L, *et al.* Dual-threshold algorithm study of weak-scratch extraction based on the filter and difference[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(7): 103-110.  
李晨, 杨雨英, 熊浩亮. 等. 基于滤波差分的双阈值弱划痕提取算法[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(7): 103-110.
- [6] Wang F. Research of image processing algorithm based on region of interest[J]. Advanced Materials Research, 2013, 798/799: 814-817.
- [7] Mu W Y, Jin J, Feng H Q. Adaptive window multistage median filter for image salt-and-pepper denoising[C]. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2013: 1535-1539.
- [8] Zhang L J, Yang D B, Xu J W, *et al.* Approach to extracting gear fault feature based on mathematical morphological filtering[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(2): 71-75.
- [9] De Natale F G B, Boato G. Detecting morphological filtering of binary images[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2017, 12(5): 1207-1217.
- [10] Zhao G P, Shen Y P, Wang J Y. Adaptive feature object tracking based on circulant structure with kernel[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0815001.  
赵高鹏, 沈玉鹏, 王建宇. 基于核循环结构的自适应特征融合目标跟踪[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0815001.
- [11] Yu Y W, Yin G F, Jiang H H, *et al.* Defect extraction method of arc magnet surface images based on adaptive morphological filtering[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(3): 351-356.  
余永维, 殷国富, 蒋红海, 等. 磁瓦表面图像的自适应形态学滤波缺陷提取方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(3): 351-356.
- [12] Wang Z Y, Fu J H, Meng H, *et al.* Small defect extracting based on region growing algorithm and grey relational analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(12): 166-169.  
王中宇, 付继华, 孟浩, 等. 基于灰色关联分析和区域生长的微小缺陷提取[J]. 农业机械学报, 2008, 39(12): 166-169.
- [13] Miao J Q. Based on Canny operator with regional growth combined research on accurate image segmentation algorithm[J]. Advanced Materials Research, 2014, 989/990/991/992/993/994: 2088-2092.
- [14] Desolneux A, Moisan L, Morel J M. Computational gestalts and perception thresholds[J]. Journal of Physiology-Paris, 2003, 97(2): 311-324.
- [15] Zhou J, Huang X H, Peng G. Recognition of airplanes using multi-feature fusion[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2009, 37(1): 38-41.
- [16] Cao L, Hu X D. Fabric image segmentation based on multi-feature fusion[J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(8): 149-153.