

结合信息熵与低秩张量分析的金属零件破损检测

杨鹏¹, 刘德儿^{1*}, 李瑞雪¹, 刘靖钰¹, 张荷苑²

¹江西理工大学建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000;

²成都大学中国-东盟艺术学院, 四川 成都 610106

摘要 针对当前金属零件破损处识别研究中自动化程度和识别精度较低等问题,提出一种结合信息熵与低秩张量的金属破损处检测算法。首先,运用差值法、中值滤波和傅里叶滤波等方法对图像进行去噪处理;其次,根据金属零件破损处与其邻域明显的差异性,采用信息熵边缘检测法获取边缘信息;最后,运用低秩张量分析差熵和权差熵矩阵以提取破损处,并与其他算法的结果进行对比分析。实验结果表明,本文算法能够有效并快速地识别金属破损处,检测结果噪声点较少,且该算法的有效精度高于 80%,优于传统算法且具有较好的稳健性。

关键词 图像处理; 信息熵; 边缘提取; 低秩张量; 破损检测; 图像去噪

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.211006

Damage Detection of Metal Parts by Combining Information Entropy and Low-Rank Tensor Analysis

Yang Peng¹, Liu Deer^{1*}, Li Ruixue¹, Liu Jingyu¹, Zhang Heyuan²

¹School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China;

²College of Chinese & Asean Arts, Chengdu University, Chengdu, Sichuan 610106, China

Abstract This study proposes an algorithm for detecting metal damage in combination with information entropy and low-rank tensor analysis to address the problems of low automation degree and recognition accuracy in the research of damage identification of metal parts. First, the image is denoised using the difference method, median filtering, and Fourier filtering. Second, according to the obvious difference between the damage of the metal part and its surroundings, the information entropy edge detection is used to obtain the edge information. At last, the low-rank tensor method is used to analyze the difference entropy and the weight entropy matrix to extract damage, and it is compared with other algorithms. The experimental results show that the algorithm can effectively and quickly identify metal damage with few noise points. The effective accuracy of the algorithm is higher than 80% with good robustness, which is higher than that of traditional algorithms.

Key words image processing; information entropy; edge extraction; low-rank tensor; damage detection; image denoising

OCIS codes 100.2960; 150.3040; 150.1835; 150.1135

1 引言

随着现代化进程的加快,人们对“智慧产品”的需求也逐步增加。金属零件作为工程应用中的重要部件,是否存在缺损对金属产品的质量有着至关重要的作用^[1-3]。如在燃气燃油管道传输过程中,管道

的破损会造成燃气燃油的泄漏,带来较大的安全隐患;在机械零件加工过程中,零件的破损可能导致机械运转不畅,降低机械的使用寿命^[4-7],因此,金属零件的定期检测是工程应用中的重要步骤。金属零件的检测通常是通过近景摄影测量、工业相机等技术拍摄金属表面信息,通过对图像进行处理,检测金属

收稿日期: 2019-03-29; 修回日期: 2019-04-30; 录用日期: 2019-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(41361077,41561085)、江西省自然科学基金(20161BAB203091)

* E-mail: landserver@163.com

是否存在破损之处。在金属零件缺陷检测中,金属破损处与其周边具有明显的差异性^[8],由于不平整性,其反光特性为无特向反射,而金属面具有特向反射或漫反射,存在不同程度的高光噪声^[9],该特性在相机图像中的表现为明显暗于周边区域,因此,其具有边界特性,可使用边缘检测提取法提取破损处。

图像边缘检测提取是图像处理领域的重要部分,在图像分割、目标检测、人脸识别、破损检测等领域均有广泛的应用^[10-13]。因此,如何提高图像边缘检测与提取的精度是图像处理的热点和难点之一,对实际工程应用具有重大意义。许多国内外学者提出了很多新颖的图像边缘提取算法,Oram等^[14]采用基于梯度的边缘检测方法对南加州海面图像的特征进行分类,该算法可应用于海面温度和叶绿素的时间序列图像,且基于梯度的边缘检测算法检测图像中的旋涡边界。刘煜等^[1]提出一种基于相邻像素间的灰度差异来提取图像多像素边缘的方法,研究表明,此算法的多像素边缘提取可得到图像清晰、位置精确的单像素边缘图像,能比较完整地提取图像的垂直边缘和水平边缘。刘清等^[15]针对含噪声的图像边缘提取,提出采用量子叠加态和信息熵的形态边缘提取算法,构造一种多结构的量子叠加态结构元素,并在算法设计中利用信息熵确定各叠加态结构元素的概率。贾迪等^[16]结合高斯加

权距离图对图像进行边缘提取,通过分析高斯加权距离图的灰度直方图,将灰度图划分为两类,并将计算得到的类中心作为无边活动轮廓模型的两个参数,最终通过此模型提取图像边缘。此外,鬃莹等^[17]采用灰熵加权关联分析法对图像进行粗定位,检测油气井管套损边缘点,再利用 Zernike 矩算子对其进行亚像素边缘的精准提取,为套损检测提供了指导。

为进一步提高金属破损处检测的自动化程度和识别精度,本文提出一种以信息熵图像边缘提取为基础,再结合低秩张量分析^[18]进行金属破损处检测的算法。该方法能够实现从数据的采集到破损处评价指标的输出一体化,并且处理速度快、识别精度高,通过系统自动化处理,能够减少大量人力物力,并为机械制造工业自动化提供信息和技术支持。

2 数据获取与处理

2.1 数据获取

为能够自动获取金属零件图像,该图像采集装置结构利用高清工业相机和传送带平台,固定相机位置 O,并利用传送带传送金属零件到固定位置 P,待相机收集完数据后,再传送下一批零件,如图 1 所示。采集的图像为 JPEG 格式,通过数据线传输并存储到主机中。

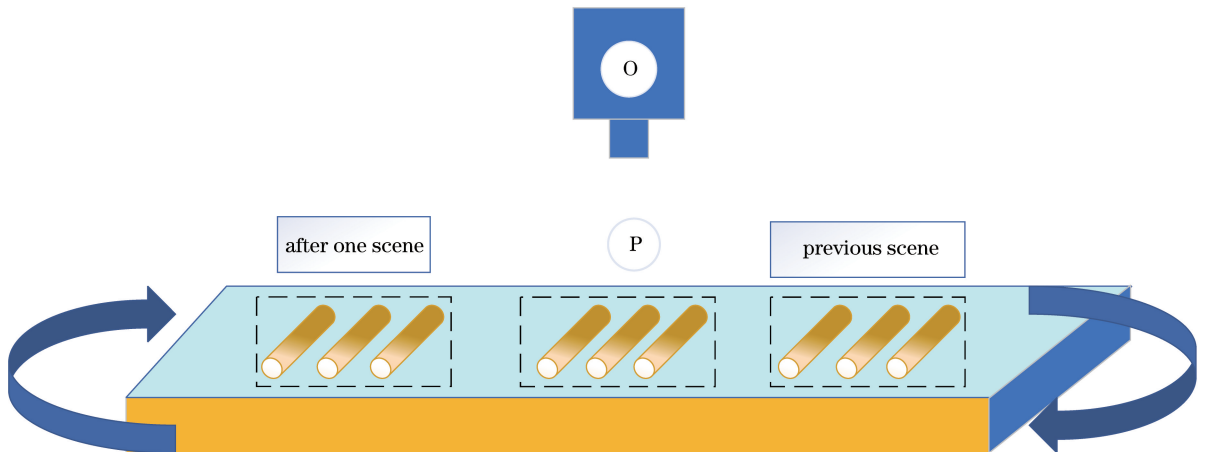


图 1 数据采集平台

Fig. 1 Data acquisition platform

2.2 数据预处理

存储在主机中的原始数据存在大量噪声,需要先对图像进行预处理才能够用于后续程序。本文利用快速傅里叶变换法(FFT)对原始图进行粗去噪。

首先,将 RGB 图像转换为灰度图像,并将其构成的灰度矩阵记为 G_{ray} ,表示为

$$G_{\text{ray}} = 0.299 \cdot R + 0.587 \cdot G + 0.114 \cdot B, \quad (1)$$

式中, R 为红色通道数据矩阵, G 为绿色通道数据矩阵, B 为蓝色通道数据矩阵。

其次,运用 FFT 进行去噪,将灰度图像的时域分布转换为频域分布 F ,利用频域阈值法将频域中小于阈值 Ω 的部分剔除,再通过快速傅里叶逆变换

将频域恢复到时域空间,得到新的灰度图像,此时的灰度矩阵记为 \mathbf{G}_{new} ,表示为

$$\begin{cases} \mathbf{F} = f(\mathbf{G}_{\text{ray}}) \\ \mathbf{F}[\lg(|\mathbf{F}| + 1) < \Omega] = 0, \\ \mathbf{G}_{\text{new}} = f^{-1}(\mathbf{F}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, f 表示快速傅里叶变换, f^{-1} 表示快速傅里叶逆变换。

依次对所拍摄的照片进行以上预处理程序,并将输出的灰度图像矩阵进行编号储存,用于金属破损处检测和编号跟踪。

3 算法设计

为获得较高的金属破损识别度的同时也保证较高的有效度,提出一种结合信息熵与低秩张量分析的算法对金属图像的破损处进行检测。

3.1 信息熵边缘提取

信息熵边缘提取的核心运算思路就是卷积,卷

积运算首先需要定义卷积核的大小,卷积核越大处理后的图像越模糊,卷积核越小信息量越小、对比度越差。因此,需要选取合理的卷积核,且卷积核有且仅有一个中心点,即卷积核的行列号必须为奇数,因此,选取卷积核大小为 $k \times k$, $k \in (1, 3, \dots, 2n-1)$, $n \in N^+$, n 为像元个数, N^+ 为正整数,最大取值为图像短边的 $1/2$ 。

对于大小为 $M \times N$ 的灰度图像 \mathbf{G}_{new} ,为避免边框卷积运算时会有空值运算,需要对矩阵 \mathbf{G}_{new} 的边缘进行扩增。取 $k \times k$ 的卷积核,矩阵 \mathbf{G}_{new} 需要扩增行数到 $2 \times [k/2] + M$, 扩增列数到 $2 \times [k/2] + N$, $[k/2]$ 为对 $k/2$ 向下取整,扩增的网格内像素点的灰度值与邻近像素点的灰度值一致,如图 2 所示,记扩增矩阵为 \mathbf{G}_{amp} 。

对扩增后的矩阵 \mathbf{G}_{amp} 进行卷积运算时,依然从原有灰度矩阵的起点开始逐行逐列进行卷积运算,记第 K 个卷积对象为 $\mathbf{G}_{\text{amp}_K}$ 。

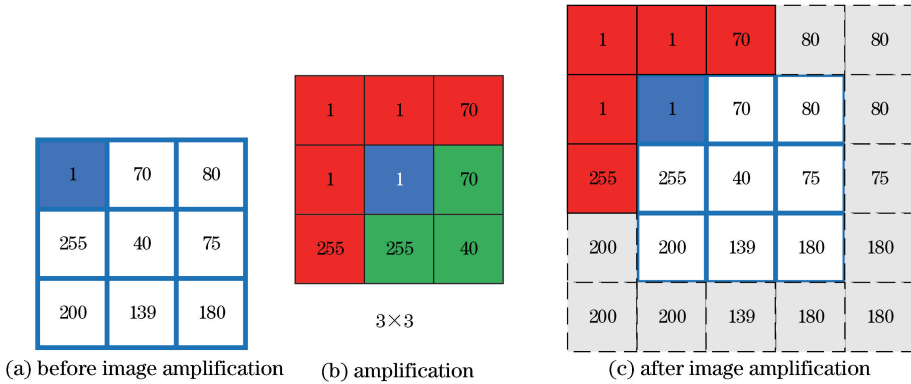


图 2 矩阵扩增

Fig. 2 Matrix amplification

信息熵卷积运算是一种运用信息熵法则对卷积核内的数据进行处理的方法。假设 $k \times k$ 的卷积核中含有 q 个不同灰度的值,则卷积核的信息熵 H 为

$$H = - \sum_{i=1}^q p_i \ln p_i, \quad (3)$$

式中, p_i 表示第 i 个灰度值出现的概率。为简便运算,将卷积核内的不同灰度值从小到大排列,记相同灰度值的个数为 Q_i , 则 $p_i = \frac{Q_i}{k^2}$, 且 $\sum_{i=1}^{q_i} p = 1$, 遍历图像中每个像素点,得到信息熵矩阵 \mathbf{A} 。

信息熵矩阵 \mathbf{A} 的运算只是考虑了信息的无序程度,没有将具体量化的信息融入其中。因此需要进行改进,定义改进信息熵 H' 符合 t 阶中心距并融合量化信息,表示为

$$H' = - \sum_{i=1}^q [(p \ln p) \cdot \mathbf{G}_{\text{amp}_K}(i)]^t, \quad (4)$$

式中: $\mathbf{G}_{\text{amp}_K}(i)$ 为像素点的灰度值或灰度级; t 为中心矩信息熵的阶数,用于提取高阶统计量的特征,本文取 $t=1$ 。遍历图像得到改进的信息熵矩阵 \mathbf{A}' , 其中高阶中心矩主要体现为更深层次的统计描述,类似于高阶张量。

将矩阵 \mathbf{A} 和 \mathbf{A}' 进行归一化处理,按照

$$\mathbf{B}(h, l) = \frac{\mathbf{A}(h, l)}{A_{\max} - A_{\min}} \cdot 255 \quad (5)$$

归化到 $(0, 255)$, 记 \mathbf{A} 中最大元素为 A_{\max} , 最小元素为 A_{\min} , 得到归一化信息熵矩阵 \mathbf{B} , 同理可得归一化改进信息熵矩阵 \mathbf{B}' 。其中, $\mathbf{A}(h, l)$ 为第 h 行 l 列的信息熵矩阵值, $\mathbf{B}(h, l)$ 为第 h 行 l 列的归一化信息熵矩阵值。

由于熵卷积能提升边缘的显著度,因此,运用差值分析对卷积结果进行增强处理,分别将归一化的信息熵和加权信息熵矩阵与原始灰度值作差,并以中值滤波去除少量斑点噪声,即得到信息熵和改进信息熵矩阵的边缘提取结果 T_c 、 T_c' ,表示为

$$\begin{cases} T_c = \text{medfilt2}(\mathbf{B} - \mathbf{G}_{\text{ray}}) \\ T_c' = \text{medfilt2}(\mathbf{B}' - \mathbf{G}_{\text{ray}}) \end{cases}, \quad (6)$$

式中,medfilt2 为中值滤波函数。

3.2 低秩张量分析

运用张量分析法分析信息熵边缘提取图的效果。一阶张量模 T_1 为

$$T_1 = \sqrt{\cos \theta \cdot (\partial T_c / \partial x)^2 + \sin \theta \cdot (\partial T_c / \partial y)^2}, \quad (7)$$

式中, $\partial T_c / \partial x$ 、 $\partial T_c / \partial y$ 为一阶偏导数, θ 为主方向与 x 方向的夹角。为简化计算,先将图像进行纠正,运用 Hough 直线变换检测,找到夹角 θ ,将图像进行旋转。

令 $\theta=0$,则 $\cos \theta=1$ 、 $\sin \theta=0$,因此一阶张量模为 $|T_1| = |\partial T_c / \partial x|$,同理可得二阶张量模为 $|T_2| = |\partial^2 T_c / \partial x^2|$,三阶张量模为 $|T_3| = |\partial^3 T_c / \partial x^3|$ 。定义张量特征矩阵 T_0 为

$$T_0 = \sum_{j=1}^3 \xi_j T_j, \quad \sum_{j=1}^3 \xi_j = 1, \quad (8)$$

式中, $|T_j|$ 为各阶张量模, ξ_j 为各阶张量权重,特征矩阵 T_0 的空间表现即为最终结果。

4 实验结果与分析

采用 CPU Intel core i3、内存 8 G、Matlab2018a 编译环境对本文算法进行调试。选取的待检测工件图片为圆柱形金属零件,其包含较大破损或点伤等缺陷。由于工件俯视图为矩形且工件及其破损处有明显的边界特征,因此使用边缘提取法。但是该工件的金属反光特性,导致有明暗条纹出现,使得边缘提取受到反光噪声影响,不利于金属破损处的寻找。

本文算法不仅能实现边缘提取,还运用傅里叶变换、差值法等方法去除噪声。所研究的金属零件如图 3 所示。

选择 Sobel、Roberts、Prewitt、Log、Canny、G&C、文献[4]、文献[17]、文献[16]、文献[14]算法与本文算法进行对比实验并验证本文算法的有效性。运用这 10 种算法与本文算法对图 3 的金属零件进行边缘检测和张量分析。

图 4 为 11 种算法的边缘提取结果,从图中可以看出,传统边缘提取算法 Sobel、Roberts、Prewitt、

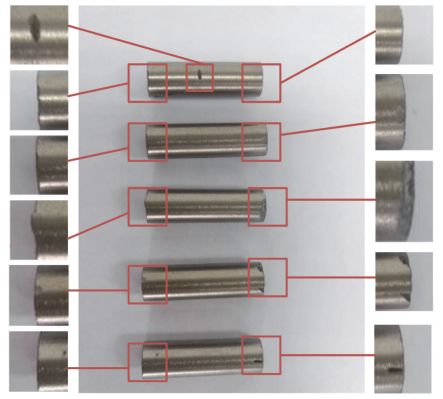


图 3 金属零件

Fig. 3 Metal parts

Log 的边缘提取效果较好,很好地去除阴影的影响,不过其内部细节较为杂乱,虽然包含了大量的边缘信息,但内部绝大部分的边缘线都是高反光噪声引起的,严重影响对金属破损处的识别精度;除此之外,Canny、G&C 算法将阴影的边缘也一并提出,输出边缘包含更多噪声,由此可以说明传统边缘提取结果包含大量无序噪声,对破损处边缘提取效果影响很大。文献[4]算法、文献[17]算法为亚像元边缘提取算法,去除零件之外的噪声后还去除了部分高反光影响的噪声,效果明显优于传统算法。文献[16]算法的效果优于传统算法,但还是没有亚像元提取的结果好,有较大的无序性。文献[14]算法的效果较好,在横向有有序性,同时也去掉了背景噪声,但对高反光噪声的去噪还是不佳。本文算法中,差熵矩阵能够提取金属物件的边缘,并且具有平滑能力,权差熵矩阵中的边缘清晰度不够高,却能有效地提取反光区,并且本文算法的有序度高于其他边缘检测算法,这种有序度的增加是检测出金属破损处的必要条件。

图 5 为 12 种算法边缘提取后再进行张量分析的效果图。从 4 个特征破损处的放大图中可以看出,传统边缘检测算法 Sobel、Roberts、Prewitt、Log、Canny、G&C 的破损处检测效果一般,虽然检测出一部分破损处,但有更多的内部噪声。文献[4]算法、文献[17]算法的检测基于亚像元的边缘提取的结果较优,其对破损处的检测较为明显。文献[16]算法由于其存在较大的无序性,检测效果不明显。文献[14]算法由于高反光噪声的影响,虽然能检测出破损处,但也伴随着高反光的错误识别。本文算法能有效地去除背景和高反光等噪声的影响,获得较好的破损处检测效果。该实验结果表明,差熵-张量分析(D-S)和权差熵-张量分析(D-QS)能有效检测出金属零件的破损处,

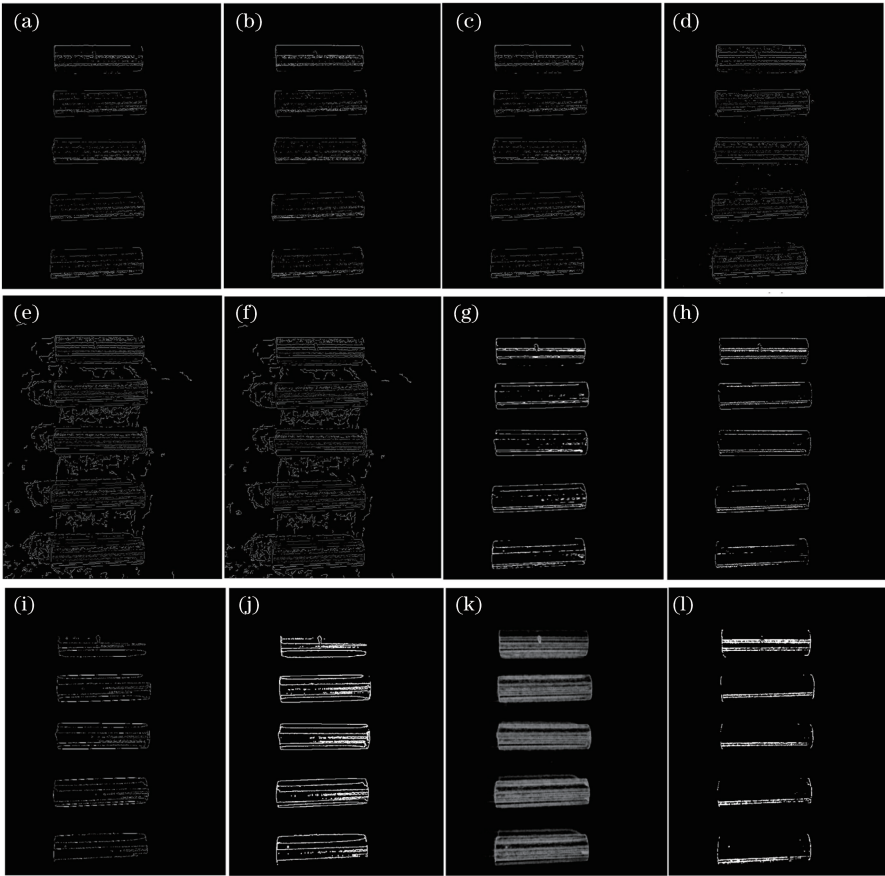


图 4 边缘提取。(a) Sobel 算法;(b) Roberts 算法;(c) Prewitt;(d) Log;(e) Canny;(f) G&C;(g) 文献[4]算法;(h) 文献[17]算法;(i) 文献[16]算法;(j) 文献[14]算法;(k) 本文算法的差熵矩阵 T_e ;(l) 本文算法的权差熵矩阵 T_e'

Fig. 4 Edge extraction. (a) Sobel algorithm; (b) Roberts algorithm; (c) Prewitt; (d) Log; (e) Canny; (f) G&C; (g) algorithm in Ref. [4]; (h) algorithm in Ref. [17]; (i) algorithm in Ref. [16]; (j) algorithm in Ref. [14]; (k) difference entropy matrix T_e of the proposed algorithm; (l) weighted difference entropy matrix T_e' of the proposed algorithm

满足人们的基本要求。

为定量评价本文算法,本文参考陈世超等^[19]提出的错误分类的精度评价指标,选择识别度 C_Q 、有效精度 C_Y 作为精度评价指标,分别表示为

$$\begin{cases} C_Q = R/L_T \\ C_Y = R/R' \end{cases}, \quad (9)$$

式中, L_T 是原图像中金属破损处的标准像素点总个数, R 是各算法处理后落入标准破损处内的像素点个数, R' 是各算法处理后识别出破损处的总像素点个数。

表 1 为本文算法和其他算法的精度验证结果。其中本文算法的有效精度最高,其中 D-QS 和 D-S 检测出的点集落入破损处的比例分别高达 90.5% 和 80.5%,其他算法的最高精度也仅为 73.7%,这说明本文算法在检测破损处的有效程度上优于一般方法。虽然 D-QS 有效精度最高,但其检测出的点远少于真实破损像素点个数,导致其识别度较低,即 D-QS 检

测出的点集少而有效。D-S 保证了 80.5% 有效精度的同时,还有 0.325 的识别度,即其落入破损处的点个数占总破损点个数的 32.5%, 优于一般算法。

表 1 精度检验

Table 1 Accuracy test

Method	R	R'	$C_Y / \%$	C_Q
Sobel	1166	3711	31.4	0.116
Roberts	1540	5312	29.0	0.154
Prewitt	1187	3588	33.1	0.118
Log	1357	5305	25.6	0.135
Canny	1969	19742	10.0	0.196
G&C	1969	19742	10.0	0.196
D-S	3258	4048	80.5	0.325
D-QS	793	876	90.5	0.079
Ref. [4]	3449	4680	73.7	0.344
Ref. [17]	671	1962	34.2	0.067
Ref. [16]	593	1599	37.1	0.059
Ref. [14]	2918	6554	44.5	0.291

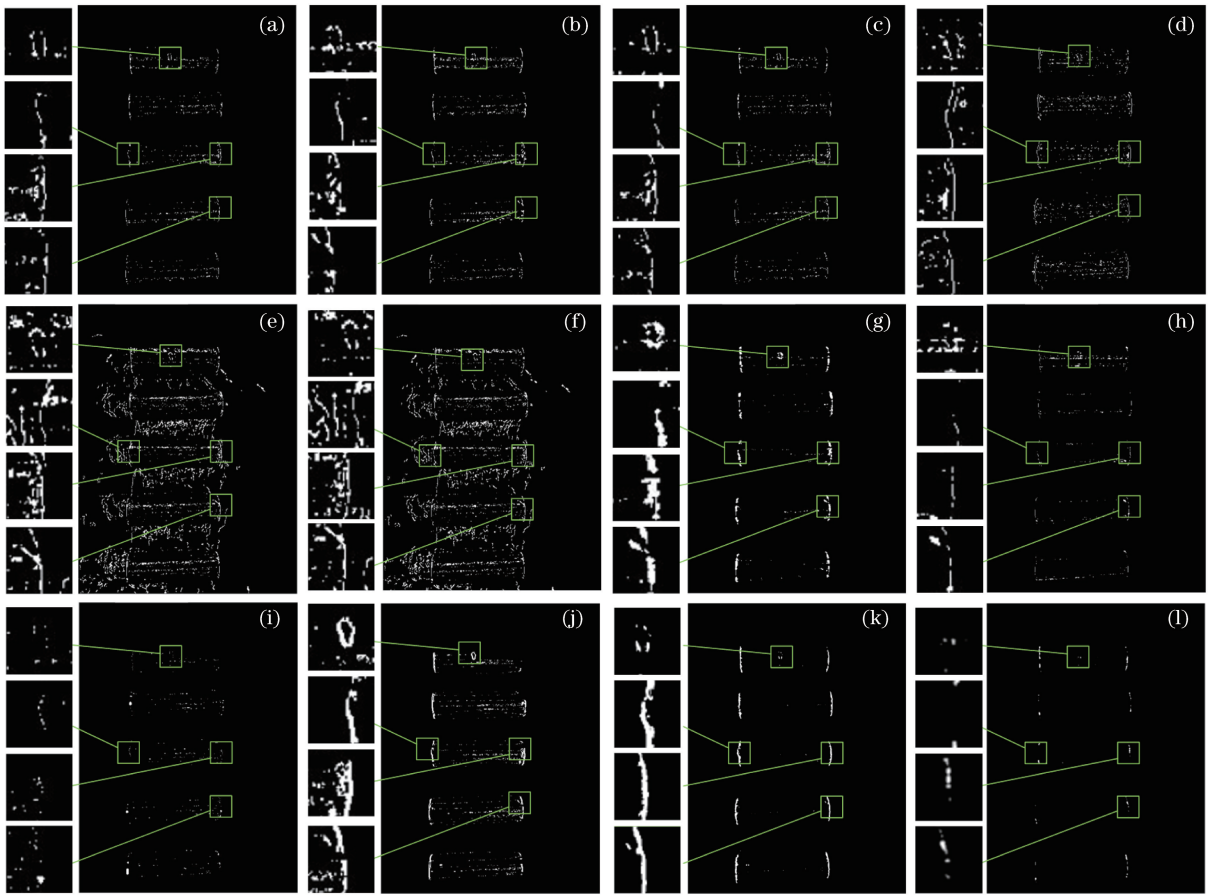


图5 张量分析。(a) Sobel;(b) Roberts;(c) Prewitt;(d) Log;(e) Canny;(f) G&C;

(g)文献[4];(h)文献[17];(i)文献[16];(j)文献[14];(k)本文算法 T_e -张量

Fig. 5 Tensor analysis. (a) Sobel; (b) Roberts; (c) Prewitt; (d) Log; (e) Canny; (f) G&C; (g) algorithm in Ref. [4]; (h) algorithm in Ref. [17]; (i) algorithm in Ref. [16]; (j) algorithm in Ref. [14]; (k) T_e -tensor of the proposed algorithm; (l) T_e -tensor of the proposed algorithm

同时,对本文算法进行抗干扰能力检验,对原始图像加入符合不同标准差的高斯噪声,具体算法结果如表2所示,Noise是根据归一化处理标准差之后的值,该值 $\times 255$ 即为误差的1倍 δ 值。

表2 稳健性检验

Table 2 Robustness test

Noise	R	R'	$C_V / \%$	C_Q
0.022	3466	4431	78.2	0.346
0.032	3325	4430	75.1	0.332
0.039	3217	4370	73.6	0.321
0.045	3348	5615	59.6	0.334
0.050	2166	2861	75.7	0.216
0.055	3180	7662	41.5	0.317
0.059	2089	3479	60.0	0.208
0.063	2827	8271	34.2	0.282
0.067	2801	11996	23.3	0.280

增加的高斯噪声在0.05之前时,本文算法依然保持着较高的有效精度,最低也有59.6%的精度,远高于一般算法;并且在整个加入噪声的数据中,识别

精度都保持在0.2以上的水平,这也很好地说明本文算法的抗干扰性。

综上所述,本文算法具有较高的有效精度、较好的识别性、一定的抗干扰能力,在金属破损处的检测上,本文算法的精度较高且稳健性较好。

5 结 论

提出将信息熵与低秩张量共同运用于金属零件破损处检测的方法。通过数据采集平台,自动采集传送零件数据,并为后续图像检测构建原始图像数据集。结合金属零件破损处的无特向反光特性,采用信息熵卷积算法生成熵卷积矩阵,再由差值分析得到差熵矩阵,由此提取边缘信息。运用低秩张量分析处理获取的差熵矩阵,以获取各方向上的灰度值的变化情况,由于差熵矩阵本身具有较高的有序度,其中包含的破损处信息多于传统边缘检测算法,再加上低秩张量分析的变化率检测能有效地增加破

损处的信息量,这也是本文算法获得较高结果的充分条件。本文算法的有效精度高于 80%,优于传统算法,在具有较高的精确性和识别能力的同时还有较好的稳健性。未来的方向是进行实时动态视频追踪并检测,并能够实现全面的破损检测,再结合亚像元边缘提取法提高精度,但对于一些外部无破损、内部有空洞的金属零件只能用工业 CT、密度计等方式进行金属探伤处理。

参 考 文 献

- [1] Liu Y, Li Y J, Zhang K. A method of multi-pixels edge detecting of image[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(2): 380-384.
刘煜, 李言俊, 张科. 一种多像素图像边缘提取方法[J]. 光子学报, 2007, 36(2): 380-384.
- [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新方法[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1104003.
- [3] Hu R W, Zhang X R, Yang L F, *et al.* Trademark pattern tilt correction based on Fourier and Hough transform[J]. Light Industry Machinery, 2018, 36(1): 62-65.
胡仁伟, 张希仁, 杨立峰, 等. 基于傅里叶变换和 Hough 变换的商标图案倾斜校正[J]. 轻工机械, 2018, 36(1): 62-65.
- [4] Liu T T, Wang P G, Zhang N. Subpixel defect detection of highly reflective workpieces based on Zernike-moments [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(12): 121203.
刘婷婷, 王培光, 张娜. 基于 Zernike 矩亚像素的高反光金属工件缺陷检测[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(12): 121203.
- [5] Li Z H, Zhang L, Yan J H. Research on image edge detection algorithm for pipeline corrosion visual measurement[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(11): 1788-1795.
李忠虎, 张琳, 闫俊红. 管道腐蚀视觉测量图像边缘检测算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(11): 1788-1795.
- [6] Li X L, Li F, Zhao R, *et al.* Non-threshold windowed Fourier filter algorithm [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(9): 0912008.
李兴龙, 李峰, 赵冉, 等. 无阈值窗口傅里叶变换滤波法[J]. 光子学报, 2014, 43(9): 0912008.
- [7] Guo J, Li Z. An edge extraction algorithm based on ICA threshold optimization and information entropy [J]. Journal of Southwest University (Natural Science), 2018, 40(9): 150-155.
郭健, 李智. 基于 ICA 阈值优化耦合信息熵的边缘提取算法[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(9): 150-155.
- [8] Jia Y, Wang R B, Yu T H, *et al.* Linear lane mark identification and track method based on entropy maximization edge extraction [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2005, 35(4): 420-425.
贾阳, 王荣本, 余天洪, 等. 基于熵最大化边缘提取的直线型车道标识线识别及跟踪方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2005, 35(4): 420-425.
- [9] 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.
- [10] Ren K Q, Zhang J R. Extraction of plant leaf vein edges based on fuzzy enhancement and improved Canny[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2018, 29(11): 1251-1258.
任克强, 张静然. 融合模糊增强与改进 Canny 的植物叶脉边缘提取[J]. 光电子·激光, 2018, 29(11): 1251-1258.
- [11] Chen Z, Wang B, Zhang L M. Dimensionality reduction and classification based on lower rank tensor analysis for hyperspectral imagery[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013, 32(6): 569-575.
陈昭, 王斌, 张立明. 基于低秩张量分析的高光谱图像降维与分类[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(6): 569-575.
- [12] Yang F F, Chen X H. Image edge detection using new weighted entropy minimal spanning tree algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(10): 182-183, 198.
杨方方, 陈秀宏. 最小加权熵支撑树图像边缘提取方法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(10): 182-183, 198.
- [13] 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.
- [14] Oram J J, McWilliams J C, Stolzenbach K D. Gradient-based edge detection and feature classification of sea-surface images of the Southern California Bight [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(5): 2397-2415.
- [15] Liu Q, Zeng X H, Wang Z H, *et al.* Edge detection by mathematical morphology filtering about quantum superposition state and entropy [J]. Application Research of Computers, 2012, 29(6): 2387-2389.
- 刘清, 曾小荟, 王忠华, 等. 量子叠加态和信息熵的形态边缘提取算法 [J]. 计算机应用研究, 2012, 29(6): 2387-2389.
- [16] Jia D, Meng X F, Meng L, *et al.* Image edge extraction combined with a Gaussian weighted distance graph [J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(1): 62-68.
- 贾迪, 孟祥福, 孟磊, 等. 结合高斯加权距离图的图像边缘提取 [J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(1): 62-68.
- [17] Cuan Y, Zhao Y. Sub-pixel edge detection of image based on weighted degree of grey entropy [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2015, 45(3): 384-388.
- 龔莹, 赵洋. 灰熵加权关联分析的亚像素边缘提取算法 [J]. 西北大学学报(自然科学版), 2015, 45(3): 384-388.
- [18] Zhao G, Lin L, Tang Y D, *et al.* Disparity map generation with tensor analysis [J]. Journal of Image and Graphics, 2013, 18(10): 1307-1314.
- 赵戈, 蔺兰, 唐延东, 等. 张量分析在视差图生成中的应用 [J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(10): 1307-1314.
- [19] Chen S C, Dai H Y, Wang C, *et al.* Method for filtering dense noise from laser scanning data [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(6): 062801.
- 陈世超, 戴华阳, 王成, 等. 激光扫描数据的密集噪声剔除方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(6): 062801.