

快速单曝光高动态范围高反光金属表面缺陷 辨识算法研究

贾维昊^{1,2} 王鹏² 陈凯³ 仝飞³ 王国彪^{1,2*}

1. 天津大学机械工程学院, 天津, 300350

2. 天津大学浙江国际创新设计与智造研究院, 绍兴, 312000

3. 宁波科诺精工科技有限公司, 宁波, 315000

摘要: 基于细节增强手段以及循环一致性生成对抗网络(CycleGAN)提出了一种快速单曝光高动态范围(HDR)的高反光金属表面缺陷辨识算法。将输入的低动态范围图像转换为HSV颜色空间,经导向滤波处理后得到亮度层和细节层;利用CycleGAN网络对这些层的动态范围分别进行扩展,并将扩展动态范围后的亮度层和细节层进行加权融合,经过滤波去噪后得到利于缺陷辨识的HDR图像;通过阈值分割、特征筛选、形态学处理等手段对HDR图像进行缺陷辨识。将该单曝光算法与经典的3种单曝光算法和1种多曝光算法进行实验对比分析,用峰值信噪比、图像熵、处理时间、灰度直方图、辨识结果5项指标综合评价实验结果。结果表明,该算法相较于其他3种单曝光算法能更好地解决过曝光问题,接近多曝光算法水平,且算法处理时间更短,能满足在线检测的需求,同时该算法挖掘图像细节信息的能力优于其他算法,辨识准确度更高。

关键词: 高反光金属;单曝光高动态范围成像;细节增强;循环一致性生成对抗网络

中图分类号: TP391; TG88

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.09.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Rapid Single-exposure HDR Defect Recognition Algorithm for Highly Reflective Metal Surfaces

JIA Weihao^{1,2} WANG Peng² CHEN Kai³ TONG Fei³ WANG Guobiao^{1,2*}

1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300350

2. International Institute for Innovative Design and Intelligent Manufacturing of Tianjin University in Zhejiang, Shaoxing, Zhejiang, 312000

3. Ningbo Kono Precision Technology Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang, 315000

Abstract: A rapid single-exposure HDR defect recognition algorithm was proposed for highly reflective metal surfaces. This algorithm was based on detail enhancement techniques and CycleGAN. The input low dynamic range (LDR) images were first converted to HSV color space and processed with guided filtering to obtain luminance and detail layers. The CycleGAN network was then used to enhance the dynamic range of these layers separately. The enhanced luminance and detail layers were weighted and fused, followed by filtering and denoising to produce an HDR image suitable for defect recognition. Defects were identified in the HDR image using threshold segmentation, feature selection, and morphological processing. This single-exposure algorithm was experimentally compared with three classic single-exposure algorithms and one multi-exposure algorithm. The evaluation was based on five metrics: peak signal-to-noise ratio (PSNR), image entropy, processing time, gray histograms, and recognition results. The experimental results indicate that the algorithm herein outperforms three other single-exposure algorithms in effectively addressing overexposure issues, achieving results comparable to multi-exposure algorithms. Additionally, it has a shorter processing time, making it suitable for online detection. Furthermore, this algorithm demonstrates superior capability in extracting image detail information compared to other algorithms, resulting in higher accuracy in recognition.

Key words: highly reflective metal; single-exposure high dynamic range (HDR) imaging; detail enhancement; cycle-consistent generative adversarial network (CycleGAN)

0 引言

低反光或弱反光表面对视觉观测影响不大,但是具有高反光特性的目标表面反射率高,产生的局部镜面反射光易使工业数字相机采集的图像亮度出现局部过饱和,造成检测盲区,导致被测表面质量信息隐没在周围复杂环境中。

目前,国内外学者针对高反光金属物体表面缺陷的机器视觉辨识研究逐渐深入。NEOGI等^[1]在汽车表面易反锈钢带的缺陷检测系统中,使用图像梯度来突出和分割感兴趣的区域,根据梯度图像灰度水平的某些特定值的像素数量制定全局自适应阈值,选择性地保留缺陷特征,以减小缺陷尺寸对检测效果的影响。GAIDHANE等^[2]提出了一种针对电路板表面缺陷检测的方法,将对称矩阵的秩作为缺陷检测的相似度量指标,在不计算特征值和特征向量等图像特征的情况下,有效实现局部缺陷的检测工作。TRUONG等^[3]提出了一种自动阈值技术,是Otsu方法的改进,使用熵加权方案,能够检测出极小的缺陷区域。ASLAM等^[4]提出了基于U-net自动分割和量化的方法,通过预处理减弱噪声,并运用形态学的后处理消除错误处理,提高了缺陷检测精度。汤勃等^[5]提出了一种支持向量机算法,降低了图像维数,且可以剔除大量冗余样本,算法简单且具有较好的鲁棒性。闵永智等^[6]改进了图像采集系统以减弱自然光的影响,并基于图像灰度和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。王柳等^[7]在测量强反射率表面时,提出了一种自适应条纹投影技术:对待测物体表面投射较高灰度级的条纹图来确定过度曝光点,降低投射强度后通过最小二乘法拟合确定像素点最适合的最大输入灰度,用重新生成的自适应条纹图来采集图像并进行相位计算和三维形貌恢复。刘婷婷等^[8]提出了一种改进的亚像素边缘提取方法对高反光金属工件缺陷进行快速检测,应用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,更精确地分割出目标轮廓,降低了金属高光噪声,在环境光照变化时具有较强的稳定性。陆雅诺等^[9]对ResNet模型进行改进,引入了注意力机制,并使用伪彩色图像增强技术处理图片,提高了带钢表面缺陷的识别准确率。李云飞^[10]提出了基于改进K-means算法的缺陷分割方法,该方法引入自适应人类学习优

化算法,提高了工件表面缺陷分割精度,并具有良好的实用价值。谢舰等^[11]改进了U-net网络,添加差异系数损失及多层损失,进行在线数据增强,提高了分割精度及分类准确率,实现了磁瓦表面缺陷的有效分割与识别。陈卓明^[12]提出基于小波多尺度分析的机械零件表面缺陷分割方法,该方法结合传统的一维Otsu分割方法和多尺度分析方法,实现了对轴零件表面缺陷的准确分割和提取。

上述对高反光金属表面缺陷的视觉检测研究大部分集中在算法的改进,小部分在算法改进的基础上辅以光源照明系统的改进,但都没有从根本上解决由于金属高反光特性产生的过曝问题,其根本原因是普通工业数字相机的动态范围不够。随着计算影像和神经网络技术的发展,有学者开始采用高动态范围成像(high dynamic range imaging, HDR)技术解决过曝问题。例如,为解决具有高反光特性的目标表面视觉检测难题,冯维等^[13]提出了一种基于高动态范围(high dynamic range, HDR)的高反光金属表面缺陷检测方法和一种改进的相机响应函数快速标定方法,在保证相机响应函数标定准确度的同时,具有计算量小、标定速度快的优点,而且合成的高动态范围图像细节清晰,满足高反光金属表面缺陷检测要求。甘富升^[14]通过合理地选择光源和多曝光融合HDR技术完成了高反光的消除处理,经过滤波和分割算法预处理后,结合特征值实现了缺陷的快速检测,并通过小样本模型实现了缺陷的分类。

现阶段一些学者虽通过HDR技术提高了相机的动态范围,解决了高反光金属表面存在的局部亮度过饱和问题,但是均采用多曝光融合技术,需拍摄多幅曝光时间不同的图像,算法的运行时间较长,不能满足快节奏生产时在线检测的要求。本文面向高反光金属表面缺陷在线视觉检测,提出一种采用基于循环一致性生成对抗网络(cycle-consistent generative adversarial network, CycleGAN)的单曝光HDR算法,缩短算法运行时间,并通过导向滤波分离细节层等手段增强图像细节,提高图像质量,使成像效果接近多曝光算法。

1 快速单曝光HDR表面缺陷辨识算法

高反光金属表面缺陷容易淹没在高光过曝导致的视野盲区中,因此高反光金属表面缺陷辨识算法需减弱高反光的影响,增强细节信息,使缺陷

更加明显。同时,如需满足在线检测的需求,算法还需保证一定的快速性。

快速单曝光HDR高反光金属表面缺陷辨识方法主要有以下步骤。

1)将拍摄的低动态范围(low dynamic range, LDR)图像先分离细节层以尽可能多地挖掘出过曝光和欠曝光区域的细节信息。

2)利用深度学习网络分别提高亮度层和细节层的动态范围后,将亮度层与细节层进行融合与去噪处理,得到HDR图像。

3)运用阈值分割、特征筛选、形态学处理等方法对得到的HDR图像进行表面缺陷检测。

其技术路线如图1所示。

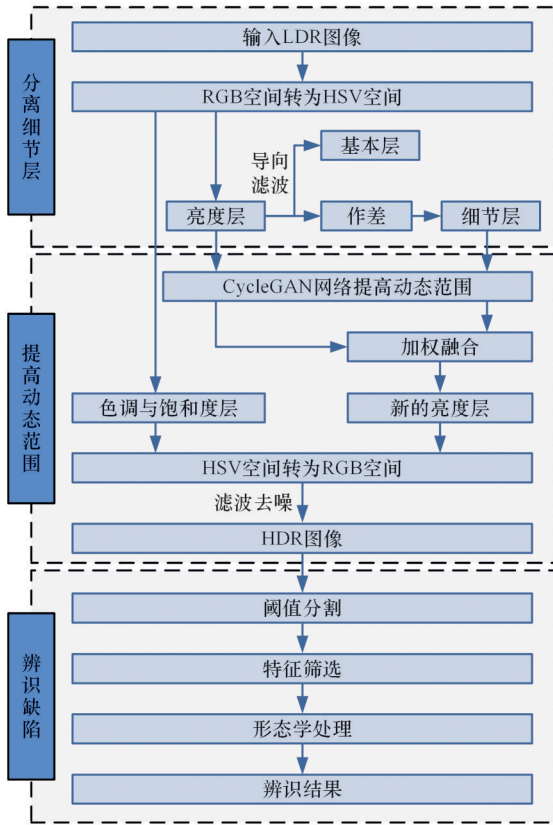


图1 快速单曝光HDR表面缺陷辨识算法技术路线
Fig.1 Technical roadmap for rapid single exposure HDR surface defect recognition algorithm

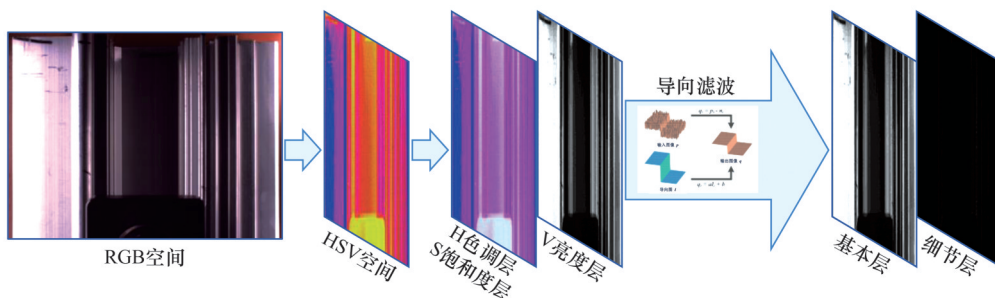


图2 分离细节层

Fig.2 Separate detail layer

1.1 分离细节层

1.1.1 将图像由RGB空间转换至HSV空间^[15]

RGB空间通常由红色(R)、绿色(G)和蓝色(B)3个通道组成。HSV空间通常由色调层(H)、饱和度层(S)和亮度层(V)3个通道组成。颜色空间变换的目的是更好地分离亮度信息和色度(色调与饱和度)信息,采用的转换式如下:

$$\begin{aligned}
 V &= \max(R, G, B) \\
 S &= \begin{cases} \frac{V - \min(R, G, B)}{V} & \text{若 } V \neq 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \\
 H &= \begin{cases} \frac{60(G - B)}{V - \min(R, G, B)} & \text{若 } V = R \\ 120 + \frac{60(B - R)}{V - \min(R, G, B)} & \text{若 } V = G \\ 240 + \frac{60(R - G)}{V - \min(R, G, B)} & \text{若 } V = B \end{cases} \quad (1)
 \end{aligned}$$

因为在HSV空间H分量用角度表示,故当 $H < 0$ 时需要将H分量加上 360° 。

1.1.2 导向滤波^[16]分离细节层

通过导向滤波算法对HSV空间下的亮度层图像进行滤波,获取亮度层图像的基本层图像,取亮度层图像与基本层图像的差值作为亮度层图像的细节层图像。具体如下:

将亮度层图像输入至导向滤波算法中,输出亮度层图像的基本层图像:

$$q_i = a_k I_i + b_k \quad \forall i \in \omega_k \quad (2)$$

式中: q_i 为输出图像即基本层图像; I_i 为导向滤波算法对应的导向图,这里取亮度层图像为导向图; i 为像素索引; a_k, b_k 为导向滤波算法的系数; k 为局部化的窗口的中点; ω_k 为局部化的窗口的中点对应的窗口。

通过带有正则项的岭回归方程求解导向滤波算法的系数,即可得到基本层图像。

取亮度层图像和基本层图像的差值作为亮度层图像的细节层图像 n_i :

$$n_i = p_i - q_i \quad (3)$$

式中: p_i 为输入图像即亮度层图像。

分离细节层过程如图2所示。

1.2 提高动态范围

1.2.1 CycleGAN网络提高动态范围

将亮度层图像与细节层图像分别输入至CycleGAN网络^[17],输出提高动态范围后的HDR亮度层图像与HDR细节层图像。

CycleGAN网络由2个生成器(G 和 F)和2个判别器(D_x 和 D_y)组成的镜像对称环形网络构成。 G 负责将 X (LDR图像)转换为 Y (HDR图像),而 F 负责将 Y 转换回 X 。 D_y 判别器用于区分输入图像是来自真实的HDR图像还是由 G 生成的假HDR图像,而 D_x 判别器用于区分输入图像是真实的LDR图像或由 F 转换的假LDR图像,它引入循环一致性损失,保证了转换的质量。

使用由海康威视MV-CU050-30GC彩色相机、海康威视MVL-HF0828M-6MPE镜头和科麦视觉BRD光源组成的拍摄系统采集数据集,采集对象为具有高反光特性的汽车天窗导轨铝合金型材。数据集包括LDR图像和HDR图像两个部分,LDR图像为上述拍摄系统拍摄到的曝光时间为30 ms的图像,HDR图像为采用Mertens多曝光算法^[18]将上述拍摄系统拍摄到的曝光时间为5~50 ms且间隔时间为5 ms的10张图像融合而成的图像。将采集到的数据集按7:3的比例划分为训练集和测试集。

1.2.2 亮度层与细节层加权融合

将HDR亮度层图像与HDR细节层图像加权融合,得到新的亮度层:

$$I_{out} = kI_V + (1 - k)I_D \quad (4)$$

式中: I_{out} 为融合后的图像; k 为权重系数, $0 < k < 1$; I_V 为HDR亮度层图像; I_D 为HDR细节层图像;HDR亮度层权

重设置为 k ,HDR细节层权重设置为 $1-k$ 。

1.2.3 HSV空间转回RGB空间

新的亮度层与原HSV空间中的色调层和饱和度层组成新的HSV空间下的高动态范围图像,之后将其转换至RGB空间。对式(1)取逆运算,得到HSV空间转换至RGB空间的转换式:

$$(R, G, B) = \begin{cases} (V, T, P) & H_i = 0 \\ (Q, V, P) & H_i = 1 \\ (P, V, T) & H_i = 2 \\ (P, Q, V) & H_i = 3 \\ (T, P, V) & H_i = 4 \\ (V, P, Q) & H_i = 5 \end{cases} \quad (5)$$

式中: H_i, F, P, Q, T 为中间计算变量。

1.2.4 高斯滤波去噪

使用高斯滤波去噪得到HDR图像。采用如下所示的二维高斯函数生成模板值:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

式中: $G(x, y)$ 为坐标 (x, y) 位置经过处理后的图像像素值; σ 为邻域窗口里像素值的标准差,邻域窗口这里取 3×3 。用模板扫描图像中的每个像素,用模板确定的邻域内像素的加权平均灰度值替代模板中心像素点的灰度值。

提高动态范围的操作如图3所示。

1.3 辨识缺陷

高反光金属表面缺陷多为划伤、碰伤类缺陷,其面积、长度、宽度等特征较为明显,且缺陷像素值比正常金属表面低,在经处理的高动态范围图

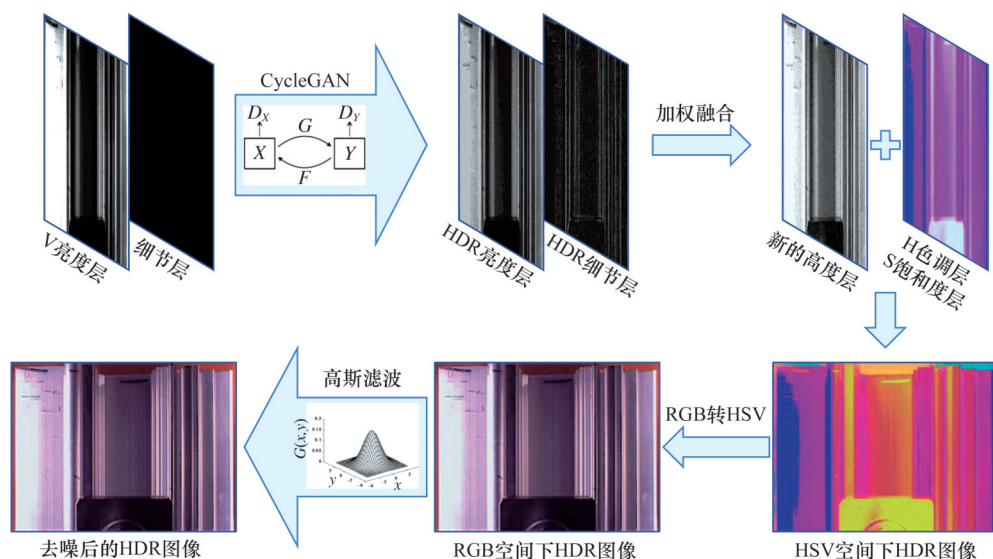


图3 提高动态范围

Fig.3 Enhance dynamic range

像中缺陷特征轮廓较易于提取。

辨识缺陷方法分为以下三步：

1) 阈值分割。缺陷像素值集中在一个区间范围内, 确定合理的阈值后, 将范围内的像素保留, 将范围外的像素剔除, 删除图像冗余部分。

2) 特征筛选。对图像进行均值滤波, 通过设置合理的阈值, 筛选出滤波后像素值变化的区域, 得到缺陷的大致形状; 通过面积、长度、宽度等数值筛选出符合缺陷特征的区域。

3) 通过腐蚀、膨胀、开闭运算、骨架提取等形态学处理操作填补孔洞, 使缺陷的形状与轮廓更加清晰准确, 辨识出缺陷的形状与数量。

缺陷辨识过程如图 4 所示。

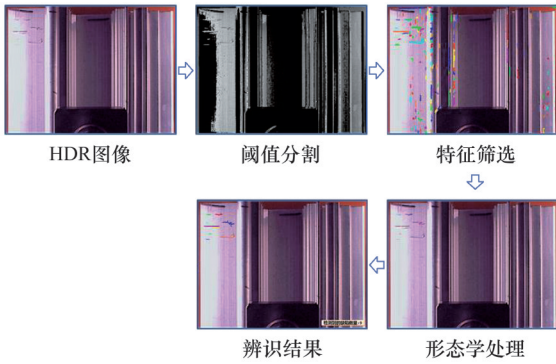


图 4 缺陷辨识过程

Fig.4 Defect identify process

2 实验分析

将本文算法与 3 种单曝光算法(文献[19-21])及 1 种多曝光算法(Mertens)进行对比, 各算法成像效果如图 5 所示。通过峰值信噪比^[22](peak signal-to-noise ratio, PSNR)、图像熵^[23]、处理时间、灰度直方图、辨识结果 5 项指标来综合评价仿真结果。

PSNR 是衡量图像质量的指标, PSNR 值越大, 表示图像质量越好, 其计算式为

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{PSNR}} &= 10 \lg \left(\frac{i_{\text{max}}^2}{E_{\text{MSE}}} \right) = 20 \lg \left(\frac{i_{\text{max}}}{\sqrt{E_{\text{MSE}}}} \right) \\ E_{\text{MSE}} &= \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i, j) - K(i, j)]^2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: E_{MSE} 为均方误差; i_{max} 为图像的最大像素值; I 为 $m \times n$ 大小的原始图像; K 为测试图像; (i, j) 为像素索引。

以多曝光算法所得 HDR 图像为参考图像, 以本文算法和另 3 种单曝光算法所得 HDR 图像为测试图像, 计算 PSNR 值, 如图 6 所示。比较各单曝光算法所得 HDR 图像与多曝光算法所得 HDR 图像的相似度, 可以看出, 本文算法成像效果比其他单曝光算法更接近多曝光算法, 成像质量更好。

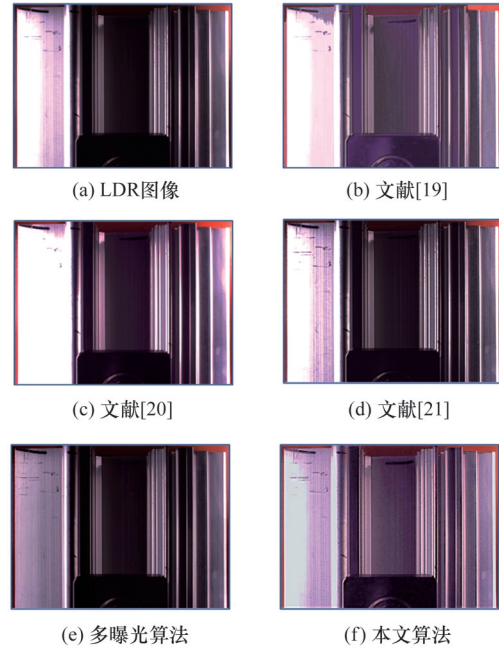


图 5 各算法成像效果

Fig.5 Imaging effects of various algorithms

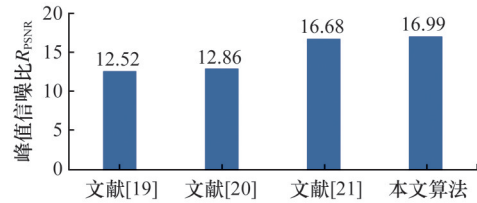


图 6 PSNR 对比结果

Fig.6 Comparison of PSNR

图像熵是一种图像特征的统计形式, 反映了图像中平均信息量的多少。图像熵越大, 代表图像中有效信息越多, 细节越丰富, 其计算式为

$$H(I) = - \sum [p(i) \log_2(p(i))] \quad (8)$$

式中: $p(i)$ 为图像中像素值为 i 的概率。

计算 LDR 图像与各算法得到的 HDR 图像的图像熵, 如图 7 所示。结果表明, 本文算法图像熵最高, 超过了多曝光算法, 包含更多细节信息, 更适合缺陷辨识。

处理时间包括图像采集时间与程序运行时

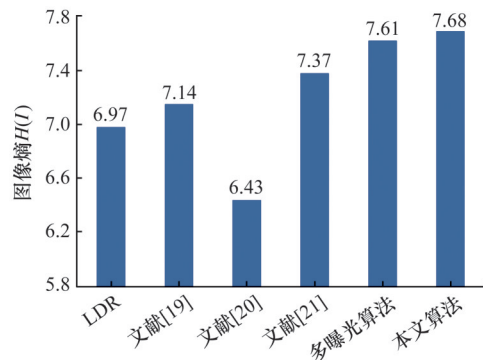


图 7 图像熵对比结果

Fig.7 Comparison of image entropy

间。图8所示为不同算法处理时间的对比结果。可以看出,本文算法比其他算法时间更短,能满足快节奏在线检测的需求。

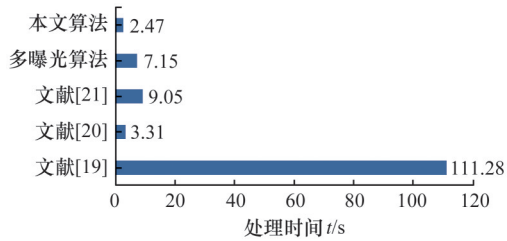


图8 处理时间对比结果

Fig.8 Comparison of processing time

图像的灰度直方图是对曝光量的量化,能直观反映图像的曝光情况。直方图横轴为灰度值,范围是 $[0, 1]$,0最暗,1最亮;纵轴代表的是图像中处于这个亮度范围的像素的数量。当直方图中

的色块偏向左边时,说明图像欠曝;当色块右边时,说明图像过曝。

对比灰度直方图,如图9所示。LDR图像像素主要分布在0.1与1附近,说明LDR图像暗光部分欠曝,高光部分过曝;多曝光HDR算法能较好地提亮暗光部分,压制高光部分,使像素分布在合理的曝光范围内;其他单曝光HDR算法的峰值在1附近,表明图像过曝,虽提亮了暗光部分,但没有很好地压制住高光;而本文算法的峰值在0.8~0.9附近,提亮暗光部分的同时压制高光的能力更强,更能满足缺陷检测需求。

辨识结果主要观察辨识准确度和辨识的缺陷数量。本文算法与多曝光算法的辨识结果如图10所示,可以看出,通过本文算法处理后的图像辨识到的缺陷数量更多,形状更准确。

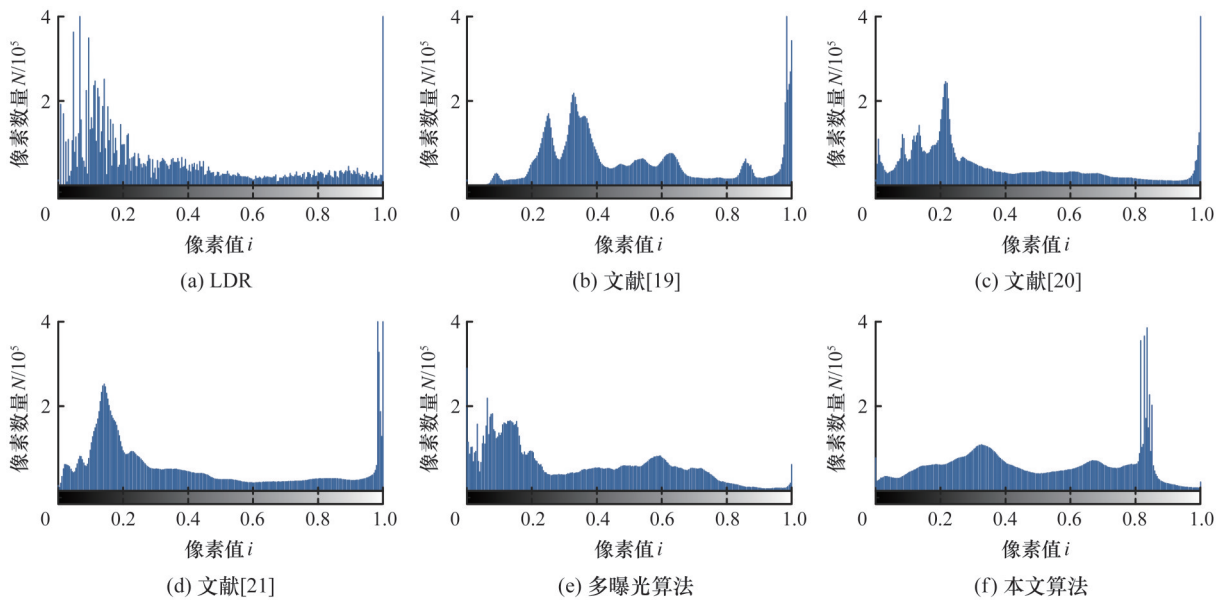


图9 图像的灰度直方图

Fig.9 Gray histogram of image

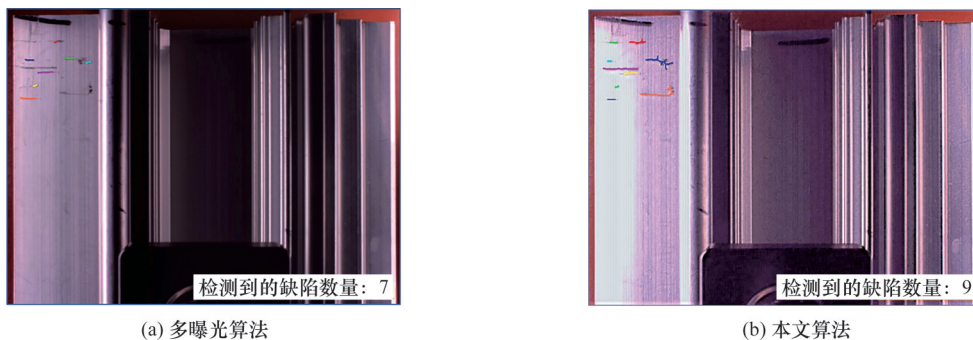


图10 辨识结果

Fig.10 Identification results

综上所述,本文算法相比于其他算法,在表示与多曝光HDR算法图像质量相似程度的PSNR方面优于其他经典的单曝光算法,在表示图像信息量的图像熵方面优于其他单曝光HDR算法以

及多曝光算法,在处理时间方面要明显小于其他算法,在表示曝光程度的直方图方面虽不如多曝光HDR算法压制过曝效果好,但却明显优于其他单曝光HDR算法,在辨识结果方面能识别出更多

缺陷,准确率更高。

3 结论

本文基于细节增强手段和CycleGAN提出了一种快速单曝光HDR的高反光金属表面缺陷辨识算法,其优势如下:

1)采用HDR技术,从成像原理层面上解决了高反光金属应用机器视觉辨识表面缺陷时遇到的过曝光淹没缺陷问题。

2)采用基于CycleGAN网络的单曝光HDR算法实现高动态范围成像,解决多曝光HDR算法处理时间过长的的问题,使其能满足快节拍生产在线检测需求。

3)采用导向滤波手段分离出了细节层,经过一系列处理,实现了细节增强,能挖掘出图像中更多的细节信息,识别出更多的缺陷,辨识准确度更高。

参考文献:

- [1] NEOGI N, MOHANTA D K, DUTTA P K. Defect Detection of Steel Surfaces with Global Adaptive Percentile Thresholding of Gradient Image[J]. Journal of the Institution of Engineers (India): Series B, 2017, 98(6):557-565.
- [2] GAIDHANE V H, HOTE Y V, SINGH V. An Efficient Similarity Measure Approach for PCB Surface Defect Detection[J]. Pattern Analysis and Applications, 2018, 21(1):277-289.
- [3] TRUONG M T N, KIM S. Automatic Image Thresholding Using Otsu's Method and Entropy Weighting Scheme for Surface Defect Detection[J]. Soft Computing, 2018, 22(13):4197-4203.
- [4] ASLAM Y, SANTHI N, RAMASAMY N, et al. RETRACTED ARTICLE: Localization and Segmentation of Metal Cracks Using Deep Learning[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2021, 12(3):4205-4213.
- [5] 汤勃,孔建益,伍世虔. 机器视觉表面缺陷检测综述[J]. 中国图象图形学报, 2017, 22(12):1640-1663.
- TANG Bo, KONG Jianyi, WU Shiqian. Review of Surface Defect Detection Based on Machine Vision [J]. Journal of Image and Graphics, 2017, 22(12): 1640-1663.
- [6] 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.
- MIN Yongzhi, YUE Biao, MA Hongfeng, 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.
- [7] 王柳,陈超,高楠,等. 基于自适应条纹投影的高反光物体三维面形测量[J]. 应用光学, 2018, 39(3):373-378.
- WANG Liu, CHEN Chao, GAO Nan, et al. Three-dimensional Shape Measurement of High Reflective Objects Based on Adaptive Fringe-pattern Projection[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(3):373-378.
- [8] 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.
- LIU Tingting, WANG Peiguang, ZHANG Na. Subpixel Defect Detection in Highly Reflective Workpieces Based on Zernike Moments[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(12):121203.
- [9] 陆雅诺,陈炳才,陈德刚,等. 一种基于注意力模型的带钢表面缺陷识别算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(14):242-250.
- LU Yanuo, CHEN Bingcai, CHEN Degang, et al. Recognition Algorithm of Strip Steel Surface Defects Based on Attention Model[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(14):242-250.
- [10] 李云飞. 基于改进K-means算法的工件表面缺陷分割算法研究[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2021, 31(1):53-58.
- LI Yunfei. Research on Workpiece Surface Defect Segmentation Algorithm Based on Improved K-means Algorithm[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering (Natural Science Edition), 2021, 31(1):53-58.
- [11] 谢舰,姚剑敏,严群,等. 基于深度学习的磁瓦表面缺陷分割与识别[J]. 液晶与显示, 2021, 36(5):713-722.
- XIE Jian, YAO Jianmin, YAN Qun, et al. Segmentation and Recognition of Magnetic Tile Surface Defects Based on Deep Learning[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2021, 36(5): 713-722.
- [12] 陈卓明. 基于多尺度分析的海洋石油机械零件表面缺陷分割[J]. 中国新技术新产品, 2022(24):63-65.
- CHEN Zhuoming. Segmentation of Surface Defects of Offshore Oil Machinery Parts Based on Multi-scale Analysis[J]. New Technology & New Products of China, 2022(24):63-65.
- [13] 冯维,刘红帝,汤少靖,等. 基于HDRI的高反光金属表面缺陷检测方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2021, 30(12):121-125.

- 2019(8):112-116.
- FENG Wei, LIU Hongdi, TANG Shaojing, et al. Research on Defect Detection Method for High-reflective-metal Surface Based on HDRI[J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(8):112-116.
- [14] 甘富升. 基于机器视觉的高反光金属表面缺陷检测与分类方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2023.
- GAN Fusheng. Research on High Reflective Metal Surface Defect Detection and Classification Method Based on Machine Vision[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [15] 张红英, 朱恩弘, 吴亚东. 一种基于细节层分离的单曝光 HDR 图像生成算法[J]. 自动化学报, 2019, 45(11):2159-2170.
- ZHANG Hongying, ZHU Enhong, WU Yadong. High Dynamic Range Image Generating Algorithm Based on Detail Layer Separation of a Single Exposure Image[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(11):2159-2170.
- [16] HE Kaiming, SUN Jian, TANG Xiaoou. Guided Image Filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6):1397-1409.
- [17] ZHU Junyan, PARK T, ISOLA P, et al. Unpaired Image-to-Image Translation Using Cycle-consistent Adversarial Networks[C]//2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Venice, 2017:2242-2251.
- [18] MERTENS T, KAUTZ J, van REETH F. Exposure Fusion: a Simple and Practical Alternative to High Dynamic Range Photography [J]. Computer Graphics Forum, 2009, 28(1):161-171.
- [19] LEE C H, CHEN L H, WANG Weikang. Image Contrast Enhancement Using Classified Virtual Exposure Image Fusion [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2012, 58(4):1253-1261.
- [20] WANG T H, CHIU C W, WU Weichen, et al. Pseudo-multiple-exposure-based Tone Fusion with Local Region Adjustment[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2015, 17(4):470-484.
- [21] PARK J S, SOH J W, CHO N I. Generation of High Dynamic Range Illumination from a Single Image for the Enhancement of Undesirably Illuminated Images [J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(14):20263-20283.
- [22] 王汇源. 数字图像通信原理与技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2000.
- WANG Huiyuan. Principle and Technology of Digital Image Communication[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000.
- [23] SHANNON C E. A Mathematical Theory of Communication [J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27(3):379-423.

(编辑 王旻玥)

作者简介: 贾维昊, 男, 1999年生, 硕士研究生。研究方向为机器视觉。E-mail: 2022201240@tju.edu.cn。王国旗(通信作者), 男, 1964年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为机械优化设计、智能检测、激光制造与增材制造战略研究。E-mail: gbwang@tju.edu.cn。

本文引用格式:

贾维昊, 王鹏, 陈凯, 等. 快速单曝光高动态范围高反光金属表面缺陷辨识算法研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(9):2039-2046.

JIA Weihao, WANG Peng, CHEN Kai, et al. Research on Rapid Single-exposure HDR Defect Recognition Algorithm for Highly Reflective Metal Surfaces [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(9):2039-2046.

2025 中国机械工程学会学术年会在天津举行

2025年9月12—14日, 2025中国机械工程学会学术年会在天津举行。年会以“AI赋能智造, 创新成就未来”为主题, 由中国机械工程学会主办, 天津大学与河北工业大学联合承办。

学会理事会成员、各专业分会代表、省区市机械工程学会代表、学会主办系列期刊负责人、学会会员以及全国机械工程科技工作者共计1100余人参加了本次会议。

9月13日举行了年会主旨报告会, 开幕式由副理事长蒋庄德院士主持。监事长郭东明院士在致辞中提出, 要以更加开放的心态探索新兴技术赋能机械工程领域的产业应用, 推动学科交叉融合与创新的高质量发展。柴立元院士、王利民教授分别代表承办单位天津大学与河北工业大学致辞。唐娜教授代表天津市科协致辞。

开幕式后举行了主旨报告会, 由郭东明、邓宗全、贾振元、杨华勇、毛明、陈学东6位院士及王德成研究员分别主持。年会邀请20位专家学者作了学术报告, 从不同领域分享了学术进展。武汉大学刘胜院士、中国航天科技集团王国庆院士、西北工业大学张开富教授、哈尔滨工业大学赵杰教授、《Bio-Design and Manufacturing》杂志社张月红主任等行业内知名专家作了精彩报告。

年会还设立了10余个分论坛, 覆盖了机械行业多个细分领域与交叉前沿。年会期间还召开了“中国机械工程学会第十二届常务理事会议、增材制造(3D打印)技术分会第三届委员会换届会议、学风与道德工作委员会&女科技工作者委员会会议”。

(工作总部)