

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211496

改进同态滤波与多尺度融合的腐蚀图像增强*

李国民^{1,2} 邵 姮^{1,2} 朱代先^{1,2} 刘 佳^{1,2}

(1.西安科技大学通信与信息工程学院 西安 710054; 2.西安科技大学理学院 西安 710054)

摘要: 为了更好地判断金属腐蚀图像的腐蚀程度,针对腐蚀图像存在的亮度不高、对比度低和细节模糊等问题,提出一种改进的同态滤波与多尺度融合的腐蚀图像增强方法。首先,采用引导滤波将原始腐蚀图像分为基础图像和细节图像后加权融合,获得细节对比度增强图像;其次将原始腐蚀图像转换为 HSV 颜色空间,对亮度分量采用改进后的单参数分块同态滤波得到亮度增强图像,能够在减少同态滤波参数的同时,改善同态滤波亮度过度增强的现象;最后利用拉普拉斯对比度、显著性和饱和度 3 个权重对处理后具有优势特征的两幅图像进行多尺度融合,得到最终的增强图像。实验结果表明,本文算法的信息熵、均值、平均梯度以及标准差的平均值相较于原图分别提升了 7.4%、9.8%、43.34%和 29.8%,其中信息熵、平均梯度以及标准差的平均值均优于其余 3 种算法;本文算法能有效改善腐蚀图像整体亮度,提升暗细节对比度,提高图像质量。

关键词: 金属腐蚀图像;同态滤波;引导滤波;多尺度融合;图像增强

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.4050

Improved homomorphic filtering and multiscale fusion for corroded image enhancement

Li Guomin^{1,2} Shao Heng^{1,2} Zhu Daixian^{1,2} Liu Jia^{1,2}

(1. School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. School of Science, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to better judge the corrosion degree of metal corrosion images, in view of the problems of low brightness, low contrast and blurred details in corrosion images, an improved corrosion image enhancement method based on homomorphic filtering and multi-scale fusion is proposed. First, the original corroded image is divided into the base image and the detail image by guided filtering and then weighted and fused to obtain the detail contrast-enhanced image. Secondly, the original eroded image is converted into HSV color space, and only the luminance component is subjected to the improved single-parameter block homomorphic filtering to obtain a luminance-enhanced image, which can reduce the homomorphic filtering parameters and improve the phenomenon of excessive brightness enhancement of homomorphic filtering. Finally, using three weights of Laplacian contrast, saliency and saturation to perform multi-scale fusion on the two images with dominant features after processing to obtain the final enhanced image. The experimental results show that the information entropy, mean, average gradient and standard deviation of the algorithm in this paper are improved by 7.4%, 9.8%, 43.34% and 29.8% respectively compared with the original image. Among them, the average value of information entropy, average gradient and standard deviation are better than the other three algorithms. The algorithm in this paper can effectively improve the overall brightness of the corroded image, improve the contrast of dark details, and improve the image quality.

Keywords: metal corrosion image; homomorphic filtering; guided filtering; multi-scale fusion; image enhancement

0 引言

材料腐蚀是指材料与所处环境之间的相互作用以及由

此产生的影响。材料所处的自然环境呈现多样性,导致材料的腐蚀特征信息也不相同,如:腐蚀特征形状不规则、腐蚀特征数量、腐蚀面积大小、腐蚀特征区域颜色等。因此使

收稿日期:2022-09-22

* 基金项目:陕西省重点研发计划(2021GY-338)、西安市科技局计划项目(21RGSF0017)资助

金属材料腐蚀程度不易被确定。为了能更准确的判断金属腐蚀程度,对腐蚀图像质量则有较高要求,因此需要对采集到的整体亮度低、细节信息不明显、腐蚀纹理特征模糊等腐蚀图像进行有目的的增强。使经过图像增强处理后的图像在细节对比度、亮度方面都有较好的改善,更符合机器学习的要求,拥有更好地图像特征效果^[1]。

近年来应用比较普遍的图像增强算法主要包括空域增强、频域增强和融合增强等方法。空域增强算法主要有直方图均衡化、灰度变换^[2]和 Retinex 算法^[3]等。频域增强方法主要有低通滤波、高通滤波和同态滤波算法^[4]。融合增强技术分为两种:一种是同一条件下,单幅图像生成多幅具有相似特征的图像进行融合;另一种是不同条件下的多幅图像进行融合。其中直方图均衡化和灰度变换是通过直接对图像灰度值运算处理,适合于提高对比度,但在提高细节方面有限。而 Retinex 算法可以显著提高暗区域的细节,但会产生泛白、颜色失真和对比度低的现象。同态滤波是通过压缩图像低频分量增强高频分量,在不损失亮区细节信息的同时,有效增强暗区的细节信息^[5],其原理简单且计算量小^[6],但同态滤波具有全局特性,因此也会出现图像亮度过度增强,细节模糊等问题。李连志等提出基于同态滤波的平面视觉图像色彩增强算法,在 DCT 变换的基础上进行同态滤波计算,通过图像构成条件创建对应的同态滤波模型,并利用可见度函数去除块效应,该算法对图像边缘信息的保护具有较好的适用性^[7]。陈法法等针对图像亮度不均匀、对比度低的问题,利用小波变换代替分块同态滤波中的傅里叶变换,对分解出的高频和低频部分合并重构,实现图像整体亮度和对比度增强^[8]。图像融合增强方面,Ancuti 等^[9-10]在水下图像增强的背景下,采用图像亮度、色度和显著性 3 个权重多尺度融合得到了较好的增强结果。

针对金属腐蚀图像存在亮度低和细节不清晰等问题,本文结合同态滤波全局性的特点,会出现亮度过度增强以及对比度增强效果不理想的问题,提出一种多尺度融合引导滤波和 HSV 模型下的分块同态滤波增强算法。利用加权引导滤波分层增强算法增强细节对比度,利用 HSV 模型下的单参数分块同态滤波增强亮度,最后利用多尺度融合具有显著优势的 2 幅图像得到最终增强图像。

1 改进同态滤波与多尺度融合的腐蚀图像增强算法

本文算法整体流程如图 1 所示。首先利用引导滤波分层的思想将原始图像分为基础图像和细节图像,将基础图像和细节图像进行加权融合得到细节对比度增强图像;选取 HSV 模型提取腐蚀图像的亮度分量,保持其他分量不变的同时对其做单参数分块同态滤波并去除块效应,改善图像的亮度;最后采用多尺度融合算法对两个输入图像融合,得到最终的增强图像。

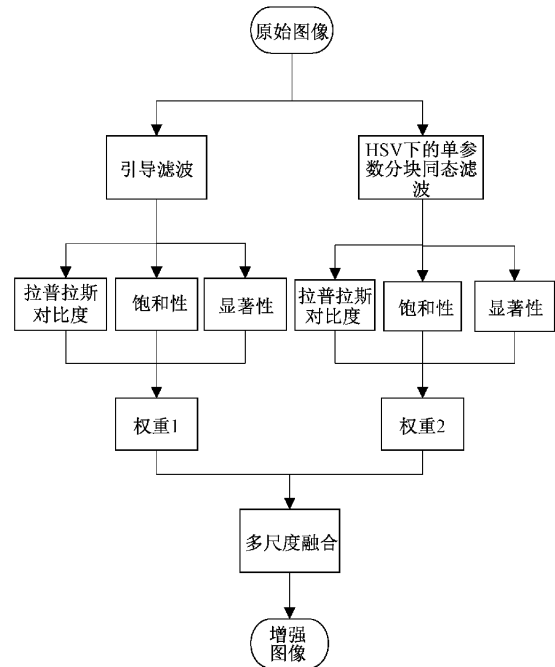


图 1 本文算法流程

1.1 引导滤波

图像可分为基础图像和细节图像,基础图像反映总体轮廓信息,细节图像反映纹理信息。目前普遍常用的滤波器有高斯滤波器、双边滤波器和引导滤波器^[11]。相较于其他滤波器,引导滤波能较好地保留边缘和梯度等细节信息,因此本文采用引导滤波对图像进行分层,其计算公式如下:

$$q_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in \omega_k \quad (1)$$

式中: q_i 为经过引导滤波输出的基础图像; I_i 为输入的原始腐蚀图像,同时也是引导图像;窗口中心位于 k , a_k 和 b_k 是该线性函数的系数。用最小二乘法获得 a_k 和 b_k 的最优解:

$$a_k = \frac{1}{|\omega|} \frac{\sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \mu_k p_k}{\sigma_k^2 + \epsilon} \quad (2)$$

$$b_k = p_k - a_k \mu_k \quad (3)$$

式中: μ_k 和 σ_k^2 分别为引导图像 I_i 的均值和方差, p_k 为待滤波图像即原始金属腐蚀图像在窗口 ω_k 的平均值; ϵ 为线性回归系数。

接着用原始图像减去基础图像便可得到细节图像 I_{detail} , 通过对基础图像和细节图像加权融合获得对比度增强图像 $I_{enhanced}$:

$$I_{detail} = I_i - q_i \quad (4)$$

$$I_{enhanced} = I_i + \lambda I_{detail} \quad (5)$$

1.2 基于单参数的分块同态滤波

1) 同态滤波

图像在成像过程中,可看作是由光源的入射光分量和物体的反射光分量组成,其数学表达式为:

$$f(x, y) = i(x, y) \times r(x, y) \quad (6)$$

其中, $f(x, y)$ 表示生成的图像; $i(x, y)$ 表示入射光分量, 入射光分量主要体现光照条件, 在空间变化比较缓慢, 主要分布在低频部分; $r(x, y)$ 表示反射光分量, 反射光分量主要表现图像的细节特征, 随空间位置变化剧烈, 主要分布在高频部分。根据上述情况描述, 只需要将入射光分量和照射光分量分开, 对 $i(x, y)$ 压缩低频部分, $r(x, y)$ 提高高频部分, 以达到压缩入射光照变化, 同时增强图像细节的目的。

因此同态滤波需要借助对数变换将入射光分量和反射光分量分开, 以便能够通过傅里叶变换将图像从空域变换到频域, 实现对频谱滤波处理的目的。即:

$$\ln f(x, y) = \ln i(x, y) + \ln r(x, y) \quad (7)$$

经傅里叶变换后得:

$$F(u, v) = I(u, v) + R(u, v) \quad (8)$$

合适的同态滤波函数是同态滤波过程中的关键一步, 目前较为常用的滤波器有 Gaussian 型同态滤波器和 Butterworth 型同态滤波器^[12]。本文选用 Gaussian 型同态滤波器, 在频域中压缩低频, 提高高频分量, 其同态滤波传递函数为:

$$H(u, v) = (r_H - r_L) [1 - e^{-c[D_0^n / (D(u, v))^n]^2}] + r_L \quad (9)$$

式中: r_H, r_L 为亮度调节系数, r_H 为高频增加倍数, 其值越大图像越亮, r_L 为低频增加倍数, 一般 $r_H > 1$ 且 $r_L < 1$; c 为常数且常在 r_H 和 r_L 之间取值, 用来控制滤波器函数斜面的陡度^[13]; D_0 为截止频率, 其值越小, 滤波后保留的低频成分越多, 图像越暗; n 为滤波器阶数, $D(u, v)$ 是点 (u, v) 到傅里叶变换中心 $(M/2, N/2)$ 的距离, 其公式如式(10)所示。

$$D(u, v) = \sqrt{(u - M/2)^2 + (v - N/2)^2} \quad (10)$$

式中: M, N 分别是图像的行程数和列数。

经传递函数 $H(u, v)$ 滤波处理后得:

$$H(u, v)F(u, v) = H(u, v)I(u, v) + H(u, v)R(u, v) \quad (11)$$

将上述处理结果式(11)经傅里叶逆变换得:

$$h_f(x, y) = h_i(x, y) + h_r(x, y) \quad (12)$$

对式(12)指数变换即可得到最终增强图像:

$$g(x, y) = e^{h_f(x, y)} = i_0(x, y) + r_0(x, y) \quad (13)$$

式中: $i_0(x, y)$ 和 $r_0(x, y)$ 分别是增强后的入射光分量和反射光分量, 同态滤波增强算法的流程如图 2 所示。

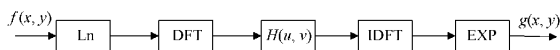


图 2 同态滤波增强算法流程

2) 单参数分块同态滤波

传统的同态滤波器需要调节 4 个参数来实现最佳增强效果, 为减少调节参数对滤波增强效果的影响, 本文受文献[14]的启示, 采用基于 S 型曲线改进的单参数传递函数。由于图像在全局同态滤波之后有亮度信息会被过度增强,

丢失部分细节和边缘信息, 因此本文提出 HSV 模型下的单参数分块同态滤波算法, 既可以减少参数对滤波效果的影响, 也可以改善同态滤波存在的亮度过度增强现象。文中首先将图像转为 HSV 颜色空间, 保持色度和饱和度分量不变的同时, 对亮度分量通过单参数分块同态滤波来提高图像亮度。S 型曲线方程为:

$$P(t) = 1/(1 + x^{-t}) \quad (14)$$

改变后的传递函数为:

$$H(u, v) = 1/(1 + D(u, v)^{-t}) \quad (15)$$

经过多次试验, 本文将图像分成 8×8 的子块进行分块同态滤波, 其中, t 取 0.3。

由于分块同态滤波是在图像子块中进行, 因此滤波后在块的边界上会出现块效应。为此本文采用邻域均值法去除块效应, 即将块与块边界处的像素值做均值滤波。设 L, R 是水平方向上的相邻子图像, U, D 是垂直方向上的相邻子图像, 子图像大小为 8×8 , M 和 N 是邻域模板大小, 具体公式如式(16)~(19)所示。

$$L(m, n) = \frac{\sum_{i=0}^{n_0-1} L(m, n-i) + \sum_{i=0}^{n_0-1} R(m, i)}{N} \quad (16)$$

$$0 \leq m \leq 7, n = 7$$

$$R(m, n) = \frac{\sum_{i=0}^{n_0-1} L(m, 7-i) + \sum_{i=0}^{n_0-1} R(m, n+i)}{N} \quad (17)$$

$$0 \leq m \leq 7, n = 0$$

$$m = 7, 0 \leq n \leq 7 \quad (18)$$

$$D(m, n) = \frac{\sum_{i=0}^{m_0-1} U(7-i, n) + \sum_{i=0}^{m_0-1} D(m+i, n)}{M} \quad (19)$$

$$m = 0, 0 \leq n \leq 7$$

图 3 所示为传统同态滤波算法与改进后的单参数分块同态滤波算法的效果对比图, 传统同态滤波算法处理后, 在图像边缘处存在亮度过度增强现象; 经过单参数同态滤波算法处理后, 图像亮度适度增强, 亮度均匀, 且减少了传递函数的调节参数。

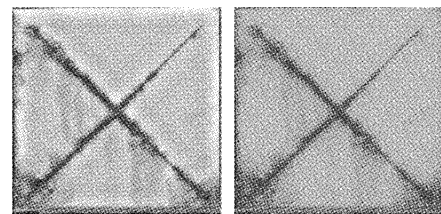


图 3 传统同态滤波与改进同态滤波算法对比图

1.3 多尺度融合

1) 融合权重

本文通过使用 3 种权重确定在融合过程中输入图像所占的比例, 来得到具有显著优势的最佳图像。其分别是拉

普拉斯对比度权重、显著性权重和饱和度权重。

(1) 拉普拉斯对比度权重

通过计算应用于每个输入图像亮度通道上的拉普拉斯滤波器的绝对值来估计全局对比度^[15]。拉普拉斯算子在图像边缘处理方面,具有较强的图像边缘定位能力以及较好的锐化效果。

(2) 显著性权重

显著性权重主要是通过增强明暗区域的对比度,来增强整幅图像的对比度。具体公式为:

$$W_s = \| I_k - I_w \| \quad (20)$$

式中: I_k 为 lab 颜色通道的平均值; I_w 为 lab 颜色通道的经过高斯低通滤波的值。

(3) 饱和度权重

饱和度权重用于调整图像的高饱和区域,以此适应彩色信息。对于每个输入 I_k , 此权重计算 R_k 、 G_k 和 B_k 颜色通道与第 k 个输入的亮度 I_k 之间的偏差:

$$W_t = \sqrt{1/3[(R_k - L_k)^2 + (G_k - L_k)^2 + (B_k - L_k)^2]} \quad (21)$$

(4) 归一化权重

对于每个输入图像 k , 将上述权重进行归一化处理, 具体公式为:

$$W_k = W_t + W_s + W_l \quad (22)$$

$$\overline{W}_k = W_k + \sigma / \sum_{k=1}^2 W_k + \delta \quad (23)$$

式中: W_k 为融合权重值, \overline{W}_k 为归一化权重, σ 和 δ 为常数系数, 为了防止分母为 0, 本文中分别设置为 0.1 和 0.2。

2) 多尺度融合

图像金字塔常用于多尺度融合算法, 整体步骤如下:

(1) 将经过导向滤波和单参数分块同态滤波的图像分解成拉普拉斯金字塔; (2) 将 2 张归一化权重图分解成高斯金字塔; (3) 将拉普拉斯金字塔和权重金字塔在各 l 层进行融合, 得到多尺度融合图像 $R_l(x)$ 。

$$R_l(x) = \sum_{k=1}^k G_l[\overline{W}_k(x)] * L_l[L_k(x)] \quad (24)$$

式中: l 为金字塔层数, k 为输入图像数目, G 为高斯金字塔分解, L 为拉普拉斯金字塔分解。

2 实验结果与分析

为了验证所提算法对低照度腐蚀图像增强的有效性和优良性, 本文选取用于自动科学评估材料的腐蚀图像数据集^[16]中部分低照度腐蚀图像作为实验图像, 该数据集是一个独特的数据集, 是第一个开放的用于材料的自动化科学评估腐蚀等级的数据集。本文选择同态滤波、自适应直方图均衡化 (adaptive histogram equalization, AHE)、和文献[17]等方法进行对比分析。对于不同图像增强算法效果的评价, 本文采用主观感受评价和客观评价进行综合评价, 即用人眼观察增强效果和利用图像评价指标评价。

2.1 主观评价

图 4~6 所示为原始金属腐蚀图像在不同算法下的增强效果对比, 图 4~6 的图 (b) 为同态滤波后的增强图像, 对比原图可以看出图像整体亮度明显提升, 但是整体亮度和腐蚀边缘处都存在过度增强; 图 4~6 的图 (c) 为 AHE 算法增强后的图像, 从图中可以看出亮度和对比度获得了改善, 但是存在亮度分布不均匀以及亮度提升不够; 图 4~6 中的图 (d) 为文献[17]方法, 虽然有效地改善了整体亮度, 但对比度不明显, 不利于腐蚀细节的体现; 图 4~6 中的图 (e) 为本文算法, 从实验结果图可以看出本文算法在亮度提升和腐蚀细节体现上均有良好改善。

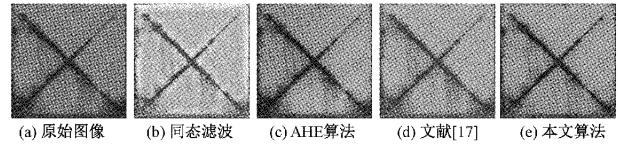


图 4 腐蚀图像 1

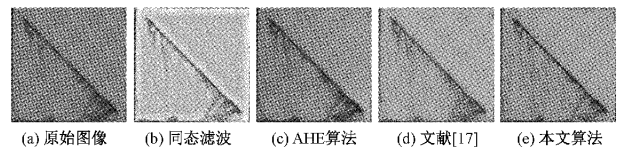


图 5 腐蚀图像 2

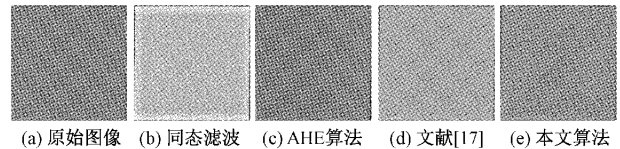


图 6 腐蚀图像 3

2.2 客观评价

为客观定量评价不同图像增强算法, 本文采用图像的信息熵、平均梯度、标准差和均值等图像评价指标来客观评价增强效果。

1) 信息熵。

图像信息熵是体现图像信息量的一个指标, 即熵值越大, 图像所包含的信息量就越多, 图像质量就越好, 如式(25)所示。

$$H = - \sum_{m=0}^{L-1} p(m) \log_2 p(m) \quad (25)$$

2) 平均梯度

平均梯度指的是图像的边界灰度差异^[18], 一般平均梯度越大, 图像层次越明显, 图像中对象边缘细节越清晰^[19], 如式(26)所示。

$$G = \frac{1}{M \times N} \times \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \sqrt{\frac{(F(i,j) - F(i-1,j))^2 + (F(i,j) - F(i,j+1))^2}{2}} \quad (26)$$

3) 标准差

标准差通常用来做衡量图像对比度高低的一个指标。

标准差越大,说明图像的对比度越高,细节也越丰富,如式(27)所示。

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (F(i, j) - \mu)^2} \quad (27)$$

4)均值

均值是图像所有像素的平均灰度,反映了图像的整体亮度。图像的均值越大,则图像的亮度也越大,如式(28)所示。

$$mean = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g(x, y) \quad (28)$$

实验结果如表 1~2 所示。

表 1 3 组图像的客观评价结果

图像分类	图像标注	算法	信息熵	平均梯度	标准差	均值
腐蚀图像 1	图 3(a)	原图	6.97	4.89	31.61	135.92
	图 3(b)	同态滤波	7.01	6.11	38.34	185.71
	图 3(c)	AHE 算法	7.24	6.12	40.22	151.12
	图 3(d)	文献[17]	7.03	5.34	30.92	166.12
	图 3(e)	本文算法	7.31	6.59	40.68	152.46
腐蚀图像 2	图 4(a)	原图	6.77	5.01	24.92	145.98
	图 4(b)	同态滤波	6.65	5.28	25.37	193.19
	图 4(c)	AHE 算法	6.99	6.25	29.38	155.02
	图 4(d)	文献[17]	6.87	5.35	25.86	172.93
	图 4(e)	本文算法	7.20	6.79	32.22	163.77
腐蚀图像 3	图 5(a)	原图	5.79	4.31	19.14	163.24
	图 5(b)	同态滤波	6.29	5.23	19.87	205.52
	图 5(c)	AHE 算法	6.24	5.20	19.65	161.77
	图 5(d)	文献[17]	5.89	4.46	19.95	188.48
	图 5(e)	本文算法	6.45	6.95	25.33	172.31

表 2 客观指标的平均值分析

算法	信息熵	平局梯度	标准差	均值的
	均值	均指	均值	平均值
原图	6.51	4.73	25.22	148.38
同态滤波	6.51	5.54	27.86	194.81
AHE 算法	6.82	5.86	29.75	155.97
文献[17]	6.60	5.05	25.58	175.84
本文算法	6.99	6.78	32.74	162.85

由表 1~2 数据可知,本文算法的信息熵、均值、平均梯度以及标准差的平均值相较于原图分别提升了 7.4%、9.8%、43.34% 和 29.8%;虽然其他增强方法在图像清晰度、对比度都有不同的增强效果,但本文算法在腐蚀图像的应用上其信息熵、平局梯度和标准差的平均值分别是 6.99、6.78 和 32.74,都优于其他算法。从图像均值的平均值方面看,均值最高的是同态滤波,这是由于同态滤波存在亮度过度增强所导致的,这反而会降低图像质量,所以其信息熵、平均梯度和标准差均值都不如本算法高。因此,相较于上述其他算法,经本文算法处理后的腐蚀图像包含有更多的信息量,腐蚀细节更加突出,亮度改善适中,失真度也较小,本文算法对金属腐蚀图像增强效果的整体性更好。

2.3 算法泛化性测试

为了进一步验证本文算法的鲁棒性,确保其能适应于各种工程环境,选取实验图像为公开图像数据集,主要包括

低照度图像、光照不均匀图像和低对比度图像,使用本文方法以及其他算法进行对比测试,实验结果如图 7~9 所示。对比可知,同态滤波算法存在边缘处过度增强情况,不能达到令人满意的效果;AHE 算法在一定程度上可以改善图像的对比度,但图像亮度偏低;文献[17]算法虽然能有效改善图像光照影响,但存在整体效果偏亮,图像中目标与背景的对比度不明显;而本文算法在这 3 种图像上整体明亮程度改善适中,且对比度和清晰度更高,这也体现了本文算法的鲁棒性,因此可应用于复杂场景下的腐蚀图像增强。



图 7 低照度图像



图 8 光照不均匀图像



图 9 低对比度图像

3 结 论

本文对金属腐蚀图像的增强提出了多尺度融合的引导滤波和单参数分块同态滤波的增强算法,通过引导滤波和HSV模型下的单参数分块同态滤波分别使图像对比度和亮度获得有效改善,再通过多尺度融合实现金属腐蚀图像的增强,同时改善了金属腐蚀图像的亮度、对比度和信息熵,使腐蚀图像的整体质量得到了提升。多尺度融合算法常应用于水下图像增强,本文算法不同于已有文献,将多尺度融合应用于腐蚀图像增强,并提出了单参数分块同态滤波算法,减少同态滤波多参数影响的同时,也改善了同态滤波过度增强的问题。最后,通过实验仿真,实验结果表明本文算法相较于其他算法增强效果明显,能有效改善图像亮度、细节对比度和整体质量,对腐蚀区域的识别度更高,清晰度更高,同时对图像的色彩具有较好的保真度,能有效适用于腐蚀图像增强。下一步的工作主要是对算法降低复杂度,提高时效性。

参考文献

- [1] 陈法法,潘瑞雪,杨蕴鹏,等.基于小波与Retinex原理的锈蚀图像特征增强[J].组合机床与自动化加工技术,2022,(4):20-23,27.
- [2] 张铮,王孙强,熊盛辉,等.结合小波变换和CLAHE的图像增强算法[J].现代电子技术,2022,45(3):48-51.
- [3] 汤浩,朱泓宇,谢超,等.低照度图像增强方法综述[J].林业机械与木工设备,2022,50(7):4-10.
- [4] 郭永坤,朱彦陈,刘莉萍,等.空频域图像增强方法研究综述[J].计算机工程与应用,2022,58(11):23-32.
- [5] 龚云,颀昕宇.一种改进同态滤波的井下图像增强算法[J/OL].煤炭科学技术:1-8[2022-11-17].DOI:10.13199/j.cnki.cst.2021-0774.
- [6] 刘源,夏春蕾.基于改进同态滤波的带钢缺陷亮度不均匀校正算法[J].电子测量技术,2021,44(8):110-114.
- [7] 李连志,邢川.基于同态滤波的平面视觉图像色彩增强算法[J].计算机仿真,2021,38(2):249-252,426.
- [8] 陈法法,刘莉莉,杨蕴鹏,等.基于小波和分块同态滤波的变光照图像增强方法[J].三峡大学学报(自然科学版),2022,44(2):107-112.
- [9] ANCUTI C O, ANCUTI C. Single image dehazing by multi-scale fusion[J]. IEEE Transactions on Image Processing,2013,22(8):3271-3282.
- [10] ANCUTI C O, ANCUTI C, VLEESCHOUWER C D,

et al. Color balance and fusion for underwater image enhancement [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 27(99):379-393.

- [11] 曹义亲,何恬.基于加权引导滤波分层的轨道图像细节增强算法[J].交通信息与安全,2020,38(6):55-62.
- [12] 雷芳,熊建斌,张磊,等.金属腐蚀区域图像增强算法研究[J].智能系统学报,2019,14(2):385-392.
- [13] 张亚飞,谢明鸿.基于HSI和局部同态滤波的彩色图像增强算法[J].计算机应用与软件,2013,30(12):303-307.
- [14] 韩美林,杨琳.基于同态滤波的彩色图像增强算法的改进与实现[J].科技经济市场,2018(8):14-15.
- [15] 林森,迟凯晨,李文涛,等.基于优势特征图像融合的水下光学图像增强[J].光子学报,2020,49(3):209-221.
- [16] YIN B, JOSSELYN N, CONSIDINE T, et al. Corrosion image data set for automating scientific assessment of materials [EB/OL]. British Machine Vision Conference (BMVC). 2021. https://arl.wpi.edu/corrosion_dataset.
- [17] YING Z, LI G, REN Y, et al. A new low-light image enhancement algorithm using camera response model[C]. IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW), 2017:3015-3022.
- [18] 彭熙舜,陆安江,龙纪安,等.结合图像分层与暗通道的雾霾图像增强[J].电子测量技术,2022,45(2):123-128.
- [19] 王智奇,李荣冰,刘建业,等.基于同态滤波和直方图均衡化的图像增强算法[J].电子测量技术,2022,43(24):75-80.

作者简介

李国民,硕士,教授,主要研究方向为通信信号处理、信息技术等。

E-mail:liguomin@163.com

邵姮(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为图像处理。

E-mail:1362847856@qq.com

朱代先,博士研究生,副教授,主要研究方向为智能机器人、嵌入式系统等。

E-mail:zhudaixian@xust.edu.cn

刘佳,博士,副教授,主要研究方向为计算机视觉、图像处理。

E-mail:453256673@qq.com