[文章编号] 1003－4684(2026)02-0014-05

基于梯度引导滤波的低照度图像增强方法

董正琼[1,2]，杨清锋[1,2]，聂 磊[1,2]

(1 湖北工业大学机械工程学院，湖北 武汉 430068；2 现代制造质量工程湖北省重点实验室，湖北 武汉 430068)

[摘 要] 针对低照度图像在增强过程中易出现细节丢失和噪声放大问题，提出一种基于 Retinex 理论的低照度图像增强方法。首先利用高斯滤波函数提取入射分量，再采用 Canny 算子增强入射分量边缘细节并求解对应反射分量；最后通过梯度引导滤波实现降噪处理，抑制增强后图像的噪声与光晕。实验结果表明，该算法可有效增强低照度图像对比度，抑制图像噪声与光晕。

[关键词] 图像增强；Retinex；边缘提取；梯度引导滤波

[中图分类号] TN252 [文献标识码] A

随着计算机视觉与图像处理技术的快速发展，数字图像已成为信息获取与传输的重要途径。然而受拍摄设备、光照条件等因素影响，尤其在低照度环境下，所拍摄图像常存在对比度低、噪声放大等问题[1]，极大影响后续图像信息的提取与分析，因此需对低照度图像进行增强处理[2]。图像增强的核心目的是按实际需求强化图像中有价值的特征信息，使图像有效信息更易于提取与分析[3]。低照度图像指光照条件较差环境下拍摄的图像，其亮度水平显著低于正常光照条件下拍摄的图像。因此，研究一种兼顾亮度增强与边缘细节保留的低照度图像增强方法，具有重要理论意义与应用价值。

常用的图像增强方法主要有直方图均衡算法(histogram equalization，HE)[4]对比度受限的自适应直方图均衡化算法(contrast limited adaptive histogram equalization，CLAHE)[5]、Gamma 校正算法[6]和 Retinex 算法。直方图均衡算法通过均衡原始图像的灰度直方图实现图像增强。CLAHE 在直方图均衡算法的基础上通过限制图像对比度，将图像分块处理实现图像增强。直方图均衡相关方法虽然能增强图像整体对比度，但容易造成图像边缘细节丢失和图像噪声放大[7]。Gamma 校正算法通过对图像的 Gamma 曲线重新编辑，实现低照度图像增强。Gamma 方法虽然可以增强图像亮度，但其增强效果依赖于校正参数的选择，既无法保证局部区域的合理增强，也不具备为不同特征图像提供自适应增强的能力[8]。Land 等[9]提出基于人类视觉的 Retinex 算法，通过将图像分解成入射分量和反射分量来实现图像增强。传统的 Retinex 算法在解决图像光照不均或者色偏方面有着非常出色的效果，但增强后的图像存在颜色失真、噪声放大和图像边缘光滑的问题。

针对传统 Retinex 算法存在的缺陷，众多学者提出改进方法。刘晓阳等[10]通过使用双边滤波器进行入射分量估计以改善图像光晕现象，但双边滤波需要提供的参数较多，难以实现图像自适应增强。岳帅等[11]提出的一种基于高斯引导滤波的 Retinex 图像增强方法，增强了夜间奶牛图像的边缘信息，并可有效抑制图像噪声，但在图像光照突变区域灰度过渡不够自然。陈松等[12]提出了一种基于多尺度双边滤波的 Retinex 图像增强方法，该方法有效提升了散斑图像的图像质量，抑制了非均匀光照对散斑图像的影响。综上，现有图像增强方法在增强图像亮度的同时往往会丢失边缘细节，且存在光晕、噪声放大、边缘模糊等问题。为此，本文提出一种结合 Canny 算子与梯度引导滤波的 Retinex 改进方法，以解决上述问题。

1 本文算法

Retinex 理论基于人眼色彩恒常性与光照不变性建立，其基本数学模型为：

$$S(x,y)=L(x,y)\cdot R(x,y) \tag{1}$$

式中：(x, y)表示图像像素的横、纵坐标；$S(x, y)$为采集到的图像；$R(x, y)$表示物体的反射分量；

[收稿日期] 2024－07－02

[第一作者] 董正琼(1987－)，女，湖北潜江人，工学博士，湖北工业大学讲师，研究方向为光学精密测量。

[通信作者] 聂 磊(1978－)，男，湖北武汉人，工学博士，湖北工业大学教授，研究方向为电子制造可靠性。

$L(x, y)$表示物体的入射分量。为减少计算量，对式(1)两边取对数，可得：

$$\lg R(x,y) = \lg S(x,y) - \lg L(x,y) \tag{2}$$

Retinex 理论中入射分量估计通常通过引入权重函数实现。权重函数可采用多种形式。传统 Retinex 算法采用高斯滤波函数估计图像入射分量，可表示为：

$$L(x,y) = G(x,y) * S(x,y) \tag{3}$$

式中：* 为卷积运算；$G(x, y)$为高斯核，$G(x,y)=\frac{1}{2\pi\sigma^2}\exp(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2})$；$\sigma$ 为尺度参数。

由式(2)、式(3)可知，入射分量的估计是 Retinex 方法的核心。传统 Retinex 方法使用高斯滤波函数作为权重函数估计入射分量，虽能较好提升图像对比度，但高斯滤波器会平滑图像细节，导致图像边缘细节丢失。为解决该问题，本文将图像边缘细节信息与近似入射分量信息融合，作为原图像(图 1)的入射分量，以保留图像边缘细节。

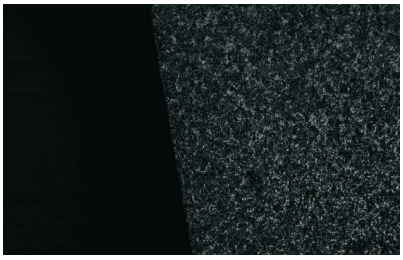
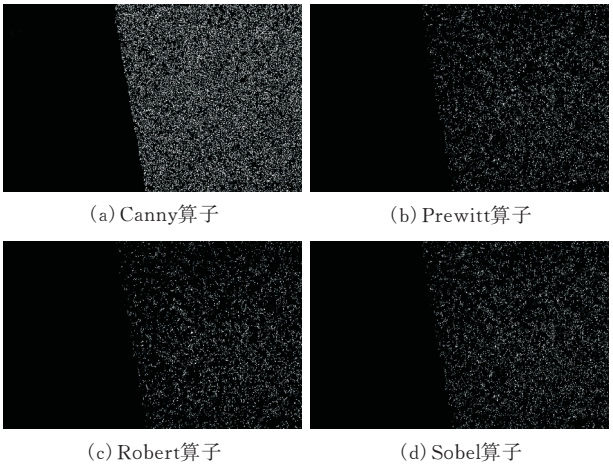


图 1　原始图像

常见图像边缘信息提取函数有 Robert、Sobel、Prewitt 及 Canny[13]。采用上述边缘提取算子处理原图像，结果表明 Canny 算子提取的图像边缘连续性更好、精度更高(图 2)。因此本文选用 Canny 算子提取图像边缘信息。



(a) Canny算子　(b) Prewitt算子

(c) Robert算子　(d) Sobel算子

图 2　不同边缘检测算子提取结果对比

通过 Canny 算子提取原图像边缘细节，检测灰度值为 255 的像素点坐标，找到近似入射分量图像中对应位置，将该位置灰度值设定为原图像在该位置的灰度值，生成融合边缘信息与粗糙入射分量的图像，代入式(2)中，可得到反射分量，即增强图像。

Retinex 图像增强的前提是原图像为光照不变的光滑图像。当图像存在高对比度区域或噪声时，Retinex 增强易产生光晕与噪声放大。为解决该问题，需选用合适滤波方法对反射图像进行处理。与传统滤波方法相比，梯度引导滤波(gradient domain guided filter，GDGF)在去噪的同时能较好地保持图像边缘细节。因此本文选用其对反射分量进行处理[14]。

传统的引导滤波(guided filter，GF)是一种局部自适应线性滤波，具有边缘保持与平滑特性，可表示为：

$$Q_i = a_k h_i + b_k, \forall i \in w_k \tag{4}$$

式中：Q_i 表示输出图像；a_k 表示与梯度相关的权重因子；h_i 表示引导图像；W_k 为以像素 k 为中心、半径为 i 窗口；b_k 为滤波参数。为获取最优滤波参数，需构建损失函数，当损失函数取最小值时，可得最优滤波参数。损失函数：

$$E(a_k, b_k) = \sum[(a_k h_i + b_k - p_i)^2 + \lambda a_k^2] \tag{5}$$

式中：p_i 表示待处理图像；λ 为正则化系数。

由于传统引导滤波中正则化系数 λ 为固定值，处理图像时不可避免会平滑图像边缘。为克服该缺陷，引入边缘能量函数：

$$\varphi_{(i,k)} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{\chi_{(k)}+\alpha}{\chi_{(i)}+\alpha}\gamma_k = 1 - \frac{1}{1+e^{\eta(\chi_{(k)}-\mu(\chi,\infty))}}\eta = 4/(\mu_\chi - \min\chi_{(k)})\phi_{(i,k)} \tag{6}$$

式中：α 是一个常数，与滤波程度成正比；χ_k 表示 W_k 窗口的均值；$\phi_{(i,k)}$ 为图像边缘感知权重；$\mu_{(\chi,\infty)}$ 表示 $\chi_{(k)}$ 的方差；γ_k 表示边缘约束。将式(6)代入式(5)，可得到新的损失函数：

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i\in w_k}[(a_k h_i + b_k - p_i)^2 + \frac{\lambda}{\varphi_{(i,k)}}(a_k - \gamma_k)^2] \tag{7}$$

由式(7)可知，若像素 i 位于图像边缘，则边缘约束 γ_k 通常接近 1，a_k 的数值也接近于 1，使滤波后图像边缘处的像素的灰度值变动较小。因此，相较于传统引导滤波，梯度引导滤波可以更好地的保留图像边缘部分。图 3 为改进 Retinex 算法增强流程图。改进 Retinex 方法先融合边缘信息图像与高斯滤波所得粗糙入射分量图像，优化入射分量估计；再通过梯度引导滤波有效抑制反射分量中的噪声与光晕。

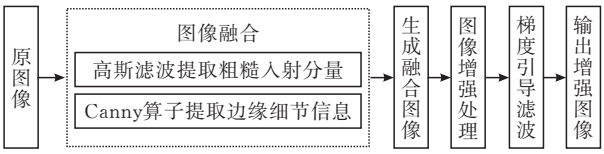
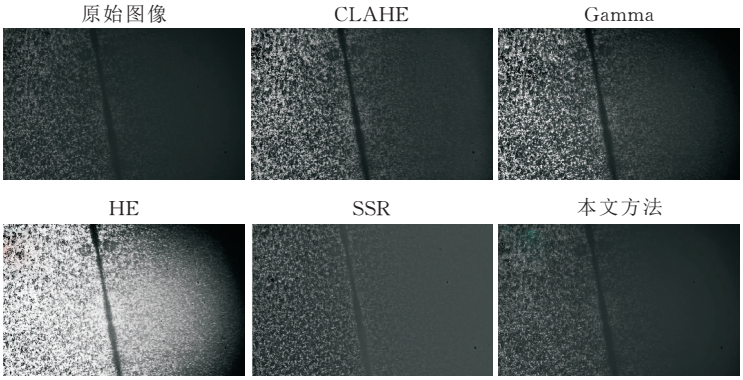


图 3 算法流程

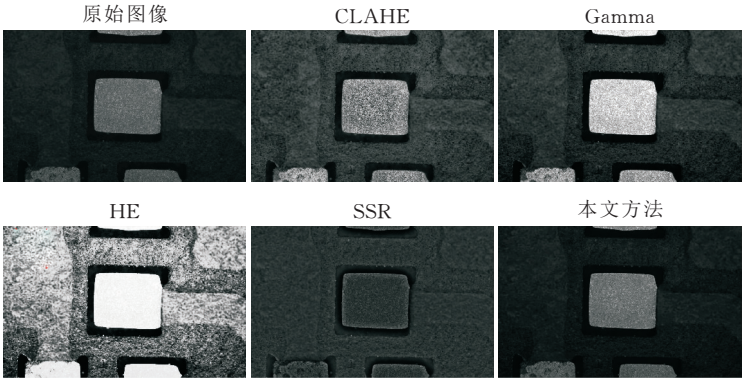
2 对比实验

实验设备相关参数如下：CPU 为 Intel Core I5-13600 K；主频 3.5 GHz；运行内存 32.0 GB；相机型号 Prosilica GT1930，分辨率为 1936×1216，像元尺寸为 5.86 μm。

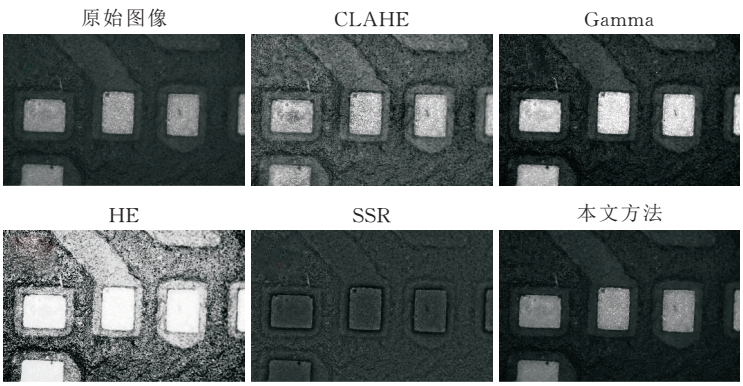
SSR 和本文算法所用高斯滤波核大小为 30，引导滤波引导图像为原图像。实验选取 2 幅低照度下封装基板不同位置图像、1 幅标准台阶图像，分别采用自适应直方图均衡化（CLAHE）、伽马变换（Gamma）、单尺度 Retinex（SSR）、直方图均衡化（HE）与本文方法进行对比实验，增强结果对比如图 4 所示。



(a)图像 1



(b)图像 2



(c)图像 3

图 4 图像增强对比结果

由图 4 可知，经 HE 算法增强后图像亮度提升明显，但细节丢失问题随之出现，尤其是 IC 基板底面的边缘细节受到影响。经 Gamma 图像增强后，图像亮度适中且边缘特征明显，但图像噪声被放大；经 SSR 算法增强后的图像对比度提升较为适中，但在亮度突变区域出现光晕现象；经过 CLAHE 算法图像增强后，图像亮度有明显提升，但整体偏灰，对比度不高。本文算法增强后的图像亮度适中，且图

像边缘特征清晰，无光晕现象。

为更客观评估不同图像增强算法的处理效果，采用定量指标峰值信噪比(PSNR)、信息熵(Entropy)、结构相似性指数(SSIM)进行定量对比分析。

PSNR 用于衡量两张图像之间的差异，表示为：

$$R_{\mathrm{PSNR}}=10\cdot\lg\left(\frac{MN\cdot I_{\max}^{2}}{\sum_{x=1}^{M}\sum_{y=1}^{N}(f(x,y)-g(x,y))^{2}}\right) \tag{8}$$

式中：M、N 分别表示图像宽度与高度；$I_{\max}$取 255；$f(x,y)$和 $g(x,y)$分别表示原始图像和处理后的图像。PSNR 值越大，图像质量越好。

信息熵(Entropy)表示图像包含信息量的指标，表达式为：

$$R_{\mathrm{Entropy}}=-\sum_{i=1}^{n}p(x_i)\lg p(x_i) \tag{9}$$

式中：$p(x_i)$表示取 x_i的概率。熵值越大，表明图像信息越丰富。

结构相似性指数(SSIM)用来衡量待评估图像与参考图像之间的相似性，SSIM 值越大，图像质量越好。其表示为

$$R_{\mathrm{SSIM}}=\left(\frac{2\mu_x\mu_y+c_1}{\mu_x^2+\mu_y^2+c_1}\right)\left(\frac{2\sigma_x\sigma_y+c_2}{\sigma_x^2+\sigma_y^2+c_2}\right) \tag{10}$$

式中：μ_x、μ_y 分别表示初始图像 x 和参考图像 y 的均值；σ_x、σ_y 表示初始图像 x 和参考图像 y 的方差；c_1、c_2 为保证分母非零的常数。

由表 1、表 2 可知，本文算法信息熵值略低于 CLAHE 算法，但峰值信噪比与结构相似性指数均显著优于其他算法。客观评价结果表明：本文低照度图像增强算法在对比度提升、细节保留、噪声抑制方面优势明显。HE 算法可有效提升亮度，但易导致噪声放大与边缘细节丢失，各项指标表现较差；CLAHE 算法因提升整体对比度使信息熵较高，但存在图像偏灰、对比度不足问题；本文算法 PSNR 与 SSIM 显著更高，说明在噪声抑制、结构相似性保持方面优势突出。

3　结论

针对传统低照度图像增强方法存在噪声放大、细节保留差、光晕明显等问题，本文提出一种基于 Retinex 的低照度图像增强方法。该方法先通过高斯滤波获取粗糙入射分量，再结合 Canny 算子优化入射分量估计，将优化后的入射分量与原图像在对数域作差，得到增强图像，最后采用梯度引导滤波对增强图像降噪，抑制噪声与光晕。实验结果表明，本文方法所得低照度图像特征信息更丰富、细节保留效果好、无光晕现象，可有效抑制噪声。部分低照度图像经本文算法增强后，亮度提升效果不明显，后续将针对该问题开展进一步研究。

表 1　峰值信噪比评价结果　　dB

PSNR	CLAHE	Gamma	HE	SSR	本文方法
图像 1	18.58	17.07	7.03	20.38	28.79
图像 2	19.10	16.14	6.98	21.89	34.60
图像 3	17.62	19.50	8.30	18.52	28.18

表 2　信息熵评价结果

Entropy	CLAHE	Gamma	HE	SSR	本文方法
图像 1	6.25	5.06	4.70	5.46	5.53
图像 2	6.55	5.17	4.74	5.32	5.45
图像 3	7.13	5.72	5.20	5.32	5.80

表 3　结构相似性系数评价结果

SSIM	CLAHE	Gamma	HE	SSR	本文方法
图像 1	0.76	0.72	0.25	0.83	0.93
图像 2	0.73	0.81	0.26	0.83	0.97
图像 3	0.66	0.86	0.30	0.89	0.93

[参　考　文　献]

[1] 徐少平，张贵珍，林珍玉，等.一种多图像局部结构化融合的低照度图像增强算法[J].自动化学报，2022，48(12)：2981-2995.

[2] YANG Y C，ZHAN W D，ZHU D P.Low-illuminance image processing based on brightness channel detail enhancement[J]. Laser & Optoelectronics Progress，2021，58(04)：0410001.

[3] 王浩，张叶，沈宏海，等. 图像增强算法综述[J].中国光学，2017，10(04)：438-448.

[4] 董丽丽，丁畅，许文海. 基于直方图均衡化图像增强的两种改进方法[J]. 电子学报，2018，46(10)：2367-2375.

[5] REDDY E，REDDY R. Dynamic clipped histogram equalization technique for enhancing low contrast images[J].Springer India，2019(04)：679-698.

[6] FARID H. Blind inverse gamma correction[J]. IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society，2001，10(10)：1428-1433.

[7] 王少东，吴春林，刘永城，等. 结合加权引导滤波和小波变换的低照度图像增强算法[J].湖北工业大学学报，2023，38(05)：14-18.

[8] 何磊，易遵辉，谢永芳，等. 基于 Retinex 先验引导的低光照图像快速增强方法[J].自动化学报，2024，50(05)：1035-1046.

[9] LAND E H E. Lightness and retinex theory[J]. Journal of the Optical Society of America，1971，61(01)：1-11.

[10] 刘晓阳，乔通，乔智. 基于双边滤波和 Retinex 算法的矿井图像增强方法[J].工矿自动化，2017，43(02)：49-54.

[11] 岳帅，秦立峰. 基于高斯引导滤波 MSRCR 的奶牛夜间

低质量图像增强方法[J].黑龙江畜牧兽医,2024(08):37-45.
[12] 陈松,温宇鑫,安浩铭.基于多尺度双边滤波 Retinex 的非均匀光照散斑图像矫正[J].激光技术,2024,48(03):1-16.
[13] 肖扬,周军.图像边缘检测综述[J].计算机工程与应用,2023,59(05):40-54.
[14] DOGRA A, KUMAR S. Multi-modality medical image fusion based on guided filter and image statistics in multidirectional shearlet transform domain[J].Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing,2022(01):1-15.

Gradient Guided Filtering Based Low Illumination Image Enhancement Method

DONG Zhengqiong[1,2], YANG Qingfeng[1,2], NIE Lei[1,2]
(1 *School of Mechanical Engineering, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*;
2 *Key Lab of Modern Manufacture Quality Engineering, Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: In the process of image enhancement, in order to solve the problem of detail loss and noise amplification that easily occurs in low illumination images, this paper proposes a Retinex-based low illumination image enhancement method. First, the Gaussian filter function is used to extract the incident component, and then the Canny operator is used to enhance the edge details of the incident component and obtain the corresponding reflection component; finally, the gradient-guided filtering is used to perform the noise reduction process, which suppresses the noise and halo phenomenon of the enhanced image. The experimental results show that the algorithm can effectively enhance the contrast of low-light images and suppress image noise and halo phenomenon.

Keywords: image enhancement; Retinex; edge extraction; gradient guided filtering

[责任编校:张 众]

(上接第 13 页)

Online Detection of End Mill Bottom Wear Based on Machine Vision

FU Qiang, ZHU Chuanjun, ZHOU Zixuan
(*School of Mechanical Engineering, Hubei Univ. of Tech., Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: In order to solve the problems of manual operation and shutdown detection of measuring tool wear in actual production, it realizes efficient and accurate monitoring of the wear status of milling cutters, finds the best tool replacement time, and reduces processing costs. Based on machine vision technology, an automatic online acquisition platform for tool wear images is built to collect high-definition images of the bottom surface of the three-flute end mill from new to completely worn, and a dataset containing 300 images is constructed. The acquired images were preprocessed in turn, such as cropping, rotation correction, contrast enhancement and denoising, the key features were extracted by Hough transform and Canny edge detection, and the algorithm with ECA Net attention mechanism was used to segment the wear area, and then the average width of the wear area was calculated. The cutting experiment was carried out in the Baoji MLV600 machining center, and the wear detected by the monitoring system was compared with the measurement results of the industrial camera, and the measurement deviation was less than 0.01mm, and the average error was 3.82%. With the addition of the ECA-NET attention mechanism, the measured value of the wear area is closer to the true value, and the error in the early and late wear period is more convergent. The proposed online monitoring method of bottom surface wear of end mill based on machine vision has high accuracy and good stability, which can be effectively applied to the real time monitoring of tool wear status in milling and provides reliable technical support for actual production.

Keywords: machine vision; online detection; algorithm; attention mechanisms

[责任编校:张 众]