

doi: 10.7690/bgzdh.2021.02.014

基于人眼视觉响应的低光照图像增强

张子夜¹, 蒲恬², 高原¹

(1. 电子科技大学光电科学与工程学院, 成都 610054; 2. 电子科技大学信息与通信工程学院, 成都 610054)

摘要: 为解决光照图像可视信息不足的问题, 提出一种基于人眼视觉响应的图像增强算法。利用导向滤波对图像亮度通道的反相图进行局部平滑计算掩模, 根据亮度通道的全局均值和标准差计算关键参数, 对图像光亮度通道进行自适应曲线调整, 全面提升动态范围。通过增强前后的亮度通道计算颜色饱和度增益和偏差进行颜色校正, 结合灰度直方图分布进一步拉伸全局对比度。采用 SSIM、VLD 和 MOS 评价指标对不同图像增强方法结果进行对比。实验结果表明: 该算法对低光照图像具有良好的增强效果, 能够有效增强图像亮度和细节, 提高视觉可视性。

关键词: 人眼视觉响应; 低光照图像; 曲线调整; 对比度增强; 颜色校正

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Low-light Image Enhancement Based on Eye Intensity Response

Zhang Ziyue¹, Pu Tian², Gao Yuan¹

(1. School of Optoelectronic Science & Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 610054, China; 2. School of Information & Communication Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: There is a lack of visibility for low-light image, for solving this problem, put forwards the image enhancement method based on eye intensity response. The guided filter is used to calculate the partial mask by the inverse version of luminance component. With global average value and standard value of luminance channel to calculate key parameter, carry out adaptive curve adjustment for image luminance-channel and improve dynamic range. A color correction is carried out by calculating enhanced luminance channel color saturation gain and offset. Depend on the grey histogram distribution to further stretch the global contrast. Use SSIM, VLD and MOS evaluation index to compare different image enhancement methods. The test results show that the algorithm has good enhancement effect on low-light images, can effectively enhance image brightness and details, and improve visibility of low-light image.

Keywords: eye intensity response; low-light images; light enhancement curve; contrast enhancement; color correction

0 引言

在光照不理想的环境中拍摄图像, 由于曝光不足, 以及现有的大多数成像设备有限的动态范围, 与实际场景中照明不均匀动态范围之间存在差异, 往往造成图像对比度降低, 能见度受限, 大量细节信息不能合理显现, 使得图像质量严重退化^[1]。由于在许多实际应用中, 如监视、日常摄影、航空成像和图像识别等, 提高图像的可见性是为后续图像分析提供一个重要的预处理步骤^[2]; 因此, 低光照图像增强具有重要的现实意义和广阔的应用价值。

早期的图像增强方法, 大多侧重于全局增强, 从图像的暗区域中提取细节, 期望通过寻找一个全局映射函数来调整灰度, 例如伽马校正、对数变换和 sigmoid 函数曲线映射等^[3]。这些方法的主要缺点是没有考虑局部内容, 图像的每一个像素值都按照单一的变换函数进行变换, 常造成令人不快的过

度增强结果。Huang 等^[4]将传统伽马校正与直方图累积分布函数相关联, 提出一种加权分布自适应伽马校正方法 (adaptive Gamma correction with weighting distribution, AGCWD)。尽管增强了对比度, 保持了图像整体亮度, 但输出图像的亮度受到输入图像灰度分布的限制, 仍然存在处理结果不够自然的问题。

笔者提出一种基于人眼视觉感知的低光照图像增强方法, 兼顾图像邻域像素灰度信息和全局统计分量, 根据图像不同特征, 动态设置相关参数, 产生不同的亮度增强曲线, 提高图像对比度。

1 背景-人眼视觉响应

人眼对于光线亮度的响应是非线性的。在背景亮度很小的情况下, 往往很小的亮度改变就会产生较强烈视觉刺激的变化, 而在背景亮度较为巨大的场景, 视觉刺激趋于饱和, 所以在强光下, 人眼对

收稿日期: 2020-08-31; 修回日期: 2020-10-10

基金项目: 四川省科技计划(2019YFG0307)

作者简介: 张子夜(1996—), 女, 四川人, 学士, 从事图像信息处理研究。E-mail: zhangzhangzzy@gmail.com。

于亮度的变化并不敏感，即人眼视觉所感知的信号来源于场景内亮度的相对变化。

一般来说，人眼在感知光刺激的响应过程中，产生细胞响应需要信号强度有一个最小可觉察变化。在实验基础上，Stevens^[5]提出一种描述强度和感知信号之间的幂率模型：

$$S = k \cdot I^a \tag{1}$$

其中： S 为感知信号强度； I 为输入强度；指数 a 和比例系数 k 由物理刺激类型决定，实际使用中一般设为常数。图像作为一种非均匀刺激，通过不同区域之间灰度级的差异来传递信息，激发视觉响应。人眼在目视观察时，视觉系统将场景的亮度值映射到合适区间，实现图像动态范围的自动调整，从而感知信息。

2 低光照图像增强方法

受人眼视觉响应机制的启发，笔者提出一种基于视觉响应模型映射曲线的亮度增强方法，具体流程如图 1 所示。主要步骤(图中虚线框部分)包括：图像经过颜色空间转换后，对于图像亮度通道，计算局部的掩模(mask)以获得局部信息，以及全局统计分量，以获得全局背景信息，利用这些信息设计视觉响应模型的参数，从而实现图像的自适应增强。

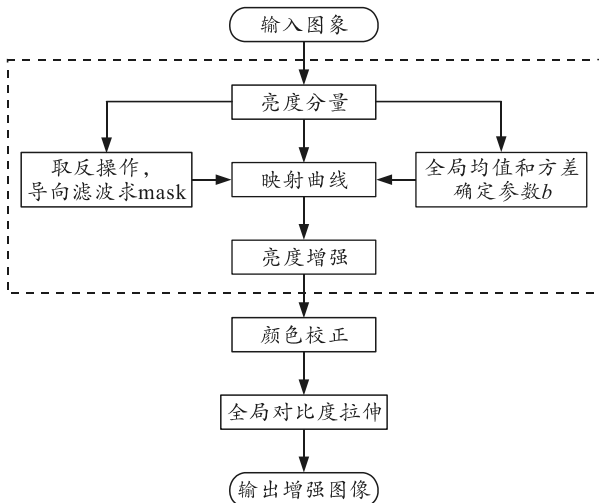


图 1 整体流程

2.1 亮度增强映射曲线

由图 1 中虚线框部分所示，利用图像亮度通道的局部分布调节不同区域的亮度感知，对亮度通道进行自适应灰度映射，以实现低光照区域和过亮区域进行提升和抑制，映射函数数学式如下：

$$I_{out}(x, y) = 255 \cdot (I_{in}(x, y) / 255)^{a(x, y, \text{mask}(x, y))},$$

$$a(x, y, \text{mask}(x, y)) = b^{((128 - \text{mask}(x, y)) / 128)} \tag{2}$$

其中： b 为大于 1 的常数； $\text{mask}(x, y)$ 为输入图像的反相图的结构分量。考虑到像素邻域内的局部纹理信息，同时保持图像轮廓特征，利用导向滤波^[6]进行保边模糊，以提取局部背景。当 $\text{mask}(x, y) > 128$ 时， $a < 1$ ，输出灰度值大于对应输入像素点的灰度值；当 $\text{mask}(x, y) < 128$ 时， $a > 1$ ，输出灰度值小于对应输入像素点的灰度值；当 $\text{mask}(x, y) = 128$ 时，表示处于理想亮度区域， $a = 1$ ，输出灰度值保持不变。

由式(2)得到的非线性灰度映射曲线如图 2 所示。对于暗区域，模拟人眼视觉响应曲线将像素值进行提升，对于过亮区域将像素值进行一定的抑制，而对于成像质量良好的中间区域，保持原本的亮度基本不变。显然，不同的 b 影响输出图像灰度值的映射范围。当 $b = 1$ 时，输出灰度值保持初始输入值不变，与参考基准线 $y = x$ 重合；当 b 取值过大，会造成像素点输出灰度值的倒置，低亮度像素点的输出灰度值大于高亮度像素点的输出；因此， b 一般限制在 $[1, 3]$ 区间。

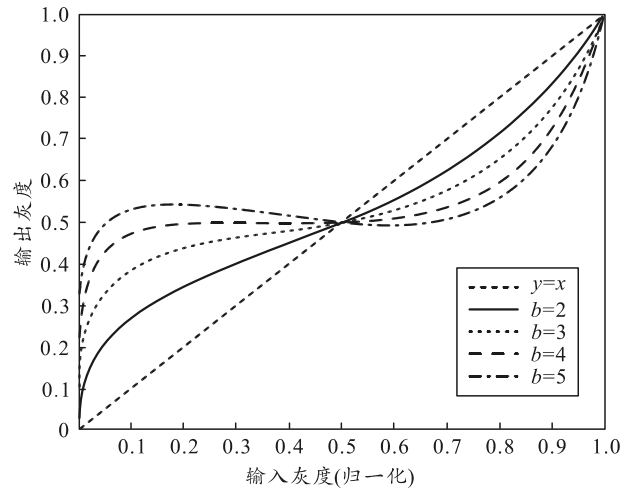


图 2 不同参数 b 对应的映射曲线

对于低对比度的图像，需要更强的提升， b 取值应较大，对于成像相对良好的图像， b 应趋近 1，尽量保持原样。为了满足不同特征输入图像的需要，通过统计亮度通道的均值 μ 和标准差 std ，实现参数 b 的动态设置：

$$b = \begin{cases} \frac{\ln(I_{thr})}{\ln(0.5)}, & I_{thr} < 0.5 \\ \frac{\ln(0.5)}{\ln(I_{thr})}, & I_{thr} \geq 0.5 \end{cases},$$

$$I_{thr} = \max((\mu - \text{std}) / 255, 0.1) \tag{3}$$

2.2 颜色校正

注意到本算法运行于 YCbCr 空间的 Y 通道(亮

度通道)。记 2.1 节亮度通道增强结果为 Y' 。

仅对亮度通道进行处理,再逆变换转换回 RGB 空间,会出现颜色饱和度丢失的现象。为了克服此问题,笔者采用下列颜色校正算法,补偿输出彩色图像的饱和度。根据增强前后的亮度通道计算色度调整因子:

$$w(x,y)=Y'(x,y)/Y(x,y), d(x,y)=Y'(x,y)-Y(x,y)。 (4)$$

结合亮度通道增益 $\omega(x,y)$ 和偏差 $d(x,y)$, 在保持输入图像和输出增强图像的颜色饱和度差异较小的条件下^[7], 折中计算增强后的各颜色通道分量:

$$\left. \begin{aligned} R'(x,y) &= (\omega(x,y) \cdot R(x,y) + d(x,y) + R(x,y))/2 \\ G'(x,y) &= (\omega(x,y) \cdot G(x,y) + d(x,y) + G(x,y))/2 \\ B'(x,y) &= (\omega(x,y) \cdot G(x,y) + d(x,y) + R(x,y))/2 \end{aligned} \right\}。 (5)$$

其中, R', G', B' 分别对应初步增强后图像的各颜色通道, 记初步增强的结果为 I' 。

2.3 自适应色阶调整

统计不同光照强度图像的直方图分布可知: 图像光照越低, 直方图分布在低强度区域越集中。为扩大低光照图像的动态范围, 利用 RGB 各分量的直方图分布, 截取低强度和高强度部分 1% 的集中灰度区间 $[m^c, M^c]$, 综合三通道的截取灰度区间上下界均值 μ_{\max}, μ_{\min} , 确定线性灰度区域拉伸的上下界 \max^c, \min^c :

$$\left. \begin{aligned} \max^c &= M^c + \lambda(\max(M^c, \mu_{\max}) - M^c) \\ \min^c &= m^c + \lambda(\max(m^c, \mu_{\min}) - m^c) \end{aligned} \right\}。 (6)$$

其中: λ 为调和参数, 这里取作 0.8; c 为颜色通道。利用下式对初步增强结果进行自适应色阶调整:

$$I_{\text{final}}^c(x,y) = (255 - 0) \cdot \frac{I'(x,y) - \min^c}{\max^c - \min^c}。 (7)$$

为避免灰度级溢出图像动态范围, 将输出灰度区间拉伸到 $[0, 255]$, 增加溢出判断, 即

$$I_{\text{final}}^c(x,y) = \begin{cases} 0, & I_{\text{final}}^c(x,y) < 0 \\ 255, & I_{\text{final}}^c(x,y) > 255 \end{cases}。 (8)$$

至此, 得到最终低质图像增强结果 $I_{\text{final}}(x,y)$ 。进一步增强图像的对比度和光影效果, 消除图像原本的雾感, 使得输出图像更清晰自然。

3 实验结果与讨论

笔者从主观评价和客观定量评价 2 个方面, 对文中提出的图像增强方法与近年的 5 种最新算法进

行对比。参与对比的算法具体包括: 基于局部直方图的 AGCWD, 基于非线性扩散滤波的对比度增强 (contrast enhancement by nonlinear diffusion filtering, CENDF)^[8], 利用相机响应模型的低光照图像增强算法 (low-light image enhancement using camera response model, LECARM)^[9], 基于全变分约束光照估计的低光照图像增强算法 (low-light image enhancement via illumination map estimation, LIME)^[10], 以及另外一种基于中心环绕对比度机制的图像增强算法 (perceptually motivated enhancement method, PME A)^[11]。为了保证对比的准确和公平, 这些算法的程序代码均源自作者, 并且算法中的参数设置与算法的原文中所提供的一致。

笔者选取了 7 张具有代表性的图像, 涵盖机场、道路、人物、自然风光等不同场景。这些图像都具有低照度、逆光以及光照不均等问题。将这些图片分别用笔者提出的算法以及前面提到的其他 5 种增强算法进行处理, 得到增强图像。处理的结果如图 3 所示, 其中每一列对应着不同算法的处理结果, 每一行分别对应不同输入的样本图像。

3.1 主观评估

由图 3 的处理结果可见: 笔者提出的算法对于不同场景下的低光照图像均能得到有效增强, 图像亮度明显提高, 原本暗区域的细节纹理信息得到增强。AGCWD 和 CENDF 算法结果, 能对图像的局部区域进行增强, 但对图像中较暗的区域仍无法实现有效的可视质量提升。LIME 和 LECARM 能够实现图像整体亮度显著提升, 但在某些原本曝光良好的区域, 会造成处理结果的过增强效应, 甚至图像边缘会产生光晕效应, 例如图 3 最后一行的人物图像, 过增强效应较为明显。另外对于第一行测试样例的夜景图像, LIME 还会在增强图像亮度的同时, 对噪声进行过度增大。PMEA 算法的结果与文中算法结果在对比度增强方面相似, 对不同测试图像均能达到较好的处理效果, 但从颜色失真角度分析, 笔者提出的算法对图像的色彩保持得更好, 对于图像中的天空区域, 明显看出 PME A 使得结果颜色过饱和。通过对比可知: 文中算法能够有效控制亮度提升的程度, 提高图像对比度, 避免颜色失真, 达到整体令人满意的视觉效果。

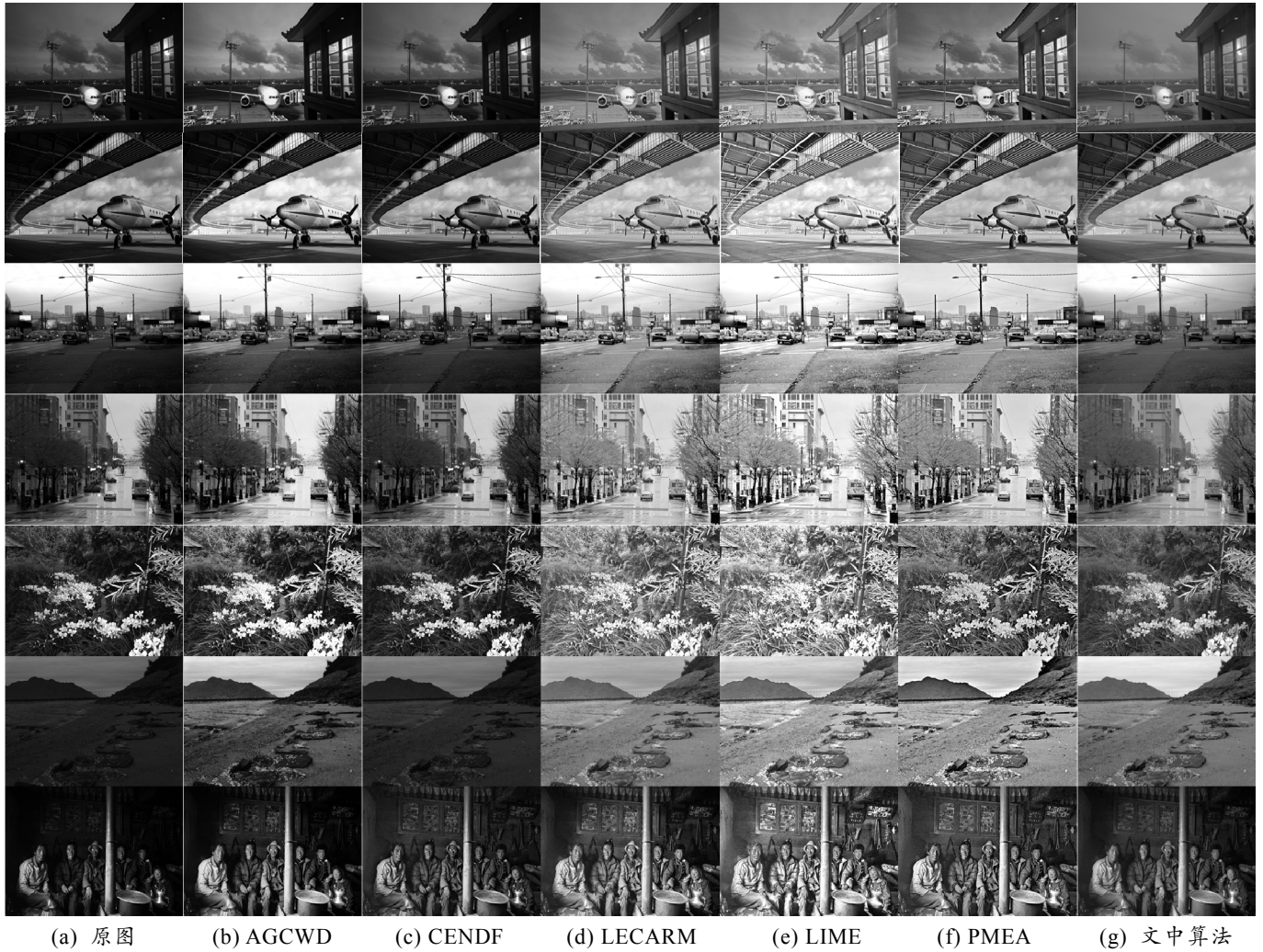


图 3 图像增强算法结果对比

3.2 定量评估

笔者分别使用无参考(no-reference, NR)、全参考(full-reference, FR)评价指标,以及平均主观意见评分(mean opinion score, MOS),分别量化图 3 中不同图像增强算法的可靠性。在 MOS 评测中,随机选取 10 幅低光照图像组成集合,依次分配给 10 名观察者。对于每一幅图像,用这些比较方法分别得到 6 幅增强结果。观察者被要求根据自己的判断,从 1(最差)到 5(最好)给这 6 张图片打分。观察者在完成当前图像之前不能判断下一组图像。每一种比较方法的 MOS 得分见表 1。

表 1 主观评分定量比较

方法	AGCWD	CENDF	LECARM	LIME	PMEA	文中算法
MOS	2.4	2.1	3.2	2.9	3.3	3.4

从表可以看出: LECARM、PMEA 和笔者提出方法的 MOS 值较高,基本都能达到 3 分以上,在感知评价中具有优势。

全参考图像质量评价是一种具有参考图像的评价方式,通过对比 2 幅图像的差异,实现对处理结果的评估。全参考图像客观评价指标主要以统计量为基础,结合亮度、对比度和结构信息来评价图像质量好坏。笔者选取结构相似性(structural similarity index measure, SSIM)^[12]和能见度水平描述子(visibility level descriptor, VLD)^[13]对增强结果的整体结构保持和可视细节恢复情况做进一步评价。SSIM 结果对比如表 2 所示。

表 2 SSIM 结果对比

图像	AGCWD	CENDF	LECARM	LIME	PMEA	文中算法
机场 1	0.59	0.52	0.82	0.63	0.87	0.65
机场 2	0.57	0.49	0.75	0.59	0.86	0.63
公路	0.59	0.54	0.86	0.65	0.75	0.83
街道	0.26	0.28	0.55	0.42	0.57	0.42
绿植	0.56	0.48	0.82	0.61	0.75	0.80
沙滩	0.64	0.45	0.79	0.56	0.78	0.80
人物	0.20	0.29	0.71	0.37	0.49	0.54

SSIM 通过计算图像块的平均灰度、信号强度

和信号结构，来衡量图像对比度信息，其值越高，代表对比度增强效果越好。从表中可以看出：笔者提出的算法得分大多占据第一或第二的位置，对于大多数低光照图像都能有较好的表现。

VLD 常用来衡量对比度的增强，大于 1，则表示图像的细节特征有所增强，其值越大，可见性越好。观察表 3，文中算法大部分也获得第一或第二的评分，此项评估中，LIME 算法的得分普遍较高。这是由于 LIME 倾向于增强图像边缘，故评分较高。结合表 2 的结果与主观评估，文中算法在一定程度上能够抑制过增强效应，避免增大噪声，在保持与输入图像整体结构相似的情况下，输出增强结果所包含的信息量有所提升，图像质量得到有效提高。

表 3 VLD 结果对比

图像	AGCWD	CENDF	LECARM	LIME	PMEA	文中算法
机场 1	1.20	1.26	1.29	1.38	1.30	1.28
机场 2	1.27	1.29	1.32	1.45	1.41	1.33
公路	1.37	1.31	1.41	1.46	1.42	1.45
街道	1.18	1.26	1.45	1.39	1.39	1.41
绿植	1.33	1.29	1.47	1.46	1.43	1.53
沙滩	1.27	1.25	1.46	1.44	1.41	1.49
人物	1.23	1.19	1.23	1.32	1.26	1.28

由于图像增强一般难以得到理想清晰图像作为参考，因此，笔者选取自然图像评价指标(natural image quality evaluator, NIQE)^[14]来对图 3 的 5 幅图像进行无参考图像情况下的定量评价，结果如表 4 所示。

表 4 NIQE 结果对比

图像	AGCWD	CENDF	LECARM	LIME	PMEA	文中算法
机场 1	17.25	19.98	23.83	22.57	23.41	19.40
机场 2	13.15	13.46	13.13	12.47	13.10	12.76
公路	16.62	17.48	17.79	16.77	17.06	16.29
街道	21.31	18.00	20.57	20.06	19.95	18.17
绿植	16.29	17.02	17.33	17.29	18.28	16.22
沙滩	18.69	19.95	22.74	21.88	21.10	19.99
人物	16.39	21.94	22.84	25.59	24.97	20.83

NIQE 用来衡量图像的畸变和噪声，其值越小越好。从表中可知：文中算法的指标值大多获得第一或第二的排名，对于大部分图像能够有效避免失真，使处理结果更自然。

综上所述：较之于其他算法，笔者提出的方法优势在于增强后的图像处理结果更接近人眼对场景的理解，对于光照不均匀分布的修正程度相对更自然，算法稳定，计算方面仅涉及点映射调整，处理速度较高。

4 结束语

基于人眼视觉响应属性，笔者提出一种有效的低光照图像增强方法。结果显示：该方法具有较高的适用性，低光照图像质量显著增强，能够有效凸显图像细节，提高场景内容可视性。

参考文献：

- [1] HORIUCHI T, TOMINAGA S. HDR image quality enhancement based on spatially variant retinal response[J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2010, 110: 1-11.
- [2] 黄少罗, 张建新, 卜昭锋. 机器视觉技术军事应用文献综述[J]. 兵工自动化, 2019, 38(2): 16-21.
- [3] 冈萨雷斯, 伍兹, 埃丁斯, 等. 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 64-77.
- [4] HUANG S C, CHENG F C, CHIU Y S. Efficient contrast enhancement using adaptive gamma correction with weighting distribution[J]. IEEE transactions on image processing, 2012, 22(3): 1032-1041.
- [5] STEVENS S S. On the psychophysical law[J]. Psychological review, 1957, 64(3): 153.
- [6] HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2012, 35(6): 1397-1409.
- [7] MORONEY N. Local color correction using non-linear masking[C]//Color and Imaging Conference. Society for Imaging Science and Technology, 2000: 108-111.
- [8] LIANG Z, LIU W, YAO R. Contrast enhancement by nonlinear diffusion filtering[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 25(2): 673-686.
- [9] REN Y, YING Z, LI T H, et al. LECARM: Low-light image enhancement using the camera response model[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2018, 29(4): 968-981.
- [10] GUO X, LI Y, LING H. LIME: Low-light image enhancement via illumination map estimation[J]. IEEE Transactions on image processing, 2016, 26(2): 982-993.
- [11] PU T, WANG S. Perceptually motivated enhancement method for non-uniformly illuminated images[J]. IET Computer Vision, 2017, 12(4): 424-433.
- [12] HORE A, ZIOU D. Image quality metrics: PSNR vs. SSIM[C]//2010 20th international conference on pattern recognition. IEEE, 2010: 2366-2369.
- [13] HAUTIERE N, TAREL J P, AUBERT D, et al. Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at visible edges[J]. Image Analysis & Stereology, 2008, 27(2): 87-95.
- [14] MITTAL A, SOUNDARARAJAN R, BOVIK A C. Making a "completely blind" image quality analyzer[J]. IEEE Signal processing letters, 2012, 20(3): 209-212.