

引用格式: TIAN Hui-juan, CAI Min-peng, GUAN Tao, *et al.* Low-light Image Enhancement Method Using Retinex Method based on YCbCr Color Space[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(2): 0210002

田会娟,蔡敏鹏,关涛,等.基于 YCbCr 颜色空间的 Retinex 低照度图像增强方法研究[J].光子学报,2020,49(2):0210002

# 基于 YCbCr 颜色空间的 Retinex 低照度 图像增强方法研究

田会娟<sup>1,2</sup>,蔡敏鹏<sup>2,3</sup>,关涛<sup>2,3</sup>,胡阳<sup>1,2</sup>

(1 天津工业大学 电子与信息工程学院,天津 300387)

(2 大功率半导体照明应用系统教育部工程研究中心,天津 300387)

(3 天津工业大学 电气工程与自动化学院 天津市电工电能新技术重点实验室,天津 300387)

**摘 要:**针对 Retinex 理论的低照度图像增强算法中光照图像估计问题,提出一种基于 YCbCr 颜色空间的低照度图像增强方法.该方法将原始低照度图像从 RGB(Red Green Blue)颜色空间转换到 YCbCr 颜色空间,提取该空间中 Y 分量构建为原始光照图像分量  $L_1(x, y)$ ,并对  $L_1(x, y)$  进行 Gamma 校正得到增强的光照图像分量  $L_2(x, y)$ ,经 Retinex 模型得到增强图像  $R(x, y)$ ,采用多尺度细节增强方法对图像  $R(x, y)$  进行细节增强,得到最终增强图像  $R_e(x, y)$ .实验结果表明,所提方法不仅能有效提升亮度,避免亮度和色彩失真,增强了图像的细节信息并获得了更好的视觉效果,而且运行速度快.

**关键词:**Retinex 模型;图像增强;光照估计;Gamma 校正;细节增强

中图分类号:TP391

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204902.0210002

## Low-light Image Enhancement Method Using Retinex Method Based on YCbCr Color Space

TIAN Hui-juan<sup>1,2</sup>, CAI Min-peng<sup>2,3</sup>, GUAN Tao<sup>2,3</sup>, HU Yang<sup>1,2</sup>

(1 School of Electronics and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

(2 Engineering Research Center of Ministry of Education on High Power Solid Lighting Application System, Tianjin 300387, China)

(3 Tianjin Key Laboratory of Advanced Electrical Engineering and Energy Technology, School of Electrical Engineering and Automation, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of illumination image estimation in low-light image enhancement algorithm of the Retinex model, a low-light image enhancement method based on YCbCr color space is proposed. The original low-light image is transformed from RGB (Red Green Blue) color space to YCbCr color space. The Y component in YCbCr color space is extracted and the initial illumination map  $L_1(x, y)$  is constructed. The enhanced illumination image  $L_2(x, y)$  is obtained by the gamma transformation of  $L_1(x, y)$ , the enhanced image  $R(x, y)$  is obtained according to the Retinex model, and we use a multi-scale approach to boost the details of the image  $R(x, y)$  and obtain the final enhanced image  $R_e(x, y)$ . The experimental results show that, the method can not only effectively improve the brightness of the low-light images, enhance the details of the image, obtain a better visual effect with fewer color and lightness distortions, but also has a faster running speed.

**Key words:** Retinex model; Image enhancement; Illumination estimation; Gamma correction; Detail

基金项目:国家自然科学基金(No.61504095)

第一作者:田会娟(1979-),女,副教授,博士,主要研究方向为光电检测与控制技术. Email: tianhjgx@126.com

收稿日期:2019-10-25;录用日期:2019-11-20

<http://www.photon.ac.cn>

boosting

OCIS Codes: 100.2980; 100.2000; 100.3010; 100.3020

## 0 引言

低照度环境下拍摄的图像,常存在曝光不足且伴有光照不均匀的现象,由于其亮度、对比度较低且含有噪声,给后续图像处理带来了严峻挑战<sup>[1]</sup>.因此,低照度图像增强一直是人们关注的热点,具有十分重要的理论意义和应用价值.

目前低照度图像增强算法主要有 3 类:基于直方图均衡化的方法,基于去雾模型的方法,基于 Retinex 理论的方法.直方图均衡化方法<sup>[2]</sup>能有效提升图像暗区亮度,对于对比度小的图片增强效果明显,但对于直方图有高峰的图像,直方图均衡化处理后会过度增强,同时由于灰度级合并易造成图像细节丢失.DONG X 等<sup>[3]</sup>基于去雾模型的方法对低照度图像进行增强,主要通过对低照度图像进行翻转、去雾,实现低照度图像增强.基于去雾模型的方法虽对低照度图像有较好的增强效果,但增强后的图像易在边缘出现伪影.基于 Retinex 理论的方法<sup>[4-5]</sup>是一种目前比较流行的低照度图像增强算法.基于 Retinex 理论对图像进行处理的算法,都是围绕如何更准确、合理地将亮度分量从原始图像中提取出来<sup>[6]</sup>.学者们先后采用不同的光照分量估计方法发展出了不同的 Retinex 算法.JOBSON D J 等<sup>[7]</sup>应用高斯平滑函数估计原图像的亮度分量,提出单尺度 Retinex (Single Scale Retinex, SSR)算法, LIN H 等<sup>[8]</sup>将多个不同尺度的 SSR 线性加权求和提出多尺度 Retinex 算法.PETRO A B 等<sup>[9]</sup>提出带色彩恢复的多尺度 Retinex 算法,该算法对低照度图像有很好的增强效果,但图像的颜色会偏离原始色彩,整体颜色偏白<sup>[10]</sup>.常猛等<sup>[11]</sup>对 Retinex 算法进行改进与扩展,对单张 LDR 图像进行增强,提升了图像对比度和细节.AHN H 等<sup>[12]</sup>用引导滤波代替高斯滤波估计亮度分量,提出 ALTM(Adaptive Local Tone Mapping Based on Retinex for High Dynamic Range Images)算法,能较好保持图像原始色彩.GUO X J 等<sup>[1]</sup>提出了 LIME(Low-Light Image Enhancement Via Illumination Map Estimation)算法,即先在原始低照度图像的 RGB 三个通道中取最大值得到初始光照图像,再通过结构先验不断修正原始光照图,并应用 Gamma 校正调整光照图像,从而得到全局平滑且边缘清晰的光照图像.WANG S 等<sup>[13]</sup>提出了 NPE(Naturalness Preserved Enhancement Algorithm for Non-uniform Illumination Images)算法,该算法使用一个光通滤波器对低照度图像滤波得到光照图像和反射图像,然后用改进的对数变换对亮度图像进行增强.FU X 等<sup>[14]</sup>提出了基于多图像融合的 MF(A Fusion-based Enhancing Method for Weakly Illuminated Images)算法,该算法能有效改善图像局部的对比度,并较好地保持图像自然性.

上述基于 Retinex 理论的低照度图像增强算法关键都是图像光照分量估计,然而,在反射分量未知的条件下,根据原始图像估计光照图像是一个病态问题,估计的光照图像并不完全准确<sup>[15]</sup>.鉴于以上分析,本文提出了一种基于 YCbCr 颜色空间的光照图像估计方法,并对增强的图像应用多尺度细节增强方法实现图像细节增强.在低照度数据集上,将该方法与近几年国内外低照度图像增强方法进行实验对比,从客观和主观方面对实验结果进行分析.

## 1 理论模型

### 1.1 Retinex 模型

Retinex 理论的基本思想是入射光决定了一幅图像中的所有像素点的动态范围的大小,而物体的颜色是由物体表面的反射属性决定,与光照情况无关<sup>[5,16]</sup>.Retinex 模型可表述为<sup>[17]</sup>

$$\mathbf{S}(x, y) = \mathbf{L}(x, y)\mathbf{R}(x, y) \quad (1)$$

$$\mathbf{R}(x, y) = \mathbf{S}(x, y)/\mathbf{L}(x, y) \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{S}(x, y)$  为输入的低照度图像,  $\mathbf{L}(x, y)$  为光照图像分量,  $\mathbf{R}(x, y)$  表示反射图像分量.Retinex 算法旨在通过数学方法去除图像中的光照分量  $\mathbf{L}(x, y)$ , 而获得其反射分量  $\mathbf{R}(x, y)$ , 如图 1 所示.因此,如何准确估计出光照分量是 Retinex 算法的核心步骤.

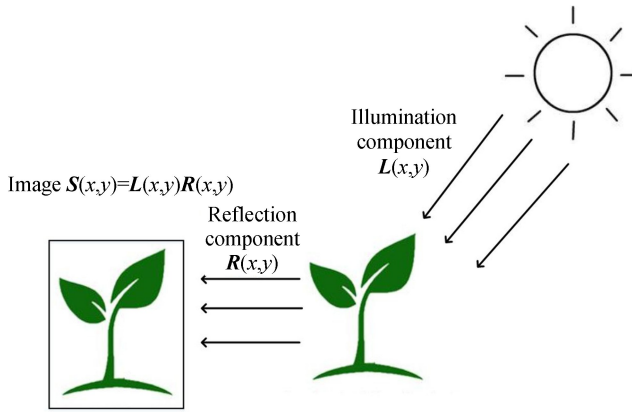


图 1 Retinex 模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of Retinex model

### 1.2 光照图像估计模型

针对 Retinex 算法中光照图像估计问题,本文将低照度图像由 RGB 颜色空间转为 YCbCr 颜色空间,提取 Y 分量构建为初始的光照图像,再通过 Gamma 校正对光照图像进行处理从而获得增强的光照图像.

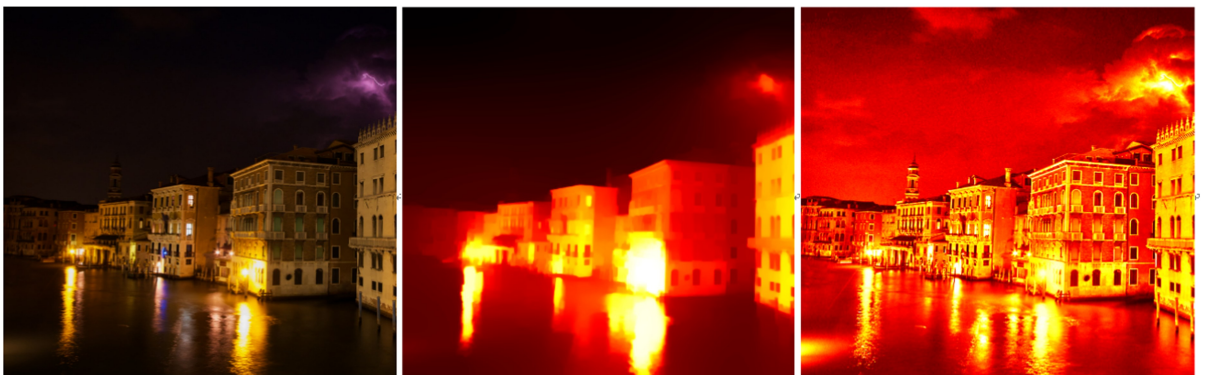
YCbCr 是一种基本的色彩空间,其中 Y 分量指颜色的明视度(Luminance),即亮度(Brightness),Cb 和 Cr 指色度分量,描述图像色彩及饱和度的属性.RGB 与 YCbCr 之间可以相互转化,RGB 颜色空间与 YCbCr 颜色空间之间的映射关系为

$$\begin{bmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.257 & 0.504 & 0.098 \\ -0.148 & -0.291 & 0.439 \\ 0.439 & -0.368 & -0.071 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} \quad (3)$$

同时,YCbCr 与 RGB 之间的转换关系式为

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.164 & 0 & 1.596 \\ 1.164 & -0.391 & -0.813 \\ 1.164 & 2.018 & 0 \end{bmatrix} \times \left[ \begin{bmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} \right] \quad (4)$$

Retinex 算法需要获得图像的光照图像,与 GUO X J 等<sup>[1]</sup>相比,本文不直接由图像的 RGB 值估计光照图像,而是将图像由 RGB 颜色空间转到 YCbCr 颜色空间,提取 Y 分量构建为光照图像.与 RGB 颜色空间相比,YCbCr 颜色空间具有亮度信号 Y 与色差信号 Cb、Cr 分离的特性.图 2 给出了 GUO X J 等<sup>[1]</sup>提出的算法和本方法得到的图像增强结果,从图 2 中可以看出本方法得到的光照图像更清晰、省时,从视觉角度表现得更加自然一些.



(a) Input low-light image

(b) Guo's method (1.13 s)

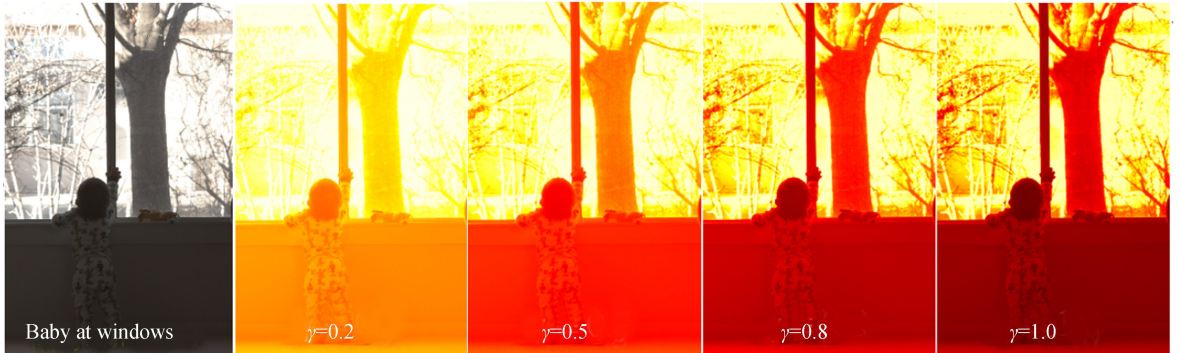
(c) Our method (0.11 s)



图2 不同光照估计方法对比

Fig.2 Comparison of different illumination estimation techniques

获得光照图像  $L(x, y)$  后可通过式(2)计算反射图像  $R(x, y)$ . GUO X J 等<sup>[1]</sup> 利用 Gamma 校正对光照图像进行调整, 采用式  $L(x, y) = L^\gamma(x, y)$  对光照图像  $L(x, y)$  进行 Gamma 校正, 调整光照图像亮度, 获得更好的图像增强效果. 本文对 HDR<sup>[18]</sup> 数据集进行实验, HDR 数据集中包含不同曝光等级的低动态图像和合成的 HDR 图像, 对其中两组低照度图像进行增强, 并与 HDR 图像进行对比. 图 3 为实验结果,  $\gamma$  分别设置为 0.2、0.5、0.8、1.0, 观察图像, 图 3(a)、(c) 两行的光照图像随着  $\gamma$  增大逐渐变暗, 而图 3(b)、(d) 两行的增强图像则逐渐变亮, 当  $\gamma$  为 0.2 时图像增强不明显,  $\gamma$  为 0.8 和 1.0 时图像存在过度增强现象, 当  $\gamma$  为 0.5 时获得的增强图像最接近 HDR 图像.

(a) Input low-light images and illumination map calculated with different  $\gamma$  values

(b) Reference HDR images and enhanced images obtained by our method


 (c) Input low-light images and illumination map calculated with different  $\gamma$  values


(d) Reference HDR images and enhanced images obtained by our method

 图 3 不同的  $\gamma$  计算的光照图像与增强图像

 Fig.3 Illumination map and enhanced images calculated with different  $\gamma$  values

### 1.3 多尺度细节提升算法

基于 Retinex 算法从低照度图像获得增强图像,虽然能有效提升了图像亮度,但会丢失部分图像细节,为提升图像局部细节,可通过对图像添加高频分量来扩展动态范围<sup>[19]</sup>.本文首先将高斯核与增强图像  $R(x, y)$  进行卷积,获得三个不同模糊参数下的高斯模糊图像

$$\begin{cases} B_1 = G_1 * R(x, y) \\ B_2 = G_2 * R(x, y) \\ B_3 = G_3 * R(x, y) \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $G_1$ 、 $G_2$  和  $G_3$  分别是标准差为  $\sigma_1 = 1.0$ 、 $\sigma_2 = 2.0$  和  $\sigma_3 = 4.0$  的高斯核.其次针对图像提取精细细节  $D_1$ , 中间细节  $D_2$  和粗细节  $D_3$ .

$$\begin{cases} D_1 = R(x, y) - B_1 \\ D_2 = B_1 - B_2 \\ D_3 = B_2 - B_3 \end{cases} \quad (6)$$

然后分配不同的权值系数融合  $D_1$ 、 $D_2$  和  $D_3$  得到细节图像  $D^*$ .

$$D^* = [1 - \omega_1 \times \text{sgn}(D_1)] \times D_1 + \omega_2 \times D_2 + \omega_3 \times D_3 \quad (7)$$

式中,  $\omega_1 = 0.5$ 、 $\omega_2 = 0.5$ 、 $\omega_3 = 0.25$ .最后,将式(7)中的与  $D^*$  增强图像  $R(x, y)$  相加,得到最终的细节增强图像  $R_e(x, y)$ .图 4 显示了多尺度细节增强对图像的影响,低照度图像经过 Retinex 算法增强后得到的图像  $R(x, y)$  亮度提升明显,但建筑物的边缘较为模糊,经过细节增强后得到图像  $R_e(x, y)$  其图像局部细节的视觉感知更清晰.同时对图像的直方图进行分析,图 4(a)底部的直方图显示低照度图像像素值集中在灰度值较低的范围,图 4(b)底部的直方图显示经过 Retinex 算法增强的图像动态范围有很大提高,从图 4(c)底部直方图可以看到,经过细节增强以后,图像的动态范围得到进一步提升.

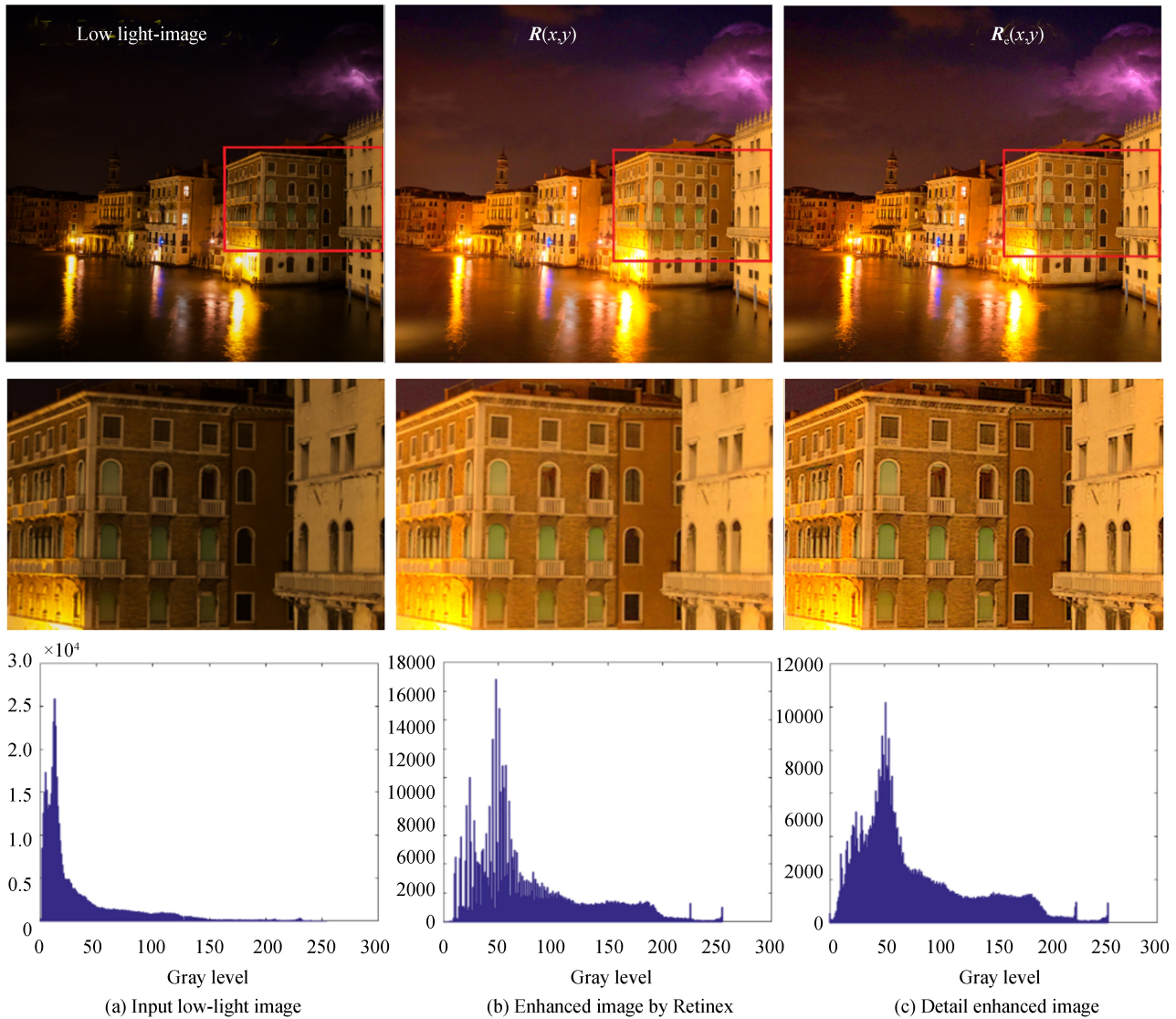


图4 多尺度细节增强的对比  
Fig.4 Contrast of multi-scale detail boosting

## 2 实验与结果分析

本文提出的这种基于 YCbCr 颜色空间的低照度图像增强方法,其算法框架如图5所示,有4个基本步

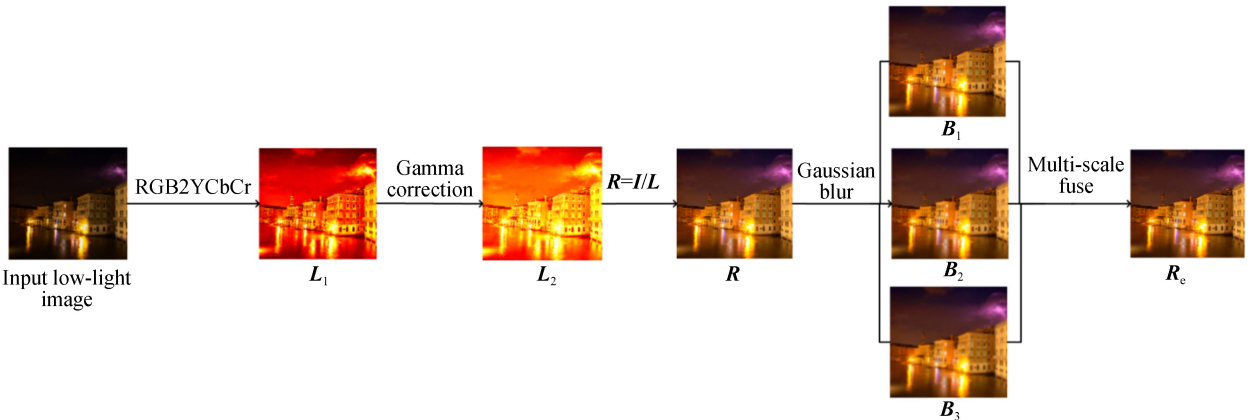


图5 算法基本框架  
Fig.5 The framework of Algorithms

骤:1)将原来的低照度图像由 RGB 颜色空间转化为 YCbCr 颜色空间,提取 Y 分量构建初始光照图像  $L_1(x, y)$ ;2)通过 Gamma 校正得到增强的光照图像  $L_2(x, y)$ ;3)根据 Retinex 算法获得增强后的图像  $R(x, y)$ ;4)采用多尺度细节增强方法对图像  $R(x, y)$  进行细节增强,得到最终增强图像  $R_e(x, y)$ ,分两个部分:(a)将高斯核与增强图像  $R(x, y)$  进行卷积获得三个不同模糊参数下的高斯模糊图像  $B_1, B_2, B_3$ ,将模糊图像与原图做加减运算,得到 3 个不同层次细节图像  $D_1, D_2$  和  $D_3$ ;(b)通过分配不同的权值,将原始图与这 3 个细节图像融合得到细节增强图像  $R_e(x, y)$ 。

为验证本文算法的有效性,本文将对实际低照度图像进行实验,从客观和主观两方面进行对比分析,对比算法为经典 Retinex 算法 MSRRCR<sup>[9]</sup>,ALTM<sup>[12]</sup>,Dong<sup>[3]</sup>,LIME<sup>[1]</sup>,NPE<sup>[13]</sup>和 MF<sup>[14]</sup>,各算法的参数值均为原文献中的推荐值.实际的低照度图像为公开的低照度图像数据集:VV-data<sup>[20]</sup>,LIME-data<sup>[1]</sup>,MEF-data<sup>[14]</sup>,NPE-data 以及其扩展数据集 NPE-part1,NPE-part2,NPE-part3<sup>[13]</sup>.为了保持对比的公平性,所有的实验都是在 Windows 7 系统、内存为 8G、CPU 为 3.6GHz 的电脑上进行。

## 2.1 主观评价

在主观评价中,选取 LIME 数据集中 5 幅图像为例来进行说明,从左到右分别记作图 6(a)~(e).从图 6

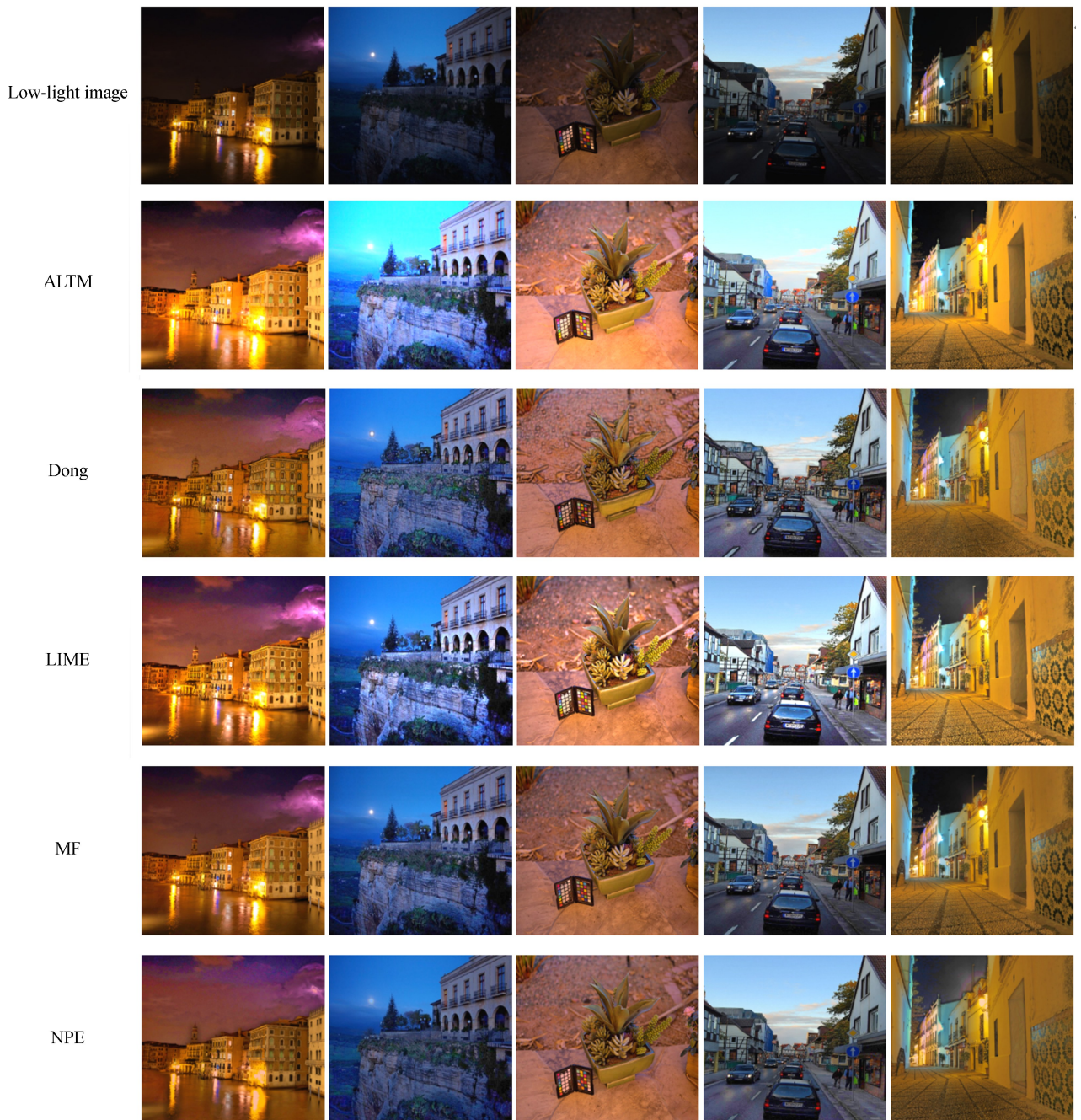




图6 不同算法在低照度图像上的主观视觉对比

Fig.6 Subjective visual comparison of different methods for low-light images

可以看出,所用的对比算法和本文算法均能够对低照度图像进行增强.通过观察图 6(a)~(c)可以发现 ALTM 算法处理后图像整体偏亮,存在增强过度的问题,增强后图像的亮度不自然.通过观察图 6(a)、(c),可以发现 Dong 算法得到的图像在物体的边缘处有明显的轮廓,如图 6(a)中房屋和窗户边缘出现了严重的轮廓线,图 6(c)中盆栽边缘有明显的黑线,视觉效果不好.LIME 算法对低照度图像的亮度提升非常明显,但是这也带来了增强过度的问题,图像中出现过曝和失真现象.如图 6(b)建筑墙体变白,天空过于明亮.MF 算法和 NPE 算法对低照度图像的增强效果有限,特别是整体偏暗的图像,如图 6(b)、(c),增强后图像亮度仍偏暗,视觉效果欠佳.MSRCR 算法对图像的亮度提升明显,但是处理后的图片整体偏白,对比度降低,细节丢失严重.本文算法通过将图像由 RGB 颜色空间转到 YCbCr 颜色空间,通过提取 Y 分量构建为光照图像,使光照图像估计更合理,通过 Gamma 校正进一步优化光照图像,不仅提高图像的亮度和对比度,还能够保持图像色彩信息基本不变,在多尺度细节增强阶段,使用合理的权值,能够很好地增强全局对比度和细节.

## 2.2 客观评价

除了主观评价外,本文选取亮度失真<sup>[12]</sup> (Lightness Order Error, LOE)和视觉信息保真度<sup>[21]</sup> (Visual Information Fidelity, VIF)两项客观指标对几种算法进行对比. LOE 可表示为<sup>[1,13]</sup>

$$\text{LOE} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n \mathbf{R}_D(x, y) \quad (8)$$

式中,  $\mathbf{R}_D(x, y)$  表示为低照度图像分量  $\mathbf{S}(x, y)$  和增强图像分量  $\mathbf{R}_e(x, y)$  在像素点  $(x, y)$  的相对阶差分,其定义为

$$\mathbf{R}_D(x, y) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{U[Q(x, y), Q(i, j)]\} \oplus U[Q_e(x, y), Q_e(i, j)] \quad (9)$$

式中,  $m, n$  分别表示图像的宽和高;  $\oplus$  为异或操作;  $Q(x, y)$  和  $Q_e(x, y)$  分别为像素点  $(x, y)$  在低照度图像  $\mathbf{S}(x, y)$  和增强图像  $\mathbf{R}_e(x, y)$  RGB 三通道中的最大值.  $U(p, q)$  为单位阶梯函数,当  $p \geq q$  则返回 1, 否则返回 0.

WANG S 等<sup>[13]</sup> 建议将图像下采样到  $100 \times 100$  进行计算,可降低 LOE 计算难度,实验选取了 2 幅低照度图像进行可视化 LOE 对比,分别是 Cloudy 和 House,图 7 为实验结果. WANG S 等<sup>[13]</sup> 指出 LOE 值越低,增强图像的亮度自然性保持越好.从图 7(a)、(c)可以看出本文算法和其他对比算法均能有效提升图像亮度,由图 7(b)、(d)可以看出,本文算法和 ALTM, MF 算法结果基本相同,亮度保持较好,只在某些点上产生较大的亮度失真现象,整体表现较好,其它算法存在不同程度的亮度失真.



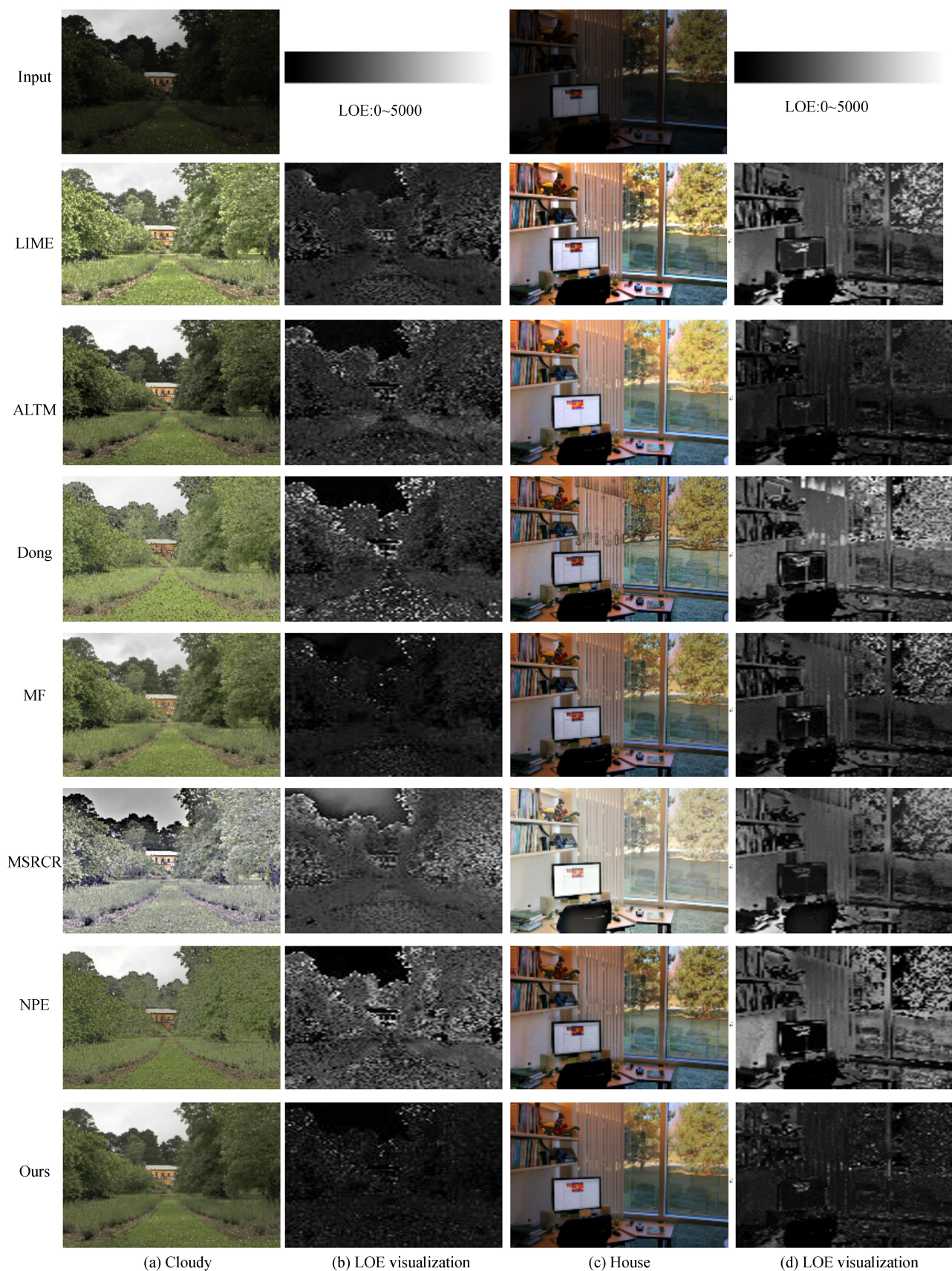


图 7 可视化的 LOE 对比

Fig.7 Comparison of LOE visualization

表 1 给出了上文提到 6 种算法与本文算法在 7 个公开数据集测试结果对比.从表中可以看到,本文算法

在 7 个公开数据集的 LOE 值最小为 434,最大为 1 065,平均值为 656,在 LIME 数据集、MEF 数据集和 VV 数据集的 LOE 值最小,除了在 NPE-data 数据集的 LOE 值偏大,在其余数据集中的亮度失真较小,且本文算法的 LOE 平均值最小,故本文算法在增强图像的自然性和鲁棒性方面较好.

表 1 LOE 测试结果

Table 1 Measurement results of LOE

Method	LIME-data	MEF-data	NPE-data	VV-data	NPE-part1	NPE-part2	NPE-part3	Ave. LOE
LIME	1 141	913	1 035	1 013	1 254	1 088	1 240	1 098
ATLM	565	498	1 250	527	<b>398</b>	859	<b>623</b>	674
DONG	1 244	1 065	1 064	900	1 455	1 153	1 513	1 199
MF	630	526	<b>532</b>	523	883	<b>600</b>	1 240	705
MSRCR	1 836	1 686	1 797	2 713	1 880	1 959	1 822	1 956
NPE	1 471	1 158	713	904	882	861	1 213	1 029
Ours	<b>473</b>	<b>434</b>	1 065	<b>452</b>	574	877	721	<b>656</b>

本文采用 VIF 评估增强图像的信息失真度, VIF 表示为<sup>[22]</sup>

$$VIF = \frac{I[R_e(x, y); S(x, y)]}{I[R_e(x, y); E(x, y)]} \quad (10)$$

式中,  $E(x, y)$  为人眼视觉系统感知到的图像. VIF 是一种全参考图像质量评价方法, 被用来评价退化图像的失真度. 使用 VIF 评价增强图像的失真度时, 低照度图像为失真图像, 增强图像为参考图像, VIF 值越大则表示增强图像信息保持越好. 从表 2 可以看出本文算法在 7 个公开数据集的 VIF 值最大为 0.829 04, 最小为 0.465 94, 平均值为 0.658 62, 在 MEF 数据集, VV 数据集, NPE-part1, NPE-part3 的 VIF 值高于比较算法, 在其余数据集的视觉信息保真度较好, 且本文的 VIF 平均值最高, 表明该算法能较好地保持图像信息.

表 2 VIF 测试结果

Table 2 Measurement results of VIF

Method	LIME-data	MEF-data	NPE-data	VV-data	NPE-part1	NPE-part2	NPE-part3	Ave. VIF
LIME	0.225 08	0.253 49	0.343 10	0.399 60	0.309 42	0.325 04	0.414 88	0.324 37
ATLM	0.327 27	0.396 99	0.573 99	0.781 20	0.483 66	0.569 75	0.686 39	0.545 61
DONG	0.325 14	0.353 25	0.423 91	0.504 36	0.390 15	0.418 09	0.504 26	0.417 02
MF	0.447 52	0.512 92	0.601 09	0.720 93	0.588 48	0.620 70	0.720 81	0.601 78
MSRCR	0.240 42	0.279 94	0.422 24	0.420 89	0.307 18	0.387 92	0.659 95	0.388 36
NPE	<b>0.508 72</b>	0.523 64	<b>0.688 90</b>	0.687 85	0.598 03	<b>0.678 15</b>	0.745 81	0.633 01
Ours	0.465 94	<b>0.553 68</b>	0.640 47	<b>0.829 04</b>	<b>0.723 42</b>	0.651 95	<b>0.745 81</b>	<b>0.658 62</b>

### 2.3 不同算法运行时间对比

图 8 给出了不同算法运行时间对比. 通过分析算法执行过程可知, 本文算法的时间复杂度为线性阶  $O(n)$ , 与其他的算法对比, 本文的计算量更小, 耗时更少, 图 8 中的数据也符合预测结果. 从图中可以看出,

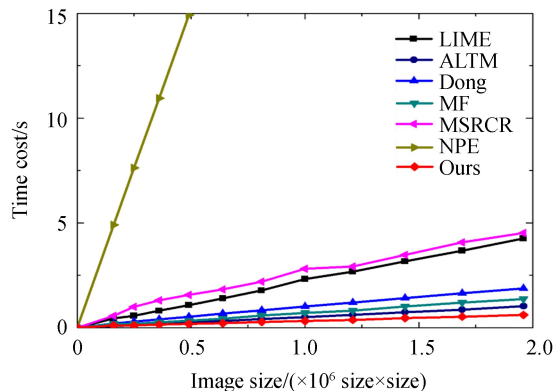


图 8 不同算法在不同图像大小下的运行时间比较

Fig.8 Time comparison among different methods with varying image sizes

这 7 种算法在图像尺寸与运行时间间存在线性关系,随着图像尺寸增大运行时间逐渐增加.同时发现,当图像尺寸不变时,NPE 算法运行最慢,MSRCR 和 LIME 算法次之,本文算法运行最快.

### 3 结论

针对基于 Retinex 模型的低照度图像增强光照图像估计问题,本文提出一种基于 YCbCr 颜色空间的图像亮度估计方法,并从主观感受、客观评价、运行时间等指标验证了本算法的有效性.在主观评价实验中,该算法不仅能提高图像的亮度和细节,还避免了图像颜色失真;在客观评价实验中,采用亮度失真和视觉信息保真度两项客观指标进行分析并与 LIME,MSRCR,Dong 等 6 种算法进行对比,该算法在 7 个公开数据集的 LOE 值最小为 434,最大为 1 065,平均值为 656,VIF 值最大为 0.829 04,最小为 0.465 94,平均值为 0.658 62,两个客观评价指标平均值优于其它算法,表明该算法能较好保持增强图像的亮度自然性和图像信息,且算法鲁棒性好;算法运行时间对比表明,在同等条件下本算法运行速度优于目前主流的低照度图像增强算法,具有一定的理论借鉴意义.

### 参考文献

- [1] GUO X J, LI Y, LING H B. LIME: low-light image enhancement via illumination map estimation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2017, **26**(2): 982-993.
- [2] CHENG H D, SHI X J. A simple and effective histogram equalization approach to image enhancement[J]. *Digital Signal Processing*, 2004, **14**(2):158-170.
- [3] DONG X, WANG G, PANG Y, *et al.* Fast efficient algorithm for enhancement of low lighting video[C]. *IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, 2011: 1-6.
- [4] LAND E H. The retinex theory of color vision[J]. *Scientific American*, 1977, **237**(6): 108-128.
- [5] ZHANG Jie, ZHOU Pu-cheng, ZHANG Qian, Low-light image enhancement based on iterative multi-scale guided filter retinex [J]. *Journal of Graphics*, 2018, **39**(1): 1-11.  
张杰,周浦城,张谦.基于迭代多尺度引导滤波 Retinex 的低照度图像增强[J].图学学报, 2018,**39**(1): 1-11.
- [6] LIANG Lin, HE Wei-ping, LEI Lei, *et al.* Survey on enhancement methods for non-uniform illumination image[J]. *Application Research of Computers*, 2010, **27**(5): 1625-1628.  
梁琳,何卫平,雷蕾,等.光照不均图像增强方法综述[J].计算机应用研究, 2010, **27**(5): 1625-1628.
- [7] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODSELL G A. Properties and performance of a center/surround retinex.[J]. *IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 1997, **6**(3): 451-62.
- [8] LIN H, SHI Z. Multi-scale retinex improvement for nighttime image enhancement[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, **125**(24): 7143-7148.
- [9] PETRO A B, SBERT C, MOREL J M. Multiscale retinex[J]. *Image Processing On Line*, 2014, **4**: 71-88.
- [10] CHEN Yong, ZHAN Di, LIU Huan-lin. Enhancement algorithm for low-light images based on physical model and boundary constraint[J]. *Journal of Electronic & Information Technology*, 2017, **39**(12): 2962-2969.  
陈勇,詹帝,刘焕淋.基于物理模型与边界约束的低照度图像增强算法[J].电子与信息学报,2017,**39**(12): 2962-2969.
- [11] CHANG Meng, FENG Hua-jun, XU Zhi-hai, *et al.* Exposure correction and detail enhancement for single LDR image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(4): 0410003.  
常猛,冯华君,徐之海,等.单张 LDR 图像的曝光校正与细节增强[J].光子学报,2018,**47**(4): 0410003.
- [12] AHN H, KEUM B, KIM D, *et al.* Adaptive local tone mapping based on retinex for high dynamic range images[C]. 2013 IEEE International Conference on Consumer Electronics(ICCE), Las Vegas, Nevada, USA, New York: IEEE, 2013, 674: 153-156.
- [13] WANG S, ZHENG J, HU H M, *et al.* Naturalness preserved enhancement algorithm for non-uniform illumination images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, **22**(9): 3538-3548.
- [14] FU X, ZENG D, YUE H, *et al.* A fusion-based enhancing method for weakly illuminated images [J]. *Signal Processing*, 2016, **129**(C): 82-96.
- [15] CHENG Yu, DENG De-xiang, YAN Jia, *et al.* Weakly illuminated image enhancement algorithm based on convolutional neural network[J]. *Journal of Computer Applications*, 2019, **39**(4): 1162-1169.  
程宇,邓德祥,颜佳,等.基于卷积神经网络的弱光照图像增强算法[J].计算机应用, 2019, **39**(4): 1162-1169.
- [16] MA Hong-qiang, MA Shi-ping, XU Yue-lei, *et al.* Low-light image enhancement based on deep convolutional neural network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, **39**(2): 99-108.  
马红强,马时平,许悦雷,等.基于深度卷积神经网络的低照度图像增强[J].光学学报, 2019, **39**(2): 99-108.
- [17] CAO J. An image enhancement method based on fractional calculus and retinex[J]. *Journal of Computer and Communications*, 2018, **6**(11): 55-65.
- [18] SEN P, KALANTARI N K, YAESOUBI M, *et al.* Robust patch-based HDR reconstruction of dynamic scenes[J].

- ACM Transactions on Graphics*, 2012, **31**(6): 1-11.
- [19] KIM Y, KOH Y J, LEE C, *et al.* Dark image enhancement based on pairwise target contrast and multi-scale detail boosting[C]. 2015 IEEE International Conference on Image Processing(ICIP), Quebec City, QC, Canada, New York: IEEE, 2015: 1404-1408.
- [20] VONIKAKIS V, KOUSKOURIDAS R, GASTERATOS A. On the evaluation of illumination compensation algorithms [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2018, **77**(8): 9211-9231.
- [21] SHEIKH H R , BOVIK A C . Image information and visual quality[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(2): 430-444.
- [22] SIMA Zi-ling, HU Feng. Low-light image enhancement method based on simulating multi-exposure fusion[J]. *Journal of Computer Applications*, 2019, **39**(6): 1804-1809.
- 司马紫菱, 胡峰. 基于模拟多曝光融合的低照度图像增强方法[J]. *计算机应用*, 2019, **39**(6):1804-1809.