

文章编号: 2095-2163(2020)12-0199-06

中图分类号: TP391

文献标志码: A

# 基于引导滤波的低照度图像增强算法

崔圆斌, 田益民

(北京印刷学院, 北京 102600)

**摘要:** 针对于低照度的图像的对比度、色彩饱和度较低以及细节模糊等问题, 本文提出了一种综合性的改进低照度图像自身缺点的算法。该算法首先将低照度图像进行色彩空间转换, 由 RGB 色彩空间转换到 HSV 色彩空间, 并对 HSV 色彩空间中的亮度分量  $V$  进行对数变换, 饱和度分量  $S$  进行线性变换; 其次, 利用顶帽变换的原理使图像背景的明暗提取功能得到增强, 图像细节部分得到改善; 最后, 利用引导滤波的算法原理, 把增强低照度图像时所模糊、丢失的边缘细节给重新弥补。实验结果表明, 该算法对明显的弥补了低照度图像的缺陷, 使低照度图像的亮度、色彩饱和度提高, 图像细节边缘变得更加清晰, 综合的提升了图像的质量。

**关键词:** 低照度图像; HSV 空间; 对数变换; 顶帽变换; 引导滤波

## Low-Light Image Enhancement Algorithm Based On Guided Filter

CUI Yuanbin, TIAN Yimin

(Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

**[Abstract]** Aiming at the problems of low-light images, such as contrast, low color saturation and fuzzy details, a comprehensive algorithm is proposed to improve the shortcomings of low-light images. Firstly, the algorithm converts the low illumination image from RGB color space to HSV color space, and performs logarithmic transformation on the luminance component in HSV color space; While the linear transformation of the saturation component  $S$ , After the principle of top hat transformation was used to enhance the shading extraction function of the image background and improve the image details. Finally, the algorithm principle of guided filtering was used to make up for the blurring and missing edge details when enhancing the low-light image. Experimental results show that the algorithm can obviously make up for the defects of low-illumination images, improve the brightness and color saturation of low-illumination images, and make the edges of image details clearer, thus comprehensively improving the image quality.

**[Key words]** Low-light image; HSV space; Logarithmic transform; Top-hat transform; Guide filtering

## 0 引言

图像增强就是以提升图像质量为目的, 使用不同的手段对图像进行处理, 如对图像的亮度、对比度、色彩饱和度、边缘细节进行调整, 使图像变得更加清晰, 符合人眼的视觉效果, 方便进一步对图像的研究和分析<sup>[1]</sup>。而低照度图像增强技术又在图像增强领域占据了举足轻重的地位, 目前对低照度图像增强往往采用直方图均衡化, 自适应直方图均衡化以及 Retinex 等算法, 这些算法可以提升低照度图像的对比度, 但是这些算法都有明显的缺点, 直方图均衡化类算法处理的低照度图像, 存在色彩失真、色彩饱和度低以及细节模糊的缺点。而 Retinex 算法应用于低照度图像增强的操作往往需要对图像 RGB 色彩空间的 3 个分量进行处理, 这种方式往往

会导致在图像增强的过程中出现色彩失真、图像部分地方变白、以及光晕现象。本文基于引导滤波的低照度图像增强算法具有很好的视觉效果, 在提升低照度图像对比度和色彩饱和度的同时, 又通过顶帽变换和引导滤波弥补了对低照度图像增强中所造成的细节模糊现象, 使低照度图像整体的画面得到了提升。

## 1 本文的算法原理

### 1.1 HSV 色彩空间变换

#### 1.1.1 HSV 色彩空间变换原理

HSV 色彩空间相对于 RGB 色彩空间具有很明显的优点, 首先彩色图像 RGB 颜色空间具有很高的色彩相关性, 处理红、绿、蓝 3 个通道的分量时, 彼此之间会互相干扰, 而 HSV 空间的 3 个分量信息色

**基金项目:** 国家自然科学基金(6378001)。

**作者简介:** 崔圆斌(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 数字图像处理; 田益民(1966-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 数字图像处理与数值分析。

**通讯作者:** 田益民 Email: tym@bigc.edu.cn

收稿日期: 2020-09-24

调、饱和度、亮度则各自独立,处理时更加的方便,同时与人眼密不可分,这样就不会引起人眼疲劳<sup>[2]</sup>。所以本文将 RGB 空间转换为 HSV 空间,得到 3 个分量,分别为色调、饱和度、亮度,其中的色调分量保持不变,对剩下的饱和度和亮度分量进行处理<sup>[3]</sup>。

假设对于给定的 RGB 空间 3 个信息分量为  $r, g, b$ , 3 个信息分量的取值范围为  $[0, 255]$  之间的整数,转换到 HSV 空间的 3 个信息分量为  $h, s, v$ , 其中  $h$  的取值范围为  $[0, 360]$  之间的整数,而亮度和饱和度的取值范围为  $[0, 1]$  之间的数,所以首先定义公式(1)~公式(5):

$$\max = \max(r, g, b), \quad (1)$$

$$\min = \min(r, g, b), \quad (2)$$

$$r' = \frac{\max - r}{\max - \min}, \quad (3)$$

$$b' = \frac{\max - b}{\max - \min}, \quad (4)$$

$$g' = \frac{\max - g}{\max - \min}, \quad (5)$$

根据公式(1)~公式(5),则 RGB 空间转换为 HSV 空间公式表示为式(6)~式(8):

$$h = \begin{cases} (5 + b') \times 60, & r = \max, g = \min, \\ (1 - g') \times 60, & r = \max, g \neq \min, \\ (1 + r') \times 60, & g = \max, b = \min, \\ (3 - b') \times 60, & g = \max, b \neq \min, \\ (3 + g') \times 60, & b = \max, r = \min, \\ (5 - r') \times 60, & \text{其它} \end{cases} \quad (6)$$

$$v = \frac{\max}{255}, \quad (7)$$

$$s = \frac{\max - \min}{\max} \quad (8)$$

### 1.1.2 饱和度分量增强

饱和度指的是色彩的纯净度,其大小取决于某种颜色的白色光含量和彩色光含量,白色光含量越大,彩色光含量越小,饱和度越高,反之亦然。纯白光的色彩饱和度为 0,像灰度图像一样,而纯彩色光的饱和度则为 100%<sup>[4]</sup>。同时色饱和度受到屏幕亮度和对比度的双重影响,一般亮度好对比度高的屏幕色饱和度也随之提升,可以看出饱和度对于图像质量的影响非常重要。所以对饱和度分量  $S$  进行线性变换可以更好的提升图像的颜色质量和视觉效果。

### 1.1.3 亮度分量的对数变换

图像中的对数变换具体是指对输入亮度分量图

像的像素点灰度值进行对数变换,通用公式(9):

$$s = c \log(1 + I(i, j)). \quad (9)$$

其中,  $c$  是一个常数,  $I(i, j)$  代表输入图像灰度归一化后的某一个点的灰度值。

对数变换作用就是将输入图像中低灰度值区间范围进行扩展,将高灰度值区间进行压缩,从而提升了低灰度区域的像素值,降低了高灰度区域的像素值。对亮度分量  $V$  进行对数变换,可以弥补低照度图像光照不均匀的缺陷,使低照度图像全局的亮度提升,以方便展现出更多的图像细节。

### 1.2 顶帽变换和底帽变换

顶帽变换和底帽变换是图像分析处理中形态学变换的重要方法,其中顶帽变换能够完成对单一较暗背景的提取,从而有效的实现从背景中提取局部较亮区域的功能<sup>[5]</sup>。而底帽变换的作用则相反,更适用于亮背景暗物体的图像。顶帽变换和底帽变换的公式为(10)和(11):

$$f' = f - (f \circ b), \quad (10)$$

$$f'' = (f \cdot b) - f. \quad (11)$$

其中,  $f$  为原始图像;  $f'$  表示顶帽变换后的图像;  $f''$  表示底帽变换后的图像;  $b$  表示图像形态学变换的卷积核;  $f \circ b$  表示原始图像和卷积核进行开运算,  $f \cdot b$  表示原始图像和卷积核进行闭运算。开运算和闭运算的效果如图 1 所示。



(a) 开运算效果演示

(a) Demonstration diagram of opening operation effect



(b) 闭运算效果演示图

(b) Demonstration diagram of closed operation effect

图 1 开闭运算效果演示图

Fig. 1 Demonstration diagram of opening and closing operation effect

图 1 中的白色部分表示背景;黑色部分表示物体;中间的小方块表示结构元素。

图像的开运算为先腐蚀再膨胀,能够去除边缘孤立的小点和毛刺,相当于腐蚀了原来的图像,而图像的闭运算为先膨胀再腐蚀,能够填平图像中的小孔和裂缝,相当于膨胀了原来的图像。

因此根据顶帽变换和底帽变换的公式可以得

出,顶帽变换为原图像减去开运算后的图像,得到了图像的细节部分,将细节部分和原输入图像进行和运算就相当于高通滤波器,突出了图像边缘细节;底帽变换为闭运算后的图像减去原图像,得到了图像目标物之间的连接边界,将原输入图像和连接边界进行减运算就相当于低通滤波,模糊了图像边缘细节。

经过对 HSV 空间的  $S, V$  分量处理过后,将 HSV 空间转换为 RGB 空间,从而得到了一个新的彩色图像,对这个新的彩色图像进行顶帽变换,可以发现图像中的细节部分被明显的增强了。

### 1.3 引导滤波

引导滤波定义了一个线性滤波的过程,具体为使用导向图像作为滤波内容图像,在输入图像上实现局部线性函数表达,假设  $I$  是导向图像、 $p$  是输入图像、 $q$  是引导滤波输出图像,引导滤波是作为局部线性模型描述导向图像  $I$  与输出图像  $q$  之间的关系<sup>[6]</sup>,则引导滤波的算法步骤为,首先滤波输出图像的线性模型为:

$$q_i = a_k I_i + b_k. \quad (12)$$

其中,  $(a_k, b_k)$  是窗口  $w_k$  范围内的参数常量,为了寻找线性相关性,窗口  $w_k$  定义的函数为:

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in w_k} ((a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \varepsilon a_k^2). \quad (13)$$

上述函数  $w_k$  可以看成是一个线性回归问题,其中的两个参数  $a_k, b_k$  的求解如下:

$$a_k = \frac{\frac{1}{w_k} \sum_{i \in w_k} I_i P_i - \mu_k \bar{p}_k}{\sigma_k^2 + \varepsilon}. \quad (14)$$

$$b_k = \bar{p}_k - a_k \mu_k. \quad (15)$$

$$\bar{p}_k = \frac{1}{|w|} \sum_{i \in w_k} p_i. \quad (16)$$

其中,  $\mu_k$  和  $\sigma_k^2$  是导向图像在  $w_k$  窗口大小的均值和方差,  $\bar{p}_k$  表示在  $w_k$  窗口内输入图像的像素均值。

使用线性相关参数  $(a_k, b_k)$ , 引导滤波图像就可以通过  $q_i = a_k I_i + b_k$  线性模型得到,针对于不同的窗口大小就会得到不相同的  $q_i$  值,所以通过其均值作为最终的输出结果:

$$q_i = \frac{1}{w_k} \sum_{i \in w_k} (a_k I_k + b_k) = \bar{a}_i I_i + \bar{b}_i. \quad (17)$$

根据需要,导向图像可以跟输入图像不同或者一致,当导向图像  $I$  与输入图像  $P$  一致时,引导滤波就变成了一个边缘保持的滤波器。本文利用这个性

质,将输入图像的 R、G、B 3 个通道的颜色分量作为导向图像,经过处理,得到了对输入彩色图像的引导滤波图像,用输入图像减去引导滤波图像,得到图像残差,将这个残差乘以相应的倍数加到原输入图像,这使得输入图像的细节变得更加深刻,画面更加清晰,更好的弥补了增强低照度图像所造成的图像细节部分的模糊和丢失。

### 1.4 本文算法步骤

**步骤 1** 首先将低照度图像中 RGB 色彩空间转换为 HSV 空间,提取亮度分量  $V$  并对其进行对数变换,并增强饱和度分量  $S$ ,将低照度图像的整体亮度和饱和度增强;

**步骤 2** 利用顶帽变换算法原理实现从输入图像中提取部分边缘细节,让图像的细节部分得到了增强。

**步骤 3** 最后用引导滤波,以自身图像为导向图像,使滤波后的图像整体细节更为清晰可见。

## 2 实验结果与分析

本文所有的图片试验均在操作系统为 Windows 10、CPU 为 2.6 GHz 酷睿 i7,内存为 8 G 的 PC 机上运行,编程环境为 MatlabR2016a。经过对大量低照度图片的仿真试验,发现本文算法对夜景低照度图像质量增强尤为明显,为了更好的对实验结果进行对比分析,本文选取 4 张低照度图片(两张夜景低照度图片和两张暗光低照度图片),使用的试验方法分别是直方图均衡化算法、自适应直方图均衡化算法、Retinex 算法中 MSRRCR (Multi-Scale Retinex with Color Restoration) 和本文算法 4 种算法。4 种算法对图像进行处理其结果为如图 3~图 6 所示,图 3、图 4 为夜间低照度图像的处理结果,图 5、图 6 为暗光低照度图像处理结果。

### 2.1 主观评价

图 2 和图 3 分别代表了不同场地的夜景图像,夜景图像存在画面整体昏暗、图像色彩饱和度低、视觉效果较差的特点。直方图均衡化处理后的图像,其灰度值过度拉大,导致画面整体的亮度偏大,也有色彩失真的现象。MSRRCR 算法处理后的图像存在 retinex 算法的弊端,就是这类算法运算量较大,容易产生光晕现象,画面整体过度的增强<sup>[7]</sup>。自适应直方图均衡化处理后的图像提高了图像的整体对比度,颜色也变的丰富,但是此类算法需要对 RGB 图像的 3 个颜色通道进行处理,使得处理后的图像的颜色不自然,感知效果也会变差。本文算法处理过的图像可以看出对图像的对比度,色彩

饱和度,以及图像的整体细节都有了明显的提升,使夜景图像的色彩丰富、清晰度更高,图像更生动饱

满,人眼观察的视觉效果也为之增强。



(a) 原图像

(a) Original image



(b) 直方图均衡化结果

(b) Histogram equalization results



(c) MSRCR 结果

(c) MSRCR results



(d) 自适应直方图均衡化结果

(d) Adaptive histogram equalization results



(e) 本文算法结果

(e) Results of this algorithm

图 2 不同算法对公园夜景的增强

Fig. 2 Enhancement of park night scene by different algorithms



(a) 原图像

(a) Original image



(b) 直方图均衡化结果

(b) Histogram equalization results



(c) MSRCR 结果

(c) MSRCR results



(d) 自适应直方图均衡化结果

(d) Adaptive histogram equalization results



(e) 本文算法结果

(e) Results of this algorithm

图 3 不同算法对城市夜景的增强

Fig. 3 Enhancement of urban night scene by different algorithms

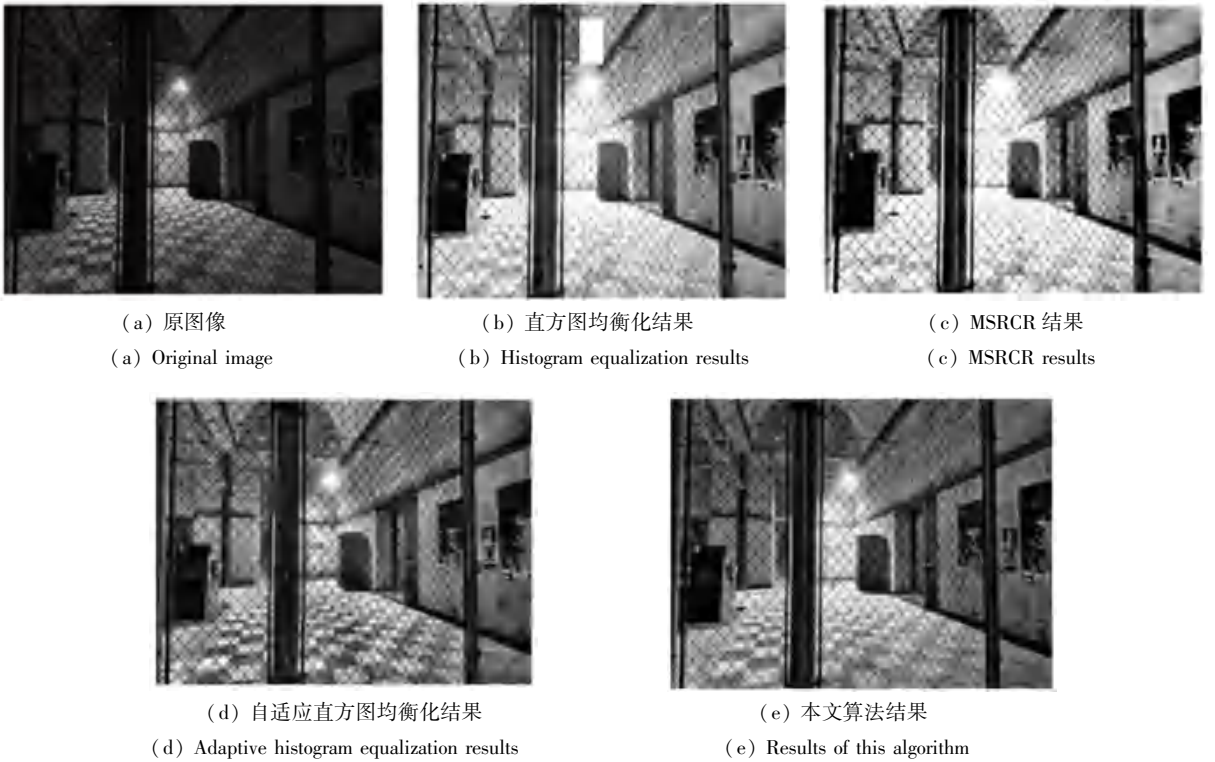


图 4 不同算法对暗光走廊的增强

Fig. 4 Enhancement of dark corridor by different algorithms



图 5 不同算法对暗光小路的增强

Fig. 5 Enhancement of dark paths by different algorithms

图 4 和图 5 分别代表了不同场地的暗光图像, 发现直方图均衡化算法和 MSRCR 算法会导致图像过度增强, 处理后的图像灰度级减少, 某些细节消

失, 图像存在较大噪声。自适应直方图均衡化算法处理的图像对轮廓和细节都有提升, 但是效果不如 (下转第 208 页)