

文章编号 1004-924X(2014)04-1048-08

# 马尔科夫随机场模型下的 Retinex 夜间彩色图像增强

赵宏宇<sup>1\*</sup>, 肖创柏<sup>1</sup>, 禹 晶<sup>2</sup>, 白 鹭<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学 计算机学院, 北京 100124; 2. 清华大学 电子工程系, 北京 100084)

**摘要:** 由于 Retinex 算法在处理夜间彩色图像时容易出现光晕、颜色失真、细节丢失与噪声干扰等问题, 本文基于马尔科夫随机场(MRF)提出了一种针对单幅图像的 Retinex 图像增强算法。该算法在 HSV 颜色空间下采用线性引导滤波估计图像照度分量; 在 MRF 模型下求解仅包含物体本身特性的反射分量, 并通过颜色恢复函数与增益补偿方法进行颜色恢复与校正, 最终实现了夜间彩色图像的增强。实验结果表明, 利用本文算法处理后图像的均值(整体亮度)可以提高 2 倍以上, 标准差、熵、峰值信噪比(PSNR)等参数均有 5% 以上的提升。与其它基于 Retinex 原理的算法相比, 本文提出的算法增强效果显著, 具有消除“光晕伪影”现象、抑制噪声、颜色保真和有效地凸显边缘细节信息能力。

**关键词:** HSV 色彩模型; 彩色图像; 图像增强; 颜色恢复; 颜色校正; 马尔科夫随机场

**中图分类号:** TP394.1    **文献标识码:** A    **doi:** 10.3788/OPE.20142204.1048

## A Retinex algorithm for night color image enhancement by MRF

ZHAO Hong-yu<sup>1\*</sup>, XIAO Chuang-bai<sup>1</sup>, YU Jing<sup>2</sup>, BAI Lu<sup>1</sup>

(1. College of Computer Science and Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

\* Corresponding author, E-mail: asas.014@163.com

**Abstract:** As Retinex algorithm usually has the problems of halo artifacts, color distortion, high noises and poor details in a low-illumination night color image, this paper proposes a novel Retinex enhancement algorithm based on Markov Random Fields (MRF) to enhance the visibility of single image. This algorithm uses the linear guided filter to estimate image illumination component in HSV (Hue Saturation Value) color space. The reflection image can be obtained through MRF model, and the night color image can be enhanced after color restoration and brightness correction. Compared with the original images, the experimental results demonstrate that the mean value (luminance) of image restored by proposed method has increased more than 2 times, and the evaluation indexes such as standard deviation, entropy, the Peak Signal and Noise Ratio(PSNR) and so on have increased more than 5%. Compared with other Retinex algorithms, the effect of enhancement of this algorithm is more remarkable in halo effect elimination, noise suppression and detail preservation.

**Key words:** Hue Saturation Value(HSV); color model; color image; image enhancement; color restoration; color correction; MarRov Random Field(MRF)

收稿日期: 2013-10-17; 修订日期: 2013-11-04.

基金项目: 北京市教委科技发展重点项目(KZ01210005007), 北京市教育委员会科技发展计划资助项目(No. KM201010005011, KM201310005020)。

## 1 引言

计算机视觉监控设备在夜间采集的图像质量退化严重、图像可辨识度很低,且含有大量噪声,这大大降低了图像的应用价值。因此,对于夜间图像增强技术的研究具有很强的实际意义。

夜间图像增强技术的目标是恢复图像的自然色彩和再现图像的暗调层次,其主要包括图像融合方法和传统的图像增强方法。图像融合主要应用在近红外或微光成像技术方面,需要在同场景下采集多幅不同频谱的图像,算法复杂耗时,难以满足人们的实时要求;传统的图像增强方法主要分为空域法和频域法两大类:空域法是直接对图像像素进行操作;频域法是在图像的某个变换域内进行操作,再通过逆变换获得增强图像。传统的图像增强方法适用于单幅图像的视觉效果改善,可应用在彩色图像、非固定视角等多种场合。

传统的图像增强方法主要包括直方图方法、同态滤波、基于 Retinex 理论<sup>[1-7]</sup>的方法、基于小波的方法等。其中,Retinex 算法对于夜晚图像、大雾图像以及低照度图像等都有不错的效果,因而该算法在视频监控、遥感图像以及航拍图像等场景的处理上有着广泛的应用前景。Retinex 算法是基于人类视觉系统(Human Visual System, HVS)而提出来的图像增强方法<sup>[1]</sup>,由于 Retinex 算法具有高动态范围压缩、局部对比度增强、保持图像色彩恒常性等特点,引起了大量国内外学者的兴趣。Land 于 1986 年最早提出了中心环绕(Center/Surround)Retinex 算法,在此基础上,Jobson 等人提出了单尺度 Retinex(Single-scale Retinex, SSR)算法<sup>[2]</sup>和多尺度 Retinex(Multi-scale Retinex, MSR)算法<sup>[3]</sup>。由于 Retinex 算法存在颜色失真的问题,Jobson 等人随后提出了具有颜色保持能力的多尺度 Retinex(Multi-scale Retinex with Color Restoration, MSRCR)算法<sup>[4-5]</sup>。该算法能够在扩大图像动态压缩范围的同时,实现颜色保真。为了提高细节的显示效果,Michael Elad 等<sup>[6]</sup>提出了基于双边滤波(Bilateral filter)的 Retinex 算法。该算法在图像细节增强的同时,可以很好地消除光晕效应的影响。为了使 Retinex 算法更好地应用于低照度增强,Rahman 等人分析了 MSRCR 算法在暗黑区域放大噪

声的原因,并提出了相应的改进方法<sup>[7]</sup>。

目前,Retinex 算法用于夜间等低照度图像的增强时,普遍存在噪声干扰、颜色失真、“光晕伪影”的影响和细节信息增强不足等问题。噪声干扰一般存在于夜间图像的暗区域中,表现为图像增强后的噪声放大现象;“光晕伪影”指的是经过增强的图像在高对比度边缘区域存在着像光晕一样的影子;颜色失真现象指的是增强后的物体颜色与增强前的物体颜色不一致;细节信息不足指的是图像中有效边缘缺失。

考虑到以上问题,本文模拟人类视觉和大脑对图像的感知和理解的方式,提出了一种基于马尔科夫随机场(Markov Random Field, MRF)<sup>[8-9]</sup>的 Retinex 夜间图像增强算法。该算法首先采用一种优化的颜色恢复函数模型,用以避免颜色失真;接着,使用一种线性的保边滤波方法进行照度分量估计,并在 MRF 模型下对图像的反射分量进行求解,从而在抑制噪声的同时增强有效细节信息,消除“光晕伪影”效应;最后,通过颜色恢复与增益补偿操作完成对图像的增强处理。

本文的结构组织如下:第 2 节对 Retinex 理论进行简单描述,第 3 节详细描述本文提出的算法,第 4 节给出实验比较与分析,第 5 节对全文进行总结。

## 2 Retinex 理论

Retinex 理论认为一幅图像可分为两部分,即一幅图像  $I(i, j)$  可由反射分量  $R(i, j)$  和照度分量  $L(i, j)$  的乘积表示,即:

$$I(i, j) = R(i, j)L(i, j), \quad (1)$$

式中: $(i, j)$  表示像素的空间二维坐标。照度分量的性质取决于光照的照射源,其决定了图像中像素能达到的动态范围,表现为频域中的低频成分;反射分量的性质则取决于成像物体的特性,它包含了场景的细节信息,表现为频域中的高频成分。Retinex 的思想就是从原始图像中剔除环境光照的影响,求解物体的反射分量,得到不受光照非均衡性影响的、动态范围压缩较好的图像。求解时首先要将式(1)转换到对数域:

$$\log R(i, j) = \log I(i, j) - \log \tilde{L}(i, j), \quad (2)$$

其中: $\tilde{L}(i, j)$  为照度分量的估计值。本文采用中

心环绕的方法对照度分量进行计算:

$$\tilde{L}(i, j) = I(i, j) * F(i, j), \quad (3)$$

其中: \* 代表卷积操作,  $F(i, j)$  为环绕函数, 常采用高斯滤波函数形式。由式(3)可知, 要想获得具有高频信息的反射分量, 照度分量的估计尤其关键, 而为了保留更多的图像细节, 环绕函数多选择具有保边能力的平滑滤波形式<sup>[6,10]</sup>。

### 3 本文算法

本文提出了一种基于 MRF 的 Retinex 单幅夜间彩色图像增强算法。该算法可分为 3 个步骤: (1) 计算出原图像在 RGB 色彩空间的颜色比重来构造优化的颜色恢复函数; (2) 将夜间彩色图像由 RGB 颜色空间转换到 HSV (Hue, Saturation, Value) 颜色空间, 对图像在 HSV 颜色空间下的亮度图像采用具有保边特性的引导滤波进行平滑处理, 估计图像照度分量, 然后在 MRF 模型下, 根据 Retinex 原理求解包含较多有效细节信息的反射分量图像; (3) 将图像由 HSV 颜色空间转换到 RGB 颜色空间, 采用颜色恢复函数和增益补偿方法进行颜色恢复与校正, 最终得到增强后的彩色图像。

#### 3.1 颜色恢复函数

有的 Retinex 算法在处理彩色图像时, 有时会出现颜色失真的情况, 如 SSR 和 MSR 等。本文采用一种优化的颜色恢复函数来保持颜色定常, 同时提高图像信号中深色部分和浅色部分的对比度。该函数在 RGB 色彩空间对原图像的每个像素设置以下颜色比重权值:

$$C_k(i, j) = \log\left(1 + \alpha I_k(i, j) / \left(\sum_{k=1}^3 I_k(i, j) + \beta + 1\right)\right), \quad (4)$$

其中:  $k$  表示 RGB 颜色空间下的颜色通道;  $\alpha$  用于调节彩色整体亮度;  $\beta$  用于调节增强处理后图像色彩的比重, 其值越大, 分配越相对平均, 并能缩小颜色通道的权值, 即加重图像高光和暗的效果。该函数对参数的依赖程度较小, 其需要设置的参数数量少于 MSR<sup>[4-5]</sup> 的权值函数。

该颜色恢复函数处理后的图像不会出现明显的颜色迁移, 函数呈对数变换曲线形式, 在保留原图颜色比重的同时有一定的拉伸颜色动态范围的能力。

#### 3.2 颜色空间转换

Retinex 理论的应用前提是灰度世界假设 (gray-world assumption)。在实际应用中, Retinex 算法对于彩色图像的增强处理一般是在图像的 R、G、B 3 个颜色通道下分别进行, 各通道的不均衡增强容易造成图像颜色失真, 且需要执行 3 次, 时间复杂度较高。因此, 本文选择用色彩感知上更加接近人类视觉期望值的 HSV 颜色空间代替 RGB 颜色空间。原图像经过 HSV 颜色空间转换得到饱和度图像  $I_S(i, j)$ 、色调图像  $I_H(i, j)$  和亮度图像  $I_V(i, j)$ , 仅对亮度图像进行增强处理。

#### 3.3 MRF 模型下的 Retinex

夜间图像中存在较多的噪声, 尤其是远景物体的信噪比较低, 在增强处理之后这些噪声也同时被放大。本文采用基于 MRF 的降噪方法用于降噪处理, 将最大后验概率 (Maximum A Posteriori, MAP) 作为最优化准则, 使得构建的 MRF 模型的能量最小。这样, 可以在保持边缘信息的前提下平滑噪声, 另外, 采用基于随机场模型的降噪技术能克服传统图像恢复方法的不足<sup>[8]</sup>。

本文方法通过 Bayes 公式进行最大后验概率估计, 即最大化下面公式:

$$p(R_V | I_V, L_V) \propto p(I_V | R_V, L_V) p(R_V | L_V), \quad (5)$$

式中:  $I_V$ 、 $R_V$ 、 $L_V$  分别为原图像的亮度图像、亮度图像对应的反射分量和照度分量;  $p(R_V | L_V)$  为先验概率, 其能反应出将要求解的  $R_V$  应具有的性质;  $P(I_V | R_V, L_V)$  为似然函数, 表示图像噪声服从的分布。MAP 目标就是在满足最大后验概率的条件下求出图像反射分量的估计值。在实际计算中通常对式(5)取对数, 将最大后验概率问题通过对数似然函数转换为最小化其对应的能量函数的问题:

$$E(R_V | I_V, L_V) = \underbrace{E(I_V | R_V, L_V)}_{E_{\text{data}}} + \underbrace{E(R_V | L_V)}_{E_{\text{smooth}}}. \quad (6)$$

上述能量函数由数据项和平滑项组成, 下面分别进行叙述。

##### (1) 数据项

公式 6 中  $E_{\text{data}}$  为数据项, 定义为:

$$E_{\text{data}} = \sum_{(i, j) \in X} \rho \left\{ \frac{|\log I_V(i, j) - \log \tilde{L}_V(i, j) - \log R_V(i, j)|}{\sigma} \right\}, \quad (7)$$

式中:  $X$  为图像的像素集合;  $\tilde{L}_V$  为  $L_V$  的估计值,

本文将在 3.4 小节给出其求法; $\rho$  为与  $\sigma$  有关的噪声分布函数,一般采用高斯分布,即  $\rho(t) = t^2$ 。

### (2)平滑项

公式(6)中的  $E_{\text{smooth}}$  称为平滑项,表示对相邻像素间一致性的约束。定义如下:

$$E_{\text{smooth}} = \lambda \sum_{(i,j) \in X} D(i,j) \sum_{(k,l) \in N} \rho_g(|\log R_V(i,j) - \log R_V(i+k, j+l)|), \quad (8)$$

式中: $\lambda$  为均衡数据项与平滑项的权重; $N$  为像素  $(i,j)$  的相邻像素集; $\rho_g$  为关于图像反射分量的梯度分布函数,一般采用线性函数。 $D(i,j)$  为指数退化函数,在本文中定义为:

$$D(i,j) = \max(e^{-n * E_a(i,j)}, \omega_{\min}), \quad (9)$$

其中: $E_a(i,j)$  为能量矩阵,图像像素邻域梯度变化越大,其对应的值越大,它的求法将在 3.4 节给出; $n$  为大于零的常数,用于调节能量矩阵的数值范围; $\omega_{\min}$  为函数的数值下限。

指数退化函数用于避免图像边缘过于平滑,增加数据项在物体边缘处的权重,力求在迭代求解过程中保持场景的细节信息。

本文采用基于 Graph Cuts 的 alpha-expansion 算法<sup>[9]</sup> 寻求能量函数的最优解。在 MRF 模型下求解图像的反射分量  $R_V(i,j)$  不仅可以有效地抑制噪声,而且能减小图像的边缘振荡,突出边缘细节,最终得到较为理想的增强效果。

### 3.4 照度分量的估计

由于照度分量具有局部平滑的特性,本文采用引导滤波对原图进行平滑操作,从而估计出照度分量。假定原图与照度分量满足以下局部线性模型:

$$\tilde{L}_V = aI_V + b, \quad (10)$$

其中: $a$  与  $b$  是线性模型的系数。在某一个局部区域内,它们的值视为常数。这个模型也可应用在图像抠图、超分辨率重建和图像恢复中。这里通过最小化下面能量方程求解式(10)中的  $a$  与  $b$ :

$$E(a,b) = \sum ((aI_V + b - \tilde{L}_V)^2 + \epsilon a^2), \quad (11)$$

其中: $\epsilon$  为正则化参数,以防止系数  $a$  的值过大。通过线性退化<sup>[11]</sup> 的方法可以求出能量方程(11)的解,最终得到照度分量的估计值。引导滤波能够在保留边缘的同时,进行良好的平滑操作,其时间复杂度是  $O(N)$ ,效率较高。每个像素对应的参数  $a$  可以形成反应梯度变化的能量矩阵  $E_a$ ,用

于 3.3 中 MRF 模型的构建。

### 3.5 颜色恢复与增益补偿

为避免图像增强后颜色失真<sup>[12-13]</sup>,需要对增强后的图像进行颜色恢复。首先结合反射分量  $R_V(i,j)$ 、饱和度图像  $I_S(x,y)$  与色调图像  $I_H(x,y)$  将图像由 HSV 颜色空间转换到 RGB 颜色空间,得到  $R_{\text{RGB}}(i,j)$ ,然后需要根据 3.1 节中的颜色恢复函数恢复原图颜色:

$$R'(i,j) = C_i(i,j) R_{\text{RGB}}(i,j). \quad (12)$$

此时获得的反射图像  $R'(i,j)$  一般整体偏暗,且对数域中的计算经常会出现负值,需要通过进一步调整以提高图像质量,本文采用增益补偿方法对图像进行修正,即:

$$R(i,j) = g * (R'(i,j) - \min(R'(i,j)))^{1/\gamma}, \quad (13)$$

其中: $g$  为增益系数;式(13)以  $R'(i,j)$  中颜色通道的最小值作为偏移量; $\gamma$  为校正参数,取值为  $[1, +\infty)$ ;  $R(i,j)$  为最后得到的反射分量,即增强后的图像。式(13)的处理实质上是为了去除  $R'(i,j)$  中部分较高或较低的非有效显示的图像信号,以达到较好的视觉效果,同时使视觉信息损失最小。

## 4 实验仿真与分析

为验证本文算法的有效性,在 Matlab 平台(CPU 为 intel 双核,主频为 2.66GHz)上对多幅彩色图像进行分组实验,分别从主观视觉效果和客观质量评价两方面对其进行分析。本文还与多种基于 Retinex 原理的方法进行了比较,包括 SSR、MSR、MSRCR 算法和 Michael Elad 提出的基于双边滤波的 Retinex 算法。算法的主要参数设置如下:(1) SSR 参数设置和参考文献[2]一致;(2) MSR 参数设置同参考文献[3]一致;(3) MSRCR 的 3 个高斯尺度参数为  $\sigma_1 = 15, \sigma_2 = 80, \sigma_3 = 250$ ,其它参数同参考文献[7];(4) Michael Elad 算法的双边滤波参数为  $P_1 = 5, \sigma_s = 100, \sigma_r = 0.3$ , Gamma 参数为  $\gamma = 5$ ,其它参数同参考文献[6]一致;(5) 本文算法 3.1 节的参数为  $\alpha = 15, \beta = 1000$ ; 3.3 节的参数为  $\lambda = 1, n = 100, \omega_{\min} = 0.0001$ ; 3.4 节的参数为  $r = 2, \epsilon = 0.04$ ; 3.5 节中的参数为  $\gamma = 2, g = 0.45$ 。为验证算法的自适应性,在实验中,5 种算法的参数一直保持不变。

本文采用图像均值、标准差、熵、边缘保持指数(EPI)、直方图的交和峰值信噪比(PSNR)对图像增强结果进行客观评价。其中:均值用于评价图像平均亮度的变化,其值越大表示亮度提高越大;标准差用于评价图像的对比度,其值越大表示对比度越大;熵用于衡量图像的信息量,其值越大表示图像包含的信息越多;EPI用于衡量边缘的保持能力,其值越大表示其保持边缘能力越强;直方图的交用来衡量增强前后图像的 RGB 颜色直方图的相似度,其值越大表示越相似、颜色保真能力越强;PSNR用于评价图像增强后噪声干扰情况,PSNR值越大则表示抑制噪声的能力越强<sup>[14]</sup>。

图 1、图 2 为对具有真实场景的夜间彩色图像的增强处理实验,原图大小分别为  $512 \times 384$ ,  $500 \times 374$ ,图(b)~图(f)为 5 种算法对图(a)增强后的结果,表 1、表 2 为其对应的客观评价结果。

图 3 为对模拟图像增强的比较实验,原图大小为  $512 \times 512$ 。在图 3 中,图 3(b)为图 3(a)添加噪声后的结果,图 3(c)为图 3(b)添加 70%透明度的阴影得到的结果,图 3(d)~图 3(h)为 5 种算法对图 3(c)增强后得到的结果,表 3 为其对应的客观评价结果。

表 1 图 1 的客观评价

Tab. 1 Objective evaluation for figure 1

	均值	标准差	熵	EPI
原图	37.747 7	41.313 6	6.311 7	—
SSR	150.395 8	35.971 7	6.995 9	1.128 2
MSR	150.425 1	35.954 9	6.999 8	1.127 8
MSRCR	132.586 6	33.802 2	6.955 8	1.121 3
Michael Elad	103.787 5	35.565 8	7.047 1	1.498 0
本文算法	121.767 6	41.828 0	7.078 6	1.495 7



(a) 原图  
(a)Original image

(b) SSR 算法处理结果  
(b)Results of SSR algorithm

(c) MSR 算法处理结果  
(c)Results of MSR algorithm



(d) MSRCR 算法处理结果  
(d)Results of MSRCR algorithm

(e) Michael Elad 算法处理结果  
(e)Results of Michael Elad algorithm

(f) 本文算法处理结果  
(f)Results of proposed algorithm

图 1 夜间图像 1 增强效果比较

Fig. 1 Comparison of enhancement effects for night time image 1



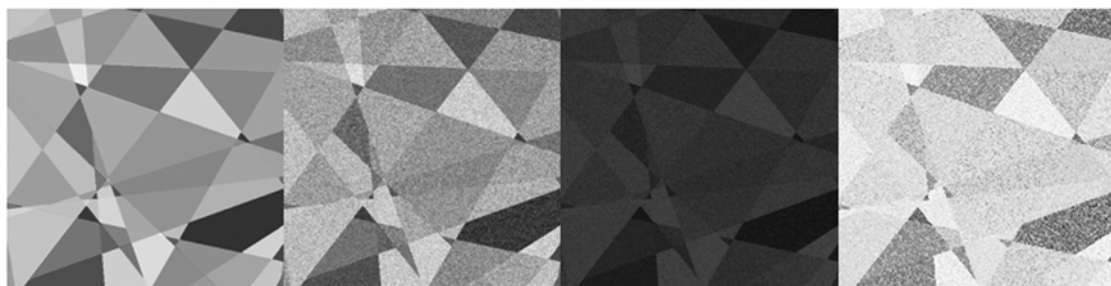
(a) 原图 (b) SSR 算法处理结果 (c) MSR 算法处理结果  
 (a)Original image (b)Results of SSR algorithm (c)Results of MSR algorithm



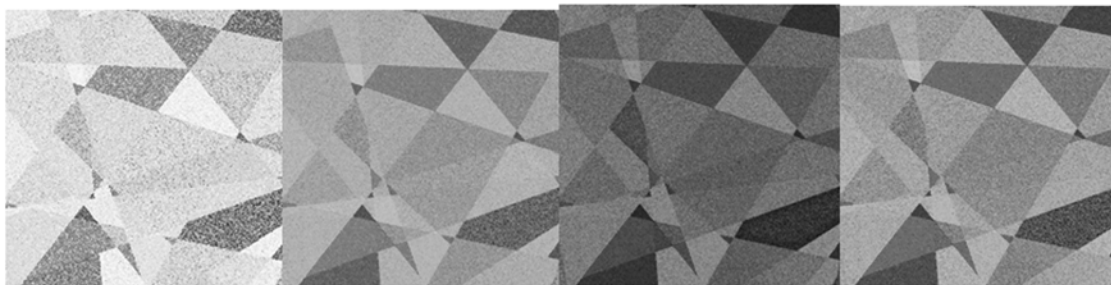
(d) MSRCR 算法处理结果 (e) Michael Elad 算法处理结果 (f) 本文算法处理结果  
 (d)Results of MSRCR algorithm (e)Results of Michael Elad algorithm (f)Results of proposed algorithm

图 2 夜间图像 2 增强效果比较

Fig. 2 Comparison of enhancement effects for night time image 2



(a) 原图 (b) 加噪声图像 (c) 加噪声加阴影图像 (d) SSR 算法结果  
 (a)Original image (b)Image with noise (c)Image with noise and shadow (d)Results of SSR algorithm



(e) MSR 算法结果 (f) MSRCR 算法结果 (g) Michael Elad 算法结果 (h) 本文算法结果  
 (e)Results of MSR algorithm (f)Results of MSRCR algorithm (g)Results of Michael Elad algorithm (h)Results of proposed algorithm

图 3 对模拟图像的增强比较

Fig. 3 Comparison of enhancement effects for simulated image

表 2 图 2 的客观评价

Tab. 2 Objective evaluation for figure 2

	均值	标准差	熵	EPI
原图	44.015 4	63.990 4	6.305 6	—
SSR	126.989 4	64.425 7	7.509 0	1.588 6
MSR	126.986 7	64.389 7	7.504 6	1.588 5
MSRCR	112.439 3	57.216 6	7.500 1	1.342 3
Michael Elad	91.213 9	51.482 9	7.467 9	1.749 3
本文算法	105.276 2	66.387 1	7.375 3	1.811 7

表 3 图 3 的客观评价

Tab. 3 Objective evaluation for figure 3

	均值	标准差	熵	直方图相 似度(%)	PSNR
原图	135.717 0	73.714 6	5.811 2	—	—
图 3(c)	40.372 6	24.421 1	5.875 8	10.879 9	24.466 8
SSR	197.142 1	43.917 6	7.074 9	13.114 3	34.679 6
MSR	197.128 9	43.911 8	7.075 1	13.118 4	34.676 7
MSRCR	148.233 7	31.649 7	6.733 2	17.627 1	28.626 1
Michael Elad	91.980 0	32.739 9	7.047 9	12.101 2	25.158 0
本文算法	132.229 1	40.615 7	7.321 7	17.323 9	27.333 9

由表 1、表 2 与表 3 的客观数据显示,5 种算法均在一定程度上增大了图像的均值和熵值。这说明它们都在一定程度上提高了图像的亮度、丰富了图像信息、提高了清晰度。3 个表中的标准差值不同则表明算法增强对比度的能力存在差异。除本文算法外,一些算法有时反而降低了图像对比度,如表 1 所示。其原因在于:基于 Retinex 的应用前提是灰度世界假设,而本文算法采用 HSV 颜色空间代替 RGB 颜色空间,这在一定程度上避免了由于不均匀增强降低对比度的情况,同时,通过对表 1 与表 2 的 EPI 值的观察,本文算法与 Michael Elad 算法在保持边缘等细节信息方面均强于其它几种算法。结合表 3 来看,Michael Elad 算法虽然在边缘保持方面获得了较好的效果,但是不具有较好的亮度增强和抑制噪声等能力。通过 3 组实验可知,对比其它几种算

法,本文算法可以很好地校正图像亮度,具有较强的对比度增强、细节恢复与抑制噪声能力。

通过对恢复图像的主观观察,以及表 3 的直方图相似度对比分析可知,SSR、MSR 与 Michael Elad 算法获得的颜色效果不如本文算法与 MSRCR,由图 1(d)、1(f)与图 2(d)、2(f)可知,整幅图像颜色鲜艳,这说明本文算法与 MSRCR 均具有较好的颜色保真能力。

另外,通过实验可知,SSR、MSR 与 MSRCR 能够很好地抑制噪声,但在一些较亮区域附近出现了“光晕伪影”现象,如图 1 与图 2 的灯光周围;而 Michael Elad 算法虽然消除了光晕的影响,但是高亮边缘存在过锐化现象,且抑制噪声能力较弱;与之相比,从主观观察来看,本文算法具有更好的细节表现能力,消除了“光晕伪影”,同时,在保证层次性的前提下抑制了过锐化现象。

## 5 结 论

针对广泛应用的 Retinex 算法在处理夜间彩色图像时,容易出现光晕现象、颜色失真、细节丢失与噪声干扰等问题,本文提出了一种基于马尔科夫随机场(MRF)的 Retinex 夜间彩色图像增强算法。通过实验证明,本文算法能够有效地增强夜间图像的亮度与对比度,实现颜色保真,在保留细节信息的同时抑制了噪声,消除了“光晕伪影”现象,有效地提高了夜间彩色图像质量。客观实验表明,本文算法可以使标准差、熵、PSNR 等评价指标至少提高 5%,并将夜间图像的亮度提高了 2 倍以上。

本文采用基于 Graph Cuts 的 alpha-expansion 算法来实现最小化能量。虽然算法效果较好,但是算法构建的 s/t 图中边的数目非常多,运算速度较慢。未来将在优化执行速度满足实时要求方面做进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 葛微,李桂菊,程宇奇,等. 利用改进的 Retinex 进行人脸图像光照处理[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4), 1011-1020.
- [2] GE W, LI G J, CHENG Y Q, et al.. Face image illumination processing based on improved Retinex [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4), 1011-1020. (in Chinese)
- [3] JOHNSON D J, RAHMAN Z, WOODRILL G A. Properties and performance of a center/surround Retinex [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(3): 451-462.
- [4] TAREL J, HAUTIERE N, CARAFFA L et al..

- Vision enhancement in homogeneous and heterogeneous fog [J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2012,4(2):6-20.
- [4] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODSELL G A. A multi-scale Retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(7): 965-976,4121:6-20.
- [5] RAHMAN Z, JOBSON D J, WOODSELL G A. Retinex processing for automatic image enhancement [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, 13(1):100-110.
- [6] ELAD M. Retinex by two bilateral filters [C]. *Scale-Space and PDE Methods in Computer Vision Lecture Notes in Computer Science*, 2005, 3459:217-229.
- [7] RAHMAN Z, JOBSON D J, WOODSELL G A, *et al.*. Image enhancement, image quality, and noise [C]. *San Diego: Photonic Devices and Algorithms for Computing VII*, SPIE, 2005, 5907: 164-178.
- [8] NISHINO K, KRATZ L, LOMBARDI S. Bayesian defogging[J]. *International Journal of Computer Vision*,2012,98:263-278.
- [9] FIX A, GRUBER A, BOROS E, *et al.*. A graph cut algorithm for higher-order Markov Random Fields [J]. *2011 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2011,1020-1027.
- [10] 何莲,张启衡.应用弦切变换提取几何特征实现目标检测[J]. *光学精密工程*, 2010,18(8):1904-1913.
- HE L, ZHANG Q H. Object detection based on geometric feature extracted by chord-tangent transformation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8):1904-1913. (in Chinese)
- [11] HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering [C]. *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, Berlin: Springer-Verlag, 2010: 1-14.
- [12] 陈洪财. 适于 LCM 应用的彩色图像全局不失真增强算法[J]. *液晶与显示*, 2013,28(3): 446-449.
- CHEN H C. Color image globally without distortion enhancement algorithms suitable for LCM application [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*,2013, 28(3): 446-449. (in Chinese)
- [13] 朱明,孙继刚,郭立强.彩色图像四元数矩不变量的研究[J]. *中国光学*, 2011,4(5): 497-502.
- ZHU M, SUN J G, GUO L Q. Quaternion moment invariant for color image [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2011, 4(5):497-502. (in Chinese)
- [14] 陈勇,李愿,吕霞付,等.视觉感知的彩色图像质量积极评价[J]. *光学精密工程*, 2013,21(3):742-750.
- CHEN Y, LI Y, LV X F, *et al.*. Active assessment of color image quality based on visual perception [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(3):742-750. (in Chinese)

## 作者简介:



赵宏宇(1984—),男,河北唐山人,博士研究生,2011年于内蒙古农业大学获得硕士学位,主要研究方向为计算机视觉与图像处理。E-mail: asas.014@163.com

## 导师简介:



肖创柏(1962—),男,湖南临湘人,教授,博士生导师,计算机学会理事,1995年于清华大学获得博士学位,主要研究方向为数字图像处理、音视频信号处理和网络通信。E-mail: cbxiao@bjut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)