

# 一种改进的具有色彩保护的多尺度 Retinex 图像增强算法

张翔<sup>1</sup> 王伟<sup>2</sup> 肖迪<sup>1</sup>

(南京工业大学电气工程与控制科学学院 南京 211800)<sup>1</sup>(海军医学研究所航空医学研究室 上海 200433)<sup>2</sup>

**摘要** 针对图像增强存在的光晕伪影、颜色失真等问题,在 MSRCP(Multi-Scale Retinex with Chromaticity Preservation)的基础上提出一种改进的多尺度 Retinex 图像增强算法。该算法首先计算原图像的强度图像;然后采用引导滤波对强度图像进行平滑处理,估计出照度分量,进而根据 Retinex 原理估计出反射分量;最后在颜色恢复函数中引入 S 型曲线函数得到最终的增强图像。实验结果表明,该算法可以有效解决光晕伪影现象,提高细节信息,使增强图像的整体色彩与原图一致,改善了图像整体的视觉效果。

**关键词** Retinex, MSRCP, 图像增强, 引导滤波, S 型曲线函数

**中图分类号** TP391.41 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.10.045

## Improved Image Enhancement Algorithm Based on Multi-scale Retinex with Chromaticity Preservation

ZHANG Xiang<sup>1</sup> WANG Wei<sup>2</sup> XIAO Di<sup>1</sup>

(College of Electrical Engineering and Control Science, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China)<sup>1</sup>

(Aviation Medicine, The Naval Medical Research Institute, Shanghai 200433, China)<sup>2</sup>

**Abstract** An improved image enhancement algorithm based on MSRCP(multi-scale Retinex with chromaticity preservation) was proposed to solve the problems of halo artifacts and color distortion. Firstly, the intensity image of the original image is obtained. Then, the intensity image is smoothed by guided filtering and the illuminance component is estimated. And the reflection component is estimated according to the principle of Retinex. Finally, in the color restoration function, the S curve function is used to obtain the final enhanced image. The experimental results show that this algorithm can effectively solve the phenomenon of halo artifacts and improve the details. The overall color of the enhanced image is consistent with original image. The overall visual effect of the image is improved.

**Keywords** Retinex, MSRCP, Image enhancement, Guided filter, S curve function

采集图像时因环境因素的影响,图像均有对比度低、图像不清晰的现象,为了从图像中得到有用的细节,需要使用图像增强技术。图像增强技术的目的就是突出图像中的感兴趣区域并减弱或去除不需要的信息,使得有用信息得到加强,从而得到与实际应用更加匹配或人眼对图像中所包含的关键信息更易识别的图像<sup>[1]</sup>。

图像增强技术包括直方图均衡化<sup>[2]</sup>、小波变换方法<sup>[3]</sup>、Retinex 方法等。其中,Retinex 具有高动态范围压缩、局部对比度增强、保持图像色觉恒常性等优点,对夜间、背光、雾天等图像均具有良好的增强效果<sup>[4]</sup>。在 Retinex 原理的基础上,Jobson 等提出了典型的单尺度 Retinex(Single Scale Retinex, SSR)、多尺度 Retinex(Multi-Scale Retinex, MSR)和带彩色恢复的多尺度 Retinex(Multi-Scale Retinex with Color Restoration, MSRCR)<sup>[5-8]</sup>。MSR 在 SSR 的基础上提高了细节的表现,MSRCR 则在 MSR 的基础上使颜色恢复更加真实。2014

年,针对 MSRCR 颜色恢复存在颜色反转风险的问题,Petro 等提出了带有色彩保护的多尺度 Retinex(Multi-Scale Retinex with Chromaticity Preservation, MSRCP)<sup>[9]</sup>,该方法可以更好地恢复场景的真实颜色。本文算法就是在 MSRCP 算法的基础上进行改进来实现图像增强。

目前,基于 Retinex 原理的图像增强算法存在不同程度的光晕伪影、颜色失真等问题。鉴于此,本文提出一种改进的 Retinex 图像增强算法。首先计算原始图像的强度图像,然后用引导滤波替代高斯滤波对强度图像进行平滑处理,最后将 S 型曲线函数引入颜色恢复函数。实验结果表明,本文算法有效避免了光晕伪影和颜色失真现象,在抑制噪声的同时保持了细节信息,使增强后的图像更加协调和自然。

## 1 Retinex 理论

Retinex 理论最早发展于 1964 年,由 Land 等用于模拟人

投稿日期:2017-09-14 返修日期:2017-12-27 本文受全军后勤科研项目(BHJ14C017),武器装备军内科研项目(14A509),国家自然科学基金资助项目(61403190),教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20133221120012)资助。

张翔(1991-),男,硕士生,主要研究方向为数字图像处理、计算机视觉;王伟(1976-),男,博士,副研究员,主要研究方向为生物医学工程、卫生装备;肖迪(1975-),女,博士,副教授,主要研究方向为图像处理、模式识别, E-mail: xiaodi@njtech.edu.cn(通信作者)。

类感知视觉如何感知场景。Retinex 理论认为人类视觉系统不会感知到绝对亮度,而感知到的是相对亮度,因此把人类视觉系统感知的图像分为两个部分:

$$I(x, y) = L(x, y) \cdot R(x, y) \quad (1)$$

其中,  $I(x, y)$  为人眼或设备接受的图像;  $L(x, y)$  为照度分量,反映了环境对物体造成的影响,表现出了图像的低频信息;  $R(x, y)$  为反射分量,反映了图像物体的本质属性,表现出了图像的高频信息。它们之间有下列关系:

$$\log(R(x, y)) = \log(I(x, y)) - \log(L(x, y)) \quad (2)$$

若想获得反射分量  $R(x, y)$ , 首先要求得照度分量  $L(x, y)$ , 根据中心环绕思想, 则有:

$$\log(L(x, y)) = \log(I(x, y) * G(x, y)) \quad (3)$$

其中,  $*$  为卷积符号;  $F(x, y)$  为归一化的环绕函数, 一般为二维高斯函数:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\pi\sigma^2}} \quad (4)$$

其中,  $\sigma$  为高斯函数的尺度。SSR 是只有一个  $\sigma$  的 Retinex, 而 MSR 可以定义为多个 SSR 的加权和, 如式(5)所示:

$$\log(R(x, y)) = \sum_{n=1}^N w_n (\log(I(x, y)) - \log(I(x, y) * G_n(x, y))) \quad (5)$$

其中,  $N$  为尺度的个数,  $n$  为尺度值,  $w_n$  为每个尺度的权重。通常取  $w_n = 1/3, N = 3$ 。

## 2 本文方法

### 2.1 强度图像

采用 MSR 算法处理彩色图像时, 分别把 R, G, B 空间图像作为初始图像进行处理。MSRCP 算法将强度图像作为初始图像, MSR 处理后的初始图像与自身的比例为放大因子, 将放大因子映射到原始图像的每个 RGB 通道中, 在增强图像的同时保留原始图像的颜色分布。强度图像的获得如式(6)所示:

$$Int(x, y) = \max(I_R(x, y), I_G(x, y), I_B(x, y)) \quad (6)$$

其中,  $I_R, I_G, I_B$  分别为原始图像 RGB 通道图像。

### 2.2 基于引导滤波估计照度分量

高斯滤波作为环绕函数时, 增强的图像在边缘地区会有光晕伪影现象, 常见的解决办法是用双边滤波替代高斯滤波作为环绕函数, 这样不仅有效避免了光晕伪影现象, 而且很好地保留了图像的细节信息<sup>[10]</sup>。但是双边滤波运算复杂, 时间复杂度高, 使用时效率非常低下, 鉴于此, 同样具有保持边缘能力的引导滤波更具有实用价值。引导滤波通过盒子滤波和积分加速的方法使其运算非常简单, 大大加快了计算速度, 并且在细节信息的表现上优于双边滤波。本文采用引导滤波作为环绕函数估算照度分量, 引导滤波在二维窗口的线性模型为:

$$q_i = a_k Int_i + b_k, \forall i \in \omega_k \quad (7)$$

其中,  $\omega_k$  为二维窗口,  $i$  为像素索引,  $q_i$  为窗口内输出的像素值,  $a_k$  和  $b_k$  是线性函数的系数。则最小化窗口  $\omega_k$  的代价函数为:

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} ((a_k Int_i + b_k - Int_i)^2 + \epsilon a_k^2) \quad (8)$$

其中,  $\epsilon$  是防止  $a_k$  过大的正则化参数。估计照度分量的结果取决于  $\epsilon$  的取值,  $\epsilon$  较小时, 反射分量边缘保持较好, 光晕不明显, 平滑程度较小; 相反,  $\epsilon$  较大时, 反射分量边缘保持较差, 光晕更明显, 平滑程度较大。本文取  $\epsilon = 0.04$ 。根据最小二乘法,  $a_k$  和  $b_k$  有如下求解公式:

$$a_k = \frac{\frac{1}{N_{\omega_k}} \sum_{i \in \omega_k} Int_i^2 - \mu_k^2}{\sigma_k^2 + \epsilon} \quad (9)$$

$$b_k = \mu_k - a_k \mu_k \quad (10)$$

其中,  $N_{\omega_k}$  为窗口  $\omega_k$  的像素总数,  $\mu_k$  和  $\sigma_k$  分别是图像  $Int$  在窗口  $\omega_k$  的像素均值和标准差。

在计算窗口的线性系数时, 一个像素会被多个窗口包含, 则每个像素有多个线性函数。为了求得稳定的  $q_i$ , 需要将所有包含该像素的线性函数值做平均值化处理。利用式(8)对整幅图像做引导滤波处理, 可得:

$$f(Int_i) = \frac{1}{N_{\omega_k}} \sum_{k: i \in \omega_k} (a_k Int_i + b_k) \quad (11)$$

则照度分量为:

$$\log(L(x, y)) = \log(f_n(Int(x, y))) \quad (12)$$

引导滤波作为保持边缘滤波的操作根据式(5)反射分量的求解公式为:

$$R'(x, y) = \sum_{n=1}^N w_n (\log(Int(x, y)) - \log(f_n(Int(x, y)))) \quad (13)$$

其中,  $R'(x, y)$  为估算的反射分量,  $f$  为引导函数滤波,  $w_n = \frac{1}{3}$ 。

文献[11]提出一种自适应设置尺度参数的方法, 其利用引导滤波获取多尺度反射分量, 尺度参数依据图像维数被设置为小、中、大 3 个尺度, 尺度大小即滤波方框的大小, 由  $(2r+1)^2$  决定, 参数  $r$  的取值范围为小尺度  $[1, r_{\min}]$ 、中尺度  $[r_{\min}, r_{\text{mid}}]$ 、大尺度  $[r_{\text{mid}}, r_{\max}]$ ,  $r_{\min}, r_{\max}, r_{\text{mid}}$  的定义分别如下:

$$r_{\min} = \lceil \frac{\min(H, W)}{2^N} \rceil \quad (14)$$

$$r_{\max} = \lceil \frac{\min(H, W)}{2} - 1 \rceil \quad (15)$$

$$r_{\text{mid}} = \lceil \frac{r_{\max} + r_{\min}}{2} \rceil \quad (16)$$

其中,  $H$  和  $W$  为待滤波图像尺寸,  $N$  为尺度个数,  $N = 3$ 。

### 2.3 改进的颜色恢复函数

得到反射分量之后, 需要进行量化操作。MSRCP 采用反对数变换进行量化, 为了使量化后的数据分布广泛, 从而得到高动态的数据, 本文采用直接线性量化, 量化范围为  $(0 \sim 255)$ , 其公式如式(17)所示:

$$R(x, y) = 255 * \frac{R'(x, y) - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \quad (17)$$

其中,  $R_{\max}$  为  $R'(x, y)$  内的最大值,  $R_{\min}$  为  $R'(x, y)$  内的最小值,  $R(x, y)$  为线性量化后的图像。

为了提升图像质量, 接下来对反射分量图像进行 Gamma 亮度调整, 即:

$$Int'(x, y) = (R(x, y))^{\frac{1}{\gamma}} \quad (18)$$

其中,  $\gamma$  为校正参数, 本文取  $\gamma = 3$ ;  $R(x, y)$  为处理后的反射分量。

在 Gamma 亮度调整操作之后, 对  $Int'(x, y)$  再进行一次线性量化拉伸, 然后用颜色平衡算法对得到的  $Int'(x, y)$  进行处理, 目的是延伸  $Int'(x, y)$  中的值, 以便占据尽可能大的动态范围, 避免图像颜色失真。具体方法是在图像动态范围 (0~255) 两边裁剪  $s$  个像素。实验表明, 小范围的裁剪会造成光晕痕迹和色彩缺失, 大范围的裁剪会造成细节缺失和动态范围压缩减弱, 本文考虑到综合因素, 在  $Int'(x, y)$  动态范围两边各裁剪 1% 的像素值。

目前得到的  $Int'$  图像并不是彩色图像, 而是通过初始图像进行 Retinex 处理后的图像, 是单通道图像。为了得到彩色增强图像并使色彩与原图相近, 还要经过颜色恢复函数的处理。首先求得放大因子  $A$ , 即:

$$A_i(x, y) = \frac{Int'_i(x, y)}{Int_i(x, y)} \quad (19)$$

MSRCP 为了使图像与原图色彩保持一致, 对原图 RGB 空间图像进行增强, 通过放大因子  $A$  便可以求取每个通道的值, 即:

$$C(x, y) = A_i(x, y)I_i(x, y) \quad (20)$$

其中,  $I(x, y)$  表示原图的 RGB 空间图像,  $C(x, y)$  表示最后得到的 RGB 空间图像。

本文采用 S 型曲线函数来改进颜色恢复函数, 对原图像较亮区域进行适当程度的增强, 对较暗区域进行较大程度的增强, 并通过对中低灰度值进行线性拉伸来进一步抑制光晕现象。改进的颜色恢复函数如下:

$$W_i(x, y) = \left( \beta - \frac{1}{1 - e^{-\alpha I_i(x, y)}} \right) \quad (21)$$

其中,  $\alpha, \beta$  为调节参数, 共同决定最后增强图像的质量。则最后得到的增强图像为:

$$C(x, y) = A_i(x, y)W_i(x, y)I_i(x, y) \quad (22)$$

## 2.4 算法流程

本文算法的具体步骤如下。

1) 按式(6)求出强度图像作为初始图像。

2) 用引导滤波对亮度图像  $Int$  进行平滑处理, 估计出照度分量, 按式(13)估计出反射分量。

3) 对反射分量进行一系列处理, 包括线性拉伸、Gamma 亮度调整、颜色平衡算法处理。

4) 按式(19)求得放大因子  $A$ , 再按式(21)求出 S 型曲线函数系数, 最后通过式(22)重构图像。

## 3 实验结果与分析

为验证本文方法的效果, 对 3 组实验图片进行仿真实验, 分别从主观视觉效果和客观质量评价两个方面进行验证。实验图片均为 IPOL(Image Processing On Line)Journal 中的实验图像。第一组图片为室外场景, 像素为  $2000 \times 1312$ ; 第二组图片为室内场景, 像素为  $855 \times 645$ ; 第三组图片为自然场景, 像素为  $800 \times 600$ 。实验硬件平台为 Intel Core(TM) i7-

5700HQ, 2.7 GHz CPU, 内存为 8 GB, 软件平台为 visual studio 2013+opencv2.4.13。

本文采用图像均值、标准差、灰度熵、彩色熵、峰值信噪比 PSNR 进行客观评价。图像均值表示图像亮度变化, 标准差表示图像对比度变化, 灰度熵表示图像细节表现, 彩色熵表示图像颜色增强程度, PSNR 表示图像质量。

对比算法为 MSRRCR 和 MSRCP。算法参数的相关设置如下: 1) 对于 MSRRCR<sup>[7]</sup>, 高斯滤波尺度为  $\sigma_1 = 15, \sigma_2 = 80, \sigma_3 = 250$ ; 2) 对于 MSRCP<sup>[9]</sup>, 高斯滤波尺度同 MSRRCR; 3) 对于本文算法, 引导滤波尺度参数<sup>[10-11]</sup>自适应  $r$  由式(14)一式(16)求得,  $\epsilon = 0.04$ , 颜色恢复函数参数  $\beta = 2, \alpha = 0.06$ 。图 1 为本文算法不同参数的对比图。由图 1(b)可知, 当  $\beta$  较大时, 亮区域部分由于增强过度导致细节丢失。由图 1(d)可知, 当  $\alpha$  较大时, 暗区域出现增强不足的现象, 导致对比度不足。图 1(c)在亮区域和暗区域有较好的细节表现和对比度, 因此调节参数根据经验取  $\beta = 2, \alpha = 0.06$ 。



(a)原图 (b) $\beta=2.2, \alpha=0.06$  (c) $\beta=2, \alpha=0.06$  (d) $\beta=2, \alpha=0.18$

图 1 颜色恢复函数参数对图像增强的影响

Fig. 1 Effects of color restoration function parameters on image enhancement

不同算法的实验结果如图 2—图 4 所示。从主观视觉上来看, MSRRCR 算法在暗区域的对比度最高, 但在暗区域内也存在大量噪点, 并且图像整体的色彩偏灰, 与原图场景颜色不相符, 出现颜色失真的现象, 降低了视觉效果。MSRCP 算法基本在保持原图色彩的基础上增强了图像, 避免了颜色失真, 整体观感较好。但是与 MSRRCR 算法一样, MSRCP 在边缘细节上的效果较差, 出现了光晕伪影现象。本文算法不仅有效消除了光晕伪影现象, 且具有更好的细节表现能力, 色彩保真能力也优于另外两种算法, 整体场景的效果与原图一致, 增强效果更加自然。



(a)原图 (b)文献[7]的算法 (c)文献[9]的算法 (d)本文算法

图 2 室外场景增强图像对比

Fig. 2 Comparison of outdoor scene image enhancement



(a)原图 (b)文献[7]的算法 (c)文献[9]的算法 (d)本文算法

图 3 室内场景增强图像对比

Fig. 3 Comparison of indoor scene image enhancement



(a)原图 (b)文献[7]的算法 (c)文献[9]的算法 (d)本文算法

图 4 自然场景增强图像对比

Fig. 4 Comparison of nature scene image enhancement

在客观评价方面,表 1—表 3 分别列出了图 2—图 4 的客观评价指标。由均值可知,本文算法在图像亮度上不如 MSRCR 算法,与 MSRCP 算法持平;由方差可知,本文算法在对比度上比 MSRCR 算法和 MSRCP 算法有所提升;灰度熵和彩色熵说明了本文算法具有较好的细节表现能力,增强了图像的清晰度;PSNR 则说明了本文算法相对于 MSRCR 算法和 MSRCP 算法有较好的抑制噪声的能力。

表 1 图 2 的客观评价

Table 1 Objective evaluation for Fig. 2

方法	均值	标准差	灰度熵	彩色熵	PSNR
原图	62.56	46.17	6.61	19.92	
MSRCR	166.51	42.61	6.89	20.69	6.77
MSRCP	137.72	73.84	7.24	20.86	10.11
本文算法	137.81	74.65	7.41	22.06	10.48

表 2 图 3 的客观评价

Table 2 Objective evaluation for Fig. 3

方法	均值	标准差	灰度熵	彩色熵	PSNR
原图	25.83	24.76	6.85	19.76	
MSRCR	180.84	32.26	7.01	21.09	6.38
MSRCP	51.89	37.99	7.11	21.11	10.01
本文算法	51.26	40.67	7.25	21.59	12.51

表 3 图 4 的客观评价

Table 3 Objective evaluation for Fig. 4

方法	均值	标准差	灰度熵	彩色熵	PSNR
原图	70.44	63.25	7.51	22.48	
MSRCR	161.94	53.07	7.53	22.57	9.55
MSRCP	95.49	55.78	7.71	23.13	13.09
本文算法	103.50	57.20	7.84	23.32	13.62

**结束语** 本文提出了一种改进的 Retinex 图像增强算法,在 MSRCP 的基础上,采用引导滤波对强度图像进行平滑处理,并用 S 型曲线函数改进 MSRCP 颜色恢复函数。实验结果表明,本文算法可以有效避免光晕伪影和颜色失真现象,复原的图像有更好的细节表现和色彩还原度,更符合观察要求。

## 参考文献

- [1] QIN X J, CHENG Y F, FAN Y L, et al. Image Enhancement Algorithm Based on Retinex of Trilateral Filter in HSV Color Space[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2016, 1(1): 168-172. (in Chinese)
- [2] YANG Y, YANG Y D, MEI X, et al. Fast video dehazing based on improved contrast limited adaptive histogram equalization[J]. Computer Engineering and Design, 2015, 36(1): 221-226. (in Chinese)
- [3] SUI D, JIAO Z, YANG J. Image Enhancement Algorithm Based on Wavelet Analysis and Retinex Algorithm[J]. Journal of Jilin University(Science Edition), 2016, 54(3): 592-596. (in Chinese)
- [4] ZHAO H Y, XIAO C B, YU J. Night color image enhancement based on dual MRF model[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2016, 47(10): 3361-3368. (in Chinese)
- [5] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODDELL G A. Properties and performance of a center/surround Retinex[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(3): 451-462.
- [6] TAREK J, HAUTIN, CARAFFA L, et al. Vision enhancement in homogeneous and heterogeneous fog[J]. IEEE Intelligent Transportation System Magazine, 2012, 4(2): 6-20.
- [7] JOBSON D J, RAHAN Z, WOODDELL 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.
- [8] RAHMAN Z, JOBSON D J, WOODDELL G A. Retinex processing for automatic image enhancement[J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 52(1): 7-23.
- [9] PETRO A B, SBERT C, JEAN-MICHEL M. Multi-scale Retinex[EB/OL]. Image Processing on Line, 2014(4): 71-88. <http://www.ipol.im/pub/art/2014/107>.
- [10] XIAO C B, ZHAO H Y, YU J. Rapid Retinex Algorithm for Night Color Image Enhancement Based on Guided Filtering[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(12): 1868-1873. (in Chinese)
- [11] WEN H B, BI D Y, MA S P, et al. Halo-free and Detail Enhancement Based on Multi-scale Retinex for Infrared Image[J]. Infrared Technology, 2016, 38(2): 149-156. (in Chinese)

Retinex 图像增强算法[J]. 小型微型计算机系统, 2016, 1(1): 168-172.

杨骥, 杨亚东, 梅雪, 等. 基于改进的限制对比度自适应直方图的视频快速去雾算法[J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(1): 221-226. (in Chinese)

杨骥, 杨亚东, 梅雪, 等. 基于改进的限制对比度自适应直方图的视频快速去雾算法[J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(1): 221-226.

苏丹, 焦振, 杨杰. 基于小波分析和 Retinex 算法的图像增强算法[J]. 吉林大学学报(理学版), 2016, 54(3): 592-596.

赵宏宇, 肖创柏, 禹晶. 基于双 MRF 模型的夜间图像增强方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(10): 3361-3368. (in Chinese)

赵宏宇, 肖创柏, 禹晶. 基于双 MRF 模型的夜间图像增强方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(10): 3361-3368.

Jobson D J, Rahman Z, WooddeLL G A. Properties and performance of a center/surround Retinex[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(3): 451-462.

Tarek J, Hautin, Caraffa L, et al. Vision enhancement in homogeneous and heterogeneous fog[J]. IEEE Intelligent Transportation System Magazine, 2012, 4(2): 6-20.

Jobson D J, RaHan Z, WooddeLL 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.

Rahman Z, Jobson D J, WooddeLL G A. Retinex processing for automatic image enhancement[J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 52(1): 7-23.

Petro A B, Sbert C, Jean-Michel M. Multi-scale Retinex[EB/OL]. Image Processing on Line, 2014(4): 71-88. <http://www.ipol.im/pub/art/2014/107>.

Xiao C B, Zhao H Y, Yu J. Rapid Retinex Algorithm for Night Color Image Enhancement Based on Guided Filtering[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(12): 1868-1873. (in Chinese)

肖创柏, 赵宏宇, 禹晶. 基于引导滤波的 Retinex 快速夜间彩色图像增强技术[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(12): 1868-1873.

Wen H B, Bi D Y, Ma S P, et al. Halo-free and Detail Enhancement Based on Multi-scale Retinex for Infrared Image[J]. Infrared Technology, 2016, 38(2): 149-156. (in Chinese)

温海滨, 毕笃彦, 马时平, 等. 消除光晕和细节增强的多尺度 Retinex 红外图像增强[J]. 红外技术, 2016, 38(2): 149-156.

秦绪佳, 程燕飞, 范颖琳, 等. 基于三边滤波的 HSV 色彩空间