

一种基于颜色恒常性的低照度图像增强方法

申春辉, 郭陈凤, 周罗岚
(武汉大学, 武汉 430079)

摘要: **目的** 在彩色图像采集过程中, 光源偏暗或曝光不足等因素常导致图像亮度和对比度偏低。提出一种基于颜色恒常性的低照度图像增强方法。**方法** 利用 HSV 颜色空间消除颜色分量之间的相关性。保持色调分量不变, 避免颜色失真; 一方面使用改进后的 MSR(多尺度 Retinex)算法对亮度分量进行增强, 提高图像的亮度和对比度; 另一方面对饱和度分量进行自适应非线性拉伸以提高颜色的饱和度。**结果** 提出的方法能够有效提高图像的对比度和信息熵, 获得较好的视觉效果; 将文中方法同传统 MSR 算法和 MSRCR 算法进行对比, 文中方法各项客观评价指标均优于其他 2 种算法, 并且具有更快的运行速度。**结论** 文中方法能够快速有效地提高低照度图像的亮度和对比度, 并且具有较强的颜色保真和细节再现能力, 实验结果证明了文中方法的有效性。

关键词: 颜色恒常性; 低照度; MSR; 图像增强

中图分类号: TS801.3; TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)03-0134-05

Color Constancy-based Image Enhancement Method under Poor Illumination

SHEN Chun-hui, GUO Chen-feng, ZHOU Luo-lan
(Wuhan University, Wuhan 430079, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a color constancy-based image enhancement method under poor illumination regarding the low image brightness and contrast caused by such factors as poor illumination or underexposure in the process of color image acquisition. The HSV color space was used to eliminate the correlation between the color components and the hue component remained unchanged to avoid color distortion. On the one hand, the luminance component was enhanced with the improved MSR (Multi-scale Retinex) algorithm to strengthen the brightness and contrast of the image. On the other hand, the saturation component was subject to adaptive nonlinear stretching to improve color saturation. The proposed method could efficiently improve the contrast and information entropy of the image, and achieve better visual effects. Compare with the traditional MSR and MSRCR algorithms, the objective evaluation indicators of the proposed method were better, and the proposed method was much faster. The proposed method can efficiently improve the brightness and contrast of the image under poor illumination, and has a stronger ability to maintain color and reproduce image details. Experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

KEY WORDS: color constancy; low illumination; MSR; image enhancement

随着科学技术的不断发展, 如今人们已经可以制造出许多高精度、高性能的图像采集设备(数码相机、扫描仪等)来获取图像。在采集彩色图像过程中, 如果光源偏暗或者曝光不足, 往往会产生阴影或者图像整体偏暗, 导致图像部分信息无法分辨或者无法得到, 而人眼却能在这些情况下正确感知颜色和亮度。人眼的这种在环境光源变化的情况下, 仍可分辨出反射体表面真实颜色的知觉特性即为颜色恒常性。将人

眼的颜色恒常特性用于低照度图像增强, 有着极其重要的现实意义。

目前低照度图像增强方法包括基于直方图的方法^[1]、基于神经网络的方法^[2]、基于小波的方法^[3]、基于暗通道先验规律的方法^[4]、基于梯度域的方法^[5-6]和基于颜色恒常性的方法^[7-10]等。其中, 基于颜色恒常性的方法在提高图像亮度和对比度的同时能够相对较好的保留原图的颜色, 该类方法对夜间图像、低照

收稿日期: 2016-07-29

作者简介: 申春辉(1990—), 男, 武汉大学硕士生, 主攻计算机视觉。

度图像、含雾图像等都能获得不错的处理效果,有着广泛的应用前景。Retinex 系列算法是一类典型的颜色恒常性方法。Land 和 McCann 基于人眼的颜色视觉特性提出了 Retinex 理论^[11],Jobson 等基于 Retinex 理论提出 SSR(单尺度 Retinex)算法^[12],并对其进行了多尺度拓展,提出 MSR 算法^[13]。MSR 算法具有较强的动态范围压缩能力,但用于低照度图像增强时,其存在颜色失真、图像整体泛灰等问题。此外,MSR 算法需要计算多个尺度 SSR 算法的增强结果并取平均值,计算量较大,处理速度与 SSR 相比较慢。在 MSR 算法的基础上,Jobson 等引入彩色恢复系数,提出了 MSRCR(颜色复原的多尺度 Retinex)算法^[14-15]。MSRCR 算法在一定程度上解决了 MSR 算法存在的颜色失真问题,但因其对 MSR 算法处理过程中丢失的彩色信息进行非线性补偿,并不是恢复场景中真实的颜色,本质上违背了颜色恒常性原理^[10]。

文中提出一种基于颜色恒常性的低照度图像增强方法。该方法对 MSR 算法进行改进,结合符合人眼颜色感知特性的 HSV 颜色空间对低照度图像进行增强,有效改善了 MSR 算法存在的颜色失真、图像整体泛灰、信息丢失等问题。实验结果表明,文中方法在提高低照度图像亮度和对比度的同时具有较强的颜色保真和细节再现能力,并且具有较快的运行速度。

1 基于颜色恒常性的低照度图像增强方法

文中提出方法的流程见图 1,其核心思想为:首先将低照度图像从 RGB 颜色空间转换至符合人眼颜色感知特性的 HSV 颜色空间,在 HSV 空间保持色调分量不变,避免了颜色失真;然后利用改进后的 MSR

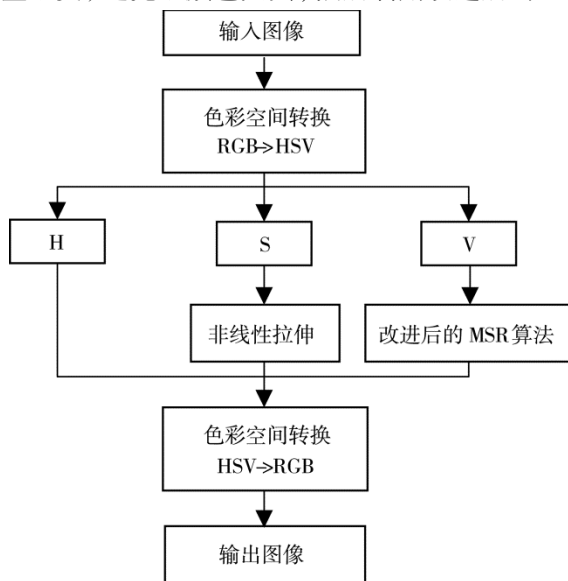


图 1 文中方法流程

Fig.1 Workflow of proposed method

算法对图像亮度分量进行增强,提高图像的亮度和对比度;再对饱和度分量进行自适应非线性拉伸,以提高颜色的饱和度;最后将图像从 HSV 空间转换至 RGB 空间,获得最终的增强结果。

1.1 HSV 和 RGB 颜色空间转换

传统的 MSR 算法在 R, G, B 3 个通道中对图像数据进行处理,容易导致在处理过程中各个颜色通道分量增幅不同而引起颜色失真和饱和度降低。文中借助符合人眼颜色感知特性的 HSV 颜色空间,分别增强亮度分量和饱和度分量。采用 HSV 空间有以下 2 个优点:通过色相、饱和度和亮度分量的分开处理,在提高图像亮度和对比度的同时能够较好地保留图像的原有颜色结构;MSR 算法需要对 R, G, B 三通道分别进行处理,但借助 HSV 空间在调整图像亮度时只需要单独对 V 通道进行处理,将 MSR 算法三通道的计算量压缩到单通道,减小了总的计算量,处理速度更快。

1.2 MSR 亮度分量增强

MSR 算法是 SSR 算法的改进形式,其为多个尺度 SSR 算法的加权平均结果,见式(1)。

$$R(x, y) = \sum_{i=1}^k w_i \ln \frac{S_j(x, y)}{L_j(x, y)} = \sum_{i=1}^k w_i \cdot \left\{ \ln \left[S_j(x, y) \right] - \ln \left[S_j(x, y) * F_i(x, y) \right] \right\}, \quad j=1, \dots, N \quad (1)$$

式中: N 为原图的颜色通道个数,文中取 $N=1$; $S_j(x, y)$ 为原图第 j 个颜色通道分量; $L_j(x, y)$ 表示第 j 个颜色通道分量的照射光分量,对应原图该颜色通道的低频分量; $R(x, y)$ 为反射光分量,即增强后的图像,对应原图中的高频分量;符号 $*$ 为卷积; $F_i(x, y)$ 为中心/环绕函数,一般使用如式(2)所示的高斯函数作为环绕函数估计照射光分量; k 为式(2)中尺度参数个数,一般取 $k=3$; w_i 表示第 i 个中心/环绕函数的加权系数,

其取值应满足 $\sum_{i=1}^k w_i = 1$, 一般取 $w_1 = w_2 = w_3$ 。

$$F_i(x, y) = \lambda e^{-\frac{(x^2 + y^2)}{C_i^2}} \quad (2)$$

式中: C_i 为尺度参数。 C_i 值较小,能够较好地增强偏暗区域的细节信息,实现动态范围压缩。 C_i 值较大,获得较好的颜色保真度,但细节再现能力较差。 λ 为归一化系数,它的取值必须满足式(3)。

$$\iint F_i(x, y) dx dy = 1 \quad (3)$$

低照度图像亮度分量的灰度级集中在暗调区(图 2a),分布区间较小;此外,低照度图像一般都携带一定的噪声。传统 MSR 算法在增强图像时采用对数函数作为灰度变换函数,在暗调区具有十分剧烈的拉伸效果,在处理低照度图像时容易放大噪声,且不利

于后续的对比度拉伸,导致图像整体泛灰和细节信息丢失,见图 2b。文献[16]利用 sigmoid 函数模拟人眼视觉响应的非线性、局部性等特点,获得了较强的动态范围压缩和细节再现能力。基于此,文中利用 sigmoid 函数(式(4))作为 MSR 算法的灰度变换函数,其优点在于: sigmoid 函数符合人眼视觉响应特性;与对数函数相比, sigmoid 函数对灰度级的拉伸更集中于暗调区,符合低照度图像亮度分量灰度级分布规律。此外, sigmoid 灰度变换对暗调区的拉伸相对平缓,不会产生明显的噪声放大现象,且增强后图像的数据分布相对集中,结合基于直方图裁剪的截断式拉伸算法能够获得更好的亮度增强效果,改进后的 MSR 算法见式(5)。

$$T(t) = \frac{1}{1 + e^{-t}} \quad (4)$$

$$R(x, y) = \sum_{i=1}^k w_i T\left(\frac{S_j(x, y)}{S_j(x, y) * F_i(x, y)}\right), \quad j=1, \dots, N \quad (5)$$

式中: T 为 sigmoid 函数,其余变量含义同式(1)。基于直方图裁剪的截断式拉伸算法公式见式(6)。

$$f(m) = \begin{cases} 0, & m < d_{\min} \\ \frac{m - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}}, & d_{\min} \leq m \leq d_{\max} \\ 255, & m > d_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中: m 为式(5)的增强结果; $f(m)$ 为拉伸结果; $d_{\min}$ 和 $d_{\max}$ 分别为下限截断点和上限截断点,两者采用基于直方图裁剪的方法求解。考虑到低照度图像亮度分量灰度级多集中在暗调区, $d_{\min}$ 取 m 的最小值;

$d_{\max}$ 计算过程如下:根据 m 的最小和最大值将其线性归一化至 0 至 255 灰度级;根据归一化后的灰度级将 m 分为 256 组,每组的序列号代表该组元素归一化后的灰度级,部分组中元素个数可能为 0;按序列号递减的顺序计算累积元素个数,当累积元素个数占图像像素点个数的比例大于 α 时终止,取当前序列号对应组中元素的最小值作为 $d_{\max}$,文中取 $\alpha=0.01$ 。实验结果表明,基于直方图裁剪的截断式拉伸算法能够有效拉伸对比度,并且具有一定的噪声抑制能力。

对比了文中改进后的 MSR 算法与传统 MSR 算法对低照度图像亮度分量的增强结果见图 2,改进后的 MSR 算法能够更好地协调图像整体对比度、亮度调整与局部增强之间的关系,较好地再现细节信息。

1.3 饱和度分量自适应非线性拉伸

对饱和度分量进行拉伸能够使图像颜色更加鲜艳饱满,获得更好的视觉效果。考虑到低照度图像的采集环境不同,每幅图像饱和度需要拉伸的程度也不同,文中提出了一种自适应非线性拉伸算法对饱和度进行拉伸,见式(7)。

$$S_{\text{out}} = \left(1 + \frac{\text{mean}(R, G, B)}{\max(R, G, B) + \min(R, G, B) + 1} \right) S_{\text{in}} \quad (7)$$

式中: S_{in} 为原图的饱和度; S_{out} 为拉伸后的饱和度; $\text{mean}(R, G, B)$, $\min(R, G, B)$ 和 $\max(R, G, B)$ 分别为原图对应像素点 R , G , B 颜色分量的平均值、最小值和最大值。实验结果表明,该拉伸算法能够快速有效地增强低照度图像颜色的饱和度,获得较好的颜色视觉效果,见图 3。



a 原图



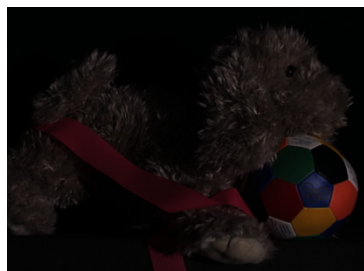
b 传统 MSR 算法



c 文中 MSR 算法

图 2 传统 MSR 算法和文中 MSR 算法效果对比

Fig.2 Comparison of effect between traditional MSR and proposed MSR algorithms



a 原图



b 未进行饱和度拉伸



c 进行饱和度拉伸

图 3 饱和度拉伸效果

Fig.3 Illustration of saturation stretch

2 仿真实验

采用 SFU (Simon Fraser University) 颜色恒常性图库对文中方法进行检验。该图库中包含 529 幅低照度图像, 这些图像的对比度较低且图像细节信息难以辨认。文中对比了传统 MSR 算法、MSRCR 算法和文中算法的处理效果。因为式(1)和式(2)中尺度参数个数和尺度参数值对 3 种算法的增强结果具有较大

影响, 文中在实验时采用文献[17]提出的尺度参数设置方法为 3 种算法设置相同的尺度参数: 尺度参数个数设置为 3; 尺度参数值分别设置为图像较长边的 0.05, 0.15 和 0.5; 加权系数设置为 0.33。客观评价指标采用标准差、熵、色调偏差指数(H)^[7]和峰值信噪比(PSNR)。实验环境为 Intel(R) Core i5 2410 m 2.3 GHz/8 GB 内存、C++。不同算法处理结果对比见图 4—6, 图像的大小为 637×468。对应的客观评价见表 1。

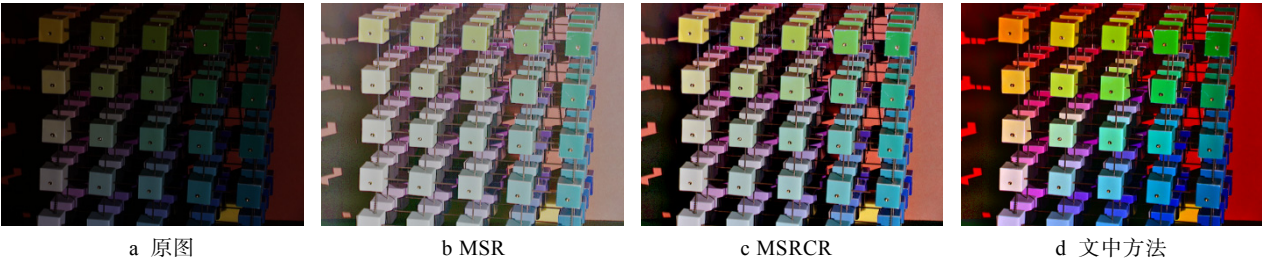


图 4 第 1 组低照度图像增强结果
Fig.4 Results of low illumination image enhancement of group 1

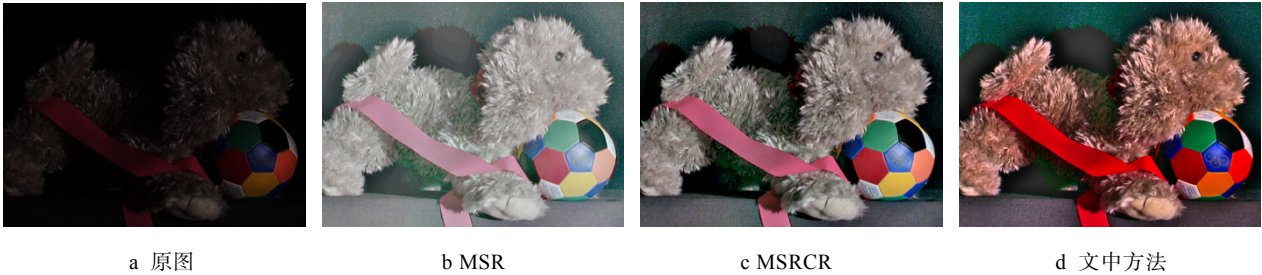


图 5 第 2 组低照度图像增强结果
Fig.5 Results of low illumination image enhancement of group 2

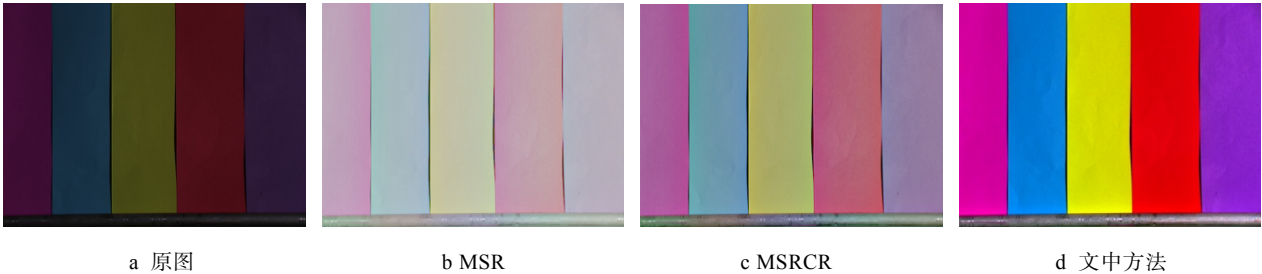


图 6 第 3 组低照度图像增强结果
Fig.6 Results of low illumination image enhancement of group 3

表 1 图 4—6 客观评价
Tab.1 Objective evaluation for Fig.4—6

		标准差	熵	H	PSNR	时间/s
图4	原图	21.33	5.32	—	—	—
	MSR	49.69	6.94	2.95	7.35	1.01
	MSRCR	71.51	7.11	2.85	9.22	1.25
	文中方法	73.28	7.34	0.29	11.21	0.29
图5	原图	14.51	4.91	—	—	—
	MSR	43.38	7.29	1.74	6.33	1.10
	MSRCR	57.11	7.32	0.92	9.35	1.20
	文中方法	58.87	7.42	0.06	10.08	0.37
图6	原图	21.03	4.69	—	—	—
	MSR	10.42	5.13	0.15	11.69	1.53
	MSRCR	32.70	5.76	0.13	14.54	1.69
	文中方法	86.45	6.14	0.03	15.53	0.52

3 结果分析

对不同方法增强结果进行主观观察可以发现, MSR 算法在提高低照度图像亮度的同时放大了噪声, 图像对比度拉伸效果不佳, 且存在明显的颜色失真, 细节再现效果较差; MSRCR 算法比 MSR 算法具有更好的颜色保真度, 但增强后颜色不够饱满, 仍会丢失部分细节信息, 增强效果未达到最优; 文中算法增强结果的颜色更加饱满真实, 在增强图像亮度和对比度的同时较好地再现了原图的细节信息, 具有更好的图像质量。

对比不同方法的客观评价指标可以看出: 在标准差方面, 文中方法平均为 MSR 算法和 MSRCR 算法

的 3.7 倍和 1.56 倍,表明文中方法具有更强的对比度拉伸能力;在熵方面,3 种方法都提高了图像的熵值,说明 3 种方法都能有效丰富图像信息,文中方法平均为 MSR 算法和 MSRCR 算法的 1.09 倍和 1.03 倍,表明文中方法增强结果中所包含的信息更丰富,具有更好的细节再现能力;在色调偏差方面,文中方法平均为 MSR 算法和 MSRCR 算法的 11%和 13%,表明文中方法的颜色保真能力明显高于其他 2 种方法;在峰值信噪比方面,文中方法平均为 MSR 算法和 MSRCR 算法的 1.4 倍和 1.12 倍,表明文中方法的失真程度小于其他 3 种方法。此外,文中方法的平均运行时间仅为其他 2 种方法的三分之一。实验结果表明文中方法在有效提高图像的亮度 and 对比度的同时,具有较好的细节再现能力和较高的颜色保真度,并且具有较快的运行速度。文中方法的综合性能优于对比的其他方法。

4 结语

文中提出一种基于颜色恒常性的低照度图像增强方法,该方法结合改进后的 MSR 算法和符合人眼颜色感知特性的 HSV 空间对低照度图像进行增强。在 SFU 颜色恒常性图像数据库上,通过主观评价与客观评价相结合的方式对比了文中方法同 MSR 算法和 MSRCR 算法。实验结果表明,提出的方法能够快速有效地提高低照度图像的亮度 and 对比度,丰富图像信息,获得较好的视觉效果。对标准差、熵、色调偏差指数和峰值信噪比 4 个客观评价指标的计算分析表明,提出方法的综合性能优于对比的其他方法,证明了文中方法的有效性。

参考文献:

- [1] 何畏. 基于改进直方图的低照度图像增强算法[J]. 计算机科学, 2015, 42(S1): 241—242.
HE Wei. Low-light Image Enhancement Based on Improved Histogram[J]. Computer Science, 2015, 42(S1): 241—242.
- [2] 毛伟民, 赵勋杰. 基于神经网络的低照度彩色图像增强算法[J]. 光学技术, 2010, 36(2): 225—228.
MAO Wei-min, ZHAO Xun-jie. Enhancement Algorithm for Low-illumination Color Image Based on Neural Network[J]. Optical Technique, 2010, 36(2): 225—228.
- [3] 李庆忠, 刘清. 基于小波变换的低照度图像自适应增强算法[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 272—278.
LI Qing-zhong, LIU Qing. Adaptive Enhancement Algorithm for Low Illumination Images Based on Wavelet Transform[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(2): 272—278.
- [4] 遆晓光, 曲悠扬. 一种改进的色彩保持低照度图像增强方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(3): 1—7.
DI Xiao-guang, QU You-yang. An Improved Low Illumination Image Enhancement Algorithm with Color Preserving[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(3): 1—7.
- [5] FATTAL R, LISCHINSKI D, WERMAN M. Gradient Domain High Dynamic Range Compression[J]. Acm Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 249—256.
- [6] 张菲菲, 谢伟, 石强, 等. 人眼视觉感知驱动的梯度域低照度图像对比度增强[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(11): 1981—1988.
ZHANG Fei-fei, XIE Wei, SHI Qiang, et al. A Perception-inspired Contrast Enhancement Method for Low-light Images in Gradient Domain[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2014, 26(11): 1981—1988.
- [7] LIU J, SHAO Z, CHENG Q. Color Constancy Enhancement Under Poor Illumination[J]. Optics Letters, 2011, 36(24): 4821—4824.
- [8] NAIK S K, MURTHY C A. Hue-preserving Color Image Enhancement without Gamut Problem[J]. IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2003, 12(12): 1591—1599.
- [9] 赵宏宇, 肖创柏, 禹晶, 等. 马尔科夫随机场模型下的 Retinex 夜间彩色图像增强[J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 1048—1055.
ZHAO Hong-yu, XIAO Chuang-bai, YU Jing, et al. A Retinex Algorithm for Night Color Image Enhancement by MRF[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(4): 1048—1055.
- [10] 禹晶, 李大鹏, 廖庆敏. 基于颜色恒常性的低照度图像视觉度增强[J]. 自动化学报, 2011, 37(8): 923—931.
YU Jing, LI Da-peng, LIAO Qing-min. Color Constancy-based Visibility Enhancement of Color Images in Low-light Conditions[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(8): 923—931.
- [11] LAND E H. The Retinex[M]. Ciba Foundation Symposium-color Vision: Physiology and Experimental Psychology, 2008.
- [12] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODDELL 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—462.
- [13] ZIA-UR R, DANIEL J J, GLENN A W. Multi-scale Retinex for Color Image Enhancement[C]//International Conference on Image Processing, 1996, 3: 1003—1006.
- [14] JOBSON D J, RAHMAN Z U, WOODDELL G A. A multiscale 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.
- [15] RAHMAN Z U, JOBSON D J, WOODDELL G A. Retinex Processing for Automatic Image Enhancement[J]. J Electronic Imaging, 2004, 13(1): 100—110.
- [16] 肖蔓君, 陈思颖, 倪国强, 等. 基于 Sigmoid 函数局部视觉适应模型的真实影像再现[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3050—3056.
XIAO Man-jun, CHEN Si-ying, NI Guo-qiang, et al. Tone Reproduction Method by a Local Model of Visual Adaptation Based on Sigmoid Function[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 3050—3056.
- [17] 刘茜, 卢心红, 李象霖. 基于多尺度 Retinex 的自适应图像增强方法[J]. 计算机应用, 2009, 29(8): 2077—2079.
LIU Qian, LU Xin-hong, LI Xiang-lin. Adaptive Image Enhancement Method Based on Multi-scale Retinex Algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(8): 2077—2079.