

基于目的性优化及改进直方图均衡化的夜间彩色图像增强

赵华夏 禹 晶 肖创柏
(北京工业大学计算机学院 北京 100124)
(manymoreconl@163.com)

Night Color Image Enhancement via Optimization of Purpose and Improved Histogram Equalization

Zhao Huaxia, Yu Jing, and Xiao Chuangbai
(College of Computer Science, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract Due to the uneven distribution of light at night, the quality of night color image is usually poor, such as low image contrast, low brightness and less texture. Most of existing night color image enhancement algorithms can't preserve the details and eliminate the "halo effect" at the edge areas of high contrast in the nighttime image processing. To solve these problems, we propose an image enhancement algorithm based on purposeful optimization and improved histogram equalization. The process of the algorithm is conducted in the luminance channel of the HSV color space: 1)enhance the contrast of the source image and reserve details furthest through improving the image gradient values using the method of optimization; 2)enhance the image by the improved histogram equalization which increases the probability of pixel values of small probability; 3)enhance the image brightness through gamma correction. Subjective and objective evaluation shows that our algorithm greatly enhances the image contrast and brightness, recovers the image details, and eliminates the "halo effect" efficiently. Experiments on the different nighttime images demonstrate the effectiveness of our approach. In summary, our algorithm is effective to complete the challenging task of enhancing the nighttime image.

Key words purposeful optimization; image enhancement; night color image; histogram equalization; Gamma correction

摘 要 夜间图像由于照明不足,存在图像对比度、亮度偏低,细节不可见,导致图像质量下降.大多夜间彩色图像增强算法往往在高对比度边缘区域存在“光晕伪影”现象,针对这些问题提出了一种基于目的性优化及改进直方图均衡化的图像增强算法.该算法通过目的性优化增强原图像对比度,最大程度地保留细节;然后采用改进的保留细节的直方图均衡化增强图像;最后采用改进的 Gamma 校正对图像进行增强.算法结果通过主观视觉效果以及客观质量评价 2 方面验证,实验结果表明该算法能够有效地增强图像对比度、亮度,恢复图像细节,并消除了“光晕伪影”.

关键词 目的性优化;图像增强;夜间彩色图像;直方图均衡化;伽马校正
中图法分类号 TP751.1

夜间图像增强技术在计算摄影学和计算机视觉领域都有很大的应用意义,主要表现在夜间图像增强技术能够有效地增强摄影效果;一些计算机视觉算法(如光度分析算法)的输入图像往往是非夜间图像,夜间图像增强技术能够增大此类算法的适应范围;一些高级任务(如视频监控)也将受益于夜间图像增强技术。

然而实现夜间图像的增强是一个具有挑战性的任务,目前对于夜间图像质量增强的技术主要包括图像融合和图像增强.图像融合技术包括夜间图像与可见光图像融合^[1-2]以及夜间图像与红外图像融合^[3-4],此类方法都需要在同一场景下采集多幅不同频谱的图像且算法复杂耗时.图像增强技术可分为空间统一方法和空间非统一方法2类,空间统一方法主要包括:对数压缩、伽玛校正、直方图均衡、线性拉伸等,这类方法计算高效、实现简单,但是效果往往不能满足实际的应用;空间非统一方法主要包括:局部直方图均衡、基于人眼对比敏感度的方法^[5]、基于 Retinex 方法^[6]等,这类算法往往处理效果较好,其中基于 Retinex 模型的增强算法对夜间图像具有较好的增强效果.根据估计亮度图像的方法不同,基于 Retinex 模型的增强算法大致分为基于路径比较的方法^[7]、基于迭代的方法^[8-9]和中心环绕计算方法等,其中中心环绕的 Retinex 算法是使用最为广泛的方法,具有代表性的有单尺度 Retinex(singlescale-Retinex, SSR)算法^[10]和多尺度 Retinex(multiscale-Retinex, MSR)算法^[11],以及在此基础上为了克服颜色失真问题而提出的颜色复原的多尺度 Retinex(multiscale-Retinex with color restoration, MSRCR)算法^[12-13].鉴于中心环绕方法存在“光晕伪影”的现象,Elad 等人^[14]提出了基于双边滤波的 Retinex 算法,该算法能够有效地消除“光晕伪影”现象;Meylan 等人^[15]提出了一种基于中心/邻域 Retinex 模型的自适应滤波方法,根据图像边缘方向自适应调整滤波器的形状,以此抑制图像边缘处的 Halo 效应。

本文提出了一种不依赖于 Retinex 模型的夜间图像增强算法,为了增强夜间图像的对比度、保护图像细节,提出了一种基于目的性优化的对比度增强方法;然后在保护细节的情况下,利用改进的直方图均衡化算法以及改进的 Gamma 校正算法增强图像.实验表明,最终结果图像符合人眼观察习惯。

1 目的性优化方法及改进直方图均衡化方法

1.1 基于目的性优化的对比度增强算法

夜间图像往往存在着对比度低、细节不明显等问题.对比度、图像细节都与图像的梯度有很密切的关系,对比度低、细节不明显往往表明相应像素的梯度值比较低.因此本文通过增强图像相应像素的梯度值来增强图像对比度、增强图像细节。

用 I 表示输入图像, R 表示结果图像.像素点 P 的梯度 $\nabla R_p = (\partial_x R_p, \partial_y R_p)$, 定义如下操作计算梯度零范数^[16]:

$$C(R) = \# \{p | |\partial_x R_p| + |\partial_y R_p| < \kappa\}, \quad (1)$$

其中, $\# \{ \}$ 是一个计数操作;式(1)计算满足 $|\partial_x R_p| + |\partial_y R_p| < \kappa$ 的像素个数,即统计梯度值小于 κ 的个数.因此,结果图像 R 的求解可通过优化框架式(2)进行求解。

$$\min_R \left\{ \sum_p (R_p - I_p)^2 + \lambda C(R) \right\}, \quad (2)$$

其中, $\sum_p (R_p - I_p)^2$ 表示结果图像与输入图像的保真度; $\lambda C(R)$ 表示对比度增强项,该项通过最小化梯度值小于 κ 的个数达到增强图像目的,其中 λ 值越大表示对比度增强越明显,式(2)实际是解决增强图像对比度以及图像失真之间的平衡问题, λ 即表示两者之间的平衡比例.式(2)中包含的离散值和统计值不能直接进行运算,我们引入了辅助变量 h_p, v_p 分别近似 $\partial_x R_p, \partial_y R_p$, 因此式(2)可写为式(3):

$$\min_{R, h, v} \left\{ \sum_p (R_p - I_p)^2 + \lambda C(h, v) + \beta ((\partial_x R_p - h_p)^2 + (\partial_y R_p - v_p)^2) \right\}, \quad (3)$$

其中, $C(h, v) = \# \{p | |h_p| + |v_p| < \kappa\}$; β 是 h_p, v_p 近似于 $\partial_x R_p, \partial_y R_p$ 的程度.显然,当 β 足够大时,式(2)和式(3)是相同的.为了求解式(3)本文将其分解为2个子问题:求解 h_p, v_p 问题和求解结果图像 R 问题,其中 h_p, v_p 问题的求解是求解 R 问题的前提.因此,要求解结果图像 R , 就必须先求解 $\partial_x R_p, \partial_y R_p$ 的近似值 h_p, v_p .

求解 h_p, v_p , 可忽略式(3)中的无关项,得到式(4):

$$\min_{h, v} \{ C(h, v) + \frac{\beta}{\lambda} ((\partial_x R_p - h_p)^2 + (\partial_y R_p - v_p)^2) \}. \quad (4)$$

式(4)是一个最优化问题,本文采用的是目的性优化求解,即忽略公式的具体求解而从公式的目的出发,从本文算法出发,结果图像应该具有更高的对比度,反应到梯度即为拥有更高的梯度值、具有更多的边缘. 因此,我们可以将式(4)的目的理解为:求解大于 $\partial x\mathbf{R}_p, \partial y\mathbf{R}_p$ 的近似值 hp, vp . 本文采用改进的 Gamma 变换求解 hp, vp , 如式(5)(6)所示:

$$hp = \begin{cases} \partial x\mathbf{R}_p, & \partial x\mathbf{R}_p < \theta; \\ G(\partial x\mathbf{R}_p), & \partial x\mathbf{R}_p \geq \theta. \end{cases} \tag{5}$$

$$vp = \begin{cases} \partial y\mathbf{R}_p, & \partial y\mathbf{R}_p < \theta; \\ G(\partial y\mathbf{R}_p), & \partial y\mathbf{R}_p \geq \theta. \end{cases} \tag{6}$$

式(5)(6)中引入了一个辅助变量 θ , 可视其为控制梯度值大小的阈值. 对大于该值的梯度值进行改进的 Gamma 变换, 以达到增强图像对比度、图像细节的目的; 而小于该值, 则表示可忽略的梯度值, 不作处理. 式(5)(6)中的函数 $G()$, 表示改进的

Gamma 变换, 该变换同样引入了一个辅助变量 γ , 将在 1.3 节中详细讨论.

求解 $\mathbf{R}$, 忽略式(3)中与 $\mathbf{R}$ 无关项, 得到式(7):

$$\min_{\mathbf{R}} \left\{ \sum_p (\mathbf{R}_p - \mathbf{I}_p)^2 + \beta((\partial x\mathbf{R}_p - hp)^2 + (\partial y\mathbf{R}_p - vp)^2) \right\}, \tag{7}$$

式(7)可利用导数求最值法求得, 为了避免运算过程中涉及到大量的矩阵求逆运算, 先将式(7)进行傅里叶变换, 最终 $\mathbf{R}$ 求解如式(8)所示:

$$\mathbf{R} = F^{-1} \left(\frac{F(\mathbf{I}) + \beta(F(\partial x)^* \times F(h) + F(\partial y)^* \times F(v))}{F(1) + \beta(F(\partial x)^* \times F(\partial x) + F(\partial y)^* \times F(\partial y))} \right), \tag{8}$$

其中, $F()$ 表示傅里叶变换, F^{-1} 表示傅里叶逆变换, $F()^*$ 表示共轭复数. 将已求解的 hp, vp 代入式(8)可求出结果图像 $\mathbf{R}$. 基于目的性优化的增强图像对比度效果如图 1 所示:

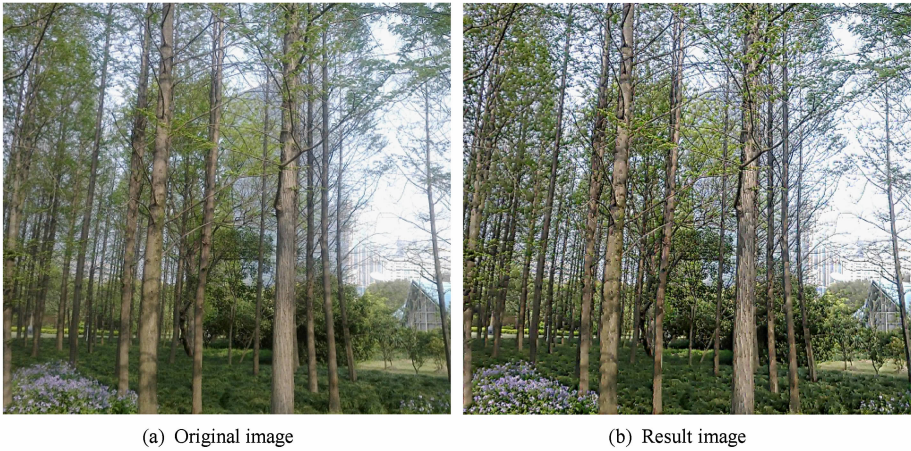


Fig. 1 Effect picture of contrast enhancement based on purposeful optimization.
图 1 基于目的性优化的对比度增强效果图

1.2 改进的直方图均衡化

直方图均衡化是一种常用的图像增强手段, 但往往由于小概率像素的合并或小概率像素依附于其他较大概率像素, 导致像素值数目减少、某些细节消失. 为了保护图像细节, 本文采用了增强小概率像素概率值的方法, 达到了很好的效果.

本文将图像像素分为 3 种: 可忽略像素、待增强像素、不需增强像素, 划分的依据是相应像素值的概率.

$$\begin{cases} \text{可忽略像素, } m < \alpha, \\ \text{待增强像素, } \alpha \leq m \leq \eta, \\ \text{不需增强像素, } m > \eta, \end{cases}$$

其中, $\eta=1/255, \alpha$ 为阈值, $\alpha < \eta, m$ 表示像素值的概

率. 本文处理的像素是待增强像素部分, 为了简便本文将该部分像素值概率都增加了一个相同的概率值, 经检验增加 η 是合适的.

1.3 改进的 Gamma 校正

通过上述 2 个过程得到的结果图像, 基本满足人的视觉要求, 但少数图像存在着某些概率小、像素值低的点. 因此, 采用 Gamma 校正是合适的, 本文对 Gamma 校正进行了改进以达到最佳效果. 改进的 Gamma 校正定义如下:

$$\tilde{\mathbf{R}} = \mathbf{R}^{(\min(\gamma \times \mathbf{R} + \gamma, 1))}, \tag{9}$$

其中, γ 为控制参数, 如图 2 所示, γ 不同代表不同的校正函数. 从图 2 可以看出, 当 γ 越小时, 改进的 Gamma 校正对整体偏暗的图像增强效果更为显著.

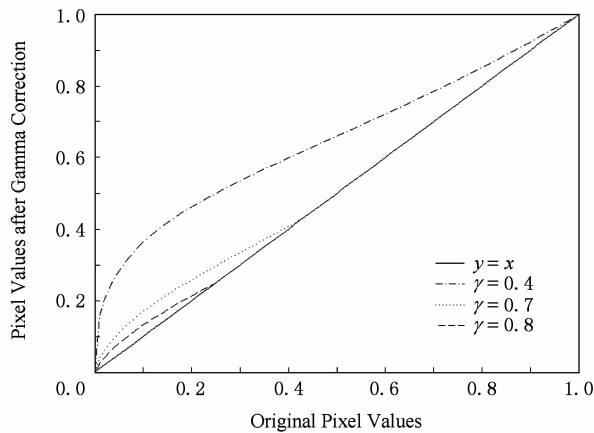


Fig. 2 Mapping table of Gamma correction.
图 2 Gamma 变换映射表

2 本文算法

本文提出了一种基于目的性优化及改进直方图均衡化的夜间彩色图像增强算法,该算法主要由 3 个过程组成:基于目的性优化的图像对比度增强、改进的直方图均衡化增强图像、改进的 Gamma 校正算法增强图像.本文算法可以有效地避免边缘两边高低像素的互相影响,达到消除“光晕伪影”的目的;同时能够有效地增强图像对比度及亮度,恢复图像细节.由于红绿蓝(red, green, blue, RGB)彩色空间颜色的相关性,直接在 RGB 空间增强彩色图像容易造成颜色失真,因此,本文选择在色彩感知上更加接近人类视觉感受的 HSV(hue, saturation, value)颜色空间对图像进行处理,且仅对 HSV 颜色空间中的亮度分量 V 进行处理.算法 1 的流程图如图 3 所示:

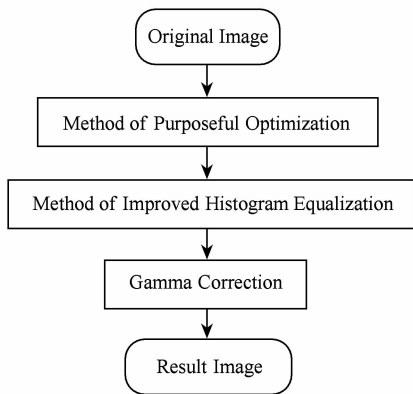


Fig. 3 Algorithm flowchart.
图 3 算法流程图

算法 1. 基于目的性优化的图像对比度增强算法.

输入:待处理的夜间彩色图像 R 、控制参数 β, θ, γ ;
输出:对比度增强后的图像.

算法步骤:

- 1) 将图像 R 颜色空间转换到 HSV 空间,以下过程的处理均是对图像 V 通道进行的;
- 2) 求解图像的梯度值 $\partial_x R_p, \partial_y R_p$;
- 3) 利用式(5)(6)求解图像梯度的近似值 h_p, v_p ;
- 4) 求解 h_p, v_p 对应梯度值图像的傅里叶变换;
- 5) 求解点扩散函数的傅里叶变换;
- 6) 利用式(8)求解增强后的结果图像;
- 7) 将上述得到的图像转换成 RGB 颜色空间并输出结果.

3 实验比较与分析

为验证本文算法的有效性,对多幅夜间彩色图像进行了实验,分别从主观视觉效果和客观质量评价 2 方面对其进行验证.将本文算法与 Elad 等人提出的基于双边滤波的 Retinex 算法和 MSRCR 算法进行比较.相关参数设置如下:1)Elad 算法参数:双边滤波参数 $N=15, \sigma_d=100, \sigma_r=0.3$, Gamma 参数 $\gamma=3$;2)MSRCR 算法参数:高斯尺度参数 $\sigma_1=15, \sigma_2=80, \sigma=250$, 颜色恢复函数参数 $G=192, b=-30, \alpha=125, \beta=46$;3)本文算法参数: $\beta=4, \theta=0.08, \gamma=0.6, \alpha=0.09$.

用主观视觉观察数字图像是一种非常有效并且重要的图像质量评价方法,现将本文算法、Elad 等人提出的基于双边滤波的 Retinex 算法及 MSRCR 算法对夜间图像处理的结果列出,如图 4~7 所示.其中,图 4(a)~7(a)为原图;图 4(b)~7(b)为 Elad 算法处理结果;图 4(c)~7(c)为 MSRCR 算法处理结果;图 4(d)~7(d)为本文算法处理结果.通过观察,3 种算法对夜间图像均有一定的增强效果.其中,MSRCR 算法在处理一些光源较多的场景时结果整体偏亮,但不能做到对细节有效的保护,如图 4(c)~7(c)所示,图像产生“雾化”的现象;如图 4(b)右上角天空区域,Elad 算法处理的结果在高亮边缘存在过度锐化现象,在暗区域存在噪声放大的现象,整幅图像相对突兀、不显柔和,并在高对比度区域产生了“光晕伪影”现象;与二者相比,本文算法具有更好的细节恢复和纹理保持能力,消除了“光晕伪影”现象并较好地抑制了噪声,整幅图像看起来更加和谐自然,处理结果具有更好的视觉表现能力.

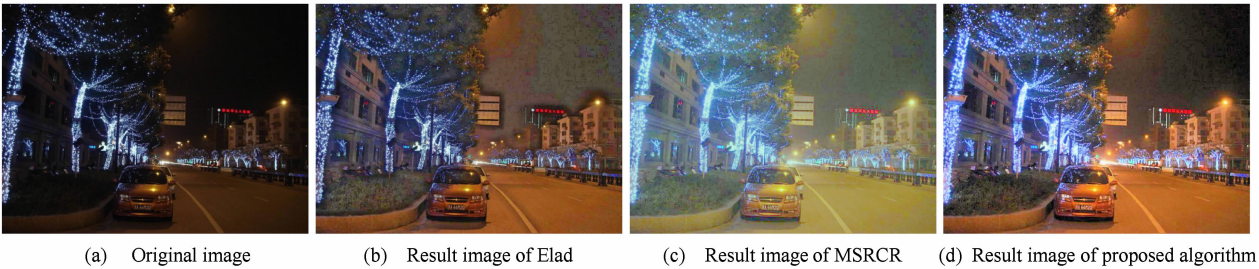


Fig. 4 Nighttime image enhancement(1).
图4 夜间图像增强效果(1)



Fig. 5 Nighttime image enhancement(2).
图5 夜间图像增强效果(2)



Fig. 6 Nighttime image enhancement(3).
图6 夜间图像增强效果(3)

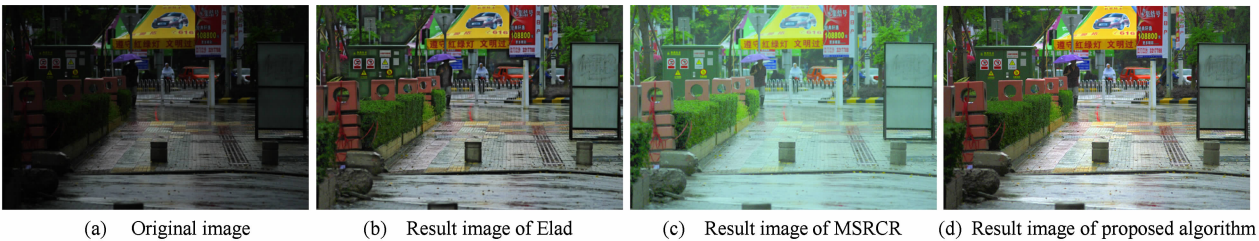


Fig. 7 Nighttime image enhancement(4).
图7 夜间图像增强效果(4)

人眼观察是一种有效的图像评价标准,但它是一种主观的标准. 为了更确定性地说明实验结果,本文还采用了客观质量评价标准来检验算法的有效性. 本文采用图像均值、标准差、熵这3个简洁有效的标准作为评价指标. 均值反映了图像的明暗程度,标准差反映了图像的对比度,熵反映了图像的信息量. 结果如表1~4所示:

Table 1 Criteria of Assessment of Fig. 4			
表1 图4 评价标准			
Name of Images	Mean	Standard Deviation	Entropy
Original Image	32.2873	35.3572	6.0917
Result Image of Elad	74.5191	30.9775	6.7493
Result Image of MSRCR	122.0179	31.2706	6.8892
Result Image of Proposed Algorithm	91.5611	46.0409	7.2600

Table 2 Criteria of Assessment of Fig. 5

表 2 图 5 评价标准

Name of Images	Mean	Standard Deviation	Entropy
Original Image	19.039 9	27.976 5	5.431 6
Result Image of Elad	54.977 0	30.175 8	6.680 4
Result Image of MSRCR	105.612 8	40.317 4	7.268 0
Result Image of Proposed Algorithm	101.659 0	53.517 9	7.424 2

Table 3 Criteria of Assessment of Fig. 6

表 3 图 6 评价标准

Name of Images	Mean	Standard Deviation	Entropy
Original Image	57.490 4	41.793 2	6.625 1
Result Image of Elad	109.158 9	44.535 9	7.154 0
Result Image of MSRCR	174.313 6	33.147 5	6.601 7
Result Image of Proposed Algorithm	114.174 6	50.650 8	7.364 0

Table 4 Criteria of Assessment of Fig. 7

表 4 图 7 评价标准

Name of Images	Mean	Standard Deviation	Entropy
Original Image	37.186 2	32.701 0	6.495 8
Result Image of Elad	87.693 1	47.902 0	7.466 7
Result Image of MSRCR	141.732 3	45.151 9	7.303 5
Result Image of Proposed Algorithm	111.420 0	60.092 6	7.737 7

由表 1~4 可以看出,3 种算法的客观评价指标在一定程度上都有所提高. 具体为:1)在均值方面,MSRCR 算法对于均值的提高效果最为显著,表现为增强后的图像整体偏亮;本文算法对均值的提升效果高于 Elad 算法,图像整体适中,符合人的视觉感受. 2)在标准差方面,本文算法明显优于其他 2 种算法,表明本文算法对图像对比度的增强效果显著,图像细节恢复效果明显. 3)在熵方面,本文算法优于其他 2 种算法,表明本文算法增强后的图像拥有较高的信息量.

综合 3 项客观标准评价指标,本文算法对夜间图像的增强效果要优于其他 2 种算法.

4 结 论

夜间图像往往存在对比度低、细节不可辨认等问题,为了解决夜间图像质量下降问题,本文提出了一种基于目的性优化及改进直方图均衡化的夜间彩

色图像增强算法. 本算法首先使用目的性优化算法增强图像对比度,恢复图像细节;然后采用保持细节的改进直方图均衡化对图像进行处理;最后采用改进的 Gamma 变换对结果图像进行校正,获得最终的增强结果.

实验结果表明,本文算法能够有效地提升夜间彩色图像的对比度,恢复图像细节,消除了“光晕伪影”现象,图像增强结果满足人眼观察习惯.

参 考 文 献

[1] Raskar R, Ilie A, Yu J. Image fusion for context enhancement and video surrealism [C] //Proc of the 3rd Int Symp on Non-Photorealistic Animation and Rendering. New York: ACM, 2004: 85-152

[2] Yamasaki A, Takauji H, Kaneko S, et al. Denighting: Enhancement of nighttime images for a surveillance camera [C] //Proc of the 19th Int Conf on Pattern Recognition. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 1-4

[3] Zhang X, Sim T, Miao X. Enhancing photographs with near infra-red images [C] //Proc of the 26th IEEE Conf on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 1-8

[4] Zhuo S, Zhang X, Miao X, et al. Enhancing low light images using near infrared flash images [C] //Proc of the 17th IEEE Int Conf on Image Processing. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 2537-2540

[5] Majumder A. Contrast enhancement of multi-displays using human contrast sensitivity [C] //Proc of the IEEE Conf on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 377-382

[6] Wang Rongui, Zhang Xinlong, Zhang Xuan, et al. Image enhancement in the compressed domain based on retinex theory [J]. Journal of Computer Research and Development, 2011, 48(2): 259-270 (in Chinese)

(汪荣贵, 张新龙, 张璇, 等. 基于 Retinex 理论的压缩域图像增强方法研究[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(2): 259-270)

[7] Brainard D H, Wandell B A. Analysis of the retinex theory of color vision [J]. Journal of the Optical Society of America, 1986, 3(10): 1651-1661

[8] Mccann J. Lessons learned from mondrians applied to real images and color gamuts [C] //Proc of the 7th IS and T/SID Color and Imaging Conf. Scottsdale, AZ: Society for Imaging Science and Technology, 1999: 1-8

[9] Mccann J. Retinex in Matlab [C] //Proc of the 8th IS and T/SID Color and Imaging Conf. Scottsdale, AZ: Society for Imaging Science and Technology, 2000: 112-121

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

[11] Rahman Z, Jobson DJ, Woodell G A. Multi-scale retinex for color image enhancement [C] //Proc of 1996 IEEE Int Conf on Image Processing. Piscataway, NJ; IEEE, 1996; 1003-1006

[12] Jobson DJ, Rahman Z, Woodell G A. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes [J]. IEEE Trans on Image Processing, 1997, 6(7): 965-976

[13] Rahman Z, Jobson DJ, Woodell G A. Retinex processing for automatic image enhancement [J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1): 100-110

[14] Elad M. Retinex by two bilateral filters [C] //Proc of the 5th Int Conf on Scale Space and PDE Methods in Computer Vision. Berlin; Springer, 2005; 217-229

[15] Meylan L, Susstrunk S. High dynamic range image rendering with a retinex-based adaptive filter [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2006, 15(9): 2820-2830

[16] Xu L, Lu C, Xu Y, et al. Image smoothing via L_0 gradient minimization [J]. ACM Trans on Graphics, 2011, 30(6): 1-11



Zhao Huaxia, born in 1989. Master candidate. His main research interests include digital image processing and pattern recognition.



Yu Jing, born in 1981. Received her MS degree from Beijing University of Technology in July 2007. PhD candidate of Tsinghua University. Member of China Computer Federation. Her main research interests include digital image processing, signal processing, and pattern recognition.



Xiao Chuangbai, born in 1962. PhD, professor, and PhD supervisor of Beijing University of Technology. Senior member of China Computer Federation. His main research interests include digital signal processing, audio and video signal processing, and network communication.