

基于伪暗原色的红外增强技术研究

曹 慧¹, 张宝辉², 陈 磊¹, 杨开峰²

(1.南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;

2.北方夜视科技集团有限公司南京研发中心, 江苏 南京 211106)

摘要: 基于红外图像与可见光雾化图像之间的相似性, 通过比较红外图像的灰度均值和图像亮暗程度的灰度阈值, 实现图像亮暗的自动判别, 进而判断图像是否需要灰度反转。对原图或原图灰度反转图采用类似可见光去雾的暗原色先验算法——伪暗原色算法求出红外图像的粗糙透射率, 结合导向滤波实现粗糙透射率的细化, 依据大气散射物理模型得到最终增强的红外图像。实验结果表明, 采用伪暗原色红外图像增强的算法可以提高红外图像的对比度, 突出其细节, 提高其信噪比, 并且具有良好的视觉效果。

关键词: 红外图像增强; 伪暗原色; 导向滤波; 大气散射物理模型

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2016)06-0476-05

Research of Infrared Images Enhancement Technique Based on Pseudo Dark Channel Prior

CAO Hui¹, ZHANG Baohui², CHEN Lei¹, YANG Kaifeng²

(1.School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2.Nanjing Research Center, North Night-Vision Science & Technology Group Co., Ltd, Nanjing 211106, China)

Abstract: Based on the similarities between infrared images and visible hazy images, automatic identification of an image whether it is light or dark is achieved by comparing the average of the image's gray level and the threshold determining the degree of dark, and then it is known whether the image needs gray scale inversion. Next, similar dark channel prior (DCP) method called pseudo dark channel prior is implemented on original image or inversed image to get the coarse transmission of the infrared image; refined transmission is got by using the guided image filtering; final enhanced infrared image is obtained according to the atmospheric scattering physical model. Experimental results show that the infrared image enhancement algorithm based on pseudo dark channel prior can improve the contrast of infrared images, highlight the details, improve signal to noise ratio, and have a good visual effect.

Key words: infrared images enhancement, pseudo dark channel prior, guided image filtering, atmospheric scattering physical model

0 引言

目前, 红外图像已经广泛应用于军事、医疗、科研等领域, 越来越多的需求也使得人们对红外图像的质量要求越来越高。由于红外热辐射及波长较长等固有的红外特性及热成像探测能力等原因, 红外图像具有对比度低、纹理信息少、信噪比低等特点。红外图像的这些缺点导致成像的红外目标质量差, 因而不利于检测、识别或跟踪。为满足后续红外图像处理要求,

需要对图像进行增强预处理, 提高其对比度, 突出其细节, 使其利于人眼观察^[1-2]。

红外图像增强的算法很多, 其中直方图均衡化算法(HE)是最常用的一种。它根据图像的累积直方图进行灰度重新分配, 使得像素多的灰度级被扩展到更多的灰度级, 像素少的灰度级被压缩到更少的灰度级, 因而提高了图像背景和噪声的对比度, 但也降低了目标的对比度。在 HE 基础上改进的平台直方图均衡化算法(PHE)与 HE 类似, 不同的是平台直方图均衡化对灰度设置了平台阈值, 对大于或小于平台阈值的

收稿日期 2015-12-14; 修订日期: 2016-03-03.

作者简介: 曹慧 (1991-), 女, 硕士研究生, 主要从事图像处理方面的研究。E-mail: chwise@163.com。

灰度值进行了限制。平台直方图均衡化算法是目前常用且有效的红外图像增强算法^[3], 但平台阈值选取得不当很容易造成增强后的图像质量下降。

本文在红外图像增强算法的研究基础上, 提出了一种基于伪暗原色先验的红外图像增强算法。实验结果表明, 该算法能够很好地实现红外图像对比度增强及细节突出, 具有良好的人眼视觉效果。

1 红外图像特征分析

红外图像表征着场景内物体的温度分布, 其灰度值对应着物体的温度值。由于同一环境中的物体之间会进行不间断的热传递和热辐射, 因而红外图像呈现出空间相关性强、灰度值相对集中、对比度差的特点。除此之外, 物体热辐射经过大气传输到达红外系统的过程中必然会受到大气衰减的影响, 文献[4]中提到大气对红外辐射的总衰减公式为:

$$\tau_a(\lambda) = \exp[-(\mu_{\text{H}_2\text{O}} + \mu_{\text{CO}_2})L + \mu_s(\lambda)L - (\mu_t + \mu_s)L] \quad (1)$$

式中: $\mu_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 μ_{CO_2} 是 H_2O 、 CO_2 对红外辐射的吸收

系数; μ_s 及 μ_t 为雨雪气象条件造成的衰减系数; L 为红外辐射的等效路程。

若令 β 为总衰减系数:

$$\beta = \mu_{\text{H}_2\text{O}} + \mu_{\text{CO}_2} - \mu_s(\lambda) - (\mu_t + \mu_s)$$

则式(1)改写为:

$$\tau_a(\lambda) = \exp(-\beta L) \quad (2)$$

1999 年由 Nayar 和 Narasimhan 提出的经典大气散射物理模型描述了可见光雾化图像的退化过程^[5]:

$$I(x) = J(x) \cdot t(x) + A[t(x)], t(x) = \exp(-\beta d) \quad (3)$$

式中: $I(x)$ 是观测到的有雾图像; $J(x)$ 为待求的无雾图像; $t(x)$ 为大气透射率; A 表示大气光强度; β 为大气衰减系数; d 为场景到摄像位置的距离。

对比式(2)和式(3)可以认为, 红外图像在大气传输中受水分子等的影响和可见光图像受雾、霾等粒子的影响有相同之处。红外图像的低对比度、视觉效果模糊的特点与可见光雾化图像偏灰白色、对比度低、视觉效果差的特点也非常相似, 可以将对比度低的红外图像也称为雾化图像。因此采用可见光雾化图像的暗原色先验去雾算法处理红外图像, 实现红外图像的对比度增强。

2 伪暗原色

近年来, 暗原色先验方法^[6]是单幅图像去雾算法中被公认为最好的算法。该方法基于大气散射物理模

型^[5], 由 He 等人依据户外无雾图像库的统计规律总结提出。He 等认为, 在非天空区域, 户外无雾图像中色彩鲜艳的景物、深色马路或物体的影子等大部分物体的 RGB 三通道中至少有一个通道的像素灰度值很低, 甚至接近于 0, 因而再对图像局部区域进行最小值滤波后的灰度值也接近于 0, 这个先验知识被称为暗原色先验。用如下公式^[6]表述:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} [\min_{c \in \{r, g, b\}} J^c(y)], J^{\text{dark}} \rightarrow 0 \quad (4)$$

式中: J^c 是图像 J 的一个颜色通道; $\Omega(x)$ 是以 x 为中心的一个局部方块域; y 是 $\Omega(x)$ 中的任一像素点。对于无雾图像 J , J^{dark} 趋近于 0; 对于有雾图像, 其暗原色灰度值的大小反映了原图的雾化程度。

然而, 红外图像是灰度图像, 没有 RGB 三通道, 因而不存在暗原色的说法。但是对红外灰度图像进行局部最小值滤波后也能得到类似暗原色的图, 该图灰度值的高低对应着红外图像雾化的程度。因此, 将对红外灰度图像进行局部最小值滤波操作获得图像雾化程度的方法称作伪暗原色, 表述为:

$$J^{\text{dark}}_I(x) = \min_{y \in \Omega(x)} [J_I(y)] \quad (5)$$

式中: 下标 I 表示红外图像, 定义的参数与式(4)类似。

3 红外图像增强模型

结合伪暗原色先验和大气散射物理模型, 建立如下红外图像增强模型。针对红外图像特征, 重新定义式(3)中参数的意义: $I_1(x)$ 表示待增强的红外初始图像; $J_1(x)$ 表示增强后的红外图像, $t_1(x)$ 表示红外辐射透射率; A_1 表示环境光。

根据式(3)中透射率 $t_1(x)$ 与场景深度 d 的关系, 可认为在一个局部方块域中 (场景深度未发生变化), 透射率的值为一个常数, 记作 $t_1(x)$ 。对式(3)两边同时除以 A_1 (假定 A_1 是一个已知数), 并同时取最小值滤波操作, 可得:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{I_1(y)}{A_1} \right) = t_1(x) \cdot \min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{J_1(y)}{A_1} \right) + [1 - t_1(x)] \quad (6)$$

根据式(5)可知场景中未雾化的区域的伪暗原色值接近于 0, 因此得到:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{J_1(y)}{A_1} \right) = 0 \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)中可得到粗糙透射率 $t_1(x)$:

$$t_1(x) = 1 - \min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{I_1(y)}{A_1} \right) \quad (8)$$

为了使复原后的图像达到合适的视觉效果,在式(8)中引入一个常数 ω ($\omega \in [0,1]$), ω 的取值偏大会使得增强后的图像偏暗,取值偏小会导致增强后的图像偏亮^[7]。依据经验值,这里 ω 取0.95,式(8)改写为:

$$t_1(x) = 1 - \omega \cdot \min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{I_1(y)}{A_1} \right) \quad (9)$$

以上求得的透射率 $t_1(x)$ 在一个局部方块域中是常数,因而有块状效应。为了提高透射率精度,我们用 He 提出的导向滤波^[8],以待增强的初始图像作导向图,求得细化后的精细透射率 $t_1(x)$,根据式(3)求出最终增强后的图像 J_1 :

$$J_1(x) = [I_1(x) - A_1] / t_1(x) + A_1 \quad (10)$$

式(10)中,分母 $t_1(x)$ 接近于0时会严重影响 $J_1(x)$,因此给 $t_1(x)$ 设定一个下限值,一般取 $t_1^{\min} = 0.1$,式(10)变为:

$$J_1(x) = [I_1(x) - A_1] / \max[t_1(x), t_1^{\min}] + A_1 \quad (11)$$

环境光 A_1 的取值是伪暗原色图像前0.1%灰度值最大的像素对应的原图灰度值中的最大值。

上述红外图像增强算法是针对较明亮的红外图像,其在视觉效果上与雾化图像类似,但偏暗的红外图像并没有这样的特征。然而通过对灰度值偏低的红外图像的灰度反转图像作伪暗原色图像增强,同样可提高图像对比度^[9]。依据人类视觉生理学,物体灰度值(0~255)小于31时人眼感觉黑暗,大于63时感觉明亮^[10]。因此将灰度值47(取31和63的中间值)设置为红外图像亮暗的阈值,比较该值与初始图像灰度平均值的大小,实现自适应伪暗原色红外图像增强算法。表述为:

$$J_1(x) = \begin{cases} \frac{I_1(x) - A_1}{\max[t_1(x), t_1^{\min}]} + A_1, & \text{if } 255 \geq \frac{1}{M \times N} \cdot \sum_{i=1}^{M \times N} I_1(i) > 47 \\ 255 - \left[\frac{255 - I_1(x) - A_1'}{\max[t_1(x)', t_1^{\min}]} + A_1' \right], & \text{if } 0 \leq \frac{1}{M \times N} \cdot \sum_{i=1}^{M \times N} I_1(i) \leq 47 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $M \times N$ 表示图像的像素总数; A_1' 、 $t_1(x)'$ 表示由 $255 - I_1(x)$ 作伪暗原色增强算法过程中的环境光强和精细透射率。该式即为本文提出的自适应伪暗原色红外图像增强模型。

4 实验结果分析与评价

为验证本文算法的有效性,我们在 MATLAB

R2010b 环境下对亮暗程度不同的红外图像(图1、图2)、不同场景的红外图像进行了实验验证(图3)。为客观评价本文算法的性能,我们对比了不同的红外图像增强算法对同一场景的红外图像的处理效果(图4)。图1为基于伪暗原色红外图像增强算法对偏亮的红外图像的处理过程及结果图;图2为该算法对偏暗的红外图像的处理结果。

图1给出了一组基于本文算法处理的灰度值偏高的红外图像及其结果图,包括伪暗原色图、精细透射率图和最终增强结果图。从伪暗原色图中可以看出原图中灰度值较小的部分向外扩张,吞噬了周围灰度值较大的区域,如图1(a)中的白色数字(13:14:30:583)在伪暗原色图中未显现;精细透射率除去了块状效应,还原了原图的边缘;增强后的图像视觉效果明显改善,细节更加清晰。对比原图直方图和增强后的图像直方图,明显看出增强后的直方图灰度级分布更加均衡。

图2给出了本文算法对偏暗的红外图像增强处理的结果,包括原图的灰度反转图(图2(b))、图2(b)的伪暗原色图像增强结果即图2(c),以及对图2(c)进行灰度反转得到的最终增强结果图2(d)。对比图2(a)和图2(d)看出图像对比度和细节信息都得到了显著提高。

图3是采用本文算法针对不同场景的红外图像的增强结果。图3第1排是原图,第2排是对应的实验结果图,显然增强后的图像对比度明显提高,视觉效果良好。这也说明基于原图灰度均值判断图像是否亮暗,进而利用基于伪暗原色先验的红外图像增强算法可行,且有良好的效果。

选择直方图均衡化和双平台直方图均衡化算法与本文算法进行对比。通过局部对比度评价指标和可见边指标来衡量处理后的图像质量。局部对比度指标是将图像分为尺寸相等的若干块,然后计算各子块局部对比度的累加值。该累加值越高说明图像对比度越高^[11]。可见边在文献[12]中是指图像局部对比度超过5%的点,可认为这样的点在视觉上可见,因而图像可见边的数量表征着图像细节的数量。

从表1数据来看,HE、DPHE和本文算法均能不同程度地提高图像对比度。虽然HE处理后的图像获得最大程度的对比度增强,但该算法主要提升背景和噪声,而细节并未突出。如图4(1b)方框内部的噪声明显突出,从而该区域的对比度增大,并非所需的目标与背景之间对比度的增大;图4(2b)红外内部灰度值溢出,失去原有的细节信息。从主观视觉和客观数据两种评价指标均可判断平台直方图均衡化的处理效果比HE的效果好,但是要确定合适的平台阈值是平台直方图均衡化算法的关键。相比HE算法和DPHE算法,本文算法更有优势。从局部对比度指标和可见边指标都显示出本文算法的增强程度更好;从人眼视

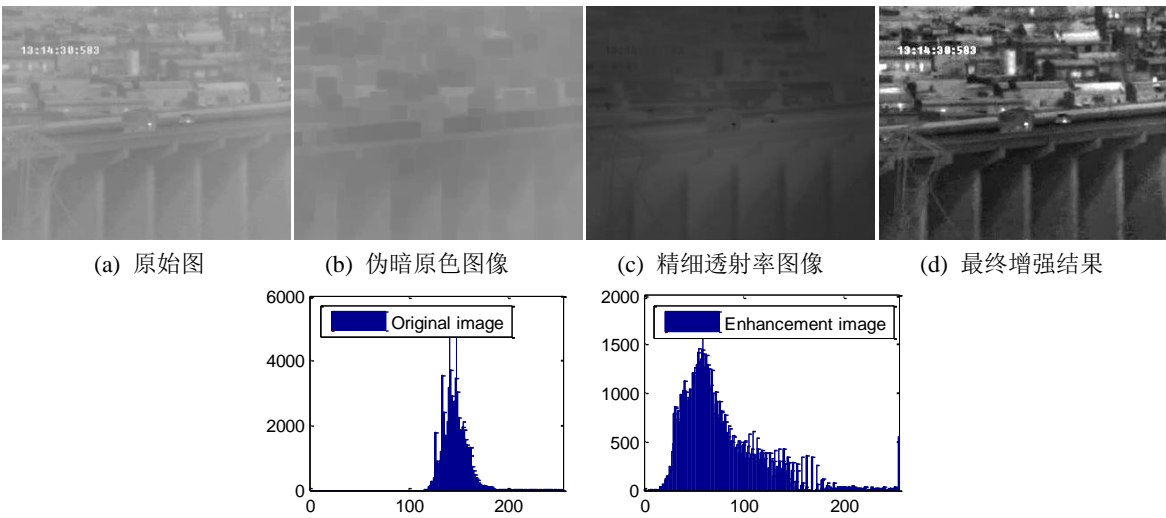


Fig.1 Results of enhancing a bright infrared image processed by pseudo dark channel prior

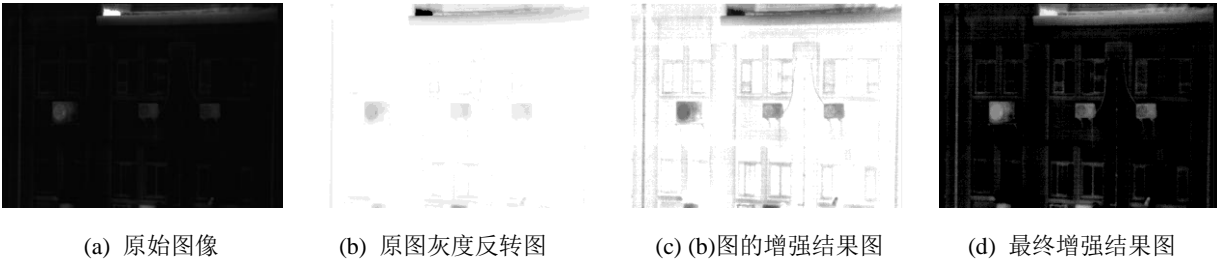


Fig.2 Results of enhancing a dark infrared image processed by pseudo dark channel prior

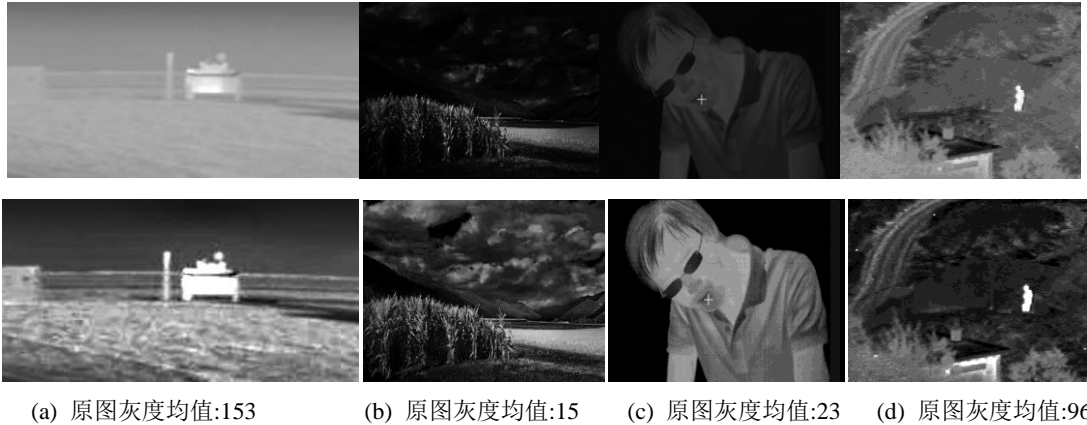


Fig.3 Results of enhancing infrared images processed by auto pseudo dark channel prior

表 1 图 4 中两组图像的局部对比度指标和可见边指标

Table 1 Local contrast and visible edges of two groups of images in Fig.4					
		Original	HE	DPHE	Proposed
Fig.4(1)	局部对比度指标/%	2.7996	14.8725	12.9811	12.3665
	可见边/Pixels	72	24281	23715	27260
Fig.4(2)	局部对比度指标/%	9.9340	15.8148	10.7554	15.6136
	可见边/Pixels	7035	28361	9232	21299

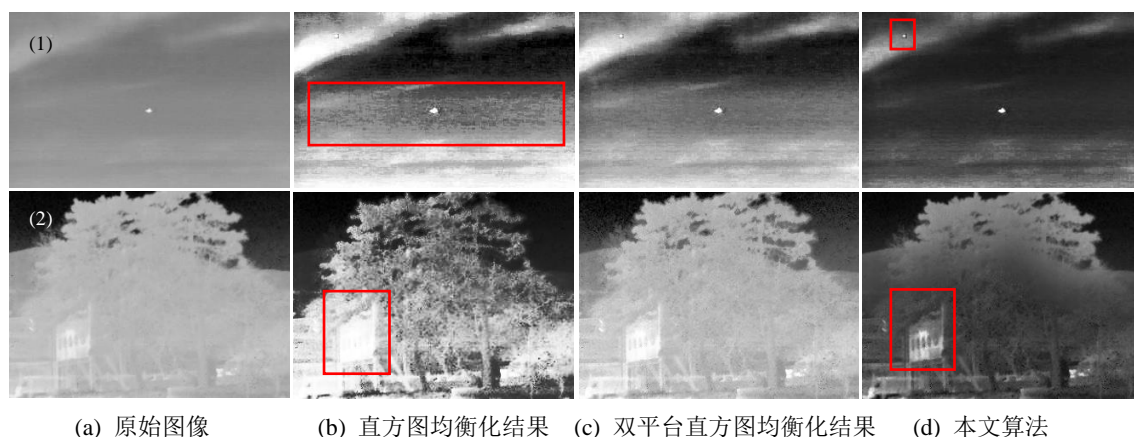


图4 3种算法处理的增强结果

Fig.4 Results of enhancing infrared images processed by three different methods

觉角度看, 本文算法处理的结果细节突出 (如图 4(d) 中方框内部细节), 背景平滑, 噪声比例低。

5 结论

在红外图像和可见光雾化图像在大气衰减过程中具有相似性的基础上, 依据人类视觉生理学, 设置判断图像亮暗的灰度阈值, 比较该阈值与红外图像的灰度均值, 实现图像亮暗的自动判断, 进而判断图像是否需要灰度反转。接着对原图或原图灰度反转图采用局部最小值滤波即伪暗原色算法求出红外图像的粗糙透射率估计; 再以原图为导向图, 通过导向滤波快速获取图像的精细透射率; 最后根据大气散射物理模型, 求出增强后的红外图像。实验结果表明, 采用伪暗原色红外图像增强的算法对亮暗程度不同、场景不同的红外图像增强后, 图像细节突出、对比度高、人眼视觉效果良好; 客观评价指标也表明, 该算法比平台直方图均衡化及直方图均衡化均有更好的提高红外图像对比度的效果。

参考文献:

[1] 于天河, 郝富春, 康为民, 等. 红外图像增强技术综述[J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(S2): 335-338.
YU Tianhe, HAO Fuchun, KANG Weimin, et al. Summarization on the infrared image enhancement technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(S2): 335-338.

[2] 胡奕明, 赵海生, 李云川, 等. 一种基于同态滤波的红外图像增强新方法[J]. 红外技术, 2012, **34**(4): 224-228.
HU Douming, ZHAO Haisheng, LI YunChuan, et al. A new approach to infrared image enhancement based on homomorphic filter[J]. *Infrared Technology*, 2012, **34**(4): 224-228.

[3] 王炳健, 刘上乾, 周慧鑫, 等. 基于平台直方图的红外图像自适应增强算法[J]. 光子学报, 2005, **34**(2): 299-301.
WANG Bingjian, LIU Shangqian, ZHOU Huixin, et al. Self-adaptive contrast enhancement algorithm for infrared images based on plateau

histogram[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 299-301.

[4] 周国辉, 刘湘伟, 徐记伟. 一种计算红外辐射大气透过率的数学模型[J]. 红外技术, 2008, **30**(6): 331-334.
ZHOU Guohui, LIU Xiangwei, XU Jiwei. A math model of calculate the atmospheric transmittance of infrared radiation[J]. *Infrared Technology*, 2008, **30**(6): 331-334.

[5] Nayar S K, Narasimhan S G. Vision in bad weather[C]//*IEEE International Conference on Computer Vision*, 1999, 2:820-827.

[6] He K, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior[C]//*IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2009:1956-1963.

[7] 李毅, 张云峰, 张强, 等. 基于去雾模型的红外图像对比度增强[J]. 中国激光, 2015, **42**(1): 298-306.
LI Yi, ZHANG Yunfeng, ZHANG Qiang, et al. Infrared image contrast enhancement based on haze remove method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(1): 298-306.

[8] He K, Sun J, Tang X. Guided image filtering[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2013, **35**(6):1397-1409.

[9] Zhang X, Shen P, Luo L, et al. Enhancement and noise reduction of very low light level images[C]//*IEEE International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, 2012:2034-2037.

[10] 赵媛, 赵敏, 谢正祥. 基于现代数字图像处理技术对中间视觉对比度分辨率限制(阈值)的测定[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2011, **15**(26): 4841-4844.
ZHAO Yuan, ZHAO Min, XIE Zhengxiang. Measuring the contrast resolution limits(threshold) of mesopic vision based on digital image processing technology[J]. *Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research*, 2011, **15**(26): 4841-4844.

[11] Grigoryan A M, Agaian S S. Transform-based image enhancement algorithms with performance measure[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, **10**(3): 367-382.

[12] Hautière N, Tarel J P, Aubert D, et al. Blind contrast restoration assessment by gradient ratioing at visible edges[J]. *Image Analysis & Stereology*, 2008, **27**(6): 87-95.