

文章编号:1007-2780(2018)09-0816-07

基于双边滤波的多尺度分层色调映射算法

芦碧波,皇甫珍珍,郭 凯,郑艳梅*,李玉静

(河南理工大学 计算机科学与技术学院,河南 焦作 454000)

摘要:为增强高动态范围图像(High dynamic range, HDR)的显示效果,本文提出一种多尺度梯度域色调映射算法。首先提取高动态范围图像的亮度信息,利用双边滤波将高动态范围图像的亮度数据进行多尺度分解,得到基本层和细节层。由于视觉上的亮度变化体现为图像数据的梯度变化,因此可在梯度域对基本层图像进行自适应动态范围压缩,然后加上细节层图像信息,最后再通过色彩校正算法恢复图像色彩,实现 HDR 图像的动态范围压缩。通过对比算法的定量分析表明,本文算法的方差和信息熵的客观指标分别提高了 30.8%和 5.9%,因此,本文方法在压缩 HDR 图像的动态范围的同时,可以更好地保留边界、纹理等细节信息。

关键词:高动态范围图像;多尺度图像分解;图像滤波;梯度压缩;色调映射

中图分类号:TP394.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20183309.0816

Bilateral filter based multiscale layer tone mapping algorithm

LU Bi-bo, HUANGFU Zhen-zhen, GUO Kai, ZHENG Yan-mei*, LI Yu-jing

(School of Computer Science and Technology, Henan Polytechnic University,
Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In order to enhance the display effect of High dynamic range image (HDR), this paper proposed a multi-scale gradient domain color mapping algorithm. Firstly, the luminance information of high dynamic range images is extracted, and the luminance data of high dynamic range images are decomposed in multiple scales by bilateral filtering, and the basic and detailed layers are obtained. Since the change of visual brightness is reflected in the gradient of image data, the adaptive dynamic range compression of basic layer images can be carried out in the gradient domain. Then the detailed layer image information is added, and finally the image color is restored through the color correction algorithm to realize the dynamic range compression of HDR images. The quantitative analysis of the comparison algorithm shows that the objective indexes of variance and information entropy of the algorithm in this paper increased by 30.8% and 5.9% respectively. In this paper, while compressing the

收稿日期:2018-04-09; **修订日期:**2018-07-04.

基金项目:国家自然科学基金(No.U1404103, No.61503124); 2016 年度河南省高等学校重点科研项目资助计划(No. 16A520053); 河南理工大学博士基金(No.B2016-40)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. U1404103, No. 61503124); Funding Plan for Key Scientific Research Projects of Henan Province in 2016(No. 16A520053); Henan Polytechnic University Doctoral Fund(No.B2016-40)

* 通信联系人, E-mail: zhengym02@hpu.edu.cn

dynamic range of HDR images, the details such as boundary and texture are preserved.

Key words: high dynamic range image; multi-scale image decomposition; image filter; gradient compression; tone mapping

1 引言

自然界中,由于光照、环境等因素的影响,形成动态范围很大的自然场景,但传统数字图像可表示的动态范围有限^[1]。为实现更好的视觉效果,往往需要使用高动态范围图像记录场景中的光值。HDR 图像一般使用浮点数表达自然界的光强,可以表示更广的动态范围^[2]。目前已有多种高动态范围图像的显示设备,但现有的输出设备所显示图像的动态范围相对有限,无法较好地显示 HDR 图像。因此,需要使用色调映射技术压缩 HDR 图像的动态范围^[3]。

近年来,国内外的学者对色调映射技术做了大量研究,并取得了较为丰硕的成果。目前常用的色调映射方法主要分为全局映射和局部映射。全局映射算法主要是指将图像中所有像素应用于同一条曲线对 HDR 图像中的每一个像素进行映射,其中曲线的形状取决于图像的内容或者预先给定。该算法操作简单,较为完整地保持图像的明暗效果,不足之处在于细节损失严重。局部色调映射算法较为灵活,该算法对 HDR 图像的不同区域采取不同的映射,通过对局部特征的处理,较为完整地保留细节信息,但是算法的运算量过大,计算效率较低^[4]。

Hyunchan Ahn 等人^[5]提出了一种基于 Retinex 理论的高动态范围图像色调映射技术,Retinex 算法通过去除原始图像中照度分量的影响,求解出了反映物体本质颜色的反射分量^[6]。岳丽等人^[7]提出一种基于 Reinhard 算法的色调映射方法,改变图像不同区域的动态范围,更好地体现图像的细节部分。Lei 等人^[8]提出一种基于

人类视觉系统的色调映射算法,该算法结合视网膜感光细胞的正向模型和逆向模型,完成动态范围的压缩。王璐等^[9]提出在照明环境下显示图像的自适应色调映射,该方法利用亮度增强和自适应色调映射,在不同的光照条件下,特别是强光条件下,明显提高了图像的可读性。为了更好地表示 HDR 图像的局部色彩,Li 等人^[10]提出基于统计聚类的颜色自适应色调映射方法,根据每个图像块的集群进行自适应处理。Xie 等人^[11]考虑到保留细节的同时也兼顾 HDR 图像的局部相关性,提出一种新的保留细节改进方法,通过使用快速聚类算法和梯度引导,提高了色调映射的保真度,但它没有消除光晕现象。芦碧波等人提出了一种基于分区的色调映射算法,对亮度图像进行增强并根据韦伯-费希纳定律将亮度图分为 4 个区域,采用不同参数的映射技术实现色调映射,实现高动态范围的压缩^[12]。

本文首先使用具有边缘保持特性的双边滤波将图像分解为包含大尺度变化的基本层和包含大尺度特征的细节层,压缩图像中较大的动态范围。接着利用梯度域压缩算子改变 HDR 图像的梯度,利用这一特点实现图像动态范围压缩,同时,保留图像的细节部分。补偿细节信息后,分别从 R、G、B 三通道恢复图像的色彩信息。

2 多尺度梯度域色调映射

2.1 双边滤波

Tomasi 和 Manduchi^[13]提出了一个能够平滑区域内部亮度位并保持边缘的非线性滤波器——双边滤波器。对于一幅图像,双边滤波器的定义为:

$$J(x) = BF(I) = \frac{1}{k(x)} \sum_{y \in \Omega} I(y) f(\|x - y\|) g(\|I(y) - I(x)\|), \quad (1)$$

$$k(x) = \sum_{y \in \Omega} f(\|x - y\|) g(\|I(y) - I(x)\|), \quad (2)$$

其中: J 是滤波之后的图像, BF 为双边滤波器, f 是空间距离项相关的光滑函数, g 是亮度项相

关的光滑函数, $k(x)$ 是归一项。

与高斯滤波相比, 双边滤波器在构造过程中, 增加了一个基于像素亮度值的高斯滤波函数, 可以根据像素值相似性自动调节, 这种差异化的权重处理方式确保边缘附近像素值得到较好的保持, 从而避免模糊边界。

2.2 梯度域动态范围压缩

由于 HDR 图像亮度变化对应数据的梯度变化, 亮度变化显著的部分产生较大的梯度, 考虑采

用如下公式压缩梯度:

$$G(x, y) = \nabla H(x, y) \Phi(x, y), \quad (3)$$

其中: $H(x, y)$ 表示亮度对数, $G(x, y)$ 为图像压缩后的梯度幅值, $\Phi(x, y)$ 为衰减函数。为压缩图像的动态范围, 需要尽可能地压缩 $H(x, y)$ 中的大幅值变化, 同时保留小幅值的局部变化。

然后, 重建一个动态范围函数 J , 使函数 J 的梯度在最小二乘意义上和 G 最为接近。为此, 考虑如下的能量函数:

$$\iint \left\| \nabla J(x, y) - G(x, y) \right\|^2 dx dy = \iint \left[\left(\frac{\partial J(x, y)}{\partial x} - G_x(x, y) \right)^2 + \left(\frac{\partial J(x, y)}{\partial y} - G_y(x, y) \right)^2 \right] dx dy, \quad (4)$$

其中 J 为目标函数。

为求得上述模型的极小值, 根据变分原理, 经计算, J 必须满足如下的 Euler-Lagrange 方程:

$$2 \left(\frac{\partial J(x, y)}{\partial x} - G_x(x, y) \right) + 2 \left(\frac{\partial J(x, y)}{\partial y} - G_y(x, y) \right) = 0, \quad (5)$$

上式经化简和重新整理后, 得到如下的泊松方程:

$$\nabla^2 J = \text{div} G, \quad (6)$$

其中: ∇J^2 是拉普拉斯算子 $\nabla J^2 = \frac{\partial^2 J}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 J}{\partial y^2}$, $\text{div} G$

是矢量场 G 的散度, $\text{div} G = \frac{\partial G_x}{\partial x} + \frac{\partial G_y}{\partial y}$ 。

对于函数 Φ , 由于各个位置边界的强度不

同, 因此其特征包含在不同的尺度空间中。为解决特征的多尺度问题, Fattal 等人^[14]提出了一种多分辨率的方法, 可以避免在边界处产生光晕, 并将边界强度的衰减从被检测到的某个尺度传递到全分辨率尺度中。下面介绍多尺度处理方法。

首先, 利用高斯滤波对输入的 HDR 数据创建高斯金字塔 $H_0, \dots, H_d$, 其中 H_0 是全分辨率的原始 HDR, H_d 至少是一个 32×32 的 HDR 块。

其次, 在高斯金字塔的每一级中, 使用如下的中心差分来计算梯度:

$$\nabla H_k(x, y) = \left(\frac{H_k(x+1, y) - H_k(x-1, y)}{2^{k+1}}, \frac{H_k(x, y+1) - H_k(x, y-1)}{2^{k+1}} \right). \quad (7)$$

在每一级 k 对应的高斯金字塔中, 使用指数函数定义该层的梯度衰减缩放因子, 具体公式如下:

$$\varphi_k(x, y) = \alpha^{1-\beta} \left\| \nabla H_k(x, y) \right\|^{\beta-1}, \quad (8)$$

其中: α 是一个固定阈值, 且 $\beta < 1$ 。根据上述构造得到的梯度衰减缩放因子, 大于 α 的幅值将会被迅速衰减, 小于 α 的幅值将略微放大。将缩放因子 φ_k 自最粗的尺度到全分辨率尺度进行传递来计算最终的 Φ :

$$\Phi(x, y) = \Phi_0(x, y), \quad (9)$$

$$\Phi_i = \begin{cases} \varphi_d(x, y) & i = d \\ U(\Phi_{k+1})(x, y) \varphi_d(x, y) & i < d \end{cases}, \quad (10)$$

式中的 U 是一个线性上采样操作。

3 多尺度梯度域色调映射算法

3.1 算法流程

梯度域压缩算子在处理 HDR 时, 对大的梯度处理较好, 但是对于细节部分的保留仍然差强人意。为此, 本文设计一种新的分层多尺度算法, 基本思路是首先利用双边滤波技术, 将高动态范围图像的亮度数据分为基本层和细节层, 然后对包含大梯度的基本层进行梯度压缩, 而后再利用细节层的信息对其进行细节补偿。算法流程如图 1 所示。

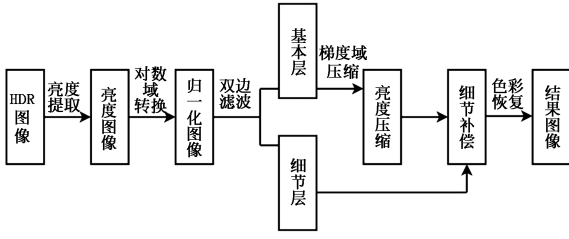


图1 梯度域多尺度算法流程图

Fig.1 Flow chart of gradient domain multiscale algorithm

3.2 亮度提取

在色调映射处理中,为了处理方便,采取了两步走的策略。第一步是对亮度数据的动态范围进行压缩,得到压缩后的亮度信息。第二步是根据压缩后的低动态亮度信息和原始的高动态范围数据,恢复和重构新的颜色信息。

输入高动态范围数据包含了红、绿、蓝这3种基本颜色的信息,利用式(11)提取高动态范围数据的亮度信息:

$$L_{lum} = 0.213R_{in} + 0.715G_{in} + 0.072B_{in}, \quad (11)$$

其中: R_{in} 、 G_{in} 、 B_{in} 分别代表了输入 HDR 数据红色、绿色和蓝色的强度值。

3.3 对数域归一化

亮度在对数域的变化与人类视觉系统对对比度的感知较为一致,因此将亮度转化至对数域。考虑到不同数据之间动态范围的差异,需要对对数域的亮度进行归一化,将数据范围变换到 $[0,1]$ 区间之中。利用式(12)对亮度数据进行对数变换和归一化操作:

$$L_{[0,1]} = \frac{\log(L_{lum} + \epsilon) - \log(L_{min} + \epsilon)}{\log(L_{max} + \epsilon) - \log(L_{min} + \epsilon)}, \quad (12)$$

其中: L_{lum} 为原始亮度值, L_{max} 和 L_{min} 分别是 L_{lum} 的最大亮度和最小亮度, ϵ 是为了避免奇异性而引入的小的正常数。

3.4 基于双边滤波的图像分层

因为双边滤波的主要特性是对图像的边缘部分得到保持^[15],避免了图像合成后的光晕现象,所以对归一化后图像的亮度数据进行滤波处理,得到图像的基本层和细节层:

$$L_{base} = BF(L_{[0,1]}), \quad (13)$$

$$L_{detail} = L_{[0,1]} - L_{base}, \quad (14)$$

其中, L_{base} 为图像的基本层, L_{detail} 为图像的细节层。

3.5 梯度域压缩与细节补偿

采用公式(6)~(10)对基本层进行梯度域动态范围压缩,得到的结果记为 L_d 。基本层压缩后,需要利用基本层中的信息进行细节补偿。由于基本层是由输入数据及其双边滤波结果之间做差得到,所以按公式(15)进行细节补偿:

$$L_{LDR} = L_{detail} + \alpha L_d, \quad (15)$$

其中细节调整参数 $\alpha \geq 1$, 取1时为正常的细节补偿,大于1时为细节增强,对细节进行相应倍数的放大操作。但若取值太大,也会让观察者感到视觉上较为虚假。如无特殊说明,本文中细节调整参数取值为1.2。

3.6 图像恢复

经过上述步骤处理后,得到压缩后的亮度图像。为得到最终的色调映射结果图像,需要为亮度图像恢复颜色信息。本文采用下述公式恢复图像的色彩:

$$R_{out} = \left(\frac{R_{in}}{L_{lum}} \right)^\lambda L_{LDR}, \quad (16)$$

$$G_{out} = \left(\frac{G_{in}}{L_{lum}} \right)^\lambda L_{LDR}, \quad (17)$$

$$B_{out} = \left(\frac{B_{in}}{L_{lum}} \right)^\lambda L_{LDR}, \quad (18)$$

其中: L_{LDR} 为色调映射后的亮度值, λ 为用户决定的饱和度参数。

4 实验结果与分析

本文选用文献[12]、文献[16]和文献[17]三种色调映射算法和本文算法进行实验对比。clay-people 图像的实验效果如图2所示,图2(a)为本文算法的效果图($\beta = 0.935$),图2(b)、图2(c)和图2(d)分别为文献[12]、文献[16]和文献[17]的效果图。本文算法在经过梯度域压缩之后的结果图像的局部对比度较高,同时,客观指标数值也比较高,图像细节清晰,避免出现颜色的失真和光晕效果,拥有较好的自然外观,自然度较好。并在经过本文算法所处理之后的图片效果保留了良好的边缘信息,天空的细节清晰,画面层次感分明。

colorcube 图像的实验效果如图3所示,图3

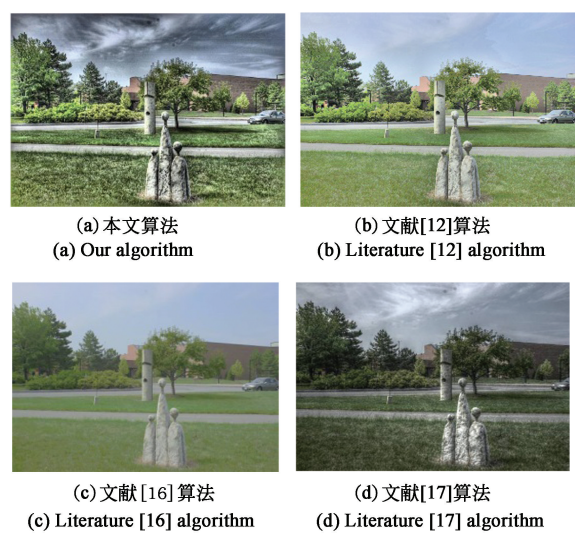


图 2 Clay-people 图像色调映射结果对比
Fig.2 Contrast of clay -people image tone mapping results

(a)为本文算法的效果图($\beta = 0.935$),图 3(b)、图 3(c)和图 3(d)分别为文献[12]、文献[16]和文献[17]的效果图。本文算法能够得到比较满意的结果图像,图像整体亮度不至于过低,同时,能够保留高亮度区域内比较完整的细节信息,图像保留了大部分的可视化纹理细节,明暗效果过渡自然并且局部对比度较高,窗户外面的自然景物清晰可见,倒映在玻璃上的细节也比较完整,轮廓十分清晰。

chairs 图像的实验效果如图 4 所示,图 4(a)

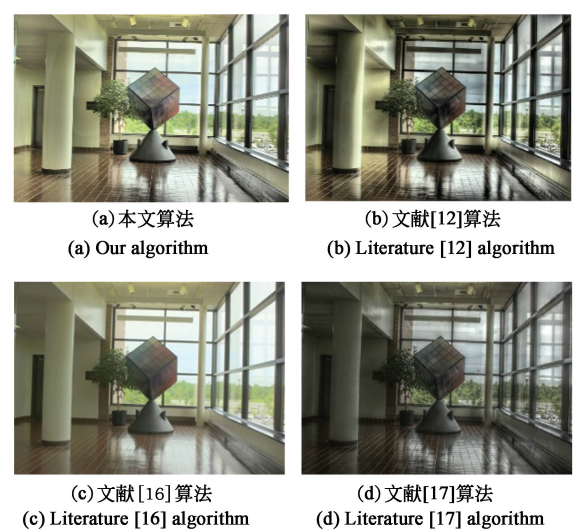


图 3 Colorcube 图像色调映射结果对比
Fig.3 Contrast of colorcube image tone mapping results

为本文算法的效果图($\beta = 0.935$),图 4(b)、图 4(c)和图 4(d)分别为文献[12]、文献[16]和文献[17]的效果图。本文算法图像细节突出,没有伪影所造成的凌乱的感觉,画面清晰自然,边缘清晰可见,对比度较高,色彩柔和,整个图像较为真实,适合人眼观察,并且较好地避免出现光晕现象。沙发和地毯上的纹路清晰,透过玻璃能清楚地看到窗外郁郁葱葱的树木。

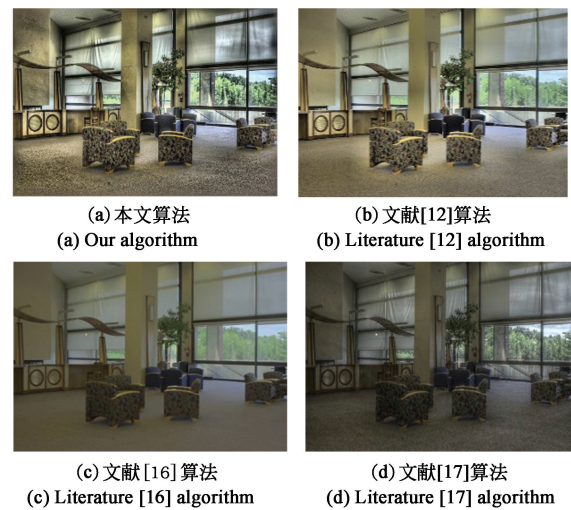


图 4 Chairs 图像色调映射结果对比
Fig.4 Contrast of chairs image tone mapping results

表 1 映射结果客观指标对比				
Tab.1 Objective index comparison of mapping results				
图像名称	算法	方差	信息熵	平均梯度
clay-people	文献[12]	39.115 3	7.523 7	3.681 3
	文献[16]	37.814 2	7.302 3	1.844 5
	文献[17]	55.714 3	7.694 9	12.393 7
	本文算法	50.739 8	7.752 0	12.617 0
colorcube	文献[12]	56.379 1	7.736 1	2.975 3
	文献[16]	57.304 4	7.619 3	1.865 5
	文献[17]	58.883 0	7.527 9	8.571 6
	本文算法	63.980 0	7.861 3	5.459 2
chairs	文献[12]	39.533 6	7.392 9	3.424 9
	文献[16]	33.721 7	7.123 8	1.764 9
	文献[17]	46.956 3	7.468 4	10.200 2
	本文算法	53.856 2	7.749 3	9.724 7

表 1 中给出了 3 幅 HDR 图像使用不同色

调映射方法所得结果的客观对比数据。所用指标分别为方差、信息熵和平均梯度^[18-19]。通过数据分析表明,和文献[12]、文献[16]和文献[17]相比,本文算法的方差提高了4.3%到30.8%,信息熵提高了2.1%到5.9%。与文献[12]、文献[16]相比,本文算法的平均梯度提高了1.8%到4.1%,但是低于文献[17]得到的结果。原因在于文献[17]结果的部分区域存在伪影,如图3(d)中右上角窗口部分和图4(d)中地毯部分存在较为明显伪影,从而提高了全图的平均梯度。

5 结 论

本文提出一种将双边滤波与梯度域压缩算子相结合的色调映射算法。首先将大尺度信息与细节信息分离,然后根据大尺度信息在梯度域上的分布规律,利用一种非线性的方式进行压缩,可以较好的保持细节。本文算法流程中的步骤较多,涉及到多个参数的设置和优化问题。下一步的研究方向是如何寻找最优参数值。

参 考 文 献:

- [1] 吕涛,付东辉,陈小云,等.利用DMD获取高动态范围图像技术[J].中国光学,2015,8(4):644-650.
LV T, FU D H, CHEN X Y, *et al.* High dynamic range imaging technology using DMD [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 644-650. (in Chinese)
- [2] 欧海燕,郭太良,姚剑敏,等.基于分层色调映射的LED背光调制算法[J].液晶与显示,2011,26(2):246-249.
OU H Y, GUO T L, YAO J M, *et al.* Modulation of LED backlight based on hierarchical tone mapping algorithm [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(2): 246-249. (in Chinese)
- [3] KUANG J T, JOHNSON G M, FAIRCHILD M D. iCAM06: A refined image appearance model for HDR image rendering [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2007, 18(5): 406-414.
- [4] 李祎,芦碧波,王永茂.分区非局部均值色貌模型在色调映射中的应用[J].武汉大学学报(信息科学版),2016,41(5):649-655.
LI Y, LU B B, WANG Y M. Image color appearance model based on regionalized non-local means filter and its application to tone mapping [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(5): 649-655. (in Chinese)
- [5] AHN H, KEUM B, KIM D, *et al.* Adaptive local tone mapping based on Retinex for high dynamic range images [C]//2013 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE). Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2013: 153-156.
- [6] 王浩,张叶,沈宏海,等.图像增强算法综述[J].中国光学,2017,10(4):438-448.
WANG H, ZHANG Y, SHEN H H, *et al.* Review of image enhancement algorithms [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 438-448. (in Chinese)
- [7] 岳丽,胡大梁,蒋玉明.基于Reinhard模型的色调映射算法的研究[J].成都工业学院学报,2013,16(1):18-21.
YUE L, HU D S, JIANG Y M. Research on HDR image tone mapping based on Reinhard's algorithm [J]. *Journal of Chengdu Technological University*, 2013, 16(1): 18-21. (in Chinese)
- [8] LIANG L, YU N, DAI L, *et al.* A tone mapping method integrated the forward and reverse perception model [J]. *Journal of Computational Information Systems*, 2014, 10(1): 205-212.
- [9] WANG L, JUNG C. Surrounding adaptive tone mapping in displayed images under ambient light[C]//2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2017: 1992-1996.
- [10] LI H, JIA X X, ZHANG L. Clustering based content and color adaptive tone mapping [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2017, 168: 37-49.
- [11] XIE Z F, DU S, HUANG D J, *et al.* Detail-preserving fidelity refinement for tone mapping[C]//2016 International Conference on Audio, Language and Image Processing. Shanghai, China: IEEE, 2017: 257-262.
- [12] 芦碧波,李玉静,郑艳梅,等.视觉自适应多尺度对数色色调映射算法[J].小型微型计算机系统,2017,38(3):625-629.

- LU B B, LI Y J, ZHENG Y M, *et al.* A visual adaptive multi-scale logarithmic tone mapping algorithm [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2017, 38(3): 625-629. (in Chinese)
- [13] TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images [C]//*Sixth International Conference on Computer Vision*. Bombay, India: IEEE, 1998: 836-846.
- [14] FATTAL R, LISCHINSKI D, WERMAN M. Gradient domain high dynamic range compression [C]//*Proceedings of the 29th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, NY, USA: ACM, 2002: 249-256.
- [15] 郝志成, 吴川, 杨航, 等. 基于双边纹理滤波的图像细节增强方法[J]. *中国光学*, 2016, 9(4): 423-431.
- HAO Z C, WU S, YANG H, *et al.* Image detail enhancement method based on multi-scale bilateral texture filter [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(4): 423-431. (in Chinese)
- [16] DRAGO F, MYSZKOWSKI K, ANNEN T, *et al.* Adaptive logarithmic mapping for displaying high contrast scenes[J]. *Computer Graphics Forum*, 2003, 22(3): 419-426.
- [17] MANTIUK R, MYSZKOWSKI K, SEIDEL H-P. A perceptual framework for contrast processing of high dynamic range images [J]. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2006, 3(3): 286-308.
- [18] 邵华, 郝梅. 一种人眼感知驱动的成分分解色调映射算法[J]. *光学技术*, 2017, 43(5): 415-422.
- SHAO H, YU M. A perception-inspired tone mapping algorithm based on components decomposition [J]. *Optical Technique*, 2017, 43(5): 415-422. (in Chinese)
- [19] 芦碧波, 陈静, 王建龙, 等. 一种改进的多尺度 Retinex 色调映射算法[J]. *计算机工程与科学*, 2017, 39(5): 951-957.
- LU B B, CHEN J, WANG J L, *et al.* An improved multi-scale Retinex method for tone mapping [J]. *Computer Engineering and Science*, 2017, 39(5): 951-957. (in Chinese)

作者简介: 芦碧波(1978—), 男, 河南焦作人, 博士研究生, 副教授, 主要从事色调映射、图像去噪、图像分割、图像融合方面的研究。E-mail: lu-bibojz@gmail.com

郑艳梅(1984—), 女, 河南开封人, 博士研究生, 副教授, 研究方向为数字图像处理、数据挖掘。E-mail: zhengym02@hpu.edu.cn

皇甫珍珍(1993—), 女, 河南焦作人, 硕士研究生, 主要从事色调映射方面的研究。E-mail: hpzz1890@126.com