

具有细节补偿和色彩恢复的多尺度 Retinex 色调映射算法

张尚伟, 曾平, 罗雪梅, 郑海红

(西安电子科技大学计算机学院, 710071, 西安)

摘要: 针对带色彩恢复的多尺度 Retinex 色调映射算法(MSRCR)在分离图像光照信息时未保留部分细节信息,导致结果图像出现细节模糊和颜色失真的问题,提出了一种具有细节补偿和色彩恢复的多尺度 Retinex 色调映射算法(MSRCD). 该算法利用 Retinex 理论的基本原理将高动态范围图像分为反射层和光照层,先使用双边滤波从图像光照层中提取出细节信息进行补偿,然后从图像的反射层中分离出基本层信息并进行自适应调整,压缩其动态范围,最后通过色彩校正还原图像颜色. 实验结果表明,与 MSRCR 算法及基于双边滤波的算法相比,MSRCD 算法的处理结果保留了更丰富的细节信息,色彩逼近于真实场景且避免了光晕的产生.

关键词: Retinex 理论;色调映射;细节补偿;高动态范围

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)04-0032-06

Multi-Scale Retinex with Color Restoration and Detail Compensation

ZHANG Shangwei, ZENG Ping, LUO Xuemei, ZHENG Haihong

(School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: An algorithm is proposed to solve the problem that the results of multi-scale Retinex with color restoration (MSRCR) are prone to have fuzzy detail and color distortion when it is used to separate lightness components. The proposed algorithm utilizes Retinex theory to divide the luminance into the components of lightness and reflectance. Then, the boundary of image is compensated by adding the detailed information that is extracted from lightness using bilateral filtering. The base-layer is extracted from the components of reflectance, and then is adaptively adjusted so as to compress the dynamic range of the high dynamic range image. Furthermore, the method can prevent color distortion and make the target images achieve better visual effect through color correction. Experimental results show that the proposed algorithm has better effect on dynamic range compression than both MSRCR and bilateral filtering methods have, and prevents halo artifacts, and that not only details but also color can be reproduced by the algorithm in visual point of view.

Keywords: Retinex theory; tone mapping; detail compensation; high dynamic range

高动态范围(HDR)图像包含了真实世界中丰富的光影和颜色信息,在数字摄影、航空航天、卫星气象、医疗、军事等行业有着越来越广泛的应用. 然而,当前主流显示设备在显示 HDR 图像时存在动态范围不匹配的问题,因此研究该问题具有十分重

要的意义. 近年来,国内外很多学者在这方面做了大量研究,并提出了许多优秀的色调映射算法^[1-6]. 现有的算法可分为 2 类:全局色调映射算法和局部色调映射算法. 全局算法只依赖于像素的亮度值,实现简单、计算高效,但由于其不关心像素在图像中的位

置及邻近像素的影响,使得处理效果达不到现实需求;局部算法较灵活,在映射时考虑局部空间内容,使局部对比度增强成为可能,能够做到在压缩动态范围的同时保持图像的细节和纹理。当前,局部色调映射算法已成为人们研究的重点。Rahma 等人^[1]提出一种带色彩恢复的多尺度 Retinex 色调映射 (multi-scale Retinex with color restoration, MSRCR) 算法,该算法基于 Retinex 理论^[2]且在动态范围压缩方面效果较好,但在图像细节上表现一般,容易出现光晕、颜色失真等问题;Roch 等人^[3]通过引入杨辉三角完成了在可编程图形单元 GPU 上的算法实现,但该算法相对较少考虑人类视觉系统的因素,使结果容易出现失真;宋明黎等人^[4]提出一种新的基于概率模型的算法,可以有效解决光晕问题,但处理结果的逼真度和算法效率有待提高;Baek 等人^[5]提出一种基于随空间变化的高维高斯滤波器算法,结果图像达到预期效果,但算法不够稳定;刘衡生等人^[6]提出了一种基于亮度分层的快速三边滤波器算法,其在处理高分辨率 HDR 图像时效率较低,不能满足实时应用场合。总的来说,不同的算法考虑问题各有侧重,目前算法都存在这样或那样的问题,并不能适用于所有的情形。

本文针对上述问题提出一种具有细节补偿和色彩恢复的多尺度 Retinex 色调映射 (multi-scale Retinex with color restoration and detail compensation, MSRCD) 算法,提取出光照层中细节信息进行补偿,并且在对图像光照和色彩进行处理部分加入了自适应因子。实验结果表明,MSRCD 算法较 MSRCR 算法及基于双边滤波算法^[7]具有较好的鲁棒性和稳定性,在细节和颜色等方面取得了较好效果,且算法效率较高。

1 MSRCR 算法与不足

Retinex 算法中比较典型的一种是单尺度 Retinex 算法^[8],可表示为

$$\lg \mathbf{R}(x, y) = \lg \mathbf{I}(x, y) - \lg(\mathbf{I}(x, y)G(x, y)) \quad (1)$$

$$G(x, y) = \lambda e^{-(x^2+y^2)/c^2} \quad (2)$$

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

式中: $\mathbf{R}(x, y)$ 为经过单尺度 Retinex 处理后得到的反射信息; $\mathbf{I}(x, y)$ 为原图像; $G(x, y)$ 为高斯卷积函数; λ 为常数; c 为高斯滤波的尺度常量, c 越大,灰度动态范围压缩的越多,意味着图像锐化的越多。

多尺度 Retinex 算法 (multi-scale Retinex, MSR)^[9]是由不同通道的单尺度 Retinex 算法的输出结果赋予权系数后的总和来实现,即

$$\mathbf{R}_{\text{MSR}} = \sum_{n=1}^N \omega_n \mathbf{R}_n \quad (4)$$

式中: N 为尺度总数; $\mathbf{R}_n$ 为第 n 个尺度的 Retinex 输出; ω_n 为对应尺度 n 的权系数。带色彩恢复的多尺度 Retinex 算法 (MSRCR) 是在多尺度 Retinex 的基础上考虑色彩的结果,可表示为

$$\mathbf{R}_{\text{MSRCR}} = C_i \mathbf{R}_{\text{MSR}} \quad (5)$$

$$C_i(x, y) = \lg[\partial \mathbf{I}_i(x, y)] - \lg\left[\sum_{i=1}^S \mathbf{I}_i(x, y)\right] \quad (6)$$

式中: $C_i(x, y)$ 为色彩恢复函数,用来调节颜色比例,该函数引入了原始图像中 3 个颜色通道之间的比例关系,从而很好地解决了图像颜色失真问题,在一定程度上还原了原图的颜色。

单尺度 Retinex 算法中用高斯滤波得到光照信息存在一个前提:光照信息在整幅图像中是平滑的或者是光照变化不大的。对于 HDR 图像,其光照信息随图像中物体的具体位置和明暗变化情况而变化,所以对亮度通道进行高斯滤波所得到的结果中不可避免地含有图像的部分细节信息,且高亮度部分的光照信息容易保留在反射信息中,这就是单尺度 Retinex 或者多尺度 Retinex 算法得到结果中细节体现不好的缘故。本文认为式(1)中的 $\lg(\mathbf{I}(x, y)G(x, y))$ 在明暗变化比较剧烈的区域中滤波得到的结果会包含一部分高频信息,使得 Retinex 方法得到的结果不可避免地失去部分(高频分量)细节信息。为了解决上述问题,本文使用双边滤波对光照信息进行细节层提取,提出了 MSRCD 算法。

2 MSRCD 算法

2.1 自适应亮度处理

对图像亮度部分的处理是色调映射算法中的核心部分,算法通过双边滤波对图像亮度信息分层,再对每层信息分别处理,并加入自适应因子,然后合成亮度信息。使用双边滤波对光照信息进行细节层提取,即

$$h(x) = k^{-1}(x) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\xi) c(\xi, x) s(f(\xi), f(x)) d\xi \quad (7)$$

归一化常数为

$$k(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} c(\xi, x) s(f(\xi), f(x)) d\xi \quad (8)$$

式中: $h(x)$ 为像素 x 处的双边滤波函数; $c(\xi, x)$ 为

临近点 ξ 与中心点 x 之间的距离相似度; $s(f(\xi), f(x))$ 为临近点 ξ 与中心点 x 之间的亮度相似度, $f(x)$ 为输入图像在 x 点的亮度值. 双边滤波对图像每一点用其空间相邻且灰度相近的像素平均值来代替原来的值. 在图像变化平缓区域, 一个小的邻域内图像灰度变化不大, 近似为常数, 这时双边滤波的作用等同于高斯低通滤波; 在图像变化剧烈区域, 滤波器用边缘点邻域内灰度相似的像素点灰度平均值代替原灰度值, 使得距离较远的像素不会影响到边缘像素数值, 从而在滤除噪声的同时保持了图像边缘等细节信息. 使用双边滤波对式(1)中光照部分进行进一步分层, 可得到

$$I(x, y)G(x, y) = \Lambda'_{\text{base}} \Lambda'_{\text{detail}} \quad (9)$$

式中: Λ'_{base} 表示低频信息, 即基本层信息; Λ'_{detail} 表示高频分量信息, 即细节层信息. 同样, 亮度通道的基本层和细节层信息也可以分离出来, 即

$$I(x, y) = \Lambda_{\text{base}} \Lambda_{\text{detail}} \quad (10)$$

那么式(1)可以表示为

$$\begin{aligned} \lg R &= \lg(\Lambda_{\text{base}} \Lambda_{\text{detail}}) - \lg(\Lambda'_{\text{base}} \Lambda'_{\text{detail}}) = \\ &= \lg(\Lambda_{\text{base}}) + \lg(\Lambda_{\text{detail}}) + \lg(\Lambda'_{\text{detail}}) - \\ &= \lg(\Lambda'_{\text{base}}) - 2\lg(\Lambda'_{\text{detail}}) \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)中, 令

$$I' = \lg(\Lambda_{\text{base}}) + \lg(\Lambda_{\text{detail}}) + \lg(\Lambda'_{\text{detail}}) - \lg(\Lambda'_{\text{base}}) \quad (12)$$

则由式(10)、(11)可以得到

$$I' = \lg R + 2\lg(\Lambda'_{\text{detail}}) \quad (13)$$

将反射层信息 R 通过双边滤波分成基本层 R_{base} 和细节层 R_{detail} , 即

$$\lg R = \lg(R_{\text{base}} R_{\text{detail}}) \quad (14)$$

由式(1)、(9)、(10)、(14)可得

$$\lg(R_{\text{base}} R_{\text{detail}}) = \lg(\Lambda_{\text{base}} \Lambda_{\text{detail}}) - \lg(\Lambda'_{\text{base}} \Lambda'_{\text{detail}}) \quad (15)$$

进一步分解转换得到

$$\begin{aligned} \lg R_{\text{base}} &= \lg \Lambda_{\text{base}} - \lg \Lambda'_{\text{base}} + \lg \Lambda_{\text{detail}} - \\ &= (\lg R_{\text{detail}} + \lg \Lambda'_{\text{detail}}) \end{aligned} \quad (16)$$

本文认为图像的所有细节层信息包含图像反射层中提取的细节层信息 R_{detail} 和光照层中提取的细节层信息 Λ'_{detail} 这 2 部分, 即

$$\lg \Lambda_{\text{detail}} = \lg R_{\text{detail}} + \lg \Lambda'_{\text{detail}} \quad (17)$$

由式(16)、(17)可得

$$\lg R_{\text{base}} = \lg \Lambda_{\text{base}} - \lg \Lambda'_{\text{base}} \quad (18)$$

因此, 只从亮度基本层中去掉光照基本层不能满足对高动态范围的压缩要求, 需要对 $\lg \Lambda_{\text{base}} - \lg \Lambda'_{\text{base}}$ 进行全局调整. 将 R_{base} 进行全局调整为 R'_{base} ,

得到

$$I' = \lg(R'_{\text{base}} R_{\text{detail}}) + 2\lg(\Lambda'_{\text{detail}}) \quad (19)$$

这样, 就保证了在没有丢失细节层信息的同时压缩图像动态范围, 使得图像明暗变化比较剧烈区域的信息保存完好, 从而没有光晕产生. 综上, MSRCDC 算法对亮度部分的处理主要是先对图像亮度信息进行 Retinex 分层, 然后对光照层和反射层进行双边滤波分别得到相应的细节层和基本层, 之后对光照层中的细节信息进行保留的同时将反射层中的基本信息进行全局压缩, 最后将所需的细节信息和基本信息合成从而得到输出亮度信息. 本文算法的亮度处理框图如图 1 所示. 从图 1 中可以看出, MSRCDC 算法的自适应亮度处理未考虑图像中通道间的比例关系, 因而容易产生色彩的失真, 故在下一步合成彩色图像的时候需要进行颜色校正处理.

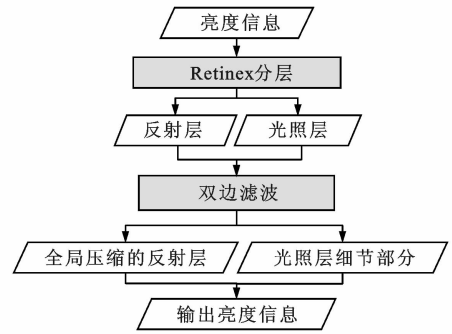


图1 MSRCDC算法的亮度处理流程

2.2 颜色处理

算法中将亮度信息还原成彩色图像信息时使用如下公式^[10]进行图像颜色的校正, 即

$$I'_i = (I_i/L) \cdot L' \quad (20)$$

式中: I_i 表示原图像通道 i 的信息; L 表示映射前亮度通道信息; L' 表示映射后亮度通道信息; I'_i 表示还原后的 i 通道信息; 参数 s 为比例调整因子. 该方法利用变换前后亮度通道的非线性比例关系来调整三通道的信息, 达到调整图像色彩的目的. 通过在 $[0, 1.0]$ 范围内选取一系列序列值分别对参数 s 进行赋值, 对得到的相应实验结果进行主观评价, 实验表明 s 取 0.45 时可取得较好的效果. 还原成彩色图像之后, 本文使用 MSRCR 算法中的色彩恢复因子 C 进行图像的色彩增强, 其表示式为

$$C(x, y) = f\left[\alpha I(x, y) / \sum_{n=1}^N I_n(x, y)\right] \quad (21)$$

式中: α 为常量; $I_n(x, y)$ 表示相应的通道信息; $f[\cdot]$ 表示颜色空间的映射函数. 该色彩因子引入了原始图像中 3 个颜色通道之间的比例关系, 用以

消除图像颜色失真的缺陷,对原图像的颜色进行了还原.

本文算法从整体上主要分为亮度处理和颜色处理 2 个部分:①亮度处理部分包括了亮度信息调整、全局调整和自适应调整 3 部分,其中全局调整涉及到自适应 gamma 校正、黑白点校正^[11]、直方图调整等,在此不作详细描述,自适应调整部分用来实现图像动态范围的压缩和细节的保持;②颜色处理部分针对图像提取出色彩校正因子,以保证图像色彩的真实度.上述处理过程中计算复杂度较高的是图像亮度处理部分,该部分中高斯滤波的计算复杂度为 $o(mn)(m<n)$,双边滤波的计算复杂度为 $o(n^2)$,在本文算法中这 2 种滤波操作串行进行,所以算法的整体复杂度为 $o(n^2)$.MSRCD 算法设计的基本框架如图 2 所示.

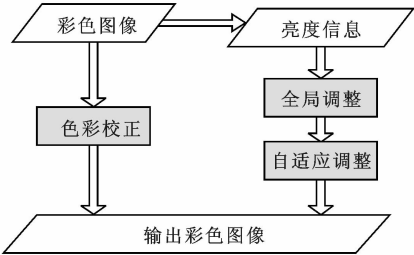


图 2 MSRCD 算法框架

3 实验结果及分析

本文采用文献[6]的 HDR 图像 memorial 作为实验数据,对 MSRCD 算法的图像处理性能进行分析,结果如图 3 所示.其中,图 3d 显示的是光照层经过双边滤波后得到的基本层,在算法中被去除,图 3e 是从光照层分离出的细节层信息,在算法中被保留下来,以补充图像的边缘细节信息.对于反射层图像,对其基本层进行全局调整,细节层保持不变,得到的结果如图 3f 所示.最后,使用图 3f 中的细节信息对图像进行细节补偿,便可得到最终的处理结果.

对于高动态范围的现实场景来说,很难直接获得一幅理想图像作为参考,并且在对色调映射的结果进行评价上国内外至今没有统一量化的标准,因

此对它的评价属于部分参考和无参考图像质量评价的范畴.虽然目前有些研究者对 HDR 图像可视化算法的评价标准做了一些工作,但是还没有被广泛认可的客观标准,因此以往文献通常对实验结果进行主观比较.为检验 MSRCD 算法的影像再现能力,本文与基于双边滤波的高动态范围色调映射算法^[7]和包含色彩复原的多尺度 Retinex(MSR)算法^[2]这 2 种较成熟的算法进行对比.图 3g 是基于双边滤波算法得到的结果,在图像细节和对动态范围的压缩方面表现较好,但是整体色彩出现失真,而且图像层次感一般.出现这种问题的原因是,对于单纯的将亮度通道的基本层进行 S 形曲线压缩^[12]固然对高亮和暗区有明显的效果,但这种对基本层的不对称压缩导致了图像明暗层次的混乱,加之后续没有在色彩方面进行相关调整,导致颜色出现失真.对于带色彩恢复的 MSR 算法,其在动态范围压缩方面表现较好,但是图像细节方面表现较差,而且图像色彩较淡.出现这种原因是该算法在去除光照层信息的时候将一部分细节信息同时去除,导致图像细节处比较模糊,同时在色彩信息上也有损失.主观上看,MSRCD 算法得到的结果颜色更逼真,在细节方面表现很好,逼近真实场景,克服了另外 2 种算法的缺点,且有效抑制了光晕现象的产生.

从图 4 的图像处理结果直方图可以看出,MSRCD 算法的处理结果有更大范围的灰度分布,即处理后的结果图像可以较好地表现亮区和暗区信息.

由于主观情绪、喜好的差别可能导致评价结论差异大,因此用主观方法来再现效果需要进行大样本的测试,费时费力.一般可以认为:一幅视觉效果好的图像应当具备原始场景的亮度、丰富的图像特征和真实的色彩效果.考虑到算法处理后的结果属于低动态范围图像,本文将此处使用当前 3 种常用的普通方法的均值和方差、平均梯度、信息熵来对实验结果进行对比分析.其中,方差表示图像偏离均值的程度,是衡量一幅图像信息量大小的一个重要参数,平均梯度反映了图像的清晰度,图像的信息熵用来衡量图像信息的丰富程度.表 1 是从上述 3 种算法处理图像的结果中获取的数据.

表 1 3 种算法处理结果的客观评价指标对比

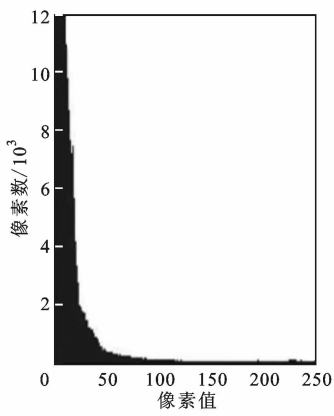
图例	处理算法	相对方差	相对平均梯度	信息熵
图 3g	基于双边滤波算法	77.574 5	7.703	4.860 2
图 3h	MSRCR 算法	84.298	4.220	3.804 9
图 3i	MSRCD 算法	98.286 7	7.722 4	5.282 0



(a)原始图像



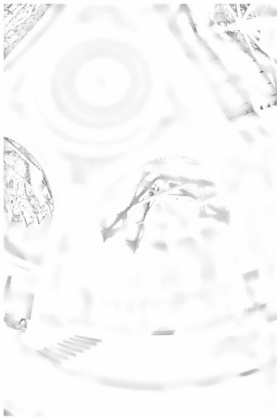
(b)原始亮度图像



(c)原始亮度直方图



(d)去除的基本层图像



(e)补偿的细节信息



(f)全局调整后的反射层图像



(g)双边滤波处理

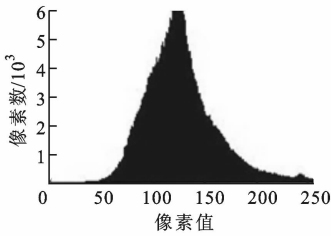


(h)带色彩恢复的 MSR 处理

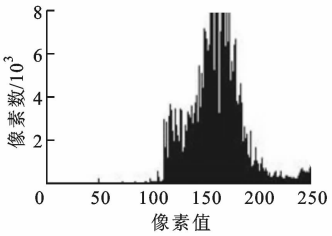


(i)MSRCD 算法处理

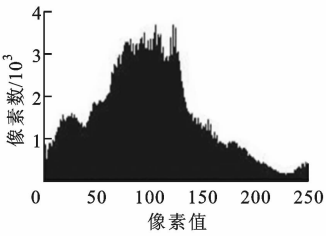
图 3 使用 3 种算法处理 memorial 图像的步骤示例及结果对比



(a)双边滤波



(b)带色彩恢复的 MSR



(c)MSRCD 算法

图 4 3 种算法对 memorial 图像处理结果的直方图对比

根据表1中数据可以得出,MSRCR算法的处理结果无论在动态范围、清晰度还是信息熵方面的表现效果明显低于另外2种算法。与基于双边滤波算法相比,MSRCD算法得到结果的动态范围整体高约8.5%,即MSRCD算法保留了原始图像中更多的光影信息;在图像清晰度方面,MSRCD算法和基于双边滤波算法的结果基本持平;在图像所含信息量方面,MSRCD算法较之高约9.4%,即得到的结果图像质量较高,达到了预想的效果。

4 结 论

MSRCR算法在去除光照信息的同时去除了部分细节信息,导致图像部分细节的模糊,本文针对该问题提出一种具有细节补偿和色彩恢复的多尺度 Retinex 色调映射算法——MSRCD算法。该算法利用双边滤波的细节保持性对细节信息进行补偿,且压缩了原反射图像中的基本层信息,在保持细节的同时最大限度地压缩动态范围。在色彩处理方面本文算法使用MSRCR中的色彩恢复因子进行色彩校正,达到了逼近真实场景的色彩效果。实验结果表明:与MSRCR及基于双边滤波算法相比,MSRCD算法处理后的图像保留了更丰富的光影信息(比基于双边滤波算法多出约8.5%),在图像清晰度方面表现好于MSRCR算法,且与基于双边滤波算法基本持平;MSRCD算法在处理过程中还原了部分细节信息,处理结果的信息熵普遍高于另外2种算法(比基于双边滤波算法多出约9.4%)。从主观上看,MSRCD算法在图像的细节、对比度以及颜色方面表现很好,相比另外2种算法有更好的效果,同时避免了光晕的产生。另外,MSRCD算法在前期亮度处理中进行了自适应调整,使得算法在处理大部分HDR图像时具有更好的自适应性。

参考文献:

- [1] RAHMA Z, JOBSON D J, WOODDELL G A. Retinex processing for automatic image enhancement [J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1):100-110.
- [2] YOSHIDA A, BLANZ V, MYSZKOWSKI K, et al. Perceptual evaluation of tone mapping operators with real-world scenes [C] // Proceedings of IS&T/SPIE Electronic Imaging. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2005:192-203.
- [3] ROCH B, ARTUSIA, MICHAEL D, et al. Interactive local tone mapping operator with the support of graphics hardware [C] // Proceedings of the 23rd Spring Conference on Computer Graphics. New York, USA: ACM, 2007:1-6.
- [4] 宋明黎,王慧琼. 基于概率模型的高动态范围图像色调映射[J]. 软件学报, 2009, 20(3):734-743.
SONG Liming, WANG Huiqiong. Tone mapping for high dynamic range image using a probabilistic model [J]. Journal of Software, 2009, 20(3):734-743.
- [5] BAEK J, JACOBS D E. Accelerating spatially varying Gaussian filters [C] // Proceedings of ACM SIGGRAPH Asia 2010 Papers. New York, USA: ACM, 2010:169-169.
- [6] 刘衡生,沈建冰. 基于亮度分层的快速三边滤波器色调映射算法[J]. 计算机辅助设计学报, 2011, 23(1):85-90.
LIU Hengsheng, SHEN Jianbing. Tone mapping using intensity layer decomposition-based fast trilateral filter[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2011, 23(1):85-90.
- [7] DURAND F, DORSEY J. Fast bilateral filtering for the display of high dynamic range image [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3):257-265.
- [8] 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.
- [9] JOBSON D J, RAHMAN 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.
- [10] TUMBLIN J, HODGINS J, GURNTER B. Two methods for display of high contrast images [J]. ACM Transactions on Graphics, 1999, 18(1):56-94.
- [11] MEYLAN L, SUSSTRUNK S. High dynamic range image rendering with a retinex-based adaptive filter [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(9):2820-2830.
- [12] KUANG J, YAMAGUCHI H, JOHNSON G M, et al. Testing HDR image rendering algorithms [C] // Proceedings of 12th IS&T/SID Color Imaging Conference. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2004: 315-320.

(编辑 刘杨)