

一种亮度可控与细节保持的高动态范围图像色调映射方法

陆许明¹ 朱雄泳² 李智文¹ 麦建业¹ 谭洪舟¹

摘要 高动态范围 (High dynamic range, HDR) 图像通常需压缩其动态范围, 以便于进行存储、传输、重现. 本文提出一种具有亮度可控与细节保持特性的 HDR 图像的全局色调映射方法. 该方法对 HDR 图像照度直方图进行裁剪与补偿, 令色调映射后的低动态范围 (Low dynamic range, LDR) 图像仍能够保持原有的细节特性, 同时利用概率模型估算输出 LDR 图像的亮度与标准差, 进而调整直方图亮度区域的分配, 使得输出 LDR 图像的亮度接近用户设置的亮度, 最后以分段直方图均衡的方法进行 HDR 色调映射处理. 仿真结果表明, 该方法能对 HDR 图像动态范围进行合理的压缩映射, 输出的 LDR 图像的亮度可由用户控制或自适应选择, 同时能保持图像的细节信息, 令图像的主观视觉感受对比和谐.

关键词 高动态范围图像, 色调映射, 细节保持, 亮度可控

引用格式 陆许明, 朱雄泳, 李智文, 麦建业, 谭洪舟. 一种亮度可控与细节保持的高动态范围图像色调映射方法. 自动化学报, 2015, 41(6): 1080–1092

DOI 10.16383/j.aas.2015.c130202

A Brightness-scaling and Detail-preserving Tone Mapping Method for High Dynamic Range Images

LU Xu-Ming¹ ZHU Xiong-Yong² LI Zhi-Wen¹ MAI Jian-Ye¹ TAN Hong-Zhou¹

Abstract For conventional storage, transfer, and display, high dynamic range (HDR) images always need to compress their dynamic ranges. This paper introduces a brightness-scaling and detail-preserving tone mapping method for HDR images. By clipping and compensating the luminance histogram of an HDR image, the method preserves the details after tone mapping. A probability model is also introduced to estimate the output brightness and its standard deviation. Then the histogram of the original image is divided into several regions to reduce the error between the expected brightness and the output brightness. Finally, the segmented histogram equalization is applied to each region for reproducing the low dynamic range image. Experiment results show that the new algorithm can successfully perform tone mapping for high dynamic range images. It can compress images according to a brightness given or set adaptively and preserve the details in images.

Key words High dynamic range (HDR) image, tone mapping, detail preserving, brightness scaling

Citation Lu Xu-Ming, Zhu Xiong-Yong, Li Zhi-Wen, Mai Jian-Ye, Tan Hong-Zhou. A brightness-scaling and detail-preserving tone mapping method for high dynamic range images. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(6): 1080–1092

目前的 CMOS 传感器已能采集到 170 dB 的高动态范围的真实场景的图像, 从而对传统图像的存储、传输、处理、重现等技术提出了新的挑战^[1]. 因此, 近年来学者们提出各种方法对采集到的高动态范围 (High dynamic range, HDR) 图像的动态范围进行压缩, 以解决真实场景与存储、传输、处

理、重现等技术的动态范围不匹配的问题^[2]. 这种对高动态范围图像的压缩方式又称为色阶重建 (Tone reproduction) 或者色调映射 (Tone mapping)^[3], 以下统称色调映射. 其目的是保证图像中从最暗到最亮的所有细节都得到体现, 同时保留真实场景的视觉对比, 从而生成符合真实场景的视觉感受的图像. 按算法中算子的作用范围来划分, 可分为基于色阶重建算子的局部色调映射算法 (Local tone mapping)^[4–10] 和基于色阶重建曲线的全局色调映射算法 (Global tone mapping)^[11–16].

局部色调映射算法实际上是对 HDR 图像中的不同区域进行线性或者非线性变换, 即在调整图像中某点的灰度值时, 同时考虑该点的空间信息, 故能增强局部较小的对比度, 压缩相对较大的对比度, 从而能保持几乎所有的可视细节信息, 较好地解决动态范围匹配的问题. 其中较有代表性的是 Kuang 等

收稿日期 2013-03-18 录用日期 2015-01-13
Manuscript received March 18, 2013; accepted January 13, 2015
国家自然科学基金—广东联合基金重点项目 (U0935002) 资助
Supported by Key Project of Joint Fund of National Natural Science Foundation of China and Guangdong Province (U0935002)

本文责任编辑 戴琼海
Recommended by Associate Editor DAI Qiong-Hai
1. 中山大学信息科学与技术学院 广州 510006 2. 广东第二师范学院
院计算机科学系 广州 510303

1. School of Information Science and Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006 2. Department of Computer Science, Guangdong University of Education, Guangzhou 510303

利用图像色调模型 (Image color appearance model, iCAM) 提出的 iCAM06 算法^[5], 该方法采用双边滤波器将输入图像分为基本层和细节层, 从而准确预测图像的复杂外貌, 在较大程度上满足人们对亮度和色度的视觉感知需求, 图像效果有质的提升. 但总体而言, 局部色调映射算法在对比度和图像信息的转换与处理中需耗费大量计算资源, 不适合实时处理系统^[6], 且容易出现偏色现象^[7-8], 导致其场景的整体明暗效果不够和谐^[9].

全局色调映射算法可以有效解决上述问题, 它最早是被提出用来解决场景和显示设备动态范围不匹配问题的^[17], 它在对图像进行动态范围色调变换时, 每个像素都使用同一条变换曲线, 变换曲线可以预先指定或者根据图像的内容获取. 例如 Drago 等提出的一种新颖的自适应对数映射算法^[12], Duan 等提出线性映射与直方图均衡结合的全局色调映射方法^[13], 以及 Kao 等提出的快速实现的细节保持全局色调映射算法^[14], 这些算法均能取得更好的映射结果, 且算法的时间复杂度低、处理速度快^[10]. 但它们能处理的动态范围有限, 且要依赖相关参数的调整, 才能达到比较好的效果^[15-16].

高动态色调映射算法实质上是一种灰度级压缩方法, 高动态范围图像中的某些照度值映射到低动态图像时会被合并, 因此丢失图像细节的现象难以避免. 全局色调映射算法对每个像素都使用同一条变换曲线, 故丢失细节的情况尤为严重, 但其算法复杂度低, 且映射后的图像比较自然. 直方图均衡算法是一种基于直方图的全局映射算法, 可根据输入图像灰度的概率而重新分配输出图像的灰度级^[18], 故也可将其应用在 HDR 色调映射领域中. 但由于直方图均衡算法扩展了概率大的区域的灰度级, 而压缩概率低的区域的灰度级, 故导致图像中概率较低的某些细节部分的灰度级在灰度级映射的过程中被合并, 丢失细节, 弱光源处的图像得不到充分的体现, 而强光环境下的图像则出现过饱和现象. 故学者们提出采用直方图修正的方法^[19-21], 在扩展图像动态范围的同时, 抑制了噪声的增强, 提高图像的细节信息, 较好地解决了传统直方图均衡算法的问题, 从而为本文解决 HDR 色调映射的问题提供了良好的思路.

HDR 图像经过色调映射处理后的低动态范围 (Low dynamic range, LDR) 图像, 除可用传统的方法进行图像理解外, 还可在传统显示设备上重现, 效果会因用户的主观感知而异, 故算法的效果应受用户控制, 且不能破坏原图像的整体和谐, 同时, 处理后的图像还应尽可能多地保留原 HDR 图像的细节信息. 因此, 本文提出了一种新的亮度可控并可保留细节的全局 HDR 色调映射方法. 该方法主要基于本文提出的直方图修正的 HDR 色调映射的数学模

型, 即先根据图像的平均照度与标准差, 将直方图分成三个区域, 对每个区域的直方图分别进行调整, 补偿图像的细节部分, 从而有效减小图像过饱和, 并可避免图像出现不自然和噪声增多的情况^[21], 然后自适应估算输出低动态范围图像的亮度, 并重新分配直方图的各区域的范围, 最后采用直方图均衡的方法, 将 HDR 图像映射为 LDR 图像.

本文其余部分的结构安排如下: 第 1 节介绍基于直方图剪切并具有细节保持特性的直方图均衡的原理; 第 2 节建立基于直方图均衡的高动态范围映射的数学模型; 第 3 节介绍本文提出的 HDR 色调映射方法; 第 4 节是相关的仿真结果分析; 第 5 节为结论与展望.

1 基于直方图剪切的细节保持的直方图均衡原理

对直方图剪切的方法能较好地改善传统直方图均衡算法的性能, 保持并增强图像的细节部分. 因为图像的细节部分通常只占据图像的很小一部分, 在直方图中表现为众多的谷; 而背景部分占据了图像中相对较多的部分, 其灰度级大多相同或较为相近, 故在直方图中表现为较高的峰, 如图 1 (a) 所示. 由于直方图均衡方法依赖于累积函数 $c(x)$, 故可采用直方图剪切的方法限制 $c(x)$ 的比例, 即可控制对不同概率灰度级的映射结果, 从而达到细节保持与增强之目的, 即:

$$\frac{d}{dx}c(x) = p(x) \quad (1)$$

其中, $p(x)$ 为灰度级出现的概率. 此时, 设定一个阈值, 然后提升或者压缩直方图中各灰度级的出现频率, 修正直方图的形状, 即为直方图剪切方法. 如图 1 所示.

由图 1 可知, 基于阈值对直方图进行剪切, 令概率小的灰度级, 在映射到新图像时, 不会与其他灰度级合并, 从而保持了图像的细节部分.

2 基于直方图均衡的 HDR 色调映射的数学模型

为避免出现过饱和与不自然现象, 同时还能保持图像的细节部分, 本文提出了一种基于多段直方图均衡与直方图剪切的高动态范围图像映射方法.

双直方图均衡方法由于只将直方图划分为两段, 处理后的图像仍然会存在过饱和的现象^[21]. 但若将直方图划分太多段, 则会导致映射后的图像出现不自然的现象. 因此, 本文将高动态范围图像的直方图划分为三个区域, 即 h_l , h_m 与 h_u , 它们的累积函数分别为 cdf_l , cdf_m , cdf_u . 此时, 需要定义两个阈值, 以将直方图划分为三段:

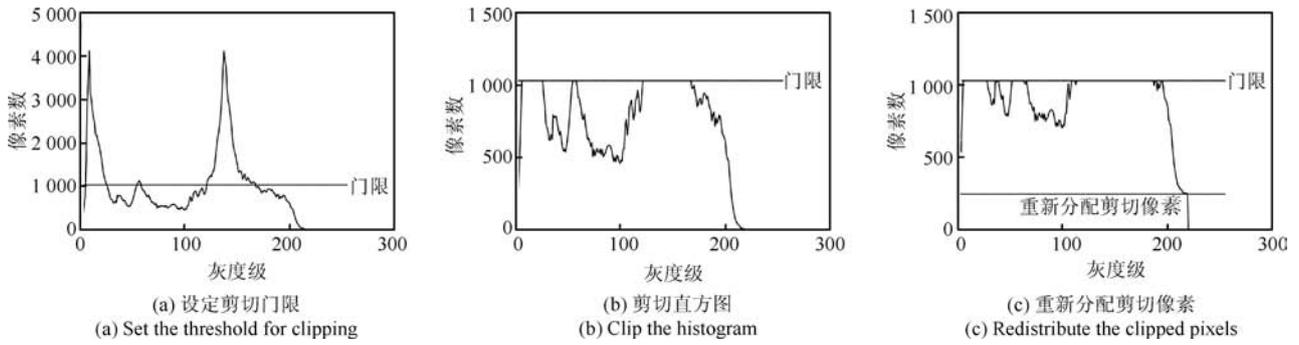


图 1 直方图门限剪切

Fig. 1 The histogram clipping

$$\begin{cases} th_1 = \mu - \sigma \\ th_2 = \mu + \sigma \end{cases} \quad (2)$$

其中, μ 为图像的平均亮度, σ 为图像的标准差, 其表达式为

$$\mu = \frac{1}{\text{Total_pixel}} \sum_{i=0}^{N-1} h(i)i \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{\text{Total_pixel}} \sum_{i=0}^{N-1} h(i)(i - \mu)^2} \quad (4)$$

其中, Total_pixel 为图像的像素总和, N 表示量化后的亮度级数.

通常情况下, 图像的直方图是正态分布的, 在 $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ 区间内的像素数约占 68.3%, 对于绝大部分的图像来说, 像素相对集中在该区域内, 故本文方法根据图像的平均亮度值与标准差将直方图在 th_1 和 th_2 位置分割为三个区域段, 即

$$h(i) = h_l \cup h_m \cup h_u \quad (5)$$

因 HDR 图像的动态范围远远超过传统的 8 位图像的灰度级范围, 故要将 HDR 源图像映射为 LDR 图像, 则必须找出从高动态图像的分割点到低动态图像灰度级的分割点的映射, 即高动态图像中每一段的直方图最终将被分配多少灰度级, 称为灰度级的分配. 因此, 本文提出一种估算 LDR 图像的平均亮度和标准差值的方法, 近似估计输出图像的直方图, 从中找到平均亮度和标准差与灰度级分配的关系, 最终找出最为合适的灰度级分配方案, 使得输出图像的平均亮度与设置的亮度误差最小.

2.1 亮度模型的估算

令输出 LDR 图像的直方图形状估计模型如图 2 所示, 由该模型得到的平均亮度可逆向推导出灰度级的分配, 从而控制输出图像的平均亮度与标准差.

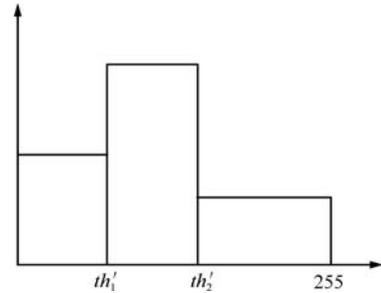


图 2 输出 LDR 图像的直方图亮度估算模型

Fig. 2 The model for the brightness estimation of the output LDR image

该模型中平均亮度 mv 和标准差 std 均是可控的, 即由用户设定. 模型中三段直方图的像素数量的比例分别为 r_1 、 r_2 和 r_3 , 这里的关键是得到输出图像灰度级的分割点 th'_1 和 th'_2 .

对 HDR 图像直方图分段与剪切补偿后, 各段直方图的像素数量并未发生变化, 故可得:

$$\begin{cases} r_1 = \frac{1}{\text{Total_pixel}} \sum_{i=0}^{th_1-1} h(i) \\ r_2 = \frac{1}{\text{Total_pixel}} \sum_{i=th_1}^{th_2-1} h(i) \\ r_3 = \frac{1}{\text{Total_pixel}} \sum_{i=th_2}^{N-1} h(i) \end{cases} \quad (6)$$

根据模型可以推导出平均亮度 μ_m 和标准差 σ_m , 得:

$$\mu_m = 0.5 [r_1(th'_1 - 1) + r_2(th'_1 + th'_2 - 1) + r_3(th'_2 + 255)] \quad (7)$$

$$\sigma_m = \left(\frac{r_1}{th'_1} \sum_{i=0}^{th'_1-1} (i - \mu_m)^2 + \dots \right)$$

$$\left. \begin{aligned} & \frac{r_2}{th'_2 - th'_1} \sum_{i=th'_1}^{th'_2-1} (i - \mu_m)^2 + \\ & \frac{r_3}{256 - th'_2} \sum_{i=th'_2}^{255} (i - \mu_m)^2 \end{aligned} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

令用户预设的平均亮度 mv 和标准差 std 与模型估算的平均亮度 μ_m 和标准差 σ_m 相等, 即有 $\mu_m = mv$, $\sigma_m = std$, 则式 (7) 和式 (8) 是求解 th'_1 和 th'_2 的二元方程组. 通过数值方法求解得到 th'_1 和 th'_2 , 然后通过分段直方图均衡映射算法最终得到输出图像, 求得输出图像的平均亮度 μ_{LDR} 与标准差 σ_{LDR} .

为了分析模型的估计效果, 通过比较大量的仿真结果的 μ_{LDR} 和设置的 mv , 发现相对误差在 15% 以内, 故该模型估计的平均亮度与输出的图像的平均亮度的相对误差较小. 在后面第 2.3 节中有相关数据的分析. 因为大多数图像都具有单峰形态的直方图, 其约有 68.3% 的像素个数集中在 $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ 区间内, 而在对直方图进行裁剪与补偿后, 算法并未改变这一比例关系, 因此通过不同的 th'_1 和 th'_2 的值可控制最终输出 LDR 图像的亮度, 这也是提出该模型的目的.

但通过比较 σ_{LDR} 和设置的 std , 可知该模型不能很好地反映出输出图像的标准差. 标准差用来度量随机变量和其数学期望之间的偏离程度, 故标准差不能由用户控制. 此外, 在算法中需要设计数值方法求解二元方程, 算法复杂度较大.

2.2 标准差模型的估算及计算优化

虽然不同的预设标准差 std 与估算输出图像的标准差 σ_{LDR} 相对误差很大, 但最终会找到一个值 std , 使得 σ_{LDR} 与该 std 值的误差最小, 此时图像有较好的视觉效果. 那么, 可以假设存在一个标准差 std , 使得输出的低动态图像的标准差 σ_{LDR} 与它的相对误差足够小. 于是, 本文提出另一种模型估计输出图像的标准差 σ_{LDR} . 为了能够估计输出图像的标准差参数, 并且缩小输出图像标准差与估计值的误差, 令输出图像的直方图的形状如图 3 所示.

图 3 中, th'_1 和 th'_2 表示低动态图像的灰度级分割点, σ_m 为模型估计的标准差. 由式 (2) 的关系可得:

$$th'_2 = th'_1 + 2\sigma_m \quad (9)$$

结合式 (7) 和式 (9), 可以计算出 th'_1 和 th'_2 的值, 其

中 th'_1 为

$$th'_1 = \frac{2\mu_m + (r_1 + r_2) - 255r_3 - 2(r_2 + r_3)\sigma_m}{r_1 + 2r_2 + r_3} \quad (10)$$

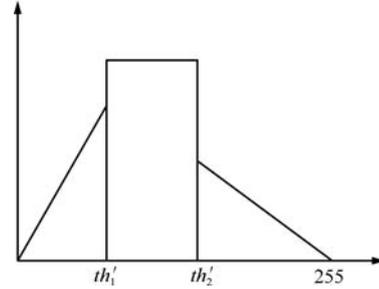


图 3 输出 LDR 图像的直方图标准差估算模型

Fig. 3 The model for the standard deviation estimation of the output LDR image

根据图 3 模型可以计算出标准差 σ_m , 得:

$$\sigma_m = \left(\begin{aligned} & \sum_{i=0}^{th'_1-1} \frac{2r_1 i}{th'^2_1} (i - \mu_m)^2 + \\ & \sum_{i=th'_1}^{th'_2-1} \frac{r_2}{th'_2 - th'_1} (i - \mu_m)^2 + \\ & \sum_{i=th'_2}^{255} \frac{2r_3(256 - i)}{(256 - th'_2)^2} (i - \mu_m)^2 \end{aligned} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

令模型的平均亮度估计值 μ_m 与设定的亮度 mv 相等, 则式 (9)~(11) 是关于 th'_1 , th'_2 , σ_m 的方程组. 利用式 (9) 和式 (10) 消去式 (11) 的变量 th'_2 和 σ_m , 得到 th'_1 的一元方程. 在 LDR 图像中, th'_1 的取值范围为 0 到 255 的整数, 因此可以通过搜索的方式得到合适的解.

为了提高搜索速度, 因式 (11) 为关于 σ_m 的不动点方程的形式, 故可考虑对 σ_m 进行迭代求解. 给定初始值 $\sigma_{m,0}$, 由式 (9) 和式 (10) 可以求出对应的 th'_1 , th'_2 , 将其代入不动点方程式 (11) 的右边, 可以得出迭代值 $\sigma_{m,1}$. 定义 $\sigma_{m,k}$ 和 $\sigma_{m,k-1}$ 的相对误差为

$$E = \frac{|\sigma_{m,k} - \sigma_{m,k-1}|}{\sigma_{m,k}}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (12)$$

若 E 大于预设的误差程度 δ , 则进行下一次迭代, 直到相对误差 E 小于预设的误差 δ , 此时获得的 th'_1 和 th'_2 就是最终源图像映射到 LDR 图像的灰度级分割点.

在实际应用中, 以上迭代对仿真的大量图像都可有效求解, 如果上述迭代不收敛, 或者迭代次数到

达一定限值, 可以退出迭代, 对 th'_1 进行取值范围内的全搜索求解.

2.3 两种模型的比较

为了能够尽可能准确地估计出输出图像的亮度以及标准差, 选择合适的模型进行有效的估计, 分别对采用图 2 的模型与采用图 3 的模型 (分别简称模型 1 和模型 2) 处理后输出 LDR 图像的平均亮度和标准差进行比较, 模型比较的结果如表 1 和表 2 所示. 其中针对不同的 HDR 图像, 计算预设的平均亮度 mv 与输出图像的平均亮度 μ_{LDR} 的相对误差 $E_\mu = |mv - \mu_{\text{LDR}}|/\mu_{\text{LDR}}$, 以及算法中收敛的标准差 σ_m 和输出图像的标准差 σ_{LDR} 的相对误差 $E_\sigma = |\sigma_m - \sigma_{\text{LDR}}|/\sigma_{\text{LDR}}$.

由表 1 和表 2 可知, 在 LDR 图像的平均亮度的比较中, 模型 2 的估计值与模型 1 的差别很小, 但是在估计标准差的比较中, 模型 2 能够有效减少标准差估计的误差, 故算法中采用模型 2, 即利用式 (11) 估算输出 LDR 图像的标准差.

2.4 平均亮度参数的选择及计算优化

以上算法的平均亮度 mv 由用户设定, 用户根据个人主观感知习惯获取合适亮度的 LDR 图像. 本文将此算法称为亮度可控算法.

为了使算法自动选择亮度参数, 本文提出亮度自适应算法. 考虑到熵是衡量一幅图像细节丰富程度的指标之一, 为了使 HDR 图像在经过色调映射后仍能保持细节, 可以通过最大化熵来获取亮度

参数. 由图 3 模型得到输出图像的标准差衡量的是像素值与平均值的偏离程度. 算法输入亮度的变化会使输出图像直方图整体像素值位置改变, 但像素值与平均值之间的偏移程度不会有明显变化. 由图 3 的直方图 $p(x)$ 得到输出图像的熵:

$$H = - \sum_0^{255} p(i) \log p(i) = - \left(\sum_{i=0}^{th'_1-1} \frac{2r_1 i}{th_1'^2} \log \frac{2r_1 i}{th_1'^2} + r_2 \log \frac{r_2}{2\sigma_m} + \sum_{i=th_2'}^{255} \frac{2r_3(255-i)}{(255-th_2')^2} \log \frac{2r_3(255-i)}{(255-th_2')^2} \right) \quad (13)$$

利用式 (9) 和式 (10) 消去式 (13) 的变量 th_2' 和 σ_m , 得到关于 th_1' 和 μ_m 的函数 $H(\mu_m, th_1')$. 问题成为在约束条件式 (9)~(11) 下的熵最大化问题. 考虑到 th_1' 取值为 $[0, 255]$ 的整数, 令 μ_m 取值为 $[20, 200]$ 范围内的整数, 其中低于 20 或高于 200 的值因亮度太暗或太亮而不作考虑, 则问题可以通过对参数进行全搜索得到解决.

为了加快搜索速度, 结合亮度可控算法中的迭代过程, 给定初始值 $\mu_{m,0}$ 和 $\sigma_{m,0}$ 后, 由式 (9)~(12) 求解各参数, 再将迭代得到的参数 th_1' 代入 $H(\mu_m, th_1')$, 然后在 μ_m 的取值范围内搜索最大化 $H(\mu_m)$ 的值 $\mu_{m,1}$, 继续式 (9)~(12) 的迭代, 直到相对误差 E 小于预设的误差 δ . 迭代搜索算法

表 1 采用不同模型的输出图像的平均亮度比较

Table 1 The mean brightness comparison for the output images based on different models

图像	模型 1			模型 2		
	mv	μ_{LDR}	E_μ (%)	mv	μ_{LDR}	E_μ (%)
Memorial	90	86.333	4.25	90	85.692	5.03
AtriumNight	90	87.725	2.59	90	87.663	2.67
Fog	70	62.599	11.82	70	62.161	12.61
Cathedral	120	109.151	9.94	120	110.888	8.22

表 2 采用不同模型的输出图像的标准差比较

Table 2 The standard deviation comparison for the output images based on different models

图像	模型 1			模型 2		
	σ_m	σ_{LDR}	E_σ (%)	σ_m	σ_{LDR}	E_σ (%)
Memorial	51.971	44.884	15.79	40.571	40.093	1.19
AtriumNight	56.722	45.789	23.88	44.690	39.063	14.41
Fog	60.917	54.371	12.04	52.737	50.471	4.49
Cathedral	52.709	47.208	11.65	41.231	42.829	3.73

获取的是局部最优值, 能够有效选择亮度参数, 提升图像处理效果.

3 细节保持的 HDR 图像色调映射方法

基于第 2.2 节提出的数学模型, 本文提出一个亮度可控和细节保持的 HDR 图像色调映射方法, 其工作流程如图 4 所示.

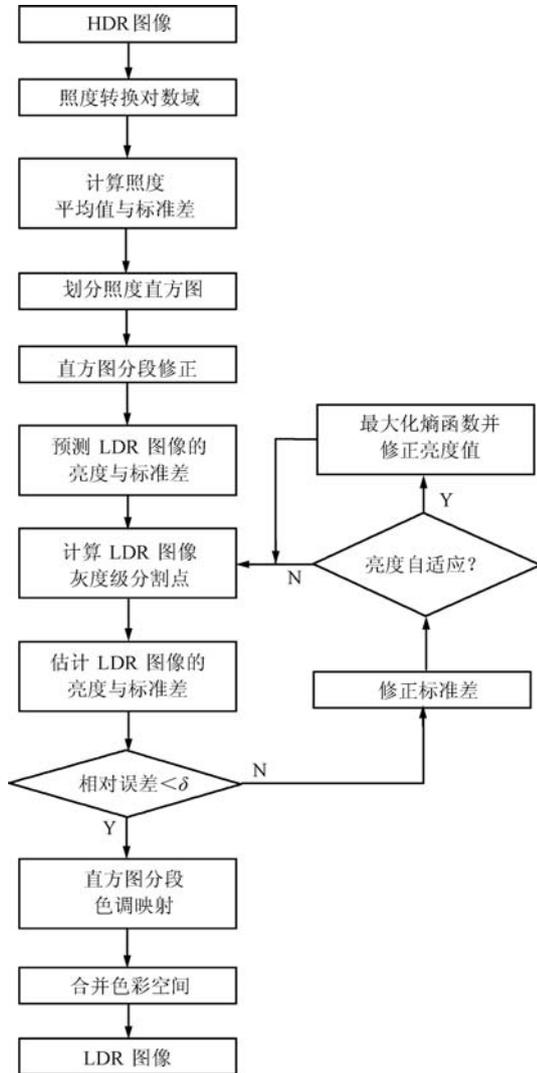


图 4 本文算法工作流程

Fig. 4 The flow chart of the proposed algorithm

与其他色调映射算法一样, 本文方法也是对 HDR 图像的照度通道 L_w 进行处理, 其表达式为

$$L_w = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (14)$$

其中, R 、 G 和 B 分别为 HDR 图像输入时的 RGB 三个通道的数据.

由于本方法是基于直方图均衡方法的, 因此必须对图像进行直方图统计处理. 在 HDR 图像中, 数

值较大的照度范围内的像素数量少, 直接进行直方图统计会导致大量的像素聚集在某些照度, 不利于后面算法的处理. 故在进行直方图统计之前, 先将照度 L_w 转换为对数域, 即 $LI = \ln(L_w)$, 可令图像更适合人眼视觉的感知特性. 因为对数曲线的自变量较小时变化快, 而自变量较大时变化缓, 故在进行直方图分组时, 不表现细节的高照度的区域将会被划分得相对集中, 降低对比度的提升; 而用以表现细节的低照度将会被划分得更加丰富, 提高对比度的效果. 转换为对数域的处理初步压缩了原始场景中高照度部分, 减少了高动态范围中较为稀疏的照度级, 突出增强低照度级的效果.

找出对数域直方图 LI 的最小值 L_{\min} 以及最大值 L_{\max} , 将在 $[L_{\min}, L_{\max}]$ 的动态范围均匀划分为 N 份, 使得落在某一区间内的连续的对数照度值离散为 $[0, N-1]$ 中对应的亮度级, 即

$$LI_{\text{map}}(x, y) = \left\lfloor \frac{(N-1)[LI(x, y) - L_{\min}]}{L_{\max} - L_{\min}} \right\rfloor \quad (15)$$

其中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整操作. 统计每一个划分区间的直方图, 得

$$h(i) = \text{num} \left(LI(x, y) \mid \text{if } \{LI_{\text{map}}(x, y) = i\} \right) \quad (16)$$

其中, $i = 0, \dots, N-1$, 表示图像的对数照度级被划分成了 N 等份的亮度等级, $\text{num}\{\cdot\}$ 为计数函数. N 一般取 1000 或者更高. 对于最终的输出结果为离散的数字图像, 在进行全局的基于直方图的色调映射算法前, 先将高动态范围连续的亮度级离散化, 初步划分出不同亮度等级, 如 0 到 $N-1$ 的亮度等级, 然后对亮度级进行直方图统计, 进而获得高动态图像的直方图信息, 以便下一步的处理. 图 5 为 HDR 图像对数照度离散化后的直方图.

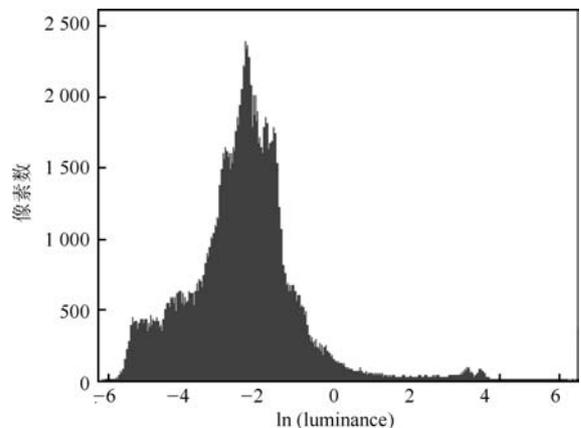


图 5 图像“memorial.hdr”, $N = 1000$ 的直方图

Fig. 5 The histogram of “memorial.hdr”, $N = 1000$

利用式 (3) 与式 (4) 分别计算图像的平均照度 μ 与标准差 σ , 从而得到分割点 th_1 和 th_2 , 并可将直方图分割为三个区间段. 然后对每段直方图进行剪切, 补偿图像的细节部分, 使得处理的图像的直方图与估计的模型有相似的形态.

对直方图采用裁剪和补偿实际上是在改变每一个像素的概率, 概率减少的像素集会被映射到相对集中的像素中, 故在输出的图像中被衰减压缩; 而概率增高的像素集在输出图像中有很好的扩展延伸, 从而达到对比度增强的效果.

对划分为三段的直方图分别设置三个不同的阈值, 其表达式由式 (17) 给出. 超过阈值的照度将被裁剪掉, 从而压缩了图像中数量较多的背景部分图像, 同时令数量较少的细节部分的照度在色调映射的时候不容易被合并.

$$\begin{cases} T_l = \frac{1}{th_1} \sum_{i=0}^{th_1-1} h(i) \\ T_m = \frac{1}{th_2 - th_1} \sum_{i=th_1}^{th_2-1} h(i) \\ T_u = \frac{1}{N - th_2} \sum_{i=th_2}^{N-1} h(i) \end{cases} \quad (17)$$

同时, 改变源图像直方图的出现概率能够改变图像的映射函数从而控制图像的增强效果. 故本文采用不同的补偿方式改变图像各段直方图内的像素数量, 对于像素相对集中的部分, 采用均匀增加的方法, 使得该部分的像素在输出图像中能够有很好的亮度的延伸, 增强整体图像细节. 而对于像素稀疏的暗部以及亮部, 则采用非均匀的补偿的方法: 对第一段直方图, 采用递增的补偿方式; 而第三段直方图则采用递减的补偿方式. 这种补偿方式不会导致低照度以及高照度部分的像素出现概率发生很大的变化, 保持了原直方图信息的低照度与高照度部分像素的信息, 在输出图像中保持原来的整体视觉效果, 减少了低照度增强后出现照度不连续或者是高照度增强后出现图像饱和的现象. 累积裁剪掉的像素数量, 将补偿在各段直方图中, 故各段直方图的总数并未发生变化.

对第一段直方图 h_l , 将裁剪出的像素点个数按递增的方式补偿在 $[0, th_1 - 1]$ 照度等级区间中像素个数不为零的地方, 使得在 h_l 中的像素总数不变, 即:

$$h'_l(i) = h_{lc}(i) + \frac{2c_sum_l}{th_1^2} i \quad (18)$$

其中, $h'_l(i)$ 表示最终经过裁剪和补偿的第一段直方图, $h_{lc}(i)$ 为裁剪后的直方图, c_sum_l 为第一段直方

图经过裁剪出来的像素个数和.

第二段直方图 h_m 的照度级大部分为场景信息, 所以将裁剪出来的像素个数和均匀补偿, 得

$$h'_m(i) = h_{mc}(i) + \frac{c_sum_m}{th_2 - th_1} \quad (19)$$

其中, $h'_m(i)$ 是最终经过裁剪和补偿的第二段直方图, $h_{mc}(i)$ 为裁剪后的直方图, c_sum_m 为该段直方图经过裁剪出来的像素个数和.

而第三段直方图 h_u , 则将裁剪出的多余的像素点个数在 $[th_2, N - 1]$ 照度级区间中按递减的方式补偿, 得:

$$h'_u(i) = h_{uc}(i) + \frac{2c_sum_u}{(N - th_2)^2} (N - i) \quad (20)$$

其中, $h'_u(i)$ 是最终经过裁剪和补偿的第三段直方图, $h_{uc}(i)$ 为裁剪后的直方图, c_sum_u 为该段直方图经过裁剪出来的像素个数和.

于是, 经过裁剪和补偿的直方图为

$$h'(i) = h'_l \cup h'_m \cup h'_u \quad (21)$$

裁剪补偿前后的直方图如图 6 所示, 由统计可得, 大部分像素集中在 $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$ 区间内.

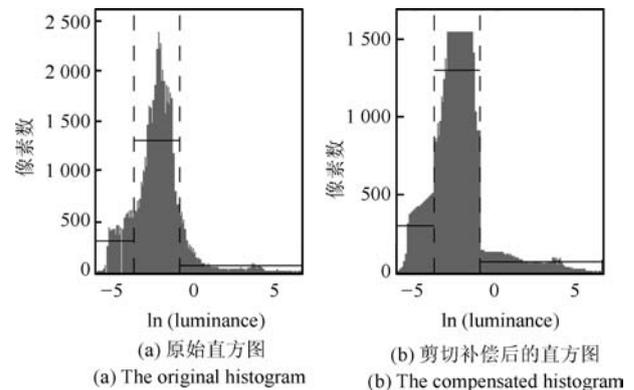


图 6 直方图剪切与补偿

Fig. 6 The histogram clipping and compensation

对经过剪切与补偿后的直方图, 采用由第 2 节算法得出的输出 LDR 图像的灰度级分割点 th'_1 和 th'_2 , 分别求得 h'_l 、 h'_m 与 h'_u 三段直方图的累积密度函数, 即 $cdf' = cdf'_l \cup cdf'_m \cup cdf'_u$.

于是, 每段直方图所对应的从 HDR 映射到

LDR 的映射曲线函数为

$$s = T(r) = \begin{cases} \omega_0 + (th'_1 - \omega_0)cdf'(r), & r < th_1 \\ th'_1 + (th'_2 - th'_1)cdf'(r), & th_1 \leq r < th_2 \\ th'_2 + (\omega_L - th'_2 + 1)cdf'(r), & r \geq th_2 \end{cases} \quad (22)$$

此时得到了从高动态范围 $[0, N - 1]$ 的图像映射到低动态范围 $[\omega_0, \omega_L]$ 的图像的映射曲线函数 s 与映射后的低动态范围灰度图, 得:

$$L_{LDR}(x, y) = T(LI_{map}(x, y)) \quad (23)$$

最后, 需要将色调映射后得到的亮度通道还原到 RGB 色彩空间, 其表达式为

$$\begin{cases} R_{LDR} = \left(\frac{R}{L_w}\right)^\gamma L_{LDR} \\ G_{LDR} = \left(\frac{G}{L_w}\right)^\gamma L_{LDR} \\ B_{LDR} = \left(\frac{B}{L_w}\right)^\gamma L_{LDR} \end{cases} \quad (24)$$

其中, R 、 G 和 B 分别为 HDR 图像输入时的 RGB 三个通道的数据. 此处的 γ 值控制颜色 (一般设置为 0.4 或 0.6 为佳).

4 仿真结果

对同一幅 HDR 图像, 设置不同的平均亮度参数 mv , 以亮度可控算法处理后得到不同的输出结果, 如图 7 所示, 其中图 7(f) 是对比的亮度自适应算法的结果. 对输出的 LDR 图像求平均亮度 μ_{LDR} 与标准差 σ_{LDR} , 并计算预设平均亮度 mv 与输出图像的平均亮度 μ_{LDR} 的相对误差 E_μ , 以及算法中收敛的标准差 σ_m 和输出图像的标准差 σ_{LDR} 的相对误差 E_σ , 结果如表 3 所示, 从而检验本文算法的处理效果.

从表 3 和图 7 可以看到, 该算法能够有效控制输出的 LDR 图像的平均亮度, 不会导致图像过饱和现象, 图像的细节部分仍然得到保留, 图像的整体主观视觉效果较好.

图 8 是本文算法与其他算法的仿真对比, 其中包括 Drago 等提出的自适应对数色调映射算法 (Adaptive logarithmic mapping, ALM)^[12], Duan 等提出的基于直方图快速色调映射算法 (Fast tone mapping, FTM)^[13], Kuang 等提出的 iCAM06 算法^[5] 以及 Kao 等提出的全局细节保持色调映射算法 (以下简称 KWC 算法)^[14].

同时, 由于图像清晰度是描述图像细节表现能力的物理量, 它表达的是相邻影像之间边界的清晰程度, 故采用拉普拉斯算子和作为图像清晰程度的客观评价指标. 该指标常被用于对具有相同目标图像及对同一图像经过不同处理手段后的质量、效果和有效性的评价, 其值越高表示图像越清晰, 其表达式为

$$LS = \frac{\sum_{m=1}^{M-2} \sum_{n=1}^{N-2} \left| 9g(m, n) - \sum_{i,j=-1,0,1} g(m+i, n+j) \right|}{(M-2)(N-2)} \quad (25)$$

采用该指标对上述算法进行图像质量的评价, 其结果如表 4 所示.

ALM 算法、FTM 算法、KWC 算法都是全局的色调映射算法, 其时间复杂度低, 保持了原有图像整体视觉的和谐. 由图 8(a), 8(g) 和 8(m) 的仿真结果可知, ALM 算法映射后的图像整体亮度效果较好, 但由于没有考虑原图亮度的统计特性, 低亮度区域的细节信息没能体现出来. 特别是在处理昏暗场景 (DesignCenter) 时, 表 4 所示的客观评价指标显示该算法未能很好突出场景的细节.

FTM 色调映射算法的仿真结果如图 8(b), 8(h) 和 8(n) 所示. 该算法的参数可以调整映射函数, 令其介于线性映射和直方图均衡之间, 故该算法在昏暗场景中能够强烈突出阴暗区域的对比度, 提高视觉效果, 从而有着较高的拉普拉斯算子和值.

表 3 设置不同平均亮度值 Merorial 的仿真结果

Table 3 The experiment results of Merorial with the mean brightness set different

输出图像	mv	σ_m	μ_{LDR}	σ_{LDR}	E_μ (%)	E_σ (%)
亮度可控 80	80	40.71	75.20	39.73	6.38	2.47
亮度可控 85	85	40.62	80.37	39.93	5.76	1.73
亮度可控 90	90	40.57	85.53	40.18	5.22	0.98
亮度可控 100	100	40.57	95.01	40.73	5.25	0.40
亮度可控 120	120	41.16	114.38	42.46	4.91	3.06
亮度自适应	—	42.95	134.65	45.43	—	5.46



图 7 设置不同亮度值的仿真效果图

Fig. 7 The results with different mean brightnesses



图 8 本文算法与其他算法的效果比较 (三幅图像分别为 Merorial、AtriumNight 和 DesignCenter)

Fig. 8 The comparison of the proposed method and others (The images are Merorial, AtriumNight, and DesignCenter.)

但因该算法未明确指出参数的设置对输出图像的影响,且直方图均衡和线性映射这两种算法本身就很难保持图像整体亮度,容易导致图像输出亮度过大,影响了整体图像感知效果,如图 8(h) 所示。

图 8(c), 8(i) 和 8(o) 为 iCAM06 算法的仿真结果,映射后的图像局部细节对比度突出。故其处理夜景图像时的拉普拉斯算子和值相对较高。但由于算法采用了非线性的双边滤波器,其运算速度非常慢,且需要根据输出图像设置对应的参数,在实时应用场合中受到限制。

图 8(d), 8(j) 和 8(p) 是 KWC 算法的仿真结果,该算法提高了映射后图像的亮度、对比度以及图像细节的可见性,增强图像整体明暗效果,但阴暗区域的信息出现丢失,如图 8(p) 昏暗的室内场景图像,输出结果亮度较暗,低亮度细节信息几乎难以分辨,故其拉普拉斯算子和值偏低。

本文亮度可控算法通过改变输出亮度以获得更丰富的低亮度区域的细节信息,从而用户可自由控制输出 LDR 图像的平均亮度来控制输出图像的整体亮度效果。同时也不会因为扩展低亮度区域的对比度而导致高亮度区域的过度映射,故高亮度区域几乎不会受到影响。无论是在强光源直射还是昏暗的情况,都有着较好的细节保持的特性,仿真结果如图 8(e), 8(k) 和 8(q) 所示。由表 4 可知,其拉普拉斯算子和值相对平衡,算法适用范围较广,其主观评价和客观指标的评价相一致。

亮度自适应算法在亮度可控算法的基础上,增加了最大化熵的步骤来选择合适的输出亮度,图 8(f), 8(l) 和 8(r) 显示出算法能有效选择 LDR 图像的亮度,整体效果明暗和谐。由表 4 可知,其拉普拉斯算子和参数比亮度可控算法的结果有很大的提高,显示出亮度自适应算法比亮度可控算法能更有

效地保持图像的细节信息。

在图像的局部处理效果方面,图 9 截取了 AtriumNight 图像中明暗对比明显的局部进行对比。由图 9 可知,就此局部而言,局部算法 iCAM06 的主观效果较好;FTM 算法则由于亮度过大,效果较差;KWC 算法在图中暗处出现明显噪点;本文亮度可控算法、亮度自适应算法以及 ALM 算法能够有效抑制高亮度区域的饱和现象。总体而言,由于全局色调映射算法难令图像的高亮度与低亮度区域同时保持较好的细节信息,而高亮度区域出现的过饱和现象会给图像带来更差的主观感知,因此,在直方图预处理上应尽量保持像素相对集中区域的概率,而减少低亮度和高亮度像素的概率,从而提升整体图像的细节对比度。

令原 HDR 图像的大小为 $m \times n$,则直方图均衡等操作的计算复杂度为 $O(mn)$ 。对于亮度可控算法,其模型参数估计的复杂度由式(11)的全搜索求解过程决定,由于输出图像的灰度级已经给定,本文取值 256,因此全搜索的搜索次数也为 256,显然参数估计的复杂度与 m, n 无关,故亮度可控算法的总复杂度为 $O(mn)$ 。采用亮度自适应算法后,熵最大化操作使参数估计的复杂度有所增加,但熵最大化的全搜索次数仍然有限,同样与 m, n 无关,故其复杂度同样为 $O(mn)$ 。

本文算法与对比算法在 Matlab 平台下仿真实现,平台配置是 Intel Core i3 M380, 4GB 内存。表 5 为各算法对不同图像的平均处理时间。由表 5 可知,局部算法 iCAM06 所用的运算时间远多于对比的全局算法,这也反映出全局算法在处理速度上的优势。在全局映射算法中,本文亮度可控算法的效率最高,亮度自适应算法的效率比亮度可控算法低,但仍然比 ALM 算法快速,和 FTM 算法的速度接近。

表 4 拉普拉斯算子和评价指标
Table 4 The sum-of-Laplacian results

图像	ALM	FTM	iCAM06	KWC	亮度可控算法	亮度自适应算法
Memorial	89	85	34	37	97	142
AtriumNight	94	174	112	107	127	150
DesignCenter	17	25	13	3	23	39

表 5 各算法对不同图像的平均计算时间 (s)
Table 5 The average time cost for different images (s)

图像尺寸	ALM	FTM	iCAM06	KWC	亮度可控算法	亮度自适应算法
768×512×3	0.33	0.22	5.61	0.18	0.14	0.26
1016×760×3	0.66	0.41	15.52	0.34	0.26	0.48
2000×1312×3	2.21	1.41	32.98	1.17	0.82	1.56

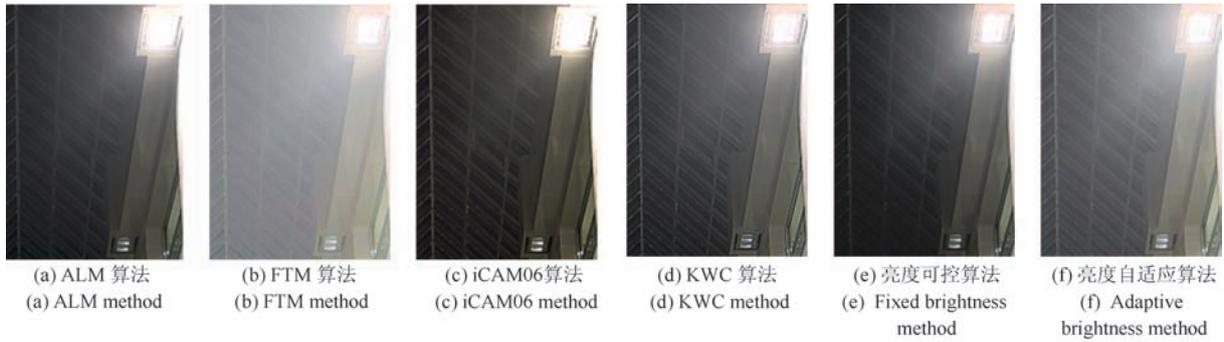


图 9 AtriumNight 局部细节

Fig. 9 The detail results in AtriumNight



图 10 本文亮度自适应算法对不同 HDR 图像的处理效果
Fig. 10 The results of the proposed adaptive brightness method for different HDR images

结合表 4 中亮度自适应算法较好的拉普拉斯算子和指标, 显示其以一定的计算复杂度来换取亮度自适应的性能和细节保持效果的改善。

本文亮度自适应算法对其他图像的仿真效果如图 10 所示. 从仿真结果可知, 采用模型估计的算法具有更高的可控性以及较好的视觉感受, 能够有效抑制高照度部分出现的过饱和现象以及增强低照度部分的对比度, 图像中纹理细节突出, 同时图像的整体视觉效果比较和谐。

5 小结与展望

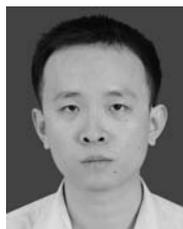
本文根据 HDR 图像的平均照度与标准差, 估算输出 LDR 图像的平均亮度与标准差, 然后对其进行修正, 同时通过构建输出图像直方图的模型来推导出算法所需要的关键参数, 提高算法的稳定性和可操作性, 最后用分段直方图均衡的方法将 HDR 图像色调映射为 LDR 图像. 仿真结果表明, 该算法具有亮度可控与细节保持的特点, 处理后的图像的视觉效果要优于其他基于全局的色调映射算法。

但该算法有着全局色调映射算法独有的局部对比度与细节丢失的缺陷, 为了扩展图像的整体细节的动态范围而丢失了在高亮度区域的细节, 这需要在设计全局色调映射算法时作适当的权衡, 也是下一步研究工作的重要内容之一, 同时还会研究更好的估算模型, 令算法能够适应更普遍的高动态范围图像。

References

- 1 Debevec P E, Malik J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. In: Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2008 Classes. New York, USA: ACM, 2008. 1–10
- 2 Li Z G, Zheng J H. Visual-saliency-based tone mapping for high dynamic range images. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, **61**(12): 7076–7082

- 3 Shen J B, Fang S F, Zhao H L, Jin X G, Sun H Q. Fast approximation of trilateral filter for tone mapping using a signal processing approach. *Signal Processing*, 2009, **89**(5): 901–907
- 4 Durand F, Dorsey J. Fast bilateral filtering for the display of high dynamic range images. *ACM Transactions on Graphics*, 2002, **21**(3): 257–266
- 5 Kuang J T, Johnson G M, Fairchild M D. iCAM06: a refined image appearance model for HDR image rendering. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2007, **18**(5): 406–414
- 6 Mantiuk R, Myszkowski K, Seidel H P. A perceptual framework for contrast processing of high dynamic range images. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2006, **3**(3): 286–308
- 7 Guarnieri G, Marsi S, Ramponi G. High dynamic range image display with halo and clipping prevention. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, **20**(5): 1351–1362
- 8 Gu B, Li W J, Zhu M Y, Wang M H. Local edge-preserving multiscale decomposition for high dynamic range image tone mapping. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, **22**(1): 70–79
- 9 Byung J L, Byung C S. Local tone mapping using sub-band decomposed multi-scale retinex for high dynamic range images. In: Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Consumer Electronics. Las Vegas, NV: IEEE, 2014. 125–128
- 10 Artusi A, Akyuz A O, Roch B, Michael D, Chrysanthou Y, Chalmers A. Selective local tone mapping. In: Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Image Processing. Melbourne, VIC: IEEE, 2013. 2309–2313
- 11 Ramsey S D, Johnson J T, Hansen C. Adaptive temporal tone mapping. In: Proceedings of the 7th IASTED International Conference on Computer Graphics and Imaging. Kauai, Hawaii, USA: ACTA, 2004. 124–128
- 12 Drago F, Myszkowski K, Annen T, Chiba N. Adaptive logarithmic mapping for displaying high contrast scenes. *Computer Graphics Forum*, 2003, **22**(3): 419–426
- 13 Duan J, Qiu G P. Fast tone mapping for high dynamic range images. In: Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition. Cambridge, UK: IEEE, 2004. 847–850
- 14 Kao W C, Wang H C. Tone mapping operator for high dynamic range imaging. In: Proceedings of the 17th IEEE International Symposium on Consumer Electronics. Hsinchu, China: IEEE, 2013. 267–268
- 15 Murofushi T, Iwahashi M, Kiya H. An integer tone mapping operation for hdr images expressed in floating point data. In: Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Vancouver, BC: IEEE, 2013. 2479–2483
- 16 Dobashi T, Murofushi T, Iwahashi M, Kiya H. A fixed-point tone mapping operation for HDR images in the RGBE format. In: Proceedings of the 2013 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference. Kaohsiung, China: IEEE, 2013. 1–4
- 17 Yang Ke-Hu, Ji Jing, Guo Jian-Jun, Yu Wen-Sheng. High dynamic range images and tone mapping operator. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(2): 113–122
(杨克虎, 姬靖, 郭建军, 郁文生. 高动态范围图像和色阶映射算子. 自动化学报, 2009, **35**(2): 113–122)
- 18 Arici T, Dikbas S, Altunbasak Y. A histogram modification framework and its application for image contrast enhancement. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, **18**(9): 1921–1935
- 19 Sen D, Pal S K. Novel automatic exact histogram specification for contrast enhancement in images. In: Proceedings of the 2011 International Conference on Communications and Signal Processing. Calicut, India: IEEE, 2011. 56–60
- 20 Yun S H, Kim J H, Kim S. Image enhancement using a fusion framework of histogram equalization and Laplacian pyramid. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2010, **56**(4): 2763–2771
- 21 Kim Y T. Contrast enhancement using brightness preserving bi-histogram equalization. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1997, **43**(1): 1–8



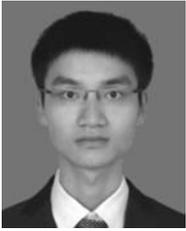
陆许明 中山大学信息科学与技术学院博士研究生. 主要研究方向为数字图像处理, 视频信号处理, 无线通信, 集成电路设计. E-mail: luxuming@189.cn
(LU Xu-Ming Ph. D. candidate at the School of Information Science and Technology, Sun Yat-Sen University. His research interest covers digital image processing, video signal processing, wireless communications, and IC design.)



朱雄泳 博士, 广东第二师范学院计算机系教师. 主要研究方向为数字图像处理, 视频信号处理, 计算机视觉, 系统分析, 移动互联.

E-mail: zhuxiongyong@163.com
(**ZHU Xiong-Yong** Ph.D. in the Department of Computer Science, Guangdong University of Education.

His research interest covers digital image processing, video signal processing, computer vision, systems analysis, and mobile internet.)



李智文 中山大学信息科学与技术学院硕士研究生. 主要研究方向为数字图像处理. E-mail: imagelee@foxmail.com

(**LI Zhi-Wen** Master student at the School of Information Science and Technology, Sun Yat-Sen University. His main research interest is digital image processing.)



麦建业 中山大学信息科学与技术学院硕士研究生. 主要研究方向为数字图像处理. E-mail: jianye_mai@163.com

(**MAI Jian-Ye** Master student at the School of Information Science and Technology, Sun Yat-Sen University. His main research interest is digital image processing.)



谭洪舟 中山大学信息科学与技术学院教授. 主要研究方向为宽带通信, 信号处理, 复杂系统辨识及建模, 半导体集成电路设计. 本文通信作者.

E-mail: issthz@mail.sysu.edu.cn
(**TAN Hong-Zhou** Professor at the School of Information Science and Technology, Sun Yat-Sen University.

His research interest covers broadband communications, signal processing, identification and modeling of complex systems, and semiconductor IC design. Corresponding author of this paper.)