

## 单幅图像的高动态范围图像生成方法

朱恩弘<sup>1,2)</sup>, 张红英<sup>1,2)\*</sup>, 吴亚东<sup>3)</sup>, 霍永青<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>(西南科技大学信息工程学院 绵阳 621010)

<sup>2)</sup>(西南科技大学特殊环境机器人技术四川省重点实验室 绵阳 621010)

<sup>3)</sup>(西南科技大学计算机科学与技术学院 绵阳 621010)

<sup>4)</sup>(电子科技大学通信与信息工程学院 成都 611731)  
(zhy0838@163.com)

**摘 要:** 为了将现有低动态范围(LDR)图像转换为高动态范围(HDR)图像, 提出一种将单幅 LDR 图像转换成对应 HDR 图像的方法. 该方法基于人类视觉系统(HVS)模型, 首先分离出 LDR 图像的亮度分量和色度分量, 对亮度分量构造其反色调映射函数, 通过逐点映射得到亮度分量的反色调映射图像; 然后对亮度分量进行光源采样处理, 并采用高斯滤波和腐蚀操作模拟光线衰减效应, 对光源采样图像进行高光区域的扩展; 再构造分段函数对反色调映射图像和高光区域扩展图像进行融合, 得到最终的亮度分量; 最后合并该亮度分量和色度分量得到最终的 HDR 图像. 实验结果表明, 文中方法能通过单幅 LDR 图像得到 HDR 图像, 处理效果较好, 运行效率高, 具有较好的鲁棒性.

**关键词:** 高动态范围; 反色调映射; 人类视觉系统; 高斯滤波  
**中图分类号:** TP391

## Method of Generating High Dynamic Range Image from a Single Image

Zhu Enhong<sup>1,2)</sup>, Zhang Hongying<sup>1,2)\*</sup>, Wu Yadong<sup>3)</sup>, and Huo Yongqing<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>(School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010)

<sup>2)</sup>(Robot Technology Used for Special Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010)

<sup>3)</sup>(School of Computer Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010)

<sup>4)</sup>(School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731)

**Abstract:** In order to convert the existing low dynamic range (LDR) image into the high dynamic range (HDR) image, a method of generating HDR image from a single LDR image is proposed in this paper. Firstly, the input LDR image is decomposed into luminance component and chrominance component based on human visual system, then, constructing the inverse tone mapping operators of this luminance and obtaining its inverse tone mapped image by pixel-wise mapping. Secondly, defining a threshold to sample on the high light areas of the luminance to get a light-source sampled image, and extending the obtained light-source sampled image by Gaussian filter and erosion which can simulate the light attenuation. Thirdly, merging the inverse tone mapped image with the extended high-light-area image by constructing the piece-wise function to get the final luminance. Finally, combining this luminance with the chrominance to generate the HDR image. A plenty of experiments show that the proposed method can get HDR image from a single LDR image with good robustness, which performs better and faster than previous methods.

收稿日期: 2015-11-05; 修回日期: 2016-07-12. 基金项目: 国家自然科学基金(61401072); 中国科学院西部之光人才培养计划项目(科发人教字(2012)179 号); 四川省科技厅科技支撑计划项目(2015GZ0212); 特殊环境机器人技术四川省重点实验室开放基金资助项目(13zxtk05). 朱恩弘(1991—), 男, 硕士研究生, CCF 学生会会员, 主要研究方向为图像处理、模式识别; 张红英(1976—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 论文通讯作者, 主要研究方向为图像分析与处理、运动目标检测与跟踪; 吴亚东(1979—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, CCF 会员, 主要研究方向为图像处理及可视化; 霍永青(1979—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为多媒体通信、图像传输与处理.

**Key words:** high dynamic range; inverse tone mapping; human visual system; Gaussian filter

动态范围是指环境中光照亮度级的最大值与最小值之比。大自然中,光的亮度范围非常广。现实世界上最亮的物体和最暗的物体亮度之比大于 $10^8$ ,人类的眼睛所能看到的范围是 $10^5$ 左右,而一般的显示器只能表示 256 种不同的亮度。基于此,为了在普通显示器上进行高动态范围(high dynamic range, HDR)图像的显示,必须首先将其动态范围进行压缩,目前普遍采用色调映射算子进行图像亮度的压缩<sup>[1-2]</sup>。

随着科技的不断发展, HDR 显示技术愈发成熟, HDR 显示屏正进入消费级市场。如何获得 HDR 图像资源成为了一个热点问题<sup>[3-4]</sup>。然而,目前绝大多数的视频图像仍为低动态范围(low dynamic range, LDR)格式, HDR 资源匮乏,无法满足技术发展的需要。因此,越来越多的学者开始关注 HDR 图像的生成问题。为了获得 HDR 图像,目前常用的办法主要有通过摄像设备获取和软件方法合成。摄像设备获取主要是通过摄像头拍摄同一场景不同曝光程度的多幅图像,取高曝光图像的暗区域,低曝光图像的亮区域,再通过方法将不同曝光图像的多个部分还原为一幅真实动态范围的图像,而软件方法合成的方法则在游戏领域应用比较普遍。在 3D 游戏中,主要通过提高图像的亮度来制作环境光源进而对图像进行渲染,让亮的部分更亮,暗的部分更暗,同时辅以光晕效果等的增强,对光线进行实时计算合成出 HDR 特效。

为了更好地解决 HDR 图像视频资源匮乏的问题,近年来,研究者开始探索采用单幅 LDR 图像生成 HDR 图像的方式。部分学者开始将注意力放到对 LDR 图像视频到 HDR 图像视频扩展的方向上。事实上,为了尽可能地捕获到现实世界中影像的细节,相机在进行拍摄时已经将现实世界中动态范围极大的亮度进行了压缩,以在显示设备中显示出更好的图像。除此以外,在普通显示屏上显示 HDR 图像时还需要对图像进行一次色调映射,才能得到更好的显示效果。

为了通过单幅 LDR 图像生成 HDR 图像,则采用与之相反的方法,即反色调映射<sup>[5]</sup>。Banterle 等<sup>[6]</sup>提出一种将单幅 LDR 图像转换为 HDR 图像的

方法,首先采用反色调映射算子将 LDR 图像映射到中等动态范围,然后通过扩展映射来重构饱和区域的图像。该方法采用文献[7]中使用的光探针中值切割方法,算法复杂度高,对硬件要求较高。与这个方法相似, Rempel 等<sup>[8]</sup>选择对一些常用于标准视频、电视节目的压缩格式进行取反,再采用亮度提升函数来增强对比度并保留饱和区域细节,但该方法对高光区域的每一次迭代处理会使该区域边缘产生镶边效应。Akyuz 等<sup>[9]</sup>通过实验指出, LDR 图像并不是必须通过一个复杂的处理才能得到 HDR 图像,对于部分 LDR 图像,一个简单的线性映射函数与其他复杂的方法相比,处理效果相差不大甚至可能会更好,并据此提出了一种线性映射的简单方法。Masia 等<sup>[10]</sup>提出了一种简单的全局扩展方法,但该方法在处理一些图片时图像色彩会产生偏移,色调映射不准确。Meylan 等<sup>[11]</sup>则提出了一种分段线性映射方法,将原始图像分为散射区域和镜面区域分别进行变换,但对镜面区域的处理可能会使该区域与其他部分产生切割。Huo 等<sup>[12]</sup>提出一种基于人类视觉系统(human visual system, HVS)的处理方法,使得 HDR 图像较好地保留了 LDR 图像中的色度信息。除此之外, Huo 等<sup>[13]</sup>还提出了一种对高光区域提取处理后再进行反色调映射的方法。Kuo 等<sup>[14]</sup>方法中对高光区域的处理,拥有较好的运算效率,但该区域细节损失较多。Le 等<sup>[15]</sup>则将反色调映射方法应用到 HDR 图像的编码中。随着对单幅 LDR 图像生成 HDR 图像的方法逐渐深入,也有许多学者开始关注方法评价指标的研究<sup>[16]</sup>。

本文根据 HVS 模型,将图像分为色度分量和亮度分量分别进行处理。首先利用反色调映射算子对 LDR 图像的亮度部分进行反色调映射;然后提出过曝光区域提升方法,采用腐蚀和高斯滤波操作对图像的高光区域进行优化;最后将处理之后的亮度分量与色度分量进行融合,同时对图像中暗区域进行调整,增强细节,减小噪声。本文方法的复杂度较低,并能够对图像动态范围进行较好的扩展,对高光区域和暗区域在保留细节的同时进一步提高对比度。

## 1 本文方法概述

### 1.1 HVS

HVS 主要由两部分组成: 人眼和视觉中枢神经系统<sup>[17]</sup>。人眼将光信号转换为神经元信号传送给视觉中枢神经系统, 视觉中枢神经系统将传递过来的信息进行分析重构构成影像。

在 HVS 中人眼是外界光线的入口, 对图像的获取起着极其重要的作用。人眼的生理结构<sup>[17]</sup>如图 1 所示。

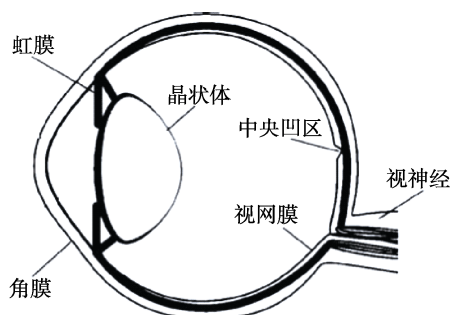


图 1 人眼生理结构示意图

视网膜位于人眼的最里层, 表面分布着大量的光敏细胞, 而光敏细胞又分为了椎状细胞和杆状细胞 2 类。位于视网膜中央的椎状细胞对亮光和色彩敏感, 分辨率高。而杆状细胞主要分布在视网膜周边, 其对暗光敏感, 分辨率低, 对色度信息不敏感。

### 1.2 本文方法框架

综上所述, 椎状细胞和杆状细胞对于外界亮度和色度的敏感度不尽相同。对于反色调映射而言, 在 RGB 空间中对图像进行直接的反色调映射图像色彩容易产生偏移。针对这个问题, 从 HVS 的原理出发, 本文将 LDR 图像分为亮度分量和色度分量分别进行处理, 在对图像亮度进行有效转换的同时, 尽可能地确保图像色彩接近人眼感知到的颜色。

本文方法主要包括 3 个部分: 1) 对亮度分量的反色调映射; 2) 对亮度分量求取阈值图像并进行高斯滤波保留高光部分细节; 3) 将前两部分处理得到的图像与色度分量图融合处理, 在融合的同时对图像进行最后的色调调整和对对比度优化, 最终得到 HDR 图像。本文方法整体框图如图 2 所示。

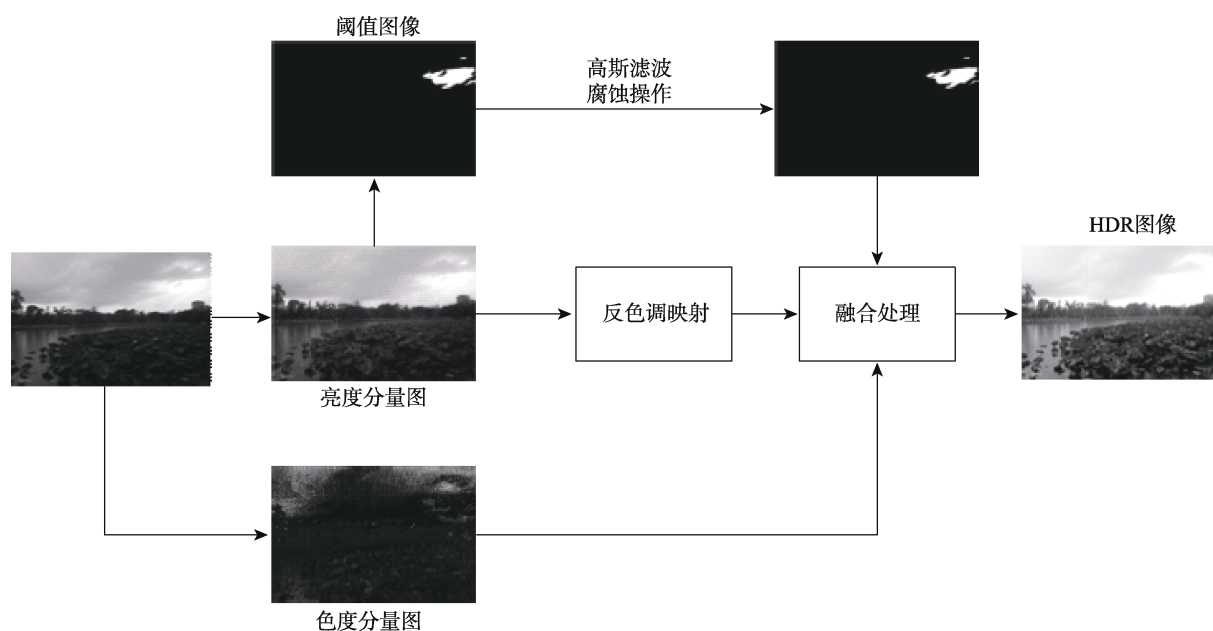


图 2 本文方法整体框图

## 2 本文方法处理过程

### 2.1 反色调映射

色调映射是将 HDR 图像数据映射成 LDR 图像数据, 并尽可能地在视觉上保留原来的视觉效果。反色调映射则是色调映射的反变换, 用于增大图像的动态范围, 其对于 LDR 图像到 HDR 图像的

转换同样非常关键。为说明本文的反色调映射算子, 先介绍一种相机图像处理的色调映射方法<sup>[18]</sup>。将亮度信息转换成对数进行计算是符合人类视觉感受的, 该色调映射算子引入几何平均亮度

$$\bar{L}_w = \exp \left( \frac{1}{N} \sum_{x,y} \lg(\delta + L_w(x,y)) \right) \quad (1)$$

其中,  $L_w(x,y)$  代表现实世界的亮度值;  $N$  是图像上

的总像素数. 为避免当图像中出现亮度值为 0 的点时式(1)中出现对数奇点, 加入参数  $\delta$  并取一个极小的正数值. 为了将现实世界中的光照亮度呈现在图像中, 还需要将模拟信号转换成数字信号, 即将现实世界中的亮度值进行量化

$$L(x, y) = \frac{\alpha}{L_w} L_w(x, y) \quad (2)$$

其中,  $L(x, y)$  代表被量化的亮度值;  $\alpha$  为一个量化参数, 根据  $\bar{L}_w$ , 不同的场景、不同的  $\alpha$  取值有不同的效果,  $\alpha$  值越大, 量化后图像的整体亮度越亮. 初始时, 摄像领域习惯采用 S 型映射曲线同时对较亮区域和较暗区域的图像进行压缩. 但经过不断改进后, 现代摄像机中主要进行的是对较亮区域的压缩映射. 一个简单的色调映射方法为

$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y)}{1 + L(x, y)} \quad (3)$$

其中,  $L_d(x, y)$  代表经过色调映射后 LDR 图像的像素点的值. 在映射过程中, 高亮度值的像素点可以近似地看作被  $1/L$  所量化压缩. 与此同时, 低亮度值的像素点可以看作被 1 量化压缩. 这使得高亮度值像素点在被压缩的同时, 低亮度值像素点的对比度得以保留. 但是在实际处理的过程中, 高亮度值像素点被压缩时会损失一些信息, 为了解决这个问题, 将式(3)进行改进后, 得到

$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y) \left( 1 + \frac{L(x, y)}{L_{\text{white}}^2} \right)}{1 + L(x, y)} \quad (4)$$

式(4)就是将式(3)与一个线性映射相乘, 代表将被映射为白色像素点的最小亮度值. 式(4)为一个常用的色调映射方法. 为了得到反色调映射算子, 将式(4)变型, 得到

$$\frac{L^2(x, y)}{L_{\text{white}}^2} + L(x, y)(1 - L_d(x, y)) - L_d(x, y) = 0 \quad (5)$$

然后将式(2)代入式(5), 得到

$$\frac{\alpha^2}{L_{\text{white}}^2 \bar{L}_w} L_w^2(x, y) + \frac{\alpha}{L_w} (1 - L_d(x, y)) L_w(x, y) - L_d(x, y) = 0 \quad (6)$$

式(2)中,  $L_w(x, y)$  表示现实世界的亮度值, 通过反色调映射后得到的 HDR 图像是为了尽可能地贴近真实世界场景, 故代入式(5)后, 采用  $L_w(x, y)$  表示 HDR 图像中像素点的值. 通过求解式(6)可以很容易地得到  $L_w(x, y)$  的解. 由于  $L_d(x, y)$  在 LDR 图像中一定为正值, 且  $L_w(x, y)$  扩展越大时越能更好地

还原显示场景, 故选用较大的  $L_w(x, y)$ , 即

$$L_w(x, y) = \frac{1}{2} \left( \frac{L_{\text{white}}^2 \bar{L}_w (L_d(x, y) - 1)}{\alpha} + \sqrt{\frac{\bar{L}_w^2 L_{\text{white}}^4 (1 - L_d(x, y))^2}{\alpha^2} + \frac{4 L_d L_{\text{white}}^2 \bar{L}_w}{\alpha^2}} \right) \quad (7)$$

但在求解式(7)的过程中存在 4 个未知参数:  $\alpha$ ,  $\bar{L}_w$ ,  $L_d(x, y)$  和  $L_{\text{white}}$ . 其中,  $L_d(x, y)$  表示 LDR 图像中像素的值, 可以直接从 LDR 图像中得到. 经过实验证明, 在大多数情况下, 单曝光 LDR 图像和 HDR 图像中的  $\bar{L}_w$  几乎是相等的<sup>[6]</sup>, 故  $\bar{L}_w$  可以采用 LDR 图像中的几何平均值.

参数  $\alpha$  无法通过 LDR 图像直接得到, 因此需要构造出一个参数  $L_{\text{max}}$  表示 LDR 图像中像素的最大值映射到 HDR 图像中像素的值的最大, 即扩展后图像的最大输出亮度. 假设 LDR 图像中像素的最大值为 1, 将  $L_d(x, y)=1$ ,  $L_w(x, y)=L_{\text{max}}$  代入式(7)可以得到

$$\alpha = \frac{L_{\text{white}} \bar{L}_w}{L_{\text{max}}} \quad (8)$$

$L_{\text{white}}$  决定了扩展函数的扩展曲线形状, 与映射后图像的对比度相关, 经过实验表明, 当取值较大时效果较好, 推荐采用  $L_{\text{white}}=L_{\text{max}}$ , 在限制伪像的同时提高对比度. 将式(8)代入式(7)进行求解, 可以得到

$$L_w(x, y) = \frac{1}{2} L_{\text{max}} \cdot L_{\text{white}} \left( (L_d(x, y) - 1) + \sqrt{(1 - L_d(x, y))^2 + \frac{4 L_d(x, y)}{L_{\text{white}}^2}} \right) \quad (9)$$

经过反色调映射算子处理后结果如图 3 所示. 可以看出, 原图像在保持较好的色彩的同时其动态范围得到了很好的扩展. 表 1 中对比了原图像与处理后图像的动态范围.



a. 原图像 b. 处理后图像

图 3 反色调映射处理对比图

表 1 处理前后动态范围对比

图像对	动态范围
原图像	2
处理后图像	7

动态范围

$$D = \lg \left( \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \right);$$

其中,  $I_{\max}$  表示图像中最亮点的亮度值;  $I_{\min}$  表示图像中最暗点的亮度值. 与此同时, 因为图像的高光

部分经过反色调映射处理后产生了过曝光现象, 高光区域细节有部分损失, 所以需要对其高光区域进行处理.

## 2.2 高光区域处理

最初获得的 LDR 图像在高光区域或暗区域往往存在着细节丢失、噪声加大等情况, 虽然无法完美地重现这些在拍摄过程中丢失的信息, 但可以通过一些方法来尽可能地对丢失的信息进行弥补. 因此, 本文提出一种处理高光区域的方法, 其流程图如图 4 所示.

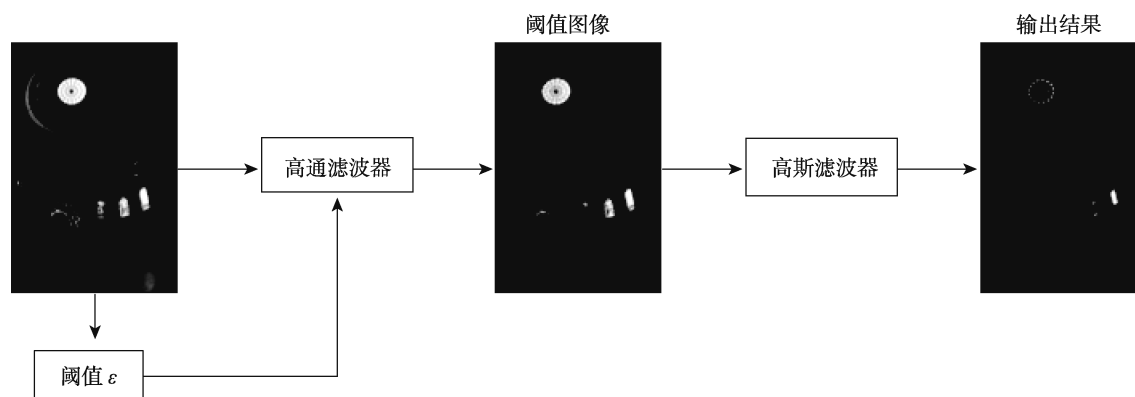


图 4 高光区域处理流程图

首先将待处理图像的亮度分量进行取阈值  $\varepsilon$  操作, 本文取一幅图像的最亮值的 95% 作为阈值  $\varepsilon$ ; 然后将得到的  $\varepsilon$  作为高通滤波器的滤波参数, 高通滤波器

$$M(p) = \begin{cases} I_{d\max}, & I(p) > \varepsilon; \\ 0, & \text{others} \end{cases};$$

其中,  $I(p)$  为各个像素点的亮度值, 当亮度值大于  $\varepsilon$  时, 该像素点值取最大值  $I_{d\max}$  (这里的  $I_{d\max}$  表示 HDR 显示屏中的最大亮度值); 反之则为 0. 由此得到 LDR 图像的阈值图像, 即对图像高光区域的提取结果.

由于提取出来的阈值图像为二值图像, 在显示中高光区域会与周围区域产生分离, 也就是说容易出现伪影或块效应. 而从光线传输的客观原理以及人的直观感觉来看, 现实世界中的光源所发出的光不会直接截断, 而是随着放射距离变长而出现亮度的衰减. 与此同时, 人眼对于高亮度物体更为敏感, 进一步增强后的图像中高光区域像素点的亮度值会影响周围低亮度值的像素点的细节表现. 为解决这 2 个问题, 本文将处理以后得到的阈值图像进行腐蚀操作

$$E(x, y) = \min_{(x', y'): e(x', y') \neq 0} m(x + x', y + y');$$

其中,  $E(x, y)$  表示腐蚀操作后得到的像素值,  $e(x', y')$  表示腐蚀操作中与图像进行卷积的核. 腐蚀操作即将原图像与核作卷积, 求局部最小值, 这样使图像中高光区域逐渐减小. 在考虑高光区域增强效果的前提下, 本文腐蚀使用参考点位于中心  $5 \times 5$  的核.

之后再将腐蚀后的图像输入到高斯滤波器. 高斯滤波器是一类根据高斯函数选择权值的线性平滑滤波器. 二维高斯函数

$$G(x, y) = Ae^{-\frac{(x-u_x)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-u_y)^2}{2\sigma_y^2}}.$$

高斯滤波器对阈值图像有模糊的效果, 其模糊效果能够有效地模拟光线的衰减情况和去除部分噪声, 而腐蚀操作将会减少高光区域对周围像素点的遮盖效果. 图 5 所示为高光区域处理效果图.

## 2.3 图像融合

经过前面两部分的处理以后还需要将处理得到的图像以及色度分量图进行融合, 得到最终结果. 图像通过反色调映射的全局映射以及高光区域的局部调整后, 在中高亮度部分的表现比较优秀, 但在暗区域部分并没有很好地保持其原有



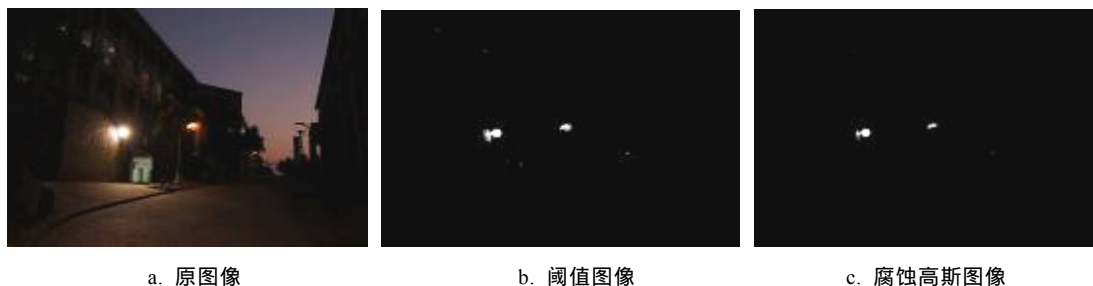


图 5 高光区域处理效果图

亮度,在减小画面对比度的同时还引入了一些新的噪声。所以在进行图像融合的时候,本文对图像暗区域进行了简单的处理

$$L(x,y)=\begin{cases} \sigma L_w(x,y), & L_w(x,y) < \beta I_{\min}; \\ \gamma L_w(x,y) + \delta L_h(x,y), & x \geq 0 \end{cases}$$

其中,  $I_{\min}$  表示图像中最小亮度值;  $L_h(x,y)$  为高光区域处理结果(推荐采用  $\sigma=2/3, \beta=2, \gamma=0.7, \delta=0.02$ )。

本文算法具体步骤如下:

输入: LDR 图像。

输出: HDR 图像。

Step1. 分离 LDR 图像的亮度分量和色度分量。

Step2. 采用式(9)对亮度分量进行反色调映射得到反色调映射图像。

Step3. 对亮度分量取阈值  $\varepsilon$  作为高通滤波器的滤波参数。

Step4. 对亮度分量进行高通滤波得到阈值图像。

Step5. 对阈值图像进行高斯滤波和腐蚀操作得到高光区域扩展图像。

Step6. 将反色调映射图像与高光区域扩展图像进行融合操作得到最终的亮度分量。

Step7. 合并亮度分量及色度分量获得 HDR 图像。

图 6 所示为反色调映射处理后图像与融合高斯图像以后效果对比图,可以看出,图像中几个窗户处的高光区域细节得到了明显的增强。



a. 反色调映射图像

b. 融合后图像

图 6 高光区域处理效果对比图

### 3 实验结果及分析

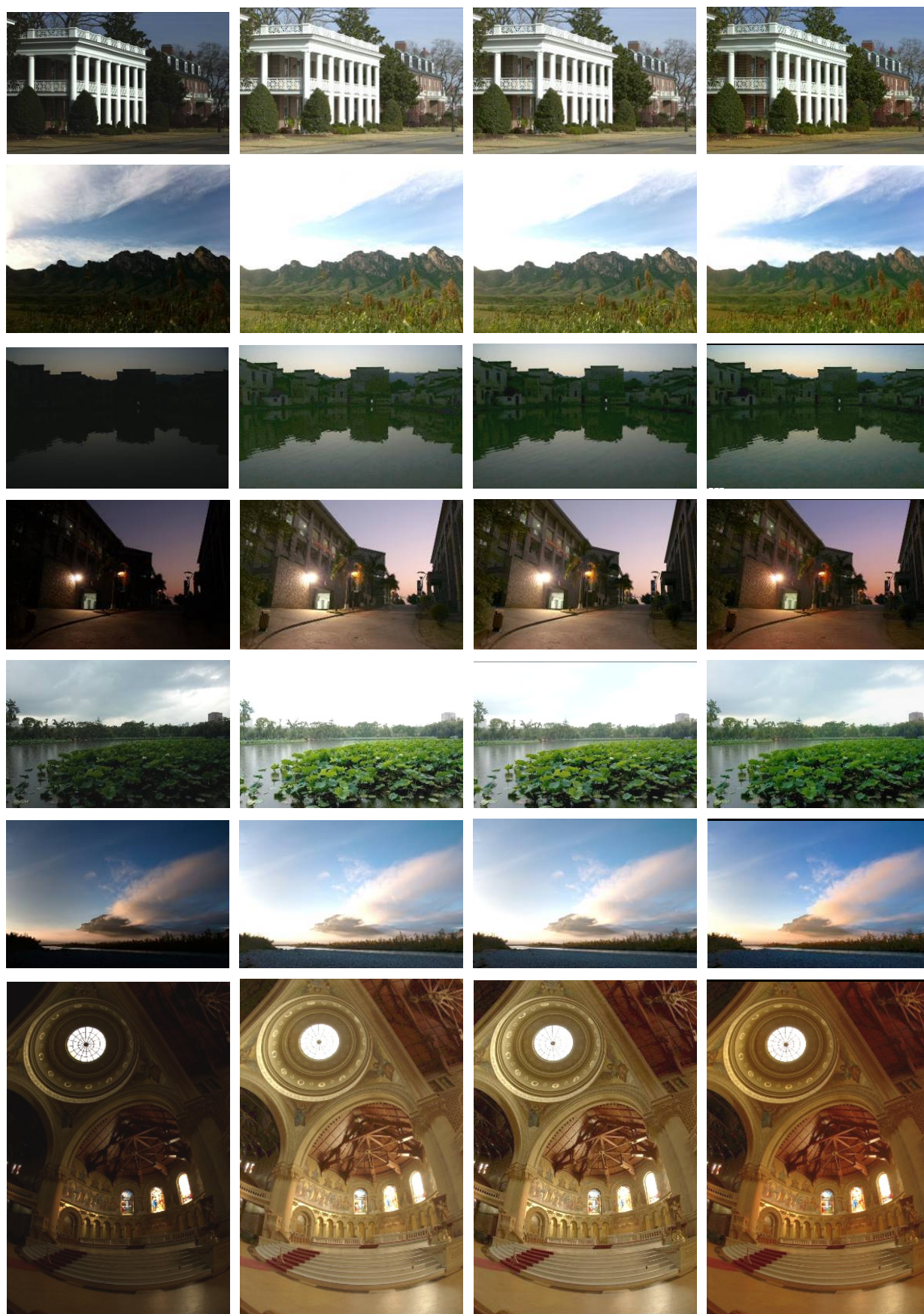
在 Pentium(R)D, 3.30 GHz CPU, 8 GB 内存的计算机上使用 vs2013+Opencv2.4.11 软件版本对本文方法进行了验证,并与目前单幅 LDR 图像转换 HDR 图像的经典方法——Akyuz 方法<sup>[9]</sup>以及 Banterle 方法<sup>[6]</sup>进行比较,最后对实验结果给出了客观性的分析。

#### 3.1 主观评价

图 7 所示为 3 种方法的结果比较。为了便于与原图像对比,均对 HDR 图像进行色调映射到普通显示屏上比较。可以看出,3 种方法都能对 LDR 图像进行相应的转换。Akyuz 方法中,处理结果对比度有所下降,例如图 7b 第 7 行图像中暗区域对比度下降明显,图像整体偏白,对于原始图像的色度信息保持在三者中保持最差;Banterle 方法中,图像动态范围提升明显,对暗区域和普通区域细节的对比度进行了有效的保持或增强,但对于高光区域的处理容易造成高曝光的现象,如图 7c 第 2 行图像天空区域细节损失比较多,色度信息保持介于 Akyuz 方法与本文之间;本文方法对于图像色度信息保持最好,对图像整体细节增强明显,但高光区域仍有部分细节的丢失。

正如引言中所述,生成 HDR 图像常见的方法还有采用多曝光图像序列进行合成的方法。本文采用 hdrsoft 图像处理工具对多曝光图像序列(如图 8 所示)进行合成得到 HDR 图像,将获得的图像作为与真实世界动态范围相近影像的实测数据结果,并采用图像序列中的一幅图像作为本文方法生成 HDR 图像的原 LDR 图像。

从图 9 可以看出,实测数据采用多幅图像合成的方法,在细节上比本文方法处理结果更丰富;但在融合多幅不同曝光程度 LDR 图像可能会导致部分色彩失真,白平衡不准,给人不真实的感觉。相比于本文方法只需要单幅图像即可生成 HDR



a. 原图像

b. Akyuz 方法

c. Banterle 方法

d. 本文方法

图 7 3 种方法结果比较



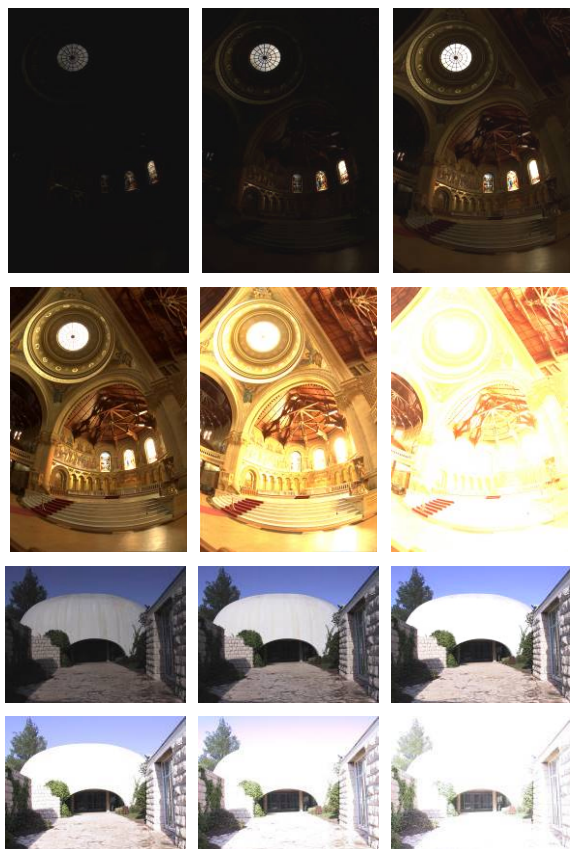


图 8 教堂、白顶建筑 LDR 图像序列

图像,多曝光融合的方法对于源图像数据的要求也更加苛刻,需要连续拍摄多幅不同曝光程度 LDR 图像时,并尽可能保证拍摄设备的静止,花费大量时间。

### 3.2 客观评价

我们采用 DRIM(dynamic range independent image quality metric)<sup>[16]</sup>对本文方法进行客观评价。DRIM 将原 LDR 图像与处理后的 HDR 图像进行对比得出 3 种不同类型的失真,并分别用红、绿、蓝 3 种颜色来表示。其中,红色表示对比度反转(HDR

图像的对比关系在该部分与对应 LDR 图像相反);绿色表示对比度丢失(LDR 图像可见的部分信息在 HDR 图像中丢失了);蓝色表示对比度增强(LDR 图像中不可见或不容易看见的信息在 HDR 图像中被增强为可见信息)。

DRIM 对比图如图 10 所示,排列方式与图 7 中相同;同时,表 2 所示为图 10 中 DRIM 结果的红、绿、蓝像素点所占百分比。可以看出,3 种方法中,本文的方法在大多数测试图中蓝色像素点较多,红色和绿色像素点最少;虽然在一些测试图中蓝色像素点稍少于对比方法,但红色和绿色像素点在 3 种方法中显然是最少的。DRIM 结果表明,本文方法有效地提升了图像动态范围,增强了图像的对比度和细节信息,同时尽可能减少图像细节信息的丢失,总体表现是 3 种方法中最好的。



a. 单曝光 LDR 图像 b. 融合的实测数据 c. 本文方法结果

图 9 本文方法处理与实测数据对比

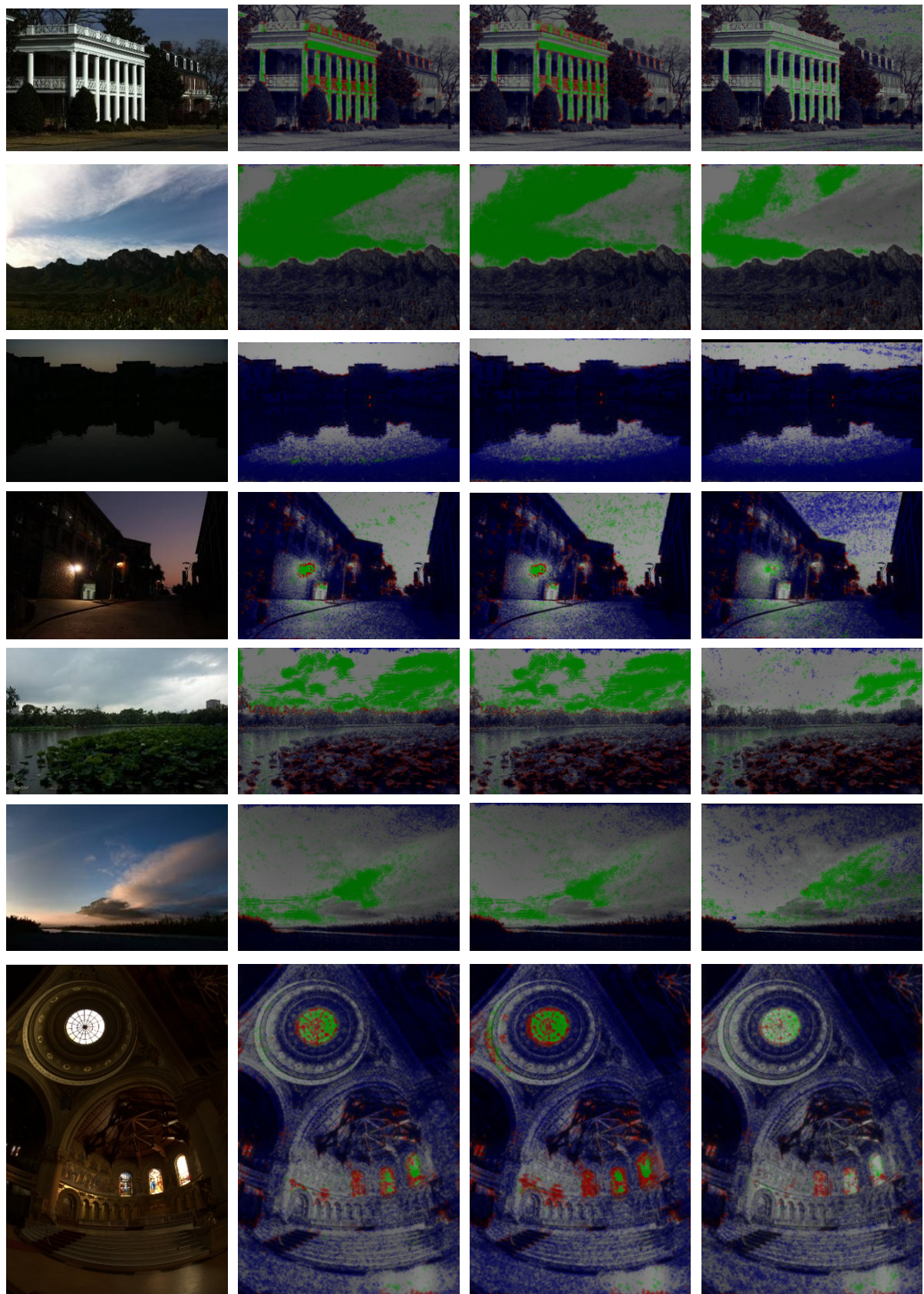
### 3.3 方法运算时间

对于图像处理方法,运行时间是必须考虑的,在实际应用中能否快速处理是一项重要衡量指标。Akyuz 方法采用复杂度为  $O(N)$  的简单线性映射方法,实时性高;Banterle 采用了中位切割方法,

表 2 图 10 中红、绿、蓝各像素点所占百分比

DRIM	方法	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	平均值
Red	Akyuz	31.71	22.01	6.26	7.81	24.6	26.84	7.45	18.10
	Banterle	24.66	16.61	3.58	6.14	20.55	26.02	5.37	14.70
	本文	17.12	11.04	2.23	4.43	20.22	23.01	4.89	<b>11.85</b>
Green	Akyuz	11.14	2.89	48.13	0.76	1.39	22.78	19.10	15.17
	Banterle	7.87	1.93	34.20	1.22	0.78	15.98	8.02	10.36
	本文	2.55	0.44	17.02	0.67	0.96	5.72	5.30	<b>4.67</b>
Blue	Akyuz	35.59	67.02	24.19	69.96	63.70	42.21	16.17	45.55
	Banterle	42.26	65.37	25.61	70.85	65.79	39.48	24.18	47.65
	本文	40.41	65.50	26.87	79.44	77.42	37.29	33.19	<b>51.45</b>





a. 原图像

b. Akyuz 方法

c. Banterle 方法

d. 本文方法

图 10 3 种方法 DRIM 对比图

复杂度较高, 运行效率较低; 本文测试了以上方法的运行时间, 结果说明本文方法在处理速度上具有一定的快速性. 对于分辨率为 600×400 的图像, Akyuz 方法所用平均时间为 0.03 s, Banterle 方法为 4.13 s, 本文方法为 0.106 s, 方便以后进一步实时处理 LDR 视频.

## 4 结 语

本文提出了一种将单幅 LDR 图像转换成对应 HDR 图像的处理方法. 根据 HVS 原理, 首先对 LDR 图像进行反色调映射处理, 再运用高斯滤波器和腐蚀对所得到的结果进行高光区域和暗区域的细节调整, 最终融合各个处理结果得到一幅 HDR 图像.

实验结果表明, 本文方法可以有效地提高图像的动态范围, 避免颜色失真、过增强等问题. 同时, 此方法的运算速度较快, 可满足未来实时处理需求, 具有广阔的应用前景.

虽然本文方法取得了不错的效果, 但在处理有大面积高光区域的 LDR 图像时仍无法避免地丢失一些细节, 下一步需要对高光区域的反色调映射做进一步的处理.

## 参考文献(References):

- [1] Liang Yun, Mo Junbin. Improved Laplacian model for tone mapping of HDR image[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2014, 26(12): 2182-2188(in Chinese)  
(梁云, 莫俊彬. 改进拉普拉斯金字塔模型的高动态图像色调映射方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2014, 26(12): 2182-2188)
- [2] 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 (in Chinese)  
(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]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2011, 23(1): 85-90)
- [3] Wan P H, Cheung G, Florencio D, *et al.* Image bit-depth enhancement via maximum-a-posteriori estimation of graph AC component[C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2014: 4052-4056
- [4] Hu J, Gallo O, Pulli K, *et al.* HDR deghosting: how to deal with saturation?[C] // *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2013: 1163-1170
- [5] Huo Yongqing, Peng Qicong. High dynamic range images and reverse tone mapping operators[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(4): 821-826(in Chinese)  
(霍永青, 彭启琮. 高动态范围图像及反色调映射算子[J]. *系统工程与电子技术*, 2012, 34(4): 821-826)
- [6] Banterle F, Ledda P, DeBattista K, *et al.* A framework for inverse tone mapping[J]. *The Visual Computer*, 2007, 23(7): 467-478
- [7] Debevec P. A median cut algorithm for light probe sampling[C] // *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*. New York: ACM Press, 2006: 1-3
- [8] Rempel A G, Trentacoste M, Seetzen H, *et al.* Ldr2Hdr: on-the-fly reverse tone mapping of legacy video and photographs[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): Article No.39
- [9] Akyuz O A, Fleming R, Riecke B E, *et al.* Do HDR displays support LDR content? a psychophysical evaluation[J]. *ACM Transaction on Graphics*, 2007, 26(3): Article No.38
- [10] Masia B, Agustin S, Fleming R W, *et al.* Evaluation of reverse tone mapping through varying exposure conditions[J]. *ACM Transaction on Graphics*, 2009, 28(5): Article No.160
- [11] Meylan L, Daly S, Susstrunk S. The reproduction of specular highlights on high dynamic range displays[C] // *Proceedings of the 14th Color and Imaging Conference*. Washington D C: Society for Imaging Science and Technology (IS&T) Press, 2006, 6: 333-338
- [12] Huo Y Q, Yang F, Dong L, *et al.* Physiological inverse tone mapping based on retina response[J]. *The Visual Computer*, 2014, 30(5): 507-517
- [13] Huo Y Q, Yang F. High-dynamic range image generation from single low-dynamic range image[J]. *IET Image Processing*, 2016, 10(3): 198-205
- [14] Kuo P H, Tang C S, Chien S Y. Content-adaptive inverse tone mapping[C] // *Proceedings of IEEE Visual Communications and Image Processing*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2012: 1-6
- [15] Le P M, Guillemot C, Thoreau D. Local inverse tone curve learning for high dynamic range image scalable compression[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(12): 5753-5763
- [16] Aydin T O, Mantiuk R, Myszkowski K, *et al.* Dynamic range independent image quality assessment[C] // *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*. New York: ACM Press, 2008, 27(3): Article No.69
- [17] Wu Jinjian. Image information perception and quality assessment based on the human visual system[D]. Xi'an: Xidian University. Library, 2014(in Chinese)  
(吴金建. 基于人类视觉系统的图像信息感知和图像质量评价[D]. 西安: 西安电子科技大学图书馆, 2014)
- [18] Reinhard E, Stark M, Shirley P, *et al.* Photographic tone reproduction for digital images[J]. *ACM Transaction on Graphics*, 2002, 21(3): 267-276