

文章编号 1004-924X(2018)12-3051-09

基于混合映射的高动态范围场景再现

李卫中*, 彭 祺

(湖北工程学院 物理与电子信息工程学院, 湖北 孝感 432000)

摘要:高动态范围场景再现技术广泛应用于消费电子、虚拟现实、摄影以及计算机视觉等领域。针对目前大多数高动态范围场景再现方法很难有效兼顾场景的整体效果和局部细节的问题,本文提出了基于混合映射的高动态范围场景再现方法。首先将输入的高动态范围场景从 RGB 颜色空间转换到 HSV 颜色空间,得到原始图像的 3 个分量:色调、饱和度和亮度;然后利用对数方程将亮度分量转换到对数域,以便符合人类对场景亮度的感知机理,并利用具有 sigmoidal 函数特性的反正切函数自适应地压缩全局动态范围,以得到良好的整体效果;接着采用改进的 SSR 方法对全局压缩后的亮度图像进行局部映射,以增强图像亮区和暗区的细节信息;最后,对饱和度分量进行自适应调整,并将图像由 HSV 颜色空间转换到 RGB 颜色空间得到最终的映射图像。选取 10 组不同的高动态范围场景,从主观和客观两方面进行比较分析。实验结果表明:本文提出的方法既保持了良好的整体效果,又充分保留了图像的局部细节,使图像看起来更加生动自然;同时该方法计算速度快,具有很高的效率。本文算法优于其他 5 种典型的比较算法,在大多数高动态范围场景再现过程中取得了令人满意的效果。

关键词:高动态范围场景;混合映射;引导滤波;单尺度 Retinex;HSV 颜色空间

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182612.3051

High-dynamic range scenes reproduction based on hybrid mapping

LI Wei-zhong*, PENG Qi

(School of Physics and Electronic Information Engineering, Hubei
Engineering University, Xiaogan 432000, China)

* Corresponding author, E-mail: weizhong@whu.edu.cn

Abstract: High dynamic range (HDR) scene reproduction has been widely used in consumer electronics, virtual reality, photography, and computer vision. An HDR scene reproduction algorithm based on hybrid mapping was proposed to address the problem of poor overall appearance and local details of an existing work. First, HDR scenes were transformed from the RGB to HSV color space, which converts the color information to hue, saturation, and luminance value components. Second, the luminance values were transformed into a logarithm domain using a special logarithm function, and an adaptive arctangent function was used to compress the global dynamic range, which then enables achieving good overall appearance. Then, the improved single-scale Retinex algorithm was applied to local detail adjustment, which enhanced the details of the bright and dark areas. Finally, the saturation component was adjusted, and the color information was restored from HSV to RGB color space. Ten

收稿日期:2018-05-23;修订日期:2018-07-06.

基金项目:湖北省自然科学基金资助项目(No. 2016CFB203)

types of HDR scenes were tested in the experiments, and the obtained results were compared both subjectively and objectively. The experimental results demonstrate that the proposed method enables good visual appearance and preserves more details. Moreover, the proposed algorithm has a low computation cost. The proposed algorithm is better than five traditional methods and can produce desirable images in most HDR scenes.

Key words: high dynamic range scenes; hybrid mapping; guided filter; single-scale Retinex; HSV colour space

1 引言

现实场景涵盖了很高的动态范围。从微弱的星光到耀眼的太阳光其动态范围大约为 $10^8 : 1$ ^[1], 人类的视觉系统能够感知的动态范围为 $10^5 : 1$, 而普通的成像设备和显示器的动态范围只有 $10^2 : 1$ ^[2]。由此可知, 现实场景的动态范围远远超过了 CCD/CMOS 成像设备和显示设备所能捕捉的动态范围^[3-4]。如果直接在普通显示设备上显示高动态范围(High Dynamic Range, HDR)场景, 将会造成场景的细节以及色彩信息的大量丢失, 从而无法还原丰富多彩的现实场景。为了实现在普通显示设备上再现 HDR 场景, 国内外众多学者对此展开了研究, 提出了很多 HDR 场景再现算法。

现有的 HDR 场景再现算法主要包括两类: 全局映射和局部映射^[5]。全局映射简单、算法复杂度低, 虽能保持较好的整体效果, 但却损失了大量的局部细节信息。Tumblin 等^[6]根据视觉感知模型提出了一种非线性的全局映射方法, 该方法丢失了较多的场景细节。Larson 等^[7]利用直方图均衡化实现全局映射, 该算法需要大量输入参数且映射效果一般。Drago 等^[8]提出了自适应对数映射算法, 该方法能较好地保持图像整体效果, 但局部信息丢失严重。方华猛等^[9]利用主成份分析法和反 S 曲线实现全局映射, 该方法只在一定程度上改善了视觉效果。

局部映射根据不同区域的动态范围情况选择不同的映射曲线, 有效地保留了不同区域的场景细节, 但其算法复杂度较高, 容易产生光晕和虚假轮廓等现象。Reinhard 等^[10]根据摄影技术中的遮光-增光处理实现局部映射, 该方法一定程度上

增加了区域的细节信息, 但由于划分区域受人为因素影响较大, 算法的应用受到了限制。Fattal 等^[11]提出了基于梯度域的局部映射算法, 该方法有效地增强了局部信息, 但整体效果不佳, 图像不够自然。Kuang 等^[12]提出了基于色貌模型的分层局部映射方法(iCAM06 算法), 该方法较好地体现了图像细节, 但存在色偏。Fang 等^[13]采用快速的引导滤波和分层融合的方式实现局部映射, 该方法增强了局部细节但存在色彩失真。Paris 等^[14]提出了基于图像金字塔的多尺度色调映射方法, 较好地保留了图像细节, 但色彩失真严重, 同时存在光晕现象。Shibata 等^[15]提出了梯度域强度范围约束的局部映射算法, 该方法能很好地保留场景的局部信息, 但色彩退化严重。

本文提出了基于混合映射的高动态范围场景再现方法, 在 HSV 颜色空间, 利用具有 sigmoidal 函数特性的自适应反正切函数实现动态范围的全局压缩, 然后采取改进的单尺度 Retinex 方法实现图像局部细节自适应调整, 并提出了新的色彩恢复方法。本文算法综合了全局映射和局部映射各自的优点, 有效地提高了色调映射图像的质量。

2 混合映射

本文提出的混合映射算法主要由四个步骤组成: 首先进行色彩空间转换, 将 HDR 图像由 RGB 颜色空间转换到 HSV 颜色空间; 接着对图像的亮度分量进行全局动态范围压缩; 然后应用改进的 Retinex 理论, 对全局压缩结果进行局部调整; 最后对色彩进行调整得到最终的映射结果。本文算法的流程框架如图 1 所示。

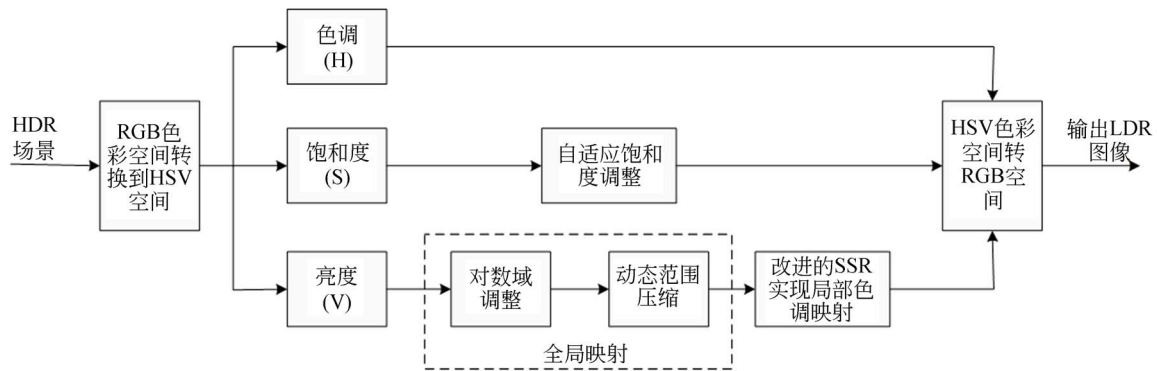


图 1 混合映射算法流程框架

Fig. 1 Whole process of hybrid mapping algorithm

2.1 色彩空间转换

目前应用最为广泛的颜色模型为 RGB 颜色空间,但直接在 RGB 颜色空间进行色调映射操作,容易改变红、绿、蓝三色的比例关系,造成输出的低动态范围(Low Dynamic Range, LDR)图像的色彩失真。HSV 颜色空间更加符合人类的视觉系统对色彩的感知^[16]。HSV 空间将色调(Hue)、饱和度(Saturation)以及亮度(Value)独立分开,有利于保持图像原有的色彩信息,也便于色调映射操作对亮度分量进行处理。因此,本文将在 HSV 颜色空间完成混合映射操作。

2.2 自适应全局映射

全局映射只针对图像的亮度分量 V 展开,全局映射分两步进行:对数域调整和全局动态范围压缩。由于人类的视觉系统对自然场景亮度的感知比较接近对数变化关系,因此,在全局映射之前,先将亮度分量在对数域中进行相应调整,以符合人类的视觉特性,即:

$$V_{\log}(i, j) = \frac{\log(1+350V(i, j))}{\log(1+350)} \quad (1)$$

式中: $V_{\log}(i, j)$ 为对数域调整后的亮度值; $V(i, j)$ 为 HSV 颜色空间中的亮度分量,该亮度分量已被归一化到区间 $[0, 1]$,从式(1)可知, $V_{\log}(i, j)$ 的值也在区间 $[0, 1]$ 。

由于人类的视觉适应具有 sigmoidal 函数的非线性特征^[17],因此本文提出了具有 sigmoidal 函数变化关系的自适应反正切函数完成全局动态范围压缩,该压缩曲线定义为:

$$V_g(i, j) = 0.5 + \frac{1}{\pi} \arctan[C_f V_{\log}(i, j) - 0.5] \quad (2)$$

式中: $V_g(i, j)$ 为全局映射输出结果, C_f 控制着动态范围压缩程度, C_f 对压缩曲线的影响如图 2 所示。

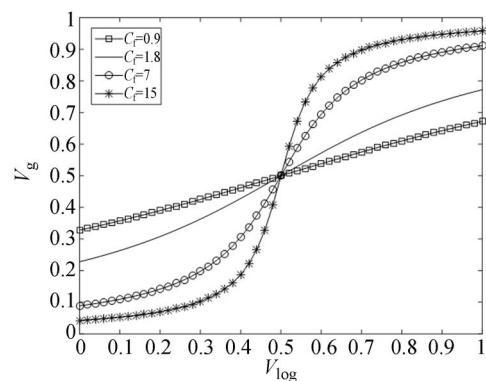


图 2 不同的 C_f 值对应的压缩曲线

Fig. 2 Compression curve corresponding to different C_f values

由图 2 可知: C_f 控制着动态范围压缩程度, C_f 值越小,动态范围压缩越剧烈(即输出亮度范围越小)。但是如果 C_f 的值过小,动态范围压缩过于剧烈,输出亮度趋于扁平化,图像的对比较低,视觉效果差;如果 C_f 的值过大,虽然整体对比度增大,但却无法很好地展现亮区和暗区的场景信息。为了适应不同现实场景的全局映射,经过大量的实验测试,将参数 C_f 定义为:

$$C_f = \max(1.8, 7.5 - 10\bar{V}_{\log}) \quad (3)$$

式中 \bar{V}_{\log} 表示对数域亮度的平均值。

2.3 自适应局部映射

完成图像的全局映射之后,图像的整体效果较好,但局部细节不够清晰,为了提高色调映射图像

的质量,需要对全局映射结果进行局部细节调整。

传统的单尺度 Retinex^[18] (Single-Scale Retinex, SSR) 算法可以有效地增强图像的局部细节,但仍然存在一些问题:(1)利用高斯滤波很难准确估算明暗变化剧烈区域的光照分量,从而导致该区域很容易产生光晕现象。(2)SSR 算法在实现过程中完全去除了光照分量,导致图像较亮区域和较暗区域像素值都向中间值靠拢,图像的整体对比度变差,图像整体看起来不够真实。(3)原算法直接在 RGB 空间对三个通道进行处理,容易导致颜色失真,并且计算的效率也不高。针对上述存在的问题,本文对经典的 SSR 算法进行了改进,并利用改进的 SSR 算法对全局压缩后的亮度分量实现自适应局部细节调整。

针对经典的 SSR 算法容易产生光晕现象的问题,本文利用具有边缘保留特性的快速引导滤波^[19]替代高斯滤波。引导滤波具有优良的保边平滑特性,能有效地避免光晕现象和梯度反转,并且计算效率高。因此本文将引导滤波用于 SSR 算法中的光照分量估计,以消除光晕现象、突出局部细节。针对完全去除光照分量之后,图像的整体对比度变差,图像整体看起来不够真实的问题,本文构造了一个调节因子 $\lambda(i, j)$,用于自动调整每个像素的背景亮度,以改善整体的视觉效果。自适应局部映射方程可以定义为:

$$V_{\text{ldr}}(i, j) = \log[V_g(i, j)] - \lambda(i, j) \log[G_{r, \epsilon}(V_g(i, j), p(i, j))], \quad (4)$$

式中: $V_{\text{ldr}}(i, j)$ 为局部映射输出结果, $\lambda(i, j)$ 为调节因子, $G_{r, \epsilon}(V_g(i, j), p(i, j))$ 表示引导滤波平滑输出的结果, $p(i, j)$ 为引导图像。

为了自适应地调整每个像素的背景亮度,提高再现场景的对比度,让场景看起来更加真实,调节因子 $\lambda(i, j)$ 定义为:

$$\lambda(i, j) = 1 - 0.5(V_g(i, j))^{0.45}. \quad (5)$$

引导滤波具有优良的保边平滑特性,能有效地避免光晕现象和梯度反转,同时可以提高 SSR 算法的效率,引导滤波对亮度分量平滑输出的结果为:

$$G_{r, \epsilon}(V_g(i, j), p(i, j)) = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_k} (a_k V_g(i, j) + b_k), \quad (6)$$

式中: $p(i, j)$ 为引导图像,在本文中引导图像等于 $V_g(i, j)$, 系数 a_k 和 b_k 分别为:

$$a_k = \frac{1}{|\omega_k|} \sum_{(x, y) \in \omega_k} V_g(x, y) p(x, y) - \mu_k \bar{V}_{g, k}, \quad (7)$$

$$b_k = \bar{V}_{g, k} - a_k \mu_k, \quad (8)$$

式中: μ_k 和 s_k^2 分别表示引导图像 p 在窗口 ω_k 的均值和方差, $|\omega_k|$ 表示窗口 ω_k 中像素的数量, $\bar{V}_{g, k}$ 表示全局压缩的亮度图像在窗口 ω_k 中像素的平均值, ϵ 是正则化参数,用于控制引导滤波输出图像的平滑程度^[19]。结合本文的应用场景,在实验的过程中,引导滤波的滤波半径设置为 $r=8$, 正则化参数设置为 $\epsilon=0.05$ 。

2.4 饱和度调整与色彩恢复

完成全局映射和局部映射之后,场景的相对亮度发生了变化。原始 HDR 场景的较暗区域在映射之后亮度会适当增加以突显暗区细节,原始 HDR 场景的较亮区域在映射之后亮度会降低以突显亮区细节。原始的 HDR 场景暗区的饱和度较小,明亮区饱和度较大,映射前后由于亮度出现相对变化,为了使映射后的图像颜色更加符合人类的视觉感知,有必要对饱和度进行适当的调整,使映射出来的 LDR 图像看起来更加生动自然。饱和度调整方程为:

$$S_{\text{ldr}}(i, j) = 0.7 S(i, j) + \log(1 + \eta(i, j)), \quad (9)$$

式中, $S_{\text{ldr}}(i, j)$ 调整后饱和度, $S(i, j)$ 表示输入的 HDR 图像在 HSV 颜色空间的饱和度, $\eta(i, j)$ 表示映射前后亮度分量的相对变化,其定义为:

$$\eta(i, j) = \frac{\left[\frac{V_{\text{ldr}}(i, j)}{V(i, j)} \right] - \min \left[\frac{V_{\text{ldr}}}{V} \right]}{\max \left[\frac{V_{\text{ldr}}}{V} \right] - \min \left[\frac{V_{\text{ldr}}}{V} \right]}, \quad (10)$$

式中 V 和 V_{ldr} 分别为映射前后归一化的亮度值。

完成饱和度调整之后,将色调分量 H 、饱和度分量 S_{ldr} 和亮度分量 V_{ldr} 由 HSV 颜色空间转换到 RGB 颜色空间,即得到最后映射的图像。同时为了改善视觉效果,减少噪声影响,将 1% 的极亮和极暗像素裁剪掉。

3 实验结果与分析

所有的仿真实验均采用 MATLAB (R2012a) 编程完成,仿真实验在 Intel i5 处理器 (3.5 GHz, 64 位), 4 G 内存的 PC 平台上完成。

选取多组不同的 HDR 场景对本文提出的算

法进行了测试,并分别与 Reinhard 等人的算法^[10]、iCAM06 算法^[12]、Paris 等人的算法^[14]、Fang 等人的算法^[13]以及 Shibata 等人的算法^[15]进行了主观和客观的对比分析。

3.1 主观评价

图 3、图 4 和图 5 为不同的 HDR 场景测试结果对比。

图 3 是 HDR 场景 treeUnil 映射的结果。从图中可以看出,Reinhard 算法和 Fang 等人的算法产生了相似的结果,图像较暗区域细节损失严重(例如树干部分),较亮区域的细节模糊(例如远处的雪山轮廓)。iCAM06 算法清晰呈现了场景

的细节信息,图像的对比度高,但仍然存在较为严重的色偏(例如大树的树叶和天空部分),画面缺乏真实感。Paris 算法处理后的图像保留了场景的局部信息,但整体的对比度低,画面有点模糊,色彩不够鲜艳(例如草地和树叶)。Shibata 算法很好地增强了图像的细节(如树干),但同时也引入了噪声,由于算法采取了结构约束的梯度域增强,导致出现了过增强现象;另外该算法导致了严重的色彩失真,整个画面看起来不够生动。本文算法较好地保留了亮区和暗区的细节信息(例如暗区的树干和远处的雪山都十分清晰),同时图像的色彩丰富(例如草地和天空),画面清晰自然。



图 3 图像 treeUnil 色调映射结果

Fig. 3 Comparison of tone mapping results for treeUnil

图 4 为 HDR 场景 AtriumNight 色调映射结果。从图 4 可以看出,Reinhard 算法呈现出的图像整体偏暗,画面的局部细节不够清晰,较暗区域损失了大量的可视细节信息(例如屋顶区域)。iCAM06 算法虽然较好地保留了图像的局部细节,但算法导致了严重的色偏(整个画面偏黄颜色),极大地影响了图像的视觉效果。Paris 算法获得的图像全局对比度低,整个图像灰蒙蒙的,图像看起来不够真实自然,并且在边缘处出现了光晕现象。Fang 等人的算法呈现出较好的全局和局部对比度,画面清晰,但色彩信息损失严重,画

面不够生动。Shibata 算法增强了图像的局部细节,整个画面非常清晰,但却导致了细节过增强,引入了大量的噪声,同时色彩信息损失严重,缺乏真实感。相比之下,本文的算法较好地呈现了场景的细节信息,图像的对比度高,色彩丰富,画面清晰自然。

图 5 给出了 HDR 场景 Desk 对应的各比较算法色调映射的结果,从图中可以看出,Reinhard 算法展现了较好的整体效果,但局部信息有所损失(例如灯箱两侧的灯框部分和桌子的下方部分)。iCAM06 算法虽然清晰地呈现了灯箱的细

节,但灯框两侧和桌子部分损失了大量可视信息。Paris 算法较好地保留了整个场景的细节信息,但画面有点模糊,且灯箱部分颜色不够鲜艳。Fang 等人的算法损失了部分较亮区域的信息(例如灯箱右边区域),且整体画面存在色偏(画面偏黄颜色)。Shibata 算法得到的图像清晰,但却导致了

图像过增强并引入了大量噪声(例如灯箱和桌子),整个画面色彩信息损失严重,画面看起来不够自然。本文算法较好地展现了场景信息,灯箱和桌子部分的细节信息都得到了很好地保留,图像的对比度高,色彩鲜艳(如灯箱部分),画面清晰自然。

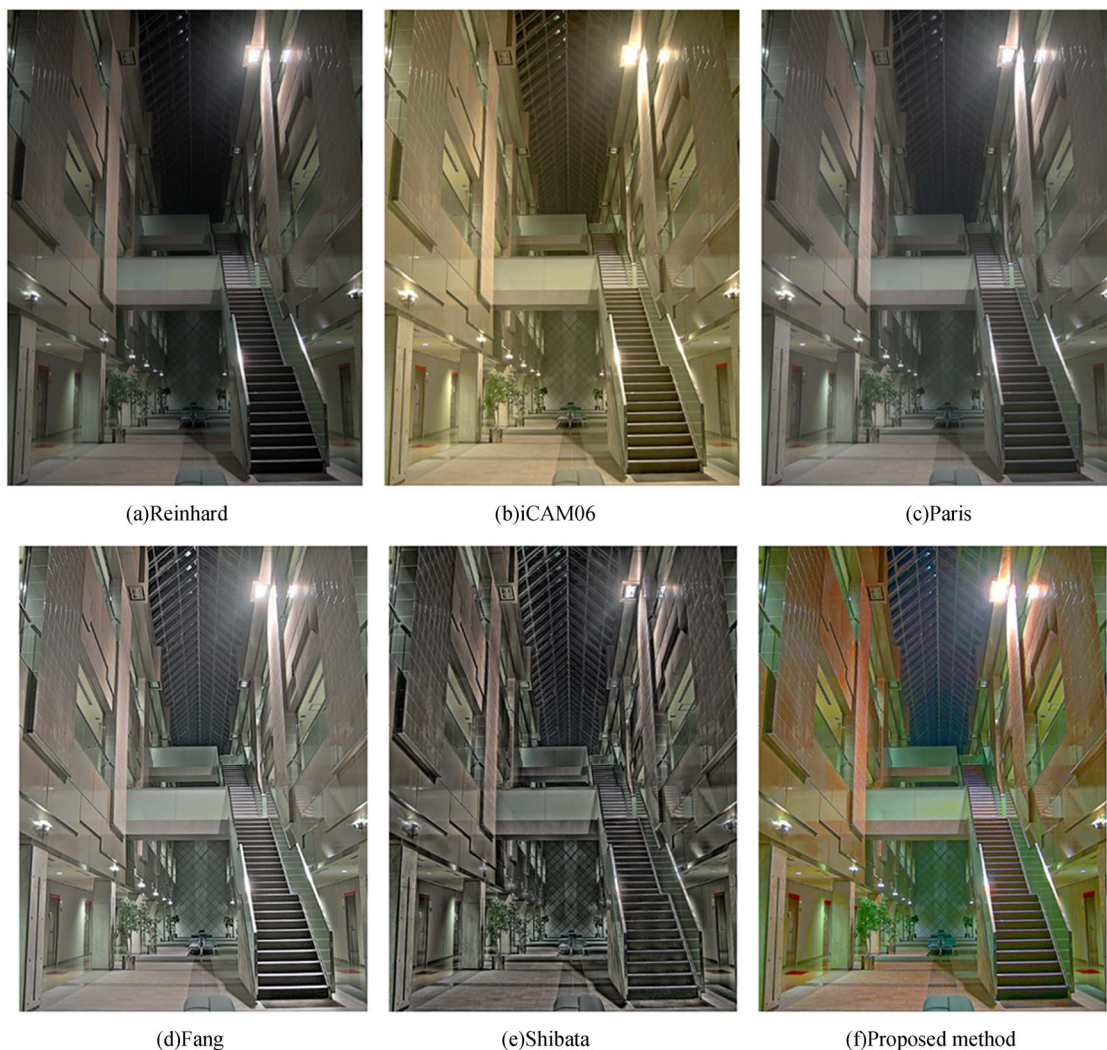


图 4 图像 AtriumNight 色调映射结果

Fig. 4 Comparison of tone mapping results for AtriumNight

3.2 客观评价

选取两个客观指标信息熵^[20]和色调映射质量指标(TMQI)^[21]评价算法的性能。信息熵用于描述图像包含信息的多少,信息熵越大,图像包含的信息越多,图像的细节越丰富。TMQI 包含了图像的结构和自然度,用于综合评价图像的整体质量,其值的范围在区间 $[0, 1]$ 之间, TMQI 的

值越大,图像质量越好。

表 1 为 6 种不同色调映射算法得到的图像信息熵对比结果。从表中的数据可以知道,在大部分 HDR 场景中,本文算法可以获得更大的图像信息熵,表明本文算法在处理大部分 HDR 场景时,可以保留更多的场景信息,展现更多的场景细

节。表 2 列出了不同场景条件下 TMQI 的比较结果。从表 2 可以看出,本文算法在处理大部分

HDR 场景时,可以获得更高的 TMQI 值,说明本文算法获得的色调映射图像质量更好。

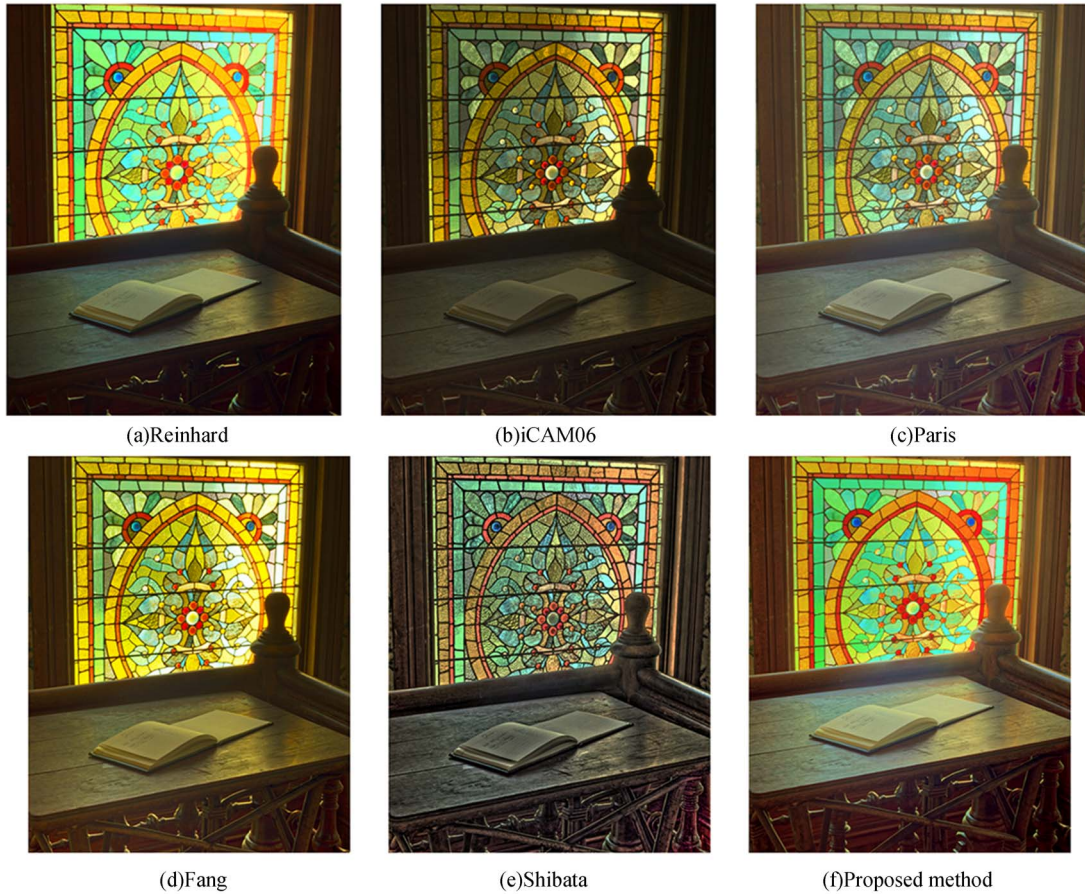


图 5 图像 Desk 色调映射结果

Fig. 5 Comparison of tone mapping results for Desk

表 1 图像信息熵对比结果

Tab. 1 Evaluated results of information entropy

Images	Reinhard	iCAM06	Paris	Fang	Shibata	Proposed method
Auto	6.946	7.438	7.278	7.427	7.824	7.839
AtriumNight	6.848	7.394	6.970	7.387	7.296	7.484
Coupole	7.166	7.692	7.473	7.466	7.906	7.712
PriceWestern	7.345	6.869	7.371	7.501	7.774	7.841
treeUnil	7.036	7.567	7.362	7.496	7.862	7.782
Vinesunset	6.394	7.146	7.049	7.186	7.266	7.395
BigFog	7.271	7.187	7.004	7.311	7.279	7.854
Desk	7.278	6.883	7.143	7.012	7.759	7.789
LausStairs	6.851	7.410	7.142	7.458	7.807	7.937
rend02	6.849	6.242	6.557	6.943	7.225	7.558

表 2 图像 TMQI 对比结果

Tab. 2 Evaluated results of TMQI

Images	Reinhard	iCAM06	Paris	Fang	Shibata	Proposed method
Auto	0.891	0.950	0.961	0.956	0.817	0.970
AtriumNight	0.883	0.957	0.900	0.948	0.822	0.963
Coupole	0.903	0.965	0.971	0.942	0.843	0.946
PriceWestern	0.870	0.814	0.936	0.917	0.825	0.971
treeUnil	0.867	0.961	0.959	0.918	0.841	0.975
Vinesunset	0.712	0.851	0.768	0.879	0.827	0.884
BigFog	0.784	0.952	0.819	0.957	0.830	0.967
Desk	0.866	0.829	0.824	0.895	0.781	0.932
LausStairs	0.825	0.915	0.902	0.917	0.882	0.935
rend02	0.784	0.753	0.839	0.856	0.797	0.943

3.3 算法效率

为了客观评价算法的效率,所有的比较算法是在 Intel Core i5 (3.5 GHz, 64 位)处理器,4GB 内存的计算机上采用 MATLAB (R2012a)编程实现。表 3 为比较算法在不同图像尺寸的条件下运行时间的对比结果,从表 3 可以看出,本文算法运行速度最快,其算法效率远远高于 iCAM06 算法和 Shibata 算法,可以用于对实时性要求较高的场合。

表 3 计算效率对比

Tab. 3 Comparison of computation efficiency (s)

Images	Image size	iCAM06	Shibata	Proposed method
Rend04	340×512	1.92	14.41	0.33
Vinesunset	720×480	3.21	31.10	0.53
Dani	1 024×768	6.63	63.17	1.14
Outdoor	1 500×1 000	9.78	112.76	2.08

参考文献:

- [1] CHAURASIYA R K, RAMAKRISHNAN K R. High dynamic range imaging [C]. *IEEE International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT)*, 2013: 83-89.
- [2] DONG Y, POURAZAD M T, NASIOPOULOS P. Human visual system-based saliency detection for high dynamic range content [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2016, 18(4): 549-562.
- [3] 李卫中, 易本顺, 邱康, 等. 细节保留的多曝光图像融合[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(9): 2283-2292. LI W ZH, YI B SH, QIU K, *et al.*. Detail preserving multi-exposure image fusion [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9): 2283-2292. (in Chinese)
- [4] 张晨, 孙世磊, 石文轩, 等. 工业线阵 CCD 相机系统测试与噪声评估[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10): 2532-2539. ZHANG CH, SUN SH L, SHI W X, *et al.*. Linear CCD camera system for industry measurement and its noise evaluation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10): 2532-2539. (in Chinese)
- [5] AGRAWAL A, RAMAN S. A novel LBP based operator for tone mapping HDR images [C]. *IEEE International Conference on Signal Processing and Communications*, 2014:1-6.
- [6] TUMBLIN J, RUSHMEIER H. Tone reproduction for realistic images [J]. *IEEE Computer Graphics*

4 结 论

本文提出了基于混合映射的高动态范围场景再现方法。在 HSV 颜色空间,对亮度分量分别进行全局映射和局部映射实现动态范围压缩和场景信息调整;并对饱和度分量进行自适应调整。选取 10 组不同的高动态范围场景,从主观和客观两方面进行比较分析。实验结果表明,本文提出的算法既保持了场景良好的整体效果,又充分保留了场景的局部细节,使图像看起来更加生动自然;同时该方法计算速度快,具有很高的效率。本文算法优于 5 种典型的对比算法。

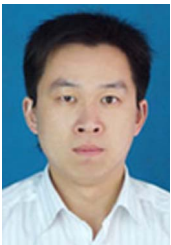
本文算法适用于大多数的高动态范围场景,但当场景亮度变化剧烈时(即同时存在极亮和极暗区域),所得的图像质量会有所下降。

and Applications, 1993, 13(6): 42-48.

- [7] LARSON G W, RUSHMEIER H, PIATKO C. A visibility matching tone reproduction operator for high dynamic range scenes [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1997, 3(4): 291-306.
- [8] DRAGO F, MYZKOWSKI K, ANNEN T, *et al.*. Adaptive logarithmic mapping for displaying high contrast scenes [J]. *Computer Graphics Forum. Blackwell Publishing*, 2003, 22(3): 419-426.
- [9] 方华猛, 易本顺, 赵继勇. 基于主成分分析和引导滤波的色调映射算法 [J]. *光电子·激光*, 2014, 25(12): 2423-2429. FANG H M, YI B SH, ZHAO J Y. A tone mapping algorithm based on PCA and guided filter [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2014, 25(12): 2423-2429. (in Chinese)
- [10] REINHARD E, STARK M, SHIRLEY P, *et al.*. Photographic tone reproduction for digital images [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2002, 21(3): 267-276.
- [11] FATTAL R, LISCHINSKI D, WERMAN M. Gradient domain high dynamic range compression [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2002, 21(3): 249-256.
- [12] KUANG J, 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.
- [13] FANG H, YI B, ZHANG Y, *et al.*. Tone mapping based on fast image decomposition and multi-layer fusion [J]. *IET Computer Vision*, 2015, 9(6): 937-942.
- [14] PARIS S, HASINOF S W, KAUTZ J. Local Laplacian filters: edge-aware image processing with a Laplacian pyramid [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(4): 1-11.
- [15] SHIBATA T, TANAKA M, OKUTOMI M. Gradient-domain image reconstruction framework with intensity-range and base-structure constraints [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016: 2745-2753.
- [16] MANCHANDA M, SHARMA R. Fusion of visible and infrared images in HSV color space [C]. *IEEE International Conference on Computational Intelligence & Communication Technology (CICT)*, 2017: 1-6.
- [17] PATTANAIK S N, TUMBLIN J, YEE H, *et al.*. Time-dependent visual adaptation for fast realistic image display [C]. *ACM Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 2000: 47-54.
- [18] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODSELL G A. Properties and performance of a center surround retinex [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(3): 451-462.
- [19] HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [20] 金伟其, 贾晓婷, 高绍姝, 等. 彩色融合图像的质量主观评价 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(12): 3465-3471.
- JIN W Q, JIA X T, GAO S S, *et al.*. Subjective evaluation of quality for color fusion images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(12): 3465-3471. (in Chinese)
- [21] YEGANEH H, WANG Z. Objective quality assessment of tone-mapped images [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(2): 657-667.

作者简介:



李卫中(1983—),男,湖北孝感人,博士,讲师,2017年于武汉大学获得博士学位,主要从事光学图像及多媒体信息处理方面的研究。E-mail: weizhong@whu.edu.cn



彭祺(1983—),男,天津人,博士,讲师,2013年于武汉大学获得博士学位,主要从事机器视觉与人工智能的研究。E-mail: petersky0316@163.com