

文章编号:1007-2780(2019)10-1000-06

一种亮度分区和导向滤波相结合的 色调映射算法

王 峰, 严利民*

(上海大学 微电子研究与开发中心, 上海 200444)

摘要:针对高动态范围(High Dynamic Range, HDR)图像的动态范围与普通显示设备不匹配的问题,本文提出了一种亮度分区和导向滤波相结合的色调映射算法。首先,通过颜色空间转换将输入的 HDR 图像转换到 CIEL* a* b* 空间,得到亮度层和色度层图像,接着对亮度层图像进行对数压缩并分区,对压缩后的各分区亮度图像选取合适 γ 值进行校正。然后,对于现有映射算法过于强调对图像亮度的处理而忽略色度的问题,本文将压缩后的亮度图像作为引导图像对色度层图像进行导向滤波处理。最后,将处理后的亮度层图像和色度层图像融合得到标准动态范围(Standard Dynamic Range, SDR)图像。通过对比实验表明,本文算法得到的图像在清晰度、信息熵、方差方面较全局映射法、局部映射法和双边滤波法平均提高了 94.03%、30.73% 和 24.23%,说明本文算法在实现高动态图像亮度压缩的同时,更好地实现了对色度和局部细节的处理。

关键词:高动态范围图像;色调映射;亮度分区;导向滤波;标准动态范围图像

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20193410.1000

Tone mapping algorithm combining luminance partitioning and guiding filtering

WANG Feng, YAN Li-min*

(Microelectronics Research & Development Center, Shanghai University,
Shanghai 200444, China)

Abstract: Aiming at the problem that the dynamic range of high dynamic range (HDR) image does not match the ordinary display device, a tone mapping algorithm combining luminance partitioning and guidance filtering is proposed. Firstly, the input HDR image is converted into the CIEL* a* b* space by color space conversion to obtain the luminance layer and the chrominance layer image. Then the luminance layer image is logarithmically compressed and luminance partitioned, and the compressed partition is performed. The luminance image is corrected by selecting the appropriate γ value. Then, for the problem that the existing mapping algorithm to overemphasize the processing of image luminance and ignore the chromaticity, the compressed luminance image is used as the guiding image to perform the guiding filtering processing on the chrominance layer image. Finally, the processed lu-

收稿日期:2019-05-15;修订日期:2019-06-13.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61674100)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61674100)

* 通信联系人, E-mail: yanlm@shu.edu.cn

minance layer image and the chrominance layer image are fused to obtain a standard dynamic range (SDR) image. The comparison experiments show that the images obtained by the proposed algorithm are 94.03%, 30.73% and 24.23%, higher than the global mapping method, local mapping method and bilateral filters method in terms of resolution, information entropy and variance. This paper proves that the algorithm achieves high dynamic image luminance compression. At the same time, the processing of chromaticity and local detail are better realized.

Key words: high dynamic range image; tone mapping; luminance partition; guided filtering; standard dynamic range image

1 引 言

高动态范围(High Dynamic Range, HDR)图像是一种亮度范围非常广的图像,相比普通图像,它可以提供更多的细节^[1]。HDR 图像采用浮点数的方式记录自然界的光强,可以表示更广的动态范围,随之也导致了与显示设备的动态范围不匹配的问题。为了在普通显示器上显示 HDR 图像,通常的做法是对图像进行色调映射。

目前的映射算法大致可以分为全局映射、局部映射和分层映射 3 种。全局映射是对图像的所有像素采用同一条映射曲线进行压缩。例如 Ward 等人^[2]根据视觉系统对亮度变化相对更敏感的原理,最先提出了一种线性映射算法,之后 Reinhard 等人^[3]根据人眼细胞的响应机理提出一种 S 形映射因子曲线的压缩方法。全局映射计算简单、运算效率高,但是往往会造成映射后的图像整体效果偏亮或偏暗,目前应用较少。局部映射是图像中每个像素的映射曲线都是同邻域像素相关。例如 Ashikhmin 等人^[4]基于保持图像映射前后的各像素亮度局部对比度不变的思想提出了一种局部映射算法,该算法较全局映射可以得到更好的效果,但计算较为复杂,并且极易在映射后产生伪影和光晕,因此应用也不广泛。分层映射是基于 HDR 图像可以分为光照分量和反射分量这一假设而提出的。光照分量具有低频率,而反射分量具有高频率^[5],通过选取合适的方法将图像分层后得到光照层和反射层再分别进行处理。例如 Xie 等人^[6]考虑到保持细节的同时也兼顾图像的局部相关性,提出了一种保留细节的映射方法,芦碧波等人^[7]采用双边滤波技术对图像分层后进行多尺度的映射处理,这种方法可以根

据像素值的相似性对亮度值进行自动调节,对于图像边缘的处理效果更好。分层映射相对前两种方法计算更加复杂,但是可以更好地保留图像的局部细节。目前对 HDR 图像的映射处理通常都采用这种方法,但是现有的算法都过于强调对亮度的处理,忽视了对色度层的调整,造成映射后的图像局部细节显示效果较差。

针对上述问题,本文采用了一种优化后的分层映射方法,首先通过颜色空间转换得到 HDR 图像的亮度层和色度层,然后将压缩后的亮度层图像作为引导图像对色度层图像进行导向滤波,最后将处理后的亮度层图像和色度层图像融合得到最终的映射图像,该算法可以有效提高图像的局部细节显示效果。

2 亮度分区与导向滤波器

2.1 亮度分区

HDR 图像的亮度范围跨度很大,并且分布不均匀,传统的映射算法未考虑图像的亮度分布特征,易造成极亮和极暗区域的信息缺失。考虑到极亮和极暗区域的像素点相互的影响不大,本文对亮度层图像进行了分区,区域分割值求法如式(1)所示:

$$\begin{aligned} L_D &= L_{\max} - (0.9 + 0.1a)(L_{\max} - L_{\min}), \\ L_B &= L_{\min} [0.6 + 0.4(1 - a)](L_{\max} - L_{\min}), \end{aligned} \quad (1)$$

式中: L_D 和 L_B 分别为较暗和较亮区域的分割值, $L_{\max}$ 和 $L_{\min}$ 分别为图像中的亮度最大值和最小值, a 为权重系数,具体如式(2)所示:

$$a = \frac{Y_{\text{avg}} - \ln L_{\min}}{\ln L_{\max} - \ln L_{\min}}, \quad (2)$$

式中: Y_{avg} 是图像所有像素点的亮度值取对数后得到的平均值。

2.2 导向滤波器

导向滤波器是一种自适应权重滤波器,能够在平滑图像的同时起到保持边界的作用^[8],可以定义为如式(3)所示:

$$Q_i = \sum_j W_{ij}(I) P_i, \quad (3)$$

式中: I 是引导图像(Guide Image), P_i 是输入的待滤波图像, Q_i 是滤波后的输出图像, W_{ij} 是根据引导图像 I 确定的权重值,具体如式(4)所示:

$$W_{ij}(I) = \frac{1}{|\omega|^2 \sum_{k(i,j) \in \omega_k} \left(1 + \frac{(I_i - \mu_k)(I_j - \mu_k)}{\sigma_k^2 + \epsilon} \right)}, \quad (4)$$

式中: ω 是窗口内的像素数, μ_k 是窗口内像素点的均值, I_i 和 I_j 指相邻两个像素点的亮度值, σ_k 代表窗口内像素点的方差, ϵ 是调节系数,用来调节图像的平滑程度。当 I_i 和 I_j 在边界两侧时, $(I_i - \mu_k)$ 和 $(I_j - \mu_k)$ 异号,否则同号,异号时的权重值将远小于同号,此时处于平滑区域的像素会加以较大的权重,平滑效果更加明显,而处于边界两侧的像素被加以较小的权重,平滑效果较弱,能够起到保持边界的效果。

3 色调映射算法

3.1 算法流程

采用亮度分区和用压缩后的亮度图像对色度层导向滤波相结合的映射方法,可以更好地对图像的局部细节进行显示,具体算法流程如图 1 所示。

3.2 颜色空间转换

CIEL* a* b* 是一种与光线和设备无关的颜色空间,其中 L^* 通道用来记录图像的亮度信息, a^* 通道和 b^* 通道用来记录图像的色度信息,本文将输入的 HDR 图像转换到 CIEL* a* b* 空间进行处理。

RGB 和 CIEL* a* b* 空间没有直接的转换公式,需要首先将 RGB 图像转换到 CIEXYZ 空间,如式(5)所示:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (5)$$

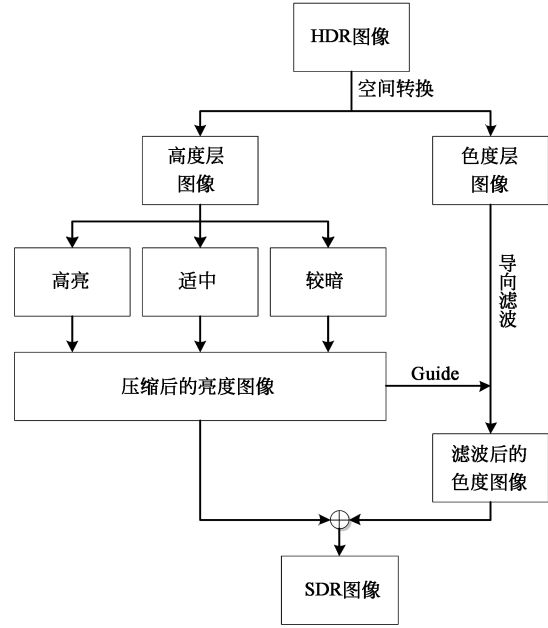


图 1 算法流程图

Fig.1 Algorithm flowchart

式中 $\mathbf{M}$ 的取值如式(6)所示:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0.4154 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

根据式(5)和式(6)可以得到 L^* 、 a^* 、 b^* 分别对应的数值,如式(7)所示:

$$L^* = 116f(Y/Y_n) - 16,$$

$$a^* = 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)], \quad (7)$$

$$b^* = 200[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)],$$

式中: X_n 、 Y_n 、 Z_n 一般默认值为 95.047, 100.0, 108.883, 函数 $f(\cdot)$ 的定义如式(8)所示:

$$f(t) = \begin{cases} t^{1/3}, & t > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \\ \frac{1}{3} \left(\frac{29}{6}\right)^2 t + \frac{4}{29}, & t \leq \left(\frac{6}{29}\right)^3 \end{cases}. \quad (8)$$

通过 L^* 通道可以得到 HDR 图像的亮度层信息,进而通过差值得到色度层图像,具体如式(9)所示:

$$\mathbf{W} = \mathbf{H} - \mathbf{P}, \quad (9)$$

式中: $\mathbf{H}$ 为输入的 HDR 图像, $\mathbf{P}$ 为亮度层图像, $\mathbf{W}$ 为得到的色度层图像。

3.3 亮度分区压缩

HDR 图像的动态范围很大,对不同亮度区域使用相同的校正系数得到的图像显示效果较差,本文

对亮度层图像进行分区,亮度层图像经对数压缩后对不同区域分别选取不同 γ 值进行校正。

3.3.1 亮度压缩

通过颜色空间转换得到图像亮度的信息,进而对图像采取对数域压缩,如式(10)所示:

$$L_{out} = k \log_2(1 + L_{in}), \quad (10)$$

式中: k 为调节参数,如无特别说明一般取 0.2, L_{out} 为亮度压缩后的输出图像, L_{in} 为输入亮度图像,具体计算如式(11):

$$L_{in} = \frac{\ln(L_{lum}) - \ln(L_{min})}{\ln(L_{max}) - \ln(L_{min})}. \quad (11)$$

式中: L_{lum} 为各像素点的亮度值。

3.3.2 亮度分区

将图像转换到 CIEL* a* b* 空间后,根据 L^* 通道可以得到图像的具体亮度信息,求得图像的黑(亮度最小值)/白(亮度最大值)点,采用 2.1 节的亮度分区方法将亮度图像分为高亮($L_{max} \sim L_B$)、适中($L_B \sim L_D$)、较暗($L_D \sim L_{min}$) 3 个区域,进而调节图像的局部亮度信息。同时黑白点可以用来检查压缩后的亮度图像是否存在奇异像素点。

3.3.3 伽马校正

选取合适的 γ 值可以使图像特定区域的细节更好地在显示设备上显示^[9],如式(12)所示:

$$P' = (P)^\gamma, \quad (12)$$

式中: P 和 P' 分别为输入和输出的亮度层图像。 γ 为调节参数,当 $\gamma < 1$ 时,适合于使暗区变亮,而当 $\gamma > 1$ 时,适合于调节过曝光区域的对比度。经多次实验,对高亮、适中、较暗区域的图像分别选取 γ 值为 0.2, 0.5, 2 进行校正,得到的图像效果最好。

3.4 色度层导向滤波

将压缩后的亮度层图像作为引导图像,通过 2.2 节中的方法对色度层图像进行导向滤波,滤波后的图像整体与输入的色度层图像相似的同时,纹理部分与引导图像更加相似,具体如式(13)所示:

$$m = |Q - P|^2, \quad (13)$$

$$n = \frac{Q}{I},$$

式中: Q 和 I 分别是色度层图像和引导图像的梯度,不难看出, m 、 n 的取值越小表示滤波效果越好。最后将滤波后的色度层图像与压缩后的亮度层图像融合得到最终的映射图像。

4 对比实验与结果

本文实验通过 Intel i5-8400(主频为 2.8 Hz) 处理器、8G 内存、Windows 10 操作系统的 PC 平台,利用 Matlab(2016a 版本)开发环境对目前较为经典的映射方法和本文算法进行了对比,选取 HDR 图片库 Anywhere Software 中的图片进行测试,如图 2 和图 3 展示了图片 Memorial 和 Synagogue 采用不同方法得到的映射图像。



图 2 Memorial 图像映射结果

Fig.2 Tone mapping results of memorial

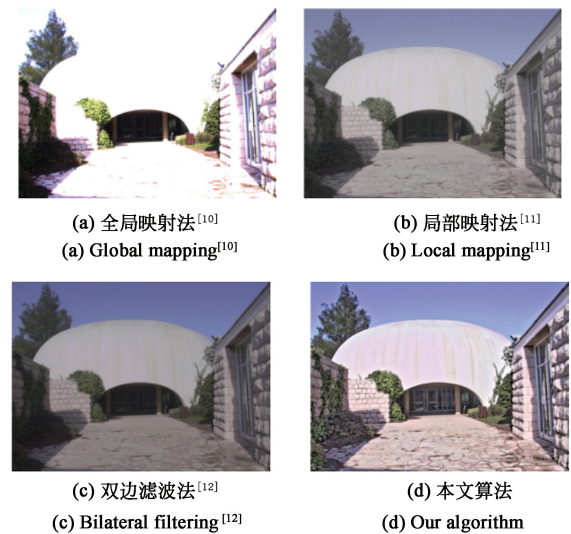


图 3 Synagogue 图像映射结果

Fig.3 Tone mapping results of synagogue

从图 2 可以看出,文献[10]提到的全局映射方法得到的结果图像整体效果偏暗;文献[11]采用局部映射的方法得到的图像对于过曝光区域的显示效果不好;文献[12]采用双边滤波的分层方法对 HDR 图像进行色调映射,得到的图像整体效果较前两幅图片有较大改善,但是对于细节部分的显示效果并不是很好;本文的算法较前 3 种算法可以更好地显示图像的细节信息,从局部放大图可以看出对于“屋顶”与“窗户”这些过曝光区

域显示效果更好。

图片 Memorial 本身整体偏暗,为此又选择了图像效果整体偏亮的图片 Synagogue 进行了对比测试。从图 3 可以看出,本文的方法对于图像的映射效果同样很明显,细节部分的显示效果更好。为进一步对映射结果进行评价,对本文算法与文献[10]、[11]、[12]所提方法所得图像的信息熵、清晰度、方差以及时间开销进行了量化比较,具体如表 1 所示。

表 1 映射结果客观评价指标
Tab.1 Object index comparison of mapping results

图像	方法	清晰度	信息熵	方差	时间/s
Memorial	全局映射法 ^[10]	4.424 3	5.137 0	56.626 1	0.743 9
	局部映射法 ^[11]	5.033 5	5.966 6	62.422 8	1.060 1
	双边滤波法 ^[12]	5.117 3	6.114 3	68.926 7	1.454 7
	本文算法	9.847 6	6.199 9	70.368 2	0.898 7
Synagogue	全局映射法 ^[10]	3.971 7	3.304 7	34.680 1	0.782 8
	局部映射法 ^[11]	4.987 9	5.987 9	44.427 5	1.186 9
	双边滤波法 ^[12]	5.156 3	6.188 4	44.687 3	1.906 0
	本文算法	8.566 0	6.513 6	55.116 2	1.168 1

从表 1 可以看出,本文的方法在清晰度、信息熵、方差方面上较全局映射法、局部映射法、双边滤波法均有较大提高,平均提高了 94.03%、30.73%和 24.23%,在时间开销方面除了比全局映射法运行时间稍长外,较其他两个算法都更短。

5 结 论

本文提出了一种基于亮度分区和导向滤波相

结合的方法对 HDR 图像进行色调映射。亮度层分区压缩可以有效调节图像中局部亮暗区域的对比度,将压缩后的亮度图像作为引导图像,对色度层进行导向滤波,色度层的调整可以根据亮度图像的改变做相应的变化。本文算法更好地实现了对色度的处理,得到的图像各项指标均有较大的提升,特别是清晰度,提高了至少 66.13%。本文算法结构仍有简化的空间,之后将继续进行优化,在保证色调映射效果的基础上,进一步缩短时间开销。

参 考 文 献:

[1] 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.
LIANG Y, MO J B. Improved laplacian model for tone mapping of HDR image [J].*Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2014, 26(12): 2182-2188. (in Chinese)

[2] WARD G. A Contrast-based Scalefactor for Luminance Display [M]//HECKBERT P S. *Graphics Gems IV*. Boston: AP Professional, 1994: 415-421.

[3] REINHARD E, DEVLIN K. Dynamic range reduction inspired by photoreceptor physiology [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2005, 11(1): 13-24.

- [4] ASHIKHMIN M. A tone mapping algorithm for high contrast images [C]//*Proceedings of the 13th Eurographics workshop on Rendering*. Pisa, Italy: ACM, 2002: 145-156.
- [5] 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)
- [6] XIE Z F, DU S, HUANG D J, *et al.* Detail-preserving fidelity refinement for tone mapping [C]//*Proceedings of 2016 International Conference on Audio, Language and Image Processing (ICALIP)*. Shanghai, China: IEEE, 2016: 257-262.
- [7] 芦碧波,皇甫珍珍,郭凯,等.基于双边滤波的多尺度分层色调映射算法[J].液晶与显示,2018,33(9):816-822.
LU B B, HUANGFU Z Z, GUO K, *et al.* Bilateral filter based multiscale layer tone mapping algorithm [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(9): 816-822. (in Chinese)
- [8] LIU W H, WANG Q, LIU Y, *et al.* High dynamic tone mapping algorithm based on wavelet domain image fusion [C]//*Proceedings of the 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. Wuhan, China: IEEE, 2018: 1945-1950.
- [9] YANG K F, LI H, KUANG H L, *et al.* An adaptive method for image dynamic range adjustment [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2019, 29(3): 640-652.
- [10] 刘颖,张凤,伍世度,等.高动态范围图像全局与局部色调映射的融合[J].传感器与微系统,2016,35(9):118-120.
LIU Y, ZHANG F, WU S Q, *et al.* Fusion of global and local tone mapping for high dynamic range images [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2016, 35(9): 118-120. (in Chinese)
- [11] 燕明,胡越黎,胡云生.保持局部对比度的动态范围压缩算法[J].上海大学学报:自然科学版,2017,23(5):682-689.
YAN M, HU Y L, HU Y S. Dynamic range compression with local contrast preservation [J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2017, 23(5): 682-689. (in Chinese)
- [12] 饶志涛,许廷发,刘子伟,等.参数控制的混合色调映射方法[J].北京理工大学学报,2015,35(12):1280-1284.
RAO Z T, XU T F, LIU Z W, *et al.* Parameters controlled hybrid tone mapping method [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2015, 35(12): 1280-1284. (in Chinese)

作者简介:



王 峰(1993—),男,山西阳泉人,硕士研究生,2017年于山西大同大学获得学士学位,主要研究方向为高动态范围图像获取与显示技术。E-mail: wang-fengshu@163.com



严利民(1971—),男,江苏吴县人,博士,副教授,2014年于上海大学获得博士学位,主要从事新型显示技术和机器视觉方面的研究。E-mail: yanlm@shu.edu.cn