

• 图像处理 •



一种改进图像色貌模型的高动态范围 视频色调映射新方法

陈璐俊¹ 郁梅¹ 姜浩² 邵华¹ 蒋刚毅¹

(1. 宁波大学 信息科学与工程学院, 宁波 315211;
2. 浙江工商职业技术学院智能家电工程中心, 宁波 315012)

摘要: 针对当前色调映射(Tone Mapping)不能精确地显示出高动态范围(High Dynamic Range, HDR)视频内容,且易出现帧间闪烁现象的问题,本文提出了一种针对 HDR 视频到低动态范围(Low Dynamic Range, LDR)视频的色调映射新方法。首先,考虑 HDR 视频的内容复杂性和颜色多样性,改进了一种基于图像色貌模型(Image Color Appearance Model, iCAM)和分层模型的视频色调映射方法;然后,为了使色调映射后的视频能够保留 HDR 视频中更多的结构和细节,在分层后的基础层操作部分引入了亮度直方图自适应调整和对比度调整的概念;最后,考虑图像色调映射算法会造成视频连续帧之间发生整体亮度突变的问题,提出了亮度均值调整的方法用以改善视频帧间闪烁的现象。主客观实验测试结果表明,所提出的方法产生的 LDR 视频有更好的视觉质量,不但保持了良好的结构纹理信息,而且具有较好的色彩保真度,与 HDR 视频的感知一致性更好,较传统的图像色调映射方法能有效压制闪烁现象。

关键词: 高动态范围视频;色调映射;图像色貌模型;帧间闪烁

中图分类号: TN91 文献标识码: A DOI 编码: 10. 14016/j. cnki. jgzz. 2017. 06. 051

New High Dynamic Range Video Tone Mapping Method

CHEN Lu-jun¹, YU Mei¹, JIANG Hao², SHAO Hua¹, JIANG Gang-yi¹

(1. Faculty of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;
2. Intelligent Household Appliances Engineering Center, Zhejiang Technology and Business Institute, Ningbo 315012, China)

Abstract: The current tone mapping cannot accurately show high dynamic range video content and prone to inter frame flicker, in this paper, a new tone mapping method for HDR video to low dynamic range video is proposed. Firstly, considering the complexity of HDR video and the color diversity, a new method of video tone mapping based on image color appearance model and layered model is improved. Then, in order to make the tone mapped video retain more structure and details in the HDR video, the base-layer operating part of the layer is introduced into the concept of brightness histogram adaptive adjustment and contrast adjustment. Finally, considering the problem that the image tone mapping algorithm can cause the whole brightness change of the video frame, the method of brightness adjustment is proposed to improve the flicker of the video frames. Subjective and objective test results show that LDR video produced by the proposed method has better visual quality, not only to maintain the good structure and texture information, but also has better color fidelity, and the perceptual consistency with HDR video is better compared with the traditional image tone mapping method, and it can effectively suppress the flicker phenomenon.

Key words: high dynamic range video; tone mapping; image color appearance model; inter frame flicker

动态范围(Dynamic Range)是指可见区域的最大亮度值和最小亮度值之间的比值^[1]。在自然场景中,阳光直射处的亮度值可达 10^2cd/m^2 ,阴暗处的亮度值

只有 10^{-3}cd/m^2 ,动态范围可高达 $10^8 : 1$,但常用的输出显示设备一般只支持低动态范围(Low Dynamic Range, LDR)显示,如 $100 : 1$,这与高动态范围(High Dynamic Range, HDR)视频的高动态范围不匹配,若直接显示势必会使原本丰富的亮度、细节、颜色等信息丢失,导致视觉效果较差,无法获得较好的视觉质量^[2]。

为了使自然界的真实场景在常规显示设备上得到更好的显示效果,再现高动态范围图像中更多的特

收稿日期: 2017-02-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(61271270);浙江省自然科学基金项目(LY15F010005)

作者简介: 陈璐俊(1993-),女,硕士在读,主要研究方向: HDR 视频色调映射、基于 HEVC 的 HDR 视频编码等。E-mail: susie-clj@163.com

通信作者: 郁梅,女,教授,博士生导师。E-mail: yumei2@126.com

[http : //www. laserjournal. cn](http://www.laserjournal.cn)

征,色调映射(Tone Mapping, TM)技术在图像和视频领域得到广泛应用^[3]。色调映射方法主要可分为全局色调映射、局部色调映射和混合色调映射^[4]。全局色调映射方法是通过像素间点到点的对应函数对 HDR 图像中的每个像素进行映射,通常计算简单快捷,效率较高,能保持良好的整体明暗度,但变换函数不能自适应图像的不同区域,会造成颜色、细节、明亮程度的信息丢失;局部色调映射方法是对图像的不同区域使用不同的比例因子进行映射,通常对图像局部特征进行处理,能保留图像中不同区域各自的观感质量,但计算量大,易产生光晕、鬼影、噪声等现象;混合色调映射方法则是综合全局与局部映射的方法进行处理^[5-9]。近年来,图像色调模型(Image Color Appearance Model, iCAM)^[10-11]因其考虑人眼视觉特性和分层处理特性,越来越多地被用于图像和视频显示处理。如 Kuang 和 Fairchild^[12]结合 iCAM 和双边滤波分层技术,提出了一种新的色调映射算法 iCAM06,该方法在颜色和细节再现方面有很大改善,但只考虑了像素绝对颜色变化而没有考虑像素间颜色相对变化;Chae^[13]等提出了一种基于 iCAM06 的在 IPT 空间对颜色失真进行补偿的图像色调映射方法,该方法在颜色校正上有更好的性能但也加大了算法复杂度;Shahid^[14]等提出了一种对显著性区域采用 iCAM06 算法,其余区域采用 Ward^[15]算法进行色调映射,当前帧分区合并后结合前一帧亮度调整当前帧亮度的视频色调映射方法,该方法能一定程度上提高色调映射效率并避免帧间闪烁现象,但效果不佳。

现有的 HDR 图像色调映射方法已经比较成熟,但 HDR 视频的色调映射还是一个需要深入研究的问题。本文在 iCAM06 图像色调映射算法的基础上,提出了一种针对 HDR 视频到 LDR 视频的色调映射改进方案,能够在 LDR 显示器上最大可能地实现显示 HDR 视频的内容。iCAM06 算法结合双边滤波分层技术和图像色调模型,在颜色再现方面有较大优势但会降低图像整体自然性,而亮度对数直方图自适应调整^[15],能较好保持图像结构和纹理但在色彩上丢失较多信息。因此,本方案在 iCAM06 算法的基础层操作部分引入了亮度直方图自适应调整的思想,使色调映射后的图像能够保留 HDR 视频中更多结构和细节的同时重现更丰富的色彩信息。此外,还引入了亮度均值调整的技术,确保连续帧之间的整体亮度不发生突变,从而较好地避免了视频闪烁的现象。现有的 HDR 图像色调映射客观质量评价方法,主要有 Yeganeh^[16]等提出的结合结构保真度和统计自然度的 TMQI 和 Nafchi^[17]等提出的基于特征相似度的 FSITM。本实验采用这两种客观评价方法对色调映射后的 LDR 视频进行质量评价,由于评价方法本身的

局限性,前者侧重于亮度的评价而后者侧重于色度的评价,因此实验结合两者的评价质量分数得到结论。实验表明,通过本文提出的色调映射改进方案获得的 LDR 视频综合质量总体优于其他经典的色调映射算法,更具应用前景。

1 基于 iCAM 的 HDR 视频色调映射新方案

现有的 HDR 图像色调映射方法虽然可以逐帧地直接用于 HDR 视频的色调映射处理,但各种不同方法得到的 LDR 帧图像质量参差不齐,且不可避免地因连续帧的平均亮度不一致而造成的帧间闪烁现象。因此,本文基于 iCAM 和分层模型提出了一种 HDR 视频色调映射新方案。该方案既能够保持更多的结构和细节信息,又能够保持较丰富的色彩信息,还能够去除一般视频色调映射方案中的帧间闪烁现象,在显示设备端得到更高质量的 LDR 视频,使用户获得更好的视觉体验。本文方案的框架如图 1 所示。

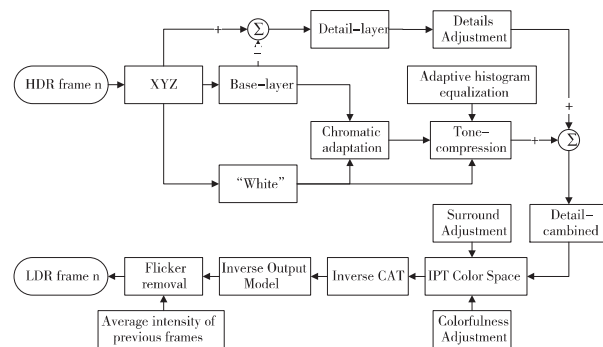


图 1 基于 iCAM 的视频色调映射新方案

首先将输入的 HDR 视频数据流转换到 XYZ 颜色空间(国际照明委员会(Commission Internationale de L'Eclairage, CIE)开发的颜色系统,是其他颜色系统的基础,更适用于颜色的计算),然后通过一个边缘保持的双边滤波器获得包含大规模变化的基础层,原视频帧与基础层作差得到细节层。由 XYZ 系统的数据得到一个“White”参考值,对其进行不同幅度的高斯模糊,指导基础层进行色彩自适应和色调压缩。其中在基础层的色调压缩部分,引入了亮度直方图自适应均衡化的优化处理,在亮度和色度方面得到更好的处理。基础层经过色调压缩后与经过细节调整后的细节层相合并,转换到 IPT 颜色空间做色彩调整和环绕调整。随后,经过 CAT 逆变换使颜色空间转换到与显示设备相匹配的显示颜色空间,最后用亮度均值调整算法结合前面帧对当前帧的平均亮度做调整,去除可能存在的视频帧间闪烁现象,最终输出得到可直接传输到显示终端的标准动态范围视频。

1.1 双边滤波技术

双边滤波(Bilateral Filter)是一种可以保边去噪

的非线性滤波方法,它最早由 Durand 和 Dorsey^[18] 提出。通过双边滤波技术可以将一幅 HDR 图像分为基础层和细节层,其中滤波输出层为基础层,原图像与其作差得到细节层,如图 2 所示。双边滤波技术包含两个高斯权函数,分别通过衡量空间距离和亮度相似度在空间域和亮度域上对邻域像素进行衰减。因此,双边滤波能在有效地模糊图像的同时保持锐利边缘的完整性,从而避免了光晕和鬼影现象,是常见的局部色调映射预处理操作。为了使像素差异度能直接对应到感知对比度,并对整帧图像进行统一处理,双边滤波技术一般在对数域中对像素进行计算操作。像素 s 经过双边滤波后的输出可以用式(1)和(2)表示。其中 $k(s)$ 是一个非线性约束。

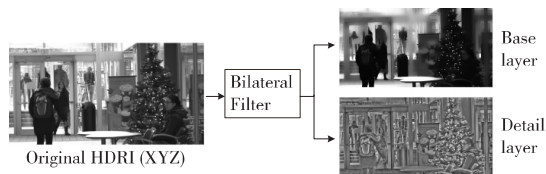


图2 双边滤波技术的分层处理

$$J_s = \frac{1}{k(s)} \sum_{p \in \Omega} f(p-s) g(I_p - I_s) I_p \quad (1)$$

$$k(s) = \sum_{p \in \Omega} f(p-s) g(I_p - I_s) \quad (2)$$

其中, $f(\cdot)$ 是一个空域上的高斯函数,核尺度 σ_s 是根据 2% 的图像大小设置的经验值, $g(\cdot)$ 是一个亮度域上的高斯函数,核尺度 σ_r 根据经验设为 0.35^[18]。 I_s 表示像素 s 的亮度值, I_p 表示像素 p 的亮度值, $p-s$ 表示像素 p 与像素 s 的空间位置差异。在本方案中,双边滤波能够快速进行分段线性逼近和领域内的取样^[18]。

1.2 基于 iCAM 的自适应均衡化

直方图均衡化(Histogram Equalization)是图像处理领域里利用直方图调整对图像对比度进行增强的方法,它可以使亮度更好地在亮度域上分布,增强图像局部对比度而不影响整体对比度。亮度直方图均衡化可以更好地保持曝光过度或者曝光不足图像中的细节,但其对处理的数据不加选择,不能兼顾保留 HDR 图像中较亮和较暗区域的细节。因此本方案中对基础层部分进行了色彩适应和亮度直方图自适应均衡化。

在色彩适应部分,采用了源自 CIECAM02^[19] 色貌模型的 iCAM,“White”参考值则是由原始帧图像通过连续下采样低通得到的基图像,再上采样至原始尺寸作为适应白信号。本部分是通过 RGB 适应白图像信号,每个定位像素(R_w, G_w, B_w)通过高斯低通自适应图像,其变换和计算用式(3)至式(5)表示。

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = M_{CA702} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix},$$

$$M_{CA702} = \begin{bmatrix} 0.7328 & 0.4296 & -0.1624 \\ -0.7036 & 1.6975 & 0.0061 \\ 0.0030 & 0.0136 & 0.9834 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$D = 0.3F \left[1 - \left(\frac{1}{3.6} \right) e^{\left(-\frac{L_A^{-42}}{92} \right)} \right] \quad (4)$$

$$(R_c, G_c, B_c) =$$

$$\left[\left((R_{D65}, G_{D65}, B_{D65}) \frac{D}{(R_w, G_w, B_w)} \right) + (1-D) \right] (R, G, B) \quad (5)$$

其中 D 表示不完全适应因子,是一个关于适应亮度 L_A (白参考值的 20%) 和周围因子 F (平坦区域 $F=1$) 的函数。 D 的取值范围为 0~1(0 表示不适应,1 表示完全适应),在实验中,最小的取值不小于 0.65 表示黑暗包围的区域, L_A 增加值的指数收敛于 1。在计算 D 时,比例系数取 0.3,能够有效降低 HDR 图像色饱和度的呈现。色彩适应变换使用了 CIE 亮度 $D65$ 的全局白点,这是为了便于后续使用 IPT 颜色空间再处理, IPT 空间也是由 $D65$ 定义的^[20]。

在色阶压缩部分,采用了非线性的色阶压缩函数,算法结合了视锥细胞响应函数和视杆细胞响应函数,还进行了亮度直方图自适应均衡化的调整。压缩算法可由式(6)至式(8)表示。

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = M_{HPE} M_{CA702}^{-1} \begin{bmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{bmatrix},$$

$$M_{HPE} = \begin{bmatrix} 0.38971 & 0.68898 & -0.07868 \\ -0.22981 & 1.18340 & 0.04641 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix},$$

$$M_{CA702}^{-1} = \begin{bmatrix} 1.096124 & -0.278869 & 0.182745 \\ 0.454369 & 0.473533 & 0.072098 \\ -0.009628 & -0.005698 & 1.015326 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$(R'_a, G'_a, B'_a) = \frac{400 \left[\frac{F_L(R', G', B')}{Y_w} \right]^p}{27.13 + \left[\frac{F_L(R', G', B')}{Y_w} \right]^p} + 0.1 \quad (7)$$

$$F_L = 0.2k^4(5L_A) + 0.1(1-k^4)^2(5L_A)^{1/3}, k = \frac{1}{(5L_A + 1)} \quad (8)$$

其中 p 是人眼视锥细胞响应曲线的斜率,可设置的范围是 0.6 至 0.85,值越大所得图像的反差越大,根据经验值设置为 0.75;式(8)中 F_L 函数可用于预测各种亮度依赖的外观效果,与图像的每个像素位置有关; Y_w 表示图像局部白适应的亮度值。

视杆细胞的响应函数使用 Hunt 模型^[21]自适应,非线性响应函数与视锥细胞的类似,视杆细胞的自适

应响应 A_s 函数可由式 (9) 至式 (13) 表示。

$$A_s = 3.05 B_s \left[\frac{400 \left(\frac{F_{LS} S}{S_w} \right)^p}{27.13 + \left(\frac{F_{LS} S}{S_w} \right)^p} \right] + 0.3 \quad (9)$$

$$F_{LS} = 3800j^2 \left(\frac{5L_{AS}}{2.26} \right) + 0.2(1-j^2)^4 \left(\frac{5L_{AS}}{2.26} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (10)$$

$$L_{AS} = 2.26 L_A \quad (11)$$

$$j = \frac{0.00001}{\left[\left(\frac{5L_{AS}}{2.26} \right) + 0.00001 \right]} \quad (12)$$

$$B_s = \frac{0.5}{\left\{ 1 + 0.3 \left[\left(\frac{5L_{AS}}{2.26} \right) \left(\frac{S}{S_w} \right)^{0.3} \right] \right\}} + \frac{0.5}{\left\{ 1 + 5 \left[\frac{5L_{AS}}{2.26} \right] \right\}} \quad (13)$$

$$RGB_{TC} = RGB'_a + A_s \quad (14)$$

其中 S 是色彩适应图像中每个像素的亮度值 S_w 表示白参考值的 S 值; L_{AS} 表示暗亮度 B_s 表示视杆白色素的饱和系数 F_{LS} 表示暗亮度适应因子。

最后的色阶压缩融合了视锥细胞响应函数和视杆细胞响应函数,用式 (14) 表示。对亮度则进行直方图自适应均衡化的调整,将 CIE XYZ 系统空间的视频数据流转化为 Lab 颜色模型空间,以得到表示明度 (Luminosity) 的单一分量 L ,其值域 0 至 100,另外, a 表示从洋红色到绿色的范围,取值为 +127 至 -128; b 表示从黄色到蓝色的范围,取值为 +127 至 -128。为了保持整体明度和图像细节,同时增强局部对比度,对 L 分量进行了直方图自适应均衡化,而对 a 、 b 分量则进行比例为 1 的缩放,因为前述已经根据视觉细胞响应对色彩进行了较好的处理,最后将颜色空间转换回 CIE XYZ 颜色系统进行下一步与细节层的融合操作。

为了验证引入亮度直方图自适应均衡化处理的有效性,实验过程中截取了基础层处理前后的图像及其直方图(实验测试用图 Playground 视频序列的第 101 帧图像)。如图 3 所示,对色阶压缩后的基本层进行了基于 White 参考信号的亮度直方图自适应均衡化处理,观察均衡化处理前后的直方图,可观测到,帧图像整体亮度较调整前有一定增大,在亮度域上分布更加均衡,反映到图像中则会使处理后的图像对比度增强并保持更突出的结构和细节,也能使方案中后续的处理更加有效。

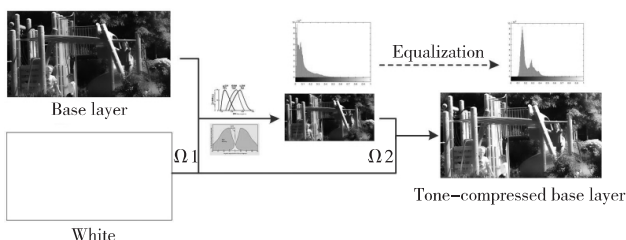


图 3 基础层均衡化处理前后的 10 倍放大直方图对比

1.3 亮度均值调整算法

为了避免连续视频帧出现闪烁现象,我们采用亮度均值调整技术,结合前面帧的亮度均值调整当前帧的总体亮度值。该操作的假设前提是使用 HDR 静态相机,拍摄时没有出现缩放、旋转或移动^[14]。处理步骤如下:

(1) 前 5 帧直接进行色调映射操作,计算并保存每帧的平均亮度值 L_i $i=1, 2, 3, 4, 5$;

(2) 处理第 n 帧前,计算此前 5 帧的平均亮度 $L_{n,avg} = \frac{1}{5} \sum_{i=n-5}^{n-1} L_i$,对其进行色调映射后,计算并保存此帧的平均亮度值 L_{n0} ;

(3) 计算 $L_{n0} - L_{n,avg}$,如果满足 $|L_{n0} - L_{n,avg}| \leq \varepsilon_L$ 或满足 $|L_{n0} - L_{n,avg}| \geq \varepsilon_H$,则不对第 n 帧进行调整处理,否则调整 L_n 值使其满足 $|L_{n0} - L_{n,avg}| \leq \varepsilon_L$ 条件,其中阈值 ε_L 表示人眼不可察觉的最大闪烁亮度差,根据实验确定其大小为亮度值 $L_{n,avg}$ 的 2%, ε_H 表示判断场景整体亮度发生变化的依据,根据实验确定其大小为亮度值 $L_{n,avg}$ 的 10%;

(4) 若当前帧做了亮度调整,则计算并保存调整后当前帧的平均亮度值 L_n 。若当前帧未做调整且满足 $|L_{n0} - L_{n,avg}| \leq \varepsilon_L$,则 $L_n = L_{n0}$ 。若当前帧未做调整且满足 $|L_{n0} - L_{n,avg}| \geq \varepsilon_H$,则 $L_n = L_{n0}$ 并执行步骤 (1)。

上述处理算法保证了同一场景中当前帧的亮度与此前 5 帧的平均亮度变化一致,可有效避免帧间闪烁的现象,且在操作过程中无需缓存大量的视频帧数据,可以实时执行 HDR 视频的色调映射操作。

2 实验结果与分析

本文测试所用的 HDR 视频序列均来自于 DML-HDR^[22-24],该数据库有两种格式的 12 位 HDR 视频,各有 5 个 HDR 视频,同时还提供每个视频每帧所对应的“.hdr”格式的 HDR 图像。实验所用序列为: Playground (2048 × 1080)、Christmas Tree (2048 × 1080)、Strangers (2048 × 1080)、Hallway (2048 × 1080)、Walking On Snow (1920 × 1080) 和 UBC (1920 × 1080),其中的 Walking On Snow 和 UBC 序列为 12 位的立体 HDR 视频序列,本文实验选用的是立体视频序列的左视点序列。

所有实验输出的 LDR 视频都采用 TMQI^[16] 和 FSITM^[17] 两种客观评价方法进行质量评价,由于评价方法本身的局限性,即前者侧重于亮度的评价而后者则侧重于色度的评价,在分析比较时,本文综合两者质量得分作为最后的客观质量评分。

表 1 所示为几种经典色调映射方案与本文方案应用到 HDR 视频中所得到的 LDR 视频的客观质量比较。在表中,最终的客观质量分数 Q 由下列式 (15) 和式 (16) 计算得到。

$$Q = \alpha \times TMQI_Q + \beta \times FSITM_Q_{\max} \quad (15)$$

$$FSITM_Q_{\max} =$$

$$\max(FSITM_QR, FSITM_QG, FSITM_QB) \quad (16)$$

其中 $\alpha=0.5$ $\beta=0.5$ 。

本文采用的主观质量评价的方法为: (1) 观看视频帧连续播放时主观质量感受, 是否观看舒适; (2) 是否能感受到视频帧由于色调映射操作产生帧间闪烁

现象; (3) 与其他经典色调映射算法得到的 LDR 视频对比观看, 选取最佳效果的序列; (4) 对帧图像进行局部放大, 对比局部的细节, 包括边缘、纹理、结构和颜色等信息。针对其中的 (2), 实验给出了本文方案得到的 LDR 视频序列每帧的平均亮度值, 连续帧之间的亮度差异均小于 0.6%, 小于人眼可察觉的亮度差。

表 1 经典色调映射方案与本文方案的质量比较

Sequence		Tonemap	ReinhardG	ReinhardL	Durand	iCAM06	Pro
Playground(2048×1080 , 101–120)	TMQI_Q	0.9743	0.8883	0.9328	0.9554	0.9022	0.9843
	FSITM_Qmax	0.8748	0.9126	0.9005	0.9033	0.9251	0.9008
	Q	0.9245	0.9005	0.9166	0.9293	0.9137	0.9426
Christmas Tree(2048×1080 , 2917–2937)	TMQI_Q	0.9167	0.8375	0.7690	0.9186	0.8989	0.9306
	FSITM_Qmax	0.8594	0.9008	0.9273	0.8804	0.9035	0.8839
	Q	0.8880	0.8692	0.8481	0.8995	0.9012	0.9073
Strangers(2048×1080 , 001–020)	TMQI_Q	0.9200	0.8522	0.8519	0.9839	0.9515	0.9565
	FSITM_Qmax	0.8937	0.9476	0.9407	0.9458	0.9414	0.9332
	Q	0.9069	0.9011	0.8963	0.9648	0.9465	0.9449
Hallway(2048×1080 , 042–062)	TMQI_Q	0.8250	0.7855	0.8358	0.8809	0.8036	0.8299
	FSITM_Qmax	0.8801	0.9328	0.9177	0.9075	0.9281	0.9157
	Q	0.8526	0.8592	0.8769	0.8942	0.8658	0.8728
Walking On Snow(1920×1080 , 0386–0406)	TMQI_Q	0.9433	0.8223	0.8370	0.8788	0.9599	0.8895
	FSITM_Qmax	0.8980	0.9438	0.9376	0.9174	0.9350	0.9189
	Q	0.9217	0.8831	0.8873	0.8981	0.9512	0.9068
UBC(1920×1080 , 0081–0100)	TMQI_Q	0.8680	0.8413	0.8532	0.9189	0.9338	0.9500
	FSITM_Qmax	0.9041	0.9463	0.9377	0.9234	0.9416	0.9265
	Q	0.8860	0.8940	0.8970	0.9211	0.9393	0.9382

在上表中, 本文色调映射方案对 Playground 和 Christmas Tree 序列进行操作的效果明显优于其他 5 种经典算法, 而在 Strangers 序列中, 本文的算法却没有 Durand 和 iCAM06 的算法分数高, 究其原因在于 Durand 在分层是采用了双边滤波处理却没有对细节层进行调整, 也没有对合并后的图像进行调整处理, 其过分突出细节, 过分强调色彩使其质量分数较高, 而 iCAM06 在亮度较小的情况下保持了较多的颜色信息, 其最后得分也较高。Hallway 序列的场景是在室内走廊里, 有较多的局部细节, Reinhard 的局部算法和 Durand 算法都在局部处理上取得了较好的效果, 而在色彩处理 iCAM 模型更具优势。Walking On Snow 和 UBC 两序列都是室外大场景, 且颜色不丰富, 其中前者更是以高亮度的白雪为主, 因此本文算法所得的质量分数不高于 iCAM06 算法。另外, 从评价方法本身对其质量得分结果进行分析, 可以找到评价方法本身存在的不足, 如质量评价时特征的选取以亮度为主, 则在色彩评价时有较大不足。因此, 完全客观的评价方法不足以评价 HDR 视频色调映射的效果好坏, 需要结合主观质量评价对色调映射结果进行综合

分析评价。

图 4 表示的是针对室外场景(Playground 序列) 进行色调映射操作后的效果图及其亮度直方图对比, 效果图旁为该 LDR 图像对应的亮度直方图。图 5 表示的是室内外场景(Christmas Tree 序列), 即室内较暗且有灯光而室外较亮的场景, 进行色调映射操作的 LDR 效果图对比。

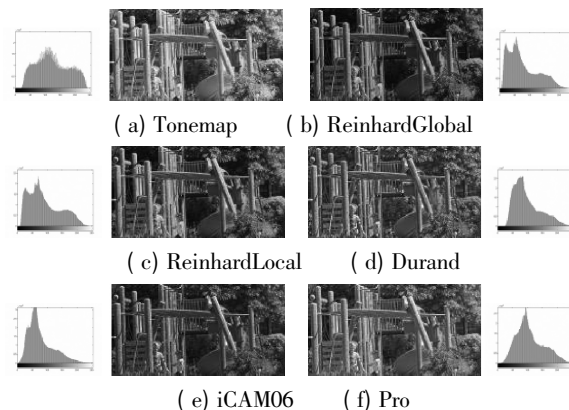


图 4 室外场景(Playground 序列) 的色调映射效果图及其亮度和色度直方图对比

表 2 色调映射的局部效果对比图

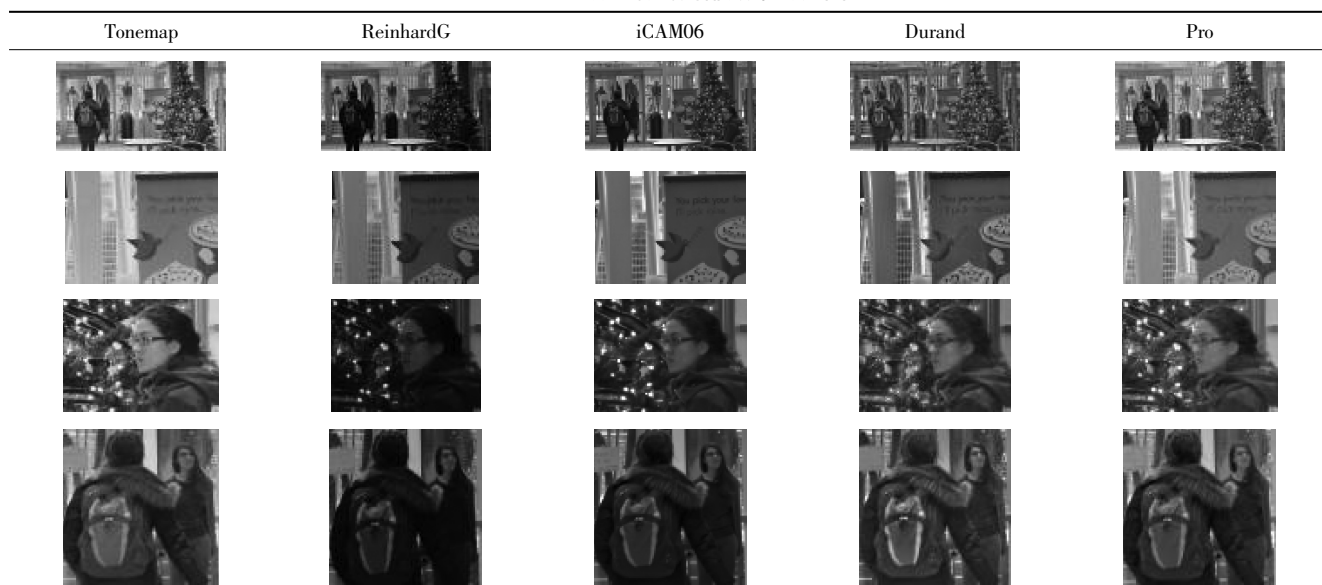


表 3 Playground 序列每帧平均亮度统计

视频帧号	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
平均亮度	109.24	109.18	109.19	108.94	108.66	108.60	108.38	108.49	108.76	109.01
亮度差	-	-0.60‰	0.10‰	-2.32‰	-2.49‰	-0.63‰	-2.02‰	1.07‰	2.48‰	2.29‰
视频帧号	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
平均亮度	108.99	109.55	109.68	109.70	109.80	110.04	110.33	110.35	110.36	110.19
亮度差	-0.23‰	5.14‰	1.21‰	0.22‰	0.84‰	2.23‰	2.61‰	0.21‰	0.11‰	-1.54‰

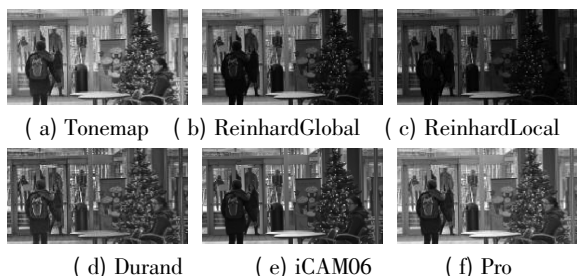


图 5 室内外场景(Christmas Tree 序列)的色调映射效果图对比



(a) Strangers_001 (b) Hallway_042



(c) UBC_L_0081 (d) WalkingOnSnow_L_0386 (e) ICICS_L_0004

图 6 本文方法得到的更多效果图

在图 4 和图 5 的效果图中, (a) 图采用的是 Ward 直方图的全局色调映射算法, 其直接转换到了 Lab 空间进行操作, 虽较好地保持了细节纹理等亮度信息, 但是色彩失真严重; (b) 图采用的是 Reinhard 提出的全局色调映射方案, 其比较适用于亮度分布比较均匀的场景中, 而对亮度跨度较大不均匀的场景操作时,

易丢失较亮和较暗区域的纹理细节; (c) 图采用的是 Reinhard 提出的局部色调映射操作, 其对局部块分别采用不同的系数, 能保持好较亮和较暗区域的纹理和细节, 但是整体画面偏暗或偏亮, 图像自然度不高; (d) 图采用的是 Durand 提出的局部色调映射算法, 采用了双边滤波的分层技术, 但是在边缘处理上出现鬼影现象十分严重, 且在颜色上过于鲜艳, 主观感受不真实; (e) 图采用的是 iCAM06 的算法, 它是基于图像色貌模型和双边滤波分层技术的局部色调映射算法, 虽然在细节和色彩上处理效果较好, 但是整体亮度有所下降; (f) 图采用的是本文方案。上述方案在应用到 HDR 视频时, 还特别针对视频特征用亮度均值调整算法进行了去除帧间闪烁的处理以得到实验结果。

各种算法的局部效果对比图详见表 2。Playground 序列进行去除闪烁处理算法后的平均亮度统计信息详见表 3。本文算法实现的更多场景效果图详见图 6。

3 总结

本文提出的针对 HDR 视频到 LDR 视频色调映射的新方案, 能够在色调映射后的 LDR 视频中保留原始 HDR 视频中更多的结构和细节, 并具有良好的色彩保真度, 且通过基于 iCAM 的直方图自适应均衡化和亮度均值处理能较好地去除视频帧的帧间闪烁

现象,在客观质量评分表中可以看到,本方案得到的 LDR 视频质量普遍高于其他色调映射方案得到的 LDR 视频,主观观看也优于其他方案的结果。因此,本方案具有较好的应用前景。但是算法的复杂度直接影响 HDR 视频色调映射的操作时间,若要实现实时视频的色调映射操作,必须要在算法上再做优化,提高视频色调映射操作的实时性,这也是未来 HDR 视频色调映射操作的主要研究之一。另外,现有的色调映射客观评价方法较少,且存在一定局限性,因此迫切需要提出切实有效的色调映射质量评价方法去指导色调映射算法的研究和发展。

参考文献

- [1] Gu B, Li W, Zhu M, et al. Local edge-preserving multi-scale decomposition for high dynamic range image tone mapping[J]. IEEE Transactions on image Processing, 2013, 22(1): 70-79.
- [2] Dong Y, Pourazad M T, and Nasiopoulos P. Human visual system-based saliency detection for high dynamic range content[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2016, 18(4): 549-562.
- [3] Čadík M, Wimmer M, Neumann L, et al. Image attributes and quality for evaluation of tone mapping operators[C]. Taipei: National Taiwan University, 2006.
- [4] Mantiuk R, Daly S, and Kerofsky L. Display adaptive tone mapping[C]. New York: ACM Transactions on Graphics (TOG), 2008.
- [5] Tumblin J, and Rushmeier H. Tone Reproduction for Realistic Images[J]. IEEE Transactions on Computer Graphics and Applications, 1993, 13(6): 42-48.
- [6] Larson G W, Rushmeier H, and 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.
- [7] Reinhard E, Stark M, Shirley P, et al. Photographic tone reproduction for digital images[C]. New York: ACM Transactions on Graphics (TOG), 2002.
- [8] Schlick C. Quantization Techniques for Visualization of High Dynamic Range Pictures[C]. Springer Berlin Heidelberg: Photorealistic Rendering Techniques, 1995.
- [9] Ashikhmin M. A Tone Mapping Algorithm for High Contrast Images[C]. New York: Proceedings of 13th Eurographics Workshop on Rendering, 2002.
- [10] Fairchild M D and Johnson G M. Meet iCAM: A next-generation color appearance model[C]. USA: 10th Color Imaging Conference, 2002.
- [11] Fairchild M D and Johnson G M. iCAM framework for image appearance, differences, and quality[J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1): 126-138.
- [12] Kuang J, Johnson G M, and 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] Chae S M, Lee S H, and Sohng K I. Color correction of the color difference in the PT space for HDR image tone compression using iCAM06[J]. Journal of Korea Multimedia Society, 2013, 16(3): 281-289.
- [14] Shahid H, Li D, Fanaswala A, et al. A new hybrid tone mapping scheme for high dynamic range (HDR) videos[C]. Las Vegas: 2015 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 2015.
- [15] Ward G. A contrast-based scale factor for luminance display[J]. Graphics gems IV, 1994, 3(3): 415-421.
- [16] Yeganeh H and Wang Z. Objective quality assessment of tone-mapped images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(2): 657-667.
- [17] Nafchi H Z, Shahkolaei A, Moghaddam R F, et al. FSITM: A feature similarity index for tone-mapped images[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(8): 1026-1029.
- [18] Durand F, Dorsey J. Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images[C]. New York: ACM transactions on graphics (TOG), 2002.
- [19] Moroney N, Fairchild M D, Hunt R W G, et al. The CIECAM02 color appearance model[C]. USA: 10th Color and Imaging Conference, 2002.
- [20] Ebner F and Fairchild M D. Development and testing of a color space (IPT) with improved hue uniformity[J]. 6th Color and Imaging Conference, 1998, (1): 8-13.
- [21] Hunt R W G. The reproduction of colour[J]. Fountain Press Ltd., 1995, 3(3): 23-25.
- [22] Banitalebi-Dehkordi A, Azimi Hashemi M, Pourazad M T, et al. High Dynamic Range Video Compression Using HEVC and H. 264/AVC Standards[C]. Greece: 10th International Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness, 2014.
- [23] Azimi M, Banitalebi-Dehkordi A, Dong Y, et al. Evaluating the Performance of Existing Full-Reference Quality Metrics on High Dynamic Range (HDR) Video Content[C]. Italy: International Conference on Multimedia Signal Processing (ICMSP), Venice, 2014.
- [24] Banitalebi-Dehkordi A, Azimi M, Dong Y, et al. Quality assessment of High Dynamic Range (HDR) video content using existing full-reference metrics[C]. France: ISO/IEC JTC1/SC29/WG11, 2014.