

# 基于交叉分解的高动态范围图像色调映射算法

庞泽邦<sup>1</sup>, 芦碧波<sup>1</sup>, 谷亚楠<sup>1\*</sup>, 郑艳梅<sup>1</sup>, 张鸣<sup>2</sup>

<sup>1</sup>河南理工大学计算机科学与技术学院, 河南 焦作 454000;

<sup>2</sup>郑州大学国际学院, 河南 郑州 450000

**摘要** 为了提升高动态范围图像的显示效果,提出一种基于交叉分解的高动态范围图像色调映射算法。在分析图像边缘滤波的基础上,给出一种基于交叉分解的图像分解与重构算法,并对重构系数进行分析,再将其应用到色调映射中。首先在色度亮度空间中对色度、亮度信息进行分离。然后对亮度信息分别使用高斯滤波器和双边滤波器进行滤波以构造出一种交叉分解方案,得到包含大尺度结构信息的基本层、包含纹理信息的细节层以及亮度存在剧烈变化的边界层。最后对重构系数进行详细讨论,确定色调映射中的系数选取规则,对亮度范围进行压缩和重构。实验结果表明,所提算法在有效压缩图像动态范围的同时,还可以较好地保持颜色信息、增强边界和纹理等细节特征。

**关键词** 图像处理; 色调映射算法; 高动态范围图像; 图像交叉分解; 图像滤波; 细节提取

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1410020

## Crossing Decomposition Based Tone Mapping Algorithm for High Dynamic Range Image

Pang Zebang<sup>1</sup>, Lu Bibo<sup>1</sup>, Gu Yanan<sup>1\*</sup>, Zheng Yanmei<sup>1</sup>, Zhang Ming<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Computer Science and Technology, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China;

<sup>2</sup> College of International, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450000, China

**Abstract** In order to improve the display effect of high dynamic range images, a high dynamic range image tone mapping algorithm based on cross decomposition is proposed. Based on the analysis of image edge filtering, an image decomposition and reconstruction algorithm based on cross decomposition is given, and the reconstruction coefficients are analyzed, and then applied to tone mapping. First, the chromaticity and brightness information are separated in the chromaticity brightness space. Then, the brightness information is filtered by Gaussian filter and bilateral filter respectively to construct a crossover decomposition scheme, a base layer containing large-scale structure information, a detail layer containing texture information, and the edge layer where the brightness varies dramatically are obtained. Finally, by discussing the reconstruction coefficients in detail, the coefficient selection rules in tone mapping are determined, and the brightness range is compressed and reconstructed. The experimental results show that the proposed algorithm can effectively compress the dynamic range of the image while maintaining the color information, enhancing the edge and texture details and other features.

**Key words** image processing; tone mapping algorithm; high dynamic range image; image crossing decomposition; image filter; detail extraction

**OCIS codes** 100.2000; 100.2980; 100.3008; 100.3010

收稿日期: 2020-10-29; 修回日期: 2020-11-19; 录用日期: 2020-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(U1404103)、河南省高等学校重点科研项目(21A520016, 18B520017)

通信作者: \*gyn\_519@163.com

# 1 引言

高动态范围 (High Dynamic Range, HDR)<sup>[1]</sup> 图像因其具有亮度范围跨度大、信息层次丰富和颜色鲜艳的优点,在消费电子和多媒体等领域中的应用场景逐渐扩大。由于传统显示设备无法直接显示 HDR 图像,而能够直接显示 HDR 图像的硬件设备,其价格较为昂贵,所以目前较为可行的方法就是压缩 HDR 图像的亮度范围,使之可以适用于动态范围较低的显示设备,这些技术统称为色调映射<sup>[2]</sup>。

现有的色调映射法大致可以分为全局映射、局部映射和分层映射三类。全局映射法是使用同一条变换曲线对所有像素进行压缩映射。Lee 等<sup>[3]</sup> 基于对称 S 型曲线的视网膜适应模型提出了一种新的非对称乙状结肠曲线,并提出了两种全局色调映射算法。陆许明等<sup>[4]</sup> 通过对 HDR 图像的照度直方图进行分析,使用估算概率模型来输出图像的亮度与标准差,进而给出一种色调映射算法。全局映射法具有计算简单和运算速度快的优点,但该方法得到的图像整体灰暗且模糊,偏亮或偏暗,不适用于复杂场景。局部映射法在考虑图像各个像素值的基础上还兼顾考虑了其位置特征以及像素之间的影响,不同区域内像素值相同的像素会得到不同的映射结果。Fattal 等<sup>[5]</sup> 提出了梯度域动态范围压缩法,其为局部映射法的经典算法之一,首先采用该方法对亮度信息进行多尺度衰减,然后通过求解泊松方程来压缩梯度分布以获得映射后的亮度图像信息。冯维等<sup>[6]</sup> 提出了一种基于梯度域的自适应局部色调映射改进算法,引入颜色校正模型并结合色差和消色差颜色间的线性插值函数,实现了自适应调节不同区域色度信息的功能。相较于全局映射法,局部映射法可以更好地保留图像的对比度和局部细节信息,但计算过程较为复杂,运算效率较低,极易出现光晕、虚假轮廓及噪声等现象,因此应用也不广泛。分层映射法的思路是将图像进行分层,处于不同层上的结构信息根据人眼视觉的特性采用不同的压缩法进行处理再合成,该算法既有效压缩了动态范围又保留了图像细节。Durand 等<sup>[7]</sup> 将 HDR 图像的亮度信息分为基本层和细节层,使用快速双边滤波对基本层进行处理,在降低对比度的同时保持了细节。Yin 等<sup>[8]</sup> 在传统滤波技术的基础上提出了一种新的边窗滤波技术,其将窗口的边或角与被处理的像素对齐,无论原来的滤波器是否保边,边窗滤波都会赋予其良好的保边性质,并结合文献<sup>[7]</sup> 的分层思路将

其应用到 HDR 图像处理后可以取得良好的效果。芦碧波等<sup>[9]</sup> 提出了一种基于双边滤波的多尺度分层映射算法,利用双边滤波可以分解得到基本层和细节层,使用梯度域压缩来处理基本层并与细节层进行融合<sup>[10]</sup>。分层映射法关键在于其具有合理有效的分层策略。

现有的分层映射法主要是利用一种滤波器将图像分为基本层和细节层,但在基本层中的边界层信息与结构信息会被不加区别地进行压缩,容易模糊边界信息。针对上述问题,本文在分析边界附近结构信息的基础上,提出一种交叉分解方案,使用两个滤波器将图像分解为包含大尺度结构信息的基本层、包含纹理信息的细节层以及亮度存在剧烈变化的边界层,并对其进行了压缩和重构。

## 2 图像的处理过程

### 2.1 图像的交叉分解和重构

高动态范围图像的亮度变化范围很大,而且在边界附近的变化尤其剧烈,准确提取边界的结构信息对于色调映射算法的设计而言非常关键。边界的结构信息包括边界位置和边界变化强度两个方面。在以前的研究中,通常做法是将图像分解为基本层和细节层,更多的是强调边界强度的保持,而忽略了精确的边界位置信息,从而导致因边界位置不精确或者边界漂移而出现的光晕现象。为此,基于经典的高斯滤波和双边滤波设计一种新颖的分解方案,即将输入图像分解为基本层、细节层和边界层。

首先将图像经过高斯滤波处理,可以得到平滑过渡的基本层  $B_s(I)$ , 表达式为

$$B_{s,m}(I) = \frac{1}{P_m} \sum_{n \in \Omega_g} g_\sigma(|m-n|) I_n, \quad (1)$$

式中:  $P_m$  为归一化系数;  $\Omega_g$  为高斯滤波窗口;  $\sigma$  为对应高斯函数的标准偏差;  $I_n$  为图像  $I$  中某像素点  $n$  的灰度值;  $m$  为像素点  $n$  邻域像素点的灰度值;  $g_\sigma$  为高斯核宽度。

基本层中包含了图像的大尺度结构信息,但模糊了重要的边界信息,而且不包含图像的细节信息。为了提取这两部分信息,使用保持边界的双边滤波器对输入图像进行滤波,并将滤波后的结果与输入图像和基本层分别进行作用,从而得到细节层和边界层,具体过程可表示为

$$D(I) = I - B_F(I), \quad (2)$$

$$E(I) = B_F(I) - B_s(I), \quad (3)$$

式中:  $D(I)$  为细节层;  $E(I)$  为边界层;  $B_F(I)$  为双边

滤波层,可表示为

$$B_{F,m}(I) = \frac{1}{Q_m} \sum_{n \in \Omega_b} g_{\sigma_s}(|m-n|) g_{\sigma_r}(|I_m - I_n|) I_n, \quad (4)$$



图 1 交叉分解示例。(a)输入图像;(b)基本层(高斯滤波结果);(c)双边滤波结果;(d)边界层;(e)细节层

Fig. 1 Crossing decomposition example. (a) Input image; (b) base layer (Gaussian filtering result); (c) bilateral filtering result; (d) edge layer; (e) detail layer

由于双边滤波器去除了纹理等细节信息,因此利用(2)式可以得到双边滤波结果与输入图像的残差,即图像的细节信息。同时,双边滤波器也可以较好地保持图像的边界等特征,因此利用(3)式可以提取图像的边界信息。对图像进行重构,重构过程可表示为

$$I_c = W_b \times B_s(I) + W_d \times D(I) + W_e \times E(I), \quad (5)$$

式中: $W_b$ 、 $W_d$ 和 $W_e$ 分别为基本层、细节层和边界层所对应的系数。

以一维信号为例,给出了交叉分解、直接重构(三个系数均为 1)以及二次重构(三个系数不全为 1)的结果。图 1 中包含典型的理想阶梯结构图像,尺寸为 64 pixel×32 pixel。提取第 16 行的像素值并使用高斯滤波和双边滤波对其进行处理,可得到对应的基本层、边界层和细节层,分解过程如图 2 所示。

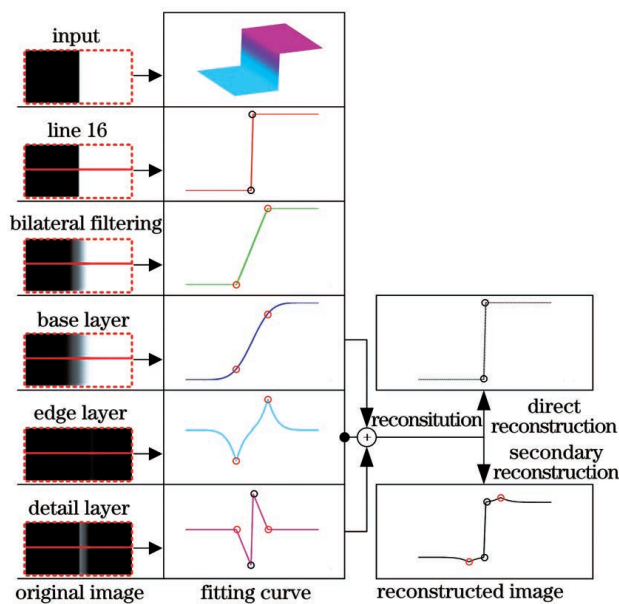


图 2 一维信号的交叉分解过程

Fig. 2 Cross-decomposition of one-dimensional signals

式中: $Q_m$ 为滤波器归一化系数; $I_m$ 为图像 $I$ 中像素点 $m$ 的灰度值; $\Omega_b$ 为滤波窗口; $\sigma_s$ 和 $\sigma_r$ 分别为双边滤波在图像空间域和灰度域的高斯核宽度。图 1 为交叉分解后得到的基本层、边界层和细节层。

从图 2 可以看到,基本层可以反映信号的基本起伏情况,双边滤波可以增加边界的宽度,而边界层的两个极值点给出较宽边界的起点和终点,细节层的极值点给出边界的中心位置信息,细节层的间断点有助于确定边界宽度,而且与边界层给出的边界信息一致。直接重构的信息与输入信号相同,但二次重构的结果受系数的影响较大。

## 2.2 重构系数对重构结果的影响

以图 2 的一维信号为例,研究系数对重构结果的影响,性能曲线如图 3 所示。从图 3(a)可以看到,等比例系数的重构保持了信号的形状,但会对信号进行线性缩放;当 $W_b = W_e = W_d = 1$ 时,重构信号的动态范围与输入信号相同;当 $W_b = W_e = W_d > 1$ 时,增加了信号的动态范围;当 $W_b = W_e = W_d < 1$ 时,缩小了信号的动态范围。从图 3(b)可以看到,当 $W_b = 0$ 时,边界位置不变,但是边界幅度会明显减小;当边界层系数与细节层系数相同时,随着系数的减小,边界的减少幅度增大。从图 3(c)可以看到,当 $W_d = 0$ 时,理想的阶梯型边界变宽,呈屋顶型边界,且边界幅值与其余两个重构系数相关;当基本层系数与边界层系数相同时,边界幅值随着系数的增大而增大。从图 3(d)可以看到,当 $W_e = 0$ 时,图像边界位置不变,但会形成虚假边缘,边界幅值与重构系数相关;当基本层系数与细节层系数相同时,随着系数的增大,真实边缘和虚假边缘的幅值都会随之增大。固定基本层系数 $W_b = 1$ ,研究边界层与细节层系数同时变化对重构结果的影响。从图 3(e)和图 3(f)可以看到,重构信号的边界位置不变,但其幅度会随之发生变化;当 $W_e$ 值和 $W_d$ 值均大于 1 时,边界幅度和细节强度都会得到增强;当 $W_e \geq W_d > 1$ 时,边界幅度和细节强度都有显著增加;当 $W_d \geq W_e > 1$ 时,则细节强度增加效果不够明

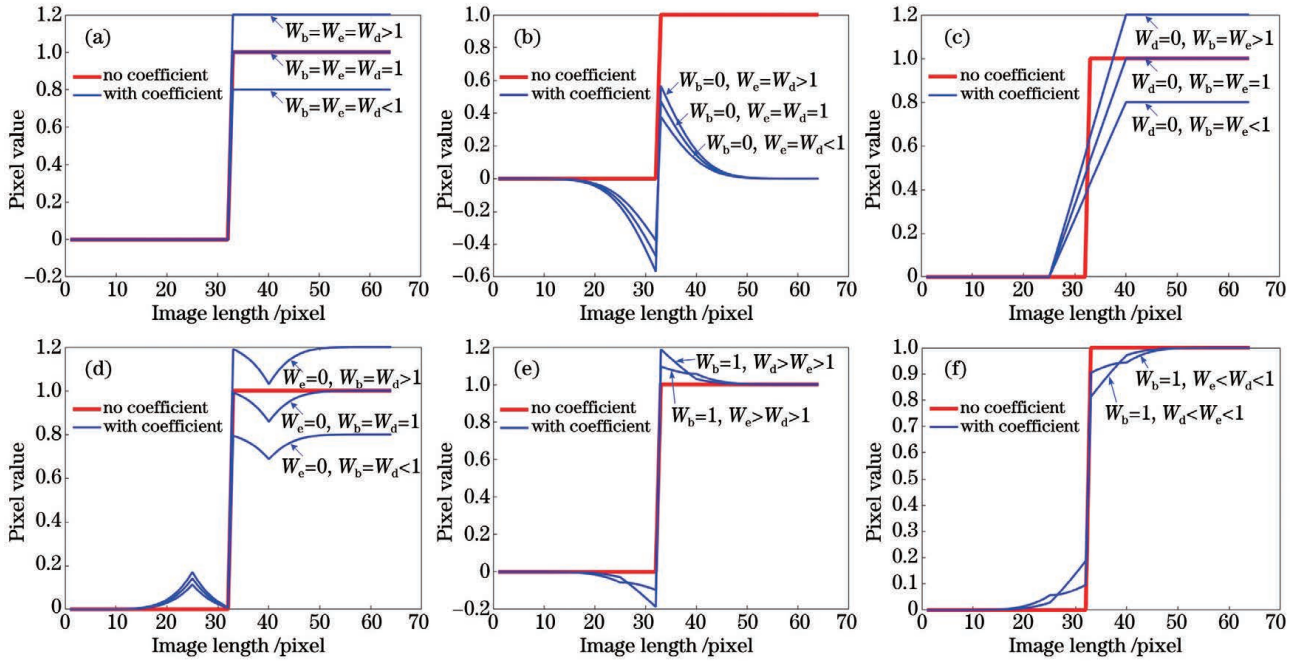


图 3 系数选择对重构的影响。(a)等比例重构;(b)无基层层重构;(c)无细节层重构;(d)无边界层重构;(e)边界层系数变化对重构的影响;(f)细节层系数变化对重构的影响

Fig. 3 Influence of coefficient selection on reconstruction. (a) Equal scale reconstruction; (b) no base layer reconstruction; (c) no detail layer reconstruction; (d) no edge layer reconstruction; (e) influence of change edge coefficient on reconstruction; (f) influence of change detail coefficient on reconstruction

显;但当  $W_e$  值和  $W_d$  值均小于 1 时,边界幅度和细节强度都会减少,从而弱化边界和细节之间的区别,容易引起视觉上的虚假边缘。

### 2.3 色调映射的系数重构规则

对于色调映射问题而言,重构结果既要大幅度压缩动态范围,也要保留和增强特征,因此结合 2.2 节的分析,重构系数应满足

$$W_b \leq 1 < W_e \leq W_d. \quad (6)$$

其中  $W_b \leq 1$  满足了动态范围压缩的要求,  $W_e$

和  $W_d$  大于  $W_b$  体现了增强边界和细节的功能,  $W_d$  大于等于  $W_e$  保证了细节在重构过程中不会被湮没,从而保持较好的显著性。

当  $W_b=1$  时,不同  $W_e$  值和  $W_d$  值下低动态范围的图像重构结果如图 4 所示。从图 4 (b) 和图 4 (d) 可以看到,边界系数太小会引起虚假边缘并在视觉上显示为伪影轮廓和光晕,边界系数太大会造成边缘附近过亮。从图 4 (f) 和图 4 (h) 可以看到,细节系数太小则图像较为模糊,细节系数太大则会



图 4 不同  $W_e$  值和  $W_d$  值下的重构结果。(a)输入图像;(b)  $W_e=0.6, W_d=1.2$ ; (c)  $W_e=1.8, W_d=1.2$ ; (d)  $W_e=5.0, W_d=1.2$ ; (e) 基本层; (f)  $W_e=1.2, W_d=0.6$ ; (g)  $W_e=1.2, W_d=1.8$ ; (h)  $W_e=1.2, W_d=5.0$

Fig. 4 Reconstruction results at different  $W_e$  and  $W_d$  values. (a) Input image; (b)  $W_e=0.6, W_d=1.2$ ; (c)  $W_e=1.8, W_d=1.2$ ; (d)  $W_e=5.0, W_d=1.2$ ; (e) base layer; (f)  $W_e=1.2, W_d=0.6$ ; (g)  $W_e=1.2, W_d=1.8$ ; (h)  $W_e=1.2, W_d=5.0$

引起过度放大细节,从而导致图像不真实。相比于图 4(g)和图 4(c),图 4(g)的边缘更清晰,原因在于图 4(g)的细节层系数大于边界层系数。

### 3 色调映射算法

#### 3.1 算法流程

本文构建一种基于交叉分解的映射算法,该算

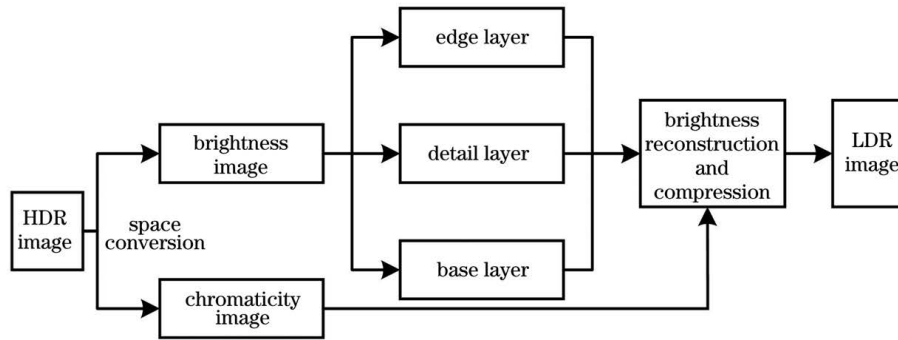


图 5 所提算法的流程

Fig. 5 Flow of proposed algorithm

#### 3.2 色度、亮度信息分离

在经典的色调映射中,亮度信息<sup>[11]</sup>由红绿蓝信息( $R$ 、 $G$  和  $B$ )组合得到,而彩色信息未能得到很好的表示。为此,采用 CB(Chromaticity Brightness)颜色空间<sup>[12]</sup>将 HDR 图像信息分为色度信息  $C$  和亮度信息  $B_r$ ,表达式为

$$B_r = \sqrt{R^2 + G^2 + B^2}, \quad (7)$$

$$C = \{r, g, b\} = \{R/B_r, G/B_r, B/B_r\}. \quad (8)$$

从(8)式可以看到,色度信息  $C$  是单位化的 RGB 图像,其模长为 1,从而在单位球上完整地存储了图像的色度信息,而且与亮度无关。一幅图像的亮度信息和色度信息可以自然地表现为亮度图像和色度图像,如图 6(a)~6(c)所示。

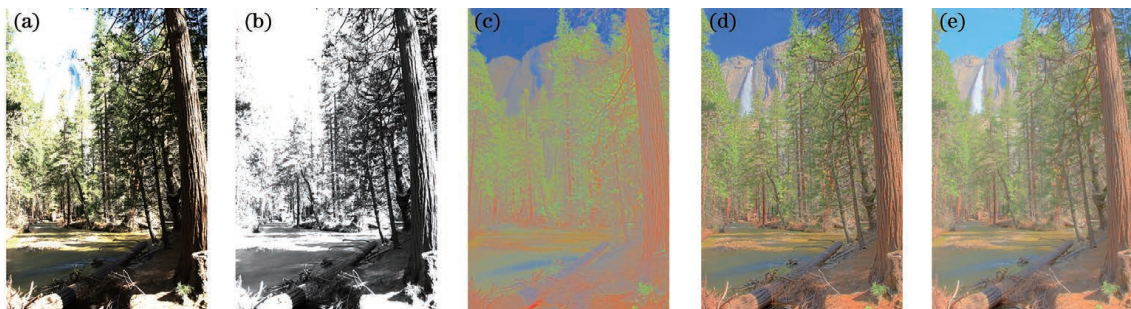


图 6 HDR 图像色度亮度分离和色调映射。(a) HDR 图像;(b) HDR 色度图像;(c) HDR 亮度图像;(d) CB 颜色空间的色调映射结果;(e) RGB 颜色空间的色调映射结果

Fig. 6 HDR Image chromaticity brightness separation and tone mapping. (a) HDR image; (b) HDR chromaticity image; (c) HDR brightness image; (d) tone mapping result in CB color space; (e) tone mapping result in RGB color space

#### 3.3 亮度处理

##### 3.3.1 对数域压缩与归一化

HDR 图像在亮度信息对数域中的变化与人类视觉感知呈线性关系,因此将亮度信息转化至对数域<sup>[13]</sup>中进行处理。在对数域变换的处理过程中,已经将亮度数据的绝对数值进行了压缩。此外,由于不同 HDR 图像的亮度区间不同,为了提高算法的

适用范围,需要利用归一化技术将数据范围变换到  $[0, 1]$  之间。结合对数变换和归一化操作的表达式为

$$L = \frac{\lg(B_r) - \lg(B_{r,\min})}{\lg(B_{r,\max}) - \lg(B_{r,\min})}, \quad (9)$$

式中: $L$  为取对数并归一化后的亮度信息; $B_{r,\max}$  和  $B_{r,\min}$  分别为原亮度  $B_r$  的最大和最小亮度信息值。

### 3.3.2 亮度重构

首先对归一化亮度  $L$  采用 2.1 节的图像交叉分解方案来计算  $L$  所对应的基本层 ( $L_{base}$ )、边界层 ( $L_{edge}$ ) 和细节层 ( $L_{detail}$ ), 然后求解压缩后的亮度信息, 表达式为

$$L_{LDR} = W_b \times L_{base} + W_e \times L_{edge} + W_d \times L_{detail} \quad (10)$$

(10) 式中系数的选取需符合 (6) 式。

### 3.4 色彩恢复

经过 3.1~3.3 节处理后, 得到新的亮度图像, 采用 (8) 式的逆运算将新的亮度和色彩进行融合并作为最终的映射结果。计算方法为

$$L_R = L_{LDR} \times r, \quad (11)$$

$$L_G = L_{LDR} \times g, \quad (12)$$

$$L_B = L_{LDR} \times b. \quad (13)$$

图 6(d) 和图 6(e) 分别为采用所提算法在 CB 颜色空间和 RGB 颜色空间中处理得到的色调映射结果。从图 6(d) 和图 6(e) 可以看到, 对于天空颜色, CB 颜色空间中的色调映射结果更接近真实场景效果。

## 4 对比试验与结果分析

实验使用 Intel Core i7-9750H 处理器、16 G 内存和 Windows 10 操作系统的 PC(Personal Computer) 平台, 使用 MATLAB 2020a 开发环境对文献 [7-9] 提出的三种映射算法与所提算法进行对比测试。结合 (6) 式并经过大量实验, 确定基本层、边界层和细节层的系数  $W_b$ 、 $W_e$  和  $W_d$  分别为 0.9、1.1 和 1.2。

第 1 组实验结果如图 7 所示。从图 7(a) 可以看到, 文献 [7] 算法处理后的图像整体效果明亮通透, 但局部叶片和字母边界轮廓模糊。从图 7(b) 可以看到, 文献 [8] 算法处理后的图像整体灰暗, 局部叶片和字母边界模糊严重且轮廓晦涩不圆润, 并且雕塑周围出现光晕。从图 7(c) 可以看到, 相较于前两种算法, 文献 [9] 在局部边界保持较好, 但图像颜色恢复较差, 从而导致颜色分布不均匀, 而且过度压缩会导致图像虚假。从图 7(d) 可以看到, 相较于上述三种算法, 所提算法处理后的叶片等局部细节清晰, 字母等物体边界整洁, 颜色恢复鲜明均匀, 没有光晕, 更好地映射显示了图像。

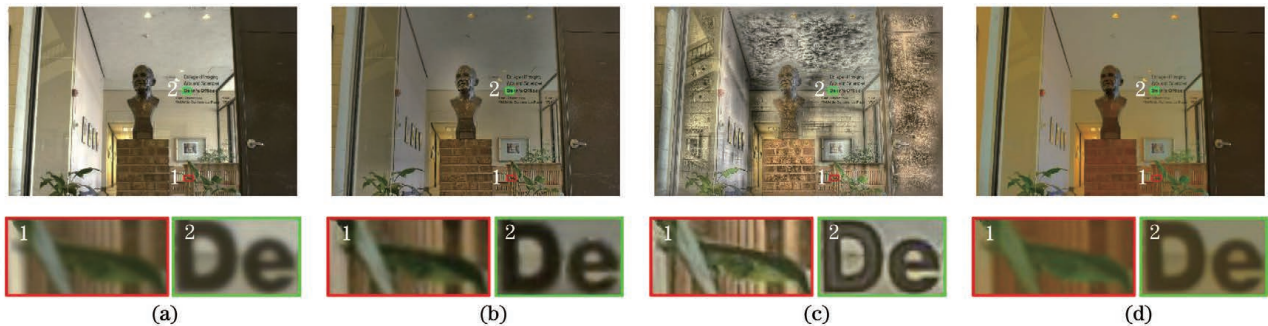


图 7 第一组色调映射结果及其局部放大图。(a) 文献 [7]; (b) 文献 [8]; (c) 文献 [9]; (d) 所提算法

Fig. 7 Group 1 of tone mapping results and their local enlargements. (a) Ref. [7]; (b) Ref. [8]; (c) Ref. [9]; (d) proposed algorithm

第二组实验结果如图 8 所示。从图 8(a) 可以看到, 文献 [7] 算法处理后的图像整体明暗反差较大, 开关和墙壁等部位亮度过高, 油画、窗框和窗帘

等部位亮度过低。从图 8(b) 可以看到, 文献 [8] 算

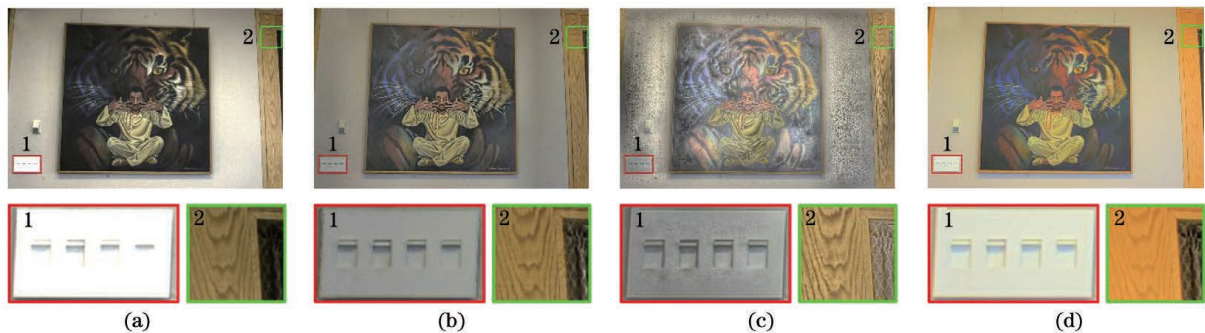


图 8 第二组色调映射结果及其局部放大图。(a) 文献 [7]; (b) 文献 [8]; (c) 文献 [9]; (d) 所提算法

Fig. 8 Group 2 of tone mapping results and their local enlargements. (a) Ref. [7]; (b) Ref. [8]; (c) Ref. [9]; (d) proposed algorithm

法处理后的细节得到增强,但开关和窗框等局部边界信息较为模糊。从图 8(c)可以看到,文献[9]算法在细节和边界处的处理效果较前两种算法较好,但颜色仍旧恢复不均匀,压缩过度会导致图像泛黑。从图 8(d)可以看到,所提算法处理后的画面层次感良好,色度饱和度和对比度适中,例如窗框和窗帘等细节部位清晰,油画中的老虎眼睛、胡须和开关等部位颜色恢复均匀,整体更有立体感。

为了进一步对映射效果进行评价,采用色调映射图像质量指标(TMQI)<sup>[14]</sup>来量化比较文献[7-9]和所提算法的表现,具体结果如表 1 所示。TMQI 指标的计算公式为

$$Q = aS^{\alpha} + (1 - a)N^{\beta}, \quad (14)$$

式中:Q、S和N分别为图像质量、结构保真度和自

Table 1 TMQI values of different algorithms

Image	Algorithm	Q	S	N
Fig. 7	Ref. [7]	0.8097	0.7776	0.4182
	Ref. [8]	0.8222	0.7109	0.3797
	Ref. [9]	0.6023	0.3890	0.3598
	Proposed algorithm	<b>0.9135</b>	<b>0.8387</b>	<b>0.6982</b>
Fig. 8	Ref. [7]	0.7151	0.6650	0.3100
	Ref. [8]	0.6815	0.5570	0.3572
	Ref. [9]	0.3134	0.7869	0.4229
	Proposed algorithm	<b>0.8834</b>	<b>0.7893</b>	<b>0.6145</b>

然度评价标准; $a=0.8012$ ,决定 S 和 N 在图像质量中的相对分量,其对应的敏感程度参数  $\alpha$  和  $\beta$  分别取 0.3046 和 0.7088。因为 S 和 N 的上界值均为 1,所以质量分数 Q 的上界值也为 1,并且该值越接近于 1 说明图像的质量越高,反之图像的质量越差。

从表 1 可以看到,所提算法在图像质量、结构保真度和自然度评价标准上较文献[7-9]均有较大的提高,平均提高 33.47%、33.69%和 76.74%。

为了研究不同系数对色调映射结果的影响,以图 7 的 HDR 图像为例,采用结构相似性(SSIM)指标<sup>[15]</sup>对其进行定量分析。分别固定基本层、边界层和细节层系数中的一个,其他两个系数以步长 0.1 递增,变动范围为[0, 2],对所有色调映射图像的 SSIM 值进行曲面可视化显示,结果如图 9 所示,其中 SSIM 的峰值位置表明本文所设定的参数基本合理。为了进一步验证参数设置的合理性,表 2 为不同系数下的 TMQI 值。上述实验结果表明,本文设计的重构系数较为合理。

Table 2 TMQI values of HDR images with different reconstruction coefficients under proposed algorithm

Image	$W_b$	$W_e$	$W_d$	Q	S	N
HDR image in Fig. 7	0.8	1.0	1.1	0.9126	0.8246	0.6798
	0.9	1.1	1.2	<b>0.9135</b>	<b>0.8387</b>	<b>0.6982</b>
	1.0	1.2	1.3	0.9130	0.8368	0.6874

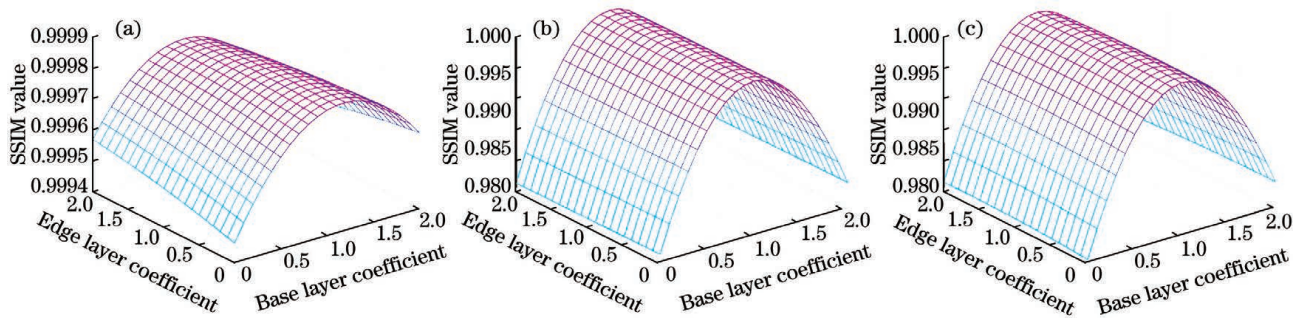


图 9 系数选择对重构图像的 SSIM 值的影响。(a)固定基本层,递增变动边界层和细节层;(b)固定边界层,递增变动基本层和细节层;(c)固定细节层,递增变动基本层和边界层

Fig. 9 Influence of coefficient selection on SSIM value of reconstructed image. (a) Fixed base layer, incremental change edge layer and detail layer; (b) fixed edge layer, incremental change base layer and detail layer; (c) fixed detail layer, incremental change base layer and edge layer

## 5 结 论

本文提出一种基于交叉分解的 HDR 图像色调映射算法。通过双边滤波和高斯滤波来构造交叉分

解算法,在将 HDR 图像亮度数据中的基本信息和细节信息提取出来的同时,也将边界信息提取出来。相比于以往算法只构造两种尺度,而该算法构造三种尺度可以有效分离和表示图像不同尺度的信息。

通过合理地选择重构系数可以得到较好的增强效果。实验结果表明,所提算法在有效压缩图像动态范围的同时,还可以较好地保持和增强 HDR 图像的纹理和细节等特征,对 HDR 图像的显示效果有显著提升,并在客观指标方面有显著提升。

## 参 考 文 献

- [1] Xie Y S, Fang J Y. Development and prospect of tone mapping techniques for HDRI [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2011, 22(5): 11-17.  
谢一淞, 方俊永. 高动态范围图像色调映射技术的发展与展望[J]. 照明工程学报, 2011, 22(5): 11-17.
- [2] Banterle F, Artusi A, Debattista K, et al. Advanced high dynamic range imaging: theory and practice [M]. Lu B B, Zheng Y M, Wang Y M, Transl. Beijing: Tsinghua University Press, 2018: 33-112.  
弗朗西斯科·班特利, 亚历山德罗·阿图西, 库尔特·德巴蒂斯塔, 等. 高动态范围成像高级教程: 理论与实践[M]. 芦碧波, 郑艳梅, 王永茂, 译. 北京: 清华大学出版社, 2018: 33-112.
- [3] Lee D H, Fan M, Kim S W, et al. High dynamic range image tone mapping based on asymmetric model of retinal adaptation [J]. Signal Processing: Image Communication, 2018, 68: 120-128.
- [4] Lu X M, Zhu X Y, Li Z W, et al. A brightness-scaling and detail-preserving tone mapping method for high dynamic range images [J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(6): 1080-1092.  
陆许明, 朱雄泳, 李智文, 等. 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[J]. 自动化学报, 2015, 41(6): 1080-1092.
- [5] Fattal R, Lischinski D, Werman M. Gradient domain high dynamic range compression[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 249-256.
- [6] Feng W, Liu H D, Wu G M, et al. Gradient domain adaptive tone mapping algorithm based on color correction model[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(8): 081007.  
冯维, 刘红帝, 吴贵铭, 等. 基于颜色校正模型的梯度域自适应色调映射算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(8): 081007.
- [7] Durand F, Dorsey J. Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 257-266.
- [8] Yin H, Gong Y H, Qiu G P. Side window filtering [C] // 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 15-20, 2019, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019: 8750-8758.
- [9] 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.  
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.
- [10] Shen Y, Chen X P, Yuan Y B, et al. Infrared and visible image fusion based on significant matrix and neural network[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(20): 201007.  
沈瑜, 陈小朋, 苑玉彬, 等. 基于显著矩阵与神经网络的红外与可见光图像融合[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(20): 201007.
- [11] Zhang T, Zeng Q, Du W L, et al. Regional backlight brightness extraction algorithm based on deep learning[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(22): 2210003.  
张涛, 曾琴, 杜文丽, 等. 基于深度学习的区域背光亮度提取方法[J]. 光学学报, 2020, 40(22): 2210003.
- [12] Zhou Q, Li W S. A method for removing mixed noise of color image by improving CB model [J]. Computer & Digital Engineering, 2017, 45(1): 147-151.  
周千, 李文胜. 一种改进 CB 模型的彩色图像混合噪声去除方法[J]. 计算机与数字工程, 2017, 45(1): 147-151.
- [13] Melgani F, Serpico S B. A Markov random field approach to spatio-temporal contextual image classification [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(11): 2478-2487.
- [14] Yeganeh H, Wang Z. Objective quality assessment of tone-mapped images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(2): 657-667.
- [15] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.