

# 基于颜色校正模型的梯度域自适应色调映射算法

冯维<sup>1,2\*</sup>, 刘红帝<sup>1</sup>, 吴贵铭<sup>1</sup>, 赵大兴<sup>1</sup>

<sup>1</sup>湖北工业大学机械工程学院, 湖北 武汉 430068;

<sup>2</sup>湖北工业大学现代制造质量工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068

**摘要** 针对高动态范围图像在亮度压缩过程中损坏色度信息, 导致映射后图像明暗不同区域色偏严重的问题, 提出一种基于颜色校正模型的梯度域自适应色调映射改进算法。通过建立图像亮度空间高斯金字塔并结合泊松方程恢复图像亮度; 再引入色度空间颜色校正算法, 在图像色差和消色差颜色之间进行线性插值, 并通过计算处理前后的亮度比值调节颜色校正因子用来增强图像饱和度; 最终实现自适应校正图像色度信息的功能。与 Larson、Drago、Reinhard 和梯度域色调映射的局部色调映射算法作对比, 结果表明改进算法处理后的图像在信息熵、对比度和平均梯度方面均有良好的优化效果, 有效减少了亮度压缩引起的色偏问题, 增强了图像整体色彩感观度。

**关键词** 图像处理; 高动态范围图像; 亮度空间; 色度信息; 色调映射; 颜色校正

中图分类号 TN27; TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.081007

## Gradient Domain Adaptive Tone Mapping Algorithm Based on Color Correction Model

Feng Wei<sup>1,2\*</sup>, Liu Hongdi<sup>1</sup>, Wu Guiming<sup>1</sup>, Zhao Daxing<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China;

<sup>2</sup>Hubei Key Laboratory of Modern Manufacturing Quality Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China

**Abstract** In this study, we propose an improved gradient domain adaptive tone mapping algorithm based on the color correction model to solve the damage of chromaticity information with respect to the process of image brightness compression in a high dynamic range, resulting in severe color gradation in regions having different image brightness and shade after tone mapping. The image brightness can be restored by combining the Gaussian pyramid of the image luminance space and Poisson equation. Subsequently, we introduce the chromaticity space color correction algorithm and apply linear interpolation between the chromatic aberration of the image and the achromatic color. Further, we adjust the color correction factor by calculating the brightness ratio before and after processing to enhance image saturation. Finally, we realize adaptive correction of the image chromaticity information. We also perform a comparison with the typical Larson, Drago, Reinhard, and gradient domain local tone mapping algorithms. The results prove that the image processed using the improved algorithm exhibits good optimization with respect to the information entropy, contrast, and average gradient. The proposed method effectively reduces the color shift because of brightness compression and enhances the overall color perception of the image.

**Key words** image processing; high dynamic range image; brightness space; chromaticity information; tone mapping; color correction

**OCIS codes** 100.2000; 100.2980; 110.3000; 120.4570

收稿日期: 2019-07-16; 修回日期: 2019-08-29; 录用日期: 2019-09-06

基金项目: 国家自然科学基金(51805153, 51675166)、精密测试及仪器国家重点实验室开放基金(pilab1801)、湖北工业大学博士科研启动基金(BSQD2019005)

\* E-mail: david2018@hbut.edu.cn

## 1 引言

现实生活中,自然场景的动态范围很大,远超过普通 CCD/CMOS 传感器所能捕获的动态范围<sup>[1]</sup>。高动态范围(HDR)图像可逼真地反映自然场景的亮度范围,尤其对包含不同明暗区域的场景,可更好地显示图像细节。但目前市场上专业配置的 HDR 图像硬件显示设备造价昂贵<sup>[2]</sup>,无法普及大众,因此 HDR 图像的动态范围压缩算法依旧为研究热点。

近年来,国内外有关 HDR 图像色调映射算法的研究越发深入。Lee 等<sup>[3]</sup>提出一种基于非对称模型的视网膜适应 HDR 图像色调映射算法,利用图像亮度直方图和基于非对称乙状结肠曲线(ASC)的映射功能,在保留映射后得到低动态范围(LDR)图像的同时,增强了图像全局对比度,但整体图像显示效果不够自然。An 等<sup>[4]</sup>提出一种新的基于逆色调映射的 HDR 成像方法,利用光谱区域检测技术,用以确定图像明亮和阴暗区域的细节信息,避免感知亮度降低,但易受光照变化影响,同时存在光晕现象。中山大学陆许明等<sup>[5]</sup>提出一种控制亮度的全局色调映射算法,通过对 HDR 图像照度直方图进行分析处理,同时利用估算概率模型输出图像的亮度与标准差,进而调整亮度区域分配的方法,该算法得到的 LDR 图像细节显示不清晰,图像质量较差。河南理工大学芦碧波等<sup>[6]</sup>为解决 HDR 图像合成和映射时存在异常值的问题,提出一种基于引导滤波的图像色貌模型(iCAM06)色调映射算法,该算法较好地显示了细节信息,但存在色偏问题。此外还有学者采用基于双边滤波、直方图均衡化的色调映射算法<sup>[7-8]</sup>对 HDR 图像进行处理。然而,HDR 图像在亮度压缩过程中,易造成色度信息受损严重,导致映射后的 LDR 图像颜色失真。因此,如何保证图像压缩后保留所有色度信息,成为目前亟待解决的难题。

鉴于此,本文提出一种基于梯度域的自适应局部色调映射改进算法,该算法不仅较好地压缩了 HDR 图像的动态范围,同时引入了颜色校正模型,并结合色差和消色差颜色间的线性插值函数与颜色校正因子,实现了自适应调节图像不同区域色度信息的功能。实验结果表明,通过改进算法处理后的 LDR 图像在信息熵、对比度和平均梯度方面均有提升,图像可视化效果更好。

## 2 算法基本原理

传统的色调映射算法<sup>[9]</sup>对 HDR 图像的亮度范

围进行压缩时,由于压缩幅度很大,难免造成图像色度信息的大部分损失,使映射后的图像颜色外观发生变化,存在色度信息无法完全恢复的问题。所提算法引入图像色度空间颜色校正模型,旨在解决对 HDR 图像进行色调映射过程中存在的因亮度压缩造成的图像色偏问题;并对模型进行改进,通过图像处理前后的亮度比值来调节颜色校正因子,自适应恢复场景不同区域色度信息,使图像细节和颜色损失最小化。

所提算法的基本原理为:先读取高动态范围图像,并将图像由 RGB 空间转换到 CIE 1931 XYZ 空间,在对数域中对 Y 分量(亮度空间)进行处理;再通过重复高斯滤波与线性下采样操作,建立图像高斯金字塔,并计算每一层图像梯度,得到最终修正后的梯度信息<sup>[10-11]</sup>;其次通过求解泊松方程以恢复图像亮度信息,并对图像进行归一化处理;最后在图像的 RGB 三通道分别进行颜色校正处理,在图像色差和消色差之间进行线性插值,并通过调节颜色校正因子自适应恢复图像色度信息<sup>[12]</sup>,得到最终映射后可输出显示的低动态范围图像。具体算法流程如图 1 所示。

## 3 算法实现

基于梯度域的色调映射改进算法主要由两步组成:第一步,对颜色空间转换后的 HDR 图像提取亮度分量,通过建立图像高斯金字塔并结合泊松方程恢复压缩后的图像亮度信息;第二步,通过在图像色差与消色差的颜色间加入线性插值,结合自适应调节颜色校正因子对图像色度信息进行颜色校正。最后,映射图像输出到不同型号及色度参数的显示设备上,得到相似的可视化效果图,可知所提算法具有良好的普适性。

### 3.1 亮度空间处理

输入的 HDR 图像是基于 RGB 颜色空间进行处理的。CIE 1931 XYZ 颜色空间是一个典型的与设备无关的颜色空间,色调映射算法大多都是在 XYZ 空间的亮度通道运行的,将图像由 RGB 颜色空间转换到 CIE 1931 XYZ 空间,得到的 Y 即为亮度。XYZ 和 RGB 颜色空间之间存在线性关系,可使用转换矩阵  $M$ ,即

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} 0.412 & 0.358 & 0.181 \\ 0.213 & 0.715 & 0.072 \\ 0.019 & 0.119 & 0.950 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

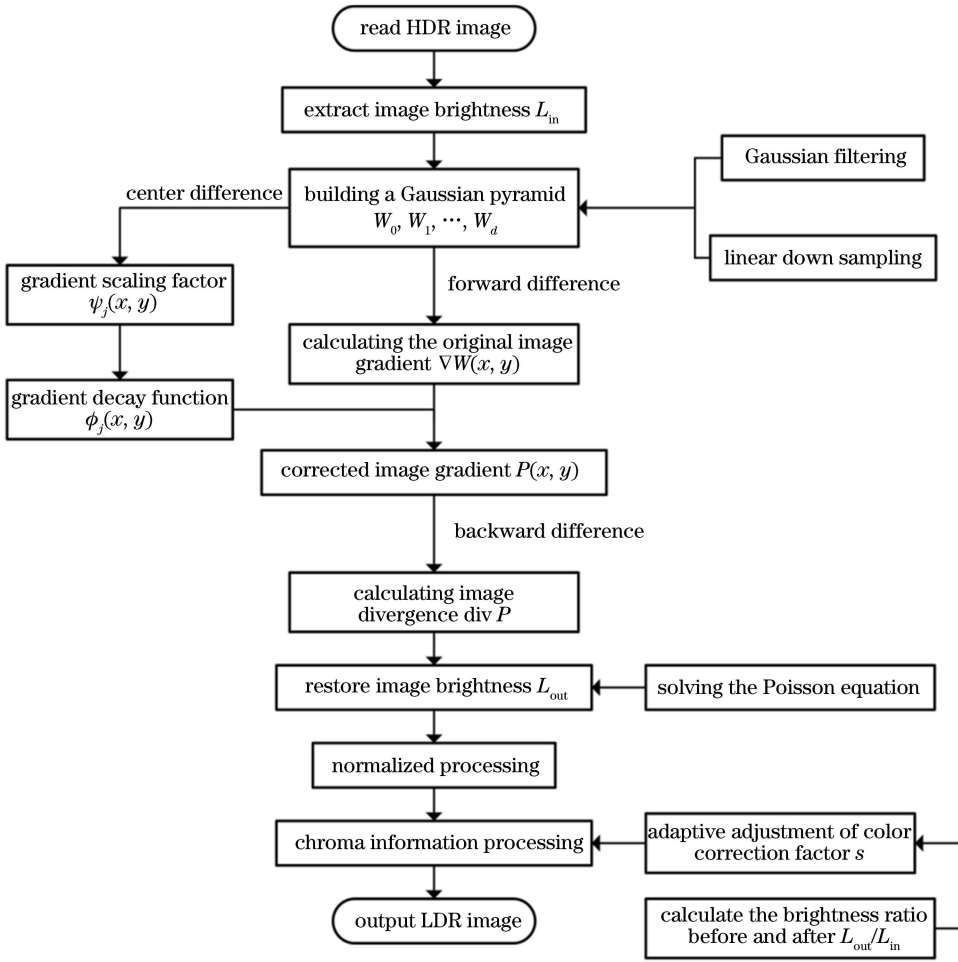


图 1 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flow chart

实现颜色空间转换。亮度值  $Y$  为

$$Y = 0.213R + 0.715G + 0.072B. \quad (2)$$

图像亮度值的对数值与人类视觉系统的感知亮度值相近,因此对图像亮度空间的处理是在对数域中进行操作的。通过高斯滤波和线性下采样

操作,建立图像高斯金字塔  $W_0, W_1, \dots, W_d$ , 其中  $W_0$  为分辨率最高的原图像,  $W_d$  的分辨率至少为  $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$  的 HDR 图像<sup>[13]</sup>。金字塔的每一级采用中心差分计算梯度,计算过程表达式为

$$\nabla W_j(x, y) = \left[ \frac{W_j(x+1, y) - W_j(x-1, y)}{2^{j+1}}, \frac{W_j(x, y+1) - W_j(x, y-1)}{2^{j+1}} \right], \quad (3)$$

式中:  $j$  为高斯金字塔层数索引;  $x, y$  为亮度值位置索引。在每一级  $j$  中,定义缩放因子为

$$\varphi_j(x, y) = \alpha^{1-\beta} \|\nabla W_j(x, y)\|^{\beta-1}, \quad (4)$$

式中:  $\alpha$  为梯度检测的阈值;  $\beta$  决定衰减程度。实验结果表明,当  $\alpha$  为平均梯度的 10%,  $\beta$  在 0.8~0.9 取值时效果最好。得到各级缩放因子后,梯度衰减函数  $\Phi(x, y)$  可由本级缩放因子  $\varphi(x, y)$  与上一级衰减函数的线性上采样值  $U[\Phi(x, y)]$  相乘得到。计算过程为

$$\begin{cases} \Phi_d(x, y) = \varphi_d(x, y) \\ \Phi_j(x, y) = U[\Phi_{j+1}(x, y)]\varphi_j(x, y), \\ \Phi(x, y) = \Phi_0(x, y) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $0, d$  为高斯金字塔层数索引。得到原图像对应的衰减函数后,原图像的梯度可由前向差分公式计算,即

$$\nabla W(x, y) = [W(x+1, y) - W(x, y), W(x, y+1) - W(x, y)]. \quad (6)$$

将衰减函数作用于梯度,得到修正后的梯度,再用修正后的梯度求得图像散度,散度计算公式为

$$\operatorname{div} P = P(x, y) - P(x-1, y) + P(x, y) - P(x, y-1)。 \quad (7)$$

从(7)式可以看到,计算图像散度时使用后向差分,以补偿计算图像梯度时的前向差分,并且得到的散度需满足泊松方程,表达式为

$$\nabla^2 L_{\text{out}} = \operatorname{div} P, \quad (8)$$

式中: $L_{\text{out}}$ 为色调映射后的图像亮度; $\nabla$ 为泊松方程。求解(8)式的 $\nabla$ ,可得到 $L_{\text{out}}$ 。

### 3.2 色度空间处理

在色调映射算法中,普遍采用的色度处理方法是保留颜色比值,即

$$C_{\text{out}} = C_{\text{in}} L_{\text{out}} / L_{\text{in}}, \quad (9)$$

式中: $C$ 为颜色通道(R,G,B); $L_{\text{in}}$ 为原始图像的亮度。随着色调映射技术的不断发展,对比度的压缩程度越来越大,使得颜色扭曲越来越明显。在(9)式的基础上,所提算法引入一个线性颜色矫正模型,在色差和消色差颜色间加入线性插值<sup>[14-15]</sup>,计算公式为

$$C_{\text{out}} = [(C_{\text{in}} / L_{\text{in}} - 1)s + 1] L_{\text{out}}, \quad (10)$$

式中:颜色校正因子 $s \in [0, 1]$ 。传统方法一般是通过手动调节 $s$ 值使得图像色彩显示达到较好的效果,但经过动态范围压缩后,不同区域的像素亮度值变化程度不同。如果对图像所有区域都使用相同的 $s$ 值进行处理,会导致某些区域色彩失真,不能使整幅图像保持良好的色度信息。因此,对颜色校正模型进行优化,根据图像中不同明暗区域的亮度信息,设计了一种具有自适应调节功能的颜色校正因子 $s$ 。设 $T$ 为亮度比值, $\lambda$ 为映射常数, $T$ 的计算公式为

$$T = \lambda L_{\text{out}} / L_{\text{in}}。 \quad (11)$$

对 $T$ 进行归一化处理,并使用幂函数建立归一化结果 $T_{\text{norm}}$ 与颜色校正因子 $s$ 间的函数关系,即

$$s = T_{\text{norm}}^\eta = \left( \frac{T - T_{\text{min}}}{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}} \right)^\eta, \quad (12)$$

式中: $T_{\text{max}}$ 和 $T_{\text{min}}$ 分别为 $T$ 的最大值和最小值; $\eta$ 为常数,其值可根据不同的HDR图像进行调整,一般取0.2左右最为合适。将(11)式和(12)式代入(10)式中,化简后得到最终的颜色校正模型表达式为

$$C_{\text{out}} = \left\{ \left( \frac{C_{\text{in}}}{L_{\text{in}}} - 1 \right) \left[ \frac{\lambda L_{\text{out}} - T_{\text{min}} L_{\text{in}}}{L_{\text{in}} (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})} \right]^\eta + 1 \right\} L_{\text{out}}。 \quad (13)$$

从(13)式看到,对亮度信息不作改变,只对颜色和色差进行处理。调节颜色校正因子不仅增强了图像饱和度,而且可以自适应调节映射后图像明暗不同区域的色度信息。与传统方法中对整幅图像使用相同 $s$ 值相比,所提方法的程序运行时间近似相等,而图像处理后效果明显改善。

## 4 实验结果分析

实验中的处理对象分别为目前广泛使用的传统HDR图像,即教堂和桌面。选取Larson、Drago、Reinhard和梯度域色调映射共四种典型算法<sup>[16-18]</sup>与所提的改进算法分别处理HDR图像作对比实验。图2(a)是输入的原图像,对其进行处理后,输出显示的LDR图像如图2(b)~2(f)所示,显示设备型号为ViewSonic VA1932 Series,色调值为85,饱和度值为125,亮度值为195 cd/m<sup>2</sup>。

图2(b)~2(e)分别为四种典型色调映射算法处理HDR图像后显示的结果,发现图中仍然存在过亮或过暗区域,且由于亮度压缩造成的图像色偏更明显,整体观感度不高。图2(f)为通过改进算法

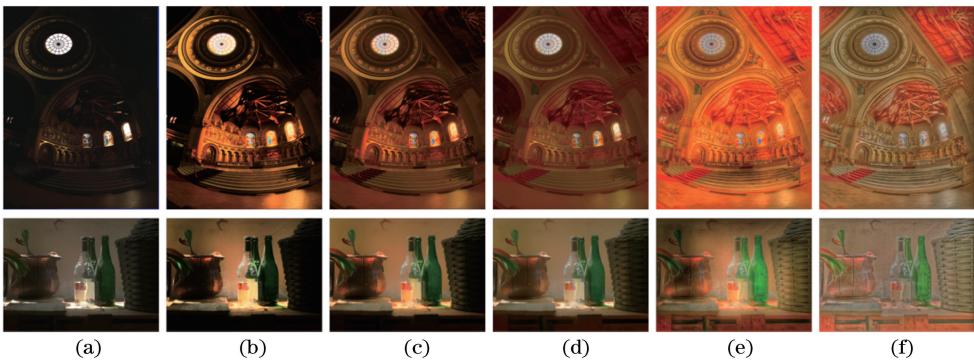


图2 教堂和桌面图像的色调映射对比实验结果。(a)原始图像;(b)Larson算法;(c)Drago算法;(d)Reinhard算法;(e)梯度域算法;(f)本文算法

Fig. 2 Tone mapping comparison experiment results of church and desktop images. (a) Original images; (b) Larson algorithm; (c) Drago algorithm; (d) Reinhard algorithm; (e) gradient domain algorithm; (f) our algorithm



映射后显示的结果,主观评价图像更加清晰,色彩信息显示更加自然,可视化效果更好。

客观上,图像信息熵可表示图像灰度分布的聚集特征,图像信息熵值越大,图像细节信息越多;对比度反映图像中不同颜色之间的差别,对比度值越

大,不同颜色间的反差越大,颜色区分越明显;平均梯度可反映图像中微小细节反差和纹理变换特征,平均梯度值越大,图像越清晰。因此分别从信息熵、对比度和平均梯度三个方面对图像进行分析处理,实验数据如表 1 所示。

表 1 教堂和桌面图像的客观评价实验对比

Table 1 Objective evaluation experiment comparison between church and desktop images

Algorithm	Church			Desktop		
	Information entropy	Contrast	Average gradient	Information entropy	Contrast	Average gradient
Larson	6.413	148.552	8.535	6.843	49.930	3.839
Drago	6.886	113.808	5.942	7.227	50.568	3.534
Reinhard	6.016	60.770	4.134	7.306	41.996	3.358
Gradient domain	7.482	127.842	7.666	7.569	42.274	4.489
Our	<b>8.652</b>	<b>193.764</b>	<b>9.824</b>	<b>8.515</b>	<b>73.436</b>	<b>6.306</b>

通过客观评价表 1 的数据,表格中重点标注每个评价指标对比后的最大值,可知改进算法在图像信息熵、对比度和平均梯度三个指标上均有不同程度的优化,有效提高了图像质量。

为进一步论证改进算法的可靠性和实用性,选用机械行业典型零件,即摆线轮和基座作为实验对象。采用的 HDR 图像采集系统如图 3 所示,主要由光学平台、相机、光源、精密位移台、服务器和被测零件等构成。

在图 3 所示系统中,利用普通工业相机采集低动态范围图像序列后,通过标定相机响应曲线,在辐照域下求解像素值对应的真实场景照度值,最终合成并保存 HDR 图像。原图像如图 4(a)所示,同样地,选取 Larson、Drago、Reinhard 和梯度域色调映射共四种典型算法与所提的改进算法处理原图像后作对比实验,最终输出显示的 LDR 图像如图 4(b)~4(f)所示,显示设备型号为 Samsung LS24C350BL,色调值为 65,饱和度值为 100,亮度值为 125 cd/m<sup>2</sup>。

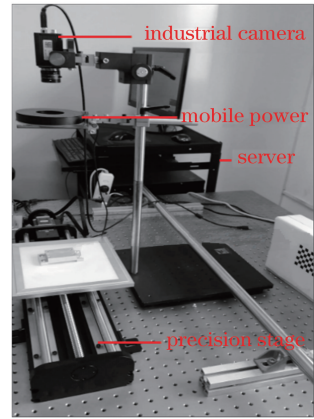


图 3 HDR 图像采集系统

Fig. 3 HDR image acquisition system

HDR 图像后输出显示的 LDR 图像,如图 4(f)所示,表面无明显过亮和过暗区域,且图像表面划痕、锈斑、凹槽和编码等细节信息较之前得到的四幅 LDR 图像[图 4(b)~4(e)]显示更清晰,图像可视化效果更好。更进一步地从图像信息熵、对比度和平均梯度三个方面对结果图像进行分析处理,实验数据如表 2 所示。

根据图 4 显示图像可主观评价改进算法处理

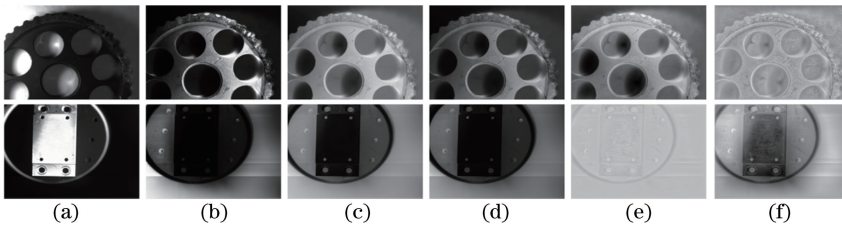


图 4 摆线轮和基座图像的色调映射对比实验结果。(a)原始图像;(b) Larson 算法;(c) Drago 算法;(d) Reinhard 算法;(e)梯度域算法;(f)本文算法

Fig. 4 Tone mapping comparison experiment results of cycloid and pedestal images. (a) Original images; (b) Larson algorithm; (c) Drago algorithm; (d) Reinhard algorithm; (e) gradient domain algorithm; (f) our algorithm

表2 摆线轮和基座图像的客观评价实验对比

Table 2 Objective evaluation experiment comparison between cycloid and pedestal images

Algorithm	Cycloid			Pedestal		
	Information entropy	Contrast	Average gradient	Information entropy	Contrast	Average gradient
Larson	6.818	112.024	4.685	6.833	82.214	4.015
Drago	7.362	39.532	3.357	6.926	79.574	3.537
Reinhard	6.967	39.565	3.091	7.072	79.590	3.637
Gradient domain	7.425	45.654	3.369	7.254	95.637	4.346
Our	<b>7.614</b>	<b>138.953</b>	<b>5.796</b>	<b>7.461</b>	<b>118.365</b>	<b>6.275</b>

表2最后一行数据为通过改进算法处理后图像客观评价结果,可直接地了解到改进算法在图像信息熵、对比度和平均梯度三个指标上均有不同程度的优化,算法处理后的图像包含了更多细节信息,颜色区分度和图像清晰度均得到了有效提高。

## 5 结 论

目前大多数色调映射算法仅对图像的亮度通道进行压缩,同时损坏了图像色度信息,导致颜色信息丢失,图像质量降低。在压缩 HDR 图像动态范围的基础上,以减少因亮度压缩造成的色偏,增强图像色彩感观度为目标,提出一种基于梯度域的自适应局部色调映射改进算法。利用所提算法与 Larson、Drago、Reinhard 和梯度域色调映射共四种典型的色调映射算法所得结果进行对比。结果表明,改进算法在信息熵、对比度和平均梯度方面均有明显提高,色彩信息显示更加自然,更好地弥补了显示设备与自然场景在可视化条件下的差异。不足之处是算法自适应性有待增强,后续拟加入深度学习算法作进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] Sun W, Han C S, Jin X F, et al. HDR imaging method of overcoming full well limitation for push-broom remote sensing cameras [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(4): 944-950.  
孙武, 韩诚山, 晋学飞, 等. 推扫式遥感相机超满阱大动态范围成像[J]. 光学精密工程, 2018, 26(4): 944-950.
- [2] Wu A, Jin X, Du X L, et al. Optimizing and implementing the high dynamic range video algorithm [J]. Journal of Computer Research and Development, 2017, 54(5): 1077-1085.  
吴安, 金西, 杜学亮, 等. HDR 视频算法优化及硬件实现[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(5): 1077-1085.
- [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] An G H, Ahn Y D, Lee S, et al. Perceptual brightness-based inverse tone mapping for high dynamic range imaging [J]. Displays, 2018, 54: 1-8.
- [5] 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.
- [6] Lu B B, Chen J, Zheng Y M, et al. Tone mapping algorithm of iCAM06 based on guide filtering [J]. Optical Technique, 2016, 42(2): 130-135, 140.  
芦碧波, 陈静, 郑艳梅, 等. 基于引导滤波的 iCAM06 色调映射算法[J]. 光学技术, 2016, 42(2): 130-135, 140.
- [7] Liu Z Y. The research of high dynamic range image synthesizing and tone mapping [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016: 36-43.  
刘宗玥. 高动态范围图像的合成与色阶映射的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016: 36-43.
- [8] Liu J, Bai X. Fuzzy Chinese character recognition of license plate based on histogram of oriented gradients and Gaussian pyramid [J]. Journal of Computer Applications, 2016, 36(2): 586-590.  
刘军, 白雪. 基于梯度方向直方图与高斯金字塔的车牌模糊汉字识别方法[J]. 计算机应用, 2016, 36(2): 586-590.
- [9] Yang Z T, Ruan P, Zhai B. Auto-exposure algorithm for scenes with high dynamic range based on image entropy [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(6): 742-746.  
杨作廷, 阮萍, 翟波. 基于图像熵的高动态范围场景的自动曝光算法[J]. 光子学报, 2013, 42(6): 742-

746.

- [10] Zhu W, Liu J, Zhu M Y, et al. Research on improved algorithm of DR image enhancement based on Gauss-Laplacian pyramid[J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2019, 43(1): 10-13.  
朱伟, 刘健, 竺明月, 等. 基于高斯-拉普拉斯金字塔的DR图像增强改进算法研究[J]. 中国医疗器械杂志, 2019, 43(1): 10-13.
- [11] Qu Y F, Liu Z Y, Jiang Y Q, et al. Self-adaptative variable-metric feature point extraction method[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(1): 188-197.  
屈玉福, 刘子悦, 江云秋, 等. 自适应变尺度特征点提取方法[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 188-197.
- [12] Han X Y, Wang Q, Ge N X. Influence of phase modulation latent image on color rendering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(7): 071011.  
韩雪莹, 王琪, 葛乃馨. 相位调制潜像对图像呈色效果的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(7): 071011.
- [13] Ren Z J, Lin S Z, Li D W, et al. Mask R-CNN object detection method based on improved feature pyramid[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(4): 041502.  
任之俊, 简素珍, 李大威, 等. 基于改进特征金字塔的Mask R-CNN目标检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(4): 041502.
- [14] Du Y S, Huang C B. Multi exposure image fusion algorithm based on quality metric coupled with color correction[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(1): 90-98.  
杜永生, 黄传波. 基于质量度量与颜色校正的多曝光图像融合算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(1): 90-98.
- [15] Song N F, Song P, Song J M, et al. Design of apochromatic optical path in polarization cross-correlation demodulation system based on fiber Fabry-Perot sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1206005.  
宋凝芳, 宋鹏, 宋镜明, 等. 光纤法布里-珀罗传感器偏振互相关解调系统的复消色差光路设计[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1206005.
- [16] Pu Y L. Research and implementation on high dynamic range image tone mapping[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2015: 36-43.  
蒲雅蕾. 高动态范围图像色调映射方法的研究与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015: 36-43.
- [17] Chen Q B. Research on high dynamic range image display technology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2014: 21-29.  
陈权斌. 高动态范围图像显示技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014: 21-29.
- [18] Zhang S F, Zhu T. A method of traffic sign detection and recognition based on HDR technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(9): 091006.  
张淑芳, 朱彤. 一种基于HDR技术的交通标志牌检测和识别方法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 091006.