

文章编号 1004-924X(2019)07-1613-08

# 结合引导滤波和非线性二阶特征的色调映射方法

芦碧波, 皇甫珍珍, 李绍森, 郑艳梅\*

(河南理工大学 计算机科学与技术学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:**为提高图像的可视化效果,增强图像的局部细节信息,提出一种结合引导滤波和非线性二阶特征的色调映射方法,首先提取输入图像的亮度信息,利用引导滤波器对亮度图像进行多尺度分解,得到基本层和细节层图像,其次,通过引导滤波方法构造细节层的权重图,对基本层利用 Hessian 矩阵构造一种非线性二阶特征,再通过引导滤波方法构造基本层的权重图,最后,根据权重图对分解后的基本层和细节层图像实现亮度图像的重构,然后恢复亮度图像的色彩信息,获得最终的结果图像。实验结果表明,该方法较为完整的保留源图像的局部细节信息,具有良好的视觉效果。本文将 Hessian 矩阵用于提取基本层图像的高频信息,可以更好地突出图像的边缘信息,丰富图像的细节特征。与对比算法的客观指标相比,该方法的质量分数提高了 11.28%,结构保真度提高了 10.82%,自然相似性提高了 186.46%。

**关键词:**高动态范围图像;色调映射;引导滤波;Hessian 矩阵

**中图分类号:**TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20192707.1613

## Tone mapping method combining guided filtering and nonlinear second-order features

LU Bi-bo, HUANGFU Zhen-zhen, LI Shao-shen, ZHENG Yan-mei\*

(School of Computer Science and Technology, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhengym02@gmail.com

**Abstract:** To improve the visualization effect and enhance the local detail information of an image, a tone-mapping method that combines guided filtering and nonlinear second-order features was proposed. First, the luminance information of an input image was extracted and the luminance image was decomposed by a multi-scale using a guide filter to obtain a base layer and a detail layer image. Second, a weighting map of the detail layer was constructed by the guided filtering method, a nonlinear second-order feature was constructed using a Hessian matrix for the basic layer, and a weight map of the basic layer was constructed using the guided filtering method. Finally, the basic graph was decomposed according to the weight map. The layer and detail layer images implement reconstruction of the luminance image and then restore the color information of the luminance image to obtain the final resulting image. Experimental results show that the method preserves the local detail information of the source image and has a good visual effect. In this study, the Hessian matrix is used to extract the

**收稿日期:**2018-11-28;**修订日期:**2019-01-30.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(No. U1404103);2016年度河南省高等学校重点科研项目资助(No. 16A520053);河南理工大学博士基金资助项目(No. B2016-40)

high-frequency information of the base-layer image, which can more effectively highlight the edge information and enrich the detail features of the image. Compared with the objective index of the comparison algorithm, the quality score of the method, the structural fidelity, and the natural similarity are increased by 11.28%, 10.82%, and 186.46%, respectively.

**Key words:** image processing; high dynamic range image; tone mapping; guide filter

## 1 引言

高动态范围图像 (High Dynamic Range, HDR) 通常用浮点型数据表示颜色分量, 它比低动态范围图像提供更多的动态范围和图像细节, 真实地再现人眼所观察到的自然场景, 在摄影、遥感、医学成像和许多其他相关领域的应用极为广泛<sup>[1]</sup>。但目前的显示设备只有两个数量级, 属于低动态范围设备, 无法完整显示 HDR 图像的丰富内容。为了在常规的显示器上显示 HDR 图像, 需要压缩 HDR 图像动态范围, 即色调映射<sup>[2]</sup> (Tone Mapping, TM)。色调映射通过压缩图像的亮度范围, 将真实场景的光照值映射到显示设备可显示的范围内, 把一幅 HDR 图像转换为 LDR 图像, 同时, 还充分保留图像的高质量信息, 如图像的对比度、饱和度, 以及 HDR 图像的压缩对比度。

目前常用的色调映射算法分为全局和局部色调映射算法, 全局映射算法利用单一的非线性函数实现映射过程, 包括基于全局映射算子的通用框架<sup>[3]</sup>、自适应对数映射算法<sup>[4]</sup>。由于单一的映射函数无法适用于图像的不同区域, 容易造成细节、颜色对比度丢失。因此, 研究者们提出了局部映射算法, 其中, 基于多尺度分解的方法被广泛应用于色调映射算法的研究。近年来许多研究者们将引导滤波器和双边滤波器应用于图像的多尺度分解<sup>[5-7]</sup>, 文献[8]首次将双边滤波器<sup>[9]</sup>引入多尺度分解色调映射算法。由于双边滤波会产生梯度逆转现象, 在色调映射图像中会产生光晕。文献[10]提出将双边滤波器替换为最小加权二乘法的算法。文献[11]基于局部线性模型, 提出了一种边缘保护平滑算子——引导滤波器, 该滤波器保持双边滤波器的优势, 克服它计算慢的缺点。文献[12]采用一种局部边缘保留 (LEP) 滤波器, 该方法将显著的边缘定义为局部较大的梯度, 但滤波器采用线性运算会减小梯度, 容易产生光晕。

文献[13]提出一种改进拉普拉斯金字塔模型的色调映射方法, 该方法能产生高质量的图像效果, 同时也克服光晕问题, 但计算复杂、算法效率较低。文献[14]采用主成分分析 (PCA) 将提取输入图像的亮度信息, 并结合引导滤波增强图像细节, 该方法避免了偏色和光晕现象, 但在重构图像时需要设定颜色分量的权重系数。上述文献中的多尺度分解方法虽然取得一定增强效果, 但无法很好地自适应调整权重系数的问题, 图像的边缘保留、细节突出等问题没有达到理想的效果。

本文基于文献[8]、文献[10]、文献[12]的方法, 提出一种结合引导滤波和非线性二阶特征的色调映射方法, 使用引导滤波对输入图像进行多尺度分解后得到不同尺度的基本层和细节层图像; 然后通过引导滤波计算细节层的权重图。为充分提取基本层中的大尺度边缘信息, 与以往方法的不同之处是对基本层采用结合 Hessian 矩阵和双边滤波器的方法提取基本层图像的边缘特征, 以便构造基本层权重图, 最后, 将基本层和细节层重构得到色调映射之后的图像。实验结果表明, 该算法在局部细节处理上具有一定优势。

## 2 多尺度分解色调映射方法

### 2.1 引导滤波

引导滤波<sup>[11]</sup>具有边缘保持特性, 滤波器由引导图像  $Z$ 、输入图像  $p$  和输出图像  $q$  组成, 其核心思想是: 假设引导图像和输出图像之间是一个线性局部模型, 在以像素  $k$  为中心, 半径为  $r$  的方形窗口  $\omega_k$  中,  $q$  与  $Z$  之间的线性关系如公式(1)所示:

$$q_i = a_k Z_i + b_k, \forall i \in \omega_k, \quad (1)$$

其中: 引导图像  $Z$  和输入图像  $p$  是预先给定的, 窗口  $\omega_k$  的中心是像素  $k$ , 大小为  $r \times r$ ,  $(a_k, b_k)$  是  $\omega_k$  中的线性系数。

引导滤波的关键是计算出线性系数  $(a_k, b_k)$  的最优解。假定输出图像  $q$  为输入图像  $p$  去除噪

声或纹理后的图像,即  $q_i = p_i - n_i$ 。为尽可能减小  $p$  与  $q$  之间的差距,通过公式(1)最小化代价函数:

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} ((a_k Z_i + b_k - p_i)^2 - \epsilon a_k^2). \quad (2)$$

即可得到  $(a_k, b_k)$  的最优解。其中  $E$  表示代价函数,  $\epsilon$  是正则化参数  $\epsilon > 0$ , 为避免出现过大的  $a_k$ 。

利用线性回归分析求解公式(2),可以得到:

$$a_k = \frac{1}{|\omega|} \frac{\sum_{i \in \omega_k} Z_i p_i - \mu_k \bar{p}_k}{\sigma_k^2 + \epsilon}, \quad (3)$$

$$b_k = \bar{p}_k - a_k \mu_k, \quad (4)$$

其中:  $\mu_k$  和  $\sigma_k^2$  分别为引导图像  $Z$  在局部窗口  $\omega_k$  中的均值和方差,  $|\omega|$  是窗口  $\omega_k$  内像素的个数,  $\bar{p}_k = \frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} p_i$  是  $p$  在窗口  $\omega_k$  中的均值。

由于像素  $i$  包含在多个窗口内,因此  $q_i$  的取值不唯一,需要对  $a_k$  和  $b_k$  取均值得到最终的输出图像  $q_i$ ,如公式(5)所示:

$$q_i = \frac{i}{|\omega|} \sum_{k: i \in \omega_k} (a_k I_i + b_k) = \bar{a}_i I_i + \bar{b}_i, \quad (5)$$

其中:  $\bar{a}_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_i} a_k, \bar{b}_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_i} b_k$ 。

### 2.2 基于引导滤波的多尺度分解

为更好地保留输出图像的边缘信息,对于一

幅给定的输入图像  $L$ ,利用引导滤波对其进行  $N$  级分解,通过公式(6)得到基本层图像  $B_n$ ,由公式(7)计算出  $N$  个细节层图像  $D_n$ :

$$B_n = GF(B_{n-1}, B_{n-1}, r, \epsilon^2), n = 1, 2, \dots, N, \quad (6)$$

$$D_n = B_n - B_{n-1}, \quad (7)$$

其中:  $GF$  表示引导滤波器,  $r$  表示在每一分解级下滤波器窗口的大小。  $B_0 = L, B_n$  表示输入图像  $L$  的第  $n$  层的基本层图像,并将其作为下一级分解中引导滤波器的输入图和引导图。

## 3 结合引导滤波和非线性二阶特征的色调映射方法

### 3.1 算法步骤

本文算法的流程图如图 1 所示,具体步骤如下:(1)图像的亮度处理,提取输入的 HDR 图像的亮度信息;(2)对亮度图像采用 2.2 节中的式(6)、式(7)实现  $N$  级多尺度分解,得到  $N$  个基本层和  $N$  个细节层图像;(3)对细节层采用引导滤波方法构造权重图;(4)采用基于 Hessian 矩阵的非线性二阶特征提取方法预处理基本层,再通过引导滤波方法构造权重图;(5)重构亮度图像,通过数学运算处理分解后的基本层和细节层对应的权重图;(6)对重构后的亮度图像恢复色彩信息,得到结果图像。

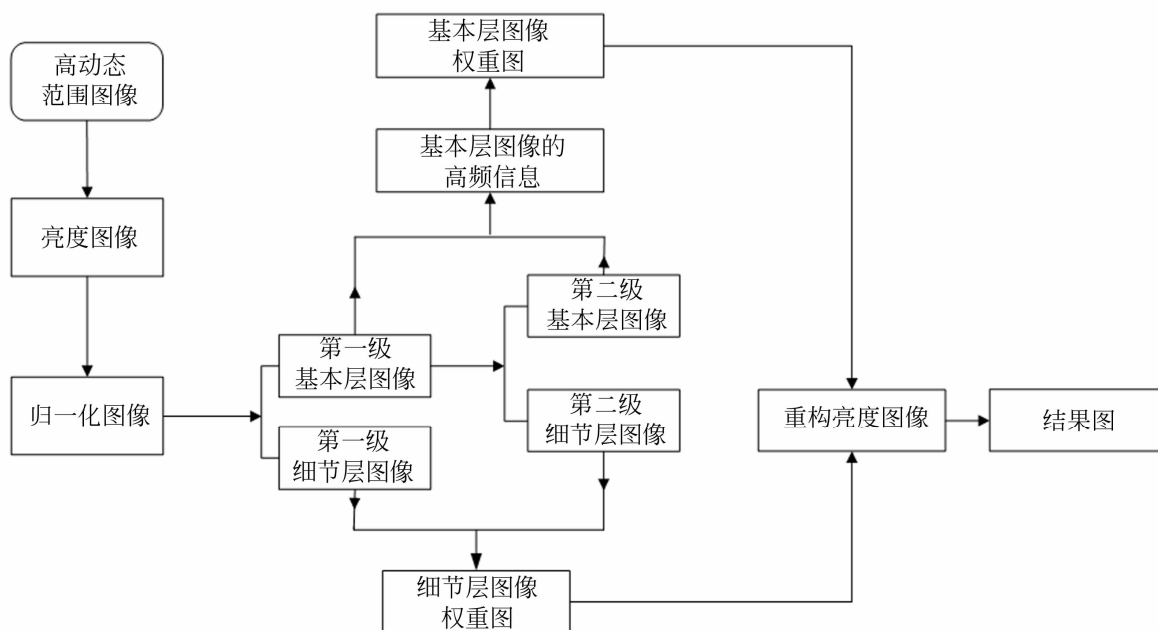


图 1 本文算法流程图

Fig. 1 Flow chart of algorithm in this paper

### 3.2 亮度处理

将输入的 HDR 图像 RGB 编码转换为 CIE 三刺激值(XYZ),再将输入数据从 RGB 空间对应到 XYZ 空间,转换后的 Y 通道信息表示 HDR 图像的亮度信息<sup>[15]</sup>,转换公式如式(8)所示:

$$Y = 0.213R_{in} + 0.715G_{in} + 0.072B_{in}, \quad (8)$$

其中  $R_{in}, G_{in}, B_{in}$  分别表示 HDR 图像的红、绿、蓝 3 个颜色通道信息。

由于人眼视觉对亮度的感知变化程度接近于对数变换曲线,因此,将 Y 通道的颜色信息转换到对数域,计算公式如式(9)所示:

$$L = \ln(Y + 10^{-4}). \quad (9)$$

最后,将灰度图像  $L$  的像素值进行归一化处理,如公式(10)所示:

$$I = \frac{L - L_{\min}}{L_{\max} - L_{\min}}, \quad (10)$$

其中:  $I$  表示压缩后的亮度图像,并将  $I$  作为引导滤波多尺度分解的输入图像,  $L_{\max}$  和  $L_{\min}$  分别表示图像  $L$  中的最大和最小亮度值。

### 3.3 细节层处理

按照引导滤波的多尺度分解方法得到细节层图像  $D_n$ 。为有效提取细节层图像的高频信息,首先使用加权均值滤波器处理每级细节层  $D_n$ ,构造能量显著图,如公式(11)所示:

$$R_n^D = |D_n| * AVE, n = 1, 2, \dots, N, \quad (11)$$

其中: AVE 是一个  $3 \times 3$  大小的均值滤波器,  $R_n^D$  是第  $n$  幅细节层图像的高频分量。

利用显著图构造加权映射,得到细节层图像的权重图,如公式(12)所示:

$$P_n^D(i, j) = \begin{cases} 1, & R_n^D(i, j) = \max(R_1^D(i, j), R_2^D(i, j), \dots, R_n^D(i, j)) \\ 0, & otherwise \end{cases}, \quad (12)$$

其中  $P_n^D(i, j)$  表示第  $n$  级分解下图像中第  $(i, j)$  个像素的能量值。

本文采用一种引导滤波方法进一步修正权重图,引导滤波的输入图像为  $P_n^D (n=1, 2, \dots, N)$ , 细节层图像  $D_n$  为引导图像,根据引导滤波的定义,细节层的权重图由公式(13)可得:

$$W_n^D = GF(D_n, P_n^D, r_D, \epsilon_D^2), n = 1, 2, \dots, N. \quad (13)$$

最后,通过公式(13),计算出每个细节层图像的加权映射权重,并且将  $N$  个加权映射权重进行

归一化处理,得到细节层图像的权重图,如公式(14)所示:

$$\omega_n^D = \frac{W_n^D}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (W_n^D)^2}}. \quad (14)$$

### 3.4 基本层处理

基本层包含图像的低频信息,主要体现为图像的边缘轮廓部分。为了提取其中的低频信息,常用的策略是使用二阶的拉普拉斯算子获得基本层中的特征<sup>[16]</sup>。对一幅二维图像  $f(x, y)$ ,拉普拉斯算子定义为两个二阶导数的和:  $\Delta f = f_{xx} + f_{yy}$ 。使用拉普拉斯算子提取特征在准确性方面存在两个问题:(1)与一阶导数不同,二阶导数对噪声比较敏感,直接计算导致特征提取不够准确,通常需要先滤波再计算二阶导数;(2)当  $f_{xx}$  和  $f_{yy}$  符号相反时,二者做和会相互抵消,也会影响特征提取的准确性。为解决上述问题,本文从 Hessian 矩阵出发,构造一种新的特征提取方法。

对于一幅二维图像,通过求解图像的二阶偏导数,构造每一个像素  $(x, y)$  对应 Hessian 矩阵:

$$\mathbf{H}(f) = \begin{bmatrix} f_{xx} & f_{xy} \\ f_{yx} & f_{yy} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

其中:  $f_{xx}, f_{yy}$  为图像的每个像素点在 X 方向和 Y 方向的二阶偏导数,  $f_{xy}, f_{yx}$  为图像在 XY 方向和 YX 方向的二阶偏导数,对于二阶连续可微函数有  $f_{xy} = f_{yx}$ 。Hessian 矩阵的迹(对角线元素之和)即为经典的拉普拉斯算子。Hessian 矩阵描述了图像中各个方向灰度梯度的变化,较大特征值所对应特征向量的方向垂直于图像特征方向,较小特征值对应的特征向量平行于图像特征方向,因此, Hessian 矩阵可以用于提取图像的特征。

由于图像的噪声干扰,对 Hessian 矩阵检测图像特征的准确性有一定影响。为保留图像的特征信息,同时平滑图像,本文将双边滤波<sup>[9]</sup>应用于 Hessian 矩阵进行处理,对图像二阶导数  $f_{xx}, f_{yy}, f_{xy}, f_{yx}$  经双边滤波处理后结果记为  $f'_{xx}, f'_{xy}, f'_{yx}, f'_{yy}$ ,构造一个非线性滤波之后的 Hessian 矩阵,具体形式如下:

$$\mathbf{H}'(f') = \begin{bmatrix} f'_{xx} & f'_{xy} \\ f'_{yx} & f'_{yy} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Hessian 矩阵的特征值来检测图像边缘,图像边缘的强度和方向即可由 Hessian 矩阵的特征

值和特征向量表示。Hessian 矩阵的两个特征值  $\lambda_1, \lambda_2$  可由式(17)和式(18)计算得出:

$$\lambda_1 = \frac{1}{2} [f'_{xx} + f'_{yy} + \sqrt{(f'_{xx} - f'_{yy})^2 + 4f'^2_{xy}}], \quad (17)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{2} [f'_{xx} + f'_{yy} - \sqrt{(f'_{xx} - f'_{yy})^2 + 4f'^2_{xy}}]. \quad (18)$$

为了避免因两个特征值符号不同引起的相互抵消现象、削弱局部特征描述能力,本文使用如下公式描述图像的局部结构,得到基本层的高频图像  $\Delta_H$ :

$$\Delta_H(f') = \sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}. \quad (19)$$

然后,运用公式(11),公式(12)对高频图像  $\Delta_H$  进行处理,获得基本层的权重图  $P_n^B$  ( $n=1, 2, \dots, N$ ),其次,将基本层  $B_n$  作为引导图像,采用一种引导滤波方法获取基本层的权重图,如公式(20)所示:

$$W_n^B = GF(B_n^{N-1}, P_n^B, r_B, \epsilon_B^2), n = 1, 2, \dots, N. \quad (20)$$

最后,将得到的  $N$  个加权映射权重进行归一化处理,计算出亮度重建后基本层图像的权重系数,如公式(21)所示:

$$\omega_n^B = \frac{W_n^B}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (W_n^B)^2}}. \quad (21)$$

### 3.5 度重建与色彩恢复

由上述方法分别得到基本层和细节层的权重图  $\omega_n^B, \omega_n^D$ , 重构后的基本层和细节层图像由式(22),式(23)表示为:

$$\overline{B}_n = \sum_{n=1}^3 \omega_n^B B_n, \quad (22)$$

$$\overline{D}_n = \sum_{n=1}^3 \omega_n^D D_n. \quad (23)$$

通过基本层  $\overline{B}_n$  和细节层  $\overline{D}_n$  相加得到重构后的亮度图像  $L_{out}$ , 如公式(24)所示:

$$L_{out} = \overline{B}_n + \overline{D}_n. \quad (24)$$

由公式(24)计算出压缩后的亮度图像,根据公式(25)恢复亮度图像的色彩信息<sup>[17]</sup>:

$$U = \begin{bmatrix} R_{out} \\ G_{out} \\ B_{out} \end{bmatrix} = L_{out} \left( \frac{1}{Y} \begin{bmatrix} R_{in} \\ G_{in} \\ B_{in} \end{bmatrix} \right)^\lambda, \quad (25)$$

其中:  $U$  表示色彩恢复后的结果图像,  $\lambda$  为饱和度

系数,  $\lambda \in (0, 1]$ , 本文选取  $\lambda = 0.6$ 。  $L_{out}, R_{out}, G_{out}, B_{out}$  分别表示重构后的图像的亮度信息和 RGB 3 个通道颜色信息。

## 4 实验结果与分析

为充分验证算法的有效性,针对大量 HDR 图像进行实验,引导滤波器相关参数为:  $N=2, r=4, \epsilon=0.1^2$ 。由于篇幅有限,选取 3 组 HDR 图像为例,从主观和客观评价两个方面,将本文算法与文献[8]文献[10]文献[12]进行对比分析。

### 4.1 主观评价

第 1 组实验结果图如图 2 所示。图 2(a)中较好地保留了窗外的背景信息,但亮度较低,丢失了大量的细节信息;图 2(b)的对比度和清晰度较低,且玻璃窗外的背景信息不丰富;与图 2(b)相比,图 2(c)整体亮度适中,但图 2(c)没有很好地体现出细节特征,瓷片上的花纹形状较为模糊。图 2(d)整体亮度适中,颜色饱和度更符合人眼视觉观察,有效地保留原图像的边缘和细节部分,例如图 2(d)中窗外的背景信息丰富,可以清晰的看到窗外的景色,室内花坛瓷片上的纹路较为清晰。

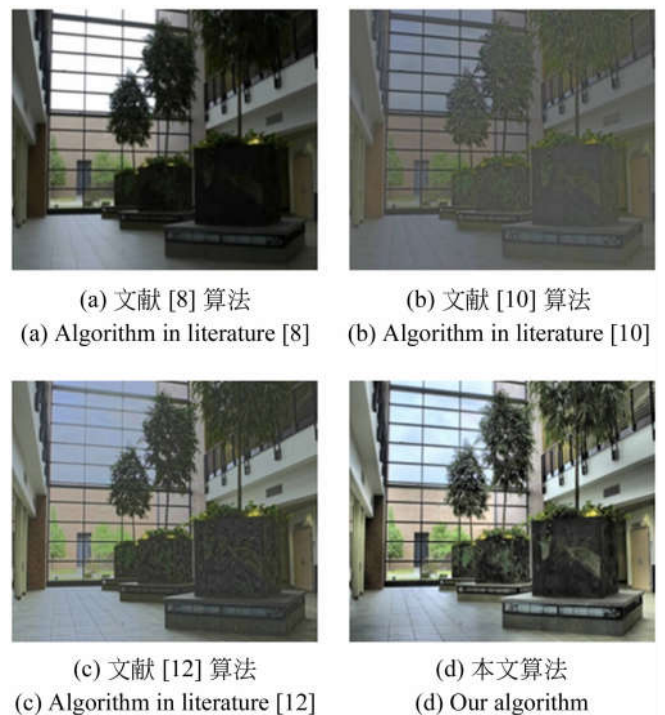


图 2 第 1 组实验结果图

Fig. 2 The first group of experimental results

第 2 组实验结果图如图 3 所示。图 3(a)中远处山脉的细节清晰,但整体明暗反差大,左上角

部分的亮度过高,而左下角部分的亮度过低;图 3(b)画面的清晰度一般,远处景色的细节增强不明显,颜色图像的对比度较低;图 3(c)在细节处理方面优于图 3(b),岩石和小草的细节部分得到增强,但右上角的背景部分没有突出山脉的边缘轮廓;图 3(d)的画面层次感良好,色彩饱和度和对比度适中,例如可以清晰地看到岩石上的颗粒物,远处的云雾、山峰,更真实地再现景色的层次。

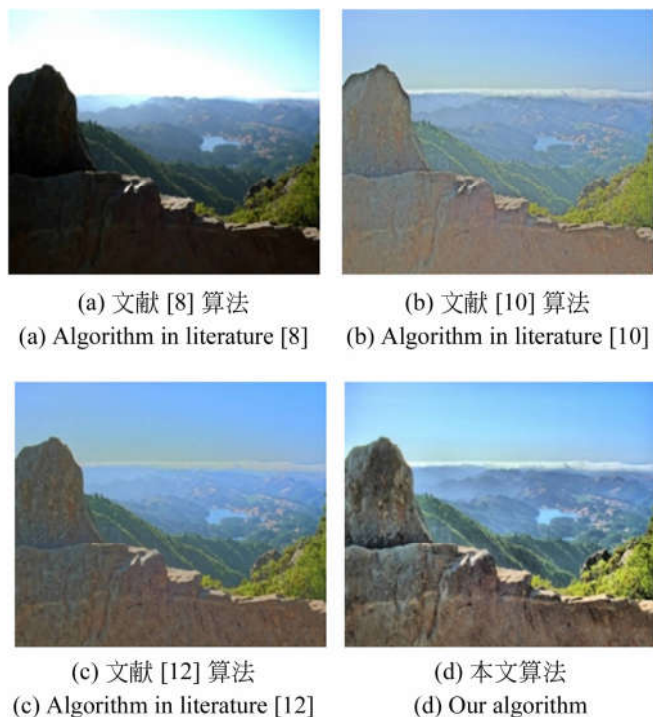


图 3 第 2 组实验结果图

Fig. 3 The second group of experimental results

第 3 组实验结果如图 4 所示。图 4(a)油画的细节部分得到增强,但整体亮度较低,背景墙面的颜色偏暗;图 4(b)中油画图像的线条较为清晰,但色彩恢复的亮度偏暗,且没有突出背景墙面的线条特征;与图 4(a)、图 4(b)相比,图 4(c)的整体色彩更鲜明,但可以发现油画部分的亮度较高,使得图像内的线条比较模糊;图 4(d)的总体视觉效果更佳,图像的清晰度,立体感更明显,颜色对比更鲜明,通过观察发现,可以清晰的看到右下角墙砖边缘的白边,油画左边白色标牌的字体也得到增强。

## 4.2 客观评价

为更全面地评价本文算法的增强效果,还需要客观数据的支持,因此,本文使用 Yeganeh<sup>[18]</sup>等人提出的色调映射质量指标(TMQI)客观评价方法。TMQI 方法是基于结构保真度和统计自然



图 4 第 3 组实验结果图

Fig. 4 The third group of experimental results

性提出的质量评估模型。文献[18]TMQI 指标的计算公式为:

$$Q = aS^\alpha + (1 - a)N^\beta, \quad (26)$$

其中: $S$ 、 $N$  和  $Q$  分别表示结构保真度,图像自然度和质量分数, $0 \leq a \leq 1$ 。

表 1 不同算法的客观评价结果

Tab. 1 Objective evaluation results of different algorithms

图像	算法	质量分数	结构保真度	自然相似性
第 1 组	文献[8]	0.845 2	0.884 1	0.245 8
	文献[10]	0.813 9	0.822 1	0.180 4
	文献[12]	0.923 3	0.871 9	0.703 1
	本文方法	0.972 6	0.908 5	0.969 7
第 2 组	文献[8]	0.7879	0.731	0.182 8
	文献[10]	0.769 4	0.714 6	0.127 4
	文献[12]	0.925 6	0.928 8	0.623 5
	本文方法	0.930 4	0.941 7	0.632 5
第 3 组	文献[8]	0.829 4	0.773 8	0.318 7
	文献[10]	0.821 3	0.774 1	0.277 9
	文献[12]	0.873 3	0.770 2	0.569 3
	本文方法	0.902 7	0.818 8	0.664 4

根据表 1 的客观数据分析比较,本文方法的

质量分数提高 11.28%, 结构保真度提高 10.82%, 自然相似性提高 186.46%。3 组图像中本文方法的质量分数和结构相似性的分值均高于其他 3 种对比算法, 第 1 组图像和第 3 组图像中, 本文方法的自然相似性分值均高于其他 3 个对比算法, 第 2 组图像中, 本文方法和文献[12]算法的自然相似性分值相差 0.01。从主观和客观角度来看, 本文算法都取得较好的实验结果, 由此可见, 本文方法的主客观评价一致。

## 5 结 论

利用引导滤波器和 Hessian 矩阵的特性, 提

出一种结合引导滤波和非线性二阶特征的色调映射方法。为了更好的提取边缘特征, 本文采用非线性滤波处理二阶特征矩阵, 使用矩阵特征值构造权重图。此外, 在重构亮度图像时, 可以自适应调整基本层和细节层在重构时的权重系数, 提高了算法的普适性。多组实验对比结果表明, 该方法不仅能提高图像的视觉效果, 而且在质量分数、结构保真度、自然相似性等客观指标方面分别提高了 11.28%, 10.82% 和 186.46%。在实践中发现, 算法可能会出现轻微的色彩伪影现象。在今后的研究中, 将关注如何设计更好的分层算法、如何提高色彩复原效果等问题。

### 参考文献:

- [1] BARAI N R, KYAN M, ANDROUTSOS D. Human visual system inspired saliency guided edge preserving tone-mapping for high dynamic range imaging[C]//2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), September 17-20, 2017. Beijing. New York, USA: IEEE, 2017.
- [2] TUMBLIN J, RUSHMEIER H. Tone reproduction for realistic images[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1993, 13(6): 42-48.
- [3] ARTUSI A, BITTNER J, , *et al.*. Delivering interactivity to complex tone mapping operators[C]//*Proceedings of the 14th Eurographics workshop on Rendering*, 2003: 38-44.
- [4] DRAGO F, MYZKOWSKI K, ANNEN T, *et al.*. Adaptive logarithmic mapping for displaying high contrast scenes[J]. *Computer Graphics Forum*, 2003, 22(3): 419-426.
- [5] 武昆, 韩广良, 杨航, 等. 多尺度引导滤波及其在去雾中的应用[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(8): 2182-2194.
- WU K, HAN G L, YANG H, *et al.*. Multi-scale guided filter and its application in image dehazing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(8): 2182-2194. (in Chinese)
- [6] 刘先红, 陈志斌, 秦梦泽. 结合引导滤波和卷积稀疏表示的红外与可见光图像融合[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(5): 1242-1253.
- LIU X H, CHEN Z B, QIN M Z. Infrared and visible image fusion using guided filter and convolutional sparse representation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(5): 1242-1253. (in Chinese)
- [7] 贾宏光, 吴泽鹏, 朱明超, 等. 基于广义线性运算和双边滤波的红外图像增强[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(12): 3272-3282.
- JIA H G, WU Z P, ZHU M C, *et al.*. Infrared image enhancement based on generalized linear operation and bilateral filter[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12): 3272-3282. (in Chinese)
- [8] 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.
- [9] TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images [C]//*Sixth International Conference on Computer Vision*, 1998:836-846.
- [10] FARBMAN Z, FATTAL R, LISCHINSKI D, *et al.*. Edge-preserving decompositions for multi-scale tone and detail manipulation [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 15-19.
- [11] HE K M, SUN J, TANG X O. Guided image filtering[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [12] GU B, LI W J, ZHU M Y, *et al.*. Local edge-preserving multiscale decomposition for high dynamic range image tone mapping [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(1): 70-79.
- [13] 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)
- [14] 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 S, 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)
- [15] KUANG J T, 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.
- [16] 杨航, 吴笑天, 贺柏根, 等. 基于多尺度引导滤波的图像融合方法[J]. *光电子·激光*, 2015, 26(1): 170-176.  
YANG H, WU X T, HE B G, *et al.*. Image fusion based on multiscale guided filters[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2015, 26(1): 170-176. (in Chinese)
- [17] MANTIUK R, MANTIUK R, TOMASZEWSKA A, *et al.*. Color correction for tone mapping[J]. *Computer Graphics Forum*, 2009, 28(2): 193-202.
- [18] 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:



芦碧波(1978—),男,河南焦作人,博士,副教授,2002年,2005年,2008年于吉林大学分别获得学士、硕士、博士学位,现为河南理工大学副教授,主要从事数字图像处理方面的研究。E-mail:lubibojz@gmail.com



皇甫珍珍(1993—),女,河南焦作人,硕士研究生,2016年于河南理工大学获得学士学位,主要从事色调映射算法研究。E-mail:hpzz1890@126.com

#### 通讯作者:



郑艳梅(1984—),女,河南开封人,博士,讲师,2006年于兰州大学获得学士学位,2012年于中国科学院数学与系统科学研究院获得博士学位,主要从事高动态范围图像处理,色调映射图像的质量评估方面的研究。E-mail:zhengym02@gmail.com