

中图法分类号: TP301.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2018)01-0009-09

论文引用格式: Gao R X, Li X Y. Specular highlight removal using improved bilateral filtering[J]. Journal of Image and Graphics, 2018, 23(1): 0009-0017. [高如新, 李雪颖. 双边滤波的改进高光去除[J]. 中国图象图形学报, 2018, 23(1): 0009-0017.] [DOI:10.11834/jig.170272]

双边滤波的改进高光去除

高如新, 李雪颖

河南理工大学电气工程与自动化学院, 焦作 454000

摘要: **目的** 由于非均匀光照条件下, 物体表面通常出现块状的强反射区域, 传统的去高光方法在还原图像时容易造成颜色失真或者边缘的丢失。针对这些缺点, 提出一种改进的基于双边滤波的去高光方法。**方法** 首先通过双色反射模型变换得到镜面反射分量与最大漫反射色度之间的转换关系, 然后利用阈值将图像的像素点分为两类, 将仅含漫反射分量的像素点与含有镜面反射分量的像素点分离开来, 对两类像素点的最大漫反射色度分别做估计, 接着以估计的最大漫反射色度的相似度作为双边滤波器的值域, 同时以图像的最大色度图作为双边滤波的引导图保边去噪, 进而达到去除镜面反射分量的目的。**结果** 以经典的高光图像作为处理对象, 对含有镜面反射和仅含漫反射的像素点分别做最大漫反射色度估计, 再以该估计图作为双边滤波的引导图, 不仅能去除镜面反射分量还能有效的保留图像的边缘信息, 最大程度的还原图像细节颜色, 并且解决了原始算法处理结果中 R、G、B 三通道相似的像素点所出现的颜色退化问题。用改进的双边滤波去高光算法对 50 幅含高光的图像做处理, 并将该算法与 Yang 方法和 Shen 方法分别作对比, 结果图的峰值信噪比 (PSNR) 也分别平均提高 4.17% 和 8.40%, 所提算法的处理效果更符合人眼视觉, 图像质量更好。**结论** 实验结果表明针对含镜面反射的图像, 本文方法能够更有效去除图像的多区域局部高光, 完成对图像的复原, 可为室内外光照不均匀情况下所采集图像的复原提供有效理论基础。

关键词: 双色反射模型; 镜面反射分量; 漫反射色度估计; 值域; 双边滤波

Specular highlight removal using improved bilateral filtering

Gao Ruxin, Li Xueying

School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China

Abstract: **Objective** Various inhomogeneous materials, including plastic, wood, ceramic, and other opaque nonconductors with uniform pigmentation, usually present some blocks of reflection areas due to nonuniform illumination conditions. However, these blocks of reflection areas often exert some negative effects on visual quality and degrade the performances of vision algorithms, such as color constancy, image segmentation, visual tracking, and object detection. For simplification, specular components are usually disregarded as outliers by methods based on diffuse component analysis. When we use traditional methods to remove the highlight of a simple image, they cannot completely separate the specular components of the image. For example, the colors and edges of images were always missed, parts of the result image exhibited color distortion.

收稿日期: 2017-06-23; 修回日期: 2017-09-19; 预印本日期: 2017-09-26

基金项目: 河南省自然科学基金项目 (162300410126); 河南理工大学博士基金项目 (B2010-17); 河南省科技攻关项目 (162102210228); 河南省创新型科技人才队伍建设工程 (CXTD2016054)

第一作者简介: 高如新 (1978—), 男, 副教授, 2009 年于华中科技大学获模式识别与智能系统专业工学博士学位, 主要研究方向为机器视觉、模式识别及其应用等。E-mail: gaoruxin@hpu.edu.cn

通信作者: 李雪颖, 研究生, E-mail: lxytk@126.com

Supported by: Natural Science Foundation of Henan Province, China (162300410126)

tion, caused artifacts for noisy and highly textured surfaces, the method was inapplicable to natural images. In view of these shortcomings, an improved method of removing highlights based on bilateral filtering is proposed. **Method** To solve the shortcomings of the traditional methods, we raise an improved bilateral filtering method. The method comprises three stages. First, we can determine the relationship between the diffuse component and the maximum diffuse chromaticity of pixels in an image according to the dichromatic reflection model and by assuming that illumination chromaticity can be measured (with a white reference). If we want to separate the diffuse component from an image, then we must estimate the maximum diffuse chromaticity value for every pixel. An estimation of the maximum diffuse chromaticity, which is the key to separating specular and diffuse components, is thus necessary. Second, we use an appropriate threshold to divide the input image into two categories. The first class of pixels contains only a diffuse component, whereas the second class of pixels includes specular and diffuse components. We then implement our proposed method (two different algorithms) to estimate the maximum diffuse chromaticity of the two categories. We adopt a compensation function in the second class of pixels. This compensation function can exert a positive effect on pixels with similar RGB channels, as well as avoid the negative effect of the specular component of the second class of pixels. Third, we use the approximated maximum diffuse chromaticity in the second step to guide the smoothing and iteratively apply joint low-pass filter (bilateral filter) to update the maximum diffuse chromaticity estimation. This stage is based on a key observation that the maximum diffuse chromaticity in local patches in colorful images generally changes smoothly. We update the maximum diffuse chromaticity after every iteration. The maximum diffuse chromaticity values can be gradually propagated from diffuse pixels to specular pixels. Our algorithm does not stop until an insignificant difference (set at 0.02 in our experiments) exists between the updated and filtered maximum diffuse chromaticity values. In practice, our method generally converges after two to four iterations. As a result, our method can remove highlights more efficiently than previous methods. **Result** In this study, we use classic images with highlights as processing objects and yield a new maximum diffuse chromaticity estimation of pixels that contain specular and diffuse reflections. We also yield a new maximum diffuse chromaticity estimation of remaining pixels that contain only diffuse reflection. With the maximum diffuse chromaticity image as a bilateral filtering guide map, we can remove the specular reflection component, as well as effectively preserve the image edge information. We remove the specular component of the pictures, and the color degradation of pixels with similar values in RGB channels is reduced. In the experiment, the proposed algorithm is compared with the methods of Yang et al. and Shen et al. We compare the peak-signal-to-noise ratios of 50 pictures and determine that our result images increase by 4.17% and 8.40% in average. The processing effect of the proposed algorithm is in line with the human eye vision. The experimental results on synthetic and real images show that our method performs better than the state-of-the-art methods in separating specular reflection. **Conclusion** We propose a new estimation of maximum diffuse chromaticity in the highlight removal field. The use of a low-pass filter guarantees the estimated diffuse reflections. With a single color image, the highlight removal problem is formulated as an iterative bilateral filtering process that normally converges in two to four iterations. The experimental evaluation indicates that the proposed method can effectively remove the specular reflection components from images. We also provide an effective theoretical basis for indoor and outdoor images with specular reflection. Our future works involve solving the limitations of our method and practically applying it.

Key words: dichromatic reflection model; specular reflection component; the maximum diffuse chromaticity estimation; range; bilateral filtering

0 引言

双色反射模型^[1]认为图像是由漫反射分量与镜面反射分量组成。在非均匀光照条件下,物体表面通常会出现块状的强反射区域,所以高光是生活中常见的现象。高光的出现会降低物体的纹理特征

和颜色特征,进而使图像质量下降。很多计算机视觉应用(如人脸识别^[2]、图像分割^[3]、图像修复^[4]、特征匹配^[5])都是假设物体在均匀光照条件下采集图像,然而这样不考虑实际情况而忽略镜面反射的存在,将会影响这些算法的精确度。镜面反射分量可以估计光照颜色^[6],所以漫反射分量和镜面反射分量的分离是图像处理和机器视觉研究中的重要

问题。

现有的彩色图像去高光方法大致分为两种:一种是基于多幅图像,利用多视角合成策略^[7]去除镜面反射分量;另一种是基于单幅图像,利用空域分析或颜色空间分析等方法去除镜面反射分量。然而实际情况常常难以获得多幅图像,所以对单幅图像的高光去除显得尤为重要。Tan 等人^[8]把像素点投影到最大强度色度空间发现同种颜色只含漫反射的像素点成竖直直线,然而含有镜面反射的却呈倒弧形,于是他提出了 SF (Specular-free) 图,并用 specular-to-diffuse 机制成功地分离了漫反射分量和镜面反射分量。但是在分离的过程中像素点的色度发生了变化,导致图像的颜色失真。Shen 等人^[9]在 Tan 的基础上提出改进的 SF 图 (MSF),并首先将图像像素分类成簇,然后通过使用最大值和范围值之间的强度比来计算图像像素点的镜面反射含量,这种方法会造成图像纹理特征的损失,因为具有相同强度比的像素可能具有不同的漫反射色度。Ren 等人^[10]对双色反射模型做了简单的变换之后将 RGB 模型转换为球形坐标系,进而利用 Shen 等人^[9]的像素点聚类思想进行镜面反射去除。Yang 等人^[11]直接应用低通滤波器,利用以最大漫反射色度估计值作为值域的双边滤波对图像的最大色度图进行处

理,以此将像素点的最大漫反射色度传递给含有镜面反射分量的像素点。Yang 等人^[12]观察到含镜面反射的像素点具有比仅含漫反射的像素点更低的饱和度和。他们通过将仅含漫反射的像素点的饱和度传递给含镜面反射的像素点,由于缺乏全局信息,该方法会降低图像的纹理特征,有时不能完全去除镜面反射。Kim 等人^[13]提出了一个 MAP 优化框架来分离单个图像的漫反射。他们的方法对于自然图像是鲁棒的,但它处理复杂纹理的图案时会造成伪影。

本文针对基于双边滤波去高光结果中出现三通相似像素点出现褪色和纹理部分缺失的现象做了相关的改进,提出了一种新的最大漫反射最大色度估计,提高了图像的纹理特征,从而获得了清晰自然的无高光图像,且算法简单,易于实现。通过大量的实验结果表明,该算法具有较高的鲁棒性,能够有效地还原图像的边缘与颜色信息。

1 双色反射模型

非均匀光照下高光的形成受两方面因素影响:一方面是由物体表面反射率决定,另一方面是由光照强度决定。被广泛用来描述高光图像的双色反射模型^[1]为

$$\begin{bmatrix} I_r(x) \\ I_g(x) \\ I_b(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_d(x) \int_{\Omega} S(\lambda, x) E(\lambda) q_r(\lambda) d\lambda + m_s(x) \int_{\Omega} E(\lambda) q_r(\lambda) d\lambda \\ m_d(x) \int_{\Omega} S(\lambda, x) E(\lambda) q_g(\lambda) d\lambda + m_s(x) \int_{\Omega} E(\lambda) q_g(\lambda) d\lambda \\ m_d(x) \int_{\Omega} S(\lambda, x) E(\lambda) q_b(\lambda) d\lambda + m_s(x) \int_{\Omega} E(\lambda) q_b(\lambda) d\lambda \end{bmatrix} \quad (1)$$

即

$$\begin{aligned} I(x) = & m_d(x) \int_{\Omega} S(\lambda, x) E(\lambda) \mathbf{q}(\lambda) d\lambda + \\ & m_s(x) \int_{\Omega} E(\lambda) \mathbf{q}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (2)$$

双色反射模型表达式中 λ 为光谱波长, Ω 为可见光谱。 $I(x) = [I_r, I_g, I_b]^T$ 是图像像素点的颜色向量, $x = (x, y)$ 是像素点的 2 维图像坐标, m_d 和 m_s 分别是漫反射和镜面反射系数,他们的值取决于像素点的空间位置, $\mathbf{q} = [q_r, q_g, q_b]^T$ 表示传感器对 3 个通道颜色的灵敏度, $S(x, \lambda)$ 是漫反射函数因为假设光照颜色一致,所以 $E(\lambda)$ 不依赖于 x 的位置,在以上模型中忽略了相机的增益和噪声,并且假设该模型满足中性界面反射 (NIR) 假设,即镜面反射

颜色等于光照颜色。为简单起见,双色反射模型可以表示为

$$I(x) = m_d(x) \mathbf{B}(x) + m_s(x) \mathbf{G} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{B}(x) = \int_{\Omega} S(\lambda, x) E(\lambda) \mathbf{q}(\lambda) d\lambda$ 代表漫反射分量, $\mathbf{G} = \int_{\Omega} E(\lambda) \mathbf{q}(\lambda) d\lambda$ 代表镜面反射分量。 $m_d(x)$ 与 $m_s(x)$ 分别为漫反射和镜面反射系数,将式(3)变换为关于色度的公式,即

$$I(x) = \omega_d(x) \mathbf{A}(x) + \omega_s(x) \mathbf{I} \quad (4)$$

像素点的强度可由镜面反射色度和漫反射色度表示,式中该像素点的漫反射色度表示为 $\mathbf{A}(x) = \frac{\mathbf{B}(x)}{B_r(x) + B_g(x) + B_b(x)}$, 镜面反射色度即光照色

度为 $\Gamma(x) = \frac{G}{G_r + G_g + G_b}$, 所以漫反射系数即为 $\omega_d(x) = m_d(x) [B_r(x) + B_g(x) + B_b(x)]$, 镜面反射系数为 $\omega_s(x) = m_s(x) [G_r + G_g + G_b]$ 。

由双色反射模型可以看出, 要将漫反射和镜面反射分离有两种方法: 一种是根据高光区域特点是物体原有色彩被白色亮区覆盖, 对于纯白色光源来说 R、G、B 三通道值完全相同^[14], 所以可以用像素点每个通道值减去最小通道值, 即可近似去除每个通道的镜面反射^[8]; 一种方式是估计光照色度即镜面反射分量, 然后将 RGB 坐标转换为球形坐标系, 接着对球形坐标系中像素点与光照色度点的距离进行分类处理, 进而消除漫反射系数的影响, 从而去除镜面反射^[10]。

由文献[11]可知, 漫反射分量可以用最大漫反射色度表示为

$$B = I - \frac{\max_{u \in \{r, g, b\}} I_u - \Lambda_{\max} \sum_{u \in \{r, g, b\}} I_u}{1 - 3\Lambda_{\max}} \quad (5)$$

所以在利用双色反射模型对漫反射分离时, 最大漫反射色度的估计是极其重要的。

2 改进的漫反射色度估计

2.1 传统最大漫反射色度估计

对于含有镜面反射的像素点, 其真实色度值将会同时受到镜面反射色度与漫反射色度的影响。图像中并不是每个像素点都含有镜面反射分量, 由式(4)可知, 若不含镜面反射, 则 $\omega_s = 0$, 那么可以通过对每个像素点的漫反射色度进行估计来去除镜面反射分量, Yang 等人^[11]对最大漫反射色度的估计, 即

$$\Lambda_{\max}(x) = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{1 - 3\sigma_{\min}} \quad (6)$$

式中, 像素点的色度 $\sigma(x) = \frac{I(x)}{I_r(x) + I_g(x) + I_b(x)}$, 像素强度最小通道 $I_{\min}(x) = \min(I_r(x), I_g(x), I_b(x))$, 像素强度最大通道 $I_{\max}(x) = \max(I_r(x), I_g(x), I_b(x))$, 像素最小色度通道和最大色度通道分别是 $\sigma_{\min} = \min(\sigma_r, \sigma_g, \sigma_b)$, $\sigma_{\max} = \max(\sigma_r, \sigma_g, \sigma_b)$, 由式(7)可知, 该方法在去除镜面反射分量时分别使该像素点 RGB 每个通道的值减去通道中的最小值(类似于 Tan 等人所提出来的 SF

图^[8]), 进而达到去除镜面反射分量的目的。

$$\begin{aligned} \Lambda_{\max}(x) &= \frac{B_{\max}(x)}{B_r(x) + B_g(x) + B_b(x)} = \\ &= \frac{m_d(x) B_{\max}(x)}{m_d(x) [B_r(x) + B_g(x) + B_b(x)]} = \\ &= \frac{I_{\max} - I_{\min} + m_d B_{\min}(x)}{\sum_{c \in \{r, g, b\}} (I_c - I_{\min}) + 3m_d B_{\min}(x)} \approx \\ &= \frac{I_{\max}(x) - I_{\min}(x)}{\sum_{c \in \{r, g, b\}} [I_c(x) - I_{\min}(x)]} = \\ &= \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\sum_{c \in \{r, g, b\}} (\sigma_c - \sigma_{\min})} = \\ &= \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{1 - 3\sigma_{\min}} \quad (7) \end{aligned}$$

2.2 改进的漫反射色度估计

Yang 等人^[11]对最大漫反射色度的估计方式虽然能去除镜面反射, 但是当处理像素点的三通道值较为接近时便会出现对漫反射色度值的错误估计, 从而造成估计的最大漫反射色度小于真实的最大漫反射色度。针对这样的情况, 结合 Shen 等人^[9]所提出的改进的 SF 图(MSF 图), 本文提出了一种鲁棒性更高的估计方式, 即对仅含漫反射的像素点与同时含镜面反射漫反射的像素点分别做估计。

首先利用阈值 $th = \frac{\sum_{x=1}^n I_{\min}}{n}$ (经验值), n 为图像中所有像素点个数, $I_{\min}$ 为每个像素强度最小通道值。

第 1 类像素点是只含漫反射(无镜面反射分量)的像素点即 $I_{\min} \leq 2 \times th$, 如图 1(a) 所示; 除第 1 类像素点以外的其余像素点都认为是含有镜面反射的第 2 类像素点, 如图 1(b) 所示。

对第 1 类像素点的最大色度估计如图 1(c) 为

$$\begin{aligned} \Lambda_1(p) &= \frac{B_{\max}(p)}{B_r(p) + B_g(p) + B_b(p)} = \\ &= \frac{m_d(p) B_{\max}(p)}{m_d(p) \sum_{c \in \{r, g, b\}} B_c(p)} = \frac{I_{\max}}{\sum_{c \in \{r, g, b\}} I_c} \quad (8) \end{aligned}$$

第 2 类像素点的最大色度估计如图 1(d) 为

$$\begin{aligned} \Lambda_2(p) &= \frac{I_{\max} - I_{\min} + m_d B_{\min}(p)}{\sum_{c \in \{r, g, b\}} (I_c - I_{\min}) + 3m_d B_{\min}(p)} = \\ &= \frac{I_{\max} - I_{\min} + \xi}{\sum_{c \in \{r, g, b\}} (I_c - I_{\min}) + 3\xi} \quad (9) \end{aligned}$$

式中, $m_d B_{\min}(p)$ 为 $I_{\min}$ 未知的一部分,所以将他的

值视为补偿函数 ξ , 令 $\xi = \frac{\sum_{x=1}^k I_{\min}}{k}$ 作为补偿函数,其中 k 为图像中第 1 类像素点个数。这样的补偿函数不含镜面反射分量,从而在估计含有镜面反射分量的像素点最大漫反射色度时能够不引入其余最小通道的镜面反射分量。

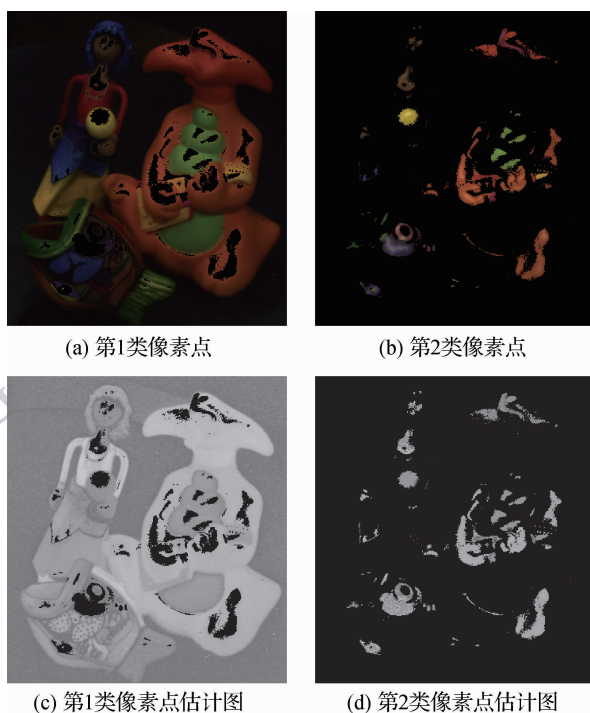


图1 本文对像素点的最大漫反射色度估计图

Fig.1 Our approximation of the maximum diffuse chromaticity ((a) the first class of pixels; (b) the second class of pixels; (c) maximum diffuse chromaticity of the first class; (d) maximum diffuse chromaticity of the second class)

对于 R、G、B 三通道相近的像素点,传统方式对最大漫反射色度估计值近似于 $\frac{0}{0}$ 型,进而导致估计值偏离其真实值,本文通过引入补偿函数使该像素点最大漫反射色度估计值更接近实际漫反射色度。

在图2中将本文的最大漫反射估计与原图的最大漫反射色度图、文献[11]的最大漫反射色度估计图,以及文献[9]的最大漫反射色度估计图作对比,可以看出,本文的最大漫反射色度估计图要更加接近原图的最大漫反射色度图,且高光区域色度明显高于原图。

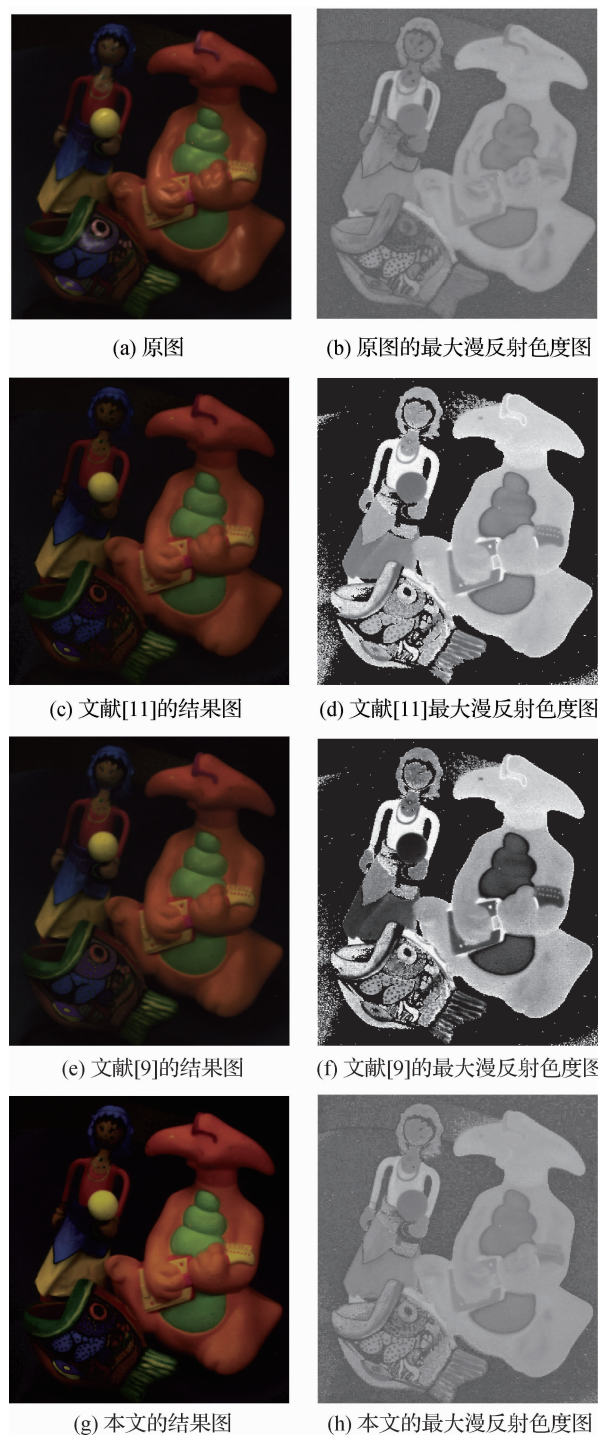


图2 本文估计图与其他算法的对比结果

Fig.2 Comparison the maximum diffuse chromaticity one of different algorithms((a) input “toys”^[9] image; (b) maximum diffuse chromaticity of the input image; (c) diffuse component of reference [11]; (d) maximum diffuse chromaticity of reference [11]; (e) diffuse component of reference [9]; (f) the maximum diffuse chromaticity of reference [9]; (g) ours; (h) maximum diffuse chromaticity of ours)

3 双边滤波器

由图 2(b) 可知, 图像的高光区域是呈局部存在的。在无高光区域, 最大色度的值就是最大漫反射色度的值, 所以对于同种颜色的像素点最大漫反射色度具有局部平滑的特性, 直观地说, 应用低通滤波可以平滑由于镜面反射分量存在所引起的差异。

双边滤波是一种非线性滤波方法, 是结合图像的空间邻近度和值域相似度的一种折中处理, 同时考虑空域信息和最大漫反射色度相似性, 达到保边去噪的目的, 具有简单、非迭代的, 输出的依赖于邻域像素值的加权组合。

用所估计的像素点最大漫反射色度值作为值域和空域的加权组合引导平滑, 对最大色度图进行去噪保边, 进而重新得到每个像素点的最大色度值, 即

$$\sigma_{\max}^F(p) = \frac{\sum_{q \in \Omega} \sigma_{\max}(q) D(p, q) R(\Lambda_{\max}(p), \Lambda_{\max}(q))}{\sum_{q \in \Omega} D(p, q) R(\Lambda_{\max}(p), \Lambda_{\max}(q))} \quad (10)$$

式中, D 是空域权值函数, R 是估计的最大漫反射色度相似度权值函数。在对含镜面反射像素点的最大色度值进行双边滤波后色度值将会降低, 使得滤波后像素点的最大色度更接近真实的最大漫反射色度。同时只含漫反射的像素点色度估计值也将受到含有镜面反射像素点的影响而变小。因此, 为了减小含镜面分量的像素对仅含漫反射的像素点色度的影响, 可以通过比较该像素点含高光时的最大漫反射色度 $\sigma_{\max}$ 和所估计的无高光状态下的最大漫反射色度 $\sigma_{\max}^F$ 并取最大值

$$\sigma_{\max}(p) = \max(\sigma_{\max}^F(p), \sigma_{\max}) \quad (11)$$

本文迭代的对 $\sigma_{\max}$ 使用双边滤波, 使得同种颜色的最大漫反射色度图平滑。本文通过比较每次迭代后的滤波值 $\sigma_{\max}^F$ 和 $\sigma_{\max}$, 当它们的差小于每个像素处的阈值(在实验中设置为 0.02)时, 该算法被认为收敛。

4 实验结果与分析

目前视觉效果最好的基于单幅图像的反射分量分离方法是文献[11]和文献[9]的方法, 为了验证

本文方法的有效性, 分别使用文献[11]和文献[9]所使用的图像集中合成图像和真实图像作为对比, 实验平台为 Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU @ 2.50 GHz 4 GB RAM 的 PC 机, 使用 Visual Studio 2013 的 C++ 语言进行仿真测试。

首先使用合成图对本文所提出的方法与文献[11]和文献[9]所提方法的结果图作对比。由图 3(b) 可以看出合成图的中心明显要比其他部分色度大, 图像颜色并不均匀。图 3(c) 在原光斑位置处则形成了明显光晕, 图 3(d) 色度均匀, 且高光去除明显优于图 3(b)(c)。

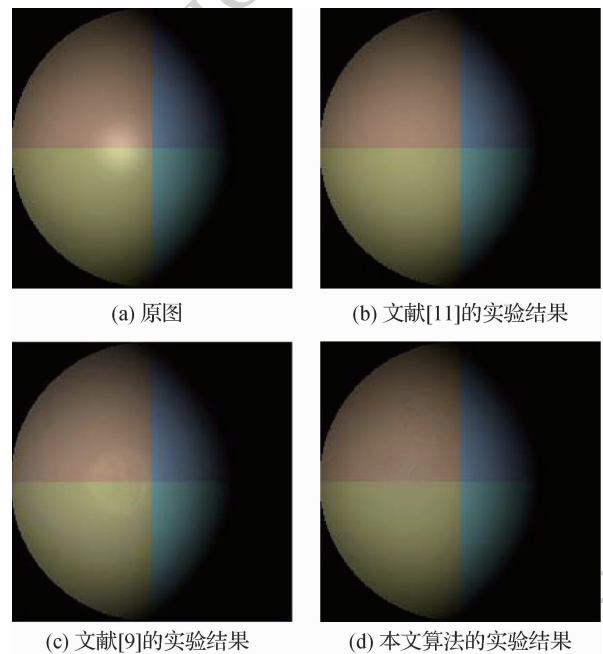


图 3 本文算法与其他算法的对比结果

Fig. 3 Comparison result one of different algorithms

((a) input "synth"^[9] image; (b) reference [11];
(c) reference [9]; (d) ours)

再使用自然图对本文方法与文献[11]和文献[9]所提方法的结果图作对比。由图 4(b) 可以看出自然图的三通道相似的像素点(如物体本身颜色为黑色的区域)在处理结束后会出现部分发灰的现象, 原因是在对最大漫反射色估计所出现的偏差。图 4(c) 在原光斑位置(如鱼眼下方)处颜色损失严重, 图 4(d) 则未出现图 4(b)(c) 的现象, 且视觉效果明显较优。

为了进一步验证本文方法的有效性, 选择文献[9]中多幅高光图像进行实验, 如图 5 所示, 对实验结果图进行定量分析。采用的图像质量评价准则

为: 图像的峰值信 PSNR^[15], 它的值越高则说明结果图与真实图越相似, 表 1 是文献[11]和文献[9]和本文算法所得的结果图与真实图的颜色相似值。当

PSNR 大于 40 dB 时, 人眼几乎分别不出来两幅图的差异^[16]。从实验整体结果上看, 本文算法优于文献[11]和文献[9]的实验结果。

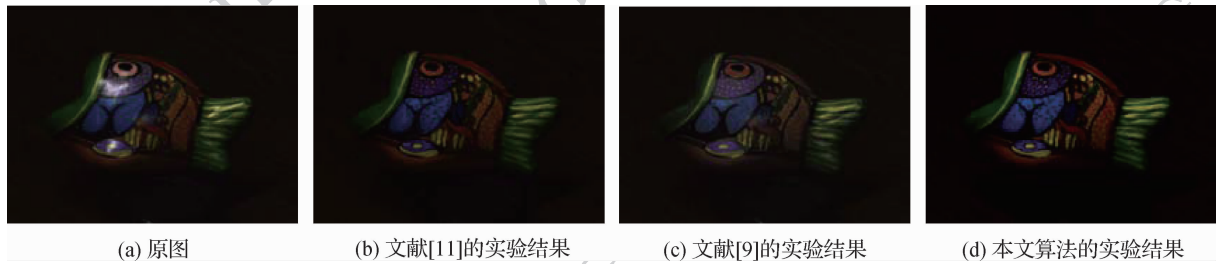


图 4 本文算法与其他算法的对比结果

Fig. 4 Comparison result one of different algorithms((a) input "fish"^[9] image;
(b) reference [11]; (c) reference [9]; (d) ours)

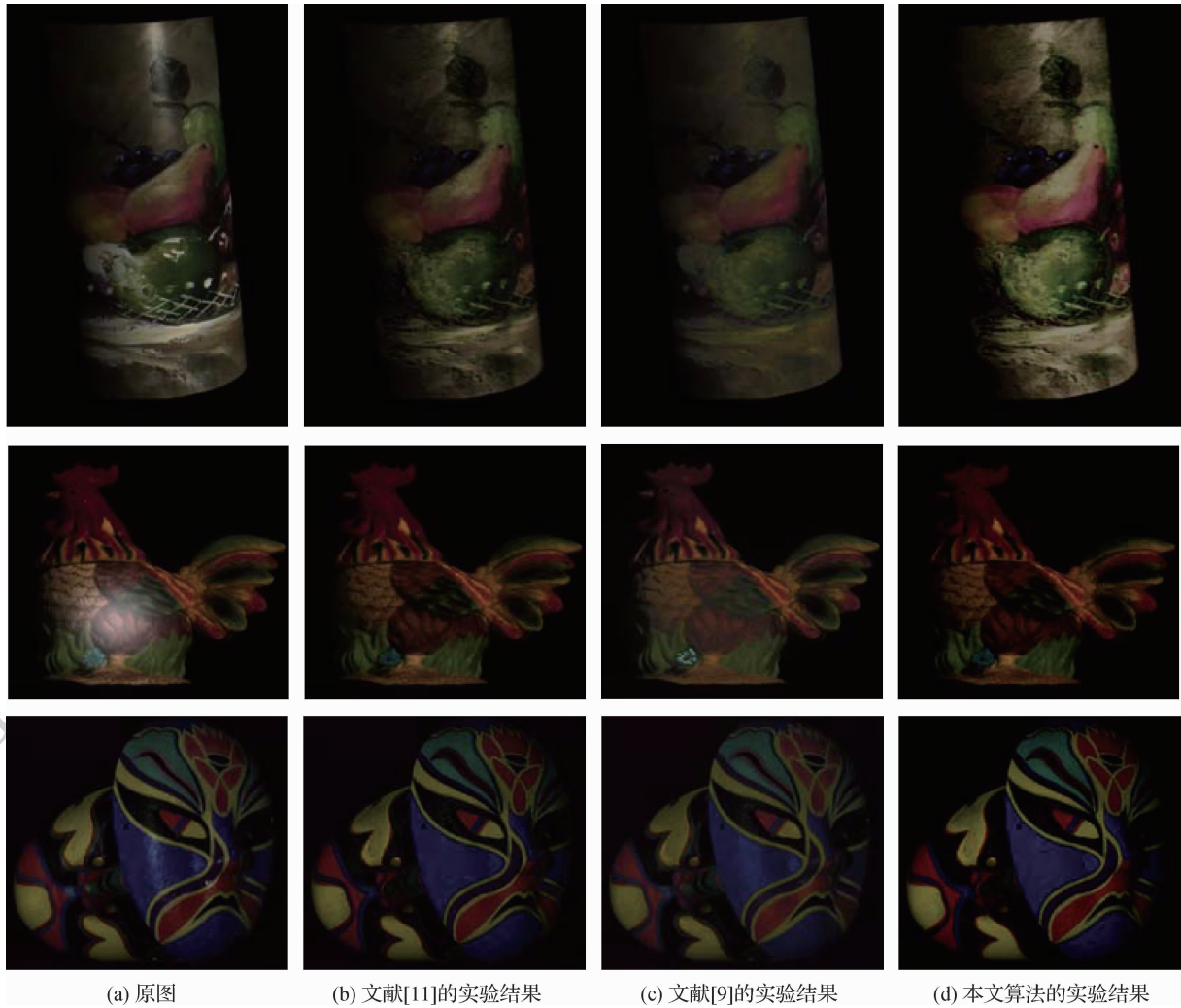


图 5 本文算法与其他算法的对比结果

Fig. 5 Comparison result one of different algorithms((a) input "circle"^[9]、"chicken"^[9]、"masks"^[9] images;
(b) reference [11]; (c) reference [9]; (d) ours)

表 1 不同算法的峰值信噪比
Table 1 Peak signal to noise ratio of different methods

算法	toys(图 1)	synth(图 3)	fish(图 4)	circle(图 5)	chicken(图 5)	masks(图 5)	/dB
Yang 等人 ^[11]	38.08	37.20	42.08	45.08	37.80	32.20	
Shen 等人 ^[9]	38.30	35.30	32.10	38.10	29.30	29.08	
本文	40.30	45.36	48.03	41.20	38.02	34.82	

实验的目的是尽可能保留图像的颜色和纹理的同时去除高光,用改进的双边滤波去高光算法对 50 幅含高光的图像做处理,并将该算法与文献[11]和文献[9]分别作对比,结果图的峰值信噪比(PSNR)也分别平均提高 4.17% 和 8.40%,得到无论从视觉效果还是定量分析,本文方法得到的结果优于文献[11]和文献[9]方法。

5 结 论

本文对基于双边滤波去除高光进行理论分析和实验观察。从中发现原算法在处理高光图像时忽略部分像素点 R、G、B 三通道值相近,导致对像素点的最大漫反射色度估计出现偏差。因此,本文提出一种新的最大漫反射色度估计方法,该算法利用阈值将图像像素点分为仅含漫反射的像素点和同时含有镜面反射的像素点,尽可能在去除镜面反射的同时,不影响只含漫反射的像素点,使估计值更接近真实值。实验结果表明,本文方法保留图像边缘信息与还原图像的色彩信息均高于传统算法。

本文方法还存在以下局限性,对于极强的镜面反射,物体表面颜色接近光源颜色时复原效果不好,导致这样的结果是极强的镜面反射的像素点漫反射分量所占比例过小或者像素点色度被光照色度取代。因此,未来的研究方向是如何结合图像信息对强反射区域填充修复,更好地去除高光。

参考文献(References)

- [1] Shafer S A. Using color to separate reflection components[J]. Color Research and Application, 1985, 10(4): 210-218. [DOI: 10.1002/col.5080100409]
- [2] Wu L F, Wang J J, Wang Y. Recovery of 3D shape based on reflectance characteristics[J]. Signal Processing, 2009, 25(6): 994-998. [毋立芳, 王涓涓, 王颖. 一种基于反射特性的人脸三维重建方法[J]. 信号处理, 2009, 25(6): 994-998. [DOI: 10.3969/j.issn.1003-0530.2009.06.028]
- [3] Cai Q Y. Recovering reflections of three-dimensional object surfaces[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. [蔡清源. 三维物体表面的反射特性恢复[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.]
- [4] Wang Y F, Jiang Z G, Shi J, et al. Highlight area inpainting guided by saliency detection[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(3): 393-400. [王伟璠, 姜志国, 史骏, 等. 显著性检测指导的高光区域修复[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(3): 393-400. [DOI: 10.11834/jig.20140308]
- [5] Xing X H, Gu G H. Method of quickly recognizing vehicle plate based on pattern matching and characteristic dot matching[J]. Optoelectronic Technology, 2003, 23(4): 268-270. [邢向华, 顾国华. 基于模板匹配和特征点匹配相结合的快速车牌识别方法[J]. 光电子技术, 2003, 23(4): 268-270. [DOI: 10.3969/j.issn.1005-488X.2003.04.015]
- [6] Fang S, Zhao Y K, Li X K, et al. Nighttime haze removal based on illumination estimation[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(11): 2569-2575. [方帅, 赵育坤, 李心科, 等. 基于光照估计的夜间图像去雾[J]. 电子学报, 2016, 44(11): 2569-2575. [DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.11.002]
- [7] Yang Q X, Wang S N, Ahuja N, et al. A uniform framework for estimating illumination chromaticity, correspondence, and specular reflection[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(1): 53-63. [DOI: 10.1109/TIP.2010.2055573]
- [8] Tan R T, Ikeuchi K. Separating reflection components of textured surfaces using a single image[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(2): 178-193. [DOI: 10.1109/TPAMI.2005.36]
- [9] Shen H L, Zheng Z H. Real-time highlight removal using intensity ratio[J]. Applied Optics, 2013, 52(19): 4483-4493. [DOI: 10.1364/AO.52.004483]
- [10] Ren W H, Tian J D, Tang Y D. Specular reflection separation with color-lines constraint[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(5): 2327-2337. [DOI: 10.1109/TIP.2017.2675204]
- [11] Yang Q X, Tang J H, Ahuja N. Efficient and robust specular highlight removal[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(6): 1304-1311. [DOI: 10.1109/TPAMI.2014.2360402]

- [12] Yang J W, Liu L X, Li S Z. Separating specular and diffuse reflection components in the HSI color space[C]//Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops. Sydney, NSW, Australia: IEEE, 2013: 891-898. [DOI: 10.1109/ICCVW.2013.122]
- [13] Kim H, Jin H L, Hadap S, et al. Specular reflection separation using dark channel prior[C]//Proceedings of 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Portland, Oregon, US: IEEE, 2013: 1460-1467. [DOI: 10.1109/CVPR.2013.192]
- [14] Panagopoulos A, Samaras D, Paragios N. Robust shadow and illumination estimation using a mixture model[C]//Proceedings of 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, Florida, USA: IEEE, 2009: 651-658. [DOI: 10.1109/CVPR.2009.5206665]
- [15] Rahman F A, Ibrahim A I. No-reference spatio-temporal activity difference PSNR estimation[C]//Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Computer and Communication Engineering. Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2016: 283-287. [DOI: 10.1109/ICCCE.2016.68]
- [16] Huynh-Thu Q, Chanbari M. Scope of validity of PSNR in image/video quality assessment [J]. Electronics Letters, 2008, 44(13): 800-801. [DOI: 10.1049/el:20080522]