

# 实时单幅图片高光去除算法

周伟, 张明敏

ZHOU Wei, ZHANG Mingmin

淮阴师范学院 数学科学学院, 江苏 淮安 223300

College of Mathematics, Huaiyin Normal University, Huaian, Jiangsu 223300, China

ZHOU Wei, ZHANG Mingmin. Real-time highlight removal from single image. *Computer Engineering and Applications*, 2011, 47(26): 200-202.

**Abstract:** Highlight removal from a single image is generally much challenging. Summarized most single-image-based methods, usually require color segmentation or user assistance for highlight detection. Based on statistical law of color highlight images, this paper finds a key observation that the maximum diffuse chromaticity in local patches in colorful images generally changes smoothly. Using this property, it then estimates the maximum diffuse chromaticity values of the specular pixels by directly applying linear model to the maximum fraction of the color components of the original image, such that the maximum diffuse chromaticity values can be propagated from the diffuse pixels to the specular pixels. The diffuse color at each pixel can finally be computed. Compared to traditional methods, this approach can get much better results after removing highlights. Furthermore, it is well suited for real-time applications, due to its simplicity and parallelism.

**Key words:** highlight removal; maximum diffuse chromaticity; linear model

**摘要:** 单幅图片的高光去除是一个非常具有挑战性的课题。综述以往多数方法, 一般需要进行图像分割等预处理, 或者要求用户进行交互输入。采用的方法是从高光图片的颜色统计规律出发, 发现了最大漫反射色度局部平滑这一特性; 然后估计镜面反射像素最大漫反射色度, 由基于线性模型对最大色度的值进行扩散传播, 从图像中的漫反射像素传播到镜面反射像素; 最后求出图像中每个像素的漫反射分量。与传统方法相比较, 这种高光去除的方法效果较好, 而且非常简单, 适合并行, 可以满足实时应用需要。

**关键词:** 高光去除; 最大漫反射色度; 线性模型

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2011.26.056 文章编号: 1002-8331(2011)26-0200-03 文献标识码: A 中图分类号: TP391.41

## 1 引言

根据 dichromatic 反射模型<sup>[1]</sup>, 反射光线可以分为镜面反射和漫反射两个分量。因此, 如何对镜面反射分量、漫反射分量进行分离成为计算机视觉中一个重大的问题。对于众多计算机视觉的应用而言, 例如分割、跟踪、匹配, 镜面反射分量处理往往非常困难, 通常的做法是将镜面反射分量视为异常值进行处理。

镜面反射分量提取方法, 根据其使用的图片数目的不同, 可以分为两类: 有些方法使用在特定条件下获取的多张图片进行分析和处理。例如, Lin<sup>[2]</sup>通过改变光线方向而获得两副光移图片 (photometric image), 然后使用线性基函数来分离镜面反射分量。然而, 这种方法在实际应用中非常受限, 因为现实世界中光源位置往往固定不变。一种可行的解决方法是改变视点而不是改变光线的照射方向来获取图片。借助于不同视点下拍摄的多幅图片, Lee<sup>[3]</sup>提出一种镜面反射区域的检测方法。

另一方面, 基于单幅图片的高光去除方法更具有挑战性, 通常都需要对该图片进行彩色分割的预处理<sup>[4]</sup>。然而对于复

杂纹理图片, 彩色分割往往会失败。针对这种情况, Tan<sup>[5]</sup>提出一种不借助于彩色分割, 从复杂纹理的物体中有效去除高光的方法。一些方法也尝试在特定的颜色空间<sup>[6]</sup>, 例如 YUV 颜色空间中解决高光去除的问题。然而, 上述基于单幅图片的高光去除方法处理速度较慢, 不适用于某些实时应用的需要, 例如实时立体视觉。因此, 借助于高光图片的颜色统计规律, 在线性模型的基础上, 本文提出一种简单且有效的实时单幅图片高光去除方法。实验结果表明, 在 Nvidia Geforce 9800 GTX 平台上, 本文方法可以以 15 帧/秒的速率处理多达 1M 的高光图片, 因而, 该方法可以广泛应用于实时高光处理场合。

## 2 反射模型

本文方法建立在文献[5]所提出的反射模型基础上。在文献[5]中, 每个镜面反射像素的漫反射分量, 通过该像素颜色以及最大漫反射色度 (maximum diffuse chromaticity) 之间的非线性函数关系而求出。其原理简述如下:

根据 dichromatic 反射模型<sup>[1]</sup>, 反射光线可分为漫反射和镜面反射分量:

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划 (863) (the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2009AA062700)。

**作者简介:** 周伟 (1975—), 男, 硕士, 主要研究方向为计算机图形学、计算机视觉; 张明敏 (1968—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师。E-mail: hysyzw@163.com

**收稿日期:** 2011-02-25; **修回日期:** 2011-05-11

$$I(X) = w_d(X)D(X) + w_s(X)S(X) \quad (1)$$

其中,  $I = \{I_r, I_g, I_b\}^T$  表示图像的颜色向量;  $r, g, b$  分别代表红、绿、蓝三个通道;  $X = (x, y)$  表示图像中某一像素的坐标;  $D(X)$ 、 $S(X)$  代表该像素的漫反射分量以及镜面反射分量;  $w_d$ 、 $w_s$  分别代表该像素的漫反射以及镜面反射权重因子。

定义色度为:

$$\begin{aligned} \sigma(X) &= \frac{I(X)}{I_r(X) + I_g(X) + I_b(X)} \\ \lambda(X) &= \frac{D(X)}{D_r(X) + D_g(X) + D_b(X)} \\ \gamma(X) &= \frac{S(X)}{S_r(X) + S_g(X) + S_b(X)} \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $\sigma$  是与像素颜色相关的色度,  $\lambda$  表示漫反射色度,  $\gamma$  表示镜面反射色度。

在文献[7]中, 最大色度定义为:

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}(X) &= \max\{\sigma_r(X), \sigma_g(X), \sigma_b(X)\} = \\ &= \frac{\tilde{I}(X)}{I_r(X) + I_g(X) + I_b(X)} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{其中 } \tilde{I}(X) = \max\{I_r(X), I_g(X), I_b(X)\} \quad (4)$$

假定图像在白光照射下生成, 即  $\gamma(X) = [1/3, 1/3, 1/3]^T$ 。那么,  $\sigma(X)$ 、 $\lambda(X)$  以及  $\gamma(X)$  最大元素出现在同一的颜色通道上, 例如红色。假定,  $\tilde{\lambda}(X)$ 、 $\tilde{\gamma}(X)$  分别为  $\lambda(X)$  以及  $\gamma(X)$  中的最大元素。Tan<sup>[5]</sup>提出, 图片中每个像素的漫反射分量可以通过式(5)求出:

$$m_d(X)\lambda(X) = I(X) - \frac{\tilde{\lambda}(X)(I_r(X) + I_g(X) + I_b(X)) - \tilde{I}(X)}{3\tilde{\lambda}(X) - 1} \quad (5)$$

从式(5)可知, 直接根据最大漫反射色度  $\tilde{\lambda}(X)$  便可得到无镜面反射的图像(高光去除后的图像), 因而如何估计  $\tilde{\lambda}(X)$  就成为解决问题的关键。

图1所示是运用文献[5]中的方法, 对一幅玩具图片进行高光去除后的效果图。从图1(d)中可以看出, 最大漫反射色度具有局部平滑这个性质, 文献[8]也发现了类似的规律。因此, 完全可以利用这个规律, 提出一些简化的方法来去除高光。

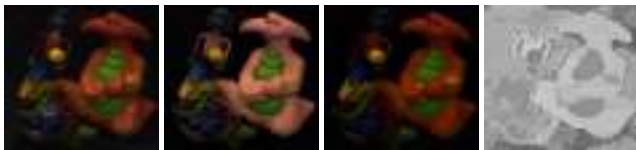


图1 用文献[5]方法对一幅玩具图片进行高光去除后的效果图

### 3 本文方法

在文献[5]中, Tan 使用“伪编码”的漫反射图片(图1(b)), 来估计高光去除后的图片。但实践中, 由于颜色依赖于几何属性与材质两个方面, 而漫反射色度  $\lambda_c, c \in \{r, g, b\}$  对几何属性保持不变, 因而文献[5]方法往往会失效。文中, 采用新的方法来估计漫反射色度  $\lambda_c$ :

$$\text{令 } \sigma_{\max} = \tilde{\sigma} = \max\{\sigma_r, \sigma_g, \sigma_b\} \quad (6)$$

接着根据式(7), 使用  $\beta_c$  来估计漫反射色度  $\lambda_c$ :

$$\beta_c = 1 - \frac{\sigma_{\max} - \sigma_c}{3\sigma_{\max} - 1} \quad (7)$$

引理 对于任意两个像素  $p$  和  $q$ , 如果  $\lambda_c(p) = \lambda_c(q)$ , 则:

$$\beta_c(p) = \beta_c(q).$$

证明 令  $I_{\max} = \tilde{I} = \max\{I_r, I_g, I_b\}$ ,  $D_{\max} = \tilde{D} = \max\{D_r, D_g, D_b\}$ 。

由式(7)知, 若  $\beta_c(p) = \beta_c(q)$ , 则:  $\frac{\sigma_{\max}(p) - \sigma_c(p)}{3\sigma_{\max}(p) - 1} = \frac{\sigma_{\max}(q) - \sigma_c(q)}{3\sigma_{\max}(q) - 1}$ 。

通过化简, 可得式(8), 即证。

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{\max} - \sigma_c}{3\sigma_{\max} - 1} &= \left( \frac{D_{\max} - D_c}{\sum_{u \in \{r, g, b\}} D_u} \right) / \left( \frac{\sum_{u \in \{r, g, b\}} (D_{\max} - D_u)}{\sum_{u \in \{r, g, b\}} D_u} \right) = \\ &= (\lambda_{\max} - \lambda_c) / \left( \sum_{u \in \{r, g, b\}} (\lambda_{\max} - \lambda_u) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

最后, 最大漫反射色度估计值  $\tilde{\lambda}_e$  根据式(9)求出:

$$\tilde{\lambda}_e = \max\{\beta_r, \beta_g, \beta_b\} \quad (9)$$

如前所述, 最大漫反射色度具有局部平滑的特性。因此, 使用式(9)中的最大漫反射色度估计值  $\tilde{\lambda}_e$  作为一个引导值, 最终求出最大漫反射色度的真实值  $\tilde{\lambda}$ 。根据最大漫反射色度局部平滑这个现象, 假定最大漫反射色度估计值  $\tilde{\lambda}_e$  与最大漫反射色度真实值  $\tilde{\lambda}$  之间满足线性模型<sup>[9]</sup>, 即:

$$\tilde{\lambda}_i = a\tilde{\lambda}_{e(i)} + b, \forall i \in w \quad (10)$$

其中,  $a$  与  $b$  是线性模型的系数。在某一个区域  $w$  内, 它们的值视为常数。为了求出  $a$  和  $b$ , 最小化式(11)所示的能量方程:

$$E(a, b) = \sum_{i \in w} ((a\tilde{\lambda}_{e(i)} + b - \tilde{\lambda}_i)^2 + \varepsilon a^2) \quad (11)$$

其中,  $\varepsilon$  为正则化参数, 以防止  $a$  系数的值过大。通过线性退化<sup>[10]</sup>的方法, 可以求出能量方程(11)的解:

$$a = \frac{(\sum_{i \in w} \tilde{\lambda}_{e(i)} \tilde{\lambda}_i - \mu \tilde{\lambda}) / |w|}{\sigma^2 + \varepsilon}, \quad b = \tilde{\lambda} - a\mu \quad (12)$$

这里,  $\mu$  和  $\sigma^2$  为区域  $w$  内关于  $\tilde{\lambda}_e$  的均值和方差,  $|w|$  是区域  $w$  内像素的个数;  $\tilde{\lambda} = (\sum_{i \in w} \tilde{\lambda}_i) / |w|$ , 为区域  $w$  内最大漫反射色度真实值  $\tilde{\lambda}$  的均值。

最后, 通过线性模型系数  $a$  与  $b$  的取值, 从而求出区域内最大漫反射色度真实值  $\tilde{\lambda}$ 。

### 4 实验与讨论

为了验证本文方法的有效性, 在合成图片与真实图片上进行实验, 并与文献[5]方法做比较。如图2所示, 在一张合成圆球图片上将本文方法与文献[5]方法的高光去除结果进行比较。从图2(b)中可以明显看出, 文献[5]方法的高光去除效果较差, 而本文方法的高光去除效果较好。究其原因, 文献[5]方法是通过比较相邻两个像素的最大色度, 取较大者, 这样的方式将最大色度由漫反射像素扩散至镜面反射像素。而本文方法则是在一个邻域内处理, 因此鲁棒性更强。为了进一步

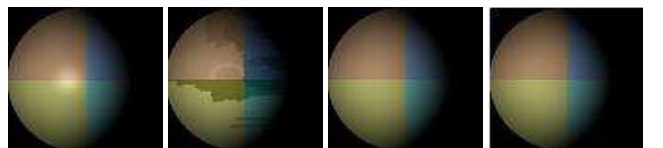


图2 一张合成圆球图片上本文与文献[5]方法的高光去除结果比较

量化比较,计算不同方法高光去除后的结果与真实值(图2(d))之间的峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio,PSNR)。文献[5]方法和本文方法的峰值信噪比结果分别为25.2 dB与50.7 dB,这里需要指出的是,峰值信噪比大于40 dB往往意味着无差异性。因此,通过峰值信噪比的计算,从另外一方面验证了本文方法的优越性。

然后,在真实的照片上分别运用本文方法与文献[5]方法进行高光去除处理,其处理的结果如图3、图4所示。图3、图4的实验结果表明,本文方法的性能仍然优于文献[5],这说明本文方法具有较好的适用性,可广泛应用于图像的高光去除处理。

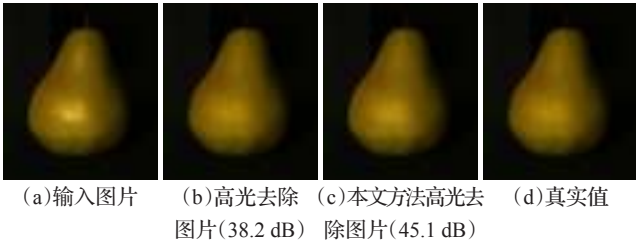


图3 真实照片上运用本文方法与文献[5]方法进行高光去除处理1

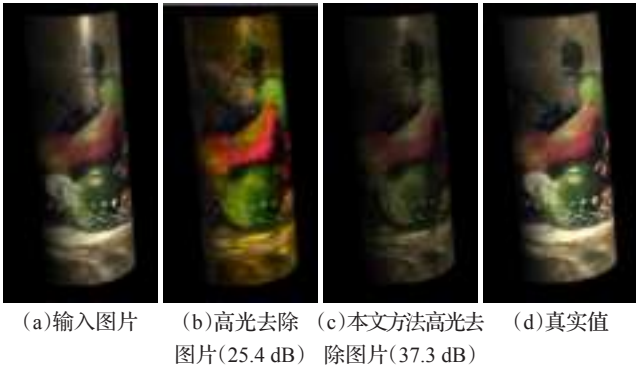


图4 真实照片上运用本文方法与文献[5]方法进行高光去除处理2

实验平台: Intel Core 2 Quad CPU Q6600@ 2.40 GHz, NVIDIA GeForce 9800 GPU。表1比较了文献[5]方法与本文方法对于不同高光图片的处理时间。从表1中可以看出,本文方法处理速度非常快,其相对文献[5]算法的执行效率提高了200倍以上。

表1 处理时间比较表	ms		
	图2	图3	图4
文献[5]方法	8 448	9 205	15 957
本文方法	38	35	73

5 结论

本文提出一种实时的单幅照片高光去除算法,基于最大漫反射色度局局部平滑这个性质,利用线性模型对最大漫反射的值进行扩散传播,从图像中的漫反射像素传播到镜面反射像素,最终求出图像中每个像素的漫反射分量,从而达到高光去除的效果。实验结果表明,相对于传统方法,本文方法具有更好的鲁棒性。同时,本文方法的处理速度非常快,完全可以满足一些实时应用的需要。

参考文献:

[1] Shafer S.Using color to separate reflection components[J].Color Research & Application,1985,10(4):210-218.

[2] Lin S,Shum H Y.Separation of diffuse and specular reflection in color images[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR'01),Kauai, USA,2001:341-346.

[3] Lee S,Bajcsy R.Detection of specularity using color and multiple views[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision(ECCV'92),Santa Margherita,Italy,1992:99-114.

[4] Bajcsy R,Lee S,Leonardis A.Detection of diffuse and specular interface reflections and inter-reflections by color image segmentation[J].IJCV,1996,17(3):241-272.

[5] Tan R,Ikeuchi K.Separating reflection components of textured surfaces using a single image[J].IEEE Trans PAMI,2005,27(2):178-193.

[6] 王超群,朱方文.一种去除单张图片中高光的方法[J].上海大学学报:自然科学版,2007,13(2):151-154.

[7] Tan R,Nishino K,Ikeuchi K.Separating reflection components based on chromaticity and noise analysis[J].IEEE Trans PAMI,2004,26(10):1373-1379.

[8] Yang Q,Wang S,Ahuja N.Real-time specular highlight removal using bilateral filtering[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision(ECCV'10),Crete,Greece,2010:87-100.

[9] He K,Sun J,Tang X.Single image haze removal using dark channel prior[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR'09),Miami, USA,2009:1956-1963.

[10] He K,Sun J,Tang X.Guided image filtering[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision(ECCV'10),Crete, Greece,2010:1-14.

(上接102页)

[10] Dimitrov V S,Imbert L,Mishra P K.Fast elliptic curve point multiplication using double-base chains[DB/OL].[2010-01].http://eprint.iacr.org/2005/069.pdf.

[11] Dimitrov V S,Jarvinen K,Jacobson M J,et al.FPGA implementation of point multiplication on Koblitz curves using Kleinian integers[C]//Proceedings of Conference on Cryptographic Hardware and Embedded Systems.[S.l.]:Springer,2006:445-459.

[12] Brickell E F,Gordon D M,McCurley K S,et al.Fast exponentiation with precomputation[C]//Proceedings of Advances in Cryptology-

EURO-CRYPT.[S.l.]:Springer,1993:200-207.

[13] Bernstein D J,Birkner P.Optimizing double-base elliptic-curve single-scalar multiplication[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Progress in Cryptology.[S.l.]:Springer,2007:167-182.

[14] Bernstein D J,Tanja L.Faster addition and doubling on elliptic curves[C]//Proceedings of the 13th International Conference on Cryptology-Asiacrypt.[S.l.]:Springer,2007:29-50.

[15] Avanzi R,Sica F.Scalar multiplication on Koblitz curves using double bases[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Cryptology-Vietcrypt.[S.l.]:Springer,2006:131-146.