

用于去除单张图像高光的光照约束补色*

谭平¹⁺, 杨杰¹, 雷蓓², Steve Lin³, 沈向洋³

¹(上海交通大学 图像处理与模式识别研究所, 上海 200030)

²(洛桑联邦科技大学(EPFL) 计算机系, 洛桑, 瑞士)

³(微软亚洲研究院, 北京 100080)

Illumination-Constrained Inpainting for Single Image Highlight Removal

TAN Ping¹⁺, YANG Jie¹, LEI Bei², Steve Lin³, Harry Shum³

¹(Institute of Image Processing and Pattern Recognition, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

²(Department of Computer Science, Federal Institute of Technology (EPFL), Lausanne, Swiss)

³(Microsoft Research Asia, Beijing 100080, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-62617711 ext 5753, E-mail: ptan@microsoft.com,

<http://www.pami.sjtu.edu.cn/>

Received 2002-11-18; Accepted 2003-03-25

Tan P, Yang J, Lei B, Lin S, Shum H. Illumination-Constrained inpainting for single image highlight removal. *Journal of Software*, 2004,15(1):33-40.

<http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/33.htm>

Abstract: Specular detection and removal are always hot problems in computer vision. Advanced results have a great impact on computer vision algorithms. In this paper, a specular detection and removal algorithm is proposed. First, through the comparison between highlight and diffuse chromaticity, a user interactive detection method for a single colored surface is developed. Second, a removal algorithm is proposed by introducing an image inpainting algorithm to this field and adding an illumination constraint. Different from traditional inpainting algorithms, the method described in this paper utilizes more cues which are embedded in the specular region. By integrating the embedded information such as the observed pixel color and illumination chromaticity, this method can overcome the shortcomings of the traditional inpainting methods, which can not keep shading variance in the highlight region. Experimental results show that this method can give a better illumination chromaticity estimation and more convincing results.

Key words: specular; image inpainting; illumination constraint

摘要: 在计算机视觉研究领域,如何检测和消除图像中的高光(specular)一直是个热点问题,有关的研究结果

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.30170274 (国家自然科学基金)

作者简介: 谭平(1980-),男,湖南涟源人,硕士,主要研究领域为模式识别与智能系统,计算机视觉与图形学;杨杰(1964-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为模式识别与智能系统,计算机视觉与图形学;雷蓓,女,硕士,主要研究领域为计算机视觉,图像处理;Steve Lin,男,博士,研究员,主要研究领域为计算机视觉,计算机图形学;沈向洋,男,博士,高级研究员,主要研究领域为机器视觉,计算机图形学。

对于提高计算机视觉算法性能有着重要的影响.针对这一问题,提出了一种检测和消除高光的方法.首先,通过比较高光和漫反射光(diffuse)的色度特性的不同,给出了一种交互检测单色物体表面高光区域的方法;然后,引入补色(inpainting)方法并结合光照约束条件,设计了一种去除单张图像中高光并还原出漫反射分量的新的补色算法.与一般补色方法不同,该算法充分利用了高光区域含有的信息来指导补色过程.通过综合利用观测到的像素值、光源的色度分析(illumination chromaticity analysis)、光源颜色的平滑性等来约束补色过程,保证了算法能够克服一般的补色方法无法保持物体表面细微明暗变化的缺点.实验结果表明,与以往的去除单张图像高光的方法相比,该算法能够提供更好的光源色度估计,从而得到更准确的结果.

关键词: 高光;补色;光照约束

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

图像中的高光反映的主要是光源的特征,却以物体表面特征的形式出现,这对计算机视觉算法是一个很大的干扰.针对这一问题,许多计算机视觉的算法都基于漫反射假定,即假定图像中没有高光.然而,自然界的绝大多数物体都不是理想的漫反射表面,因此在真实图像中往往都有高光存在.这样,图像中的高光经常是导致图像分割、识别以及匹配产生错误的重要原因.由于高光对计算机视觉算法的这种干扰,长期以来研究人员一直致力于去除图像中高光的工作.

以往的去除高光的工作主要是使用颜色分析或者光线的极化分析等方法.Wolff^[1]利用漫反射与高光极化特性的不同去除高光.Sato 和 Ikeuchi^[2]通过分析在一个移动光源照射下采集的图像序列的颜色成分来计算高光.Nayar^[3]同时利用了极化信息和颜色分析,以此做约束来估计高光.尽管这些方法可以得到较好的结果,但是这些算法都需要用到图像序列,因而极大地限制了它们的应用领域.

Klinker^[4]提出了一个去除单张图像中高光的算法.根据 Shafer 的两色反射模型(dichromatic reflection model)^[5],Klinker 发现,在 RGB 颜色空间中,漫反射像素和高光像素形成一个 T 形分布.对漫反射区域和高光区域分别做主成分分析,拟合出漫反射和光源颜色向量,利用这两个向量作投影,就可以快速地去掉高光.然而,高光像素簇通常都因为表面粗糙程度、物体的几何形状^[6]等原因被扭曲.因此主成分分析对光源颜色的估计通常都是不精确的,从而降低了该算法的适用性,如图 1 所示(其中,图 1(b)中直线 L_1 是对漫反射像素簇拟合的结果,直线 L_2 是对高光像素簇拟合的结果,直线 L_3 代表了真正的光源颜色).针对这一问题,Novak 和 Shafer^[6]从 RGB 空间中的像素分布估计表面的粗糙程度和物体的几何形状,并以此估计高光像素簇的扭曲程度,以便获得一个更精确的光源颜色估计.但是由于图像噪声等的影响,仅仅从像素的分布形状往往很难可靠地估计出这些信息.

扭曲的问题在色度空间(chromaticity space)中并不存在.Lee^[7]提出了一个在色度空间估计光源色度的方法.但是由于图像噪声的影响,直接利用该方法估计光源色度,往往得不到理想的结果.而且,这个方法无法应用于单色表面.关于光源颜色估计的问题在研究颜色一致性(color constancy)^[8-10]中也有讨论,其目的是为了消除光源颜色对图像的影响.然而,通过这样的方法估计出来的光源颜色往往过于粗糙而不能用于去除高光.

在本文中,我们充分考虑了高光区域的特点,设计出一个专门针对去除高光的光照约束的补色方法.实验表明,本文的方法可以保留漫反射光的明暗变化,并得到比直接应用补色方法更好的结果.

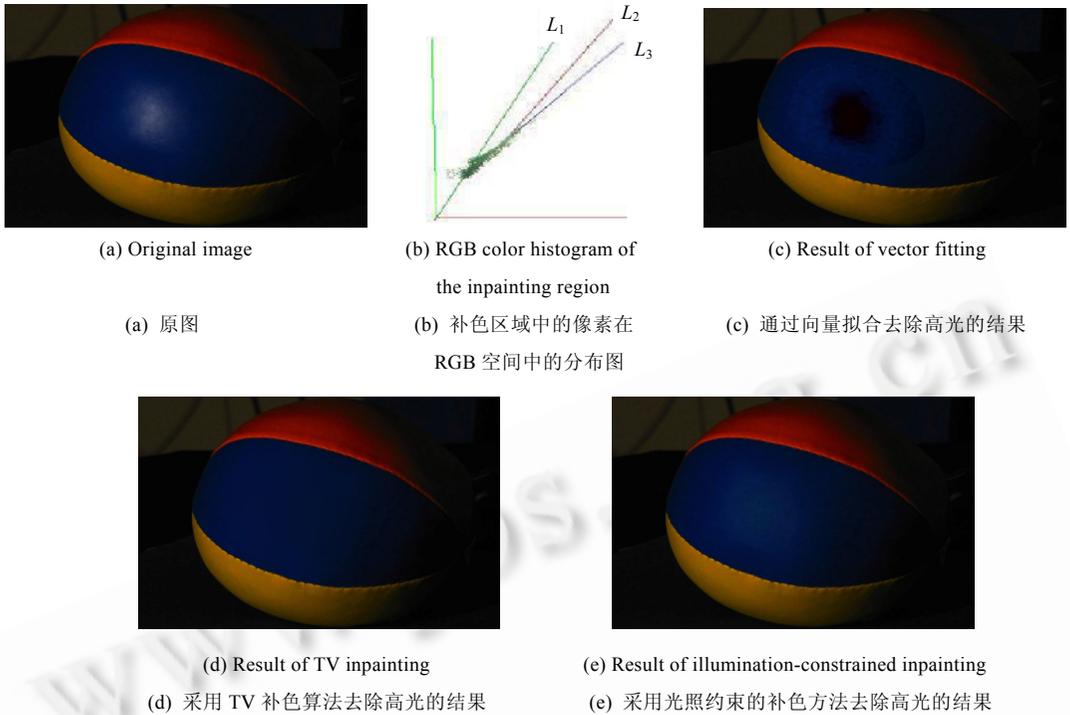


Fig.1 A comparison of highlight removal methods

图 1 几种去除高光方法的对比

1 算法概述

在单色物体表面,非高光区域的色度为常数,而高光区域不是,利用这一特点可以进行高光检测.尽管本文只考虑单色物体表面的高光,但是由于图像中往往有其他颜色的物体存在,全自动检测高光区域是一个非常困难的问题.为了方便、准确地检测到图像中的高光区域,本文提出了一种交互检测的办法.用户只需在高光区域内选中一点,算法将从这个点自动生长出整个高光区域.如果图像中有多个高光区域,这些区域将被分别处理.这样,不同的高光区域可以有不同光源颜色,比如来自不同的光源或者是来自于物体间的相互反射.

另外,一个与去除高光有联系的领域是图像补色(image inpainting).补色是一种填充图像区域的方法,可以有效地恢复受损坏的照片、从图像中去除物体或是降低图像噪声^[11,12].但是直接将补色用于去除高光却会丢失高光区域中漫反射光的明暗变化.本文充分考虑了高光区域的特点,设计出一个专门针对去除高光的光照约束的补色方法.在一般的补色算法中,被填充的区域是被遮挡的部分,这一区域的信息是完全缺失的.然而高光区域中通常都包含部分可以用来指导恢复漫反射分量的信息.考虑到高光的这一特点,本文中提出两个用于约束补色的假设:首先,根据两色反射模型,高光像素的颜色值是漫反射分量与高光分量的线性组合;其次,我们发现对于大多数图像,一个高光区域的光源颜色是均一的.结合这两个假设,我们就可以设计针对去除高光的补色过程,从而可以保留漫反射光的明暗变化,得到比直接应用补色方法更好的结果.

本文第 2 节介绍基于用户交互的高光区域检测算法;第 3 节给出对高光的色度分析,通过分析可以得到光源色度的约束;第 4 节详细叙述如何估计光源色度以及利用此色度约束去除高光的算法;第 5 节给出一些实验结果并对本文做了总结.

2 高光检测

为了区分高光像素和非高光像素,我们对图像色度进行分析.定义色度为 $C=(r,g)$,其中 $r=R/I;g=G/I;I=R+G+B$.从定义可以看出,色度是一个被亮度标准化的颜色度量.根据朗伯(Lambertian)反射模型和色度的定义可以知道,单色理想漫反射表面的色度是一个常数,而高光区域却不是.将 Shafer 两色反射模型(dichromatic reflection model)变换到色度空间,还可以知道高光像素的色度 C_h 是漫反射分量的色度 C_d 和光源色度 C_i 的线性组合,即

$$C_h = \alpha C_d + (1-\alpha)C_i \quad (1)$$

这里, $0 \leq \alpha \leq 1$,且 α 的取值只与像素的位置和表面材料的属性相关.对于非高光区域的像素,色度是常数 C_d ,即 $\alpha=1$.

从高光区域内部某一点出发进行区域生长,直到边界像素的色度变化都小于某一个设定的阈值为止,就可以获得一个高光区域的初始估计.本文使用拉普拉斯算子来衡量色度的变化.由于噪声等因素的干扰,通过一次区域生长获得的高光区域往往并不非常准确.通过实验可以发现,在第 1 次区域生长终止的时候,区域边界上有些像素成功地到达并停止在漫反射区域,有些却因为噪声仍然停留在高光区域.为此,本文引入了一个再检测的过程.第 1 次区域生长结束后,选取区域边界亮度较低的若干像素的色度平均值作为 C_d 的估计值,然后对该区域再次进行区域生长,直到所有边界像素的色度到 C_d 的欧氏距离小于某一阈值.这样可以获得一个准确得多的高光区域估计,如图 2 所示.同时也获得了一个对于漫反射色度 C_d 的估计.

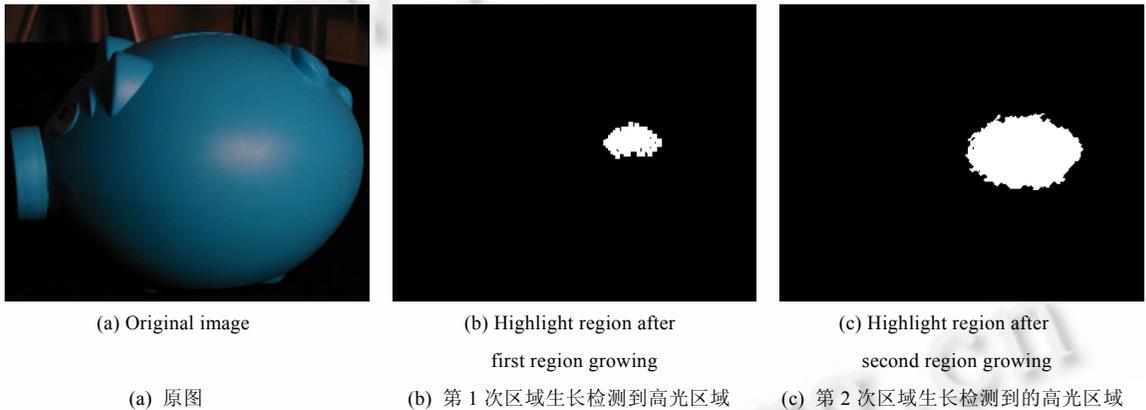


Fig.2 Highlight detection by user interactive

图 2 基于用户交互的高光区域检测

3 高光色度分析

本节对高光像素的色度进行分析,得到光源色度 C_i 取值范围的估计.如文献[7]所述,分析色度而不是直接分析 RGB 颜色,可以避免因为高光像素簇扭曲而产生的问题.本文只考虑单色物体的情况.根据方程式(1),高光区域内未饱和的每一个像素映射到色度空间后,都落在从 C_d 到 C_i 之间的线段上.因为高光像素都包含了一定的漫反射分量在其中,色度空间中的像素簇形成的直线段通常并不到达 C_i 点,然而,它却提供了一个关于 C_i 的位置的约束,即 C_i 必定落于这一直线段的延长线上,并且位于亮度最强的(也就是高光成分最多的)像素那端.图 3 显示了这一约束.其中,灰色的点簇表示高光像素在色度空间的分布,矩形网格区域表示光源色度的取值范围.

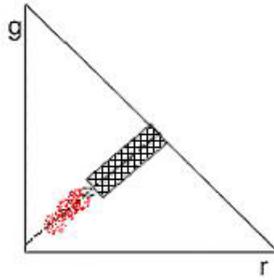


Fig.3 Chromaticity space constrain on illumination color
图3 光源的色度约束

将高光区域内以及边界的像素(不包括已经饱和的像素)映射到色度空间,在色度空间使用霍夫(Hough)变换检测出从 C_d 到 C_i 的直线段,就得到了关于光源色度的取值范围的估计.考虑到图像中的噪声对霍夫变换的影响,我们允许光源色度可以在离直线一定距离的范围内取值.下一节我们将叙述如何利用光照约束的补色在这个取值范围内找到最佳的光源色度,并以这个色度作为约束去除物体表面高光.在本文提出的算法中,对光源色度取值范围的估计可以起到加速作用.如果使用霍夫变换检测直线失败,就需要在整个色度空间中搜索光源色度,这时计算量会有所增大.

4 光照约束的补色

本节首先考虑在已知光源色度的情况下,如何利用该色度做光照约束来去除高光.类似于 Shen^[13],我们采用一个全变化(total variation)的补色方案.给定光源色度,光照约束的补色将在整个高光区域 Ω 中最小化以下能量函数:

$$E_{ci} = \int_{(x,y) \in \Omega} \{|\nabla r(x,y)|^2 + |\nabla g(x,y)|^2 + \alpha |\nabla I(x,y)|^2\} dx dy \quad (2)$$

这里, $r(x,y) = \frac{R(x,y)}{I(x,y)}$; $g(x,y) = \frac{G(x,y)}{I(x,y)}$; $I(x,y) = R(x,y) + G(x,y) + B(x,y)$.

根据假设,一个高光区域的光源颜色是单一的,即光源色度是单一的,高光像素的颜色值是漫反射分量与高光分量的线性组合.我们提出光照约束如下:

$$(R(x,y), G(x,y), B(x,y)) = (R_0(x,y), G_0(x,y), B_0(x,y)) + \gamma(x,y) \hat{C}_i \quad (3)$$

这里, $(R_0(x,y), G_0(x,y), B_0(x,y))$ 表示原始高光图像中观测到的像素值; \hat{C}_i 是三维向量表示的这一高光区域的光源色度,值为 $(r_i, g_i, 1 - r_i - g_i)$; α 是一个权重; $\gamma(x,y)$ 用于调整像素颜色值.当给定光源色度 \hat{C}_i 之后,优化过程实际上是为每一个像素调整 $\gamma(x,y)$ 使得能量最小化的过程.

从 RGB 空间来看,通过这一约束,漫反射分量的取值被限制在一系列平行于光源色度向量的直线上,如图4所示.在图4中,漫反射分量必须落在平行于光源色度的直线上.图中直线 \hat{C}_d 上的黑点就是高光点 I_0 沿光源色度 \hat{C}_i 往 \hat{C}_d 投影的结果.通过最小化能量,漫反射分量在这些直线上的具体位置被确定下来.由于这些直线之间的距离,估计出来的各个像素的漫反射值保留了一些变化,这些变化正是初始的高光图像中所包含的漫反射光的变化.这样,光照约束的补色就能比一般的补色更好地保持漫反射光的明暗变化.光照约束的补色还保留了图像中的细节.相反地,一般的补色方法则会丢失高频分量,这使得我们的结果比一般补色方法的结果看起来更自然.

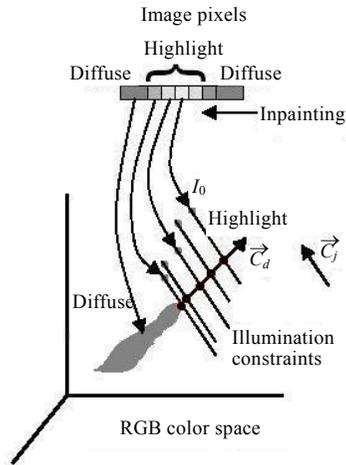


Fig.4 Illumination constrained image inpainting

图4 光照约束的补色方法

在最小化能量函数(2)的时候,需要为每一个像素搜索最优的 $\gamma(x, y)$, 选取合适的初值可以极大地加快计算.对高光区域中的每一个像素,在 RGB 空间中沿着 \hat{C}_i 方向往 \hat{C}_d 投影,以投影点作为对这一像素漫反射光的初始估计.这样可以获得 $\gamma(x, y)$ 在这一点的一个较优的初始值.即

$$\gamma(x, y) = \frac{\|(R'(x, y), G'(x, y), B'(x, y)) - (R_0(x, y), G_0(x, y), B_0(x, y))\|}{\|\hat{C}_i\|} \quad (4)$$

这里, $\|\cdot\|$ 表示三维向量的模, $(R_0(x, y), G_0(x, y), B_0(x, y))$ 表示原始图像中的观测值, $(R'(x, y), G'(x, y), B'(x, y))$ 表示沿光源色度的投影结果.在 $\gamma(x, y)$ 这个初始值的领域内搜索,可以得到使得能量最小的最优值.

上面讨论的是在已知光源色度 \hat{C}_i 的情况下优化能量函数去除高光的问题.上一节中,通过对高光像素的色度分析,得出了一个光源色度的取值范围.采用一定的搜索步长,逐一尝试这个色度取值范围中的所有色度值,选取使得补色后能量 E_{ci} 最小的色度 \hat{C}_i 为光源色度,就可以得到一个光源色度估计.从图 4 中可以看出,搜索最优光源色度 \hat{C}_i 就是搜索使得补色的结果最为光滑的平行直线簇方向.能量定义(2)保证了通过最小化补色后能量 E_{ci} 可以得到光源色度的精确估计.这是因为能量定义式(2)中包含了对图像色度不连续性的惩罚,当光源色度估计错误的时候,补色过程将会收敛在较大的能量值上,因此能够保证通过最小化能量获得的光源色度是正确的.

5 实验结果与讨论

光照约束的补色比一般的补色在去除高光方面更为有效,恢复出的漫反射分量更为准确.图 5 给出了一个例子.一般的补色就是对区域内部做某种形式的插值,最终的结果使得整个表面给人一种“平坦”的感觉,不能真实地反映因表面法向量变化而引起的明暗变化,而光照约束的补色方法能给出更为准确和自然的结果.如图 5(c)所示,高光区域内部的亮度值大于高光区域边界,这是一般的补色算法所不能做到的.

与以往的通过颜色分析去除高光的方法相比,光照约束的补色方法更具有优越性.以往的去高光的方法通常都在获得精确的光源色度估计时遇到问题.本文的算法通过采用补色方法,引入一个色度光滑性约束,成功地消除了光源色度的不确定性,给出更为准确的光源色度估计,从而得到更好的结果.

图 6、图 7 给出了一些用本文的算法去除高光的例子.由于相机对光线强度响应的非线性特点,这里所有的图像 RGB 分量都需要采用文献[14]中的方法线性化.线性化的工作对于一个相机只需做一次,因此并不给本算法的应用造成障碍.在实验中,式(2)中使用的 α 取值为 10^{-4} .图 6、图 7 是对一个具有复杂几何形状的物体的实验结果.该结果中很好地保留了因为物体几何形状变化而产生的明暗细节,这是一般的补色所不能做到的.从图 7

中也可以看出,物体表面由于自遮挡造成的阴影对于本文的去除高光算法有一定影响.

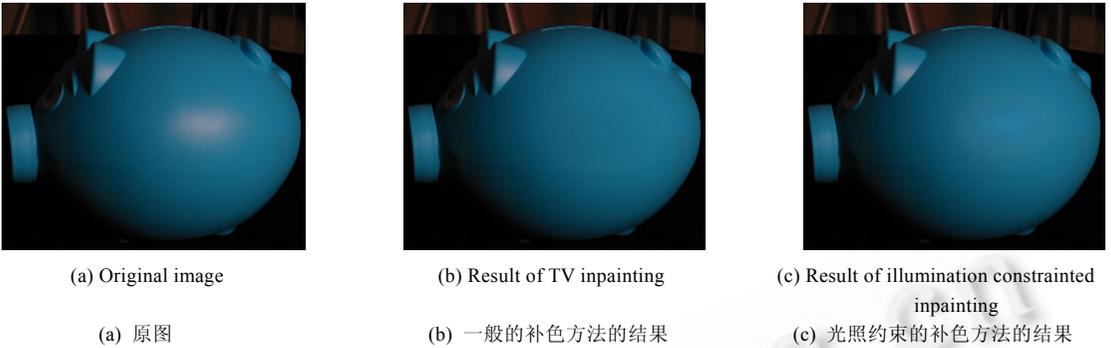


Fig.5 A comparison of highlight removal methods
图5 两种补色方法的对比

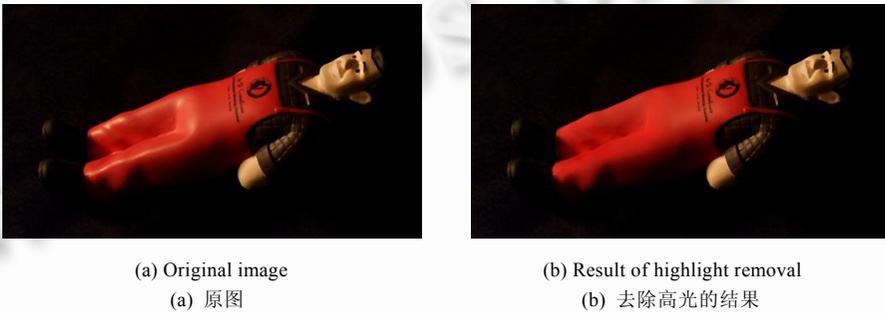


Fig.6 Highlight removal on complex surface
图6 光照约束的补色方法去除复杂表面的高光

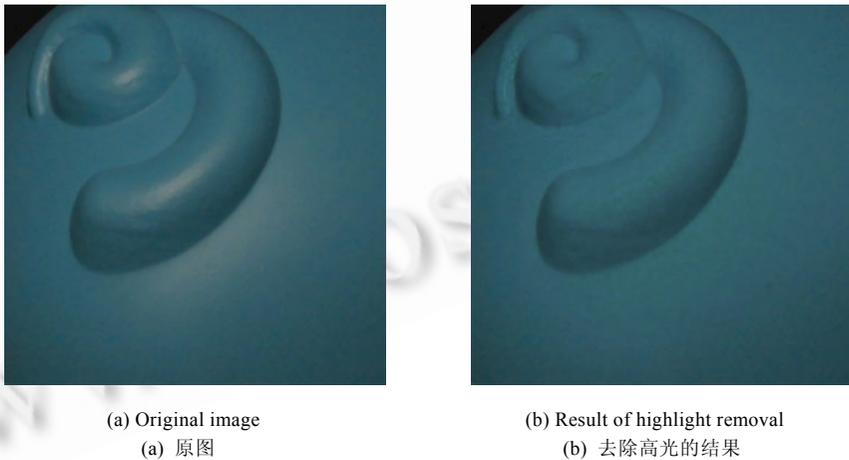


Fig.7 Highlight removal on complex surface
图7 光照约束的补色方法去除复杂表面的高光

实验结果表明,基于光照约束的补色方法可以从图像中准确地估计光源的色度,并且利用这一色度作为约束,有效地去除具有复杂几何形状的单色物体表面的高光,恢复出漫反射光.进一步的工作可以在以下几个方面开展:

- 将本文提出的方法应用到含有丰富纹理的表面,特别是在处理高光区域中出现了边界处不存在的新颜色的情况.

- 设计完全自动的高光检测算法,使得整个计算过程无须人工干预.

致谢 在此,感谢在本文的撰写过程中,王天树博士、孙剑博士给予的宝贵意见.徐迎庆老师的修改给本文增色不少.

References:

- [1] Wolff LB. Using polarization to separate reflection components. In: Proc. of the IEEE Computer Vision and Pattern Recognition. 1989. 363~369.
- [2] Sato Y, Ikeuchi K. Temporal-Color space analysis of reflection. Journal of the Optical Society of America A, 1994,11(11).
- [3] Nayar SK, Fang X, Boulton TE. Removal of specularities using color and polarization. In: Proc. of the IEEE Computer Vision and Pattern Recognition. 1993. 583~590.
- [4] Klinker GJ, Shafer SA, Kanade T. The measurement of highlights in color images. International Journal of Computer Vision, 1990,2:7~32.
- [5] Shafer SA. Using color to separate reflection components. COLOR Research and Application, 1985,10(4):210~218.
- [6] Noak CL, Shafer SA. Anatomy of a color histogram. In: Proc. of the IEEE Computer Vision and Pattern Recognition. 1992. 599~605.
- [7] Lee H-C. Method for computing the scene-illuminant chromaticity from specular highlights. Journal of the Optical Society of America A, 1986,1(10).
- [8] Brainard DH, Freeman WT. Bayesian color constancy. Journal of the Optical Society of America A, 1997,14(7).
- [9] Sapiro G. Color and illuminant voting. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999,21(11).
- [10] Finlayson GD, Hordley SD, Hubel PM. Color by correlation: A simple, unifying framework for color constancy. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001,23(11).
- [11] Bertalmio M, Bertozzi AL, Sapiro G. Navier-Stokes, fluid dynamics, and image and video inpainting. In: Proc. of the IEEE Computer Vision and Pattern Recognition. 2001. 355~362.
- [12] Bertalmio M, Sapiro G, Ballester C, Caselles V. Image inpainting. In: Computer Graphics, SIGGRAPH 2000. 2000. 417~424.
- [13] Chan TF, Shen JH. Mathematical models for local nontexture inpaintings. SIAM Journal on Applied Mathematics, 2002,62(3): 1019~1043.
- [14] Debevec PE, Malik J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. In: Proc. of the SIGGRAPH'97. 1997.