

# 一种单幅室外图像的阴影去除算法\*

刘艳丽<sup>1,2</sup>, 石俊<sup>1,2</sup>, 张严辞<sup>1,2+</sup>

<sup>1</sup>(四川大学 计算机学院, 四川 成都 610065)

<sup>2</sup>(四川大学 视觉合成图形图像技术国防重点学科实验室, 四川 成都 610065)

## Shadow Removal Based on Single Outdoor Image

LIU Yan-Li<sup>1,2</sup>, SHI Jun<sup>1,2</sup>, ZHANG Yan-Ci<sup>1,2+</sup>

<sup>1</sup>(College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

<sup>2</sup>(State Key Laboratory of Fundamental Science on Synthetic Vision, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

+ Corresponding author: E-mail: yczhang@scu.edu.cn

Liu YL, Shi J, Zhang YC. Shadow removal based on single outdoor image. *Journal of Software*, 2012, 23 (Suppl. (2)): 168-175 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/12036.htm>

**Abstract:** This paper proposes an algorithm for shadow-removal based on a single outdoor image. The algorithm consists of three steps: first, the study the characteristics of outdoor illumination and an color space to detect the shadow areas in the outdoor scene. Second, by taking detected shadows as background, the paper incorporates the matting method to calculate the matting scale factor, with which the penumbra can receive consistent lighting. Finally, shadow pixels are relit by multiplying the corresponding scale factors derived from the matting scale factor. The experimental results demonstrate that the proposed approach can not only detect the self-shadow and cast-shadow, but also produce satisfactory shadow removal results in various outdoor scenes.

**Key words:** shadow detection; shadow removal; image matting; Markov random field

**摘要:** 提出了一种针对单幅室外场景图像的阴影去除算法. 该算法首先利用室外光照特点和改进的颜色空间检测出室外场景中的阴影, 其次, 为了进一步准确地检测半阴影区域以便去除阴影时更好地保持纹理区域, 将检测出的阴影标记为背景, 使用图像前景抠取算法计算抠取比例因子, 最后, 根据计算得到的抠取比例因子计算去除阴影所应打光的比例因子, 给阴影区域打回相应的光照. 实验结果表明, 该算法不但能够检测出场景中的自阴影和投射阴影, 而且在去除阴影的同时可以有效地保持原图阴影内的纹理.

**关键词:** 阴影检测; 阴影去除; 图像抠取; 马尔可夫随机场

在计算机视觉与图像处理中, 阴影往往给视频监控、视频分割等算法带来困难. 因此, 阴影去除一直是图像处理领域的热点之一. 去除场景中的阴影需要首先检测出场景中的阴影区域, 然后对其亮度进行调整, 使其与周围非阴影区域具有相同的光照效果, 我们将这个过程称为打光. 由于受场景几何、光照条件等因素的影响, 阴影检测和去除非常困难.

目前, 图像处理领域已有大量的阴影检测工作. 由于阴影不仅引起图像灰度值上的剧烈变化, 同时还改变图

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61103137, 60832011, 60903118); 国家重点基础研究发展计划(973)(2009CB320800); 浙江大学CAD&CG 国家重点实验室开放课题(A1112)

收稿时间: 2012-05-20; 定稿时间: 2012-09-29

像中纹理、颜色等特征,因此基于灰度值变化特征<sup>[3]</sup>、颜色空间变换<sup>[17]</sup>和基于高斯混合模型<sup>[20]</sup>等的阴影检测算法都只能适用于某些特定类型的场景.为此,文献[5,7,9,16,22]通过对图像三通道灰度值进行相应的变化来得到光照不变特征图像,并将其分割结果与原图像的边缘结合起来以确定出阴影区域.这种基于光照不变图像的阴影检测算法对于场景中的投射阴影检测效果显著,但对于场景中的自阴影的检测并不理想.最近几年来,基于统计学习的阴影检测算法受到了越来越多的关注<sup>[9,11,22]</sup>.基于统计学习的阴影检测算法具有更好的通用性和鲁棒性,但它们往往需要复杂的离线学习过程.

本文提出了一种新的针对单幅的室外场景图像的阴影检测和去除算法,该方法利用室外光照特点能快速地检测出室外场景中的阴影,并且通过简单的交互输入计算出场景中各光照成分的比例从而进行阴影区域的打光处理.最后,采用 Levin 等人<sup>[1]</sup>的方法来对较难处理的半阴影区域进行光照增强处理,较好地提升了阴影去除后的效果.算法的实现流程如图 1 所示.沿着如箭头方向首先检测出场景中的阴影,并选择矩形框感兴趣区域来计算场景中的各光照成分的比例,然后使用抠取算法对原图像进行阴影去除.箭头方向为本文算法实现流程.首先从原图像中检测出部分阴影,将腐蚀后的阴影检测结果标记为背景白色,同时自动在其外围标记前景色,使用文献[1]中的方法求出抠取比例因子图,计算得到相应的打光比例因子,打光得到阴影去除后的图像.其中矩形框区域为人工选取的处于同一物体同一平面的且包含阴影和非阴影的感兴趣区域.本文算法不需复杂冗长的学习训练过程,既能保持打光后阴影部分的纹理,同时也能使其与周围环境的光照和谐一致.

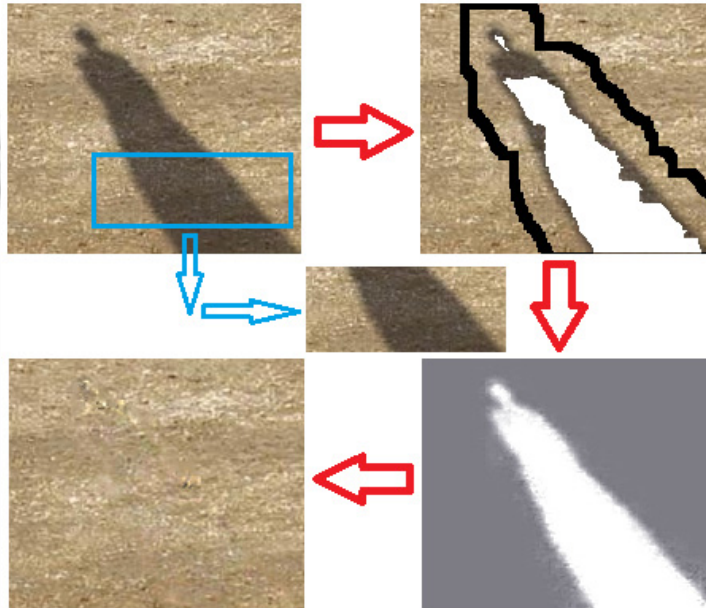


图 1

本文第 1 节为相关算法的介绍.第 2 节详细介绍本文算法.第 3 节为算法实验结果与分析.第 4 节指出算法的一些不足之处,并对今后工作的做出展望.

## 1 相关工作

阴影去除的算法主要分为两大类:基于梯度域的方法和基于灰度值域的方法.两种方法都需精确地标记出阴影的边界,然后将其消除.基于梯度域方法通过调整阴影边界的梯度,使其与周围区域内的梯度保持一致.Xu 等人<sup>[10]</sup>直接在梯度域上对阴影边界进行平滑处理,然后使用泊松编辑<sup>[13]</sup>给整个阴影区域重新打光以得到平滑的整个图像梯度场.但是这种方法易改变整个场景的光照条件且对半阴影区域的纹理破坏严重.Shor 等人<sup>[18]</sup>通

过半阴影区域粘贴纹理来修复阴影区域.该方法虽能避免因为平滑过程而带来的纹理破坏,但是当半阴影区域原有纹理比较复杂时结果将会出现明显的痕迹.

基于灰度值域的阴影去除方法通过利用合适的数学模型来对三维灰度值表面进行描述,根据得到的三维灰度值表面模型来计算阴影区域的灰度值分布.基于灰度值域的方法能够较好地保存阴影过渡区域的纹理且不会改变整个场景中的光照条件.文献[2,12]通过选择阴影周围区域内的多个锚点来插值生成灰度值三维表面,然后通过能量最小化对生成的表面平滑约束.但当阴影区域灰度值非平滑或非一致的时,基于灰度值域的方法结果较差.因为阴影和非阴影区域的灰度值对比度变大且阴影区域内的噪声同时可能被增强.为了增强阴影去除后的视觉效果,文献[12,15]根据非阴影区域来调整阴影区域内灰度值均值和方差来进行增强后处理.文献[18]通过在阴影区域与非阴影区域灰度值之间建立一个仿射映射关系来进行修复.文献[3]提出的直方图定制方法不但能控制每个面片内的统计属性还能保持阴影区域灰度值单调性的特点.这些阴影去除后处理过程需将阴影区域分割成许多面片,并找到与其相匹配的非阴影区域,因此使后处理的过程变得复杂而繁冗.

## 2 本文算法

### 2.1 阴影检测

Chong 等人提出了一种基于感知的颜色空间(perception-based color space)<sup>[4]</sup>,并指出在该颜色空间中两个颜色向量之差的 L2 范数与人类的视觉感知差相匹配且颜色矢量差异不随场景中光照的变化而变化.论文通过图像分割、泊松编辑等实验表明将一幅图像转换到该颜色空间后,可摆脱光照变化的影响,大大提高分割和编辑性能.因此,该颜色空间使得人们对图像有了新的理解和认识.为叙述方便,我们将该空间简记为 PCS 空间,并记该空间的 3 个通道分别为  $C_1C_2C_3$ .我们将待检测阴影的图像转换到 PCS 空间后发现自然场景图像在 PCS 空间呈现以下特征:1)  $C_1C_2$  通道可以近似表征该场景中的光照无关特性,2) 阴影区域在  $C_3$  通道表现出较大值,而非阴影区域值却较小.记新像素  $i$  的阴影标签为  $f_i \in \{0,1\}$  (0 表示非阴影,1 表示阴影).定义图像空间为  $\Omega$ ,场景中的阴影集合可表示为  $S = \{i \in \Omega | f_i = 1\}$ ,则

$$\forall i \in \Omega, \text{ if } \frac{C_3(i)}{C_1(i) + C_2(i) + C_3(i)} > \alpha \text{ and } C_3(i) > \beta \text{ then } i \in S \quad (1)$$

我们首先把满足式(1)的像素作为阴影种子点,然后使用马尔可夫随机场(MRF)<sup>[14,21]</sup>和信任传导(belief propagate)<sup>[19]</sup>算法对阴影区域进行扩充检测.进行阴影扩充的思想是:首先设定一个阈值  $K$ ,根据图像局部平滑的特点,若阴影种子点邻域内的某待检测像素的灰度值与该种子像素灰度值绝对值之差小于  $K$ ,则将该待检测像素标记成阴影,但这种处理方法可能将不是阴影的像素误标记成阴影,为此我们在马尔可夫随机场能量函数中引入一个惩罚项,待检测像素与已种子像素的灰度值绝对值之差(在阈值范围内)越大其惩罚的力度也就越大.用公式表示如下:定义图像的像素集  $p = \{p_i | i \in \Omega\}$  ( $p_i$  表示像素  $i$  处像素灰度值)及标签集  $f = \{f_i \in \{0,1\} | i \in \Omega\}$ ,马尔可夫随机场能量函数表示为

$$U(f | p) = \sum_{j=1}^n \left\{ \sum_{i=1}^m [1 - \delta(f_i - f_j)] + \sum_{i=1}^m w(p_i, p_j) \cdot \delta(f_i - f_j) \right\} \quad (2)$$

其中  $f_i$  和  $p_i$  分别表示像素  $i$  的阴影标签和灰度值,  $n$  和  $m$  分别表示图像中像素点的个数和考虑的邻域数,  $\delta(\cdot) \in \{0,1\}$  为 delta 函数,权重函数  $w(p_i, p_j)$  定义为

$$w(p_i, p_j) = \begin{cases} (p_i - p_j)^2 - K, & f_i = f_j \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

我们使用式(2)大括号中的第 1 项描述图像邻域范围内的平滑性,使用第 2 项保证邻域内的两像素之间的灰度值差异越大,两者阴影标签值不同的可能性也越大.

大多数阴影检测算法对于场景中的投射阴影检测效果明显,而对于场景中由于几何遮拦等原因形成的自阴影却很难检测出来.本文算法中,由于选取的阴影种子像素包含有场景中的自阴影和半阴影区域,所以经过马

尔可夫随机场的扩展检测过程,场景中的投射阴影和半阴影大都能被检测出来.图 2 给出了本文阴影检测算法的一个结果图,从中可以看到我们的算法有效地检测出自阴影区域(矩形框内).经过实验发现,对大多数图像,当  $\alpha=0.6, \beta=15, K=40$  时可取得较好的阴影检测结果.因此,我们将其设置为默认参数,这也是本文的阴影检测例子所使用的参数.



(a) 原图像

(b) 阴影检测结果

图 2

## 2.2 阴影去除

为了剔除影响像素灰度值变化的材质和几何因素,根据上节得到的阴影检测结果,我们选择属于同一物体并处于相同平面上的包含阴影和非阴影的一块区域来计算场景中的光照.设选取的包含阴影和非阴影区域为  $R$ ,记  $R$  中的阴影像素集合为  $S=\{i|i \in R, f_i=1\}$ ,非阴影像素集合为  $\bar{S}=\{i|i \in R, f_i=0\}$ .计算阴影像素集合  $S$  中的平均灰度值为

$$L_{sky} = L_{sky} \times A_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i, i \in S \quad (4)$$

其中,  $A_i$  为像素  $i$  处表征表面材质、遮挡项和双向反射分布函数综合作用的函数.由于天空光分布复杂多变,考虑到问题的可解性,本文近似地将天空视为一个均匀的面光源,所以整个场景中的天空光强描述子  $L_{sky}$  近似相同.非阴影像素集合  $\bar{S}$  中的平均灰度值可表示为

$$I_{full} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i, i \in \bar{S} \quad (5)$$

同时定义全光照(天空光照+太阳光照)与天空光照的光照比例因子:

$$\kappa = \frac{I_{full}}{L_{sky}} = \frac{L_{sun} \cdot \cos \theta + L_{sky}}{L_{sky}} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,  $\kappa$  比例因子已经剔除了诸如物体表面材质、遮挡项和双向反射分布函数等因素,给阴影区域打光只需为每个检测出来的阴影像素灰度值乘上相应的光照比例因子  $\kappa$  即可.但在实验中发现,利用该方法得到的阴影去除后的图像阴影边界附近会出现不协调的光照,我们对这种原因进行了分析,发现这是由于半阴影区域像素受到了一部分太阳光的照射,而打光时却把这些半阴影像素当成了本阴影像素打回了整个太阳光照,从而使得这些像素显得更亮,出现了光照不一致的现象.为此,需要对半阴影区域进行标示.

为了更准确地表示半阴影区域,我们使用  $[0,1]$  区间表示阴影像素处的遮挡情况.具体方法是:(1) 设置背景阴影区域抠取比例因子值为 1,前景全光照区域抠取比例因子值为 0.(2) 采用文献[25]的抠取算法求得半阴影区域(前景和背景的过渡区域)的抠取比例因子  $\alpha$  (满足  $0 < \alpha < 1$ ),根据  $\alpha$  给半阴影像素打回相应的光照.上述方法使用公式表示如下(对于图像中的每个像素灰度值定义如下关系式):

$$I_i = \rho_i \cdot (t_i \cdot L_{sun} \cdot \cos \theta_i + L_{sky}) = (1 - \alpha_i) \cdot F_i + \alpha_i \cdot B_i \quad (7)$$

$I_i$  表示原图像中像素  $i$  的灰度值,  $0 \leq t_i \leq 1$  为太阳光遮挡因子,  $\theta_i$  为入射光线和物体表面法线夹角,  $\rho_i$  为反射系数,  $F_i$  表示前景像素值,  $B_i$  表示背景像素值,  $\alpha_i$  为背景像素值所占的比例即抠取比例因子. 把背景定义为天空光成像  $B_i = L_{sky} \rho_i$ , 前景为全光照且  $t_i = 1 - \alpha_i$ . 为了尽量减少半阴影区域误标记带来的影响, 我们先使用腐蚀算法将检测出来的阴影结果进行腐蚀, 确保半阴影区域不会被标记. 然后在阴影外围一定距离(30 个像素)外区域用黑色标记前景如图 1 所示. 同时将标记的背景区域抠取比例因子置为 1, 前景和未标记的区域抠取比例因子置为 0. 使用公式(7)和文献[1]中的算法求解出整幅图像的抠取比例因子.

定义太阳光强与天空光强的比例因子:

$$r = \frac{L_{sun}}{L_{sky}} \quad (8)$$

对于阴影去除图像中每个像素  $I_i^{shadow\_free}$  满足:

$$\begin{aligned} I_i^{shadow\_free} &= (L_{sun} \cos \theta_i + L_{sky}) \rho_i \\ &= \frac{L_{sun} \cos \theta_i + L_{sky}}{t_i L_{sun} \cos \theta_i + L_{sky}} I_i \\ &= \frac{r \cos \theta_i + 1}{(1 - \alpha_i) r \cos \theta_i + 1} \end{aligned} \quad (9)$$

结合公式(6)和公式(8)可以得到:

$$r = \frac{\kappa - 1}{\cos \theta_i} \quad (10)$$

将公式(10)代入公式(9)得到阴影去除图像的表达式:

$$I_i^{shadow\_free} = \frac{\kappa}{\kappa + \alpha_i - \kappa \alpha_i} I_i \quad (11)$$

公式(11)给出了对于原图像中每个像素阴影去除的表达式. 根据该式, 只需在原像素灰度值的基础上乘上一个比例因子  $\frac{\kappa}{\kappa + \alpha_i - \kappa \alpha_i}$  即可得到全光照图像. 对于背景本阴影区域  $\alpha_i$  其取值为 1, 此时像素将直接乘以光照比例因子  $\kappa$ , 对于前景全光照区域  $\alpha_i$  取值为 0, 此时像素灰度值不变, 在半阴影区域其  $0 < \alpha_i < 1$ , 其像素灰度值将乘以比例因子  $\frac{\kappa}{\kappa + \alpha_i - \kappa \alpha_i}$ , 打回的光照少于本阴影区域且大于非阴影区域, 可达到光照平滑过渡的效果.

### 3 实验结果

我们首先选取了 3 个室外场景来进行阴影检测, 这些场景除了具有丰富的投射阴影外还含有因遮拦关系而形成的自阴影区域, 其实验结果如图 3 所示. 从下排的阴影检测效果来看, 算法对于自阴影区域也能较好地检测. 对于灰度值较大的白色自阴影区域检测失效的原因是这些像素灰度值在原 RGB 三通道上的值大相等, 转换后的  $C_1 C_2 C_3$  三通道上的值也差别不大, 使得变换后并不满足阴影检测公式(1).

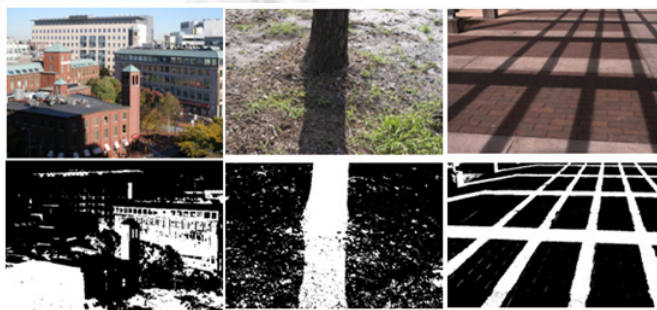


图 3 上排图像为原图像, 下排图像为阴影检测结果

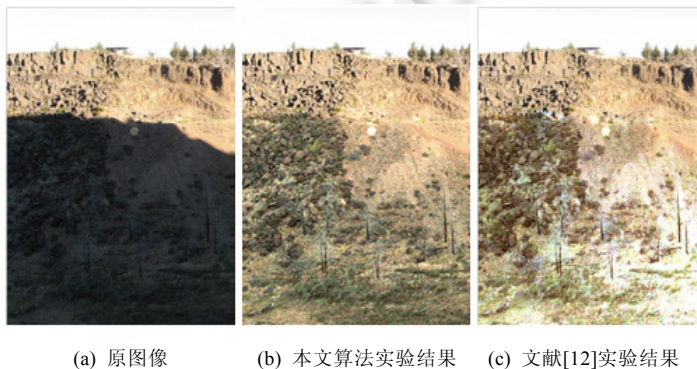


阴影去除后的效果如图 4 所示,从左往右依次为原图像、抠取比例因子图(图中像素的灰度值越大表明其抠取比例因子越大)和阴影去除后的图像.从实验结果可以看到阴影部分的光照与周围环境能较好地保持了一致,并且在阴影与非阴影的过渡区域没有出现明显的光照突刺(其光照强于附近非阴影区域和打光后本阴影区域内的光照而形成的光照不协调现象),从而在半阴影区域形成了良好的光照过渡效果.



图 4 从左往右依次为原图像,抠取比例因子图和阴影去除后的图像

我们还将本文算法与现有的代表性的阴影去除方法进行了比较.图 5 中给出了本文算法与文献[12]的实验结果比较,从中可以看出本文算法阴影去除的实验结果比文献[12]光照更自然和谐,较好地保持了山地上草木的纹理和颜色特征,没有出现如文献[12]中阴影去除结果过亮的缺点.我们还将本文算法分别与文献[6,8,18,20]进行了比较,实验结果如图 6 所示,其中,(a)为原图像,(b)为文献[8]实验结果,(c)为文献[6]实验结果,(d)为文献[18]实验结果,(e)为文献[20]实验结果,(f)为本文算法实验结果.从中可以看到这些算法得到的阴影去除图像或是光照不协调(图 6(b)和图 6(c)),或是纹理损坏严重(图 6(d)和图 6(e)),或是有些阴影去除效果并不充分,人工痕迹较为明显(图 6(d)).从图 6(f)图可以看出,本文中所提出的算法不但能得到光照一致的阴影去除图像,而且较好地保持了原图像的纹理特征.



(a) 原图像 (b) 本文算法实验结果 (c) 文献[12]实验结果

图 5

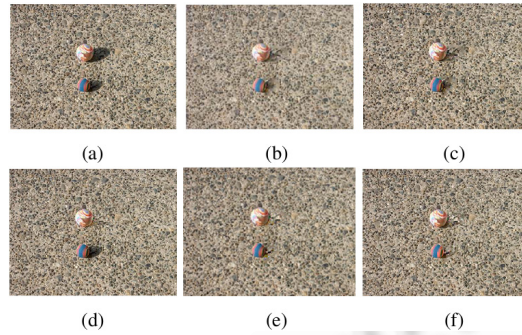


图 6

## 4 总 结

针对单幅室外图像,我们提出了一种基于马尔可夫随机场的阴影检测方法,并利用抠图算法给阴影区域打回相应的光照达到阴影去除的效果.算法输入简单且实现快捷,对多种室外场景的阴影检测和去除效果理想.本文算法的缺陷是对一些具有较大灰度值的白色自阴影区域检测时会失效或效果不理想.同时,在某些室外场景的阴影去除效果图中,有些阴影内部区域光照强度并不一致,表现为光照强度在沿着阴影投射的方向上逐渐变强.这是由于在较大片的阴影区域中,离遮挡物较近的阴影区域受到的天空光照要少于较远处得到的天空光照造成的.如何更好地适应室外场景中的自阴影检测以及均衡天空光照在投射阴影内的影响将是我们以后努力和研究的方

## References:

- [1] Levin A, Lischinski D, Weiss Y. A closed-form solution to natural image matting. In: Proc. of the CVPR. 2008. 228–242.
- [2] Arbel E, Hel-Or H. Shadow removal using intensity surfaces and texture anchor points. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011,33(6).
- [3] Baba M, Mukunoki M, Asada N. Shadow removal from a real image based on shadow density. In: Proc. of the ACM SIGGRAPH 2004 Posters. 2004.
- [4] Chong HY, Gortler SJ, Zickler T. A perception-based color space for illumination-invariant image processing. In: Proc. of the ACM SIGGRAPH. 2008.
- [5] Finlayson G, Hordley SD, Lu C, Drew MS. On the removal of shadows from images. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006,28:59–68.
- [6] Finlayson GD, Drew MS, Lu C. Intrinsic images by entropy minimization. In: Proc. of the ECCV. 2004. 582–595.
- [7] Gevers T, Smeulders AWM. Color based object recognition. Pattern Recognition, 1997,32:453–464.
- [8] Finlayson GD, Drew MS, Lu C. Entropy minimization for shadow removal. Int. J. Comput. Vis., 2009,85:35–57.
- [9] Guo RQ, Dai QY, Hoiem D. Single-Image shadow detection and removal using paired regions. In: Proc. of the CVPR. 2011.
- [10] Xu L, Qi FH, Jiang RJ. Shadow removal from a single image. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Intelligent Systems Design and Applications. 2006. 1049–1054.
- [11] Lalonde JF, Efros AA, Narasimhan SG. Detecting ground shadows in outdoor consumer photographs. In: Proc. of the ECCV. 2010.
- [12] Liu F, Gleicher M. Texture-Consistent shadow removal. In: Proc. of the European Conf. on Computer Vision. 2008. 437–450.
- [13] Perez P, Gangnet M, Andrew B. Poisson image editing. In: Proc. of the SIGGRAPH. 2003.
- [14] Szeliski R, Zabin R, Scharstein D, Veksler O, Kolmogorov V, Agarwala A, Tappen M, Rother C. A comparative study of energy minimization methods for Markov random fields. In: Proc. of the ECCV. 2006. 16–29.
- [15] Guo RQ, Dai QY, Hoiem D. Single-Image shadow detection and removal using paired regions. In: Proc. of the ICCV. 2011.
- [16] Salvador E, Cavallaro A, Ebrahimi T. Shadow identification and classification using invariant color models. In: Proc. of the ICASSP, Vol 3. 2001. 1545–1548.

- [17] Shan Y, Yang F, Wang RS. Color space selection for moving shadow elimination. In: Proc. of the 4th Int'l Conf. on Image and Graphics. 2007. 496–501.
- [18] Shor Y, Lischinski, D. The shadow meets the mask: Pyramid-Based shadow removal. In: Proc. of the Eurographics 2008. 2008.
- [19] Tappen MF, Freeman WT. Comparison of graph cuts with belief propagation for stereo, using identical MRF parameters. In: Proc. of the ICCV. 2003. 900–907.
- [20] Wu TP, Tang CK, Brown MS, Shum HY. Natural shadow matting. ACM Trans. on Graphics, 2007,26(2).
- [21] Li SZ. Markov Random Field Modeling in Image Analysis. Springer-Verlag, 2003.
- [22] Zhu JJ, Samuel KGG, Masood SZ, Tappen MF. Learning to recognize shadows in monochromatic natural images. In: Proc. of the CVPR. 2010. 223–230.



刘艳丽(1981—),女,博士,讲师,主要研究领域为计算机图形学,增强现实,图像/视频处理.



张严辞(1975—),男,博士,副教授,主要研究领域为并行计算,计算机图形学.



石俊(1986—),男,硕士生,主要研究领域为图像视频处理.