

灰度一致纹理图像的光参数估算方法

孙玉娟¹, 董军宇², 王增锋¹

¹鲁东大学信息与电气工程学院, 山东 烟台 264025;

²中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100

摘要 从单幅图像估算光照参数时未知条件太多,而采用多幅输入图像的方法估算光照参数,虽然精度较高,但增加了输入数据的复杂度。提出灰度一致图像的光参数估算方法,能够从输入的单幅图像准确地估算光照参数。该方法通过探测输入图像的最大亮度变化方向估算光照的方位角;通过检测输入图像与虚拟光环境下的随机纹理的相似性估算光照的翘角。对 Photex 纹理库中的 24 类图像(共 142 幅图像)进行了实验,实验结果表明,该算法对于表面灰度一致图像的光参数估算具有较高的准确率。

关键词 图像处理; 光参数估算; 密度参数; 灰度一致纹理; 朗伯模型

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.061002

Estimation of Lighting Parameters for Uniform Texture Image

Sun Yujuan¹, Dong Junyu², Wang Zengfeng²

¹ School of Information and Electrical Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China;

² College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China

Abstract Estimating lighting direction from a single input image requires too many unknown parameters, whereas although the accurate estimated lighting parameters from multiple input images can be obtained, the complexity of the input data is increased. The method for lighting parameters estimation of the uniform texture images is proposed. The proposed algorithm only utilizes one input image for estimating the lighting directions. By detecting the largest direction of the brightness changes of the input image, the azimuth angle of the light source can be estimated. The slant angle is estimated by detecting the similarity between the input image and the random texture with virtual lighting conditions. 24 kinds of texture images (142 images) in Photex database are studied experimentally. Experimental results show that the proposed approach is effective and robust in estimating the lighting parameters for the uniform texture images.

Key words image processing; estimation of lighting parameters; density parameter; uniform texture; Lambertian model

OCIS codes 100.6890; 100.2000; 100.3010

1 引言

准确估算图像的光照环境或光照参数在计算机视觉应用^[1-2]中具有非常重要的意义,估算的实际光参数可用于绘制虚拟现实中的场景或者物体的光环境^[3],也可用于基于光度立体技术(PMS)的三维重建^[4-5],降低 PMS 光环境控制的复杂性。

由于光照可以看成物体自身颜色或者明暗的一种表现,因此理论上,仅从一幅输入图像很难估计出图像的光照方向。通常可通过图像中影子的方向来粗略估算图像的光环境,但是这种方法对于阴影不明显或者影子很少的图像估算准确率较低,尤其是纹理图像。纹理的表面高度起伏不大,且高度变化随机性较大,无

收稿日期: 2017-01-10; **收到修改稿日期:** 2017-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(61602229)、山东省自然科学基金(ZR2016FM13)

作者简介: 孙玉娟(1977—),女,博士,讲师,主要从事图像处理及光度立体技术等方面的研究。

E-mail: syj_anne@163.com

法通过明显的阴影来判断光照的方向。本文提出一种简单有效的光照估计算法,可快速估算单幅纹理图像的光照参数。

纹理图像的表面是凹凸不平的,当光照射到纹理表面时,沿着光照方向会产生微小的、不同形态的阴影,如自阴影、投射阴影等。产生的这些阴影主要沿着光照的方向分布,因此光照方向上的亮度对比度是最大的。通过检测纹理图像的最大亮度对比度方向,可检测到光源的方位角。同时,为了检测输入图像中方向光的翘角,通过模拟产生与输入纹理图像表面高度变化一致的合成纹理,并配以虚拟光环境,检测输入图像与具有虚拟光的随机纹理图像的相似性,进而估算光照方向的翘角。本文提出的光照方向估算方法具有速度快、实时性高且不需要训练库的特点,可准确有效地估算具有表面灰度一致性的纹理图像的光照参数。

2 光照估算方法概述

目前,由拍摄的场景图像估算实际场景的光照环境或者光照参数的研究方法已经有很多种,大致分为四类。

第一类光照估算方法,需要已知输入图像中某个(或者某些)物体的三维形状。文献[4]和文献[6]提出了一种简单的点光源方向估算法,假设此点光源存在于无穷远处,基于朗伯反射模型和输入图像中某个物体的三维形状,利用图像中像素的灰度变化信息可准确的估算出光照方向。为了降低光学反射模型的约束条件,文献[7]采用一套球协系数正交基描述物体的光学反射特性,根据同一场景中物体的光照是否一致进行真伪图像检测。为了进一步降低对场景中反照率一致性的约束限制,文献[8]提出了一种可同时估算光参数和物体反照率的方法,需要输入同一场景或物体的两幅图像,这两幅图像必须在不同的光环境下拍摄,该方法可同时估算出两种不同光环境下的参数。文献[9]提出了一种可从单视图估算光源位置和强度的方法,但是需要已知场景中物体的表面法向量。此类光照估算方法对图像中已知物体形状的约束限制了其应用范围。

第二类光照估算方法,需要图像具备某些特殊的特征。文献[10]利用图像中的投射阴影、自阴影、高光等光学反射特征,提出了一种合成多因素的光照方向估算法,此方法对于具有明显阴影或者高光的输入图像具有较准确的估算结果。文献[11]提出了一种基于单幅输入图像的光照方向估算法,该方法需要提前将具有朗伯反射特性的遮挡物体分割出来,用于进一步的光照估算。文献[12]专门对室外太阳光和天空光进行了研究,可实现静态室外场景的阴影分离和光照估算。此类方法仅适用于具备某些特殊光学反射特性的图像。

第三类光照估算方法,是使用特殊的感光设备或者仪器捕获场景的光照信息。例如使用结构光估算场景的光照方法^[13]、使用 Kinect 的彩色相机和深度相机估算白色点光源的位置^[14]等。

最后一类光照估算方法,主要是针对纹理图像,文献[15-16]提出了一种基于朗伯模型从单幅纹理图像估算光照方位角的方法,通过求纹理图像的二阶微分统计特性,可估算垂直视角下平行光的光照参数,但是该文献中并没有给出估算光源翘角的方法。文献[17]将这一理论进一步推广到非一致性纹理图像。由于该理论的推理都是在高斯分布的假设下,因此要求输入的纹理图像必须具有高斯分布,且仅适用于平行光光源。文献[18-20]利用纹理库,在对纹理进行分类的同时估算光照的方位角,但该方法需要大量的训练样本,且估算光照的速度很慢。本文主要研究纹理图像的光照估算方法,该算法仅需要单幅输入图像,不需要提供纹理图像的训练数据或者纹理库,可快速实现表面灰度一致纹理图像的光照估算。

3 灰度一致纹理图像的光参数估算

提出一种灰度一致纹理图像的光参数估算方法,该方法可快速估算出单幅输入纹理图像的光照方向。为了简化模型,提出以下约束条件,后续的实验验证将不受此约束条件限制:

1) 所拍摄纹理图像的表面反射特性严格遵守朗伯反射模型,且光源为无穷远处点光源,光源参数(光源方位角和翘角)未知,如图 1 所示。

2) 纹理图像的表面反照率是一致的,即纹理图像表面反照率不能有明显的纹理方向。

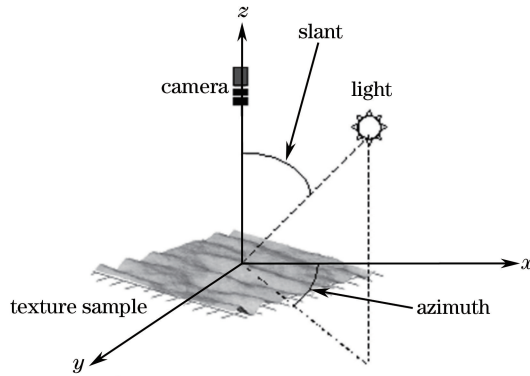


图 1 朗伯光学反射模型

Fig. 1 Lambertian optical reflection model

图 1 为朗伯光学反射模型示意图,图中样本为表面凹凸不平的纹理,相机位于该纹理的正上方,镜头向下拍摄此纹理图像。拍摄图像时,点光源从无穷远处照射到纹理表面(光源离纹理的距离远大于纹理的尺寸时,即可认为是无穷远光源)。光源与相机光轴的夹角称为翘角,光源投影到纹理平面后与 x 轴的夹角称为方位角。只要确定翘角和方位角即可确定光源的准确方位。

3.1 纹理图像光照方向方位角的测量

当光沿着某方向照射到物体上时,如果物体的表面凹凸不平,则会产生不同种类的阴影,如自阴影和投射阴影,由于光是沿直线传播的,产生的阴影大多数与光传播方向是平行的,即平行于光传播方向的物体表面亮度变化是最大的,通过检测亮度变化最大的方向可检测出光源的方位角。为了更形象地表示出表面图像变化的方向,将拍摄到的纹理表面变换到频域。如图 2 所示,为不同方位角光照方向的岩石纹理图像,图 3 为图 2 中岩石纹理的频域图像。

岩石纹理的频域图像更直观的显示了沿着光照方向灰度变化的最大特性,为了能够检测出频域的最大变化方向。利用文献[21]中人类感知轮廓与边界的视皮质增强模型,检测岩石纹理的频域方向。

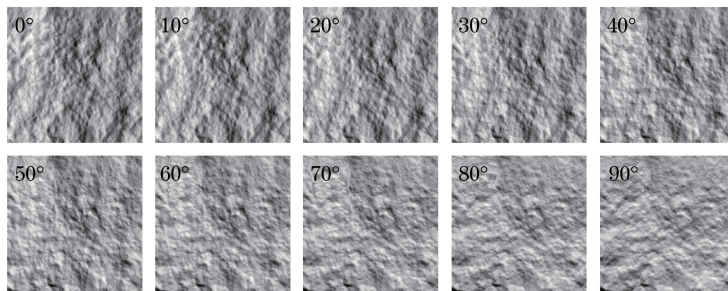


图 2 翘角为 45° 时不同方位角光照方向的岩石纹理图像

Fig. 2 Rock texture images captured with slant angle of 45° in different azimuth angles

人眼的生理特性表明,视觉系统具有快速感知轮廓的特性,而 Gabor 函数可以很好的模拟人眼感知轮廓的生理特性,采用二维 Gabor 函数作为人眼感知轮廓的数学模型,检测频域的方向信息。二维 Gabor 函数的数学表达式为

$$G(u, v, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{u^2 + v^2}{\sigma^2}\right), \quad (1)$$

式中 σ 为 G 的方差, (u, v) 表示 G 的朝向,由笛卡尔坐标系下的 (x, y) 旋转得到,即

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 (x, y) 表示人眼感受野的中心位置, θ 表示旋转角度,即人眼感受野的朝向。人眼不仅具有边缘检测的功能,对于边缘为连续的图像轮廓,人眼具有增强边缘的功能。采用边缘增强模型

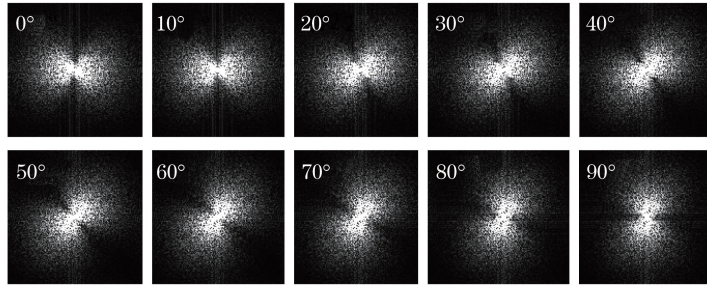


图 3 翘角为 45° 时不同方位角光照方向的岩石纹理的频域图像

Fig. 3 Frequency domain images of the rock texture captured with slant angle of 45° in different azimuth angles

$$E(x, y, \sigma, \theta) = G(x, y, \sigma, \theta) \times (x^2 - y^2). \quad (3)$$

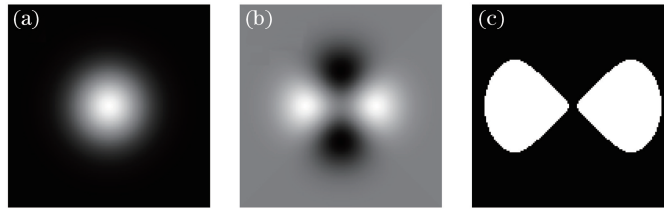


图 4 基于 Gabor 函数的人眼轮廓感知模型。(a)二维 Gabor 函数;(b)边缘增强模型;(c)方向检测模板

Fig. 4 Human eye perception model based on Gabor function. (a) 2D Gabor function; (b) edge enhancement model; (c) direction detection template

图 4(b)所示图像为(3)式所对应的边缘增强模型,将边缘增强模型的灰度平均值设为阈值,对边缘增强模型进行二值化,得到方向检测模板,如图 4(c)所示。将方向检测模板旋转,与频域图像进行卷积,利用最大似然估算法可检测出输入纹理图像光照方向的方位角为

$$T = \{\theta \mid \max_{\theta} \{\text{mean}[F(I) * T(x, y, \sigma, \theta)]\}, \theta = 0^\circ, 5^\circ, \dots, 180^\circ\}, \quad (4)$$

式中 T 为估算的光照方向的方位角, $F(I)$ 为输入纹理的频域图像, $*$ 表示卷积。为了更有效的检测岩石纹理频域的方向信息,将边缘增强模型进行阈值处理提取出方向检测模板,方向检测模板 θ 每 5° 变化一次,通过统计模板内频域图像的平均值,记录下取得最大值时的角度,即可判断出岩石纹理光照的方位角 T 。

3.2 纹理图像光照方向翘角的测量

图 5 所示为岩石纹理及其频谱随光源翘角变化所对应图像。翘角超过 60° 时,会有非常明显的投射阴影,这种情况不在本文研究范围,因此将算法翘角范围限制在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 以内,在此范围内的翘角变化通常只会影响整幅图像的明暗,不会引起纹理图像的外观结构变化。

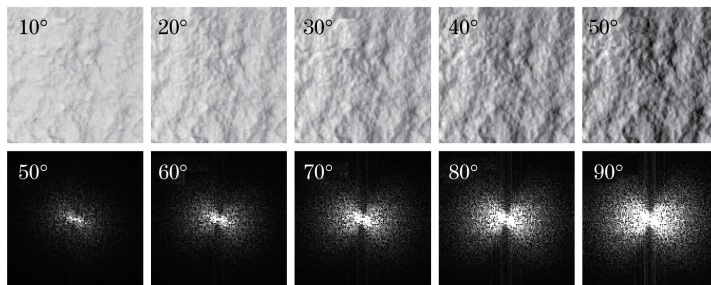


图 5 不同光源翘角所对应的(a)岩石纹理图像和(b)岩石纹理频域图像

Fig. 5 (a) Rock texture images and (b) the frequency domain images in different slant angles

为了准确估算光照方向的翘角,模拟产生与输入纹理表面高度变化一致的合成纹理,合成纹理的表面高度变化率用密度参数 δ 控制。如图 6 所示, δ 越小,合成纹理表面高度变化越剧烈,反之,表面高度变化越平缓。对产生的合成纹理用虚拟光环境,即估算的方位角光和 $0^\circ \sim 70^\circ$ 翘角光,进行绘制。通过检测输入图像

与虚拟光环境中随机纹理的相似性,可估算出输入纹理图像光照方向的翘角 S 。

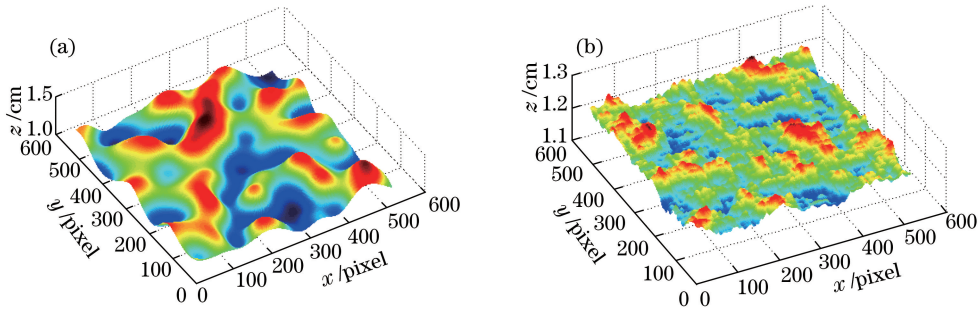


图6 合成纹理表面高度图像。(a) $\delta=2$; (b) $\delta=0.5$

Fig. 6 Height map of the generated texture. (a) $\delta=2$; (b) $\delta=0.5$

翘角估算法的具体步骤如下:

初始化:初始化合成纹理图像密度参数 $\delta=1$,输入单幅纹理图像 I 。

1) 生成密度参数为 δ 的随机高度纹理 T_1 ,利用 T_1 估算输入图像 I 的翘角 S ,估算公式为

$$S = \{\theta, | \text{similar}_{\max} [I, T_1(\theta)] \}, \theta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, \dots, 70^\circ \}, \quad (5)$$

式中 $\text{similar} [I, T_1(\theta)]$ 为相似度测量函数,通过计算 I 与合成纹理 T_1 在不同翘角 S 下的最大相似度,可初步估算输入纹理图像的翘角 S 。 $\text{similar} [I, T_1(\theta)]$ 函数定义为

$$\text{similar} [I, T_1(\theta)] = \lambda_1 S_1 [I, T_1(\theta)] + \lambda_2 S_2 [I, T_1(\theta)], \quad (6)$$

式中 $S_1 [I, T_1(\theta)]$ 代表 I 与 T_1 局部图像块的相似性, $S_2 [I, T_1(\theta)]$ 代表 I 与 T_1 图像直方图的相似性, λ_1 、 λ_2 代表权重。

2) 利用步骤1)估算的翘角 S ,调整密度参数 δ ,分别向正负两个方向,以步长 0.1 调整 δ 的大小,即 $\delta_{\text{new}} = \delta \pm 0.1n, n=1, 2, \dots, N, N$ 为固定值,代表 δ 调整的最大范围。通过求式(6)的最大值,即可获得局部最优的密度参数 δ 为

$$\text{similar}_{\max} (\delta) = \lambda_1 S_1 [I, T_1(S, \delta)] + \lambda_2 S_2 [I, T_1(S, \delta)]. \quad (7)$$

3) 如果(5)式和(6)式的值变化较小或者达到最大迭代次数,则停止;否则,转步骤1)。

输出:估算的翘角 S 及合成纹理的密度参数 δ 。

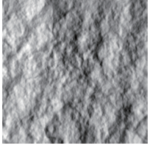
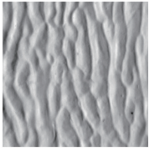
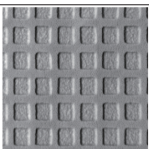

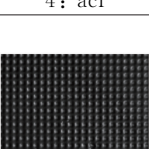
4 实验验证与分析

实验对 Photex 数据库中 24 种类型的纹理进行了光照估算,共包括翘角 S 为 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$,方位角 T 为 $0^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 80^\circ, 90^\circ, 110^\circ, 120^\circ, 140^\circ, 150^\circ$ 等共 142 幅图像。Photex 数据库包含表面一致纹理和非一致纹理,为了对纹理光照估算的结果进行统计,将 Photex 数据库中的纹理分为 5 类。第一类为岩石纹理,包括 aab, aaf, aai, aaj, aam, aan, aao, aap, aar, aas; 第二类为树皮纹理,包括 aba, abj, abk, acc, ada; 第三类为泡沫板纹理,包括 acd, adb; 第四类为竖条纹理,包括 ace, acf, acg; 第五类为点纹理,包括 ach, aci, acj, ack。实验结果如表 1 所示。

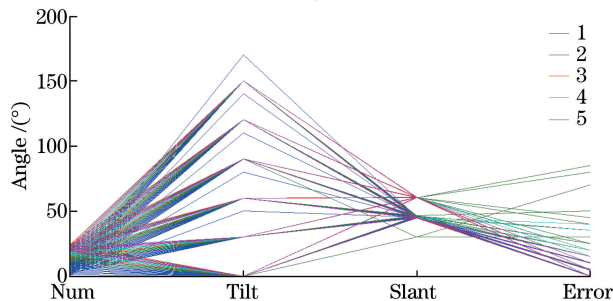
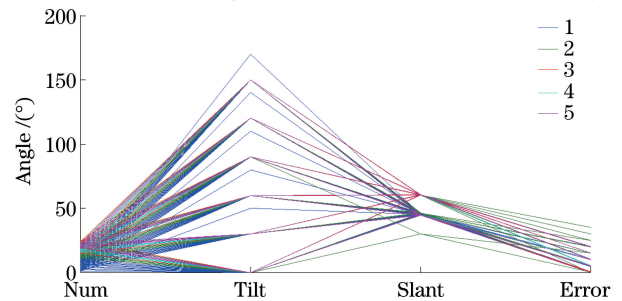
对 Photex 数据库分类后,每一类纹理仍然包含大量表现和光照环境不同的样本。第一列中的样本均为方位角 0° ,翘角 45° 的图像,图像下方的文字代表纹理种类和纹理名称,第二列为测试图像的实际方位角,第三列为光照算法估算所得方位角,最后一列为估算方位角与实际方位角的误差绝对值。从最后一列的误差结果可以看出对于第一类,第三类和第五类纹理的光照方向估算比较准确,方位角误差均在 5° 以内,可达到虚拟光照的绘制或者 PMS 应用中对光照精度的要求。而对于第二类和第四类纹理估算的误差较大,从表 1 第一列这两类的样本可以看出,第二类和第四类纹理具有明显的纹理方向,由此可知,纹理表面主方向会干扰光照方位角的判定,因此表面非一致纹理的方位角估算有待于进一步研究。翘角的取值范围限定在 0° 到 90° ,超过此范围时人眼看不到光线。 δ 的初始值设为 1,分别以 0.1 的步长向左右两个方向调整 δ 的大小,控制参数 N 取值为 20,然后根据算法来估算翘角。

表 1 5 类纹理的光照方位角估算结果

Table 1 Estimated results of azimuth angle for five kinds of texture images

Texture image	Actual azimuth	Estimated azimuth	Azimuth error
 1: aab	0°	0°	0°
	50°	45°	5°
	90°	85°	5°
	110°	105°	5°
	140°	145°	5°
	170°	170°	0°
 2: aba	0°	20°	20°
	30°	15°	15°
	60°	25°	35°
	90°	55°	35°
	150°	170°	20°
	 3: acd	0°	5°
30°		25°	5°
60°		55°	5°
90°		85°	5°
120°		120°	0°
 4: acf		0°	0°
	30°	10°	20°
	90°	90°	0°
	120°	105°	15°
	150°	170°	20°
	 5: ach	0°	0°
30°		25°	5°
60°		55°	5°
90°		90°	0°
120°		120°	0°
150°		155°	5°

为了更准确地描述估算算法的有效性,对 Photex 数据库中的 142 幅图像全部进行了其方位角和翘角的估算,统计结果如图 7 和图 8 所示。图 7 显示了对 Photex 数据库中五类纹理样本在不同光照下的方位角 T 的误差统计。图 8 显示了对翘角 S 的误差统计。图 7 和图 8 中纵坐标均为角度值,横坐标 Num 表示在不同光照下的五类样本,共 142 幅图像,Tilt 和 Slant 表示纹理图像样本实际光照的方位角和翘角,Error 分别表示的是估算方位角和实际方位角以及估算翘角与实际翘角的误差绝对值。从统计结果可以看出,在 Photex 数据库中该算法对表面一致纹理(第一、三、五类纹理)方位角的偏差 5°,准确率估计可达到 94% 以上(偏差 5° 内即视为正确估算),而翘角估算的误差相比方位角误差,受纹理种类影响的敏感度低,仅第四类竖条纹理的误差较大。该算法对具有表面一致性的纹理图像具有较高的估算精度和较强的稳健性,对部分

图 7 估算方位角 T 的误差统计Fig. 7 Error statistics of the estimated azimuth angle T 图 8 估算翘角 S 的误差统计Fig. 8 Error statistics of estimated slant angle S

表面非一致纹理的翘角估算也具有较高的准确率,但对表面非一致纹理方位角估算的准确度影响较大。Photex 数据库中的纹理图像均为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 的黑白图像,该算法估算方位角 T 的平均估算时间约为 1.32 s,估算翘角 S 的平均估算时间为 3.14 s。

5 结 论

提出了一种光照方向的快速估算方法,可准确地估算表面一致纹理图像的光参数。利用 Photex 数据库中的 142 幅图像对该算法进行了验证,实验结果表明,该算法可准确地估算表面一致纹理图像光照方向的方位角和翘角,且该算法在实际的光照角度估算中不必严格遵守朗伯假设,允许纹理图像表面存在少量投射阴影或者高光,对具有表面一致性的纹理图像具有较高的估算精度和较强的稳健性,但对表面非一致纹理方位角的估算准确度受外界影响较大,有待进一步的研究。

该算法的估算结果对基于光度立体技术的三维重建技术具有重要的意义,可辅助实现非校准光度立体三维重建,减少实验的复杂度,对于基于真实环境的虚拟现实的光环境模拟也具有重要的实际意义。

致谢 感谢英国瓦特大学 M. Chantler 教授提供的 Photex 纹理库,为验证该算法提供了有效的数据支撑。

参 考 文 献

- [1] Zhang Qishen, Zhou Ya, Hu Xiaoming, *et al.* Hand vein recognition based on three-dimensional point clouds matching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0115005.
张祺深, 周 雅, 胡晓明, 等. 基于三维点云匹配的手掌静脉识别[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0115005.
- [2] Song Pengcheng, Wen Shangsheng, Shang Jun, *et al.* A dimming method for RGB LED based on three channels' PWM [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0223001.
宋鹏程, 文尚胜, 尚 俊, 等. 基于 PWM 的三基色 LED 的调光调色方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0223001.
- [3] Liszio S, Masuch M. Designing shared virtual reality gaming experiences in local multi-platform games [C]. 15th International Conference on Entertainment Computing, 2016: 235-240.
- [4] Sun Y J, Jian M W, Zhang X F, *et al.* Reconstruction of normal and albedo of convex Lambertian objects by solving ambiguity matrices using SVD and optimization method[J]. *Neurocomputing*, 2016, 207: 95-104.
- [5] Yu Zhijing, Wang Shaobin. Improved PCA-SIFT algorithm for matching stereo system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(3): 031501.
于之靖, 王韶彬. 改进 PCA-SIFT 算法的立体匹配系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(3): 031501.
- [6] Weber M, Cipolla R. A practical method for estimation of point light-sources[C]. *Proceedings British Machine Vision Conference*, 2001: 1-10.
- [7] Peng B, Wang W, Dong J, *et al.* Improved 3D lighting environment estimation for image forgery detection[C]. 2015 IEEE International Workshop on Information Forensics and Security, 2015: 1-6.
- [8] Tachikawa T, Hiura S, Sato K. Robust estimation of light directions and diffuse reflectance of known shape object[C]. *Proceedings of Vision, Modeling, and Visualization Workshop*, 2009: 37-44.
- [9] Hara K, Nishino K, Ikeuchi K. Light source position and reflectance estimation from a single view without the distant illumination assumption[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(4): 493-505.
- [10] Li Y Z, Lin S, Lu H Q, *et al.* Multiple-cue illumination estimation in textured scenes[C]. *Proceedings of 2003 IEEE International Conference on Computer Vision*, 2003, 2: 1366.
- [11] Baba M, Haruta K, Hiura S. Estimating lighting environments based on shadow area in an omni-directional image[C]. *Proceedings of 2016 ACM SIGGRAPH*, 2016: 88.
- [12] Liu Y L, Qin X Y, Xu S H, *et al.* Light source estimation of outdoor scenes for mixed reality[J]. *The Visual Computer*, 2009, 25(5): 637-646.
- [13] Vo M, Narasimhan S G, Sheikh Y. Separating texture and illumination for single-shot structured light reconstruction [C]. *Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 2014: 433-440.

- [14] Jiang Z S, Rezvankhah S, Siddiqi K. Light source estimation using Kinect[R]. Project Report, 2013.
- [15] Koenderink J J, Pont S C. Irradiation direction from texture[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2003, 20(10): 1875-1882.
- [16] Varma M, Zisserman A. Estimating illumination direction from textured images[C]. Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004(1): 179-186.
- [17] Ikeuchi K, Sato K. Determining reflectance properties of an object using range and brightness images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(11): 1139-1153.
- [18] Chantler M J, McGunnigle G. The response of texture features to illuminant rotation[C]. Proceedings of 15th International Conference on Pattern Recognition, 2000, 3: 943-946
- [19] Chantler M, Petrou M, Penirschke A, *et al.* Classifying surface texture while simultaneously estimating illumination direction[J]. International Journal of Computer Vision, 2005, 62(1): 83-96.
- [20] Dong J Y, Su L Y, Zhang Y, *et al.* Estimating illumination direction of three-dimensional surface texture based on active basis and Mojette transform[J]. Journal of Electronic Imaging, 2012, 21(1): 013023.
- [21] Pineo D, Ware C. Data visualization optimization via computational modeling of perception[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(2): 309-320.