

适于多种反射现象的光照估计方法

张艾嘉, 赵岩, 王世刚

(吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 增强现实技术是将虚拟物体叠加到真实环境中, 为了使虚拟物体更逼真地融入到环境, 就需要估计场景中的真实光照。文中针对同时存在漫反射和镜面反射的场景或只存在漫反射的场景, 提出了一种适于多种反射现象的光照估计方法。该方法使用相机拍摄多幅视角图像, 通过检测每幅视角图像的镜面高光点来识别场景中是否存在镜面反射。若不存在镜面反射, 则采用单张漫反射图像估计光照算法进行多幅视角图像光照估计。反之, 若存在镜面反射则以镜面反射提供的信息为先验知识, 再结合漫反射光照估计方法得到最终的光照估计结果。实验结果表明, 文中方法提高了多种反射现象的光照估计的准确性。

关键词: 光照估计; 增强现实; 光照一致性

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0526002

Method of illumination estimation for multiple reflection phenomena

Zhang Aijia, Zhao Yan, Wang Shigang

(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: In an augmented reality system, the virtual objects are superimposed on the real scene. In order to integrate the virtual objects into the environment more realistically, it is necessary to estimate the illumination in the scene. An illumination estimation method was proposed, which was suitable for multiple reflection phenomena for scenes with only diffuse reflection or scenes with both diffuse and specular reflections. In this method, a camera was used to shoot multiple-view images, and the presence of specular reflection in the scene was identified by detecting the specular highlights of each view image. If there was no specular reflection, then a single diffuse image estimation lighting algorithm was used to perform multi-view images illumination estimation. If there existed specular reflection, the information provided by the specular reflection was a priori knowledge and then the diffuse reflection estimation illumination method was used to obtain the final result. The experimental results show that this method improves the accuracy of the illumination estimation of multiple reflection phenomena.

Key words: illumination estimation; augmented reality; illumination consistency

收稿日期: 2018-12-10; 修订日期: 2019-01-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB1002900)

作者简介: 张艾嘉(1994-), 女, 博士生, 主要从事三维场景光照估计方面的研究。Email: zhangaj17@mails.jlu.edu.cn

导师简介: 赵岩(1971-), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事立体视频处理方面的研究。Email: zhao_y@jlu.edu.cn

0 引言

增强现实技术是虚拟现实技术的延伸,通过计算机把生成的虚拟物体与实际场景结合起来呈现在用户眼前,在生产和生活中的各个领域都很有应用前景。早期人们关注更多的是三维注册与虚实遮挡的问题,随着技术不断进步,解决虚实融合后的光照一致性也是首要任务。光照一致性主要分析的是场景中真实光源对虚拟物体所造成表面面片的明暗变化和阴影等。在现如今人们追求的真三维显示中,将生成的虚拟物体与实际场景融合也同样需要光照一致性来达到更逼真的视觉效果。

现有的光照估计方法中,有借助辅助标志物、辅助拍摄设备完成光照估计,或者只从图像分析光照情况。其中借助辅助标志物可分为基于阴影和人工放置的标志物。基于阴影的方法可通过阴影边缘和物体模型来估算光源位置^[1],或者通过构建带有阴影的图像数据集进行神经网络训练来估计光源位置^[2]。基于人工放置的标志物方法可以通过分析标志物表面的明暗和阴影投射方向等信息来估计光源。随着技术发展,很多研究者借助辅助拍摄设备进行光照估计。深度相机^[3]、光场相机以及鱼眼相机^[4]等,这些特殊拍摄设备能够提供深度、光场和全视角图像等信息,为光照估计带来了更多便利。

近年来,更多的是无需标志物或辅助拍摄设备的方法应用到增强现实中。仅通过单张图像或者多张图像恢复出场景的光照分布,这也是光照估计的难点。现有的方法中,参考文献[5]用单幅图像估计粗略的场景几何图和照射图,然后使用几何图和照射图恢复光照^[5]。刘斌等人设计了一个系统,该系统使用视频图像恢复光照^[6]。然而,这些方法都假定场景是朗伯表面,并且未把镜面反射信息当作有利条件应用到光照估计的过程中。

文中提出了适于多种反射现象下的光照估计方法,反射现象可分为镜面反射、漫反射和方向反射。其中方向反射是介于漫反射和镜面反射之间的反射,其表现为各个方向都有反射,且各个方向反射强度不均一。现有的大部分文献中只是单独模拟漫反射或者镜面反射的情况。因此笔者提出的是既存在漫反射同时也存在镜面反射时的光照估计方法,使用相机拍摄场景中多幅视角图像,通过检测多幅视

角图像是否存在镜面高光点,将场景分为两类:若每幅视角图像都不存在镜面高光点,则场景中只存在漫反射现象;若多幅视角图像中存在镜面高光点,则场景中同时存在镜面反射与漫反射现象。文中方法不再假设场景物体全部是朗伯表面,针对两类场景都可以进行光照估计,解决了只从镜面反射现象估计光照的局限性,获得了更准确的光照估计结果。

1 算法概述

文中提出的方法适用于离线情况下多种反射现象的光照估计,算法流程图如图 1 所示。首先对用同一相机在不同视角拍摄的多幅视角图像进行三维点云重建,恢复出场景中物体几何结构和相机参数。然后通过检测多幅视角图像的镜面高光点,将场景区分为只存在漫反射的场景或者是同时存在漫反射与镜面反射的场景。若每幅视角图像都不存在高光点则在场景中只存在漫反射现象,可直接使用多幅视角图像和三维点云模型进行光照估计。若在多幅视角图像中存在镜面高光点,则将多幅视角图像分成两类:存在和不存在镜面高光点的图像,使用这两类图像和三维点云模型进行光照估计。

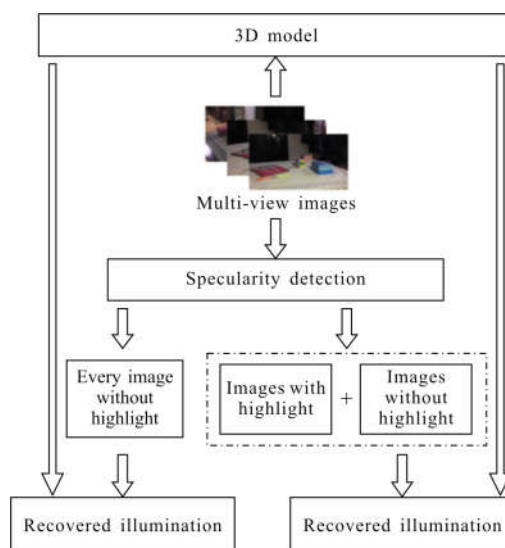


图 1 光照估计方法流程图

Fig.1 Flow of illumination estimation method

2 光照估计

2.1 三维模型重建

由于拍摄了场景中多幅视角图像,所以使用运

动恢复结构方法(Structure from Motion, SfM)来重建场景的稀疏点云, 在这一步骤中同时得到相机的内参矩阵和每幅视角图像的外参矩阵。为了得到场景的稠密点云模型, 可以使用多视角立体视觉(multi-view stereo)的方法。在文中, 采用了 VisualSfM 和 CMVS 来完成了稀疏点云模型和稠密点云模型的重建。场景复杂或者庞大的情况下, 在稠密点云模型重建后可能存在杂点, 使用软件 MeshLab 可对点云模型进行处理。

2.2 镜面高光点检测

观测材质属于光滑的物体, 当发生镜面反射时, 只有在接近光线反射方向才能观察到镜面高光现象, 并且高光点强度随着观测角度偏离反射方向迅速下降, 基于这些条件根据高光点计算光线入射方向是可行的。因此镜面高光点检测可以为光照估计提供很多信息。Qing Tian 等人使用维纳熵的非标准化形式来检测图像中镜面现象, 该方法简单易行且结果准确^[7]。文中采用 Qing Tian 的方法对每幅视角图像都进行镜面高光点检测。

2.3 不存在镜面高光点时光照估计

当每幅视角图像都没有检测到镜面高光点时, 则在场景中未发生镜面反射现象。在这种情况下, 将参考文献[5]基于单张图像估计光照方法应用于多幅视角图像光照估计中。假设光源分布在以场景物体为中心的半球面上并且方向指向球心, 光源位置分布的公式为:

$$\begin{cases} x = \sin\theta \cos\varphi \\ y = \sin\theta \sin\varphi \\ z = \cos\theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ 和 φ 分别为光源位置和原点组成的直线与 z 轴和 x 轴的夹角。

将多幅视角图像进行本征图像分解, 得到反射图和表征光照信息的照射图。由于不存在镜面高光点就排除了镜面反射现象, 则选择 Lambert 漫反射模型, 其公式为:

$$I(x) = I_a + \sum_{i=1}^N I_{\omega_i}(\omega_i, n) V(x, \omega_i) \quad (2)$$

式中: I 为位置 x 处的光强值; I_a 为环境光强; N 为分布在半球面上总的光源数量; I_{ω_i} 为分布在半球面上以 ω_i 方向入射的光源强度; n 为点云模型中物体表面法线; $V(x, \omega_i)$ 为在半球面上以 ω_i 方向入射的光源

在位置 x 处是否可见的项, 可见则 V 取 1, 反之 V 为 0。将本征图像分解出的不同视角的照射图灰度值与 Lambert 漫反射模型联立组成方程组:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & (\omega_1, n_1)V(x, \omega_1) & \cdots & (\omega_N, n_1)V(x, \omega_N) \\ 1 & (\omega_1, n_2)V(x, \omega_1) & \cdots & (\omega_N, n_2)V(x, \omega_N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & (\omega_1, n_p)V(x, \omega_1) & \cdots & (\omega_N, n_p)V(x, \omega_N) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_a \\ I_1 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: S 为照射图灰度值; p 为参与计算的总像素点数; 通常 p 远大于 N 。求解上述超定方程组得到 $I_a, I_1 \cdots I_N$ 的值。从 $I_1 \sim I_N$ 中筛选出强度值不为 0 的光源, 记录这些光源的位置和强度值。将位置相邻的光源聚集为一个待选光源集合, 此时的待选光源集合个数设为 x 。对每一个待选光源集合进行光源强度和方向的筛选, 由于环境光的存在, 虚实融合渲染时较弱光源对结果几乎没有影响。因此, 选取待选光源集合中强度值最大的光源作为该待选光源集合的光源。环境光强度与每个待选光源集合中强度值最大光源的位置及强度为最终光照估计结果。

2.4 存在镜面高光点时光照估计

当在多幅视角图像中检测到镜面高光点存在时, 说明场景中同时存在镜面反射与漫反射。在这种情况下, 假设光源分布与公式(1)所示的半球面光源分布相同。通过镜面高光点检测方法检测出高光点在每幅图像中的位置, 根据镜面高光点计算光线入射方向 L 的公式为:

$$L = 2 \cdot (V \cdot M) \cdot M - V \quad (4)$$

式中: V 为不同视角下相机坐标系中光轴方向; M 为该视角对应的图像高光点像素映射到三维点云的点云法线方向。计算所有高光点对应的光线入射方向与半球面上分布的所有光源方向之间的夹角。对每个高光点选取其对应的光线入射方向与半球面上分布的所有光源方向之间的夹角的最小值, 该最小值对应的半球面上光源方向作为对应该高光点的光线入射方向, 并称之为高光点半球化光源入射方向。将位置相邻的高光点半球化光源聚集为一个待选光源集合, 待选光源集合的个数设为 y 。筛选出所有待选光源集合中出现次数最多的高光点半球化光源作为由镜面高光点得到的光源, 该光源为通过镜面反射得到的先验知识。

由镜面高光点得到的光源可能并不是场景中全部光源, 因为拍摄多幅视角图像时, 当视线方向偏离

光线反射方向, 则不能在拍摄的图像中捕获到镜面高光点。所以, 将由镜面高光点得到的光源数目与场景中实际光源数目对比。场景中实际光源数目 x 的计算采用不存在镜面高光点时光照估计方法, 但是在本征图像分解步骤中只对不包含镜面高光点的图像进行分解。将场景中实际光源数目 x 与先验知识中通过镜面高光点得到的光源数目 y 作比较。若 $x=y$, 则说明所有光源位置都已经由镜面高光点得到的光源估计出来, 把由镜面高光点得到的光源代入公式(3), 求解超定方程组得到环境光强度值和光源强度值。若 $x < y$, 则说明由先验知识镜面高光点得到的光源数目并不是场景中全部光源数目, 排除先验知识中 x 个通过镜面高光点得到的已知光源位置, 从半球面上剩余的 $N-x$ 个光源中随机选取 $y-x$ 个光源代入公式(3)进行超定方程组求解, 共需求解 C_{N-x}^{y-x} 次, 比较每次结果的均方误差, 均方误差最小时的超定方程组的解即为环境光强度值、光源的方向和强度值。

3 实验结果

为了验证文中的算法, 在内存为 2 GB、处理器 3.10 GHz 的平台上, 在 Matlab2014a 的环境下进行了实验, 并使用 3ds MAX 软件渲染虚拟物体。实验中的测试样本为手持相机拍摄。

如图 2 所示, 图 2(a)为真实场景, 通过物体阴影可以观测到场景中有 2 个光源。图 2(b)为使用 Salma Jiddi 等人^[8]的方法只通过镜面高光估计的光照进行

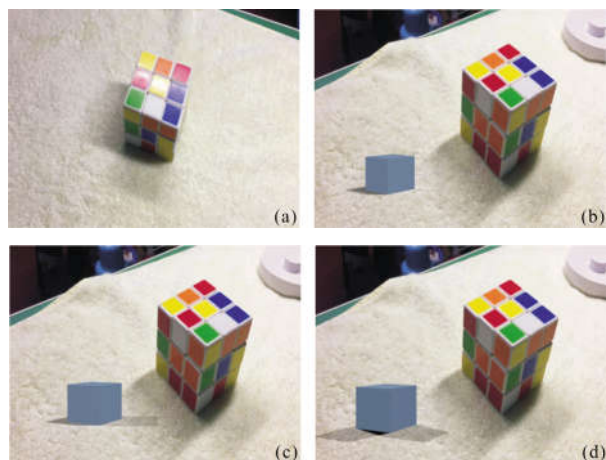


图 2 简单场景中虚实融合结果图

Fig.2 Combination of virtual and real objects in a simple scene

虚实融合的结果, 其中蓝色正方体为虚拟物体。该方法在最后结果中只估计出一个光源方向。图 2(c)为使用参考文献[5]根据漫反射估计光照算法得到的虚实融合结果, 其在复杂光源情况下估计结果会有误差。图 2(d)为使用文中方法得到的虚实融合结果, 可以看出, 文中方法可以得到更加准确的光照估计结果。

在更加复杂的场景下, 图 3(a)为真实场景, 通过物体阴影可以观测到场景中有两个光源。图 3(b)为使用 Salma Jiddi 等人^[8]的方法只通过镜面高光估计的光照进行虚实融合的结果, 其中蓝色长方体为虚拟物体。由融合结果可以看出, 该方法只能在最后结果中估计出一个光源方向。图 3(c)为使用参考文献[5]根据漫反射估计光照算法得到的虚实融合结果, 其阴影方向上仍有偏差。图 3(d)为使用文中方法得到的虚实融合结果, 可以看出, 和参考文献[5], [8]相比, 文中方法渲染出的阴影方向更加准确。

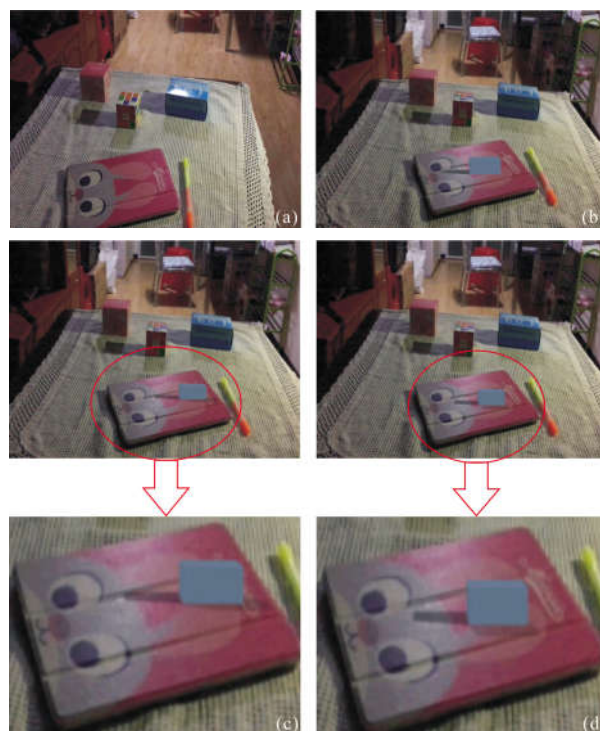


图 3 复杂场景中虚实融合结果图

Fig.3 Combination of virtual and real objects in a complex scene

表 1 给出了实际光源方向与估计光源方向之间的误差夹角值, 其中 LS 代表光源。笔者分别计算了两个场景下每个光源的误差值。从客观数据中可以看出在场景 1 中对于光源 1 的估计, 笔者提出的方

法较好,对于光源 2 的估计,使用所提出的方法计算出的误差夹角值小于参考文献[5]的误差夹角值,而参考文献[8]不能估计出光源 2 的方向。在场景 2 中,对于光源 1 的估计参考文献[8]的方法更加准确。对于光源 2 的估计,所提出的方法优于参考文献[5],参考文献[8]并不能估计出光源 2 的方向。

表 1 估计光源误差角度对比

Tab.1 Comparison of estimated light source error angle

Method	Scene 1		Scene 2	
	LS1	LS2	LS1	LS2
Method in reference [8]	17°	Null	3°	Null
Method in reference [5]	18°	34°	4°	38°
Proposed method	16°	22°	4°	25°

4 结 论

提出一种适于多种反射现象的光照估计方法,首先由多幅视角图像恢复出场景三维点云模型,通过图像镜面高光点的检测来判断场景中是否存在镜面反射现象。文中的方法不再假设场景物体表面全部为朗伯表面。同时,可以应用于只存在漫反射的场景或者同时存在镜面反射与漫反射场景,适用性较广,这是相对于其他光照估计方法的优越之处。

在多光源环境下,如果有一个光源强度过大而其他光源强度较弱,则估计结果中会把较弱光源忽略。因此,未来可以继续研究如何解决较弱光源的估计问题。

参 考 文 献:

- [1] Jacobs K, Nahmias J D, Angus C, et al. Automatic generation of consistent shadows for augmented reality [C]// Conference on Graphics Interface, 2005: 113–120.
- [2] Akila Pemasiri, Chameera Wijebandara, Samee-ra Wijayarathna, et al. An online lighting model estimation using neural networks for augmented reality in hand-held devices [C]// International Conference on Advances in ICT for Emerging Regions, 2015: 4–8.
- [3] Natalia Neverova, Damien Muselet, Alain Tr'emeau. Lighting estimation in indoor environments from low-quality images [C]//Proc of ECCV, 2012: 380–389.
- [4] Yoo J D, Lee K H. Real time light source estimation using a fish-eye lens with ND filters [C]//International Symposium on Ubiquitous Virtual Reality, 2008: 41–42.
- [5] Chen Xiaowu, Wang Ke, Jin Xin. Single image based illumination estimation for lighting virtual object in real scene [C]//International Conference on Computer-aided Design, 2011: 450–455.
- [6] Liu Bin, Xu Kun, Ralph R Martin. Static scene illumination estimation from videos with applications [J]. *Journal of Computer Science and Technology*, 2017, 32(3): 430–442.
- [7] Qing Tian, James J Clark. Real-time specular-arity detection using unnormalized wiener entropy [C]//International Conference on Computer and Robot Vision, 2013: 356–363.
- [8] Salma Jiddi, Philippe Robert, Eric Marchand. Reflectance and illumination estimation for realistic augmentations of real scenes [C]//IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2016: 244–249.