

从单幅高动态范围图像恢复环境中物体的材质*

孙其民^{1,2}, 吴恩华^{1,3}

¹(中国科学院 软件研究所 计算机科学重点实验室,北京 100080);

²(曲阜师范大学 计算机科学系,山东 曲阜 273165);

³(澳门大学 科技学院,澳门)

E-mail: sqm@ios.ac.cn; ehwu@umac.mo

http://www.ios.ac.cn

摘要: 提出一种从单幅高动态范围图像恢复一般环境中物体材质的方法,适用于单一材质物体,对物体形状和光照条件没有任何特殊要求.在一般光照环境中,获取被考察物体的一幅高动态范围图像以及用来近似物体光照的一个或几个高动态范围环境映照,然后用模拟退火算法求解逆向绘制问题.在求解过程中采用了基于图像的光照和光线跟踪技术,充分考虑了物体自身互反射的影响.最后得到了物体表面反射模型的最优参数.若与基于图像的建模技术相结合,可以根据真实物体的照片建立真实感模型.

关键词: 逆向绘制;反射模型;高动态范围图像;基于图像的光照;光线跟踪

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

恢复物体的材质是逆向绘制的重要课题^[1].已有的许多研究工作基本上都局限于特殊的光照条件,比如点光源或面光源照射^[2~5].有关复杂光照条件下的逆向绘制研究得较少.俞益洲等人^[6]研究了自然光照条件下建筑物材质的恢复方法.在物体材质已知的情况下,理论上光照是可以恢复的,但是光照的高频分量可能会丢失;在物体材质未知的情况下同时恢复光照和材质,结果中会有一个不能确定的比例因子,从而不能得到真实的材质和光照^[1].一般环境中,物体的光照通常不能用简单的点光源和面光源来近似表示.基于图像的光照技术可以很好地模拟自然光照^[7,8].环境光照可以用反射球或鱼眼相机方便地获取并用于绘制^[7,9].复杂的光照给材质恢复带来了许多困难,但也提供了更加丰富的信息,这使得我们有可能用较少的图像来恢复材质.以前的研究一般都需要多幅图像^[1,3~7],而且只考虑物体各部分的互相遮挡.本文提出了一种方法,利用直接获取的复杂光照来恢复单一材质物体的材质只需要物体的一幅高动态范围图像^[10],对物体的形状和光照条件没有任何限制.

1 反射模型

我们用一个低参数的反射模型来近似物体表面的反射函数.为了使算法适用于尽可能多的材质类型,需要一个表达能力较强的反射模型.我们选择 RADIANCE^[11]中的基本反射模型.这是一个基于物理的模型,考虑了物体表面两侧的镜面和漫反射作用,因此,除了不透明的反射材质,它还适用于描述透明和半透明的材质.我们对这个反射模型稍作简化.本章采用的反射模型的基本形式是

$$\rho = \text{Max}(0, \vec{q} \cdot \vec{n}_p) \left[\frac{\rho_d}{\pi} + \rho_s \right] + \text{Max}(0, -\vec{q} \cdot \vec{n}_p) \left[\frac{\tau_d}{\pi} + \tau_s \right]. \quad (1)$$

式(1)中右端第 1 部分对应于光的反射贡献,第 2 部分表示光的透射贡献. ρ_d 表示材质的漫反射系数, ρ_s 表示镜

* 收稿日期: 2002-03-23; 修改日期: 2002-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69873044;60033010;60072014);澳门大学基金资助项目(RG022/01-02S/WEH/FST)

作者简介: 孙其民(1970-),男,山东泰安人,博士生,讲师,主要研究领域为计算机图形学,逆向绘制,增强现实;吴恩华(1947-),男,江苏南通人,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为真实感图形生成,科学计算可视化,虚拟现实.

面反射系数, τ_d 是透射漫反射系数, τ_s 是规则透射系数. 各项具体的定义如下:

$$\rho_d = pC(1 - a_4), \tag{2}$$

$$\rho_s = r_s \frac{f_s(\vec{q})}{\sqrt{(\vec{q} \cdot \vec{n}_p)(-\vec{v} \cdot \vec{n}_p)}}, \tag{3}$$

$$\tau_d = a_6(1 - r_s)(1 - a_7)pC, \tag{4}$$

$$\tau_s = a_6 a_7 (1 - r_s) \frac{g_s(\vec{q})}{\sqrt{(-\vec{q} \cdot \vec{n}_p)(-\vec{v} \cdot \vec{n}_p)}}, \tag{5}$$

$$r_s = \begin{cases} a_4 & \text{塑料} \\ (a_1 a_4, a_2 a_4, a_3 a_4) & \text{金属} \end{cases}, \tag{6}$$

其中 \vec{q} 是入射光方向, \vec{v} 是视线方向, \vec{n}_p 是表面法向, \vec{h} 是入射光线和视线的角平分线, C 是材质的颜色, p 是材质的模式, 一般物体表面是无模式的, 这时 $p=1$. $f_s(\vec{q})$ 和 $g_s(\vec{q})$ 的不同形式决定了材质是各向同性的还是各向异性的. 对各向同性的材质, 它们如式(7)和式(8)所示.

$$f_s(\vec{q}) = \frac{1}{4\pi\alpha} \exp\left(\frac{(\vec{h} \cdot \vec{n}_p)^2 - \|\vec{h}\|^2}{(\vec{h} \cdot \vec{n}_p)\alpha}\right), \tag{7}$$

$$g_s(\vec{q}) = \frac{1}{\pi\beta} \exp\left(\frac{2\vec{q} \cdot \vec{t} - 2}{\beta}\right), \tag{8}$$

其中 $\alpha = a_5^2 + \frac{\omega}{4\pi}$, $\vec{t} = \frac{\vec{v}}{\|\vec{v}\|}$, $\beta = a_5^2 - \frac{\omega}{\pi}$. 对于各向异性的材质, 我们只考虑物体为不透明的情形, 此时

$$f_s(\vec{q}) = \frac{1}{4\pi\sqrt{\alpha_x\alpha_y}} \exp\left[-\frac{\frac{(\vec{h} \cdot \vec{x})^2}{\alpha_x} + \frac{(\vec{h} \cdot \vec{y})^2}{\alpha_y}}{(\vec{h} \cdot \vec{n}_p)^2}\right]. \tag{9}$$

其中, $\alpha_x = a_5^2 + \frac{\omega}{4\pi}$, $\alpha_y = a_6^2 + \frac{\omega}{4\pi}$, 分别是沿两个方向的表面粗糙度; ω 是光源的立体角; $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ 是基本反射模型待定的参数, 给定一组参数就指定了一种材质.

2 物体的光照场

一般环境中物体的光照不能简单地离散为点光源和面光源, 物体处于一个光场中, 我们称之为光照场. 这是一个五维的向量场, 可以用类似 Light field^[12]的方法来表示. Light field 表示的是反射光场. 我们定义光照场是入射到物体表面的光线组成的入射光场. 光照场中物体和光线的关系可由图 1 来说明, 中间的封闭区域表示物体, 四周的平面可以想象成鱼眼相机平面, 每个鱼眼相机记录从外面的环境入射到该相机的光线, 光线由外向内穿过相机的光心照射到内部的物体表面.

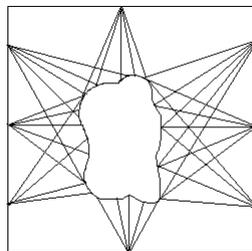


Fig.1 The relation between an object and its illumination field

图 1 光照场与物体的关系

光照场在理论上给出了物体光照的一个完全表示,但是要建立一个物体的光照场一般需要数量巨大的光线采样图像.在实践中,为了减少采样的数量,我们采用光照场的近似表示.考虑如下两种情形:

(1) 当物体与环境中的其他物体足够远时,用一个环境映照来近似物体的光照场;

(2) 当不满足情形(1)中的条件时,把物体表面分成许多小的区域,使每个区域与其他物体的距离都足够远,从而可以看成(1)的情形.这样,可以用多个环境映照来近似物体的光照场.表面任一点的光照可取来自最近一个环境映照的光照,或是邻近几个环境映照的插值.

3 高动态范围图像

我们采用高动态范围图像(high dynamic range image)^[10]来表示光照场和物体的图像.普通相机所拍摄图像的像素值不直接等同于物体表面的辐射强度,而且也不是简单的线性对应关系.在用一般数码相机拍摄时,一个CCD单元累积的电荷与入射光能成正比,但是在把它们存储到存储介质时施加了一个非线性映射,另外,由于数字化,超过某个值的所有像素都被映射到同一个最大值,这样一来,所拍摄图像的动态范围就是受限的,因此在拍摄前要根据景物的被照射情况来确定曝光时间.但是在一般的场景中,由于太阳或人工光源和特别光亮物体的存在,导致环境中亮度的变化范围非常大,一幅照片不能反映这种变化.一种解决的办法是用不同的曝光时间拍摄一系列图像,然后把它们合成为高动态范围图像;另一种办法是直接采用高动态范围相机来拍摄.高动态范围图像的像素值线性地对应于场景中物体表面的辐射强度,与入射光强度成正比,还可以精确地记录环境中的光照.因此,采用高动态范围图像可以比较准确地恢复物体的材质.

4 物体材质的恢复

恢复物体的材质,就是在已知一幅图像和光照的情况下,根据反射方程来确定物体反射模型的所有参数.对于本文采用的反射模型,这是一个非线性回归问题.

一幅图像可以看做是RGB三维空间中的一个点集,每个像素看做是一个点.图像 I 的测度定义为

$$\|I\| = \left(\sum_i (r_i^2 + g_i^2 + b_i^2) \right)^{1/2}. \quad (10)$$

记用来恢复材质的高动态范围图像为 I_o ,由绘制方程得到的图像为 I_r ,两幅图像在最小二乘意义下的误差测度定义为

$$\chi^2 = \|I_o - I_r\|^2 = \sum_i [(r_{oi} - r_{ri})^2 + (g_{oi} - g_{ri})^2 + (b_{oi} - b_{ri})^2]. \quad (11)$$

由于有些参数对各个颜色分量是相同的(比如涉及镜面反射分量的参数),为了避免重复计算,我们把3个颜色分量合在一起进行优化.材质恢复的问题就是找到一组参数,使 χ^2 取得最小值.我们用模拟退火算法来求得模型的最优解.用模拟退火算法可以求得全局最优解,并且对初始值不敏感,是鲁棒的算法.给定反射模型参数的一组初始值,算法在参数的有效空间中搜索,对参数值逐步进行优化, χ^2 逐步减小,直到满意为止.在优化过程中的每一步,对当前一组参数值采用基于图像的光照和光线跟踪技术绘制图像 I_r ,计算最小二乘误差,若能使 χ^2 变小,则找到了一组更好的参数,否则原参数值和 χ^2 保持不变.

5 物体自身的互反射

非凸物体自身的不同部分会存在相互之间的反射.由于计算互反射非常复杂,在已有的逆向绘制研究中,通常只考虑直接光照,即只考虑物体自身的互遮挡.对镜面反射较强的物体,若忽略自身互反射可能引起较大的误差.另外,互反射也给我们提供了更多关于物体反射特性的信息.为了得到更精确的结果,我们采用光线跟踪技术来计算光照.当计算物体表面某一点的光照时,除了直接来自光源的光线,还要从该点向四周发射射线,若发出的一条射线与物体表面另一点相交,则交点沿射线相反的方向反射的光是它对当前点的贡献,对交点处光照的计算也要递归地进行下去.加速光线跟踪的一些技术都可以考虑用来加速我们的绘制过程.

RADIANCE^[11]是一个著名的绘制系统.它提供了高效的光线跟踪算法,可以很好地模拟光的传播,生成具

有高度真实感的图像.它还提供了基于图像的光照(image-based lighting)机制和丰富的控制绘制过程的参数.RADIANCE 还有一个重要的特点,即光照和生成的图像都是以高动态范围形式表示的,特别适合模拟真实的光照.我们用 RADIANCE 提供的光线跟踪绘制工具进行绘制,使算法的效率得到了保证,并且取得了非常好的效果.

6 实验结果

我们用两个虚拟场景来验证本文的方法.在 Dell Dimension4100(Petium 667MHz CPU,128M RAM)上,我们用本文的算法恢复一个物体的材质需要 2~3 个小时.图 2 是两个实验场景的全景图(还没有放入实验物体).

图 3 是分别用 3 个模型做材质恢复的实验结果,其中(a)和(b)两组图像分别用来恢复材质的原始图像和迭代求解过程中最后一次优化参数后绘制的图像.实验 1 中马的模型与周围其他物体的距离远远大于其自身的尺寸,我们只需采集一个环境映照作为马的光照.实验 2 中维纳斯塑像与周围物体的距离并不远大于其高度,根据维纳斯塑像的形状特点,我们用垂直排列的 8 个环境映照来近似它的光照场.实验 3 中的兔子模型具有透明的材质,其尺寸和其与周围其他物体的距离相比足够小,可以只用一个环境映照近似其光照场.

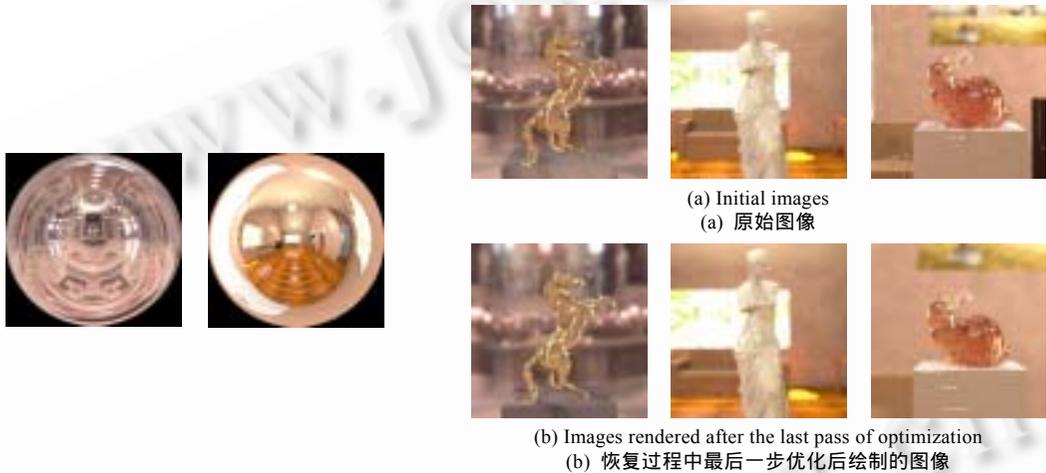


Fig.2 Panoramas of two test scenes
图 2 两个实验场景的全景图

Fig.3
图 3

表 1 给出了恢复的参数和真实参数的误差.在实验中,兔子的材质是 Dielectric 类型,采用了比 RADIANCE 中的一种更简洁的表示形式,因此,表 1 和表 2 中兔子的参数与其他两个模型的参数相比,具有不同的含义.用恢复的材质绘制的图像在图 4 中给出,所采用的光源是几个发白光的球形光源.

Table 1 Comparison of true and recovered parameters
表 1 恢复参数和真实参数的比较

Model		Parameters				
		a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Horse	True	0.8	0.6	0.3	0.9	0.01
	Recovered	0.743 7	0.607 6	0.308 2	0.852 2	0.010 2
	Error	0.056 3	0.092 4	0.008 2	0.047 8	0.000 2
Venus	True	0.7	0.7	0.7	0.12	0.125
	Recovered	0.695 9	0.703 8	0.691 1	0.104 2	0.103 2
	Error	0.004 1	0.003 8	0.008 9	0.015 8	0.021 8
Bunny	True	0.7	0.2	0.1	1.5	-
	Recovered	0.691 0	0.234 9	0.075 2	1.489	-
	Error	0.009 0	0.034 9	0.024 8	0.011	-

模型, 参数, 马, 维纳斯, 兔子, 真实的, 恢复的, 误差.

Table 2 The scope and initial value of each parameter
表 2 参数的范围和初始值

Model		Parameters				
		a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Horse	Upper bound	1.0	1.0	1.0	1.0	0.3
	Lower bound	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0
	Initial value	0.5	0.5	0.5	0.5	0.1
Venus	Upper bound	1.0	1.0	1.0	0.3	0.3
	Lower bound	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Initial value	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2
Bunny	Upper bound	1.0	1.0	1.0	2.0	-
	Lower bound	0.0	0.0	0.0	0.0	-
	Initial value	0.5	0.5	0.5	1.0	-

模型, 参数, 马, 维纳斯, 兔子, 上界, 下界, 初值.



Fig.4 Images rendered with recovered materials

图 4 用恢复的参数绘制的图像

模拟退火算法是搜索算法,参数空间的大小对其收敛速度有直接的影响,因此,我们尽量压缩参数的有效空间.对本节的 3 个实验中物体的材质,我们设定的参数范围和初值见表 2.把参数分组交替进行优化也是加快收敛的有效方法,特别是当一些参数已经接近最优而其他参数误差较大时,采用分组交替优化的方法可以明显地提高收敛的速度.另一个加速的办法是减少绘制的时间.在优化的初期,由于参数误差较大,不必绘制精细的图像;当参数值接近最优解的时候,需要绘制高质量的图像.

7 结 论

本文提出了一种从单幅高动态范围图像恢复单一材质物体的材质的方法,适用于一般的光照环境,实验表明可以得到满意的结果.光照场采用环境映照的高动态范围图像来近似表示,容易获取,且对光照条件没有任何特殊要求.算法所需的图像数量少,用模拟退火算法求物体反射模型的所有参数,在求解过程中充分考虑了物体自身互反射的影响,求得的材质比较精确.这些特点使该方法具有相当的可行性和实用性.

需要注意的是,并不是在任何光照条件下都可以得到满意的结果,从信号处理的角度来讲,物体的光照中必须包含足够多的高频分量才可以检测到反射函数的高频分量.因此,必要时可以在真实场景中添加几个辅助光源.

References:

- [1] Ramamoorthi, R., Hanrahan, P. A signal-processing framework for inverse rendering. In: Fiume, E., ed. Proceedings of the SIGGRAPH 2001. New York: ACM Press, 2001. 117~128.
- [2] Boivin, S., Galalowicz, A. Image-Based rendering of diffuse, specular and glossy surfaces from a single image. In: Fiume, E., ed. Proceedings of the SIGGRAPH 2001. New York: ACM Press, 2001. 107~116.
- [3] Lensch, H., Kautz, J., Goesele, M., *et al.* Image-Based reconstruction of spatially varying materials. In: Gortler, S.J., Myszkowski, K., eds. Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering. Vienna: Springer-Verlag, 2001. 71~82.
- [4] Marschner, S., Westin, S., Lafortune, E., *et al.* Image-Based BRDF measurement including human skin. In: Lischinski, D., Larson, W., eds. Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering. Vienna: Springer-Verlag, 1999. 131~144.

- [5] Yu, Y., Debevec, P., Malik, J. Inverse global illumination: recover reflectance models of real scenes from photographs. In: Rockwood, A., ed. Proceedings of the SIGGRAPH'99. New York: ACM Press, 1999. 215~224.
- [6] Yu, Y., Malik, J. Recovering photometric properties of architectural scenes from photographs. In: Cohen, M., ed. Proceedings of the SIGGRAPH'98. New York: ACM Press, 1998. 207~217.
- [7] Debevec, P. Rendering synthetic objects into scenes: bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography. In: Cohen, M., ed. Proceedings of the SIGGRAPH'98. New York: ACM Press, 1998. 189~198.
- [8] Debevec, P., Hawkins, T., Tchou, C., *et al.* Acquiring the reflectance field of a human face. In: Akeley, K., ed. Proceedings of the SIGGRAPH 2000. New York: ACM Press, 2000. 145~156.
- [9] Sato, I., Sato, Y., Ikeuchi, K. Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1999,5(1):875~882.
- [10] Debevec, P., Malik, J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. In: Whitted, T., ed. Proceedings of the SIGGRAPH'97. New York: ACM Press, 1997. 369~378.
- [11] Ward, G. The RADIANCE lighting simulation and rendering system. In: Glassner, A.S., ed. Proceedings of the SIGGRAPH'94. New York: ACM Press, 1994. 459~472.
- [12] Levoy, M., Hanrahan, P. Light field rendering. In: Rushmeier, H., ed. Proceedings of the SIGGRAPH'96. New York: ACM Press, 1996. 31~42.

Recovering Material for a Homogeneous Object in an Environment from a Single High Dynamic Range Image*

SUN Qi-min^{1,2}, WU En-hua^{1,3}

¹(Key Laboratory of Computer Science, Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China);

²(Computer Science Department, Qufu Normal University, Qufu 273165, China);

³(Faculty of Science and Technology, University of Macau, Macau, China)

E-mail: sqm@ios.ac.cn; ehwu@umac.mo

<http://www.ios.ac.cn>

Abstract: An approach is proposed to recover material of a homogeneous object in a general environment from a single high dynamic range image. There is no limitation on the shape and illumination condition of the object. In a general environment, acquire a high dynamic range image for an object and one or a few high dynamic range environment maps as illumination of the object. Then the simulated annealing algorithm is employed to solve the inverse rendering problem. In the course of optimization, image-based lighting and ray tracing techniques are used, and inter-reflection is calculated. Finally, optimal parameter values for the reflection model are obtained. Combined with the image-based modeling techniques, a realistic model can be created from images of a real object.

Key words: inverse rendering; reflection model; high dynamic range image; image-based lighting; ray tracing

* Received March 23, 2002; accepted June 10, 2002

Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.69873044, 60033010, 60072014; the Research Grant of the University of Macau of China under Grant No.RG022/01-02S/WEH/FST