

全局光照环境中的逆向绘制*

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)

Inverse Rendering in a Global Illuminated Environment

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(Department of Computer Science, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

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

+ Corresponding author: Phn: 86-10-62522028, E-mail: sunqimin@liming.com

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

Received 2002-04-10; Accepted 2002-10-28

Sun QM, Wu EH. Inverse rendering in a global illuminated environment. *Journal of Software*, 2003,14(10): 1796~1805.

<http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1796.htm>

Abstract: A method is proposed to recover the reflectance properties of all objects in an environment. The input of the algorithm is a 3D geometric model of the scene, a panorama of it, and the information of light sources. The result is a full model of the reflectance properties of the scene. Recovery is done in a progressive refinement manner. At the very beginning, supposes all surfaces are diffuse and generates a new panorama. Then the new rendered panorama and the original one are compared iteratively. If the differences of some objects are greater than a threshold, more complex reflectance models are chosen for them. Finally, each object in the scene has a proper reflectance model, the scene can be rendered under novel lighting or viewing conditions, old objects can be removed from the scene, and new objects can be augmented into the scene. Special efforts have been done on recovering textures of textured diffuse, isotropic, and anisotropic surfaces; shadows and highlights are eliminated almost clearly.

Key words: inverse rendering; global illumination; panorama; reflectance model; augmented reality; texture

摘要: 提出一种恢复场景中所有物体的反射特性的方法.算法以一个全景图、场景的完整几何模型和光源信息为输入,结果是场景的一个完整反射模型.恢复是以逐步求精的方式进行的.先假定物体表面是漫反射面并生成一幅全景图,然后算法逐步迭代,比较绘制的全景图和原始全景图,如果有的物体的误差超过某个阈值,算法为

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60033010, 60173078, 60072014 (国家自然科学基金); the China Foundation of the University of Macao under Grant No.RG022/01-02S/WEH/FST (澳门大学基金资助项目)

第一作者简介: 孙其民(1970—),男,山东泰安人,博士,讲师,主要研究领域为计算机真实感绘制,逆向绘制技术.

他们选择更负责的反射模型.最后,场景中的每个物体有了一个合适的反射模型,可以在新的光照和视点条件下绘制,旧的物体可以从场景中移去,新的物体可以添加到场景中.对漫反射、各向同性反射和各向异性反射纹理面的纹理恢复也作了深入研究;高光和阴影的影响也能基本去除.

关键词: 逆向绘制;全局光照;全景图;反射模型;增强现实;纹理

中图法分类号: TP391 **文献标识码:** A

当看到一幅场景的照片时,人们有时希望看到场景在不同光照条件下的情景,或者是景物发生一些变化后的样子(比如,加入一个虚拟的物体或拿走一个真实的物体).但是,通常只有少量的照片,要达到其中的任何一个目标都是非常困难的.因为不论是光照的变化还是场景中的景物发生了变化,都要重新计算环境中的光能分布,但是在物体表面反射特性未知的情况下是不可能做到的,因此恢复物体的材质是必须的.

恢复物体材质的研究可以分为两类:一类是恢复单个物体的材质,这方面的研究相对较多^[1-4];另一类是从照片获取场景中所有物体反射特性的全局光照逆向绘制技术研究.根据采用照片数量的多少,也可以把现有全局光照逆向绘制技术的研究分为两类:一类用多幅照片来获取场景中物体的材质,并可以加入虚拟物体重新绘制^[5-8];另一类用一幅真实场景的照片来做同样的工作^[9-11].使用单幅照片的方法由于只能从照片中得到部分场景的信息,因此恢复的精度可能差一些,并且视点和观察方向的变动可能受到一些限制,因为未看到的部分场景的材质可能误差非常大.俞益洲^[8]和 Boivin 等人^[11]的工作分别是这两类中比较有代表性的.俞益洲等人用多幅照片来恢复场景中所有物体表面的反射特性,要求每个可见面必须至少有一个高光采样,否则认为它是漫反射面.而 Boivin 等人只用一幅照片,场景中许多物体不可见.它们的材质直接取为可见部分某个物体的材质或任意指定.他们对纹理面的处理也比较简单,均把它们作为漫反射面来对待.

本文提出一种用全景图和场景的完整几何模型恢复场景中所有物体反射特性的方法.该方法既避免了大量采样的麻烦,又克服了用单幅图像的不足.我们采用与 Boivin 相同的分层迭代的总体策略,但在求解过程中采取了一些不同的措施;Boivin 采用局部优化的算法,我们采用全局优化的算法;在理想镜面的判定和各向异性材质参数的求解方面,我们的做法也不同;特别是对纹理表面,我们做了更深入的研究,成功地恢复了漫反射面的纹理,对一般各向同性和各向异性的纹理反射面也能有效地减弱高光和阴影的影响.

1 预处理

在进行恢复前要对场景的模型进行预处理.首先为每个物体指定材质类型(塑料、金属、半透明材质等),因为现在还没有自动区分物体材质类型的办法.然后把物体分组,具有相同材质类型的分为一组.这样做有两个好处,一是可以减少材质的数目,二是可以避免直接恢复一些较小的、光照不充分的和不可见物体的参数,导致较大的误差.在恢复过程中,我们对每一类材质分别控制其优化进程,为此需要为每一类材质对应的物体组定义一个误差函数,优化的过程就是误差逐步减小的过程.一个物体组的误差定义为它们在绘制图像上的投影与全景图中对应区域的最小二乘误差的均值.两幅图像的最小二乘误差定义为

$$\chi^2 = \|I_{\text{temp}} - I_{\text{real}}\|^2 = \sum_i [(r_{\text{temp},i} - r_{\text{real},i})^2 + (g_{\text{temp},i} - g_{\text{real},i})^2 + (b_{\text{temp},i} - b_{\text{real},i})^2],$$

其中 $(r_{\text{temp},i}, g_{\text{temp},i}, b_{\text{temp},i})$ 和 $(r_{\text{real},i}, g_{\text{real},i}, b_{\text{real},i})$ 分别是两幅图像 I_{temp} 和 I_{real} 中的第 i 个像素.

2 反射模型

我们采用 RADIANCE^[8]中的反射模型,但是不考虑光的透射.对一般各向同性的材质,反射模型为

$$\rho = \frac{\rho_d}{\pi} + \rho_s \frac{f_s(q)}{\sqrt{(q \cdot n_p)(-v \cdot n_p)}}.$$

$$\rho_d = \rho C(1 - a_4);$$

$$f_s(q) = \frac{e^{[(h \cdot n_p)^2 - \|h\|^2]/(h \cdot n_p)^2 / \alpha}}{4\pi\alpha};$$

$\alpha = a_s^2 + \frac{\omega}{4\pi}$, 对应表面的粗糙度;

q_s , 入射光方向;

v , 视线方向;

n_p , 表面法向;

h , 入射光线和视线的角平分线;

C , 材质的颜色;

P , 材质的模式;

ω , 光源的立体角;

$$\rho_s = \begin{cases} a_4, & \text{塑料} \\ \{a_1 a_4, a_2 a_4, a_3 a_4\}, & \text{金属} \end{cases}$$

对各向异性的材质, 模型中镜面反射部分的定义不同, $f_s(q)$ 由下式给出:

$$f_s(q) = \frac{1}{4\pi\sqrt{\alpha_x\alpha_y}} \exp \left[-\frac{\frac{(h \cdot x)^2}{\alpha_x} + \frac{(h \cdot y)^2}{\alpha_y}}{(h \cdot n_p)^2} \right],$$

$$\alpha_x = a_5^2 + \frac{\omega}{4\pi},$$

$$\alpha_y = a_6^2 + \frac{\omega}{4\pi}.$$

α_x 和 α_y 分别对应 x 和 y 方向的粗糙度, x 和 y 是两个正交的方向. $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ 是待定的参数.

3 算法概述

算法的输入包括场景的三维模型和它的一个全景图, 模型中包括场景中所有光源的信息(位置、形状和辐射强度), 输入数据是经过预处理的. 算法采用逐步求精的思想, 分 5 步完成.

首先, 假定所有物体表面均是漫反射面, 迭代计算各材质的参数, 使绘制图像和给定全景图误差逐步变小. 迭代结束时, 误差小于给定阈值的确认漫反射, 其余的假定为各向同性的.

对可能是各向同性的材质, 确定一组最优的参数, 使各物体组的误差最小; 检查每一类材质的参数, 判断是否为理想镜面; 非镜面且误差小于给定阈值的判定为各向同性的, 误差大于阈值的, 进入下一步处理.

对于前面两步都没有判定的物体, 通过分析其在全景图中的投影区域, 标出纹理面片, 其余的判定为各向异性的.

对各向异性物体求解最优反射参数.

对纹理表面恢复其纹理和反射参数. 首先假定为漫反射面, 若恢复纹理后误差太大, 则作为各向同性反射纹理面片处理, 如果对结果仍然不满意, 就作为最后一类各向异性反射纹理表面处理.

最后, 我们得到一个既有几何信息, 又有材质和纹理信息的完整的场景模型, 可以在场景中加入新的物体、拿走一些旧物体, 或者改变光照和视点, 并且可以保证绘制的真实感.

下一节将详细介绍针对不同材质类型的逆向绘制技术.

4 从一幅全景图进行逆向绘制

4.1 漫反射表面

对于漫反射物体,采用迭代法确定其漫反射系数.设 I_{real} 为真实的图像,第 k 步得到的漫反射系数为 ρ_d^k , I_k 是用 ρ_d^k 绘制的图像,再经一次迭代得到的漫反射系数为 ρ_d^{k+1} ,则

$$\rho_d^{k+1} = \rho_d^k \cdot f, \quad f = \frac{\tilde{B}_{\text{real}}}{\tilde{B}_k},$$

其中 \tilde{B}_{real} 和 \tilde{B}_k 分别是 I_{real} 和 I_k 中所有像素的均值. ρ_d^0 可取为像素的平均值.

这个迭代过程收敛非常快,经过少数几次迭代就可以得到令人满意的结果.迭代终止后,对每组物体的误差进行分析,若小于给定阈值,则判定为漫反射,否则标记为各向同性的.

4.2 各向同性反射表面

对于这类物体,我们的目标是,确定各类材质反射模型的最优参数 ρ_d , ρ_s 和 a_s ,使每组物体的误差都达到最小.一般各向同性的反射函数具有镜面反射分量,在反射模型中由一个非线性项表示,因此,误差函数是非线性的.确定最优化参数要解一个非线性最优化的问题,我们选择鲁棒的非线性全局最优化算法——模拟退火算法来完成.

模拟退火算法最初是 Metropolis 等人用来模拟晶体结构冷却的物理过程.当温度逐渐降低的时候,材料的结构趋向于势能最小的热平衡态,降温的速率决定了能否达到能量最低的最优状态.该算法常被用于求解组合优化问题,这时参数的一组取值对应系统的一个状态,由目标函数计算得到的代价看作是系统在当前状态的能量,能量最小的状态就是目标函数达到最小值的状态.模拟退火算法从给定的参数初始值开始,逐步寻找使误差函数更小的参数,直到误差足够小或达到迭代的次数.我们这样来选择参数的初值: ρ_d 的初值为第 4.1 节中已经得到的结果, ρ_s 和 a_s 的初值取为设定的参数取值范围的中值.

确定反射表面最优参数,我们马上判断其是否为理想镜面.判定的依据是,镜面反射分量超过 90% 并且反射光的颜色非常接近入射光的颜色.实验证明,这一判据比最小误差判据更为有效.

Boivin 等人对理想镜面的处理是在处理完漫反射物体之后立即进行,所采用的是基于最小误差(与本文的定义类似,是真实图像和绘制图像的一种误差度量)的判别准则.在实验中我们发现,若在处理完漫反射物体后直接进行镜面检测,如果每次分别把一个物体设为理想镜面绘制图像计算其误差(本文定义的),则有的非理想镜面的误差反而比真正的镜面还要小,因此,以误差大小作为判据会出现误判.其原因是,场景中的许多物体不是漫反射的(比如有镜面反射分量或有纹理),目前仍有很大的误差,而它们恰好在镜面中反射出来,造成镜面区域的误差比较大.

在各向同性优化阶段检测理想镜面非常合适.一个原因是,理想镜面本来就是各向同性的,而且场景中各向同性和漫反射的物体居多,经过本阶段的优化以后,除了少量的各向异性面和纹理面以外,其他物体的反射参数已经确定,因此,在此阶段检测镜面比在此之前检测准确性更高.另外,我们还可以在此阶段采取一些加快镜面检测的方法.由于大片的镜面或较多镜面存在但是没有被确认,可能会影响整个优化的进程.我们采用镜面优先的优化策略,先对镜面反射参数进行优化,尽早确定有没有镜面.在我们的实验中,经过很少的迭代步数就能确定场景中惟一的镜面,而此时若用基于误差大小的方法来判定,会得到错误的结果.镜面优先的做法是一边对各向同性的反射面进行优化,一边对优化的结果进行分析,因此没有多余的光照计算.

4.3 纹理面的检测

经过前面两步以后,剩余的物体或者作为各向异性反射物体处理,或者作为纹理面处理.各向异性反射函数在本文的反射模型中是最复杂的,求解其最优参数也是最耗时的.漫反射纹理面可以不进行迭代优化,各向同性反射纹理面的待定参数也比各向异性反射面少得多,如果能把纹理面区分出来,就可以省去许多不必要的工作,从而提高逆向绘制求解的效率.

由于纹理表面颜色变化丰富,而各向异性反射面以色彩明暗缓慢变化为主,因此检测出纹理是容易的.其方法是,对物体在全景图上投影区域的图像作差分,对差分图像作统计分析,取差分值高于某一阈值的所有差分像素的均值作为特征量,特征量高于给定阈值则认为纹理.区分纹理面和各向异性反射面的特征量阈值要统计得出,且与步长的步长有关.

图 1 是纹理检测的实例,采用叠加图像中最大值的 1% 作为截断阈值,特征量阈值在步长为 3 的情况下取为 40%. 在图 1 中,上面一行是原图像,下面一行是对应的差分图像.图 1(a)~图 1(c)对应 3 种不同各向异性反射率的表面,图 1(a)~图 1(c)对应 3 种不同类型的纹理.6 幅图像的特征量在表 1 中列出,从中可以看出,当取阈值为 40% 时可以把纹理面检测出来.如果基于预处理中定义的误差来判断,在我们的实验中不能确定一个合适的阈值,因为有一个非纹理面(如图 1(c)所示)的误差比一个纹理面(如图 1(f)所示)的误差要大.

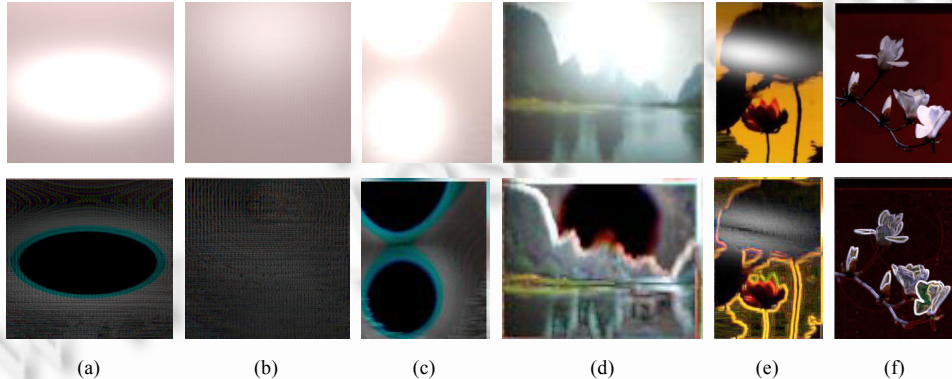


Fig.1 Example for distinguishing textures from anisotropic surfaces

图 1 区分纹理和各向异性反射面的例子

Table 1 Eigenvalues of difference images

表 1 差分图像的特征量

Image No.	1	2	3	4	5	6
Eigenvalue (%)	9.56	7.82	26.57	74.47	48.66	63.3

4.4 各向异性的反射表面

对于各向异性反射面,我们通过实验证实了 Boivin 的判断,即漫反射系数和镜面反射系数与粗糙度和各向异性方向无关.因此,第 4.2 节假定得到的漫反射系数 ρ_d 和镜面发射系数 ρ_s 仍然可用,不确定的参数只有沿两个方向的粗糙度 a_s , a_g 和各向异性方向向量 (x, y, z) , 所以有 5 个参数待定, a_s 和 a_g 的初值取为各自取值范围的中值, (x, y, z) 的初值为 $(0.5, 0.5, 0.5)$.

各向异性情况下的误差函数有多个极小值点,求局部极小值的算法是不合适的.因此,Boivin 等人先用其他方法来确定各向异性的方向,然后再用单纯形下山法来求其他参数的最优值.由于我们采用全局最优化算法,所以不存在这个问题,可以采用与第 4.2 节求各向同性反射函数最优参数相同的方式来做.

4.5 纹理表面

最后我们处理第 4.3 节中检测出来的纹理表面.现在所有的参数都是未知的,包括纹理.因此,还要考虑纹理的提取,问题比前面的更为复杂.在有些情况下在理论上没有惟一解,只能求得一个合理的解.

从图像中直接提取的纹理图像已经包含了环境中的光照,如果直接用来绘制,则会由于再一次接受光照而过亮,并且可能有其他物体的影子在上面,所以直接提取的纹理图像不能用于绘制.俞益洲等人^[8]在用多幅图像作逆向绘制时,讨论了一般纹理面的纹理恢复问题.在用单幅图像作逆向绘制时,Boivin 等人^[11]的方法只考虑了漫反射纹理面,不能处理含有镜面反射的纹理面.本节我们讨论漫反射纹理面、各向同性反射纹理面和各向异性反射纹理面的纹理恢复.

(1) 漫反射纹理表面

对于理想漫反射纹理面片,其上任意一点的漫反射辐射强度与入射光照度成正比,即

$$I = T \cdot \rho_d \cdot E = T_\rho \cdot E,$$

其中 T 为纹理函数, ρ_d 为漫反射系数, E 为入射光照射度. 比例因子 T_ρ 就是我们要恢复的, 它是真实的纹理图像 T 乘以漫反射系数 ρ_d . 由于从中不能分离出漫反射系数, 因此漫反射纹理面恢复的结果为

$$T_{\text{recovered}} = \frac{I_{\text{real}}}{E}.$$

从这里可以看出, 漫反射纹理恢复的精度取决于入射光照计算得是否精确. 由于处在一个全局光照环境中, E 的计算与其他物体有关, 因此纹理恢复不宜过早进行.

图 2 是恢复漫反射纹理的例子. 图 2(a) 中有一个漫反射纹理面, 由于照射到它的光线部分被一个球体遮挡, 上面两朵花落在阴影中, 下面那朵没有落在阴影中的花亮度较高, 恢复的纹理 (如图 2(b) 所示) 很好地去除了阴影并平衡了整个画面的亮度.



(a) Original image (a) 原始图像 (b) Recovered texture image (b) 恢复的纹理图像

Fig.2 Recovering texture for a textured diffuse surface 图 2 恢复漫反射纹理面的纹理

(2) 各向同性反射纹理面

这里我们只讨论各向同性塑料材质表面的纹理恢复问题. 对于塑料材质, 纹理只影响其漫反射分量. 对于没有纹理的图像, 可以表示成漫反射分量和镜面反射分量两部分:

$$I = I_d + I_s.$$

加上纹理作用以后得到的图像为

$$I_T = T \cdot I_d + I_s.$$

从上式中可以看出, 直接提取的图像含有镜面高光. 如果能够确定镜面反射分量, 则将其转化为漫反射纹理恢复问题. 但是, 在只有一幅图像的情况下, 我们只有 1 个等式, 不能从中解出 T 或消去 I_s , 而且我们也不知道漫反射系数, 所以也无从确定 I_s , 这就是为什么不能完全消除镜面高光的根本原因. 我们给出一种可以在一定程度上消除镜面反射高光和阴影的方法, 使恢复的纹理可以用于重新绘制.

首先, 把纹理面看作是漫反射面, 按照处理漫反射面的方法得到一幅图像 T_d :

$$T_d = \frac{I_{\text{real}}}{E}.$$

T_d 已经消除了部分光照的影响, 比 I_{real} 更接近真实的纹理, 对于漫反射的情形, T_d 已经可以代替真实的纹理.

取 T_d 所有像素的平均 ρ_{d0} 作为漫反射系数的近似, 把纹理面看作一个没有纹理的各向同性反射面, 它的漫反射系数为 ρ_{d0} , 而镜面反射系数未知, 应用前面求各向同性反射参数的方法求出镜面反射系数 ρ_s 和表面粗糙度 α .

由于镜面反射分量与纹理无关, 我们用没有纹理的反射面的镜面反射分量 I'_s 作为纹理面镜面反射分量的近似, 把它从 I_{real} 中分离出来, 最后恢复的结果为

$$T_{\text{recovered}} = \frac{I_{\text{real}} - I'_s}{E}.$$

图 3 是恢复各向同性反射面的纹理的例子, 由于经面反射影响不能完全



(a) Original image (a) 原始图像 (b) Recovered texture texture image (b) 恢复的纹理图像

Fig.3 Recovering texture for a textured isotropic surface 图 3 恢复各向同性纹理反射面的纹理

消除,上边缘有高光的地方误差较大.

(3) 各向异性的纹理反射面

对各向异性的纹理面片,处理的策略与各向同性的纹理面片相同,不同点在于,要先把它作为没有纹理的各向异性的面片来处理,求出漫反射系数以外的其他系数,然后分离漫反射分量和镜面反射分量,最后恢复纹理.

图 4 是恢复各向异性纹理反射面纹理的例子,与各向同性纹理反射面情形相同,高光的地方误差较大.

5 算法的优化和分析

由于在恢复过程中要反复计算环境的全局光照,因此,算法的优化是非常重要的.我们采取的策略主要有:限定参数的有效范围、镜面优先、纹理检测、选取适当的阈值.另外,全景图用 6 幅图像表示比用 1 幅图像更灵活,如果有的视图中已经没有未确定的材质,那么就不必再绘制那个视图的图像了.

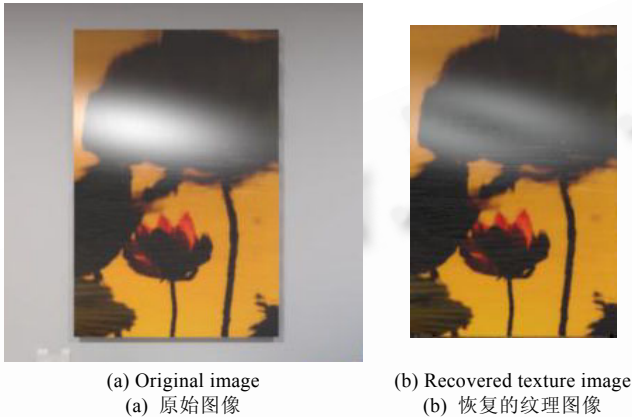


Fig.4 Recovering texture for a textured anisotropic surface
图 4 恢复各向异性纹理反射面的纹理

各阶段阈值的选取对优化的进度和精度都有直接的影响.对于理想漫反射材质,阈值可取 5%;如果要避免把镜面反射非常弱的物体判定为漫反射体,可以取 1%.对于各向同性的材质,可取 5%,这一阈值保证了不会把一些较小的物体因误差过大而判定为各向异性的.区分纹理和各向异性反射面的特征量阈值为 40%.漫反射纹理和各向同性反射纹理的阈值以及各向同性与各向异性反射纹理的阈值都是 5%.这些阈值是通过实验得出的,还需要更多的真实场景的例子来验证和修正.

最后,我们给出算法的伪代码描述.

Input: Scene, Panorama, Lights;

Output: A reflection model of the scene.

Begin

/* Inverse rendering diffuse surfaces */

For each surface in the scene Do

$\rho_d^0 = \text{averaged color value of all pixels in } I_{\text{real}};$

Calculate $\chi^2;$

EndDo

$k=1;$

While ($k < \text{MaxStep}$ AND not all χ^2 's are low enough) Do

For each surface in the scene Do

$\rho_d^{k+1} = \rho_d^k \cdot f; f = \frac{\tilde{B}_{\text{real}}}{\tilde{B}_k};$ Calculate $\chi^2;$

EndDo

$k=k+1;$

EndDo

For each surface in the scene Do

为了加快非线性优化的收敛速度,我们采取的第 1 步措施是限定参数取值的有效范围.由于材质的类型在预处理中已经指定,根据经验值可以确定合适的参数范围,缩小待搜索的参数空间.镜面属于各向同性的反射面,大片镜面或较多镜面的存在对光能分布有较大的影响,为了能尽早地把它们检测出来,在各向同性反射面的恢复过程中,我们采用镜面反射参数优先的策略.纹理面的检测可以避免因把它们作为各向异性反射面而作无用的处理,并且可以把确定非漫反射纹理面镜面反射参数和各向异性反射面的参数优化同时进行.

```

If ( $\chi^2$  is low enough)
    Mark it as a diffuse surface;
Else
    Mark it as an isotropic surface;
EndDo
/* Inverse rendering isotropic surfaces */
k=1;
While (k<MaxStep AND not all  $\chi^2$ 's of isotropic surfaces are low enough) Do
    For each isotropic surface Do
        Anneal ( $\rho_d, \rho_s, a_5$ ); // Do one step of Annealing
    EndDo
    k=k+1;
EndDo
For each isotropic surface Do
    If ( $\chi^2$  is low enough)
        If MirrorCheck(an isotropic surface)
            Mark it as a mirror;
        Else do nothing;
    Else Mark it as an anisotropic surface;
EndDo
/* Identify textured surfaces */
For each anisotropic surface Do
    If TextureCheck(an anisotropic surface)
        Mark it as a textured surface;
EndDo
/* Inverse rendering anisotropic surfaces */
k=1;
While (k<MaxStep AND not all  $\chi^2$ 's of anisotropic surfaces are low enough) Do
    For each anisotropic surface Do
        Anneal( $\rho_d, \rho_s, a_5, x, y, z$ ); //Do one step of Annealing
    EndDo
    K=k+1;
EndDo
/* Inverse rendering textured diffuse surfaces */
For each textured surface Do
     $T_{\text{recovered}} = \frac{I_{\text{real}}}{E}$ ; Calculate  $\chi^2$ ;
    If ( $\chi^2$  is low enough)
        Mark it as a textured diffuse surface;
    Else Mark it as a textured isotropic surface;
EndDo
/* Inverse rendering textured isotropic surfaces */
For each textured isotropic surface Do
     $T_d = \frac{I_{\text{real}}}{E}$ ;  $\rho_{d0}$ =average color of all pixels in  $T_d$ ;
EndDo
k=1;
While (k<MaxStep AND not all  $\chi^2$ 's of textured isotropic surfaces are low enough) Do
    For each textured isotropic surface Do
        Anneal ( $\rho_{d0}, \rho_s, a_5$ ); //Do one step of Annealing
    EndDo
    k=k+1;
EndDo
For each textured isotropic surface Do

```



```


$$T_{\text{recovered}} = \frac{I_{\text{real}} - I'_s}{E}; \text{ Calculate } \chi^2;$$

If ( $\chi^2$  is not low enough)
Mark it as an anisotropic surface
EndDo
/* Inverse rendering textured anisotropic surfaces */
For each textured anisotropic surface Do

$$T_d = \frac{I_{\text{real}}}{E};$$

 $\rho_{d0}$  = average color of all pixels in  $T_d$ ;
EndDo
k=1;
While (k<MaxStep AND not all  $\chi^2$ 's of textured anisotropic surfaces are low enough) Do
For each textured anisotropic surface Do
Anneal ( $\rho_{d0}, \rho_s, a_5, a_6, x, y, z$ ); //Do one step of Annealing
EndDo
k=k+1;
EndDo
For each textured anisotropic surface Do

$$T_{\text{recovered}} = \frac{I_{\text{real}} - I'_s}{E};$$

EndDo
End

```

6 实验结果

我们用一个虚拟的场景验证了本文的算法.场景的全景图用 6 幅视图表示(如图 5 所示).场景中有前面讨论的各种类型的材质,包括 3 种类型的纹理反射面.表 2 给出了实验中反射模型参数的取值范围, (a_1, a_2, a_3) 是物体表面的颜色, a_4 是镜面反射系数, a_5 和 a_6 是表面粗糙度, (x, y, z) 是各向异性方向.

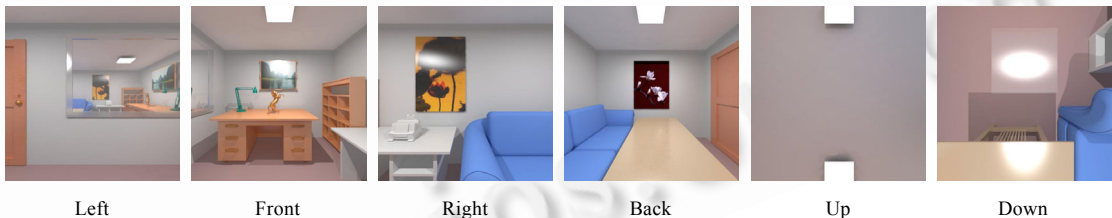


Fig.5 Six views of a scene panorama

图 5 场景全景图的 6 幅视图

图 6 是利用恢复的场景反射模型绘制的图像.原场景中有的物体(马的模型)被去掉了,有的位置发生了移动(台灯),加入了一些新的物体(书架、书桌上的书和铅笔、沙发上的玩具熊),而且环境中的光照也发生了变化.图 6(a)~图 6(c)是在新的视点处绘制的,图 6(d)是在原视点处绘制的.图 6(a)和图 6(c)光照相同,是在天花板中央增加了一个新的光源;图 6(b)中的光照改变是把台灯打开,其他光源亮度减弱为 40%;图 6(d)只是增加了一个新光源.图 6(c)中墙上的画对应于漫反射纹理面,图 6(a)和图 6(b)中的画对应于同一个各向同性反射纹理面,图 6(d)中另一幅画对应于各向异性反射纹理面.从图 6(a)~图 6(c)来看,恢复的纹理效果非常好.图 6(d)反映出当镜面反射分量较强时,对恢复效果影响明显.

Table 2 Scopes of parameters in the reflection model

表 2 反射模型中参数的取值范围

Parameter	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	x	y	z
Upper bound	1.0	1.0	1.0	1.0	0.3	0.3	1.0	1.0	1.0
Lower bound	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

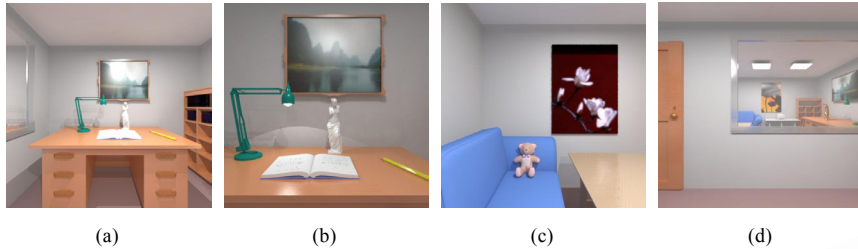


Fig.6 Images rendered after modification of 3D model and lighting of the environment
图 6 改变场景的 3D 模型和光照后绘制的图像

7 结 论

全局光照条件下的逆向绘制是逆向绘制中最复杂的一种情形,光照复杂,多种材质同时出现,而且采样问题也比较复杂.本文给出一种方法,在光源已知的条件下用一幅全景图和场景的几何模型来恢复场景中所有物体的反射特性,可以得到视觉上满意的结果,同时又无须太多的采样.算法采用对物体材质逐步求精的策略,由简单到复杂,逐步恢复场景中的漫反射面、镜面、各向同性反射面、各向异性反射面和各种纹理反射面.本文对纹理的恢复做了较细致的分析研究,得出了较好的结果.为了提高恢复算法的效率,采用了镜面优先、纹理检测等优化的方法,实验证明是有效的.利用恢复的结果,可以改变环境的光照、加入新的物体或移走某个物体,也可以改变观察的视点和方向,然后绘制具有高度真实感的图像.

References:

- [1] 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.
- [2] Lensch H, Kautz J, Goesele M, Heidrich W, Seidel H. Image-Based reconstruction of spatially varying materials. In: Gortler SJ, Myszkowski K, eds. Proceedings of the Eurographics Workshop on Rendering. Vienna: Springer-Verlag, 2001. 71~82.
- [3] Nishino K, Zhang Z, Ikeuchi K. Determining reflectance parameters and illumination distribution from a sparse set images for view-dependent image synthesis. In: Proceedings of the International Conference on Computer Vision. 2001. <http://www.cvl.iis.u-tokyo.ac.jp/~kon/publication/KNishino-ICCV01.pdf>.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Drettakis G, Robert L, Bougnoux S. Interactive common illumination for computer augmented reality. In: Slusallek D, ed. Rendering Techniques'97, the 8th Eurographics Workshop on Rendering. Vienna: Springer-Verlag, 1997. 45~56.
- [7] Loscos C, Frasson M-C, Drettakis G, Walte B, Granier X, Poulin P. Interactive virtual relighting and remodeling of real scenes. In: Lischinski D, Ward-Larson G, eds. Rendering Techniques'99, the 10th Eurographics Workshop on Rendering'99. Vienna: Springer Verlag, 1999.
- [8] 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.
- [9] Fournier A, Guawan A, Romanzin C. Common illumination between real and computer generated scenes. In: Proceedings of the Graphics Interface'93. Morgan Kaufmann Publishers, 1993. 254~262. <http://www.iro.umontreal.ca/~poulin/fournier/papers.html>.
- [10] Loscos C, Drettakis G, Robert L. Interactive virtual relighting of real scenes. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2000,6(4):289~305.
- [11] Boivin S, Gagalowicz 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.