

实时全局重光照算法*

吴向阳^{1,2+}, 彭群生^{1,2}, 张宏鑫¹, 陈为¹, 刘钢^{1,2}

¹(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

²(浙江大学 数学系, 浙江 杭州 310027)

A Real-Time Global Relighting Algorithm

WU Xiang-Yang^{1,2+}, PENG Qun-Sheng^{1,2}, ZHANG Hong-Xin¹, CHEN Wei¹, LIU Gang^{1,2}

¹(State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

²(Department of Mathematics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-571-87951045, E-mail: wuxy@cad.zju.edu.cn, <http://www.cad.zju.edu.cn>

Received 2004-04-05; Accepted 2004-07-05

Wu XY, Peng QS, Zhang HX, Chen W, Liu G. A real-time global relighting algorithm. *Journal of Software*, 2004,15(Suppl.):252~258.

Abstract: A real-time global relighting algorithm is proposed in this paper. The scene illumination is divided into three parts: direct, indirect and ambient components. After calculating the reflectance of objects from reconstructed geometry and pre-sampled images, indirect and ambient components of each sampled image are fitted with low-order basis functions. To relight the scene under new illumination conditions or viewpoints, the recovered reflectance is applied to the illumination model to get direct lighting, while indirect and ambient ones are obtained from the basis functions. In addition surface details are recovered by the variations of the micro-property and orientations on the surface computed from sampled images. The results show that this algorithm can reconstruct global illumination with clear shadow and surface detail vividly in real-time.

Key words: relighting; global illumination; BRDF; BTF; reflectance recovery; image-based rendering

摘要: 提出了一个实时全局重光照算法。算法利用重建的几何模型和沿不同光照方向的预采样图像恢复材料的反射属性,通过这些属性得到了面片在不同采样图像上的间接光照和环境光照,并用低阶基函数将它们拟合。重光照绘制时,将恢复的材料属性应用于光照模型计算出直接光照分量。间接光照和环境光照分量由低阶基函数获得,物体表面细节则通过求解表面法向和材料属性的扰动量重建。实验结果表明,算法有效地重建了全局光照明效果和表面细节,生成的阴影边缘清晰,且绘制速度达到实时。

关键词: 重光照;全局光照;BRDF;BTF;反射率恢复;基于图像的绘制

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60033010 (国家自然科学基金); the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.2002CB312101 (国家重点基础研究发展规划(973))

作者简介: 吴向阳(1975-),男,浙江临安人,博士生,主要研究领域为真实感绘制;彭群生(1947-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为真实感图形,虚拟现实,红外成像仿真,基于点的造型与绘制,科学计算可视化;张宏鑫(1975-),男,博士,主要研究领域为曲线曲面造型,真实感绘制;陈为(1976-),男,博士,主要研究领域为科学计算可视化,虚拟现实;刘钢(1976-),男,博士生,主要研究领域为基于图像的造型。

基于图像的重光照(image-based relighting)作为图形学中增强现实的一个重要手段而被广泛地研究,其方法主要有两类:一类基于经验光照明模型和场景几何恢复物体材料的光照属性,再根据这些属性生成新光照条件或新视点下同一场景的图像^[1-8]。这类方法允许用户在场景中任意漫游并与场景物体进行交互操作,图像阴影边界清晰,其缺点是应用全局光照明模型恢复材料的光照属性时,需要知道场景的完整几何和环境光照,在重光照绘制时又因全局光照计算而很难达到实时。另一类方法基于场景不同视点、光照方向的采样图像,采用合适的基函数对采样图像进行插值拟合等处理,获得以视点和光照方向为变量的重光照函数^[9-11]。重光照函数中包含了间接光照和环境光照效果,因而具有全局性。绘制时利用重光照函数计算新视点和重光照条件下的图像,速度较快。为了获取高光、阴影等效果,这类方法需要对视点和光照方向构成的高维空间进行密集采样,数据量极大。所以往往固定视点仅沿光源方向进行二维采样,并在一定精度要求下减少采样量^[12],或者对数据进行压缩^[13,14]。此外,通常需要较多的基函数(几十个)才能在阴影边界等高频分量丰富的区域产生较好的效果。物体表面细节一般用六维采样的BTF(双向纹理函数)重建^[15,16],但无疑数据量是巨大的。

本文通过对表面直接光照和间接、环境光照分量分别处理来实现实时的全局重光照。在环境光未知的情况下,首先利用固定视点但沿不同光源方向的少量采样图像,恢复材料反射属性,进而采用低阶基函数拟合每个面片的间接光照和环境光照分量。重光照绘制时用恢复的表面材料属性逐像素计算表面直接光照分量,间接光照分量和环境光照分量则通过基函数逐面片计算。同时在这些采样图像的基础上对高光面求取法向和反射属性的扰动量,有效地重建了物体表面细节。算法无需密集的采样数据和高阶的基函数,可在普通微机平台上获得满意的光照效果,且速度达到实时。此外,我们对材料类型的判别提出了预测和图像处理的方法,对纹理面求出了去光照纹理。

1 算法描述

算法的输入是场景的几何模型和固定视点沿不同光源方向少数采样图像。场景中面片的反射光可分解成直接光照分量和非直接光照分量(包括间接光照和环境光照)两部分。直接光照分量包括表面在光源照射下的漫反射分量、高光分量,位于该光源阴影中的表面区域,其直接光照分量为0。光源方向和视点改变时,由于景物之间的遮挡关系和表面高光区域的变化,直接光照分量变化很大,因此我们采用重建表面反射属性的策略逐像素计算表面在重光照下的直接光照分量,并可获得清晰的阴影边界和高光。间接光照和环境光照一般变化平缓,算法用低阶基函数对采样图像中表面的间接光照分量和环境光照分量逐面片拟合,生成的重光照函数较精确地表征这些非直接光照的变化。

很多材料表面存在微观几何细节,它们对高光效果的影响往往较大。算法分两步生成高光,首先利用光照明模型求整个面片的高光反射系数,获得高光在面片上的宏观分布,再假设微观几何细节可通过表面高光系数或法向微小扰动来模拟,求解这些扰动量来对高光系数和法向作适当调整,即可生成具有真实感的表面细节。

算法流程如图1所示,利用无高光的采样图像获得漫反射系数,并求出这些图像中的间接和环境光分量,将它们拟合成低阶重光照函数。再对有高光的采样图像使用已获得的漫反射系数和低阶重光照函数计算总的漫反射分量,它们与总光强的差即为高光分量,对它们用高光模型拟合并求出高光系数或法向的扰动量。重光照绘制时分别用漫反射系数、重光照函数、扰动后的高光系数或法向求各个分量。

1.1 表面类型判别

不同的材料类型对入射光的反射情况不同,对场景中面片的材料类型进行判别和分类有利于为表面材料属性重建提供良好的初值。Boivin^[1]和孙其民等^[8]提出利用逐步假设的方法获得各面片的材料类型,需不断迭代,速度较慢。我们用预测及图像处理的方法判断各面片的材料类型。

1.1.1 纹理面判断

纹理表面细节丰富,相邻像素间颜色变化大,用孙其民^[8]求差分的方法能较精确地检测出纹理面。

1.1.2 高光面判断

高光是一个视点相关的表面反射属性。Stephen^[17]利用不同视点处拍摄的图像的直方图的差来检测图像中

的高光点,但往往会因为噪声作出误判.只有当光照方向与视线沿法向基本对称时才存在明显高光,我们利用无高光采样图像求得面片的漫反射系数和低阶重光照函数,再用这个漫反射系数和重光照函数预测其它采样图像中同一面片的漫反射光亮度,如果预测值与实际图像中该面片的亮度相差较大,则可判定该面片为高光面.

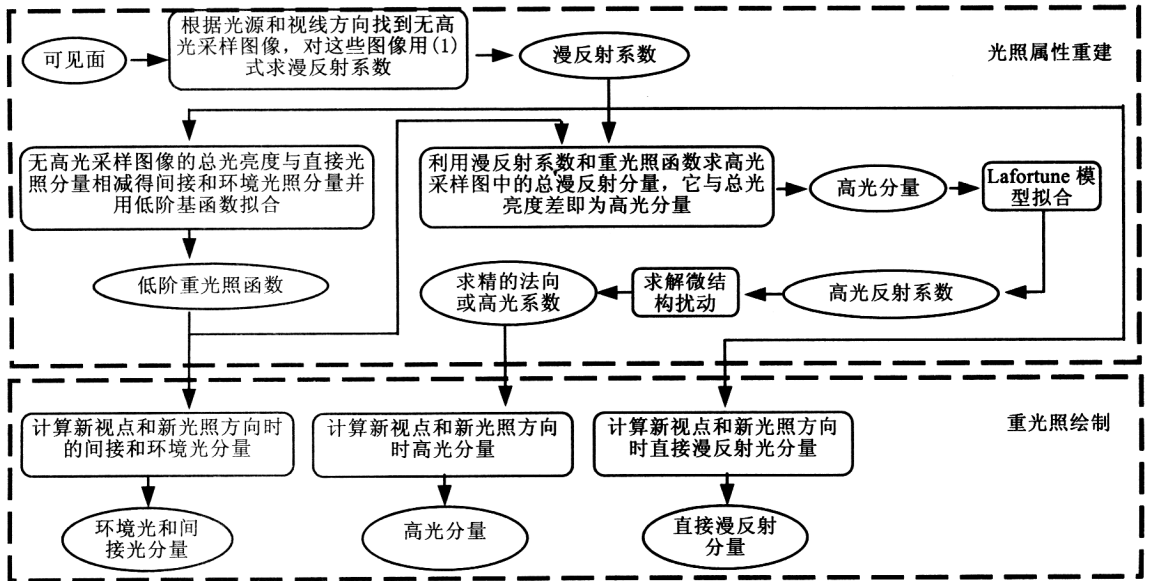


图1 算法流程

1.1.3 镜面判断

判断一个面是否是镜面的依据是别的物体是否能在它上面成像.为了对某个面作出判断,算法先假设它是镜面,根据采样图像的照相机位置和场景的几何计算在这个面片上理论上能看到的像和像的边缘,如图 2 中的虚线所示.再利用边缘检测算法(如 Sobel 算子)提取图像中实际存在的边缘,如图 2 中的白线所示,如果相关性匹配算法检测出白线与虚线吻合,则认为镜面假设是成立的,否则不是镜面.

1.2 材料属性恢复

阴影可以表现场景中景物的相对方位和画面的层次,合成清晰的阴影一直是图形学研究的一个热点^[18].对无阴影、高光等高频分量的面片采用低阶基函数拟合预采样图像能获得较好的效果,但如果存在阴影和高光,就需要密集的采样图像和数量众多的基函数.利用重建的表面光照属性计算直接光照分量是获得清晰阴影和逼真高光的一个最直接的方法.

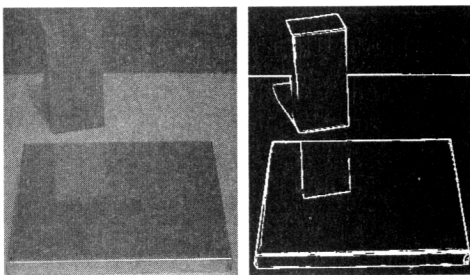


图2 镜面判断



图3 直接光照计算

1.2.1 漫反射系数恢复

高光只在入射光线方向与视线方向对称分布于表面法向两侧的很小范围里存在,对每个面片根据几何关系可找到无高光的图像,利用这些图像求漫反射系数. Yu^[4]用相邻的非阴影区域和阴影区域(如图 3 中两个框中的区域所示)的颜色差来得到直接光照分量.利用多幅带阴影的图像通过最小二乘法获得漫反射系数 k_d ,即求

公式(1)取最小值时的 k_d 值,其中 I_i 是图像中两区域平均颜色差, I_i 和 $d\omega$ 分别是光源的强度和立体角.

$$\sum_i (I_i - k_d I_i d\omega N \cdot L)^2 \tag{1}$$

1.2.2 纹理面光亮度计算

纹理面的每个像素处的漫反射系数各不相同,对每个像素分别求光亮度比较繁琐.我们的算法对纹理面计算去光照后的漫反射纹理以及这个面片去除纹理效果后的归一化平均亮度.利用去光照纹理调节整个面片的归一化平均亮度得到精确的纹理效果.假定在同一幅采样图像上某纹理局部区域上任两点受到的环境光和间接光是一样的,设为 I_a ,它们的漫反射系数为 k_1, k_2 ,则有

$$I_1 = k_1(I_a + I_l d\omega_1 N_1 \cdot L_1), I_2 = k_2(I_a + I_l d\omega_2 N_2 \cdot L_2) \tag{2}$$

由上述二式可解得 $k_1 I_2 - k_2 I_1 = k_1 k_2 I_l (d\omega_2 N_2 \cdot L_2 - d\omega_1 N_1 \cdot L_1)$,两幅以上的采样图像就可解出去光照纹理 k_1, k_2 ,采样图像中去纹理效果的归一化平均亮度可表示为

$$\bar{I} = \frac{1}{n} \sum_j I_j / k_j \tag{3}$$

其中 I_j 是每个像素的亮度值.第 1.4 节中纹理面的低阶重光照函数拟合是对归一化平均亮度进行的.

1.2.3 高光系数恢复

在我们的算法中,直接光照引起的表面漫反射分量可根据重建的表面漫反射系数得到,而间接光照由第 1.4 节中的方法可近似获得.因此,由总反射强度与这两者之和的差可得到高光分量.我们对整个面片分离出的高光用 Lafortune^[19]模型来拟合,它能模拟各向同性、各向异性、回射等效果,表达式如下:

$$f = \sum_{i=1}^m (C_{x,i} u_x v_x + C_{y,i} u_y v_y + C_{z,i} u_z v_z)^{n_i} \tag{4}$$

式(4)由几个基函数组成,每个基函数表达某种光照效果, (u_x, u_y, u_z) 和 (v_x, v_y, v_z) 是局部坐标系下的光源方向和视线方向. $C_{x,i}, C_{y,i}, C_{z,i}, n_i$ 是需要拟合的系数,它们表征材料的反射性质.

1.3 表面微观几何细节模拟

第 1.2.3 节得到整个面片的平均高光反射系数,但很多物体表面细节丰富,用统一的法向和反射系数难获得逼真效果,由于高光表达式(4)是非线性的,逐像素优化非线性函数计算量太大,我们取两种扰动量来生成表面细节.第 1 种方法假设材料属性不变,而面片表面的每个点的法向相对于宏观法向有微小扰动,这个扰动引起 $u_x, u_y, u_z, v_x, v_y, v_z$ 变化;而另外一种方法则假设法向不变,但材料属性相对于第 3 节中求出的 $(C_{x,i}, C_{y,i}, C_{z,i}, n_i)$ 有微小扰动.我们对每个像素对应的面片点求出这些扰动量.将式(4)写成:

$$f = f(C_{x,1}, C_{y,1}, C_{z,1}, n_1, \dots, C_{x,m}, C_{y,m}, C_{z,m}, n_m, \theta, \phi) = f(\Omega, \Theta) \tag{5}$$

其中 θ, ϕ 是法向的方位角, Θ 是它们写成列向量的矢量形式, Ω 是材料属性矢量.扰动材料时,对式(5)做泰勒展开,有

$$f(\Omega + \Delta\Omega, \Theta) = f(\Omega, \Theta) + \nabla f^T(\Omega, \Theta) \cdot \Delta\Omega \tag{6}$$

利用 k 幅图像得到 k 个方程组成的线性方程组,用最小二乘法解出每个点的扰动量 $\Delta\Omega$,绘制时利用这些扰动量更新式(4)中的参数 $(C_{x,i}, C_{y,i}, C_{z,i}, n_i)$ 或者直接用式(6)进行绘制.

同样用类似方法可求出法向的扰动量 $\Delta\Theta = (\Delta\theta, \Delta\phi)$.

由于 Lafortune 模型中的高光系数表示了高光与法向、主方向等局部几何的关系,所以对它们的扰动也能表现物体表面法向的微小变化,从图 4 可以看出这种效果.图 4(a)~图 4(c)分别是原图、没有扰动和用扰动法得到的桌面绘制效果.

1.4 间接光照和环境光照的拟合

场景中的光照非常复杂,获得场景中的环境光比较困难,一个近似的方法是用光亮小球获得的环境映照^[5,20]来表示.这种技术对小场景比较适用,对复杂场景误差较大.

场景中的间接光照和环境光照分量可通过将总颜色强度减去直接光照分量(包括漫反射分量和高光分量)

得到,注意到场景中的间接光照和环境光照往往变化平缓,对它们用低阶函数拟合误差较小.

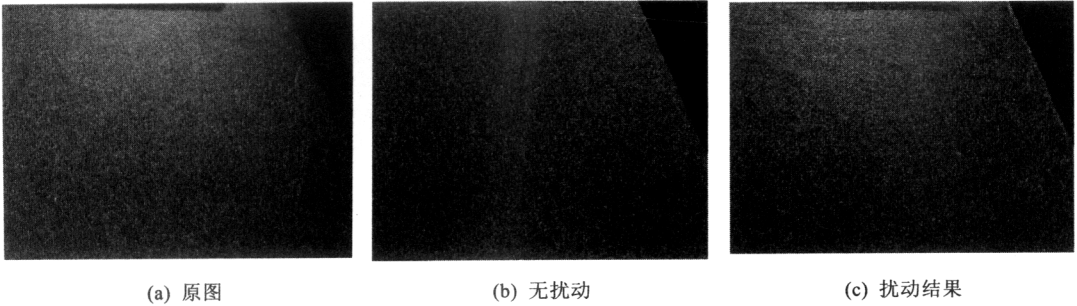


图4 微观几何细节重建

光源的参数除了亮度以外,主要还有位置 (x, y, z) 和方向 (θ, φ) , 因此重光照函数的形式如下:

$$I(x, y, z, \theta, \varphi) = I_l \sum_{i=1}^n c_i f_i(x, y, z, \theta, \varphi) \quad (7)$$

式(7)由 n 个低阶基函数 f_i 线性组合而成, f_i 可以是调和函数、多项式函数等等.例如当光源是平行光时,利用多项式基组成的重光照函数可表示为 $I(\theta, \varphi) = I_l(c_1\theta^2 + c_2\varphi^2 + c_3\theta\varphi + c_4\theta + c_5\varphi + c_6)$. 对式(8)用不少于 n 幅的图像就可利用最小二乘法求出各个系数 c_i . 重光照时只要将新的光源位置、方向、强度代入式(7)即可算出面片的颜色.

2 实验结果

我们的实验平台是一台带有 AMD Athlon XP2000+, 内存为 256M 的微机, 计算重光照时, 直接光照分量与图像的像素数和场景面片数有关, 而间接光照和环境光照分量只与可见面数有关. 本文的验证实例采用 IBM(基于图像的造型)方法造型的图 5~图 7 场景中桌面及桌面上物体, 周围环境未知, 图 5~图 7 显示了我们的重光照效果. 为了验证重光照速度, 我们又将面片加密剖分成 120 732 块, 图像尺寸为 400×300 , 重光照的绘制时间是 0.064 3s.

图 5 是两帧不同光照条件下的重光照效果图, 第 1 行是实拍照片, 第 2 行是我们算法生成的图像. 由于实拍环境复杂, 精确获得各种环境光非常困难, 因此基于传统的全局光照明模型很难实现重光照. 我们采用低阶函数拟合获得了较好的效果, 图中的阴影和铜镜中的像长度有所差别是因为几何重建误差引起的. 图 6 是一红一白两光源条件下的光照效果图, 图 7(a)是同一场景在新视点下图像(它没有作为采样图像参与材料属性和低阶重光照函数的重建), 图 7(b)是生成的光照效果图. 铜镜由于在它上面的环境像变化, 颜色有些误差.

3 结论

本文对直接光照与间接光照、环境光照采用不同的方法分别计算, 实现了在重光照条件下较精确的全局光照明效果. 由直接光照产生的阴影边缘清晰, 且绘制速度达到实时. 相对于纯粹恢复材料属性的方法, 我们的方法不需要测量环境光, 也不需要创建场景中所有几何, 只要对感兴趣的部分重建即可, 而且由于采用低阶函数拟合场景中的环境光照和间接光照分量, 避免了全局光照计算, 大大加速了绘制速度. 相对于纯粹采样的方法, 我们的方法不需要密集采样图像, 而是通过重建表面材料属性获得高光和清晰阴影边界, 需要的采样图像少. 此外, 本文的算法可实现不同视点下的重光照, 从而达到实时场景漫游. 通过扰动面片表面法向和材料属性来处理微表面是该算法的另一个特点, 通过几幅照片恢复表面微观细节, 避免了 BTF 等方法的大量六维采样问题.

由于输入的采样图像是固定视点的, 所以拟合产生的低阶重光照函数只反映了该视点下间接光照和环境光照的变化, 改变视点时会有差别, 特别在镜面上的像变化很大, 这是我们的方法的不足. 但由于在很多情况下面片的环境光照和间接光照分量随视点变化不大, 因此该算法得到的结果误差不大.

重建几何在很多情况下比较繁琐, 基于少量几幅无几何信息图像实现重光照是未来考虑的研究方向之一. 法向和材料属性的扰动不能完全表现物体表面的细节, 如微小几何之间的遮挡会对光照效果产生影响, 如何表

征和生成物体表面丰富细节将是我们的另一个研究方向.

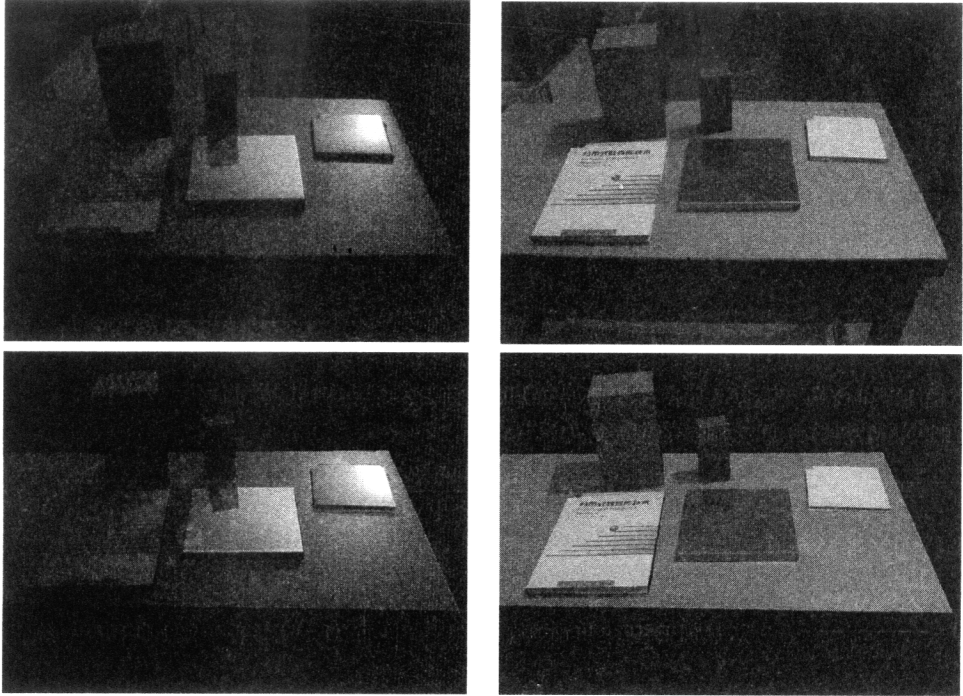
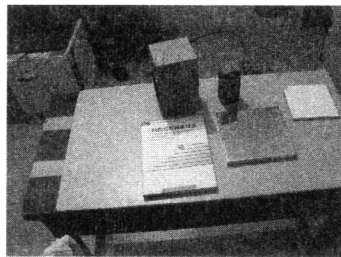


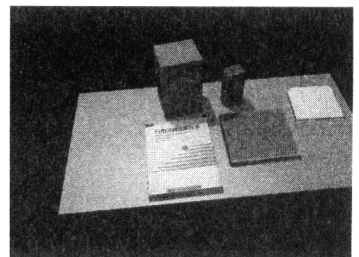
图 5 重光照效果图



图 6 两光源效果图



(a) 原图



(b) 生成图像

图 7

References:

- [1] Boivin S, Galgalowicz A. Image-Based rendering of diffuse, specular and glossy surfaces from a single image. In: Fiume E, ed. Proc. of the SIGGRAPH 2001. New York: ACM Press, 2001. 107~116.
- [2] Lensch H, Kautz J, Goesele M, Heidrich W, Seidel H. Image-Based reconstruction of spatially varying materials. In: Gortler SJ, Myszkowski K, eds. Proc. of the Eurographics Workshop on Rendering. Vienna: Springer-Verlag, 2001. 71~82.
- [3] Yu YZ, Debevec P, Malik J, Hawkins T. Inverse global illumination: recover reflectance models of real scenes from photographs. In: Rockwood A, ed. Proc. of the SIGGRAPH'99. New York: ACM Press, 1999. 215~224.
- [4] Yu YZ, Malik J. Recovering photometric properties of architectural scenes from photographs. In: Cohen M, ed. Proc. of the SIGGRAPH'98. New York: ACM Press, 1998. 207~217.
- [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. Proc. of the SIGGRAPH'98. New York: ACM Press, 1998. 189~198.
- [6] Sato Y, Wheeler MD, Ikeuchi K. Object shape and reflectance modeling from observation. In: Whitted T, ed. Proc. of the SIGGRAPH'97. New York: ACM Press, 1997. 379~387.

- [7] Sun QM, Wu EH. Recovering material for a homogeneous object in an environment from a single high dynamic range image. *Journal of Software*, 2002,13(9):1852~1857 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13/1852.pdf>
- [8] Sun QM, Wu EH. Inverse rendering in a global illuminated environment. *Journal of Software*, 2003,14(10):1796~1805 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1796.htm>
- [9] Wong TT, Heng PA, Or SH, Ng WY. Image-based Rendering with controllable illumination, In: Dorsey J, Slusallek P, eds. *Eurographics Rendering Workshop'97*. New York: Springer Wien, 1997. 13~22.
- [10] Malzbender T, Gelb D, Wolters H. Polynomial texture maps. In: Fiume E, ed. *Proc. of the SIGGRAPH'2001*. New York: ACM Press, 2001. 519~528.
- [11] Masselus V, Peers P, Dutre P, Willems YD. Relighting with 4D incident light fields. *ACM Trans. on Graphics*, 2003,22(3): 613~620.
- [12] Lin ZC, Wong TT, Shum HY. Relighting with the reflected irradiance field: representation, sampling and reconstruction. *Int'l Journal of Computer Vision*, 2002,49(2-3):229~246.
- [13] Wong TT, Fu CW, Heng PA, Leung CS. The plenoptic illumination function. *IEEE Trans. on Multimedia*, 2002,4(3):361~371.
- [14] Wong TT, Leung CS. Compression of illumination-adjustable images. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 2003,13(11):1107~1118.
- [15] Liu XG, Yu YZ, Shum HY. Synthesizing bi-directional texture functions for real-world surfaces. In: Fiume E, ed. *Proc. of the SIGGRAPH 2001*. New York: ACM Press, 2001. 97~106.
- [16] Sloan PP, Liu XG, Shum HY, Snyder J. Bi-Scale radiance transfer. *ACM Trans. on Graphics*, 2003,22(3):370~375.
- [17] Lin S, Li YZ, Kang SB, Tong X, Shum HY. Diffuse-Specular separation and depth recovery from image sequences. In: Petkov N, Westenberg MA, eds. *Proc. of the 7th European Conf. on Computer Vision-Part III*. London: Springer-Verlag, 2002. 210~224.
- [18] Ng R, Ramamoorthi R, Hanrahan P. All-Frequency shadows using non-linear wavelet lighting approximation. *ACM Trans. on Graphics*, 2003,22(3):376~381.
- [19] Lafortune E, Foo SC, Torrance KE, Greenberg DP. Non-Linear approximation of reflectance functions. In: Whitted T, ed. *Proc. of the SIGGRAPH'97*. New York: ACM Press, 1997. 117~126.
- [20] Debevec P, Malik J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. In: Whitted T, ed. *Proc. of the SIGGRAPH'97*. New York: ACM Press, 1997. 369~378.

附中文参考文献:

- [7] 孙其民,吴恩华.从单幅高动态范围图像恢复环境中物体的材质.软件学报,2002,13(9):1852~1857. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13/1852.pdf>
- [8] 孙其民,吴恩华.全局光照环境中的逆向绘制.软件学报,2003,14(10):1796~1805. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1796.htm>