

## 可变材质的实时全局光照明绘制<sup>\*</sup>

孙鑫<sup>1+</sup>, 周昆<sup>2</sup>, 石教英<sup>1</sup>

<sup>1</sup>浙江大学 CAD/CG国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

<sup>2</sup>(微软亚洲研究院 网络图形组, 北京 100080)

### Real-Time Global Illumination Rendering with Dynamic Materials

SUN Xin<sup>1+</sup>, ZHOU Kun<sup>2</sup>, SHI Jiao-Ying<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>(Internet Graphics Group, Microsoft Research Asia, Beijing 100080, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-58963512, E-mail: sunxin@cad.zju.edu.cn

**Sun X, Zhou K, Shi JY. Real-Time global illumination rendering with dynamic materials. *Journal of Software*, 2008,19(4):1004–1015. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1004.htm>**

**Abstract:** All previous algorithms of real-time global illumination rendering based on precomputation assume that the materials are invariant, which makes the transfer from lighting to outgoing radiance a linear transformation. By precomputing the linear transformation, real-time global illumination rendering can be achieved under dynamic lighting. This linearity does not hold when materials change. So far, there are no algorithms applicable to scenes with dynamic materials. This paper introduces a real-time rendering method for scenes with editable materials under direct and indirect illumination. The outgoing radiance is separated into different parts based on the times and corresponding materials of reflections. Each part of radiance is linear dependent on the product of the materials along its path of reflections. So the nonlinear problem is converted to a linear one. All materials available are represented as linear combinations of a basis. The basis is applied to the scene to get numbers of different material distributions. For each material distribution, all parts of radiance are precomputed. This paper simply linear combines the precomputed data by coefficients of materials on basis to achieve the effects of global illumination in real-time. This method is applied to scenes with fixed geometry, fixed lighting and fixed view direction. And the materials are represented with bidirectional reflectance distribution functions (BRDFs), which do not take refraction or translucency into account. The authors can simulate in real-time frame rates up to two bounces of light in the implementation, and some interesting phenomena of global illumination, such as color bleeding and caustics, can be achieved.

**Key words:** global illumination; bidirectional reflectance distribution function (BRDF); path tracing; rendering equation; principle component analysis (PCA)

**摘要:** 现有的基于预计算的全局光照明绘制算法都假设场景中物体的材质固定不变, 这样, 从入射光照到出射

\* Supported by the National Basic Research Program of China under Grant No.2002CB312105 (国家重点基础研究发展计划(973)); the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60533080 (国家自然科学基金)

Received 2006-11-02; Accepted 2006-12-27

的辐射亮度之间的传输变换就是线性变换.通过对这种线性变换的预计算,可以在动态光源下实现全局光照的实时绘制.但是,当材质可以改变时,这种线性变换不再成立,因此,现有算法无法直接用于动态材质的场景.提出了一种方法:在修改场景中的物体材质时,可以实时得到场景在直接光照和间接光照下的绘制效果.将最终到达视点的辐射亮度根据其之前经过的反射次数及相应的反射材质分为多个部分,每个部分和先后反射的材质的乘积成正比,从而将该非线性问题转化为线性问题.又将所有可选的材质都表示为一组基的线性组合.将这组基作为材质赋予场景中的物体,就有各种不同的组合方式,预计算每种组合下所有部分的出射辐射亮度.在绘制时,根据各物体材质投影到基上的系数线性组合预计算的数据就能实时得到最终的全局光照的绘制结果.该方法适用于几何场景、光照和视点都不发生变化的场景.使用双向反射分布函数来表示物体的材质,不考虑折射或者半透明的情况.该实现最多包含两次反射,并可以实时绘制得到一些很有趣的全局光照明效果,比如渗色、焦散等等.

关键词: 全局光照明;双向反射分布函数;路径跟踪;绘制方程;主元分析法

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

全局光照明技术帮助我们使用计算机合成照片级真实感的图像.通过模拟光在虚拟场景中的传播方式,可以生成现实中的各种光影效果.Kajiya<sup>[1]</sup>提出的绘制方程是一个统一描述光的直线传播、反射、折射、散射、自发光、遮挡等各种行为的框架,决定最终绘制结果的因素包括3个部分:光源、场景几何结构和材质.

物体的材质描述了物体对光的反射特性,包括反射光的强度、颜色和方向分布等.直接光照下,材质可以表现为物体的颜色、明暗、高光或者漫反射等.在全局光照的框架下,需要考虑从光源出射的光经过反射后照亮场景的效果.比如,反射光能进一步照亮场景;反射物体的颜色能够影响其他物体的颜色,即渗色(color bleeding);高光材质可以形成焦散(caustics).当物体采用可变材质时,也就是说,当物体的材质被改变时,光照效果都会受到相应的影响.比如,物体颜色改变除了其本身颜色的变化以外,周围受到它反射的物体的颜色也会相应变化.再比如,当材质逐渐从漫反射变为高光镜面反射时,除了可能会从接近于木头、粉刷墙面之类的效果变得接近于金属的效果以外,周围受到其反射光照射的物体很可能也会逐渐形成程度不同的焦散.

采用光线跟踪算法按照绘制方程计算模拟光的传播,无法达到实时的绘制性能.采用OpenGL或者DirectX等绘制引擎,在可编程图形处理硬件(graphics processing unit,简称GPU)的支持下,基本功能无法处理遮挡产生的阴影和多次反射的效果.阴影贴图(shadow mapping)不支持复杂光源的软阴影(soft shadow).Sloan<sup>[2]</sup>提出的基于预计算辐射传播(precomputed radiance transfer,简称PRT)能够实现复杂光源照射下场景的重光照(relighting),但是物体的材质固定不变.直到Ben-Artzi<sup>[3]</sup>才将材质作为独立动态变化的因素纳入实时绘制的框架,虽然可以支持复杂光源的直接光照效果,但不能实现间接光照的效果,所以不是一种全局光照的算法.

图1包含不同绘制技术的效果.图1(a)采用点光源,没有阴影和间接光照,实际上是DirectX或者OpenGL的结果.图1(b)是采用点光源的直接光照的结果,有硬阴影.图1(c)是面光源的直接光照的结果,有软阴影.图1(d)是面光源的直接光照和间接光照的结果,场景变亮,阴影区被照亮,Bunny上有明显的渗色效果:墙壁的红色使得Bunny也显现红色.可见,采用复杂光源和全局光照明技术可以极大地提升绘制的视觉效果.

本文致力于复杂光照下改变材质的全局光照明效果的实时绘制.具体描述为:在静态场景中采用复杂光源(本文采用的是面光源,当材质发生变化时,能实时地得到绘制效果.绘制效果包括直接光照效果,比如材质效果和软阴影,以及间接光照的效果,比如阴影区被反射光照亮、渗色和焦散等.本文假定只在物体表面改变光路,并且没有折射,所以采用双向反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function,简称BRDF)描述材质.并且,我们采用Blinn-Phong<sup>[4]</sup>的BRDF模型描述物体的材质,可以通过改变其参数来改变物体的材质.

随着GPU的飞速发展,出现了一些实时绘制的算法,比如Sloan<sup>[2]</sup>提出的PRT和周昆<sup>[5]</sup>提出的阴影场(shadow fields).他们将光照或遮挡反射等因素的影响分解到线性基上,将积分运算转化为基的系数的操作,并且利用GPU并行运算的特点加速绘制.但由于光线在到达视点前可能会经过多次反射,反射的次数越多,材质的影响就越大,绘制效果和材质呈现非线性的关系,类似PRT的方法不能直接推广到可变材质的全局光照明绘制. Ben-Artzi<sup>[3]</sup>为建立这种线性关系放弃了间接光照效果,因此不是一种全局光照明算法.

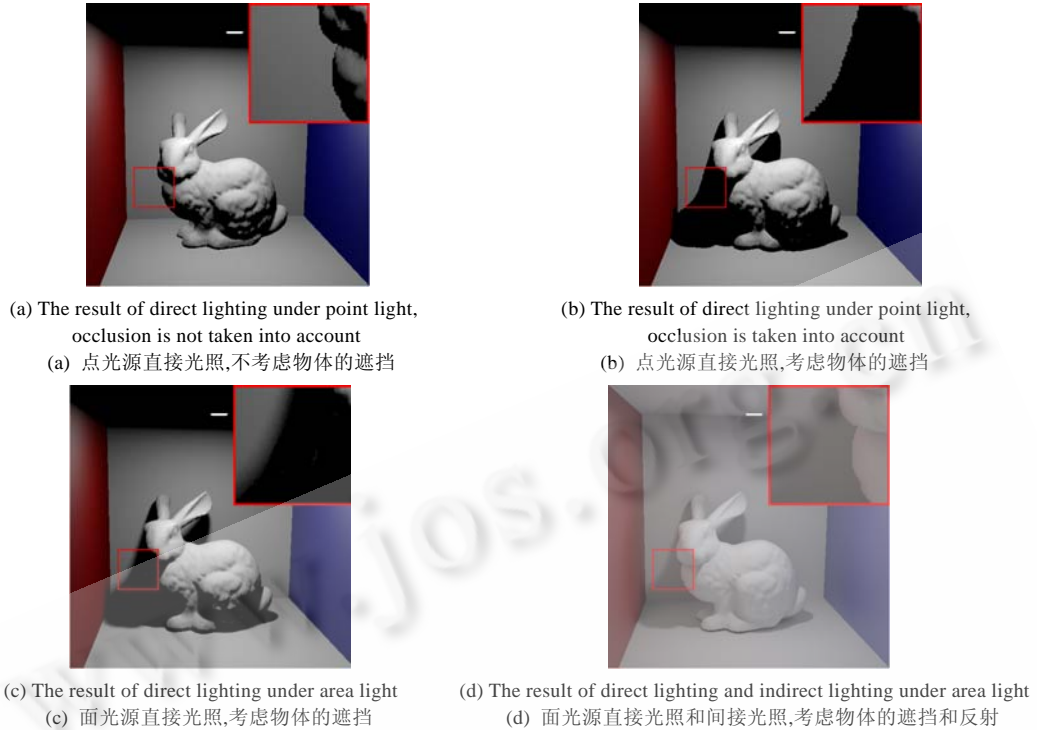


Fig.1 Results of rendering with different techniques

图 1 不同的绘制技术得到的结果

我们的算法基于如下假设:场景几何结构、光照和视点不变,场景由多个独立的区域组成,不同区域采用不同材质.针对绘制效果和材质的非线性关系,将最后出射的辐射亮度根据其在场景中反射的次数和材质来分类,每一类都与各自反射区域的 BRDF 成正比.比如直接光照的辐射亮度与其反射的材质成正比,经过两次反射的辐射亮度和先后两次反射的材质的乘积成正比,同样可以扩展到多次反射得到的辐射亮度,从而间接建立绘制效果和材质的线性关系.预计算每一部分的辐射亮度,根据当前的材质分布线性组合预计算的结果就能得到最终的绘制效果.算法包含以下步骤:首先,将 BRDF 的定义域进行离散,用向量表示每个 BRDF,构成一个 BRDF 空间;密集采样 BRDF,然后 PCA 降维得到一组数量有限的 BRDF 的基;然后,将这些基分配给场景中的各个区域,不同的分配方法得到场景材质分布的不同组合,对所有组合中的每一个使用路径跟踪的方法绘制全局照明的效果,将出射的辐射亮度根据不同的反射次数和不同的反射区域分别存储;在绘制时,根据当前材质计算其系数,并以此线性组合预计算的数据得到最终结果.我们使用 GPU 的半透明混合(alpha blending)来加速线性组合,达到实时的绘制速度.本文实现了一次反射(直接光照)和两次反射的效果.

综上所述,本文的创新主要有两点:一是将全局光照的出射辐射亮度根据光线到达视点之前经过的反射次数和反射区域分类计算,从而将动态材质的全局光照明这个非线性问题转化为一组线性问题的叠加;二是用一组数量有限的基表示可选 BRDF 所组成的空间,每一个可选 BRDF 都能表示成这组基的线性组合.

本文的方法可在场景建模时进行材质的选择和编辑,目前,大多数工具只提供直接光照甚至不考虑遮挡的反馈效果.本文的方法还能快速生成动态材质的绘制效果序列,并且序列的生成可以实时响应用户的交互.

## 1 相关工作

### 1.1 全局光照明及图像空间的重光照

离线的全局光照明算法有许多种.辐射度算法<sup>[6]</sup>只能处理漫反射材质,不能处理非漫反射材质.光线跟踪<sup>[7]</sup>

只能处理漫反射或者纯镜面反射的材质.Kajiya<sup>[1]</sup>提出的绘制方程统一描述了通用性的全局光照明问题,并以此提出路径跟踪算法完整地模拟绘制方程.Jensen<sup>[8]</sup>提出的光子映射(photon mapping)算法通过建立独立于场景的光子传播的数据结构来加速绘制速度.现有其他离线全局光照明算法基本都是以上的扩展或优化.

Dorsey<sup>[9,10]</sup>利用光照和绘制效果的线性关系实现了图像空间的重光照.此外,Dobashi<sup>[11]</sup>也做了类似的工作,他们把可选择的光照投影到基上进行预计算,并且利用增量计算来加速绘制过程.Saito<sup>[12]</sup>利用几何帧缓存存储每个像素对应的几何信息.之后,几何帧缓存被扩展为深度帧缓存<sup>[13,14]</sup>,用于存储每个像素对应的几何和光传播的信息,并采用GPU加速.Hasan<sup>[15]</sup>将这类重光照的方法提高到实时的绘制速度.

## 1.2 预计算辐射传递

同样,基于光照和绘制效果的线性关系,并利用GPU的优越性能,Sloan提出了PRT框架<sup>[2]</sup>,能够实时绘制固定场景在环境光下的全局光照效果,并用聚类主元分析(clustered principle component analysis,简称CPCA)进行压缩和加速<sup>[16]</sup>.由于它采用的是球面调和(spherical harmonic,简称SH)基,所以难以得到高频效果,如小光源、金属高光等.因此,Ng<sup>[17]</sup>引入Haar小波基,得到了高频的光照效果,但是对于包含非漫反射材质的场景,无法实现实时绘制视点移动时的效果.对此,Ng<sup>[18]</sup>将绘制方程表述为一个三重积(triple product)问题.此外,对非漫反射的BRDF进行分解<sup>[19,20]</sup>也是该问题的一种可行的策略.根据物体遮挡性和局部光源的可叠加性,周昆<sup>[5]</sup>提出了阴影场的框架,实现了动态场景和局部光源的直接光照的实时绘制,但是不能实现间接光照.

## 1.3 双向反射分布函数

BRDF<sup>[21]</sup>是一种材质的简化模型,广泛运用于不考虑透明或半透明的场景绘制.BRDF是关于光源入射方向和出射方向的函数,所以是一个四维函数.有许多BRDF模型关于反射点的法向中心对称,我们称其为各向同性BRDF<sup>[4,22,23]</sup>;其他的,我们称之为各向异性BRDF<sup>[24]</sup>.一些BRDF模型使用参数来描述其形态或者表面结构的假设,并有显式解析表达,比如Phong<sup>[23]</sup>,Blinn-Phong<sup>[4]</sup>,Cook-Torrance<sup>[22]</sup>和Ward<sup>[24]</sup>等.有一类BRDF直接从真实材质采集得到,既可以拟合为解析形式的BRDF,也可以数据集的形式表示或使用<sup>[25]</sup>.

## 1.4 双向反射分布函数的编辑

获取新的BRDF,最简单的方法是给出解析形式的BRDF的相关参数.有许多商业软件所提供的BRDF编辑的功能,就是基于这种对BRDF的操作(Maya,3DMax).也有一些软件支持用户订制的BRDF<sup>[26]</sup>.但是,这些实现的绘制速度都相当慢,而且不能得到间接光照的效果.McCool<sup>[27]</sup>提出对任意BRDF的分解方法.Matusik<sup>[25]</sup>使用100个采集得到的BRDF组合生成新的BRDF.Ben-Artzi<sup>[3]</sup>分离出BRDF的用户可编辑部分,进行重新参数化后得到一维的曲线表达,并通过编辑相应的一维曲线来实现BRDF的编辑.

## 2 算法概述

若物体没有自发光,且场景中不存在透明或半透明材质.根据绘制方程<sup>[1]</sup>可将全局光照明问题描述为

$$\begin{cases} L(x, x') = \int_{\Omega/2} L(x', x'') \rho(x, x', x'') G(x, x', x'') dx'' \\ G(x, x', x'') = V(x, x') V(x', x'') \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

其中, $x, x', x''$ 表示场景中的点, $L(x, x')$ 表示点 $x'$ 射向点 $x$ 的辐射亮度, $V(x, x')$ 表示点 $x$ 和点 $x'$ 的可见性, $\Omega/2$ 表示积分的范围是点 $x'$ 的法向所在的半球面内的所有点 $x''$ , $\rho(x, x', x'')$ 表示光线沿点 $x''$ 到点 $x'$ 的方向入射,沿点 $x'$ 到点 $x$ 的方向出射时的BRDF的值, $\theta$ 表示从点 $x'$ 到点 $x''$ 的方向和点 $x'$ 的法向的夹角.

给出如下假设:场景由 $N_r$ 个区域组成, $(R, \rho)$ 表示一个区域及其BRDF, $\rho_R$ 表示区域 $R$ 的BRDF.图(2)中有两个区域: $(R_1, \rho_{R_1})$ 和 $(R_2, \rho_{R_2})$ .从光源出射的光线可能先后经过多次反射,一个经过 $n$ 次反射的过程记作 $P_n$ :

$$P_n = (R_1, \rho_{R_1})(R_2, \rho_{R_2}) \dots (R_n, \rho_{R_n}) \quad (2)$$

采用如下的表示: $L_n(x, x')$ 表示点 $x'$ 射向点 $x$ 的辐射亮度,并且光在到达点 $x'$ 之前经过了 $n$ 次反射,但对反射路径没有约束. $\tilde{L}(x, x', P_n)$ 表示点 $x'$ 射向点 $x$ 的辐射亮度,而且光在到达点 $x'$ 之前按 $P_n$ 所描述的路径经过了 $n$ 次反射.

如图 2 所示( $P_A$ :光经过一次反射到达视点. $P_B, P_C$ :光经过两次反射到达视点), $P_A$ 的路径可描述为 $P_0, P_B$ 的路径可描述为 $P_1 = (R_1, \rho_{R_1})$ .将入射的辐射亮度根据不同的反射路径和次数进一步区分,并以此重新陈述绘制方程,那么,点 $x'$ 射向点 $x$ 的辐射亮度包含所有反射次数后到达 $x'$ 的辐射亮度经过 $x'$ 反射到达 $x$ 的辐射亮度,如下所示:

$$L(x, x') = \sum_{n=0}^{\infty} L_n(x, x') \tag{3}$$

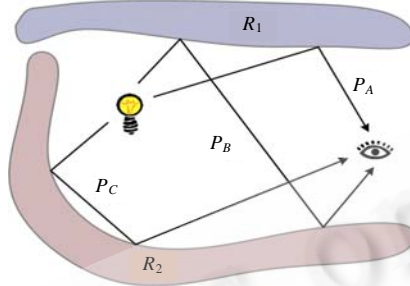


Fig.2 The light transport paths  
图 2 光的传播路径

经过同样的反射次数,不同反射路径到达  $x'$  的辐射亮度经过  $x'$  反射到达  $x$  的辐射亮度可递归地表示如下:

$$L_{n+1}(x, x') = \sum_{P_n} \sum_{R=1}^{N_r} \tilde{L}(x, x', P_n(R, \rho_R)) \tag{4}$$

如果得到一组 BRDF 的基,我们可以将所有可选的 BRDF 都表示成这组基的线性组合.如下所示:

$$\rho_R(x, x', x'') = \sum_{i=1}^{N_b} c_{R_i} \tilde{\rho}_i(x, x', x'') \tag{5}$$

$\tilde{\rho}_i$  表示第  $i$  个基,  $c_{R_i}$  表示区域  $R$  的 BRDF 对应于第  $i$  个基的系数,  $N_b$  是基的数量.根据式(1),到达  $x'$  前最后一次反射对最终从  $x'$  到达  $x$  的辐射亮度的影响可投影到相同数量的基上:

$$\tilde{L}(x, x', P_n(R, \rho_R)) = \sum_{i=1}^{N_b} c_{R_i} \tilde{L}(x, x', P_n(R, \tilde{\rho}_i)) \tag{6}$$

如图 2 所示,与  $P_B$  相关的  $P_1$  包括  $(R_1, \tilde{\rho}_1), \dots, (R_1, \tilde{\rho}_{N_b})$ .由式(4)的递归形式,式(6)也可以得到类似的递归形式:

$$L_{n+1}(x, x') = \sum_{P_n} \sum_{R=1}^{N_r} \sum_{i=1}^{N_b} c_{R_i} \tilde{L}(x, x', P_n(R, \tilde{\rho}_i)) \tag{7}$$

式(7)对  $n$  递归可以得到:

$$L_n(x, x') = \sum_{\{R_i\}=1}^{N_r} \sum_{\{\rho_i\}=1}^{N_b} \left( \tilde{L}(x, x', P_n) \prod_{i=1}^n c_{R_i \rho_i} \right) \tag{8}$$

用  $R'$  表示点  $x'$  所在区域,用  $\rho_{R'}$  表示相应的 BRDF.同样可以将  $\rho_{R'}$  表示成 BRDF 的基的线性组合,如下所示:

$$\rho_{R'} = \sum_{i=1}^{N_b} c_{R'_i} \tilde{\rho}_i \tag{9}$$

我们引入如下表示形式:

$$\tilde{L}'(x, x', P_n, \rho) = \tilde{L}(x, x', P_n) | \rho_{R'} = \rho \tag{10}$$

那么,将式(9)、式(10)带入, $x'$ 所在区域的 BRDF 对最终从  $x'$  到达  $x$  辐射亮度的作用同样可以表示为一组线性组合,系数同样为  $x'$ 所在的区域的 BRDF 在基上的系数,式(8)可以得到如下形式:

$$L_n(x, x') = \sum_{\rho'=1}^{N_b} c_{R' \rho'} \sum_{\{R_i\}=1}^{N_r} \sum_{\{\rho_i\}=1}^{N_b} \left( \tilde{L}'(x, x', P_n, \rho') \prod_{i=1}^n c_{R_i \rho_i} \right) \tag{11}$$

如图 2 所示, $P_B$  相关的  $\tilde{L}'$  形式如  $\tilde{L}'(x, x', (R_1, \tilde{\rho}_i), \tilde{\rho}_j)$ , 共  $N_b^2$  个.只处理两次反射的效果,式(3)、式(11)简化为

$$\tilde{L}(x_e, x') = L_0(x_e, x') + L_1(x_e, x') \tag{12}$$

$$L_0(x_e, x') = \sum_{\rho'=1}^{N_b} c_{R'\rho'} \tilde{L}'(x_e, x', P_0, \rho') \tag{13}$$

$$L_1(x_e, x') = \sum_{\rho'=1}^{N_b} c_{R'\rho'} \sum_{R_1=1}^{N_s} \sum_{\rho_1=1}^{N_b} (\tilde{L}'(x_e, x', P_1, \rho') c_{R_1\rho_1}) \tag{14}$$

其中  $x_e$  表示视点位置.  $\tilde{L}(x_e, x')$  就是我们需要的最终结果.

综上所述,首先确定 BRDF 的基  $\tilde{\rho}_i$ ,然后预计算所有的  $\tilde{L}'$ ,在绘制时计算选定的 BRDF 的系数,如式(5)所示,再根据式(3)、式(11)得到最后的结果.如果不考虑超过两次反射的情况,可从式(3)、式(11)简化为式(12)~式(14).

### 3 双向反射分布函数的线性表述和降维

我们将BRDF的参数空间进行离散,每一个BRDF都可以用一个固定长度的向量表示.在可选的BRDF所构成的空间中,我们采样足够数量的BRDF,并认为这些样本能够线性表示整个空间.我们使用PCA对这些样本进行降维.后文中提供的实验数据中显示,少量的基就能以很小的误差线性表示每一个样本.由于BRDF空间的连续性和我们采样的密集性,这组基对任意一个BRDF的线性组合的误差都很小,如式(5)所示,我们使用符合Blinn-Phong模型的BRDF构成我们的BRDF空间.Blinn-Phong<sup>[4]</sup>模型的BRDF表示如下:

$$\rho_{BP} = \frac{K_d}{\pi} + K_s \frac{n_s + 2}{2\pi} \cos^{n_s} \delta \tag{15}$$

其中,  $\delta$  表示入射方向和出射方向的中间方向和反射点法向的夹角;  $n_s$  表示物体表面的粗糙程度,为正实数;  $K_d$  表示漫反射的反射率;  $K_s$  表示非漫反射的反射率.考虑能量守恒和总反射率非负:

$$\begin{cases} K_d, K_s \geq 0 \\ K_d + K_s \leq 1 \end{cases} \tag{16}$$

Blinn-Phong 模型是一种各向同性的 BRDF 模型,其参数空间是一个三维空间.我们将它定义在如下空间:

$$\begin{cases} (\theta_i, \theta_o, \phi) \\ \theta_i, \theta_o \in [0, \pi/2] \\ \phi \in [0, \pi] \end{cases} \tag{17}$$

$\theta_i$  表示入射方向和法向的夹角,  $\theta_o$  表示出射方向和法向的夹角,  $\phi$  表示入射方向和出射方向在反射表面上的投影的夹角.不把  $\phi$  定义在  $[0, 2\pi]$  是因为  $\rho_{BP}$  在  $[0, \pi]$  和  $[0, 2\pi]$  是对称的.我们把这 3 个分量在各自的定义域均匀采样,一个BRDF就能表示为一个三阶的张量,展开后就得到一个向量.

所有  $K_s=0$  的  $\rho_{BP}$  都是线性相关的,实际上都是反射率不同的漫反射BRDF.当  $K_d=0$  而且  $n_s$  不变时,所有的BRDF都是线性相关的.因此,我们采样如下:  $K_d=1$  且  $K_s=0$ ;  $K_d=0$  且  $K_s=1, n_s$  在选定的范围内均匀采样  $N_s-1$  次.这样得到  $N_s$  个线性无关的BRDF,不妨将第 1 个定为漫反射采样.我们将它们记作

$$\{\rho_{s_1}, \rho_{s_2}, \dots, \rho_{s_{N_s}}\} \tag{18}$$

漫反射经常占有主要而敏感的视觉效果,所以,漫反射的BRDF采样直接作为一个基.其他  $N_s-1$  个BRDF进行PCA得到  $N_b-1$  个特征向量.这样,总共得到  $N_b$  个基,不妨将第 1 个定为漫反射的基,我们将它们记为

$$\{\tilde{\rho}_1, \tilde{\rho}_2, \dots, \tilde{\rho}_{N_b}\} \tag{19}$$

并且对于所有的 BRDF 样本,我们都可以得到式(5)的系数:

$$\rho_{s_i} \approx \sum_{j=1}^{N_b} c_{s_i j} \tilde{\rho}_j \tag{20}$$

显然,由于第 1 个基是独立选取的漫反射分量,而后面的基是 PCA 得到的,所以,

$$\begin{cases} \{c_{1j} | j \neq 1\} = 0 \\ \{c_{i1} | i \neq 1\} = 0 \end{cases} \tag{21}$$

基的每一项都是一个未必符合物理意义的BRDF,可能有负值或者反射率超过 1,但同样可以作为物体的材

质计算全局光照明的效果,这并不影响我们的预计算和最后绘制的结果.那么,对于某一个区域 $R$ 的形如式(15)的BRDF, $\rho_R$ 只要它的 $n_s$ 在采样的范围内就能通过线性插值 $\{c_{ij}|i,j \neq 1\}$ 得到类似于式(5)的表述形式:

$$\rho_R \approx K_d \tilde{\rho}_1 + K_s \sum_{i=2}^{N_b} \tilde{c}_{R_i} \tilde{\rho}_i \tag{22}$$

### 4 预计算

获得形如式(19)的BRDF的基之后,场景中所有材质可变的区域都从这些基中选择BRDF,我们预计算这些基的各种分布组合所对应的光照效果,就能得到式(13)、式(14)中的 $\tilde{L}'(x_e, x', P_0, \rho')$ 和 $\tilde{L}'(x_e, x', P_1, \rho')$ .我们采用Kajiya<sup>[1]</sup>的路径跟踪完成预计算,在需要计算BRDF时,根据 $(\theta_i, \theta_o, \phi)$ ,通过三线性插值相应的 $\tilde{\rho}$ 得到.

我们从视点向每一个绘制像素发射一根光线,若与场景相交,则测试交点和所有光源采样点是否可见.若可见,则根据交点的BRDF计算出射的辐射亮度,并根据交点的BRDF的基加到相应的 $\tilde{L}'(x_e, x', P_0, \rho')$ .然后,在该交点的法向半球内均匀散射光线,如果与场景相交,则按照相同的方法计算沿着这些散射光线出射的直接光照形成的辐射亮度,进一步计算它所贡献的经过两次反射到达视点的辐射亮度,并且根据散射光线的交点所在的区域及先后两个交点所采用的BRDF的基加到相应的 $\tilde{L}'(x_e, x', P_1, \rho')$ .根据式(11),在绘制图像分辨率、散射光线的数量和光源采样点的数量都相同的情况下,预计算和绘制的时间和空间的代价取决于BRDF的基的数量以及场景中的材质可变的区域的数量.此外,我们认为,场景中有一个区域 $\hat{R}$ ,这个区域的材质不变.在BRDF的基中有一个 $\hat{\rho}$ ,是一个空间变化的BRDF,对应于区域 $\hat{R}$ .那么,式(5)中的 $c_{R_i}$ 满足

$$\begin{cases} c_{R_i} | (R = \hat{R}; \rho_i = \hat{\rho}) = 1 \\ c_{R_i} | (R = \hat{R}; \rho_i \neq \hat{\rho}) = 0 \\ c_{R_i} | (R \neq \hat{R}; \rho_i = \hat{\rho}) = 0 \end{cases} \tag{23}$$

并且对于式(2),形如 $(\hat{R}, \rho) | \rho \neq \hat{\rho}$ 或是 $(R, \hat{\rho}) | R \neq \hat{R}$ 的路径是不存在的.因此,我们定义如下运算:

$$B(R) = \begin{cases} \{\tilde{\rho}_i | \tilde{\rho}_i \neq \hat{\rho}\}, & R \neq \hat{R} \\ \{\hat{\rho}\}, & R = \hat{R} \end{cases} \tag{24}$$

那么,将该材质不变的区域引入式(11),就得到如下形式:

$$L_n(x, x') = \sum_{\rho' \in B(R')} c_{R' \rho'} \sum_{\substack{R_i=1 \\ \{\rho_i\} \in B(R_i)}}^{N_r} \left( \tilde{L}'(x, x', P_n, \rho') \prod_{i=1}^n c_{R' \rho_i} \right) \tag{25}$$

同样,式(13)、式(14)变换为如下形式:

$$L_0(x_e, x') = \sum_{\rho' \in B(R')} c_{R' \rho'} \tilde{L}'(x_e, x', P_0, \rho') \tag{26}$$

$$L_1(x_e, x') = \sum_{\rho' \in B(R')} c_{R' \rho'} \sum_{\substack{R_1=1 \\ \{\rho_1\} \in B(R_1)}}^{N_r} (\tilde{L}'(x_e, x', P_1, \rho') c_{R_1 \rho_1}) \tag{27}$$

我们认为,纹理只作用于BRDF的漫反射部分.材质可变部分只有第1个基,即漫反射的BRDF,受到纹理的作用.材质不变的部分预计算的结果把漫反射和非漫反射部分合在一起,所以也需要考虑纹理的作用.我们采用RGB三通道的纹理,因此对于所有预计算的结果,如果反射的路径中包含了材质固定的区域,或者经过的材质可变区域采用了漫反射的BRDF,预计算时需要考虑纹理的作用,生成的结果包含RGB三个通道.不失一般性,我们依然如上一节假设 $\tilde{\rho}_1$ 为漫反射BRDF的基,显然, $R_1 \neq \hat{R}$ 且 $\rho_1 \neq \hat{\rho}$ ,并且定义:

$$\begin{cases} \bar{R} \in \{R_i\} - \{R_1, \hat{R}\} \\ \bar{\rho} \in \{\rho_i\} - \{\rho_1, \hat{\rho}\} \end{cases} \tag{28}$$

综上所述,场景中如果包含材质不变区域,并贴有RGB三通道纹理,根据式(26)、式(27),预计算的结果见表1.预计算的结果采用一组和最终绘制结果同样分辨率的高动态范围(high dynamic range,简称HDR)图像来存储,每张图像中的一个像素代表相应的点 $x'$ 在表1中某一项的一个值.由表1可得,共需 $(N_r-1)(N_b-2)^2 + (N_b-2)$ 张

单通道图像,  $2N_r N_b - 3N_r - N_b + 3$  张三通道图像.此外,还需要一张同样分辨率的场景材质区域分布映射图像.

**Table 1** Data of precomputation

表 1 预计算的数据

$P_n(R', \rho_R)$	Color space	Number of HDR images
$(\hat{R}, \hat{\rho})$ and $(\bar{R}, \rho_1)$	RGB	1
$(\hat{R}, \hat{\rho})$ $(\hat{R}, \hat{\rho})$ and $(\hat{R}, \hat{\rho})(\bar{R}, \rho_1)$	RGB	1
$(\bar{R}, \rho_1)(\hat{R}, \hat{\rho})$ and $(\bar{R}, \rho_1)(\bar{R}, \rho_1)$	RGB	$N_r - 1$
$(\bar{R}, \bar{\rho})(\hat{R}, \hat{\rho})$ and $(\bar{R}, \bar{\rho})(\bar{R}, \rho_1)$	RGB	$(N_r - 1)(N_b - 2)$
$(\bar{R}, \bar{\rho})$	Gray	$N_b - 2$
$(\hat{R}, \hat{\rho})(\bar{R}, \bar{\rho})$	RGB	$N_b - 2$
$(\bar{R}, \rho_1)(\bar{R}, \bar{\rho})$	RGB	$(N_r - 1)(N_b - 2)$
$(\bar{R}, \bar{\rho})(\bar{R}, \bar{\rho})$	Gray	$(N_r - 1)(N_b - 2)^2$

路径积分算法产生散射光线的方向时加入随机扰动,可以避免和场景结构相关的走样,但会引入噪点.如果噪点在不同的图像之间相互独立,我们绘制时,线性组合多幅图像的系数将会放大这些噪点,严重影响最终效果.对此,我们只做一次路径跟踪,将表 1 每一项相应的 BRDF 的分布依次代入,生成所有的预计算图像.这样就能避免绘制时放大噪点,还使得预计算的时间与基及场景中区域的数量无关,只与图像分辨率、散射光线和光源的采样点的数量相关.因为在我们的路径跟踪过程中,主要运算代价在于光线和场景的求交计算.由于 BRDF 的各个基的反射叶(reflectance lobe)的分布差异很大,因此,我们不能对 BRDF 做重要性采样(important sampling).这也正是我们采用路径跟踪而不是分布式光线跟踪(distributed ray tracing)的原因.

### 5 绘制

根据用户实时指定的场景中 BRDF 的分布,我们可以将各区域的 BRDF 表述为基的线性组合.然后根据式(12)、式(26)、式(27)线性组合预计算的图像,就能得到最终绘制结果.为了达到实时的绘制速度,使用 GPU 实现最后线性组合预计算图像的操作.我们使用多遍绘制(multi-pass rendering)方法,在每一遍绘制中,将一张预计算的图像和材质区域分布映射图像作为纹理传入 GPU,并用各区域的系数乘以相应的像素,经过多遍之后,对所有的预计算图像都进行了同样的操作.每一遍的结果通过半透明混合的方法叠加在一起,就能得到最后的结果.如果每张预计算图像都要绘制一遍,那么由于绘制的遍数太多,性能会受到很大影响.所以,每遍绘制可以组合多张纹理,而不是只操作一张纹理,这样可以大量减少绘制的遍数,从而得到实时的绘制速度.

### 6 实验结果

我们用 VC++2005 和 DirectX9 在 Windows XP 下实现以上算法,运行环境是 3.2 GHz 的 Pentium 4 PC, 1 Gbytes 内存, Nvidia GeForce 6800 GT 显示卡.我们对  $(\theta, \theta_0, \phi)$  采用  $30 \times 30 \times 60$  的采样分辨率,  $n_s \in [1, 200]$ ,  $N_s = 201$ ,  $N_b = 6$  个基.采样 BRDF 的重建的  $L_2$  误差为 0.7979%, 其中最大的单个样本的  $L_2$  误差是 6.747%. 实验的场景包含两个材质可变的区域, 绘制分辨率为  $512 \times 512$ . 预计算的结果包括 55 张单通道的 HDR 图像, 29 张 RGB 三通道的 HDR 图像和 1 张场景材质区域分布映射图像, 我们使用 pfm(portable floatmap) 的格式进行存储, 总共需要 140Mbytes, 绘制性能为 67fps. 一些实验数据有参考图像. 参考图像的绘制同样采用路径跟踪的方法得到, 而且光源采样数量、散射光线的数量、物体 BRDF 的参数都和被比较的数据相同, 但是 BRDF 采用原始数据, 而不是被压缩之后的数据. 在表 2 中记录了文中提供的 3 个场景的规模和相应的预处理的数据.

**Table 2** Performance of precomputation on exhibited examples

表 2 所示实验的预计算的性能

Number of	Number of	Number of light sampling points	Precomputation
-----------	-----------	---------------------------------	----------------



	faces	sampling rays	Direct lighting	Indirect lighting	time (hours)
Ring	579	4 096	1	1	1.65
Bunny	69 487	4 096	98	8	30.08
Gargoyle	45 678	4 096	98	8	22.75

图 3 所示场景的光源是顶部的一个面光源(Bunny  $Kd=0.2, Ks=0.4$ , 白色墙壁  $Kd=0.3, Ks=0.3$ ).从图 3(a)到图 3(d):Bunny  $n_s=5$ , 白色墙壁  $n_s=5, L_2$  误差为 0.0150%;从图 3(e)到图 3(h):Bunny  $n_s=180$ , 白色墙壁  $n_s=180, L_2$  误差为 0.0021%).图 3(a)和图 3(e)是直接光照的效果,天花板和Bunny造成的阴影区域是全黑的.图 3(c)和图 3(g)包含了直接光照和间接光照的效果,天花板和Bunny造成的阴影区域被反射光照亮.图 3(a)~图 3(d),场景材质漫反射明显;图 3(e)~图 3(h),场景材质高光明显.比较图 3(c)和图 3(g):在左上方的方框区域内,图 3(g)中Bunny被照亮;在下面的方框区域内,图 3(g)有明显的Bunny的倒影;在右侧方框区域内,图 3(g)可以看到右侧墙面和地面之间的边界在后面的墙上产生的清晰的投影.

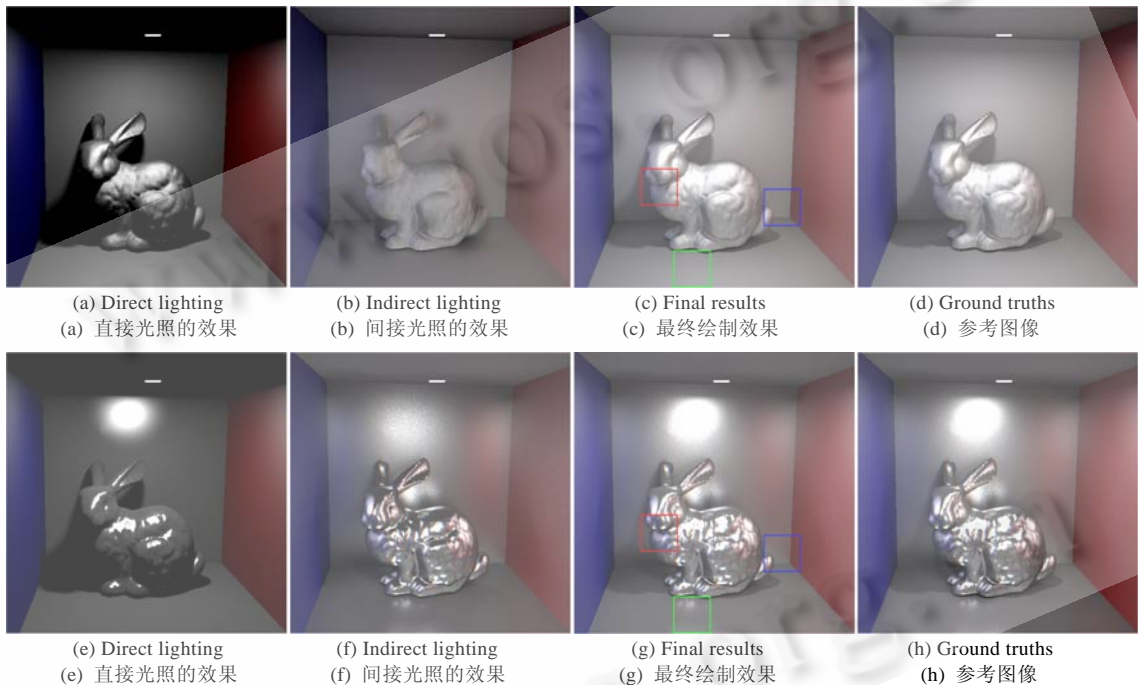


Fig.3 The BRDFs of Bunny and the white walls (including the floor and the ceiling) are editable

图 3 Bunny 和白色墙壁(包括地面和天花板)的 BRDF 是可编辑的

图 4 所示的场景采用点光源以凸现焦散的效果,但是我们的算法也可以使用复杂光源(圆环  $Kd=0.2, Ks=0.2$ , 平面  $Kd=0.2, Ks=0.2$ ).从图 4(a)向图 4(d):我们的结果;从图 4(e)向图 4(h):相应的参考图像).我们知道,反射物体的材质高光越强,焦散越明显;接受反射光的物体的材质高光越强,反射物体形成的倒影越明显.图 4(a)中,圆环和平面的材质漫反射明显,只是显现出渗色效果;图 4(b)中,圆环漫反射明显,平面高光明显,圆环投影到平面上的倒影圆形边界十分清晰;图 4(c)中,圆环高光明显,平面漫反射明显,可见圆环内部投到平面上的焦散:两条圆弧线及连接处的亮斑;图 4(d)中,圆环和平面高光明显,焦散效果相比于图 4(c)焦散的形状和分布都有明显不同.其中,图 4(a)~图 4(d)是我们实时绘制的结果,图 4(e)~图 4(f)是参考图像.

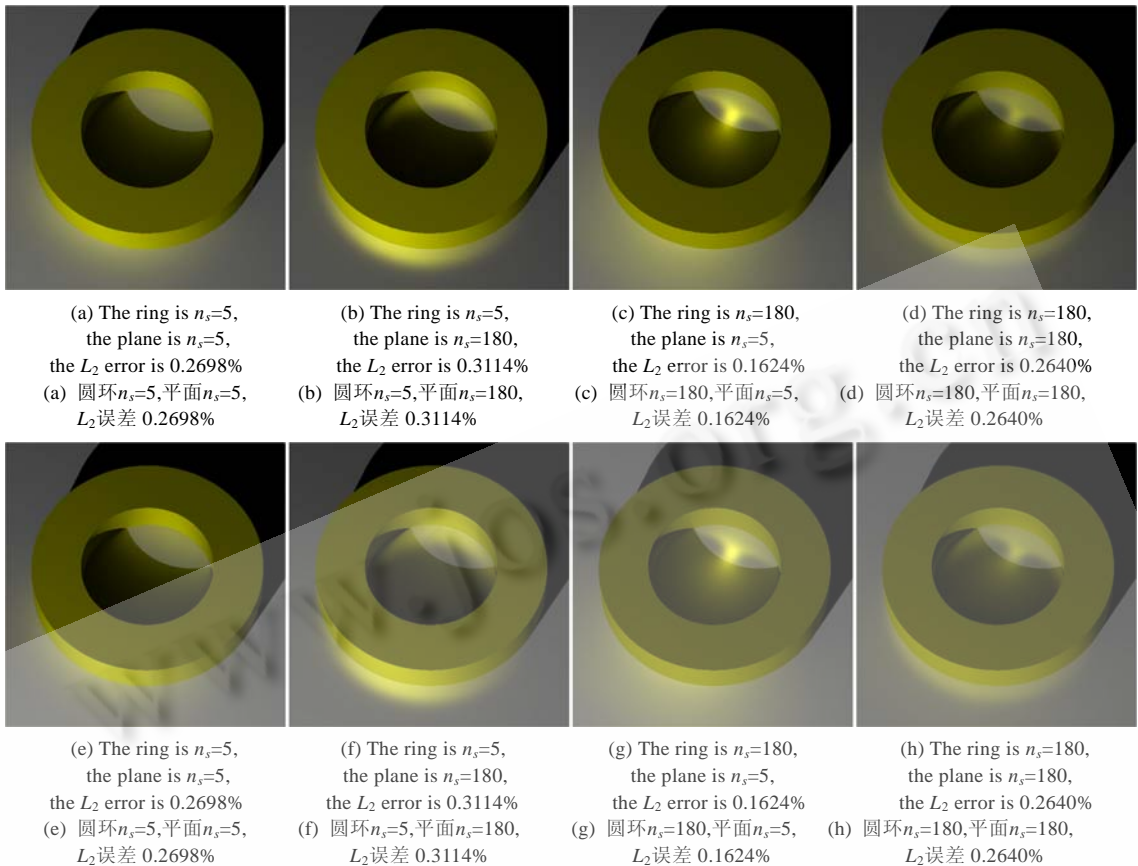


Fig.4 The BRDFs of the ring and the plane are editable

图4 圆环和平面的 BRDF 是可编辑的

在图 5 所示的场景中可以看到多个物体反射和遮挡造成的全局光照效果(四周墙壁和飞机都贴上了纹理).光源在图像中不可见,是顶部靠近视点处的一个面光源.Gargoyle 的材质从图 5(a)~图 5(d),从类似于石膏的漫反射材质,变为接近于塑料的材质,再变为金属感强烈的高光材质.纹理只作用于 BRDF 漫反射部分,因此,飞机上面的纹理在漫反射强烈时十分明显,随着高光的增强,纹理就随之变弱至不可见.飞机、Gargoyle、圆环面之间的互相影响,除了渗色之外,最明显的是图 5(d)中圆环面在 Gargoyle 的身体和底座上形成了一个环形的倒影.此外,图 5(b)~图 5(d)中飞机的反光照亮到了后面墙面.

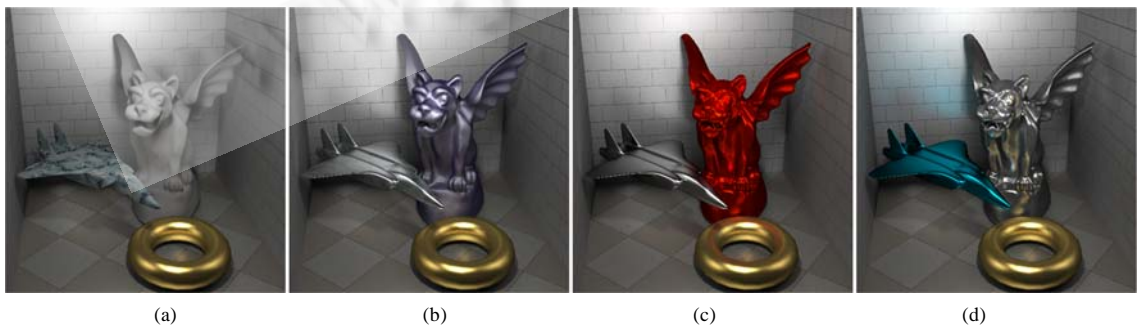


Fig.5 The BRDFs of gargoyles and the plane are editable

图5 Gargoyle 和飞机的材质是可编辑的

## 7 结束语

本文将全局照明问题分解为一组与材质线性相关问题的叠加,提供了一个材质可变的全局照明的预计算和实时绘制的框架.在这个框架下,我们将 BRDF 空间离散采样,并使用主元分析法得到较少数量的基.所有的预计算都在这组基上进行:场景的材质采用 BRDF 的基,并用路径跟踪得到各种组合下的绘制结果.最后根据用户指定的 BRDF,使用 GPU 线性组合预计算得到图像,从而达到实时的绘制速度.

本文的算法中,预计算的存储空间和绘制时的性能都与场景中可变材质区域的数量和BRDF空间的基的数量是密切相关的.本文选取Blinn-Phong的BRDF模型,其中 $n_s \in [1, 200]$ ,从纯漫反射到高光十分强烈的材质,可以覆盖很大的范围,结果中也能看到明显的对比效果.由误差分析可知,6个基(包括漫反射项)已经可以达到足够高的精度,并且最终绘制效果和参考图像肉眼基本无法辨别差异.我们的实验中采用了两个可变材质区域,其他都是材质不变的区域,对于许多材质编辑的应用已经足够,因为一个场景中对全局照明效果有明显影响的区域数量有限.但是,如果大量引入镜面或者接近镜面的材质,那么,BRDF空间需要更多的基来表示,或者采用更多数量可变材质的区域,都会大大增加预计算的存储空间,降低绘制性能.这些问题的解决需要进一步的工作.此外,本文的算法还可以进一步扩展以支持动态光源和可变视点.如果可以进一步压缩预计算的数据量并提高绘制的速度,则可将本文的实现扩展到实现更多次的反射效果.

## References:

- [1] Kajiya JT. The rendering equation. In: Evans DC, ed. Proc. of the SIGGRAPH'86. New York: ACM Press, 1986. 143–150.
- [2] Sloan PP, Kautz J, Snyder J. Precomputed radiance transfer for real-time rendering in dynamic, low-frequency lighting environments. In: Fiume E, ed. Proc. of the SIGGRAPH 2002. New York: ACM Press, 2002. 527–536.
- [3] Ben-Artzi A, Overbeck R, Ramamoorthi R. Real-Time BRDF editing in complex lighting. In: Hart JC, ed. Proc. of the SIGGRAPH 2006. New York: ACM Press, 2006. 945–954.
- [4] Blinn JF. Models of light reflection for computer synthesized pictures. In: George J, ed. Proc. of the SIGGRAPH'77. New York: ACM Press, 1977. 192–198.
- [5] Zhou K, Hu Y, Lin S, Guo B, Shum H. Precomputed shadow fields for dynamic scenes. In: Hart JC, ed. Proc. of the SIGGRAPH 2005. ACM Press, 2005. 1196–1201.
- [6] Goral CM, Torrance KE, Greenberg DP, Battaile B. Modeling the interaction of light between diffuse surfaces. In: Christiansen H, ed. Proc. of the SIGGRAPH'84. New York: ACM Press, 1984. 213–222.
- [7] Appel A. Some techniques for shading machine renderings of solids. In: Proc. of the Spring Joint Computer Conf. Arlington: AFIPS Press, 1968. 37–45.
- [8] Jensen HK. Realistic image synthesis using photon mapping. Natick: A K Peters, Ltd., 2001. 1–181.
- [9] Dorsey J, Sillion F, Greenberg DP. Design and simulation of opera lighting and projection effects. In: Sederberg TW, ed. Proc. of the SIGGRAPH'91. New York: ACM Press, 1991. 41–50.
- [10] Dorsey J, Arvo J, Greenberg DP. Interactive design of complex time-dependent lighting. IEEE Computer Graphics and Applications, 1995,15(2):26–36.
- [11] Dobashi Y, Kaneda K, Nakatani H, Ya-mashita H. A quick rendering method using basis functions for interactive lighting design. Computer Graphics Forum, 1995,14(3):229–240.
- [12] Saito T, Takahashi T. Comprehensible rendering of 3-D shapes. In: Baskett F, ed. Proc. of the SIGGRAPH'90. New York: ACM Press, 1990. 197–206.
- [13] Gershbein R, Hanrahan PM. A fast relighting engine for interactive cinematic lighting design. In: Akeley K, ed. Proc. of the SIGGRAPH 2000. New York: ACM Press, 2000. 353–358.
- [14] Pellacini F, Vidmce K, Lefohn A, Mohr A, Leone M, Warren J. Lpics: A hybrid hardware-accelerated relighting engine for computer cinematography. In: Hart JC, ed. Proc. of the SIGGRAPH 2005. New York: ACM Press, 2005. 464–470.
- [15] Hasan M, Pellacini F, Bala K. Direct-to-Indirect transfer for cinematic relighting. In: Hart JC, ed. Proc. of the SIGGRAPH 2006. New York: ACM Press, 2006. 1089–1097.

- [16] Sloan PP, Hall J, Hart J, Snyder J. Clustered principal components for precomputed radiance transfer. In: Hodgins J, ed. Proc. of the SIGGRAPH 2003. New York: ACM Press, 2003. 382–391.
- [17] Ng R, Ramamoorthi R, Hanrahan P. All-Frequency shadows using non-linear wavelet lighting approximation. In: Hodgins J, ed. Proc. of the SIGGRAPH 2003. New York: ACM Press, 2003. 376–381.
- [18] Ng R, Ramamoorthi R, Hanrahan P. Triple product integrals for all-frequency relighting. In: Marks J, ed. Proc. of the SIGGRAPH 2004. New York: ACM Press, 2004. 477–487.
- [19] Liu X, Sloan P, Shum HY, Snyder J. All-Frequency precomputed radiance transfer for glossy objects. In: Jensen HW, ed. Proc. of the Eurographics Symp. on Rendering 2004. Aire-la-Ville: Eurographics Association, 2004. 337–344.
- [20] Wang R, Tran J, Luebke D. All-Frequency relighting of non-diffuse objects using separable BRDF approximation. In: Jensen HW, ed. Proc. of the Eurographics Symp. on Rendering 2004. Aire-la-Ville: Eurographics Association, 2004. 345–354.
- [21] Minnaert M. The reciprocity principle in lunar photometry. *Astrophysical Journal*, 1941,93:403–410.
- [22] Cook RL, Torrance KE. A reflectance model for computer graphics. *ACM Trans. on Graph*, 1982,1(1):7–24.
- [23] Phong BT. Illumination for computer generated pictures. *Communications of the ACM*, 1975,18(6):311–317.
- [24] Ward GJ. Measuring and modeling anisotropic reflection. In: Thomas JJ, ed. Proc. of the SIGGRAPH'92. New York: ACM Press, 1992. 265–272.
- [25] Matusik W, Pfister J, Brand M, McMillan L. A data-driven reflectance model. In: Hodgins J, ed. Proc. of the SIGGRAPH 2003. New York: ACM Press, 2003. 759–769.
- [26] Ershov S, Kolchin K, Myszkowski K. Rendering pearlescent appearance based on paint-composition modelling. In: Chalmers A, ed. Proc. of the Eurographics 2001. Britain: Blackwell Publishers, 2001. 227–238.
- [27] McCool MD, Ang J, Ahmad A. Homomorphic factorizations of BRDFs for high-performance rendering. In: Fiume E, ed. Proc. of the SIGGRAPH 2001. New York: ACM Press, 2001. 227–238.



孙鑫(1980—),男,浙江杭州人,博士生,主要研究领域为实时绘制.



石教英(1937—),男,教授,博士生导师,CCF高级会员,主要研究领域为分布式计算,虚拟现实,科学计算可视化,多媒体技术.



周昆(1977—),男,博士,研究员,主要研究领域为几何处理,纹理合成,实时绘制.