

文章编号:1001-9081(2007)02-0486-03

环境贴图在 VR 系统中的应用研究

艾祖亮,张立民

(海军航空工程学院 电子与信息工程系,山东 烟台 264001)

(aizuliang@sina.com)

摘要:为了把环境贴图应用于 VR 系统中,实现场景对象的真实感绘制,首先从分析球面调和函数入手,提出了漫反射环境纹理图的快速计算方法。在研究镜面反射模型时,提出采用箱式滤波器代替 Phong 余弦函数滤波的方法,从而简化了镜面反射环境纹理图的滤波计算。在实现阶段,采用立方体环境纹理图表示场景光照环境,并对纹理图进行分级细化从而提高了绘制效率。实验表明,该方法实现了物体漫反射和镜面反射的快速绘制,非常适合虚拟现实应用。

关键词:环境纹理图;VR 系统;双向反射分布函数;球面调和函数;箱式滤波器

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A

Application study of environment mapping in VR systems

AI Zu-liang, ZHANG Li-min

(Department of Electronics and Information Engineering, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai Shandong 264001, China)

Abstract: To realize the realistic rendering of the scene in applying environment mapping to VR systems, an approach to fast calculating diffuse environment maps was proposed starting from the analysis of spherical harmonics. To simplify the filtering of environment maps for glossy reflections, we decided to use a cube map representation together with a simple box-filter instead of the Phong cosine kernel. In the end, we achieved fast rendering by generating a mip-map of the specular environment map. The experimental result shows that this technique realizes fast rendering of diffuse and glossy reflections and is well-suited for virtual reality applications.

Key words: environment maps; VR systems; Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF); spherical harmonics; box-filter

0 引言

真实感图形的实时绘制是 VR (Virtual Reality) 系统和计算机游戏软件的一个重要组成部分,并支配、影响着画面的最终视觉效果。光照模型是生成真实感图形的基础,它根据几何光学原理计算出由场景中物体表面上任一点投向观察者视点中的亮度大小和色彩组成^[1]。环境纹理技术的一个重要应用就是生成物体表面复杂的光照效果,它通过将光照效果表示在纹理中从而实现复杂的光照模型。文献[2]最早引入环境纹理在曲面物体上产生镜面反射效果,文献[3,4]采用物体表面双向反射分布函数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) 对环境纹理图预卷积来模拟漫反射和镜面反射,文献[5]通过一个或多个波瓣近似 BRDF 从而实现了对环境纹理的实时滤波计算,文献[6]基于球面调和函数提出了环境纹理图的表示方法,提高了算法的执行效率。

目前,环境贴图滤波已经广泛应用在交互式绘制中近似镜面反射和漫反射,然而由于在绘制中生成每个纹理元素是通过原始环境纹理图中近半数的纹理元素计算得到,非常复杂和耗时,因此环境贴图很少应用于 VR 系统(如视景仿真)。本文综合现有环境贴图绘制技术的优点和不足,针对虚拟现实应用提出了一种简化的、实时的、真实感强的环境贴图方法。实验表明,采用该方法在增强对象真实感的同时,运算速

度也能够满足虚拟现实系统实时性的要求。

1 环境贴图滤波

对于物体表面给定位置 x , 环境纹理图存储了该位置点所有方向上的入射辐射率,环境贴图滤波通过对环境纹理图预卷积计算从而实现物体表面复杂的镜面反射和漫反射光照效果。滤波后的环境纹理保存了位置点 x 向所有视点方向的出射辐射率。

$$L_{em}(x, v, n, t) = \int_{\Omega} f_r(\omega(v, n, t), \omega(l, n, t)) L_{in}(x; l) (n \cdot l) dl \quad (1)$$

其中 v, l 为世界坐标系下的视点方向和光线方向, $\{t, n \times t, n\}$ 为定义在物体反射表面上的局部坐标系, $\omega(v, n, t), \omega(l, n, t)$ 分别表示局部坐标系下的视点方向与光线方向, L_{in} 相当于原始的环境纹理图, f_r 表示物体表面 BRDF, 显然最终积分值的大小取决于视点方向和反射表面方向, 所以滤波后的环境纹理图一般是五维的, 有两维用来表示视点方向向量, 另外三维表示局部坐标系 $\{t, n \times t, n\}$ 。为了简化计算, 对于特定 BRDF, 我们需要进行参数化降维从而加快环境纹理图的滤波速度, 下面分别对漫反射和镜面反射环境纹理图进行分析。

1.1 漫反射环境纹理图

文献[7]最先提出采用单纯的漫反射 BRDF 对环境纹理

收稿日期:2006-08-31;修订日期:2006-10-31 基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2005038469)

作者简介:艾祖亮(1980-),男,湖北随州人,硕士研究生,主要研究方向:真实感图形、虚拟现实;张立民(1966-),男,山东烟台人,教授,博士,主要研究方向:真实感图形、虚拟现实、科学计算可视化。

图滤波,漫反射 BRDF 表示为:

$$f_r(v, l) = \frac{k_d}{\pi} \quad (2)$$

其中, $k_d \in [0, 1]$ 表示漫反射系数,代入公式(1)得到:

$$L_{diffuse}(x; v, n, t) = \int_{\Omega} \frac{k_d}{\pi} L_{in}(x; l) (n \cdot l) dl \quad (3)$$

显然与 $L_{diffuse}(x; v, n, t)$ 与 v, t 无关,所以最终形式为:

$$L_{diffuse}(x; n) = \frac{k_d}{\pi} \int_{\Omega} L_{in}(x; l) (n \cdot l) dl \quad (4)$$

从上式可以看出滤波后的漫反射环境纹理图只是二维的,通过物体表面法向 n 对其进行检索。

1.2 镜面反射环境纹理图

对于镜面反射,文献[8]提出用 Phong 光照模型^[9]滤波环境纹理,Phong 光照模型 BRDF 为:

$$f_r(v, l) = k_s \frac{(r_v(n) \cdot l)^N}{(n \cdot l)} \quad (5)$$

其中, r_v 为视点方向 v 在物体表面的反射方向向量, k_s 和 N 用来控制波瓣的形状和大小,代入公式(1)得到:

$$L_{phong}(x; v, n, t) = k_s \int_{\Omega} (r_v(n) \cdot l)^N L_{in}(x; l) (n \cdot l) dl \quad (6)$$

显然积分结果仅与 r_v 有关,因此有:

$$L_{phong}(x; r_v) = k_s \int_{\Omega} (r_v(n) \cdot l)^N L_{in}(x; l) dl \quad (7)$$

公式(7)表明镜面反射纹理图也是二维的,可以直接用反射向量 r_v 检索。尽管 Phong 光照模型在物理意义上并不是很准确,但由于其计算简单,模拟的光照效果在大多数情况下看起来比较合理,并且 OpenGL API 直接支持通过 r_v 检索各种环境纹理图,因此选择 Phong 光照模型作为镜面反射模型来滤波环境纹理。

合并上述两种环境纹理图最终得到一个完整的光照反射环境纹理图如下:

$$L_o(r_v, n) = (1 - F(r_v \cdot n)) L_{diffuse} + F(r_v \cdot n) L_{phong} \quad (8)$$

大多数材质都可以通过这个反射模型创建,其中 $F(r_v, n)$ 为非涅耳因子,用于调整不同视角下漫反射与镜面反射之间比例,其表达式为^[10]:

$$F(r_v, n) = f_{\lambda} + (1 - f_{\lambda})(1 - r_v \cdot n)^5 \quad (9)$$

f_{λ} 表示非涅耳因子的光谱分布,后面将对这个参数的意义进行讨论。

2 实时滤波计算

滤波环境纹理都需要对原始纹理近半数的纹理元素积分计算,其过滤过程非常耗时,因此产生光照环境纹理图仍需要很高的计算代价,不能满足 VR 系统实时性的要求。为了解决上述问题,我们基于球面调和函数对环境纹理图的漫反射滤波进行加速计算,对于镜面反射滤波,在保证真实感的情况下对滤波函数进行近似简化,最终取得满意的绘制效果。

2.1 漫反射滤波

公式(4)描述了环境纹理图的漫反射滤波过程,滤波函数为余弦函数,采用直接过滤计算创建漫反射纹理图的方法需要比较昂贵的计算开销。文献[6]基于球面调和函数^[11]提出了环境纹理图的快速表示方法,它可以将标准的环境纹理图转化为辐射照度函数,我们将这种方法应用于漫反射滤波。

球面调和函数是应用在球面上的一种正交函数基,基于单位球面上向量 l 有:

$$l = (x, y, z) = (\sin\theta\cos\varphi, \sin\theta\sin\varphi, \cos\theta) \quad (10)$$

球面调和基函数定义为:

$$Y_l^m(\theta, \varphi) = K_l^m e^{im\varphi} P_l^{|m|}(\cos\theta), l \in N, -1 \leq m \leq l \quad (11)$$

其中, P_l^m 为相关的勒让德多项式, K_l^m 为常量:

$$K_l^m = \sqrt{\frac{(2l+1)(l-|m|)!}{4\pi(l+|m|)!}} \quad (12)$$

公式(11)定义的球面调和基函数比较复杂,为了方便表示光照,实际使用的基函数如下:

$$y_l^m = \begin{cases} \sqrt{2} K_l^m \cos(m\varphi) P_l^m(\cos\theta), m > 0 \\ \sqrt{2} K_l^m \sin(-m\varphi) P_l^{-m}(\cos\theta), m < 0 \\ K_l^0 P_l^0(\cos\theta), m = 0 \end{cases} \quad (13)$$

l 表示频率波段指数,低的值表示低频球面调和基函数,实验证明,光照环境的高频项对环境贴图贡献很小,当 $l \leq 2$,即用前9项来近似表示环境纹理图时,平均误差大约为1%,因此只需计算前9项球面调和基函数:

$$\begin{cases} y_0^0 = \frac{1}{\sqrt{4\pi}}, (y_1^1; y_1^0; y_1^{-1}) = \sqrt{\frac{3}{4\pi}}(x; z; y) \\ (y_2^2; y_2^1; y_2^0) = \sqrt{\frac{15}{4\pi}}(xz; yz; xy) \\ y_2^0 = \sqrt{\frac{5}{16\pi}}(3z^2 - 1), y_2^2 = \sqrt{\frac{15}{16\pi}}(x^2 - y^2) \end{cases} \quad (14)$$

用上述球面调和基函数表示环境纹理图如下:

$$\begin{cases} L_{in}(\theta, \varphi) = \sum_{l,m} L_l^m y_l^m(\theta, \varphi) \\ L_{diffuse}(\theta, \varphi) = \sum_{l,m} E_l^m y_l^m(\theta, \varphi) \\ L_l^m = \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} L_{in}(\theta, \varphi) y_l^m(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi \end{cases} \quad (15)$$

由于公式(4)中 $(n \cdot l)$ 值大小并不依赖于方位角 φ ,因此定义 $A(\theta) = (n \cdot l)$,则有:

$$A(\theta) = (n \cdot l) = \max[\cos\theta, 0] = \sum_l A_l y_l^0(\theta) \quad (16)$$

根据光度测量中辐射率与辐照度的关系^[12]可以得到下式:

$$E_l^m = \sqrt{\frac{4\pi}{2l+1}} A_l L_l^m \quad (17)$$

代入式(15)得到滤波后的漫反射环境纹理图表达式:

$$L_{diffuse}(\theta, \varphi) = \sum_{l,m} \sqrt{\frac{4\pi}{2l+1}} A_l L_l^m y_l^m(\theta, \varphi) \quad (18)$$

上式表明通过球面调和函数最终用9个光照系数 L_l^m 代替了复杂的环境纹理图的滤波计算。在绘制漫反射纹理图之前首先需要预滤波环境纹理图计算这几个光照系数,用公式(15)计算光照系数只需简单求解 y_l^m 加权的环境纹理像素的和,然后在绘制阶段以上述计算的9个系数为输入,执行简单的顶点着色程序,最终计算出每个像素的值。假设初始环境纹理图像素总数为 s ,采用上述的方法生成一幅漫反射纹理图其计算耗费的时间为 $O(9s)$,而采用传统滤波方法,如果生成的漫反射纹理图的纹理元素总数为 t ,则计算耗费的时间为 $O(t \cdot s)$,对于一幅 64×64 大小的低分辨率漫反射纹理图, t 为4096,显然我们的方法在速度上占有明显的优势。

2.2 镜面反射滤波

从公式(7)可以看出产生镜面反射纹理图需要预滤波环境纹理,预滤波通常采用平滑滤波法,生成镜面反射纹理图的

每一个纹理元素,都需要对环境纹理图的每一个像素进行滤波,同时还要执行相应的 BRDF 求值计算,这使得滤波的过程非常缓慢。文献[13]基于分级细化纹理图(Mipmap)提出了分层次滤波思想,同时也基于图形硬件实现了快速卷积计算,但前者在分层次比较计算上比较繁琐,并且有偏差,后者需要两个通路来计算,花销仍然很昂贵,不能满足实时性要求。综合这两种方法的优点,我们提出了一种更为简单、快速的方法。

首先选择立方体纹理图作为环境纹理图的表示方法,环境纹理图的获取也相当简单,对于静态的光照环境可以直接加载预计算好的立方体环境纹理图;对于动态光照环境则需要在画面之间的空闲时间重新计算得到。然后采用箱式滤波器代替 Phong 光照模型的余弦滤波器,替换的理由基于以下两点:一是箱式滤波器被图形硬件直接支持,可以快速地执行滤波计算;二是 Phong 光照模型本身在物理意义上并不是很准确,选用一个近似的滤波器并不会特别影响整体的光照效果。最后对滤波后的环境纹理图分级细化得到最终的像素值。其滤波过程如图 1 所示。

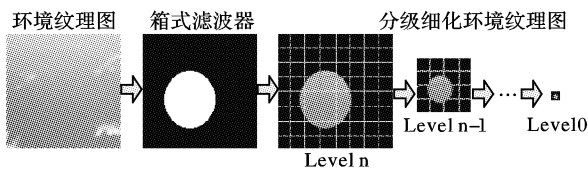


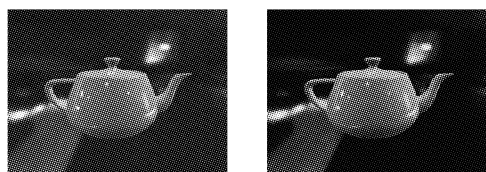
图1 镜面反射滤波过程

2.3 绘制流程及结果

环境贴图的绘制流程如下:

- 1) 获取立方体环境纹理图;
- 2) 预滤波环境纹理图,计算漫反射光照系数 L_r^n ;
- 3) 执行顶点着色程序绘制漫反射纹理图;
- 4) 采用箱式滤波器滤波环境纹理图(OpenGL 卷积);
- 5) 设置细节层次偏移(Level of Detail bias, LOD bias) b , 分级细化环境纹理图;
- 6) 绘制最终镜面反射纹理图;
- 7) 设置参数 f_λ , 合并漫反射和镜面反射纹理图产生最终反射纹理图;
- 8) 用反射纹理图绘制反射物体表面。

我们所使用的实验平台是 3.0G CPU 的 PC 机,内存为 512M, Geforce 6800GT 显卡,显存为 256M。为了比较,分别采用传统环境贴图方法和本文简化的环境贴图方法实现反射效果的绘制,结果如图 2 所示。图 2(a)为传统环境贴图方法绘制的结果,其光亮指数 N 取值为 500,图像更新速度为 20fps;图 2(b)为采用本文简化方法绘制的,参数 b 设为 0.2, f_λ 为 0.48,绘制速度为 180 fps。从绘制的结果来看,本文所采用的方法在保证整体绘制效果的情况下在速度上有明显的优势。



(a)传统环境贴图方法 (b)简化环境贴图方法
图2 物体表面反射绘制结果

图 3 为采用本文环境贴图方法选取不同参数值绘制的效果图,水平从左到右 f_λ 值依次设为 0.02、0.08、0.25、0.45,从上到下 b 值设为 0.2、2.4。从绘制的效果图来可以看出,光谱分布参数 f_λ 值的大小影响物体表面的反射效果,其值越大,

模拟的反射效果越明显;细节层次偏移参数 b 影响着反射表面的光滑程度, b 越小,表面看起来越光滑。对于不同类型的材质,我们应该选择相应的参数值来模拟反射效果。

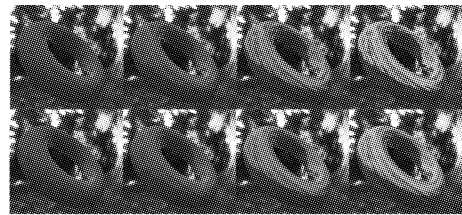


图3 不同参数值下的环境贴图效果

3 结语

本文基于球面调和函数、箱式滤波器提出了一种快速绘制物体表面反射的环境贴图方法,该方法具有计算效率高,真实感强、只需单个通路就可以完成绘制的特点,特别适用于包含大量对象的大规模场景或者对渲染效率要求高的应用中。实验结果证明,该方法在效率和真实感上取得了令人满意的效果,非常适合虚拟现实应用。

参考文献:

- [1] 彭群生, 鲍虎军, 金小刚. 计算机真实感图形的算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 27 - 52.
- [2] BLINN J F, NEWELL ME. Texture and reflection in computer generated images[J]. Communications of the ACM, 1976, 19(10): 542 - 546.
- [3] GREENE N. Applications of World Projections[A]. In Proceedings Graphics Interface[C]. 1986. 108 - 114.
- [4] GREENE N. Environment mapping and other applications of world projections[J]. IEEE Computer Graphics & Applications, 1986, 6(11): 21 - 29.
- [5] KAUTZ J, MCCOOL M. Approximation of Glossy Reflection with Prefiltered Environment Maps[A]. In Proceedings Graphics Interface[C]. 2000. 119 - 126.
- [6] RAMAMOORTHY R, HANRAHAN P. An Efficient Representation for Irradiance Environment Maps[A]. In Proceedings SIGGRAPH[C]. 2001. 497 - 500.
- [7] MILLER G, HOFFMAN R. Illumination and Reflection Maps: Simulated Objects in Simulated and Real Environments[R]. In SIGGRAPH Course Notes Advanced Computer Graphics Animation, 1984.
- [8] HEIDRICH W, SEIDEL H - P. Realistic, Hardware - accelerated Shading and Lighting[A]. In Proceedings SIGGRAPH[C]. 1999. 171 - 178.
- [9] PHONG B-T. Illumination for Computer Generated Pictures[J]. Communications of the ACM, 1975, 18(6): 311 - 317.
- [10] SCHLICK C. An Inexpensive BDRF Model for Physically based Rendering[A]. In Eurographics'94[C]. 1994. 149 - 162.
- [11] SLOAN P-P, KAUTZ J, SNYDER J. Precomputed Radiance Transfer for Real-Time Rendering in Dynamic, Low-Frequency Lighting Environments[A]. In Proceedings SIGGRAPH[C]. 2002. 527 - 536.
- [12] RAMAMOORTHY R, HANRAHAN P. On the relationship between radiance and irradiance: Determining the illumination from images of a convex lambertian object[J]. Journal of the Optical Society of America, 2001, 18(10): 2448 - 2459.
- [13] KAUTZ J, V ZQUEZ P-P, HEIDRICH W, et al. A Unified Approach to Prefiltered Environment Maps[A]. In Eleventh Eurographics Workshop on Rendering[C]. 2000. 185 - 196.