

文章编号:1001-9081(2006)02-0430-03

基于环境贴图的实时光照及其在 VR 中的应用

顾德明,樊养余,郝重阳,邵岳伟,李 扬

(西北工业大学 电子与信息工程研究所,陕西 西安 710072)

(gudeming@hotmail.com)

摘要:为了解决全局光照下漫反射和高光反射的实时计算,提出了一种利用环境贴图实现漫反射和高光反射实时渲染的综合算法。通过对原始光照环境贴图进行分级,改进了原有计算漫反射贴图的滤波算法,提高了运算速度。同时在保证一定逼真度的条件下,利用硬件完成了高光反射贴图的生成。最终通过可编程图形管道,完成了光照的实时计算和渲染。实验结果表明,这种综合算法可以在 VR 程序中达到比较满意的效果。

关键词:环境贴图;可编程硬件;实时光照;漫反射贴图;高光反射贴图

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A

Real-time illumination and its applications in VR based on environment map

GU De-ming, FAN Yang-yu, HAO Chong-yang, SHAO Yue-wei, LI Yang

(Institute of Electronic & Information Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shannxi 710072, China)

Abstract: A synthetic approach was proposed for rendering diffuse and glossy reflections in real-time by using environment map, which solved the real-time computation of diffuse and glossy reflections under globally incident lighting. By means of hierarchical original environment map the filtering algorithm of diffuse map was improved and accelerated. And the glossy map could be achieved using hardware under the circumstance of keeping the fidelity. In the end, the programmable graphics pipeline completes the illumination computation and rendering. The experimental results show that this approach can get satisfactory effect in VR applications.

Key words: environment map; programmable hardware; real-time illumination; diffuse map; glossy map

0 概述

随着计算机图形硬件的不断发展,显卡正经历着由支持一些固定算法到完全可编程的显著转变。因此使得一些原本只有在 SGI 等大型图形工作站才可以实现的功能,在一般的 PC 机上也可以很好地实现。本文充分利用了图形硬件的可编程性,结合环境映射技术,实现了 VR 程序中的动态全局光照。

环境映射技术是近年来计算机图形学中广泛应用的一项技术,其最初目的是为了近似模拟光线追踪的效果而不必跟踪反射光线。Bill 和 Newell^[1]最早提出了这项技术,他们利用环境映射模拟了曲面物体对周围环境的反射。在该方法中,环境贴图存储了各个方向到一点处的入射光辐射(radiance),而物体上的反射向量是通过视点方向和表面法向量计算得到,然后利用反射向量对环境贴图进行查询。但是由于环境映射只是相对一个固定点,而物体总有一定大小,因此环境映射假设物体离环境无限远。

文献[2]、[3]利用对环境贴图进行预滤波来分别得到漫反射图和高光反射图。其中环境贴图存储的并不是入射的光辐射,而是出射的光辐射(irradiance)。例如:利用 BRDF(双向折射率分布函数,它描述的是当光线与特定材质接触时,光线的反射量)对入射光线进行滤波,得到的出射光线形成新的图。

由于环境映射是定义在球面上的,因此必须找到一种合适的方法在二维空间中表示它。已有的映射方式主要有文献[1]引入的球形映射,文献[4]提出的双抛物面映射和立方体映射。随着硬件对于立方体贴图的支持,现在的应用程序中广为采用的就是立方体贴图。本文采用的全局光照也是高动态范围立方体贴图。

到目前为止已经有很多种基于预滤波的用于模拟高光反射^[3,5]的方法提出。这些算法都假定了一个简单、固定的 BRDF 模型(例如:Phong 模型等)或者只是面向一些各向同性的材质 BRDF,且这些算法都不能实时实施。虽然文献[6]提出的硬件预滤波方法利用现有硬件也可以达到每秒 30 多帧的速率,但是这并不适合复杂的 VR 场景。因为在实际的 VR 程序中,这种耗时的光照计算会严重的影响最终的帧速率,所以需要一种更加快速的滤波方法。针对计算漫反射贴图,文献[7]提出了一种高效、快速的算法。这种算法虽然简化了预滤波的计算量,但是由于滤波的计算量仍然很大,在现有的 PC 机上根本无法完成实时计算。基于对以上算法的优缺点分析,本文采用分级的方法对这种算法进行了改进,使得计算生成漫反射贴图可以实时的完成。

1 环境贴图滤波概述

一般来说,预先做滤波的环境贴图存储了从一个固定点

收稿日期:2005-08-13;修订日期:2005-11-02 基金项目:国家博士点基金资助项目(20040699015)

作者简介:顾德明(1980-),男,上海人,硕士研究生,主要研究方向:虚拟现实、计算机仿真、通讯技术等;樊养余(1960-),男,陕西西安人,教授,博士生导师,主要研究方向:虚拟现实、图形工程、模式识别等;郝重阳(1940-),男,河北保定人,教授,博士生导师,主要研究方向:图像图形工程、人机界面、虚拟现实等;邵岳伟(1983-),男,湖南岳阳人,硕士,主要研究方向:虚拟现实,计算机仿真等;李扬(1981-),女,陕西西安人,硕士研究生,主要研究方向:数字信号处理、数字图像处理等。

x 向各个方向 \hat{v} 射出的全部光辐射:

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

上式中 \hat{v} 和 \hat{l} 分别代表世界坐标系下的视点方向和光照方向。 $(\hat{n}, \hat{t}, \hat{n} \times \hat{t})$ 是反射表面所在的局部坐标系, 而 $\hat{\omega}(\hat{v}, \hat{n}, \hat{t})$ 和 $\hat{\omega}(\hat{l}, \hat{n}, \hat{t})$ 分别是在局部坐标系下的视点方向和光照方向。 f_r 就是 BRDF, 它以局部坐标系下的视线方向和光线方向为参数。从上式可以看出, 所谓的滤波就是把反射方向为 \hat{v} 的所有入射光 L_{in} , 以 f_r 为权值进行加权求和。 L_{in} 在这里表示未经滤波的环境贴图。为了使最终获得的图像更加具有真实感, 应该将 HDR(高动态范围) 辐射值存储到环境贴图中。可以看出, 此滤波过程与视线方向 \hat{v} 和反射面的朝向有关, 也就是和局部坐标系 $(\hat{n}, \hat{t}, \hat{n} \times \hat{t})$ 有关。

一般形式的环境贴图是五维的。两维用来表示视点方向 \hat{v} (在世界坐标系下是单位矢量), 另外三维用来表示坐标系 $(\hat{n}, \hat{t}, \hat{n} \times \hat{t})$ 。一般对于经过滤波的环境贴图都要进行降维并重新参数化。

1.1 漫反射环境贴图

文献[2]提出了用一个纯漫反射的 BRDF 对环境贴图进行滤波的方法。一个漫反射 BRDF 可以写为:

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

这里 $k_d \in [0, 1]$, 表示表面的吸收。将其代入(1)式得:

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

可以看出环境贴图只与表面法向量有关, 因此将上式简化为:

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

由此得到的这个环境贴图准确的存储着 x 点的漫反射光照, 而且只是二维的, 所以可以利用法向量进行索引。

1.2 高光反射贴图

文献[2]和文献[5]使用 Phong 反射模型对环境贴图进行滤波。Phong 模型的 BRDF 定义为:

$$f_r(\hat{v}, \hat{l}) := k_s \frac{(\vec{r}_v(\hat{n}) \cdot \hat{l})^N}{(\hat{n} \cdot \hat{l})} \quad (5)$$

其中 k_s 是高光反射率, N 是光泽指数。利用同样方法我们可以得到:

$$L_{phong}(x; \vec{r}_v) = k_s \int_{\Omega} (\vec{r}_v \cdot \hat{l})^N L_{in}(x, \hat{l}) d\hat{l} \quad (6)$$

由上式看出可以直接用视点的反射向量 \vec{r}_v 对滤波过的高光环境贴图进行索引。

文献[2]和文献[5]利用权值将漫反射和环境反射加起来构成一个完整的光照模型, 提出使用 Fresnel 项作为权值, 使得漫反射和光照反射可以随视点的不同而改变:

$$L_o(\hat{r}_v, \hat{n}) = (1 - F(\hat{r}_v, \hat{n})) L_{diffuse} + F(\hat{r}_v, \hat{n}) L_{phong} \quad (7)$$

这种方法可以模拟多种材质。

2 实时滤波的实现

传统的滤波方法要对环境贴图每个像素进行加权求和, 从而计算出目标环境贴图每个像素值, 同时还要计算相同次数的 BRDF 计算, 所以这种方法滤波效率很低无法达到实时的要求。

本文提出了一种综合的算法以获得实时的滤波效果。

首先对原始环境贴图进行分级, 即通过 2×2 的盒滤波器生成环境贴图的 mip-map。然后根据物体距离的视点远近选取不同的 mip 层级, 由文献[8,9]可知很小分辨率的环境贴图(每个面 8×8 像素)就足以达到比较满意的结果。为了在近距离时获得更加准确的光照, 本文通过分级选取不同分辨率的贴图, 实现了不同质量的光照效果。当然, 这是以牺牲一定帧速率为代价的。环境贴图分级处理后, 还需要再次进行简化计算。

由(4)式可以看出, 对环境贴图进行滤波, 就是将 cosine 核用于 L_{in} , 因为 cosine 核是低频的, 所以用其滤波过的图也应是低频的。

文献[7]提出一种在频域的滤波方法, 这样可以充分利用 cosine 核的低频特性, 并利用球形谐波函数实现频域滤波这一过程。球形谐波级数是定义在球面上的一组标准正交积, 类似于定义在线或圆上的傅立叶级数。低频的光照环境一般需要 9 个系数就可以表示。前 9 个球形谐波级数, 在笛卡尔坐标系 (x, y, z) 下是常数 ($l = 0$), 线性 ($l = 1$) 表达式, 二次多项式 ($l = 2$)。数值表达式如下:

$$\begin{cases} Y_{00} = 0.282095 \\ (Y_{11}; Y_{10}; Y_{1-1}) = 0.488603(x, y, z) \\ (Y_{21}; Y_{2-1}; Y_{2-2}) = 1.092548(xz, yz, xy) \\ Y_{20} = 0.315392(3z^2 - 1) \\ Y_{22} = 0.546274(x^2 - y^2) \end{cases} \quad (8)$$

利用这些基本函数可以表示环境贴图:

$$L_{in}(\hat{l}) = \sum_{lm} L_{lm} Y_{lm}(\hat{l}) \quad (9)$$

$$L_{lm} = \int_{\Omega} L_{in}(\hat{l}) Y_{lm}(\hat{l}) d\hat{l} \quad (10)$$

将(9)、(10)式代入(4)式可得:

$$L_{diffuse}(\hat{n}) = \frac{k_d}{\pi} \sum_{l,m} \hat{A}_l L_{lm} Y_{lm}(\hat{n}) \quad (11)$$

其中渲染中要用的 \hat{A}_l 的前几项为:

$\hat{A}_0 = 3.141593, \hat{A}_1 = 2.094395, \hat{A}_2 = 0.785398$ 。完整的推导可以参见文献[7]。

在实际渲染过程中可以将(11)式展开并将 \hat{A}_l 代入得到:

$$L_{diffuse}(\hat{n}) = \frac{k_d}{\pi} \hat{n}^T M \hat{n} \quad (12)$$

其中矩阵:

$$M = \begin{bmatrix} c_1 L_{22} & c_1 L_{2-2} & c_1 L_{21} & c_2 L_{11} \\ c_1 L_{2-2} & -c_1 L_{22} & c_1 L_{2-1} & c_2 L_{1-1} \\ c_1 L_{21} & c_1 L_{2-1} & c_3 L_{20} & c_2 L_{10} \\ c_2 L_{11} & c_2 L_{1-1} & c_2 L_{10} & c_4 L_{00} - c_5 L_{20} \end{bmatrix}$$

$c_1 = 0.429043, c_2 = 0.511664, c_3 = 0.743125, c_4 = 0.886227, c_5 = 0.429043$

通过以上两种方法结合可以在 VR 程序中获得实时的漫反射光照计算。

对于滤波生成高光反射贴图, 本文采取一种简单的方式来实现快速滤波, 即通过设置环境贴图的 LOD 偏移 b 来模拟一个模糊算子^[10], 用这种方式模拟(6)式的 Phong 算子, 最终将漫反射和高光反射利用 Fresnel 项结合起来。这种模拟的视觉效果令人满意(如图1所示)。

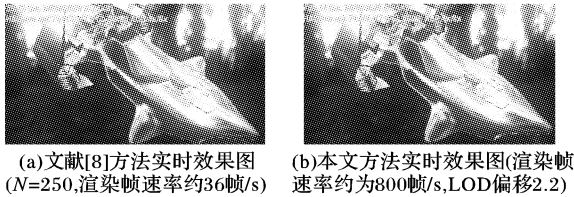


图1 效果对比图

Fresnel 项实际的计算是很复杂的,文献[11]提出的简化公式为:

$$F_{\lambda}(\hat{h} \cdot \hat{v}) = f_{\lambda} + (1 - f_{\lambda})(1 - (\hat{h} \cdot \hat{v}))^5 \quad (14)$$

其中 f_{λ} 是白光入射到物体表面时的反射量,范围是(0 ~ 1)。在实际应用中本文对其进行了进一步近似,得到:

$$F_{\lambda}(\hat{n} \cdot \hat{v}) = f_{\lambda} + (1 - f_{\lambda})(1 - (\hat{n} \cdot \hat{v}))^5 \quad (15)$$

这种近似同样可以获得理想的结果。

3 在 VR 程序中实时渲染的实现

要完成上述的复杂计算,如果只依赖于 CPU 进行数据处理,根本不能达到实时的帧速率。本文通过利用 HLSL 语言有效的使用了显卡这个可编程硬件,使得程序渲染能够实时的完成,其具体的实现步骤如下:

1) 环境贴图的获取:将照相机放在物体所在位置并在 6 个方向(X 正轴、X 负轴、Y 正轴、Y 负轴、Z 正轴和 Z 负轴)上照相。每张相片都应该有一个 90° 的视角和一个正方形的长宽比例,这样 6 个立方体表面就可以紧密的结合在一起创造一个全方位的全景图。要获得 HDR 光照环境贴图,Paul^[12] 利用一组曝光度不同的照片完成这项工作。

2) 对于获得的 HDR 光照环境贴图首先进行预分级,生成 *mip-map*, 这些可以很轻易的通过硬件完成,程序中根据物体距离视点的远近线性的选取相应分辨率的贴图。每个面的分辨率选取范围为 8 × 8 像素 ~ 64 × 64 像素。其实当物体很接近于观察者时,由于场景的复杂度降低,帧速率必然会随着绘制数量的减少而提高。这时采用更加精细的光照,作为提高 VR 程序的真实性,也是很必要的。

漫反射光照计算,对选取出的 HDR 环境贴图进行前面所述的滤波。将滤波后得到的 9 个系数代入矩阵 M 得到,得到计算(12)式所需的矩阵。然后将矩阵 M 与像素着色器中的矩阵相关联。利用硬件支持的矩阵运算在像素着色器中完成(12)式的计算。

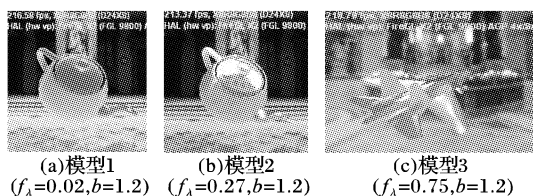


图2 各种实例展示本文提出的算法

高光反射的滤波和查询利用硬件编程很容易实现,在着色器中设置 *mip-map* 和 *mip-map lod* 偏移就可以完成滤波。在像素着色器中完成光照查询。对于 Fresnel 项只需要在程序中传入 f_{λ} , 就可以在顶点着色器中完成计算,当然逐像素计算也是可以的。利用着色器提供的操作很容易完成两种光照的混合。因为本文采用的是 HDR 环境贴图作为光源,目前的显示器只能显示一个低动态范围亮度。为了在实际的 VR 程序中获得更加好的视觉效果, Tone mapping^[13] (调和映射)成了一项必不可少的技术,这项技术将高动态范围的亮度映

射到显示器可以显示的低动态范围。利用调和映射技术可以使场景更加真实。最终的效果如图 2 所示(所有的渲染在 ATI FireGL X2-256 上都达到了比较高的帧速率)。

4 结语

本文中提出的综合算法在 DirectX 开发的 VR 程序中获得了很好的效果。因为在每帧都重新进行滤波计算,所以该算法允许动态的环境光照。本文中采用的都是 shade2.0,因此在指令等方面都有一些限制。现在的硬件已经支持 shade3.0,新的 shade3.0 提供了许多新的特性,指令条数无限,支持 32 位浮点数纹理,允许在顶点进行纹理采样等。利用 shade3.0 的一些新特性,可以将程序更多的运算交由图形硬件完成。在全局光照下阴影的计算等也都是可能实现的。今后的研究工作主要是利用当今最新的图形硬件编程技术,将实时速度进一步提高,实现在全局光照下的柔和阴影以及相互反射的实时计算。

参考文献:

- [1] BLINN J, NEWELL M. Texture and Reflection in Computer Generated Images[J]. In: Communications of the ACM, 1976, 19(10): 542 - 546.
- [2] MILLER G, HOFFMAN R. Illumination and Reflection Maps: Simulated Objects in Simulated and Real Environments[M]. New York: Proc Siggraph'84, Course Notes for Advanced Computer Graphics Animation, ACM Press, 1984.
- [3] GREENE N. Applications of World Projections[A]. In: Proceedings Graphics, Interface[C]. New York: ACM Press, 1986. 108 - 114.
- [4] HEIDRICH W, SEIDEL H-P. ViewH-P. Independent Environment Maps[A]. In: Eurographics/ SIGGRAPH Workshop on Graphics Hardware[C]. New York: ACM Press, 1998. 39 - 45.
- [5] HEIDRICH W, SEIDEL H - P . Realistic , Hardware accelerated Shading and Lighting[A]. In: Proceedings SIGGRAPH[C]. New York: ACM Press, 1999. 171 - 178.
- [6] KAUTZ J, V'AZQEZazquez P-P, HEIDRICH W, et al. A Unified Approach to Prefiltered Environment Maps[EB/OL]. <http://graphics.csail.mit.edu/~kautz/publications/unifiedRW00.pdf>, 2000.
- [7] RAMAMOORTHY R, HANRAHAN P. An Efficient Representation for Irradiance Environment Maps[A]. In: Proceedings SIGGRAPH[C]. New York: ACM Press, 2001. 497 - 500.
- [8] 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]. New York: ACM Press, 2002. 527 - 536.
- [9] KAUTZ J, DAUBERT K, SEIDEL H - P . Advanced Environment Mapping in VR Applications[EB/OL]. <http://www.eg.org/EG/DL/PE/OPENSG03>, 2003.
- [10] ASHIKHMIN M, GHOSH A. Simple blurry reflections with environment maps[J]. In: Journal of Graphics Tools, 2003, 7(4): 3 - 8.
- [11] SCHLICK C. An Inexpensive BDRF Model for Physically based Rendering[J]. In: Computer Graphics Forum, 1994, 13(3): 149 - 162.
- [12] DEBEVEC P. Rendering Synthetic Objects into Real Scenes: Bridging Traditional and Image-based Graphics with Global Illumination and High Dynamic Range Photography[A]. In: Proceedings SIGGRAPH [C]. New York: ACM press, 1998. 189 - 198.
- [13] ERIK R, STARK M, SHIRLEY P, et al. Photographic Tone Reproduction for Digital Images[A]. ACM Transactions on Graphics (TOG), Proceedings of the 29th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH)[C]. New York: ACM press, 2002. 267 - 276.