

复杂环境光源下虚实融合光照实时计算

王贞东^{1),2)} 马小虎¹⁾ 潘志庚²⁾

¹⁾(苏州大学计算机科学与技术学院, 苏州 215006)

²⁾(浙江大学计算机辅助设计与图形学国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要 在互动电子游戏、增强现实等对实时计算要求很高的交互式图形应用中,大量使用复杂环境光源对虚拟物体进行照明,使其和真实场景的光照一致,虚实融合。提出了用 Cook Torrance 光照模型进行虚拟场景的光照计算;利用球面调和基函数的方法,实时地计算高动态范围环境映射光照系数,得到高动态范围环境映射的二次多项式表达形式,在着色器计算该式得到漫反射分量;通过环境映射技术对镜面反射进行模拟,全部光照计算在 GPU 中完成。实验结果表明,该方法在动态变化的复杂环境光源下,完成对虚拟物体光照实时计算,绘制速度每秒 30 帧以上,绘制结果具有较强的真实感。

关键词 复杂环境光 虚实融合 光照一致 实时绘制

中图法分类号: TP311.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)10-2118-04

Real-time Illumination Computing Algorithm Mixing of Virtual and Actual Reality under Complex Environment Lighting

WANG Zhen-dong^{1),2)}, MA Xiao-hu¹⁾, PAN Zhi-geng²⁾

¹⁾(School of Computer Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006)

²⁾(State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract In the interactive graphics applications such as games and augmented reality which require high demanding real time performance, the adoption of complex environment lighting has been increasing to illuminate the synthetic objects naturally in the dynamic scenes and make them merge consistently. we propose the Cook Torrance illumination model to accomplish the illumination computing. Our method analyze spherical harmonics to determine the lighting coefficients of high dynamic range environment map in real time and use them to obtain a quadratic polynomial form of high dynamic range environment map. Then calculate the expression in the shader to obtain the diffuse component of the illumination model. And the specular component of it is approximated via the technology of environment maps. Finally all of them are computed in GPU. The experimental results show our algorithm renders the synthetic objects at rates of over 30 FPS under dynamic complex environment lighting and achieves photo-realistic visual effect.

Keywords complex environment lighting, mix of virtual and actual reality, illumination consistent, real-time rendering

1 引言

真实感图形绘制逼真地模拟和重现现实世界中

的各种光影效果,生成各种照片级真实感的图像或者图像序列,它广泛运用于电子娱乐、计算机图形电影等领域。复杂环境光指用高动态成像设备从现实世界中采集到的光源^[1],真实场景中的光照相当复

基金项目:国家自然科学基金重点项目(60533080);江苏省自然科学基金项目(BK2007050)

收稿日期:2009-06-18;改回日期:2009-07-15

第一作者简介:王贞东(1977 ~),男,苏州大学计算机软件与理论专业硕士研究生。主要研究方向为计算机图形学、增强现实。

E-mail:zdw163m@163.com

通讯作者:马小虎,E-mail:xhma@suda.edu.cn

杂,来自各种各样的光源,如天空光、面光源等产生的直接光照以及直接光照在物体之间相互反射而产生间接光照,很难用传统虚拟光源,如点光源、面光源或方向光源来模拟。复杂环境光可以用高动态范围环境映射(high dynamic range environment map, HDREM)来表示,HDREM 是一种亮度范围非常广的图像,能记录真实场景中最亮区域和最暗区域的照明信息,基于图像光照技术^[2](image-based lighting, IBL)用它来代替虚拟光源“照亮”虚拟物体,能使虚拟物体很好地融入周围的真实场景中,产生非常真实的光照效果。以虚实融合为目标的增强现实或混合现实采用 HDREM 表示真实场景中光源,利用实时绘制算法完成虚拟物体和真实场景光照一致的实时计算。

Blinn 等人利用环境映射技术生成物体表面复杂的光照效果^[3],通过将入射光照表示在纹理中来实现复杂的光照模型,模拟虚拟物体对远处周围环境的反射。Greene 对映射贴图进行预滤波可以分别得到双向反射分布函数(BRDF)中的漫反射分量^[4]和镜面反射分量^[4],利用纹理映射技术对其进行查询使绘制达到实时交互性能。但预滤波通常要考虑到半球上所有方向入射光能,需要在半球上进行昂贵的积分计算,且当场景光照动态变化时,必须对新生成的环境贴图重新进行滤波,不能实现动态光照下实时绘制。由于以 HDREM 表示复杂环境光是定义在球面上的照明亮度分布,Ramamoorthi 等引入球面调和基函数(spherical harmonics, SH)的方法来表示复杂环境光^[5],把 HDREM 表示成二次项函数多项式形式,从而避免了昂贵的半球积分运算,并证明对全漫反射材质来说能得到误差小于 1% 的精确绘制结果,但其绘制算法要执行复杂的矩阵和大量的向量运算,艾祖亮等提出了利用 GPU 实现 Ramamoorthi 等的方法^[6],可以实时计算动态的复杂的环境光照。然而,他们都只是模拟了漫反射材质的光照,并没有把镜面反射考虑到绘制当中,对现实世界大量具有镜面反射材质属性的虚拟物体来说,绘制结果缺乏真实感。针对上述问题,本文充分利用 GPU 硬件加速方法,采用 Cook Torrance 光照模型^[7]进行虚实场景的光照计算,使用着色器完成漫反射的计算;利用环境映射技术模拟镜面反射的效果。实验结果表明,该方法在动态复杂的环境光源下,实现虚拟物体与真实场景虚实融合光照一致,具有实时交互的性能与较高的真实感。

2 复杂环境光下光照实时计算

2.1 Cook Torrance 光照模型

本文主要针对这样的绘制场景:(1)采用由 HDREM 表示的复杂动态光源,虚拟物体尺度远小于环境光;(2)光在传播过程中只在物体表面反射,不考虑在空气中折射及物体之间的反射;(3)虚拟物体不被场景中其他物体遮挡,即它始终是可见。在以上场景进行全局光照的绘制需求解绘制方程^[8]:

$$L(x, \omega_o) = \int_{\Omega} L_{in}(\omega_i) \cdot f(\omega_i, \omega_o) \cdot \rho(x, \omega_i) \cos(\theta) d\omega \quad (1)$$

这个方程表示,物体表面上一点 x 总的出射辐射亮度 $L(x, \omega_o)$ 是 ω_i 方向上的入射光 $L_{in}(\omega_i)$ 、双向反射分布函数 $f(\omega_i, \omega_o)$ 、可见函数 $\rho(x, \omega_i)$ 、视点方向 ω_o 与入射光 ω_i 夹角余弦 $\cos(\theta)$ 的积在由 x 点表面法向量定义的半球面 Ω 上的积分。由于要进行上半球面所有方向积分运算,在实时交互图形学应用中直接计算式(1)是不可行的。Ngan 等人证明了在复杂环境光源下, Cook Torrance 光照模型能够得到比 Phong 光照模型更精确绘制结果^[9],且能在双向反射分布函数的表现特性和计算复杂性之间取得很好均衡。Cook Torrance 光照模型的 $f(\omega_i, \omega_o)$ 定义为

$$f(\omega_i, \omega_o) = k_d R_d + k_s FR(\omega_i, \omega_o) \quad (2)$$

式中, $k_d \in [0, 1]$ 是漫反射系数,表示表面的吸收; R_d 是朗伯 BRDF 常数; $k_s \in [0, 1]$ 是镜面反射系数; F 是菲涅耳(Fresnel)项; $R(\omega_i, \omega_o)$ 是粗糙度测量函数,它定义为 $R(\omega_i, \omega_o) = dg/\pi(\mathbf{n} \cdot \omega_i)(\mathbf{n} \cdot \omega_o)$ (其中, d 是微面元分布函数(micro-facet distribution function), g 是几何衰减因子(geometry attenuation factor), \mathbf{n} 是表面法向量);等式右边第 1 项是漫反射分量,它仅仅与入射光有关;等式右边第 2 项是镜面反射分量,它与入射光与视点方向有关。把式(2)代入式(1),由前面场景假设(3)有 $\rho(x, \omega_i) = 1$,得完整的 Cook Torrance 光照模型

$$L(x, \omega_o) = \int_{\Omega} L_{in}(\omega_i) \cdot k_d R_d \cos(\theta) d\omega_i + \int_{\Omega} L_{in}(\omega_i) \cdot k_s FR(\omega_i, \omega_o) \cos(\theta) d\omega_i \quad (3)$$

式中,漫反射分量与镜面反射分量仍然要进行半球积分的计算,但由于采用了 Cook Torrance 光照模型,漫反射分量与镜面反射分量可以分别用不同简化方法在 GPU 中用着色器并行计算。

2.2 BRDF 漫反射分量的计算

辐射照度环境映射是由朗伯表面通过其表面法

向量检索的漫反射环境映射,它的每个像素保存了物体表面上一个特定朝向的辐射亮度值,辐射照度环境映射是一种绘制任意光照环境下漫反射物体表面一种高效的方法。用 $L_{\text{diffuse}}(x; \mathbf{n})$ 来表示式(3)中的漫反射分量,并把常数 k_d 和 R_d 提取出来,有

$$L_{\text{diffuse}}(x; \mathbf{n}) = k_d R_d \int_{\Omega} L_{\text{in}}(\omega_i) \cdot \cos(\theta) d\omega_i \quad (4)$$

式中, \mathbf{n} 为 x 点上法向量,对物体表面一点 x ,它向所有视点方向的漫反射辐射亮度 $L_{\text{diffuse}}(x; \mathbf{n})$ 为法向量 \mathbf{n} 所定义的半球面 Ω 上的积分。通过分析光照在朗伯表面的分布发现,相对于表面法线,漫反射的辐射亮度的变化极其缓慢,把定义在球面上的 HDREM 入射光分布表示在频率空间,利用球面调和基函数来表示单位球面上光照分布可以实现动态复杂环境光照实时计算。Sloan 分析了在实时光照计算中^[10],为了方便表示复杂环境光照,可用下式简化表示球面调和基函数

$$y_l^m = \begin{cases} \sqrt{2} K_l^m \cos(m\varphi) P_l^m(\cos\theta) & m > 0 \\ \sqrt{2} K_l^m \sin(|m|\varphi) P_l^{|m|}(\cos\theta) & m < 0 \\ K_l^0 P_l^0(\cos\theta) & m = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $l(0 \leq l, -l \leq m \leq l)$ 表示频率波段指数,当 $l \leq 2$ 时,用球面调和基函数的前 9 项以小于 1% 误差近似表示定义在球面上辐射照度环境映射,这时式(4)可用球面调和基函数展开级数来近似表示

$$L_{\text{diffuse}}(\mathbf{n}) = k_d R_d \sum_{l=0}^2 \sum_{m=-l}^l A_l L_l^m y_l^m(\mathbf{n}) \quad (6)$$

式中, $\mathbf{n} = (x, y, z) = (\sin\theta\cos\varphi, \sin\theta\sin\varphi, \cos\theta)$, $A_0 = \pi$, $A_1 = 2\pi/3$, $A_2 = \pi/4$, $y_l^m(\mathbf{n})$ 分别是 (x, y) 的 1 个常数函数, 3 个一次函数, 5 个二次函数, $L_l^m(0 \leq l \leq 2, -2 \leq m \leq 2)$ 是 9 个光照系数,其表达式如下:

$$L_l^m = \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} L(\theta, \varphi) y_l^m(\theta, \varphi) d\theta d\varphi \quad (7)$$

式中, $L(\theta, \varphi)$ 与给定的 HDREM 一一对应,计算动态产生的 HDREM 的光照系数,代入式(6)就能计算场景动态复杂环境光照漫反射分量。由于 $y_l^m(\mathbf{n})$ 已知,式(7)表明要计算光照系数,只要对 HDREM 所有像素用 $y_l^m(\theta, \varphi)$ 加权求和即可。对于离散采样的 300×300 像素 HDREM(用 M 表示其像素数)而言,利用式(7)计算 9 个光照系数时间开销是 $300 \times 300 \times 9 \approx 810K$ ($K = 1024$) 次运算,即计算时间开销为 $O(MP)$, $P = 9$ 为光照系数个数。对于同一 HDREM,用传统求解 $L_{\text{diffuse}}(x; \mathbf{n})$ 方法求其对应 256×256 像素的辐射照度环境映射(用 N 表示其像素数)需要开

销是 $300 \times 300 \times 256 \times 256 \approx 5.9G$ ($G = 10^6 K$) 次运算,时间开销是 $O(MN)$, $P \ll N$,可见用球面调和基函数求漫反射分量有 N/P 倍的速度提高,大大降低了计算复杂度,能达到实时计算。通过式(7)计算出 9 个光照系数 L_l^m ,把 $L_l^m, A_l, y_l^m(\mathbf{n})$ 代入式(6)

$$L_{\text{diffuse}}(\mathbf{n}) = k_d R_d \left[L_2^2(x^2 - y^2) + c_3 L_2^0 z^2 + c_4 L_0^0 - c_5 L_2^0 + 2c_1(L_2^{-2}xy + L_2^1xz + L_2^{-1}yz) + 2c_2(L_1^1x + L_1^{-1}y + L_1^0z) \right] \quad (8)$$

式中, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 为常数,在 CPU 计算随光照变化而实时更新的 HDREM 光照系数,并送到 GPU 着色器的易变变量中,在着色器中以顶点的法向量为参数计算式(8),返回该顶点漫反射 RGB 颜色值,得到每个顶点的漫反射分量对绘制结果的贡献。

2.3 BRDF 镜面反射分量的计算

用 $L_{\text{specular}}(x; \omega_o)$ 表示式(3)中的镜面反射部分并把镜面反射系数 k_s 提取出来有

$$L_{\text{specular}}(x; \omega_o) = k_s \int_{\Omega} L_{\text{in}}(\omega_i) \cdot FR(\omega_i, \omega_o) \cos(\theta) d\omega_i \quad (9)$$

用上式计算镜面反射,需对 $L_{\text{in}}(\omega_i)$ 和定义复杂的粗糙度测量函数等的积进行半球积分,这使得实时计算非常困难。但是,可以采用环境映射的技术来模拟镜面反射效果,HDREM 经过色调映射生成能在普通显示设备上显示,并以立方体贴图表示的环境映射,通过视点的反射向量对其索引来完成镜面反射的计算。菲涅耳方程非常复杂,本文菲涅耳项 $F \in [0, 1]$ 采用下式进行简化计算

$$F \approx F_0 + (1 - F_0)(1 - (\omega_i \cdot \mathbf{h})^5) \quad (10)$$

式中, F_0 是法向量为入射角的菲涅耳值, \mathbf{h} 为半角向量(halfway vector)。用 F 作为权值使得漫反射和镜面反射可以随视点变换而改变:

$$L_o(\omega_o, x) = (1 - F)L_{\text{diffuse}}(x; \mathbf{n}) + FL_{\text{specular}}(x; \omega_o) \quad (11)$$

式中, $L_o(\omega_o, x)$ 表示虚拟物体表面最终的光照效果, $L_{\text{specular}}(x; \omega_o)$ 表示对立方体环境映射进行快速滤波后产生镜面反射映射,采用在着色器中设置 mip-map 和 mip-map lod 偏移来完成实时滤波。

3 实验结果

本文用 VC++ 2005 和 opengl 着色器语言 2.0 在 Windows XP 下实现以上算法,运行环境是 3.0 GHz CPU 的 PC 机,内存 2 G, Geforce 8600GT 显

卡,显存 512 M。HDREM 来自 Debevec 采集的结果^[2],以 .hdr 为文件格式的 HDREM 在被分成了 6 部分,每部分为真实场景立方体的一面,利用 OpenGL 的扩展建立绘制虚拟物体的真实场景,通过 GPU 硬件加速和多通道着色技术,完成整个光照计算过程。本文方法可以模拟多种常见材质在动态复杂光照下的反射效果,图 1(a)采用 Ramamoorthi 等方法模拟的全漫反射材质,图 1(b)、图 1(c)、图 1(d)采用了本文方法模拟的金属材质、体现菲涅耳效果透明的玻璃材质、体现高光的陶瓷材质,虚拟物体茶壶有 63 589 个顶点。图 2 分别模拟了相同材质的虚拟物体在室外和室内两种不同动态光照条件下绘制结果,虚拟物体阿玛德罗有 85 739 个顶点。实验结果表明,本文的方法既克服了 Ramamoorthi 等只模拟了全漫反射材质单一材质问题,取得较好的视觉真实感,又实现了实时光照计算,绘制速度达 30 帧/秒以上。

4 结 论

本文提出了在复杂环境光源下对虚拟物体进行动态光照实时计算方法,采用 Cook Torrance 光照模型使得虚拟物体的漫反射和镜面反射能够分别采用不同简化方法进行计算,最终在 GPU 中利用着色器对二者进行混合绘制。采用球面调和基函数的方法实时计算动态 HDREM 的光照系数,完成漫反射分量的计算;利用环境映射技术较好地模拟了各种常见材质在动态光照下反射效果。实验结果表明,本文方法在光照动态变化的场景中,完成对虚拟物体和真实场景光照虚实融合实时绘制,绘制速度和绘制结果的视觉真实感都取得了比较好的结果,适合互动电子游戏、增强现实等实时交互式图形应用。

参考文献 (References)

- 1 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 of Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH [C], Orlando, FL, USA, 1998:189-198.
- 2 Debevec P. A tutorial on image-based lighting [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2002, 22(2): 26-34.
- 3 Blinn J F, Newell M E. Texture and reflection in computer generated images [J]. Communications of the ACM, 1976, 19(10): 542-547.
- 4 Greene N. Environment mapping and other applications of world projections [J]. IEEE Computer Graphics & Applications, 1986, 6(11): 21-29.
- 5 Ramamoorthi R, Hanrahan P. An efficient representation for irradiance environment maps [A]. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH [C], LOS Angeles, CA, USA, 2001: 497-500.
- 6 Ai Zu-liang, Peng Geng, Zhang Li-min. A technique to evaluate irradiance environment maps using graphics hardware [J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(5): 972-976. [艾祖亮, 彭耿, 张立民. 基于图形硬件的辐照度环境纹理图的计算方法 [J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(5): 972-976.]
- 7 Cook R L, Torrance K E. A reflectance model for computer graphics [A]. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH [C], Dallas, TX, USA, 1981: 307-316.
- 8 Kajiyama J T. The rendering equation [A]. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH [C], Dallas, TX, USA, 1986: 143-150.
- 9 Ngan A, Durand F, Matusik W. Experimental analysis of BRDF models [A]. In: Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering, EGSR [C], Konstanz, Germany, 2005: 117-226.
- 10 Sloan P. Stupid spherical harmonic (SH) ticks [A]. In: Game Developer's Conference, GDC [C], San Francisco, CA, USA, 2008.

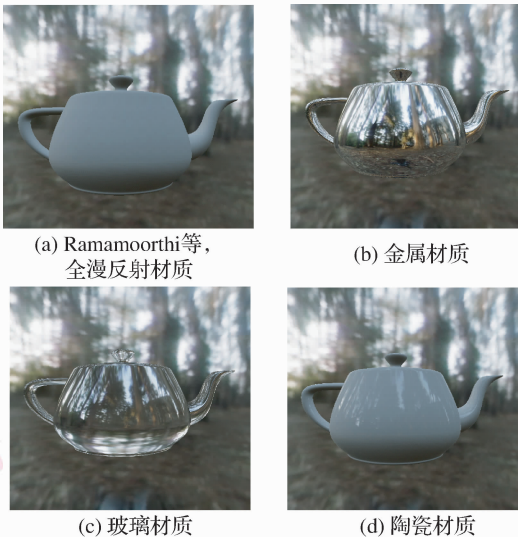


图 1 不同材质虚拟物体绘制结果

Fig. 1 Results of synthetic objects with difference material



图 2 不同光照条件下虚拟物体绘制结果

Fig. 2 Results of under difference complex lighting