

利用深度图优化的自然光束体构建与绘制

李思宇, 李 胜*, 王 衡, 汪国平

(北京大学信息科学技术学院机器感知与智能教育部重点实验室 北京 100871)

(lisheng@graphics.pku.edu.cn)

摘 要: 为了模拟由散射形成的自然光束, 提出基于深度图的光束体优化构建和实时绘制算法. 首先把阴影体视作特殊的光束体参与计算, 实现光束被物体遮挡的光照与阴影交错的效果; 其次利用深度图在 GPU 中消除重叠的阴影体, 降低填充率, 优化复杂场景中多个阴影体与光束体相交情况的绘制效果. 该算法将自然光束体构建中的一部分提前到预处理中完成, 另一部分在 GPU 内核实现, 提高了效率, 再结合 GPU 上高效的散射计算绘制出动态光源产生的自然光束效果; 此外, 添加了大气中因散射可见的尘埃粒子的模拟, 进一步增强了真实感. 对动态光源下多个场景的实验结果表明, 文中算法解决了散射光束中的遮挡与阴影问题, 有效地模拟了光影交错的综合效果, 并具有实时性.

关键词: 光束体; 散射; 阴影体; 深度图; 图形处理器

中图法分类号: TP391

Optimized Construction and Rendering of Natural Light Shaft Volumes through Depth Map

Li Siyu, Li Sheng*, Wang Heng, and Wang Guoping

(Key Laboratory of Machine Perception (Ministry of Education), EECS, Peking University, Beijing 100871)

Abstract: In this paper, an efficient method is proposed for constructing and simulating dynamic natural light shaft volumes with atmospheric scattering. First, to represent the obstructed light shafts, the shadow volumes are considered as special light shaft volumes. Then the information in depth map is used to eliminate the complex overlapping between shadow volumes so that the fill-rate consumption of rasterization is reduced. We preprocess some construction steps of light shafts and the remainder are implemented in GPU kernel. The scattering process is efficiently computed on GPU. This algorithm can afford realistic simulation of complex scene with dynamic light source in real-time. We also simulate the visible dust floating in the air due to scattering to enhance the reality. Experimental results showed that the proposed algorithm offers an efficient solution to the occlusion and shadow problem and simulates the combined effect of natural light and shadow in real time.

Key words: light shaft volumes; atmospheric scattering; shadow volume; depth map; GPU

收稿日期: 2010-11-10; 修回日期: 2010-12-30. 基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划项目(2010CB328002); 国家自然科学基金(60833007, 90915010); 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室开放基金(30815006). 李思宇(1985—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机图形学、虚拟现实; 李 胜(1974—), 男, 博士, 副教授, 论文通讯作者, 主要研究方向为计算机图形学、虚拟现实; 王 衡(1960—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为人机交互、数字图像处理; 汪国平(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 高级会员, 主要研究方向为计算机图形学、人机交互、虚拟现实.

光线在传播中因粒子散射形成的光束现象可迅速提高真实感、烘托场景氛围,如阳光穿过云层或树林时的效果,街灯、舞台聚光灯的效果,光从窗口射入有尘埃房间的效果等。然而,光束涉及的散射计算非常复杂,难以同时满足绘制质量和效率。本文以局部光照明模型为基础进行快速散射计算,从自然光束体的有效构建入手,着重研究如何处理物体对光束产生的遮挡,关键是使用阴影体裁剪场景中被物体遮挡的无效光束。本文通过引入深度图以消除重叠阴影体的重复绘制,减少填充率的消耗,提高绘制质量和速度,可绘制复杂场景中动态的自然光照效果。

1 相关工作

自然光束是大气中的一种散射现象,游戏中的简单模拟可以实时运行,但不严格依据物理原理,缺乏真实感;利用全局光照明模型如光线跟踪、光子贴图等方法^[1]的方法虽然效果逼真,却难以实时绘制。近年来出现了一些基于局部光照明模型的算法,如 Dobashi 等^[2]、提出的绘制方法性能不够理想;Sun 等^[3]提出的解析计算方法只能实时模拟各向同性的点光源散射效果;Li 等^[4]提出的方法利用 GPU 的并行性优化散射计算公式,实时模拟效果较好,但对于复杂场景(如包含很多相互遮挡的物体的情况)缺乏足够考虑,没有提出系统化的绘制方法。

阴影的实时绘制主要有阴影体和阴影图 2 种方法。1977 年, Crow^[5]首先提出阴影体算法,通过挤压轮廓边得到半无穷的阴影体;在此基础上, Bergeron^[6]提出能处理不封闭物体及非平面多边形的更通用算法;Everitt 等^[7]提出基于模板的硬件加速算法,并解决了远近裁剪平面引起的非封闭阴影体的问题;Lloyd 等^[8]提出的改进可去除已完全处于阴影中的阴影体或投射到空旷的大空间区域的阴影体,提高了光栅化速度。随着 GPU 的发展, Brabec 等^[9]通过把轮廓边计算和阴影体拉伸的步骤移到 GPU 上实现加速, Govindaraju 等^[10]则使用 3CPU, 4GPU 的并行处理架构和多种剔除算法实现了大规模场景的实时阴影绘制。

与基于物体空间的阴影体方法相比, 1978 年由 Williams^[11]提出的阴影图方法基于图像空间。该方法简单快速,但其在有限的深度精度和不同视点变

换下的光栅化会引起走样。之后研究人员提出了多种改进算法:一类是通过改善阴影图所在的空间变换减少阴影图与物体不在同一空间导致的走样,如经典的透视阴影图^[12];另一类通过分割物体空间或深度空间,每部分用不同分辨率绘制,以提高存储的深度精度,如文献^[13]方法,以及通过时间相关性改善像素级精度的方法^[14]等。为了提高阴影质量,人们通常采用组合多种方法。

阴影图方法快速实用,但不够精确;阴影体算法可以得到光滑、准确的阴影轮廓,但填充率高、时间代价大。因而出现了阴影体与阴影图混合的方法: McCool^[15]提出硬件加速的轮廓边检测算法,用深度图中的深度差信息进行边缘检测,以构造最优的阴影体侧面多边形,但不能生成阴影体的顶面和底面。Sen 等^[16]用深度图和轮廓边构建出阴影轮廓图,以提高阴影判断精度。Govindaraju 等^[10]先用阴影图判断出使用该方法易走样的区域,只在这些区域绘制阴影体,其他区域使用阴影图。Chan 等^[17]的混合方法则先用阴影图判断阴影与非阴影部分的交界区域,只绘制此范围内的阴影体,以此来降低填充率,并获得阴影体方法生成的光滑阴影边界。

2 本文算法概述

本文算法基于局部光照明计算生成逼真自然光影效果,分为预处理和实时绘制两步。阴影体沿物体轮廓构建,光束体基于光源构建,这些只涉及场景的几何信息,所以大部分工作在预处理中完成。实时绘制时,首先以光源为视点绘制一遍得到深度图;再按普通视点绘制场景和软阴影;接着在着色器中拉伸光束体和阴影体,并使用深度图优化完成整体构造;然后用此结构从光束体中剔除阴影体空间,同时计算光束的散射效果,实现光束被物体遮挡的效果;最后绘制光束中的尘埃粒子。本文算法流程图如图 1 所示。

本文针对图 1 中的第 1, 4 步,重点研究如何准确有效的构建光束体、阴影体的几何结构,并利用 GPU 的特性加速绘制。自然光照效果依赖于散射的物理原理,光束体和阴影体的结构也与散射的计算紧密相关。下面首先简要介绍高效的散射基本计算方法,并引出光束体和阴影体的快速构造方法,然后介绍尘埃粒子的绘制方法。

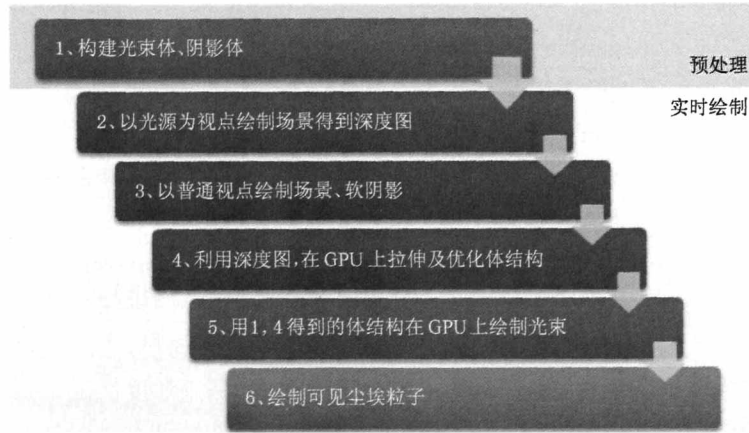


图 1 本文算法流程图

3 高效光束散射计算

根据文献[4]计算光束散射的方法,从视点发射一条射线,然后与光束体、阴影体分别相交,最终进入视点的光亮度 I_{eye} 为视点到 P_{obj} 的射线上所有粒子散射引起的光亮度的累积.其快速计算公式为

$$I_{eye} = I[f\beta_r(\alpha) + (1-f)\beta_m(\alpha)][f\beta_r + (1-f)\beta_m](d_{upper} - d_{lower}) \quad (1)$$

其中, β_r 和 $\beta_r(\alpha)$, β_m 和 $\beta_m(\alpha)$ 为散射系数; f 是控制

天气朦胧模糊的因子; $d_{upper} - d_{lower}$ 是可见光束的深度范围.把阴影体的前向面看作光束体的背向面,阴影体的背向面看作光束体的前向面,则光束体加上阴影体相当于减去光束体中被物体遮挡的空间.然而,式(1)只考虑了阴影体完全在光束体内、彼此不相交的理想情况.对于复杂场景,往往存在许多阴影体重叠、阴影体与光束体重叠的情况,它们经过复杂重叠之后交错颠倒,导致错误的深度差,影响积分计算的正确结果,如图 2 a 所示.

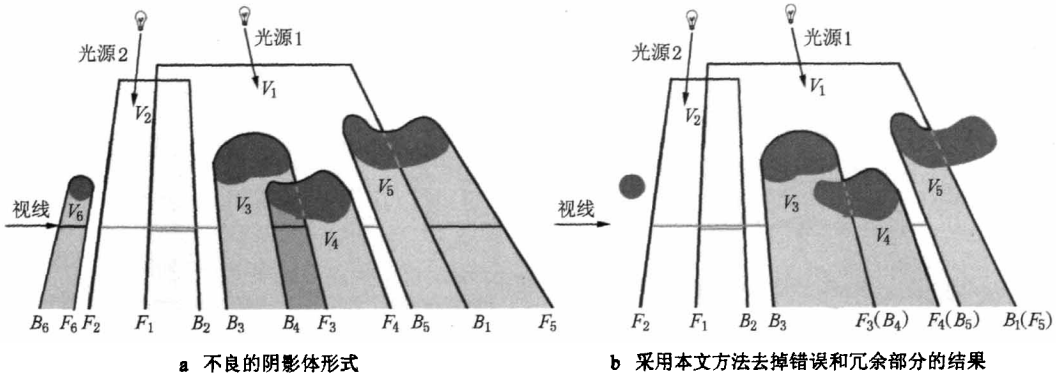


图 2 光束体与阴影体重叠示意图

一个光源只产生一个光束体,图 2 a 中有 2 个重叠的光束体 V_1 和 V_2 分别来自光源 1 和光源 2,用浅黄色表示; V_3, V_4, V_5, V_6 为蓝色物体产生的阴影体,用浅蓝色表示,其中 V_3 和 V_4 处于光束体 V_1 内部,相互重叠,重叠部分为蓝色, V_5 与光束体相交,重叠部分为绿色, V_6 在所有光束体之外, F 和 B 分别表示向光面、背光面.则可见光束体累积的深度差为

$$\Delta d = d_{upper} - d_{lower} = (d_{B_{光束体}} + d_{F_{阴影体}}) - (d_{F_{光束体}} + d_{B_{阴影体}}) =$$

$$(d_{B_1} + d_{B_2} + d_{F_3} + d_{F_4} + d_{F_5} + d_{F_6}) -$$

$$(d_{F_1} + d_{F_2} + d_{B_3} + d_{B_4} + d_{B_5} + d_{B_6}) \quad (2)$$

但深度差的正确结果只包含图 2 中标绿线部分,即光束体的累积深度减去其内部阴影体的深度,记作

$$\Delta d' = (d_{B_1} - d_{F_1}) + (d_{B_2} - d_{F_2}) -$$

$$(d_{F_4} - d_{B_3}) - (d_{B_1} - d_{B_5}) \quad (3)$$

为了使式(2)的计算符合式(3)的正确情况,需要添加一个修正量

$$d_{dif} = \Delta d' - \Delta d = -(d_{F_3} - d_{B_4}) -$$

$$(d_{F_5} - d_{B_1}) - (d_{F_6} - d_{B_6}),$$

即需要减去阴影体重叠部分的深度差以及光束体外的阴影体的深度差,在图 2a 中用红线表示这部分。本文算法可构建出图 2b 所示的正确阴影体和光束体,以确保不产生冗余或错误部分,提高散射计算的准确性和实时性。

4 光束体及阴影体的构建

4.1 阴影体构造框架

光束体根据光源信息即可确定形状。为了参与光束计算,用阴影体表示一个完整封闭的空间,封闭性由物体模型的封闭性保证。阴影体由顶面、底面和侧面 3 部分组成。物体向光面留在原处,构成阴影体的顶面;背光面沿光线方向延伸到远处,构成阴影体的底面;底面与顶面之间的侧面多边形通过挤压退化四边形构成:对每一条被 2 个三角形共享的边,插入一个以其 2 个顶点分别为顶点的四边形,由于此时每 2 个顶点重合,四边形表现为一条退化的边,不影响模型外观。绘制场景时,只需在 GPU 中检测顶点,如果顶点位于背光面则被拉伸,自动形成侧面多边形,如图 3 所示。退化四边形的构建只和模型几何结构相关,在预处理中进行。与基于轮廓边的算法相比,这种方法更快,更适于动态环境。

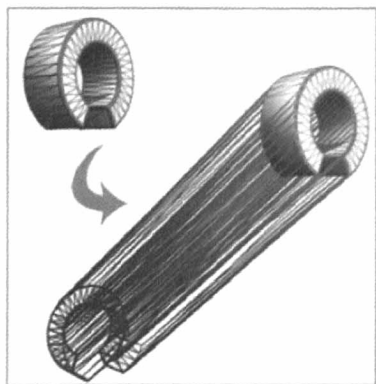


图 3 使用退化四边形的阴影体拉伸

法向相同的 2 个相邻三角形必然同时向光或背光,因此它们之间不需插入退化四边形,平均可减少约占原面片数 37.2% 的退化四边形,节省存储空间。另外,使用顶点缓冲区对象(vertex buffer object, VBO)存储数据,使 CPU 到 GPU 的数据传输不会成为瓶颈,从而提高整体绘制速率。

4.2 深度图优化阴影体生成

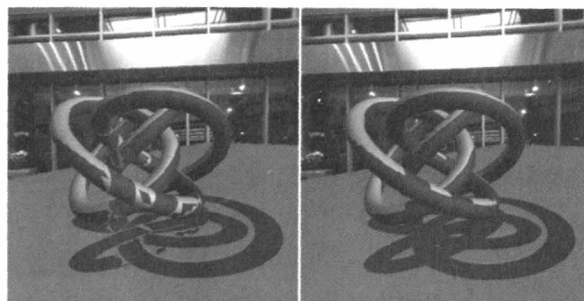
当阴影体重叠率较高或屏幕覆盖率较大时,阴影体的光栅化很消耗带宽,而在复杂场景中这两者均易出现。基于此及光束计算的要求,需要避免阴影

体之间的重叠。

在一个光源下,如果物体上的一点已在一个阴影体里,则被完全遮挡(不考虑半透明情况),即使它被多个阴影体覆盖,多次判断也不会使阴影检测结果更改,也即只需一个阴影体的信息就可判断出最终结果,不必绘制多个阴影体。顶点即使被遮挡也会根据向光性的判断生成阴影体,这是造成阴影体重叠的原因。借鉴阴影图方法:深度纹理中存储了离光源最近的点的深度,深度大于此的点被遮挡。引入这一特性,若利用深度已确定顶点在阴影中,则不再产生阴影体,这样只生成最接近光源的向光面构成的阴影体。与文献[15]中的阴影体相似,对于已被遮挡的物体不再生成阴影体,但是该方法只生成侧面多边形,阴影检测有局限性^[7],且不能参与光束计算;而本文得到的是全封闭的阴影体,可以计算光束被物体遮挡后的散射。

具体方法如下:在顶点着色器中对深度图用双线性插值进行纹理采样,把顶点深度同深度图中对应位置的数据进行比较,如果顶点被遮挡则拉伸,则向光面与背光面同时拉伸,退化四边形仍处于退化状态,相当于没生成阴影体。最终,拉伸的阴影体仅来自未被遮挡的向光面,不再重叠。

原始阴影体方法中顶点的拉伸只取决于顶点法向,而顶点法向在预处理中被赋予所在面的法向,因此一个三角形整体被移动或保留原位。增加以顶点为单位的基于深度图的判断后,一个向光三角形可能只有一或二个顶点被拉伸到远处,而且深度纹理的走样可能引起深度误差,会产生偏差,影响阴影体准确性,如图 4a 中的硬阴影边界所示。



a 以顶点为单位拉伸

b 以面为单位拉伸

图 4 不同方式拉伸阴影体产生的硬阴影

本文针对这一点提出如下改进:在顶点着色器中,同时读取顶点所在三角形的另外 2 个顶点的深度值,当且仅当整个三角形都被遮挡且背光才拉伸该顶点以生成阴影体,这样依然以三角形为单位,不

会出现误差.具体计算时,需要在预处理中把相邻顶点的位置保存为顶点属性(如颜色),绘制时直接将其传递给 GPU,以避免增加额外的时间开销查找或传输数据.图 4 b 所示为根据三角形整体判断后的效果,可以看出阴影体已被修正.

图 5 b,5 c 表明覆盖物体的阴影体数目从蓝色到红色按光谱顺序递增;图 5 b 所示为使用原始算法,离光源越远,光线穿过的物体越多,阴影体重叠

量越大;从图 5 c 可以看出,本文算法迅速减少重叠数目,只在物体边缘有重叠,基本消除了被遮挡物体的阴影体且没有破坏阴影体的结构,因而能在减少填充率的同时参与光束计算,提高总体绘制质量和速率.其他优化的阴影体算法或分割^[1]或重建^[16]阴影体,不适合参与光照计算,而基于可见性判断方法^[18-19]虽然不破坏体结构,但光束范围通常较小,涉及的阴影体数量不是很大,使用反而得不偿失.

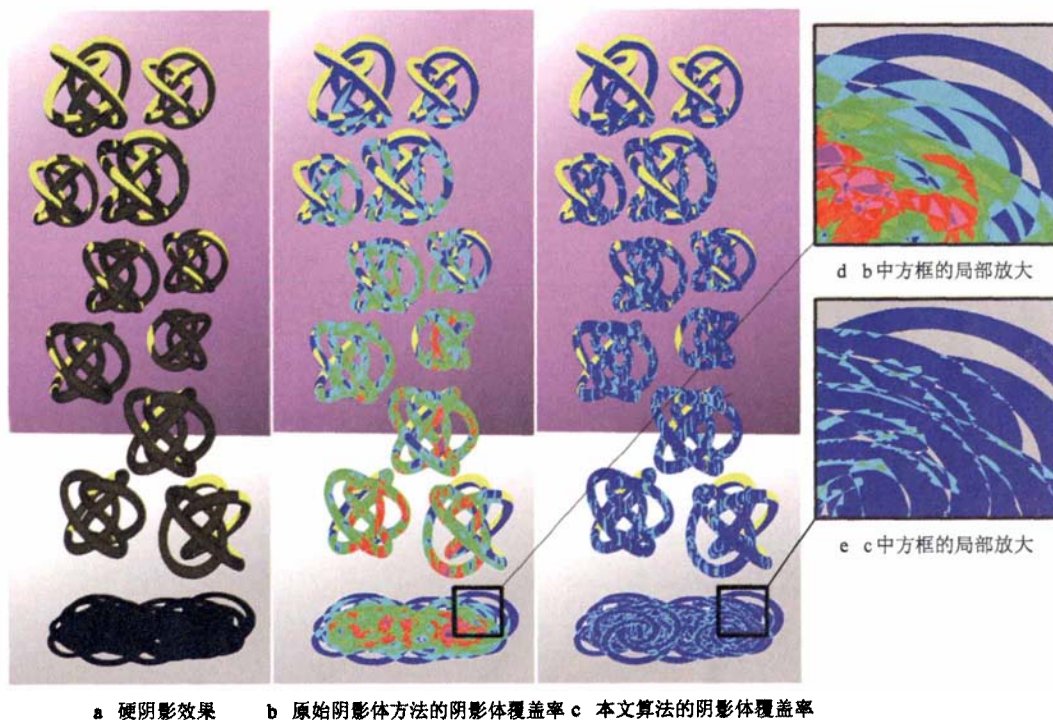


图 5 原始阴影体方法与本文算法的对比

由于光束体据光源构建,通过光源的方向、位置、照射范围等可直接判断一个点是否在光束照射范围内.因此若顶点在光束体外,则不产生参与光束计算的阴影体,如图 6 所示,其中白色线框为光束范围.对于超大规模场景还可参考可见性计算,把光束区域看作可视范围,预先剔除完全不在光束区域内物体的阴影体.

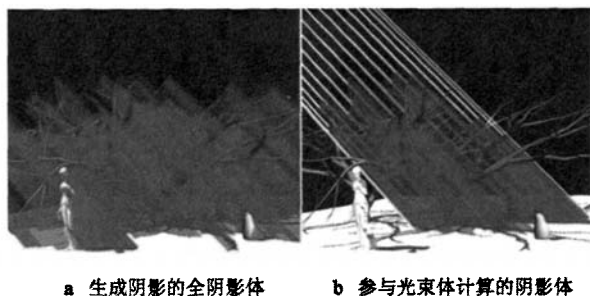


图 6 不同使用情境的阴影体范围

5 尘埃效果模拟

大气环境因空气湿润、含有杂质而较浑浊时,容易产生散射效果.已有的方法中尚未考虑这一现象,由于散射光束过于纯净,因此本文增加了对微尘的模拟.

空气中的分子不停地做布朗运动,对这些大粒子产生撞击力,使它们做近似布朗运动的无规则折线运动.在时间 t 内,粒子沿 x 轴运动的平均偏移量

$$\bar{x} = \sqrt{\frac{RT}{N} \times \frac{1}{3\pi\eta r}} \times t \quad (4)$$

其中, R 为理想气体常数, T 为绝对温度, N 为阿伏伽德罗常数, η 为空气的浑浊度, r 为散射粒子的半径.可见温度越高,粒子半径越小,运动越剧烈;随着空气的浑浊度增大,运动则趋于平缓,粒子的密度也

和空气的浑浊度成正比,空气越浑浊,粒子数目也越大,如图 7 所示.用粒子系统模拟尘埃运动,经过时间间隔 Δt ,粒子位置

$$p(t+\Delta t)=p(t)+(v_b+v_e)\times\Delta t.$$

其中, $p(t)$ 粒子为上一个时刻 t 的位置; $v_b=(\bar{x},\bar{y},$

$\bar{z})$ 为上述无规则运动引起的速度; $\bar{x},\bar{y},\bar{z}$ 分别为 3 个轴上单位时间内的粒子的平均偏移量,即式(4)中令 $t=1$ 的结果; v_e 为其他外力引起的速度,用小的随机向量模拟.粒子的初始位置 $p(0)$ 随机分布在可视空间内.



图 7 不同浑浊度空气中散射光束中的粒子

尘埃的绘制效果与尘埃的运动同样重要.粒子颜色取决于其半径,如果半径较大,则因光反射可见,看到的粒子为暗色;否则看到的是散射光颜色,且光强度与粒子半径相关.另外,对于不对称粒子,当向光面变化时光强度也会随之变化,并产生闪烁.粒子形状是不规则的,多为颗粒状、毛绒状和细绒线等,其中第一种的概率为 70%~80%,为各种形状不规则的细小杂质,用小随机多边形模拟;后者则是一定量小粒子的聚合体,用混合纹理实现.

6 实验结果与分析

我们将本文算法在 Intel Core 2 Duo CPU, nVIDIA 9500 GT, 3 GB 内存,512 MB 显存的 PC 机上进行测试.绘制时采用的光束采样分辨率为 512×512 ,帧缓冲区对象(frame buffer object, FBO)色彩缓冲和深度图的大小均为 1024×1024 .

室内外多种场景的部分模拟绘制效果如图 8~10 所示.选取 4 个面片规模分别为 50 k,100 k,150 k 和 200k 的场景(相同动态光源)进行数据收集分析.

从图 11 中各绘制部分所占比例可见,光束绘制最耗时,尤其对于室外光束范围很大、阴影体很少的 150 k 场景,所占时间比很大;尘埃绘制由于限制在屏幕范围内,故不受场景规模影响,绘制时间相对稳定.由于阴影体规模和场景的几何数据规模成正比,体绘制效率随着场景规模的增大而线性降低,如图 12 所示.插入退化四边形后的网格规模比原有模型网格增大近 4 倍,本文算法采用的是典型的空间换时间策略.深度图绘制只占了流程的很小比例,如图 11 中红色部分所示,约占 12%~23%,不仅不影响光束散射计算的速率,而且增强了阴影体、光束体的构建效果.



图 8 路灯下的散射光照模拟效果



图 9 日光射入室内场景的模拟效果



图 10 不同时段的光照照射下的室外场景模拟

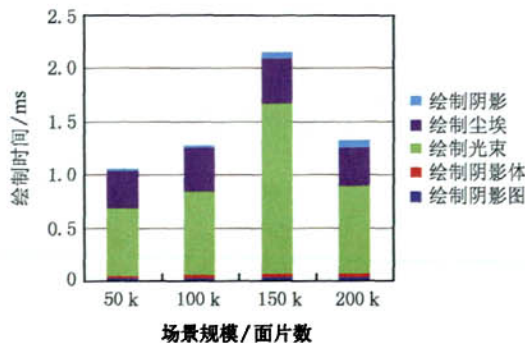


图 11 不同规模场景下各部分绘制的时间比

图 13 所示为所绘制阴影体的填充率,蓝色为采用普通阴影体算法,可以看出阴影体重叠次数多、高重叠次数的阴影体数量高;红色为采用本文算法,可以看出阴影体绘制的填充率总和明显下降,场景 1 中阴影体最多重叠 3 次,场景 2 中只有 2 次,极大地优化了阴影体的绘制,使其参与光束计算时效率也有所提高。

当物体面片大于光束范围时,所产生的阴影体会因为在光束体外而被剔除,出现光束穿过物体的

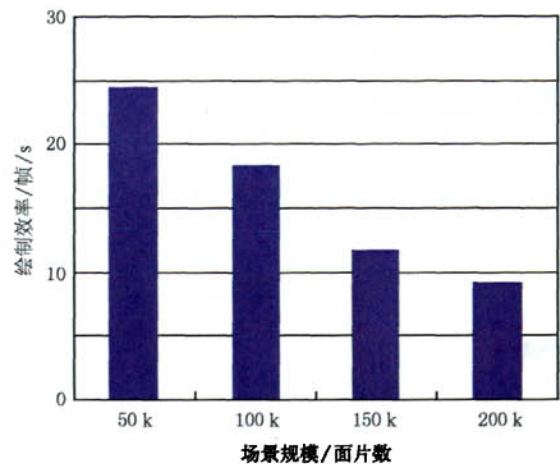


图 12 不同规模场景的帧速率

现象,可通过在预处理中细分模型、合理设置光束范围予以避免。深度图采样的失真会导致细小物体深度信息丢失,从而影响阴影体精确度,但光束效果是朦胧、浑浊的,不要求绝对精确,因此小的细节损失不影响效果,如图 10 中经过细树杈的光束效果良好(150 k 面片,11.7 帧/s)。

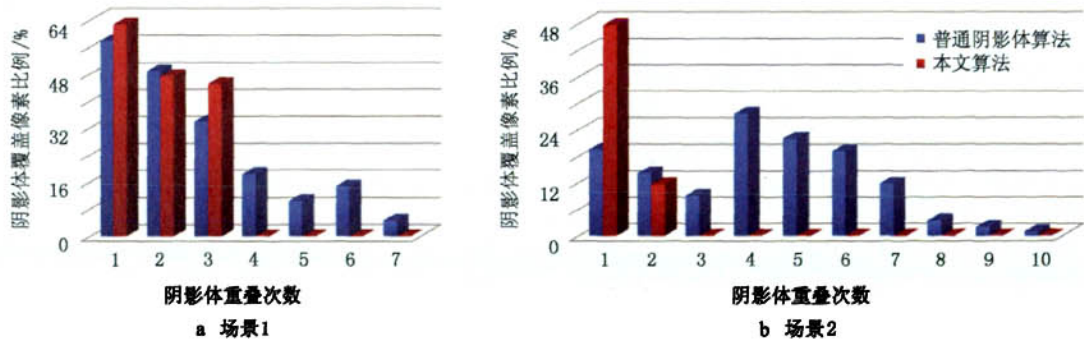


图 13 不同场景中阴影体绘制的填充率

6 总结与展望

本文研究了大气散射形成的自然光束及其中阴影的绘制,利用深度图进行优化剔除了原有算法中未考虑的阴影体、光束体的重叠或冗余部分,并充分

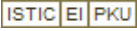
利用 GPU 的特性加速散射计算。本文算法生成的图像真实感高,效果接近全局光照明模型,而且对于动态光源下的场景具有较高绘制效率,可实时交互。该算法考虑了物体之间的遮挡关系、光束中物体形成的大气阴影,还添加了空气中因为光的散射而可见的尘埃粒子的模拟,很好地表现了场景中光影交错

的综合效果。

但是,当光源改变时需要重新绘制阴影体,而阴影体的绘制速率与场景规模成正比,因此对于多个动态光源或者复杂的超大规模动态场景,本文算法实时性会受到一定影响,如可以通过结合空间层次结构、遮挡查询、可见性计算等思路进行提高。对于空气中漂浮的各种粒子,绘制效率仍有提高空间,为了提高真实感,还可模拟它们随时间推移缓慢落到物体表面、继而形成累积浮尘的效果,这将是我们的下一步的工作。

参考文献(References):

- [1] Jarosz W, Zwicker M, Jensen H W. The beam radiance estimate for volumetric photon mapping [J]. *Computer Graphics Forum*, 2008, 27(2): 557-566
- [2] Dobashi Y, Yamamoto T, Nishita T. Interactive rendering of atmospheric scattering effects using graphics hardware [C] // *Proceedings of the of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Conference on Graphics Hardware*. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2002: 99-107
- [3] Sun B, Ramamoorthi R, Narasimhan S G, *et al.* A practical analytic single scattering model for real time rendering [C] // *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*. New York: ACM Press, 2005: Article No. 23
- [4] Li S, Wang G P, Wu E H. CAD and Graphics: a new approach for construction and rendering of dynamic light shaft [J]. *Computers and Graphics*, 2008, 32(6): 660-668
- [5] Crow F C. Shadow algorithms for computer graphics [C] // *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*. New York: ACM Press, 1977: 242-248
- [6] Bergeron P. A general version of crow's shadow volumes [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1986, 6(9): 17-28
- [7] Everitt C, Kilgard M J. Practical and robust stenciled shadow volumes for hardware-accelerated rendering [OL]. [2010-11-10]. <http://arxiv.org/pdf/cs.GR/030/002>
- [8] Lloyd B, Wendt J, Govindaraju N, *et al.* CC shadow volumes [C] // *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*. New York: ACM Press, 2004: 146-152
- [9] Brabec S, Seidel H P. Shadow volumes on programmable graphics hardware [J]. *Computer Graphics Forum*, 2003, 22(3): 433-440
- [10] Govindaraju N K, Lloyd B, Yoon S E, *et al.* Interactive shadow generation in complex environments [C] // *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*. New York: ACM Press, 2003: 501-510
- [11] Williams L. Casting curved shadows on curved surfaces [C] // *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*. New York: ACM Press, 1978: 270-274
- [12] Stamminger M, Drettakis G. Perspective shadow maps [C] // *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*. New York: ACM Press, 2002: 557-562
- [13] Zhang F, Sun H Q, Xu L L, *et al.* Parallel-split shadow maps for large-scale virtual environments [C] // *Proceedings of the ACM International Conference on Virtual Reality Continuum and its Applications*. New York: ACM Press, 2006: 311-318
- [14] Scherzer D, Jeschke S, Wimmer M. Pixel-correct shadow maps with temporal reprojection and shadow test confidence [C] // *Proceedings of Eurographics Symposium on Rendering*. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2007: 45-50
- [15] McCool M D. Shadow volume reconstruction from depth maps [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2000, 19(1): 1-26
- [16] Sen P, Cammarano M, Hanrahan P. Shadow silhouette maps [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(3): 521-526
- [17] Chan E, Durand F. An efficient hybrid shadow rendering algorithm [C] // *Proceedings of the 15th Eurographics Workshop on Rendering Techniques*. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2004: 185-196
- [18] Koltum V, Chrysanthou Y, Cohen-Or D. Virtual occluders: an efficient intermediate PVS representation [C] // *Proceedings of the 11th Eurographics Workshop on Rendering Techniques*. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2000: 59-70
- [19] Wonka P, Wimmer M, Schmalstieg D. Visibility preprocessing with occluder fusion for urban walkthroughs [C] // *Proceedings of Eurographics Workshop on Rendering Techniques*. Aire-la-Ville: Eurographics Association Press, 2000: 71-82

作者: 李思宇, 李胜, 王衡, 汪国平, Li Siyu, Li Sheng, Wang Heng, Wang Guoping
作者单位: 北京大学信息科学技术学院机器感知与智能教育部重点实验室, 北京, 100871
刊名: 计算机辅助设计与图形学学报 
英文刊名: JOURNAL OF COMPUTER-AIDED DESIGN & COMPUTER GRAPHICS
年, 卷(期): 2011, 23(7)
被引用次数: 1次

参考文献(19条)

1. Jarosz W; Zwicker M; Jensen HW [The beam radiance estimate for volumetric photon mapping](#) [外文期刊] 2008(2)
2. Dobashi Y; Yamamoto T; Nishita T [Interactive rendering of atmospheric scattering effects using graphics hardware](#) 2002
3. Sun B; Ramamoorthi R; Narasimhan S G [A practical analytic single scattering model for real time rendering](#) 2005
4. Li S; Wang G P; Wu E H [CAD and Graphics: a new approach for construction and rendering of dynamic light shaft](#) 2008(06)
5. Crow F C [Shadow algorithms for computer graphics](#) 1977
6. Bergeron P [A general version of crow's shadow volumes](#) 1986(09)
7. Everitt C; Kilgard M J [Practical and robust stenciled shadow volumes for hardware-accelerated rendering](#) 2010
8. Lloyd B; Wendt J; Govindaraju N [CC shadow volumes](#) 2004
9. Stefan Brabec; Hans-Peter Seidel [Shadow Volumes on Programmable Graphics Hardware](#) [外文期刊] 2003(3)
10. Govindaraju N K; Lloyd B; Yoon S E [Interactive shadow generation in complex environments](#) 2003
11. Williams L [Casting curved shadows on curved surfaces](#) 1978
12. Stamminger M; Drettakis G [Perspective shadow maps](#) 2002
13. Zhang F; Sun H Q; Xu L L [Parallel-split shadow maps for large-scale virtual environments](#) 2006
14. Scherzer D; Jeschke S; Wimmer M [Pixel-correct shadow maps with temporal reprojection and shadow test confidence](#) 2007
15. McCool MD. [Shadow volume reconstruction from depth maps](#) [外文期刊] 2000(1)
16. Pradeep Sen; Mike Cammarano; Pat Hanrahan [Shadow Silhouette Maps](#) [外文期刊] 2003(3)
17. Chan E; Durand F [An efficient hybrid shadow rendering algorithm](#) 2004
18. Koltum V; Chrysanthou Y; Cohen-Or D [Virtual occluders: an efficient intermediate PVS representation](#) 2000
19. Wonka P; Wimmer M; Schmalstieg D [Visibility preprocessing with occluder fusion for urban walkthroughs](#) 2000

引证文献(1条)

1. 袁赞, 唐玉蕾, 吴志红 [基于光线投射算法的体积光实时绘制](#) [期刊论文] - 计算机工程与设计 2014(07)

引用本文格式: 李思宇, 李胜, 王衡, 汪国平, Li Siyu, Li Sheng, Wang Heng, Wang Guoping [利用深度图优化的自然光束体构建与绘制](#) [期刊论文] - 计算机辅助设计与图形学学报 2011(7)