

6-5-2020

CoverageDetecting Algorithm Based on Sub-Pixel GeometricPrimitives

Li Hua

1. School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun130022, China;;2. National Local combined Engineering Research Center of Special Film Technology and Equipment, Changchun130000, China;

Huamin Yang

1. School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun130022, China;;2. National Local combined Engineering Research Center of Special Film Technology and Equipment, Changchun130000, China;

Han Cheng

1. School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun130022, China;;2. National Local combined Engineering Research Center of Special Film Technology and Equipment, Changchun130000, China;

Jianping Zhao

1. School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun130022, China;;2. National Local combined Engineering Research Center of Special Film Technology and Equipment, Changchun130000, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

CoverageDetecting Algorithm Based on Sub-Pixel GeometricPrimitives

Abstract

Abstract: A hard shadow anti-aliasing rendering algorithm with sub-pixel accuracy was proposed. The method focused on addressing aliasing artifacts of the shadow map due to the sample density mismatching between light space and camera space. The method extracted geometric primitives from the scene's front view from a light source and stored scene visible triangles with fixed-size and local approximation using conservative rasterization; An algorithm was proposed to detect the covered plurality primitives in one texel based on the texel's vertices, and reconstruct testing depth of shadow ray precisely. The experiment results showed that covered primitives' detection algorithm was able to identify more than 90% triangles implicated in one texel. This method reduced jagged shadows effectively compared with standard shadow mapping.

Keywords

shadow map, hard shadows, sub-pixel, anti-aliasing, primitives

Recommended Citation

Li Hua, Yang Huamin, Han Cheng, Zhao Jianping. CoverageDetecting Algorithm Based on Sub-Pixel GeometricPrimitives[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(11): 2723-2731.

基于亚像素级几何图元覆盖检测算法

李华^{1,2}, 杨华民^{1,2*}, 韩成^{1,2}, 赵建平^{1,2}

(1. 长春理工大学计算机科学技术学院, 长春 130022; 2. 特种电影技术及装备国家地方联合工程研究中心, 长春 130000)

摘要: 为减少、消除由于光照空间和相机空间采样密度不匹配造成的走样现象, 提出一种亚像素级准确的硬阴影反走样绘制方法。该方法从光源视角抽取场景前表面的几何图元, 利用保守光栅化方法存储固定大小、局部近似的场景可见三角形; 计算纹素的顶点坐标, 检测跨纹素几何图元, 精确重建阴影测试深度。测试实验表明, 几何图元覆盖检测算法能准确检测出纹素中包含的90%以上的隐含三角形, 算法有较好的适应性, 能有效减少阴影图算法的走样问题。

关键词: 阴影图; 硬阴影; 亚像素; 反走样; 图元

中图分类号: TP391.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017)11-2723-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201711018

CoverageDetecting Algorithm Based on Sub-Pixel GeometricPrimitives

Li Hua^{1,2}, Yang Huamin^{1,2*}, Han Cheng^{1,2}, Zhao Jianping^{1,2}

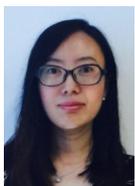
(1. School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun130022, China;
2. National Local combined Engineering Research Center of Special Film Technology and Equipment, Changchun130000, China)

Abstract: A hard shadow anti-aliasing rendering algorithm with sub-pixel accuracy was proposed. The method focused on addressing aliasing artifacts of the shadow map due to the sample density mismatching between light space and camera space. The method extracted geometric primitives from the scene's front view from a light source and stored scene visible triangles with fixed-size and local approximation using conservative rasterization; An algorithm was proposed to detect the covered plurality primitives in one texel based on the texel's vertices, and reconstruct testing depth of shadow ray precisely. The experiment results showed that covered primitives' detection algorithm was able to identify more than 90% triangles implicated in one texel. This method reduced jagged shadows effectively compared with standard shadow mapping.

Keywords: shadow map; hard shadows; sub-pixel; anti-aliasing; primitives

引言

阴影是虚拟场景绘制中重要的视觉元素, 实时的阴影绘制技术一直是计算机图形学研究的热点。



收稿日期: 2016-05-31 修回日期: 2016-07-14;
基金项目: 吉林省重点科技攻关项目(20140204050GX, 20140204009GX), 吉林省重点科技成果转化项目(20130303011GX), 长春市重大科技攻关计划(14KG008), 吉林省省级产业创新专项资金项目(2016C091);
作者简介: 李华(1977-), 女, 北安, 博士生, 副教授, 研究方向为真实感绘制及虚拟现实。

目前, 交互式阴影绘制技术大致上可分为三类: 光线跟踪技术、基于几何体的技术和基于图像的技术。其中, 光线跟踪^[1]方法直接生成光源到场景采样点的求交测试光线, 该方法能非常精确的绘制硬阴影效果, 但大量的求交计算无法满足交互式应用的要求。阴影体^[2]算法通过识别的物体投射的边缘检测采样点亮度, 该方法生成的阴影轮廓清晰, 真实感强, 但其填充率高, 计算效率依赖于场景的复杂性, 难以满足交互式需求。基于图像的技术阴影图^[3]

算法是目前应用最广泛的方法,该方法先利用 z-buffer 存储光源视角的最小深度纹理,再对相机视角的每个采样点进行深度测试,判断采样点是否处于阴影中。阴影图算法的计算时间与场景复杂性无关,在目前的硬件渲染管线中得到广泛的支持。但由于受阴影图分辨率的限制和透视投影等因素的影响,生成的阴影容易产生走样。因此,反走样是阴影图算法在实时应用方面的主要研究内容。

亚像素精度是指相邻两像素之间细分情况,即每个像素被分为更小的单元,达到亚像素级精度的阴影绘制是阴影反走样理想的目标。在最近提出的反走样算法中,亚像素阴影图(SPSM, Sub-Pixel Shadow Mapping)^[4]提出存储场景表面的几何信息,并利用几何信息准确的恢复采样点的深度,进而实现亚像素级的阴影绘制。但在该方法中一个纹素只存储一个三角形信息,导致深度重建会出现错误。本文针对亚像素阴影图算法进行改进,提出一种基于几何阴影图的跨纹素几何图元检测算法,实现亚像素级准确的硬阴影绘制。

1 前期工作

提高阴影图的分辨率可以减少走样,但计算效率会大大降低,且目前图像硬件所支持的最大分辨率基本限制在 4096×4096 之内。过洁等^[5]叙述了阴影图产生走样的原因:深度测试是阴影图算法的主要过程,在深度测试过程中,需要对阴影图进行采样,如果阴影图的分辨率低于采样需求,就会产生典型的锯齿状阴影边界。目前,在阴影图反走样方面已有大量的相关研究成果, Scherzer 等^[6]和 Eisemann 等^[7]对各种阴影图反走样算法做了详细分析;在此,将讨论与本文方法相关的一些反走样算法。透视阴影图(PSM, Perspective shadow map)^[8]及光照空间透视投影阴影图(LiSPSMs, Light space perspective shadow maps)^[9]根据矩阵转换依赖于观察视角的原理,在透视投影后的空间生成阴影图,使得靠近观察者的物体有更高的分辨率,远离观察者的物体保持低分辨率,在平衡计算复杂度的前提

下,达到减少走样的目的;采样分配阴影图(SDSM, Sample distribution shadow maps)^[10]提出一种对深度采样的重新分配算法,同样可以提高近观察者的物体分辨率;自适应阴影图(ASM, Adaptive shadow maps)^[11]提出建立一种层次网格结构存储多个不同分辨率的阴影图,对图象的不同位置用不同的分辨率进行深度测试,该方法在匹配分辨率阴影图(RMSM, Resolution-matched shadow maps)^[12]中被扩展到动态场景;平行分割阴影图(PPSM, Parallel split shadow maps)^[13]提出把视锥体分割成平行的子阴影图,对每个分层子图用不同分辨率渲染;T.Aila 等提出的 AFSM(Alias free shadow maps)算法^[14]先从相机视角确定可见像素,再把可见像素由屏幕空间转换到光照空间,以此减少深度测试数量,但该方法不能被现代图形硬件广泛支持;S. Hertel 等^[15]利用保守光栅化方法生成全部像素,然后对阴影边界实施光线跟踪并利用 GPU 加速;扭曲阴影图(DSM, Distorted Shadow mapping)^[16]缩减了完全光照或完全阴影区域的信息存储而扩大阴影轮廓区域的采样信息;Dai 等^[17]通过深度偏移的自适应改进,改善偏移走样;可重建几何阴影图(RGSM, Reconstructable geometry shadow maps)^[18]抽取和识别场景表面的几何三角形,用三角形图元重建的深度值测试采样点的深度,实现了深度测试从离散到连续的转变;亚像素阴影图(SPSM)^[4]在可重建几何阴影图的基础上将采样点分类,确定被照亮和处于阴影的两类像素点,再对第三类不确定的采样点搜索相邻纹素进一步测试深度,达到亚像素级反走样的目的。该方法有效的改进了可重建几何阴影图算法在阴影边界可能出现的三角形遗漏情况,但由于 SPSM 算法在一个纹素中只存储一个三角形信息,因此存在深度重建和测试的不准确。本文算法将在保守几何阴影图策略的基础上,利用纹素的顶点坐标检测跨纹素的几何图元,在不明显增加存储成本的前提下,建立纹素的多个三角形索引关系,实现精确的亚像素级反走样的目的。

2 保守几何阴影图

2.1 阴影图绘制原理

标准阴影图(SM, Shadow Mapping)^[3]算法最早由 Lance Williams 提出。算法分为两个阶段: 第一阶段, 从光源视角生成场景中可见点的深度, 并在 z-buffer 中以纹理的方式存储; 第二阶段, 从相机视角绘制场景, 将场景中的每个采样点的坐标转换到光照空间, 读取阴影图中对应的深度值进行比较, 如果采样点的实际深度大于阴影图中对应的深度值, 则采样点处于阴影之中, 反之该点处于阴影之外(被照亮)。图 1 为阴影图算法的基本原理, 其中 d_p 为采样点的深度值, d_z 为对应光照空间的深度值, 只有当 $d_p \leq d_z$ 时, 采样点才会被照亮。阴影图算法走样的主要原因是其分辨率低于采样需求, 受数值精度和深度偏移的影响, 阴影图算法也存在光渗和画面时间闪烁的问题。本文主要针对阴影边界的锯齿走样, 提出解决办法。图 2 分析了阴影图走样的主要原因^[19]。

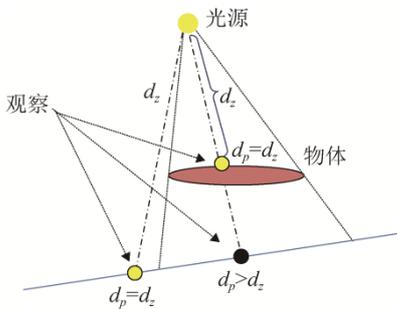


图 1 阴影图原理示意图
Fig.1 Diagram of shadow map

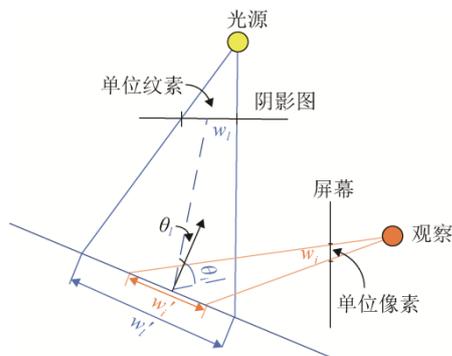


图 2 阴影图走样原因
Fig.2 Illustration of aliasing in shadow map

图 2 所示为一个大小为 w_i 的屏幕单位像素和一个大小为 w_l 阴影图单位纹在场景表面投影相交于同一区域, 单位像素的投影宽度为 w'_i ; 单位纹素的投影宽度为 w'_l 。

当 $w'_l > w'_i$, 即一个纹素对应多个像素采样点, 就会产生锯齿走样。关于透视走样和投影走样, 可用公式(1)表示, 设走样因子为 m , 则:

$$m = \frac{w'_l}{w'_i} \approx \frac{w_l \cos \theta_l}{w_i \cos \theta_i} \quad (1)$$

其中: θ_l 和 θ_i 分别为采样点表面法向量与该像素中心和该纹素中心的夹角。 w_l / w_i 项为透视走样, 其独立于场景的几何信息, 只与相机和光源的相对位置有关。当 $w_l / w_i = 1$ 时, 透视走样消失; $\cos \theta_l / \cos \theta_i$ 项为投影走样, 其依赖于场景表面方向与投影像素(或纹素)的夹角, 当 $\cos \theta_l / \cos \theta_i = 1$ 时, 可消除投影走样。

2.2 保守光栅化算法

在图元光栅化阶段, 标准硬件光栅化操作只允许对有图元经过中心点的像素生成片元。细小的三角形及只覆盖部分像素的图元(未覆盖像素中心)则无法实行像素的光栅化。而保守光栅化算法(Conservative Rasterization)^[20]通过三角形扩展, 能实现对每个有图元经过的纹素都执行光栅化操作。如图 3 所示。

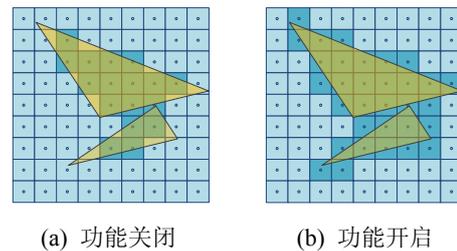


图 3 保守光栅化功能开启与关闭对比图
Fig.3 Comparison of conservative rasterization turned on and turned off.

深度片段的连贯性是识别三角形轮廓和亚像素级深度测试的关键。为避免近阴影边缘的检测错误, 本算法将存储最小的保守化深度、三角形的 2D 顶点坐标、三角形 ID 及法向量信息。

2.3 保守几何阴影图创建

创建保守几何阴影图，主要步骤如下：

- 从光源视角开启深度测试生成前表面可见点；
- 并识抽取别可见图元信息；
- 根据顶点坐标计算三角形法向量；
- 压缩存储最小保守化深度，法向量及三角形 ID。

由于目前图形硬件渲染管线只允许在一个 RGBA 纹理图中存储 4 位全精度浮点类型或 8 位半精度浮点类型，所以存储三个 3D 顶点信息将至少需要生成两个渲染目标(Render target)，本文采用压缩存储方法^[4]，在保守光栅化基础上存储固定大小、局部近似的表面可见三角形，即距离纹素中心最近的三角形。如图 4 所示，在 32 位 RGB 分量中分别存储三角形的 2D 顶点坐标 $v_{0.xy}$, $v_{1.xy}$, $v_{2.xy}$, Alpha 通道的高 16 位存储深度 depth, Alpha 通道的低 16 位存储三角形法向量 normal 和 ID 及 ID 索引。

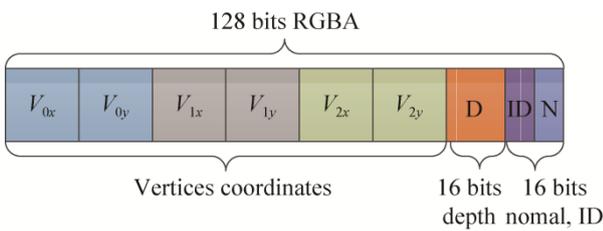


图 4 RGBA 缓存存储结构
Fig.4 Structure of RGBA buffer

3 几何图元覆盖检测

几何图元覆盖检测的目的是确定一个纹素中覆盖的多个三角形，进而确定一个采样点的确切投影平面。如图 5 所示，图中每个单元格代表一个纹素，设采样点 p_1 的投影纹素为 $Texel_1$ 。在已有的方法中^[4]，一个纹素只存储距离中心最近的一个三角形信息。例如，纹素 $Texel_1$ 中存储的是 ΔT_5 的坐标信息，而实际上 p_1 的投影三角形为 ΔT_3 (ΔT_3 信息存储在纹素 $Texel_2$ 中)，因此，利用 ΔT_5 重建 p 的深度进行深度测试是错误的。

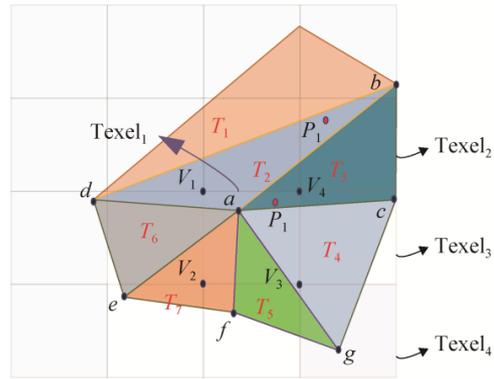


图 5 一个纹素包含多个三角形示意图
Fig.5 A texture contains multiple triangles

3.1 纹素顶点坐标检测及索引

通过阴影图的大小可计算出每个纹素的中心坐标，然后线性扫描保守几何阴影图，如图 6 所示，扫描线沿着平行于对角线的方向进行，每两个纹素中心连线的中点即纹素的顶点(小圆点所示)。

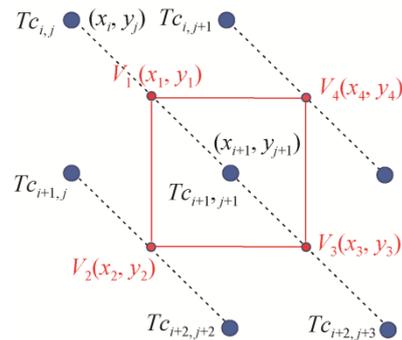


图 6 纹素顶点坐标计算示意图
Fig.6 Calculation of vertex coordinates

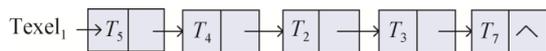
已知纹素 $Texel_1$ 的中心坐标 T_c 在任意扫描线上，纹素顶点 $V_1(x_1, y_1)$ 坐标计算如公式(2)所示：

$$V_1(x_1, y_1) \begin{cases} x_1 = \frac{x_i + x_{i+1}}{2} \\ y_1 = \frac{y_j + y_{j+1}}{2} \end{cases} \quad (2)$$

其中： x_i 和 y_i 是一个与 V_1 相邻的纹素的中心坐标。确定纹素顶点坐标后，读取以 T_c 为中心的 8 个(侧边纹素小于 8 个)相邻纹素的三角形坐标及 ID 信息，运用重心法判断 $V_1(x_1, y_1)$ 点是否在三角形的 2D 投影平面内。如果 V_1 在 Δabc 内，则应满足方程(3)：

$$V_1 = a + u * (c - a) + v * (b - a) \quad (3)$$

其中: $u \geq 0$, $v \geq 0$ 且 $u + v \leq 1$ 。当 $u=0$, $v=0$ 时对应 a 点, $u=0$, $v=1$ 时对应 b 点, $u=1$, $v=0$ 时对应 c 点。建立纹素 T_c 的三角形索引链表, 由于相关的三角形信息已存储在相邻的纹素中, 而且节点数量最多为 4 个, 因而不需要额外增加存储空间, 只需在 RGBA 存储结构中添加 ID 的索引信息。例如, 纹素 $Texel_1$ 对应的三角形链表为:



其数据结构为:

```

struct triangle
{
    int ID;
    struct triangle *next;
} triangle
  
```

3.2 深度重建

第二阶段的渲染从相机视角出发, 对屏幕的每个像素点采样并投影到光照空间。已知屏幕空间采样点 $p(p_x, p_y)$, 经过坐标转换后投影纹素为 $Texel_1$, 读取 $Texel_1$ 的索引信息, 依次测试相关三角形。如图 5 所示, 最终确定 p 点的投影平面为 ΔT_3 。利用 ΔT_3 的几何信息计算 p 点的测试深度, 首先, 根据 ΔT_3 的法向量计算表面斜率 d_z / d_x 和 d_z / d_y , 设 d_p 为 P 的测试深度, 则如公式(4)所示:

$$d_p = \tilde{z} + (p_x - c_x) \frac{d_z}{d_x} + (p_y - c_y) \frac{d_z}{d_y} \quad (4)$$

其中: \tilde{z} 为纹素的最小保守化深度。设 d_p 为 p 点的实际深度(光源到 p 点的距离), 如果 $d_p \leq d_p$ 则 p 为亮点, 否则 p 处于阴影中。

3.3 边界恢复及反走样

本算法虽然利用了保守光栅化功能, 识别了跨越纹素的三角形, 却仍然有小三角形丢失(相邻的纹素均未保存), 这在任何一种绘制方法中都是难以避免的。但是通过有效的边界恢复算法, 可以进一步提高阴影质量。边界恢复的步骤如下:

(1) 对采样点所在纹素的索引列表里的三角形顶点做正切投影。

(2) 比较投影点与三角形顶点序列的垂直投影距离, 判断 p 位于“界内”或“界外”。

如 p 点位置所在为“界内”需对三角形进行填充, 恢复边界。通常情况下, 因为遗漏的都是很细小的三角形, 所以在正切投影中不会跨越多个纹素。设 p 点的正切投影点为 p' , 则假设 p 点所在三角形的顶点在正切投影线上与投影点 p' 是线性相近的。根据这个思想, 采用二次线性探测的方法对 p' 附近的点分别进行检测, 确定 p 所在的三角形, 填充该三角形为阴影区域。

进行边界恢复对细小几何图元和大量重叠的几何图元构成的目标(如树叶, 草)的绘制尤为关键, 否则阴影将会产生缺失或间断, 如图 9(b)所示。为全面衡量算法对各种复杂场景及不同分辨率的阴影图有较好的适应性, 本文利用不同模型进行了测试。

4 实验

算法实验环境为 Intel®Xeon(R) CPU E5620@双核 2.40GHz, NVIDIA GeForce GTX580。利用 GLSL 语言及 CUDA 平台实现。实验对比了标准阴影图(SM)、亚像素阴影图(SPSM)以及本文的准确亚像素绘制法。

如图 7 所示的 Model ball 模型绘制, (a)为标准阴影图(SM)绘制效果, (b)为本文的准确亚像素绘制效果, 可见标准阴影图由于阴影图分辨率和屏幕分辨率的不匹配, 生成的阴影锯齿走样明显, 甚至很难达到像素级别; 而本文的亚像素级阴影绘制算法实现了细分像素。为测试本文算法对高细节及重叠的几何图元的阴影绘制效果, 实验绘制了 Tree 模型和 Butterfly 模型(模型来自 TF3DM), 并与已有的亚像素阴影图算法 SPSM 进行了对比, 如图 8 和 9 所示。

模型 Tree 为多重叠性的几何图元代表, 图 8(a)所示为 SPSM 算法的亚像素级绘制效果; 图 8(b)所示为本文算法对重叠性的几何图元的细节处理效果, 从图中可以看出, 本文算法能很好的处理重叠几何图元。

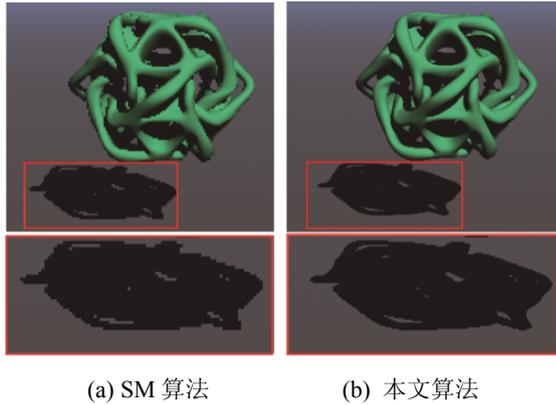


图 7 Ball 模型的绘制效果, 阴影图分辨率均为 1024×1024 .
Fig.7 Ballmodel drawingeffect, the resolution of shadow map is 1024×1024 .

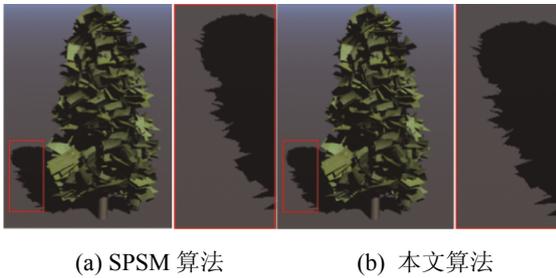


图 8 Tree 绘制效果对比
Fig.8 Comparison of Tree rendering effects

Butterfly 为细小几何图元模型代表, 图 9 中(a)为测试模型, (b)为标准阴影图算法, 由于分辨率不足, 可见明显的阴影缺失和线条间断; (c)为 SPSM 算法, (d)为本文算法, 阴影图分辨率均为 1024×1024 。由于本文方法实现了跨纹素几何图元的检测, 增加了三角形覆盖区域的阴影绘制面积, 因此能很好的表现细阴影线条。

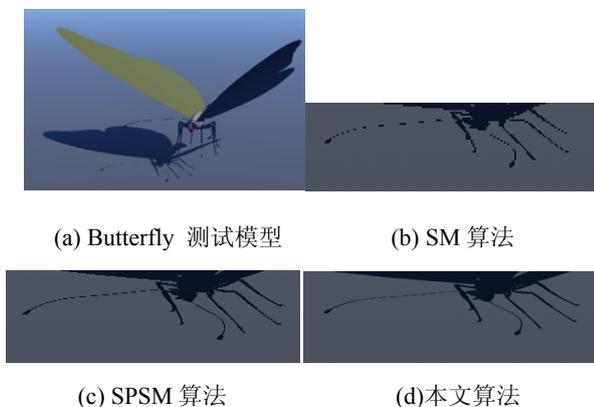
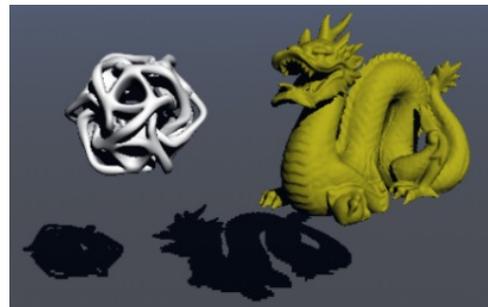


图 9 Butterfly 模型绘制效果对比图
Fig.9 Contrast diagram of Butterfly model drawingeffect

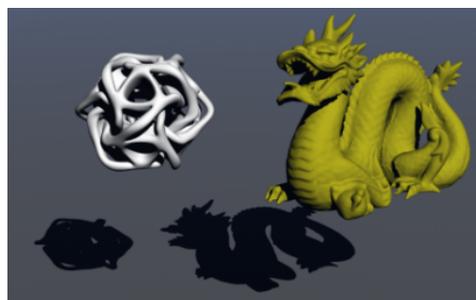
图 10 所示为 SM、SPSM 以及本文算法的绘制对比, 阴影图分辨率均为 1024×1024 , 图 11 分别为 SM 与 SPSM、SM 与本文算法以及 SPSM 与本文算法像素差对比; 从图中可以看出, SPSM 和本文算法都在绘制质量上比标准阴影图有较大改进, 但是运算时间成本也相应增加, 以 YeahRight 模型为例, SPSM 算法与标准阴影图的时间消耗增量范围是 $81\% \sim 27\%$ ^[4]。表 1 对比了 Dragon 模型在不同阴影图分辨率下的绘制时间(单位: ms)。与标准阴影图相比本文算法的时间消耗虽有增加, 但随着采样分辨率的增加, 时间消耗的增量逐渐减少, 时间消耗增量从 52% 降低至 16% 。



(a) SM 算法 1024×1024



(b) SPSM 算法 1024×1024



(c) 本文算法 1024×1024

图 10 SM、SPSM 算法与本文算法对比
Fig.10 Comparison of SM, SPSM algorithm and ours



(a) SM 与 SPSM 像素差



(b) SM 与本文算法像素差



(c) SPSM 与本文算法像素差

图 11 SM、SPSM 算法与本文算法像素差
Fig.11 Pixel difference of SM, SPSM algorithm and ours

表 1 本文算法与标准阴影图绘制时间对比
Tab.1 Comparison of the rendering time between our algorithm and standard shadow map

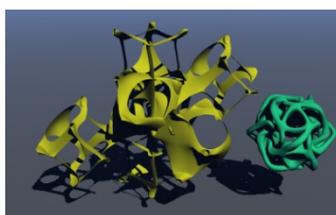
阴影图大小	标准阴影图 (T_1 /ms)	本文算法 (T_2 /ms)	$(T_2-T_1)/T_1$ (%)
512×512	16.9	25.7	52
1024×1024	32.8	42.8	30
2048×2048	34.4	44.1	28
4096×4096	67.3	78.4	16

表 2 所示为不同测试模型的 SM、SPSM 以及本文算法在 1024×1024 和 2048×2048 分辨率下的计算时间对比, Dragon 模型在本算法下的计算时间与 SPSM 相比增加了 0.7%~1.1%, Ball 模型的计算时间增加了 1.8%~5.5%, Butterfly 模型和 Tree 模型的计算时间增加了 3.2%~3.8%以及 1.7%~5.4%。虽然计算时间有少量增加,但本文算法的阴影质量在细节上比 SPSM 更准确。最后,实验对比了本文算法在不同分辨率下的绘制效果。如图 12 所示,其中(a)图分辨率为 512×512, (b)图分辨率为 1024×1024, (c)图分辨率为 2048×2048。可以看出,本文算法在细线条几何图元和重叠几何图元的阴影反走样方面都较已有的方法处理的更精确。

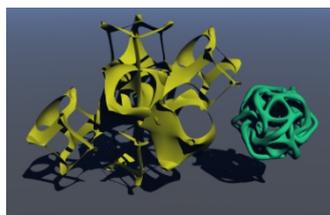
表 2 本文算法与标准阴影图(SM)和亚像素阴影图(SPSM)的计算时间对比

Tab.2 Comparison of computation time of four algorithm, standard shadow map (SM) and sub pixel shadow map (SPSM)/ms

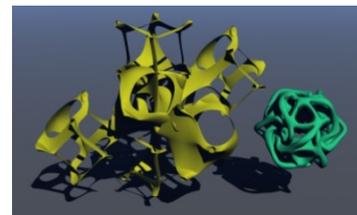
模型	顶点	多边形	标准阴影图(SM)		亚像素阴影图(SPSM)		本文算法(Ours)	
			1024×1024	2048×2048	1024×1024	2048×2048	1024×1024	2048×2048
Dragon	1527728	2459294	32.8	34.4	42.5	43.6	42.8	44.1
Butterfly	213182	73138	15.7	17.1	24.6	26.3	25.4	27.3
Tree	59406	46036	11.1	16.9	16.9	18.5	17.2	18.9
Ball	19872	39936	7.6	9.4	10.7	12.6	10.9	13.3



(a) 分辨率为 512×512



(b) 分辨率为 1024×1024



(c) 分辨率为 2048×2048

图 12 本文算法在不同分辨率下的绘制效果
Fig.12 Drawing effect of our algorithm at different resolutions

从理论上讲,算法改进不仅限制在硬阴影的锯齿走样,对于受数值精度和深度偏移影响的光渗和画面闪烁现象,通过该算法的精确深度重建也得到了改善。

5 结论

提出利用保守光栅化方法存储固定大小、局部近似的场景可见三角形,利用基于纹素顶点的检测算法识别同一纹素中覆盖的多个三角形,建立三角形的索引结构;利用亚像素级准确的深度测试和边界恢复算法获得了高质量的硬阴影绘制效果。算法达到了预期理想目标,边界恢复反走样具有较高的时间一致性。当然,该算法仍存在不足之处:在效率上低于标准阴影图算法。尤其对于大规模复杂场景,几何图元数量呈现指数级增加,且当一个纹素中的重叠三角形个数大于 4 时,算法还无法全部检测到。今后的工作将对大规模复杂场景的计算效率进行研究,对几何阴影图的并行化扫描方法^[21]进行改进,提高算法效率和准确性,并将其扩展到基于反射阴影图的近似间接光照计算中。

参考文献:

- [1] Whitted T. An improved illumination model for shaded display[C]. Los Angeles, California, USA, Proceedings of International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 2005, (4): 343-349.
- [2] Crow F C. Shadow algorithms for computer graphics[C]. Los Angeles, California, USA. Proceedings of ACM SIGGRAPH, 1977:242-248.
- [3] Williams L. Ca Shadow algorithms for computer graphics ting curved shadows on curved surfaces[C]. Los Angeles, California, USA. Proceedings of the 5th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1978, (12)3:270-274.
- [4] Pascal L, Jean-Eudes M, Gaël S. Sub-Pixel Shadow Mapping[C]. San Francisco, USA. Proceeding of the 18th Meeting of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, 2014:103-110.
- [5] 过洁, 徐晓阳, 潘金贵. 基于阴影图的阴影生成算法研究现状[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(4): 579-591.
Guo J, Xu X Y, Pan JG. Present status of shadow generation algorithms based on shadow maps[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2010, 22(4): 579-591.
- [6] Scherzer D, Wimmer M, Purgathofer W. A Survey of real-time hard shadow mapping methods[J]. Computer Graphics Forum(S1467-8659). Black well publishing Ltd, 2011, 30(1): 169-186.
- [7] Eisemann E, Schwarz M, Assarsson U, et al. Real-time shadows[M]. Boca Raton, Florida(S0458-3035). CRC Press, 2011.
- [8] Stamminger M, Drettakis G. Perspective shadow maps[C]. New York. Proceedings of ACM Transactions on Graphics (TOG). ACM, 2002, 21(3):557-562.
- [9] Wimmer M, Scherzer D, Purgathofer W. Light space perspective shadow maps[C]. San Francisco, California. Proceedings of Eurographics Symposium on Rendering, 2004:143-151.
- [10] Lauritzen A, Salvi M, Lefohn A. Sample distribution shadow maps[C]. San Francisco, CA. Proceedings of Symposium on Interactive 3D Graphics and Games. ACM, 2011: 97-102.
- [11] Fernando R, Fernandez S, Bala K, et al.. Adaptive shadow maps[C]. Los Angeles, California, USA. Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2001: 387-390.
- [12] Lefohn A E, Sengupta S, Owens J D. Resolution-matched shadow maps[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG) (S0730-0301), 2007, 26(4): 20.
- [13] Zhang F, Sun H Q, Xu L L, et al. Parallel split shadow maps for large-scale virtual environments[C]. Hong Kong. Proceedings of the 2006 ACM International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications, 2006: 311-318.
- [14] Aila T, Laine S. Alias-free shadow maps[C]. Norrköping, Sweden. Proceedings of the Fifteenth Eurographics Conference on Rendering Techniques, 2004: 161-166.
- [15] Hertel S, Hormann K, Westermann R. A hybrid GPU rendering pipeline for alias-free hard shadows [J]. Eurographics Association, Geneva (S2309-5059), 2009: 59-66.
- [16] Jia N X, Luo D N, Zhang Y C. Distorted Shadow mapping[C]. St Andrews, UK. Proceedings of the 19th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, 2013: 209-214.
- [17] Dou H, Yan Y, Kerzner E, et al. Adaptive depth bias for shadow maps[C]. San Francisco, CA. Proceedings of the 18th meeting of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games. ACM, 2014: 97-102.

(下转第 2741 页)

<http://www.china-simulation.com>

• 2730 •