

层次结构辐射度渲染中的可见性测试

龚震宇 孙元浩 俞建新 潘金贵

(南京大学软件新技术重点实验室, 南京大学多媒体计算机研究所, 南京 210093)

摘要 在辐射度渲染等整体光照模型中, 可见性测试是影响整体性能的关键。为了获得较好的可见性测试效果, 在光线投射方法基础上, 对可见性测试方法做了如下两方面的优化。一方面引入 Shaft Culling 算法, 作首轮筛选, 以提高光线投射的效率; 另一方面, 在可见性测试和自适应分割时, 进行基于可见性的分割, 以保证只有完全可见和完全不可见两种情况, 这两方面优化都被引入到层次结构辐射度渲染的实现中, 实验结果表明, 改进过的可见性测试, 不仅减少了计算量和误差, 还保证了阴影边界的质量。

关键词 可见性 辐射度渲染 集簇的层次结构辐射度 光线投影 Shaft Culling 算法

中图分类号: TP391.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2002)11-1176-05

Visibility Test in Hierarchical Radiosity with Clustering

GONG Zhen-yu, SUN Yuan-hao, YU Jian-xin, PAN Jin-gui

(State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University

Multimedia Computing Technology Institute, Nanjing 210093)

Abstract In radiosity and other global Illumination algorithm, visibility test is the key component, which dominates the performance of algorithm. It consumes much time and memory. So our goal is to reduce the time spent in visibility test and improve the performance of the shadow. This paper introduces an optimized algorithm to reach this goal. The most popular method to test visibility is ray casting. Based on the theory of ray casting, two ways are used to improve the performance. First, the Shaft culling algorithm was introduced to improve the efficiency of ray casting. It preprocesses to cut off a majority of objects that need not to be test. This algorithm is very useful for decreasing the computation of ray casting. Second, do visibility-based meshing. It makes a difference between full visibility, full occlusion and partial occlusion. This guarantees partial occlusion is almost eliminated. This work not only decreases the computation cost and error, but also ensures the quality of the shadow boundary. The two ways are used in the implementation of HRC. Results show the new method is more efficient and the shadow created is very smooth.

Keywords Visibility, Radiosity render, Hierarchical Radiosity with Clustering (HRC), Ray cast, Shaft culling algorithm

0 引言

辐射度渲染算法(Radiosity Rendering Algorithm)^[1,2]提供了在理想的漫反射环境下整体光照(Global Illumination)模型的解决方法和理论。经过不断的改进后, 集簇的层次结构辐射度(Hierarchical Radiosity with Clustering, HRC)算

法已经能获得比较令人满意的效果和性能, 并已成为如今辐射度渲染算法的主流。

在辐射度渲染的实现中, 个体(指场景中的面片或者是由许多面片组成的集簇)之间的可见性测试不仅是最费时的部分, 而且还将直接影响到辐射度渲染的效果。鉴于辐射度渲染是旨在通过面片之间能量传递的计算来模拟理想漫反射的效果, 从而能产生辉映、阴影、半影等效果, 而如何生成真实感比较强的阴

影和半影也是可见性测试要解决的主要方面。

可见性测试不但在辐射度渲染算法中举足轻重,同样也是图形学中的一个重要研究领域,一直受到人们普遍的重视,如今已形成了多种可见性测试方法,例如有取样测试^[3]、体可见性测试^[4]、解析法可见性测试^[5,6]、入口分析可见性测试和阻挡物剔除测试等,但是已有的成熟技术大都只是基于某个指定视点的,而对于空间任意两个物体的可见性测试技术还不很完善。为此,需要解决如何更好地利用各种方法的优点,组成一个完整的可见性测试方案。

本文提出了一种分割方法,用于将可见性区分为完全可见或完全不可见,以便提高可见性测试的效率和质量。因为对这两种情况的可见性,两个参考物的子物体就不再需要进行可见性测试,所以可以减少大量的计算,而且在能量传递时也不会产生误差,即或者全部传递,或者没有能量传递。这种方法的开销就是在阴影的边界处,必须被分割得很细。

本文将介绍一种可见性测试的加速方法,即使用 Shaft 来对待测面进行筛选^[7],以加快两个参考物之间的光线投影计算。在判断两个个体之间的可见性时,一般是通过在两个个体上分别采集一些样点,然后进行光线投影。因为这样在光线投影时,如果与场景中的所有面进行求交,则计算量会非常大,所以需要对待测面进行筛选。

1 光线投影的优化技术

1.1 Shaft Culling 算法的产生

由于光线投射技术在可见性测试中运用非常普遍,在笔者开发的系统中也将运用光线投影,所以先介绍一下光线投影的优化技术。

所谓光线投影就是先在两个个体上分别取样若干点(取样点个数可从 1 到 25,典型的样点数取值为 4),并由发射个体上的点向接受个体上的点投射光线;然后用这些投射光线和场景中的其他个体求交来得到被阻挡的光线数,其可见性就等于未被阻挡的光线数与投射的光线总数之比。虽然光线投影是最直观的可见性测试方法,但是如果要是得到很高的精度,就必须增加投射的光线数。由于需要将每条光线和场景中所有其他个体求交,因此势必会导致求交运算的计算量很大。如果能在光线投射时,减少光线和其他个体求交的数量,那么就能大幅度减少计算量。

1.2 Shaft Culling 算法

Haines & Wallace 最早提出了 Shaft Culling 算法^[7]用于提高可见性测试的效率, Shaft Culling 算法的概要:

开始时,将场景中的所有个体建成为一个绑定盒的层次结构(Hierarchy of Bounding Box, HBB);接着寻找一个发光个体和接收个体(这两个个体被称为参考个体)之间遮挡物的集合,称之为候选列表(Candidate List);最后,在一对参考个体之间作光线投射时,只需把光线与候选列表中的所有个体进行求交测试。

候选列表的一种实现方案是将场景中所有的物体构造成一个候选列表,这相当于在没有进行优化的情况下,依次测试所有个体;另一种方案是只把层次结构的根节点加入候选列表,并在阴影测试时,对层次树进行遍历测试。

如果能在一对参考个体之间生成一个多面体,且这个多面体包围了两个参考个体和其中所有点,那么这对参考个体上的取样点和取样点之间的连线也都在这个多面体中。此时,这个多面体就可以被用来生成一个更好的候选列表,如果一个个体在这个多面体之外,那么因其不可能与参考个体之间的光线相交,也就不可能产生遮挡,所以该参考个体可以排除在候选列表之外。如果候选列表为空,那么就可以肯定这对参考个体是完全可见的。

这样构造形成的多面体就被称为 Shaft 多面体,并且只要将两个绑定盒用若干个面连接起来,那么这些面就组成了 Shaft 多面体。其二维形式如图 1 所示。

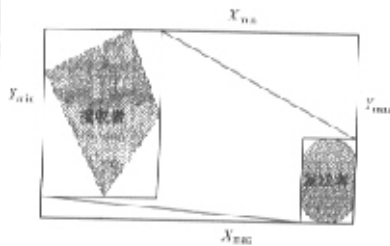


图 1 Shaft 构造的多面体二维表示

利用这个多面体来构造候选列表,并进行可见性测试,可以分为以下 3 个步骤:

- (1) 构造测试用的 Shaft 多面体;
- (2) 用这个 Shaft 多面体来得到候选列表;
- (3) 利用候选列表进行可见性测试。

虽然在某些情况下,构造 Shaft 多面体和用

Shaft 进行测试的代价可能比直接进行光线投影的代价还要大,但总体来说,特别是在一些复杂的场景中,Shaft Culling 算法非常有效,由于其能够剔除很多不需要检测的个体,从而可节省大量的光线投射计算。

2 区分的可见性

2.1 允许部分遮挡的层次辐射度算法中的可见性测试

HRC 算法的关键部分是计算两个面片或者集簇之间的能量传递,同时需要计算面片之间的形状因子(form factor),该形状因子由这对参考个体的位置、形状、角度和可见性决定。如果允许部分遮挡,则只需要在个体之间进行光线投射,即可求得可见性。这种方法得到的可见性的误差与采样点数有关,且随着采样点的增加,计算量将大幅度增加。另外,由于阴影边界的细度完全依赖于面片分割的尺寸,因此只有将面片分割得非常细,才能得到较好的阴影边界。

检测完一对个体之间的可见性后,如果在计算这对参考个体之间的能量传递时,发现传递的能量超过阈值,则需要对这对个体中的一个或者两个再同时进行细分,而细分后得到的子个体之间,仍然需要进行光线投影,以计算可见性。

如果能区分出可见性的3种情况,即完全可见、完全不可见和部分可见,那么就可以在可见性测试过程中,利用这3种情况的不同特点进行不同的处理,以减少计算量。

2.2 完全可见测试

因为如果能检出一对个体之间完全可见,即没有遮挡物,则其子个体之间也一定也是完全可见的,所以不需要再进行可见性测试,这样就可以减少很多不必要的可见性测试。在许多可见性测试应用中,都已经特殊处理了这种情况。

具体的完全可见性分析步骤如下:

在一对个体的可见性测试之前,先用 Shaft Culling 算法得到候选列表,然后进行可见性分析。

(1) 如果候选列表为空,肯定完全可见,则直接返回可见性1。

(2) 如果候选列表不为空,则进行光线投射。一旦有光线被阻挡,就不是完全可见。

(3) 如果所有光线都没被阻挡,则判定是完全可见,返回可见性1。

2.3 完全不可见测试

完全不可见的情况与完全可见一样,其参考个

体的子个体之间不需要再进行可见性测试,然而,判断一对参考个体是否被其间的若干遮挡物完全遮挡是非常复杂的。相对来说,判断一个凸多面体是否完全阻断 Shaft 多面体则比较容易,因为只需要判断 Shaft 多面体的几条棱是否都与该凸多面体相交即可。这样在用 Shaft 测试每个个体是否在候选列表中时,可以增加一项测试,即对于每个凸多面体个体,均需判断其是否完全阻断 Shaft 多面体。一旦发现这样的凸多面体存在,就直接返回可见性0。

但是在许多情况下,完全遮挡是由若干个遮挡物共同造成的。如果没有可以单独完全阻断 Shaft 的个体存在,就需要进行进一步的光线投射测试。

2.4 部分可见性测试

由于在可见性测试得到的3种情况中,绝大部分情况是部分可见的,因此对于部分可见的情况,希望能够快速检测出,并对参考个体进行分割,以逐渐减少部分可见的情况,最终使得经过多次细分后得到的个体之间的可见性或者是完全可见,或者是完全不可见。

部分可见性测试的基本途径也是通过光线投射完成,在这基础上,还可以做一些优化处理。实际上,部分可见不必完成所有的光线投影就能够判断:如果前 k 条光线都被阻断,而第 $k+1$ 条光线没有被阻断,就可以判断是部分可见的,剩余的光线就不需要检测;同样若前 k 条光线畅通,而第 $k+1$ 条光线被阻断,也可以立即判断是部分可见。

判定可见性为部分可见之后,就需要对参考个体进行细分。细分的原则是比较发光个体和接收个体的大小,然后分割较大的个体。如果两个个体的尺寸都超过了一个阈值,就同时分割。对于分割得到的子个体,通过建立相互之间能量传递的链接后,继续进行基于可见性测试的分割。

3 完整的可见性测试

利用第1、2节介绍的技术和算法,可以在辐射度渲染算法中,实现完整的可见性测试以及基于可见性测试的分割。

该算法可简单描述如下:

(1) 如果参考个体方向相反,就直接返回可见性0,否则进入第2步;

(2) 构造初始的候选列表 CandidateList,并由参考个体来构造 Shaft 多面体;

(3) 使用 Shaft 多面体对候选列表中的个体进

- 行筛选,剔除与 Shaft 多面体不相交的个体;
- (4) 判断经过筛选的候选列表是否为空,如果为空,就直接返回可见性 1,否则进入第 5 步;
- (5) 利用候选列表进行光线投射,判断可见性类型;
- (6) 根据可见性类型返回可见性是 0、1 或者 0.5。(部分可见的可见性统一用 0.5 表示)
- 详细的算法流程如图 2 所示。

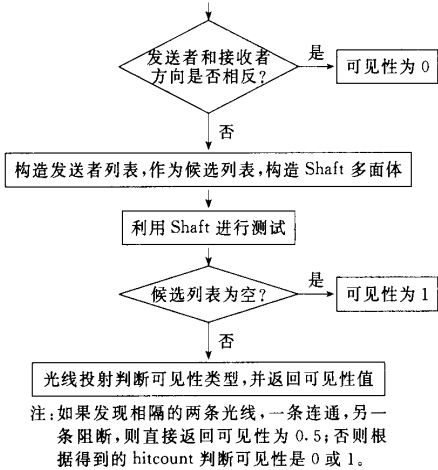


图 2 完整可见性测试的流程

由于在实际应用中,不可能将面片无限地不断细分,所以应该设置一个最小面片大小的阈值,当

一对参考个体的尺寸小于这个阈值时,则在光线投影后,直接计算可见性大小,这是实际应用中产生可见性误差的来源。

4 统计数据和结果

利用以上算法,在层次辐射度渲染过程中加入可见性测试,对场景 Scene1、2、3 分别进行了渲染实验,辐射度渲染后的统计数据如表 1 所示,渲染效果分别如图 3、图 4、图 5 所示。

表 1 Scene 1、2、3 场景采用 HRC 渲染后的统计数据 (CPU P4,1.5GHz,Memory 256M)

场景	Scene1	Scene2	Scene3
初始三角面数	120	680	24
最终的三角面数	5 448	4 607	6 504
簇个数	113	475	23
面片个数	7 132	5 322	8 652
链接总数	20 758	14 770	12 095
完全可见链接数	11 285	13 835	7 769
不可见链接数	395	109	763
部分可见链接数	9 073	796	3 563
内存(KB)	2 503	2 241	2 632
渲染时间(s)	344	285	96
迭代次数	5	9	4
能量误差(watt)	5.246 438e-3	2.790 470e-2	3.157 823e-4

从图 3、4、5 中可以看出,基于可见性的分割,由于将阴影边界周围的面片分割得非常细,因此使得面片之间的可见性基本上都是完全可见和完全不可见。

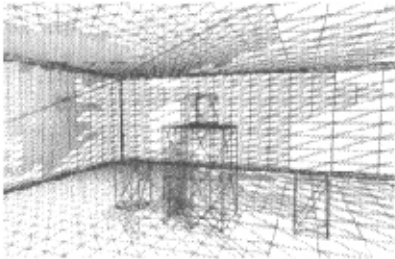


图 3 Scene1 渲染效果

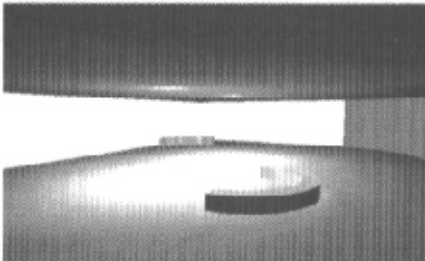
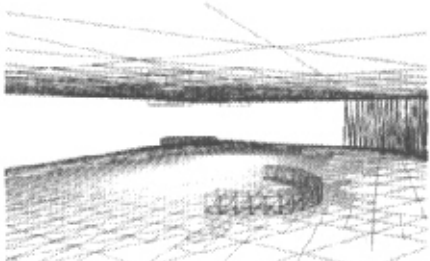
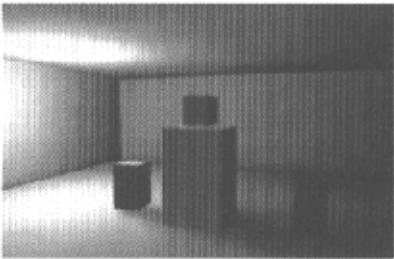


图 4 Scene2 渲染效果



图5 Scene3 渲染效果

对于完全不可见的面片之间,因为不需要建立能量传递的链接,所以大大减少了链接数,并使得内存和时间的消耗都大大减少.由表1可以看出,渲染得到的链接数、内存和时间消耗等性能都比以往的辐射度渲染算法有了很大的提高.由此可见,以这种可见性测试方法为基础的辐射度渲染表现出了良好的性能.

5 结 论

综上所述,以上介绍的可见性测试方法,在实际应用中的表现还是可以接受的.而基于可见性的阴影边界分割不仅很好地满足了阴影绘制的要求,而且误差也被控制在很小的范围内.另外,算法也比较简单,很容易实现,可行性较强,但是算法仍然不能克服可见性测试计算量大的缺点,因为在最后的光线投影时,仍然需要很大的计算量.

如果需要更好的阴影边界或者需要更快的测试速度,则必须进一步改进算法或者另外研究新的可见性测试算法,比如引言中提到的解析法可见性测试,可以精确地计算阴影和半影的边界,不过这种方法的效率太低,使得至今还无法在全局光照模型中得到使用.为此,寻求一种更理想的可见性测试方法,将是今后可见性测试领域的重要研究方向.

参 考 文 献

- Gibson S, Hubbard R J. Efficient hierarchical refinement and clustering for radiosity in complex environments[J]. Computer Graphics Forum, 1996,15(5):297~310.
- Sillion F, Drettakis G, Soler C. A clustering algorithm for radiance calculation in general environments[A]. In: Proceedings of Eurographics Rendering workshop 1995 [C], New York: Springer-Verlag, 1995:196~205.
- Wallace J R, Elmquist K A, Haines E A. A ray tracing algorithm for progressive radiosity[A]. In: Computer Graphics (SIGGRAPH'89 Proceeding.) [C], Boston U. S. A: Addison Wesley, 1989,23:315~324.
- Schauffler G, Dorsey J, Decoret X et al. Conservative volumetric visibility with occluder fusion [A]. In: Proceedings of SIGGRAPH 2000 Annual Conference Series [C], Boston, USA: Addison Wesley, 2000:229~238.
- Drettakis G, Fiume E. A fast shadow algorithm for area light sources using backprojection [A]. In: Proceedings of SIGGRAPH'94 Annual Conference Series [C], Darmstadt Germany, 1994:223~230.
- Durand F, Drettakis G, Puech C. The visibility skeleton: A powerful and efficient multi-purpose global visibility tool [A]. In: Proceedings of SIGGRAPH'97 [C], St. Etienne France, 1997:89~100.
- Haines E A, Wallace J R. Shaft culling for efficient ray-traced radiosity [A]. In: Photorealistic Rendering in Computer Graphics (Proceedings of the Second Eurographics Workshop on Rendering) [C], New York: Springer-Verlag, 1994:122~138.



龚震宇 1978年生,硕士研究生,2000年获南京大学计算机科学与技术系学士学位.研究方向为计算机图形学及虚拟现实技术.



孙元浩 1977年生,硕士研究生,2000年获南京大学计算机科学与技术系学士学位.研究方向为计算机图形学及虚拟现实技术.



俞建新 1953年生,高级工程师.主要研究方向为多媒体技术以及计算机图形学应用.



潘金贵 1952年生,教授,博士生导师.主要研究方向为多媒体应用技术和远程教育.发表论文130余篇,出版著(译)作10余本.