

基于旋转曲面场景的快速光线跟踪算法

王 华, 朱丽华, 顾耀林

(江南大学信息工程学院, 无锡 214122)

摘要: 针对旋转曲面场景提出一种基于综合包围盒技术快速光线跟踪算法。根据二次曲线的局部单调性原理, 将母线划分成多个单调区间, 连接所有单调区间构造一棵二叉树, 在光线跟踪阶段对每个单调区间再剖分, 得到的子区间作为二叉树的叶子节点, 使用综合包围壳方法为每个子区间计算合适的包围壳。实验结果表明该算法对旋转曲面场景逼近程度好, 绘制的图形质量高, 平均绘制速率比 Kajiya 传统算法提高 40%。

关键词: 光线跟踪; 包围盒; 单调区间; 综合包围壳

Quick Ray Tracing Algorithm Based on Surfaces of Revolution

WANG Hua, ZHU Li-hua, GU Yao-lin

(School of Information Engineering, Southern Yangtze University, Wuxi 214122)

【Abstract】 This paper presents a quick ray tracing algorithm of surfaces of revolution based on hybrid bounding volume. According to the local monotonic of the curve, the generatrix of the surfaces is segmented into monotonic intervals to connect the monotonic intervals to get a binary tree. Then each monotonic interval is subdivided again in the course of ray tracing, and subsets of the intervals are the leaves of the binary tree. The bounding shell is constructed for every subset based on the method of the hybrid bounding shell. Experiments show that the algorithm constructing the scenes of surfaces of revolution has a high approximation accuracy with perfect rendering quality. Compared with Kajiya's classical work, the average rate of rendering is improved by 40%.

【Key words】 ray tracing; bounding volume; monotonic interval; hybrid bounding shell

1 概述

光线跟踪算法是绘制真实感图形最常用的算法之一, 在计算机图形学^[1]和可计算几何^[2]中被广泛应用, 文献[3-4]对光线跟踪算法生成的三维场景提出了优化策略。光线跟踪算法由于需要跟踪从视点出发的每一条光线, 因此涉及到大量的光线和物体的求交测试运算, 与传统扫描线算法相比, 光线跟踪算法所需的计算量显得较大。快速确定光线与景物是否有交已成为改进光线跟踪的主流技术。

目前, 快速确定光线与物体交点的主要技术有空间剖分(space subdivision)和光线相关性(ray coherence)。空间剖分的关键是光线与物体交点的定位。Kajiya^[5-6]基于条带树(strip-tree)数据结构对不规则表面和旋转曲面提出了有效的光线跟踪算法。但是若场景中的不规则表面和旋转曲面规模较大时, 其对母线的细分并不理想, 使光线和曲面求交测试次数变得十分庞大, 因此本文提出了一种基于旋转曲面场景快速光线跟踪算法, 能有效地提高光线和曲面的求交效率。

2 问题描述

给定一条曲线 C 和一条旋转轴 u , S 是 C 绕 u 旋转生成的曲面。对于一条光线 R , 目标是尽可能有效地从视点 E 出发, 沿着光线路径确定光线和曲面的交点 I 。现将母线看作由一系列的点 $P_i (i=1, 2, \dots, n)$ 构成, 且认为任何相邻两点间的有效距离 $\overline{P_k P_{k+1}}$ 足够小。在 $X-Z$ 平面坐标系中, 母线上每个点的坐标为 $P_i (x_i, z_i)$, 这里 Z 轴是旋转轴。当母线绕着 Z 轴旋转时, 每一条 $\overline{P_k P_{k+1}}$ 线段就生成了一个空间的截锥体, 如图 1 所示。

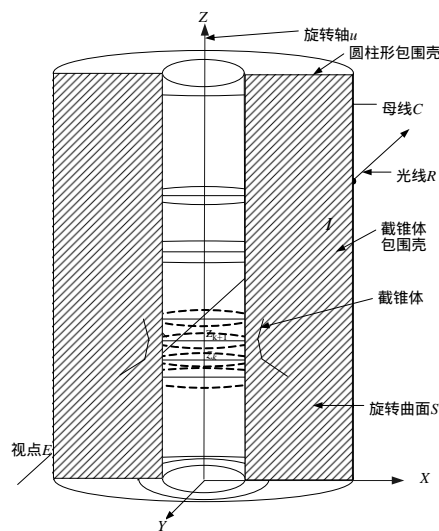


图 1 光线与截锥体相交及包围壳

假定在局部坐标 (z_k, I_k) 中 P_k 已知, 则:

$$I_k = z_k E_k + F_k \tag{1}$$

其中, E_k 是线段 K 的斜率; F_k 是偏移量。

$$E_k = \frac{I_{k+1} - I_k}{z_{k+1} - z_k}, F_k = \frac{I_k z_{k+1} - I_{k+1} z_k}{z_{k+1} - z_k} \tag{2}$$

作者简介: 王 华(1980 -), 男, 硕士, 主研方向: 计算机图形学; 朱丽华, 硕士; 顾耀林, 教授

收稿日期: 2007-05-28 **E-mail:** wanghua325@hotmail.com

$$\frac{x_k - x_E}{x_P - x_E} = \frac{y_k - y_E}{x_P - x_E} = \frac{z_k - z_E}{z_P - z_E} \quad (3)$$

$$x_k = (z_k - z_E) \frac{x_P - x_E}{z_P - z_E} + x_E \quad (4)$$

$$y_k = (z_k - z_E) \frac{y_P - y_E}{z_P - z_E} + y_E \quad (5)$$

$$x_k^2 + y_k^2 = I_k^2 \quad (6)$$

$$\text{令: } G_x = \frac{x_P - x_E}{z_P - z_E}, G_y = \frac{y_P - y_E}{z_P - z_E} \quad (7)$$

$$H_x = -z_E \frac{x_P - x_E}{z_P - z_E} + x_E \quad (8)$$

$$H_y = -z_E \frac{y_P - y_E}{z_P - z_E} + y_E \quad (9)$$

$$x = G_x z + H_x, y = G_y z + H_y \quad (10)$$

由式(4)~式(6), 得到关于 z 轴的二次方程:

$$Uz_k^2 + 2Vz_k + W = 0 \quad (11)$$

其中,

$$U = G_x^2 + G_y^2 - E_k^2 \quad (12)$$

$$V = (G_x + G_y)x_E - (G_x^2 + G_y^2)z_E - E_k F_k \quad (13)$$

$$W = (x_E - H_x)^2 + (y_E - H_y)^2 - F_k^2 \quad (14)$$

线段 $\overline{P_k P_{k+1}}$ 绕 Z 轴旋转形成的截锥体, 它的大小 T_k 由 z_{k+1} 到 z_k 间距离决定。

若 $z_{k+1} z_k$ 较小, 生成的截锥体就多, 系统计算量会成倍增加; 若 $z_{k+1} z_k$ 较大, 则 $\overline{P_k P_{k+1}}$ 旋转生成的物体用截锥体来模拟就不够精确, 使得计算误差较大。

3 光线与曲面求交

光线跟踪算法绘制真实感图形的过程中, 光线与物体求交需耗费大量的时间, 设计一个高效的求交算法尤其重要。目前, 包围盒技术是加速光线跟踪算法的最基本技术之一。

3.1 圆柱形包围壳

旋转母线生成的空间曲面 S 可看作一个二次曲面, 为减少光线与二次曲面的求交次数, 算法中使用内外 2 个圆柱体构造一个圆柱形包围壳来逼近旋转曲面, 如图 1 所示。母线到旋转轴的最小和最大距离分别作为内外圆柱体截面圆的半径。

提出的圆柱形包围壳应基于以下 2 点考虑:

(1) 圆柱体包围壳比传统包围盒和包围球或单一包围柱体更接近旋转曲面;

(2) 光线和柱体的求交计算比光线和二次曲面的求交计算更简单。

3.2 交集区间

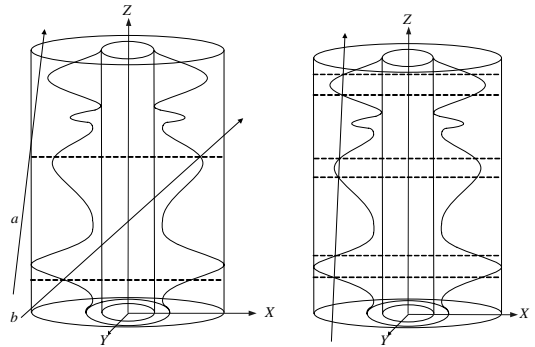
交集区间被定义成一系列 Z 轴上的投影区间, 对于交集区间的计算就能找出所有的旋转二次曲面, 因此只需对这些旋转的二次曲面进行求交计算。

通过光线与旋转曲面的交点来确定交集区间, 存在以下 3 种情况:

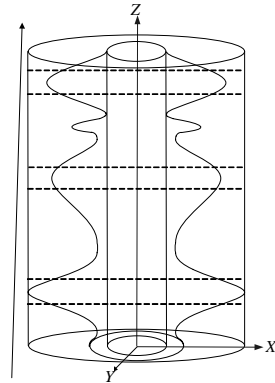
(1) 如果一条光线与外部包围圆柱体相交, 此时不能确定其与旋转曲面一定相交, 如图 2(a)所示, 光线 a 与曲面没有交点, 但光线 b 与曲面有交点, 并形成单一的交集区间;

(2) 光线与外部包围圆柱体有交, 并形成多个交集区间, 如图 2(b)所示;

(3) 如果光线和外部包围圆柱体没有交点, 则光线和曲面不存在交点, 交集区间为空, 如图 2(c)所示。



(a)光线与外部包围圆柱体相交 (b)光线与旋转曲面相交



(c)光线与外部包围圆柱体不相交

图 2 交集区间

3.3 综合包围盒

圆柱体包围盒对每一条光线计算 1 次圆柱面交点, 2 次平面交点, 计算比较简单, 但它对母线的包围不紧密; 而截锥体包围盒对母线的包围紧密, 但求交计算的开销却很大, 因此提出一种综合包围盒技术, 可基于以下任何一个方面, 来选择不同的包围盒:

- (1) 使选择的包围盒总面积最小;
- (2) 选择的包围盒使交集区间范围最小;
- (3) 单调区间二叉树。

根据母线局部的单调特性, 将母线划分成单调区间集合 (C_1, C_2, \dots) , 构造一棵单调二叉树, 如图 3 所示。

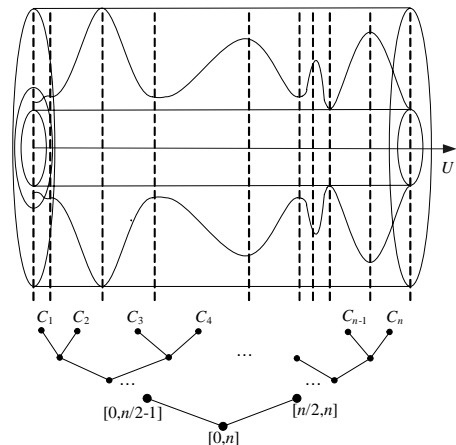


图 3 单调区间二叉树

根据构造的二叉树可知, 单调区间为树的叶子节点, 对于树节点的数据结构, 存储以下信息:

- (1) 单调区间的起始点 g_1 和终点 g_i ;
- (2) g_1 和 g_i 的 x, y 坐标。其中, x, y 坐标各含一个布尔

值:0 表示单调区间上升,1 表示单调区间下降。因此可知单调区间点的数量,并且可通过比较 2 个尾点来确定区间中最大和最小点的 z 坐标与 x 坐标。

4 光线跟踪

光线跟踪分 2 个阶段进行:预处理阶段和光线跟踪阶段。

4.1 预处理阶段

预处理阶段中单调区间内的母线被分成 2 段,每一子段使用一个包围壳,将新生成的子段作为叶子节点重新构造单调区间二叉树。确定单调区间时,可考虑 2 种类型的剖分:

(1)剖分是将母线分成 s 个单调的区间,这些区间在旋转轴 u 上生成的投影将 u 分成 s 等份;

(2)将每个单调区间定义成 t 个统一的单调子区间。

对应着 s 个单调区间生成 s 个节点,然后连接节点朝着根节点方向构造树。子树的叶子数为 2^k ,也是母线的单调区间的剖分数, k 是子树的高度。

接下来的预处理过程为每个子区间计算一个适当包围壳,一个包围壳对应树中一个节点。

4.1.1 截锥体包围壳

对单调区间内的母线剖分形成的子段绕旋转轴生成截锥体,沿着截锥体包含的母线可构造截锥体包围壳,见图 1。可用与圆柱形壳相似的方式对它进行简化。易知截锥体包围壳比圆柱形包围壳包围得更紧密。然而实验证明光线和截锥体包围壳求交时间一般多于光线和圆柱形包围壳求交时间。

4.1.2 综合包围壳

在实际环境中,旋转二次曲线段的方向预先并不知道,此时可以先通过使用圆柱壳减少光线求交计算,然后在母线剖分区间方向发生显著变化的地方采用截锥体壳。在综合包围壳中,二叉树的任意节点含圆柱壳或截锥体壳,为了包围得更紧密,叶子节点总是使用截锥体包围壳,如图 4 所示。

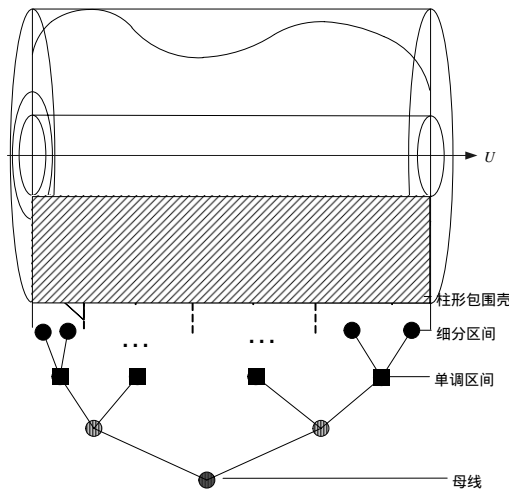


图 4 综合包围壳

4.2 光线跟踪阶段

光线跟踪阶段涉及 2 个方面内容:

- (1)光线自由变换到由旋转曲面定义的局部坐标;
- (2)区间的递归搜索和求交算法。

预处理阶段为每个目标建造单调区间二叉树,这种结构中的节点包括 2 种类型:

- (1)单调分组类型,单调区间彼此连接直到根节点;
- (2)单调精简类型,将每个单调区间分成多个子区间,这些子区间在树内也是分级构成。

若区间(图 2 所示)为空,则光线和曲面就没有交点,否则存在交点。若有唯一的交点 I ,则计算 I 的 u 坐标,对一个非常小的实数 δ ,从 $u \pm \delta$ 中构造区间 $[u_1, u_2]$,若存在 2 个交点,则有效的初始范围为 $[u_1, u_2]$ 。

通过递归地减少树中单调分组类型节点来搜索单调区间,若树的一条路径上的单调分组类型节点搜索完,则转到另外一条路径搜索单调精简类型节点。同理,单调区间的子区间继续同样的递归搜索。

5 实验和结果

基于以上的研究成果,设计并实现了基于综合包围盒技术的旋转曲面场景快速光线跟踪算法,对 Kajiya 的传统算法作了很大的改进。

实验分无高光反射和有高光反射 2 种情况,图 5 所示为无高光反射情形,图 6 为有高光反射情形。其中,壳类型表示使用的包围盒的形状。KJ 表示 Kajiya 的传统算法,CY 表示基于圆柱形包围壳的剖分方法,CO 表示基于截锥体包围壳的剖分方法,HY 表示基于综合包围壳的剖分方法;时间表示生成该图形花费的时间;时间百分比表示与 KJ 比较节省的时间和花费时间比;遍历节点百分比表示树中被遍历的节点比例,交点数量表示光线与包围盒的交点数。



图 5 无高光反射的旋转曲面场景



图 6 有高光反射的旋转曲面场景

每次实验都分别按单调区间剖分或不剖分 2 种情况进行,得到的实验数据见表 1、表 2。

表 1 图 5 母线单调区间进行剖分/不剖分数据比较

壳类型	时间/s	时间百分比/(%)	遍历节点百分比/(%)	交点数量/($\times 10^6$)
KJ	15.44		0.02	9.67
CY	5.54/6.86	178.70/125.07	0.02	10.26/10.37
CO	5.60/7.60	175.71/103.15	0.02	10.38/10.63
HY	5.44/6.93	183.81/122.79	0.02	10.18/10.28

表 2 图 6 母线单调区间进行剖分/不剖分数据比较

壳类型	时间/s	时间百分比/(%)	遍历节点百分比/(%)	交点数量/($\times 10^6$)
KJ	32.78		0.02	21.34
CY	17.96/20.92	82.52/56.69	0.03	25.15/25.65
CO	18.22/22.48	79.91/45.82	0.03	26.09/26.71
HY	17.75/20.83	84.68/57.37	0.03	24.88/25.38

(下转第 279 页)