

基于空间分解的三角网格模型求交方法

张少丽,王毅刚,陈小雕

(杭州电子科技大学 图形图像研究所,杭州 310018)

(zhangshaoli610@126.com)

摘要:三角网格模型间的求交问题是计算机辅助设计与制造领域的关键问题之一。分析了已有空间分解技术和包围盒方法等的优缺点,并在此基础上提出了改进的空间分解求交方法。该算法能够精确定位三角形所占的空间网格,一定程度上减少了需要求交的三角形的数量。实验的结果表明,改进的算法提高了采用空间分解进行三角网格求交的计算效率。

关键词:三角网格模型;求交;空间分解;包围盒

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Intersection method for triangular mesh model based on space division

ZHANG Shao-li, WANG Yi-gang, CHEN Xiao-diao

(Institute of Graphics and Image, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou Zhejiang 310018, China)

Abstract: The intersection problem between triangular mesh models is one of the key issues in the field of CAD/CAM. The authors analyzed the advantages and disadvantages of the existing space division technology and bounding boxes method, and then proposed an improved space division algorithm. This method can more precisely locate space grids that the triangular facets occupy. As a result, it decreases the number of triangular facets that need intersecting calculation. Experiments show that the new method can improve the efficiency of computing triangular mesh intersections based on space division.

Key words: triangular mesh model; computing intersection; space division; bounding box

0 引言

三角网格模型在计算机动画、CAD/CAM、虚拟设计等领域均有着广泛的应用。三角网格模型间的求交问题是其中的核心问题之一。随着三维技术的不断发展,三角网格模型的复杂度也不断增加,模型所包含的三角形数量不断飙升。因此设计一种更加高效的三角网格模型求交算法非常必要。

减少需要求交的三角形数,是提高三角网格模型求交效率的主要手段之一。因此需要在进行三角形之间求交之前,尽量多地剔除那些肯定不会相交的三角形,减少三角网格模型求交的计算量。在剔除不相交元素的问题上,主要算法包括层次包围盒方法^[1]、包围盒编码方法^[2]和空间分解法^[3-5]等。

层次包围盒方法需要划分模型对象,并对这些对象建立最小包围盒,在某些情况下这种算法的求交效率不是很理想。包围盒编码方法通过对空间编码,把元素间的有交判断简化为逻辑运算,但剔除不相交元素效果不理想。空间分解法在剔除不相交元素方面效果相对较好,该方法将模型所在的空间划分为空间立方体网格,通过判断模型各元素所占的空间网格,剔除不占有相同网格的元素;但是在确定元素所占空间网格时,该方法用元素包围盒所占网格来近似等于元素所占网格,然而元素包围盒所占网格数远大于真正元素所占的网格数,因此使得剔除效率不是很高。

本文提出了一种改进算法,通过精确确定三角形所占空间网格数,判断两三角形是否可能相交,剔除用传统空间分解法未能剔除掉的一些三角形,减少了求交计算量。实验结果表明,该算法较传统空间分解法在三角网格模型求交的剔除

效率上有一定的提高。

1 空间分解法

空间分解法是将整个虚拟空间划分成相等体积的小单元格,只对占据了同一单元格或相邻单元格的几何对象进行测试。典型的方法有 K-D 树^[6]、八叉树^[7]、BSP 树^[8]、四面体网^[9]等。空间分解法适用于稀疏环境中分布比较均匀的几何对象间的碰撞检测^[10]。

在空间分解法的实际应用过程中,还需要用到包围盒技术。传统包围盒技术是指用几何形状相对简单的封闭表面(如长方体、球、圆柱体等)将一复杂曲面包围起来,该封闭表面称为包围盒^[11]。包围盒技术的基本思想是使用简单的几何体来代替复杂的几何体,先对两个模型的包围盒进行粗略检测,当包围盒相交时,其包围的模型才有可能相交;若包围盒不相交,其包围的模型一定不相交^[12]。在传统的算法中往往使用长方体作为包围盒,它由 3 组平行平面包围而成,分别与 x 、 y 、 z 坐标轴平行。具体的构造方法是取模型分别在 x 、 y 、 z 方向上的最大值和最小值,再过这些点分别做垂直于所在轴的平面。这六个平面相交后所构成的长方体就是最小包围盒^[2]。

利用空间分解方法对两个三角网格模型进行求交计算的过程,可用如下的算法描述^[3]。

1) 用上述建立最小包围盒的方法对两个模型所在的局部空间建立一个最小包围盒。

2) 记此包围盒所包围的空间为 S , 对该空间进行空间分解。把 S 划分成边长为 $size$ 的空间网格(正方体),然后要对这些网格进行编号。这里取三个整数(i, j, k) 来唯一地标识一个

收稿日期:2009-04-27;修回日期:2009-06-02。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60807036)。

作者简介:张少丽(1985-),女,浙江湖州人,硕士研究生,主要研究方向:虚拟现实、计算机图形学;王毅刚(1971-),男,河南嵩县人,教授,博士,主要研究方向:虚拟现实、图形图像处理;陈小雕(1976-),男,浙江人,副教授,博士,主要研究方向:计算机图形学、几何造型。

网格,依次代表该网格在 x, y, z 轴方向上的编号。

3) 需要确定每个三角形分别占据了哪些空间网格,即将三角形映射到空间网格中去。空间分解法采取的是一种近似的方法,用三角形的包围盒所占有的空间网格来近似等于三角形所占有的空间网格。具体实现步骤为。

① 用上述的包围盒构造方法求出三角形的包围盒,该包围盒可以由主对角线上的两个顶点唯一标识,两个点记为 p_1 和 p_2 。只要求出这两个顶点所占据的空间网格,那么该两个顶点所在的包围盒所占据的空间网格也就很容易求出;

② 设 p_1, p_2 的坐标分别为 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)$, 根据点的坐标值,可以很容易得到该点所在的空间网格。设 p_1 所在的空间网格为 (i_1, j_1, k_1) , 那么 i_1, j_1, k_1 可以由下式求出:

$$i_1 = \left\lfloor \frac{x_1}{size} \right\rfloor, j_1 = \left\lfloor \frac{y_1}{size} \right\rfloor, k_1 = \left\lfloor \frac{z_1}{size} \right\rfloor$$

同理 p_2 所占据的空间网格 (i_2, j_2, k_2) 也可以按同样的方法求出。这样,三角形所占据的空间网格就是 (i_1, j_1, k_1) 和 (i_2, j_2, k_2) 之间所有的连续网格。

4) 对比两个模型中三角形所占据的空间网格,比较得出占据有相同的空间网格的三角形对,对它们进行求交计算。

采用空间划分的方法,可以直接判定两个三角形是否相交,从而快速剔除部分肯定不相交的三角形,大大提高了求交效率。但是,传统的空间划分方法有一个缺点,它不能精确地确定三角形所占的空间网格,而是采用非常近似的计算,用三角形的包围盒所占有的空间网格来近似代替三角形所占有的空间网格。这就导致用这种方法判断两个三角形是否相交的效率不高,会把很多根本没相交的三角形误判断为可能相交,增加了三角网格模型求交的代价。

2 空间分解算法的改进

鉴于传统空间分解法存在的不足,如果能找到一种方法,在三角形两两求交之前更加精确地确定三角形所占的空间网格,从而尽可能多地排除肯定不相交的三角形,无疑可以提高三角网格模型间的求交效率。基于这种思想,本文对传统的空间分解法进行了改进,从而进一步提高了相应的求交算法的效率。

首先对模型进行预处理,剔除绝大部分不相交的三角形,只保留小部分可能相交的三角形到下一步的求交计算中,这对于提高求交速率是相当关键的。在改进的空间分解算法中,1)、2) 与传统的空间分解法基本一致,在这里主要是对第 3) 步进行改进。具体的实现依次为以下几点(设三角形的三个顶点为 A, B, C)。

1) 根据三角形三个顶点的坐标值,确定它们所在的空间网格,将这些网格标记为 1。

2) 用平面 x, y, z 分别截三角形的其中一条边,得到一系列的点。将每个点在上、下、左、右、前、后六个方向相邻的空间网格标记为 1。例如,用平面 y 与三角形的一边 AB 求交, y 平面的步长为 k (假设空间网格的边长 $size$ 为 k), 假设得到的交点为 a, b, c 。将每个交点所在 y 轴方向的相邻两个空间网格(空间网格 1 和 2) 同时标记为 1, 如图 1 所示。

3) 将上述步骤之后得到的每个交点分别与三角形的另一个点相连,得到新的线段。对这些新得到的线段进行第 2) 步同样的处理。在操作完成之后,该三角形所占的空间网格将全都被标记为 1。如图 2 所示,是以交点 b 和顶点 C 的连线为例的操作。

通过上述三个步骤的处理,就能比较准确地确定三角形所占的空间网格。因此,在后续的求交计算中所进行求交的三角形都是很有可能相交的,从而节省了很多不必要的求交计算时间。

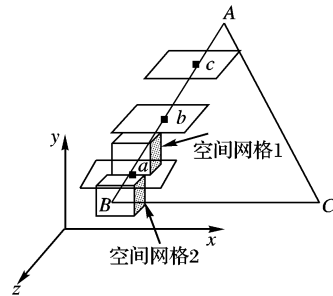


图 1 线段 AB 与平面的交点

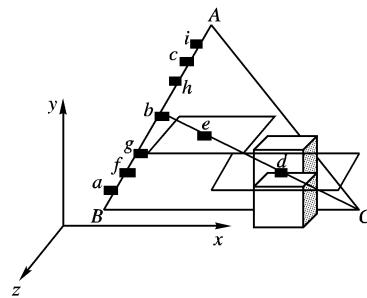


图 2 顶点 C 和交点连线与平面相交

本文算法在 Visual C++ 6.0 环境下实现与运行,算法中类代码如下:

1) 定义两个整型的三维指针变量 $***cube1$ 和 $***cube2$, 并用 $malloc_cube()$ 函数为它们开辟一定的空间。每个单位空间即为一个空间网格,赋初始值为 0, 作为确定三角形占用空间网格的依据。其中 $CUBE_X, CUBE_Y, CUBE_Z$ 分别表示两模型所在包围盒的三边长。

开始

置 i 的初值为 0

置 j 的初值为 0

当 $i < CUBE_X$, 执行下面操作:

使 $*(cube1 + i) = malloc()$ 开辟大小为 $CUBE_Y * sizeof(int)$ 的空间

当 $j < CUBE_Y$, 执行下面操作:

使 $*(*(cube1 + i) + j) = malloc()$ 开辟大小为 $CUBE_Z * sizeof(int)$ 的空间

使 $j = j + 1$

(循环体到此结束)

使 $i = i + 1$

(循环体到此结束)

结束

开始

置 i 的初值为 0

置 j 的初值为 0

置 k 的初值为 0

当 $i < CUBE_X$, 执行下面操作:

当 $j < CUBE_Y$, 执行下面操作:

当 $k < CUBE_Z$, 执行下面操作:

使 $*(*(*(cube1 + i) + j) + k) = 0$

使 $k = k + 1$

(循环体到此结束)

使 $j = j + 1$

(循环体到此结束)

使 $i = i + 1$

(循环体到此结束)

结束

2) 平面 y 与线段 AB 求交, 并置相应的空间网格的值为

1. 其中 \min_y 、 \max_y 分别指 A, B 两点中 y 的最小值和最大值, node1 为 A 点, node2 为 B 点。

开始

置 i 的初值为 $\min_y + 1$

当 $i < \max_y$, 执行下面操作:

若 $\text{node1}.y$ 不等于 $\text{node2}.y$

使 $t = (i - \text{node1}.y) / (\text{node2}.y - \text{node1}.y)$

△求出交点的 x, y, z 值

使 $\text{temp}.z = \text{node1}.z + t * (\text{node2}.z - \text{node1}.z)$

使 $\text{temp}.x = \text{node1}.x + t * (\text{node2}.x - \text{node1}.x)$

使 $\text{temp}.y = i$

△将相应的空间网格的值为 1

使 $((\text{cube} + (\text{int}) \text{temp}.x) + i - 1) + (\text{int}) \text{temp}.z = 1$

使 $((\text{cube} + (\text{int}) \text{temp}.x) + i) + (\text{int}) \text{temp}.z = 1$

(IF 操作到此结束)

使 $i = i + 1$

(循环体到此结束)

结束

3 实验结果与分析

情景一:如图 3(a)所示,给定两个几何球体,分别由 128 个三角形组成,其中一个球体完全包围另一个球体,两模型不相交。

情景二:如图 3(b)所示,给定两个 8 面体,分别由 8 个三角形组成,其中一个 8 面体完全包围另一个 8 面体,两个模型不相交。

情景三:如图 3(c)所示,给定一个几何球体和一个 8 面体,其中球体由 128 个三角形组成,8 面体由 8 个三角形组成,两模型相交。

情景四:如图 3(d)所示,给定两个 8 面体,分别由 8 个三角形组成,两模型相交。

情景五:如图 3(e)所示,给定两个几何球体,分别由 72 个三角形组成,两模型相交。

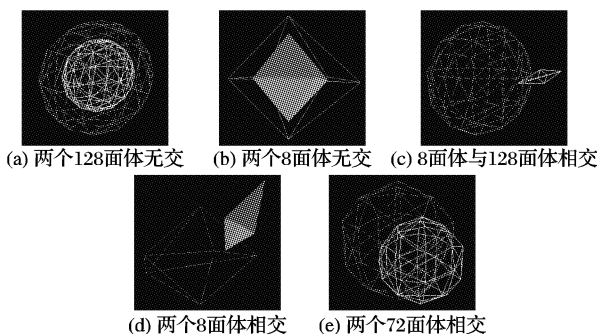


图 3 实验结果

表 1 传统空间分解法和改进算法实验结果

对比项	情景一		情景二		情景三		情景四		情景五	
	空间 分解法	改进 算法	空间 分解法	改进 算法	空间 分解法	改进 算法	空间 分解法	改进 算法	空间 分解法	改进 算法
共有三角形对	16 384	16 384	64	64	1 024	1 024	64	64	5 184	5 184
求交三角形对	16 256	0	64	0	952	408	64	32	5 112	4 896
剔除三角形百分比/%	0.78	100	0	100	7.03	60.16	0	50	1.39	5.56
剔除后三角形 求交时间/s(1000 次)	16.4	0	0.47	0	2.34	1.1	0.47	0.31	9.22	8.9

注:实验中空间网格是边长为 1 的小立方体。

从表 1 中可以看出,在处理两模型没有相交或相交部位比较小的情况时,改进的算法在剔除三角形时效率较传统空间分解法有明显的提高;处理相交部位比较大的模型时,剔除三角形的效率也有些许提高,从而使后续的求交过程时间缩短,达到了提高求交效率的目的。

4 结语

本文在传统空间分解法的基础上,对其作了一定的改进,使之能够更加精确地确定三角形所占的空间网格,从而在三角网格模型求交之前更多地剔除肯定不相交的三角形,减少了需要进行求交计算的三角形数量。实验结果表明,处理某些根本没有相交或相交部位比较小的模型时,该算法能排除模型中的绝大部分不相交的三角形,这样就可以大大提高模型的求交效率;对于处理一些相交部位比较大的模型,排除三角形的效率较传统空间分解法也有一定的提高。并且当系统有多个线程并行处理两模型求交时,可以将三角形映射到空间网格的运算分批交给多个线程并行处理,从而提高程序的运行速率。今后的工作将充分利用空间连续的特点,研究相交部分的更加高效的求交算法,进一步提高计算效率。

参考文献:

[1] 潘振宽,崔树娟,张继萍. 基于层次包围盒的碰撞检测方法[J]. 青岛大学学报:自然科学版,2005,18(1):23-25.

[2] 刘丽萍,王琰. 基于包围盒编码的曲面求交算法[J]. 沈阳理工大学学报,2008,27(2):11-18.

[3] 李建波,潘振宽,孙志军. 基于包围盒与空间分解的碰撞检测算法[J]. 计算机科学,2005,32(6):155-157.

[4] THIBAULT W C, NAYLOR B F. Set operations on polyhedral using binary space partitioning trees[J]. Computer Graphics, 1987, 21(4):153-162.

[5] DINGLIANNA J, O'SULLIVAN C, BRADSHAW G. Collisions and adaptive levels of detail[C]// SIGGRAPH 2001 Sketches Program. New York: ACM Press, 2001:156.

[6] 杨俊华,符红光,郭惠. 基于 GPU 快速光线跟踪算法的设计与实现[J]. 计算机应用,2007,27(8):2033-2035.

[7] 孙家广. 计算机图形学[M]. 3 版. 北京:清华大学出版社,1998:1-595.

[8] NAYLOR B, AMANATIDES J, THIBAULT W. Merging BSP trees yields polyhedral set operations[J]. Computer Graphics, 1990, 24(4):115-124.

[9] 戴上平,黄革新. 空间数据模型研究[J]. 武汉冶金科技大学学报,1999,22(1):78-80.

[10] 边美玲,任建平. 包围盒碰撞检测技术的研究[J]. 机械管理开发,2008,4(2):27-31.

[11] 高军峰,徐凯声,崔劲. 一个基于包围盒技术提高光线与物体求交效率的方法[J]. 交通与计算机,2004,22(6):65-68.

[12] 谭同德,吴强,赵红领,等. OBB 层次包围盒构造方法的改进[J]. 计算机工程与应用,2008,44(5):79-81.