

基于 OBB 树层次关系的相交体特征计算*

罗 枫¹, 陈志杨², 张三元¹, 叶修梓¹

(1. 浙江大学 计算机学院 CAD&CG 国家重点实验室, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江工业大学 软件学院, 浙江 杭州 310014)

摘 要: 针对不同复杂情况的网格模型在运动过程中发生的接触问题, 提出了一个有效、准确的相交体特征计算算法, 这里的特征包括相交三角形求交线, 相交体求轮廓线, 相交体求轮廓体。该算法以 OBB(Oriented Bounding Boxes) 树的数据结构为基础, 借助 AABB(Axis-Aligned Bounding Boxes) 包围盒, 通过分析线段、三角面、包围盒的位置关系情况, 得到了相交线段、相交三角面以及包围三角面, 并在此基础上计算出相应的相交体特征。该算法在 CAD 模型分割、建造、几何特征提取、生产车间以及机器人运动轨迹规划等方面都有很高的应用价值。

关键词: OBB 层次树; 分离轴; 轮廓环; AABB 包围盒; 内外轮廓

中图法分类号: TP391. 4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3695(2005)10-0023-03

An Algorithm for Rapidly Computing Intersection Body Character Based on Hierarchical Structure of OBBTree

LUO Feng¹, CHEN Zhi-yang², ZHANG San-yuan¹, YE Xiu-zi¹

(1. State Key Laboratory of CAD&CG, College of Computer Science & Technology, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China; 2. College of Software Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang 310014, China)

Abstract: Aiming at collision condition amongst complex geometric model undergoing rigid motion, the text puts forward an algorithm characterized with effectivity, exactness, rapidness in computing intersection body characters. The physicol characteristics including computing intersection line within the intersected triangles, contour line around the intersected models, contour body among the intersected models. Based on OBBTree hierarchical structure, in the helps of AABB bounding box as auxiliary, through analyzing the location of line, triangle, bounding box, the algorithm can compute relative physical charactristics. The algorithm have large application value in the many fields such as models partition, constructing, geometric character distilling in CAD, the manufacture shop and robot motion track planing.

Key words: OBB Hierarchical Structure; Separate Axes; Contour Loop; AABB Bounding Box; Inside and Outside Contour

1 引言

随着三维网格在机械以及 CAD 领域的迅速发展, 三维网格物体在运动过程中物理特征的提取也成为了一个十分重要的研究问题。碰撞检测是机器人、动画仿真、虚拟现实等领域不可避免的问题之一, 其基本任务是确定两个或多个物体彼此之间是否发生接触或穿透^[1]。在物体间进行碰撞检测是基于现实世界中的一个简单观察事实, 即在不破坏物体的前提下, 两个或多个物体不可能同时占有同一空间区域。而碰撞求交又是机械、CAD 领域时常要处理的问题, 主要是计算物体碰撞后出现的情况, 比如表面相切、穿透、包含等。求交使得我们可以进一步了解到物体间的位置关系、相对空间位置等^[2]。在几何上, 物体轮廓的计算已经运用得十分普遍, 但是这仅适用于静态的物体当中。而相对运动的网格物体来说, 碰撞相交体的轮廓计算也是一个十分重要的特征计算, 它不仅使我们更详细地了解到物体间的物理特性, 而且在改善路径优化、测量排

斥容量等方面都有很大的用处。所以当物体间发生碰撞时, 有关碰撞物理特征的问题也就成为一个核心问题。这里所说的物理特征仅仅包括相交的交线、相交体的轮廓交线环、相交体的轮廓。

由于网格模型与网格模型求交线、求相交体的轮廓交线环、求相交体的轮廓是复杂而且费时的特征计算, 所以需要找到一种快速检测相交范围和快速求相交三角形的方法。本文首先利用 Rapid 算法^[3]得到网格体的相交三角形, 进一步快速通过空间三角形相交交线算法去计算相交三角形队列的交线。尽管这些交线求了出来, 但是它们并不是轮廓线, 所以需要再进行物理位置关系处理来得到轮廓线。这里的处理是指通过最近距离计算和轮廓环分割方法来得到碰撞网格体的轮廓线。最后在 Rapid 算法的基础上以分离轴思想为准则提出了一种快速计算相交网格体轮廓的算法。

2 网格三角形交线和网格交线环的计算

利用 Rapid 提供的 OBB 树层次结构算法我们可以快速地获得两个网格模型中所有相交的三角形, 但是 Rapid 并没有给出这些三角形的交线以及相交网格模型上完整的交线环。为了估算网格相交部分的轮廓, 我们需要先计算出相交三角形的

收稿日期: 2004-09-15; 修返日期: 2004-11-15
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60273060, 60073026); 国家科技部重大软件课题(2003AA4ZB120)

交线以及相交网格的交线环。

2.1 相交三角形的交线计算

Rapid 算法中已经计算出相应的相交三角形对, 下面我们通过空间三角形交线算法快速计算出相交三角形的交线。相交三角形对有以下两种情况: 两个三角形不共面, 如图 1 所示。两个三角形共面, 如图 2 所示。

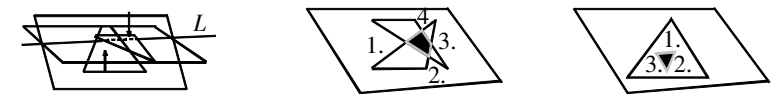


图 1 三角形和它所位于的平面, 箭头指向沿着 L 的间隔 (虚线表示)

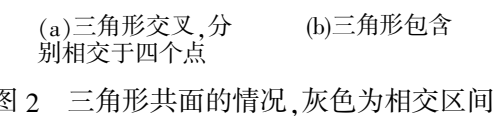


图 2 三角形共面的情况, 灰色为相交区间

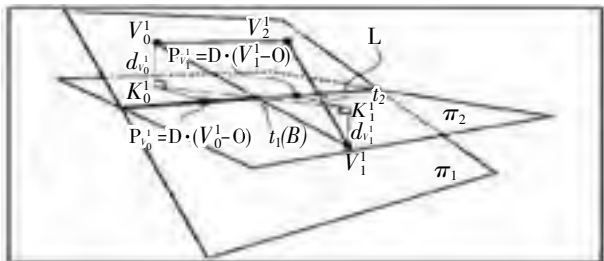
如果两个三角形不共面, 假定我们要计算图 3 中 T_1 (三角形) 和 L (直线) 上的大小间隔, 例如 V_0^1 和 V_2^1 位于 π_2 的同一面, V_1^1 位于另外的一面 (不然就认为两个三角形不相交)。为了得到边 $V_0^1V_1^1$ 和 $V_1^1V_2^1$ 在 L 上相交的间隔值, 首先将顶点投影到 L 上:

$$P_{V_i^1} = D \cdot (V_i^1 - O) \tag{1}$$

然后计算一条线的参数值 t_1 , 这里 $B = V_0^1V_1^1 \cap L = O + t_1D$ 。 K_0^1 为 V_0^1 在 π_2 上的投影, 从图 3 中可以看出 $V_0^1BK_0^1$ 和 $V_1^1BK_1^1$ 是相似的, 所以

$$t_1 = P_{V_0^1} + (P_{V_1^1} - P_{V_0^1}) \frac{d_{V_0^1}}{d_{V_0^1} - d_{V_1^1}} \tag{2}$$

相似计算可以得出 t_2 , T_2 的间隔同样可以计算出来。如果这些间隔重叠, 那么三角形就相交。相应的交线也就可以通过 t_2 , T_2 计算出来。



几何位置: V_i^1 是平面 T_1 的顶点, π_1 和 π_2 是 T_1 和 T_2 所位于的平面; $d_{V_i^1}$ 是 V_i^1 到 π_2 的距离; K_i^1 是 V_i^1 在 π_2 的投影; $P_{V_i^1}$ 是 V_i^1 在交线 L 上的投影

图 3 几何图形

如果三角形共面的话, 就将它们投影到与轴平行的平面上, 分别出现图 2(a) 和图 2(b) 所示的两种情况: T_1 与 T_2 相互交叉; T_1 完全包含于 T_2 , 或者 T_2 包含于 T_1 。第一种情况执行二维的三角形与三角形之间的求交运算即可计算出交线; 第二种情况两个三角形没有实际的交点和交线, 但是为了得到相应的三角形环, 我们将内部的三角形边也作为交线考虑。

2.2 相交网格的轮廓交线环计算

在计算出了网格相交三角形交线后, 相交三角形交线成对存储在数组中。由于 OBB 树相交检测算法是按照分离轴分割原则进行检测求交的, 所以计算出的三角形交线队列之间没有必然的物理位置关系, 这样就必须对相交线进一步进行处理才可以产生碰撞网格体之间的轮廓交线环。

我们先分析一下两个网格体碰撞相交时相交线可能出现的拓扑连接。如图 4 所示, 两个网格体相交碰撞的时候产生了以下几种交线情况: 单交线环; 半开放边界环; 分离的交线环; 共边界的交线环; 交叉的交线环。直接将相交三角形的交点、

交线连在一起构成轮廓相交线是不合理的, 我们需要对相交线队列进行物理位置关系的重新排列, 这样才可以构成准确的轮廓交线环。

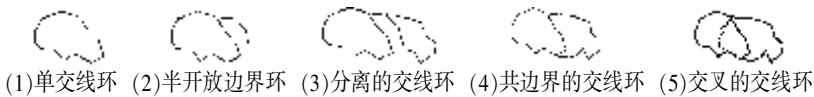


图 4 网格体碰撞时可能出现的轮廓交线

算法中运用了最近距离点计算、相交点对的拓扑关系排列以及轮廓环分割计算等, 算法具体过程如下:

(1) 对所有相交三角形的相交点对进行处理, 由于相交点是成对出现的, 而且相交点对是存放在数组中的, 所以根据轮廓最近距离点相邻的原则, 可以从任意一个相交点开始, 依次找出每一对相交点的轮廓后续点, 也就是离上一个交点最近的下一个交点, 然后以此成对全部存在新的数组中。由于网格相交时产生了大量的相交三角形队列, 所以得到的相交交线队列数量也是巨大的, 这给最近距离点计算带来很大的时间花费。为了达到快速查找最近距离点的目的, 用到了 AABB 包围盒。

具体构建 AABB 包围盒的过程是: 以当前交线点作为中心点, 以一个包围盒限度值 a 为包围盒半径构建 AABB 包围盒, 这里的 a 值可以根据网格体表面定点的距离来大致定义。这样以其他交线点到当前交线点的相对距离是否位于包围盒内就可以逐步找到最近的距离交线点。通过 AABB 包围盒可以大大提高最近距离点的查找速度。但是为了处理图 4 中的各种情况, 我们还需要利用交线环分离的方法。

(2) 在每次找轮廓后续点的时候都相应地判断是否出现回环的情况, 没有回环就继续找后续点; 如果出现回环, 通过交线环分离, 以指针链表分割出前面的轮廓线环, 然后以相交线队列中的下一个点为起点进行下一个环或线段的查找, 一直进行到所有的点对都遍历过。这样通过指针链表遍历新的数组就可以得到网格碰撞体对应的轮廓线。

下面是指针链表的结构以及数组的结构, 该指针链表对应于以上算法新生成的数组。

```
struct LoopPointsList{
    int loopindex; //每一个环的开始点位置
    int loopsize; //每一个环包含的点对数量
    LoopPointsList* Next; //指向下一个环
};

Coord ContourLine[ Contact_Number* 2];
//Contact_Number 是相交的三角形对数
struct Coord{
    float coord[ 3]; //数据点的三维坐标
    Coord &operator = ( const Coord &a)
    {
        coord[ 0] = a.coord[ 0];
        coord[ 1] = a.coord[ 1];
        coord[ 2] = a.coord[ 2];
        return* this;
    }
};
```

3 网格相交体轮廓计算

当网格碰撞时, 需要得到相应的相交包含体, 也就是相交而处于对方体内的区域 (内轮廓), 这样结合上面的相交三角形 (外轮廓) 就构成了整个相交体的轮廓。这里我们继续计算处于对方体内的三角形, 也就是说求出两个网格体相互包含的三角面片, 这样就可以得到整个相交的三角面片体, 即相交包围体。正因为如此, 根据包围盒的位置关系提出三种不同的情

况: 分离、相交及包含。上面的求交线算法可以判断前两种情况, 但是不能处理第三种情况, 从而对包围盒重叠判断算法进行了扩展, 得到了另外一种算法, 即包围盒包含判断算法。

凸块 OBB 包围盒之间的相交检测方法是基于分离轴定理提出的相交检测方法。依据分离轴定理分别向 15 个轴投影, 以投影区间来判断 OBB 包围盒的位置关系。由于这里是包含测试, 所以投影轴不需要 15 个, 只需要 12 个, 其中三个来自一个 OBB 包围盒的三个轴向, 另外九个来自于三个轴向与另三个轴向两两叉乘得到的九个向量。具体实现跟上面的包围盒测试方法一样, 但是判断过程有了区别: 如果前者大于后两者之和, 则在该分离轴上的两包围盒投影区间不重叠, 进而得知两包围盒处于分离状态; 反之, 如果在所有 12 个分离轴上两包围盒的投影区间均发现重叠, 则两包围盒相交。在相交的基础上, 我们还要进一步将相交的情况区分开来, 这里又出现了一种判断, 即如果在 12 个轴上前者都小于后两者之差的绝对值, 那么其中一个必然包含于另外一个网格中。

图 5 进一步描述了每个分离轴的包含判断。图 5 中 A 和 B 为两个 OBB 包围盒, 向量 $\mathbf{D}$ 为 A 中心点至 B 中心点的距离矢量, 单位向量 $\mathbf{SA}$ 为 12 个分离轴之一。两个投影区间中点之距离长度为 $|\mathbf{D} \times \mathbf{SA}|$, ρ_A 和 ρ_B 分别为 A, B 在 $\mathbf{SA}$ 上的投影区间半径。于是, 可以得出投影区间处于包含状态的充分必要条件为

$$|\mathbf{D} \cdot \mathbf{SA}| \leq |\rho_A - \rho_B|$$

(3)

即 $\Psi > 0$: $\Psi = |\mathbf{D} \cdot \mathbf{SA}| - (\rho_A + \rho_B)$

(4)

这里 Ψ 的绝对值为在分离轴 $\mathbf{SA}$ 上的投影区间重叠部分的长度或为投影区间分离间隙的长度。令 a_i 和 b_i ($i = 1, 2, 3$) 分别为 A, B 的半径, 即分别为 A, B 两包围盒长宽高的一半。 $\mathbf{A}^i$ 和 $\mathbf{B}^i$ ($i = 1, 2, 3$) 分别为两包围盒的坐标轴单位向量, 则两包围盒在 $\mathbf{SA}$ 上的投影区间半径 ρ_A 和 ρ_B 可由公式(5)得到。

$$\rho_A = \sum_i |a_i \mathbf{A}^i \cdot \mathbf{SA}| \quad \rho_B = \sum_i |b_i \mathbf{B}^i \cdot \mathbf{SA}|$$

(5)

当两 OBB 包围盒有包含, 则它们在 12 个分离轴上的投影区间都应是包含的。如果两个包围盒相交, 那么子分其中的一个包围盒, 再检测相互是否相交包含, 这个过程一直进行, 直到其中的一个包围盒中只有一个三角形。如果两个 OBB 包围盒包含, 那么判断这个位于其中的包围盒是否只有一个三角形, 如果不是一个三角形, 即为多面体, 那么就再将这个多面体的包围盒子分, 再检测是否相互相交包含; 如果多面体的那个包围盒只有一个三角形, 那么就可以用下面的三角形与多面体的相交包含检测。

三角形与多面体的位置关系测试主要用到点在多面体内的检测算法^[6]。该算法主要包括以下三个步骤:

- (1) 使用平行投影将检测算法的复杂度降为可以解决的二维。
- (2) 应用点在多边形内的测试算法决定投影出的点的图像是否位于投影面内部。
- (3) 将测试点与多面体内一个表面所在的平面进行比较, 判断点在这个表面的前方还是后方。

对两个网格之间彼此包含对方三角面片的具体计算过程如下: 将第一个多面体相对于第二个多面体进行测试, 求出第一个多面体内所有包含于第二个多面体内的三角形, 将它们存在数组内; 同理, 再反过来求第二个多面体包含于第一个多面

体内的三角形, 这样就可以知道两个多面体所包含的所有三角形。由于前面已经求出了相交表面上的三角形, 这样, 两个多面体相交的包围体的边界三角形就全部求了出来, 即相交包围体的轮廓计算了出来。

4 算法验证

图 6 分别是两个网格碰撞产生多轮廓体后计算出的相交面、相交轮廓线。图 7 分别是两个网格碰撞产生双轮廓体后计算出的相交面、相交轮廓线、相交轮廓体。图 8 分别是两个网格碰撞产生双轮廓体后计算出的相交面、相交轮廓线、相交轮廓体。为了视图效果明显, 在显示相交轮廓线和轮廓体面的时候, 下面的图隐去了其中的一个网格体。另外在图 7 和图 8 中用抛分显示方法将轮廓的具体形状也显示了出来。

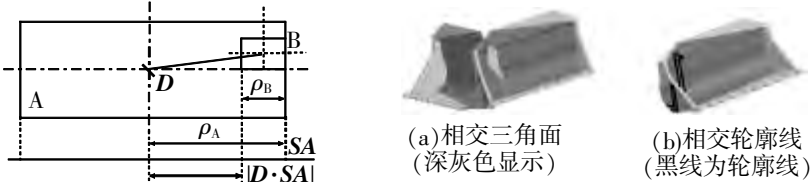


图 5 包围盒的包含测试

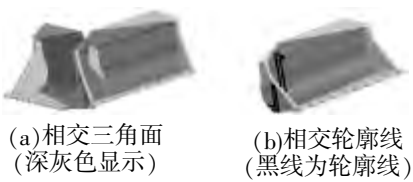


图 6 两个长形推铲网格碰撞

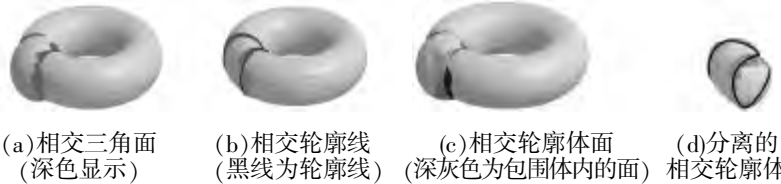


图 7 圆环和球体碰撞

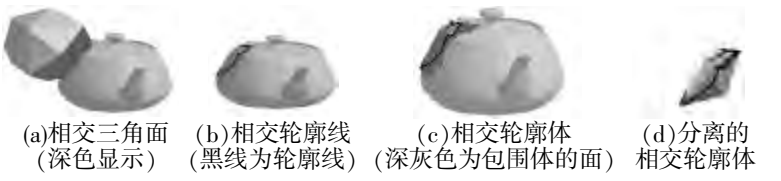


图 8 茶壶和多边形盒子网格碰撞

经过对不同数据实验结果的分析, 网格物体的三角面尺寸比例和网格凹凸程度对计算结果会有很大影响, 因此最近距离限定值 α 取值和内轮廓包含取值的选择也会对计算结果影响很大。最近距离比较取值和内轮廓包含取值主要取决于网格物体的尺寸均匀性, 当两个网格物体的三角面尺寸比例近似时, 该值可取小些; 当两个网格物体的三角面尺寸比例较大时, 该值可取大些, 但都应该满足正确构造关系拓扑结构的要求。

5 总结

本文针对复杂三维网格体在碰撞运动过程中物理特征的变换, 提出了一种快速碰撞检测求交线的算法, 同时将该算法扩展, 生成了一种求相交线轮廓和相交体轮廓的快速计算方法。该算法的主要特点在于以下三方面: 可以根据物体间碰撞的情况快速计算出相交三角形的交线; 可以根据拓扑关系快速求出碰撞体的多条碰撞轮廓线; 可以快速生成相交体的网格轮廓, 当生成多个交体时, 它也可以分别计算出来。

以上算法已经在开发项目中进行了测试, 实践证明: 相交三角形交线和碰撞轮廓线都与实际情况完全一致; 而相交体的网格轮廓也基本与实际轮廓大致相同。由于相交体网格轮廓的估算有形状精细的不同要求, 所以我们在运算时间和运算精度上需要进行合理调节, 这样才能够生成较理想的轮廓体来满足不同要求。

价系统,并研究了每种模式实施的关键技术。这些 CAID 技术为设计师提供了面向产品全生命周期的信息支持,丰富了定制设计内容,为用户提供了更多的产品个性化定制设计方法,实现客户及不同部门的设计人员共同参与到产品方案评价中来,提高了设计效率和用户满意度。CIMS 中的 CAID 技术研究和应用还处于刚刚起步阶段,需要进行大量的研究开发工作。同时,在对应用技术研究的同时,需要密切关注一些高新技术的发展,及时将其成果引入到 CAID 技术中来,促进网络化制造环境下 CAID 技术的发展。

参考文献:

[1] aRui Xiao, YangJian Guo, ChenRui Qi. A Strategy of Product Design in Concurrent Engineering[J] . Mechanical Design, 1997, 10: 1-3.

[2] N Shyamsundar, Rajit Gadh. Intemet-based Collaborative Product Design with Assembly Features and Virtual Design Spaces[J] . Computer Aided Design, 2001, 33(6) : 637-651.

[3] Alford, Sackettp, Neldeerg. Mass Customization an Automotive Perspective[J] . Int. Jour. Production Economics, 2000, 65: 99-110.

[4] W J Zhang, Q Li. Information Modeling Form Made to Order Virtual Enterprise Manufacturing Systems [J] . Computer Aided Design, 1999, 31: 611-619.

[5] 裘建新,王晰巍.网络化设计方法研究综述[J] . 机械设计,2003, 20(3) : 4-7.

[6] Westin Stephen H. Computer-Aided Industrial Design[J] . Computer Graphics (ACM) , 1998, 32(1) : 49-52.

[7] 陆长德,余隋怀.计算机辅助工业设计在数控机床工业设计中的应用[J] . 机械工程学报,1995, 31(5) : 86-90.

[8] 潘云鹤,孙守迁,包恩伟.计算机辅助工业设计技术发展现状和趋势[J] . 计算机辅助设计与图形学学报,1999, 11(6) : 248-252.

[9] Diane HS. Communication Roles That Support Collaboration during the Design Process [J] . Design Studies, 1996, 17(3) : 277-301.

[10] Gong Feng-You. The Study of New Industrial Design Methods Caused by the Development of CAD/CAM[C] . Guilin: Proceedings of International Workshop on Computer-Aided Industrial Design and Concep-

tual Design, 1998. 24-31.

[11] 李浙昆,胡志勇,李勇平,等. CMIS &CAID 的发展及 CAID 的信息集成[J] . 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(11) : 835-838.

[12] 张文莉. 计算机集成制造系统中的计算机辅助工业设计[J] . 江苏理工大学学报(自然科学版) , 1999, 20(6) : 42-45.

[13] 陆长德,余隋怀. 计算机辅助工业设计(上) [J] . 制造技术与机床, 1995, 10: 26-27.

[14] 陆长德,余隋怀,刘芳. 机电产品 CAID 的图库管理系统[J] . 机械工程学报, 1997, 33(5) : 54-56.

[15] 范玉顺. 网络化制造的内涵与关键技术问题[J] . 计算机集成制造系统——CIMS, 2003, 9(7) : 576-582.

[16] 张霖,杨吉江,刘连臣,等. 制造业信息化的网络平台——现代集成制造系统应用网络 CIMSNET[J] . 制造业自动化, 2000, 22(11) : 1-4.

[17] 谢友柏. 现代设计与知识获取[J] . 中国机械工程, 1996, 7(6) : 36-41.

[18] 齐元胜,彭华,方兴,等. 基于 Web 的设计知识管理系统研究[J] . 计算机工程与应用, 2003, 39(4) : 98-101.

[19] 李洁. 产品工业设计网络化信息资源系统研究与构建[D] . 西安: 西北工业大学, 2002.

[20] 王莉萍. 基于网络的工业设计信息系统的研究与实现[D] . 西安: 西北工业大学, 2003.

[21] 程振波,肖刚,单继宏,等. 基于虚拟技术的产品定制设计平台研究[J] . 机械科学与技术, 2003, 22(3) : 389-392.

[22] 肖刚,方志民,单继宏,等. 机电产品大规模定制设计模式研究[J] . 中国机械工程, 2003, 13(18) : 1548-1551.

[23] 田生彩,方卫宁,郭北苑,等. 面向客户的协同工业设计产品方案评价系统[J] . 计算机集成制造系统——CIMS, 2003, 9(12) : 65-69.

作者简介:

许占民(1970-) ,男,吉林乾安人,讲师,博士研究生,研究方向为计算机辅助工业设计、产品创新设计;陆长德,男,教授,研究方向为工业设计、计算机辅助工业设计;张全,男,博士研究生,研究方向为计算机辅助工业设计;于明玖,女,博士研究生,研究方向为计算机辅助工业设计。

(上接第 25 页)

当然,对于以上的工作还需要不断完善和提高的地方,主要集中在以下几个方面: 由于网格体存在的形状各异,所以对一些细长、凹凸差异大的物体来说,求出来的相交包围体还不够精确、理想,这在网格细分算法上有待优化提高。 由于网格碰撞相交会存在多个相交体,针对这种多个物理特征计算的情况,在速度、精确度上也是需要提高的。

参考文献:

[1] Lin, S Gottschalk. Collision Detection between Geometric Models: A Survey[C] . The Proceedings of IMA Conference on Mathematics of Surfaces, 1998.

[2] M Lin, D Manocha, J Cohen, *et al.* Collision Detection: Algorithms and Application[C] . Proc. of Algorithms for Robotics Motion and Manipulation, 1997. 129-142.

[3] S Gottschalk, M C Lin, D Manocha. OBBTree: A Hierarchical Structure for Rapid Interference Detection[C] . Computer Graphics (SIG-GRAPH '96) Proceedings, 1996. 171-180.

[4] Tomas M ller. A Fast Triangle-Triangle Intersection Test[J] . Journal

of Graphics Tools, 1997, 2(2) : 25-30.

[5] Tomas M ller, Ben Trumbore. Fast, Minimum Storage Ray-Triangle Intersection[J] . Journal of Graphics Tools, 1997, 2(1) : 21-28.

[6] Ali Said, David Parker . Design and Analysis of a New Point-in-Polyhedron Algorithm[D] . Department of Surveying, University of Newcastle-upon-Tyne.

[7] B Barber, M Hirsch. A Robust Algorithm for Point in Polyhedron [C] . Waterloo: Proc. of the 5th Canad. Conf. Comput. Geom, 1993. 479-484.

[8] 范昭炜,万华根,高曙明. 基于图像的快速碰撞检测算法[C] . Beijing: Proceedings of Chinagraph 2002, 2002.

[9] 王志强,洪嘉振,杨辉. 碰撞检测问题研究综述[J] . 软件学报, 1999, 10(5) : 545-551.

作者简介:

罗枫(1980-) ,男,硕士研究生,主要研究方向为计算机图形学和 CAD;陈志杨(1971-) ,男,副教授,主要研究方向为 CAD 技术、逆向工程、图形图像处理;张三元(1966-) ,男,教授,主要研究方向为产品数学建模、图形图像处理技术;叶修梓(1966-) ,男,长江学者奖励计划特聘教授,博士生导师,主要研究方向为 CAD、计算几何。