

文章编号:1002-0640(2004)04-0045-04

虚拟场景中的碰撞检测算法*

马登武,孙隆和,佟明安

(西北工业大学,陕西 西安 710072)

摘 要:综述了当前出现的虚拟场景中的各种碰撞检测算法。重点对包围盒层次法中的轴向包围盒法(AABB)、方向包围盒法(OBB)、离散方向多面体法(K-DOPs)的检测原理和检测效率进行了分析比较。得出的主要结论是:包围盒层次法应用极为广泛,检测效率取决于对包围盒的选取。K-DOPs 是介于 AABBs 和凸包之间的包围盒,只要合理地选取平行平面对应的个数和方向,就可以在碰撞检测的简单性和包裹物体的紧密性之间取得较好的折衷。

关键词:虚拟现实;虚拟场景;碰撞检测

中图分类号:TP391.9

文献标识码:A

The Algorithm of Collision Detection in Virtual Scene

MA Deng-wu, SUN Long-he, TONG Ming-an

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Different collision detections (CD) in virtual scene are surveyed in this paper. The principle and effectiveness of axis-aligned bounding boxes (AABB) method, oriented bounding box (OBB) method, discrete orientation polytopes (K-DOP) method are discussed in detail. Compared with existing algorithms used for CD, effectiveness of K-DOP is high. The key of the algorithm is to select suitable slabs to construct the discrete orientation polytopes.

Key words: virtual reality, virtual scene, collision detection

引 言

与传统的 CAD 和动画建模相比,虚拟场景建模要复杂的多。原因在于对虚拟物体仅仅进行几何建模是不够的,还必须对它的行为规则、物理属性加以描述,即不仅要进行静态建模(几何尺寸、形状特征、位置和方向等),还要进行动态建模(运动、行为及其约束条件等)。只有将几何模型、行为规则以及物理属性等有机结合起来,才能真正虚物实化,将自然物理世界映射到计算机系统之中,形成逼真的虚拟场景。在行为规则和物理属性中,虚拟对象之间的碰撞检测是关键问题之一,快速高效的碰撞检测对于增强虚拟场景的沉浸感和真实感至关重要。

本文详细分析了包围盒层次法中的沿坐标轴的轴向包围盒(Axis-Aligned Bounding Boxes; AABB)检测算法、方向包围盒(Oriented Bounding Box; OBB)检测算法、离散方向多面体(Discrete Orientation Polytopes; k-DOP)检测算法的原理和各自的特点,并对它们的检测效率进行了比较,得出的结论对于虚拟场景的开发具有较高的参考价值。

1 碰撞检测的基本原理

简单地讲,碰撞检测(Collision Detection)就是检测虚拟场景中不同对象之间是否发生了碰撞。从几何上讲,碰撞检测表现为两个多面体的求交测试问题;按对象所处的空间可分为二维平面碰撞检测和三维空间碰撞检测。平面碰撞检测相对简单一些,已经有较为成熟的检测算法,而三维空间碰撞检测则要复杂得多。在虚拟现实系统中,主要是如何解决碰撞检测的实时性和精确性的矛盾。不同的应用场合,对实时性和精确性的要求不尽相同。人们已经从不同的角度对碰撞检测问题进行了广泛的研究。总

收稿日期:2003-10-20

* 基金项目:军内重点课题资助项目

作者简介:马登武(1964-),男,山东淄博人,副教授、博士研究生,研究方向:航空火力控制系统、计算机仿真、虚拟现实。

体上有以下几个方面:

按照模型的构造模式可分为面模型碰撞检测和体模型碰撞检测。面模型是传统的计算机图形学研究的主要对象,根据这类模型的柔韧性和变形特性,又可以进一步分为柔性表面(Flexible Surface)碰撞检测和刚性表面(Rigid Surface)碰撞检测。柔性表面碰撞检测是指布织物一类的柔软物体参与的碰撞,这类物体发生碰撞后其外形会发生较大的变化。刚性表面碰撞又可以进一步分为由体素构造法(CSG)或多边形网格生成的非参数曲面模型,以及由参数曲面生成的模型之间的碰撞检测。总的来讲,柔性表面碰撞检测因为涉及到变形后包围盒的重构(refit)或更新(update),与刚性表面碰撞检测相比处理起来更为费时。

按照是否考虑时间参数,碰撞检测又可分为连续碰撞检测(Continuously Collision Detection; CCD)和离散碰撞检测(Discrete Collision Detection; DCD)。CCD 的定义如下:

定义 设三维空间 R 用三维几何坐标系 F_w 表示,其中有 N 个运动模型,它们的空间位置和姿态随着时间而改变, F_i 表示第 i 个模型所占的空间。 F_w 随着时间的变化形成四维坐标系 C_w , 模型 F_i 沿着一一定的轨迹运动形成四维坐标系 C_i , 碰撞检测就是判断 $C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cdots \cap C_n = \Phi$ 是否成立。

上述定义给出了碰撞检测的精确的理论描述,但计算的复杂度太高。在实际中通常采用牺牲计算精度,提高计算时间的方法,不考虑连续的四维空间(包括时间轴),仅仅在一些离散的点上考虑问题,以简化碰撞检测的计算。具体方法是:计算出环境中所有物体在下一时刻的位置、方向等运动状态后并不立即将物体移动到新的状态,而是先检测是否有对象在新的状态下与其它物体重叠,从而判断是否发生了碰撞。这种方法称为离散碰撞检测(DCD)方法。DCD 方法只检测离散时间点上可能发生的碰撞,若对象运动速度很快或时间点间隔太长时,一个物体有可能完全穿越另一个物体,即出现物体间的“穿透”现象。解决的方法是:一是限制对象的运动速度;二是减小离散点采样的时间步长;三是对 CCD 方法中物体的运动状态(速度、方向、加速度等)加以限制,考虑围绕对象运动的整个空间(称之为“时-空包围盒”(Space-Time Bound),检测对象从当前状态运动到下一状态所滑过的四维空间(包括时间轴)与其它对象滑过的四维空间是否发生了重叠,即检测对象的运动轨迹。

2 典型碰撞检测算法分析

碰撞检测问题若用算法表示可具体表示为图 1

的形式。

```

开始: for  $t \leftarrow 0$  到  $t_{\text{end}}$ , 步长为  $\Delta t$ 
    for 对象  $A_i \in \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$ 
        移动对象  $A_i$  到  $t$  时刻的位置
        for 对象  $A_j \in \{A_{i+1}, A_{i+2}, \dots, A_N\}$ 
            移动  $A_j$  到  $t$  时刻的位置
            for 对象的  $A_i$  中的每一个多边形  $P_i$ 
                for 对象的  $A_j$  中的每一个多边形  $P_j$ 
                    如果 ( $P_i$  和  $P_j$  相交)
                        则在  $t$  时刻发生了碰撞

```

图 1 碰撞检测算法流程

在图 1 的表示当中有三层循环:首先是最外层的 for 循环,该循环中时间 t 以步长 Δt 递增。步长 Δt 越大,检测速度越快,但检测精度却会下降(出现漏检),且这种固定步长的检测算法不能根据具体情况调整步长和精度。其次是二、三两层 for 循环,它们要对所有“对象对”(A_i 和 A_j)进行检测,使问题的时间复杂度变为 $O(N^2)$ 。第三是四、五两层表示的最内层的 for 循环,即对组成多体的基本几何元素(通常是三角形)进行相交测试。如果虚拟场景中有 N 个多面体,每个多面体有 M 个顶点,则碰撞检测的时间复杂度为 $O(N^2 M^2)$ 。

以上表述的碰撞检测算法要遍历所有的基本几何元素,是最基本、也是速度最慢的碰撞检测算法。实际系统中为了提高检测速度,人们对图 1 所示的检测算法进行了简化,总体上分为空间分解法和包围盒层次法(Hierarchical Bounding)^[2]两大类。空间分解法是将虚拟空间分解为体积相等的小单元格,只对占据同一单元格或相邻单元格的几何对象进行相交测试。典型的空分解法有八叉树(Octree)法和二叉空间剖分(Binary Space Partion)法。空间分解法由于存储量大及灵活性不好,使用不如包围盒层次法广泛。包围盒层次法是利用体积略大而形状简单的包围盒把复杂的几何对象包裹起来,在进行碰撞检测时首先进行包围盒之间的相交测试;如果包围盒相交,再进行几何对象之间精确的碰撞检测。显然,包围盒法对于判断两个几何对象不相交是十分有效的。包围盒相交,并不意味着两个几何对象一定相交,所以包围盒的选择应该满足既简单又紧密的要求。包围盒层次法中由于包围盒的不同又分为 AABB、OBB、K-DOP 等多种类型。详细分析如下:

2.1 沿坐标轴的轴向包围盒(AABB)检测法

一个物体的 AABB 被定义为包含该碰撞体,且边平行于坐标轴的最小六面体。因此,描述一个 AABB,仅需六个标量。在构造 AABB 时,需沿着物体局部坐标系的轴向(X, Y, Z)来构造,因此,所有的 AABB 具有一致的方向。

AABB 树是基于 AABB 的二叉树,按照从上到下的递归细分方式构造生成。在每一次递归过程中,要求取最小的 AABB,需沿所选的剖面分别将物体分为正负两半,并将所对应的原始几何元素分别归属正、负两边,整个递归过程类似于空间二叉剖分,只是每次剖分的对象是 AABB,而不是空间区域。递归细分一直要进行到每一个叶子节点只包含一个原始几何元素为止,所以具有 n 个原始几何元素的 AABB 树具有 $n-1$ 个非叶子节点和 n 个叶子节点。

AABB 树之间的碰撞检测是一个双重递归遍历的过程。对 AABB 树 A 和 B,若发现树 A 的根节点的 AABB 与树 B 内部节点的 AABB 不相交,则停止向下遍历。如果遍历能达到树 B 的叶节点,再用该叶节点遍历树 A;如果能到达树 A 的叶节点,则进一步进行基本几何元素之间的相交测试。根据两个 AABB 相交当且仅当它们在三个坐标轴上的投影区间均相交这一特性,可以将三维求交问题转化为一维求交问题。

2.2 方向包围盒(OBB)检测法

一个物体的 OBB 被定义为包含该对象且相对于坐标轴方向任意的正六面体。与 AABB 树相比, OBB 的最大特点是其方向的任意性,这使得它可以根据被包裹对象的形状特点尽可能紧密地包裹对象。该算法利用顶点坐标的一阶和二阶统计特性,包围盒层次的划分依据是^[4]:

$$\mu = \frac{1}{3n} \sum_{i=0}^n (p^i + q^i + r^i) \quad (1)$$

$$C_{jk} = \frac{1}{3n} \sum_{i=0}^n (\bar{p}_j \bar{p}_k + \bar{q}_j \bar{q}_k + \bar{r}_j \bar{r}_k), 1 \leq j, k \leq 3 \quad (2)$$

其中: n 构成模型的三角形的数目; $\bar{p}^i = p^i - \mu$, $\bar{q}^i = q^i - \mu$, $\bar{r}^i = r^i - \mu$ 是 3×1 向量; $\bar{p}^i = (\bar{p}_1^i, \bar{p}_2^i, \bar{p}_3^i)^T$ 和 C_{jk} 是 3×3 协方差矩阵; μ : 均值; C : 协方差; $p^i - \mu$; 第 i 个三角形的三个顶点是 (p^i, q^i, r^i) 。

2.3 离散方向多面体(k-DOP)检测法

k-DOP 的概念最早由 Kay 和 Kajiya 提出^[3],他们在分析了以往采用的层次包围盒进行光线跟踪计算的缺点后,提出了一个高效的场景层次结构应满足的条件。综合起来就是各层次包围盒都应尽可能紧密地包裹其中所含的景物。作为叶节点,景物自身即是最紧的包围盒,但由于包围盒的选取还要求光线与包围盒的求交测试尽可能简单,因此应选取形状比较简单的球体、圆柱体、长方体等作为包围盒。但这些形状简单的包围盒具有包裹景物不紧的缺点, Kay 和 Kajiya 提出了根据景物的实际形态选取若干组不同方向的平行平面对(Slab)包裹一个景物或一组景物的层次包围盒技术。这些平行平面对组成一个凸体,称之为平行 2K 面体,如图 2 所示。

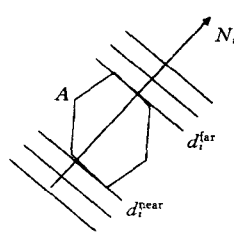


图 2 用平行平面对包裹对象示意图

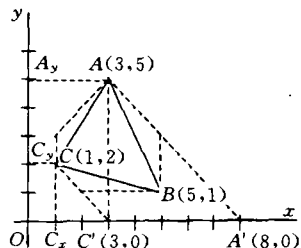


图 3 平行平面对与对象交点的计算

将这一思想应用于碰撞检测就是用超过 3 对平行平面对来逼近对象,所有的平行平面对都是由方向相反的两个法向量所定义的半空间相交得到的,而这些平行平面对的法向量是固定不变的。在实际应用中,可以合理地选择法向量的方向,例如取集合 $\{-1, 0, 1\}$ 中的整数,以简化平行平面对的计算。

由此可以看出, AABB 是 $k=6$ 时 k -DOP 的情形,即 6-DOP。当 k 足够大时, k -DOP 就发展为物体的凸包(Convex Hull)。对于平面图形而言凸包是包围一组控制点的凸多边形的边界;对于立体图形而言凸包是用面片连接各顶点的多面体的包围。

对于 K 值和方向平面对方向的选取,我们考察 $k=6, k=14, k=18, k=24$ 时的情形。如前面所述 $k=6$ 时的 k -DOP 就是 AABB,可以看作是坐标轴正交的 3 对平行平面对的法向量由矢量 $(1,0,0), (0,1,0)$ 和 $(0,0,1)$,如图 3 所示。

当 $k=14$ 时就有 7 对 $(K/2)$ 平行平面对来包裹物体,选平行平面对的法矢量为 $(1,0,0), (0,1,0), (0,0,1), (1,1,1), (1,-1,1), (1,1,-1)$ 和 $(1,-1,-1)$ 。前面的 3 个法矢量所决定的平行平面对交集就是 AABB。后面 4 个矢量所决定的 8 个斜半平面“砍去”了 AABB 的 8 个角。 $k=18$ 和 $k=26$ 时情形,依此类推。因此,只要合理地选取 K 的大小以及平行平面对的方向,就可以在碰撞检测的简单性和包裹物体的紧密性之间取得较好的折中。

3 结 论

①空间分解法将空间分解为体积相等的小单元格,每一时刻各对象分配于一个或多个单元格之中。这样,对象间的碰撞检测问题转化为包含该对象的单元格之间的碰撞检测。当对象较少且均匀分布于空间时这种方法效率较高;当对象较多且距离很近时,需进行单元格的进一步递推细分并要求大量的单元格之间的相交测试和存储空间,效率明显降低。

②时空包围盒法虽然按照碰撞检测的严格定义,考虑了对象所滑过的运动轨迹是否相互重叠,避

免了由于对象的快速运动而产生的“穿透”现象。但时空包围盒法需要对物体的运动加以限制,即使象 Hubbard P. M. 的算法^[1]没有这样的严格限制,但也假定了物体的运动加速度在一定范围以内。而且这种方法建模比较困难,尤其对复杂的有突变的运动过程。

③包围盒法是目前应用最为广泛的一类碰撞检测方法。AABB 法紧密性差,但 AABB 之间的相交测试简单。OBB 法紧密性好,但由于 OBB 的方向任意性,使得 OBB 间的相交测试复杂。Stefan Gottschalk 提出的基于分离轴理论(Separating Axis Theorem)的 OBB 碰撞检测方法是对 OBB 检测方法的重要改进^[4]。K-DOPs 其实是介于 AABBs 和凸包之间的包围盒,其特点是只要合理地选取平行平面对个数和方向,就可以在碰撞检测的简单性和包裹物体的紧密性之间灵活取舍,即紧密性要优于 AABBs,而相交测试的复杂度要小于 OBBs。

④目前大部分碰撞检测算法都是针对具体的应用场合设计的,没有一种算法适用于所有的情形,且

舰艇组件 Move() 改变属性 Position 的值,舰艇邦元的相应环境变量值 Xposition 和 Yposition 相应更新,而此二值被潜艇邦元订购。潜艇发动攻击,若被击中则 RTI 回调舰艇邦元的 Destroyed(),该函数调用舰艇组件的 Destroy() 方法,舰艇组件实例被销毁。其它作战过程的实现与此相似,不再一一详述。

(上接第 32 页)

舰艇组件 Move() 改变属性 Position 的值,舰艇邦元的相应环境变量值 Xposition 和 Yposition 相应更新,而此二值被潜艇邦元订购。潜艇发动攻击,若被击中则 RTI 回调舰艇邦元的 Destroyed(),该函数调用舰艇组件的 Destroy() 方法,舰艇组件实例被销毁。其它作战过程的实现与此相似,不再一一详述。

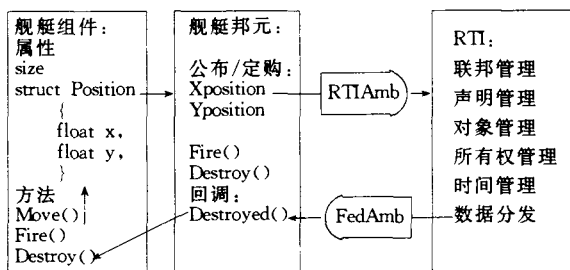


图3 舰艇被攻击过程实现示意图

如果大量的计算装载在同一个服务器上完成则会拖慢整个联邦仿真,将负载平衡是必须要做的工作。在添加服务器的时候,服务器端软件 GRAM 会向 GIS 发送相关信息,并在将本地服务器资源及负载情况发生变化时在资源管理服务器上登记。登记的服务器情况供调度进程进行任务调度之用,从而实现负载平衡及弹性服务。另外,如果在程序运行过程中,有并行计算机出现异常情况(比如硬件故障或停电),或者连接某台并行机的网络出现拥塞或根本不通,或者加入网络的并行计算机因为有更重要的任务,要求提前退出模型服务的执行,就可以将服务

主要集中于在静态环境下两个包围盒树(Single Pairs)之间碰撞检测效率的研究,而对于动态环境下复杂虚拟场景中多虚拟对象之间的碰撞检测问题,高效率的检测算法还不多。

参考文献:

- [1] Hubbard P M. Collision Detection for Intersection Graphics Application [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1995, 1(3): 218-230.
- [2] Moore M, Wilhelms J. Collision Detection and Response for Computer Animation [A]. ACM Siggraph[C], 1988, 22(4): 289-298.
- [3] Klosowski J T, Teld M, et al. Efficient Collision Detection Using Bounding Volume Hierarchies of K-DOPs [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1998, 4(1): 21-36.
- [4] Gottschalk S, Lin M C, Manocha D. OBBTree: A Hierarchical Structure for Rapid Interference Detection [A]. Computer Graphics (SIGGRAPH'96) [C], New Orleans, LA, USA, 1996, 30: 171-180.

转移到其它空闲机器执行。这种“弹性”在未加入网格技术的时候是不可能的。

对于仿真组件的管理,我们开发了仿真组件管理器,提供组件注册、浏览、相似组件的组合等功能,以支持可视化的管理。

4 结束语

本文中将仿真分为应用层、HLA 层、模型层三层的体系框架经过我们利用已有的模型实验证明,能较好地适应指挥自动化效能仿真的需要,其它类似的大规模仿真也可采用。模型组件在模型服务器上注册,只负责模型的管理工作,不用做任何改动就可对不同仿真方案提供服务。邦元是仿真实体模型与 RTI 进行通信的接口。应用层则专门负责整个仿真方案的进度及各种效果显示,它是直接面向军事人员的。这样就将军事指挥员、系统管理员与方案设计人员完全分开了。这三个层次互有分工,层次分明,构成了整个仿真体系结构。但是该系统资源管理的功能还比较弱,需要在以后的研究中进一步强化,探索更有效的方法。

参考文献:

- [1] 徐学文,王寿云. 现代作战模拟[M]. 北京:科学出版社, 2001.