

基于层次包围盒的碰撞检测方法

潘振宽,崔树娟,张继萍,李建波

(青岛大学信息工程学院,山东 青岛 266071)

摘要:碰撞检测是虚拟现实应用中的关键技术。本文主要介绍了碰撞检测中的层次包围盒方法,并对几种基于不同类型包围盒的碰撞检测算法进行了比较研究。

关键词:虚拟现实;碰撞检测;层次包围盒

中图分类号:TP391.9

文献标识码:A

碰撞检测问题基于这样一个事实:两个不可穿透的对象不能共享相同的空间区域,其目的是发现碰撞并报告,即检测两个模型是否发生干涉。在虚拟环境的许多领域如计算机仿真、物理模拟、实体建模及机器人运动规划中碰撞检测问题十分重要^[1,2]。例如,在计算机仿真中,被模拟的物体根据碰撞约束和碰撞动力学来改变运动状态,当物体发生碰撞时需要及时计算响应,以反映仿真的真实效果。虚拟现实中,物质环境是模拟的,以便人们能很容易的想象、探测以及与虚拟的物体进行相互作用,如果人们能接收到所期望的对象反馈的自然行为,比如推、拉、抓等,那么虚拟环境将使人感觉更真实。因此,精确的碰撞检测对于增强虚拟环境的真实性和沉浸感有重要的作用。

碰撞检测自 20 世纪 80 年代开始受到人们的重视,在计算几何和机器人等领域得到了广泛的研究和应用^[3],形成了一些较为成熟的技术。在两个几何模型间的碰撞检测算法大致可分为两类:空间分解法^[4,5](space decomposition)和层次包围盒(hierarchical bounding volumes)方法^[6,7]。这两种方法的目的都是为了尽可能地减少需要进行相交测试的对象对或基本几何元素对的数目。空间分割法是将整个虚拟空间划分成相等体积的小的单元格,只对占据了同一单元格或相邻单元格的几何对象进行相交测试。一般来说空间分割算法在每次碰撞检测时都需要确定每个模型占有的空间单元,如果场景中不可动的模型很多,可以预先划分好空间单元格并确定每个模型占有的空间单元,当有模型运动时,只需重新计算运动模型所占有的空间就可以了。所以该方法通常适用于类似物体在障碍物之间飞行这样的虚拟场合。

层次包围盒方法近年来在碰撞检测中得到广泛应用。它的基本思想是用体积稍大且特性简单的几何体(称为包围盒)来近似地代替复杂的几何对象,并通过构造树状层次结构逐渐逼近对象的几何特性。进行重叠测试时只需对包围盒重叠的部分进行进一步的相交测试,从而可以大大减少参与相交测试的包围盒的数目,提高碰撞检测的效率。S. Suri^[8]等人对包围盒方法进行了一系列的理论研究,证明了该方法可以使碰撞检测的算法复杂度大大降低。

1 层次包围盒

1.1 包围盒层次结构

一个几何对象的包围盒是包含该对象的一个简单的几何体,它可以近似地代替几何对象进行一些粗略

* 收稿日期:2004-03-22

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(Y2003G01)

作者简介:潘振宽(1966-),男,山东人,博士,教授,主要研究方向:多体系统动力学。

的原始计算。图 1 所示为一二维空间中的包围盒层次结构示例,其包围盒为圆形,基本几何元素为线段。进行计算时用圆形代替各层次的对象就会简单多了。由图可知,通过构造层次结构,可以越来越逼近对象的几何特征。

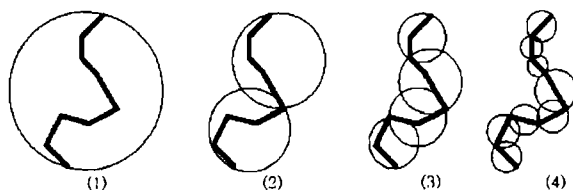


图 1 包围盒层次结构示例

1.2 层次包围盒的构造

层次包围盒又称为包围盒树,以下以 AABB(具体说明见 2.2)为例说明包围盒树的构造方法:

对组成对象的基本几何元素的集合 S 构造包围盒树通常有两种方法,自顶向下和自底向上方法:

1) 自顶向下方法:从全集 S 出发,以全集 S 作为根结点,利用基于全集的信息递归的对这个结点进行划分以形成其子结点,直到到达叶结点,即如何把一个集合划分成若干个子集。这里涉及到一个问题即树的度,大多数情况下选择树的度为 2。

2) 自底向上方法:是从集合 S 的基本几何元素出发,每个元素对应一个叶结点,然后利用任何局部信息递归地对它们进行分组归并,形成父结点,直到得到一个单一的根结点(即集合 S),这一方法就是如何把若干个集合归并为一个父集。

其中自顶向下方法在碰撞检测中使用的较多,计算更成熟一些,因此以下采用这一方法。

根据前面所述,采用自顶向下的方法构造 AABB 包围盒树的过程,实际上就是将给定结点 V 的基本几何元素集合 S_v 划分成两个子集的问题。

本论文中对 S_v 的划分采用基于分裂平面的划分方法,即选定一个平面,根据集合中的基本几何元素相对于平面的几何位置进行划分。一个平面可以把整个空间划分为两个闭半空间,一个基本几何元素或者属于平面的左半空间;或者属于平面的右半空间;或与平面相交,跨越这两个半空间(如基本几何元素为三角形,还可能在平面内)。对于前两种情况可以很自然的把他们划分到两个子集中,而对后一种情况可以这样处理,首先为每个基本几何元素指定其重心为其表现点,然后根据表现点在平面的那一侧来分配,如表现点恰好位于平面上,那么将它分配给所含元素较少的子集,如图 2 所示:

这种划分方法简单且尽可能的保证把相邻的基本几何元素分在一组。其关键在于分裂平面的选择,通常分两步完成:确定分裂轴(即分裂平面的法线)和确定分裂轴上的分裂点以定位分裂平面。

1) 确定分裂轴:使用最长轴方法,即选择方向轴使得包围盒沿轴线方向最长,该方法仅需要两次比较即可确定,简单快速。

2) 确定分裂点:选择好与分裂平面正交的轴线后,必须确定分裂点以定位分裂平面,有两种方法:

a 平均值方法:选择集合中所有基本几何元素的表现点在分裂轴上的投影的平均值。此方法通常可以使子结点的包围盒体积更小,从而提高了碰撞检测的速度;但使树的平衡性有一定的伤害,使构造树的时间增加。

b 中值方法:选择集合中所有基本几何元素的表现点在分裂轴上的投影的中值。此方法简单快速,而且可以得到两个大小相等的子集,从而得到一棵基本平衡的包围盒树,尤其当集合中的基本几何元素大小相差不多时,该方法更有效。

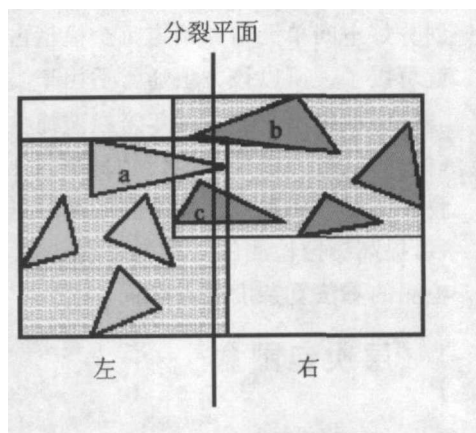


图 2 基于分裂平面的划分方法

1.3 具体构造过程

- 1) 根据结点 V 所包含的基本几何元素的坐标值求出各元素的表现点;
 - 2) 求出结点 V 的 AABB 包围盒;
 - 3) 确定分裂轴:使用最长轴方法;
 - 4) 确定分裂点,定位分裂平面:使用中值方法;
 - 5) 应用基于分裂平面的划分方法将所有元素分为两个子集;
 - 6) 把两个子集分别作为根结点,返回步骤 1。直到每个基本几何元素的 AABB 包围盒都是叶子结点。
- 由此得到一棵 AABB 包围盒树,图 3 所示为二维空间中度为 2 的 AABB 包围盒树示意图。图中虚线为包围盒,实线为对象模型,对象模型由基本几何元素三角形组成。

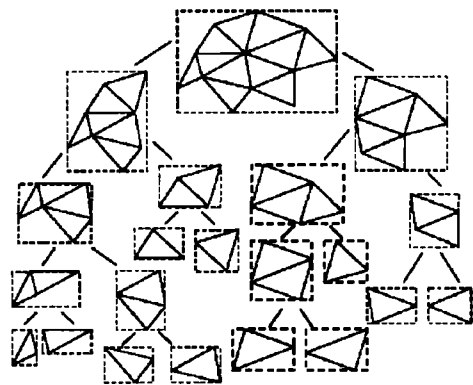


图 3 度为 2 的层次包围盒

2 碰撞检测算法

层次包围盒方法用于碰撞检测主要是为了提高碰撞检测的速度,通过对两个对象的包围盒层次间的相交测试,尽可能早地排除所有不可能相交的基本几何元素对,即如果两个结点的包围盒不相交,那么它们的后代结点的所有包围盒一定不相交,而它们所包围的对象也一定不相交,从而不需要对这些后代结点进行相交测试;只有两个对象的包围盒相交时才有必要对它们的后代结点进行进一步的相交测试,当两个对象的基本几何元素的包围盒相交时,要进一步进行基本几何元素间的测试以确定碰撞部位。因此,适当的层次包围盒方法可以大大减少参与相交测试的包围盒的数目,从而能有效提高碰撞检测的速度。

用于碰撞检测的包围盒有两个属性:简单性和紧密性。简单是指包围盒要比被包围的几何对象简单,这不但要求几何形状简单易与计算,而且要求相交测试算法的快速简单。紧密性要求包围盒尽可能的贴近被包围的对象,这一属性直接关系到需要进行相交测试的包围盒的数目,紧密性越好,参与相交测试的包围盒数目就越少。

到目前为止,用于碰撞检测的包围盒主要有包围球(sphere)、沿坐标轴的包围盒(AABB axis-aligned bounding boxes)、方向包围盒(OBB oriented bounding box)、k-DOPs(Discrete Orientation Polytope)等,以下分别介绍这几种方法:

2.1 基于包围球的碰撞检测

对象的包围球^[9]被定义为包含该对象的最小的球体,计算给定对象的包围球,首先需分别计算组成对象的基本几何元素集合中所有元素的顶点的 x 、 y 、 z 坐标的均值以确定包围球的球心,再由球心与 3 个最大值坐标所确定的点间的距离确定半径 r 。包围球间的相交测试也比较简单。对于两个包围球($c1, r1$)和($c2, r2$),如果球心距离小于两球半径之和,即 $|c1-c2| \leq r1+r2$,则两包围球相交。当对象发生旋转运动时,包围球不需做任何更新,当几何对象进行频繁的旋转运动时,使用包围球可能会得到很好的结果;当对象变形时,

需要重新计算其包围球。

在大多数情况下包围球无论是紧密性还是简单性都不够理想,因此使用的比较少。

2.2 基于 AABB 的碰撞检测

对象的 AABB 被定义为包含该对象且各边平行于坐标轴的最小的六面体。AABB 的计算十分简单,只需分别计算组成对象的基本几何元素集合中各个元素的顶点的 x 、 y 、 z 坐标的最大值和最小值即可;AABB 间的相交测试也比较简单,两个 AABB 相交当且仅当它们在 3 个坐标轴上的投影区间均重叠,因此 AABB 间的相交测试最多需要六次比较运算。

AABB 在碰撞检测中使用的最广泛,也是历史最久的。采用 AABB 的碰撞检测库主要有 I-COLLIDE (interactive collision detection)^[10-12] 和 Q-COLLIDE (quick collision detection)^[13,14]。I-COLLID 适用于大量运动着的对象间的碰撞检测,Q-COLLIDE 是对 I-COLLIDE 的改进,当对象运动或旋转加快或几何模型复杂时,Q-COLLIDE 会大大提高碰撞检测的效率。但是 I-COLLIDE 和 Q-COLLIDE 要求处理对象是刚性并且是凸的,不适合包含软体变形的复杂的虚拟环境中的情况。SOLID^[15] 是荷兰 Eindhoven 大学开发的一个基于 AABB 包围盒层次的碰撞检测系统,它涉及了模型变形的处理,但是仅研究了模型顶点位移的变形,没有包含拓扑结构改变的情况。

但 AABB 对于沿斜对角方向放置的瘦长形对象,其紧密性较差,从而会导致大量冗余的包围盒相交测试,大大影响了碰撞检测的效率。

2.3 基于 OBB 的碰撞检测

方向包围盒(OBB Oriented Bounding Boxes)是比较著名的一个包围盒类型。对象的 OBB 是包含该对象且相对于坐标轴方向任意的最小的长方体。OBB 最大特点是它的方向的任意性,这使得它可以根据被包围对象的形状特点尽可能紧密的包围对象,但同时也使得它的相交测试变得复杂。OBB 的计算相对复杂一些,关键是找出最佳方向,并确定在该方向上包围对象的包围盒的最小尺寸。OBB 间的相交测试基于分离轴理论,即若两个 OBB 在一条轴线上的投影不重叠,则这条轴就为分离轴。若一对 OBB 间存在一条分离轴,则可以判定这两个 OBB 不相交。尽管 OBB 间相交测试的代价比较大(两个 OBB 间的相交测试需 15 次比较运算、60 次加减运算、81 次乘法运算和 24 次绝对值运算)^[16],但它的紧密性是比较好的,可以大大的减少参与相交测试的包围盒的数目,因此总体性能要优于 AABB 和包围球。

1981 年,Ballard 提出了用于逼近曲线的 strip tree^[17],其实质就是二维平面中的方向包围盒,后来 Barequet 等人将它扩展到三维空间,称作 BOXTree^[18],用于光线跟踪和碰撞检测领域。1996 年北卡罗莱纳大学的 Gottschalk 等人开发研制了基于 OBB 包围盒层次(称作 OBBTree)的 RAPID^[19] 系统,主要是解决一个活动对象在大型复杂环境中的碰撞检测问题,该系统当时声称是最快的碰撞检测算法,曾经被作为评价碰撞检测算法的标准。

当几何对象发生旋转运动后,只要对 OBB 进行同样的旋转即可。因此,对于刚体间的碰撞检测,OBB 不失为一种较好的选择,但迄今为止,还没有一种有效的方法能够较好地解决对象变形后 OBB 树的更新问题,而重新计算每个结点的 OBB 的代价又太大,所以 OBB 不适用于包含软体对象的复杂环境中。

2.4 基于 K-DOPs 的碰撞检测

K-DOPs(discrete orientation polytope)^[20] 是由纽约州立大学的 James T. Klosowski 等人 1996 年提出的一种方法,用于复杂环境中运动对象间的碰撞检测。一个对象的 K-DOPs 被定义为包含该对象且它的所有面的法向量都来自一个固定的方向(k 个向量)集合的凸包,其中的方向向量为共线且方向相反的向量对,Masaryk University 的 Karel Zikan 称其为 FDH(Fixed Direction Hull)(为了方便,在此我们也称其为 FDH)。FDH 的计算比较简单,一个几何对象的 FDH 可以由它在固定方向集合 D 中的各个方向向量上的最大延伸所确定,即通过计算对象的顶点与固定方向集中的各个方向的最大点积得到。这样计算有 n 个顶

点的对象的 FDH 可以在 $O(kn)$ 时间内完成(k 为固定方向集中的向量个数)。FDH 最简单的特例是固定方向集中仅包含坐标轴方向,这时便成为 AABB,因此它也可以看作是 AABB 的扩展;另外,当 k 值取无限大时,它即成为对象的凸包。因此它不但具有凸包紧密性好的优点,同时也继承了 AABB 简单性好的优点。FDH 间的相交测试也比较简单,与 AABB 相似,我们仍然可以对 FDH 使用区间测试法,即依次对它们在 D 中的 $k/2$ 个方向轴上的范围区间进行重叠测试,如果找到了一对不重叠的区间,则这两个 FDH 包围盒不相交。否则,认为它们是相交的。尽管这一判断方法不是很精确,但它不会影响到检测的结果,从检测速度方面考虑,这种方法还是值得的。因此,两个 FDH 的相交测试最多只需 k 次比较运算,尽管它比 AABB 间的相交测试(6 次比较)略微复杂,但与 OBB 相比较,其复杂度大大降低了。

通过调整固定方向集合的大小和取值,可以在紧密性和简单性之间达到一定的折衷。 k 的取值越大,紧密性越好,但计算复杂度也越大,因此如何取得合适的 k 值还有待进一步的研究。浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室已经验证对象变形后其 FDH 可以更新^[21],所以基于 FDH 的碰撞检测不但可以应用于刚体对象间的碰撞检测,而且也可应用于刚体与软体间的碰撞检测,适用于包含软体对象的复杂环境模型中。但软体对象的 FDH 的更新有待进一步研究优化。

2.5 几种包围盒的比较

由以上分析可知,不同类型的包围盒特性有很大区别。包围球除了对在各个方向分布比较均匀的几何体外,其紧密性是最差的,因此很少使用。其他三种类型包围盒的区别见图 4:

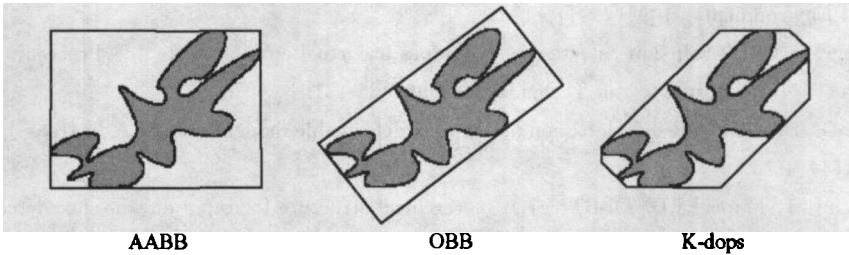


图 4 AABB,OBB 及 K-dops 的区别

由图 4 可以看出,紧密性最好的是 K-DOPs,而简单性最好的是 AABB;同时由前面分析可知,OBB 只适用于刚体对象间的碰撞检测,AABB 和 K-DOPs 既适用于刚体,也可用于软体对象的碰撞检测,但它们的复杂度有很大不同。因此对不同类型的包围盒确定其性能应根据需要决定。

4 结束语

层次包围盒方法可广泛应用于虚拟环境的碰撞检测中,不同的包围盒适用的场合也不一样,可以根据实际需要选择合适的包围盒类型,并可进行适当的优化以提高碰撞检测的速度。当然,因虚拟环境通常是由数百个以上模拟的动态或静态对象组成,而每个对象可能由数百甚至更多的基本元素组成,复杂度越大对碰撞检测的实时性要求越高。因此,碰撞检测问题是虚拟技术中的一个主要瓶颈之一,实时且有效的碰撞检测方法永远是研究的主题。

参考文献:

[1] 汪成为,高文,王行仁. 灵境(虚拟现实)技术的理论、实现及应用[M]. 北京:清华大学出版社,1996.
[2] Kamat V. A survey of techniques for simulation of dynamic collision detection and response[J]. Computer & Graphics, 1993, 17(4): 379-385.
[3] Cameron S. Collision detection by four-dimensional intersection testing[J]. IEEE Trans. Robot. Autom. 1990, 6(3): 291-302.

- [4] Noborio H, Fukuda S, Arimoto S. Fast interference check method using octree[J]. *Advanced Robotics*. 1989, 3(3): 193 - 212.
- [5] Naylor B, Amanatides J, Thibault W. Merging BSP trees yields polyhedral set operations. *ACM Computer Graphics (SIGGRAPH 90 Proceedings)*, 1990, 24(2):115-124.
- [6] Stephen J Adelson, Larry F Hodges, Generating exact ray-traced animation frames by reprojection[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1995, 15(3):43-52.
- [7] Goldsmith J, Salmon J. Automatic creation of object hierarchies for ray tracing[J]. *IEEE Computer Graphics and Application*, 1987, 7(1): 14-20.
- [8] Suri S, Hubbard P M, Hughes J J. Collision detection in aspect and scale bounded polyhedra[C]. *Proc. 9th ACM-SIAM Sympos*, 1998, 127-136.
- [9] Palmer I J, Grimsdale RL. Collision detection for animation using sphere-trees[J]. *Computer Graphics Forum*, 1995, 14(2):105-116.
- [10] Hubbard P M. Collision detection for interactive graphics applications[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 1995, 1(3):218-230.
- [11] Cohen J D, Lin M C, Manocha D, et al. I-COLLIDE: An interactive and exact collision detection system for large-scale environments[C]. *Proceedings of ACM Interactive 3D Graphics Conference*. 1995:189-196.
- [12] Ponamgi M, Manocha D, Lin M. Incremental algorithms for collision detection between 8polygonal models[J]. *IEEE Transactions on Visualization and computer graphics*. 1997, 51-75.
- [13] Chung K, Wang W. Quick elimination of non-interference polytopes in virtual environments[C]. *3rd European Workshop on Virtual Environments*. 1996(7):171-178.
- [14] Chung K, Wang W. Quick collision detection of polytopes in virtual environments[J]. *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. 1996, 125-131.
- [15] van den Bergen G. Efficient collision detection of complex deformable models using AABB trees[J]. *Journal of Graphics Tools*. 1997, 2(4):1-13.
- [16] Gottschalk S. Lin M, Manocha D. OBBTree: A hierarchical structure for rapid interference detection[C]. *Proceedings of SIGGRAPH '96*. 1996, 171-180.
- [17] Ballard D H. Strip trees: A hierarchical representation for curves. *ACM Communication*, 1981, 24(5): 310-321.
- [18] Barequet G, Chazelle B, Guibas L J. et al. A. Tal. BOXTREE: A hierarchical representation for surfaces in 3D[M]. *EuroGraphics96*, 1996: 76-79.
- [19] Gottschalk S, Lin M C, Manocha D. OBBTree: A hierarchical structure for rapid interference detection[C]. In: *Comput. Graphics (SIGGRAPH '96 Proc.)*, 1996, v30:171-180.
- [20] James T. Klosowski, Martin Held, et al. Joseph S. B. Mitchell ; Efficient collision detection using bounding volume hierarchies of k-DOPs[C]. *SIGGRAPH96 Visual Proceedings*, 1996, 26-37.
- [21] 魏迎梅. 虚拟环境中碰撞检测问题的研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2000.

Collision Detection Methods Based on Bounding Volume Hierarchies

PAN Zhen-kuan, CUI Shu-juan, ZHANG Ji-ping, LI Jian-bo
(College of Information Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: Collision detection is a key technique in virtual reality applications. Based on bounding volume hierarchies some collision detection methods are introduced and compared based on bounding volume hierarchies.

Key words: virtual reality; collision detection; bounding volume hierarchies