

# 包围盒碰撞检测算法的优化

刘健鑫,崔汉国,张晶,吴昇

LIU Jian-xin, CUI Han-guo, ZHANG Jing, WU Sheng

海军工程大学 船舶与动力学院, 武汉 430033

College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

E-mail: ljx0601406@163.com

LIU Jian-xin, CUI Han-guo, ZHANG Jing, et al. Optimization of box-based algorithms for collision detection. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(18): 51-53.

**Abstract:** How to speedup the algorithms for collision detection is mainly studied, and some hypothesis is made and a method of pretreatment before collision detection is advanced, and a mixed bounding boxes algorithm of selecting different bounding boxes for objects which have different geometrical character is brought forward, and the improvement of box-based algorithms for collision detection is realized after analyzing the algorithm of intersection calculation between bounding boxes, and the algorithm for collision detection is accelerated.

**Key words:** virtual environment; collision detection; bounding box; pretreatment; mixed bounding boxes

**摘要:** 围绕如何提高碰撞检测的速度,对虚拟环境中的物体进行了假设,提出了对碰撞检测进行预处理的方法,并结合各类包围盒的特点,提出了在碰撞检测中针对具有不同几何特征的物体选择不同类型包围盒的混合包围盒算法,分析了不同类型包围盒之间的求交算法,实现了层次包围盒碰撞检测算法的优化,提高了碰撞检测的速度,增强了系统的实时性。

**关键词:** 虚拟环境;碰撞检测;包围盒;预处理;混合包围盒

**DOI:** 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.18.016 **文章编号:** 1002-8331(2008)18-0051-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP391

碰撞检测是计算机动画、物理仿真、计算几何、机器人学等研究领域的重要课题,是虚拟环境中必不可少的一部分。在虚拟环境中,由于用户的参与和物体的运动,物体间经常会发生碰撞。此时,为保证用户能以自然的方式与这个环境交互(包括感知环境并干预环境),并产生身临其境的虚幻感、沉浸感,就需要及时检测到这些碰撞、做出碰撞反应、更新绘制结果。

虚拟环境中通常包含大量物体,而且物体的形状复杂,检测这些物体之间的碰撞情况是一项非常耗时的工作。由于虚拟现实系统是典型的限时计算、限时显示系统,这些物体的碰撞检测必须在很短的时间内完成,因此,碰撞检测实际上成了虚拟环境及其他实时仿真系统的瓶颈<sup>[1-3]</sup>。目前,国内外的学者对虚拟环境下的碰撞检测进行了深入的研究,并提出了空间分解(space decomposition)法、时空包围盒法、距离跟踪法、层次包围盒(hierarchical bounding volumes)法等许多有效、可靠的检测算法<sup>[4-9]</sup>,其中,层次包围盒法是目前在虚拟环境中最常用的方法之一,其典型的算法有包围球(Sphere)、轴向包围盒AABB(Axis-Aligned Bounding Box)、固定方向包围盒FDH(Fixed Directions Hulls)、方向包围盒OBB(Oriented Bounding Box)、离散方向包围盒K-Dop(Discrete orientation polytopes)等。然

而,各类包围盒的应用都有一定的局限性,包围球一般适用于在三个坐标轴上分布比较均匀或经常发生旋转运动的几何体,但当对象发生变形时,很难从子结点的包围球合成父结点的包围球,只能重新进行计算。在固定方向凸包FDH中,当物体变形后,要通过重新计算变形节点的包围盒,然后严格按自底向上的顺序,由子结点的FDH合成父结点的FDH,而重新计算包围盒的计算量较大。OBB的重叠测试和节点修改耗费相对较高。K-Dop包围盒是由平行平面对组成的包围盒,它是AABB的推广和一般化,也必须在其所包含的物体发生旋转时进行更新。

为了减少在层次包围盒碰撞检测过程中对包围盒进行检测的次数,本文针对虚拟环境中不同运动状态的物体进行合理的假设,对将要进行碰撞检测的物体进行预处理,并结合包围球构造和计算的简单性,提出混合包围盒模型,即对具有不同几何特征的物体采用不同类型包围盒,并给出了具体的判断方法,对碰撞检测算法进行了优化,提高了碰撞检测的实时性和可靠性。

## 1 碰撞检测优化算法

按物体的运动状态可将虚拟场景分成静态的部分和动态

**基金项目:** 国家部委科技预研基金项目。

**作者简介:** 刘健鑫(1983-),男,研究生,研究方向为舰船工程信息可视化技术;崔汉国(1964-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为计算机图形学和虚拟现实;张晶(1980-),男,博士生,研究方向为图形图像设计与可视化技术;吴昇(1982-),男,硕士生,研究方向为舰船工程信息可视化技术。

**收稿日期:** 2007-09-21 **修回日期:** 2007-12-10

的部分,在实际场景中,大部分的物体处于静止状态,而只有少部分的物体在运动,如 3D 游戏(赛车游戏中的汽车)、3D 模拟训练系统(模拟飞行系统中的飞机)、环境漫游系统等,在这些虚拟场景中,可能在大部分时间片内,绝大部分的物体没有发生碰撞。如果在进行碰撞检测之前,先进行一定的假设和预测<sup>[6,7]</sup>,排除掉那些在该时间片内不可能发生碰撞的物体,减少碰撞检测的计算次数,即可加快碰撞检测的速度。

本文将整个碰撞检测过程分为预处理、初步估计、精确求交 3 个阶段。在虚拟场景中,预处理和初步估计阶段的计算对整个处理过程的影响较大。

### 1.1 预处理阶段

基本假设:对于虚拟场景中的物体,进行如下假设:

(1)系统不会出现“漏报”现象,即在进行碰撞检测之前,物体之间没有发生穿透现象。在现实的系统中,当检测时间片间隔较小(在一定的精度要求下)时,可以保证两物体在进行碰撞检测时还没发生碰撞或正好发生碰撞。

(2)不会同时有两个以上的物体发生碰撞。在现实生活中,两个以上的物体几乎不可能同时发生碰撞,两次碰撞之间都会存在微小的时间差(多个时间片的时间)。在虚拟现实系统中只考虑两个物体之间的碰撞检测问题。

(3)物体是凸的,对于凹的物体,则对其凸包进行运算。

(4)所有的碰撞都在一个时间片内完成,即如果上次已经检测到发生了碰撞,这次检测时则认为上次发生的碰撞已经完成。

对于虚拟环境中原来静止的物体,假设:

该物体是质点,即只有位置没有大小和方向。在虚拟场景相对于物体而言很大时,两个相距很远(超过一定的数值时)的物体根本不可能发生碰撞,也就无需进行碰撞检测。

对于虚拟环境中运动的物体,假设:

物体在前一时刻的速度或加速度是已知的,或者是可以推导出来的,从而可以提前预测物体大概的运动方向和位置,估计出下次可能发生碰撞的时间下限和大概位置,提前排除在该时刻不可能发生碰撞的物体。

### 1.2 初步估计阶段

在初步估计阶段,分两步来进行,第 1 步先采用包围球或轴向包围盒排除不可能发生碰撞的物体;第 2 步,针对具有不同几何特征的物体选择不同类型的包围盒进行碰撞检测。

#### 1.2.1 包围球、轴向包围盒的构造

层次包围盒法的基本思想是使用体积略大而几何特性简单的几何体包围盒(球体、长方体等)来近似地描述虚拟场景中复杂的几何对象,先对物体的包围盒进行粗略地检测,当包围盒相交时,其包围的几何对象才有可能相交。

(1)虚拟场景中的包围球为包含该对象的最小球体。包围球仅需两个标量描述,即球心和半径。首先计算物体所有基本几何元素(如三角形)的顶点的  $x, y, z$  坐标的均值以确定包围球的球心,然后计算球心与由三个坐标的最大值所确定的点之间的距离,即确定包围球的半径。

在虚拟场景中,一般一个物体的包围球是不会改变的,即使在运动的过程中,包围球也不用再进行更新,即包围球的半径不变。对于运动的物体,增加一个变量  $\lambda$ ,存储两包围球之间的距离,利用预先估计的可能发生碰撞的时间下限,等时间片到了再进行碰撞检测,同时更新数据  $\lambda$ ,并估计下一次可能发生碰撞的时间下限,从而在该时间片到来之前不用再进行检

测,避免了大量时间片的无用检测。

两个包围球间的相交检测也很简单,当两球心之间的距离大于两包围球半径之和时,即可判断出这两个物体不相交。

#### (2)轴向包围盒的构造

沿坐标轴的包围盒 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。描述一个 AABB,仅需 6 个标量,即组成物体基本几何元素的顶点的  $x, y, z$  坐标的最大和最小值。对两个 AABB 包围盒进行相交测试时,只需判断两个包围盒在三个坐标轴的投影是否重叠,当且仅当它们在三个坐标轴上的投影均重叠时,两个 AABB 包围盒才相交。

#### 1.2.2 混合包围盒算法

在层次包围盒算法中,为了快速且比较精确地确定发生碰撞的区域,应尽量采用紧凑性好且几何特征简单的包围盒,通过选择合适的包围盒可以减少不必要的包围盒树的碰撞检测次数。

为了充分利用各种包围盒的优点,避免它们的不足,在碰撞检测的初步估计阶段灵活运用不同的包围盒,将不同的包围盒运用到具有不同几何特征的物体上<sup>[8]</sup>,可以更进一步地排除不可能发生碰撞的物体,同时可以在碰撞检测的精确求交阶段,更准确地进行求交计算。

一般来说,包围球比较适合于近似球形或是发生旋转的物体,AABB 包围盒比较适合细长形且与坐标轴夹角不大的物体,OBV 比较适用于细长形且与坐标轴有一定夹角的物体, $k$ -dop 则比较适用于表面结构比较复杂但不发生旋转的物体。

#### (1)包围球与 AABB 包围盒之间的求交

设 AABB 包围盒的长为  $L$ ,宽为  $W$ ,高为  $H$ ,包围盒的一个顶点在原点,包围盒的中心坐标为  $(X_{AB}, Y_{AB}, Z_{AB})$ ,则 AABB 包围盒的约束方程为:  $\{(x, y, z) | 0 < x, y, z < H\}$ 。

设包围球的半径为  $R$ ,球心坐标为  $(X_0, Y_0, Z_0)$ ,则包围球的约束方程为:  $\{(x, y, z) | (x-X_0)^2 + (y-Y_0)^2 + (z-Z_0)^2 < R^2\}$ 。

在此先假定包围盒和包围球均在坐标系的第一象限,其它情况都可利用坐标转换转化成这种情况,此时,只需判断以下几个简单的方程组是否有解即可判断出包围盒的相交情况,具体方程组如下:

$$\begin{cases} x=W(0 \leq y \leq L, 0 \leq z \leq H) \\ (x-X_0)^2 + (y-Y_0)^2 + (z-Z_0)^2 = R^2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x=0(0 \leq y \leq L, 0 \leq z \leq H) \\ (x-X_0)^2 + (y-Y_0)^2 + (z-Z_0)^2 = R^2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} y=L(0 \leq x \leq W, 0 \leq z \leq H) \\ (x-X_0)^2 + (y-Y_0)^2 + (z-Z_0)^2 = R^2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} y=0(0 \leq x \leq W, 0 \leq z \leq H) \\ (x-X_0)^2 + (y-Y_0)^2 + (z-Z_0)^2 = R^2 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} z=H(0 \leq x \leq W, 0 \leq y \leq L) \\ (x-X_0)^2 + (y-Y_0)^2 + (z-Z_0)^2 = R^2 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} z=0(0 \leq x \leq W, 0 \leq y \leq L) \\ (x-X_0)^2 + (y-Y_0)^2 + (z-Z_0)^2 = R^2 \end{cases} \quad (6)$$

在判断包围盒和包围球的相交情况时,只要判断出以上任意方程组有解,即可断定它们是相交的,并且当包围球球心的  $y$  坐标大于  $R$  时,即可判断出方程组(4)无解,同理当  $x > R, z > R$  时,方程(2)、(6)无解。在最坏情况下,需要进行 6 次判断才能判断出它们的相交情况。

#### (2)OBV 包围盒与包围球之间的求交

一个给定对象的 OBV 包围盒被定义为包含该对象且相对

于坐标轴方向任意的最小的长方体。在对 OBB 包围盒进行计算时, 利用该物体中所有基本几何元素(如三角形)的顶点的均值和协方差矩阵来计算 OBB 包围盒的中心和方向, 设该物体中第  $i$  个三角形的顶点矢量为  $p^i, q^i$  和  $r^i$ , 包围盒所包围的三角形面片的数量为  $n$ , 下标  $j$  和  $k$  代表了点的  $(x, y, z)$  分量。则包围盒的中心位置为<sup>[9]</sup>:

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

协方差矩阵元素:

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

其中,  $\bar{p}^i = p^i - \mu, \bar{q}^i = q^i - \mu, \bar{r}^i = r^i - \mu$  且每个都是  $3 \times 1$  向量,  $\mu$  为均值,  $C_{jk}$  为协方差矩阵, 协方差矩阵  $C_{jk}$  的三个特征向量是正交的, 归一化后可作为一个基底, 它确定了 OBB 包围盒的方向, 分别计算物体中各个元素的顶点在该基底的三个轴上的最大值和最小值, 以确定该 OBB 的大小。

在判断 OBB 包围盒与包围球的相交情况时, 其方法和判断 AABB 包围盒与包围球的方法基本相同。在最坏情况下, 需要进行 6 次判断。

### (3) $k$ -dop 包围盒与包围球之间的求交

当  $k$  的值取定之后, 其包围盒各个面的方程即可确定, 从而可以确定包围盒各个面的方程。在判断其与包围球的相交情况时, 其方法和判断 OBB 包围盒与包围球的方法基本相同。在最坏情况下, 需要进行  $k$  次判断。

### (4) AABB 包围盒与 OBB 包围盒之间的求交

AABB 包围盒可看成是 OBB 包围盒的特殊情况, 即各轴的方向与坐标轴的方向一致的 OBB 包围盒, 故可以将 AABB 包围盒与 OBB 包围盒的求交看成是 OBB 包围盒之间的求交。一般运用分离轴理论对 OBB 间进行相交测试。

### (5) AABB 包围盒与 $k$ -dop 包围盒之间的求交

AABB 包围盒与包围球具有相同的对称性, 可用包围球来取代 AABB 包围盒来与  $k$ -dop 包围盒进行求交测试, 尽管会使包围盒树的遍历深度加大, 但由于每个子结点包围盒的求交算法比原始算法简单, 所花费的时间较少, 因此, 在总时间上用包围球来代替 AABB 并不会比直接使用 AABB 包围盒所花时间多。

### (6) OBB 包围盒与 $k$ -dop 包围盒的求交

OBB 包围盒与  $k$ -dop 包围盒是包围盒中最复杂的两类包围盒, 因此它们之间的求交算法相当复杂, 可使用 AABB 包围盒(或者是包围球)来代替它们进行求交运算, 如前所述, 这样做会使包围盒树的遍历深度加大, 但由于每个子结点包围盒的求交算法比原始算法简单, 因此, 在总时间上反而比直接使用 OBB 包围盒与  $k$ -dop 包围盒求交要少。

经过以上一系列的处理后, 在进行精确碰撞检测之前, 就已经排除了大量的没有发生碰撞的物体, 大大缩小了可能发生碰撞物体的范围, 避免了许多不必要的检测, 减少了系统进行碰撞检测的次数, 加快了碰撞检测的速度。

## 1.3 精确求解阶段

包围盒树的建立: 构造的包围盒树是基于该包围盒的二叉树, 按照自顶向下的方法细分构造而成。在该物体的包围盒树中, 根节点即为该物体的包围盒, 叶节点为构成该物体的基本几何元素(如三角形), 中间节点则为对应于各级子部分的子包围盒。具有  $n$  个基本几何元素的包围盒树包含有  $n-1$  个非叶子

节点和  $n$  个叶子节点。层次包围盒碰撞检测算法的核心思想就是通过有效地遍历两棵包围盒树, 以快速确定当前位置所对应的两个子包围盒或叶节点是否相交。假设两个物体  $A, B$ , 其包围盒对应其包围盒树中的节点  $V_A, V_B$ , 以  $V_A, V_B$  为根节点的包围盒为  $b(V_A), b(V_B)$ , 设  $V_A, V_B$  的初始值为该物体的包围盒,  $A$  和  $B$  包围盒树的遍历算法伪码如下:

```
CollisionTrees( $V_A, V_B$ )
{
  if  $b(V_A) \cap b(V_B) \neq \Phi$  then
    if  $V_A$  是叶子 then
      if  $V_B$  是叶子 then
        进行基本几何元素  $V_A, V_B$  的求交;
        进行碰撞响应计算;
        return;
      else
        for  $V_B$  中的每个子节点  $V_b$ 
          CollisionTrees( $V_A, V_b$ );
    else
      for  $V_A$  中的每个子节点  $V_a$ 
        CollisionTrees( $V_a, V_B$ );
  else
    return;
}
```

两棵包围盒树之间的碰撞检测是一个递归遍历的过程, 对  $b(V_A)$  和  $b(V_B)$ , 若发现  $b(V_A)$  的根节点的包围盒与  $b(V_B)$  的根节点的包围盒不相交, 则停止向下遍历; 如果遍历能达到物体  $A$  的包围盒树的叶节点, 再用该叶节点遍历物体  $B$  的包围盒树; 如果能到达物体  $B$  的包围盒树的叶节点, 即可进行基本几何元素之间的精确求交计算。

## 2 实验结果

实验环境采用 P43.0 MHz 的 PC 计算机, 实现了优化的层次包围盒碰撞检测算法。实验采用本文优化算法(即在初步估计阶段先用包围球进行碰撞排除再运用 OBB 进行相交判断的算法)和原始算法(即直接运用 OBB 进行相交判断的算法)分别测试了两个场景碰撞检测的时间。场景 1 中有两个圆环体, 每一个圆环体由 5 000 三角形组成, 场景 2 中也有两个圆环体, 一个圆环体由 5 000 三角形组成, 另一个由 20 000 三角形组成。图 1 为计算结果。

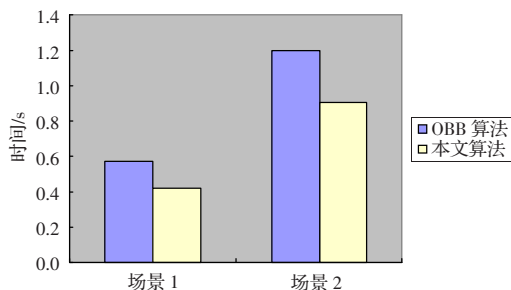


图 1 不同碰撞检测算法效果对比

从实验结果可以看出, 本文优化的碰撞检测算法较之 OBB 算法有大约 10%~15% 的性能上的改进, 并且当场景的规模越大时, 算法改进的效果也越明显。