

文章编号: 1005-0523(2019)06-0112-07

基于混合层次包围盒碰撞算法的改进

李玉虎^{1,2}, 王宗彦^{1,2}

(中北大学 1.机械工程学院; 2.山西省起重机数字化设计工程技术研究中心, 山西 太原 030051)

摘要: 针对传统的混合层次包围盒的检测精度和碰撞效率低下的缺点, 本文将材料力学中的形心的概念引入进来, 利用形心的位置来确定父节点包围盒中心, 然后对层次包围盒的树型结构加以改进, 上层结构采用 AABB(轴对齐包围盒)保证了更新的效率, 下层结构采用 OBB(有向包围盒)保证了测试的精度, 最终得到改进后的混合层次包围盒碰撞算法, 经过模拟实验验证两种算法对比, 改进后的算法在精度和效率上有了一定的提高, 为以后碰撞检测的研究提供了理论基础。

关键词: 包围体; 碰撞检测; 分离轴; 层次树; 相交测试

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2019.06.017

近年来, 伴随着虚拟现实技术的发展, 碰撞检测技术成为了学者们研究的热点。碰撞检测的研究就是判断不同物体之间的碰撞情况, 如果物体发生碰撞, 则需要反馈出碰撞的准确的位置信息、时间。由于虚拟环境中包含各种复杂的物体以及环境需要实时的反馈虚拟环境中的物体信息, 所以对于虚拟环境中物体之间的碰撞检测的效率和准确性的提高就具有重要的意义。

在碰撞效率上文献[1]提出了一种基于轴向包围盒和包围球的高效的混合包围盒碰撞检测算法, 并且将该碰撞算法应用于虚拟手术系统中; 文献[2]提出了一种基于质点转换和包围盒相结合的碰撞检测算法, 将物理学中质点的概念引入到碰撞检测中, 适用于检测复杂环境中物体的碰撞; 在碰撞精度上文献[3]在吸收了基于图像的碰撞检测的优点之后, 提出了将 PDH 包围盒和 AABB 相结合的算法, 在检测的速度上相比传统的经典算法提高了 20%; 文献[4]中利用图形硬件的计算能力对每个时间点上进行实时的处理, 提出了一种连续碰撞检测算法。

本文首先对传统的混合层次包围盒进行了分析, 其次将材料力学中的形心的概念引入进来, 利用形心的位置来确定父节点包围盒中心, 然后对层次包围盒的树型结构加以改进, 并最终通过模拟碰撞试验, 验证了改进后算法在保证一定精度的基础上碰撞效率有了提高。

1 包围体 BV(Bounding Volume)

在虚拟碰撞检测中直接对物体之间进行检测, 由于物体的多样性, 会造成检测过程中计算的繁琐复杂, 碰撞效率的低下。为减少计算的消耗就提出了包围体, 包围体简单的说就是创建一个包围一个或多个复杂形状物体的简单体空间。在进行检测的时候, 先进行包围盒的检测, 只有包围盒之间检测发生了碰撞, 才会进行物体的图元检测, 否则判断两物体不相交。

常用的包围盒有: 球体(Sphere)、轴对齐包围盒(AABB)、方向包围盒(OBB)、离散有向多面体(K-DOP)等^[5]。图 1 为包围盒的类型, 表 1 为包围盒的特征对比。

收稿日期: 2019-04-22

作者简介: 李玉虎(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为起重机数字化设计、虚拟现实技术。

通讯作者: 王宗彦(1963—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为 CAD/CAM, 起重机数字化设计。

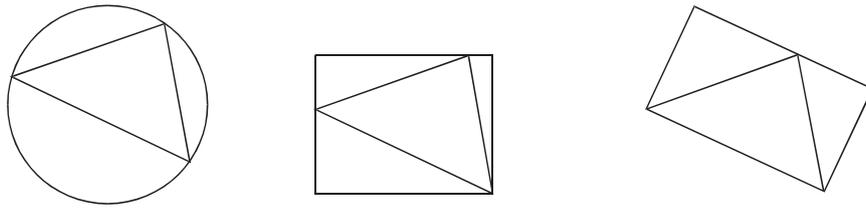


图 1 包围盒类型

Fig.1 Type of bounding box

表 1 包围盒比较

Tab.1 Comparisons of bounding boxes

类型	紧密性	构造性	检测速度	检测精度	检测难度
Sphere	差	简单	快	差	容易
AABB	较差	较简单	快	中等	较易
OBB	较好	较复杂	较快	中等	较易

2 算法实现

2.1 传统的算法

层次包围盒 BVH (bounding volume hierarchy)^[6]的思想是把包围体与树型结构相结合,通过树型结构的遍历对包围盒进行遍历检测。通过该算法在时间复杂度上降到了 Log 级。利用层次包围结构检测时,首先对父节点进行相交检测,如果父节点相交,才会继续对子节点进行相交检测,否则退出检测。算法流程图如图 2 所示。

2.2 性能函数^[7]

有学者针对层次包围盒的期望性能提出了相关的公式用于考量其综合性能经过不断的修正公式如下

$$T=N_v+C_v+N_p C_p+N_u C_u+C_o \quad (1)$$

式中: T 为最终测试性能; N_v 为 B_v 对的数量; C_v 为 B_v 间的测试消耗; N_p 为图元对数量; C_p 为图元间的测试消耗; N_u 为更新的节点数量; C_u 为更新这类节点时的所需消耗; C_o 为一次性操作过程中所需的消耗值。

为降低 N_v 和 C_p 的数量级,可构造紧凑的包围体;实现快速测试可降低 C_v 和 C_p 。

通常上述变量之间是相互有联系的,即一个值的减少必然会引起另一值的增加。

2.3 基本图元相交

2.3.1 分离轴测试

分离轴测试^[8]源于分离超平面理论,即 A 和 B 为给定的两个凸物体,若 $A \cap B = \emptyset$,则一定存在分离超平面 P ,使得 A 和 B 处于 P 的两侧。分离轴测试是该理论的直观表现,若凸物体之间不相交则一定可以在两物

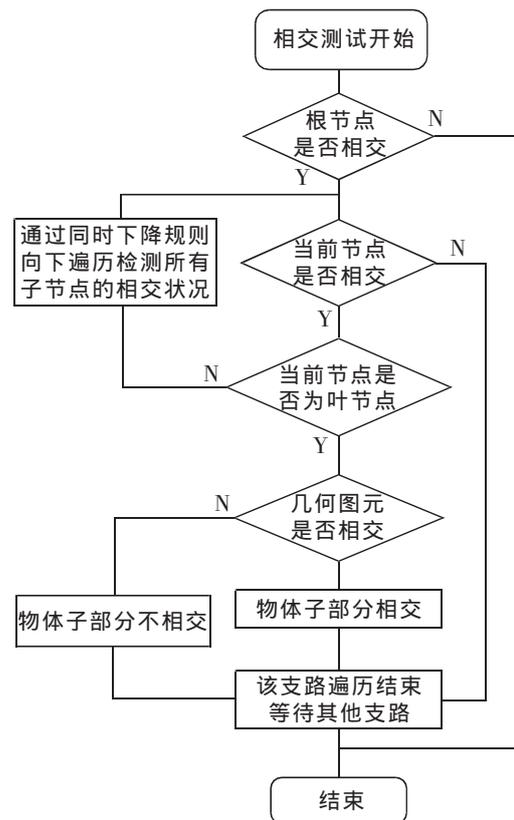


图 2 层次树相交测试遍历

Fig.2 Intersecting test traversal of the hierarchical tree

体之间找到一个平面 P 将凸物体分隔开。若两个凸体相交,则不存在该平面 P 。

由于 Sphere, AABB, OBB 等为对称几何体,所以他们的中心在投影轴上的投影都位于投影区间的中心。图 3 为圆形 A 和矩形 B 的相交测试。

图 4 中对于每一个物体对象获取沿 L 的一个支撑点,即在 L 上任一方向、距离物体中心点最远的一点,由于上述图形为对称的所以存在两个方向上的等距点,通过计算对象中心在 L 上的投影和最远点之间的距离,可以得到两个物体对象的半径 r_A 和 r_B ,同时也可以得到两物体中心间的投影距离 d ,若 $r_A+r_B < d$,则两物体间处于分离状态。

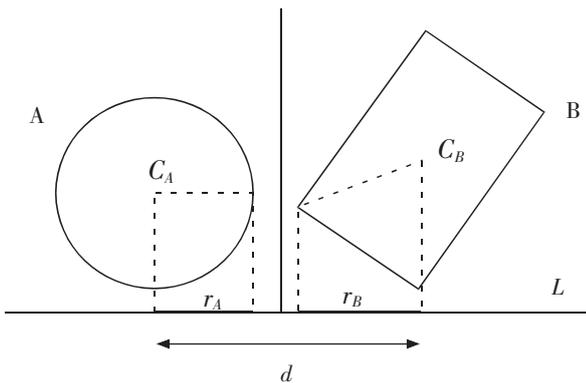


图 3 相交测试
Fig.3 Intersection test

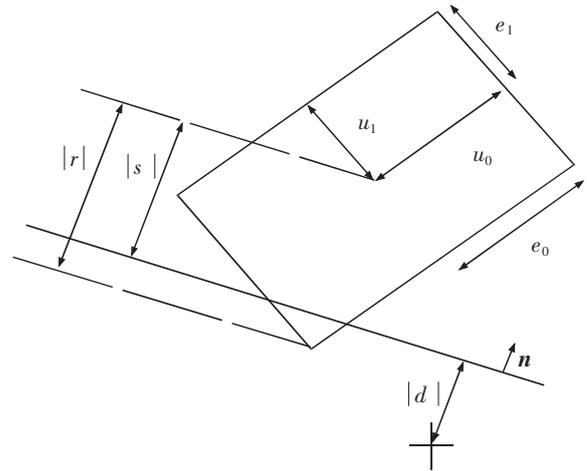


图 4 OBB 与平面之间相交测试
Fig.4 Intersection test between OBB and plane

2.3.2 箱体与平面间的测试

OBB 包围箱体 B 与平面 P 的相交测试采用分离轴测试,在这里,由于平面是可以无限扩展的,所以①排除与箱体面法线对应的轴测试;②不存在边-边组合测试。

将平面 P 定义为 $(n \cdot X) = d$, B 的中心 C ,局部坐标轴 u_i ,以及 3 个标量 $e_i (0 \leq i \leq 3)$,OBB 的定点 R 定义为: $R = C \pm a_0 u_0 \pm a_1 u_1 \pm a_2 u_2$,其中 $|a_i| \leq e_i$,OBB 的 8 个顶点, $V_i = C \pm e_0 u_0 \pm e_1 u_1 \pm e_2 u_2 (0 \leq i \leq 7)$ 。

选取直线 L 平行于 n ,且穿过盒体的中心,将 L 定义为 $L(t) = C + tn$ 。当 $t=0$ 时即为盒体中心 C 在直线 L 上的投影。中心对称体 OBB 在 L 上的投影为一个对称区间,令 C 为中心点, r 为投影半径则区间为 $[C - rn, C + rn]$ 。那么 B 与 P 的相交问题就转化为:计算半径 r ,并检测 B 中心点至 P 的距离与 r 的大小。

由于 OBB 上距中心最大距离点一般是 OBB 的顶点,则向量 n 上的最大投影半径可通过这些定点得到。因此,计算半径 r 时只需考查这一类顶点即可,相应的 8 个顶点的投影半径如下所示

$$r_i = (V_i - C) \cdot n = (C \pm e_0 u_0 \pm e_1 u_1 \pm e_2 u_2 - C) \cdot n = (\pm e_0 u_0 \pm e_1 u_1 \pm e_2 u_2) \cdot n \quad (2)$$

根据点积的分配律则为: $r_i = \pm(e_0 u_0 \cdot n) \pm(e_1 u_1 \cdot n) \pm(e_2 u_2 \cdot n)$ 通过计算各项绝对值并求和得到 n 向的正向幅度

$$r = |e_0 u_0 \cdot n| + |e_1 u_1 \cdot n| + |e_2 u_2 \cdot n| \quad (3)$$

由于 OBB 范围值设定为正值时, r 可写为

$$r = e_0 |u_0 \cdot n| + e_1 |u_1 \cdot n| + e_2 |u_2 \cdot n| \quad (4)$$

若分离轴向量 n 不是单位向量,则 r 为

$$r = \frac{(e_0 |u_0 \cdot n| + e_1 |u_1 \cdot n| + e_2 |u_2 \cdot n|)}{\|n\|} \quad (5)$$

将点 C 带入平面方程可得 C 距 P 的有符号距离 s ,得综上所述 $s = n \cdot C - d$:对平面 P 有 $(n \cdot X) = d$,其中对平面上的一点 Q 有 $d = Q \cdot n$ 。由于平面 P 上的所有点在 L 上的投影结果为一,因此距离

$$u = (Q - C) \cdot n = Q \cdot n - C \cdot n = d - C \cdot n \quad (6)$$

除去符号变化,该计算结果等同于将盒体中心点代入平面方程后的计算值。

当 $-r \leq s \leq r$ 时 OBB 与平面相交。在测试过程中,向量 n 不必加以规范化。若 n 不是单位向量, r 和 s 相当于增加了一个系数 $\|n\|$ 且对测试不会产生影响。

3 算法改进

3.1 OBB 的改进

OBB 即方向包围盒,相比于 AABB,OBB 增加了方向性,通常用 1 个表示旋转的矩阵和 3 个表示 1/2 边长的数值来表示 OBB。通常运用分离轴理论对 OBB 进行碰撞测试,对于 OBB 的测试一般确定 15 个分离轴,分别为 2 个物体的 3 个坐标轴共 6 条,2 个物体的各自 1 条边所构成面的法线共 9 条^[9]。若 OBB 在 15 个轴上的任意一个上都不发生重合,则 OBB 不相交,否则 OBB 相交。

传统的 OBB 计算包围盒的方向和位置是通过物体上的三角面片的信息用均值和协方差矩阵的单位话进行确定。但是这一算法忽略了三角形的分布问题使得计算出来的结果会倾向于三角面片数量多的部分,从而使计算结果不准确。

针对上述问题,材料力学中的形心就很好的解决了这个问题,形心就是图形的几何中心,本文将每个三角形看作简单的图形,先计算出每个三角形的形心,然后通过组合图形的形心计算公式计算出整体的形心,将该形心坐标作为包围盒的中心,然后再根据协方差计算公式计算协方差。过程如下:

1) 首先建立第 i 个三角形 T_i 的局部坐标系,以 T_i 平面为 XOY 面,以 T_i 的面法线方向为 Z 方向,根据公式计算 T_i 的形心。 (x, y) 表示 T_i 内的坐标, A_i 表示 T_i 的面积, dA 为该点处微面积, S_{xi} 和 S_{yi} 为 T_i 对 X 轴和 Y 轴的静矩分别为: $S_{xi} = \int_{A_i} y dA$, $S_{yi} = \int_{A_i} x dA$, T_i 的形心位置 $x_i = \frac{S_{xi}}{A_i}$, $y_i = \frac{S_{yi}}{A_i}$ 。

2) 利用局部坐标系和世界坐标系的转换矩阵,将上述每个 T_i 的形心坐标转化为世界坐标 Q^i 为 (x_{Gi}, y_{Gi}, z_{Gi}) 即为 T_i 的中心位置。则对于所有三角形 T 的组合形心 O 为

$$x_C = \frac{\sum_{i=1}^n A_i x_{Gi}}{\sum_{i=1}^n A_i}, y_C = \frac{\sum_{i=1}^n A_i y_{Gi}}{\sum_{i=1}^n A_i}, z_C = \frac{\sum_{i=1}^n A_i z_{Gi}}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (7)$$

$$3) \quad A_H = \sum_{0 \leq i \leq n} A_i, C_{ij} = \left[\frac{1}{A_H} \sum_{0 \leq k \leq n} \frac{A_k}{12} (9O_k^i O_k^j + x_k^i x_k^j + y_k^i y_k^j + z_k^i z_k^j) \right] - O^i O^j \quad (8)$$

3.2 树型结构的改进

在传统的混合层次包围盒中的所有节点都是由 Sphere 和 AABB 构成,在最初的检测中,首先对最顶层的 Sphere 进行检测,将不相交的物体进行区分,对于相隔比较近的物体,利用 AABB 进行检测。在检测过程中,对于两个相交比较深的包围盒,传统的算法会使层次树的遍历较深,从而使得进行相交检测时产生大量的计算,使得测试代价及其高。

在混合层次包围盒的测试中,不同类型的包围盒之间的测试更新会非常的耗时,针对这一问题有人提出了分层的思想,即将包围盒树分成 X 层、Y 层、Z 层,X 层采用 Sphere,Y 层采用 Sphere-OBB,Z 层采用 OBB。上述方法虽然通过 Y 层缓冲,巧妙地避免了不同类型包围盒的相交测试,但是如果 Y 层过大则同样会给 Y 层节点的更新产生巨大的计算量,相反如果 Y 层太小,则又不能避免不同包围盒的相交。

本文将采用 AABB-OBB 结构,分为上下两层 X 层、Y 层,其中 X 层采用 AABB,Y 层采用 OBB。X 层使用的 AABB 具有了快速测试的优点,可以快速剔除肯定不会碰撞的物体。Y 层采用 OBB 不但可以保证包围盒紧密型而且还可以相对较快的测试更新速度。对于不同层之间的测试,由于 AABB 可以看成是 OBB 的一种特例,故 AABB 与 OBB 的测试,可以看作是 OBB 与 OBB 的测试,所以既可以起到缓冲层的作用又避免缓冲层带来的冗余。

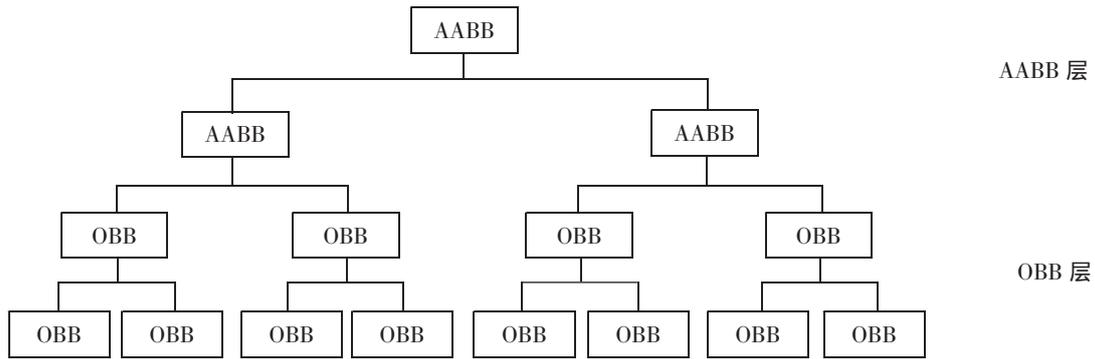


图5 层次结构图

Fig.5 Hierarchical structure diagram

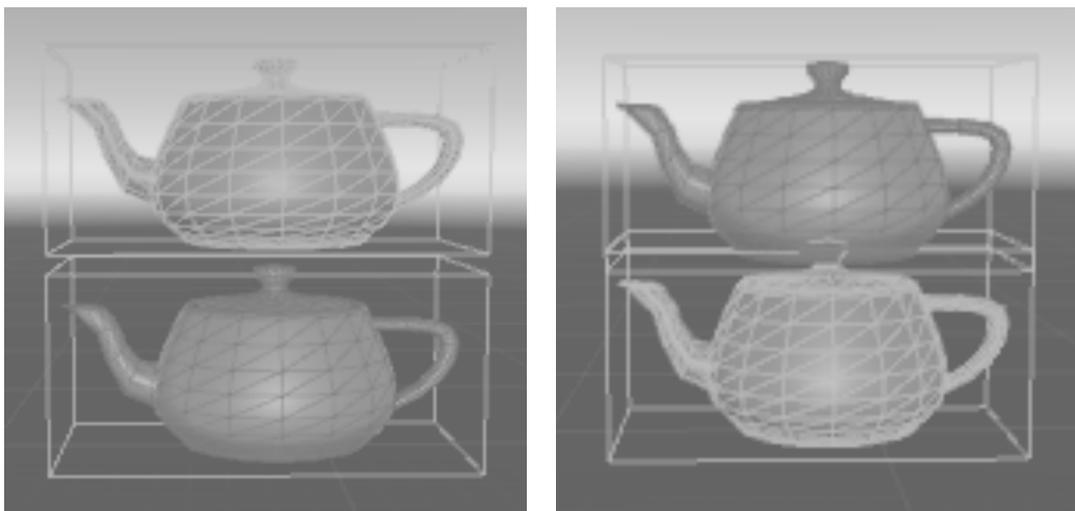
为了保证碰撞检测的效率,在不同的情况中要注意调整AABB和OBB的权重,对于一些复杂的环境,则需要增大AABB的权重,这样可以降低层次树的更新计算量,对于具有很大几率碰撞且需要精确检测的物体,则需要增大OBB的权重。本文采用的是:当包围盒的体积小于最大包围盒的 $1/2$ 时,采用OBB包围盒。针对两个有 n 个集合图元组成的物体传统的算法在相交测试时,相交时间复杂度为 $o(n)$,改进后的算法的相交时间复杂度为 $o(\log n)$,显然降低了时间复杂度。

4 实验验证

为了验证改进后的混合层次包围盒的可行性,本文对此进行了试验验证,首先通过验证两个物体的碰撞验证碰撞检测的精度,其次在验证传统算法检测和改进后算法的碰撞效率。具体试验环境为Intel(R)Core(TM)i5-2320 CPU @3.00 Hz,编译环境为Visual Studio 2017,采用C#语言编写代码。

4.1 精度检测

碰撞精度的测试是通过在空间中建立两个茶壶三维体,采用改进后的混合层次包围盒法对三维体进行碰撞检测,分别对有无包围盒的三维物体的对比来观察碰撞检测的精度问题,具体见图6。



(a) 显示包围盒碰撞前

(b) 显示包围盒碰撞时

图6 两物体碰撞图

Fig.6 Collision diagram of two objects

图6为空间两个茶壶不显示包围盒的碰撞检测和显示包围盒的碰撞检测,其中图6(a)碰撞之前的状态,图6(b)是碰撞时的状态,通过对比发现两物体只有间隔很小时,碰撞检测才会生效,因此碰撞检测精度得到了保证。

4.2 测试效率

本文通过检测在一定空间内25,50,100个物体的碰撞时间来观察传统混合层次包围盒和改进后的混合层次包围盒的碰撞效率,见图7。

表2中显示了相同空间下不同算法在不同数量下的碰撞时间,通过检测到的碰撞时间发现,在相同数量的碰撞物体下,改进后的算法相比于传统的算法在时间上有很大的缩短,即检测效率得到了很大的提高。

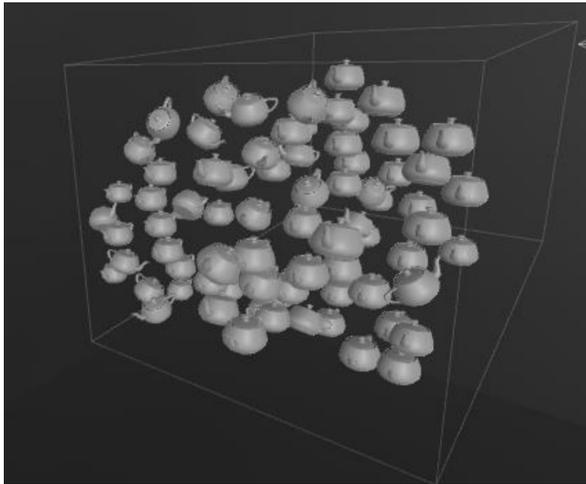


图7 多物体碰撞图

Fig.7 Multi-object collision map

表2 检测结果
Tab.2 Test results

算法	物体数量/个	碰撞时间/s
传统混合	25	40.593
层次包围	50	310.205
盒算法	100	3 462.964
改进后混	25	30.262
合层次包	50	223.582
围盒算法	100	2 038.266

5 结论

1) 本文利用形心的位置来确定混合层次包围盒的父节点的包围盒中心,再利用协方差矩阵的单位化来确定包围盒方向。

2) 对层次包围盒的树型结构加以改进,本文上层结构采用的是AABB结构,该结构可以保证快速碰撞和更新的效率,下层结构采用的是OBB结构,该结构保证了测试的精度。

最终得到了改进后的混合层次包围盒碰撞算法,经过相关的模拟实验,对改进前后的两种算法进行了对比,对比发现改进后的算法在检测精度和检测效率上都有了一定的提高,为以后碰撞检测的研究提供了理论基础。

参考文献:

- [1] 于凌涛,王涛,宋华建,等.面向虚拟手术的碰撞检测优化算法[J].哈尔滨工程大学学报,2014,35(9):1164-1170.
- [2] 唐源皓,侯进,吴婷婷,等.基于质点转换和包围盒的混合碰撞检测算法[J].哈尔滨工程大学学报,2018,39(10):1695-1701.
- [3] 刘晓东,姚兰,邵付东,等.一种基于混合层次包围盒的快速碰撞检测算法[J].西安交通大学学报,2007(2):141-144.
- [4] 黄通浪,唐敏,董金祥.一种快速精确的连续碰撞检测算法[J].浙江大学学报(工学版),2006(6):1051-1055.
- [5] 刘超.虚拟环境中碰撞检测算法的研究和实现[D].南京:南京航空航天大学,2018.
- [6] 许燦.基于混合包围盒的碰撞检测算法的优化研究[D].南京:南京理工大学,2013.
- [7] 康勇,熊岳山,费先宏,等.基于空间分解和包围盒层次的混合碰撞检测算法[J].计算机仿真,2010,27(6):191-193.
- [8] 林小彬.基于混合式包围盒的碰撞检测算法的研究与实现[D].广州:华南理工大学,2015.
- [9] 甘建红,彭强,戴培东,等.基于OBB层次结构碰撞检测的改进算法[J].系统仿真学报,2011,23(10):2169-2173.

Improvement of Collision Algorithm Based on Mixed Level Bounding Box

Li Yuhu^{1,2}, Wang Zongyan^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering; 2. Shanxi Engineering Research Center for Digital Design of Crane, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the disadvantages of low detection accuracy and collision efficiency of the traditional hybrid hierarchical bounding box, the concept of centroid in material mechanics was introduced. The location of centroid was used to determine the center of parent node bounding box. Then the tree structure of hierarchical bounding box was improved. AABB bounding box was used in the upper structure to ensure the renewal efficiency, and OBB bounding box was used in the lower structure to ensure the detection efficiency. Finally, the improved hybrid hierarchical bounding box collision algorithm was obtained. The simulation results show that the improved algorithm has a certain improvement in accuracy and efficiency, which may provide a theoretical basis for future research on collision detection.

Key words: bounding volume; collision detection; declutch shaft; hierarchy tree; intersection test