

虚拟手术中刚体和软体碰撞检测算法研究

淡科锋¹, 耿国华¹, 周明全^{1,2}

(1. 西北大学 可视化技术研究所, 陕西 西安 710127;

2. 北京师范大学 信息科学与技术学院, 北京 100875)

摘 要:在虚拟手术中,组织器官的碰撞检测一直是影响手术模拟效率的瓶颈。文中基于手术器械一般远小于组织器官、并且手术过程中器械仅有极小尖端部分与器官接触这一事实,提出了一种新的算法。传统的碰撞检测算法中,一般用层次包围盒树对物体进行建模。文中对虚拟手术器械的建模使用线性表来代替层次包围盒树,与标准库 RAPID 的对比实验表明,该方法提高了检测的效率,能较好地解决类似虚拟手术中小型刚体和大型软体之间的碰撞检测。

关键词:碰撞检测;刚体;软体;层次包围盒

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2008)09-0060-04

Research on Collision Detection between Rigid and Soft Body in Surgery Simulation

DAN Ke-feng¹, GENG Guo-hua¹, ZHOU Ming-quan^{1,2}

(1. Institute of Visualization Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. College of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In virtual operation, the surgery tools always are very small compared to the organ and they have very little spin segment that contacting with soft tissue. Based on this fact, presents a method for collision detection that is well suited to the collision between small rigid body and big deformable body. The method uses linear list instead of traditional BVH in the model of surgical tools. A new corresponding collision detection algorithm is presented. Experimental results show that it performs well compared to the RAPID collision detection library, a standard in the field.

Key words: collision detection; rigid body; deformable body; bounding volume hierarchy

0 引 言

碰撞检测一直是计算机图形学中的研究热点,在计算机几何、机器人学、计算机生物学、计算机动画、计算机仿真、虚拟手术以及织物模拟中有着广泛的应用。近年来针对刚体的碰撞检测算法已趋于成熟,许多新的算法被用来检测物体之间的碰撞。而可变形体的碰撞检测作为交互式物理模拟和动画中的重要组成部分,也正快速成长为热门的研究领域。

常见的软体碰撞检测算法有包围盒层次方法(Bounding Volume Hierarchies)、随机方法(Stochastic Methods)、距离场方法(Distance Fields)、空间分割方法

(Spatial Subdivision)和图像空间(Image-space Techniques)方法。其中层次包围盒方法由刚体碰撞检测演化而来,由于其简单、易行、高效而得到了最广泛的研究和应用^[1,2]。

层次包围盒技术^[3]的核心思想是用体积略大而几何特性简单的包围盒来近似地描述复杂的几何对象,从而只需对包围盒重叠的对象进行进一步的相交测试,此外通过构造树状层次结构来逐渐逼近对象的几何模型,直到几乎完全获得对象的几何特性。这种方法能将大量无关区域迅速排除,这样就能很快找到碰撞位置。包围盒的类型主要有包围球(sphere)、方向包围盒(OBB)、离散方向包围盒(k-DOPs)、沿坐标轴的包围盒(AABB)和凸壳(Convex Hull)等。

文中首先对碰撞检测的相关研究背景作一介绍,在此基础上针对虚拟手术中手术器械远小于组织器官的特点,对层次包围盒方法加以改进,提出了一种新的碰撞检测方法。实验表明该方法能较好地满足虚拟手

收稿日期:2007-12-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(F020503)

作者简介:淡科锋(1981-),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,研究方向为可视化技术、虚拟现实;耿国华,教授,博士生导师,研究方向为模式识别、智能信息处理;周明全,教授,博士生导师,研究方向为计算机图形学、数字图像处理、科学计算可视化。

术中实时性和准确性的需要。

1 构建包围盒

对于可变形体,构建层次包围盒的主要目标在于找到一种方法,当变形发生后,能迅速更新或者重建包围盒树。在建立包围盒树(BVH)时,有三种策略:自上而下、自下而上、插入法。事实上,自上而下方法被广泛应用于碰撞检测。这种方法的主要思想是递归分解目标物体,直至到达基本单位元。用户可以自定标准或者选用某种启发式方法来指导分解过程,以产生更好的包围盒树,如完全平衡树。利用这种思想建立 n 叉 BVH 树的算法如下:

```
CreateBVH(Note n, partition D, split strategy CL)
Begin
    应用划分策略 CL 划分物体为:  $D_1, D_2, \dots, D_n$ 
    为  $D_1, D_2, \dots, D_n$  建立结点,并分别记为  $n_1, n_2, \dots, n_n$ 
    for all  $n_i$  do
        CreateBVH( $n_i, D_i, CL$ )
    end for
End
```

刚体经常采用二叉树作为包围盒树,与此不同,可变形体却常常采用四叉树或八叉树。随着存储密度的增加,需要更新的结点变少了。如图 1 所示^[1]。

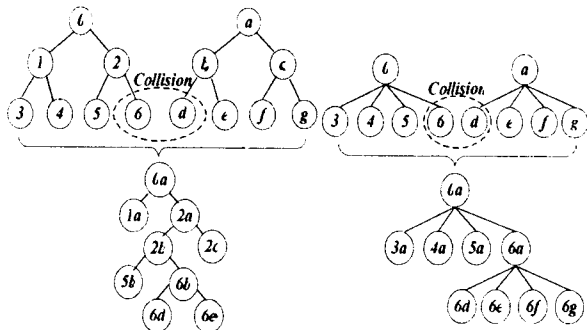


图 1 二叉树、四叉树的碰撞检测

虚拟手术中的软组织变形并不如织物一样复杂,呈现出一定的局部化、轻微化、低速化特征。另外,在建立包围盒树过程中,将一个集合划分为两份比划分为三份或多于三份具有更少的选择,更容易实现。基于这样的考虑,选用了二叉树作为层次包围盒树的存储结构。

2 碰撞检测算法

2.1 碰撞检测中的数据结构

虚拟手术中的碰撞检测与织物模拟不同,它主要考虑器官组织与手术器械之间的碰撞以及软组织变形引起的自碰撞问题^[4]。可以发现人体器官结构上极其复杂,动辄数万、数十万的面片,而常用的手术器械在

结构上却很简单。如图 2 所示。



图 2 3D 心脏网格,手术器械

可以假设器官有 n 个面片,手术器械有 m 个面片, $n \gg m$ 。在构建以 n 个面片为叶子结点的二叉 BVH 过程中,其总结点数将达到 $2n$ 个。在最优情况下,BVH 为完全二叉树,此时它的高度为 $\lceil \log_2(2m + 1) \rceil - 1$;在最差情况下,BVH 形如哈夫曼树,此时它的高度将达到 $m - 1$ 。在一般的碰撞检测算法中,算法的时间大量耗费在 BVH 树结点的递归处理中,其增长速度随着高度的增加而迅速加快。笔者认为,在虚拟手术中,一般的手术器械如手术刀、手术钳、镊子等相比组织器官体积很小,且为刚体没有变形要求。所以在手术器械建模时没有采用层次包围盒树,而是使用了顺序表。对于有 m 个面片的手术器械,它的顺序表有 $m + 1$ 个元素。其中第一个元素为手术器械的包围盒,建立这个包围盒的目的在于使用它只需一步就能判断器械是否与器官发生碰撞。剩余 m 个元素依次为器械的面片数据。如图 3 所示。

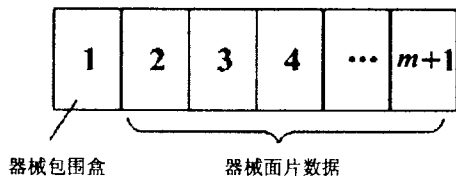


图 3 碰撞检测中刚体使用的数据结构

这里有一个问题需要注意,在人体器官模型 A 中,面片大小是不一致的。如果器械 B 的面片较大的话,有可能与 A 的某个结点的左右孩子都相交,这时在向下遍历的过程中,就会出现误差。解决这一问题的方法是,在建立手术器械模型时,尽量选用较为均匀的小面片,其大小最好不超过 A 的最小面片,此时将完全没有误差。查找最小面片可在遍历 BVH 的过程中完成,时间复杂度为 $O(n)$ 。算法流程如图 4 所示。

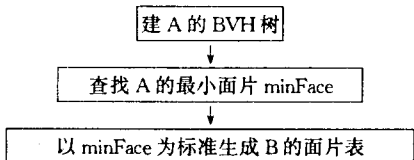


图 4 手术器械面片表生成流程

这样做会对手术器械模型引入大量的细小面片,

但在虚拟手术中,实际发生碰撞的面片数远少于总体面片数,以镊子为例,在手术中发生碰撞的面片不超过 1%。通过分析下面的碰撞检测算法,可知,判断某一面片没有发生碰撞,只需要一步即可。另外,以 min-Face 为标准生成 B 的面片表,会增加生成 B 的时间。但由于 B 为刚体,不会变形,这一步可以把它放在程序预处理中进行,不会影响碰撞检测的效率。

2.2 碰撞检测算法描述

在碰撞检测过程中,首先用顺序表(用 B 指代)的第一个元素,即它的包围盒,与器官的 BVH 树(用 A 指代)作检测,如果不相交,直接返回;如果相交,则用 B 的剩余元素依次与 A 作相交测试。任一元素与包围盒的相交测试将在 2.3 节论及。

基于这种思想,设计实现了如下的检测算法:

CollisionDetection(A, B)// A 为器官的包围盒树, B 为手术器械的顺序表($m+1$ 个元素)

Begin

if A 和 $B[1]$ 不相交 then

 return no collision // A 和 B 的包围盒作相交测试

end if

for ($i := 2, i \leq m+1, i := i+1$) // 对器械 B 所有的面片进行相交测试

 while($B[i]$ 与 A 基本测试为真)

 if A 为叶子结点 then

 break; // 已到达叶子结点,转作精确测试

 end if

 if $B[i]$ 与 $A \rightarrow \text{leftChild}$ 基本测试为真 then // 向下作测试

$A := A \rightarrow \text{leftChild}$

 else

$A := A \rightarrow \text{rightChild}$

 end if

 end while

 if A 与 $B[i]$ 作精确测试为真 // 此时 A 为叶子结点

 保存碰撞信息

 end if

end for

return 所有碰撞面片的信息

End

在虚拟手术中,由于手术器械与器官组织发生碰撞的面片实际上很少,因此上面算法中的 while 循环很少检测为真,整个算法时间复杂度近似最优为 $O(n)$ 。

2.3 基本相交测试和精确相交测试

在上述算法中,提到了基本相交测试和精确相交测试两个概念。基本相交测试指的是手术器械面片与 BVH 树中叶子包围盒进行的相交测试。精确相交测试指的是 BVH 树中叶子包围盒中的基本几何元素与

手术器械面片进行的相交测试。

2.3.1 基本相交测试

以 AABB 包围盒^[5]为例说明如下。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 可表示为:

$R = \{(x, y, z) \mid l_x \leq x \leq u_x, l_y \leq y \leq u_y, l_z \leq z \leq u_z\}$, 其中 $l_x, u_x, l_y, u_y, l_z, u_z$ 分别是该 AABB 在 X, Y, Z 坐标轴上投影的最小和最大坐标值。这样基本相交测试就转化为 AABB 与空间三角形的相交测试。

事实上,由于此时进行的碰撞检测并非精确的基本几何元素检测,依然可以构建三角形面片的 AABB 包围盒,从而将问题转化为两个 AABB/AABB 之间的碰撞检测问题。构建三角形的 AABB 以及 AABB 之间的相交测试很简单,只需要六步即可完成,这里不再叙述。

2.3.2 精确相交测试

当基本相交测试报告发生碰撞时,算法转移到精确相交测试,只在这一步才能真正判断是否发生了碰撞。这是最基本的几何元素之间的相交检测。三角形是最简单的多边形,四面体是最简单的多面体,这两者是最常见的基本几何元素。四面体由四个三角形构成,与四面体的相交测试可以通过分别与四个面的相交测试完成,因此,最终的测试可归结为三角形与三角形间(Triangle-to-triangle)的相交测试^[6]。

二维平面中的两个三角形不相交当且仅当存在某一个三角形的一条边,使得另一个三角形的三个顶点均位于这条边的右侧(三角形的顶点按逆时针顺序排列)。因此如果不存在这样的一条边,则这两个三角形相交。

三维空间中的检测要相对复杂。设 A, B 是三维空间中的两个三角形,如果它们相交,则一个三角形的边与另一个三角形的面相交。不失一般性,设 p_1 和 p_2 为共享顶点 P 的三角形 B 的两条边, $q_i (1 \leq i \leq 3)$ 为三角形 A 的三条边,对应的顶点为 Q_i 。找出 p_1, p_2 形成的面与边 q_i 的交点,实际上就是求解以下方程式:

$$P + \alpha_1 * P_1 + \alpha_2 * P_2 = Q_i + \beta_i * q_i \\ (0 \leq \beta_i \leq 1, \alpha_1, \alpha_2 \geq 0, \alpha_1 + \alpha_2 \leq 1)$$

很明显, A 和 B 的三条边、 B 和 A 的三条边都要做这样的测试。所以,这样的方程式一共是 6 个。算法开始时,利用一个三角形(设为 A)与另一个三角形(设为 B)测试形成的三个方程求出 $\beta_i, 1 \leq i \leq 3$ 。如果没有解,则说明没有相交;如果有多个这样的 β_i ,用它们构造 A 和面 B 的相交线。两个三角形的任合相交将发生在这条线上。这样,问题就简化为这条相交线和三角

形 B 的相交测试,这是一个二维平面问题。具体算法如下:

Step1: 运用行列式找出参数 $\beta_i, 1 \leq i \leq 3$;

Step2: 如果不存在这样的解,则没有碰撞,退出;

Step3: 构造三角形 A 与面 B 的相交线;

Step4: 如果这条线与三角形 B 相交,则两个三角形相交。

3 实验结果与分析

将算法与碰撞检测库 RAPID^[7]作了对比测试,平台为 Pentium 4 CPU 3.00GHz, Windows Xp sp2 操作系统。测试结果如表 1 所示。

表 1 碰撞检测测试结果比较

	软体面片	刚体面片		文中算法(ms)	RAPID(ms)	RAPID/文中算法
		测试算法	RAPID			
模型 1	836	103	60	0.037	0.031	0.838
模型 2	5000	247	108	0.083	0.102	1.229
模型 3	247446	287	125	1.054	2.049	2.285

可以看出,当软体面片较少时,算法性能较差。但是当软体面片数显著大于刚体面片数时,算法速度提高很快。算法性能提高的关键在于当刚体面片数较少时,能在很大程度上节约程序嵌套递归的开销。

4 结束语

文中提出的算法在虚拟手术中具有较高的实际应

用意义。有一点要指出的是,算法同样适用于大型刚体与小型刚体之间的碰撞检测。如何改进算法,使之适合大型物体之间的碰撞检测是下一阶段的研究目标。

参考文献:

- [1] Dequidt J, Marchal D, Grisoni L. Time - critical animation of deformable solids: Collision Detection and Deformable Objects [J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2005, 16(3 - 4): 177 - 187.
- [2] 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.
- [3] Moore M, Wilhelms J. Collision Detection and Response for Computer Animation [J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1988, 22(4): 289 - 298.
- [4] 魏迎梅, 王涌, 吴泉源, 等. 刚体在软体对象环境中的碰撞检测的研究[J]. 计算机学报, 2001, 24(8): 802 - 808.
- [5] van den Bergen G. Efficient Collision Detection of Complex Deformable Models Using AABB Trees[J]. Journal of Graphics Tools, 1998, 2(4): 1 - 13.
- [6] Tropp O, Tal A, Shoshone I. A Fast Triangle to Triangle Intersection Test for Collision Detection[J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2006, 17(5): 83 - 90.
- [7] Gottschalk S. RAPID: Robust and accurate polygon interference detection[R/OL]. 1996. URL: <http://www.cs.unc.edu/geom/OBB/OBBT.html>.

(上接第 59 页)

表 2 可以看出,此时 SORR 算法的精度更高;当 $C > 10^5$ 时,虽然 SORR 算法和 SVR 算法的回归估计精度相当,但是 SORR 算法所需时间大幅度减少,即学习速度大幅度提高。因此,在学习速度和回归估计精度之间取折衷时, SORR 算法的自由度更大。

以上实验均采用 Matlab 7.0 编程,运行于 Intel Pentium III /796MHz, 256M 内存。

4 结束语

支持向量机在模式识别方面的研究已相当成熟,应用也十分广泛。然而,在回归估计方面的研究和应用都还不成熟,如何设计快速有效的算法就是其应用中的问题之一。文中在研究标准支持向量机回归估计算法的基础上,通过理论推导,提出一种改进的回归估计算法 SORR,而后将 SORR 算法和 SVR 算法应用于医学上三种血浆脂蛋白样本中胆固醇含量测定。实验结果表明 SORR 算法优于 SVR 算法。进一步扩大支持向量机在回归估计上的应用范围是今后研究的方向

之一。

参考文献:

- [1] Vapnik V N. The nature of statistical learning theory[M]. New York: Springer Verlag, 1995.
- [2] 边肇祺, 张学工. 模式识别[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [3] Olvi L M, David R M. Successive overrelaxation for support vector machines[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1999, 10(5): 1032 - 1037.
- [4] Smola A J, Scholkopf B. A tutorial on support vector regression [R]. UK: Royal Holloway College, University of London, 1998.
- [5] Trafalis T B, Inco H. Support vector machine for regression and applications to financial forecasting[C]//Proceedings of the IEEE - INNS - ENNS International Joint Conference on Neural Networks. Como, Italy: [s. n.], 2000: 348 - 353.
- [6] 丁蕾, 陶亮. 支持向量机在胆固醇测定中的应用[J]. 安徽大学学报: 自然科学版, 2005, 29(2): 60 - 63.