

基于点云模型的虚拟手术系统建模及碰撞检测

胡凌燕¹ 何声星¹ 熊鹏文¹ 刘小平^{1,2} 任忠杰¹

(1. 南昌大学信息工程学院, 南昌, 330031; 2. 卡尔顿大学工程与设计学院系统与计算机工程系, 加拿大渥太华, K1S5B6)

摘要: 建模与碰撞检测算法是虚拟手术具有良好实时性的前提。通过 CT 得到病人身体患部的点云数据, 再基于八叉树剖分算法, 采用层次包围球结构, 对手术部位的软组织及器官进行建模。为了提高碰撞检测的实时性, 将手术器械物理模型简化为一个小球或一条直线与软组织交互, 而几何模型保持不变, 这样在不影响虚拟手术的视觉效果同时又提高了碰撞检测的速度。实验结果表明, 算法能准确检测出虚拟手术器械与虚拟模型接触的点, 而且碰撞检测实时性显著提高, 简化后的平均碰撞检测时间仅为虚拟手术的快速碰撞检测算法中未简化的方法平均时间的 10%。

关键词: 虚拟手术; 碰撞检测; 点云; 包围球

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Modeling and Collision Detection for Virtual Surgery System Based on Point Cloud Model

Hu Lingyan¹, He Shengxing¹, Xiong Pengwen¹, Liu Xiaoping^{1,2}, Ren Zhongjie¹

(1. Information Engineering School of Nanchang University, Nanchang, 330031, China; 2. Department of Systems and Computer Engineering, School of Engineering and Design, Carleton University, Ottawa, ON, K1S5B6, Canada)

Abstract: Modeling and collision detection algorithm is the premise of the real-time in virtual surgery. Here, we extract the CT point cloud data from patients. Then, we model for soft tissues and organs based on the algorithm of octree subdivision and hierarchical structure of bounding sphere. In order to improve the real-time of the collision detection, the physical models of the surgical instruments are simplified to balls or lines. The geometry remains unchanged, and it thus does not affect the operation of the virtual visual while the speed of the collision detection is improved greatly. The experimental results show that the algorithm can accurately detect the point of virtual contact with the virtual model of surgical instruments, and collision detection in real-time have increased considerably. Simplified average collision detection time is 10% of the original.

Key words: virtual surgery; collision detection; point cloud; bounding sphere

引 言

虚拟手术是涉及计算机图形、机械力学及生物科学等跨领域互相渗透的研究方向。通过虚拟手术

的模拟仿真,医生们可以进行术前计划及术中仿真及术后结果预测等研究工作。虚拟手术能够非常逼真地模拟真实手术,因此虚拟手术受到越来越多的科研工作者的青睐。

随着计算机技术的不断提升,尤其是虚拟现实的迅猛发展,使得碰撞检测的研究显得更加急切。碰撞检测是保证虚拟手术沉浸感和逼真感的关键技术。在虚拟手术过程中,需要不断的检测手术器械是否与虚拟组织发生碰撞,如果没有碰撞则继续检测,否则反馈发生碰撞区域的具体数据。近年来,研究者在该领域也有不错的成果,碰撞检测算法也多样化^[1,2]。基于图形的碰撞检测算法,主要使用层次包围盒模型^[3];Arbabi 使用圆柱分割法进行碰撞检测,它的特点是精度高,但是主要适用于边界约束运动^[4];Macie 采用包围球的算法实现快速碰撞检测^[5];Lai 使用球体和圆柱体描述场景中的物体已达到快速过滤不相交的物体^[6];Chang 使用包围盒嵌套方向包围盒(Oriented bounding box, OBB)的方法加快了碰撞检测速度,但是检测精度却不高,在对一些检测精度要求较高的场合多使用层次包围盒算法^[7];李红波等使用混合包围盒算法提高了检测的效率^[8];方彬等利用四维时空的 AABB(Axis-aligned bounding box)层次包围盒进行碰撞检测^[9];宋城虎等基于包围盒和空间分割的混合碰撞检测算法^[10];此外, Govindaraju 通过分析得到图像空间保存的信息^[11],检测是否发生干涉;Gress 将碰撞检测计算映射到 GPU 顶点多处理器,通过实施绘制完成碰撞检测计算^[12]。

本文基于点云模型,对系统建模及碰撞检测进行研究。点云模型具有如下特性:没有复杂的拓扑结构,自适应性强,在数值计算时不需要生成网格,计算复杂度小,而且通常点云的数目巨大,细节再现能力强,因而点云模型在虚拟仿真系统中逐渐成为一种趋势。在点云模型基础上使用八叉树剖分算法,采用层次包围球结构进行系统建模和碰撞检测。采用该算法时,层次包围球树不会因为模型旋转而受到影响。同时包围球还具有构造简单,算法简单易实现等优点,可以大大提高系统仿真的实时性。在虚拟手术过程中,主要是虚拟仿真手术器械与人体组织之间的交互。一般常用的手术器械包括:抽吸管、穿刺器及手术刀等。这些手术器械可以分成两类:(1)抽吸管和穿刺器等主要功能部位为器械的前端的器械;(2)手术刀等这种主要功能部位为刀锋面的器械。为了提高虚拟手术系统交互的实时性,本文对这两类虚拟手术器械在物理模型上进行了简化,将其分别抽象为一条直线和一个点,而几何模型上仍然是相应手术器械的形状。这样可以加快碰撞检测速度,缩短检测时间并且不影响虚拟仿真系统视觉效果。本文最后的实验结果证明,采用点云模型及简化的手术器械模型的碰撞检测不仅能够准确仿真出器械与人体组织交互的场景,同时具有很好的实时性。

1 虚拟手术仿真系统建模

“点云”数据通过三维扫描仪从真实世界中得到。点云的细节表达能力要强于传统的面片模型,而且由于点与点之间没有拓扑关系,减少了计算代价。正是因为点云模型的种种优势,所以本文放弃了传统的面片模型。每个数据点实际上是一个小球,包括球心坐标、半径、法向量及颜色值等信息。这些信息能够保证真实地再现手术场景和手术过程。虚拟手术场景主要包含两部分:(1)病人身体中待手术的部位;(2)手术器械,包括手术刀、抽吸管及穿刺器等。

1.1 人体软组织建模

在人体建模过程中,可以通过 CT 扫描得到病人身体待手术部位的数据。然后通过数据立方算法(CUBE)得到点云数据。为了提高碰撞检测的效率,用八叉树结构来存储点云数据,其中,中间结点用来构成八叉树结构,而叶子结点用于存储人体软组织的点云数据。八叉树中每个中间结点都有 2~8 个孩子。八叉树的优点是树的深度小,存储空间需求低,能有效提高碰撞检测效率;它的缺点是构造难度大。

系统采用“八叉树剖分算法”来实现所有人体点云数据的管理及建模,它能够把空间中大量离散的

点云数据整合成一颗层次包围球树。所有点云数据用一个最大的球包围起来,这是八叉树的根结点,再将所有的点以 X, Y, Z 方向作为均分面,均匀地剖分成 8 个区域,每个区域用一个球包围起来,这 8 个球就把所有的点都包含进去。这 8 个球是八叉树中的第 1 层中间结点。然后再对第 1 层中的每个球,再以 X, Y, Z 方向作为均分面,均匀地剖分成 8 个区域,每个区域用 1 个球来包围。这 64 个球分别是八叉树的第 2 层中间结点。如此依次剖分下去,直到所有中间结点中包含小球的数目小于等于 8 剖分结束。这就是“八叉树剖分算法”。点云数据通过剖分形成八叉树的具体过程如图 1 所示。

在建模过程中,中间结点的半径未知。碰撞检测首先判断手术器械与根结点是否相交,如果相交再判断是否与孩子相交,直到叶子结点结束。由图 1 可知,中间结点是大小各异的小球用于包围叶子结点,但是它的半径未知。本文提出了一种简单有效的方法来获取各个中间结点的半径 r 。中间结点的半径就包围该结点所有孩子的最小球的半径。具体过程如下:

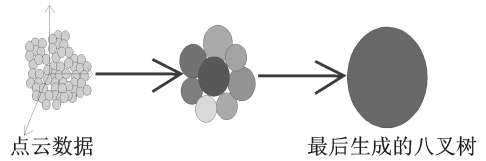


图 1 点云建树过程

Fig. 1 Process of point cloud building

假设某一中间结点有 8 个孩子,它们的圆心 x 轴坐标分别为 $x_1 \sim x_8$, y 轴坐标分别为 $y_1 \sim y_8$, z 轴坐标分别为 $z_1 \sim z_8$ 。首先根据所有叶子结点的坐标,找出包围这些叶子结点的包围球的球心坐标记为 (X, Y, Z) 。其中 $X = (x_1 + \dots + x_8) / 8$, $Y = (y_1 + \dots + y_8) / 8$, $Z = (z_1 + \dots + z_8) / 8$ 。

然后求出点 (X, Y, Z) 到所有叶子球中球心最远的一个的小球,记为 Sphere。设该球半径为 r_1 ,到该球的距离记为 d ,则包围这些结点的包围球半径为 $r = r_1 + d$ 。

1.2 手术器械建模

对于手术器械,传统的方法是建立一颗层次包围球树,当手术器械移动时,这棵树要同步更新,这样计算量非常大,检测效率低,从而导致碰撞检测速度跟不上。在虚拟交互过程中,在视觉上手术器械已经和软组织接触,形变和力反馈都无法实时呈现,或者整个虚拟手术过程的不流畅等现象。在虚拟手术中,抽吸器、穿刺器等手术器械与人体组织交互的是手术器械的末端,而手术刀与人体组织交互的功能部位主要是刀锋面。因此,本文提出一种在物理模型上简化,而在几何模型上不简化的方法来建模方法。在物理模型上,根据手术器械功能部位的不同,对手术器械采用两种不同的简化方法。把抽吸管、穿刺器等抽象成一个小球,把手术刀等抽象成一条直线。在视觉模型上仍然是各种手术器械实际形状。这样处理既不影响虚拟手术的视觉效果,同时在建模及碰撞检测过程中可以大大提高速度及精度。

2 碰撞检测

对于现实中的两个物体它们是不可能相互穿透共享相同的空间,正是基于这个现实生活中的事实才有了碰撞检测的出现。碰撞检测作为虚拟手术系统中的一个关键组成部分,主要的任务是判断手术器械与手术对象之间是否发生了碰撞,如果发生了碰撞,给出碰撞位置穿刺深度等信息。它是形变计算及触觉反馈的基础。碰撞检测的速度直接关系到整个系统仿真的实时性。

在本文虚拟手术碰撞检测过程中,用简化的手术器械模型与“八叉树”的人体软组织进行相交检测。根据手术器械简化模型的不同,碰撞检测采用不同的检测方法。当手术器械简化成球模型时,采用的碰撞检测方法本文称之为点碰;当手术器械简化成线模型时,相应的碰撞检测方法为线碰。

2.1 点碰

对于抽吸管和穿刺器等手术器械与软组织交互时,本文把这些手术器械简化为一个小球模型,实际上就是点云数据中的一个点,用这个点去遍历“八叉树”,这样可以快速排除不相交的部分,如果能够遍历到手术对象的叶子结点则认为发生了碰撞。因此称之为点碰。点碰示意图如图 2 所示。A 为手术器械代理点的球心;B 为虚拟人体软组织点云模型中一个点的球心,它们的半径分别为 r_1 和 r_2 。球心 A

到球心 B 的距离为 d 。如图 2 所示, $d \leq r_1 + r_2$, 则两个球发生碰撞; 如果 $d > r_1 + r_2$, 则这两个球没有发生碰撞, 然后逐层遍历, 直到检测到手术器械代理点与叶子结点发生交互, 就判断手术器械与软组织发生碰撞, 并且输出发生碰撞点的信息。

2.2 线碰

对于手术刀这类与软组织交互功能部位主要是一条线的手术器械, 碰撞检测则用这条线与“八叉树”进行相交检测, 这样可以快速排除不相交的部分。如果能够遍历到手术对象的叶子结点则认为发生了碰撞检测。这种碰撞检测方法称之为线碰。线碰的示意图如图 3 所示。其中直线 AB 为简化的手术刀, P 为包围球的球心, 半径为 r 。 P 到线段 AB 的最短距离为 PC , 此时有两种可能。第 1 种是点 P 与线段的交点在线内如图 3(a) 所示; 第 2 种是交点不在线内如图 3(b) 所示。判断是否发生碰撞具体步骤如下:

- (1) 求出根结点球心到直线的最短距离为 d ;
- (2) 通过 d 和直线方程能够得出交点 C 的坐标;
- (3) 分如下几种情况考虑:
 - (a) 当这个交点在线段内, 并且 $d \leq r$, 则判断为发生碰撞;
 - (b) 当这个交点在线段内, 但 $d > r$, 则判断为没有发生碰撞;
 - (c) 当这个交点不在线段内, 并且 $d > r$, 判断为没有发生碰撞;
 - (d) 当这个交点不在线段内, 但 $d \leq r$, 则计算球心到线段两个端点的距离, 设分别为 d_1 和 d_2 , 有且仅有 d_1 和 d_2 同时大于 d 时不发生碰撞, 反之则发生碰撞。

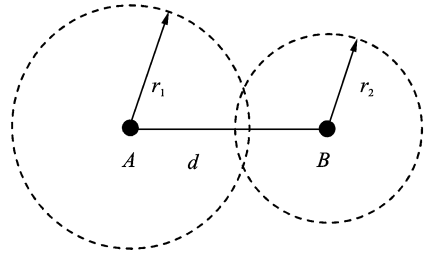


图 2 点碰示意图 ($d < r_1 + r_2$)

Fig. 2 Schematic diagram of point of touch ($d < r_1 + r_2$)

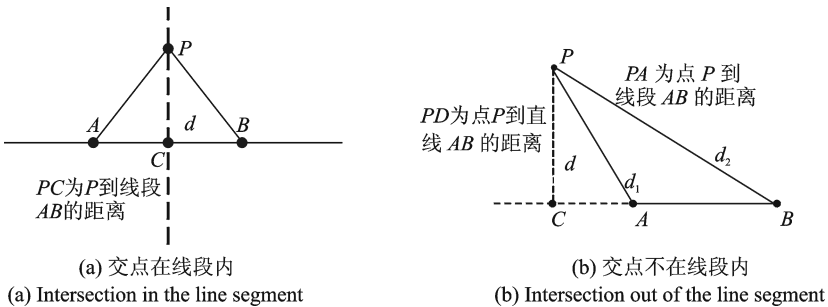


图 3 线碰示意图

Fig. 3 Schematic diagram of line of touch

3 虚拟手术系统模型及碰撞检测结果

通过 CT 得到病人待手术部分的点云数据, 再基于八叉树剖分算法, 采用层次包围球结构, 对手术部位的软组织及器官进行建模, 同时建立手术器械的简化模型。把抽吸管、穿刺器等手术器械抽象成一个小球, 把手术刀等抽象成一条直线。为了给操作者逼真的视觉效果, 对以上模型进行渲染, 使操作者在视觉上看仍然是各种手术器械实际形状。具体碰撞检测过程如下: 首先与根结点判断是否发生碰撞, 如果没有发生碰撞, 则不可能发生碰撞; 如果发生碰撞, 再与其孩子结点判断, 直至最后能与叶子结点发生碰撞, 才认为是真正发生碰撞。碰撞检测系统流程如图 4 所示。

本文建立的脑膜瘤模型如图 5 所示。在图 5(a)中先用少量的点云数据建模,再将触觉机械手映射成手术器械,与脑膜瘤接触;完整点云数据的脑膜瘤模型如图 5(b)所示。在图 5(a,b)中,蓝色空心点为模型点,红色线条为虚拟手术机械手运动轨迹,绿色实心点为碰撞点,由图 5 看出,每个机械手代理点的碰撞点不一定只有一个,在实际应用中,通过算法选择一个最优点来表示碰撞点。

经过渲染的脑膜瘤虚拟手术仿真系统如图 6 所示。其中红色突出物体是脑膜瘤模型,白色物体是手术器械。触觉机械手被映射成手术器械,当操作者握住触觉机械手运动时,手术器械跟随机械手做出同样的动作,同时,虚拟模型能够将虚拟模型计算的交互力输出到触觉机械手上,并反馈给操作者。

当虚拟手术中的手术器械是抽吸管和穿刺器之类的器械时,其被简化成位于其顶端的一个点,采用“点碰”的方法进行碰撞检测,手术器械与组织碰撞前后场景如图 7 所示。图 7(a)是没有发生碰撞时的状态,图 7(b)是发生碰撞且软组织形变后的状态。通过对比图 7(a,b)可以看出,图 7(b)中发生碰撞的区域是以手术器械前端的小球与瘤子的接触点为球心的凹陷部位,形变是根据碰撞检测得到的接触点信息进行进一步处理后得到的效果(不在本文讨论范围之内)。从图 7(b)形变效果可以看出,碰撞检测结果正确。当虚拟手术中的手术器械是手术刀之类的器械时,手术器械与组织碰撞前后场景如图 8 所示。此时采用“线碰”原理进行碰撞检测,将

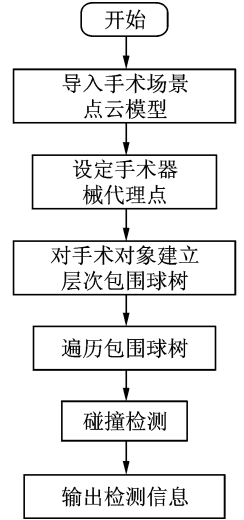


图 4 碰撞检测流程图
Fig. 4 Flow chart of collision detection

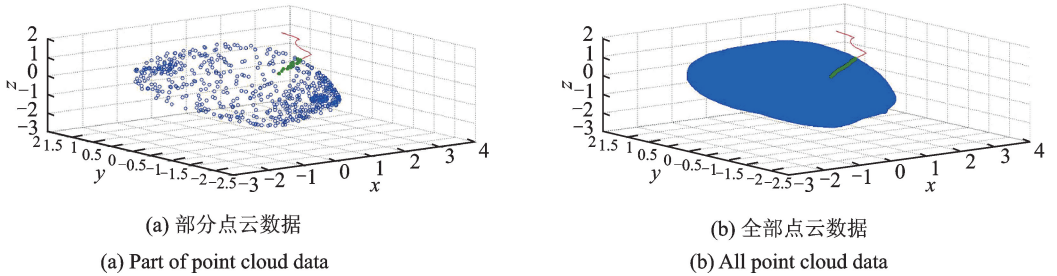


图 5 脑膜瘤和手术器械三维示意图

Fig. 5 3D schematic diagram of meningioma and surgical instrument

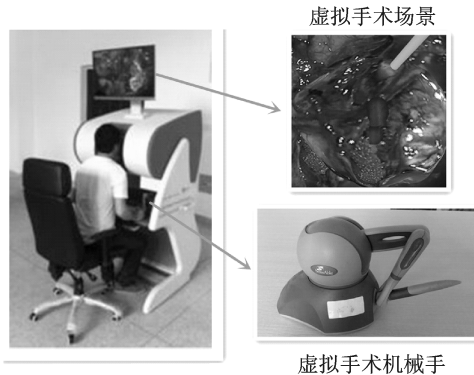


图 6 虚拟手术仿真系统

Fig. 6 Simulation system of virtual surgery

手术刀的功能部位刀锋面简化为一条线段,考虑到现实中手术器械与点云数据的大小差距,为了使图片具有更直观的效果,进行了放大处理,本文假设这条线为圆柱体,其半径约为“点云”中单个点半径的 10 倍。从结果可以清晰地看到,软组织在手术器械接触部位撕裂,出现一条凹槽。这条凹槽与手术刀切割的路径相吻合,说明“线碰”的碰撞检测结果正确。

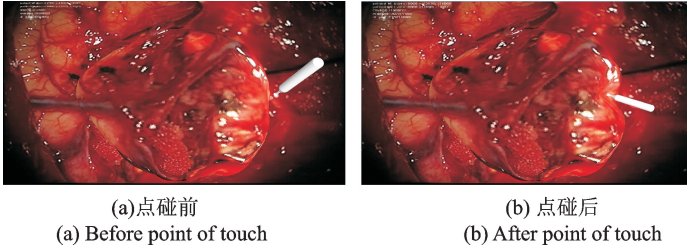


图 7 点碰

Fig. 7 Point of touch

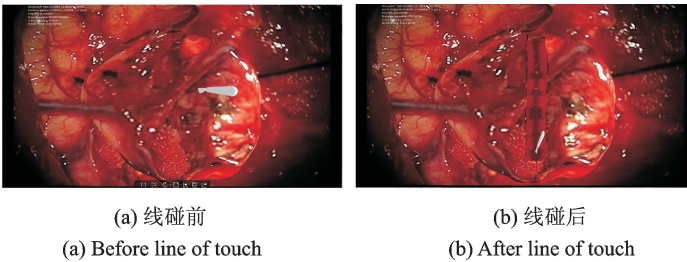


图 8 线碰

Fig. 8 Line of touch

4 碰撞检测的实时性和准确性实验结果分析

本实验基于虚拟软组织手术实验平台,该平台以 Visual Studio 2010 为开发环境,在上述虚拟手术仿真平台上进行碰撞检测实验。计算机硬件参数是:4 核 i5 处理器(3.2 GHz)、4 GB 内存以及 NVIDIA GeForce 605 显卡。

4.1 准确性分析

首先进行碰撞检测准确性分析实验,具体步骤如下:(1)操作者握住触觉机械手,使机械手代理点与虚拟脑膜瘤中随机标定的一个结点进行碰撞接触,发生碰撞检测;(2)程序记录机械臂的位置坐标,如果发生了碰撞,会记录碰撞点的位置坐标,如果没有发生碰撞,只记录未发生碰撞的最大包围球。同时系统给出是否发生碰撞的提示;(3)比较机械手代理点坐标与指定结点的坐标,检验是否确实发生碰撞。按照如前所述方法,机械手坐标为 (X_1, Y_1, Z_1) ,半径为 R_1 ,结点坐标为 (X_2, Y_2, Z_2) ,半径为 R_2 ,两点距离为 $S = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2}$,如果 $S \leq R_1 + R_2$,则表示发生了碰撞,如果 $S > R_1 + R_2$,则表示没有发生碰撞。

表 1 中列出了系统记录下来的机械手代理点和结点的 X, Y, Z 轴坐标位置,以及此时检测到包围球半径 R 是点的半径,然后与算法计算得到的碰撞标志发生比对,根据数据得出碰撞检测是正确的。由于算法基于八叉树剖分算法,采用层次包围球结构,所以机械手最先是和根结点即最大的包围球进行比较,之后逐层递进,直至最底层的叶子结点。如表 1 所示,发生了碰撞的那些点半径都是 1.035 mm,是最底层的叶子结点。而那些未发生碰撞的点因为与在外层的球已经发生了碰撞,因而就不需要与里层的点进行比较。机械手代理点的半径是固定的,结点要经过一层一层判定是否发生碰撞,如表 1 的

序号7 结点所示,代理点先与半径为 108.313 1 mm 的大包围球比较,此时发生了碰撞,接着往里面一层,与和它距离最小的包围球比较,此时未发生碰撞,则最后标记未发生碰撞。

表 1 碰撞检测数据

Tab.1 Data of collision detection

序号	机械手代理点位置				结点位置				碰撞标志
	X	Y	Z	R	X	Y	Z	R	
1	-35.968	65.630	-80.021	0.033	-9.848	-11.805	-4.579	108.313	否
2	-15.957	28.221	-38.299	0.033	-16.106	28.439	-38.111	1.035	是
3	7.798	7.978	-20.309	0.033	7.962	8.100	-20.028	1.035	是
4	6.081	22.678	-30.734	0.033	6.410	22.963	-30.361	1.035	是
5	-30.717	69.779	-85.862	0.033	-9.848	-11.805	-4.579	108.313	否
6	-41.314	66.366	-99.031	0.033	-9.848	-11.805	-4.579	108.313	否
7	-37.963	60.810	-79.529	0.033	-9.848	-11.805	-4.579	108.313	是
					-31.226	-37.571	-31.226	-28.784	否
8	-20.291	13.177	-47.585	0.033	-19.989	12.793	-47.584	1.035	是
9	-2.400	1.472	-28.836	0.033	-2.131	1.841	-28.639	1.035	是
10	26.046	-7.039	-6.327	0.033	25.820	-6.764	-6.249	1.035	是
11	5.069	21.151	-36.116	0.033	4.857	21.399	-36.389	1.035	是
12	-28.317	69.087	-95.535	0.033	-9.849	-11.805	-4.579	108.313	否

4.2 实时性分析

实时性实验步骤如下:(1)分别按照“点碰”和“线碰”与传统方法建模;(2)运行程序,记录3种碰撞的重叠次数和相交次数;(3)计算平均碰撞检测时间。本文提出的“点碰”和“线碰”与传统方法检测时间比较如表2所示。在相同数据量的情况下,本文提出简化后的平均碰撞检测时间仅为虚拟手术的快速碰撞检测算法中未简化的 OBB 方法平均时间的 10%,检测速度提高了近 90%,并且能够保证碰撞检测的精确性,数据图如图 9 所示。

表 2 “点碰”、“线碰”与传统方法检测时间比较

Tab.2 Comparison of point of touch, line of touch and the original in detection time

模型数据量/ 10^4	包围球点碰/ms	包围球线碰/ms	未简化的 OBB 方法/ms
1	1.314	5.494	26.412
2	1.362	5.567	41.863
5	1.392	5.852	70.077
8	1.409	5.940	82.661
10	1.439	6.009	90.467
13	1.454	6.105	101.123
15	1.503	6.230	108.432
20	1.577	6.392	121.065

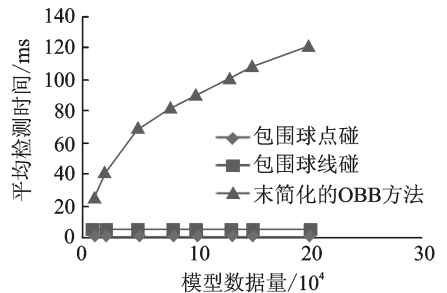


图 9 碰撞检测的时间

Fig.9 Time of collision detection

5 结束语

本文采用八叉树剖分算法及层次包围球结构的点云模型的脑膜瘤虚拟手术仿真系统,在手术器械与脑膜瘤交互过程中,能准确地检索到手术器械与脑膜瘤交互的区域,并且能流畅地实现虚拟手术操

作,在建模过程中,手术器械几何模型保持不变,而物理模型简化为一个小球或一条直线与软组织交互。继而在碰撞检测过程中分别采用点碰和线碰的方法实时准确地获得手术器械与软组织器官接触信息。本文方法响虚拟手术的视觉效果同时又大大提高了虚拟手术操作的实时性。

参考文献:

- [1] 潘海鸿,冯俊杰,陈琳,等.基于分离距离的碰撞检测算法综述[J].系统仿真学报,2014,26(7):1407-1415.
Pan Haihong, Feng Junjie, Chen Lin, et al. Collision detection algorithms based on separation distance: A survey[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(7): 1407-1415.
- [2] 唐勇,杨偲偲,吕梦雅,等.自适应椭球包围盒改进织物碰撞检测方法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2013,25(10):1589-1596.
Tang Yong, Yang Caicai, Lü Mengya, et al. Collision detection for cloth based on adaptive enclosing ellipsoids[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2013, 25(10): 1589-1596.
- [3] 冯立颖.碰撞检测技术研究综述[J].计算机时代,2014,8:7-10.
Feng Liying. A survey on collision detection technology[J]. Computer Era, 2014, 8: 7-10.
- [4] Arbabi E, Boulier R, Thalmannd D. Fast collision detection methods for joint surfaces[J]. Journal of Biomechanics, 2009, 42(2): 91-99.
- [5] Arbabi E, Boulier R, Thalmannd D. Efficient collision detection within deforming spherical sliding contact[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(3): 518-529.
- [6] Lai K C, Kang S C. Collision detection strategies for virtual construction simulation[J]. Automation in Construction, 2009, 18(6): 724-736.
- [7] Chang J W, Wang W P, Kim M S. Efficient collision detection using a dual OBB-sphere bounding volume hierarchy[J]. Computer Aided Design, 2010, 42(1): 50-57.
- [8] 李红波,周东渝,吴渝.基于混合包围盒的碰撞检测算法[J].计算机应用,2010,30(12):3304-3306.
Li Hongbo, Zhou Dongyu, Wu Yu. Collision detection algorithm based on mixed bounding box[J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(12): 3304-3306.
- [9] 方彬,王竹林,郭希维.基于AABB的四维时空层次包围盒碰撞检测方法[J].计算机测量与控制,2014,22(2):397-399.
Fang Bin, Wang Zhulin, Guo Xiwei. Four-dimensional space and time hierarchical collision detection method based on AABB bounding box[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(2): 397-399.
- [10] 宋城虎,闵林,朱琳,等.基于包围盒和空间分解的碰撞检测算法[J].计算机技术与发展,2014,24(1):57-60.
Song Chenghu, Min Lin, Zhu Lin, et al. A collision detection algorithm based on bounding box and spatial subdivision[J]. Journal of Computer Research and Development, 2014, 24(1): 57-60.
- [11] Govindaraju N K, Lin M C, Manocha D. Fast and reliable collision culling using graphics hardware[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, 12(2): 143-154.
- [12] Gress A, Zachmann G. Object-space interference detection on programmable graphics hardware[C]//SIAM Conference on Geometric Design and Computing Washington Brenwood. TN: Nashboro Press, 2006: 13-17.

作者简介:



胡凌燕(1978-),女,教授,研究方向:虚拟现实、机器人, E-mail: hulingyan@ncu.edu.cn.



何声星(1990-),男,硕士研究生,研究方向:虚拟现实, E-mail: hsx_lyhh@sina.cn.



熊鹏文(1991-),通讯作者,男,博士,讲师,研究方向:机器人传感与控制技术, E-mail: steven.xpw@ncu.edu.cn.



刘小平(1970-),男,博士,教授,井冈学者,研究方向:虚拟现实、机器人, E-mail: xpliu@sce.carleton.ca.



任忠杰(1990-),男,硕士研究生,研究方向:虚拟现实, E-mail: 815780273@qq.com.

