

文章编号:1001-9081(2013)09-2614-03

doi:10.11772/j.issn.1001-9081.2013.09.2614

# 虚拟手术中基于可变方向凸包的碰撞检测算法

史玲玲<sup>1,2\*</sup>, 王伟东<sup>1,2</sup>, 闫志远<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150080;  
2. 机器人技术与系统国家重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150080)  
(\* 通信作者电子邮箱 shilingling\_hit@yahoo.cn)

**摘要:**为了实现机器人辅助虚拟手术中快速精确的碰撞检测,提出了基于可变方向凸包的层次包围盒碰撞检测算法。在虚拟场景中,手术器械末端运动复杂多变且软体组织持续形变,分析器械和软组织的作用形式,根据器械运动学参数,预测软组织的变形,将其与固定方向凸包检测方法相结合,通过改变方向向量集合,提高包围盒树的紧密性,进而减少相交测试的次数,加速碰撞检测。仿真实验证明了可变方向凸包的碰撞检测算法可以实现精确的碰撞检测;与固定方向凸包算法相比在快速碰撞检测方面具有优越性,当软组织包含的面片数目越多时,快速性优势越显著。

**关键词:**虚拟手术;碰撞检测;可变方向凸包;层次包围盒;运动学;固定方向凸包

中图分类号:TP391.9 文献标志码:A

## Collision detection algorithm based on changeable direction hull in virtual surgery

SHI Lingling<sup>1,2\*</sup>, WANG Weidong<sup>1,2</sup>, YAN Zhiyuan<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150080, China;  
2. State Key Laboratory of Robotics and System (Harbin Institute of Technology), Harbin Heilongjiang 150080, China)

**Abstract:** In order to achieve fast collision detection in robot assisted virtual surgery, an algorithm based on changeable direction hull was proposed. It combined fixed direction hull algorithm with the two characteristics in virtual scene, complex motion of surgical instrument end and continuous deformation of soft tissues. Action mode between instruments and soft tissue was analyzed and deformation of soft tissue was predicted. Then the set of box directions was changed to improve the tightness of bounding volume trees. Accordingly, collision detection was accelerated with decreased interaction tests. The simulation results show that collision information can be obtained through the proposed algorithm and the new method implements faster compared with fixed direction hull algorithm.

**Key words:** virtual surgery; collision detection; changeable direction hull; hierarchical bounding volume; kinematics; fixed direction hull

## 0 引言

在机器人辅助虚拟手术仿真系统中,碰撞检测是计算反馈力和软体变形的前提,其对于提高用户的沉浸感和系统的逼真度具有重要意义<sup>[1]</sup>。虚拟手术中的碰撞检测涉及到模型与模型之间、模型与环境之间的测试<sup>[2]</sup>。在完整的手术场景中,存在有多个用关节连接的手术器械构件,以及可以发生变形或切割等物理变化甚至生理变化的软组织,使得碰撞检测更加复杂。虚拟手术场景中的碰撞检测既涉及到刚体与刚体之间、刚体与软体之间、软体局部之间的碰撞检测,又不能一概而论,避免器械关节连接构件之间的碰撞检测。

层次包围盒技术被广泛应用于虚拟手术中的碰撞检测。国内外学者通过优化算法、数据结构和硬件配置等方式来减少参与测试的基本数目或提高更新包围盒树速度,进而加速碰撞检测<sup>[3-7]</sup>,这些研究都具有一定的针对性,且实现了碰撞检测在不同领域的应用成果,但鲜见针对于机器人运动学和碰撞检测算法相结合的研究策略。

为了应用虚拟手术场景中机器人的运动学特性加速碰撞检测进程,本文通过主手参数和D-H算法求得器械的运动参

数,结合固定方向凸包碰撞检测方法,通过预测软组织变形和改变包围盒方向向量集合,提出了可变方向凸包碰撞检测算法。

## 1 基于固定方向凸包的层次包围盒技术

### 1.1 包围盒树的构建

在包含手术器械和软组织的虚拟手术场景中,需要实时更新包围盒树。本文提出的碰撞检测总体策略是在手术器械和软体组织根包围盒相交前,采用固定方向凸包(Fixed Direction Hull, FDH)构建物体的包围盒树,当其满足设定条件时,采用可变方向凸包算法。两种方法进行包围盒树的构建过程相似,因此,本文详细叙述固定方向凸包包围盒树的构建方法,并将其作为构建可变方向凸包包围盒树的参考。

固定方向凸包可以描述为特殊的半空间包围体<sup>[8]</sup>。其是由平行平面包围取交获得的凸体,且平行平面的法向量取自于 $k/2$ 对具有相反方向的固定向量集合 $S = \{d_1, d_2, \dots, d_{k/2}, -d_1, -d_2, \dots, -d_{k/2}\}$ 。此集合为FDH包围盒树中所有的包围盒所共享。与轴向包围盒(Axis-Aligned Bounding Box, AABB)不同,由于物体几何形状的各向异性,较复杂的FDH

收稿日期:2013-02-25;修回日期:2013-05-21。基金项目:国家863计划项目(2009AA044001)。

作者简介:史玲玲(1988-),女,河北保定人,硕士研究生,主要研究方向:医疗机器人;王伟东(1978-),男,山东潍坊人,讲师,博士,主要研究方向:医疗机器人、特种机器人;闫志远(1983-),男,黑龙江齐齐哈尔人,讲师,博士研究生,主要研究方向:医疗机器人。

很难勾勒出其具体轮廓。在碰撞检测过程中,通常通过各点在方向向量上投影的极值对包围盒进行表述,将其称作FDH包围盒的特征值。例如FDH8包围盒,可以通过如下的结构体信息完整地表达。

```
struct FDH8
{
    float min[4];           //沿四个固定方向向量投影的极小值
    float max[4];           //沿四个固定方向向量投影的极大值
}
```

构建叶节点的包围盒,方法为将每个三角面片在 $d_k$ 方向的投影进行比较,即设 $d_i = (d_{ix}, d_{iy}, d_{iz})$ , $i = 0, 1, \dots, k/2$ 。三角面片的三个顶点分别为 $v_j = (v_{jx}, v_{jy}, v_{jz})$ , $j = 1, 2, 3$ 。则各顶点在各个方向向量上的投影极值可以通过两个向量之间的点积 $value = v_{jx} \cdot d_{ix} + v_{jy} \cdot d_{iy} + v_{jz} \cdot d_{iz}$ 进行比较获得。在构建父节点的包围盒时,利用子节点包围盒在 $d_k$ 方向的极值比较即可获取父节点包围盒的特征值。本文基于碰撞检测的快速性原则,采用自顶向下的构造方式,选用二叉树作为包围盒树的存储结构,设定分离轴为最长轴方向,构造出紧密性和平衡性较好的包围盒树。对于可变方向凸包算法,其包围盒树的构建流程与FDH相同,只是集合S中的各向量要根据虚拟场景的变化进行更新。

### 1.2 相交测试

物体间的碰撞检测,首先是包围盒树的遍历。在虚拟手术场景中,先用运动器械包围盒的根节点遍历软组织的包围盒树,若相交则获取相交的叶节点,否则返回不相交。之后用获得的叶节点遍历器械的包围盒树,获取相交叶节点。无论是可变方向凸包还是固定方向凸包,其包围盒之间的相交测试可以通过S中各向量方向的极值比较来实现,且两个包围盒的相交与否最多只需通过k次比较运算。需要说明的是,方向凸包围盒相交测试的充要条件是,如果两个方向凸包在 $C(D_n)$ 中的某个方向上投影区间不重叠,则它们必然不相交;若在所有方向上的投影区间都重叠,则它们必然相交,其中 $C(D_n) = \{x \mid x = a \times b, a \text{ 和 } b \text{ 为凸包的边方向}\}$ 。对于一般的固定方向凸包, $S \subseteq C(D_n)$ ,所以即使其在所有的 $d_i$ 方向都相交,也不能得出绝对相交的结论,但这并不影响最终检测结果,只是延迟了获取不相交的结论。

在获取了相交的叶节点之后,要进行精确地碰撞检测,即基元相交测试。本文中的基元为三角面片,基元相交测试主要指三维空间中三角面片之间的测试。采用Tomas Moller改进的快速三角形相交测试方法——区间相交算法<sup>[8-9]</sup>。实验证明此方法优于BruteForce<sup>[10]</sup>和ERIT<sup>[11]</sup>方法。

### 1.3 三维空间物体碰撞测定

物体与物体之间的碰撞检测要比线段与物体之间的碰撞检测或者基本几何元素之间的相交测试复杂很多。线段与物体之间的碰撞检测可以采用射线与包围盒相交测试的方法进行计算,并且通常存在可数个容易确定位置的交点。而两个物体相互接触进而发生碰撞的过程中,会存在多种不同方式,进而产生的碰撞信息也就不能一概而论。虚拟手术系统中,碰撞检测是计算力反馈和软体变形的基础。在虚拟场景中,物体是以面模型的方式来呈现的,其表面只是看似光滑,实际上是由三角面片密集形成的凸多面体。在碰撞检测过程中,经过包围盒树遍历后,通过叶节点所对应的三角面片的相交测试获取发生交叠的三角面片。当物体与物体接触时,可能会产生很多个碰撞点,利用三维空间物体碰撞测定技术<sup>[12]</sup>获取碰撞信息——包括碰撞特征点的位置、接触法线的方向以及刺穿深度。

为了使虚拟场景中的运动和动力响应更加真实,这里采取多点碰撞处理方法。可通过2.2节和2.3节所述的碰撞检测算法和碰撞测定算法获取多个碰撞点的位置、接触法线方向和刺穿深度组成的碰撞检测信息组。如图1所示,当手术器械和手术对象发生碰撞时,可以利用上述的碰撞检测方法获取碰撞点的位置及碰撞点处的法线方向。

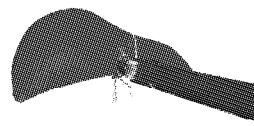


图1 碰撞结果可视化

## 2 虚拟手术场景的包围盒树更新

### 2.1 虚拟手术场景的特点

虚拟手术仿真的模块框架如图2所示。虚拟手术场景中,既包含运动的手术器械,又包含发生变形的软组织。如果活动对象只是进行平行移动,则只需对包围盒树的各个坐标进行平移向量的加减运算即可。然而,当对象进行姿态变换,也就是发生旋转时,如果对包围盒进行跟随旋转获得新的包围盒树,那么获取的新包围盒树的包围盒的法向量将来源于新的k值集合,即此包围盒树与另外一个物体的包围盒树的k个方向向量不同。这样两个包围盒树相交测试的消耗要远远大于来自同一k值集合的两包围盒树的相交测试。另外,当软体组织发生变形后,如果仍然采用原方向集合中的向量构造FDH树,会降低包围盒的紧密性。这两种情况,均会与构造FDH包围盒树来减小相交测试时间的目标相背离。因此,当器械运动或是组织发生变形后,其包围盒树的更新是碰撞检测所要研究的一个关键问题。

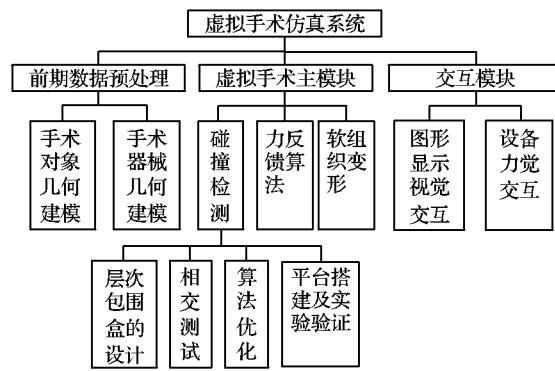


图2 虚拟手术仿真系统模块框架

### 2.2 手术器械的包围盒树更新

当手术器械的位姿发生改变时,三角面片的顶点坐标发生改变,如果根据三角面片的顶点坐标重新构造包围盒树,会使更新的时间开销很大。设手术器械的平移向量和旋转矩阵分别为 $\Delta p$ 和 $R$ ,节点的包围盒集合为 $S(V)$ ,各节点的包围盒根据物体在全局坐标系中的位姿矩阵做相应的旋转或平移,则变换后的包围盒集合为: $S'(V') = RS(V) + \Delta p$ 。

两个物体的包围盒方向根据各自位姿发生改变,进行包围盒树遍历时需要将一个物体的包围盒树从全局坐标系转换到相对于另外一个物体局部坐标系的坐标,然后才能进行包围盒之间的相交测试。设一个物体相对于全局坐标系的坐标为 $S_1(V)$ ,另外一个物体相对于全局坐标的位置向量和位姿矩阵分别为 $\Delta p_2$ 和 $R_2$ ,则第一个物体的包围盒树在物体二的

局部坐标系中的表示为:  $S_{12}(V) = S_1(V)\mathbf{R}_2 + \Delta\mathbf{p}_2$ 。

### 2.3 可变方向凸包算法

当手术器械逐渐接近并与软组织发生碰触的过程中, 手术器械会发生姿态的改变, 且软组织在器械作用下会产生变形, 碰撞点附近的三角面片位姿变化。器械的种类不同, 则软组织变形的结果不同。对于不同的手术器械和软组织, 可以预测两者相互作用的结果。例如, 当用夹钳夹取软组织时, 沿着夹钳与组织接触面法向, 软组织会产生压缩变形。如果根据原特定方向进行包围盒的构造, 构造的包围盒树紧密性不好, 造成包围盒树的遍历过程复杂, 消耗时间, 从而达不到虚拟环境中的快速性要求。根据运动器械与软组织的作用形式和运动器械的运动参数, 预测软组织变形, 改变包围盒树的原设定方向。在器械与组织达到即将碰触的界定点时, 对器械和组织的包围盒树根据变换后的向量方向进行更新, 可达到很好的紧密性, 进而减少了遍历过程, 提高碰撞检测的效率。基于此种原因, 本文提出了可变方向集合策略。

当手术器械与软组织还未发生碰撞时, 采用共享固定方向向量构造包围盒树, 由于包围盒树遍历过程很快就能检测到互不相交的节点, 检测迅速终止。如果检测出器械已经运动到其根包围盒与手术器械的包围盒相交的临界点, 则根据器械运动的速度方向, 确定新的方向向量集合  $S'$ , 并据此更新包围盒树。考虑到手术器械运动的连续性, 在器械与组织即将发生碰触时两者的包围盒已经具备相当好的紧密性, 进而快速获取碰撞点。

对于  $S'$  中  $d_k$  的确定, 要根据器械类型确定。如果器械要达到按压组织的效果, 则  $d_k$  中应存在两对与其运动方向相垂直和一对与其运动方向相平行的向量。设器械的运动参数集合为  $X = \{p_x, p_y, p_z, T, v_x, v_y, v_z\}$ , 则  $S'$  可表示为  $S' = f(X)$ , 如图 3 所示, 可以清晰地表示出新的包围盒树  $S'$  中向量方向与器械运动方向的关系, 同时也能够表示出利用本文方法器械与软组织由不相交到相互碰触的实现过程。由图 3 可看出: 当手术器械和软组织两者相对位置十分接近时, 采用  $S$  构造的包围盒树已经发生相交, 而采用  $S'$  构造的包围盒树并未发生交叠, 因此能够快速检测到不相交的节点, 终止进一步的相交测试。另一方面, 新的包围盒树呈现出更好的紧密性, 子节点之间的交叠少, 在包围盒树遍历的过程中, 可以迅速排除不相交的包围盒, 减少基元测试次数, 实现快速的碰撞检测。

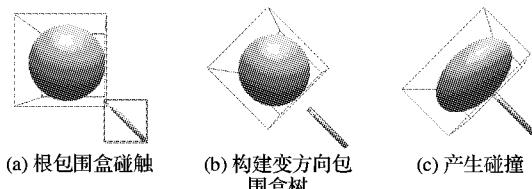


图 3 可变方向凸包包围盒算法

## 3 仿真结果及分析

为了证明可变方向凸包相对于固定方向凸具有优越性, 进行可视化仿真。采用传统方法和可变方向向量方法为变形后的软组织构造包围盒树, 包围盒树的构建过程分别如图 4 所示, 当软体如图中所示方向发生变形后, 紧密性的优势会凸显出来, 由此证明了新方法在包围盒树构建紧密性上采用可变方向凸包算法的正确性。

为了进行快速性的对比, 分别利用传统测试方法和可变方向方法进行碰撞检测, 平台为 Pentium 2 CPU 1.60GHz,

Windows XP SP3。在碰撞检测过程中, 由于硬件配置、外界程序干扰或者主手操作的不稳定性, 会使测量数据产生一定的波动, 图 5 所示为软组织面片数目约为 9800 时, 碰撞检测时间的采样图。在硬件条件相同的条件下, 分别将两种算法应用于不同模型的碰撞检测, 并对碰撞检测消耗的时间进行对比, 软组织模型的面片数如表 1 所示, 获得的结果如图 6 所示。由实验数据可知, 采用可变方向凸包建立包围盒树, 碰撞检测的时间比固定方向凸包建立的包围盒树碰撞检测的时间短, 且当物体逐渐呈现越来越复杂的特性时, 采用可变方向凸包进行快速性碰撞检测的优越性越明显。

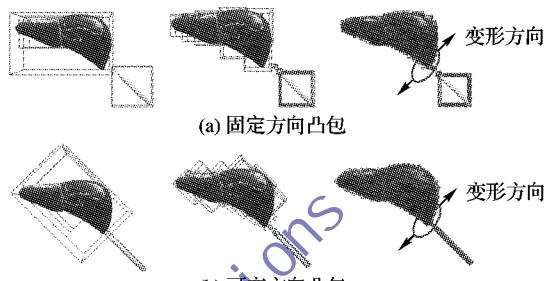


图 4 包围盒树

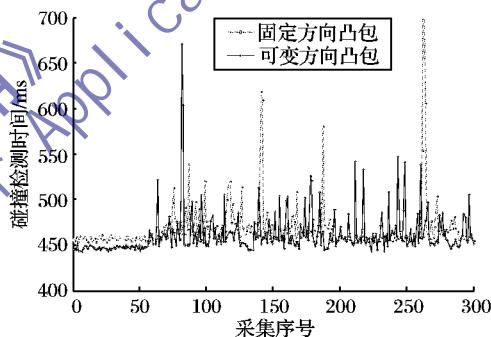


图 5 软组织面片为 9800 的碰撞检测时间

表 1 软组织面片数目

软组织序号	面片数	软组织序号	面片数
1	960	7	9800
2	1520	8	14160
3	2400	9	22200
4	3480	10	28560
5	5400	11	39600
6	6970		

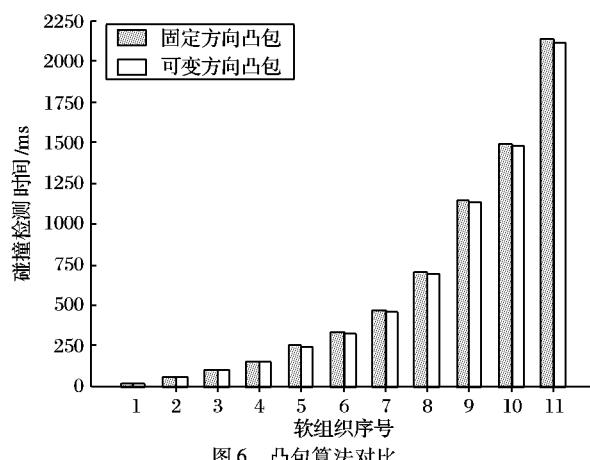


图 6 凸包算法对比

(下转第 2639 页)

## 4 结语

本文针对互补柱面全景图像在水平方向和垂直方向分别率互补的特点,提出了一种基于小波变换得到图像的多尺度分解,然后逐层互换的图像融合策略,有效融合了两幅互补柱面全景图像在不同方向上的优点。实验结果表明,与传统的小波图像融合算法相比,该算法在用于互补柱面全景图像融合时简单有效,具有较好的视觉效果和较高的峰值信噪比。

### 参考文献:

- [1] NAYAR S K. Catadioptric omnidirectional camera[ C]// Proceedings of the 1997 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1997: 482–488.
- [2] 曾吉勇, 苏显渝. 柱面场景无畸变的折反射全景成像系统[J]. 光电工程, 2003, 30(1): 42–45.
- [3] 曾吉勇, 苏显渝. 水平场景无畸变的折反射全景成像系统[J]. 光学学报, 2003, 23(5): 636–640.
- [4] STEFAN G. Mirror design for an omnidirectional camera with a uniform cylindrical projection when using the SVAVISCA sensor[ R]. Czech Technical University in Prague, 2001.
- [5] 陈立栋, 王炜, 张茂军, 等. 双反射面互补结构的折反射全向成像系统设计[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3487–3494.
- [6] CHEN L D, WANG W, ZHANG M J, et al. Complementary-structure catadioptric omnidirectional sensor design for resolution enhancement[ J]. Optical Engineering, 2011, 50(3): 1–10.
- [7] MALLAT S. Multi-frequency channel decomposition of images and wavelet models[ J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1998, AS-SP-37(12): 2091–2110.
- [8] KANNAN K, PERUMAL S A, ARULMOZHI K. The review of fea-

(上接第 2616 页)

## 4 结语

本文将虚拟手术场景的特点和固定方向凸包检测方法相结合,根据器械运动学和软组织预测变形提出了基于可变方向凸包层次包围盒树的快速碰撞检测算法。通过构建紧密性好的包围盒树,在包围盒树的遍历过程中迅速排除不相交的节点,进而进行更精确的基元测试,获取碰撞信息,从而为力反馈和软体变形的研究提供基本条件。该方法在碰撞检测的快速性方面优于固定方向凸包算法,更利于虚拟手术场景中实时碰撞检测的实现。本文将计算机图形学和机器人运动学的知识相结合,为碰撞检测算法在机器人辅助虚拟手术中的应用提供了一种新的思路。

### 参考文献:

- [1] 魏迎梅, 王涌, 吴泉源, 等. 虚拟手术仿真中碰撞检测问题的研究[ J]. 系统仿真学报, 2000, 12(5): 572–575.
- [2] KŁOSOWSKI J T, HELD M, MITCHELL J S B, et al. Efficient collision detection using bounding volume hierarchies of  $k$ -DOPs[ J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1998, 4(1): 21–36.
- [3] LARSSON T, AKENINE-MOLLER T. A dynamic bounding volume hierarchy for generalized collision detection [ J]. Computers and Graphics, 2006, 30(3): 450–459.
- [4] WALD I. On fast Construction of SAH-based bounding volume hier-

ture level fusion of multi-focused images using wavelets[ J]. Recent Patents on Signal Processing, 2010(2): 28–38.

- [9] GONZALO P, MANUEL J. A wavelet-based image fusion tutorial [ J]. Pattern Recognition, 2004, 37(9): 1855–1872.
- [10] KRISTA A, ZHANG Y, DARE P. Wavelet based image fusion techniques — an introduction, review and comparison[ J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2007, 62(4): 249–263.
- [11] ZHANG Z, BLUM R S. A categorization of multiscale decomposition-based image fusion schemes with a performance study for a digital camera application[ J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(8): 1315–1326.
- [12] 刘磊, 张红, 王莎. 基于小波变换的全局能量图像融合算法[ J]. 吉林大学学报: 工学版, 2009, 39(S1): 232–236.
- [13] PETROVIC V S, XYDEAS C S. Gradient-based multiresolution image fusion[ J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(2): 228–237.
- [14] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[ J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600–612.
- [15] MASHITA T, IWAI Y, YACHIDA M. Calibration method for misaligned catadioptric camera[ J]. IEICE Transactions on Information and Systems, 2006, 89(7): 1984–1993.
- [16] 张鹏飞, 张茂军, 王炜, 等. 互补柱面全景图像对的差异分析及其配准研究[ J]. 计算机应用, 2011, 31(1): 159–162.
- [17] QU G H, ZHANG D L, YAN P F. Information measure for performance of image fusion[ J]. Electronic Letters, 2002, 38(7): 313–315.

archies [ C]// Proceedings of IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 34–40.

- [5] TANG M, CURTIS S, YOON S, et al. ICCD: interactive continuous collision detection between deformable models using connectivity-based culling[ J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009, 15(4): 544–556.
- [6] CHANG J, WANG W, KIM M S. Efficient collision detection using a dual OBB-sphere bounding volume hierarchy[ J]. Computer-Aided Design, 2010, 42(1): 50–57.
- [7] LAUTERBAC C, GARLAND M, SENGUPTA S, et al. Fast BVH construction on GPUs[ EB/OL]. [2012-10-10]. <http://luebke.us/publications/eg09.pdf>.
- [8] ERICSON C. 实时碰撞检测算法技术[ M]. 刘天慧, 译. 北京: 清华大学出版社, 2010: 119–120.
- [9] MOLLER T. A fast triangle-triangle intersection test[ J]. Journal of Graphics Tools, 1997, 2(2): 25–30.
- [10] GUIQUE P, DEVILLERS O. Fast and robust triangle-triangle overlap test using orientation predicates[ J]. Journal of Graphics Tools, 2003, 8(1): 39–52.
- [11] HELD M. ERIT: A collection of efficient and reliable intersection tests [ J]. Journal of Graphics Tools, 1997, 2(4): 25–44.
- [12] 傅由甲, 杨克俭, 王玉华. 一种快速计算三维空间中物体碰撞接触面的方法[ J]. 计算机仿真, 2005, 22(1): 68–72.