

冯安洋¹ 陈笋² 陈柏¹ 耿令波³ 吴洪涛¹

血管介入手术中的柔性虚拟力触觉系统研究

摘要

随着微创手术的发展,虚拟手术的应用前景越来越广阔.力反馈作为虚拟手术的核心技术,其实现的效果直接影响了虚拟手术的沉浸感.通过对经典包围盒碰撞检测算法进行研究对比,选择了球包围盒的碰撞检测算法,并建立了精确的反馈力计算模型,实现了介入血管中的柔性碰撞仿真.该仿真具有很高的实时性和精度.

关键词

虚拟现实;力反馈;柔性碰撞;实时性

中图分类号 TP391.9

文献标志码 A

收稿日期 2013-10-07

资助项目 江苏省自然科学基金(BK2012798);江苏省产学研联合创新资金—前瞻性联合研究项目(BY2012011, BY2013003-10);国家自然科学基金(51075209);南京市科委产学研计划(201204014);上海市科委科技计划(124119A3900);上交大医工交叉项目(YG2011MS08)

作者简介

冯安洋,男,硕士生,从事主从控制、虚拟现实的研究. fenganyang849639668@126.com

陈笋(通信作者),男,副教授、副主任医师,硕士生导师. chengsun@hotmail.com

1 南京航空航天大学 机电学院,南京,210016

2 上海交通大学附属新华医院 儿科心脏中心,上海,200092

3 中国科学院沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室,沈阳,110016

0 引言

血管介入手术是指通过医学影像设备的引导,将手术器械从血管引入到人体病变部位对其进行诊断和治疗的过程.它具有出血少、创伤小、恢复快、并发症少等优点^[1],但进行该手术的医师必须具备相当熟练的技术.传统的手术训练方式缺乏交互性和沉浸感,而基于力反馈的虚拟手术弥补了这方面的不足.

近年来,国内外许多课题组开展了血管介入的虚拟手术研究.如 Li 等^[2]设计了一系列导管手术的虚拟插管模型,并采用流体模型计算导管末端的反馈力,操作者可以通过力触觉设备感知虚拟触觉的仿真效果^[3-4],但该系统实时性有待提高;Lenoir 等^[5]设计了一种复杂的血管手术模型,并通过有限元法对模型的碰撞反馈力进行精确的仿真计算,可实现力触觉反馈,但该系统将血管模型简化为刚体,使虚拟场景的碰撞失去真实性;文献^[6-7]运用质点-弹簧模型来模拟介入导管与血管的虚拟力触觉,有效提高了系统的实时性,但反馈力的精度有待验证.

为兼顾虚拟力反馈的实时性以及模型逼真的柔性变形,本文利用球包围盒碰撞检测算法进行模型的碰撞检测,使用质点-弹簧模型计算反馈力的大小,并用三维软件建立血管模型,在软件平台上进行了仿真实验,取得了较好的效果.

1 系统设计和关键技术

1.1 系统设计的要求

虚拟手术的沉浸感和反馈力的稳定性是决定虚拟手术效果的重要指标,而这依赖于虚拟场景和反馈力的实时刷新和合理假设,使仿真效果更逼真及保证反馈力的精度,故对虚拟仿真提出下列要求:

1) 实时性,虚拟力反馈的首要要求就是实时性.力触觉的产生需要手柄的震动频率达到 10^3 Hz 量级,这就对力反馈的频率提出了较高要求.一旦反馈力存在滞后或者虚拟场景的图像无法实时更新,那么整个系统就失去沉浸感.

2) 逼真性,即要实现柔性碰撞.把人体的组织或器官简化为刚体来处理,虽然能保证交互的实时性,但逼真性欠佳.合理的柔性碰撞假设将能有效保证虚拟仿真的逼真性.

3) 精确性.在保证实时性和逼真性的基础上,需要研究碰撞对象

的力学特性,建立符合实际的力反馈计算模型.

1.2 虚拟系统运行机制

本文所设计虚拟仿真系统的硬件基础是 Novint Falcon 三维力触觉交互设备和计算机. Falcon 力触觉交互设备是虚拟仿真的核心硬件. 其有 2 个功能: 一是通过位置传感器跟踪操作者所控制手柄的位置信息, 从而将手柄的三维坐标参数传递给虚拟系统中的导管末端; 二是接受计算机实时传递的反馈力, 并在手柄上产生同样大小的力触觉.

系统内部运行机制如图 1 所示. Falcon 将手柄位置映射到虚拟导管的末端, 通过包围盒碰撞检测算法获得导管末端和血管模型的位置关系. 若检测后发生碰撞, 计算机将通过反馈力的计算模型计算该反馈力, 然后将相关参数传给 Falcon, 使之在手柄端产生力触觉. 整个过程中, 图像不断刷新并实时将导管和模型的位置和形态显示在计算机上.

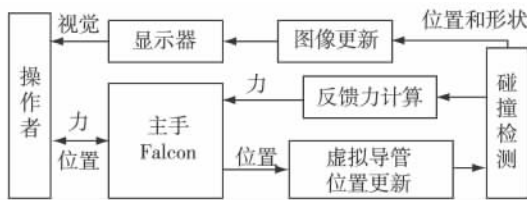


图 1 虚拟力反馈系统框架
Fig 1 Virtual force feedback system

1.3 包围盒检测算法

经典的包围盒碰撞检测方法分为: 沿坐标轴的包围盒 (AABB)、方向包围盒 (OBB)、包围球 (Sphere) 以及固定方向凸包包围盒 (k -DOPs) 等^[8-9].

1) AABB 包围盒, 如图 2a 所示. 对于一个给定的对象, 其 AABB 就是包围该对象且各边都平行于坐标轴的最小六面体^[10]. 若获得该对象基本组成元素的各元素顶点在 x, y, z 3 个坐标轴上投影的最小值和最大值分别为 l_x, l_y, l_z 和 u_x, u_y, u_z , 则 AABB 包围的区域可描述为

$R = \{(x, y, z) \mid l_x \leq x \leq u_x, l_y \leq y \leq u_y, l_z \leq z \leq u_z\}$, 可知, 构造一个 AABB 需要 6 个标量. 构造 AABB 时其方向必须沿着物体局部坐标系的坐标轴.

AABB 之间的相交测试是通过比较不同的 AABB 在 3 根坐标轴上的投影关系确定的. 例如对于包围盒 A、B, 假设 A、B 包围盒在 x 轴上投影坐标的最小值和最大值分别为 $A_{x\min}, A_{x\max}, B_{x\min}, B_{x\max}$. 如果检测到 $A_{x\min} > B_{x\max}$ 或 $A_{x\max} < B_{x\min}$, 则 A、B 包围盒显然不相交 (图 3), 否则 A、B 包围盒在 x 轴向

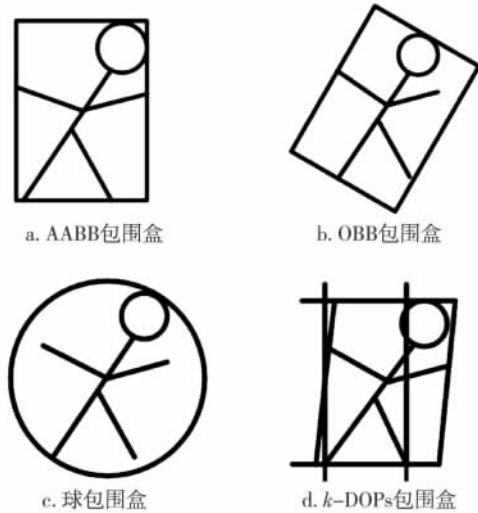


图 2 经典包围盒示意
Fig 2 Schematic of classic bounding boxes

投影区重叠 (图 4). 此时还需用同样方法进一步检测 2 个包围盒在 y, z 轴上的投影关系. 因而 2 个包围盒的相交测试最多需进行 6 次比较.

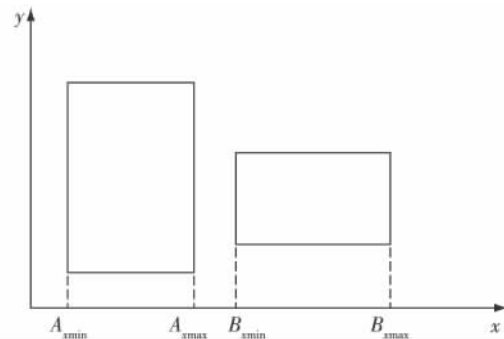


图 3 包围盒在 x 轴上未发生投影重叠
Fig 3 Projections of the bounding boxes doesn't overlap in x -axis

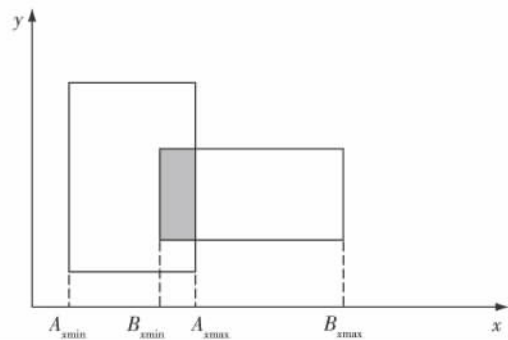


图 4 包围盒在 x 轴上发生投影重叠
Fig 4 Projections of the bounding boxes overlaps in x -axis

2) OBB 包围盒, 如图 2b 所示. OBB 可定义为包含对象但 3 个正交法向量的方向可以任意选择的

最小六面体^[11],因而 OBB 的紧密性很好. 假定一个 OBB 的中心为 o , 3 个互相正交的法向量分别为 u_1 、 u_2 、 u_3 , 此 OBB 在这 3 个法向量上的半径分别为 r_1 、 r_2 、 r_3 , 那么 OBB 所确定的区域可表示为

$$R = \{o + ar_1u_1 + br_2u_2 + cr_3u_3, | a, b, c \in (-1, 1)\}.$$

OBB 3 个正交法向量方向的任意性大大增加了它的几何构造及相交测试的复杂度. 对于相交测试, AABB 最多进行 6 次测试, 但 OBB 最多需 15 次, 而且 OBB 测试的过程更复杂, 计算量更大.

3) 球包围盒, 如图 2c 所示. 球包围盒就是包围对象的最小球体. 球包围盒的特点就是构造简单, 但紧密性较差, 会出现大量的冗余空间. 其构造过程一般先根据对象中基本元素的三维坐标均值来确定包围球的球心, 然后由对象元素中三维坐标离球心距离最大的来确定球的半径. 假设包围球球心坐标为 $O(a, b, c)$, 半径为 r , 则可得出球包围盒的区域为

$$R = \{(x, y, z) | (x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2 < r^2\}.$$

球包围盒的相交检测方法是几种检测方法中最简单的, 只需将 2 个包围球的球心距和它们的半径之和相比较即可知. 假设有 2 个包围球, 其球心和半径分别是 $O_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 r_1 和 $O_2(x_2, y_2, z_2)$ 、 r_2 . 若 $|O_1O_2| > r_1 + r_2$, 表示 2 球包围盒不相交, 否则 2 包围盒相交. 将不等式进一步展开可表示为

$$(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 > (r_1 + r_2)^2.$$

可知, 球包围盒之间的测试, 只需进行 3 次减法运算、3 次加法运算、4 次乘法运算和 1 次比较运算, 因而其相交测试相对于其他类型包围盒都要简单, 并且当对象发生旋转时, 由于包围球始终包围着对象, 不用进行更新. 所以当对象运动时, 球包围盒只需进行相应的球心坐标平移, 大大减少了更新的计算量.

4) k -DOPs 包围盒, 如图 2d 所示. k -DOPs 可定义为包含目标对象且它所有面的法向量都来自一个固定方向集合的凸包, 该固定方向集合中包含 k 个方向向量. 当集合中包含的是 3 组共线反向向量时, k -DOPs 就可以等效为 AABB.

表 1 经典包围盒特点对比

Table 1 Comparison between classic bounding boxes

包围盒	实时性	紧密性	计算量	适用性
AABB	良	中	中	广
OBB	下	良	良	窄
Sphere	优	下	优	广
k -DOPs	中	优	下	广

经过以上对比分析, 通过牺牲一定的精度来保证仿真的实时性, 本文选择球包围盒算法进行碰撞的检测.

1.4 反馈力计算模型

目前力反馈的计算模型主要有有限元模型和质点-弹簧模型^[12]. 但有限元模型的计算量大, 实时性不好. 因而本文选择了实时性较好的质点-弹簧模型来进行反馈力的计算仿真. 其具体原理如下.

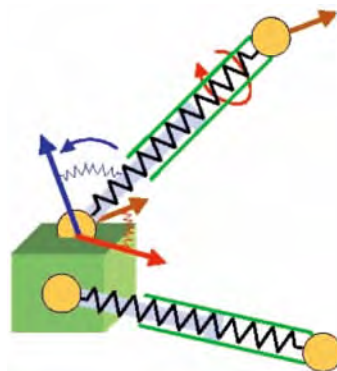


图 5 质点-弹簧模型示意

Fig. 5 Schematic of mass-spring model

虚拟导管末端和血管的接触力可以简化为正压力和摩擦力之和: $\vec{F} = \vec{F}_N + \vec{F}_f$, 其中的摩擦力 F_f 的大小可简化为成正比于接触压力 F_N : $F_f = \mu F_N$, 因而反馈力的求解可简化为虚拟导管末端和血管正压力的求解, 而接触压力的大小可表示为 $\vec{F} = -k\vec{d} - c\vec{v} + t$, 其中 k 为接触的弹性系数, c 为介入环境的阻尼系数, t 为常数, d 为虚拟导管末端在血管法向长度上的压缩量, v 为导管末端的速度. 除了模型本身产生的误差外, 相关系数的选择也会给反馈力带来误差, 因而相关系数的确定也直接影响着反馈力的大小.

2 虚拟力反馈系统软件实现

本文所建立的虚拟力反馈系统是在 Windows XP 系统的基础上, 以 Microsoft Visual Studio 2008 中的 MFC 模块作为编程环境, 结合 OpenGL 软件图形库和 chai3d 开源软件库来实现的.

先运用 3ds MAX 软件建立导管的三维模型, 再用 Netfabb 和 Meshlab 软件对模型进行前处理. Netfabb 软件可以修复模型孤悬的点面(图 6), 而 Meshlab 可以获得模型的三维数据, 并生成可直接导入程序中的模型三维数据文件.

完成模型的前处理后, 将模型导入到 VS08 平台中. 运用 OpenGL 函数库进行基本的场景渲染, 并

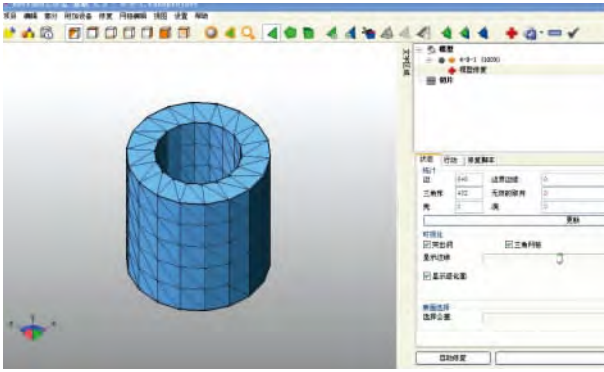


图 6 运用 Netfabb 修复模型
Fig. 6 Model repair by Netfabb software

用 chai3d 库函数建立模型的球包围盒. 从图 7 中可以直观看出球包围盒的缺点在于存在一定冗余的空间. 为弥补这方面的缺陷, 本文将导管末端简化为有一定半径的球来增加碰撞检测的范围, 弥补了球包围盒对血管模型包围不够紧密的缺陷.

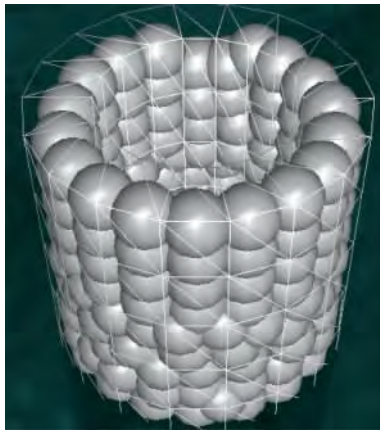


图 7 建立血管模型的球包围盒
Fig. 7 Sphere bounding boxes created for vessel model

图 8 是导管末端和血管外壁发生碰撞, 图 9 是和血管内壁的碰撞. 同时在控制界面上通过进度条的方式显示了反馈力在 x 、 y 、 z 3 个方向上的大小, 使接触力的显示更直观.

图 10 为虚拟系统实物. 为比较系统仿真得出的反馈力和真实手柄末端获得的反馈力是否一致, 将手柄末端固定在推压力传感器上, 来对实际反馈力进行测量. 当手柄沿 y 方向移动时, 传感器可得出手柄在 y 方向上的反馈力.

图 11 为仿真时间在 0.5~5 s 内, 传感器在 y 方向上测得力与仿真系统在 y 方向上计算力的比较. 可看出实测曲线比理论曲线有一定滞后, 这是由于仿真曲线是系统直接计算而得的, 而传感器获得的

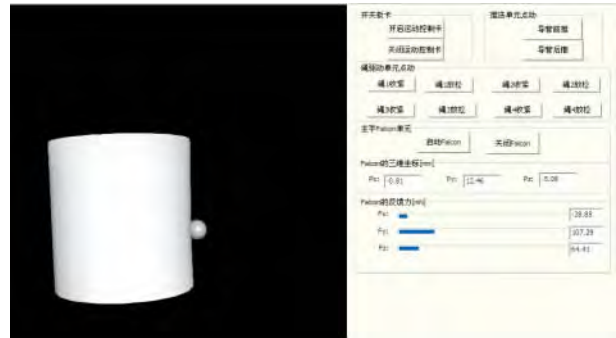


图 8 导管末端和血管外壁发生柔性碰撞
Fig. 8 Flexible collision between the tip of the catheter and outer vessel wall

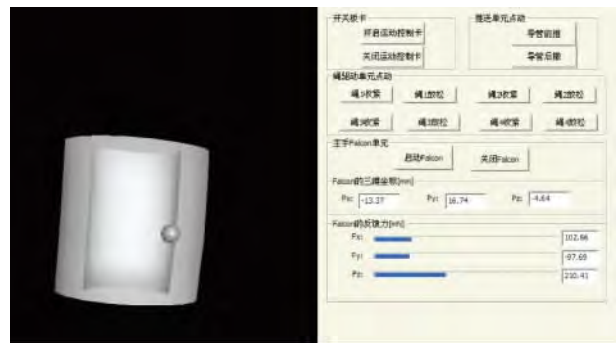


图 9 导管末端和血管内壁发生柔性碰撞
Fig. 9 Flexible collision between the tip of the catheter and inner vessel wall



图 10 虚拟力反馈系统实物
Fig. 10 Picture of virtual force feedback system

反馈力需要系统先获得仿真数据, 然后通过 Falcon 内置电机作用到手柄上, 传感器测得信号后还需经过放大和换算处理. 但 2 条曲线整体重合性较好, 误差较小.

实验结果表明, 该虚拟仿真具有较好的实时性, 可以实现导管的柔性碰撞, 具有较好的精度, 满足设计要求, 可用于手术的训练和仿真.

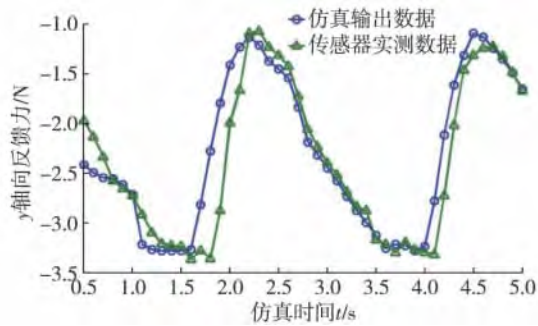


图 11 理论和实测反馈力曲线

Fig 11 Theoretical and experimental curves of feedback force

3 总结与展望

本文设计了一种虚拟血管介入手术的仿真,实现了手术器械和血管的柔性碰撞.系统具有很高的实时性、逼真性和精度.此系统可以帮助医生进行介入手术的训练,进行复杂手术前的预演,从而可以降低手术风险,提高手术成功率.下一步是改进碰撞检测算法,进一步提高反馈力的精度.

参考文献

References

- [1] Hansen Medical. Sensei X robotic catheter system [EB/OL]. [2011-05-29]. <http://www.hansenmedical.com/sensei-x-robotic-catheter-system-eu>
- [2] Li Z R, Chui C-K, Anderson J H, et al. Computer environment for interventional neuroradiology procedures [J]. *Simulation & Gaming*, 2001, 32(3): 404-419
- [3] Cai Y Y, Ye C K, Ye X Z, et al. VR-simulated training for less invasive vascular intervention[J]. *Computers &*

- Graphics*, 2003, 27(2): 215-221
- [4] Xin M, Lei Z, Volkau I, et al. A virtual reality simulator for remote interventional radiology: Concept and prototype design[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2006, 53(8): 1696-1700
- [5] Lenoir J, Cotin S, Duriez C, et al. Interactive physically-based simulation of catheter and guidewire [J]. *Computers & Graphics*, 2006, 30(3): 416-422
- [6] Zhang D P, Wang T M, Liu D, et al. Vascular deformation for vascular interventional surgery simulation [J]. *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2010, 6(2): 171-177
- [7] Wang T M, Zhang D P, Da L. Remote-controlled vascular interventional surgery robot[J]. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2010, 6(2): 194-201
- [8] 张小瑞, 宋爱国, 孙伟, 等. 支持力/触觉反馈的虚拟肝脏手术仿真系统 [J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2009, 39(3): 490-494
ZHANG Xiaorui, SONG Aiguo, SUN Wei, et al. Virtual liver surgery simulation system supporting haptic feedback[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2009, 39(3): 490-494
- [9] Coldet-free 3D collision detection library[EB/OL]. [2011-05-29]. <http://photoneffect.com/coldet/>
- [10] Laycock S D, Day A M. Simulating deformable tools with haptic feedback[C]// *Communications of the ACM in WSCG*, 2003, Short Papers Proceedings(12): 75-81
- [11] 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, 41(2): 141-144
LIU Xiaodong, YAO Lan, SHAO Fudong, et al. Fast collision detection algorithm based on mixed BVH[J]. *Journal of Xi'an JiaoTong University*, 2007, 41(2): 141-144
- [12] Otaduy M A, Lin M C. A modular haptic rendering algorithm for stable and transparent 6-DoF manipulation[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(4): 751-762

Research of haptic virtual force system in soft vascular interventional surgery

FENG Anyang¹ CHEN Sun² CHEN Bai¹ GENG Lingbo³ WU Hongtao¹

1 College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016

2 Cardiac Department of Shanghai Children's Medical Center,

Xinhua Hospital Affiliated to Medical School of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200092

3 State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016

Abstract With the development of minimally invasive surgery, virtual surgery has an increasingly broad application prospects. As the core technology of virtual surgery, force feedback directly affects the sense of immersion in virtual surgery. The classic bounding box collision detection algorithms are compared in this paper, and the sphere bounding box collision detection algorithm is then adopted. A precise force feedback model is established to simulate the flexible collision impact in vascular interventional surgery. The simulation is of high accuracy and real-time capability.

Key words virtual reality; force feedback; flexible collision; real-time