

基于力/触觉反馈的虚拟血管介入手术系统

陈拓汉¹ 宋爱国¹

摘要

设计了一种新颖的基于力/触觉反馈的虚拟血管介入手术系统.该系统以通用型力/触觉交互设备——Novint Falcon 力/触觉再现装置为核心,能够完成虚拟血管手术环境中的力/触觉反馈.详细介绍了系统的硬件环境参数,并设计了基于 3DS MAX 的建模与 CHAI 3D 的仿真软件系统.仿真实验结果表明:基于力/触觉反馈的虚拟血管介入手术系统可以有效地模拟血管介入手术时的力反馈状态,帮助医师进行血管介入手术术前训练,提高手术成功率.

关键词

力/触觉反馈;手术仿真;虚拟现实

中图分类号 TP391

文献标志码 A

0 引言

血管介入手术是利用现代高科技手段进行的一种微创性治疗方法,它通过医学影像设备的引导,将特制的导管、导丝等精密器械,从血管引入人体,对体内病态进行诊断和局部治疗.它具有不开刀、创伤小、恢复快、效果好等特点,是当前外科医学的发展趋势.由于该手术相当复杂,医师需要经过大量的培训才能具备实际手术操作的能力,因此,基于力/触觉反馈的虚拟血管介入手术系统为血管手术医生提供了一个虚拟的术前训练环境.

一些研究人员对虚拟的血管介入手术仿真技术进行了相关研究.目前在建模方面常用的方法有:有限元模型^[1-2]、弹簧-质点模型^[3]和多体动力学模型^[4].有限元模型是形变建模最真实的方法,但有限元法计算复杂度高,很难用于实时仿真.弹簧-质点模型是实时模拟的常用方法,它为节点分配一定的质量,用弹簧连接质点,其仿真模型容易建立,可获得实时的模拟结果,但精确性和稳定性往往不能令人满意.多体动力学模型是一种合适的模拟技术,但它常用于模拟由若干部件及节点组成的机器人,不太适合血管的模拟仿真.此外,还可以运用虚拟主动漫游技术对 CT 血管造影(CTA)数据进行分割,获得较为精确的血管的三维几何结构,但这又需要高昂的设备费用.

本文利用 3DS MAX 建模和通用型力/触觉交互设备——Novint Falcon 力/触觉再现装置设计了一种基于力/触觉反馈的虚拟血管介入手术系统^[5-6],它具有交互性、可重复性、无损伤性等优点,力触觉反馈效果良好,可以为医师提供血管介入手术术前训练,提高手术的成功率.

1 系统简介

本文设计并实现了一种基于力/触觉反馈的虚拟血管介入手术系统,它不仅可以为操作者提供一个极具真实感和沉浸感的训练环境,还能够将力/触觉信息反馈给操作者,产生良好的临场感效果,所以训练过程与真实情况几乎一致.此外,它还可以让医师在计算机建立的虚拟的血管中设计手术过程,进刀的部位、角度等,从而使医师获得手术中的手感,提高手术的成功率.

1.1 结构和原理

基于力/触觉反馈的虚拟血管介入手术系统的结构示意图如图 1 所

收稿日期 2011-08-26

资助项目 国家自然科学基金(61075068)

作者简介

陈拓汉,男,硕士生,研究反向为力/触觉再现. chentuohan1988@163.com

宋爱国(通信作者),男,博士,教授,博士生导师,主要从事机器人传感与控制的研究. a.g.song@seu.edu.cn

¹ 东南大学 仪器科学与工程学院,南京,210096

示. 其中力/触觉交互设备是整个系统的核心硬件平台,其主要功能是利用力/触觉传感器准确跟踪人手的运动位置,并将虚拟环境中生成的力/触觉信息通过力反馈的方式反馈给操作者. 基于力/触觉反馈的虚拟血管介入手术系统原理框如图2所示. 系统主要由软件和硬件组成,其中软件主要包括碰撞检测模块、力/触觉计算模块、力/触觉信息反馈模块和图形更新模块;硬件主要包括计算机、力/触觉交互设备和显示器.

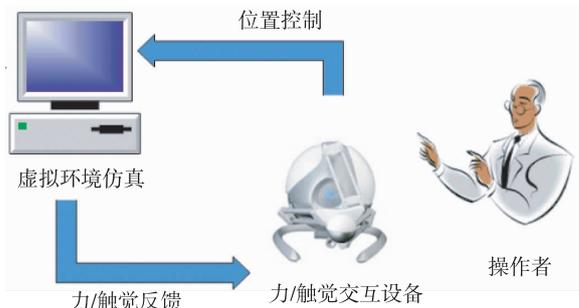


图1 系统结构示意图

Fig.1 Structure diagram of system

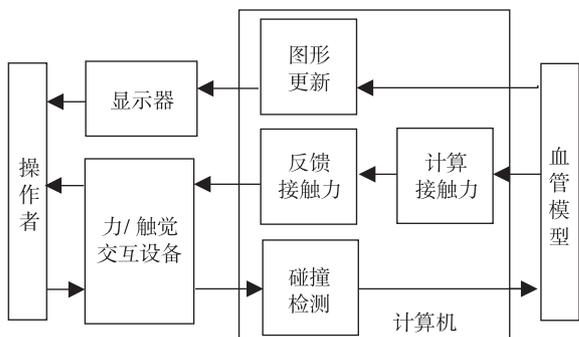


图2 系统原理框

Fig.2 Functional block diagram of system

1.2 关键技术

1) 碰撞检测算法

精确的碰撞检测对提高虚拟环境的真实性有重要作用,而提高速度是其核心问题^[7]. 针对虚拟血管介入手术系统具有稳定性和快速性的要求^[8],本文采用 AABB 碰撞检测算法,其核心思想是使用最小六面体包围盒包围虚拟场景中复杂的几何物体,此包围盒作为物体的根包围盒,然后将根包围盒分为2个子包围盒,以此进行直达到规定的深度为止. AABB 的碰撞检测从物体的根包围盒开始,采用自上向下的递归方式进行. 如果检测到当前包围盒没有相交,则其子包围盒也不会相交,反之,如果当前

包围盒发生相交则依次检测其子包围盒是否相交,直至结束. 系统中碰撞检测算法片段代码如下:

```
void    cMesh::createAABBCollisionDetector( double a_ radius, bool a_ affectChildren, bool a_ useNeighbors)
{
    if ( m_ collisionDetector != NULL)
    {
        delete m_ collisionDetector;
        m_ collisionDetector = NULL;
    }

    cCollisionAABB * collisionDetectorAABB =
    new cCollisionAABB( pTriangles(), a_ useNeighbors);
    collisionDetectorAABB -> initialize( a_ radius);
    m_ collisionDetector = collisionDetectorAABB;
    if ( a_ useNeighbors)
    {
        createTriangleNeighborList( false);
    }

    if ( a_ affectChildren)
    .....
    .....
}
```

2) 接触力的计算

系统的接触力可由式(1)得到:

$$\vec{F} = \vec{F}_N + \vec{F}_f \quad (1)$$

其中 F_N 是根据胡克(Hooke)定理来计算的:

$$F_N = -K | X - X_0 | = -K \Delta X \quad (2)$$

式(2)中 K 是血管壁的弹性系数,可以自由改变大小, X_0 是虚拟的小球和血管壁接触的位置,当前面提到的碰撞检测算法检测到虚拟的小球与虚拟的血管发生碰撞时,在接触力的方向上会产生另一个虚拟的小球,这个虚拟的小球的位置就是 X ,同时,在原有的虚拟的小球和新产生的虚拟的小球之间会产生一条连线,系统可以根据2个虚拟小球的位置计算出这条连线的长度 $|X - X_0|$,也就是 ΔX . 然后,系统将根据设定的 K 的值和算出的 ΔX 的值计算出接触力的大小,接触力的反向就是2个虚拟小球间连线的反向.

F_f 指的是摩擦力:

$$F_f = \mu F_n \quad (3)$$

其中 μ 是与接触面粗糙程度有关的摩擦系数.

2 系统的硬件环境和软件设计

2.1 硬件环境

力/触觉系统的硬件部分主要包括力/触觉交互

设备和计算机. 其中力/触觉交互设备主要是 Novint Falcon 力/触觉再现装置. 本文后面的仿真实验都是基于下面所介绍的计算机和 Novint Falcon 力/触觉再现装置来完成的.

1) 计算机配置

计算机的硬件配置为 3.1 GHz Intel Core i3-2100 处理器、4 G DDR3 内存、AMD HD 6700 显卡和 Maxtor STAT 硬盘;其操作系统为 Windows XP.

2) Novint Falcon 力/触觉再现装置

Novint Falcon 力/触觉再现装置是一种高性能力/触觉交互设备,它通过 3 自由度(Degree-of-Freedom, DOF)的移动来提供力/触觉再现功能. Novint Falcon 力/触觉再现装置的主要特性如表 1 所示.

表 1 Novint Falcon 力/触觉再现装置的主要特性

Table 1 Main parameters of Novint Falcon haptic display device

特性	参数
工作空间	100 mm × 100 mm × 100 mm
作用力	9 N
分辨率	0.4 K dpi (Dots per Inch)
尺寸	230 mm × 230 mm × 230 mm
接口	USB 2.0
电源	110 ~ 240 V
系统	Windows XP/Vista

2.2 软件设计

2.2.1 虚拟环境的构造

虚拟血管介入手术系统的虚拟仿真环境主要基于 3 DS MAX 9.0 和 CHAI 3D 在 Windows 操作平台下开发,进行了虚拟血管的建模从而构造虚拟环境.

2.2.2 虚拟血管介入手术系统仿真程序的实现

本系统主要基于 CHAI 3D 环境下使用 Microsoft Visual C++ 2008 语言进行软件编程以实现对虚拟物体的感知,并通过 Novint Falcon 力/触觉交互装置进行实时力反馈,主要步骤如下:

1) 初始化虚拟场景并初始化 Novint Falcon 力/触觉交互设备,此时,计算机将会生成虚拟物体;

2) 操作者通过 Novint Falcon 力/触觉交互设备前部的操作柄移动触觉交互设备;

3) 计算机利用碰撞检测模块判断力/触觉交互设备是否碰撞到虚拟物体的表面;

4) 如果碰撞到虚拟物体的表面,则力/触觉计算模块将计算出接触力的大小和方向,如果没有发生碰撞,则输出力为 0;

5) 计算机利用力/触觉信息反馈模块将接触力反馈给力/触觉交互设备;

6) 通过力/触觉交互设备、显示器把要求更新的力/触觉信息和视觉信息反馈给操作者,使其不仅能够看到并且能感觉到力/触觉信息的变化;然后再回到 3).

虚拟血管介入手术系统仿真流程如图 3 所示,系统的采样控制周期为 1 ms.

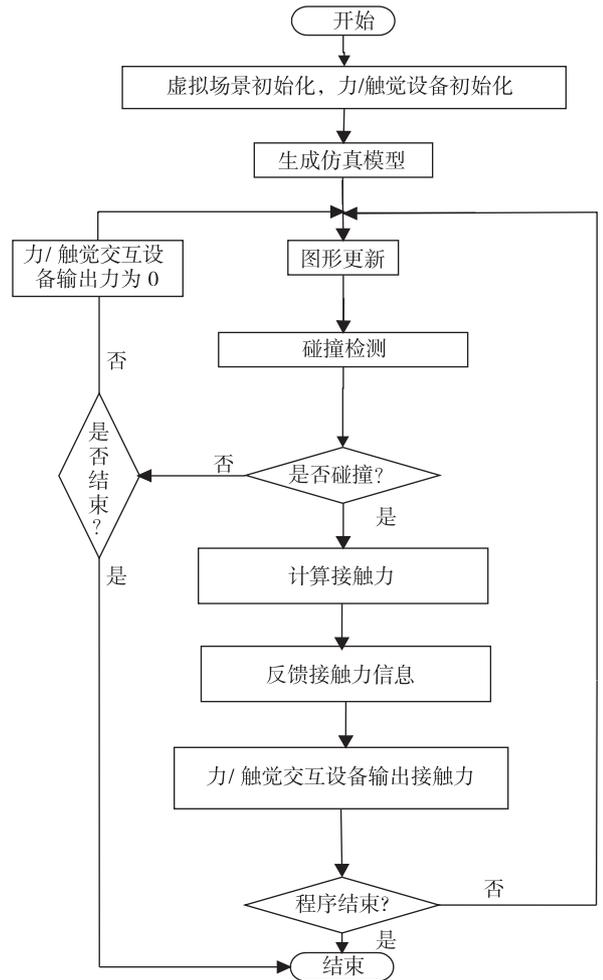


图 3 仿真流程
Fig. 3 Simulation flow

3 系统的实验仿真

3.1 实验平台

基于以上所介绍的系统的结构、原理以及软、硬件设备,搭建了系统的实验平台,其实验平台如图 4 所示,图 4 中某位操作者正在进行虚拟血管介入手术实验. 系统中,Novint Falcon 力/触觉再现装置作为人机交互接口装置,当人控制力/触觉再现装置在

空间平移时,虚拟环境中的虚拟小球也随之平移,同时,计算机采集人手的位置、速度等信息,并根据碰撞检测算法计算出接触力,然后将接触力实时反馈给操作者,从而使操作者产生一种真实的正在进行手术实验的感觉。



图4 实验平台

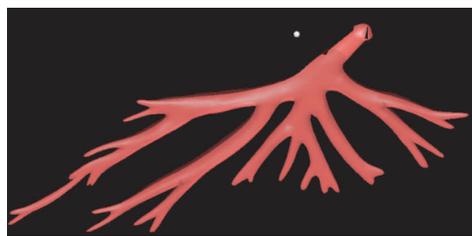
Fig. 4 Experiment platform

3.2 实验仿真

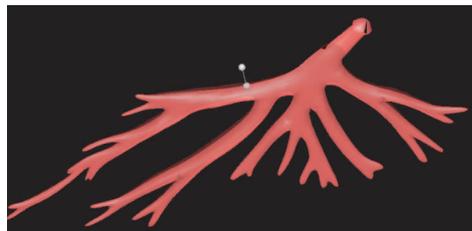
图5所示的是操作者利用基于力/触觉反馈的虚拟血管介入手术系统在进行仿真实验时的情况。图5a反映的是刚开始实验时,虚拟的小球还在血管外面,此时虚拟的小球还没有和血管发生接触,系统反馈的接触力为0。图5b反映的是虚拟的小球进入了血管,并与血管壁相接触,此时,在血管外面产生了另外一个虚拟的小球,同时,血管内虚拟的小球和血管外虚拟的小球之间会产生一条连线,这条连线代表的是反馈的接触力的大小和反向。图5c反映的是2个虚拟小球之间的连线越长,反馈的接触力就越大,通过观察连线的长短,操作者可以很轻松地控制接触力的大小。图5b和图5d反映的是虚拟的小球与血管壁接触点不同,产生了不同方向但大小相同作用力时的情况。

4 总结与展望

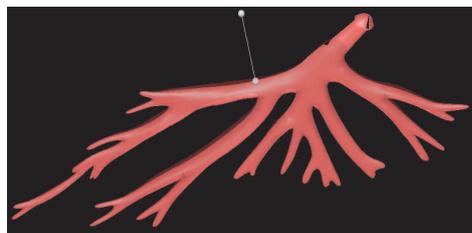
本文基于力/触觉交互设备设计了一种虚拟血管介入手术系统。此虚拟系统可以使医师在手术前进行各种必要的手术预演,提高正确处理各种突发情况的能力,降低医师进行实习血管介入手术时的风险,从而可以提高手术的成功率。对于虚拟手术技术的研究、培养医学人才和提高整体医疗水平具有重要的意义。下一步的工作是改进虚拟血管介入手术系统的碰撞检测算法和力/触觉算法,提高系统的准确度。



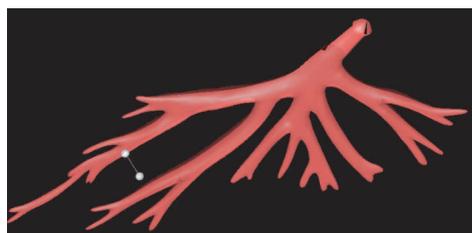
a.虚拟小球未进入血管



b.虚拟的小球进入了血管,与血管壁相接触,产生了反馈力



c.虚拟的小球在与b图相同的地方与血管壁相接触,产生了较大的反馈力



d.虚拟的小球在与b不同的地方与血管壁相接触,同样产生了反馈力

图5 仿真试验

Fig. 5 Simulation experiment

参考文献

References

- [1] Berkley J, Turkiyyah G, Berg D, et al. Real-time finite element modeling for surgery simulation: An application to virtual suturing[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2004, 10(3): 314-325
- [2] Hansen K V, Brix L, Pedersen C F, et al. Modeling of interaction between a spatula and a human brain[J]. Journal of Medical Image Analysis, 2004, 8(1): 23-33
- [3] Castañeda M A P, Arío F. Deformable model of the prostate for TURP surgery simulation[J]. Journal of Computers and Graphics, 2004, 28(5): 767-777

- [4] Featherstone R. The calculation of robot dynamics using articulated body inertias[J]. *International Journal of Robotics Research*, 1983, 2(1):13-30
- [5] 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
- [6] 张小瑞,宋爱国,刘佳,等. 虚拟物体的力触觉模型及再现技术研究进展[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(15):4555-4560
ZHANG Xiaorui, SONG Aiguo, LIU Jia, et al. Development on haptic model and rendering technology of virtual objects[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(15):4555-4560
- [7] 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 Xian Jiaotong University*, 2007, 41(2):141-144
- [8] 王党校,张玉茹,姚冲. 力反馈汉字书法模拟的任务规划和逼真度评价方法[J]. *系统仿真学报*, 2006, 18(8):2307-2310
WANG Dangxiao, ZHANG Yuru, YAO Chong. Task planning and fidelity evaluation in force enabled Chinese calligraphy simulation system[J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(8):2307-2310

Virtual system of hemal intervening operation based on haptic feedback

CHEN Tuohan¹ SONG Aiguo¹

¹ School of Instrument Science & Engineering, Southeast University, Nanjing 210096

Abstract This paper introduces a virtual system of hemal intervening operation based on haptic feedback. This system is a core of general-purpose haptic interactive device—Novint Falcon haptic display device, which can achieve haptic feedback in the virtual hemal intervening operation. This paper introduces hardware environment parameters of the system, and designs modeling based on the 3DS MAX and simulation software system based on CHAI 3D. The simulation results show that this system can effectively simulate the condition of haptic feedback in the hemal intervening operation, which may offer convenience for doctor training before hemal intervening operation and increase the success rate.

Key words haptic feedback; surgery simulation; virtual reality