

论著 · 技术与方法

基于 Unity3D 虚拟现实技术的心血管介入仿真模拟系统

戴红芬^{1,2}, 吴斌², 金伟伟²

1. 湖北中医药大学(武汉 430000); 2. 湖北省中医院光谷院区(武汉 430000)

【摘要】目的 设计一种基于 Unity3D 虚拟现实技术的以实现心脏介入治疗训练为主要目的介入心脏病学仿真系统,可模拟仿真介入心脏病手术中的多重感官反馈。**方法** 采用 3Dmax 和 Unity3D 引擎构建三维心血管模型,并使用 Novint Falcon 和 Oculus Rift 软硬件系统构建虚拟现实环境,模拟导丝介入手术。**结果** 用户可利用 Novint Falcon 力反馈控制器进行经皮腔内冠状动脉成形术的多种虚拟仪器练习,并通过 Oculus Rift 虚拟现实设备还原手术场景,具有较好的仿真模拟效果。**结论** 设计了一种介入手术的仿真模拟系统,为广泛的医疗培训,模拟研究提供了帮助。

【关键词】 心血管系统;介入心脏学;虚拟现实;医疗仿真

Simulation System of Cardiovascular Interventional Simulation Based on Unity3D Virtual Reality Technology

DAI Hong-fen^{1,2}, WU Bin², JIN Wei-wei²

1.Hubei University of Chinese Medicine, Wuhan 430000, P.R. China; 2.Hubei Hospital of Traditional Chinese Medicine, Wuhan 430000, P.R. China

Corresponding author: DAI Hong-fen, Email: 1910131855@qq.com

【Abstract】Objective To design an interventional cardiology simulation system based on unity 3D virtual reality technology to simulate the multi-sensory feedback in the operation of heart disease. **Methods** We used 3Dmax and Unity3D engine to build a three-dimensional cardiovascular model, and use Falcon Novint and Rift Oculus software and hardware system to build a virtual reality environment to simulate pilot wire intervention surgery. **Results** The user can use the Falcon Novint force feedback controller to carry out a variety of virtual instrument exercises of percutaneous coronary angioplasty, and also it can restore operation scene through Rift Oculus virtual reality device. **Conclusion** A simulation system for interventional surgery is designed, which provides the help for the extensive medical training.

【Key words】 Cardiovascular system; Interventional cardiology; Virtual reality; Medical simulation

心血管疾病,是指任何影响心血管系统的疾病,主要是心脏病、脑或肾血管疾病以及外周动脉疾病^[1]。介入心脏病学是心血管病学的一个分支,是基于导管的心血管疾病治疗方法,利用导管可在心脏上实施手术中的各种操作,常用于股动脉穿刺和 X 射线下的心脏可视化。例如,经皮冠状动脉腔内血管成形术(PTCA)。据报道发达国家每百万人口介入治疗病例数为 1 000 ~ 2 000 例,我国仅为 200 多例,特别是 ST 段抬高型心肌梗死患者,仅有 5% 接受介入治疗(林福盛. 心脏支架有没有因暴利被滥

用. 石家庄新闻网. 2015)。由于心血管疾病治疗需求提升,迫切需要更多专业的介入心脏病学家。而介入治疗手术较为复杂,初学者通常需要花费几年的努力,才能成为一个合格介入心脏病学家。因此,将现有热门的虚拟现实技术结合介入手术的培训,对进行介入手术培训的初学者人群和教学试验而言意义重大,其能使得培训研究更加高效、低成本,更贴合实际情况,显得尤为重要。

1 资料与方法

1.1 临床资料和虚拟现实技术简介

经皮冠状动脉腔内血管成形术 PTCA 是典型的血管成形术,是解决冠心病患者心脏中冠状动脉狭

窄部位的非手术疗法,这些狭窄部位是由于高胆固醇累积造成的动脉粥样硬化。作为最常见的冠状动脉血管成形术,PTCA是一种以微创导管为基础的介入性手术。

用于PTCA过程中的操作仪器由导丝、动脉鞘管、导管、球囊和支架、Y型连接管、四通管等构成。手术过程见图1,通过针孔穿透股动脉,伸入导丝到达动脉鞘,再伸入导管,放置球囊扩张支架用以消除血管狭窄或堵塞部位,最后移除支架以外的所有设备。该系统模拟仿真的即为导丝介入操作部分^[2-3]。

Unity3D是可以作为创建类似三维游戏,动画视频以及结构可见性、具有较强类型交互内容的虚拟现实技术用的设计工具^[4]。通过该项技术完成虚拟手术实验环境的搭建,为介入式心脏病治疗的规划、培训创造了一种新模式。虚拟手术可以仿真手术过程中如视觉、声音、触觉等多感官反馈信息,可用于术前规划、手术技能训练以及手术操作指导等方面^[5]。Novint Falcon可以满足虚拟现实的人机互动,进行立体空间操作,自由度非常高,并给人以真实的触觉感受,Oculus Rift头戴显示器,具有360°全景模式,让人身临其境,可以非常逼真的模拟手术操作的环境^[6]。将Unity3D技术结合Novint Falcon、Oculus Rift、空间定位跟踪器等VR设备,形成一个结构完备的虚拟现实模拟培训操作平台,具有较好的应用前景。

1.2 方法

随着虚拟现实技术在现代医学中的应用,介入

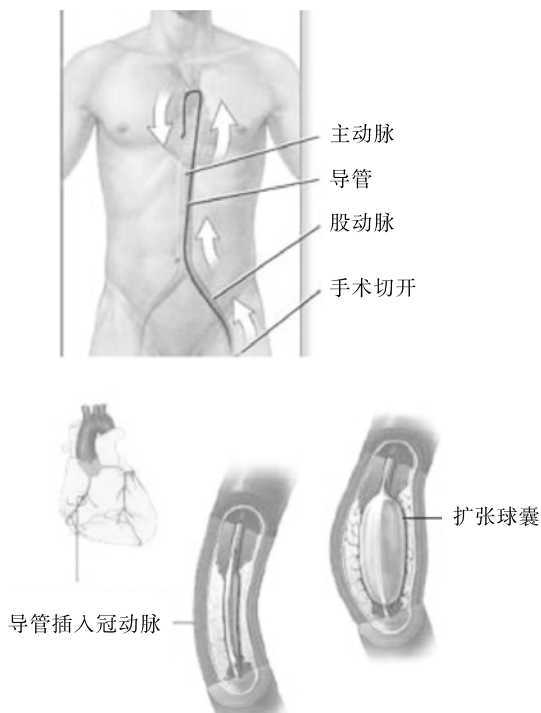


图1 PTCA手术中使用的扩张支撑

心脏病学虚拟仿真系统可模拟如PTCA心脏介入手术过程,通过监视系统显示操作场景以及声音、触觉等反馈信息。

1.2.1 硬件组成 PTCA仿真系统硬件主要由计算机控制主机、Novint Falcon力反馈控制器、虚拟现实头戴显示器Oculus Rift、三维空间跟踪定位器等组成,系统硬件组成见图2。

计算机控制主机:由较强图形处理能力的Windows操作系统计算机构成,负责承载虚拟现实操作系统,搭建心血管生理模型,以及处理接收的位置、压力等信息,并输出控制流。

Novint Falcon力反馈控制器:虚拟现实控制器,可以进行上下左右前后六维度的空间操作,根据操作的力度反馈为不同的压力,使操作人员身临其境^[7-8],见图3。

显示器Oculus Rift:操作者头戴的显示器,支持传统的视频格式,甚至是3D视频格式。通过Oculus Rift,能进行球形、柱形360度全景观看,给操作者以沉浸式的体验,见图4。

三维空间跟踪定位器:进行三维空间的跟踪定位,具有检测物体在空间六个自由度的能力,采用低频磁场式传感器,接收器与发射器均采用正交天线,从反馈的磁场信息可以锁定接收器的位置和方向,并将数据上传给主机,与该仿真系统的其他VR设备,如Oculus Rift相结合起来,能够让操作者在空间上进行自由位移,见图5。

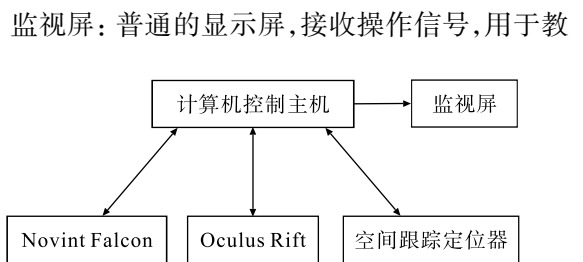


图2 PTCA仿真系统硬件组成

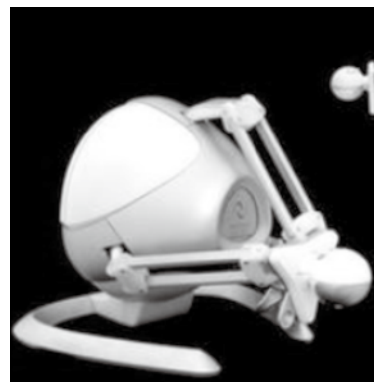


图3 Novint Falcon

师旁观指导。

1.2.2 软件设计 PTCA 仿真模型基于 Unity3D 引擎开发,引擎可以搭建于当前主流的 Windows 操作系统平台。手术中的各种模型、操作器具模型,实时操作三维动画等内容均在此平台上搭建,将 PTCA 手术所具有的对象抽象为 Unity3D 中的场景、物体对象。将各种操作指令以及反馈的效果、操作评价等的流程控制采用 C# 语言进行编写脚本,实现对应功能。通过物理引擎来渲染手术操作场景,以达到

逼真的效果 [9-13]。

虚拟现实 PTCA 模型实现顺序如下:(1)可根据医学图像及相关技术制作心脏和血管的几何模型;(2)通过建立适当的运动数学模型模拟血液流动和心脏跳动;(3)渲染操作场景,如导丝精确测定,扩张球囊,释放并定位支架;(4)模拟导管及其它仪器;(5)通过 Novint Falcon 计算并输出力反馈;(6)手术操作的模拟;(7)评价手术模拟的正确性,给出评判。整个系统结构框图见图 6。



图 4 Oculus Rift

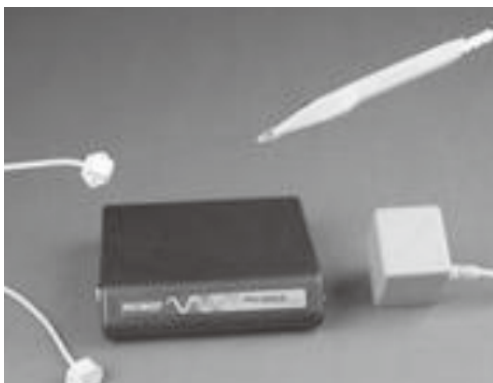


图 5 三维空间跟踪定位器

1.2.3 心血管三维建模设计 心血管几何模型是 PTCA 仿真系统的基础,采用三维建模软件 3DS max 进行构建,建模可以根据现有的生理模型,进行精确建模,见图 7。主要由心房、心室、冠状动脉等组成。需要指出,手术工具作为刚体建模较为简单,但心血管器官生理结构比较复杂,有着软体属性,建模有一定难度,需要根据已有的 CT 图像、断层扫描图像,进行建模,同时在几何模型的基础上了解其物理特性,添加约束条件,搭建软体器官的动力学模型,符合真实对象的质量、形变等物理特点,为后续的碰撞检测及力作用打下基础。模型建立后导入 Unity3D 引擎进行贴图处理,渲染,生成交互控制。

此外,PTCA 中如导丝、导管等手术器械可以建模为简单的组段。

1.2.4 多维度人机交互实现设计 系统的另一个关键问题是虚拟环境中的碰撞检测,它主要由实际受力反馈器件和虚拟环境的一个交互。具体过程是检测器械与器械,器械与人体组织之间的接触情况,从而通过一定的算法进行计算,该类检测为多点接触检测,具有很强的实时特性。其基本特性是由静态的几何器械和操作的位移情况,为检测输入量。通过 Unity3D 引擎插件开发 PC 机客户端,系统通过

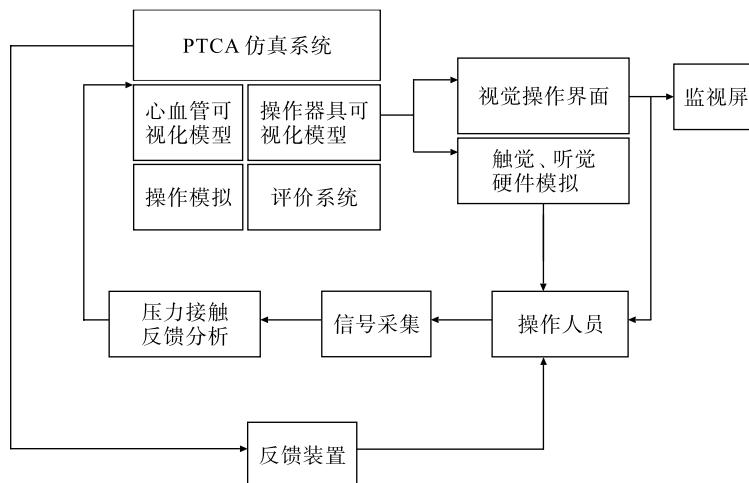


图 6 PTCA 仿真模型整体结构框图

Novint Falcon 力反馈控制器和三维空间跟踪器读取相关信息,完成人手到虚拟手的映射,手势操作识别,即读取输入量,然后进行虚拟手和虚拟模型间的碰撞检测。

该系统中,碰撞对象主要是手术器件和人体的直接交互作用。本文将器件作为刚体,只考虑其位移特性,忽略形变,和人体碰撞交互采用典型的AABB算法,其基本原理是,在Unity 3D场景中将对象用最小化六面体包围,采用从上到下的方法建立包围盒树,来进行交互测试。其判别方式是将两个基本的包围盒进行相交测试,通过树形节点依次检测其在三维空间上的投影长度重叠来确定是否产生碰撞,在何处碰撞。下面以两个基本的包围举例进行说明。

设两个包围盒分别为 a、b, 若其相交,则在三维空间坐标系下分量必然会相交,因此将两盒的坐标投影进行比较计量,就可以判断:

```

Int judge (a, b)
{ If (a.xmax<b.xmin||a.xmin>b.xmin)
Return 0; //x 坐标轴区间比较,若不相交,则无重复
If (a.ymax<b.ymin||a.ymin>b.ymin)
Return 0; //y 坐标轴区间比较,若不相交,则无重复
If (a.zmax<b.zmin||a.zmin>b.zmin)
Return 0; // z 坐标轴区间比较,若不相交,则无重复
Return 1; // 若三个坐标分量均有重复部分,则两盒相交 }
    
```

相交之后,则紧接着进行局部精确计算,判断其接触位置,及接触深度,为力反馈的后续计算提供数据打下基础。以最简单的单点接触举例,若碰撞检

测得到接触深度为 l , 则反馈力可以采用胡克定律计算,其公式原理如下:

$$F = \begin{cases} K_0(l_0 - l) & l < l_0 \\ 0 & l \geq l_0 \end{cases}$$

式中, K_0 为弹性系数, l_0 表示临界接触距离;

得到力反馈数据之后,将其输出到 Novint Falcon, 给操作者以体验。由于包围盒算法相交可以转化为低维度运算进行处理,结构简便,该方法所需内存空间较小。如果需要高精度,实时传输测量特性高的系统,可以采用改进的算法达到相应的效果。

而对于软体仿真比较复杂,其在外力接触下会发生形变,同时在一定的形变范围内,可以恢复原状,超过限度,将会造成不可逆破坏。本文将软体组织器官采用弹性小球模型,将其离散进行有限元分析计算力反映,对每一个小单元应用动力学方程,其接触情况可以模拟质量、弯折、扭转等特性,通过弹性链接在一起,最后求出其受力情况,位置偏移以及应变等物理量。结合模型的生理特性,通过程序进行判断,输出图像、声音、压力等信息,最后由 PC 机将这些信号输出给 Novint Falcon 和 Oculus Rift 等硬件设备,给操作者感官反馈来实现交互。软件流程见图 8。

1.2.5 导丝运动模拟 导丝的组成结构比一般一维弹性物体复杂得多。介入手术中所使用的导丝通常都不是空心的。大部分介入导丝由特殊材料制成的中芯和表面包被的弹簧线圈组成^[11]。在手术操作过程中,导丝顶部先穿刺到人体血液循环系统,由于其与血管壁接触,所以导丝是由弹性好、光滑的材料组成,避免扎破血管壁,引起医疗事故。导丝其他部分则对整个导丝起支撑作用。

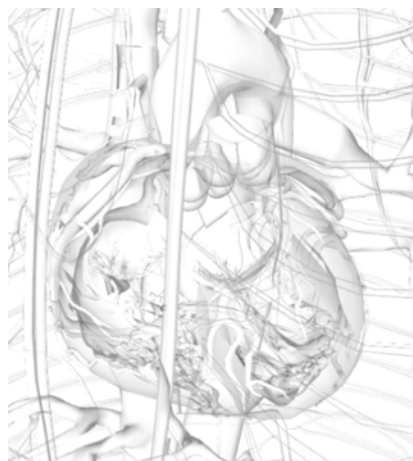


图7 心血管几何模型

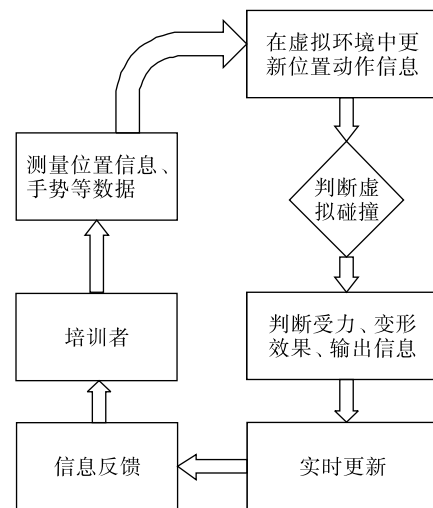


图8 软件流程图

有学者将导丝建模成一系列可形变的轻梁,并施以不完整约束,通过增量有限元的方法计算轻梁的形变,从而获取整个导丝的形变^[13]。本文在此基础上通过动态调整导管和导丝的材料属性来模拟他们之间的相互作用^[13-16]。其碰撞算法可以参考前面软体模型,通过有限元方法离散建模,通过碰撞检测得到相应力反馈,进而输出位置特性及形变特性,见图9。

2 结果

2.1 系统软件界面简介

该仿真系统进入采用实名认证方式进行,由用户名、密码组合登录,背后数据库由录入的在职医生和具有许可证的操作人员信息组成。

2.2 系统结构简介

介入心脏病学仿真模拟系统运行在一个设计的软件程序上,由该软件统一控制每个子系统模块的功能,完成介入心脏病手术的培训和模拟。该软件是由心脏生理模型子系统、手术器械操作子系统、操作反馈子系统、安全评估子系统以及数据库管理5大块组成。心脏生理模型子系统和手术器械操作子系统是本仿真系统的基础,所有的操作在此2个子系统上搭建;操作反馈子系统则是本系统的核心部分,用来模拟操作的效果,输出相应的信息供操作者进行辅助判断;安全评估子系统则是整个系统的评估部分,用来记录操作者的操作流程,操作效果,操作合理性等内容,指出操作错误之处,并给出整体评分供导师参考;数据库管理则是为本系统的运行及管理提供信息支撑。

2.3 系统功能简介

根据对介入心脏病模拟培训的要求,本系统功能包括心血管3D模型的展示功能、风险意识训练功能、心脏病介入手术模拟功能、手术模拟评价功能。

2.3.1 心血管3D模型展示功能

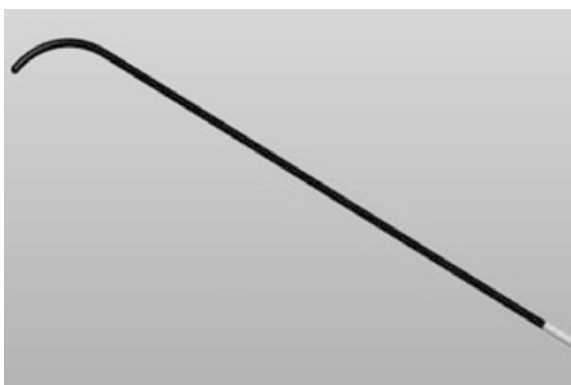


图9 导丝建模

3DS -Max 3D 建模软件构建心脏及心血管的虚拟现实模型,并搭建对应的模型数据库,可以利用该数据库搭建不同的心脏病虚拟现实模型,以便应用于不同的介入手术需求。

在此功能的基础上,培训者可以深入了解心血管的结构模型,使培训者通过虚拟现实场景对该手术对象有深刻了解,并对各自病变结构有详细认识,增加实际操作中的掌控能力。

2.3.2 风险意识训练功能 介入手术是属于操作风险较高的一种手术,其风险主要表现为:(1)心率失调;(2)刺入局部大出血以及血肿情况;(3)出现动脉瘤;(4)突发性心肌梗死;(5)手术器械及药剂过敏。通过该培训系统进行研究,可以使培训者了解介入手术操作中的安全及风险意识,风险发生的情况,采取恰当的措施。并且通过培训,操作者可以尽量避免操作过程中发生风险,而且能提高有效处理风险的能力。

2.3.3 心脏病介入手术模拟功能 本系统可以模拟PTCA介入手术、尖瓣球囊扩张术等介入手术,通过加载不同的模拟对象和评价操作系统进行仿真模拟。以PTCA手术为例模拟操作如下:PTCA手术中,导丝介入是定位病变位置的重要步骤,因此在系统中模拟这一步骤很关键,用户操纵Novint Falcon在虚拟人体中进行导丝的移动、刺入操作,利用三维空间定位跟踪器实时追踪导丝头的位置。在虚拟操作中,用户眼睛盯着监视器,利用跟踪器上的接收端操控虚拟导丝,当导丝头部到达动脉分支时,跟踪器提供的空间数据可帮助判断导丝头需要穿刺哪个分支,直到发现血管病变部位或狭窄处。在操作过程中,模型可随着用户的视角移动而变化,指导老师在计算机监视屏幕上观看培训者操作是否正确。图10显示了导丝的模拟操作界面。

2.3.4 手术模拟评价功能 首先通过对培训者进行生理检测,依照相关原理,对培训者的心理素质,处理风险事故的能力进行评价,以及操作的承受程度。利用Novint Falcon和Oculus Rift传感器监测培训者的操作,根据传感器获取的数据以及培训系统反馈的信息,判断培训者的操作是否正确,并对其处理能力进行评价。并通过计时以及优化处理操作等评价培训者操作的优劣情况。本系统还可以通过设置突发风险,来训练培训者的决策及应急响应能力。

3 讨论

经过系统测试,本系统的力反馈计算响应速度见表1。采用AABB碰撞算法的响应环节满足使用

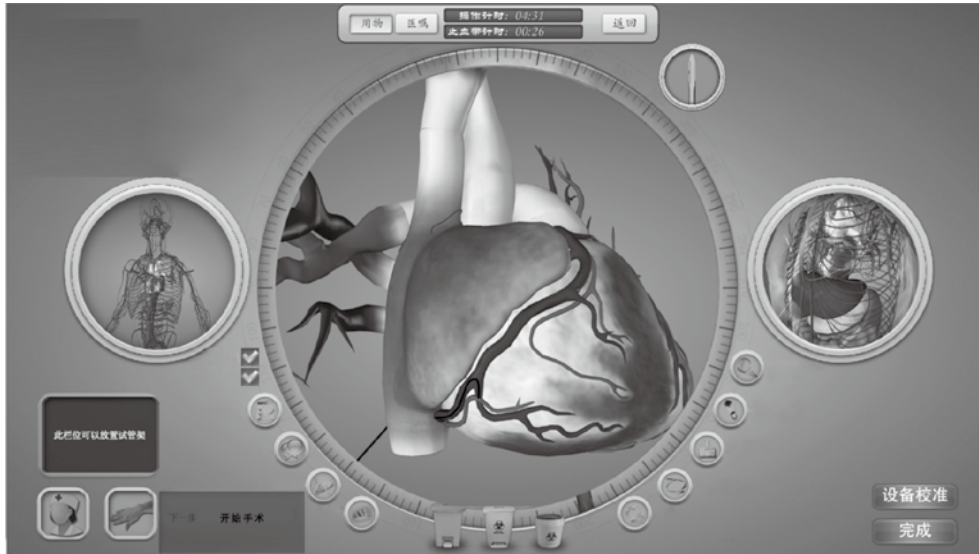


图 10 导丝介入仿真界面

要求,一个导丝模型包括超过 250 个节点,以及一定数量的有限元构成,进行力反馈计算时,所需约 40 ms。而在模拟手术导丝操作的时候,导丝模型变化较为明显的是最前端段,而对远离前端的以及中后段的导丝形变不太明显,可以在仿真中省略。因此,本文的力反馈算法可以只考虑最靠近前端的部分,这样节点可进一步精细化,同时需计算的节点约 200 个,因此响应时间可达到约 30 ms,即刷新频率接近 30 帧每秒,满足相关条件。

本文评估仿真碰撞的有效性,选取导丝上某点进行力学跟踪检测。在开始计算时,该点承受的压力为极大值,但随着计算迭代继续进行,所受压力逐渐降低,逐渐收敛到一个固定值,见图 11。这种现象可以通过物理和生理原理来解释。当导丝最开始和血管接触时,由于血管产生形变需要一定时间,故此时,导丝和血管壁之间压力处于最大值;随后血管壁和导丝会相互“磨合适应”,因此形变会减小,直到二者达到平衡状态。因此,在碰撞发生时,进行第一碰撞反馈计算后,再经过一定的迭代次数,得到的数据是有效的、满足物理和生理特征的。

系统仿真参数如下:实时刷新率 0.030 s,精度 0.07、0.25 mm,最大输出力 30 N,导丝位置 0 ~ 1.2 m。

该仿真系统的设计及相关精度基本满足培训的要,本系统成功展示了模型的建立工作,描述了其系统功能,通过建立三维虚拟现实心血管模型,并通过碰撞算法等理论实现了虚拟现实互动,能有效的帮助广大培训者和研究学者更加深入熟悉掌握介入心脏病手术的相关操作技巧和原理。

介入心脏病学中最常见的手术,需要进行大量

表 1 力反馈响应时间

节点数量	时间 (ms)
50	1.6
100	10.5
150	25.3
200	30.8
250	41.3
300	53.1

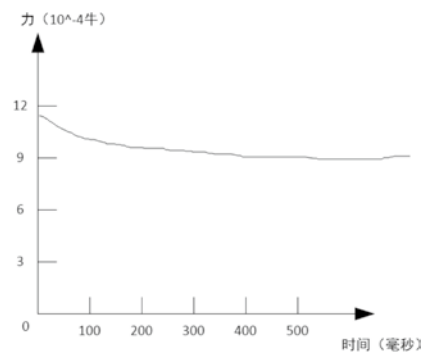


图 11 导丝压力

的、复杂的培训来培养一个合格的介入心脏病学家,基于虚拟现实技术的介入心脏病仿真系统可提供电脑环境用来练习操作过程。开发这样一个系统,涉及到心血管疾病和虚拟现实领域内大量的技术和专业知识,需要不断进行完善,比如建模的虚拟现实对象弯曲程度、刺入深度等多种参数的交互控制。

参考文献

- 1 Maton A, Hopkins J, Johnson S, et al. Human biology and health, Englewood Cliffs, New Jersey: PrenticeHall, 1993.
- 2 徐志云. 心血管手术风险预测研究与现状. 中国胸心血管外科临床杂志, 2011, 18(3): 187-188.

- 3 武忠, 陈保俊, 张杰, 等. 升主动脉不接触技术在非体外循环冠状动脉旁路移植术中的应用. 中国胸心血管外科临床杂志, 2010, 17(1): 62-64.
- 4 赵海峰. 基于 Unity3D 的游戏开发与设计. 山东科技大学, 2014.
- 5 俞亮, 俞文心. 基于 Unity 的 Web 游戏设计与实现. 计算机光盘软件与应用, 2014, (8): 225-226.
- 6 孙雨霞. 基于力反馈的虚拟手术切割技术研究. 哈尔滨工程大学, 2013.
- 7 于德海. 虚拟手术系统中力反馈技术的设计与实现. 山东大学, 2013.
- 8 王瑞艺. 虚拟手术中力反馈的研究与实现. 华北水利水电大学, 2014.
- 9 尚建民, 张岳. 头戴式立体显示器在电视产业中的新形态应用. 电视技术, 2014, 38(12): 45-46.
- 10 石巧, 侯建霞. 虚拟现实技术在口腔诊疗操作培训中的应用. 国际口腔医学杂志, 2015, 42(1): 69-74.
- 11 冀晶晶. 结合触觉力反馈与变形可视化的柔性机构设计分析. 浙江大学, 2014.
- 12 姜学智, 李忠华. 国内外虚拟现实技术的研究现状. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2004, 23(2): 238-240.
- 13 邹湘军, 孙健, 何汉武, 等. 虚拟现实技术的演变发展与展望. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 1905-1909.
- 14 王树国, 任倩, 蔡鹤皋. 利用虚拟现实和力反馈的遥现技术综述. 中国机械工程, 1999, 10(7): 803-806.
- 15 方向明, 方明, 刘天元, 等. 基于虚拟现实技术的机器人仿真设计研究. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2016, 39(1): 61-65.
- 16 滕翠, 梁川. 基于虚拟现实技术的网络渗透仿真训练系统设计. 自动化与仪器仪表, 2016, 2: 196-200.

收稿日期: 2016-03-15

编辑: 刘雪梅、林锋

引用本文: 戴红芬, 吴斌, 金伟伟. 基于 Unity3D 虚拟现实技术的心血管介入仿真模拟系统. 中国胸心血管外科临床杂志, 2016, 23(11): 1092-1098. [Dai HF, Wu B, Jin WW. Simulation system of cardiovascular interventional simulation based on unity3D virtual reality technology. Chin J Clin Thorac Cardiovasc Surg, 2016, 23(11): 1092-1098.]