

文章编号: 1000-5862(2017)04-0331-07

具有力反馈的心血管介入虚拟手术模拟器的研发

谢 叻^{1,2} 神祥龙¹ 吴朝丽¹ 邓子龙¹ 顾力栩² 蔡 萍³ 郝爱民⁴

(1. 上海交通大学国家数字化制造技术中心, 上海 200030; 2. 上海交通大学生物医学工程学院, 上海 200030;
3. 上海交通大学电信学院, 上海 200030; 4. 北京航空航天大学虚拟现实技术与系统国家重点实验室, 北京 100191)

摘要: 目前我国介入手术医生的总量远远不能满足冠心病患者的治疗需求, 运用新的心血管介入手术训练手段来加快医生的培养显得尤为迫切, 故开展心血管介入虚拟手术系统的研究有重要意义。针对心血管介入虚拟手术模拟器进行研发, 对心血管介入虚拟手术力反馈模拟器进行总体设计, 该文设计了心血管介入手术介入导丝、导管的运动功能、力反馈功能模块的机械结构与控制系统, 设计了X光透视开关、造影剂注射剂量采集、球囊加压气压采集等辅助介入操作仿真模块。研究表明: 集成的心血管介入手术模拟器系统满足医学培训的需要。

关键词: 虚拟现实; 心血管介入手术; 虚拟手术

中图分类号: TP 391.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2017.04.01

0 引言

冠心病在中国乃至全球都是导致死亡的主要原因。心血管介入手术属于微创治疗手术, 首先从大腿股动脉插入鞘管, 导丝、导管从鞘管进入动脉血管再沿血管到达冠状动脉, 在X光透视影像下, 诊断冠状动脉病变, 再通过球囊扩张或者支架植入疏通治疗动脉血管狭窄或阻塞^[1-5]。

由于心血管介入手术不需开胸手术, 创伤小, 病人术后恢复周期短, 已成为冠心病的主要诊治方式。然而, 心血管介入手术医生的培养周期长, 我国的介入手术医生的总量远远不能满足冠心病患者的治疗需求, 因此迫切需要新的心血管介入手术训练手段来加快医生的培养。

近年来虚拟手术越来越受关注, 虚拟手术是基于各种医学影像数据、结合快速发展的虚拟现实技术, 借助计算机及其相关设备的支持, 建立起的手术虚拟培训环境, 医生可以借助虚拟环境进行手术训练、手术规划, 用以提高临床医学诊治的技能和精度, 降低手术训练及治疗的成本和风险、减少医学院、临床教学中对人体标本解剖的依赖, 使得高难度手术得以更快地普及。因此, 运用虚拟现实技术开展

心血管介入虚拟手术系统的研究有重要意义^[6-10]。

美国、加拿大、瑞典等国家虚拟心血管介入手术系统进行了研究, 但在力反馈技术方面尚不完善, 国内虚拟心血管介入手术系统的研究较少, 本文将对具有力反馈的心血管介入虚拟手术模拟器进行研究。

1 心血管介入虚拟手术模拟器的设计需求

在虚拟现实手术环境中, 需要进行医学器官建模, 建立手术流程, 实现虚拟手术过程中器官或器械的交互作用, 构建虚拟现实软件系统。但是, 仅依靠虚拟现实软件系统, 让训练医生操作鼠标进行训练, 将会大大降低训练的逼真性和训练效果。为了使受训医生逼真地感受手术过程, 还需要研发虚拟手术模拟器硬件系统。本文针对心血管介入虚拟手术模拟器进行研发。

为了获得训练效果的真实性, 在本文研发的心血管介入手术训练系统中, 受训医生的操作与实际手术进行完全相同的手术器械训练, 包括: 导丝、引导导管、球囊导管、造影注射器、X光开关踏板、球囊加压气泵等。

收稿日期: 2017-03-10

基金项目: 国家自然科学基金重大课题(61190124, 61190120) 和国家自然科学基金面上(61672341) 资助项目。

作者简介: 谢 叻(1964-), 男, 江西南昌人, 教授, 博士生导师, 主要从事虚拟现实技术、数字化制造技术和手术机器人技术的研究。E-mail: lexie@sjtu.edu.cn

虚拟手术模拟器系统需要实现与实际手术相同的感受,因此需要感受到以下信息:

- 1) 实时感受到介入导丝、导管的运动,包括前进后退的移动以及旋转的运动;
- 2) 实时感受介入导丝、导管在血管中摩擦、碰撞等引起的医生操作端受到的阻力,包括前进后退的阻力以及旋转的阻力;
- 3) 实时采集到造影注射器的注射量;
- 4) 实时获得 X 光开关踏板的开关状态;
- 5) 实时采集到球囊加压气泵的气压。

2 具有力反馈的心血管介入虚拟手术模拟器的设计

大多数虚拟手术系统往往只依靠视觉图像信息训练医生,而没有力反馈信息,从而影响培训效果。力反馈功能是虚拟手术的难点,如何使训练医生在看到心血管系统的同时,能够感受到介入器械与虚拟动脉血管交互时的运动阻力,使训练过程更逼近、培训效果更明显^[11-12]是本文研究的内容。

人手感受到的力觉是从肌肉和肌腱等组织感知到的信息,力觉感知往往伴随着运动觉感知,力觉感受与运动觉是密不可分的。

力反馈是由力反馈设备作用于操作者的反作用力。力反馈装置通常由机械结构、驱动器、执行元件、控制器、传感器以及软件程序等组成。如图 1 所示,传感器采集运动机构的位置、速度、加速度等信息,虚拟手术软件根据运动数据计算阻力的方向和大小,软件的控制模块驱动动力反馈机构产生反馈力,训练医生通过力反馈机构感受到力觉反馈效果^[13]。

医生在实际心血管介入手术过程中操作的器械

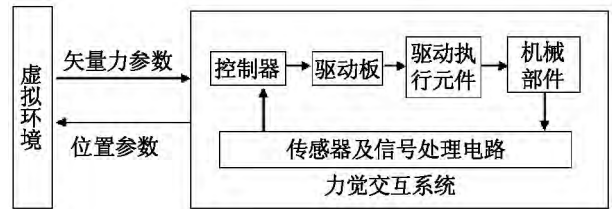


图 1 力反馈的原理图

包括鞘管、导丝、导管、X 光设备控制踏板、球囊加压泵、造影剂注射器等。其中,导丝、导管的操作技巧要求最高,医生操作导丝用于引导导管(指引导管和球囊导管)在动脉血管中的移动。医生主要通过推拉导丝、导管和捻旋导丝、导管进行导丝、导管的输送。因此,导丝、导管沿着轴向前进后退运动和周向旋转运动的 2 个自由度运动;导丝、导管也有推拉反馈力和捻旋反馈力 2 个自由度的力反馈。为了获得逼真的介入手术训练效果,本文设计的心血管虚拟介入手术模拟器系统能模拟导丝、导管 2 个自由度的运动反馈以及 2 个自由度的力反馈。

虚拟手术模拟器系统总体结构如图 2 所示,模拟器由计算机、力反馈机构、位移采集单元、处理器、电机驱动器、驱动电机、X-射线脚踏开关单元、造影剂采集单元、球囊加压泵压力测量单元等组成。模拟器可分别采集到导丝、导管沿着轴向前进后退和沿着周向的旋转 2 个自由度的位移运动信息,同时具备以下功能:1) 提供沿着周向的旋转和沿着轴向前进后退 2 个自由度的力反馈;2) 模拟器系统可以采集 X 光设备控制器脚踏开关的信号,为虚拟介入手术 X 光显影提供依据;3) 可以采集虚拟造影剂注射器的注射量,为虚拟介入手术再现造影剂显影提供参数;4) 可以采集虚拟球囊加压泵的压力信号,为虚拟介入手术软件球囊扩张提供参数。

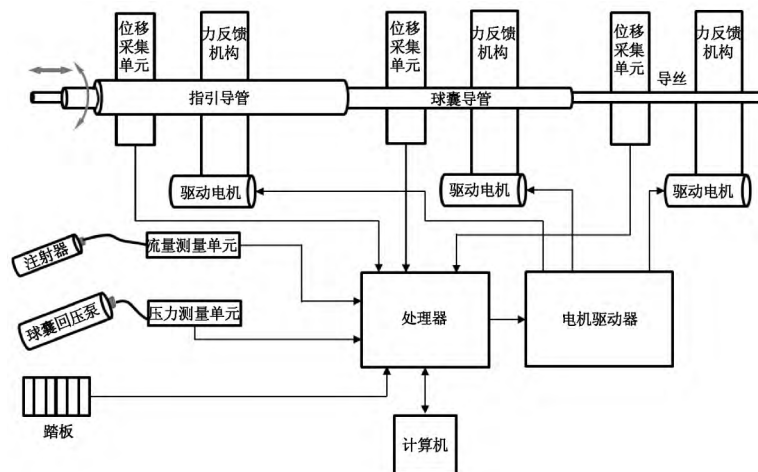


图 2 心血管虚拟介入手术模拟器总体结构框图

如图 2 所示,当模拟器工作时,计算机与力反馈设备相连,计算机运行虚拟心血管介入手术软件,虚拟心血管介入手术软件实时显示虚拟心血管等信息;根据采集到的导丝、导管的运动位移信息,在虚拟心血管介入手术软件中构建虚拟的导丝、导管,并计算导丝、导管与虚拟心血管组织的交互作用的反馈力,分解为推拉反馈力和捻旋反馈力,通过计算得到控制信号,控制信号由控制器传达给电机驱动器驱动电机带动力反馈机构工作,导丝、导管将虚拟反馈力传递到训练医生的手上,训练医生可以感受到虚拟心血管介入手术的力反馈信息,达到实现虚拟介入手术的训练目的。

3 具有力反馈的心血管介入手术模拟器的机械设计

力反馈机构性能直接影响到心血管虚拟介入手术系统的训练效果。

3.1 力反馈装置的整体结构

如图 3 所示,设计的力反馈装置由 3 组类似的机构组成,每组机构包括导丝、导管力反馈模块以及位移测量单元,其中,导丝力反馈单元、指引导管力反馈单元、球囊导管力反馈单元可分别实现导丝力反馈单元、指引导管力反馈单元、球囊导管的运动位移测量和力反馈。

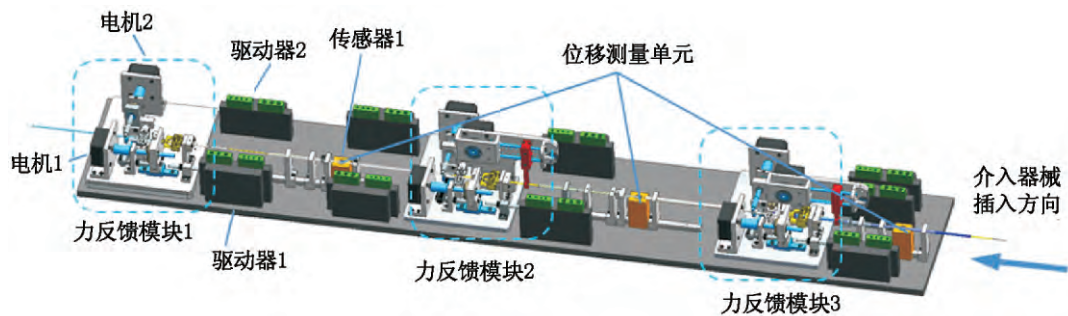


图 3 力反馈装置整体结构图

3.2 导丝导管力反馈模块结构设计

如图 4 所示,每个力反馈模块由导丝、导管轴向前进后退的力反馈机构、周向旋转的力反馈机构组成。当导丝、导管到达力反馈模块时,依次通过导丝、导管轴向前进后退的力反馈机构、周向旋转的力反馈机构。力反馈控制由计算机软件实现:位移测量模块实时测量导丝、导管的运动位移信息,经计算机计算后将控制信号传递给电机驱动器驱动电机运转带动力反馈机构运转。

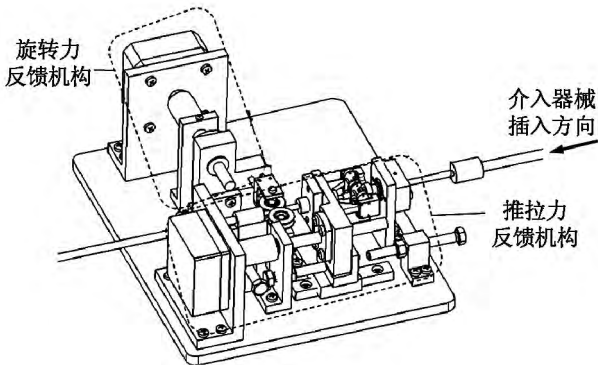


图 4 导丝导管力反馈模块结构图

3.2.1 导丝导管推拉力反馈机构设计 如图 5 所示,介入导丝、导管轴向前进后退力反馈机构由导丝、导管推拉夹紧机构、微型丝杠、微型直线导轨、驱动电机、联轴器、限位块等组成,电机驱动微型丝杠沿着微型直线导轨直线运动实现轴向前进后退力反馈。当导丝、导管运动时夹紧机构产生导丝、导管的运动阻力,通过导丝、导管传递到训练医生的手上,使训练医生感受到力反馈。

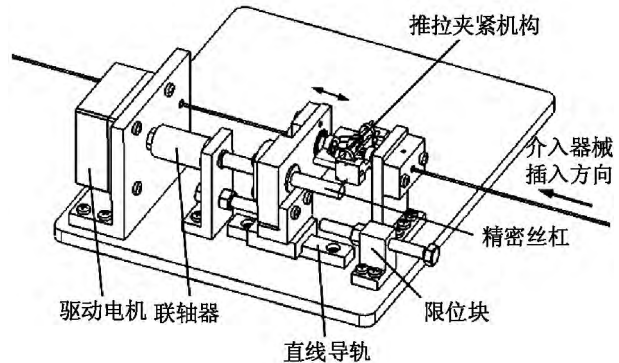


图 5 导丝导管推拉力反馈机构

3.2.2 导丝导管旋转方向力反馈机构设计 导丝、导管周向旋转力反馈的实现如图 6 所示,旋转夹紧

机构可提供大小可调的旋转反馈力,滑轮动模块沿着与导丝、导管轴线垂直的方向做直线运动,给导丝、导管施加压力,当训练医生推拉导丝、导管时,滑轮外边缘随着导丝、导管做旋转运动,由于精密轴承旋转摩擦系数小,故可忽略此时导丝、导管受到的进退方向的阻力。当捻旋导丝、导管做周向旋转运动时,由于滑轮外缘机构是圆形凹面,会提供较大的旋转阻力,传递到人手即为感受到的捻旋反馈力。

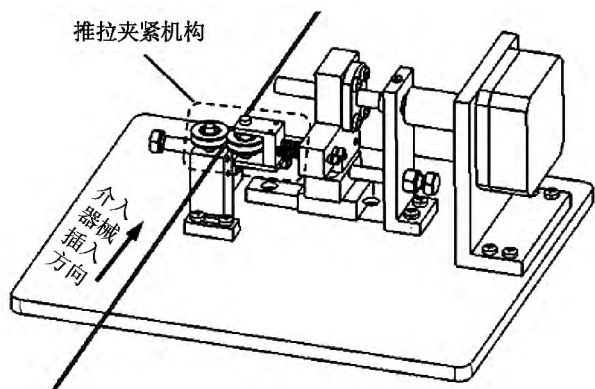


图6 导丝导管捻旋力反馈机构

4 具有力反馈血管手术模拟器控制系统设计

力反馈控制系统主要分为导丝、导管的位移测量和步进电机的运动控制^[13-14]。

4.1 控制系统的整体架构

力反馈机构控制系统的实现分为导丝、导管的位移测量和步进电机的运动控制两部分内容。运动控制器、位移传感器分别与计算机通信,导丝、导管对应的传感器实时测量其运动位移,并将位移信号发送给计算机,心血管介入虚拟手术软件计算出导丝、导管的位移信息,计算虚拟的导丝、导管与心血管的运动阻力,并将该数据发送给运动控制器控制对应的驱动器驱动电机对导丝、导管施加反馈力。

受训医生在操作导丝、导管时,位移传感器实时测量导丝、导管运动信息,虚拟心血管介入手术软件计算出虚拟血管对导丝、导管的阻力,并分解成轴向反馈力和周向反馈力,再将反馈力信号转换成步进电机的旋转角度信号,运动控制卡驱动对应电机动作,给导丝、导管施加运动阻力。

4.2 位移测量单元的设计

导丝、导管位移测量单元要求较高的测量精度

和较快的响应速度,由于导丝、导管质地柔软,如果使用传统的接触式位移测量方式(如旋转编码器)测量导丝、导管的位移,可能会出现导丝、导管与位移传感器的接触打滑现象;同时,也会带来额外的摩擦阻力,影响测量精度。因此导丝、导管的位移测量应采用非接触(电磁场、光学或者超声方式)位移测量方式。另一方面,由于本文设计的力反馈装置结构紧凑,要求位移测量单元占据的空间体积要尽量小。综合考虑上述因素,故采用光学位移传感器测量导丝、导管的位移。

5 虚拟心血管介入手术模拟器辅助功能的设计

在心血管介入手术过程中,手术医生通常在CT设备、造影剂、球囊加压泵等辅助介入器械帮助下,进行导丝、导管的推送,球囊的扩张、支架的释放等介入操作。手术的成功与否跟辅助介入操作有关联,虚拟手术辅助介入操作是提高医生辅助介入操作水平的有效方式。因而,X光透视、造影剂显影、球囊加压等辅助介入操作仿真是虚拟手术仿真的重要组成部分。

以上描述了心血管介入手术模拟器中导丝、导管的运动与力反馈功能的实现,除此之外,心血管介入手术模拟器还需在研发过程中设计虚拟造影剂注射器、虚拟球囊加压泵、虚拟X光设备控制器脚踏板等,并具备以下功能:1)虚拟造影剂注射器模拟造影剂注射量的变化,为心血管介入虚拟手术软件仿真造影剂的显影提供参数;2)虚拟球囊加压泵模拟球囊加压泵的压力变化,为心血管介入虚拟手术软件中的球囊扩张提供参数;3)虚拟X光设备控制器脚踏板需要采集X光设备控制器脚踏板的开关信息,为虚拟手术软件中呈现X光影像效果提供依据^[15-16]。

5.1 虚拟X光设备控制器脚踏板的设计

心血管介入手术中图像界面更新一般是通过踩踏医用脚踏开关。心血管介入虚拟手术中可以采用与真实手术相同或类似的医用脚踏开关,实现X光仿真信号的输入。脚踏开关是以脚的踩踏实现电路通断的控制开关,主要应用在双手无法或者不便的

情况下,医学上,由于医生双手操作较多,一般采用脚踏开关来控制医疗设备。

在心血管介入虚拟手术中,脚踏开关用于X光仿真信号采集。由于X光踏板只有踩踏闭合和断开2种状态,属于开关量信号。开关量信号的采集可以通过数据采集模块完成,其具体工作原理为:操作医生踩踏脚踏开关,开关状态发生变化,数据采集模块逻辑电平发生变化,采集到开关量信号后传输至计算机。

踩下X光脚踏开关则更新透视界面,显示介入器械踩下瞬间在人体或血管中的位置,从而实现X光照射仿真(见图7)。

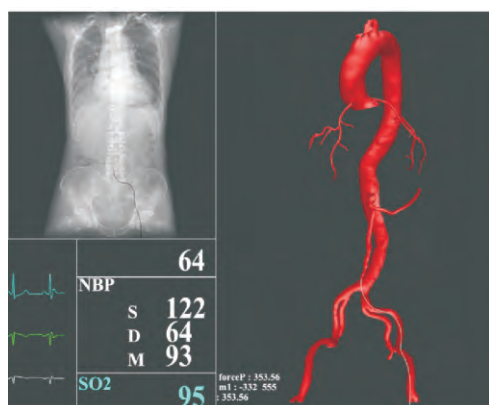


图7 X光透视仿真

5.2 虚拟造影剂注射器的设计

在心血管介入手术过程中,注射造影剂可增强血管成像,辅助医生手术。然而,造影剂剂量增加会损失患者肾功能,故造影剂的使用剂量须控制适当。

心血管介入手术需要在血管造影等医学影像下进行。因而,造影剂的显影模拟是其中必不可少的模块,而进行造影剂显影仿真,首先需要采集虚拟手术中造影剂注射剂量信号。在心血管虚拟手术仿真中,要求模拟器尽可能地反映真实的手术状态,因而造影剂仿真模块应当逼真。由于造影剂注射器注射腔为圆柱型,造影剂注射剂量信号的检测可以通过检测造影剂注射器直线位移转换得到。故采用光学位移传感器这种非接触式检测方式,检测精度高,且能够不影响医生注射造影剂手感,适合心血管介入手术模拟器中造影剂剂量检测。

在心血管介入手术中,造影剂主要用于血管显示及确认介入器械在血管中的位置。造影剂注射后,

随血流在血管中扩散开来,由于造影剂的密度不同于介入器械及血管周围组织,在CT扫描观察中,能够明显区分介入器械、血管和血管周边组织。

使用心血管介入手术仿真器进行虚拟手术,操作者推动造影剂注射器活塞,造影剂注射剂量信息被检测,之后仿真软件绘出造影剂仿真画面,效果如图8所示。



图8 造影剂显影效果

5.3 虚拟球囊加压泵的设计

心血管介入手术中常常使用球囊加压泵对球囊施加压力从而撑开球囊。虚拟手术中,交互装置使用实际手术中常用的球囊加压泵,并设计压力信号采集模块,采集球囊加压泵中的气压数值,传递给虚拟现实软件。虚拟现实软件接收到球囊加压泵压力数值变化信号后,反馈至虚拟球囊和支架。当压力超过一定数值,虚拟球囊或支架将虚拟狭窄血管撑开;压力下降后虚拟球囊缩小,虚拟支架保持撑开状态,虚拟血管保持通畅。

心血管介入虚拟手术仿真包含了虚拟球囊撑开与收缩以及虚拟支架撑开等仿真内容,要实现这部分内容首先需要采集球囊加压泵压力信号。医生操作球囊加压泵施压或释放压力,压力信号经压力传感器检测并转换成标准的电信号输出,利用数据采集卡将电信号采集并方便地传输至计算机。

医生在进行心血管介入手术时,支架植入,撑开狭窄或堵塞血管是非常关键的步骤。本心血管介入虚拟手术仿真器,提供球囊加压泵实物,可以进行球囊胀开和支架植入的仿真模拟。如图9所示,左图为球囊加压操作,右图为支架撑开仿真效果。

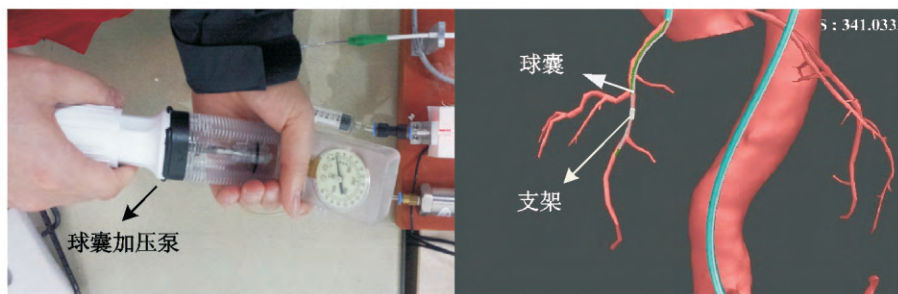


图9 球囊加压仿真

6 心血管介入手术系统集成

心血管介入手术模拟器与软件系统集成,如图10所示.集成后的软硬件集成系统已在2016年上海工博会上参展(见图11),获得好评,且该心血管介入手术系统在北京协和医院得到应用.

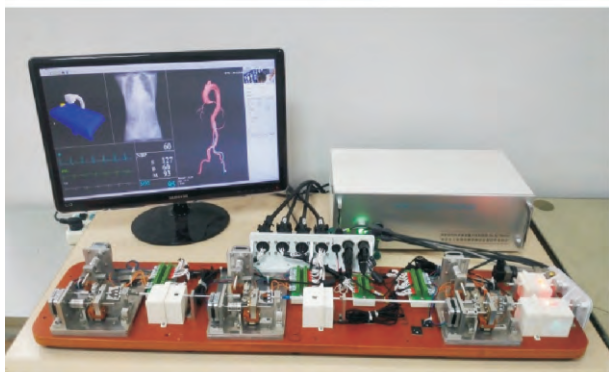


图10 心血管介入手术模拟器与软件系统集成

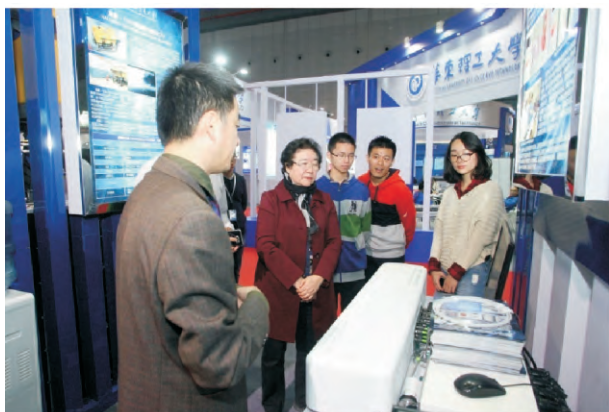


图11 心血管介入手术系统在2016年上海工博会上参展

7 参考文献

- [1] 陈伟伟,高润霖,刘力生,等.中国心血管病报告2014概要[J].中国循环杂志,2015,30(7):617-622.
- [2] Jorgensen T, Capewell S, Prescott E, et al. Population-level

changes to promote cardiovascular health [J]. European Journal of Preventive Cardiology, 2012, 20(3): 409-421.

- [3] Compagnone G, Campanella F, Domenichelli S, et al. Survey of the interventional cardiology procedures in Italy [J]. Radiation Protection Dosimetry, 2012, 150(3): 316-324.
- [4] Klein L W, Ho K K L, Singh M, et al. Quality assessment and improvement in interventional cardiology: A position statement of the society of cardiovascular angiography and interventions, Part II: public reporting and risk adjustment [J]. Catheterization and Cardiovascular Interventions, 2011, 78(4): 493-502.
- [5] Klein L W, Uretsky B F, Chambers C, et al. Quality assessment and improvement in interventional cardiology: A position statement of the society of cardiovascular angiography and interventions, Part I: standards for quality assessment and improvement in interventional cardiology [J]. Catheterization and Cardiovascular Interventions, 2011, 77(7): 927-935.
- [6] Herzele I V, Aggarwal R. Virtual reality simulation in the endovascular field [J]. U S Cardiology, 2008, 5(1): 41-45.
- [7] Lee J T, Qiu M, Teshome M, et al. The utility of endovascular simulation to improve technical performance and stimulate continued interest of preclinical medical students in vascular surgery [J]. Journal of Surgical Education, 2009, 66(6): 367-373.
- [8] 谭珂, 郭光友, 王勇军, 等. 虚拟现实技术在医学手术仿真训练中的应用 [J]. 军医进修学院学报, 2002, 23(1): 77-79.
- [9] 马旻, 吴剑煌, 王树国, 等. 脑血管介入手术仿真训练系统研究 [J]. 透析与人工器官, 2010, 21(3): 25-31.
- [10] Morrone D, Weintraub W S. Interventional cardiology: Cost-effectiveness of PCI guided by fractional flow reserve [J]. Nature Reviews Cardiology, 2011, 8(3): 125-126.
- [11] Eslahpazir B A, Goldstone J, Allemang M T, et al. Princi-

- pal considerations for the contemporary high-fidelity endovascular simulator design used in training and evaluation [J]. *Journal of Vascular Surgery*, 2014, 59 (4) : 1154-1162.
- [12] Tavakoli M ,Patel R V ,Moallem M. A haptic interface for computer-integrated endoscopic surgery and training [J]. *Virtual Reality* 2006 9(2) : 160-176.
- [13] 神祥龙. 心血管介入虚拟手术力反馈装置的研制 [D]. 上海: 上海交通大学 2013.
- [14] 吴朝丽. 虚拟心血管介入手术力觉交互技术的研究 [D]. 上海: 上海交通大学 2014.
- [15] 邓子龙. 基于力反馈的心血管介入虚拟手术仿真与评价 [D]. 上海: 上海交通大学 2015.
- [16] 邓子龙, 谢叻, 罗买生 等. 心血管介入虚拟手术造影剂显影仿真 [J]. *中国数字医学* 2015, 10(2) : 29-31.

The Simulator Development of Cardiovascular Interventional Virtual Surgery with Force Feedback

XIE Le^{1,2}, SHEN Xianglong¹, WU Zhaoli¹, DENG Zilong¹, GU Lixu², CAI Ping³, HAO Aimin⁴

(1. National Digital Manufacturing Technology Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;

2. School of Biomedical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;

3. School of Telecommunications, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;

4. State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and System, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The total amount of interventional surgeons in our country is far from meeting the treatment demands of patients with coronary heart disease, so it is quite urgent to develop new cardiovascular interventional training methods to speed up the training of doctors, therefore it is important to study of cardiovascular interventional virtual surgery system. Aiming at the virtual surgery simulator for cardiovascular intervention to develop, the overall design of the cardiovascular interventional virtual surgery force feedback simulator is implemented. The movement function of the catheter, mechanical structure and control system of force feedback function are designed, and a series of auxiliary intervention operation simulation modules are designed including X-ray perspective switch, contrast agent injection dose collection system and balloon pressurized air pressure acquisition, and so on. The studies show that the integrated cardiovascular interventional simulator system meets the demands of medical training.

Key words: virtual reality; cardiovascular interventional operation; virtual surgery

(责任编辑: 王金莲)