

文章编号:1004-7220(2014)04-0386-07

# 心血管介入虚拟手术力反馈技术

吴朝丽<sup>a</sup>, 谢 叻<sup>a,b</sup>, 神祥龙<sup>a</sup>, 周朝政<sup>a</sup>

(上海交通大学 a. 国家数字化制造技术中心; b. 数字医学临床转化教育部工程研究中心, 上海 200030)

**摘要:** 心血管介入虚拟手术技术可用于心血管介入手术的手术培训、手术导航、手术优化和手术评价等方面。本文介绍了心血管介入虚拟手术系统的结构组成,对国内外虚拟心血管介入手术的研究现状进行讨论,并详细分析了几款代表性产品的工作原理。通过对虚拟心血管介入手术系统中力反馈技术的关键技术开展研究,探讨了心血管介入虚拟手术技术的发展方向,从而提高心血管介入手术的手术训练效果和临床成功率。

**关键词:** 介入手术; 心血管疾病; 虚拟手术; 力反馈

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

## Force feedback technology in virtual cardiovascular interventional surgery

WU Zhao-li<sup>a</sup>, XIE Le<sup>a,b</sup>, SHEN Xiang-long<sup>a</sup>, ZHOU Chao-zheng<sup>a</sup> (a. National Digital Manufacturing Technology Center; b. Engineering Research Center of Digital Medicine and Clinical Translation, Ministry of Education, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** Virtual technology of cardiovascular interventional surgery can be used for surgical training, surgical navigation, surgical optimization and postoperative evaluation in cardiovascular interventional procedures. In this paper, the composition of virtual cardiovascular interventional operation system was introduced, and the research status of virtual cardiovascular interventional operation both at home and abroad was discussed, including detailed analysis on working principles of several representative products. Through the intensive study on force feedback used as the key techniques in virtual cardiovascular interventional surgery, the author investigated its future development as well as how to improve the training effect and success rate of cardiovascular interventional operation.

**Key words:** Interventional operation; Cardiovascular disease; Virtual surgery; Force feedback

血管疾病是当今严重威胁人类健康的头号杀手,主要分为心脏血管疾病、神经血管疾病与血管外围疾病三大类,其中心脏血管疾病最为常见。每年,我国冠心病等心脏血管疾病的新发病人数量约为100万人,然而接受心脏介入治疗的患者只有极少的几万人,这一比例与国外相比相当低<sup>[1-2]</sup>。

心血管介入手术是借助于介入导管通过血管管

腔到达体内较远的病变部位、并对病变部位实现微创治疗的一种新兴医疗技术,具有手术时间缩短、病人的痛苦减小、手术恢复时间从几个月缩短为几天等优点<sup>[3-5]</sup>。国外已将心血管介入手术方法广泛应用于临床血管成形术、血栓或异物的摘除、肿瘤治疗等,国内的研究与临床应用也正在逐步开展,而相关的训练手段还较为欠缺。

收稿日期:2013-03-12; 修回日期:2013-05-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61190124,61190120,60873131),国家科技支撑计划重点项目课题(2009BAI71B06),国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA01Z310,2009AA01Z313),国家科技型中小企业技术创新基金(11C26213100942),上海交通大学“医工(理)交叉研究基金”项目(YG2012MS54)。

通信作者:谢叻,教授, Tel: (021)62932119; E-mail: lexie@sjtu.edu.cn。

借助于心血管介入虚拟手术系统,医生对虚拟手术器械进行操作,实时观察虚拟手术环境的变化,体验真实手术的感觉,提高培训效果,并大大降低培训成本。虚拟手术系统为医生提供具有真实感和沉浸感的训练环境,精确预测手术结果,并培养应付各种突发情况的能力。虚拟手术系统利用实时图像数据,可帮助医生制定最佳手术方案,辅助医生进行手术导航,有效提高手术成功率。因此,研究和开发心血管介入虚拟手术系统,可以有效完成心血管介入手术的手术训练、手术优化和远程手术,具有重大的理论与实际意义<sup>[6-7]</sup>。

本文聚焦于近年来已经逐渐成熟的心血管介入虚拟手术系统,研究对象均为有力反馈功能的虚拟手术系统。

## 1 心血管介入虚拟手术系统

在心血管介入虚拟手术系统中,通过心血管介入虚拟手术环境和虚拟手术器械,用户可获得视觉、触觉、运动觉的多感知实时交互,从而达到手术真实感的要求。用户按照实际心血管介入手术的手术过程,对虚拟手术器械进行相应操作,同时在虚拟手术环境中得到动态响应;并获得实时的多感知信息反馈。因此,心血管介入虚拟手术系统的设计必须满足实时性和真实感。基于实时交互的设计要求,心血管介入虚拟手术系统必须包含完整的硬件组成和软件模块。

心血管介入虚拟手术系统分为无力反馈设备和有力反馈设备两种类型。早期的虚拟手术系统没有有力反馈设备,医生在训练中只能得到视觉信息,无法获得操作器械在血管中运动时的合适力度。然而心血管介入手术的难点就在于控制介入器械在血管分叉处的运动和碰撞,力度过大会导致血管破裂。因此,心血管介入手术的特点要求虚拟手术系统必须有力反馈设备。

### 1.1 力反馈硬件

心血管介入虚拟手术系统的硬件设备主要有有力反馈机构、测量采集单元和控制单元(见图1)。力反馈机构是硬件设备的核心单元,通过特定的机械结构对介入器械施加运动阻力,使操作者得到力觉反馈信息。力反馈机构决定操作者所得到的反馈力,其精度直接决定虚拟手术系统的真实性。测量

采集单元主要完成器械和辅助设备的运动信息采集,将采集到的介入器械位移信息反馈给计算机,以计算器械此时应受到的运动阻力。控制单元由处理器、驱动电机以及电机驱动板等组成,通过处理采集单元上传的数据,完成对力反馈机构的驱动。因此,力反馈机构、测量采集单元和控制单元是力反馈设备的3个基本组成单元,三者共同作用,才能实现虚拟手术系统的力反馈。

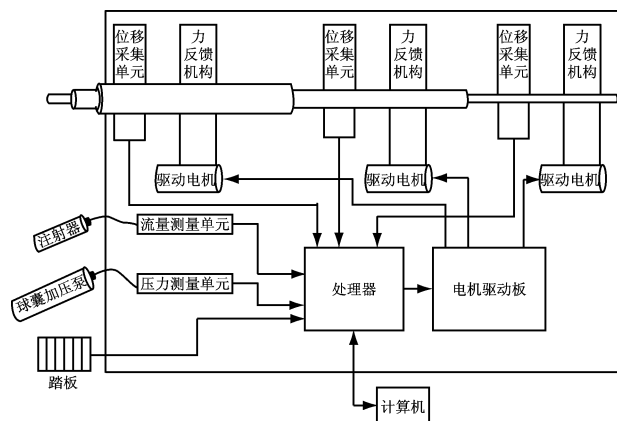


图1 虚拟心血管手术系统硬件组成

Fig. 1 Hardware modules in virtual cardiovascular interventional surgery system

### 1.2 虚拟现实软件

心血管介入虚拟手术系统的软件模块完成虚拟手术环境的建立和虚拟手术器械的建模,同时能利用算法改善系统的功能和规模<sup>[8]</sup>,具体组成如图2所示。建模模块根据临床采集的医学数据进行组织器官的重建,并通过形变、应力和生理模拟约束,建立符合现实物体原有属性的三维模型。绘制模块则实时更新三维模型,使操作者得到良好的视觉感。碰撞检测模块通过物理/生理计算提供触觉反馈,用户交互模块提供操作者和虚拟手术环境的交互接

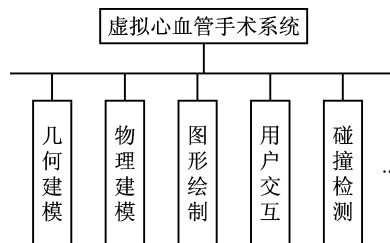


图2 虚拟心血管手术系统软件模块

Fig. 2 Software modules in virtual cardiovascular interventional surgery system

口,两者共同作用,提供给操作者虚拟手术系统的真实感和沉浸感。

## 2 研究现状

作为心血管介入手术的重要训练设备,心血管介入虚拟手术系统已成为近年来虚拟手术领域的研究热点,国内外的众多研究机构都对此进行了深入研究<sup>[9-10]</sup>。心血管介入虚拟手术的力反馈技术效果主要取决于硬件结构的设计,故本文按照心血管介入虚拟手术系统的硬件结构特点进行分类分析。

### 2.1 刚性夹头的接触式心血管介入虚拟手术系统

2000年, Merril<sup>[11]</sup>设计出一种虚拟介入放射手术系统(见图3)。该系统既可对介入手术的导丝导管等介入器械进行操作,也包含介入手术的辅助部件,如造影剂注射器、球囊加压泵以及X光脚踏板等。操作者可对器械进行推拉或旋捻操作,以此模拟器械在真实血管中的二维运动。当介入器械运动时,会通过摩擦带动位移跟踪单元的跟踪球与之产生相对运动,跟踪球的运动带动与之摩擦接触的滚轴产生相对运动,滚轴末端安装光学编码器,从而通过编码器发出的脉冲电信号进行位移采集,在计算机显示屏上显示出介入器械的实时位置和姿态。介入器械运动时,力反馈单元根据碰撞检测软件计算的作用力,将力学信号转变为电信号,驱动伺服电机旋转,从而带动刚性加压臂对介入器械施加一定压力,从而达到力反馈作用。但由于系统均采用摩擦现象进行力和运动的实时采集,系统的测量精度较差,医生操作器械时的触觉反馈不真实。

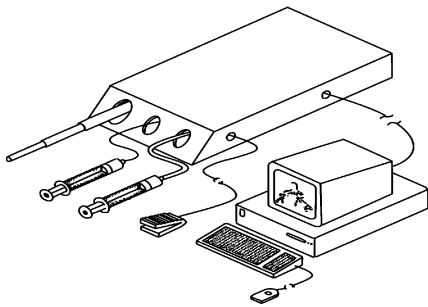


图3 虚拟介入放射手术系统

Fig. 3 Virtual interventional radiology system

刚性夹头的接触式心血管介入虚拟手术系统,位移采集方法基于器械的接触摩擦现象,介入器械

直径较小,容易出现打滑,导致测量精度较差;其力反馈执行机构采用刚性夹头夹紧介入器械,而介入器械为柱状柔性器材,刚性夹头会在接触面产生应力集中,容易造成医生操作器械时触觉反馈不真实。

### 2.2 弹性夹头的接触式心血管介入虚拟手术系统

2001年, Bailey<sup>[12]</sup>开发出一种虚拟微创手术系统(见图4)。该系统可模拟手术器械的插入和进退等直线运动,并提供器械运动时的轴向反馈力。器械位移仍是通过器械运动时的接触摩擦现象,由光电编码器进行检测。而介入器械运动时的反馈力则由弹簧片施加给器械,由于弹簧片接触面积比较大,而且施加的作用力为柔性力,器械得到的运动阻力误差有所减小。但由于该系统不能对器械进行旋转操作,不能得到周向的旋转力反馈。医生操作器械时只能轴向进退,且得到的触觉反馈不真实。

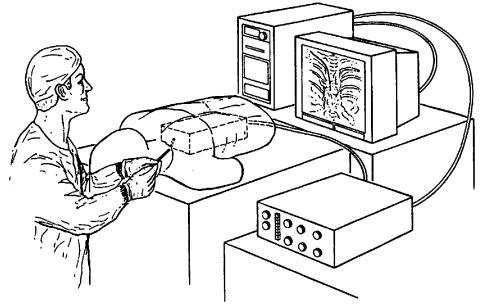


图4 虚拟微创手术系统

Fig. 4 Virtual minimally invasive operation system

心血管介入虚拟手术系统的理论研究日渐成熟后,许多公司陆续开展虚拟手术系统的产品化研究。Mentice VIST系统由瑞典Mentice公司<sup>[13-14]</sup>于2006年研制成功,并于2009~2012年对第1代系统进行升级,形成Mentice VIST系列产品(见图5)。其力反馈技术由研发团队自主研发,将力反馈机构做成可在导轨上运动的运载单元<sup>[15-17]</sup>。位移测量仍为接触式位移测量方法,通过运载单元的光学编码器进行检测。器械运动到指定位置时,通过控制运载单元中弹性夹头的夹紧或松开实现对手术器械的力觉反馈。Mentice VIST系列产品提供真实手术所用的手术器械,使虚拟手术的手术真实感得到增强。Mentice VIST-C系统满足了虚拟心血管手术的基本要求,Mentice VIST-Lab系统则对人体对象模型进行优化,使介入器械的运动更接近真实手术中的器械

运动。这两款设备相对成熟,医生操作器械时的虚拟手术环境逼近真实手术环境,在国外医院应用较多。



(a) Mentice VIST-C 系统



(b) Mentice VIST-Lab 系统

图5 Mentice VIST 系列产品

Fig.5 Mentice VIST product series (a) Mentice VIST-C system, (b) Mentice VIST-Lab system

弹性夹头的接触式心血管介入虚拟手术系统,位移采集方法仍旧基于器械的接触摩擦现象,测量精度较差;其力反馈执行机构采用弹性夹头夹紧介入器械,弹性夹头施加的作用力为柔性力,且反馈力对称施加,故力觉反馈时的应力集中现象有所缓解。

### 2.3 刚性夹头的非接触式心血管介入虚拟手术系统

ANGIO Mentor 模拟器由美国 Symbionics 公司<sup>[18-20]</sup>于2007年研制成功(见图6)。该产品可模拟介入手术过程中的各种突发情况,并针对临床病人的具体情况设计了不同的器械选择方案;其亮点在于首次采用非接触式的位移测量方法,器械的运动可通过光电传感器的感光口获得,并通过传感器

内部的信号处理,从而实时显示在计算机的虚拟软件中,可避免因器械打滑造成的测量误差。器械运动时,通过伺服电机旋转,带动刚性偏心轮给介入器械施加压力,并未将轴向力和周向力分开,故手术力觉真实感尚待提高。但由于该款设备功能基本满足手术需求,且医生操作器械时的虚拟手术环境接近真实手术,国内有医院采用此设备进行手术训练。

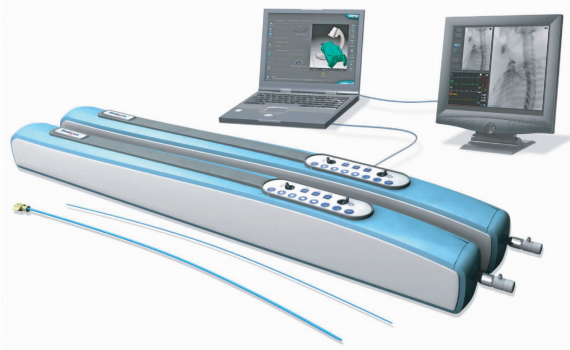


图6 ANGIO Mentor 系统

Fig.6 ANGIO Mentor system

刚性夹头的非接触式心血管介入虚拟手术系统,位移测量采用非接触式测量方法,可避免器械打滑造成的测量误差,测量精度较高,适用于导丝等微细器材的位移测量;其力反馈执行机构仍采用刚性夹头夹紧介入器械,无法解决力觉反馈时的应力集中现象,力反馈精度较低,导致虚拟手术效果较差。

### 3.4 弹性夹头的非接触式心血管介入虚拟手术系统

Simantha 手术模拟系统由美国 Simsuite 公司<sup>[21-22]</sup>于2011年研制成功(见图7)。该产品不仅提供了虚拟手术的手术平台,还建立了对操作者的技术参考和技能评估等手术评价标准。该系统的创新点在于力反馈单元安置在患者模型内,患者模型则采用实际患者的身体数据制作,使虚拟手术环境更接近于真实手术场景。该系统与 Mentice 系统结构相近,力反馈机构作为单独的运载单元放置在滑轨上。其位移测量为非接触式测量方法,位移测量精度高。器械运动到指定位置时,运载单元内的弹簧夹头对器械施加一定的作用力,从而达到力觉反馈的效果。鉴于该系统强大的功能和手术环境,目前国内外的医院和训练机构对此设备评价很高。



图7 Simantha 系统  
Fig. 7 Simantha system

由于国内引入血管介入手术的时间较晚,国内心血管介入虚拟手术系统的研究还未成熟。部分高校和科研机构针对虚拟手术中心血管生物力学、血流动力学以及心血管支架性能等展开了研究工作<sup>[23-25]</sup>。这些研究对血管介入虚拟手术系统的开发奠定了坚实的基础,但是鲜有针对心血管介入虚拟手术系统硬件设备的整体研究。

因此,在国家自然科学基金重大项目课题(61190124,61190120)的支持下,上海交通大学于2012年开展了对心血管介入虚拟手术力反馈技术的研究工作,并研制了心血管介入虚拟手术系统的力反馈技术实验平台(见图8)。该系统是目前国内首款自主研发的心血管介入虚拟手术系统,包括软件模块和硬件设备。软件系统包含介入器械和心血管组织的三维建模、碰撞检测、反馈力计算以及手术过程的实时模拟。硬件设备的设计是整个系统的特色,轴向力反馈执行机构采用弹簧和压紧块组成的加紧机构施加阻力,周向力反馈执行机构则采用滑轮外缘凹形面施加阻力,从而实现轴向反馈力和周向反馈力的完全分离。同时,介入器械的位移采用光电位移传感器进行采集,位移采集精度高,而且便于控制系统处理数据<sup>[26-29]</sup>。这款设备虽然是国内首项心血管介入的虚拟手术设备,但其在力反馈机构设计和位移传感器选择方面,都极大提高了系统的精度,在力反馈的触觉感知和视觉感知方面取得很好成效。

弹性夹头的非接触式心血管介入虚拟手术系统,位移测量采用非接触式测量方法,测量精度较高,适用于介入器械的位移测量;其力反馈执行机构采用弹性夹头夹紧介入器械,有效解决力觉反馈时

的应力集中现象,力反馈的精度较高,但和真实手术的力觉效果仍有差距。

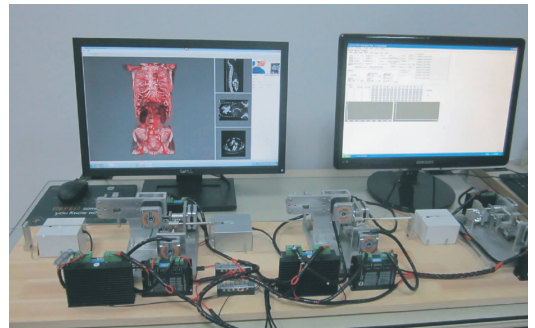


图8 虚拟手术力反馈系统  
Fig. 8 Virtual force feedback system

由上可知,虚拟介入手术系统的力反馈单元是系统的核心单元,主要由力反馈机构、力反馈驱动、反馈力检测单元和位移检测单元等部件组成。力反馈执行机构直接作用于介入器械上,施加给介入器械运动阻力,因此其机械设计必须小巧轻便,制造精度高。力反馈驱动元件要求体积小、效率高,一般采用直流伺服电机作为驱动元件<sup>[30]</sup>。非接触式的位移测量方法,避免因器械打滑所产生的测量误差,测量精度较高,适于介入手术过程的器械位移检测<sup>[31-33]</sup>。为提高力觉反馈的精度,可采用闭环控制策略,根据执行机构的机械结构和测量精度选择合适的力传感器。

### 3 存在问题和解决途径

心血管介入虚拟手术技术旨在服务于实际的心血管介入手术,故虚拟手术系统的开发必须尽量接近实际的手术操作。心血管介入手术的介入器械直径小、器械位移量大、血管路径复杂,而且器械的操作力必须精准。考虑到心血管介入手术的特点,虚拟心血管手术系统需要解决以下问题:

(1) 快速、精准的柔性器械力反馈执行机构。操作者利用虚拟手术系统进行模拟时,需要对介入器械进行推拉和旋捻操作。力反馈执行机构必须对介入器械进行快速、精准的阻力施加,使操作者能够感受到力觉反馈,以此模拟器械在实际病人血管内穿行时的阻力,从而训练操作者的操作力度。目前,力反馈执行机构大都基于刚性金属件进行设计,而



心血管介入手术中的介入器械比较柔软,必须设计出适合于柔性器械的力反馈执行机构。柔性器械若产生点、线接触时,会有应力集中问题,故可以增大执行机构与接入器械的接触面积。

(2) 实时、准确的两自由度位移检测。介入手术中,介入器械的运动主要有轴向进退和周向旋转两个自由度,故位移检测机构必须能满足两个自由度的位移测量。早期的虚拟心血管手术训练设备,利用介入器械和位移检测机构的摩擦,进行位移测量。而心血管介入手术的介入器械为柔性器械,不利于带动检测机构运动,导致位移检测误差较大,故接触式位移检测方法不适用于虚拟手术系统。因此,可以采用非接触测量方式检测介入器械的位移,例如激光位移传感器。

(3) 实时、精确的反馈力作用机制。虚拟手术必须达到运动觉和力觉的精确反馈,故反馈力作用机制必须实时精确。目前,多数国内外的驱动元件都采用伺服电机,要想提高反馈力精度,应采用闭环控制策略,把反馈力作为控制量。同时,力传感器必须选择灵敏度好、精度高的产品,例如应变片式力传感器、压电式力传感器等。伺服电机带动力反馈执行机构运动,促使执行机构对施加给介入器械一定的运动阻力,并通过力传感器将介入器械受到的阻力反馈给控制系统,从而提高力反馈机构的精度。

## 4 结语

心血管介入手术以其创伤小、费用低、安全性高和术后恢复快的优点,在冠心病治疗中得到了广泛的应用。但由于介入手术需要医生精准的手术操作,术前医生必须进行手术训练。心血管介入虚拟手术可以提供实时交互的虚拟手术环境,既能利用力觉、触觉、声觉的多感知技术对医生进行培训,又能辅助医生进行手术导航和手术优化,提高手术成功率。因此,心血管介入虚拟手术技术的发展对我国医疗水平的提高具有重要意义。

目前国外心血管介入虚拟手术的研究渐成成熟,许多商业化产品已经上市。但是国内的研究水平和国外相距甚远,还处于基础研发阶段,在虚拟手术系统开发和手术评价准则制定方面还有很多的工作要做。

## 参考文献:

- [1] 梁兆光,周玉杰,陈柯萍. 现代心脏疾病介入诊疗基础[M]. 北京:人民卫生出版社,2007.
- [2] 马根山. 介入心脏病学手册[M]. 南京:东南大学出版社,2006.
- [3] Kandarpa K, Aruny JE. Handbook of interventional radiologic procedures [J]. USA: Lippincott Williams & Wilkins, 2002; 37-39.
- [4] Ernst S. Initial experience with remote catheter ablation using a novel magnetic navigation system magnetic remote catheter ablation [J]. Circulation, 2004, 109(12): 1472-1474.
- [5] Alan L, Frank T. A survey of surgical simulation: Applications, technology, and education [J]. Presence-Teleoper Virtual Env, 2003, 12(6): 599-610.
- [6] Darzi SA, Munz Y. The impact of minimally invasive surgical techniques [J]. Ann Rev Med, 2004, 55: 223-237.
- [7] Dayal R, Faries PL, Stephanie CL, et al. Computer simulation as a component of catheter-based training [J]. J Vasc Surg, 2004, 40(6): 1112-1117.
- [8] 康勇. 虚拟心脏介入手术系统中的碰撞检测技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学硕士学位论文,2007: 42-48.
- [9] Kazanzides P, Fichtinger G, Hager GD, et al. Surgical and interventional robotics-core concepts, technology, and design [tutorial] [J]. IEEE Robot Autom Mag, 2008, 15(2): 124-129.
- [10] Fichtinger G, Kazanzides P, Okamura A, et al. Surgical and interventional robotics: Part II [J]. IEEE Robot Autom Mag, 2008, 15(3): 95-100.
- [11] Merrill GL. Interventional radiology interface apparatus and method [P]. USA: 6106301, 2000-08-22.
- [12] Bailey BE. System for training persons to perform minimally invasive surgical procedures [P]. USA: 6267599B1, 2001-07-31.
- [13] Mentice. VIST-C-2012-Ir [EB/OL]. <http://www.mentice.com/our-simulators/vist-c/>.
- [14] Mentice. VIST-Lab-feb-2012-Ir [EB/OL]. <http://www.mentice.com/our-simulators/vist-lab/>.
- [15] Ohlsson F. An interventional simulation device [P]. USA: 0127864A1, 2006-06-15.
- [16] Corrado C. System and a method for simulating a manual interventional operation by a user in a medical procedure [P]. USA: 20080286735A1, 2008-11-20.
- [17] Christopher T. Method and apparatus for generating and interfacing with rigid and deformable surfaces in a haptic virtual reality environment [P]. USA: 6191796B1, 2001-02-20.

- [18] Smbionics. ANGIO Mentor brochure [EB/OL]. <http://smbionix.com/simulators/angio-mentor/>.
- [19] Bronstein R, Israeli S. Medical simulation device with motion detector [P]. USA: 0134637A1, 2007-07-14.
- [20] Bronstein R, Niv F, Ofek S, *et al.* System and method for performing computerized simulations for image-guided procedures using a patient specific model [P]. USA: 20090177454, 2009-03-17.
- [21] Simsuite. Simantha overview [EB/OL]. <http://www.medsimulation.com/Simantha.asp/>.
- [22] Daniel LH, Raymond L, Christopher DL, *et al.* Medical simulation system and method [P]. USA: 7455523B2, 2011-11-22.
- [23] 姜宗来. 心血管生物力学研究的新进展[J]. 医用生物力学, 2010, 25(5): 313-315.  
 Jiang ZL. Recent advances in cardiovascular biomechanics [J]. J Med Biomech, 2010, 25(5): 313-315
- [24] 刘友军, 乔爱科. 基于血流动力学仿真的心血管外科手术规划[J]. 医用生物力学, 2009, 24(6): 395-400.  
 Liu YJ, Qiao AK. Progress of basod on hemodynamics simulation cardiovascular surgical planning [J]. J Med Biomech, 2009, 24(6): 395-400
- [25] 智友海, 史向平. NiTi 心血管支架的疲劳断裂性能分析[J]. 医用生物力学, 2011, 26(1): 1-6.  
 Zhi YH, Shi XP. Fatigue and fracture behavior of Nitinol cardiovascular stents [J]. J Med Biomech, 2011, 26(1): 1-6.
- [26] Kouji M. Displacement detector, displacement detection method and computer program product [P]. Europe: 2312273B1, 2012-06-20.
- [27] Guillermo T, Stephen AB. Method and apparatus for performing optical measurements using a fiber optical imaging guidewire, catheter or endoscope [P]. USA: 6134003, 2000-10-17.
- [28] 陈智博, 林永忠, 蔡钟山, 等. 光电鼠标传感器的精密测量与控制系统[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2009, 2: 57-59.
- [29] Culjat MO, King CH, Franco ML, *et al.* A tactile feedback system for robotic surgery [C]// Proceedings of 30th IEEE EMBS Annual International Conference. Vancouver, Canada: IEEE, 2008.
- [30] 孔德仁, 朱蕴璞, 狄长安. 工程测试技术[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2009.
- [31] 彭力彬, 赵国豪, 韩洪广. 光电传感芯片在机器人运动检测中的应用[J]. 电子技术, 2005, 32(2): 15-17.
- [32] Esthappan J, Kupinski MA, Li L, *et al.* A method for the determination of the 3D orientations and positions of catheters from single-plane X-ray images [C]// Proceedings of the 22nd IEEE EMBS Annual International Conference. Chicago, USA: IEEE, 2000: 2029-2032.
- [33] Yan Y, Chen D, Yin H. Optics based motion measurement for a catheter navigation system; A novel and low cost approach [C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Robotics and Applications. Shanghai, China: Springer, 2010: 475-485.