

虚拟心脏搭桥手术模型雕塑系统的研究

曹 雪, 丁金立, 刘有军

(北京工业大学 生命科学与生物工程学院, 北京 100124)

摘要: **目的** 利用力反馈装置在虚拟三维环境中实现抓取和变形等操作,模拟心血管手术中的血管搭桥术式。**方法** 利用医院中真实病人的CT扫描数字图片重建出心脏可视化模型并进行显示,建立搭桥血管,然后利用力反馈装置对血管模型进行雕塑,以模拟Fontan手术中从肺动脉到右心室的血管搭桥手术。**结果** 在虚拟三维环境中显示心脏的空间结构,选择任意长度和直径的血管进行虚拟搭桥仿真,或选择自定义大小的补片对模型进行修补,最终得到术后模型和测量参数。**结论** 力反馈装置在虚拟心脏搭桥手术中的应用为今后模拟各种手术术式、建立包含力学特性的手术规划系统奠定了基础。

关键词: 模型雕塑; 虚拟手术; 力反馈; 血管搭桥; CT扫描

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

Model sculpture for virtual coronary artery bypass operation

CAO Xue, DING Jin-li, LIU You-jun (College of Life Science and Bioengineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Objective To conduct the operation of capture and deformation in virtual three-dimensional (3D) environment with force feedback device and simulate the coronary artery bypass operation. **Methods** Based on data collected from real CT images of the patient with heart disease, digitized visual model of the heart was reconstructed. Then the bypass vessel was built and the vessel model was sculptured by force feedback device to simulate the bypass surgery from pulmonary artery to ventriculus dexter in Fontan operation. **Results** Space structure of the heart was shown in the virtual 3D reconstructed environment. Bypass vessel with any diameter and angle was transformed to simulate the coronary artery bypass operation. Heart patch with any size was built to repair the heart model. The satisfactory model and parameters of the postoperative model were finally achieved. **Conclusions** The application of force feedback device in virtual coronary artery bypass operation sets the stage for cardiovascular surgery planning system with mechanical characteristics to simulate multiple modalities of such operation.

Key words: Model sculpture; Virtual surgery; Force feedback; Artery bypass; CT scans

先天性心脏病是小儿常见的一种心脏病,Fontan手术是治疗单心室、三尖瓣闭锁等复杂先天性心脏病的主要手术方式。以往的血流动力学研究中,搭桥模型和搭桥过程主要借助传统的CAD等建模软件实现,其缺点是对于个性化模型处理效果不理想,搭桥血管过于生硬^[1],不利于个性化模型仿真

和虚拟手术的操作。

为了改善解剖真实模型的虚拟手术操作,本研究利用力反馈装置,结合OpenGL可视化技术,建立虚拟心脏搭桥手术模型雕塑系统,实现虚拟搭桥、补片、医学参数测量和力触觉反馈等功能,并以Fontan手术第2步为例,进行阐述。

收稿日期:2012-01-18; 修回日期:2012-03-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10872013, 10972016)。

通讯作者:刘有军,研究员,E-mail: lyjlma@bjut.edu.cn。

1 材料与方法

1.1 数据来源

模型数据来自于患有先天性心脏病的患者。患者胸部的多层 CT 扫描图像共 211 层,数据量大小为 $512 \times 512 \times 211$ 体素,体素大小为 $0.30 \text{ mm} \times 0.30 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,单个数据量大小约为 541 KB,总体数据量大小约为 107 MB,文件保存格式均为 DICOM 格式。通过 Mimics 和 Geomagic 等软件对图像进行分割和三维重建^[2],得到本系统所用的心血管可视化模型。

1.2 力反馈装置

采用 Phantom Omni 装置作为力反馈交互设备(见图 1)。该装置可以提供非常大的工作空间和反馈力,以及 6 自由度的运动能力,完全满足了心脏搭桥虚拟手术对触觉交互的需要。Phantom Omni 装置由底座、机械手臂和代理铁笔组成,其中白圈所示位置即为力反馈装置与虚拟环境进行力触觉交互的作用点。



图 1 Phantom Omni 装置
Fig. 1 Phantom Omni device

1.3 数据保存

作为一个通用的建模平台,本研究设计了两个输入接口,即针对 Amira 软件输出的 HyperSurface 文件的输入接口和 STL 模型的输入接口。

对比 HyperSurface 和 STL 这两种文件的数据集结构,STL 文件在存储时重复存储了相同顶点的坐标值,而非顶点索引值,这就意味着在后续计算时,STL 文件存储格式将耗费更大的内存。因此,输入

接口根据 HyperSurface 文件的数据集格式进行设计,包括顶点、三角网格两个基础数据结构。其中,顶点数据集包含着模型的顶点坐标信息,而三角网格数据集中则包含网格顶点的索引值、网格材质和法向量等信息,其数据结构如图 2 所示。

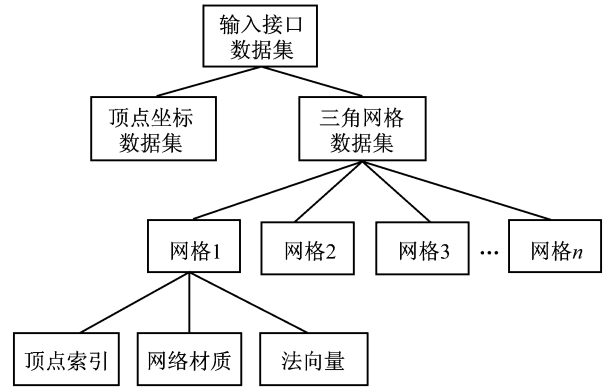


图 2 输入接口数据集结构
Fig. 2 Structure of input interface dataset

1.4 模型建立

为模拟心脏手术中的血管搭桥术式,需要在心脏模型上建立搭桥血管模型。如果重建的心脏模型有缺损,还需要建立补片模型进行修补。

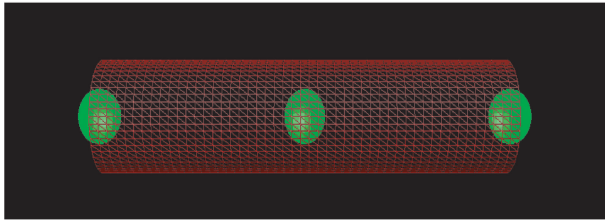
在建立一个直管或平面时,为了避免模型数据处理的重复工作,血管和补片模型都采用与系统输入接口相同的数据结构,将建立模型的工作转化为建立相应的顶点坐标数据集和三角网格数据集。

搭桥血管模型被定义为一个由一系列圆心在同一直线上的圆环所构成的圆柱体,每个圆环均由若干三角面片构成。而补片模型则被定义为一个由三角面片构成的矩形平面。图 3(a)、(b)分别显示了搭桥血管和补片模型的三角网格结构。

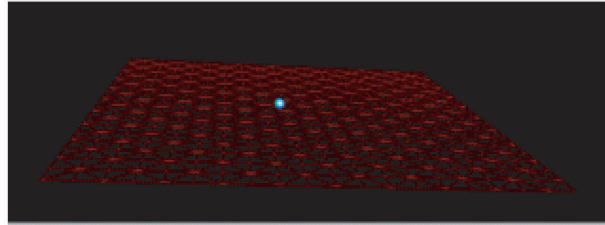
1.5 模型的几何形变

在模拟心脏搭桥手术过程中,为了得到所需的手术模型,需要对模型进行弯曲和拉伸等变形,使之符合对原始心血管模型搭桥的几何学需要。

弯曲变形的实质是对模型中心线进行弯曲等变化的计算,然后再根据中心线新的位置对模型进行拓扑重构。本研究采用 Bezier 曲线作为模型中心线弯曲处理的方法,通过模型上 3 个控制点的坐标确定一条二维曲线,实现模型的弯曲变形操作。



(a) 搭桥血管的网格模型



(b) 补片模型的网格结构

图3 三角网格模型

Fig.3 Triangular mesh model (a) Meshes form the artificial vessel, (b) Meshes form the patch

应用力反馈装置对模型进行拉伸形变的实质是当力反馈装置与模型发生碰撞后,根据力反馈装置位置的变化对受影响区域内的模型顶点进行操作,使之发生相应的位移,产生拉伸变形。

1.6 参数测量

在进行搭桥手术时,搭桥血管的长度和半径对术后效果有很大影响,补片的面积则可以反映心脏模型的缺损情况。在本研究中,血管长度被定义为中心线上各点间距离之和,血管半径则是通过对原半径按比例缩放变化,通过海伦公式可以得到补片内三角网格的面积,所有三角形的面积之和即为补片的面积。

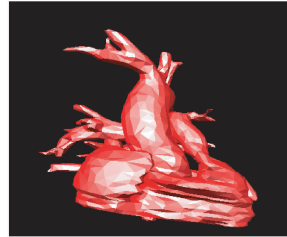
2 结果

为了对模型雕塑功能进行验证,将从一系列二维切片出发,模拟心血管手术中的血管搭桥术式,建立心血管三维模型,然后进行显示,建立搭桥血管,对血管模型进行雕塑,移动、旋转血管模型使之符合对原始心血管模型搭桥的几何学形态及位置的要求,以模拟 Fontan 手术中第 2 步,即从肺动脉到右心室的血管搭桥手术,得到最终的术后模型和模型参数。

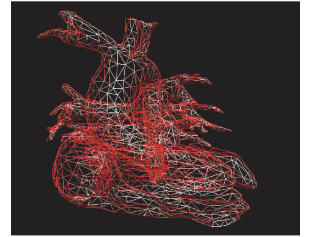
2.1 模型显示

在对模型进行雕塑时,既有对模型网格进行的

操作,也有对模型面片进行的操作。因此,模型的显示模式分为面片模式和网格模式两种(见图 4)。



(a) 面片模型



(b) 网格模型

图4 模型显示

Fig.4 Display of the model (a) Triangles model, (b) Triangular mesh model

2.2 搭桥手术模拟

血管搭桥手术是指利用一段人造血管,跨越病变血管而将近端血液引到远端缺血部位,来旁通狭窄或阻塞的动脉血管,从而改善血流动力学因素。

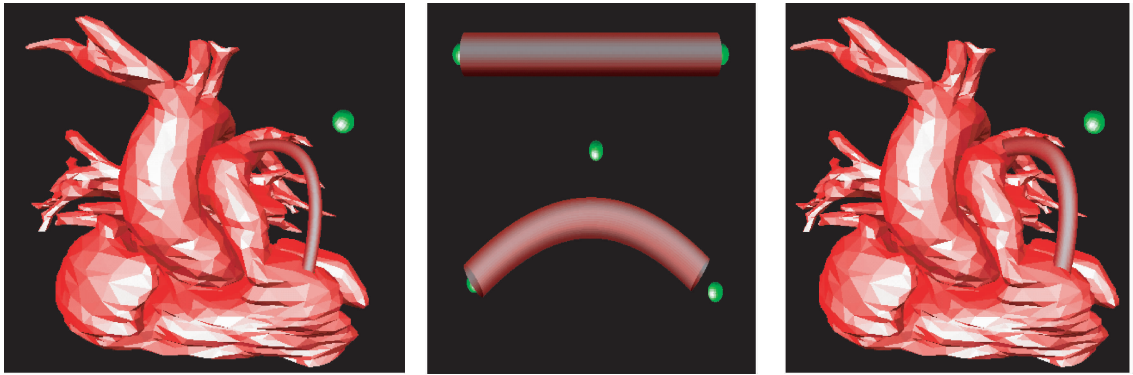
在虚拟环境中模拟血管搭桥手术大致分为以下 4 个步骤(见图 5):① 输入原始模型,建立搭桥血管;② 根据需要对搭桥血管进行弯曲、拉伸的操作;③ 将搭桥血管移动到相应位置,调整角度,并再次调整血管形状;④ 对搭桥血管的半径进行调整,得到满意的手术模型。

2.3 模型修补

补片是为了对模型中缺失的部分进行修补。补片形变影响区域被简化为一个圆形区域。通过调节影响因子来控制变形区域的半径,利用力反馈装置控制补片的形变位置及变形程度,得到所需曲面。将曲面移动到需要修补的区域,得到比较满意的模型(见图 6)。

2.4 医学参数的测量

心血管手术规划的最终目的是为医生提供有效地数据信息,从而在术前对特定病例进行术后效果的评估,得到最佳的手术方案。因此,本研究在模拟手术过程、建立术后模型等工作的基础上,对所得手术模型的有效信息进行提取,为今后的术后效果评估提供数据依据。提取的医学参数依次为血管搭桥术中的搭桥血管长度、半径以及补片的面积。在模拟血管搭桥手术后得到的模型中(见图 5(c)),搭桥血管长度约为 28.68 mm,半径为 1.11 mm,由于没有加入补片,故补片面积为 0。



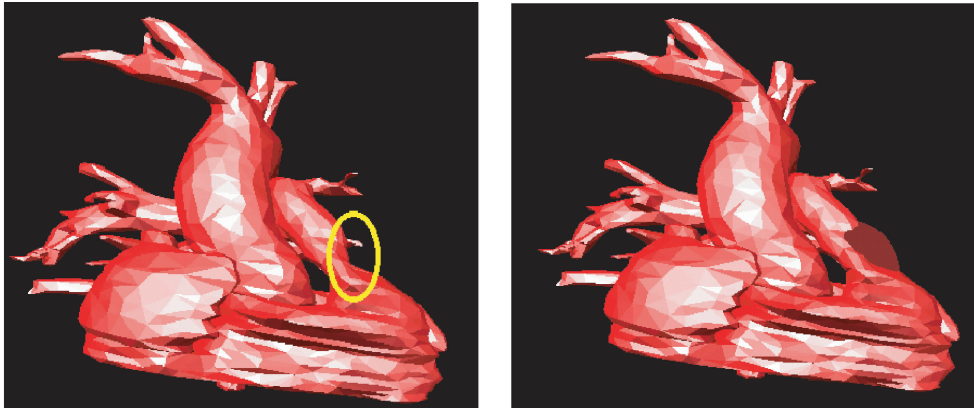
(a) 血管建立与弯曲

(b) 调整血管位置与弯曲度

(c) 调整血管半径得到满意模型

图5 搭桥手术模拟过程搭桥

Fig. 5 Simulation of the coronary artery bypass operation (a) Establishment and bending of the blood vessel, (b) Modification of the vessel position and bending flexibility, (c) Satisfactory model after modification of the vessel radius



(a) 补片前

(b) 补片后

图6 补片效果图

Fig. 6 Sketch of the patch effect (a) Before patch, (b) After patch

3 讨论

虚拟现实技术使得外科医生可以灵活地与仿真环境进行交互,获得听觉、视觉以及触觉的反馈,而不对真实的病人造成任何伤害^[3]。随着虚拟现实技术日趋成熟,虚拟仿真科技与医学研究的结合逐渐成为新的研究热点。早期的手术仿真主要集中于内窥镜和腹腔镜手术,结构和步骤的复杂性都受到严重限制^[4]。而后随着计算机水平和力觉反馈装置的进步,力觉反馈开始被广泛应用于虚拟手术系统中。如Wagner等^[5]开发了基于力反馈视网膜手术训练系统。Webster等^[6]又将力反馈应用于白内障手术中撕囊术过程的仿真中。2006年,Song等^[7]

提出了基于力反馈的远程康复系统。此外,应用于骨科、心脏外科等很多科室的手术仿真、训练也不断取得进展^[8]。目前,国内针对复杂的心血管手术模型进行“再塑”,并将力反馈器应用于心血管手术规划的研究还不多见^[9]。

本研究利用力反馈装置取代鼠标,可以直接对虚拟空间中的模型进行抓取、选择和拉伸、弯曲的变形操作,模拟心血管手术中的血管搭桥术式,实现在物理空间中快速地对三维心血管模型进行雕塑,易于操作,无需掌握任何CAD、CAE等软件,即可实现虚拟模型的几何形变雕塑。

相比于虚拟手术系统对虚拟环境仿真度的关注,本研究更侧重于建立虚拟模型的灵活性、方便性

和模型的可用性;设计了一种数据结构来实现两种常用的医学三维模型的导入,能够导入常见三维建模软件建立的模型;通过力反馈装置直接对虚拟空间中的模型进行各种操作,增加系统建模的灵活性和方便性;得到的医学参数能对不同的搭桥血管模型进行术后效果评估,成为最优手术方案的重要依据。

本研究实现了 HyperSurface 和 STL 表面模型的输入显示、力反馈环境加载以及模型雕塑、参数测量等功能,能够对模型进行拉伸、弯曲等形变操作,并初步模拟血管搭桥手术步骤,得到术后模型。但本研究中的模型雕塑功能基于几何形变,缺乏真实的力觉反馈,所提供的医学参数也过于简单,缺少对模型角度、形状等参数的描述。此外,只能模拟一种手术术式也使得本研究的应用范围受到局限。在今后的研究中,需要进一步的完善和优化。

4 结论

本文选择先天性心脏病搭桥手术作为应用背景,来实现支持力反馈的心脏手术模型雕塑仿真系统。实践证明,力反馈交互设备的引入,可以使整个仿真系统操作更简便,使虚拟环境更接近真实。用户不仅可以使用力反馈器对虚拟的模型进行移动、旋转等操作,还可以模拟心脏搭桥手术的过程,得到搭桥手术后的模型来进行术后效果评估。

参考文献:

[1] Pekkan K, Whited B, Kanter K, Sharma S, *et al.* Patient-specific surgical planning and hemodynamic computational fluid dynamics optimization through free-form haptic anatomy editing tool (SURGEM) [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2008,

46(11): 1139-1152.

- [2] 王野平, 林小英, 周慧峰. Mimics 和 Geomagic 辅助下建立固定义齿的有限元模型[J]. *医用生物力学*, 2010, 25(6): 433-438.
- Wang YP, Lin XY, Zhou HF. Finite element model of fixed denture aided by Mimics & Geomagic [J]. *J Med Biomech*, 2010, 25(6): 433-438.
- [3] Kuroda Y, Nakao M, Kuroda T, *et al.* Interaction model between elastic objects for haptic feedback considering collisions of soft tissue [J]. *Comput Method Program Biomed*, 2005, 80(3): 216-224.
- [4] Wang P, Becker AA, Jones IA, *et al.* A virtual reality surgery simulation of cutting and retraction in neurosurgery with force-feedback [J]. *Comput Method Program Biomed*, 2006, 84(1): 11-18.
- [5] Wagner C, Schill MA, Manner R. Collision detection and tissue modeling in a VR-simulator for eye surgery [C]// Eighth Eurographics Workshop on Virtual Environments. Barcelona, Spain; [s. n.], 2002: 27-36.
- [6] Webster R, Sassani J, Shenk R, *et al.* Simulating the continuous curvilinear capsulorhexis procedure during cataract surgery on the EYESI system [J]. *Stud Health Technol Inform*, 2005, 111: 592-595.
- [7] Song G, Guo SX. Development of a novel tele-rehabilitation system [C]// Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Kunming, China: [s. n.], 2006: 785-789.
- [8] Lee J, Choi S. Effects of haptic guidance and disturbance on motor learning; Potential advantage of haptic disturbance [C]// Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Haptics Symposium. Waltham, UK: [s. n.], 2010: 335-342.
- [9] 刘有军, 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 ardiovascular surgical planning based on hemodynamics simulation [J]. *J Med Biomech*, 2009, 24(6): 395-400.