

虚拟手术系列专著

虚拟骨科手术 系统建模与仿真

王沫楠 著



科学出版社

虚拟手术系列专著

虚拟骨科手术系统建模与仿真

王沫楠 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以实现虚拟机器人辅助正骨手术系统为目标详述了该虚拟手术系统机器人结构建模、运动学建模、手术环境建模、手术对象几何建模、手术对象生物力学建模、手术对象生物力学模型解算、碰撞检测、模型验证、虚拟手术力反馈设备设计、仿真系统集成、实时仿真方法等虚拟手术系统设计中涉及的各方面研究内容。本书在基于医疗机器人模型与人体组织模型虚拟环境构建方面、人体软组织建模方面、虚拟模型验证方面、实时仿真实现方面的介绍具有独到之处,解决了虚拟手术系统设计中的关键技术,为该方向的研究者提供了理论基础与新鲜的设计思想。

本书适用于从事虚拟手术、计算机辅助医疗、虚拟样机、医疗机器人等领域教学、科研与开发的教师、学生、研发人员等广大读者。

图书在版编目(CIP)数据

虚拟骨科手术系统建模与仿真 / 王沫楠著. —北京: 科学出版社, 2013
(虚拟手术系列专著)

ISBN 978-7-03-037879-8

I. ①虚… II. ①王… III. ①虚拟技术-应用-骨科学-外科手术-系统仿真 IV. ①R687-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 131547 号

责任编辑:刘宝莉 孙伯元 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 6 月第一次印刷 印张:13 3/4

字数:262 000

定价:75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在临床上,直接应用不经过任何检测的手术策略进行手术,风险性非常高。随着数字化时代的到来,计算机软硬件的发展为正确的医疗诊断、优化治疗方案和医生培训带来了生机与希望,集医学、生物力学、机械学、材料学、计算机图形学、计算机视觉、数学分析、机器人等诸多学科为一体的虚拟手术技术已经成为当前国际研究的热点。虚拟手术可以帮助医生进行外科诊断;能够利用图像数据,帮助医生合理、定量地制定手术方案,这对于选择最佳手术路径、减小手术损伤、减少对临近组织损害、提高肿瘤定位精度、执行复杂外科手术和提高手术成功率具有十分重要的意义;可以进行新医生的培训,利用虚拟手术系统进行培训的优点是从失败和错误中去学习、进行单独试验或与有经验的医生共同试验、实现从普通的病理学到极端情况的手术培训、在手术前验证医生的熟练程度、进行多次重复试验;虚拟手术可以帮助我们建造定制的修复拟合模型,帮助医生在进行手术前,通过非破坏性的模拟仿真对更换部位尺寸和形状进行精确测量,然后定制相应假体,这样可以把因尺寸不合格而重新开刀的比例从 30% 降到 5% 以下;同时虚拟手术还可以使手术室中的外科医生能实时地获得远程专家的交互式会诊或遥控机器人手术,使专家们技能的发挥不受空间距离的限制。

本书在介绍虚拟手术系统构成、虚拟手术相关技术研究现状以及人体组织数字化医学影像获取方法等基本研究背景的基础上,详述了虚拟骨科手术系统的构成,包括基于医学影像信息虚拟骨科手术系统几何建模方法;基于人体组织本构方程的生物力学建模方法;基于有限元法的生物力学模型计算;本研究建立的人体组织模型的精确性验证;碰撞检测和实时仿真的实现方法。本书论述和证实了在实现多层次建模构想,实现肌肉简化几何模型,实现在同一仿真环境下构建手术机器人系统模型与人体组织模型,实现建立既能满足临床精确性要求又能满足控制系统实时仿真要求的仿真平台等方面的新途径。该数字化骨科手术系统通过计算机技术,生成一个虚拟仿真环境,将系统内的各机器人组件以三维模型的形式显示在虚拟环境中,通过机器人技术,对各机器人组件进行运动学计算,以确定其执行机构在世界坐标系中的位置,在实际操作之前,可先将控制信号输入到虚拟仿真系统中,若执行动作结果正确,过程合理,再将此命令送给实际操作机器人,避免出现不可挽回的错误。

本书共分为 9 章:第 1 章虚拟骨科手术系统介绍;第 2 章人体组织数字化医学影像信息获取;第 3 章虚拟骨科手术系统人体组织解剖结构及生物力学特性分析;

第4章基于医学影像信息虚拟骨科手术系统人体组织几何建模;第5章虚拟骨科手术系统人体组织生物力学建模;第6章虚拟骨科手术系统人体组织模型计算;第7章虚拟手术中的碰撞检测;第8章虚拟骨科手术系统的交互式实时仿真;第9章有限元方法在生物医学工程中的应用。

本书的出版得到了国家自然科学基金项目(编号 61073144、61272387)、黑龙江省高校长江学者后备计划项目和哈尔滨理工大学机械工程特色优势学科建设基金的支持。孙磊、安贤俊、王琪、王红晶、张猛等研究生参与了第9章的部分研究工作和文字整理工作。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 虚拟骨科手术系统介绍	1
1.1 虚拟手术简介及其应用意义	1
1.2 虚拟手术系统的发展框架	2
1.3 虚拟手术系统构成	3
1.3.1 虚拟手术系统硬件组成	4
1.3.2 虚拟手术系统软件功能模块	5
1.4 虚拟手术建模与仿真技术研究现状	7
1.4.1 虚拟手术建模及仿真方法研究现状	8
1.4.2 虚拟手术建模与仿真技术存在的问题	18
1.5 虚拟骨科手术系统建模与仿真的研究背景概述	19
1.6 虚拟手术系统中的机器人建模	21
1.6.1 虚拟手术建模与仿真技术研究的硬件平台简介	21
1.6.2 正骨机器人的三维几何建模	23
1.6.3 正骨机器人的运动学建模	25
1.7 虚拟手术系统中的环境建模	29
1.7.1 构建虚拟环境的软件平台	29
1.7.2 虚拟环境的交互操作	30
1.7.3 机器人执行机构的轨迹显示	30
1.8 小结	31
参考文献	31
第 2 章 人体组织数字化医学影像信息获取	37
2.1 医学影像获取技术	37
2.1.1 X 射线摄影	38
2.1.2 X 射线计算机断层摄影(X-CT)	40
2.1.3 核医学成像	43
2.1.4 磁共振成像	46
2.1.5 超声成像	53
2.1.6 其他新型的医学成像技术	56
2.2 医学影像数据库	58

2.2.1 医学影像数据库的数据建模	59
2.2.2 医学影像数据库的管理方法	59
2.2.3 医学影像数据库国内研究现状	61
2.2.4 医学影像数据库国外研究现状	61
2.3 小结	62
参考文献	62
第3章 虚拟骨科手术系统人体组织解剖结构及生物力学特性分析	64
3.1 复位手术	64
3.1.1 牵引原理	64
3.1.2 牵引流程	65
3.2 腿部生物力学	66
3.3 腿部的解剖结构	67
3.3.1 腿部骨骼的解剖结构	67
3.3.2 腿部肌肉的解剖结构	69
3.4 小结	70
参考文献	71
第4章 基于医学影像信息虚拟骨科手术系统人体组织几何建模	72
4.1 几何建模的基本框架	72
4.2 算法描述	73
4.2.1 等值面抽取算法——Marching-Cubes 算法	73
4.2.2 网格简化算法	77
4.2.3 体模型生成算法	79
4.3 虚拟骨科手术系统人体组织几何建模	81
4.3.1 图像预处理	81
4.3.2 重建结果及分析	85
4.3.3 模型简化结果	86
4.4 小结	88
参考文献	88
第5章 虚拟骨科手术系统人体组织生物力学建模	89
5.1 三维线弹性模型	89
5.1.1 无穷小应变的定义	89
5.1.2 无限小应力的定义	91
5.1.3 各向同性线弹性材料	91
5.1.4 横向各向异性线弹性材料	92
5.1.5 虚功原理	93

5.2 非线性弹性模型	94
5.2.1 线弹性模型的缺点	94
5.2.2 非线性弹性的引入	94
5.3 小结	96
参考文献	97
第6章 虚拟骨科手术系统人体组织模型计算	98
6.1 线弹性模型的有限元计算	98
6.1.1 线性四面体单元	98
6.1.2 面积矢量	100
6.1.3 各向同性线弹性材料刚度矩阵的计算	101
6.1.4 横向各向异性材料刚度矩阵的计算	103
6.2 非线性弹性模型有限元分析	104
6.3 材料变形的平衡等式	105
6.3.1 重力做功	105
6.3.2 外表面压力做功	105
6.3.3 质量矩阵	106
6.3.4 边界条件	107
6.3.5 平衡等式	107
6.4 准静态变形的有限元计算	108
6.5 动态变形的有限元计算	109
6.6 人体腿部有限元模型的建立	111
6.6.1 骨骼有限元模型	111
6.6.2 肌肉有限元模型	112
6.6.3 其他软组织有限元模型	115
6.7 有限元模型验证	116
6.7.1 边界和载荷条件	116
6.7.2 试验结果	117
6.7.3 试验结论	119
6.8 小结	120
参考文献	120
第7章 虚拟手术中的碰撞检测	122
7.1 包围盒层次结构	122
7.1.1 固定方向凸包的定义与计算	122
7.1.2 包围盒层次结构	123
7.2 基于包围盒树的碰撞检测算法	124

7.3 包围盒树的更新	126
7.3.1 对象运动后包围盒树的更新——近似法	126
7.3.2 对象变形后包围盒树的更新	127
7.4 小结	129
参考文献	129
第8章 虚拟骨科手术系统的交互式实时仿真	131
8.1 虚拟骨科手术系统的交互式仿真	131
8.1.1 主从双向力操作关键技术研究状况	131
8.1.2 力觉主手机构	134
8.1.3 力觉主手控制系统	134
8.1.4 系统控制算法设计及实现	139
8.1.5 基于 WINDOWS 的实时控制软件设计	143
8.2 虚拟骨科手术系统的实时仿真	148
8.2.1 基于神经网络的生物力学模型	148
8.2.2 系统集成	150
8.2.3 实时力反馈试验	151
8.2.4 试验结果分析	153
8.3 小结	153
参考文献	154
第9章 有限元方法在生物医学工程中的应用	156
9.1 有限元方法	156
9.1.1 有限元方法概述	156
9.1.2 有限元软件	159
9.2 有限元方法在生物医学工程中的应用	160
9.3 股骨颈骨折内固定方式有限元分析	161
9.3.1 骨折内固定模型的建立	162
9.3.2 有限元分析及结果优化	168
9.3.3 骨密度对股骨近段力学性能的影响	173
9.4 热力学基本知识	175
9.4.1 传热学理论	176
9.4.2 Pennes 生物传热方程	178
9.4.3 热应力理论	180
9.5 基于三维温度场有限元分析股骨肿瘤热疗方案优化	183
9.5.1 骨骼三维重建	183
9.5.2 骨骼材料特性与 CT 值的关系	185

9.5.3 股骨有限元模型的建立	185
9.5.4 股骨三维温度场分析	190
9.6 髋关节假体置换模型的建立及其热应力有限元分析	196
9.6.1 髋关节置换模型的建立	196
9.6.2 ANSYS 热应力分析	198
9.6.3 置换髋关节热应力分析	198
9.7 骨愈合过程有限元模拟	204
9.7.1 影响骨愈合过程的因素	204
9.7.2 骨愈合过程的模拟方法	205
9.8 小结	207
参考文献	207

(2) 用动物做试验,对于其是否符合道德标准正在被国际社会争论,而且价格较高,一个试验品只能用于一次培训。

(3) 用尸体做试验,价格昂贵。

(4) 用塑料模型器官做试验,缺乏真实性。

(5) 数字仿真,优点体现在可以从失败和错误中去学习、可以单独试验或与有经验的医生共同试验、可以实现从普通的病理学到极端情况的手术培训、可以在手术前验证医生的熟练程度、可以进行多次重复试验。

2. 手术规划

在计算机中建立一个模拟环境,按照手术策略在计算机上形象化地预演整个手术过程,不断地发现不足,纠正错误,直到仿真效果达到预期目标时再进行真正的手术操作。医生借助虚拟环境中的信息合理制定手术方案,对于选择最佳手术路径、减小手术损伤、减少对临近组织损害、提高定位精度、执行复杂外科手术和提高手术成功率等具有十分重要的意义。

3. 保护医生

对于医务人员来说较危险的动作,如在感染或放射情况下,精确复杂的虚拟手术干预将是十分必要的,采用虚拟临场技术可以使医生免受感染或射线的侵害。

4. 降低手术费用

现代外科医疗检测系统造价昂贵,医疗成本也很高,虚拟手术能够缩短病人的恢复周期,降低病人和医院的开支,虚拟手术不受手术设备的制约。

5. 远程干预

虚拟手术与远程干预将使在手术室中的外科医生能实时地获得远程专家的交互式会诊。交互工具可以使顾问医生把靶点投影于患者身上来帮助指导主刀外科医生的操作,或通过遥控帮助操纵仪器,这样使专家们技能的发挥不受空间距离限制,也可以通过网络在机器人辅助手术中控制和监控机器人的动作。

1.2 虚拟手术系统的发展框架

Satava^[1]于1996年在第四届医学虚拟现实会议上提出了关于三代医学仿真系统框架的概念。在三代医学仿真系统框架中(见图1.1),第一代医学仿真系统着重于表现人体的几何特性,将虚拟现实技术中的漫游和沉浸概念应用于人体解

剖数据集,提供有限的用户交互,已经在医护人员教育和培训中得到应用。第二代医学仿真系统在组织建模时考虑到不同解剖组织的物理特性,加入了人体作为生物体的物理特性,如对软组织的研究,考虑在几何模型的基础上构造合适的物理模型来反映软组织在外力作用(如手术器械等)下的变形。第三代医学仿真系统则考虑了人体各器官的功能本质,如切断血管(物理现象)可能对血压(生理现象)造成的影响,进而影响其他器官的正常功能(生理功能)。从另一方面来说,肿瘤的生长(生理现象)会对其周围的组织的物理特性有所影响和改变。总体来说,第三代医学仿真系统最接近于人体的生理功能及其生物功能,是医学仿真系统的最终研究目标。目前,研究人员对虚拟手术的研究大多集中于其发展框架的第二代,即考虑器官组织物理特性的物理学仿真。

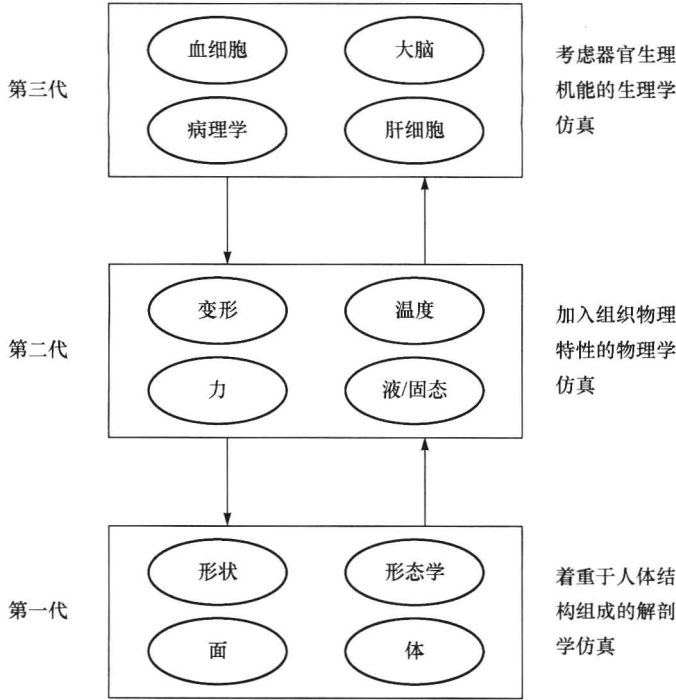


图 1.1 三代医学仿真系统示意图

1.3 虚拟手术系统构成

虚拟手术系统是虚拟现实技术与现代医学的结合。在虚拟环境中,用户应获得沉浸感(视觉、力和触觉等)、真实感和实时交互,可以通过虚拟工具来改变虚拟

场景中对象的状态。虚拟手术系统的构成框架如图 1.2 所示。另外,针对具体的虚拟环境,如虚拟手术仿真系统,操作者的动作所引起模型的物理变化应该尽可能地反映真实人体组织的行为。手术仿真系统的设计还需要在实时性和真实感之间做一折中。针对虚拟手术系统的特点,从硬件组成和软件模块划分两方面来说明虚拟手术系统的构成。

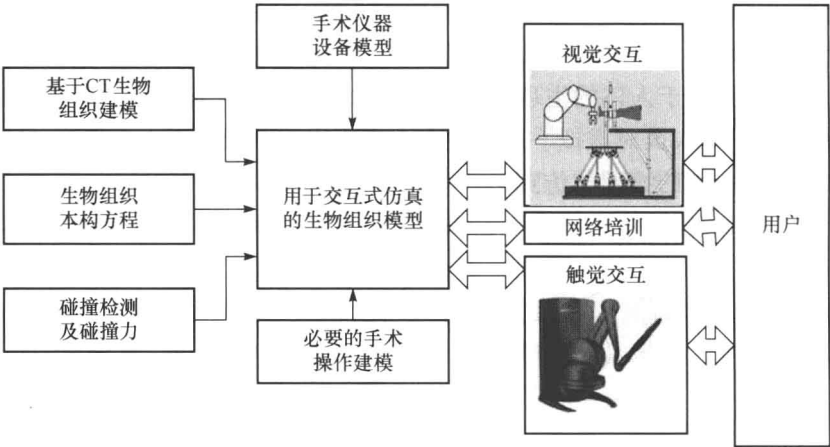


图 1.2 虚拟手术系统的构成

1.3.1 虚拟手术系统硬件组成

总体上说,虚拟手术系统的硬件组成主要有主计算机、输入设备、反馈设备 3 部分,如图 1.3 所示。

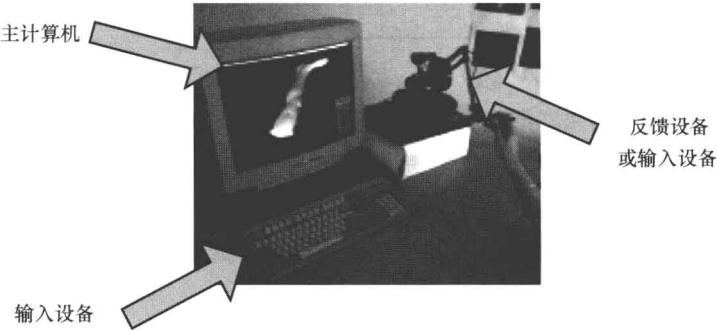


图 1.3 虚拟手术系统的硬件组成

1. 输入设备

输入设备为操作者提供和虚拟系统交互的工具,如键盘、鼠标、移动模型、旋转

模型等,是虚拟手术系统的入口。输入设备需要实时捕捉操作者的动作,向系统汇报。在虚拟手术系统中,输入设备无论是在使用自由度和空间活动范围上都应该尽量模拟真实的手术器械。

2. 主计算机

主要提供图形绘制、变形计算、碰撞检测 3 部分功能。

(1) 图形绘制:实施获得研究对象模型中各节点的几何位置和联结关系,进行真实感的图形绘制,提供操作者视觉反馈。

(2) 碰撞检测:检测虚拟手术器械和模型之间的碰撞。

(3) 变形计算:在检测到虚拟和手术仪器结合模型间的碰撞后,根据碰撞信息,计算模型在虚拟手术器械作用下的形变,更新模型数据;在符合切割条件下,进行模型分裂。

3. 反馈设备

主要完成反馈计算,为操作者提供力觉反馈和触觉反馈。力觉反馈、触觉反馈可增加操作者和仿真系统之间的交互信息,增强虚拟手术系统的沉浸感。力觉反馈系统、触觉反馈系统、视觉反馈系统的紧密结合,可以使操作者感受到施力于模型时模型所产生的反馈力;当操作者用输入设备接触模型时,触觉反馈系统则使操作者获得基于模型所模拟组织的信息(如摩擦、温度、表面纹理、材料、光滑度、黏度等)。

1.3.2 虚拟手术系统软件功能模块

根据虚拟手术系统所需实现的功能,将软件设计划分为 5 个相对独立又相互联系的模块,如图 1.4 所示。

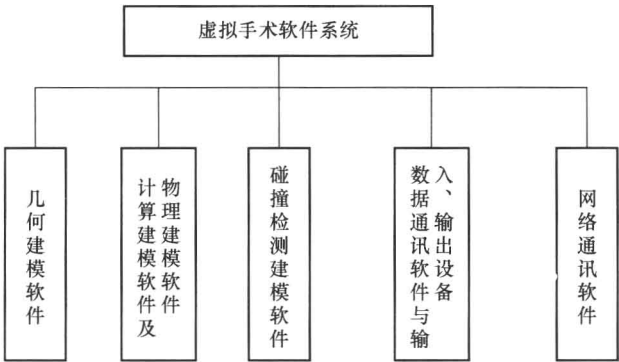


图 1.4 虚拟手术软件系统框图

1. 几何建模

几何建模是虚拟手术软件实现的第一步,以前的研究一般是从虚拟人数据库获得几何建模的资料,进而对资料数据进行三维重建。建议采用患者 CT 图像和 MRI 图像等医学图像获取手段作为三维重建的数据来源,这样的几何建模更具有针对性^[2~4]。

2. 物理建模、计算建模

物理建模及计算建模是指在几何建模的基础上,结合相关生物组织特性(即组织材料的本构方程),在动力学平衡等式的基础上,利用相关算法计算在外力作用下,生物组织的应力和应变。

3. 碰撞检测建模

在计算机动画、虚拟现实和仿真机器人等领域中,碰撞检测是一个基本而关键的研究课题。精确的碰撞检测对提高虚拟环境的真实感和沉浸感有着至关重要的作用,而虚拟环境自身的复杂性和实时性对碰撞检测提出了更高的要求。在手术仿真系统中,作用于模型的力一般是由操作者的手术器械与软组织接触的力,软组织的变形应该是由操作者的动作引起的,碰撞检测的加入才能更加增强操作者的交互感和沉浸感。

该模块的功能是实时检测用户所操纵的虚拟手术器械是否与虚拟的病人组织器官发生了碰撞,以便决定是否需要基于物理/生理模型的计算和变形及切割,碰撞检测发生在刚体和软体之间或软体和软体之间,与通常情况下刚体与刚体之间的碰撞检测相比,复杂度更大。由于必须在一定时间间隔内完成软组织与刚体或软组织与软组织自身的碰撞检测,进行组成几何模型的基本元素的遍历是实时计算的关键之一。碰撞检测的结果(发生碰撞的基本体素以及碰撞发生的作用点、线或面)是对几何模型实施变形计算或进行切割等操作的控制参数。

4. 与输入、输出设备数据通信的软件

基于虚拟手术人机交互接口,如图 1.5 所示,作为连接操作者和虚拟操作环境的桥梁,主要有两个作用:其一是给操作者提供环境信息(视觉、力觉),借助于主手和图形设备,属于虚物实化;其二是感觉人类操作者的动作和响应(位置跟踪和映射),借助于跟踪设备,属于实物虚化范围。视觉显示占主要地位需要一台专门的计算机,力觉显示需要专门的外部设备,进行转化的工具就是虚拟现实软件。

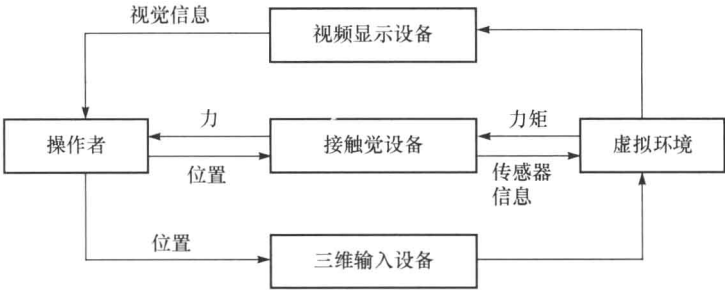


图 1.5 人机交互系统

5. 网络通信的软件

网络通信模块负责整个系统各个部分之间的信息交换,将系统连接成为一个有机的整体。通信系统将虚拟环境生成端对远端手术机器人的控制信息,和远端机器人反馈回来的状态信息,通过网络进行传递。对于网络通信模块的设计,要求能够实时、准确地传输数据。

1.4 虚拟手术建模与仿真技术研究现状

20 世纪 70 年代,就有了关于人体运动仿真的研究^[5],将每个运动的部分作为一个刚体,控制各刚体间的运动达到运动仿真的目的,然而这种仿真技术不能应用于非刚体部位,Brekelmans 和 Rybicki 在 1972 年第 1 次将有限元方法(finile element method)应用于骨科生物力学的研究^[6]。下面,概要地总结虚拟手术相关研究的发展过程。

从 20 世纪 80 年代至 2001 年所进行的研究很庞杂。其中的研究包括医学图像的获取;生物组织体模型的建立和仿真^[7];利用有限元解决线性生物力学等式;基于 2D 图像的仿真;基于 3D 图像的仿真^[8];生物组织面模型的建立和仿真^[9];建立包括手术仪器在内的虚拟手术系统^[10,11];建立生物组织的质量-弹簧模型^[12]。尽管这些研究都是很粗浅的,但是它说明了虚拟手术作为一个崭新而又具有相当潜力的领域,研究工作在这个时期全面展开^[13~19]。2002 年,主要研究集中于寻求快速、稳定、实时的交互式变形的计算方法^[20~25]。2003 年,主要研究触觉对虚拟手术系统的作用及如何在仿真系统中加入力觉和触觉^[26~30]。2004 年,主要研究生物组织模型如何与输入、输出设备集成到一起构建虚拟手术系统^[31~35]。2005 年,研究主要集中在如何实现基于更复杂的生物材料模型的交互式仿真这个问题上^[36~40]。

从 1999 年开始,国内出现了一些关于利用有限元进行生物组织的性能分析的研究、关于医学图像三维重构的分析、手术模拟仿真的初步探讨、组织性能的数学

计算等几方面的科学问题的研究^[41~45]。但这些研究同国外相比,技术上还比较落后,以临床大系统的姿态出现的研究成果还很少,国内已经应用在临床上的仿真平台是解放军总医院承担与国防科学技术大学计算机学院协作,历时两年研究开发的虚拟鼻内窥镜手术仿真系统如图 1.6 所示。

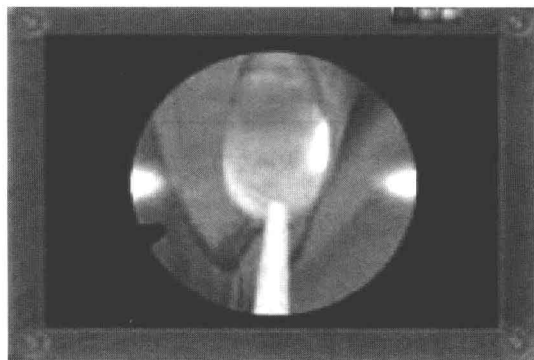


图 1.6 虚拟鼻内窥镜手术仿真系统

从以上分析可以看出,虚拟手术研究最关键的问题就是解决建模和仿真两大难题。模型是对系统、实体、现象、过程、数学、物理或逻辑的描述,仿真是模型随时间变化的实现方法。这两大部分既相互独立又相互影响。虚拟手术中的研究对象是人体组织和器官,需要为研究者展示在手术过程中研究对象的图像和变化。手术仿真系统不仅要求实时的图形交互,而且,模型必须能体现真实人体器官或组织的行为特性。在实际的研究中,由于人体组织的复杂性、多样性,相应器官和组织的物理参数难以获得,因此完全真实的建模很难实现。在一个虚拟手术系统中,建模往往是最基础的也是最关键的一个环节。许多研究人员在手术仿真系统的建模上做了大量的工作,从模型构造的不同方向来看,一个完整的研究对象建模主要应有几何建模、物理建模和计算建模 3 部分。在仿真方面的工作集中在交互式仿真的设计和实时仿真算法实现以及基于网络的仿真等几个方面。这些方面都与建模过程、建模方法和建模结果密切相关。

下面,详细介绍虚拟手术建模技术和虚拟手术仿真技术两个领域的研究现状。

1.4.1 虚拟手术建模及仿真方法研究现状

1. 几何建模

虚拟手术几何建模包括手术设备建模和手术对象建模两个方面,关于手术设备尤其是辅助手术的机器人建模和其他领域的并联机器人建模、串联机器人建模原理一致,这里不详细介绍。我们主要关心的是手术对象的建模,手术对象建模可以有两种方法,一种是直接在三维建模软件上手工绘制,另一种是在医学图像的基