

虚拟膝关节镜手术仿真系统的关键技术研究*

熊岳山¹, 徐凯¹, 王彦臻¹, 谭珂², 郭光友²

(1. 国防科技大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073; 2. 中国人民解放军总医院 技术教育中心, 北京 100853)

摘要 :虚拟手术仿真系统是医学仿真训练的有力工具,在医学教育领域有很好的应用前景。结合虚拟膝关节镜手术系统开发中的实际经验,介绍了系统开发过程中的几何建模、形变计算、力反馈与场景特效处理等关键技术与模拟仿真效果;文中的技术可推广应用到其他虚拟手术仿真系统的开发中。

关键词 :手术仿真,医学训练,力反馈,特效处理

中图分类号 :TP391.9 文献标识码 :A

Research on Key Techniques for System of Virtual Surgery Simulation with Knee Arthroscope

XIONG Yue-shan¹, XU Kai¹, WANG Yan-zhen¹, TAN Ke², GUO Guang-you²

1. College of Computer, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Center for Technique Education, PLA General Hospital, Beijing 100853, China)

Abstract :Virtual surgery simulation system is one of the important tools for medical training. It can be widely applied in medical education. By the experiences in the development of the virtual surgery system for knee arthroscope, we introduce the key techniques about geometry modeling, deformation computing, mechanics feedback and special effect processing. The methods developed in this paper can be extended to other virtual surgery simulation.

Key words :surgery simulation, medical training, mechanics feedback, special effect processing

20 世纪 80 年代, Delp 和 Rosen^[1]建造了世界上第一个虚拟手术仿真系统,它可以用于观察关节移植手术的过程与结果。在 1991 年, Satava^[2-3]完成了第一个腹部手术的仿真系统,它的结果虽然和真实感与交互性的要求相差甚远,但却提供了在组织周围漫游来观察组织并使用虚拟的手术器械来进行手术动作的手段。目前,国外已经有许多研究机构和商业公司对虚拟手术仿真中的实时力反馈交互技术展开了研究和实践,具有代表性的是:

德国的卡尔斯鲁厄研究中心(Forschungszentrum Karlsruhe)的 Uwe G. Kühnapfel^[4]等人于 1997 年研制成功虚拟腹腔镜手术训练系统 Karlsruhe Endoscopic Surgery Trainer。他们开发了功能强大的 3D 模拟软件 KISMET 作为训练系统的核心软件,可完成实时的物理学模拟、运动学模拟以及快速的 3D 图形渲染等功能。该训练系统采用弹簧振子(mass-spring)模型模拟子宫等软组织形变,通过添加父结点使物体两侧的结点产生联系,使面模型形变表现出体行为,满足了实时性和逼真性的要求,该研究中心于 2002 年又推出了系列系统 VSOne。

美国 GE Research & Development Center 开发了医学虚拟内窥镜系统(virtual endoscopy medical application:VEMA)。该系统采用先进的分割、重建、显示和自动路径规划算法,使用器官的 CT 或 MRI 切片图像,生成器官的 3D 内表面模型,模拟视频内窥镜的功能。VEMA 支持多视图技术,如细节放大、同步显示器官内外 3D 视图、组合 2D 和 3D 表面视图,在人体空腔管道中交互移动或自动航行,并且提供了交互式解剖结构测量工具。VEMA 可应用于人体许多区域:虚拟结肠镜、支气管、血管镜检查等。其采用的目标器官的 CT 和 MRI 图像同周围组织的对比度较好,主要用于医疗人员的培训和教学。相

* 收稿日期:2006-08-05
基金项目:国家自然科学基金资助项目(60371036)
作者简介:熊岳山(1963—),男,教授,博士。

关的其他研究成果还有:虚拟结肠内窥镜^[6-7]、虚拟耳窥镜^[8-9]、虚拟食管-支气管内窥镜^[10-11]、冠状动脉虚拟内窥镜^[12-13]等。

关节镜手术是内窥镜手术的一种重要应用,本文主要介绍我们开发虚拟膝关节镜手术系统中的软硬件环境及其关键技术的创新成果。

1 系统软硬件环境

硬件环境:主计算机采用 PC 机(配置有图形加速卡);力反馈设备使用美国 SensAble 公司提供的 PHANTOM 力反馈设备。

PHANTOM 触觉交互设备是 SensAble 公司生产的力反馈设备。它由 PHANTOM 力反馈终端、信号放大器和计算机硬件卡三部分组成。该设备位移精度达到 0.03mm,最大外力可达 8.5N,可以接受 6 个自由度的输入信息(三维空间内的位置和旋转),提供 3 个自由度的力反馈(只与位置有关)。

软件环境:WindowsXP 操作系统、GHOST SDK(general haptics open software toolkit SDK)、OpenGL、VC++ 6.0。

2 虚拟手术系统中的关键技术

2.1 几何模型构建

医疗成像包括计算机断层扫描(CT)、核磁共振成像(MRI)、超声(US)、正电子辐射断层摄影(PET)、单光子辐射断层摄影(SPECT)等。

图 1 是对医学解剖图像(Visible Human 数据集的腿外部图像)的几何重建模型,它是对医学解剖图像进行断层轮廓提取后生成的四面体模型,图 2 是图 1 的渲染效果图。



图 1 重建后的膝关节部位的四面体网格

Fig.1 Tetrahedron grid of knee joint after rebuild

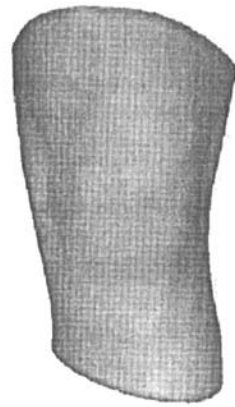


图 2 膝关节模型的渲染效果图

Fig.2 Romancing for model of knee joint

2.2 碰撞检测

碰撞检测是形变和压力计算的基础,同时也是切割和缝合模拟的先决条件。碰撞检测的实时性、稳定性和精确性将会对后续处理乃至整个虚拟手术系统的性能产生巨大的影响。

利用 GHOST SDK 提供的接口,可以很方便地实现 PHANTOM 设备终端与组织模型表面之间的碰撞检测,但不能对平面与四面体单元之间进行方便高效的碰撞检测。针对这一问题,我们在虚拟膝关节镜手术系统中提出了基于八叉树的层次包围盒碰撞检测算法^[14],有效实现了手术器械与四面体单元的碰撞检测。

2.3 力反馈

力反馈是一种重要的触觉通道,它作用于体内,可感知物体的重量以及物体对于作用力的反抗作用。只有提供与实际手术中相近的力反馈,虚拟手术系统才会具有实际意义。虚拟环境中力的表现采

用了机器人学和遥控学中描述的算法和模型来进行低层控制。虚拟手术系统中的力反馈必须维持一个非常高的刷新频率,一般要求高于 500Hz。

采用 GHOST SDK 提供的力场机制来实现器械整体与组织表面的力反馈,实现了探钩探查交叉韧带时的力反馈和使用刨削器时使用者感到器械震动的效果。

2.4 形变与切割模拟

2.4.1 软组织形变模拟:弹簧振子模型、有限元模型

弹簧振子模型和有限元模型是两种形变模拟模型。弹簧振子模型的原理简单,容易满足系统实时性的要求,但是精确性较差;而有限元模型较复杂,但精确度较高。针对内窥镜手术的特点,我们提出了一种线弹性有限元半隐式模型,实现了对人体软组织较为精确的形变模拟。采用半隐式技术,提高了系统的稳定性,使用高效的超松弛迭代法求解有限元模型,并且采用了质量团聚和有选择的矩阵向量乘法等技术来减少算法的时间、空间复杂度;采用动态模型,实现了对软组织振、粘滞等动态特性的模拟^[15]。图 3 显示了医疗器械对腿外部模型的形变效果。

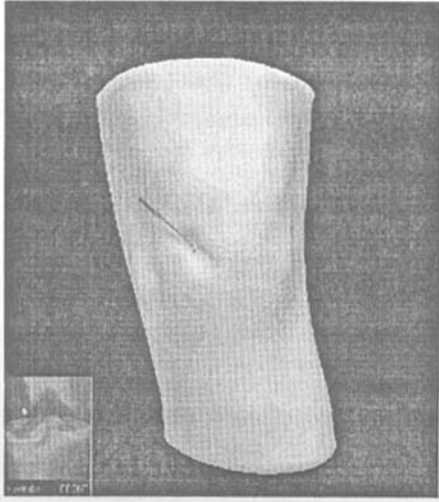


图 3 腿外部模型的形变
Fig. 3 Deformation of leg surface

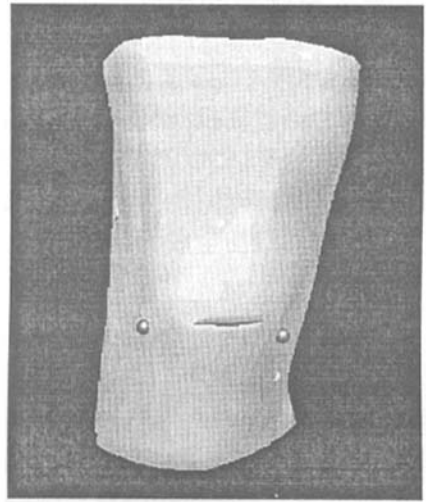


图 4 腿外部模型的切割
Fig. 4 Cutting of leg surface

2.4.2 切割模拟:去除法、体元剖分法

去除法、体元剖分法是实现切割的两种基本方法,去除体元法的计算量小,实时性好。不足之处是去除体元法违反了质量守恒定律,而且切割边界存在锯齿状走样,影响了切割处理的真实感效果。体元剖分法是另一种切割处理方法,它的基本思路是将切割到的体元(四面体、六面体等)分解为多个小的体元,对体元进行切割处理。本系统中,我们研究了一种新的基于体元剖分的软组织切割算法,该算法不同于以往的体元剖分算法,它将整个剖分过程分两步来完成:首先通过退化处理过程将不完全切割的四面体单元分解成多个完全切割的四面体单元,然后将切割情况进行分类,根据不同的切割情况分别进行相应的基元分解^[16]。图 4 是腿外部的切割效果。

2.5 虚拟场景渲染与特效模拟

在虚拟场景渲染方面,重点讨论几何模型面绘制的一些问题,包括模型的网格平滑处理、法向量的计算问题以及纹理映射下高光效果的实现。针对特殊组织的绘制,提出了物理模型结合纹理映射的绘制方法,图 5 是系统中模拟气化时的场景图。

在特效模拟方面,重点针对两类不同的流血现象分别提出了两种流血模型,均达到了较好的模拟效果,还讨论了微粒系统的原理和方法,并用它实现了其他一些特殊效果的模拟^[17-18]。图 6 是实际手术录像的流血效果,图 7 是模拟实现的流血效果。

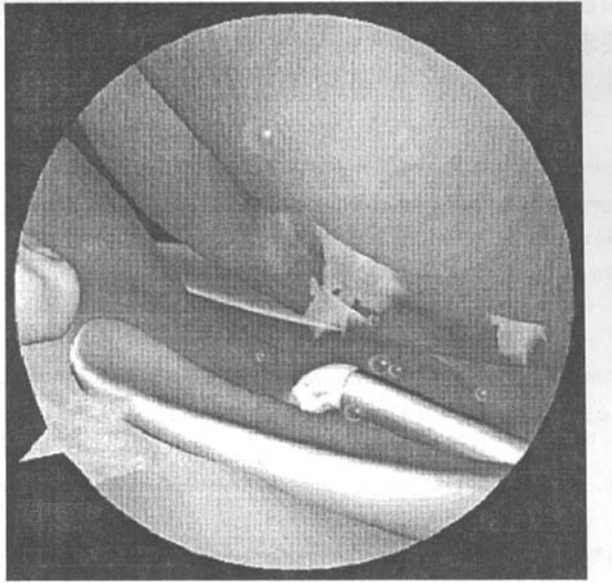


图 5 系统中模拟气化时的场景
Fig. 5 Scene for simulating aerification



图 6 柱状流血的录像效果
Fig. 6 Video record for bleeding with columnarity

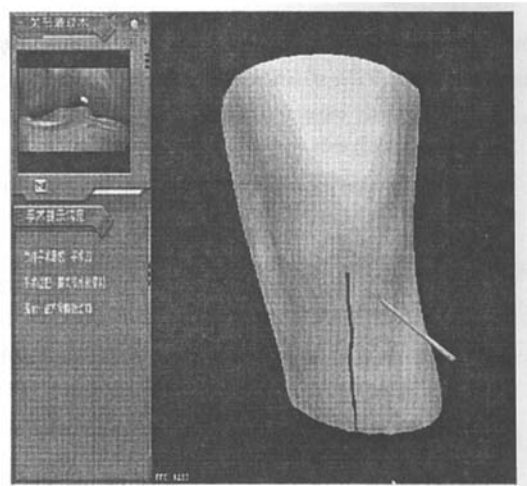


图 7 模拟的柱状流血效果
Fig. 7 Scene for bleed simulation with columnarity

3 研究展望

(1) 复杂医学图像的三维重建

结合先进的图像处理技术、计算几何和有限元网格生成技术,研究由医学图像直接生成适合于虚拟手术系统开发的三角面片(或四面体)网格的几何模型。

(2) 基于粘性流体流动模型的流血特效处理

利用流体力学中的流体流动模型仿真实际血管的流动,利用移动网格方法求解血流参数,结合绘制技术绘制流血效果。

(3) 高效的碰撞检测技术

研究满足实时性要求的与PhanToM力反馈设备相关的碰撞检测算法,重点解决医疗器械与体元或面片之间的碰撞检测。

(4) 虚拟手术中的切割、形变计算

研究基于四面体网格模型在手术仿真中的切割、形变模型,用有限元或有限体积等数值方法计算产生满足真实感和实时性要求的切割、形变效果。

参考文献:

- [1] Satava R M, Johns S B. Current and Future Application of Virtual Reality for Medicine[J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(3):484-489.
- [2] Satava R M. Telepresence Surgery: Medical Implications for Virtual Reality[C]//Helsel S. Ed, Proceedings of Virtual Reality '92, VR Becomes a Business, Westport, CT: Meckler Publishing, 1992:136-143.
- [3] Satava R M. Virtual Reality Surgical Simulator[J]. Surgical Endoscopy, 1993, 7(3):203-205.
- [4] Kuhn C, Kuhnappel U, Krumm H G, et al. A "virtual Reality" Based Training System for Minimally Invasive Surgery[C]//Proc. of Computer Assisted Radiology (CAR '96), 1996:764-769.
- [5] Meenan P. Virtual Endoscopy Medical Application[R/OL]. http://www.crd.ge.com/es/cgsp/fact_sheet/virtendo/index.html.
- [6] Lee T Y, Lin P H, Lin C H, et al. Interactive 3-D Virtual Colonoscopy System[J]. IEEE Trans. on Information Technology in Biomedicine, 1999, 2(2):139-150.
- [7] Razdana A, Patel K, Farin G E, et al. Volume Visualization of Multicolor Laser Confocal Microscope Data[J]. Computers & Graphics, 2001, 25(5):371-382.
- [8] Nakasato T, Sasakia M, Ehara S, et al. Virtual CT Endoscopy of Ossicles in the Middle Ear[J]. Journal of Clinical Imaging, 2001, 25(3):171-177.
- [9] Nakasato T, Sasak M, Ehara S, et al. Virtual CT Endoscopy of Ossicles in the Middle Ear[J]. Journal of Clinical Imaging, 2001, 25(7):171-177.
- [10] Buthiau D, Antoine E, Piette J C, et al. Virtual Tracheo-bronchial Endoscopy: Educational and Diagnostic Value[J]. Surg. Radiol Anat., 1999, 18(2):125-131.
- [11] Kagadis G C, Patrino V, Kaloger C P, et al. Virtual Endoscopy in the Diagnosis of an Adult Double Tracheal Bronchi Case[J]. European Journal of Radiology, 2001, 40(9):50-53.
- [12] Bartza D, Grvitb O, Lanzendo M, et al. Virtual Endoscopy for Cardio Vascular Exploration[C]//Computer Aided Radiology and Surgery (CARS 2001), Berlin, 2001:1005-1009.
- [13] Radetzky A, Nu A. Visualization and Simulation Techniques for Surgical Simulators Using Actual Patient's Data[J]. Artificial Intelligence in Medicine, 2002, 26(4):255-279.
- [14] 邓文平, 熊岳山, 李思昆. 八叉树层次包围盒碰撞检测算法的快速实现[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(s):158-160.
- [15] 王彦臻, 熊岳山, 郭光友, 等. 虚拟手术中软组织形变的有限元半隐式模型[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(s):216-218.
- [16] 熊岳山, 罗军, 谭珂, 等. 一种新的基于体元剖分的软组织切割算法[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(12):2132-2136.
- [17] 徐凯, 熊岳山, 郭光友, 等. 虚拟手术中基于扩散方程模型的表面流血模拟[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(s):444-446.
- [18] 徐凯, 熊岳山, 谭珂, 等. 一种小量流血形成的弯曲血槽模型[J]. 国防科技大学学报, 2004, 26(5):70-73.
- [19] 钟云辉, 熊岳山, 谭珂, 等. FASTRAK 数据滤波校正及其在虚拟手术中的应用研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(5):1243-1246.

