

# 虚拟脊柱手术系统的设计

王 玫<sup>1</sup>, 张月东<sup>2</sup>, 尚宪刚<sup>1</sup>, 张兆臣<sup>1</sup>

(1. 泰山医学院 信息工程学院, 山东 泰安 271016;

2. 泰安市中心医院 骨外科, 山东 泰安 271000)

**摘 要:** 脊柱手术因其复杂性所以治疗困难。为了使医生可以方便地对患者的病患部位进行观察分析、制定手术方案并随时进行手术模拟, 使用虚拟现实技术, 利用 CT 断层图像 DICOM 格式的原始数字图像数据, 提出了使用 ITK、VTK 等开发工具设计虚拟手术系统平台的思想。对原始数据进行预处理和图像分割获取三维重建的数据信息, 进而快速地建立几何形态精准、解剖形态完整的高精度脊柱骨三维有限元模型, 最终帮助医生在三维环境下进行多方位多角度观察分析和交互操作, 确定及时、准确的诊断和手术方案。

**关键词:** 三维重建; 阈值分割; 表面绘制; 有限元模型

**中图分类号:** TP39

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2011)07-0179-04

## The Design of Virtual Spinal Surgery System

WANG Mei<sup>1</sup>, ZHANG Yue-dong<sup>2</sup>, SHANG Xian-gang<sup>1</sup>, ZHANG Zhao-chen<sup>1</sup>

(1. College of Information Engineering, Taishan Medical University,

Taian 271016, China;

2. Department of Orthopedics, The Central Hospital of Taian, Taian 271000, China)

**Abstract:** Treatment of spinal surgery is difficult because of its complexity. In order to easily observe and analyze the parts of patients, make a operative proposal and surgical simulation virtual at any time, use virtual reality technology and CT slice images of DICOM format as original digital, propose the virtual surgery system platform design ideas making use of ITK, VTK and other development tools. Preprocess the original data to obtain three-dimensional reconstruction and image segmentation data information, and then quickly create accurate geometry, the complete anatomy of high-precision three-dimensional finite element model of the spine, and ultimately help doctors in the three-dimensional environment with multi-directional multi-angle analysis and interaction to determine the timely and accurate diagnosis and surgical programs.

**Key words:** three dimensional reconstruction; threshold; surface rendering; finite element model

## 1 概 述

脊柱手术由于有损脊髓导致截瘫的危险性高、难度大, 手术操作学习与实践较为困难, 一般需要年资较高的医师才可以主刀脊柱手术。

虚拟现实技术在医学上的应用是一门新技术, 它包容了计算机和临床专业等的多学科知识。由于临床人员对复杂的医学体数据有着可视化需要, 并对可视化的数据有进行实时操作的需求, 所以建立可供骨科手术前方案进行规划的虚拟平台, 对于在医学骨科手术的教学和仿真训练等方面都有着良好的应用前景<sup>[1]</sup>。

## 2 系统实现方法及重建流程

### 2.1 系统的实现工具和方法

系统的实现是将 ITK (Insight Toolkit)、VTK (Visualization Toolkit) 开发包使用跨平台的安装工具 Cmake 进行编译, 使用 Microsoft Visual C++. NET2003 进行编程, 将以上开发包进行了整合和设计。

其中 ITK 是专门针对医学影像领域开发的, 用于图像配准和分割的开源软件工具箱, 分割是在图像中进行数据分类的过程, 通常被分割的图像是从 CT 或者 MR 扫描器等医学器械操作获得的图像。VTK 主要是用于三维计算机图形、可视化和图像处理的面向对象的软件工具, 它向开发者提供了一系列的可视化和几何建模的类库。由于开发包内融合了三维计算机图形学、图像处理和可视化等相关技术, 集成了众多成熟的图像处理和图形生成算法, 在科学研究和工程领域都有广泛的应用, 在图像处理与可视化方面, 特别是在

收稿日期: 2010-12-25; 修回日期: 2011-03-27

基金项目: 山东省高等学校科技计划项目 (J10LC59)

作者简介: 王 玫 (1980-), 女, 硕士, 研究方向为软件工程、医学图像处理。

医学图像处理方面具有其他软件无法比拟的优势,已成为目前一种流行的图像应用软件开发工具<sup>[2]</sup>。CMake 是一个跨平台的安装工具,可以用简单的语句来描述所有平台的安装(编译过程),它能够输出各种格式的 makefile 或者 project 文件,能测试编译器所支持的 C++ 特性,类似 UNIX 下的 autotconf。

系统的实现过程:

(1) 对 DICOM 标准的医学图像数据作为原始数据进行读取和进一步解析;

(2) 使用 ITK 提供的相关医学图像算法进行数据预处理和不同组织区域的图像分割;

(3) 将所获取虚拟切片和三维重建所需的信息利用 VTK 工具包重建后得到三维立体图形。得到的三维模型可以从多角度不同方位进行观察和分析,并提供在三维虚拟空间进行交互性操作,方便医生对具体病患部位进行手术模拟,从而做出准确的诊断和手术方案的确定(系统流程见图 1)。

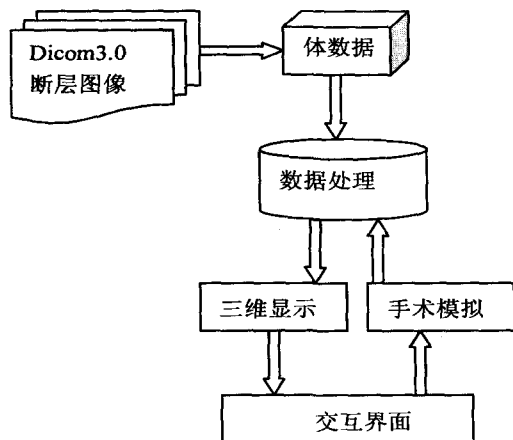


图 1 系统流程图

## 2.2 主要模块功能

采用模块化编程,图 1 中各个模块分工合作实现系统的功能,例如:交互操作模块可以使医务人员直观清晰地观察在手术模拟的过程中病患部位的位置和坐标等信息,而这些信息再经过手术模拟模块就可以对数据进行具体操作,相应的操作及时地通过数据处理模块实时完成,最后通过三维显示模块的绘制和显示得到最终的模拟结果<sup>[3]</sup>。

各个模块的主要功能和任务:

### 1) 脊柱图像采集。

选取病人的脊柱部位连续断层图像,成像的断层层距为 1.0mm。图像格式为 DICOM3.0 格式,各断面图像摄影分辨率为 262144(512 \* 512) 像素。采用 CT 图像的原因是成本较低,其空间分辨率比较高,从中可以得到比较清晰的软硬组织图像,CT 断层图像重建后就可以得到较精确的脊柱三维结构<sup>[4]</sup>。

### 2) 数据处理。

预处理的主要任务是:

#### (1) 重建体数据。

系统直接读取 CT 断层序列图像,这些 DICOM 标准格式的序列文件通过重建算法计算得到三维体数据,得到的体数据中每个体素的值是体组织在该点的 CT 值。

#### (2) 图像分割骨组织。

采用图像分割技术将图像中具有特殊含义的不同区域区分开来,分割后的这些区域是互不交叉的,每一个区域都满足特定的一致性。目前经常用于图像分割的特征包括:图像纹理、灰度颜色、频谱特征和局部统计特性等,分析并利用这些特征的差别就可以区分图像中的不同目标物体。在具体的操作过程中,每次一般只能利用图像信息中某些部分特征来分割不同的区域<sup>[5]</sup>。

系统中是通过阈值分开骨组织及软组织,阈值分割对于 CT 切片的效果最好,由于 CT 图像的不同灰度值反映了人体不同的组织构成,并且算法简单、计算速度快,因此通过设定分割灰度值就可以对人体 CT 图像中的不同组织器官进行分离,但在选择阈值时需要作多次尝试性分割以确定最佳分割阈值。

阈值分割法的原理是根据阈值,把图像中灰度级大于阈值的像素和小于阈值的像素分别显示,从而把图像分割开来。设  $(x, y)$  是二维数字图像平面上的点,  $f(x, y)$  是图像各点的灰度值,图像灰度级范围为  $G \in [0, L - 1]$ 。阈值  $T$  对图像的分割结果定义为:

$$g(x, y) = \begin{cases} 255 \text{ 或 } 1 & f(x, y) > T \\ 0 & f(x, y) \leq T \end{cases}$$

从上面的分析可见,最佳阈值的确定是阈值法的关键,阈值法分割实质上就是按照某种准则函数求出最佳阈值的过程。在实际的图像处理过程中,常用的阈值选取方法有全局阈值法和局部阈值法等。由于采集的脊柱图像中的各组织的密度不同,在图像中反映出不同的灰度值,可采用灰度作为分割的特征,利用阈值法可有效地将脊柱的部分与其他组织进行分割。在脊柱断层图像中,脊柱部分的灰度值与其他组织的灰度值有非常大的差异,在图像分割过程中采用了灰度直方图峰谷法。若图像的灰度直方图呈双峰状且有明显的谷,选择谷点的灰度值作为阈值就可把目标从背景中分割出来。选取直方图的谷点可借助求曲线极小值的方法,该方法对于目标和背景有很大灰度差异的图像能实现简单而有效的分割。

该模块主要应用了 ITK 图像分割和配准开发包,在 ITK 中实现了图像分割的主流方法,利用它们可以解决常见的医学图像分割问题,这些方法也是算法改进与功能扩展的基础。

### 3) 三维显示和交互操作。

虚拟手术系统是计算机虚拟现实(Virtual Reality)的一个崭新的应用领域。虚拟现实是人机交互的、模仿现实环境并且能允许许多用户实时操作的应用接口,它的一个最主要的应用就是医学领域的虚拟手术的完全模拟,提高了现实手术操作计划的安全性、实时性和高效性,其中医学图像的三维重建技术就是虚拟现实的基础和核心技术之一。医学数据可视化及三维重建技术是医学图像处理与分析领域的一部分,从目前发展情况来看,将可视化技术应用于脊柱外科、介入放射学领域的研究还较少。应用可视化技术深入了解、描述脊柱部分,对开发和研究脊柱及其周围结构的虚拟解剖学软件、计算机辅助骨科手术、手术模拟训练系统等具有重要的临床意义。

虚拟手术系统提供的一个重要功能是其交互操作,用户在模拟的过程中可以选取不同的组织结构,系统为其提供手术模拟的必要数据信息,并利用三维交互实现用户和三维有限元模型间的互动操作。ITK 和 VTK 的流程类似,都是通过管道来进行连接和数据交换,管道(pipeline)的实现是针对一系列的处理对象,所处理的是一个或多个数据对象,这些对象是通过过滤器(filter)沿着管道的方向从输入流向输出,达到在不同系统间进行数据交换<sup>[6]</sup>。这样,当在 ITK 中修改了原图像时,就可以使 VTK 中可视的立体图像也发生改变。同一道理,用户在 VTK 中修改图像时,ITK 中的图像数据也随着发生改变。因为单纯使用 ITK 开发包不具备可视化的功能,要想实现医学图像的三维可视化显示,所以必须借助 VTK 中的相关类库来实现三维重建和绘制显示<sup>[7]</sup>。

系统的三维重建工作主要是借助 VTK 提供的类库,运用等值面绘制算法,实现了 3-D 图像的重建,这部分的主要功能是等值面提取和三维图像的绘制以及三维场景的交互操作。通过布尔运算及三维切割功能,分别将腰 1、腰 2、腰 3、椎体,腰 1/2 椎间盘,腰 2/3 椎间盘分开,从而建立腰 1~3 的几何模型(见图 2)。虚拟手术对重建模型的显示速度有较高的要求,利用 Marching Cubes 算法进行等值面提取,得到骨组织表面的三角面顶点数据和法向量数据,然后利用 OpenGL 图形函数绘制出来。虚拟手术对重建模型的显示速度有较高的要求,系统采用表面绘制进行三维重建,主要原因是医学手术系统的交互性很强,面绘制可以保证进行旋转和平移等操作时场景能够被实时绘制,而如果采用体绘制,当场景中物体位置发生变化时需要重新计算比较费时很难满足实时性的要求<sup>[7,8]</sup>。

MC 算法是面绘制算法中常用的一种,于 1987 年由 W. Lorensen 等人提出,因其原理简单算法容易实现

得到了广泛的应用。算法的本质是从一个三维的数据场中抽取一个等值面,算法的主要操作是对体数据中的体素逐个进行处理:对于每个被处理的体素,以三角片逼近其内部的等值面片,把每个体素作为一个小立方体,构造三角片的处理过程对每个体素都进行一遍扫描,假定原始数据(用于医疗诊断的断层扫描(CT)及核磁共振成像(MRI)等产生的图像)是离散的三维空间规则数据场,对数据场中的立方体(体素)进行逐个处理,分类出等值顶点与等值面的相对位置,将等值面与立方体边的交点按一定方式连接生成等值面,作为等值面在该体素内的一个逼近表示<sup>[9]</sup>,MC 算法中每一单元内提取等值面要进行的两个主要计算是:立方体中由三角片逼近的等值面计算和三角片各顶点法向量计算。最终构建的实体模型表面光滑,曲线流畅,满足后续有限元分析要求。



图 2 三维重建图

有限元法是求解弹性力学问题的经典方法,其基本思路是将连续体离散成有限个单元的集合体,通过对每个单元进行力学分析,获得整个连续体的力学性质。当几何模型十分精细复杂时,为了提高虚拟组织器官的物理模型的真实性和精确度,采用弹性有限元方法来模拟弹性形变,并精确地模型化几何形状复杂的求解域。将其应用于虚拟手术,并且通过恰当的参数调节,可以构造出几何与物理上都较为精确的模型。有限元模型的解算方法具有较好的可伸缩性,它可以方便地用相同的网格结构实现不同的计算复杂程度和精度,而且模型的参数易于调节,能够方便地实现材质的各种属性,有限元模型见图 3。有限元网格划分是进行有限元数值模拟分析至关重要的一步,它直接影响着后续数值计算分析结果的精确性。有限元网格划分的指导思想是首先进行总体模型规划,包括物理模型的构造、单元类型的选择、网格密度的确定等多方面的内容。在网格划分和初步求解时,做到先简单后复杂,先粗后精,2D 单元和 3D 单元合理搭配使用<sup>[10,11]</sup>。

### 4) 手术模拟。

该模块主要是医务工作者在平台上对前期得到的

有限元模型进行交互性操作,需要辅助相应的力反馈设备协助完成手术的模拟交互,系统根据用户给定的特定信息,比如选定指定的组织区域,切割深度等在体数据上实现手术的模拟操作,完成操作后的体数据经过三维显示部分重新绘制出变化后的立体图像,而且医务工作者可以进行虚拟切割从而形成术前方案<sup>[12]</sup>。

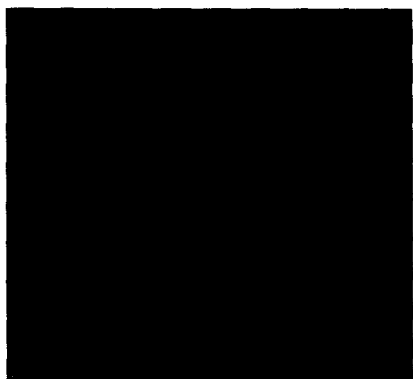


图 3 有限元模型图

### 3 结束语

虚拟脊柱手术系统的经济性、直觉性和多样性使它在临床实践中有着很大的应用价值:

(1) 临床脊柱手术的仿真和训练:运用虚拟现实技术可以使医务人员置身于虚拟的场景内,学习如何应对临床脊柱手术的实际情况,虚拟环境下的交互操作可以通过多方位的感知如视、听、触觉学习各种手术的实际操作;

(2) 医疗手术方案的制定:可以直观地在三维模型上对病患部位进行不同方位的显示,依据其部位在虚拟系统中制定手术治疗方案,或模拟评判治疗效果;

(3) 节省资源,提高效果:使非熟练人员实施骨科手术的风险性大大降低,节约培训医务人员的费用和时间,利用图像技术和虚拟现实技术帮助医生合理定制术前方案、辅助选择最佳手术途径,提高病患部位的定位精度,减少手术对组织的损害和损伤,从而提高手术成功率等<sup>[13]</sup>。

### 参考文献:

- [1] 郭圣文. 集成化三维虚拟手术系统的设计[J]. 中国医学影像技术, 2006, 22(12): 1894-1897.
- [2] 曾妍文. 面向显微外科手术的虚拟血管缝合仿真系统的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [3] Shim V B, Pitto R P, Streicher R M, et al. The use of sparse CT datasets for auto-generating accurate FE models of the femur and pelvis[J]. Journal of Biomechanics, 2007, 40(1): 26-35.
- [4] 林晓梅. 虚拟手术中软组织重建及显示关键技术的研究[J]. 自动化技术与应用, 2005, 24(10): 4-6.
- [5] 肖宜龙, 路游, 亓永刚. 基于神经网络的 NURBS 曲面重建[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(9): 65-68.
- [6] 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.
- [7] 牛文鑫, 丁祖泉. 三种三维有限元建模方法在跟骨模型建立中的应用比较[J]. 医用生物力学, 2007, 22(4): 345-350.
- [8] Helgason B, Perilli E, Schileo E, et al. Mathematical relationships between bone density and mechanical properties: a literature review[J]. Clin Biomech, 2008, 23(2): 135-146.
- [9] Su R, Campbell G M, Boyd S K. Establishment of an architecture-specific experimental validation approach for finite element modeling of bone by rapid prototyping and high resolution computed tomography[J]. Med Eng Phys, 2007, 29(4): 480-490.
- [10] 孙艳霞, 鲍旭东, 蒋春涛. 软组织建模中的有限元模型[J]. 生物医学工程研究, 2004, 23(3): 137-140.
- [11] 陈辉, 廖瑛. 骨盆三维有限元模型的研究与应用[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2008, 12(35): 6891-6894.
- [12] 郭立新, 刘学勇, 陈威, 等. 人体腰椎有限元模型及其生物力学研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2007, 24(5): 1085-1088.
- [13] 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.

(上接第 178 页)

bryan-sipping-p2p-00.html.

- [5] Landsiedel O, Lehmann K A, Wehrle K. T-DHT: Topology-Based Distributed Hash Tables[C]// IEEE Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing. [s.l.]: [s.n.], 2005: 143-144.
- [6] Singh K, Schulzrinne H. Peer-to-Peer Internet Telephony using SIP[R]. New York: Department of Computer Science, Columbia University, 2004.
- [7] Sun Microsystems Inc. JXTAv2.0 Protocols Specification[EB/OL]. 2003-02-27. <https://jxta.dev.java.net/>.
- [8] 许斌. JXTA: Java P2P 网络编程技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 22-26.
- [9] Sun Microsystems Inc. Project JXTA2.0 Super-Peer Virtual Network[EB/OL]. 2003-05-25. <https://jxta.dev.java.net/>.
- [10] Li S. JXTA 2: A high-performance, massively scalable P2PNetwork[EB/OL]. 2003-11-11. <http://www.ibm.com/developerworks/library/j-jxta2/index.html>.
- [11] Skype. Skype[EB/OL]. 2010-12-02. <http://skype.tom.com/>.