

基于 MITK 的医学图像三维表面重建算法

周 娟

(西南政法大学刑事侦查学院重庆高校物证技术工程研究中心 重庆 401120)

摘 要 对 MITK 算法平台进行研究,根据其总体框架、数据模型、算法模型的设计准则,依托该平台对医学图像序列实现基于体积元素的 Marching Cubes 表面绘制算法,并将绘制后的模型进行三维可视化显示。该方法构造出的等值面虽不能反映整个原始数据场的全貌及细节,但对感兴趣的等值面可以产生清晰的图像,而且可以利用现有的图像硬件实现绘制功能并进行实时交互操作。

关键词 MITK, Marching Cubes, 体素, 表面绘制, 三维可视化

中图法分类号 TP391.41 **文献标识码** A

3D-surface Reconstruction Algorithm for Medical Images Based on MITK

ZHOU Juan

(Chongqing Institutions of Higher Learning Center of Forensic Science Engineering and Research, College of Criminal Investigation, Southwest University of Political Science and Law, Chongqing 401120, China)

Abstract Studying on MITK and based on its design criteria of integrated framework, data model and algorithm model, we implemented Marching Cubes surface drawing algorithm based on volume pixel of medical image sequence, and then showed the reconstructed surface model by 3D-visualization. The contour plane constructed by this algorithm can bring a sharp image of the interested contour plane, although can not reflect the general view and detail of the whole raw data, and can implement drawn function and real time interactive operation based on in-being image hardware implementation.

Keywords MITK, Marching Cubes, Volume pixel, Surface drawing, 3D-visualization

1 引言

医学图像三维重建是研究由各种医疗成像设备获取的二维图像序列构建组织或器官的三维几何模型,并在计算机屏幕上“真实”绘制与显示。这些医疗成像技术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)等。医学图像三维重建包括对输入图像分割、对图像序列进行三维绘制等主要内容。

目前在医学影像研究人员中对序列图像进行三维重建使用最广泛的两个算法平台是 VTK(Visualization Tool Kit)和 ITK(Insight Segmentation and Registration Tool Kit),虽然还有其他一些平台,但是它们都不系统,只是针对某个特定领域。另外本文将要用到的 MITK(Medical Imaging Tool Kit)算法平台是将算法和可视化二者结合起来的集成化医学影像算法平台,弥补了 VTK 和 ITK 算法与可视化分离的局限,是对二者的一个补充。

本文基于对 MITK 算法平台的总体框架、数据模型、算法模型的深入研究,对表面绘制的基本流程进行了分析,并对表面绘制中的 Marching Cubes 算法模型及原理进行了研究,详细分析了该算法的等值面提取算法,并对该算法在 MITK 中对应的类及数据模型等关键技术进行了深入讨论和研究,

实现了医学数据的表面绘制。最后在医学三维重建系统中显示出重建组织的三维模型,并对表面绘制的显示效果作了比较。

2 MITK 算法平台

2.1 总体框架[1]

MITK 的设计采用的是数据流的模型,以数据处理为中心,在概念上算法与数据分开表达,图 1 示出了 MITK 对数据的整个处理流程。

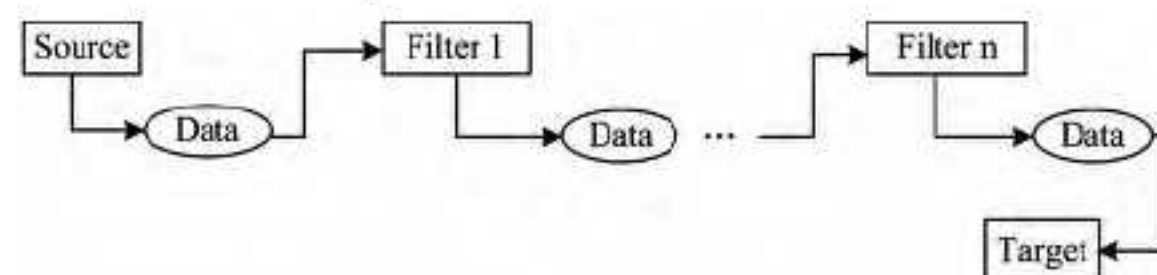


图 1 MITK 的计算框架

其中,Source、Filter、Data、Target 等都是些高层抽象的类,封装的是一些概念,具体工作通过继承由它们的子类来完成。

Source 负责生成数据,具体包括从磁盘上读文件进来(在 MITK 中叫做 Reader),或者用某些算法生成数据,比如随机数产生器(在 MITK 中叫做 Procedural Source)等。

Filter 对数据进行处理,即各种算法。

Target 是数据的终点。具体包括,将得到的结果数据保

本文受重庆市教委科学基金项目(KJ1400102),重庆市高校创新团队项目(KJDT201301)资助。

周娟(1983—),女,博士,讲师,主要研究方向为医学图像三维重建、人体伤残鉴定、人工智能等,E-mail:zjajf@126.com。

存至磁盘(在 MITK 中叫做 Writer),或者将得到的结果在屏幕上显示出来(在 MITK 中叫做 View)等。

Data 是对算法要处理的数据所进行的抽象。当然一个系统要能处理多种不同的数据,在 MITK 中是通过 Data 的各个具体的子类来描述不同的数据对象的。

2.2 数据模型^[2]

数据表达是数据流模型中的一个核心的内容,数据对象起连接算法流水线的重要作用。考虑到 MITK 的设计目标之一是有限目标,只关注于医学影像这个特定的领域,此处简化了数据模型的建立。通过对医学影像数据进行仔细的分析以后,MITK 中的数据对象(Data)可以被具体化为 Volume 和 Mesh 两种不同的具体数据对象,Data 的类继承关系如图 2 所示。

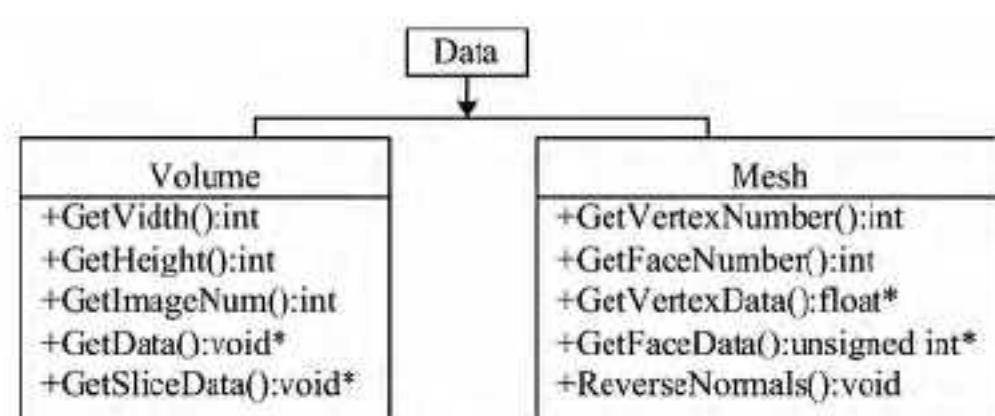


图 2 MITK 的数据模型

Volume 用来表达一个医学影像数据集,提供一个多维(包括一、二、三维)、多模态(CT、MRI 等)的规则数据场的抽象。Volume 提供了丰富的接口给算法对象使用,图中给出了一部分最常用的函数接口,这些接口可以使得其他对象很方便地访问其内部的实际数据。Volume 是 MITK 中的核心对象之一。

Mesh 用来表达一个几何数据,尤其是以三角面片网格形式表达的几何模型。Mesh 内部的结构基于半边数据结构,它提供了对一维线段、二维平面图形、三维三角网格以及通用多边形的支持,提供了丰富的接口来给相关的算法对象使用,图中给出了一部分最常用的函数接口。不同于 Volume,Mesh 并不对应于医学影像设备所直接采集得到的数据,而是医学影像数据集处理后得到的结果所依赖的表达形式。它是可视化算法中面绘制和某些分割算法所处理的对象,也是 MITK 中的核心对象之一。

2.3 算法模型

有了一个良好的数据模型,下一步就是算法模型的抽象。因为 Source 和 Target 只是特殊目的的算法对象,真正的算法是由 Filter 对象来代表的。按照一个 Filter 的输入和输出数据对象的类型,它可以被具体化为 4 种不同的算法种类,Filter 的类继承关系如图 3 所示。

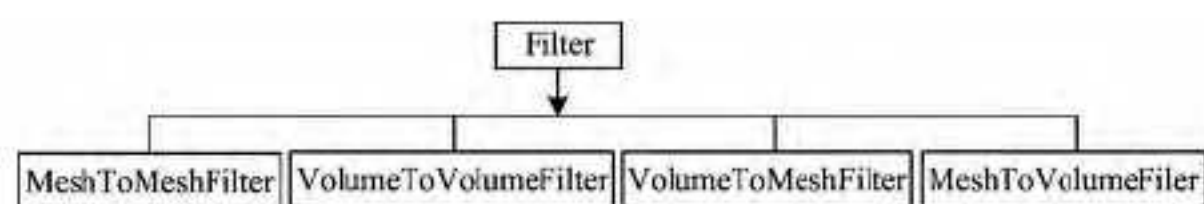


图 3 MITK 的算法模型

从图中可以看出,Filter 被具体化为 4 种不同的种类,VolumeToVolumeFilter 指的是输入数据和输出数据都为 Volume 数据对象的算法,其可以更细分出图像处理算法、图像配准算法、一部分图像分割算法等;VolumeToMeshFilter 指的是输入数据为 Volume 数据对象,而输出数据为 Mesh 数据对象的算法,包括三维可视化中的面重建算法、一部分图像

分割算法;MeshToMeshFilter 指的是输入数据为 Mesh 数据对象,而输出数据为 Mesh 数据对象的算法,包括三维可视化中的面片网格化简、平滑、细分等数字几何处理算法;MeshToVolumeFilter 指的是输入数据为 Mesh 数据对象,而输出数据为 Volume 数据对象的算法,包括三维可视化中的基于距离场的算法、隐似曲面算法等。

3 表面绘制

基于表面的重建^[2]就是采用对物体表面进行拟合而忽略物体内部信息的重建方法。面绘制技术的特点是要提取出所要查看的结构表面轮廓,用算法把某种几何面片施加到每一轮廓点,再除去隐藏面并进行明暗处理即可得到绘制的表面。由于表面绘制法所处理的数据通常仅是整个体数据(Volumetric Data)的一小部分,并且利用了计算机图形学多边形绘制技术,还借助图形硬件加速的支持,因此表面绘制法具有速度快的优点,而且可以快速灵活地进行旋转和变换光照效果,适用于绘制表面特征分明的组织和器官。面绘制舍弃了物体内部信息,只能提供表面信息,绘制表面存在着人为的虚假表面。面绘制主要的算法有:轮廓重建表面法、Cuberville 方法、移动立方体(Marching Cubes)法、剖分立方体法等,本文采用 Marching Cubes 算法^[3]。

3.1 Marching Cubes 算法原理

Marching Cubes 算法是面显示算法中的一种,因为它的本质是从一个三维的数据场中抽取出一个等值面,所以也被称为等值面提取(Equivalence Surface Extraction)算法^[3]。

一个标准的医学图像的体数据集往往是由一系列的二维切片数据组成的,而每张切片都有空间上的分辨率。假设有一个体数据集,包含 58 张切片,每张切片的分辨率是 512×512 ,那么它可以被认为是一个连续函数 $f(x, y, z)$ 在 x, y, z 3 个方向上按一定的间隔分别采样了 512、512、58 次所得到的。而所谓的等值面,实际上是指空间中的一张曲面,在该曲面上 $f(x, y, z)$ 函数的值等于某一给定值。等值面提取算法的核心就是要从给定的采样点中找出等值面来,这时最容易想到的方法就是首先由采样点恢复出连续函数 $f(x, y, z)$,然后由 $f(x, y, z)$ 和某一给定的值(即阈值)来得出等值面。这种方法一般被称为显式的等值面提取算法,其计算复杂度比较高,并且由于重构和重采样所带来的误差比较大,所以精度也得不到保证。

与此相反,Marching Cubes 算法^[4]采用了隐式的等值面提取方法,它不直接计算 $f(x, y, z)$,而是直接从体数据中获取等值面的信息。算法需要用户提供一个阈值,也就是所希望提取出来的物质的密度值,比如要提取出骨骼,阈值就要相对大一些,然后根据体数据的信息就可以提取出等值面的三角网格表达。Marching Cubes 算法的过程可以描述如下:

- (1) 每次读出两张切片,形成一层(Layer);
- (2) 两张切片上下相对应的 4 个点构成一个立方体(Cube),也叫 Cell、Voxel 等,如图 4 所示;
- (3) 以从左至右、从前到后的顺序处理一层中的立方体(抽取每个立方体中的等值面),然后以从下到上的顺序处理到 $n-1$ 层,则算法结束。

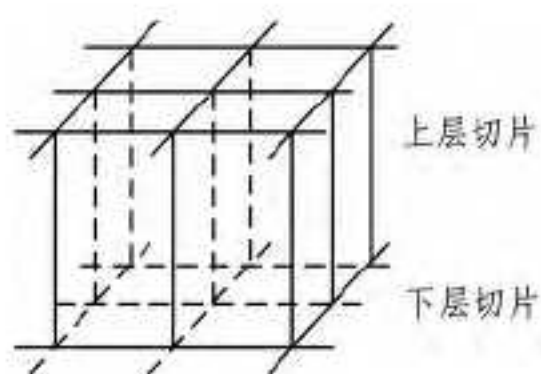


图4 Cube示意图

对于每一个立方体而言,它的8个顶点的灰度值可以直接从输入数据中得到,要抽取的等值面的阈值也已经知道。如果一个顶点的灰度值大于阈值,则将它标记为黑色(Marked),而小于阈值的顶点不标记(Unmarked),如图5所示。

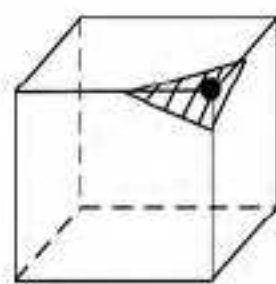


图5 标记与未标记

很显然,在Marked和Unmarked之间必然存在等值点,此时需要考虑等值点的位置计算及如何连接以形成等值面。因为一个立方体有8个顶点,每个顶点有Marked、Unmarked两种状态,所以等值面的分布总共可能有 $2^8=256$ 种。但是考虑到立方体有旋转(Rotation)不变性,即旋转不影响等值面的拓扑结构,以及立方体有对称(Inversion)不变性,即所有的Marked变为Unmarked、Unmarked变为Marked,等值面的连接方式不会改变,如图6所示。

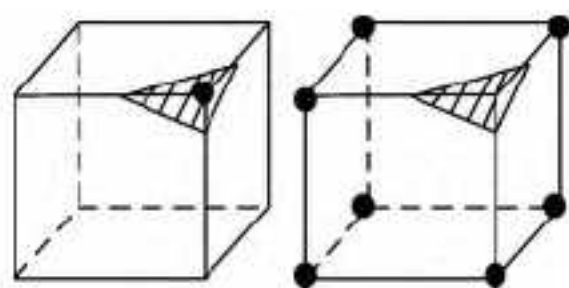


图6 对称示意图

因此此时只需分别比较一个立方体的8个顶点与阈值之间的大小关系,即可得出一个0~255之间的索引值,然后直接查表就可得到此立方体在哪条边上有等值点,并且还能得到等值点的连接方式等信息,这时即可将等值点连接起来以形成等值面。要想用真实感图形学技术将等值面显示出来,除了要知道每个等值点的坐标外,还必须知道每个等值点的法向量。在计算立方体某条边上的等值点坐标与法向量时有两种方法:1)线性插值;2)中点选择。

3.2 Marching Cubes 算法实现

MITK中的mitkMarchingCubes类实现的表面重建算法基于传统的Marching Cubes算法,它可以接受高、低两个阈值,把灰度在这两个阈值之间的组织分界面提取出来,从而达到物体表面重建的目的。

该算法使用了两个查找表g-EdgeTable^[6]和g-TriTable^[5,6],与这两个查找表对应的Cube顶点和边的位置关系如图7所示。

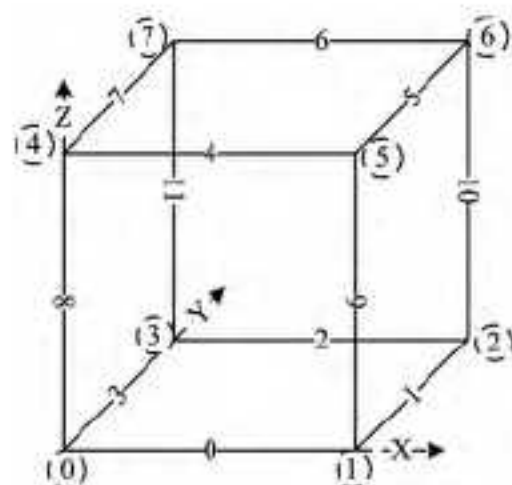


图7 与查找表对应的Cube各顶点和边的位置关系及索引编号

按照图7可以很容易地生成查找表。

首先,每个顶点以一位二进制位表示,将0~7 8个顶点从低到高排成一个8bits的整数,若第 i 个顶点灰度在低阈值和高阈值之间,则第 i 位置1,否则置0,这样就形成了一个索引值,范围为0~255。

然后,根据这256种不同情况写出上面两表中的对应项。对于g-EdgeTable来说,其每一项是一个12bits的整数,0~11bit分别代表图7中第0~11条边,根据索引值所对应的顶点灰度情况判断,若第 i 条边与等值面存在交点(一个端点灰度值在高、低阈值之间,另一端点灰度值在高、低阈值之外),则第 i 位置1,否则置0。对于g-TriTable,其每一项是一个由16个8bits整数组成的数组,记录了与索引值对应的三角面片分割情况,则第0、2、8和11条边与等值面有交点,g-EdgeTable^[7]的值就是1001000001012=90516,而g-TriTable^[9]则以顶点所在的边的编号记录了这4个交点所构成的两个三角片:0-11-2和8-11-0,如图8所示,生成的三角片正向必须保持一致。该算法在计算等值点坐标和法向量时使用线性插值的方法。

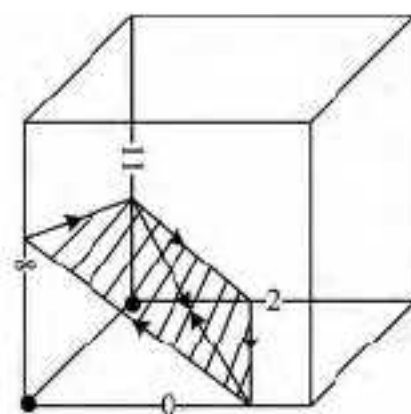


图8 索引值为9时对应的表项示意

3.3 表面重建流程

本系统采用了Marching Cube算法抽取等值面,首先将感兴趣的图像区域进行分割,以减少计算量。然后将其作为输入图像进行后续处理,其算法流程如图9所示。

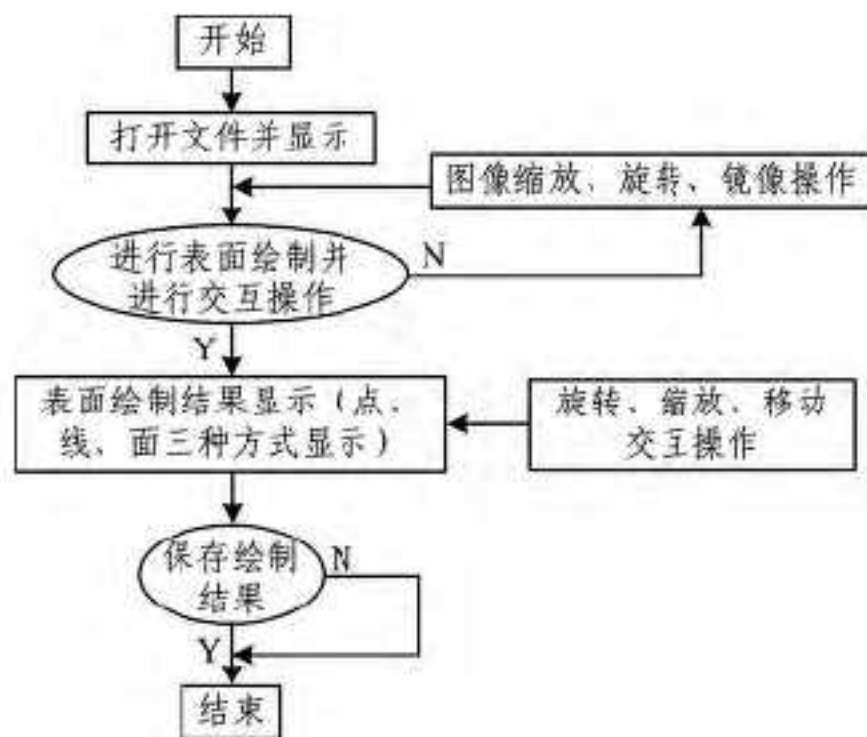


图9 表面重建流程

3.4 算法实现

首先介绍本系统实现表面绘制功能要用到的类^[8,9]。

mitkMesh: 首先,mitkMesh是一个Data,也就是说它代表一个三维的几何数据对象,具体说就是三维重建以后物体表面的表达。它是整个MITK中重要的数据对象。要使用它必须先包含mitkMesh.h头文件。

mitkSurfaceModel: mitkSurfaceModel是一个Data Model,表示Data对象在三维场景中的显示模型。mitkSurfaceModel即是对应于mitkMesh对象的显示模型。

mitkMarchingCubes: mitkMarchingCubes是一个Filter,它代表一个算法对象。它封装了三维重建算法,是本文使用

的算法。要使用它必须先包含 `mitkMarchingCubes.h` 头文件。

下面对读入的 `Volume` 数据进行表面重建,重建的结果通过 `SurfaceModel` 显示,工作步骤如下:

(1)在 `CMITKTestDoc` 类添加 `mitkMesh*` 类型的成员变量,`mitkMesh` 代表了一个三维的几何数据对象,是用三角片来表示的物体表面模型,表面重建输出的就是该类型的数据。在使用 `mitkMesh` 的文件中要包含 `mitkMesh.h` 头文件。

(2)在工具栏添加按钮,对读入的 `Volume` 数据进行表面重建以及重建后表面模型的 3 种显示方式(点、线、面显示)。在 `CMITKTestDoc` 类中添加代码实现功能。使用标准的 `Marching Cubes` 算法进行表面重建,该算法封装在 `mitkMarchingCubes` 类中,它是一个 `Filter`,代表算法对象。接收一个 `mitkVolume` 输入,处理后,输出一个 `mitkMesh` 对象。因此在该文件中要包含 `mitkMarchingCubes.h` 头文件。

(3)在工具栏添加按钮,用来显示重建后的表面模型的表面信息,也在 `CMITKTestDoc` 类中添加代码实现功能。

(4)添加一个对话框,接收用户输入的阈值作为重建算法的输入参数。

(5)给 `CMITKTestView` 类添加一个 `mitkSurfaceModel*` 类型的成员变量。`mitkSurfaceModel` 属于 `Data Model`,表示数据对象在三维场景中的显示模型,`mitkSurfaceModel` 即对应于 `mitkMesh` 对象的显示模型,通过三维重建得到的 `mitkMesh` 对象将由 `mitkSurfaceModel` 来负责绘制。

(6)添加一个显示重建进度的对话框,并添加代码实现。

(7)在 `MITKTestView.cpp` 添加“`#include "mitkSurfaceModel.h"`”,修改 `OnCreate()` 函数,添加 `mitkSurfaceModel` 的初始化代码。

(8)修改 `OnDraw()` 函数,保证在绘制之前 `mitkMesh` 数据的有效性。

4 测试结果

图 10 为一个医学图像序列文件的 3 个方向上的断面图像,每个方向有 16 张切片。

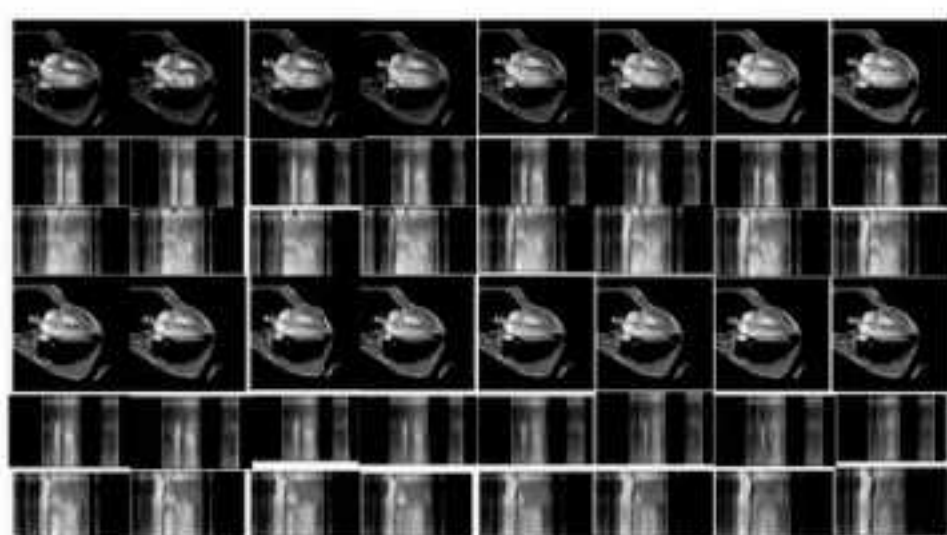


图 10 每一断面都有 16 张三维切片

表面绘制后的模型,按住鼠标左键可以进行拖动,按住鼠标右键可以进行缩放。在工具栏上对应不同的按钮有 3 种显示方式:点显示、线框显示、面显示,如图 11 所示。图 12 是改

变阈值以及表面显示特性,进行表面绘制后相应的 3 种显示方式。



图 11 表面模型的 3 种显示方式



图 12 改变参数后的表面模型的 3 种显示方式

结束语 本文对 MITK 算法平台作了细致的研究,同时对三维重建算法 `Marching Cubes` 的模型和原理进行了研究,之后将二者相结合,利用现有的 MITK 算法平台对应的类和数据模型,实现了医学图像序列的三维重建功能。在该重建系统中可以实时地显示出重建组织的三维几何表面,并可以实现点显示、面显示和线框显示 3 种显示方式,以及进行旋转、缩放、平移等交互操作。本文的工作是对 MITK 算法平台实用性的一个成功尝试,并可以在未来进一步拓展其功能并进行不同算法的探索研究。

参考文献

- [1] 翟争峰,蒲立新,等.基于 GPU 的医学图像三维重建体绘制技术综述[J].中国数字医学,2015(4):11-13
- [2] 吴焕焕,汪友生,等.基于 MITK 的血管三维重建[J].微型机与应用,2013(4):39-41
- [3] Masala G L, Golosio GL, Oliva P. An improved Marching Cube algorithm for 3D data segmentation[J]. Computer Physics Communications, 2013, 184(3): 777-782
- [4] Gregory M, Nielson. On marching cubes[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2003, 9(3): 283-297
- [5] Marz K, Franz A M. MITK-US: real-time ultrasound support within MITK[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2014, 9(3): 411-420
- [6] 沈海戈,柯有安.医学体数据三维可视化方法的分类与评价[J].中国图像图形学报,2000,5(7):545-550
- [7] 朱恒军.医学图像三维可视化技术[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007
- [8] 何江平,瞿中.计算机断层扫描图像的剖切研究[J].计算机科学,2006(1):267-277
- [9] 孙一鸣. PACS 系统中三维图像重构及可视化技术[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007

(上接第 190 页)

- [7] 马艳红,胡军.姿态四元数相关问题[J].空间控制技术与应用,2008,3(3):55-60
- [8] 刘博.基于 MEMS 传感器的动作捕捉系统开发设计[D].北京:北京理工大学,2011
- [9] 高文斌,王洪光,姜勇.一种基于指数积的串联机器人标定方法

[J]. 机器人,2013,35(2):156-161

- [10] Chen I M, Yang G, Tan C T, et al. Local POE model for robot kinematic calibration[J]. Mechanism & Machine Theory, 2001, 36(11): 1215-1239
- [11] He R, Zhao Y, Yang S, et al. Kinematic-Parameter Identification for Serial-Robot Calibration Based on POE Formula[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2010, 26(3): 411-423