

三维数据场 重构与显示

工程软件设计

Engineering Software Design of
Reconstruction & Display of 3-D Data Field

蒋先刚 著



提供完整源代码、资源及素材



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要介绍三维数据场重构与显示的基础理论和程序实现技术,从工程应用的角度介绍三维数据场重构与显示应用软件设计的基本方法和实用技术。全书分为5章,第1章简要介绍三维数据场重构与显示的应用发展、研究内容和基本方法,第2章介绍三维数据场的数据类型与转换技术,第3章介绍基于等值面的三维数据场重构与显示的基本理论和程序设计方法,第4章介绍基于直接体绘制的三维数据场重构与显示基本理论和程序设计方法,第5章介绍基于二维轮廓线的三维物体重构和显示的理论及程序设计方法,每章都包含多个基于不同技术的三维数据场重构与显示的工程应用例程,各章之间的理论分析和程序模块具有一定的相关性和独立性。

本书系统地介绍了基于 Delphi 的三维数据场重构与显示的程序设计技术,比较全面地介绍了三维数据场重构与显示的各种方法的程序实现技术,以讲解实例设计的方式介绍三维数据场重构与显示的程序设计技巧。注重理论、突出实用。

本书可作为大学生、研究生和工程软件人员在三维数据场重构与显示的算法及相关应用课程的参考教材,书中的例子全部通过 Delphi 7 验证实现,书中程例主要涉及三维医学图像重构与显示、无损三维测量与显示、快速逆向加工等工程软件设计技术。随书所附光盘提供书中所介绍的所有三维数据场重构与显示的软件包的完整源程序及编程和运行所需资源、素材和控件。

图书在版编目(CIP)数据

三维数据场重构与显示工程软件设计 / 蒋先刚著

— 北京: 中国水利水电出版社, 2009. 10

ISBN 978-7-5084-6869-3

I. ①三… II. ①蒋… III. ①软件工具—程序设计
IV. ①TP311.56

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第181445号

策划编辑: 杨庆川 责任编辑: 杨元泓 加工编辑: 陈洁 封面设计: 李佳

书 名	三维数据场重构与显示工程软件设计
作 者	蒋先刚 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)、82562819 (万水)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京蓝空印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 20.25印张 502千字
版 次	2009年10月第1版 2009年10月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	39.80元(赠1CD)

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

基于计算机的三维数据场重构与显示工程软件在工业、农业、国防、科学研究和医学等各个方面得到了更加全面的应用,定制设计三维数据场重构与显示软件包就必须对三维数据场重构与显示技术的算法和软件设计方法有一个全面而深入的掌握。

Windows 软件平台具有极大的使用广泛性,由于计算机软硬件技术的发展,在 Windows 操作系统下进行复杂的三维数据场计算和显示已经成为可能。而 Delphi 作为面向对象的快速开发的工具,以其高速的开发效率深得程序开发员的热爱,在 Delphi 开发环境下,软件人员的主要精力放在想达到的目的规划上,而不是具体的烦琐细节上。Delphi 具有良好的封装性,各种实用控件十分丰富,它在数字计算、图像处理和数据库开发等方面都具有无可比拟的优越性。用 Delphi 开发的三维数据可视化软件具有运行效率高、安全可靠、开发快捷和模块可重用性强等诸多优点,国内外基于 Delphi 开发的三维数据场显示的软件也提供了许多成功的范例。

本书主要介绍三维数据场重构与显示的基础理论和程序实现技术,从工程应用的角度介绍三维数据场重构与显示应用软件设计的基本方法和实用技术。全书分为 5 章,每章都以一个或多个具体的基于不同技术的三维数据场重构和显示软件包开发的实例来叙述其相关的理论和编程技术。

第 1 章简要介绍三维数据场重构与显示的应用发展、研究内容和基本技术方法,对三维数据可视化在工业、农业、军事、科学计算、医学和气象等方面的应用进行了介绍,并概要介绍三维数据场重构的基于面绘制、基于直接体绘制、基于硬件环境和由二维轮廓线重构三维外表面等技术。

第 2 章介绍三维数据场的数据类型与转换技术,该章主要介绍了三维数据记录和表达的格式,重点介绍了 DICOM 文件格式,还介绍了医学图像的文件格式转换和表达三维数据场的不同数据格式转换的软件设计技术,并介绍了自定义三维面模型格式与 AutoCAD 三维文件格式的转换的程序设计技术。

第 3 章介绍基于等值面的三维数据场重构与显示的基本理论和程序设计方法,该章详细介绍了 Marching Cubes 方法的基本原理和实现技术,比较详细地介绍了 OpenGL 的基本技术与方法,针对图像的二维预处理和三维预处理对三维图像的重构效果的影响进行了分析对比,重点讲述了基于等值面的三维重构的各程序模块的设计技术。

第 4 章介绍基于直接体绘制的三维数据场重构与显示基本理论和程序设计方法,该章重点介绍了光线投射法、抛雪球法和错切—变形法等直接体绘制方法和软件设计技术,并介绍了基于三维纹理的直接体绘制技术。

第 5 章介绍基于二维轮廓线的三维物体重构和显示的理论和程序设计方法,并介绍基于 Delaunay 剖分的外表面重构技术,主要介绍了在不同高度的二维轮廓线间外表面产生和显示的技术方法。

本书的各章之间的理论分析和程序模块具有一定的相关性和独立性。从应用角度讲,三

维数据场重构与显示中的基于等值面的面绘制技术、基于直接体绘制、基于硬件环境和由二维轮廓线重构三维外表面等各种技术的目的都是希望用快捷合理的方法形象地表达三维数据的拓扑和逻辑关系,这些方法可以独立或综合应用而达到工程软件需达到的应用效果,各种方法的配合和协调才能到达最佳的显示效果。本书在章节安排上考虑了一般教课书的层次性、连贯性、系统性,同时也考虑了每个软件包开发的各種技术的组合性和全面性。各章节中的许多技术是交叉引用的,书中各章既可以独立阅读和实验,也可相互贯通地理解和实践。

全书将三维数据场重构和显示技术与 Delphi 编程技巧结合起来讲述,着重于实践性、实用性和源码表现。本书以讲解实例设计的方式介绍三维数据场重构与显示的理论和相关的程序设计技巧,注重理论、突出实用,提倡在程序的字里行间的理解的基础上去理解三维数据场重构与显示的理论 and 概念。人的眼睛和大脑对三维物体的真切性感知是最后的判别标准,而三维物体实际的显示效果就是对算法、源码先进性理论理解的最后标尺。程序的实现是理论学习的目的,更是理论正误验证的唯一准则,只有在程序实现和调试的基础上,才能验证新旧算法、技术和方法的效率并产生新的具生产力的源码。

本书可作为大学生、研究生和工程软件人员在三维数据场重构与显示的算法实现技术的掌握及相关应用课程的参考教材,书中的例子全部通过 Delphi 7 验证实现,书中程例主要涉及三维医学图像显示与手术模拟、无损三维测量、快速逆向加工、科学数据可视化等工程应用。随书所附光盘提供书中所介绍的所有三维数据场重构与显示方面的软件包的完整源程序及编程和运行所需资源、素材和控件。这些软件包及其中的源程序段可不加修改和稍加修改而直接应用于非商业开发的三维数据场重构与显示软件技术研究和相关工程软件包的研究和设计中。

由于作者的水平有限和研究总结的时间限制,加之三维数据场可视化技术仍在不断发展过程中,书中介绍的三维数据场可视化的相关技术、软件包及源程序还有许多功能需要进一步完善和改进,如有错误和可商讨的地方,敬请读者提出宝贵意见和建议。作者通信地址:江西南昌华东交通大学。E-mail: jxg_2@tom.com。

作 者

2009 年 7 月

目 录

前言

第1章 绪论	1	3.2.2 医学器官三维重构软件包系统的基本软件系统的构成	55
1.1 三维空间数据场可视化概述	1	3.2.3 基于 Marching Cubes 的等值面产生的程序实现技术	57
1.2 三维数据场重建的发展与应用	2	3.2.4 三维重构算法的程序流程	64
1.3 三维数据可视化系统的开发步骤与技术方法	8	3.2.5 Marching Cubes 算法中三角形片构成的效率比较与分析	65
1.3.1 三维数据可视化系统的开发步骤	8	3.2.6 三维重构软件系统各功能模块的设计	66
1.3.2 三维数据场可视化的主要技术方法	10	3.2.7 三维重构系统各功能模块的协调	81
第2章 三维数据场的数据类型与转换	18	3.3 图像预处理对三维重构效果的作用	82
2.1 三维空间数据场的数据类型与表达	18	3.4 OpenGL 在三维数据场显示中的应用	83
2.1.1 三维数据场的数据类型	18	3.4.1 OpenGL 基本技术简介	83
2.1.2 三维空间数据场的通常表达方式	19	3.4.2 图形变换基础	86
2.2 医学图像格式格式介绍	21	3.5 OpenGL 的程序应用技术	90
2.2.1 医学图像格式 DICOM 基本介绍	21	3.5.1 OpenGL 应用功能	91
2.2.2 DICOM 标准中涉及的基本概念和定义	22	3.5.2 Delphi 下的 OpenGL 绘制过程	92
2.2.3 DICOM 标准的组成	23	3.5.3 Delphi 下的 OpenGL 编程	93
2.2.4 DICOM 在医学图像信息系统中的应用	24	3.6 基于面表达的复杂三维重构软件包的设计	108
2.2.5 DICOM 图像文件结构	24	3.6.1 基于面表达的复杂三维重构软件包的功能要求	108
2.3 三维空间数据场的数据转换	27	3.6.2 基于面表达的复杂三维重构软件包的功能实现技术	109
2.3.1 各种三维数据转换接口技术及应用	27	第4章 基于直接体绘制的三维空间数据场的显示	188
2.3.2 三维数据模型转换功能模块的设计	27	4.1 直接体绘制技术简介	188
2.3.3 医学图像格式转换	42	4.2 体绘制中的光学模型	190
第3章 基于等值面的三维空间数据场重构与显示	47	4.2.1 光吸收模型	190
3.1 基于等值面的三维空间数据场重构技术	47	4.2.2 光线发射模型	190
3.1.1 Marching Cubes 算法的基本概念	47	4.2.3 光线吸收与发射模型	190
3.1.2 Marching Cubes 算法介绍	48	4.3 体绘制方程	191
3.1.3 Marching Cubes 算法的程序实现	51	4.3.1 体绘制方程一般公式	191
3.1.4 其他基于面的三维重构算法介绍	53	4.3.2 体绘制近似合成公式	192
3.2 基于面表达的基本三维重构基本软件包设计	54		
3.2.1 医学器官三维重构软件包系统的基本技术要求	54		

4.4 图像空间扫描的体绘制技术	193	5.1 由二维轮廓线重构三维形体的基本 原理	262
4.4.1 光线投射算法的基本原理	193	5.2 单轮廓线之间的三维形体重构的 基本方法	264
4.4.2 光线投射算法的实现技术	195	5.2.1 最短对角线法	264
4.5 物体空间扫描的体绘制技术	201	5.2.2 最大体积法	265
4.5.1 抛雪球法	201	5.2.3 相邻轮廓线同步前进法	265
4.5.2 错切—变形法 (Shear-Warp)	203	5.2.4 基于 Delaunay 剖分的外表面重构	266
4.6 基于直接体绘制的基本三维重构软 件的设计	218	5.3 图像的滤波和边缘轮廓求取与应用	274
4.6.1 基于直接体绘制的基本三维重 构软件包的框架设计	218	5.3.1 图像的滤波处理	274
4.6.2 基于直接体绘制系统的主要功 能模块设计	220	5.3.2 图像的阈值分割	277
4.6.3 传递函数的设计	231	5.3.3 图像的边缘检测	282
4.7 由三维纹理映射硬件支持的直接体 绘制	238	5.3.4 图像的边界提取	287
4.7.1 三维纹理映射及其硬件实现的 基本原理	238	5.3.5 提取轮廓线上的网格点	290
4.7.2 基于三维纹理映射硬件支持三 维显示软件的设计	239	5.3.6 由二维轮廓线的点构成三维曲面	296
4.8 基于 GPU 的三维绘制技术	258	5.3.7 显示二维轮廓线组成的三维曲面 的技术	305
4.9 各种体绘制算法的实验与比较	260	5.3.8 基于轮廓线的三维表面重构实验 与结果分析	307
第 5 章 基于二维轮廓线的三维重构与显示	262	5.4 由二维轮廓线重构三维形体显示软件 的设计	307
		参考文献	312

第 1 章 绪论

1.1 三维空间数据场可视化概述

三维数据场可视化是指运用计算机图形学和图像处理技术,将实验测量和科学计算过程中得到的数据及计算结果转换为图形、图像在屏幕、硬拷贝设备上显示出来,并进行交互处理的理论、方法和技术。三维数据场可视化的应用包括科学计算数据的可视化和实验测试数据的可视化等各方面。

三维数据场可视化将图形生成技术、图像处理技术和人机交互技术结合在一起,其主要功能是从复杂的多维数据中产生图形,它形象化地分析和理解存入在计算机中的图像数据。它涉及到计算机图形学、图像处理、计算机辅助设计、计算机视觉及人机交互技术等多个领域。

计算机的广泛使用使得人类社会进入了信息时代,它给人类社会提供了全新的科学计算和数据获取手段。由于长期以来受计算机软硬件技术水平的制约,科学计算和实验测量的数据不能以图形方式显示,只能以字符和统计报表的方式呈现,同时缺乏形象的交互处理手段,并且大量的输出数据只能通过人工方式处理。具有空间关联的数据需要以合适的方式获取和显示出来,因而包含空间层次关系的科学计算和实验测量的数据的后处理已经成为提高数据处理质量和效率的主要问题之一。随着近年来计算机软硬件性能的不断提高和计算机图形学的蓬勃发展,使得运用计算机技术形象直观地显示三维数据场和对其进一步交互处理成为可能。

三维数据场可视化的目标就是把由科学计算或实验测试获得的大量数据转换成人的视觉可以直接感观的计算机三维图像。一幅图像能把大量的抽象数据有机地结合在一起,展示其数据所表现的内容及其相互关系,使人们摆脱直接面对大量抽象数字组合成的复杂情形,以把握数据的全局分布和三维数据间的关联和层次关系。

对客观物体在计算机中进行真实的三维重建,一直以来都是计算机图像学以及计算机图形学所研究的热门领域之一,逼真而准确地再现真实的三维形体是一个重要的计算机技术研究领域。三维数据场可视化将图形生成技术、图像处理技术和人机交互技术结合在一起,其主要功能是从复杂的多维数据中产生三维图形。

三维数据场可视化的含义包括科学计算数据的可视化和工程计算数据的可视化等许多方面,同时也包括各种测量数据的可视化,如用于医疗领域的计算机断层扫描(CT)数据及核磁共振(MRI)数据的可视化是应用较为广泛的领域。三维数据可视化所涉及的主要技术问题有:标量、矢量和张量场的显示;数据场和流场的动态显示;多参数数据场的显示;三维图形的程序设计环境;并行图像处理技术;三维数据场结构的定义和模型转换技术;图像预处理对三维重构效率的影响;与硬件相关的图形生成和显示的技术;虚拟现实技术在三维数据可视化中的应用等。所有这些技术的应用目的和作用的着重点是研究真实、快速地显示三维数据场。

1.2 三维数据场重建的发展与应用

三维数据场的重建和显示在工程界中得到了广泛的应用,如基于断层图像序列的三维重建不仅在医学领域具有重要价值,在工业无损探伤、快速逆向成型加工及其他更广泛的领域也有着极其重要的实用价值和研究意义。随着第一台医用 CT 机的问世及应用,人们可以得到人体及其内部器官等的二维数字断层图像序列。这些医学成像的临床应用,使得医学诊断和治疗技术取得了很大的发展。围绕如何将二维断层图像序列转变成为具有直观立体效果的三维空间图像,发展起来了一系列基于二维图像序列的以可视化最终目的的三维重建理论,并且得到大量研究与广泛应用。同时数字图像的二维和三维预处理为断层图像数据的三维重建提供了更加合理的分割和显示效果,所涉及到的数字图像预处理技术有图像增强、特征提取以及图像分割等,数字图像的二维、三维预处理技术对三维数据场的重构效果具有很大的影响效果。不同形式的科学计算和工程测量得到的数据都可以转换为二维图像序列表达的或三维重构方法可接受的三维数据集。三维重构与显示被广泛应用在医学、虚拟现实、计算机动画、显微摄影学、三维测量、物理学、化学、地质学、工业检测、计算流体力学、有限元分析等方面。其应用范围涉及自然科学及工程技术的许多领域,下面简要列举三维数据场可视化的在各方面的应用和发展。

(1) 医学科学。

传统的影像技术还只是获得人体某一断层的影像数据,然后医生通过胶片进行诊断或者通过显示屏幕进行观察。但是,无论使用胶片还是屏幕显示方式,医务人员所观察到的仍然是二维图像,并且只能以固定静态方式对图像进行观察,所得到的诊断结果带有医生的主观经验,这在很大程度上取决于医生的临床经验。计算机技术的应用可以改变这种状况,通过图形图像技术,可以对影像图像进行任意放大、缩小、旋转、对比调整和三维重建与显示等处理。近几年,人体组织与器官的三维成像技术在现代临床医学中起着越来越重要的作用,利用 CT 扫描成像和 MRI 成像等设备得到人体断层的二维成像序列,通过观察人体的这些切片图像来进行病灶诊断和分析。由于人体器官构造的复杂性和形状变异的多样性以及病灶位置的不可知性,没有相当的专业知识和实践经验,很难读懂这种二维图像,并且很难从这些二维切片中构想出组织器官的立体形态和相互关系。所以,仅仅从二维图像的分析已难以满足医疗诊断的更高的要求。因此,利用计算机进行医学图像的三维重建和显示具有重要意义。所谓医学图像的三维重构技术就是指利用一系列的二维切片图像重建三维图像模型并进行定性、定量分析的技术。该技术可以从二维图像中获取三维结构信息,而且为医生提供更逼真的显示手段和定量分析工具。三维医学图像可视化技术作为有力的辅助手段能够弥补影像设备在成像维数和质量上的不足,能够为用户提供具有真实感的三维医学图像,便于医生从多角度、多层次进行观察和分析,在辅助医生诊断、手术仿真、引导治疗等方面都发挥了重要的作用,因此面向医学领域的三维可视化技术的研究得到了广泛关注,逐渐形成了三维可视化应用中最为广泛的一门学科。

在医学影像中有核磁共振 MRI、CT 扫描和 B 超等设备产生的人体器官密度场的图像记录,不同组织的不同密度值表现在不同的点像素的灰度上。通过各种数据分割和传递函数的合理利用来表现病变区域或者重建出具有不同细节层次的三维真实图像,使医生对病灶部位的大小、位置不仅有定性的认识,而且有定量的认识,尤其是对大脑、血管组织等复杂区域,医学数据

场可视化所带来的效果尤其明显。借助虚拟现实的手段,医生可以对病变的部位进行确诊,制定出有效的手术方案,并在手术之前模拟手术过程和手术中引导手术过程,通过精确定位技术的应用,使伽玛刀放射治疗成为有效的治疗方法。

尽管计算机断层扫描及核磁共振图像已广泛应用于对疾病的诊断,但是,这些医疗仪器一般只能提供人体内部的二维图像。医生们只能凭经验由多幅二维图像去估计病灶的大小及形状,想象出病灶与其周围组织的三维几何关系,这给治疗带来了困难。通过三维医学图像重构软件可以构建出各器官的三维形状而供医生进行病例分析,图 1-1 是依头部二维切片图像构造头颅的三维形状例子,实验切片数据在图像数据目录“程序\Slices\Slice7”中,应用三维重构软件“Visual3D_V2”构成三维曲面,构成三维曲面的头骨灰度等值面取值为 180-255。

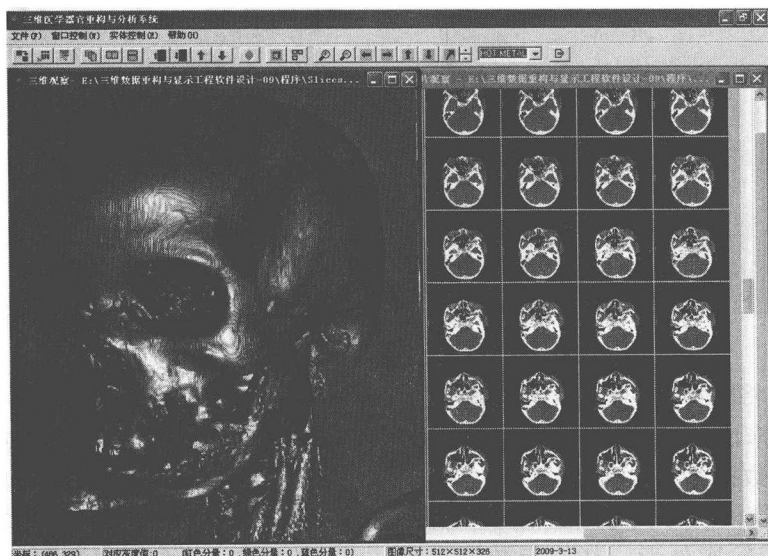


图 1-1 由头部二维切片图像构造头颅的三维形状

医学图像三维软件可以由一系列二维图像而重构出三维形体,并在计算机上显示出来。在此基础上就可以实现矫形手术、放射治疗等的计算机模拟及手术规划。例如,髌关节发育不正常在儿童中经常遇到,在做矫形手术时,需要对髌关节进行切割、移位、固定等操作。通过得到的病孩髌关节部分的二维切片图像可以首先在计算机上构造出髌关节的三维图像,然后对切割部位、切割形状、移位多少及固定方式等的多种方案在计算机上进行模拟,并从各个不同角度观察其效果,最后由医生选择出最佳实施方案以提高矫形手术的质量。又如在做脑部肿瘤放射治疗时,需要在颅骨上穿孔,然后将放射性同位素准确地安放在脑中病灶附近,要求同位素射线最少伤及正常组织的情况下而尽量靠近病灶组织,可利用三维可视化技术重构出病灶组织附近的人脑内部结构,对颅骨穿孔位置、同位素置入通道、安放位置及等剂量线等进行计算机模拟以提高手术的效率和精确性。

(2) 工业无损探伤与逆向加工工程。

在工业无损探伤中,可以用工业 CT、超声波在不破坏部件的情况下,不仅可以清楚地认识其内部结构,而且对发生细小裂口和缺陷的区域进行准确探测。能够及时检查出有可能发生断裂等具有较大破坏性的隐患。图 1-2 是用不打开包装情况下扫描得到的切片组构成三维图像

而得到箱子里各物品的分布,从而得到箱子里物体是否为安全物品的结论,实验切片数据在图像数据目录“程序\Slices\Slice4”中,应用三维重构软件“Visual3D_V2”构成三维曲面,构成三维曲面的灰度等值面取值为 120~255。



图 1-2 无损测量探测不开箱容器的内部物体构造

逆向工程是将实物转变为 CAD 模型相关的数字化技术、几何模型重建技术和产品制造技术的总称。具体来说,逆向工程也称反求工程,是指用一定的测量手段对实物或模型进行三维测量,根据测量数据通过三维几何建模方法,重构实物的 CAD 模型,从而实现产品设计与制造的过程。与传统的设计制造方法不同,逆向工程是利用三维扫描设备,准确快速地测量工件样品表面数据或轮廓外形,加以点数据处理、曲面创建、三维实体模型重构,然后通过 CAD/CAM 系统进行数控编程,最终用 CNC 加工设备或快速成型机(如三维打印机)制造出与测试实物一致或者修改过的实物产品。

广义逆向工程包括几何逆向、工艺逆向、材料逆向,管理逆向等诸多方面的系统工程,这些技术中主要涉及的还是几何逆向工程。而通常的正向工程是指包括产品设计→制造→检验的加工过程。逆向工程的主要过程包括通过测量扫描系统获得产品的数字化点云,通过曲面/实体反求软件对测量数据进行处理,实现曲面或者实体重构,然后通过 CAD/CAE/CAM 软件产生数控指令由数控机床进行产品加工。逆向工程中 CAD 模型重建是通过对测量数据的处理,提取模型所需的表征零件形状特征的数据,依据测量数据生成物体的几何模型是最关键的步骤。对于测量的物体的三维云点,通过有限的三角形去逼近这些点而组成面模型,对于工业 CT 扫描得到的切片可以用 Marching Cubes 技术构造出等值面,并将这个等值面模型送到诸如 AutoCAD 等 CAD/CAM 软件中,并由 CAD/CAM 软件产生其他的几何模型和加工指令。

通过测量的三维云点数据求出 CAD 模型是一种有效的方法,而用工业 CT 直接得到三维物体的二维切片,并由二维切片图像求出三维模型的技术得到更加广泛的应用。工业 CT 在无损状态下能获得被检断面的二维灰度图像,从图像上可以直观地看到目标细节的位置、形状、大小。随着工业 CT 的测量精度和速度的提高,基于断层数据的模型三维重建成为国内外的研

究热点,并成为工业界逆向工程的一个新的研究方向。图 1-3 显示由一个零件的断面图和由这些断面图产生的三维模型并将这个三维面模型送到 AutoCAD 中的过程,切片数据为切片在图像数据目录“程序\Slices\Slice3”中,应用三维重构软件“Visual3D_V2”构成三维曲面,构成三维曲面的灰度等值面取值为 90~255。在三维重构软件中产生的模型是通过模型文件交换模块而送入到 AutoCAD 中。

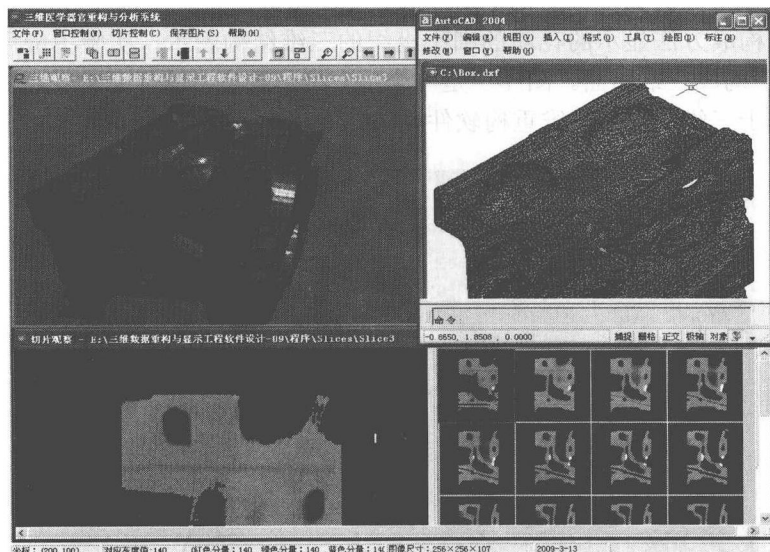


图 1-3 逆向工程的三维模型转换的一个例子

(3) 地质勘探。

地质勘探采用模拟人工地震的方法以获得震动地层的信息,通过数据特征的抽取和匹配,可以确定地下的矿藏资源。用可视化方法对模拟地震数据进行三维演示可以形象地表达矿床的三维地形构造。其主要方式是通过地质勘探了解大范围内的地质结构,发现可能的油田地质构造和矿床脉向,并通过测井数据了解局部区域的地层结构,探明和估计油藏位置和矿床分布。由于地质数据及测井数据的数据量极其庞大和数据离散性和不规则性,不易进行文字性描述与总结,而用图形化的三维模型对地质勘探数据或测井数据进行描述和显示其矿床、油田的等值面、等值线而知道矿藏、油田的分布位置及储量大小等重要信息。

(4) 气象预报。

对灾害性天气的预报和预防将会大大减少人民生命财产的损失,气象预报的准确性依赖于对大量数据的计算和对计算结果的分析。气象三维数据可视化可将大量的数据转换为三维图像,在屏幕上显示出某一时刻的等压面、等温面、位涡、云层的位置及运动、暴雨区的位置及其强度、风力的大小及方向等,使预报人员能对未来的天气作出准确的分析和预测,并且根据全球的气象监测的历史数据和目前的气象状态而预测一定时期内全球的气温分布、气压分布、雨量分布及风力风向等,显示出气象的三维演化模型,对与气象相关的农业、航海和土木工程实施提出引导和合理安排。

(5) 分子模型和细小组织构造。

在对蛋白质和 DNA 分子等复杂结构进行研究时,可以利用电镜、光镜等辅助设备对其创

片进行分析，利用这些二维切片构成的三维数据模型可以对其原形态进行定性和定量分析，这是研究分子结构的形象化的分析工具。

用交互式图形方式观察复杂的化学物质的细小结构是业界研究分子结构及其相互间关系的工具，三维数据可视化技术是分子模型构造分析的有效工具。通过构造蛋白质和 DNA 等高度复杂的分子结构的三维图像，在遗传工程的药物设计中可以显示出已有药物的分子结构或新药物结构和合成效果。例如实验的花粉切片数据在图像数据目录“程序\Slices\Slice9”中，图 1-4 是一个用面构成方法显示的花粉的细小组织的三维结构表示，实验中应用三维重构软件“Visual3D_V2”构成三维曲面。图 1-5 是一个用直接体绘制方法显示的花粉的细小组织的三维结构，应用基于三维纹理的三维重构软件“Visual3D_V4”构成具透明感的三维模型。

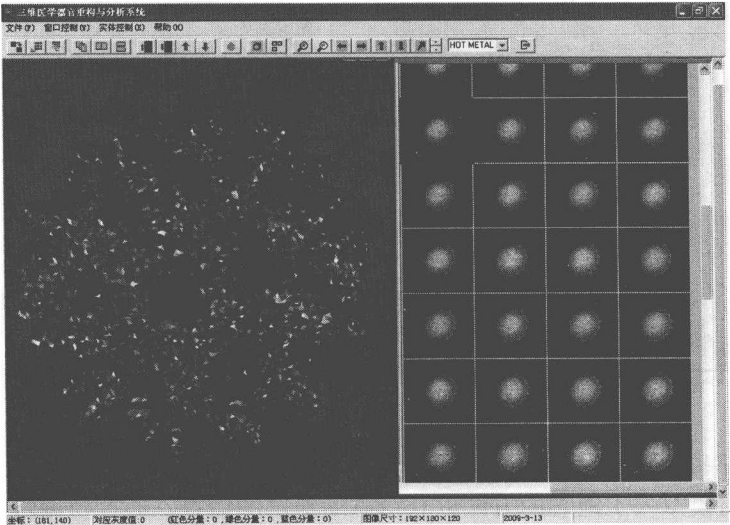


图 1-4 用面体绘制方法显示一个花粉的细小组织的三维结构

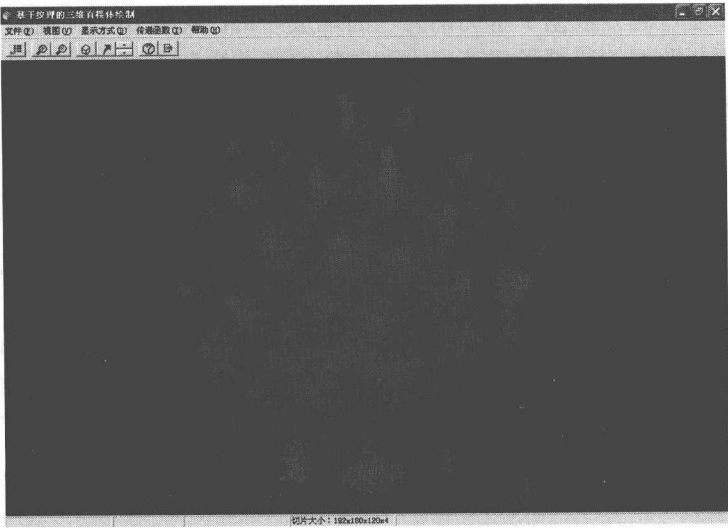


图 1-5 用直接体绘制方法显示的花粉的细小组织的三维结构

(6) 流体力学和有限元分析。

通常情况下,运动器件的外形设计都必须考虑其在流体中高速运动的工作状态,经典的设计过程是将所设计的运动器件的模型放在风洞里做流体动力学的物理模拟实验,然后根据实验结果修正外形等参数,这就需要比较长的设计周期和较高的成本,如通过在计算机上建立运动器件的几何模型和环境条件进行流体动力学的模拟计算并将结果以三维图像的方式表现出来,可以非常直观地展现运动器件模型在流体中的运动情况,这样应用流体动力学模型的三维动态仿真可以大大提高实验效率和减少实验成本,通过动态显示三维数据场的变化情况,其模拟动态图像可表示出空间每一点的流速和流向以表示出涡流、尾流及湍流等,使流体数据场的分布和变化可以实时动态地被显示。

有限元分析是将研究对象划分为若干细小单元并在此基础上求出偏微分方程的近似解的适用于计算机处理的一种数值计算技术,它主要用于结构分析,是计算机辅助设计技术的基础之一。有限元分析在产品设计、制造和力学分析中得到了广泛应用,采用可视化技术可以将对物体的有限元分析的不同阶段的结果用动态图形的方式表现出来。

由以上各方面的应用与发展可知,三维数据的可视化技术为实验测试数据和科学计算提供了更加形象化的研究方法和工具。

国外和国内已有许多三维数据获取的商品化系统,如加拿大的 Allegro 系统,它可以根据用户需要,与不同厂家的 CT 扫描设备或核磁共振仪相连接,美国通用电器公司(GE)出产的螺旋 CT 扫描设备可以沿 x、y、z 三个方向逐帧显示输入的图像,可以用不同方法构造三维形体,可以对三维图像由外向内按层剥离或作任意位置的剖切以观看内部结构,也可以做平移、旋转、放大、缩小操作。

现在市面上的主要使用的医学和工业 CT、MRI 机器主要来自西门子、通用电气、飞利浦公司和部分国产 CT 和 B 超设备公司。

国外和国内有许多有名的三维重构软件具有比较好的性能和参考价值。3D-DOCTOR 是美国 Able Software 公司开发的一个医用三维图形建模系统,在普通 PC 机上可进行三维成像的软件,仅仅使用普通 PC 机,这个软件表现比较突出的功能是器官组织的自动分割和基于面绘制的几个不同面的同时显示的三维表面渲染,同时它提供基于向量的编辑工具,可以方便地完成图像的处理、测量以及定量分析。3D-DOCTOR 还提供了类似于 Basic 的脚本语言,在此基础上用户可以编制自己的自定义宏程序,具有更好的灵活性。Volume Graphics 公司的医疗三维重建研究软件 VGStudioMAX 是根据 CT、MRI 等的体数据来生成体模型的三维重构和显示软件,该软件支持大多数文件的输入/输出格式,使用一般的 PC 即可对大容量(1.5GB)的数据进行双方向处理,利用透明度和明暗度的调节,可以使数据生成各种层次分明的立体图像,VGStudioMAX 是在形象视觉化基础上增加有检测功能和模型的部分输出交换功能,被广泛利用在医疗和工业领域上。它具有特有的三维影片制作能力与任意视角观察能力,可以通过三维模拟内窥镜而进入人体内部进行任意视角的观测。它在优质工作站的支持下可以处理几十 GB 甚至上百 GB、TB 级别数据。VGStudioMAX 提供强大的多物体在一场景的功能,在一个计算场景下,可以导入多个 CT/MRI 体模型或者同时导入 STL 三角形模型。Roger Rowland RMR Systems Limite 研究的 3DView 软件可在普通的 PC 机上进行医学器官组织的三维重建、显示和测量并可实现手术计划 and 设计,其中的传递函数的设计给清晰图像的产生带来方便。Chris Rorden 设计的开源的 MRICroN 是一个用于脑部区域功能分析的三维显示软件,它提供 Pascal

和 Free Pascal 两种版本的源程序,而 MRicroGL 是基于三维纹理映射的三维重构软件。Michael Knapp 开发的 VolVis 三维重构软件也是一个有源程序,是基于 VC+OpenGL 开发的 Windows 版软件。中科院田捷教授研究的 3Dmed 医学图像处理系统具有一定的应用参考价值。中国科技大学的周荷琴、诸葛斌等在应用 Delphi 开发三维重构软件的研究上取得了很好的成果。在医学图像转变方面, XMedCon 是一个医学图像转换工具和库,它基本上可以解决所有医学文件的格式转换, Chris Rorden 教授设计的 EzDicom 软件基本上可解决所有的医学图像转变问题,并且是一个可参考的开源 Pascal 程序。Steve Evans 在应用 Delaunay 方法构建三角片进而由二维轮廓构建三维曲面方面设计了高效的 Pascal 程序。

1.3 三维数据可视化系统的开发步骤与技术方法

1.3.1 三维数据可视化系统的开发步骤

三维数据可视化系统主要包括以下几个步骤:数据的获取;数据预处理;映射和分析;绘制;显示与交互。可视化系统将测试的原始数据和科学计算的结果按用户要求形成图形化的三维直观图像信息。用户还可根据可视化过程的中间结果和对可视信息的分析结果与整个可视化过程各个模块进行交互操作而得到最佳三维显示效果。

尽管三维空间数据类型和处理方法有多种,其数据场可视化处理的基本流程却大体相同。因此,根据三维空间数据可视化处理的几个主要步骤,基于二维断层图像序列的三维重建和显示系统的总体框架可由图 1-6 表示。

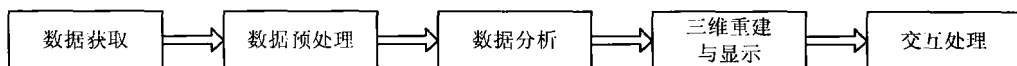


图 1-6 三维数据场可视化的基本流程

(1) 数据获取。

原始数据可由计算机数值模拟或者测量仪器产生和得到,如通常的表达人体器官分布的三维数据由二维切片图像表达,二维断层图像序列可以由 CT、ICT、X-CT、MRI 等设备产生的,有些三维数据是如单个红外图片的图像形式表达的,有些测量的数据是以二维数组的形式表达的,有些测量的数据是以三维数组的形式表达的,有些重构的数据是以其他软件的三维模型格式提供的。

(2) 数据预处理。

三维重构显示的数据来自计算机模拟数据和实验测量数据,计算机模拟可产生的数据包括数值数据、几何数据与图像数据,实验测量数据包括数值数据和图像数据等。三维重构中的数据预处理模块应能处理数值数据、几何数据和图像数据这三类数据,为数据的三维重构提供最佳的输入信息。

数值数据又称属性数据,用来表示灰度、法线、强度分布等。属性数据通常可划分为标量、矢量和张量形式。属性数据与几何数据存在着一定的关系,几何数据用来表示对象的形状,包括点、线、多边形、曲面等,几何数据有时是独立的变量,有时与其他属性数据相关,如通过一张红外图片的彩色分布的位图可以得到其温度场的三维可视化结果图,也可以从彩色分布

的位图中得到几何表达的等高线图,由等高线图也可得到温度场的三维可视化重构图,这样灰度标量和等高线轮廓这个几何数据存在一定的相互关系和转换关系。通过等值面的重构将属性数据变成了三角形表示的几何数据。

一般通过 CT、MRI 等设备得到的图像,由于设备以及图像自身的原因,经常会有一些噪声,由科学实验获得的原始数据或者仪器获得的切片图像数据,需要经过适当的处理才能达到合适和有利于进一步三维重构显示处理的要求,如图像中的噪声点会对图像重构的真实性和整体性造成影响,针对所处理的图像的特点,图像预处理的目标是既要去除噪声,又要充分保留原始图像中的整体信息。对原始数据进行变换处理的功能包括:①数据规范化处理,如灰度拉伸、均值化处理;②滤波处理,如中值滤波、均值滤波处理;③平滑处理,如形态学开运算、各向异性扩散处理;④网格重新划分,如动态网格划分或将三个方向划分为 0-1 变化范围;⑤坐标变换,如将坐标原点移动到三维数据集的中间,将径向弧形分布的序列的二维 B 超图像变换为三维平行切片数据;⑥分割与边缘检测,如用蛇形边界搜寻方法、均值聚类方法进行器官组织分割处理;⑦进行特征数据映射和赋值,如进行伪彩色处理等处理。

三维数据量较大是三维数据场可视化处理技术中的特点,二维切片图像数据和体数据随着图像分辨率的提高而增大,一幅 $512 \times 512 \times 512$ 图像尺寸比一幅 $128 \times 128 \times 128$ 的图像尺寸大 9 倍多,这给数据存储和处理带来了硬件负担和软件难度。通过适当的数据结构定义和数据处理技术可以使重构效率得到提高。如在图像数据存储阶段采用合适的低字节的灰色图像数据,这时处理的是三维数据,而在显示阶段通过彩色、透明度和浓度传递函数的作用而得到细腻和层次分明的彩色图像是一种技术方法,这时处理的是二维数据。通过整型数和浮点数的合理切换和使用,也可以使内存消耗成倍减少。

由于三维数据的获取途径、应用范围和处理方法是种类繁多,需要考虑在不同应用系统之间进行数据交换和共享,仍然有必要建立标准的科学数据标准格式,不同行业和组织已提出多种描述和表达数据的格式,其中包括 DCM、IMG、3DS、DXF 等,通过对三维数据的合适的预处理和格式文件的转换就可达到三维模型的转换。

(3) 映射与分析。

对应于不同的数据类型和显示要求需要采用不同的体绘制方法和技术,不同的体绘制方法是根据不同的数据类型、光学模型和几何构形法而采用和得到。在三维可视化的基本功能模块的组成中,映射模块应完成将数值数据转变为几何数据的功能,映射功能实质是可视化技术中的构模功能。可视化系统处理的数据类型应随着应用领域的不同而不同,从而对不同类型的应用数据应采用不同的可视化技术。可视化技术的分类有根据三维物体构成方法和选择的数据类型两种方式来定义。采用不同的数据类型就对应于不同的重构和显示技术的采用,同时不同的数据类型的采用也决定了重构和显示的效率。如果对可视化技术的分类按数据集来分的话,可视化技术一般可分为 5 类,即点数据可视化、标量场可视化、矢量场可视化、张量场可视化和其他可视化技术。在上述 5 类基础上,根据数据的维数可将可视化技术进一步细分,不同类型的可视化技术就需采用不同的合适的光模型和构形算法。

(4) 绘制。

通过三维重建算法,将经过处理的原始数据转化成可供绘制的几何图素和属性,将三维数据场的每个单元、等值面和相互间的层次关系表现出来,利用计算机图形学中的基本技术,或者借助已有的图形软件包、显示功能模块及图形硬件将这些几何图素和属性转化成可在计算

机上显示的图像。

绘制功能应完成将几何数据转换成图像数据的过程。成熟的计算机图形学理论和方法提供了丰富的绘制算法可供可视化技术利用,包括扫描转换、隐藏面的消除、光照模型、明暗处理、透明与阴影、纹理映射和反走样技术等。一般讲,计算机图形学提供的绘制方法在三维数据可视化技术中的应用是比较关键的核心问题。一些新的绘制技术,如基于三维纹理的体绘制技术和基于 GPU 的体绘制技术有时会加快绘制速度和从根本上改变算法的选择和系统的显示性能。

(5) 显示与交互。

人机交互显示功能的实现就是图像变换和动态显示功能的实现,包括图像的几何变换、图像压缩、颜色量化、图像格式转换以及图像的动态输出等。

显示模块的功能是将绘制模块生成的图像数据按用户指定的输出设备、显示窗的大小与位置进行显示和模型输出。显示模块是将处理好的显示数据以静态或动态的形式输出在显示、打印装置或者文件中。实际上,显示模块除了完成可视图像信息输出功能外,用户的反馈信息也是通过显示模块的接口界面得到数据而传递到不同的功能执行模块,以实现人一机交互功能,图像、图形的显示借助于已有的模块和工具可以使设计效率大大提高,现在的所有的三维绘图和重构显示软件一般都成熟的 OpenGL 图形库进行图形显示和绘制。图 1-7 是通过传递函数和彩色分布选择等处理后的血管显示,应用三维重构软件“Visual3D_V4”构成三维曲面。实验的血管切片数据在图像数据目录“程序\Slices\Slice10”中。

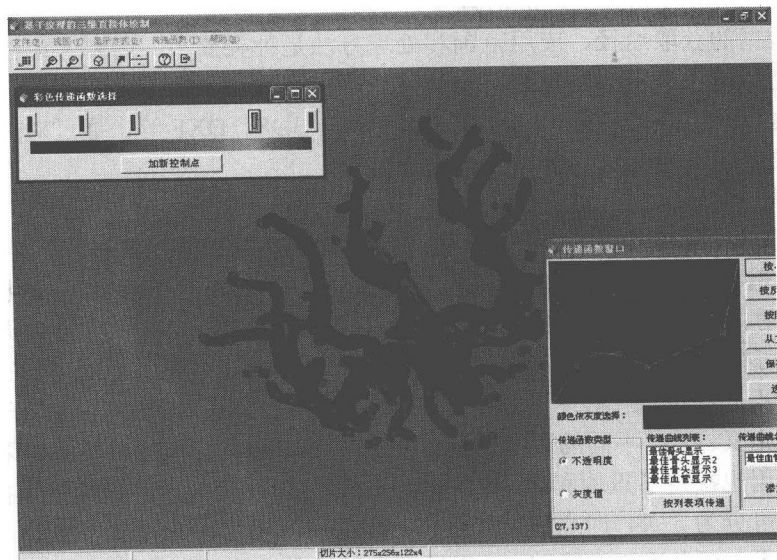


图 1-7 通过传递函数和彩色分布选择处理后的血管显示

1.3.2 三维数据场可视化的主要技术方法

在三维可视化实现中,有两类不同的算法:表面绘制算法和直接体绘制算法。

第一种方法是首先由三维空间数据场构造出中间几何图元,然后再由传统的计算机图形

学技术实现画面绘制,这种方法构造出的可视化图形不能反映整个原始数据场的全貌和细节,但却可以产生较清晰的等值面图像。面绘制最大的特点是,需要先对二维数据场进行三维几何重建,生成体数据等值面的曲面表示,利用现有的 OpenGL 等技术实现面的绘制。常用的基于面的三维重建方法有: Marching Cubes 方法、Marching Tetrahedral 和由一序列二维轮廓线重构三维形体方法等。

第二种方法是体绘制算法,是近几年中三维数据场可视化方法中发展较迅速的一种算法。体绘制算法不需要构造中间几何图元,而是直接由三维数据场的光学模型计算而产生屏幕上的投影图像。常用的体绘制三维显示方法有光线投射法、抛雪球算法、Shear-Warp 法和基于三维纹理的直接体绘制方法等,体绘制算法的主要优点是能够产生表达整个三维数据场各个个体影像和它们相互关系的整体图像,产生的渲染图像质量比较高,而且利于并行处理。但这种方法缺点是计算量偏大,对图像计算和显示的硬件要求较高,但在体绘制中通过采用改进的算法如用 Shear-Warp 方法可以达到和超过面绘制方法的计算速度和显示效果。

1. 三维数据面绘制技术

三维数据面绘制技术是在三维空间数据场中构造出中间几何图元,再由传统的计算机图形学技术实现画面绘制,基于等值面的三维空间数据场重构与显示的算法和技术有许多种,这方面主要包括移动立方体(Marching Cubes)、移动四面体(Marching Tetrahedra)和由二维轮廓线构建外表面等。Marching Cubes 的基本步骤为首先给出等值面的值,找出该等值面经过的体元的位置,然后求出该体元内的等值面并计算出相关参数,最后绘制等值面,它已经成为应用最为广泛的三维重建方法。

在 Marching Cubes 算法中,假定原始数据是离散的三维空间规则数据场,这一假设符合大多数情况,CT 和 MRI 等设备产生的图像就属于这一类型。例如对于一个标准的医学图像的体数据集,它往往是由一系列的二维断层切片数据构成的,而每张切片都有其空间上的分辨率。假设一体数据集有 100 张切片,而每张切片的分辨率为 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 三个方向上按一定的间隔分别采样了 512, 512, 100 次所得到的。所谓等值面实际上是指空间中的一张曲面,在该曲面上函数 $f(x,y,z)$ 的值是恒定的或在有限变化范围的。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 $f(x,y,z)$ 和某一给定的域值来构造等值面,这种方法一般被称为显式的等值面提取算法,它的计算复杂度比较高,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 算法采用了隐式的等值面提取方法,不直接计算函数 $f(x,y,z)$,而是直接从体数据中获取等值面的信息。其算法需要用户提供一个域值,也就是所希望提取出来的物质的密度值。然后根据体数据的信息,就可以提取出等值面的三角面片表示,以便由常用的图形软件或图形硬件提供的面绘制功能绘制出等值面,如用 OpenGL 提供的三角形链表而显示出表达等值面的三角形面簇。

一般来说,相对于体绘制方法,面绘制方法的最大优势是可以借助传统的图形硬件来进行加速,绘制速度比完全采用软件方法的体绘制快。另一方面,中间几何图元生成以后,可以将原始数据中间几何图元列表的形式保留,节省存储空间,而且在下次需要显示的时候可以直接读取几个图元列表文件,然后进行图元列表显示,可以省去费时的生成中间几何图元的过程,达到快速显示的目的。图 1-8 是基于面绘制 Marching Cubes 技术实现的效果图,切片数据为切片在图像数据目录“程序\Slices\Slice6”中,应用三维重构软件“Visual3D_V2”构成三维曲面,