



全国高技术重点图书

体视化技术及其应用

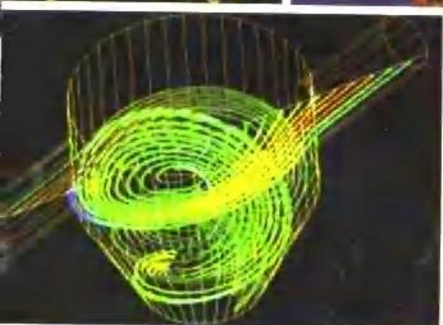
●管伟光 编著 ●马颂德 主审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

URL: <http://www.phei.com.cn>



高技术重点图书

体视化技术及其应用

管伟光 编著 马颂德 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

内 容 简 介

体视化是八十年代后期兴起的一项非常引人注目的新技术,它是在吸收计算机图形学、计算机视觉和图象处理等领域有关知识的基础上发展起来。作为科学可视化的一个主要组成部分之一,体视化研究的是体数据在计算机中的表示、变换、操作和显示等问题,其目的是探查体数据中所蕴含的物体,使我们能够看到物体内部原本不可见的复杂结构。

体视化的出现给传统计算机图形学带来一场革命,同时也展示出无比广阔的应用前景。本书系统地介绍了体视化的基本概念、原理、方法以及体视化硬软件系统的设计与实现。为了使读者更好地了解这门新兴学科在国外的发展动态,本书不仅总结了该领域的研究前沿,还介绍了几个主要的发展趋势。

在本书的编写过程中,作者参阅了大量的国内外文献资料,总结了作者七年来在这一领域的研究成果。本书可供高等院校的教师、研究生、本科生和工程技术人员学习研究体视化这一门新兴学科的参考书。

书 名:高技术重点图书 体视化技术及其应用

著 者:管伟光

审 校 者:马颂德

责任编辑:焦桐顺

印 刷 者:科学院印刷厂

出版发行:电子工业出版社、发行

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036 发行部电话 68214070

URL: <http://www.phei.com.cn>

经 销:各地新华书店经销

开 本:787×1092 1/16 印张:12 字数:299.5 千字

版 次:1998 年 4 月第 1 版 1998 年 4 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-5053-4771-3
TP·2307

定 价:24.00

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换

版权所有·翻印必究

《全国高技术重点图书》出版指导委员会名单

主任:朱丽兰

副主任:刘 杲 卢鸣谷

委员:(以姓氏笔划为序)

王大中	王为珍	牛田佳	王守武	刘 仁
刘 杲	卢鸣谷	叶培大	朱丽兰	孙宝寅
师昌绪	任新民	杨牧之	杨嘉墀	陈芳允
陈能宽	罗见龙	周炳琨	欧阳莲	张钰珍
张效祥	赵忠贤	顾孝诚	谈德颜	龚 刚
梁祥丰				

总干事:罗见龙 梁祥丰

《信息获取与处理技术领域》编审委员会名单

主任委员:陈芳允

委 员:汪成为 杨震明 袁宝宗 邓又强

前 言

体数据 (Volume Data) 是对某种物理场 (温度场、压力场、流速场、射线传播衰减场等) 的离散采样, 而体视化就是研究体数据的表示、变换、操作和显示的学科。如今, 在医学、物理学、化学、地质学、显微摄影学以及工业检测等诸多领域都存在着大量的体数据, 对蕴藏在体数据之中的物体或者自然现象进行处理、分析和显示, 无疑会帮助人们更好地认识所研究对象的内部结构、属性和内在规律。体视化 (Volume Visualization) 就是在这种背景下, 在吸收计算机图形学、图象处理和计算机视觉等学科相关知识的基础上发展起来的一门交叉学科。体视化的出现, 给科学可视化, 计算机图形学和计算机成像技术带来一场革命。

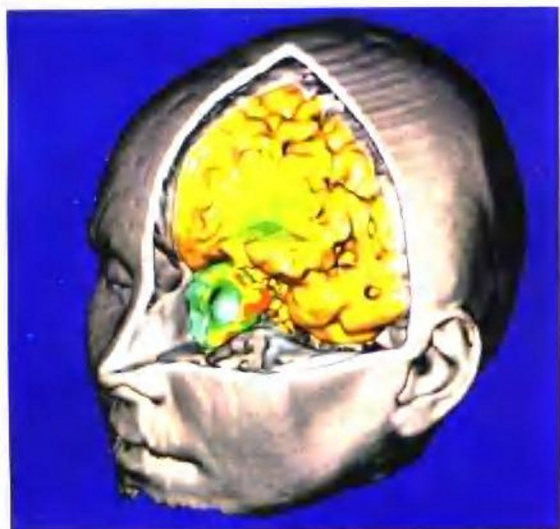
传统的计算机图形学只关心物体表面的几何表示、变换和显示问题; 而体视化则研究含有物体内部信息的体数据的表示、操作和显示等问题。因此, 体数据比表面表示包含的信息更丰富、更完整, 而且更适合于表示不规则的 (象生物组织、山脉、树木等) 与无形的目标 (象烟云等)。正因为如此, 体视化具有传统的计算机图形学无可比拟的优越性, 展示出旺盛的生命力。

关于体视化的研究可以追溯到70年代初期。当时, 射线天文学、地质学和医学成像等领域的研究人员已经开始研究从投影计算空间数据场的反演方法, 生成了一些初级的体数据。当然, 那时还没有“体数据”这个名词。1987年, 美国自然科学基金会在一份报告“Visualization in Scientific Computing”中对数据可视化的研究范围和研究分支进行了总结, 体视化才真正作为一门独立的学科出现。促使体视化迅速发展起来的因素主要有两个方面, 一方面是图象处理、图形学和计算机视觉等相关学科日益完善, 为体视化的建立提供了必要的理论和方法; 另一方面是随着各种影象技术的发展, 在许多领域都出现了大量的体数据, 对体视化的需求越来越迫切了。目前, 国际上对体视化的研究与应用方兴未艾, 从理论、方法、系统实现到体视化专用处理硬件设计都在以惊人的速度向前发展。我国在这一领域的研究工作虽然起步较晚, 但取得了一些可喜的进展。鉴于高等院校、科研院所和企业对这项新技术的迫切需要, 作者结合自己在这个领域近七年的研究成果, 参阅了大量的文献资料, 系统地介绍了体视化的基本概念、方法、总体框架以及系统设计实现, 综述了最新研究动态和它在各个领域中的应用。

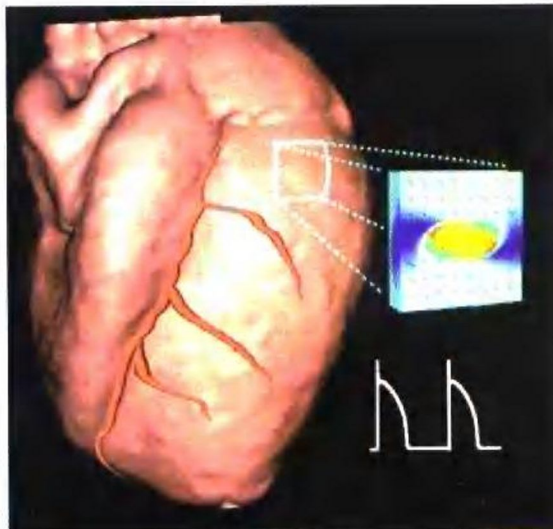
由于体视化是一个新兴学科, 有些术语尚未统一, 而且同一个术语的中文译名也不尽相同。在本书的编写过程中, 作者主要参照纽约州立大学Arie E. Kaufman教授的论著, 力求做到概念、方法表达完整、准确, 对主要术语附英文原词。希望本书能为从事体视化的教学、科研以及应用的研究和工程技术人员提供有益的参考, 同时也恳请读者对本书的不足和错误之处给予批评指正。

在本书的编写过程中，曾得到中科院自动化所国家模式识别实验室的全体同志的很多帮助和鼓励。北京航空航天大学唐荣锡教授、中科院自动化所胡占义研究员、卢汉清研究员、计算所侯紫峰研究员为本书提出了许多宝贵意见。哈尔滨理工大学陈是荣教授、孙立镌教授、尤波副教授、刘润涛副教授等几位同志参加了本书的校对和修改工作。中科院自动化所马颂德研究员在百忙之中仔细地审阅了全书，并提出大量宝贵的修改意见。在此向他们表示衷心的感谢！

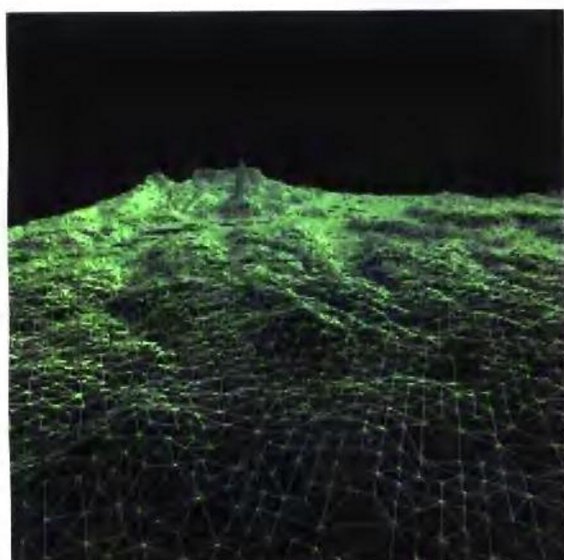
作 者



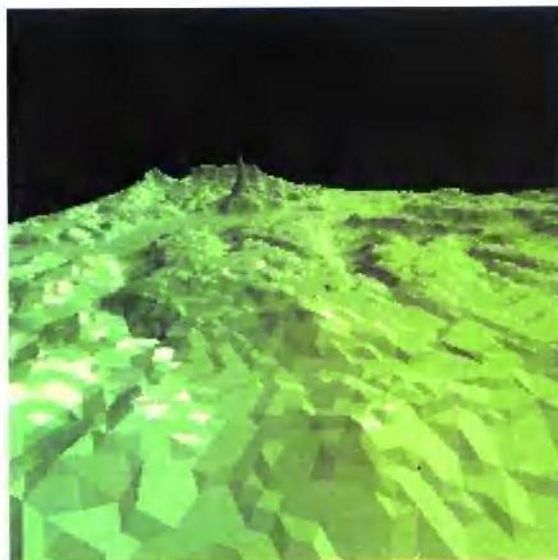
附图1 人头部



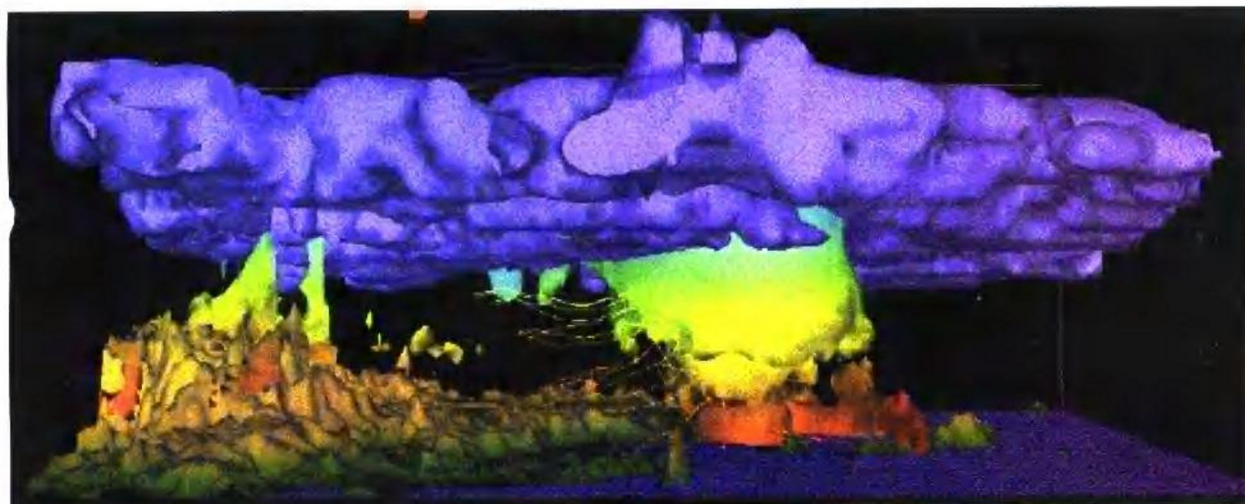
附图2 猪的心脏



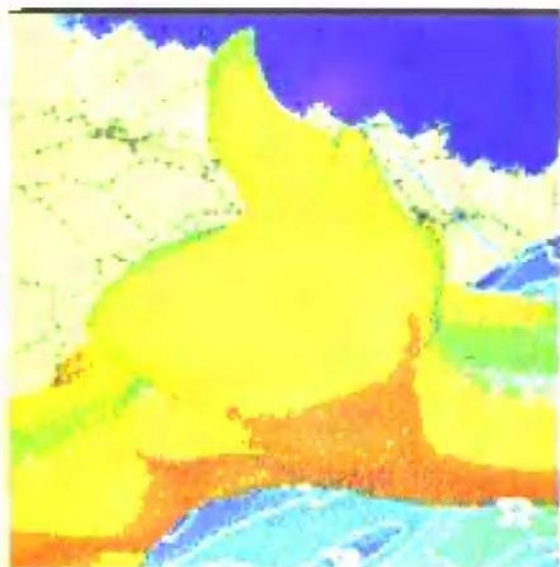
附图3 地形的网格表示



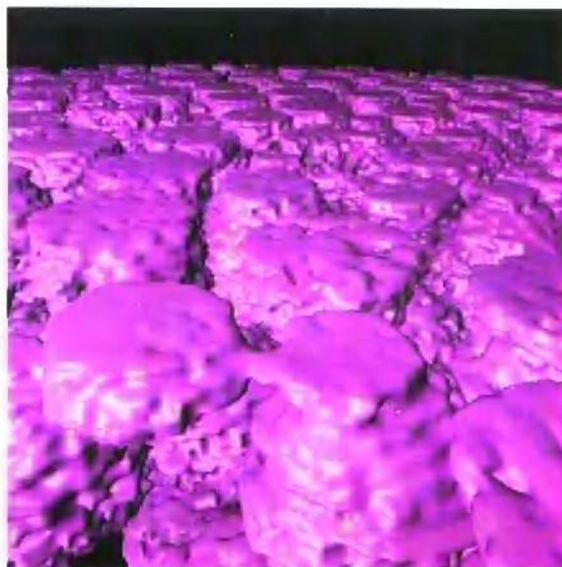
附图4 地形的多边形表示



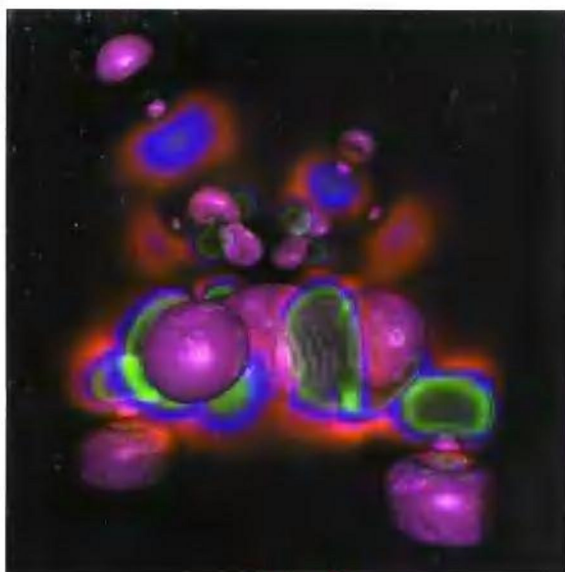
附图5 气象分析



附图6 气象云图



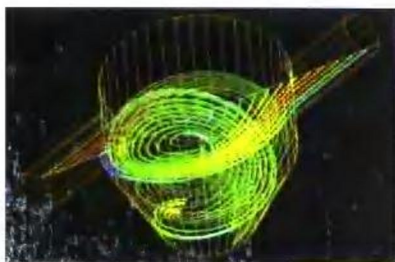
附图7 地质构成



附图8 蛋白质



附图9 虾



附图10 涡流



附图11 机械设计



附图12 造型设计

电子工业出版社电子出版部隆重推出

电影风暴——系列英语教学光盘(CD-ROM)

电影风暴系列是将世界英语电影名著以多媒体的形式制作成的英语教学产品,其目的是通过生动直观的交互式教学方式帮助用户轻松提高英语听说能力。本产品主要特征如下:

电影播放:可以连续播放整部电影,播放电影时可显示中、英文字幕。当用户未听清楚某些句子时可随时重播。本功能的目的是让用户看电影。

逐句对话练习:对话部分不仅包括视频,而且可以将电影的对话的中、英文文本显示在屏幕上。用户可以单击选定的中文或英文句子来播放该句的声音或视频。这使用户能够仔细聆听每一句英文,并看到说话人的嘴形,表情和动作,使用户能无意识地体会英文句子的含义。

循环听力练习:从简单到复杂,从复杂到简单;从生词到句子,从句子又回到上次听错的单词,循环往复地听写。使用户学习起来既轻松有趣,又能够通过多次往来来提高英语听力。特别是听写中所采用的记分方式,使您感到您在不停地进步,并且时时刻刻都有破记录的强烈愿望。经过开发者试验,如果初中英语水平以上的用户能够花一个月听写完一部电影的每一课,其英语听力将能够胜任日常会话。

角色配音:用户可以在电影中充当一个或多个选定的角色,来同其他角色对话。充当电影中的一个角色使自己学习时象在同真人会话一样,为您提高英语会话能力提供了一个极富挑战的环境。

电子词典:配有一个英汉词典,用鼠标右键单击英文单词即可显示中文释义。

详细的剧情介绍:用户了解剧情后,学习起来更轻松,学习兴趣会大增。

动人的故事,直观生动的场景,强大的交互功能,方便简单的操作,电影风暴将为您提供一个极佳的英语学习环境。

首批推出的电影有:

魂断蓝桥 (双 CD, 定价 48.00 元)

茶花女 (双 CD, 定价 48.00 元)

简爱 (双 CD, 定价 48.00 元)

一夜风流 (双 CD, 定价 48.00 元)

首批产品将于 4 月初上市,以后还将陆续推出其他电影名著。

目 录

第一章 什么是体视化.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 体视化的基本概念和总体框架.....	4
1.2.1 体视化的基本概念.....	4
1.2.2 体视化的总体框架.....	6
1.3 体视化发展的历史、现状和趋势.....	8
1.3.1 体视化发展的历史.....	8
1.3.2 体视化发展的现状.....	10
1.3.3 体视化发展的趋势.....	17
1.4 体视化的应用.....	18
1.4.1 体视化在医学中的应用.....	19
1.4.2 体视化在显微摄影学中的应用.....	19
1.4.3 体视化在无损检测中的应用.....	19
1.4.4 体视化在地质勘探中的应用.....	20
1.4.5 体视化在计算流体力学中的应用.....	20
1.4.6 体视化在气象学中的应用.....	21
第二章 体数据的预处理.....	23
2.1 体数据的来源.....	23
2.2 数据格式转换.....	26
2.3 体数据的滤波.....	26
2.3.1 付立叶平面上的滤波.....	27
2.3.2 实平面上的滤波.....	27
2.4 体数据的分割.....	29
2.4.1 基于点的分割与分类.....	29
2.4.2 基于边缘的分割.....	30
2.4.3 基于区域的分割.....	32
2.4.4 用数学形态学解决分割问题.....	33
2.5 二维断层图象之间的插值.....	34
2.5.1 线性加权平均的图象插值方法.....	35
2.5.2 断层图象之间的匹配.....	35
2.5.3 基于匹配的断层图象插值.....	48
2.5.4 轮廓插值.....	50
第三章 三维物体表面重建.....	55
3.1 引言.....	55
3.2 体素级重建方法.....	57
3.2.1 体素模型和等值面定义.....	57

3.2.2 等值面的构造.....	59
3.2.3 等值面的高质量显示算法.....	67
3.3 切片级重建方法.....	70
3.3.1 轮廓对应.....	71
3.3.2 轮廓拼接.....	74
3.3.3 分叉情况的处理.....	81
3.3.4 曲面拟合.....	82
第四章 直接体视.....	85
4.1 引言.....	85
4.1.1 视见变换.....	86
4.1.2 明暗计算.....	87
4.2 体视见方法.....	87
4.2.1 物空间的视见方法.....	88
4.2.2 象空间的视见方法.....	96
4.2.3 视见方法的比较.....	103
4.3 体浓淡方法.....	103
4.3.1 物空间的浓淡计算.....	104
4.3.2 象空间的浓淡计算.....	105
4.3.3 颜色与阻光度的累积.....	109
4.4 基于斜体素的体视方法.....	109
4.4.1 斜体素的构成.....	110
4.4.2 斜体素的投影.....	110
4.4.3 斜体素内颜色和阻光度的积分.....	111
4.4.4 图象合成.....	113
4.5 不规则体数据的体视方法.....	114
4.5.1 不规则体数据的规则化.....	114
4.5.2 不规则体数据的直接体视.....	116
4.6 并行体视算法.....	118
4.6.1 物空间的并行体视算法.....	119
4.6.2 象空间的并行体视算法.....	120
第五章 体图形学.....	123
5.1 引言.....	123
5.2 矢量图形与光栅图形.....	124
5.3 面图形学与体图形学.....	125
5.4 离散拓扑学.....	129
5.5 体素化.....	132
5.5.1 体素化基础.....	132
5.5.2 体素化过程.....	133
5.6 离散光线跟踪.....	136
第六章 体视化专用硬件.....	139
6.1 引言.....	139

6.2 传送器和三维变换	140
6.2.1 基础知识	140
6.2.2 束的无冲突访问	141
6.2.3 用传送器实现三维变换	142
6.2.4 传送器的设计实现	143
6.3 翻转立方体和体视硬件	145
6.3.1 基本概念	145
6.3.2 翻转立方体体系结构	146
6.3.3 翻转立方体中的并行投影	148
6.3.4 翻转缓存器	150
第七章 几个典型的可视化系统	153
7.1 AVS 系统	154
7.2 VolVis 系统	156
7.3 APE2.0 系统	159
7.4 3DVIEWNIX 系统	161
7.5 VISUALIZER 系统	163
第八章 体视化的发展动态	167
参考文献	175
附图	

第一章 什么是体视化

体视化 (Volume Visualization) 技术^[4,5]已经有二十多年的发展历史了。在这二十多年中, 它从概念、原理、方法到硬件系统等方面得到了全面发展, 逐步形成了一套完整的体系并作为一门独立学科出现。它的出现和发展丰富了可视化的理论和方法, 同时也开辟了更加广阔的应用领域。目前, 在国外这项技术的研究与应用方兴未艾。然而, 对于一些读者来说, 体视化可能还是一个比较陌生的名词。本章首先将介绍体视化的基本概念、原理和方法, 阐明它与其它相关学科的关系。然后回顾体视化发展的历史, 概括其现状并展望今后的发展趋势。最后, 将简要介绍体视化的几个主要应用。通过阅读本章, 读者不仅会了解到体视化技术的概貌、内涵和特点, 以及它在可视化中所处的地位, 还会发现它与我们熟知的计算机图形学、图象处理、计算机视觉之间存在着非常密切的关系。

1.1 引言

当今社会正处在一个信息爆炸的时代, 人们常常在茫茫的数据海洋面前显得不知所措, 一时难以抓住隐藏在数据之中的本质、结构和规律。可视化^[1-4] (Visualization) 就是在这种背景下发展起来的, 它把数据变换成易于被人接受和理解的形式 —— 图形。可视化的前身是计算机图形学, 今天它已经发展成为研究用户界面、数据表示、处理算法、显示方式等一系列问题的一个综合性学科, 并成为人们分析自然现象、社会经济发展形势, 认识客观事物本质和变化规律的得力助手。

根据侧重面的不同, 可视化可以分成三个分支, 它们分别叫做科学可视化^[4] (Scientific Visualization)、数据可视化^[1,5] (Data Visualization) 和信息可视化^[137] (Information Visualization)。科学可视化侧重科学和工程领域数据的可视化问题; 数据可视化比科学可视化具有更广泛的内涵, 它不仅包含工程技术领域中数据的可视化, 还包含其它领域 (如经济、商业、金融等) 中数据的可视化; 而信息可视化一般是指Internet网上超文本、目录、文件等抽象信息的可视化。本书所要介绍的是科学可视化中的一个重要分支 —— 体视化^[5,6,7] (Volume Visualization), 它研究体数据的可视化问题。

在利用计算机对客观事物进行分析和研究时, 需要建立相应的模型来表示实际的或抽象的对象或现象, 这个过程称为建模。模型是客观事物的抽象表示, 它描述对象的结构、属性、变化规律或各个组成部分之间的关系等。例如, 在计算机辅助建筑设计系统中, 需要交互地建立和修改建筑物的三维模型; 在训练飞行员的飞行模拟器中, 需要建立地面上山川河流、城市、桥梁、公路等景物以及天空中的云雾等自然景观的模型; 此外还有用于宏观经济分析和预测的经济模型以及用于天气预报的气象系统的复杂模型等等。因此, 建

模是用计算机进行分析、设计、模拟、检测的首要任务。

客观事物一般都存在多方面、多层次的属性和特征，而我们在建模时无法把事物的方方面面全部囊括到模型中去。这就需要我们根据具体应用的要求，有选择地从某些侧面来刻划对象。例如，对于一个建筑物，城市规划者关心的是它的规模、外观以及它与所处的环境是否和谐；建筑设计师则要考虑建筑物的结构、材料和施工等问题；而使用者会更更多地关心它的设施和功能。这些不同的要求会导致在选择建筑物模型上各有侧重。另外，在设计模型时还要考虑到模型的描述能力、修改的方便性以及是否便于对它进行处理、分析、加工和显示。

计算机图形学一般采用几何模型，即用点、线（直线或曲线）和面（平面或曲面）等图形基元来描述形体。它主要有边界表示法、构造实体几何（CSG）和空间分解三种表示模型。边界表示法是以形体的边界来描述形体。构造实体几何是以一些基本体素（立方体、圆柱、圆锥、球体等）的并、交、差等集合运算来定义复杂的形体。空间分解法是与体数据比较相近的一种表示模型，如在八叉树表示中，一个立方体空间被等分成八个子立方体，每个子立方体当其内部同时包含物体和背景则将继续进行等分。最终的结果用一棵八叉树来表示，其叶子节点的值要么是 0 要么是 1，分别表示相应的小立方体是空或是完全被形体占有。几何模型是表示有形而且规则的形体的理想模型，因此常用于机械、建筑设计上，也用于汽车和飞机的外形设计上。但是它无法描述烟云等无形对象，在刻划山脉、树木等复杂形体上也显得过于笨拙。边界表示法和构造实体几何是实体造型系统中两个主要的表示模型，但它们只是描述了形体的表面，却无法刻划形体内部复杂的细微的结构。从这个意义上讲，它们只能表示形体的外壳，而不能表示“有皮有肉”的实际物体。

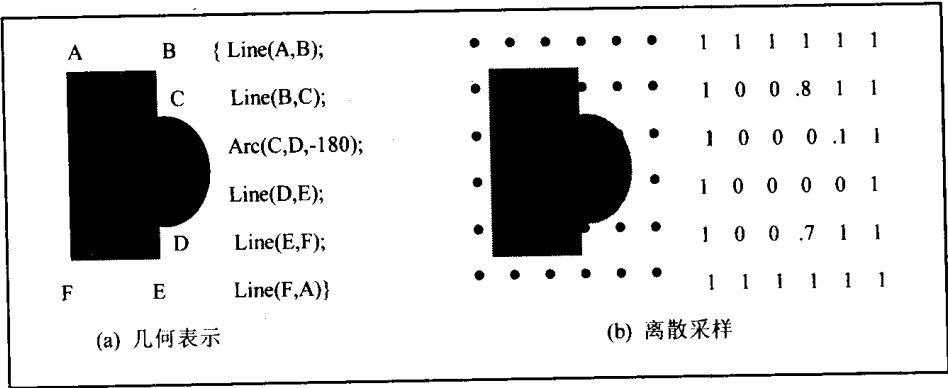


图 1.1.1 二维形体的两种表示模型

与传统计算机

图形学描述物体的方式不同，体数据是对有限空间的一组离散采样，每个采样点上的采样值可以是一种或多种，代表在该点上的一个或多个物理属性值，例如用检测仪器对温度场、

速度场进行采样，其结果都是以有限个采样来描述场空间。因此体数据是真正的三维实体，它含有物体内部信息。图 1.1.1 给出了同一个物体的图形描述和离散采样的对比。

现实世界中的许多物体、自然现象以及一些计算模型都可以用体数据描述。关于体数据的表示、处理分析、操作、物体重建和显示的研究已经逐渐形成一门独立的学科——体可视化^[1,5,6]。体可视化的任务就是要揭示物体内部复杂的结构，使我们能够看到通常情况下看不到的物体内部结构。体可视化与传统计算机图形学的主要差异就在于对象的表示模型不同，一个是有限个离散采样，一个是连续的几何描述，由此导致对物体的处理、操作、变换、分析和显示方法的截然不同。

自计算机诞生之日起,就有关于可视化的研究。将数据以图形方式来表示是早期可视化的基本思想,然而那时还没有系统的可视化的理论和方法。随着科学技术的发展,从各种各样的仪器获取的数据无论在数量上还是在种类上都成倍增长,再者,科学计算和实验也产生越来越多的数据,这就需要对它们进行加工分析和直观的图形显示,因而对可视化的需求也更加迫切,要求也更高。另一方面,计算机的处理能力日益增强,为可视化的发展提供了必要的物质基础。在这种背景下,可视化技术蓬勃发展起来。在 1987 年,科学可视化正式作为一门学科出现了,当时美国国家科学基金会在一份报告^[4]中用了“科学计算中的可视化”(Visualization in Scientific Computing)一词来描述这方面的研究工作,它包括源于自然界的数据、科学研究中的实验数据和计算模型的可视化研究。

体视化是科学可视化的一个重要组成部分,它是在吸收图象处理、计算机视觉和计算机图形学等学科有关知识的基础上发展起来的^[5,9]。图象处理^[25,26]主要研究从图象到图象的变换,其中图象滤波和变换方法被借用过来,用于滤除体数据中的噪声和校准成像过程带来的畸变。体数据是对某种物理属性的空间采样,而不同的物质一般具有不同的物理属性,因此利用图象分割技术可以基于采样值把不同物质区分开。计算机视觉^[108](或图象理解)的任务是对图象进行解释,即给予每个图象元素一个符号描述,其中分割或分类可用于区分体数据中不同种类的物质。体数据分类是体视化的一个关键步骤,分类的正确性和准确性直接关系到对体数据所含对象的分析和显示。计算机图形学研究物体的描述方法以及从几何描述生成显示图象的方法。体视化继承了计算机图形学的一些显示技术,如可见性算法和光照模型等。

体视化在吸收图形学有关知识的同时,又孕育着计算机图形学的一场革命^[1]。传统计算机图形学以面和边等基元来描述物体,不含有任何内部信息;而三维体视化则是以三维基元(体素)来描述整个物体,它包含物体内外的全部信息。正如 70 年代光栅图形取代矢量图形而更有效地显示二维物体的内部(多边形区域)一样,现在体视化正在逐渐代替传统图形学来更好地显示三维物体(不仅是物体表面,还有物体的内部)。从硬件上来看,设计和制造存储体数据的大容量存储器已经不再是一件困难的事情,用于体数据操作显示的体视化专用并行处理硬件也在设计和测试之中,预计到本世纪末将会有大批的体视化硬件^[2]问世。

目前,关于体视化的研究可谓是如火如荼,它的应用遍及医学、物理学、化学、地质学、显微摄影学、工业检测、航空航天和科学计算等诸多领域^[1-4,8,10,15,22]。本书主要讨论三维体视化的原理、方法和应用,并主要以它在医学领域中的应用为背景,这不仅因为三维医学图象是可视化的重要研究对象,同时也因为它非常具有代表性。

本书所介绍的体视化方法都具有一定的普适性,可以直接地或者稍加改动就能用于其它领域中体数据的分析和显示。

1.2 体视化的基本概念和总体框架

1.2.1 体视化的基本概念

当提到体视化时，有人误认为它仅仅研究体数据的显示问题。其实，体视化是处理和分析从实验获得的、扫描器测得的或者由计算模型合成的体数据，并对这些体数据进行变换、操作和显示，其目的是让人们更清楚地认识蕴涵于体数据之中的复杂结构。

由于体视化正处在研究和发展阶段，所使用的术语还没有完全统一，而且同一术语的中文译名也不尽相同。本文参考大量有关文献，力图给出多数人认同的相对规范的术语。为了保证交流无误，所有名词术语都附有其英文名称。

体数据 (Volume Data, Volumetric Data) 可以看成是在有限空间中对一种或者多种物理属性的一组离散采样，它可以表示成： $f(x)$, $x \in R^n$, $\{x\}$ 是 n 维空间的采样点 (Sample Point) 的集合，因此也有人把体数据成为数据集 (Dataset)。体数据可以按不同标准分成不同种类^[5]：

1. 按采样空间的维数分

当空间维数为三 ($n=3$) 时，则称 $f(x)$ 为**三维体数据** (3D Volume Data)；而当 $n>3$ 时，则称 $f(x)$ 为**高维体数据** (High-Dimensional Volume Data)。

2. 按采样值的个数分

当采样值是单值时，得到的是标量体数据；当采样值是多值时，得到的是向量体数据。例如，CT设备产生的是标量体数据，采样值反映物质对X射线的吸收程度。而磁共振设备产生的是向量体数据，每个采样点上有三个采样值，它们分别代表质子密度、 T_1 值和 T_2 值。

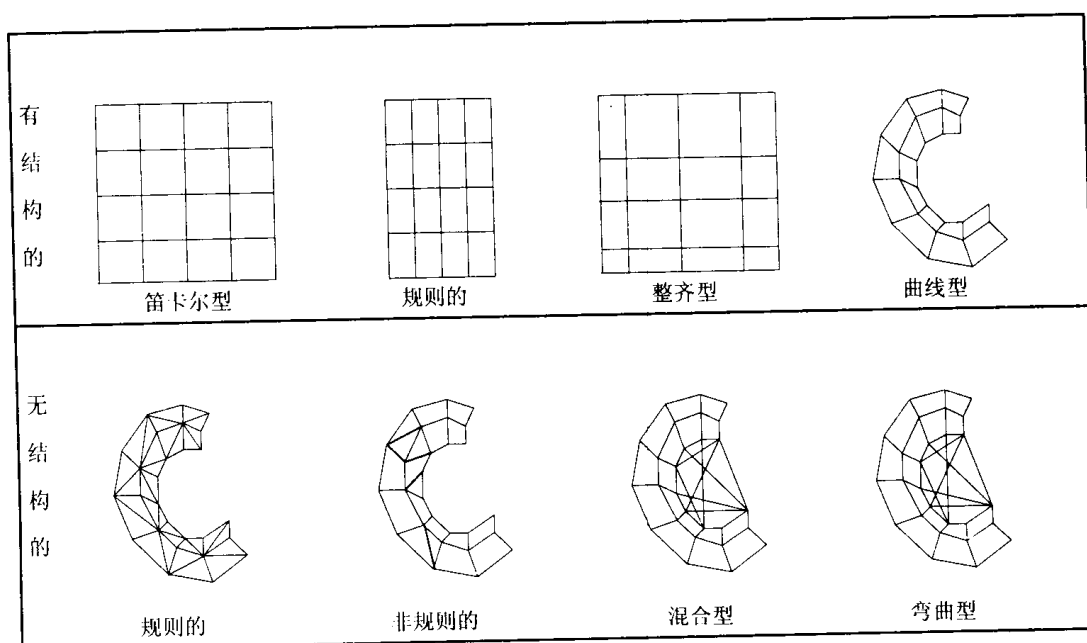


图 1.2.1 体数据类型

3. 按采样点之间的拓扑结构分

体数据可以分成有结构的 (Structured) 和无结构的 (Unstructured)。对于有结构的体数据, 采样点之间在各维上存在确定而统一的邻接关系。例如, 对于三维有结构的体数据, 它的任一个采样点都可以用它所在的行、列、层的序号 (i, j, k) 加以标识, 因此每个采样点 (如果它在体数据的边界上) 在三个轴向上有六个邻接采样点。逻辑坐标 (i, j, k) 不一定等于采样点的实际物理位置 $x = (x, y, z)$ 。对于无结构的体数据, 采样点之间则不存在这样统一的邻接关系, 不同的三角剖分算法将产生不同的邻接关系。

有结构的体数据不只是采样数据的集合, 它还隐含着采样点之间的连接关系。所以, 我们常以网格表示采样点的连接关系, 把采样点称作网格点 (Grid)。图1.2.1是按拓扑和几何结构分类而得到的八种体数据类型。

(a) 对于有结构的体数据, 按其采样点之间的几何位置关系可以进一步分为笛卡尔型的 (Cartesian)、规则的 (Regular)、整齐的 (Rectilinear) 和曲线型的 (Curvilinear) 四种类型。在这四种类型中, 物理坐标与逻辑坐标之间的关系分别为 $(x, y, z) = (i, j, k)$, $(x, y, z) = (i \times \Delta x, j \times \Delta y, k \times \Delta z)$, $(x, y, z) = (x[i], y[j], z[k])$, 和 $(x, y, z) = (x[i, j, k], y[i, j, k], z[i, j, k])$ 。也就是说, 从笛卡尔型、规则的、整齐的体数据到曲线型体数据, 对采样点的几何结构要求越来越宽。

(b) 对于无结构的体数据, 按其采样点之间的几何关系可以进一步分为规则的 (Regular)、非规则的 (Irregular)、混合型的 (Hybrid) 的和弯曲型的 (Curved) 四种类型。如果采样空间以某种统一方式进行剖分, 由此形成的采样点连接网格就是无结构规则的。而对同一组采样点采用多种剖分方式, 则得到的是非规则的网格。如果一个体数据的一部分是规则的, 而另一部分是非规则的, 那么它就是混合型的。以上这三种类型的网格都是直线网格, 只有弯曲型体数据具有曲线网格。

有结构规则体数据 (Structured Regular Volume Data) 可以用 n 维数组 (外加表示各轴向网格点间距的 n 个参数 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$) 来表示, 所以它也称作 n 维离散图象 (简称 n 维图象)。本书主要讨论三维有结构规则标量体数据^[15,16] (简称三维体数据, 或称为三维数字图象) 的可视化问题, 这种三维体数据可以用三维数组表示成下面的形式

$$\{f(i, j, k), (\Delta x, \Delta y, \Delta z)\}, \begin{cases} i = 0, 1, \dots, d_1 - 1 \\ j = 0, 1, \dots, d_2 - 1 \\ k = 0, 1, \dots, d_3 - 1 \end{cases}$$

其中, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 分别是网格点在三个轴向上的间距, d_1, d_2, d_3 是体数据的维数, $f(i, j, k)$ 称为三维体数据在 (i, j, k) 上的灰度 (Grey-level) 或密度 (Intensity)。

体素 (Voxel) 是组成体数据的最基本单位。通常有两种体素定义, 一种是把体素定义为中心点在采样点上的小长方体, 这个小长方体内的值是不变的, 都等于该采样点的采样值。另一种是以八个相邻的网格点 $((i, j, k), (i+1, j, k), (i, j+1, k), (i, j, k+1), (i+1, j+1, k), (i+1, j, k+1), (i, j+1, k+1), (i+1, j+1, k+1))$ 为顶点的小长方体当作一个体素, 这个小长方体内的值是变化的, 体素内任一点的值可以用八个顶点上采样值的三线