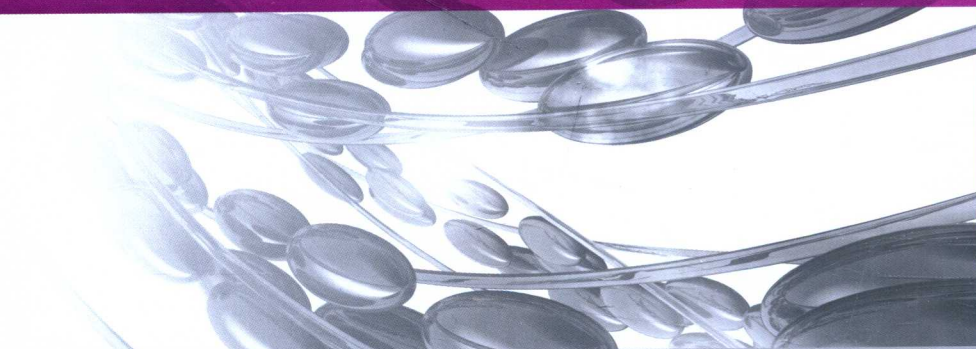




工业和信息化部“十二五”规划教材

体视化技术及其应用

李金 王磊 梁洪 栾宽 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

工业和信息化部“十二五”规划教材

体视化技术及其应用

李金 王磊 梁洪 栾宽 编著



電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

体视化技术是计算机图形学领域中快速发展起来的一个新的研究领域，它在描述客观对象方面所具有的强大功能远远超过了传统的计算机图形学。

本书系统地阐述了体视化技术的基本概念、原理、方法、实现，包括体数据预处理、表面绘制、像空间的体绘制、物空间的体绘制、频域体绘制、三维不规则体数据的体绘制、三维数据并行体绘制等核心内容，并结合我们最近几年的最新科研成果和教改成果，融合体视化技术研究动态以及各个领域的实际应用，突出了工科研究生注重理论与工程实践相结合的宗旨与特色。本书可以作为高等学校研究生的教材，也可以作为从事体视化技术的研究或开发人员的技术参考书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

体视化技术及其应用 / 李金等编著. —北京：电子工业出版社，2015.5
ISBN 978-7-121-26291-3

I. ①体… II. ①李… III. ①计算机图形学 IV. ①TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 126262 号

策划编辑：章海涛

责任编辑：冉 哲

印 刷：北京中新伟业印刷有限公司

装 订：北京中新伟业印刷有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：14.75 字数：377 千字

版 次：2015 年 5 月第 1 版

印 次：2015 年 5 月第 1 次印刷

定 价：59.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

前 言

近几年来, 体视化技术已成为科技先进国家图形学研究的热门课题之一。

体视化的研究对象是用体数据类型定义的数据场, 这些体数据是由三维空间定义的大量点而不仅是表面的集合组成的。这些体数据集合不仅可以用于描述表面, 而且更重要的是, 可以描述整个数据场的变化。

体视化技术研究的是在真正的三维空间里实现数据的输入、存储、构造、分析、处理以及显示的方法, 目的是探查客观事物的全貌, 使人们能够看到客观对象内部原本不可见的复杂结构。

由于全面采用三维表示, 因此体数据类型比面数据类型具有更强的描述能力, 体绘制技术在描述或可视化客观事物内部方面的强大功能越来越受到人们的重视。

在过去的十几年中, 在医学以及科学计算等方面应用需求的推动下, 体视化技术取得了令人瞩目的进展, 人们研究了很多体视化的方法, 用于将体数据集合中的三维信息有选择地显示在二维屏幕上。随着现代计算机硬件技术的不断发展, 这些显示方法的实现已经不存在问题; 而且更重要的是, 基于体数据的表示方法为体数据内部和表面的描述提供了一致的解, 而传统的基于面的显示技术的最主要的缺陷是不能描述体数据的内部, 也不能描述无形的物理现象。

体视化技术的出现, 给传统的计算机图形学带来了一场革命, 具有传统图形学无可比拟的优越性, 它不仅拓宽了计算机图形学的应用范围, 而且使计算机图形学更贴近于科学计算和工程实践。

在本书中, 作者结合自己在体视化技术研究领域的一些研究成果, 并借鉴了大量的文献资料, 介绍了体视化的基本概念、原理、方法、实现、最新研究动态以及在各个领域的实际应用等。

全书共分为 11 章。第 1 章是绪论, 概括性地介绍了体视化技术及其主要应用领域。第 2 章是体视化基础, 介绍了体数据的体素化、滤波、分割、插值等重要的基础工作。第 3 章是 Marching Cubes 方法。第 4 章是体视见方法。第 5 章是体光学模型, 介绍了在体视化中应用广泛的三种光学模型。第 6 章是像空间的体绘制, 介绍了光线投射法。第 7 章是物空间的体绘制, 介绍了足迹表法、基于错切-变形的体绘制算法。第 8 章是频域体绘制。第 9 章是三维不规则体数据的体绘制。第 10 章是三维体数据并行体绘制。第 11 章是体视化技术应用示例。扫描封面或扉页上的二维码, 可以查看书中的彩色原图。

全书由哈尔滨工程大学李金教授主编并统稿, 由哈尔滨工程大学李金、王磊、梁洪和栾宽共同编写完成, 李金编写了第 5~9 章, 王磊编写了第 4 章, 梁洪编写了第 1 章、第 10 章和第 11 章, 栾宽编写了第 2 章和第 3 章。

由于体视化技术是一个新兴的、发展中的学科, 有些术语尚未统一, 也存在许多问题有待研究, 再加上作者从事的研究范围和研究能力有限, 书中难免有不妥之处, 因此, 对本书存在的不足和错误, 恳请专家和读者批评指正。

在本书的编写过程中, 得到了工业和信息化部、哈尔滨工程大学领导和同事们的关心和支持, 在此表示衷心的感谢。

作者

目 录

第1章 绪论	1	2.4 体数据的定义及体素化	28
1.1 科学计算可视化概述	1	2.4.1 体数据的定义	28
1.2 矢量图形与光栅图形	2	2.4.2 体素化	30
1.3 计算机三维重构	5	2.5 体数据的表示方式	30
1.4 面绘制技术	7	2.6 体数据的类型	31
1.4.1 面绘制技术的成像机制	7	2.6.1 按采样空间的维数分类	31
1.4.2 面绘制技术存在的问题	9	2.6.2 按体素的数据类型分类	31
1.4.3 面绘制技术的关键问题研究	9	2.6.3 按采样点之间的拓扑结构 分类	31
1.5 体绘制技术	10	2.7 三维离散拓扑学基础	33
1.5.1 体绘制技术的成像机制	10	2.8 体视化的理论模型	34
1.5.2 体绘制技术所具有的优势	11	2.9 体数据的预处理	35
1.5.3 体绘制技术所存在的问题	12	2.9.1 图像文件的处理	35
1.5.4 面绘制技术与体绘制技术的 特性对比	13	2.9.2 体数据的滤波	35
1.5.5 体绘制技术的关键问题研究	13	2.9.3 图像分割	37
1.6 体视化技术的应用	14	2.9.4 平行切割图像的插值	60
1.6.1 体视化在医学中的应用	14	2.9.5 扇扫切割图像的插值算法	62
1.6.2 体视化在教育中的应用	16	2.10 本章小结	71
1.6.3 体视化在显微分析中的应用	18	思考题	71
1.6.4 体视化在生物学和分子模型 构造中的应用	19	第3章 Marching Cubes 方法	72
1.6.5 体视化在计算流体力学中的 应用	20	3.1 Marching Cubes 方法的基本 原理	72
1.6.6 体视化在有限元分析中的 应用	21	3.1.1 体素中等值面剖分方式	73
1.6.7 体视化在气象学中的应用	21	3.1.2 等值面与体素边界的交点 计算	74
1.6.8 体视化在无损伤探测中的 应用	22	3.1.3 等值面法向的计算	74
1.6.9 体视化在考古中的应用	23	3.1.4 MC 算法流程	75
1.6.10 体视化在石油勘探中的应用	25	3.2 Marching Cubes 方法中二义性的 消除	76
1.7 本章小结	26	3.2.1 Marching Cubes 方法中二义性 问题	76
第2章 体视化基础	27	3.2.2 二义性消除方法	77
2.1 引言	27	3.3 多边形的连接与三角化	78
2.2 体数据的来源	27	3.4 本章小结	79
2.3 断层图像的几种采集方式	27	思考题	79

第4章 体视见方法	80	4.10 沿着光线的累积和合成	132
4.1 引言	80	4.11 本章小结	133
4.2 二维几何变换	81	思考题	133
4.2.1 二维平移变换	81	第5章 体光学模型	134
4.2.2 二维比例变换	81	5.1 光线的发射	134
4.2.3 二维旋转变换	82	5.2 光线的吸收	135
4.2.4 二维错切变换	83	5.3 光线的发射与吸收	136
4.2.5 二维复合变换	83	5.4 本章小结	137
4.3 体变换	84	思考题	137
4.3.1 空间几何变换	85	第6章 像空间的体绘制	138
4.3.2 前向映射变换	89	6.1 光线投射的基本原理	138
4.3.3 逆向映射变换	90	6.2 逆映射中的光线投射	139
4.3.4 逆正交变换和投影	90	6.3 光线投射的基本过程	139
4.4 逆向映射中的光线投射	91	6.4 光线投射的计算方法	141
4.5 两种视见方法	92	6.5 再采样方法	144
4.6 视见方法的比较	93	6.5.1 插值核	144
4.7 颜色	94	6.5.2 最小近邻法	145
4.8 阻光度传递函数设计	95	6.5.3 线性插值法	146
4.8.1 阻光度传递函数	95	6.5.4 三线性插值算法	147
4.8.2 基于体素的阻光度传递函数	95	6.5.5 加权插值法	148
4.8.3 基于体素和梯度的阻光度传递函数	96	6.6 图像合成的基本原理	148
4.8.4 基于体数据直方图熵的分类算法	98	6.7 光线投射积分	149
4.8.5 基于体数据直方图矩的分类算法	106	6.8 光线投射积分的离散化	149
4.8.6 基于直方图凹度的阈值选取方法	112	6.8.1 光线积分的从前向后形式	150
4.8.7 基于 Fisher 准则的阻光度传递函数	113	6.8.2 光线积分的从后向前形式	151
4.8.8 基于核估计的阻光度传递函数	116	6.9 图像合成的方法	151
4.8.9 基于自然选择粒子群的阻光度传递函数	121	6.9.1 利用光线上的一个采样点	151
4.9 体浓淡方法	130	6.9.2 利用光线上的所有采样点	151
4.9.1 概述	130	6.10 本章小结	154
4.9.2 光照模型的选择	131	思考题	155
4.9.3 表面法向量的估算	132	第7章 物空间的体绘制	156
		7.1 Z 缓存算法	156
		7.2 足迹表法	157
		7.2.1 体重构方程	157
		7.2.2 体重构核	158
		7.2.3 足迹函数	158
		7.2.4 足迹表	159
		7.3 错切-变形算法	163
		7.3.1 错切-变形算法基本原理	163

7.3.2 两种基于错切-变形的体绘制 算法的流程	165	10.2.2 CUDA C 语言	185
7.4 本章小结	167	10.2.3 基于 CUDA 的算法并行化 原理	186
思考题	167	10.2.4 基于 CUDA 的脑组织图像体 绘制实例	188
第 8 章 频域体绘制技术	168	10.3 基于改进八叉树的工业 CT 体素编码	190
8.1 基本的频域体绘制算法原理	168	10.3.1 传统八叉树编码	190
8.1.1 二维空间傅里叶投影截面 定理	168	10.3.2 改进八叉树编码	191
8.1.2 三维空间傅里叶投影截面 定理	170	10.3.3 基于改进八叉树的并行光线 投射体绘制	192
8.2 频域体绘制所存在问题的解决 方法	171	10.3.4 基于改进八叉树的并行光线 投射绘制实验与分析	193
8.2.1 线性深度补偿	172	10.4 本章小结	195
8.2.2 指数深度补偿	172	思考题	195
8.2.3 物质分类和颜色赋值与频域 体绘制方法的融合	173	第 11 章 体视化技术应用示例	196
8.2.4 频域边界面突出算法	173	11.1 由计算形成的体数据的 体绘制	196
8.3 本章小结	175	11.2 由计算机模拟形成的胸部 脏器体数据的体绘制	197
思考题	175	11.3 由平行切割获得的头部 CT 图像数据的体绘制	198
第 9 章 三维不规则体数据的体绘制	176	11.4 规则模型的扇扫切割图像 数据的体绘制	202
9.1 规则体数据	176	11.5 不规则模型的扇扫切割图像 数据的体绘制	204
9.2 不规则体数据	176	11.6 工业部件的三维无损检测及 模拟拆卸	207
9.2.1 不规则体数据的规则化	176	11.6.1 汽车模型的体绘制实验	207
9.2.2 直接对不规则体数据进行 体绘制	178	11.6.2 电钻的体绘制实验	209
9.3 本章小结	179	11.7 三维剖分	211
思考题	179	11.7.1 汽车模型的三维剖分	211
第 10 章 三维体数据并行体绘制	180	11.7.2 电钻的三维剖分	213
10.1 并行体绘制基本原理	181	11.8 本章小结	214
10.1.1 基于 CPU 的并行体绘制的 基本原理	181	参考文献	215
10.1.2 基于 GPU 的并行体绘制的 基本原理	182		
10.2 基于 CUDA 的并行体绘制	184		
10.2.1 CUDA 软件体系结构及编程 模型	184		

1.1 科学计算可视化概述

近年来,来自超级计算机、卫星、先进医学成像设备以及地质勘探等领域的数据与日俱增,特别是互联网的飞速发展,人类活动呈现出空间扩展性和时间瞬时性的特点。相应地,产生了大量信息,原有的信息处理方法如数字信号处理、数字图像处理等已不能完全满足用户的多样性需求:准确、直观、迅速、可交互、分布式,数据可视化日益成为迫切需要解决的问题。

强烈的社会需求是科技发展的推动力,也是产生新学科的必要条件。针对大数据场处理问题,美国国家科学基金会(NSF)于1986年专门召开了一次研讨会,提出了“科学计算可视化(Visualization in Scientific Computing, ViSC)”这一全新的概念。在1987年华盛顿召开的科学计算会议上,美国计算机成像专业委员会提出了解决方案:可视化——用图形和图像解释数据。这次会议正式形成了ViSC报告,后称为科学可视化(Scientific Visualization, SV)。从此一门新的交叉学科诞生了。ViSC报告认为:“科学计算可视化是一种特殊的计算方法,它把数字符号转换为几何图像或图形,使研究者能够观察其模拟和计算过程,并进行交互控制。科学计算可视化提供了一种发现不可见信息的方法,丰富了科学发现的过程,赋予人们深刻而意想不到的洞察力,从根本上改变了科学家进行科学研究的方式。”

科学计算可视化涉及计算机图形学、图像处理、计算机辅助设计、计算机视觉及人机交互等多个领域,是发现和理解科学计算过程中各种现象的有力工具,将同“理论—实验—计算”三种科学方法一样广泛应用于科学研究中。10多年来,SV的应用遍及医学、地质勘探、气象预报、分子生物学、核科学等自然科学、工程技术、经济管理和艺术领域,呈现出蓬勃发展的趋势。科学计算可视化的实质是运用计算机图形学和图像处理技术,将科学计算过程中产生的数据及计算结果转换为图像,在屏幕上显示出来并进行交互处理,其核心是三维数据场的可视化。

科学计算可视化技术可按照其功能划分为以下三个层次。

(1) 后处理(Postprocessing)

将计算过程与可视化过程分开,也就是说,数据采集或模拟计算系统与可视化系统可以是两个完全独立运行的系统,用户与数据的采集及计算过程不存在任何交互,用户不能对计算过程进行干预和引导,可视化过程在数据采集或模拟计算完成后的任意时刻的脱机状态下进行。这样做的优点是可以重复显示,此外,由于不要求实时地用图形、图像显示数据,因而,这一

层次上的可视化对计算能力的需求较下面两个层次要低一些。目前，这一层次上的可视化应用最为广泛，如计算流体力学、气象分析计算的后处理。其缺点是，无法提早发现数据采集和计算中的错误，不能及时地得到有关数据的直观、形象的整体概念，而且还有可能丢失大量信息。

(2) 跟踪处理 (Tracking)

可视化过程与计算过程同时进行，即在进行科学计算的同时，实时地对计算的结果数据或测量数据实现可视化。近年来，由于计算机的计算速度迅速提高，内存容量和磁盘空间不断扩大，网络功能日益增强，并可用硬件来实现许多重要的图形生成及图像处理算法，使得直观、形象地用三维动画显示海量的数据和信息并进行实时的交互处理成为可能。另外，由于图像直接从数据中产生，在某些情况下一些数据无须写入介质中，节约了存储容量和存取时间。例如，医学上的 CT 诊断技术和工业无损检测技术均属于跟踪的范围。因此，这一层次上的功能较上一层次需要更强的计算能力。

(3) 驾驭处理 (Steering)

随着网络的发展和计算机能力的进一步提高，科学计算可视化的结果可以自动反馈到计算过程中，即这一层次的功能不仅能对数据进行实时处理及显示，而且如果有必要，还可以根据计算结果通过交互方式修改原始数据、物理模型、计算方法（包括计算网格、边界条件等）及其他参数，使计算结果更为满意，实现用户对科学计算过程的交互控制和引导。为了实现较广范围的驾驭处理，应该具有扩展的交互技术及支持大型数据集的交互技术、灵活的图像绘制功能、三维数据的输入、公共单元的输出手段及动画功能、用户接口等。很显然，这一层次的功能不仅要求计算机硬件具有很强的计算能力，而且要求可视化具有很强的交互功能。目前，这一层次上的可视化系统还不多见。

为适应硬件平台、操作系统、网络和通信方面的飞速发展，体视化的软件产品在近几年中发展很快，它们已可以提供多平台的交互式多维可视化软件开发和集成环境。

实现可视化具有多方面的重要意义。第一，它可以加快数据的处理速度，使数据得到及时有效的利用，极大地提高科学计算的速度和质量；第二，它可以在人与数据、人与人之间实现图像通信，而不仅仅局限于文字通信和数字通信，实现计算工具和环境的进一步现代化；第三，由于可视化可以将计算结果用图形或图像形象、直观地显示出来，使许多抽象的、难于理解的原理和规律变得容易理解，许多冗繁而枯燥的数据变得生动有趣。

体视化 (Volume Rendering) 技术是科学计算可视化中的一个重要分支，研究的是体数据的可视化问题。

1.2 矢量图形与光栅图形

计算机图形学经历了从矢量图形 (Vector Graphics) 到光栅图形 (Raster Graphics) 的发展历程。矢量图形和光栅图形这两个概念在没有计算机之前好像难以理解，实际上，这是在计算机技术特别是 CAD 技术发展以后才拥有具体内容的东西。

矢量图形，又称为向量图形，发展于 20 世纪 60 年代到 70 年代，是用包含位置和颜色属性的直线或曲线（称为矢量）来描述图像属性的一种方法，即用数学函数来描述图形的位置、大小、形状和色彩。其基本原理是：定义一些诸如点、线、圆、圆弧、多边形、曲线、球、立方体等基本图素（图形基元），这些基本图素存放在显示列表中，并依此建立更复杂的物体，

物体的描述、变换和显示都建立在图形基元之上。例如，要画一个圆，第一种方法是用公式法，这种方法先判断函数代表的曲线形状（比如圆形），然后根据圆心和半径画图，这就是矢量图形的绘制原理。也就是说，每个图形元素都是由几个简单的控制点位置来描述的，而不是直接描述数据的每个点，画矢量图就像画几何图形和函数曲线。对显示列表中的图形基元不断地重绘起到屏幕刷新的目的，从而保证物体保留在屏幕上。图 1.1 给出了矢量图形系统示例。

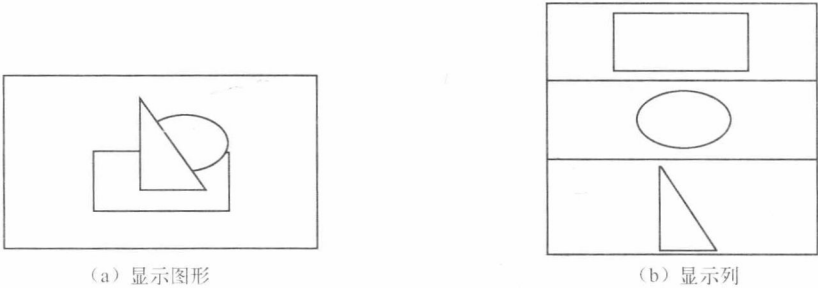


图 1.1 矢量图形系统示例

画一个圆，第二种方法是用描点法。这种方法先列出图上点的坐标，然后描出图形。这就是栅格图的画图机制。

光栅图形又称为栅格图形，也叫作位图图像（Bit-Map Image），是指在空间和亮度上已经离散化的图像，是在 20 世纪 70 年代后期逐渐发展起来的。它使用称为像素的一格一格的小点来描述图像。像素是图像的基本单位，是一个有颜色的小方块。图像由许多像素组成，它们以行和列的方式排列。即用像素来代表图像，每个像素都被分配一个特定位置和颜色值。因为图像是由方形的像素组成的，这就导致了图像必须是方形的。计算机的屏幕其实就是一张包含大量像素点的网格，光栅图形是由这样的像素矩阵构成的，有人将光栅图形的产生比喻成绘画：图形由“墨水”等有颜色的点点缀而成，画光栅图就像素描、水彩画。也有人将光栅图形的产生比喻成铺瓷砖，所以，光栅图形在放大的时候变得更颗粒化，并且图像边缘呈锯齿状，最终变得难以识别，这是因为放大以后将单个的像素都显露出来了。

通常，把一幅位图图像考虑为一个矩阵，矩阵中的一个元素（像素）对应图像的一个点，相应的值表示该点的灰度或颜色等级。图 1.2 给出了光栅图形系统示例。

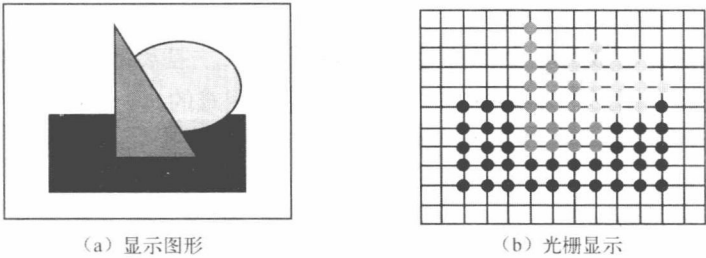


图 1.2 光栅图形系统示例

矢量图形和光栅图形的属性对比如下。

(1) 矢量图形是画线，而光栅图形是画点

矢量图像是用包含颜色和位置属性的直线或曲线来描述图像属性的一种方法。例如一个椭圆，它包括由通过椭圆边缘的一些点组成的轮廓和轮廓内的点两部分。

对于矢量图形,椭圆的颜色取决于椭圆轮廓曲线的颜色和轮廓封闭的区域颜色,与轮廓内单独的点无关。可以通过修改描述椭圆轮廓的直线或曲线来更改椭圆的性质,也可以进行移动、放缩、变形操作,或者在不改变图形显示质量的前提下,改变具有矢量性质的椭圆的颜色。

光栅图形用每个栅格内不同颜色的点(像素)来描述图像属性。同样,椭圆可以由所有组成该椭圆的像素的位置和颜色来描述。因为编辑光栅图形时,修改的是像素,而不是直线和曲线,所以无法通过修改描述椭圆轮廓的直线或曲线来更改椭圆的性质。

(2) 物体显示与屏幕刷新

在矢量图形系统的显示过程中,需要对显示列表中的内容(基本图素)不停地显示,才能达到屏幕刷新的目的。因此,矢量图形显示是与显示物体紧密地结合在一起的,即物体的显示嵌入屏幕刷新过程。用基本图素可以构成简单的物体,也可以构成复杂的物体。但当物体的形状十分复杂时,显示列表中基本图素的数量就会很大,屏幕刷新的负担也就加重了。严重时会导致刷新频率过低,影响视觉效果。

而光栅图形最吸引人之处是它将显示图像的生成与屏幕刷新分成两个独立的部分,即光栅图形的扫描变换独立于屏幕刷新过程,这使得屏幕刷新与被显示场景和物体的复杂性无关,即一旦显示图形生成完毕,光栅图形显示将不再受景物复杂度的影响。

(3) 几何变换

矢量图形中的每个基本图素都是一个自成一体的实体对象,它们具有颜色、形状、轮廓、大小和屏幕位置等属性。既然每个对象都是一个自成一体的实体,就可以在维持它原有清晰度和弯曲度的同时,多次移动和改变它的属性,而不会影响图例中的其他对象。所以,矢量图形是面向对象的。

矢量图形的一个优点是,它们能够被任意放大、缩小而不损失细节和清晰度,也不会扭曲。它另外一个优点是,在矢量图中可以只编辑其中某个单个物体而不影响图中的其他物体。例如,想缩小或放大矢量图中的某个物体,只要选中它,进行缩放操作就可以了。矢量图物体间可以相互覆盖而不会相互影响。

在光栅图形中,每个像元是由许多单个激光点组成的。一个光栅图形详细地规定了生成多少个像元,像元数不随输出器件的分辨率改变而改变。位图图像是不能被任意放大的。当图像扩大时,像素栅格尺寸也相应增大,可以看见构成整个图像的无数个方块,从而使线条和形状显得参差不齐,所以清晰度就下降了。

光栅图形导入后,将成为一个单独对象,也就是说,一旦离散化后,“物体”的概念就不存在了。所以,在光栅图形中要编辑它的单个物体是很困难的。

(4) 显示图形的走样现象

矢量图形利用点和线等矢量化数据描述图像,并在图形中包含色彩和位置信息。矢量图形的最大优点是“分辨率独立”。当显示或输出图像时,图像的品质不受设备的分辨率影响,能够提供高清晰的画面。放大和缩小矢量图不会影响图像品质。

光栅图形受分辨率影响,与分辨率有关,也就是说,它包含固定数量的像素,因此,在屏幕上以较大的倍数放大显示,或以过低分辨率打印时,光栅图形会出现锯齿边缘。

(5) 存储量

光栅图形需要的存储量大,并且需要帧缓存有较强的处理能力,这两个问题曾一度严重制约了光栅图形的推广。直到 20 世纪 70 年代末期,随着廉价、快速存储器以及其他硬件的问世,

这两个问题才得到解决，光栅图形也才开始为人们所接受。

而矢量图形通常占的存储空间要比光栅图形小得多。在分辨率相同且图形大小相同时，光栅图形所需要的存储量可能是矢量图形的 10~1000 倍。

(6) 与数字图像的相容性

光栅图形特别适用于二维图像的显示，它为几何定义的图形与图像的融合提供了一个理想的环境。

(7) 块运算

在光栅图形上可以方便地实现块操作。例如，它可以快速地对屏幕上的一个区域填充某种纹理。

矢量图形与光栅图形的属性对照简表见表 1.1。

表 1.1 矢量图形与光栅图形的属性对照简表

序 号	属 性	矢 量 图 形	光 栅 图 形
1	画图机制	画线	画点
2	物体显示与屏幕刷新	物体显示嵌入屏幕刷新过程	扫描变换独立于屏幕刷新过程
3	几何变换	连续的，变换作用于几何定义的形体	离散的，变换作用于区域内的所有像素
4	显示图形的走样现象	没有走样	会产生走样
5	存储量	变化的，依赖于景物的复杂度	很大，但恒定不变
6	与数字图像的相容性	不相容	完全相容
7	块操作	困难	容易

光栅图形的上述优越性，加上相应的处理硬件的发展，以及反走样技术的提高，促使了矢量图形向光栅图形的转变。

1.3 计算机三维重构

1895 年 11 月 8 日，德国物理学家伦琴（Rontgen）在调试一组阴极射线仪器时，发现了 X 射线，并用 X 射线给他夫人的手拍了人类历史上第一张 X 射线图像。这是人类科学史上的一个重大事件，被称为 19 世纪最伟大的发现之一。伦琴本人也因为这一重大贡献获得了第一个诺贝尔物理学奖。

如图 1.3 所示的是伦琴和 X 光图像。

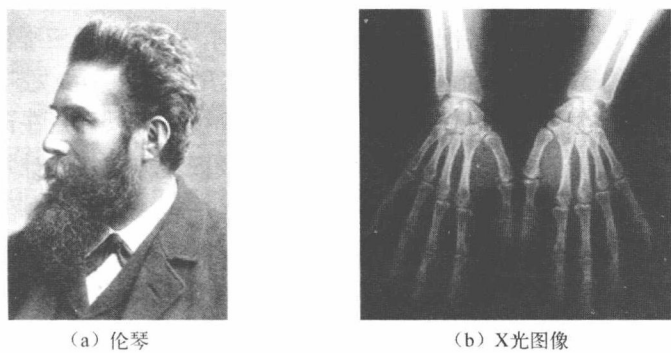


图 1.3 伦琴和 X 光图像

X 射线透视设备的诞生,使人们拥有了探索事物内部的手段。它一出现就在医疗诊断和工业探伤上发挥着重要的作用。然而,这种设备产生的 X 光照片只是一种透视投影图像,它仅反映出 X 射线穿过人体或工件后的衰减程度。虽然从这种 X 光照片中,人们可以在一定程度上发现人体内部的肿瘤,以及检查器官是否正常,也可以检测机械部件内部是否有气泡和裂痕等,但是人们无法从 X 光照片中获得对象的立体信息,如肿瘤在三维空间的位置、形状等。

1968 年,英国 EM 公司的工程师 Hounsfield 成功地设计出计算机辅助大脑扫描器(Computer-assisted Brain Scanner),它可以产生清晰的断层图像。这是医学影像技术发展史上非常重要的一个里程碑,而 Hounsfield 与南非物理学家 Cormack 因此获得了 1979 年诺贝尔物理奖和医学奖。进入到 20 世纪 70 年代以后,各种医学影像技术不断出现,计算机断层扫描(Computed Tomography, CT)、核磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, MRI)、超声(Ultrasonography, US)、正电子辐射断层摄影(Positron Emission Tomography, PET)和光电子辐射断层摄影(Single Photon Emission Computer Tomography, SPECT)等影像技术逐渐成熟,让人们可以得到人体内部器官的二维数字断层图像,使得传统的医学诊断方式发生了根本性的变革。

在大多数的医学影像诊断中,主要通过观察一组 CT、MRI 的二维切片图像去发现病变体,但这些切片只能提供人体内部的二维断层图像,二维图像只是表达某一界面的解剖信息,因此医生只能凭经验由多幅二维图像去估计病灶的大小及形状,“构思”病灶与其周围组织的三维几何关系,这就给诊断带来了一定的困难。在放射治疗应用中,仅由二维图像上的某些解剖信息进行简单的坐标叠加,不能给出准确的三维影像,可能会造成病变定位的失真和畸变。

因此,人们迫切地希望根据二维切片重构物体的三维信息。三维重构技术从手工方法、光学方法到计算机处理方法已有了 100 多年的历史。计算机三维重构就是通过仪器从人体或物体的某一部位几个不同位置获取若干数量的二维断层图像,然后将这些二维断层图像以及它们之间的位置和角度信息一起输入计算机,由计算机对这些切片进行组合和处理,最后在计算机显示器上精确地再现这些部位原来的三维构型。利用医学可视化技术从一系列连续的二维切片重建出人体器官、软组织和病变体等的三维模型并进行三维显示,可以真实再现对象的本来面貌,辅助医生对病变体或感兴趣的区域进行定性直至定量分析,使医生能够充分地了解病灶的性质及其周围组织的三维结构关系,并辅助医生对病变体和周围组织进行分析。

利用可视化技术重建出三维医学图像并不是最终目的,人们不仅要求能够“观看”,更重要的是能够对重建出的三维医学图像进行各种交互操作。最简单的交互操作是旋转、缩放和平移,它可以让医生获得一个较好的观察角度,以便对病情做出正确的判断。例如,虚拟切片提取,可以再现三维物体的某一断层情况;三维物体的切割,可以去除三维物体的某一部分,显示出被它覆盖的内部结构等。例如,髋关节发育不正常在儿童中并不少见,在进行矫形手术时,需要对髋关节进行切割、移位、固定等操作。利用可视化技术可以首先在计算机中构造出髋关节的三维图像,然后对切割部位、切割形状、移位多少及固定方式等在计算机中进行模拟,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,从而大大提高矫形手术的质量。又如,在进行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部位,整个过程既要求治疗效果最好,又要保证整个手术过程及同位素射线不伤及正常组织。由于人脑内部结构十分复杂,而且在不开颅情况下,医生无法观察到手术进行的实际情况,因而要达到上述要求是十分困难的。利用可视化技术,就可以在重构出的人脑内部结构三

维图像的基础上,对颅骨穿孔位置、同位素置入通道、安放位置、等剂量射线等进行计算机模拟,从而帮助医生做出准确的诊断和制定最佳的手术方案,不仅如此,还可以在手术过程中对手术进行情况在屏幕上予以监视,使医生们做到“心中有数”,极大地提高了医疗诊断的准确性和科学性,从而提高了手术的成功率。

计算机三维重构技术的历史经历了从面绘制 (Surface Rendering) 到体绘制 (Volume Rendering) 的发展过程,并获得了迅猛发展。

1.4 面绘制技术

1.4.1 面绘制技术的成像机制

矢量图形基于对象的方法被推广到三维重构就构成了面绘制的基础。面绘制技术在屏幕上仍然采用光栅显示技术,而在对象的描述、变换以及显示图像生成等方面则采用基于对象的方法。在三维重构中同样要将对象保存在一个显示列表中,所不同的是,这个列表中存放的不仅仅是点、线、多边形等基本图素,同时还有三维空间中对象的面(平面或曲面),即对象以它的表面作为表示、操作和显示的核心,需要对显示列表中的几何基元进行维护和处理。对列表中对象的任何改动或者视见参数、光照参数等变化(如改变视点)时,都要重新生成显示图像。被称为几何机 (Geometry Engine) 的计算机图形处理的专门硬件在过去曾风靡一时,造就了面绘制技术在三维图形领域的辉煌。

医学图像的三维重构就是根据输入的断层图像序列,经分割和提取后,构建出待建组织的三维几何表达。这种三维几何表达的模型最常用的就是表面模型。表面模型一般以平面片特别是三角面片来逼近表示,对于封闭的表面,构成一多面体,这时也称多面体模型。

从物体的表面进行物体的三维重构在诸如医学和 CAD 等很多领域中具有重要的意义。从 20 世纪 70 年代中期到末期,由于受当时计算机断层成像发展水平的限制,CT 切片的厚度和切片之间的距离都很大,因此早期的研究工作主要集中于轮廓连接 (Contour Connection), 或称为从平面轮廓重建形体 (Shape from Planar Contours), 也有人称为切片级重建方法。其中,具有代表性的是 Keppel 在 1975 年提出的用三角片拟合物体表面的方法。这类重建方法需要解决断层图像上的轮廓提取、层之间的轮廓对应和物体外表面的拟合等问题。

切片级重建方法是指从一组显微切片图像重建微观结构,或从一组扫描的断层图像重建感兴趣区的三维图像。可以从每个切片或断层中首先提取感兴趣区的轮廓曲线,再由这一组平面轮廓重建三维物体的形态。该方法的主要步骤如下。

(1) 平面轮廓的提取

平面轮廓的提取一般基于物体与背景间灰度或其他属性的差异进行分割。

(2) 片间轮廓的对应

一般通过对不同层面上轮廓重叠部分进行定量比较,或应用一些能够描述轮廓形状的椭圆拟合、柱体生长等方式进行判断。

(3) 轮廓拼接

确定了对应的轮廓之后,还需要确定对应轮廓上的对应点。由于人体结构在不同层面上的形态可能有较大差异,因此“对应点”只是相对而言。通常采用活动轮廓法,典型的有蛇形法、

气球法等。一般，在一个轮廓上选取一定数量的控制点，在另一个轮廓上选取数目相同的活动点。用相同序号点间欧式距离作为产生外力的来源，作用在活动点上使其发生位移。控制点与活动点的距离越大，作用力和位移也越大。为使形变过程中整体轮廓拓扑不变，还应在相邻点间加上横向约束力。整个轮廓对应点过程就是类似弹性形变过程。确定了对应点之后，可以用小三角形或四边形面片将相邻层面上对应点及相邻点连接起来。这些小三角形连接起来就构成了物体表面的大致表示。

(4) 曲面拟合

小三角形结构只能是物体表面的粗略表示，较为精确的方法可用曲面拟合，即通过小三角形顶点的曲面代替三角形平面。常用的有三次 B 样条插值，更为精细的有非均匀有理 B 样条 (NURBS)。

在医学上切片级重建是以断层图像作为处理的对象的，首先在每个切片图像上抽取出物体的轮廓，然后用轮廓拼接构造通过这组轮廓的物体表面。从一组平行的平面轮廓重建三维形体必须解决以下 4 个基本问题。

(1) 轮廓对应问题

确定相邻切片上轮廓的对应关系。由于约束不足，因此轮廓对应存在很大的任意性。特别是当切片间距很大时，轮廓之间的错位也会很大，对应问题就变得越发难以解决。目前还没有完全可靠的解决轮廓对应问题的全自动方法，人工干预在某些场合还是必不可少的。目前常用的有轮廓覆盖检查和基于全局的广义柱体 (Generalized Cylinder) 方法。

(2) 轮廓拼接问题

用多边形或者三角片连接不同层上的对应轮廓以“最佳地”表示物体表面，“最佳”的含义是使某种准则最优。其关键是确定对应轮廓上点的相互对应关系，并用多边形构造轮廓间的表面。通过一组平面轮廓的曲面有无穷多个，为了使重建问题有解，人们引入新的约束，如体积最大、表面积最小、对应方向一致、跨度最小或者使轮廓点匹配方向最大程度与质心匹配方向一致等。轮廓拼接就变成了基于这些优化目标的优化问题。

(3) 分叉问题

当一个物体在一对相邻断层上的轮廓个数不相等时就会发生分叉情况。分叉发生时的轮廓对应关系一般无法由分叉发生的局部信息来确定，分叉处理必须依赖于形体全局的拓扑和几何结构。

(4) 曲面拟合

根据以上步骤确定的点之间的连接关系和表面拓扑结构，确定最佳的拟合曲面。一般选用参数曲面拟合拼接得到多边形网格，产生光滑的表面。在拟合过程中，网格点作为控制点，网格点之间的连接关系决定曲面的拓扑结构。

在切片级重建中，轮廓对应和拼接以及对分叉情况的处理都是关键性的问题。这方面的代表性工作是 Kepple 和 Boissonnat 的“从平面轮廓重建三维形体”。从理论上来说，虽然引入新的约束除去了原始重建问题的多义性，但却不能保证重建出的曲面很准确地表示真实物体的表面。另一个更加棘手的问题是对分叉情况的处理没有可靠的方法。当三维物体自身出现分叉状态时，在断层图像上表现为相邻断层上的轮廓存在一对多的关系，这时由于约束不足，轮廓对应的随意性很大。再者，切片级重建方法把各切片上抽取的物体轮廓作为输入，但是至今仍没有鲁棒的分割方法能保证边缘轮廓抽取的正确性，人机交互仍是不可缺少的。尽管切片级重建

方法目前存在一些尚未解决的问题,但是在物体几何结构不是十分复杂的情况下还是能够自动地重建出物体的表面的。

切片级表面重建在处理存在多重轮廓、分叉、孔洞等情况时较为复杂,特别是在重建复杂组织器官(如大脑)时,轮廓形状复杂,处理起来很困难。随着新一代 CT 和 MRI 设备的出现,切片间距及切片内像素间距都可以达到很小,出现了基于体素级的重建方法。

基于体素级的表面重建方法主要有立方体法(Cuberille)、移动立方体法(Marching Cubes, MC)和剖分立方体(Dividing Cubes)方法。其中 Lorensen 等人于 1987 年提出的移动立方体法是最有影响的等值面构造方法,一直沿用至今。最初的 MC 算法不能保证三角片所构成的等值面的拓扑一致性,会造成等值面上出现孔隙。M. J. Durst 首先提出了 MC 算法中的二义性,后来许多人在 Lorensen 方法的基础上做了改进。解决二义性的方法主要有两类:采用双曲线渐近线交点来判定二义性面和采用四面体细分立方体。

移动四面体法(Marching Tetrahedra)是在 MC 算法的基础上发展起来的,该算法首先将立方体剖分成四面体,然后在其中构造等值面。进行四面体剖分后,等值面在四面体中的剖分模式减少,算法实现简单;其次,构造的等值面较 MC 算法构造的等值面精度高。而最直接的原因是企图通过在四面体内构造等面来避免 MC 算法中存在二义性问题。

三维面绘制的主要优点是可以采用比较成熟的计算机图形学方法进行显示(如裁剪、隐藏面消除和浓淡计算等),其计算量小,运行速度快,借助于专用的硬件支持,可以实现实时交互显示的功能。尽管面绘制技术中目前存在一些尚未解决的问题,但是面绘制研究中的很多理论和技术都处于成熟阶段,并且获得了广泛的应用。

1.4.2 面绘制技术存在的问题

传统的计算机图形学可以利用称为图素(Primitive)的点、线和多边形等基本构件去模拟一个场景。在面绘制技术的基础上,可以利用诸如纹理映射(Texture Mapping)等很多技术来增加物体的真实性。但是,利用传统的计算机图形学不论模拟多么逼真,如果想透过物体的外表面看物体的内部,将一无所获,原因是这些场景缺少真实物体的内部信息。因而,面绘制的最大缺陷就是它只能描述物体的表面,换句话说,它无法描述物体的内部。例如,在前列腺的诊断和治疗当中,如果前列腺肿胀的话它就会压迫尿道,在这种情况下病人会感到排尿困难。为了获得更好的治疗方案和配合外科手术,医生不仅要了解前列腺的病变情况,还要了解尿道的病变情况,但遗憾的是,面绘制技术对此无能为力。

1.4.3 面绘制技术的关键问题研究

(1) 型值点的确定(Determination of Nodes)。为了防止三维图像显示时形状扭曲等畸变现象的出现,型值点的确定在面绘制过程中是至为重要的关键步骤。

(2) 二维图像之间的插值(Interpolation)。由于获得的二维图像数量有限,且通常截面间的距离要比截面内像素间的距离大得多,因此必须进行插值处理,以获得更多的截面。

(3) 视见变换(Visual Translating)及显示。视见变换实现的是图形经过几何变换产生新图形的过程,其既可以看作图形不动而坐标系动,又可以看作坐标系不动而图形动。为使显示对象在合适位置以合适的大小和方向显示出来,需要对其进行旋转、平移、缩放等几何变换。

(4) 消隐(Hiding)。人们所研究的三维图形是由网格线连接的,如果显示时,可见的和

不可见的网格线都显示出来，势必会影响视觉效果，很容易产生错觉，不利于分析和理解图形。所以，消隐不仅是为了视觉的真实，更重要的是为了更好地理解计算结果。因此，为了避免产生二义性，消除图形中的隐藏线、隐藏面和隐藏体是非常必要的。但是，消隐又是计算机中较为困难的问题。

(5) 明暗处理 (Shading)。为了获得真实感的图形，需要对消隐处理后的三维图形进行明暗着色处理，计算出图像上的每个像素点的光强值，得到一个有明有暗的真实图像。这种显示方法有较好的视觉效果。

1.5 体绘制技术

1.5.1 体绘制技术的成像机制

推动计算机图形学从矢量图形向光栅图形演变的同样的动力，在计算机存储器和处理能力大幅度提高的情况下，也促进了从基于面的技术向基于体的技术的应用的进步。这种趋势首先很自然地在诸如三维医学图像和科学计算可视化等采样和计算数据等领域中获得应用，在这些应用中，数据集合都是体数据形式。多种多样的、从实验获得的体数据可视化应用也是体图形学发展的主要推动力。

如前所述，很难用传统计算机图形学中的基本图素去真实地描述物体的内部和易变形的物体，在这种情况下，体绘制技术 (Volume Rendering) 便应运而生。体绘制是计算机图形学的一个新的分支，它在很多方面优于面绘制，其中，能够描述物体的内部是体绘制的最大优势，它为计算机图形学带来了生机并开拓了更加广泛的应用领域。

体绘制技术研究的是体素化对象的产生和显示等问题，所有的对象都转换成一个均匀的中间对象——体素，每个体素都是原子的，并可以最大限度地描述体素所蕴涵的对象的信息。这些体素存放在一个称为体缓存 (Volume Buffer) 的介质中。体缓存既可以是实际的物理器件，也可以用软件模拟。

与光栅图形相对应，体缓存可以看作一种“三维光栅”，三维光栅中体素的概念源于二维光栅图像中的像素，是像素在三维空间的推广。

简单讲，体绘制是一种在二维图像显示器上显示体数据的方法。这些体数据可能是在三维空间物体采样的结果，例如，人脑的磁共振图像。通过体绘制，三维空间采样点的集合可以转换成计算机二维屏幕上有意义的图像。体绘制与传统图形显示方法的思想截然不同，它的最大特点在于放弃了传统图形学中“体由面构造”这一约束，在不构造物体表面几何描述的情况下直接对体数据进行显示，采用体绘制光照模型直接从三维数据场中绘制出各种物理量的分布情况，也就是说，直接研究光线穿过三维体数据场时的变化，得到最终的绘制结果。

因为体绘制的对象不再是用几何曲面或曲线表示的三维实体，而是以体素 (Voxel) 作为操作的基本单位，每个体素都对显示图像产生一定的影响，所以，体绘制的目的就在于提供一种基于体素的绘制技术，它有别于传统的基于面的绘制，能显示出对象体的丰富的内部细节。

体绘制技术的出现不仅拓宽了图形学的应用范围，而且使图形学更贴近于科学与工程上的描述，如图像处理、计算机视觉、有限元分析等。