

重点大学计算机教材

HZ BOOKS

计算机图形学

Computer Graphics

何援军 编著

上海交通大学



机械工业出版社
China Machine Press

重点大学计算机教材

计算机图形学

Computer Graphics

何援军 编著

上海交通大学



机械工业出版社
China Machine Press

本书用通俗易懂的语言、精心设计的图示清晰而准确地讲述了计算机图形学的基础理论、算法、几何模型与数据结构等内容,包括光栅图形学、图形裁剪、基本几何、二维几何、图形变换、三维几何、几何造型、光照模型、曲线和曲面、曲线拟合和双圆弧逼近、交互式图形系统的设计问题,以及 CAD 系统中的一个难点——参数设计问题。为加深学生对基本知识的理解,本书每章后都附加了相关习题和思考题。

本书可作为计算机图形学(Computer Graphics, CG)课程的教材,也可供从事图形处理和计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)的相关人员参考。

版权所有,侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

图书在版编目(CIP)数据

计算机图形学/何援军编著. —北京:机械工业出版社, 2006. 1

(重点大学计算机教材)

ISBN 7-111-18234-0

I. 计… II. 何… III. 计算机图形学—高等学校—教材 IV. TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 157765 号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:李云静

北京牛山世兴印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2006 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·22.5 印张

印数:0 001-5 000 册

定价:35.00 元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换
本社购书热线:(010)68326294

作者简介



何援军，1945年7月生，1968年毕业于浙江大学数学系。现为上海交通大学计算机系教授、博士生导师。

1992年7月被中国船舶工业总公司授予“有突出贡献中青年专家称号”，同年10月起享受政府特殊津贴。事迹曾被《上海科技报》和《中国船舶报》报道，《计算机辅助设计与制造》杂志也曾人物篇刊载过专访。

1973年主持我国第一台引进的大型数控绘图机软件的接收工作，此后，一直从事计算机图形处理、CAD等的理论研究和软件开发工作。

正在主持和曾经主持过的项目有国家自然科学基金、863等课题和上海市、中国船舶工业总公司的重点和重大课题等。分别获得过全国科学大会奖(1项)，国防工办2等奖(1项)，中国船舶工业总公司科技进步2等奖(1项)、3等奖(3项)和上海市科技进步2等奖(4项)等多项国家和省市级科技进步奖。国家“八五”课题《船舶CAD支撑软件》曾荣获国家计委、国家科委和国家财政部联合颁发的《国家“八五”科技攻关重大科技成果》。

主研的CAD软件曾在由国家科委主持的全国自主版权软件评测中获得同类软件第一名，登记计算机软件著作权1项。

正式出版的学术专著有《计算机图形学算法与实践》(1990，湖南科技出版社)和《CAD图形开发工具》(1997，上海科技出版社)等2本，发表论文70余篇。

“九五”期间曾任上海市CAD应用工程专家组成员。现任中国工程图学学会副理事长、计算机图形学专业委员会主任委员和上海市工程图学学会理事长。

主要研究方向：CAD、计算机图形学，计算机信息集成技术，几何计算的理论、算法和软件等。

Email: yjhe@sjtu.edu.cn

前 言

图形是传递信息最主要的媒体之一,计算机图形学的发展和应用在某种意义上已成为计算机软硬件发展水平的标志。它已成为一门成熟的学科,是信息技术中不可缺少的重要内容和基石。“计算机图形学”课程也已成为大学计算机、机械等相关学科的一门主干课程。

本书对一些被普遍认同的计算机图形学领域的理论、技术和算法作了介绍,主要定位于作为计算机图形学(Computer Graphics, CG)课程的教材,兼作计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)的科研参考书。

理论教学与应用实践应各有自己的定位和目标,前者培养学生解决问题的思维方式,后者提高学生解决问题的能力。本书强调了对**基础理论、算法、几何模型与数据结构**等内容的叙述,并努力保证它们的正确性,尽可能使叙述准确、清晰。

基础理论。计算机图形学理论与计算机科学中的算法设计、算法分析、数据结构等学科密切相关。本书强调了对理论核心思想的阐述,用通俗易懂的语言,简明、透彻地阐明这些理论最本质的思想,附以精心设计的图示形式,力图使读者在较短的时间内掌握这些基本理论。

算法。本书重视原理上的阐述,从理论上分析各种算法的原理、可行性及几何复杂性。对各种典型的算法尽可能比较多种可能的方案,分别指出它们的优缺点和应用场合(某些关键思想将被反复运用)。在如何提高算法的效率,保证算法的准确性、可靠性,怎样处理好多值问题以及如何组织好数据结构,提高程序设计的技巧等各方面都进行了仔细推敲。精心设计算法用例,提高算法的正确性、示范性和适应性。采用通用的、规范化的描述形式,例如近于自然语言的算法描述、伪代码形式和全局性较好的框图形式等。

几何模型与数据结构。本书重视几何模型与数据结构的描述,便于读者更好地理解其背后的理论依据,也是对数据结构、程序设计等主干课程的一次深化和应用。

本书由13章正文和3篇附录构成。

第1章 绪论。阐述了计算机图形学的学科定位;与其他学科CAD(及计算机绘图)、计算几何(Computer Geometry)、图像(Image)等的关系;叙述了计算机图形学中的一些基本概念、基本任务和它们在计算机图形学中的作用和地位;根据计算机图形学理论和技术的发展情况,简单地介绍了当前计算机图形学的相关开发技术。

第2章 光栅图形学。对基本几何(直线、圆、椭圆等)光栅化的理论和算法,以及多边形填充、字符和汉字显示、反走样等计算机图形学的基本理论和算法作了详细的讲解。本章是计算机图形学的“入门”章,努力用浅显的语言和直观的图示形式阐述各种变量的几何意义,引导读者“入门”计算机图形学。这是吸引读者学好计算机图形学的关键。

第3章 图形裁剪。本质上,图形裁剪应是一种几何计算问题,它与基本几何的光栅化算法不同,因此单列一章。

第4~8章涉及基本几何、二维几何、图形变换、三维几何和几何造型等各个方面。这些内容全部基于一套以向量几何为理论、以“方向性”概念为基础的几何计算理论体系。这套理论不仅统一了点、线(向量)、圆(弧)等基本几何及曲线和图形等的表示,并将基本几何与角度、距离、面积、分比、几何元素连接时的方向、封闭图形的边界走向等辅助几何(属性)

有机地联系在一起。同时,引入“交点特征”的概念,有效地将二维布尔运算下降为一维向量计算、将三维布尔运算下降为二维布尔运算、将三维消隐算法最终归结为一维交集算法等等,从而使几何计算的复杂性大为简化,极大地提高了布尔运算、几何造型以及参数化设计等重大几何计算的稳定性和计算效率。

由此构筑了一种全新的、统一各种图形变换的坐标几何变换新机制,将平移、旋转、错切等坐标变换统一于基本几何体系,使基本几何与几何变换有机联系起来。阐明了“投影”和所谓“投影变换”的机理。研究了透视变换矩阵系数的意义和构造方法,使透视变换矩阵“量化”,以寻求在给定“灭点”的情况下定量求取透视变换系数的方法。

基本几何点、线(向量)、圆(弧)和面的定义以及它们之间的相互关系虽然并不复杂,但是作为描述所有图形和几何体的基础,其定义的严密性和算法的强壮性以及处理的效率却至关重要。需要深入地研究这些基本几何的有关问题,研究几何计算的稳定性和算法的复杂性理论,探索基本几何的方向定义以及它对几何计算效率的影响,建立对角度、距离、面积、分比、几何连接、封闭图形的边界走向等几何和属性概念的新涵义、新体系。

根据这套几何计算的理论体系,在第5章“二维几何”、第7章“三维几何”和第8章“几何造型”中叙述的经典几何算法:凸包算法、包容性测试算法、图形填充算法、2D和3D布尔运算算法、一维交集算法、消隐算法和三维几何造型算法等等,“交点特征”和“几何方向”的优越性发挥得淋漓尽致,使这些在基本几何新体系上构筑的典型几何算法变得出奇的简单。

整个体系显得较为完整、相对完善、使用方便。所有引入的理论和算法均提供了详细的例证,相信能被读者与同行接受和应用。

第9章讨论的光照模型是当前计算机图形学学科发展最快、最引人注目的方向,也是目前计算机图形学应用最广的部分。本书介绍了产生真实感图形的基本理论、原理、模型和算法。

先简单地介绍了光和颜色的基本概念,增加了“色彩应用”一节,供实现算法的读者构造出或热情、欢快、激动、奔放,或恬静、低沉、淡雅、严肃,或沉思、幽静、柔和,或朝气蓬勃、向上的作品来。

接着采用从简到繁,逐步深化的叙述方式,以环境光、漫反射和 Lambert 模型、镜面反射和 Phong 模型、透明模型的次序,自然地引出简单局部光照模型。

Gouraud 明暗处理——光强插值算法和 Phong 明暗处理——法向插值算法从本质上讲是一种几何算法,本书将它单独列为“插值算法”一节。

光线跟踪是整体光照模型的基础,也是计算机图形学中典型的、较难的算法。本书强调了光线跟踪算法原理的叙述,配以插图,使读者更易理解。光线跟踪算法中的关键技术则强调了可能采用的策略,并未展开。例如几何求交的问题,在有些书中列举了直线与立方体、球和二次曲面等的求交算法,其实,这种求交工作是几何计算或数学问题,无法一一枚举,倒不如将它的本质列出,给读者一个自由发挥的天地。

阴影算法,本书强调了自身阴影和投射阴影的概念。

纹理问题,将颜色纹理和几何纹理概念分别予以讨论。

从工程应用的角度讲,曲线曲面可分成两大应用需求:设计型和拟合型。“设计型”往往是设计人员对其所设计的曲线(曲面)并无定量概念情况下于设计过程中的即兴发挥。“拟合型”曲线则是对已经存在的离散点列(例如通过测量或实验得到的一系列有序点列)构造出尽

可能光滑的曲线或曲面,用以直观(而忠实)地反映出实验特性、变化规律和趋势等。

第 10 章介绍的由 Bézier 提出的一种由控制多边形定义曲线和曲面的方法是“设计型”曲线曲面的典型代表。曲线、曲面本身的基础理论和进一步的研究与发展应该属于计算机辅助几何设计(Computer Aided Geometric Design)的范畴,在计算机图形学中讲授曲线、曲面知识的目的是更好地在计算机上显示曲线曲面,以计算机图形学的优势更好地展示多彩的世界。

第 11 章详细介绍的曲线拟合和双圆弧逼近属于“拟合型”曲线,它是计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing, CAM)中的常用算法,包括“小挠度样条函数”和“大挠度样条函数”以及“双圆弧逼近算法”和“直线逼近算法”等。

CAD 常常是与计算机图形学联系在一起的,第 12 章和第 13 章讨论了计算机图形学最密切的应用——CAD 中的一些问题。

第 12 章讨论了交互式图形系统的设计问题,简要介绍了交互式图形系统设计中的几个关键问题:交互系统的设计原则、界面和菜单设计、交互设计的基本技术,例如定位技术、橡皮筋技术、拖拉技术和选择技术等。对交互式图形系统的数据结构设计也作了原则性的介绍。UNDO 和 REDO 功能虽然是交互系统的重要而必需的技术,而且在计算机应用系统中均有应用,但很少见到这方面的介绍。本书介绍了一种实现 UNDO 和 REDO 功能的方法,包括 UNDO 和 REDO 功能的数据结构设计、命令执行时的操作、交互应用系统中的命令接口和 UNDO 或 REDO 时的动作流程等,希望能对读者有所启发。

第 13 章介绍的是 CAD 系统中的一个难点——参数设计问题。先讨论了几何约束满足问题(Geometric Constraint Satisfaction Problem, GCSP),给定一组几何元素和一组描述几何元素间关系的约束条件,求解这组几何元素以满足这组约束。GCSP 的求解是智能 CAD 系统中参数化设计的核心问题,也是人工智能、软件工程、工程设计等领域的研究课题。而后介绍一种参数化的二维图形的输入方法,这种方法采用文本文件输入,但是是一种具有“计算功能”的文本文件。它可以由基本几何直接构造“图元”,也可以采用图形陈列、旋转、平移、对称、比例等图形操作定义新的“图元”。这种“图元”可以是已经构造或即将构造的“图元”组合,用宏调用的方法,实现图形的递归构造。它提供了比较灵活的图形构造手段,既使图形生成简化,又减少了图库的存储量。

最后的附录实际上是对正文的一个很好补充,涵盖了如何将理论和算法付诸实践的范例,有助于读者更好地理解本书的一些基本思想。同时,这些简洁明了、构思巧妙、久经考验的图形处理工具也给广大从事工程设计的科研人员和研究生提供了一个图形开发平台。

本书附录 C 介绍的教学网站 <http://cg.sjtu.edu.cn> 提供的主要内容有:

- 本书理论教学的多媒体教材。
- 本书附录所列的是计算机图形处理程序的实体以及在此基础上开发的交互式应用系统。这个应用系统不仅可以直接实际使用,也可作为研究生和 CAD 设计人员的图形开发平台。
- 一个简单的、基于 C++ 的计算机图形学实验平台及其运行环境和计算机图形学经典算法的演示系统。
- 部分学生作业等等。
- 特别是,网站中收录了一些大众化的、以计算机图形学理论应用为主的知识性样板课题。这些样板课题具有知识性、抽象性、应用性和综合性。它向读者展示了如何

从原始问题开始,从问题抽象→找出难点→理论基础→项目实施(数据结构和程序设计等)→应用检验(系统化、产品化)直至理论升华(设计书、论文等)的全过程。相信会激发读者的探索欲望。

“伤其十指,不如断其一指。”本书没有也不可能对计算机图形学许多精彩的理论和算法面面俱到,而是着重对一些典型的算法作了详细介绍。例如,对三维造型-装配-几何计算-消隐的全过程描述得十分详尽,读者几可直接按此编程实现。而且,在这条主线的叙述中,又将本书的几何计算的理论体系完整、充分地体现出来。

当然,只有在对算法真正实现并作了大量的考证以后才能对其有深刻的理解,才能对算法的枝梢末节有所体会,享受到其中的奥妙和乐趣。

本书的1~9章应该是计算机图形学课程的基本教学内容,而有条件的学校可以介绍或补充一些第10~11章中关于曲线、曲面的内容,第12~13章及附录会对从事CAD工作和有关的研究生有所帮助。

柳伟、徐建明、李震霄等分别参与了第1章、第10章和第9章的起草工作,何一江对前言作了润色,一些本科生及研究生参与了上海交通大学计算机图形学教学网站的制作,提供了他们的习作,特向他们表示感谢。

上海交通大学计算机系高手林立,也是一个和谐的集体,同事们对我的工作一直给予大力协助和支持,感谢他们的帮助。

最后,感谢夫人许剑秋为我创造了良好的生活环境。

书中不当之处,希望读者、专家和同行勿吝指正。

何援军

2005年7月5日

于上海交通大学计算机系

目 录

作者简介

前言

第1章 绪论	1
1.1 计算机图形学及它与其他学科的关系	1
1.2 计算机图形学发展简史	2
1.3 计算机图形学的应用领域	3
1.3.1 计算机辅助设计与制造	3
1.3.2 科学计算可视化	4
1.3.3 虚拟现实	4
1.3.4 计算机艺术	5
1.3.5 计算机动画	5
1.3.6 图形用户接口	6
1.4 计算机图形学研究的基本问题	6
1.4.1 图形输入	6
1.4.2 图形描述	7
1.4.3 图形变换	7
1.4.4 图形运算	8
1.4.5 图形输出	8
1.4.6 几何算法、几何复杂性和计算效率	9
1.5 计算机图形学的相关开发技术	10
1.5.1 OpenGL	10
1.5.2 ACIS	11
1.5.3 DirectX	11
1.5.4 Java3D	12
1.5.5 VRML	12
第2章 光栅图形学	14
2.1 直线光栅化显示算法	14
2.1.1 直线光栅化显示的数字微分分析法(DDA)	14
2.1.2 直线光栅化显示的 Bresenham 算法	16
2.2 圆光栅化算法	19
2.2.1 利用圆的八方对称性画圆	20
2.2.2 简单的方程画圆方法	20
2.2.3 Bresenham 画圆算法	21
2.2.4 中点圆算法	23
2.3 椭圆光栅化算法	25
2.4 多边形填充	26
2.4.1 扫描线填充算法	27

2.4.2 边填充算法	28
2.4.3 种子填充算法	29
2.5 字符和汉字显示	31
2.5.1 点阵字符	31
2.5.2 矢量字符	32
2.6 反走样	32
2.6.1 图形走样	32
2.6.2 超采样	33
2.7 本章要点	34
2.8 本章作业	35
第3章 图形裁剪	36
3.1 线裁剪算法	36
3.1.1 Cohen-Sutherland 算法	36
3.1.2 Liang-Barsky 算法	38
3.2 多边形裁剪	41
3.2.1 Sutherland-Hodgon 多边形裁剪算法	41
3.2.2 图形求交集多边形裁剪法	42
3.3 本章要点	43
3.4 本章作业	43
第4章 基本几何	44
4.1 基本几何的描述	44
4.1.1 直线的描述	44
4.1.2 圆的描述	46
4.1.3 圆弧的描述	46
4.1.4 基本几何的统一描述	47
4.1.5 圆弧曲线	48
4.2 基本几何及图形边界的方向	48
4.2.1 基本几何及其方向的定义	48
4.2.2 几何元素定向的优点	51
4.3 直线和圆弧的相交	52
4.3.1 坐标系变换求交	52
4.3.2 几何计算求交	53
4.4 曲线和曲线的相交	54
4.4.1 劣弧段最小外接矩形求取	55
4.4.2 圆弧曲线的相交算法	56
4.5 本章要点	57
4.6 本章作业	58
第5章 二维几何	59
5.1 向量和向量的交点	59
5.2 包容性测试	60

5.2.1 符号判别法	60	6.5 轴测变换	101
5.2.2 角度判别法	60	6.5.1 轴测变换的定义	101
5.2.3 半射线交点计数判别法	61	6.5.2 正轴测变换	102
5.2.4 Griffiths 判别法	63	6.5.3 轴测投影变换的一般公式	104
5.3 直线段和图形公共部分的求取	63	6.5.4 斜二测变换	105
5.4 一般图形的填充算法	65	6.6 罗盘变换	106
5.4.1 一般图形的描述	65	6.6.1 罗盘变换的基本原理	106
5.4.2 一般图形的填充算法	65	6.6.2 罗盘变换公式	106
5.5 二维布尔运算	66	6.6.3 屏幕轴三角架的实时产生	107
5.5.1 环	67	6.7 透视变换	108
5.5.2 二维几何构型中的图形描述	67	6.7.1 透视变换的基本原理	108
5.5.3 两个环的交、并、差几何 运算	68	6.7.2 透视变换矩阵	109
5.5.4 两个环运算的数据结构	75	6.7.3 透视投影转化为平行投影	109
5.5.5 两个环运算的算法	76	6.7.4 灭点及其产生	110
5.5.6 扩展到圆弧	77	6.8 坐标变换矩阵小结	116
5.5.7 含有多个内环图形的运算	80	6.9 视图变换	117
5.5.8 算法复杂度分析	81	6.9.1 视图变换的基本原理	117
5.6 平面多角形面积的求取	81	6.9.2 视图变换的实施	118
5.7 本章要点	82	6.10 本章要点	119
5.8 本章作业	82	6.11 本章作业	120
第 6 章 图形变换	83	第 7 章 三维几何	121
6.1 图形变换的理论基础	83	7.1 坐标系	122
6.1.1 坐标系、基底、坐标行	83	7.2 物体的描述	122
6.1.2 基底变换	84	7.3 几何计算	124
6.1.3 线性变换及其乘积	85	7.3.1 最小最大判定法	124
6.1.4 不同基底下的线性变换	87	7.3.2 标准平面方程的建立	125
6.2 图形变换的基本描述	87	7.3.3 通过 N 个顶点求取平面 方程	126
6.2.1 齐次坐标	87	7.3.4 深度测试	126
6.2.2 齐次坐标变换矩阵	88	7.3.5 面对棱的遮挡	127
6.2.3 二维图形变换	88	7.3.6 隐藏线的表示	128
6.2.4 三维图形变换	88	7.3.7 一维交集算法	129
6.3 图形变换的几何化表示	91	7.4 凸多面体的隐藏线消除	130
6.3.1 几何化表示的基本理论	91	7.4.1 凸多面体的描述	131
6.3.2 图形变换的几何化表示	92	7.4.2 全体凸多面体的数据结构	132
6.3.3 图形变换几何化表示的实施	92	7.4.3 棱的表示与输出	132
6.3.4 图形变换几何化表示的应用	93	7.4.4 凸多面体消隐算法的基本 原理	134
6.3.5 三维变换的几何化表示	95	7.4.5 凸多面体落影区的求取	135
6.3.6 图形变换几何化表示与基本 几何	98	7.4.6 凸多面体对其他物体的遮挡 计算	136
6.4 投影与投影变换	99	7.4.7 凸多面体的自消隐	137
6.4.1 平行投影	99	7.4.8 凸多面体场景消隐算法的 实施	138
6.4.2 投影变换、深度坐标与三维观测 流水线	99	7.5 一般多面体的隐藏线消除	140
6.4.3 投影示意图	100		

7.5.1 物体的描述和面的构造	140	8.6 本章作业	175
7.5.2 棱分类——一般多面体的自 消隐	141	第9章 光照模型	176
7.5.3 面对棱的遮挡	141	9.1 光和颜色	176
7.5.4 面消隐时特殊情况的处理	145	9.1.1 人对世界的视觉感知	176
7.5.5 消隐算法的数据结构	147	9.1.2 光源的种类	176
7.5.6 一般多面体消隐算法的实施	149	9.1.3 物体表面的种类	177
7.6 一般多面体的隐藏面消除	151	9.1.4 颜色论	177
7.6.1 隐藏面消除的基本原理	151	9.1.5 三色学说	178
7.6.2 隐藏面消除的实施	153	9.1.6 CIE 色度图	178
7.7 本章要点	156	9.1.7 色彩应用	181
7.8 本章作业	156	9.2 颜色模型	182
第8章 几何造型	158	9.2.1 原色系统	182
8.1 垂直扫描物体生成算法	159	9.2.2 RGB 颜色模型	182
8.1.1 垂直扫描算法的输入参数	159	9.2.3 CMY 颜色模型	183
8.1.2 垂直扫描算法的顶点编号与坐标 值定值	160	9.2.4 HSV 颜色模型	183
8.1.3 垂直扫描算法的构造过程	160	9.3 光照模型	184
8.1.4 垂直扫描算法的三维物体 记录	160	9.3.1 环境光	184
8.1.5 垂直扫描算法边的重复显示 处理	161	9.3.2 漫反射和 Lambert 模型	185
8.1.6 垂直扫描算法的扩展	161	9.3.3 镜面反射和 Phong 模型	186
8.1.7 垂直扫描物体产生程序	162	9.3.4 透明模型	188
8.1.8 进一步扩展	162	9.3.5 简单局部光照模型	189
8.2 旋转物体的生成算法	163	9.4 插值算法	189
8.2.1 旋转体的输入参数	163	9.4.1 恒定明暗处理	189
8.2.2 旋转体的顶点编号与坐标 定值	163	9.4.2 Gouraud 明暗处理 (光强插值算法)	190
8.2.3 旋转体的构造过程	164	9.4.3 Phong 明暗处理 (法向插值算法)	190
8.2.4 旋转体的三维物体记录	165	9.5 光线跟踪	191
8.2.5 旋转体边的重复显示处理	165	9.5.1 Whitted 整体光照模型	191
8.2.6 特殊情况处理	165	9.5.2 光线跟踪基本原理	191
8.2.7 旋转体算法的扩展	166	9.5.3 光线跟踪算法	192
8.2.8 旋转体的物体产生程序	166	9.5.4 光线跟踪算法中的关键技术	195
8.2.9 旋转体产生示例	166	9.5.5 光线跟踪的反走样	196
8.3 物体装配	167	9.6 阴影	197
8.3.1 基本构件的输入	167	9.6.1 自身阴影	197
8.3.2 装配数据的输入	169	9.6.2 投射阴影	198
8.4 布尔运算	170	9.6.3 阴影算法	198
8.4.1 布尔运算的基本原理——拓扑 重构	171	9.7 纹理	200
8.4.2 布尔运算的几何信息重构——误差 处理	174	9.7.1 纹理的定义	201
8.5 本章要点	175	9.7.2 颜色纹理	202
		9.7.3 几何纹理	205
		9.8 本章要点	206
		9.9 本章作业	206
		第10章 曲线和曲面	208
		10.1 曲线曲面的基本理论	209

10.1.1 曲线与曲面的参数表示·····	209	11.2 大挠度分段三次样条函数的 建立·····	240
10.1.2 曲线的切矢及自然参数 表示·····	209	11.2.1 大挠度样条函数基本方程组的 导出·····	240
10.1.3 曲面论·····	210	11.2.2 大挠度样条基本方程组的 解法·····	242
10.2 参数三次曲线曲面·····	210	11.3 双圆弧逼近·····	244
10.2.1 参数三次曲线方程·····	211	11.3.1 平均切线法·····	244
10.2.2 参数三次曲面·····	212	11.3.2 双圆弧公切点的轨迹·····	245
10.2.3 参数连续性和几何连续性·····	212	11.3.3 公切点的确定·····	245
10.3 Bézier 曲线和曲面·····	213	11.3.4 双圆弧的求法·····	246
10.3.1 Bézier 曲线方程·····	214	11.3.5 样条曲线的直线逼近·····	247
10.3.2 Bernstein 基函数的性质·····	215	11.3.6 一般函数曲线的双圆弧 逼近·····	248
10.3.3 Bézier 曲线的性质·····	216	11.4 圆的直线逼近·····	249
10.3.4 Bézier 曲线的升阶·····	217	11.5 本章要点·····	250
10.3.5 Bézier 曲线的拼接·····	218	11.6 本章作业·····	251
10.3.6 Bézier 曲面·····	219	第 12 章 交互技术·····	252
10.4 B 样条曲线和曲面·····	220	12.1 设计原则·····	252
10.4.1 B 样条曲线方程及其与 Bézier 曲线的比较·····	220	12.2 界面和菜单设计·····	253
10.4.2 B 样条基函数的递推定义及其 性质·····	220	12.2.1 建立一个新应用·····	254
10.4.3 B 样条曲线的类型划分·····	222	12.2.2 定义主菜单·····	254
10.4.4 一般非均匀 B 样条曲线·····	222	12.2.3 定义一个执行菜单·····	254
10.4.5 B 样条曲面方程及其性质·····	224	12.2.4 添加源代码·····	256
10.4.6 B 样条曲面的矩阵表示和常见的 B 样条曲面·····	225	12.2.5 C 语言(*.c)程序文件的 加入·····	256
10.5 NURBS 曲线和曲面·····	226	12.2.6 加标题·····	256
10.5.1 NURBS 的提出·····	226	12.3 交互设计的基本技术·····	257
10.5.2 NURBS 曲线方程及其 性质·····	226	12.3.1 定位技术·····	257
10.5.3 NURBS 曲面方程及其 性质·····	227	12.3.2 橡皮筋技术·····	257
10.6 Coons 曲面·····	228	12.3.3 拖拉技术·····	257
10.7 曲面的三角化表示·····	228	12.3.4 选择技术·····	258
10.7.1 曲面三角化描述·····	229	12.4 数据结构设计·····	258
10.7.2 曲面三角化遍历·····	230	12.4.1 图形的数据结构设计·····	259
10.7.3 三角形曲面的简化·····	231	12.4.2 层的数据结构设计·····	259
10.7.4 三角形曲面的压缩·····	232	12.4.3 基本图元的数据结构设计·····	259
10.8 本章要点·····	234	12.4.4 辅助图元的数据结构设计·····	259
10.9 本章作业·····	234	12.4.5 其他数据结构设计·····	260
第 11 章 曲线拟合与双圆弧逼近·····	235	12.5 UNDO 和 REDO 技术·····	260
11.1 小挠度样条函数的建立·····	235	12.5.1 UNDO 和 REDO 功能的数据 结构设计·····	261
11.1.1 小挠度样条函数基本方程的 导出·····	235	12.5.2 UNDO 和 REDO 功能命令执行时 的操作·····	262
11.1.2 小挠度样条函数的边界 条件·····	239	12.5.3 交互应用系统中的命令 接口·····	263

12.5.4 UNDO 或 REDO 时的动作 流程.....	264	13.3.4 表示圆的各种节点.....	278
12.6 本章要点	265	13.3.5 模型扩展.....	280
12.7 本章作业	265	13.3.6 模型求解.....	282
第 13 章 参数设计.....	266	13.4 参数化图库建库工具	283
13.1 几何约束满足问题	267	13.4.1 文件转换器.....	283
13.2 基于点簇归约的几何推理算法	268	13.4.2 图形校正.....	284
13.2.1 基于点簇的几何推理算法 原理.....	268	13.4.3 用户界面.....	284
13.2.2 基于点簇的几何推理算法.....	271	13.5 本章要点	285
13.3 基于图形构造模型的参数设计 方法	273	13.6 本章作业	285
13.3.1 基本模型.....	273	附录 A 基础算法程序	286
13.3.2 表示点的各种节点.....	275	附录 B 图形接口	337
13.3.3 表示直线的各种节点.....	277	附录 C 教学网站	344
		参考文献	345

第1章 绪 论

计算机图形学已成为一门成熟的学科。所有现代科学和工程领域几乎都可以采用计算机图形以加强信息的传递和理解,因此当今的科学家和工程师都需要具备计算机图形学的基本知识。作为商品的图形软件和硬件已能方便地生成各种线画图形和自然景物的真实感图像。图形学的应用从某种意义上标志着计算机软、硬件的发展水平。计算机图形学之所以能在其短短 30 多年的历史中获得飞速发展,其根本原因是图形为传递信息的最主要媒体之一。人们要利用计算机进行工作,必须有在人和计算机之间传递信息的手段——人机界面。人机界面从早期的读卡机及控制板上的开关、指示灯发展到键盘和字符中断,再发展到基于键盘、鼠标、光笔等输入设备和光栅显示器的图形用户界面,而最终必然过渡到带给用户身临其境感觉的三维用户界面。人机界面的发展过程正好对应着计算机技术从初级到高级的发展过程。计算机图形学来源于生活、科学、工程技术、艺术、音乐、舞蹈、电影制作等,反过来,它又大大促进了这些领域的发展。

本章将从计算机图形学与其他学科的关系、它的发展简史、应用领域、要解决的基本问题及图形开发平台等方面概括地介绍计算机图形学的有关内容,使读者对它有个概括的了解。

1.1 计算机图形学及它与其他学科的关系

计算机图形学是研究怎样利用计算机表示、生成、处理和显示图形的原理、算法、方法和技术的一门学科,它是计算机科学中最为活跃、得到广泛应用的分支之一。

IEEE 定义: Computer graphics is the art or science of producing graphical images with the aid of computer.

计算机图形学与其他学科 CAD(及计算机绘图)、计算几何/计算机辅助几何设计(CAGD)、图像(及识别)等的关系是界线模糊、相互交叉、相互渗透的,基本上可以用图 1.1-1 标示。

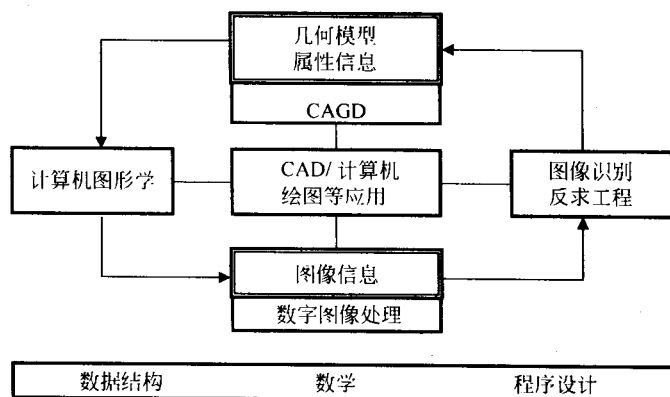


图 1.1-1 计算机图形学与其他学科的关系示意图

图像(image): 计算机中以具有颜色信息的点阵来表示的图形,它强调图形由哪些点组成,记录点及它的灰度或色彩。

图形(graphics): 计算机中由场景的几何模型和景物的物理属性表示的图形,它更强调

场景的几何表示,记录图形的形状参数与属性参数。它的显示形式是基于线条信息的矢量图和基于明暗(shading)处理后的图像图。

计算机图形学最直观的目的是将具有属性信息的几何模型(以图像形式)显示在计算机上。

在CAD/计算机绘图等应用中,常通过图像识别和反求工程等得到几何模型。

处理图像信息的主要理论是数字图像处理。

处理几何模型的主要理论是计算几何/计算机辅助几何设计(CAGD)和计算机图形学,前者集中在曲线、曲面的生成和处理,而几何造型等常被认为是后者的工作。

上述的各种理论、方法和技术的基础是数学、数据结构和程序设计等。

1.2 计算机图形学发展简史

1950年,第一台图形显示器作为美国麻省理工学院(MIT)旋风I号(Whirlwind I)计算机的附件诞生了。该显示器用一个类似于示波器的阴极射线管(CRT)来显示一些简单的图形。1958年美国Calcomp公司由联机的数字记录仪发展成滚筒式绘图仪,GerBer公司把数控机床发展成为平板式绘图仪。在整个20世纪50年代,只有电子管计算机,用机器语言编程,主要应用于科学计算,为这些计算机配置的图形设备仅具有输出功能。计算机图形学处于准备和酝酿时期,并称之为“被动式”图形学。在20世纪50年代末期,MIT的林肯实验室在“旋风”计算机上开发SAGE空中防御体系,第一次使用了具有指挥和控制功能的CRT显示器,操作者可以用笔在屏幕上指出被确定的目标。与此同时,类似的技术在设计和生产过程中也陆续得到了应用,它预示着交互式计算机图形学的诞生。

1962年,MIT林肯实验室的Ivan E. Sutherland发表了一篇题为“Sketchpad:一个人机交互通信的图形系统”的博士论文,他在论文中首次使用了计算机图形学(Computer Graphics)这个术语,证明了交互计算机图形学是一个可行的、有用的研究领域,从而确定了计算机图形学作为一个崭新的科学分支的独立地位。他在论文中所提出的一些基本概念和技术,如交互技术、分层存储符号的数据结构等至今还在广为应用。1964年MIT的教授Steven A. Coons提出了被后人称为超限插值的新思想,通过插值四条任意的边界曲线来构造曲面。同在20世纪60年代早期,法国雷诺汽车公司的工程师Pierre Bézier发展了一套被后人称为Bézier曲线、曲面的理论,成功地用于几何外形设计,并开发了用于汽车外形设计的UNISURF系统。Coons方法和Bézier方法是CAGD最早的开创性工作。计算机图形学的最高奖是以Coons的名字命名的,而获得第一届(1983)和第二届(1985)Steven A. Coons奖的,恰好是Ivan E. Sutherland和Pierre Bézier,这也算是计算机图形学的一段佳话。

20世纪70年代,是计算机图形学发展过程中一个重要的历史时期。由于光栅显示器的产生,在20世纪60年代就已萌芽的光栅图形学算法,迅速发展起来,区域填充、裁剪、消隐等基本图形概念及其相应算法纷纷诞生,图形学进入了第一个兴盛时期,并开始出现实用的CAD图形系统。又因为通用、与设备无关的图形软件的发展,图形软件功能的标准化问题被提了出来。1974年,美国国家标准学会(ANSI)在ACM SIGGRAPH的一个与“与机器无关的图形技术”的工作会议上,提出了制定有关标准的基本规则。此后ACM专门成立了一个图形标准化委员会,开始制定有关标准。该委员会于1977、1979年先后制定和修改了“核心图形系统”CGS(Core Graphics System)。ISO随后又发布了计算机图形接口CGI(Computer Graphics Interface)、计算机图形元文件标准CGM(Computer Graphics Metafile)、计算机图形核心系统GKS(Graphics Kernel System)、面向程序员的层次交互图

形标准 PHIGS(Programmer's Hierarchical Interactive Graphics Standard)等。这些标准的制定为计算机图形学的推广、应用和图形信息的共享等起到了重要作用。

20 世纪 70 年代, 计算机图形学的另外两个重要进展是真实感图形学和实体造型技术的产生。1970 年 Bouknight 提出了第一个光反射模型, 1971 年 Gourand 提出“漫反射模型+插值”的思想, 被称为 Gourand 明暗处理。1975 年 Phong 提出了著名的简单光照模型——Phong 模型。这些可以算是真实感图形学最早的开创性工作。另外, 从 1973 年开始, 相继出现了英国剑桥大学 CAD 小组的 Build 系统、美国罗彻斯特大学的 PADL-1 系统等实体造型系统。

1980 年, Whitted 提出了一个光透视模型——Whitted 模型, 并第一次给出光线跟踪算法的范例, 实现 Whitted 模型; 1984 年, 美国 Cornell 大学和日本广岛大学的学者分别将热辐射工程中的辐射度方法引入到计算机图形学中, 用辐射度方法成功地模拟了理想漫反射表面间的多重漫反射效果; 光线跟踪算法和辐射度算法的提出, 标志着真实感图形的显示算法已逐渐成熟。从 20 世纪 80 年代中期以来, 超大规模集成电路的发展, 为图形学的飞速发展奠定了物质基础。计算机运算能力的提高, 图形处理速度的加快, 使得图形学的各个研究方向得到了充分发展, 图形学已广泛应用于动画、科学计算可视化、CAD/CAM、影视娱乐等各个领域。

最后, 需要强调一下 SIGGRAPH 会议。ACM SIGGRAPH 会议是计算机图形学最权威的国际会议, 每年在美国召开, 参加会议的人在 50 000 人左右。世界上没有第二个领域每年召开如此规模巨大的专业会议, SIGGRAPH 会议在很大程度上展示了计算机图形学的当前水平和发展方向。

SIGGRAPH 会议是由 Brown 大学教授 Andries van Dam(Andy)和 IBM 公司 Sam Matsa 在 20 世纪 60 年代中期发起的, 全称是“The Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques”。1974 年, 在 Colorado 大学召开了第一届 SIGGRAPH 年会, 并取得了巨大的成功, 当时大约有 600 位来自世界各地的专家参加了会议。到了 1997 年, 参加会议的人数已经增加到 48 700。因为每年只选取大约 50 篇论文, 在《Computer Graphics》杂志上发表, 因此论文的学术水平较高, 基本上代表了图形学的主流方向。

真实感图形学, 特别是光照模型、纹理贴图 and 阴影等理论和技术的发展, 一批以 OpenGL、DirectX 和 ACIS 等为代表的图形引擎和几何引擎的应用使得计算机图形学在艺术、动画、工业设计和游戏等方面的应用登上了一个新的台阶, 计算机图形学的理论和技术已拓展到教育、工农业生产和日常生活的各个方面, 远非狭义的“计算机图形学”所能覆盖。

1.3 计算机图形学的应用领域

1.3.1 计算机辅助设计与制造

CAD/CAM 是计算机图形学在工业界最广泛、最活跃的应用领域。计算机图形学被用来进行土建工程、机械结构和产品的设计, 包括设计飞机、汽车、船舶的外形和发电厂、化工厂等的布局以及电子线路、电子器件等。有时, 着眼于产生工程和产品相应结构的精确图形, 然而更常用的是对所设计的系统、产品和工程的相关图形进行人机交互设计和修改, 经过反复的迭代设计, 便可利用结果数据输出零件表、材料单、加工流程和工艺卡, 或者是数据加工代码。在电子工业中, 计算机图形学应用于集成电路、印制电路板、电子线路和网络分析等方面的优势是十分明显的。一个复杂的大规模或超大规模集成电路版图根本不可能用手工设计和绘制, 而用计算机图形系统不仅能进行设计和画图, 而且可以在较短的时间内完成, 并

把结果直接进行后续工艺加工处理。在飞机工业中,美国波音飞机公司已用有关的 CAD 系统实现波音 777 飞机的整体设计和模拟,其中包括飞机外型、内部零部件的安装和检验。

随着计算机网络技术的发展,在网络环境下进行异地异构系统的协同设计,已经成为 CAD 领域最热门的课题之一。现代产品设计已不再是一个设计领域内孤立的技术问题,而是综合了产品各个相关领域、相关过程、相关技术资源和相关组织形式的系统化工程。它要求设计团队在合理的组织结构下,采用群体工作方式来协调和综合设计者的专长,并且从设计一开始就考虑产品生命周期的全部因素,从而达到快速响应市场需求的目的,协同设计的出现使企业生产的时空观发生了根本的变化。异地设计、异地制造、异地装配成为可能,从而为企业在市场竞争中赢得了宝贵的时间。

三维几何造型系统具有许多优点,例如,可以进行装配件的干涉检查,可以用于有限元分析、仿真、数控加工等后续操作,它基本上代表了 CAD 技术的发展方向。CAD 领域另一个非常重要的研究领域就是基于工程图纸的三维形体重建。三维形体重建就是从二维信息中提取三维信息,通过对这些信息进行分类、综合等一系列处理,在三维空间中重新构造出二维信息所对应的三维形体,恢复形体的点、线、面及其拓扑关系。二维图纸设计在工程界中仍占有主导地位。工程上有大量旧的透视图和投影图片可以利用、借鉴,许多新的设计可凭借原有的设计基础进行修改即可完成,所以,三维形体重建在工程中有重要的意义。不过,目前的三维形体重建算法主要是针对多面体和对主轴方向有严格限制的二次曲面体的。任意曲面体的三维形体重建,至今仍是一个未解决的难题。

1.3.2 科学计算可视化

科学技术的迅猛发展,数据量的与日俱增使得人们对数据的分析和处理变得越来越困难,人们难以从“数据海洋”中得到最有用的数据,找到数据的变化规律,提取数据最本质的特征。但是,如果能将这些数据用图形形式表示出来,常常会使问题迎刃而解。1986 年,美国科学基金会(NSF)专门召开了一次研讨会,会上提出了“科学计算可视化(Visualization in Scientific Computing, ViSC)”。其后第二年,美国计算机成像专业委员会向 NSF 提交了“科学计算可视化的研究报告”后,ViSC 就迅速发展起来了。

现在,科学计算可视化已广泛应用于医学、流体力学、有限元分析和气象分析等领域,尤其在医学领域,可视化有着广阔的发展前途。机器人和医学专家配合做远程手术是目前医学上很热门的课题,而这些技术实现的基础则是可视化。可视化技术将医用 CT 扫描的数据转化为三维图像,并通过一定的技术生成在人体内漫游的图像,使得医生能够看到并准确地判别病人体内的患处,然后通过碰撞检测一类的技术实现手术效果的反馈,帮助医生成功地完成手术。从目前的研究状况来看,这项技术离实用还有一定的距离。主要原因是生成人体内漫游图像的三维体绘制技术还没有达到实时的程度,而且现在大多数体绘制技术是基于平行投影的,而漫游则需要真实感更强的透视投影技术,而体绘制的透视投影技术还没有很好地解决。另外,在漫游当中还要根据 CT 图像区分出不同的体内组织,这项技术叫 Segmentation。目前的 Segmentation 主要是靠人机交互来完成,远未达到自动实时的地步。

1.3.3 虚拟现实

简单地说,虚拟现实技术就是人们利用计算机生成一个逼真的三维虚拟环境,通过自然技能使用传感设备与之相互作用的新技术。它传统的模拟技术完全不同,是将模拟环境、视景系统和仿真系统合三为一,并利用头盔显示器、图形眼镜、数据服、立体声耳机、数据手套及脚踏板等传感装置,把操作者与计算机生成的三维虚拟环境连结在一起。操作者头戴