

重点大学计算机教材



计算机图形学教程

Computer Graphics

孙正兴 主编

周良 郑洪源 谢强 编著



本书为教师配有电子课件，需要的教师可登录华章网站下载。



机械工业出版社
China Machine Press

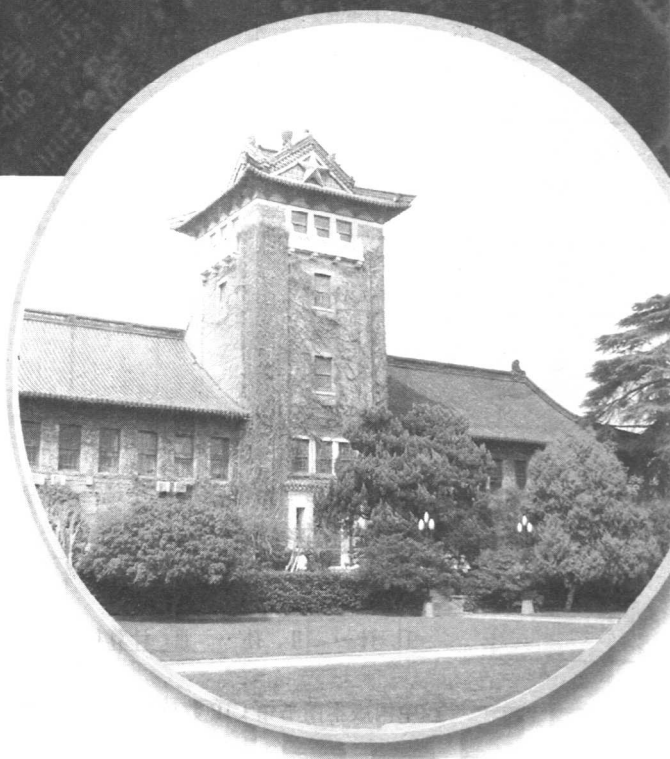
重点大学计算机教材

计算机图形学教程

Computer Graphics

孙正兴 主编

周良 郑洪源 谢强 编著



机械工业出版社
China Machine Press

本书系统讲解计算机图形学的基本概念和原理方法。主要包括：图形显示、图形生成和操纵、图形表示和建模等基础理论和技术，以及图形动画原理及基本二维动画制作方法等图形学的综合应用。书中既包括传统计算机图形学的内容，也涉及诸如非规则形体建模、表演和人脸动画、可缩放矢量和数字墨水等计算机图形学最新技术进展。同时，使用大量图示简化读者学习的难度。书后附有相关的习题巩固读者的学习成果。

本书可作为计算机图形学课程的教材，供高等院校相关专业师生使用，也可供专业技术人员参考。

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

计算机图形学教程/孙正兴主编. —北京：机械工业出版社，2006.8

(重点大学计算机教材)

ISBN 7-111-19174-9

I. 计… II. 孙… 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(2006)第 050592 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：朱 劼

北京诚信伟业印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2006 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·15.5 印张

定价：26.00 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

前 言

计算机图形学是目前计算机学科中最活跃的分支之一,已成为信息技术领域不可缺少的重要内容和基石。同时,计算机图形学应用已经渗透到科研、工程、商业、艺术等社会生活和工业生产的几乎一切领域,并与这些领域的发展相互推动和促进。

本书是根据作者多年来为高等院校计算机科学与技术学科本科生和硕士生讲授计算机图形学课程的实践经验而编写的。本书主要有以下特点:

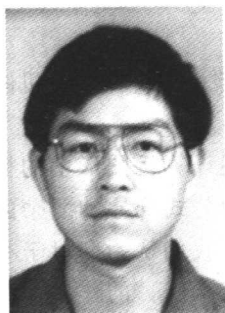
- **重概念:**在编写过程中,我们以“授之以渔”为出发点,注重表述计算机图形学的概念内涵、算法原理和思想方法,既没有将计算机图形学中繁琐的公式推导和复杂的软件实现技术作为重点,也没有强调计算机图形学的使用技能。我们认为,对于有志于从事计算机图形学研究的读者来说,课程和教材只能起到“领进门”的作用,深入、系统的知识必须借助这一领域的专著才能真正获得。同样,对于关心软件实现和应用技能的读者来说,唯一的解决办法不是看许多书籍,而是不断地去实践,在理解的同时注重实习和应用,才能深切体会概念的内涵,领悟概念与技能间的关系。
- **重系统:**本书注重概念的系统性,使读者能学以致用。在内容的编排上,不是采用传统的二维与三维或硬件和软件的分类方式,而是归结为以基础概念、图形显示、图形生成、图形观察、图形建模和图形动画为主线,使读者能从概念、技术和应用三个不同层次上同时理解图形学内容。
- **重形象:**“一图胜千言”是图形图像领域的一句名言,本书充分体现了这一特点,没有简单地罗列各种概念,也没有严格地定义每个概念,而是将概念的图解放在十分重要的位置,采用很多图示来对各种概念进行解释,便于读者学习时理解和记忆。

本书由孙正兴和周良共同筹划,由孙正兴统一审核和定稿。第1章和第2章由孙正兴编写,第3章和第6章由周良编写,第4章和第5章由郑洪源编写,第7章由谢强编写。本书的部分内容得到了国家自然科学基金(69903006, 60373065)和教育部“新世纪优秀人才资助计划”(NCET-04-0460)的资助。由于编者水平所限,书中难免存在不足,恳请读者和同行指正。

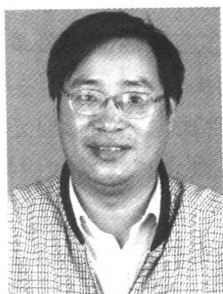
编 者

2006年4月于南京

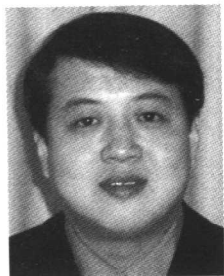
作者简介



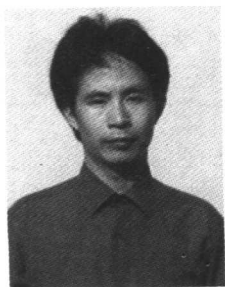
孙正兴 博士，南京大学计算机科学与技术系教授、博士生导师、学术委员会委员。研究兴趣包括：多媒体计算、视觉信息处理和智能人机交互等。现任江苏省微型电脑应用协会第五届理事会副理事长、多媒体技术专业委员会主任；江苏省计算机学会计算机辅助设计与图形学专业委员会主任。主持“中国博士后科学基金”项目一项、“国家自然科学基金”项目两项，曾获省部级科技进步三等奖三次；入选教育部“高等学校骨干教师资助计划(1999 年度)”和“新世纪优秀人才支持计划(2004 年度)”。



周 良 在职博士研究生，南京航空航天大学信息学院计算机系副教授。研究兴趣为智能人机交互、信息系统及信息安全。参与完成多项国家 863 CIMS 工程及省市信息化应用示范工程，曾获民航总局科学技术进步三等奖。



郑洪源 博士，南京航空航天大学信息学院计算机系副教授。研究兴趣为智能人机交互、信息系统及信息安全。参与完成多项国家 863 CIMS 工程及省市信息化应用示范工程。



谢 强 博士，南京航空航天大学信息学院计算机系副教授。研究兴趣为智能人机交互、信息系统及信息安全。参与完成多项国家 863 CIMS 工程及省市信息化应用示范工程。

目 录

前言

作者简介

第1章 图形学基础 1

1.1 计算机图形学的产生与发展 1

1.2 计算机图形学的学科范畴 3

1.2.1 计算机图形学的研究内容 3

1.2.2 计算机图形学中的图形定义 6

1.2.3 计算机图形学的相关学科 10

1.3 计算机图形学应用及其发展 12

1.3.1 人机交互技术 12

1.3.2 计算可视化 15

1.3.3 真实感图形显示 17

1.3.4 虚拟现实技术 18

1.3.5 计算机辅助设计 20

1.3.6 计算机动画 20

1.4 计算机图形系统 22

1.4.1 计算机图形系统的软件 22

1.4.2 计算机图形系统的硬件 24

1.5 计算机图形软件标准 25

1.5.1 图形软件标准的类型 25

1.5.2 标准图形支撑软件 26

1.5.3 可缩放矢量图形标准 28

1.6 计算机图形系统的颜色模型 30

1.6.1 颜色特征描述: 颜色空间 31

1.6.2 三基色原理和 XYZ 模型 31

1.6.3 设备输出颜色模型 34

1.6.4 用户交互颜色模型 35

1.6.5 颜色模型间的转换和颜色

插值 37

思考题 38

第2章 图形显示与生成 39

2.1 图形显示原理 39

2.1.1 阴极射线管 39

2.1.2 光栅扫描显示原理 42

2.1.3 随机扫描显示原理 47

2.1.4 液晶显示器 50

2.1.5 数字墨水: 开启“自然计算
时代” 52

2.1.6 其他图形输出设备 55

2.2 线画图元生成 56

2.2.1 图元生成的基本概念 56

2.2.2 线段生成的 Bresenham
算法 60

2.2.3 中点圆生成算法 64

2.2.4 中点椭圆生成算法 66

2.3 填充图元生成 68

2.3.1 多边形扫描转换填充 69

2.3.2 区域填充 71

2.3.3 扫描转换填充与区域填充的
比较 76

2.4 字符图元生成 77

2.4.1 字符编码标准 77

2.4.2 点阵字符生成 77

2.4.3 矢量字符生成 78

2.4.4 点阵字符和矢量字符的
比较 78

2.5 反走样技术 79

2.5.1 反走样的基本原理 79

2.5.2 常用的反走样技术 80

思考题 83

第3章 图形观察与变换 85

3.1 图形观察和变换原理 85

3.1.1 观察和变换过程 85

3.1.2 图形系统中的坐标系	85	4.1.3 三维形体的表示方法	132
3.1.3 图形系统中的图形变换	87	4.2 非规则形体的表示	142
3.2 窗口与视区变换	88	4.2.1 分形几何	143
3.2.1 窗视变换过程	89	4.2.2 形状文法	146
3.2.2 二维观察坐标系	89	4.2.3 粒子系统	148
3.2.3 二维观察变换: 规范化 变换	90	4.2.4 基于物理的建模	150
3.2.4 二维观察变换: 工作站 变换	91	思考题	151
3.3 二维图形的裁剪	91	第5章 图形的真实感显示	152
3.3.1 裁剪的效率	91	5.1 消隐技术	152
3.3.2 点的裁剪	92	5.1.1 消隐的基本概念	152
3.3.3 线段裁剪	92	5.1.2 后向面判别算法	153
3.3.4 多边形裁剪	98	5.1.3 深度缓冲器算法	154
3.4 二维几何变换	104	5.1.4 A 缓冲器算法	155
3.4.1 二维变换的齐次表示	105	5.1.5 画家算法	155
3.4.2 二维基本几何变换	105	5.1.6 BSP 树算法	156
3.5 三维几何变换	109	5.2 光照模型	157
3.5.1 三维坐标表示	109	5.2.1 简单光照模型	157
3.5.2 三维几何变换齐次矩阵	109	5.2.2 面绘制模型	161
3.5.3 三维基本几何变换	110	5.2.3 整体光照模型	165
3.6 三维投影变换	113	5.2.4 基本效果模型	168
3.6.1 平行投影	114	5.3 OpenGL 的光照模型	173
3.6.2 透视投影	116	5.3.1 建立光源	174
3.7 图形观察变换	118	5.3.2 定义材料性质	174
3.7.1 观察坐标系定义	118	5.3.3 真实感显示应用	174
3.7.2 观察坐标变换	119	思考题	178
3.7.3 观察空间	120	第6章 曲线和曲面基础	179
3.7.4 裁剪空间定义	121	6.1 曲线和曲面的基础知识	179
思考题	121	6.1.1 曲线和曲面的参数化表示	179
第4章 图形表示与建模	124	6.1.2 曲线和曲面的基本类型	182
4.1 规则形体的表示	124	6.1.3 曲线和曲面的基函数表示	184
4.1.1 规则形体表示的基本概念	124	6.1.4 曲线的连续性	185
4.1.2 实体的定义与运算	127	6.2 参数三次插值样条曲线	186
		6.2.1 参数三次插值样条曲线的类型 和性质	186

6.2.2	自然三次插值样条	188
6.2.3	Hermite 三次插值样条	188
6.2.4	Cardinal 样条	189
6.2.5	Kochanel-Bartels 样条	191
6.3	Bézier 曲线和曲面	191
6.3.1	Bernstein 基函数及其性质	191
6.3.2	Bézier 曲线的定义和性质	192
6.3.3	Bézier 曲线生成的分割递推 算法	195
6.3.4	Bézier 曲线逼近	195
6.3.5	Bézier 曲线的拼接	196
6.3.6	Bézier 曲线的升降阶	197
6.3.7	Bézier 曲面的定义和性质	198
6.4	B 样条曲线和曲面	200
6.4.1	B 样条基函数	200
6.4.2	B 样条曲线的定义	201
6.4.3	B 样条曲线的性质	203
6.4.4	B 样条曲线的类型	204
6.4.5	B 样条曲线的离散生成	205
6.4.6	B 样条曲线的节点插入	206
6.4.7	B 样条曲线的形状控制	207
6.4.8	B 样条曲线与 Bézier 曲线的 比较	209
6.4.9	B 样条曲面的定义	209
6.5	NURBS 曲线和曲面	209
6.5.1	有理样条曲线定义	210

6.5.2	NURBS 曲线的表示	210
6.5.3	NURBS 曲线的形状因子	213
6.5.4	二次曲线的 NURBS 表示	214
6.5.5	NURBS 曲面的表示与 性质	215
	思考题	217
第 7 章	图形动画原理	219
7.1	计算机动画的概念和应用领域	219
7.1.1	动画的基本原理	219
7.1.2	计算机动画的概念	220
7.1.3	计算机动画的应用领域	221
7.2	计算机动画的基本原理	222
7.2.1	计算机动画的基本类型	223
7.2.2	计算机动画的关键技术	224
7.3	二维动画的制作	232
7.3.1	二维动画简介	232
7.3.2	二维动画的制作过程	233
7.3.3	二维动画的软件系统	234
7.4	三维动画的制作	235
7.4.1	三维动画简介	235
7.4.2	三维动画的制作过程	235
7.4.3	制作三维动画的软件系统	236
7.5	计算机动画的最新发展	238
	思考题	239
	参考文献	240

第 1 章 图形学基础

计算机图形学(Computer Graphics)是研究图形的计算机生成、处理和显示的一门学科,以图形人机接口和可视化技术为代表的计算机图形学在计算机技术的发展中有着十分重要的作用。目前,计算机图形学及其应用已经渗透到社会生活和工业生产的几乎一切领域,并与这些领域自身的发展相互推动和促进,因而成为信息技术中不可缺少的重要内容和发展基石。计算机图形学及其应用的发展水平直接表现为计算机图形系统的功能;而计算机图形软件标准对计算机图形系统的发展具有重要作用;颜色模型则是理解和运用计算机图形学的基础。

1.1 计算机图形学的产生与发展

计算机图形学形成于 20 世纪 60 年代,并逐渐发展成为以图形硬件设备、图形处理专用算法和图形软件系统等为研究内容的一门成熟学科。计算机图形学的兴起和发展与图形输入/输出设备、计算技术及其在各个领域的应用都有很大关系,计算机图形技术的发展概况如图 1-1 所示。

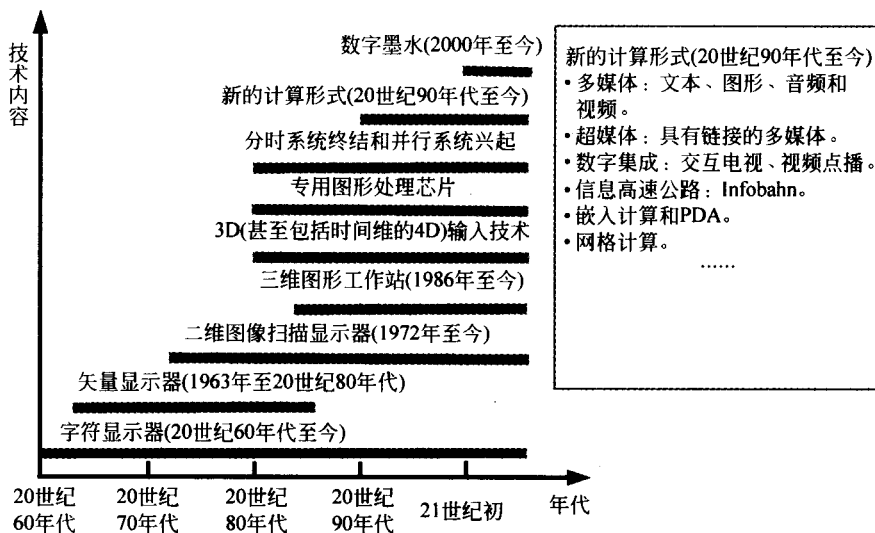


图 1-1 计算机图形技术的发展概况

20 世纪 50 年代阴极射线管(CRT)显示器的出现为计算机显示图形提供了可能。美国麻省理工学院的旋风(whirlwind)计算机就采用这种显示器显示输出图形。随后,由麻省理工学院林肯实验室主持研制的战术防空系统 SAGE 能将雷达获取的地理和地形等信号转换为图形在显示器上显示出来,而且用户可通过光笔与系统交互,获取某地区更详细的信息或发出命令。这是交互式图形显示技术诞生的标志。

1963 年,美国麻省理工学院的 Ivan Sutherland 在撰写博士论文期间研制出 SketchPad 系统[○],该系统允许用户利用光笔在图形显示器上实现拾取、定位、跟踪等交互功能。同

○ Ivan Sutherland, Sketchpad: a man-machine graphical communication system, Proceedings of the 1963 Spring Joint Computer Conference, Baltimore, MD: Spartan Books, 1963: 45-53.

时, Ivan Sutherland 在实现该系统时提出了图元的层次表示和数据结构等一系列计算机图形系统的概念和方法, 并一直延用至今。因此, Ivan Sutherland 被公认为交互式计算机图形技术的开创者和奠基人, 其工作也成为交互式计算机图形系统诞生的标志。

图形显示设备的发展是推动计算机图形技术发展的一个重要因素。20 世纪 60 年代中期出现的图形显示器只能绘制线条, 所以这种图形显示器称为线画图形显示器或矢量图形显示器。由于这种显示器生成图形的过程与人类用纸笔方式绘图的过程相似, 其电子束只在荧光屏上有图形的位置扫描, 因此, 大多数情况下被称为随机扫描显示器。这种显示器的电子束在荧光屏上产生的亮点持续时间很短, 电子束必须以至少 30Hz 的刷新频率周期性地反复扫描要绘制的图形才能产生静态又不闪烁的图形, 且具有这种功能的显示器当时十分昂贵, 限制了它的普及。

20 世纪 60 年代末期出现的存储管式显示器具有内在的存储部件, 它利用一个安装在荧光屏内距发光涂层很近的密集金属网来存储电子束轰击产生的电子图像(靶像), 进而由靶像持续发出电子在荧光屏上产生静态图形。这种显示器避免了刷新过程, 消除了闪烁问题, 且其价格远低于线画图形显示器, 所以, 它一度作为典型的图形显示设备得到广泛应用。但存储管式显示器不具有动态修改图形的能力, 这一缺陷使它很快被光栅扫描显示器所替代。20 世纪 70 年代出现了刷新式光栅扫描显示器, 大大地推动了交互式图形技术的发展。光栅扫描显示器以点阵形式表示图形, 由专用的缓冲区存储, 由视频控制器负责扫描并将图形在屏幕上显示。与随机扫描显示器相比, 它具有价格低廉、颜色丰富等诸多优点。直至今日, 它仍然是标准的图形显示设备。

随着交互式图形技术的发展, 出现了许多图形输入设备。键盘是交互式图形系统必不可少的输入设备, 利用它可以输入字符串命令、数字或完成一些特殊的功能。现在我们所使用的计算机的键盘脱胎于英文机械打字机, 主要在键数、布局及功能等各方面有所变化, 而基于人体工程学设计的键盘是当前的主流。20 世纪鼠标(Mouse)的诞生是计算机图形技术, 尤其是人机交互技术领域中的重大发明, 它奠定了图形用户接口(Graphic User Interface, GUI)的基础, 鼠标的发展经历了从机械鼠标到光学定位鼠标的过程, 而基于人体工程学设计的无线鼠标受到用户的广泛欢迎。此外, 二维图形输入设备还有图形输入板(Tablet)、跟踪球(Traceball)、光笔(Light Pen)、触摸屏、操纵杆(Joystick)等, 它们主要用来完成拾取、定位或二维坐标输入等功能。在虚拟环境等三维图形系统中, 用户置身于虚拟的三维场景之中, 必须利用空间球(Spaceball)和数据手套(Data Glove)等三维图形输入设备, 输入包括空间坐标和旋转方向在内的 6 个自由度的数值。总之, 图形输入设备的发展方向是使人能够更自然地、更方便地与计算机进行交互, 使得人的一举一动、一颦一笑所传递的信息都能为计算机接受和理解。

计算机图形学的诞生也为计算机技术与各种应用领域间架设了一座“桥梁”, 从而拓展了计算机的应用范围。借助计算机图形技术, 计算机辅助设计和制造广泛应用于计算机、汽车及航空工业领域, 出现了许多辅助设计系统, 如美国通用汽车公司用于计算机辅助汽车设计的 DAC 系统等。到了 20 世纪 60 年代中期, 一些相关的科研项目、商业化产品也纷纷出现。但是, 由于图形硬件设备非常昂贵, 并且基于图形技术的应用相对较少, 直到 20 世纪 80 年代初, 图形学仍然是一个较小的专业学科。20 世纪 80 年代中后期, 由于大规模集成电路技术的快速发展, 计算机硬件的性能不断提高, 特别是廉价的图形输入输出设备和大容量存储

介质的出现,使得以小型机、微机、图形工作站为基础的图形系统进入市场并成为主流,如 IBM-PC、Apple 机等微机和 Apollo、Sun 等工作站。特别是由于专用图形处理芯片的加入,图形显示质量和图形处理能力快速提高,对交互式图形学的发展起到了里程碑式的作用,之后,图形技术蓬勃发展,理论日臻成熟,应用日趋广泛。

概括起来,交互式计算机图形系统的发展经历了以下 4 个主要技术阶段:

1) 字符(Character)显示和交互方式。这种方式产生于 20 世纪 60 年代,并一直沿用至今。这是一种文字加数字的伪图形(pseudo-graphics)显示方式,图形的存储采取文本格式编码,用户采用命令行逐行输入(command line typing)的方式交互。

2) 矢量图形(Vector)显示和交互方式。这种方式产生于 20 世纪 60 年代,20 世纪 80 年代后逐步被光栅扫描显示方式所取代。它以图形构成的基本单元(主要是线)来输出线画图形和笔画文字(Line Drawings and Stroke Text)的显示方式,它采用命令行输入、功能键(Function Key)和菜单(Menu)等方式来进行对象指定和命令输入等交互。

3) 二维光栅图形(2D Bitmap)显示和交互方式。这种方式产生于 20 世纪 70 年代,并成为当今计算机图形系统的主流技术。它以清晰的文字及丰富的色彩来输出图形,采取以 WIMP(窗口(Windows)、图标(Icons)、菜单(Menus)和拾取(Pointing))为代表的图形用户接口完成对象的直接选取和控制,即采用“所见即所得”(What You See Is What You Get, WYSIWYG)的显示控制方式。

4) 三维图形(3D Graphics)显示和交互方式。自 20 世纪 80 年代产生以来,实时及三维的真实感景象的显示和交互一直是计算机图形系统的重点,它是在二维光栅图形显示和交互方式下向三维真实感图形的拓展和发展。它与各种新型计算机技术、多媒体技术、计算机视觉、计算机动画和数字娱乐、人工智能技术等结合,可以在多任务、多窗口和网络化计算环境中采取二维、三维甚至是多维的输入设备(虚拟现实环境中的听觉、视觉和触觉等)来实现对象的直接选取和控制,实现“所见即所得”或“所见全所得”(What You See Is All You Get, WYSIAYG),甚至是“所觉即所得”(What You Perceive is What You Get, 简写为 WYPIWYG。这里的“Perceive”可以来自于人的任何感觉器官)的显示控制方式。

现今,计算机图形学及其应用技术已经渗透到社会生活和工业生产的各个领域,而计算机软硬件技术的不断发展和各种计算机应用的不断深入也使计算机图形学学科得到极大拓展。恰如 Gino Brunetti 在 1998 年的 ACM Siggraph 会议上所指出的那样^①:“计算机图形学是支持几乎所有领域计算机应用交互式图形对话(interactive graphics dialogues)的基础技术,更是实现诸如多媒体内容管理和访问、计算机支持的协同工作、虚拟现实的开发和应用、复杂系统的分析和模拟、智能交互图形信息系统等的关键技术;计算机图形学还可用于模拟生物结构、移动信息系统及其通信,推动 Internet、WWW 和在线服务的发展”。

1.2 计算机图形学的学科范畴

1.2.1 计算机图形学的研究内容

通俗地讲,计算机图形学是研究怎样用计算机生成、处理和显示图形的一门学科。确切地说,计算机图形学是研究几何对象(Geometric Object)及其图像(Image)的生成

^① 参见 <http://old.siggraph.org/publications/newsletter/v32n1/columns/brunetti.html>。

(Creation)、存储(Storage)、处理(Processsing)和操纵(Manipulation)的一门学科^①。这里,几何对象是指计算机内所表示的客观世界物体的模型(图形对象模型);图像则是经过模型化的对象在计算机显示设备或其他输出设备上的效果;生成、处理和操纵是利用计算机实现客观世界、对象模型和输出图像三者之间映射的一系列操作和处理过程。这里,我们将计算机图形系统处理图形的过程概括为:以客观世界对象的计算机内表示(图形对象模型)为基础的模型生成(客观对象建模)和图形显示(输出效果处理)过程,如图1-2所示。



图 1-2 计算机图形学的研究内容

图形对象模型用于存放图形对象的全部描述信息。这些信息包括用于定义该物体所有组成部分形状和大小的几何信息;与图形有关的拓扑信息(位置和布局信息);与这个物体图形显示相关的所有属性信息,如颜色、亮度、线型、纹理、填充图案和字符样式等,以及在实际应用中要涉及的非几何数据信息,如图形的标记与标识、标题说明、分类要求、统计数字,等等。这些数据以图形文件的形式存放于计算机中,根据不同的系统硬件和结构组成不同的数据结构,或者形成一种通用的或专用的数据集。

模型生成是获取、存储和管理图形对象模型的过程,目的是在计算机内建立客观世界的场景或客观世界对象的图像。由于计算机图形的操作和处理过程十分复杂,特别是模型生成必须反映用户利用计算机系统模拟客观世界的意图和思路,这在很大程度上依赖用户的输入和干预,因此,计算机图形系统通常是交互式的。交互式计算机图形系统的含义是:模型生成时,图形设备和图形系统接收来自用户的输入,而此输入又是利用图形设备和图形系统所产生的显示来表示的。目前,主要的模型生成方式是采用菜单和手绘形式的交互输入,而基于客观世界实际场景的其他模型生成技术将成为未来模型生成的主流。

模型生成的一种方式是人造对象模型生成,如图1-3a所示。在这种方式下,由图形系统提供大量预定义模型构成元素(如点、线、面和体等)和相应的模型构建工具指令,由用户按照自己对客观世界及其对象的认识在图形系统环境中交互地构造所需要的模型,并进行着色、光照等各种效果和模拟处理,最终在输出设备上输出所设计的图形。利用这种方式所产生的模型通常是对客观世界或对象的一种模拟,如产品或建筑物、动画片场景和角色、艺术作品等,尤其适合于机械、建筑、动画和艺术创作等设计性和创造性领域应用。许多商业化图形软件系统提供了丰富的建模和管理工具。但从发展来看,现有的交互式图形系统的建模功能要求用户在大量菜单和按钮中选择预定义的标准图形对象,用户仍无法摆脱结构化输入对其快速流畅地呈现思路的束缚,难以捕捉通常不完备而又稍纵即逝的思维灵感,也不能体现形象思维在提出问题和假设及确定解决问题方向和策略方面的优势。因此,让用户采用传

① ACM Siggraph 在 20 世纪 90 年代所确定的计算机图形学的任务包括生成、存储和管理几何对象及其图像;在屏幕和硬拷贝设备上显示图像;用户控制对象及图像的内容(content)、结构(structure)及其外在形式(appearance);实现从模型到图像的图形合成(synthetic graphics),且与存储在 CD-ROM、磁盘上或实时生成的视频和音频结合;触觉的输入和输出(haptic input/output)及包括从像素数据(intensity data)到过滤图像、特征或模型(filtered images, features or models)的图像处理。

统“纸-笔”涂绘方式自然而流畅地勾画其模型生成意图的笔式用户接口(Pen-based/Calligraphic User Interface)^①是这种模型生成方式的发展方向,与此相关的在线手绘草图识别(Online Sketchy Shape Recognition)^②技术是目前人机交互技术的一个研究热点。

模型生成的另一种方式是现实场景模型化,如图 1-3b 所示。它借助数字摄像机、数字照相机和扫描仪等图形采集设备来获取客观世界及其对象的信息,通过图像或视频的识别来构造客观世界的模型,进而用户可以利用图形系统提供的工具对模型进行编辑和修改,获取所需要的图形对象模型。从理论上讲,这种方式所产生的模型直接来自于客观世界,其真实性效果是显然的,在虚拟环境、数字艺术和数字娱乐等应用领域有广泛的应用前景,这也是计算机图形学和计算机视觉等学科融合发展的重要方向之一。但图像和视频的识别十分困难,除了计算机图形学自身技术外,它还依赖于计算机视觉及模式识别和人工智能等技术的进步和发展。



图 1-3 计算机图形系统的模型处理方式

图形显示是生成、处理和操纵客观世界物体模型的可视化效果,以在输出设备上呈现客观世界物体的图像。这里包括两个方面:一是图形显示设备或图形显示硬件。除了计算机系统的计算能力外,图形显示硬件的显示原理及其性能决定着计算机图形系统的图形显示质量和效果。在早期的计算机图形学研究内容中,图形显示硬件及其显示原理占据着十分重要的地位。随着光栅扫描显示原理及其相应设备的出现,使得这一研究内容趋向平稳,但随着计算机技术的发展,图形的存储和处理能力、图形处理软件的硬件化(图形处理器的功能)、图形显示的真实感等方面依然处于高速发展中,尤其是短颈大屏幕显示器、液晶显示器等新的显示设备和数字墨水(Digital Ink)^③等新的显示技术依然在发展中。二是图形的表示、生成、处理和操纵等,这是当前计算机图形学学科的重点研究内容,它涵盖图形处理和输出的所有方面,从简单到复杂、从规则到非规则、从静态到动态、从离线(Offline)到在线(Online),图形显示一直朝着逼真、高效方向发展着,也就产生了大量关于图形表示、生成和各种操

① Sun Zhengxing, Liu Jing, Informal User Interface for Graphical Computing, 《Lecture Notes in Computer Science》, Vol. 3784, 2005, pp. 675-682.

② 孙正兴, 冯桂焕, 周若鸿. 基于手绘草图的人机交互技术研究进展[J]. 计算机辅助设计与图形学学报. 2005, 17(9), 1891-1899.

③ Walid G. Aref, Daniel Barbará, Daniel P. Lopresti, Ink as a First-Class Datatype in Multimedia Databases, Multimedia Database System: Issues and Research Direction, 1996: 113-163.

纵处理算法^①，计算机图形学也因此而得到不断的应用和发展。

概括起来，计算机图形学的研究内容主要包括以下几个方面：

1) 图形输入技术：主要研究如何让用户自然流畅地将表示对象的图形输入到计算机中，并实现用户对物体及其图像的内容、结构及其呈现形式的操纵和控制，这个技术的核心是人机接口技术(Human-Computer Interface, HCI)。以 WIMP(Window、Icon、Menu 和 Point)为特征的图形用户接口(Graphic User Interface, GUI)是目前最常用的用户图形交互方式，而利用人类多个感觉通道(如触觉、视觉和听觉等)和效应通道(如语音、眼神和动作等)的多通道用户接口(Multimodal User Interface)正成为图形交互的新方式。但这些新方式的发展涉及多学科和多领域技术的综合，如多媒体信息处理技术、人工智能技术和模式识别技术等技术的综合。对于采用笔式交互和语音交互等输入方式的系统，需要手绘草图识别和理解、手写文字识别和理解及语音识别和理解等技术；而对于采用现实场景模型化交互输入方式，则需要计算机视觉等技术。

2) 图形建模技术：研究在计算机内如何表示和存储图形，即对象建模技术。线架建模(Wireframe Modeling)、曲面建模(Surface Modeling)、实体建模(Solid Modeling)和特征建模(Feature Modeling)等是目前计算机图形系统中最常用的技术。但这些技术主要用于可以用欧氏几何方法来描述的规则形状建模，对诸如山、水、草、树、云、烟、水等不规则形状的造型需要非流形造型(Non-manifold Modeling)、分形造型(Fractal Modeling)、粒子系统(Particle System)和基于物理造型(Physical Modeling)等技术。

3) 图形处理和输出技术：主要研究在显示设备上如何“逼真”地显示图形，包括面向设备内部图形输出的图元扫描和填充等生成处理方法；面向用户观察图形的图形变换、投影和裁剪等操作处理方法以及面向真实感图形输出的线面消隐、纹理映射和光照等效果处理方法等。同时，在计算机图形中也存在着图像处理的要求^②，其目的是改善图形显示质量，反走样(Anti-Sampling)便是最典型的计算机图像处理技术。

4) 图形应用技术：图形应用技术的范围十分广泛，既包括计算机图形软件包的设计开发技术及图形标准的建立等，也包括计算机动画、计算机辅助设计与制造、计算机辅助工程、可视化和体视化技术、虚拟现实技术等大量在多个领域的应用技术。

总的来说，计算机图形学是沿着“逼真”地模拟现实世界物体对象及其场景的主线发展的。需要指出的是，尽管通过计算机图形学中的“图形模拟”能够具体了解它所表示的物体，但它仍是一种抽象，因为它只能“逼真”地“模拟”这个物体，图形的“真实感”程度随着显示设备的性能和图形处理技术的不同而变化。这也是计算机图形学学科研究和发展的一个重要课题。尤其是对许多无法用颜色、纹理等显示(图形化)表示的非几何信息的处理是个难点。例如，“形状相同+颜色相同+透明度相同”的两个杯子可能材质不同，它们可能是玻璃杯、塑料杯、金属杯或陶瓷杯。

由于学科发展的动态性及知识交叉的繁杂性，与其他学科一样，计算机图形学的发展也是日新月异，应用领域不断拓展，相关技术相互重叠和渗透。因此，在许多情况下，并不能将上述技术严格地区分，而是多种理论和技术的综合。

1.2.2 计算机图形学中的图形定义

计算机图形学的任务是在计算机内生成客观世界的一切对象和事物，图形及其各种表现

① David F Rogers. 计算机图形学的算法基础(第2版)[M]. 石教英, 彭群生, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2002.

② Jonas Gomes, Luiz Velho. Image Processing for Computer Graphics: Principles and Practice[M]. 世界图书出版公司, 2002.

形式是计算机图形学的主要研究对象。图形是计算机图形学中能够把“计算机图形系统”各组成部分联系在一起的基本概念,图形的各种表现形式是计算机图形学丰富的研究内容的基础,图形的各种形态也成为计算机图形学自身不同研究内容之间及其与其他图形图像学科之间联系的“纽带”。

从广义上说,现实世界中能够在人的视觉系统中形成视觉印象的客观对象都称为图形。这主要包括人眼所观察到的自然界物体和景物;用照相机、摄像机等装置获得的图片;用绘图工具绘制的工程图纸、各种人工美术绘画和用数学方法描述的图形,等等。

抽象地说,图形是科学研究中对客观对象的一种抽象表示,它带有形状和颜色信息。由这个定义可得到,图形的两个信息构成要素:

- 形状:刻画图形形状构成的点、线、面和体等几何要素信息。
- 颜色:反映物体表面属性或材质的灰度、色泽等性质的非几何要素信息。

例如,半径为 R 、圆心在原点的“圆”图形包括下列两方面的信息:

- 形状信息:由多个点组成的符合 $X^2 + Y^2 = R^2$ 的圆。
- 颜色信息:圆周线和圆的内部具有一定的颜色(设定)。

因此,计算机图形学中的图形是采用数学方法表示、能在计算机机内表示和存储并在图形输出设备上显示的对象。它与数学学科中的图形的区别在于:数学学科中的图形是采用几何和代数方程或分析表达式等抽象方法所确定的图形;而计算机图形学中的图形除了数学方法所描述的形状等几何信息外,还包括颜色、材质等非几何信息,它比数学学科中的图形更具体、更接近它所表示的客观对象。

1. 计算机图形学中的图形形式

目前,常提到“图形”和“图像”两个术语。过去,人们认为图形就是几何上使用的、可用数学方程描述的平面图,而图像是指实际拍摄、卫星遥感获得的或印刷出来的画面,而图形处理则是利用计算机将这些数据转换为图形(数字化)而显示出来。实际上,现在利用计算机完全能够在光栅显示器上产生高度逼真的彩色图形,与实际拍摄的图片几乎没有差别,因此,图形的含义也应包括图像、画面和景物等。可以这样说,凡是通过计算机处理、生成、显示和输出的,我们都称之为“图形”。

在计算机图形学中,图形和图像的主要区别在于:图形是用矢量表示的,图像则是用点阵表示的,如图 1-4 所示。它们分别存储成矢量文件和点阵文件。所谓矢量文件就是一种存

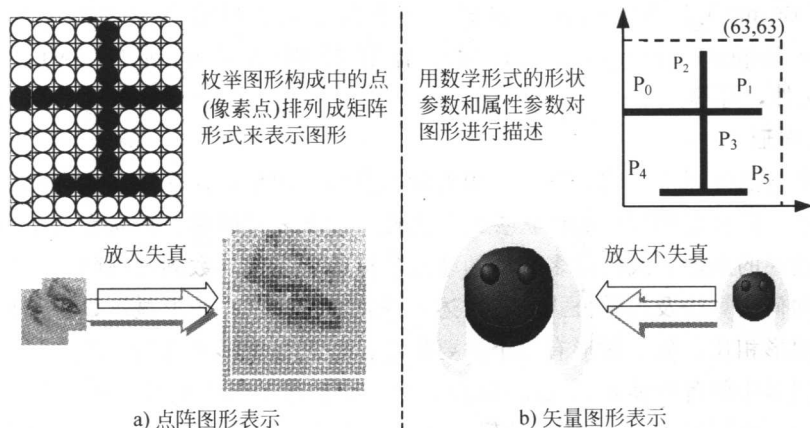


图 1-4 图形的两种表示方法:点阵图形和矢量图形

储生成图形所需坐标、形状、颜色等几何和非几何数据的集合,这些数据反映了图形的内在联系;而点阵文件只是存储图的各个像素点的颜色值,它从外表上反映了图形。

点阵和矢量可以相互转化,矢量文件经过扫描转换可在光栅显示器上产生点阵图像;图像通过识别和处理可转化为矢量表示的图形形式。

同时,图形和图像间的界限有时是模糊不清的。例如,图形扫描仪和图像扫描仪实际上指的是同一种设备;图形文件格式和图像文件格式讨论的内容也无实质区别,而且可在同一环境中同时处理图形和图像;动画画面中究竟是图形还是图像也是无关紧要的。

(1) 点阵图形

点阵图形是一种电视图像形态,它通过枚举图形构成中的点(像素点)排列成矩形形式(点阵图)来表示图形而提供近似“真实”的表示,强调图形由哪些点构成,这些点具有什么样的颜色。通常,这种表示采用整数元素(图像元素或像素)的位置矩阵来实现(大多数应用中矩阵非常大),颜色用彩色表(矩阵)来表示,每个元素的不同值对应于不同的颜色。

真实感强的点阵图形好像经过精心策划似的,和照片一样,看起来特别赏心悦目,因为这种图形直观地、有效地表示了其中的内容。这种图形可以用数字相机或图形扫描仪获得,也可以用图形软件生成。由于许多硬拷贝设备(如激光打印机、喷墨绘图仪等)多是以许多小圆点打印图像,所以点阵图形特别适合这些设备的输出。

但点阵图形需要大量的存储空间,虽然一幅简单的黑白点阵图形仅需几十字节或更少的空间,但是一幅复杂的彩色扫描图形则需要消耗几兆或几十兆字节的计算机存储空间。另外,对点阵图形进行编辑、修改相对要更困难一些,因为点阵图形中各物体的描述是混在一起的,对不同物体的操作存在麻烦,不可能将某一个物体的所有像素都置为零,这样会同时消除重叠的其他物体。解决这个问题的方法就是引入存储器分块,并且在每个分开的块上显示相互独立的物体。此外,点阵图形的放大操作会使图形失真。

常用的点阵图形文件格式有:基于PC绘图程序的PCX格式;用于在桌面排版类应用以及其他应用之间进行数据交换的TIFF(Tagged Image File Format)格式;用于在网上进行图形在线传输的GIF(Graphics Interchange Format)格式;用于网络上传输图像数据的PNG(Portable Network Graphics)格式;用于显示或保存Window系统下图像的DIB(Device-Independent Bitmap)/BMP(Bitmap)格式;用于保存或者显示照片类图像的JPEG(Joint Photographic Experts Group)格式;用于保存视频/音频序列的AVI(Audio Video Interleave)文件,等等。

(2) 矢量图形

矢量图形与点阵图形不同,它不是用大量的点建立图形,而是用数学方程、数学形式对图形进行描述。通常是用图形的形状参数和属性参数来表示图形。形状参数指描述图形的方程或分析表达式的系数、线段或多边形的端点坐标等,属性参数则包括颜色、线型等。矢量图的关键是如何用算法及数学公式进行描述,并且如何将之在图形显示设备上显示出来。

与点阵图形相比,矢量图形有三个主要优点:1)矢量图形文件所占的空间要比点阵小得多。2)矢量图形中的各物体是独立的(以点、线、面和体为基本构成元素,所以也称这种图形表示为面向对象图形表示),所以编辑、修改起来比较方便。3)矢量图形的输出与实际显示的分辨率无关,因而放大图形不会失真(丢失细节)。

矢量图形的缺点是看起来比较抽象,图形构造比较复杂,处理某些特殊效果比较困难,

同时矢量的输出必须采用矢量式输出设备,不能直接使用打印机打印。要想以光栅图形显示时则需要进行某种变换(称为“扫描转换”),即将矢量表示转换成点阵表示。

常用的矢量图形文件格式有:用于交换 CAD 绘图数据的 DXF(Data Exchange File)文件;用于打印机输出及对象存储和交换的 PostScript EPS 格式;用于控制笔式绘图仪以及激光打印机的 HPGL 格式;用于在 Window 系统下保存和交换图像的 WMF 格式;用于保存 WordPerfect 软件中图像图形的 WPG 格式和用于 UNIX 图像绘制程序的通用格式 UnixPlot;用于保存运动图像系列的 MPEG(Moving Picture Experts Group)格式;用于在网络上传输多媒体数据的 RIFF(Resource Interchange File Format)、SGML(Standard Generalized Markup Language)文件和 ODA 文件等多媒体文件格式;NASA 的 CDF 格式和 NCSA 的 HDF 格式等可视化文件格式。

2. 图形的类型及其转换

上述点阵图形和矢量图形可以细分为以下几个类型(如图 1-5 所示)。

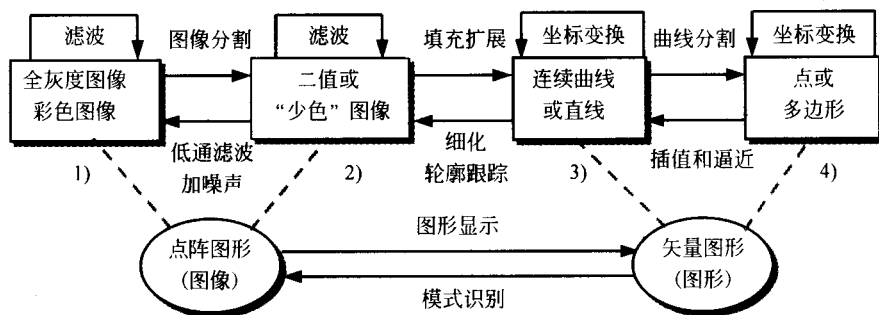


图 1-5 图形的类型及其相互转换关系

1)全灰度图像和彩色图形(点阵图形):这是常见电视图像的格式,它提供一种近乎“真实”的表示。常用整数元素的矩阵表示。

2)二值或“少色”图形(点阵图形):这些图像包含颜色均匀且轮廓分明的区域。它能用每个像素 1 比特(bit)的矩阵表示,也能用映射图(Graph)表示。

3)连续的曲线和直线(矢量图形):这种图形的数据是点的序列,且点之间的距离足够小,可用 X-Y 坐标、坐标增量和差分链码表示。

4)离散点或多边形(矢量图形):这类图形由离散的点集构成,这些点相对分得较开,其表示必须根据点间距离的统计分析来选择(散乱点数据的拟合)。

这四类图形间可进行相互转换,主要包括以下几类转换(如图 1-5 所示):

1)第一类变至第二类:这个过程称为分割,它确定一些颜色或亮度近似的均匀的区域。要利用比较复杂的特性(如纹理)去寻找均匀性。

2)第二类变至第三类:一种可能的变换是轮廓跟踪,另一种是细化。在轮廓跟踪中,区域映射为封闭的曲线;而在细化中,区域映射为区域的骨架图形。

3)第三类变至第四类:曲线的分割。这个过程是沿图形的轮廓找出其临界点。

4)第四类变至第三类:包括插值处理和逼近处理。在插值处理中,通过给定的点画出一条平滑的曲线;而在逼近处理中,所画的平滑曲线应靠近这些点。

5)第三类变至第二类:如果输入是轮廓,就有填充问题。它通常表示为遮荫问题(一个