

高等院校计算机教育系列教材

# 计算机图形学 基础教程

孙正兴 周良 郑宏源 编著

01



清华大学出版社

高等院校计算机教育系列教材

# 计算机图形学基础教程

孙正兴 周良 郑宏源 编著

清华大学出版社

北 京

## 内 容 简 介

计算机图形学是计算机学科中最活跃的分支之一。本书以独特的视角对计算机图形学的基本概念、原理方法和应用方式进行了全面的介绍。在内容选取上,本书既对计算机图形学所涉及的图形显示、图形生成和操纵、图形表示和建模等基础理论和技术进行了系统讲解,也对诸如图形动画原理及基本二维动画制作方法等计算机图形学综合应用方法进行了适当介绍;既包括了传统计算机图形学内容的讲解,也不乏诸如非规则形体建模、表现和人脸动画、可缩放矢量和数字墨水等计算机图形学最新进展的介绍。

在结构编排上,本书采取将计算机图形学内容归结为基础概念、图形显示、图形生成、图形观察、图形建模和图形动画一条主线,便于读者真正系统地领悟计算机图形学“逼真”地模拟现实世界物体的发展和应用宗旨。在描述方式上,本书摒弃了传统计算机图形学教材中繁琐复杂的算法推导和连篇累牍的软件程序,采取启发式方法,注重于使读者能从概念、技术和应用三个不同层次上理解计算机图形学的内容,并使用大量图示以易于学习和理解。另外,本教材还得到了国家自然科学基金资助。

本书是作为计算机图形学基础教材而编写的,不仅可作为高等学校、高等职业学校等计算机、医学、机械、天文、物理、化学、环境、地学、军事等理工科师生作为教材使用,而且对于想了解计算机图形学及其应用知识的读者也是一本很好的参考资料。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

计算机图形学基础教程/孙正兴,周良,郑宏源编著.—北京:清华大学出版社,2003  
(高等院校计算机教育系列教材)

ISBN 7-302-07682-0

I.计… II.①孙…②周…③郑… 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(2003)第106123号

出版者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

社总机:010-62770175 客户服务:010-62776969

组稿编辑:刘建龙

文稿编辑:桑任松

封面设计:陈刘源

印刷者:北京市通州大中印刷厂

装订者:三河市兴旺装订有限公司

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:17.25 字数:414千字

版 次:2004年2月第1版 2004年2月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-07682-0/TP·5627

印 数:1~5000

定 价:24.00元

---

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103或(010)62795704

# 丛书序

人类进入新千年时，计算机科学已成为一块极其活跃的、崇尚发展与创新的领地并成为我们这一时代决定性的先驱技术。计算机是现代文化构成不可或缺的组成部分，是现代科学技术发展的先导，并成为世界经济巨量增长的根本引擎。同时，计算机技术的发展日新月异，它的快速发展对计算机科学与工程的教育产生了深刻的影响。因此，计算机教育在世界各国备受重视，计算机知识与能力已成为 21 世纪人才素质的基本要素之一。

伴随着计算机新技术的不断涌现，已有技术几年内即变得陈旧。与此同时，计算机教育也被其所在的专业、文化和社会范围的改变影响着。计算机学科已变得更宽广、内容更丰富，其应用领域不断飞速增长。因此，无论在教学体系、教学内容还是教学方法、教学手段上都必须进行深化改革，与时俱进。CC2001(是国际上著名的两个计算机组织 ACM 和 IEEE-CS 于 2001 年提交的计算机教学计划 2001 的简称)的出现，无疑是对计算机学科课程体系一个崭新的、完整的引导。我们工科院校无论计算机专业还是非计算机专业的计算机科学与工程的教育应该紧密有机地与工科学生的培养目标相结合，注重知识、能力、素质教育三方面的综合教育，加强计算机系统的认知、分析、设计和应用能力、算法设计与分析能力和程序设计能力以及计算思维能力等方面的培养。

原化工部部属高校计算机教育协作组结合工程教育的特点，大力开展计算机教育协作与交流，十年来开展了务实的、全方位的、卓有成效的教学研讨及教研观摩等活动，极大地促进了交流并推动了各校计算机教育的发展。同时，协作组不断地扩展，吸收了许多其他领域的高校参加，共同为我国计算机高等教育事业的发展与完善进行广泛的交流探索。

目前参加这个协作组的主要高校有：

清华大学	南京大学	天津工业大学	北京化工大学
南京工业大学	青岛科技大学	郑州大学	武汉化工学院
沈阳化工学院	南京师范大学	华南理工大学	河北行政学院
南京工程学院	淮海工学院	北京石油化工学院	江苏石油化工学院

在清华大学出版社的大力支持下，本协作组 2001 年年会决定组织出版一套最新的计算机系列教材，第一期出版 10 部有关程序设计与软件应用方面的教材。它们是：《计算机导论》、《C 语言程序设计》、《Visual Basic 程序设计》、《Java 程序设计》、《面向对象程序设计——Visual C++》、《SQL Server 数据库原理及应用教程》、《C#编程及应用程序开发教程》、《组网技术与配置》、《现代语音技术基础与应用》和《计算机图形学基础教程》等。

本系列教材依据 CC2001 框架精心策划、准确定位，书中概念清晰，例题丰富，深入

浅出，内容翔实，体系合理，重点突出，是一套面向高等学校计算机和非计算机专业学生的计算机基础与应用系列教材，也可供从事计算机应用和开发的各类人员学习使用。

本系列教材源于十几所全国重点大学和普通高等院校计算机教育的教学改革与实践，凝聚了工作在教学第一线的任课教师的教学经验与研究成果。我们期望本系列教材的出版，以及在教学实践中的不断完善与更新，为我国高校计算机教育事业做出新的贡献。

编委会  
2003年9月

## 编委会名单

**主编：朱群雄**

**编委：闵华清 王晓峰 邵定宏**

**刘川来 彭四伟 刘 斌**

**刘新民 张彦锋 吕纪国**

**刘 焯 王相林 蔡莲红**

**孙正兴**

# 前 言

计算机图形学影响着每一个使用计算机的人，正是计算机图形学中图形用户界面技术的产生和发展才使得计算机及其应用能够如此普及。有些人认为自身并不从事计算机图形学方面的工作而不重视甚至放弃对计算机图形学的学习，孰不知只要你想通过显示器来学习和工作，图形学就会悄然来到你身边。实际上，计算机图形学及其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，并与这些领域自身发展相互推动和促进，计算机图形学已成为信息技术中不可缺少的内容，社会也将需要有更多的人能够全面了解和正确理解计算机图形学的本质。

计算机图形学应用十分广泛，因而在编写作为基础课程的计算机图形学教材时要考虑多种因素。首先，就相关学科而言，诸如人机交互技术、计算机动画技术、可视化技术、真实感图形显示技术、虚拟现实、多媒体技术、计算机视觉、基于内容的视觉信息检索、多媒体挖掘、可视化软件工程、计算机辅助几何设计和造型、计算机辅助设计和制造、地理信息系统、艺术和网页设计等课程或技术都以计算机图形学为基础，教材内容必须能够包含其共性，真正为学习者提供进一步学习这些课程或技术的基础。其次，从传授知识的方式来讲，是采取传之以“鱼”，还是授之以“渔”。“鱼”注重于计算机图形学中的具体算法、特定工具或专门技能，“渔”则强调计算机图形学的算法原理、方法思想和概念内涵。在信息技术及其工具迅猛发展的今天，孰优孰劣，不言自明。第三，从学习者角度来看，有两种不同的要求：一种是从事计算机图形学及其相关领域的开发和研究者，他们要求书的内容应注重系统、深入和完善的知识；另一类读者主要将计算机图形学作为学习和工作的基础或工具，这类读者从事的工作包括：信息工程相关学科、计算机辅助设计和制造等工程以及网页、艺术、工程等，他们更关心的是图形学的原理和使用方法。显然，在有限的篇幅内要做到两全其美是困难的，而且，读者想通过一个学期或更短时间的学习就能达到开发和应用的水平也是不大可能的，而应该注重于深刻理解和正确应用计算机图形学的原理和概念。

本书是作为计算机图形学的基础教材而编写的，目的就是让读者能够全面而系统地理解计算机图形学的相关概念、原理和知识。书中并没有将计算机图形学的算法推导和严格定义作为重点(读者不必担心被繁琐复杂的图形学算法过程和严格定义所困扰，假如你需要，这种面向计算机图形学专业人员的书籍在参考文献中可以找到)，也没有强调计算机图形学的使用技能(使用技能培养的惟一解决办法不是去看多少书籍，而是不断地对特定工具或软件使用)，而是介绍了必要的、最小限度的内容，并介绍了计算机图形学领域中的一些最新的研究方法和成果，重点放在概念的解释、原理的讲解和方法的使用等方面，力图使读者易于正确地理解计算机图形学的基本知识。本书的特点是：①重概念。本书摒弃了繁琐的公式推导和繁杂的软件实现技术，而主要从图形学应用角度讲述概念。内容上选取图形学的应用和深入研究所必备的知识，不追求“罗列式的全面”，而追求“透彻型的精炼”。②重系统。本书不是支离破碎地罗列概念和定义，而是注重概念的系统性，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。③重形象。“一幅画胜过千句话”在图形图像领域是句名言,然而很多教材缺乏对这一优势的利用。本书并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,书中采用了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。

本书包括6章。第1章全面介绍计算机图形学的研究内容、发展状况、学科范畴、软件标准、系统构成及发展方向,尤其是透彻阐述了计算机图形学的定义及其过程以及图形和图像的联系和区别,这是理解计算机图形学中的相关技术和概念,及其作为相关学科基础和关联的理论基础。第2章从作为人类视觉系统基础的颜色模型开始,详细介绍了图形的显示原理及相关技术,主要包括:作为显示器技术基础的图形显示原理,作为图形显示核心的线画图形、填充图形和字符的生成原理和方法,为提高图形显示质量的反走样技术的主要思想。第3章从分析图形的显示过程入手,重点介绍了图形显示过程中涉及的基础技术,既包括作为图形观察和操纵基础的基本二维和三维几何变换,也包括实现图形观察和操纵的投影变换、观察变换,还包括为确保图形显示真实性的图形裁剪和可见面判别方法。第4章从规则形体建模、非规则形体建模和图形光照模型这三个方面介绍了作为计算机图形学核心技术的图形表示和建模方法,既包括传统的线架模型、多边形模型、扫掠模型、空间分割、边界表示、实体表示和特征表示等几何造型方法,也包括诸如分形几何、形状文法、粒子系统及基于物理造型等最新非规则过程建模方法,并介绍了作为真实感图形显示基础的几种基本光照模型。第5章以曲线曲面的基本原理为基础,重点介绍了 Bézier 曲线曲面、B 样条曲线曲面和 NURBS 曲线曲面这三种最常用曲面模型的基本概念和性质。第6章作为全书的综合应用,概括了图形动画的基本原理、分类和发展,并以 GIF、PhotoMorph 和 Flash 为例简单介绍了二维图形动画的制作方式。附录中简单介绍了计算机图形学的两个最新技术,即可缩放矢量图形(SVG)标准和数字墨水(Digital Ink)。

学习本书可如下安排:对于计算机专业或具备相应计算机基础知识的人员,可选择第1章至第5章作为重点内容,第6章作为自学和综合练习使用;对于非计算机专业或缺乏计算机系统知识的人员,可选择第1章至第4章及第6章的部分内容;对于高职或技能人员可以选择第1、第2和第6章的内容重点学习,而粗读第3、第4和第5章的内容。学习方式可以先将内容粗略地看一遍,然后,参照教学幻灯片学习或由教师讲解重点,并完成有关思考题。

需要指出的是:计算机图形学是一门有用的、有趣的课程,但也是难学的课程。“难”体现在整个学科发展日新月异,应用领域不断拓展,相关学科相互重叠和渗透,难以把握和区分;同时,图形学涉及的内容和应用很广,学科交叉繁杂,难以形成一个简单、独立和明确的知识体系。但是,计算机图形学是沿着“逼真”地模拟现实世界物体这条主线发展的,所以,其概念和处理方法具有相当好的一致性,因此,读者只要在学习时注意“前后联想”,就能达到“一通百通”的效果。另外,计算机图形学对于大多数读者而言属于应用型技术,因此,在学习的同时必须注重实习和应用,找一个你手边最熟悉或想熟悉的工具或软件环境,试着做你最想做或喜欢做的事情,就会更深切体会到计算机图形学是如何有用和有趣,真正领悟概念与技能间的微妙关系。

本书以笔者近年来承担南京大学计算机科学与技术系相应课程的教学讲义为基础编写

而成，凝聚了多年来对计算机图形学及其应用的理解。在写作过程中，与南京航空航天大学周良和郑宏源两位老师进行了紧密的合作和详细的讨论，融入了他们对工科院校各专业同类课程的许多教学经验和思想，并与他们共同完成本书。在课程教学和本书编写过程中，得到了笔者的博士后导师张福炎教授以及博士学位导师丁秋林教授、蔡士杰教授等前辈的许多悉心指点和帮助，在此谨表深深的敬意和衷心的感谢！硕士生周若鸿和张莉莎花费了大量精力和时间对全稿进行了认真校正，并提出了许多有益的修改意见，同时硕士生孙建勇、邱庆华、张斌和李曼舞在本书编写过程中也给予了最大的帮助，在此一并表示感谢！对书中存在的不足，恳请读者和同行指正。

孙正兴

2003年9月于南京大学



# 目 录

<b>第 1 章 图形学概论</b> ..... 1	
1.1 计算机图形学的内容及其发展..... 1	
1.1.1 计算机图形学的研究内容..... 1	
1.1.2 计算机图形学的发展概况..... 3	
1.1.3 计算机图形学中的 图形定义和形式 ..... 6	
1.1.4 计算机图形学的学科范畴..... 9	
1.2 计算机图形学软件标准..... 12	
1.2.1 图形软件标准的发展 ..... 12	
1.2.2 图形软件标准的类型 ..... 13	
1.2.3 标准图形支撑软件 ..... 14	
1.3 计算机图形系统..... 16	
1.3.1 计算机图形系统的 基本功能 ..... 16	
1.3.2 计算机图形系统的组成..... 17	
1.4 图形学应用及其发展..... 20	
1.4.1 人机交互技术 ..... 20	
1.4.2 计算可视化 ..... 22	
1.4.3 真实感图形显示 ..... 24	
1.4.4 虚拟现实技术 ..... 26	
1.4.5 计算机辅助设计 ..... 28	
1.4.6 计算机动画 ..... 29	
1.5 思考和练习 ..... 31	
<b>第 2 章 图形显示与生成</b> ..... 32	
2.1 颜色模型 ..... 32	
2.1.1 颜色特征描述: 颜色空间..... 33	
2.1.2 颜色的基色混合描述 ..... 34	
2.1.3 图形显示的颜色模型 ..... 36	
2.2 图形显示原理 ..... 42	
2.2.1 阴极射线管 ..... 42	
2.2.2 光栅扫描显示原理 ..... 45	
2.2.3 随机扫描显示原理 ..... 50	
2.2.4 其他图形输出设备 ..... 51	
2.3 线图形生成原理..... 54	
2.3.1 线图形生成的基本概念..... 54	
2.3.2 线生成 DDA 算法..... 57	
2.3.3 Bresenham 线生成算法..... 58	
2.3.4 中点圆生成算法..... 62	
2.3.5 中点椭圆生成算法..... 64	
2.3.6 其他曲线生成算法..... 65	
2.4 填充图元生成原理..... 66	
2.4.1 多边形扫描转换填充..... 66	
2.4.2 区域填充 ..... 68	
2.4.3 扫描转换填充与区域 填充的比较 ..... 72	
2.5 字符图元生成..... 73	
2.5.1 字符编码标准..... 73	
2.5.2 点阵字符生成..... 73	
2.5.3 矢量字符生成..... 74	
2.5.4 点阵字符和矢量 字符的比较 ..... 75	
2.6 反走样技术..... 75	
2.6.1 反走样的基本原理..... 75	
2.6.2 常用的反走样技术..... 76	
2.7 思考和练习..... 79	
<b>第 3 章 图形观察与变换</b> ..... 82	
3.1 图形观察和变换原理..... 82	
3.1.1 图形的观察和变换过程..... 82	
3.1.2 计算机图形系统 中的坐标系 ..... 83	
3.1.3 计算机图形系统中的 图形变换 ..... 85	
3.2 图形的二维几何变换..... 86	
3.2.1 二维基本几何变换..... 86	
3.2.2 几何变换的齐次表示..... 89	
3.2.3 复合变换 ..... 90	
3.2.4 特殊几何变换..... 90	
3.3 图形的三维几何变换..... 92	

3.3.1	三维基本几何变换 .....	92	4.3.3	整体光照模型 .....	162
3.3.2	三维特殊几何变换 .....	95	4.3.4	基本效果模型 .....	165
3.3.3	三维坐标系的变换 .....	95	4.4	思考和练习 .....	171
3.4	投影变换 .....	96	<b>第 5 章</b>	<b>曲线曲面基础 .....</b>	<b>173</b>
3.4.1	平面几何投影 .....	96	5.1	曲线曲面的基本概念 .....	173
3.4.2	平面投影变换原理 .....	97	5.1.1	曲线曲面的参数化表示 .....	173
3.5	图形观察变换 .....	99	5.1.2	曲线曲面的基本类型 .....	176
3.5.1	三维观察变换 .....	99	5.1.3	曲线曲面的基函数表示 .....	178
3.5.2	一般投影变换 .....	103	5.1.4	曲线的连续性 .....	179
3.5.3	二维观察变换 .....	105	5.2	参数三次插值样条曲线 .....	180
3.6	图形的裁剪 .....	107	5.2.1	参数三次插值样条 曲线的类型和性质 .....	180
3.6.1	点的裁剪 .....	108	5.2.2	自然三次插值样条 .....	182
3.6.2	线段的裁剪 .....	108	5.2.3	Hermite 三次插值样条 .....	182
3.6.3	非矩形裁剪窗口的 线段裁剪 .....	113	5.2.4	Cardinal 样条 .....	184
3.6.4	多边形裁剪 .....	114	5.2.5	Kochanel-Bartels 样条 .....	185
3.7	可见面判别 .....	119	5.3	Bézier 曲线曲面 .....	186
3.7.1	可见面判别中的连贯性 .....	119	5.3.1	Bernstein 基函数及其 性质 .....	186
3.7.2	后向面判别 .....	120	5.3.2	Bézier 曲线的定义和性质 .....	187
3.7.3	深度缓冲器算法 .....	121	5.3.3	Bézier 曲线的离散生成 .....	188
3.7.4	A 缓冲器算法 .....	121	5.3.4	Bézier 曲线分割和逼近 .....	189
3.7.5	深度排序算法 .....	122	5.3.5	Bézier 曲线的拼接 .....	190
3.7.6	BSP 树算法 .....	123	5.3.6	Bézier 曲线的升降阶 .....	191
3.8	思考和练习 .....	123	5.3.7	Bézier 曲面的定义和 性质 .....	191
<b>第 4 章</b>	<b>图形表示与建模 .....</b>	<b>127</b>	5.4	B 样条曲线曲面 .....	193
4.1	规则形体的精确表示 .....	127	5.4.1	B 样条基函数 .....	194
4.1.1	规则形体表示的 基本概念 .....	127	5.4.2	B 样条曲线的定义 .....	194
4.1.2	实体的定义与运算 .....	131	5.4.3	B 样条曲线的性质 .....	196
4.1.3	三维形体的表示方法 .....	136	5.4.4	B 样条曲线的类型 .....	198
4.2	非规则形体的表示 .....	147	5.4.5	B 样条曲线的离散生成 .....	199
4.2.1	分形几何 .....	148	5.4.6	B 样条曲线的节点插入 .....	200
4.2.2	形状文法 .....	151	5.4.7	B 样条曲线的形状控制 .....	201
4.2.3	粒子系统 .....	152	5.4.8	B 样条曲面的定义 .....	202
4.2.4	基于物理的建模 .....	153	5.5	NURBS 曲线曲面 .....	203
4.3	图形光照模型 .....	154	5.5.1	有理样条曲线定义 .....	203
4.3.1	简单光照模型 .....	155	5.5.2	NURBS 曲线的优缺点 .....	204
4.3.2	面绘制模型 .....	159			

5.5.3 NURBS 曲线的表示 .....	204	6.3.1 二维动画的特点 .....	225
5.5.4 NURBS 曲线的形状因子 .....	207	6.3.2 GIF 简单动画的应用 .....	226
5.5.5 NURBS 曲面的 表示与性质 .....	208	6.3.3 PhotoMorph 动画的应用 .....	228
5.6 思考和练习 .....	211	6.3.4 Flash 动画的应用 .....	230
<b>第 6 章 图形动画原理 .....</b>	<b>212</b>	6.4 计算机动画的最新发展 .....	239
6.1 动画的概念和原理 .....	212	6.4.1 表演动画及其原理 .....	240
6.1.1 动画的基本原理 .....	212	6.4.2 表演动画的关键技术 .....	241
6.1.2 计算机动画的概念 .....	214	6.4.3 几种典型的表演动画 系统 .....	245
6.2 计算机动画的基本原理 .....	216	6.4.4 人脸动画 .....	248
6.2.1 计算机动画的基本类型 .....	216	6.5 思考和练习 .....	251
6.2.2 计算机动画的关键技术 .....	218	<b>附录 A 可缩放矢量图形 (SVG) 标准 .....</b>	<b>252</b>
6.3 二维简单动画的制作 .....	225	<b>附录 B 笔式交互与数字墨水 .....</b>	<b>257</b>
		<b>参考文献 .....</b>	<b>261</b>

# 第 1 章 图形学概论

## 阅读提示:

还记得《侏罗纪公园》里活灵活现的恐龙和《泰坦尼克号》中船翻人落水的情景吗?在欣赏这些精彩的美国大片时,你有没有想到这就是计算机图形学在动画、电影、广告、科教演示、电子游戏、美术和商用艺术中广泛应用的最典型体现;在你领略了数字摄像机和数码照相机等给生活所带来方便和愉悦的同时,你是否知道这与计算机图形学原理有着密切的关系。总之,人类的知识和信息有 80%来自于视觉,俗话说“百闻不如一见”、“一幅画胜于千句话”,说明了图形图像是人类社会中信息传递、思想交流和工业应用等方面的最主要媒体之一。计算机图形学是计算机科学中最活跃的分支之一,以图形人机接口和可视化技术为代表的计算机图形学及其应用在计算机技术的发展中有着十分重要的作用。现今,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,并与这些领域自身发展相互推动、互相促进,而成为信息技术中不可缺少的重要内容和发展基石。

本章的主要内容包括:

- 计算机图形学研究内容及其学科范畴、图形图像的联系和区别。
- 计算机图形学的软件标准及其特点。
- 计算机图形系统的功能、构成及其特点。
- 计算机图形学的主要应用及其发展前景。

## 1.1 计算机图形学的内容及其发展

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,图形及其各种表现形式是计算机图形学的主要研究对象。计算机图形学的诞生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,计算机图形学的应用从某种程度上反映了计算机软、硬件技术的发展水平;同时,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极大地推动了计算机图形学学科的发展,也丰富了计算机图形学的研究内容。

### 1.1.1 计算机图形学的研究内容

通俗地讲,计算机图形学(Computer Graphics)是研究怎样用计算机生成、处理和显示图形的一门学科。严格地说,计算机图形学是研究几何对象(geometric objects)及其图像(images)的生成(creation)、存储(storage)、处理(processsing)和操纵(manipulation)的一门学科。这里,几何对象就是计算机内所表示的客观世界物体的模型;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、存储和操纵是利用计算机实现客观世界、对象模型和输出图像这三者之间映射的一系列操作和处理过程。

计算机图形学的核心可以概括为以客观世界对象的计算机内表示为基础的两大方面：模型生成(客观世界建模)和图形显示(输出效果处理)，如图 1.1 所示。

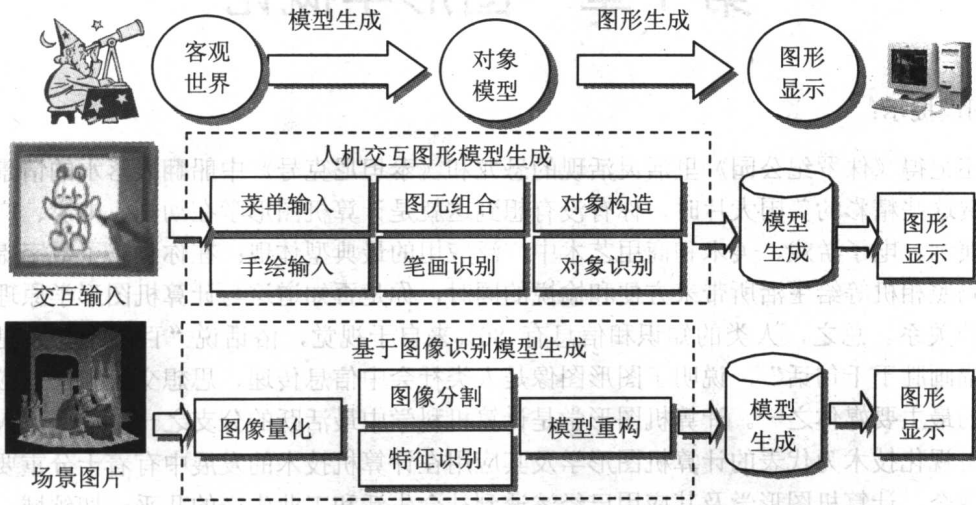


图 1.1 计算机图形学的研究内容

模型生成是获取、存储和管理客观世界物体的计算机模型，以在计算机内建立客观世界物体的模拟环境；模型生成有两种方式：一种方式是由图形系统提供模型构成的基本元素(如：点、线、面和体等)，而由用户按自己的设想在图形系统所提供的环境中交互地构造所需要的模型，这种方式是目前计算机图形系统模型生成的主流方法；另一种借助于数字摄像机、数字照相机和扫描仪等采集设备所获取的客观世界对象，通过图形的识别来构造客观世界的模型。由于图形的识别非常困难，因此，这种方式虽然具有很多优势，但还不成熟。

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。这里包括两大方面：一是图形显示设备本身的能力和性能，即图形硬件。在计算机图形学产生的早期，图形显示设备是其一个十分重要的研究内容，尽管目前图形显示设备的技术已经相对比较成熟，但液晶显示和数字墨水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，这是计算机图形学的软件部分，也是当前计算机图形学学科的重点研究内容。

计算机图形系统是反映计算机图形学研究成果及其在各个领域中应用的软件系统。由于计算机图形的操作和处理及其过程十分复杂，尤其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：设备和系统接受来自用户的输入，而此输入又用设备和系统所产生的显示来表示的。目前，主要的模型生成交互方式是菜单和手绘输入，而基于客观世界实际场景的其他模型生成技术尚未进入实用化阶段，但将成为未来对象模型生成的主流。

由此可知，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

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控制。这个技术的核心是人机接口(Human-Computer Interface, HCI),尤其是图形用户界面(Graphic User Interface, GUI)技术,以WIMP(Window、Icon、Menu和Point)为特征及压力反馈(Haptic Input,如触摸屏)式的图形用户界面是目前最普遍的用户图形输入方式,手绘草图/笔迹输入(Sketch-based/Caligraphic Interface)、多通道用户界面(Multimodal User Interface)和基于图像的绘制(Image-based Rendering)正成为图形输入的新方式。

### (2) 图形建模技术

图形建模技术主要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(Wireframe Modeling)、曲面(Surface Modeling)、实体(Solid Modeling)和特征(Feature Modeling)等造型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形状的建模,对于诸如山、水、草、树、云、烟、水等不规则对象,其造型需要非流形造型(Non-manifold Modeling)、分形造型(Fractal Modeling)、纹理映射(Texture Mapping)、粒子系统和基于物理造型等技术。

### (3) 图形处理和输出技术

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。包括图元扫描和填充等生成处理,图形变换、投影和裁剪等操作处理及线面消隐、光照等效果处理,尤其是真实感图形显示技术。同时,在计算机图形中也存在着图像处理的要求,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;对于采用手绘草图等输入方式,还需要草图的识别和理解技术。

### (4) 图形应用技术

图形应用技术十分广泛,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;还包括计算机动画、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的主线发展的。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,相关学科相互重叠和渗透,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。

此外,尽管通过计算机图形学中的图形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、纹理等显式(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”的两个杯子可能杯子的材质不同,而可能是玻璃杯、塑料杯、金属杯或陶瓷杯。

## 1.1.2 计算机图形学的发展概况

计算机图形学的兴起和发展与图形输入/输出设备密切相关,同时,与计算机软硬件、计算技术及其在各个领域的应用都有很大关系。

计算机图形学的发展历史可以追溯到20世纪50年代,当时阴极射线管(CRT)显示器的出现为计算机生成和显示图形提供了可能性。美国麻省理工学院的旋风(whirlwind)计算



机就配置了一台这样的显示器，它主要用来显示输出，尚不具备交互功能。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 标志了交互式图形显示技术的诞生。该系统由分布在全国各地区的 100 多台图形工作站及连接它们的通信网络构成，主要用于监视北美的整个地区和领空，以便指挥员能清楚观察到空中和地面上的动态场景，及时准确地指挥作战。系统中包含了各地区的地理、地形信息，并能将雷达信号转换为图形在显示器上显示出来。指挥员可以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。

1963 年，美国麻省理工学院的 Ivan Sutherland 在做博士论文期间研制出了 SketchPad 系统，利用该系统可以用光笔在图形显示器上实现拾取、定位等交互功能，系统还能跟踪光笔在相邻的点之间画直线或者以此直线段为半径画圆。在这个系统中，Ivan Sutherland 引入了图元的层次表示概念和数据结构。事实上，这些方法一直被延用至今。因此，Ivan Sutherland 被公认为开创交互式图形技术的奠基人。

与此同时，计算机辅助设计和制造在计算机、汽车及航空工业领域中被开展起来，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，所以，直到 20 世纪 80 年代初，图形学仍然是一个较小的专业化学科。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，体积缩小，价格降低，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，在这些系统中，主机和显示器融为一体，价格便宜，开放性好，易于维护，并且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也快速提高。它们的出现对交互式图形学的发展起到了里程碑式的作用，致使自那以后图形技术蓬勃发展，理论日臻成熟，应用日趋广泛。

除了计算机系统本身的处理能力之外，图形显示设备的发展是推动计算机图形技术不断前进的另一重要因素。20 世纪 60 年代中期出现的图形显示器所能绘制的图形只能是线条，所以称之为画线显示器，或称随机扫描显示器和矢量显示器。在这种显示器中，电子束在荧光屏上产生的亮点只能持续很短的时间，为了产生静态的不闪烁的图形，电子束必须周期性地反复扫描所要绘制的图形。当时，具有刷新频率要达到 30 Hz(这样图样才不闪烁)这样能力的画线显示器十分昂贵，因而限制了它的普及。

20 世纪 60 年代末期人们研制出了存储管式显示器，它具有内在的存储部件。一般用了一个很密集的金属网装在荧光屏内距发光涂层很近的地方，当它第一次被电子束轰击之后，在其上形成电子图像(靶像)。靶像可以持续发出电子，在荧光屏上产生静态图形。这样便避免了刷新过程，消除了闪烁问题，而它的价格又远低于画线显示器，所以它在当时被作为典型的图形显示设备得到较广泛的应用。但存储管式显示器也有其固有的缺陷，它不具有动态修改图形的能力。这一缺陷使它很快被后来出现的光栅扫描显示器所替代。

20 世纪 70 年代出现的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，这个点阵存放在专用的缓冲区中，由视频控制器负责扫描，并将图形在屏幕上显示。因为与随机扫描显示器相比，具有价格低，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。

伴随着交互式图形技术的发展，出现了许多图形输入设备。二维图形输入设备有鼠标(Mouse)、图形输入板(Tablet)、跟踪球(Traceball)、光笔(Light Pen)、触摸屏、操纵杆(Joystick)等，它们主要被用来完成拾取、定位或二维坐标输入等功能，是二维图形用户界面不可缺少的设备。在三维图形界面如虚拟显示系统中，用户置身于虚拟的三维场景之中，必须有三维的图形输入设备，包括空间球(Spaceball)和数据手套(Data Glove)等。用它们能够输入包括空间坐标和旋转方向在内的6个自由度的数值。键盘也是交互式图形系统必不可少的输入设备，由它可以输入字符串命令、数字或完成一些特殊的功能。总之，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。

交互式计算机图形系统的发展可从显示技术、显示方式、对象和命令指定方式、显示控制方式和应用控制方式这几个方面的进化而概括为以下几个阶段(如图1.2所示):

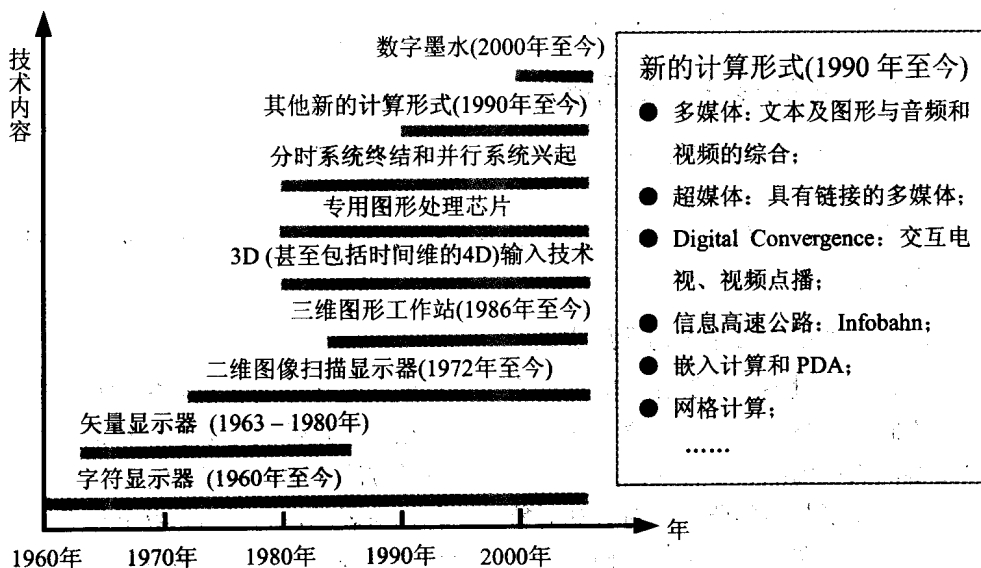


图 1.2 计算机图形学的发展示意

- (1) 20 世纪 60 年代至今: 字符显示(Character Displays)
  - 显示方式: 文字加数字的伪图形(pseudo-graphics);
  - 对象和命令指定方式: 命令行输入(Command Line Typing);
  - 显示控制方式: 文本格式编码;
  - 应用控制方式: 单任务。
- (2) 20 世纪 60 年代至 80 年代: 矢量显示(Vector Displays)
  - 显示方式: 线画图形和笔画文字(Line Drawings and Stroke Text);
  - 对象和命令指定方式: 命令行输入、功能键(Function Keys)和菜单(Menus);
  - 显示控制方式: 伪(pseudo)所见即所得(What You See Is What You Get, WYSIWYG);
  - 应用控制方式: 单/多任务、主机及分布式计算。
- (3) 20 世纪 70 年代至今: 二维光栅扫描显示(2D Bitmap Raster Displays)

- 显示方式：窗口、图标、清晰文字及丰富色彩的图形(“Flat Earth”);
  - 对象和命令指定方式：WIMP(Window、Icon、Menu 和 Point)、图形用户接口 GUI(Graphical User-Interface)：菜单和对象的直接选取和控制(e.g. Drag and Drop);
  - 显示控制方式：WYSIWYG(What You See Is What You Get);
  - 应用控制方式：多任务、网络化客户/服务器计算和窗口管理(X 终端)。
- (4) 20 世纪 80 年代至今：三维图形工作站(3D Graphics Workstations)
- 显示方式：实时及三维景象的真实图像;
  - 对象和命令指定方式：具有菜单和对象直接选取和控制的二维、三维、甚至是多维的输入设备(虚拟现实环境);
  - 显示控制方式：WYSIWYG、WYSIAYG(What You See Is All You Get, 所见全可得)和 WYPIWYG(What You Perceive is What You Get, 所觉即所得);
  - 应用控制方式：多任务、网络化计算和窗口管理。

### 1.1.3 计算机图形学中的图形定义和形式

顾名思义，计算机图形学的研究对象是图形。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多彩研究内容的基础，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”。

#### 1.1.3.1 计算机图形学中的图形定义

广义上，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。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，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：形状是刻画图形形状构成的点、线、面和体等几何要素信息；颜色是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。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的表示方法、能在计算机内表示和存储、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。计算机图形学的任务是在计算机系统内“逼真”地模拟(描绘)各种客观世界事物。

#### 1.1.3.2 计算机图形学中的图形形式

目前，常提到“图形”和“图像”两个名称。过去，人们认为图形就是几何上使用