



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等学校规划教材

计算机图形学基础 (第2版)

陆 枫 何云峰 编著

计算机学科教学计划



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等学校规划教材

计算机图形学基础

(第2版)

陆 枫 何云峰 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。全书共分10章,第1章简要介绍计算机图形学的基本概念、应用和发展动态。第2~5章,由“外”到“内”介绍计算机图形处理系统的硬件设备、人机交互处理、图形对象在计算机内的表示以及基本图形的生成算法等。第6章主要介绍二维变换和二维观察的概念。第7章介绍三维变换及三维观察的基本内容,包括几何变换和投影变换等。第8章介绍曲线和曲面的生成。第9章简要介绍常用的消隐算法。第10章对真实感图形绘制的基本思想做了简单描述。

本书内容全面翔实,概念简明清晰,实例丰富实用。配套教学资源,包含教学大纲、电子课件和相关教学编程实例等,可免费下载。

本书可作为高等学校计算机等相关专业本科生教材和科技人员参考书。

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

计算机图形学基础/陆枫,何云峰编著.—2版.—北京:电子工业出版社,2008.10
高等学校规划教材
ISBN 978-7-121-07042-6

I.计… II.①陆…②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(2008)第100436号

策划编辑:童占梅

责任编辑:童占梅

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

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:20.25 字数:518千字

印 次:2008年10月第1次印刷

印 数:6000册 定价:30.00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 30 多年来,交互式计算机图形学有了引人瞩目的发展。可以说:“已经没有哪一个领域未从计算机图形学的发展和应用中获得好处。”

目前,几乎所有的高等学校均已开设了“计算机图形学”课程。国内外知名大学通常这样来安排计算机图形学的课程体系:本科生开设“计算机图形学基础”或“计算机图形学引论”课程,讲述计算机图形学的基本知识和基础技术,为在这一领域深入学习和研究奠定基础;研究生则开设“高级计算机图形学”、“计算机图形学热点话题”、“真实感图形显示”以及“虚拟现实技术”等课程,重点讨论计算机图形学的发展动态与研究热点。

我们在多年教学实践的基础上,参阅国内外最新版本的教材,主要针对高等院校本科生编写了本书。力争达到三个目标:一是着重介绍计算机图形学的基本内容,让学生逐渐掌握和熟悉这个学科中涉及的基本概念和思维方式;二是尽量给出计算机图形学最新发展所需要的基础知识;三是坚持理论与实践相结合,尽可能多地采用现有的成熟技术,提供相关的编程实例。

本书第 1 版因其良好的可读性和可用性,受到国内高校师生的普遍欢迎,累计印刷 14 次,印数达 6 万多册,并入选普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本次修订在第 1 版的基础上,结合教学实践、教材使用反馈和最新技术发展,由陆枫和何云峰进行了修订和改写,特别增加了基于 OpenGL 的编程实例。本书保持了上一版的风格,内容全面翔实,概念简明清晰,实例丰富实用,教学资源配套。本书配有教学资源,包含教学大纲作者多年来教学改革和实践的成果——电子教案和相关教学编程实例,教师可通过华信教育资源网 <http://www.hnaxin.edu.cn> 负责注册下载。

全书共分 10 章。

第 1 章,简要介绍计算机图形学的基本概念、应用和发展动态。

第 2~5 章,由“外”到“内”介绍计算机图形处理系统的硬件设备、人机交互处理、图形对象在计算机内的表示以及基本图素的生成算法等。

第 6 章,主要介绍二维变换和二维观察的概念。

第 7~10 章,主要涉及三维图形的变换、处理和绘制。

第 7 章介绍三维变换及三维观察的基本内容,包括几何变换和投影变换等。

第 8 章介绍曲线和曲面的生成。

第 9 章简要介绍常用的消隐算法。

第 10 章对真实感图形绘制的基本思想做了简单描述。

在本书的编写过程中,得到了华中科技大学计算机科学与技术学院卢正鼎、王炎坤、金海、李桂兰、刘乐善、周功业等教授的支持,在此表示衷心感谢。感谢杨薇薇、于俊清、徐海银、李丹、万琳、凌贺飞、邹复好、陶文兵、李国宽等华中科技大学计算机科学与技术学院计算机图形学课程组的教师们,他们参与了本书的教学实践并提出了宝贵的修改意见。感谢李其申、龚文杰、谢琦珺、张林、庞敏、张潇、白云、王重、闵敏、李涛、杨红圆、陈文

辉、沙晋、华睿、宋承璐、马琰、慎厚雄、王玉琼、邓黎明、陈霞、洪雪松、曾辉、严川鰾、吴峰、方涛、黎良、章昆、熊炎、谢欣荣、朱唯波、姚杰、钱达胜、李磊、吴为、王敖、章仙军、陈慧、杨波、潘龙、潘伟文、盛斌、夏永、高玉琴、杨文、杨亮、张聪、卢嘉、任天兵、李晓宇、何文珺、刘紫兆、万季、方哲翔等同学在计算机图形学教学中提出的建议和制作的相关程序。感谢电子工业出版社童占梅老师对本书的完成付出的辛勤劳动。同时还要感谢许多没有列出名字的人以多种方式对本书写作作出的贡献。

由于作者水平有限，书中难免有不妥甚至错误之处，恳请读者不吝指正。作者的 E-mail 地址：lufeng@hust.edu.cn。

编著者

于武汉喻家山

华中科技大学计算机科学与技术学院

目 录

第 1 章 绪论 (1)	2.2.7 数据手套..... (21)
1.1 计算机图形学及其相关概念..... (1)	2.2.8 数字化仪..... (22)
1.2 计算机图形学的发展..... (2)	2.2.9 图像扫描仪..... (23)
1.2.1 计算机图形学学科的发展..... (2)	2.2.10 声频输入系统..... (23)
1.2.2 图形硬件设备的发展..... (3)	2.2.11 视频输入系统..... (23)
1.2.3 图形软件的发展..... (4)	2.3 图形显示设备..... (23)
1.3 计算机图形学的应用..... (4)	2.3.1 阴极射线管..... (24)
1.3.1 计算机辅助设计与制造..... (4)	2.3.2 CRT 图形显示器..... (29)
1.3.2 计算机辅助绘图..... (5)	2.3.3 平板显示器..... (32)
1.3.3 计算机辅助教学..... (5)	2.3.4 三维观察设备..... (35)
1.3.4 办公自动化和电子出版技术..... (6)	2.4 图形显示子系统..... (36)
1.3.5 计算机艺术..... (6)	2.4.1 光栅扫描图形显示子系统的 结构..... (36)
1.3.6 在工业控制及交通方面的应用..... (6)	2.4.2 绘制流水线..... (37)
1.3.7 在医疗卫生方面的应用..... (6)	2.4.3 相关概念..... (39)
1.3.8 图形用户界面..... (7)	2.5 图形硬拷贝设备..... (42)
1.4 计算机图形学研究动态..... (7)	2.5.1 打印机..... (42)
1.4.1 计算机动画..... (7)	2.5.2 绘图仪..... (43)
1.4.2 地理信息系统..... (9)	2.6 OpenGL 图形软件包..... (43)
1.4.3 人机交互..... (9)	2.6.1 OpenGL 的主要功能..... (44)
1.4.4 真实感图形显示..... (10)	2.6.2 OpenGL 的绘制流程..... (44)
1.4.5 虚拟现实..... (11)	2.6.3 OpenGL 的基本语法..... (45)
1.4.6 科学计算可视化..... (13)	2.6.4 一个完整的 OpenGL 程序..... (46)
1.4.7 并行图形处理..... (14)	习题 2..... (49)
习题 1..... (14)	第 3 章 用户接口与交互式技术 (50)
第 2 章 计算机图形系统及图形 硬件 (15)	3.1 用户接口设计..... (50)
2.1 计算机图形系统概述..... (15)	3.1.1 用户模型..... (50)
2.1.1 计算机图形系统的功能..... (15)	3.1.2 显示屏幕的有效利用..... (50)
2.1.2 计算机图形系统的结构..... (16)	3.1.3 反馈..... (51)
2.2 图形输入设备..... (19)	3.1.4 一致性原则..... (52)
2.2.1 键盘..... (19)	3.1.5 减少记忆量..... (52)
2.2.2 鼠标器..... (19)	3.1.6 回退和出错处理..... (53)
2.2.3 光笔..... (19)	3.1.7 联机帮助..... (53)
2.2.4 触摸屏..... (20)	3.1.8 视觉效果设计..... (53)
2.2.5 操纵杆..... (21)	3.1.9 适应不同的用户..... (53)
2.2.6 跟踪球和空间球..... (21)	3.2 逻辑输入设备与输入处理..... (54)

3.2.1 逻辑输入设备.....	(54)	5.1.1 数值微分法.....	(104)
3.2.2 输入模式.....	(57)	5.1.2 中点 Bresenham 算法.....	(106)
3.3 交互式绘图技术.....	(58)	5.1.3 Bresenham 算法.....	(109)
3.3.1 基本交互式绘图技术.....	(58)	5.2 圆的扫描转换.....	(110)
3.3.2 三维交互技术.....	(60)	5.2.1 八分法画圆.....	(111)
3.4 OpenGL 中橡皮筋技术的实现.....	(62)	5.2.2 中点 Bresenham 画圆算法.....	(111)
3.4.1 基于鼠标的实现.....	(62)	5.3 椭圆的扫描转换.....	(113)
3.4.2 基于键盘的实现.....	(65)	5.3.1 椭圆的特征.....	(113)
3.5 OpenGL 中拾取操作的实现.....	(66)	5.3.2 椭圆的中点 Bresenham 算法.....	(114)
3.6 OpenGL 的菜单功能.....	(70)	5.4 多边形的扫描转换与区域填充.....	(118)
习题 3.....	(71)	5.4.1 多边形的扫描转换.....	(118)
第 4 章 图形的表示与数据结构	(72)	5.4.2 边缘填充算法.....	(122)
4.1 基本概念.....	(72)	5.4.3 区域填充.....	(124)
4.1.1 基本图形元素.....	(72)	5.4.4 其他相关的概念.....	(128)
4.1.2 几何信息与拓扑信息.....	(73)	5.5 字符处理.....	(129)
4.1.3 坐标系.....	(74)	5.5.1 点阵字符.....	(130)
4.1.4 实体的定义.....	(76)	5.5.2 矢量字符.....	(130)
4.1.5 正则集合运算.....	(77)	5.6 属性处理.....	(131)
4.1.6 平面多面体与欧拉公式.....	(79)	5.6.1 线型和线宽.....	(131)
4.2 三维形体的表示.....	(80)	5.6.2 字符的属性.....	(134)
4.2.1 多边形表面模型.....	(81)	5.6.3 区域填充的属性.....	(134)
4.2.2 扫描表示.....	(84)	5.7 反走样.....	(135)
4.2.3 构造实体几何法.....	(85)	5.7.1 过取样.....	(136)
4.2.4 空间位置枚举表示.....	(87)	5.7.2 简单的区域取样.....	(137)
4.2.5 八叉树.....	(87)	5.7.3 加权区域取样.....	(138)
4.2.6 BSP 树.....	(89)	5.8 在 OpenGL 中绘制图形.....	(139)
4.2.7 OpenGL 中的实体模型函数.....	(89)	5.8.1 点的绘制.....	(139)
4.3 非规则对象的表示.....	(94)	5.8.2 直线的绘制.....	(140)
4.3.1 分形几何.....	(94)	5.8.3 多边形面的绘制.....	(141)
4.3.2 形状语法.....	(97)	5.8.4 OpenGL 中的字符函数.....	(146)
4.3.3 粒子系统.....	(97)	5.8.5 OpenGL 中的反走样.....	(146)
4.3.4 基于物理的建模.....	(98)	习题 5.....	(149)
4.3.5 数据场的可视化.....	(98)	第 6 章 二维变换及二维观察	(151)
4.4 层次建模.....	(99)	6.1 基本概念.....	(151)
4.4.1 段与层次建模.....	(99)	6.1.1 几何变换.....	(151)
4.4.2 层次模型的实现.....	(100)	6.1.2 齐次坐标.....	(151)
4.4.3 OpenGL 中层次模型的实现.....	(101)	6.1.3 二维变换矩阵.....	(152)
习题 4.....	(103)	6.2 基本几何变换.....	(152)
第 5 章 基本图形生成算法	(104)	6.2.1 平移变换.....	(152)
5.1 直线的扫描转换.....	(104)	6.2.2 比例变换.....	(153)

6.2.3 旋转变换	(154)	7.4.1 一点透视	(204)
6.2.4 对称变换	(154)	7.4.2 二点透视	(205)
6.2.5 错切变换	(156)	7.4.3 三点透视	(207)
6.2.6 二维图形几何变换的计算	(157)	7.5 观察坐标系及观察空间	(208)
6.3 复合变换	(158)	7.5.1 观察坐标系	(208)
6.3.1 二维复合平移变换	(158)	7.5.2 观察空间	(209)
6.3.2 二维复合比例变换	(159)	7.6 三维观察流程	(212)
6.3.3 二维复合旋转变换	(159)	7.6.1 用户坐标系到观察坐标系的 变换	(213)
6.3.4 其他二维复合变换	(159)	7.6.2 平行投影的规范化投影变换	(214)
6.3.5 相对任一参考点的二维几何 变换	(160)	7.6.3 透视投影的规范化投影变换	(215)
6.3.6 相对于任意方向的二维几何 变换	(160)	7.7 三维裁剪	(218)
6.3.7 坐标系之间的变换	(162)	7.7.1 关于规范化观察空间的裁剪	(219)
6.3.8 光栅变换	(163)	7.7.2 齐次坐标空间的裁剪	(219)
6.3.9 变换的性质	(164)	7.8 OpenGL 中的变换	(220)
6.4 二维观察	(165)	7.8.1 矩阵堆栈	(220)
6.4.1 基本概念	(165)	7.8.2 模型视图变换	(221)
6.4.2 用户坐标系到观察坐标系的 变换	(167)	7.8.3 投影变换	(223)
6.4.3 窗口到视区的变换	(167)	7.8.4 实例	(224)
6.5 裁剪	(168)	习题 7	(227)
6.5.1 点的裁剪	(169)	第 8 章 曲线与曲面	(229)
6.5.2 直线的裁剪	(169)	8.1 基本概念	(229)
6.5.3 多边形的裁剪	(176)	8.1.1 曲线/曲面数学描述的发展	(229)
6.5.4 其他裁剪	(179)	8.1.2 曲线/曲面的表示要求	(230)
6.6 OpenGL 中的二维观察变换	(180)	8.1.3 曲线/曲面的表示	(231)
习题 6	(182)	8.1.4 插值与逼近	(232)
第 7 章 三维变换及三维观察	(184)	8.1.5 连续性条件	(232)
7.1 三维变换的基本概念	(184)	8.1.6 样条描述	(233)
7.1.1 几何变换	(184)	8.2 三次样条	(234)
7.1.2 三维齐次坐标变换矩阵	(184)	8.2.1 自然三次样条	(235)
7.1.3 平面几何投影	(185)	8.2.2 Hermite 插值样条	(235)
7.2 三维几何变换	(186)	8.3 Bezier 曲线/曲面	(237)
7.2.1 三维基本几何变换	(186)	8.3.1 Bezier 曲线的定义	(237)
7.2.2 三维复合变换	(191)	8.3.2 Bezier 曲线的性质	(239)
7.3 三维投影变换	(195)	8.3.3 Bezier 曲线的生成	(241)
7.3.1 正投影	(195)	8.3.4 Bezier 曲面	(244)
7.3.2 斜投影	(201)	8.4 B 样条曲线/曲面	(246)
7.4 透视投影	(202)	8.4.1 B 样条曲线	(246)
		8.4.2 B 样条曲线的性质	(251)
		8.4.3 B 样条曲面	(253)

8.5 有理样条曲线/曲面	(254)	10.1.5 颜色	(292)
8.5.1 NURBS 曲线/曲面的定义	(254)	10.2 基于简单光照模型的多边形绘制	(294)
8.5.2 有理基函数的性质	(256)	10.2.1 恒定光强的多边形绘制	(294)
8.5.3 NURBS 曲线/曲面的特点	(256)	10.2.2 Gouraud 明暗处理	(295)
8.6 曲线/曲面的转换和计算	(257)	10.2.3 Phong 明暗处理	(296)
8.6.1 样条曲线/曲面的转换	(257)	10.3 透明处理	(297)
8.6.2 样条曲线/曲面的离散生成	(258)	10.4 产生阴影	(299)
8.7 OpenGL 生成曲线/曲面	(261)	10.5 模拟景物表面细节	(299)
8.7.1 Bezier 曲线/曲面函数	(261)	10.5.1 用多边形模拟表面细节	(299)
8.7.2 GLU 中的 B 样条曲线/曲面函数	(264)	10.5.2 纹理的定义和映射	(300)
习题 8	(271)	10.5.3 凹凸映射	(301)
第 9 章 消隐	(272)	10.6 整体光照模型与光线追踪	(302)
9.1 深度缓存器算法	(272)	10.6.1 整体光照模型	(302)
9.2 区间扫描线算法	(274)	10.6.2 Whitted 光照模型	(302)
9.3 深度排序算法	(276)	10.6.3 光线跟踪算法	(303)
9.4 区域细分算法	(278)	10.6.4 光线跟踪反走样	(305)
9.5 光线投射算法	(279)	10.7 OpenGL 中的光照与表面绘制函数	(306)
9.6 BSP 树	(280)	10.7.1 OpenGL 点光源	(306)
9.7 多边形区域排序算法	(281)	10.7.2 OpenGL 全局光照	(307)
9.8 OpenGL 中的消隐处理	(282)	10.7.3 OpenGL 表面材质	(308)
习题 9	(287)	10.7.4 OpenGL 透明处理	(309)
第 10 章 真实感图形绘制	(288)	10.7.5 OpenGL 表面绘制	(310)
10.1 简单光照模型	(288)	10.7.6 实例	(310)
10.1.1 环境光	(288)	10.8 OpenGL 中的纹理映射	(312)
10.1.2 漫反射光	(289)	习题 10	(314)
10.1.3 镜面反射光	(290)	参考文献	(316)
10.1.4 光强衰减	(292)		

第1章 绪论

图形图像技术是现代信息社会的重要技术。据统计，人类主要通过视觉、触觉、听觉和嗅觉等感觉器官感知外部世界，其中约 80% 的信息由视觉获取，“百闻不如一见”就是一个非常形象的说法。因此，旨在研究用计算机来显示、生成和处理图形信息的计算机图形学便成为一个非常活跃的研究领域。

1.1 计算机图形学及其相关概念

计算机图形学 (Computer Graphics) 是研究怎样利用计算机来显示、生成和处理图形的原理、方法和技术的学科。世界各国的专家学者对图形学有着各自不同的定义。国际标准化组织 (ISO) 将其定义为：计算机图形学是研究通过计算机将数据转换成图形，并在专门显示设备上显示的原理、方法和技术的学科。电气与电子工程师协会 (IEEE) 将其定义为：计算机图形学是利用计算机产生图形化的图像的艺术和科学 (Computer graphics is the art or science of producing graphical images with the aid of computer)。

计算机图形学的研究对象是图形。通常意义的图形是指能够在人的视觉系统中形成视觉印象的客观对象。它既包括了各种照片、图片、图案、图像以及图形实体，也包括了由函数式、代数方程和表达式所描述的图形。构成图形的要素可以分为两类，一类是刻画形状的点、线、面、体等几何要素；另一类是反映物体本身固有属性，如表面属性或材质的明暗、灰度、色彩 (颜色信息) 等非几何要素。例如，一幅黑白照片上的图像是由不同灰度的点构成的；方程 $x^2+y^2=r^2$ 所确定的图形是由具有一定颜色信息并满足该方程的点所构成的。因此，计算机图形学中所研究的图形可以定义为“从客观世界物体中抽象出来的带有颜色信息及形状信息的图 and 形”。

计算机中表示带有颜色及形状信息的图 and 形常用两种方法：点阵法和参数法。点阵法是用具有灰度或颜色信息的点阵来表示图形的一种方法，它强调图形由哪些点组成，这些点有什么灰度或色彩。参数法是以计算机中所记录图形的形状参数与属性参数来表示图形的一种方法。形状参数可以是形状的方程系数、线段的起点和终点对等几何属性的描述；属性参数则描述灰度、色彩、线型等非几何属性。这样，可以进一步细分：把参数法描述的图形叫做图形 (Graphics)，而把点阵法描述的图形叫做图像 (Image)。

随着人们对图形概念认识的深入，图形图像处理技术也逐步出现分化。目前，与图形图像处理相关的学科有计算机图形学、数字图像处理 (Digital Image Processing) 和计算机视觉 (Computer Vision)。这些相关学科间的关系如图 1-1 所示。计算机图形学试图将参数形式的数据描述转换生成 (逼真的) 图像。数字图像处理则着重强调在图像之间进行变

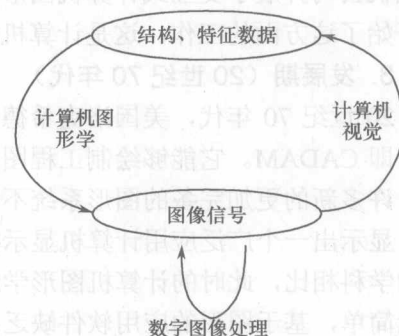


图1-1 图形图像处理相关学科间的关系

换,它旨在对图像进行各种加工以改善图像的视觉效果,如对图像进行增强、锐化、平滑、分割,以及为存储和传输而进行的编码压缩等。计算机视觉是研究用计算机来模拟生物外显或宏观视觉功能的科学和技术,它模拟人对客观事物模式的识别过程,是从图像到特征数据、对象的描述表达的处理过程。

近年来,随着多媒体技术、计算机动画、三维数据场可视化以及虚拟现实技术的迅速发展,计算机图形学、数字图像处理和计算机视觉的结合日益紧密,它们之间的互相渗透,反过来也促进了学科本身的发展。

1.2 计算机图形学的发展

1.2.1 计算机图形学学科的发展

计算机图形学自20世纪50年代形成以来,先后经历了酝酿期、萌芽期、发展期、普及期和提高增强期等几个阶段,逐步发展成为一门以图形硬件设备、图形专用算法和图形软件系统为研究内容的综合学科。计算机图形学软件与硬件的发展是相互促进、相辅相成的。

1. 酝酿期(20世纪50年代)

1950年,美国麻省理工学院旋风1号(Whirlwind)计算机配备了由计算机驱动类似于示波器所用的阴极射线管(CRT)来显示一些简单的图形。1958年,美国CAL-COMP公司将联机的数字记录仪发展成滚筒式绘图仪,GERBER公司则把数控机床发展成平板式绘图仪。整个50年代,计算机图形学处于准备和酝酿时期,称为“被动”的图形学。

2. 萌芽期(20世纪60年代)

20世纪60年代,美国麻省理工学院林肯实验室的基于旋风计算机开发的北美空中防御系统SAGE(Semi-Automatic Ground Environment system)具有了指挥和控制图形对象的功能。该系统能够将雷达信号转换为显示器上的图形,操作者可以借用光笔指向屏幕上的目标图形来获得所需要的信息。与此同时,类似的技术在设计和生产过程中也陆续得到应用。1962年,美国麻省理工学院林肯实验室的Ivan.E.Sutherland在参与了一个用于CAD(Computer Aided Design)的SKETCHPAD系统的研制后,发表了一篇题为《Sketchpad:一个人-机通信的图形系统》的博士论文,其中首次使用了“Computer Graphics”这个术语,从而确立了计算机图形学的学科地位。Ivan.E.Sutherland的Sketchpad系统被公认为对交互式图形生成技术的发展奠定了基础。60年代中期,美国麻省理工学院、通用汽车公司、贝尔电话实验室和洛克希德飞机公司开展了交互式计算机图形处理技术的大规模研究。与此同时,英国的剑桥大学等也开始了这方面的工作。这是计算机图形学的萌芽期。

3. 发展期(20世纪70年代)

20世纪70年代,美国洛克希德飞机公司完成了一个用于飞机设计的交互式图形处理系统,即CADAM。它能够绘制工程图,分析与产生数据加工纸带,在许多国家得到应用。之后,许多新的更加完备的图形系统不断地被研制出来,计算机图形处理技术进入了实用化阶段,显示出一个广泛应用计算机显示技术和交互技术的新时期已经到来。但也应注意到,与别的学科相比,此时的计算机图形学还是一个很小的学科领域。主要原因是图形设备昂贵,功能简单,基于图形的应用软件缺乏。

4. 普及期 (20 世纪 80 年代)

20 世纪 80 年代是图形处理技术开花结果的时期,除了传统的军事和工业方面的应用之外,计算机图形学进入了教育、科研、艺术和事务管理等众多领域,甚至进入了家庭。这时由于出现了带有光栅图形显示器的个人计算机和 workstation,如美国苹果公司的 Macintosh、IBM 公司的 PC 及其兼容机, Apollo、Sun 工作站等,使人机交互中图形的使用日益广泛。光栅图形显示器付诸应用后不久,就出现了大量简单易用、价格便宜的基于图形的应用软件,如图形用户界面、绘图、字处理、游戏软件等,由此推动了计算机图形学的发展和應用。

5. 提高增强期 (20 世纪 90 年代以后)

进入 20 世纪 90 年代后,随着数字视听、虚拟现实、系统仿真以及数字娱乐等应用领域的发展,对计算机图形学提出了更高的要求。近 10 年来,计算机图形学与视频、图像、虚拟现实、人机交互、多媒体等新技术日益结合,成为一个多学科交叉融合的研究领域。与传统的计算机图形学相比,当前图形学的发展呈现以下趋势:①结合图形硬件实现实时绘制;②基于数据采集进行真实感建模;③绘制与建模任务相结合。基于计算机图形处理和显示技术的数字多媒体、虚拟现实、可视化以及数字娱乐等已经形成庞大的产业。

1.2.2 图形硬件设备的发展

从图形显示设备的发展来看,20 世纪 60 年代中期出现的是随机扫描的显示器,它具有较高的分辨率和对比度,具有良好的动态性能。但为了避免图形闪烁,通常需要以 30 次/秒左右的频率不断刷新屏幕上的图形。为此需要一个刷新存储器来存储计算机产生的显示文件,还要求有一个较高速度的处理器,这些在当时是相当昂贵的,因而成为影响交互式图形系统普及的主要原因。60 年代后期,针对上述情况,出现了存储管式显示器,它不需要缓存及刷新功能,价格较低廉,分辨率高,显示大量信息也不闪烁,但是它却不具有显示动态图形的能力,也不能进行选择性的删除。存储管式显示器的出现使一些简单的图形实现交互处理,而其低廉的价格使计算机图形学得以推广和普及(其后出现了与刷新技术相结合的存储管式的图形显示器)。70 年代中期,廉价的固体电路随机存储器出现,可以提供比 10 年前大得多的刷新缓冲存储器,因而就能构造基于电视技术的光栅扫描的图形显示器。在这种显示器中,被显示的线段、字符、图形及其背景等都按像素一一存储在刷新缓冲存储器中,系统按光栅扫描方式以 30 次/秒的频率对存储器进行读写,以实现图形的刷新而避免闪烁。光栅扫描图形显示器的出现使计算机图形生成技术和现有的电视技术相衔接,生成的图形更加形象、逼真,图形处理系统更易于推广和应用。这也是光栅扫描图形显示器受到普遍重视和迅速发展的原因之一。其后还发展了几种显示器,包括液晶显示器、等离子显示器、激光显示器等,它们正向着小型化、低电压和数字化等方向发展。

图形显示设备能够在屏幕上生成各种图形,但计算机图形系统还应能把图形画在纸上,这类设备就是图形绘制设备,也称图形硬拷贝设备,分为打印机和绘图仪两种。打印机从针式打印机发展到喷墨式打印机和激光打印机,在速度方面越来越高、性能方面越来越优越。绘图仪包括静电式绘图仪和笔式绘图仪等。

伴随着图形显示设备和绘制设备的发展,图形输入设备也从早期的键盘和光笔发展为各种类型的图形输入板、操纵杆、跟踪球、鼠标和拇指轮等。还发展了将光笔与屏幕相结合的

产品——触摸屏和坐标数字化仪等。而在三维图形处理系统，如虚拟现实系统中，必须有可以操纵三维场景信息的三维图形输入设备，包括空间球和数据手套等，它们可以输入包括空间坐标和旋转方向在内的6个自由度的数值。

1.2.3 图形软件的发展

伴随着图形硬件的进步，与计算机图形学有关的软件开发和应用都在迅速发展，并在图形系统中占据越来越重要的地位。早期，各个硬件厂商生产的图形设备具有不同的功能，它们各自开发专用于自己硬件平台的图形软件包和相应的高级语言接口，致使图形软件包和建立于其上的应用程序互不兼容，没有可移植性。这一方面限制了图形技术的发展，另一方面也阻碍了图形硬件设备的推广普及。于是人们希望图形软件能够朝着标准化、开放式和高效率的方向发展，这使得图形应用软件不仅可以在不同的计算机系统及外部设备之间移植，而且其研制开发能够更为简捷和高效。

1974年，美国计算机协会图形专业委员会（ACM SIGGRAPH）召开了一个题为“与机器无关的图形技术”的工作会议，开始进行有关图形标准的制定和审批工作。该委员会于1979年提出了CORE图形软件标准。然而经国际标准化组织（ISO）和美国国家标准局（ANSI）批准的第一个图形软件标准却是图形核心系统GKS，这是一个二维图形软件包。它的三维扩充GKS-3D在1988年被批准为三维图形软件标准。20世纪80年代又公布了更强调图形层次结构及动态性和交互性的图形标准PHIGS，以及基本图形转换标准IGES和STEP等。近20年来，ISO已经批准的与计算机图形处理有关的标准有：计算机图形核心系统（GKS）及其语言联编、三维图形核心系统（GKS-3D）及其语言联编、程序员层次交互式图形系统（PHIGS）及其语言联编、计算机图形元文件（CGM）、计算机图形接口（CGI）、基本图形转换规范（IGES）、产品数据转换规范（STEP）等。

除了由官方组织制定和批准的标准之外，还存在一些非官方的图形软件，它们在业界被广泛应用，成为事实上的标准，如SGI等公司开发的OpenGL，微软公司开发的Direct X，Adobe公司的Postscript等。其中，OpenGL实现了各种二维和三维的高级图形处理技术，是实现逼真三维效果与建立交互式三维景观的强大工具。目前，OpenGL规范的管理者包括SGI、Microsoft、Intel、IBM、Sun、HP等知名的软硬件公司，已经成为工业标准。本书将结合C、C++编程语言和OpenGL库函数给出相关教学参考实例。

1.3 计算机图形学的应用

近年来，计算机图形学已经广泛地用于多种领域，如科学、医药、商业、工业、政府部门、艺术、娱乐业、广告业、教育和培训等。

1.3.1 计算机辅助设计与制造

计算机辅助设计（CAD）与计算机辅助制造（CAM）是计算机图形学应用最广泛、最活跃的领域之一。将计算机图形处理技术运用于大楼、汽车、飞机、轮船、宇宙飞船、计算机、纺织品以及建筑工程、机械结构和部件、电路设计、电子线路或器件等的设计和制造过程中，已成为目前CAD/CAM的总体发展趋势。

CAD技术提供了一种强有力的工具，通过交互式的图形设备对部件进行设计和描述，产

生工程略图（线框图）或者更接近实际物体的透视图等，通过迅速地将各种修改信息进行组合，用户可以自由、灵活地对图形进行实验性改动和形体显示。CAD 技术被广泛应用于各领域。在电子工业中，无论是集成电路设计、印制电路板设计，还是电子线路和网络分析等，CAD 系统都可以成为电子电气工程师们喜爱的得力工具。建筑 CAD 在建筑学和房屋设计领域广泛采用了计算机图形处理技术。利用专门的图形软件包，可以进行楼层的设计、门窗的安排、建筑的空间利用等布局规划；利用三维建筑模型，可以研究单座建筑或建筑群的外观；利用高级图形软件包，设计人员甚至可以“漫游”于各个房间，环视整座建筑的外部，更好地核实特殊设计的整体布局 and 效果。

CAM 技术在各种工业制造业中得到广泛应用。在汽车工业、航天航空工业以及船舶制造中，可以利用实体的边界模型来模拟各个独立的零部件，设计规划汽车、飞机、航天器以及轮船的表面轮廓。这些独立的表面区域和交通工具的各个零部件可以分别设计，然后采用系统集成的方式（拟合）组装到一起，从而构成并显示整个设计实体。在设计和生成产品加工图的过程中，部件表面以一种颜色表示，加工路径，即在产品加工过程中沿形体表面形成的轨迹，用另一个颜色表示，数控机床就可以按照这样的加工构形来生产部件。

1.3.2 计算机辅助绘图

图形、图表和模型图的绘制是计算机图形学应用的另一个重要方面。许多已经商品化的图形软件专门用于针对特定数据生成二维或三维图形或者图表。二维图形包括直方图、线条图、表面图或扇形图等；三维作图多用于显示多种形体间或多种参数间的关系，如统计关系百分比图、分布关系图等，采用三维图形还可以方便地表达数据的动态性质，如增长速度、变化趋势等。

计算机辅助绘图发展得最快的一个领域就是商务事务领域。在该领域中，将可视化作为汇总分析财政、数学和经济等方面数据的手段。特别是在分析大量数据时，具有不同颜色、亮度的结构图和模型图将有助于研究者对于数据的理解。没有这类图形的帮助，研究者要分辨含有上百个数据的数据表，会感到十分困难。

计算机辅助绘图应用的典型例子包括科学计算的可视化。传统科学计算的结果是数据流，这种数据流不易理解也不易于检查其中的错误。科学计算的可视化可以对空间数据场构造中间几何图素或用体绘制技术在屏幕上产生可见图像。近年来，这种技术已用于有限元分析的后处理、分子模型构造、地震数据处理、大气科学、生物信息以及生物化学等领域。

1.3.3 计算机辅助教学

计算机图形显示与处理技术已广泛地应用于计算机辅助教学（CAI）系统中，它使教学过程，特别是基础学科的教学过程形象、直观和生动。例如，将数学中的各种函数图形、方程和表达式的变化，物理中的各种动态图形以及化学中的各种原子、分子结构等，都形象地展示在学生面前，可以提高学生的学习兴趣和教学效果。财政金融与经济系统的计算机生成模型技术也常常用于计算机辅助教育，例如生理系统、人口趋势或者物理设备（如原子反应堆）等模型都能很好地帮助学生理解系统的操作。

1.3.4 办公自动化和电子出版技术

图形显示技术在办公自动化和事务处理中的应用,有助于数据及其相互关系的有效表达,因而有利于人们进行正确的决策。利用电子计算机进行资料、文稿、书刊、手册等的编写、修改、制图、制表、分页、排版,这是对传统活字印刷技术进行的重大变革。图文并茂的电子排版系统代替了传统的铅字排版,这是印刷史上的一次革命。随着图、声、文结合的多媒体技术的发展,可视电话、电视会议以及视频、音频等正在家庭、办公室得到普及。伴随着计算机和高清晰度电视相结合产品的推出,这种普及率将会越来越高,进而改变传统的办公和家庭生活方式。

1.3.5 计算机艺术

计算机图形技术已广泛应用于各种图案、花纹、工艺外形及传统的油画、中国国画和书法等艺术品的制作,为创作艺术和商品艺术提供了更为广阔的空间。例如,通过用不同的颜色按照一系列数据函数绘制的分形图可以产生各种抽象的任意的显示图景,这些图形变化无穷,使人眼花缭乱。采用笔型绘图仪又可以绘制出另一类艺术设计图,如人物头像,这些造型、图形画法细腻真实。借助于计算机图形技术,艺术家们可以利用一种称为“画笔”(Painbrush)的作图程序在荧光屏上创作图形画面,也可以利用图形输入板作图绘画。计算机不仅可以绘制动画中的景象,还可以生成各种艺术模型和景物,如山水风景、花草树木和动物图案等。此外,图形程序已在出版印刷和文字处理方面得到了大量的开发和研究,将图形操作与文本编辑融合在一起,将有助于各种艺术形式,如书法与绘画的结合。许多商业广告中还经常用到一种“变形”(Morpher)的图形处理方法,它可以将一辆汽车变形成为一只老虎,将一个人的脸变成另一个人的脸等。

1.3.6 在工业控制及交通方面的应用

在过程控制中,用户利用计算机图形处理和显示技术实现与其控制或管理对象间的相互作用。例如各种实时过程,如火箭的运行、某种物理过程、电力系统的实时监测、监控等,常常利用交互式计算机图形系统将可描述的实时状况(如火箭的运行轨迹,电力机组发电情况等)显示出来,与正常值作比较,同时通过反馈控制过程来进行校正。图形显示技术还可用于石油化工、金属冶炼过程中的监视和控制,如管道、泵、储油罐的工作状态及其阀门的开闭状态,监视流程的运行情况。在电网管理上,操作者可通过显示器监视电网的工作状态,用鼠标在荧光屏上打开或关闭某一发电站或电网中的某一开关。

在各种交通管制方面,例如民航、铁路和公路系统的管制与监视,在显示屏上实时地显示一个地区铁路上机车以及公路上车辆的运行状态,一片领空中飞机飞行的状态,并可向飞行中的飞机发出二次雷达信息,指挥飞行着陆等。除了用于各工业系统的监视外,还可设计许多生产过程的未来状态,改进生产,提高效率。

1.3.7 在医疗卫生方面的应用

在医疗卫生方面的应用包括用显示设备显示病历,显示各种药物的剂量、性能;对某种病的治愈率进行统计分析;对病人的医疗方案(如放射线照射)进行研究,以提高治疗效率等。

医学上往往结合图像处理和计算机图形学来建模和研究物理功能。计算机图像显示技术是现代医疗方面受欢迎的一门新技术，彩色超声波、彩色胃镜、CT 和核子医学扫描仪等医疗仪器已陆续应用于临床。实践证明，用计算机图像显示协助诊断和治疗癌症，可显著提高诊断准确度及治疗效果。

还有一种应用称为计算机辅助手术 (Computer-Aided Surgery)，通过使用图像技术可获得身体的二维剖面，然后使用图形方法模拟实际手术过程，观察并操纵每一剖面，以试验不同的手术位置。

1.3.8 图形用户界面

介于人与计算机之间，完成人与机器通信工作的部件称为人机界面 (HCI, Human Computer Interface)，它由软件和硬件两部分组成。随着计算机技术的发展，人机界面也从原始的由指示灯和机械开关组成的操纵板界面，过渡到由终端和键盘组成的字符界面，并发展到现在基于多种输入设备和图形显示设备的图形用户界面 (GUI, Graphical User Interface)。典型的图形用户界面包含一个窗口管理程序、显示菜单和图符等。窗口管理程序允许用户显示多个窗口区域，每一个窗口可以获得包括图形和非图形显示在内的不同处理，仅仅简单地使用交互式定位设备在某窗口内按一下就可以激活该窗口。而从菜单中可选择不同的处理、颜色值和图形参数。图符则设计成与它代表的选择对象含义相符合的图形符号。图符的优点是它比相应的文本描述占用较少的屏幕空间，并且容易理解。这里强调的是，带来诸多方便的窗口管理系统中用到了大量的计算机图形处理技术。

计算机图形学的应用远远不止上述几个方面，它在艺术、广告、教学、游戏以及商业等许多方面都有很好的应用和发展前景。总之，交互式计算机图形学的应用极大地提高了人们理解数据、分析趋势、观察现实和想象形体的能力。随着各种软硬件设备与图形应用软件的不不断推出，计算机图形学的应用前景将更加具有魅力。

1.4 计算机图形学研究动态

1.4.1 计算机动画

计算机动画是指用计算机自动或半自动生成一系列的景物 (帧) 画面，其中当前帧画面是对前一帧画面的部分修改，通过以足够快的速度显示这些帧以产生动态的效果。一般来说，动画的播放速度要求在 15 帧/秒以上，电影界的标准是 24 帧/秒。

计算机动画始于 20 世纪 70 年代，最初只是作为动画设计师的辅助工具。在传统动画的制作过程中，需要动画设计师根据动画剧本设计出关键画面 (关键帧)，再由其助手根据关键帧逐帧画出中间画面 (中间帧)，工作量非常巨大。引入计算机技术后，动画设计师可以利用计算机设计角色造型和景物造型，确定关键帧，然后由计算机根据一定的规则逐帧生成各中间帧，这就大大地简化了动画的制作过程。这种由动画设计师绘制出关键帧，由计算机通过插值方式生成中间帧的方式通常称为关键帧动画。相应的另一种动画形式为逐帧动画。逐帧动画将动画中的每一帧都绘制出来。一般来说，计算机动画大多采用关键帧动画，而中间帧在计算机自动计算生成后，可以进行细微的调整以获得最佳的动画效果。

传统的动画是一种胶片动画，一直被固定在二维空间之中，对于三维情况，如明暗处理

和阴影只是偶尔考虑。而计算机动画所生成的是一个虚拟的三维世界，所有的角色和景物都可以以三维的方式创建，色、光、影、纹理和质感十分逼真，并且采用各种运动学模型，使物体运动的计算更加准确。依据三维造型方式的不同，可以有刚体动画、变形动画、基于物理的动画、粒子动画、关节动画与行为动画等。

刚体动画是人们熟悉的计算机动画中最原始的形式，最简单的刚体动画是在一定范围内移动物体或观察点（虚拟摄像机）。在刚体动画中，物体可以运动，虚拟摄像机可以运动，还可以是两者同时运动，动画主要通过关键帧和插值系统以及用于描述运动路径和方式的脚本系统来确定。

变形动画是把一种形状或物体变成另一种不同的形状或物体，而中间过程则通过形状或物体的起始状态和结束状态进行插值计算。电影《终结者II》中的T-1000液体机器杀手自由变化成不同物体的情形就是典型的变形动画。通常而言，变形动画的生成与物体的表示方法有关。对于用多边形表示的物体，变形可以通过移动多边形的顶点来实现，但在变形过程中由于多边形顶点间的连接关系容易导致三维走样问题，如原来共面的多边形出现了不共面的情况。对于用参数曲面表示的物体，变形主要通过移动控制点来实现，此时只改变了曲面基函数的系数，曲面仍然是光滑的，不会出现三维走样。

基于物理的动画也称运动动画，它采用物理学规律来模拟运动。由于考虑了物体在真实世界中的各种属性，如质量、弹性、摩擦力等，并采用运动学原理来生成物体的运动，因此基于物理的动画可以产生比手工制作更加真实的动作，但是它失去了动画制作者对艺术性的控制。

粒子动画主要是采用大量的粒子产生动画来模拟某些自然现象，如烟火、雾等。在粒子动画中，粒子是很小的物体，每个粒子的运动都是由一个预定的动画脚本指定，包括粒子的形状、大小、产生和消失的时间、运动的方式等。

关节动画通过建立计算机模型来模拟四足动物和两足动物的运动。四足和两足动物的运动是由各个肢体骨骼协同合作的结果，骨骼连接的位置就是关节，运动时关节的位置、角度和形状都会发生变化。设置关节动画的方法主要包括正向和逆向运动学。正向运动学主要是通过对关节的位置和角度设置关键帧，从而获得其关联的各个肢体的位置。例如，在人的行走动画中，通过设置人体髋关节的位置和角度，由计算机计算出膝关节和踝关节的位置和角度。正向运动学是一种低层次的方法，通过设置各关节的关键帧来生成逼真的动画，需要大量的工作与一定的工作经验。逆向运动学则是一种高层次的方法，通过设置末端关节的位置和角度，由计算机计算出所有相关的中间关节的位置和角度，它减轻了动画制作者的繁琐工作，不过它也相应地减少了角色运动的创作空间。

行为动画是指对物体的行为进行建模。这里的行为是指比基本运动更为复杂的运动。物体的运动既有自主的运动，也有受到场景中其他物体的影响而生成的运动，这些运动需要通过行为规则去确定。例如一群鸟在飞行时，单个鸟有自身的运动，也会根据其在鸟群的位置而运动。行为动画常用于描述群体的运动。

实际的动画生成过程中，通常会结合多种方式产生理想的动画效果。例如在用粒子动画描述烟雾时，可以采用风力模型来描述烟雾在风中的状态，这属于基于物理模型的动画。

得益于计算机图形学以及相关软硬件技术的快速发展，计算机动画开始渗透到人们生活的各个领域，比如电影、广告、工业设计和教育领域等。在电影，特别是科幻电影中，计算机动画带来电影技术的变革。在电影《终结者II》中，由于采用计算机动画技术生成了大量