

● 北京大学计算机系主干课教材

计算机图形学

倪明田 吴良芝 编著

北京大学出版社



北京大学计算机系主干课教材

计 算 机 图 形 学

倪明田 吴良芝 编著

北 京 大 学 出 版 社
北 京

图书在版编目(CIP)数据

计算机图形学/倪明田编著. —北京:北京大学出版社, 1999. 11

(北京大学计算机系主干课教材丛书)

ISBN 7-301-04371-6

I. 计… II. 倪… III. 计算机图形学-高等学校-教材 IV. TP391.4

书 名: 计算机图形学

著作责任者: 倪明田 吴良芝 编著

责任编辑: 沈承凤

标准书号: ISBN 7-301-04371-6 / TP·0506

出版者: 北京大学出版社

地址: 北京市海淀区中关村北京大学校内 100871

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn/cbs.htm>

电 话: 出版部 62752015 发行部 62754140 编辑室 62752037

电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

排版者: 北京因温特有限公司

印刷者: 中国科学院印刷厂

发行者: 北京大学出版社

经销者: 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 21.75印张 537千字

1999年11月第一版 1999年11月第一次印刷

定 价: 28.00元

总 序

“科教兴国”战略强调教育对国民经济的基础地位,要求高等教育“实施全面素质教育,加强思想品德教育和美育,改革教育内容、课程体系和教学方法……”。为了落实好“科教兴国”这一战略决策,北京大学计算机科学技术系与北京大学出版社合作,编审出版基础主干课和专业主干课系列教材。

目前,伴随着微电子和计算机科学技术渗透到社会的各个领域,人类正跨步迈进知识经济时代。在知识经济时代,具有创新能力的高素质人才是经济持续发展的必备条件。

计算机科学技术包括科学和技术两部分,不仅强调严谨的科学性,同时也注重工程性,是一门科学性和工程性并重的学科。信息科学技术的支柱学科是微电子、计算机、通信和软件,其中微电子是基础,计算机和通信是载体,软件是核心,它们相辅相成,共同培育了知识经济。因而,高素质的信息领域科技人才应该掌握上述学科的基础理论和专业技能。

近年来,北京大学计算机科学技术系通过跟踪、分析国际知名大学的相关课程设置、教学实施情况,借鉴国内兄弟院系的课程体系调整建议,总结北大计算机科学技术系集计算机软、硬件技术和微电子学于一体的人才培养经验,对课程体系进行了较大力度的梳理,形成了一系列基础主干课和专业主干课。

这一系列教材正是为配合课程体系的调整而编撰的。所选书稿主要是在我系多年的教学实践中师生反映较好的讲义和教材的基础上修编而成的。我们希望这批教材能够达到“注重基础、淡化专业(或突出交叉)、内容系统、选材先进、利于教学”的要求。

对于教材中的不足之处,欢迎广大读者不吝赐教。

杨芙清
一九九九年九月

北京大学计算机系基础主干课名称

计算引论
数字逻辑
微机原理
计算机组织与体系结构
集合论与图论
代数结构与组合数学
数理逻辑
数据结构
编译原理
操作系统
微电子学概论
集成电路原理与设计

北京大学计算机系专业主干课名称

计算机网络概论
数据库概论
软件工程
计算机图形学
面向对象技术引论

北京大学计算机科学技术系

基础主干课和专业主干课教材编审指导小组

组 长：杨芙清

成 员：（按姓氏笔画序）

卢晓东 李晓明 许卓群 沈承凤 屈婉玲

张天义 赵宝璞 袁崇义 董士海 程 旭

内 容 提 要

本书介绍了计算机图形学的基本概念、方法与算法。全书由三部分组成:第一部分为第1章,简单介绍了计算机图形学的历史、应用、发展,显示器和典型光栅扫描显示系统的结构与工作原理;第二部分为第2章到第7章,介绍二维图形处理技术,包括二维图形的生成、裁剪、变换以及反混淆;第三部分为第7章到第13章,介绍三维图形处理技术,包括三维图形的投影、表示、消隐和真实感显示。因为绘制真实感图形需要用到颜色,在第11章中介绍了与颜色相关的概念和处理技术。

本书是作者在多年从事教学工作并参考了国内外最新教材的基础上编写成的,可作为高等院校本科生、研究生计算机图形学基础课程的教材,也可作为相关工程技术人员的参考书。

前 言

计算机图形学在中国的发展历史可以追溯到 80 年代初,迄今已有近 20 年。在这 20 年中,一方面由于计算机硬件、软件提供了有力的支持,另一方面由于应用的推动,计算机图形处理技术发展十分迅速。国际上各个大学对此非常重视,纷纷为本科生和研究生开设了“计算机图形学”课程,并把它放在十分重要的位置。而在我国,计算机图形学的普及程度是相对滞后的,只有有限的一些重点大学开展了较多的科研和教学工作,并达到了较高的水平;很多相关工作人员尚停留在只知简单地应用图形处理软件,而不知其内部处理技术的阶段。为了大范围地提高学生及相关技术人员计算机图形学的应用水平,教材是关键。

在教学过程中学生普遍反映“计算机图形学是有用的,有趣的,也是难学的。”这个“难”字可能体现在两个方面:一是整个学科的发展日新月异,难以把握;二是图形学涉及的内容很广,难以形成一个简单明确的知识体系。为此,我们在本书中力争体现如下两个特点:(1) 尽量反映最新图形处理技术所需的基础知识,让读者在学习了本书之后,能够系统地掌握这个学科中涉及的概念和方法,为进一步学习相关新技术提供准备。图形学中的概念和处理方法具有相当好的一致性,例如“扫描线”这个概念在扫描转换图元时用到,在消隐时用到,在显示真实感图形时也用到,并且利用的方式也相同。读者只要注意前后联想,就能达到一通百通的效果。(2) 在内容安排上具有两条明显的线索:一条是二维图形显示流程,一条是三维图形的显示流程。围绕二维图形的显示流程,我们从第 2 章到第 7 章相继安排了二维图形的生成、反混淆、裁剪和变换。类似地,围绕三维图形的显示流程,我们从第 7 章到第 13 章相继安排了三维图形的投影、表示、消隐和真实感显示。其中第 7 章是一个过渡,它介绍了二维和三维的图形变换。

在本书的编写过程中,得到了北京大学出版社沈承凤老师、北京大学计算机系的董士海老师的许多鼓励和帮助,没有他们的支持就不会有本书的出版。张春尧同志为本书的录入、排版付出了辛勤的劳动。在此谨向为本书提供帮助的所有同志表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免有不妥甚至错误之处,希望读者不吝指正。

编 者

1999 年 9 月

目 录

第 1 章 计算机图形学概述	(1)
1.1 计算机图形学的研究内容	(1)
1.2 计算机图形学应用举例	(2)
1.2.1 图形用户界面	(2)
1.2.2 计算机辅助设计	(3)
1.2.3 科学计算可视化	(4)
1.2.4 科学、教育、商业领域中的交互式绘图	(4)
1.2.5 计算机艺术	(4)
1.2.6 地理信息系统	(6)
1.2.7 计算机动画、广告及娱乐	(6)
1.2.8 多媒体系统	(6)
1.2.9 虚拟现实系统	(6)
1.3 计算机图形学发展简史	(7)
1.3.1 图形显示设备的发展	(7)
1.3.2 图形输入设备的发展	(8)
1.3.3 图形软件的发展及软件标准的形成	(9)
1.4 图形显示设备	(9)
1.4.1 阴极射线管	(9)
1.4.2 彩色阴极射线管	(11)
1.4.3 随机扫描显示系统	(12)
1.4.4 光栅扫描显示系统	(13)
1.5 交互式图形系统的逻辑结构	(19)
1.5.1 图形软件包	(19)
1.5.2 应用模型	(20)
1.6 计算机图形学当前的研究动态	(20)
1.6.1 造型技术	(20)
1.6.2 真实感图形绘制技术	(21)
1.6.3 人-机交互技术	(22)
1.6.4 与计算机网络技术紧密结合	(22)
习题	(23)
第 2 章 一个简单的二维光栅图形软件包	(24)
2.1 用图形软件包绘图	(24)
2.1.1 图元的声明	(24)
2.1.2 图元的属性	(27)

2.1.3	填充图元及其属性	(29)
2.1.4	保存与恢复图元属性	(30)
2.1.5	字符	(30)
2.2	基本的交互处理	(31)
2.2.1	设计交互程序的几条原则	(31)
2.2.2	逻辑输入设备	(32)
2.2.3	输入方式	(32)
2.2.4	取样方式	(33)
2.2.5	事件驱动方式	(35)
2.2.6	设置输入设备的属性	(37)
2.3	光栅操作	(38)
2.3.1	画布	(38)
2.3.2	裁剪窗口	(39)
2.3.3	位块拷贝	(40)
2.3.4	显示模式	(40)
2.4	小结	(41)
	习题	(42)
第3章	二维线画图元的生成	(43)
3.1	简单的二维图形显示流程图	(43)
3.2	扫描转换直线段	(44)
3.2.1	生成直线段的DDA算法	(44)
3.2.2	生成直线段的中点算法	(45)
3.3	扫描转换圆弧	(49)
3.3.1	圆的八对称性	(49)
3.3.2	生成圆弧的中点算法	(49)
3.3.3	生成椭圆弧的中点算法	(53)
3.3.4	生成圆弧的多边形逼近法	(58)
3.4	生成圆弧的正负法	(61)
3.4.1	正负法简介	(61)
3.4.2	正负法生成圆弧	(62)
3.5	线画图元的属性控制	(64)
3.5.1	线宽控制	(64)
3.5.2	线型控制	(66)
	习题	(66)
第4章	二维填充图元的生成	(68)
4.1	扫描转换矩形	(68)
4.2	扫描转换多边形	(69)
4.2.1	逐点判断算法	(70)
4.2.2	扫描线算法	(72)

4.2.3 边缘填充算法	(77)
4.3 扫描转换扇形区域	(79)
4.4 区域填充	(80)
4.4.1 区域的表示和类型	(80)
4.4.2 递归填充算法	(81)
4.4.3 扫描线算法	(83)
4.4.4 多边形扫描转换与区域填充的比较	(86)
4.5 以图像填充区域	(87)
4.6 字符的表示与输出	(88)
4.6.1 点阵字符	(89)
4.6.2 矢量字符	(90)
习题	(91)
第5章 二维光栅图形的混淆与反混淆	(92)
5.1 二维光栅图形的混淆现象	(92)
5.2 反混淆方法	(93)
5.2.1 提高分辨率方法	(93)
5.2.2 非加权区域采样方法	(93)
5.2.3 加权区域采样方法	(95)
5.3 采样定理	(97)
5.3.1 基本概念	(97)
5.3.2 傅里叶变换	(98)
5.3.3 滤波	(99)
5.3.4 采样定理	(100)
5.3.5 混淆与反混淆	(102)
5.4 图像信号采样、滤波及重建过程中的几个实际问题	(103)
5.4.1 采样函数的影响	(103)
5.4.2 滤波器的影响	(104)
5.4.3 重建插值函数的影响	(105)
习题	(106)
第6章 二维裁剪	(107)
6.1 直线段裁剪	(107)
6.1.1 点裁剪	(108)
6.1.2 直接求交算法	(108)
6.1.3 Cohen-Sutherland 算法	(109)
6.1.4 Nicholl-Lee-Nicholl 算法	(113)
6.1.5 中点分割算法	(114)
6.1.6 梁友栋-Barsky 算法	(115)
6.2 多边形裁剪	(118)
6.2.1 Sutherland-Hodgman 算法	(118)

6.2.2 Weiler-Atherton 算法	(122)
6.3 字符裁剪	(124)
习题	(125)
第 7 章 图形变换	(126)
7.1 变换的数学基础	(126)
7.1.1 矢量	(126)
7.1.2 矩阵	(127)
7.2 二维基本变换	(129)
7.2.1 平移变换	(129)
7.2.2 旋转变换	(129)
7.2.3 放缩变换	(130)
7.3 齐次坐标与二维变换的矩阵表示	(130)
7.4 复合变换及变换的模式	(131)
7.5 其它变换	(134)
7.5.1 对称变换	(134)
7.5.2 错切变换	(136)
7.5.3 仿射变换	(137)
7.6 二维图形的显示流程图	(137)
7.7 窗口到视区的变换	(138)
7.8 三维几何变换	(140)
7.8.1 平移变换	(140)
7.8.2 放缩变换	(141)
7.8.3 旋转变换	(141)
7.8.4 错切变换	(142)
7.8.5 对称变换	(142)
7.9 坐标系之间的变换	(143)
习题	(147)
第 8 章 投影	(148)
8.1 三维图形的基本问题	(148)
8.2 平面几何投影	(149)
8.2.1 照像机模型与投影	(149)
8.2.2 平面几何投影及其分类	(150)
8.2.3 透视投影	(151)
8.2.4 平行投影	(151)
8.3 观察坐标系中的投影变换	(152)
8.3.1 观察坐标系	(152)
8.3.2 视见体	(153)
8.3.3 透视投影变换	(154)
8.3.4 平行投影变换	(155)

8.3.5	世界坐标系到观察坐标系的变换	(156)
8.4	投影举例	(157)
8.4.1	透视投影	(157)
8.4.2	平行投影	(159)
8.4.3	前、后裁剪面的影响	(159)
8.5	三维图形的显示流程图	(160)
8.5.1	模型变换	(160)
8.5.2	何时裁剪	(161)
8.5.3	规范视见体	(161)
8.5.4	平行投影视见体的规范化	(162)
8.5.5	透视投影视见体的规范化	(164)
8.5.6	规范视见体之间的变换	(166)
8.6	三维裁剪	(167)
8.6.1	关于规范视见体的裁剪	(167)
8.6.2	齐次坐标空间中的裁剪	(169)
8.7	图形显示过程小结	(169)
习题		(170)
第9章	三维实体的表示	(171)
9.1	实体的定义	(171)
9.2	正则集合运算	(173)
9.3	特征表示	(174)
9.4	空间分割表示	(175)
9.4.1	空间位置枚举表示	(175)
9.4.2	八叉树表示	(175)
9.4.3	单元分解表示	(177)
9.5	推移表示	(178)
9.6	边界表示	(179)
9.6.1	多面体及欧拉公式	(179)
9.6.2	平面方程的计算	(180)
9.6.3	边界表示的数据结构	(181)
9.6.4	欧拉运算	(185)
9.6.5	正则集合运算	(189)
9.7	构造实体几何表示	(190)
9.8	各种表示方法的比较	(192)
习题		(193)
第10章	曲线与曲面	(194)
10.1	表示形体的三种模型	(194)
10.2	参数曲线基础	(195)
10.2.1	曲线的表示形式	(195)

10.2.2	参数曲线的切矢量、弧长、法矢量、曲率与挠率	(197)
10.2.3	参数连续性与几何连续性	(201)
10.3	参数多项式曲线	(202)
10.3.1	定义与矩阵表示	(203)
10.3.2	参数多项式曲线的生成	(203)
10.4	三次 Hermite 曲线	(205)
10.4.1	三次 Hermite 曲线的定义	(205)
10.4.2	形状控制	(206)
10.4.3	曲线的生成	(207)
10.4.4	三次参数样条曲线	(208)
10.5	Bezier 曲线	(210)
10.5.1	Bernstein 基函数的定义及性质	(210)
10.5.2	Bezier 曲线的定义及性质	(212)
10.5.3	三次 Bezier 曲线的矩阵表示及生成	(215)
10.5.4	Bezier 曲线的离散生成算法	(216)
10.5.5	Bezier 曲线的拼接	(221)
10.5.6	有理 Bezier 曲线	(221)
10.6	B 样条曲线	(225)
10.6.1	B 样条基函数的定义及性质	(225)
10.6.2	B 样条曲线的定义及性质	(227)
10.6.3	B 样条曲线的离散生成	(228)
10.6.4	三次均匀 B 样条曲线	(234)
10.6.5	三次非均匀 B 样条曲线	(236)
10.6.6	非均匀有理 B 样条曲线	(241)
10.7	三次参数曲线的比较及相互转换	(242)
10.8	二次曲线	(243)
10.9	参数多项式曲面	(244)
10.9.1	曲面的表示形式	(244)
10.9.2	参数曲面的切平面与法矢量	(244)
10.9.3	参数多项式曲面的定义及矩阵表示	(245)
10.9.4	参数多项式曲面的生成	(246)
10.10	Coons 曲面	(249)
10.10.1	双线性 Coons 曲面	(249)
10.10.2	双三次 Coons 曲面	(250)
10.10.3	双三次 Hermite 曲面	(252)
10.11	Bezier 曲面	(253)
10.11.1	Bezier 曲面的定义与性质	(253)
10.11.2	离散生成算法	(255)
10.11.3	Bezier 曲面的拼接	(261)
10.12	B 样条曲面	(262)
10.12.1	B 样条曲面的定义及性质	(262)
10.12.2	非均匀有理 B 样条曲面	(263)

10.13	二次曲面	(263)
	习题	(264)
第 11 章	颜色	(265)
11.1	基本概念	(265)
11.1.1	光的属性	(265)
11.1.2	光效率函数	(266)
11.1.3	明度、亮度及亮度对比	(266)
11.2	单色模型	(267)
11.2.1	灰度的选择	(267)
11.2.2	半色调技术	(268)
11.3	彩色模型	(269)
11.3.1	颜色的描述	(269)
11.3.2	三基色与颜色匹配	(269)
11.3.3	CIE-XYZ 色度图	(273)
11.4	光栅系统中的颜色模型	(276)
11.4.1	RGB 模型	(276)
11.4.2	CMY 模型	(276)
11.4.3	YIQ 模型	(277)
11.4.4	HSV 模型	(278)
11.4.5	RGB 模型与 HSV 模型的相互转换	(279)
11.4.6	颜色的交互指定与颜色插值	(281)
	习题	(282)
第 12 章	隐藏面的消除	(283)
12.1	基本概念	(283)
12.2	提高消隐算法效率的常用方法	(283)
12.2.1	利用连贯性	(283)
12.2.2	将透视投影变换成平行投影	(284)
12.2.3	包围盒技术	(285)
12.2.4	背面剔除	(286)
12.2.5	空间分割技术	(287)
12.2.6	物体的层次表示	(287)
12.3	画家算法	(288)
12.4	Z 缓冲器算法	(289)
12.5	扫描线 Z 缓冲器算法	(291)
12.5.1	数据结构	(291)
12.5.2	算法	(294)
12.6	扫描线算法	(295)
12.7	区域子分算法	(296)
12.8	光线投射算法	(299)

习题	(300)
第 13 章 光照明模型与真实感图形的绘制	(301)
13.1 简单光照明模型	(301)
13.1.1 环境光	(301)
13.1.2 漫反射	(301)
13.1.3 镜面反射与 Phong 模型	(302)
13.1.4 光的衰减	(305)
13.1.5 产生彩色	(306)
13.1.6 采用多个光源	(307)
13.2 多边形绘制方法	(308)
13.2.1 均匀着色	(308)
13.2.2 光滑着色	(308)
13.2.3 Gouraud 着色方法	(308)
13.2.4 Phong 着色方法	(310)
13.2.5 插值着色方法存在的问题	(311)
13.3 模拟物体表面细节	(313)
13.3.1 表面细节多边形	(313)
13.3.2 纹理映射	(313)
13.3.3 法向扰动法	(316)
13.4 产生阴影	(316)
13.4.1 Z 缓冲器阴影算法	(317)
13.4.2 阴影细节多边形算法	(317)
13.4.3 光线跟踪算法	(317)
13.5 透明	(318)
13.5.1 简单透明	(318)
13.5.2 考虑折射的透明	(318)
13.6 整体光照明模型与光线跟踪算法	(319)
13.6.1 整体光照明模型	(319)
13.6.2 光线跟踪算法的基本原理	(320)
13.6.3 光线与物体表面的求交计算	(322)
13.6.4 提高光线跟踪算法的效率	(324)
13.6.5 光线跟踪算法中的混淆与反混淆	(326)
13.7 绘制真实感图形的流程图	(327)
13.7.1 采用局部光照明模型的绘制流程图	(327)
13.7.2 采用整体光照明模型的绘制流程图	(328)
习题	(328)
参考文献	(329)

第 1 章 计算机图形学概述

计算机图形学是计算机科学最活跃的分支之一,它伴随着计算机技术的发展而发展。事实上,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它短短的 30 多年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终端,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——虚拟环境(虚拟现实)。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。

本章将从图形学的研究内容、应用、发展简史、当前的研究课题和图形的输入、输出设备等方面概括性地介绍计算机图形学的有关内容,使读者有个较为全面的了解。

1.1 计算机图形学的研究内容

计算机图形学的研究对象是**图形**,那么什么是图形呢?从广义上说,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。它包括人眼所观察到的自然界的景物,用照像机等装置所获得的图片,用绘图工具绘制的工程图,各种人工美术绘画和用数学方法描述的图形等等。用数学方法描述的图形包括几何图形、代数方程或分析表达式所确定的图形,是几何学等数学学科的研究对象,也是计算机图形学的主要研究对象。但计算机图形学所研究的图形早已超出了用数学方法描述的图形,它不仅具有形状等几何信息,也具有颜色、材质等非几何信息,所以它更具体,更接近它所表示的客观对象。

构成图形的要素有两个,一是刻画形状的点、线、面、体等**几何要素**;二是反映物体表面属性或材质的灰度、颜色等要素,统称为**非几何要素**。例如,方程 $x^2 + y^2 = r^2$ 确定的图形是由这样一些点构成的,这些点满足这个方程(形状信息),并且具有一定的颜色(颜色信息)。现在,我们可以简单地描述计算机图形学所研究的图形了,即图形是对客观对象的一种抽象表示,它带有形状和颜色信息。通过图形,我们能够比较具体地了解它所表示的物体,但它仍是一种抽象。例如,一只玻璃杯和一只塑料杯只要形状一样,颜色一样,透明度一样,则它们的图形是一样的,我们无法仅仅通过它们的图形区别哪个是玻璃杯,哪个是塑料杯。

计算机中表示一个图形有如下两种方法:

(1) **点阵法**。点阵法通过枚举出图形中所有的点来表示图形,它强调图形由哪些点构成,这些点具有什么样的颜色。例如,一幅二维数字图像就是用矩阵 $\{P_{ij}\}_{i,j=0}^{m,n}$ 表示的,其中 P_{ij} 表示图像在 (i,j) 点的颜色。

(2) **参数法**。参数法用图形的形状参数和属性参数来表示图形。形状参数指的是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。