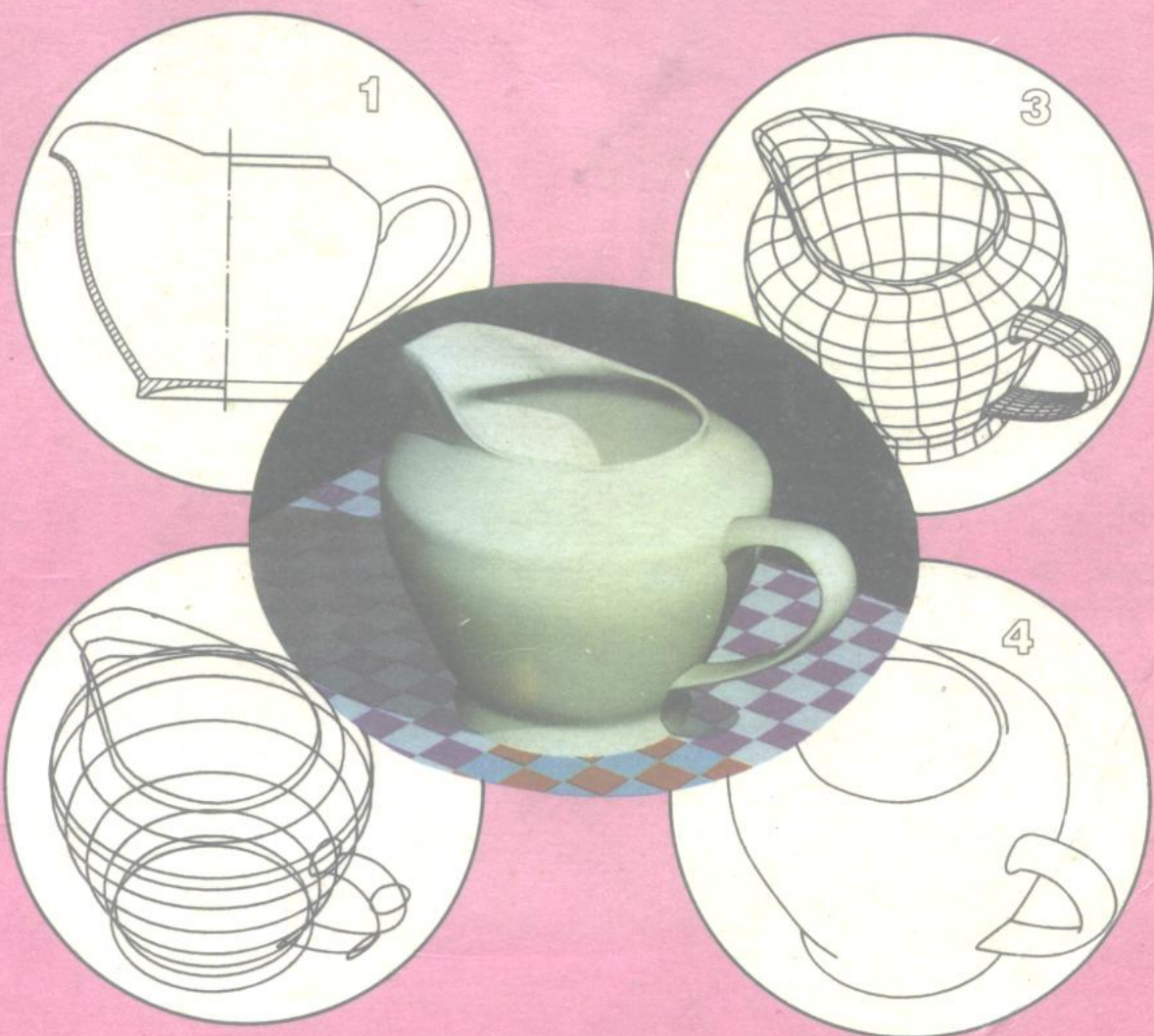


# 计算机图形学(新版)

孙家广 杨长贵 编著



清华大学出版社



# 计算机图形学（新版）

孙家广 杨长贵 编著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

## 内 容 提 要

本书介绍计算机图形学的有关原理、算法及系统,主要内容有:计算机图形硬件、图形国际标准、交互技术与用户接口、实用的图形程序库、自由曲线和曲面、几何造型、真实图形显示、图象处理等。这些内容反映了 90 年代以来国内外,尤其是我们在计算机图形学领域的最新成果。

本书作为高等院校本科生、研究生学习“计算机图形学”或“计算机图形学基础”的教材,也可供技术人员从事有关专业工作参考。

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/孙家广等编著. —北京:清华大学出版社,1994

清华大学计算机系列教材

ISBN 7-302-01708-5

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 14495 号

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

责任编辑: 贾仲良

印 刷 者: 中国科学院印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京科技发行所

开 本: 787×1092 1/16 印张: 36.25 字数: 902 千字 16K 彩色插页 1

版 次: 1995 年 5 月第 2 版 1995 年 8 月第 2 次印刷

书 号: ISBN 7-302-01708-5/TP·746

印 数: 8001—20000

定 价: 29.00 元

9810129

# 前 言

计算机图形学是近 30 年来发展迅速、应用广泛的新兴学科。它主要是研究用计算机及其图形设备来输入、表示、变换、运算和输出图形的原理、算法及系统。图形通常是由点、线、面、体等几何元素和灰度、色彩、线型、线宽等非几何属性组成。在计算机中表示图形最常用的是点阵法,即用具有灰度或色彩的点阵来表示图形的一种方法。例如,一幅二维灰度图形可用矩阵 $(x_i, y_j, g_k)$  ( $i=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N; k=1, 2, \dots, L$ )表示。其中 $(x_i, y_j)$ 表示图形所占点阵的位置, $g_k$ 表示 $(x_i, y_j)$ 该点象素的灰度等级,一般 $L \leq 256$ 。具有灰度和色彩的点阵图形实际上就是图象。由于光栅图形显示器和点阵式图形输出设备的广泛应用,图形和图象的处理技术相互渗透而且结合得越来越紧密。对于用形状参数和属性参数表示的图形,如描述图形的方程系数,线段的起点和终点坐标,图形的灰度、色彩、线型和线宽等均可采用某种转换算法,把图形的参数表示转换成点阵表示。

本书介绍的内容主要有:计算机图形学的发展和应用;计算机图形设备和系统;国际标准化委员会(ISO)发布的图形标准和一个基于窗口系统的实用化图形程序库,基本图形生成算法;自由曲线和自由曲面;图形变换和裁剪;窗口系统;计算机图形学中常用的软件形式及人-机交互技术;几何造型的理论、算法及系统;颜色、光照模型及真实图形显示技术;图象处理技术等。本书是作者在从事十几年计算机图形学教学和科研、参考国内外十余本同类书籍、吸收国内外近十年来在计算机图形学方面的新成果、尤其是在广泛征求国内同行使用作者 1984 年编著的“计算机图形学”全国统编教材的意见和建议的基础上写成的。本书既注意讨论清楚计算机图形学中最基本、最广泛应用的理论和算法,也力求反映 90 年代国内外的一些重要新成果,如:精简指令(RISC)工作站;图形的并行处理;产品模型数据交换规范(STEP);多媒体对象表示环境标准(PREMO);曲线曲面的非均匀有理 B 样条(NURBS)算法;窗口系统;线框、表面、实体统一的非流形造型技术;生成真实图形的幅射度算法;科学计算的可视化技术;图形和图象的转换及应用技术等。这些内容在作者 1986 年出版的“计算机图形学”中是不会有。本书第 1 章、第 2 章和第 5 章适合读者自学,第 3 章、第 4 章、第 6 章及第 7 章适宜大学本科 48 学时的教学内容,第 8 章、第 9 章与

第10章适合研究生36至48学时的教学内容。本书要求先修的课程为“线性代数”、“程序设计基础”等。书中第5章介绍的“交互式图形程序库——GIL”有相应的软件,有需要的读者可和作者联系。

本书由孙家广主编。杨长贵参加第4、8、9章的撰写,赵修伟参加第10章的撰写,其余章节由孙家广撰写。本书在编写过程中陈玉健、王学福、王建民、熊志刚、李学军、范刚、屈敏、刘强、左征等同志帮助调试程序、绘制图例,朱钢帮助录入文稿,在此对他们的辛勤劳动表示诚挚的感谢。此外对那些给1986年版“计算机图形学”教材提过意见和建议的同志表示衷心的感谢。由于作者水平有限,书中难免还存在缺点和不足,殷切希望广大读者批评指正。

作 者

1994年5月

北京清华大学  
计算机科学与技术系  
邮编:100084

# 目 录

<b>+第1章 图形设备、系统和应用</b> ..... ( 1 )	1.6 图形系统和工作站 ..... ( 34 )
1.1 计算机图形学的发展及应用 ..... ( 1 )	1.6.1 计算机图形系统的 功能及组成 ..... ( 34 )
1.1.1 计算机图形学硬件的 发展 ..... ( 1 )	1.6.2 个人计算机图形系统 ..... ( 35 )
1.1.2 计算机图形学软件及 算法的发展 ..... ( 3 )	1.6.3 工作站的发展和特点 ..... ( 38 )
1.1.3 计算机图形学在我国 的发展 ..... ( 4 )	1.6.4 几种精简指令集工作站 ..... ( 41 )
1.1.4 计算机图形学的应用 ..... ( 5 )	1.6.5 工作站的性能评测与选择 ..... ( 49 )
1.2 图形输入设备 ..... ( 7 )	1.7 虚拟现实系统 ..... ( 51 )
1.2.1 鼠标器 ..... ( 7 )	1.7.1 系统构成 ..... ( 51 )
1.2.2 光笔 ..... ( 8 )	1.7.2 三维输入设备 ..... ( 53 )
1.2.3 触摸屏 ..... ( 9 )	1.7.3 跟踪器 ..... ( 53 )
1.2.4 坐标数字化仪 ..... ( 10 )	1.7.4 头盔显示器 ..... ( 54 )
1.2.5 图形扫描仪 ..... ( 11 )	1.7.5 应用前景 ..... ( 55 )
1.3 图形显示设备 ..... ( 12 )	习 题..... ( 56 )
1.3.1 阴极射线管 ..... ( 12 )	<b>+第2章 计算机图形的标准化和窗口         系统</b> ..... ( 57 )
1.3.2 彩色阴极射线管 ..... ( 13 )	2.1 计算机图形接口(CGI) ..... ( 58 )
1.3.3 随机扫描的图形显示器 ..... ( 13 )	2.1.1 控制功能集 ..... ( 58 )
1.3.4 存储管式的图形显示器 ..... ( 13 )	2.1.2 输出功能集 ..... ( 58 )
1.3.5 光栅扫描式图形显示器 ..... ( 14 )	2.1.3 图段功能集 ..... ( 59 )
1.3.6 液晶显示器(LCD) ..... ( 19 )	2.1.4 输入和应答功能集 ..... ( 59 )
1.3.7 等离子显示器 ..... ( 19 )	2.1.5 光栅功能集 ..... ( 59 )
1.3.8 几种显示技术的比较 ..... ( 20 )	2.2 计算机图形元文件(CGM) ..... ( 60 )
1.4 图形绘制设备 ..... ( 20 )	2.2.1 图形元文件 ..... ( 60 )
1.4.1 喷墨打印机 ..... ( 20 )	2.2.2 图形元文件的解释 ..... ( 60 )
1.4.2 激光打印机 ..... ( 21 )	2.2.3 CGM的组成 ..... ( 61 )
1.4.3 静电绘图仪 ..... ( 22 )	2.3 图形核心系统(GKS) ..... ( 63 )
1.4.4 笔式绘图仪 ..... ( 23 )	2.3.1 GKS的功能 ..... ( 63 )
1.5 图形处理器 ..... ( 24 )	2.3.2 图形输入与输出 ..... ( 64 )
1.5.1 简单图形处理器 ..... ( 24 )	2.3.3 工作站 ..... ( 65 )
1.5.2 单片图形处理器 ..... ( 27 )	2.3.4 坐标系 ..... ( 65 )
1.5.3 个人计算机图形卡 ..... ( 28 )	2.3.5 图段 ..... ( 65 )
1.5.4 图形并行处理器 ..... ( 32 )	2.3.6 GKS的文件接口 ..... ( 65 )

2.3.7 GKS的分级管理 .....	( 65 )	3.1 用户接口的常用形式 .....	( 130 )
2.3.8 GKS-3D .....	( 65 )	3.1.1 子程序库 .....	( 130 )
2.4 程序员层次交互式图形		3.1.2 专用语言 .....	( 131 )
系统(PHIGS) .....	( 67 )	3.1.3 交互命令 .....	( 132 )
2.4.1 模块化的功能结构 .....	( 67 )	3.2 交互设备、交互任务和交互技术	
2.4.2 动态的结构、元素管理 .....	( 68 )	.....	( 135 )
2.4.3 GKS-3D和PHIGS的比较		3.2.1 交互设备 .....	( 135 )
.....	( 70 )	3.2.2 交互任务 .....	( 137 )
2.4.4 PHIGS的扩充版本PHIGS+		3.2.3 交互技术 .....	( 140 )
.....	( 72 )	3.2.4 拾取图形 .....	( 142 )
2.4.5 网络窗口环境下的		3.3 输入控制 .....	( 144 )
PHIGS-PEX .....	( 73 )	3.3.1 三种输入控制方式 .....	( 144 )
2.4.6 图形程序库GL .....	( 75 )	3.3.2 请求方式 .....	( 145 )
2.5 基本图形转换规范(IGES) .....	( 77 )	3.3.3 取样方式 .....	( 145 )
2.5.1 IGES的作用 .....	( 77 )	3.3.4 事件方式 .....	( 146 )
2.5.2 IGES的实体 .....	( 78 )	3.3.5 输入控制方式的混合使用 .....	( 147 )
2.5.3 IGES的文件结构 .....	( 78 )	3.4 如何构造一个交互系统 .....	( 147 )
2.5.4 IGES的出错处理 .....	( 78 )	3.4.1 交互式用户接口的表现形式	
2.6 产品模型数据转换标准(STEP)		.....	( 147 )
.....	( 79 )	3.4.2 交互式用户接口常见的工作	
2.6.1 STEP的产品模型数据 .....	( 79 )	方式 .....	( 150 )
2.6.2 STEP的概念模式 .....	( 80 )	3.4.3 用户命令集的描述 .....	( 150 )
2.6.3 STEP中特征的定义 .....	( 81 )	3.4.4 人-机对话序列的设计 .....	( 151 )
2.6.4 STEP的基本组成 .....	( 81 )	3.4.5 交互式用户接口的实现 .....	( 153 )
2.7 计算机图形参考模型(CGRM) .....	( 82 )	3.4.6 交互式用户接口简例 .....	( 159 )
2.7.1 基本概念 .....	( 82 )	3.5 基于知识的用户接口设计环境 .....	( 161 )
2.7.2 CGRM的外部关系 .....	( 83 )	3.5.1 目标 .....	( 162 )
2.7.3 CGRM的环境模型 .....	( 83 )	3.5.2 结构 .....	( 162 )
2.7.4 CGRM的数据元素 .....	( 84 )	3.5.3 基于知识的用户接口 .....	( 162 )
2.8 窗口系统 .....	( 85 )	3.5.4 用户接口变换器 .....	( 163 )
2.8.1 窗口系统的特点 .....	( 85 )	习 题 .....	( 163 )
2.8.2 几种常用的窗口系统 .....	( 88 )	<b>第4章 基本图形生成算法</b> .....	( 165 )
2.8.3 窗口系统的输入处理 .....	( 96 )	4.1 直线的扫描转换 .....	( 165 )
2.8.4 窗口系统的输出处理 .....	( 100 )	4.1.1 数值微分法 .....	( 166 )
2.8.5 窗口系统工具箱 .....	( 102 )	4.1.2 中点画线法 .....	( 167 )
2.8.6 流行的图形用户接口 .....	( 105 )	4.1.3 Bresenham画线算法 .....	( 169 )
2.8.7 从窗口系统Windows到窗口		4.2 圆与椭圆的扫描转换 .....	( 170 )
操作系统Windows NT .....	( 108 )	4.2.1 圆的扫描转换 .....	( 170 )
2.8.8 如何用窗口系统编		4.2.2 Bresenham画圆算法 .....	( 173 )
应用程序 .....	( 111 )	4.2.3 椭圆的扫描转换 .....	( 176 )
习 题 .....	( 128 )	4.3 区域填充 .....	( 178 )
<b>第3章 交互技术与用户接口</b> .....	( 130 )	4.3.1 多边形域的填充 .....	( 179 )

4.3.2	边填充算法	(182)	5.3.3	对话框	(240)
4.3.3	种子填充算法	(185)	5.3.4	提示信息和出错信息	(245)
4.3.4	圆域的填充	(187)	5.3.5	拖动画图方式的设置	(246)
4.3.5	区域填充图案	(187)	5.3.6	拾取几何信息	(247)
4.4	线宽与线型的处理	(190)	5.3.7	输入数据	(247)
4.4.1	直线线宽的处理	(190)	5.3.8	定义热键	(250)
4.4.2	圆弧线宽的处理	(192)	5.3.9	用 GIL 构造交互系统实例	(251)
4.4.3	线型的处理	(193)	5.4	GIL 中基本数据类型定义	(258)
4.5	字符	(193)	5.5	GIL 中函数一览表	(259)
4.5.1	矢量字符	(194)	习 题	(260)	
4.5.2	点阵字符	(195)			
4.5.3	字型技术	(195)			
4.5.4	字符输出	(197)	<b>第 6 章 曲线和曲面</b>	(262)	
4.6	裁剪	(199)	6.1	曲线、曲面参数表示的	
4.6.1	线段裁剪	(200)	基础知识	(262)	
4.6.2	多边形裁剪	(206)	6.1.1	显式、隐式和参数	
4.6.3	字符裁剪	(209)	表示	(262)	
4.7	反走样	(210)	6.1.2	参数曲线的定义及其切矢量、	
4.7.1	提高分辨率	(210)	法矢量、曲率和挠率	(265)	
4.7.2	简单的区域取样	(211)	6.1.3	插值、逼近、拟合和光顺	
4.7.3	加权区域取样	(213)	(267)		
习 题	(215)		6.1.4	参数曲线的代数形式	
<b>第 5 章 交互式图形程序库——GIL</b>	(217)		和几何形式	(270)	
5.1	应用 GIL 的预备知识	(217)	6.1.5	调和函数	(271)
5.1.1	为什么要用 GIL	(217)	6.1.6	曲线段间 $C^1, C^2$ 和 $G^1, G^2$	
5.1.2	GIL 的运行环境	(218)	连续性定义	(272)	
5.1.3	变量、坐标及控制流程	(218)	6.1.7	重新参数化	(273)
5.1.4	用户界面	(219)	6.1.8	四点式曲线	(275)
5.1.5	文件格式	(220)	6.1.9	有理参数多项式曲线	(276)
5.1.6	设置光标	(223)	6.2	常用的参数曲线	(276)
5.1.7	系统初始化	(224)	6.2.1	Bezier 曲线	(277)
5.2	如何用 GIL 画图	(225)	6.2.2	B 样条曲线	(284)
5.2.1	窗口的创建和管理	(225)	6.2.3	非均匀有理 B 样条(NURBS)	
5.2.2	画基本图形	(229)	曲线	(294)	
5.2.3	区域填充	(231)	6.2.4	常用参数曲线的等价表示	(302)
5.2.4	设属性	(232)	6.2.5	等距线	(302)
5.2.5	象素操作	(235)	6.2.6	圆锥曲线	(305)
5.2.6	字符和汉字	(236)	6.2.7	等值线	(306)
5.3	如何用 GIL 实现人-机交互操作	(238)	6.3	常用的参数曲面	(309)
5.3.1	人的因素	(238)	6.3.1	参数曲面的定义	(309)
5.3.2	内存空间的申请和释放	(239)	6.3.2	参数曲面的重新参数化	(314)
			6.3.3	平面、二次面和直纹面	(316)



6.3.4	Coons 曲面和张量积面	(319)	<b>*第8章 几何造型</b>	(368)
6.3.5	Bezier 曲面	(321)	8.1 形体在计算机内的表示	(368)
6.3.6	B 样条曲面	(323)	8.1.1 表示形体的坐标系	(368)
6.3.7	非均匀有理 B 样条(NURBS) 曲面	(324)	8.1.2 几何元素的定义	(371)
6.3.8	常用双三次参数曲面 的等价表示	(326)	8.1.3 表示形体的线框、表面、 实体模型	(373)
6.3.9	等距面	(327)	8.1.4 形体的边界及其连接 关系	(374)
6.3.10	基于三维散列数据构造 曲面	(327)	8.1.5 常用的形体表示方式	(376)
6.3.11	扫描面	(329)	8.2 边界表示的数据结构与欧拉 操作	(380)
习 题		(331)	8.2.1 翼边结构	(380)
<b>第7章 图形变换</b>		(333)	8.2.2 对称结构	(381)
7.1 图形变换的数学基础		(333)	8.2.3 基于面的多表结构	(382)
7.1.1 矢量运算		(333)	8.2.4 欧拉操作	(383)
7.1.2 矩阵运算		(333)	8.3 求交算法	(388)
7.1.3 齐次坐标		(336)	8.3.1 点与各几何元素的求交计算	(388)
7.2 窗口视图变换		(337)	8.3.2 直线与各几何元素求交	(393)
7.2.1 用户域和窗口区		(337)	8.3.3 曲线与各几何元素求交	(396)
7.2.2 屏幕域和视图区		(337)	8.3.4 面与面求交	(398)
7.2.3 窗口区和视图区的 坐标变换		(337)	8.4 集合运算	(409)
7.2.4 从规格化坐标(NDC)到设备 坐标(DC)的变换		(339)	8.4.1 一维几何元素的集合运算	(410)
7.3 图形的几何变换		(340)	8.4.2 二维几何元素的集合运算	(414)
7.3.1 二维图形的几何变换		(341)	8.4.3 三维几何元素的集合运算	(420)
7.3.2 三维图形的几何变换		(344)	8.5 常用的其他造型方法	(439)
7.3.3 参数图形的几何变换		(348)	8.5.1 分数维(Fractal)造型	(439)
7.4 形体的投影变换		(353)	8.5.2 特征(Feature)造型	(443)
7.4.1 投影变换分类		(353)	8.5.3 从二维正投影图构造三维 形体	(448)
7.4.2 正平行投影(三视图)		(353)	8.5.4 从二维图象信息构造三维 形体	(453)
7.4.3 斜平行投影		(354)	习 题	(458)
7.4.4 透视投影		(355)	<b>*第9章 真实图形</b>	(459)
7.4.5 投影空间		(359)	9.1 消除隐藏线	(459)
7.4.6 用户坐标系到观察 坐标系的变换		(360)	9.1.1 凸多面体的隐藏线消除	(461)
7.4.7 规格化裁剪空间和图象 空间		(362)	9.1.2 凹多面体的隐藏线消除	(462)
7.5 三维线段裁剪		(365)	9.1.3 二次曲面体的隐藏线消除	(467)
习 题		(366)	9.2 消除隐藏面	(473)
			9.2.1 画家算法	(473)
			9.2.2 Z 缓冲区算法	(475)
			9.2.3 扫描线算法	(476)

9.2.4 区域采样算法 .....	(478)	9.8.3 以图象空间为序的体绘制 算法 .....	(529)
9.3 明暗效应 .....	(481)	习 题 .....	(531)
9.3.1 明暗模型 .....	(482)	<b>第 10 章 图象处理</b> .....	(533)
9.3.2 处理方法 .....	(483)	10.1 图象数据 .....	(533)
9.3.3 透明效果 .....	(485)	10.1.1 图象的表示 .....	(534)
9.4 颜色模型 .....	(486)	10.1.2 图象的采样 .....	(535)
9.4.1 基本概念 .....	(486)	10.1.3 图象的数据格式 .....	(537)
9.4.2 CIE 色度图 .....	(487)	10.1.4 图象的灰度直方图 .....	(542)
9.4.3 常用的颜色模型 .....	(490)	10.1.5 图象的二值化 .....	(545)
9.4.4 颜色的选择插值和复制 .....	(495)	10.2 图象变换 .....	(546)
9.5 纹理 .....	(497)	10.2.1 图象的空间变换 .....	(546)
9.5.1 纹理的定义和映射 .....	(498)	10.2.2 傅里叶变换 .....	(550)
9.5.2 纹理的反走样处理 .....	(501)	10.3 图象解析 .....	(554)
9.6 光线跟踪 .....	(504)	10.3.1 细线化技术 .....	(554)
9.6.1 求交算法 .....	(505)	10.3.2 轮廓线追踪 .....	(557)
9.6.2 法向量计算 .....	(509)	10.4 图象数据压缩 .....	(558)
9.6.3 反射与折射方向 .....	(510)	10.4.1 步长法 .....	(559)
9.6.4 光照模型 .....	(511)	10.4.2 差值法 .....	(560)
9.6.5 加速算法 .....	(515)	10.4.3 块域符号法 .....	(562)
9.7 辐射度 .....	(520)	10.5 图象识别 .....	(564)
9.7.1 基本算法 .....	(521)	10.5.1 手写文字的识别 .....	(565)
9.7.2 有遮挡关系环境中辐射度的 计算 .....	(523)	10.5.2 印刷体文字识别 .....	(566)
9.7.3 半阴影区域的特殊处理 .....	(525)	习 题 .....	(567)
9.8 科学计算的可视化 .....	(528)	<b>参考文献</b> .....	(569)
9.8.1 数据场 .....	(528)		
9.8.2 体绘制技术的基本原理 .....	(528)		

十：适合自学的章节；

\*：适合研究生教学的章节；

其余章节适合大学本科生教学。

# 第一章

## 图形设备、系统和应用

在这一章,我们将介绍计算机图形学的发展和应用、图形输入、显示及绘制设备以及图形系统,侧重讨论了当前在计算机领域中发展较快、应用广泛的集成化图形设备——工作站的发展、原理、评测和选择。此外,还介绍了当前国际上仍在研究的虚拟现实环境的进展情况。通过本章,不仅使读者对本书所要介绍的计算机图形学的有关内容有个概括性的了解,更重要的是使读者对计算机图形学所涉及的有关硬件有较为全面的认识,从而能正确地选择合适的设备开展计算机图形学的研究及其应用工作。

### 1.1 计算机图形学的发展及应用

计算机图形学是伴随着电子计算机及其外围设备而产生和发展起来的。它是近代计算机科学与雷达、电视及图象处理技术的发展汇合而产生的硕果。在造船、航空航天、汽车、电子、机械、土建工程、影视广告、地理信息、轻纺化工等领域中的广泛应用,推动了这门学科的不断发展和,而不断解决应用中提出的各类新课题,又进一步充实和丰富了这门学科的内容。计算机出现不久,为了在绘图仪和阴极射线管(CRT)屏幕上输出图形,计算机图形学随之诞生了。现在它已发展为对物体的模型和图象进行生成、存取和管理的新学科。

#### 1.1.1 计算机图形学硬件的发展

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。到50年代末期,MIT的林肯实验室在“旋风”计算机上开发的SAGE空中防御系统,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 and 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,证明了交互式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。60年代中期,美国MIT、通用汽车公司、贝尔电话实验室和洛克希德公司开展了计算机图形学的大规模研究,同时,英国剑桥大学等也开始了这方面的工作,从而使计算机图形学进入了迅速发展并逐步得到广泛应用的新时期。

如果说60年代是计算机图形学确立并得到蓬勃发展的时期,那么70年代则是这方面技术进入实用化的阶段。在这十年中,交互式的图形系统在许多国家得到应用,许多新的更加完备的图形系统又不断研制出来。除了传统的军事上和工业上的应用之外,计算机图形学还进入教育、科研和事务管理等领域。70年代末,美国安装图形系统达12000多台(套),使用人数超过数万人。直到80年代初,和别的学科相比,计算机图形学还是一个很小的学科领域。主要原因是由于图形设备昂贵、功能简单、基于图形的应用软件缺乏。后来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 workstation等,从而才使得在人-机交互中位图图形的使用日益广泛。位图(Bitmap)是显示屏幕上点(像素:pixel)的矩形阵列的0,1表示。位图图形学付诸应用不久,就出现了大量简单易用、价格便宜的基于图形的应用程序,如用户界面、绘图、字处理、游戏等。由此推动了计算机图形学的发展和应用。在80年代,计算机图形系统(含具有光栅图形显示器的个人计算机和 workstation)已超过数百万台(套),不仅在工业、管理、艺术领域发挥巨大作用,而且已进入家庭。进入90年代,计算机图形学的功能除了随着计算机图形设备的发展而提高外,其自身朝着标准化、集成化和智能化的方向发展。在此期间,国际标准化组织(ISO)公布的有关计算机图形学方面的标准越来越多,且更加成熟。多媒体技术、人工智能及专家系统技术和计算机图形学相结合使其应用效果越来越好。科学计算的可视化、虚拟现实环境的应用又向计算机图形学提出了许多更新更高的要求,使得三维乃至高维计算机图形学在真实性和实时性方面将有飞速发展。

图形显示器是计算机图形学中的关键设备。60年代中期使用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。为此需要一个刷新缓冲存储器来存放计算机产生的显示图形的数据和指令,还要有一个高速的处理器(这些在60年代中期是相当昂贵的),因而成为影响交互式图形生成技术进一步普及的主要原因。

针对这一情况,60年代后期采用了存储管式显示器。它不需要缓存及刷新功能,价格比较低廉,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,也不能选择性的进行删除、修改图形。虽然,存储管式显示器的推出对普及计算机图形学起到了促进作用,但对于交互式计算机图形学的需求,其功能还有待进一步的改进和完善。

到了70年代中期,廉价的固体电路随机存储器的出现,可以提供比十年前大得多的刷新缓冲存储器,因而就可以采用基于电视技术的光栅图形显示器。在这种显示器中,被显示的线段、字符、图形及其背景色都按像素一一存储在刷新缓冲存储器中,按光栅扫描方式以每秒30次的频率对存储器进行读写以实现图形刷新而避免闪烁。光栅图形显示器的出现使得计算机图形生成技术和电视技术相衔接,图形处理和图象处理相渗透,使得生成的图形更加形象、逼真,因而更易于推广和应用。

在图形输出设备不断发展的同时,出现了许多不同类型的图形输入设备。早期的定位、拾取装置——光笔,由于易损坏、使用笨拙,而被各种类型的鼠标器及图形输入板所代替。与此同时还发展了操纵杆、跟踪球、拇指轮等定位、拾取装置。此外,键盘是交互式图形生成系统的必不可少的设备,与一般键盘不同的是它附有一些命令控制键和特殊的功能键。坐标数字化仪和图形输入板类似,用它可以把图形坐标和有关命令送入计算机中去。近年来,由于图形和图象的紧密结合和互相渗透,图形(纸)扫描输入仪和触摸屏等设备也得到普遍使用,从而提高了图形输入的速度和直观性。

### 1.1.2 计算机图形学软件及算法的发展

随着计算机系统、图形输入、图形输出设备的发展,计算机图形软件及其生成、控制图形的算法也有了很大的发展。近十余年来,发展了多种计算机图形软件系统,概括起来主要有以下三种:

(1) 用现有的某种计算机语言写成的子程序包。 用户使用时按相应计算机语言的规定调用所需要的子程序生成各种图形。这类子程序包很多,使用较为广泛的有图形标准化程序包,如 GKS、PHIGS、GL 等,用其中的子程序可实现各种基本绘图及显示功能,各种图形设备及交互过程中各种事件的控制和处理。这种类型的图形软件基本上是一些用计算机语言写成的子程序集。对于窗口系统中的 X 程序库和 Ms-Windows 下的 SDK 开发程序库使用起来的难度较大,从熟悉到真正掌握,灵活、正确使用的周期较长。在这类程序包的基础上开发的图形程序有便于移植和推广的优点,但执行速度相对较慢,效率较低。

(2) 扩充某一种计算机语言,使其具有图形生成和处理功能。 目前具有图形生成和处理功能的计算机语言很多,如 Turbo Pascal、Turbo C、AutoLisp 等,即在相应的计算机语言中扩充了图形生成及控制的语句或函数。对解释型的语言,这类功能的扩充还方便些;对编译型的语言,扩充图形功能的工作量较大,且不具备可移植性。用这类语言编写的图形软件比较简练、紧凑、执行速度较快。

(3) 专用的图形系统。 对于某一种类型的设备,可以配置专用的图形生成语言。如果要求简单,可以采用在多功能子程序包的基础上加上命令语言的方式。如果需要配置一个具有综合功能的较为复杂的图形生成语言,又要求有较快的执行速度,则应开发或配置一个完整的编译系统。比起简单的命令语言,它具有更强的功能;比起子程序包,它的执行速度较快,效率更高。但系统开发工作量大,且移植性较差。

随着通用的、与设备无关的图形软件的发展,提出了一个图形软件功能标准化的问题。早在 1974 年,在美国国家标准化局(ANSI)举行的 ACM SIGGRAPH,一个“与机器无关的图形技术”的工作会议上,就提出了制定有关标准的基本规则。在此会之后,美国计算机协会(ACM)成立了一个图形标准化委员会,开始了有关标准的制定和审批工作。在以往多年图形软件工作经验的基础上,该委员会于 1977 年提出了称为“核心图形系统”(Core Graphics System)的规范,1979 年又公布了修改后的第二版,增加了包括光栅图形显示技术在内的许多其他功能,但仍作为进一步讨论的基础。随后由 ISO 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),程序员层次交互式图形系统 PHIGS (Programmer's Hierarchical Interactive Graphics System)等。这些标准有的是面向图形设备

的驱动程序包,有些是面向用户的图形生成及管理程序包,其主要出发点是实现程序和程序员的可移植性。要使图形软件和图形设备以及系统软件绝对无关是十分困难的,但是只对源程序作少量修改即可在不同的图形系统上运行是可以做到的。

计算机图形学所涉及的算法是非常丰富的,围绕着生成、表示物体的图形图象的准确性、真实性和实时性,其算法大致可分为以下几类。

(1) 基于图形设备的基本图形元素的生成算法,如用光栅图形显示器生成直线、圆弧、二次曲线、封闭边界内的填色、填图案、反走样等。

(2) 基本图形元素的几何变换、投影变换、窗口裁剪等。

(3) 自由曲线和曲面的插值、拟合、拼接、分解、过渡、光顺、整体修改、局部修改等。

(4) 图形元素(点、线、环、面、体)的求交与分类以及集合运算。

(5) 隐藏线、面消除以及具有光照颜色效果的真实图形显示。

(6) 不同字体的点阵表示,矢量中、西文字符的生成及变换。

(7) 山、水、花、草、烟云等模糊景物的生成。

(8) 三维或高维数据场的可视化。

(9) 三维形体的实时显示和图形的并行处理。

(10) 虚拟现实环境的生成及其控制算法等。

多年来,围绕这些算法发表了许多论文和报告,进行了十分热烈的讨论和探索,其中某些算法已日趋完善和成熟,并实现了固化。但很多算法还没有真正解决,还有待我们的努力和奋斗。

计算机图形学研究如何从计算机模型出发,把真实的或想象的物体画面描绘出来。而图象处理(也称之为画面处理)进行的却是与此相反的过程:是基于画面进行二维或三维物体模型的重建,这在很多场合都是十分重要的。如高空监测摄影、以宇航探测器收集到的月球或行星的慢速扫描电视图象、以工业机器人“眼”中测到的电视图象、染色体扫描、X射线图象、断层扫描、指纹分析等,都需要图象处理技术。图象处理包括图象增强、模式探测和识别、景物分析和计算机视觉模拟等领域。虽然计算机图形学和图象处理目前仍然是两个相对独立的学科分支,但它们的重叠之处越来越多。例如,它们都是用计算机进行点、面处理,都使用光栅显示器等。在图象处理中,需要用计算机图形学中的交互技术和手段输入图形、图象和控制相应的过程。在计算机图形学中,也经常采用图象处理操作来帮助合成模型的图象。图形和图象处理算法的结合是促进计算机图形学和图象处理技术发展的重要趋势之一。

### 1.1.3 计算机图形学在我国的发展

我国开展计算机图形设备和计算机辅助几何设计方面的研究开始于60年代中后期。进入80年代以来,随着我国四个现代化建设事业的发展,计算机图形学无论在理论研究,还是在实际应用的深度和广度方面,都取得了令人可喜的成果。

在图形设备方面,我国陆续研制出多种系列和型号的绘图机、坐标数字化仪和图形显示器,并已批量生产投放市场;国内许多公司均可批量生产具有高分辨率光栅图形显示器的个人计算机,如PC 486、pentium等以及具有全色(24个位面)的图形图象处理卡;国际上应用最广泛的Sun SPARC系列工作站、HP 9000/700、800系列工作站、SGI IRIS系列工作站在我国也有定点工厂生产;此外,鼠标器、光笔显示器等交互设备也已在国内生产。这些硬件在

国内的制造,为计算机图形学在我国普及应用奠定了坚实的物质基础。

与计算机图形学有关的软件开发和应用都在迅速发展,大力普及应用。在国家攻关项目、863 高技术和国家自然科学基金项目中有不少关于计算机图形软件研究开发的课题,其中二维交互绘图系统已进入商品化阶段,并可以在国内市场上和美国 Autodesk 公司的 AutoCAD 二维交互绘图软件试比高。三维几何造型系统在国内也已有几个比较实用的版本,无论是基于平面多面体表示、非均匀有理 B 样条(NURBS)表示,还是混合表示模式,这几个几何造型系统均可以支持有限元分析、数控加工等对产品和工程建模的要求。在图形生成和显示算法方面,我国学者在矢量线段及其多边形的裁剪、计算机辅助几何设计、用光线跟踪和辐射度算法产生真实图形、在科学计算的可视化等方面都已取得了为国内外同行高度重视的成果。

与计算机图形学有关的学术活动在我国也很活跃。在计算机学会、工程图学学会、自动化学会、电子学会等国家一级学会下面都设有与计算机图形学有关的二级分会,并定期(一般是二年一次)举办全国的学术会议,其中计算机学会和工程图学学会每两年分别举办一次与计算机图形学有关的国际会议。在我国也有好几种与计算机图形学有关的学术刊物,如“计算机辅助设计与图形学学报”、“工程图学学报”、“计算机辅助工程”等。我国参加国际上计算机图形学会议的人数也不断增加,象 SIGGRAPH、Eurographics、Computer Graphics International、Pacific Graphics 等国际会议,我国每年都派代表参加。我国学者在国际上与计算机图形学有关刊物上发表的论文也越来越多。愈来愈多的国内论文被国际会议或国际刊物录用也说明了我国计算机图形学的水平正在不断提高。

计算机图形学在我国的应用从 70 年代起步,经过近 20 年的发展,至今已开始在电子、机械、航空航天、建筑、造船、轻纺、影视等部门的产品设计、工程设计和广告影视制作中得到了初步应用,取得了明显的经济和社会效益。据有关部门统计,目前我国安装的工作站和个人计算机已愈 60 多万台,其中与计算机图形学有关的工作站和个人计算机占 25%左右,工作站有 2 万台左右。在电子领域用于集成电路的版图设计和印制板设计已取得了显著成效。在建筑工程领域二维交互绘图的普及率已达 20%,三维方案设计的计算机化已在甲级设计院中基本实现。用计算机图形系统做广告和影视片,尤其是动画片也已取得了很大的成功。但国内的应用与国际上的发达国家相比还相差甚远,除了图形设备和系统价格比较昂贵的原因外,更主要或更直接的原因是我国这方面的人材缺乏,懂计算机图形学的工程技术人员不多,或知之不深,因而影响了计算机图形学这门新型学科在我国的推广应用。采取多种途径、多种渠道、多种方式培训计算机图形学的技术人才,建立一支群众性的计算机图形学的应用技术队伍是摆在我们面前的一项非常紧迫而又非常有意义的任务。随着计算机图形学专门人才的成长,计算机图形学在国民经济各个领域中将发挥越来越大的作用,取得越来越大的经济效益和社会效益。

#### 1.1.4 计算机图形学的应用

由于计算机图形设备的不断更新和图形软件功能的不断扩充,也由于计算机硬件功能的不断增强和系统软件的不断完善,计算机图形学在近 20 年内得到了广泛的应用。目前,主要的应用领域有:

(1) 用户接口。用户接口是人们使用计算机的第一观感。过去传统的软件中约有 60%

以上的程序是用来处理与用户接口有关的问题和功能,因为用户接口的好坏直接影响着软件的质量和效率。如今在用户接口中广泛使用了图形和图标,大大提高了用户接口的直观性和友好性,也提高了相应软件的执行速度。

(2) 计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)。这是一个最广泛、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,或者数控加工代码的指令。在电子工业中,计算机图形学应用到集成电路、印刷电路板、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,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,将其结果直接送至后续工艺进行加工处理。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。

(3) 科学、技术及事务管理中的交互绘图。可用来绘制数学的、物理的、或表示经济信息的各类二、三维图表。如统计用的直方图、扇形图、工作进程图、仓库和生产的各种统计管理图表等,所有这些图表都用简明的方式提供形象化的数据和变化趋势,以增加对复杂对象的了解并协助作出决策。

(4) 绘制勘探、测量图形。计算机图形学被广泛地用来绘制地理的、地质的以及其他自然现象的高精度勘探、测量图形,例如地理图、地形图、矿藏分布图、海洋地理图、气象气流图、人口分布图、电场及电荷分布图以及其他各类等值线、等位面图。

(5) 过程控制及系统环境模拟。用户利用计算机图形学实现与其控制或管理对象间的相互作用。例如石油化工、金属冶炼、电网控制的有关人员可以根据设备关键部位的传感器送来的图象和数据,对设备运行过程进行有效的监视和控制;机场的飞行控制人员和铁路的调度人员可通过计算机产生运行状态信息来有效、迅速、准确地调度,调整空中交通和铁路运输。

(6) 电子印刷及办公室自动化。图文并茂的电子排版制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、电视会议以及文字、图表等的编辑和硬拷贝正在家庭、办公室普及。伴随计算机和高清晰度电视结合的产品推出,这种普及率将会越来越高,进而会改变传统的办公、家庭生活方式。

(7) 艺术模拟。计算机图形学在艺术领域中的应用成效越来越显著,除了广泛用于艺术品的制作,如各种图案、花纹、工艺外形设计及传统的油画、中国国画和书法等,还成功地用来制作广告、动画片,甚至电视电影,其中有的影片还获得了奥斯卡奖,这是电影界的最高殊荣。目前国内外不少单位正在研制人体模拟系统,这使得在不久的将来把历史上早已去世的著名影视名星重新搬上新的影视片成为可能。

(8) 科学计算的可视化。传统的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对错。科学计算的可视化通过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二维图象。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、大气科学及生物化学等领域。



(9) 工业模拟。这是一个十分大的应用领域,包含对各种机构的运动模拟和静、动态装配模拟,在产品和工程的设计、数控加工等领域迫切需要。它要求的技术主要是计算机图形学中的产品造型、干涉检测和三维形体的动态显示。

(10) 计算机辅助教学。计算机图形学已广泛应用于计算机辅助教学系统中,它可以使教学过程形象、直观、生动,极大地提高了学生的学习兴趣和教学效果。由于个人计算机的普及,计算机辅助教学系统将深入到家庭和幼儿教育。

还有许多其他的应用领域。例如农业上利用计算机对作物的生长情况进行综合分析、比较时,就可以借助计算机图形生成技术来保存和再现不同种类和不同生长时期的植物形态,模拟植物的生长过程,从而合理地进行选种、播种、田间管理以及收获等。在轻纺行业,除了用计算机图形学来设计花色外,服装行业用它进行配料、排料、剪裁,甚至是三维人体的服装设计。在医学方面,利用可视化技术为准确的诊断和治疗提供了更为形象和直观的手段。在刑事侦破方面,计算机图形学被用来根据所提供的线索和特征,如指纹,再现当事人的图象及犯罪场景。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、观察现实或想象形体的能力。随着个人计算机和工作站的发展,随着各种图形软件的不 断推出,计算机图形学的应用前景将是更加引人入胜的。

## 1.2 图形输入设备

图形输入设备从逻辑上分有六种,如表 1.2.1 所示。但实际的图形输入设备往往是某些逻辑输入功能的组合,下面介绍几种常用的图形输入设备。

表 1.2.1 图形输入设备的逻辑分类

名称	相应的典型设备	基本功能
定位(locator)	叉丝、指姆轮	输入一个点的坐标
笔划(Stroke)	图形输入板	输入一系列点的坐标
数值(Valuator)	数字键盘	输入一个整数或实数
选择(Choice)	功能键、叉丝、光笔选择菜单项	由一个整数得到某种选择
拾取(Pick)	光笔或叉丝接触屏幕上已显示图形	通过一种拾取状态来判别一个显示着的图形
字符串(String)	字符键盘	输入一串字符

### 1.2.1 鼠标器

鼠标器是一种移动光标和做选择操作的计算机输入设备,除了键盘外,它已成为我们使用计算机的主要输入工具。随着“所见即所得”环境越来越普及,使用鼠标器的机会也就越来越多。鼠标器的基本工作原理是:当移动鼠标器时,它把移动距离及方向的信息变成脉冲送给计算机,计算机再把脉冲转换成鼠标器光标的坐标数据,从而达到指示位置的目的。鼠标器根据其中测量位移的部件,可分为光电式、光机式和机械式三种。

**光电式鼠标器** 是上述三种鼠标器中可靠性最好的一种,它是利用 LED(发光二极管)