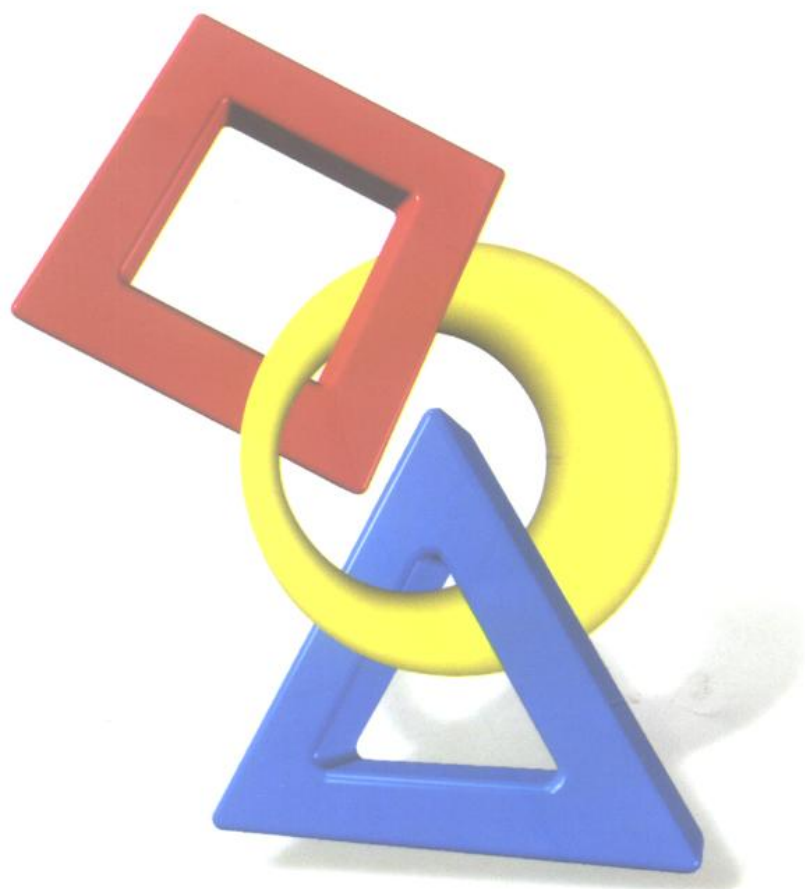


计算机图形学教程 (修订版)

唐荣锡 汪嘉业 彭群生 汪国昭 等编著



科学出版社

计算机图形学教程

(修订版)

唐荣锡 汪嘉业 彭群生 汪国昭 等编著

科学出版社

内 容 简 介

本书是讲述计算机图形学基本原理和算法的一本教材,是1990年4月版的修订本。全书共分十三章,包括常用的计算机图形设备的简单工作原理,直线和圆弧的生成算法,图形的各种变换、裁剪,层次结构,交互技术,光栅图形的扫描转换和区域填充,消隐,曲面,实体和特征造型,真实感图形绘制,计算机动画和科学计算可视化。

本书的特点是:取材比较系统、完整,重视基本原理和基础算法的阐述,注重实践环节与能力培养。为了便于复习和提高应用能力,各章都附有习题。全书力求条理清晰,内容实用,简明易懂,便于自学。作者长期在相关领域从事研究、应用开发和教学工作,经验丰富,写作严谨。

本书可作为高等院校相关专业的本科生、研究生学习计算机图形学的教材,对从事计算机辅助设计和计算机图形学技术工作的广大科技人员也有较大参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

计算机图形学教程/唐荣锡等编著. 修订版. -北京:科学出版社,2000
ISBN 7-03-008819-1

I. 计… II. 唐… III. 计算机图形学-教材 N. TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 53942 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

北京双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

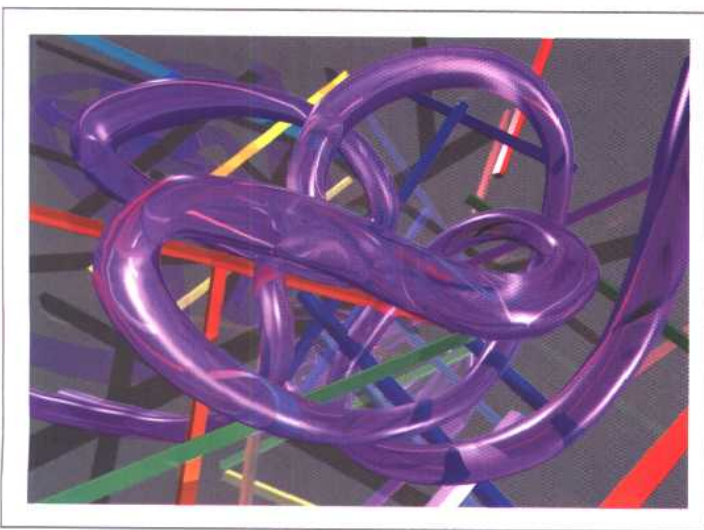
1990年4月第一版 开本:787×1092 1/16
2000年11月修订版 印张:24 1/2 插页:1
2000年11月第八次印刷 字数:560 000
印数:27 536—32 535

定价:34.00元

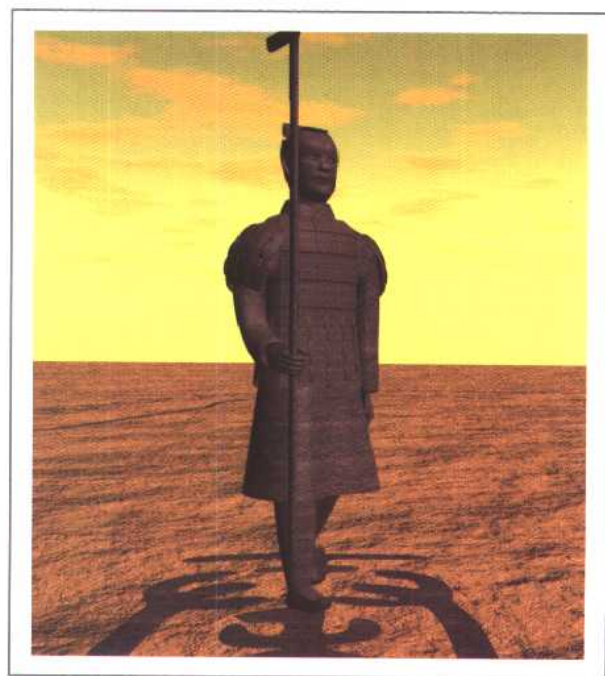
(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)



彩色照片1 采用面光源照明模型绘制
(鲍虎军, 1999)



彩色照片2 由光线跟踪算法生成的镜面反射和
折射效果(鲍虎军, 1999)



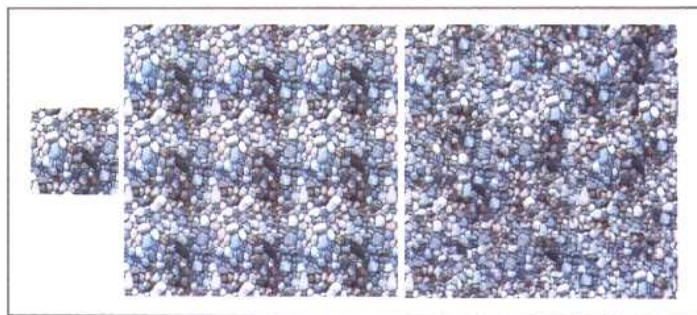
彩色照片3 基于NURBS曲面表示的兵马俑模型
(应建国, 1995)



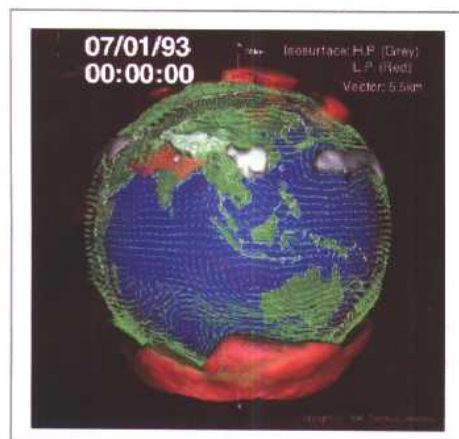
彩色照片4 采用辐射度算法绘制的客厅一角
(朱幼虹, 1998)



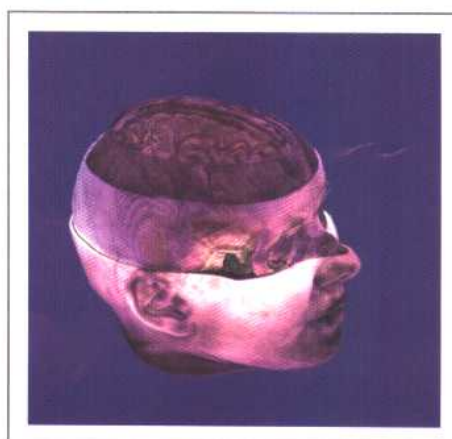
彩色照片5 采用基于几何和图像的树木造型技术以及体元纹理绘制技术生成的森林场景效果(陈彦云等, 1999)



彩色照片6 纹理拼接效果。(a)原始纹理: (b)纹理的简单拼接:
(c)纹理的无缝拼接(徐迎庆等, 1999)



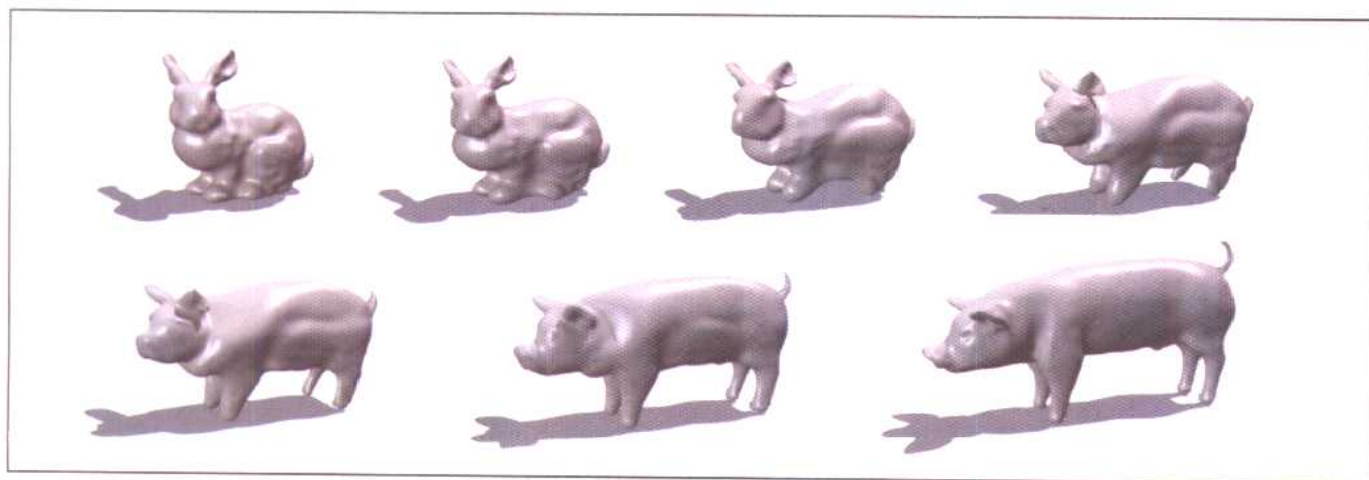
彩色照片7 高层气流分布的可视化结果
(唐泽圣等, 1998)



彩色照片8 人脑CT数据的体绘制结果
(蔡文立, 1994)



彩色照片9 基于图像的人脸模型重建
效果(张正友等, 1999)



彩色照片10 基于连续距离场表示的三维
形状过渡效果(方向, 2000)

修订版前言

本书是1990年4月版的修订本。该版前后印刷了7次。由于取材全面,内容严谨,该书被很多学校和研究所选为本科生和研究生的计算机图形学教材,并被指定为有关专业2000年前自学考试参考书。该书曾于1995年获得电子工业部优秀图书一等奖。

10年前本书初版时,国内有关图形学的教材和参考资料还很少。现在情况已经有了很大的变化。随着微机的日益普及,以AutoCAD和3DStudio为代表的一批高性能、低价位的计算机图形和动画软件已成为人们最为常用的软件。CAD取代了传统的手工设计,建筑院全面采用计算机生成的渲染图作为投标用的设计效果图。在文化娱乐方面,国外进口大片中的特技镜头使观众惊心动魄之余,领略到图形高技术的神奇魅力。电脑游戏的趣味性和刺激性使参与者完全沉浸在用计算机图形交互技术营造的虚拟环境中。每日电视中插播的形形色色的广告中,不时可以欣赏到纯三维的计算机动画片断。显然,时至今日,CAD和图形学已不再是一个陌生的名词。走进书店,装帧精美的各种图形软件使用说明书琳琅满目,均称可以无师自通。要想找图形程序,C语言、C++语言的各种著作也很多,而且附有源程序光盘。在这种情况下,图形学教材应该怎样写才好?

我们认为,一本好的教材应该系统准确地讲述该学科所需的基础知识和基本概念,内容安排有较广的适应面,能满足各类专业的基本教学需要;注重实践环节,用典型算法和习题启迪读者的思维,培养其独立研究工作的能力;及时反映该学科领域的发展动向,开阔读者眼界,适应高新技术的快速发展。基于上述考虑,我们保留了原书中内容相对较稳定的基础性、原理性章节,即第三、四、七、八、九章。第九章增加了一节“有理形式的曲线曲面”,因为NURBS非均匀有理B样条已经成为CAD中产品形状数字化描述的一种通用标准表达形式。这些章节里的算法也在不断精化,新发表的程序更加精练,计算速度更快。但是我们觉得保留一些经典性的算法,介绍一些早期的原始构思并非无益。

原书的其它章节,即第一、二、五、六章都因内容有较大变化而重新写过。原书中的第十章增补了有关特征造型和参数化设计的内容。关于真实感图形的第十一章和第十二章合并为一章,着重介绍基本光照明模型和实用的真实感图形绘制技术,包括光线跟踪算法,光能辐射度方法,纹理映射技术等。鉴于计算机动画和科学计算可视化已成为计算机图形学最为成功的两大应用领

域,新版增设了第十二章和第十三章,分别介绍这两个领域所涉及的基本概念,基本算法及其最新研究动向,力求使读者对这两个分支领域有一全面的了解。

本书可作为本科生和研究生的教材,每章都附有习题。在上机练习时,较基础的内容可以在 Windows 环境下用 C 语言编程。更深入的习题可以使用 OpenGL 图形库。经过实践的检验,原来制定的计算机图形国际标准,如 GKS 和 PHIGS,并未真正得到推广,而 OpenGL 则成为当前公认的工业标准,为工业部门广泛采用。

本书的编写分工前九章未变。第一章由北京航空航天大学唐荣锡执笔,第二章由山东大学宁飞执笔,第三、四、五、六、八章由山东大学汪嘉业执笔,第七、九章由浙江大学汪国昭执笔。最后四章由浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室高曙明、鲍虎军、金小刚和陈莉分头执笔,并由彭群生修改定稿。

浙江大学彭群生、鲍虎军、金小刚于 1999 年撰写了《计算机真实感图形的算法基础》(科学出版社出版)一书,内容有:光照明模型原理、简单画面绘制、光线跟踪算法、纹理映射技术、辐射度方法、真实感图形的实时绘制技术、自然景物模拟、颜色等,共 60 多万字。内容比较系统、深入,可作为本书的后续教材或科研参考资料。

衷心感谢广大读者对本书第一版所提的种种改进建议,并希望新版能继续得到各位同行的支持和批评指正。

作者

2000 年 5 月

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 图形无所不在	1
1.2 景物的几何建模	4
1.3 场景绘制	8
1.4 人机交互界面.....	10
1.5 计算机动画.....	11
习题	12
第二章 计算机图形系统及其设备	13
2.1 计算机图形显示原理.....	13
2.1.1 CRT 显示器	13
2.1.2 光栅扫描图形显示原理	16
2.1.3 液晶显示器	17
2.1.4 显示适配器	18
2.2 计算机图形系统概述.....	23
2.2.1 微型计算机图形系统	23
2.2.2 图形工作站	25
2.2.3 虚拟现实系统	25
2.3 图形输入设备.....	26
2.3.1 光笔	26
2.3.2 图形输入板	27
2.3.3 触摸板	27
2.3.4 图形扫描仪	28
2.3.5 语音系统.....	29
2.3.6 数据手套.....	29
2.4 计算机绘图设备.....	29
2.4.1 滚筒式绘图机	29
2.4.2 平板式绘图机	30
2.4.3 喷墨式彩色绘图机与静电式绘图机	31
习题	32
第三章 生成直线和圆弧的算法	33
3.1 生成直线的 DDA 方法	33
3.2 生成直线的 Bresenham 算法.....	34
3.3 生成直线算法的进一步改进.....	36
3.4 Bresenham 生成圆弧的算法	38

3.5 绘圆弧的正负法.....	40
3.6 圆的多边形逼近法.....	42
习题	46
第四章 变 换	48
4.1 一个简单的图形软件包.....	48
4.2 三维图形的显示流程.....	50
4.3 三维几何变换.....	51
4.4 投 影.....	57
4.4.1 透视	57
4.4.2 平行投影	59
4.4.3 投影平面是任意平面的情况	59
4.5 裁 剪.....	62
4.5.1 Sutherland-Cohen 算法	63
4.5.2 中点分割算法	65
4.5.3 梁友栋-Barsky 算法	65
4.5.4 快速算法	67
4.5.5 其它图形的裁剪	69
4.5.6 三维图形的裁剪	71
4.6 窗口到视区的变换.....	72
4.7 图形显示流程的进一步说明.....	74
习题	82
第五章 层次结构	83
5.1 几何模型及其层次结构.....	83
5.2 层次结构的实现.....	84
5.3 用结构方法实现层次结构.....	86
5.4 块和嵌入.....	90
5.5 层.....	91
习题	92
第六章 交互技术	93
6.1 交互的硬件设备.....	93
6.2 基本交互任务.....	94
6.3 进一步的交互技术.....	98
6.4 输入过程基本处理模式	105
6.5 设计人机交互的一般风格及原则	107
6.6 图形标准及图形程序库 OpenGL	109
习题.....	111
第七章 光栅图形的扫描转换与区域填充.....	112
7.1 多边形的扫描转换	112
7.1.1 什么是多边形的扫描转换	112

7.1.2	逐点判断算法	113
7.1.3	扫描线算法	113
7.1.4	边缘填充算法	119
7.1.5	边界标志算法	121
7.2	区域填充	123
7.2.1	区域的表示和类型	123
7.2.2	递归算法	125
7.2.3	扫描线算法	126
7.3	多边形的扫描转换与区域填充的比较	129
7.4	光栅图形的反走样算法	130
7.4.1	光栅图形的走样现象	130
7.4.2	反走样线段	131
7.4.3	反走样多边形	132
7.4.4	提高分辨率的反走样方法	133
	习题	133
第八章	隐藏面和隐藏线的消除	134
8.1	多面体的隐藏线消除	135
8.2	曲面的隐藏线消除	140
8.3	区域子分算法	143
8.4	z 缓冲器算法和扫描线算法	145
8.5	区间扫描线算法	149
8.6	曲面的扫描线消隐算法	151
8.7	优先级表算法	152
	习题	154
第九章	曲线曲面的表示	155
9.1	Bézier 曲线曲面	155
9.1.1	Bézier 曲线	155
9.1.2	Bézier 曲线的拼接	157
9.1.3	Bézier 曲线的离散生成	159
9.1.4	Bézier 曲面	162
9.2	B 样条曲线曲面	165
9.2.1	B 样条基函数	165
9.2.2	B 样条曲线	166
9.2.3	deBoor 算法和 B 样条曲线的离散生成	168
9.2.4	B 样条曲面	171
9.3	孔斯曲面	172
9.3.1	双三次孔斯曲面	172
9.3.2	双三次孔斯曲面与双三次 Bézier 曲面的互化	173
9.4	有理形式的曲线曲面	175

9.4.1 有理 Bézier 曲线	175
9.4.2 二次有理 Bézier 曲线	176
9.4.3 有理 Bézier 曲面	177
9.4.4 有理 B 样条曲线	178
9.4.5 有理 B 样条曲面	179
9.4.6 有理形式的孔斯曲面	179
习题	180
第十章 三维实体造型	181
10.1 概述	181
10.2 体素构造表示(CSG 树表示)	182
10.2.1 三维物体的点集模型	182
10.2.2 物体间的正则集合运算	183
10.2.3 物体的 CSG 树表示	184
10.2.4 CSG 树表示的分治算法	185
10.2.5 光线投射算法	186
10.3 边界表示法	187
10.3.1 三维物体的曲面模型	187
10.3.2 物体的边界表示	187
10.3.3 Sweep 运算	190
10.3.4 欧拉运算	191
10.3.5 集合运算	194
10.3.6 局部运算	196
10.4 八叉树表示	198
10.5 基于参数化、特征的实体造型	201
10.5.1 参数化设计	201
10.5.2 基于特征的实体造型	206
习题	209
第十一章 真实感图形的基本理论与算法	211
11.1 引言	211
11.2 简单光照明模型	212
11.3 多边形表示物体的光滑明暗处理	217
11.4 阴影生成	220
11.4.1 影域多边形方法	221
11.4.2 曲面细节多边形方法	222
11.4.3 ϵ 缓冲器方法	223
11.4.4 光线跟踪方法	223
11.5 整体光照明模型	224
11.5.1 透射光亮度的简单模拟	224
11.5.2 Whitted 光照明模型	225

11.6	光线跟踪技术的基本原理	226
11.7	加速光线跟踪算法	229
11.8	物体表面细节的模拟	236
11.8.1	二维纹理映射原理	236
11.8.2	Catmull 纹理映射算法	240
11.8.3	纹理映射中的快速反走样技术	242
11.8.4	环境映照技术	248
11.8.5	三维纹理映射技术	249
11.8.6	几何纹理映射技术	249
11.9	图形反走样技术	251
11.9.1	A 缓冲器方法	252
11.9.2	复杂阴影生成的反走样技术	254
11.9.3	光线跟踪的图形反走样技术	257
11.10	辐射度方法	258
11.10.1	理想漫射环境的辐射度方程	259
11.10.2	形状因子	262
11.10.3	半立方体(hemi-cube)算法	263
11.10.4	辐射度方程的求解技术	268
11.10.5	辐射度方法的前后置处理	272
11.10.6	子结构技术	275
	习题	277
第十二章	计算机动画	278
12.1	计算机动画的发展历史和应用	279
12.2	商业动画软件简介	282
12.2.1	Alias Wavefront 动画软件	283
12.2.2	Maya 动画软件	285
12.2.3	Softimage 动画软件	286
12.3	低层运动控制方法	287
12.3.1	参数关键帧技术	288
12.3.2	样条驱动动画技术	288
12.3.3	物体朝向的欧拉角表示和插值技术	289
12.3.4	物体朝向的四元数表示和插值技术	289
12.4	Morphing 和空间变形动画技术	292
12.4.1	二维多边形形状渐变	292
12.4.2	二维图像 morphing 技术	293
12.4.3	三维 morphing 技术	298
12.4.4	整体和局部变形方法	300
12.4.5	自由变形方法 FFD 及其变种	300
12.4.6	其它变形方法	303

12.4.7 元球的造型和动画技术	304
12.5 过程动画技术	305
12.5.1 粒子系统	305
12.5.2 群体动画	307
12.5.3 布料动画	307
12.5.4 水波动画	308
12.6 关节动画与脸部表情动画技术	308
12.6.1 关节链结构的基本概念	309
12.6.2 关节链结构表示	309
12.6.3 关节链结构的运动求解技术	310
12.6.4 复杂骨架的层次构造及其运动控制	310
12.6.5 两足行走模型	312
12.6.6 骨架驱动的肌肉模型	313
12.6.7 脸部表情动画	315
12.7 基于物理的动画技术	316
12.7.1 刚体运动模拟	317
12.7.2 塑性物体变形运动	318
12.7.3 流体运动模拟	319
12.7.4 其它动力学模型	319
习题	319
第十三章 科学计算可视化	321
13.1 引言	321
13.1.1 科学计算可视化出现的背景、意义及与计算机图形学的关系	321
13.1.2 科学计算可视化的基本步骤	322
13.1.3 科学计算可视化的应用	322
13.2 可视化数据的基本表示	324
13.2.1 可视化数据的基本特征	324
13.2.2 可视化数据表示的设计策略	324
13.2.3 数据集的类型	325
13.3 面绘制方法	329
13.3.1 基于等值线的生成方法	329
13.3.2 基于体素(voxel)的生成方法	332
13.3.3 基于能量函数的封闭等值面生成方法	335
13.4 体绘制方法	335
13.4.1 体绘制方法出现的背景	335
13.4.2 体光照模型	335
13.4.3 以图像空间为序的体绘制方法	336
13.4.4 以物体空间为序的体绘制方法	337

13.4.5 其它的体绘制方法	340
13.4.6 面绘制和体绘制相结合的方法	341
13.5 矢量场和张量场的可视化	341
13.5.1 三维矢量场可视化的研究内容及难点	341
13.5.2 基于几何形状的矢量场映射方法	341
13.5.3 基于颜色、光学系统的矢量场映射方法	344
13.5.4 基于纹理的矢量场映射方法	346
13.5.5 特征可视化	348
13.5.6 张量场的可视化	350
13.6 免费可视化软件 VTK 简介	352
习题	352
参考文献	353

第一章 绪 论

1.1 图形无所不在

人认识自然,首先是靠眼睛观察事物的外表形象,至于语言、符号、文字,都是在此以后经过千、万年的进化才逐渐形成的。人脑与计算机的明显差异之一就在于人脑擅长形象思维,而计算机则擅长逻辑思维。成人的大脑有 10^{11} 个神经元,神经元之间的连接达到 $10^{12} \sim 10^{13}$ 对,大脑皮层的总面积约为 2500cm^2 。几个月的婴儿自己会辨认妈妈,但要学会做 $1+1=2$ 的算术题,则是好几年以后的事了。计算机则相反,一台微机可以轻而易举地在一秒钟内完成上亿次数字运算,而要想让它自己去观察、识别书桌上摆放的铅笔、橡皮、眼镜盒,至今还显得无比笨拙、幼稚。

计算机图形学是研究怎样用数字计算机生成、处理和显示图形的一门学科,它的发展、成长、普及同样要滞后于计算机自身的发展很多年。早期与计算机配用的图形显示器采用阴极射线管原理,利用两对偏转电极或电磁偏转线圈来控制电子束打在荧光屏上的落点位置,在屏幕上绘出闪亮的线条。由于屏幕荧光质的余辉时间短,电子束必须不断重复扫描图形,才能保持屏幕上的画面稳定,因此它被称作随机扫描刷新式显示器。国外在一段时间里还流行过存储管显示器,它的特点是在阴极射线管的荧光屏前增设一个细密的金属网栅,其上涂有绝缘介质材料。电子束的扫描成像轨迹被保留在这一网栅上,形成相对持久的正电荷画面。这些正电荷不断吸引负电子冲击荧光屏,使屏幕上显示的图形得以保存较长时间。这类显示器不再需要反复刷新画面,从而降低了造价,因此在低档的图形终端配置中得到较广泛的应用。

大约在 1980 年前后,诞生了真正在广大用户中得到普及应用的光栅扫描式显示器。它采用成熟的彩色电视机技术,用三个电子束同步逐行扫描荧光屏上整齐排列的红、绿、蓝三基色点簇。一条电子束对准一种基色,一个点簇称作一个像素。一幅画面可以由 640×480 , 1024×800 , 1280×1024 不等的像素构成。将需要显示的图形点阵分解成红、绿、蓝三基色,并将各像素所对应的色彩编码值存储在帧缓存器内,用以控制扫描电子束每一瞬间的激励强度,这样就在屏幕上产生一幅绚丽多彩的图像。

图形终端从随机扫描转向光栅扫描是发展历程中一次质的飞跃,有力促进了计算机图形学的繁荣和普及。随机扫描要求电子束在屏幕上随意绘制直线或曲线,需要将线条的连续轨迹从数字量转换成模拟量来控制电子束的运动。它只能绘制线框图,而且控制系统相对更复杂,造价更高。

在光栅扫描状态下,则要求电子束在屏幕上做规则的逐行扫描往复运动,计算机将显示对象的连续数学模型加以离散,逐点计算每一像素中可见点的颜色和光亮度,实现景物的明暗渲染,产生出足以以假乱真的高度真实感图像。光栅扫描器的硬件器件,很多方面与大量生产的彩色电视机兼容,再加上微机性能迅速提高和出现了低价位普及型 CAD 及图形软件,使得计算机图形技术最终摆脱了只有少数人涉足的局限性,进入了大普及、

大发展的广阔天地。在绘图技术中,以抬笔、落笔和画线为标志的笔式绘图机也因出图慢、笔的寿命短、墨水容易堵塞而最终为喷墨和激光绘图机所取代,同样经历了从随机矢量式转向点阵扫描式的发展道路。

点阵图像在计算机图形输入、输出中得到普遍应用,促使计算机图形学与图像处理两个学科分支间的联系变得更加紧密。前面已经提到,计算机图形学的任务是用计算机从无到有生成景物的数字模型,并将它显示在计算机屏幕上,或者绘制成纸张或胶片上的图形。因此,它所研究的主要对象是景物的几何建模方法(modeling),数字模型的绘制技术(rendering),图形输入和控制的人机交互界面(user interface),以及计算机动画(animation)。图像处理则是用摄像机或扫描仪等观测手段将客观世界中原来存在的景物摄制成数字化图像,对图像进行处理和分析,理解图像的内涵,进而从图像中提取所关注的景物的二维或三维几何模型。从某种意义上说,图像处理是计算机图形学的一个逆过程,它可应用于微小细胞的显微观测,用合成孔径干涉成像雷达测绘地球表面的三维地形图;用卫星遥感技术估产农作物收成;用CT或核磁共振成像检查人体病理……。它所研究的内容有图像增强、边缘提取、图像分割、图像压缩、纹理分析、图像序列分析、形状特征提取、模式识别、机器人视觉、三维形体重建等。数字化信息时代的到来,使计算机互联网与电视网、电话网合一,多媒体技术应用日益深入,计算机图形与图像技术的相互渗透、紧密结合则是确凿无疑的一种发展潮流。

以公路建设的勘察、设计、施工、运营全生命周期为例,当工程立项后,首先要通过航空摄影、GPS卫星测量、野外测量和地质勘察,获取整个地区的地理、人文环境信息,建立地形地貌的三维数字模型,进行线路的优化规划,然后进一步细化设计,确定公路的平面线形,设计线路的纵断面和横断面,计算施工中挖掘和填充的土石方工程量,构建沿线的涵洞、桥梁和隧道,规划线路的立体交叉点。一些先进的公路设计软件还可以作待建公路的行车驾驶仿真和桥梁等重要构筑物的景观模拟,即将公路和桥梁的三维CAD模型融合进沿线的自然、社会环境照片中,实现图形和图像的叠加。

计算机图形学的应用无所不在。其中涉及面最广、数据量最大的一种应用,可能要算“数字地球”。1998年1月31日美国副总统戈尔在洛杉矶市加利福尼亚科学中心召开的地理信息系统年会上提出了这一思想。这是指以地球坐标为依据,全方位采集和应用地球表层各种综合信息的宏伟计划。设想若干年后,一位小学生可以来到当地的一家博物馆,戴上带有立体视觉的头盔显示镜,遥望漂浮在浩瀚星空中的数字地球。通过数据手套的指引,地球越来越近,呈现出海洋、大陆、国家、城市、街道和建筑……。她好像正坐在魔毯上漫游世界,可以随时停留下来,驻足观望,通过语音系统了解当地的风土人情、名胜古迹、资源分布……。她可以逐个访问埃及金字塔、巴黎卢浮宫、西安兵马俑、北京紫禁城,并且走进故宫博物馆,尽情欣赏里面收藏的奇珍异宝。“数字地球”作为地理信息系统的一个发展,可以在国土资源规划、水资源和环境保护、自然灾害预防、城市规划、管网管理、社区管理以及城市灾害、紧急事务动态管理等方面发挥巨大的作用,是世界各国可持续发展的必然依托,是新的经济建设增长点,是科学技术、经济、政治、社会、历史发展的必然产物。

计算机图形学是计算机辅助设计、制造(CAD/CAM)技术的基础学科之一。这是因为CAD系统的中心任务就是让设计人员用最简单、方便的操作来生成产品几何形状的精确

数字定义并且实时显示其真实感图形；而 CAM 系统的任务则是根据产品的数字化几何定义确定零件的制造和装配工艺过程、计算数控加工的走刀轨迹、制定产品的质量保证金计划等。在传统生产方式下，产品的制造依据是图纸和技术规范。二维工程图通过投影、剖视来表示三维复杂形状很不方便、直观。对于飞机、汽车、船舰等的流线外形，还必须按 1:1 的比例在特制的地板或铝板上精确绘制出机体全身的纵剖面线和横剖面线，称作模线，再通过样板、主模型、标准样件等标准工艺装备将零、部件的外形和结构传递给生产车间。这种以实物为依据来协调产品零、部件间的外形和结构配合关系的生产组织方式具有很多缺点：生产准备周期长，费用高，协调精度低，产品设计更改的柔性小，生产过程的劳动率低，而且模线、样板、标准样件占用了大量车间和库房面积，这些笨重的标准工装搬运和使用起来都很费力。

美国波音公司在 1990 年 10 月开始启动新一代大型客机波音 777 的全新设计，全部设计工作在计算机图形终端和图形工作站上展开，在全世界范围内首次实现了“无纸设计”。三年半后，1994 年 4 月 9 日第一架 B-777 推出总装厂房；再过一年，777 就以批生产的速度，一架接一架交付客户，直接投入航线飞行。整个设计、生产、试飞周期共 4 年半，耗资 50 亿美元，技术上一次成功，生产规模一步到位，这对于一架新一代大型客机的创新开发，不能不说是飞机设计史上的一次深刻革命。对比另一个数字，美国克莱斯勒公司在此之前研制新型“彩虹”(Neon)轿车，共用了 3 年时间，耗资 10 亿美元，这在当时已经达到了汽车行业的领先水平。大型客机的研制难度要远远超过轿车，难怪波音公司的新创举在全球范围内掀起了广大制造业和工程建设业的业务重组新高潮，并竞相采用产品的数字化设计、制造、施工、管理一体化技术来建立现代企业的新运行机制。

波音的设计革命得以获得成功，首先要归功于以计算机图形学为核心的 CAD 产品三维建模和绘制技术。利用存储在计算机里的清晰、直观、准确的产品几何模型可以及早进行复杂部件的数字预装配，在正式出图前就排除掉各部分结构和尺寸的不协调。可以将三维人体的数字模型放进机舱里，检查驾驶员的操作环境和设备装拆、维修的开敞性；可以将产品模型预先给所有开发小组成员浏览，以便及早备料、优选加工方案、订制工艺装备、估算成本，这样可以一面并行开展生产准备工作，一面对产品设计方案提出合理化改进建议。在全球化经济形势下，基于产品的数字化模型通过网络通信实现跨国合作已是一种新的常规。产品的数字化精确模型还推动了数控加工、数控测量技术的广泛应用。传统的模线、样板、主模型、标准样件等协调工具现在可以全部省略不用。只要产品的数字化几何模型本身是精确、协调的，现代数控技术就足以保证加工出的零件和装配成的部件也是精确、协调的。777 第一架飞机装配时，机身蒙皮就与隔框贴合良好，铆接时不再需要用垫片来消除缝隙。机身对接中，从机头到机尾的 63 米长度内，机身轴线的准直误差只有 0.6mm，即小于阳光照射机身一侧时所产生的热胀变形。存储在计算机里的全机三维几何模型还可以直接用在飞机的使用说明、维修手册和备件供应手册中，不再需要聘请大量美工师成年累月地操劳，将原来的二维工程图改画成三维立体图。1993 年时波音公司印刷 757 飞机的维护、修理手册，加上图纸、资料等摞起来有 16,320 米高，超过了 B747 飞机的巡航高度 13,716m。现在改用光盘和联网检索，要想查询飞机结构和维修细节就变得轻而易举了。以上这些实例足以说明用 CAD/计算机图形学高技术来改造传统产业，实现设计、制造、施工、管理一体化，是当前国际竞争中摆在我们面前的无比紧迫的历史重任。