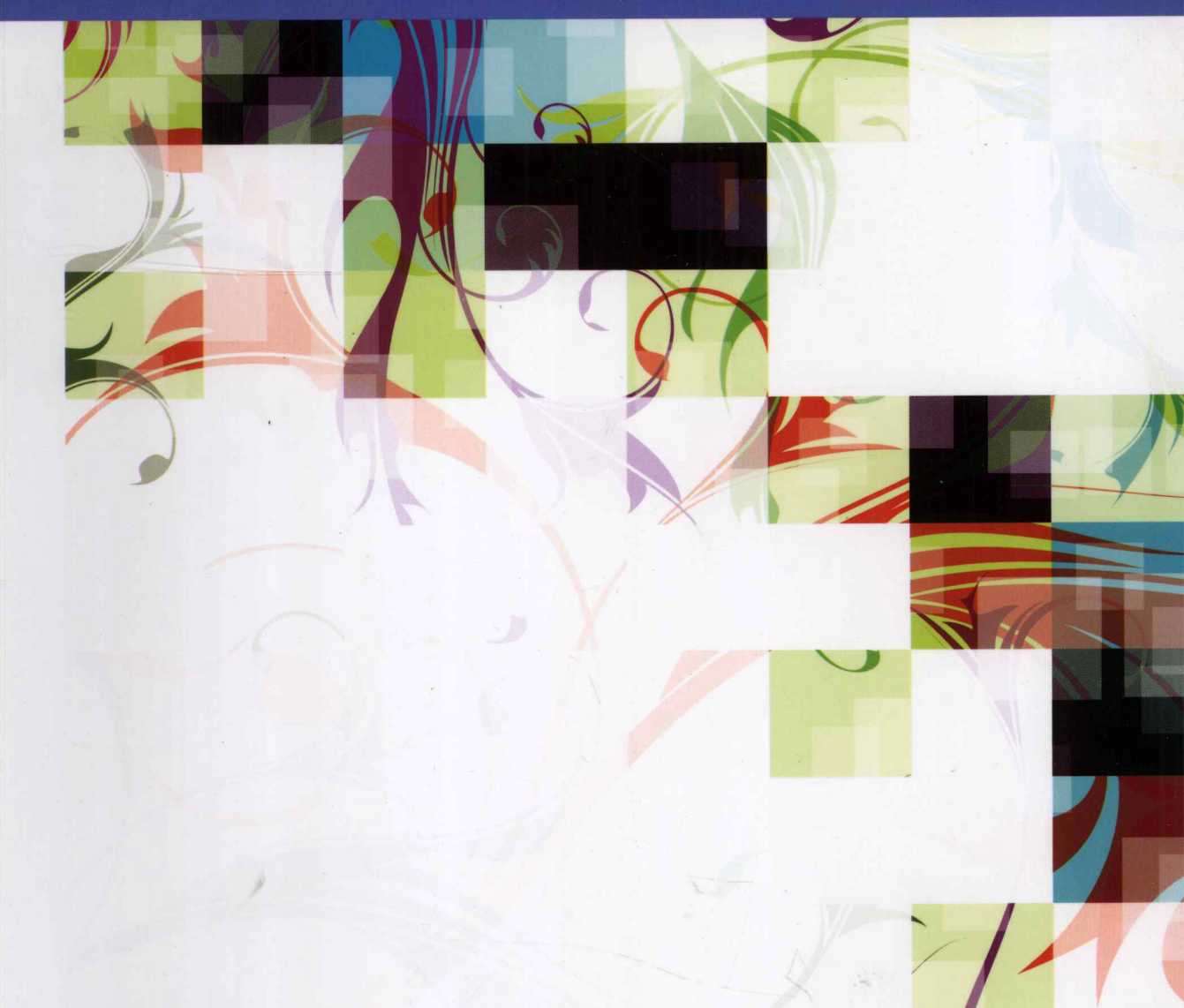




新编计算机图形学

张一 段延娥 杨焱 刘莹莹 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

新编计算机图形学

张 一 段延娥 杨 焱 刘莹莹 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书以图形流水线为主线,系统地介绍了计算机图形学的基础知识和基本方法。注重计算机图形学的原理与技术、图形硬件与软件相结合,不但涉及计算机图形学的经典内容,而且紧密联系计算机图形学的发展趋势,使本书的内容具有新颖性和适应性,为读者清楚地展现了计算机图形学领域的概貌。

本书既适合作为计算机科学与技术等相关专业的本科生、研究生的教材和参考书,又可供从事计算机图形学领域研发工作的专业技术人员使用。

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

新编计算机图形学 / 张一等编著. —北京: 电子工业出版社, 2013.1
ISBN 978-7-121-19370-5

I. ①新… II. ①张… III. ①计算机图形学—高等学校—教材 IV. ①TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 311938 号

责任编辑: 董亚峰 特约编辑: 王 纲

印 刷: 北京天宇星印刷厂

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

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: 18 字数: 468 千字 彩插: 2

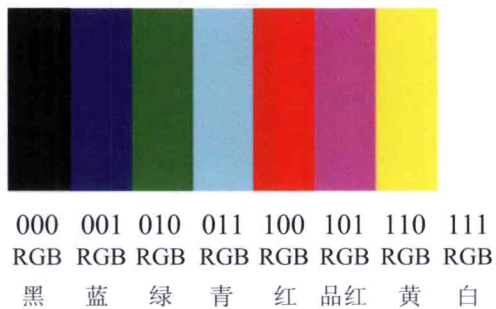
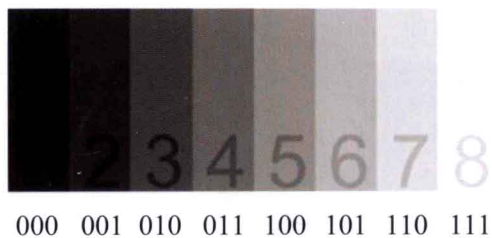
印 次: 2013 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 38.00 元

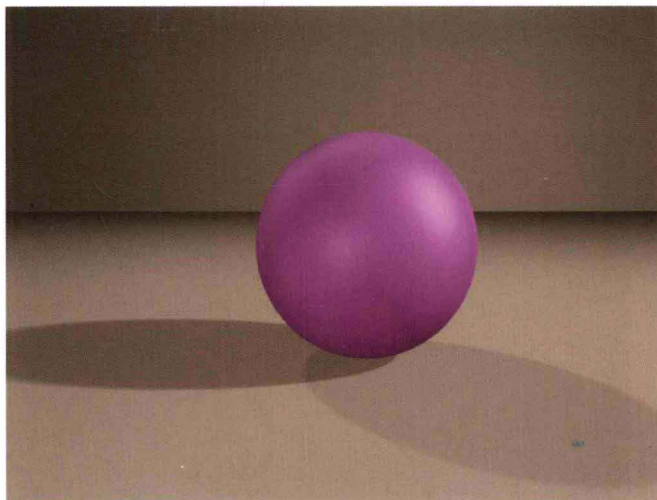
凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。



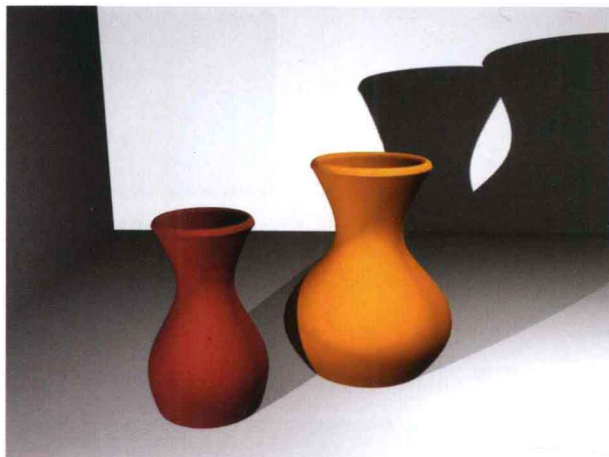
彩图 I (图 2.15 灰度表示与彩色表示)



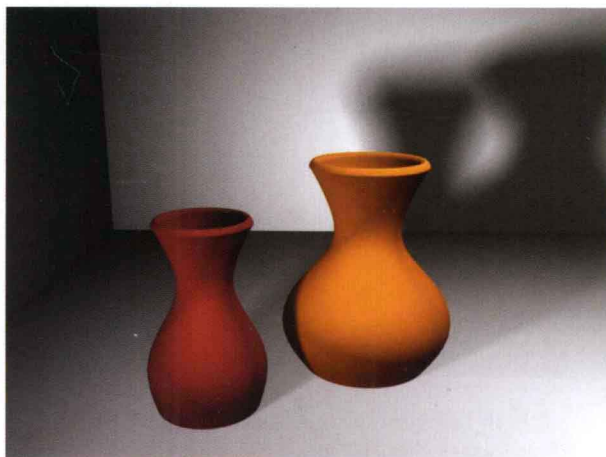
彩图 II (图 9.16 (a) Gouraud 明暗处理效果)



彩图 III (图 9.16 (b) Phong 明暗处理效果)

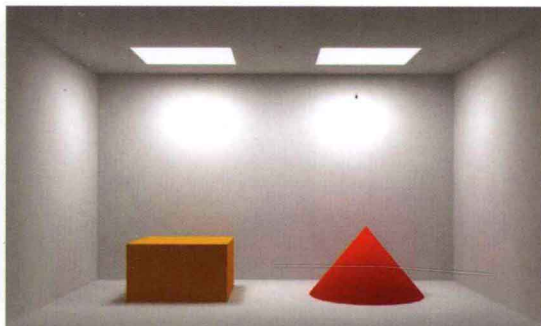
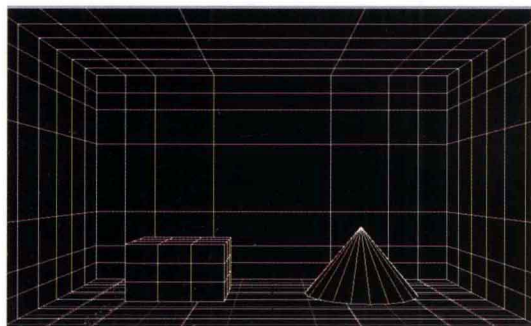


(a) 一个小的光源产生的硬（边缘）阴影



(b) 一个较大的光源产生的软阴影

彩图IV（图 9.22 硬阴影与软阴影）



彩图V（图 11.9 采用辐射度方法绘制场景的一个例子）

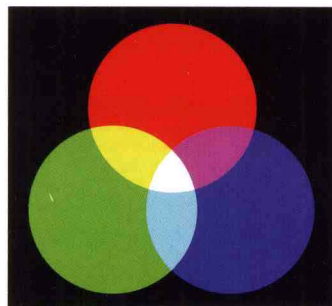
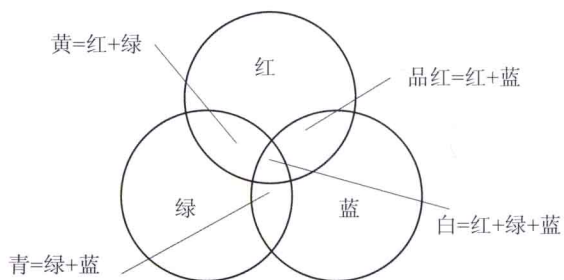


彩图VI (图 12.16 凹凸纹理的效果图)

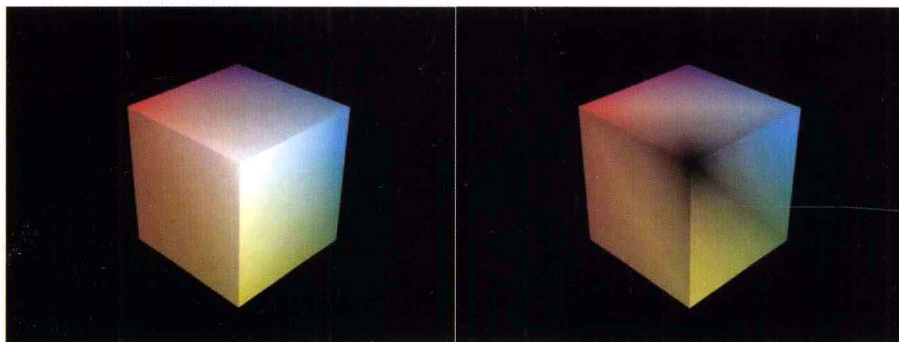


一个墙面纹理和一个光源纹理合成得到一个光照墙面

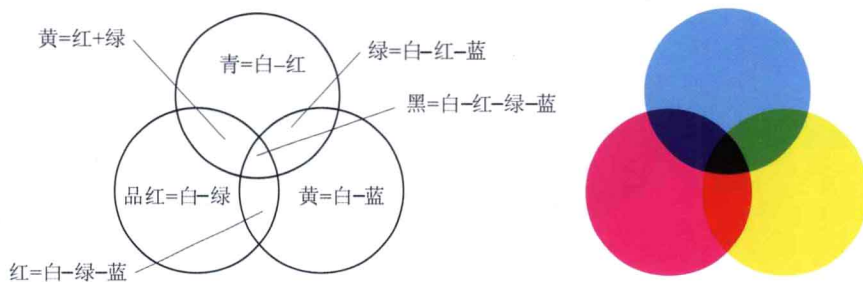
彩图VII (图 12.18 多重纹理合成)



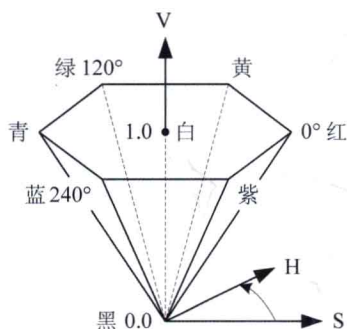
彩图VIII (图 13.3 RGB 三原色的迭加效果)



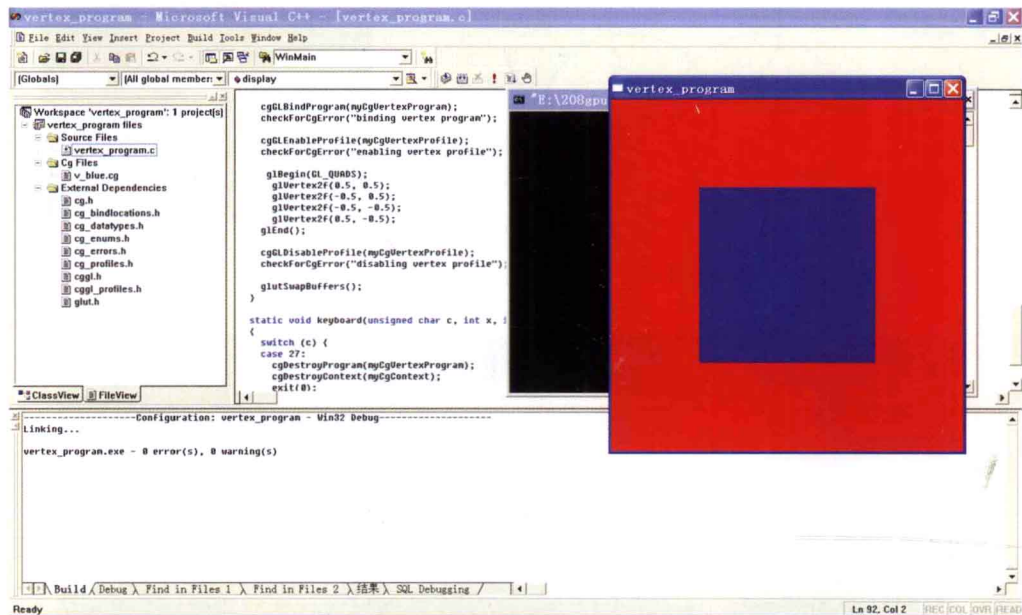
彩图IX (图 13.5 RGB (左) 和 CMY (右) 颜色模型立方体)



彩图 X (图 13.6 CMY 三原色的减色效果)



彩图 XI (图 13.7 HSV 颜色模型)



彩图 XII (图 A.1 C/OpenGL/Cg 程序示例的运行结果)

前 言

本书系统介绍计算机图形学的基础知识和方法，是我们为计算机科学与技术等相关专业的高年级本科生、研究生以及对计算机图形学感兴趣的读者而编写的教材。

近年来，随着数字技术的飞速发展，计算机图形技术在世界范围内得到了普遍重视，图形学成为计算机科学与技术中最为活跃的领域之一。相关研究成果被广泛应用于各行各业，如影视动画制作、视频游戏、地理信息系统、医学图像处理、计算机辅助设计与制造、仿真、人机工程、信息与知识可视化、教育培训、艺术创作、广告与传播媒体等。

美国、日本及欧洲一些发达国家和地区，借助其世界领先的计算机图形学技术推动着相关软件与硬件的发展，为影视、动漫、游戏、设计等文化创意提供了强有力的技术支持，形成了庞大的 CG 相关产业。这些产业每年能够带来成百上千亿的经济利润，同时也深刻影响着这些国家的经济和文化的發展。

为了写好本书，我们进行了一些新的尝试，打破了传统教程的模式，努力使本书既具有普通教材的系统性和讲述形式，又具有学术专著的研究、探讨式风格。

我们始终坚持“授人以鱼，不如授之以渔”的理念，努力遵循清晰、精练，突出基本原理、概念及算法思想的指导原则。我们不以过多的篇幅讨论计算机辅助几何设计，而将重点放在真实感图形合成与实时绘制这两大内容上面，着力避免内容陈旧、表述枯燥、版面单调、理论与应用脱节等弊端，突出计算机图形学内容丰富多彩、应用广泛、引人入胜的特点，使读者在阅读本书的过程中对计算机图形学原理与应用产生浓厚的兴趣，乐于学习，从而打牢基础，明确努力方向，能够更加深入地学习、掌握和应用计算机图形学理论与技术。

在本书编写大纲的制定过程中，我们一方面进行了比较广泛的人才市场需求调研和分析，充分考虑到国内外本领域的发展现状和当前国内人员从业的一些实际情况；另一方面借鉴了 ACM SIGGRAPH Education Committee 的 Computer Graphics Curriculum Knowledge Base Working Group 编写的 Curriculum Knowledge Base Report (CKB 报告)，参考了 ACM 出版的 Computer Graphics Career Handbook 和 SYBEX Inc. 出版的 Getting a Job in CG: Real Advice from Reel People，以及 VGM Professional Careers Series 中的 Careers in Computers 等资料，参阅了 ACM/IEEE Computing Curricula 的相关文档和教育部高等学校计算机科学与技术专业教学指导委员会的相关文档。

本书首先引入计算机图形学的基本要素与图形流水线的概念，并以图形流水线作为中心线索，深入浅出地进行计算机图形学知识的系统讲解。另外还专列一章简要讨论对自然景物的模拟技术，特别介绍了模拟植物形态与生长的 L 系统和粒子系统等图形学内容。

书后列出了本书所引用的主要文献的出处。计算机图形学领域的文献可谓汗牛充栋。在学习、研究和讲授计算机图形学的实践中，我们花费很大气力收集到了大量的文献资料。在本书附录 B 中择要列出了这些文献资料的题录，目的是帮助读者进一步深入学习和应用计算

机图形技术。附录 B 中列出的主要是国外一些优秀的本科、研究生层次的教程和专业参考书；还有部分是计算机图形学领域的学术与技术专著，有相当的深度和一定的难度；除参考书目外，也列出了本领域极少数里程碑性质的研究论文题录，以及与计算机图形学有关的重要的国际会议、期刊和若干常用的网址等。

为了帮助对计算机图形学感兴趣且想要进一步研修的读者，我们还特意编写了附录 C，建议在计算机图形学领域研修的一组核心课程，并推荐了相应的参考书，希望对读者有用。

本书是以我们 2007 年编印的一份校内讲义为蓝本修改补充而成的。该讲义曾经由五届学生试用。

在本书原始讲义的资料整理、编写、排版、校样打印以及装订过程中，得到了计算机与信息工程学院实验中心唐剑、郭静卫、徐淑艳三位老师的鼎力相助，深表谢意。

我校计算机与信息工程学院王玉洁教授对原始讲义的印制给予了大力支持；计算机与信息工程学院院长徐践博士对原始讲义的印制及本书的编写与出版给予了热情关注和有力的支持，最终使讲义和本书得以付梓，特表示感谢。

杨全月和兰彬两位老师担任本书副主编，牛芴洁、郭成魁和唐剑三位老师也参与了本书的编写工作，在此向他们表示感谢。

还要感谢电子工业出版社的董亚峰编辑，他对本书的出版自始至终给予了很大的帮助。

在计算机图形学的研究以及本书的编写实践中，我们深感计算机图形学博大精深，计算机图形技术复杂而多样，显然不是一个由少数几位编写者就可以完全掌握的领域。对于本书的编写，我们始终抱着十分严肃和认真的态度，具体工作确实是非常艰巨的。尽管已经竭尽所能，但由于出版时间紧迫，加之我们的水平和学识有限，疏漏与谬误在所难免，恳请读者不吝赐教，以便改正。我们的联系方式为 zhangyi_bac@163.com。

编 者

2012 年

目 录

第1章 绪论	1
1.1 计算机图形学简史	1
1.2 计算机图形学的概念	3
1.3 计算机图形学的研究内容	5
1.4 计算机图形学的应用领域	6
1.5 小结	7
本章推荐阅读	7
第2章 计算机图形学的构成要素与图形流水线	9
2.1 建模	9
2.2 变换与投影	11
2.3 绘制	12
2.4 显示	12
2.5 图形流水线	13
2.6 数字图像的表达	15
2.7 小结	16
本章推荐阅读	17
第3章 三维景物建模	18
3.1 边界表示	18
3.1.1 多边形表示	18
3.1.2 翼边数据结构	19
3.2 构造实体几何表示	20
3.2.1 图元	20
3.2.2 集合运算	20
3.3 体素表示	22
3.4 八叉树表示	22
3.5 元球表示	23
3.6 扫描表示	24

本章推荐阅读	24
第4章 曲线和曲面的表示	25
4.1 曲线与曲面的参数表示	25
4.2 曲线生成	27
4.2.1 曲线段的一般形式	27
4.2.2 Bézier 曲线生成	27
4.2.3 B 样条曲线生成	29
4.2.4 非均匀有理 B 样条曲线生成	30
4.3 曲面生成	31
4.3.1 曲面片的一般形式	31
4.3.2 Bézier 曲面生成	31
4.3.3 B 样条曲面生成	33
4.3.4 非均匀有理 B 样条曲面生成	33
4.3.5 特殊曲面生成	34
4.4 曲线、曲面的拼接与细分	34
本章推荐阅读	37
第5章 图形变换	38
5.1 几何变换的分类	38
5.2 二维图形几何变换	39
5.2.1 基本变换	39
5.2.2 变换矩阵	42
5.2.3 复合变换	43
5.3 三维坐标系	43
5.4 三维图形几何变换	44
5.4.1 平移	45
5.4.2 旋转	45
5.4.3 缩放	52
5.4.4 切变	53
5.5 参数图形的几何变换	53
5.6 关于坐标变换的说明	54
本章推荐阅读	55

第 6 章 观察与投影	56
6.1 图形学坐标系统	56
6.2 规格化变换与设备坐标变换	60
6.2.1 规格化变换	60
6.2.2 窗口操作	61
6.3 投影	62
6.3.1 投影的基本概念	62
6.3.2 平行投影	63
6.3.3 透视投影	65
本章推荐阅读	68
第 7 章 光栅算法	69
7.1 光栅化	69
7.2 直线的生成算法	69
7.2.1 直线的 DDA 生成算法	70
7.2.2 直线的 Bresenham 生成算法	71
7.3 圆的生成算法	74
7.3.1 直接算法	74
7.3.2 圆的 Bresenham 生成算法	75
7.4 区域填色算法	77
7.4.1 扫描线填色算法	78
7.4.2 种子填色算法	81
7.5 图形裁剪	82
7.5.1 直线的裁剪	83
7.5.2 多边形的裁剪	84
7.5.3 其他图形的裁剪	85
7.5.4 三维裁剪	85
本章推荐阅读	87
第 8 章 可见性计算	88
8.1 背向面剔除	89
8.2 深度缓存算法	90
8.3 扫描线深度缓存算法	91
8.4 二叉空间剖分算法	92

本章推荐阅读	96
第9章 计算机真实感图形绘制技术 I ——表面明暗处理	98
9.1 光源特性和景物表面光学特性	98
9.2 简单光照原理与模型	100
9.3 明暗的平滑处理	104
9.4 阴影生成	107
9.4.1 阴影的基本概念	107
9.4.2 阴影生成算法	109
9.5 全局光照原理与模型	110
本章推荐阅读	114
第10章 计算机真实感图形绘制技术 II ——光线追踪与光子映射	115
10.1 光线追踪的基本原理与性质	115
10.2 光线与景物的求交问题	118
10.3 光线追踪方法中的场景树结构	121
10.4 光子映射	123
10.4.1 光子映射的概念	124
10.4.2 光子映射方法的原理	124
本章推荐阅读	127
第11章 计算机真实感图形绘制技术 III ——辐射度方法	128
11.1 辐射度方程	128
11.2 形状因子	130
11.3 半立方体算法	131
11.4 辐射度方程求解技术	132
本章推荐阅读	136
第12章 计算机真实感图形绘制技术 IV ——纹理映射	137
12.1 二维纹理映射	138
12.1.1 表面图案映射	139
12.1.2 Catmull 纹理映射方法	139
12.1.3 两步纹理映射技术	140
12.1.4 环境映射技术	142
12.1.5 反走样与纹理映射	145

12.2 二维几何纹理映射	147
12.3 透明与不透明	149
12.4 多重纹理与像素着色	150
12.5 纹理映射中的透视问题	151
12.6 三维纹理映射	151
12.7 过程纹理映射	152
12.7.1 木材纹理函数	153
12.7.2 三维噪声函数	154
12.8 小结	156
本章推荐阅读	157
第 13 章 关于颜色的讨论	158
13.1 颜色的基本概念	158
13.2 CIE 色度图	159
13.3 几种常用的颜色模型	161
本章推荐阅读	163
第 14 章 图形标准与图形 API	164
14.1 图形标准	165
14.2 OpenGL	165
14.3 Direct3D	168
14.4 Java 3D	170
本章推荐阅读	173
第 15 章 图形硬件——GPU	174
15.1 图形硬件的演进	174
15.2 GPU 的工作原理与特点	177
15.3 着色语言与 GPU 编程	180
15.4 小结与展望	184
本章推荐阅读	185
第 16 章 自然景物模拟	186
16.1 分形图形	187
16.2 L 系统	188
16.3 粒子系统	193
本章推荐阅读	196

第 17 章 计算机动画原理	197
17.1 动画原理及制作流程	197
17.1.1 动画原理	197
17.1.2 动画制作流程	198
17.2 计算机动画的应用	198
17.3 计算机动画的主要技术	200
17.3.1 关键帧动画技术	201
17.3.2 Morphing 和空间变形动画技术	203
17.3.3 运动捕捉技术	208
17.3.4 关节链动画和人体动画技术	209
17.3.5 其他动画技术	211
本章推荐阅读	214
第 18 章 高级论题	215
18.1 细节层次技术	215
18.1.1 LOD 模型及其生成算法	216
18.1.2 LOD 模型的切换策略	218
18.1.3 LOD 模型选取的度量技术	221
18.2 基于图像的绘制技术	223
18.2.1 绘制技术谱系	223
18.2.2 几种基于图像的绘制技术的实现方法	223
18.3 体绘制与可视化	226
18.4 基于点的建模与绘制	229
18.4.1 点绘制技术原理	230
18.4.2 两种基本的点绘制技术	231
18.4.3 多边形面片、三角面片和点表示的比较	236
18.4.4 基于点的绘制技术小结	238
本章推荐阅读	238
附录 A 一个简单的 C/OpenGL/Cg 程序示例	239
附录 B 推荐阅读的部分书目、文献题录以及会议、期刊、网址等	243
附录 C 进一步学习计算机图形学	260
参考文献	264
索引	271

第1章 绪论

经过半个世纪的发展，计算机图形学已成为计算机科学中最为活跃的分支之一。它利用计算机来研究图形的表示、生成、处理与显示，是一门建立在计算机科学、数学、物理、心理学及美学等学科基础上的综合学科，并在许多领域得到了广泛的应用。本章简要介绍计算机图形学的发展历史、研究内容、主要应用领域。目的是让读者在深入系统学习之前对计算机图形学的相关内容有大致的了解。

1.1 计算机图形学简史

计算机图形学起源于麻省理工学院（MIT）。

1950年，第一台图形显示器作为美国麻省理工学院旋风 I 号（Whirlwind I）计算机的附件而诞生。该显示器用一个类似于示波器的阴极射线管（CRT）来显示一些简单的图形。虽然发明了晶体管和 FORTRAN 语言，但几乎整个 20 世纪 50 年代，实用的只有电子管计算机，并采用机器语言编程，主要应用于科学计算领域。为这些计算机配置的图形设备仅具有输出功能，计算机图形学尚处于孕育时期。20 世纪 50 年代在美国军方的资助下，MIT 的林肯实验室联合 IBM 公司在 AN/FSQ-7 计算机上开发半自动空中防御系统（Semi-automatic Ground Environment, SAGE），其中使用了 9 英寸和 15 英寸的 CRT 显示器，操作者可以用光枪在屏幕上指示被确定的目标。与此同时，IBM 也将该技术陆续应用于计算机产品设计和生产。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 发表了题为“Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communication System”的博士论文。论文中首次使用了计算机图形学“Computer Graphics”这个术语，并为一台定制的林肯 TX-2 计算机研制成功第一台光笔交互式图形显示器。该论文所提出的革命性的图形用户接口（Graphical User Interface, GUI）验证了现代 UI 设计的许多核心原理，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。该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广为应用。

计算机图形学与计算机辅助几何设计（Computer Aided Geometric Design, CAGD）有着很深的渊源。大约在 1962 年前后，法国雷诺汽车公司的工程师 Pierre Bézier 开发了一套被后

人称为 Bézier 曲线、曲面的理论，成功地用于几何外形设计，并开发了用于汽车外形设计的 UNISURF 系统。1964 年 MIT 的教授 Steven A. Coons 提出了被后人称为超限插值的新思想，通过插值 4 条任意的边界曲线来构造曲面，用小块曲面片组合表示自由型曲面时使曲面片边界上达到任意阶连续的理论方法。此方法得到工业界和学术界的极大推崇，被称为 Coons 曲面。Bézier 方法和 Coons 方法是 CAGD 最早的开创性工作。Steven A. Coons 和 Pierre Bézier 被称为现代计算机辅助几何设计技术的奠基人。值得一提的是，计算机图形学界的最高奖是以 Steven A. Coons 的名字命名的，而获得第一届（1983）和第二届（1985）Steven A. Coons 奖的正是 Ivan E. Sutherland 和 Pierre Bézier。

20 世纪 70 年代是计算机图形学发展过程中一个重要的历史时期。由于光栅显示器的发明，在 20 世纪 60 年代就已萌芽的光栅图形学算法，迅速发展起来。区域填充、裁剪、消隐等基本图形学概念及相应算法纷纷诞生，图形学进入了第一个兴盛时期，并开始出现实用的计算机辅助设计（Computer Aided Design, CAD）图形系统。在此期间，由于通用的、与设备无关的图形软件的发展，图形软件的标准化问题也被提了出来，先后制定了 Core Graphics System、CGI、CGM、GKS、PHIGS 等标准。

20 世纪 70 年代计算机图形学领域的两个重要进展是真实感图形学和实体建模技术的产生。1970 年，Bouknight 提出了第一个光反射模型。1971 年 Gourand 提出“漫反射模型+插值”的思想，被称为 Gourand 明暗处理。1975 年 Phong 提出了著名的简单光照模型——Phong 模型。这些可以算是真实感图形学最早的开创性工作。另外，从 1973 年开始，相继出现了英国剑桥大学 CAD 小组的 Build 系统、美国 Rochester 大学的 PADL-1 系统等实体建模系统。

1980 年，Whitted 提出了一个光透射模型——Whitted 模型，并第一次给出光线追踪算法的范例，实现了 Whitted 模型。1984 年，美国康奈尔大学和日本广岛大学的学者分别将热辐射工程物理中的辐射度方法引入计算机图形学中，用辐射度方法成功地模拟了理想漫反射表面间的多重漫反射效果。光线追踪算法和辐射度算法的提出，标志着计算机图形学中的真实感图形的生成算法已逐渐成熟。20 世纪 80 年代中期以来，超大规模集成电路的发展为计算机图形学的飞速发展奠定了物质基础。计算机运算能力的提高，图形处理速度的加快，特别是近年来图形处理器（Graphical Processing Unit, GPU）技术的进展，使图形学的各个研究方向得到充分发展。实时计算机图形学的发展与应用更是与图形硬件、计算机体系结构、算法研究相互促进，进展神速。计算机图形学已被广泛应用于影视动画、科学计算可视化、计算机辅助设计与制造（Computer Aided Design and Manufacturing, CAD/CAM）、仿真、娱乐、教育培训、艺术、军事等各个领域。

在对计算机图形学的历史作任何回顾时都不可以忽视和降低 ACM SIGGRAPH 会议所起到的无法比拟的巨大作用。ACM SIGGRAPH 会议是计算机图形学领域最具权威性的国际会议，几乎每年都在美国（北美）召开，现时参加会议的人已达数万之众。世界上没有第二个领域能够每年召开如此规模巨大的专业会议，ACM SIGGRAPH 会议在很大程度上促进了图形学的发展。ACM SIGGRAPH 是大约 20 世纪 60 年代中期，由 Brown 大学的教授 Andries van Dam (Andy) 和 IBM 公司的 Sam Matsa 发起的，全称是“the Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques”。1974 年，在 Colorado 大学召开了第一届 ACM SIGGRAPH 年会，并取得了巨大的成功，当时有大约 600 位来自世界各地的专家学者参加了会议。而 1997 年，参加会议的人数已经增加到了 48 700 位。由于每年只录取大约 50 篇论文在 Computer