

计算机图形学理论 与OpenGL编程实践

周建龙 肖 春 编著
王知衍 主审

华南理工大学出版社

计算机图形学理论与 OpenGL编程实践

周建龙 肖春 编著
王知衍 主审

华南理工大学出版社

·广州·

内 容 简 介

本书采用理论与实践相结合的方式讲解计算机图形学理论和 OpenGL 图形编程实践。本书内容丰富、组织结构清晰,涵盖了基本的三维计算机图形学理论,以及使用 OpenGL 进行三维图形编程的概念和方法。全书共分为三大部分:图形学基础、高级图形学理论和实现以及 OpenGL 高级编程。书中附有使用 OpenGL 编写的大量程序以及各种效果图,所选实例具有很强的代表性,程序代码全部采用 C 语言编写,并且在 Visual C++ 6.0 环境下调试通过,便于读者对计算机图形学理论和 OpenGL 编程概念的理解。

本书只要求读者有一定的 C 语言基础和数学知识,适合作为相关专业计算机图形学的教材或辅助教材,还可作为 OpenGL 编程以及计算机游戏编程等培训班的理想教材,而对那些对 OpenGL 编程和计算机图形学感兴趣的读者来说也是一本不可多得的入门和提高的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

计算机图形学理论与 OpenGL 编程实践/周建龙,肖春编著. —广州:华南理工大学出版社,2007.7

ISBN 978 - 7 - 5623 - 2663 - 2

I . 计… II . ①周… ②肖… III . ①计算机图形学②图形软件,OpenGL—程序设计 IV . TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 095089 号

总 发 行: 华南理工大学出版社(广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)

营销部电话: 020 - 87113487 87110964 87111048 (传真)

E-mail: scutc13@scut.edu.cn

http: //www. scutpress. com. cn

责任编辑: 赵 鑫

印 刷 者: 广州市穗彩印厂

开 本: 787mm×960mm 1/16 印张: 23.25 字数: 496 千

版 次: 2007 年 7 月第 1 版 2007 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 1~3 000 册

定 价: 36.00 元

版权所有 盗版必究

前 言

计算机图形学是近年来发展迅速的计算机学科之一，它的应用范围涵盖 CAD/CAM、仿真、科学计算可视化、虚拟现实、三维游戏、数字电影、广告动画创作等领域。OpenGL 图形库是一个软件接口，能够让程序员创建交互式程序，使用计算机图形学技术生成各种效果的图像。

目前大多数的计算机图形学和 OpenGL 编程书籍没有把二者有机地结合在一起。很多计算机图形学书籍只讲解纯粹的计算机图形学理论知识，读者很难将学到的理论知识和实际编程实践结合在一起，缺少具体的实践思考，而计算机图形学恰恰是一门实践性很强的课程。相应地，OpenGL 编程应该以坚实的计算机图形学理论知识为基础，才能高效地产生实用的计算机图形应用程序，而很多 OpenGL 编程书籍缺少让读者在进行 OpenGL 编程的同时，理解计算机图形学理论知识的桥梁。因此，一本能够将计算机图形学理论和 OpenGL 编程实践结合在一起的书，使二者互为补充，融会贯通，一定是计算机图形领域工程师的有力工具之一，也是高校学习计算机图形学课程的学生所热切盼望的。

本书以两条主线贯穿其中，一条是向读者介绍基本的计算机图形学理论知识，另一条是在介绍图形学理论知识的同时，向读者条理清晰地说明怎样用 OpenGL 命令来实现计算机图形的基本要素。这种互为补充的安排能使读者更容易理解相应的理论和编程。在介绍计算机图形学理论时，本书着重于实践性强、实用性广的理论，让读者能够在理解理论知识的同时用 OpenGL 编写实用的应用程序，而不是让读者去实现诸如 OpenGL 一类的底层图形库，这是有别于其他计算机图形学教程的特点之一。因此，本书采用理论与实践相结合的方式讲解计算机图形学理论和 OpenGL 图形编程实践，通过将二者有机地融合在一起，使读者既掌握了计算机图形学理论知识，又掌握了编程实践理论的方法。这也是本书的一个重要目标：使读者在 OpenGL 编程时不再感到“孤立”，相互融合讲解的计算机图形学理论和 OpenGL 编程方法一起指导读者编写出更强大、更有效的应用程序。

本书内容覆盖了基本的三维计算机图形学理论，以及使用 OpenGL 进

行三维图形编程的概念和方法。全书共分为 14 章。书中首先对计算机图形学进行综述；然后讲解计算机图形学的基础理论知识，从基本的几何图元定义到图形变换和颜色模型表示、算法和应用，由浅入深、循序渐进，理论讲解和编程实践相结合；接着介绍光照模型、纹理映射、曲线和曲面造型、隐藏面消除、图形合成等高级图形技术。本书还重点介绍了各种 OpenGL 高级编程技术，如使用缓存技术、显示列表和顶点数组、位图和图像的显示、字体显示特别是显示中文字体的方法，等等。

本书所讲内容是进行计算机图形学应用编程（如游戏编程等）的基础，实用性强而又容易理解，它们都是经过精心选择的。书中包括大量的 OpenGL 编程示例和效果图，所选实例具有很强的代表性，程序代码全部采用 C 语言编写，并且全部在 Visual C++ 6.0 环境下调试通过，便于读者对计算机图形学理论和 OpenGL 编程概念的理解。

本书只要求读者有一定的 C 语言基础和数学知识，适合作为相关专业计算机图形学的教材或辅助教材，还可以作为 OpenGL 编程以及计算机游戏编程等培训班的理想教材，对那些对 OpenGL 编程和计算机图形学感兴趣的读者来说是一本不可多得的详尽的参考用书。

由于编者水平有限，不当之处恳请读者批评指正。

编 者

2007 年 5 月

本章小结	41
4 图形和视图变换	42
4.1 齐次坐标	42
4.2 二维变换	43
4.2.1 二维平移变换	43
4.2.2 二维比例变换	44
4.2.3 二维旋转变换	45
4.2.4 二维反射变换	46
4.2.5 二维错切变换	47
4.2.6 复合变换	48
4.2.7 二维变换的分解	49
4.3 三维变换	50
4.4 视图	51
4.4.1 平行投影	51
4.4.2 透视投影	52
4.5 基于 OpenGL 的图形变换	54
4.5.1 视点或照相机坐标	55
4.5.2 OpenGL 中的矩阵	55
4.5.3 模型变换	56
4.5.4 投影变换	57
4.5.5 剪切变换	60
4.5.6 视口变换	63
4.6 综合利用各种变换绘制机器人模型	64
本章小结	72
5 颜色	74
5.1 计算机颜色	74
5.1.1 颜色生成原理	74
5.1.2 颜色模型及变换	75
5.2 OpenGL 颜色模式	79
5.2.1 RGBA 颜色模式	79
5.2.2 颜色索引模式	80
本章小结	80

第 II 部分 高级图形学理论和实践

6 图形明暗效应	83
6.1 光照模型	83
6.1.1 环境光	84
6.1.2 漫反射光	84
6.1.3 镜面反射光	85
6.1.4 Phong 简单光照模型	86
6.2 多边形光照计算	87
6.2.1 常量模型	87
6.2.2 Gouraud 模型	88
6.2.3 Phong 模型	88
6.3 OpenGL 光照	89
6.3.1 光源	89
6.3.2 光照分量	90
6.3.3 材质	90
6.3.4 加入光照步骤	90
6.4 创建 OpenGL 光源	91
6.4.1 启动光源	92
6.4.2 设置光源颜色	92
6.4.3 设置光源位置与衰减因子	93
6.5 OpenGL 光照模型	96
6.5.1 全局环境光	97
6.5.2 视点位置	97
6.5.3 双面光照	98
6.5.4 镜面反射光颜色	98
6.6 定义材质属性	98
6.6.1 设置材质环境反射光色和漫反射光色	99
6.6.2 设置镜面反射光色	100
6.6.3 设置发射光色	100
6.6.4 常见的材质属性值	100
6.6.5 设置材质属性示例	103
6.7 光源的高级控制	109
6.7.1 设置聚光灯	109

6.7.2	设置多光源	110
6.7.3	控制光源的位置和方向	114
	本章小结	118
7	纹理映射	120
7.1	纹理映射概述	120
7.1.1	纹理的定义	121
7.1.2	二维纹理映射	121
7.2	凸包纹理映射	124
7.3	环境纹理映射	126
7.4	OpenGL 纹理映射	127
7.5	OpenGL 纹理定义	131
7.6	OpenGL 纹理对象	132
7.6.1	生成纹理名	132
7.6.2	生成并使用纹理对象	132
7.7	OpenGL 纹理控制	133
7.7.1	纹理滤波	133
7.7.2	重复与缩限	134
7.8	OpenGL 纹理映射方式	135
7.9	OpenGL 纹理坐标	135
7.9.1	纹理坐标定义	135
7.9.2	自动产生纹理坐标	136
7.10	OpenGL 环境映射	140
	本章小结	149
8	曲线和曲面	150
8.1	双线性面片	150
8.2	二次 Bézier 曲线	151
8.3	高次 Bézier 曲线	154
8.3.1	高次 Bézier 曲线的定义	154
8.3.2	Bézier 曲线的性质	155
8.4	Bézier 曲面	156
8.4.1	Bézier 曲面的定义	156
8.4.2	Bézier 曲面的细分	157
8.5	Hermite 和 Catmull-Rom 曲线	157
8.6	B 样条	159
8.6.1	B 样条的定义	159

8.6.2 非三次 B 样条	162
8.6.3 NURBS	163
8.7 Loop 曲面细分方法	163
8.8 OpenGL 曲线和曲面	165
8.8.1 Bézier 曲线	165
8.8.2 Bézier 曲面	169
8.8.3 纹理曲面	175
8.8.4 NURBS	179
本章小结	185
9 隐藏面消除	187
9.1 BSP 树	187
9.1.1 BSP 树算法概述	187
9.1.2 创建树结构	190
9.1.3 划分三角形	192
9.1.4 树的优化	194
9.2 Z 缓存区	194
9.2.1 Z 缓存区算法	194
9.2.2 整型 Z 缓存区	195
9.3 背面消除	195
9.4 OpenGL 隐藏面消除	196
本章小结	198
10 图形合成技术	199
10.1 融合	199
10.1.1 图形融合	199
10.1.2 OpenGL 图形融合	200
10.1.3 图形融合应用	202
10.2 反走样	209
10.2.1 图形反走样	209
10.2.2 OpenGL 反走样线条	211
10.2.3 OpenGL 反走样多边形	214
10.3 雾化	217
10.3.1 深度暗示和雾	217
10.3.2 OpenGL 雾化	218
本章小结	223

第 III 部分 OpenGL 高级编程

11 OpenGL 缓存技术	227
11.1 缓存及其应用	227
11.1.1 OpenGL 缓存概念	227
11.1.2 清除缓存	228
11.1.3 屏蔽缓存	229
11.2 颜色缓存	230
11.2.1 双缓存系统	230
11.2.2 立体缓存	231
11.3 模板缓存	231
11.4 累积缓存	244
本章小结	252
12 使用显示列表和顶点数组	253
12.1 显示列表	253
12.1.1 建立显示列表	254
12.1.2 添加函数命令到显示列表	254
12.1.3 执行显示列表	255
12.1.4 删除显示列表	257
12.1.5 显示列表与纹理	258
12.1.6 显示列表使用示例	258
12.2 顶点数组	268
12.2.1 启动顶点数组	269
12.2.2 使用顶点数组	270
12.2.3 使用隔行数组	273
12.2.4 锁定顶点数组	273
12.2.5 顶点数组使用示例	274
本章小结	278
13 OpenGL 位图和图像	279
13.1 OpenGL 位图	279
13.1.1 定位位图	279
13.1.2 绘制位图	281
13.1.3 OpenGL 位图示例	281
13.2 使用图像	285

13.2.1 绘制图像数据.....	285
13.2.2 从屏幕上读取图像数据.....	286
13.2.3 拷贝屏幕数据.....	287
13.2.4 放大、缩小和反转	288
13.2.5 管理像素存储.....	288
13.2.6 图像应用示例.....	289
13.3 Windows 位图	293
13.3.1 BMP 文件格式	293
13.3.2 载入 BMP 文件	295
13.3.3 输出 BMP 文件	298
本章小结.....	300
14 显示字体.....	302
14.1 字体和显示列表.....	302
14.2 位图字体.....	302
14.3 轮廓字体.....	314
14.4 纹理字体.....	325
14.5 中文字体.....	338
本章小结.....	357
参考文献.....	358

第 I 部分

图
形
学
基
础



绪 论

计算机图形学作为计算机科学与技术学科的一个独立分支,已经历了近 50 年的发展历程.一方面,作为一个学科,计算机图形学在图形基础算法、图形软件与图形硬件三方面取得了长足的发展,成为当代几乎所有科学和工程技术领域用来加强信息理解和传递的技术和工具.另一方面,计算机图形学的硬件和软件本身已发展成为一个巨大的产业,当前全世界从事计算机图形学研究、应用和产业化的队伍十分庞大.随着计算机软、硬件技术的发展,计算机图形学在各个行业的应用和研究得到了迅速普及和深入.

本章主要介绍计算机图形学的基本概念和术语、计算机图形学的应用领域以及发展历史等.

1.1 计算机图形学的研究内容

计算机图形学是一种使用数学算法将二维或三维图形转化为计算机显示器的栅格形式的科学.计算机图形学的主要研究内容包括如何在计算机中表示图形以及利用计算机进行图形的计算、处理和显示的相关原理与算法.图形通常由点、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.从处理技术上看,图形主要分为两类,一类是基于线条信息表示的,如工程图、等高线地图、曲面的线框图等;另一类是明暗图,也就是通常所说的真实感图形.计算机图形学一个主要研究目的就是要利用计算机产生令人赏心悦目的真实感图形.为此,必须建立图形所描述的场景的几何表示,再用某种光照模型,计算在假想的光源、纹理、材质属性下的光照效果.所以,计算机图形学与另一门学科“计算机辅助几何设计”有着密切的关系.事实上,图形学也把可以表示几何场景的曲线曲面造型技术和实体造型技术作为其主要的研究内容.同时,真实感图形计算的结果是以数字图像的方式提供的,计算机图形学也就和图像处理有着密切的关系.

图形与图像两个概念间的区别越来越模糊,但还是有区别的:图像仅指计算机内以位图形式存在的灰度信息,而图形含有几何属性,或者说更强调场景的几何表示,是由场景的几何模型和景物的物理属性共同组成的.计算机图形学的研究内容非常广泛,如图形硬件、图形标准、图形交互技术、光栅图形生成算法、曲线曲面造型、实体造型、真实

感图形计算与显示算法,以及科学计算可视化、计算机动画、自然景物仿真、虚拟现实等.使用计算机生成图形的理论、方法和技术,可以重现现实世界中已经存在的物体的图形,也可以生成虚构物体的图形.因此,计算机图形学是生成真实物体或虚构物体的综合技术.与此相反,图像处理是计算机图像分析技术,它除了研究图像增强、图像分割、轮廓提取等基本的分析技术外,还研究景物分析和计算机视觉(Computer Vision),即研究如何从图像中提取二维或三维物体的模型,因此这个过程是计算机图形学的逆过程.尽管计算机图形学和图像处理所涉及的对象都是图形和图像,但是它们属于两个不同的技术领域.随着多媒体技术、三维数据场的绘制、纹理映射技术和图形硬件等技术的发展,计算机图形学和图像处理结合日益紧密,相互渗透,促进了这两个领域的发展.

综上所述,计算机图形学主要是研究图形(图像)的计算机生成,其研究方向众多.在图形基础研究方面可归纳为三个主要方向,即建模(Modeling)技术(又称“造型技术”)、绘制(Rendering)技术和动画(Animation)技术.

- 建模.建模技术研究的是物体形状和表面特性的数学表示方法,以便物体的相关信息能够储存在计算机中.建模技术又可分为两大分支,即计算机辅助几何设计和自然景物建模.计算机辅助几何设计追求建模的精确度、可靠性和速度;自然景物建模追求建模的逼真度和速度.

- 绘制.计算机图形学中的绘制技术是指基于光栅图形显示技术的“真实感图形”绘制技术,包括各种光照模型、明暗(Shading)处理和纹理生成等内容.绘制技术追求的是真实感(逼真度)和绘制速度.

- 动画.动画是通过一系列图像生成运动幻影的技术.建模技术和绘制技术通过不同的时间序列运用在动画技术中.

另外,其他一些领域也与计算机图形学有紧密的关系,这些领域主要有:

- 人机交互.研究输入设备、应用程序与用户之间的反馈及交互.
- 虚拟现实.使用户沉浸在一个三维虚拟世界中.一个虚拟现实系统也应该有声音以及力反馈等系统的支持.因为这个领域要求高级三维图形显示技术,它与图形学有着紧密的联系.

- 可视化.使用户能够通过图形图像的显示来了解数据的特征.在一个可视化系统中经常需要解决一些图形学技术方面的问题.

- 图像处理.研究对二维图像的操作.图像处理常用于图形学及计算机视觉领域.

综合上述计算机图形学研究方向可以看出,计算机图形学研究水平的高低关键反映在“真实感”(近年来,在绘制技术中的另一个分支非照片真实感绘制(Nonphotorealistic Rendering, NPR)也得到了深入的研究, NPR 技术追求的是简洁有效地描述物体)和“速度”的高低以及两者的结合上,也就是既要逼真地反映客观世界的对象,又能高速(通常又称“实时”)地绘制它们.众所周知,“真实感”与“实时性”是一对尖锐的矛盾,如何解决

这一矛盾是当代计算机图形学工作者奋斗的目标。

1.2 计算机图形学的应用领域

计算机图形系统软硬件的性能日益提高,促使计算机图形技术的应用越来越广泛.当前计算机图形学已经在航空、航天、汽车制造、电子、影视广告、医学、数据可视化等领域取得了广泛的应用.下面简要介绍计算机图形技术的一些重要应用领域.

- 视频游戏. 游戏产业已经成为计算机软件领域一个重要的分支,为了设计出更吸引用户的、有丰富内容的场景,视频游戏趋向于使用更多复杂的三维模型和绘制算法.

- 卡通. 卡通通常由三维模型直接绘制得到.许多传统的二维卡通使用由三维模型绘制生成的图像作为背景,并且通过移动视点很快就可生成平稳的实时动画.

- 电影特殊效果. 使用各种类型的计算机图形技术.现在几乎每部电影都使用数字合成技术把计算机产生的三维模型叠加在已有的背景上,以产生特殊效果.

- CAD/CAM. 即 Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing. 计算机辅助设计和计算机辅助制造领域通过计算机设计零件和产品,然后指导整个制造过程.例如,现在许多机械零件通过计算机三维图形软件包(如 AutoCAD)来设计,并自动地产生加工程序在机床上加工完成.

- 模拟. 模拟技术可看做一种精确的视频游戏.例如,飞行模拟器常使用复杂的三维图形来模拟飞机的飞行过程.模拟技术对于初级培训以及安全性要求很高的领域有重要的作用,用户可在模拟器上进行初始的训练,等获得一定经验后再利用实物进行训练,一方面可提高安全系数,另一方面可节约大量的培训费用.

- 医学成像. 医学成像系统一般生成所检查病人的一组二维图像,例如,核磁共振(MRI)图像是由一组二维扫描图像组成的,可以把它看做一个三维数据.计算机图形技术可以从一个三维数据恢复出病人身体的各个组织结构,以帮助医生更好地诊断病变.

- 信息可视化. 信息可视化可产生描述有关数据的图像表示,以帮助用户更好和更自然地理解数据信息.例如,图形技术可以帮助用户很好地理解气温在不同时间的变化趋势这类数据.

1.3 计算机图形学的发展简史

计算机图形学的研究始于20世纪50年代.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阴极射线管(CRT)来显示一些简单的图形.这是计算机图形学研究的开始.六七十年代,计算机图形学中的绘制及齐次坐标的核心技术主要在麻省理工学院、哈佛(Harvard)大学以及犹他(Utah)大学研究开发成功.

现代图形用户界面起源于 1962 年 MIT 林肯实验室 Ivan E. Sutherland 发表的一篇题为《Sketchpad: 一个人机交互通信的图形系统》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,证明了交互计算机图形学是一个可行的、有用的研究领域,从而确立了计算机图形学作为一个崭新的学科分支的独立地位.他在论文中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.与此同时,哈佛大学 Larry Roberts 开发了齐次坐标用于绘制在透视图显示三维几何物体的图像.后来 Sutherland 转到哈佛大学工作,并在麻省理工学院 Chuck Seize 的帮助下开发出了一个头盔式的交互式三维显示设备,这是第一个虚拟现实的复杂例子.在后来的几年中,犹他大学的科学家开发出了帧缓存(Frame Buffer)、深度缓存(Z-Buffer)、纹理映射(Texture Mapping)和三维明暗度(3D Shading)等技术,并将这些技术用在了一个飞行模拟器上.20 世纪 70 年代,计算机图形学其他的重要进展还有:1970 年,Bouknight 提出了第一个光反射模型;1971 年,Gourand 提出了“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).这些可以说是研究真实感图形学最早の開创性工作.

随着绘制技术的发展,建模技术主要在汽车领域取得了很大的进步.计算机辅助汽车建模技术要求表示光滑的自由形状的表面,很多科学家(著名的如 Coons 及 Bézier)在 20 世纪六七十年代开发出了许多著名的光滑表面技术.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、美国罗彻斯特大学的 PADL-1 系统等实体造型系统.

从 20 世纪 80 年代至今,工作站的出现和硬件的发展极大地促进了计算机图形学的发展.计算机运算能力的提高、图形处理速度的加快,使得图形学的各个研究方向得到了充分发展,图形学已广泛应用于动画、科学计算可视化、CAD/CAM、影视娱乐等各个领域.

1.4 主要的图形库 API

一个图形库提供一组图形命令和函数,这些命令和函数可在不同的计算机平台上用不同的编程语言来访问和使用(如 C++、Java).使用图形库的一个主要部分是处理应用程序接口(Application Program Interface, API).API 是软件接口,它提供了应用程序怎样访问系统功能的模型,例如在一个窗口中画一个矩形.一个图形程序通常提供两个主要的功能:处理图形调用(如“画一个矩形”)和处理用户的交互操作(如“按下一个按钮”).

大多数图形库 API 提供某种类型的用户界面工具包,这些工具包一般使用回调函数(Callbacks).回调机制是指使用函数指针或者虚函数传递来传递调用信息给一个函数.例如,把一个函数与一个“按钮按下”事件关联,通过这种关联,用户界面工具包就能