



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

高等学校计算机规划教材

# 计算机图形学

## ——理论、工具与应用（第3版）

Computer Graphics

Theory, Tools and Applications, Third Edition

◆ 魏海涛 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

013068437

TP391.41  
531-3

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材  
高等学校计算机规划教材

# 计算机图形学

——理论、工具与应用(第3版)

Computer Graphics

Theory, Tools and Applications, Third Edition

魏海涛 编著



TP391.41  
531-3

电子工业出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
北京·BEIJING



北航

C1675958

## 内 容 简 介

本书是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

全书分上下两篇,分别介绍二维图形学和三维图形学的基础知识,主要包括计算机图形学导论、图形的描述与生成、图形的基本运算、图形的观察运算、图形的输入、图形的数据结构以及照相机模型、平面物体/曲面物体、灯光模型的构建与图形显示和 OpenGL 图形标准与应用等内容。同时,提出改革国内外计算机图形学以图形标准为主的教学模式等建议,界定了计算机图形学的学科内涵与计算机科学的学科结构,明确计算机图形学作为可视化与物理仿真应用程序在计算机科学中的地位与作用,构建了计算机图形学“理论(软件系统、建模、仿真、程序设计)、工具(OpenGL 图形标准)与应用(3D 动画)”3 个学科形态的教材新体系,并形成面向科学思维的教学方法。

全书配套有电子课件、算法程序源代码等教学资源,供教师教学参考。

本书可作为高等学校计算机、信息处理、数学、物理、机械、地理、土木工程等专业的本科生与研究生,掌握计算机程序设计的基本方法、计算机仿真入门并进行计算思维训练的重要教科书。

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

计算机图形学:理论、工具与应用/魏海涛编著. —3 版. —北京:电子工业出版社,2013.9

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-121-20793-8

I. ①计… II. ①魏… 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(2013)第 137058 号

策划编辑:袁 玺

责任编辑:章海涛 文字编辑:袁 玺

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

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:18.75 字数:480 千字

印 次:2013 年 9 月第 1 次印刷

定 价:39.00 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 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

### 第3版前言

#### 一、教材编写的指导思想

本教材围绕“实现三维图形显示的基本方法是程序设计和计算机仿真”这一命题,在“可计算性的实现前提<sup>①</sup>”与“计算机仿真实理论架构原理<sup>②</sup>”思想指导下,以3D动画与图形标准为教学目标,用系统分析与综合的方法<sup>③</sup>组织教材内容的编写。教材中先用二维图形建立软件系统的概念,然后根据仿真原理建立描述可视物体、灯光、照相机等物理模型所需多个数学模型,以此为主线,构建了仿真光线在计算机场景与照相机模型中传播,并在照相机镜头中生成3D动画图形的教学内容,使读者能在物理仿真、数学建模与软件系统概念的指引下,编程实现三维图形软件系统,以此实现三维动画图形的自动显示。因为计算机动画原理包含图形标准的原理,可顺势讲解 OpenGL 图形标准绘图工具,便于读者应用可视化编程工具开发应用程序,做到与国内外目前计算机图形学课程的教学现状<sup>[32, 34-41]</sup>相接轨。故本课程可作为软件工程课程的教学实习对象,并期待能用计算机图形学课程解决传统的软件工程课程中存在的教学困惑<sup>④</sup>。

#### 二、授课所用的教学模式与教学方法

用3D动画系统案例的形式培养读者熟悉科学研究的工作方法,以此稳定结构方式使读者掌握计算机程序设计的基本方法。科学研究的工作方法遵循以下原则:

(1) 选题。找任务、检索阅读资料、提出问题或自由选题并为此命名,是开发项目的基础。探索新发现属于自然科学的研究对象,不属于计算机图形学的研究范畴;而提出问题是任务深入思考的前提。自由选题要确立研究问题(应是国际上目前受关注、有发展前途的

① 可计算性的实现前提是指待解问题被模型与系统形式化方法所描述,这种描述要转换成算法,算法要有合理的复杂度(即程序的使用有明确的边界范围限制)。形式化方法描述指用数学模型、流程图与逻辑符号进行描述,且这种描述要遵从逻辑上的一致性(一致性指事物的基本特征或特性相同,其他特性或特征相类似,不能有矛盾)。用某种固定结构方式处理数据的基本过程即为一种模型,如计算机。

② 计算机仿真实理论架构原理包括系统、建模、仿真算法与评估。系统指由相互联系、相互作用的要素或部件组成的具有一定结构和功能的有机整体,它决定了被研究任务与考察对象的组成与边界范围。大型复杂的系统一般由多个相对简单的子系统构成,它一般具有多样性、层次性、动态性、智能性与关联性等特征。

③ 系统分析与综合的方法:如为实现三维图形的自动显示这一目标,本教材先把这一总任务分解成多个相对独立的各个子任务,形成各章的教学内容并提出各章要解决的基本问题。最后,将各章解决问题方法进行集合,构成一个自动运行并完成指定任务的完整系统,以达到设定的教学目标。

④ 狭义的软件工程包括两个步骤:(1)用一组规则约定并经抽象形成理论或工具等方法;(2)以此规范并协调多人分工协作编写程序源代码与程序测试等开发过程,即用第(2)步加强对第(1)步的理解。这是避免大型程序系统开发少走弯路并取得成功的基本保证。在该课程教学中,若仅进行第(1)步的讲授而不进行第(2)步的实习,则该课程教学并不完备。广义的软件工程包括大型工程应用中所涉及具体软件的整体开发技术与实现等过程。传统的课程教学中,并没有明确是否应包含复杂大系统的数学建模与系统仿真等要求(实际应用软件的开发过程有这些要求,但其教科书往往没有这些内容),也不清楚以什么问题作为教学案例以达到该课程设定的教学目标。这导致该课程的实习部分不易进行,使其课程教学出现了教学困惑——即不能把一门理论与实践并重的课程,仅当作一门纯理论课程来传授。

重要领域或方向或疑难问题)的创新性(如填补空白或修改传统的理论,新技术、新方法的发明创造;或在前人工作基础上进行补充完善等)、科学性(对自然现象提出疑问和假设,并通过科研实践证明、演绎、显示答案。科研实践是一个试错的过程,即通过不断犯错而逐渐揭示事物的本来面目)、目标性(设定所期望的结果)、可行性(有能力与条件达到所设定的目标),并理顺课题的申报渠道。如计算机图形学的学科(教学科目与知识类别)属性与教学内容,是目前国际计算机图形学教育界多年(1999—2011年)关注的疑难问题<sup>[32, 33, 1, 104]</sup>。

(2) 分析问题。真实照片由物体、灯光与照相机 3 个主要因素决定,由此提炼描述这些物理模型所需多个教学基本点。如用几何模型、材质模型、纹理模型描述可视物体模型;用点光源的光线几何模型、颜色模型、照明模型、光线跟踪算法与辐射度算法等描述灯光模型(点发光体);根据照相机的观察参数,用几何模型的几何变换、裁剪、投影、多边形填充与纹理映射、图像融合等算法描述照相机模型;对光线跟踪算法,需重构照相机模型。

(3) 提出解决问题的方法(提出假说)。教材中先用二维图形建立软件系统的概念,然后以建立描述可视物体、灯光、照相机等物理模型所需多个数学模型为主线,建立仿真光线传播生成三维图形的概念。注意:选定的研究问题、解决问题的方法是否创新或有意义,以及研究人员的实力(需用证据证明),是取得创新成果的基础。

(4) 做实验解决问题(寻找证据支持假说)。在物理仿真、数学建模与软件系统概念的指引下,选择数据结构、设计算法、编写程序源代码并调试、测试运行程序,以构建三维图形软件系统。向该运行软件输入各种图形模型的描述数据与命令,计算机能自动生成像照片一样效果的三维真实感图形。物体运动或变形、灯光变幻、照相机运动,可形成计算机动画。

(5) 取得新成果(用查新方法验证)。对学科已有的系统理论与方法进行渐进改进或更新,发表学术论文、推广该成果,直至论证申报新开发项目或教学改革项目,推动学科建设不断向前发展。当我们在国内外率先界定计算机图形学的学科内涵、论证计算机图形学是可视化与物理仿真应用程序后<sup>[1, 104]</sup>,为健全、理顺、提炼本教材(第 3 版)的内容奠定了理论基础。

由此构建计算机程序设计教学的完整过程(计算机应用程序设计的基本规律与基本方法,详见 0.4 节的最后结论),并形成了**面向科学思维的教学方法**。该教学方法要求把科学研究的工作方法、系统分析与综合的方法、思考问题的方法、查找资料与抽象的方法等知识产生的方法(简称**方法论**)引入课程教学中,有效讲解学科专业知识是根据需求通过研究各种问题产生的,进而形成本学科的理论体系(计算机图形学的理论体系,用可计算性的现实前提与计算机仿真理论架构原理有效描述)与其学科结构(详见导论),这是科学思维产生的结果。掌握这种方法,将为人们日后取得创新成果打下基础。

### 三、教材的适用对象、教学安排与修订情况

教材中的例题均是在 Windows 环境中编程实现的。学习本课程,要求读者具有 C++ 语言的编程基础与数据结构方面的知识,并对基础物理学有一个基本的了解。

本教材可作为高等学校计算机、信息处理、数学、物理、机械、地理、建筑、园林、纺织、工艺美术、土木工程等专业的本科生与研究生,正确认识图形数学模型的构建与显示规律、掌握计算机程序设计的基本方法、计算机仿真入门的重要教科书。

计算机图形学的教学安排如下:

| 课时安排  | 教学对象     | 教学内容与基本要求                                                      |
|-------|----------|----------------------------------------------------------------|
| 30 学时 | 非计算机专业学生 | 讲授二维图形学与图形标准,这对于快速掌握计算机程序设计的基本规律与可视化程序的开发非常有帮助                 |
| 46 学时 | 计算机专业学生  | 补充软件系统的概念,讲授全部的三维图形学与图形标准,这有助于培养学生综合运用物理、数学与计算机知识解决实际应用问题的能力   |
| 36 学时 | 计算机专业学生  | 讲解照相机模型,平面物体的几何建模与图形显示,灯光模型与光照物体的图形显示,图形标准;不讲曲面物体的几何模型构建与显示等内容 |
| 30 学时 | 计算机专业学生  | 可以图形标准的教学为主,辅以补充软件系统与用数学模型描述可视物体、灯光和照相机物理模型等概念                 |

本次修订重写了教材的导论与各章小结,每章先通过提出基本问题来介绍各章的教学要点,精简了相关教学内容。对于一批重要术语(黑体字标明)的基本含义进行了诠释,改变国外目前以图形标准为主的计算机图形学教学模式<sup>[32, 34-40]</sup>不能概括计算机图形学的研发成果与发展规律等被动局面,有效解决国内外计算机图形学教育界长期对本课程的教学困惑<sup>[1, 104]</sup>。

感谢浙江大学的彭群生教授对本教材写作的大力支持与亲切指导;感谢厦门大学的赵致琢教授,上海交大的何援军教授,空军预警学院(原空军雷达学院)的杨瑞娟、鲁汉榕、吴彩华、高燕、戴志平、俞志强、周焰(他们参与了教材的策划讨论、试用、审稿、校对、画图、实例设计等工作)、程平、熊家军、徐毓、肖兵、魏忠、蔡益朝、宾雪莲、代科学、郭乐江、李嵩斌老师和参考文献作者的帮助;感谢关心、使用本教材的所有读者;这些支持与帮助使作者能顺利完成本教材的修订工作。对于书中不妥之处,恳切读者批评指正。

本教材的修订,受到空军预警学院“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材出版基金的资助。

本书提供相关的教学资源。需要的教师,可登录华信教育资源网([www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn))注册后进行下载,也可与作者直接联系,作者 E-mail: [weihaitaogood@126.com](mailto:weihaitaogood@126.com)

作 者

# 目 录

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第0章 计算机图形学导论                  | 1  |
| 0.1 计算机图形学的系统理论               | 2  |
| 0.2 计算机图形学研发的多种开发工具           | 8  |
| 0.3 计算机图形学的应用                 | 10 |
| 0.4 计算机图形学学科当前的研究热点与发展方向      | 12 |
| 0.5 计算机图形学学习的参考资料             | 16 |
| 本章小结: 建设成熟的课程教学内容是搞好课程教学工作的前提 | 16 |
| 习题0                           | 19 |
| 上篇 二维图形学基础                    |    |
| 第1章 线段图形的描述与生成                | 22 |
| 1.1 直线的描述与生成                  | 22 |
| 1.1.1 直线的简单微分算法               | 22 |
| 1.1.2 直线的整数算法                 | 24 |
| 1.2 圆与椭圆的描述与生成                | 26 |
| 1.2.1 圆的角度微分法                 | 26 |
| 1.2.2 椭圆的角度微分法                | 28 |
| 1.3 自由曲线的描述与生成                | 29 |
| 1.3.1 三次样条曲线                  | 29 |
| 1.3.2 三次参数样条曲线                | 34 |
| 1.3.3 贝齐埃曲线                   | 36 |
| 1.3.4 B样条曲线                   | 40 |
| 1.3.4.1 均匀B样条曲线               | 41 |
| 1.3.4.2 准均匀B样条曲线              | 43 |
| 1.3.4.3 非均匀有理B样条曲线            | 45 |
| 1.4 矢量字符的描述与生成                | 47 |
| 本章小结: 直线与曲线的描述、建模与生成          | 49 |
| 习题1                           | 50 |
| 第2章 实面积图形的描述与生成               | 52 |
| 2.1 多边形的描述与填充                 | 52 |
| 2.1.1 多边形的定义与性质               | 52 |
| 2.1.2 多边形的填充原理                | 53 |
| 2.1.3 多边形的YX填充算法              | 54 |
| 2.1.4 多边形的Y-X填充算法             | 54 |
| 2.1.5 多边形的优先级填充算法             | 58 |

|                                           |     |
|-------------------------------------------|-----|
| 2.2 直线的反走样显示处理技术 .....                    | 60  |
| 2.2.1 反走样直线的面积采样生成算法 .....                | 61  |
| 2.2.2 反走样直线的加权面积采样生成算法 .....              | 62  |
| 本章小结: 多边形的描述、建模、生成与直线的反走样显示技术 .....       | 63  |
| 习题 2 .....                                | 64  |
| <b>第 3 章 图形的基本运算</b> .....                | 65  |
| 3.1 图形的几何变换 .....                         | 65  |
| 3.1.1 几何变换常用的齐次坐标变换矩阵 .....               | 66  |
| 3.1.2 二维图形的连续几何变换 .....                   | 67  |
| 3.2 图形的布尔运算 .....                         | 71  |
| 3.2.1 正则集合运算公式 .....                      | 71  |
| 3.2.2 $A, B$ 多边形之间的相互关系, 对生成新多边形的影响 ..... | 73  |
| 本章小结: 图形建模方法的提升 .....                     | 74  |
| 习题 3 .....                                | 74  |
| <b>第 4 章 图形的观察运算</b> .....                | 76  |
| 4.1 图形的开窗显示 .....                         | 76  |
| 4.1.1 图形学中常用的坐标系 .....                    | 76  |
| 4.1.2 窗口、视区及图形的窗视坐标变换 .....               | 78  |
| 4.2 图形的裁剪 .....                           | 80  |
| 4.2.1 点与字符的裁剪 .....                       | 81  |
| 4.2.2 直线的裁剪 .....                         | 81  |
| 4.2.3 曲线的裁剪 .....                         | 83  |
| 4.2.4 实面积多边形的裁剪 .....                     | 83  |
| 本章小结: 图形数据输出显示的完整处理过程 .....               | 86  |
| 习题 4 .....                                | 87  |
| <b>第 5 章 图形数据与命令的输入</b> .....             | 88  |
| 5.1 图形数据输入常用的编程处理方法 .....                 | 89  |
| 5.1.1 利用高级图形专用语言编程输入图形数据 .....            | 89  |
| 5.1.2 利用图形输入设备交互输入图形数据 .....              | 91  |
| 5.1.3 图形标准为图形数据输入提供的交互处理方法 .....          | 92  |
| 5.2 光栅扫描图形显示器常用的交互输入处理技术 .....            | 93  |
| 5.2.1 光栅扫描图形显示器的工作原理与软件功能 .....           | 94  |
| 5.2.2 图形的定位、拾取、命令选择等交互输入处理技术 .....        | 98  |
| 5.3 图形系统交互设计的基本方法 .....                   | 101 |
| 5.3.1 图形系统交互设计的重要性与发展 .....               | 101 |
| 5.3.2 图形系统交互设计的基本方法 .....                 | 102 |
| 本章小结: 提高向计算机输入数据的效率, 是人们编程追求的目标之一 .....   | 105 |
| 习题 5 .....                                | 106 |

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 第6章 图形的数据结构          | 108 |
| 6.1 复合图形元素           | 109 |
| 6.1.1 图形组            | 110 |
| 6.1.2 重复图            | 112 |
| 6.2 图形的基本编辑功能        | 113 |
| 6.3 图形系统的数据结构与数据处理流程 | 116 |
| 本章小结: 图形软件系统的构建原理    | 123 |
| 习题6                  | 124 |

## 下篇 三维图形学基础

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 第7章 照相机模型的建立与三维几何图形的显示          | 126 |
| 7.1 三维图形几何模型的几何变换               | 126 |
| 7.2 三维图形几何模型的投影(用矩阵方式描述光线的传播过程) | 133 |
| 7.2.1 三维图形几何模型常用的坐标系            | 133 |
| 7.2.2 平行投影的基本原理与描述方法            | 134 |
| 7.2.3 正透视投影的基本原理与描述方法           | 136 |
| 7.3 照相机模型功能的描述方法                | 141 |
| 7.3.1 照相机模型的两种观察空间与描述方法         | 142 |
| 7.3.2 三维直线的平行投影显示在照相机模型中的实现方法   | 145 |
| 7.3.3 三维直线的透视投影显示在照相机模型中的实现方法   | 150 |
| 本章小结: 照相机模型显示三维图形的原理            | 154 |
| 习题7                             | 155 |
| 第8章 平面物体几何模型的构建与图形显示            | 157 |
| 8.1 平面物体的描述与数据结构                | 157 |
| 8.1.1 平面物体的几何信息与拓扑信息            | 157 |
| 8.1.2 平面物体几何模型常用的表示方法           | 158 |
| 8.1.3 平面物体几何模型常用的数据结构           | 160 |
| 8.2 平面物体的全剖切运算                  | 163 |
| 8.2.1 全剖面的定义与平面物体的顶点分类          | 163 |
| 8.2.2 被剖物体有效剖面的形成               | 163 |
| 8.2.3 被剖平面物体截面的形成               | 166 |
| 8.2.4 形成新的剖面体                   | 167 |
| 8.3 平面物体的布尔运算                   | 168 |
| 8.3.1 求交运算                      | 168 |
| 8.3.2 分类运算                      | 170 |
| 8.3.3 合并运算                      | 171 |
| 8.4 平面物体线框模型的真实感图形显示——隐藏线的消除    | 173 |
| 8.5 平面物体表面模型的真实感图形显示——隐藏面的消除    | 177 |
| 8.5.1 Z缓冲器算法                    | 177 |

|                                     |                          |     |
|-------------------------------------|--------------------------|-----|
| 8.5.2                               | 扫描线深度缓存算法                | 178 |
| 8.5.3                               | 区间扫描线算法                  | 180 |
| 8.5.4                               | Warnock 算法               | 181 |
| 8.5.5                               | 多边形的 BSP 算法              | 182 |
| 8.5.6                               | A 缓冲器算法                  | 184 |
| 本章小结: 平面物体几何建模与图形显示方法的成熟            |                          | 188 |
| 习题 8                                |                          | 189 |
| <b>第 9 章 曲面物体几何模型的构建基础与线框模型图形显示</b> |                          | 191 |
| 9.1                                 | 三维物体几何模型常用的描述方法          | 191 |
| 9.1.1                               | 八叉树表示法                   | 191 |
| 9.1.2                               | 扫描表示法                    | 192 |
| 9.1.3                               | 边界表示法                    | 193 |
| 9.1.4                               | 元球表示法                    | 197 |
| 9.1.5                               | 蒙皮表示法                    | 198 |
| 9.1.6                               | 物体几何模型表示方法的选择            | 199 |
| 9.2                                 | 曲面物体的几何造型                | 199 |
| 9.2.1                               | 常用曲面的数学描述函数              | 200 |
| 9.2.1.1                             | 孔斯(Coons)曲面              | 200 |
| 9.2.1.2                             | 贝齐埃曲面                    | 201 |
| 9.2.1.3                             | B 样条曲面                   | 203 |
| 9.2.2                               | 几何造型中的相交计算问题             | 204 |
| 9.2.2.1                             | 二维贝齐埃曲线之间的相交计算           | 205 |
| 9.2.2.2                             | 常用二次曲面之间的相交计算            | 207 |
| 9.2.3                               | 用旋转曲面以及贝齐埃曲线、曲面构建茶壶的几何模型 | 208 |
| 9.3                                 | 曲面物体线框模型的图形显示            | 210 |
| 9.3.1                               | 曲面物体轮廓线的定义与图形显示          | 210 |
| 9.3.2                               | 用等值线方法显示曲面物体的几何形状        | 212 |
| 本章小结: 曲面物体几何模型的构建与图形显示, 任重而道远       |                          | 213 |
| 习题 9                                |                          | 214 |
| <b>第 10 章 灯光模型的建立与光照物体的图形显示</b>     |                          | 215 |
| 10.1                                | 光源物理模型                   | 215 |
| 10.1.1                              | 光源与光线几何模型                | 215 |
| 10.1.2                              | 颜色                       | 216 |
| 10.1.3                              | 颜色模型                     | 221 |
| 10.2                                | 物体的照明模型                  | 223 |
| 10.2.1                              | 物体的简单光照模型                | 223 |
| 10.2.2                              | 透明体的透明模型                 | 226 |
| 10.3                                | 曲面物体表面模型的真实感图形显示         | 228 |

|                                                |     |
|------------------------------------------------|-----|
| 10.3.1 曲面物体、透明物体表面的着色处理 .....                  | 228 |
| 10.3.2 物体表面的纹理显示(逐点仿真光线照射物体表面产生的反光显示效果) .....  | 231 |
| 10.3.2.1 光滑纹理的图形显示 .....                       | 231 |
| 10.3.2.2 凹凸纹理的图形显示 .....                       | 236 |
| 10.3.3 物体的阴影显示 .....                           | 237 |
| 10.3.3.1 阴影的Z缓冲器算法 .....                       | 238 |
| 10.3.3.2 阴影的阴影体算法(影域多边形算法) .....               | 239 |
| 10.4 高度真实感图形的显示技术 .....                        | 242 |
| 10.4.1 整体光照模型与光线跟踪算法 .....                     | 242 |
| 10.4.1.1 Whitted 整体光照模型 .....                  | 243 |
| 10.4.1.2 光线跟踪算法原理(仿真光线传播生成三维图形) .....          | 244 |
| 10.4.1.3 光线跟踪算法中需要的各种计算 .....                  | 246 |
| 10.4.1.4 光线跟踪算法的进展介绍 .....                     | 251 |
| 10.4.2 辐射度算法(仿真漫射光传播确定物体表面的色彩与亮度) .....        | 252 |
| 10.4.2.1 理想漫射环境中的辐射度方程 .....                   | 252 |
| 10.4.2.2 形状因子的计算公式与性质 .....                    | 253 |
| 10.4.2.3 用半立方体方法累计计算形状因子 .....                 | 254 |
| 10.4.2.4 用辐射度方法绘图时应注意的几个问题 .....               | 256 |
| 本章小结:用仿真光线传播的方法生成像照片一样的三维真实感图形 .....           | 258 |
| 习题 10 .....                                    | 260 |
| <b>第 11 章 OpenGL 图形标准与应用</b> .....             | 262 |
| 11.1 OpenGL 的基本功能与工作原理 .....                   | 262 |
| 11.2 Windows 中 OpenGL 编程的环境设置与语约定 .....        | 264 |
| 11.3 OpenGL 中读写一个像素点的实现方法 .....                | 265 |
| 11.4 OpenGL 用几何与材质参数、灯光与照相机参数描述并显示光照物体图形 ..... | 268 |
| 11.5 OpenGL 的堆栈与图形的几何变换 .....                  | 271 |
| 11.6 OpenGL 的纹理与物体表面光滑纹理的图形显示 .....            | 273 |
| 11.7 OpenGL 的交互输入与拾取 .....                     | 276 |
| 本章小结:调用图形标准轻松实现三维图形的实时显示 .....                 | 279 |
| 本教材界定重要专业术语索引 .....                            | 281 |
| 参考文献 .....                                     | 284 |

## 第 0 章

# 计算机图形学导论

**基本问题：**为什么把计算机图形学定位于显示图形的计算机应用程序？计算机图形学学科的基本问题与计算机图形学理论、工具与应用学科结构的基本内涵是什么？当前计算机图形学的研究热点与发展方向在哪？深入学习研究计算机图形学问题所需的参考资料有哪些？

通俗地说，**计算机图形学**是一种显示图形的计算机应用程序，它主要从理论上研究如何**用编程<sup>①</sup>**与数学计算的方法生成各种图形，以满足用户在计算机程序中用图形方式表达各自不同的追求目标与设计思想(这个计算机图形学的宽泛定义，要求应用程序处理的描述数据与其显示的图形有关联)。该定义能确保计算机图形的自动生成，并能有效克服目前国外把计算机图形学定位于图形标准<sup>[32, 34-40]</sup>或着色语言、其图形不能自动生成等弊端。因为这是造成传统计算机图形学课程产生教学困惑的主要原因。事实上，计算机图形学是随着计算机与图形显示设备的设计、制造与大规模的应用，逐渐产生并发展起来的。

计算机图形学的基本问题是“如何用计算机自动生成类似于人眼观察世界获得的观察图像”。人们获得观察图像的物理方法是用照相机拍照或使用人工绘画。一般用如下仿真程序生成显示图像：

(1) 仿真光线在自然界与照相机模型中传播，并在照相机镜头中生成动态图像——真实感图形的生成。

(2) 仿真画笔的绘画过程——非真实感图形的生成<sup>[42]</sup>。这是一个先观察，后绘画记录，再主观创作的复杂过程(其中，国画以写意风格为主，油画以写实风格为主)。该内容目前暂时没有纳入计算机专业本科课程教学。但实线、虚线、点画线与线宽等是仿真笔画的结果。

上述两类仿真程序确立了计算机图形学是可视化与物理仿真应用程序。

计算机显示图形的种类可分为：**静态图形**，即图形显示或绘制后不用擦除以永久保留，如绘图仪、打印机在纸上生成的图形；**动态图形**，即在显示器上显示的图形，可根据需要擦除或重新显示；**实时图形**，即在给定的短时间内完成相应图形的动态显示，如工业过程的实时监控系统和军事防空系统等应用领域所要求的图形显示。如果要求二维图形的显示随时间逐渐变化，如制作**动画(卡通)**片，主要依靠人们事先画出一个个中间图形的显示效果，再继续播放这组图形，从而在人们的视觉中形成动画效果。**实时动画**中每帧图像都有不同程度的改变，并要求每秒至少显示 60 帧图像，以形成稳定流畅的动画画面。如 3D 游戏，人们可以

① 程序源代码的编码实现过程与方法<sup>[98]</sup>简称编程(program)，它只是计算机程序设计过程中的一个步骤。

随意操作游戏中的各种角色进行各种动作与变换,以仿真各色人物的社会活动,并要求每秒显示 60~75 帧对应的动画图像。

显然,图像是平面上可见点阵的集合,它是图形的表现形式。图形是图像的一种数学抽象与模型描述。从图像的显示效果中自动提取已有各种物理模型的类别与描述数据,并进一步明确图像的表达式等,是模式识别学科的研究对象。通过数学变换,把已有的图像显示效果变得更清晰或模糊,是图像处理学科的研究对象。这两个学科的存在,对计算机图形学的研究与应用有很大的促进作用。

作为一类图形应用程序实例,从图形形成原理上讲,计算机图形学为达到生成像照片一样效果的三维真实感图形的目的,根据物理学原理,建立了多个描述可视物体、灯光、照相机等物理模型物理特性的数学模型,通过编程实现仿真光线在计算机场景(由多个物体构建的仿自然界可视物理环境)与照相机模型中传播,并在照相机镜头中生成三维动画图像。

计算机图形学作为计算机应用的一个分支,与计算机科学一样具有理论、工具与应用 3 个学科形态<sup>[1]</sup>,这决定了计算机图形学的学科结构。

## 0.1 计算机图形学的系统理论

为达到本教材设定的教学目标,可用数学模型描述可视物体、灯光、照相机等物理模型,并把该研究对象分解成以下 10 个问题以实现三维图形的显示。它们是本教材各章的主要内容。

1. 描述可视物体模型的主要因素,如描述物体外型的几何模型、确定物体外表反光透光能力的材质模型和物体外表显示细节的纹理模型等。显然,计算机图形学研究的物体,既可以是长方体、圆柱体、球体,也可以是机床、飞机、轮船与大炮,还可以是桥梁、铁路、房屋建筑以及其相应的设计图纸(抽象方法的应用),或是山水、草丛、树木、大地与活动的动物,以及狂风暴雨、电闪雷鸣、大气层、电磁场等自然现象。在国内外专业杂志中,可以看到人们如何建立这些物体或场景的几何模型等描述。它们在计算机动画<sup>①</sup>(空间复杂性高,时间复杂性低)与游戏(时间复杂性高,空间复杂性低)中有大量的应用。

几何模型:① 它包括点、线、面、体<sup>②</sup>、场<sup>③</sup>的构建、运动与演化(即几何模型描述数据随时间不断的变化)、碰撞检测与变形等要求。这些模型分别称为一维、二维、三维、四维几何图形。各种几何模型描述数据的自动获取,在实际应用中是一个非常复杂的问题。对此问题的深入研究,形成了测绘学专业学科。② 为了适应描述各种复杂物体的几何外型,人们分别建立了适应多种几何模型的描述工具(如直线、二次曲线、三次样条曲线、B 样条曲线,以及与其对应的曲面等函数表达式。人们还在不断构建新的适合不同类型物体几何形状的描述函数等工具)、描述方法(如边界表示法、扫描表示法、八叉树表示法、蒙皮表示法等)、建模方

① 计算机动画即在计算机中模拟拍电影、拍电视这一物理过程,以形成数字影像产品。物体运动或变形、灯光变幻、照相机运动,可形成计算机动画。

② 体是三维空间中有限的封闭空间并有明确的几何形状,它一般用数个表面的封闭进行描述(即为壳)。体的边界是壳,壳的边界是面,面的边界是边线,边线的边界是点,且体、壳、面、边线、点都有方向性。

③ 场的物质密度在一定的空间范围内有规律地逐渐变化并减小,它不像体具有界限分明的边界。场有标量场、矢量场、张量场之分。

法(如三维几何模型的重建与恢复<sup>[2]</sup>,用多个简单的几何模型编辑形成新的复杂几何模型,对已有几何模型的变形处理如拉伸、挤压、弯曲、螺旋、自由变形等)与建模实例(如长方体或茶壶等);构建几何模型的常用工具,包括对平面物体几何模型进行全剖切运算与布尔运算、欧拉运算<sup>[2]</sup>等;模型的变换包括对几何模型进行几何变换、全剖切运算与布尔运算,对其进行变形处理,以及通过细分曲线曲面技术形成新的光滑曲线曲面等;实例模型的存储方式与编程处理方法,包括对物体几何模型描述数据用翼边数据结构、半边数据结构、辐射边数据结构进行有效保存与处理;或对点、线、面等非封闭表面几何模型描述数据,用三表数据结构进行有效保存与处理。

③ 场可以描述更广泛一类的物理现象,如台风的变化过程、风洞的实验效果、电磁场的分布规律、物体表面的应力变化现象、环境中热传递效果的变化、地质勘探结果的可视化显示等。一般人们把这些问题放在“科学计算可视化”课程中讲授,因为这些气体、流体与场的模型构造需要比较深的数学知识。另如,人体的身体结构图或地质矿藏分布规律,其模型描述数据更加复杂。人们希望通过对它的多层次的剖面图或透视,观察它的内部结构关系或其功能,这可以通过对人体进行核磁共振、解剖或人造地震等地质普查测量方法构造而成。正因为场的这种复杂性,人们才希望借助图形显示的方法,直观地了解并掌握场的物质密度在空间中的变化规律,挖掘出动态数据场中所蕴涵的物理现象等。

④ 试图精确地构造现实世界中所有物体的几何模型,特别是具有复杂结构或微小结构或细微动态变化物体的几何模型,需要花费很大的代价。经过不断地探索和实践,人们通过其他的方法成功地构造这些几何模型,这就是所谓分形描述、粒子描述建模等多种其他建模方法的来源。分形描述、粒子描述等方法,可以方便地表现火焰、云彩、山脉、树林、沙漠、海岸线等模糊、不甚明确或具有某种相似性与随机性边界的物体或物质,它特别适合计算机艺术造型等应用领域。人们往往根据用户需求,按照数学方法或文法规则建立分形或粒子模型。这些研究内容,属于计算机图形学中新的研究分支<sup>[16]</sup>。

⑤ 计算机辅助设计与计算机动画在几何模型上的区别:CAD对物体的几何模型要求很高,特别要求其误差要小。因为它需要用数控机床把这些已设计好的物体零件加工制造出来。而多个零部件组成的精密加工机床,以及机床自身各零部件的误差精度等,会直接影响它对其他零部件的加工效果,但CAD领域中对物体的图形显示可以放低要求。机床的加工过程表明,在机床内部也存在机械运动与动画等效果。在计算机动画领域,一般对最后计算机渲染的图像质量要求很高,但对物体几何模型的要求低。例如,物体的外表面可以不封闭,只要这个破壳表面不被照相机拍摄到就可以。

⑥ 正因为几何模型问题的重要性与复杂性,人们常把计算机图形学研究的问题划分成两个相对独立的分支:计算机辅助设计与显示图形的图形学,这两者不能分离,否则易带来教学困惑。

**材质模型:**不同材料形成的几何物体,其外表面反光(透光)的效果由该物体表面的光滑度与其材料反射(透射)各种波长光能的能力确定。这种反光能力与其对应的光谱反射率曲线相似。为了简化这种反光能力的表示与计算,根据RGB三基色颜色模型的要求,人们分别测试并定义了各种材料物体表面对红绿蓝的各种反光系数,近似表示各物体表面对环境光、漫射光、镜面光与镜面高光、透明度等反光(透光)能力的大小。这些系数分别为环境光反射系数、漫射光反射系数、镜面光反射系数、镜面高光指数、透明系数、透明材料的折射率,或双向反射系数,以及光线跟踪算法需要的环境镜面反射光的反射系数与环境规则透射光的透射系数等。这些系数称为一个物体材料的材质模型,它们可以近似地表达该物体材料对各种波长光能的反射(透射)能力。

**纹理模型:**即用解析数学的方法,描述物体表面在外观上所呈现出的某种有规律的图案。一些复杂材质的物体表面,每个点对各波长照射光的反光能力可能均有差异,且其表面各点亮度起伏较大,故其外表可能会呈现出极为复杂的图案。为简化其数学解析描述的复杂性,可用数字图像等离散方法精确描述这些复杂的纹理现象。两者均为有效的纹理模型,但后者描述产生的真实感图形显示效果更好。

用数学模型有效描述物体的外形外表等特征的同时,还应有效地描述物体姿态朝向、运动轨迹与运动方程,多个物体之间的碰撞检测与多种变形,以及多个简单物体在复合物体内部的相互配合关系,多关节物体的运动与群动等。这些描述在计算机动画与游戏以及在CAD中均有重要的应用。

2. 描述灯光模型(即发光体,对点光源可忽视其几何、材质、纹理特性)发光物理特性的光线几何模型、颜色模型、照明模型、光线跟踪算法与辐射度算法等<sup>①</sup>,这是确定物体表面每点颜色与亮度的另一个主要因素。灯光模型,特别是发光体在3D动画与游戏中应用较多,在CAD中应用较少。

**光线几何模型:**包括光源的位置与其几何形状,如点光源、线光源或面光源;光线是平行光线或透视线;光线的照射方向与照射范围;光线传播其亮度的衰减规律等。

**颜色模型:**在可见光谱中,任意指定彼此独立的三个基色作为配色的基础,通过该三基色不同亮度的相加混合,能配出许多新的颜色以形成三角形色域(颜色的变色范围)。由于该三基色能表示三角形色域范围内的各种颜色以及颜色的变化规律,故称该三基色为颜色模型。显示器中常用的颜色模型是RGB颜色模型,印刷中常用的颜色模型是CMY颜色模型。

**照明模型(透明模型):**在光源光线的直接照射下,该模型用于确定物体表面每点亮度的计算方法。它的建立与物体和灯光两因素有关,说明该模型的实现有一定的关联性与复杂性。后述的光线跟踪算法与辐射度算法,因其与多个物体直接相关使照明模型的计算变得更复杂,这也给光线跟踪算法与辐射度算法的硬件实现带来了困难。

**光线跟踪算法:**即在计算机中由多物体构建仿自然界可视物理环境,仿真光线在该可视物理环境与照相机模型中传播(如光线的反射、折射、各种衰减规律与照明效果),并在照相机镜头中动态生成显示图像的过程。这样跟踪光线,常导致大量光线射出照相机外,使算法的计算效率降低。改进的方法是利用光线的可逆性,从视线的方向逆向开始跟踪光线的照射过程,并在照相机镜头中生成显示图像。但这样处理,一般会遗失镜面作为二次光源产生的递归照射现象,可以采用双向跟踪算法解决该问题。

**辐射度算法:**该算法借鉴热辐射传导并趋于平均的原理与计算方法,求解在封闭环境中仅有理想的漫射光能在多物体之间多次相互传播之后,各物体表面所形成的稳定照明效果(非光源光线一次直接照射所产生的照明效果)。通过插值均匀面片的亮度,并经照相机模型的投影、填充等处理后,确定该场景的图形显示画面。

### 3. 显示各种三维图形的照相机模型。

**照相机模型:**该模型是一种描述投影光线在投影平面中成像的数学模型,以此模拟物理

<sup>①</sup> 一个物理模型的多个不同物理特性,要用不同的数学模型进行有效描述,这是物理模型与数学模型的主要区别。一个数学模型一般只在一定使用范围内描述其物理特性,超出该范围其物理特性可能会发生新的不同变化。正确处理这种变化关系,是系统仿真与计算机仿真对数学建模的基本要求。

照相机的功能。它根据照相机自身的观察参数以及其接受的多个可视物体与灯光模型等描述数据,根据光照条件确定各线段与面片的亮度(或在投影后计算它们的亮度或直接指定其亮度),用投影、着色或纹理映射等方式,生成其对应的三维图像。这是实现图形标准与着色语言功能的基础,但这仅相当于解决了应用程序的数据输出显示这一子任务,它们不能作为计算机图形学的代名词。因为还有很多其他程序,不用图形标准或着色语言也能生成三维图形,且图形标准与着色语言还有多种形式之分,故传统的计算机图形学定位于图形标准的做法需要改革。

照相机模型显示三维图形的运算处理步骤,可分为:① **几何变换**。即对待显示的点、线、面等三维图形的几何模型描述数据进行几何变换,使其便于规格化观察空间的裁剪处理。② **裁剪**。根据照相机的观察空间大小,去掉超出三维显示范围的三维图形几何模型描述数据,使保留的三维图形几何模型描述数据能在显示器中正确地显示。③ **投影**。根据光线传播原理,把三维图形的几何模型描述数据转换成二维图形的几何模型描述数据,并保留每个图形几何模型描述数据的规格化相对深度数据,便于在二维显示器中生成其对应的显示图像与消隐处理。④ **生成图像**。调用二维图形的生成算法生成二维图像,如直线的生成、多边形填充等。

照相机模型生成图像的过程,又细分为消隐算法、着色算法、纹理映射、阴影算法等4种形式。其中:① **消隐算法**要求显示那些能被视线直接观察的各可见表面与边线,不显示那些不能被视线直接观察(即被遮挡)的各表面与边线。② **着色算法**确定用何种数学插值算法填充多边形网格表面,使其显示效果是多边形网格效果或是一张整体光滑的曲面效果(Gouraud 填充或 Phong 填充)。③ **纹理映射算法**,即把图像映射至屏幕的多边形中,而这个图像既可以是实际照相机拍摄的照片,也可以是用数学模型描述或程序动态产生的结果。④ 在计算机场景中,由于某些遮挡物的存在,使光源光线不能直接照射到某些物体的表面,会使某些表面反光(透光)的亮度暗于被光源光线直接照射物体表面的亮度。观察的角度不同,所见这种阴影效果的形状与大小不一样。**阴影算法**即在此场景图中,统一绘制这种阴影图形显示效果与非阴影图形显示效果。故正确计算每一面片的亮度,是阴影算法的关键。

但上述照相机模型,不适合光线跟踪算法显示三维图形。为解决此问题,应根据光线跟踪算法逐点光线传播的原理重构照相机模型。这决定了三维图形的生成技术沿两个方向发展的路线图。

4. 三维图形学的仿真算法:计算机三维图形的生成,可以用仿真光线传播生成显示图像的新观点统一解释如下:① 三维图形几何模型描述数据的投影显示,即仿真“光线照射空间几何物体在投影平面中形成投影图形”或“物体表面反射光线至照相机模型所致”这一物理过程。② 仿真漫射光能在物体之间多次相互传播的最终效果,以确定物体表面上每点的颜色与亮度(如辐射度算法);或仿真光线在计算机场景与照相机模型中传播,并在照相机镜头中动态生成显示图像(如光线跟踪算法)。③ 纹理映射算法,可解释为“把照片映射至屏幕的多边形中,以仿真逐点光线照射物体表面产生的反光显示效果”。④ 二维直线的生成过程,可解释为是对空间直线的位置(非几何形状)逐点投影(仿真光线传播)至显示屏幕过程的一种刻画与仿真。这是一个数学概念与命题,它不是真实的物理变化过程,故三维真实感图形不包括这种图形的显示。直线等线段图形在三维图形的数学模型构建中有重要的应用,它们是三维真实感图形生成的前提,比如对物体几何形状或物体运动轨迹进行有效描述,或对照相机模

型的观察范围和灯光模型的照射范围等几何参数进行有效描述。⑤事实上,三维真实感图形的渲染过程即生成照片,与雷达发射电磁波,并接收空中目标反射电磁波信号在显示器中成像的物理过程很相似。这是因为光线是一种特定波长电磁波,但雷达成像的原理更复杂。

5. **图像融合算法**:两个不同的像素点,各自有不同的融合系数。用户可根据需求,把这两个不同的融合系数配置成新的比例系数。再用该比例系数,把这两个像素点混合成一个新的像素点。很多光晕、光圈等特效,用物理数学方法建模的方案解决很复杂,但用图像融合的方案解决相对简单。利用图像融合算法,可较好地模拟照相机的镜头功能。

6. **三维图形学的仿真系统**:在计算机图形学中,光线传播涉及的所有可视物理现象,均为计算机图形学的研究对象,它确定了计算机图形学的研究范围。

7. **计算机图形学学科发展的基本规律(评估)**:通过比较计算机生成三维图形的显示效果与实际照片的差异,可不断提出用新的数学模型或仿真算法等对其已有的计算模型进行渐进改进或更新,使计算机图形学的数学计算过程,不断地逼近灯光、照相机与现实物体模型(包括刚体、软体、流体、多关节运动物体、气体、场)的构建、运动与演化、碰撞检测与变形和物体反光效果的显示这一真实的物理变化过程,以此推动计算机图形学的研究走向深入。

8. **计算机仿真的理论架构原理**:计算机仿真与传统系统仿真的差异与共同点在于,不同领域的系统仿真,仅仅在于它们待处理的对象、处理问题的方法即数学模型不一样。但这些仿真均由“系统、建模、仿真实验(仿真算法)、评估”4个过程构成。若能用案例讲清仿真这4个过程,即可认为介绍清楚计算机仿真的基本原理。

另外,从三维图形学的上述教学研究内容可知,用图形方式显示各种可视物理现象的变化过程只是一个表面现象。关键是要掌握这种变化过程的物理机理并能用数学模型的方法,全面正确地描述这种变化的过程。也就是说,人们所观察到的图形显示效果,多是自然界中各种物理演变过程所产生的一种反光(发光)可见物理现象。物理学中的各种理论研究方法,研究这些物理演变过程所产生的结果,也应该能用图形显示的方法表现出来,这样其研究成果才容易被一般大众所理解。例如,宇宙大爆炸理论、黑洞理论、相对论理论、量子力学理论等,都有用图形的方式表示其研究成果的图片,在互联网上供人们浏览,这些图片使人们能加深理解这些学说和理论研究的物理意义。可见,传统意义上的物理学科的研究内容(如物体的运动与演化)与计算机图形学有着紧密的联系,这就是科学计算可视化的来源<sup>[10, 80, 81, 82]</sup>。

9. **计算机图形学的学科性质**:本节前8个问题很好地说明了计算机图形学可以用数学模型的方法,描述可视物体、灯光与照相机物理模型物理特性的变化过程,并仿真光线传播生成三维图形等部分物理学仿真应用。计算机图形学仿真所涉及的数学计算,属于科学计算<sup>①</sup>的一种基本形式。计算机图形学倡导的仿真教育,是证明计算机学科科学性的一种有效方法。

10. **编程实现三维图形的自动显示**,应按下述3个步骤进行:

(1) 定义软件系统的概念。

**软件系统**即按解决问题的数据处理系统流程要求,编程实现数个模型描述数据与命令的“输入、存储管理、运算处理、输出”4个过程,能直接达到自动运行软件的追求目标并具有完整动态结构的综合程序。

① 科学计算是用计算机处理科学研究和工程技术应用中遇到的数学计算问题,它是计算机仿真的一个子集。