



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



高等学校规划教材

# 计算机图形学基础

(第3版)

◎ 陆 枫 何云峰 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
高等学校规划教材

# 计算机图形学基础

(第3版)

陆 枫 何云峰 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。全书共 10 章,第 1 章简要介绍计算机图形学的基本概念、应用和发展动态。第 2~5 章由“外”到“内”介绍计算机图形处理系统的硬件设备、人机交互处理技术、图形对象在计算机内的表示以及基本图形的生成算法等。第 6 章主要介绍二维变换和二维观察的概念。第 7 章介绍三维变换及三维观察的基本内容,包括几何变换和投影变换等。第 8 章介绍曲线和曲面的生成。第 9 章简要介绍常用的消隐算法。第 10 章对真实感图形绘制的基本思想做了简单描述。

本书内容全面翔实,概念简明清晰,实例丰富实用。配套教学资源,包含教学大纲、电子课件和相关教学编程实例等,可免费下载。

本书可作为高等学校计算机等相关专业本科生教材和科技人员参考书。

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

计算机图形学基础/陆枫,何云峰编著. —3 版. —北京:电子工业出版社,2018.7

ISBN 978-7-121-34668-2

I. ① 计… II. ① 陆… ② 何… III. ① 计算机图形学—高等学校—教材 IV. ① TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 149827 号

策划编辑:章海涛

责任编辑:章海涛

特约编辑:何 雄

印 刷:三河市华成印务有限公司

装 订:三河市华成印务有限公司

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:19.25 字数:490 千字

版 次:2002 年 3 月第 1 版

2018 年 7 月第 3 版

印 次:2019 年 2 月第 3 次印刷

定 价:52.00 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, 88258888。

质量投诉请发邮件至 [zltts@phei.com.cn](mailto:zltts@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式:192910558 (QQ 群)。

# 前言

近几十年来,交互式计算机图形学有了引人瞩目的发展。可以说:“已经没有哪一个领域未从计算机图形学的发展和应用中获得好处。”

目前,几乎所有的高等学校均已开设了“计算机图形学”课程。国内外知名大学通常这样来安排计算机图形学的课程体系:本科生开设“计算机图形学基础”或“计算机图形学引论”课程,讲述计算机图形学的基本知识和基础技术,为在这一领域深入学习和研究奠定基础;研究生开设“高级计算机图形学”“计算机图形学热点话题”“真实感图形显示”“虚拟现实技术”等课程,重点讨论计算机图形学的发展动态与研究热点。

我们在多年教学实践的基础上,参阅国内外最新版本的教材,主要针对高等院校本科生编写了本书。力争达到三个目标:

一是着重介绍计算机图形学的基本内容,让学生逐渐掌握和熟悉这个学科中涉及的基本概念和思维方式;

二是尽量给出计算机图形学最新发展所需要的基础知识;

三是坚持理论与实践相结合,尽可能多地采用现有的成熟技术,提供相关的编程实例。

本书第2版入选普通高等教育“十一五”国家级规划教材。结合教学实践、教材使用反馈和最新技术发展,由陆枫和何云峰进行了修订和改写。

本书内容全面翔实,概念简明清晰,实例丰富实用,教学资源配套。本书配有教学资源,包含作者多年来教学改革和实践的成果——电子教案和相关教学编程实例,教师可通过华信教育资源网 <http://www.hxedu.com.cn> 负责注册下载。

全书共10章。

第1章,简要介绍计算机图形学的基本概念、应用和发展动态。

第2~5章,由“外”到“内”介绍计算机图形处理系统的硬件设备、人机交互处理、图形对象在计算机内的表示以及基本图素的生成算法等。

第6章,主要介绍二维变换和二维观察的概念。

第7~10章,主要涉及三维图形的变换、处理和绘制。

第7章介绍三维变换及三维观察的基本内容,包括几何变换和投影变换等。

第8章介绍曲线和曲面的生成。

第9章简要介绍常用的消隐算法。

第10章对真实感图形绘制的基本思想做了简单描述。

感谢烟台大学的韩明峰教授为本书提出的一些有益建议。

在本书的编写过程中,得到了华中科技大学计算机科学与技术学院卢正鼎、王炎坤、金海、李桂兰、刘乐善、周功业等教授的支持,在此表示衷心感谢。感谢杨薇薇、于俊清、徐海银、李丹、万琳、凌贺飞、邹复好、陶文兵、李国宽等华中科技大学计算机科学与技术学院计算机图形学课程组的教师们,他们参与了本书的教学实践并提出了宝贵的修改意见。感谢李其申、龚文杰、谢琦琚、张林、庞敏、张潇、白云、王重、闵敏、李涛、杨红圆、陈文辉、沙晋、华睿、宋承璐、马琰、慎厚雄、王玉琼、邓黎明、陈霞、洪雪松、曾辉、严川鰲、

吴峰、方涛、黎良、章昆、熊炎、谢欣荣、朱唯波、姚杰、钱达胜、李磊、吴为、王敖、章仙军、陈慧、杨波、潘龙、潘伟文、盛斌、夏永、高玉琴、杨文、杨亮、张聪、卢嘉、任天兵、李晓宇、何文珺、刘紫兆、万季、方哲翔等同学在计算机图形学教学中提出的建议和制作的相关程序。

由于作者水平有限，书中难免有不妥甚至错误之处，恳请读者不吝指正。作者的 E-mail 地址：[lufeng@hust.edu.cn](mailto:lufeng@hust.edu.cn)。

作者  
于武汉喻家山

# 目 录

|                     |    |
|---------------------|----|
| 第 1 章 绪论            | 1  |
| 1.1 计算机图形学及其相关概念    | 1  |
| 1.2 计算机图形学的发展       | 2  |
| 1.2.1 计算机图形学学科的发展   | 2  |
| 1.2.2 图形硬件设备的发展     | 3  |
| 1.2.3 图形软件的发展       | 4  |
| 1.3 计算机图形学的应用       | 4  |
| 1.3.1 计算机辅助设计与制造    | 4  |
| 1.3.2 计算机辅助绘图       | 5  |
| 1.3.3 计算机辅助教学       | 5  |
| 1.3.4 办公自动化和电子出版技术  | 5  |
| 1.3.5 计算机艺术         | 6  |
| 1.3.6 在工业控制及交通方面的应用 | 6  |
| 1.3.7 在医疗卫生方面的应用    | 6  |
| 1.3.8 图形用户界面        | 6  |
| 1.4 计算机图形学研究动态      | 7  |
| 1.4.1 计算机动画         | 7  |
| 1.4.2 地理信息系统        | 8  |
| 1.4.3 人机交互          | 9  |
| 1.4.4 真实感图形显示       | 10 |
| 1.4.5 虚拟现实          | 10 |
| 1.4.6 科学计算可视化       | 12 |
| 1.4.7 并行图形处理        | 13 |
| 习题 1                | 13 |
| 第 2 章 计算机图形系统及图形硬件  | 15 |
| 2.1 计算机图形系统概述       | 15 |
| 2.1.1 计算机图形系统的功能    | 15 |
| 2.1.2 计算机图形系统的结构    | 16 |
| 2.2 图形输入设备          | 18 |
| 2.2.1 键盘            | 18 |
| 2.2.2 鼠标器           | 19 |
| 2.2.3 光笔            | 19 |
| 2.2.4 触摸屏           | 20 |
| 2.2.5 操纵杆           | 20 |
| 2.2.6 跟踪球和空间球       | 20 |

|        |                       |    |
|--------|-----------------------|----|
| 2.2.7  | 数据手套 .....            | 21 |
| 2.2.8  | 数字化仪 .....            | 21 |
| 2.2.9  | 图像扫描仪 .....           | 22 |
| 2.2.10 | 声频输入系统 .....          | 22 |
| 2.2.11 | 视频输入系统 .....          | 23 |
| 2.3    | 图形显示设备 .....          | 23 |
| 2.3.1  | 阴极射线管 .....           | 23 |
| 2.3.2  | CRT 图形显示器 .....       | 27 |
| 2.3.3  | 平板显示器 .....           | 30 |
| 2.3.4  | 三维观察设备 .....          | 33 |
| 2.4    | 图形显示子系统 .....         | 34 |
| 2.4.1  | 光栅扫描图形显示子系统的结构 .....  | 34 |
| 2.4.2  | 绘制流水线 .....           | 36 |
| 2.4.3  | 相关概念 .....            | 37 |
| 2.5    | 图形硬拷贝设备 .....         | 40 |
| 2.5.1  | 打印机 .....             | 40 |
| 2.5.2  | 绘图仪 .....             | 41 |
| 2.6    | OpenGL 图形软件包 .....    | 41 |
| 2.6.1  | OpenGL 的主要功能 .....    | 42 |
| 2.6.2  | OpenGL 的绘制流程 .....    | 42 |
| 2.6.3  | OpenGL 的基本语法 .....    | 43 |
| 2.6.4  | 一个完整的 OpenGL 程序 ..... | 44 |
|        | 习题 2 .....            | 47 |
| 第 3 章  | 用户接口与交互式技术 .....      | 48 |
| 3.1    | 用户接口设计 .....          | 48 |
| 3.1.1  | 用户模型 .....            | 48 |
| 3.1.2  | 显示屏幕的有效利用 .....       | 48 |
| 3.1.3  | 反馈 .....              | 49 |
| 3.1.4  | 一致性原则 .....           | 50 |
| 3.1.5  | 减少记忆量 .....           | 50 |
| 3.1.6  | 回退和出错处理 .....         | 51 |
| 3.1.7  | 联机帮助 .....            | 51 |
| 3.1.8  | 视觉效果设计 .....          | 51 |
| 3.1.9  | 适应不同的用户 .....         | 52 |
| 3.2    | 逻辑输入设备与输入处理 .....     | 52 |
| 3.2.1  | 逻辑输入设备 .....          | 52 |
| 3.2.2  | 输入模式 .....            | 55 |
| 3.3    | 交互式绘图技术 .....         | 56 |
| 3.3.1  | 基本交互式绘图技术 .....       | 56 |

|       |                  |     |
|-------|------------------|-----|
| 3.3.2 | 三维交互技术           | 58  |
| 3.4   | OpenGL 中橡皮筋技术的实现 | 59  |
| 3.4.1 | 基于鼠标的实现          | 60  |
| 3.4.2 | 基于键盘的实现          | 62  |
| 3.5   | OpenGL 中拾取操作的实现  | 63  |
| 3.6   | OpenGL 的菜单功能     | 67  |
|       | 习题 3             | 68  |
| 第 4 章 | 图形的表示与数据结构       | 69  |
| 4.1   | 基本概念             | 69  |
| 4.1.1 | 基本图形元素           | 69  |
| 4.1.2 | 几何信息与拓扑信息        | 70  |
| 4.1.3 | 坐标系              | 71  |
| 4.1.4 | 实体的定义            | 73  |
| 4.1.5 | 正则集合运算           | 74  |
| 4.1.6 | 平面多面体与欧拉公式       | 76  |
| 4.2   | 三维形体的表示          | 77  |
| 4.2.1 | 多边形表面模型          | 78  |
| 4.2.2 | 扫描表示             | 81  |
| 4.2.3 | 构造实体几何法          | 81  |
| 4.2.4 | 空间位置枚举表示         | 83  |
| 4.2.5 | 八叉树              | 84  |
| 4.2.6 | BSP 树            | 85  |
| 4.2.7 | OpenGL 中的实体模型函数  | 85  |
| 4.3   | 非规则对象的表示         | 90  |
| 4.3.1 | 分形几何             | 90  |
| 4.3.2 | 形状语法             | 92  |
| 4.3.3 | 粒子系统             | 93  |
| 4.3.4 | 基于物理的建模          | 93  |
| 4.3.5 | 数据场的可视化          | 93  |
| 4.4   | 层次建模             | 94  |
| 4.4.1 | 段与层次建模           | 94  |
| 4.4.2 | 层次模型的实现          | 95  |
| 4.4.3 | OpenGL 中层次模型的实现  | 96  |
|       | 习题 4             | 98  |
| 第 5 章 | 基本图形生成算法         | 99  |
| 5.1   | 直线的扫描转换          | 99  |
| 5.1.1 | 数值微分法            | 99  |
| 5.1.2 | 中点 Bresenham 算法  | 101 |

|       |                    |     |
|-------|--------------------|-----|
| 5.1.3 | Bresenham 算法       | 103 |
| 5.2   | 圆的扫描转换             | 105 |
| 5.2.1 | 八分法画圆              | 105 |
| 5.2.2 | 中点 Bresenham 画圆算法  | 106 |
| 5.3   | 椭圆的扫描转换            | 107 |
| 5.3.1 | 椭圆的特征              | 108 |
| 5.3.2 | 椭圆的中点 Bresenham 算法 | 109 |
| 5.4   | 多边形的扫描转换与区域填充      | 112 |
| 5.4.1 | 多边形的扫描转换           | 112 |
| 5.4.2 | 边缘填充算法             | 116 |
| 5.4.3 | 区域填充               | 118 |
| 5.4.4 | 其他相关概念             | 122 |
| 5.5   | 字符处理               | 123 |
| 5.5.1 | 点阵字符               | 123 |
| 5.5.2 | 矢量字符               | 124 |
| 5.6   | 属性处理               | 124 |
| 5.6.1 | 线型和线宽              | 124 |
| 5.6.2 | 字符的属性              | 127 |
| 5.6.3 | 区域填充的属性            | 127 |
| 5.7   | 反走样                | 128 |
| 5.7.1 | 过取样                | 129 |
| 5.7.2 | 简单的区域取样            | 130 |
| 5.7.3 | 加权区域取样             | 131 |
| 5.8   | 在 OpenGL 中绘制图形     | 132 |
| 5.8.1 | 点的绘制               | 132 |
| 5.8.2 | 直线的绘制              | 133 |
| 5.8.3 | 多边形面的绘制            | 134 |
| 5.8.4 | OpenGL 中的字符函数      | 138 |
| 5.8.5 | OpenGL 中的反走样       | 139 |
|       | 习题 5               | 141 |
| 第 6 章 | 二维变换及二维观察          | 143 |
| 6.1   | 基本概念               | 143 |
| 6.2   | 基本几何变换             | 144 |
| 6.2.1 | 平移变换               | 144 |
| 6.2.2 | 比例变换               | 145 |
| 6.2.3 | 旋转变换               | 146 |
| 6.2.4 | 对称变换               | 146 |
| 6.2.5 | 错切变换               | 148 |
| 6.2.6 | 二维图形几何变换的计算        | 149 |

|       |                 |     |
|-------|-----------------|-----|
| 6.3   | 复合变换            | 150 |
| 6.3.1 | 二维复合平移变换和比例变换   | 150 |
| 6.3.2 | 二维复合旋转变换        | 150 |
| 6.3.4 | 其他二维复合变换        | 151 |
| 6.3.5 | 相对任一参考点的二维几何变换  | 151 |
| 6.3.6 | 相对于任意方向的二维几何变换  | 152 |
| 6.3.7 | 坐标系之间的变换        | 153 |
| 6.3.8 | 光栅变换            | 154 |
| 6.3.9 | 变换的性质           | 155 |
| 6.4   | 二维观察            | 156 |
| 6.4.1 | 基本概念            | 156 |
| 6.4.2 | 用户坐标系到观察坐标系的变换  | 158 |
| 6.4.3 | 窗口到视区的变换        | 158 |
| 6.5   | 裁剪              | 159 |
| 6.5.1 | 点的裁剪            | 160 |
| 6.5.2 | 直线段的裁剪          | 160 |
| 6.5.3 | 多边形的裁剪          | 166 |
| 6.5.4 | 其他裁剪            | 169 |
| 6.6   | OpenGL 中的二维观察变换 | 170 |
|       | 习题 6            | 172 |
| 第 7 章 | 三维变换及三维观察       | 173 |
| 7.1   | 三维变换的基本概念       | 173 |
| 7.1.1 | 几何变换            | 173 |
| 7.1.2 | 三维齐次坐标变换矩阵      | 173 |
| 7.1.3 | 平面几何投影          | 174 |
| 7.2   | 三维几何变换          | 175 |
| 7.2.1 | 三维基本几何变换        | 175 |
| 7.2.2 | 三维复合变换          | 180 |
| 7.3   | 三维投影变换          | 183 |
| 7.3.1 | 正投影             | 183 |
| 7.3.2 | 斜投影             | 189 |
| 7.4   | 透视投影            | 190 |
| 7.4.1 | 一点透视            | 192 |
| 7.4.2 | 二点透视            | 193 |
| 7.4.3 | 三点透视            | 194 |
| 7.5   | 观察坐标系及观察空间      | 195 |
| 7.5.1 | 观察坐标系           | 195 |
| 7.5.2 | 观察空间            | 196 |
| 7.6   | 三维观察流程          | 199 |

|       |                |     |
|-------|----------------|-----|
| 7.6.1 | 用户坐标系到观察坐标系的变换 | 200 |
| 7.6.2 | 平行投影的规范化投影变换   | 200 |
| 7.6.3 | 透视投影的规范化投影变换   | 202 |
| 7.7   | 三维裁剪           | 205 |
| 7.7.1 | 关于规范化观察空间的裁剪   | 205 |
| 7.7.2 | 齐次坐标空间的裁剪      | 206 |
| 7.8   | OpenGL 中的变换    | 207 |
| 7.8.1 | 矩阵堆栈           | 207 |
| 7.8.2 | 模型视图变换         | 208 |
| 7.8.3 | 投影变换           | 209 |
| 7.8.4 | 实例             | 211 |
|       | 习题 7           | 213 |
| 第 8 章 | 曲线与曲面          | 215 |
| 8.1   | 基本概念           | 215 |
| 8.1.1 | 曲线/曲面数学描述的发展   | 215 |
| 8.1.2 | 曲线/曲面的表示要求     | 216 |
| 8.1.3 | 曲线/曲面的表示       | 217 |
| 8.1.4 | 插值与逼近          | 218 |
| 8.1.5 | 连续性条件          | 218 |
| 8.1.6 | 样条描述           | 219 |
| 8.2   | 三次样条           | 220 |
| 8.2.1 | 自然三次样条         | 220 |
| 8.2.2 | Hermite 插值样条   | 221 |
| 8.3   | Bezier 曲线/曲面   | 222 |
| 8.3.1 | Bezier 曲线的定义   | 223 |
| 8.3.2 | Bezier 曲线的性质   | 224 |
| 8.3.3 | Bezier 曲线的生成   | 226 |
| 8.3.4 | Bezier 曲面      | 229 |
| 8.4   | B 样条曲线/曲面      | 230 |
| 8.4.1 | B 样条曲线         | 230 |
| 8.4.2 | B 样条曲线的性质      | 235 |
| 8.4.3 | B 样条曲面         | 237 |
| 8.5   | 有理样条曲线/曲面      | 237 |
| 8.5.1 | NURBS 曲线/曲面的定义 | 238 |
| 8.5.2 | 有理基函数的性质       | 239 |
| 8.5.3 | NURBS 曲线/曲面的特点 | 240 |
| 8.6   | 曲线/曲面的转换和计算    | 241 |
| 8.6.1 | 样条曲线/曲面的转换     | 241 |
| 8.6.2 | 样条曲线/曲面的离散生成   | 242 |

|        |                    |     |
|--------|--------------------|-----|
| 8.7    | OpenGL 生成曲线/曲面     | 244 |
| 8.7.1  | Bezier 曲线/曲面函数     | 244 |
| 8.7.2  | GLU 中的 B 样条曲线/曲面函数 | 247 |
|        | 习题 8               | 252 |
| 第 9 章  | 消隐                 | 253 |
| 9.1    | 深度缓存器算法            | 253 |
| 9.2    | 区间扫描线算法            | 255 |
| 9.3    | 深度排序算法             | 257 |
| 9.4    | 区域细分算法             | 258 |
| 9.5    | 光线投射算法             | 260 |
| 9.6    | BSP 树              | 260 |
| 9.7    | 多边形区域排序算法          | 261 |
| 9.8    | OpenGL 中的消隐处理      | 262 |
|        | 习题 9               | 267 |
| 第 10 章 | 真实感图形绘制            | 268 |
| 10.1   | 简单光照模型             | 268 |
| 10.1.1 | 环境光                | 268 |
| 10.1.2 | 漫反射光               | 269 |
| 10.1.3 | 镜面反射光              | 270 |
| 10.1.4 | 光强衰减               | 271 |
| 10.1.5 | 颜色                 | 272 |
| 10.2   | 基于简单光照模型的多边形绘制     | 273 |
| 10.2.1 | 恒定光强的多边形绘制         | 274 |
| 10.2.2 | Gouraud 明暗处理       | 274 |
| 10.2.3 | Phong 明暗处理         | 276 |
| 10.3   | 透明处理               | 277 |
| 10.4   | 产生阴影               | 278 |
| 10.5   | 模拟景物表面细节           | 278 |
| 10.5.1 | 用多边形模拟表面细节         | 279 |
| 10.5.2 | 纹理的定义和映射           | 279 |
| 10.5.3 | 凹凸映射               | 280 |
| 10.6   | 整体光照模型与光线追踪        | 281 |
| 10.6.1 | 整体光照模型             | 281 |
| 10.6.2 | Whitted 光照模型       | 281 |
| 10.6.3 | 光线跟踪算法             | 282 |
| 10.6.4 | 光线跟踪反走样            | 284 |
| 10.7   | OpenGL 中的光照与表面绘制函数 | 285 |
| 10.7.1 | OpenGL 点光源         | 285 |

|        |               |     |
|--------|---------------|-----|
| 10.7.2 | OpenGL 全局光照   | 286 |
| 10.7.3 | OpenGL 表面材质   | 287 |
| 10.7.4 | OpenGL 透明处理   | 288 |
| 10.7.5 | OpenGL 表面绘制   | 289 |
| 10.7.6 | 实例            | 289 |
| 10.8   | OpenGL 中的纹理映射 | 291 |
| 习题 10  |               | 293 |
| 参考文献   |               | 295 |

# 第1章 绪 论

图形图像技术是现代社会信息化的重要技术。据统计,人类主要通过视觉、触觉、听觉和嗅觉等感觉器官感知外部世界,其中约80%的信息由视觉获取,“百闻不如一见”就是一个非常形象的说法。因此,旨在研究用计算机来显示、生成和处理图形信息的计算机图形学成为一个非常活跃的研究领域。

## 1.1 计算机图形学及其相关概念

计算机图形学(Computer Graphics)是研究怎样利用计算机来显示、生成和处理图形的原理、方法和技术的一门学科。世界各国的专家学者对图形学有着各自不同的定义。国际标准化组织(ISO)将其定义为:计算机图形学是研究通过计算机将数据转换成图形,并在专门显示设备上显示的原理、方法和技术。电气与电子工程师协会(IEEE)将其定义为:计算机图形学是利用计算机产生图形化的图像的艺术和科学。(Computer graphics is the art or science of producing graphical images with the aid of computer.)

计算机图形学的研究对象是图形。通常意义的图形是指能够在人的视觉系统中形成视觉印象的客观对象,既包括了各种照片、图片、图案、图像以及图形实体,也包括了由函数式、代数方程和表达式所描述的图形。构成图形的要素可以分为两类:一类是刻画形状的点、线、面、体等几何要素;另一类是反映物体本身固有属性,如表面属性或材质的明暗、灰度、色彩(颜色信息)等非几何要素。例如,一幅黑白照片上的图像是由不同灰度的点构成的;方程 $x^2+y^2=r^2$ 确定的图形是由具有一定颜色信息并满足该方程的点所构成的。因此,计算机图形学中所研究的图形可以定义为“从客观世界物体中抽象出来的带有颜色信息及形状信息的图和形”。

计算机中表示带有颜色及形状信息的图和形常用两种方法:点阵法和参数法。点阵法是用具有灰度或颜色信息的点阵来表示图形的一种方法,强调图形由哪些点组成,这些点具有什么灰度或色彩。参数法是以计算机中所记录图形的形状参数与属性参数来表示图形的一种方法。形状参数可以是形状的方程系数、线段的起点和终点对等几何属性的描述;属性参数则描述灰度、色彩、线型等非几何属性。这样可以进一步细分:把参数法描述的图形叫做图形(Graphics),而把点阵法描述的图形叫做图像(Image)。

随着人们对图形概念认识的深入,图形图像处理技术也逐步出现分化。目前,与图形图像处理相关的学科有计算机图形学、数字图像处理(Digital Image Processing)和计算机视觉(Computer Vision),它们之间的关系如图1-1所示。计算机图形学试图将参数形式的数据描述转换成(逼真的)图像。数据图像处理则着重强调在图像之间进行变换,旨在对图像进行各种加工以改善图像

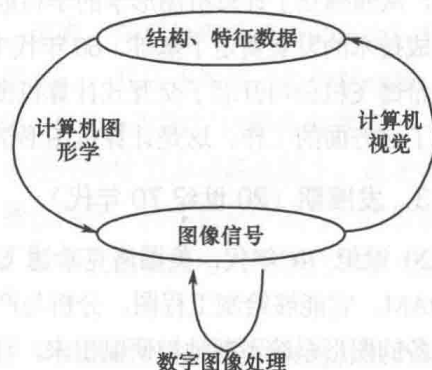


图 1-1 图形图像处理相关学科间的关系

的视觉效果,如对图像进行增强、锐化、平滑、分割,以及为存储和传输而进行的编码压缩等。计算机视觉是研究用计算机来模拟生物外显或宏观视觉功能的科学和技术,它模拟人对客观事物模式的识别过程,是从图像到特征数据、对象的描述表达的处理过程。

近年来,随着多媒体技术、计算机动画、三维数据场可视化以及虚拟现实技术的迅速发展,计算机图形学、数字图像处理和计算机视觉的结合日益紧密,它们之间的互相渗透,反过来也促进了学科本身的发展。

## 1.2 计算机图形学的发展

### 1.2.1 计算机图形学学科的发展

自 20 世纪 50 年代形成以来,计算机图形学先后经历了酝酿期、萌芽期、发展期、普及期和提高增强期等阶段,逐步发展成为一门以图形硬件设备、图形专用算法和图形软件系统为研究内容的综合学科。计算机图形学软件与硬件的发展是相互促进、相辅相成的。

#### 1. 酝酿期(20 世纪 50 年代)

1950 年,美国麻省理工学院旋风 1 号(Whirlwind)计算机配备了由计算机驱动类似于示波器所用的阴极射线管(CRT)来显示一些简单的图形。1958 年,美国 CAL-COMP 公司将联机的数字记录仪发展成滚筒式绘图仪,GERBER 公司则把数控机床发展成平板式绘图仪。整个 50 年代,计算机图形学处于准备和酝酿时期,称为“被动”的图形学。

#### 2. 萌芽期(20 世纪 60 年代)

20 世纪 60 年代,美国麻省理工学院(MIT)林肯实验室的基于旋风计算机开发的北美空中防御系统 SAGE(Semi-Automatic Ground Environment system)具有了指挥和控制图形对象的功能。该系统能够将雷达信号转换为显示器上的图形,操作者可以借用光笔指向屏幕上的目标图形来获得所需要的信息。与此同时,类似的技术在设计 and 生产过程中也陆续得到应用。1962 年,美国麻省理工学院林肯实验室的 Ivan.E.Sutherland 在参与了一个用于 CAD(Computer Aided Design)的 Sketchpad 系统的研制后,发表了博士论文《Sketchpad: 一个人机通信的图形系统》的,其中首次使用了“Computer Graphics”术语,从而确立了计算机图形学的学科地位。Ivan.E. Sutherland 的 Sketchpad 系统被公认为对交互式图形生成技术的发展奠定了基础。60 年代中期,美国麻省理工学院、通用汽车公司、贝尔电话实验室和洛克希德飞机公司开展了交互式计算机图形处理技术的大规模研究。与此同时,英国的剑桥大学等也开始了这方面的工作。这是计算机图形学的萌芽期。

#### 3. 发展期(20 世纪 70 年代)

20 世纪 70 年代,美国洛克希德飞机公司完成了一个用于飞机设计的交互式图形处理系统,即 CADAM。它能够绘制工程图,分析与产生数据加工纸带,在许多国家得到应用。之后,许多新的更加完备的图形系统不断地被研制出来,计算机图形处理技术进入了实用化阶段,表明一个广泛应用计算机显示技术和交互技术的新时期已经到来。但应注意到,与其他学科相比,此时的计算机图形学还是一个很小的学科领域,主要原因是图形设备昂贵,功能简单,基于图形的应用软件缺乏。

#### 4. 普及期（20 世纪 80 年代）

20 世纪 80 年代是图形处理技术开花结果的时期，除了传统的军事和工业方面的应用，计算机图形学进入了教育、科研、艺术和事务管理等众多领域，甚至进入了家庭。这时由于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 工作站等，使人机交互中图形的使用日益广泛。光栅图形显示器付诸应用后不久，就出现了大量简单易用、价格便宜的基于图形的应用软件，如图形用户界面、绘图、字处理、游戏软件等，由此推动了计算机图形学的发展和应用。

#### 5. 提高增强期（20 世纪 90 年代以后）

进入 20 世纪 90 年代后，随着数字视听、虚拟现实、系统仿真以及数字娱乐等应用领域的发展，对计算机图形学提出了更高的要求。近年来，计算机图形学与视频、图像、虚拟现实、人机交互、多媒体等新技术日益结合，成为一个多学科交叉融合的研究领域。与传统的计算机图形学相比，当前图形学的发展呈现以下趋势：① 结合图形硬件实现实时绘制；② 基于数据采集进行真实感建模；③ 绘制与建模任务相结合。基于计算机图形处理和显示技术的数字多媒体、虚拟现实、可视化、数字娱乐等已经形成庞大的产业。

### 1.2.2 图形硬件设备的发展

从图形显示设备的发展来看，20 世纪 60 年代中期出现的是随机扫描的显示器，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。为此需要一个刷新存储器来存储计算机产生的显示文件，还要求有一个较高速度的处理器，这些在当时是相当昂贵的，因而成为影响交互式图形系统普及的主要原因。60 年代后期，针对上述情况，出现了存储管式显示器，它不需要缓存及刷新功能，价格较低廉，分辨率高，显示大量信息也不闪烁，但是它不具有显示动态图形的能力，也不能进行选择性删除。存储管式显示器的出现使一些简单的图形实现交互处理，而其低廉的价格使计算机图形学得以推广和普及（其后出现了与刷新技术相结合的存储管式的图形显示器）。70 年代中期，廉价的固体电路随机存储器出现了，可以提供很大的刷新缓冲存储器，因而能构造基于电视技术的光栅扫描的图形显示器。在这种显示器中，被显示的线段、字符、图形及其背景等都按像素——存储在刷新缓冲存储器中，系统按光栅扫描方式以 30 次/秒的频率对存储器进行读写，以实现图形的刷新而避免闪烁。光栅扫描图形显示器的出现使计算机图形生成技术和现有的电视技术相衔接，生成的图形更加形象、逼真，图形处理系统更易于推广和应用。这也是光栅扫描图形显示器受到普遍重视和迅速发展原因之一。其后还发展了几种显示器，包括液晶显示器、等离子显示器、激光显示器等，它们朝着小型化、低电压和数字化等方向发展。

图形显示设备能够在屏幕上生成各种图形，但计算机图形系统还应能把图形画在纸上，这类设备就是图形绘制设备，也称为图形硬拷贝设备，分为打印机和绘图仪两种。打印机从针式打印机发展到喷墨式打印机和激光打印机，速度越来越高，性能越来越优越。绘图仪包括静电式绘图仪和笔式绘图仪等。

伴随着图形显示设备和绘制设备的发展，图形输入设备也从早期的键盘和光笔发展为各种类型的图形输入板、操纵杆、跟踪球、鼠标和拇指轮等，还发展了将光笔与屏幕相结合的产品——触摸屏和坐标数字化仪等。在三维图形处理系统如虚拟现实系统中，必须有可以操纵三维场景信息的三维图形输入设备，包括空间球和数据手套等，可以输入包括空间坐标和旋转方向在内的 6 个自由度的数值。

### 1.2.3 图形软件的发展

伴随着图形硬件的进步，与计算机图形学有关的软件开发和应用都在迅速发展，并在图形系统中占据越来越重要的地位。早期，各硬件厂商生产的图形设备具有不同的功能，各自开发专用于自己硬件平台的图形软件包和相应的高级语言接口，致使图形软件包和建立于其上的应用程序互不兼容，没有可移植性。这一方面限制了图形技术的发展，另一方面也阻碍了图形硬件设备的推广普及。于是人们希望图形软件能够朝着标准化、开放式和高效率的方向发展，这使得图形应用软件不仅可以在不同的计算机系统及外部设备之间移植，而且其研制开发能够更为简捷和高效。

1974 年，美国计算机协会图形专业委员会（ACM SIGGRAPH）召开了一个题为“与机器无关的图形技术”的工作会议，开始进行有关图形标准的制定和审批工作。该委员会于 1979 年提出了 CORE 图形软件标准。经国际标准化组织（ISO）和美国国家标准局（ANSI）批准的第一个图形软件标准却是图形核心系统 GKS，这是一个二维图形软件包。它的三维扩充 GKS-3D 在 1988 年被批准为三维图形软件标准。20 世纪 80 年代又公布了更强调图形层次结构及动态性和交互性的图形标准 PHIGS，以及基本图形转换标准 IGES 和 STEP 等。近几十年来，ISO 已经批准的与计算机图形处理有关的标准有：计算机图形核心系统（GKS）及其语言联编、三维图形核心系统（GKS-3D）及其语言联编、程序员层次交互式图形系统（PHIGS）及其语言联编、计算机图形元文件（CGM）、计算机图形接口（CGI）、基本图形转换规范（IGES）、产品数据转换规范（STEP）等。

除了由官方组织制定和批准的标准，还存在一些非官方的图形软件，它们在业界被广泛应用，成为事实上的标准，如 SGI 等公司开发的 OpenGL、微软公司开发的 DirectX、Adobe 公司开发的 Postscript 等。其中，OpenGL 实现了二维和三维的高级图形处理技术，是实现逼真三维效果与建立交互式三维景观的强大工具。目前，OpenGL 规范的管理者包括 SGI、Microsoft、Intel、IBM、Sun、HP 等软/硬件公司，已经成为工业标准。本书将结合 C、C++ 编程语言和 OpenGL 库函数给出相关教学参考实例。

## 1.3 计算机图形学的应用

近年来，计算机图形学已经广泛用于各领域，如科学、医药、商业、工业、政府部门、艺术、娱乐业、广告业、教育和培训等。

### 1.3.1 计算机辅助设计与制造

计算机辅助设计（CAD）与计算机辅助制造（CAM）是计算机图形学应用最广泛、最活跃的领域之一。将计算机图形处理技术运用于大楼、汽车、飞机、轮船、宇宙飞船、计算机、纺织品、建筑工程、机械结构和部件、电路设计、电子线路或器件等的设计和制造过程中，已成为目前 CAD/CAM 的总体发展趋势。

CAD 技术提供了一种强有力的工具，通过交互式的图形设备对部件进行设计和描述，产生工程略图（线框图）或者更接近实际物体的透视图等，通过迅速地将各种修改信息进行组合，用户可以自由、灵活地对图形进行实验性改动和形体显示。在电子工业中，无论是集成电路设计、印制线路板设计，还是电子线路和网络分析等，CAD 系统都可以成为电子电气工程师们喜爱的得力工具。建筑 CAD 在建筑学和房屋设计领域广泛采用了计算机图形处理技术。利用专门的图形软件包，可以进行楼层的设