



高等学校电子信息类“十二五”规划教材

# 计算机图形学

主编 贾建康 宝生



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

TP391.41/3783

2013

高等学校电子信息类“十二五”规划教材

# 计算机图形学

主编 贾建 康宝生

图书在版编目(CIP)数据

计算机图形学 / 贾建, 康宝生主编. — 西安: 西安电子科技大学出版社, 2013.8

高等学校电子信息类“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5508-3082-6

I. ① 计… II. ① 贾… ② 康… III. ① 计算机图形学—高等学校—教材

V. ① TP391.41

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第157153号

策 划 王 刚

责任编辑 樊 昊

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88312882 88301497

网 址 www.xdpuh.com 电子邮箱 xduh@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安文彬彩印厂

版 次 2013年8月第1版 2013年8月第1次印刷

开 本 785毫米×1092毫米 1/16 印张 12

字 数 358千字

定 价 1-3000册

58.00元

ISBN 978-7-5508-3082-6

XDUP 3337001-1

北方工业大学图书馆



C00339086

RFID

西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书按照教育部《普通高等学校本科专业目录》第三次修订版的要求,结合作者多年教学工作中总结的其他相关教材的优点,在教学讲义的基础上编写而成。本书讲述了计算机图形学的基础理论、原理和算法,主要内容包括:计算机图形学综述、图形系统、基本图形生成技术、二维图形变换与二维观察、几何造型技术、三维图形变换与三维观察、真实感图形生成技术基础和颜色共八个部分。全书内容紧凑、结构合理且数学思维严密。

本书既可作为高等学校数学、计算机科学与技术等学科本科专业计算机图形学课程教材,也可作为从事 CAD/CAM、计算机科学研究及相关工作人员的自学教材或工作参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

计算机图形学/贾建,康宝生主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2013.8

高等学校电子信息类“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3065 - 6

I. ① 计… II. ① 贾… ② 康… 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(2013)第 157123 号

策 划 王 飞

责任编辑 马武装 吴晓明

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安文化彩印厂

版 次 2013年8月第1版 2013年8月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 15

字 数 353千字

印 数 1~3000册

定 价 28.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3065 - 6/TP

**XDUP 3357001 - 1**

\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*

# 前言

随着信息技术的进步与发展,计算机图形学知识已经成为现代科技人员必须掌握的知识之一。计算机图形学是一门涉及学科领域相当广泛的交叉性学科,与数学特别是计算数学具有紧密的联系。它具有研究内容丰富、理论性强、实践性强、预修课程多、应用领域广及发展迅速等特点。“计算机图形学”课程设立的目的是使学生通过该课程的学习,系统掌握计算机图形学的基本知识、必要的基础理论和常用的图形生成方法,并熟知图形软件相关国际标准,为以后学习相关课程或从事相关研究与开发工作奠定坚实的基础。

《普通高等学校本科专业目录》第三次修订版于1998年颁布实施,其中所列的专业种数由原504种减至249种,同时,对专业名称也进行了修订,这意味着专业口径的拓宽和培养目标的改变。根据新教学大纲的要求,学生需摄取的知识与信息量大幅度增加,但各专业对每门课程的授课学时却在不断压缩。国内外已经出版的同类书籍追求内容的大而全,这不符合新大纲对授课学时的要求,现在多数“211工程”学校对计算机图形学课程的安排都只有54学时,有的学校甚至仅30学时。因此,对同样的内容用较少的学时进行讲授,如果不进行教学内容的调整,将会导致课堂信息量大量堆积,难以使学生产生学习的兴趣。

我们对“计算机图形学”课程内容进行了调整与改革,结合专业的特点,编写了《计算机图形学》教材,并于2001年起在西北大学数学系、信息科学与技术学院作为本科高年级学生专业课程教材使用。同时,针对实际教学过程中遇到的问题对教材内容体系进行了修订,教学效果良好,提高了教学效率和教学水平。实践证明,本教材内容符合目前相关专业教学要求,能够很好地平衡教学学时缩短与教学内容基础与应用并重之间的关系,完全能够满足本科阶段计算机图形学课程教学以及学生知识拓展的需要。为本书制作的“计算机图形学”课程教学课件,在2011年西北大学第四届优秀教案(课件)展评活动中被评为课件理科组一等奖第一名。

本书主要涵盖图形系统基本知识、图形生成算法、几何变换、图形观察、几何造型技术、真实感图形生成技术基础等内容。根据新专业目录特点及其培养目标,本书从数学和计算机课程讲授的角度出发,围绕计算机图形学中与数学关系密切的技术来调整课程教学内容,压缩或摒弃了陈旧的内容,在使学生系统学习计算机图形生成、处理、绘制的基础理论、基本原理和算法的基础上,更加注重培养学生将数学物理基础理论应用于解决实际问题,用计算机进行求解的能力,以期在有限的篇幅和教学课时中达到提高教学效率和教学效果,夯实学生专业基础,提高学生实践动手能力的目的。

通过本书的学习,读者可快速掌握计算机图形学的实现原理,感受它的最新进展。无论是CAD几何造型用户、动画设计用户、图形学软件设计师,还是未来的计算机图形学研

究者，都可通过学习本书掌握扎实的基础知识，从而使今后的学习、工作更加得心应手。

感谢陕西省自然科学基金计划(2012JQ1012)、陕西省教育厅自然科学研究项目(2010JK865)及西北大学数学系本科教学研究项目为教材出版提供的经费支持。

由于时间和编者水平有限，书中难免有不足之处，敬请读者批评指正。

作者

2013年4月于西安

# 目 录

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| <b>第一章 计算机图形学综述</b> .....     | 1  |
| 1.1 图形信息的计算机处理 .....          | 1  |
| 1.2 交互图形系统的组成 .....           | 2  |
| 1.3 计算机图形学的研究内容 .....         | 4  |
| 1.4 计算机图形学的发展历史 .....         | 5  |
| 1.5 计算机图形学的应用 .....           | 6  |
| <b>第二章 图形系统</b> .....         | 9  |
| 2.1 视频显示设备 .....              | 9  |
| 2.1.1 CRT 显示器 .....           | 9  |
| 2.1.2 平板显示器 .....             | 12 |
| 2.1.3 三维观察设备 .....            | 13 |
| 2.1.4 立体感和虚拟现实系统 .....        | 13 |
| 2.2 光栅扫描系统 .....              | 14 |
| 2.2.1 结构与原理 .....             | 14 |
| 2.2.2 视频控制器 .....             | 15 |
| 2.2.3 帧缓冲器 .....              | 15 |
| 2.2.4 彩色表的结构与使用 .....         | 16 |
| 2.2.5 图像生成器 .....             | 17 |
| 2.2.6 光栅扫描系统的性能参数 .....       | 18 |
| 2.3 图形软件 .....                | 19 |
| 2.3.1 坐标表示 .....              | 19 |
| 2.3.2 图形功能 .....              | 19 |
| 2.3.3 图形软件包的性质 .....          | 20 |
| 2.3.4 图形软件标准 .....            | 20 |
| <b>第三章 基本图形生成技术</b> .....     | 21 |
| 3.1 直线的生成算法 .....             | 21 |
| 3.1.1 画直线的一般要求 .....          | 21 |
| 3.1.2 直线的 DDA 算法 .....        | 22 |
| 3.1.3 直线的 Bresenham 算法 .....  | 23 |
| 3.2 圆的生成算法 .....              | 28 |
| 3.2.1 生成圆的 Bresenham 算法 ..... | 29 |
| 3.2.2 生成圆的中点算法 .....          | 31 |
| 3.2.3 生成圆的正负法 .....           | 34 |
| 3.2.4 生成圆的多边形逼近法 .....        | 35 |
| 3.2.5 多边形逼近算法稳定性分析 .....      | 37 |
| 3.2.6 生成椭圆的正负法 .....          | 38 |

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| 3.3 多边形的扫描转换与区域填充 .....      | 39        |
| 3.3.1 多边形的扫描转换 .....         | 40        |
| 3.3.2 区域填充 .....             | 52        |
| 3.3.3 关于填充的几点说明 .....        | 56        |
| 3.4 字符的生成 .....              | 57        |
| 3.5 基本图元的输出属性 .....          | 58        |
| 3.5.1 直线的属性 .....            | 59        |
| 3.5.2 曲线的属性 .....            | 61        |
| 3.5.3 区域填充属性 .....           | 62        |
| 3.5.4 字符属性 .....             | 63        |
| 3.6 光栅图形的反走样 .....           | 65        |
| <b>第四章 二维图形变换与二维观察 .....</b> | <b>69</b> |
| 4.1 几何变换的基本原理 .....          | 69        |
| 4.2 基本变换 .....               | 70        |
| 4.2.1 平移 .....               | 70        |
| 4.2.2 旋转 .....               | 71        |
| 4.2.3 缩放 .....               | 71        |
| 4.2.4 对称 .....               | 72        |
| 4.2.5 错切 .....               | 73        |
| 4.3 二维组合变换 .....             | 74        |
| 4.3.1 对任意直线的对称变换 .....       | 74        |
| 4.3.2 绕任意点的旋转变换 .....        | 75        |
| 4.3.3 组合变换矩阵 .....           | 76        |
| 4.3.4 级联顺序对组合变换的影响 .....     | 77        |
| 4.4 变换模式 .....               | 78        |
| 4.5 二维观察 .....               | 78        |
| 4.5.1 观察流程 .....             | 79        |
| 4.5.2 观察坐标系 .....            | 79        |
| 4.5.3 视窗变换 .....             | 79        |
| 4.5.4 裁剪操作 .....             | 80        |
| 4.5.5 点的裁剪 .....             | 81        |
| 4.5.6 直线段的裁剪 .....           | 81        |
| 4.5.7 多边形的裁剪 .....           | 90        |
| 4.5.8 曲线的裁剪 .....            | 93        |
| 4.5.9 字符的裁剪 .....            | 93        |
| 4.5.10 外部裁剪 .....            | 94        |
| <b>第五章 几何造型技术 .....</b>      | <b>95</b> |
| 5.1 曲线的表示 .....              | 95        |
| 5.1.1 绘制曲线的基本方法 .....        | 95        |
| 5.1.2 参数曲线 .....             | 96        |
| 5.1.3 Bézier 曲线 .....        | 102       |
| 5.1.4 B 样条曲线 .....           | 106       |
| 5.1.5 NURBS 曲线 .....         | 113       |

|                        |                   |     |
|------------------------|-------------------|-----|
| 5.2                    | 曲面的表示             | 115 |
| 5.2.1                  | Bézier 曲面         | 115 |
| 5.2.2                  | B 样条曲面            | 119 |
| 5.2.3                  | NURBS 曲面          | 120 |
| 5.2.4                  | Coons 曲线面         | 122 |
| 5.3                    | 实体的表示             | 124 |
| 5.3.1                  | 三维实体的定义           | 124 |
| 5.3.2                  | 三维实体建模            | 125 |
| 5.3.3                  | 实体的表示方法           | 126 |
| 5.4                    | 分形                | 136 |
| 5.4.1                  | 分形的历史             | 137 |
| 5.4.2                  | 分数维的计算            | 138 |
| 5.4.3                  | 分形的定义             | 139 |
| 5.4.4                  | 典型的分形模型           | 140 |
| <b>第六章 三维图形变换与三维观察</b> |                   | 144 |
| 6.1                    | 三维几何变换            | 144 |
| 6.1.1                  | 平移                | 144 |
| 6.1.2                  | 缩放                | 144 |
| 6.1.3                  | 旋转                | 145 |
| 6.1.4                  | 对称                | 149 |
| 6.1.5                  | 错切                | 149 |
| 6.1.6                  | 复合变换              | 150 |
| 6.2                    | 投影变换              | 150 |
| 6.2.1                  | 透视投影及其分类          | 150 |
| 6.2.2                  | 透视投影的确定           | 151 |
| 6.2.3                  | 平行投影及其分类          | 152 |
| 6.2.4                  | 平行投影的确定           | 153 |
| 6.2.5                  | 一般投影变换            | 153 |
| 6.3                    | 三维图形裁剪            | 156 |
| 6.3.1                  | 三维观察体             | 156 |
| 6.3.2                  | 三维裁剪              | 157 |
| 6.4                    | 三维观察体的规范化变换       | 160 |
| 6.4.1                  | 平行投影情况下的变换        | 160 |
| 6.4.2                  | 透视投影下的变换          | 161 |
| 6.5                    | 三维观察流程            | 163 |
| <b>第七章 真实感图形生成技术基础</b> |                   | 166 |
| 7.1                    | 隐藏线隐藏面消除          | 166 |
| 7.1.1                  | 多面体的隐藏线消除         | 167 |
| 7.1.2                  | 参数曲面的隐藏线消除        | 171 |
| 7.1.3                  | 区域子分算法            | 174 |
| 7.1.4                  | 深度缓冲器(Z-buffer)算法 | 176 |
| 7.1.5                  | 扫描线算法             | 178 |
| 7.1.6                  | 曲面的扫描线消隐算法        | 180 |

|               |                    |     |
|---------------|--------------------|-----|
| 7.1.7         | 优先级表算法             | 186 |
| 7.1.8         | BSP 算法             | 188 |
| 7.1.9         | 光线投射算法             | 188 |
| 7.2           | 光源属性和物体表面属性        | 189 |
| 7.3           | 基本光照模型             | 189 |
| 7.3.1         | Lambert 漫反射模型      | 190 |
| 7.3.2         | Phong 光照模型         | 192 |
| 7.4           | 阴影                 | 194 |
| 7.4.1         | 阴影细节多边形算法          | 195 |
| 7.4.2         | 影域多面体算法            | 196 |
| 7.4.3         | Z 缓冲器算法            | 199 |
| 7.5           | 整体光照模型             | 200 |
| 7.5.1         | 简单透射模型             | 200 |
| 7.5.2         | Whitted 光照模型       | 201 |
| 7.6           | 明暗处理技术             | 202 |
| 7.6.1         | Gouraud 明暗处理       | 202 |
| 7.6.2         | Phong 明暗处理         | 204 |
| 7.6.3         | Phong 明暗处理的加速方法    | 205 |
| 7.7           | 光线跟踪技术             | 207 |
| 7.7.1         | 基本光线跟踪算法           | 207 |
| 7.7.2         | 光线跟踪的求交计算          | 209 |
| 7.7.3         | 光线跟踪中的阴影生成算法       | 212 |
| 7.8           | 物体表面细节模拟           | 214 |
| 7.8.1         | 颜色纹理的模拟            | 214 |
| 7.8.2         | 几何纹理的模拟            | 217 |
| <b>第八章 颜色</b> |                    | 219 |
| 8.1           | 颜色的视觉特性及基本定义       | 219 |
| 8.2           | 标准原色和色度图           | 220 |
| 8.2.1         | CIE-XYZ 颜色系统       | 220 |
| 8.2.2         | CIE 色度图            | 221 |
| 8.3           | 常用颜色模型             | 223 |
| 8.3.1         | RGB 颜色模型           | 223 |
| 8.3.2         | CMY 颜色模型           | 225 |
| 8.3.3         | YIQ 颜色模型           | 226 |
| 8.3.4         | YUV 颜色模型           | 227 |
| 8.3.5         | HSV 颜色模型和 HLS 颜色模型 | 227 |
| 8.4           | 颜色裁剪和 Gamma 修正     | 230 |
| <b>参考文献</b>   |                    | 232 |

## 第一章 计算机图形学综述

计算机已经成为快速、廉价生成图形的强有力的工具,几乎所有的领域都可以从使用图形显示中获益。基于计算机图形学,工程设计人员在设计图纸时就可以浏览产品的形状和结构;考古工作者可以穿越时间隧道,在古代的宫殿中漫游;探险家无须乘坐宇宙飞船即可领略太空的瑰丽景色。随着计算机技术和数学技术的不断进步,计算机图形学已不再是一个陌生的名词。现在,我们可以看到计算机图形学已经被广泛地应用于多个领域,如科学、工程、医学、商业、工业、政府部门、艺术、娱乐业、广告业、教育和培训等。

### 1.1 图形信息的计算机处理

与其他形态的信息相比,图形具有直观明了、含义丰富、信息量大等优点。所谓“一目了然”、“耳闻不如目睹”都说明了图形信息的优越性。当然,图形的表示、生成、处理、存储、检索、传输和管理等远比文本复杂。用计算机处理图形信息相对传统的手工或机械方式有很大的进步,它使图形的用途更加广泛,使用更加有效,并使得图形的生成成本也越来越低。

图形信息的计算机处理涉及图像处理、模式识别和计算机图形学。

#### 1. 图像处理(Image Processing)

图形(图像)经过数字化后输入计算机,由计算机按应用的需要进行图像增强、复原、分解、重建、编码、存储、传输等不同的处理,需要时再把加工处理后的图形(图像)输出,这个过程称为“图像处理”。卫星遥感图片、CT 图片、MRC 图片的处理、金相图谱分析、卫星云图和海图处理等都是图像处理的典型应用。图像处理所研究的问题有:如何滤去噪声、压缩图像以便传输和存储;用对比增强技术突出图像中的某些特征;用复原技术使图像清晰;从 CT、MRC 信息重建二维和三维图像等。

#### 2. 模式识别(Pattern Recognition)

图形信息输入计算机后,先对它进行特征提取等预处理,然后用统计判定方法或语法分析方法对图形做出识别,最后由计算机按照使用需求给出图形的分类或描述,这就是模式识别。邮政自动分拣、中西文字符和工程图纸自动阅读等都是模式识别技术的应用实例。模式识别研究怎样分析和识别输入的图形,以便找出其中蕴涵的内在联系或抽象模型。

#### 3. 计算机图形学(Computer Graphics)

国际标准化组织对“计算机图形学”的定义是:研究通过计算机将数据转换为图形,并在专门显示设备上显示的原理、方法和技术的学科。其中待处理的对象可以代表各种具体的、实在的物体,如汽车、飞机、船舶、机械零件、山川、河流等,也可以代表抽象的或假想的物体,如天气形势、人口分布、经济发展增长速度等。而图形从基本的处理技术来看

只有两类：一类是线条图，如工程图、地图、曲线图表等；另一类是明暗图，与照片相似，也称做真实感图。

计算机图形学的主要任务是先对对象进行描述(建模)，然后对描述这些对象的数据或过程进行不同处理，从无到有地生成能正确反映这些对象某种性质的图形并输出。图形的生成方式有被动式(Passive)和交互式(Interactive)两种。前者指图形生成过程中人工无法对图形进行操纵和控制，它主要使用在以绘图机为输出设备的早期系统中。交互式则允许用户使用交互设备操纵和控制模型的建立与图形的生成过程，模型及其图形可以边生成、边显示、边修改，直到产生符合要求的模型和图形为止。目前图形系统的工作方式均为交互式。

图像处理、模式识别和计算机图形学这三门与图形信息处理相关学科之间的关系是界限模糊、相互交叉、相互渗透的，如图 1.1 所示。

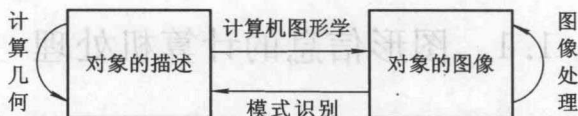


图 1.1 计算机图形学与相关学科之间的关系

既然计算机图形学是通过对象的模型建立对象的图形，那么与此密切相关的一个问题就是如何建立对象的模型。这就涉及另外两个专门研究几何模型和数据处理的学科——计算几何和分形几何。计算几何着重讨论规则几何形体的计算机表示、分析和综合，研究怎样方便灵活地建立几何形体的数学模型，提高算法效率，并在计算机内怎样更好地存储和管理这些模型数据等；分形几何则重点研究不规则几何形体和自然景象的数学描述方法。

图像(Image)作为计算机中以具有颜色信息的点阵来表示的图形，它强调图形由哪些点组成，记录并处理点及它的灰度或色彩，包括去噪或者锐化等分析，改进图像的质量，检测或识别图像中特定的特征，对二维场景进行分析进而重构三维场景等。计算机中由场景的几何模型和景物的物理属性表示的图形(Graphics)更强调场景的几何表示，记录并处理图形的形状参数与属性参数。它的显示形式是基于线条信息的矢量图和基于明暗(Shading)处理后的图像图。应用方面更偏重于从计算机模型来构建图像，包括各种信息的表示、二维或三维模型的设计、仿真或交互界面设计等。因此，图像处理与计算机图形学最根本的区别在于图像处理是从真实存在的图像空间出发，针对图像完成一系列基于像素的操作，从而得到能够展示某些期望特征的新图像。

图像处理、模式识别、计算机图形学、计算几何和分形几何这些学科都已有四十余年的历史了。但长期以来，它们基本上是以相互独立的形式各自发展、成长的。到了 20 世纪 80 年代，由于光栅图形显示器的广泛使用，以及大量复杂的应用课题的研究需要，这几门学科的相互关系和共同技术引起了人们越来越大的兴趣，其学科界限日益模糊。从计算机软硬件的角度来看，起核心作用的是图形显示技术。

## 1.2 交互图形系统的组成

从程序员的角度来看，所有交互式图形系统在概念上均由四部分组成，如图 1.2 所示。

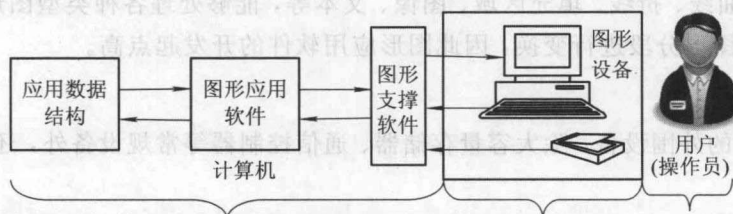


图 1.2 交互式图形系统的组成

### 1. 应用数据结构

应用数据结构(Application Data Structure)实质上是一些数据文件，其中保存着要生成其图形的那个(些)对象的全部描述信息。这些信息包括：定义对象所有组成部分的形状和大小的几何信息及有关拓扑信息；用于说明与该对象图形有关的属性信息，如色彩、纹理、表面性质；实际中还需要涉及的其他非几何数据，如材料、单价、加工要求等。它们通常存放在数据库中。

能够正确表达一个对象的性质、结构和行为的所有描述信息，称为对象的模型。计算机图形学感兴趣的主要是对象的几何性质(形状、大小、位置、结构等)，用于刻画被处理对象几何性质的描述信息就构成了它们的几何模型。常用的几何模型有线框模型(Wireframe Model)、面模型(Surface Model)、体模型(Solid Model)和分形模型(Fractal Model)，它们用来表示三维空间中的物体。

### 2. 图形应用软件

图形应用软件是图形系统中的核心部分，它是图形技术在各种不同应用中的抽象，其主要功能如下：

(1) 根据从图形输入设备经由图形支撑软件送来的命令和数据，构造或修改被处理对象的模型。

(2) 从应用数据结构中取出该对象的几何数据及有关属性数据，按照应用的要求进行种种处理，然后使用图形支撑软件所提供的各种功能，生成该对象的图形并在图形输出设备上输出。

(3) 与图形显示无直接关系的其他处理功能，如性能模拟、分析计算、后处理、用户接口、系统维护等。

### 3. 图形支撑软件

图形支撑软件通常由一组公用的图形子程序组成，它扩展了系统中原有高级语言和操作系统的图形处理功能。特别是采用标准图形软件如 PHIGS<sup>+</sup>、GKS、CGI、Open GL 等后，图形应用软件的开发具有以下三方面的优点：

(1) 与设备无关：在标准图形软件基础上开发的各种图形应用软件，不必关心具体设备的物理性能和参数，可在不同的硬件系统之间方便地进行移植和运行。

(2) 与应用无关：标准图形软件的各种图形输入、输出处理功能，综合考虑了多种应用的不同要求，因此具有很好的适用性。

(3) 开发起点高：标准图形软件提供了多种图形输出原语(Graphics Output Primitives)，

如线段、圆弧、曲线、折线、填充区域、图像、文本等,能够处理各种类型图形输入设备的操作,可允许对图形分段进行变换,因此图形应用软件的开发起点高。

#### 4. 图形设备

图形系统中的外围设备,除大容量存储器、通信控制器等常规设备外,还有图形输入、输出设备。

(1) 输入设备:国际标准中,输入设备按照逻辑功能分为定位设备、定值设备、选择设备、拾取设备、字符输入设备和笔画设备六类。通常,一种物理设备往往兼有几种逻辑功能。在交互式系统中,图形的生成、修改、标注等人机交互操作,都是由用户通过图形输入设备进行控制的。

(2) 输出设备:分为图形显示器和图形硬拷贝设备,如绘图机、打印机以及其他设备等。

### 1.3 计算机图形学的研究内容

计算机图形学是一门交叉性学科,它的主要核心技术是如何建立所处理对象的模型并生成该对象的图形。其主要研究内容大体上可以概括为以下几个方面:

(1) 几何模型构造技术(Geometric Modeling)。例如,各种不同类型几何模型(二维、三维、分维)的构造方法及性能分析,曲线曲面的表示与处理,专用与通用模型构造系统的研究等。

(2) 图形生成技术(Image Synthesis)。例如,线段、圆弧、字符、区域填充的生成算法,隐藏线/隐藏面消除、光照明模型、浓淡处理(Shading)、纹理(Texture)、阴影、灰度与色彩等各种真实感图形生成技术。

(3) 图形编辑与处理技术。例如,图形的平移、旋转、缩放、投影、裁剪等各种几何变换操作的方法及其软件或硬件实现技术。

(4) 图形信息的存储、检索与交换技术。例如,图形信息的各种机内外表示方法、组织形式、存取技术、图形数据库的管理、图形信息的通信等。

(5) 人机交互与用户接口技术。例如,新型定位设备、选择设备等的研发,各种交互技术如构造技术、命令技术、选择技术、响应技术等的研究,以及用户模型、命令语言、反馈方法、窗口系统等用户接口技术的研究等。

(6) 动画技术。研究实现高速动画的各种软、硬件方法,开发工具,动画语言等。

(7) 图形输出设备与输出技术。例如,各种图形显示器逻辑结构的研究,实现高速图形功能的专用芯片的开发,图形硬拷贝设备的研究等。

(8) 图形标准与图形软件包的研究开发。例如,制定一系列图形国际标准,使其能满足多方面图形应用软件开发工作的需要,并使图形应用软件摆脱对硬件的依赖性,允许在不同系统间方便地进行移植。

总之,计算机图形学的研究内容是十分丰富的。虽然许多工作已进行了多年,取得了不少成果,但随着计算机技术的进步和图形显示技术应用领域的扩大和深入,计算机图形学的研究、开发与应用必将得到进一步的发展。

## 1.4 计算机图形学的发展历史

计算机最早仅仅是用来进行科学计算的,利用计算机进行图形处理的工程应用,应归功于美国的战术防空系统 SAGE(Semi-Automatic Ground Environment)。SAGE 系统于 1957 年投入使用,20 世纪 60 年代中期逐渐被淘汰,整个计划并未最终完成。但这一尝试无疑为交互式计算机图形显示技术的发展起到了巨大的推动作用。

二次世界大战刚结束,美国国防部就开始筹划解决如何预防远程轰炸机携带核弹头突然袭击美国本土的问题,最后决定建立一个实时信息控制系统,以便监视北美的整个空域和地域,使空军总部的指挥员能清晰地看到空中的目标和地面机场的动态,及时准确地指挥作战。许多公司参与研制了 SAGE 系统,整个技术方案由麻省理工学院(MIT)林肯实验室负责。在 SAGE 计划的推动下,1950 年,MIT 研制了“旋风 I 号”(Whirlwind I)图形设备。这种设备类似于示波器,可显示简单图形。1952 年,世界上第一台数控铣床的原型在 MIT 的伺服机构实验室诞生。1957 年,美国空军将第一批数控铣床装备到飞机制造的工厂里。1958 年,美国的 Calcomp 公司和 Gerber 公司分别研制出滚筒式绘图仪和平板式绘图仪。其后,MIT 发展了 APT(Automatically Programmed Tools)数控加工自动编程语言,这是目前国际上最为通用的加工编程工具。整个 20 世纪 50 年代,使用的都是电子管计算机,用机器语言编程。计算机仍以科学计算为主,为之配置的图形设备仅具有输出功能,计算机图形学处于被动式的图形处理阶段。

1962 年,第一台光笔交互式图形显示器在 MIT 林肯实验室研制成功,I. E. Sutherland 在这里发表了划时代的博士论文《Sketchpad: 一个人机通信的图形系统》,首次提出了计算机图形学、交互技术、分层存储符号的数据结构等新思想,使人们意识到人机交互的潜力,也标志着“计算机图形学”学科的诞生。1964 年,S. A. Coons 在 MIT 提出了用小块曲面片组合表示自由型曲面时使曲面片在边界上达到任意高次连续阶的理论方法。法国雷诺汽车公司(Renault)的 P. Bézier 提出了自由型曲线、曲面设计的理论方法。这些方法得到了工业界和学术界的极大推崇,分别称之为 Coons 曲面和 Bézier 方法。Coons 和 Bézier 并列被称为现代计算机辅助几何设计技术的奠基人。

在美国工业界,研制交互式图形显示器的工作也在同时开展。1964 年,IBM 推出了自主设计的图形显示设备 IBM 2250 显示器,这是 IBM 正式提供工业界使用的第一代刷新式随机扫描图形终端。作为 IBM 2250 最早用户的波音、麦克唐纳、洛克希德等飞机公司也先后开发了一系列 CAD/CAM 系统软件。到 20 世纪 60 年代末,美国安装的 CAD 工作站已达 200 多台,可供几百人使用。

1970 年,美国 Applicon 公司推出了第一个完整的 CAD 系统。在此期间出现了廉价的固体电路随机存储器、产生逼真图形的光栅扫描显示器、光笔、图形输入板等多种形式的图形输入设备,同时出现了面向中小企业的商品化 CAD/CAM 系统。整个 20 世纪 70 年代,CAD/CAM 技术的应用已相当广泛,许多功能强大的大型系统软件相继面世,如英国飞机公司的 CONSURF 系统、Renault 公司的 UNISURF 系统、Rochester 大学的 PADL 系统、Cambridge 大学的 BUILD 系统、北海道大学的 TIPS 系统等。到 70 年代末,美国 CAD 工作站的安装数量已超过 12 000 台,使用人数超过 2.5 万。图形系统和 CAD/CAM

工作站的销售量与日俱增,到1981年,美国实际安装CAD系统5000套,1983年超过12 000套,1988年发展到63 000套。

1974年,第一届SIGGRAPH(Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques)年会在Colorado大学召开,很大程度上促进了图形学的发展。该会议是计算机图形学最权威的国际会议,每年只录取大约50篇论文,基本上代表了图形学的主流方向,SIGGRAPH于1977年推出三维核心图形系统(3D Core Graphics System, CORE)规范,随后又相继出现了许多标准,如计算机图形接口标准CGI(Computer Graphics Interface)、计算机图形元文件标准CGM(Computer Graphics Metafile)、计算机图形核心系统GKS(Graphics Kernel System)、面向程序员的层次交互式图形标准PHIGS及PHIGS+(Programmer's Hierarchical Interactive Graphics Standard)、初始图形交换规范IGES(Initial Graphics Exchange Specification)、工业产品数据交换标准STEP(Standard for The Exchange of Product model data)、开放式图库Open GL、数据交换接口DXF等。图形接口、图形功能、数据交换、形状定义日趋标准化和集成化。这些标准的制定和采用为CAD技术的推广和移植以及资源信息的共享起到了重要作用。

计算机硬件和软件理论的不断更新,人工智能、专家系统和知识工程等技术的应用大大提高了图形应用系统的自动化程度,同时也不断促进着计算机图形学这门学科的完善与发展。

## 1.5 计算机图形学的应用

计算机已经成为快速、廉价生成图形的强有力的工具,几乎所有的领域都可以从使用图形显示中获益。虽然在工程和科学上的应用必须依赖昂贵而笨重的设备,但是计算机技术的发展已将计算机图形学变成了实用的工具。计算机图形学已经在诸如科学、工程、医学、商业、工业、政府部门、艺术、娱乐业、广告业、教育和培训等多个领域得到了广泛应用。下面简要说明一些典型的图形学应用实例。

### 1. 计算机辅助设计与制造

计算机辅助设计与制造(Computer-Aided Design/Manufacturing, CAD/CAM)和计算机图形学是紧密联系在一起,它是计算机图形学在工业界应用的最重要领域,现在几乎所有的产品都是用计算机来设计的。CAD系统已迅速取代绘图板加丁字尺的传统设计方法,频繁地应用于汽车、飞机、轮船、宇宙飞船、集成电路、大楼、纺织品和其他产品的设计中,担负起繁重的日常绘图任务,承担着总体方案的优化和细节设计工作。

### 2. 计算机模拟和动画

用计算机制作的动画片已日益普及,它可以表现真实对象或模拟对象随时间变化的行为和动作。通过以图形方式观察变化的效果,我们不仅可以研究数学图形,而且可以研究科学现象的数学模型,例如,液体流动、相对论、核反应、化学反应、生理系统与器官以及有负载时结构的变形等。计算机动画的另一种复杂的应用是飞行模拟器。模拟器不仅能产生固定环境的景色(飞行器在这一环境中运动),而且可以产生诸如云、雾、烟、灯光以及不同大小和形状的其他飞行器等特殊的景物。例如为练习登陆月球,宇航员可在模拟器上

演习驾驶登月轮及使母船进入船坞等操作。

计算机图形学在电影、动画片、电视片及电子游戏的制作中已得到了广泛应用。图形场景有时单独显示,有时则与演员及实际场景混合显示。

### 3. 过程控制

在过程控制中,图形显示器用来显示被控对象(核电厂、炼油厂等)有关环节在操作过程中的状态,操作人员通过图形交互技术进行各种调节或处理所发生的意外事故。军事指挥员可在指挥和控制显示器上观察战场的数据(车辆的数目和位置、投入的武器、军队的移动、伤亡人员),并根据需要修订其战略战术。飞行控制人员也可从雷达显示器上观察计算机产生的标志及状态信号和飞机信号,进行空中交通指挥。

### 4. 人体造型

用计算机构造人体模型有着非常广泛的应用前景。人机工程中需要考虑人和机器以及周围环境的关系。工业设计中要使生活用具适应人的生理、心理特征;服装设计中要将人体作为效果分析的对象;舞蹈工作者需要方便地编写舞谱和形象地表达舞蹈动作细节的工具……针对不同的应用场合,人体模型的构造方法也不同。最简单的是杆系模型,应用最多的是多面体模型,最复杂的是曲面模型。模型的活动关节数也取决于应用需要。例如,为了设计战斗机驾驶舱,需要计算飞行员的视景角度,用人体模型检查各部分的允许活动范围,考查各种手把、开关能否操纵自如,等等。这时,使用的人体模型应该详细到包含手掌和手指。

### 5. 计算机辅助教学与培训

利用计算机生成的物理模型、财政模型、经济系统模型等作为辅助教学工具,可以帮助学员掌握和理解理论知识。有些方面的教学与培训需要设计专门的系统,如船长、飞行员、宇航员、大型设备操作员和航空控制人员的实习和培训模拟系统就是这样的专门系统。

将基于计算机图形学的虚拟现实技术(Virtual Reality, VR)应用于教学,能够使学生游览海底、遨游太空、观摩历史城堡,甚至深入原子内部观察电子的运动和体验爱因斯坦的相对论世界,从而更形象地获取知识,激发学生思维。通过构造基于虚拟教室的协同教学环境,能够使教师和学生虚拟的教学环境中自然地进行面对面的交流,营造出真实、自然的教学氛围。教师能够及时根据学生的掌握情况对授课内容和深度进行适时调整,同时可以利用虚拟现实技术进行相关实验,对一些抽象概念以可视化的形式向学生展示和阐述,如分子结构、空间曲线等。学生之间可以在教师的协调下进行分组讨论,开展虚拟实验等。

### 6. 科学可视化

科学家、工程师、药剂师、商业分析员和其他一些人员常常要分析大量的信息或研究特定处理的行为。但是,如果这些数据被转换成可视形式,其趋势和相互关系就立即显现出来。1986年美国科学基金会(NSF)专门召开了一次研讨会,会上提出了“科学计算可视化(Visualization in Scientific Computing, ViSC)”。第二年,美国计算机成像专业委员会向NSF提交了“科学计算可视化的研究报告”后,ViSC就迅速发展起来了。

Visc中待处理的数据类型可以包含标量、向量、高次张量或这些数据类型的组合。数据集可以是二维的或三维的。数据集可视化的常用方法有彩色编码、等值线、图表、曲面

绘制、体绘制等技术。图像处理技术与计算机图形学技术相结合可实现多种数据的可视化。

数学家、物理学家等使用可视化技术来分析数学函数和进程或简单地生成有趣的图形表示。天气形势分析、地层地貌的数值模拟、金属内部断裂的传递研究、空气薄层的流体密度的彩色绘图、数据集的交叉切片、蛋白质建模、分子结构的立体视图、海平面模型、空气污染研究、作物生长模型以及汽车车祸统计图示等都是可视化的应用实例。

## 7. 图像处理

尽管在计算机图形学和图像处理中所使用的技术有重叠,但两者有不同的基本操作。在计算机图形学中使用计算机来生成图形,图像处理则使用有关技术修改或解释现有图片,比如照片和电视扫描片。图像处理有两个主要应用:一是改善图片质量;二是对视觉信息的机器感觉。

要使用图像处理方法,首先需将一些照片或另外的图片数字化成图像文件,然后使用数字方法来重新安排图片部分的位置,提高颜色的分离或改善着色质量。

医学上在图片增强、层面 X 线照相术和手术模拟等方面广泛应用了图像处理技术。层面 X 线照相术是一种 X 射线照相技术,它能将生理系统的横断面显示出来。计算机 X 照相术(CT)和定位发射照相术(PET)两者均使用投影方法由数值数据重建断面。这些技术也可用来在做外科手术时监视内部功能和显示断面。其他的医学图像技术包括超声波和核子医学扫描仪。超声波扫描仪使用高频声波代替 X 射线来产生数值数据,核子医学扫描仪从吞下的无线核素中发射的射线收集数据并给出彩色图像。

图像处理和计算机图形学在许多应用中都是结合在一起的。例如,在医学上使用这些技术建模和研究物理功能、设计人造肢体、计划和练习手术等。计算机辅助手术(Computer-Aided Surgery)是目前发展最为快速的一个应用领域,通过使用图像技术获得身体的二维剖面,然后使用图形方法模拟实际手术过程、观察并操纵每一剖面,以及试验不同的手术位置。

## 8. 图形用户接口

图形比文字、统计报表更直观、逼真。Macintosh 微机首先在商品化产品上使用形象的图形表示操作命令,使得普通用户也能用计算机画图、做日常计算,消除了人们对计算机操作的神秘感。图文形式相结合的用户接口大大改善了计算机交互操作的用户界面,开辟了计算机应用的许多新领域。

现在的软件系统普遍提供图形用户接口。特别是微软公司 Windows 操作系统的普及,标志着图形学已经全面融入计算机的方方面面。图形用户接口的主要部分是一个允许用户显示多个窗口区域的窗口管理程序。每一窗口可以获得包括图形和非图形显示在内的不同处理。我们只需简单地使用交互式指点设备在某一窗口内按一下就可激活该窗口。

接口也可显示菜单和图标,以便加速操作和参数的选择。图标是一个设计成与它代表的选择相像的图形符号,其优点是它比相应的文本描述占用较少的屏幕空间,并且设计得当的话很容易理解。菜单中往往会包含有一组文字描述或图标。

目前几个大的软件公司都在研究下一代用户界面,致力于开发面向主流应用的自然、高效、多通道的用户界面。研究多通道语义模型、多通道整合算法及其软件结构和界面范式是当前用户界面和接口方面研究的主流方向,而图形学在其中起着主导作用。