

清华大学计算机系列教材

# 计算机图形学 基础教程

清  
／  
华  
／  
大  
／  
学  
／  
计  
算  
机  
／  
系  
列  
教  
材

孙家广 编著  
胡事民



清华大学出版社

清华大学计算机系列教材

# 计算机图形学基础教程

孙家广 胡事民 编著

清华大学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书是介绍计算机图形学基本原理和最新进展的基础教材。它是作者在清华大学多年教学经验的基础上,同时参考了国内外最新相关资料和部分最新研究成果编写而成的。全书按内容分为5章,分别介绍计算机图形学的最新概况、光栅图形学的基本原理、几何造型技术的基础知识、真实感图形学的基础知识和 OpenGL 及 VRML 这两类重要的图形标准,基本上涵盖了计算机图形学的主要内容。书中每章均附有习题,便于教学。

本书可作为高等院校本科生、研究生学习计算机图形学的教材,并可供相关专业技术人员和教育工作者参考使用。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用清华大学核研院专有核径迹膜防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

### 图书在版编目(CIP)数据

计算机图形学基础教程/孙家广,胡事民编著. —北京:清华大学出版社,2005.2

(清华大学计算机系列教材)

ISBN 7-302-10320-8

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 002765 号

出 版 者: 清华大学出版社

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

社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客 户 服 务: 010-62776969

责任编辑: 焦 虹

印 刷 者: 北京季蜂印刷有限公司

装 订 者: 三河市金元装订厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×260 印 张: 15 字 数: 350 千字

版 次: 2005 年 2 月第 1 版 2005 年 2 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-10320-8/TP·7024

印 数: 1~5000

定 价: 20.00 元

# 作者简历

**孙家广** 现任国家自然科学基金委员会副主任,兼任清华大学计算机系教授、博士生导师,国务院学位委员会委员,国务院学位委员会学科评议组成员,国家企业信息化应用支撑软件工程技术研究中心主任,中国工程图学学会理事长。长期从事计算机图形学、计算机辅助设计及管理技术与系统以及软件工程与理论的教学和研究开发工作。获国家、部委科技进步奖 15 项;作为第一完成人获国家科技进步二等奖 1 项、三等奖 2 项;部委科技进步一等奖 1 项、二等奖 5 项;发表科技论文 176 篇, EI 收录 56 篇, SCI 收录 23 篇;作为第一作者著书 4 本。1989 年被评为北京市优秀教师,1999 年被授予国家级有突出贡献的中青年专家。

**胡事民** 现为清华大学计算机系教授、博士生导师、兼任计算机学会理事、副秘书长。研究方向为计算机图形学、几何计算和智能信息处理。发表科技论文 80 余篇,其中 20 多篇发表在国际重要学术期刊 ACM Transaction on Graphics, Computer Aided Design, Computer Aided Geometric Design, The Visual Computer, Graphical Models and Images Processing, Journal of Computer Animation and Virtual Worlds 和 Multimedia System 上。2002 年获国家杰出青年基金资助,2003 年获霍英东优秀青年教师科研类一等奖。

# 序

清华大学计算机系列教材已经出版发行了近 30 种,包括计算机专业的基础数学、专业技术基础和 专业等课程的教材,覆盖了计算机专业大学本科和 研究生的主要教学内容。这是一批至今发行数量很大并赢得广大读者赞誉的书籍,是近年来出版的大学计算机教材中影响比较大的一批精品。

本系列教材的作者都是我熟悉的教授与同事,他们长期在第一线担任相关课程的教学工作,是一批很受大学生和研究生欢迎的任课教师。编写高质量的大学(研究生)计算机教材,不仅需要作者具备丰富的教学经验和科研实践,还需要对相关领域科技发展前沿的正确把握和了解。正因为本系列教材的作者们具备了这些条件,才有了这批高质量优秀教材的出版。可以说,教材是他们长期辛勤工作的结晶。本系列教材出版发行以来,从其发行的数量、读者的反映、已经获得的许多国家级与省部级的奖励以及在各个高等院校教学中所发挥的作用上,都可以看出本系列教材所产生的社会影响与效益。

计算机科技发展异常迅速、内容更新很快。作为教材,一方面要反映本领域基础性、普遍性的知识,保持内容的相对稳定性;另一方面,又需要跟踪科技的发展,及时地调整和更新内容。本系列教材都能按照自身的需要及时地做到了这一点,如《计算机组成与结构》一书十年中共出版了三版,其他如《数据结构》等也都已出版了第二版,使教材既保持了稳定性,又达到了先进性的要求。本系列教材内容丰富、体系结构严谨、概念清晰、易学易懂,符合学生的认识规律,适合于教学与自学,深受广大读者的欢迎。系列教材中多数配有丰富的习题集和实验,有的还配备多媒体电子教案,便于学生理论联系实际地学习相关课程。

随着我国进一步的开放,我们需要扩大国际交流,加强学习国外的先进经验。在大学教材建设上,我们也应该注意学习和引进国外的先进教材。但是,计算机系列教材的出版发行实践以及它所取得的效果告诉我们,在当前形势下,编写符合国情的具有自主版权的高质量教材仍具有重大意义和价值。它与前者不仅不矛盾,而且是相辅相成的。本系列教材的出版还表明,针对某个学科培养的要求,在教育部等上级部门的指导下,有计划地组织任课教师编写系列教材,还能促进对该学科科学、合理的教学体系和内容的研究。

我希望今后有更多、更好的优秀教材出版。

清华大学计算机系教授,中科院院士

张钹

2002 年 6 月 28 日

# 前 言

计算机图形学是利用计算机研究图形的表示、生成、处理和显示的一门重要的计算机学科分支,它是计算机学科中最活跃的分支之一。

随着计算机系统的硬件、软件的迅速发展,计算机已经具有强大的图形处理功能,目前计算机图形学的应用已无处不在。从 CAD 设计到广告设计,从影视娱乐到计算机动画,都使人们感受到了计算机图形技术独特的魅力。同时,由于计算机图形学技术本身的长足进步及其应用的日益广泛,计算机图形学已成为计算机科学技术与其他应用学科之间沟通的一座桥梁,成为许多专业的必修课程之一。

如何使读者在较短的时间内成为计算机图形学的入门者,领悟并有能力实现那激动人心的计算机图形效果呢?本书就是希望达到这样一个目的。本书分为:光栅图形学、几何造型技术、真实感图形学和图形标准 4 个技术专题,涵盖了当前图形学的基本内容。书中内容新旧结合,篇幅精练,难度错落有致;书中各专题间相对独立,适合于课堂教学,也便于自学。

通过本书的学习,读者可以快速掌握计算机图形学的实现原理,感受它的最新进展。本书还介绍了 Open GL 和 VRML 技术,力图让学习者学以致用。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,通过学习本书都可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。

计算机图形学是一门实践性很强的计算机学科,其内容变化日新月异。本书在保留经典图形学的必要内容外,对最近十多年的研究近况作了介绍,力图使读者在掌握相应的基础知识后,能迅速了解研究前沿。本书每章都附有相应的习题,读者通过对这些习题的思考和上机操作,可以加深对所学内容的理解,达到理论与实践相结合的目的。

清华大学计算机系一直将图形学作为本科生的一门重要课程,在大学三年级下学期开设此课;近 10 年来,主要使用清华大学出版社出版、孙家广教授等编著的《计算机图形学》作为教材。本书第二作者自 1998 年以来,在主讲图形学的过程中,深切感到,《计算机图形学》一书内容太多,因此急需一本内容精练,既能包含图形学的主要内容,又能介绍图形学最新技术的教材。1999 年,在清华大学 985 项目的支持下,开始编写新的讲义,经 2000—2004 学年的使用、实践,现交付清华大学出版社出版。在编写本教材的过程中,许多同事、研究生付出了辛勤劳动。周登文副教授,以及我们的研究生王斌、王涛、吴建华、许云杰等同学帮助整理部分初稿;我们的研究生张慧、雍俊海、张松海、董未明、朱旭平、丁俊勇、郭滨、严寒冰、靳力等作为图形学课程的助教,曾提出过许多宝贵的建议,给予了我们许多帮助。车武军博士在书稿写作的后期,付出了许多辛勤的劳动。他通读全书,给出了许多建议,并且充实了某些章节的内容,使本书增色不少。在此我们向这些同事和学生表示衷心的感谢!

为了便于读者阅读、使用本教材,我们已将本教材相应的多媒体课件发布在图形学课题组网站 <http://cg.cs.tsinghua.edu.cn> 上,可供读者参考。

最后衷心希望读者在阅读过程中,对书中不足之处提出宝贵意见,以便我们能对书中内容不断加以完善,更好地为读者服务。

联系方式: 胡事民 电话: 62782052 电子邮件: [cg@cg.cs.tsinghua.edu.cn](mailto:cg@cg.cs.tsinghua.edu.cn)

作者

2005年2月

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....       | 1  |
| 1.1 计算机图形学的研究内容 .....       | 1  |
| 1.2 计算机图形学发展的历史回顾 .....     | 1  |
| 1.3 计算机图形学的应用及研究前沿 .....    | 3  |
| 1.3.1 计算机辅助设计与制造.....       | 3  |
| 1.3.2 可视化.....              | 4  |
| 1.3.3 真实感图形实时绘制与自然景物仿真..... | 5  |
| 1.3.4 计算机动画.....            | 6  |
| 1.3.5 用户接口.....             | 7  |
| 1.3.6 计算机艺术.....            | 8  |
| 1.4 图形设备 .....              | 8  |
| 1.4.1 图形显示设备.....           | 8  |
| 1.4.2 图形处理器 .....           | 13 |
| 1.4.3 图形输入设备 .....          | 14 |
| 习题 .....                    | 16 |
| <b>第 2 章 光栅图形学</b> .....    | 17 |
| 2.1 直线的扫描转换算法.....          | 17 |
| 2.1.1 DDA 法 .....           | 17 |
| 2.1.2 中点画线法 .....           | 18 |
| 2.1.3 Bresenham 算法 .....    | 20 |
| 2.2 圆弧的扫描转换算法.....          | 22 |
| 2.2.1 圆的特征 .....            | 22 |
| 2.2.2 中点画圆法 .....           | 22 |
| 2.3 多边形的扫描转换与区域填充.....      | 23 |
| 2.3.1 多边形的扫描转换 .....        | 23 |
| 2.3.2 区域填充算法 .....          | 27 |
| 2.4 字符.....                 | 30 |
| 2.4.1 点阵字符 .....            | 31 |
| 2.4.2 矢量字符 .....            | 31 |
| 2.4.3 字符属性 .....            | 31 |
| 2.5 裁剪.....                 | 31 |
| 2.5.1 直线段裁剪 .....           | 32 |



|                         |                                    |           |
|-------------------------|------------------------------------|-----------|
| 2.5.2                   | 多边形裁剪 .....                        | 36        |
| 2.5.3                   | 字符裁剪 .....                         | 39        |
| 2.6                     | 反走样 .....                          | 39        |
| 2.6.1                   | 提高分辨率 .....                        | 39        |
| 2.6.2                   | 区域采样 .....                         | 40        |
| 2.6.3                   | 加权区域采样 .....                       | 41        |
| 2.7                     | 消隐 .....                           | 41        |
| 2.7.1                   | 消隐的分类 .....                        | 42        |
| 2.7.2                   | 消除隐藏线 .....                        | 42        |
| 2.7.3                   | 消除隐藏面 .....                        | 44        |
|                         | 习题 .....                           | 55        |
| <b>第3章 几何造型技术 .....</b> |                                    | <b>56</b> |
| 3.1                     | 参数曲线和曲面 .....                      | 56        |
| 3.1.1                   | 曲线曲面的表示 .....                      | 56        |
| 3.1.2                   | 曲线的基本概念 .....                      | 58        |
| 3.1.3                   | 插值、拟合和光顺 .....                     | 60        |
| 3.1.4                   | 参数化 .....                          | 61        |
| 3.1.5                   | 参数曲线的代数和几何形式 .....                 | 62        |
| 3.1.6                   | 连续性 .....                          | 63        |
| 3.1.7                   | 参数曲面的基本概念 .....                    | 64        |
| 3.2                     | Bézier 曲线与曲面 .....                 | 65        |
| 3.2.1                   | Bézier 曲线的定义和性质 .....              | 65        |
| 3.2.2                   | Bézier 曲线的递推(de Casteljau)算法 ..... | 68        |
| 3.2.3                   | Bézier 曲线的拼接 .....                 | 69        |
| 3.2.4                   | Bézier 曲线的升阶与降阶 .....              | 70        |
| 3.2.5                   | Bézier 曲面 .....                    | 71        |
| 3.2.6                   | 三边 Bézier 曲面片 .....                | 74        |
| 3.3                     | B 样条曲线与曲面 .....                    | 77        |
| 3.3.1                   | B 样条的递推定义和性质 .....                 | 77        |
| 3.3.2                   | B 样条曲线的性质 .....                    | 79        |
| 3.3.3                   | de Boor 算法 .....                   | 81        |
| 3.3.4                   | 节点插入算法 .....                       | 82        |
| 3.3.5                   | B 样条曲面 .....                       | 84        |
| 3.4                     | NURBS 曲线与曲面 .....                  | 84        |
| 3.4.1                   | NURBS 曲线的定义 .....                  | 85        |
| 3.4.2                   | 齐次坐标表示 .....                       | 86        |
| 3.4.3                   | 权因子的几何意义 .....                     | 86        |

|              |                           |            |
|--------------|---------------------------|------------|
| 3.4.4        | 圆锥曲线的 NURBS 表示 .....      | 87         |
| 3.4.5        | NURBS 曲线的修改 .....         | 87         |
| 3.4.6        | 非均匀有理 B 样条(NURBS)曲面 ..... | 89         |
| 3.5          | Coons 曲面 .....            | 89         |
| 3.5.1        | 基本概念 .....                | 89         |
| 3.5.2        | 双线性 Coons 曲面 .....        | 90         |
| 3.5.3        | 双三次 Coons 曲面 .....        | 91         |
| 3.6          | 形体在计算机内的表示 .....          | 93         |
| 3.6.1        | 引言 .....                  | 93         |
| 3.6.2        | 形体表示模型 .....              | 95         |
| 3.6.3        | 形体的边界表示模型 .....           | 100        |
| 3.7          | 求交分类 .....                | 105        |
| 3.7.1        | 求交分类简介 .....              | 105        |
| 3.7.2        | 求交分类策略 .....              | 106        |
| 3.7.3        | 基本的求交算法 .....             | 107        |
| 3.8          | 实体造型系统简介 .....            | 111        |
| 3.8.1        | Parasolid 系统 .....        | 111        |
| 3.8.2        | ACIS 系统 .....             | 113        |
|              | 习题 .....                  | 115        |
| <b>第 4 章</b> | <b>真实感图形学 .....</b>       | <b>117</b> |
| 4.1          | 颜色视觉 .....                | 117        |
| 4.1.1        | 基本概念 .....                | 118        |
| 4.1.2        | 三色学说 .....                | 119        |
| 4.1.3        | CIE 色度图 .....             | 119        |
| 4.1.4        | 常用的颜色模型 .....             | 121        |
| 4.2          | 简单光照明模型 .....             | 124        |
| 4.2.1        | 相关知识 .....                | 124        |
| 4.2.2        | Phong 光照明模型 .....         | 125        |
| 4.2.3        | 增量式光照明模型 .....            | 128        |
| 4.2.4        | 阴影的生成 .....               | 130        |
| 4.3          | 局部光照明模型 .....             | 131        |
| 4.3.1        | 理论基础 .....                | 132        |
| 4.3.2        | 局部光照明模型 .....             | 133        |
| 4.4          | 光透射模型 .....               | 134        |
| 4.4.1        | 透明效果的简单模拟 .....           | 135        |
| 4.4.2        | Whitted 光透射模型 .....       | 135        |
| 4.4.3        | Hall 光透射模型 .....          | 136        |

|             |                    |            |
|-------------|--------------------|------------|
| 4.4.4       | 简单光反射透射模型          | 138        |
| 4.5         | 纹理及纹理映射            | 138        |
| 4.5.1       | 纹理概述               | 138        |
| 4.5.2       | 二维纹理域的映射           | 139        |
| 4.5.3       | 三维纹理域的映射           | 140        |
| 4.5.4       | 几何纹理               | 141        |
| 4.6         | 整体光照明模型            | 141        |
| 4.6.1       | 光线跟踪算法             | 141        |
| 4.6.2       | 辐射度方法              | 150        |
| 4.7         | 实时真实感图形学技术         | 157        |
| 4.7.1       | 层次细节显示和简化          | 158        |
| 4.7.2       | 基于图像的绘制技术          | 160        |
|             | 习题                 | 162        |
| <b>第5章</b>  | <b>图形标准</b>        | <b>163</b> |
| 5.1         | Open GL            | 163        |
| 5.1.1       | Open GL 概述         | 163        |
| 5.1.2       | Open GL 程序结构       | 165        |
| 5.1.3       | 基本几何元素             | 168        |
| 5.1.4       | 坐标变换               | 175        |
| 5.1.5       | 光照处理               | 182        |
| 5.2         | VRML               | 188        |
| 5.2.1       | VRML 简介            | 188        |
| 5.2.2       | 线性变换               | 192        |
| 5.2.3       | 场景交互               | 199        |
| 5.2.4       | VRML 节点            | 202        |
| 5.2.5       | VRML 展望            | 206        |
|             | 习题                 | 207        |
| <b>附录 A</b> | <b>计算机图形学的数学基础</b> | <b>208</b> |
| <b>附录 B</b> | <b>图形的几何变换</b>     | <b>212</b> |
| <b>附录 C</b> | <b>形体的投影变换</b>     | <b>218</b> |
|             | 参考文献               | 222        |

# 第 1 章 绪 论

计算机图形学是利用计算机研究图形的表示、生成、处理和显示的学科。经过 40 多年的发展,计算机图形学已成为计算机学科中最活跃的分支之一,获得了广泛的应用。本章主要介绍计算机图形学的研究内容、发展历史、应用领域、研究前沿及未来趋向,同时还介绍图形硬件的一些基本原理,可使读者对图形学的相关内容有一个概括性的了解。

## 1.1 计算机图形学的研究内容

计算机中图形的表示方法,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,构成了计算机图形学的主要研究内容。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。从处理技术上来看,图形主要分为两类:一类基于线条信息表示,如工程图、等高线地图、曲面的线框图等;另一类是明暗(shading)图,也就是通常所说的真实感图形。

计算机图形学的一个主要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,一般先建立目标图形所描述场景的几何表示,再采用某种光照模型,计算在假想的光源、纹理、材质属性下几何模型的光照效果。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,图形学也把可用于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,因此计算机图形学和图像处理也有着密切的关系。尽管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:图像指计算机内以位图(bitmap)形式存在的灰度信息;而图形则含有几何属性,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。作为一本面向计算机专业本科生和非计算机专业研究生的图形学教材,本书将着重讨论与光栅图形生成、曲线曲面造型和真实感图形生成相关的原理与算法。

## 1.2 计算机图形学发展的历史回顾

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(cathode-ray tube, CRT)来显示一些简单的图形。1958 年美国 Calcomp 公司将联机的数字记录仪发展成滚

筒式绘图仪, GerBer 公司把数控机床发展成为平板式绘图仪。在 20 世纪整个 50 年代里, 只有电子管计算机, 采用机器语言编程, 主要应用于科学计算。为这些计算机配置的图形设备仅具有输出功能。计算机图形学处于准备和酝酿时期, 并称之为“被动式”图形学。20 世纪 50 年代末期, MIT 的林肯实验室在旋风 I 号计算机上开发了 SAGE 空中防御体系, 第一次使用了具有指挥和控制功能的 CRT 显示器, 操作者可以用笔在屏幕上指出被确定的目标。与此同时, 类似的技术在设计和生产过程中也陆续得到了应用, 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》(“Sketchpad: 一个人机交互通信的图形系统”)的博士论文<sup>[1]</sup>, 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有价值的研究领域, 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。他在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。1964 年 MIT 的教授 Steven A. Coons 提出了被后人称为超限插值的曲面造型新思想, 通过插值四条任意的边界曲线来构造曲面<sup>[2]</sup>。同样在 20 世纪 60 年代早期, 法国雷诺汽车公司的工程师 Pierre Bézier 发展了一套被后人称为 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<sup>[3]</sup>。Coons 的方法和 Bézier 的方法是 CAGD 领域的开创性工作。值得一提的是, 计算机图形学的最高奖是以 Coons 的名字命名的, 而分别获得第一届(1983 年)和第二届(1985 年) Steven A. Coons 奖的, 恰好是 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。由于光栅显示器的诞生, 早在 60 年代就已萌芽的光栅图形学算法便迅速发展起来。区域填充、裁剪、消隐等基本图形概念及其相应的算法纷纷诞生, 图形学进入了第一个兴盛时期。同时, 实用的 CAD 图形系统也开始出现。因为通用的、与设备无关的图形软件的发展, 图形软件功能的标准化问题也被提了出来。1974 年, 美国国家标准化局(ANSI)在 ACM SIGGRAPH 的一个“与机器无关的图形技术”的工作会议上, 提出了制定有关标准的基本规则。此后 ACM 专门成立了一个图形标准化委员会, 开始制定有关标准, 该委员会于 1977 年和 1979 年先后制定和修改了“核心图形系统”(Core Graphics System)。ISO 随后又发布了计算机图形接口(Computer Graphics Interface, CGI)、计算机图形元文件标准(Computer Graphics Metafile, CGM)、计算机图形核心系统(Graphics Kernel System, GKS)、面向程序员的层次交互图形标准(Programmer's Hierarchical Interactive Graphics Standard, PHIGS)、产品模型数据交换标准(Standard for the Exchange of Product Model Data, STEP)等标准。这些标准的制定, 为计算机图形学的推广、应用和资源信息共享起了重要的推动作用<sup>[4,5]</sup>。

同在 20 世纪 70 年代, 计算机图形学的另外两个重要进展是真实感图形学和实体造型技术的产生。1970 年 Bouknight 提出了第一个光反射模型<sup>[6]</sup>。1971 年 Gourand 提出了“漫反射模型+插值”的思想, 被称为 Gourand 明暗处理<sup>[7]</sup>。1975 年 Phong 提出了著名的简单光照模型——Phong 模型<sup>[8]</sup>。这些都是真实感图形学的开创性工作。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、美国罗彻斯特大学的 PADL-1 系统等实体造型系统<sup>[9]</sup>。

1980年 Whitted 提出了一个光透视模型——Whitted 模型,并第一次给出了光线跟踪算法的范例,实现了 Whitted 模型<sup>[10]</sup>。1984年,美国 Cornell 大学和日本广岛大学的学者分别将热辐射工程中的辐射度方法引入到计算机图形学中,成功地模拟了理想漫反射表面间的多重漫反射效果<sup>[11]</sup>。光线跟踪算法和辐射度算法的提出,标志着真实感图形的显示算法已逐渐成熟。从 20 世纪 80 年代中期以来超大规模集成电路的发展,为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,使得图形学的各个研究方向得到了充分发展,现在图形学已广泛应用于动画、科学计算可视化、计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)、影视娱乐等各个领域。

### 1.3 计算机图形学的应用及研究前沿

#### 1.3.1 计算机辅助设计与制造

CAD/CAM 是计算机图形学在工业界中最广泛、最活跃的应用<sup>[12]</sup>。运用计算机图形学可以进行土建工程、机械结构和产品的设计,包括设计飞机、汽车、船舶的外形和发电厂、化工厂等的布局以及电子线路、电子器件结构等。CAD/CAM 大量应用于产生工程和产品相应结构的精确图形,然而更常用的是对所设计的系统、产品和工程的相关图形进行人-机交互设计和修改,经过反复的迭代设计,便可利用结果数据输出零件表、材料单、加工流程和工艺卡,或者数据加工代码的指令。在电子工业中,计算机图形学应用到集成电路、印刷电路板、电子线路和网络分析等方面的优势是十分明显的。一个复杂的大规模或超大规模集成电路版图根本不可能用手工设计和绘制,用计算机图形系统不仅能进行设计和画图,而且可以在较短的时间内完成,把结果直接送至后续工艺进行加工处理。在飞机工业中,美国波音飞机公司已用有关的 CAD 系统实现波音 777 飞机的整体设计和模拟,其中包括飞机外型、内部零部件的安装和检验等。

随着计算机网络的发展,在网络环境下进行异地异构系统的协同设计,已成为 CAD 领域最热门的课题之一。通俗地说,协同设计就是一种让不同用户在不同地点共同设计一个产品模型的新技术。现代产品设计已不再是一个设计领域内孤立的技术问题,而是综合了产品各个相关领域、相关过程、相关技术资源和相关组织形式的系统工程。它要求设计团队在合理的组织结构下,采用群体工作方式来协调和综合设计者的专长,并且从设计一开始就考虑产品生命周期的全部因素,从而达到快速响应市场需求的目的。协同设计的出现使企业生产的时空观发生了根本的变化,异地设计、异地制造、异地装配成为可能,从而为企业在市场竞争中赢得了宝贵的时间。

与此相关,随着 STEP 标准的制订与完善,异构 CAD 系统间的数据通信已成为一个新的热门课题。而数据通讯中的几何问题,更是计算机辅助几何设计中的重要研究方向,它主要解决异构 CAD 系统间不同表示形式间的转化问题<sup>[13]</sup>以及模型表示的数据简化问题<sup>[14,15]</sup>。

CAD 领域另一个非常重要的研究领域是基于工程图纸的三维形体重建(见图 1-1)。三维形体重建就是从二维信息中提取三维信息,通过对这些信息进行分类、综合等一系列处理,在三维空间中重新构造出二维信息所对应的三维形体,恢复形体的点、线、面及其拓扑关系,从而实现形体的重建。目前二维图纸设计在工程界中仍占有主导地位,工程上有大量旧的透视图和投影图片可以利用、借鉴,许多新的设计可凭借原有的设计基础加以修改即可完成。同时,因为三维几何造型系统可以完成装配部件的干涉检查,以及有限元分析、仿真、加工等后续操作,它也代表了 CAD 技术的发展方向。目前国际上主要的三维形体重建算法是针对多面体和对主轴方向有严格限制的二次曲面体的。最近,清华大学计算机系刘世霞等提出了一个新算法,可以重建任意二次曲面体<sup>[16]</sup>。任意曲面体的三维形体重建,至今仍是一个有待解决的世界难题。

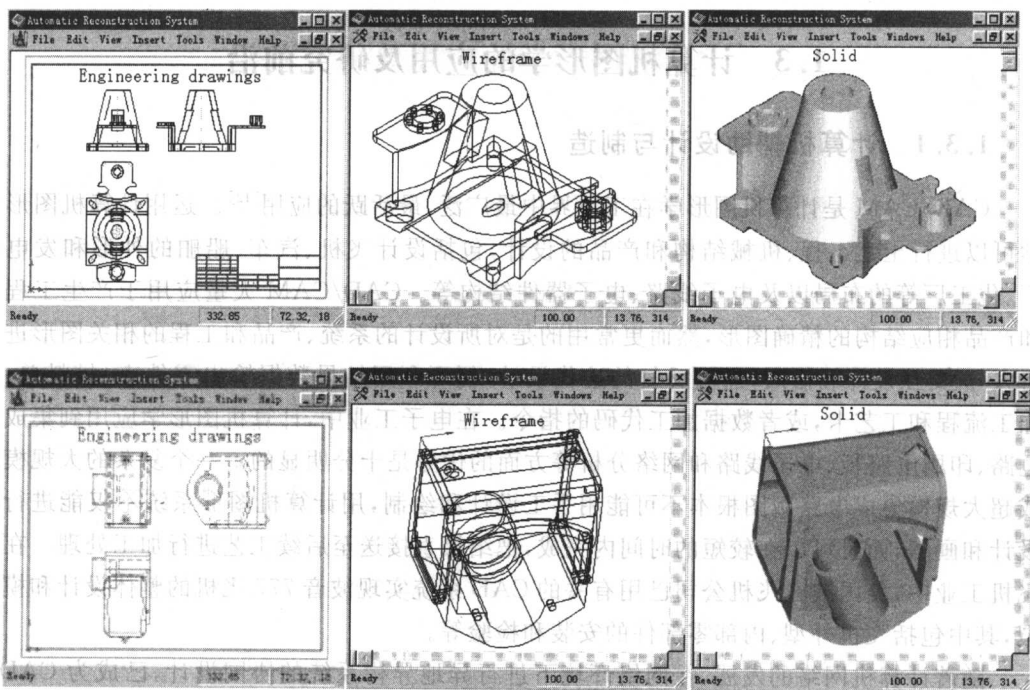


图 1-1 三维重建的两个例子

### 1.3.2 可视化

科学技术的迅猛发展为社会生产和科学研究提供了日益丰富和精密的探测手段,人们能够轻易地采集到各种不同类型的数据;但数据量的与日俱增使得数据的分析和处理变得越来越难,人们难以从数据海洋中得到最有用的数据,找到数据的变化规律并提取本质特征。但是,如果能将这数据用图形的形式表示出来,情况就大不一样了,因为这种数据的图形形式会很清楚地将事物的发展趋势和本质特征呈现在人们面前。1986年,美国科学基金会(NSF)专门召开了一次研讨会,会上正式提出了科学计算可视化(visualization in scientific computing, VISC)的概念。1987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。

目前科学计算可视化广泛应用于医学、流体力学、有限元分析、气象分析当中,尤其在医学领域,可视化有着广阔的发展前景<sup>[17,18]</sup>。依靠精密机械做脑部手术以及由机械人和医学专家配合做远程手术是目前医学上很热门的课题,而这些技术实现的基础则是可视化。可视化技术将医用 CT(computer tomography, 计算机断层扫描)的数据转化为三维图像,并通过一定的技术生成在人体内漫游的图像,使得医生能够看到并准确地判别病人体内的患处;然后通过碰撞检测一类的技术实现手术效果的反馈,帮助医生成功完成手术。从目前的研究状况来看,这项技术还远未成熟,离实用还有一定的距离。主要难点在于生成人体内漫游图像的三维体绘制技术还没有达到实时的程度,而且现在大多数体绘制技术是基于平行投影的,漫游需要的是真实感更强的透视投影技术,而体绘制的透视投影技术到还没有很好地解决。另外在漫游当中还要根据 CT 图像区分出不同的体内组织,这项技术叫做分割(segmentation)。目前分割主要是靠人机交互来完成,远未达到自动实时的地步。

### 1.3.3 真实感图形实时绘制与自然景物仿真

在计算机中重现真实世界的场景叫做真实感绘制。真实感绘制的主要任务是模拟真实物体的物理属性,具体地说就是物体的形状、光学性质、表面的纹理和粗糙程度、物体间的相对位置以及遮挡关系等,其中光照和表面属性是最难模拟的。为了模拟光照,目前已有各种各样的光照模型,将它们从简单到复杂进行排列分别是:简单光照模型、局部光照模型和整体光照模型。从绘制方法上看,有模拟光的实际传播过程的光线跟踪法,也有模拟能量交换的辐射度方法。除了构造逼真的物理模型外,真实感绘制还有一个研究重点是研究加速算法,力求在最短时间内能绘制出最真实的场景,例如,求交算法的加速、光线跟踪的加速等,包围体树、自适应八叉树等都是著名的加速算法。实时的真实感绘制已经成为当前真实感绘制的研究热点,而真实感图形实时绘制的两个热点问题则是物体网格模型的面片简化<sup>[19~21]</sup>和基于图像的绘制(image based rendering, IBR)<sup>[22]</sup>。网格模型的面片简化是指在一定误差的精度范围内,删除部分网格面片表示模型的点、边、面,从而简化所绘制场景的复杂程度,加快图形绘制速度。IBR 则完全摒弃了传统的先建模,再确定光源的绘制方法,直接从一系列已知的图像生成未知视角的图像。这种方法省去了建立场景几何模型和光照模型的过程,也不用进行如光线跟踪等极其费时的计算,尤其适用于野外复杂场景的生成和漫游。

此外,真实感绘制现在已从最初绘制简单的室内场景,发展到了对大量野外自然景物的模拟,比如绘制山、水、云、树、火等。人们提出了多种方法来绘制这些自然景物,比如绘制火和草的粒子系统(particle system)、基于生理模型的绘制植物的方法、绘制云的细胞自动机方法等;也出现了一些自然景物仿真/绘制的综合平台,如德国 Lintermann 和 Deussen 的绘制植物的平台 Xfrog<sup>[23]</sup>以及清华大学计算机系自主开发的自然景物设计平台<sup>[24]</sup>。图 1-2 和图 1-3 是两个自然景物仿真的例子。





图 1-2 由清华大学的自然景物平台生成的野外场景

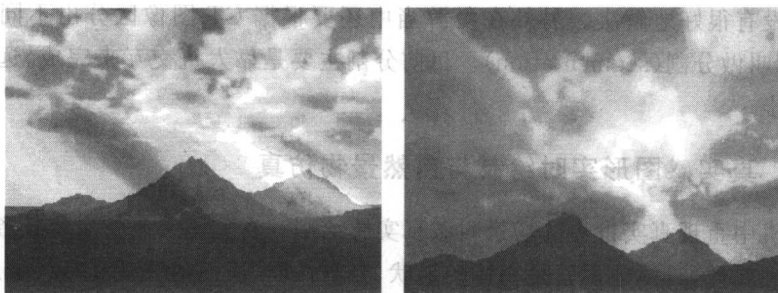


图 1-3 Yoshinori Dobashi 等人绘制的真实感云(SIGgraph'2000)

### 1.3.4 计算机动画

随着计算机图形学和计算机硬件的不断发展,人们已经不满足于仅仅生成高质量的静态场景了,于是计算机动画应运而生。事实上计算机动画也只是生成一幅幅静态的图像,但是每一幅都对前一幅做微小的修改(如何修改便是计算机动画的研究内容)。当这些画面连续播放时,整个场景就会产生视觉连续。

早期计算机动画的灵感来源于传统的卡通片。在生成几幅被称为“关键帧”的画面后,由计算机对两幅关键帧进行插值生成若干“中间帧”;连续播放时,两个关键帧就被有机地结合起来了。计算机动画内容丰富多彩,生成动画的方法也多种多样,比如基于特征的图像变形(见图 1-4)、二维形状混合、轴变形方法、三维自由形体变形(free-form deformation, FFD)及其直接操作(见图 1-5)等。

近年来人们普遍将注意力转向基于物理模型的计算机动画生成方法,这是一种崭新的方法。该方法大量运用弹性力学和流体力学的物理方程进行计算,力求使动画过程体现出最适合真实世界的运动规律。然而要真正到达真实的运动是很难的,比如人的行走或跑步是全身的各个关节协调的结果,要实现很自然的人走路的动画,计算方程非常复杂,计算量极大,因此,基于物理模型的计算机动画还有许多内容需要进一步研究。

20 世纪 90 年代是计算机动画应用取得辉煌硕果的 10 年。Disney 公司每年都要出