



»»»»»»»» 高等学校教材

计算机图形学

聂 烜 编

TEXTBOOK FOR HIGHER EDUCATION



西北工业大学出版社

NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY PRESS

计算机图形学

聂 烜 编

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书系统讲授计算机图形学原理以及该领域的重要技术——虚拟现实,使读者较全面掌握计算机图形学和虚拟现实技术的基本概念、一般方法和应用实践,并为进一步在该领域学习深造或从事相关行业工作打下基础。

本书主要内容包括计算机图形学基本理论、图形系统、计算机图形标准、基本图元及常用曲线的生成、图形填充等常用算法、几何变换、投影变换、三维物体及常用曲面的表示方法、三维图形消隐、真实感图形、OpenGL 编程、虚拟现实系统的理论以及应用等。书中既包括传统计算机图形学的内容,也涉及 OpenGL 开发实践。同时,文字叙述配有大量图示与实例,使较深奥的理论与概念变得通俗易懂。

本书既可作为计算机图形学课程的教材,供高等院校相关专业师生使用,也可供专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

计算机图形学/聂恒编. —西安:西北工业大学出版社,2013.1
ISBN 978-7-5612-3561-4

I. ①计… II. ①聂… III. ①计算机图形学 IV. ①TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 006374 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpu. com

印 刷 者:陕西兴平报社印刷厂

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:11.75

字 数:284 千字

版 次:2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

定 价:25.00 元

前 言

计算机图形学是目前计算机学科中最活跃的分支之一,已成为信息技术领域不可缺少的重要内容和发展基石。同时,计算机图形学应用已经渗透到科研、工程、商业、艺术等社会生活和生产实践领域,并与这些领域的发展相互推动和促进。

显而易见的是,由于计算机图形在人与计算机之间能建立起直观的形象以及高效率的对话,因而图形学随着计算机的发展和应用而渗透到各个领域。比如,游戏软件中出现的场景、电影制作和电视节目中的特技效果、合成技术、多媒体软件制作、工业产品的设计,以及电子出版等,都离不开计算机图形的支持。图形学应用的影响也在互联网上持续激增,为理解信息提供了直观手段,使互联网世界更加丰富多彩。

今天,图形学发展非常迅速,作为图形学的教科书也需要周期性地更新与扩充。本书重点介绍了图形学的基础知识和应用,并对图形学当前发展的最新技术进行了探讨。作为本书的读者,需具备一些高级语言程序设计知识、基本数据结构与算法基础,以及简单线性代数基础。读者可以从对原理方法的理解开始,循序渐进,逐步学习相关的开发实践技巧,并反过来促进对理论的深入理解。

本书是笔者基于多年的教学实践和研究成果编写而成的,最主要的特点是强调理论联系实际。在讲述图形学理论概念的同时,还配套介绍了基于 OpenGL 的实现方法,以便于读者直观理解相关概念和掌握开发技术。本书根据图形学发展迅速的特点,还介绍了一些新概念、新方法和新技术,读者在系统地学习理论知识的同时,还能够了解到这一技术的前沿和发展趋势,并从中得到启迪和帮助。

全书共分为 8 章。第 1 章为绪论,介绍了计算机图形学的基本概念、理论以及研究现状,使读者对于计算机图形学有一个初步的认识。第 2 章为图形系统与图形生成,包括计算机图形构成、图形显示原理、基本图元生成算法和三维模型等内容,主要介绍了与图形生成和显示相关的方法和算法。第 3 章为图形编程基础,包括 GDI 编程基础、OpenGL 简介及工具包、OpenGL 编程步骤和 OpenGL 基本几何图形的绘制等内容。该章主要在实现的层面上作了较详细的讲解,完成了理论向实践的过渡。第 4 章为图形观察与变换,包括数学基础、二维几何坐标变换、二维观察变换、三维几何坐标变换、三维投影变换、三维观察变换和 OpenGL 中的三维图像变换等内容。第 5 章为三维物体的表示,包括曲线和曲面的表示、三次样条、Bézier 曲线和曲面、B 样条曲线和曲面、NURBS 曲线和曲面等内容,使读者对三维物体的表示有较深层次的认识。第 6 章为真实感图形的生成与处理,包括可见面判别算法、简单光照模型、明暗处理方法、透明的处理、阴影的产生技术、整体光照模型与光线跟踪、纹理处理、颜色模

型、材质、OpenGL 光照及材质模型等内容。第 7 章为计算机动画,介绍动画原理以及计算机动画的特点。第 8 章为虚拟现实技术,包括虚拟现实技术概述、虚拟现实接口设备和分布式虚拟现实系统等内容,使读者了解到当前最前沿的虚拟现实技术。

由于水平有限,书中难免存在不足之处,欢迎广大读者批评指正。

编 者

2012 年 4 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 计算机图形学的研究内容	1
1.2 计算机图形学的发展	6
1.3 计算机图形学的应用	8
1.4 计算机图形系统的软件结构.....	13
1.5 计算机图形学的当前研究课题.....	14
第 2 章 图形系统与图形生成	19
2.1 计算机图形系统构成.....	19
2.2 图形显示原理.....	29
2.3 基本图元生成算法.....	39
2.4 三维模型.....	48
第 3 章 图形编程基础	53
3.1 GDI 编程基础	53
3.2 OpenGL 简介及工具包	61
3.3 OpenGL 编程步骤	66
3.4 OpenGL 基本几何图形的绘制	70
第 4 章 图形观察与变换	75
4.1 数学基础.....	75
4.2 二维几何坐标变换.....	77
4.3 二维观察变换.....	83
4.4 三维几何坐标变换.....	87
4.5 三维投影变换.....	92
4.6 三维观察变换.....	97
4.7 OpenGL 中的三维图形变换.....	99
第 5 章 三维物体的表示	107
5.1 曲线和曲面的表示	107
5.2 三次样条	112

5.3	Bézier 曲线和曲面	115
5.4	B 样条曲线和曲面	121
5.5	NURBS 曲线和曲面	126
第 6 章 真实感图形的生成与处理		129
6.1	可见面判别算法	130
6.2	简单光照模型	133
6.3	明暗处理方法	136
6.4	透明的处理	139
6.5	阴影的产生技术	140
6.6	整体光照模型与光线跟踪	141
6.7	纹理处理	143
6.8	颜色模型	146
6.9	材质	148
6.10	OpenGL 光照及材质模型	149
第 7 章 计算机动画		157
7.1	动画的概念和原理	157
7.2	计算机动画的基本原理	159
7.3	基于 OpenGL 的动画实现	161
第 8 章 虚拟现实技术		164
8.1	虚拟现实技术概述	164
8.2	虚拟现实的接口设备	179
8.3	分布式虚拟现实系统	180
参考文献		182

第 1 章 绪 论

本章介绍计算机图形学的概念、研究内容、发展历史、应用和当前热点研究课题,使读者对图形学的内容有个大致的了解。

1.1 计算机图形学的研究内容

1.1.1 计算机图形学的定义

1982 年,国际标准化组织 ISO 给出了计算机图形学(Computer Graphics,CG)的定义:研究用计算机进行数据与图形之间相互转换的方法和技术。同年美国的 James Foley 在他的著作中给出了如下的定义:计算机图形学是研究计算机产生、存储、处理物体和物理模型及它们的图画的一门学科。而 IEEE(电气与电子工程师协会)对计算机图形学的定义是在计算机的帮助下生成图形图像的一门科学或艺术。

尽管各个定义有不同的侧重点,但是,从这些定义里可以看出,计算机图形学这门新兴学科所要涉及和探讨的主要问题是利用计算机进行图形信息的表达、输入、存储、显示、输出、检索、变换及图形运算等工作。经过 30 多年的发展,计算机图形学已成为计算机科学中最为活跃的分支之一,并得到广泛的应用。

从研究范围讲,计算机图形学是研究怎样用计算机生成、处理和显示图形的一门学科。生成是指在计算机内表示客观世界物体的模型,即图形建模;显示是指模型对象在计算机显示设备或其他输出设备上的显示;处理是指利用计算机实现客观世界、对象模型和输出图形这三者之间映射的一系列操作和处理过程。

研究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,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、材质属性下的光照明效果。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,因此计算机图形学也就和图像处理有着密切的关系。

1.1.2 计算机图形学的研究内容

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,构成了计算机图形学的主要研究内容。其研究范围通常包括图形软硬件、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、非真实感绘制,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。

具体地说,可大致分为下述内容。

- (1)图形的输入:研究如何把要处理的图形输入到计算机内,以便让计算机进行各种处理。
- (2)产生图形的算法:研究在显示器或其他输出设备上产生图形的各种算法。
- (3)图形的数据结构:研究图形在计算机内的表示方法。
- (4)图形的变换:研究图形的各种几何变换。
- (5)图形运算:包括图形的分解、组合等。
- (6)图形语言:研究具有各种图形处理功能的语言。
- (7)图形软件的标准化:研究如何使图形软件像高级语言那样,与具体设备无关。

因此,总的来说,计算机图形学应该解决和研究下列一些问题:

- (1)图形表示和处理的数学方法及其实现的计算机算法。
- (2)设计一个好的图形软、硬件系统。
- (3)设计与实际应用相结合的图形应用系统。

1.1.3 计算机图形学的相关学科

计算机图形学不仅涉及计算机的各个学科,同时也涉及诸如计算几何、光学、图像处理、计算机视觉等多门专业学科。其相互间关系如图 1-1 所示。

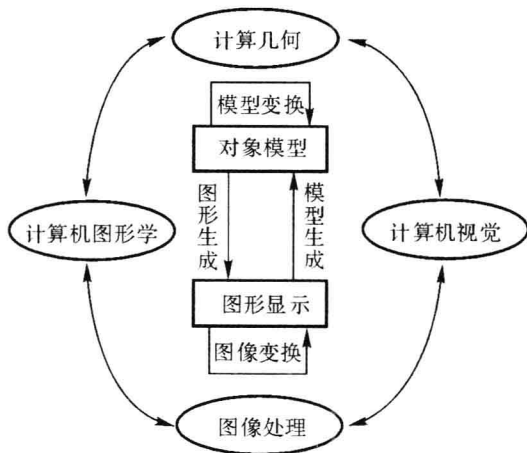


图 1-1 计算机图形学相关学科

计算机图形学既是理论性的学科,同时也是实践性的学科。计算机图形学是研究由非图像的信息而产生“逼真”的图像,是研究自然事物的建模、表示和显示的方法,例如计算机游戏图形显示和操纵、自然景物的模拟。

与图形学相关的另一门学科——图像处理——所讨论的问题中,输入和输出两者均为图像,它研究如何对一幅连续的图像采样、量化以产生数字图像,如何对数字图像作各种变换以方便处理,如何压缩图像数据以便于存储和传输,如何提取图像中的无用噪声或增强图像中的某些特征。

计算机视觉和模式识别讨论对输入图像进行描述或者对图像进行归类的方法。它从图像开始,分析和识别输入图像并从中提取二维或三维的数据模型或特征,再将其变换到抽象的描述,如一组数、一串符号或一个图(graph)。

计算几何着重讨论几何形体在计算机内的表示、分析和综合。它研究如何方便灵活地建立几何形体的数学模型,提高算法的效率;在计算机内如何更好地存储和管理这些模型等。因此计算几何是对计算机图形学中的图形表示和建模的专业化研究和处理。在许多情况下,计算几何是计算机图形中的许多技术和方法的理论基础。

1.1.4 图形与图像

什么是图形?从直观上来说,我们看见的一切从视觉性质上讲都是图形,例如,下面列出的都是图形。

- (1)人肉眼所见的一切景象;
- (2)各种人工美术绘画、雕塑品;
- (3)用摄像机、照相机等获得的照片;
- (4)用各种绘图工具所绘制的工程图、设计图、方框图;
- (5)用数学方法描述的图形等。

我们看到的客观世界画面,通常由点、线、面、体等几何元素和灰度、色彩、线型、线宽等非几何元素组成。在计算机中有两种表示景物的视觉感应的方法:点阵法和参数法。

所谓点阵法是指以图形中所有点的亮度或者颜色来表示视觉画面,强调视觉画面是由点及其点的属性构成的。这样表示的图也称为点阵图、位图或图像,如图 1-2 所示。



图 1-2 点阵图像

一般地,一个图像就是一个矩阵,该矩阵的每一个元素为一个(或多个)非负整数,表示图像同行同列一个点的颜色值,称为像素;矩阵的维数代表图像的宽度和高度,如图 1-3 所示。

由扫描仪、摄像机等输入设备捕捉实际的画面产生的图就是用点阵法表示的。在学术上,研究图像的学科称为图像处理。图像的特点是,需要大量的存储空间;由于点阵图的基本单位是像素,其编辑、修改比较困难;点阵图的放大操作会使图形失真(见图 1-4)。

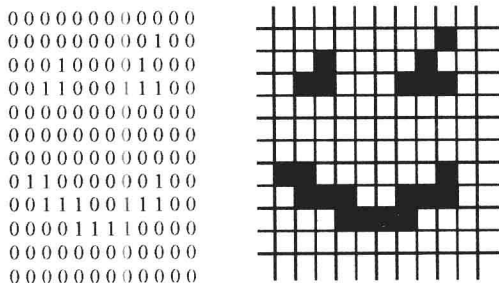


图 1-3 点阵法表示

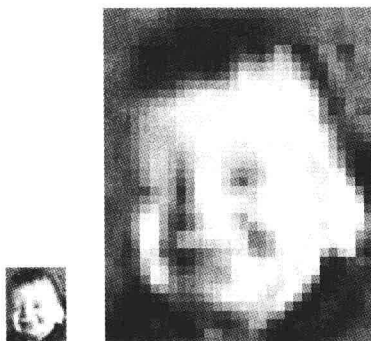


图 1-4 点阵图的失真问题

参数法是指图由形状参数和属性参数表示,也称为图形或者矢量图。形状参数是指描述图形的方程或分析表达式,线段的端点坐标,构成图形的点、线、面、体以及它们的空间关系等相关参数;属性参数指颜色、明暗、透明度、光照、材质、纹理、线型等相关参数。如图1-5所示为用参数法表示的真实感图形。

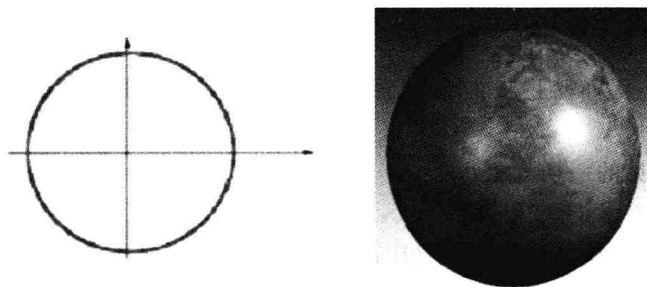


图1-5 参数法图形

在参数法中,图形通常由点、线、面、体、线型、线宽等几何元素和灰度、色彩、纹理、材质、反光性质、光折射性质等非几何属性组成,也即所谓“用数学方法描述的图形”。

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。

但是图形与图像两个概念是有本质区别的。图像指计算机内以位图形式存在的灰度或者颜色信息,是平面概念;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。

图形可以是二维的也可以是三维的;图形的基本信息包括基本几何要素(必须的),拓扑关系以及颜色、材质、纹理等可选要素。

而图像一定是二维的;图像的最小单位是像素;图像的基本参数包括图幅参数、灰度级分辨率和颜色分辨率等;图像分为黑白图、灰度图、256彩色图和真彩色图(见图1-6)。

在计算机图形学中,图形是指由外部轮廓线条构成的矢量图,即由计算机绘制的直线、圆、矩形、曲线、图表等,即研究“用数学方法描述的图形”这一类。但从构成图形的要素来看,计算机图形学的图形不仅仅是“用数学方法描述的图形”,除了考虑它的点、线、面等几何要素,同时也要考虑它的明暗、灰度、材质、透明度、纹理、色彩等这样一些与视觉有关的非几何要素。

从处理技术上来看,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。图形学把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。如图1-7所示为表示汽车外形设计的线框图。

另一类是明暗图(Shading),也就是通常所说的真实感图形。计算机图形学一个主要的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、材质属性下的光照明效果。如图1-8所示为真实感图形生成过程的原理。

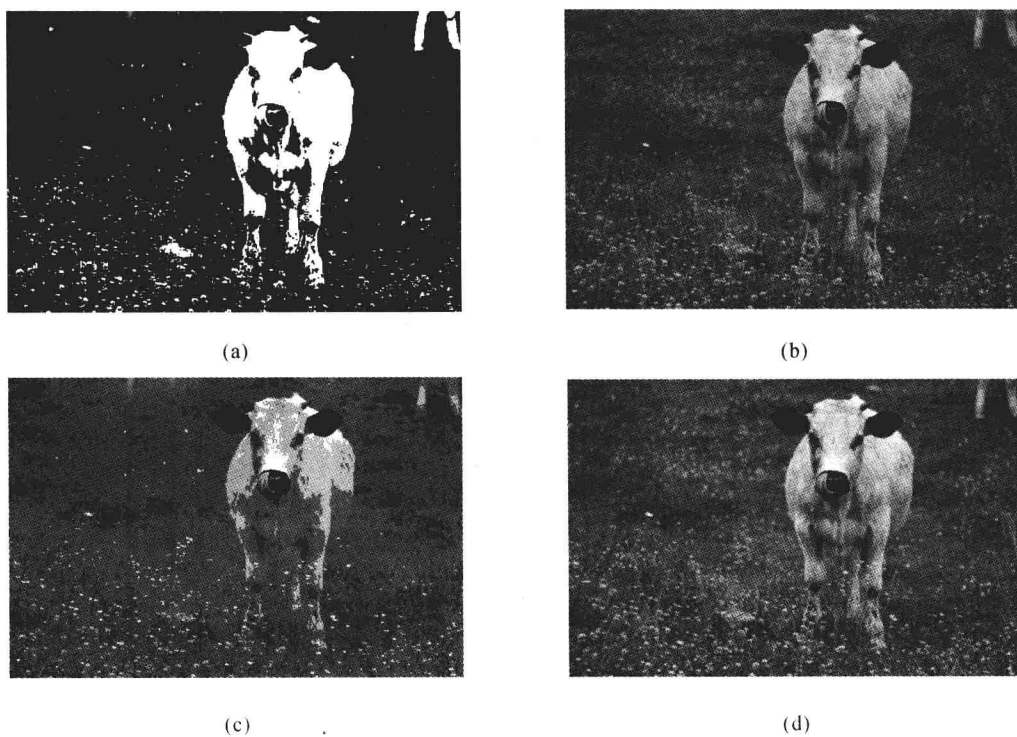


图 1-6 图像分类

(a)黑白图；(b)灰度图；(c) 256 彩色图；(d)真彩色图

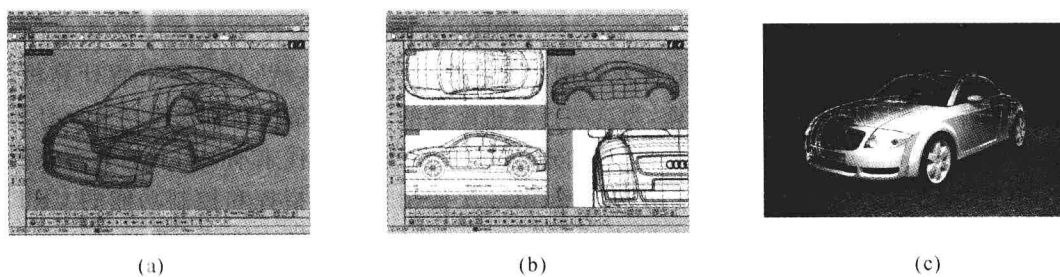


图 1-7 真实感图形

(a)线框图；(b)局部线框图；(c)效果图

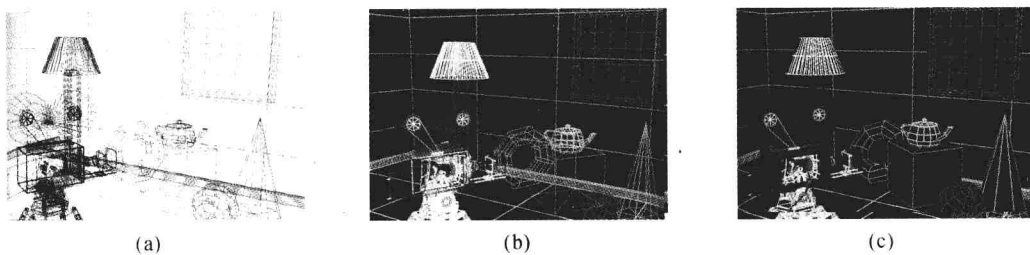
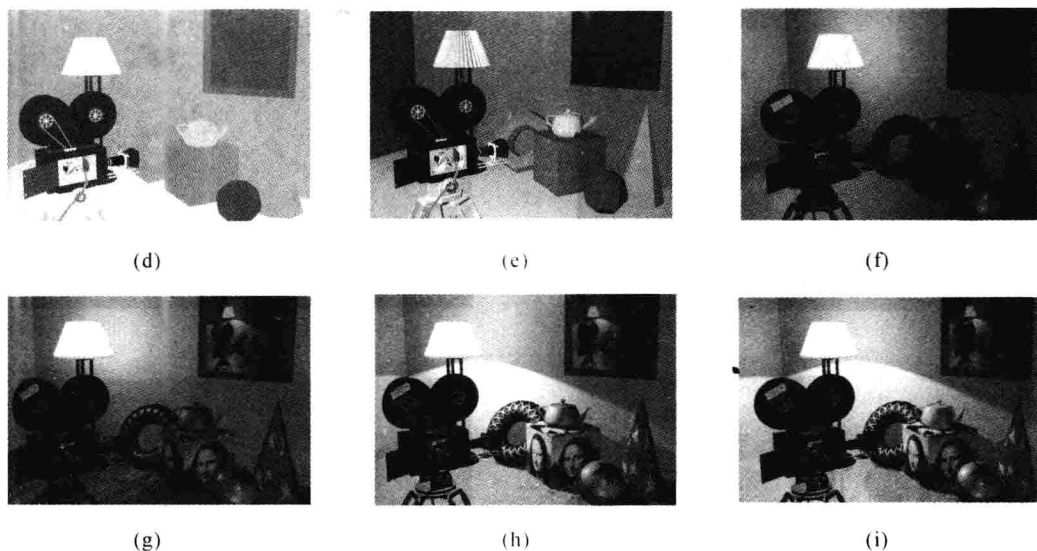


图 1-8 真实感图形生成过程

(a)制作集合元素组合成的线框图；(b)线框图区别着色，产生层次感；(c)擦掉无用的辅助线条



续图 1-8 真实感图形生成过程

(d)对不同的表面着色；(e)颜色细化；(f)添加材质效果；(g)添加纹理；(h)打光；(i)光线的柔化处理

1.2 计算机图形学的发展

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,如图 1-9 所示。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。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 50 年代,只有电子管计算机,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。到 50 年代末期,MIT 的林肯实验室在“旋风”计算机上开发 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 and 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。

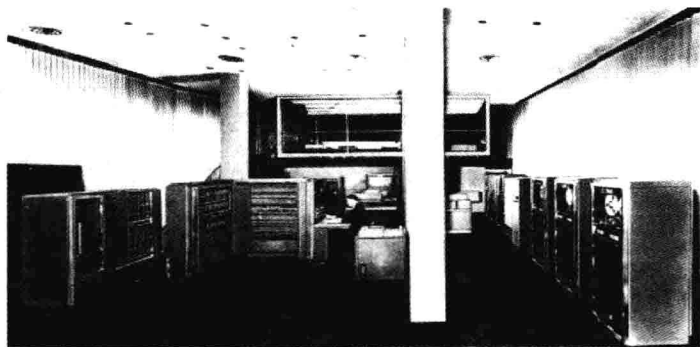


图 1-9 旋风 I 号

1962年,MIT 林肯实验室的 Ivan E. Sutherland 发表了一篇题为“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在广为应用。1963年,MIT 开发出了第一个交互式图形系统,该系统使用阴极射线管监视器、光笔和功能键面板,如图 1-10 所示。1964年,MIT 的 Steven A. Coons 教授提出了被后人称为超限插值的新思想,通过插值四条任意的边界曲线来构造曲面。同在 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。Coons 方法和 Bézier 方法是 CAGD 最早的开创性工作。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,而获得第一届(1983)和第二届(1985) Steven A. Coons 奖的,恰好是 Ivan E. Sutherland 和 Pierre Bézier,这也算是计算机图形学发展中的一段佳话。

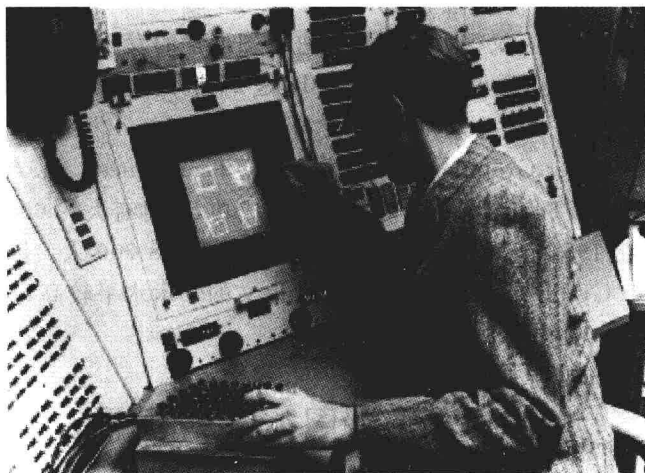


图 1-10. 第一个交互式图形系统

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。由于光栅显示器的产生,在 60 年代就已萌芽的光栅图形学算法迅速发展起来,区域填充、裁剪、消隐等基本图形概念及其相应算法纷纷诞生,图形学进入了第一个兴盛的时期,并开始出现实用的 CAD 图形系统。又因为通用、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被提了出来。1974 年,美国国家标准化局(ANSI)在 ACM SIGGRAPH 的一个与“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、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 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图形标准 PHIGS(Programmer's Hierarchical Interactive Graphics Standard)等。这些标准的制定,为计算机图形学的推广、应用、资源信息共享,起了重要作用。

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,1971 年 Gourand 提出“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。这些可以算是真实感图形学最早的开创性工作。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。

1980 年 Whitted 提出了一个光透视模型——Whitted 模型,并第一次给出光线跟踪算法的范例,实现 Whitted 模型;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,用辐射度方法成功地模拟了理想漫反射表面间的多重漫反射效果。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 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。

最后,我们以 SIGGRAPH 会议的情况,来结束计算机图形学的历史回顾。ACM SIGGRAPH 会议是计算机图形学最权威的国际会议,每年在美国召开,参加会议的人在 50 000 人左右。SIGGRAPH 会议很大程度上促进了图形学的发展,世界上没有第二个领域会每年召开如此规模巨大的专业会议。SIGGRAPH 是 20 世纪大约 60 年代中期,由 Brown 大学的教授 Andries van Dam (Andy) 和 IBM 公司的 Sam Matsa 发起的,全称是“the Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques”。1974 年,在 Colorado 大学召开了第一届 SIGGRAPH 年会,并取得了巨大的成功,当时有大约 600 位来自世界各地的专家参加了会议。仅在 1997 年,参加会议的人数就增加到 48 700 人。因为每年只录取大约 50 篇论文在 Computer Graphics 杂志上发表,因此论文的学术水平较高,基本上代表了图形学的主流方向。

1.3 计算机图形学的应用

随着计算机图形学的不断发展,它的应用范围也日趋广泛。目前,计算机图形学应用领域主要有以下几个方面。

1. 用户接口

用户接口是人们使用计算机的第一观感。一个友好的图形化的用户界面能够大大提高软件的易用性。在 DOS 时代,计算机的易用性很差,编写一个图形化的界面要费去大量的劳动,过去传统的软件中有 60% 的程序是用来处理与用户接口有关的问题和功能的。进入 20 世纪 80 年代后,随着 Xwindow 标准的提出,苹果公司图形化操作系统的推出(见图 1-11),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。如今在任何一台普通计算机上都可以看到图形学在用户接口方面的应用。操作系统和应用软件中的图形、动画比比皆是,程序直观易用。很多软件几乎可以不看任何说明书,而根据它的图形或动画界面的指示进行操作。

目前,几个大的软件公司都在研究下一代用户界面,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,而图形学在其中起主导作用。



图 1-11 苹果公司浏览器

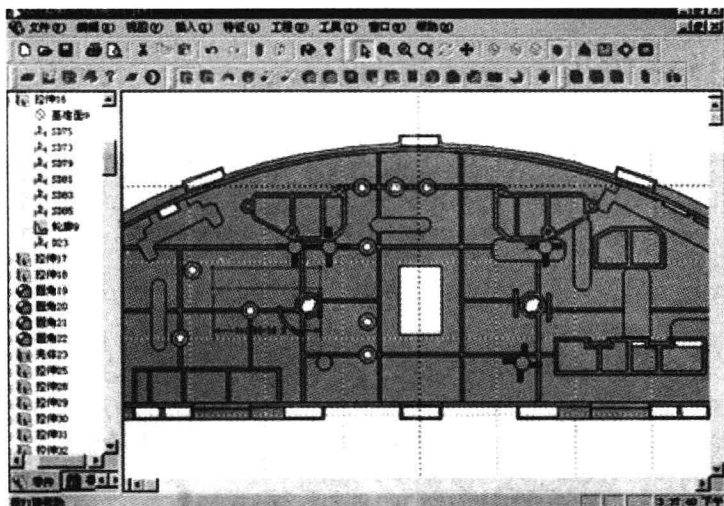


图 1-12 CAD 零件设计

2. 计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)

CAD/CAM 是计算机图形学在工业界最广泛、最活跃的应用领域。计算机图形学被用来进行土建工程、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、电子器件等。如图 1-12 和图 1-13 所示为浙江大学开发的 Gscad 三维机械 CAD 系统,分别用于零件设计和装配设计。有时,人们着眼于利用计算机图形学产生工程和产品相应结构的精确图形,然而更常用的是利用它对所设计的系统、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

规模集成电路板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,把其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,其中包括飞机外形设计、内部零部件的安装和检验,如图 1-14 所示。

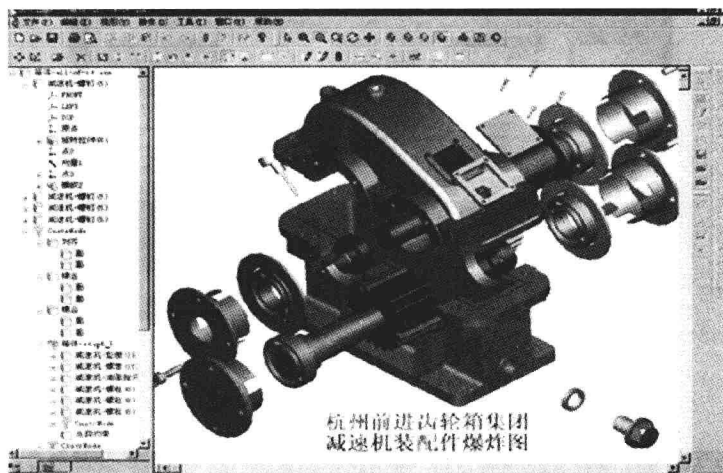


图 1-13 CAD 装配设计



图 1-14 波音 777

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,已经成为 CAD 领域最热门的课题之一。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