



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

计算机图形学

——原理、方法及应用

(第 3 版)

潘云鹤 童若锋 唐敏 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

面向 21 世纪课程教材
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

计算机图形学

——原理、方法及应用

Jisuanji Tuxingxue——Yuanli、Fangfa ji Yingyong

(第 3 版)

潘云鹤 童若锋 唐 敏



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书介绍计算机图形学中的基本原理、经典算法和部分应用,主要包括经典光栅图形算法、图形变换与观察、真实感图形绘制等图形显示流程中的关键算法和参数曲线曲面、实体造型等图形表示基本方法,同时还对当前在游戏和计算机动画中广泛应用的细分曲面、基于 GPU 的实时绘制以及图形学的部分应用作了介绍。

本书可作为高等学校计算机、数字媒体等相关专业的基础教材,也可供计算机图形学或相关领域的爱好者参考。

图书在版编目(CIP)数据

计算机图形学:原理、方法及应用/潘云鹤,童若锋,唐敏编著. —3版.

—北京:高等教育出版社,2011.6

ISBN 978-7-04-032204-0

I. ①计… II. ①潘… ②童… ③唐… III. ①计算机图形学

IV. ①TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 141097 号

策划编辑 武林晓 责任编辑 武林晓 封面设计 于文燕 版式设计 马敬茹 插图绘制 尹莉
责任校对 胡晓琪 责任印制 张福涛

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京七色印务有限公司
开 本 787mm × 1092mm 1/16
印 张 20
字 数 450 千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2001 年 1 月第 1 版
2011 年 6 月第 3 版
印 次 2011 年 6 月第 1 次印刷
定 价 32.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 32204-00

第3版前言

本书自2004年6月修订本出版以来,受到了很多读者的欢迎,作为高等学校相关专业的研究生、本科生和研究生进修班等不同层次学生的教材,获得较好的效果。近十年来,计算机图形学在三维游戏、计算机动画、虚拟现实等研究成果与应用需求的推动下得到了飞速发展。与计算机图形学相关的学科如计算机视觉、多媒体技术等领域的发展,以及相关硬件如图形采集设备、动作捕捉仪等的成熟也为图形学的高速发展提供了相应的条件。这就使得在图形的表示、处理和绘制等方面都有了较大的更新。为使读者能够掌握计算机图形学中的新方法,我们在《计算机图形学——原理、方法及应用》第二版的基础上进行修订,增加了在计算机动画中经常使用的细分曲线曲面、网格重建与几何处理以及三维游戏、虚拟现实中的关键技术实时绘制等内容,同时也删减了原书中的数据接口与交换标准以及布尔运算与特征造型等偏重于计算机辅助设计方面的内容。为使读者更好地理解和应用网格处理和GPU绘制等新内容,我们在中国高校计算机课程网(<http://computer.cncourse.com>)上提供了相应的代码供读者参考。在修订中,我们注重内容的系统性,从原理、方法和应用三个层面阐述图形学技术,力求使本书内容更丰富、结构更合理、适用面更广。

童若锋、唐敏、张宏鑫、李际军等参加了本书的修订工作。

近年来,计算机图形学通过与图像技术、智能技术、计算机视觉技术等学科的交叉衍生出了丰富多彩的新内容。学科的交叉不仅使计算机图形学推动了兄弟学科的发展,也促进了图形学本身的快速发展,特别是三维数据采集、立体视觉、GPU等方面的发展对图形学技术产生了重要影响。由于本书的主要功能是作为高等院校教授计算机图形学知识的基础教材,因此在增选内容时重点考虑的是内容的系统性、基础性和主流性。受篇幅限制,还有很多图形学中的新发展、新应用如非真实感绘制、运动捕捉、运动控制、立体视频生成等方面的内容未能介绍。随着图形学与智能技术、计算机视觉技术、互联网技术的进一步交叉与融合,图形学会不断产生新的方法,带动新的应用,感兴趣的读者可进一步关注相关论文和专著中所展示的进展。

因写作时间与水平的局限,书中难免有疏漏之处,敬请读者指正。

潘云鹤

2011年4月1日

修订版前言

本书是2001年1月版的修订本。计算机图形学从20世纪60年代至今短短几十年内在应用需求的驱动下得到了飞速发展,成为计算机应用的主要研究方向之一。与计算机图形学的快速发展相对应,计算机图形学在国内外已有不少教材,但各教材侧重点有所不同,传统的教材注重原理和基本方法,较少涉及CAD等应用领域的实用方法介绍。作者在分析了多年教学过程中使用的国内外教材的优缺点后编写了计算机图形学讲义,并在此基础上完善而写成了《计算机图形学——原理、方法及应用》一书。本书除介绍计算机图形学基础知识、主要算法和应用外,还介绍系统与标准,并有一些在工业界应用的CAD系统实例,使读者既能很好地理解基础理论知识,又能掌握实际的应用方法和系统结构。

2001年1月本书第一版出版后,作为浙江大学和兄弟院校相关专业的研究生、本科生和研究生进修班等不同层次学生的教材,获得较好的教学效果。但计算机技术特别是图形硬件和网络技术的快速发展以及应用需求的推动,使得计算机图形学的知识有了更新和发展,并不断衍生出生机勃勃的学科分支,计算机动画、科学计算可视化等相关技术也日益成熟。为使读者尽快掌握相关知识,并使本书内容更丰富,结构更合理,适用面更广,我们在《计算机图形学——原理、方法及应用》第一版的基础上进行修订,增加了曲线曲面、计算机动画、科学计算可视化等章节,并对造型、真实感绘制等章节进行了调整,增加了分解模型、粒子系统、阴影生成等内容,使读者能了解新技术的发展。除了内容上的调整外,修订版还将在形式上有所提高,对应课本内容,我们将提供PPT课件,增加一些纸质课本无法表达的图形、图像,以取得更好的教学效果。

董金祥、陈德人、童若锋、唐敏、耿卫东、许端清、李际军、鲁东明、欧阳应秀等同志参加了本书的编写和修订工作,并由董金祥修改定稿。

今后10年,计算机图形学会在一片更加广阔的空间发展,在此过程中,特别要注意3个发展方向。一是图像技术和图形技术的交叉,它可能成为应对更高显示水平与更低计算成本挑战的强大武器,这也包括它的延伸,即动画和视频技术的交叉;二是智能技术与图形技术的交叉,基于数学计算的图形学算法发展得很快,同时也留下了用数学公式难以攻克的问题,解决这些问题的一套强大工具便是人工智能中的知识和逻辑技术,这种交叉手段,已经在动画的生成、基于图像的真实感显示(IBR)等技术上显示了远大的前景;三是互联网技术与图形技术的交叉,互联网络的那种分布式的、协同的、远距离的乃至无线的技术还将给计算机图形学带来哪些不可预知的变化,我们应当积极探索而不仅仅是拭目以待。

因写作时间有限,书中若有疏漏之处,敬请读者指正。

潘云鹤

2003年9月1日

初版前言

近 20 多年来,计算机图形学已成为计算机科学中最主要的分支之一。这种现象的产生至少有两个原因:其一,图形是人类最易接受的信息形式,这不仅因为眼睛是人类最重要的感知器官,而且也因为人的大脑中的绝大部分信息是关于形象的信息,因此,以图形方式进行人一机交互最自然,也最敏捷;其二,计算机图形学本身就很有吸引力,人的探索欲是促进科学发展最大的动力,于是,全世界越来越多的学者加入了这个领域的研究工作,结果使得各种计算机图形学会议的规模日渐扩大,成果日趋精彩,相关产业也随之蓬勃发展。

目前,计算机图形学已广泛应用于各个领域,同娱乐界中众多的计算机动画技术一样,工业界也已普遍使用了各种各样的计算机辅助设计技术。近年来,科学界对计算机模拟技术给予了越来越高的评价,并将其列为可与理论、实验相并立的第三大科学研究手段。随着远程教育的发展,声、文、图并茂的教材将会迅速普及,人类的智力开发水平也将随之被推向一个新的高度。

本书是计算机图形学的基本教材。书中不但描述了计算机图形学的基本概念与算法,而且介绍了系统与标准,并有一些在工业界应用的 CAD 系统实例。希望读者通过阅读此书获得系统的计算机图形学知识,并为今后学习日新月异发展的计算机图形学前沿知识打下坚实的基础。

今后 10 年,计算机图形学会在一片更加广阔的空间发展。在此过程中,特别要注意 3 个发展方向。一是图像(Image)技术和图形技术的交叉,它可能成为应对更高显示水平与更低计算成本挑战的强大武器,也包括它的延伸,即动画和视频(Video)技术的交叉;二是智能(Intelligence)技术与图形技术的交叉,基于数学计算的图形学算法发展得很快,同时也留下了用数学公式难以攻克的问题,解决这些问题的一套强大工具便是人工智能中的知识和逻辑技术,这种交叉手段,已经在动画的生成、基于图像的真实感显示(IBR)等技术上显示了远大的前景;三是互联网(Internet)技术与图形技术的交叉,互联网络的那种分布式的、远距离的、协同的技术将给计算机图形学带来哪些不可预知的变化,我们应不仅仅是拭目以待,还要积极探索。

中国科学院软件研究所总工程师戴国忠研究员仔细审阅了全书,并提出了宝贵建议,在此表示衷心的感谢。参加本书编写工作的还有董金祥、陈德人、唐敏、童若峰、耿卫东、许端清等同志。本书所附光盘由董金祥、陈德人、陈纯、吕菁、唐敏、许端清等同志制作。

因写作时间有限,书中若有疏漏之处,敬请读者指正。

潘云鹤

2000 年 10 月 1 日

目 录

第一章 计算机图形学基本知识 1

- 1.1 计算机图形学的概念 1
- 1.2 计算机图形学的发展 2
- 1.3 计算机图形学的应用 4
- 1.4 计算机图形硬件简介 5
- 习题一 20

第二章 基本图形的生成与计算 21

- 2.1 直线的生成算法 21
 - 2.1.1 直线 DDA 算法 21
 - 2.1.2 直线 Bresenham 算法 22
- 2.2 圆的生成算法 26
 - 2.2.1 基础知识 26
 - 2.2.2 圆的 Bresenham 算法 27
- 2.3 区域填充算法 28
 - 2.3.1 基础知识 28
 - 2.3.2 扫描线填色算法 29
 - 2.3.3 种子填色算法 37
- 2.4 字符的生成 38
 - 2.4.1 点阵式字符 38
 - 2.4.2 矢量式字符 39
 - 2.4.3 方向编码式字符 39
 - 2.4.4 轮廓字形技术 40
- 2.5 图形求交 40
 - 2.5.1 求交点算法 41
 - 2.5.2 求交线算法 43
 - 2.5.3 包含判定算法 45

2.5.4 重叠判定算法 48

2.5.5 凸包计算 48

2.6 图形裁剪 49

2.6.1 直线的裁剪 49

2.6.2 多边形的裁剪 55

2.6.3 字符串的裁剪 59

习题二 60

第三章 图形变换与输出 62

3.1 图形的几何变换 62

3.1.1 二维图形几何变换 62

3.1.2 三维图形几何变换 66

3.1.3 参数图形几何变换 70

3.2 坐标系统及其变换 71

3.2.1 坐标系统 71

3.2.2 规格化变换与设备坐标
变换 72

3.2.3 投影变换 76

3.3 图元输出与输出属性 78

3.3.1 二维图元输出 78

3.3.2 输出属性及其控制 79

3.3.3 三维图元的输出 84

习题三 85

第四章 真实感图形显示 86

4.1 线消隐 86

4.1.1 消隐的基础知识 86

4.1.2 凸多面体的隐藏线消除 87

4.1.3 凹多面体的隐藏线消除	87	5.8 细分曲线、曲面	151
4.2 面消隐	89	5.8.1 细分曲线和曲面基本 知识	151
4.2.1 区域排序算法	89	5.8.2 细分曲线	152
4.2.2 深度缓存(Z-Buffer) 算法	89	5.8.3 细分曲面	153
4.2.3 射线踪迹算法	91	习题五	155
4.2.4 扫描线算法	91	第六章 网格重建与几何处理	157
4.3 光照模型	91	6.1 Delaunay 网格重建	158
4.3.1 光源特性和物体表面 特性	91	6.2 网格重建的多项式拟合方法	160
4.3.2 光照模型及其实现	93	6.3 基于三维微分属性的网格 重建	165
4.3.3 明暗的光滑处理	96	6.4 网格修补	167
4.3.4 阴影生成	97	6.5 网格简化	168
4.3.5 整体光照模型	101	6.6 网格滤波与光顺	170
4.4 光线跟踪	102	习题六	173
4.4.1 光线跟踪的基本原理	102	第七章 基本造型方法	174
4.4.2 光线与实体的求交	104	7.1 概述	174
4.4.3 光线跟踪算法	106	7.2 结构实体几何模型	175
4.5 纹理映射	111	7.3 分解模型	179
4.5.1 表面纹理及映射	111	7.3.1 八叉树表达	179
4.5.2 表面纹理的描绘	113	7.3.2 八叉树的操作	180
4.6 颜色空间	114	7.3.3 线性八叉树	182
4.6.1 颜色的基本概念	114	7.4 边界模型	183
4.6.2 CIE 色度图	115	7.4.1 翼边结构	183
4.6.3 几种常用的颜色模型	117	7.4.2 半边数据结构	185
习题四	119	7.4.3 欧拉操作	195
第五章 曲线曲面	120	7.4.4 基本体元的生成	204
5.1 曲线和曲面的表示	120	7.5 非传统造型技术	211
5.2 Bézier 曲线	123	7.5.1 分形造型	211
5.3 Bézier 曲面	130	7.5.2 粒子系统	213
5.4 B 样条曲线	133	习题七	215
5.5 B 样条曲面	141	第八章 基于 GPU 的实时渲染技术	216
5.6 NURBS 曲线	143	8.1 GPU 简介与可编程渲染	
5.7 NURBS 曲面	146		

流水线	216	习题八	244
8.1.1 GPU 简介	216	第九章 计算机图形学的应用	245
8.1.2 GPU 发展历程	217	9.1 计算机动画	245
8.1.3 着色语言	218	9.1.1 计算机动画的起源与 发展	245
8.1.4 渲染流水线	219	9.1.2 计算机动画的应用	246
8.2 基于顶点着色器的实时几何 变形	221	9.1.3 计算机动画的过程与 分类	247
8.2.1 使用流程	221	9.1.4 计算机动画中的运动控制 方法	248
8.2.2 效果	222	9.1.5 典型动画方法介绍	257
8.2.3 绘制代码	223	9.1.6 计算机动画的制作软件	271
8.2.4 着色器代码	224	9.2 科学计算可视化	274
8.2.5 效果对比	224	9.2.1 科学计算可视化的概念和 意义	274
8.3 基于顶点着色器的实时曲面 细分	225	9.2.2 标量场可视化方法	274
8.3.1 GPU 细分算法	226	9.2.3 矢量场可视化方法	279
8.3.2 自适应细分	228	9.2.4 张量场可视化方法	280
8.3.3 Watertight 划分	229	9.2.5 可视化应用软件	280
8.4 基于几何着色器的实时几何 生成	230	9.3 文物数字化	285
8.4.1 镂空特效	231	9.3.1 文物数字化的概念和 意义	285
8.4.2 轮廓线特效	233	9.3.2 文物数字化方法介绍	286
8.5 基于片段着色器的非侵入 式风格化绘制	236	9.3.3 文物数字化典型系统 介绍	300
8.5.1 非侵入式风格化绘制	236	习题九	304
8.5.2 OpenGL 截获算法	237	参考文献	305
8.5.3 风格化渲染技术	238		
8.5.4 颜色缓存和深度缓存上的实时 三维场景的后处理	238		
8.5.5 实现和风格化渲染器	241		

第一章 计算机图形学基本知识

1.1 计算机图形学的概念

计算机图形学(Computer Graphics)是研究怎样用计算机表示、生成、处理和显示图形的一门学科,在计算机辅助设计、地理信息系统、计算机游戏、计算机动画、虚拟现实等方面有着广泛的应用。要了解计算机图形学,首先要理解计算机图形和数字图像的概念。

计算机图形 用计算机表示、生成、处理和显示的对象。从范围上说,计算机图形包括了山、水、虫、人等客观世界存在的所有物体甚至意识形态;从内容上说,计算机图形也已不仅仅是物体的形状,还包含了物体的材质、运动等各种属性。因此,计算机图形是存储在计算机内部的物体的坐标、纹理等各种属性。

数字图像 由规则排列的像素上的颜色值组成的二维数组。数字图像可能由数码相机、摄像机或其他成像设备如 CT 机等从外界获取,也可能在计算机上通过程序将计算机图形转化而成。

除了计算机图形和数字图像外,物体在计算机内部的表达还可以是符号或抽象模型、图像中的一个区域等,研究物体的这些在计算机内部的表达及表达间的转换形成了和计算机图形学密切相关的几个重要学科。

图像处理 将客观世界中原来存在的物体的影像处理成新的数字化图像的相关技术,如 CT 扫描、X 射线探伤等。

模式识别 对所输入的图像进行分析和识别,找出其中蕴涵的内在联系或抽象模型,如邮政分拣、人脸识别、地形地貌识别等。

计算几何 也称为计算机辅助几何设计,是研究几何模型和数据处理的学科,探讨几何形体的计算机表示、分析和综合,研究如何灵活、有效地建立几何形体的数学模型以及在计算机中更好地存储和管理这些模型数据。

计算机视觉 模拟人的视觉机理使计算机获得与人类相似的获取和处理视觉信息能力的学科。

1.2 计算机图形学的发展

计算机图形学的研究起源于美国麻省理工学院。从 20 世纪 50 年代初期到 20 世纪 60 年代中期,美国麻省理工学院积极从事现代计算机辅助设计/制造技术的开拓性研究。1952 年,在该校的伺服机构实验室里诞生了世界上第一台数控铣床的原型。1957 年,美国空军将第一批三坐标数控铣床装备运用到飞机制造工厂,大型精密数控绘图机也同时诞生。随后,麻省理工学院发展了数控加工自动编程工具(Automatically Programmed Tools, APT),并演变成国际上最通用的加工编程工具。1964 年,孔斯(Steve Coons)在麻省理工学院提出了用小块曲面片组合表示自由型曲面时使曲面片边界达到任意高次连续阶的理论,此方法得到工业界和学术界的极大推崇,称之为孔斯曲面。孔斯和法国雷诺汽车公司的贝齐埃(Pierre Bézier)并列被称为现代计算机辅助几何设计技术的奠基人。

1962 年,第一台光笔交互式图形显示器在美国麻省理工学院林肯实验室研制成功,这是 Ivan Sutherland 以博士论文形式完成的研究课题。

在美国工业界,研制交互式图形显示器的工作也同时开展,其中起到最重要作用的是 IBM 公司。在 1964 年秋,它推出了自主的设计方案,以后经过改进,成为 IBM 2250 显示器,这是 IBM 计算机正式提供给工业界使用的第一代刷新式随机扫描图形终端。它使用光笔作为交互输入手段,并且配有 32 个功能键,以便调用程序中的相应功能模块。洛克希德飞机公司利用 IBM 2250 施行开发的 CADAM(Computer-graphics Augmented Design And Manufacturing,计算机图形增强设计与制造)绘图加工系统,从 1974 年起向外界转让,成为目前 IBM 主机上应用最广的 CAD/CAM 软件。

IBM 2250 在 1978 年前后改型为 IBM 3250,但在其工作原理上并无明显变化。1984 年又改型为 IBM 5080,采用光栅扫描技术,带彩色图像;有局部处理能力,并可以用旋钮直接放大、平移、旋转画面;光笔改为电笔,与输入板配合使用,并操纵屏幕上的光标。

20 世纪 60 年代末和 20 世纪 70 年代初,美国 Tektronix 公司发展了存储管技术,显示器型号先后有 4006、4010、4012 等。Tektronix 4014 曾经是 20 世纪 70 年代末 CAD 和工程分析中应用最广的图形终端,它的屏面尺寸是 19 英寸,画面线条清晰,分辨率可以达到 $4\,096 \times 3\,072$,而价格不到刷新式显示器的一半,每次输入显示命令后可以保留画面 1 小时,因此,它的优点是编程简单,复杂的画面不会像刷新式显示器那样出现闪烁。它的缺点是不能局部地动态修改显示画面。

光栅扫描型显示器采用与电视机类似的工作原理,最初主要用于图像处理。屏面像素的分辨率并不高,大多是 512×512 ,但是,色彩层次十分丰富,可以高达 24 个二进制位,即红、绿、蓝三原色各占 8 bit,各有 2^8 即 256 种层次,最终组合成 2^{24} 种色彩或灰度等级。当分辨率低时,这类显示器显示线条的效果不太好,有明显的锯齿形,而且要作矢量到点阵的相互转换,交互响应速

度受到一定影响,图形显示缓冲器占用的存储量大。到了20世纪80年代初,个人计算机如Apple、IBM PC以及Apollo、SUN等工程工作站问世,并迅速受到广大用户的欢迎,销售量激增。在这些产品的设计中,主机和图形显示器融为一体,都用光栅扫描型显示方法,并得以同时生成高质量的线形图和逼真的彩色明暗图。由于大规模集成电路技术的发展和专用图形处理芯片的出现,光栅扫描型显示器的质量越来越好,价格越来越低,已成为图形显示器的常规形式。在工程设计中,联网的分布式工作站也正在逐渐取代分时式的大型主机连接几十个图形终端的结构。

在图形显示技术发展的历程中,需要强调两家公司的产品,这就是Evans & Sutherland公司的PS 300型和Silicon Graphics公司的IRIS型显示设备。它们采用了新的体系结构来提高图形的处理速度,在某种程度上满足了实时的要求。

Evans和Sutherland都是计算机业界知名的计算机图形学专家,后者是光笔图形系统的研制人。PS 300脱离了传统的冯·诺依曼机结构,不是逐条执行操作命令,而是采用数据驱动式原理,各个操作的执行次序取决于所需数据的到达时刻,当一种操作所需的全部输入数据都已齐备时,该操作便启动执行,这样可以方便地组织并行处理。图形处理中的矩阵运算和其他基本算法使用3个位片处理机组成的流水线,使得屏面上显示的线框图可以用旋钮实时旋转、平移和缩放,并且快速显示运动机构的动作过程,以便从不同角度观察各个元件间的协调关系。三维物体轮廓线的显示亮度可以随距离远近而变化,离眼睛越远的部分线条越淡,这样可更好地体现出立体图的真实感。

数字成像的一般处理过程如下。

(1) 建立模拟对象的几何模型,按照需要的逼近精度将模型简化为平面多面体。不少系统为了简化、统一运算过程,还进一步将多面体的各个棱面分解为三角形单元。

(2) 将单个物体进行组装,施加平移、旋转和比例变换等操作,形成整体模拟环境。

(3) 确定观察点位置,进行显示对象的透视变换。

(4) 确定显示范围,相当于照相时的取景。窗口的有效范围用上、下、左、右、前、后6个平面规定。将所有准备输出的图元与窗口范围进行比较,裁剪出落在窗口有效边界以内的部分。

(5) 确定图形显示器屏面上的显示范围(称为视区),将用户定义的三维空间(称为世界坐标系)内的物体映射到显示器的屏面坐标系中。

(6) 计算各单元三角形的法向矢量,根据光照模型确定可见三角形表面的亮度和色彩。

(7) 显示所有可见的三角形单元。

美国人J. H. Clark从1979年至1981年在美国斯坦福大学计算机系统实验室试用特殊的浮点运算器组成的流水线来完成上述过程。他将这类专用处理器称为几何机器。

Silicon Graphics公司的IRIS工作站就是采用数字成像工作原理的工业产品。此后,其他公司纷纷效仿。这种持续不断地提高显示画面质量、加快交互速度的努力会继续进行,必将进一步推动计算机图形学技术的飞速发展。

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,计算机图形学的应用领域主要有以下几个方面。

1. 用户接口

图形比文字、统计报表更直观、逼真,所谓“一目了然”、“耳闻不如目睹”,都说明了形象观察的优越性和必要性。Macintosh 微机首先在商品化产品上用形象的图形表示操作命令,使得普通用户也会用计算机画图、作日常计算,打破了人们对操作计算机所持的神秘感。图文结合的形式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很多新领域。

2. 计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)

这是计算机图形学在工业界最重要的应用领域。交互图形工作站在机械、电子、建筑等行业中迅速取代绘图板加丁字尺的传统设计方法,担负起繁重的日常绘图任务和总体方案的优化、细节设计等工作。

本书中将介绍一些机械 CAD 系统所生成的零件、装配件的例子。

3. 地形地貌和自然资源图

我国正在筹建国土基础信息系统,此系统是国家经济信息系统的组成部分。它将以往分散的表册、照片、图纸等资料整理成统一的数据库,记录全国的大地/重力测量数据、高山/平原地形、河流/湖泊水系、道路/桥梁、城镇/乡村、农田/林地/植被、国界/地区界、地名等。利用这些存储的信息不仅可以绘制平面地图,还可以生成三维的地形地貌图,为高层次的国土整治预测和决策、为综合治理和资源开发的研究工作提供科学依据。

计算机图形学在战争指挥自动化中占有重要地位。例如,美国早期的 SAGE 战术防空计划直接推动了现代光笔图形显示器的研制。现代战争是多单位、多兵种的协同作战,战役指挥员和统帅部都必须及时了解各单位的发展态势。依靠电话和地图指挥作战的方式正在演变成利用计算机网络和图形显示设备直接传输态势变化并下达作战部署。此外,计算机图形系统在陆军和海军的战役/战术对抗训练中也发挥着重要的作用。这种作战模拟系统使用联机的 3 台图形工作站,分别供红军、蓝军和导演使用。每个工作站配置了显示作战态势的图形终端、显示战斗损耗的字符终端以及交互输入设备。计算机内存储作战区域的地图、各种军标符号和模拟战斗效果的各种算法。全部模拟过程由导演指挥,分别向红军和蓝军布置作战任务、组织讲评。空军飞行员的空战模拟器对图形显示器的硬件结构和软件算法提出了最苛刻的要求。飞行员在训练模拟舱内的操纵动作需要实时变换成投影在球形房顶上的飞机映象的飞行姿态。一场空战中同时有二三架战斗机参与,这无疑使整个计算机系统的研制费用高涨。在国外这类系统已投入使用,我国则正在积极朝此发展方向努力。

4. 计算机动画和艺术

计算机动画已经成为计算机图形学的一个分支,并逐步进入实用阶段,使用巨型 Cray 计算机和高级图形显示器。

用计算机构造人体模型有着非常广阔的应用前景。人一机工程中需要考察人、机器同周围环境的关系;工业设计中要使应用于生活的造型适应人的生理、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;等等。针对应用场合的不同,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,用人体模型检查身体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. 科学计算可视化

科学计算可视化将计算中涉及与产生的大量数字信号以图像或图形的信息呈现在研究者面前,以促进研究人员对被模拟对象变化过程的认识,发现通常通过数值信息发现不了的现象,取得更多的研究成果。随着可视化技术的不断发展,它在自然科学(如分子构模、医学图像的三维重建、地球科学)和工程技术(如计算流体动力学、有限元分析、CAD/CAM)等许多领域有着越来越广泛的应用。如它可以将 CT 扫描图像通过体绘制或表面重构把肿瘤等的三维形象展示出来,给医师提供诊断治疗的直观依据;它还能够显示飞行器穿越大气层时周围气流的运动情况和飞行器各部位所受的压力,以供工程师分析。可视化既用到二维曲线图表和三维模型,也可用于彩色高维几何表示。

6. 游戏

计算机游戏是计算机图形学应用的一个主要增长点,目前已成为促进计算机图形学研究特别是图形硬件发展的最大动力源泉,对大规模场景的组织、管理和实时绘制以及 GPU 技术的发展起到巨大的推动作用。

7. 虚拟现实

虚拟现实可以认为是在计算机图形学的基础上结合人机交互、人工智能等形成的一个新的计算机学科分支,也可以认为是计算机图形学的一种应用。它用计算机生成逼真的三维场景,通过适当装置使人作为参与者在计算机生成的场景中自然地进行具有沉浸感的交互操作,实现与在现实场景中相同的真实体验。

随着计算机硬件的不断更新以及各种图形软件的不断出现,计算机图形学的应用前景将会更加引人入胜。

1.4 计算机图形硬件简介

首先介绍常用的图形输入设备。

1. 矢量型图形输入设备

矢量型图形输入设备采用跟踪轨迹、记录坐标点的方法输入图形,主要输入的数据形式为由直线或折线组成的图形数据。常用的矢量型图形输入设备有数字化仪、鼠标器、光笔等。

2. 光栅扫描型图形输入设备

光栅扫描型图形输入设备采用逐行扫描、按一定密度采样的方式输入图形,主要的输入数据为一幅由亮度值构成的像素矩阵——图像(Image)。这类设备常采用自动扫描输入方式,因此输入快捷;但是,它所获得的图像数据必须被转换为图形(Graphics)数据,这样才能被CAD系统和各子系统所使用。这种转换,是一种图形识别的过程。这方面的研究已逐步达到实用阶段。常用的光栅扫描型图形输入设备有扫描仪和摄像机。

图形输入设备的功能可分为以下6类。

- (1) 确定点坐标,即定位。
- (2) 确定一系列点的坐标,即笔画。
- (3) 确定数值。
- (4) 进行选择。
- (5) 进行图形识别。
- (6) 识别字符串。

下面对主要图形输入设备进行介绍。

1. 键盘

键盘包括ASCII编码键、命令控制键和功能键,可实现图形操作的某些特定功能。

2. 鼠标

鼠标器是一种手持滚动设备,形状如一个方盒,表面有2~4个开关,下面是两个互相垂直的轮子,或是一个球。当轮子或球滚动时,带动两个角度——数字转换装置,产生出滚动距离的 x 方向、 y 方向移动值。表面的开关则用于位置的选择。鼠标器的一个重要特征是:只有当轮子滚动时,才会产生指示位置变化。把鼠标器从一个位置拿起后,放到另一个位置,如果没有轮子的滚动,则不会输入任何信息,即鼠标器只能输入轮子的滚动值,而不能像数字化仪那样输入位置值。因此,鼠标器不能用于输入图纸,而主要用于指挥屏幕上的光标。鼠标器价格便宜、操作方便,是目前图形交互时使用最多的图形输入设备。现介绍以下两种。

光电式鼠标

光电式鼠标利用发光二极管与光敏晶体管来测量位移。前、后位置的夹角使二极管发光,经鼠标板反射至光敏晶体管,由于鼠标板均匀间隔的网格使反射光强弱不均,因此反射光的变化转化为表示位移的脉冲。

机械式鼠标

机械式鼠标内有3个滚轴,即空轴、 x 向滚轴、 y 向滚轴,还有1个滚球。 x 向、 y 向滚轴带动译码轮,译码轮位于两个传感器之间且有一圈小孔,二极管发向光敏晶体管的光因被译码轮阻断而产生反映位移的脉冲,两脉冲相位成 90° 。

3. 坐标数字化仪

坐标数字化仪由一块平板和一个探头组成,它按工作原理的不同可分为电磁式、磁致伸缩式、机械式、超声波式等多种。

机械式坐标数字化仪

机械式坐标数字化仪的导轨和测头沿两个方向移动,带动光栅轮移动,产生光电信号,从而得到相对有距离两点的坐标数。

超声波式坐标数字化仪

超声波式坐标数字化仪利用 x 、 y 方向的超声波传感器,拾取坐标点的笔尖上产生的超声波,通过所记录的超声波到 x 、 y 边的最小时间换算出两点间的距离。

全电子式坐标数字化仪

全电子式坐标数字化仪在平板的板面下面,是一块 x 方向和 y 方向的导线网印制电路板。平板内装有一套电子线路,它向导线网的 x 方向线与 y 方向线依次进行时序脉冲扫描。扫描电流对导线的瞬间激励引起的时序脉冲的时间进行比较后,就可以自动求出探头所在的位置数据并送入计算机。

3D 数字化仪

3D 数字化仪通过投影的方法,将 3D 物体的表面结构(线框)输入计算机,以形成计算机内的 3D 线框图模型,直接用于真实感显示。2D 数字化仪可视为其特例。因此,这类设备称为 3D 数字化仪(3D Digitizer)。传统的 CAD 技术致力于在计算机中设计和装配几何形体,但那些习惯于创作雕塑的人却难以将他们丰富的创造结果逼真而快速地输入到计算机内,因而限制了 CAD 造型在许多领域中的应用。然而,3D 自动数字化仪的出现将以上两个截然不同的创作世界有机地结合在一起。这一设备能够自动地将 3D 物体的表面形状以及色彩信息输入计算机中。

3D 数字化仪的工作原理是:投射一组垂直的光线到物体上,镜子从两个视点拣取光照射后得到的轮廓;然后,用一个高精度的传感器进行扫描,经由特殊的电路将视频图像数字化后转换成一个矩形区域的范围表(Range Map),这是一个关于距离测量的数组。数字化仪以每投射一组光线得到一个轮廓的方法,沿着物体的周围扫描一遍,直到创建一个描述整个物体的范围表为止。Cyberware 每秒钟收集 15 000 个范围的测量结果。工作站上的数字化仪最后将范围表经标准以太网传送到工作站上的数据库。数据的输出是任何一种能被现有的图形 CAD 软件所识别的格式,如 DXF 等。

4. 光笔

光笔是一种手持式检测光的设备。它的外形像一支笔,笔尖是一组透镜,在透镜的聚焦处是光导纤维,连入光电二极管。光线经透镜射入,通过光导纤维,由光电二极管转换为电信号,整形后成为电脉冲,光笔上的按钮则控制电脉冲是否被输出。光笔的工作过程和数字化板类似。光笔将荧光屏当做图形平板,屏上的像素矩阵能够发光。当光笔所对应的像素被激活时,像素发出的光就被转换为脉冲信号,这个脉冲信号与扫描时序进行比较后,便得到光笔所指位置的方位信

号。光笔原理简单、操作直观,是早期 CAD 系统中最主要的图形输入设备。但是,光笔也存在不少缺点。光笔以荧光屏作为图形平板,因此它的分辨率、灵敏度同荧光屏的特征有很大关系,显示器的不同分辨率、电子束的不同扫描速度、荧光粉的不同特性、笔尖同荧光粉的不等距离与角度等诸多因素都会影响光笔的分辨率与灵敏度;光笔无法检测荧光屏上不发光的区域;而且,使用者长期凝视荧屏,会感到眼睛疲劳。

5. 触摸屏

触摸屏利用手指等物体对屏幕的触摸进行定位,其主要类型有以下几种。

电阻式和电容式

利用两涂层间的电阻和电容的变化确定触摸位置。

红外线式

利用红外线发生/接收装置检测光线的遮挡情况,从而引发电平变化,或通过测量投射屏幕两边的阴影范围来确定手指位置。

声表面波式

利用手触及使声波发生衰减,从而确定 x 、 y 坐标。

6. 图形扫描仪

Microtek 公司率先推出了具有划时代意义的产品——扫描仪,为微型计算机带来了眼睛。扫描仪通过光电转换、点阵采样的方式,将一幅画面变为数字图像。它由以下 3 个部分组成。

扫描头

扫描头由两部分构成,即光线发射部分发射出一束细窄的光线到画面上,光线接收部分接收画面所反射的光线,并转换为电信号。

控制电路

控制电路将扫描头输出的电信号整形,并通过 A/D 转换电路转换为表示方位与光强度的数字信号输出。

移动扫描机构

移动扫描机构使扫描头相对于画面作 x 和 y 方向的二维扫描移动。按照移动机构的不同,扫描仪可以分为两类,即平板式和滚筒式。前者将画面固定在平面上,扫描头在画面上作二维水平扫描移动;后者将画面固定在一个滚筒上,扫描头只作 y 方向的一维移动,而 x 方向的移动则由滚筒的旋转完成。

扫描仪的精度一般在 300 ~ 600 dpi 以上,有的可高达 2 400 dpi,甚至达 4 800 dpi、9 600 dpi。画面通过扫描仪变为一幅数字矩阵图像,其中每一点的值代表画面上对应点的反射光线强度,即该点的亮度。

扫描仪也可用摄像机代替。摄像机价格便宜、速度快,可连续输入运动的实物形象,但精度较差,一般摄像机每幅画面的分辨率在 640×640 左右,它可用于对精度要求不高的 CAD 领域。

下面介绍常用的图形输出设备。

图形输出设备是以纸、胶片、塑料薄膜等物质为介质,输出人眼可视并能长期保存的图形的