

# 计算机图形学教程

唐荣锡 汪嘉业 彭群生等 编著



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助项目

# 计算机图形学教程

唐荣锡 汪嘉业 彭群生 等 编著

科学出版社

1999

## 内 容 简 介

本书是讲述计算机图形学基本理论和算法的一本教材。重点讲述光栅图形的生成和显示技术。全书共分十二章,包括常用的计算机图形设备的工作原理,图形的各种变换、裁剪和消隐算法,曲面造型和立体造型方法,以及真实感图形生成的基本理论和各种处理技术等内容。本书的特点是:取材新颖,内容丰富,并注意结合作者的亲身实践体会,介绍国际、国内的有关最新研究成果。

本书可作为高等院校计算机科学、土建工程、应用数学、机械工程、航空、造船、电子工程、轻工、纺织、工艺美术等专业的本科生、研究生学习计算机图形学和计算机辅助设计课程的教材,对从事 CAD 和计算机图形技术的广大科技人员也有较大参考价值。

为便于读者学习此书,我社同时发行一套 IBM-PC 机软盘,以源程序形式提供 GGP 图形软件包。软件的实现方法与教材的叙述内容一致,因此特别适合于配合教学进行示范和供学生上机练习。GGP 的目标程序每套 400 元,源程序 2000 元,若增购笔画式汉字输出软件,需另加 300 元。目前正在开发 GGP 的 GKS 版,完成后免费赠送给已购买 GGP 的用户。欲购者请与科学出版社鞠丽娜联系。

## 计算机图形学教程

唐荣锡 汪嘉业 彭群生 等 编著

责任编辑 鞠丽娜

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1990 年 4 月 第 一 版

开本: 850×1168 1/32

1999 年 4 月 第七次印刷

印张: 15 1/4 插页: 1

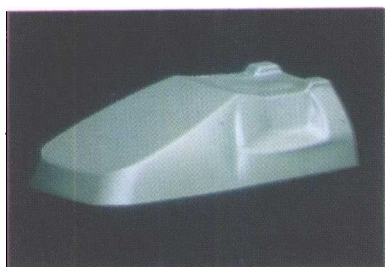
印数: 24 537—27 536

字数: 402 000

ISBN 7-03-001517-7 / TP·103

定价: 23.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)



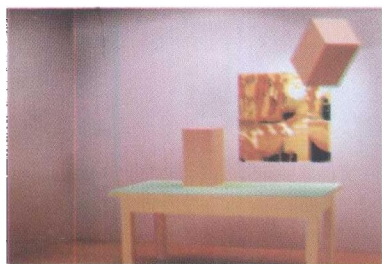
彩色照片 1 电话机底座  
(浙江大学, 徐子韬, 1986)



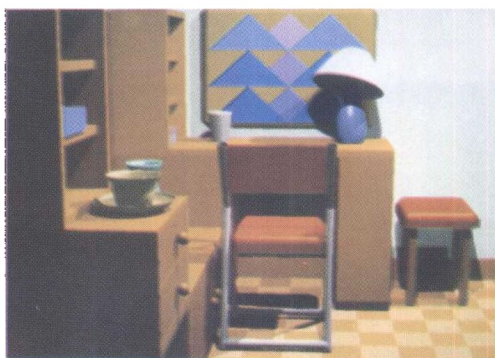
(a)



(b)

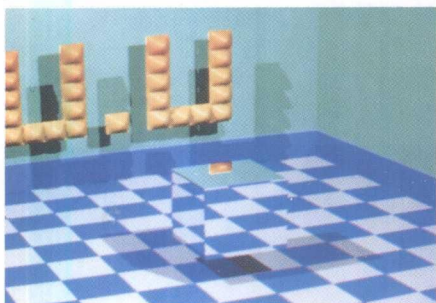


彩色照片 2 墙上名画  
采用纹理映射方法绘制  
(浙江大学, 徐皓, 1988)

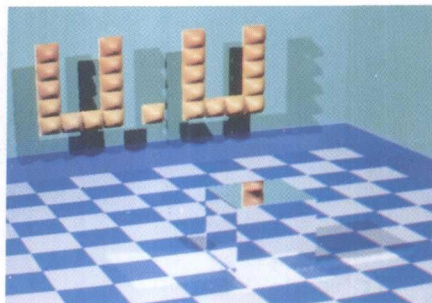


(c)

彩色照片 3 室内一角  
采用光线跟踪的八叉树算法绘制  
(浙江大学, 朱一宁, 1986)



(a)

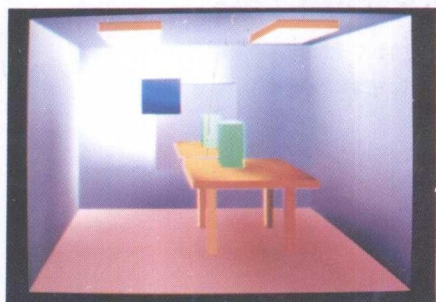


(b)

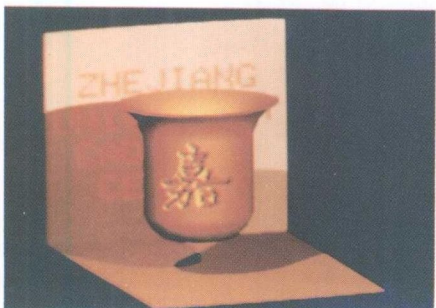
彩色照片 4 u.u。(a)用普通光线跟踪算法绘制；(b)用双向光线跟踪算法绘制  
(浙江大学，朱一宁，1987)



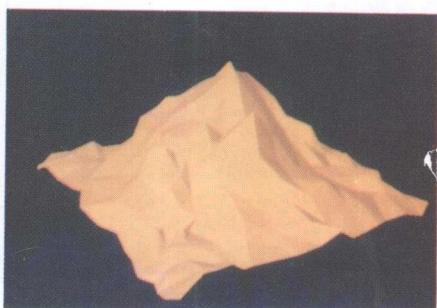
彩色照片 5 用标准辐射度方法绘制  
(浙江大学，邵敏之，1988)



彩色照片 6 用包含镜面反射的辐射度方法绘制 (浙江大学，邵敏之，1988)



彩色照片 7 几何纹理  
(浙江大学，邵平等，1987)



彩色照片 8 碎片曲面，用fBM方法绘制  
(浙江大学，朱一宁，1986)



## 前 言

1982年和1984年的暑假,复旦大学、山东大学和浙江大学联合在青岛、烟台举办了计算几何和计算机图形学的短期学习进修班。清华大学、北京大学、中国科技大学、西北大学、吉林大学、北京航空航天大学等高等院校的教师一起参加了讲课和专题介绍。这在当时起到了很好的普及和交流作用。此后,经过长期的酝酿,我们决定以讲座的内容为基础,整理成系统的教材出版。经过几个学校对本科生和研究生多届教学实践的检验,加上国内各方面科研工作的不断深入,本书内容有了很大充实和提高。

与国内外已经出版的同类书籍比较,本书在编写中注意了以下几点:

1. 篇幅紧凑。内容力求简明扼要,由浅入深,着重将基本概念、基本原理和基本算法解释清楚。

2. 力求实用。书中的主要算法均已做过上机调试和运行实验,证明行之有效。为了配合教学实习,我们已建立一套用高级语言调用的图形软件包<sup>1)</sup>,该软件包可在 IBM-PC 机上运行,对学生学习本教材较有帮助。

3. 将光栅图形的生成和显示作为重点,以较多篇幅介绍了连续色调真实感图形的生成技术。书中还结合作者的实践经验,介绍了国内外的有关最新研究成果。

本书兼顾了本科生和研究生学习的需要,本科生的教学可以侧重前面八章,而研究生的教学则可将更多的注意力放在后面四章上。对于广大的科技工作者和计算机应用软件开发人员,本书

---

1) 该软件包能在二、三维空间中用各种线型绘制直线、圆、弧、插值曲线、多边形,并书写字符,对上述元素进行变换、裁剪、消隐、生成符号和实例,操作中可使用多种交互输入,各种子程序可用 Fortran 或 C 语言调用。

也有实际的参考价值。

本书的编写分工是：第一章由北京航空航天大学唐荣锡执笔，第二章由山东大学宁飞执笔，第三、四、五、六、八章由山东大学汪嘉业执笔，第七、九章由浙江大学汪国昭执笔，第十章由浙江大学彭群生执笔，第十一、十二章由浙江大学朱一宁执笔。全书由唐荣锡、汪嘉业、彭群生修改定稿。

浙江大学计算机系金廷赞老师认真审阅了全书，提出不少宝贵意见，在此表示衷心的感谢。绪论一章中的应用实例全部取自国内的研究成果，图片由西北工业大学蔡青，清华大学孙家广，中国科学院自然资源综合考察委员会陈宝雯，浙江大学石教英、金廷赞，吉林大学庞云阶、王易工，南方 CAD 中心汪保华等同志提供。封面的图案由浙江大学数学系和计算机系提供。在此一并致谢。

由于作者水平所限，书中仍不免出现错误或不妥之处，渴望读者不吝赐教。

作者

1988 年 9 月

# 目 录

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| <b>第一章 绪论</b> .....          | 1   |
| 1.1 计算机图形学的研究内容 .....        | 1   |
| 1.2 简单的历史回顾 .....            | 2   |
| 1.3 计算机图形学的应用 .....          | 8   |
| 1.4 计算机图形学的当前研究课题 .....      | 22  |
| <b>第二章 计算机图形外围设备</b> .....   | 28  |
| 2.1 计算机图形外围设备基础 .....        | 28  |
| 2.2 随机扫描刷新式显示器 .....         | 33  |
| 2.3 其它图形显示器 .....            | 44  |
| 2.4 图形输入设备 .....             | 50  |
| 2.5 自动绘图机 .....              | 55  |
| <b>第三章 生成直线和圆弧的算法</b> .....  | 60  |
| 3.1 生成直线的 DDA 方法 .....       | 60  |
| 3.2 生成直线的 Bresenham 算法 ..... | 61  |
| 3.3 Bresenham 生成圆弧的算法 .....  | 65  |
| 3.4 绘圆弧的正负法 .....            | 68  |
| 3.5 圆的多边形逼近法 .....           | 70  |
| <b>第四章 变换</b> .....          | 78  |
| 4.1 一个简单的图形软件包 .....         | 78  |
| 4.2 三维图形的显示流程 .....          | 81  |
| 4.3 三维几何变换 .....             | 83  |
| 4.4 投影 .....                 | 92  |
| 4.5 裁剪 .....                 | 100 |
| 4.6 窗口到视区的变换 .....           | 114 |
| 4.7 图形显示流程的进一步说明 .....       | 117 |
| <b>第五章 图形段</b> .....         | 129 |
| 5.1 图形段的操作 .....             | 129 |



|            |                              |            |
|------------|------------------------------|------------|
| 5.2        | 一个计算机辅助绘图例子 .....            | 132        |
| 5.3        | 图形段功能的实现方法 .....             | 143        |
| 5.4        | 存贮器的管理 .....                 | 151        |
| 5.5        | 多层结构和过程方法 .....              | 153        |
| 5.6        | 符号和实例 .....                  | 159        |
| 5.7        | 应用模型和图形系统 .....              | 162        |
| <b>第六章</b> | <b>人机图形交互与图形标准 GKS .....</b> | <b>165</b> |
| 6.1        | 基本图形输入逻辑功能的实现 .....          | 165        |
| 6.2        | 其它图形交互技术 .....               | 171        |
| 6.3        | 输入设备和输入信息的管理 .....           | 180        |
| 6.4        | 设计人机图形交互的一般原则 .....          | 185        |
| 6.5        | 计算机图形国际标准 GKS .....          | 187        |
| <b>第七章</b> | <b>光栅图形的扫描转换与区域填充 .....</b>  | <b>200</b> |
| 7.1        | 多边形的扫描转换 .....               | 200        |
| 7.2        | 区域填充 .....                   | 216        |
| 7.3        | 多边形的扫描转换与区域填充的比较 .....       | 224        |
| 7.4        | 光栅图形的反混淆算法 .....             | 226        |
| <b>第八章</b> | <b>隐藏面和隐藏线的消除 .....</b>      | <b>233</b> |
| 8.1        | 多面体的隐藏线消除 .....              | 234        |
| 8.2        | 曲面的隐藏线消除 .....               | 243        |
| 8.3        | 区域子分算法 .....                 | 246        |
| 8.4        | 缓冲器算法和扫描线算法 .....            | 250        |
| 8.5        | 跨距扫描线算法 .....                | 255        |
| 8.6        | 曲面的扫描线消隐算法 .....             | 259        |
| 8.7        | 优先级表算法 .....                 | 261        |
| <b>第九章</b> | <b>曲线曲面的表示 .....</b>         | <b>265</b> |
| 9.1        | Bézier 曲线曲面 .....            | 265        |
| 9.2        | B 样条曲线曲面 .....               | 281        |
| 9.3        | 孔斯曲面 .....                   | 291        |
| <b>第十章</b> | <b>三维立体造型 .....</b>          | <b>297</b> |
| 10.1       | 概述 .....                     | 297        |
| 10.2       | 体素构造表示 (CSG 树表示) .....       | 303        |

|             |                            |            |
|-------------|----------------------------|------------|
| 10.3        | 边界表示法 .....                | 311        |
| 10.4        | 八叉树表示 .....                | 327        |
| 10.5        | 三维几何造型系统设计 .....           | 332        |
| 10.6        | 数据结构设计实例 .....             | 336        |
| <b>第十一章</b> | <b>真实感图形的基本理论与算法 .....</b> | <b>343</b> |
| 11.1        | 引言 .....                   | 343        |
| 11.2        | 简单光照明模型 .....              | 345        |
| 11.3        | 多边形表示物体的光滑明暗处理 .....       | 352        |
| 11.4        | 一个快速的 Phong 明暗处理算法 .....   | 356        |
| 11.5        | 阴影生成 .....                 | 358        |
| 11.6        | 整体光照明模型 .....              | 363        |
| 11.7        | 光线跟踪技术的基本原理 .....          | 367        |
| 11.8        | 光线跟踪的求交计算 .....            | 371        |
| 11.9        | 物体表面细节的模拟 .....            | 379        |
| 11.10       | 图形反混淆技术 .....              | 388        |
| <b>第十二章</b> | <b>高度真实感图形绘制 .....</b>     | <b>403</b> |
| 12.1        | 光照明模型的光学原理 .....           | 403        |
| 12.2        | 局部光照明模型 .....              | 410        |
| 12.3        | 采用光线跟踪的整体光照明模型 .....       | 422        |
| 12.4        | 辐射度方法 .....                | 433        |
| 12.5        | 光源的描述 .....                | 441        |
| 12.6        | 自然景象的模拟 .....              | 446        |
| 12.7        | 颜色 .....                   | 454        |
| <b>参考文献</b> | <b>.....</b>               | <b>472</b> |

# 第一章 绪 论

## 1.1 计算机图形学的研究内容

计算机图形学 (Computer Graphics) 是研究怎样用数字计算机生成、处理和显示图形的一门新兴学科。图形的具体应用范围很广,但是从基本的处理技术看只有两类,一类是线条,如工程图、地图、曲线图表等;另一类是明暗图,与照片相似。为了生成图形,首先要有原始数据或数学模型,如工程人员构思的草图,地形航测的判读数据,飞机的总体方案模型,企业经营的月统计资料等等。这些数字化的输入经过计算机处理后变成图形输出。

图形也可以称作图象,但是图象处理往往是指另一门计算机技术。它是将客观世界中原来存在的物体映象处理成新的数字化图象,如卫星遥感中的资源勘测,气象预报中的云图和海图处理,人体的 CT 扫描,工业中的射线探伤,金相图谱分析等等。图象处理中关心的问题是怎样滤去噪声,压缩图象数据以便于传输和存贮,用对比增强技术突出图象中的某些特征,用复原技术使模糊的图象清晰,从 CT 信息重建二维和三维图象等。

与图象处理有密切关系的另一门技术是模式识别。它研究怎样分析和识别输入的图象,找出其中蕴含的内在联系或抽象模型。例如邮政分检设备扫描信封上手写的邮区编码,将数码图象复原成数字,并依此分拣信件。医疗诊断设备根据 X 光照片或其它扫描图象自动发现病理的异常现象。工业机器人识别传送带上的零件品种和方位,自动完成装配工序等等。

计算机图形学着重讨论怎样将数据和几何模型变成图象,而模式识别则是讨论怎样从图象提取数据和模型。两者是相反的过程。这些关系可以表示成图 1.1 的形式。图 1.1 中将图象处理表示为递归形式,因为它的任务是将一种图象变换成另一种图象。

依此类推,应该还有一门专门研究几何模型和数据处理的学科,这

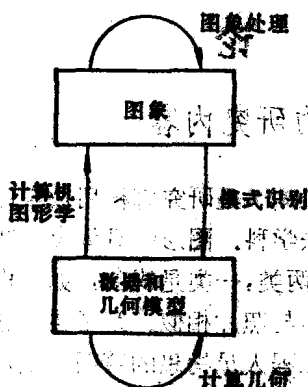


图 1.1 计算机图形学与相关学科的关系

就是计算几何。它着重讨论几何形体的计算机表示和分析、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,在计算机内怎样更好地存贮和管理这些模型数据等。计算几何在目前最活跃的研究课题是曲线曲面的构造和拼接、三维立体造型、散乱数据插值、计算复杂性等。

科学技术发展的一个普遍规律是各门学科之间的相互渗透与沟通。计算机图形学和计算几何、图像处理、模式识别的学科界线也正在变得模糊起来。例如现在出版的计算机图形学教材中往往都用专门的篇幅介绍参数曲线和曲面的数学表示和立体造型技术,工程图的自动扫描输入首先要用图像处理技术提取图面的特征信息,然后用模式识别技术进一步生成向量形式的各种几何元素,计算机视觉也是以上几门学科的综合应用。

计算机图形学有两本国际上公认的经典教材<sup>[10,11]</sup>。本书将采用类似的体系,讨论范围限制在图形学本身,即图形显示和绘图设备的硬件原理、基本图形元素直线和圆的生成方法、图形的各种几何变换、图形显示基本软件的组织 and 标准化、交互输入方法、几何模型的建立、彩色真实感图形的生成等。光栅扫描型显示器已经成为当前图形显示的基本形式,且应用正变得日益普及,本书取材将以这一内容为重点。

## 1.2 简单的历史回顾

光笔和交互图形显示原理的工程应用,最早要追溯到 50 年代

初的美国战术防空系统 SAGE(Semi Automatic Ground Environment)。当二次世界大战一结束,美国国防部就开始筹划如何预防远程轰炸机携带核弹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看到空中目标和地面机场的动态情景,及时准确指挥作战。具体的部署是研制计算机通信网和在全国布置一百多个图形显示站。利用 19 英寸<sup>1)</sup>阴极射线管显示各个军分区的地理边界、雷达搜索目标的位置和航迹、拦截点位置以及计算机生成的其它信息。指挥员可以用光笔(当时称为光枪)指点屏幕上的某一目标,询问进一步的细节或向计算机输送其它指令。SAGE 系统有很多公司参加研制,整个技术方案由麻省理工学院林肯实验室负责。SAGE 系统在 1957 年投入使用,到了 60 年代中期逐渐淘汰,整个计划并未最终完成。但是这一尝试对于交互图形显示技术的发展无疑起了巨大的带头作用。

从 50 年代初到 60 年代中,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 年在它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了飞机工厂。大型精密数控绘图机也同时诞生。接着麻省理工学院发展了 APT 数控加工自动编程语言,这是目前国际上最通用的加工编程工具。1964 年孔斯(Steve Coons)在这里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上达到任意高次连续阶的理论方法,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。从 60 年代初开始,这里还积极酝酿建立土木工程的集成化 CAD 系统,称作 ICES 计划(Integrated Civil Engineering System)。ICES 技术至今仍有生命力,1980 年时它的用户协会共有 600 个会员,其中欧洲会员占 160 个。上述麻省

---

1) 1 英寸=25.4mm。

理工学院的卓越贡献表明它不愧是当代 CAD/CAM 技术的孕育地和摇篮。

在这样的历史背景下,第一台光笔交互式图形显示器 1962 年在麻省理工学院林肯实验室研制成功,这无疑有着内在的必然性。这是 Ivan Sutherland 以博士论文形式完成的研究课题。

在美国工业界,研制交互图形显示器的工作也在平行开展。其中最重要的是 IBM 公司。它曾经参与 SAGE 计划中的计算机制造,了解林肯实验室的研究成果,并且与通用汽车公司合作开发 DAC-1 计算机辅助设计系统。因此在 1964 年秋它推出了自己的设计方案。以后经过改进,成为 IBM 2250 显示器。这是 IBM 计算机上正式提供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,并且配有一组 32 个功能键,以便调用程序中的相应功能模块。除了通用汽车公司外,美国的最大几家飞机公司,如波音、麦克唐纳、洛克希德等公司都是 IBM 2250 的最早用户。其中洛克希德飞机公司利用 IBM 2250 开发的 CADAM 绘图加工系统,从 1974 年起向外界转让,成为 IBM 主机上目前应用最广的 CAD/CAM 软件。

IBM 2250 在 1978 年前后改型为 IBM 3250,但在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,有局部处理能力,并且可以用旋钮直接放大、平移、旋转画面。光笔也改为电笔,与输入板配合使用,并操纵屏幕上的光标。

刷新式随机扫描型显示的动态性能好,可以迅速更改画面,交互作用响应速度快,但是价格贵。当时一台 IBM 2250 约折合十万美元,而且编程复杂。对于中小企业的广大用户,希望有价格更低、更大众化的普及型图形终端。60 年代末、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 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  $4096 \times 3072$ , 价格不到刷新式同类显示器的一半。一次输入显示命令后可以保留画面一小时,因此编程简

单,复杂的画面不会象刷新式显示器那样出现闪烁。它的缺点是不能局部动态修改显示画面。1981年后新推出的型号 Tektronix 4114 兼有存贮和刷新能力,并且用 Intel 8086 作为显示控制器,可以脱离主机接受显示命令。到了1984年后 Tektronix 公司终于脱离了传统的存贮管技术,转向生产光栅扫描型彩色显示器。其中的高档型有 4125 B, 4129 等,分辨率为  $1280 \times 1024$ 。

光栅扫描型显示器采用电视机的类似工作原理,最初主要用作图象处理。屏面象素的分辨率不很高,大多用  $512 \times 512$ ,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 位,各有  $2^8=256$  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很好,有明显的锯齿形,而且要作向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贮量大,对于  $1024 \times 1024 \times 8$  的彩色显示,缓冲区将占用 1 兆字节。直至 70 年代末,它们作为图形终端的性能价格比还比不上 Tektronix 4014 存贮管,而只能作为后者的一种低价粗糙代用品。到了 80 年代初,个人计算机象 Apple, IBM-PC 以及 Apollo, SUN 等工程工作站问世,并迅速得到广大用户的欢迎,销售量激增。在这些设计中,主机和图形显示器融为一体,都用光栅扫描型显示,并可以同时生成高质量的线型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,使得光栅扫描型显示的质量越来越好,价格越来越低,现已成为图形显示器的当前常规形式。在工程设计中,联网的分布式工作站的应用也正在逐渐取代分时形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里程碑中,需要提出两家公司的产品,这就是 Evans & Sutherland 公司的 PS 300 型和 Silicon Graphics 的 IRIS 型。它们采用了新的体系结构来提高图形的处理速度,在某种程度上达到了实时的要求。

Evans 和 Sutherland 都是知名的计算机图形学专家。后者就是前面提到的光笔图形系统的研制人。PS 300 在 1981 年推出。



系列中的 PS 330 属于面线式,分辨率高达  $8192 \times 8192$ 。PS 340 属于光栅式,分辨率为  $640 \times 480$ 。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数据的到达时刻。当一次操作所需的全部输入数据都已齐备时,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它基本算法使用三个位片处理机组成流水线,使得屏面上显示的线框图可以用旋转变实时旋转、平移和放大缩小,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,这样则可更好的体现出立体图的真实感。

E & S 公司长期以来还生产飞行模拟器的实时视觉系统 CT-5。这是图形处理速度要求最高的显示系统,每秒成象 30 幅,这种显示系统可以随着飞机模拟驾驶舱内飞行员的操纵动作而改变窗外视景。每幅画面包含上万个多边形棱面,可以模拟飞行员在起飞、着陆、空域飞行以至空战时所看到的地面和空中景象。CT-5 使用了几十台微机并行处理,售价极高。

数字成象的一般处理过程是:

(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。不少系统为了简化和统一运算过程,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,形成整个模拟环境。

(3) 确定观察点位置,作出显示对象的透视变换。

(4) 确定显示范围,相当于照相中的取景。窗口的有效范围用上下、左右、前后六个平面规定。将所有准备输出的图元都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(称作视区),将用户定义的三维空间(称作世界坐标系)内的物体映射到显示器的屏坐标系中。

(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。

美国的 J. H. Clark 从 1979 至 1981 年在斯坦福大学计算机系统实验室试用专用的浮点运算器组成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。一个完整的图形处理器由 12 个几何机器组成, 如图 1.2 所示。

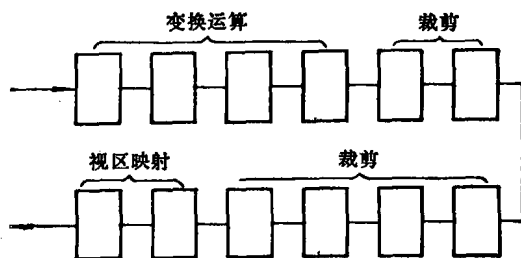


图 1.2 图形处理过程的流水线

典型的矩阵计算是

$$[x'y'z'w'] = [xyzw]M$$

式中  $M$  是  $4 \times 4$  方阵。每个处理器的任务是将矢量的分量  $[xyzw]$  与变换矩阵  $M$  的一列元素相乘。整个几何变换由四个处理器共同完成, 包括平移、旋转、比例和透视等内容。变换子系统中有一堆栈, 可以存放 8 种变换矩阵, 以便处理层次模型中的各种子图调用关系的组合。几何变换系统还可以计算三次有理曲线的插值点。窗口裁剪最多涉及六个限制面, 系统中相应由六个处理器共同负责完成运算。图 1.2 中的最后两个处理器则用来将用户空间内的物体矢量经过裁剪后映射到显示器的屏面视区内。这是一种平移和比例变换。Silicon Graphics 公司的 IRIS 工作站就是采用上述工作原理的工业产品。此后, 其它公司也纷纷效仿。这种持续不断的提高显示画面质量和加快交互响应速度的努力将会继续进行, 从而必将进一步推动计算机图形学技术的飞速发展。