



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

潘云鹤 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

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

潘云鹤 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内容提要

本书是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果，是面向 21 世纪课程教材。本书主要介绍计算机图形学基础知识及其实际应用。主要内容包括：计算机图形学基本知识、基本图形的生成与计算、图形变换与输出、图形输入与交互技术、图形数据结构、数据接口与交换标准、造型技术、真实感图形显示、实用 CAD 系统介绍等。

本书内容新颖，结构合理，实例丰富，应用性强。可作为高等学校计算机及相关专业计算机图形学课程的教材，对于从事计算机研究及相关工作的人员也有参考价值。

本书附有计算机图形学的三个应用系统的演示版和学习版，供读者学习参考。联系人：董金祥、陈德人，联系电话：0571-7951245，电子信箱号码：djx@cs.zju.edu.cn，drchen@cs.zju.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

计算机图形学：原理、方法及应用/潘云鹤主编.

—北京：高等教育出版社，2001

ISBN 7-04-008910-6

I. 计… II. 潘… 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(2000)第 77405 号

计算机图形学—原理、方法及应用

潘云鹤 主编

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 中国科学院印刷厂

开 本 787×960 1/16

版 次 2001 年 1 月第 1 版

印 张 22.75

印 次 2001 年 1 月第 1 次印刷

字 数 410 000

定 价 27.30 元(含光盘)

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

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—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一套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。

今后十年, 计算机图形学会向一片更加广阔的空间前进。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。这也包括它的延伸, 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。

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, 书中若有错误及遗漏之处, 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.....	1
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.....	21
第二章 基本图形的生成与计算	23
2.1 直线的生成算法.....	23
2.1.1 直线 DDA 算法.....	23
2.1.2 直线 Bresenham 算法.....	25
2.2 圆的生成算法.....	29
2.2.1 基础知识.....	29
2.2.2 圆的 Bresenham 算法.....	30
2.3 区域填充算法.....	32
2.3.1 基础知识.....	32
2.3.2 扫描线填色算法.....	33
2.3.3 种子填色算法.....	41
2.4 字符的生成.....	43
2.4.1 点阵式字符.....	43
2.4.2 矢量式字符.....	44
2.4.3 方向编码式字符.....	45
2.4.4 轮廓字形技术.....	45
2.5 图形求交.....	46
2.5.1 求交点算法.....	47
2.5.2 求交线算法.....	49
2.5.3 包含判定算法.....	51
2.5.4 重叠判定算法.....	55
2.5.5 凸包计算.....	56
2.6 图形裁剪.....	57

2.6.1	直线的剪裁	57
2.6.2	多边形的剪裁	63
2.6.3	字符串的剪裁	68
2.7	曲线生成与求交	69
2.7.1	Bezier 曲线生成	69
2.7.2	B 样条曲线生成	71
2.7.3	非均匀有理 B 样条(NURBS)曲线生成	72
2.7.4	曲线求交	73
	习题二	74
第三章	图形变换与输出	76
3.1	图形的几何变换	76
3.1.1	二维图形几何变换	76
3.1.2	三维图形几何变换	80
3.1.3	参数图形几何变换	86
3.2	坐标系统及其变换	87
3.2.1	坐标系统	87
3.2.2	规格化变换与设备坐标变换	89
3.2.3	投影变换	93
3.3	图元输出与输出属性	96
3.3.1	二维图元输出	96
3.3.2	输出属性及其控制	97
3.3.3	三维图元的输出	102
	习题三	103
第四章	图形输入与交互技术	105
4.1	逻辑输入设备	105
4.2	图形输入控制	106
4.2.1	概述	106
4.2.2	请求方式	107
4.2.3	取样方式	108
4.2.4	事件方式	108
4.2.5	输入控制方式的混合使用	110
4.3	交互技术	111
4.3.1	定位技术	111
4.3.2	橡皮条技术	112
4.3.3	拖曳技术	113

4.3.4	菜单技术	114
4.3.5	定值技术	116
4.3.6	拾取技术	117
4.3.7	网格与吸附技术	118
4.4	三维图形输入	118
习题四		119
第五章	图形数据结构	120
5.1	图段	120
5.1.1	图段及其属性	120
5.1.2	图段的操作	121
5.1.3	独立于工作站的图段存储器和图文件	124
5.2	结构	125
5.2.1	结构元素	125
5.2.2	结构网络(structure network)	127
5.2.3	集中式结构存储(CSS)与结构操作	128
5.2.4	建模操作	136
5.3	图段与结构的比较	140
习题五		140
第六章	数据接口与交换标准	141
6.1	GKS 元文件标准 GKSM	142
6.1.1	GKSM 功能	142
6.1.2	GKSM 生成	143
6.1.3	GKSM 输入	145
6.2	计算机图形元文件标准 CGM	146
6.2.1	CGM 功能	146
6.2.2	CGM 描述	147
6.3	计算机图形接口标准 CGI	149
6.3.1	CGI 功能	149
6.3.2	光栅功能集	151
6.4	基本图形交换规范标准 IGES	152
6.4.1	IGES 功能	152
6.4.2	IGES 元素	153
6.4.3	IGES 文件结构	157
6.5	DXF 数据接口	161
6.6	产品模型数据交换标准 STEP	166

6.6.1	STEP 的组成	167
6.6.2	产品模型信息结构	172
6.6.3	几何与拓扑表示	179
习题六		181
第七章	造型技术	182
7.1	特征造型	182
7.1.1	特征的定义	183
7.1.2	特征的分类	183
7.1.3	特征的形式化描述	184
7.1.4	特征造型系统实现模式	185
7.1.5	特征表示	187
7.1.6	特征与约束	189
7.1.7	特征的依赖描述	189
7.2	分形造型	190
7.2.1	基本概念	190
7.2.2	分形造型对模型的基本要求	191
7.2.3	分形造型的常用模型	192
7.3	体绘制技术	194
7.4	从二维图像信息构造三维形体	195
7.5	从二维正投影图构造三维形体	195
7.6	实体造型	196
7.6.1	实体造型技术的发展概况	196
7.6.2	边界表示法	209
7.7	几何造型中的元素表示及集合运算	232
7.7.1	CAD 技术的发展	233
7.7.2	几何造型的简要介绍	233
7.7.3	几何元素的定义	234
7.7.4	几何元素的集合运算	237
7.8	实体的布尔操作	246
7.8.1	引言	246
7.8.2	在 Brep 模型上的布尔集合操作	247
7.8.3	边界分类	249
7.8.4	步骤	250
7.8.5	顶点邻域分类	251
7.8.6	空边的连接	256

7.8.7 结果的产生	257
7.8.8 提高拼合运算可靠性措施	257
习题七	259
第八章 真实感图形显示	260
8.1 线消隐	260
8.1.1 消隐的基础知识	260
8.1.2 凸多面体的隐藏线消除	261
8.1.3 凹多面体的隐藏线消除	261
8.2 面消隐	264
8.2.1 区域排序算法	264
8.2.2 深度缓存(Z-buffer)算法	265
8.2.3 射线踪迹算法	266
8.2.4 扫描线算法	266
8.3 光照模型	267
8.3.1 光源特性和物体表面特性	267
8.3.2 光照模型及其实现	269
8.3.3 明暗的光滑处理	274
8.4 光线跟踪	276
8.4.1 光线跟踪的基本原理	276
8.4.2 光线与实体的求交	279
8.4.3 光线跟踪算法	282
8.5 表面图案与纹理	287
8.5.1 表面图案的描绘	287
8.5.2 表面纹理的描绘	289
8.6 颜色空间	290
8.6.1 颜色的基本概念	290
8.6.2 CIE 色度图	292
8.6.3 几种常用的颜色模型	294
习题八	296
第九章 实用 CAD 系统介绍	297
9.1 基于特征的参数化产品造型系统 GS-CAD	297
9.1.1 引言	297
9.1.2 系统简介	298
9.1.3 系统特色	299
9.1.4 系统设计的技术路线	300

9.1.5	系统的功能与技术特点	300
9.1.6	系统体系结构	301
9.1.7	系统配置要求	313
9.1.8	造型实例	313
9.2	纺织图案 CAD/CAM 系统	326
9.2.1	概述	326
9.2.2	系统的体系结构	329
9.2.3	系统功能	332
9.2.4	主要模块的实现	333
	习题九	352
	附录	353

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生成、处理和显示图形的一门学科。图形的具体应用范围很广,但是按基本的处理技术划分只有两类。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,就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,飞机的总体设计方案模型,企业经营状况的月统计资料,等等。这些数字化的输入经过计算机处理后变成图形输出。

首先介绍几个计算机图形学中的基本概念。

计算机图形 用计算机生成、处理和显示的对象。由几何数据和几何模型利用计算机进行存储、显示,并修改、完善后形成。

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、地形地貌识别等。

计算几何 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。

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 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 APT(Automatically Programmed Tools, 数控加工自动编程语言),这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, 其中所起作用最重要的是 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 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 4096×3072 , 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, 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, 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。这种持续不断的提高显示画面质量、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，计算机图形学应用领域主要有以下几种。

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。图文形式相结合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。本节简要说明某些典型的应用实例。

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 workstation 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、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，而且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、也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/战术对抗训练中也在发挥重要的作用。这种作战模拟系统使用联机的 3 台图形 workstation，分别供红军、蓝军和导演使用。每个 workstation 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转换成投影在球形房顶上的飞机映像的飞行姿态。一场空战中同时有二、三架战斗机参与,无疑使整个计算机系统的研制费用涨高。在国外这类系统已投入使用,我国则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……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. 分析计算中的应用

这里既有二维曲线图表和三维模型,也有彩色高维几何表示。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. **向量型图形输入设备** 它采取跟踪轨迹、记录坐标点的方法输入图形。主要输入的数据形式为直线或折线组成的图形的图形学数据。常用的向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** 它采取逐行扫描、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,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 6 类：

- (1) 确定点坐标即定位。
- (2) 确定一系列点的坐标即笔划。
- (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

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。

(1) 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，反射光的变化转化为表示位移的脉冲。

(2) 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，两脉冲成 90° 。

3. 坐标数字化仪

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而分为电磁式、超声波式、磁致伸缩式、机械式等多种。

(1) 机械式坐标数字化仪

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。

(2) 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的超声波发生器, 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。

(3) 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 方向的导线网印刷线路板。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, 探头所在的位置数据就可以自动求出并送入计算机。

(4) 三维数字化仪

这类设备通过投影的方法, 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集中在一起。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。数字化仪以这种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 每秒种收集 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。它的外形像一根笔, 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。光笔将荧光屏当作图形平板, 屏上的像素矩阵能够发光。当光笔所对应的像素被激活, 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