



机械科学与工程研究生教学用书

计算机图形学算法与应用

Computer Graphics: Algorithms and Practice

常 明 李 丹 罗年猛 主编

BOOKS FOR GRADUATE STUDENTS

华中科技大学出版社



机械科学与工程研究生教学用书

计算机图形学算法与应用

Computer Graphics: Algorithms and Practice

常 明 李 丹 罗年猛 主编

华中科技大学出版社
中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

计算机图形学算法与应用/常 明 李 丹 罗年猛 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2009年10月

ISBN 978-7-5609-5713-5

I. 计… II. ①常…②李…③罗… III. 计算机图形学-算法理论-研究生-教材
IV. TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 172634 号

计算机图形学算法与应用

常 明 李 丹 罗年猛 主编

策划编辑:万亚军 刘 锦

责任编辑:刘 勤

责任校对:刘 竣

封面设计:刘 卉

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉众心图文激光照排中心

印 刷:湖北恒泰印务有限公司

开本:787mm×960mm 1/16

印张:21.5 插页:2

字数:450 000

版次:2009年10月第1版

印次:2009年10月第1次印刷

定价:37.80元

ISBN 978-7-5609-5713-5/TP·707

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

机械科学与工程研究生教学用书

· 编委会 ·

主 任: 杨叔子 华中科技大学
李培根 华中科技大学
熊有伦 华中科技大学

委 员: (以姓氏笔画为序)

王安麟 同济大学
史铁林 华中科技大学
江平宇 西安交通大学
刘继红 北京航空航天大学
杜凤山 燕山大学
姚英学 哈尔滨工业大学
姚振强 上海交通大学
殷国富 四川大学
宾鸿赞 华中科技大学

内 容 提 要

本书全面介绍了计算机图形学的基本概念、原理和算法,是根据作者长期从事计算机图形学的教学经验和科研成果,并参考了国内外同类教材编写而成,是华中科技大学出版社出版的“机械科学与工程研究生教学用书”系列教材之一。主要内容包括二维图形显示和三维图形显示两部分。二维部分共分绪论、基本图形生成算法、图形变换的矩阵方法、图形处理算法、图形数据结构,以及二维图形软件开发应用等 6 章;三维部分包括三维几何造型、曲线曲面、三维观察与三维视见变换、消隐处理、真实感图形、计算机动画和计算机图形学的相关研究领域等 7 章,每章附有习题,便于教学。

本书适合于高等院校研究生的计算机图形学教学工作,也可作为相关专业的工程技术人员的学习参考用书。

序

今天,我国的教育正处在一个大发展的崭新时期,高等教育已跨入“大众化”阶段,蓬蓬勃勃,生机无限。在高等教育中,研究生教育的发展尤为迅速。党的十七大报告提出,要“努力造就世界一流科学家和科技领军人才,注重培养一线的创新人才”,强调了在建设创新型国家中教育的优先发展地位。我们可以清楚知道,研究生教育是培养创新人才的主渠道,对走自主创新道路,建设创新型国家,具有重要的战略意义。

前事不忘,后事之师。历史经验已一而再、再而三地证明:一个国家的富强,一个民族的繁荣,最根本的是要依靠自己,要以自力更生、自主创新为主。《国际歌》讲得十分深刻,世界上从来就没有什么救世主,只有依靠自己救自己。寄希望于别人,期美好于外援,只是一种幼稚的幻想。内因是发展的决定性的因素。当然,我们绝不应该也绝不可能采取“闭关锁国”、自我封闭、故步自封的方式来谋求发展,重犯历史错误。外因始终是发展的必要条件。改革开放三十年所取得的辉煌成就,谱写的中华民族历史性跨越的壮丽史诗,就是铁证。正因为如此,我们清醒看到了,自助者人助天助,只有独立自主,自强不息,走以自主创新为主的发展道路,才有可能在向世界开放中,争取到更多的朋友,争取到更多的支持,充分利用好外部的各种有利条件,来扎扎实实地、而又尽可能快地发展自己。这一切的关键就在于,我们要有数量与质量足够的高级专门人才,特别是拔尖创新人才。何况,在科技高速发展与高度发达,而知识经济已初见端倪的今天,更加如此。人才、高级专门人才、拔尖创新人才、领导人才,是我们一切事业发展的基础。

“工欲善其事,必先利其器。”自古凡事皆然,教育也不例外。教学用

书是培育人才的基本条件之一。“巧妇难为无米之炊”。特别是在今天,学科的交叉及其发展越来越多越快,人才的知识基础及其要求越来越广越高,因此,我一贯赞成与支持出版研究生教学用书,供研究生自己主动地选用。早在1990年,《机械工程测试·信息·信号分析》出版时,我就为此书写了个“代序”,其中提出:

一个研究生应该博览群书,博采百家,思路开阔,有所创见。但这不等于他在一切方面均能如此,有所不为才能有所为。如果一个研究生的主要兴趣与工作不在某一特定方面,他也可选择一本有关这一特定方面的书作为了解与学习这方面知识的参考;如果一个研究生的主要兴趣与工作在这一特定方面,他更应选择一本有关的书作为主要的学习用书,寻觅主要学习线索,并缘此展开,博览群书。

这就是我赞成要为研究生编写系列的“机械科学与工程研究生教学用书”的主要原因。今天,我仍然如此来看。

还应提及一点,在教育界有人讲,要教学生“做中学”,这很有道理;但是,必须补充一句,“学中做”。既要在实践中学习,又要在实践中实践,学习与实践紧密结合,方为全面。重要的是,结合的关键在于引导学生思考、积极独立思考。我一贯认为,要造就一个人才,学习是基础,思考是关键,实践是根本,三者必须结合,缺一不可。当然,学生的层次不同,结合的方式、深度与广度就应不同,思考的深度也应不同。对研究生特别是对博士研究生,就必须是而且也应是“研中学,学中研”,就更须而且也更应是“研中思,思中研”,在研究这一实践中,甚至可以讲,研与学通过思考就是一回事情了。正因为如此,“机械科学与工程研究生教学用书”就大有英雄用武之地,供学习之用,供研究之用,供思考之用。

在此,还应讲一点。作为一个研究生,来读“机械科学与工程研究生教学用书”中的某书或其他有关的书,有的书要精读,有的书可泛读。因为知识是基础,有知识不一定有力量,没有知识就一定没有力量,千万千万不要轻视知识。但是,对研究生特别是博士研究生而言,最为重要的还不是知识本身这个形而下,而是以知识作为基础,努力来体悟知识所

承载的思维、方法、原则与精神等内涵,体悟知识所蕴含的形而上,即《老子》所讲的不可道的“常道”,即思维能力的提高,即精神境界的升华。《庄子·天道》讲得多好:“书不过语。语之所贵者意也,意有所随。意之所随者,不可以言传也。”这个“意”,就是知识所承载的内涵,就是孔子所讲的“一以贯之”的“一”,就是“道”,就是形而上。它比语言、比书本、比具体的知识,重要多了。当然,要能体悟出形而上,一定要有足够数量的知识作为必不可少的基础,一定要在读书去获得知识时,整体地读,重点地读,反复地读;整体地想,重点地想,反复地想。如同韩愈在《进学解》中所讲的那样,能“提其要”,“钩其玄”,这样,就可驾驭知识,发展知识,创新知识,而不是为知识所驾驭,为知识所奴役,成为计算机存储装置。

“机械科学与工程研究生教学用书”是“研究生教学用书”的延续和发展。“研究生教学用书”自从1990年问世以来,到今年已经历了不平凡的18个春秋,已出版了用书80多种,有5种已被教育部研究生工作办公室列入向全国推荐的研究生教材。为了满足当前的研究生教育培养创新人才的要求,华中科技大学出版社在已出版的机械类研究生教学用书的基础上进一步拓展,在全国范围内约请一大批著名专家,力争组织最好的作者队伍,有计划地出版“机械科学与工程研究生教学用书”系列教材。

唐代大文豪李白讲得十分正确:“人非尧舜,谁能尽善?”我始终认为,金无足赤,人无完人,文无完文,书无完书。这套“机械科学与工程研究生教学用书”更不会例外。本套书出版后,这套书如何?某本书如何?这样的或那样的错误、不妥、疏忽或不足,必然会有。但是,我们又必须积极、及时、认真而不断地加以改进,与时俱进,奋发前进。我们衷心希望与真挚感谢读者与专家不吝指教,及时批评。当局者迷,兼听则明;“嚶其鸣矣,求其友声。”这就是我们的肺腑之言。

当然,在这里,还应该深深感谢“机械科学与工程研究生教学用书”的作者、审阅者、组织者与出版者(华中科技大学出版社的编辑、校对及

其全体同志);深深感谢对本套研究生教材的一切关心者与支持者,没有他们,就决不会有今天的“机械科学与工程研究生教学用书”。让我们共同努力,深入贯彻落实科学发展观,建设创新型国家,为培养数以千万计高级人才、特别是一大批拔尖创新人才、领导人才,完成历史赋予研究生教育的重大任务而做出应有的贡献。

谨为之序。

中国科学院院士
丛书主编

杨克子

2008.9.14

(中秋夜)

前 言

图形、文字、语言是人类记录和传递信息的三大主要媒体,而图形又是其中最生动、最简洁、最富联想和启发性的一种。计算机图形学主要研究用计算机及图形设备来生成、显示和处理各种图形的原理和算法。迄今为止,计算机图形学技术已经能够处理人类文明所创造的所有图形,包括图形(graph)、图样(drawing)、图像(image)和图画(picture),成为信息技术的重要组成部分和发展基石。计算机图形技术的应用已经渗透到国民经济的各行各业及社会生活的各个领域。毫不夸张地说,它已经成为与每个人的工作和生活密不可分的发展最快的现代技术。人们每天接触的产品设计图纸、模拟培训软件、音乐视频、电视广告、影视片头、股票行情分析图、各种管理图表等都是计算机图形技术在各个领域的具体应用。正因为如此,国内外各高等院校对计算机图形学的教学都非常重视,纷纷为本科生和研究生开设了“计算机图形学”的课程。本教材就是根据作者 10 多年来为我校各专业的研究生讲授计算机图形学的实践经验并参考国内外相关教材之精华编写而成的。

本教材具有如下特点。

1. 注重基本概念、基本原理和相关算法的基本知识的介绍。虽然随着计算机图形软件技术的发展,读者可以用封装好的各种各样的图形软件包去实现图形显示和处理,但作为高等学校的学生,尤其是研究生和所有相关专业的技术人员不能仅满足于“知其然”的水平,更应该探究“知其所以然”的奥秘,这才是培养 21 世纪创新型人才之关键。所以,我们建议读者不仅要掌握用图形接口软件包去编写图形程序,更重要的是要了解这些工具软件内部实现方法的原理和算法,这样读者才具备在某些特定环境下取得创新成果的知识基础。

2. 强调培养读者的动手能力,具体地说,就是培养读者动手编写各种图形程序的能力。尤其是对研究生,将来从事的研究工作几乎没有不与计算机图形显示相关联的,因此在学习原理和算法的同时,动手编写一些图形显示程序对学好本课程是非常重要的。我们始终认为,计算机图形学是一门实践性很强的课程,在学习过程中,如果不能实现几个图形程序的设计与调试,很难体现本课程的学习效果。为此,我们在教材中安排了两个大型图形程序例子,一个是简单二维图形系统设计程序,一个是三维基本立体(如锥、柱、球、环等)的建模和光照程序。在研究生学习阶段,重点应放在后一个程序练习上。

3. 在教学内容和上机实践的安排上有两条明显的主线,一条是二维图形显示与上机实践,另一条是三维图形显示与上机实践。在我们的教学实践中,本科生的教学

以二维图形显示与处理为主线,而研究生教学则以三维图形显示和上机实践为主线,同时也要兼顾二维部分的主要内容,这是因为研究生来自各个不同的高校,有的学校在本科生阶段尚未设置计算机图形学这门课程。

本书由常明、李丹、罗年猛任主编。常明负责第1、7章的编写及全书的统稿工作,李丹负责第2、3、4、8、9、10、11、12、13章的编写,罗年猛负责第5、6章的编写。本书编写过程中,参考了国内外一些同类著作,在此向有关作者表示衷心感谢。

由于作者水平所限,书中的错误和不足之处在所难免,恳请同行、专家和广大读者批评指正。

编 者

2009年6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 计算机图形学的应用	(2)
习题	(8)
第 2 章 基本图形生成算法	(9)
2.1 直线的生成算法	(9)
2.2 圆弧的生成算法	(20)
2.3 规则曲线的生成算法	(29)
习题	(36)
第 3 章 图形变换的矩阵方法	(37)
3.1 二维图形变换	(37)
3.2 三维图形变换	(46)
3.3 二维视见变换	(63)
习题	(71)
第 4 章 图形处理算法	(72)
4.1 直线段的剪取	(72)
4.2 多边形的剪取算法	(88)
4.3 光栅图形的扫描转换与区域填充	(91)
4.4 光栅图形的反走样技术	(98)
习题	(101)
第 5 章 常用图形数据结构	(102)
5.1 数据结构概述	(102)
5.2 线性表	(104)
5.3 数组	(108)
5.4 栈结构及应用	(111)
5.5 队列及实现	(117)
5.6 链表及应用	(118)
5.7 树结构及应用	(123)
5.8 图形数据文件	(124)
习题	(125)

第 6 章 二维图形软件开发应用实例	(126)
6.1 MiniCAD 系统的总体设计	(126)
6.2 MiniCAD 系统的实现	(134)
习题	(143)
第 7 章 三维几何造型基础	(145)
7.1 三维图形系统的坐标系	(145)
7.2 三维图形中的几何元素	(146)
7.3 三维立体的构造模型	(148)
7.4 正则实体	(150)
7.5 三维物体的表示方法	(157)
习题	(166)
第 8 章 曲线与曲面	(167)
8.1 曲线基本知识	(167)
8.2 三次样条曲线与 Hermite 插值曲线	(171)
8.3 贝塞尔曲线	(177)
8.4 B 样条(B-Spline)曲线	(184)
8.5 均匀三次 B 样条曲线	(190)
8.6 非均匀有理 B 样条曲线	(194)
8.7 曲面的基础知识	(198)
8.8 双三次孔斯曲面	(203)
8.9 贝塞尔曲面	(210)
8.10 反求控制顶点的曲面片拼接方法	(213)
8.11 B 样条曲面	(218)
习题	(222)
第 9 章 三维观察与三维视见变换	(223)
9.1 三维图形的显示过程	(223)
9.2 观察坐标系的定义及有关计算	(224)
9.3 三维图形显示的数学基础	(226)
习题	(232)
第 10 章 消隐处理	(233)
10.1 消隐处理概述	(233)
10.2 分段可见性判断算法	(235)
10.3 隐藏量算法	(236)
10.4 后向面判别算法	(238)
10.5 后向面判别算法的形体矩阵方法	(241)

10.6	深度缓冲器算法	(245)
10.7	扫描线算法	(246)
10.8	扫描线 Z 缓冲器消隐算法的改进	(248)
10.9	画家算法	(252)
	习题	(264)
第 11 章	真实感图形基础	(265)
11.1	引言	(265)
11.2	颜色的基础知识	(266)
11.3	光栅系统中的颜色模型	(270)
11.4	光照模型	(278)
11.5	绘制方法	(285)
	习题	(291)
第 12 章	计算机动画	(292)
12.1	计算机动画概述	(292)
12.2	计算机动画的发展	(292)
12.3	计算机动画的分类	(295)
12.4	参数关键帧技术	(296)
12.5	变形动画	(300)
12.6	过程动画	(303)
12.7	关节动画	(304)
12.8	基于物理的动画	(308)
12.9	行为动画	(309)
12.10	动画新技术	(310)
12.11	动画软件介绍	(313)
	习题	(316)
第 13 章	计算机图形学的相关研究领域	(317)
13.1	计算机辅助设计与制造	(317)
13.2	虚拟现实	(321)
13.3	科学计算可视化	(328)
13.4	真实感图形	(330)
13.5	几何造型	(332)
	参考文献	(333)

第 1 章 绪 论

计算机图形学是研究图形的计算机生成、处理和显示的一门学科。它诞生于 20 世纪 60 年代,20 世纪 80 年代以后是计算机图形学硬件技术和软件系统蓬勃发展阶段,20 世纪 90 年代开始得到越来越广泛的应用。进入 21 世纪以来,计算机图形学的应用已渗透到国民经济建设的各行各业及社会生活的各个领域,从产品设计的三维模型到车间生产作业的工程图纸,从每天收看的影视片头到令人眼花缭乱的广告制作,从计算机软件的图形界面到宏伟工程的虚拟场景,从飞机驾驶员培训到两军的模拟对抗,从巨幅图片的喷绘到实时动画的实现,都让各行各业的人们深深感受到计算机图形学的独特魅力。这也是越来越多的高等院校和越来越多的专业都把计算机图形学作为必修课程的主要原因。计算机图形学在短短几十年中得到如此飞速发展,其主要原因是:在人类描述信息使用的语言、文字和图形三大工具中,图形是表达和传递信息最重要、最简洁、最生动、最富启发性和联想性的媒体,而且是超越国界的,从而成为全世界都能理解的共同“语言”。因此掌握好、应用好计算机图形学的原理、算法和实现方法,对于培养 21 世纪创新型人才是非常必要的。

1.1 计算机图形学的研究内容

计算机图形学的研究内容涉及用计算机对图形数据进行处理硬件和软件两方面的技术,以及与图形生成、显示密切相关的基础算法。按照二维和三维图形可归纳为以下几个主要研究内容。

1. 二维图形中基本图素的生成算法

图素是组成图形的基本要素,例如:点、直线段、规则曲线、自由曲线、文本等。

2. 二维图形的基本操作和图形处理算法

其内容包括对图形的平移、放大和缩小、旋转、镜像等操作,此外还包括二维图形的剪取、多边形的填充及二维图形的布尔运算。

3. 二维图形的输入输出

工程界输入图形的方法分为交互式输入和自动扫描输入两大类。交互式输入主要是指通过交互设备(如键盘、鼠标、数字化仪等),一个图元一个图元地输入;自动扫描输入主要是指采用光电扫描仪逐行扫描输入。这两种方法都是借助计算机实现图与数之间的转换。

4. 规则物体的几何造型技术

它包括:对基本体素的定义及输入,规则曲面与自由曲面的造型技术,以及基本

体素之间的布尔运算方法的研究。

5. 不规则物体造型方法

不规则物体是指那些不能用几何模型的数据来描述和存储的对象,如山、水、树、草、烟、云、雾等。这些景物一般都是用一组数据和一个产生过程来共同描述,如分形几何方法、粒子系统方法及纹理映射方法,等等。

6. 真实感图形的生成算法

其内容包括:三维图形的消隐算法,光照模型的建立,阴影层次及彩色浓淡图的生成算法。

按一般的教学规律及学时计划,在大学本科阶段,应着重学习前面三部分内容,同时简要介绍后面三部分内容;而在研究生学习阶段,则应全面学习计算机图形学的内容,但重点是学习和实践后面三个涉及三维图形的内容,这样才能对自己的研究工作和创新思维有所裨益。

1.2 计算机图形学的应用

1. 计算机辅助设计与制造

计算机辅助设计与制造(computer aided design and manufacturing, CAD/CAM)是计算机图形学应用最广泛、研究最活跃、成果最丰富的应用领域。20 世纪 90 年代以后,由于微型计算机性能的提高, CAD/CAM 已广泛应用于机械、电子、飞机、船舶、建筑、服装、玩具和集成电路等各个领域的设计与制造。采用 CAD 技术进行产品设计,不仅可以在计算机屏幕上显示设计结果,而且还可以建立产品的三维模型,对产品进行性能分析和修改设计,直到获得满意的设计结果为止。

CAM 一般是指由计算机辅助进行的从零件毛坯到最终产品装配全过程中的所有活动,包括工艺准备、生产作业计划和物料作业计划的运行控制,以及生产控制和质量控制等,其中最重要的一个环节是数控编程。数控编程是用数控机床的数控装置所规定的代码和程序格式对数控设备的加工过程进行程序设计,包括刀具路径规划、刀位文件生成、刀具轨迹仿真,以及数控代码的生成。在这些过程中,计算机图形的生成与显示技术都起着关键的作用,所以 CAD/CAM 最早应用于航天航空、汽车制造等大型制造企业。随着制造业信息化时代的到来, CAD/CAM 已发展成为基于数据库和网络技术的集市场信息、设计、加工原材料供应链管理及销售服务于一体的计算机集成制造系统(computer integrated manufacturing system,

CIMS)。图 1-1 所示为 CAD 软件设计的产品三

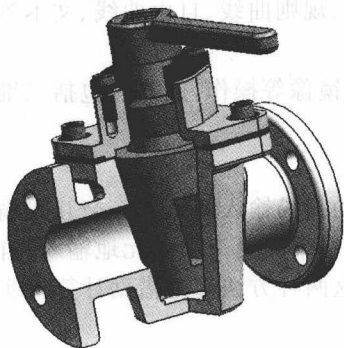


图 1-1 CAD 软件设计的产品三维模型

CIMS)。图 1-1 所示为 CAD 软件设计的产品三

维模型。

2. 图形交互界面

计算机用户都知道,使用计算机来完成各项工作,必须要有人与计算机之间进行通信的手段,这就是通常所说的人机交互界面(human computer interactive interface, HCII),它是由软件和硬件两部分共同组成。随着计算机技术的发展,人机交互界面也由 20 世纪 80 年代的字符交互界面逐步发展到今天的图形交互界面(graphical user interface, GUI)。今天,无论使用的是操作系统软件(如 Windows、OS/2、X-Window),还是应用软件(如 AUTOCAD、UG、NX、3D MAX 等),都是以图标、菜单为主的图形交互界面,形象而又生动,富有启发性,大大提高了软件的友好性,易学易用,方便快捷,能够极大地提高用户的工作效率。图 1-2 所示为 CAD 软件的图形用户界面。

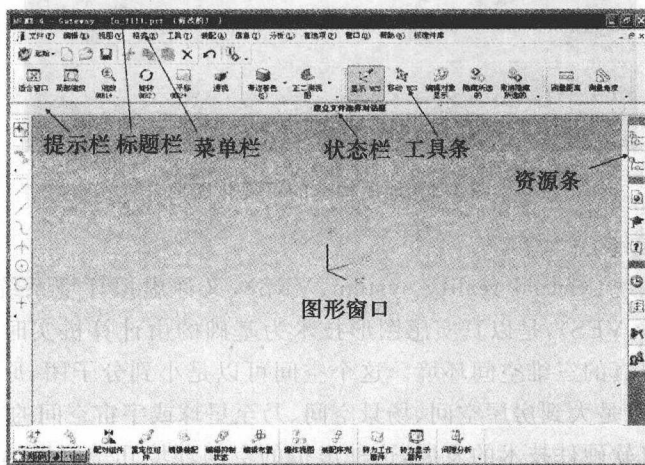


图 1-2 CAD 软件的图形用户界面

3. 科学计算可视化

随着科学技术的迅猛发展,人们面临着越来越多的科学计算和工程分析的数据需要处理。这些数据来自各种超级及大型计算机、人造地球卫星、宇宙飞船、天文望远镜、CT 扫描仪、核磁共振仪等现代化仪器和勘探手段。分析处理和理解这些海量数据是枯燥而艰巨的工作。为了解决这一难题,美国科技界于 1987 年 2 月提出了科学计算可视化(visualization in scientific computation)的概念。科学计算可视化就是综合利用计算机图形学、图像处理、计算机视觉及计算机辅助设计等多门学科的技术手段,将科学计算和工程分析的中间结果或最终结果及所涉及的大量数据在计算机屏幕上以图形形式显示出来,使人们能够观察到以常规手段难以观察到的自然现象和规律,充分利用人的视觉和判断力提高人们对海量数据的理解能力和速度。科学