



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
教育部普通高等教育精品教材



面向CS2013计算机专业规划教材

计算机图形学

第3版



何援军 编著

Computer Graphics
Third Edition



机械工业出版社
China Machine Press



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
教育部普通高等教育精品教材



面向CS2013计算机专业规划教材

计算机图形学

第3版



何援军 编著

Computer Graphics
Third Edition



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

计算机图形学 / 何援军编著. —3 版. —北京: 机械工业出版社, 2016.7
(面向 CS2013 计算机专业规划教材)

ISBN 978-7-111-54147-9

I. 计… II. 何… 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 (2016) 第 150278 号

本书采用一种全新的计算机图形学架构, 阐述清楚、文字浅显、图示精细、教案完整。

从宏观上构建一个计算机图形学的清晰框架与认知体系, 给计算机图形学以正确的定位、合理的定义; 以“基础”、“绘制”、“造型”和“交互”四篇形式阐述计算机图形学的目的、内容、任务、理论与实践; 明确计算机图形学“绘制”与“造型”两个主要任务, 使教者易、学者清。

在微观上精致编织、准确表述具体的知识点, 注重理论的系统性、算法的完整性; 用明晰的分析、浅显的解释、精细的图示使问题的表述简洁、叙述准确、举重若轻、化繁为简, 将复杂问题简单化; 努力保证基础理论、基本算法、几何模型与数据结构的正确性。

书的最后提供了该课程的教学建议书、课程设计指导书和颜色表, 方便教师的教学与学生的学习和研究, 其中颜色表有利于图形输出的美观。本书配套建设 <http://cg.sjtu.edu.cn> 网站, 提供了电子教案、实验基础、算方案例、学生作品、相关课题、算法库及课程设计等广泛内容, 读者可以免费下载。

本书可作为各类高等学校计算机图形学课程的教材, 也可供从事图形处理和计算机辅助设计的相关人员参考。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 余 洁

责任校对: 董纪丽

印 刷: 三河市宏图印务有限公司

版 次: 2016 年 8 月第 3 版第 1 次印刷

开 本: 185mm×260mm 1/16

印 张: 19.75

书 号: ISBN 978-7-111-54147-9

定 价: 49.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

图书图书，左图右书。地理之学，非图不明。图与书、诗与画是研究社会之发展、创新和实践的载体，持续不断地记录着人类文明进步的轨迹。图与语言、文字、数字和声音一样，是人类描述思想、交流知识的基本工具。图样更是科学、技术和工程界的语言，用于传递设计与加工的构想。它既是人类语言的补充，也是人类智慧和语言在更高一级发展阶段上的具体体现，在人类生活中有不可替代的作用。在当今社会，图更显现出在人类思维、活动与交流中的巨大作用。“曾向沧江看不真，却因图画见精神。”在以计算机和数据为代表的信息时代，图与图学已如同文字与文学、数字与数学一样，成为人类活动最基本的工具和必须掌握的学问。因此，编制经典的图学教材，支撑图学学科的发展，使图学能够与文学、数学一起共同支撑科学与工程的发展，促进社会的进步，是图学工作者的责任和义务。

计算机图形学是图学的杰出代表与引领者，其地位稳固，几乎所有领域都可涉及，相关教材数百种，千奇百怪。新的理论、方法乃至硬件日新月异。这就需要静下心来思考：计算机图形学最基础、最本质的是什么？作为一门课程，它的基本任务是什么？作为一本教材，它需要包含哪些最基本的内容？科学的发展十分迅速，一些方法与技术可能随硬件的更新而发展，但是它们的基础与特定硬件、网络协议以及一些短暂的事物并不相关。

因此，一本计算机图形学的教材需要回答的最基本问题有两个：在宏观上，绘制一个计算机图形学的清晰框架与认知体系，回答“计算机图形学是什么”；在微观上，精致编织、准确表述计算机图形学具体而细节的知识点，回答“计算机图形学有什么”。基于这个认识，本版对第2版的修改工作主要包括对学科的认知和教材的组织两个方面。

图与图学的认知方面。包含对图与图学总体上的定位、定义的对计算机图形学的计算基础的认知两个方面。从“形”的角度认识与表述图与图学，认为世界由形构造，形由图在画面上显示，因此，形是图之源，图是形的载体，图学就是研究“形→图”和“图→形”之间的转换。在这个整体上分析图形、图像、工程图的本质属性和它们的共性，给出统一的图学之定位和定义：“图学是以图图为对象，研究在将形演绎到图的过程中，关于图的表达、产生、处理与传播的理论、技术和应用的科学。”全局性地考虑计算机图形学、计算机图像学、工程图学在科学上的同一性，以及它们在学科上的分工。在这个总的定义下，计算机图形学的学科地位将得到加强，计算机图形学的根本任务将更为明确。在“第1章导论”中，给出了这个学科的基本内容及逻辑关系。

加强了对图学计算基础的阐述，专门增加了“第2章计算基础”。阐述了图学计算的内涵，分析了几何与几何计算在图学中的地位和作用，指出图学最根本的理论基础是几何学，它的计算基础是几何计算。介绍了一种基于几何问题几何化的“形计算”机制，以寻求一种合适的几何计算方法与机制，从而更有利于形的表述和图的生成。“形计算”机制

补充了常规的“数计算”机制，可以从更宏观的角度构建算法框架，使图学计算的过程更加结构化、直观化、简单化。

教材的组织方面。这次修订的宗旨是向读者提供一本更科学、更浅显易懂的计算机图形学教材，努力使理论更统一、更系统，实施更规范、更简单。

在基本理论的叙述方面，更宏观、更具条理性。从“形”的角度去统一、阐述和研究，去发展图学的基础理论、基本方法和典型算法，明晰图学的计算基础和应用基础。从构造的角度阐述模型的几何品质，认识几何计算在计算机图形学中的地位和作用。从几何奇异是造成几何造型系统不稳定性的本源入手，给出了处理几何奇异的基本原则。

在实施方面，更易实践、资源更多。一是增加了一些算法的实施描述，二是为了教师上课需要，也是为方便学生，在最后的附录中给出了一系列的教学资源。

本版教材包括导论（1章）、4篇正文（14章）和3个附录。每章的最后均有一个小结，列出本章的基础理论和知识要点，并附加了一些习题、思考题和课程设计题等。教材的结构如下：

第1章 导论				
基础篇	绘制篇	造型篇	交互篇	附录
第2章 计算基础	第6章 光栅计算	第11章 二维造型	第15章 交互技术	附录A 教学建议书
第3章 基本几何	第7章 裁剪计算	第12章 三维造型		附录B 课程设计指导书
第4章 几何变换	第8章 消隐计算	第13章 曲线曲面		附录C 颜色表
第5章 几何计算	第9章 颜色模型	第14章 曲线拟合		
	第10章 光照计算			

在章节的次序上，与上版不同，将绘制篇安排在造型篇的前面，即按照“基础-绘制-造型-交互”4篇的次序编排。这是考虑到绘制是关于图的内容，如光栅计算、裁剪计算、消隐计算和光照计算等，是计算机图形学公认的也是最基本的内容，是必需的。造型是关于“形”的内容，如二/三维造型、曲线曲面和曲线拟合等，是服务于绘制的，因而是可以选择的。

编制一个完整的代码并实现它，可能是对理论和算法认知的最高境界，本版不惜篇幅给出了一些经典算法的代码，便于读者从这些算法的实施过程中更深入地理解那些经典算法的原理。有些原理上看起来很复杂，实施却很简单，而有些看上去很简单的原理，实施时却并非易事。但是，作为一本教材，还是应该注重在理论上的阐述，不可能将这些算法都展开。希望对书中算法的理论进行深入了解的读者，可以参考笔者的另一本专著《几何计算》^[18]，它详细给出了300余个常用几何算法的理论、原理、方法和源代码，这些算法几乎在计算机图形学中都会用到。它与本教材的思想体系是一致的，所述的算法简洁、稳定、实用。

为了教学和读者实施的方便，本书给出了3个附录，作为本书的教学资源。

教学建议书按照“36学时教学+18学时课程设计”的教学内容与时间安排，教师可根据所教专业与实际需求自行增删相关内容。

课程设计指导书帮助读者在一个交互系统总体框架下选择性地实现其中的一些算法题或者稍微难一些的课程设计题。在课程设计题的前面参考性地给出了该题目的“难度系

数”，有些题目甚至可以作为研究题。这样的安排可以满足不同层次的学校、专业及学生的需求。

计算机图形学的一项主要任务是得到绚丽多彩的图形图像，颜色的选择与配置是其中的重要一环。本版新增了一个**颜色表**，它给出了一些颜色数字模型的计算机表示，方便读者的应用。

教程的每章最后给出了一些习题、思考题和课程设计题，教师可以从中选择一些题目用于平时布置作业或在课程结束时形成试卷，也可以阶段性地布置课程设计。学生则可以预先选择自己感兴趣的题目作为项目进行训练。

这些教学资源的安排希望不仅有利于教师教学，也可以协助教师和学生在一个总体架构下进行有条不紊、累进性的工作，形成有自己特色的课程资源或工作资源。积跬步以至千里，积小流以成江海。

除了参考文献已经列出的以外，撰写本书时还参考与采用了其他一些图书及网上资源，无法一一列出，谨向那些作者们表达谢意。

书中不当之处，欢迎读者、专家和同行勿吝指正。



2016年6月5日

于上海

目 录

前言

第1章 导论	1
1.1 计算机图形学的定位和定义	1
1.1.1 国内外对计算机图形学的定义	1
1.1.2 “大图学”下计算机图形学的定位与定义	2
1.1.3 图形、图像、模型与几何	3
1.1.4 计算机图形学的总体架构	5
1.2 计算机图形学与其他学科的关系	6
1.3 计算机图形学的发展简史	7
1.3.1 硬件平台	7
1.3.2 基础理论	7
1.3.3 实际应用	8
1.3.4 SIGGRAPH	8
1.4 计算机图形学的应用领域	8
1.4.1 计算机辅助设计与制造	8
1.4.2 科学计算可视化	9
1.4.3 虚拟现实	9
1.4.4 计算机艺术	9
1.4.5 计算机动画	9
1.4.6 图形用户接口	10
1.5 计算机图形学的相关开发技术	10
1.5.1 OpenGL	10
1.5.2 ACIS	11
1.5.3 DirectX	11
1.5.4 Java3D	11
1.5.5 VRML	11
1.6 本章要点	12
1.7 本章作业	13

第一篇 基础

第2章 计算基础	17
2.1 计算	18
2.1.1 计算及其作用	18
2.1.2 计算的理论基础	18
2.1.3 计算的对象与结果	18
2.1.4 计算的关键	19
2.1.5 计算的方法论	20
2.2 图学计算的内涵分析	21
2.2.1 图、形、几何与几何计算	21
2.2.2 模型与图形的本质	22
2.2.3 图学计算的矛盾与关键	22
2.3 形计算机制	23
2.3.1 形计算的基本概念	24
2.3.2 形计算的理论基础	25
2.3.3 形计算的基本架构	25
2.3.4 形计算的实施形式	27
2.4 本章要点	31
2.5 本章作业	31
第3章 基本几何	32
3.1 向量	32
3.1.1 向量及其性质	32
3.1.2 向量点积	32
3.1.3 向量叉积	33
3.2 二维基本几何	34
3.2.1 点	34
3.2.2 直线	34
3.2.3 圆	36
3.2.4 圆弧	36
3.2.5 基本几何的统一表示	37
3.2.6 圆弧曲线	37
3.3 基本几何的几何数	37
3.4 图形边界的几何数	38

3.5 辅助几何的几何数	38	4.4.2 视图变换的实施	68
3.6 向量交点几何数	39	4.5 本章要点	69
3.6.1 交点几何数的定义	39	4.6 本章作业	70
3.6.2 交点几何数的几何意义	39	第5章 几何计算	72
3.6.3 交点几何数的求取	40	5.1 处理几何奇异的基本策略	73
3.6.4 圆弧交点的几何数	41	5.1.1 重交点的取舍规则	73
3.7 平面基本几何	41	5.1.2 重边交点的取舍规则	73
3.7.1 直线的建立	41	5.1.3 圆弧重交点的求取	74
3.7.2 圆和圆弧的建立	42	5.2 判断计算	75
3.8 三维基本几何	43	5.2.1 拐向判断	75
3.8.1 空间直线	43	5.2.2 凸包算法	76
3.8.2 平面	43	5.2.3 包容性测试	77
3.8.3 三维交点几何数	44	5.2.4 最小最大判定法	79
3.9 本章要点	45	5.2.5 线与线的关系(深度测试)	80
3.10 本章作业	45	5.2.6 线与面的关系	80
第4章 几何变换	47	5.3 距离与面积计算	81
4.1 几何变换的基本描述	47	5.3.1 点到平面直线的距离	81
4.1.1 齐次坐标	47	5.3.2 点到空间直线的垂足	81
4.1.2 齐次变换矩阵	48	5.3.3 点到空间直线的距离	82
4.1.3 变换的几何化表示	48	5.3.4 点到平面的距离	82
4.2 二维变换	49	5.3.5 空间两直线的距离	83
4.2.1 二维基本变换	49	5.3.6 直线与平面的距离	83
4.2.2 一般二维旋转变换	50	5.3.7 空间两平面的距离	83
4.2.3 坐标系的旋转	50	5.3.8 平面多角形面积	84
4.2.4 以向量及其中垂线构建 坐标系	50	5.4 二维相交计算	84
4.2.5 二维对称变换	51	5.4.1 直线与直线的相交	84
4.2.6 不同坐标系下直线系数的 变换	51	5.4.2 直线与圆的相交	85
4.3 三维变换	52	5.4.3 圆与圆的相交	86
4.3.1 六视图变换矩阵	52	5.4.4 二维几何交切的复杂例子	87
4.3.2 三维基本旋转变换	52	5.5 三维相交计算	89
4.3.3 以空间一向量为坐标轴建立 坐标系	53	5.5.1 直线与平面的相交	89
4.3.4 绕空间任意轴的旋转变换	55	5.5.2 平面与平面的相交	89
4.3.5 向任意平面的投影	56	5.5.3 直线与球面的相交	89
4.3.6 轴测变换	58	5.6 本章要点	91
4.3.7 透视变换	59	5.7 本章作业	91
4.4 视图变换	67	第二篇 绘制	
4.4.1 视图变换的基本原理	67	第6章 光栅计算	94
		6.1 直线光栅化算法	94

6.1.1 直线 DDA 光栅化算法·····	94	7.5.2 Liang-Barsky 三维 Box 裁剪·····	129
6.1.2 直线 Bresenham 光栅化 算法·····	95	7.5.3 基于—维裁剪的三维 Box 裁剪·····	130
6.2 圆光栅化算法·····	98	7.6 三维视锥体裁剪·····	131
6.2.1 圆的八方对称光栅化算法···	98	7.6.1 线面求交视锥体裁剪·····	131
6.2.2 圆方程光栅化算法·····	98	7.6.2 Liang-Barsky 视锥体裁剪···	134
6.2.3 Bresenham 圆光栅化算法···	99	7.6.3 基于投影降维的视锥体 裁剪·····	136
6.2.4 中点圆光栅化算法·····	101	7.7 本章要点·····	138
6.3 多边形填充算法·····	103	7.8 本章作业·····	139
6.3.1 扫描线填充算法·····	103	第 8 章 消隐计算 ·····	141
6.3.2 边填充算法·····	105	8.1 凸多面体的隐藏线消除·····	142
6.3.3 种子填充算法·····	106	8.1.1 凸多面体的自消隐·····	142
6.4 字符和汉字显示·····	108	8.1.2 凸多面体消隐的基本 原理·····	143
6.4.1 点阵字符·····	108	8.1.3 凸多面体对其他物体的 遮挡计算·····	144
6.4.2 矢量字符·····	108	8.2 一般平表面物体的线消隐 算法·····	146
6.5 反走样·····	109	8.2.1 一般多面体的描述·····	146
6.5.1 图形走样·····	109	8.2.2 面的描述·····	146
6.5.2 超采样·····	109	8.2.3 一般多面体的自消隐·····	147
6.5.3 区域采样方法·····	110	8.2.4 面对线的遮挡·····	147
6.6 本章要点·····	111	8.2.5 隐藏线的表示·····	149
6.7 本章作业·····	111	8.2.6 一维交集算法·····	150
第 7 章 裁剪计算 ·····	113	8.2.7 消隐算法的数据结构·····	151
7.1 一维线性窗口裁剪·····	113	8.2.8 平表面物体线消隐算法的 实施·····	153
7.2 二维窗口裁剪·····	114	8.3 一般多面体的隐藏面消除·····	155
7.2.1 Cohen-Sutherland 二维矩形 窗口裁剪·····	114	8.3.1 隐藏面消除的基本原理·····	156
7.2.2 Cyrus-Beck 二维凸多边形 窗口裁剪·····	116	8.3.2 隐藏面消除的实施·····	158
7.2.3 Liang-Barsky 二维矩形窗口 裁剪·····	119	8.4 本章要点·····	159
7.2.4 基于—维裁剪的二维矩形 窗口裁剪·····	121	8.5 本章作业·····	160
7.2.5 四种矩形窗口裁剪效果 分析·····	122	第 9 章 颜色模型 ·····	161
7.3 二维矩形窗口对多边形的裁剪···	123	9.1 光和颜色·····	161
7.4 多边形窗口对线的裁剪·····	125	9.1.1 人对世界的视觉感知·····	161
7.5 三维 Box 裁剪·····	127	9.1.2 光源的种类·····	161
7.5.1 Cohen-Sutherland 三维 Box 裁剪·····	127	9.1.3 物体的表面性质·····	162

导 论

社会已进入数字化时代，这个时代是“图形图像时代”，主要认知方式是视觉形象方式。这是一种全球化的联络模式，语言的阻隔被打破，文字的垄断被消解。传统文学借助于文本对人世的间接性和想象性的体会、感悟转变为借助于图形图像对现实的记录、展示和消费。“虚拟空间”介入了现实空间，成为对现实的演绎、复制和扭曲。文字语言中对形象的解读是二度转换的：表述者将现实的形象转换为文字，解读者在感受和理解时，再将文字转换为形象。图形图像的感知则与之不同，它是直接感知的，更多地诉诸直觉。视觉具有优先性和至上性，它压倒了其他感官。图形图像的应用已表现在社会生活和生产的各个领域、各个层面上。

我们生活在一个充满三维物体的世界中，计算机可再现这些物体；我们生活在一个充满信息的世界中，需要用一种最直接的形式来表示和表现这些信息。计算机图形学研究的正是这种对三维世界的再现，它将人与机器的智慧和力量以一种直觉而自然的方式加以统一，赋予人们一种仿真的、三维的并具有实时交互的能力，这样人们可以在所展示的三维空间的图形环境中用以前不可想象的手段来获取信息，发挥自己的创造性思维。

1.1 计算机图形学的定位和定义

学习一门科学，先要了解它是什么，做什么，最后弄清楚怎样做。

计算机图形学研究如何用一种最直接的形式来表示和表现我们生活的多彩世界。它是计算机科学的一个分支，但是它的吸引力是其他相关专业领域所望尘莫及的^[1]。

1.1.1 国内外对计算机图形学的定义

下面列出的是目前国内外对计算机图形学的一些定义。

在各大百科全书中对计算机图形学的相关解释有：大英百科全书 (Britannica Encyclopedia) 中的定义为，利用计算机生成可视图像或图像本身；麦格劳-希尔科技百科全书 (McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology) 的表述是，计算机科学领域中利用计算机生成图像的理论技术分支，用来支持科学信息的传播和理解。

国际标准化组织 (ISO) 对计算机图形学的定义为：计算机图形学是研究通过计算机将数据转换为图形，并在专门显示设备上显示的原理、方法和技术的学科。

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 美国电气电子工程师学会) 对计算机图形学的定义是：计算机图形学是借由计算机产生图形影像的一门艺术或科学 (Computer graphics is the art or science of producing graphical images with the aid of computer)。

Foley^{[1][2]}将交互式计算机图形学的概念架构 (architecture) 的软件部分分为 3 块：应用模型、应用程序和图形系统。

1) 应用模型 (Application Model)，代表了将要在屏幕上显示的数据和物体。

2) 应用程序 (Application Program)，负责创建 (图元)，并将其存入应用模型，或从应用

模型中取出(图元),处理用户的输入,向图形系统发送一系列图像输出命令产生视图。

3) 图形系统(Graphics System),负责从对象的细节描述产生实际的图像,并将用户的输入传递给应用程序以供处理。

Rogers^[3]认为,“图是计算机图形学的基本概念,必须解决计算机图形学中图的表示机理、图的预处理、图的最终输出及如何与用户交互的问题。”这里,他强调以“图”(picture)为中心,并将“交互”(interaction)作为计算机图形学的核心问题之一。

国内被广泛采用的对计算机图形学定义的表述是^{[4]~[10]}:计算机图形学是研究怎样利用计算机表示、生成、处理和显示图形的原理、算法、方法和技术的一门学科(见图1.1-1)。

这里,“表示、生成和处理”是“建模→变换→像素点的几何位置”决定的过程,属于几何或3D问题;“显示”是对客观世界的机内表示的“再现”,决定屏幕点的显示属性(可见性和颜色),属于图像或2D问题。

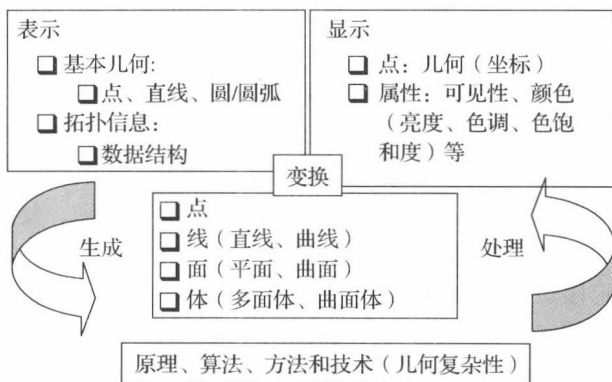


图 1.1-1 国内被广泛采用的计算机图形学定义

1.1.2 “大图学”下计算机图形学的定位与定义

上述列举的计算机图形学是以“图”为基础和目标,建立在传统的图学理论、应用数学及计算机科学基础上的一门交叉学科。

中国图学学会2013年发布《2012—2013图学学科发展报告》^[11],报告认为,构建科学与工程的最底层的基础不仅有文学和数学,还应该有图学。文学、数学和图学三者共同支撑科学与工程的发展。因此,需要整合分散在其他学科中有关图的理论、方法与技术,在已有的工程图学、计算机图形学和计算机图像学等学科的基础上建立“大图学”学科。这个结论是基于“形”的概念的——它们研究的对象都是“形”,“形”的表示与表现,从“形”的角度认识与表述图与图学。该报告详细阐述了“图”和“形”的关系,认为“形”是客观世界与虚拟世界的表示和构造,“图”是“形”在画面上的展现。“形”的属性是表示,“图”的属性是表现。“形”是“图”之源,“图”展示“形”,是“形”的载体、“形”之表现。在计算机背景下,图学的主要工作就是由“图”显示“形”,由“图”构造“形”,以及由一张图变成另一张图。所以,简单说来,图学的基本工作是研究“形→图”和“图→形”之间的转换。这是对图学科学与图学学科表述与定位的首次尝试。在这个整体上分析图形、图像、工程图的本质属性和它们的共性,全局性地考虑计算机图形学、计算机图像学、工程图学在科学上的同一性,以及它们在学科上的分工,给出统一的图学之定位和定义:“图学是以‘图’为对象,研究在将‘形’演绎到‘图’的过程中,关于‘图’的表达、产生、处理与传播的理论、技术与应用的科学。”在这个定义下,计算机图形学的学科地位将得到加强,其根本任务将更为明确。

形,指形体或形状,存在于客观世界(如自然界的物体、人造物体、自然现象等),也存在于虚拟世界(如动画、游戏等),它的本质是“表示”。“形”一般采用模型表达,有几何模型、数字模型、数学模型等。模型的基础是各种几何,如点、直线、曲线、平面、曲面等,没有几何,图形图像将是无本之木,所谓的像素、光照、阴影等皆无意义。

图,用于描述、反映、展现与想象世界,用于表达“形”,是“形”的视觉表现,它的本

质是“表现”。不管是图形类还是图像类，图本质上是由包含几何信息与属性信息（颜色、线型、线宽等显式属性和层次等隐式属性）的线、点等基本图元构成的画面。

从计算机的角度看，“形”是输入，“图”是输出，“形”是“图”之源。组成形体、图形与图像的基元都是几何，理论基础是几何学（含画法几何、射影几何等），图学计算的本质是几何计算。

图学研究“形”和“图”的表示、表现以及相互关系，目标是“图”，核心是“形”，本质是几何，最根本的理论基础是几何学。它的基本内容应该包含以下几个方面：造型理论与方法、“形→图”的理论与方法、图的处理理论与方法、“图→形”的理论与方法以及图的传输理论与方法等。

1.1.3 图形、图像、模型与几何

1. 图形/图像

计算机图形学中所研究的图形实际上可分成“图形类”和“图像类”两种。

图形 (Graphics) 类，以矢量图形式呈现。在计算机中由场景的几何模型与物理属性表示的图形，能体现景物的几何个体，记录体元的形状参数与属性参数。例如工程图纸 (Drawing)，最基本的图形单元（简称“图元”——Primitives）是点、线、圆/弧等，其信息包含图元的几何信息与属性信息（颜色、线型、线宽等显式属性和层次等隐式属性，见图 1.1-2）。

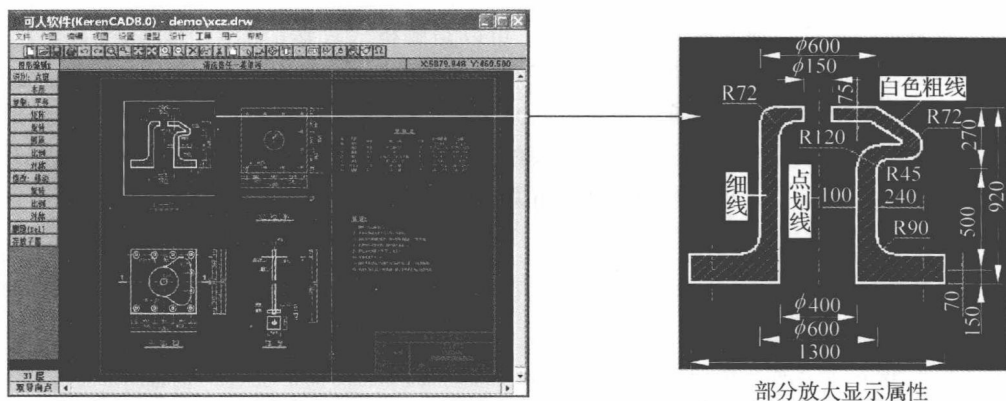


图 1.1-2 图形类例子（右面的局部放大图表明：一幅图形实际上是由一条条具有不同属性的线弧构成的）

图像 (Image 或 Picture) 类，以点阵图形式呈现。在计算机中以具有颜色信息的点阵来表示的图形，更强调整体形式，描述一个个点——像素 (Pixel) 或图像单元 (Pels, picture elements)，记录点及它的灰度或色彩，如照片、扫描图片和由计算机产生的真实感、非真实感图形等。其信息实际上是点与它的属性信息（颜色、灰度、亮度等，参见图 1.1-3）。

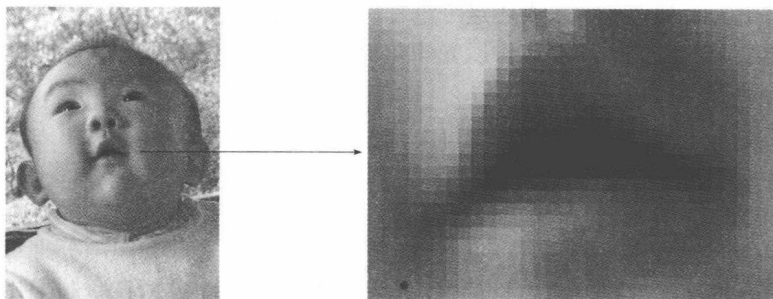


图 1.1-3 图像类例子（观测右面的局部放大图，一幅图像实际上是由一个个具有不同属性的像素构成的）

图形与图像两者间存在相互转换问题,该问题也是计算机图形学的研究对象。

如果用“图”一词作为统称的话(它表述了对客观世界模拟的静态/动态表现),那么显示一幅图本质上就是决定图元(含点/像素)的几何位置和显示属性的问题,这个过程将计算机中模拟的客观世界在屏幕(或其他显示、打印设备)上展现出来。

因此,抽象图的本质可以概括为:图=图元+属性。

2. 模型与几何

计算机图形学要研究的是模拟现实世界,构造虚拟世界。前者主要是模拟已经存在的物体,如一辆汽车、一张脸、一座山等,这种模拟是近似的;后者构造原先并不存在的物体,如用图形表示调查的结果、科学计算的模拟、书法等(此时,因为是对一种不存在物体形状的表现,可以认为物体的形状与计算机中的表示完全吻合),这种模拟与构造通过模型表示。

没有模型,图形将是无本之木。模型,以点、线、圆、曲线、曲面、体元等各种几何元素以及它们的组合构造,即模型的根本是几何。特别地,像素点也是几何。模型偏向于外部表述,而几何更揭示内部品质。因此,在计算机图形学中采用“几何”(geometry)一词替代“模型”(model)更为确切,更能准确地揭示出模型的几何品质。几何有更宽泛的含义:几何(偏重于模型)和几何计算(偏重于处理)。几何又包含表示和创建两个方面;几何计算则包含基本几何元素间的相交、相切处理,几何造型,几何分析,几何推理等。

模型的表示与构造,通常称为“造型”。它可以是解析式表达的简单形体,或是隐函数表达的复杂曲线、曲面,也可以是面片表达的任意几何体等。二维几何造型还有交互式、参数式等;三维几何造型手段以几何运算(布尔算法)为典型代表。分形造型、点造型等已用于真实感与非真实感图形的产生中。但是,几何建模的许多问题,特别是理论问题并不局限在计算机图形学学科研究,如曲线、曲面的构造常在计算机辅助几何设计(CAGD)学科研究。

3. 绘制

绘制(Rendering/Image Synthesis)——几何的视觉实现过程,是计算机图形学的主要工作。

计算机图形学的一项主要工作是将计算机中抽象的模型转换为人们可以直观可见、形象理解的图形或图像表达出来。这是对几何的视觉(图形化)演绎,是几何模型的视觉实现过程。它综合利用数学、物理学、计算机以及心理学等知识,将几何模型的形状、物理特性(如材料的折射率和反射率、物体发光温度、机械强度、材料密度等对运动模拟的影响),以及物体间的相对位置、遮挡关系等性质在计算机屏幕上模拟出来。这个过程犹如一个电影导演将剧本拍成电影,是一个将几何演绎到画面上的再创造过程。目前国内用于描述这个过程的表述叫做“绘制”。虽然“绘制”一词用于表述对几何的视觉演绎并不理想,但本书无意创造新词,尊重国内的习惯,仍用“绘制”一词来表述这个过程。

对于图形类绘制,二维的绘制工作以光栅化算法和裁剪算法为代表,三维的绘制工作以线消隐(hidden line)算法为代表。

对于图像类绘制,在计算机图形学中以三维几何的画面(Picture)产生为主,典型的算法有面消隐(Shading)、光照计算(反射、透明、光线跟踪和辐射度等)、阴影计算和纹理计算,以及光源计算和颜色模型等。

走样所引起的人为痕迹的消除,可见面判定的不同方法,光照和明暗处理算法,纹理、阴影、反射、透明效果,基于物理的光照模型,光线跟踪和辐射度等均是绘制工作。裁剪算法影响显示的内容,也可被列入。

绘制是计算机图形学的专业部分,它向人们展示计算机图形学的魅力,综合了计算机(硬件、程序、数据结构和交互技术等)、数学(向量、矩阵、几何计算和变换等)、物理学(运动、光学及颜色等)以及美学(布局、色彩等)等多学科的知识。

1.1.4 计算机图形学的总体架构

Rogers 认为计算机图形学必须考虑的“图的表示机理、图的预处理、图的最终输出及如何与用户交互的问题”等4个问题,前两个问题实际上是几何的表示和创建问题,第3个问题是几何的绘制问题。Miller^[12]认为计算机图形学和造型依赖于点和向量的数学运算,应使用向量几何分析简化推导。

根据上述对图与图学的认识,计算机图形学的基本架构如下^[4]。

图形,其实可分成“图”和“形”。“形”是“图”之源,是“图”之根本,“图”的基础;“图”是“形”的载体,是“形”的表现,“形”的视觉表达。从计算机的角度讲,“形”是表示,是输入;“图”是展现,是输出。

常规说的图形与图像,本质上只是具有线型、宽度、颜色等属性信息的图元素(图元,含点)的组合。因此,图形与图像以及工程图等,可以由“图”统一表述,抽象图的本质可以概括为:图=图元+属性。

在计算机中,“形”被称为模型,它的根本是几何。在计算机图形学中也可采用“几何”一词替代“模型”。几何可以理解为几何模型、几何创建、几何运算等,有更宽泛的含义。而模型还可用作其他表述,如光照模型、纹理模型等非几何类。

计算机图形学主要研究两个问题:如何在计算机中“表示”和“表现”出多彩的客观世界。这里的“表示”,是如何将客观世界放到计算机中——几何的定义与建模,可以用“造型”一词统一表述之;而“表现”,是如何将计算机中抽象的几何用一种形象的方式(静态或动态的图形图像)表现出来——几何的视觉实现,可以用“绘制”一词统一表述之。因此可以简单地说:计算机图形学=造型+绘制。

造型负责“形”的表示与构建,绘制负责“形”的展现和输出。从宏观上讲,造型构造模型,绘制展示模型;从微观上讲,造型决定点,绘制显示点。两者的基础是几何计算。

计算机图形学中主要是对“形”的计算,因此应该尽量用几何的方法处理几何问题,综合利用数学、计算机的理论构建几何计算的理论体系,特别要考虑几何与画法几何的理论与方法在几何计算中的作用,协助解决几何奇异这个几何计算中的关键问题,提高计算的稳定性。

交互式图形学可以提供图形通信手段,是人机交互的主要工具。

可由“基础”、“绘制”、“造型”和“交互”4方面构建计算机图形学新架构。

计算机图形学中的基础、绘制、造型和交互4方面的内容及逻辑关系如图1.1-4所示。

数学基础包括向量、矩阵、齐次坐标和几何变换等,是计算机图形学中几何与绘制的工具,真实感图形生成过程中有大量的法向计算、直线与平面及各种曲面的计算,曲线曲面的构造与光顺更需要较丰富的数学知识等。

几何变换包括同维变换与降维变换,是计算机图形学中数学知识应用的典型代表,如几何建模时的二维与三维几何变换,绘制时的三维到二维的投影变换以及二维空间的窗口和视图变换等。

计算机科学中的数据结构、算法以及显示技术是计算机图形学的实施平台。

二维几何包括点、直线和圆/弧等基本几何,以及经曲线拟合及双圆弧逼近后描述的曲线等。二维几何的复杂组合构成任意平面图形,点是一个特殊的二维几何,具有属性(如颜色、

亮度等)的点的组合构成图像。处理二维几何的理论与算法(如典型的布尔运算)是图形学的基础,也是工程系统(如CAD)的理论基础。

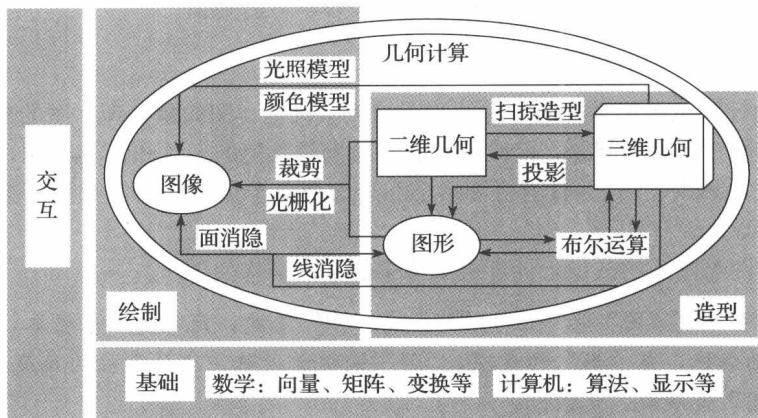


图 1.1-4 计算机图形学的内容及逻辑关系

三维几何包括空间的直线、平面、曲线、曲面以及由它们的组合构造的表面或实体。一些三维几何可以通过二维几何及其组合(图形)由简单的平移、旋转等扫掠造型方法构造,也可根据三维几何间的布尔运算等三维造型技术形成更为复杂的三维几何物体。

三维几何经透视、轴测等投影变换后在平面上形成图形。

上述工作可简单地划入造型类。

三维几何通过两条途径输出画面:一是通过线消隐计算得到矢量图形,二是经过光照计算(和颜色模型)的面消隐计算输出图像画面。

二维几何及其衍生的图形通过光栅化和裁剪算法以图像形式显示到画面上。

上述工作可以归入绘制类。

交互(Interaction)技术^[14]应该是计算机图形学的重要部分,也是计算机图形学相对独立的一部分,它的发展不仅反映了计算机技术从初级到高级的发展,也体现了计算机图形学在计算机软、硬件发展过程中的推动作用和发展历程。

人机交互工程属于专门的学科,不是本书所能讨论的。但是人机交互中最主要的是图形界面和图形交互,交互式图形学的研究是人机交互的关键。

1.2 计算机图形学与其他学科的关系

同属图学科学的主要学科有工程图学、画法几何、计算机图形学和计算机图像学等。它们中有一些是理论性的,有一些是应用性的,各有各的定位和分工。

对于工程图学,机械、建筑、土木、水利、电气、园林制图目前属于工程制图。从宏观上讲,应用性多于理论性,它的任务是给各应用领域提供工程语言。

对于画法几何,它是工程制图的理论基础,是几何的一个分支。有趣的是,数百年来几何走的是代数化道路,走到了极致;画法几何走的是几何化道路,仿佛走到了尽头,阴差阳错。

计算机图形学是由“形”产生“图”的典型代表,它的核心内容是绘制,这是对“形”的视觉演绎。它将计算机中抽象的模型转换为直观可见、形象的图形或图像,它的下端如动画等就是应用。

计算机图像学偏重于对已有图像的处理。如对密集的点的处理和对色彩的处理,图像编