

非真实感图形学

——造型、绘制与动画技术

Non-Photorealistic Computer Graphics

Modeling, Rendering, and Animation



Thomas STROTHOTTE | Stefan SCHLECHTWEG

Non-Photorealistic
Computer Graphics

MODELING, RENDERING, and ANIMATION

[加] Thomas Strothotte 著
[德] Stefan Schlechtweg

叶修梓 万华根 张引 译



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

<http://www.phei.com.cn>

国外计算机科学教材系列

非真实感图形学

——造型、绘制与动画技术

Non-Photorealistic Computer Graphics

Modeling, Rendering, and Animation

[加] Thomas Strothotte

[德] Stefan Schlechtweg

著

叶修梓 万华根 张 引 译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

作为一个与真实感图形学相对应的图形学分支,非真实感图形学关注于那些原来由手工制作,现在改由计算机自动生成的图画、图像和动画,并涉及到通常的计算机图形学所讲述的各方面内容。本书深入而系统地讲解了非真实感图形学的基本原理,以及非真实感效果的造型、绘制和动画算法等。本书从研究的角度,考察了真实感图形学从二维图像到三维图像的发展历程。在二维图像部分,更多地涉及图像处理的内容,如各种特殊效果的处理等。在三维图像部分,本书开始关注与非真实感相关的图形学研究内容,如造型技术和光照模型等。本书不但内容全面,还提供了大量图形图像实例、可供直接编写程序的算法以及章后习题,为对非真实感图形学感兴趣的读者提供了一个很好的切入点。

本书适合作为高年级本科生或研究生的教材,也可供非真实感图形学领域的研究者作为参考。

Authorized translation from the English language edition published by Elsevier Science(USA). Copyright © 2002 by Elsevier Science(USA).

Translation Copyright © 2004 by Publishing House of Electronics Industry.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from the Publisher.

本书中文简体专有翻译出版权由Elsevier Science(USA)授予电子工业出版社。其原文版权及中文翻译出版权受法律保护。未经许可,不得以任何形式或手段复制或抄袭本书内容。

版权贸易合同登记号 图字:01-2003-0377

图书在版编目(CIP)数据

非真实感图形学——造型、绘制与动画技术/(加)施特罗托特(Shrothotte, T.)等著;

叶修梓,万华根,张引译.

-北京:电子工业出版社,2004.11

(国外计算机科学教材系列)

书名原文:Non-Photorealistic Computer Graphics: Modeling, Rendering, and Animation

ISBN 7-121-00469-0

I. 非... II. ①施... ②叶... ③万... ④张... III. 计算机图形学-教材 IV. TP391.41

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第106981号

责任编辑:刘 静

印 刷:北京智力达印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:17.5 字数:494千字 彩插:2页

印 次:2004年11月第1次印刷

定 价:39.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

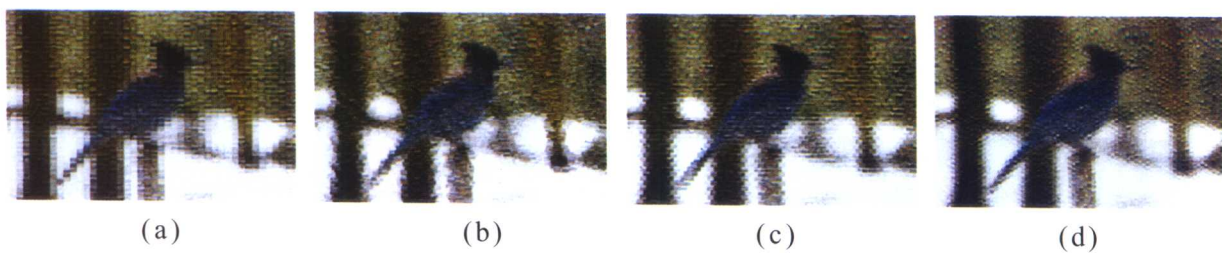


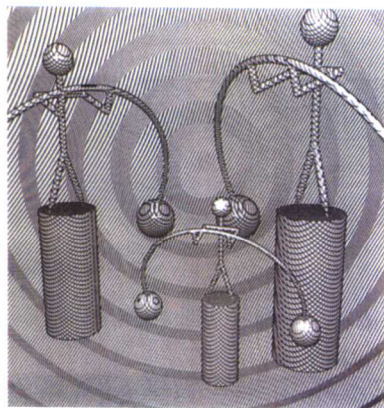
图 2.38 选择盖瓦网格以产生不同的马赛克结构的不同策略: (a) 规则安排; (b) 分散的布局; (c) 成角度的排列; (d) 六边形网格



图 4.6(b) 由计算机生成的使用了流体模拟技术的水彩画实例



(a)

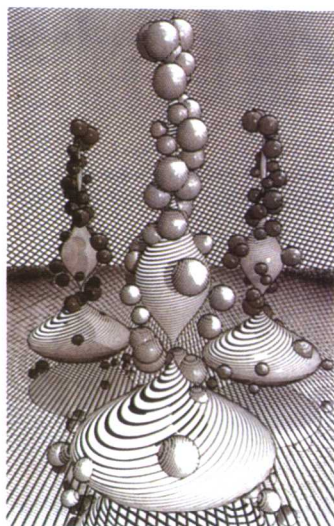


(b)

图 4.15 由计算机生成的铜板版画“Mobile”:
(a) 标准光线跟踪; (b) 铜板版画

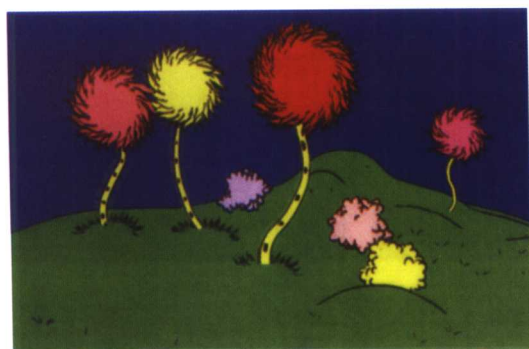


(a)



(b)

图 4.16 由计算机生成的铜板版画“Martian Bananas”:
(a) 标准光线跟踪; (b) 铜板版画

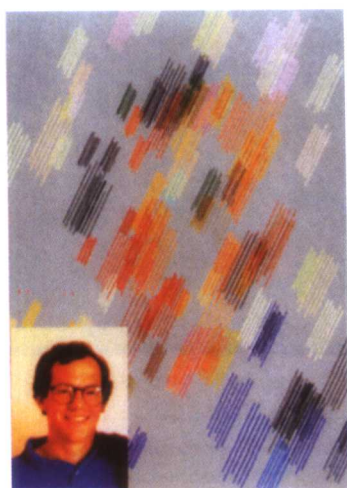


(a)



(b)

图 5.2 用来创建不同风格插图的不同笔划：(a) 沿物体轮廓放置的标记；(b) 用颜料画刷笔划填满区域



(a)



(b)



(c)

图 5.8 在相片真实感图像上用鼠标绘画的实例。在图(a)左下角插入的图像就是原始图像，图(a)显示的是在原始图像上执行很少的快速笔划时的结果。在图(b)和图(c)中，笔划逐渐变得细腻



(a)



(b)



(c)

图 6.2 揭示不同场景属性的图像：(a) 场景物体的颜色（RGB 缓冲器）；(b) 物体标识符（ID 缓冲器）；(c) 深度（z 缓冲器）

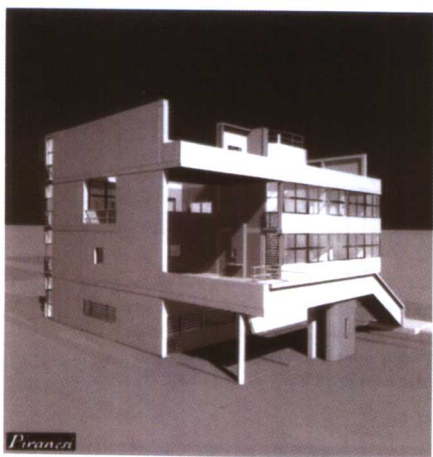


(a)



(b)

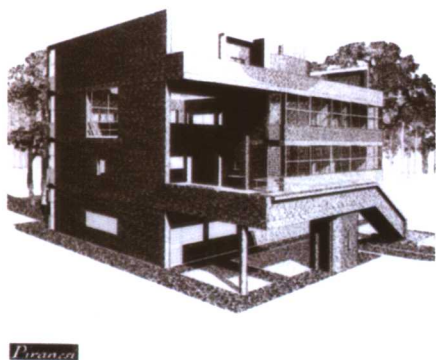
图 6.8 基于G缓冲器的交互绘画。(a)基于潜在几何模型的属性对画笔笔划进行参数化；(b)树是附加的位图，其放置基于z缓冲器。注意它们是怎样改变大小并获得正确的遮挡的



(a)



(b)



(c)



(d)

图 6.9 通过使用不同图画工具而获得的不同风格变化：(a)真实感绘制作品；(b)附加的环境；(c)笔墨画风格；(d)油画风格

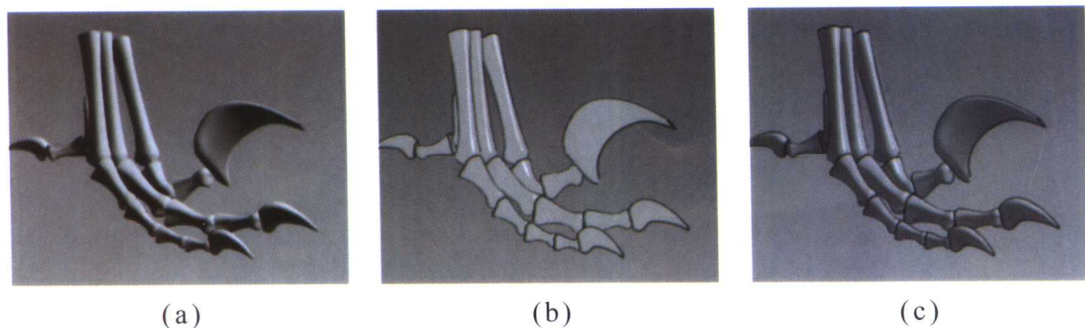


图 8.7 使用 Phong 模型作为插图的起点, 暴露出模型的一些缺点: (a) 未被直接照亮的区域看起来颜色是固定的 ($k_d=1$, $k_s=0$); (b) 丢失了形状信息, 特别是在高曲率区域仅绘制高光 and 边线时; (c) 在经 Phong 明暗处理的图像中包含边线 ($k_d=0.5$, $k_s=0.1$) 时, 丢失了细节

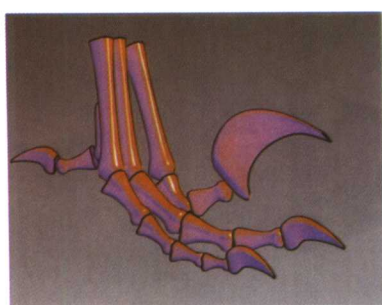


图 8.8 近似不变的亮度色调绘制。边线和高光清晰易见, 也可见经明暗处理的区域中的一些细节, 但缺少亮度变化使这些改变显得细微

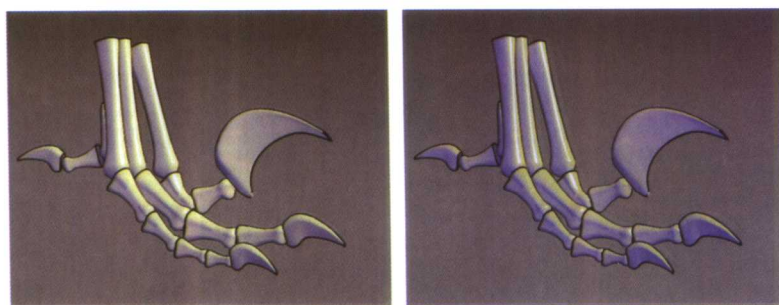


图 8.9 用所介绍的明暗处理模型创建的图像: (a) $b=0.4$, $y=0.4$, $\alpha=0.2$, $\beta=0.6$ 和 (b) $b=0.55$, $y=0.3$, $\alpha=0.25$, $\beta=0.5$

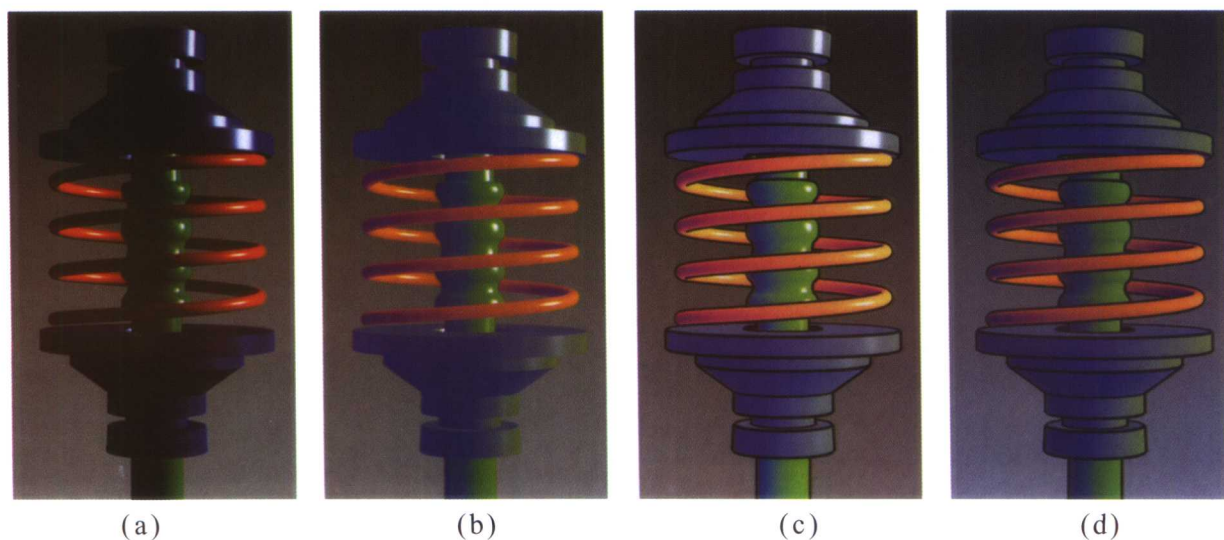


图 8.10 传统计算机图形技术和用于创建技术插图的技术比较: (a) Phong 明暗处理; (b) 没有边线的新的明暗处理模型; (c) 带有边线和高光的新的明暗处理模型; (d) 使用 Phong 明暗处理对新模型的逼近

出版说明

21世纪初的5至10年是我国国民经济和社会发展的关键时期,也是信息产业快速发展的关键时期。在我国加入WTO后的今天,培养一支适应国际化竞争的一流IT人才队伍是我国高等教育的重要任务之一。信息科学和技术方面人才的优劣与多寡,是我国面对国际竞争时成败的关键因素。

当前,正值我国高等教育特别是信息科学领域的教育调整、变革的重大时期,为使我国教育体制与国际化接轨,有条件的高等院校正在为某些信息学科和技术课程使用国外优秀教材和优秀原版教材,以使我国在计算机教学上尽快赶上国际先进水平。

电子工业出版社秉承多年来引进国外优秀图书的经验,翻译出版了“国外计算机科学教材系列”丛书,这套教材覆盖学科范围广、领域宽、层次多,既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。这些教材涉及的学科方向包括网络与通信、操作系统、计算机组织与结构、算法与数据结构、数据库与信息处理、编程语言、图形图像与多媒体、软件工程等。同时,我们也适当引进了一些优秀英文原版教材,本着翻译版本和英文原版并重的原则,对重点图书既提供英文原版又提供相应的翻译版本。

在图书选题上,我们大都选择国外著名出版公司出版的高校教材,如Pearson Education培生教育出版集团、麦格劳-希尔教育出版集团、麻省理工学院出版社、剑桥大学出版社等。撰写教材的许多作者都是蜚声世界的教授、学者,如道格拉斯·科默(Douglas E. Comer)、威廉·斯托林斯(William Stallings)、哈维·戴特尔(Harvey M. Deitel)、尤利斯·布莱克(Uyless Black)等。

为确保教材的选题质量和翻译质量,我们约请了清华大学、北京大学、北京航空航天大学、复旦大学、上海交通大学、南京大学、浙江大学、哈尔滨工业大学、华中科技大学、西安交通大学、国防科学技术大学、解放军理工大学等著名高校的教授和骨干教师参与了本系列教材的选题、翻译和审校工作。他们中既有讲授同类教材的骨干教师、博士,也有积累了几十年教学经验的老教授和博士生导师。

在该系列教材的选题、翻译和编辑加工过程中,为提高教材质量,我们做了大量细致的工作,包括对所选教材进行全面论证;选择编辑时力求达到专业对口;对排版、印制质量进行严格把关。对于英文教材中出现的错误,我们通过与作者联络和网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订。

此外,我们还将与国外著名出版公司合作,提供一些教材的教学支持资料,希望能为授课老师提供帮助。今后,我们将继续加强与各高校教师的密切联系,为广大师生引进更多的国外优秀教材和参考书,为我国计算机科学教学体系与国际教学体系的接轨做出努力。

电子工业出版社

教材出版委员会

主 任	杨芙清	北京大学教授 中国科学院院士 北京大学信息与工程学部主任 北京大学软件工程研究所所长
委 员	王 珊	中国人民大学信息学院院长、教授
	胡道元	清华大学计算机科学与技术系教授 国际信息处理联合会通信系统中国代表
	钟玉琢	清华大学计算机科学与技术系教授 中国计算机学会多媒体专业委员会主任
	谢希仁	中国人民解放军理工大学教授 全军网络技术研究中心主任、博士生导师
	尤晋元	上海交通大学计算机科学与工程系教授 上海分布计算技术中心主任
	施伯乐	上海国际数据库研究中心主任、复旦大学教授 中国计算机学会常务理事、上海市计算机学会理事长
	邹 鹏	国防科学技术大学计算机学院教授、博士生导师 教育部计算机基础课程教学指导委员会副主任委员
	张昆藏	青岛大学信息工程学院教授

译者序

在计算机图形学30余年的发展历史中,真实感绘制一直是贯穿其中的主旋律。在有关真实感图形的出版物中,人们不难看到这样的比较:在一张真实场景的照片旁边,放上了一张针对同样场景和同样拍摄角度、由计算机生成的图形,以区分两者间细微的差别。随着计算机图形硬件和算法的不断发展、改进,到20世纪90年代中期,人们已能真实地模拟各种自然界的客观现象和想像中的特殊效果了。特别是在《侏罗纪公园》、《真实的谎言》、《阿甘正传》等好莱坞电影中,真实感图形与电影胶片摄制出的图像得到了完美的结合。从这个意义上讲,真实感图形达到了它所追求的“像照片一样真实”的效果。从心理学的观点来看,真实感图形暗示着精确性和完美性,强调模拟场景对于现实世界的保真度。

随着真实感图形趋向于具有更强的真实感并提供更贴近现实世界的场景,研究者们意识到,在有些时候,人们反而更需要由计算机来生成一些不同于照片的图形。事实上,照相机只是近代才有的用于捕获现实世界影像的工具。在照相机发明之前的千余年时间里,人们往往借助于素描、绘画、卡通等艺术形式来刻画丰富多彩的现实和虚幻的世界。

自20世纪90年代中期开始,非真实感绘制逐渐成为计算机图形学的研究热点之一。顾名思义,非真实感绘制指的是利用计算机生成不具有照片般真实感,而具有手绘风格的图形的技术。其目标不在于图形的真实性,而主要在于表现图形的艺术特质、模拟艺术作品(甚至包括作品中的缺陷)或作为真实感图形的有效补充。

本书为对非真实感图形感兴趣的广大读者提供了一个很好的切入点。诚如原著序言的作者(微软研究院高级研究员David Salesin教授)所言,本书提供了对非真实感绘制这一领域迄今为止所发表成果的最系统、最深入的研究综述,全面地介绍了大量有关非真实感绘制的技术。如作者所述,本书主要服务于以下三个目的:

1. 用做面向高年级大学生或研究生的非真实感绘制课程的教材。
2. 为想要进入非真实感图形领域的读者提供足够的材料,其中详细介绍了可供直接编写程序的方法。
3. 供非真实感图形领域的研究者参考。

本书翻译分工如下:第1章由叶修梓教授翻译,第2章至第5章由张引博士翻译,其余部分均由万华根博士翻译。

与真实感计算机图形学相比较,非真实感图形学是一门相对较新的学科。一方面,我们相信,本书在国内的出版,对推动国内有关非真实感绘制技术的教学、科研将不无裨益。我们衷心感谢电子工业出版社为我们提供了这样一个机会,与国内正在从事或有志于从事非真实感计算机图形工作的同行们交流。另一方面,由于我们对这一新兴技术的理解深度有限,加之时间仓促,译作中难免出现不妥之处,欢迎广大读者就译作中的问题与我们探讨和交流。

序 言

David Salesin

微软研究院高级研究员

华盛顿大学计算机科学与工程系教授

对真实感的追求造就了绘制技术的历史,绘制是用计算机图形学创造合成影像的过程。这一领域中最早的工作与开发看似真实的局部光照明模型的过程有关,局部光照明模型研究光怎样从表面反射出来。稍后的工作与求光线在环境中反射时到达所有表面的光线的平衡解这一问题(即大家熟知的整体光照明问题)有关。将这些问题表征为可以用日益增加的速度和精度来模拟的物理过程,是计算机图形学领域的巨大成功。

然而,伴随着对具有日益增加的真实感场景模拟能力的提高,出现了一个新问题,即以尽可能有效的方式描述这些复杂场景并对其进行可视化。因此,在过去的10年中,一种新的追求已经出现了。在我看来,这种追求比对真实感的追求更微妙,实际上也更有趣。这一新的、在某种意义上更高的追求更多地与创造有用的、美的(而非仅仅是物理上真实的)影像有关。此时,我们已经不能再求助于物理学了。相反,必须寄希望于认知科学,以及艺术、图形设计和传统插图领域。在这些领域中,人们已经进行了极其仔细的研究(对信息进行结构化和抽象化),以期能最有效地传达信息。

这一新的研究领域就是非真实感图形学,人们对该领域已经有所了解。非真实感图形学在近年来已经引起了人们的极大兴趣。的确,围绕着非真实感图形学,已经产生了大量的论文和技术:从使用其形状(这些形状可能传递着其自身的信息)具有一定意义的微点来打印图像的艺术网印(artistic screening)方法,到以笔墨、水彩或雕刻蚀刻版画(engraved etching)风格绘制图像的技术,再到照明过程以及表明形状或指引观察者注意力的变形三维模型。每当看到首次在SIGGRAPH(最高级别的计算机图形学会议)或其他研究论坛展示的新作品时,我都为这些技术的多样性、精巧性以及大胆的创新感到吃惊。

本书全面地介绍了这些非凡的技术,提供了对非真实感绘制这一领域迄今为止所发表成果的最系统、最深入的研究结果。我相信,要使从业者和研究者都对这一领域有一定程度的了解,还有相当长的一段路要走。我衷心希望通过向更多的读者介绍非真实感绘制的许多早期研究成果,能够促进从业者改进这些方法,使它们对计算机图形作品来说真正可行,并且能在激发研究人员的创造性和创新意识这两方面扮演同样关键的角色。

前 言

非真实感计算机图形学这一术语已经开始用于表示这样一个领域,该领域处理的是用计算机生成一类图像与动画的问题。通常,这类图像与动画是部分地由“手工”创作完成的。这类图像通常类似于建筑师、工业艺术家或科学插图画家创造出来的、用以传达或多或少的特定信息的、通常有文字伴随的那些图像。这些图像的特征是,在刻画物体属性方面更多地使用了随机性、模糊性或任意性,而较少使用完整性和依附性(adherence)。

非真实感计算机图形学涉及到通常使用的计算机图形学的所有阶段。到目前为止,大多数工作已经由本书中所特指的非真实感绘制所完成。非真实感绘制最早出现在20世纪80年代的早期论文中(特别是Strassmann, 1986a和Sasada, 1987)。SIGGRAPH(1990年)会议上发表了两篇非常有影响力的论文(Saito and Takahashi, 1990和Haeberli, 1990),但这两篇论文所展示的技术当时仍被孤立地对待。1994年,随着几篇论文在SIGGRAPH会议(Winkenbach and Salesin, 1994和Salisbury等, 1994)和Eurographics会议(Strothotte et al等, 1994)上的发表,这一新领域的轮廓才逐渐显现出来。这些论文通过展示潜在原则的通用性而有效地开辟了新途径。

在1994年的这些论文发表以后,国际会议开始设立专题,以专门讨论非真实感计算机图形学。2000年6月,在法国Annecy举行了专门讨论这一主题的首届国际研讨会。到本书写作之前,有关该主题的文献约有300篇。

对文献进行系统评价的时机已经成熟。由于这一领域是“有机地”成长起来的,因此人们所开发出来的方法和技术缺少统一的术语和符号。该领域至今仍然是无组织的,这使得确定和评估新的开放问题(open problem)日益困难。的确,有时论文甚至会有“多此一举,重复别人的工作”之嫌,虽然具体背景和应用并不相同。事实上,由于人们对该领域缺乏系统的研究,因此在本书写作时,市场上或实验室里均不存在针对非真实感计算机图形学的单一的、全面的工具。

本书结构

本书深入而系统地介绍了非真实感计算机图形学这一计算机科学中的新兴领域,强调了该领域的结构,并总结了文献中所列出的主要研究成果。

- 第1章介绍了该领域的背景,其中包括其历史根源、现在如此受欢迎的原因、所采用的基本算法、长期目标等。
- 第2章至第5章论述了基于二维数据结构的方法,其中包括像素操作,绘制直线、曲线和其他图形基本体素,以及模拟自然介质。
- 第6章向在图像中加入所刻画物体的一些深度信息迈出了第一步。然而,这些信息会再次被存储在二维数据结构中。
- 第7章与第8章介绍了如何在非真实感计算机图形学中利用编码于几何模型内部的三维信息。
- 第9章介绍了图像与模型的变形。
- 第10章讨论了非真实感计算机图形学的多种应用。
- 第11章提出了将所有东西组合在一起的概念模型,从而总结了全书。

目标读者

本书有三种用途。首先,可以作为计算机专业高年级本科生和研究生的教材。本书作者分别于1999年秋、2000年夏、2000年秋和2001年秋在德国马格德堡大学用本书的初稿讲授了这一课程。针对一个学期(14周),该课程每周的课时为4小时。所有学生均至少修过一门讲授基本二维与三维计算机图形学的大学计算机图形学课程,并精通一门程序设计语言。

作者在加拿大 Simon Fraser 大学讲授了同一课程的为期两周的速成课程,在该学期第2周和第3周(2000年秋)的每晚讲授4小时。在该学期第7周安排了一次开卷的期中考试,并要求学生,在第13周提交最终答案。这种授课方式效果不错,学生还可以同时参加几个其他的正规课程。

教师应当按照本书中的先后顺序给学生讲授这门课程,并将章末习题作为家庭作业。如果没有足够时间讲完整本书,可减少某些章节的内容。例如,在不影响学生对主题基本理解的情况下,可省略2.3节、2.4节、3.3节、4.2节、4.3节、5.3节、7.3节、8.4节和9.4节,并将它们作为进一步的读物。

其次,本书对于这一领域的从业者将会是有用的。本书包含了很多例子,特别是以图像形式给出的例子,作者希望能以此激发读者使用非真实感计算机图形的兴趣。书中在解释所介绍的方法时包含了足够多的细节,因此,在不需要了解更多概念的情况下,可直接编写程序。

想要了解非真实感计算机图形学的计算机图形学专业人士可按顺序阅读本书。如果时间有限,也可以先有选择性地阅读。但第1章、第2章至5章中的一章、第6章、第9章以及第10章是应当阅读的,实在不行可以跳过上面提到的那些小节(学生也可以跳过那些小节)。

本书的第三个用途是供这一领域的研究者作为参考。本书总结了该领域的文献,并介绍了术语。在任何可能的地方,书中都使用了原始文献中所采用的术语。然而,在某些情况下,特别是在不同的论文使用了不同术语的情况下,本书会给出一个统一的词汇。在每章结尾的文献注解中,均给出了重要文献的出处。

由于本书在介绍某个内容时,会适时地提及所用到的方法,因此非真实感计算机图形学研究人员可以按任意顺序阅读本书。

计算机科学家研究非真实感图形学的原因

有关诸如非真实感绘制等前沿主题的课程是否应该是计算机专业研究生的学位课程呢?

这一问题实际上是在问计算机专业的研究生想要学习的是什么。总的来说,学习计算机科学不同分支的学生们已经不能只学习那些级别相同的、特定的工程知识了。相反,现在出现了越来越多的需求,这就要求从业者具有一些核心技能,教师应当针对这些核心技能来组织教学。这些核心技能是与计算机科学家在解决问题时所采取方法的核心相关联的。应当使用某个实例,结合这类技能的彼此关系来学习和研究它们。一旦在一个领域中掌握了这些技巧,就能够把这些技巧应用于其他领域。

可以在非真实感绘制领域中研究这些技巧。正如本书所做的,对这一问题的处理可以仿效计算机科学家的做法,将问题分解,将单个解整合到一起,并将它们嵌入到帮助用户实现其当前任务的系统中。

此外,不难注意到,在20世纪90年代晚期,教学的重点已经转向培养研究生以用户为中心的概念。尽管可以在不具备实际经验的情况下研究计算机科学,甚至计算机图形学中的许多领域,本书仍将非真实感绘制视为这样一个领域:该领域所要解决的问题与用户的需求相关。

为跟上以用户为中心这一趋势，近年来在一些高校的计算机科学系存在一种倾向，即为迎合媒体工业的需求而设置新的学位课程。德国马格德堡大学所提供的计算视觉学 (computational visualistics) 方面的本科生和研究生课程就是一个例子。这些课程的重点是视觉传达的方法和工具，且均从算法的 (计算机科学)、以用户为中心的 (人文科学) 观点出发。其中，非真实感绘制方面的一门课程特别重要，因为它展示了图形通信的部分灵活性，而图形通信将会是新千年第一个10年中基于 Web 的系统的核心。

致谢

本书所介绍的材料利用了许多科学家的研究成果和思想。感谢 Kees van Overveld 为本书最后一章的主题提供了许多深刻的见解。许多同事就这一主题提供了他们的见解，他们是 Lyn Bartram, John Buchanan, Sheelagh Carpendale, Dave Forsey 和 Simon Schofield。本书第一作者的许多博士生提供了不少研究结果，这些结果对本书的写作是有帮助的。就这一点而言，我们要感谢 Oliver Deussen, Bert Freudenberg, Frank Godenschweger, Nick Halper, Jörg Hamel, Knut Hartmann, Stefan Hiller, Axel Hoppe, Tobias Isenberg, Maic Masuch, Bernhard Preim, Andreas Raab 和 Michael Rüger。

我们要感谢其他所有为本书的写作提供帮助的人，他们是：我们学院的管理人员、技术人员以及秘书 (即 Heiko Dorwarth, Volkmar Hinz, Petra Janka, Thomas Rosenburg, Petra Specht 与 Sylvia Zabel)，马格德堡大学和 Simon Fraser 大学阅读本手稿前一版本的学生，以及那些为我们提供图像版权的同事。

最后，我们要特别感谢 Morgan Kaufmann 出版社的专业人员 Mona Buehler, Diane Cerra 和 Edward Wade 在本书出版过程中所付出的努力。

目 录

第 1 章 导论	1
1.1 关于真实感	2
1.2 非真实感绘制	5
1.2.1 成功的目标及标准	5
1.2.2 一种观点	6
1.3 通向非真实感绘制算法的途径	8
1.3.1 图像瑕疵	8
1.3.2 模型瑕疵	9
1.3.3 图像和模型瑕疵的计算框架	11
1.4 对非真实感绘制的想像	15
1.4.1 科学和医学插图	15
1.4.2 技术插图	16
1.4.3 考古插图	17
1.4.4 讲故事	17
第 2 章 图像像素操作	19
2.1 半调法	19
2.1.1 有序抖动	20
2.1.2 误差扩散	21
2.1.3 在 NPR 中的应用	22
2.2 掩膜	25
2.2.1 基本方法	25
2.2.2 调整图像和屏幕的强度	27
2.2.3 过程式掩膜	30
2.2.4 在抖动网屏中嵌入形状	33
2.3 点画法	38
2.3.1 自动法	38
2.3.2 交互法	41
2.4 图像马赛克	44
2.4.1 选择盖瓦网格或图案	44
2.4.2 安排图像瓦片	46
2.4.3 选择瓦片图像	46
2.4.4 颜色修正	47

第3章 线条、曲线和笔划	51
3.1 画“不正确的”线条	51
3.1.1 对手绘图画的观察	51
3.1.2 用计算机画摆动的线条	52
3.2 画“艺术的”线条：路线和风格的隐喻	54
3.2.1 变形图像	55
3.2.2 使用路线的信息：线条风格	57
3.2.3 模拟水彩画	61
3.3 一般化：多分辨率曲线	64
3.3.1 曲线的小波表示	65
3.3.2 编辑多分辨率曲线	66
3.4 画线方法的比较	67
第4章 模拟自然的介质和艺术手法	69
4.1 模拟湿颜料的画法	69
4.1.1 使用细胞自动机来模拟水彩画	70
4.1.2 使用流体模拟，由计算机生成水彩画	75
4.1.3 绘制模拟结果	77
4.2 模拟纸上的铅笔画	78
4.2.1 显微级别	78
4.2.2 模型	80
4.2.3 结果	83
4.3 模拟木版画和版画	84
4.3.1 铜板版画的光线跟踪方法	84
4.3.2 版画的图像处理方法	88
第5章 基于笔划的插图	94
5.1 笔划和笔划纹理	94
5.1.1 单一笔划的定义和绘制	95
5.1.2 构建笔划纹理	96
5.2 细节和方向	99
5.2.1 轮廓和阴影	99
5.2.2 方向	100
5.2.3 对细节的抽象	102
5.3 基于笔划的图像的比例改变	103
5.3.1 比例调整操作的目标	105
5.3.2 将输入近似成连续函数	105
5.3.3 不连续边缘	106
5.3.4 创建和重构再现	108

第6章	用二维半数据结构工作	111
6.1	G 缓冲器	111
6.2	G 缓冲器上的操作	112
6.3	可理解的绘制	114
6.4	交互绘画	115
6.5	用于二维抖动的三维参数	118
第7章	几何模型及其在非真实感绘制中的运用	122
7.1	作为数据类型的几何模型	122
7.1.1	数据	123
7.1.2	数据上的操作	124
7.1.3	实现	125
7.2	多边形模型	126
7.2.1	对多边形模型的描述	127
7.2.2	针对多边形模型的操作	127
7.2.3	针对非真实感绘制的边分类	128
7.2.4	计算交点	134
7.2.5	确定总体形状	136
7.3	自由曲面	140
7.3.1	自由曲面模型描述	140
7.3.2	自由曲面模型上针对绘制的操作	141
第8章	非真实感绘制光照明模型	148
8.1	相对于照明传达形状	148
8.2	一个基本光照明模型	151
8.3	彩色插图	153
8.4	基于成分的光照明模型	155
8.4.1	标准光照明和阴影	156
8.4.2	边缘阴影、高原及背面光照明	156
8.4.3	曲率光照明	157
8.4.4	传输与透明	158
8.4.5	总体亮度	159
8.5	实现要点	159
第9章	变形非真实感绘画作品	162
9.1	图像空间变形	162
9.1.1	基本算法	163
9.1.2	放大区域	165
9.1.3	陡坡函数	165
9.1.4	偏心焦点和多重焦点	167