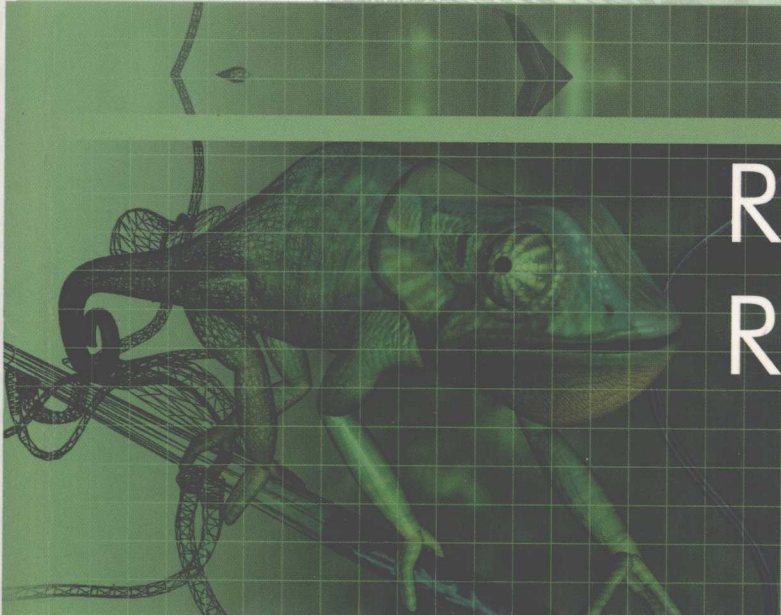


本书获得2002年美国《游戏开发者》杂志的“前沿奖”



REAL-TIME RENDERING

Second Edition

实时计算机图形学

(第2版)

作者: Tomas Akenine-Möller

Eric Haines

译者: 普建涛



北京大学出版社

<http://cbs.pku.edu.cn>

TP391.41
M851.1

内容简介

实时计算机图形学 (第2版)

Real-Time Rendering(Second Edition)

Tomas Akenine-Möller 著
Eric Haines 著
普建涛 译

著
译

北京大学出版社

• 北 京 •

内 容 简 介

针对近些年三维实时绘制技术的发展,本书系统地介绍了实时计算机图形学涉及的若干关键技术,包括基本的三维几何变换、各种照片级真实感和非照片级真实感绘制技术、各种加速算法、多边形和曲线曲面技术、相交测试和碰撞检测技术,同时还对图形硬件技术给予了特别关注。在介绍这些技术的同时,本书还给出了详尽的参考文献出处,有利于读者找到相关的原始文献。

本书可作为计算机专业高年级本科生和研究生教材;同时,也可作为三维图形学领域的专门研究人员的参考用书。通过对本书的学习,读者可以深入了解图形学相关技术发展。

Original English edition :Real-Time Rendering ,Second Edition by Tomas Akenine-Möller & Eric Haines.
EISBN:1-56881-182-9

Copyright © 2002 by A K Peters,Ltd.

All rights reserved.

No part of the material protected by this copyright notice may be reproduced or utilized in any form,electronic or mechanical,including photocopying,recording,or by any information storage and retrieval system,without written permission from the copyright owner.

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2003-3326

图书在版编目(CIP)数据

实时计算机图形学(第2版)/埃肯因(Akenine,T.)等著;普建涛译. —北京:北京大学出版社,2004.7

ISBN 7-301-07105-1

I. 实… II. ①埃… ②普… III. 计算机图形学 IV. TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 033779 号

书 名: 实时计算机图形学(第2版)

著作责任者: Tomas Akenine-Möller, Eric Haines 著

译 者: 普建涛

责任编辑: 温丹丹

标准书号: ISBN 7-301-07105-1/TP · 0758

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区中关村北京大学校内 100871

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750581

电子信箱: xxjs@pup.pku.edu.cn

排 版 者: 北京东方人华北彩印中心 电话: 62754190

印 刷 者: 河北涞县鑫华书刊印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 30 印张 925 千字

2004 年 7 月第 1 版 2004 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 78.00 元

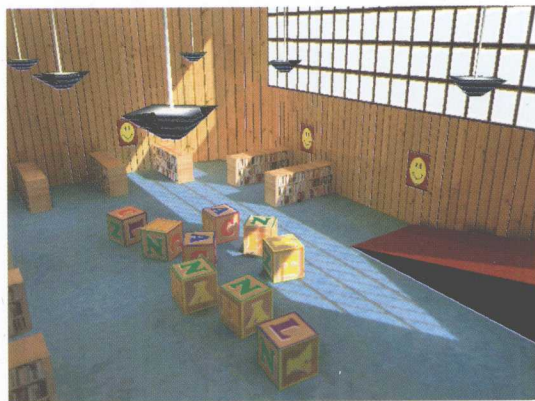
北京大学出版社是中宣部、新闻出版总署和教育
部表彰的全国优秀出版社，本着“教材优先，学术为
本，创建一流”的宗旨，为读者提供了大量的精品计
算机图书。您可以信赖我们所奉献原创的、专业的和
权威的计算机图书。要迎接信息化时代的挑战，请选
用北大版计算机图书。



彩图 III Rachel 的面部表情和动作，通过蒙皮方法和其他插值方法来给予控制，可以使用图形硬件进行加速(此图经 ATI 技术公司和 LifeFX 公司的 Alex Vlachos、John Isidoro、Dave Gosselin，以及 Eli Turner 授权使用)



彩图 IX 高分辨率地形纹理贴图，它需要一个非常巨大的图像数据库，使用裁减图进行绘制，目的是减少一次所需要的数据总量(此图经 Aechelon 技术公司授权使用，这幅图是在 SGI 硬件上由 C-Nova/C-Radiant 图像生成器生成的)

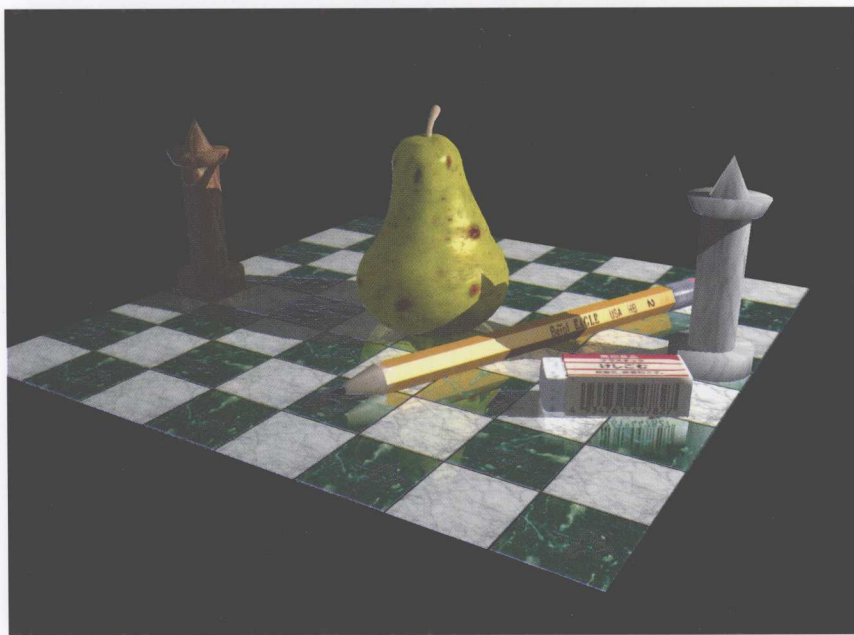


彩图 XI 高分辨率的光照图，可以产生强烈而细致的光照效果(此图经 Any Channel 公司的 Brian Yen 授权使用)

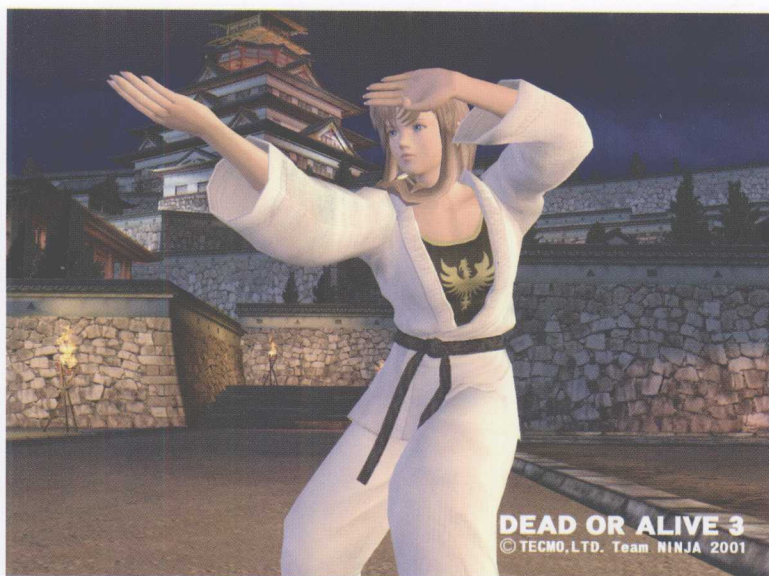
注：本书只采用了部分彩图，书中提到的其他彩图请在下面的网址下载：<http://cbs.pku.edu.cn>。



彩图 XII 是 Xbox 游戏《世界街头赛车》(Project Gotham Racing)中的一幅静态画面，车灯的炫目效果清楚地表明时间是在晚上。为了生成车体的动态反射效果，每一帧画面都必须创建一个车体所在位置的环境立方体图(此图经 Bizarre Creations 和 Microsoft 公司授权使用)



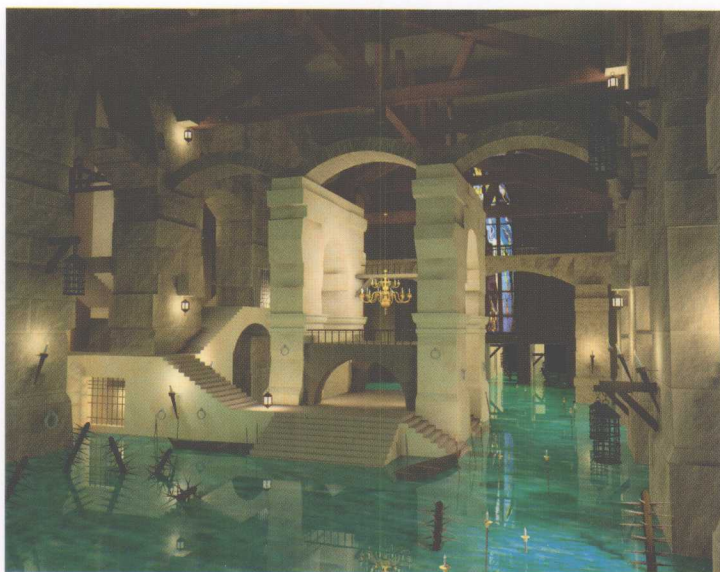
彩图 XIII 光泽贴图、阴影，以及雾化反射。使用 Hourcade 算法加入了阴影，随着物体与平面之间距离的增大，使用雾可以减弱其中的反射(此图经 ATI 技术公司的 J. L. Mitchell 和 E. Hart 授权使用)



彩图 XXVI 使用辐射照度图实现的人物光照效果(此图源自 Tecmo 公司的游戏“Dead or Alive @3”，2001 年)



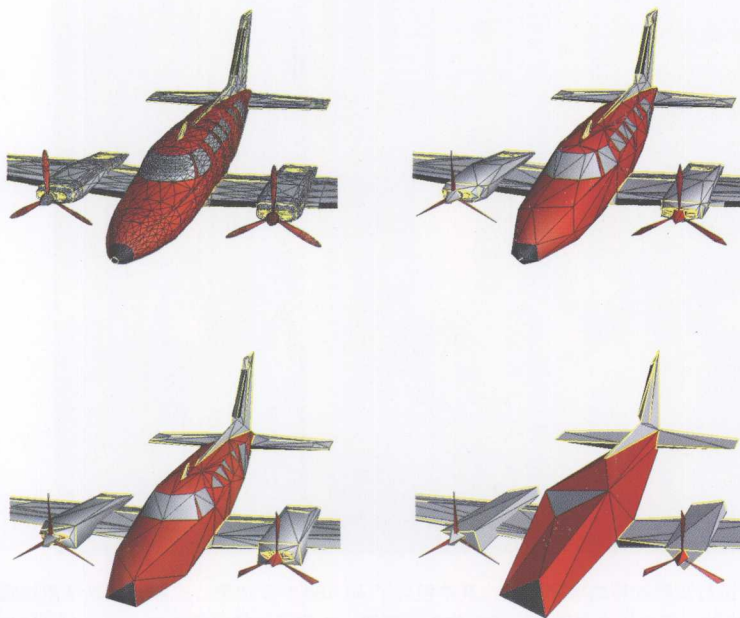
彩图 XXVIII 使用累积缓冲器实现的运动模糊效果



彩图 XXXII 可以进行实时观察的城堡模型，其中包含了 40 760 个多边形。光照效果是使用热辐射方法预先计算出来的，将比较大表面光照贡献作为光照图。水面反射效果是通过水面来对多边形进行镜像处理并与具有纹理的水面多边形进行混合实现的，城堡中的吊灯和其他元素则用具有纹理的多边形来代替(此图经 Advanced Graphics Applications 公司的 Agata 和 Andrzej Wojaczek(agand@clo.com)授权使用)



彩图 XXXVIII 图中的狼人皮肤使用了 4 种纹理：颜色纹理、用于凸凹效果的法线图、对镜面函数进行编码的一维图、自身阴影图。狼人的皮毛是通过壳与尾翅技术进行扩展而绘制出来的^[488]，8 个同心图层是通过用顶点着色器沿着表面法线对每个图层进行移位生成的，其中每个图层均有一个不同的二维纹理来表示皮毛几何片段。这个纹理在 RGB 通道保存了一个每纹理元素切向量，在 alpha 通道保存着皮毛密度信息，像素着色器使用这个切向量对皮毛进行光照，其中皮毛具有各向异性光照模型。此外，使用另外一个纹理对皮毛进行着色，同时对不应该出现皮毛的地方进行标志。基网格中的每一条边都是由“尾翅”四边形生成，每个尾翅都有纹理，而且会随表面法线与视点之间的角度变化而逐渐淡化，从而产生一个毛茸茸的边界效果。这个狼人模型使用了顶点着色器中的矩阵调色板蒙皮技术，一共有 61 个骨块，而整个场景的每幅画面有 10 万个多边形，在 GeForce4 上的运行速度是 30 fps(此图经 NVIDIA 公司授权使用)



彩图 XLVII 网格简化。左上图所示为由 13 546 个面构成的初始网格，右上图所示为简化成 1 000 个面的网格，左下图剩下了 500 个面，右下图仅剩 150 个面(此图经 Microsoft Research 的 Hugues Hoppe 授权使用)



彩图 XLIX 从较远的地方来看，小兔子的皮毛是用体纹理来绘制的。当靠近小兔的时候，就用具有 alpha 混合的多义线来绘制小兔的皮毛；当靠近小兔很近的时候，轮廓附近的皮毛就用 graftal 尾翅来绘制(此图经 Microsoft Research 的 Jed Lengyel 和 Michael Cohen 授权使用)

推 荐 序

在过去的十多年里,三维计算机图形学的发展非常迅速,作为一种对各类事物进行形象化表示的技术手段,它在各种行业的应用深度与广度也在日益增大。如今,在三维应用(特别是电脑游戏)的推动下,实时图形技术的发展速度非常快,对计算机图形学相关领域产生了很大影响,实时性已经成为三维图形应用性能的一个最重要的指标之一。但是,随着模型和场景复杂程度的急剧增长,实时性的要求也越来越高,依然是很多应用系统(虚拟现实技术、可视化技术等)的主要瓶颈所在。

阅读完本书之后,我深感它有别于一般的三维图形学书籍,有相当的深度,是一本值得期待的书。它不仅对三维图形学中的一些典型、关键的问题给予了详细介绍,同时还对很多新型的技术和研究成果给出了文献出处,极大地方便了我们的查阅。特别需要提及的是,这本书非常富有系统性,它从三维图形绘制管线出发,围绕实时性,详细解说了三维图形学的基础内容(比如纹理贴图技术、真实感光照技术等),对各种基于图像的绘制技术给予了全面介绍,还针对复杂模型和大规模场景的绘制问题,众多加速和优化方法进行了总结,最后还对实时应用中相交和碰撞问题进行了解析。

总的来说,对于希望从事图形学研究与开发的人员,特别是游戏开发人员以及每一位虚拟现实领域或期望进入这一领域的研究人员来说,本书都是一本非常难得的好书。作为一名实时应用领域的研究与开发人员,在此,我衷心地期望本书能早日和三维图形领域的研究与开发人员见面。

迟伟先生简介:伟景行数字城市科技有限公司(GVision Technologies)的创始人,清华大学建筑学院数字城市实验室主任,多年以来一直从事虚拟现实技术的研究与开发。伟景行科技是国内建筑和城市规划领域最早从事虚拟现实可视化技术研究和开发的机构,目前已经成为国际领先的虚拟现实技术整体解决方案供应商和相关服务提供商。伟景行科技于2001年在北京宣布推出国内首套面向建筑和城市规划的虚拟现实仿真系统 CityMaker,新近推出的 Tango 系列高性能图形集群系统,性能达到甚至超过国外同类产品,但是价格更能适应国内各类用户的预算要求。

伟景行科技首席科学家 迟伟

2003年9月

张松海

张松海

译者序

近十年来,计算机图形学领域的发展非常快,新的理论和方法层出不穷,如果对照传统的图形学教材,就会发现有很大变化。一方面,如今的研究和应用重在三维,对场景的真实感提出了非常高的要求,而传统的图形学则集中在二维,粗略涉及三维,几乎没有真实感方面的内容。另一方面,如今图形应用领域的数据规模非常庞大,实时性已经成为可用性的关键,而传统的图形学则没有强调实时性。幸运的是,本书的面世有力地填补了这种缺憾,对近些年来图形学研究领域的最新发展状况进行了很好地总结,更重要的是它对实时计算机图形学给予了系统化,虽然在此之前就已经提出了关于实时计算机图形学的概念,但是并没有专门的论著从系统的高度给予总结和论述。值得一提的是,本书参考了大量最新的图形学资料,书中涉及的参考文献多达 800 多篇,最新的资料也到了 2002 年初,足以见作者的功底和认真程度,以及本书的新颖性。在 2003 年年初,本书因为其创新性被美国《游戏开发者》杂志(Game Developer Magazine)评为 2002 年度“前沿奖(Front Line Award)”,下面是该杂志对本书的原文评价:

"I can't think of any higher praise for a book than the fact that it's always on my desk and within easy reach, and Real-Time Rendering, 2nd Edition is one of the few books that qualifies for that distinction. Real-Time Rendering provides thorough coverage of the current state of the art in real-time graphics, as well as case studies, appendices to help brush up your math skills, and a voluminous source bibliography. There's no doubt that this is a must-have volume for any graphics programmer."

—— Herb Marselas, Ensemble Studios

从上面的评述中,不难看出本书所具有的价值,我非常有幸承担本书的翻译工作。本书的英文原书名为《Real-time Rendering》,在征得相关单位和个人同意的情况下,大胆将这本书译为《实时计算机图形学》。之所以这样翻译,一方面希望本书能与国内的计算机图形学方面的教学之间有一个很好的衔接,另一方面希望图形学界的研究者们能更进一步丰富和完善“实时计算机图形学”这门学科。

在本书的翻译过程中,译者尽可能遵循原文。尤其是对于一些新技术术语,在译法上力求准确,以期术语既能反映其实际含义,又能符合中文习惯。由于译者的翻译水平有限,书中难免有不妥和错误之处,敬请指教。

在此,需要感谢在我国虚拟现实技术领域最早从事相关技术的研究者与实践者——伟景科技的迟伟先生,他在百忙之余阅读了译稿并提出了很多宝贵意见,同时为本书作了推荐序。最后,还要特别感谢北京大学出版社的黄庆生先生,他对本书的翻译自始至终给予了很大的帮助和关注。

普建涛

2003 年 9 月

前 言

在过去的三年间,计算机实时绘制领域的发展异常迅猛,三年前还没有顶点和像素着色器,而如今它们已经成为图形加速器的关键组成部分。本书第一版将多纹理贴图技术作为比较前沿的内容给予了讨论,而在第二版中,新增加的内容有 60% 以上,其中包括大量有关曲面、全局光照、非照片级真实感绘制等方面的内容。此外,还有很多内容在第一版中只进行了简单涉及,而在第二版中则给予了详细介绍。

本书内容主要是关于合成图像的快速生成算法,它们允许用户与虚拟环境进行实时交互。本书重点集中在三维绘制和用户交互方面。虽然对于实时应用来说,三维建模、动画,以及许多其他技术也同样重要,但这些内容并不在本书讨论的范围之列。

计算机实时绘制领域的发展非常快,已经引起了多方面的注意。目前,图形加速器很容易就超过了摩尔定律,三年之间图形加速器的速度提高了 10 倍。与此同时,图形库的发展也经历了从诞生、发展到有可能被淘汰(如 3Dfx Glide API)的历程。正因为如此,除非需要介绍一些基本的概念,本书中大部分内容尽量避免介绍一些专用的 API、芯片、总线,以及存储器体系结构等。本书主要介绍一些常用的算法和比较有生命力的算法,这些算法很可能在将来某个时候会用到。

在阅读本书之前,读者最好具备一些计算机图形学方面的基础知识,还应该对计算机基础,以及编程有一定的了解。本书后面几章特别讲到了有关各种复杂算法的具体实现,如果读者对其中某些部分不是很理解,那么可以略过或者查阅相应的参考文献。通过对本书的学习,可以让读者开阔视野,并能了解到一些知之不多的内容,此外,可以让读者知道未来应该学习的内容和研究方向。

本书并不是无中生有,我们在写此书时尽可能参考了大量的相关资料,同时在大部分章末尾提供了进一步阅读资料与相关资源。此外,我们还花费了大量时间查找参考文献所在的网址,其中大部分文章都可以免费得到,只有居住在好的图书馆附近才能学到最新算法的时代已结束了。

由于实体计算机图形学领域的发展非常迅猛,所以我们提供了一个与本书相关的网址:<http://www.realtimerendering.com/>,其中包括一些教材、演示程序、代码示例、软件库、书中校正等相关链接。

本书的目的和指导思想非常简单,就是试图写一本我们自己的书,这本书不仅在整体上具有系统性,而且包含很多其他介绍性文章所没有的细节内容。我们衷心地希望读者能读到这本书,并能从中受益。

致谢

本书第二版的编写得到了很多人的支持与帮助,他们在百忙之中参与了本书的编写,花费了大量的时间和精力对本书进行改进。在此,我们尤其要感谢下列主要参与者(按字母顺序排列): Michael Abrash、Ian Ashdown、Ulf Assarsson、Chris Brennan、Sébastien Dominé、David Eberly、Cass Everitt、Tommy Fortes、Evan Hart、Greg James、Jan Kautz、Alexander Keller、Mark Kilgard、Adam Lake、Dean Macri、Carl Marshall、Jason L. Mitchell、Paul Lalonde、Thomas Larsson、Kasper Høy Nielsen、Jon Paul Schelter、Jacob Ström、Nick Triantos、Joe Warren、Michael Wimmer 和 Peter Wonka。在这些人中,特别要感谢 NVIDIA 公司的 Cass Everitt 和 ATI 技术有限公司的 Jason L. Mitchell,他们花费了大量时间和精力帮助我们查找所需要的相关资料。同时,还要感谢 Wolfgang Engel,谢谢他允许我们免费使用他即将出版的书《ShaderX》^[210]中的一些内容。

本书的出版还得到其他很多人的帮助,他们和我们一起讨论他们自己的研究工作,提供了相关图片和资料,还为本书各章写小结。在此,我们对他们表示感谢,这些人包括: Jason Ang、Haim Barad、Jules Bloomenthal、Jonathan Blow、Chas. Boyd、John Brooks、Cem Cebenoyan、Per Chrestensen、Hamilton Chu、Michael Cohen、Daniel Cohen-Or、Matt Craighead、Paul Debevec、Joe Demers、Walt Donovan、Howard Dortch、

Mark Duchaineau、Phil Dutré、Dave Eberle、Gerald Farin、Simon Fenney、Randy Fernando、Jim Ferwerda、Nickson Fong、Tom Forsyth、Piero Foscari、Laura Fryer、Markus Giegl、Peter Glaskowsky、Andrew Glassner、Amy Gooch、Bruce Gooch、Simon Green、Ned Greene、Larry Gritz、Joakim Grundwall、Juan Guardado、Pat Hanrahan、Mark Harris、Michael Herf、Carsten Hess、Rich Hilmer、Kenneth Hoff III、Naty Hoffman、Nick Holliman、Hugues Hoppe、Heather Horne、Tom Hubina、Richard Huddy、Adam James、Kaveh Kardan、Paul Keller、David Kirk、Alex Klimovitski、Jason Knipe、Jeff Lander、Marc Levoy、J.P. Lewis、Ming Lin、Adrian Lopez、Michael McCool、Doug McNabb、Stan Melax、Ville Miettinen、Kenny Mitchell、Henry Moreton、Jerris Mungai、Jim Napier、George Ngo、Hubert Nguyen、Tito Pagón、Jörg Peters、Tom Porter、Emil Praun、Kekoa Proudfoot、Bernd Raabe、Ravi Ramamoorthi、Ashutosh Rege、Szymon Rusinkiewicz、Carlo Séquin、Chris Seitz、Jonathan Shade、Brian Smits、John Spitzer、Wolfgang Straßer、Wolfgang Stürzlinger、Philip Taylor、Pierre Terdiman、Nicolas Thibieroz、Jack Tumblin、Fredrik Ulfvies、Ulrich Thatcher、Steve Upstill、Alex Vlachos、Ingo Wald、Ben Watson、Steve Westin、Dan Wexler、Matthias Wloka、Peter Woytiuk、Garrett Young、Borut Zalik、Harold Zatz、Hansong Zhang 和 Denis Zorin。我们还要感谢期刊《ACM Transactions on Graphics》，感谢他们继续为本书提供镜像网站支持。

Alice、Klaus Peters、产品经理 Ariel Jaffee、编辑 Heather Holcombe、校对 Michele M. Richards，以及其他在 A K Peters 的工作人员，他们对本书的出版都尽了最大努力，在此对他们一并表示感谢。

最后，也是最为重要的，就是把最为真挚的感谢送给我们的家人，是他们让我们有大量的时间完成本书的出版。说实话，我们没有想到这本书会花费这么长时间。

Tomas Akenine-Möller

Eric Haines

2002 年 5 月

第一版致谢

本书是在很多人的帮助下完成的，其中为本书内容进行审阅的朋友为本书的出版做出了最大的贡献。这些审阅者欣然提出了他们自己的意见，对本书内容与风格的完善具有非常大的帮助。在此，我们对他们表示感谢，他们分别是（按字母顺序排列）：Thomas Barregren、Michael Cohen、Walt Donovan、Angus Dorbie、Michael Garlael、Stefan Gottschalk、Ned Greene、Ming C.Lin、Jason L. Mitchell、Liang Peng、Keith Rule、Ken Shoemake、John Stone、Phil Taylor、Ben Trumbore、Jorrit Tyberghein，以及 Nick Wilt。

此外，还有许多人为了本书付出了大量时间与精力，他们为本书提供了一些图像、模型，以及其他重要资料，还有人联系了一些可以为我们提供帮助的人。另外，除了上述提到的人之外，我们还要感谢 Tony Barkans、Daniel Baum、Nelson Beebe、Curtis Beeson、Tor Berg、David Blythe、Chas.Boyd、Don Brittain、Ian Bullard、Javier Castellar、Satyan Coorg、Jason Della Rocca、Paul Diefenbach、Alyssa Donovan、Dave Eberly、Kells Elmquist、Stuart Feldman、Fred Fisher、Tom Forsyth、Marty Franz、Thomas Funkhouser、Andrew Glassner、Bruce Gooch、Larry Gritz、Robert Grzeszczuk、Paul Haeberli、Evan Hart、Paul Heckbert、Chris Hecker、Joachim Helenklaken、Hugues Hoppe、John Jack、Mark Kilgard、David Kirk、James Klosowski、Subodh Kumar、André LaMothe、Jeff Lander、Jens Larsson、Jed Lengyel、Fredrik Liliegren、David Luebke、Thomas Lundqvist、Tom McReynolds、Stan Melax、Don Mitchell、André Möller、Steve Molnar、Scott R.Nelson、Hubert Nguyen、Doug Rogers、Holly Rushmeier、Gernot Schaufler、Jonas Skeppstedt、Stephen Spencer、Per Stenström、Jacob Ström、Filippo Tampieri、Gary Tarolli、Ken Turkowski、Turner Whitted、Agata、Andrzej Wojacek、Andrew Woo、Steve Worley、Brian Yen、Hans-Philip Zachau、Gabriel Zachmann 和 Al Zimmerman。我们还要感谢期刊《ACM Transactions on Graphics》，感谢他们为本书提供了一个长期不变的网址。

Alice、Klaus Peters、在 A K Peters 的全体工作人员，尤其是 Carolyn Artin 和 Sarah Gillis，他们为本书的成功面世做了大量出色的工作，在此表示感谢。

最后，对我们的家人和朋友表示深深的谢意，感谢他们在本书的出版过程中始终给予我们的鼓励与支持。

Tomas Möller

Eric Haines

1999年3月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 内容概要	1
1.2 符号和定义	2
1.2.1 数学符号	2
1.2.2 几何定义	4
1.3 进一步阅读资料与相关资源	4
第2章 图形绘制管线	5
2.1 体系结构	5
2.2 应用程序阶段	7
2.3 几何阶段	7
2.3.1 模型和视点变换	7
2.3.2 光照和着色	8
2.3.3 投影	9
2.3.4 裁减	10
2.3.5 屏幕映射	10
2.4 光栅阶段	10
2.5 体验管线	12
2.5.1 应用程序阶段	12
2.5.2 几何阶段	12
2.5.3 光栅阶段	12
2.6 本章小结	12
2.7 进一步阅读资料与相关资源	13
第3章 图形变换	14
3.1 基本变换	15
3.1.1 平移变换	15
3.1.2 旋转变换	15
3.1.3 缩放变换	17
3.1.4 错切变换	18
3.1.5 变换级联	19
3.1.6 刚体变换	19
3.1.7 法线变换	20
3.1.8 逆矩阵的计算	21
3.2 特殊类型的矩阵变换和运算	21
3.2.1 欧拉变换	21
3.2.2 从欧拉变换中提取相关参数	23
3.2.3 矩阵分解	24
3.2.4 绕任意轴的旋转	24
3.3 四元组	26
3.3.1 有关的数学背景	26
3.3.2 四元组的变换	27
3.4 顶点混合	31

3.5 投影.....	34
3.5.1 正交投影.....	34
3.5.2 透视投影.....	36
3.6 进一步阅读资料与相关资源.....	39
第4章 视觉外观.....	40
4.1 光源.....	40
4.2 材质.....	41
4.3 光照和着色处理.....	41
4.3.1 漫反射分量.....	43
4.3.2 镜面反射分量.....	44
4.3.3 环境分量.....	47
4.3.4 光照方程.....	48
4.4 走样和反走样.....	49
4.4.1 采样和滤波理论.....	50
4.4.2 基于屏幕的反走样技术.....	54
4.5 透明度、alpha 值, 以及合成.....	59
4.6 雾化.....	62
4.7 伽玛校正.....	64
4.8 进一步阅读资料与相关资源.....	67
第5章 纹理贴图.....	68
5.1 一般纹理贴图.....	68
5.2 图像纹理贴图.....	74
5.2.1 放大.....	75
5.2.2 缩小.....	76
5.3 纹理缓冲与压缩.....	82
5.4 多通路纹理绘制.....	83
5.5 多重纹理贴图.....	84
5.6 纹理动画.....	85
5.7 纹理贴图方法.....	85
5.7.1 alpha 贴图.....	86
5.7.2 光照贴图.....	86
5.7.3 光泽贴图.....	88
5.7.4 环境贴图.....	88
5.7.5 凸凹贴图.....	96
5.7.6 其他纹理贴图技术.....	102
5.8 进一步阅读资料与相关资源.....	103
第6章 高级光照与着色技术.....	104
6.1 辐射线测量和光度测量.....	104
6.2 颜色测量.....	108
6.3 BRDF 理论.....	111
6.4 BRDF 的应用.....	116
6.4.1 因式分解法.....	116
6.4.2 环境贴图滤波.....	117
6.5 顶点着色器.....	121

6.6	像素着色	125
6.7	着色器语言	132
6.8	运动模糊	134
6.9	场深度	135
6.10	反射	135
6.10.1	平面反射	136
6.10.2	光泽效果	138
6.10.3	曲面反射	139
6.11	折射	139
6.12	阴影	141
6.12.1	平面阴影	142
6.12.2	曲面阴影	148
6.12.3	阴影体	148
6.12.4	阴影图	153
6.12.5	阴影优化	157
6.13	全局光照	157
6.13.1	辐射度算法	157
6.13.2	射线跟踪方法	160
6.14	进一步阅读资料与相关资源	163
第7章	非照片级真实感绘制	164
7.1	toon 着色处理	164
7.2	轮廓边缘绘制	166
7.2.1	表面角轮廓	166
7.2.2	过程几何轮廓	167
7.2.3	通过图像处理生成轮廓	169
7.2.4	轮廓边缘检测	170
7.2.5	混和轮廓处理	172
7.3	其他风格	172
7.4	线条	175
7.4.1	边缘加亮技术	175
7.4.2	多边形边缘绘制	175
7.4.3	隐藏线绘制	176
7.4.4	光晕	176
7.5	进一步阅读资料与相关资源	177
第8章	基于图像的绘制	178
8.1	绘制谱	178
8.2	算法综述	179
8.3	布告板技术	180
8.3.1	对齐于屏幕的布告板	181
8.3.2	面向世界的布告板	182
8.3.3	轴向布告板	184
8.3.4	替代技术	184
8.4	透镜眩光和数霜效果	187
8.5	粒子系统	188
8.6	深度精灵	188