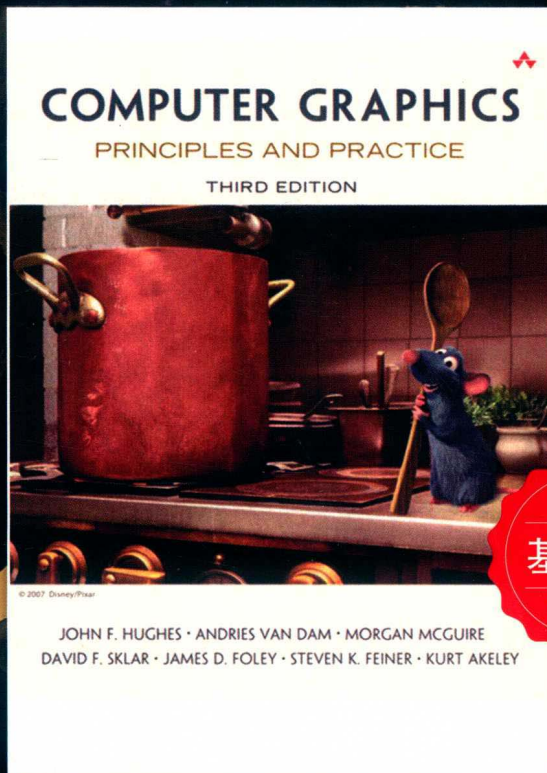


# 计算机图形学 原理及实践

[美] 约翰·F. 休斯 (John F. Hughes) 安德里斯·范·达姆 (Andries van Dam)  
摩根·麦奎尔 (Morgan McGuire) 戴维·F. 斯克拉 (David F. Sklar)  
詹姆斯·D. 福利 (James D. Foley) 史蒂文·K. 费纳 (Steven K. Feiner)  
科特·埃克里 (Kurt Akeley) 著

彭群生 刘新国 苗兰芳 吴鸿智 等译

Computer Graphics Principles and Practice Third Edition



基础篇

算 机 科 学 丛 书

原书第3版

# 计算机图形学 原理及实践

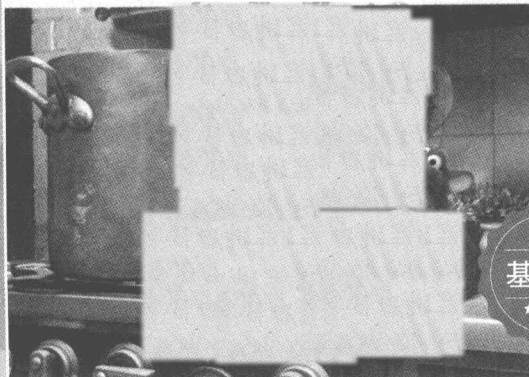
[美] 约翰·F. 休斯 (John F. Hughes) 安德里斯·范·达姆 (Andries van Dam)  
摩根·麦奎尔 (Morgan Mcguire) 戴维·F. 斯科拉 (David F. Sklar) 著  
詹姆斯·D. 福利 (James D. Foley) 史蒂文·K. 费纳 (Steven K. Feiner)  
科特·埃克里 (Kurt Akeley)  
彭群生 刘新国 苗兰芳 吴鸿智 等译

Computer Graphics Principles and Practice Third Edition

COMPUTER GRAPHICS

PRINCIPLES AND PRACTICE

THIRD EDITION



© 2007, Elsevier/Press

JOHN F. HUGHES · ANDRIES VAN DAM · MORGAN MCGUIRE  
DAVID F. SKLAR · JAMES D. FOLEY · STEVEN K. FEINER · KURT AKELEY

基础篇

★★★



机械工业出版社  
China Machine Press

## 图书在版编目 (CIP) 数据

计算机图形学原理及实践 (原书第 3 版) (基础篇) / (美) 约翰·F. 休斯 (John F. Hughes) 等著; 彭群生等译. —北京: 机械工业出版社, 2018.10

(计算机科学丛书)

书名原文: Computer Graphics: Principles and Practice, Third Edition

ISBN 978-7-111-61180-6

I. 计… II. ①约… ②彭… III. 计算机图形学—教材 IV. TP391.411

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 235230 号

本书版权登记号: 图字 01-2013-7580

Authorized translation from the English language edition, entitled Computer Graphics: Principles and Practice, Third Edition, 9780321399526 by John F. Hughes, Andries van Dam, Morgan Mcguire, David F. Sklar, James D. Foley, Steven K. Feiner, Kurt Akeley, published by Pearson Education, Inc, Copyright © 2014 Pearson Education, Inc.

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 Pearson Education, Inc.

Chinese simplified language edition published by Pearson Education Asia Ltd., and China Machine Press Copyright © 2019.

本书中文简体字版由 Pearson Education (培生教育出版集团) 授权机械工业出版社在中华人民共和国境内 (不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区) 独家出版发行。未经出版者书面许可, 不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

本书封底贴有 Pearson Education (培生教育出版集团) 激光防伪标签, 无标签者不得销售。

本书是计算机图形学领域公认的经典教材, 与上一版相比, 新版从内容到形式都有大幅变化。为了便于教学, 中文版分为基础篇和进阶篇两册, 此为 基础篇, 包括原书第 1 ~ 16 章, 内容涵盖图形学基本概念、主要的图形生成算法、简单的场景建模方法、2D 和 3D 图形变换、实时 3D 图形平台等。

本书可作为高等院校计算机相关专业学生的教学用书, 对业界研究人员和技术人员也有很大的参考价值。

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: 朱秀英

责任校对: 李秋荣

印 刷: 北京市兆成印刷有限责任公司

版 次: 2019 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 185mm × 260mm 1/16

印 张: 26 (含 0.5 印张彩插)

书 号: ISBN 978-7-111-61180-6

定 价: 99.00 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 1-9 左图所画是一幅法向量图。图中每一点的  $x$ 、 $y$  坐标对应于球面上一点的纬度和经度。每个点处存储的 RGB 颜色分量决定了球面上对应点法向量将如何倾斜。淡紫色表示无倾斜，而四周的 4 个条纹表示该点处的球面法向量将分别朝上、朝下、朝左、朝右倾斜。右图中法向映射生成的形状看上去似乎凹凸不平，但从侧影轮廓线可看出，表面实际上是光滑的。注意，它采用了天空的镜面映像作为“颜色纹理”

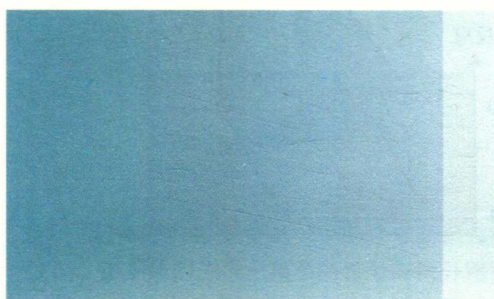


图 1-13 每条窄带为一种颜色，但每条窄带的左侧窄带颜色更亮，其右侧窄带稍暗，从而使得各窄带之间的分界线被凸显出来，该效应称为马赫带效应

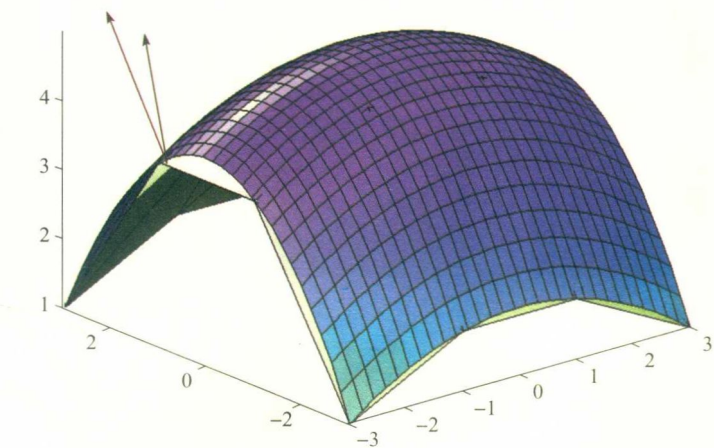


图 1-17 一个半透明的光滑表面及其法向量（红色）。该表面可采用一个多边形网格（白色）来近似，图中的绿色法向量为多边形网格在相应点处的法向量

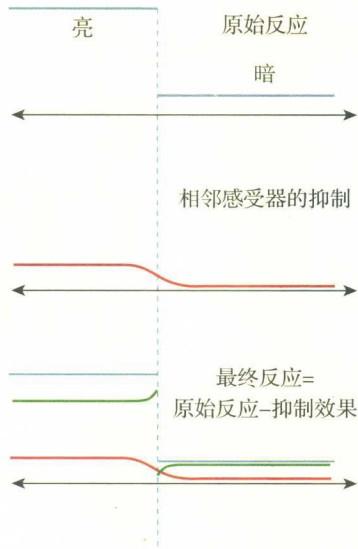


图 5-6 明暗区域感受器的原始反应（上面，蓝线表示），相邻感受器的抑制效果（中间，红线表示），以及下面绿线表示的两者差值，即实际反应。可以看到，用虚线表示的明暗边界的对比度增强

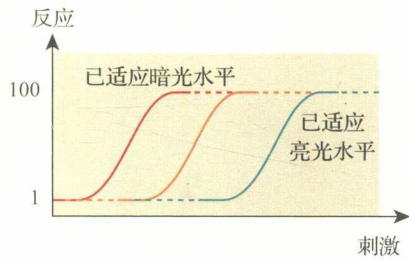


图 5-7 已适应暗光的眼睛对低刺激水平光饱和度的反应；已适应亮光的眼睛无法检测到很多弱光刺激间的差异

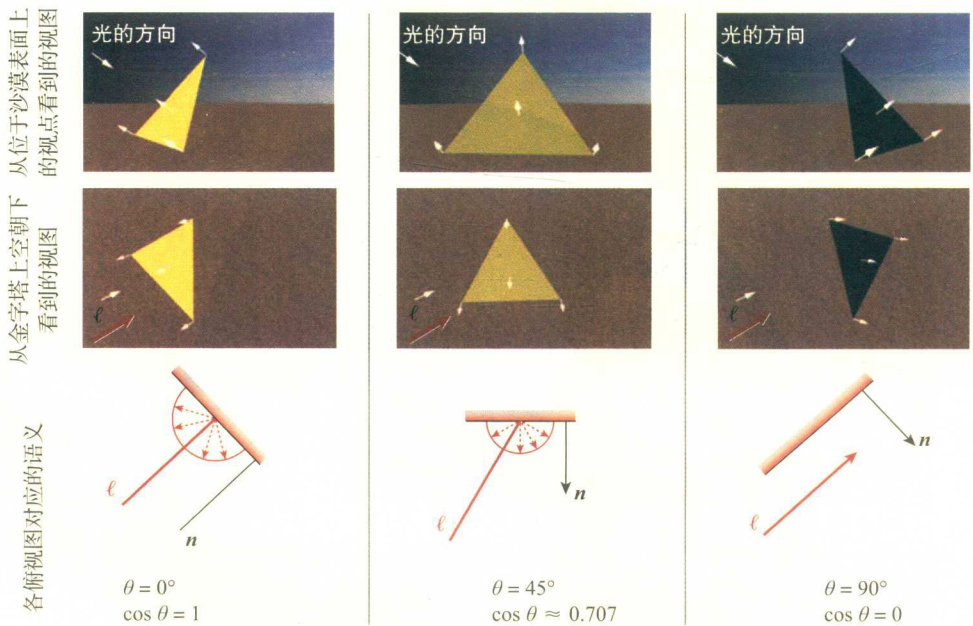


图 6-15 基于朗伯余弦定律计算不同  $\theta$  角下表面的亮度

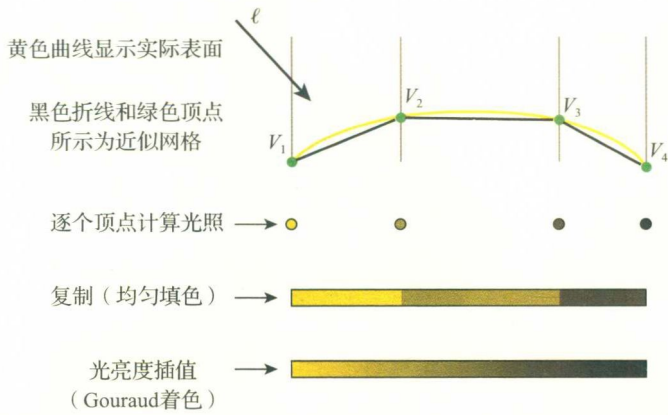


图 6-23 均匀着色方法和 Gouraud 着色方法的比较，两种不同的方法均用来确定顶点间各点的光亮度值（顶点的光亮度值已预先计算）

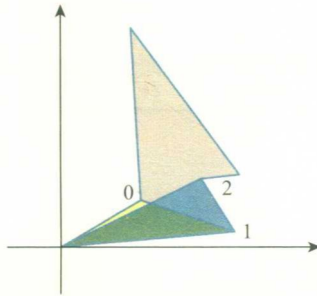


图 7-22 浅黄色三角形（包含原点和顶点 0、1）的符号面积为负，蓝色三角形（包含原点和顶点 1、2）为正。接下来的三个三角形的符号面积分别为负、正和负，它们的符号面积的累加结果即为灰色多边形的面积

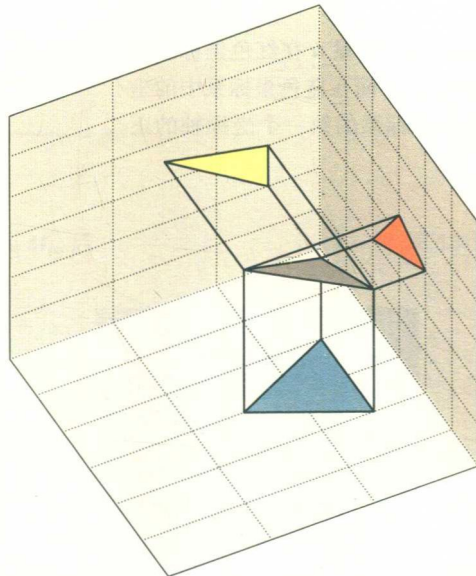


图 7-23 灰色三角形朝各坐标平面投影，得到 3 个三角形，橙色、黄色和蓝色三角形的符号面积即为灰色三角形法向量的坐标分量

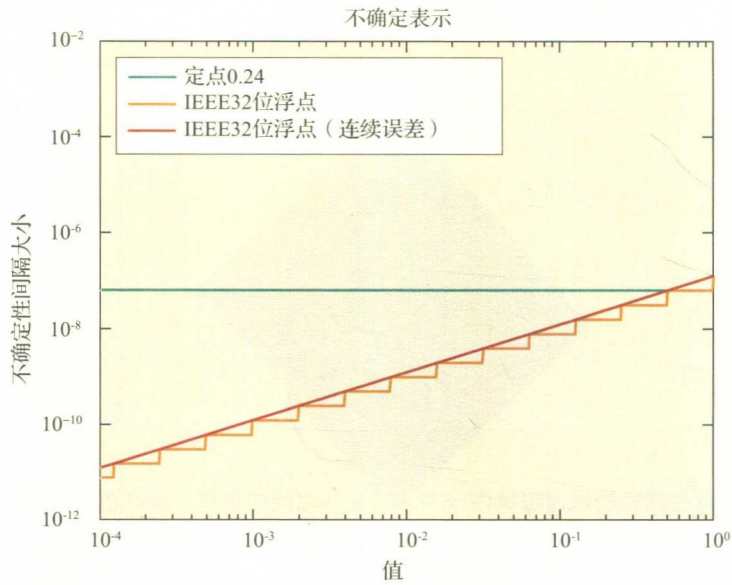


图 14-4 用 8.24 位定点和 32 位浮点表示的相邻实数在范围  $[10^{-4}, 1)$  的距离 [AS06]。其中浮点表示精度随幅度变化。© 2006 ACM 授权许可

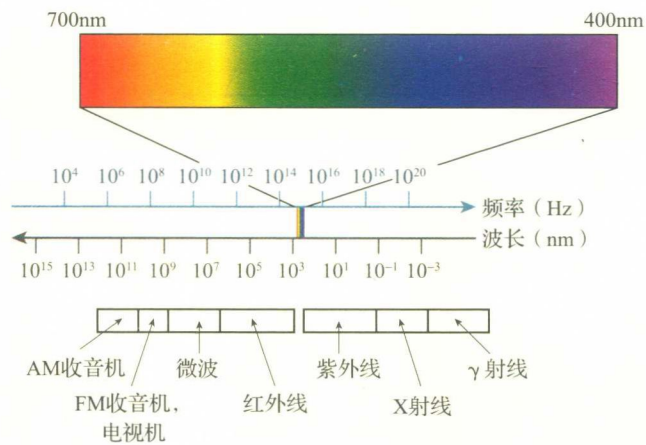


图 14-9 可见光谱是整个电磁波频谱的一部分。我们所感知的源于某一电磁波的光的颜色是由它的频率决定的。而频率和波长的关系取决于电磁波传播时所通过的介质 (由 Leonard McMillan 提供)

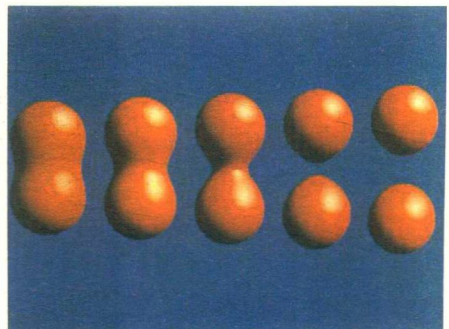
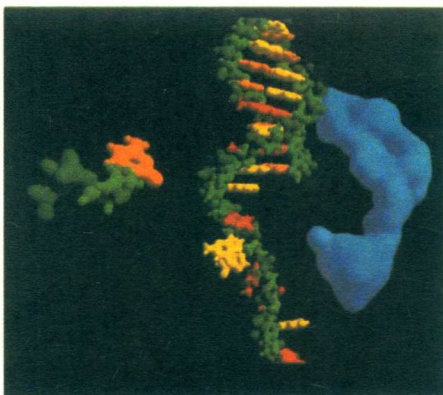


图 14-16 水滴状模型，每一滴都由多个 3D 高斯密度函数之和的等值线定义 [Bli82a] (原图由 James Blinn©1982 ACM, Inc. 所有, 获准转载)

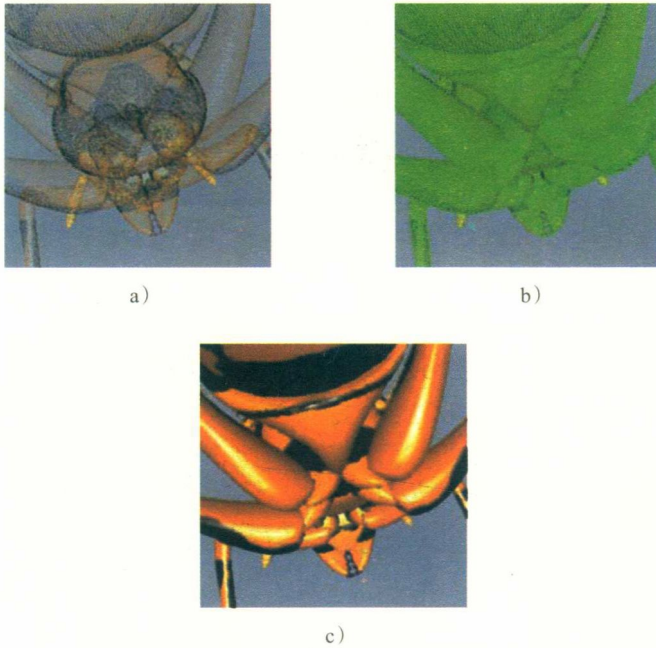


图 14-19 a) 一个附加了曲面属性的点集。b) 按当前分辨率对点进行绘制时留下的空隙。c) 由原始点集的抛雪球插值所定义的曲面 [ PZvBG00 ] (授权: 计算机科学 Wang 讲座教授 Hanspeter Pfister 提供, ©2000ACM)

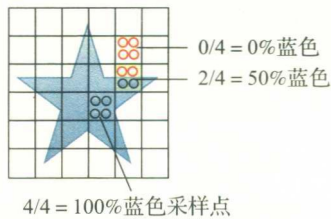


图 14-27 在低分辨率像素网格上的理想蓝色向量星形状。圆点代表要计算覆盖率的采样点



图 15-4 视线方向的可视化结果

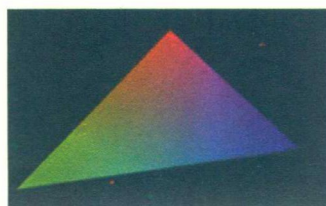


图 15-6 单个三角形场景，其颜色取为交点的重心坐标，通过这种可视化来调试求交代码



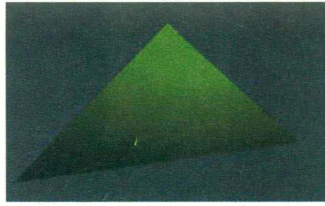


图 15-7 一个绿色的朗伯三角形

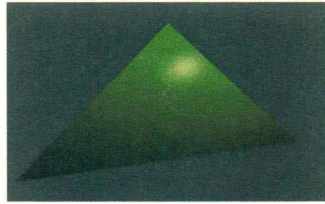


图 15-8 使用归一化的 Blinn-Phong BSDF 绘制的三角形

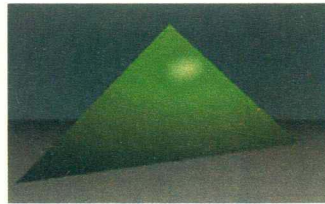


图 15-9 绿色三角形场景中添加了由两个灰色三角形构成的地“平面”。同时引入绿色三角形的背面

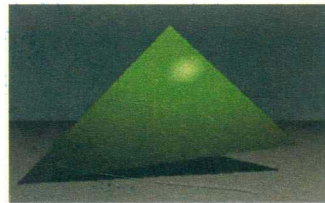


图 15-10 由四个三角形组成的场景，其中绿色三角形是双面的，采用 `visible` 函数生成光线投射阴影

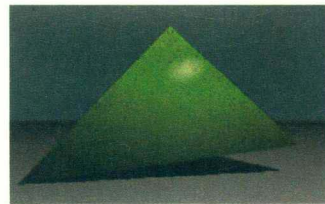


图 15-11 绿色三角形上的麻点。产生这种瑕疵的原因是由于阴影探测光线交于当前正在着色的三角形的背面，本质上属于自身阴影

文艺复兴以来，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势；也正是这样的优势，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，计算机学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的计算机产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对计算机教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其计算机科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀计算机教材将对我国计算机教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与Pearson、McGraw-Hill、Elsevier、MIT、John Wiley & Sons、Cengage等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从它们现有的数百种教材中甄选出Andrew S. Tanenbaum、Bjarne Stroustrup、Brian W. Kernighan、Dennis Ritchie、Jim Gray、Afred V. Aho、John E. Hopcroft、Jeffrey D. Ullman、Abraham Silberschatz、William Stallings、Donald E. Knuth、John L. Hennessy、Larry L. Peterson等大师名家的一批经典作品，以“计算机科学丛书”为总称出版，供读者学习、研究及珍藏。大理石纹理的封面，也正体现了这套丛书的品位和格调。

“计算机科学丛书”的出版工作得到了国内外学者的鼎力相助，国内的专家不仅提供了中肯的选题指导，还不辞劳苦地担任了翻译和审校的工作；而原书的作者也相当关注其作品在中国的传播，有的还专门为其书的中译本作序。迄今，“计算机科学丛书”已经出版了近500个品种，这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也被越来越多实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着计算机科学与技术专业学科建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外计算机教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方式如下：

华章网站：[www.hzbook.com](http://www.hzbook.com)

电子邮件：[hzjsj@hzbook.com](mailto:hzjsj@hzbook.com)

联系电话：(010)88379604

联系地址：北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码：100037



计算机图形是信息社会的重要支撑技术之一。在众多的计算机图形学教材中, J. D. Foley 等人编写的《Computer Graphics: Principles and Practice》是公认的经典教材。早在 1982 年, J. D. Foley 就和 A. van Dam 合作出版了《Fundamentals of Interactive Computer Graphics》, 1990 年, 他们继续与 Steven K. Feiner 和 John F. Hughes 合作, 编写了该系列教材的第 2 版。1995 年, 作者将第 2 版中的所有实例和算法程序从 Pascal 语言改写成 C 语言。我国学者唐泽圣、董士海等将该版教材译成中文版《计算机图形学原理及实践: C 语言描述》。由于第 2 版教材概念清晰, 叙述深入, 注重实践环节和能力培养, 因此被广大图形学教师作为教材或作为必备的教学参考书, 产生了很大的影响。

在过去的 20 年间, 图形学取得了飞速的发展。基于 CPU 的传统图形流水线(又称为 2D 显卡)被基于 GPU 的 3D 图形流水线所取代。与此同时, 三角形网格表面成为图形系统中景物表面的主要表示形式。计算机图形学与数字图像处理、计算机视觉等学科日益交叉, 形成了基于图像的绘制、增强现实等新的学科方向。为了反映图形学的新发展, 由第 2 版 4 位作者中的 John F. Hughes 领衔, 作者增加至 7 人, 于 2013 年 7 月出版了本系列教材的第 3 版。

新版教材由 38 章组成。与第 2 版(共 21 章)相比, 新版从内容到形式都有巨大的改变。第一, 传统的线画图形内容, 包括直线和圆弧的生成算法、线裁剪、线消隐、基于扫描线的多边形生成等经典算法已不再是计算机图形学关注的重点, 因此不再列为本书的教学内容。第二, 三角形网格面由于便于 GPU 处理, 因而成为图形学研究的热点。本书专辟章节介绍三角形网格面的表示和简化、多层次网格的构建和传输以及细分曲面的生成。第三, 新增了若干图像处理的内容, 包括常用的图像格式、图像信号的采样与重建、图像的自适应缩放等。第四, 由于计算机图形学是一门面向应用的学科, 本书重点讲述了图形学中各种常用的近似模型及其表示方法、基于 CPU 的图形流水线的组成以及各种实用的实时 3D 图形平台。由于新版教材内容丰富, 为了便于安排教学, 我们将中文版划分为基础篇和进阶篇两册出版。其中基础篇为原书的第 1~16 章, 内容覆盖了基本的图形学概念、主要的图形生成算法、简单的场景建模方法、2D 和 3D 图形变换、实时 3D 图形平台等。进阶篇则讲述与图形生成相关的图像处理技术、复杂形状的建模技术、表面真实感绘制、表意式绘制、计算机动画、现代图形硬件等。

翻译如此一本经典教材无疑是一件极为艰巨的任务, 尽管我们有翻译 D. F. Rogers 的《Procedural Elements of Computer Graphics》第 1、2 版的经验, 但面对这本久负盛名的教材, 我们仍感到压力巨大。在翻译中, 我们采取了分工合作的方法。参加基础篇各章初稿翻译的有浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室冯结青、陈为, 浙江师范大学苗兰芳, 武汉大学肖春霞等。浙江大学彭群生翻译了前言并对第 1、5、7、8、9 章的翻译初稿进行了审核和修改。浙江师范大学苗兰芳(第 2、10、11、12、13 章), 浙江大学刘新国(第 3、4、6

章)、吴鸿智(第 15、16 章)、廖子承(第 15 章),杭州电子科技大学吴向阳(第 14 章)参加了对所列各章翻译初稿的审核和修改。浙江工业大学陈佳舟对插图中的文字进行了翻译。全书最后由彭群生逐章仔细校对,修改定稿。

由于译者的水平和学识有限,译文中翻译不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

译者

2018 年 10 月

本书面向学生、研究人员和从业人员，介绍计算机图形学的许多重要概念和思想。其中一些概念读者并不陌生，它们早已出现在广为流行的学术出版物、技术报告、教科书和行业报刊中。在某个概念出现一段时间后再将其写入教科书的好处是，人们可以更充分地理解它的长远影响并将其置于一个更大的背景中予以领悟。本书将尽可能详细地介绍这些概念(当然也略过了一些曾经火热但现在已不再重要的概念)，并以一种清晰、流畅的风格将它们呈现给初学者。

本书属于第二代图形学教科书：我们并不将之前的所有工作全部认定为天然合理的，而是按今天的理解重新审视它们，进而更新其原有的陈述方式。

甚至一些最基本的问题也可能变得非常棘手。举例来说，假如要设计一个适用于低光照环境(如电影院的暗环境)的程序。显然，我们不能采用亮屏幕显示器，这意味着在显示程序中采用亮度对比来区分环境中的不同对象不再适宜。也许可以改用彩色显示，但遗憾的是，在低光照环境中人们对颜色的感知同样有所降低，某些颜色的文字要比其他颜色更易读。在这种情况下，光标是否仍容易被用户看到呢？一种简单的应对方式是利用人眼对运动的感知能力，让光标持续抖动。于是，一个看似简单的问题最后涉及交互界面设计、颜色理论以及人类感知等领域。

尽管上述例子很简单，但仍隐含了某些假设：采用图形方式输出(而不是通过触觉或封闭良好的耳机来输出)；显示设备既非常规的影院屏幕，也不是头盔显示器。其中也包含了一些显式的假设，例如采用光标(也有一些用户界面不使用光标)。上述每一种假设都是对用户界面的一种选择。

遗憾的是，这种多方面内容相互交织的关系使得我们不可能完全按照某种顺序来讲述各主题，而且还能很好地介绍它们的研究动因和背景，也就是说，这些主题无法以线性方式展开。也许，我们可以先介绍它们涉及的所有相关的数学、感知理论或其他内容，总之，将较为抽象的内容和主题放在前面介绍，然后再介绍图形学应用。尽管这种内容组织方式可能便于参考(读者很容易找到讲述一般化向量叉积的有关章节)，但对一本教科书而言，其效果并不好，原因是那些涉及主题研究动因的应用都要等到书的最后才会介绍。另一种展开方式是采取案例研究的思路，分别介绍各种不同的任务(难度不断增大)，然后根据问题的需要讲述相关内容。在某些情况下，这确实是一种自然的内容演绎方式，但难以对各主题做出整体性、结构化的呈现。本书是这两种方式的折中：开始部分介绍了广泛使用的数学知识和常规的符号标记方式，然后逐个主题展开内容，根据需要补充介绍必要的数学工具。熟悉数学的读者完全可以跳过开始部分而不致错过任何图形学知识。其他人则可从这些章节中获益良多。教师授课时可根据需要对其进行取舍。基于主题的章节安排方式可能会导致内容上的重复。例如，本书从不同的细节层次对图形流水线进行了多次讨论。与其让读者回头参考之前的章节，有时我们会再次陈述部分内容，使对该问题的讨论更为流畅。毕竟让读者返回 500 页之前去查看一幅图并非令人惬意的事。

对本教材的作者来说，另一个挑战是选材的广度。本书的第 1 版确实覆盖了当时图形学出版物中的大部分内容，第 2 版至少也约略提到了其中大部分的研究工作。本版教材不

再追求内容的覆盖度，理由很简单：当本书第 2 版出版时，我们一只手就能拿起 SIGGRAPH 会议的全部论文集(这些论文几乎包含了图形学领域的代表性工作)；如今，SIGGRAPH 会议的全部论文集(仅仅是许多图形学出版物中的一种)叠在一起高达数米。即使是电子版的教材也无法将全部内容塞进 1000 页中。本书这一版旨在为读者指明在哪里可以找到和复制当今的大部分 SIGGRAPH 论文。下面是几点说明：

- 第一，计算机图形学与计算机视觉的交叉面越来越大，但这并不能构成让我们将本书写成计算机视觉教材的理由，尽管一些有该领域丰富知识的人已经这样做了。
- 第二，计算机图形学涉及编程，尽管许多图形学应用题目很大，但本书并没有试图讲授编程和软件工程。当然，在书中我们也会简要讨论一些专门针对图形学的编程方法(尤其是排错)。
- 第三，许多图形学应用都提供了用户界面。在编写本书时，大多数界面均基于 Windows 操作系统，采用菜单和鼠标进行交互。不过基于触觉的交互界面正变得越来越常见。交互界面的研究曾经是图形学的一部分，但如今已成为一个独立的领域(尽管它仍和图形学有很大的交叉)。我们假定读者在编写含用户界面的程序方面已具备了一些经验，因此本书将不再对它们做深入讨论(除了其实现过程与图形学密切关联的 3D 界面外)。

毋庸置疑，图形学领域的研究论文区别很大：有些涉及很多的数学表述；有些介绍的是一个大规模的系统，涉及各种复杂的工程因素的权衡；还有些涉及物理学、色彩理论、地形学、摄影学、化学、动物学等各个学科的知识。我们的目标是让读者领会这些论文中的图形学贡献，而其他的相关知识则需要读者在课外自行学习。

## 历史上的方法

在历史上，图形学大多为一些面向当时急需解决的问题的专门方法。这么说并非对那些曾经使用这些方法的人有所不敬，他们手头有任务，必须想办法完成。其中一些解决方法中包含了重要的思想，而其他时候这些解决方法不过是让任务得以完成的途径。但这些方法无疑对后面图形学的发展产生了影响。举例来说，大多数图形系统中采用的图像合成模型均假定图像中存储的颜色可以线性方式融合。但实践中，图像中存储的颜色值与其显示的光亮度之间却呈非线性关系，因此颜色的线性组合并不对应光亮度的线性组合。两者之间的差别一直到摄影工作室试图将现实场景的照片与计算机生成的图像合成时才为人们所注意，即上述图像合成方式并不能生成正确的结果。此外，尽管一些早期方法描述十分原则化，但其关联的程序却对实现的硬件做了一些假设，几年后，这些假设不再适用，当读者看到这些实现细节时会说：“这不是过时的东西吗，与我们毫不相关啊！”于是，就忽略了这些研究工作中某些仍旧重要的思想。更多的时候，研究人员只是在重新利用其他学科运用多年的那些概念和方法。

因此，我们不打算按照图形学发展的年代顺序来讲述。正如物理学教程并不从亚里士多德的动力学讲起，而是直接介绍牛顿动力学(更好的是一开始就讲述牛顿动力学系统的局限性，将平台搭建在量子力学的基础上)，我们将直接从对相关问题的最新理解入手，当然也会介绍与之相关的各种传统研究思路。同时，我们还会指出这些思路的源头(可能不为大家所熟悉)，例如，关于 3D 多边形法向量的 Newell 公式即 19 世纪初期的 Grassmann 公式。我们希望，指出这些参考源头能增加读者对许多早已开发并有望应用于图形学的方法的了解。

## 教学方法

日常生活中图形学最令人瞩目的应用是视频游戏中的 3D 形象以及娱乐行业和广告中的特效。然而，我们每天在家庭电脑和手机中的交互也都离不开计算机图形学。这些界面之所以不那么显眼也许是由于它们太成功：其实，最好的界面是你完全忘记了它的存在。虽然“2D 图形学要比 3D 图形学简单”这句话听上去很诱人，但是 3D 图形学不过是它的一个稍复杂的版本而已。2D 图形学中的许多问题，诸如在方形发光单元(像素)组成的屏幕上如何最佳地显示一幅图像，或者如何构建高效且功能强大的界面等，都和绘制 3D 场景图像时遇到的问题一样困难。而 2D 图形学中通常采用的简单模型在怎样最佳地表示颜色和形状等方面也可能对学生造成误导。因此，我们将 2D 和 3D 图形学的讲述交织在一起，分析和讨论两者共同的敏感问题。

本书设置“黑盒”的层次与众不同。几乎每一本计算机科学的书都需要选择一个合适的层次来讲述计算机的有关内容，该层次应便于读者理解和掌握。在图形学教科书中，我们同样需要选择一个读者将会遇到的图形学系统。也许，在输入某些指令后，计算机的硬件和软件就能在屏幕上生成一个彩色三角形。但这一切是怎样发生的？其中的细节与图形学的大部分内容并无关联。举例来说，假如你让图形系统绘制一个位于屏幕可显示区域下方的红色三角形，将会发生什么？是先确定那些应置为红色的像素的位置然后因其不在屏幕显示区域内而将其抛弃？还是图形系统尚未开始计算任何像素值之前因发现该三角形位于屏幕之外而终止后面的过程？从某种意义上说，除非你正在设计一块图形卡，否则上述问题并不那么重要，它并非一个图形系统用户所能控制的。因此，我们假定图形系统能够显示像素的值，或画出三角形和直线，而不考虑该过程是怎样实现的。具体实现的细节将在光栅化和图形硬件的相关章节中介绍，但因其大都超出了我们的控制范围，诸如裁剪、直线反走样、光栅化算法等内容均将推迟到其后面章节予以介绍。

本书教学方法的另一点是试图展示相关的思想和技术是怎样浮现出来的。这样做无疑会增长篇幅，但我们希望会有所帮助。当学生需要独立推导自己的算法时，他们遇到过的研究案例可能会为当前问题提供解决思路。

我们相信，学习图形学最好的途径是先学习其背后的数学。与直接跨入图形学应用相比，先学习较为抽象的数学确实会延长你开始学习最初的几个图形算法所需的时间，但这个代价是一次性的。等你学习到第 10 个算法时，先前的投入将会完全得到补偿，因为你会发现新的方法组合了之前已经学过的许多内容。

当然，阅读本书表明你有兴趣编写一个绘图程序。因此，本书一开始就引入多个题目并直接给出解决方案，然后再回过头仔细讨论更广泛的数学背景。书中大部分篇幅都集中于其后面的处理上。在打下必要的数学基础后，我们将结束上述题目，延伸到其他的相关问题并给出求解思路。由于本书聚焦于基础性的原则，因此并未提供这些方法的实现细节。一旦读者领会了基础原则，每一个求解思路的具体算法就会了然于胸，并将具有足够的知识来阅读和理解其原始参考文献中给出的论述，而不是基于我们的转述。我们能做的是采用更为现代化的形式来介绍那些早期的算法，当读者回头阅读原始文献时，能比较容易理解文献中词汇的含义及其表达方式。

## 编程实践

图形学是一门需要自己动手实践的学科。由于图形产业为观众提供的是视觉类信息以

及相关的交互手段，图形工具也经常用来为新开发的图形算法排错。但这样做需具备编写图形程序的能力。如今已有许多不同的方法可在计算机上生成图像，对本书中介绍的大部分算法而言，每一种方法都有其优点。尽管将一种编程语言和库转化为另一种编程语言和库已成为常规，但从教学的角度，最好是采用单一编程语言以便学生可以聚焦于算法的更深层面。对本书提供的所有练习，我们建议使用 WPF(Windows Presentation Foundation, 一种广泛使用的图形系统)完成。为此，我们编写了一段基本且易于修改的程序(称为 test bed)以便学生使用。对于一些不适于采用 WPF 的情形，我们通常采用 G3D(一个公共的图形库，由本书的一位作者维护)。大多数情况下，我们使用伪代码，因为它提供了一种简洁的算法表述方式，而且，绝大多数算法的实际代码(按你所选语言编制)均可从网上下载，因此将其编入书中并无意义。注意代码形成过程中的变化，在有些情形中，它的最初版本只是一个非正式的框架，然后逐步发展成采用某种语言编写的接近于完成的程序，因此对其之前的版本进行语法检查并无意义，可以免去。有时，我们希望代码能反映出数学的推导过程，故会采用诸如  $x_R$  之类的变量名，这使得其看上去如同数学表达式。总的来说，伪代码并非正式编程语言，我们用它来表达宏观的思路而非算法的细节。

本书并非一本讨论如何编写图形程序的书，也不讨论应用图形程序中的细节。例如，读者无法从本书中找到有关 Adobe 最新图像编辑软件存储图像最好方式的任何提示。但只要读者领会了书中的概念并具备足够的编程能力，就一定能编写图形程序，并知道如何应用这些程序。

## 原则

在本书中，我们列出了一些计算机图形学的原则，希望对读者未来的工作有所帮助。也收入了一些有关图形学实践的章节，如怎样运用当今的硬件来逼近理想解，或者更快速地计算出实际解。虽然这些实现方法是面向当今硬件的，但对未来也有价值。也许十年后不能直接照搬这些实现方法，但其中蕴含的算法在多年内仍有意义。

## 预备知识

本书大部分内容所需的预备知识并未超出有一定实际能力的理工类在校生现有知识的范围，如：编写面向对象程序的能力；掌握微积分工具；对向量有所了解(可能是从数学、物理学甚至是计算机科学的课程中学到的)；至少遇到过线性变换等。我们也希望学生编写过一两个含有 2D 图形对象(如按钮、复选框、图标等)的程序。

本书一部分内容会涉及更多的数学知识，但在有限的篇幅内讲授这些知识是不现实的。一般而言，这些稍显复杂的数学知识将被精心安排于少数章节内，而这些章节更适合作为研究生的课程。它们和某些涉及一定深度数学知识的练习均注有“数学延伸”(◇)标记。同样，涉及计算机科学中较深概念的内容注有“计算机科学延伸”(◆)标记。

书中某些数学表述可能令那些曾在其他地方接触过向量的人感到困惑。本书的第一作者是一位数学博士，当第一次看到图形学研究论文中涉及数学问题的表述时，他也同样感到奇怪。本书试图清晰和彻底地解释它们与标准的数学表述之间的不同之处。

## 讲授本书的方式

本书可作为一个学期或一个学年的本科生课程的教科书，或者作为研究生课程的参考书。作为本科生的教学用书时，其中较深的数学内容(如仿重心坐标标架、流形网格、球



面调和函数等)可以略去,而集中于几何模型的建模与显示,各种变换的数学原理,相机的数学描述,以及标准的光照、颜色、反射率模型及其局限性等基础问题上。也应介绍一些基本的图形学应用和用户界面,讨论在设计中如何对各种因素进行权衡和折中以使其更有效率,也许最后再介绍几个特殊的主题,如怎样创建一段简单的动画、编写一个基础的光线跟踪程序等。上述内容对一学期的课程而言可能太多,即使是一学年的课程,也不可能覆盖书中的每一节,未讲授的内容可供有兴趣的学生课后学习。

安排较满的一学期课程(14周)可讲授下述内容:

1. 绪论和一个简单的2D程序:第1、2、3章。
2. 对绘制中几何问题的介绍,进一步的2D和3D程序:第3、4章。视觉感知和人类的视觉系统:第5章。
3. 2D和3D几何建模——网格、样条、隐函数模型:7.1~7.9节,第8、9章,22.1~22.4节,23.1~23.3节,24.1~24.5节。
4. 图像,第一部分:第17章、18.1~18.11节。
5. 图像,第二部分:18.12~18.20节、第19章。
6. 2D和3D变换:10.1~10.12节、11.1~11.3节、第12章。
7. 取景、相机以及post-homogeneous插值:13.1~13.7节、15.6.4节。
8. 图形学中的标准近似:第14章、某些相关的章节。
9. 光栅化与光线投射:第15章。
10. 光照与反射:26.1~26.7节(26.5节或可不选)、26.10节。
11. 颜色:28.1~28.12节。
12. 基本反射模型,光能传输:27.1~27.5节、29.1~29.2节、29.6节、29.8节。
13. 递归光线跟踪细节,纹理:24.9节、31.16节、20.1~20.6节。
14. 可见面判定和面向加速的数据结构,更前沿的图形绘制技术:第31、36、37章中的相关节。

不过,并非上面提到的每一节中的所有内容都适合于初学者。

另外,也可参考作为本科生基于物理的绘制课(12周课程)的教学大纲。该课程按离线绘制到实时绘制的原则安排授课内容。可深入到其中的核心数学和光线跟踪背后的辐射度学,然后回过头来再介绍计算机科学中提升算法可扩展性和性能的有关方法。

1. 绪论:第1章。
2. 光照:第26章。
3. 感知,光能传输:第5、29章。
4. 网格和场景图简介:6.6节、14.1~14.5节。
5. 变换:第10、13章(简要介绍)。
6. 光线投射:15.1~15.4节、7.6~7.9节。
7. 面向加速的数据结构:第37章、36.1~36.3节、36.5~36.6节、36.9节。
8. 绘制理论:第30、31章。
9. 绘制实践:第32章。
10. 颜色和材质:14.6~14.11节,第27、28章。
11. 光栅化:15.5~15.9节。
12. 着色器和硬件:16.3~16.5节,第33、38章。

注意上述授课内容并非按各章顺序排列。在编著本书时,我们试图让大多数章的内容