



ELSEVIER  
爱思唯尔

# Physically Based Rendering, From Theory to Implementation

Second Edition

## 物理渲染 从理论到实现 (第2版)

[美] Matt Pharr Greg Humphreys — 著

李秋霞 — 译

清华大学出版社

# 物理渲染——从理论到实现

(第2版)

[美]Matt Pharr, Greg Humphreys 著

李秋霞 译

清华大学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书详细阐述了与物理渲染相关的高效解决方案,主要包括几何形状和转换,图元和相交加速计算,颜色和辐射度,相机模型,采样和重构,反射模型,材质、纹理、体散射、光源、蒙特卡罗积分、光线传输等内容。此外,本书还提供了相应的算法、代码以及伪代码,以帮助读者进一步理解相关方案的实现过程。

本书适合作为高等院校计算机及相关专业的教材和教学参考书,也可作为相关开发人员的自学教材和参考手册。

Physically Based Rendering, From Theory to Implementation, 2e

Matt Pharr, Greg Humphreys

ISBN: 9780123750792

Copyright © 2010 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by Elsevier (Singapore) Pte Ltd Press and Tsinghua University Press.

Copyright © 2017 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd and Tsinghua University Press. All rights reserved.

Published in China by Tsinghua University Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd.. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授予清华大学出版社在中国大陆地区(不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区)出版与发行。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2014-3937

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

物理渲染——从理论到实现:第2版/(美)马特·法尔(Matt Pharr), (美)格雷格·汉弗莱斯(Greg Humphreys)著;李秋霞译. —北京:清华大学出版社,2016

书名原文:Physically Based Rendering: From Theory to Implementation, 2nd Edition

ISBN 978-7-302-44981-2

I. ①物… II. ①马… ②格… ③李… III. ①计算机图形学 IV. ①TP391.411

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第216087号

责任编辑:钟志芳

封面设计:刘超

版式设计:牛瑞瑞

责任校对:王云

责任印制:沈露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:203mm×260mm

印 张:57.25

字 数:1500千字

版 次:2016年12月第1版

印 次:2016年12月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:139.00元

# 译者序

作为 CG 重量级巨著，本书在图形学业界颇有影响。

渲染操作可视为基于某一 3D 场景的 2D 图像处理行为，显然，该任务涉及较为广泛的内容，且包含多种转换实现方式。物理技术可对现实场景进行模拟，并通过物理原理对光线和物质之间的交互行为进行建模。在物理渲染中，真实感通常为首要目标，相比较而言，交互式渲染则追求高性能和低延迟，非照片模拟渲染则关注于写意性和表达性。

本书内容基于光线跟踪的物理渲染系统 (pbtr)，大多数书籍仅讨论算法和理论知识，并辅以少量的代码片段。相比较而言，本书则将理论与实践完全结合，并展示了一款全功能渲染系统。

pbtr 以及本书内容主要讨论照片级渲染，并可通过多种不同方式定义为图像生成任务，且与相机所拍摄的照片基本一致；或者对应图像生成任务具有与人眼相同的响应机制。除此之外，照片级图像对于影视特效工业也十分重要，其原因在于，计算机生成的图像须与真实世界环境实现无缝混合。在娱乐应用中，全部图像均为合成结果，真实感可视为一种效果工具，以使观众不会留意并不存在的场景环境。最后，针对渲染系统的输出质量，真实感还可作为一种定义良好的度量方案。

在本书的翻译过程中，除李秋霞外，刘鹏、郭志杰、白永丽、刘玮、赵洪玉、米玥、潘冰玉、李强、皮雄飞、史云龙、王巍、张欣欣、姚楷峰、刘凌、梁红娇、李莉、李中卉、李亚楠、孙年果、程聪、朱利平、王晓晓、解宝香、吴骅、李保金、刘天慧、王梅、林芮、刘鹤、王烈征、张博、刘君、张弢、张颖、马琳琳、沈旻、张骞、李垚、周建娟、黄丽臣等人也参与了部分翻译工作，在此一并表示感谢。

限于译者的水平，译文中难免有错误和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

译者

# 前言

渲染可视为计算机图形学中的基础内容。在最高抽象层次上，渲染行为表示为三维场景描述与图像之间的转换。动画、集合建模、纹理机制以及其他计算机图形学领域的相关算法须通过某种渲染处理过程传递其结果，进而在图像中呈现。渲染操作的应用日趋广泛，包括影视业以及游戏等领域，并逐渐成为创意表达、娱乐以及视觉化的前沿阵地。

在该领域的早期，渲染研究主要集中于处理基本问题，例如确定相对于既定视点的可见对象。随着高效方法的不断涌现，以及图形学其他领域不断发展导致的更为丰富、逼真的场景描述，现代渲染操作扩展为更为广泛的学科领域，包括物理和天文物理、天文学、生物学、心理学、感知研究以及纯数学和应用数学。渲染操作的跨学科特征也使其成为一个令人着迷的科研领域。

本书通过完整渲染系统的文档资源代码，选取了相应的渲染算法，书中的全部图像均通过该系统加以渲染。pbrt 系统通过文学编程（literate programming）这一程序设计方法加以编写，并将系统描述与其实现代码加以混合。在计算机图形学和通用计算机科学中，文学编程可视为引入相关概念的一种有效方法。某些时候，算法细节直至其实现完毕后方清晰呈现。因此，考察算法的真实实现过程则是深入理解算法细节的一种较好方法。实际上，针对计算机图形学的进一步研究，与粗浅的了解相比，通过这一方式可向读者提供更为坚实的基础知识。

除了了解算法的实际实现之外，在完整和较为重要的软件系统中表达算法还可处理中等规模渲染系统中的设计和实现问题。渲染系统的基本抽象和接口设计对于实现的优雅性以及后续扩展性均会产生较大的影响，而这一设计领域内的折中方案则较少讨论。

pbrt 以及本书内容主要讨论照片级渲染，并可通过多种不同方式定义为图像生成任务，且与相机所拍摄的照片基本一致；或者对应图像生成任务具有与人眼相同的响应机制。除此之外，照片级图像对于影视特效工业也十分重要，其原因在于，计算机生成的图像须与真实世界环境实现无缝混合。在娱乐应用中，全部图像均为合成结果，真实感可视为一种效果工具，以使观众不会留意并不存在的场景环境。最后，针对渲染系统的输出质量，真实感还可作为一种定义良好的度量方案。

本书及其所描述的系统并不会涉及渲染过程中的全部技术，鉴于某些与真实感渲染相关的话题无法与软件系统体系结构实现较好的适配（例如有限元辐射度算法），因而相关内容并未出现于本书中；或者，算法的实现复杂度已超出了其教学价值。相关内容本书会在相应章节予以提示，并提供了相应的参考资源以供读者进一步阅读。另外，渲染机制的其他领域，例如交互式渲染、可视化机制以及渲染说明形式（例如笔墨风格）本书也并未涉及。无论如何，系统中的大多数算法和概念（例如纹理贴图抗锯齿算法）适用于多种不同类型的渲染集。

## 本书读者

本书的读者群定位于计算机图形学课程的研究生或高年级本科生，且假设读者已掌握了大学

计算机图形学基础课方面的知识。同时，本书还将对某些核心概念进行回顾，例如基础向量几何学。对于缺乏编程经验的学生，文学编程风格将对此予以适度介绍。同时，本书将对某些核心接口和系统抽象背后的成因进行重点介绍，以使读者了解系统的构造方式。

本书第二类也是较为重要的一类读者人群则是高年级研究生、科研人员、业界软件开发人员以及编写渲染系统的个人爱好者。虽然此类读者熟悉书中的某些内容，但基于文学编程风格的算法解释依然提供了全新的视角。pbrt 包含大量的高级和/或较为困难的算法和技术实现，例如表面细分、蒙特卡罗光线传输和 Metropolis 采样、子表面散射以及预计算光线传输算法，此类算法均是经验丰富的专业人员所关注的话题。这一类读者应考察完整、复杂渲染系统的特定组织方式。

## 概述和目标

pbrt 基于光线跟踪算法，该技术可视为一种相对优雅的方案，且源自透镜制造技术。在 19 世纪，Carl Friedrich 和 Gauß 通过手工方式在透镜间跟踪光线。计算机领域内的光线跟踪算法则依据场景间无穷小光线路径，直至与某一表面相交。当从任意位置和方向上进行观察时，该方案可针对首个可见对象生成简单的计算方法，并构成了众多渲染算法的基本内容。

pbrt 的设计和实现包含了 3 个主要目标，即完整性、说明性以及物理性。

完整性表示系统应具备高质量商业级渲染系统的核心特征。特别地，应对某些重要的实际问题予以解决，例如抗锯齿、健壮性以及复杂场景的高效渲染。需要注意的是，可在系统设计开始时即考察这一类问题，相关特性针对系统的全部组件均会产生微妙的影响，且在实现的后续阶段难以改正。

第二个目标则是谨慎选取相应的算法、数据结构以及渲染技术，并具备应有的可读性和清晰性。相比于其他渲染系统，实现内容将被众多读者解析，因而需要选择最具优雅性的算法并予以实现。本书采用了可扩展的体系结构实现 pbrt，系统核心内容根据一组精心设计的抽象基类实现，其实现包含了诸多特定功能。最终结果可描述为，用户在了解系统的基本结构时无须知晓全部特定实现，以使用户可深入考察感兴趣的内容，且不会忽视系统整体间的适配方式。

完整性和说明性之间存在着某种矛盾，描述并实现各项功能将会增加本书的篇幅，对于读者而言也会使系统变得异常复杂。若 pbrt 缺少某个功能项时，当前体系结构设计在添加相关特性时无须改变系统的整体设计。

物理渲染的基本内容遵循物理定律及其数学表达。pbrt 设计针对所计算的量值采用正确的物理单位、概念及其实现的算法。当按照此方法进行设置后，pbrt 可计算并包含物理正确性的图像，并按照真实场景世界中的方式准确地反射光线。当采用物理基本概念时，其优势在于可生成程序正确性的具体标准：对于简单场景，期望结果可通过闭形进行计算，如果 pbrt 未得到同一结果，可知实现过程中必然存在 bug。类似地，如果 pbrt 中不同的物理光照算法对于同一场景生成不同的结果，或者 pbrt 未生成与另一渲染器相同的结果，则其中必存在错误。最后，鉴于物理渲染方案的严谨性，因而存在较大的价值。若计算存在不确定性，则物理学方案所给出的答案可确保获得一致性结果。

与上述 3 个目标相比，效率反而处于次要地位。由于渲染系统在图像生成过程中常需要运行数分钟或数个小时，因而效率的重要性不言而喻。然而，多数时候我们仅关注算法效率，而非底

层代码优化。某些时候，与代码的清晰以及良好的组织结构相比，细微优化往往处于次要地位，尽管我们仍会不遗余力地对系统的计算部分进行最大程度的优化。

在表达 `pbrt` 并讨论其实现的过程中，本书希望能够传达多年来渲染研究以及发展中的某些经验教训。与整合一系列的快速算法集相比，编写一款优秀的渲染器则更为困难，系统的灵活性以及健壮性其任务难度均不容小视。当加入更多的几何对象或光源时，系统的性能应平缓衰减。另外，还应谨慎处理数值稳定性问题；同时，具有严格浮点精度的算法同样十分重要。

待上述问题全部解决后，系统开发得到的回报也是巨大的——可方便地编写新渲染器，或向现有渲染器中添加新特性，并创建全新的图像。编写本书的基本目的也是向广大读者提供这一条件，以使读者可渲染 `pbrt` 软件中的示例场景。各章结尾练习将对系统进行调整，以使读者了解系统内部的工作机制；更为复杂的项目练习则尝试向系统添加新特性，进而对系统进行扩展。

本书支持网站 [www.pbrt.org](http://www.pbrt.org) 提供了 `pbrt` 源代码的最新版本，除此之外，该网站还包含了勘误表、bug 修复、附加渲染场景以及工具。另外，网站中未涉及的 bug 和错误均可发送至 [bugs@pbrt.org](mailto:bugs@pbrt.org)，我们将对读者的反馈信息表示感谢。

## 第 2 版中的变化内容

自本书第 1 版出版以来已经过去了 6 年时间，期间本书发行了数千册。相应地，`pbrt` 也从本书支持网站中下载了数千次。`pbrt` 用户给予了我们大量的反馈和鼓励，不断地对系统进行调整也使我们在新、旧版本间积累了大量的经验。除修复了相关 bug 之外，本书还包含设计方面的改进，其中包括：

- 移除了插件体系结构。`pbrt` 的第 1 版内容采用运行期插件体系结构，以动态加载对象的实现代码，例如形状、光照、积分器、相机以及渲染场景中的其他对象。该方案可使用户采用新对象类型扩展 `pbrt`（例如新形状图元），且无须重新编译整体渲染系统。该方案初看之下较为优雅，但会加剧多平台 `pbrt` 支持任务的复杂度，并使得调试过程变得愈加困难。该方案（仅 `pbrt` 的二进制版本或二进制插件）与当前教学目标以及开源思想相违背，因而本书第 2 版不采用插件体系结构。
- 移除了图像处理管线。`pbrt` 的第一个版本提供了色调映射接口，并将高动态范围（HDR）浮点输出图像直接转换为低动态范围 TIFF 以供显示。这一功能项在 2004 年尚存在应用价值，当时对 HDR 的支持还比较少见。2010 年，数字摄影技术的进步使得 HDR 图像随处可见。虽然色调映射的理论和实现过程颇为优雅并值得学习，但本书将注意力集中于图像构成的处理操作，并省略了图像显示这一话题。对于 HDR 图像显示操作过程的综合处理方法，感兴趣的读者可参考 Reinhard 等人（2005）编写的著作。
- 任务并行机制。尽管多核体系结构当今无处不在，`pbrt` 也应对此有所支持。我们也衷心地希望，本书所讨论并行编程实现细节能够帮助图形程序员理解编写可扩展并行代码的复杂性以及微妙之处（例如选取任务的粒度或互斥体类型），此类话题相对小众且具有一定的难度。
- “产品级”渲染的适用性。`pbrt` 的第 1 版内容主要用于教学工具，并提供了渲染研究的基础内容。实际上，第 1 版中制定的决策多与产品环境应用相矛盾，例如基于图像光照

的有限支持，缺少运动模糊机制，以及复杂光照机制下缺少健壮的光子贴图实现。本书第2版则对此类特性予以支持，同时还涵盖了子表面散射以及 Metropolis 光线传输机制。因此，当前版本的 `pbrt` 适用于渲染复杂环境中的高质量图像。上述改进过程中涉及的折中方案可描述为：随着系统各项功能的不断完善，使用新软件创建可管理任务将变得越发困难。这一点的确值得考虑，本书第1版中也存在类似的情形。对此，可适当减轻学生的负担，并尽量避免从头编写光线跟踪系统。本书第1版曾被多所高校选用，相关教学经验表明，此类折中方案十分必要。这里，我们也希望本书第2版内容可继续应用于高质量的渲染教学中。

## 致谢

Pat Hanrahan 通过多种方式对本书的出版给予了极大的支持，在此向他表示衷心的感谢。Pat Hanrahan 建议采用清晰的接口以及正确的抽象方式，他对渲染问题的理解以及提出的对应方案对其设计产生了深远的影响。另外，他对 `pbrt` 采取的支持态度，以及他在斯坦福大学授课过程中的手稿（包括期间的反馈信息）均对本书的内容提供了极大的帮助。在 Pat 的帮助下，斯坦福图形实验室也应运而生，其开放的环境形成了令人兴奋的研发氛围，并给我们留下了深刻的印象。我们曾对该实验室进行造访，对此感到非常荣幸。

1999 年至 2004 年间，斯坦福大学和弗吉尼亚大学的学生们曾使用了本书的早期教案，并对书中内容和 `pbrt` 提供了大量的反馈意见，在此也对他们表示感谢。在此，下列课程助教特别值得提及，他们是：斯坦福大学的 Tim Purcell, Mike Cammarano, Ian Buck, Ren Ng, 以及弗吉尼亚大学的 Nolan Goodnight。在授课过程中，学生们提出了大量极具价值的建议、问题报告和修正结果，这里要特别感谢 Evan Parker 和 Phil Beatty。本书的草案曾被德克萨斯大学奥斯汀分校的 Bill Mark 和 Don Fussell，以及俄亥俄州立大学的 Raghu Machiraju 作为课程教案所选用，他们提出的宝贵意见值得我们进一步思考。同时，也感谢他们将当前系统引入到课程教学中去，尽管该系统仍处于完善中。

在渲染开发过程中，还要感谢全体同事和合作者们，他们均是教育界的精英人士，并对渲染器编写方案以及该领域内问题的理解产生了深远的影响。这里要特别感谢 Craig Kolb，他向我们提供了 Matt 早期在计算机图形学教育中的基础成果，即 rayshade 光线跟踪系统的源代码。Eric Veach 同样与我们分享了宝贵的时间及其专家意见。感谢 Doug Shult 和 Stan Eisenstat 在计算机科学和数学方面提供的课程帮助；还要感谢 Matt 的父母所提供的良好的教育环境，以及长久以来的支持和鼓励。最后，还要感谢 Nick Triantos, Jayant Kolhe 和 NVIDIA 对本书第1版的大力支持。

感谢普林斯顿大学本科课程中的各位教授和助教。同时，多位人士针对我在图形学方面的兴趣给予了极大的鼓励，如 Michael Cohen, David Dobkin, Adam Finkelstein, Michael Cox, Gordon Stoll, Patrick Min 和 Dan Wallach。Doug Clark, Steve Lyon, Andy Wolfe 则在独立科研经费方面给予了我无私的帮助。Steve Lyon 曾在一次与机器人项目相关的小组会上咆哮：“不要解释，告诉我如何实现它！”——这句话我至今记忆犹新。Eric Ristad 曾聘用我作为其助理研究员，并把介绍与 Pat Hanrahan 相识，从而开启了长达 10 年的学术关系。最后，感谢 Dave Hanson 传授

文学编程方面的知识,并使我领略到计算机程序设计这一美妙、精致的艺术形式。

感谢 Don Mitchell, 在他的帮助下,使我们了解到采样和重构方面的细节内容; Thomas Kollig 和 Alexander Keller 则解释了低偏差采样较优点的选取方法; Dave Eberly, “Just d’FAQs”, Hans Bernhard Broecker, Steve Westin 和 Gernot Hoffmann 则提供了 comp.graphics.algorithms 上诸多有趣的内容; Christer Ericson 针对 kd 树的改建提出了大量的建议; Christophe Hery 曾帮助我们进一步理解子表面散射中的细微差异; Peter-Pike Sloan 则审阅了第 17 章内容,即预计算光线传输算法。

针对书中内容以及 pbrt, 诸多人士提供了大量的场景和模型,他们的慷慨行为有助于我们在书中生成有趣的示例图像。其中,兔模型、佛像模型以及龙模型源自斯坦福计算机图形实验室的扫描数据库,对应网址为 [graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/](http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/)。Oliver Deussen, Bernd Lintermann 及其同事在发表的论文 (Deussen, Hanrahan, Lintermann, Mech, Pharr, Prusinkiewicz 1998) 中曾创建了本书中显示的生态场景图; killeroo 模型则经过 Phil Dench 和 Martin Rezard 授权使用 (headus 提供 3D 扫描和数字表示,设计和粘土模型则由 Rezard 完成); Duc Nguyen 和 Ron Fedkiw 负责生成准确的物理烟雾数据集; Nolan Goodnight 创建了包含真实天空模型的环境贴图; 计算机图形光线测算实验室的 Cornell 项目则允许我们使用 DRDF 测算数据,而 Paul Debevec 则提供了大量高质量的动态范围环境贴图; Marc Ellens 针对各类光源提供了频谱数据; 各种显式的频谱 RGB 测算数据则源自 X-Rite 公司的 Tom Lianza。

这里要特别感谢 Evolución Visual 公司 (公司网址为 [www.evvisual.com](http://www.evvisual.com)) 的 Guillermo M. Leal Llaguno, 他对 San Miguel 场景以及书中的多幅图像建模并进行渲染。另外还要感谢 RNA Studios 公司 (公司网址为 [www.rna.hr](http://www.rna.hr)) 的 Marko Dabrovic (个人网站为 [www.3lhd.com](http://www.3lhd.com)) 和 Mihovil Odak, 他们提供了大量的优秀模型和场景,包括 atrium 门廊、Sibenik 大教堂以及奥迪 TT 汽车模型。同时,还要感谢 Florent Boyer (个人网站为 [www.florentboyer.com](http://www.florentboyer.com)), 他提供了第 15 章众多图像所采用的当代居室场景。

本书的感谢名单还包括成书过程中不同阶段的审校人员,他们建设性的意见对本书提供了极大的帮助,其中包括: Ian Ashdown, Per Christensen, Doug Epps, Dan Goldman, Eric Haines, Erik Reinhard, Pete Shirley, Peter-Pike Sloan, Greg Ward 以及众多匿名读者。在本书第 2 版中, Janne Kontkanen, Nelson Max, Bill Mark 和 Eric Tabellion 也提出了许多有益的建议。

感谢在授课过程中使用 pbrt 的大学教职人员,他们是 Emmanuel Agu, Dirk Arnold, Stephen Chenney, Yung-Yu Chuang, Don Fussell, Pat Hanrahan, Bill Mark, Nelson Max, Gary Meyer, Torsten Möller, Rick Parent, Sumanta Pattanaik 和 Luiz Velho。

关于 pbrt 以及渲染问题的深入理解,大量人士通过问题报告、补丁以及问题建议等方式做出了重要贡献,其中包含了某些颇具建设性的信息,他们是 Kevin Egan, John Danks, Volodymyr Kachurovskyi, Solomon Boulos 和 Stephen Chenney。除此之外,下列人员也对本书提出了相关建议和问题报告,在此一并表示感谢,他们是: Rachit Agrawal, Frederick Akalin, Mark Bolstad, Thomas de Bodt, Brian Budge, Mark Colbert, Shaohua Fan, Nigel Fisher, Jeppe Revall Frisvad, Robert G. Graf, Asbjørn Heid, Keith Jeffery, Greg Johnson, Aaron Karp, Donald Knuth, Martin Kraus, Murat Kurt, Larry Lai, Craig McNaughton, Swaminathan Narayanan, Anders Nilsson, Jens Olsson, Vincent Pegoraro, Nils Thuerey, Xiong Wei, Wei-Wei Xu, Arek Zimny 和 Matthias Zwicker。最后

还要感谢 LuxRender 开发人员以及 LuxRender 开发社区,特别是 Terrence Vergauwen, Jean-Philippe Grimaldi 和 Asbjørn Heid。他们欣慰地见证了基于 pbrt 打造的渲染系统;同时,我们也从他们提供的源代码中受益良多,进而实现了某些新的渲染算法。

对于本书的第 1 版内容,还应感谢 Tim Cox (高级编辑),他全身心地投入至这一出版项目中,掌控着出版加工过程中的指导方向,并为此付出了极大的耐心。这里还要感谢 Elisabeth Beller (项目经理),其工作范围已经超出了本书的职责要求,她对项目的良好把控使得本书得以按时出版,并对本书的最终质量起到了极为关键的作用。感谢 Rick Camp (助理编辑)长期以来提供的各种帮助。感谢 Windfall Software 公司的 Paul Anagnostopoulos 和 Jacqui Scarlott 完成了本书的排版工作,并将作者提供的自制文学编程文件格式转换为高质量的输出结果。感谢 Ken DellaPenta (版权编辑)、Jennifer McClain (校对)、Chen Design 公司(负责文本和封面设计)的 Max Spector 以及 Steve Rath。

感谢 Greg Chalsion,在本书的第 2 版中,他建议对书中内容进行扩展和更新,并再次指定 Windfall Software 公司的 Paul Anagnostopoulos 完成本书的排版工作。因此,这里再次向 Paul 的工作表示感谢。最后,还要向 Elsevier 出版社的 Todd Green, Paul Gottehrer 以及 Heather Scherer 表达最为真挚的谢意。

## 补充阅读

Donald Knuth 发表的论文 *Literate Programming* (Knuth 1984) 描述了文学编程背后的主要理念及其 Web 编程环境。其中,TEX 排版系统采用 Web 进行编写,并通过一系列的专著予以发布 (Knuth 1986, Knuth 1993a)。近期,Knuth 在“The Stanford GraphBase”中发表了图算法集。此类程序具有较好的阅读体验,并完美表达了各自的算法。网站 [www.literateprogramming.com](http://www.literateprogramming.com) 中包含了大量与文学编程相关的文章、可供下载的程序以及各类文学编程系统。鉴于 Knuth 所做的大量工作,因而多数内容均经过提炼方得以发布。

其他作为专著发表的文学程序还包括 lcc 编译器实现,即 Christopher Fraser 和 David Hanson 编写的 *A Retargetable C Compiler: Design and Implementation* 一书 (Fraser-Hanson 1995),以及 Martin Ruckert 编写的 MP3 音频格式的书籍 *Understanding MP3* (Ruckert 2005)。

# 目 录

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| 第 1 章 概述.....                                   | 1  |
| 1.1 文学编程.....                                   | 1  |
| 1.2 照片级渲染和光线跟踪算法.....                           | 3  |
| 1.2.1 相机.....                                   | 4  |
| 1.2.2 光线-对象相交.....                              | 5  |
| 1.2.3 光照分布.....                                 | 6  |
| 1.2.4 可见性.....                                  | 7  |
| 1.2.5 表面散射.....                                 | 7  |
| 1.2.6 递归光线跟踪.....                               | 8  |
| 1.2.7 光线传播.....                                 | 9  |
| 1.3 pbrt 系统概述.....                              | 11 |
| 1.3.1 执行阶段.....                                 | 14 |
| 1.3.2 场景表达.....                                 | 15 |
| 1.3.3 渲染器接口与 <code>SamplerRenderer</code> ..... | 17 |
| 1.3.4 主渲染循环.....                                | 19 |
| 1.3.5 pbrt 的并行机制.....                           | 27 |
| 1.3.6 WHITTED 光线跟踪积分器.....                      | 31 |
| 1.4 如何阅读本书.....                                 | 35 |
| 1.5 使用并理解程序代码.....                              | 36 |
| 1.5.1 指针或引用.....                                | 36 |
| 1.5.2 代码优化.....                                 | 36 |
| 1.5.3 本书网站.....                                 | 37 |
| 1.5.4 系统扩展.....                                 | 37 |
| 1.5.5 Bug.....                                  | 37 |
| 1.6 进一步阅读.....                                  | 38 |
| 1.7 本章练习.....                                   | 39 |
| 第 2 章 几何形状和转换.....                              | 40 |
| 2.1 坐标系.....                                    | 40 |
| 2.2 向量.....                                     | 41 |
| 2.2.1 运算.....                                   | 42 |
| 2.2.2 缩放操作.....                                 | 43 |
| 2.2.3 点积和叉积计算.....                              | 44 |

|       |                           |    |
|-------|---------------------------|----|
| 2.2.4 | 标准化计算.....                | 46 |
| 2.2.5 | 基于向量的坐标系.....             | 46 |
| 2.3   | 点.....                    | 47 |
| 2.4   | 法线.....                   | 49 |
| 2.5   | 射线.....                   | 50 |
| 2.6   | 三维包围盒.....                | 53 |
| 2.7   | 转换操作.....                 | 56 |
| 2.7.1 | 齐次坐标.....                 | 57 |
| 2.7.2 | 基本操作.....                 | 58 |
| 2.7.3 | 平移.....                   | 59 |
| 2.7.4 | 缩放操作.....                 | 61 |
| 2.7.5 | x, y, z 轴旋转.....          | 62 |
| 2.7.6 | 围绕任意轴的旋转行为.....           | 63 |
| 2.7.7 | 视见转换.....                 | 65 |
| 2.8   | 转换应用.....                 | 66 |
| 2.8.1 | 点.....                    | 67 |
| 2.8.2 | 向量.....                   | 67 |
| 2.8.3 | 法线.....                   | 68 |
| 2.8.4 | 射线.....                   | 68 |
| 2.8.5 | 包围盒.....                  | 69 |
| 2.8.6 | 复合转换.....                 | 69 |
| 2.8.7 | 转换和坐标系的左右手规则.....         | 70 |
| 2.9   | 动画转换.....                 | 70 |
| 2.9.1 | 四元数.....                  | 72 |
| 2.9.2 | 四元数插值.....                | 74 |
| 2.9.3 | AnimatedTransform 实现..... | 75 |
| 2.10  | 微分几何.....                 | 79 |
| 2.11  | 进一步阅读.....                | 82 |
| 2.12  | 本章练习.....                 | 83 |
| 第3章   | 几何形状.....                 | 84 |
| 3.1   | 基本的 Shape 接口.....         | 84 |
| 3.1.1 | 包围机制.....                 | 85 |
| 3.1.2 | 细化操作.....                 | 86 |
| 3.1.3 | 相交行为.....                 | 87 |
| 3.1.4 | 避免自相交行为.....              | 88 |
| 3.1.5 | 几何体着色.....                | 88 |
| 3.1.6 | 表面积.....                  | 89 |
| 3.1.7 | 多面性.....                  | 89 |

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 3.2 球体.....                            | 89  |
| 3.2.1 构建过程.....                        | 91  |
| 3.2.2 包围体.....                         | 91  |
| 3.2.3 相交.....                          | 92  |
| 3.2.4 局部球体.....                        | 94  |
| *3.2.5 法线向量的偏导数.....                   | 96  |
| 3.2.6 DifferentialGeometry 的初始化操作..... | 97  |
| 3.2.7 表面积.....                         | 98  |
| 3.3 圆柱体.....                           | 99  |
| 3.3.1 圆柱体的构造过程.....                    | 99  |
| 3.3.2 圆柱体的包围机制.....                    | 101 |
| 3.3.3 圆柱体的相交计算.....                    | 101 |
| 3.3.4 局部圆柱体.....                       | 102 |
| 3.3.5 圆柱体的表面积.....                     | 103 |
| 3.4 圆盘.....                            | 103 |
| 3.4.1 圆盘的构建过程.....                     | 104 |
| 3.4.2 圆盘的包围机制.....                     | 105 |
| 3.4.3 圆盘的相交计算.....                     | 105 |
| 3.4.4 圆盘的表面积.....                      | 106 |
| 3.5 其他二次表面.....                        | 107 |
| 3.5.1 圆锥体.....                         | 107 |
| 3.5.2 抛物面.....                         | 108 |
| 3.5.3 双曲面.....                         | 108 |
| 3.6 三角形和网格.....                        | 109 |
| 3.6.1 三角形.....                         | 112 |
| 3.6.2 三角形相交计算.....                     | 113 |
| 3.6.3 网格表面积.....                       | 117 |
| 3.6.4 着色几何体.....                       | 118 |
| *3.7 表面细分.....                         | 120 |
| 3.7.1 网格表达方式.....                      | 122 |
| 3.7.2 网格边界.....                        | 130 |
| 3.7.3 网格细分.....                        | 130 |
| 3.7.4 计算新的顶点位置.....                    | 132 |
| 3.7.5 更新网格拓扑结构.....                    | 137 |
| 3.7.6 极限表面和输出结果.....                   | 139 |
| 3.8 进一步阅读.....                         | 142 |
| 3.9 本章练习.....                          | 143 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 第4章 图元和相交加速计算                         | 148 |
| 4.1 图元接口和几何图元                         | 148 |
| 4.1.1 几何图元                            | 151 |
| 4.1.2 TransformedPrimitive: 对象实例和动画图元 | 152 |
| 4.2 集合体                               | 155 |
| 4.3 网格加速结构                            | 158 |
| 4.3.1 构建过程                            | 159 |
| 4.3.2 遍历操作                            | 164 |
| 4.4 包围体层次结构                           | 169 |
| 4.4.1 BVH 构建过程                        | 170 |
| 4.4.2 启发式表面积计算                        | 176 |
| 4.4.3 遍历过程中的紧凑 BVH                    | 180 |
| 4.4.4 遍历                              | 182 |
| 4.5 kd 树加速结构                          | 185 |
| 4.5.1 树形结构的表达方式                       | 186 |
| 4.5.2 树形结构的构造方式                       | 188 |
| 4.5.3 遍历操作                            | 196 |
| 4.6 调试聚合体                             | 200 |
| 4.6.1 寻找聚合体中的 bug                     | 201 |
| 4.6.2 修复几何体中的 bug                     | 204 |
| 4.6.3 聚合体性能问题                         | 204 |
| 4.7 进一步阅读                             | 205 |
| 4.7.1 网格                              | 205 |
| 4.7.2 包围体层次结构                         | 205 |
| 4.7.3 kd 树                            | 207 |
| 4.7.4 启发式表面积方案                        | 207 |
| 4.7.5 其他加速结构                          | 208 |
| 4.8 本章练习                              | 209 |
| 第5章 颜色和辐射度                            | 212 |
| 5.1 光谱表达方式                            | 212 |
| 5.1.1 Spectrum 类型                     | 213 |
| 5.1.2 CoefficientSpectrum 实现          | 214 |
| 5.2 SampledSpectrum 类                 | 216 |
| 5.2.1 XYZ 颜色                          | 219 |
| 5.2.2 RGB 颜色                          | 222 |
| 5.3 RGBSpectrum 实现                    | 227 |
| 5.4 辐射度测量学的基本知识                       | 229 |

|        |                             |     |
|--------|-----------------------------|-----|
| 5.4.1  | 基本量值.....                   | 230 |
| 5.4.2  | 入射和出射辐射度函数.....             | 233 |
| 5.4.3  | 亮度和光度测定.....                | 233 |
| 5.5    | 与辐射积分协同工作.....              | 234 |
| 5.5.1  | 投影立体角的积分运算.....             | 235 |
| 5.5.2  | 球体坐标的积分运算.....              | 235 |
| 5.5.3  | 面积积分运算.....                 | 237 |
| 5.6    | 表面反射.....                   | 239 |
| 5.6.1  | BRDF .....                  | 239 |
| 5.6.2  | BSSRDF .....                | 240 |
| 5.7    | 进一步阅读.....                  | 241 |
| 5.8    | 本章练习.....                   | 242 |
| 第 6 章  | 相机模型.....                   | 243 |
| 6.1    | 相机模型概述.....                 | 243 |
| 6.2    | 投影相机模型.....                 | 246 |
| 6.2.1  | 正交相机.....                   | 247 |
| 6.2.2  | 透视相机.....                   | 250 |
| 6.2.3  | 景深.....                     | 253 |
| 6.3    | 环境相机.....                   | 257 |
| 6.4    | 进一步阅读.....                  | 258 |
| 6.5    | 本章练习.....                   | 259 |
| 第 7 章  | 采样和重构 .....                 | 260 |
| 7.1    | 采样理论.....                   | 260 |
| 7.1.1  | 频率范围和傅里叶变换.....             | 261 |
| 7.1.2  | 理想采样状态和重构.....              | 263 |
| 7.1.3  | 锯齿.....                     | 266 |
| 7.1.4  | 抗锯齿技术.....                  | 267 |
| 7.1.5  | 图像合成技术.....                 | 269 |
| 7.1.6  | 渲染中的锯齿来源.....               | 269 |
| 7.1.7  | 理解像素数据.....                 | 270 |
| 7.2    | 图像采样接口.....                 | 271 |
| 7.3    | 分层采样.....                   | 277 |
| 7.4    | 低偏差采样.....                  | 287 |
| *7.4.1 | 偏差定义.....                   | 288 |
| 7.4.2  | HAMMERSLEY 和 HALTON 序列..... | 289 |
| 7.4.3  | [0,2]序列 .....               | 295 |
| 7.4.4  | 低偏差采样器.....                 | 298 |

|       |                          |     |
|-------|--------------------------|-----|
| *7.5  | 最佳候选采样模式.....            | 303 |
| 7.6   | 自适应采样.....               | 309 |
| 7.7   | 图像重构.....                | 314 |
| 7.8   | Film 类和成像管线.....         | 323 |
| 7.8.1 | Film 接口.....             | 323 |
| 7.8.2 | ImageFilm 类.....         | 325 |
| 7.9   | 进一步阅读.....               | 333 |
| 7.10  | 本章练习.....                | 336 |
| 第 8 章 | 反射模型.....                | 339 |
| 8.1   | 基本接口.....                | 342 |
| 8.1.1 | 反射率.....                 | 344 |
| 8.1.2 | BRDF→BTDF 适配器.....       | 345 |
| 8.1.3 | BxDF 缩放适配器.....          | 345 |
| 8.2   | 镜面反射和透射.....             | 346 |
| 8.2.1 | 菲涅耳反射率.....              | 347 |
| 8.2.2 | 镜面反射.....                | 351 |
| 8.2.3 | 镜面透射.....                | 354 |
| 8.3   | Lambertian 反射.....       | 358 |
| 8.4   | 微面元模型.....               | 358 |
| 8.4.1 | Oren-Nayar 漫反射.....      | 360 |
| 8.4.2 | Torrance-Sparrow 模型..... | 361 |
| 8.4.3 | Blinn 微面元分布.....         | 364 |
| 8.4.4 | 各项异性微面元模型.....           | 366 |
| 8.5   | 菲涅耳入射效果.....             | 368 |
| 8.6   | 测算 BRDF.....             | 370 |
| 8.6.1 | 不规则的各向同性测算 BRDF.....     | 371 |
| 8.6.2 | 规则半角格式.....              | 374 |
| 8.7   | 进一步阅读.....               | 376 |
| 8.8   | 本章练习.....                | 378 |
| 第 9 章 | 材质.....                  | 380 |
| 9.1   | BSDF.....                | 380 |
| 9.2   | Material 接口和实现.....      | 385 |
| 9.2.1 | MatteMaterial 类.....     | 386 |
| 9.2.2 | PlasticMaterial 类.....   | 387 |
| 9.2.3 | 混合材质.....                | 389 |
| 9.2.4 | 测算材质.....                | 390 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 9.2.5 其他材质.....           | 391 |
| 9.3 凹凸贴图.....             | 392 |
| 9.4 进一步阅读.....            | 396 |
| 9.5 本章练习.....             | 397 |
| 第 10 章 纹理.....            | 399 |
| 10.1 采样和抗锯齿操作.....        | 400 |
| 10.1.1 计算纹理采样率.....       | 400 |
| 10.1.2 滤波纹理函数.....        | 404 |
| *10.1.3 镜面反射和透射的光线微分..... | 405 |
| 10.2 纹理坐标生成.....          | 408 |
| 10.2.1 2D( $u,v$ )映射..... | 409 |
| 10.2.2 球体映射.....          | 410 |
| 10.2.3 圆柱体映射.....         | 411 |
| 10.2.4 平面映射.....          | 412 |
| 10.2.5 3D 映射.....         | 413 |
| 10.3 纹理接口和基本纹理.....       | 413 |
| 10.3.1 固定纹理.....          | 414 |
| 10.3.2 混合纹理.....          | 415 |
| 10.3.3 线性插值.....          | 416 |
| 10.4 图像纹理.....            | 417 |
| 10.4.1 纹理缓存.....          | 418 |
| 10.4.2 纹理链.....           | 421 |
| 10.4.3 各向同性三角形滤波器.....    | 428 |
| *10.4.4 椭圆加权平均值.....      | 430 |
| 10.5 体纹理和过程纹理.....        | 435 |
| 10.5.1 UV 纹理.....         | 436 |
| 10.5.2 棋盘纹理.....          | 436 |
| 10.5.3 体棋盘纹理.....         | 441 |
| 10.6 噪声.....              | 442 |
| 10.6.1 Perlin 噪声.....     | 443 |
| 10.6.2 随机波尔卡圆斑.....       | 446 |
| 10.6.3 频谱合成.....          | 448 |
| 10.6.4 凹凸和褶皱纹理.....       | 451 |
| 10.6.5 风力波形.....          | 452 |
| 10.6.6 大理石纹理.....         | 453 |
| 10.7 进一步阅读.....           | 454 |
| 10.8 本章练习.....            | 456 |