



光线跟踪算法技术



Kevin Suffern

著

刘天慧

译

Ray Tracing from the Ground Up

清华大学出版社

光线跟踪算法技术

Kevin Suffern 著

刘天慧 译

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书详细阐述了与光线跟踪问题相关的高效解决方案及相应的数据结构和算法,主要包括采样技术、投影视图、视见系统、景深、非线性投影、立体视觉、光照与材质、镜面反射、光泽反射、全局光照、透明度、阴影、环境遮挡、区域光照、光线与对象间的相交计算、对象变换、栅格技术以及纹理映射技术等内容。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计算方案的实现过程。

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。

Original English edition: Ray Tracing from the Ground Up

© 2007 A K Peters, Ltd. ALL RIGHTS RESERVED.

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

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

光线跟踪算法技术/(美)萨芬(Suffern, K.)著;刘天慧译. —北京:清华大学出版社, 2011.3

书名原文: Ray Tracing from the Ground Up

ISBN 978-7-302-24821-7

I. ①光… II. ①萨… ②刘… III. ①光学跟踪-算法理论 IV. ①TP72

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第022389号

责任编辑:熊 健 毛姗姗

封面设计:刘 超

版式设计:杨 洋

责任校对:张彩凤

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦A座

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

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

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京市人民文学印刷厂

装 订 者:三河市溧源装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:203×260 印 张:38.25 字 数:1022千字

版 次:2011年3月第1版 印 次:2011年3月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:98.00元

产品编号:033942-01

译者序

光线跟踪技术是一项极为复杂的、用于创造真实事物和场景的渲染技术，获取逼真的图像效果一直以来既是 3D 计算机图形学的追求目标，也是光线跟踪计算的用武之地。该技术主要应用于视觉工业，例如电影、游戏中，某些令人炫目的特效使得影片、场景更具有视觉冲击力，同时该技术也被应用于创造 3D 模型，这些模型画面异常生动、逼真，仿佛真实世界。与现在普遍使用的光栅化渲染技术相比，光线跟踪普遍被视为图形处理的未来方向，因为它可带来近乎真实的真正电影级图形和光影物理效果。

针对这一问题，本书详细阐述了与光线跟踪问题相关的高效解决方案及其相应的数据结构和算法。光线跟踪技术涵盖了丰富的内容，主要包括：采样技术、投影视图、视见系统、景深、非线性投影、立体视觉、光照与材质、镜面反射、光泽反射、全局光照、透明度、阴影、环境遮挡、区域光照、光线与对象间的相交计算、对象变换、栅格技术以及纹理映射技术等。值得一提的是，本书并非一本纯理论书籍，除了对相关内容进行了全面、系统的讲解以外，其设计思想、数据结构和算法均辅以对应的代码示例，以帮助读者进一步理解计算方案的实现过程。

本书深入光线跟踪这一核心问题的内部，内容涉及数学、物理、数据结构、算法、计算机图形学等知识。这里是我们具体应用所学知识的地方，不再有 API 调用，一切都是真实的——这的确令人激动！

在本书的翻译过程中，除刘天慧外，刘鹏、张博、刘璋、刘祎、周建娟、李莉、马琳琳、祁宏亮、付钰、李素梅、张超、赵雅利、吕莹莹、贾亚飞、古庆梅、张文京、左雪飞、孙方旭、庞云凤、李孝静、刘冬悦、李淑清、宋立帅、杨丽丽、李娜、聂芳等也参与了部分翻译和校对工作。

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

序 言

Introductory

模拟 3D 环境下的光线分布是计算机图形学中的重要内容之一。目前,仅存在某些基础算法符合实时特征并可大致归结为投影算法和图像-空间算法。投影算法将几何图元投影至图像平面上并负责对象外观的局部着色计算。由于这一类算法支持管线处理机制以及基于显卡的硬件实现方式,因而得到了广泛的应用。

图像空间算法通过确认像素的光照来源计算该像素的颜色值。其中,较为基础的操作是计算视线方向上的最近对象。因此,沿某一光线方向上的逆向光线追踪使得这一类操作以及相关的图像合成算法得名“光线跟踪计算”。

1980 年,光线跟踪计算在学术界尚属前卫学科,采用光线跟踪计算后的图像质量令人大开眼界,相关图像包含了光线路径,例如镜面反射以及透射,这一类效果是难以采用投影算法实现的。由于某些形状易于实现光线的相交计算,因而当时的光线跟踪图像一般使用球体。亦即,相关图像中通常包含相应的光泽球体以彰显光线跟踪计算的威力。

随后,大量的相关研究简化了光线跟踪的计算过程且丰富了其渲染效果,包括漫反射交互反射、腐蚀效果以及多介质计算。为了加速图像的生成过程,曾涌现出大量的数据结构和算法以实现 3D 几何体的空间排序。针对各条光线的最近对象相交计算,空间子划分算法显著地降低了候选对象集的数量。另外,光线跟踪计算还支持并行计算,这也使得该领域内的研究格外令人关注。

高质量的图像渲染通常比较耗时,这一点毋庸置疑。因此,针对大型场景的渲染,计算时间的降低往往也意味着更为先进的硬件设施、算法以及着色技术。

在光线跟踪计算 25 年的发展过程中,其交互性和实时性得到了显著的改善。这里,渲染速度取决于下列条件:先进的硬件设施、强大的并行处理技术、优秀的算法以及科学的软件工程学观念。最近的研究表明,对于动画场景的实时渲染以及无法与主存实现良好匹配的大型场景,光线跟踪计算可视为一类有效的替代方案。同时,光线跟踪计算也为硬件的不断发展起到了推波助澜的作用。

天道酬勤,作为一类图像合成技术,光线跟踪计算正在揭去其神秘的面纱,并逐步成为实际应用中切实可行的算法。必要的话,光线跟踪计算还可实现实时操作以及物理渲染,因此可用于模拟预光照。同时,光线跟踪计算还广泛地用于电影工业、汽车制造行业以及科学可视化计算中。除此之外,光线跟踪计算还构成了其他图形学算法的基础理论,例如辐射度和光子映射。

作为一类光照模拟技术,无论是针对在校学生抑或是业界从业人员,其实用价值应得以传承。光线跟踪计算体现了算法的多样性以及综合知识的运用,包括 3D 建模技巧、数学理论、软件工程理念(代码管理对光线跟踪器的实现是十分必要的)、面向对象程序设计的编程经验、对光线物理特征以及材质属性的深刻理解。

综上所述,本书以循序渐进的方式介绍了光线跟踪计算的方方面面。当然,这也要求读者应具备相应的背景知识。

本书得以出版,我很欣慰。本书对光线跟踪技术进行了系统的分析,并引领读者感受光线跟踪算

法之美及其优雅性。同时，我也坚信，作为一本引人入胜的科技专著，本书应在你的书阁中保有一席之地。

Kevin 的慷慨令我有幸阅读了相关章节的首稿，其中过程令我受益匪浅。另外，本书深入浅出的叙述方式也给人留下了深刻的印象。

在此，我愿向学生、教师以及广大业界人员隆重推荐本书。或许，光泽球体的渲染引发了读者的强烈兴趣；或许，读者计划渲染一幅由复杂、真实场景构成的高质量图像，而答案就在本书中。

Erik Reinhard
Bristol 大学
Central Florida 大学

前言

Preface

简介

自 20 世纪 90 年代早期，我有幸在悉尼科技大学教授光线跟踪课程，本书源于多年来课堂上的美好回忆。迄今为止，光线跟踪器已经得到了长足的发展，而我，业已是桃李满天下。期间，我收到了大量极具价值的信息反馈、除错报告、先进的理念以及高质量的渲染图像。本书的手稿即出自授课过程中的点点滴滴。随着光线跟踪器的不断发展以及授课经验的不断丰富，本书亦采用逐章的方式加以编写（修订）。另外，与闭门造车相比，课堂上的交流、互动也使得本书对于问题的理解更具可读性。为此，我更喜欢将程序设计、著书立说以及授课这一重复过程命名为“光线跟踪循环”。

光线跟踪计算

光线跟踪计算隶属于计算机图形学范畴并通过投射光线生成图像，如图 1 所示。其中，场景由相机、像素窗口、两条光线以及两个对象构成，光线穿越像素并与相关对象执行相交测试。若光线与某一对象发生碰撞，则光线跟踪器将沿当前光线逆向方向计算反射光线的数量，以确定像素的颜色值，光线跟踪器将通过使用足够的像素，生成场景对象的渲染图像。如果场景对象具备反射特性，则光线可反射多次并于其他对象发生碰撞。

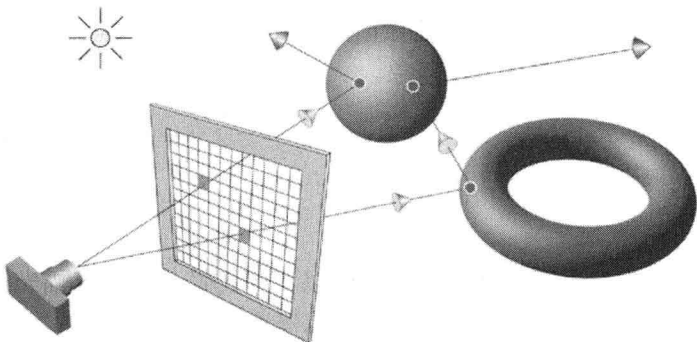


图 1 光线跟踪过程

上述处理过程简单、优雅且不失其有效性。例如，光线跟踪计算可对反射、透明对象、阴影以及全局光照实现精确的渲染。另外，与其他渲染技术相比，光线跟踪计算还可作为大型三角形网格的高效渲染方案。

光线跟踪计算的重要性

获取逼真的图像效果一直以来既是 3D 计算机图形学的追求目标，也是光线跟踪计算的用武之地。光线跟踪计算主要应用于电影工业，不单单是视觉效果，它往往用于渲染整部电影。例如，动画电影《冰河世纪》、《冰河世纪 2》、《机器人历险记》以及早期的《棕兔夫人》和《大教堂》（《The Cathedral》又名《Katedra》）。其中，《冰河世纪》荣获 2002 年奥斯卡最佳动画短片奖；《棕兔夫人》赢得了 1998 年奥斯卡最佳动画短片奖；《大教堂》获得 2002 年奥斯卡最佳动画短片提名。除此之外，光线跟踪计算还出现在动画电影《快乐的大脚》中，采用环境遮挡技术渲染企鹅，且针对海洋表面分别使用了反射计算和折射计算（参见第 17、27 和 28 章）。值得一提的是，《快乐的大脚》荣获 2006 年奥斯卡最佳动画电影奖。

视觉工业所使用的软件包中均内置了光线跟踪器，另外，作为插件或单机应用程序，还存在众多较为优秀的光线跟踪器，其中包括 Brazil（<http://www.splutterfish.com/>）、Mental Ray（<http://www.mentalimages.com/>）、finalRender（<http://www.finalrender.com/>）以及 Maxwell Render（<http://www.maxwellrender.com/>）。Cinema 4D 中也内置了高级光线跟踪器。

实时 3D 游戏对场景的真实性提出了较高的要求，虽然实时光线跟踪游戏仍受限于当前 PC 的运行速度，但这一情况定会在不久的将来得到相应的改善。可编程的多核图形处理器的出现可在一定程度上有效地解决这一“瓶颈”问题。由于可对每条光线进行独立跟踪，因而光线跟踪计算可通过多处理器实现。实际上，光线跟踪计算在并行计算领域曾被描述为“勉为其难”^①。因此，硬件的发展必将使得光线跟踪计算广泛地应用于视觉效果工业中。

这也意味着，光线跟踪计算的前景是光明的，相信在未来的几年内，本书所提供的内容将有助于读者实现自己的实时光线跟踪应用程序，例如游戏。

编写光线跟踪器可视为深入理解各类渲染算法工作原理的最佳方案，光线跟踪计算的灵活性以及编程的简洁性使得这项任务成为可能。同时，这也将是计算机图形学教育领域的幸事。

从广义范围上讲，光线跟踪计算有助于还原周围世界的真实景观。通过对几何光学的模拟，光线跟踪计算可用于渲染诸多我们所熟悉的光学现象。

本书特点

本书全面介绍了光线跟踪计算的工作原理，并辅以示例代码、约 600 幅光线跟踪图像以及 300 多个演示示例，大多数图像均采用本书所提供的光线跟踪器渲染完成。同时，本书也是 25 名学生集体智慧的结晶。读者可按照相关章节顺序依次阅读并开发一款属于自己的光线跟踪器。

本书多数章节均设立了“问题”和“练习”环节，其中，“问题”部分鼓励读者对渲染后的光线

^① 该言论出自 Alan Norton（约 1984 年）。

跟踪图像实现进一步的思考；“练习”部分则涉及到光线跟踪器的实现及其扩展方案。书中提供了约 400 个问题和练习。

作为渲染方程的求解方案，着色计算将被着重讲解并以辐射度的方式给出（参见第 13 章）。

针对某些视觉效果、难以理解的处理过程以及静态图像无法显示的渲染效果，本书网站提供了相应的动画演示，其网址为 <http://www.raytracegroundup.com>。

学习路径

当然，读者可选择性地阅读本书。例如，第 2 章和第 20 章讲述了与光线跟踪计算相关的数学知识，本书假设读者已经具备了一定的数学基础；第 19 章则讨论了光线-对象之间的相交计算，读者可进行针对性的阅读。

第 1~4 章、第 9 章以及第 13~16 章讲述了光线跟踪计算的基础知识、基于针孔相机的透视投影、理论基础以及基本的着色技术。第 13 章则从数学角度着重强调了与后续着色计

算相关的理论基础，读者不必精通其中的全部内容，多数较为复杂的积分计算只需采用几行代码即可完成。

第 24 章讨论了镜面反射；第 27~28 章讲述了透明度计算；第 29~31 章则阐述了纹理操作，相关章节包含了丰富的内容并且融知识性和趣味性于一身。必要的话，读者也可先期阅读与纹理计算相关的章节。

第 5~7 章深入分析了各类采样技术；第 10~12 章提供了基于各类相机模型的相关背景知识；第 17 章讲述了环境遮挡计算；第 18 章探讨了区域光照问题；第 25 章专门介绍了光泽反射；第 26 章集中讲解了全局光照。

第 21 章详细阐述了变换对象的光线跟踪计算；第 22 章将涉及到栅格加速方案，该方案可视为加速三角形网格（参见第 23 章）光线跟踪计算的有效工具。

背景知识

光线跟踪器通常采用 C++ 语言编写，因而读者应具备一定的 C++ 编程基础。第 1 章将着重讨论较为关键的程序设计元素，即继承结构、动态绑定以及多态机制。

另外，读者还应了解几何学、基本的三角形计算、向量计算以及矩阵代数等内容。虽然本书将会涉及相关的微积分知识，但也仅限于直接引用其计算结果并将其转换为对应的代码。

需要说明的是，读者无需具备相应的计算机图形学知识，本书将会对此进行详细的阐述，例如第 3 章、第 8 章以及第 13 章。就图形输出而言，光线跟踪计算可简单地解释为：在计算机屏幕窗口上绘制相关的像素。

读者对象

本书可作为高年级本科生以及研究生计算机图形学课程的专业教材。这里，假设读者已具备一定的 C++ 编程基础知识。

另外，对于急需了解光线跟踪器的背景知识或工作原理的部分读者以及业内从业人员，本书也极具参考价值。

在线资源

本书网站为 <http://www.raytracegroundup.com>，其中包含了下列内容：

- ☒ 第 1 章所描述的基础型光线跟踪器；
- ☒ 示例代码；
- ☒ PLY 格式的三角形网格文件；
- ☒ PPM 格式的图像文件；
- ☒ JPEG 格式的光线跟踪图像；
- ☒ 其他渲染图像；
- ☒ 构建场景的 C++ 代码；
- ☒ 动画演示文件；
- ☒ 勘误表；
- ☒ 其他链接信息。

本书未涉及内容

鉴于时间和篇幅关系，本书并未包含下列内容：基于色调映射算子的高动态范围成像（HDR）技术、栅格加速方案和其他加速方案之间的比较过程（例如包围体层次结构）、高效的全局光照算法、高效的腐蚀效果渲染技术以及多介质间的体渲染技术。除了 HDR 成像技术可视为一类全新的课题，其他问题则可根据相关内容进行相应的扩展。上述内容将留予读者以作为项目练习。

致谢

首先，我要感谢我的妻子 Eileen，本书的出版得力于她的全力支持。在本书的编写过程中，Eileen 曾先后 3 次通读了本书的全部内容以及样章，并修改了书中的语法错误，这也间接地提高了本人的写作水平。期间，Eileen 包揽了全部家务，同时，她还以惊人的毅力完成了其学历教育。

我的儿子 Chris 则在 Adobe Illustrator 软件绘图方面提供了专业级的援助，并完成了全部图像的曲线绘制工作。图 29.26 中的照片以及图形设计即出自 Chris 的手笔。另外，我的儿子 Tim 则对书中的参考文献部分进行了严格的校对。最后，经过我 4 岁的孙子 Broden 的授权，图 29.26 采用了他的照片。在此一并向他们表示感谢！

Paul Perry，作为一位 40 年的老友，感谢他对本书提出的建议，也感谢他在墨尔本为我提供的那座安静的场所，使我能够全身心地致力于本书的创作。

这里，我还要感谢 Erik Rienhard。毫无疑问，他是一名合格的评论家，Erik 阅读了本书的全部手稿，并指出了书中的相关错误，他富有建设性的意见为本书平添了几许色彩。本书的序言即由 Erik 主笔，这也是我的荣幸。当然，我也不会忘记我们之间的电话交谈，感谢他的支持！

感谢 Pete Shirley！针对变换对象的光线跟踪计算，Pete 建议采用正交基向量以及实例化对象进行问题的求解。

下列相关人员审阅了本书的初稿，他们是：Dave Breen（Drexel 大学）、Bob Futrelle（Northeastern 大学）、Steve Parker（Utah 大学）、Erik Reinhard（Central Florida 大学）以及 Pete Shirley（Utah），在此向他们表示衷心的感谢！

这里，还要特别感谢 A K Peters 出版社的 Alice Peters 女士，感谢她对本书持有的坚定信念并在本书的出版过程中对我赋予了极大地耐心，她的专业精神确保本书在 SIGGRAPH 2007 大会之前得以顺利出版。同时，还要向 A K Peters 出版社高级编辑 Kevin Jackson-Mead 以及录入员 Erica Schultz 表达我真挚的谢意。

感谢 Skye Design 的 Darren Wotherspoon，感谢他为本书所制作的精美封面。

感谢 Richard Raban，作为悉尼科技大学的一名系主任，他给予了我莫大的支持并为我提供了相对宽松的工作环境，使我能够致力于本书的创作。Chris W. Johnson 和 Helen 也阅读了本书的相关章节，并指出了本书中的若干错误。

本书包含了大量的精美图像并得到了下列人员的授权，他们是：Steve Agland, Nathan Andrews, John Avery, Peter Brownlow, David Gardner, Peter Georges, Mark Howard, Tania Humphreys, Daniel Kaestli, Adeel Khan, Mark Langsworth, Lisa Lönroth, Alistair McKinley, Jimmy Nguyen, Riley Perry, Duy Tran 以及 Ving Wong。感谢他们的作品，这也使得本书平添了几分精彩。

感谢 Tania Humphreys 为 Mirage 2000 设备（Opti-Gone 协会赞助）所提供的建模和渲染方案；感谢 Alistair McKinley 制作的光线-可视化软件并使图 27.24（b）的渲染工作得以顺利进行；感谢 Jimmy Nguyen 所完成的大量的文件转换工作。

下列人员修正了原稿中的相关错误，他们是：Deepak Chaudhary, Tim Cooper, Ronnie Sunde, Ksenia Szeveva 以及 Mark White。

感谢 Naomi Hatchman 授权我使用企鹅模型（参见第 23 章和第 29 章）并提供了各种格式和分辨率的图像文件。

本书使用了一个基础型的光线跟踪器，其早期版本由 Peter Kohout 和 James McGregor 编制，最新版本则由 Sverre Kvåle 编制完成。另外，Sverre 还将全部代码文件转换为 PC 格式并测试了相关的示例代码。在此，也向他们的劳动成果以及高超的编程水平表达我崇高的致意。

本书网站由 HwaLeon（Ayo）Lee 制作完成，感谢 Ayo，他的慷慨和专业的开发技术极大地丰富了本书的在线资源。

感谢我的学生 Ayo, James McGregor, Naomi, Peter 以及 Sverre; James McNess 还是 Naomi 的学生。本书的动画演示文件由 Hong Son Nguyen 制作, 感谢他的授权并允许我将其发布至本书的网站上。

我的学生 Naomi Hatchman, André Mazzone, Glen Sharah, Rangi Sutton 以及诸多在校同仁均参与了奥斯卡影片的制作过程, 他们高超的技艺也使得参展影片屡获殊荣——这也是对我最大的鼓励。其中, 获奖影片包括: 《快乐的大脚》、《指环王: 王者归来》以及《黑客帝国》。

关于非线性投影以及立体对问题, 和 Paul Bourke 之间的交流令我受益匪浅。Paul 审阅了第 11 章和第 12 章, 他的精彩点评极大地增加了相关应用程序的渲染真实性。针对于此, 他还允许我无偿使用其网站 <http://local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/> 中的素材, 谢谢 Paul!

另外, 这里还要感谢 Paul Debevec 授权我使用其网站 <http://www.debevec.org/Probes/> 中的 Uffizi 探头图像及其光探头映射设备。

下列人员和机构向我提供了大量极具价值的免费信息, 请允许我向你们表达我最真挚的谢意, 他们是: Cyberware 公司的 Stephen Addleman (马模型、Isis 模型和 Ganesh 模型, 源于 <http://www.cyberware.com/>)、James Hastings-Trew (第 29 章中的地图图像, 源于 <http://planetpixlemporium.com/planets.html>)、Phillipe Hurbain (第 11 章和第 12 章中的天空图像, 源于 <http://www.philohome.com/>)、Opti-Gone International 公司的 Michael Levin (第 12 章中 Mirage 2000 设备的相关素材, 源于 <http://www.optigone.com/>)、Lopez-Fabrega Design 公司的 Ric Lopez-Fabrega (第 29 章中的天空图像, 源于 <http://www.lfgrafix.com>)、Morgan Kaufmann 出版社 (第 31 章中的图像和示例代码)、Utah 大学的 Steve Parker (第 26 章中的 Cornell 箱体图像) 以及 Greg Turk (PLY 代码以及 Stanford 兔对象的各种 PLY 模型, 源于 http://www.cc.gatech.edu/projects/large_models/index.htm)。

最后感谢 Eric Hainos 和 Pete Shirley 对本书的热情推荐!

目 录

Contents

第 1 章 光线跟踪器和程序设计	1	1.11.5 内存分配.....	11
1.1 通用解决方案	1	1.11.6 简化操作.....	11
1.2 继承	2	1.11.7 透明度.....	11
1.3 语言	2	1.11.8 图像的使用.....	11
1.4 建立场景	3	进一步阅读	11
1.5 用户接口	3	第 2 章 数学知识.....	13
1.6 基础光线跟踪器	4	本章目标	13
1.7 开发光线跟踪器	4	2.1 集合	13
1.8 单精度浮点数和双精度浮点数	5	2.1.1 集合定义和集合符号.....	13
1.9 效率问题	5	2.1.2 子集.....	14
1.9.1 简约之美.....	5	2.1.3 有序偶和集合的笛卡儿积.....	14
1.9.2 数据存储.....	6	2.2 区间	14
1.9.3 按引用传递.....	6	2.3 角度	15
1.9.4 避免返回引用.....	6	2.3.1 度量方法.....	15
1.9.5 避免使用浮点型除法操作.....	7	2.3.2 角度制和弧度制.....	16
1.9.6 使用内联函数.....	7	2.4 三角学	16
1.9.7 工具类.....	7	2.4.1 定义.....	16
1.10 代码风格	7	2.4.2 三角关系.....	16
1.10.1 标识符.....	7	2.5 坐标系统	17
1.10.2 实体数据类型.....	8	2.5.1 3D 笛卡儿坐标.....	17
1.10.3 封装.....	8	2.5.2 圆柱坐标系统.....	18
1.10.4 函数签名.....	8	2.5.3 球体坐标.....	18
1.10.5 改变函数签名.....	9	2.6 向量	19
1.10.6 纯虚函数和虚函数.....	9	2.6.1 向量的定义及其表示方法.....	19
1.10.7 文件结构.....	9	2.6.2 向量计算.....	20
1.10.8 项目结构.....	10	2.7 顶点	21
1.11 调试	10	2.8 法线	22
1.11.1 熟悉调试器.....	10	2.9 数学表面	23
1.11.2 对单像素图像实施光线跟踪.....	10	2.9.1 隐式表面.....	23
1.11.3 跟踪像素坐标.....	10	2.9.2 参数表面.....	25
1.11.4 使用 cout 语句.....	10	2.9.3 切平面.....	27

2.10 立体角	28	提示和讨论	63
2.10.1 定义	28	进一步阅读	63
2.10.2 球体坐标中的立体角	28	问题	64
2.10.3 半球体积分	29	练习	65
2.11 随机数	30	第4章 抗锯齿技术	66
2.12 正交基和正交坐标系	32	本章目标	66
2.12.1 定义	32	4.1 锯齿效果	67
2.12.2 构造正交基	32	4.2 解决方案	68
2.12.3 正交坐标系	33	4.2.1 增加图像的分辨率	68
2.12.4 使用正交坐标系	34	4.2.2 均匀采样	68
2.13 等比数列	34	4.2.3 随机采样	70
2.14 $\delta()$ 函数	34	4.2.4 抖动采样	71
提示和讨论	35	4.3 细节抗锯齿技术	71
进一步阅读	35	4.4 滤波	72
问题	36	进一步阅读	73
练习	36	问题	73
第3章 光线跟踪器的基本要素	37	练习	73
本章目标	37	第5章 采样技术	74
3.1 光线跟踪计算的工作原理	38	本章目标	74
3.2 场景世界	40	5.1 采样框架	75
3.3 光线	40	5.2 良好采样技术所具备的特征	81
3.4 光线-对象相交测试	41	5.3 采样模式	82
3.4.1 概述	41	5.3.1 随机采样	82
3.4.2 光线和隐式表面	42	5.3.2 抖动采样	82
3.4.3 几何对象	43	5.3.3 n -Rooks 采样	83
3.4.4 平面	44	5.3.4 多重抖动采样	84
3.4.5 球体	46	5.3.5 Hammersley 采样	85
3.5 颜色值	49	5.4 混合索引	87
3.6 基本的光线跟踪器	51	5.5 渲染结果	89
3.6.1 工作类	52	提示和讨论	93
3.6.2 主函数	53	进一步阅读	94
3.6.3 视平面	53	问题	94
3.6.4 像素和图像	55	练习	95
3.6.5 build()函数	56	第6章 圆采样映射	96
3.6.6 渲染场景	57	本章目标	96
3.7 跟踪器	58	6.1 选择性采样	96
3.8 颜色显示	59	6.2 同心映射	97
3.9 对多个对象实施光线跟踪	60		

进一步阅读	100	第 10 章 景深	134
问题	100	本章目标	134
练习	100	10.1 薄透镜理论	134
第 7 章 半球体采样映射	101	10.2 模拟	136
本章目标	101	10.3 实现	139
7.1 余弦分布	101	10.4 结果	141
7.2 映射理论	103	进一步阅读	144
7.3 实现	104	问题	144
7.4 操作结果	104	练习	145
进一步阅读	105	第 11 章 非线性投影	146
练习	106	本章目标	146
第 8 章 投影视图	107	11.1 鱼眼投影	147
本章目标	107	11.1.1 理论概述	147
8.1 定义	108	11.1.2 实现	150
8.2 透视投影的特征	109	11.1.3 结果	152
8.3 轴对齐透视图	113	11.2 球体全景投影	154
8.4 实现方法	114	11.2.1 理论概述	154
8.5 处理结果	115	11.2.2 实现	155
8.6 透视偏差	117	11.2.3 结果	156
进一步阅读	118	进一步阅读	158
问题	118	问题	158
练习	119	练习	158
第 9 章 视见系统的应用	121	第 12 章 立体视觉	161
本章目标	121	本章目标	161
9.1 描述	121	12.1 视差问题	162
9.2 用户接口	122	12.2 相机的布局	164
9.3 视见坐标系	123	12.3 立体相机	166
9.4 光线计算	125	12.4 立体图像对的显示和观察	167
9.5 实现	126	12.5 实现	168
9.6 示例	129	12.6 结果	171
9.7 缩放	130	提示和讨论	174
9.8 倾斜角	131	进一步阅读	174
9.9 异常	131	问题	174
进一步阅读	132	练习	175
问题	132	第 13 章 理论基础	176
练习	133	本章目标	176
		13.1 辐射量	177

13.2 入射辐射度的角度依赖性	178	14.6.2 双面着色	214
13.3 光线方向及其标记符号	179	14.7 Material 类	216
13.4 辐射度和入射辐射度	180	14.8 示例	218
13.5 光谱表示法	180	14.9 溢色处理	220
13.6 BRDFs	181	进一步阅读	222
13.6.1 定义	181	问题	222
13.6.2 反射辐射度	182	练习	224
13.6.3 BRDFs 的特征	182	第 15 章 镜面反射	225
13.7 反射率	182	本章目标	225
13.8 完全漫反射 BRDF	183	15.1 光照模型	225
13.9 BRDF 类	184	15.2 实现	228
13.9.1 类的组织方式以及成员函数	184	15.3 视角依赖性	231
13.9.2 Lambertian 类的实现	186	15.4 有色高光	231
13.10 光照渲染模型	187	15.5 高光和颜色上溢	232
13.10.1 半球模型	187	15.6 其他反射模型	233
13.10.2 面积模型	188	进一步阅读	234
13.10.3 解决方案	190	问题	234
13.11 Monte Carlo 积分	191	练习	235
13.11.1 基础知识概述	191	第 16 章 阴影	237
13.11.2 方差	193	本章目标	237
13.11.3 重要性采样	193	16.1 阴影的重要性	237
进一步阅读	195	16.2 阴影的定义	238
练习	196	16.3 实现	240
第 14 章 光照和材质	197	16.4 ϵ 系数	243
本章目标	197	16.5 示例	245
14.1 光照和反射	198	16.6 计算开销	246
14.2 光照	200	16.7 阴影选项	246
14.2.1 环境光照	201	提示和讨论	247
14.2.2 方向性光照	201	进一步阅读	247
14.2.3 点光源	203	问题	247
14.3 光照类	206	练习	248
14.4 World 类和 ShadeRec 类	208	第 17 章 环境遮挡	250
14.4.1 World 类	208	本章目标	250
14.4.2 ShadeRec 类	209	17.1 建模过程	251
14.5 光线跟踪器类	211	17.2 实现	252
14.6 漫反射着色	213	17.3 一个简单的场景	254
14.6.1 基本公式	213		

17.4 双面对象	259	19.5.5 通用对象和默认对象	307
17.5 其他场景	260	19.6 着色问题	307
提示和讨论	261	19.7 局部对象	307
进一步阅读	261	19.7.1 基本理论	307
问题	262	19.7.2 局部圆柱体	308
练习	263	19.7.3 局部球体	308
第 18 章 区域光照	264	19.7.4 局部圆环体	310
本章目标	264	19.7.5 角度范围	311
18.1 区域光源体系结构	265	19.8 组合对象	312
18.2 直接渲染	266	19.8.1 组合对象的优势	312
18.3 直接光照计算	267	19.8.2 实现	312
18.4 区域光照跟踪器	267	19.8.3 实体圆柱体	314
18.5 自发光材质	268	进一步阅读	316
18.6 其他类型的材质	269	问题	316
18.7 几何对象类	270	练习	316
18.8 AreaLight 类	271	第 20 章 仿射变换	321
18.9 示例图像	274	本章目标	321
18.10 环境光照	276	20.1 2D 变换	322
提示和讨论	281	20.1.1 缩放操作	322
进一步阅读	282	20.1.2 旋转操作	323
问题	282	20.1.3 剪切操作	324
练习	283	20.1.4 镜像变换	325
第 19 章 光线与对象间的相交计算	286	20.1.5 平移变换	325
本章目标	286	20.2 3D 齐次坐标	325
19.1 包围盒	287	20.3 3D 变换	326
19.2 轴对齐盒体	291	20.3.1 平移变换	326
19.3 三角形	293	20.3.2 缩放变换	327
19.3.1 三角形的定义	293	20.3.3 旋转变换	328
19.3.2 相交测试	294	20.3.4 镜像变换	328
19.4 其他对象	298	20.3.5 剪切变换	329
19.4.1 圆形对象	298	20.4 组合变换	329
19.4.2 矩形对象	298	20.5 逆变换	332
19.5 通用对象	300	20.5.1 独特的逆变换	332
19.5.1 目的	300	20.5.2 组合逆变换	333
19.5.2 通用球体、圆形以及矩形对象	301	20.6 任意直线的旋转变换	333
19.5.3 通用开放式圆柱体	301	进一步阅读	335
19.5.4 通用圆环体	302	问题	336
		练习	336