

渲染技术发展概述：计算机图形学里程碑

张家辉¹

¹(浙江大学 软件学院, 浙江 宁波 315048)

摘要: 渲染技术是计算机图形学领域的核心要素，关键在于三维场景向二维图像的转换过程，旨在通过模拟光与物质的相互作用来创造出真实或超真实的视觉图像。本文综述了该领域的技术演进，从原始的线框渲染和光栅化方法到复杂的光线追踪和全局照明模型。特别提到了光照计算的飞跃，包括 Gouraud 和 Phong 着色，及其对实时渲染系统的影响。纹理映射技术的进步——包括 MIP 映射和各向异性过滤，及其在增强视觉细节方面的作用也被强调。随着技术的进步，当前的挑战在于全局照明的高计算成本，但不断优化的算法和提升的计算能力预示着未来更高效率和更真实感渲染技术的可能性。总之，渲染技术是计算机图形学不断进步的强大推动力。

关键词: 计算机图形学; 渲染算法; 全局照明

Overview of Rendering Technology Evolution: Milestones in Computer Graphics

ZHANG Jia-Hui¹

¹(school of software, Zhejiang University, Ningbo 315048, China)

Abstract: Rendering technology is a fundamental element in the field of computer graphics, pivotal to the transformation of three-dimensional scenes into two-dimensional images. Its primary objective is to create realistic or hyper-realistic visual imagery by simulating the interaction of light with materials. This paper provides an overview of the technological evolution within this domain, from primitive wireframe rendering and rasterization methods to sophisticated ray tracing and global illumination models. A particular emphasis is placed on the leaps made in lighting calculations, including Gouraud and Phong shading techniques and their impact on real-time rendering systems. Advances in texture mapping techniques, such as MIP mapping and anisotropic filtering and their role in enhancing visual details, are also highlighted. As technology progresses, the current challenge lies in the high computational cost of global illumination. However, continuous algorithmic optimizations and increasing computational power indicate the potential for more efficient and more realistic rendering technologies in the future. In summary, rendering technology is a potent driving force behind the ongoing advancements in computer graphics.

Key words: Computer Graphics; Rendering Algorithms; Global Illumination

1 引言

1.1 渲染技术在计算机图形学中的重要性

渲染技术，作为计算机图形学的核心组成部分，自成科学领域以来一直是数十年技术进步的重要推动力。它的根本目的是为了创造出既精确又令人信服的视觉图像，通过模拟光与物质的交互效应，将 3D 场景转换为 2D 图像，而这一进程是高度计算密集型的，对算法的设计和硬件的性能提出了极高的要求。渲染技术影响了从数码艺术创作到科学可视化，从电影特效到游戏设计的多个领域，它不仅使得虚拟世界的构建成为可能，同时也极大地推进了用户交互体验的发展^[1]。

在过去的几十年中，渲染技术已经从简单的线框模型和平面着色，发展到了今天高度复杂的全局照明和真实感图像生成。这种发展不仅是技术进步的结果，也是不断变化的用户需求和期望的响应。计算机图形学的研究者和从业者一直在寻求更高的图像质量、更快的渲染速度、更有效的资源利用以及更高的可访问性

和易用性。随着技术的发展,渲染算法变得更为复杂,但它们的目标始终如一:尽可能真实地再现自然界的视觉效果,并以此为基础,再创造出超越现实的视觉体验^[2, 3]。

此外,渲染技术对于推动硬件发展也具有不可忽视的作用。高端的渲染需求驱动了图形处理单元(GPU)性能的持续提升,这反过来又促进了渲染技术的进步。现代的 GPU 不仅是高效渲染的工具,更成为了推动计算机视觉、机器学习和科学计算等领域进展的关键硬件基础。

综上所述,渲染技术既是计算机图形学的一个关键分支,也是现代信息技术领域中最活跃、最具革新性的研究领域之一。该领域的发展不但体现在技术和算法的进步上,更在于它如何塑造和丰富我们对于虚拟世界的理解和探索。

1.2 渲染技术的发展历程

自 20 世纪中叶计算机图形学领域诞生以来,渲染技术的发展历程便开始了其蜿蜒的道路。早期的渲染工作主要集中在简化的线框模型和基本的光栅化过程上。这一时期的研究和应用为后续更高级的图形技术奠定了基础。随着计算能力的增强和图形学理论的深入,二维图像的渲染逐渐演变为更为复杂的三维场景的构建。70 年代,随着计算机技术的飞速发展,出现了首个公认的 3D 渲染模型——Phong 模型,以及伴随其而来的 Phong 着色,它们在当时被看作是一个巨大的飞跃^[4]。

Phong 模型的提出标志着光照模型在渲染技术中的重要性,为后续渲染算法提供了光照效果的计算基础。此后,渲染技术开始着重考虑光线如何与物体表面相互作用,产生令人信服的视觉效果。随后,渲染算法开始引入更多的现实世界因素,例如反光、阴影、透明度和纹理等。这些因素的加入显著提升了渲染图像的真实感^[5]。

进入 80 年代,随着计算机硬件性能的提高和图形学算法的突破,光线追踪算法和辐射度方法被引入渲染领域。这些技术的采用大幅度提高了渲染图像的质量,逼真度达到了新的高度。光线追踪通过模拟光的传播路径来生成影像,为复杂的视觉效果,如反射、折射和散射等提供了计算方法。辐射度方法则通过全局照明计算,更精确地模拟了光在场景中如何互相作用,产生了更加柔和和均匀的阴影效果^[6]。

90 年代至 21 世纪初,随着个人电脑的普及和图形处理单元(GPU)的引入,实时渲染技术得到了长足的发展。这一时期,硬件加速成为可能,让复杂的渲染任务得以在更短的时间内完成。这同时也是着色器语言的诞生时期,它们极大地扩展了艺术家和开发者设计和实现复杂渲染效果的能力。

21 世纪初至今,基于物理的渲染(PBR)开始成为主流。PBR 强调使用更加真实的材料和光照模型,以创建出更符合物理规律的图像。它在游戏设计和电影制作中得到了广泛应用,因为 PBR 能够提供一致的视觉效果,无论观看角度和光照条件如何变化。此外,近年来非真实感渲染(NPR)也成为研究的热点,它着重于创造出可以超越现实世界的、具有艺术风格的图像,拓展了计算机图形学的边界。

如今,渲染技术正朝着更加智能和自动化的方向发展。利用机器学习和人工智能的进步,研究者正在开发新算法,以进一步缩短渲染时间,提升图像质量,同时减少对专业知识的依赖。这既包括通过深度学习来优化光线追踪的性能,也包括自动生成高质量资产的技术。这些进步正在不断推动渲染技术向前发展,激发着新的应用可能,为计算机图形学的未来描绘出一幅充满活力和创新的图景。

2 渲染技术的早期发展

2.1 二维图形的起源和渲染

二维(2D)图形渲染在计算机图形学的早期历史中占有重要地位。最初,渲染技术的应用主要集中在向量图形,这些图形在二维空间通过一系列点和线来定义图像。通过使用一系列算法和技术,如线条算法(如 Bresenham 算法)^[7]和着色算法(如 Scanline 填充算法),工程师和研究人员能够在计算机屏幕上绘制出简单的图形和图案。这些基础技术为后来的图形界面设计和计算机辅助设计(CAD)系统等方面奠定了基石^[8]。

2.2 早期的三维图形表示方法

随着计算机技术的发展,渲染技术也开始从二维拓展到三维(3D)。三维图形的表示方法主要通过模型来完成,最初是使用线框模型,其中三维形状通过其边缘线来呈现,但不包含表面或颜色信息。这种方法在当时由于其较低的计算要求而被广泛采用,尤其是在硬件资源有限的条件下。随后,随着表面细分技术的发展,人们开始能够创建出更加复杂和详细的三维模型,这标志着对三维图形表示方法的深入研究和发[9, 10]。

2.3 早期的渲染硬件和软件

在早期的计算机图形学发展中,渲染硬件和软件的发展同样显得至关重要。在硬件方面,专用的图形显示系统如早期的矢量显示器和后来的光栅扫描显示器,提供了对图形数据的基础渲染支持。此外,用于加速图形处理的专用硬件,如图形加速卡,也开始出现。这些硬件显著提高了渲染效能,尤其是在交互式应用和实时渲染领域。

在软件方面,早期的图形应用编程接口(API)和渲染引擎开始出现。这些软件工具抽象了底层硬件的复杂性,为开发者提供了一个更高级别和易于操作的编程接口。随着早期的图形应用编程接口例如 OpenGL 和 Direct3D 的推出,软件开发者能够更加高效地创建复杂的三维图形应用。这些发展在提高图形渲染的质量和效率方面发挥了重要作用,为计算机图形学向更高层次的发展奠定了基础。

3 三维图形和渲染算法的历史

3.1 线框渲染和隐藏线消除

三维图形的线框渲染是最早的三维渲染方法之一,涉及将三维物体的边缘投影到二维屏幕上,形成由边缘构成的图像。此方法的主要挑战在于处理物体的遮挡关系,即确定哪些线段应该被视为可见,哪些应该被隐藏。为解决这一问题,隐藏线消除算法被开发出来。这些算法,如 Robert's algorithm 等,使得渲染的图像能更真实地反映三维场景的深度和结构。这些方法为渲染实体模型奠定了基础,也为后续的渲染技术如表面细化和贴图技术提供了技术准备[10]。

3.2 扫描转换和光栅化算法

随着图形显示技术由矢量显示器转向光栅显示器,扫描转换和光栅化算法成为三维图形渲染的关键技术。这些算法负责将三维几何图形转换成像素阵列,即屏幕上的二维图像。其中,光栅化过程包括确定哪些像素组成了图形的内部,并将相应的颜色和纹理信息填充到这些像素上。这一转换过程涉及多个步骤,包括顶点处理、图元装配、像素着色等,每个步骤都要求精确的数学运算和复杂的优化策略。这些技术大大推进了实时渲染的可能性,为视频游戏和交互式媒体的发展做出了重要贡献[14]。

3.3 Z-Buffering 和深度测试

为了正确处理三维场景中物体的遮挡关系,Z-Buffering(或深度缓冲)技术被引入。Z-Buffering 是一种用于实时渲染的技术,通过在每个像素处存储深度信息(即距离观察者的距离),来确定哪个像素在最终图像中应该可见。当新的像素被渲染时,通过深度测试和比较现有的深度值,来确定是否更新像素的颜色。这种方法不仅提高了渲染的效率,而且能够生成更为准确和真实的视觉结果[11]。

Z-Buffering 的实施,结合了先进的渲染技术,比如光照计算和阴影生成,使得渲染的场景能够表现出令人信服的空间感和层次感。这些技术的发展,不仅促进了计算机图形学的理论研究,也推动了硬件制造商开发更为强大的图形处理单元,进一步加速了渲染技术的进步和应用的普及。这些算法和方法的集成与优化,直接影响了计算机图形学作为一门科学的发展,同时也塑造了我们今天在多媒体和数字娱乐中看到的复杂和

高质量的图形表现^[12]。

4 光照模型和着色技术

在三维图形渲染中，准确的模拟光照是实现真实感视觉效果的关键因素。着色技术和光照模型的发展极大地提升了渲染图像的质量，为创造出逼真的数字图像和动画奠定了基础。

4.1 Gouraud 和 Phong 着色

Gouraud 着色和 Phong 着色是两种广泛使用的着色技术^[13]。Gouraud 着色由 Henri Gouraud 在 1971 年提出，它是一种顶点着色方法，通过计算多边形顶点处的颜色，然后在多边形表面上进行线性插值来获得整个表面的颜色。这种方法可以产生较为平滑的着色效果，特别是对于低多边形计数的模型。然而，Gouraud 着色可能不会准确渲染出锐利的光照变化，如高光。

Phong 着色^[14]，由 Bui Tuong Phong 于 1973 年引入，是一种改进的着色技术，它在像素级别上进行光照计算。与 Gouraud 着色不同，Phong 着色在每个像素处计算光照效果，能够更精细地捕捉到光照细节，特别是镜面高光。这种方法因其能够产生更加真实的图像而得到广泛应用^[15]。

4.2 光照模型：环境光、漫反射、镜面反射

光照模型的目的是为了模拟现实世界中光的行为。基本的光照模型包括环境光、漫反射和镜面反射。环境光是对全局光照的简化，假设光线均匀地散布在场景中，不考虑任何方向性，为场景提供基础的明暗效果。漫反射描述了光线照射到粗糙表面上，以各个方向均匀反射的现象，它决定了物体的主要颜色。镜面反射模型则用于模拟光线照射到光滑表面并产生高光的效果。

4.3 高级光照模型：Blinn-Phong 模型

Blinn-Phong 模型是 Phong 模型的一种变体，由 Jim Blinn 提出^[16]。它对 Phong 模型中的镜面反射部分进行了改进，引入了“半程向量”的概念，这是从光源方向和观察方向的中间向量。Blinn-Phong 模型提供了一种计算上更有效率的方式来近似镜面高光，特别是在使用低指数的高光时，这使得模型更加实用，更容易集成到实时渲染系统中。

总而言之，光照模型和着色技术的发展对于三维图形学的演进起到了决定性的作用。它们不仅增加了渲染图像的真实性和视觉吸引力，而且对于提升用户的视觉体验和加深对三维场景理解有着不可忽视的贡献。随着技术的进一步发展，高级光照模型如基于物理的渲染（PBR）应运而生^[17]，进一步增强了三维图形的真实感

5 纹理映射和材料效果

在三维图形学中，纹理映射是一种增强视觉细节和材料真实感的关键技术，它允许二维图像（纹理）被映射到三维物体的表面上。这不仅提高了图形的真实性，同时也提升了渲染效率，因为相比复杂的几何细节，纹理更易于计算和存储。

5.1 纹理映射的基本概念

纹理映射的基本概念涉及将二维纹理图像均匀地附着到三维模型的表面。这一过程需要纹理坐标，即 UV 坐标，将纹理图像上的每个像素点与模型表面的特定点相对应。纹理映射的方法有多种，包括平面映射、圆柱映射、球面映射等，每种技术都有其适用的场景和优缺点。在执行纹理映射时，还要考虑纹理过滤、纹理包裹等问题，以确保纹理的平滑性和连贯性^[18]。

5.2 MIP 映射和各向异性过滤

为了解决物体远距离观察时纹理出现走样的问题，MIP 映射技术被提出。MIP 映射是一种纹理抗锯齿技术，它通过存储纹理的多个分辨率版本，并根据物体与相机的距离来选择适当的分辨率进行渲染。这种方法可以有效减少纹理在远距离观察时的模糊和走样现象^[19]。

此外，各向异性过滤是一种更先进的纹理过滤技术^[20]，能够针对不同的观察角度和距离保持纹理细节的清晰度。不同于 MIP 映射的各向同性过滤，各向异性过滤会考虑纹理在屏幕上投影的形状，从而提供更佳的纹理质量，特别是在观察角度变化较大的表面。

5.3 法线贴图和位移贴图的发展

随着对图形真实性要求的提升，单纯的纹理映射已无法满足需要，因此法线贴图和位移贴图技术应运而生^[21]。法线贴图利用在每个像素点上存储的法线向量信息来模拟光照下的高度细节，从而在不增加模型几何复杂度的前提下，提供物体表面更为精细的光照效果。这种技术尤其适用于复杂的表面细节渲染，例如皮肤、布料的纹理等。

位移贴图则进一步提升了表面细节的真实感，它通过纹理映射的方法改变模型表面的实际几何形状。不同于法线贴图仅影响光照，位移贴图会根据纹理中的值实际地移动模型表面上的顶点，从而创造出真正的凹凸感。这种技术在视觉上产生了更为显著的三维效果，但同时也要要求更高的计算资源。

综上所述，纹理映射及相关的材料效果技术在三维图形学领域发挥着举足轻重的作用。它们不仅极大地提高了视觉场景的复杂度和真实性，而且优化了渲染性能，使得三维图形的应用领域得到了极大的拓展和深化。随着技术的不断进步，这些方法将继续演变，以适应不断增长的图形质量和性能要求。

6 全局照明和真实感渲染

全局照明技术在三维图形领域扮演了至关重要的角色，它提供了一种接近现实的方法来模拟复杂场景中光的行为。这些技术考虑了光线与物体交互后的所有效果，包括反射、折射、散射和漫反射等，以产生高度真实感的图像。

6.1 全局照明的基本原理

全局照明（Global Illumination, GI）指的是在三维场景中，不仅模拟直接光源对物体的照明，还模拟光线从一个物体表面反射到另一个物体上的间接光效应。这种技术关注于光线传输的整体效应，包括光线多次反射引起的颜色交互和复杂阴影等现象。全局照明的计算通常相当复杂，并且要求大量的计算资源，因此其技术发展密切跟随硬件能力的提高^[22]。

6.2 光线追踪和光线投射

光线追踪（Ray Tracing）是一种著名的全局照明技术，它通过追踪从观察者的视点发出，反射和折射经过场景中物体的光线，以计算每个像素的颜色值。光线追踪能够产生非常真实的图像，特别是在模拟透明、反光表面和复杂光照效果方面^[23]。光线投射（Ray Casting）是光线追踪的简化版，它仅考虑光线与物体的第一次交互，因而计算速度更快，但不考虑光线的多次反射或折射。

6.3 辐射度理论和光子映射

辐射度理论（Radiosity）是另一种全局照明方法，它侧重于场景内的漫反射效果。辐射度方法将场景分割为许多小的平面元素，并计算这些元素间互相照射的光能传输^[24]。该技术特别适用于模拟间接光的软阴影和颜色渗透效果。辐射度算法通常用于静态场景，因为其计算过程要求高昂的计算成本。

光子映射 (Photon Mapping) 是一种结合光线追踪和辐射度优点的方法, 由 Henrik Wann Jensen 于 1996 年提出。光子映射首先模拟光源发出的光子在场景中的散播过程, 然后将这些信息存储在光子图中。最后, 在进行光线追踪时, 利用存储的光子信息来计算全局照明效果, 从而提高计算的效率和图像的真实性。

这些全局照明技术的开发显著提升了三维图形的真实感, 并且在影视制作、游戏设计和建筑可视化等领域找到了广泛的应用。随着计算能力的增强以及算法的优化, 全局照明技术正在变得更加高效, 为未来的图形渲染工作提供了更多可能性。

7 结论

随着计算机图形学领域的不断进步, 渲染技术作为其核心的组成部分, 其发展对于整个学科的推动作用不言而喻。本文通过对现有渲染技术的分析, 旨在对这一进步进行总结并探讨。

7.1 渲染技术的发展对计算机图形学的贡献

渲染技术的发展极大地丰富了计算机图形学的表现力。从简单的线框渲染到复杂的全局照明系统, 每一次技术的突破都极大地提升了数字图像的真实感, 扩展了计算机图形学在各个领域内的应用范围。这些技术的进步不仅使得影视特效更加逼真, 还促进了虚拟现实、增强现实等交互式应用的发展, 提升了用户体验。此外, 渲染算法的优化也推动了计算机硬件的发展, 尤其是图形处理单元 (GPU) 的高速进步。

7.2 当前渲染技术的局限性和未来的可能性

尽管渲染技术已经取得了显著的进展, 但当前技术的局限性仍然存在。例如, 高质量全局照明算法往往需要昂贵的计算成本, 限制了其在实时应用中的使用。此外, 现实世界的光照和材料属性在其复杂性上远超目前大多数渲染技术所能模拟的范围。这些局限性成为了推动未来技术发展的动力。

随着计算能力的增加和渲染算法的持续优化, 未来的渲染技术有可能实现更加高效的全局照明计算, 使得真实感渲染在实时应用中变得更加可行。此外, 基于物理的渲染技术 (PBR) 的进步将使得材料属性的模拟更加精确^[17], 进一步提升图像的真实感。

8 参考文献

- [1] Shirley P, Ashikhmin M, Marschner S. Fundamentals of computer graphics [M]. AK Peters/CRC Press, 2009.
- [2] Pharr M, Jakob W, Humphreys G. Physically based rendering: From theory to implementation [M]. MIT Press, 2023.
- [3] Akenine-Moller T, Haines E, Hoffman N. Real-time rendering [M]. AK Peters/crc Press, 2019.
- [4] Foley JD. Computer graphics: principles and practice [M]. Addison-Wesley Professional, 1996.
- [5] Glassner AS. An introduction to ray tracing [M]. Morgan Kaufmann, 1989.
- [6] Sillion FX, Puech C. Radiosity and global illumination [M]. Morgan Kaufmann Publishers, 1994.
- [7] Bresenham JE. Algorithm for computer control of a digital plotter [M]. Seminal graphics: pioneering efforts that shaped the field. 1998: 1-6.
- [8] Hughes J, Van Dam A, Mcguire M, et al. Computer graphics, principles and practice. Addison Wesley [Z]. 1990
- [9] Sutherland IE, Sproull RF, Schumacker RA. A characterization of ten hidden-surface algorithms [J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 1974, 6(1): 1-55.
- [10] Catmull EE. A subdivision algorithm for computer display of curved surfaces [M]. The University of Utah, 1974.
- [11] Foley JD, Van Dam A, Feiner SK, et al. Introduction to computer graphics [M]. Addison-Wesley Reading, 1994.
- [12] Buss SR. 3D computer graphics: a mathematical introduction with OpenGL [M]. Cambridge University Press, 2003.
- [13] Bishop G, Weimer DM. Fast phong shading [J]. ACM Siggraph Computer Graphics, 1986, 20(4): 103-6.
- [14] Phong BT. Illumination for computer generated pictures [M]. Seminal graphics: pioneering efforts that shaped the field. 1998:

95-101.

- [15] Mcauley S, Hill S, Hoffman N, et al. Practical physically-based shading in film and game production [M]. ACM SIGGRAPH 2012 Courses. 2012: 1-7.
- [16] Blinn JF. Models of light reflection for computer synthesized pictures; proceedings of the Proceedings of the 4th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, F, 1977 [C].
- [17] Cook RL, Torrance KE. A reflectance model for computer graphics [J]. ACM Transactions on Graphics (ToG), 1982, 1(1): 7-24.
- [18] Heckbert PS. Fundamentals of texture mapping and image warping [J]. 1989.
- [19] Williams L. Pyramidal parametrics; proceedings of the Proceedings of the 10th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, F, 1983 [C].
- [20] Mitchell DP, Netravali AN. Reconstruction filters in computer-graphics [J]. ACM Siggraph Computer Graphics, 1988, 22(4): 221-8.
- [21] Olano M, Baker D. Lean mapping; proceedings of the Proceedings of the 2010 ACM SIGGRAPH symposium on Interactive 3D Graphics and Games, F, 2010 [C].
- [22] Kajiya JT. The rendering equation; proceedings of the Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, F, 1986 [C].
- [23] Jensen HW. Global illumination using photon maps; proceedings of the Rendering Techniques' 96: Proceedings of the Eurographics Workshop in Porto, Portugal, June 17-19, 1996 7, F, 1996 [C]. Springer.
- [24] Cohen MF, Greenberg DP. The hemi-cube: A radiosity solution for complex environments [J]. ACM Siggraph Computer Graphics, 1985, 19(3): 31-40.