

三维图形渲染技术国内研究动态

过洁¹ 徐昆² 王璐³ 等

¹南京大学

²清华大学

³山东大学

三维图形渲染（rendering，又称绘制）是采用计算机程序将三维场景描述（通常包含物体几何、材质、光照和相机等参数）转换成二维图像或者图像序列的技术，其本质是将虚拟的三维世界以接近物理世界的真实方式呈现在二维屏幕上，使屏幕上看到的虚拟世界栩栩如生。自1962年伊凡·苏泽兰（Ivan Sutherland）开发第一个渲染系统Sketchpad以来，渲染技术已经发展了60多年，经历了从早期简单的三维物体表面明暗变化模拟到当前大规模复杂场景各类全局光照特效的逼真生成的技术更新迭代。当前，渲染技术已广泛应用于工业设计、建筑设计、虚拟仿真、影视特效、三维游戏和数字文保等领域。

我国在图形渲染领域起步较晚，但是近年来发展迅速。我国作为世界领先的制造业大国，对图形渲染技术在工业设计、虚拟现实和消费电子等领域的应用需求与日俱增，推动了相关产业的发展。随着我国高端制造业的转型和数字经济的飞速发展，以及人工智能国家战略的布局和元宇宙相关产业的发展，围绕渲染技术的基础理论和核心算法研究必将成为新一代信息技术领域至关重要的研究方向，渲染技术的应用前景也必将更加广阔。本文将首先介绍图形渲染技术的分类，然后从真实感渲染、实时渲染、云和分布式渲染、可微渲染以及神经渲染五个方面详细阐述国内目前的研究动态。

图形渲染技术的分类

渲染的终极目标是使虚拟三维场景生成的图像和物理世界拍摄的图像几乎一致，这需要渲染技术对物理世界的各种光传播现象进行客观真实的模拟。以此为目标的渲染方法称为真实感渲染。遗憾的是，物理世界的光传播现象非常复杂，即使只考虑几何光学，也存在多种复杂的光传播路径，导致真实感渲染方法算力消耗大、收敛速度慢、运行性能低。对于追求高性能的实时类应用（如三维游戏和虚拟现实系统）而言，这类方法通常无法直接使用，需要通过大量简化、近似或优化以满足一定帧率（如30帧/秒）的要求。满足这种帧率要求的方法称为实时渲染。由于单机平台算力的局限性，以及云计算和移动设备的普及，云和分布式渲染受到学术界和工业界的广泛关注。云和分布式渲染通过渲染任务在多设备上的分配和协同，可以显著提升渲染性能，同时保证图像的质量。此外，以深度学习为代表的人工智能技术的蓬勃发展也为渲染带来新的机遇和挑战。以可微渲染（differential rendering）和神经渲染（neural rendering）为代表的新一代渲染技术的发展正推动计算机图形学、三维视觉、虚拟现实等领域发生翻天覆地的变革。

真实感渲染

真实感渲染旨在模拟真实世界中的光照、阴影、

反射和折射等现象，创造出视觉逼真的图像。如何得到遵循物理的光照效果是真实感渲染领域研究的核心目标。决定渲染真实感的因素众多，主要包括具有真实感的材质模型以及符合物理规律的光线传输模型等。近年来，国内研究人员在材质模型和全局光照算法的研究领域中有所突破，提出了多种先进的材质模型和高效的全局光照算法。

基于物理的材质建模 国内的主要研究集中在微表面的多次散射模型以及多层材质的表达模型方面。其中比较有特色的是由王贝贝等人^[1]提出的SpongeCake多层材质模型。不同于现有方法，该模型省略了层级材质之间的反射以及折射效果，转而使用体散射介质表达每一层材质，从而将层级材质之间的多次散射过程转化为单次散射的解析解形式，极大地提高了计算效率。此外，Cui等人^[2]还提出了一种无偏的、快速收敛的多次散射Smith模型。该方法基于不变性原理，将原始的单次散射Smith模型拓展为多次散射形式，以保证材质模型的物理真实性。

基于学习的材质表达 胡炳扬等人^[3]提出DeepBRDF模型，将双向反射分布函数(BRDF)视作图像切片，使用卷积网络将多个BRDF压缩到隐空间中，以便于高效的材质编辑和材质重建等应用。为了进一步提升网络对多个测量BRDF的拟合效果，郑传焜等人^[4]利用神经过程(neural process)将材质建模到函数空间中。这不仅提高了拟合的精度，同时方便了对材质的编辑。对于比较复杂的多层材质，南京大学团队提出了NLBRDF^[5]和Meta-Layer^[6]等模型，借助神经网络显著提升了多层材质处理的性能和可编辑性。

全局光照绘制 王贝贝等人^[7]提出了路径分割(path cuts)方法求解纯镜面路径，首次实现了纯镜面之间多次弹射的模拟。在此基础上，李贺等人^[8]将纯镜面的光线传输扩展到光泽表面之间的光线传输。范之闽等人^[9]对已有镜面链样本进行空间复用，基于镜面流形的连续性，首次提出了种子镜面链的重要性采样方法。该方法对于长镜面链和具有复杂可见性的路径也能够实现快速收敛。传统方法通常

使用牛顿迭代寻找镜面链，然而牛顿迭代并不保证收敛，并且对种子路径的选择非常敏感。范之闽等人^[10]提出了一种非牛顿迭代的确定性方法，以多项式形式表示镜面约束，同时，开发了高效的CPU和GPU实现，相比牛顿迭代方法，该方法在多种具有挑战性的场景下具有明显优势。

实时渲染

实时渲染追求渲染的高性能，广泛应用于虚拟现实和游戏等对性能要求较高的领域。国内在实时渲染方面的研究主要集中于基于缓存的实时全局光照和实时后处理技术方面。

基于缓存的实时全局光照 过洁等人^[11]针对实时光线追踪难以处理光泽表面间多次反射的问题，提出了一种基于梯度的迭代搜索方法，能够高效找到较为正确的反射方向，从而得到更加准确的反射结果。此外，为了弥补前面的低采样率，他们引入了一个特制的神经网络进行重建。该方案大幅减少了预计算的开销。张航宇等人^[12]针对ReSTIR GI只能复用光线在第一次反射处的样本这个问题，在世界坐标下使用蓄水池结构，通过基于法线的哈希网格实现了相似样本的高效划分和聚类。Hu等人^[13]实现了包含多次散射的实时介质渲染，提出使用轻量级的网络学习光线在不同参与介质中的多次散射结果，在实时渲染时省掉递归处理多次散射的计算量，并引入精心设计的透射率场和频率敏感模板，降低网络的训练难度。该模型一次训练后就能在不同介质参数、体积数据和光照环境下使用，具有极强的泛用性。

实时后处理技术 浙江大学团队^[14]提出的WSKP降噪方案针对经典的KPCN方法进行改进，达到了实时降噪性能。张浩南等人^[15]使用高清几何缓存作为输入来辅助计算并重建超分(super-resolution)后的内容细节。该方法引入了一种新的策略，在多个尺度融合高清缓存与低清图像的特征信息。该方法是首个在渲染超分领域将高清几何缓存作为输入的解决方案，为之后的研究工作开辟了新

的方向。FuseSR^[16]超分框架同样利用高清几何缓存作为附加输入预测高质量的上采样重建，并引入了一种高效的 H-Net 架构解决低清内容与高清几何缓存的对齐问题。MNSS 框架^[17]采用轻量级的网络设计，通过历史帧与当前帧的低清数据进行高效网络推理，实现了具有竞争力的运行时性能。该工作首次将渲染超分的神经网络方案应用于移动端，为此后的商用落地提供了可能。张浩南等人^[18]提出的渲染超分框架实现了任意分辨率的渲染超分，同时考虑到渲染帧和几何缓存具有相似的频谱值，提出了一种基于傅里叶的隐式神经表示谱。该开源方案利用基于傅里叶的隐式神经表示来编码呈现内容，实现了渲染领域的任意分辨率超分，为后续的研究工作带来启发。南京大学过洁等人提出的 ExtraNet^[19]是首个将帧外插与神经网络相结合的实时插值方案，其使用遮挡运动向量与几何缓存信息输入神经网络处理去遮挡区域和阴影变化，在保证实时推理性能的同时获得高保真度的外插画面，启发了后续的 ExtraSS^[20] 和 FASSET^[21] 等支持联合超分和插帧的研究工作。

云和分布式渲染

随着云计算和移动设备的普及，云渲染受到学术界和工业界研究人员的广泛关注。这一技术将渲染任务发送到云服务器，利用其强大的计算能力，快速完成渲染任务，并将高质量的渲染结果反馈回本地客户端，从而为用户提供远超本地硬件性能限制的渲染效果。同时，随着人们对影像渲染精度和质量需求的提高，场景规模越来越大，一些高精度、大规模的场景无法在单个云计算节点完成渲染，需要进一步采用分布式并行渲染的方式，将渲染任务和场景数据分配给不同节点，由它们共同完成大规模场景渲染的目标。

云渲染 赖泽祺等人^[22]针对手机虚拟现实应用，采用本地渲染的方法减少交互延迟，并根据场景对象与视点的距离，将场景分成前景和背景，客户端在本地渲染前景，而背景则由云服务器渲染，

再在客户端进行图像合成得到最终渲染结果。后续，Meng 等人^[23]进一步将背景分解为近背景和远背景，在客户端渲染近背景和前景，并缓存服务器渲染的远背景帧。同时，客户端通过在相邻帧重用远背景帧减少服务器的数据传输频率。Web3D 以其天然的跨平台性，被广泛应用于云渲染架构中。刘畅等人^[24]提出一种用于动态 Web3D 场景的云渲染架构，使用云渲染器进行全局光照渲染，并将结果保存到全局光照贴图中发送到客户端。客户端将接收到的全局光照贴图与本地渲染结果进行混合，得到质量更高的场景渲染结果。后续，为降低网络延迟，同济大学贾金原团队^[25]提出一套轻量级的云边页（cloud-edge-browser）协同 Web3D 可视化架构，将边缘计算技术应用于云渲染。针对云游戏场景中的云渲染服务器资源分配问题，高永强等人^[26]提出了一种融合边缘计算的多人云游戏系统，通过将游戏渲染任务分配到附近的边缘服务器来改善多人云游戏体验和运营成本。

分布式渲染 徐翔等人^[27]提出一种基于帧间连贯性分布式光线追踪方法，利用前一帧记录的光线在场景块之间的传输规律，优化当前帧场景块在各个节点的分布式存储情况，并通过缓存上一帧光线的亮度，预测当前帧渲染时的光线亮度，将亮度低的光线交由能够轻易存储在内存的简化模型进行渲染，从而减少节点间的光线传输开销。针对光子映射算法中的大规模光子数据，徐翔等人^[28]提出一种负载均衡的分布式光子映射方法，使用莫顿码（Morton code）进行分布式光子树和着色点树并行构建，并通过两棵树的协同遍历实现各个分布式节点之间的任务和数据负载均衡。

可微渲染

可微渲染是计算机图形学领域近年来新兴的研究热点，其目标是通过对传统的渲染管线进行可微化改造，以计算渲染输出图像颜色关于输入场景参数的梯度。有了这一梯度之后，可以将渲染过程融入生成式分析框架和基于梯度下降的优化方法中，

使其可以广泛应用于逆向渲染、三维重建等问题。我国目前在可微渲染理论、可微渲染框架和可微光线追踪方面都取得了一定突破。

可微渲染理论 邢健开等人^[29]受流体模拟工作的启发，提出了拉格朗日视角下的可微光栅化方法。该工作将其他可微渲染方法视为欧拉视角下的可微渲染。两个视角的区别在于：欧拉视角下，只计算在成像平面上位置固定光路（即固定像素位置）的颜色关于场景参数的梯度；而在拉格朗日视角下，不再约束光路在成像平面的位置，而是可以随着场景参数的改变而变化，因此，该方法在求解光路颜色梯度的基础上还允许求解光路几何关于场景参数的梯度。其后续工作^[30]进一步将该思想扩展到可微光线追踪中，利用路径空间流形的概念建立场景参数和光路几何之间的联系。范之闽等人^[31]通过将路径导引策略引入到可微渲染中，提高了三维场景梯度计算的收敛性。

可微渲染框架 2020年，清华大学团队在国产自研深度学习平台计图（Jittor）^[32]基础上，研发了可微光栅化渲染库 JRender，旨在解决可微渲染速度慢、真实感低、复现难等问题。2021年，JRender进一步支持了前向渲染与延迟渲染，并引入多种独有渲染效果，包括环境遮挡、软阴影、全局光照及次表面散射，大幅提升渲染真实感，而以上渲染效果在其他开源可微渲染库中均未得到支持。此外，基于多尺度优化和包围盒机制，JRender 的渲染速度进一步提升。

可微光线追踪 郑少锐等人^[33]研发了一个跨平台高性能渲染系统 LuisaRender，通过结合嵌入于 C++ 和 Python 的领域特定语言（DSL）和即时编译技术，提供了多阶段的 kernel 编程能力，且支持自动微分以实现高效可微渲染。该系统相比同类型渲染系统如 Mitsuba，可获得几倍至一个数量级的速度优势。

神经渲染

神经渲染最早由国外学者提出，但是国内一直

紧跟研究前沿，浙江大学、清华大学、上海科技大学和中国科学技术大学等高校的高水平研究团队在神经数字人、大规模神经三维场景和全局神经渲染等领域取得了国际领先成果，腾讯、阿里巴巴和字节跳动等企业积极推动神经渲染技术在虚拟现实、文物保护、影视与游戏制作等方面的应用。

面向数字人的神经渲染 Neural Body^[34]方法利用结构化 3D 人体骨架模板编码隐式神经表达，实现了动态人体的高效建模，在电影制作、体育广播和远程呈现等应用场景中具有重要的应用潜力。DoubleField^[35]方法结合了表面场和辐射场的优点，用于高保真人体重建和渲染，可保留头发和皮肤的高频细节。Animatable Gaussians^[36]技术提出了一种新颖的动画化高斯表示方法，用于高保真人体建模。NeuralDome^[37]通过对多视点的人体和物体交互进行神经建模，实现了高质量的交互式场景重建，能够高效捕捉和重建复杂的人体动作和物体交互。NeRFFaceLighting^[38]方法利用生成先验实现神经辐射场中的人脸光照表示，通过从融合表示中提取与外观解耦的光照信息，实现了对真实人脸的光照控制。

面向场景的神经渲染 TensoIR^[39]技术提出了一种基于张量分解的逆渲染方法，适用于处理复杂光照和材质的几何与材质解耦。Mirror-NeRF^[40]项目采用 Whitted 光线追踪准确地学习镜子的几何和反射，支持在场景中重建和编辑镜子。ScaNeRF^[41]方法针对大规模场景渲染提出了基于瓦片的可扩展神经辐射场表示，并通过并行分布式优化技术提高了场景渲染效率。I²-SDF^[42]使用可微分的蒙特卡洛光线追踪技术在 Neural SDF 上优化，实现对室内场景几何、材质和光照的高精度重建和编辑。GN-eRF^[43]技术通过引入生成对抗网络（GAN）和逆转网络共同学习辐射场和相机姿态，可以在没有相机姿态信息的情况下高效训练和优化模型。MVSNeRF^[44]通过构建代价体积（cost volume）和使用 3D 卷积神经网络（3D CNN）进行辐射场重建，能够从少量视点输入中高效生成高质量的辐射场。LightFormer^[45]和 NeLT^[46]通过将场景全局传输函数解耦为可组件

化的传输函数，率先突破全局神经渲染的泛化性、伸缩性和动态性难题。

总结与未来展望

近年来，尽管我国在图形渲染技术研究方面取得了显著的成果，但是仍然面临诸多问题和挑战。

在真实感渲染方面，为了满足实时渲染和高效计算的需求，未来的材质模型需要在保证真实感的同时提升计算效率。基于学习的材质方法在表达与压缩等应用中显示出巨大的潜力。然而，目前高质量、大规模的材质数据集相对匮乏，严重制约了深度学习方法在生成、编辑和逆向建模等复杂任务的应用。

在实时渲染方面，人工智能和光线追踪的结合可以进一步提升渲染的性能，有望突破传统方法的上限。同时，以三维高斯泼溅（3DGS）为代表技术的体数据渲染领域也有望借助算力提升而使实时渲染获得新的突破。

在云和分布式渲染方面，目前分布式渲染的相关研究主要集中在大规模场景的分布式光线追踪方法。如何高效利用计算资源，减少通信开销是其研究重点。在云渲染过程中，用户的各种交互信息会被完全上传到云端，如何在此过程中保护用户数据安全和隐私，也将成为研究和开发的重点。

在可微渲染方面，目前可微光栅化的理论已经较为成熟，但可微光线追踪方面仍然有许多尚未解决的问题，例如：如何正确计算复杂光路、复杂光源、复杂材质条件下的梯度，如何高效处理边界情

况，如何有效降低梯度估计的方差等。此外，如何在光线追踪路径空间完善拉格朗日视角下的可微渲染理论也是非常值得深入研究的课题。

在神经渲染方面，神经渲染技术已经在高质量3D图像和视频生成方面展示了强大能力，未来的研究将致力于进一步提升渲染的质量和速度。研究可能集中在开发更高效的神经表达，以获得更高的渲染质量和分辨率，并解决镜面反射等困难场景的重建问题。另一方面，研究新的网络架构和优化算法，以减少计算资源的消耗，实现在移动端的实时高分辨率渲染。■



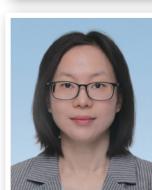
过洁

CCF 高级会员。南京大学长聘副教授。主要研究方向为真实感绘制、实时绘制、虚拟现实。guojie@nju.edu.cn



徐昆

CCF 高级会员。清华大学长聘副教授。主要研究方向为计算机图形学、真实感绘制。xukun@tsinghua.edu.cn



王璐

CCF 专业会员。山东大学教授。主要研究方向为计算机图形学、高度真实感渲染、并行渲染、实时绘制、表观材质建模等。luwang_hcivr@sdu.edu.cn

其他作者：王贝贝 霍宇驰 于飘飘

（本文责任编辑：王斌）

延伸阅读请登录 <http://dl.ccf.org.cn/cccf/list>