

基于3D高斯泼溅技术的航拍建模应用与展望

谢玉强, 许洪健

中水淮河规划设计研究有限公司, 安徽 合肥 230601

DOI:10.61369/WCEST.2025050013

摘 要 : 神经辐射场 (NeRF) 虽能实现照片级真实感的视图合成, 但其基于体积渲染的计算范式存在训练与渲染速度慢的固有瓶颈, 难以满足实时交互应用的需求。三维高斯泼溅 (3D Gaussian Splatting, 3DGS) 作为一种新兴的显式辐射场表示技术, 通过数百万个可学习的3D高斯基元与可微分的光栅化流水线, 在保持高视觉保真度的同时, 实现了实时渲染性能, 推动了神经渲染领域的范式转变。本文系统地阐述了3DGS的核心技术原理, 并对比分析了其相对于传统摄影测量方法的优势与局限。最后展望了3DGS在空间计算及数字孪生等领域的产业化应用前景与未来研究方向。

关 键 词 : 三维重建; 3D高斯泼溅 (3DGS); 实时神经渲染; 数字孪生; 地理信息系统

Application And Prospect Of Aerial Modeling Based On 3D Gaussian Splatting Technology

Xie Yuqiang, Xu Hongjian

China Water Huaihe Planning and Design Research Co., LTD., Hefei, Anhui 230601

Abstract : While Neural Radiance Fields (NeRFs) enable photo-realistic view synthesis, their volume rendering-based computational paradigm suffers from inherent limitations in training and rendering speed, making them unsuitable for real-time interactive applications. 3D Gaussian Splatting (3DGS), an emerging explicit radiance field representation technology, achieves real-time rendering performance while maintaining high visual fidelity through millions of learnable 3D Gaussian basis functions and differentiable rasterization pipelines. This paper systematically elucidates the core technical principles of 3DGS, compares its advantages and limitations with traditional photogrammetric methods, and explores its industrial applications in spatial computing and digital twin fields along with future research directions.

Keywords : 3D reconstruction; 3D Gaussian Splatting (3DGS); real-time neural rendering; digital twin; geographic information system

引言

虚拟现实、数字孪生及自动驾驶等技术的迅猛发展, 对高保真、实时渲染的3D内容产生了巨大需求。传统基于多视点立体视觉或摄影测量的方法虽几何精度高, 但在处理复杂光影、半透明材质及实现任意视角实时渲染方面存在瓶颈, 其生成的网格模型复杂度高, 难以满足交互式应用对毫秒级响应的要求。

神经辐射场 (NeRF) 通过隐式场景表示突破了视图合成的视觉保真度, 但其体积渲染机制依赖沿光线密集采样, 导致训练与渲染速度极慢, 阻碍了其在 AR/VR 等实时应用中的部署。尽管后续研究 (如 Instant-NGP 通过哈希编码) 尝试加速, 其计算范式瓶颈依然存在。

为此, 三维高斯泼溅 (3DGS) 应运而生。它显著区别于 NeRF 的隐式体积表示与射线追踪, 转而使用数百万个可学习的3D高斯基元来显式表达场景, 并基于 GPU 优化的可微分光栅化流程进行渲染。3DGS 不仅在视觉质量上媲美甚至超越 NeRF, 更将渲染速度提升至实时级别 (>30 FPS), 同时将训练时间从数天缩短至数十分钟, 实现了质量与效率的统一, 展现了成为下一代3D内容生成核心技术的巨大潜力。

作者简介:

谢玉强 (1990-), 男, 汉族, 安徽大和人, 学历: 大学本科, 职称: 工程师, 研究方向: 水利信息化、工程测量;

许洪健 (1994-), 男, 汉族, 安徽蚌埠人, 学历: 硕士研究生, 职称: 工程师, 研究方向: 软件开发、水利信息化。

一、3DGS技术原理

3DGS的原理是基于对高斯基元的数学建模和高效的 GPU 光栅化算法的结合。

（一）高斯基元的数学建模与参数化

在3DGS中，整个三维场景被离散化为一个庞大的、可学习的3D高斯基元集合。每个高斯基元由一个三维高斯函数定义，并由一系列可优化的参数所刻画：

中心位置（ μ ）：高斯基元在三维空间中的坐标，通常由 SfM 生成的稀疏点云初始化。

协方差矩阵（ Σ ）：定义高斯的形状、尺度和方向。为确保其在优化过程中的物理有效性（半正定性）， Σ 被分解为旋转矩阵 R （由四元数 q 表示）和缩放矩阵 S （由尺度向量 s 表示），即 $\Sigma = RSS^T R^T$ 。

不透明度（ α ）：一个介于0到1的可学习标量，用于控制该高斯基元在 Alpha 混合中的权重。

颜色 / 外观：通过球谐函数（SH）系数参数化，用于建模视角相关的外观变化，从而精确捕捉复杂的光影效果，如高光和漫反射。

（二）渲染过程

3DGS实现实时渲染的核心在于其完全不同于 NeRF 光线追踪的、具备可微分特性的光栅化流水线。该过程主要包括两个步骤：

1. 3D到2D投影：对于给定相机视角，将所有3D高斯基元根据透视投影变换到该相机的二维图像平面上。每个3D高斯会形成一个2D的椭圆区域，此过程即为“泼溅（Splatting）”。

2. 基于图块的 Alpha 混合：屏幕被划分为多个图块以供并行处理。系统对每个图块内重叠的2D高斯进行深度排序，并按从后到前的顺序进行 Alpha 混合，合成像素最终颜色。这套高效的光栅化器是实现超实时渲染（>100 FPS）的核心。

（三）优化与自适应密度控制

3DGS的训练始于运动恢复结构（SfM）产生的稀疏点云。优化的目标是 minimized 渲染图像与真实训练图像之间的差异，通常采用结合了 L1 损失、结构相似性（D-SSIM）以及感知损失（LPIPS）等的混合损失函数进行监督。

3DGS最精妙的设计之一在于其自适应密度控制机制，它动态地管理高斯集合的规模与分布，是模型从稀疏走向稠密的关键：

1. 致密化过程：在训练过程中，系统会周期性地分析各个高斯基元的优化状态。对于位置梯度累积值较大的高斯，系统会执行克隆操作；对于物理尺寸过大的高斯，则执行分裂操作。这种智能的致密化策略使得模型能够从稀疏点云自动“生长”出描述精细结构的密集表示。

2. 修剪机制：系统会定期移除那些不透明度低于设定阈值或者尺寸异常的高斯基元。这种机制确保了计算资源始终集中在对视觉表现有实质贡献的区域，同时有效消除了可能产生的浮游伪影。

通过这种动态的、闭环的优化策略，3DGS通常能在几十分钟到一小时内收敛，在消费级 GPU 上实现实时（>30 FPS）乃至超实时（>200 FPS）的渲染，从而在视觉质量与渲染效率之间取得平衡。

二、3DGS与传统航拍建模对比

大范围的城市建模是三维重建技术最具挑战性也是最具价值的应用领域之一。该领域对建模区域的精度、范围和效率都有着很高的要求。本章将深入探讨3DGS如何在这一传统上由摄影测量学主导的领域崭露头角，并带来工作流的革新。

（一）传统航拍建模特点

航拍数据通常具有以下特点：拍摄视角为顶视或倾斜、光照条件复杂、图像数量多、重叠度不规则等。传统的倾斜摄影测量工作流，虽然能够生产出几何精度经过严格验证的实景三维模型（通常以纹理网格形式存在），但其过程涉及密集匹配、空中三角测量、点云生成、网格化与纹理映射等多个步骤，整体流程耗时漫长，且最终生成的网格模型在实时渲染的视觉沉浸感和对复杂光影的还原能力上存在不足。

（二）3DGS建模对比

在航拍领域，传统方法如 Context Capture 是生成实景模型的主流手段。与3DGS在视觉沉浸感、几何精度和渲染效率三个维度进行分类对比。

1. 视觉沉浸感

这是3DGS的天然优势领域。基于高斯泼溅的模型能够自然地运动模糊、半透明物体（如水体、玻璃）和复杂的光影交互进行建模，其新视角合成结果具有高度的沉浸感和照片真实感。相比之下，传统的纹理网格在实时渲染引擎中，其光照是基于虚拟光源重新计算的，往往显得生硬、缺乏真实世界的光线微妙变化，呈现出所谓的“合成感”。

2. 几何精度

这是传统方法的传统优势，也是早期3DGS备受质疑之处。然而，随着 AGS 等工作的出现，局面已经发生根本性转变。通过引入强大的几何约束，3DGS模型不再仅仅是“看起来真实”，其内在的几何结构在引入额外约束后已展现出达到度量级精度的潜力，能够满足许多工程测绘与城市规划的应用需求。EOGS在卫星DEM生成上的成功，更是强有力地证明了这一点。

3. 处理效率

3DGS带来的是效率的跃升。传统摄影测量流程从数据准备到最终模型产出，可能需要数天时间。而3DGS，特别是经过优化的变体，能够将这一过程缩短至数小时甚至更短。这种数量级的速度提升，极大地加速了从数据采集到决策支持的闭环。

三、应用与挑战

（一）产业应用前景

目前3DGS技术已开始被集成到主流的创作工具和商业平台中。主流游戏引擎（如 Unreal Engine）和视觉特效软件（如 3ds Max）已通过插件等方式提供了对3DGS模型的良好支持，加速3DGS在电影制作、虚拟背景和游戏资产创建中的应用。在消费级市场，基于3DGS的“一键式”3D扫描应用正在迅速普及，极大地降低了高质量3D内容制作的门槛，推动了大众市场对3DGS模型的接受度。这些进展为其在更广阔产业领域中的应用铺平了道路。

1. 空间计算

实时性是 VR/AR 和元宇宙应用体验的基础。3DGS 的渲染速

度能够支持用户从任意角度进行实时、流畅的探索，完美契合了空间计算对低延迟交互的需求。此外，3DGS模型通常生成比传统网格模型更小的文件，这赋予了其极高的可移植性，使其能够快速集成到各种平台，包括移动设备和 Web 应用。

2. 数字孪生

数字孪生的价值在于提供精确、实时更新的虚拟表示，用于优化监控、模拟和预测性维护。3DGS极大地加速了从现实世界到数字孪生的转换效率。一方面，3DGS使得3D数据的采集变得前所未有的便捷。结合消费级设备，如手机及民用无人机，使得非专业人员也能快速采集数据，并生成高质量的3D模型。另一方面，GIS平台正在积极接入3DGS。通过将3DGS模型导入GIS环境，用户可以在Web端、桌面端或移动端进行三维可视化、分析和数据管理，推动智慧城市和基础设施管理进入实时三维化的新阶段。3DGS作为数据链的起点，解决了GIS数据获取效率低、成本高昂的瓶颈问题，使得大规模、实时、高精度的城市管理和测绘目标在经济上变得可行。

（二）未来挑战

尽管3DGS优势显著，但作为一项新兴技术，其在应对大规模场景、动态对象、复杂物理光照及几何精度等方面仍面临挑战，这也构成了未来的核心研究方向。

1. 大场景处理与轻量化

将3DGS应用于城市级、流域级等超大规模场景时，目前最大的挑战是大量高斯基元带来的内存能力与计算能力问题。当前数据分块策略（如 Vast-Gaussian, CityGaussian）是主流解决方案，通过将大场景划分为地理区块进行并行训练与渲染。然而，类似传统倾斜摄影方法，该方法在区块接边处易出现颜色、几何的不连续现象。展望未来，引入细节层次（LoD）技术至关重要，这对于实现大规模场景的流畅漫游不可或缺。

在模型轻量化方面，高效压缩是推动3DGS走向实用的关键。NeuralGS等研究探索了使用小型MLP神经网络来编码高斯基元的属性，实现了模型存储空间的显著缩减。同时，在渲染端，针对边缘计算设备的优化也至关重要。梯度感知超分等技术通过利用3DGS渲染图像的内在梯度信息，对低分辨率结果进行高质量采样，可在轻量级GPU上实现数倍的渲染加速，为移动端和Web端部署铺平道路。

2. 动态场景建模（4DGS）

现实世界是动态的，而原生3DGS是为静态场景设计的。为了捕捉运动对象，必须引入时间维度，形成4D高斯泼溅（4DGS）。当前主流方法通过为每个高斯附加一个形变场来建模其随时间发生的位置、旋转和尺度变化。这类方法已能较好地重建中等速度的非刚性运动，并在特定视角下实现实时回放。

对于现阶段来说挑战依然巨大：首先，对于快速、剧烈的运

动，模型容易产生模糊和拖影；其次，如何保证长时序序列中动态对象的长期外观与几何一致性，避免时间轴上的闪烁与抖动，目前尚未完全解决；最后，当前动态模型的训练成本远高于静态场景，如何提升训练效率是推动其实际应用的关键。

3. 全局光照

3DGS依赖球谐函数（SH）建模视图相关外观，这本质上是一个光度模型，其目标是拟合观测到的像素颜色，而非揭示场景的物理属性（如材质、光照）。这导致其无法响应外部光照变化，难以实现逼真的重照明与全局光照（GI）效果。

4. 几何增强与建图

原生3DGS虽然视觉效果出色，但其几何精度并不总是满足测绘或机器人自主导航的需求。在大型户外场景中，相机姿态估计的微小误差会导致高斯基元不受控制地扩张，造成伪影和不必要的内存消耗。为了提升几何的鲁棒性和精度，研究开始将3DGS与传统几何优化方法深度融合。BGS-SLAM等系统利用深度立体网络估计的深度图来指导3D高斯的优化，并结合局部束调整来联合优化相机姿态和3D结构，从而确保几何一致性。此外，为了直接从3DGS模型中提取准确的几何信息，Ray-Gaussian Intersection方法被引入，通过计算视线光线与高斯基元之间的交集，来获取精确的法线和深度信息，为后续的几何约束和网格重建提供了可靠的基础。

四、结论

3D高斯泼溅技术通过其创新的显式场景表示与GPU优化的可微分光栅化流水线，成功突破了NeRF技术在训练与渲染速度上的瓶颈，实现了高保真神经渲染从“可观”到“可用”的范式转变。

在航拍建模与大尺度场景重建这一传统由摄影测量主导的领域，3DGS展现出革命性的潜力。通过引入AGS、EOGS等几何增强框架，3DGS有效弥补了其在初始几何精度上的不足，使其生成的结果不仅具备照片级的视觉沉浸感，更在度量精度上逼近甚至超越传统方法。与此同时，其将建模效率提升数个量级的巨大优势，使得快速、低成本的城市级数字孪生成为可能，正深刻重塑着GIS与测绘行业的工作流程。

展望未来，3DGS的研究将超越纯粹的光度重建，向着物理真实性、几何精确性与动态交互性的更高层次迈进。这需要进一步融合计算机图形学、物理光学与测绘学的跨学科知识，最终目标是使3DGS成为构建可编辑、可交互、物理精确的实时数字世界的核心底层技术。

参考文献

- [1]侯礼杰,沈寅松,刘晓晨,等. 三维高斯泼射超分辨率视觉场景构建算法[J]. 中国测试, 2024, 50(9): 13-20. DOI:10.11857/j.issn.1674-5124.2024070006.
- [2]王锋,银莹,王佳炎,等. 基于高斯泼溅的轻量级重建场景分割方法[J]. 计算机学报, 2025, 48(5): 1232-1243. DOI:10.11897/SP.J.1016.2025.01232.
- [3]何天琪,宋佳洁,程景春,等. 基于三维高斯泼溅技术的航拍场景建模[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39(2): 1-12, 21. DOI:10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202502001.
- [4]李永昌,李玮. 基于多传感器融合的三维高斯泼溅技术[J]. 现代电子技术, 2025, 48(17): 93-97. DOI:10.16652/j.issn.1004-373x.2025.17.014.
- [5]朱东林,陈森,毛宇岩,等. 三维高斯泼溅技术在场景重建中的研究现状与挑战[J]. 集成技术, 2025, 14(4): 1-20. DOI:10.12146/j.issn.2095-3135.20241127002.