引文格式：王伟,汪旻琦,任晨阳. 城市实景三维建模技术进展研究与实践[J]. 地理空间信息, 2025, 23(9): 93-95. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.09.020

城市实景三维建模技术进展研究与实践

王　伟[1]，汪旻琦[1]，任晨阳[1]
（1. 上海市测绘院，上海 200063）

摘　要：实景三维是新型基础测绘标准化产品，为智慧城市建设提供了统一的空间基底。目前，实景三维模型存在生产过程复杂、可视化效果失真等问题，限制了进一步推广应用。人工智能技术发展日新月异，开始渗透到了三维重建领域。回顾了三维重建技术的发展，对多视图三维重建、神经辐射场和3D高斯散射3种建模技术进行了对比和分析。采用3D高斯散射技术生产了实景三维模型数据，并对数据进行编辑，验证了3D高斯散射技术建模的高效性和便捷性，展望了3D高斯散射技术未来可能的研究方向。

关键词：三维重建；倾斜摄影；神经辐射场；3D高斯散射
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）09-0093-03

Research and Practice on the Development of Urban 3D Real Scene Modeling Technology

WANG Wei[1], WANG Minqi[1], REN Chenyang[1]
(1. Shanghai Surveying and Mapping Institute, Shanghai 200063, China)

Abstract: 3D real scene is a new standardized product for basic surveying and mapping, providing a unified spatial foundation for the construction of smart cities. At present, 3D real scene models have problems such as complex production process and distorted visualization effect, which limit their further promotion and application. The development of artificial intelligence technology is advancing rapidly and has begun to penetrate into the field of 3D reconstruction. We provided a review of the development of 3D reconstruction technology, compared and analyzed the multi-view 3D reconstruction, neural radiance field, and 3D Gaussian splatting three modeling techniques at first. Then, we used 3D Gaussian splatting technology to produce 3D real scene model data, and edited the data, verifying the high efficiency and convenience of 3D Gaussian splatting technology modeling. Finally, we looked forward to the possible research directions of 3D Gaussian scattering technology in the future.

Key words: 3D reconstruction, oblique photography, neural radiance field, 3D Gaussian splatting

实景三维是新型基础测绘标准化产品，具有直观、信息丰富、沉浸感强等特点，得到了广泛应用。三维重建技术发展迅速，促进了实景三维场景建设。倾斜摄影是一种常用的三维重建技术，首先计算得到摄像机图像坐标系与世界坐标系的关系，再利用多个二维图像信息重建三维信息[1-2]，具有成本低廉、速度快、模型纹理丰富等优点，现已发展为大规模三维重建的主流方法。然而，倾斜摄影建模也存在图像匹配稳定性差、无法匹配弱纹理区域、处理时间长、无法满足逼真场景需求等缺陷。神经辐射场（NeRF）于2020年被首次提出，是一种基于神经网络的三维场景重建方法，能利用神经网络模拟场景中每个点的辐射量和密度，从而实现高质量的三维重建[3-4]，能捕捉场景复杂的光影效果，但训练和渲染速度较慢。3D高斯散射（3DGS）是2023年提出的三维重建技术，融合了可微分管道和基于点的渲染技术的优点，通过可学习的3D高斯函数表示场景，保留了连续体积辐射场的理想特性，提高了训练速度和渲染效率[5]。本文梳理和对比了以倾斜摄影为代表的多视图三维重建、NeRF和3DGS的技术特点，并采用3DGS技术对一个小花园进行三维重建实验，以期能促进3DGS技术的推广和应用研究。

1　三维重建综述

1.1　多视图三维重建

基于多视图的三维重建技术，是三维重建技术领域的一个重要分支。其核心是基于多视角立体视觉（MVS）算法，在多张图像中间寻找共同特征，再将从图像提取的稀疏点云逐步叠加并融合生成稠密点云，使得重建的三维模型纹理更加接近真实拍摄的视觉效果[6-7]。多视图三维重建的核心步骤包括：①运动恢复结构（SFM），通过输入指定场景的多视角图像、GPS数据和摄像机内参数，计算得到稀疏三维点云和摄像机的外参数；②MVS算法，利用多视角图像和已

第一作者简介：王伟（1981—），硕士，高级工程师，研究方向为地理信息应用开发，E-mail：306813748@qq.com。

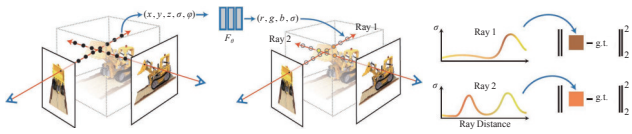
获取的摄像机内外参数，对稀疏三维点云进行稠密化，从而获得稠密三维点云；③表面重建，通过输入稠密三维点云来构建场景或模型的三角网格；④纹理重建，输入多视角图像、摄像机内外参数和表面重建后的三维模型，输出带纹理的三维场景和模型。

1.2 NeRF算法

NeRF算法被视为从空间位置和视角方向到颜色图片和透明度图片的映射函数。通过MLP学习，对三维场景中的光照、颜色和透明度等信息进行建模，从而实现场景的精确重建和逼真渲染。NeRF核心算法（图1）的简单表达为输入5维 (x,y,z,σ,φ)，输出4维 (r,g,b,σ)。采用函数表示为：$F_\theta(x,d)\rightarrow(c,\sigma)$，其中 $x=(x,y,z)$ 为3维点的坐标，$d=(\theta,\varphi)$ 为观测方向，$c=(r,g,b)$ 为3维点预测的颜色值，σ 为体密度。假设一条射线的原点为 o，射线方向（即相机视角）为 d，则可将射线表示为 $r(t)=o+td$。颜色的计算公式为：

$$c(r)=\int_{t_n}^{t_f} e^{-\int_{t_n}^{t}\sigma(o+sd)\mathrm{d}s}\times\sigma(o+td)\times c(o+td,d)\mathrm{d}t \qquad (1)$$

式中，t_n、t_f 分别为光线起点和终点



a 5维输入（位置+方向） b 输出（颜色+密度） c 体渲染和渲染损失函数

图1 NeRF算法

NeRF的训练流程与多视图三维重建相似，都需要输入摄像机内外参数和多视角图像（图2a），不同的是NeRF通过构建一个神经辐射场（即神经网络）替代了MVS、表面重建、纹理重建3个步骤[8-9]。在训练过程中，NeRF通过神经网络将摄像机拍摄到的图像对应的三维场景信息存储在神经网络的权值里，训练完成后，每个视角观察到的三维场景对应的图像信息都会被记录，最终生成细节更加真实且无空洞的3D模型[10]（图2c）。



a 多视角图像 b 神经网络训练 c 新视角生成

图2 神经辐射场训练过程

1.3 3DGS技术

3DGS是一种以高斯分布为基础，实现高效、高质量、实时三维场景重建与渲染的技术。3DGS采用SFM方法从一组图片中估计点云，从获得的稀疏点云开始，创建并优化高斯点云。每个高斯点包括点的坐标 μ（3D高斯函数的均值）、协方差矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}$（决定该点的形状）、不透明度和球谐函数（高斯点在任意视角下的颜色）。在3DGS中，每个点高斯分布 $G(x)$ 由 μ 和 $\boldsymbol{\Sigma}$ 描述，即

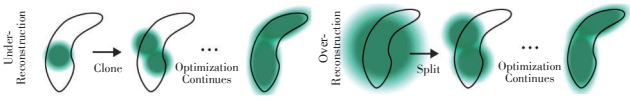
$$G(x)=\exp\left(-\frac{1}{2}(x-\mu)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Sigma}(x-\mu)\right) \qquad (2)$$

三维高斯投影到二维图像平面后，采用基于Tile的光栅化策略进行渲染：

$$C(v)=\sum_{i\in N}c_i\alpha_i\prod_{j=1}^{i-1}(1-\alpha_j) \qquad (3)$$

式中，C_i 为第 i 个高斯点的颜色；N 为瓦片中的高斯点数量；$\alpha_i=o_iG_i^{2D}(v)$，o_i 为第 i 个高斯点的不透明度，G_i^{2D} 为投影到二维上的第 i 个高斯点的函数。

训练流程为从初始的SFM点云出发，为每个点建立一个3D高斯模型，并利用相机参数将投影点投影到图像平面上[5]；然后在高斯散射的痕迹中进行快速光栅化，得到渲染图像，并通过渲染图像和真实图像求取损耗值；最后进行反向传播，通过自适应密度控制模块，根据传到每一个点上的梯度决定是否需要克隆或分裂（图3）。梯度同时会传播到投影中，更新其位置、协方差矩阵、球谐函数和不透明度等参数，完成一次迭代。完成全部迭代优化后，高斯模型的对应参数被学习获得，体渲染需要的信息被获取，即可通过光栅化实现三维渲染的可视化。



a 克隆 b 分裂

图3 高斯点克隆与分裂

倾斜摄影可提供真实详细的地理信息数据，支持精确的测量、建模和分析，被广泛应用于对精度有要求的城市规划、GIS、土地管理、建筑设计和文化遗产保护等领域；但缺点是对物体的细节特征重建不够精确[11]。NeRF算法的生产流程比倾斜摄影简单，模型拥有更加逼真的视觉效果，可应用于三维GIS、自动驾驶、数字孪生城市和元宇宙等虚拟场景；但缺点是隐式表达不直观，训练效率低，对硬件要求较高，难以进行实时渲染，场景编辑性弱。3DGS技术的数据生产便捷、渲染速度快，可为实景三维、数字文物和元宇宙等前沿领域提供强大的技术支撑；但缺点是对于复杂场景的重建效果不如NeRF算法。

2　3DGS技术实践

2.1　3DGS技术的生产环境

为验证3DGS技术生产模型的效果，笔者选取有植被和雕塑的花园作为实验场景，采用GPU型号为RTX-A4000处理器和RTX-4080处理器，显存均为16 GB，视频数据均为259 MB，视频切片数据均为348 MB，点云成果数据均为698 MB，点云训练时间分别为31、11 h。由于硬件条件限制，实验中通过减少迭代参数来保证三维模型训练的顺利进行。

2.2　3DGS技术的生产流程

3DGS生产数据的步骤包括：①利用手机、相机或无人机从俯视、平视和仰视进行360°环绕拍摄；②将拍摄的视频剪切切成图片；③通过SFM方法从多张二维图像中恢复出三维点云信息，选择合适的图像特征提取和匹配算法，确保点云的准确性；④点云转高斯分布，为每个点分配一个高斯函数，其均值和协方差分别对应点的位置和不确定性，每个点即为一个高斯分布，从而形成了一个高斯分布的集合；⑤模型训练，找到最优的高斯参数，使光栅化后的图像与真实图像差异最小，训练过程中采用随机梯度下降等优化算法，不断调整高斯参数，直至达到收敛条件；⑥光栅化，将高斯分布集合光栅化为图像，根据每个高斯分布的均值和协方差，计算得到每个像素点对应的颜色值和深度值，最终就得到了一个与真实场景高度相似的三维重建结果（图4）。

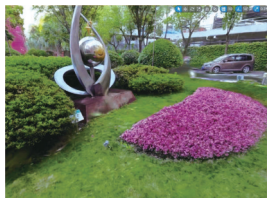
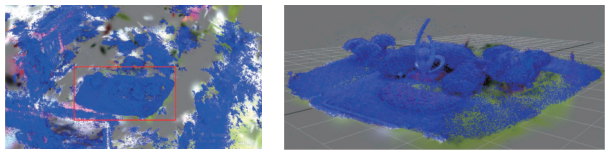


图4　基于3DGS技术生产的三维模型效果图（ply格式）

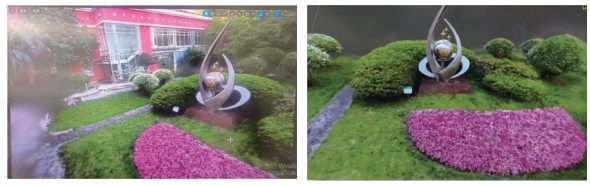
2.3　3DGS技术的数据编辑

NeRF算法的隐式三维特性具有高保真的渲染能力，但其限制了场景数据的修改，编辑比较复杂，阻碍了实际应用[12]。3DGS技术的显式特性在数据编辑方面优势明显，可直接对场景进行修改和交互。利用3DGS编辑器裁剪点云数据的效果见图5，将裁剪后的点云数据导入UE三维引擎后的效果见图6。



a 裁剪前　　b 裁剪后

图5　3DGS点云数据剪裁前后效果对比



a 裁剪前　　b 裁剪后

图6　3DGS点云数据导入UE后的效果对比

3　结　语

本文从实用性的角度对城市三维建模技术的发展进行了回顾，并采用3DGS建模技术选取小场景进行了实验，验证了3DGS良好的视觉效果和可视化的数据编辑能力。目前，3DGS技术的研究与应用还处于起步阶段，虽然还存在不可量测等问题，但已展现出引领三维建模技术发展潮流的趋势。根据目前已有的研究成果，针对实景三维建设需求，以下工作值得关注：

1）大场景实景三维。3DGS建模技术在小场景可达到良好的视觉效果，可应用于博物馆虚拟漫游、数字文旅、产品三维展示和数字资产等方面。针对大规模实景三维可视化，一种策略是通过将大场景划分为多个单元，独立优化每个单元，最后合并成一个完整的场景[10]；另一种策略是应用选择性高斯致密化、高斯裁剪和稀疏阶数增量等方法来加快渲染速度、降低资源消耗[13]。相关研究尚处于起步阶段。

2）多源数据融合。由于缺少场景几何精度，限制了3DGS技术的应用范围。将三维激光扫描或激光雷达先验引入到3DGS模型生产过程中，综合激光雷达和相机传感器的优势，获取更准确的几何特征并确保多个周围视图的渲染一致性[14]，从而推动3DGS三维建模技术的进一步应用。

3）3DGS曲面网格提取。Mesh是用于物体建模的一种数据结构，表示比较简单、灵活且拓扑描述方便。从3DGS中提取网格的方法是先采用正则化项使高斯与场景表面对齐，再使用泊松重建从高斯中提取网格，最后引入一种可选的细化策略，将高斯绑定到网格表面，并通过高斯溅射渲染共同优化这些高斯和网格[15]。从3DGS中精确快速地提取网格具有广泛的应用前景，是重要的研究方向。

参考文献

[1]　张书航,李旺民,庞尹宁,等.基于无人机倾斜摄影和激光扫描的离岸海岛高精度实景三维重建[J].测绘通报,2024(3):25-30

（下转第132页）