

# 高斯泼溅技术在脆弱文物非接触式三维存档中的应用探索

张义杰

山西万鼎空间数字股份有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i6.16821

**[摘要]** 本文旨在系统探讨高斯泼溅技术在脆弱文物非接触式三维存档中的应用潜力。首先,本文回顾了脆弱文物三维存档的特殊挑战与现有技术的局限性;其次,深入剖析了高斯泼溅技术的核心原理、优势及其在文物数字化场景下的适配性;再次,通过构建一个面向文物的高斯泼溅存档 workflow,详细阐述了从数据采集到模型优化的全流程;最后,对其面临的挑战与未来发展方向进行了展望。研究表明,高斯泼溅技术为脆弱文物的高保真、非接触式三维存档提供了一条极具前景的新路径。

**[关键词]** 高斯泼溅; 脆弱文物; 三维存档; 非接触式; 神经场景表示

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A

## Exploration on the Application of Gaussian Splatting Technology in Non-Contact 3D Archiving of Fragile Cultural Relics

Yijie Zhang

Shanxi Wanding Spatial Digital Co., Ltd.

**[Abstract]** This paper aims to systematically explore the application potential of Gaussian splatting technology in non-contact 3D archiving of fragile cultural relics. Firstly, it reviews the special challenges of 3D archiving for fragile cultural relics and the limitations of existing technologies. Secondly, it deeply analyzes the core principles, advantages, and adaptability of Gaussian splatting technology in the context of cultural relic digitization. Thirdly, by constructing a Gaussian splatting archiving workflow for cultural relics, it elaborates in detail the entire process from data acquisition to model optimization. Finally, the challenges and future development directions are prospected. The research shows that Gaussian splatting technology provides a highly promising new path for high-fidelity, non-contact 3D archiving of fragile cultural relics.

**[Key words]** Gaussian Splatting; Fragile Cultural Relics; 3D Archiving; Non-Contact; Neural Scene Representation

### 引言

文化遗产是联结不同时代的桥梁,保护传承是全人类责任。数字时代,文物高精度三维数字化存档,是预防性保护手段,也是深度研究、展示与教育的核心基础。但文物多样脆弱,尤其材质脆弱、结构疏松、有易脱落颜料彩绘的文物,物理接触、强光照射或不稳定环境都可能造成不可逆损伤。所以,“非接触、低干预、高保真”是脆弱文物三维存档核心原则。传统三维数字化技术精度高,但可能损伤文物,设备笨重、操作复杂。基于图像的三维重建技术有非接触优势,是主流方法,但处理复杂表面细节时,易出现几何失真等问题,难实现“高保真”。2023年,3DGS技术带来曙光,它采用新表示方式,能高效渲染且保留细节。本文认为,该技术为脆弱文物三维存档提供近乎理想方案,将系统性论证并构建应用框架。

### 1 脆弱文物三维存档的挑战与现有技术评述

#### 1.1 脆弱文物的特性与存档挑战

脆弱文物通常具备以下一个或多个特征:一是材质敏感性:纸张、丝绸、壁画地仗层等有机或无机材料对光照(尤其是紫外线和红外线)、温湿度变化极为敏感,长时间或高强度的光照会导致褪色、脆化。二是结构不稳定性:文物可能因年代久远而出现开裂、酥粉、层离等现象,任何微小的物理接触或气流扰动都可能导致碎片脱落。三是表面细节丰富且脆弱:彩绘、墨迹、织物纹样等表面信息是文物价值的重要组成部分,但这些颜料或纤维极易因摩擦或化学反应而损坏<sup>[1]</sup>。这些特性共同决定了其三维存档必须遵循“最小干预”原则,即:(1)绝对非接触:整个采集过程不能有任何物理接触。(2)光照最小化:使用尽可能低强度、无紫外线/红外线的冷光源,并严格控制光照时长。(3)环境稳定性:在文物原位或恒温恒湿的专用工作室内进行,避免移动带来的风险。

## 1.2 现有三维数字化技术的局限性

### 1.2.1 主动式扫描技术(LiDAR/结构光)

优点是精度高,受环境光影响小。局限是主动发射的光源(激光或投影光栅)强度较高,存在光损伤风险;设备通常体积大,难以对大型壁画或置于展柜内的文物进行灵活扫描;对高反光或纯黑表面效果不佳。

### 1.2.2 SfM/MVS技术

优点是完全被动,仅需普通相机,成本低,灵活性高,符合非接触原则。局限是重建结果依赖于特征点匹配,在纹理缺失(如纯色区域)或重复纹理区域容易失败;生成的Mesh模型是对真实表面的近似,复杂的微观几何(如笔触的立体感、织物的柔软感)在Mesh简化或纹理映射过程中会丢失;最终的纹理贴图(TextureAtlas)是将多张照片投影拼接而成,存在接缝、模糊和光照不一致的问题,难以达到“所见即所得”的保真度。

### 1.2.3 NeRF及其变体

优点是能够从稀疏视图中学习出连续的场景表示,渲染效果逼真,能处理复杂的光照和视角变化。局限是训练过程计算开销巨大,耗时长;渲染速度慢,难以实时交互;对输入图像质量和数量要求高,在低光照、低纹理的文物场景下训练不稳定,容易产生伪影(artifacts);其隐式表示(MLP网络)不便于直接编辑或进行几何分析。

## 2 高斯泼溅技术原理及其在文物存档中的适配性分析

### 2.1 高斯泼溅核心技术原理

高斯泼溅的核心思想是用一组3D高斯分布来显式地表示一个3D场景。每个高斯椭球由以下参数定义:

中心位置( $\mu$ ): 3D空间中的一个点。

协方差矩阵( $\Sigma$ ): 一个3x3的对称正定矩阵,描述了高斯椭球的形状(缩放)和朝向(旋转)。

不透明度( $\alpha$ ): 一个标量,控制该高斯对最终像素颜色的贡献程度。

球谐函数系数( $c$ ): 一组系数,用于描述该高斯在不同视角下呈现的颜色变化,从而模拟复杂的光照和材质反射效果。

渲染过程(前向传递): (1) 视锥剔除与排序: 根据当前相机视角,剔除不可见的高斯,并将可见的高斯按深度(从后往前)排序,以正确处理透明度混合。(2) 协方差投影: 将3D协方差矩阵 $\Sigma$ 投影到2D图像平面上,得到每个高斯在屏幕空间的2D协方差。(3) 光栅化(泼溅): 对于每个高斯,根据其2D协方差计算其在图像平面上的影响范围(通常为一个椭圆),并将该椭圆覆盖的所有像素进行颜色和alpha值的混合(使用alpha blending)<sup>[2]</sup>。(4) 反向梯度传递: 为了优化高斯参数,需要计算渲染图像与真实图像之间的损失(如L1损失、感知损失),并通过可微分的光栅化过程将梯度反向传播回每个高斯的参数,利用梯度下降法进行迭代优化。整个过程完全可微分,使得模型能够通过优化,使其渲染出的任意新视角图像都与真实拍摄的图像高度一致。

### 2.2 高斯泼溅在脆弱文物存档中的优势与适配性

极致的渲染保真度: 3DGS直接从输入图像中学习场景的颜色和几何信息,其渲染结果几乎可以做到与输入图像“像素级”一致。对于文物而言,这意味着其表面的色彩、笔触、裂纹、污渍等所有细节都能被完美保留,不存在Mesh纹理映射带来的信息损失或失真。这是实现“高保真”存档的关键。

完全的非接触式 workflow: 3DGS的输入仅为从不同角度拍摄的RGB图像,与SfM/MVS完全相同。这意味着我们可以沿用为脆弱文物精心设计的、成熟的低光照、多角度摄影采集方案,无需引入任何新的、可能带来风险的硬件设备,这避免了传统方式不断对大型设备架设、转站带来的巨大工作量。

对低纹理和复杂几何的鲁棒性: 与依赖特征点匹配的SfM不同,3DGS通过全局优化所有高斯参数来拟合图像,即使在文物表面纹理稀疏(如大面积单色区域)或几何复杂(如镂空、半透明)的情况下,也能通过协方差矩阵和球谐系数学习到合理的表示,避免了重建失败或几何错误。

实时交互性能: 经过优化的3DGS模型可以在现代GPU上实现实时(>30FPS)的高质量渲染。这为文物的虚拟展示、在线浏览、细节放大观察等应用提供了流畅的交互体验,远超NeRF的渲染速度。

显式且可编辑的表示: 与NeRF的隐式黑盒不同,3DGS的每个高斯都是一个显式的实体。这为后续的文物研究提供了便利,例如,可以通过筛选特定位置或属性的高斯来分析局部区域的状况,或在虚拟修复中对局部高斯进行编辑。

## 3 面向脆弱文物的高斯泼溅存档 workflow 构建

### 3.1 第一阶段: 精细化、低干预数据采集

在此阶段,一切操作都必须以文物的绝对安全为最高优先级。我们应选用高分辨率、低噪点的专业级数码相机,并搭配畸变极小的定焦镜头,以确保原始数据的质量。照明方案是重中之重,必须采用经过光谱过滤的博物馆专用LED冷光源,严格剔除有害的紫外线和红外线,并将光照强度控制在文物可承受的安全阈值之内,通常不超过50勒克斯。光线需通过柔光设备进行充分扩散,以营造均匀、柔和的照明环境,避免产生任何可能误导重建的强烈高光或阴影<sup>[3]</sup>。拍摄策略上,采用环绕式多角度拍摄,确保文物表面每一处细节都被充分覆盖,在对某些体型较大文物拍摄时,可适当配合无人机,补充高处或上方影像数据,相邻照片间保持60%至80%的重叠度,以提供充足的视差信息。整个拍摄过程必须保证视角中心固定,并使用快门线或定时拍摄来消除任何人为抖动。同时,在文物附近放置高精度的标定板,用于后续恢复模型的真实尺度和空间坐标。

### 3.2 第二阶段: 预处理与初始化

此阶段旨在为3DGS训练提供高质量的输入。首先,对采集到的原始RAW格式照片进行专业的后期处理,包括降噪、精确的白平衡校正(需以标准色卡为参照,避免主观色彩偏差)以及镜头畸变校正。随后,利用成熟的SfM软件(如COLMAP)处理这些预处理后的图像,精确恢复出每张照片的相机位姿(即内外参数)以及一个稀疏的特征点云。这一步至关重要,因为准确的相机参数

是3DGS能够正确理解多视角几何关系的前提。在此基础上,进一步通过MVS算法生成一个密集点云,这个点云将作为3DGS模型中数百万个高斯椭球的初始位置和颜色来源。

### 3.3 第三阶段: 高斯泼溅模型训练与优化

模型训练和优化是核心阶段,也是决定最终呈现效果最重要的一环,需要针对文物特性进行参数调优。将上一阶段得到的密集点云中的每个点转化为一个初始的3D高斯,其协方差矩阵初始化为微小的各向同性球体,不透明度设为一个较小的正值,颜色则由对应点的RGB值确定。随后,采用分阶段的优化策略:首先固定协方差和颜色,仅优化高斯的位置和不透明度,使其初步勾勒出文物的整体轮廓;接着引入协方差矩阵的优化,允许高斯根据局部表面的几何特性进行拉伸和旋转,从而更精确地拟合复杂的形状;最后,激活高阶球谐函数系数的优化,以捕捉文物表面因材质和光照角度变化而产生的细腻色彩变化。在整个优化过程中,需要谨慎调整自适应密度控制的参数,避免在平滑区域过度生成高斯而引入噪声,确保模型在细节丰富区域拥有足够的表达力,同时保持整体的简洁性。

### 3.4 第四阶段: 后处理与存档交付

第四阶段是后处理与存档交付,旨在将训练好的模型转化为可长期保存、易于使用的数字资产。针对大型文物模型可能存在的文件体积过大的问题,可采用聚类或重要性采样等技术进行有损或无损压缩,在视觉质量与存储效率之间取得平衡。色彩管理贯穿始终,从采集到渲染的整个流程都应锁定在统一的专业色彩空间(如ProPhotoRGB)中,并将ICC色彩配置文件嵌入最终的模型文件,以保证色彩信息的长期准确性和跨平台一致性<sup>[4]</sup>。最终的数字模型需与详尽的元数据(包括文物信息、采集日志、处理参数等)一同打包存档,并开发基于WebGL的轻量化在线查看器,以便于全球的研究者和公众能够随时随地、流畅地交互式探索这些珍贵的文化遗产。

## 4 面临的挑战与对策

(1) 数据采集质量依赖: 3DGS的效果高度依赖于输入图像的质量和相机位姿的准确性。对策是必须投入资源建立标准化的、针对脆弱文物的采集规范和流程。(2) 透明与半透明材质处理:

3DGS目前主要处理不透明或漫反射表面。对于玻璃器皿、薄纱等半透明文物,其内部光线散射效应难以用简单的alpha blending模拟。未来可探索结合体积渲染(Volume Rendering)或次表面散射(Subsurface Scattering)模型的混合表示方法。(3) 大规模场景的内存与计算瓶颈: 对于大型壁画或建筑遗址,高斯数量可能达到亿级,对GPU显存和计算能力提出挑战,配置一般的硬件设备对数据加载吃力或卡顿不连续。对策包括开发更高效的分块(tiling)和流式加载(streaming)技术,以及探索基于神经网络的高斯压缩表示。(4) 缺乏显式几何: 虽然高斯集合能完美渲染,但它不是一个水密的(watertight)网格,难以直接用于3D打印或某些需要精确几何体的物理仿真。对策是在3DGS模型的基础上,通过泊松重建(Poisson Reconstruction)等算法提取一个高质量的Mesh作为补充。

## 5 结语

高斯泼溅技术以创新场景表示,为脆弱文物非接触式三维存档开启新篇章,将“非接触”采集与“高保真”存档统一于高效实时框架。本文系统分析,论证了其在保留微观细节、确保色彩准确、提升交互体验上的优势,并构建完整 workflow。虽面临半透明材质处理、大规模场景优化等挑战,但随着算法迭代与硬件提升,有望得到解决。未来研究可聚焦: 开发文物材质专用渲染模型; 探索与多光谱、高光谱成像技术融合; 构建文物状态监测与虚拟修复平台,推动数字化存档向动态保护发展。

### [参考文献]

- [1] 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.
- [2] 吕恒焯,刘艳丽,李宏,等.三维高斯泼溅框架下的室内场景多视图本征分解[J].中国图象图形学报,2025,30(07):2514-2527.
- [3] 朱东林,陈淼,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(04):1-20.
- [4] 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(05):1232-1243.