arXiv:2601.19310v1 [cs.GR] 27 Jan 2026

ClipGS-VR：移动虚拟现实中的体积医学数据沉浸式交互电影级可视化

Yuqi Tong、Ruiyang Li*、Chengkun Li、Qixuan Liu、Shi Qiu、Pheng-Ann Heng 计算机科学与工程系及医学智能与XR研究所，香港中文大学{yqtong、liry、ckli、qxliu、shiqiu、pheng}@cse.cuhk.edu.hk

摘要

在移动虚拟现实（VR）中实现高保真电影级医学可视化仍然颇具挑战。尽管 ClipGS 借助 3D高斯泼溅支持横截面探索，但在消费级VR头显上尚不支持任意角度切片。为实现实时交互性能，我们提出 ClipGS-VR，并将 ClipGS 的神经推理重构为一个整合数据集，将多个预计算切片状态中的高保真层整合至统一的渲染结构中。我们的框架还支持通过基于梯度的不透明度调制实现任意角度切片，从而实现平滑且视觉连贯的渲染。评估结果证实，我们的方法在提供更佳可用性和交互效率的同时，保持了与离线结果相当的视觉保真度。

索引词：3D高斯泼溅、电影级医学可视化、交互式切片、虚拟现实

1 引言

医学可视化帮助临床医生直观理解复杂的空间关系，并将原始体积数据转化为可用于诊断的见解。近年来，3D高斯泼溅（3DGS） [1] 取得了进展，使体积医学数据的实时渲染成为可能；例如，Kleinbeck等人采用多层高斯训练来显示不同的解剖结构 [2]。然而，现有方法通常将解剖结构表示为中空表面，或将用户限制在预定义的层上，因此无法支持灵活的医学数据探索。

为解决这一局限，ClipGS [3] 引入了一种可学习截断策略，明确建模组织的实体特性并支持横截面切片，同时渲染内部纹理和外部表面，并借助最新的神经渲染技术实现高质量的体积真实感。然而，ClipGS仅支持单轴切割平面变换，不支持任意切片。此外，其较高的计算开销（显存超过6GB）通常会限制

这使其只能部署在高端工作站上，限制了其在消费级沉浸式设备上的实际应用。

在本研究中，我们提出了一种新颖的移动端框架，将 ClipGS 改造用于沉浸式应用，并扩展其功能以支持任意角度切片。我们的框架引入了一种通用的任意切片机制，通过基于梯度的不透明度调制，从任意方向合成连贯视图。我们将离散预计算状态中保真度最高的层整合到统一、轻量的结构中，从而避免运行时神经推理，并在移动虚拟现实严格的性能和内存限制下保留 ClipGS 的电影级保真度，进而实现交互式高分辨率解剖结构切片。

*通讯作者

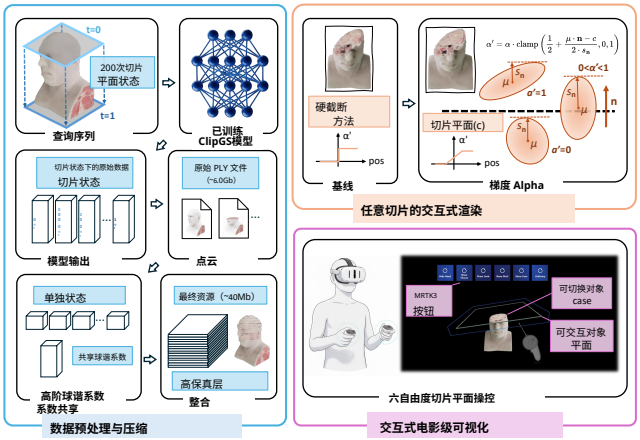

图 1：所提出方法 ClipGS-VR 的整体工作流程。

2 方法

2.1 数据预处理与压缩

为使 ClipGS 框架适用于独立式移动虚拟现实设备上的实时渲染，我们开发了一套数据预处理流程，以消除运行时神经网络推理的需求。原始 ClipGS 架构依赖可学习截断（LT）方案和自适应调整模型（AAM），在切片过程中动态操控高斯可见性和形变 [3]。由于这些模块无法在移动虚拟现实平台上实时运行，我们以离散预计算策略取代连续推理。我们在 ClipGS 数据集中每个案例的体积范围内均匀采样 200 个切片平面状态，并计算 LT 和 AAM 在每个状态下的优化输出。随后，将神经模块输出直接烘焙至高斯属性中，把隐式神经处理转换为显式的三维高斯表示。

生成这些离散状态后，我们使用 Unity Gaussian Splatting 框架[1] 将三维高斯的点云数据序列化为紧凑的二进制资源格式。我们采用两种关键压缩策略来最大限度地降低内存开销。首先，我们发现 ClipGS 网络会保留高斯点的零阶以上球谐系数。因此，我们将高阶系数从各个状态中分离出来，并存储一个由全部 200 个状态共享的球谐系数全局参考数组。其次，我们减少连续切片中的空间冗余：相邻状态之间的几何差异仅限于切割平面附近。我们不再为每个状态重复存储整个体积，而只保留切片平面上独有的图元，这些图元是水平层中保真度最高的部分。随后，我们将所有点云整合为统一结构，并将每个切片状态分配到特定的渲染层，以便实现

[1]https://github.com/aras-p/UnityGaussianSplatting。

高效的运行时转换。我们的方法将每个序列的原始点云 PLY文件（每个案例 ∼6.0 GB）压缩为最终资源，每个案例平均仅 ∼40MB。

2.2 任意切片的交互式渲染

为克服原始 ClipGS 框架中单轴切割平面变换的局限，我们扩展了渲染管线，以支持任意切片方向，从而实现交互式探索。朴素的基线实现提供了一种基础的剖切机制，该机制依赖二元可见性测试，仅根据图元的质心是否位于切片平面的正侧来进行渲染。然而，这种硬截断忽略了泼溅的体积范围，必然会在切割边界处产生锯齿状混叠伪影和视觉不连续。为消除这些伪影并实现高保真渲染，我们引入了基于梯度的不透明度调制。具体而言，对于中心位于 μ 的任意渲染图元，我们通过计算与图元到切割平面的有符号距离 c 及其沿平面法向量 $\mathbf{n}$ 的投影半径 $s_{\mathbf{n}}$ 之比相关的透明度系数 σ，来调整其原始不透明度 α。若 σ 位于 (0,1) 内，则将其用于修正最终不透明度 α'，公式如下：$\alpha' = \alpha \cdot \sigma$，其中 $\sigma = \text{clamp}(1/2 + (\mu \cdot \mathbf{n} - c)/(2 \cdot s_{\mathbf{n}}), 0,1)$。这种调制可使与切片平面相交的高斯体根据其几何穿透深度平滑淡出，同时保持较高的渲染速度。

2.3 实现

我们使用混合现实工具包 3（MRTK3）实现交互逻辑[2]。核心机制是一个六自由度（6-DoF）切片平面，用户可通过 VR 控制器直接操控。该虚拟平面的变换会实时传输至渲染着色器，从而实现对解剖结构的精确任意切片。此外，我们提供了带有按钮的菜单界面，方便用户快速切换临床病例。所有实验均在独立式 Meta Quest 3[3] 头显上进行。

3 评估

3.1 视觉比较

我们将渲染结果与基线硬截断方法进行比较，并以原始 ClipGS 方法生成的真实值作为参照。在定量分析中，我们报告了单轴切片模式下渲染图像与真实值之间的峰值信噪比（PSNR）和结构相似性指数（SSIM）。如图中的案例 1–3 所示。

2，我们的方法平均峰值信噪比达到 33。40 分贝，结构相似性为 0。9698；而基线方法的峰值信噪比为 30。55 分贝，结构相似性为 0。9542，表明我们的渲染质量更优。对于没有真实参考的任意切片设置，我们在图 2 的第 4–5 列中提供了定性比较。当切片平面以斜切角度与体积相交时，我们的方法能够生成平滑、抗锯齿的切割表面，有效减轻基线实现中出现的锯齿伪影。

3.2 用户研究

我们对 10 名参与者开展了用户研究，要求他们在两种交互模式下检查解剖结构：固定的单轴切片模式，以及我们提出的任意切片方法。表中展示了系统可用性量表（SUS）得分，以及采用 5 点李克特量表评估的交互效率。1。配对 t 检验显示，我们的任意切片方法的 SUS 得分显著高于单轴切片（$t(9) = -2.988, p = 0.015$）。我们对交互效率的非正态性评分进行了分析，并使用

[2]https://github.com/MixedRealityToolkit/MixedRealityToolkit-Unity。[3] https://www.meta.com/quest/quest-3/。

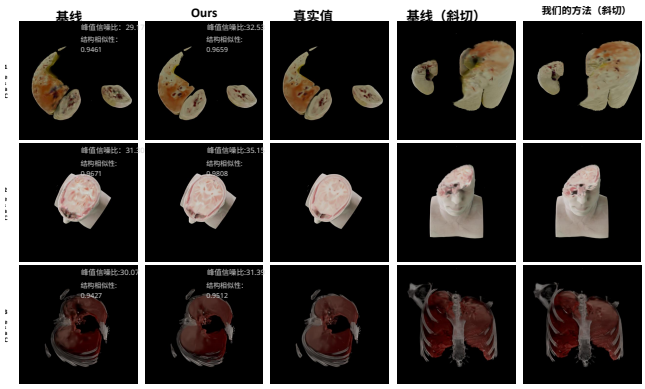

图 2：单轴切片模式（第 1–3 列）和斜切模式（第 4–5 列）下的视觉比较。

表 1：单轴切片和任意切片的系统可用性量表及交互效率得分比较（均值 ± 标准差）。

交互模式	系统可用性量表得分	交互效率
单轴切片	71.80 ± 14.41	3.40 ± 0.70
任意切片	88.20 ± 9.35	4.70 ± 0.48

威尔科克森符号秩检验，发现两种交互方法之间存在显著差异（$W = 0.00, Z = -2.739, p = 0.006$）。此外，参与者报告称，单轴切片模式常常需要采取不舒适的身体姿势才能查看特定角度，而我们的任意切片方法则能与内部结构自然对齐。这些发现表明，完整的 6-DoF 交互对于减轻身体疲劳、增强沉浸式医学可视化中的空间理解至关重要。

4 结论

在本研究中，我们提出了一种新型移动框架，将 ClipGS 应用于独立式虚拟现实头显上的沉浸式医学可视化，并支持交互式任意切片。通过将离散预计算状态中保真度最高的图层整合到统一的渲染结构中，我们的系统无需运行时神经推理即可实现实时性能。此外，我们还扩展了该框架，通过基于梯度的不透明度调制支持任意切片方向。全面评估结果表明，我们的方法在保持高视觉保真度的同时，提高了系统可用性和交互效率。未来的工作将着重优化预计算流程，并探索实时形变，以支持动态医学仿真场景。

致谢

本研究得到中国香港特别行政区研究资助局资助（项目编号：T45-401/22-N）；部分经费由香港中文大学提供（项目编号：4055212）。

参考文献

[1] B. Kerbl, G. Kopanas, T. Leimk¨uhler, and G. Drettakis. 用于实时辐射场渲染的 3D高斯泼溅。*ACM* 图形学汇刊， 42 4 139 1, 2023 1 ( ): – . C.

[2] Kleinbeck, H. Schieber, K. Engel, R. Gutjahr, and D. Roth. 用于沉浸式解剖可视化的多层高斯泼溅。*IEEE* 可视化与计算机图形学汇刊，2025 1 。C. Li 等。

[3] ClipGS：用于体积医学数据交互式电影化可视化的可裁剪高斯泼溅。载于国际医学图像计算与计算机辅助干预会议，第 127–137 页。施普林格，2025 年。1