arXiv:2601.19233v1 [cs.GR] 27 Jan 2026

UniMGS：通过单遍光栅化和基于代理的变形统一网格与3D高斯泼溅

Zeyu Xiao[1*]、**Mingyang Sun**[1*]、**Yimin Cong**[1]、、**Lintao Wang**[1]、、**Dongliang Kou**[1]、、**Zhenyi Wu**[1]、、**Dingkang Yang**[1]、、**Peng Zhai**[1]、、**Zeyu Wang**[3, 4†]、**Lihua Zhang**[1, 2†]

[1]复旦大学智能机器人与先进制造学院，中国上海 [2]Fysics Intelligence Technologies Co.,Ltd.，中国上海[3]香港科技大学（广州），中国广州[4]香港科技大学，中国香港

摘要

网格与3D高斯泼溅（3DGS）的联合渲染和变形具有重要价值，因为这两种表示各有优势，可互为补充，适用于图形应用。然而，由于表示方式和渲染管线存在差异，现有研究通常分别渲染网格和3DGS，因此难以准确处理遮挡和透明度。此外，变形后的3D高斯泼溅仍会因对代理网格拓扑质量敏感而产生视觉伪影。这些问题严重阻碍了3D高斯泼溅与网格的联合使用，使3D高斯泼溅难以适配传统的面向网格的图形管线。我们提出UniMGS，这是首个以抗锯齿方式通过单遍光栅化网格和3D高斯泼溅的统一框架，并提出一种基于代理网格、用于3D高斯泼溅变形的新型绑定策略。我们的关键见解是在单遍处理中通过抗锯齿混合α融合三角形片段和高斯片段的颜色，从而在精确处理遮挡和透明度的同时，获得视觉连贯的结果。为改善变形后的3D高斯泼溅的视觉效果，我们以高斯为中心的绑定策略采用代理网格，并将高斯与网格面进行空间关联，从而显著减少渲染伪影。凭借这两个组成部分，UniMGS能够在统一框架内可视化和操作以网格或3D高斯泼溅表示的3D物体，为具身人工智能、虚拟现实和游戏开辟了新的可能性。我们将发布源代码，以助力未来研究。

引言

辐射表示领域的最新进展，尤其是 3D高斯泼溅（3DGS）（Kerbl等人 2023年），使高效建模逼真的 3D场景成为可能。在辐射场景中加入网格，以实现交互和可视化，已在具身人工智能（Xie 等人，2025年）和游戏（Xia 等人，2024年）等应用中展现出巨大价值。因此，3D视觉社区迫切需要提升 3DGS 与网格在渲染和操作方面的兼容性。

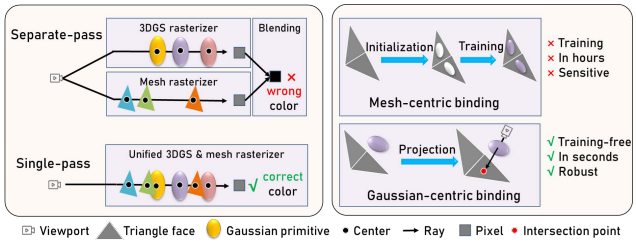


图 1：UniMGS 与先前工作在光栅化和变形方面的差异。

为应对不同形状表示在渲染上的差异，大多数方法会先分别渲染网格和 3D高斯泼溅，再通过可见性和深度排序将结果混合，从而实现直接的分离式渲染方案（Xie 等人，2025年；Wang 等，2024；Xiao 等，2024）。由于分离式渲染方案必须单独渲染每种形状以计算可见性，因此从本质上无法处理对象之间嵌套的空间关系。相比之下，单次渲染方法可以在统一渲染管线中同时处理网格和辐射表示（Qiao 等，2023），但对此的探索仍不充分。尽管近期已有研究利用光线追踪渲染 3D高斯泼溅和网格（Byrski 等人，2025；Wu 等，2025），但由于计算成本较高，其运行时性能仍逊于光栅化。

此外，由于 3D高斯泼溅 表示的形状由带有中心点的离散高斯核构成，因此可以通过直接操控这些核来实现变形（Wu等人，2024；Xie 等，2024）。另一种方法是将 3D高斯泼溅 绑定到代理上，并通过操控代理间接使其变形，例如稀疏控制点（Huang 等人 2024；Zhong 等，2024）、变形图（Tong 等，2025a）、笼式结构（Tong 等，2025b；Huang 和 Yu，2024）以及网格（Gao 等人 2024a；Waczy´nska 等人 2024；Gao 等，2024b）。正如 GaussianMesh（Gao 等人 2024a）所指出的，除基于网格代理的方法以外，其他范式都缺乏明确的拓扑信息，因此在处理大幅变形时会产生错位伪影。然而，现有依赖代理网格的方法通常采用以网格为中心的绑定策略：首先在每个面上初始化高斯，然后利用代理网格提供的几何约束进行训练和优化。

*这些作者贡献相同。

†这些作者为共同通讯作者。版权所有 © 2026，人工智能促进协会 (www.aaai.org)。保留所有权利。

由于这些方法遵循“先初始化、再训练”的工作流程，即使是经过优化的 3D高斯泼溅，也必须重新训练才能绑定到代理网格，这就形成了因果依赖。这种设计不仅降低了易用性，而且对网格的拓扑结构较为敏感，当网格存在缺陷时会产生伪影。

受这些观察的启发，我们提出了**UniMGS**，一个用于在单遍光栅化和基于代理的变形中实现**Uni**统一网格与3D**GS** 集成的框架。我们的核心思想由两部分组成：1）调整 3DGS 光栅器以实现抗锯齿网格渲染；2）将面向网格的操控适配到 3DGS。由于 3DGS 和网格都可以进行光栅化，直接为带纹理网格分配不透明度属性，即可通过 α-混合实现统一渲染。然而，两种方法的抗锯齿实现有所不同：对于 3DGS，在进行 α-混合之前会应用椭圆加权平均（EWA）滤波器（Zwicker等人 2001年；Kerbl 等人 2023年）。相比之下，对于三角网格，抗锯齿通常在进行 α-混合期间完成，并涉及一个取决于子像素透射率的覆盖率值（de Vries 2020年）。因此，3DGS 中的 α-混合必须进行调整，以考虑网格的抗锯齿。我们的方法正是自然地源于这一推理。我们将深度相邻三角形视为一个整体，在该整体内部，颜色混合仍在像素级进行，而透射率则在子像素级独立计算，并通过覆盖率加权，以表示像素级透射率。在该整体之外，每个三角形仍被视为独立的片段，因为抗锯齿仅适用于这一三角形整体。因此，必须在像素级更新各三角形片段之间的透射率，以便为后续计算做出贡献，例如与高斯或背景进行混合。这一新颖设计成功地将抗锯齿网格渲染集成到 3DGS 光栅器中，且不会造成任何性能下降，从而使高斯和网格能够以单遍方式共同进行光栅化。据我们所知，尚无先前工作探索网格与 3DGS 的单遍光栅化——这是一项被 3D视觉社区忽视的基础技术。

为了将面向网格的操控应用于 3D高斯泼溅，我们提出了一种新颖的高斯变形表示，使 3D高斯泼溅能够进行拓扑感知操控。给定对象的 3D高斯泼溅及其网格（可通过各种重建方法轻松获取（Yu、Sattler 和 Geiger，2024；Wang 等人，2023）），我们的目标是将每个高斯与网格面关联起来，从而实现变形传递。为提高易用性和变形鲁棒性，我们倡导采用以高斯为中心的视角，以消除以网格为中心的方法所涉及的因果依赖。高斯与网格面之间的空间关系可直接用于绑定。得益于训练数据集中的相机，我们提出使用光线投射作为一种准确且高效的解决方案。具体而言，从相机发射一条穿过高斯中心的光线；如果它与代理网格的某个面相交，我们就记录该面。遍历所有相机后，可能会得到多个面。我们选择最近的面作为绑定目标。在操作过程中，变形会从网格传递到高斯。我们进一步将此方法扩展至高斯的包围盒，以增强变形鲁棒性，详情将在后文介绍。与以网格为中心的设计相比，我们以高斯为中心的策略能够自然地利用空间关系，在无需重新训练的情况下将高斯与面关联起来，从而在变形过程中对网格缺陷具有更高的鲁棒性。

我们通过多种实验对*UniMGS* 进行了全面评估。它首次实现了网格与3D高斯泼溅的统一光栅化，并忠实呈现透明度和颜色，且能正确处理遮挡。与现有的以网格为中心的范式相比，我们以高斯为中心的绑定策略能够带来更出色的变形视觉质量，即使代理网格存在缺陷也不例外，表现显著优于以往方法。*UniMGS* 弥合了3D高斯泼溅与网格之间的差距，同时保持了较高的使用灵活性。光栅化和变形模块各自都提升了3D高斯泼溅与网格之间的兼容性，而将二者结合起来，进一步增强了在混合表示下进行模拟的能力。

相关工作

混合表示的渲染方法

将3D图元渲染到图像平面上主要有两种范式：基于光线的方法（例如光线步进、光线追踪）和基于图元的方法（光栅化）（Hughes 等，2013），二者都常用于网格。神经辐射场（NeRF）（Mildenhall 等，2020）采用光线步进实现体渲染，而3D高斯泼溅（Kerbl 等人 2023）则利用光栅化实现快速渲染。尽管不同方法的渲染原理相似，要在统一的渲染框架中融合不同的形状表示仍然面临挑战。大多数研究会先单独渲染网格，再利用其深度图，在渲染辐射表示时处理遮挡。在网格-NeRF混合渲染中，通常假设网格是不透明的，因此光线一旦命中网格表面，光线步进便可提前终止（Ye 等，2024；Guo 等，2023；Xia 等人，2024）。在网格-3D高斯泼溅混合渲染中，现有研究（Xiao 等，2024；Wang 等，2024；Xie 等人，2025）会先对网格进行光栅化，然后通过 α-混合将光栅化结果与渲染出的高斯结合起来。与此不同，DMERF（Qiaoet al.2023）通过允许光线在光线追踪与光线步进之间交替，以单遍方式实现网格-NeRF耦合。显然，与分遍方法相比，单遍方法在准确计算透明度和遮挡方面具有显著优势。近期研究（Moenne-Loccoz 等，2024；Wu 等，2025；Byrski 等，2025）提出使用光线追踪渲染3D高斯泼溅，从而实现与网格的无缝集成。虽然这些方法提升了视觉质量，但代价是渲染速度几乎减半。

3D高斯泼溅变形的表示

3D高斯泼溅（Kerbl 等人 2023）是一种离散形状表示，其中每个高斯都由核函数连续参数化。尽管直接操控 3D高斯泼溅是可行的（Xie 等，2024；Wu等人，2024），但由于缺乏拓扑信息，形变往往会产生伪影。

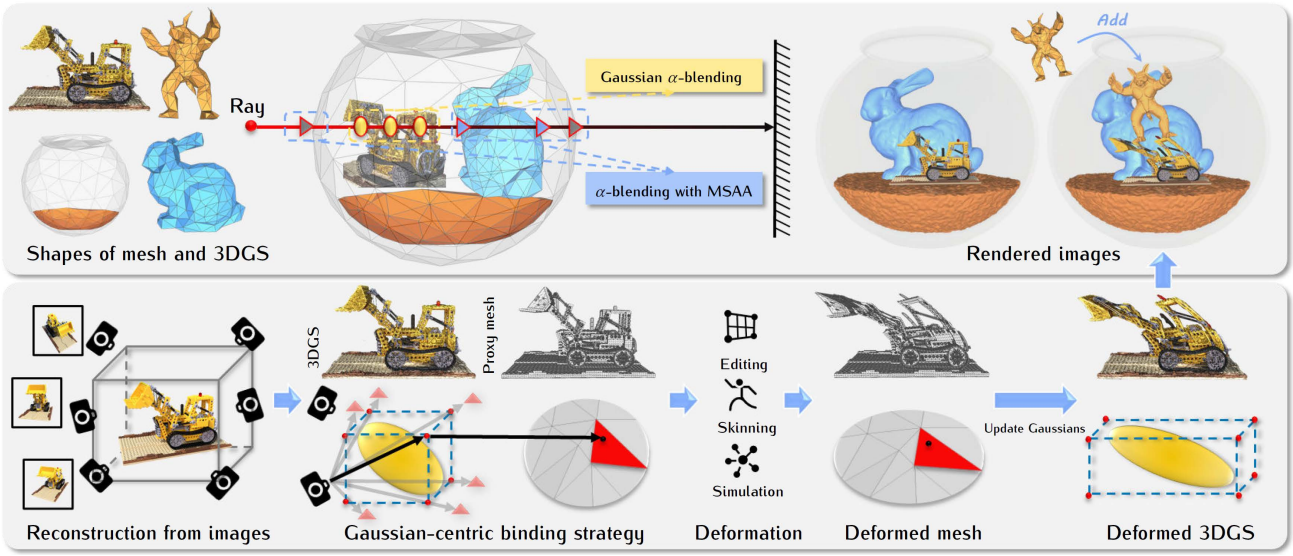


图2：UniMGS 概述。对于由3D高斯泼溅和网格组成的对象，统一渲染管线通过在单遍方式下进行 α 混合，连接高斯与三角形，从而准确计算颜色并处理遮挡。为减少混叠伪影，我们将深度相邻的三角形片段归为一个整体，并在其中使用多重采样抗锯齿进行 α 混合。该框架还支持借助代理网格，将基于网格的形变无缝扩展到3D高斯泼溅。我们将包围盒的顶点投影到网格上，从而把高斯与三角形面关联起来。在形变过程中，三角形面的运动首先传递到包围盒，再传递到高斯。

因此，近期研究提出了基于代理的表示，以支持对 3D高斯泼溅进行间接形变，例如稀疏控制点（Huang 等，2024；Zhong 等，2024；Li、Chen 和 Liu，2024）、形变图（Tong 等，2025a）、笼式结构（Tong 等，2025b；Huang 和 Yu，2024）以及网格（Gao 等 2024a；Waczy´nska 等，2024）。其中，代理网格凭借完整的拓扑结构以及与大多数面向网格的操控方法的兼容性，表现更佳；近期先进研究也证实了这一点（Gao 等 2024a,b）。给定代理网格后，SuGaR（Gu´edon 和 Lepetit，2024b）和 GaMeS（Waczy´nska 等，2024）会将多个高斯附着到每个三角形面上，随后这些高斯按照重心坐标加权，随三角形顶点移动。Frosting（Gu´edon 和 Lepetit，2024a）会在网格周围形成糖霜层，并创建棱柱单元来包围高斯、控制其在形变过程中的运动。Mani-GS（Gao 等 2024b）将高斯置于网格面的局部坐标系中，并通过网格编辑驱动高斯。GaussianMesh（Gao 等 2024a）为每个三角形面分配一个高斯，并在训练过程中使它们共同分裂；同时，该方法对网格进行 ACAP 形变（Gao 等人 2021），以编辑高斯。上述方法首先通过以网格为中心的绑定方案在网格面上初始化高斯，然后进行训练；由于形变后的高斯容易受到代理网格拓扑质量的影响，因此容易产生视觉伪影。

不同于以往研究，我们提出了一种基于 α-混合的 3D高斯泼溅与网格单次光栅化管线，在不降低渲染速率的情况下，实现透明度渲染和正确的空间遮挡关系，

在基于代理的三维高斯泼溅形变方面，我们提出了不同的思路：采用以高斯为中心的策略，将训练好的 3D高斯泼溅直接连接至代理网格，从而实现最小化的伪影，并具备对网格质量的鲁棒性。总体而言，这些贡献推动了动态场景中网格与 3D高斯泼溅的可视化和操作取得显著进展。

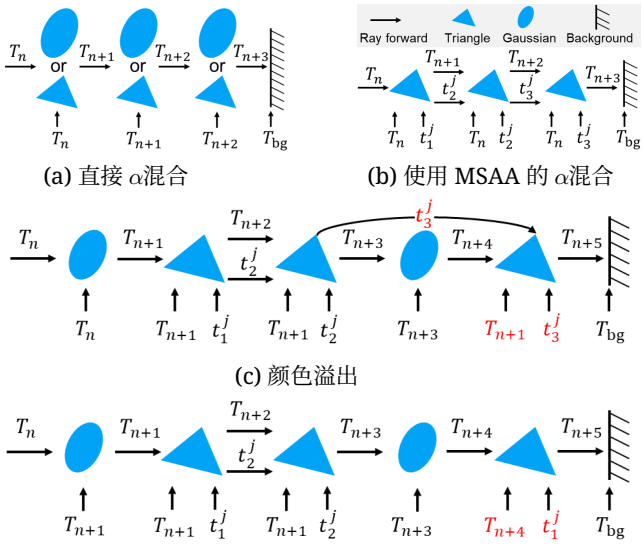
方法论

框架概述

图2概述了我们的统一框架，该框架由两个关键模块组成：光栅化和形变。我们首先根据多视图图像重建3D高斯泼溅，同时可通过各种重建算法获得相应的代理网格（Wang 等人，2023；Yu、Sattler 和 Geiger，2024；Kazhdan、Bolitho 和 Hoppe，2006年）。随后，我们采用以高斯为中心的绑定策略，将每个高斯与相关网格面关联起来。形变首先作用于代理网格，然后传递到3D高斯泼溅。对于以3D高斯泼溅或网格表示的不同对象的光栅化，我们将抗锯齿三角形 α 混合整合到3D高斯泼溅渲染流水线中。该单通道流水线可确保正确处理遮挡和颜色混合。接下来，我们将详细介绍光栅化和形变模块。

单通道光栅化3D高斯泼溅与网格

为了更清楚地阐明我们在光栅化方面的贡献，我们在方程旁补充了示意图和渲染结果



(a) 直接 α混合 (b) 使用 MSAA 的 α混合

(c) 颜色溢出

(d) 我们的方法

图 3：使用 α 混合进行单遍光栅化的示意图。$\rightarrow$表示透射率的更新，而 $\uparrow$ 表示用于 α混合的透射率。(a)：直接混合三角形和高斯，不对三角形进行抗锯齿处理。(b)：将与同一像素重叠的所有三角形视为一个整体，并在 α混合中执行 MSAA。(c)：直接将 (b) 应用于 (a) 会导致颜色溢出。(d)：通过仅将深度相邻的三角形视为一个实体来修改 (c)，差异以红色突出显示。

。图 3 展示了我们如何构建统一渲染方法，而图 4 则将各个部分可视化，以说明我们方法中每个步骤背后的原理。

3DGS 光栅器采用 α混合，沿一条光线对与像素重叠的按深度排序的片段进行混合，从而计算像素的颜色C_{gs} N （Kerbl 等人 2023年）：

$$C_{\text{gs}} = \sum_{i=1}^{N} T_i \alpha_i c_i, \tag{1}$$

with

$$T_i = \prod_{j=1}^{i-1} (1 - \alpha_j) \text{ and } T_1 = T_{\text{in}}. \tag{2}$$

在方程 (1) 中，c_i 和 α_i 分别是第 i 个片段的 RGB 值和不透明度，T_i 称为透射率，表示第 i 个片段的可见性（Maule 等人，2012），而 T_{in} 表示光线穿过这些片段之前的透射率；如果尚未穿过任何片段，通常将其初始化为 1.0。对于统一光栅化，一种直接的方法是将三角形片段纳入深度排序过程，从而无缝集成到 3DGS 光栅器中（见图 3a 和 4a）。然而，尽管高斯通过 EWA 滤波减轻了混叠，也必须为三角形片段配备抗锯齿策略。多重采样抗锯齿（MSAA）（de Vries，2020年）是一种常用方案（Epic Games, Inc. 2025b），它

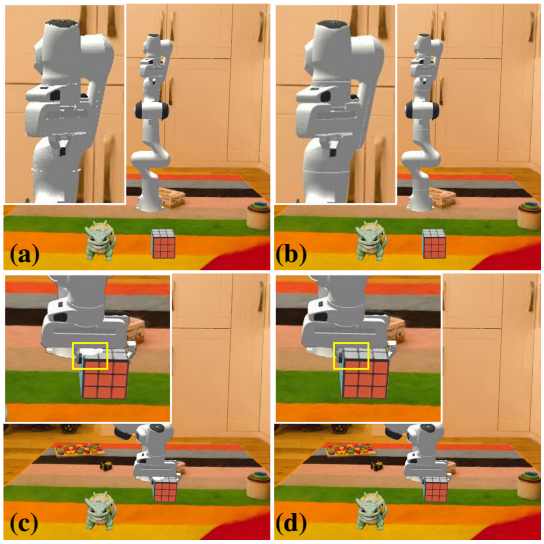


图 4：我们的光栅化流程带来的视觉改进。(a)：直接进行 α 混合；(b)：结合多重采样抗锯齿与 α 混合消除锯齿；(c)：透射率错误导致颜色溢出；(d)：我们完整的方法，没有伪影。

根据不透明三角形片段在子像素上的覆盖率，对其颜色贡献进行缩放：

$$C_{\text{tris}} = O_i c_i, \tag{3}$$

with

$$O_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^{M} \hat{o}_i^j \text{ and } \hat{o}_i^j = \begin{cases} o_i^j, & o_{i-1} = 0 \\ 0, & o_{i-1} = 1 \end{cases}, \tag{4}$$

其中，$o_i^j \in \{0, 1\}$ 表示第 i 个片元在几何上是否覆盖第 j 个子像素，$\hat{o}_i^j$ 是经过深度测试后的覆盖率，O_i 是像素级的总覆盖率，M 是子像素的数量（我们设定 M=4）。正如 Maule 等人，2012 所述，一种常见方法是将多重采样抗锯齿与 α 混合结合起来：

$$C_{\text{tris}} = \sum_{i=1}^{N} T_i O_i \alpha_i c_i, \tag{5}$$

with

$$O_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^{M} o_i^j \text{ and } T_i = \prod_{k=1}^{i-1} (1 - O_k \alpha_k). \tag{6}$$

在方程 (6) 中，片段的可见性取决于像素级的透射率 T_i，但根据方程 (4)，这应在子像素级进行。由于 (Maule 等人，2012) 未包含每个子像素透射率计算的细节，我们根据方程 (2) 定义这些三角形片段内的 t_i^j：

$$t_i^j = \prod_{k=1}^{i-1} (1 - o_k^j \alpha_k) \text{ and } t_1^j = 1.0. \tag{7}$$

因此，方程 (6) 中的 O_i 可改写为：

$$O_i = \frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M} o_i^j t_i^j. \tag{8}$$

O_i 可通过加权平均视为受子像素透射率 t_i^j 影响的连续覆盖率，这与方程 (4) 中的 M 离散值不同。因此，不再需要 T_i，因为现在是在子像素级处理透射率，以满足多重采样抗锯齿的需求。由此，我们将方程 (5) 修改为：

$$C_{\text{tris}} = T_{\text{in}} \sum_{i=1}^{N} O_i \alpha_i c_i. \tag{9}$$

值得注意的是，虽然与方程 (5) 相比，T_i 被省略了，但它仍会通过方程 (6) 更新，以用于后续混合。例如（见图 3b 和 4b），给定一个具有 C_{bg} 和 α_{bg} 的背景，像素的最终颜色为：

$$C_{\text{pixel}} = C_{\text{tris}} + T_{\text{bg}} C_{\text{bg}}, \tag{10}$$

with

$$T_{\text{bg}} = T_N(1 - \alpha_{\text{bg}}). \tag{11}$$

方程 (9) 的核心思想是将重叠于同一像素的 N三角形视为一个整体，从而使像素级更新后的透射率 T_N 能够正确地用于方程 (11)。然而，这种方案无法直接与高斯结合。当三角形之间存在高斯时，对于深度值大于高斯的三角形，在 α 混合中使用的透射率过大（见图 3c 最右侧的三角形），因为它没有考虑光线穿过高斯时导致的透射率衰减。这会造成颜色溢出，并表现为白色伪影（见图 4c）。为避免颜色溢出，我们提出了一种简单而有效的方法：仅将深度相邻的三角形视为一个整体（见图 3d 中左侧的两个三角形），而非所有与像素重叠的三角形。在网格和 3D高斯泼溅的统一光栅化过程中，分别对高斯片段和三角形片段采用方程 (1) 和方程 (9)，从而实现单次通过的抗锯齿处理（见图 4d）。

基于高斯中心绑定的变形

将高斯绑定到网格。 我们倡导以高斯为中心的视角，并采用光线投射将高斯与网格面关联起来。该方法无需训练，且对网格拓扑具有鲁棒性。由于用于3DGS训练的相机天然朝向对象，我们从这些相机向高斯中心投射光线。如果光线击中某个面，我们便记录面索引、交点的重心坐标，以及交点到高斯中心的距离。随后，将高斯绑定到最近的候选面。然而，这并不是理想的选择，因为高斯与面之间的尺寸差异可能很大，进而可能导致不一致的变形幅度。鉴于笼式结构或包围盒变形具有鲁棒性（Tong 等，2025b），我们将高斯变换扩展为其BBX角点变换的平均值。为此，我们提出一种扩展策略：每个相机向高斯包围盒的8个角点投射光线。对于每条光线，我们保留距离高斯最近的面。因此，每个高斯最终会绑定到8个面。该方法使用OptiX（Parker等人，2010）实现。由于光线投射完全并行化，绑定过程可在几秒内完成。

变形传递。 将 3D高斯泼溅绑定到代理网格后，任何适用于网格的变形方法都可以扩展到 3D高斯泼溅，例如物理模拟以及图形引擎中的修改器。下面简要介绍如何将变形从代理网格传递到 3D高斯泼溅。考虑一个高斯核 G及其包围盒 B，其参数由均值向量 μ和协方差矩阵 Σ表示。为便于记号说明，任意量 X_i^j中的下标 $i = \{1, 2, \cdots, 8\}$ 表示包围盒角点的索引，而上标$j = \{1, 2, 3\}$则表示相关三角形面的顶点索引。遵循 GaussianMesh（Gao 等人 2024a）的方法，我们采用 ACAP（Gao 等人 2021）计算操作过程中顶点的变换。具体而言，顶点的运动由偏移量 Δ_i^j和变换矩阵 D_i^j构成，后者可通过极分解分解为旋转矩阵 R_i^j和剪切矩阵 S_i^j。此外，重心插值可以将变换从三角形顶点传播到三角形内的任意点；在本文中，该点对应于交点 P_i，其重心坐标为 $\{u, v, w\}$。 P_i 的变换可按如下方式计算：

$$\begin{aligned}
\Delta_i &= u\Delta_i^1 + v\Delta_i^2 + w\Delta_i^3 \\
&= u(V_i^{1\prime} - V_i^1) + v(V_i^{2\prime} - V_i^2) + w(V_i^{3\prime} - V_i^3), \\
R_i &= u\log(R_i^1) + v\log(R_i^2) + w\log(R_i^3), \text{ and} \\
S_i &= uS_i^1 + vS_i^2 + wS_i^3,
\end{aligned} \tag{12}$$

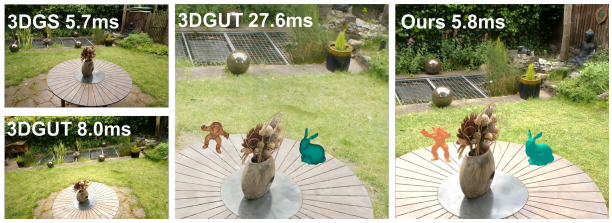
其中， V_i^j 和 $V_i^{j\prime}$ 分别表示操作前后三角形的第 j 个顶点的位置。由于 B 的第 i 个角的变换与 P_i 保持一致，因此随后通过平均操作将其传递给 G：

$$\begin{aligned}
&R' = \exp\left(\frac{1}{8}\sum_{i=1}^{8} R_i\right),\ S' = \frac{1}{8}\sum_{i=1}^{8} S_i,\ \Sigma' = R'S'\Sigma(R'S')^T, \\
&\mu' = \mu + \frac{1}{8}\sum_{i=1}^{8}\Delta_i, \text{ and } G'(x) = e^{-\frac{1}{2}(x-\mu')^T(\Sigma')^{-1}(x-\mu')},
\end{aligned} \tag{13}$$

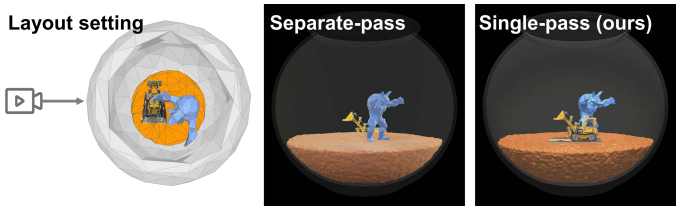
其中， G'（x）是更新后的高斯核。更多详情请参阅参考文献（Gao 等人 2024a，2021年）。

实验

我们通过定量和定性实验，全面评估了*UniMGS*的能力，包括统一光栅化的性能、以高斯为中心的绑定策略带来的变形质量提升，以及基于统一框架的两种代表性应用。对于我们的方法，所有高斯对象均使用3D高斯泼溅（Kerbl 等人 2023）进行重建，



(a) 与基于射线的方法比较



(b) 与分离式渲染方案比较

图5：与现有混合渲染研究的评估。(a)：与基于射线的方法相比，我们的方法在保持视觉效果相当的同时，展现出良好的运行时性能。(b)：与分离通道光栅化方法相比，我们的方法能够保证正确的空间关系，因为高斯和三角形的颜色在单次处理中进行混合。

方法	峰值信噪比↑	结构相似性↑	学习感知图像块相似度↓	数量
UniMGS	**28.43**	**0.946**	**0.048**	275K
*UniMGS**	28.23	0.940	0.051	275K
GaussianMesh	27.21	0.925	0.079	989K
Frosting	25.42	0.912	0.059	2.16M
Mani-GS	23.76	0.842	0.123	2.47M

表 1：NeRF-Synthetic 数据集上新视角合成的定量比较。

而对于其他方法，我们则遵循其官方说明进行训练，直至收敛。评估基于公开数据集神经辐射场合成（Mildenhall 等，2020）、Mip-NeRF360（Barron 等人，2022）、Hybrid-IBR（Prakash 等人，2021），以及我们从Fab（Epic Games, Inc. 2025年）自行采集的数据。受篇幅限制，我们仅展示部分结果。更多示例请参见补充材料。

统一光栅化能力

基线方法。 现有关于高斯与网格耦合光栅化的研究（Xie 等人，2025年；Wang 等，2024；Xiao 等，2024）均采用分离式通道范式，但这些方法都无法获取。因此，我们必须复现分离式通道渲染方案，以便进行直观评估。此外，3DGUT（Wu 等，2025）采用基于光线的方式渲染 3D高斯泼溅和网格。实现细节见补充材料。

结果。 在图5a中，我们设计了一个由高斯（MipNeRF360 中的花园 （Barron 等，2022））和低多边形网格（橙色和绿色的形状）组成的基准场景，并记录了平均每帧渲染时间。仅使用高斯时，3DGUT 的渲染时间比 3DGS 长 1.4× ，这与其原始研究结果一致。加入网格后，我们的渲染速度保持稳定，而 3DGUT 的速度则降低了 3.4×。这种性能下降是因为 3DGUT 依赖额外的光线追踪流程来处理网格，而我们的方法采用统一光栅化管线，在单次处理中同时处理网格和高斯。图5b展示了这样一种场景：一个由高斯表示的乐高与网格对象并置，并被一个透明碗包围。然而，分离式渲染方案无法处理这种情况下的遮挡。在分离式渲染方案中，乐高 图像和网格图像根据深度逐像素合成。然而，由于嵌套的空间关系，乐高不可能出现在碗内。关键原因在于，只有在同一种表示内部才能确保正确的可见性，而仅凭深度图不足以保证后续颜色合成的正确性。相比之下，我们的单次渲染方法通过在片段级计算颜色，实现了真正的统一渲染。

变形性能

本实验评估了网格中心绑定策略与我们的高斯中心绑定策略在不同动画算法和代理网格来源下的变形性能。视觉伪影是主要评判指标。GaussianMesh（Gao 等人 2024a）、Mani-GS（Gao 等，2024b）和 Frosting（Gu´edon 和 Lepetit 2024a）提出了几种先进的变形表示，它们均属于网格中心方法。对于我们的方法，将一个高斯直接绑定到单个面称为*UniMGS**，将基于 BBX 的关联绑定到多个面称为*UniMGS*。

NeRF-Synthetic 数据集上的定量比较。在 NeRF-Synthetic 数据集（Mildenhall 等，2020）中，采用艺术家创建的真实值（GT）网格作为代理网格，其三角形面数量范围为 60K 至 1,200K。遵循 PhysGaussian（Xie 等，2024），我们在 Blender（Blender 基金会 2025）中使用简单变形修改器执行变形，并使用峰值信噪比（PSNR）、结构相似性（SSIM）和学习感知图像块相似度（LPIPS）评估结果。这些指标通过比较变形网格与 3D高斯泼溅的新视角渲染结果计算得出。此外，还报告了平均高斯数量，记为数量。

如表 1 所示，我们的方法在所有定量指标上均优于其他方法，相应的可视化结果见补充材料。在 GaussianMesh 中，训练期间面与高斯可以一起细分；Frosting 引入了由高斯组成的额外糖霜层；Mani-GS 则为每个面分配多个高斯。这些以网格为中心的策略必须在训练前将高斯绑定到网格，并以代理网格提供的几何约束为指导。尽管这有利于静态 3DGS 优化，但此类约束可能会损害变形质量并产生伪影。相比之下，我们的

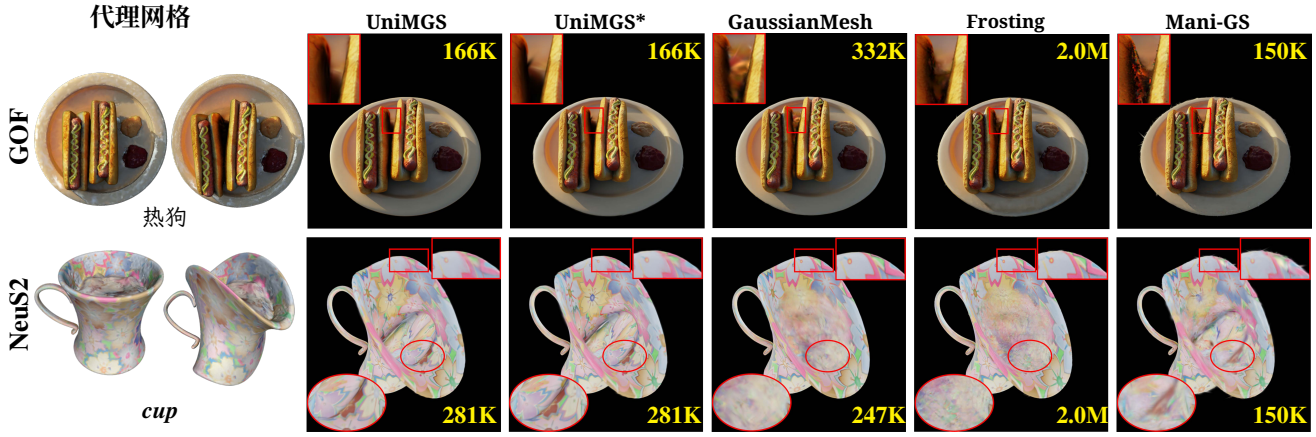


图6：形变效果的视觉对比。我们展示了从两种先进重建方法（NeuS2 和 GOF）获得的纹理代理网格在形变前后的效果，其中高斯数量以黄色标出。所有代理网格均简化为 5 万个面。基线方法（GaussianMesh、Frosting 和 Mani-GS）在大幅形变下会产生严重伪影，主要是因为其采用的面片中心绑定策略对代理网格拓扑质量十分敏感。



图 7：具身人工智能与流体模拟中的应用。这两个场景涉及复杂的遮挡、丰富的交互和多样的外观（包括透明和不透明物体），这些都得到了忠实呈现。背景由 3D高斯泼溅（Kerbl 等人 2023年）重建。

以高斯为中心的策略直接将训练后的 3D高斯泼溅与网格关联，从而保持原始 3D高斯泼溅数据不变，同时仍能取得出色的结果。

对网格质量的鲁棒性。 由于高质量网格并非总是可用，本实验中的代理网格取自 NeuS2（Wang 等人，2023）（GaussianMesh 和 Mani-GS 推荐使用）和 GOF（Yu、Sattler 和 Geiger，2024）。考虑到计算成本，我们遵循 GaussianMesh （ Gao 等人 2024a ）的做法，使用简化方法（Garland 和 Heckbert，1997；Cignoni 等人，2008）将所有代理网格简化至 50K 个面。我们对热狗进行物理模拟（Macklin、M¨uller 和 Chentanez，2016），而对杯子则使用 Blender 修改器。图6展示了变形前后的代理网格，以及由此得到的变形后 3D高斯泼溅。GOF 是一种先进的从 3D高斯泼溅中提取带纹理网格的方法，而 NeuS2 则依赖隐式神经场，能够稳定生成水密网格。然而，NeuS2 存在一个失败案例：它错误地封闭了杯子的开口。在这种不利情况下，现有的网格中心方法在高斯优化方面表现不佳，因为高斯被限制在代理网格表面附近。相比之下，我们的以高斯为中心的方法在空间上将高斯与网格关联起来，而不施加因果关系，因此即使代理网格质量较差或结构存在缺陷，也具有更强的容错能力。

无论网格质量如何，GaussianMesh 也采用 ACAP 进行变形传递，但会产生失真和模糊，进一步凸显了我们以高斯为中心的绑定策略的优势。与*UniMGS**相比，在*UniMGS*中引入包围盒提升了视觉效果。

基于 UniMGS 的应用

UniMGS 在光栅化和形变方面统一了网格与 3D高斯泼溅，为涉及混合表示的下游任务奠定了基础。图 7 展示了两个代表性案例，以说明 UniMGS 在具身人工智能和流体模拟中的应用潜力。实现细节见补充材料。

结论

本文首先研究了鲜少受到关注的3D高斯泼溅与网格统一光栅化问题：通过单次处理混合三角形片段和高斯片段的颜色，从而确保颜色计算准确并妥善处理遮挡。其次，我们提出了一种新颖的以高斯为中心的绑定策略，以提升由代理网格驱动的3D高斯泼溅的视觉效果。最后，全面的实验验证了*UniMGS* 在渲染和操作方面的优势，而应用案例进一步凸显了其实用价值。

参考文献

Barron, J. T.; Mildenhall, B.; Verbin, D.; Srinivasan, P. P.; and Hedman, P. 2022. Mip-NeRF 360：无界抗锯齿神经辐射场。载于*IEEE/CVF*计算机视觉与模式识别会议（*CVPR*）论文集，5470–5479。Blender 基金会。2025年。Blender 4.4手册。https://www.blender.org/。 [在线；访问日期：2025]年4月25日。Byrski, K.; Mazur, M.; Tabor, J.; Dziarmaga, T.; Kadzi-olka, M.; Baran, D.; and Spurek, P. 2025。RaySplats：基于光线追踪的高斯泼溅。*arXiv*预印本 *arXiv:2501.19196*。Cignoni, P.; Callieri, M.; Corsini, M.; Dellepiane, M.; Ganovelli, F.; and Ranzuglia, G. 2008。MeshLab：开源网格处理工具。载于 Scarano, V.; Chiara, R. D.; and Erra, U. 编，欧洲图形学意大利分会会议。欧洲图形学协会。国际标准书号 978-3-905673- 68-5。de Vries, J. 2020年。*Learn OpenGL*：循序渐进地学习现代 *OpenGL* 图形编程（书中章节），章节：第四部分——高级OpenGL抗锯齿，264–271。Kendall & Welling。国际标准书号 978-90-90-33256-7。Epic Games, Inc. 2025年。Fab。https://www.fab.com/。 [在线；访问日期：2025]年5月18日。Epic Games, Inc. 2025b。Unreal Engine 5.6文档：抗锯齿与升采样。https://dev.epicgames.com。[在线；访问日期：2025]年6月20日。Gao, L.; Lai, Y.-K.; Yang, J.; Zhang, L.-X.; Xia, S.; and Kobbelt, L. 2021年。稀疏数据驱动的网格变形。*IEEE*可视化与计算机图形学汇刊，27(3)：2085–2100。Gao, L.; Yang, J.; Zhang, B.-T.; Sun, J.-M.; Yuan, Y.-J.; Fu, H.; and Lai, Y.-K. 2024a。高斯泼溅的实时大规模变形。*ACM*图形学汇刊，43(6)：1–17。Gao, X.; Li, X.; Zhuang, Y.; Zhang, Q.; Hu, W.; Zhang, C.; Yao, Y.; Shan, Y.; and Quan, L. 2024b。Mani-GS：利用三角网格操作高斯泼溅。*arXiv*预印本 *arXiv:2405.17811*。Garland, M.; and Heckbert, P. S. 1997。使用二次误差度量进行曲面简化。载于第*24*届计算机图形学与交互技术年度会议论文集，209–216。Gu´edon, A.; and Lepetit, V. 2024a。Gaussian Frosting：支持实时渲染的可编辑复杂辐射场。载于欧洲计算机视觉会议（*ECCV*）论文集，413–430。施普林格。Gu´edon, A.; and Lepetit, V. 2024b。SuGaR：用于高效三维网格重建和高质量网格渲染的表面对齐高斯泼溅。载于*IEEE/CVF*计算机视觉与模式识别会议（*CVPR*）论文集，5354–5363。Guo, Y.-C.; Cao, Y.-P.; Wang, C.; He, Y.; Shan, Y.; and Zhang, S.-H. 2023。VMesh：用于高效视图合成的混合体积—网格表示。载于*SIGGRAPH Asia 2023*会议论文集，1–11。Huang, J.; and Yu, H. 2024年. GSDeformer：用于3D高斯泼溅的直接笼式结构变形。*arXiv*预印本 *arXiv:2405.15491*。Huang, Y.-H.; Sun, Y.-T.; Yang, Z.; Lyu, X.; Cao, Y.-P.; and Qi, X. 2024年. SC-GS：用于可编辑动态场景的稀疏控制高斯泼溅。载于*IEEE/CVF*计算机视觉与模式识别会议（*CVPR*）论文集，4220–4330。Hughes, J. F.; van Dam, A.; McGuire, M.; Sklar, D. F.; Foley, J. D.; Feiner, S. K.; and Akeley, K. 2013年. 计算机图形学原理与实践（书中章节），章节：光线投射与光栅化，387–393。美国新泽西州上萨德尔河：Addison-Wesley Professional。国际标准书号 978-0-321-39952-6。Kazhdan, M.; Bolitho, M.; and Hoppe, H. 2006年. 泊松表面重建。载于第四届欧洲图形学几何处理研讨会论文集，第7卷。Kerbl, B.; Kopanas, G.; Leimk¨uhler, T.; and Drettakis, G. 2023年. 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。Li, Z.; Chen, Y.; and Liu, P. 2024年. DreamMesh4D：基于稀疏控制高斯-网格混合表示的视频到四维生成。神经信息处理系统进展，37：21377–21400。Macklin, M.; M¨uller, M.; and Chentanez, N. 2016年. XPBD：基于位置的柔顺约束动力学模拟。载于第*9*届国际游戏运动会议论文集，49–54。Maule, M.; Comba, J. L.; Torchelsen, R.; and Bastos, R. 2012年. 实时渲染中的透明度与抗锯齿技术。载于*2012*年第*25*届*SIBGRAPI*图形、模式与图像教程会议，50–59。IEEE。Mildenhall, B.; Srinivasan, P. P.; Tancik, M.; Barron, J. T.; Ramamoorthi, R.; and Ng, R. 2020年. NeRF：将场景表示为用于视图合成的神经辐射场。载于欧洲计算机视觉会议（*ECCV*）论文集，405–421。施普林格。Moenne-Loccoz, N.; Mirzaei, A.; Perel, O.; de Lutio, R.; Esturo, J. M.; State, G.; Fidler, S.; Sharp, N.; and Gojcic, Z. 2024年. 三维高斯光线追踪：粒子场景的快速追踪。*ACM*图形学汇刊（*SIGGRAPH Asia*）。Parker, S. G.; Bigler, J.; Dietrich, A.; Friedrich, H.; Hoberock, J.; Luebke, D.; McAllister, D.; McGuire, M.; Morley, K.; Robison, A.; and Stich, M. 2010年. OptiX：通用光线追踪引擎。*ACM*图形学汇刊，29(4)。Prakash, S.; Lei mk¨uhler, T.; Rodriguez, S.; and Drettakis, G. 2021年. 用于自由视点合成的混合式基于图像的渲染。*ACM*计算机图形学与交互技术论文集，4(1)：1–20。Qiao, Y.-L.; Gao, A.; Xu, Y.; Feng, Y.; Huang, J.-B.; and Lin, M. C. 2023年. 动态网格感知辐射场。载于*IEEE/CVF*国际计算机视觉会议（*ICCV*）论文集，385–396。Tong, X.; Shao, T.; Weng, Y.; Yang, Y.; and Zhou, K. 2025年. 高斯辐射场的尽可能刚性变形。*IEEE*可视化与计算机图形学汇刊。

Tong, Y.; Tian, R.; Han, X.; Liu, D.; Yu, F.; and Zhang, Y. 2025b. CAGE-GS：基于高保真笼的三维高斯泼溅变形。*arXiv*预印本 *arXiv:2504.12800*。Waczy´nska, J.; Borycki, P.; Tadeja, S.; Tabor, J.; and Spurek, P. 2024年. GAMES：基于网格的高斯泼溅适配与修改。*arXiv*预印本 *arXiv:2402.01459*。Wang, C.; Kang, D.; Sun, H.-Y.; Qian, S.-H.; Wang, Z.-X.; Bao, L.; and Zhang, S.-H. 2024年. Mega：用于高保真渲染与头部编辑的混合网格-高斯头部化身。*arXiv*预印本 *arXiv:2404.19026*。Wang, Y.; Han, Q.; Habermann, M.; Daniilidis, K.; Theobalt, C.; and Liu, L. 2023年. NeuS2：用于多视图重建的神经隐式表面快速学习。载于*IEEE/CVF*国际计算机视觉会议（*ICCV*）论文集，3295–3306。Wu, G.; Yi, T.; Fang, J.; Xie, L.; Zhang, X.; Wei, W.; Liu, W.; Tian, Q.; and Wang, X. 2024年. 用于实时动态场景渲染的四维高斯泼溅。载于*IEEE/CVF*计算机视觉与模式识别会议（*CVPR*）论文集，20310–20320。Wu, Q.; Martinez Esturo, J.; Mirzaei, A.; Moenne-Loccoz, N.; and Gojcic, Z. 2025. 3DGUT：在高斯泼溅中支持失真相机与次级光线。计算机视觉与模式识别会议（*CVPR*）。Xia, H.; Lin, Z.-H.; Ma, W.-C.; and Wang, S. 2024年. Video2Game：基于单个视频构建实时交互式逼真且兼容浏览器的环境。载于*IEEE/CVF*计算机视觉与模式识别会议（*CVPR*）论文集，4578–4588。Xiao, Y.; Wang, X.; Li, J.; Cai, H.; Fan, Y.; Xue, N.; Yang, M.; Shen, Y.; and Gao, S. 2024年. 融合三维高斯与网格，实现自由视点视频渲染。*arXiv*预印本 *arXiv:2403.11453*。Xie, T.; Zong, Z.; Qiu, Y.; Li, X.; Feng, Y.; Yang, Y.; and Jiang, C. 2024年. PhysGaussian：用于生成式动力学的融合物理三维高斯。载于*IEEE/CVF*计算机视觉与模式识别会议（*CVPR*）论文集，4389–4398。Xie, Z.; Liu, Z.; Peng, Z.; Wu, W.; and Zhou, B. 2025. Vid2Sim：用于城市导航的逼真交互式视频仿真。*arXiv*预印本 *arXiv:2501.06693*。Ye, K.; Wu, H.; Tong, X.; and Zhou, K. 2024年. 一种将虚拟对象插入神经辐射场的实时方法。*IEEE*可视化与计算机图形学汇刊。Yu, Z.; Sattler, T.; and Geiger, A. 2024年. 高斯不透明度场：无界场景中的高效自适应表面重建。*ACM*图形学汇刊，43(6)：1–13。Zhong, L.; Yu, H.-X.; Wu, J.; and Li, Y. 2024年. 使用弹簧质点三维高斯重建与模拟弹性物体。载于欧洲计算机视觉会议（*ECCV*）论文集，407–423。施普林格。Zwicker, M.; Pfister, H.; Van Baar, J.; and Gross, M. 2001年. EWA体积泼溅。载于*2001*年可视化会议论文集（*VIS'01*），29–538。IEEE。