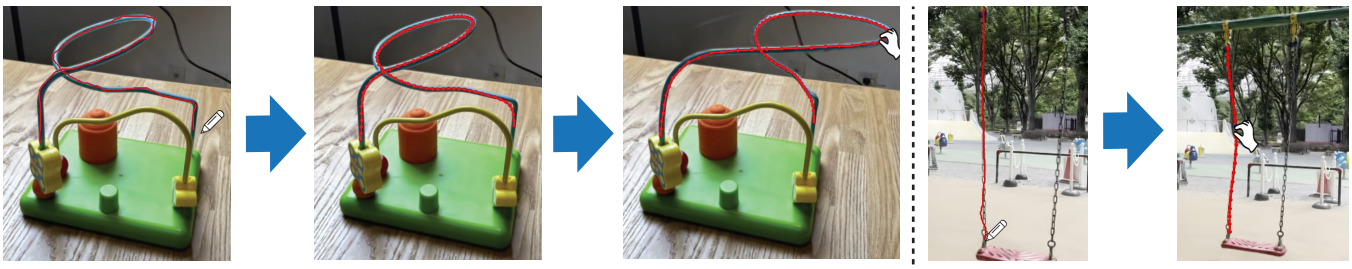
SketchRodGS：基于草图的细长几何体提取，用于动画化高斯泼溅场景

Haato Watanabe 东京大学 日本
haato.watanabe.research@gmail.com

Nobuyuki Umetani 东京大学 日本
n.umetani@gmail.com

arXiv:2601.02072v1 [cs.GR] 5 Jan 2026



(a) 二维用户草图 (b) 构建的三维折线 (c) 交互式变形 (d) 编辑复杂物体

图1：给定用户在高斯泼溅模型上的草图（a），系统会构建一条用于弹性杆模拟的三维折线（b），用户可以通过拖动使其变形（c）。该方法还能够捕捉和编辑链条等复杂形状（d）。

摘要

细长弹性物体的物理模拟通常需要将其离散化为折线。然而，从高斯泼溅中构建折线颇具挑战，因为高斯泼溅缺乏连通性信息，且高斯基元的配置包含大量噪声。本文提出一种方法，根据用户绘制的草图输入，从高斯泼溅场景中提取物体细长部分的折线表示。我们的方法利用屏幕空间最短路径分析，稳健地构建表示细长部分的折线网格，并通过动态规划高效求解。我们通过多个真实场景示例展示了该方法的有效性。

CCS 概念

• **计算方法 → 基于点的模型**；**图形系统与接口**；**网格几何模型**。

关键词

基于草图的建模，弹性杆模拟，高斯泼溅

1 引言

近年来，高斯泼溅 [Kerbl等人 2023] 作为一种高效且高质量的新视角合成方法，受到了广泛关注。高斯泼溅使用一组高斯基元表示辐射场，因此，可以通过改变基元的位置和形状等属性，动态地为场景制作动画。由于场景中有大量细小的高斯基元，逐个为其制作动画并不实际。相反，通常会将基元嵌入网格变形中 [Gao等人, 2024], 四面体网格 [Jiang等人 2024], 蒙皮变换，或对基于点的模拟中的点进行空间插值 [Feng等人 2025]。物理模拟或绑定动画会在这种嵌入式变形空间中进行。

构建变形嵌入（即参数化变形）时，变形模式需要解析物体的几何细节，才能实现精细动画。对于布料和杆等薄或细长结构，这一点尤为重要，因为相邻几何体（例如身体和布料）会独立运动。薄或细长场景的动画通常需要使用符合几何形状的网格进行离散化。此外，要在该网格上进行物理模拟，网格还必须具备较高质量（即规整拓扑和均匀边长）。从新视角合成模型构建这样的可用于模拟的网格 颇具挑战，因为新视角合成针对视角插值进行优化，因此其几何表示含有噪声，且与实际物体不一致。在高斯泼溅中，一种可能的方法是根据邻近关系连接高斯基元的三维中心位置来构建网格。然而，这种方法往往速度较慢且不够稳健，因为高斯泼溅优先考虑视觉一致性，而非几何精度。

为解决这一局限，我们提出了一种新的屏幕空间算法，用于构建适用于弹性杆模拟的三维折线。我们的方法允许用户在细长部分上绘制草图，随后生成适用于弹性杆模拟的折线网格。该方法利用动态规划，实现杆网格的快速交互式构建，并提出了一种在屏幕空间中处理自相交的新流程。所提出的方法能够高效地重建和编辑细长物体，使其成为模拟驱动的内容创作的实用工具。

我们的贡献总结如下：

- 一种新颖的屏幕空间算法，可从高斯泼溅场景中的草图笔画捕捉细长结构，并高效利用动态规划，
- 处理部分遮挡对象对屏幕空间方法而言颇具挑战，• 多个面向细长物体的高斯泼溅数据集。

2 相关工作

神经形变与分割。 Lan等人 [2024] 基于投影二维图像上的语义分割对高斯泼溅场景进行分割。Qu等人 [2025] 提出了一种通过指定目标位置来拖动高斯泼溅场景中物体的方法。然而，使用分数蒸馏模型移动高斯基元的计算开销很大。我们的方法基于对投影高斯泼溅的几何分析，因此轻量且不依赖先验知识。

绑定形变。 以高斯泼溅表示的角色通常使用线性混合蒙皮进行动画制作（例如， [Kocabas等人 2024]）。Ma等人 [2024] 将蒙皮与混合变形目标相结合，构建了高质量、可动画的头部模型。我们的方法也通过蒙皮实现细长物体的实时动画。角色绑定通常通过模板拟合或神经模型构建（例如， [Xu等人 2020]），而我们则基于从高斯泼溅中提取的折线构建绑定。

网格嵌入。 为了通过弹性模拟为高斯泼溅设置动画，VR-GS [Jiang等人 2024] 引入了高斯基元在四面体网格内部的双层嵌入。然而，构建四面体网格的成本很高。SuGaR [Guédon和Lepetit2024] 通过将高斯基元与表面对齐，从高斯泼溅中提取表面网格。为实现大幅变形，Gao等人 [Gao等人 2024] 将高斯基元嵌入表面网格的面中，并可对该网格进行自适应细分。给定一个表面网格，我们可以通过骨架提取（例如，[Au等人 2008]）从表面网格中构建折线，但从高斯泼溅中构建网格的成本仍然很高。

无网格嵌入。 PhysGaussian [Xie等人 2024] 和高斯泼溅 [Feng等人 2025] 使用基于点的离散化来模拟变形。基于点的离散化进行弹性变形适用于粗大物体，但不适用于布料和杆等细长物体。变形场需要与执行模拟所依托的几何体相一致。弹性杆需要一个与细长结构对齐的折线网格。

基于草图的三维场景操控。 我们的工作深受计算机图形学领域基于草图的建模研究启发。具体来说，3-sweep [Chen等人 2013] 提供了一种通过草图输入来操控图像的交互方式。Skippy [Krs等人 2017] 开发了一种草绘交互界面，可用于设计环绕三维物体的三维曲线。近期综述请参阅 [Liu和Bessmeltsev 2025] 。由于基于点的表示的形状分析十分复杂，因此要将交互式基于草图的界面融入高斯泼溅仍然颇具挑战。

3 方法

挑战。 我们系统的核心在于稳健地确定高斯基元之间的连通性。朴素的方法依据高斯基元之间的邻近关系来确定连通性，但这种方法速度慢且十分耗费内存。此外，细长部分的高斯基元通常呈高度细长的形状，这使得邻近关系分析颇具挑战。我们的方法在二维屏幕空间 而非三维物体空间 中确定连通性（见图2）。我们的关键观察是，即使高斯基元在三维空间中并未几何连通，它们在投影到屏幕上后仍会连通。毕竟，高斯泼溅是基于投影图像上的损失进行优化的。

基元索引图像。 对于每个像素，如果该像素中可见某个高斯基元，我们就存储该基元的索引。由于每个高斯基元都有一个不透明度通道，一个像素中可能会看到多个高斯基元，最终图像则通过阿尔法混合生成。因此，我们存储对该像素贡献最大的基元的索引。通过对高斯泼溅的光栅化过程稍作修改，即可高效地找到该基元 [Kerbl 等人 2023]。我们将与像素 i关联的基元索引记为 $\mathrm{K}\ [i]$ 。

用户输入。 将用户的笔画视为屏幕坐标序列 $\mathbf{s} = \{p_1,\ p_2,\ \ldots\ldots,\ p_N\}$。我们将 $I\colon\ \mathbb{R}^2 \to \mathbb{N}$ 记作一个函数，该函数根据屏幕坐标返回对应像素的索引。我们假设笔画的首个顶点和最后一个顶点都位于我们想要提取的物体上。将与首尾顶点对应的高斯基元分别记为 $k_{first} = \mathrm{K}\ [I(p_1)]$, $k_{last} = \mathrm{K}\ [I(p_N)]$。不过，下面将介绍的算法允许中间点不必精确落在我们想要提取的物体上。用户还需提供细长物体的半径 $R \in \mathbb{R}$ 。

路径优化。 我们通过连接从 $I(p_1)$ 到 $I(p_N)$ 的像素，在屏幕上寻找路径。我们的方法在屏幕上寻找路径，在遵循用户输入笔画的同时，最小化连接 k_{first} 到 k_{last} 的高斯基元的三维路径长度。给定像素 i 和 j 相连，我们将权重 w_{ij} 计算为

$$w_{ij} = \left|\vec{c}_{\mathcal{K}[i]} - \vec{c}_{\mathcal{K}[j]}\right| + \alpha D_{\mathbf{s}}\left(I^{-1}(i)\right)^2, \tag{1}$$

其中， $\vec{c}_k \in \mathbb{R}^3$ 是高斯基元 k 的中心， $D_{\mathbf{s}}$ 是到折线 $\mathbf{s}$ 及屏幕上一点的最小距离，而 $I^{-1}\colon\ \mathbb{N} \to \mathbb{R}^2$ 是一个根据像素索引返回像素中心的函数。请注意，在公式 (1) 中，第一项计算三维折线的长度，第二项计算到输入笔画的距离，而 $\alpha \in \mathbb{R}$ 是一个用户定义参数，用于控制路径偏离笔画的容差（本文中为 $\alpha = 1$ ）。屏幕上的一个像素可以与相邻的八个像素相连，这些像素与其共享边或顶点。动态规划可以高效地找到连接相邻像素且权重总和最小的路径，权重如公式 (1) 所示。我们的工作受到 Su 等人 2014] 在草图吸附中使用动态规划的启发 [。

遮挡。如果所有细长部分都可见，即没有被自身或其他物体遮挡，那么我们目前介绍的算法效果良好。然而，如图3左图所示，最短路径可能会在自相交处跳过环状部分，也可能跳到

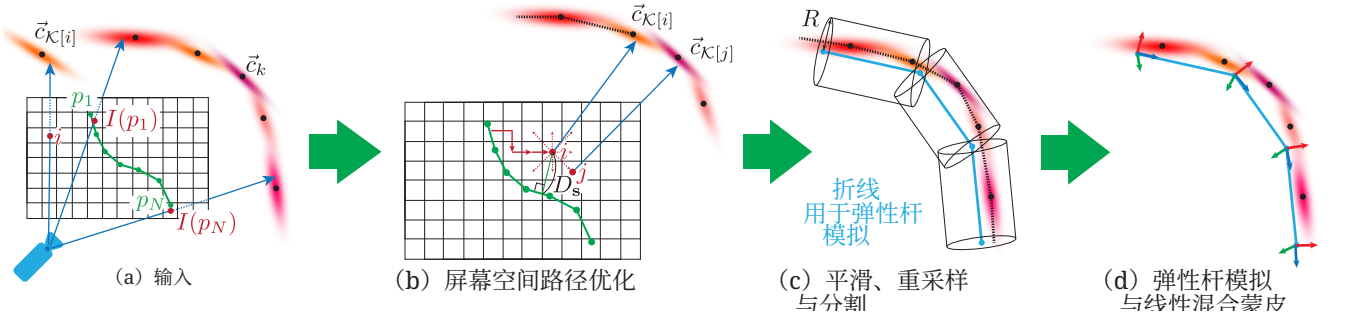


图 2：工作流程。（a）用户在某个视角中输入一条笔画 s，并计算该视角下每个像素对应的高斯基元索引 $\mathcal{K}$。（b）通过动态规划计算连接各像素的最短路径。（c）我们对连接高斯基元中心的折线进行平滑和重采样，以获得用于模拟的折线。我们分割半径为 R的圆柱体内的基元。（d）我们基于折线上的弹性杆模拟，使用线性混合蒙皮对高斯基元进行动画处理。

遮挡物体上。在这两种情况下，最短路径中相邻像素之间的深度都会发生不连续变化。因此，在动态规划中，当距离大于 $3R$ 时，我们会将这些像素排除在候选项之外。

通过从候选项中排除不连续的相邻像素，我们的算法可能会在不存在候选项的位置停止（见图 3-右）。为跳过被遮挡部分，我们检查笔画顶点与连接像素的路径之间的距离；如果该距离小于某个阈值（此处为 10 个像素），则将其标记为 *covered*。随后，我们从笔画中索引最小且未被*covered* 的顶点继续进行路径查找，该顶点的深度值应与连接中断处像素的深度值相近。请注意，我们的遮挡处理包含一些启发式方法，有时会失败。不过，由于算法速度非常快，用户始终可以通过绘制更准确的笔画，或从遮挡较少的视点进行绘制来重试。

后处理。计算出连接屏幕上像素的最短路径后，我们通过连接与这些像素关联的高斯基元中心，构建三维折线网格。由于高斯基元中心与像素中心并未完全对齐，初始三维折线会显得参差不齐。我们进行几步拉普拉斯平滑，然后按照用户指定的边长对折线重新采样。一旦

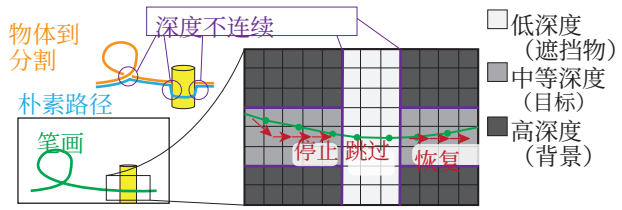


图 3：左：在屏幕上直接连接最短路径，遇到遮挡时可能导致不连续。右：为解决这一问题，我们不连接存在较大深度间隙的像素。此外，如果存在深度间隙，我们会跳过笔画中的顶点。

计算出折线网格后，如果某个高斯基元的中心到折线的最短距离小于 R，我们就对其进行分割。

最后，我们使用线性混合蒙皮为高斯基元制作动画。通过找到折线上距离高斯中心最近的点，计算蒙皮权重。对于弹性杆的物理模拟，我们采用离散弹性杆，并对旋转帧进行局部更新 [Bergou 等人 2010]。顶点上的帧通过对相邻边上的帧取平均值计算得出。

4 结果

实现细节。 动态规划和弹性杆模拟分别使用 C++ 和 Rust 实现，而界面则使用 Python [1]实现。由于我们的方法侧重于构建细长物体的折线网格，我们收集了 10 组来自真实场景的三维高斯泼溅数据集，其中包含细长物体（例如链条、管子和杆）。训练图像为全高清，由作者使用 iPhone 15 Pro 拍摄。所有实验均在一台配备 GeForce RTX 3090 GPU 和 I ntel Core i9 CPU 的机器上进行，图像分辨率为 960 x 540。图 4 展示了使用我们系统进行编辑的示例结果。对于所有示例，我们的算法处理草图大约需要 0.5 秒，动画制作与渲染则需要 50 毫秒。动画结果请参阅随附视频。

与基线方法的比较。图 5 展示了与朴素方法的比较。该方法使用相同的权重（1），通过动态规划优化基元之间的连接，但根据三维欧几里得距离，从基元中心的八个最近邻中选取候选项。由于各向异性高斯基元高度细长，朴素方法在计算路径时会在中途停止。朴素方法以 Python 实现，停止前耗时 13 秒，不包括构建加速结构所需的时间。

[1]代码可在 https://github.com/haato-w/sketch-rod-gs 获取

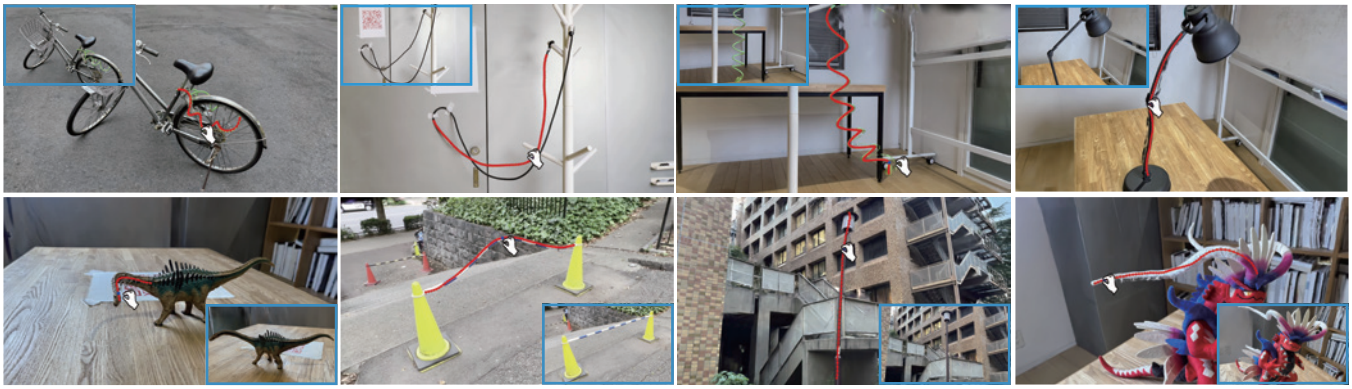
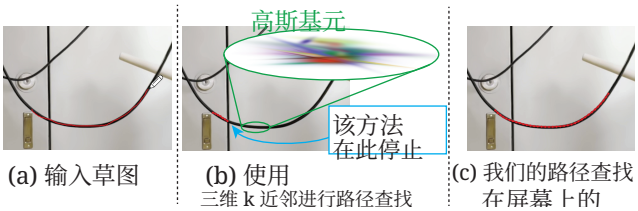


图 4：使用我们的系统操控细长物体的示例。每组图像展示了未变形物体（插图）以及通过拉动三维折线产生的实时变形。



(a) 输入草图　(b) 使用三维 k 近邻进行路径查找　(c) 我们的路径查找在屏幕上的

图 5：与采用三维 k 近邻路径查找的基线方法进行比较。给定一条笔画（a），朴素方法会因高斯基元存在噪声且高度细长而在中途停止工作（b）。另一方面，我们的屏幕空间方法能够找到覆盖整条笔画的路径（c）。

5 结论与未来工作

在这项工作中，我们提出了一种交互式系统，可根据高斯泼溅模型构建用于弹性杆模拟的折线网格。我们展示了利用动态规划的屏幕空间算法的高效性和鲁棒性。

然而，当光滑折线弯曲并形成尖点时，单个针状细长高斯基元可能会显现为伪影。可通过预先细分高斯基元来避免这种伪影 [Gao等人 2024]。目前，用户需要设置细长物体的半径以进行分割。未来的工作将通过提取中轴和横截面形状，将细长部分识别为广义圆柱体 [Chen等人 2013]。最后，一个有趣的未来研究方向是基于屏幕空间分析构建高质量曲面网格，使其能够进行薄壳或布料模拟。

致谢

本研究获得 I. Meisters 公司的经费支持。

参考文献

Oscar Kin-Chung Au、Chiew-Lan Tai、Hung-Kuo Chu、Daniel Cohen-Or 和 Tong-Yee Lee。2008年。基于网格收缩的骨架提取。*ACM* 图形学汇刊27，3（2008）。Miklós Bergou、Basile Audoly、Etienne Vouga、Max Wardetzky 和 Eitan Grinspun。2010年。离散黏性细丝。*ACM* 图形学汇刊 29，4，文章 116（2010年7月）。Tao Chen、Zhe Zhu、Ariel Shamir、Shi-Min Hu 和 Daniel Cohen-Or。2013年。3-Sweep：从单张照片中提取可编辑物体。*ACM* 图形学汇刊 32，6（2013）。

Yutao Feng、Xiang Feng、Yintong Shang、Ying Jiang、Chang Yu、Zeshun Zong、Tianjia Shao、Hongzhi Wu、Kun Zhou、Chenfanfu Jiang 和 Yin Yang。2025年。高斯飞溅：用于多样化运动合成与渲染的统一粒子。载于 *IEEE/CVF*计算机视觉与模式识别会议（*CVPR*）论文集。518–529。

Lin Gao、Jie Yang、Bo-Tao Zhang、Jia-Mu Sun、Yu-Jie Yuan、Hongbo Fu 和 Yu-Kun Lai。2024年。高斯泼溅的实时大规模变形。*ACM* 图形学汇刊 43，6，文章 200（2024年11月），共 17 页。doi:10.1145/3687756

Antoine Guédon 和 Vincent Lepetit。2024年。SuGaR：用于高效三维网格重建与高质量网格渲染的表面对齐高斯泼溅。发表于 *2024*年 *IEEE/CVF*计算机视觉与模式识别会议（*CVPR*）。

Ying Jiang、Chang Yu、Tianyi Xie、Xuan Li、Yutao Feng、Huamin Wang、Minchen Li、Henry Lau、Feng Gao、Yin Yang 和 Chenfanfu Jiang。2024年。VR-GS：虚拟现实中的物理动力学感知交互式高斯泼溅系统。发表于*ACM SIGGRAPH 2024*会议论文集（*SIGGRAPH '24*）。

Bernhard Kerbl、Georgios Kopanas、Thomas Leimkuehler 和 George Drettakis。2023年。用于实时辐射场渲染的三维高斯泼溅。*ACM* 图形学汇刊 42卷，4期，文章 139（2023年7月），14页。doi:10.1145/3592433 Muhammed Kocabas、Jen-Hao Rick Chang、James Gabriel、Oncel Tuzel 和 Anurag Ranjan。2024年。HUGS：人体高斯泼溅。发表于*IEEE/CVF*计算机视觉与模式识别会议论文集（*CVPR*）。505–515。Vojtěch Krs、Ersin Yumer、Nathan Carr、Bedrich Benes 和 Radomír Měch。2017年。Skippy：单视图三维曲线交互建模。*ACM* 图形学汇刊 36卷，4期（2017年）。Kun Lan、Haoran Li、Haolin Shi、Wenjun Wu、Lin Wang 和 Yong Liao。2024年。二维引导的三维高斯分割。发表于*2024*年亚洲通信与网络会议（*ASIANComNet*）。1–5。doi:10.1109/ASIANComNet63184.2024.10811031 Chenxi Liu 和 Mikhail Bessmeltsev。2025年。草图处理前沿报告。计算机图形学论坛 44卷，2期（2025年）。Shengjie Ma、Yanlin Weng、Tianjia Shao 和 Kun Zhou。2024年。用于头部虚拟形象动画的三维高斯混合形状。发表于*ACM SIGGRAPH 2024*会议论文集（*SIGGRAPH '24*）。Yansong Qu、Dian Chen、Xinyang Li、Xiaofan Li、Shengchuan Zhang、Liujuan Cao 和 Rongrong Ji。2025年。拖动你的高斯：利用分数蒸馏对三维高斯泼溅进行有效的基于拖动的编辑。发表于计算机图形学与交互技术特别兴趣小组会议论文集（*SIGGRAPH*会议论文集 *'25*）。文章80，共12页。Qingkun Su、Wing Ho Andy Li、Jue Wang 和 Hongbo Fu。2014年。EZ-sketching：用于容错图像描摹的三级优化。*ACM* 图形学汇刊33卷，4期，文章54（2014年7月），9页。doi:10.1145/2601097.2601202 Tianyi Xie、Zeshun Zong、Yuxing Qiu、Xuan Li、Yutao Feng、Yin Yang 和 Chenfanfu Jiang。2024年。PhysGaussian：用于生成式动力学的物理集成三维高斯。发表于*IEEE/CVF*计算机视觉与模式识别会议论文集（*CVPR*）。4389–4398。Zhan Xu、Yang Zhou、Evangelos Kalogerakis、Chris Landreth 和 Karan Singh。2020年。RigNet：关节式角色的神经网络骨骼绑定。*ACM* 图形学汇刊 39卷，4期，文章58（2020年8月），14页。doi:10.1145/3386569.3392379