



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

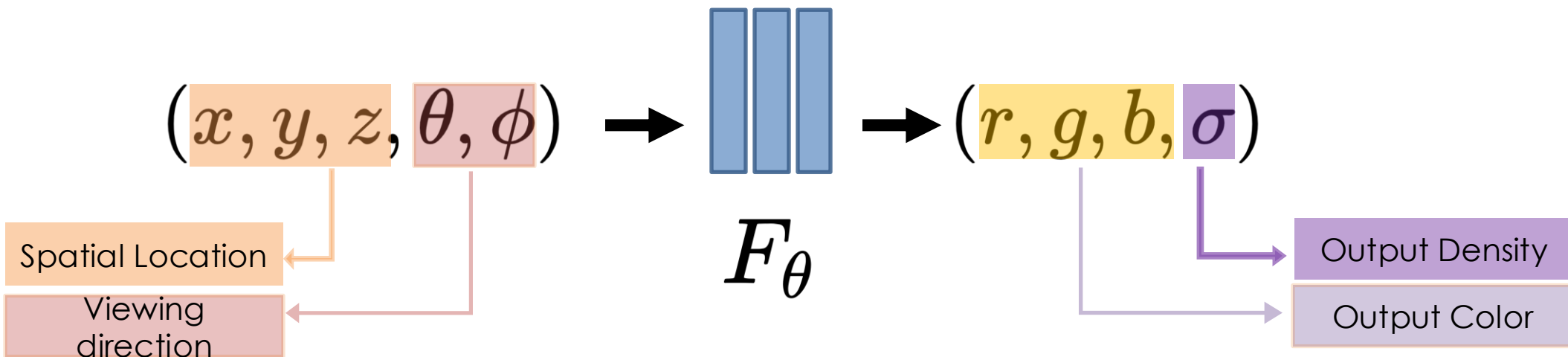
StructuredField: 结构化辐射场表达

张举勇

中国科学技术大学

NeRF表达

学习场景的神经辐射场表示

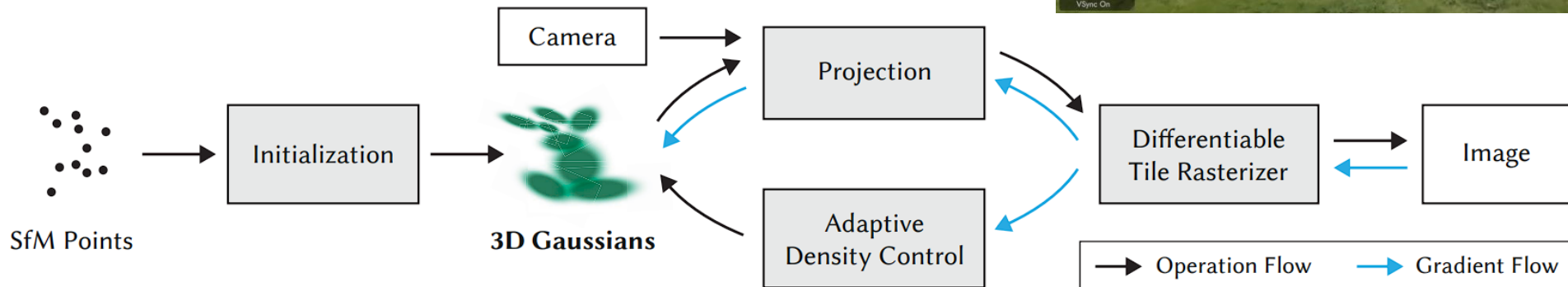


NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis. ECCV 2020.

3DGS表达

- 显式表达, 无需MLP
- Splatting, 无需采样

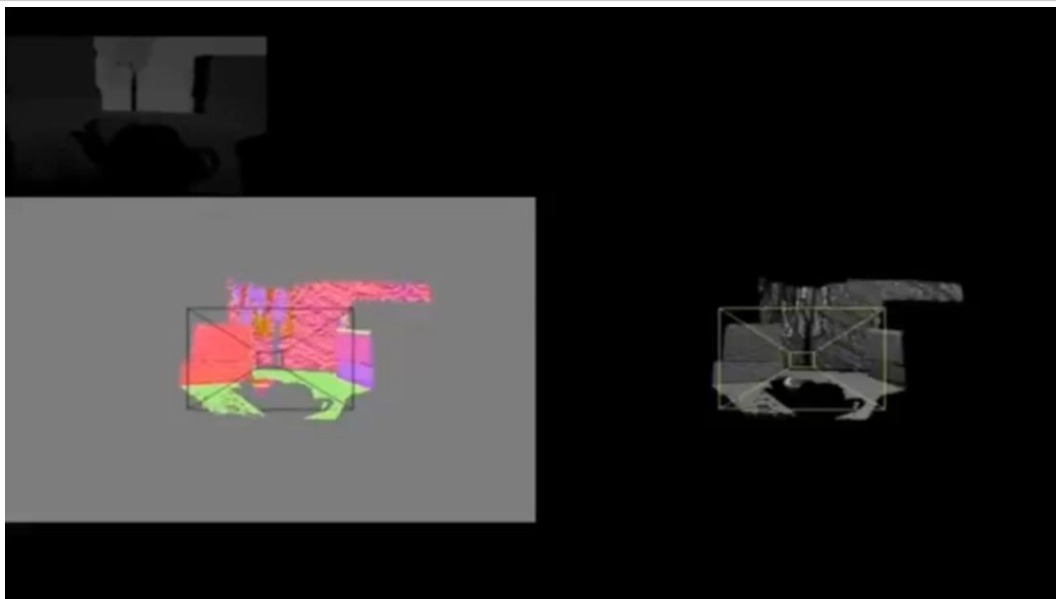
- 实时渲染, 大于100FPS
- 快速训练, 十几分钟



3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering. SIGGRAPH 2023.

现有三维表达还存在什么问题？

网格表达



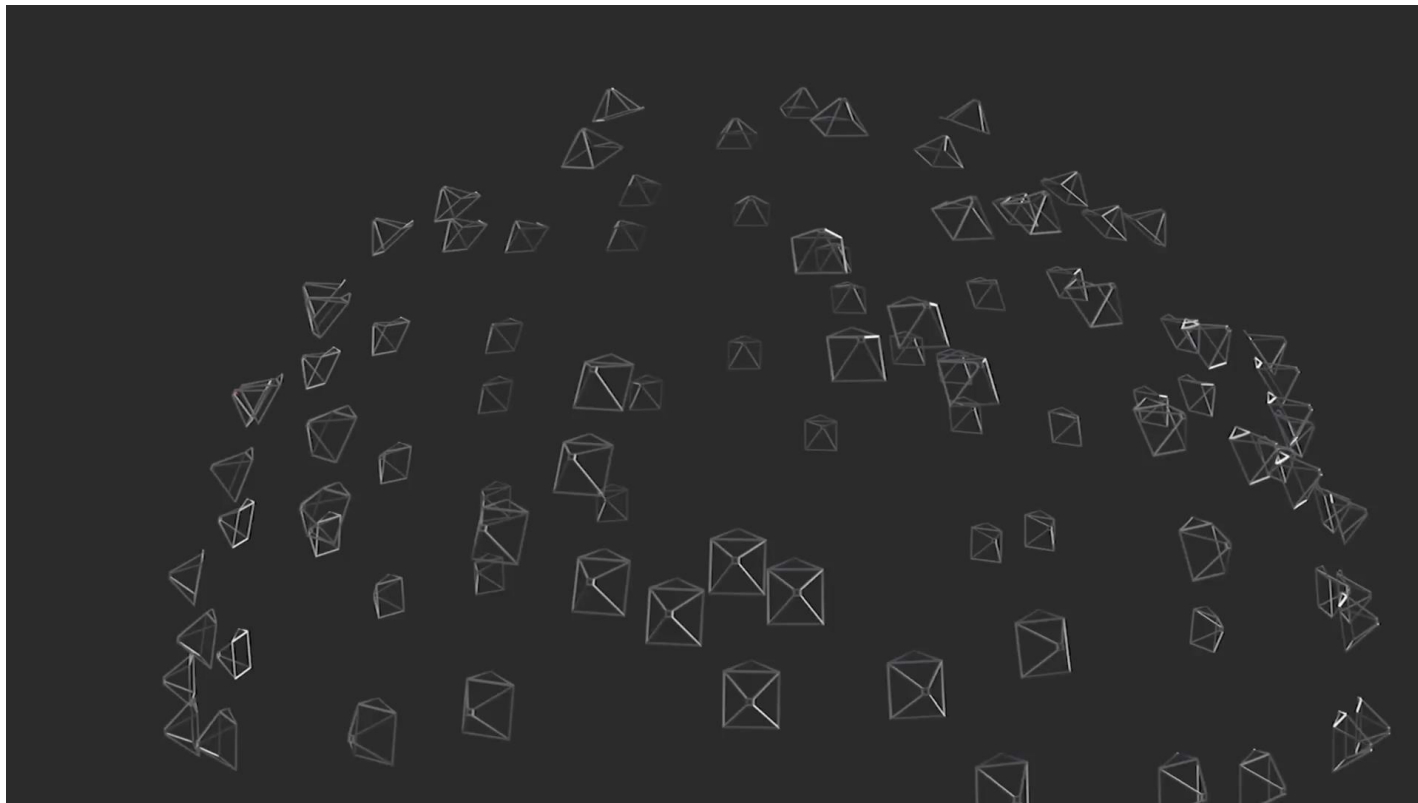
• 优点:

- **结构化:** 明确的拓扑连接
- **编辑技术成熟:** 支持直接几何编辑
- **渲染高效:** 光栅化渲染在GPU上高度优化。

• 缺点:

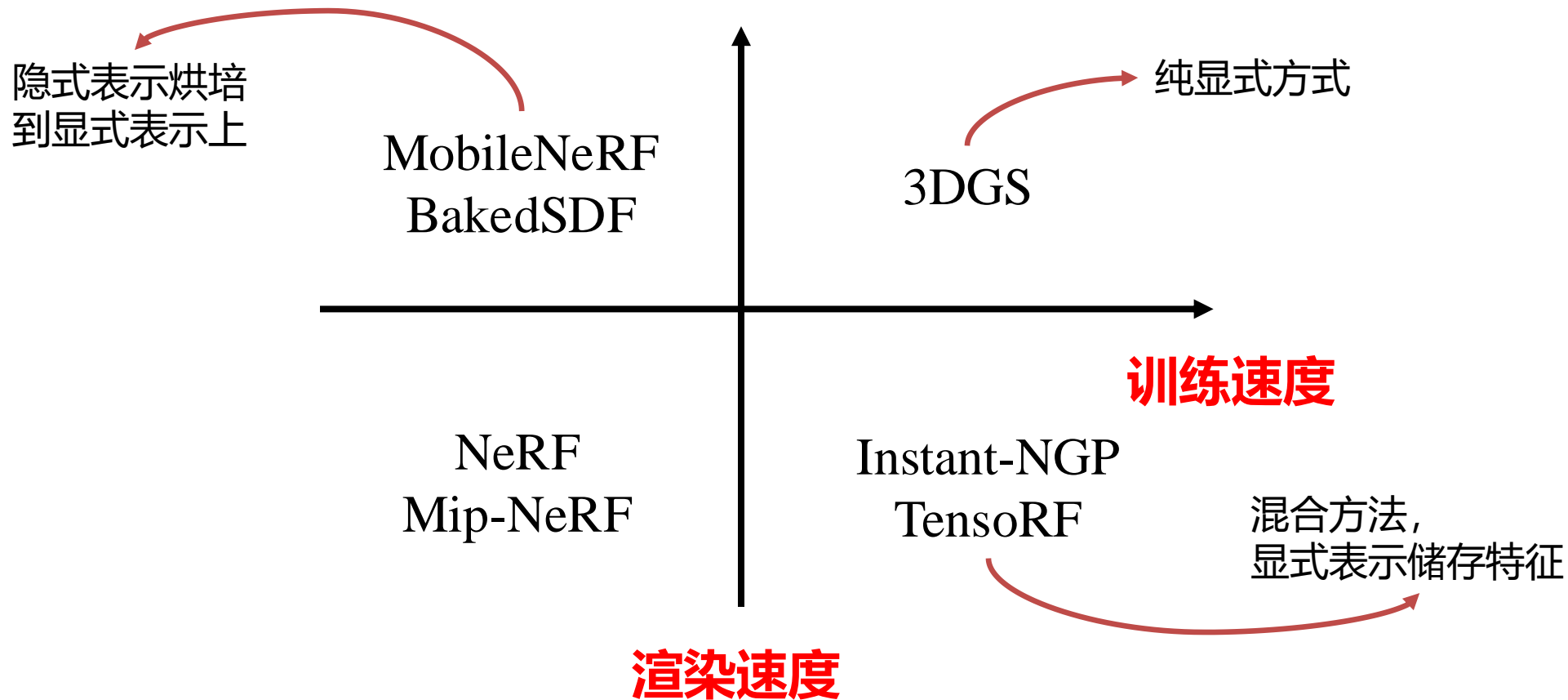
- **真实感局限:** 难以端到端重建真实场景
- **几何细节捕捉:** 对于极其精细或体数据的细节表达能力有限

辐射场表达



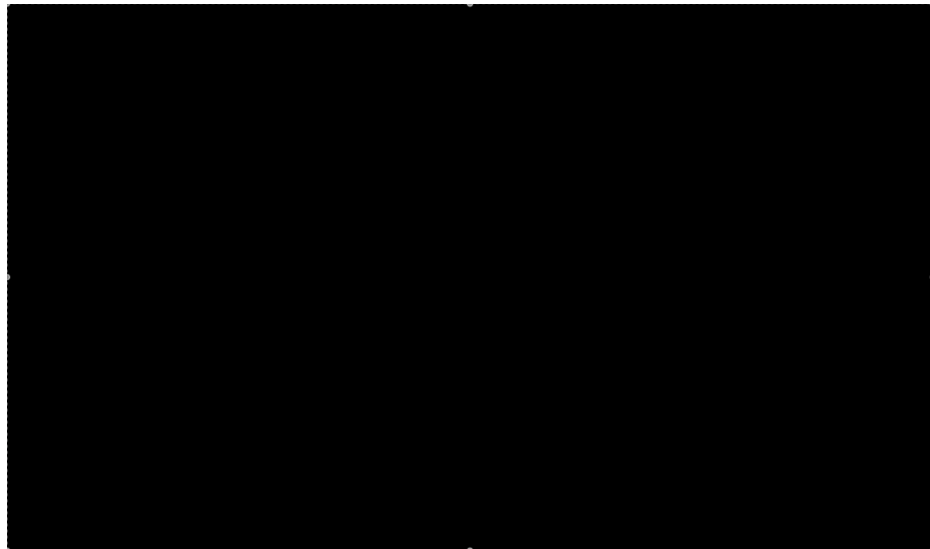
高保真但渲染、训练速度慢

隐式表达



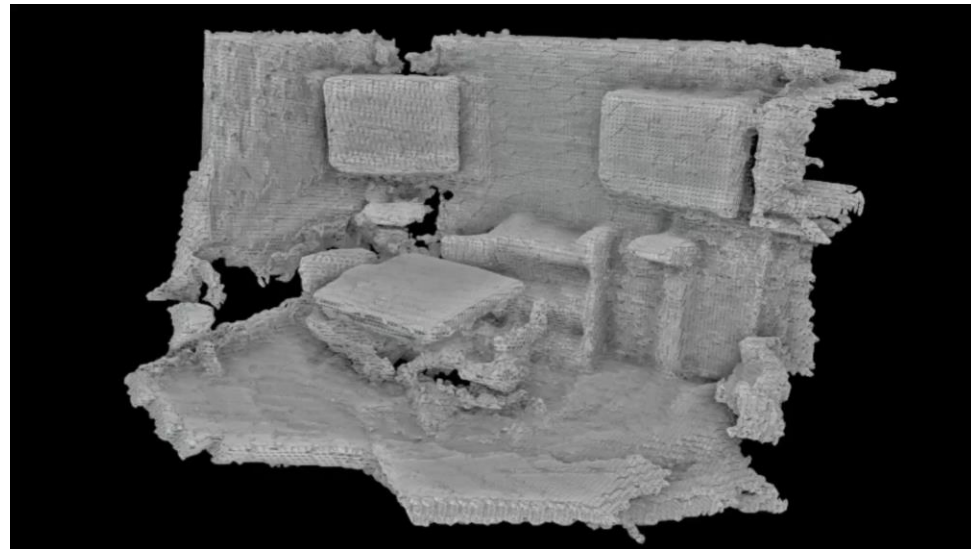
3D表达中的挑战

真实感 vs. 结构化



3D Gaussian Splatting

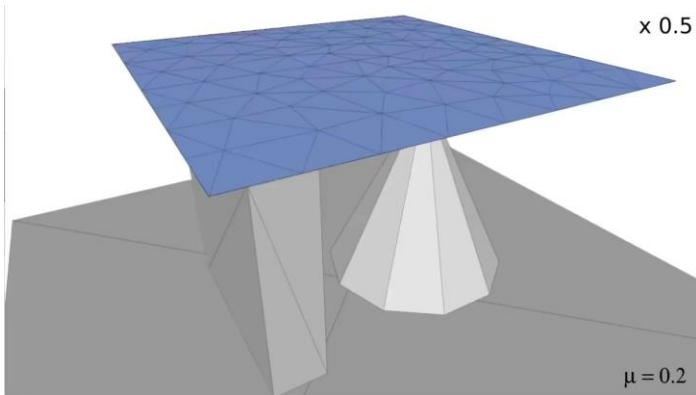
渲染质量高，但缺乏显式结构



Mesh

结构化，易于编辑/模拟，但真实感不足

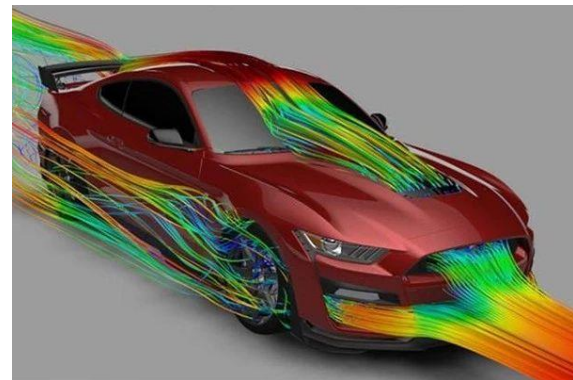
为何“结构”如此重要？



物理模拟



动画

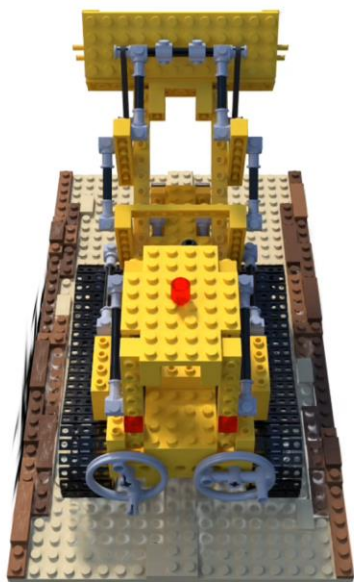


性能分析

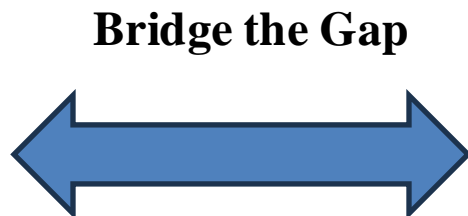
结构化表示是当前3D内容交互、仿真与应用的基础

目标：统一与桥梁

既能实现高保真渲染，又有结构化几何以支持后续应用



高保真渲染



结构化几何

新型三维表示: StructuredField



多视角图像



结构化几何: Tet Mesh



高保真渲染: 3DGS

StructuredField

形变



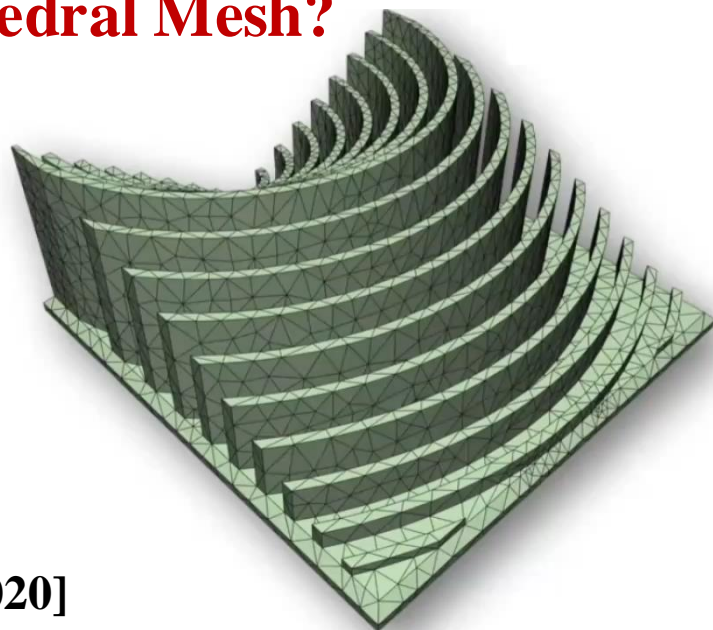
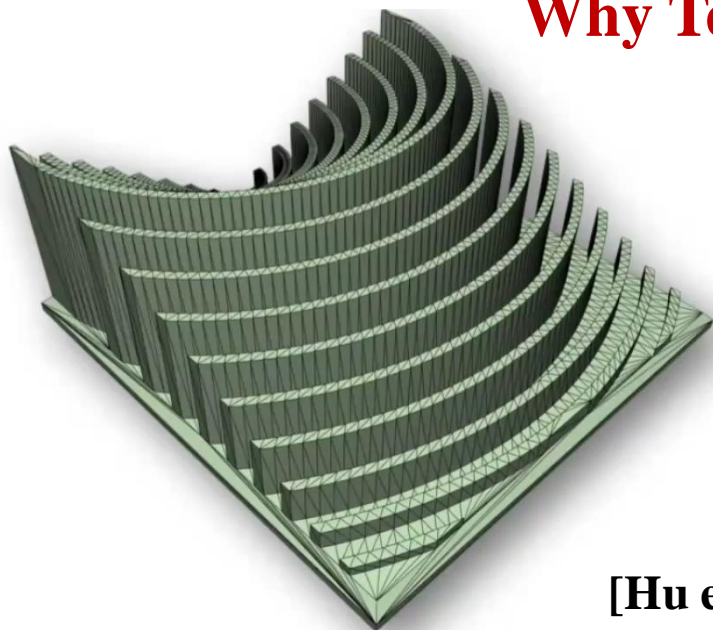
物理仿真



应用

基础表示：四面体网格

Why Tetrahedral Mesh?

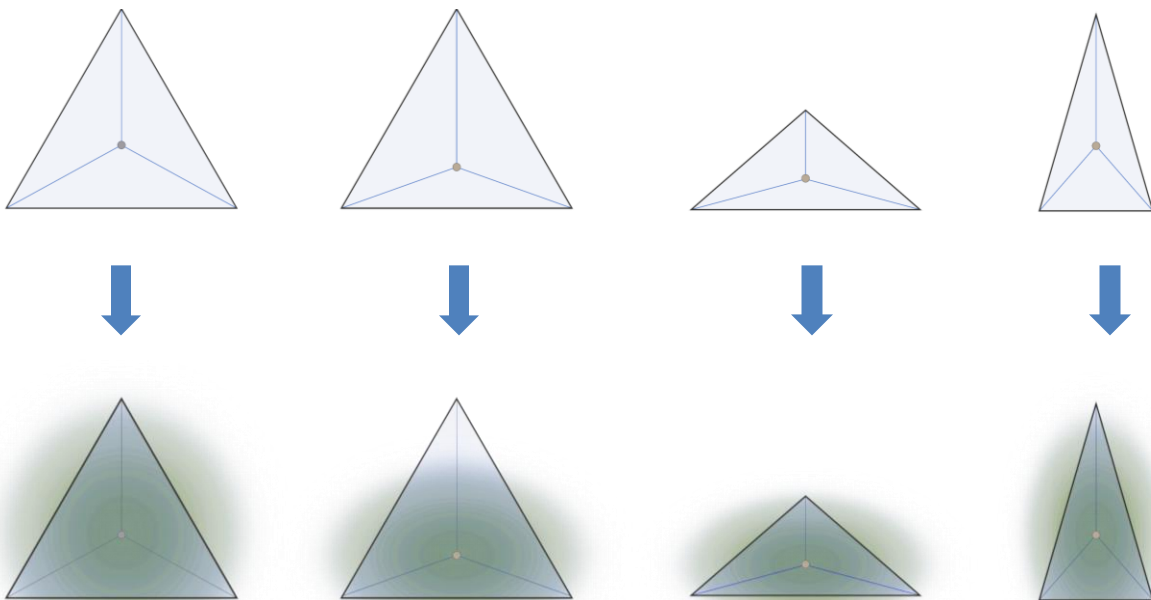


[Hu et al. 2020]

- 在物理仿真、有限元分析领域有广泛应用
- 相较于表面网格，是一种体表示，更适合体渲染

重参数化四面体

如何可微分渲染四面体网格来实现端到端的监督?



Tetrahedron:

- Vertices
- Weights

Gaussians:

- Mean
- Covariance

重参数化四面体

如何可微分渲染四面体网格来实现端到端的监督?

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^4 w_i \mathbf{v}_i}{\sum_{i=1}^4 w_i},$$

$$\Sigma = \frac{\sum_{i=1}^4 w_i (\mathbf{v}_i - \mu) (\mathbf{v}_i - \mu)^\top}{\sum_{i=1}^4 w_i}.$$

Tetrahedron:

• Vertices

• Weights

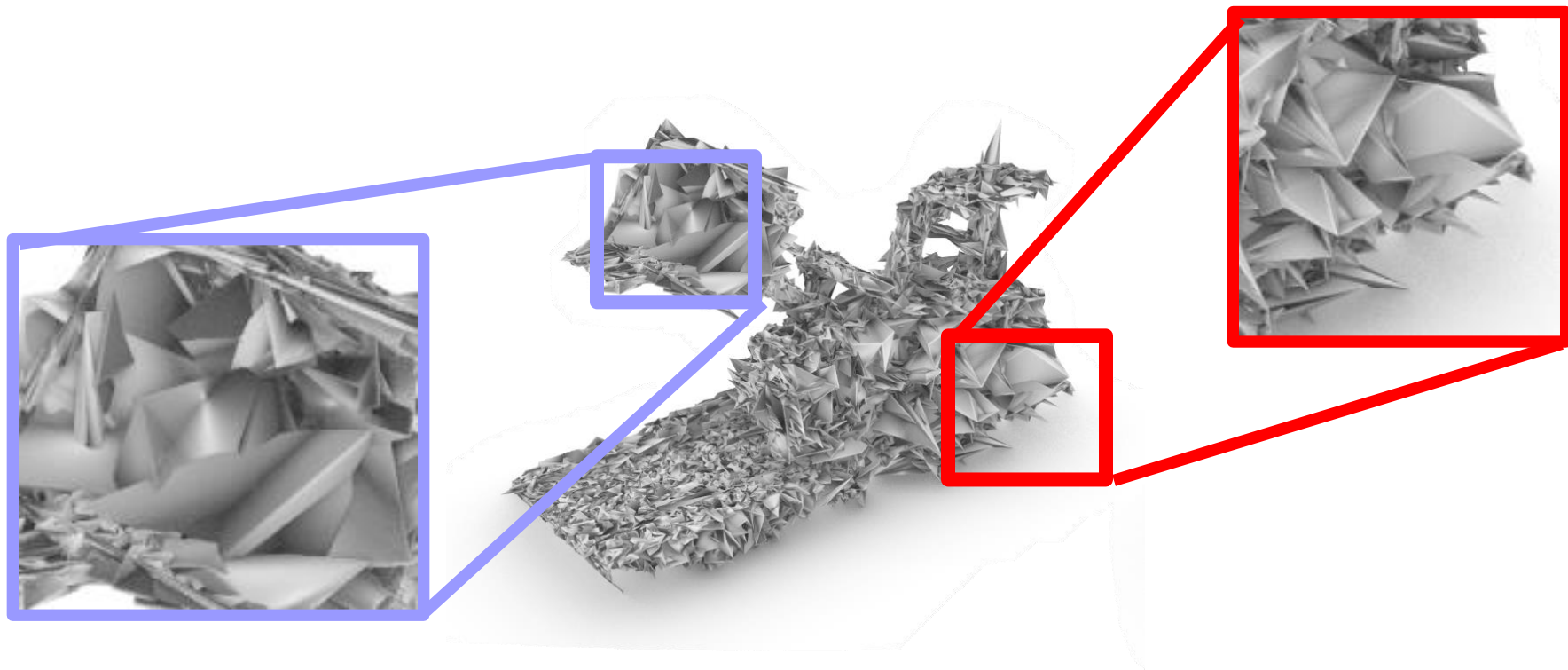
Gaussians:

• Mean

• Variance

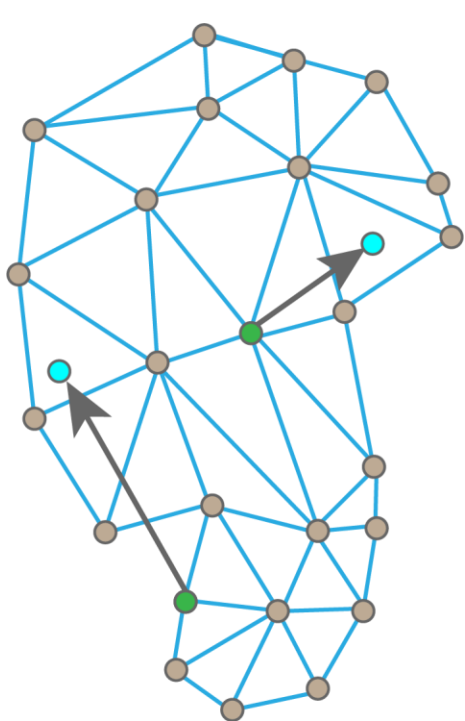
- 3DGS的形状能够有效的反应四面体的形状
- 利用3DGS的可微分渲染器实现高保真重建

优化过程中顶点的变化

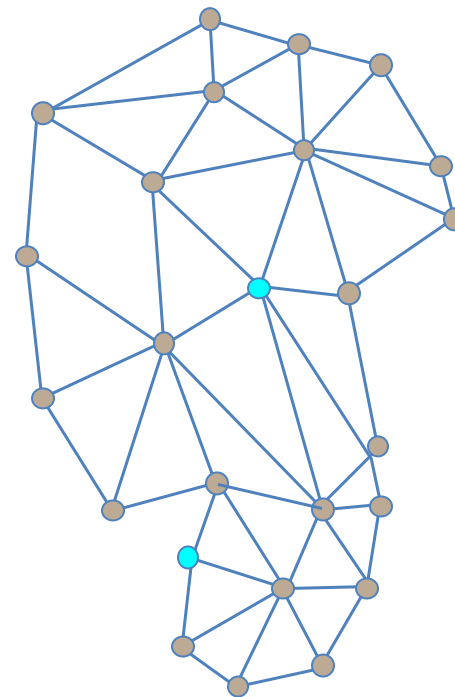


优化过程中不加约束，会导致低质量网格结构，无法支撑后续物理仿真等

网格顶点优化分析



Optimize Vertices



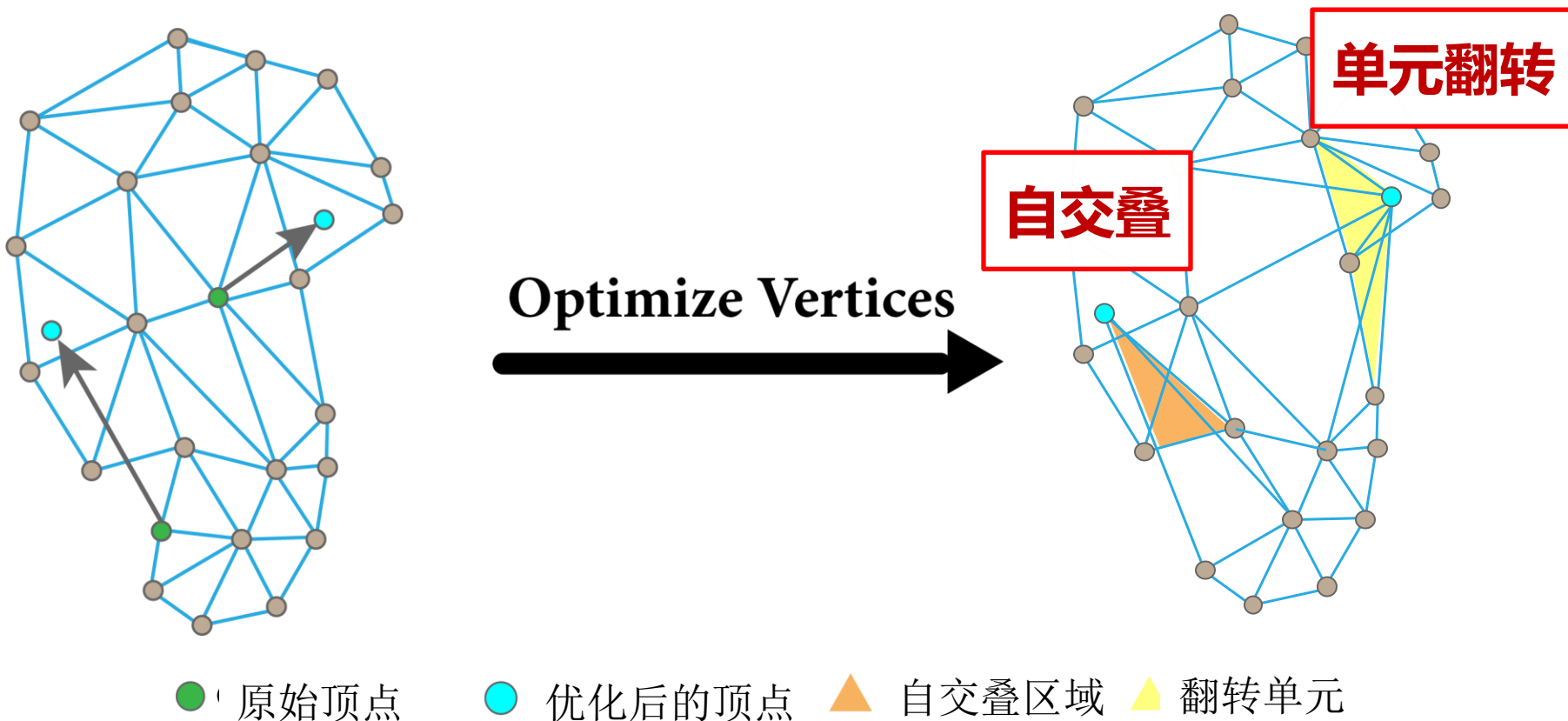
● 原始顶点

● 优化后的顶点

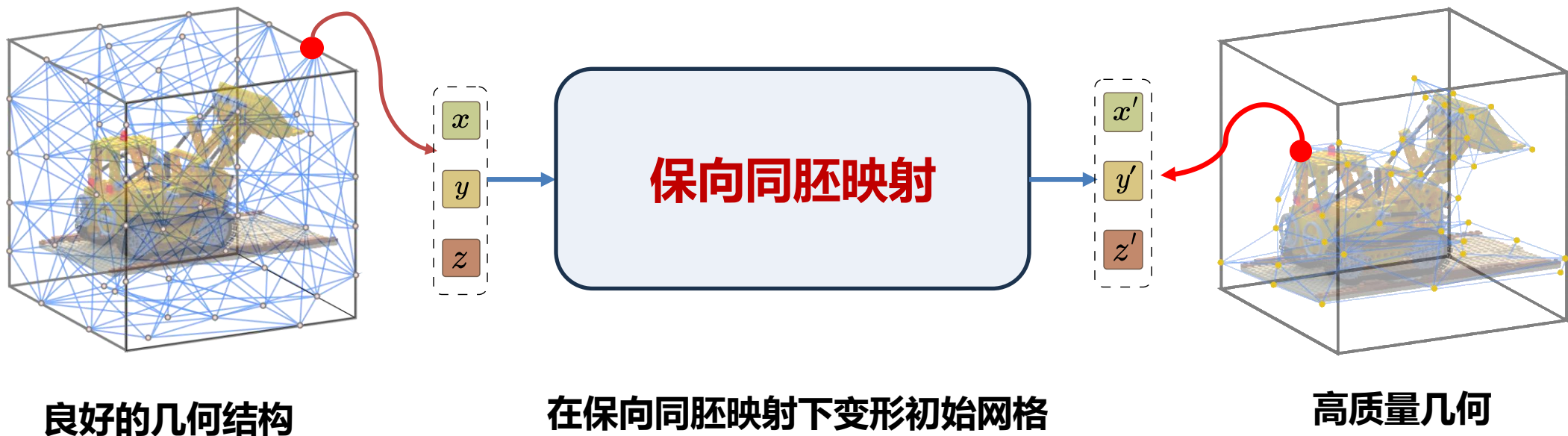
▲ 自交叠区域

▲ 翻转单元

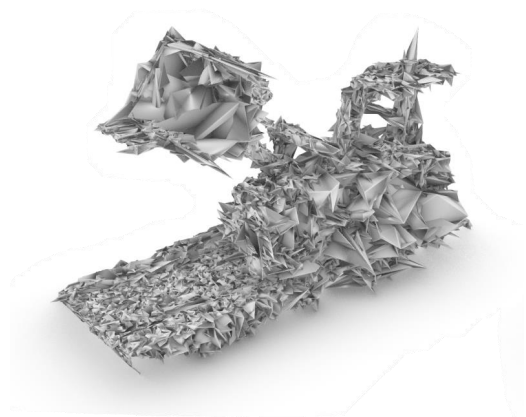
网格顶点优化分析



保向同胚映射作为约束



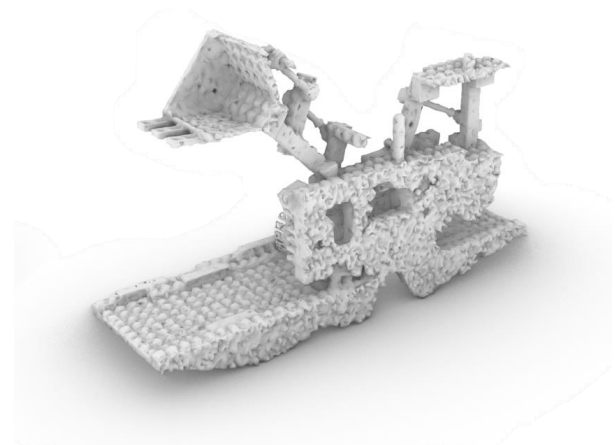
保向同胚映射作为约束



无约束

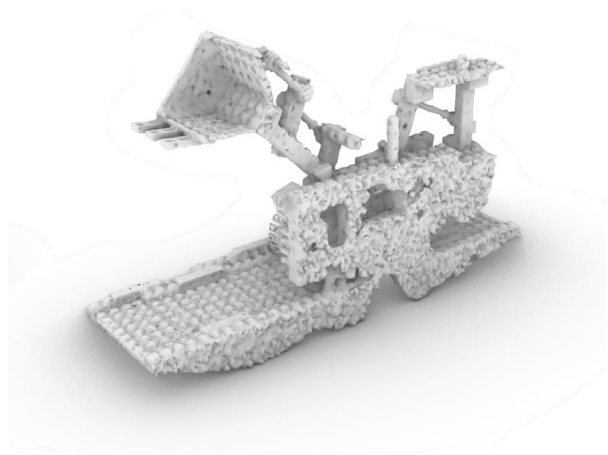


损失函数约束



保向同胚约束

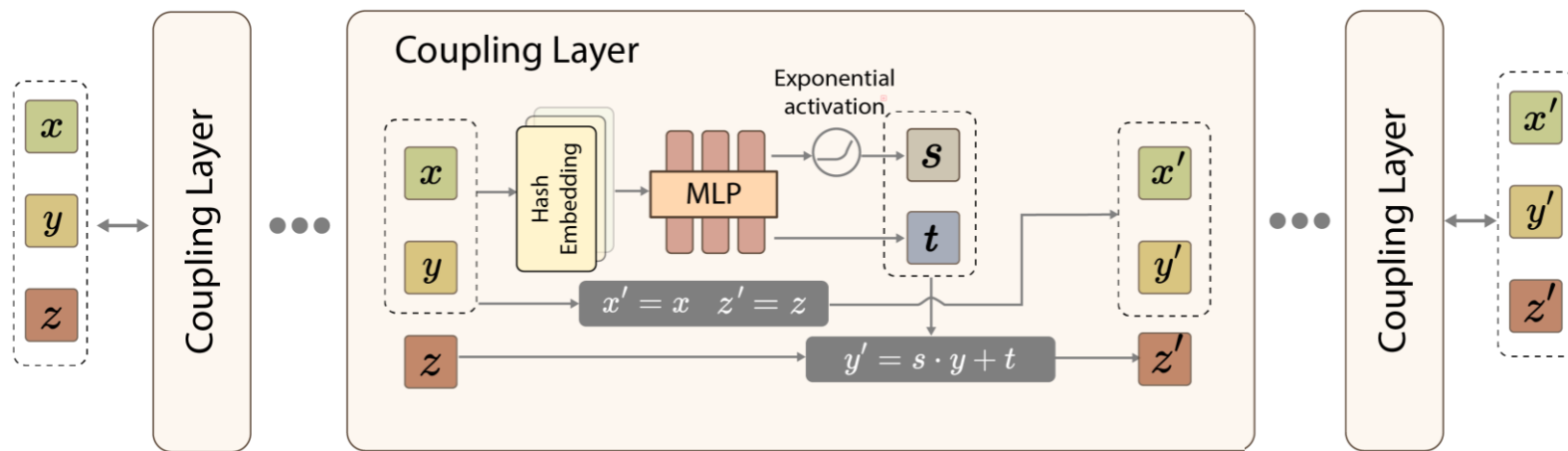
保向同胚映射作为约束



- 同胚映射防止优化过程中网格的自交叠
- 保向映射仿真优化过程中防止空间朝向的翻转，进而约束四面体单元的翻转

保向同胚映射设计

如何表示一个保向同胚映射?

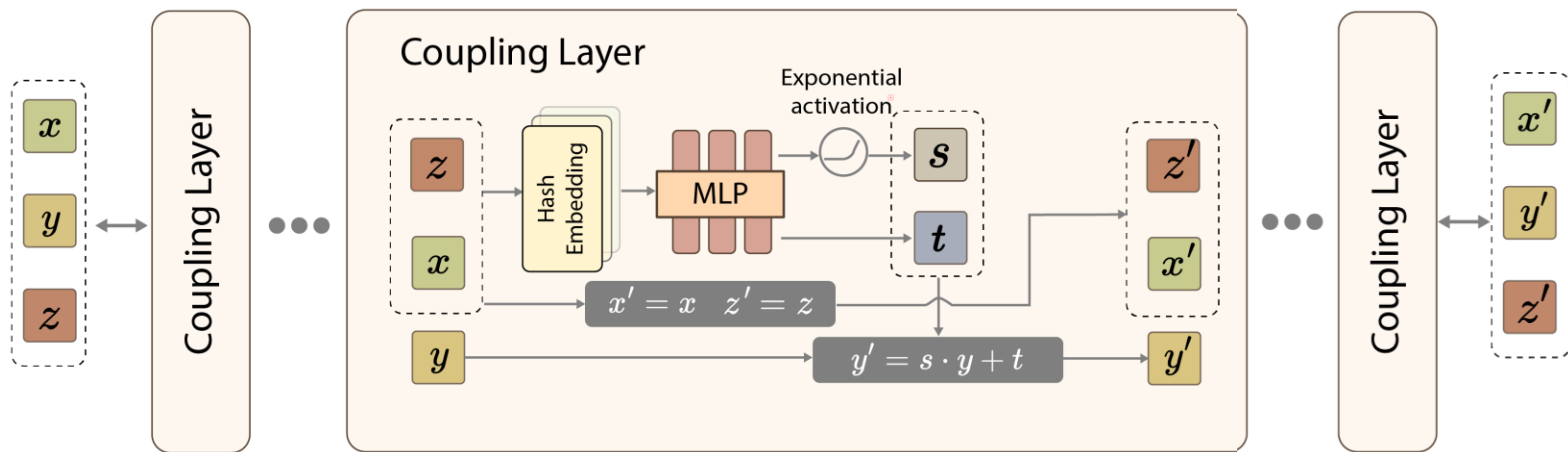


可逆神经网络

天然满足双射 (可逆性)
保证同胚

保向同胚映射设计

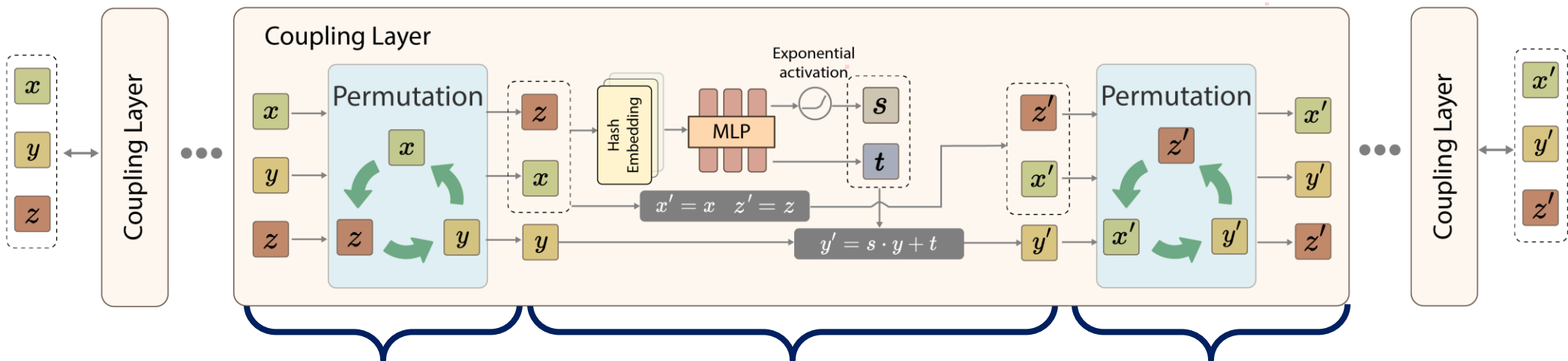
如何表示一个保向同胚映射？



$$J_h = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\partial y'}{\partial x} & 0 \\ 0 & \exp(s) & 0 \\ 0 & \frac{\partial y'}{\partial z} & 1 \end{bmatrix}$$

非上三角矩阵
行列式符号未知
不一定保向

保向同胚映射设计



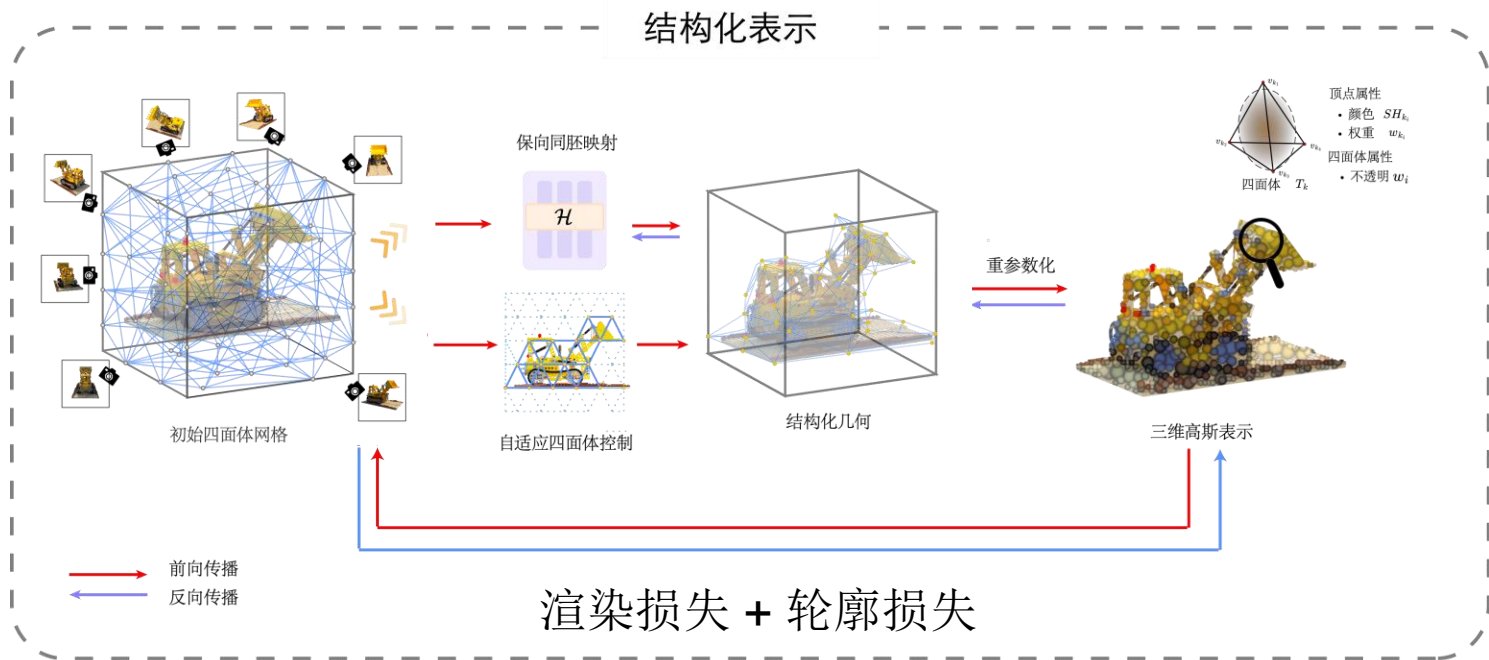
$$J_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$J_h = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{\partial x'}{\partial y} & \exp(s) & 0 \\ \frac{\partial x'}{\partial z} & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

引入置换策略在每个耦合层更新不同维度前，对输入坐标进行置换，确保每次变换的行列式为正

算法流程



高保真渲染

3D Gaussians
[Kerbl et al.]



Ours



保向同胚映射消融实验



W/o constraints



W/ \mathcal{L}_{volume}



W/ \mathcal{L}_{sv}



Ours

物理仿真

建模为质点弹簧模型



物理仿真

模拟不同材料下的物理效果



大尺度形变



总结

- **StructuredField**: 统一结构化几何与高保真辐射场渲染
- **核心贡献**:
 - **重参数化**实现四面体网格的可微渲染
 - **保向同胚约束**保证优化过程中的几何质量。
- StructuredField可有效支撑以下应用:
 - 从视频中**同时建模几何、物理属性、外观**
 - 基于建模好的物理属性**预测并渲染物体动态序列**
 - **生成符合物理规律的影像**

