

NeurCADRecon

论文：《NeurCADRecon: Neural Representation for Reconstructing CAD Surfaces by Enforcing Zero Gaussian Curvature》

地址： <https://arxiv.org/abs/2404.13420>

年份：SIGGRAPH 2024

Introduction

任务：CAD 零件的表面重建

技术贡献：

(1) 由于 CAD 零件的表面通常是分段光滑的，引入高斯曲率的限制来建模这一特性。

Method

文章基于 CAD 零件的表面是分段光滑的，且表面通常是展性曲面 (developability) 这一观察，从而引入高斯曲率来限制 SDF。

文章用了多个 loss，其中几个 loss 都是先前文章常用的 loss，如 Eikonal Condition 和 Dirichlet Condition。

Gaussian Curvature Constraint Term

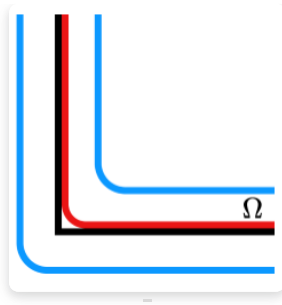
developability 的曲面有高斯曲率为 0 的特性 (想象平面以及圆柱面等，至少有一个主曲率为 0)，所以提出如下 loss：

$$\mathcal{L}_{\text{Gauss}} = \frac{1}{|\mathcal{P}|} \int_{\mathcal{P}} |k_{\text{Gauss}}(x)| dx$$

根据《Curvature formulas for implicit curves and surfaces》隐式表达的曲面的高斯曲率可由 Hessian 矩阵和梯度计算得到：

$$k_{\text{Gauss}}(\mathbf{x}) = -\frac{\begin{vmatrix} H_f(\mathbf{x}) & \nabla f^T(\mathbf{x}; \Theta) \\ \nabla f(\mathbf{x}; \Theta) & 0 \end{vmatrix}}{\|\nabla f(\mathbf{x}; \Theta)\|^4}.$$

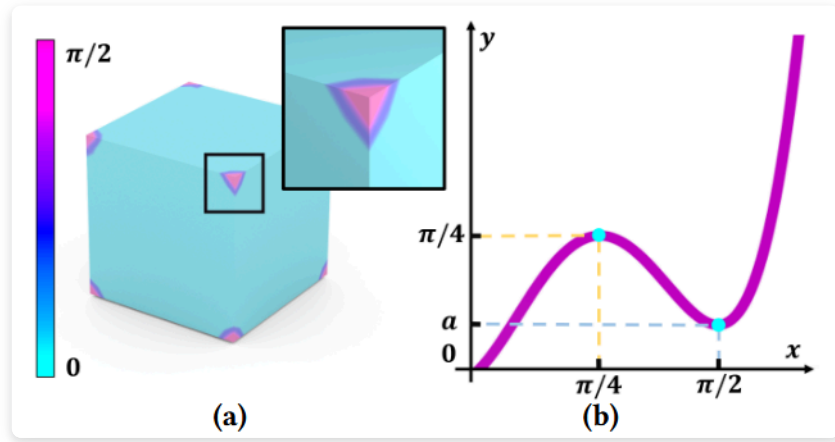
文章与 Rank Constraint 方法进行了讨论。Hessian 矩阵的特征向量为主方向 α_p, β_p 和法向 \mathbf{n}_p 。 \mathbf{n}_p 对应的特征值是 0，高斯曲率为 0 也说明 κ_1 和 κ_2 至少有一个是 0，因此 Hessian 矩阵的秩至多为 1。因此上述 loss 等价于约束 Hessian 阵的秩。但对秩进行约束会有数值不稳定的问题，因为在 H_f 中一个很小的值的变动就会带来秩的变化。



还有个问题是真实的 SDF 会在顶点处不可导，因此文章将代表物体表面的范围放松到蓝色线条代表的小邻域 Ω 内。具体做法就是参照之前工作，在每个点构建一个高斯分布采样点。因此 loss 变为：

$$\mathcal{L}_{\text{Gauss}} = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} |k_{\text{Gauss}}(x)| dx$$

Double-trough Function



在 CAD 零件表面的大部分区域高斯曲率为 0，但在顶点处高斯曲率会趋近于 $\pi/2$ ，这样会与 loss 产生冲突。因此文章提出的解决方案是构建一个函数将 $\pi/2$ 映射到 0，并将 loss 更新为

$$\mathcal{L}_{\text{Gauss}} = \frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} \text{DT}(|k_{\text{Gauss}}(x)|) dx$$

Implementation Details

对于一些部分缺失的点云，需要采样一些点来补足。文章这里其实就用了 Neural-Pull 相似的方法，把不在表面上的点根据梯度和 sdf 值映射到表面上。

$$x' = x - \frac{\nabla f(x; \Theta)}{\|\nabla f(x; \Theta)\|} \cdot f(x; \Theta)$$

EXPERIMENTS

评估指标：Chamfer Distance (CD), F1-score (F1), and Normal Consistency (NC)

数据集：ABC, Fusion Gallery, DeepCAD

Ablation Study

Isosurface Extraction

文章比较了几种提取等值面的方法，“the polygonal surfaces reconstructed by **MC** and **gradient-based DMC** exhibit sharper features at corner positions compared to **DMC without gradients**”“a comparison of Hausdorff distances highlights that the reconstruction result of **MC** is closer to the ground truth” 因此最终还是选择 marching cube 来提取等值面。

Comparison with Other Smoothness Forms

高斯曲率相当于是利用二阶信息的平滑项，因此与 Dirichlet energy 和 Hessian energy 进行了比较，最终结果还是高斯曲率效果会好一些。