

神经渲染--从传统图形学的Blending、Alpha合成理解NeRF体渲染方程2

基于论文《[NeRF_Representing-Scenes-as-Neural-Radiance-Fields-for-View-Synthesis](#)》，从图形学角度理解NeRF的体渲染方程（Volumetric Rendering），需要重点分析论文中的公式（1）和其离散化实现公式（3），并将其与传统图形学中的Alpha合成（Alpha Blending）关联起来理解。

在这个论文中，将静态场景表示为连续的五维函数，该函数输出每个点 (x, y, z) 在每个方向上发射的辐射亮度，并在每个点输出一个密度，该密度类似于微分不透明度，用于控制穿过该点的光线累积多少辐射亮度。论文方法优化了一个没有任何卷积层的深度全连接神经网络（通常称为多层感知器或 MLP）来表示该函数，通过从单个五维坐标 (x, y, z) 回归到单个体积密度和依赖视角的 RGB 颜色。

1. 体渲染方程的核心公式

论文中的辐射场渲染公式（公式1）为：

$$C(\mathbf{r}) = \int_{t_n}^{t_f} T(t) \sigma(\mathbf{r}(t)) \mathbf{c}(\mathbf{r}(t), \mathbf{d}) dt$$

其中：

- $T(t)$ ：累积透射率（Transmittance），表示光线从起点 t_n 到 t 未碰撞物质的概率：
$$T(t) = \exp \left(- \int_{t_n}^t \sigma(\mathbf{r}(s)) ds \right)$$
- $\sigma(\mathbf{r}(t))$ ：位置 $\mathbf{r}(t)$ 处的体积密度（微分碰撞概率）。
- $\mathbf{c}(\mathbf{r}(t), \mathbf{d})$ ：视角 \mathbf{d} 依赖的RGB颜色。

2. 离散化与Alpha合成的关联

NeRF实际采用**分层采样（公式2）**近似积分，推导出渲染公式（公式3）：

$$\hat{C}(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^N T_i (1 - \exp(-\sigma_i \delta_i)) \mathbf{c}_i$$

其中：

- T_i ：第 i 样本前的累积透射率：
$$T_i = \exp \left(- \sum_{j=1}^{i-1} \sigma_j \delta_j \right)$$
- α_i ：不透明度（Alpha），由体密度转换而来：
$$\alpha_i = 1 - \exp(-\sigma_i \delta_i)$$

α_i 的物理意义是光线在 $[t_i, t_{i+1}]$ 区间内被阻挡的概率。

此公式可重写为：

$$\hat{C}(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^N T_i \alpha_i \mathbf{c}_i$$

这正是体积渲染中的Alpha合成公式。

3. 与传统图形学的Alpha Blending对比

传统图形学中，Alpha合成用于混合半透明物体：

- 颜色混合：** $C_{\text{final}} = C_{\text{new}} + (1 - \alpha)C_{\text{prev}}$
- 深度排序：**按深度从远到近叠加颜色和不透明度。

在NeRF中：

- 采样点即“图层”：**每个样本点 i 可视为一个半透明图层。
- 顺序性：**由于 T_i 随深度递减（见公式 T_i 定义），其隐式实现了**从光路起点到终点的顺序叠加**（无需显式排序）。
- 物理可解释性：** α_i 和 T_i 从体密度 σ 推导而来（ α_i 与光学深度 $\sigma_i \delta_i$ 直接相关）。

4. 关键图形学思想总结

概念	传统图形学	NeRF体渲染
不透明度	α （人为指定）	$\alpha_i = 1 - e^{-\sigma_i \delta_i}$ （物理推导）
颜色叠加	$C_{\text{out}} = \alpha C + (1 - \alpha)C_{\text{bg}}$	$C(\mathbf{r}) = \sum T_i \alpha_i \mathbf{c}_i$
混合顺序	依赖深度排序	T_i 自动实现从近到远叠加（沿射线累乘）
微分性	不可微（硬决策）	可微（ σ_i, \mathbf{c}_i 可优化）

5. 实际意义

NeRF的渲染过程可类比为：

- 射线分层切割：**将射线划分为若干小段。

2. **每段生成半透明图层**：由MLP预测 σ_i （密度）和 \mathbf{c}_i （颜色）。

3. **顺序Alpha混合**：从射线起点到终点合成所有图层，得到像素颜色。

这种模型既继承了体绘制的物理准确性（如模拟烟雾透光率），又通过可微渲染支持端到端优化——这正是NeRF核心创新点之一。公式中的 α_i 与图形学Blending紧密关联，而 $\sigma_i \delta_i$ 相当于"光学厚度"（Optical Thickness），与透射率 T_i 形成物理学闭环。