

非刚性动态场景

1. 定义

非刚性动态场景是指场景中的物体或结构在时间维度上发生形变或内部结构变化的场景。例如：

- **人体运动**：人类的手臂、腿部等关节活动。
- **柔性物体**：如飘动的衣物、变形的橡皮球。
- **液体和气体**：如流动的水、蒸腾的烟雾。
- **生物体行为**：如动物跑步、植物随风摇摆。

非刚性场景的动态特性包括：

1. **局部运动**：局部区域的形状变化显著。
2. **非刚性形变**：物体的尺寸、形状或结构会发生动态变化。
3. **多样性**：不同部分可能同时以不同的方式运动。

2. 数学描述

非刚性场景中的动态变化可以通过以下公式进行描述：

(1) 形变场 (Deformation Field)

非刚性场景的形变通常用形变场 $\phi(\mathbf{x}, t)$ 表示，描述点 \mathbf{x} 在时间 t 的变换：

$$\mathbf{x}_t = \phi(\mathbf{x}_{t-1}) \quad (1)$$

- ϕ 是形变函数，可以是线性、非线性或学习得到的模型。

(2) 动态几何约束

形变需要满足一定的几何约束：

- **局部刚性**：局部区域的形变近似刚体变换。
- **体积保持**：某些情况下，形变需要保持体积不变：

$$\det(\nabla \phi(\mathbf{x})) = 1 \quad (2)$$

- **连续性约束**：形变场需保持连续和光滑：

$$\|\nabla \phi(\mathbf{x})\| \text{较小} \quad (3)$$

(3) 动力学方程

非刚性场景中的动态变化还可能受动力学方程控制，例如柔性物体遵循弹性力学方程：

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \sigma + \mathbf{f}_{\text{ext}} \quad (4)$$

- \mathbf{u} : 位移场。
 - σ : 应力张量，由弹性模量和应变张量定义。
 - \mathbf{f}_{ext} : 外力。
-

3. 表征方法

(1) 基于欧拉表示

通过固定网格描述场景变化，如使用4D体素网格记录每个体素的动态属性（如颜色、密度）随时间变化。

优点：

- 适合描述全局变化。
- 易于处理密集场景。

缺点：

- 对局部细节和形变捕捉能力不足。
- 无法跟踪粒子的时间对应关系。

(2) 基于拉格朗日表示

通过跟踪个体粒子的运动和属性变化描述非刚性场景。

优点：

- 能捕捉粒子级别的形变细节。
- 自然支持时间步之间的粒子对应关系。

缺点：

- 对大规模场景计算复杂性较高。

(3) 混合方法

结合欧拉和拉格朗日表示的优点，例如：

- 在全局场景中采用欧拉表示记录整体动态变化。
- 在局部细节区域中采用拉格朗日表示进行精细建模。

4. 应用场景

(1) 人体运动建模

- 任务：描述人类的动态形变，如行走、跑步、跳舞。

- **方法：**使用基于骨架的模型（如线性混合变形，Linear Blend Skinning），结合形变场描述表面动态。

(2) 动态4D场景重建

- **任务：**重建复杂的非刚性场景，如舞蹈表演。
- **方法：**利用多视角图像，通过形变场模型生成动态几何。

(3) 柔性物体模拟

- **任务：**描述衣物、绳索等柔性物体的动态行为。
- **方法：**使用弹性力学和布料模拟模型（如质量-弹簧系统）。

5. 本文方法对非刚性场景的适用性

本文采用 **动态3D高斯粒子**，通过粒子的位置、方向和形状描述非刚性场景中的动态变化。

其优势包括：

1. **粒子方向和大小的动态调整：**可以捕捉局部非刚性变化。
2. **基于物理的正则化：**
 - 局部刚性损失 L_{rigid} 确保局部区域的形变符合物理规律。

- 旋转相似性损失 L_{rot} 约束粒子的方向变化一致。
- 局部等距损失 L_{iso} 保证粒子间的距离不随时间变化。

这些机制确保本文方法在描述非刚性动态场景时兼具物理一致性和重建精度。

6. 挑战与未来方向

挑战

1. **复杂形变捕捉**：当场景中存在剧烈非刚性形变时，可能需要更高分辨率的粒子。
2. **大规模计算开销**：对于高复杂度场景，粒子数目和正则化项的计算代价较高。

未来方向

1. **结合深度学习**：学习基于数据驱动的形变场，提高重建效率。
 2. **多尺度建模**：在全局采用低分辨率欧拉表示，局部采用高分辨率拉格朗日粒子表示。
 3. **实时性能优化**：通过高效的计算方法（如GPU加速）提升非刚性动态场景建模的实时性。
-

总结

非刚性动态场景建模需要兼顾局部细节和全局一致性。本文通过动态高斯粒子结合基于物理的正则化，提供了一种高效且准确的解决方案，为复杂动态场景的重建和跟踪提供了新思路。

如果需要更具体的公式推导或实际案例分析，请告诉我！