

项目可行性验证报告：基于热成像与模拟事件相机的单视角暗光4D重建系统

学生姓名：裴家豪

班级：22级嵌入式2班

项目代码仓库：<https://github.com/Jason-Pei-hub/4d-system>

项目背景

现有技术的局限

目前主流的 **3D Gaussian Splatting (3DGS)** 技术虽然在静态场景重建上效果惊人，但在以下两种场景中存在严重缺陷：

1. **光照依赖强**：在极暗或全黑环境下，传统 RGB 相机无法捕捉纹理，导致 SFM (Structure from Motion) 稀疏点云初始化失败。
2. **高速运动模糊**：传统相机受限于曝光时间，在拍摄高速运动物体时会产生拖影，导致重建几何失真。

本项目的解决方案：

- 利用事件相机对暗光环境的适应性和热成像来实现星光或者全黑环境的信息采集
- 单视角通过事件相机提供的边缘信息以及热成像在不同距离下边缘的扩散程度不同来实现距离的判断
- 单视角通过利用时间轴来充当空间轴来补全高斯泼溅的信息

本项目提出一种“**单视角多模态 4D 重建**”方案，旨在解决上述问题：

- **暗光感知**：利用**热成像** 提供绝对深度先验和物理属性。
- **动态捕捉**：利用**模拟事件流** 的微秒级响应特性，将高频时间信息转化为空间几何约束 (Spatiotemporal Manifold) 。
- **模拟事件相机**：不依赖昂贵的真实事件相机，而是通过**高帧率红外相机 + 差分算法**实现事件流模拟。（未来成本跟上可以尝试事件相机）

事件相机：事件相机成本太高，无法购买试验，通过高帧率全局快门的摄像模组来实现模拟

当前工程实现进度

目前已完成边缘侧采集系统的底层开发与验证

硬件架构

- **计算平台**：Raspberry Pi 4B (Edge) + PC (Host)
- **传感器组**：
 - **模拟事件源**：OV9281 全局快门相机（去IR滤光片，改装窄带850nm镜头）
 - **热成像源**：Tiny1-C (256x192)
- **传输链路**：千兆以太网 TCP Socket 直连

底层驱动

为了在树莓派有限的算力上实现1280x800 120fps处理以及热成像数据采集，放弃了 Python，**全栈采用 C++ 开发**：

- **超高帧率采集**：通过底层 V4L2 驱动优化，成功将 OV9281 采集帧率稳定在 **100 FPS**。
- 完成了SDK的测试，可以收集到相关热成像信息

关键算法验证：模拟事件相机

算法原理

参考 *Event-based Vision* 相关理论，通过计算连续高帧率红外图像的对数域亮度变化，生成正负事件流：

$$Event(x, y, t) = \begin{cases} +1 & \text{if } \log(I_t) - \log(I_{t-1}) > \theta \\ -1 & \text{if } \log(I_t) - \log(I_{t-1}) < -\theta \end{cases}$$

实测效果

由于高帧率相机曝光时间极短而且还未进行补光，导致画面看起来漆黑一片

但是模拟的事件相机仍然能很好的捕捉到物体的边缘信息

后续技术路线及要点

基于目前夯实的工程基础，后续毕设将分为三个阶段进行：

1. 数据融合

- 利用 PC 端算力，将热成像的温度矩阵与模拟事件流进行空间配准。
- 将边缘数据传递到pc利用高算力实现算法的推理

2. 单视角深度解算与高斯初始化

这里可能是整个工程最大的难点，不一定可以做出来

但是这几天思考了大致的思路可以尝试一下

后续可能出现噪点问题，需要到时候再说

• 2.1 找温度基准值（热成像）

- 取图像最边缘一圈（比如宽 5 个像素）的所有点，算这些点的平均温度，记为 T_{base} （比如 20°C ）。如果有噪声，用中值滤波把它滤掉。
- 这样的好处是防止物体过大影响环境温度判断

• 2.2 找锚点（热成像）

- 遍历整张热图，找到温度最高的像素点 $P_{max}(u_0, v_0)$ ，记录其温度 T_{max} （比如 37°C ）。强制设定这个点的深度 $Z_{anchor} = 5.0$ 米（这个值可以是固定值，也可以根据应用场景微调）。

• 2.3 大致形状估计 (热成像)

- 根据温差，温度越接近 T_{max} ，离5米越近；温度越低，离得越远。
- 公式：

$$Z_{therm}(x, y) = Z_{anchor} \times \left(\frac{T_{max} - T_{base}}{T(x, y) - T_{base} + \epsilon} \right)^\gamma$$

- 深度=锚点距离× (最大温差比当前温差)
- ϵ : 防止分母为 0 的极小值 (比如 0.001) 。
- γ : 整形系数 (Shaping Factor) 。
 - 这是工程创新参数**。
 - 如果 $\gamma = 1$, 形状是线性的圆锥体。
 - 如果 $\gamma = 2$, 形状更圆润 (像球体)。建议设为 1.5 到 2.0 之间。
- 温度越高 (越接近 T_{max})，分母越大 → 分数值越小 (接近1) → 距离 Z 保持在锚点附近 (近) 。
- 温度越低 (越接近 T_{base})，分母越小 → 分数值越大 → 距离 Z 变大 (远) 。

• 2.4 计算像素点速度 (事件相机)

- 使用 Farneback 算法计算像素运动速度 $v_{flow}(x, y)$ 。

注意：稠密光流算法会对内部空洞进行插值（脑补），提供初步的内部速度估计。

• 2.5 解算物理速度 (事件相机)

- 公式：

$$V_{real} = \frac{Z_{anchor} \times v_{flow}(u_0, v_0)}{f}$$

- u_0, v_0 : 最热点的坐标。
- f : 相机焦距 (比如 500 像素) 。
- V_{real} : 算出来的物体真实物理速度 (比如 1.5 米/秒) 。
- 既然我知道基准点在5米远，而且它在画面上每秒跑 100 个像素，根据相似三角形，我就能算出它实际有多快。

• 2.6 解算几何深度 (事件相机)

- 既然算出了物体真实的速度 V_{real} ，我们假设物体是刚体，那就可以反推每一个点的精确深度了。
- 动得比中心点快的点 → 更近 (削掉泥巴) 。
- 动得比中心点慢的点 → 更远 (填补泥巴) 。
- 增加防除零保护和最大距离限制。

$$Z_{event}(x, y) = f \times \frac{V_{real}}{v_{flow}(x, y) + 0.001}$$

约束：若计算结果大于背景阈值 (如5米)，则强制设为背景距离。

• 2.7 最终深度合成

- 统计像素周围 5×5 邻域内的事件密度。
- 边缘区（事件多）： $\alpha \approx 1$ （信事件相机，要锐利）。
- 内部区（事件少）： $\alpha \approx 0$ （信热成像，要填充）。

凹凸校验：比较中心区域速度 v_{center} 与边缘区域速度 v_{edge} 。

- 若 $v_{center} < v_{edge}$ （中心慢，边缘快），判定为**凹陷**。此时翻转 Z_{therm} 的趋势（让热的地方变远）。

融合权重 α ：使用光流幅值作为置信度。

- $\alpha = \text{Sigmoid}(|v_{flow}|)$ 。速度越快（越确定的前景）， α 越接近 1。
- 速度接近 0（背景或死区）， α 接近 0。

最终公式：

$$Z_{final} = \alpha \cdot Z_{event} + (1 - \alpha) \cdot Z_{therm_corrected}$$

高斯初始化

- 将 Z_{final} 作为 z 坐标，将原始温度 T_{raw} 作为颜色属性，初始化高斯球。

3.4D Gaussian Splatting 训练

- 引入时间维度 t ，将 3D 高斯球扩展为**4D 时空高斯球**。
- 目标：在全黑环境下，重建出动态物体的完整运动轨迹（类似“时空虫子”效果，可以看到物体时间切片下的位置姿态）。

参考

模拟事件相机方案

- 《Raw2Event: Converting Raw Frame Camera into Event Camera》
 - 模拟事件相机的差分算法直接参考了该论文的亮度阈值触发机制。

单目深度与几何重建

- 《EventPS: Real-Time Photometric Stereo Using an Event Camera》(CVPR 2024)
 - 引用其利用事件流的边缘信息来解算物体表面法线的思路。仅靠单目事件流的高频变化，足以恢复出高精度的 3D 几何细节。
- 《Absorption-Based, Passive Range Imaging》
 - 利用“热辐射强度衰减”和“大气吸收特性”来进行被动单目测距的物理依据。

4D 动态重建与时空互换

- 《Deformable 3D Gaussians for High-Fidelity Monocular Dynamic Scene Reconstruction》(CVPR 2024)
 - 解释如何引入时间维度 t 来解决空间视角的缺失。

热成像与 3DGS 融合

- 《ThermalGaussian: Thermal 3D Gaussian Splatting》 (2024/2025)
 - 证明热成像可以弥补 RGB 相机在暗光下无法初始化 SFM 点云的缺陷。
- 论文标题：《EvDiG: Event-guided Direct and Global Components Separation》
 - 说明在极暗环境下，利用事件流来引导热成像的纹理重建，解决低光下丢失结构信息的问题。