



北京大学计算机学院
School of Computer Science



Camera Intelligence
A Computational Photography Lab @ PKU
<http://camera.pku.edu.cn>



神经形态相机视觉计算年度进展报告

施柏鑫

shiboxin@pku.edu.cn

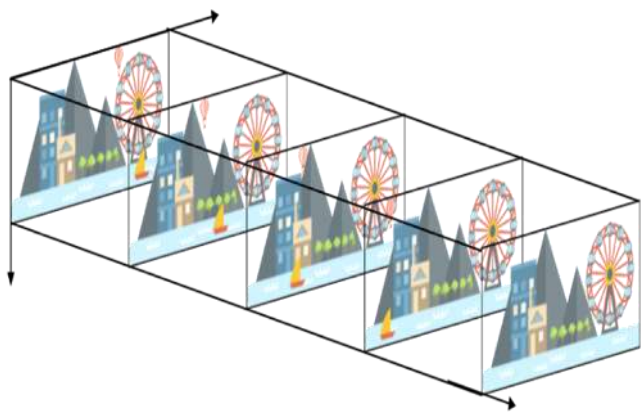
2024.05.05 @ VALSE 2024 重庆



基于帧的传统相机存在一些问题



过去 60 年的研究一直致力于基于帧的相机.....但它们还不够好!



信息冗余



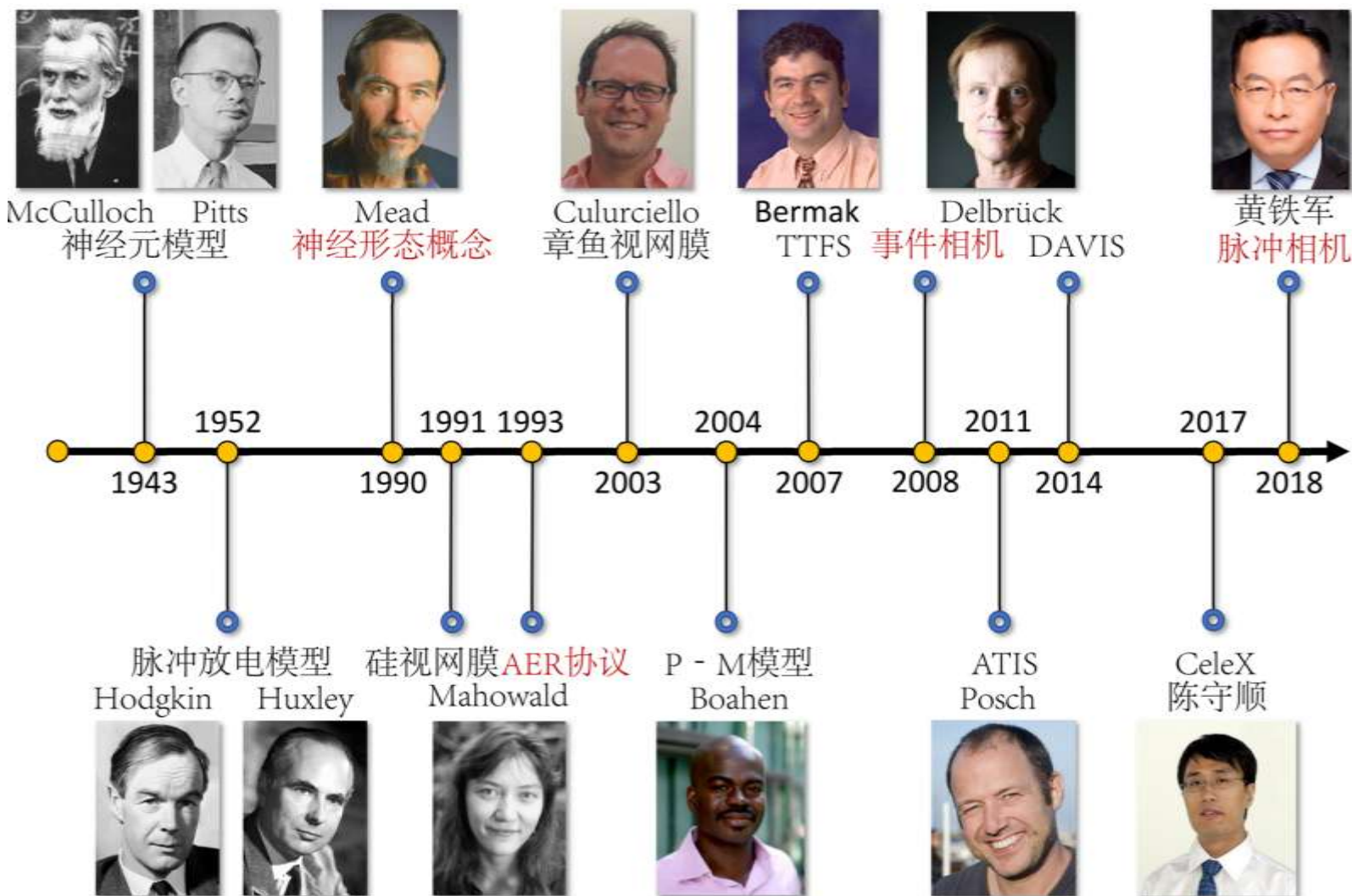
高延时



低动态范围



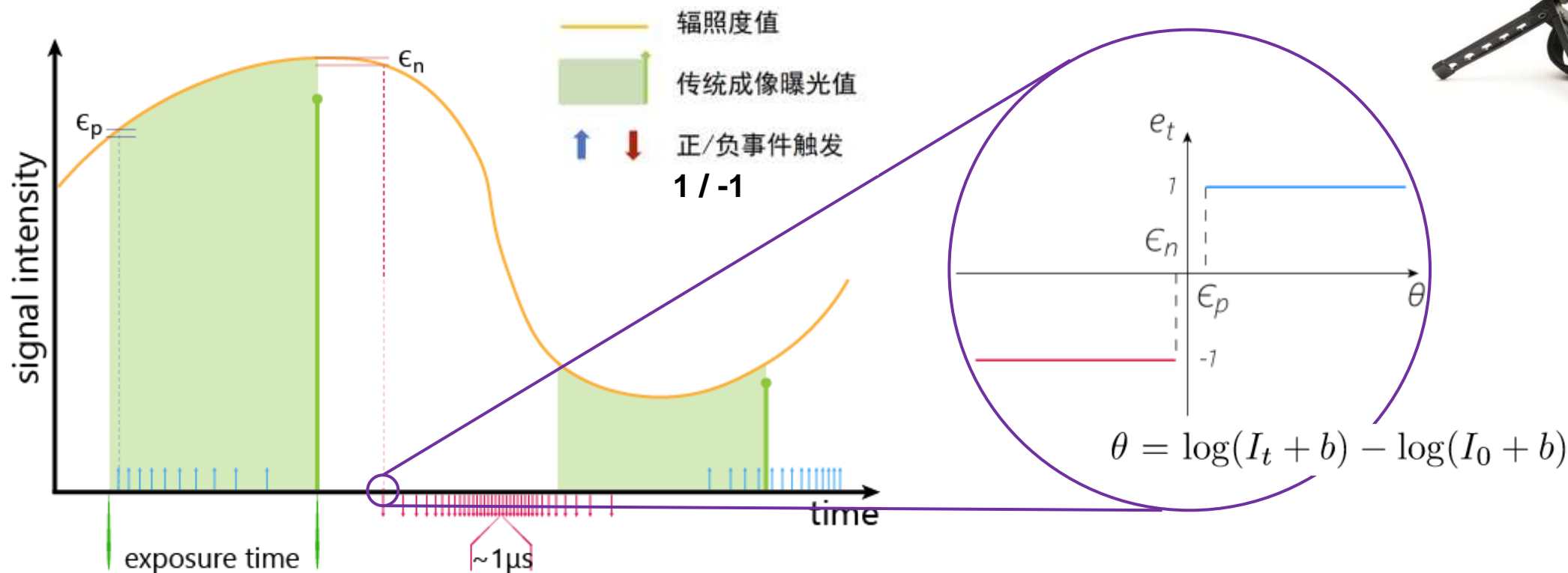
神经形态视觉的发展历程





神经形态相机之事件相机

- 每当单个像素看到亮度变化大于阈值时，就会生成事件

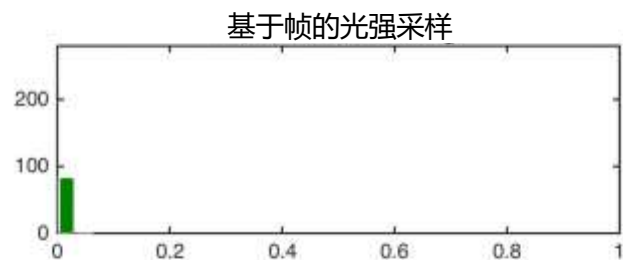
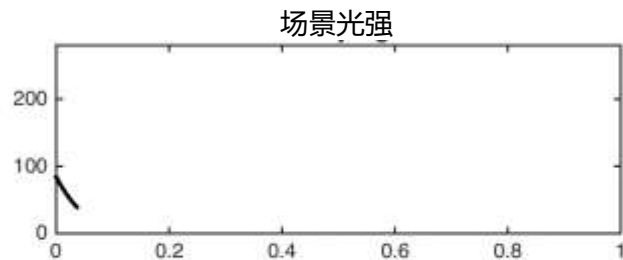




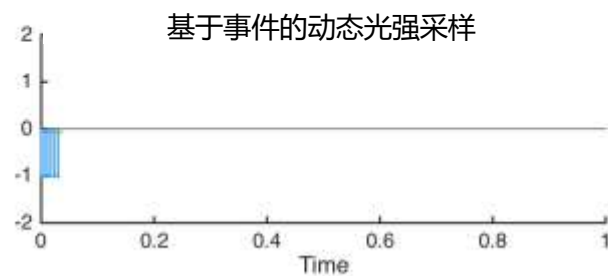
神经形态相机之事件相机



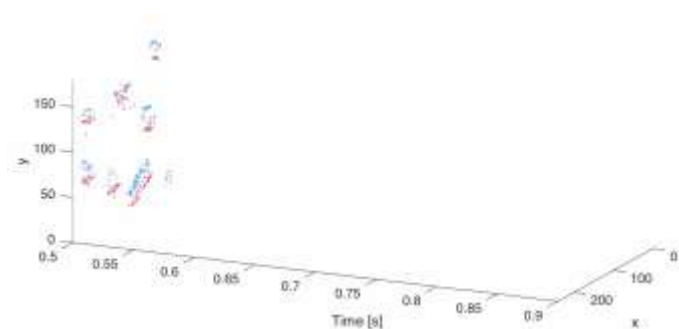
传统帧相机:



事件相机:



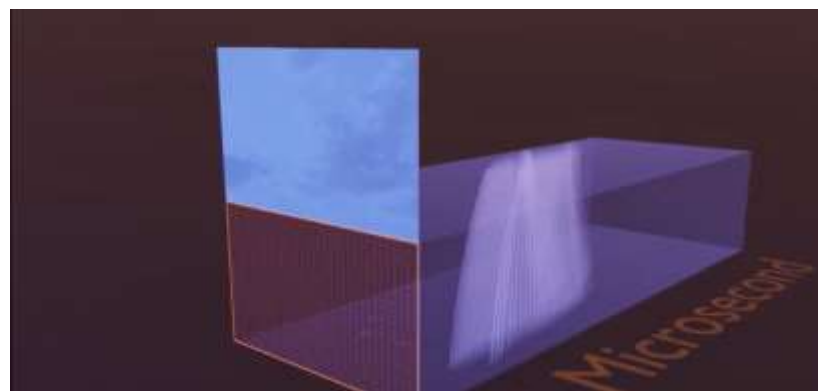
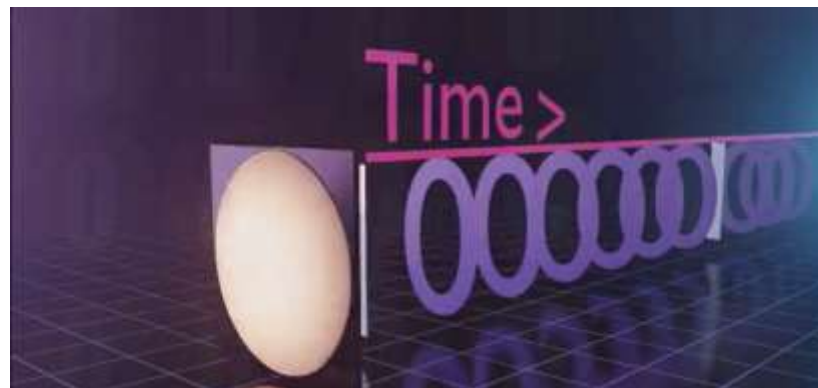
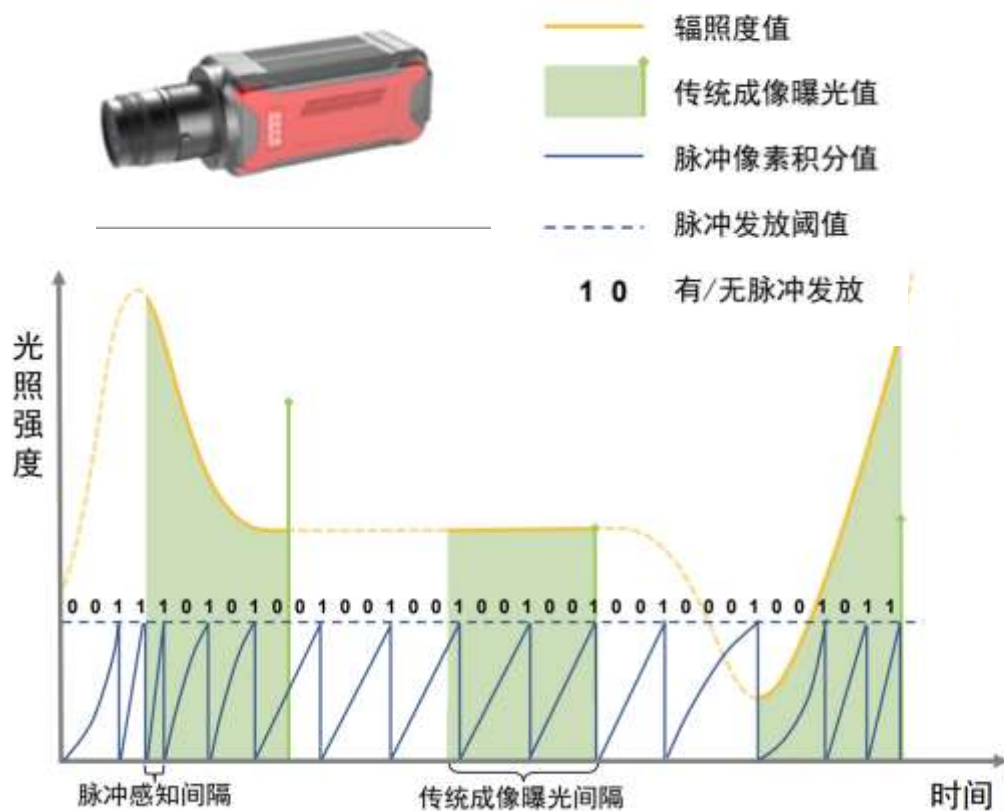
微秒级别的时间戳精度





神经形态相机之脉冲相机

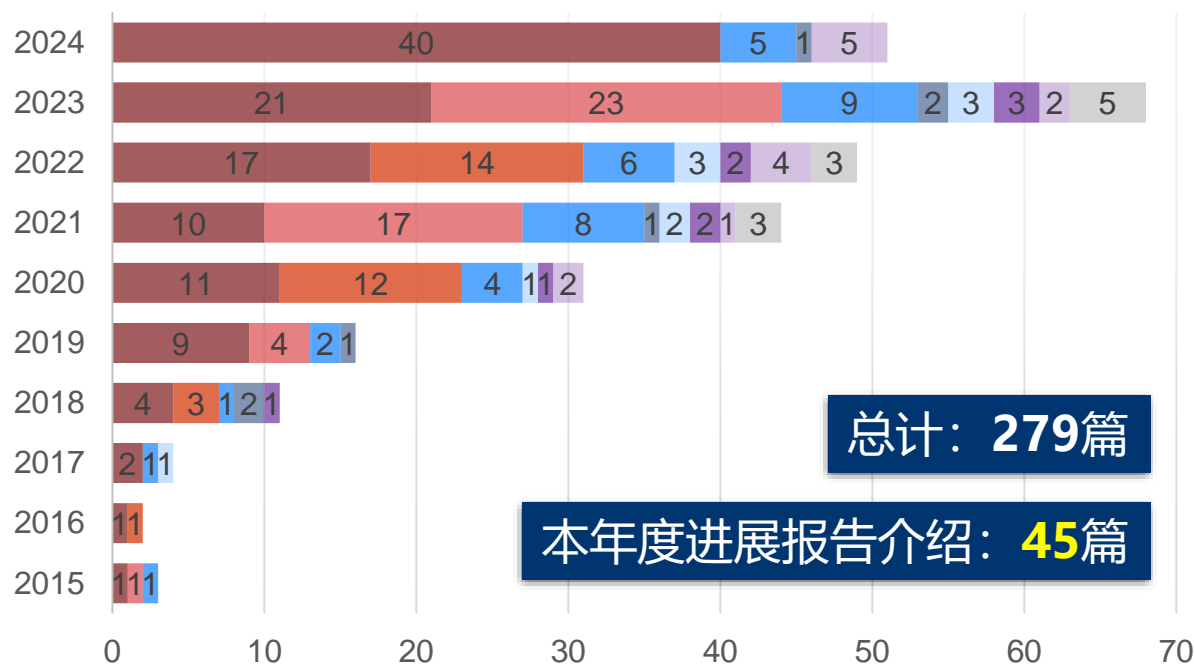
- 每当单个像素累积光强积分大于阈值时，就会生成脉冲



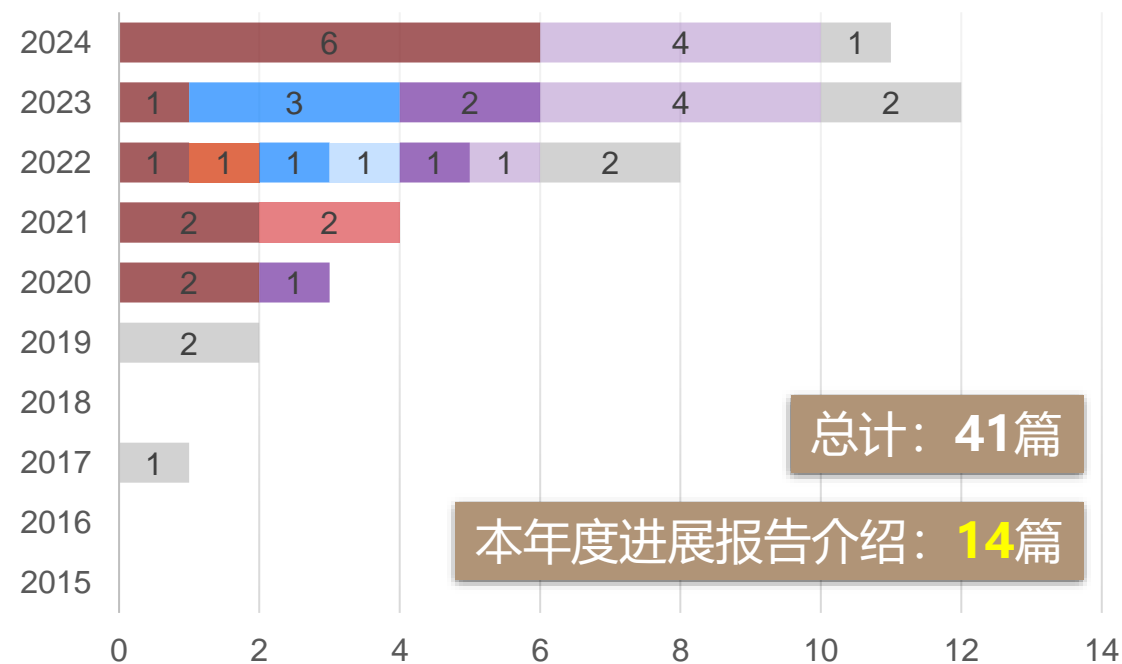


神经形态相机相关研究发文情况统计

事件相机在重要期刊和会议论文发表统计



脉冲相机在重要期刊和会议发表论文统计



■ CVPR ■ ICCV ■ ECCV ■ TPAMI ■ IJCV ■ TIP ■ NeurIPS ■ AAAI ■ 其他

年度进展：事件相机 ▶▶▶



01 信号处理



- 信号生成
- 信号重构
- 信号增强
- 信号表达

02 辅助拍照



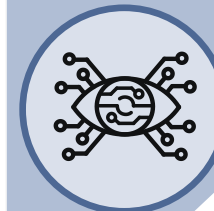
- 极端光照
- 视频插帧
- 模糊去除
- 三维重建

03 智能感知



- 物体分割
- 光流估计
- 物体跟踪
- 物体识别

04 下游任务



- 工业应用
- 科学应用

信号重构：基于正则化的图像信号重构

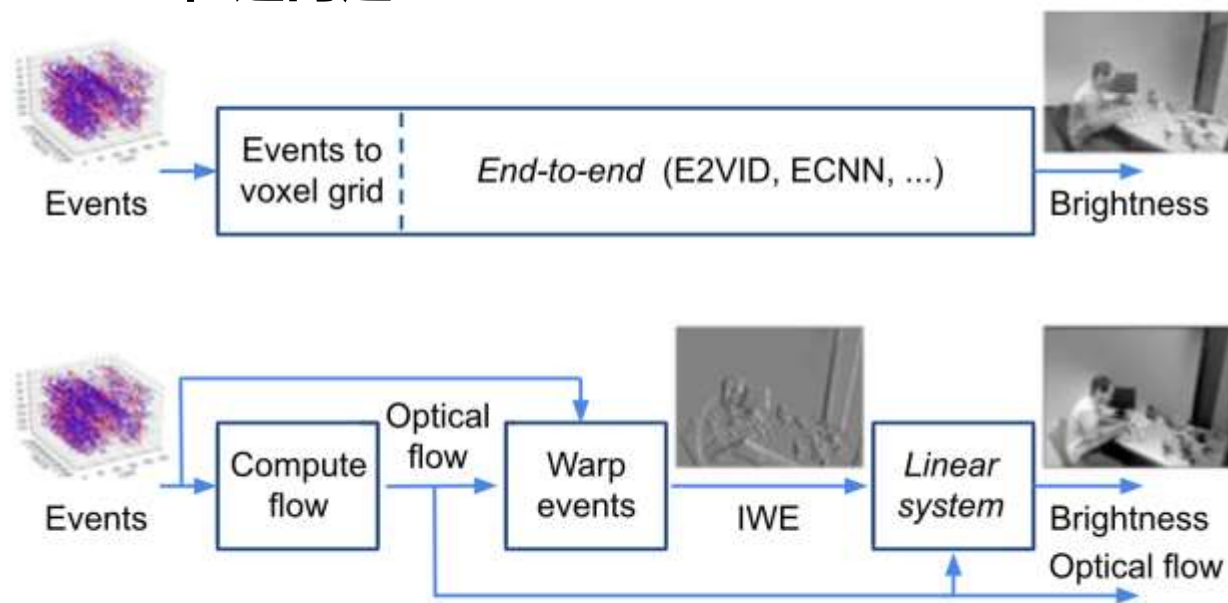


研究动机

现有工作大多基于端到端的循环神经网络 (RNN) ， **缺乏可解释性**，且容易出现过拟合

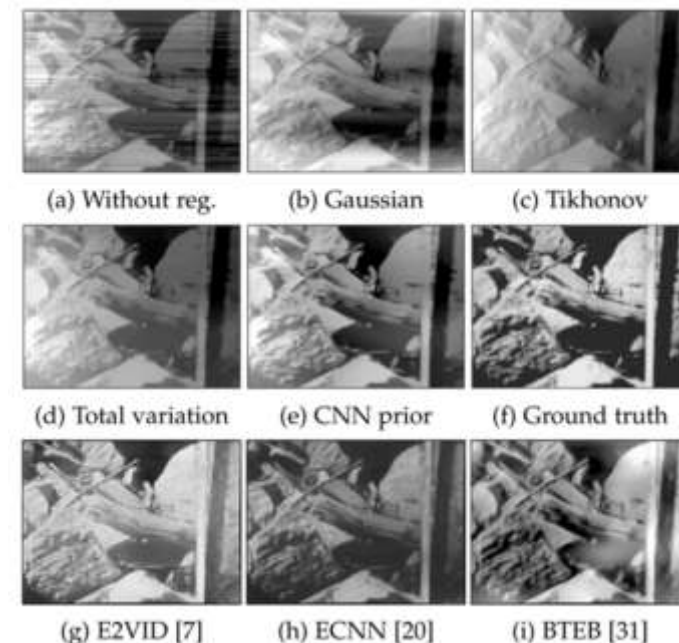
研究方法

将运动（光流）和亮度视为相互关联的变量，从而将基于事件的图像重构过程表示为一个**线性逆问题**



研究结果

在保证重建质量的前提下提升了算法的**泛化能力**



信号重构：基于主动光照的图像信号重构



研究动机

论文发现在主动照明变化的条件下，事件信号的**瞬态频率**能够线性反映辐射亮度值

研究方法

通过分析在开启光源**瞬间**，事件信号的频率，将事件信号的高时间分辨率转换为**精确的辐射度值**

研究结果

瞬态事件频率重构辐射度**鲁棒性高**，可用于光谱响应估计等



Hyperspectral imaging



信号增强：背景噪声实时去除算法

研究动机

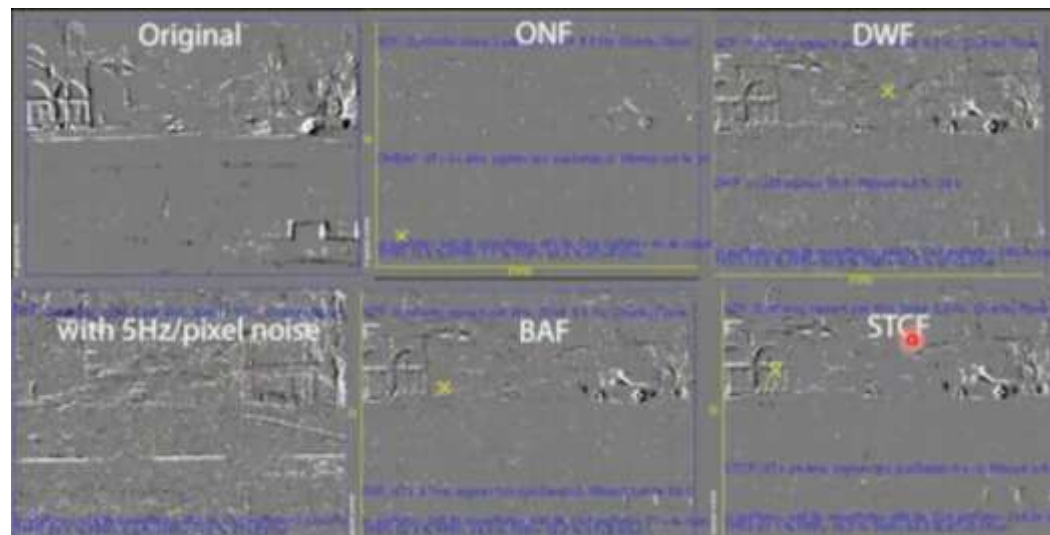
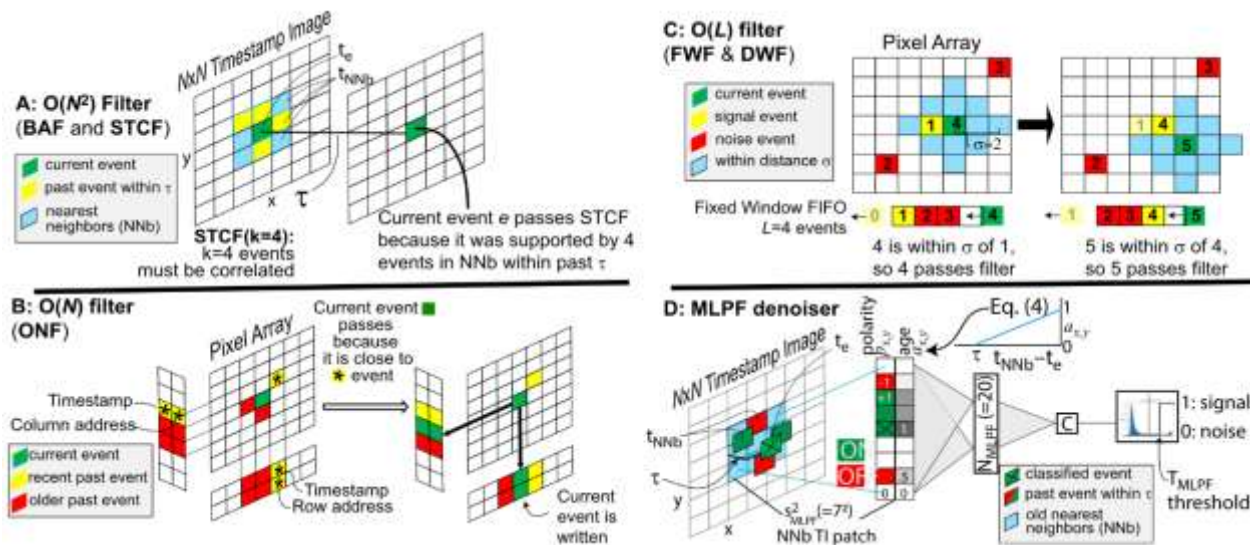
事件相机在低光照和高光强条件下产生的背景噪声具有**不同的特征**

研究方法

针对不同的场景提出了4种轻量级**实时事件信号滤波器**，构建了一个测试数据集，并提出了一种新的去噪指标

研究结果

在去除更多噪声的同时，保留了**更多的有效信号**



信号增强：事件去噪基准数据集



研究动机

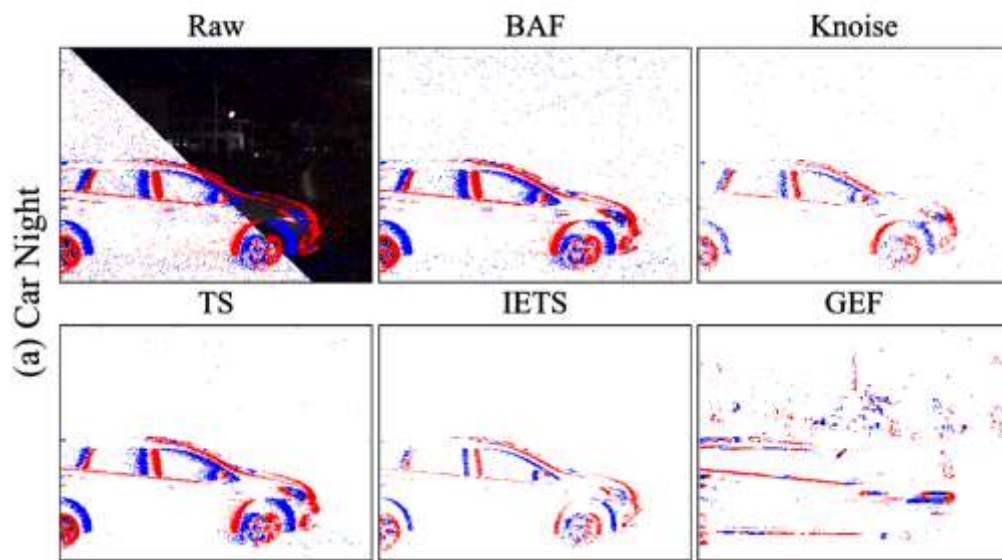
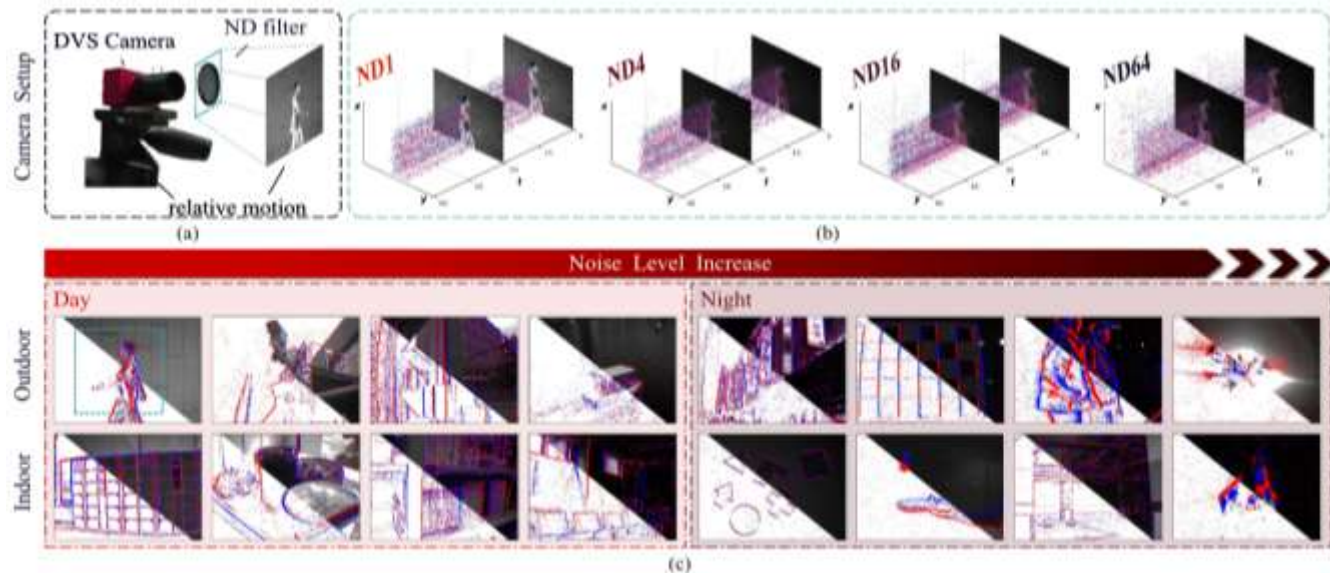
现有的去噪数据集**规模小**、噪声**多样性不足**；评估指标大多依赖于额外信息或手动标注

研究方法

构建了一个**大规模**的事件去噪数据集 (E-MLB)，提出了一个**无需基准真值**的事件去噪指标：事件结构比 (ESR)

研究结果

数据集包含**100**个场景，每个场景有**4**个噪声水平



信号生成：基于可逆条件正则化流



研究动机

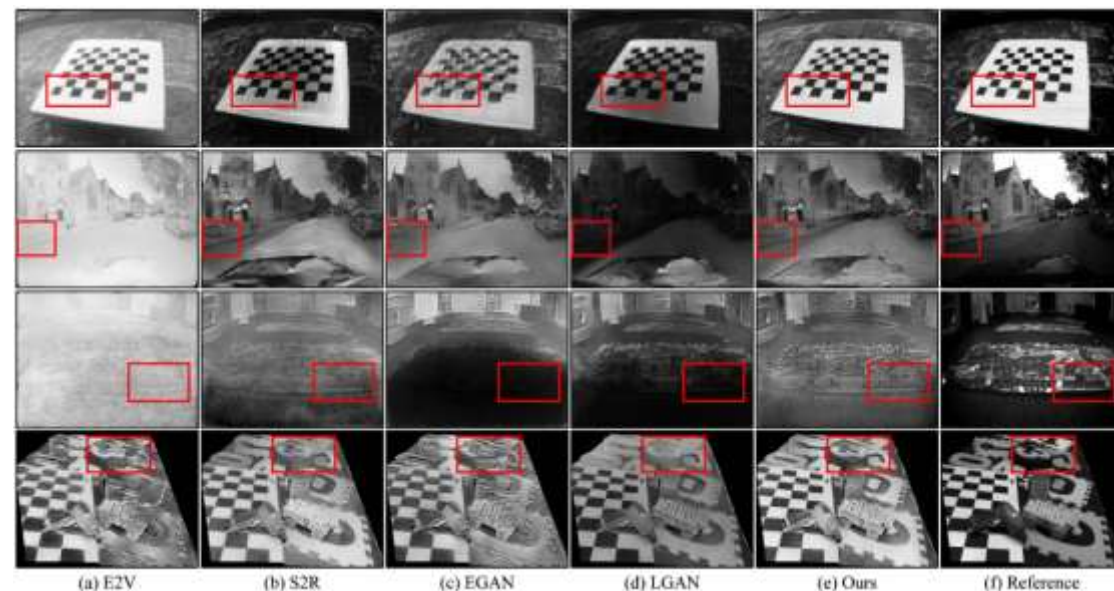
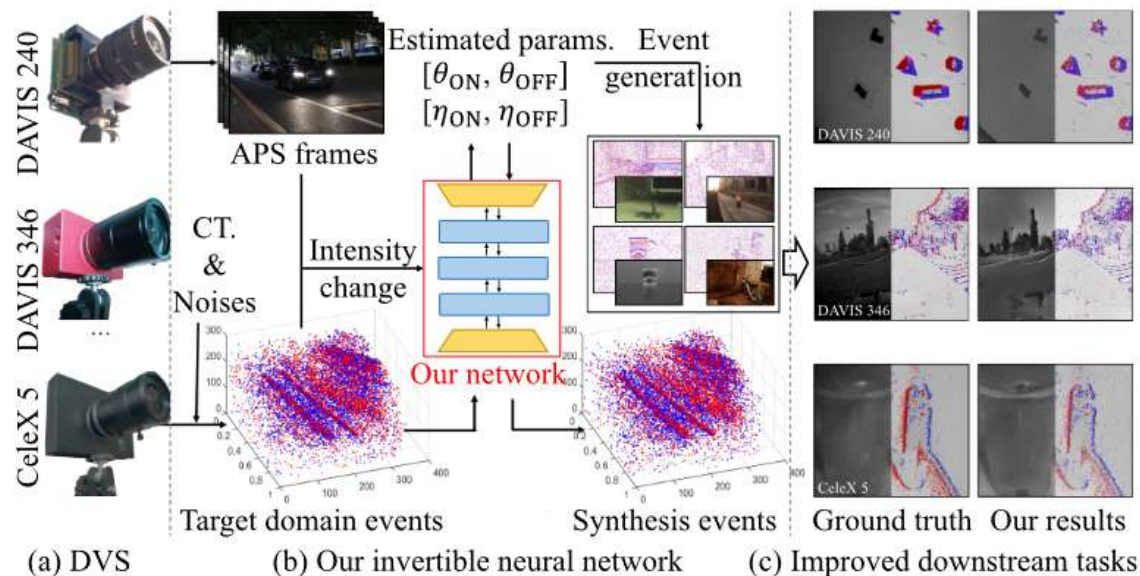
现有的事件生成方法**依赖手工制定**的参数和噪声率，难以适应不同场景的需求

研究方法

通过**可逆条件正则化流**学习事件信号与事件相机参数空间的双向映射关系，将图像作为附加信息输入到网络中

研究结果

在**下游任务**上取得了**更好的效果**，提高了不同场景的泛化能力



信号生成：连续事件流生成



研究动机

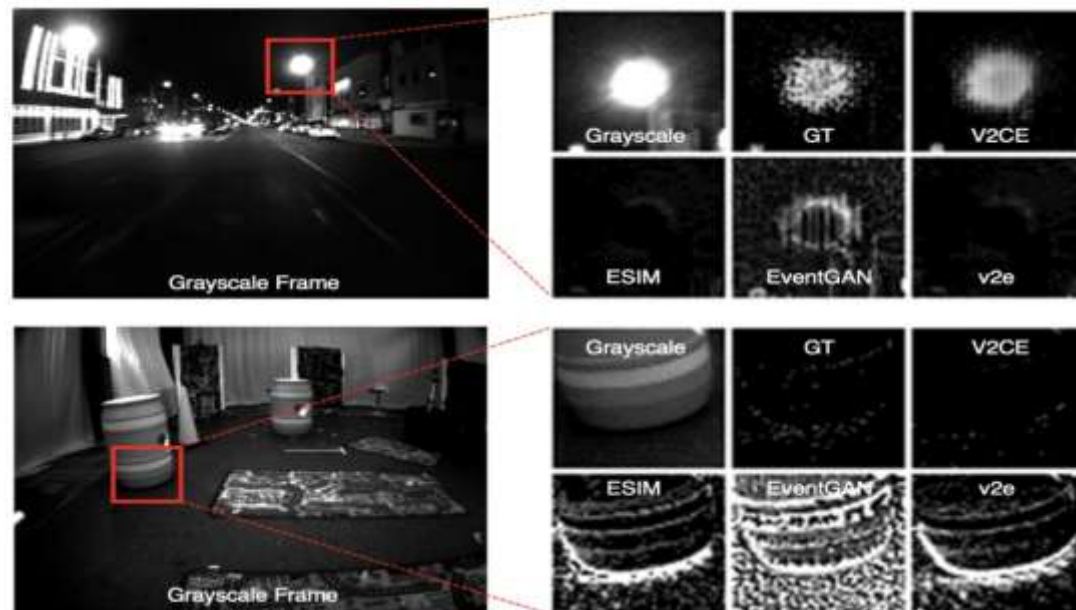
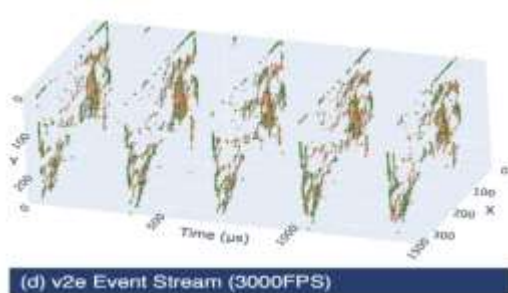
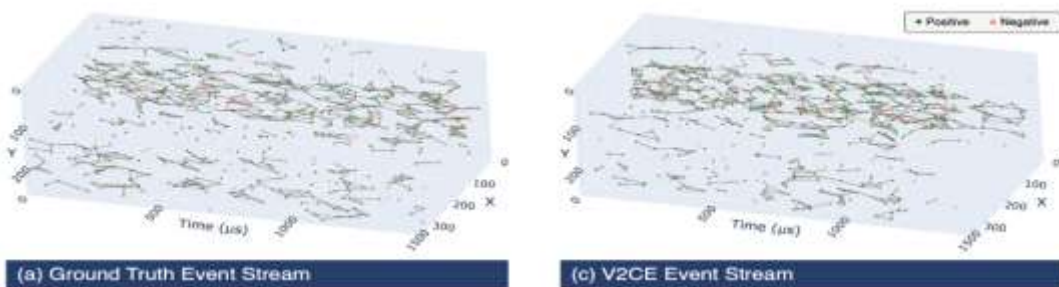
现有的事件生成方法产生的事件通常具有一系列相对**离散的时间戳**

研究方法

提出了一种新的局部动态感知时间戳推断算法，该算法能够实现从事件体素网格到**连续事件流**的平滑过渡

研究结果

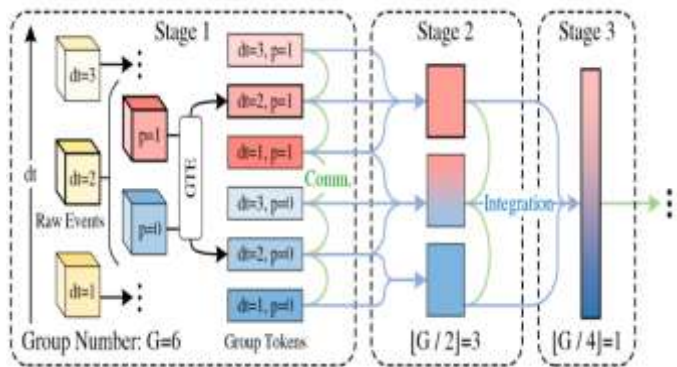
在事件体素网格和**连续事件流**的生成上都达到了更好的指标





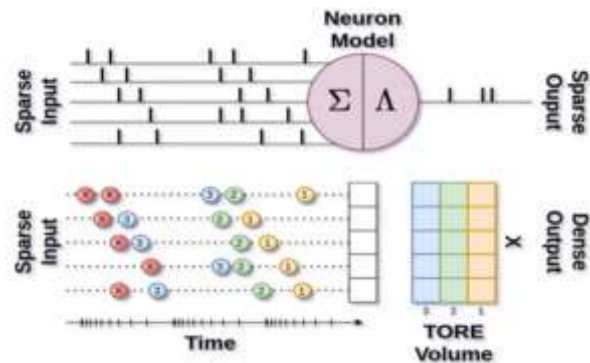
信号表达：提出新的表示方法

组卷积编码



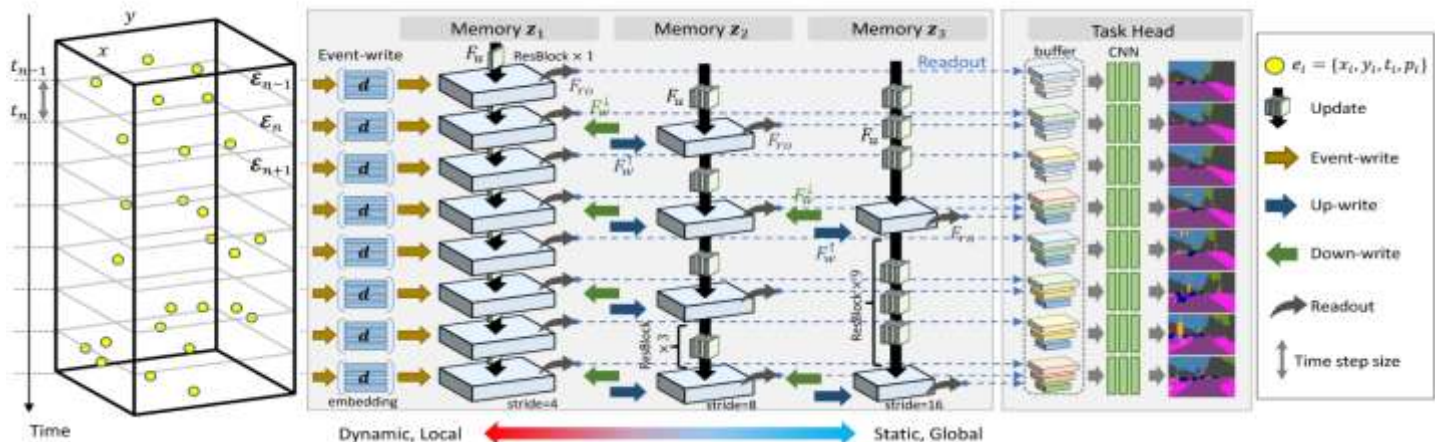
[7] 事件重编码后卷积

时序近邻



[8] FIFO队列维护最近的事件

存储堆栈



[9] 多个以不同速率运行的存储器堆栈

新的表示方法的提出，
为事件预处理提供了更多选择

[7] Peng et al., GET: Group Event Transformer for Event-Based Vision, ICCV 2023.

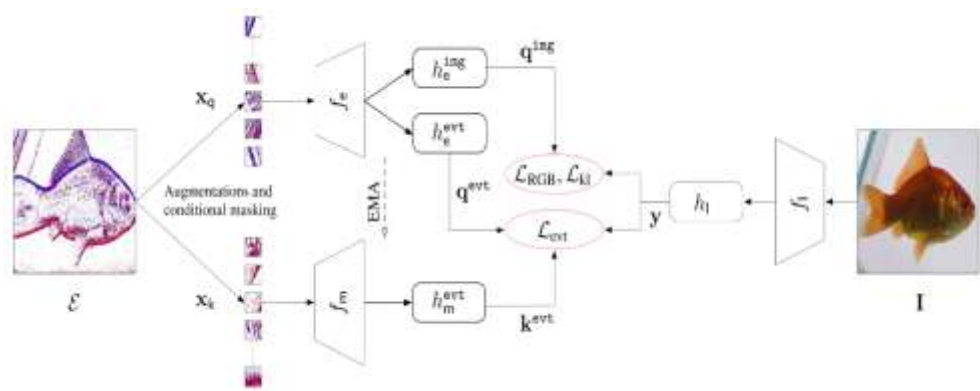
[8] Baldwin et al., Time-Ordered Recent Event (TORE) Volumes for Event Cameras, TPAMI 2023.

[9] Hamaguchi et al., Hierarchical Neural Memory Network for Low Latency Event Processing, CVPR 2023.

信号表达：基于已有表示方法进行性能提升

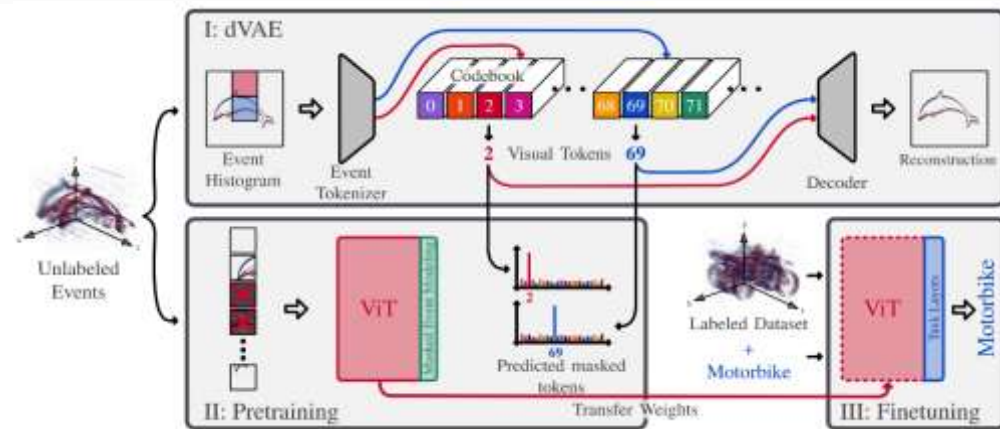


事件数据增强



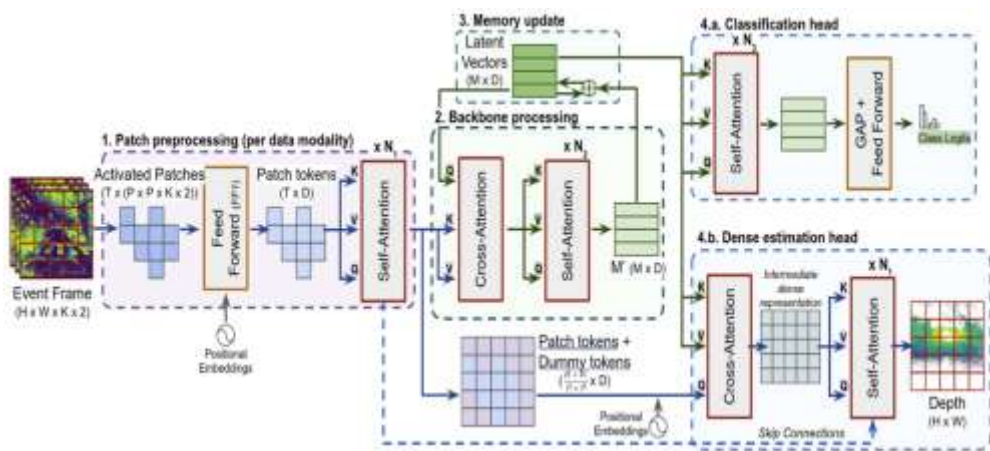
[10] 基于Time Surface [13]

预训练模型



[11] 基于事件直方图

基础网络结构



[12] 基于时序近邻

基于已有表示方法的通用事件数据预处理算法，提高了在多种下游任务上的性能

- [10] Yang et al., Event Camera Data Pre-training, ICCV 2023.
- [11] Klenk et al., Masked Event Modeling: Self-Supervised Pretraining for Event Cameras, WACV 2024.
- [12] Sabater et al., Event Transformer+. A Multi-Purpose Solution for Efficient Event Data Processing, TPAMI 2023.
- [13] Sironi et al., HATS: Histograms of Averaged Time Surfaces for Robust Event-Based Object Classification, CVPR 2018.

极端光照：提升视频的动态范围



研究动机

基于事件提升动态范围的现有算法多基于单张图像，直接应用于**视频会导致闪烁**

研究方法

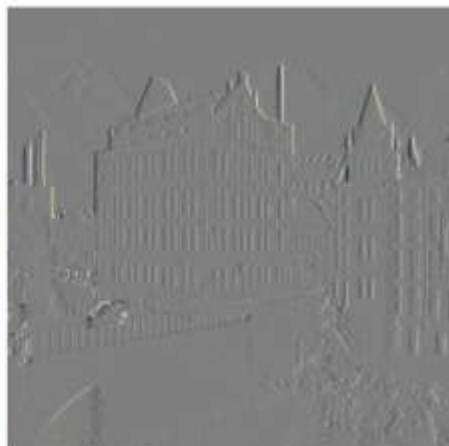
提出了更好的**模态融合算法**；
加入了**时序上的约束**

研究结果

在**视频**上实现了高质量的动态范围提升



LDR



Event



E2VID



Han *et al.*



Ours

极端光照：提升低光照图像质量



研究动机

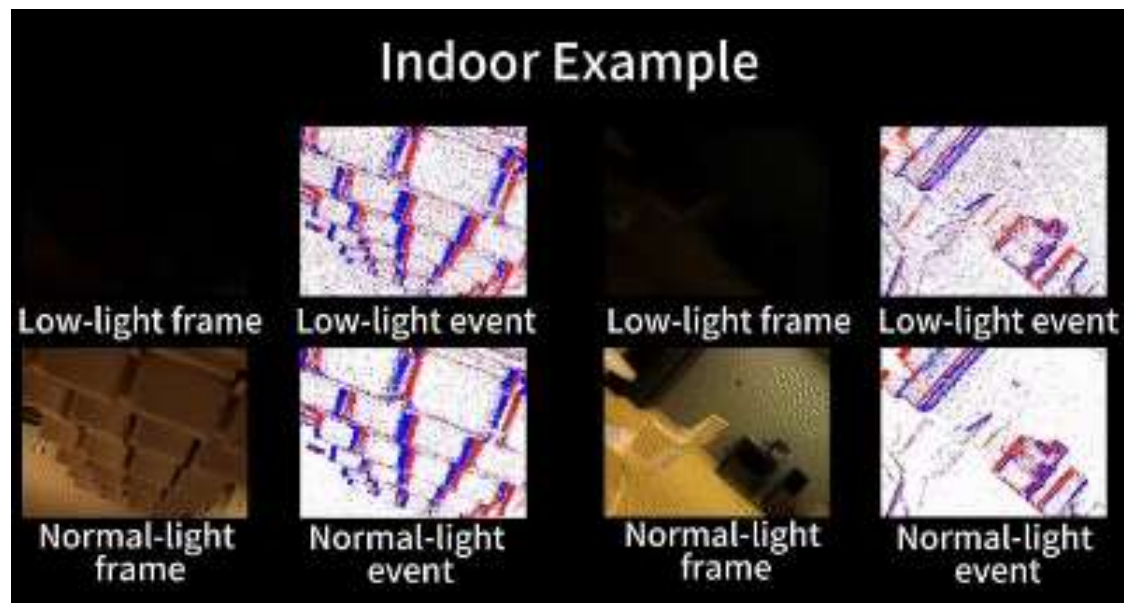
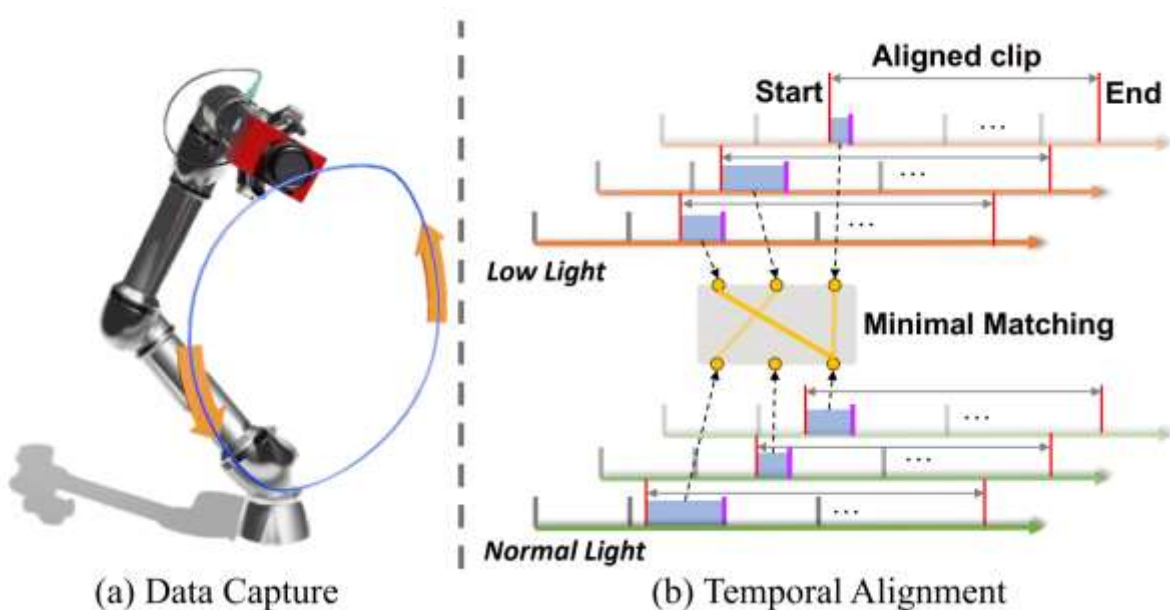
基于事件相机能提升低光照图像质量，但该任务缺乏大规模实拍数据集

研究方法

设计了基于精密重复动作的机械臂系统，拍摄了大规模含真值的数据集

研究结果

数据集包含31477组图，每组包括低光图像、事件流、正常光照图像



视频插帧：提升视频帧率



研究动机

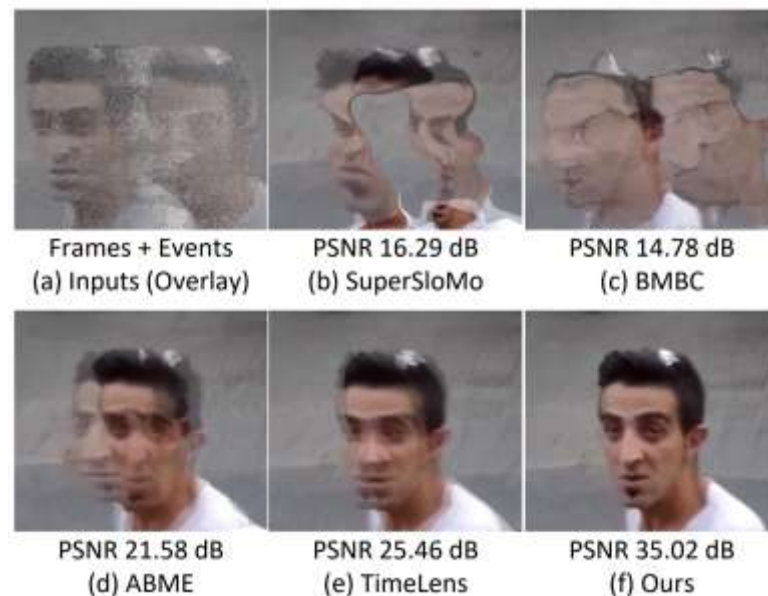
以往算法**无法有效融合**基于图像与事件的线索

研究方法

设计了**融合生成算法**与
变形算法的网络结构

研究结果

拍摄了**更大的真实数据集**ERF-X170FPS;
各数据集上的表现均有显著提升



视频插帧：消除卷帘快门导致的果冻效应



研究动机

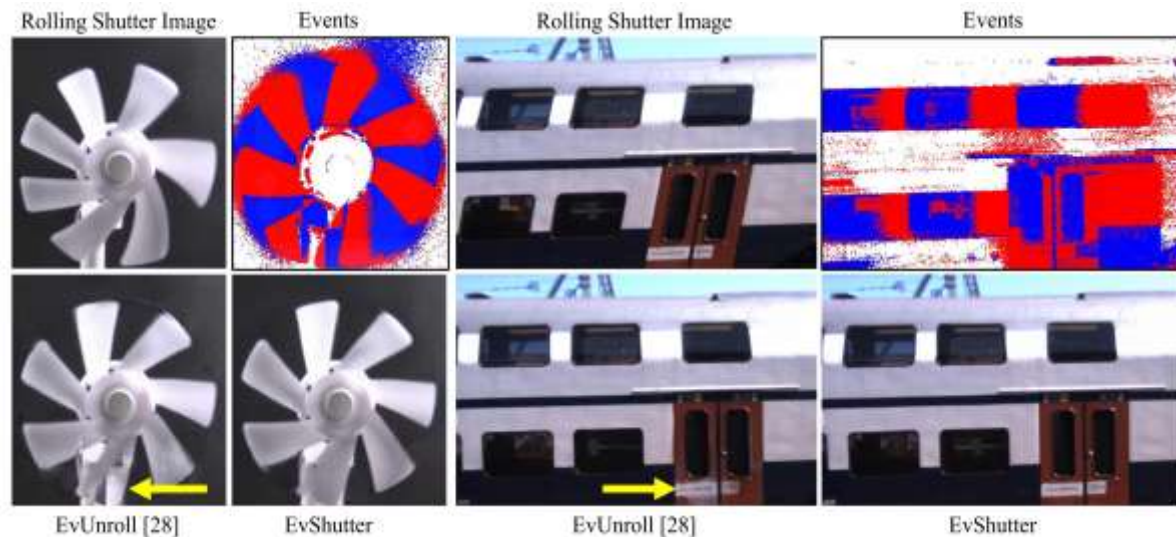
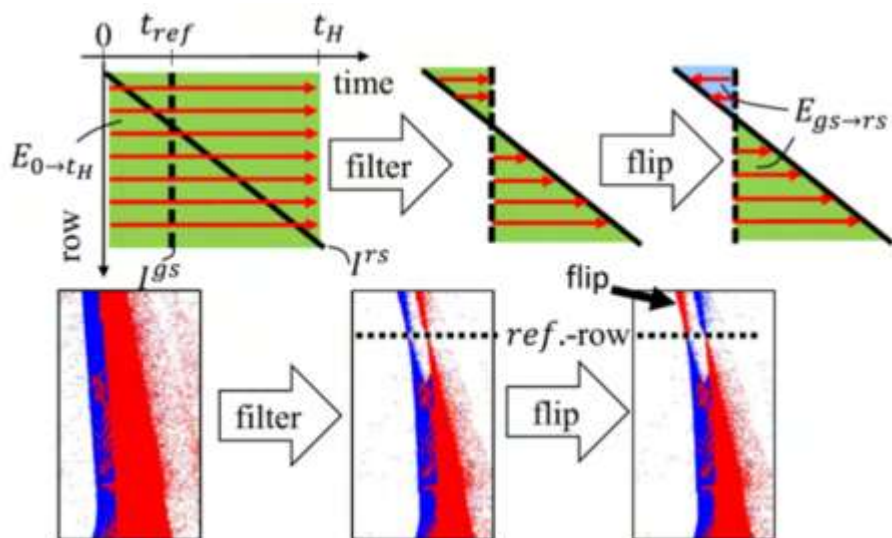
已有算法假设场景中只有匀速移动，**不适用于多数场景**

研究方法

提出了预处理事件数据的Filter-and-Flip方法；**实拍数据集RS-ERGB训练**

研究结果

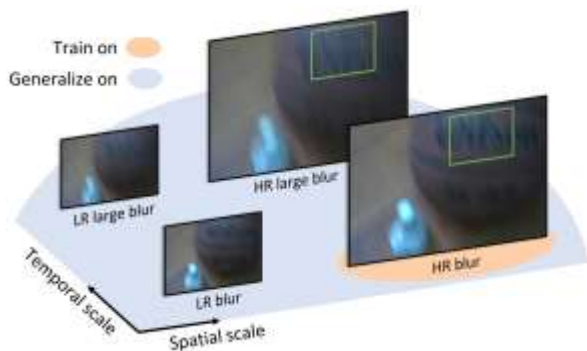
将基于事件的去果冻效应消除算法拓展到了**非匀速运动场景**





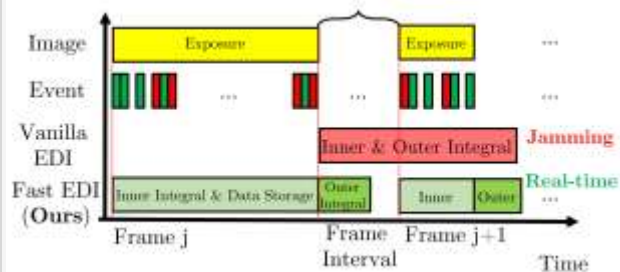
模糊去除：消除图像中的运动模糊

性能提升



自监督微调提升泛化性能 [18]

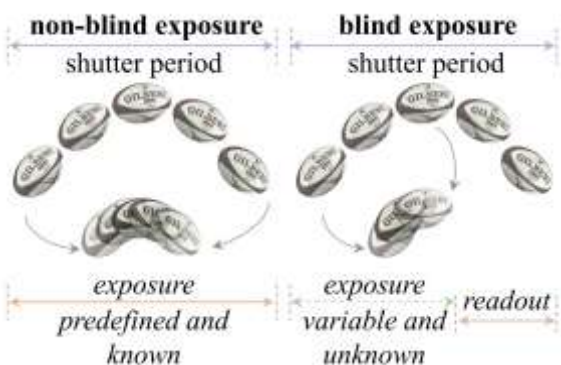
运行加速



将EDI加速至实时运行 [19]

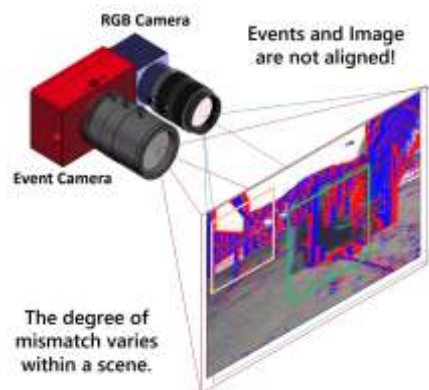
在基于事件的图像去模糊任务上，一些新提出的方法实现了**性能提升、运行加速**，并尝试解决**更复杂、更困难**的去模糊问题

时间扩展



曝光时长未知的去模糊 [20]

空间扩展



空间不对齐的去模糊 [21]

[18] Zhang et al., Generalizing Event-Based Motion Deblurring in Real-World Scenarios, ICCV 2023.

[19] Lin et al., Fast Event-Based Double Integral for Real-Time Robotics, ICRA 2023.

[20] Weng et al., Event-Based Blurry Frame Interpolation Under Blind Exposure, CVPR 2023.

[21] Cho et al., Non-Coaxial Event-Guided Motion Deblurring with Spatial Alignment, ICCV 2023.

模糊去除：消除图像中的失焦模糊



研究动机

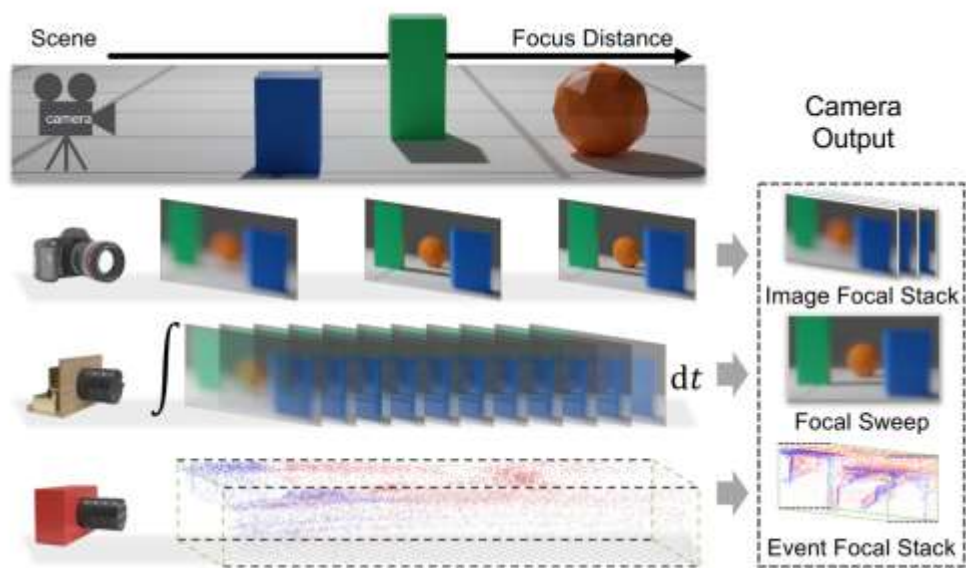
基于图像的焦点堆栈方法只能覆盖场景中的少数对焦平面，而“事件焦点堆栈”能**连续扫过所有深度**，保留更多信息

研究方法

基于模糊图像与事件焦点堆栈重建**各个聚焦深度处的图像**，再融合为全聚焦图像

研究结果

基于模糊图像与事件焦点堆栈实现了**全聚焦成像**



(a) 输入模糊图像

(b) 输入事件焦点堆栈

(c) 重聚焦图像

三维重建：基于神经辐射场



研究动机

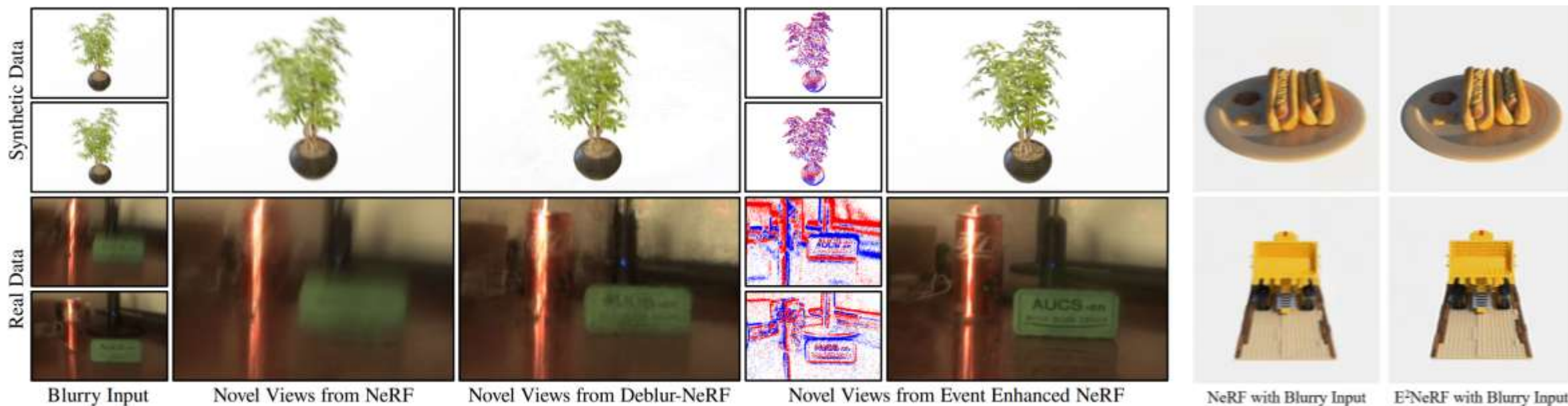
事件相机能在模糊、运动条件下捕捉更多信息，有利于**神经辐射场重建**

研究方法

在事件引导下估计相机位姿，并由此基于事件相机成像原理与**模糊图像**成像原理构造约束

研究结果

提升**基于模糊图像**的三维重建结果



三维重构：基于偏振光恢复物体形状



研究动机

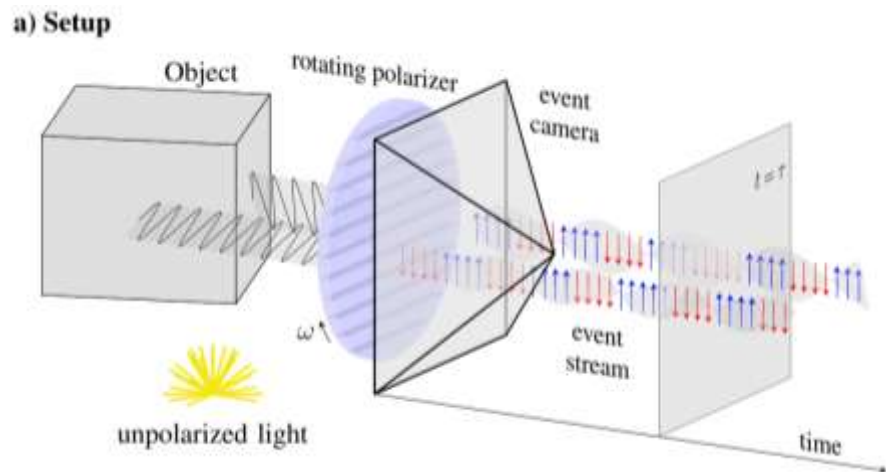
测量各个角度的偏振光强度可以恢复物体表面形状，但逐个角度拍摄**耗时太长**

研究方法

用事件相机录制偏振片旋转的过程；
基于事件约束恢复场景表面信息

研究结果

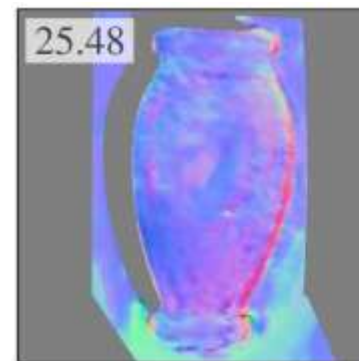
实现了**50帧/秒**的物体形状扫描，
相比传统拍摄方法加速了**2倍以上**



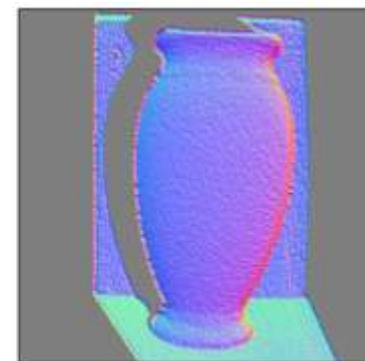
场景



事件



法线估计结果



法线真值

实例分割：人体实例分割



研究动机

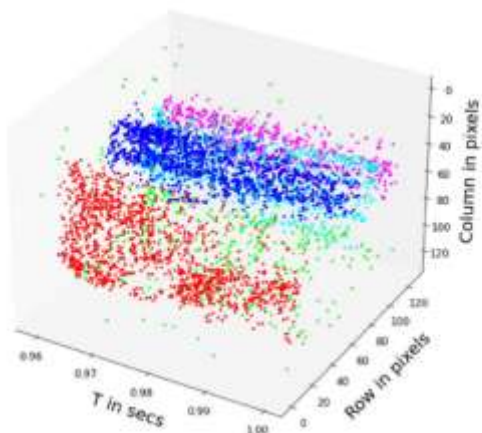
基于传统相机的方案**计算成本高且速度慢**，事件相机以稀疏和高速的特性成为替代方案

研究方法

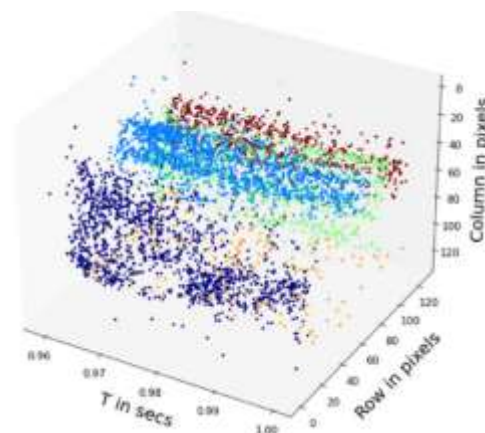
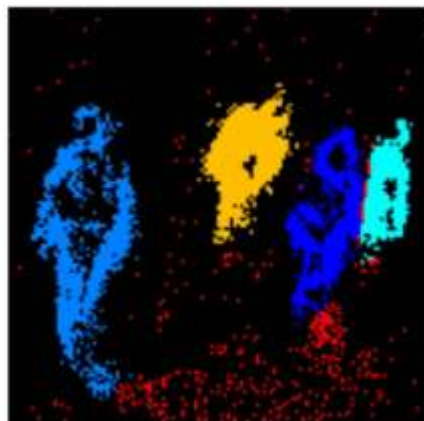
采用统计和概率等非深度学习方法，实现**低成本、低延迟**和实时的人体实例分割

研究结果

使用事件相机**提升计算成本和运行速度**



真实标签



预测标签

对象分割：低光视频对象分割



研究动机

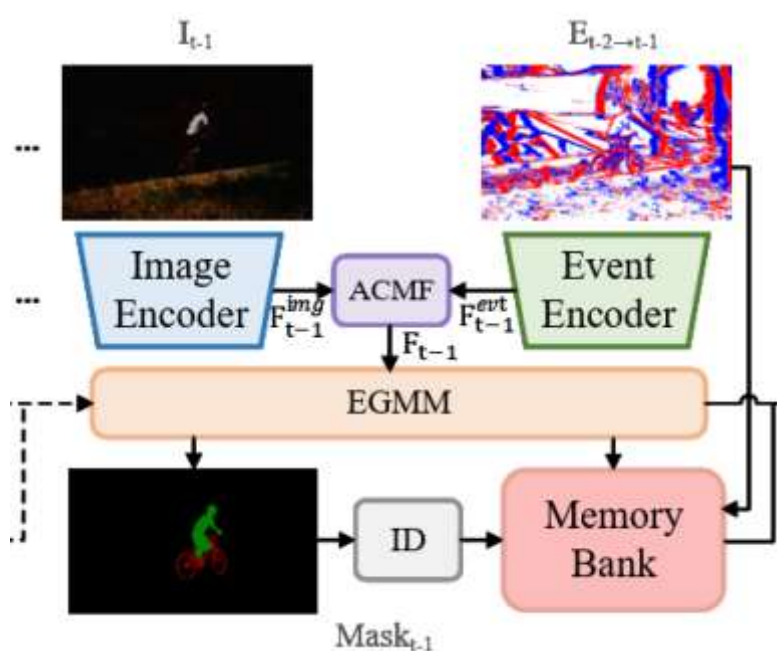
低光下图像质量显著下降，影响性能；事件有高动态范围并能**提供对象边缘和运动数据**

研究方法

自适应跨模态融合 (ACMF)、事件引导的记忆匹配 (EGMM) **自适应融合**帧和事件信息

研究结果

通过融合事件信息实现了**对象分割精度提升**





光流估计：像素级运动轨迹估计

研究动机

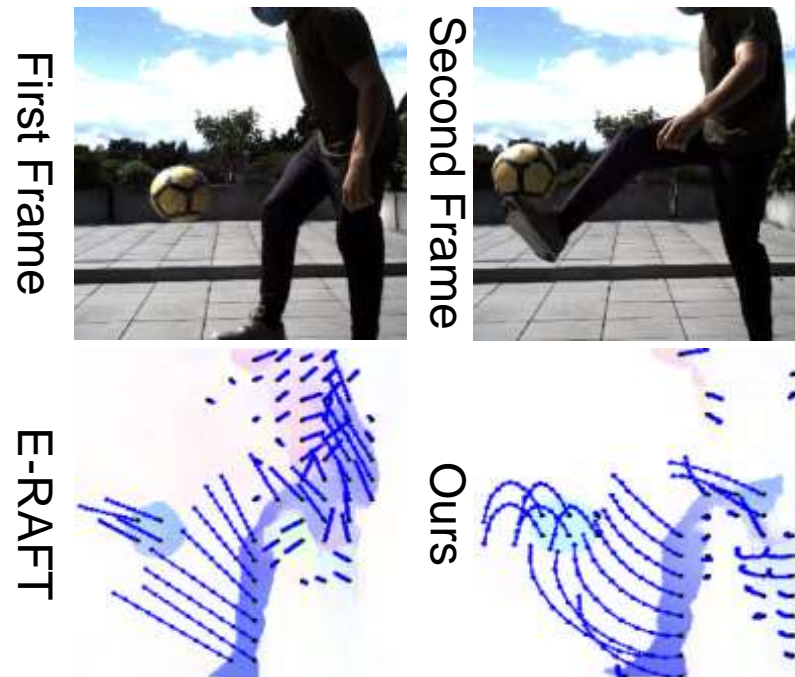
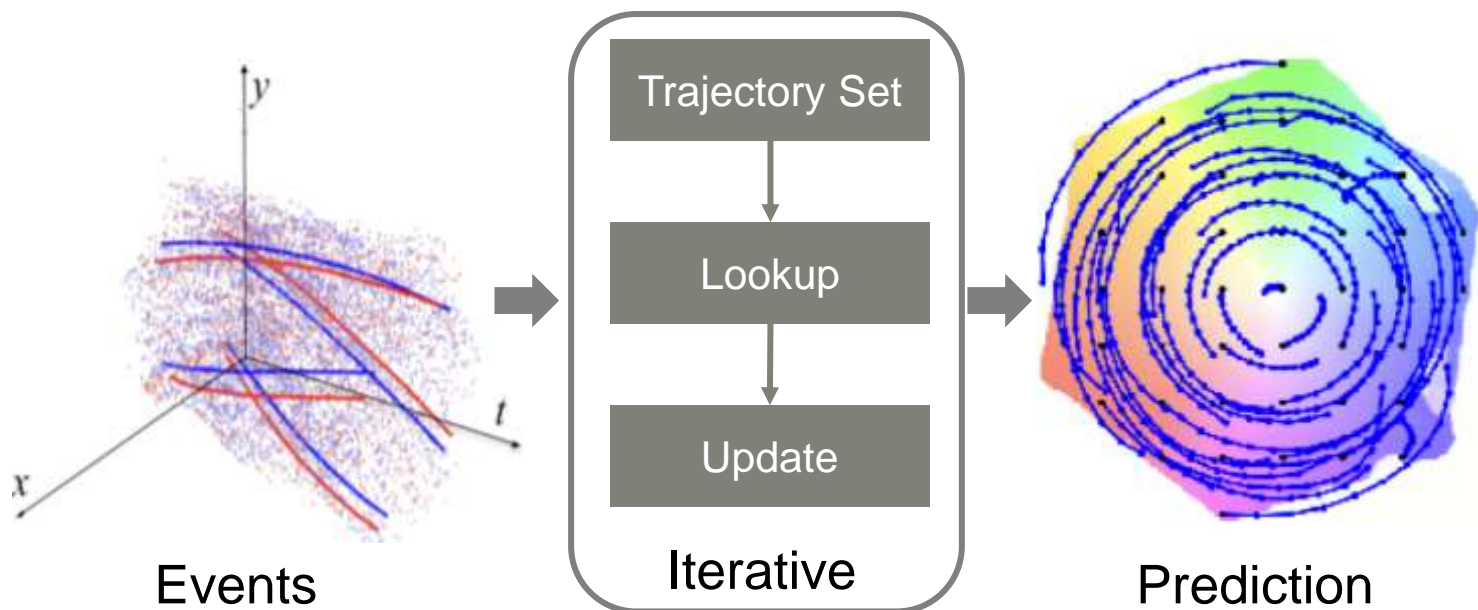
现有光流方法在两帧图像间非曝光时段，**无法恢复像素级别的运动轨迹信息**

研究方法

基于参数化Bézier曲线拟合，迭代更新**预测连续时间内的像素轨迹**

研究结果

发掘高时间分辨率的特性，构建像素级**连续运动轨迹**



光流估计：大规模仿真数据集

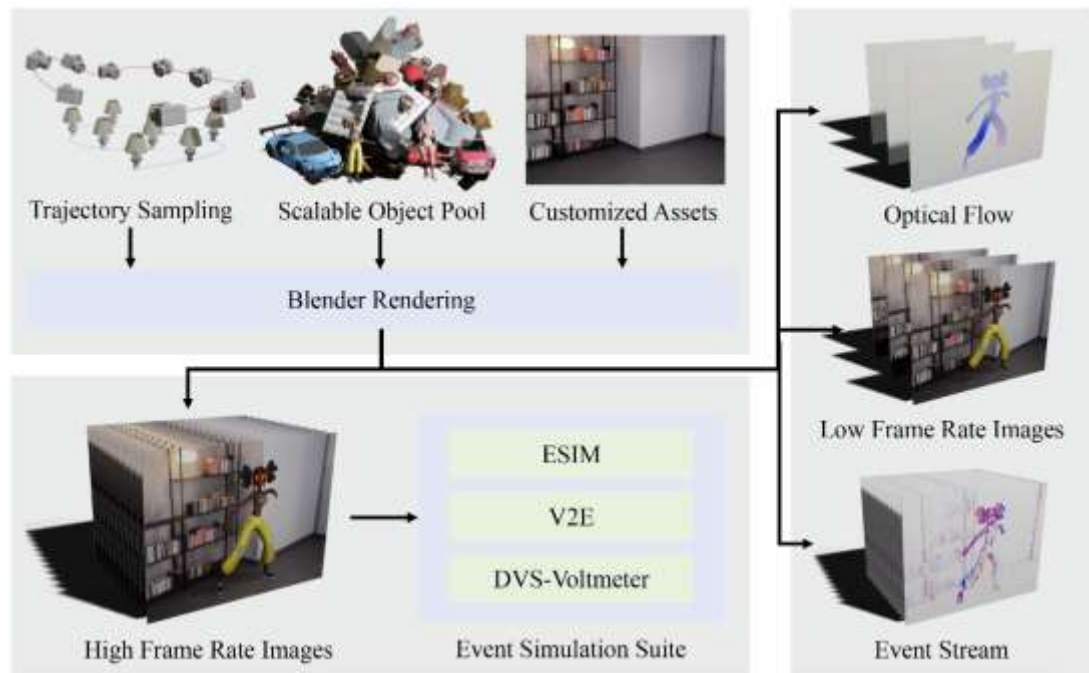


研究动机

现有的“事件—光流”数据集的质量低且数据量不足，导致**光流估计算法泛化性差**

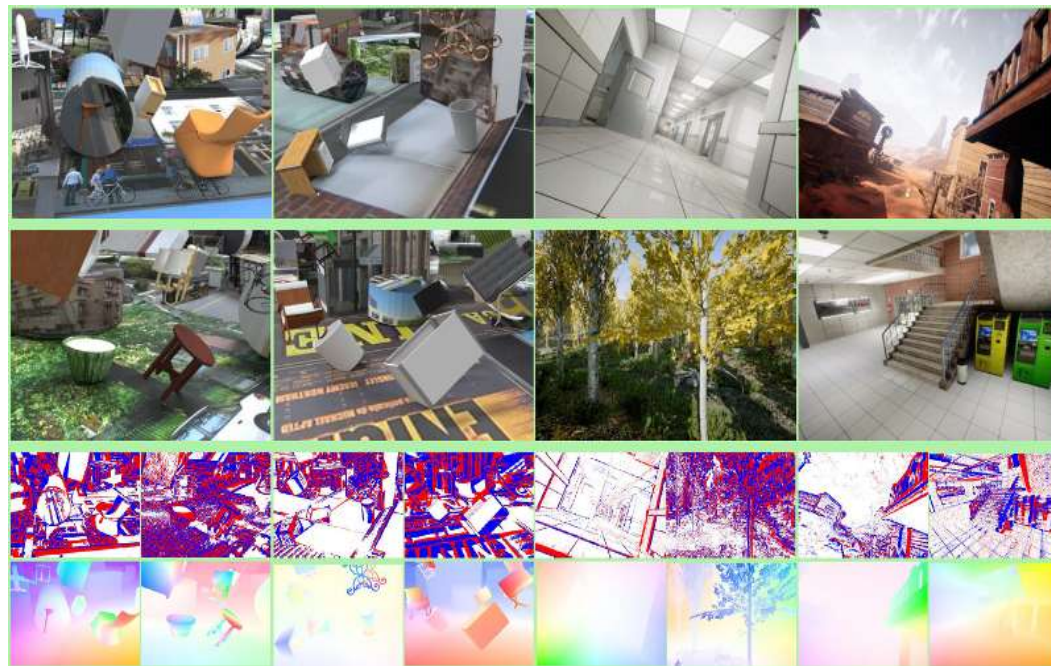
研究方法

基于三维信息渲染高帧率图像生成**高质量的事件流和光流标签**



研究结果

在BlinkFlow数据集上训练后，在公开测试集上平均提升超**40%**



目标跟踪：跨模态目标跟踪



研究动机

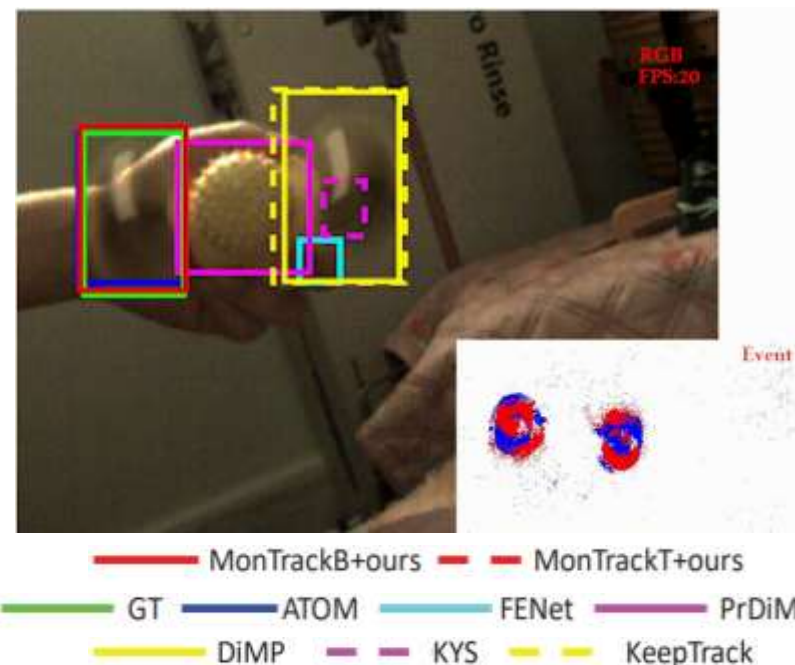
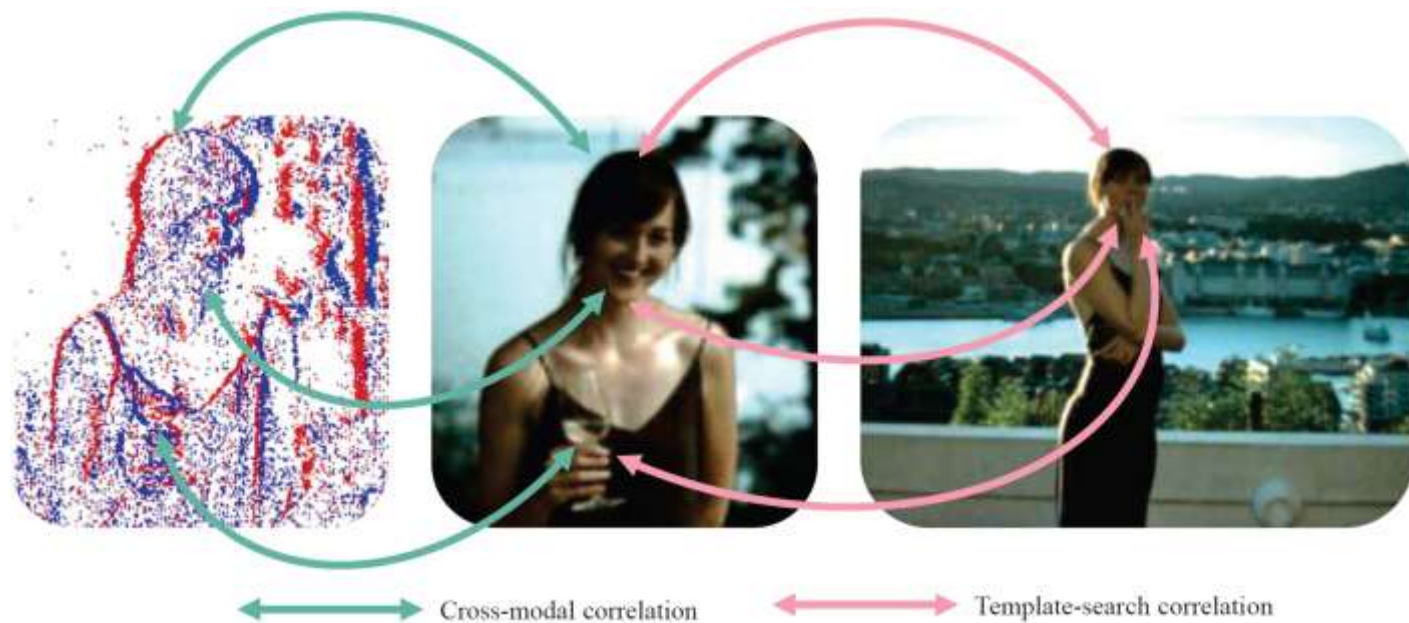
单模态观测具有动态范围（图像）和颜色纹理（事件）的局限性，图像帧率低且存在模糊

研究方法

学习模板和搜索区域的相关性、使用掩码驱动的跨模态交互策略等实现即插即用的增强方法

研究结果

结合图像和事件的优势实现低光高速的跨模态目标跟踪



眼动跟踪：实时眼动注视估计



研究动机

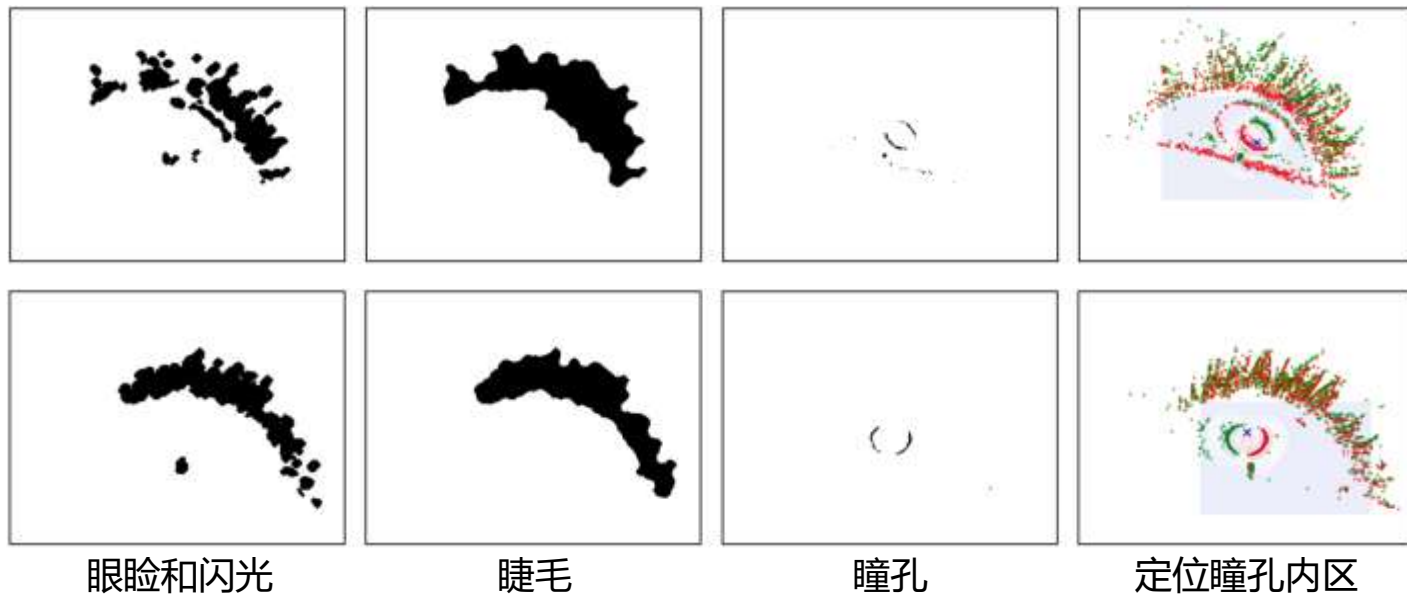
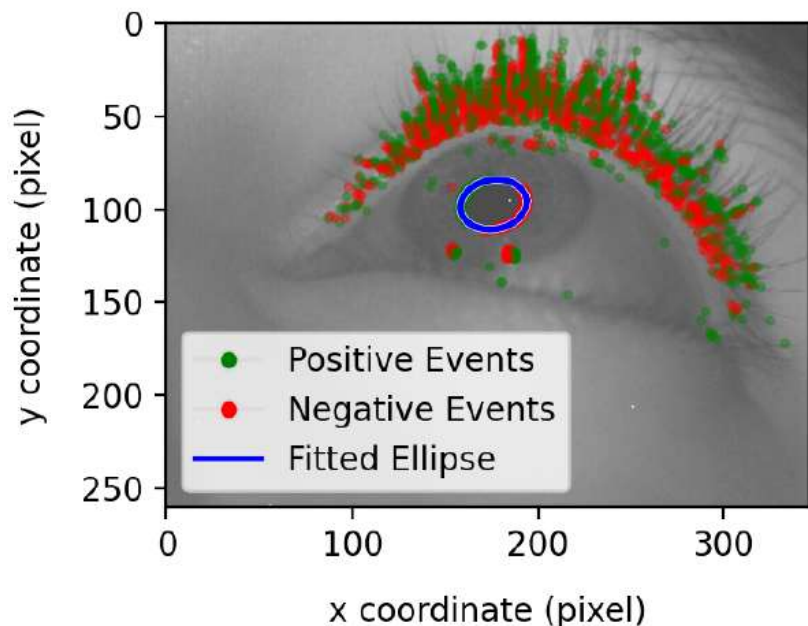
传统相机存在**信息丢失和模糊**，事件能以高感测率、低延迟和高动态范围捕捉快速眼动

研究方法

眼动跟踪（瞳孔特征提取）
注视估计（瞳孔特征映射）

研究结果

基于事件高速低时延高动态的特性实现**高精度** (0.46°) **低延迟** (1.025ms) 近眼注视跟踪



动作识别：多融合表示动作识别与基准数据集



研究动机

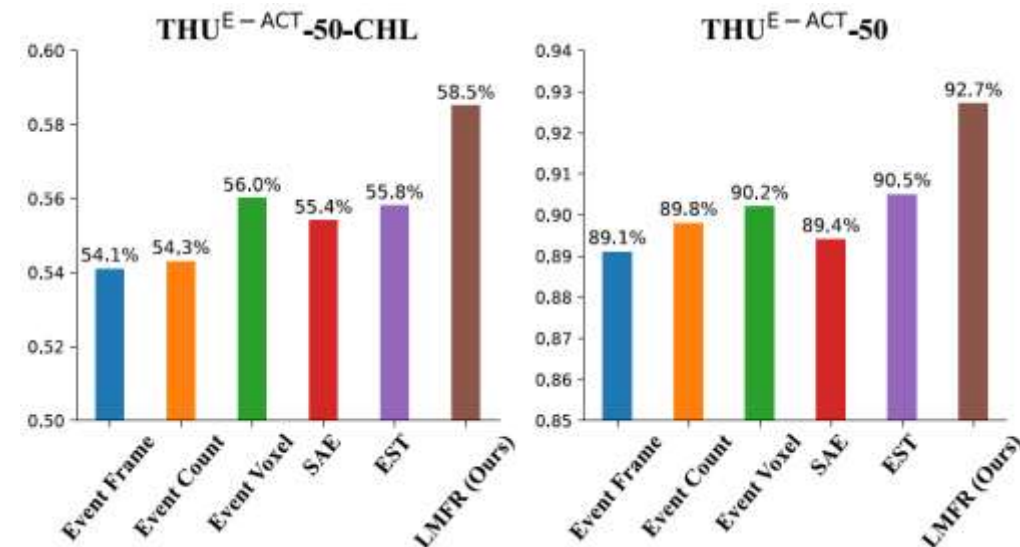
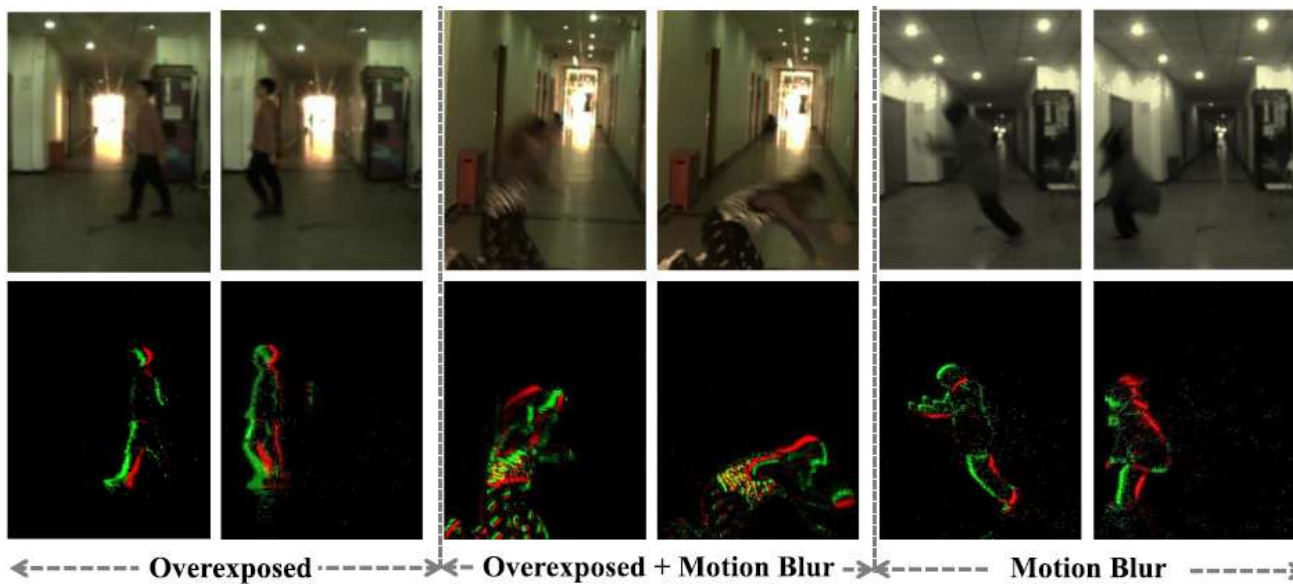
传统相机在效率和功耗方面存在局限性，事件相机**记录像素变化**、不直接暴露视觉细节

研究方法

使用**多融合表示**、事件快慢网络和注意力；提出包含50种动作、12830组图的**数据集**

研究结果

基于困难条件的数据采集和框架设计实现了**14.5%**的性能提升



动作识别：高速强光场景的手势估计



研究动机

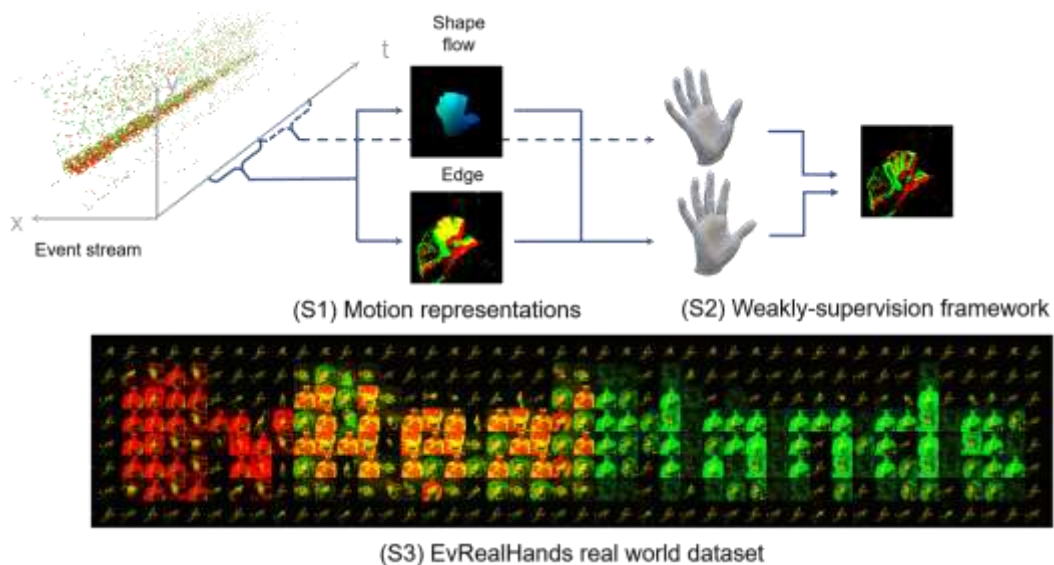
事件相机特性可以应对**困难场景的手势估计**，但逐帧的标注方式无法充分利用其高速特性

研究方法

针对事件数据的特性设计**手势运动表达**方式，提出基于时域离散标注下的**弱监督训练框架**；大规模真实数据集构建

研究结果

在**高速手势变化**和**高动态范围**场景下实现高时间分辨率、准确的手势估计



Fast Motion Scenes

Play speed: 1/7.5 x



EventHands: Rudnev et al., ICCV 2021
MobRecon: Chen et al., CVPR 2022

自然科学：单分子定位显微成像



研究动机

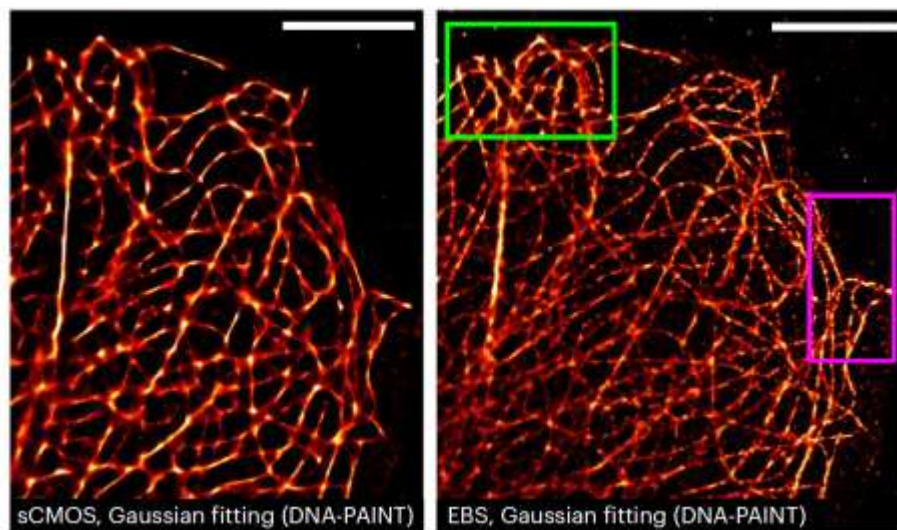
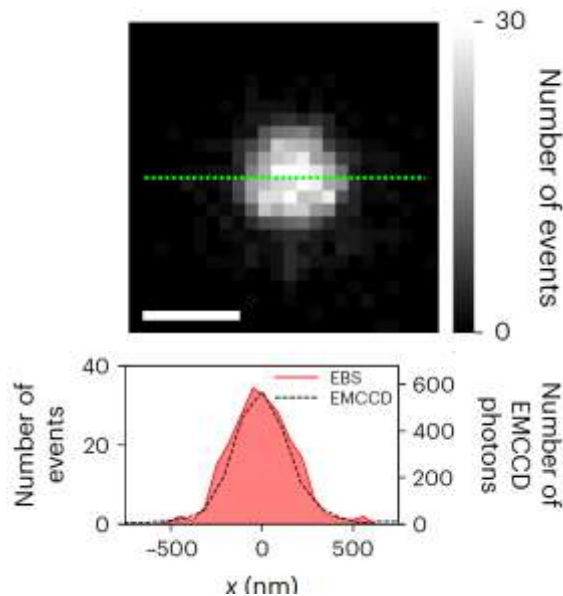
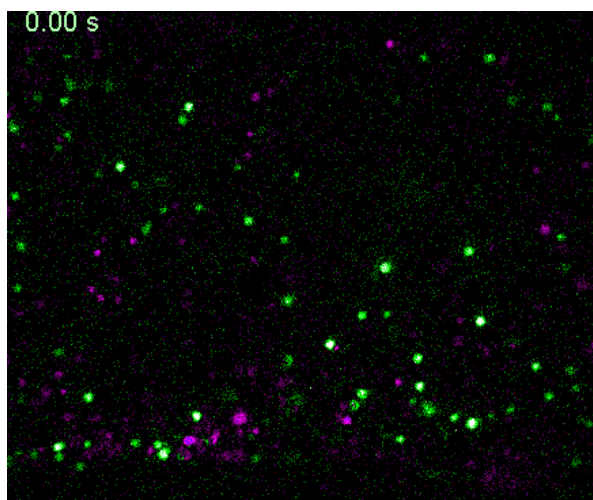
传统图像的单分子成像**很难处理密度较高**的情况，通常需要几万帧来保证定位准确性

研究方法

单分子亮暗闪烁触发事件，基于触发事件数量采用质心或者高斯拟合等方式**精确定位单分子位置**

研究结果

事件单分子成像能**更好处理高密度**单分子情况，**并缩短拍摄时间**



自然科学：动物行为监测



研究动机

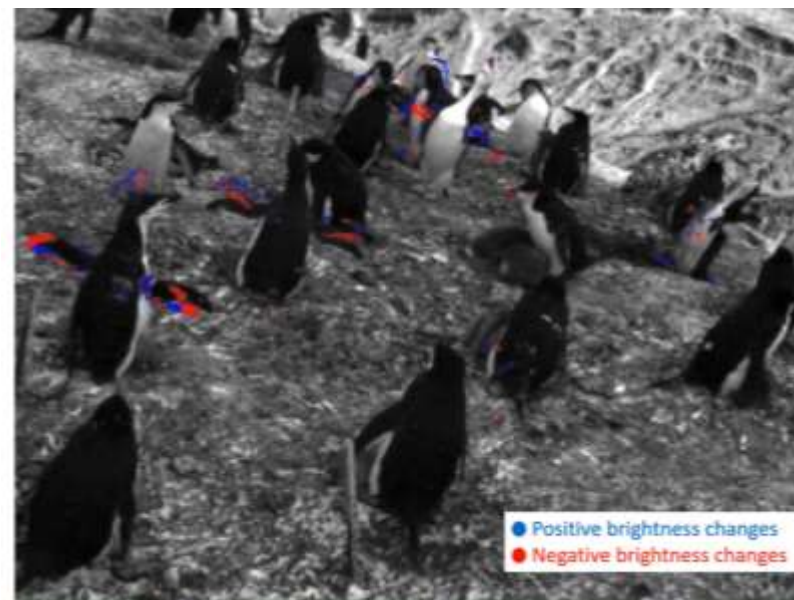
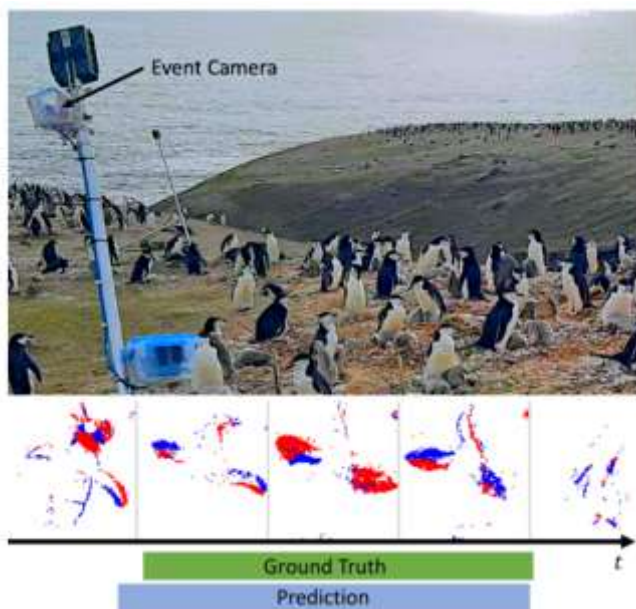
野外环境动物行为监测对**相机功耗**、**数据量**和**极端光照**适应能力有**严格要求**

研究方法

搭建事件相机野外动物监测系统，采集**南极企鹅数据集**，标注特定行为出现时间，设计对应时域运动检测方法

研究结果

事件相机低功耗、数据量少、高动态范围等特性适合**长时间连续的野外动物行为研究**



自然科学：流体运动估计



研究动机

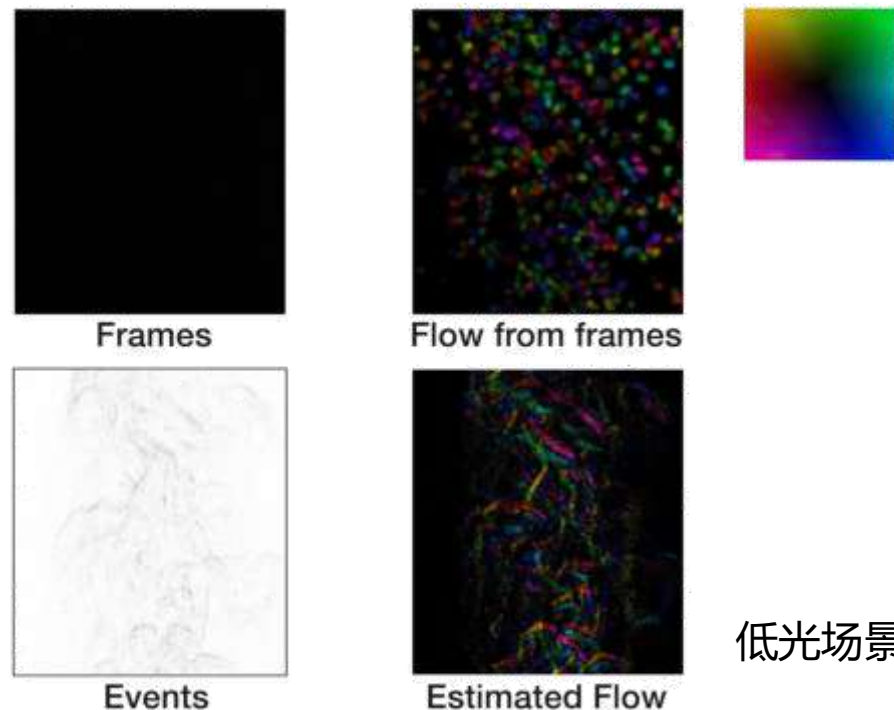
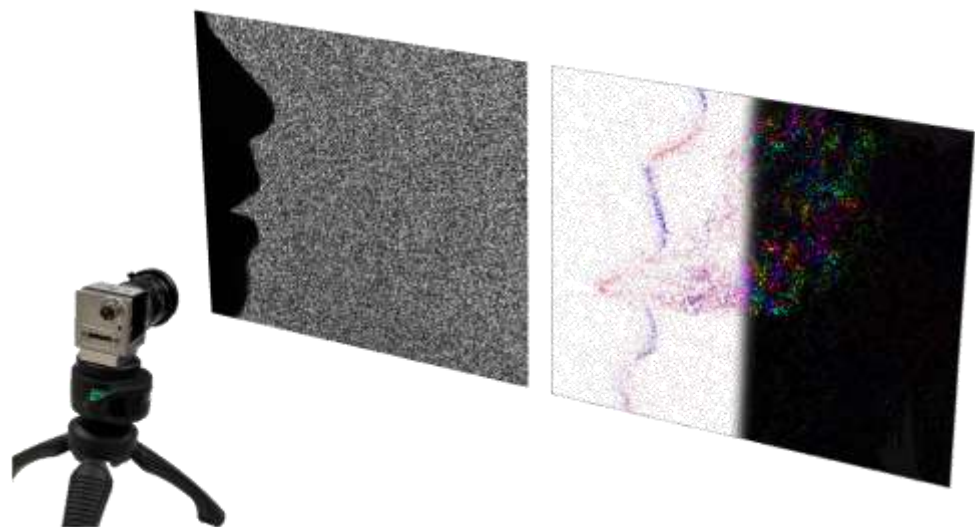
事件相机高时间分辨率特性满足**纹影摄影估计流体运动**中对**高速**、高空间分辨率的需求

研究方法

背景图案和相机之间的**流体运动触发事件**，设计线性事件触发模型下的流体运动估计优化框架

研究结果

基于事件相机实现**高速**、**高动态范围**、**低数据量**的纹影摄像方法



自然科学：太空成像



研究动机

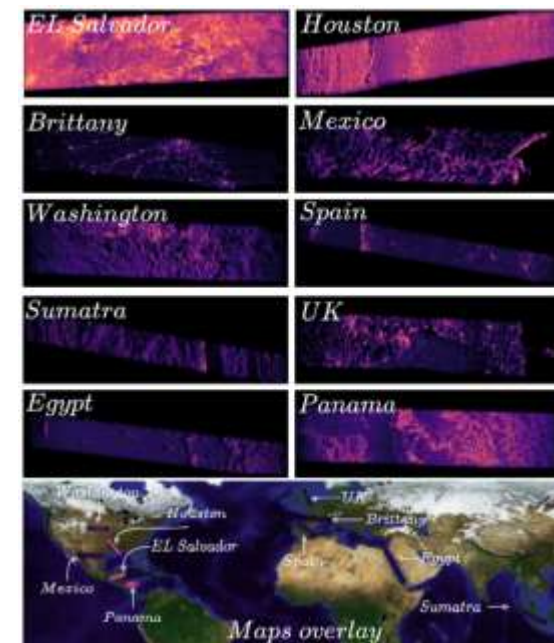
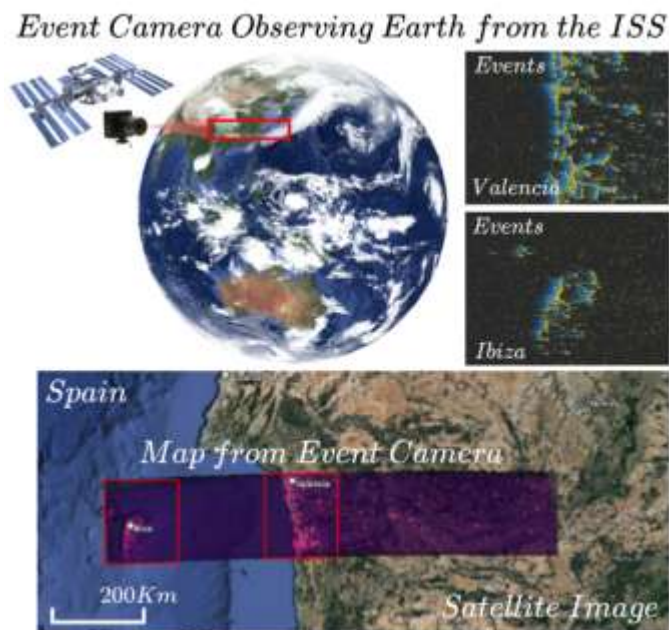
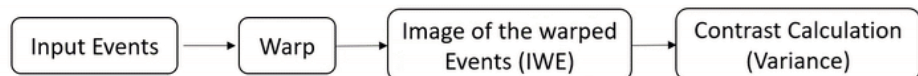
高动态范围事件相机能应对太空成像中的**极端光照条件**

研究方法

改进**对比度最大化方法**，利用运动补偿得到清晰事件图像

研究结果

利用**空间站的事件相机**对地球进行准确测绘和观测，**适应不同光照和天气**



工业应用：机器人

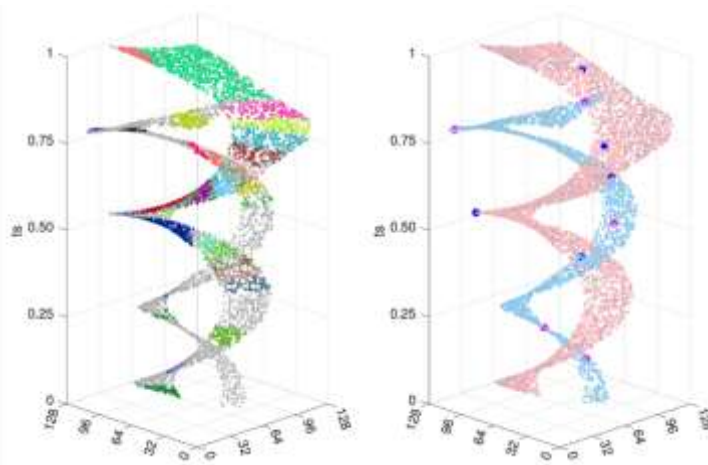


位姿估计



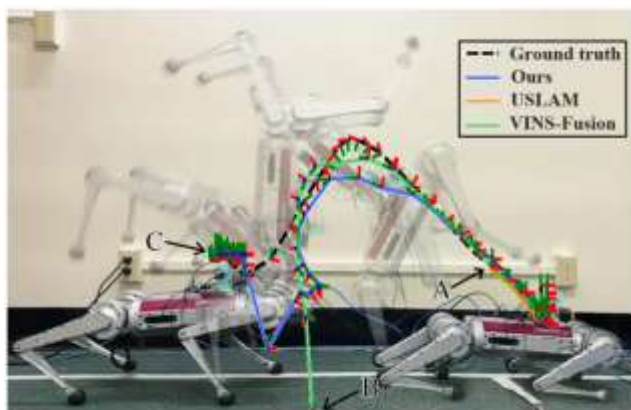
LDE 标记位置估计 [37]

运动估计



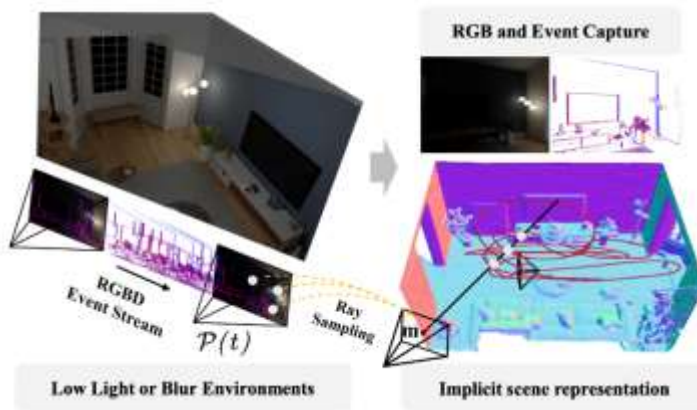
提高线速度估计准确率 [38]

视觉里程计



腿式机器人运动估计 [39]

同步定位与建图



融合RGB-D 相机 [40]

事件相机在高速高动态的极端场景下（例如物体快速运动、逆光等环境）能提供**更为可靠的感知数据，提升机器人对环境的感知能力**

[37] Ebmer et al., Real-Time 6-DoF Pose Estimation by an Event-Based Camera Using Active LED Markers, WACV 2024.

[38] Gao et al., A 5-Point Minimal Solver for Event Camera Relative Motion Estimation, ICCV 2023.

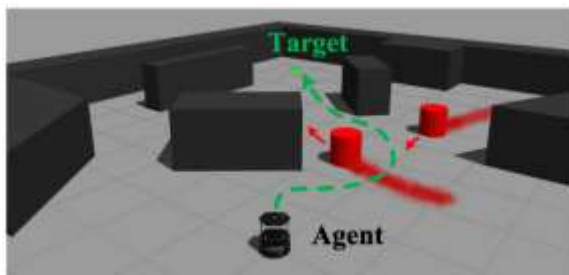
[39] Zhu et al., Event Camera-Based Visual Odometry for Dynamic Motion Tracking of a Legged Robot Using Adaptive Time Surface, IROS 2023.

[40] Qu et al., Implicit Event-RGBD Neural SLAM, CVPR 2024.

工业应用：机器人/自动驾驶

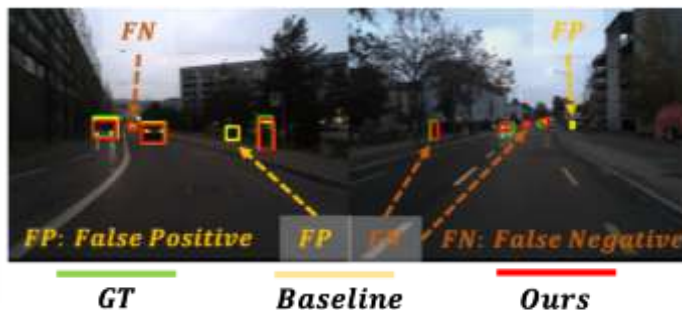


路径规划



激光融合事件信号 [41]

自动驾驶



事件相机辅助快速物体检测 [42]

事件信号流能在较低的数据带宽下提供更为高速的场景信息，**提高机器人/自动驾驶车辆的响应速度和准确度**

物体抓取



事件视觉辅助的四足机器人 [43]

[41] Wang et al., Event-Enhanced Multi-Modal Spiking Neural Network for Dynamic Obstacle Avoidance, MM 2023.

[42] Zhou et al., RGB-Event Fusion for Moving Object Detection in Autonomous Driving, ICRA 2023.

[43] Forrai et al., Event-based Agile Object Catching with a Quadrupedal Robot, IROS 2023.

工业应用：电网频率检测



研究动机

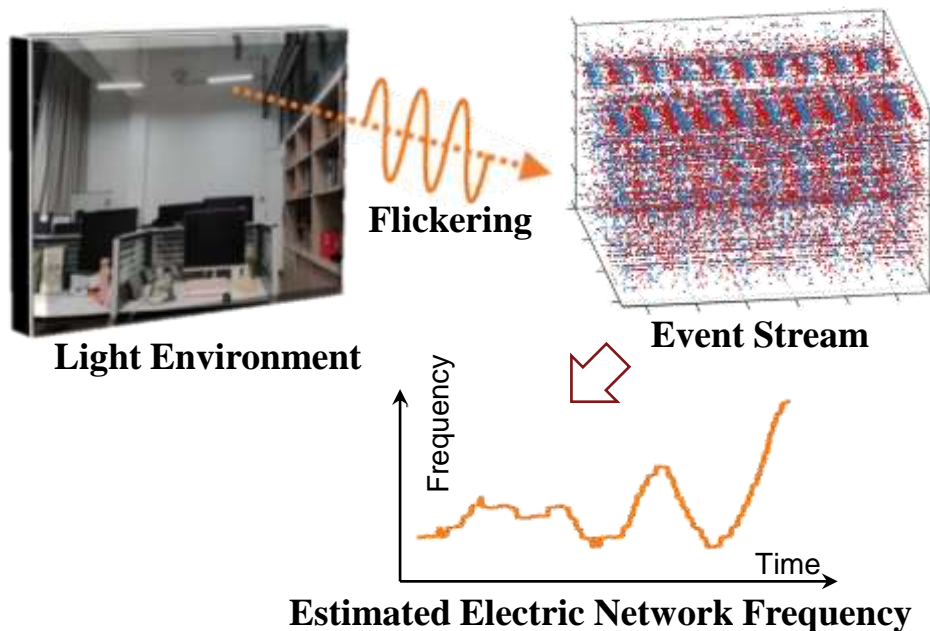
从灯泡等光源的轻微亮度变化可以估计**电网交流电频率**，基于传统视频的方法依赖于成像质量，**运动和极端照明等造成的干扰较大**

研究方法

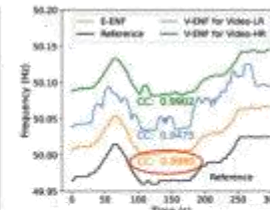
均匀采样时域上事件信号的整体变化极性，进而分析电网频率

研究结果

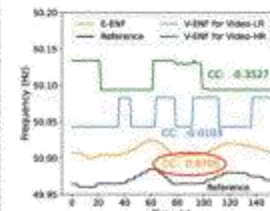
在运动和极端光照场景下实现**高精度**的电网频率估计



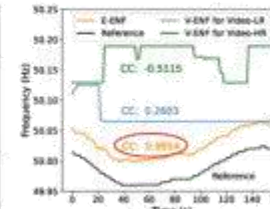
Static Scene



Dynamic Scene



Extreme Lighting



Video

Event

Estimation

工业应用：触觉反馈估计



研究动机

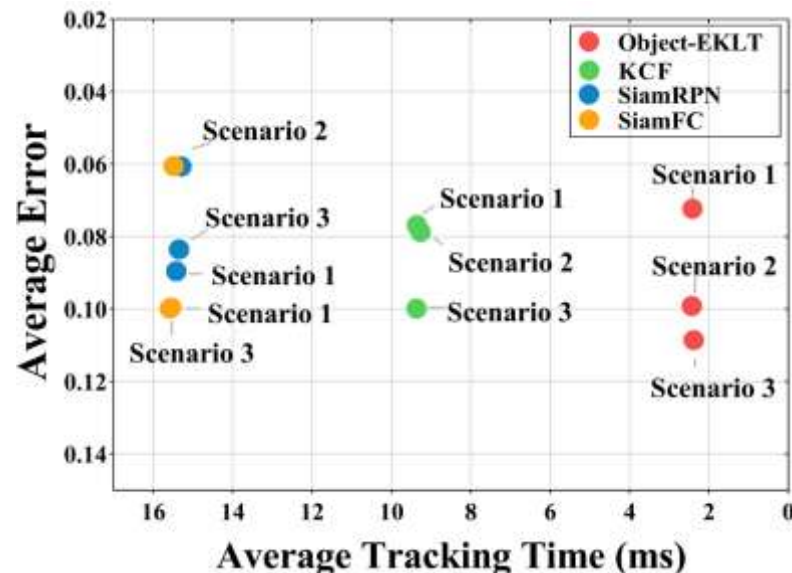
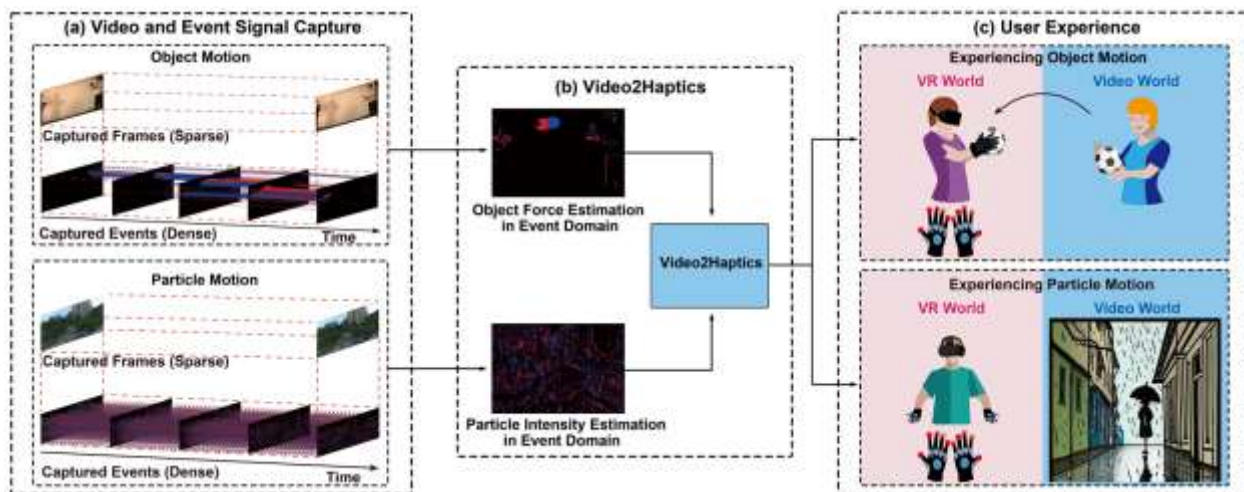
事件相机低延迟和数据量小等特性满足从视觉信号到对应**触觉反馈估计的实时性要求**

研究方法

将场景运动分为物体运动和雨雪等粒子运动两部分，**分别估计对应的力和强度**，并转换手部触觉反馈到设备

研究结果

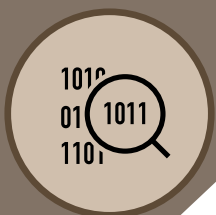
利用事件低延迟和数据量小等特性相比于传统方法**速度提升一到两个数量级**，实现**实时触觉反馈渲染**



进展概括：脉冲相机

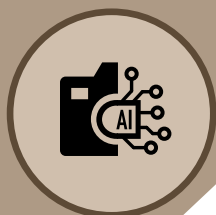


01 信号处理



- 信号重构
- 信号增强
- 信号表达

02 辅助拍照



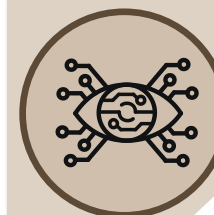
- 极端光照
- 视频插帧
- 模糊去除

03 智能感知



- 物体分割
- 光流估计
- 物体跟踪
- 物体识别

04 下游任务



- 工业应用
- 科学应用



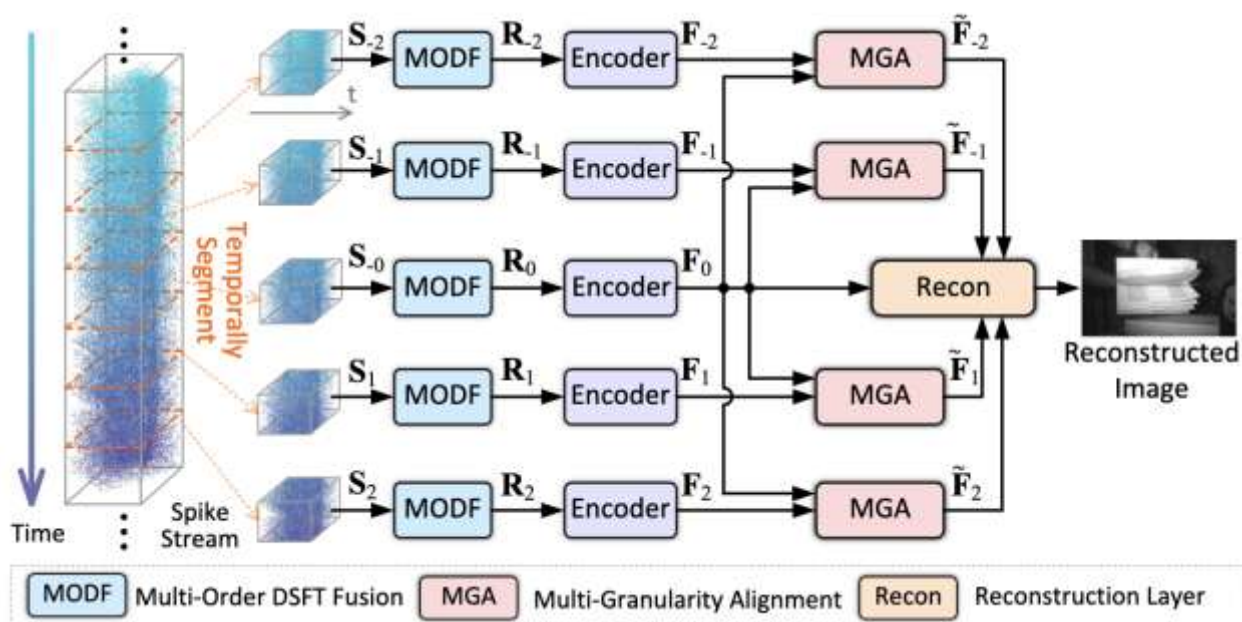
信号重构：多阶脉冲触发时间微分

研究动机

脉冲数据的**潜在噪声**和拍摄场景中的**高速运动**阻碍图像的清晰重构

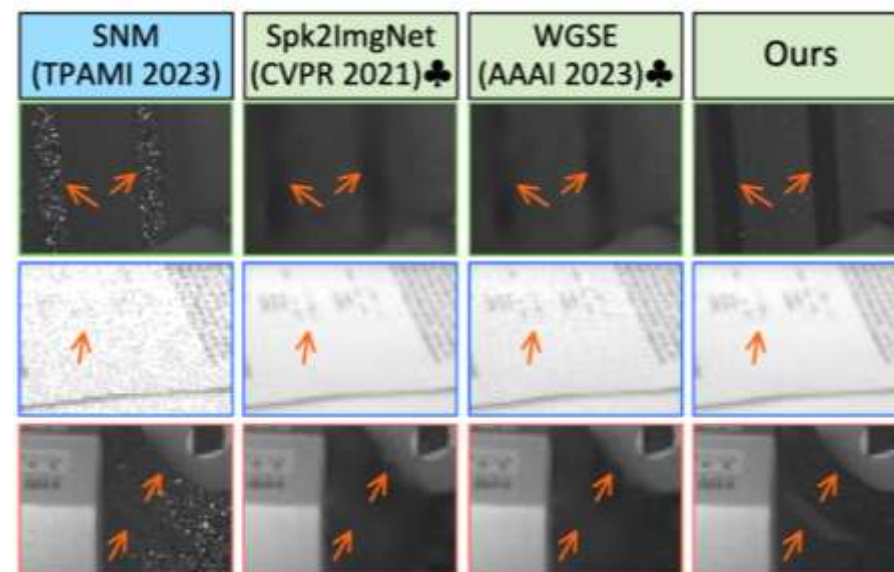
研究方法

多阶脉冲触发时间微分 (DSFT) **融合机制**减少噪声干扰，利用长时信息做**多粒度空间对齐**



研究结果

提出脉冲触发时间微分处理脉冲波动、**提升重构质量**



■ Training-free ■ Data-driven ♣ Retrained ↗ Highlight

信号重构：图像重构和光流估计联合自监督



研究动机

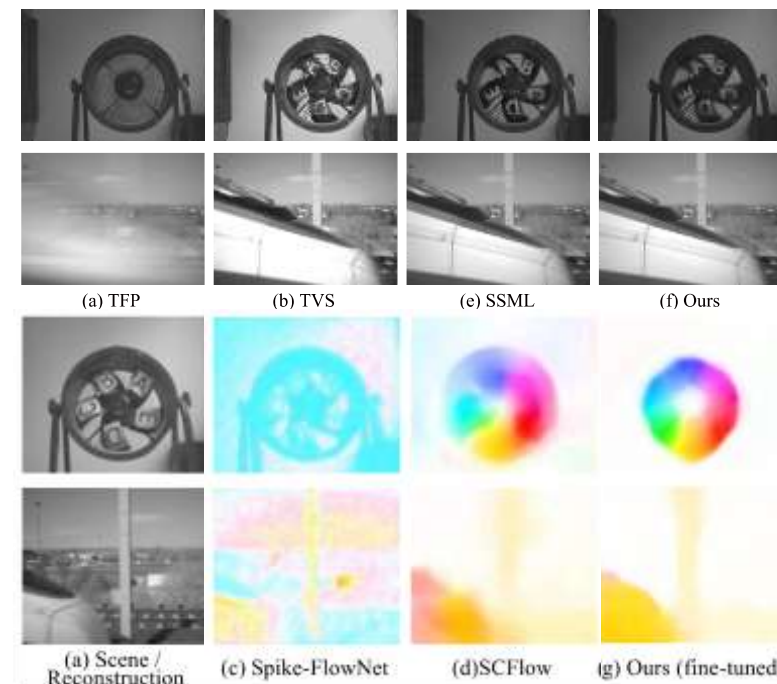
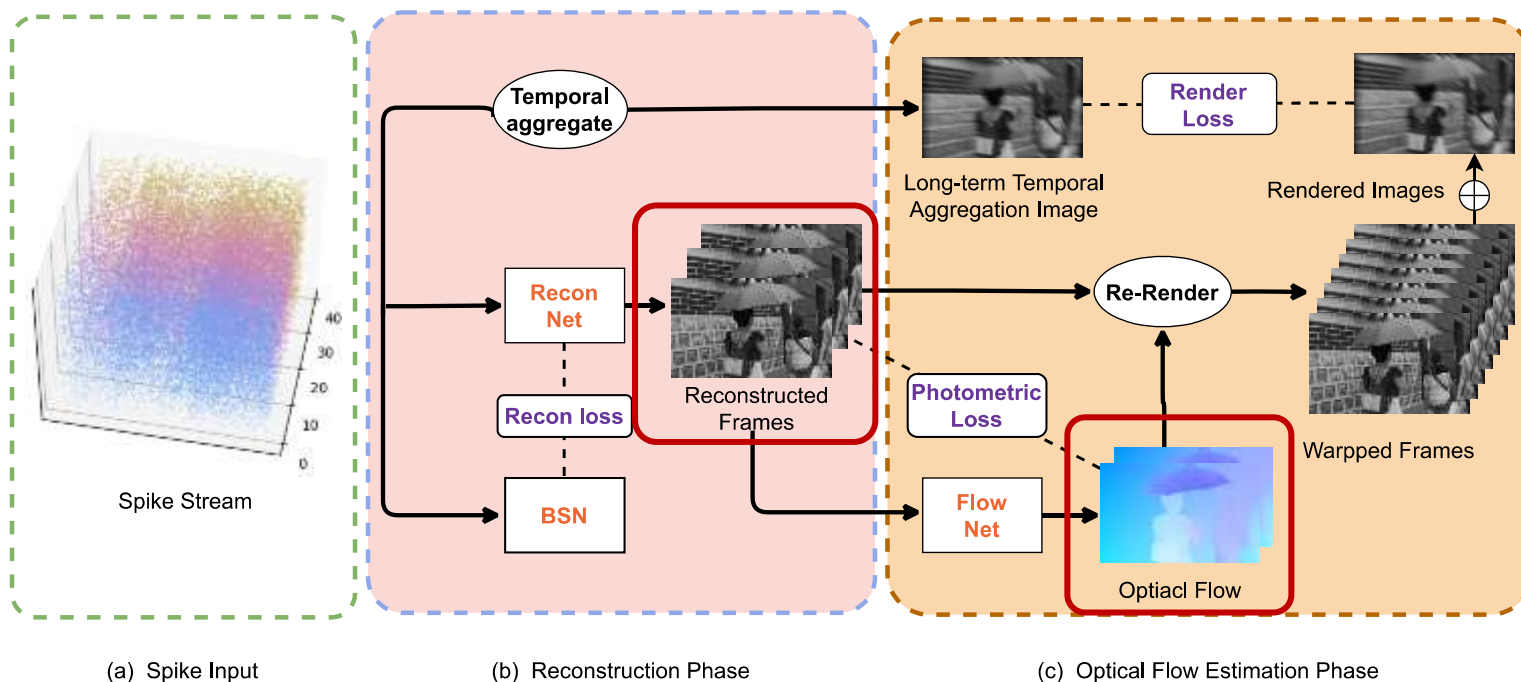
基于**监督学习**的重构算法**依赖有标注的合成数据集**，渲染开销大且真实场景泛化性差

研究方法

联合图像重构和光流估计任务进行**自监督学习**，利用对齐的重构图像构造额外监督

研究结果

填补“合成—真实”数据鸿沟，提升**真实场景效果**



信号增强：拜耳阵列脉冲流超分辨率



研究动机

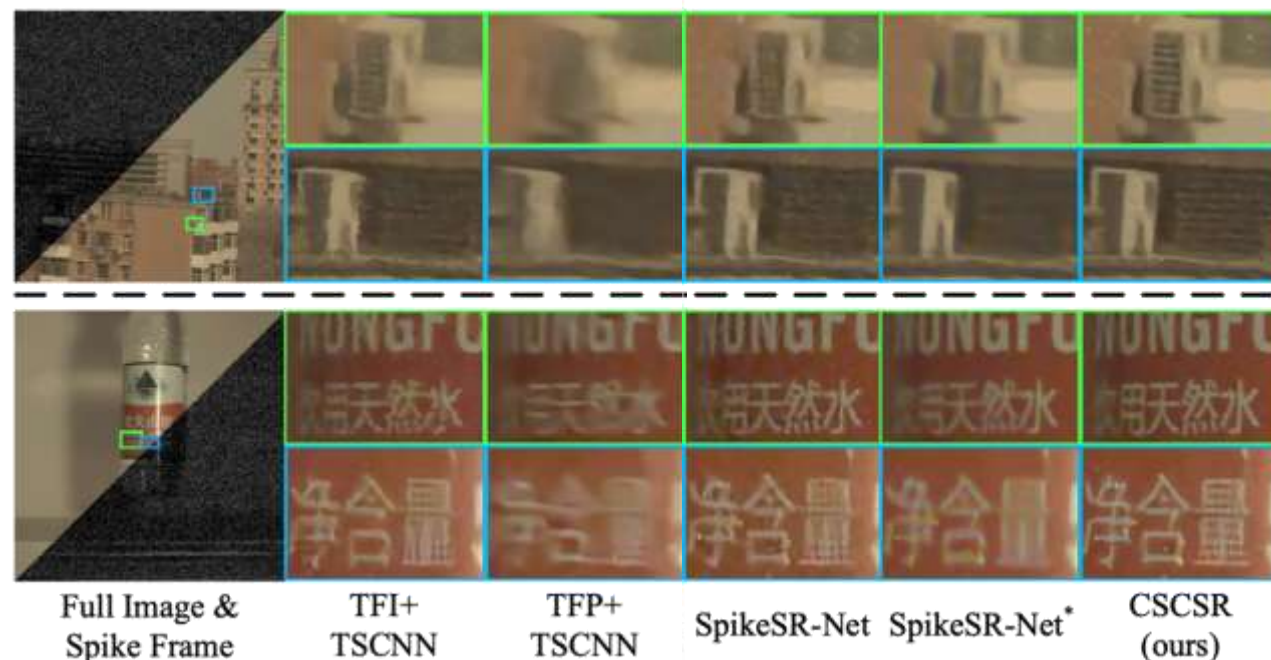
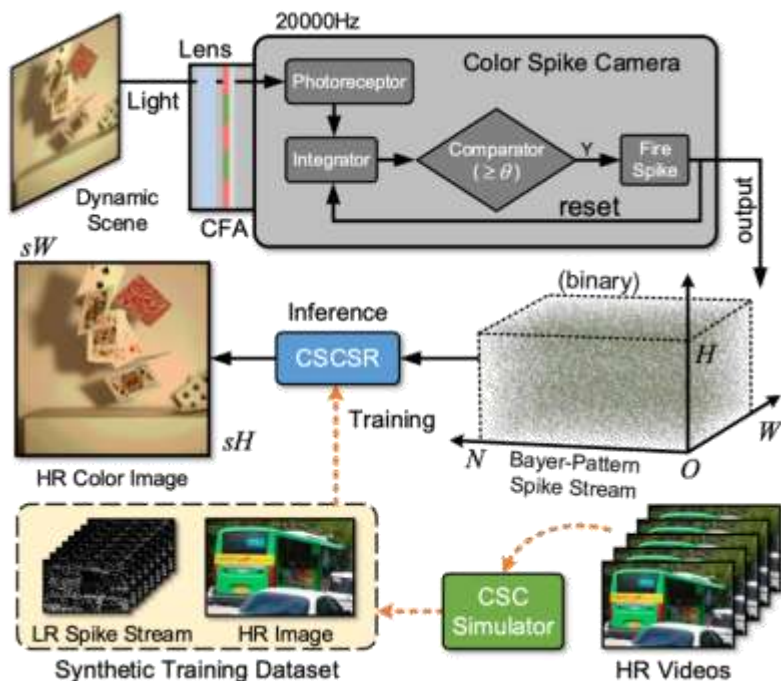
色彩滤波阵列使脉冲相机可以捕获颜色信息，却**损失了一定空间分辨率**

研究方法

利用**高速脉冲流运动**信息恢复**亚像素**信息，特征增强规避光流误差，多通道融合获彩色成像

研究结果

从拜耳阵列脉冲流获得**高分辨率的彩色成像结果**



信号表达：滚动混合比特脉冲



研究动机

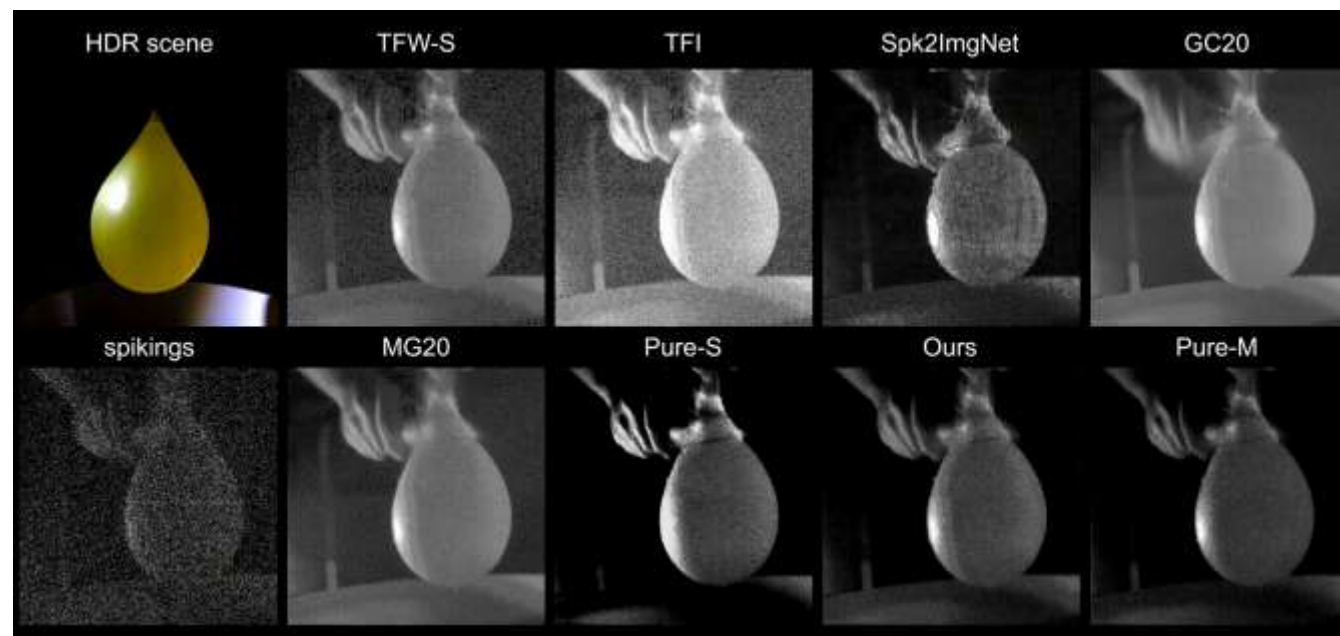
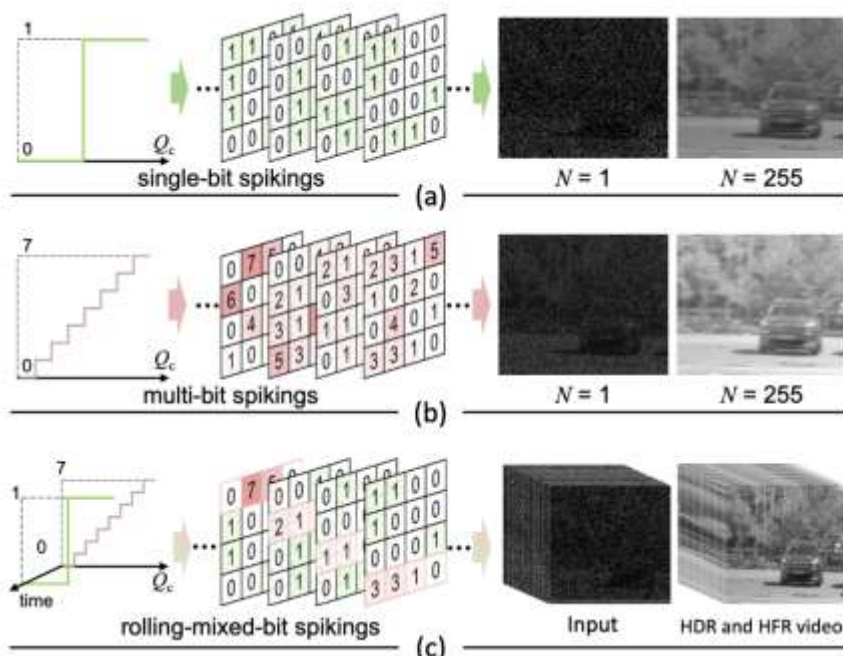
单比特脉冲流刷新率高但动态范围低，**多比特脉冲流**动态范围高但刷新率低

研究方法

提出**滚动混合比特脉冲流**，并通过跨比特、跨时域的注意力机制进行视频重建

研究结果

仅用**2%额外数据量**实现高动态范围、高帧率视频重建



信号压缩：端到端学习的脉冲压缩框架



研究动机

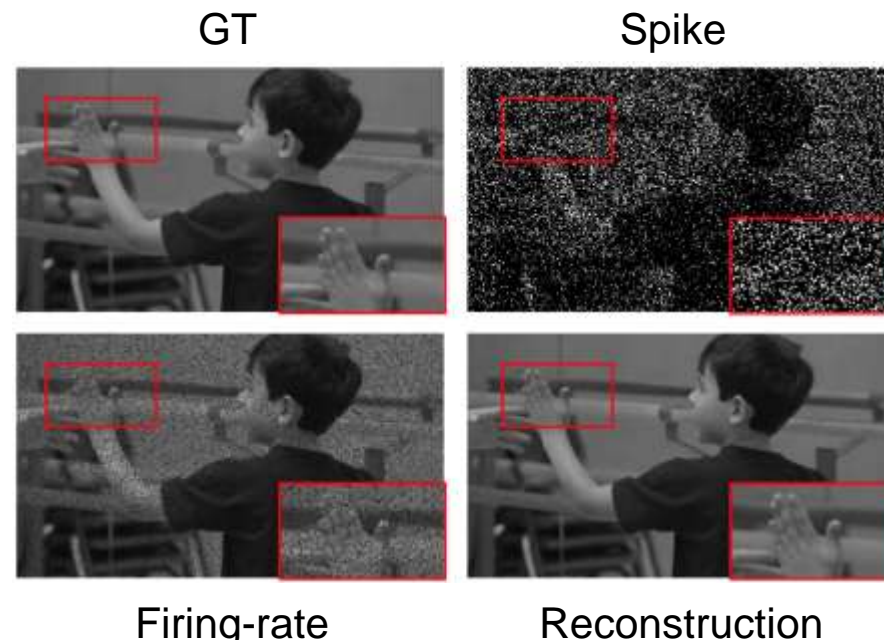
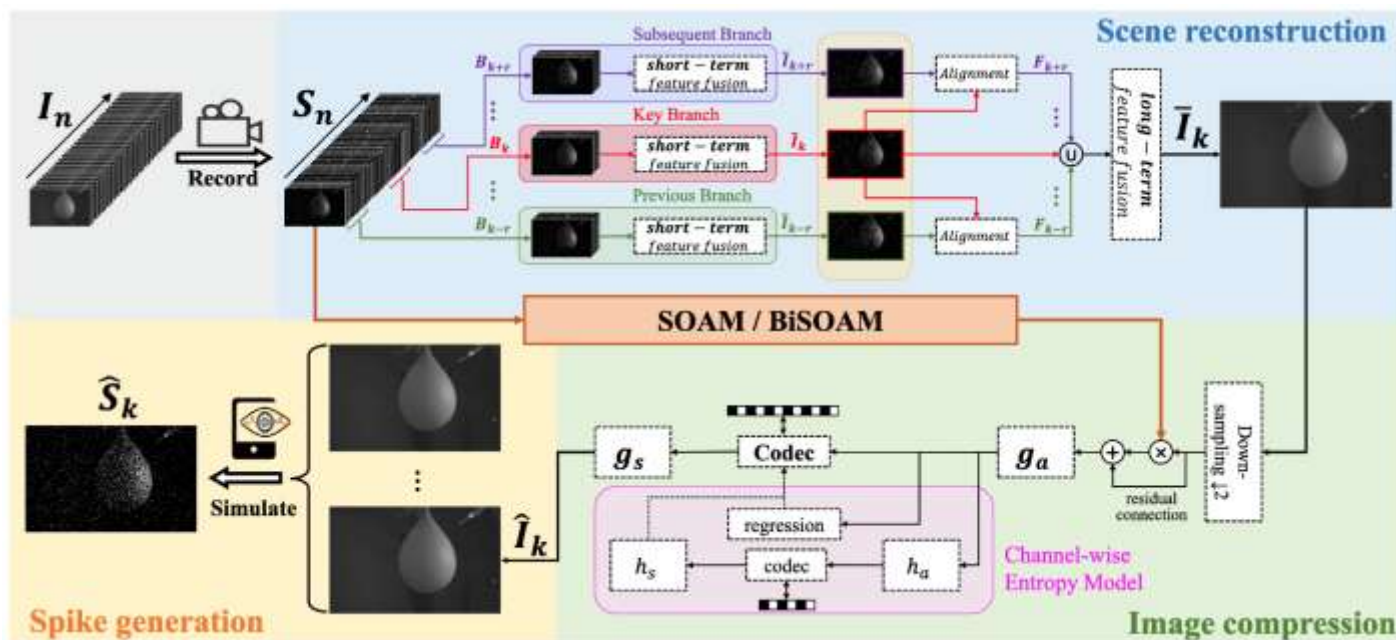
脉冲流数据量大，存在**存储、传输困难**，其高冗余度展现了较大压缩潜力

研究方法

基于学习的端到端脉冲数据压缩框架，引入双向脉冲注意力机制实现对**运动区域的精细处理**

研究结果

不同比特率下**超越传统编码器**和基于学习的对比编码器



极端光照：脉冲流辅助彩色高动态范围成像



研究动机

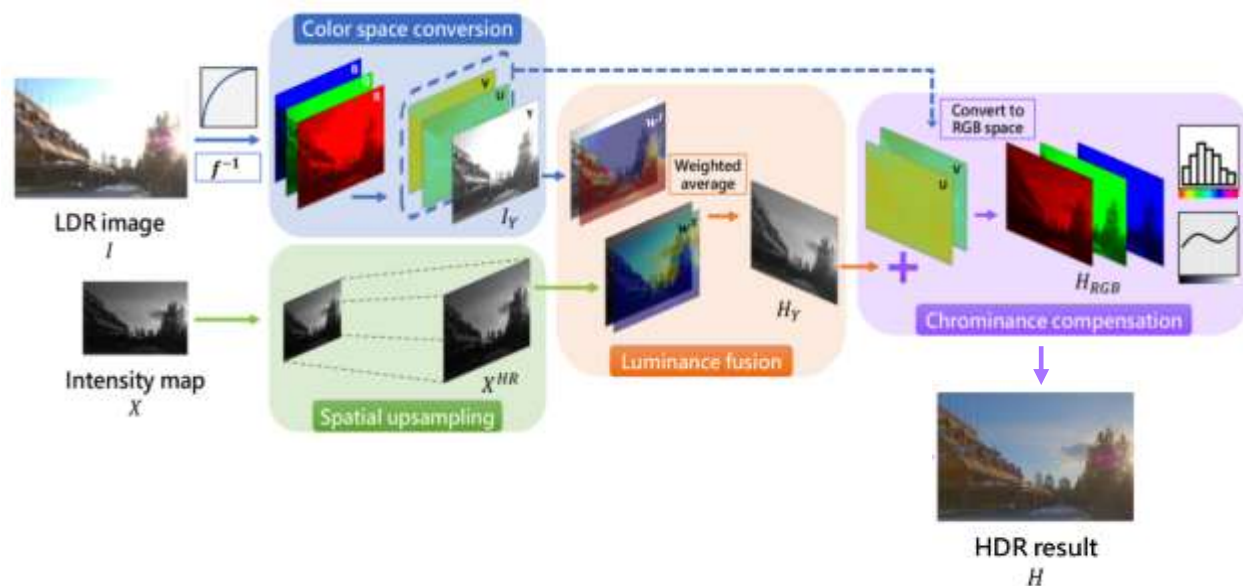
低速场景下用高动态脉冲信号引导低动态彩色视频帧信号提升动态范围

研究方法

充分考虑双模数据的颜色空间转换、上采样、亮度特征融合和颜色补充

研究结果

从脉冲信号重建高动态范围亮度图，对低动态范围视频帧进行彩色补偿



LDR图像

脉冲重构的亮度图

重建结果

极端光照：脉冲流辅助高帧率高动态范围视频重建



研究动机

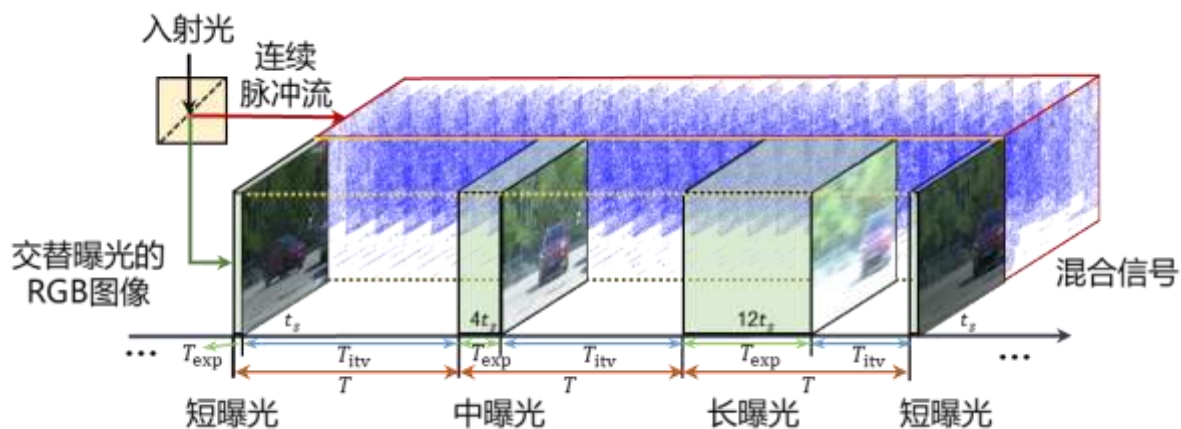
传统帧视频面对高速场景在长曝光下出现运动模糊，短曝光下噪声严重，二者很难兼顾；高速场景下用高帧率、高动态**脉冲流**引导低帧率**交替曝光彩色**视频完成中间帧插值

研究方法

从脉冲信号估计出**运动信息**，辅助交替曝光LDR视频帧的**融合与插值**

研究结果

嵌入高动态高时间分辨率脉冲信息，实现**1000帧/秒的HDR视频重建**



图像+脉冲



重建结果

视频插帧：脉冲流辅助高速运动场景视频插帧



研究动机

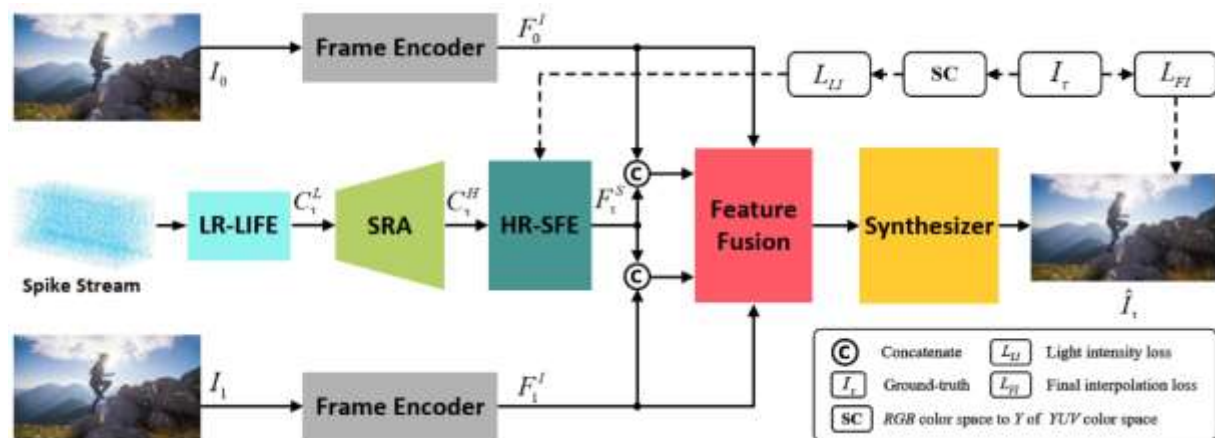
传统相机难以清晰捕捉运动物体细节，脉冲相机能够提供**高速运动和纹理信息**

研究方法

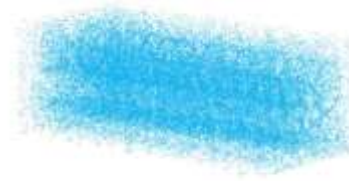
低分辨率光强特征提取，空间分辨率对齐，**高分辨率**结构特征提取和融合

研究结果

视频插帧质量对比纯视频帧方法 PSNR提升**5dB**以上



First input frame



Spike stream input



SVFI interpolated



Second input frame

模糊去除：脉冲流辅助高速场景运动去模糊



研究动机

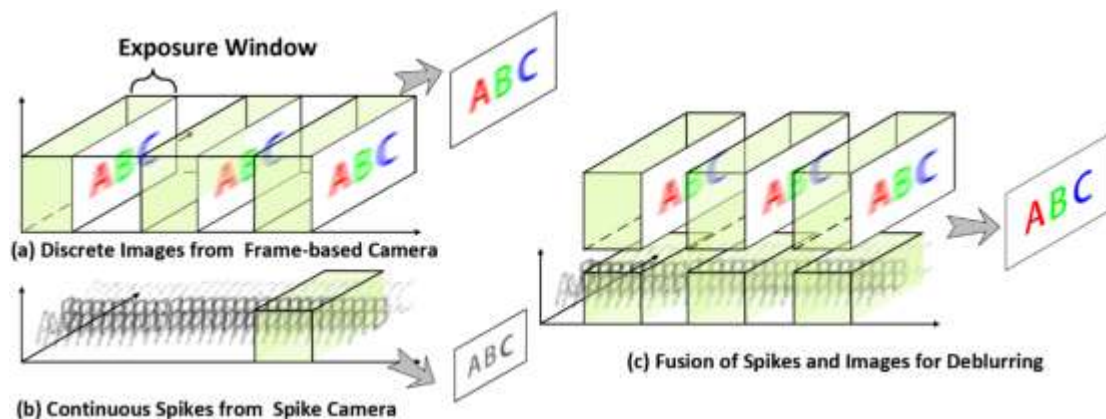
高时间分辨率的脉冲数据能够额外地提供丰富且互补的**边缘纹理和像素运动信息**

研究方法

可学习掩模、内容感知的运动幅度**注意力**，合成大规模“清晰帧—模糊帧—脉冲流”**数据集**

研究结果

高时间分辨率脉冲流信号有助于**补偿运动模糊失真**



语义分割：基于脉冲流进行细粒度场景感知



研究动机

高时间分辨率脉冲流可以实时捕获场景的**纹理细节**，能用于细粒度场景感知

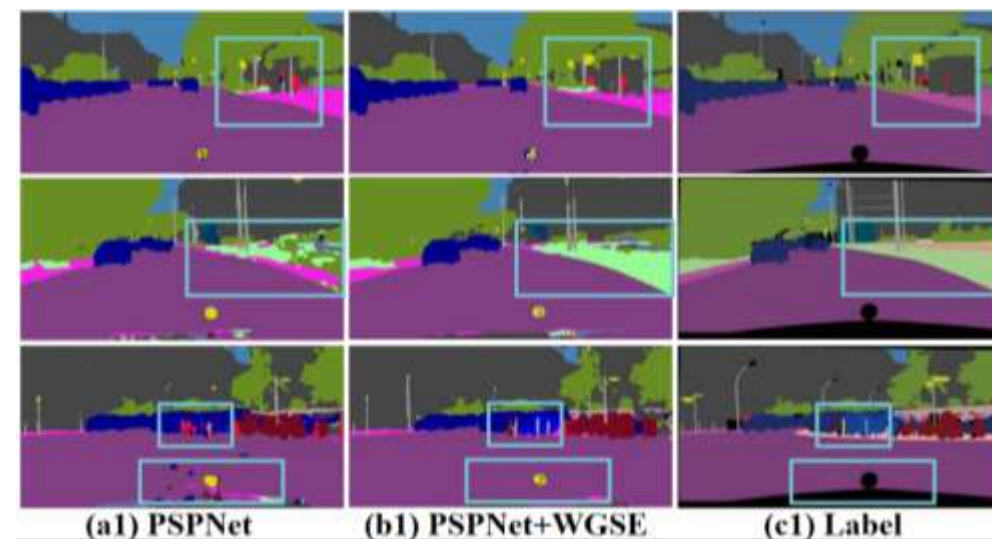
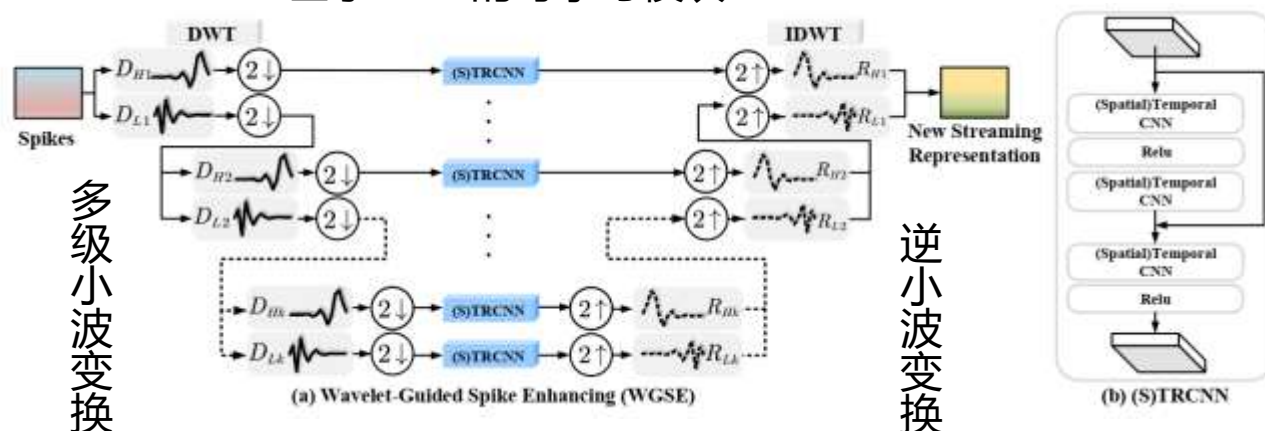
研究方法

提出基于**离散小波变换**的时序脉冲增强表示，可以级联现有语义分割算法进行场景感知

研究结果

脉冲信号能够直接服务于**细粒度的场景感知和理解**

基于CNN的可学习模块



光流估计：像素级连续运动轨迹估计



研究动机

脉冲相机具有捕获高速运动的优越能力，**估计像素运动轨迹**对下游任务极其关键

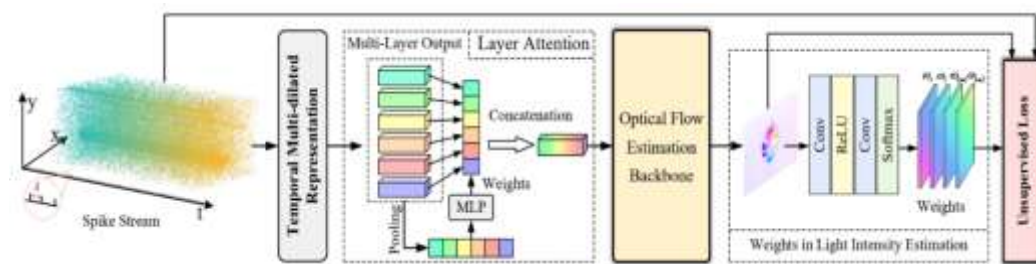
研究方法

有监督、无监督学习策略与架构设计
分层时空表征，时间多重扩张表征

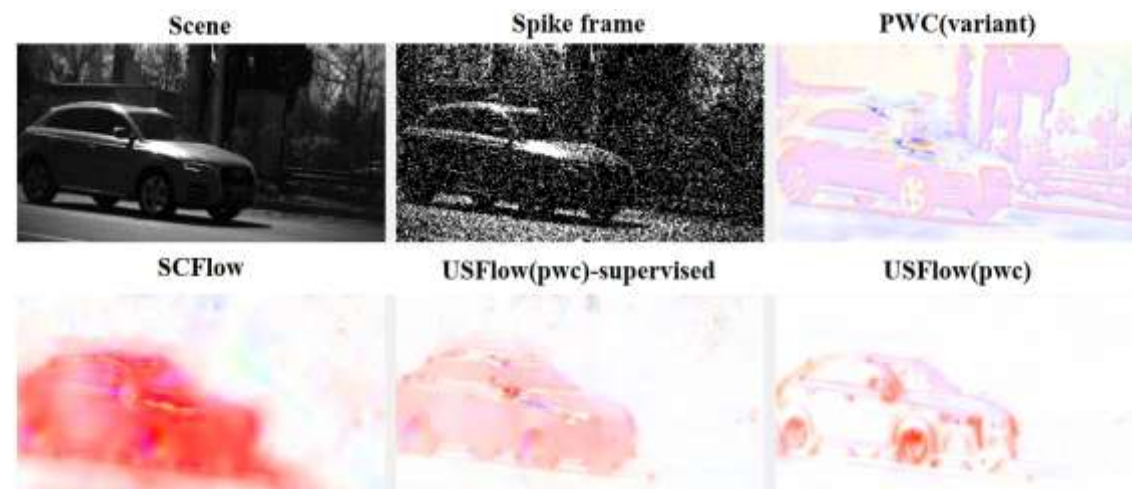
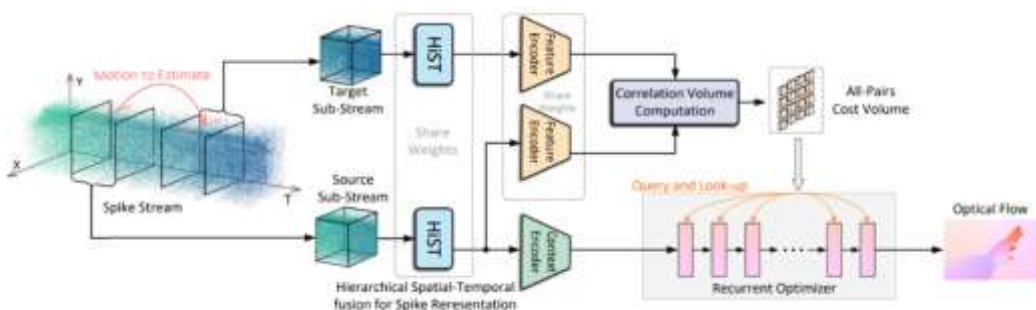
研究结果

设计高效的**脉冲时空表示模型**，
实现连续稠密光流的精确估计

有监督
[56]
架构



无监督
[57]
架构



[56] Zhao et al., Optical Flow for Spike Camera with Hierarchical Spatial-Temporal Spike Fusion, AAAI 2024.

[57] Xia et al., Unsupervised Optical Flow Estimation with Dynamic Timing Representation for Spike Camera, NeurIPS 2023.

目标检测：脉冲相机对显著目标的快速检测



研究动机

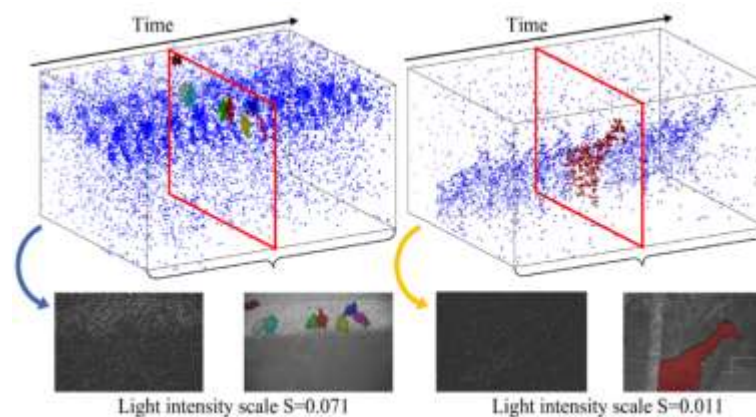
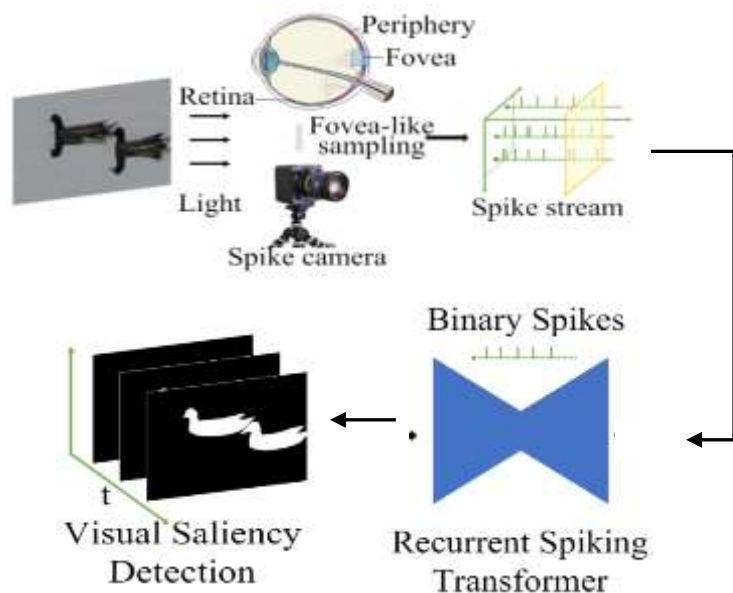
连续高速脉冲流有望实现**快速、高效、低功耗**的显著目标检测

研究方法

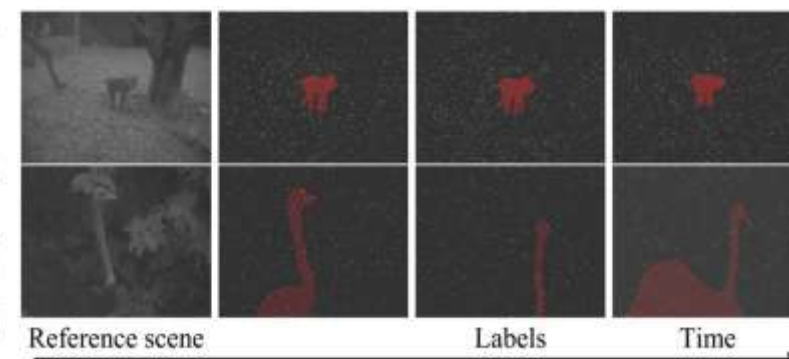
循环脉冲Transformer框架，循环特征聚合；提出脉冲视觉显著数据集，包含脉冲流和各对象的掩码

研究结果

使用高时间分辨率脉冲流，实现**显著目标的快速检测**



不同光强下的视觉显著性



不同时刻下的视觉显著性

目标跟踪：利用脉冲的时空信息捕捉内在运动模式



研究动机

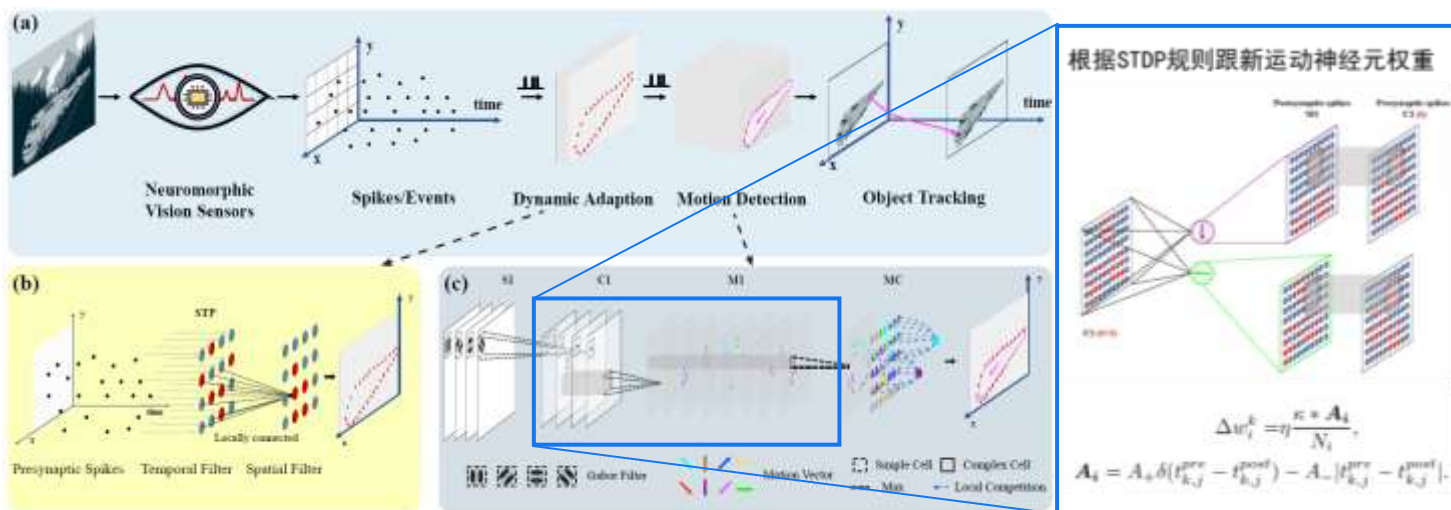
高速脉冲流不经过图像重构，也可以有效反应场景中高速运动目标的信息

研究方法

短期可塑性的动态自适应模块过滤冗余信号，
时间可塑性的运动估计模块提取运动模式

研究结果

多层脉冲神经网络模型实现
运动目标的鲁棒检测和跟踪



Tracking Multiple Rotating Moving Digits
(Spiking cameras)

滤波层、检测层、跟踪层

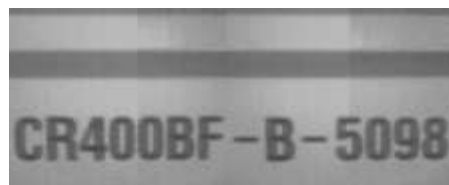
工业应用：在高铁监测和工业测量上的应用案例



高铁监测

对高速行驶高铁进行状态监测

高铁会车场景（慢放）



高铁会车
相对速度700 km/h
清晰观测车身编号

工业测量

对碎石溅射物进行跟踪测量

坠落冲击碎石溅射视频



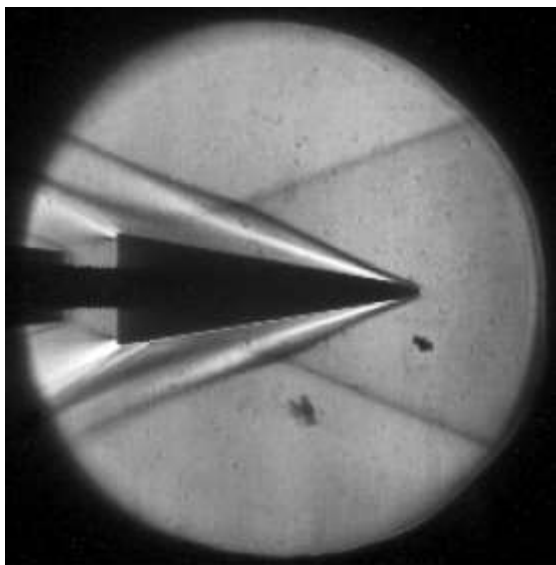
碎石实时跟踪

监测识别定位高速运动的粒子轨迹，
跟踪粒子空间定位精度为 $\pm 0.2\text{mm}$ ，
测量的粒子速度在0 ~ 2.0m/s之间，测量误差为10%

科学应用：脉冲重构超高速影像用于科研观测

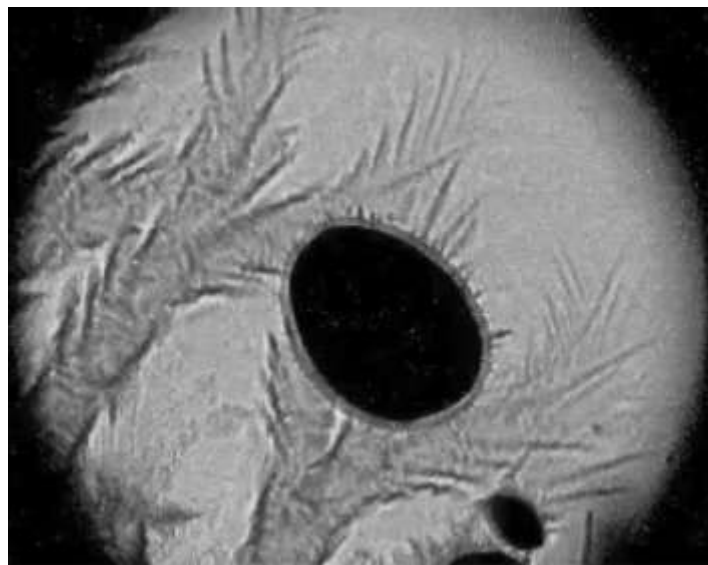


高超声速流动



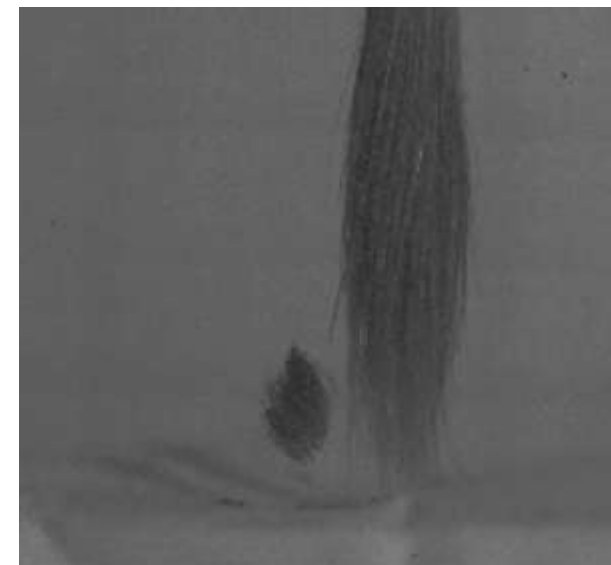
可清晰地观测到6马赫高超声速流动结构，对开展复杂模型的空气动力学试验研究观测有着重要的意义

液态金属相变



温度降至-60度时
液态金属及周围水的相变过程
选取大概50-60ms的片段

蛇莓跳甲



蛇莓跳甲平均起跳速度约0.66 m/s
平均加速度约213m/s²
选取大概30ms的片段



神经形态相机视觉计算研究展望

事件相机

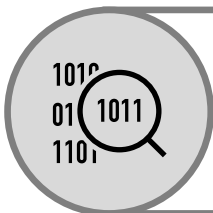
低光场景噪声消除
高速特征提取
高质量仿真器
延迟拖尾消除

多相机配准协调
跨模态知识迁移
高实时三维成像
高速对焦与拍照

稀疏事件特征建模
困难场景识别
多传感器融合
高速高效感知

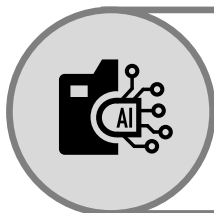
低延迟智能体控制
低功耗长时监测
极端光照观测
高速科学成像

数据真实



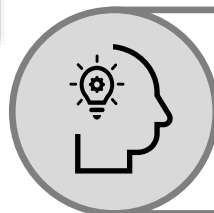
信号处理

同步精准



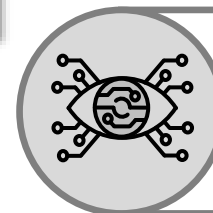
辅助拍照

任务通用



智能感知

场景拓展



下游任务

脉冲相机

压缩编码
自监督表示
高质量仿真器
脉冲神经网络

三维重建
光流估计
多光谱感知
真实数据驱动

脉冲基础模型
复杂场景识别
多传感器融合
无监督域迁移

自动驾驶
医学成像
智能制造
卫星观测



参考文献



- [1] Zhang et al., Formulating Event-Based Image Reconstruction as a Linear Inverse Problem with Deep Regularization Using Optical Flow, TPAMI 2023.
- [2] Han et al., High-Fidelity Event-Radiance Recovery via Transient Event Frequency, CVPR 2023.
- [3] Guo and Delbrück, Low Cost and Latency Event Camera Background Activity Denoising, TPAMI 2023.
- [4] Ding et al., E-MLB: Multilevel Benchmark for Event-Based Camera Denoising, TMM 2023.
- [5] Gu et al., Reliable Event Generation with Invertible Conditional Normalizing Flow, TPAMI 2024.
- [6] Zhang et al., V2CE: Video to Continuous Events Simulator, ICRA 2024.
- [7] Peng et al., GET: Group Event Transformer for Event-Based Vision, ICCV 2023.
- [8] Baldwin et al., Time-Ordered Recent Event (TORE) Volumes for Event Cameras, TPAMI 2023.
- [9] Hamaguchi et al., Hierarchical Neural Memory Network for Low Latency Event Processing, CVPR 2023.
- [10] Yang et al., Event Camera Data Pre-training, ICCV 2023.
- [11] Klenk et al., Masked Event Modeling: Self-Supervised Pretraining for Event Cameras, WACV 2024.
- [12] Sabater et al., Event Transformer+. A Multi-Purpose Solution for Efficient Event Data Processing, TPAMI 2023.
- [13] Sironi et al., HATS: Histograms of Averaged Time Surfaces for Robust Event-Based Object Classification, CVPR 2018.



参考文献



- [14] Yang et al., Learning Event Guided High Dynamic Range Video Reconstruction, CVPR 2023.
- [15] Liang et al., Towards Robust Event-Guided Low-Light Image Enhancement: A Large-Scale Real-World Event-Image Dataset and Novel Approach, CVPR 2024.
- [16] Kim et al., Event-Based Video Frame Interpolation with Cross-Modal Asymmetric Bidirectional Motion Fields, CVPR 2023.
- [17] Erbach et al., EvShutter: Transforming Events for Unconstrained Rolling Shutter Correction, CVPR 2023.
- [18] Zhang et al., Generalizing Event-Based Motion Deblurring in Real-World Scenarios, ICCV 2023.
- [19] Lin et al., Fast Event-Based Double Integral for Real-Time Robotics, ICRA 2023.
- [20] Weng et al., Event-Based Blurry Frame Interpolation Under Blind Exposure, CVPR 2023.
- [21] Cho et al., Non-Coaxial Event-Guided Motion Deblurring with Spatial Alignment, ICCV 2023.
- [22] Lou et al., All-in-Focus Imaging from Event Focal Stack, CVPR 2023.
- [23] Qi et al., E2NeRF: Event Enhanced Neural Radiance Fields from Blurry Images, ICCV 2023.
- [24] Muglikar et al., Event-Based Shape from Polarization, CVPR 2023.



参考文献



- [25] Annamalai et al., EventMASK: A Frame-Free Rapid Human Instance Segmentation with Event Camera through Constrained Mask Propagation, RAL 2024.
- [26] Li et al., Event-Assisted Low-Light Video Object Segmentation, CVPR 2024.
- [27] Gehrig et al., Dense Continuous-Time Optical Flow from Event Cameras, TPAMI 2024.
- [28] Li et al., BlinkFlow: A Dataset to Push the Limits of Event-Based Optical Flow Estimation, IROS 2023.
- [29] Zhu et al., Cross-Modal Orthogonal High-Rank Augmentation for RGB-Event Transformer-Trackers, ICCV 2023.
- [30] Li et al., E-Gaze: Gaze Estimation with Event Camera, TPAMI 2024.
- [31] Gao et al., Action Recognition and Benchmark Using Event Cameras, TPAMI 2023.
- [32] Jiang et al., EvHandPose: Event-Based 3D Hand Pose Estimation with Sparse Supervision, TPAMI 2024.



参考文献



- [33] Cabriel et al., Event-Based Vision Sensor for Fast and Dense Single-Molecule Localization Microscopy, Nature Photonics 2023.
- [34] Hamann et al., Low-Power, Continuous Remote Behavioral Localization with Event Cameras, CVPR 2024.
- [35] Shiba et al., Event-Based Background-Oriented Schlieren, TPAMI 2024.
- [36] Arja et al., Density Invariant Contrast Maximization for Neuromorphic Earth Observation, CVPRW 2023.
- [37] Ebmer et al., Real-Time 6-DoF Pose Estimation by an Event-Based Camera Using Active LED Markers, WACV 2024.
- [38] Gao et al., A 5-Point Minimal Solver for Event Camera Relative Motion Estimation, ICCV 2023.
- [39] Zhu et al., Event Camera-Based Visual Odometry for Dynamic Motion Tracking of a Legged Robot Using Adaptive Time Surface, IROS 2023.
- [40] Qu et al., Implicit Event-RGBD Neural SLAM, CVPR 2024.
- [41] Wang et al., Event-Enhanced Multi-Modal Spiking Neural Network for Dynamic Obstacle Avoidance, MM 2023.
- [42] Zhou et al., RGB-Event Fusion for Moving Object Detection in Autonomous Driving, ICRA 2023.
- [43] Forrai et al., Event-based Agile Object Catching with a Quadrupedal Robot, IROS 2023.
- [44] Xu et al., “Seeing” Electric Network Frequency from Events, CVPR 2023.
- [45] Chen et al., Video2Haptics: Converting Video Motion to Dynamic Haptic Feedback with Bio-Inspired Event Processing, TVCG 2024.



参考文献



- [46] Zhao et al., Boosting Spike Camera Image Reconstruction from a Perspective of Dealing with Spike Fluctuations, CVPR 2024.
- [47] Chen et al., Self-Supervised Joint Dynamic Scene Reconstruction and Optical Flow Estimation for Spiking Camera, AAAI 2023.
- [48] Dong et al., Super-Resolution Reconstruction from Bayer-Pattern Spike Streams, CVPR 2024.
- [49] Chang et al., Towards HDR and HFR Video from Rolling-Mixed-Bit Spikings, CVPR 2024.
- [50] Feng et al., SpikeCodec: An End-to-End Learned Compression Framework for Spiking Camera, arXiv 2023.



参考文献



- [51] Han et al., Hybrid High Dynamic Range Imaging Fusing Neuromorphic and Conventional Images, TPAMI 2023.
- [52] Chang et al., 1000 FPS HDR Video with A Spike-RGB Hybrid Camera, CVPR 2023.
- [53] Xia et al., SVFI: Spiking-Based Video Frame Interpolation for High-Speed Motion, AAI 2023.
- [54] Chen et al., Enhancing Motion Deblurring in High-Speed Scenes with Spike Streams, NeurIPS 2023.



参考文献



- [55] Zhang et al., Learning Temporal-Ordered Representation for Spike Streams Based on Discrete Wavelet Transforms, AAI 2023.
- [56] Zhao et al., Optical Flow for Spike Camera with Hierarchical Spatial-Temporal Spike Fusion, AAI 2024.
- [57] Xia et al., Unsupervised Optical Flow Estimation with Dynamic Timing Representation for Spike Camera, NeurIPS 2023.
- [58] Zhu et al., Finding Visual Saliency in Continuous Spike Stream, AAI 2024.
- [59] Zheng et al., Spike-Based Motion Estimation for Object Tracking Through Bio-Inspired Unsupervised Learning, TIP 2023.

北京大学 “相机智能”



Camera Intelligence
A Computational Photography Lab @ PKU
<http://camera.pku.edu.cn>

相关研究



Home Team Publication Course Contact

Research Highlights

In top venues

TPAMI = 25, UCV = 7, TIP = 6, TOG = 1, CVPR = 42, ICCV = 13,
ECCV = 14, ICCP = 2, NeurIPS = 10, ICML = 1, MM = 3, AAAI = 8

Complete list

Refer to [Google Scholar](#) and [DBLP](#) for more updated information.

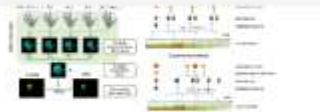
Select Year

Select Venue

Neuromorphi...

Clear Card View

2024



[TPAMI24a] EvHandPose: Event-based 3D Hand Pose Estimation with Sparse Supervision

Jianping Jiang, Jiayu Li, Baoxian Zhang, Xiaoming Deng, and Boxin Shi

EDE

2023



[TPAMI23b] Hybrid high dynamic range imaging fusing neuromorphic and conventional images

Jin Han, Yixin Yang, Feifei Duan, Chu Zhou, Lei Ma, Chao Xu, Tiejun Huang, Imari Sato, and Boxin Shi

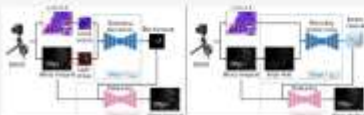
EDE Website



[TPAMI23g] NeuroZoomer: Denoising and super-resolving neuromorphic events and spikes

Peiqi Duan, Yi Ma, Xinyu Zhou, Xinyu Shi, Zihao W. Wang, Tiejun Huang, and Boxin Shi

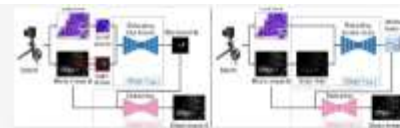
EDE



[JCV23] Deburring low-light images with events

Chu Zhou, Minggui Teng, Jin Han, Jinhui Liang, Chao Xu, Gang Cao, and Boxin Shi

EDE Website



[JCV23] Deburring low-light images with events

Chu Zhou, Minggui Teng, Jin Han, Jinhui Liang, Chao Xu, Gang Cao, and Boxin Shi

EDE Website



[CVPR23a] 1000 FPS HDR video with a spike-RGB hybrid camera

Yekun Chang, Chu Zhou, Yuchen Hong, Liwen Hu, Chao Xu, Tiejun Huang, and Boxin Shi

EDE Website Video



[CVPR23b] All-in-focus imaging from event focal stack

Hanyue Lou, Minggui Teng, Yixin Yang, and Boxin Shi

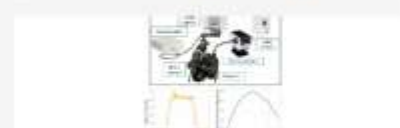
EDE Website Video



[CVPR23c] Learning event-guided high dynamic range video reconstruction

Yixin Yang, Jin Han, Jinhui Liang, Imari Sato, and Boxin Shi

EDE Website



[CVPR23g] High-fidelity event-radiance recovery via transient event frequency

Jin Han, Yuta Asano, Boxin Shi, Yingqiang Zheng, and Imari Sato

EDE Website



[ICCV23a] Coherent event-guided low-light video enhancement

Jinhui Liang, Yixin Yang, Boyu Li, Peiqi Duan, Yong Xu, and Boxin Shi

EDE Website

致谢：为本次报告做出贡献的博士后/研究生



梁锦秀



樊斌



段沛奇



洪雨辰



滕明桂



杨溢鑫



周鑫渝



杨思祺



钟灏峰



楼涵月



李博宇



朱成轩



北京大学计算机学院
School of Computer Science



Camera Intelligence
A Computational Photography Lab @ PKU
<http://camera.pku.edu.cn>



感谢聆听，请各位专家批评指正

施柏鑫

shiboxin@pku.edu.cn

2024.05.05 @ VALSE 2024 重庆