

摘要

神经形态相机是一种新型的视觉传感器，它以每个像素为独立的感知单元，连续采样场景的亮度信息，并输出神经形态视觉时空信号。相比于传统基于帧的相机，神经形态相机具有高时间分辨率、高动态范围、低数据冗余、低功耗等优势，在自动驾驶、机器人视觉等多种视觉领域有着极大的应用潜力。然而，受有限带宽和高时间分辨率的限制，现有的神经形态相机空间分辨率不高，使得信号所能表征的空间细节缺失。另外，以独立的像素作为最小采样单元，是对场景的稀疏采样，仅能为神经形态视觉任务提供有限的有效信息。如何将稀疏且低分辨率的神经形态视觉信号上采样成高时空分辨率的图像或信号，提供优质的视觉信号并满足多种视觉任务需求，是神经形态视觉领域亟待解决的基本问题。

本文首先对神经形态相机的时空上采样进行了形式化定义，采集了多个真实数据集并提出信号直接评价指标。在此基础上，分别从**空间维度**、**时间维度**、**时空维度**对神经形态相机时空信号进行上采样，围绕神经形态信号**时空依赖性**、**信号运动特性**和**神经形态相机采样原理**，提出了适用于神经形态信号时空上采样的算法和应用系统。本文的主要创新工作包括：

第一，针对低空间分辨率带来的细节表征缺失问题，提出基于时空特征学习的空域上采样网络，实现低分辨率时空信号到高分辨率图像生成。为提取神经形态信号丰富的时空依赖关系，设计了时空信号编码器，并提出了包含流内特征提取模块、流间依赖性提取模块、联合特征学习模块的多级特征学习网络，为超分辨率图像的生成提供更多参考信息。本方法将低分辨率的神经形态视觉信号重建为空间分辨率扩大 16 倍的高质量图像，且在高速场景中也能发挥作用。

第二，针对信号稀疏导致的有效信息不足问题，提出基于运动轨迹估计的时域上采样算法，实现稀疏异步信号到高采样率异步信号生成。受神经形态信号的运动特性启发，沿信号运动方向通过混合点过程模型实现信号时域上采样。所提出的运动估计算法可适应多种不同运动模式的场景，混合点过程模型可对稀疏时空信号建模并上采样，在增加有效信号的同时抑制噪声的生成。本方法是首个神经形态相机的时域上采样工作。实验结果表明，时域上采样可增加有效信号量，并提升后续任务性能。

第三，为同时解决低空间分辨率和信号稀疏造成的时空建模困难问题，提出基于亮度变化估计的时空上采样算法，实现低分辨率稀疏信号到高时空分辨率信号生成。受神经形态相机采样原理启发，将异步信号时空上采样问题转换为亮度变化时空上

采样问题，从稀疏异步信号估计高时空分辨率的亮度变化，并恢复时空上采样信号。本算法同时提升神经形态信号的时域和空域分辨率，在多种后续任务中有效发挥作用，在图像重建任务中，时空上采样后结构相似性指标提升了 46%；在光流估计任务中，上采样后光流估计的错误率减少了 34%。

最后，搭建了一个神经形态视觉系统，集成上述算法，实现了大视场高分辨率拼接重建和高速目标检测。所提出的空域上采样算法集成在大视场高分辨率拼接重建模块，将拼接分辨率从 781×179 扩大至 3362×712 ，视场角从 143.6° 扩大至 167.8° 。时域上采样算法集成在高速目标检测模块，实现转速 1000 转每秒的风扇数字检测，将检测的 MAP50-95 指标从 75% 提升至 85%。时空上采样算法集成在高速小目标检测模块，将时速 100 公里、所占像素小于 10 的子弹检测率提升 10%。

关键词：神经形态相机，时空上采样，超分辨率，图像重建，类脑视觉