

## 摘要

图像和视频作为计算机视觉与人工智能的核心数据形式，承载着丰富的信息，其质量直接影响各类视觉任务的性能和稳定性。计算成像技术通过结合传感器与计算算法，突破传统光学成像的局限。例如，在低光照环境下增强图像清晰度，在高速运动场景中减少模糊，并支持三维重建、光场成像等高级功能。相比传统成像方式，计算成像能够提供更高质量的视觉数据，不仅提升图像处理效果，也为机器视觉和人工智能技术的发展提供重要支撑。

传统数字相机依赖曝光成像机制，通过设定特定的曝光时间来捕捉图像。然而，这种方式在复杂运动场景下存在局限性：曝光时间过长会导致过曝或运动模糊，过短则可能造成欠曝和噪声增加。此外，传统相机缺乏时间连续性，难以充分利用时间序列信息，影响依赖动态感知的应用。例如，在自动驾驶场景中，面对光照变化、高速运动物体等挑战，传统成像方式的感知能力可能受限。

脉冲相机是一种新型神经形态视觉传感器，其每个像素独立且持续捕捉光子，进行光电转换并在累积电压达到阈值时触发脉冲，以极高时间分辨率生成连续脉冲流。脉冲摄影原理能够记录丰富光强信息，有望替代传统相机，实现超高速连续摄影。本文考虑脉冲相机在运动中的成像难题。第一，对于脉冲相机，超高速连续摄影原理天然适合运动场景的感知。充分挖掘脉冲摄影原理与运动的关系并实现增强成像是亟待解决的问题。第二，相机在真实世界中的运动场景是复杂的，高速、遮挡、空间复杂运动等都与成像相关，而目前缺少相关技术对复杂运动场景成像进行探索。本文分析三种典型运动场景的成像挑战：（1）高速运动。在真实世界的各种高速运动场景中，连续脉冲流的时序信息刻画了运动过程，如何利用时序信息高效成像是基本难点。同时，脉冲相机的空间分辨率及色彩质量不佳，脉冲相机混合数字相机实现可靠的增强成像技术未被解决。（2）遮挡运动。相机摄影的运动过程中往往因遮挡丢失背景纹理线索，利用脉冲摄影原理解决遮挡运动的背景成像问题是脉冲相机运动增强成像的新难题。（3）空间运动。相机的空间信息在运动过程中未被有效利用，将脉冲相机的连续摄影优势转为空间信息，实现立体成像以增强对真实世界的空间感知是领域空白。

本文围绕基于脉冲摄影原理的运动增强成像展开研究，完成三个研究内容：（1）高速运动下的脉冲相机高清增强成像：挖掘脉冲流的时空表征以完成高效清晰成像，融合脉冲流与传统相机的高分辨率彩色图像，实现自适应对齐与增强成像；（2）遮挡运动下的脉冲相机增强成像：基于脉冲流学习连续视角对应关系，以去除遮挡并增强成像质量；（3）空间运动下的脉冲相机立体成像：利用脉冲的连续视角信息，在三维

场景中实现新视角影像合成。针对脉冲相机在不同运动场景对应的三个挑战问题，本文探索了不同的脉冲相机运动增强成像方案。

(1) **面向高速运动场景，提出了一个新型脉冲相机高清增强成像方案：**针对在高速运动中，解决如何实现脉冲相机高质量成像的科学问题。该方案实现在依赖单一脉冲相机感知时完成高效清晰的直接成像，并在数字相机辅助条件下实现高清彩色增强成像。本文考虑脉冲流的时序特性提出小波引导的脉冲增强网络，有效地表示了脉冲并提高成像质量。当存在数字相机辅助成像时，利用脉冲和图像的互补性，并针对传感器融合中时空对齐的难题，本文设计了一种自适应时空对齐脉冲-图像融合成像网络，在时空对齐不精准时实现精准融合并增强成像效果。该方案包含三个步骤。第一，采用图像域算法处理图像，缓解模糊并增强纹理信息。第二，设计了双向可变形模态对齐网络，通过上一阶段脉冲成像结果与图像之间的双向可变形卷积，实现特征对齐。第三，设计了一个结合光流的多尺度融合网络，通过估计像素运动偏移对齐不同模态，并在网络中进行深度特征融合。

(2) **面向遮挡运动场景，提出了一个连续脉冲流多视角合成孔径成像技术：**针对运动中存在遮挡的情况下，如何融合连续视角信息以去除遮挡并增强成像质量的科学问题，本文提出新的脉冲合成孔径成像方案，并建立了一个脉冲去遮挡模型，利用单台脉冲相机实现遮挡去除成像。该方法对脉冲实现有效的特征表示、提取和融合。首先，模型建立了长短时间窗特征提取模块，该模块能够从不同视角的长、短时间窗口中挖掘并融合脉冲数据的空间与时间特征。第二，模型引入基于跨视角互注意力的模块来融合不同视角分支中的特征，通过模型训练实现跨视角的脉冲特征融合。

(3) **面向空间运动场景，提出了一个脉冲三维高斯泼溅立体成像技术：**针对在空间运动中，如何利用脉冲流的空间信息进行立体成像的科学问题，探索了相机空间运动中脉冲流的连续视角特性，设计了高速自监督的脉冲相机立体成像算法，在三维场景中实现新视角影像合成。本研究首次尝试在高速成像任务中将三维高斯泼溅法与脉冲相机结合，利用三维高斯泼溅作为高质量成像框架，并构建 **SpikeGS** 方案。一方面，为了满足三维高斯泼溅渲染中的瞬时成像假设，本文构建一个高效的自监督脉冲成像网络，提供稳定监督信息。另一方面，通过建立脉冲与连续相机位姿的等式约束，更充分地利用脉冲连续性，并提高脉冲新视角影像合成质量。

本文从三种不同运动场景中提出了新的方法解决脉冲相机的运动增强成像问题，有望突破传统成像技术的局限。本文研究以脉冲相机摄影特点为线索，深入分析并提出创新方法，拓宽了脉冲相机在计算成像领域的应用价值。

关键词：机器视觉，脉冲相机，计算成像，影像增强