

摘要

近年来涌现的无人机、自动驾驶、智能机器人等新兴应用要求机器可以清晰地记录高速运动，并快速地做出响应，使得高速机器视觉成为了一个重要的研究方向。当前的成像技术主要基于图像传感器的一次性曝光成像。这种成像机制虽然可以对静态和缓慢运动的场景产生清晰的图像，但是对于高速运动场景却有明显的局限。当场景中的物体高速运动时，物体的像点会在曝光时段内投射到传感器上的不同像素上，导致产生模糊的影像。为了满足高速成像的需求，一种新型的仿生视觉传感器-高速脉冲相机被提出。它采用高速的“积分-脉冲发放”机制，产生连续的脉冲流来持续地记录外界光学场景，突破了传统图像传感器一次性曝光成像的局限。

对于高速脉冲相机来说，如何从二值脉冲流中重构出高质量的影像是十分重要的一个问题。该问题主要面临以下几个挑战。首先，由于场景中运动的存在，传感器上同一像素会记录场景中的不同物体点；其次，在脉冲“积分-发放”的过程中易受到量化效应、泊松过程和暗电流等因素的影响，导致采集到的脉冲数据中有较大的噪声；此外，脉冲相机传感器的空间分辨率通常有限，进行与脉冲相机等分辨率的影像重构可能难以重现出场景中的纹理细节。针对上述问题，本文将探索以下内容。首先，考虑到场景中的物体运动，本文将对脉冲序列的运动结构进行分析，从而建立不同时刻点像素间的映射关系；其次，为了降低噪声对成像的影响，本文将基于运动分析的结果，研究脉冲信号间的时空相关性；第三，为了重构出高信噪比、不模糊的影像，本文将对鲁棒的光照信息融合方法展开探索。特别地，为了重构出更多的纹理细节，本文进一步探索信号内在相关性规律，从而重构出高分辨的影像。本文的主要贡献包括：

1. 提出了基于运动轨迹的脉冲相机影像重构方案

针对脉冲相机影像重构过程中噪声与高速运动的矛盾，本文提出沿着运动轨迹进行时域滤波，从而在不引起运动模糊的前提下，有效地利用时域相关性来提升重构信号的稳定性。考虑到场景内容的多样性会导致时域相关性结构的多样性，本文建立沿运动轨迹的时域自回归模型，来自适应地利用时域相关性。特别地，考虑到时域自回归模型的复杂度会随着运动轨迹的延长而增大，本文提出了分层运动轨迹滤波来实现脉冲相机的影像重构。首先，采用短时滤波来利用短时时域相关性；然后，在短时滤波结果的基础上，建立时域下采样的长时自回归模型，以利用长时相关性进一步提升重构图像的质量。实验结果表明，运动信息的引入，有利于解决噪声与高速之间的矛盾，可以重构出高信噪比、不模糊的影像。

2. 提出了基于渐进融合的脉冲相机影像重构网络

考虑到传统脉冲相机影像重构算法在复杂运动场景下的局限性，本文从脉冲流的特性出发，设计了基于渐进融合的脉冲相机影像重构网络，借助深度神经网络渐进式地利用时空相关性来实现高质量的影像重构。首先，考虑场景中光照强度及运动速度的差异，提出了时域相关性自适应的瞬时光强推断子网络来利用局部时空相关性，从而将二值脉冲信号转化为不同时刻点的瞬时光强信号；然后，提出了特征提取子网络来提取不同时刻点的深层特征，以进一步利用更大范围的空域相关性；最后，提出了基于运动对齐的特征融合子网络来进一步利用长时相关性，从而提升重构图像的信噪比且不引起运动模糊。特别地，考虑到运动对齐可能受到遮挡、光强变化等因素的影响而存在误差，本文引入对齐可靠性估计模块来产生对齐可靠性预测图，以实现鲁棒的特征融合。实验结果表明，所提算法在真实和合成脉冲数据集上均可以实现高质量的影像重构。

3. 提出了运动引导的脉冲相机超分辨率影像重构方案

脉冲相机具有超高的时间分辨率，但是空间分辨率较为有限。本文提出运动引导的脉冲相机超分辨影像重构方案，旨在将时域方向的密集采样转化为空域方向的密集采样，从而将低分辨率的脉冲流重构为高分辨率的影像。由于外界光学场景和相机传感器间存在相对运动，每个脉冲可能记录了外界光学场景中多个物体点的亮度。本算法基于运动信息，建立待重构图像中各细粒度像素值与各脉冲之间的映射关系，以重构出高于相机传感器分辨率的影像。特别地，本文在此基础上引入了非局部相似性先验，以进一步消除噪声以及运动估计不准所引起的误差，从而提高重构图像的质量。实验结果表明，所提算法可以重构出丰富的纹理细节，实现高信噪比、高分辨率的脉冲相机影像重构。

综上所述，本文对新型高速脉冲相机的影像重构技术展开探索。针对重构过程中噪声与高速运动所带来的挑战，提出了基于运动轨迹的脉冲影像重构算法和基于渐进融合的脉冲相机影像重构网络。为了提升脉冲相机的空间分辨率，提出了运动引导的脉冲相机超分辨率影像重构算法。高质量的脉冲相机影像重构，不仅可以重现出人眼及传统相机难以捕捉的高速运动场景，还可以应用于高速运动场景的跟踪、检测和识别等高速机器视觉任务。

关键词：高速脉冲相机，影像重构，超分辨率，时空相关性，运动分析