引用格式：ZHANG Haiyang, LV Yuanyuan, LI Jing, et al. Research on Event Camera Imaging Methods for High Dynamic Range Static Scenes[J]. Acta Photonica Sinica, 2026, 55(3):0311003
张海洋,吕媛媛,李静,等.事件相机高动态静止场景成像方法研究[J].光子学报,2026,55(3):0311003

事件相机高动态静止场景成像方法研究

张海洋[1,2,3],吕媛媛[1,3],李静[1],崔凯[1,3],刘朝晖[1,3],姚大雷[1],周亮[1,3]
(1 中国科学院西安光学精密机械研究所,西安 710119)
(2 中国科学院大学,北京 100049)
(3 中国科学院空间精密测量技术重点实验室,西安 710119)

摘 要:针对事件相机在静止场景中无法响应的问题,提出一种基于快门映射的高动态范围成像方法。该方法在静止场景中通过控制机械快门旋转,从而触发场景亮度变化并产生事件流,最终将不同机械快门旋转速度下获得离散事件重建为高动态范围静止图像。实验结果表明,该方法能够在场景动态范围达到112 dB时,成功实现事件相机对静止场景的成像。该方法优势在于无需改变场景的静止性,能够在不牺牲成像效果的前提下,有效扩展事件相机在静止场景下的应用范围。所提出的基于快门映射方法为复杂光照条件下的高动态静止场景成像提供了一种简单可行的途径,为事件相机的应用拓展提供了新的思路。

关键词:事件相机;HDR成像;机械快门;灰度图像;成像方法
中图分类号:TP29 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/gzxb20265503.0311003

0 引言

事件相机是一种受到生物视网膜启发的新型视觉传感器。与传统相机不同,事件相机并不以固定帧率采集帧图像,而是采用异步方式感知和记录像素光强的变化[1]。事件相机的每个像素点都独立工作,当光强$I(x,y,t)$对数变化超过阈值时以微秒级时间分辨率输出一个事件$e(x,y,p,t)$,事件包括像素位置信息x,y、极性p(亮度增加或减小)以及触发时间戳t,从而形成事件流。该机制为事件相机带来远超传统基于帧的相机(60 dB)的超高动态范围(140 dB)、极高的时间分辨率和低数据冗余[2]。基于这些特点,事件相机在物体跟踪[3]、结构光扫描[4]、同步定位与建图[5]和空间碎片监测[6-7]、震动测量[8-9]等应用中取得了积极进展,并逐渐成为计算机视觉和智能感知方面的重要研究方向。

但其局限性同样明显,事件相机无法直接获取绝对强度的灰度图像,而是由异步离散事件流反映场景中亮度的变化[2]。这使得事件相机在多数视觉任务中构成了瓶颈,例如目标识别、图像插帧、图像自动对焦等,均需要灰度信息作为输入。在静止场景中,由于缺乏光强变化,事件相机不会产生事件,导致其成像能力受限,难以替代传统帧相机。尽管混合事件相机(如DAVIS系列)已具有同步输出事件流与灰度图像的功能,但其在静态场景中仍面临事件流缺失、高动态范围特性失效的问题。因此在静态场景下仅使用事件流进行重建图像,可以避免对传统帧传感器的依赖,降低其功耗和带宽开销,提升图像动态范围。

事件相机的重建分为静止和动态场景。动态场景中,一类方法是利用事件流中包含的亮度梯度信息,通过时间积分估计相对强度变化,从而实现灰度信息恢复。然而,这类方法对事件噪声和低频干扰高度敏感,导致成像质量下降[10-12]。另一类方法则采用帧图像与事件流融合,借助相邻两帧之间事件流插值恢复中间时刻强度,但要求严格同步,系统实现较为复杂[13-14]。近年来,深度学习方法也被引入该领域,例如

基金项目:国家科技重大专项(2022ZD0117301),空天飞行器技术航空科技重点实验室基金(J2025-STAV-01-001)
第一作者:张海洋,zhanghaiyang21@mails.ucas.ac.cn
通讯作者:周亮,zhouliang@opt.ac.cn
收稿日期:2025-10-28;**录用日期**:2026-01-07

E2VID等算法通过端到端训练模型直接将事件流映射为灰度图像，取得了较好的恢复效果，但普遍存在纹理模糊、细节欠缺的问题[11]。

针对静止场景成像，不少研究者提出了多种重构方法。浙江大学BAO Y等提出了基于透射率可调装置（AT-DVS）的方法，采用时间映射（Event-based Temporal Mapping Photography，EvTemMap）方法，调节光学器件透射率来触发事件并将事件时间戳映射到强度域[15]。此外，中国科学技术大学WU Y等尝试利用液晶显示器改变透过率，以时间加权的方式实现静止场景的高动态成像[16]。这两种方法高度依赖投射率装置的稳定性，一旦透射率曲线存在偏差，将直接导致时间与灰度映射得不准确，而且由于事件相机存在输出延迟，会导致事件输出时间戳错误或丢失。与此同时，在静态场景重建的技术探索中，CAO R等跳出传统降噪思路的局限，将事件相机成像过程中产生的噪声转化为有效信息，借助噪声的固有特性实现了静态场景的重建[12]。GAO Q等聚焦事件相机在静止工况下的核心性能参数，对其光响应机制、噪声分布规律及灵敏度特征开展系统性分析，从底层原理层面为静态场景灰度重建技术探索了可行路径[17]。

基于上述问题，本文提出基于快门映射的高动态范围成像方法，实现了高动态静止场景下灰度恢复与成像。通过调节快门速度，驱动场景光强变化激发有效事件流，从而提升事件相机在静止场景下的成像能力。引入标定过程建立事件与光强之间的映射关系，在静止场景下实现图像重建与校准。该方法不仅拓展了事件相机在工业检测等领域的应用，也为复杂光照环境下的高动态场景成像提供了新的解决方案。

1 事件流重建与灰度标定

1.1 机械快门事件流产生方法

事件相机在光电流的对数变化达到设定阈值时产生事件。如图1所示，当像素在时间间隔Δt_i内的光强对数变化超过设定阈值时，该像素会输出一个事件

$$\Delta L\left(x_i, y_i, t_i\right)=\left|\ln I\left(x_i, y_i, t_i+\Delta t_i\right)-\ln I\left(x_i, y_i, t_i\right)\right|=\theta \tag{1}$$

式中，$\theta=\left|p_k C\right|$，$p_k \in +1, -1$，$C>0$，$\theta$为触发阈值的绝对值，$p_k$为事件的极性。如图1所示，光强增加对应ON事件（红色箭头），光强减小对应OFF事件（绿色箭头），C为触发事件的阈值大小。

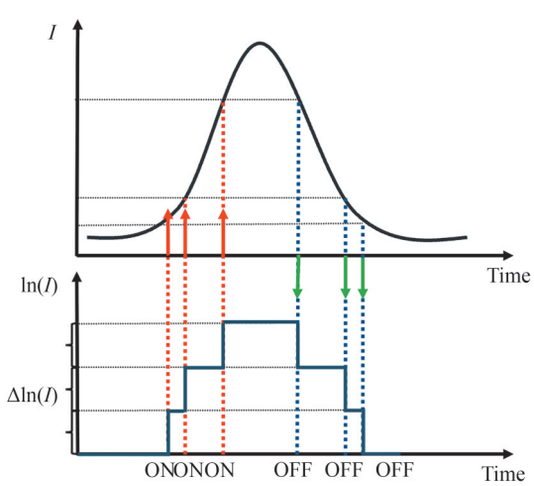


图1 事件产生与对数转换示意

Fig.1 Schematic of event generation and logarithmic transformation

静止场景下，对于单个像素，光强$I\left(x_i, y_i, t_i\right)$随时间保持恒定，其对数变化$\Delta L\left(x_i, y_i, t_i\right)$也不发生变化，从而不会产生事件。因此需要改变光强来驱动场景内产生事件。通过机械快门的旋转可以改变场景内光强。由于事件具有ON和OFF两种极性，光强从低到高增加和从高到低减小达到阈值都会触发事件。因此机械快门可以分为两类，图2(a)对应的为光强从低到高再到低；图2(b)为光强从高到低再到高；两种方式都围绕o点进行顺时针旋转。

机械快门时，其边缘线速度决定了像面的积分时间，由于快门在镜头两端的线速度差异，如图2(c)所

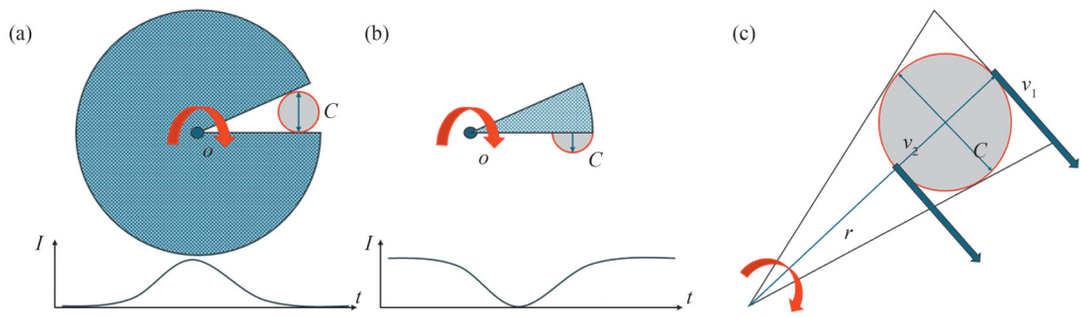


图2　两种类型的机械快门和旋转快门示意。(a)光强从低到高；(b)光强从高到低；(c)机械快门旋转

Fig.2　Two types of mechanical shutters and Shutter rotation diagram。(a)Light intensity from low to high; (b)Light intensity from high to low; (c) Shutter rotation

示，即快门的长度为r，镜头直径为c时，快门边缘的线速度为v_1，镜头相对于快门边缘一侧的线速度为v_2。两端的速度差值为$\frac{r}{r-c}$，因此当r很大时划过像面的速度差值可忽略不计。

将机械快门尽可能偏心地放置于事件相机旁，以减小旋转过程中由于线速度差异所带来的影响。本文最终选择图2(a)所示的机械快门进行采集。在采集过程中，像面始终保持关闭状态，以减小因噪声波动产生的事件，当旋转至透光部分时，才开始记录有效事件。

本文所使用的机械快门触发方法与基于光学透射率可调装置是两种不同的技术路线。尽管都是通过外部光强调制获得静止场景的事件流，但后者基于光学透射率调节装置，其灰度映射高度依赖于时间戳精度；而本文的方法是基于机械快门的物理通量的调制，采用事件数量作为映射依据，两者的映射路径不同，具有不同的装置构成、触发机制和误差来源。此外，通过实验设计将所提方法与E2VID、事件计数等基准方法进行了对比，表明本文方法在灰度恢复精度和稳定性上的优势。

1.2　基于事件流的图像重建与标定方法

对于较小的Δt_i，式(1)可以视为光强变化的微分形式。由此可得

$$\Delta L\left(x_i, y_i, t_i\right) \approx L\left(x_i, y_i, t_i+\Delta t_i\right)-L\left(x_i, y_i, t_i\right)=\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}t}\left(x_i, y_i\right)=\theta \tag{2}$$

通过事件相机灵敏度公式得到事件相机产生的事件数量与吸收的光子数之间的数学式，Patrick Lichtsteiner[18]建立的数学公式，给出的事件发生率为

$$f(t) \approx \frac{T_c}{\theta}=\frac{1}{\theta} \frac{\mathrm{d} \ln I}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

式中，T_c为时间对比度，θ是阈值，控制事件产生的速率大小，而光电流$I=R\times P$，R表示光电二极管的响应度，P代表光功率，I表示在单位时间内所吸收光子的总能量大小。

对一个像素从时间t_0到t_1进行积分，得到这段时间内产生的事件总数，表示为

$$\int_{t_0}^{t_1} f(t)\,\mathrm{d}t=\frac{1}{\theta} \ln\left(\frac{I\left(t_1\right)}{I\left(t_0\right)}\right) \tag{4}$$

单个像素从时间t_0到t_s产生一个事件满足：

$$\int_{t_0}^{t_s} f(t)\,\mathrm{d}t=1 \tag{5}$$

式中，t_s表示产生第一个事件所用时间，若初始时刻的光强为0，可以得到产生一个事件时所用时间t_s与光强值的大小成正比。

$$I\left(t_s\right)=\mathrm{e}^{\theta} \tag{6}$$

当I以线形增长(匀速变亮)时，$I(t)=I_{\mathrm{ref}}+at(a>0)$，$I_{\mathrm{ref}}$是初始基线大小。

$$t_s=\frac{\left(\mathrm{e}^{\theta}-1\right) I_{\mathrm{ref}}}{a} \tag{7}$$

因此可以得出，在固定时间内光强越大，事件产生速率越快，像素将更快地翻转并产生事件。当快门以固定速率旋转时，由于曝光时间固定，事件相机无法探测到更小的光强并产生事件。如图3所示，当旋转速率固定时，曝光时间固定，分别为Δt_1、Δt_2、Δt_3。当曝光时间为Δt_1时，只有当光功率大于P_1时，才会产生事件e_1；当速率减缓，曝光时间为Δt_2，则会产生事件e_1和事件e_2；当曝光时间为Δt_3时，则会激活所有事件e_1、e_2、e_3。因此，通过机械快门以固定速率旋转时，可以激活当前曝光时间内的所有像素。

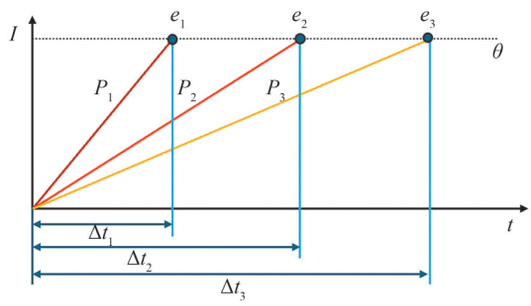


图3 不同光功率下事件产生时间，$P_1>P_2>P_3$

Fig.3 The time of event generation under different optical powers, $P_1>P_2>P_3$

通过控制机械快门，可以在一次旋转过程中使整个像面获得相同的曝光时间，此时达到特定光强大小的像素就可以输出事件。

$$g(x,y,\Delta t)=\sum_i\int_0^{\Delta t}I(x_i,y_i,t)\,\mathrm{d}t \tag{8}$$

需要注意的是，当事件发生率较高时，即快门刷新速度较慢，事件量很大时，会产生事件拥堵。这是由于事件相机在传输过程中采用仲裁机制实现异步传输，称为地址事件表示（Address-event Representation，AER）。事件在此过程中以地址事件对的形式输出。在输出事件时，像素单元向总线发出请求，总线选中该行后由列选择器选择确定具体像素并输出事件[19]。此时，事件需要等待仲裁进行排队输出，输出将带有一定的延迟，事件输出完成后，像素复位并继续感受光强变化，等待触发新的事件。

例如，DVXplorer的全局事件采样率为5 KHz，即触发一半像素时，延迟时间至少为200 μs。每次最多输出30 000个事件（由0.3 M像素总数的10%产生），此时帧率约为5 000 Hz[20]。图4描述了事件相机的延迟示意图，t_1为事件产生的开始时刻，t_2为事件产生的结束时刻。由于存在最大读出速度，当事件产生大于读出速率时，其事件会被延迟至t_3时刻输出完毕。

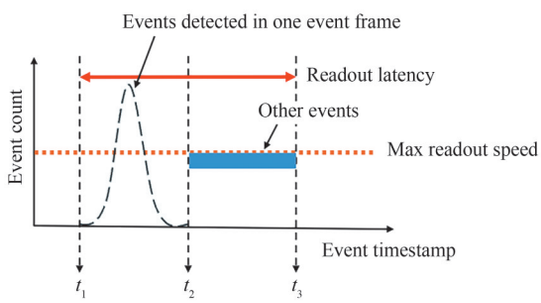


图4 事件读出延迟示意图，事件产生速率大于读出速率，输出事件会有一定的延迟

Fig.4 Event readout latency, generation rate is greater than the readout rate, and the output event will have a certain delay

由此所产生的延迟会导致较亮和较暗的像素都只产生一次事件。由于较亮的像素无法产生更多的事件，因此，仅需筛选记录每次刷新过程中首次产生的事件位置，即可获得该曝光时间内所激发的所有像素位置。将若干速度下获得的事件流集合在一起，可以构成一个包含全部光强信息的集合$G(x,y)$。

$$G(x,y)=\sum_{i=\Delta t_1}^{\Delta t_{\max}}g(x,y,\Delta t_i) \tag{9}$$

由此实现了从快门速度到真实图像的过程，通过该过程获得的每个速度下的事件流所构成的事件帧则

包含了该光强下的所有像素，将其合成即可重构为真实图像。

当光功率不变时，通过控制曝光时间来探测特定光强，从而使事件获得相应的光强信息。通过控制机械快门的旋转，可以为场景内的像素提供统一的曝光时间，从而捕获静态场景内的全局像素变化。通过物理遮挡，机械快门旋转刷新事件相机镜头前的场景，进而生成事件流。

事件相机存在固定的传输速率和总线输出延迟限制，在读出延迟时间 T 内，像素仅会被激活一次。在时间 T 内，像素是否产生事件取决于其积分时间的长短。由于场景中不同像素对应的光功率存在差异，事件数量的多少并不能直接反映亮度的变化，因此需要准确的映射关系。

在实际拍摄过程中，事件流是在不同速率下产生，因此需要对标定每个速率下产生的事件流，以建立事件和灰度之间的关系。

图5是基于机械快门的事件相机灰度标定方法框架。标定过程分别使用帧相机和事件相机对灰度标定板进行拍摄，帧相机拍摄时保持镜头无遮挡；事件相机拍摄时，驱动机械快门由最大转速15 Hz逐渐减速到完全静止，并记录全过程事件流。最终得到270组不同旋转速度下的事件帧图像，通过统计对应的灰度级别下的事件数量，并与帧相机在相同位置拍摄的灰度值进行关联，完成事件数与灰度值之间的标定。

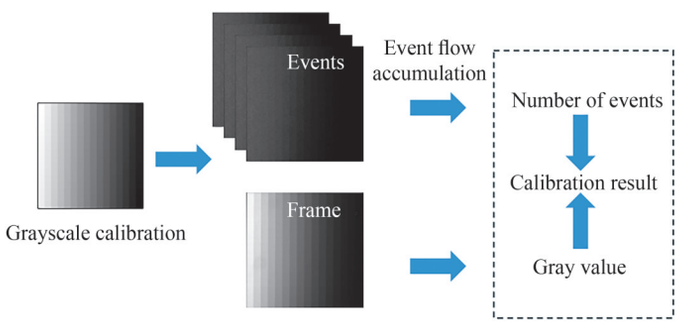


图5　基于机械快门的事件相机灰度标定框架

Fig.5　The overall framework of the gray-scale calibration method for event-camera based on mechanical shutter

将所对应的不同曝光的事件流标定相应灰度信息之后，事件流就可以重构为一个包含真实灰度的图像事件流 $G(x,y)$，即

$$G\left(x,y\right)=f\left(G\left(x,y\right)\right) \tag{10}$$

2 实验与结果

在前述原理的基础上，提出一种基于机械快门的事件相机静止场景灰度标定方法，借助机械快门旋转触发事件，调节快门速度改变像面曝光时间，在光强确定的情况下，不同快门速度下采集的事件流表征场景的亮度信息。通过这种方法，标定当前速度下所产生的事件，从而恢复真实的灰度信息。

图6为基于机械快门的事件相机成像系统，由四部分组成：包括事件相机、传统相机、机械快门及测量系统。虚线内为事件相机成像系统，通过机械快门中透光部分成像至事件相机，随着机械快门的不断旋转主动触发事件，当透光部分旋转至机械快门测量部分，光源所发出的光线被光电探测器所记录，以记录机械快

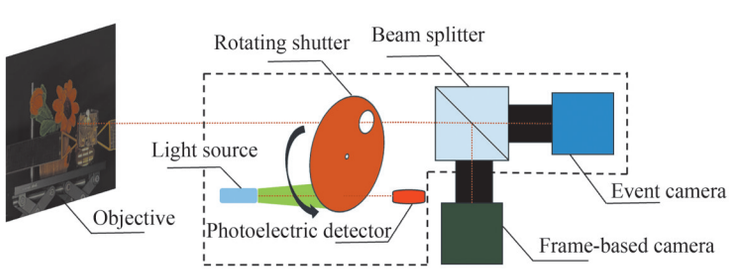


图6　基于机械快门的事件相机成像系统

Fig.6　Event camera imaging system based on mechanical shutter

门旋转的参数用以控制机械快门的电源和事件相机使用外触发的方式进行同步。传统相机的主要目的是对事件相机进行灰度标定，在系统工作前记录场景的真实灰度信息，从而使事件相机获得准确的灰度基准。

2.1 事件相机响应特性标定与测试

系统分为测速和采集两部分，测速所采用的光源是白色的LED光源，光电探测器为APD雪崩光电二极管。事件采集使用的事件相机为CelexV，其分辨率为1 280×800像素。灰度图像采集使用基于帧的相机为Flir BFS-U3-51S5M-C，其分辨率为2 448×2 048像素，图像采集使用16位图像深度。两款相机都使用了焦距为16 mm的C接口镜头。在测试时使用20×20的400阶灰度标定板进行标定。

图7为实验过程所使用的实验仪器，其中图7(a)为事件相机和机械快门，图7(b)为机械快门所使用的直流电源，图7(c)为APD采集速度过程，图7(d)为使用事件相机拍摄标灰度标定板。灰度标定板内有20×20共400阶的灰度信息，灰度标定板的灰度从左到右从上到下逐级降低。重建过程在标定阶段通过调整机械快门速度，由最大速度到静止状态采集不同快门速度下的事件数据，并同步记录每一快门速度对应的转速信息。待实际拍摄目标时，采用与标定阶段一致的快门速度进行拍摄，获取与之匹配的事件流，用于重建灰度图像。

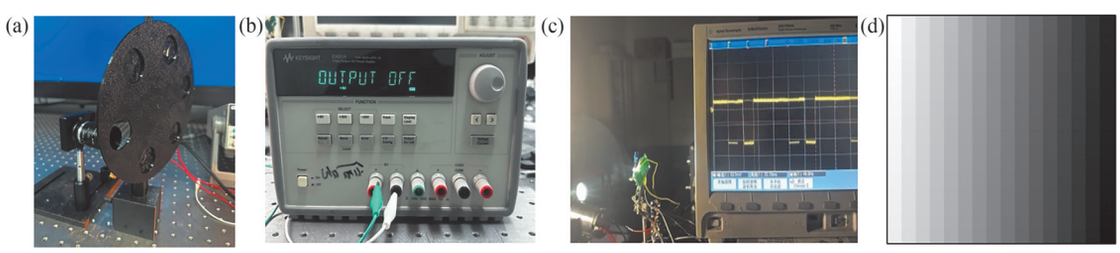


图7 实验装置。(a) Celex-V和机械快门；(b)直流电源；(c)测速装置；(d) 20×20灰度标定板

Fig.7 Experimental facilities。 (a) Celex-V and Mechanical Shutter; (b) Dc power supply; (c) speed measurement device; (d) 20×20 grayscale calibration board

为验证基于机械快门的事件相机静止场景灰度重建方法的有效性，首先进行机械快门速度与事件流响应的标定。如图8所示，在固定的时间窗口内，使用不同旋转速度的机械快门主动触发标定板，产生事件流。图8底部的时间轴显示了快门触发的时间序列，时间间隔越短表示当前转速越快。选取Time 1到Time 6六个时刻进行分析。从Time 1到Time 6，随着快门转动速度逐渐降低，低阶灰度区域逐渐显现。然后统计该时间窗口内事件的累积数量，获得不同灰度阶梯所对应的事件响应数量分布，如图8所示。不同区域的事件数量有效反映对应灰度阶梯的强度。

基于灰度标定结果，使用随机生成10×10(共100阶)灰度板进行实验验证，以评估本文方法在未知场景中的性能。实验过程中，快门转速设置与标定过程保持一致。如图9所示，Time 1到Time 6对应不同时刻

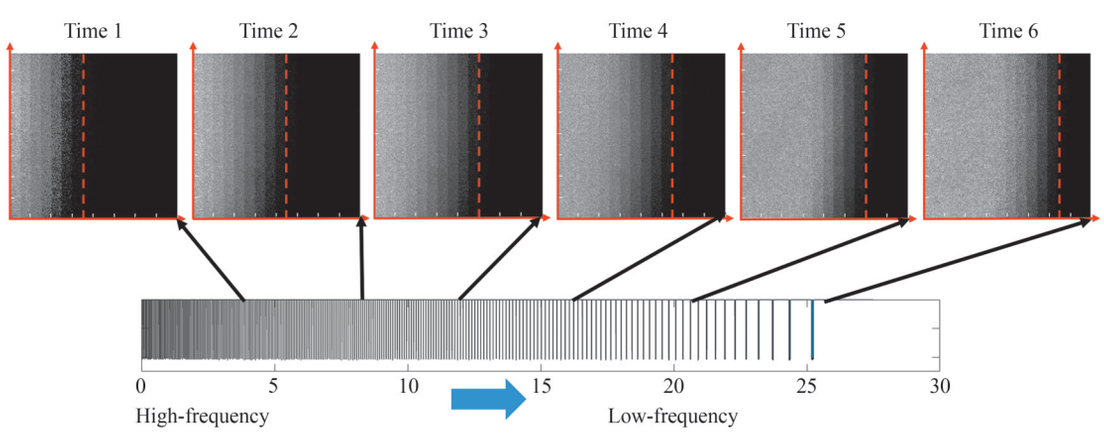


图8 灰度标定版从Time 1到Time 6的不同时刻对应的事件累积图像

Fig.8 The event frame images a of the grayscale calibration plate corresponding to different time points from Time 1 to Time 6

的事件累计图像，随着时间推进，机械快门的转速逐渐降低，事件响应覆盖的灰度区域逐渐增加。为了更全面地评估本方法的有效性，将其与其他灰度重建方法进行了对比。图10给出了不同方法的灰度重建结果。其中，E2VID[21]为一种基于事件流重建灰度图像的开源算法，可将事件流直接映射为灰度图像。此外，还使用事件累积的方法进行灰度重建。该方法旨在统计事件的发生频次，近似估计每个像素在该时间段内的亮度变化，从而生成对应的灰度图像。同时，给出了本文方法生成的灰度图像结果。最后，将重建结果与帧相机拍摄的灰度图像进行对比，计算各灰度区域内的均值差异。

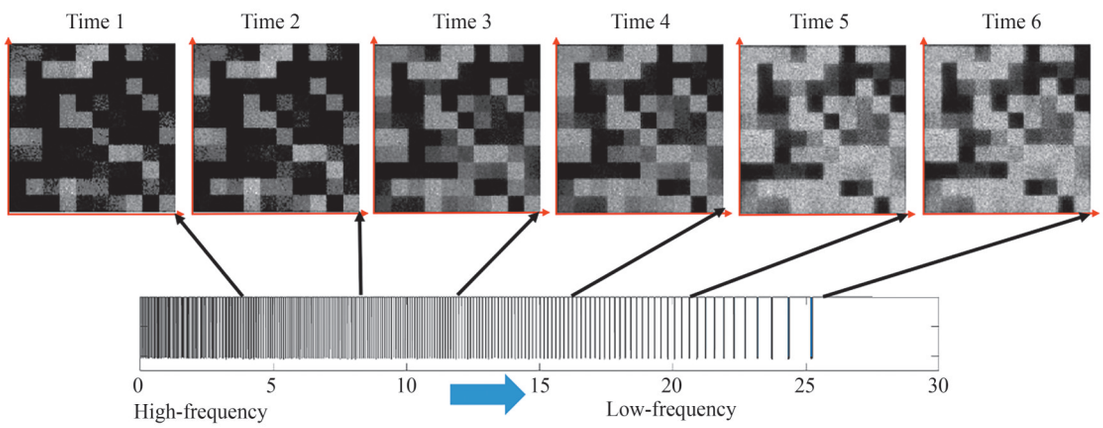


图9　随机生成的100阶灰度10×10的灰度板，从Time 1到Time 6的不同时刻对应的事件累积图像

Fig.9　Randomly generate 100 grayscale boards of 10×10, with cumulative images of events corresponding to different moments from Time 1 to Time 6

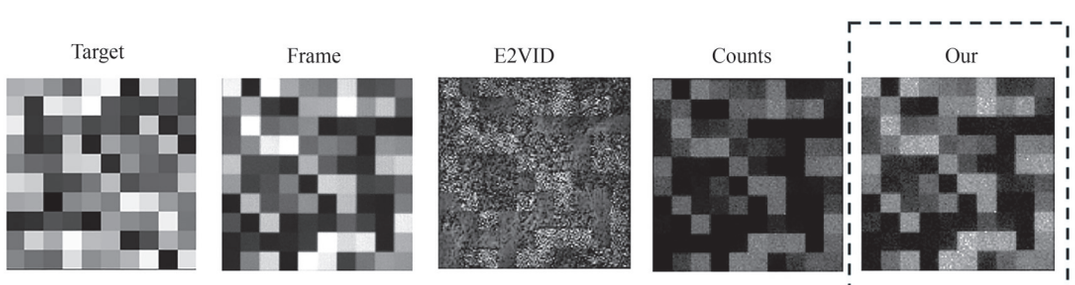


图10　随机目标的恢复，从左到右依次为目标图、帧相机图、E2VID恢复、计数法恢复以及本文采用的方法

Fig.10　Recovery of Random Targets. From left to right: target image, frame camera image, E2VID recovery, counting method recovery, and the method used in this paper

使用的E2VID从事件流中直接重建灰度帧，虽然能够显示一些轮廓信息，但由于缺乏时间维度的信息，其重建效果与实际拍摄效结果存在较大偏差。图10中的Counts方法使用事件累积进行灰度重建，假设事件的计数以线性地映射到像素的灰度值。然而，在实际场景中，亮度变化通常呈现非线性特征，尤其是在高动态范围场景下，基于线性假设的计数可能导致重构的图像灰度失真。

如表1所示，对三种灰度恢复方法在不同灰度阶数条件下的性能进行了评估。设置灰度阶梯为20×20（400阶灰度）、15×15（225阶灰度）、10×10（100阶灰度）和5×5（25阶灰度）。在事件相机内每个灰度占据20×20个像素（共400个像素），帧相机在同一区域获得的像素数量为80×80个像素（共6 400个像素）。通

表1　不同阶随机目标的相对误差

Table 1　RE under different random targets

Method	Order			
	400	225	100	25
E2VID	0.613 3	0.485 4	0.285 3	0.930 0
Counts	0.939 2	0.917 3	0.917 8	0.840 6
Our	0.977 9	0.992 0	0.964 4	0.810 5

过统计区域的灰度平均值，在固定时间窗口内所触发的事件帧图像，将所恢复的灰度和帧相机所采集的灰度进行逐一对。从快门开始旋转至停止的整个过程中，在不同灰度区域内产生的所有事件数N与帧相机获取的对应灰度值L分别进行采集，采用最小二乘法拟合得到事件数到灰度值的映射函数$L=F(N)$。并根据标定曲线作为灰度恢复过程中的映射系数，能够更加准确地描述事件数与灰度值之间的关系，从而提高灰度恢复的精度和稳定性。

本文方法在不同灰度阶数下均表现出优异的灰度恢复性能，显著优于其他方法。当灰度阶数为15时，精度最高可达0.992，尽管在阶数降至5时有所下降，但整体仍保持较高水平。原因是在标定过程中像面存在一定程度的不均匀性，导致在恢复过程中随着阶数的变化存在一定程度的波动。本文方法的整体灰度恢复精度仍显著优于E2VID等现有算法，且在静止场景下具有更为稳定的灰度恢复性能。

2.2 高动态范围成像重建与评估

经过标定后，事件流获得了灰度信息，解决了事件相机无法获得绝对强度的限制。为了验证该方法的有效性与泛化能力，将其应用于真实的高动态场景进行测试。验证过程遵循标定阶段确立的数据采集和处理流程，确保实验的一致性，并对重建的灰度图像进行评估。

2.2.1 极端光照条件场景构建

为了定量评估事件相机在极端光照条件下的高动态场景成像能力，在实验室内搭建了一个可控的高动态场景以测试其大动态场景的恢复能力。如图11(a)所示，使用一台150 W的氙灯光源(卓立汉光，Gloria-X150A)模拟高亮区域，经照度计(特安斯，TA630B)标定，如图11(c)所示，其中心照度可达200 000 lx；环境背景照度则被控制在约0.5 lx的极暗水平。具体实验布置如图11(b)所示。

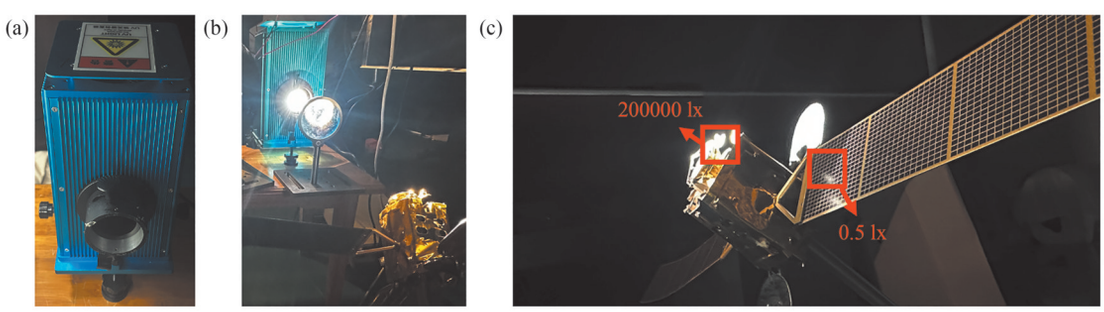


图11 氙灯和目标。(a)氙灯；(b)工作状态的氙灯；(c)氙灯照射至目标表面

Fig.11 Xenon lamp and target . (a) Xenon lamp source; (b) Xenon lamp at work; (c) Xenon lamp illuminates the target

根据动态范围计算公式可知场景的动态范围为

$$\mathrm{DR}_{\mathrm{scence}}=20\log_{10}\left(\frac{I_{\max}}{I_{\min}}\right)=20\log_{10}\left(\frac{200\,000}{0.5}\right)=112\ \mathrm{dB} \tag{11}$$

式中，$I_{\max}$为场景的最大照度200 000 lx，$I_{\min}$为场景最小照度0.5 lx。此场景的动态范围$\mathrm{DR}_{\mathrm{scence}}$可达112 dB，符合大动态场景的要求。

2.2.2 高动态场景重构

首先，使用传统相机拍摄的同一场景，并采用不同积分时间。图12显示了不同曝光时间下的结果。当曝光时间较短时，如图12(a)所示，场景出现欠曝光，无法呈现暗部细节；而当曝光时间较长时，如图12(b)和图12(c)所示，场景会过度曝光，导致亮部细节丧失。因此，采用传统相机进行灰度标定时，由于其动态范围有限，需要设置多个曝光时间，以有效覆盖场景的真实动态范围。此场景下测量可得传统相机所拍摄的场景动态范围为

$$\mathrm{DR}_{\mathrm{frame}}=20\log_{10}\left(\frac{I_{\max}}{I_{\min}}\right)=20\log_{10}\left(\frac{200\,000}{100}\right)=66\ \mathrm{dB} \tag{12}$$

传统相机的动态范围为66 dB，远小于场景的真实动态范围，无法满足高动态场景的成像需求。在传统帧相机中，曝光时间决定了图像的亮度范围，但在高动态场景下，单一曝光时间易出现欠曝光或过曝光现象，从而限制成像的动态范围。相比之下，事件相机基于光强对数变化触发事件，更适合高动态范围场景的成像。

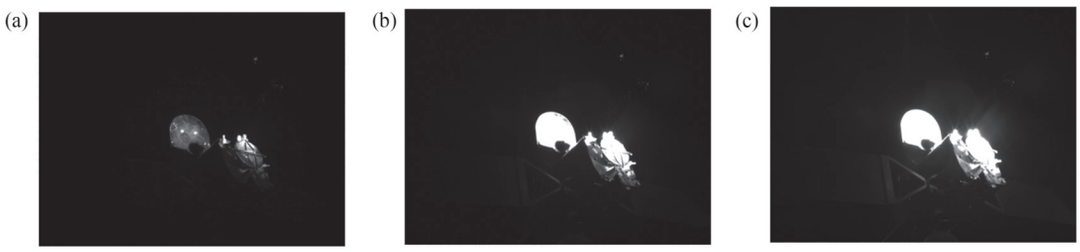


图12　传统帧相机拍摄不同积分时间拍摄。(a)1 000 μs;(b)1 100 000 μs;(c)1 250 000 μs

Fig.12　Traditional frame cameras capture images with varying exposure times. (a)1 000 μs; (b)1 100 000 μs; (c)1 250 000 μs

使用事件相机拍摄高动态场景之前,需要建立事件相机输出与光强之间的定量关系。使用1.2节中提出的标定方法,建立事件数量与灰度值之间的映射关系,再对所拍摄的高动态场景进行灰度映射。为了在单次快门旋转过程中获得多组不同等效曝光量的事件流,在同一旋转轴上布置了三种不同宽度的快门开口,分别对应狭缝、半开与全开三种状态,如图13所示,且三者在相同转速下同步工作。三种不同宽度的快门在同一转速下分别对应不同的入射光通量,使得在同一次旋转过程中能够获取多组覆盖不同亮度区间的事件数据。

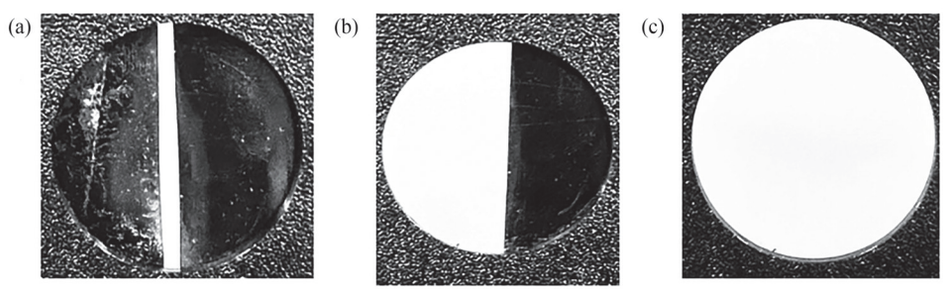


图13　不同快门宽度。(a)狭缝;(b)半开;(c)全开

Fig.13　Different shutter widths. (a) Slit; (b) Half-open; (c) Fully open

采集过程使用与标定阶段相同的机械快门配置。图14(a)~(c)分别给出了狭缝、半开与全开三种快门宽度下恢复得到的中间灰度结果。由于事件相机中像素的触发模型可近似表示为光强的对数变化,单个像素在时间窗口 Δt 内触发的事件数量与光强 $I(x,y)$ 之间有如下关系:

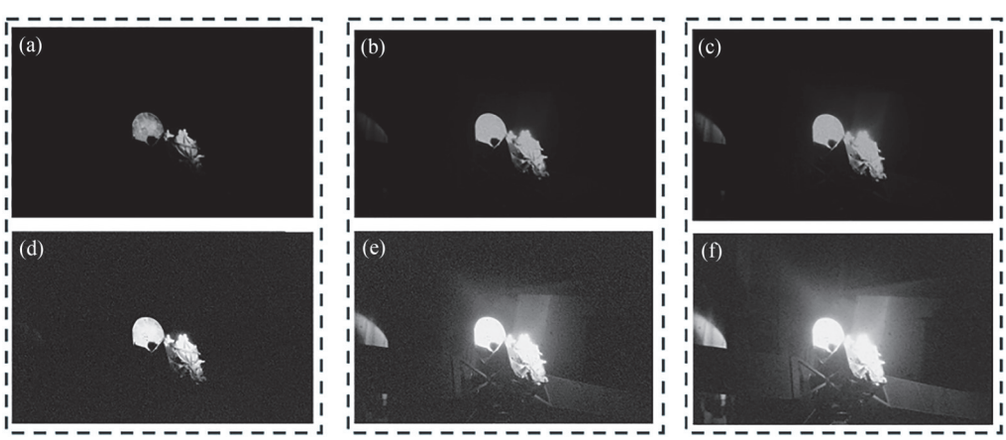


图14　不同快门宽度所拍摄图像。(a)狭缝成像;(b)半开快门成像;(c)全开快门成像;(d)、(e)、(f)为对应的可视化显示

Fig.14　Images captured under different shutter widths. (a) slit imaging; (b) half-open shutter imaging; (c) fully open shutter imaging; (d), (e), and (f) are the corresponding visualizations

$$N_{\text{event}}\left(x,y,\Delta t_i\right)\propto\log\left(I(x,y)\right) \tag{13}$$

利用式(12)中的对数关系,可以将暗部区域中弱光引起的微小亮度变化通过事件计数放大并可视化,对应的重建结果如图14(d)~(f)所示,暗区细节得以显著增强。

结合1.2节中得到的事件-灰度标定关系$L=F(N)$,对于给定的快门宽度与时间窗口Δt_i,可以将每个像素在该窗口内的事件数映射为灰度值,得到对应条件下的灰度重建结果$g(x,y,\Delta t_i)$。

为了获得完整的场景重建结果,需要将不同快门宽度条件下的事件重建图像进行融合。根据式(8)可知,在相同成像条件下,事件数量可表征不同的强度等级,因此可以将不同快门下重建的灰度结果进行累积融合。

$$G(x,y)=\sum_{i=1}^{M}g(x,y,\Delta t_i) \tag{14}$$

式中,M表示所采用的快门个数。融合后的$G(x,y)$能够同时保留暗部与亮部的结构细节,实现对高动态场景的有效重建。重建结果如图15所示。

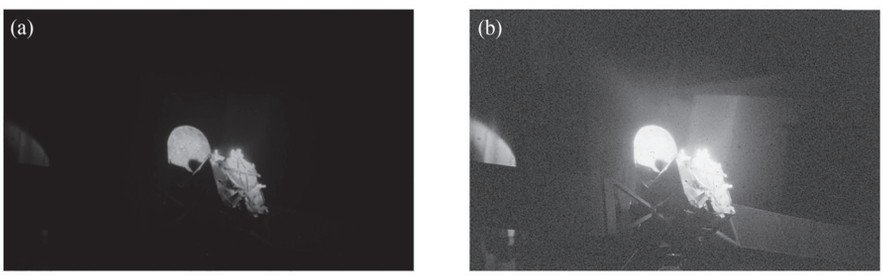


图15 重建结果。(a)结果图;(b)对数变换后显示的图像

Fig.15 Reconstruction Result Image. (a) Result Image; (b) The image displayed after logarithmic transformation

进行融合之后的图像将覆盖场景的112 dB动态范围,如图14所示,在保留清晰的亮部区域细节的同时显示出暗部区域的细节信息。但由于暗光区域需要更多的曝光时间予以触发事件,在拍摄过程中暗光区域所受噪声波动较大。因此会有大量噪声产生,在拍摄过程中,快门所拍摄的图像按照信噪比公式有

$$\mathrm{SNR}=20\log_{10}\left(\frac{\mu}{\delta}\right) \tag{15}$$

式中,μ表示图像区域的均值大小,μ表示图像区域的标准差。得到最终的图像目标区域的信噪比为20.14 dB,背景区域信噪比为1.3 dB。尽管事件相机相对于传统相机拥有更大的动态范围,但其受限于暗电流噪声、热噪声、散粒噪声和阈值波动噪声等影响,成像质量会有所下降,导致信噪比的进一步降低。

3 结论

本文提出并验证了一种基于快门映射的事件相机高动态静止场景成像方法。该方法的核心在于引入机械快门作为主动驱动装置。与现有的混合事件相机相比,该方法有效克服了在静止场景下因缺乏亮度变化无法产生事件流的局限性。本文方法使用纯事件流的事件相机,在动态范围高达112 dB的极端光照条件下,实现了静止场景的灰度重建。与现有方法相比,本文方法显著提升了重建质量,减少了灰度失真。此外,所提出机械快门触发机制还具备通用性和可移植性,可为不同型号事件相机提供可控的主动刷新机制。本方法仍存在一定的优化空间,所得到的灰度图像需要针对特定的噪声进行优化,以提升图像的信噪比。未来可结合事件流反馈动态调节快门速度,并引入深度学习方法以进一步提升重建质量和计算效率,探索其在动态场景和目标运动下的适应能力。

参考文献

[1] ALIAKBARPOUR H, MOORI A, KHORRAMDEL J, et al. Emerging trends and applications of neuromorphic dynamic vision sensors: a survey[J]. IEEE Sensors Reviews, 2024, 1: 14-63.

[2] GALLEGO G, DELBRUCK T, ORCHARD G, et al. Event-based vision: a survey[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2022, 44(1): 154-180.

[3] GLOVER A, BARTOLOZZI C. Event-driven ball detection and gaze fixation in clutter[C]. 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, 2016: 2203-2208.

[4] MUGLIKAR M, MOEYS D P, SCARAMUZZA D. Event guided depth sensing[C]. 2021 International Conference on 3D Vision (3DV), IEEE, 2021: 385-393.

[5] KONG Delei, FANG Zheng. A review of event-based vision sensors and their applications[J]. Information and Control,

2021,50(1):1-19.
孔德磊, 方正. 基于事件的视觉传感器及其应用综述[J]. 信息与控制,2021,50(1):1-19.
[6] AFSHAR S, NICHOLSON A P, VAN SCHAIK A, et al. Event-based object detection and tracking for space situational awareness[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(24): 15117-15132.
[7] COHEN G, AFSHAR S, MORREALE B, et al. Event-based sensing for space situational awareness[J]. The Journal of the Astronautical Sciences, 2019, 66(2): 125-141.
[8] LV Y, ZHOU L, LIU Z, et al. Structural vibration frequency monitoring based on event camera[J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(8): 085007.
[9] LV Y, ZHOU L, LIU Z, et al. Small space target detection using megapixel resolution CeleX-V camera[J]. Journal of Electronic Imaging, 2024, 33(5) :085007.
[10] BELBACHIR A N, SCHRAML S, MAYERHOFER M, et al. A novel HDR depth camera for real-time 3D 360° panoramic vision[C].2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, IEEE, 2014: 425-432.
[11] REBECQ H, GALLEGO G, MUEGGLER E, et al. EMVS: event-based multi-view stereo—3D reconstruction with an event camera in real-time[J]. International Journal of Computer Vision, 2018, 126(12): 1394-1414.
[12] CAO R, GALOR D, KOHLI A, et al. Noise2Image: noise-enabled static scene recovery for event cameras [J]. Optica, 2025, 12(1): 46-55.
[13] BRANDLI C, MULLER L, DELBRUCK T. Real-time, high-speed video decompression using a frame- and event-based DAVIS sensor[C]. 2014 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), IEEE, 2014: 686-689.
[14] HAN J, ZHOU C, DUAN P, et al. Neuromorphic camera guided high dynamic range imaging[C]. 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR),IEEE, 2020: 1727-1736.
[15] BAO Y, SUN L, MA Y, et al. Temporal-mapping photography for event cameras [C]. European Conference on Computer Vision,2024: 55-72.
[16] WU Y, TAN G, CHEN J, et al. Event-based asynchronous HDR imaging by temporal incident light modulation[J]. Optics Express, 2024, 32(11): 18527.
[17] GAO Q, SUN X, YU Z, et al. Understanding and controlling the sensitivity of event cameras in responding to static objects[C]. 2023 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics ,IEEE, 2023: 783-786.
[18] LICHTSTEINER P, POSCH C, DELBRUCK T. A 128×128 120 db 15μs latency asynchronous temporal contrast vision sensor[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2008, 43(2): 566-576.
[19] HAFLIGER Ph. Asynchronous event redirecting in bio-inspired communication[C]. 8th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems ,IEEE, 2001: 87-90.
[20] Inivation. Understanding the performance of neuromorphic event-based vision sensors[R/OL]. 2020-05. https://inivation.com/wp-content/uploads/2020/05/White-Paper-May-2020.pdf
[21] REBECQ H, RANFTL R, KOLTUN V, et al. High speed and high dynamic range video with an event camera[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2021, 43(6): 1964-1980.

Research on Event Camera Imaging Methods for High Dynamic Range Static Scenes

ZHANG Haiyang[1,2,3], LV Yuanyuan[1,3], LI Jing[1], CUI Kai[1,3], LIU Zhaohui[1,3], YAO Dalei[1], ZHOU Liang[1,3]

(1 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an* 710119, *China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

(3 *Key Laboratory of Space Precision Measurement Technology, Chinese Academy of Sciences, Xi'an* 710119, *China*)

Abstract: Event cameras are a novel type of visual sensor inspired by the biological retina, capable of asynchronously capturing pixel brightness changes with microsecond-level temporal resolution. Unlike traditional cameras that capture frames at fixed intervals, event cameras only trigger an event when pixel brightness exceeds a preset threshold. This unique mechanism endows event cameras with an ultra-wide dynamic range of up to 140 decibels and exceptional temporal resolution, granting them significant advantages in high-speed, high-dynamic-range scenarios such as object tracking, motion detection, and Simultaneous Localization and Mapping (SLAM). These capabilities enable event cameras to capture rapid movements and subtle changes in dynamic scenes that conventional cameras might miss. However, event cameras have a significant limitation: they can not directly capture grayscale images in static scenes. This is

because when a scene is stationary and light intensity remains constant, the camera detects no change in light intensity, failing to meet the conditions for event triggering. These characteristics restrict their application in scenarios requiring complete brightness information, such as static object or scene recognition and measurement in traditional image processing tasks. Consequently, despite their ultra-high dynamic range, temporal resolution, and exceptional performance in dynamic environments, event cameras still face challenges in applications demanding detailed, continuous brightness data acquisition under static conditions.

To address the challenge of capturing static scenes with event cameras, this paper introduces a novel approach using mechanical shutter mapping for imaging. The core innovation lies in modulating brightness variations in static scenes through the rotation of a mechanical shutter, triggering events even in the absence of light intensity changes. By adjusting the shutter′s rotation speed at varying rates, discrete events are generated, which are then reconstructed into High Dynamic Range (HDR) grayscale images. This technique overcomes a significant limitation of traditional event cameras, which struggle to capture static scenes due to the lack of natural light variations. A key aspect of this method is the calibration process, which ensures that the generated event data is accurately aligned with the actual light intensity of the scene, enabling precise and accurate grayscale image reconstruction. In this setup, the mechanical shutter acts as an active driving mechanism, inducing event generation by modulating the scene′s brightness. This allows the event camera to capture dynamic information in static scenes, where traditional event cameras would otherwise fail to register changes. As a result, this method significantly enhances the imaging capabilities of event cameras, broadening their potential applications in static environments with minimal or no natural light variations.

Experimental results show that the reconstructed HDR images achieve a dynamic range of up to 112 dB. This range allows the event camera to capture fine details in both dark and bright areas of the scene, overcoming the limitations of conventional cameras with fixed dynamic ranges. The calibration process further improves the accuracy of grayscale image reconstruction. Our experimental results demonstrate that shutter-based techniques successfully reconstruct grayscale images of static scenes under extreme lighting conditions. Compared to prior methods, this approach significantly improves image quality, reduces grayscale distortion, and preserves details often lost in conventional event reconstruction techniques. By generating events through controlled brightness variations, this method enhances the imaging capabilities of event cameras in static environments. Furthermore, the mechanical shutter mechanism facilitates portability, enabling adaptation to multiple event camera models and enhancing the system′s versatility and practical applicability. Beyond expanding event cameras′ capabilities in static scenes, this approach also provides a solution for event cameras operating under complex lighting conditions. Our shutter mapping technology offers a controlled event triggering mechanism, enabling event cameras to function in scenarios where traditional methods fail. This opensnew possibilities for event cameras in fields requiring high-quality grayscale images, such as industrial inspection.

This paper proposes and validates a shutter-mapped event camera method for grayscale imaging in high-dynamic-range static scenes. The core innovation of this approach lies in introducing a mechanical shutter as an active driving mechanism, which effectively overcomes the limitation that event cameras cannot generate event streams in static scenes due to the absence of brightness changes. By modulating the scene′s brightness using controlled shutter rotations, the event camera can trigger events even in stationary conditions. Experimental results demonstrate that this method successfully reconstructs grayscale images of high-dynamic-range static scenes, achieving a dynamic range of up to 112 dB under extreme illumination conditions, all using a frameless event camera. Compared to existing methods, our approach significantly improves reconstruction quality, reduces grayscale distortion, and preserves fine details. Additionally, the proposed mechanical shutter triggering mechanism offers versatility and portability, providing a controllable active refresh mechanism that is compatible with various event camera models. In summary, the shutter mapping method extends the capabilities of event cameras in static scenes, enabling high-quality HDR grayscale image reconstruction. By inducing brightness variations through mechanical shutter actuation, event cameras can generate event streams and reconstruct HDR images, even in static scenes with extreme lighting conditions.

Key words: Event camera; HDR image; Mechanical shutter; Grayscale image; Imaging method

OCIS Codes: 110.2960; 110.2970; 110.3000; 110.3010

CSTR: 32255.14.gzxb20265503.0311003

Foundation item: National Science and Technology Major Project (2022ZD0117301), Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Vehicle (J2025-STAV-01-001)