

引用格式: ZENG Sikang, ZHAO Rujin, MA Yuebo, et al. An Event-based Method for Extracting Star Points from High Dynamic Star Sensors[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(9):0912003

曾思康, 赵汝进, 马跃博, 等. 基于事件的高动态星敏传感器星点提取方法[J]. 光子学报, 2022, 51(9):0912003

# 基于事件的高动态星敏传感器星点提取方法

曾思康<sup>1,2,3</sup>, 赵汝进<sup>1,2,3</sup>, 马跃博<sup>1,2,3</sup>, 朱自发<sup>1,2,3</sup>, 唐雨萍<sup>1,2,3</sup>, 朱梓建<sup>1,2,3</sup>

(1 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 中国科学院空间光电精密测量技术重点实验室, 成都 610209)

**摘要:**针对传统帧模式星敏传感器在高动态( $\geq 3^\circ/\text{s}$ )下星点质心提取精度低或提取失败的问题,提出一种基于事件的高动态星敏传感器星点提取方法。该方法基于事件相机低延迟、高时间分辨率的特性,解决了高动态条件下的运动模糊问题。首先,提出基于时空密度的噪声去除方法,针对事件流进行降噪处理,平均去噪精度在 0.85 以上,提高了事件信噪比。其次,提出基于均值漂移的星点定位方法,计算星点事件簇的中心作为星点质心。最后,通过不同条件下的仿真实验,验证了所提去噪方法的有效性和鲁棒性,且角速度达到  $20^\circ/\text{s}$  时,仍可完成星点提取,角速度在  $3^\circ/\text{s}\sim 10^\circ/\text{s}$  时,平均质心误差小于 0.04 pixel,角速度达到  $15^\circ/\text{s}$  时,平均质心误差小于 0.1 pixel。

**关键词:**星敏传感器;事件相机;质心提取;高动态;时空密度;均值漂移

中图分类号:V249.31

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225109.0912003

## 0 引言

星敏传感器是根据惯性坐标系下恒星的位置测量航天器在惯性坐标系下姿态的姿态敏感器,是现有姿态敏感器中精度最高的姿态测量设备,具有无漂移、工作寿命长等优点。它是航天器赖以生存和性能提升的基础性和关键性器件,在对地遥感、深空探测以及高精度探测等航天应用领域中具有重要的战略意义<sup>[1]</sup>。

传统星敏传感器采用的是基于帧的成像模式,如全局曝光和卷帘曝光,在一定曝光时间内生成一帧星图。但是这种成像模式在航天器大幅度机动的高动态条件下,拍摄的星图会产生运动模糊,出现“星点拖尾”效应,加上噪声影响,使得星图信噪比显著降低,造成星点质心提取精度降低甚至提取失败,严重限制了星敏传感器的动态性能。基于事件的星敏传感器星点提取,采用的是事件相机的成像模式,突破了传统帧图像的模式,采用事件驱动的方式生成流态事件数据,其输出的是像素的亮度变化<sup>[2]</sup>。与传统基于帧的成像模式相比,事件相机具有两个主要的优点:第一,高时间分辨率,可以极大地提高恒星跟踪的动态性能。第二,由于事件驱动的方式,在星空背景下,具有较小的数量,且功耗更小。

近年来,基于事件的信息处理在机器人和计算机视觉领域得到了极大的关注。许多核心功能,如光流估计<sup>[3]</sup>、3D重建<sup>[4]</sup>、SLAM<sup>[5]</sup>等,已证明使用事件相机可以取得更优异的性能。尤其是在高动态问题中,基于事件相机的性能明显优于传统相机。在空间领域的应用,COHEN G等使用事件相机结合大口径、长焦距地基望远镜探测太空中的运动目标,在白天和夜晚均可观测到从 LEO 到 GEO 的空间物体,证明了使用事件相机观测空间物体的可行性<sup>[6]</sup>。CHEUNG B等使用事件相机观察空间目标,并用概率多假设跟踪器从事件流中估计目标轨迹,证明了在事件流中使用概率多假设模型跟踪快速移动的空间目标的可行性和合理性,但这种方法在对较暗的物体跟踪时可能导致较多的错误轨迹<sup>[7]</sup>。CHIN T J等将事件相机用于恒星跟踪,但其

基金项目:中国科学院“西部之光”人才计划(No.YA21K001),四川省西部之光专项,四川省杰出青年科技人才项目

第一作者:曾思康(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为事件相机、星敏传感器。Email:zengsikang19@mailsucas.ac.cn

导师(通讯作者):赵汝进(1982—),男,研究员,博士,主要研究方向为空间目标视觉测量、星敏传感器等。Email:zrj0515@163.com

收稿日期:2022-01-25;录用日期:2022-04-29

<http://www.photon.ac.cn>

着重点在姿态估计,没有进行明确的星点提取<sup>[8-9]</sup>。ROFFES等将事件相机放在广谱中子的照射下来观测其单粒子效应,结果表明事件相机能够在类似太空的辐射环境中工作<sup>[10]</sup>。这些工作都没有涉及到基于事件相机的高动态星点质心提取。

本文针对传统星敏传感器在高动态下( $\geq 3^\circ/\text{s}$ )星点质心提取精度低和现有基于事件的方法的缺点提出一种基于事件的高动态星敏传感器星点质心提取方法,基于时空密度的方法,去除噪声事件,增强流态事件数据的信噪比,并基于均值漂移定位星点位置进一步计算星点质心,从而实现在高动态下亚像素级的提取精度。

## 1 基于事件的星敏传感器原理

星敏传感器是通过拍摄深空中的导航星来解算航天器的姿态信息。首先,星敏传感器的感光探测器在曝光时间内以积分成像方式生成星图,然后进行定位星图中的星点,提取星点质心坐标,再根据星敏传感器的参数计算出星点在星敏传感器坐标系下的方向矢量,在星敏传感器初始姿态捕获阶段通过星图识别技术识别出当前拍摄到的星点在导航星表中所对应的导航星,进而得到星敏传感器在惯性坐标系中的方向矢量,最后解算出此时星敏传感器的三轴姿态信息<sup>[11]</sup>。其工作流程如图1。

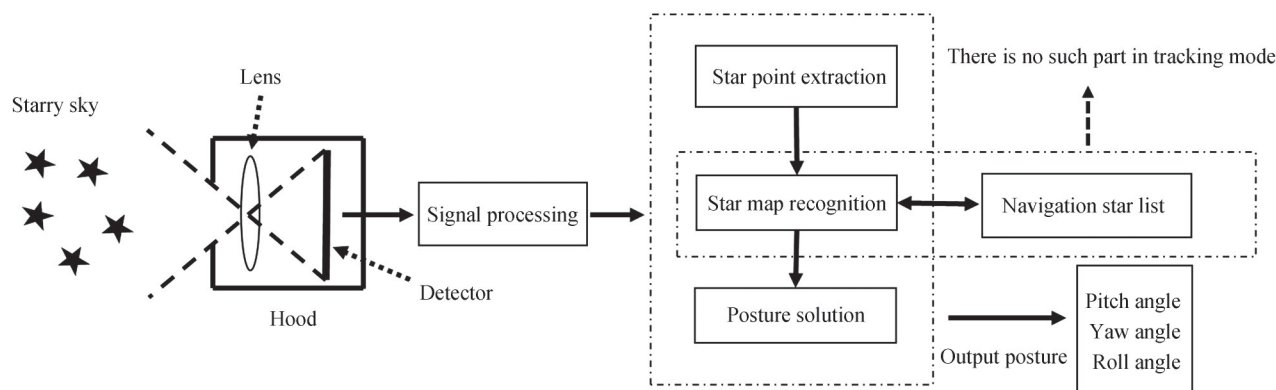


图1 星敏传感器工作原理  
Fig.1 Working principle of star sensor

星点质心提取是星敏传感器中至关重要的一个环节,直接关系到星敏传感器最终姿态的测量精度。星敏传感器所敏感的导航星是远距离目标,其在天球坐标系中的方位是高精度天文观测数据,精度在毫角秒量级,且几乎恒定不变,因此星敏传感器最后解算的姿态精度主要取决于数字图像中星点质心的提取精度。传统星敏传感器的星点质心提取方法一般是将整幅图的平均灰度值作为背景噪声灰度值,再用星点区域灰度值减去背景噪声得到校正的星点,最后用灰度质心法计算星点精确质心。星点质心提取的流程如图2。

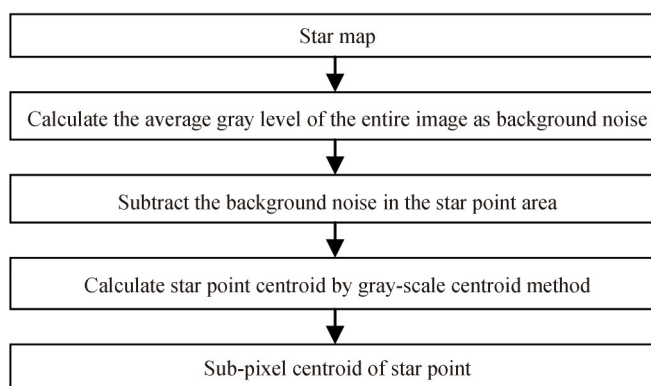


图2 星点质心一般提取流程  
Fig.2 General extraction process of star point centroid

基于事件的星敏传感器采用事件相机对导航星成像。事件相机<sup>[12]</sup>,又叫动态视觉传感器(Dynamic Vision Sensor, DVS),是一种新型的动态图像传感器。传统的相机是以一定的速率获取整幅图像,而事件相机只

对场景中的每个像素的亮度变化异步且独立地做出响应,响应速度可达微秒甚至纳秒级,图3为简化的事件相机像素电路图。这些变化叫做事件,当像素的亮度变化超过阈值时,事件相机就会输出一个事件,图4(a)为事件异步触发示意图。一个事件 $e(x, y, t, p)$ 包含四个元素:像素行坐标 $x$ 、像素列坐标 $y$ 、发生事件的时刻 $t$ 、表征亮度变化的极性 $p$ 。因此,事件相机的输出是一系列由事件组成的数据速率可变的异步事件流,图4(b)为事件相机与传统相机输出对比图。事件相机由于内部电路结构加上外部环境因素的影响,输出的事件流中会有一些量的噪声,图5(a)是视场中的星空,图5(b)是事件相机仿真器生成的星点事件流。

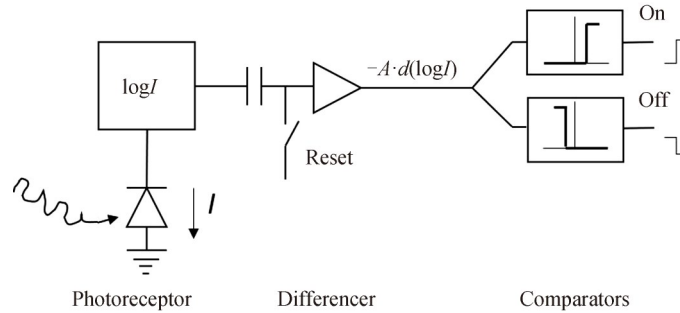


图3 简化的事件相机像素电路图  
Fig.3 Simplified circuit diagram of the event camera pixel

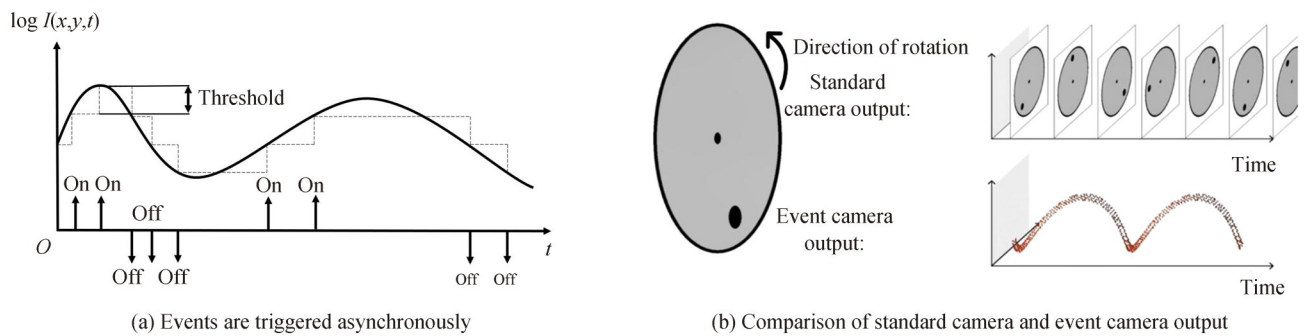


图4 事件相机工作原理  
Fig.4 Working principle of event camera

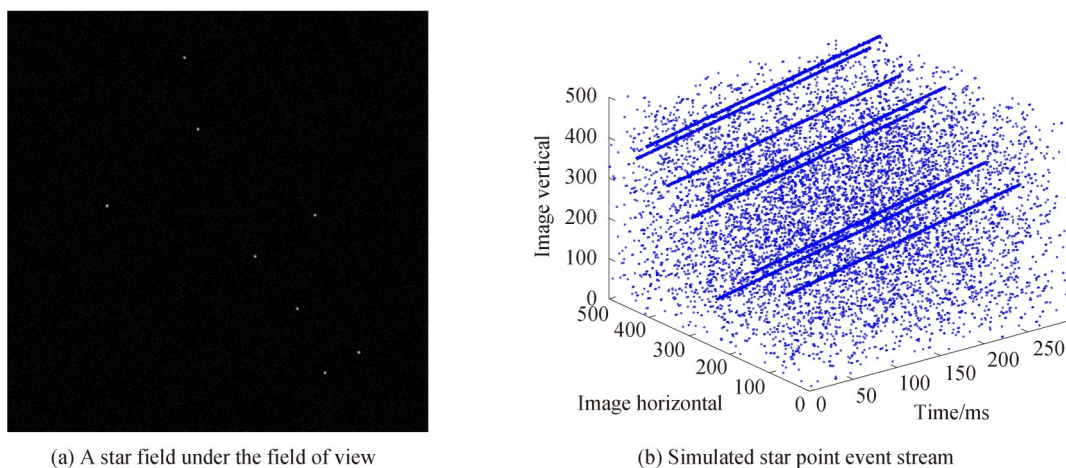


图5 视场中的星图与仿真星点事件流  
Fig.5 Star map in the field of view and simulated star point event stream

## 2 基于事件的星点提取方法

基于事件的高动态星敏感器的星点提取方法由于数据格式的不同,在处理方法上难以应用传统的质心提取方

法,如图5(b)。因此,本文提出基于事件的星点提取方法主要分为两步:第一步根据星点事件与噪声事件之间的时空相关性和密度特性对事件流去噪;第二步利用均值漂移聚类对星点事件簇进行定位,计算事件簇的质心作为星点质心。图6为本文所提方法的流程框图。

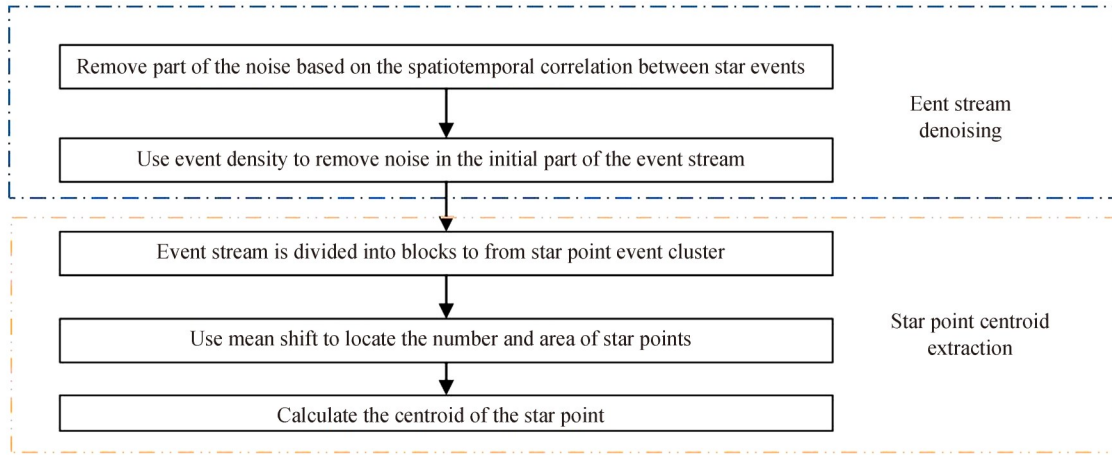


图6 算法流程  
Fig.6 Algorithm flow

### 2.1 基于时空密度的事件流降噪

受到背景噪声、空间杂散光和暗电流等因素的影响,事件相机输出的事件流中会有虚假事件,即由非星点运动产生的噪声事件。这些噪声事件除了会占用输出带宽,还会干扰星点坐标位置的确定,严重影响星点质心的提取。噪声事件随机出现在不同的位置与时刻,密度和时空相关性低<sup>[13]</sup>。真实的星点事件是航天器与导航星之间的相对运动导致光强变化产生的,且被激发的像素在一定的时间段内一般都是相邻的,所以在某个时间邻域内,星点事件流密度大且时空相关性高。因此,可通过基于时空密度的方法对事件流去噪。

判断两个事件  $e_1(x_1, y_1, z_1)$  和  $e_2(x_2, y_2, z_2)$  的时空相关性

$$\begin{cases} x_1 - \frac{L-1}{2} \leq x_2 \leq x_1 + \frac{L-1}{2} \\ y_1 - \frac{L-1}{2} \leq y_2 \leq y_1 + \frac{L-1}{2} \\ t_2 - t_1 \leq \Delta t \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $L$  表示空间邻域大小,为奇数;  $\Delta t$  表示时间邻域大小,如图7所示。

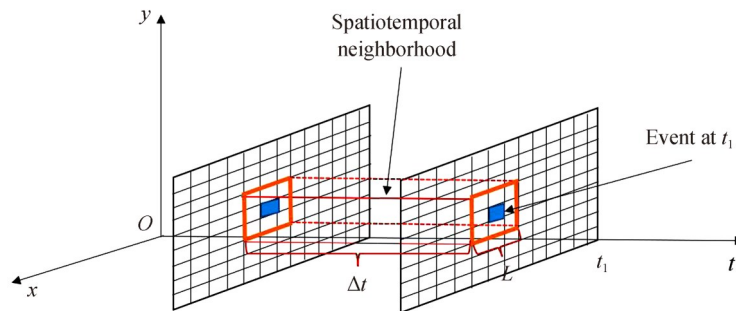


图7 时空邻域示意  
Fig.7 Schematic of spatiotemporal neighborhood

单个事件所包含的信息并不能反映其与其他事件的关系,为保证事件的低延迟特性,在逐个处理事件时,需要分析其与已发生事件的关系,尤其是该事件与其时空邻域内事件的关系。根据已到达事件判断新到达事件是否为噪声的步骤为:

- 1) 将每个新到达事件  $e_i(x_i, y_i, t_i, p)$  的时间戳  $t_i$  存储在一个与事件相机分辨率相同大小的矩阵中,存储



位置为矩阵中对应的行列 $(x_i, y_i)$ 及其8邻域,并覆盖掉之前的时间戳。

2)判断当前位置的时间戳是否在此位置写入的前一个时间戳的 $\Delta t$ 范围之内,即

$$t_c - t_p \leq \Delta t \quad (2)$$

式中, $t_c$ 为新到达事件的时间戳; $t_p$ 为此位置写入的前一个已到达事件的时间戳。

3)若新到达事件满足式(2),则为星点事件,否则为噪声事件去除掉。

上述处理之后,初始部分的事件流中的噪声没有去掉,这是因为对于某个位置开始到达的事件,在其时间邻域内没有对比事件。因此,为了能够后续提取出任意时刻的星点质心,计算初始部分事件流的密度进行去噪。

以每个事件为中心,建立一个 $L \times L$ 的矩阵 $D$ , $L$ 为奇数,分别统计该事件及其8邻域共 $L^2$ 个位置的事件个数,并放入矩阵 $D$ 中对应的位置。

$$D(i, j) = \epsilon \left( x_0 - \frac{L-1}{2} - 1 + i, y_0 - \frac{L-1}{2} - 1 + j, t \right) \quad (3)$$

式中, $D(i, j)$ 表示矩阵 $D$ 中第 $i$ 行第 $j$ 列的元素, $(x_0, y_0)$ 为事件的空间坐标, $1 \leq i, j \leq L$ , $\epsilon(x, y, t)$ 是一个二值函数,表示为

$$\epsilon(x, y, t) = \begin{cases} 1 & \text{if there is an event } e(x, y, t) \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (4)$$

计算矩阵中所有元素的累加和 $R$ ,表示为

$$R = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} D(i, j) \quad (5)$$

若 $R$ 大于设定的阈值,则为星点事件保留下来,否则为噪声事件,去掉。

## 2.2 基于均值漂移的星点质心提取

事件流传递的信息不再是像传统图像那样以灰度的形式传递图像信息,而是通过事件簇来传递<sup>[14]</sup>。光强变化、星点的运动都会产生事件,这些事件在时空上关联比较紧密,称之为事件簇,可以展示星点的运动轨迹等信息。获取事件簇的方式主要有两种,一种是固定时间切片,一种是固定事件数量切片。但是固定事件数量切片会受到拍摄场景、目标数量、传感器分辨率等因素的影响,在相同事件数量情况下,存在事件簇不能完整表达目标的可能。因此在处理星点事件流时选择固定时间切片。

计算任意时刻 $t_0$ 的星点质心坐标,截取事件流时间切片 $[t_0 - dt, t_0 + dt]$ 如图8。

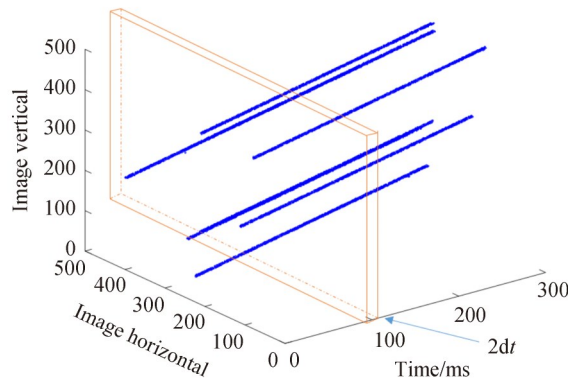


图8 截取时间切片示意

Fig.8 Schematic of intercepting time slice

事件是异步输出的,即一个时刻只有一个事件,所以 $t_0$ 时刻无法确定视场中星点的个数。为了定位视场中所有星点,采用均值漂移对时间切片 $[t_0 - dt, t_0 + dt]$ 内所有事件聚类。

随机选择一个事件作为中心点,计算在半径为 $D$ 的圆形空间中所有事件点与中心点的偏移向量。

$$M(x) = \frac{1}{k} \sum_{x_i \in S_D} (x - x_i) \quad (6)$$

式中,  $k$ 为包含在  $S_D$  范围内事件的个数,  $x_i$ 为包含在  $S_D$  范围内的事件的空间坐标,  $S_D$ 为以  $x$ 为中心点, 半径为  $D$ 的圆形区域, 满足以下关系的  $y$ 点的集合

$$S_D = \{y: (y - x)^T (y - x) \leq D^2\} \quad (7)$$

沿着漂移向量方向更新中心点

$$x_{T+1} = M_T + x_T \quad (8)$$

式中,  $M_T$ 为  $T$ 状态下求得的偏移向量;  $x_T$ 为  $T$ 状态下的中心点。

重复上述步骤, 直到偏移向量的模小于一定的阈值停止更新。如果当前事件簇  $C_1$ 的中心与某个事件簇  $C_2$ 中心的距离小于某个阈值, 则把当前事件簇归类为  $C_2$ , 否则事件簇的个数加一。遍历完时间切片中所有的事件, 完成对所有星点事件的聚类。

计算每个事件簇的质心即为星点质心

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{N_{\text{stark}}} x_{\text{stark}} \\ \sum_{N_{\text{stark}}} y_{\text{stark}} \end{bmatrix} / N_{\text{stark}} \quad (9)$$

式中,  $x_c$ 为事件簇质心的横坐标,  $y_c$ 为事件簇质心的纵坐标,  $N_{\text{stark}}$ 为组成导航星  $K$ 的事件个数,  $x_{\text{stark}}$ 为组成导航星  $K$ 中事件点的横坐标,  $y_{\text{stark}}$ 为组成导航星  $K$ 中事件点的纵坐标。

### 3 实验与结果

#### 3.1 事件流去噪仿真实验与分析

本节所用星敏传感器参数如表1, 根据式(10)计算星敏传感器以速度  $v$ (pixel/ms)运动时的角速度  $\omega$ 。其中  $d$ 是像元尺寸,  $f$ 是焦距。根据事件相机的成像原理仿真星点事件流。

$$\omega = 2 \arctan \left( \frac{d \cdot v}{2f} \right) \quad (10)$$

表1 星敏传感器参数

Table 1 Parameters of star sensor

Parameter	Value
Focal length/mm	24
Pixel size/ $\mu\text{m}$	5.5
Field of view/( $^\circ$ )	10 $\times$ 10
Imager size/pixel	1 024 $\times$ 1 024

评估去噪效果的优劣, 除了视觉直观定性上的评价, 还需要具有科学性和综合性的评价指标。但是目前还没有统一的评价标准, 以参考文献[15]中提出的事件去噪精度(Event Denoising Precision, EDP)和事件信噪比(Event Signal-to-noise Ratio, ESNR)作为本文去噪效果优劣的评估指标。

EDP的计算表达式为

$$\text{EDP} = \frac{N_{\text{star-event}}}{N_{\text{total}}} \quad (11)$$

式中,  $N_{\text{star-event}}$ 为事件流中星点事件数量,  $N_{\text{total}}$ 为事件流中所有事件的个数。该值越大, 去噪效果越好。

ESNR的计算表达式为

$$\text{ESNR} = 10 \lg \left( \frac{N_{\text{star-event}}}{N_{\text{noise}}} \right)^2 \quad (12)$$

式中,  $N_{\text{noise}}$ 为事件流中噪声事件的个数。该值越大, 去噪效果越好。

为了验证去噪方法的有效性与鲁棒性, 在星点仿真事件流中分别加入10%、30%、50%和80%的随机噪声。图9为去噪前后三维视图, 分别给出了在不同噪声强度下的去噪效果可视化图, 随着噪声比率的增加, 本文所提方法均可以较好地剔除虚假噪声事件。图(10)是不同噪声强度下去噪前后EDP和ESNR对比图, 由图可知随着噪声比率的增大, 事件流数据的EDP和ESNR减小, 而本文所提的基于时空密度的事件流去噪方法对事件流去噪之后, EDP均在0.85以上, 在不损失有效星点事件的基础上将事件流数据的ESNR

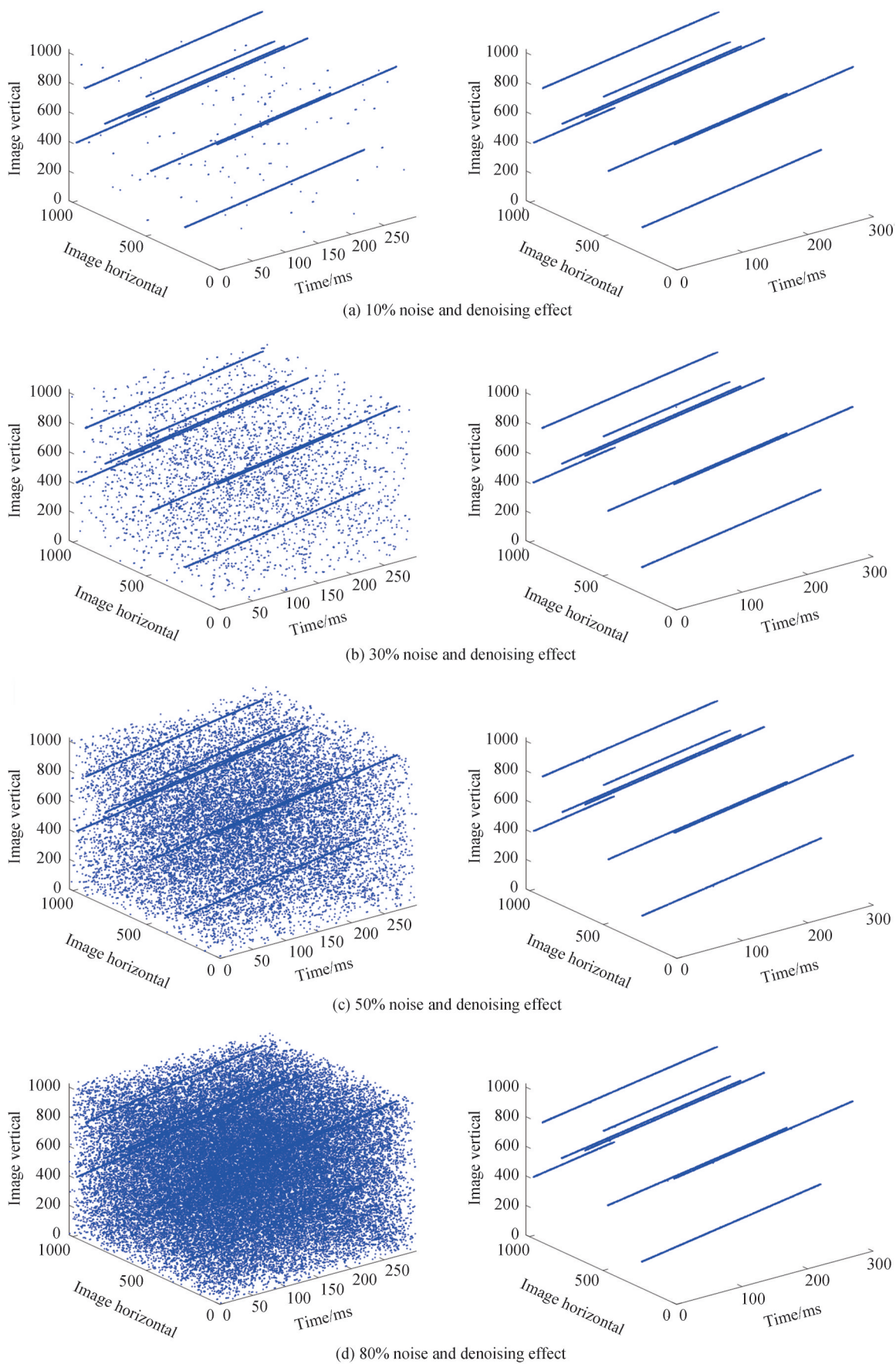


图9 不同噪声强度下的去噪效果  
Fig.9 Denoising effect under different noise intensities

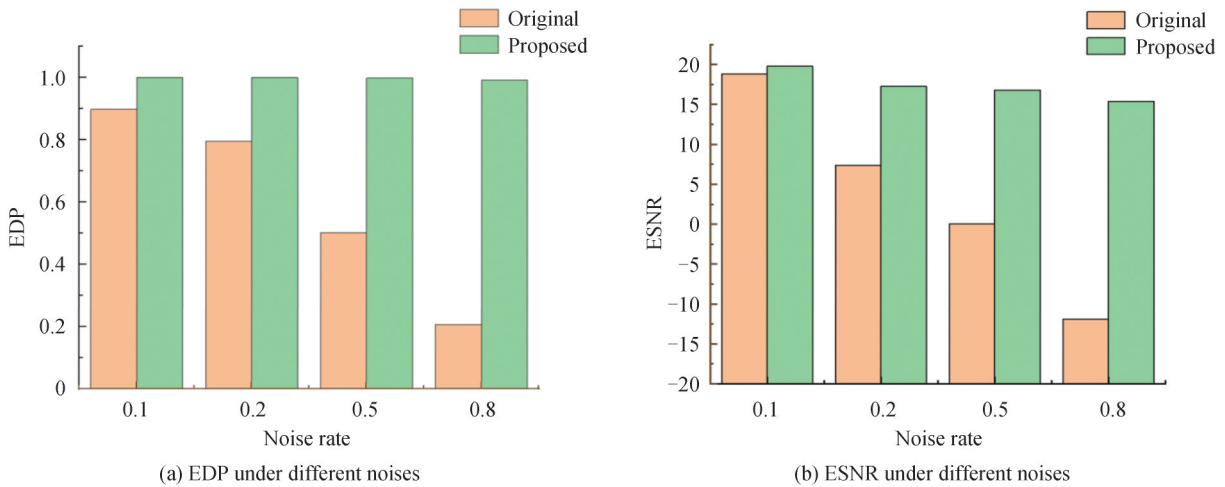


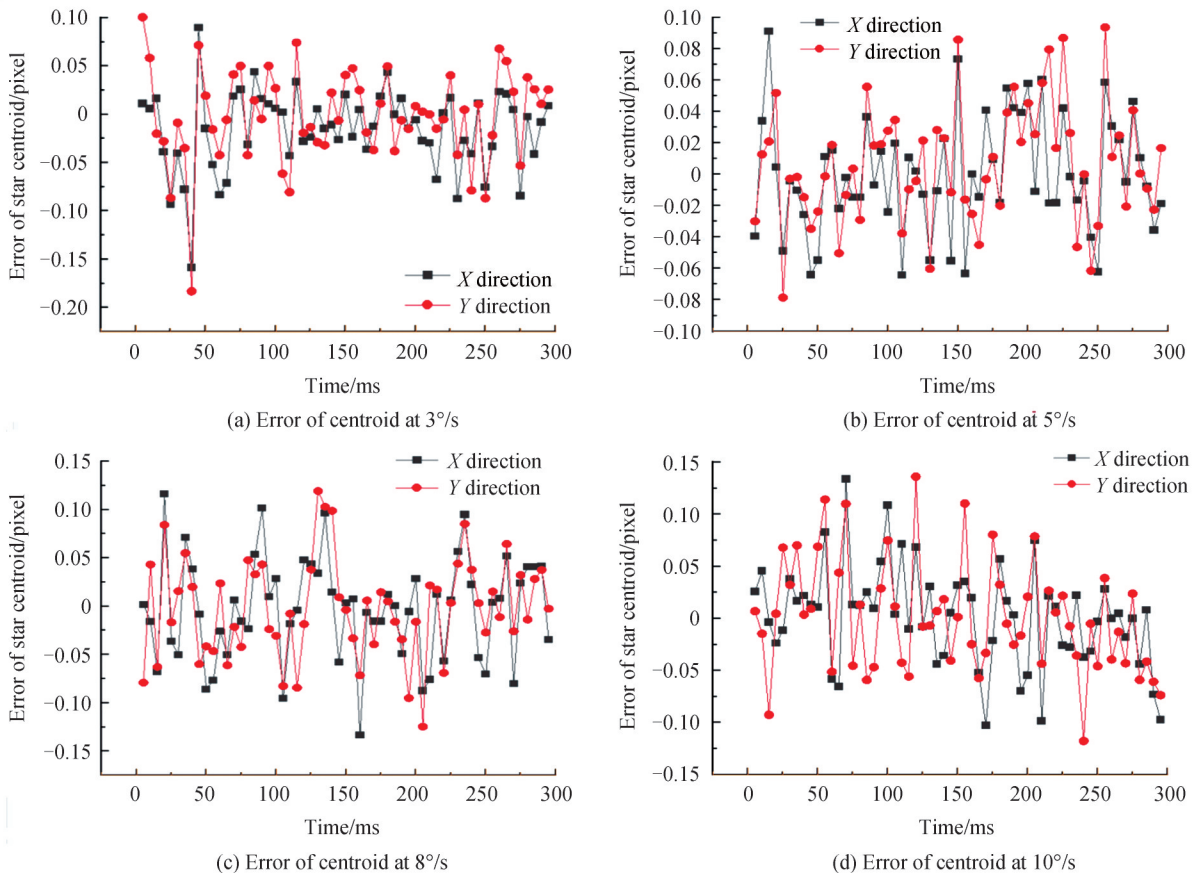
图10 不同噪声下EDP和ESNR  
Fig.10 EDP and ESNR under different noises

保持在17.31。因此,本文所提的事件流去噪方法具有较强的鲁棒性,有利于后续星点质心的提取。

### 3.2 星点质心提取仿真实验与分析

一般地,参与计算的导航星越多,后续星敏器姿态解算的精度越高,但是过多的导航星会增加计算时间和资源的消耗,通常参与计算星敏器姿态的导航星个数为5~10颗。本文在仿真实验中,导航星数量为8颗,  $dt = 1/v(\text{ms})$ , 类聚半径为5 pixel。

为验证本文方法在高动态条件下的有效性,固定噪声强度在50%,分别在角速度为3°/s、5°/s、8°/s、10°/s、15°/s、20°/s的动态条件下生成星点事件流,分别截取其中一段300 ms的事件流,并用本文方法对这300 ms事件流进行星点质心提取,计算提取的实际星点质心与星点质心理论真值之间的绝对误差。图11分





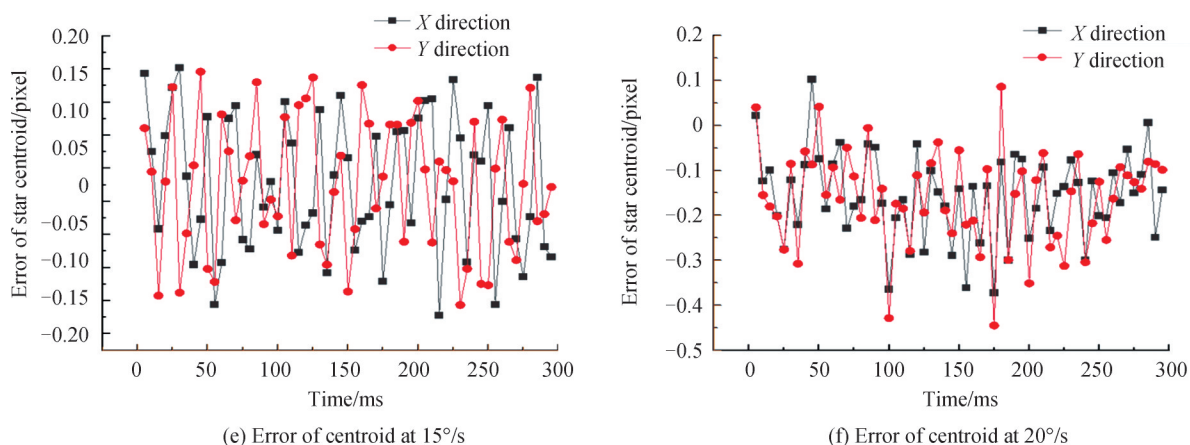


图 11 不同角速度下质心提取误差

Fig.11 Extraction error of centroid under different angular velocities

别给出了不同角速度下星点质心坐标误差。图 12(a)和 12(b)分别表示在 X 方向和 Y 方向上,本文方法与轨迹拟合法在不同角速度下星点质心提取的平均坐标误差对比图,从图中可以看出,本文方法相较于轨迹拟合法的平均误差更低,更适用于基于事件的星点质心提取。结合图 11 和图 12,可以看出,动态角速度在  $3\sim 10^\circ/\text{s}$  时,平均质心误差小于 0.04 pixel,在动态角速度达到  $15^\circ/\text{s}$  时,平均质心误差小于 0.1 pixel。当动态角速度达到  $20^\circ/\text{s}$  时,仍可提取出星点质心,平均误差在亚像素级,而目前传统星敏感器的整体动态性能最高在  $10^\circ/\text{s}$ <sup>[16]</sup>,因此本文所提方法相较于传统星点提取方法在高动态下更具有优势。需要注意的是,由事件相机的工作原理所致,本文所提方法对低动态下的适用性有所欠缺,图 13 为低速工况下的事件相机输出的三维视图,可以看到在低动态下,事件相机的输出仍然有活动背景噪声,但是几乎没有星点事件流输出。

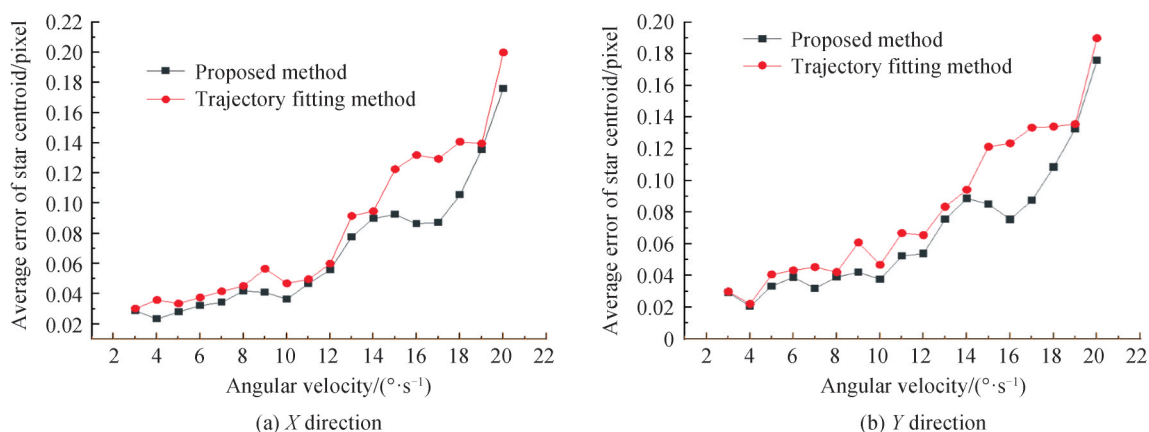


图 12 不同角速度下质心提取平均误差

Fig.12 Average error of centroid extraction under different angular velocities

为进一步验证本文方法对噪声的鲁棒性,固定角速度  $\omega = 5^\circ/\text{s}$ ,在不同噪声强度下,使用本文方法提取星点质心。在每个噪声强度下计算本文方法提取质心的平均误差,如图 14 所示,随着噪声强度的增大,质心误差有所增大,但即使噪声强度在 0.8,质心误差仍小于 0.04 pixel,说明本文方法在高动态条件下对噪声具有较好的鲁棒性。

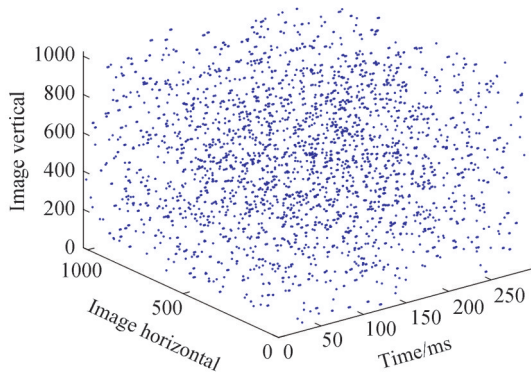


图13 低动态下( $<0.5^\circ/\text{s}$ )输出的事件流三维视图  
Fig.13 3D view of the event stream output at low dynamics  
( $<0.5^\circ/\text{s}$ )

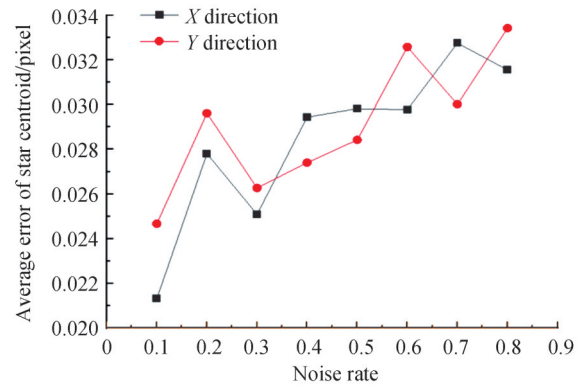


图14 不同噪声强度下质心提取平均误差  
Fig.14 Average error of centroid extraction under different  
noise intensities

## 4 结论

为解决传统星敏感器在高动态下( $\geq 3^\circ/\text{s}$ )星点质心提取精度和能力受限的问题,提出了基于事件的高动态星敏感器星点提取方法,该方法基于事件相机高时间分辨率、低延迟的特性,实现高动态下的星点质心提取。基于时空密度的事件流降噪方法可有效去除噪声事件,平均EDP在0.85以上,事件流的平均ESNR保持在17以上。同时基于均值漂移的星点质心定位方法可在角速度为 $3\sim 15^\circ/\text{s}$ 时,实现星点质心提取的平均误差小于0.1 pixel,并可在角速度到达 $20^\circ/\text{s}$ 时,提取出星点质心。但是在有杂散光或者月亮进入视场时,本文所提方法无法提取出星点质心,后续将对这一问题展开研究。

### 参考文献

- [1] XING Fei, YOU Zhen. Principle and implementation of APS CMOS star tracker[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017.  
刑飞, 尤政. APS CMOS 星敏感器系统原理及实现方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [2] 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.
- [3] BENOSMAN R, IENG S H, CLERCQ C, et al. Asynchronous frameless event-based optical flow[J]. Neural Networks, 2012, 27: 32-37.
- [4] CAMEIRO J, IENG S H, POSCH C, et al. Event-based 3D reconstruction from neuromorphic retinas[J]. Neural Networks, 2013, 45: 27-38.
- [5] VIDAL A R, REBECQ H, HORSTSCHAEFER T, et al. Ultimate SLAM? combining events, images, and IMU for robust visual SLAM in HDR and high speed scenarios[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(2): 994-1001.
- [6] 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.
- [7] CHEUNG B, RUTTEN M, DAVEY S, et al. Probabilistic multi hypothesis tracker for an event based sensor[C]. 2018 21st International Conference on Information Fusion (FUSION), IEEE, 2018: 1-8.
- [8] CHIN T J, BAGCHI S, ERIKSSON A, et al. Star tracking using an event camera[C]. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2019.
- [9] BAGCHI S, CHIN T J. Event-based star tracking via multiresolution progressive Hough transforms[C]. Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision, 2020.
- [10] ROFFE S, AKOLKAR H, GEORGE A D, et al. Neutron-induced, single-event effects on neuromorphic event-based vision sensor: a first step and tools to space applications[J]. IEEE Access, 2021, 9: 85748-85763.
- [11] HOU Yaxian, ZHAO Rujin, MA Yuebo, et al. An on-orbit correction method for high dynamic aps star tracker based on adaptive filtering[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(2): 0212004.  
侯娅贤, 赵汝进, 马跃博, 等. 一种基于自适应滤波的高动态星敏感器在轨校正方法[J]. 光子学报, 2021, 50(2): 0212004.
- [12] PATRICK L, POSCH C, DELBRUCK T. A  $128 \times 128$  120 db  $15\mu\text{s}$  latency asynchronous temporal contrast vision sensor[J]. IEEE Journal of Solid-state Circuits, 2008, 43: 566-576.

- [13] FENG Y, LV H, LIU H, et al. Event density based denoising method for dynamic vision sensor[J]. Applied Sciences, 2020, 10(6): 2024.
- [14] FENG Yang. Research on event stream processing method of dynamic vision sensor[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2021.  
冯阳. 动态视觉传感器事件流处理方法研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2021.
- [15] WU J, MA C, LI L, et al. Probabilistic undirected graph based denoising method for dynamic vision sensor[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2020, 23: 1148-1159.
- [16] WANG Jun. Research on key technologies of high dynamic star sensor [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2019.  
王军. 高动态星敏传感器关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019.

## An Event-based Method for Extracting Star Points from High Dynamic Star Sensors

ZENG Sikang<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Rujin<sup>1,2,3</sup>, MA Yuebo<sup>1,2,3</sup>, ZHU Zifa<sup>1,2,3</sup>,

TANG Yuping<sup>1,2,3</sup>, ZHU Zijian<sup>1,2,3</sup>

(1 Institute of Optics and Electronics of Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

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

(3 Key Laboratory of Science and Technology on Space Optoelectronic Precision Measurement, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

**Abstract:** Star sensor is a device that relies on measuring the pointing of the navigation star in the spacecraft coordinate system to determine the attitude of the spacecraft, and is the highest precision attitude sensor, whose accuracy can reach the angular second level, with the advantages of no drift, long working life, etc. It is a fundamental and critical device for the survival and performance improvement of spacecraft. It is of strategic importance in space applications such as remote sensing to the earth, deep space exploration and high precision detection. Most of the current star sensors use traditional optical sensors. Conventional star sensors use frame-based imaging modes, such as global exposure and roll-up exposure, which generate a frame of star image within a fixed exposure time (usually 100 ms). However, under the high dynamic conditions of large spacecraft maneuvers, this imaging mode produces motion blur and "star point trailing" effect, which, together with the noise effect, significantly reduces the signal-to-noise ratio of the star map, resulting in lower accuracy or even failure of star point extraction, and severely limits the dynamic performance of the star sensor. Star point center of mass extraction is a crucial part of the star sensor, which is directly related to the final attitude measurement accuracy of the star sensor. The sensitive navigation stars are long-range targets, and their orientations in the celestial coordinate system are high-precision astronomical observations with milliarsecond accuracy and almost constant, so the final attitude accuracy of the star sensor depends on the extraction accuracy of the star point masses in the digital images. Therefore, the accuracy of the final solution of the star sensor depends mainly on the extraction accuracy of the star point center in the digital image. In the traditional star sensor, the average gray value of the whole image is used as the background noise gray value, and then the background noise is subtracted from the star point region gray value to obtain the corrected star point, and finally the exact center of the star point is calculated by the gray scale center method. In this paper, we propose an event-based star point extraction method for high-dynamics star point sensors to address the problem that the accuracy of star point center extraction decreases or even fails under high dynamics ( $\geq 3^\circ/\text{s}$ ) due to the imaging mode of traditional star sensors. The method takes advantage of the low latency and high temporal resolution of the event camera to avoid the motion blur under high dynamic conditions. The event camera has no fixed exposure time and no frame concept; it outputs an event stream, and each event in the event stream characterizes the change of pixel brightness, and the event contains four main elements: pixel row coordinates  $x$ , pixel column coordinates  $y$ , the moment  $t$  when the event occurs, and the polarity  $p$  that characterizes the change of brightness. Compared with the traditional frame-based imaging mode, the event camera has two main

advantages: first, high temporal resolution, event cameras have extremely fast response times, in the microsecond or even nanosecond range, allowing for higher dynamic star tracking; second, lower power consumption, which generates a smaller number of events relative to the number of pixel positions in a black star background, consumes less energy. Event-based star point extraction for high dynamic star-sensitive instruments uses the imaging mode of the event camera, but there are two main challenges in processing event stream information: first, there is a certain amount of noise in the event stream due to the internal circuit structure of the event camera coupled with external environmental factors; second, existing star map processing methods can not be used directly on asynchronous event streams. Therefore, the method proposed in this paper is mainly divided into two steps: 1) based on the spatiotemporal correlation and spatial density characteristics between events, a method based on spatiotemporal density is proposed to denoise the star point event stream, remove the noisy events and retain the star point events as much as possible; 2) based on the asynchronous output characteristics of the events, we propose a mean drift-based star point localization method to calculate the center of the star point event cluster as the extracted star point center of mass. Through simulation experiments under different conditions, it is verified that our method can not only effectively remove most of the noise in the event stream but also extract the star point center of mass under the dynamics of  $3^\circ/\text{s}\sim 10^\circ/\text{s}$  with an average error of 0.04 pixels. when reaching  $15^\circ/\text{s}$ , the average error is less than 0.1 pixel. Under the dynamics of  $15^\circ/\text{s}\sim 20^\circ/\text{s}$ , the average error is still in the sub-pixel level. The average error is still in the sub-pixel level, and under this dynamic condition, the accuracy of the conventional star-sensitive mass extraction is greatly reduced, and even no star point is extracted, therefore, our method has obvious advantages under high dynamics.

**Key words:** Star sensor; Event camera; Centroid extraction; High dynamics; Spatiotemporal density; Mean shift

**OCIS Codes:** 120.6085; 040.5160; 110.2970