

文章编号 1004-924X(2026)11-1708-13

## 高动态事件星点椭圆拟合质心提取

段锐<sup>1,2</sup>, 常琳<sup>1,2\*</sup>, 付宗强<sup>1,2</sup>, 丁兆言<sup>3</sup>, 王怡婷<sup>1,2</sup>, 徐婷婷<sup>3</sup>, 杨秀彬<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国矿业大学 计算机科学与技术学院/人工智能学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:**针对动态星点目标尺寸小、亮度低,事件相机成像易受噪声干扰,星点质心提取精度低的问题,提出一种基于非对称邻域的密度聚类与事件形态迭代加权最小二乘稳健拟合的动态星点质心提取方法。首先,将动态星点事件流按固定时间窗方式划分为事件帧,基于定向各向异性的帧内密度聚类方法,以事件密度连通方式聚合事件,实现了帧内真实星点事件簇与噪声事件的有效分离。然后,将星点事件簇沿主成分分析(Principal Components Analysis, PCA)方向投影至帧中心平面,在二维投影域内建立椭圆形态包络,采用改进的迭代加权最小二乘稳健拟合方法(Iteratively Reweighted Least Squares, IRLS),抑制离群事件,从而提取亚像素级质心位置。实验结果表明,在半物理仿真实验中,星点目标以 $20^\circ/\text{s}$ 的速度运动,输出频率设置为 60 Hz,其质心均方根误差为 0.107 8 pixel。可满足事件相机对高动态目标的亚像素级定位与快速跟踪,在星敏感器领域有重要应用前景。

**关键词:**星点;质心提取;事件相机;高动态目标跟踪;稳健最小二乘

**中图分类号:** V249.31; V249.32 **文献标识码:** A

**doi:**10.37188/OPE.20263411.1708 **CSTR:**32169.14.OPE.20263411.1708

## Elliptical fitting centroid extraction for high-dynamic event star point

DUAN Rui<sup>1,2</sup>, CHANG Lin<sup>1,2\*</sup>, FU Zongqiang<sup>1,2</sup>, DING Zhaoyan<sup>3</sup>, WANG Yiting<sup>1,2</sup>,  
XU Tingting<sup>3</sup>, YANG Xiubin<sup>1,2</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Computer Science and Technology/School of Artificial Intelligence,  
China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

\* Corresponding author, E-mail: fagnlinchang@aliyun.com

**Abstract:** To address the challenges of small target size, low brightness, strong noise interference in event-camera imaging, and limited centroid extraction accuracy for dynamic star targets, a dynamic star centroid extraction method based on asymmetric-neighborhood density clustering and robust event-shape

收稿日期:2026-03-12;修订日期:2026-04-01.

基金项目:吉林省自然科学基金面上项目(No. 20250102177JC);江苏省基础研究计划自然科学基金青年基金项目(No. BK20241641);吉林省中青年科技创新团队培育资助项目(No. 20250601090RC)

fitting using iterative reweighted least squares is proposed. First, the event stream of dynamic star targets is segmented into event frames using a fixed time window. Within each frame, a directional anisotropic density-based clustering approach is employed to aggregate events via density connectivity, effectively separating true star-event clusters from noise. Subsequently, the extracted star-event clusters are projected onto a frame-centered plane along the principal component analysis direction, where an elliptical envelope is constructed in the two-dimensional projection domain. An improved iterative reweighted least squares fitting method is then applied to suppress outliers and estimate subpixel centroid positions. Experimental results demonstrate that, at a target motion speed of  $20 (^{\circ})/s$  and an output frequency of 60 Hz, the root-mean-square error of centroid localization reaches 0.107 8 pixels. The proposed method enables accurate subpixel localization and rapid tracking of high-dynamic targets in event cameras, indicating strong potential for application in star sensor systems.

**Key words:** star point; centroid extraction; event camera; high-dynamic target tracking; robust least squares

## 1 引 言

星敏感器<sup>[1]</sup>是一种高精度的测量器件,通过实时比对所摄星图与数据库存储的星对信息,以判别航天器姿态,引导遥感卫星依照规划指向预定区域。然而,在高动态条件下,星点像在探测器上会产生位移,导致图像拖尾、模糊,能量分散、信噪比降低,可识别星数减少而使质心定位与姿态解算精度明显退化。

针对高动态条件下的星点拖尾问题,传统帧相机体制受曝光积分与读出过程的固有限制<sup>[2-5]</sup>,为获得足够的星等以提升星点识别的可靠性,往往需要延长曝光时间,从而进一步加剧拖尾效应<sup>[2]</sup>;同时,曝光时间的增加也会降低姿态信息的输出频率。

事件相机<sup>[6]</sup>作为一种事件读出速度可达微秒量级的新型动态图像传感器,具有异步高频输出的特性<sup>[7]</sup>。其输出的事件流包含事件点坐标、时间戳、极性正负信息。由于事件相机本身具备低延迟、高时间分辨率、弱运动模糊与高动态范围等优点,在目标与本体保持相对高动态运动工况时,事件相机相对帧相机更具优势<sup>[8]</sup>。因此,基于事件相机的星敏感器研究逐渐成为一个有潜力的方向,目前已有较多星点目标提取与跟踪<sup>[9-13]</sup>的相关研究。

现有基于事件相机的星点提取与跟踪方法大体可归纳为两类。第一类为连续处理方法,如

Bagchi 等基于多分辨率渐进式 Hough 变换的事件投票检测星点轨迹<sup>[11]</sup>,以及 Reed 等将事件星点观测引入扩展卡尔曼滤波(EKF)实现高频星点轨迹跟踪<sup>[12]</sup>。这类方法通过在连续时间域内更新星点状态或轨迹参数实现高频输出,但通常需要相对可靠的星点初始定位或观测初始化,否则容易出现轨迹漂移、误跟踪或滤波发散<sup>[14]</sup>,在实际使用中缺乏稳定性。

第二类为分帧处理方法,如 Chin 等将事件在短时间窗内累积为事件图像并通过均值滤波与阈值化获取有效点集<sup>[10]</sup>。这种方法获得的点精度低于亚像素级别,进一步会导致姿态精度下降。Bagchi 等在 e-STURT 中对事件集合采用基于密度的空间聚类算法(DBSCAN)<sup>[15-18]</sup>提取星点事件簇并以簇中心作为星点位置<sup>[11]</sup>。这类方法以时间窗截取事件点,从而降低连续跟踪对初始化的敏感性,便于与传统星图识别流程<sup>[19]</sup>对接,但其在预处理阶段较为依赖各向同性邻域的滤波与聚类方法,例如固定窗口平滑、圆形邻域密度聚类等。当星点在高动态条件下呈现方向性条带拉伸分布时,各向同性邻域难以同时兼顾沿运动方向的有效事件覆盖与法向噪声抑制,容易引入额外噪声或截断有效事件;此外,仅利用空间坐标聚类也难以充分利用事件的时间连续性,可能混入空间相近但时间相距较远的噪声事件,进而影响质心估计的稳定性与精度。

基于上述分析,本文针对高动态暗弱星点事件的条带化形态,提出定向各向异性密度聚类方法 OA-DBSCAN(Oriented Anisotropic DBSCAN),在运动方向上扩展邻域、在法向收窄并结合时间门控,以提升簇内有效事件率。在此基础上,进一步引入与时间相关的稳健质心估计策略,实现亚像素级质心定位,从而增强事件星敏感器在高动态条件下的精度与稳定性。

## 2 星点质心提取方法

事件相机对运动暗弱星点成像时,星点事件流在时空域呈现明显的条带化拉伸分布,如图 1 所示(彩图见期刊电子版)。其中,蓝色聚类中原星迹出现了像素不连续的现象,使得有效事件分离与稳定质心估计更为困难。

由于负事件触发延迟较高<sup>[12]</sup>,如图 2 所示,本文仅保留正事件参与聚类与质心估计,文中事件

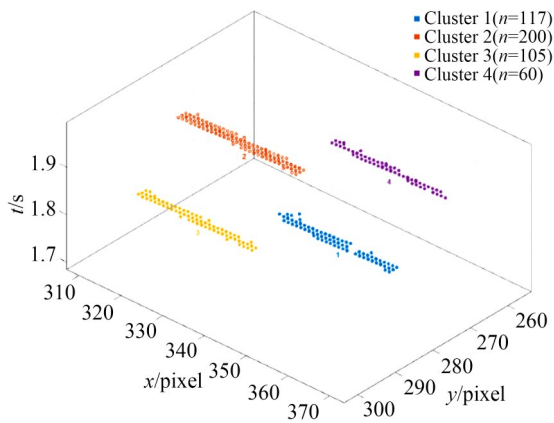


图 1 角速度为 20 (°)/s 的高速暗弱星点目标(OA-DBSCAN)

Fig. 1 High-speed dim star target at an angular velocity of 20 (°)/s (OA-DBSCAN)



图 2 角速度为 20 (°)/s 的高速暗弱星点目标生成的原始事件

Fig. 2 Events generated from high-speed dim star target at angular velocity of 20 (°)/s

均表示正事件。

本文提出了一套由事件聚类分离、时空对齐和稳健拟合定位组成的质心提取方法。首先,在固定时间窗内对原始事件流进行处理,利用定向各向异性密度聚类实现真实星点事件与噪声事件的有效分离,如图 3 所示;随后,结合时间归一化、时间加权和主成分分析法,对事件簇进行时空对齐,将其投影至统一参考时刻下的帧中心平面;最后,在二维初始统计特征基础上构建椭圆包络,采用迭代加权最小二乘方法进行稳健拟合,输出亚像素级质心位置。所提方法的整体处理流程如图 4 所示。

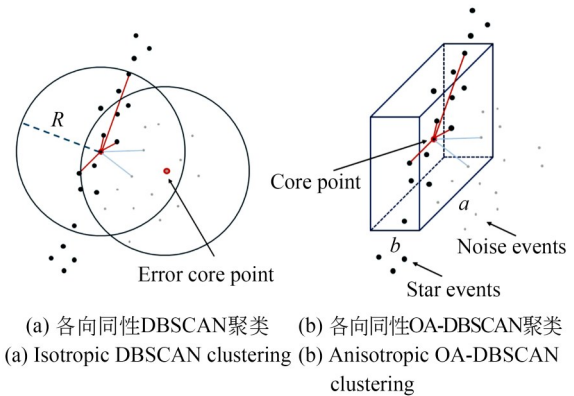


图 3 不同聚类方法对比  
Fig. 3 Comparison of different clustering methods

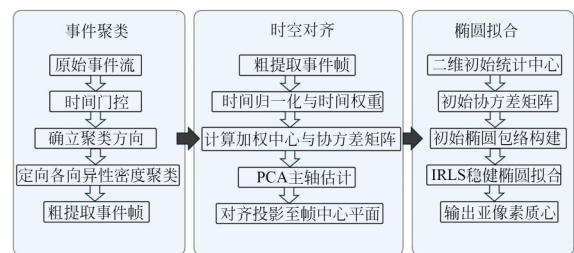


图 4 质心提取方法流程  
Fig. 4 Flowchart of centroid extraction

### 2.1 定向各向异性 OA-DBSCAN 方法

为实现高动态星点事件与噪声事件的有效分离,提出了 OA-DBSCAN。与传统 DBSCAN 方法在空间上采用各向同性邻域不同,该方法在固定窗口  $\Delta t$  的事件集  $D_k = \{ p_i = (x_i, y_i, t_i) | t_i \in [t_k, t_k + \Delta t) \}$  上构建沿运动方向拉伸、法向收窄

的时空邻域。具体地,对帧内任一事件  $p_i$ ,在时间门控下构造候选集合:

$$C_i = \{p_j \in D_k \mid |t_j - t_i| \leq \delta_i\}. \quad (1)$$

并在候选集合内估计该点的局部运动主方向  $\hat{u}_i$ 。即对任意  $p_j \in C_i$ ,令  $\Delta r_{ij} = [x_j - x_i, y_j - y_i]^T$  并以时间先后赋予符号  $s_{ij} = \text{sign}(t_j - t_i)$ ,则方向向量  $\hat{u}_i$  可以表述为:

$$\mathbf{v}_i = \sum_{p_j \in C_i} s_{ij} \Delta r_{ij} \hat{u}_i = \frac{\mathbf{v}_i}{\|\mathbf{v}_i\|}. \quad (2)$$

得到  $\hat{u}_i = [u_x, u_y]^T$  后,其对应的法向单位向量记为  $\hat{n}_i = [-u_y, u_x]^T$ ,将任意邻近点  $p_j$  的空间差分  $\Delta r_{ij}$  分解为运动方向  $d_{//}(i, j)$  及法向方向  $d_{\perp}(i, j)$ :

$$d_{//}(i, j) = \Delta r_{ij}^T \hat{u}_i, d_{\perp}(i, j) = \Delta r_{ij}^T \hat{n}_i. \quad (3)$$

据此定义 OA-DBSCAN 的定向各向异性时空邻域,从而在三维时空中覆盖星点轨迹:

$$N_i = \{p_j \in D_k \mid |t_j - t_i| \leq \delta_i, |d_{//}(i, j)| \leq a, |d_{\perp}(i, j)| \leq b\}. \quad (4)$$

为保证空间领域沿运动方向延展、法向收窄,设置长宽比参数  $\gamma = a/b$ ,将原本的空间邻域转变为长宽分别为  $a, b$  的矩形邻域。沿用 DBSCAN 的密度判据:若  $|N_i| \geq \text{MinPts}$  (形成一个有效簇所需的最少点数,则  $p_i$  为核心点;基于邻域  $N_i$  定义密度可达与密度连通关系,并通过递推的方式进行簇扩展,最终得到帧内聚类标签。由于邻域在方向上与轨迹一致,在法向上抑制核心点扩张,OA-DBSCAN 能显著降低高动态条件下由二维投影重叠引起的串簇风险,同时更好地保留同一轨迹内的密度连通性,从而实现星点事件簇与噪声事件的分离。

## 2.2 基于加权椭圆迭代的质心估计

在获得单帧内的有效事件簇后,首先提取主成分方向,将事件点时间维度对齐,最后进行二维形态稳健拟合实现星点质心估计。聚类步骤已将不同星点的时空事件轨迹与背景噪声及相邻目标初步分离,因此,可在单个簇内对原始事件点进行主成分分析(Principal Components Analysis, PCA),将事件沿主轴投影至参考时刻  $t_{\text{mid}}$  像平面,从而实现帧内时空事件的对齐。考虑到三维事件点受噪声、PCA 方向估计误差、像

素离散采样误差影响,投影后的截面仍可能包含离群点与局部偏差,进一步引入椭圆形态拟合光斑并采用迭代加权最小二乘(Iteratively Reweighted Least Squares, IRLS)进行稳健拟合,以获得稳定的亚像素质心。

### 2.2.1 事件点的二维初始形态

在高动态成像条件下,如图 5 所示,聚类后得到的事件相机输出的数据呈三维点云形式分布。当星点在像面上按照近似线性运动时,则一个短时间区间  $\Delta t$  内,任一空间-时间分布的事件  $E$  可近似视为围绕运动方向延展的细长体状结构。

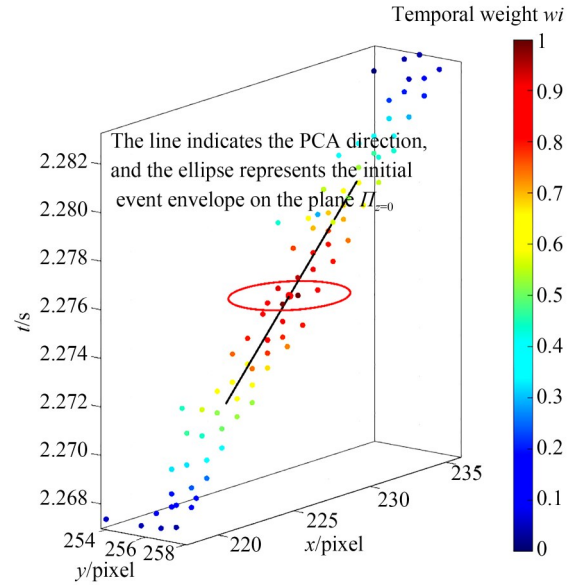


图 5 某帧角速度为  $11 (^{\circ})/s$  事件聚类簇

Fig. 5 Event cluster in one frame at an angular velocity of  $11 (^{\circ})/s$

为了减少非线性运动引入的误差,在簇内引入与时间偏离相关的权重,计算加权三维均值与加权协方差矩阵;协方差的主特征向量对应点云的主延展方向,可用于表征该时间窗内的运动主轴。本方法先对每一个聚类事件簇  $E_k = \{(x_i, y_i, t_i)\}_{i=1}^{N_k}$  进行预处理,以便获取迭代初值。

设事件簇  $E_k$  的时间为  $[t_{\text{min}}, t_{\text{max}}]$ ,则中点为:

$$t_{\text{mid}} = \frac{t_{\text{min}} + t_{\text{max}}}{2}. \quad (5)$$

为实现空间坐标与时间坐标之间的无量纲

统一表示,依照时间区间宽度对时间戳进行归一化,并定义归一化后事件点时间轴方向坐标  $z_i$  为:

$$z_i = \frac{t_i - t_{\text{mid}}}{0.5\Delta t}, z_i \in [-1, 1]. \quad (6)$$

考虑到事件质心的输出应当对统一的参考时刻,而事件时间片的中心时刻在统计意义上最具代表性,可视作簇内时序分布的对称中心,因此更能反映星点真实的运动轨迹;且在高速运动条件下,时间片边缘的事件因受星点运动状态影响,会出现相对中心时刻的偏离。基于上述原因,在三维时空建模中引入以事件帧中心为对称点的无量纲时间权重  $W_i$ ,对靠近帧中心的事件赋予更高可信度,从而提升轴线方向的估计稳定性与截面投影事件簇形态建模的稳定性,即:

$$W_i = 1 - |z_i|. \quad (7)$$

式(6)和式(7)定义了时间归一化事件点  $\boldsymbol{p}_i = (x_i, y_i, z_i)^T$  及权重  $W_i$ ,由此构造加权三维协方差矩阵并求解加权事件形态中心  $c_3$  及轴向方向向量  $\boldsymbol{a} = [a_x, a_y, a_z]^T$ 。

$c_3$  为  $\boldsymbol{p}_i$  的时间加权中心:

$$c_3 = \frac{\sum_{i=1}^N W_i \boldsymbol{p}_i}{\sum_j W_j}. \quad (8)$$

对  $\boldsymbol{p}_i$  去中心化:

$$\boldsymbol{p}'_i = \boldsymbol{p}_i - c_3. \quad (9)$$

构建三维加权协方差矩阵,

$$\boldsymbol{\Sigma}_{3,w} = \frac{1}{\sum_j W_j} \sum_{i=1}^N W_i \boldsymbol{p}'_i \boldsymbol{p}'_i{}^T. \quad (10)$$

使用 PCA 求解  $\boldsymbol{\Sigma}_{3,w}$  的最大特征向量,对加权协方差矩阵做特征值分解:

$$\boldsymbol{\Sigma}_{3,w} = \boldsymbol{V} \boldsymbol{D} \boldsymbol{V}^T, \boldsymbol{D} = \text{diag}(\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3), \quad \boldsymbol{V} = [\boldsymbol{v}_1, \boldsymbol{v}_2, \boldsymbol{v}_3]. \quad (11)$$

其中:  $\lambda_1$  最大的方向即  $\boldsymbol{v}_1$ , 可用来表示事件聚类最主要的延伸方向。此时的椭圆轴线方向  $\boldsymbol{a}$  为:

$$\boldsymbol{a} = \boldsymbol{v}_1, \|\boldsymbol{a}\|_2 = 1. \quad (12)$$

在获得事件簇的主轴方向  $\boldsymbol{a}$  及时间加权中心  $c_3$  后,进一步将事件点沿主轴投影至时间帧中心截面  $\Pi_{z=0}$ , 定义为:

$$\Pi_{z=0} = \{(x, y, z) | z = 0\}. \quad (13)$$

则对簇内任一事件点  $\boldsymbol{p}_i = (x_i, y_i, z_i)^T$ , 其投影后的二维坐标为:

$$\boldsymbol{x}'_i = \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i - \frac{z_i}{a_z} a_x \\ y_i - \frac{z_i}{a_z} a_y \end{bmatrix}. \quad (14)$$

通过上述过程,将同一簇内不同时刻产生的事件对齐到同一参考时刻,相对于直接通过三维坐标的二维截取投影至中心截面  $\Pi_{z=0}$ 。该步骤可有效降低帧内星点运动叠加造成的形态拖尾程度,提升后续拟合的稳定性。

三维事件点  $\boldsymbol{p}_i$  受噪声、PCA 方向估计误差、像素离散采样误差的影响,投影在二维时间-空间中  $\{\boldsymbol{x}'_i\}_{i=1}^N$  的分布为椭圆形态,如图 6 中事件点所示;若仍然按照各向同性的 PSF 模型构造迭代初值可能会引入离群点,还会将沿椭圆长轴方向的正常偏差误判为较大误差,在迭代过程中赋予星点事件错误的权重。因此,需要构建协方差矩阵以描述该椭圆。

在短时间片内,事件点在  $\Pi_{z=0}$  平面上的分布呈近椭圆扩展,其统计特性由均值与协方差矩阵刻画。首先,采用二维事件点集  $\{\boldsymbol{x}'_i\}_{i=1}^N$  计算其欧氏意义下的初始统计中心:

$$c_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \boldsymbol{x}'_i. \quad (15)$$

据此构造初始协方差矩阵:

$$\boldsymbol{\Sigma}_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\boldsymbol{x}'_i - c_2)(\boldsymbol{x}'_i - c_2)^T. \quad (16)$$

进一步地,为避免在初始化阶段引入由离群事件或几何偏差导致的尺度不确定性,椭圆的初始尺度通过预设的概率覆盖率参数  $\rho$  (coverage) 进行统一约束,其对应的二维卡方分布分位数为:

$$\tau_0 = \chi^2_2(\rho). \quad (17)$$

从而定义初始椭圆包络为:

$$(\boldsymbol{x}' - c_2)^T \boldsymbol{\Sigma}_2^{-1} (\boldsymbol{x}' - c_2) \leq \tau_0. \quad (18)$$

通过上述步骤,三维事件点云被转化为一个在  $\Pi_{z=0}$  定义的二维椭圆初始模型,如图 6 椭圆包络所示,实现了从时空结构到二维几何表示的合理过渡,为后续基于 IRLS 的椭圆拟合提供了可靠的初始条件。

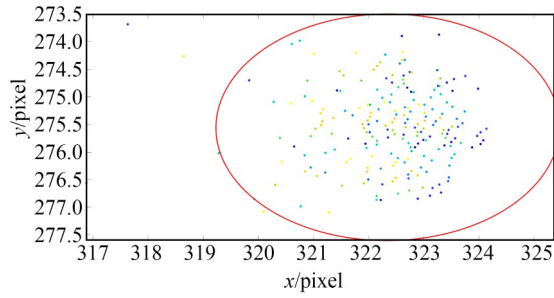


图 6 角速度为  $17 (^{\circ})/s$  事件聚类簇在  $\Pi_{z=0}$  上的投影及其初始椭圆包络

Fig. 6 Projection of event cluster onto plane  $\Pi_{z=0}$  at an angular velocity of  $17 (^{\circ})/s$ , together with its initial elliptical envelope

### 2.2.2 IRLS 稳健椭圆拟合

在完成三维事件点云向  $\Pi_{z=0}$  平面的投影,得到初始二维协方差矩阵  $\Sigma_w$  与初始二次型后,即可在  $\Pi_{z=0}$  平面内进行椭圆的稳健迭代优化。由于事件相机输出的事件点往往受噪声、时间漂移与局部密度变化影响,传统基于最小二乘的椭圆拟合容易被离群事件干扰,因此,采用迭代加权最小二乘 (Iteratively Reweighted Least Squares, IRLS) 对椭圆中心和协方差进行优化,使拟合过程稳定性更强。

迭代初值由式 (15) 和式 (16) 给出,令  $c^{(0)} = c_2$ ,  $\Sigma^{(0)} = \Sigma_2$ 。在第  $k$  次迭代中,采用马氏距离平方残差度量点  $x'$  相对于当前椭圆的偏离程度:

$$r_i^2 = (x'_i - c^{(k)})^T (\Sigma^{(k)})^{-1} (x'_i - c^{(k)}), r_i = \sqrt{r_i^2}, \quad (19)$$

其中:  $r_i$  为无量纲量,便于使用统一阈值进行鲁棒门控。为抑制离群点影响,引入 Tukey 权重  $w_{\text{rob},i}$ :

$$w_{\text{rob},i} = \begin{cases} \left(1 - \left(\frac{r_i}{c_T}\right)^2\right)^2, & r_i < c_T, \\ 0, & r_i \geq c_T \end{cases}, \quad (20)$$

其中  $c_T$  为截断常数。结合时间权重  $W_i$ , 得到总权重  $w_i = W_i w_{\text{rob},i}$ , 在权重  $\{w_i\}$  下, 中心与形状矩阵分别按加权一阶与二阶矩更新:

$$\begin{cases} c^{(k+1)} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i x'_i}{\sum_{i=1}^N w_i}, \\ \Sigma^{(k+1)} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i (x'_i - c^{(k+1)})(x'_i - c^{(k+1)})^T}{\sum_{i=1}^N w_i} + \epsilon I_2 \end{cases}, \quad (21)$$

其中:  $\epsilon I_2$  为数值正则项,用于保证  $\Sigma^{(k+1)}$  的正定性与稳定性。迭代直至满足  $\|c^{(k+1)} - c^{(k)}\|_2 < \eta$  或达到最大迭代次数  $k_m$ , 最终输出  $\hat{c}$  作为该事件簇在参考时刻的质心估计。

## 3 实 验

为验证所提算法的有效性,开展了数值仿真实验,验证算法在不同场景下对运动星点事件的适应性。在实验室环境搭建了一套准直投影实验系统,以完成事件相机对真实星点的半物理仿真实验。最后,通过外场观星实验进一步验证算法在真实复杂环境中的可用性与稳定性。

### 3.1 仿真实验

设计基于事件相机触发机理的点源事件流仿真与评估流程。假设星点在分辨率  $(640(H) \times 480(V))$  像面上按照预设轨迹随时间运动,采用高斯点扩散函数 (Point Spread Function, PSF) 表征轨迹中心附近的光强分布:

$$I(x, y, t) = I_{\text{bg}} + I_{\text{peak}} \exp\left(-\frac{(x - x_c(t))^2 + (y - y_c(t))^2}{2\sigma_{\text{px}}^2}\right), \quad (22)$$

其中:  $I_{\text{bg}}$  为背景光强,  $I_{\text{peak}}$  为峰值光强。取仿真步长  $\Delta t$ , 第  $k$  步对应时间  $t_{k_0}$ 。对每个像素  $(x, y)$ , 定义参考对数亮度  $L_{\text{ref}}$  与其累积量  $A(x, y)$ 。每一步进行如下更新:

$$A_k(x, y) = A_{k-1}(x, y) + L(x, y, t_k) - L_{\text{ref}, k-1}(x, y). \quad (23)$$

当  $A_k(x, y)$  超过阈值  $C$  触发事件, 即:

$$\begin{cases} n_{\text{on}}(x, y) = \left\lfloor \frac{A_k(x, y)}{C} \right\rfloor, A_k(x, y) > 0 \\ n_{\text{off}}(x, y) = \left\lfloor \frac{-A_k(x, y)}{C} \right\rfloor, A_k(x, y) < 0 \end{cases}, (24)$$

其中:  $n_{\text{on}}(x, y)$  和  $n_{\text{off}}(x, y)$  分别为正负事件触发次数,  $C$  为事件触发阈值。同时更新  $A_k(x, y)$ ,

$$\begin{aligned} A_k(x, y) &\leftarrow A_k(x, y) - n_{\text{on}}(x, y)C + n_{\text{off}}(x, y)C \\ L_{\text{ref}}(x, y) &\leftarrow L_{\text{ref}}(x, y) + n_{\text{on}}(x, y)C - n_{\text{off}}(x, y)C \end{aligned} \quad (25)$$

设置总仿真时长为 1 s, 添加噪声事件点个数  $N_{\text{noise}}$  占总事件点的 40%, 阈值  $C$  设置为 0.3, 时间以固定步长  $1 \mu\text{s}$  进行离散更新, 生成李萨如曲线, 其轨迹方程为:

$$\begin{cases} x(t) = c_x + A_x \sin(2\pi f_x t + \phi_x) \\ y(t) = c_y + A_y \sin(2\pi f_y t + \phi_y) \end{cases} \quad (26)$$

参数设置为:

$$\begin{cases} c_x = 0.5(W - 1), c_y = 0.52(H - 1) \\ A_x = 0.42(W - 1), A_y = 0.28(H - 1) \\ f_x = 0.35 \times \text{speed\_gain} \\ f_y = 0.22 \times \text{speed\_gain} \\ \phi_x = \pi/2.7, \phi_y = -\pi/2.2 \\ \text{speed\_gain} = 0.9 \end{cases} \quad (27)$$

由于  $x, y$  方向振幅、频率及初始相位均不相同, 星点在成像平面上的运动形式表现出明显的非匀速、非直线特征, 因此为模拟探测器在复杂运动时对星点成像的状态, 将轨迹方程(26)结合上述事件触发流程可以得到该曲线的事件点分布如图 7 所示, 对轨迹函数求导可以得到其星点速度如图 8 所示。

将本文方法分别与连通域均值中心法 (Connected Component Mean Center Method, CCMC), 和时空滤波-均值漂移法 (Spatio-Temporal Mean-Shift Filtering Method, STMSF) 进行比较, 误差对比如图 9 所示, 统计结果如表 1 所示。可以看出, 本方法在非匀速非直线星点运动工况下依然保持较高的质心提取精度, 进一步评估本方法在不同速度、运动轨迹下的性能。图 10~图 11 分别给出了不同星点速度下匀速直线运动、匀速圆周运动的星点轨迹, 仿真结果见表 2~表 3。

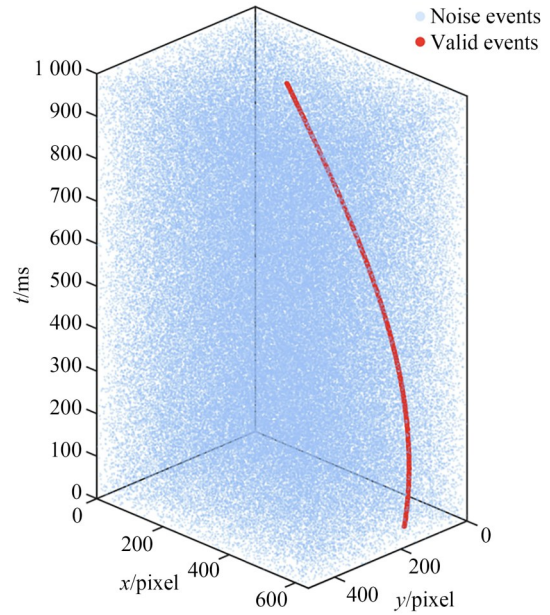


图 7 非匀速曲线运动星点仿真事件分布

Fig. 7 Simulated event distribution of non-uniformly moving star along curved trajectory

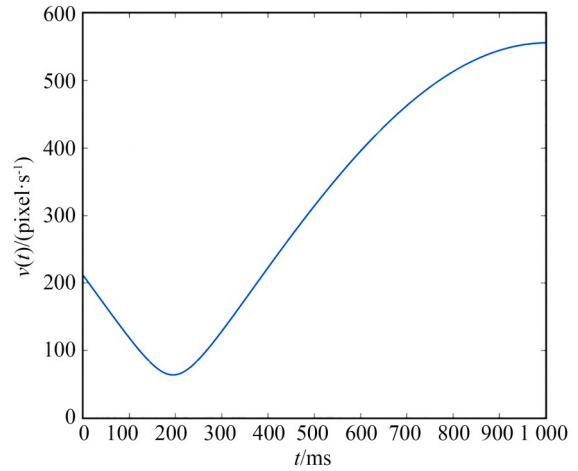


图 8 非匀速曲线运动星点在像面上的运动速度

Fig. 8 Velocity profile of star spot on image plane under non-uniform curvilinear motion

表 1 非匀速曲线运动星点仿真实验结果

Tab. 1 Simulation results for star spot under non-uniform curvilinear motion

Method	RMSE	MAE	STD
Proposed method	0.096 4	0.066 2	0.070 8
CCMC	0.250 1	0.222 0	0.115 6
STMSF	0.277 0	0.248 7	0.122 2

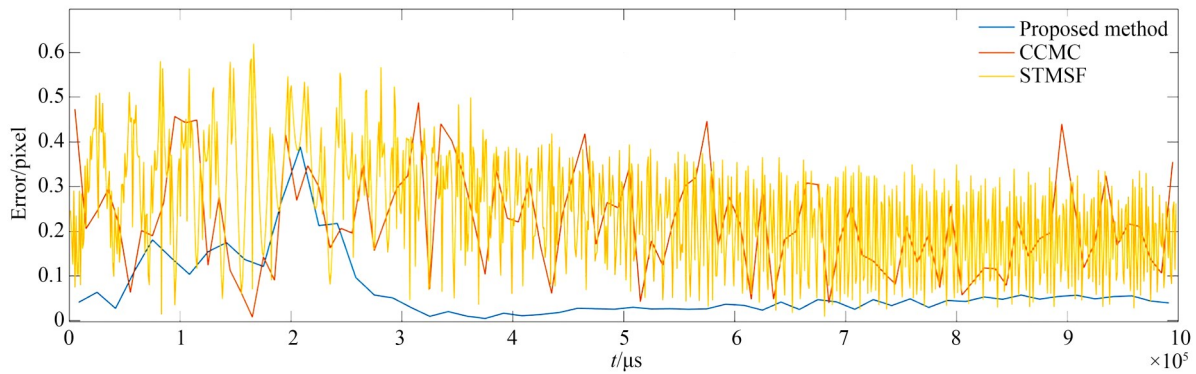


图 9 非匀速曲线运动星点仿真实验质心误差对比

Fig. 9 Comparison of centroid errors in simulation experiments for star spot under non-uniform curvilinear motion

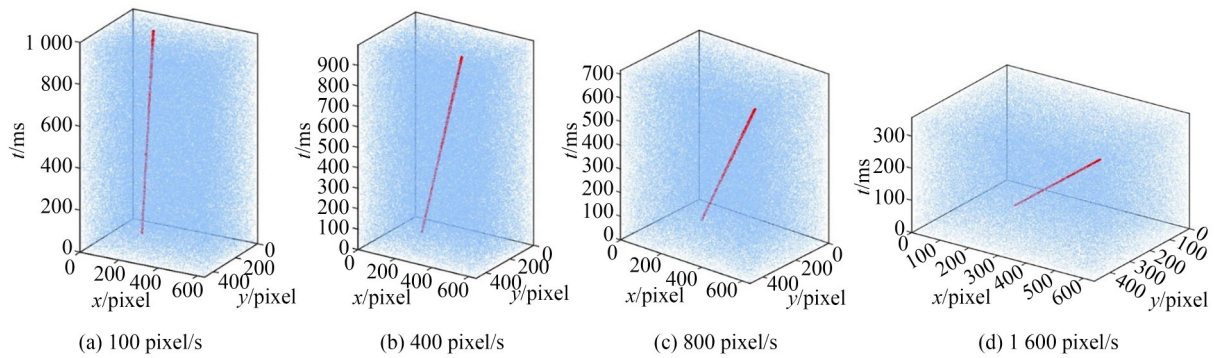


图 10 不同星点速度匀速直线运动的仿真星点分布

Fig. 10 Simulated star spot distribution under uniform linear motion at different star point velocities

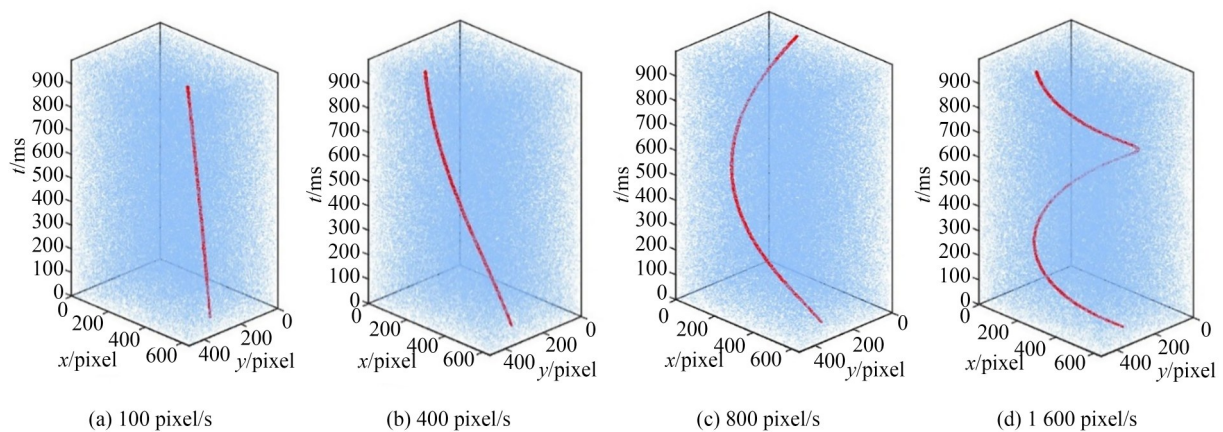


图 11 不同星点速度匀速圆周运动的仿真星点分布

Fig. 11 Simulated star spot distribution under uniform circular motion at different star point velocities

由仿真可知,在不同工况下,本文方法相较于 CCMC 和 STMSF 均表现出更高的质心定位

精度,其误差水平整体更低,且随时间的波动幅度更小,稳定性更佳。

表 2 匀速直线运动星点仿真数据

Tab. 2 Simulation data of star spot under uniform linear motion

Method	Velocity/ (pixel·s <sup>-1</sup> )			
	RMSE	MAE	STD	
Proposed method	100	0.122 7	0.116 1	0.040 1
CCMC	100	0.231 6	0.197 7	0.121 3
STMSF	100	0.355 1	0.331 5	0.127 5
Proposed method	400	0.036 3	0.035 6	0.007 0
CCMC	400	0.235 7	0.221 6	0.080 9
STMSF	400	0.185 4	0.175 5	0.060 0
Proposed method	800	0.069 2	0.068 3	0.010 7
CCMC	800	0.249 2	0.214 6	0.127 6
STMSF	800	0.102 8	0.092 5	0.044 8
Proposed method	1 600	0.131 3	0.130 5	0.014 5
CCMC	16 00	0.230 7	0.213 6	0.088 5
STMSF	1 600	0.143 1	0.135 0	0.047 5

表 3 匀速圆周运动星点仿真数据

Tab. 3 Simulation data of star spot under uniform circular motion

Method	Velocity/ (pixel·s <sup>-1</sup> )			
	RMSE	MAE	STD	
Proposed method	100	0.223 4	0.192 2	0.114 8
CCMC	100	0.316 7	0.288 5	0.131 3
STMSF	100	0.368 7	0.346 9	0.125 0
Proposed method	400	0.106 0	0.069 7	0.080 5
CCMC	400	0.247 7	0.223 4	0.107 7
STMSF	400	0.239 6	0.214 4	0.107 1
Proposed method	800	0.101 1	0.090 3	0.045 8
CCMC	800	0.264 8	0.228 8	0.134 0
STMSF	800	0.176 3	0.145 2	0.100 0
Proposed method	1 600	0.150 1	0.146 2	0.034 0
CCMC	1 600	0.275 6	0.226 9	0.157 2
STMSF	1 600	0.169 3	0.144 6	0.088 1

### 3.2 半物理仿真实验

本文使用 PROPHESSEE PPS3MVCD 事件相机,详细参数见表 4。搭建的实验系统如图 12 所示,为获得时间连续且稳定的星点光流,避免显示器件的刷新或扫屏线引入星点事件光斑的离散跳跃和扫频伪事件,实验选用 Thorlabs 的 OSL1-EC Fiber Illuminator 连续宽谱白光照明源照射孔径间距的等距四点星点板,星点板开孔在相邻点边长为 $(8.4\pm 0.01)$  mm 的正方形的 4 个顶点上,孔径为 $(0.02\pm 0.002)$  mm,光源照射星点板后,经平行光管准直输出平行光,可在事件

表 4 事件相机及镜头的规格参数

Tab. 4 Parameters of event camera and lens

Parameters	Value
Effective resolution	640(H)×480(V)
Pixel size/ $\mu\text{m}$	15
Dynamic range	>120 dB
Typical latency/ $\mu\text{s}$	200
Focal length/mm	75
$F/\#$	2.8

相机上形成连续星点光斑。

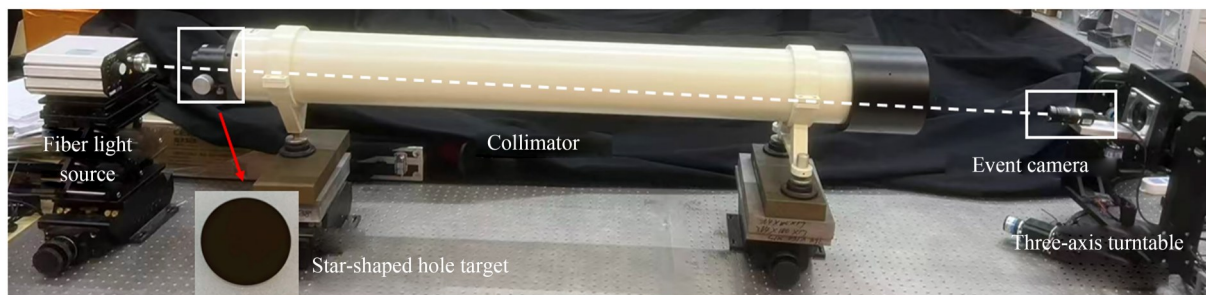


图 12 半物理仿真实验装置

Fig. 12 Experimental setup for semi-physical simulation

为了实时感知航天器的姿态变化,定义星敏感器单次更新最大角位移为  $\Delta\theta_{\max} = \frac{\omega_{\max}}{f}$ ,该指标反映了系统在相邻两次更新之间航天器可能产生的最大姿态变化量。现有的星敏感器的动态性能一般不超过  $2^\circ$ ,且  $\Delta\theta_{\max}$  通常小于  $0.5^{[20]}$ ,因此,在事件相机以  $20(^{\circ})/s$  的角速度运动时,设置姿态输出频率为  $60\text{ Hz}$ ,  $\Delta\theta_{\max}$  约为  $0.33^\circ$ ,足以满足姿态频率更新需求。

表 5 平行光管的核心参数

Tab. 5 Key parameters of collimator

Parameters	Value
Focal length/m	1.6
FOV/( $^\circ$ )	1

接着设置转台以不同的角速度运动,事件相机接收星点板经平行光管准直出射的平行光并输出事件流。基于不同星点速度下的事件数据,横向对比相关方法的质心提取精度,以评估算法的性能差异。

当角速度过低时,星点在像面上的位移较小,单位时间内引起的亮度变化不足,易导致有效事件数减少,事件分布方向性减弱,并使噪声事件相对占比上升,从而降低聚类分离与质心拟合的稳定性。为此应设置转台速度使事件相机能稳定提供输出。

为体现星对角距的精度,由于该靶标 4 个特

征点的相邻点理论间距相同,本文采用相邻点平均间距误差作为评价指标。设  $2 \times 2$  靶标 4 个特征点按左上、右上、左下、右下依次编号为  $P_1, P_2, P_3, P_4$ ,则 4 组相邻点距离分别为:

$$\begin{aligned} d_1 &= \|P_2 - P_1\|_2, d_2 = \|P_4 - P_3\|_2, \\ d_3 &= \|P_3 - P_1\|_2, d_4 = \|P_4 - P_2\|_2. \end{aligned} \quad (28)$$

进一步定义该帧的平均相邻点间距为:

$$\bar{d} = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 d_k. \quad (29)$$

设靶标理论点间距为  $d_{\text{ref}}$ ,则误差定义为:

$$e = |\bar{d} - d_{\text{ref}}|. \quad (30)$$

对所有时刻得到的单帧误差  $e_i$  进一步统计均方根误差、平均绝对误差和标准差,以综合评价方法在动态条件下的精度和稳定性:

$$\begin{aligned} MAE &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i, \\ RMSE &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2}, \\ STD &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (e_i - \bar{e})^2}. \end{aligned} \quad (31)$$

由表 6 可以看出,在 4 组角速度工况下,本文方法在 3 项误差指标上最优,体现出更高的定位精度与更强的稳定性。低速  $5(^{\circ})/s$  时,本文方法的 RMSE 为 0.221 9,较 CCMC 降低约 21%,且 STD 仅 0.030 7,波动显著更小;与 STMSF 相比,MAE 基本一致但 STD 更低,说明在相近平均误差水平下输出更平稳。随着角速度提高到

表 6 半物理仿真实验数据

Tab. 6 Experimental data from semi-physical simulation

Method	Velocity/( $^\circ \cdot s^{-1}$ )	Number of centroids/s	RMSE	MAE	STD
Proposed method	5	58.5	0.229 3	0.219 9	0.030 7
CCMC	5	67	0.282 2	0.253 3	0.139 2
STMSF	5	862	0.238 0	0.220 0	0.093 3
Proposed method	11	60	0.150 9	0.138 6	0.061 0
CCMC	11	268	0.342 9	0.287 6	0.328 9
STMSF	11	859.35	0.706 2	0.527 9	0.722 2
Proposed method	17	57.7	0.084 4	0.070 5	0.056 0
CCMC	17	101.1	0.613 6	0.411 3	0.601 0
STMSF	17	238.3	0.861 4	0.690 2	0.817 1
Proposed method	20	57.25	0.107 8	0.101 0	0.099 2
CCMC	20	115.3845	1.152 3	1.003 4	1.153 3
STMSF	20	168.98	0.371 5	0.261 5	0.384 6

11~20 (°)/s, CCMC 与 STMSF 的误差与波动均明显增大, 而本文方法仍保持较低的 RMSE 与 MAE, 并且 STD 始终处于较小水平, 且均显著低于 CCMC 与 STMSF, 表明本文方法对高动态条件下的噪声干扰与事件结构间断更不敏感, 稳定性更强。虽然本文方法的质心输出频率最低, 但其输出频率仍能够满足动态星点跟踪与定位的实际需求。且由于本文方法采用了更严格的有效事件筛选机制, 并通过稳健估计获得高可靠性的质心结果, 因此, 在定位精度与输出稳定性方面具有更显著的优势。

### 3.3 外场观星实验

为验证本算法在外场中的性能表现, 现开展外场观星实验。如图 13(a) 所示, 实验使用帧相

机 MARS-170-662GTM, 相机参数见表 7, 并结合事件相机的镜头拍摄静态星图, 得出两星像面像素距离  $d_A$ , 接着将帧相机换成事件相机, 如图 13(b) 所示, 使用转台驱动事件相机分别按照 10 (°)/s, 20 (°)/s 的转速扫描两星, 得到两星像素距离测量值  $d_B$ 。

由于两者镜头参数一致, 且星对间角距不变, 两星在事件相机像面上的基准值  $d_{B, \text{ref}}$  可以由帧相机像素点距  $p_a$ 、事件相机像素点距  $p_b$  之间的比例关系表示:

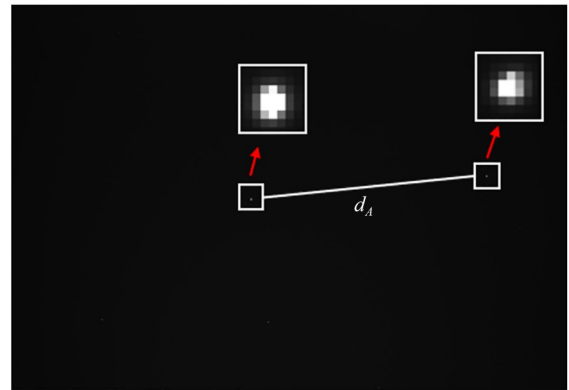
$$d_{B, \text{ref}} = d_A \times \frac{p_a}{p_b} \quad (32)$$

误差可以表示为:

$$e = |d_B - d_{B, \text{ref}}| \quad (33)$$



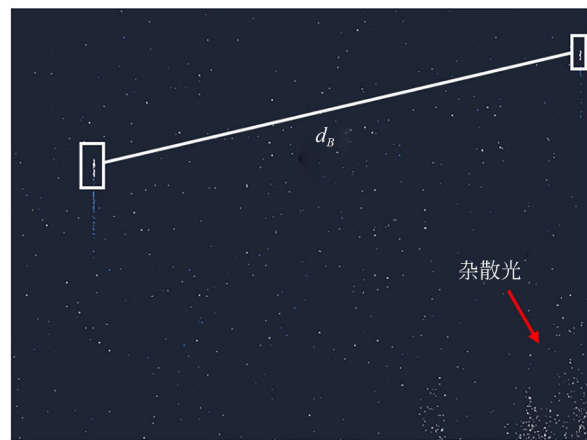
(a) 帧相机拍摄静态星对  
(a) Frame camera imaging of static star pairs



(b) 帧相机拍摄的星对图像  
(b) Star-pair images captured by a frame camera



(c) 事件相机拍摄动态星对  
(c) Event camera imaging of dynamic star pairs



(d) 事件相机获取的星对事件流  
(d) Star-pair event stream acquired by an event camera

图 13 帧相机与事件相机星对获取过程及结果

Fig. 13 Frame- and event-camera-based star-pair acquisition and result

评估结果如表 8 所示。

表 7 MARS-170-662GTM 核心参数

Tab. 7 Key parameters of MARS-170-662GTM

Parameters	Value
Effective resolution	1 600(H)×1 104(V)
Pixel size/ $\mu\text{m}$	9
SNR/dB	51
Sensor	1.1" IMX425 CMOS

表 8 观星实验数据

Tab. 8 Field star observation experimental data

Velocity/ ( $^{\circ}$ ) $\cdot$ s $^{-1}$	Number of centroid/s	RMSE	MAE	STD
10	55.22	0.188 4	0.174 6	0.084 8
20	47.33	0.142 7	0.133 6	0.132 4

## 4 结 论

本文针对高动态条件下事件相机星点成像中噪声干扰强,传统质心方法定位精度不足的问题,提出了一种基于非对称邻域密度聚类与事件形态迭代加权最小二乘稳健拟合的动态星点质心提取方法。仿真实验表明,在非匀速曲线、匀速直线和匀速圆周等运动场景下,本文方法均能

实现稳定的事件分离与高精度质心定位。半物理仿真实验进一步表明,在 5, 11, 17 和 20 ( $^{\circ}$ )/s 条件下,本文方法的 RMSE 分别为 0.221 9, 0.150 9, 0.084 4 和 0.107 8,均优于连通域均值中心法和时空滤波-均值漂移法;其中,在 20 ( $^{\circ}$ )/s 高动态条件下,本文方法 RMSE 为 0.107 8,远远优于上述对比方法的 1.152 3 和 0.371 5。外场观星实验结果表明,在 10 ( $^{\circ}$ )/s 和 20 ( $^{\circ}$ )/s 角速度条件下,本文方法的质心更新频率分别达到 55.22 次/s 和 47.33 次/s,对应 RMSE 分别为 0.188 4 和 0.142 7,受大气湍流、帧相机参考质心定位误差等因素影响,定位精度相较半物理仿真实验有所降低,但整体误差仍保持在可接受范围内,表现出较好的动态适应能力与稳定性。因此,该方法能够满足高动态条件下星点目标的亚像素级质心定位需求,可为事件相机星敏感器的目标跟踪与姿态测量提供支持。

### 作者贡献声明:

段 锐:论文构思与撰写,算法开发;  
常 琳:论文构思与审核,实验设计;  
付宗强:算法开发指导,实验指导;  
丁兆言:数据整理与可视化;  
王怡婷:实验数据分析与编辑写作;  
徐婷婷:研究现状调研分析与写作指导;  
杨秀彬:资源获取。

### 参考文献:

- [1] LIEBE C C. Accuracy performance of star trackers—a tutorial[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(2): 587-599.
- [2] MA L H, DAI D K, NI Y M. How to improve the attitude accuracy of the star sensor under dynamic conditions: a review[J]. *Acta Astronautica*, 2025, 233: 42-54.
- [3] TANG X Y, CAO Q P, FU Z Q, *et al.* Multi-centroid extraction method for high-dynamic star sensors based on projection distribution of star trail[J]. *Remote Sensing*, 2025, 17(2): 266.
- [4] LUO Z W, GUO Q, *et al.* Centroid algorithm for high-dynamic star sensor based on key point detection deep learning algorithms [J]. *Optics Express*, 2025, 33(8): 17203.
- [5] LU Y F, XU X G, LI P T, *et al.* From events to enhancement: a survey on event-based imaging technologies [EB/OL]. 2025: *arXiv*: 2505.05488. <https://arxiv.org/abs/2505.05488>
- [6] CHAKRAVARTHI B, VERMA A A, DANILIDIS K, *et al.* Recent event camera innovations: a survey [C]. *Computer Vision-ECCV 2024 Workshops*. Cham: Springer, 2025: 342-376.
- [7] GALLEGO G, DELBRÜCK T, ORCHARD G, *et al.* Event-based vision: a survey [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2022, 44(1): 154-180.
- [8] GEHRIG D, SCARAMUZZA D. Low-latency automotive vision with event cameras [J]. *Nature*, 2024, 629(8014): 1034-1040.
- [9] 曾思康, 赵汝进, 马跃博, 等. 基于事件的高动态星敏感器星点提取方法[J]. *光子学报*, 2022, 51

- (9): 0912003.
- ZENG S K, ZHAO R J, MA Y B, *et al.* An event-based method for extracting star points from high dynamic star sensors [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(9): 0912003. (in Chinese)
- [10] CHIN T J, BAGCHI S, ERIKSSON A, *et al.* Star tracking using an event camera [C]. 2019 *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*. June 16-17, 2019. Long Beach, CA, USA. IEEE, 2019: 1646-1655.
- [11] BAGCHI S, CHIN T J. Event-based star tracking via multiresolution progressive Hough transforms [C]. 2020 *IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*. March 1-5, 2020, Snowmass, CO, USA. IEEE, 2020: 2132-2141.
- [12] REED A W, HASHEMI C, MELAMED D, *et al.* EBS-EKF: accurate and high frequency event-based star tracking [C]. 2025 *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. June 10-17, 2025, Nashville, TN, USA. IEEE, 2025: 6510-6519.
- [13] BAGCHI S, ANASTASIOU P, TETLOW M, *et al.* Event-based star tracking under spacecraft jitter: the e-STURT dataset [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2026, 62: 4629-4645.
- [14] JOHANSEN T A, FOSSEN T I. Nonlinear filtering with exogenous Kalman filter and double Kalman filter [C]. 2016 *European Control Conference (ECC)*. June 29-July 1, 2016, Aalborg, Denmark. IEEE, 2017: 1722-1727.
- [15] ESTER M, KRIEGEL H P, SANDER J, *et al.* A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise [C]. *Knowledge Discovery and Data Mining*, 1996.
- [16] IABONI C, PATEL H, LOBO D, *et al.* Event camera based real-time detection and tracking of indoor ground robots [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 166588-166602.
- [17] HU S M, KIM Y, LIM H, *et al.* eCDT: event clustering for simultaneous feature detection and tracking [C]. 2022 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. October 23-27, 2022, Kyoto, Japan. IEEE, 2022: 3808-3815.
- [18] MITROKHIN A, FERMÜLLER C, PARAMESHWARA C, *et al.* Event-based moving object detection and tracking [C]. 2018 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. October 1-5, 2018, Madrid, Spain. IEEE, 2019: 1-9.
- [19] DING J Q, DAI D K, TAN W F, *et al.* Implementation of a real-time star centroid extraction algorithm with high speed and superior denoising ability [J]. *Applied Optics*, 2022, 61(11): 3115.
- [20] 孙博. 星载星敏感器高精度姿态测量关键技术研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2024.
- SUN B. *Research on Key Technologies for High-Precision Attitude Measurement of Spaceborne Star Sensors* [D]. Changchun: Jilin University, 2024. (in Chinese)

## 作者简介:



段 锐(2000—),男,江苏南京人,硕士研究生,2022年于常州工学院获得学士学位,主要从事事件相机与空间目标检测的研究。E-mail: ddzwuhu@163.com

## 通讯作者:



常 琳(1985—),女,吉林长春人,博士,副研究员,2014年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事卫星姿态控制算法以及地面成像仿真验证的研究。E-mail: fagnlinchang@aliyun.com