

多光轴标校中脉冲激光与十字靶标中心检测方法

安兴起 严小军 郑涛 董蓉桦 王静

Center detection methods for pulsed laser spots and cross targets in multi-optical-axis calibration

AN Xing-qi, YAN Xiao-jun, ZHENG Tao, DONG Rong-hua, WANG Jing

引用本文:

安兴起, 严小军, 郑涛, 董蓉桦, 王静. 多光轴标校中脉冲激光与十字靶标中心检测方法[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2026-0071

AN Xing-qi, YAN Xiao-jun, ZHENG Tao, DONG Rong-hua, WANG Jing. Center detection methods for pulsed laser spots and cross targets in multi-optical-axis calibration[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2026-0071

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2026-0071>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

涡旋光束轨道角动量的十字线检测法

Crosshair detection method for orbital angular momentum of vortex beams

中国光学 (中英文). 2025, 18(4): 803 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0209>

脉冲激光辐照背照式CMOS图像传感器损伤机理研究

Damage mechanism of back-illuminated CMOS image sensor irradiated by pulsed laser

中国光学 (中英文). 2025, 18(2): 256 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0139>

纳秒脉冲激光对背照式CMOS探测器组件损伤机理研究

Investigation of laser-induced damage mechanisms in back-illuminated CMOS detector modules under nanosecond pulsed irradiation

中国光学 (中英文). 2025, 18(6): 1277 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0090>

距离选通成像系统中短脉冲激光驱动技术研究

Short pulse laser drive technology in a distance-selective imaging system

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 567 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0142>

纸膜双层缺陷检测的视觉成像光场设计

Design of optical field of vision imaging for defect detection of paper and transparent film

中国光学 (中英文). 2024, 17(2): 354 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0134>

复杂水文微弱多目标激光探测仿真与实验

Simulation and experiment of weak multi-target laser detection in complex hydrology

中国光学 (中英文). 2024, 17(3): 560 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0141>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-10

多光轴标校中脉冲激光与十字靶标中心检测方法

安兴起^{1,2*}, 严小军¹, 郑涛¹, 董蓉桦¹, 王静¹

(1. 北京航天控制仪器研究所, 北京 100039;

2. 北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要: 为提升光电吊舱多通道光轴一致性, 解决光轴标校复杂成像条件下靶标中心检测精度不足的问题, 提出两种具有针对性的高精度检测方法。针对脉冲激光闪烁及灼痕干扰, 提出基于分阶段加权质心法的脉冲激光中心检测方法, 实现大光斑粗定位到灼痕精定位的逐级优化; 针对红外十字靶标边缘模糊、噪声干扰等问题, 提出基于多组霍夫直线筛选与方向约束的交点优化策略, 提高弱边缘条件下的中心定位精度。通过对多组激光序列及十字靶标图像进行实验验证, 结果显示: 脉冲激光中心检测中, 分阶段加权质心法的均方根误差为 0.237 像素, 优于最小二乘圆拟合法和传统质心法; 霍夫直线筛选法在 15 幅红外十字靶标图像上的平均误差和最大误差仅为 0.499 像素和 0.974 像素。实验结果表明, 所提方法可实现亚像素级中心检测, 具有良好的稳定性以及较强的工程应用价值。

关键词: 多光轴标校; 脉冲激光; 十字靶标; 中心定位; 视觉检测

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2026-0071 CSTR: 32171.14.CO.2026-0071

Center detection methods for pulsed laser spots and cross targets in multi-optical-axis calibration

AN Xing-qi^{1,2*}, YAN Xiao-jun¹, ZHENG Tao¹, DONG Rong-hua¹, WANG Jing¹

(1. *Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100039, China;*

2. *Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China*)

* Corresponding author, E-mail: anxq456@163.com

Abstract: To improve the consistency among multiple optical axes in electro-optical pods, this paper proposes two high-precision target center detection methods for optical-axis calibration under complex imaging conditions. For pulsed laser images affected by flicker and burn-mark interference, a staged weighted centroid method is proposed. This method performs coarse localization using large laser spots and then refines the center position using burn marks. For infrared cross targets with blurred edges and noise interference, an intersection optimization strategy based on Hough line screening and directional constraints is proposed. This strategy improves center localization accuracy under weak-edge conditions. Experiments were carried out using multiple laser image sequences and infrared cross-target images. The results show that the root mean square error of the staged weighted centroid method is 0.237 pixels, which is lower than those of

收稿日期: 2026-04-22; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 基础科研项目 (No. JCKY2024203B022)

Supported by Basic Research Project (No. JCKY2024203B022)

the least-squares circle fitting method and the conventional centroid method. For 15 infrared cross-target images, the proposed Hough line screening method achieves an average error of 0.499 pixels and a maximum error of 0.974 pixels. These results demonstrate that the proposed methods can achieve sub-pixel center detection. The proposed methods also show good stability and strong potential for engineering applications.

Key words: multi-optical-axis calibration; pulsed laser; cross target; center localization; visual detection

1 引言

在现代无人机和航空光电系统中,光电吊舱被广泛应用于目标搜索、识别与跟踪等任务^[1-2]。为保证吊舱多通道间图像信息的一致性,高精度光轴平行性标校成为系统性能的重要保障^[3]。当前多光轴标校方法主要有投影靶法^[4]、惯性测量法^[5]、五棱镜法^[6]、相交校靶法^[7]、小口径平行光管法^[8]以及大口径平行光管法^[9]等。其中大口径平行光管法因具备精度高、稳定性好、非接触检测及可见光与红外兼容等优势得到广泛应用。该方法通过将预设靶标(如十字线分划板等)置于物镜焦平面,实现准直光输出,使被测系统等效观测无穷远目标。不同通道(如相机、激光器等)对同一目标的成像偏移反映其光轴指向差异,通过测量像面偏移量并进行线性转换,可实现光轴误差的定量估计与机械校正。因此,靶标中心的提取精度直接决定标校结果的准确性^[10]。

为提高激光光斑中心检测精度,杨耀权^[11]提出了基于 Hough 变换的激光光斑中心读取方法,李天宇^[12]采用高斯曲面拟合方法实现信号弹光斑中心的亚像素定位,潘登^[13]基于椭圆拟合实现了圆形和椭圆形光斑中心的亚像素提取,任守峰^[14]使用灰度重心法对高分七号卫星获取的连续激光进行光斑质心提取,偏移量标准差小于 0.05 pixel。上述方法在光斑形状规则、灰度分布稳定或边缘特征清晰时能够取得较高精度,但对脉冲激光动态闪烁、能量分布不均及灼痕残留等复杂情况适应性不足,容易导致质心偏移、拟合误差增大或中心位置波动^[15-17]。为实现十字线图像中心检测与定位,张吉璇^[18]采用最小二乘法直线拟合算法进行中心定位,武华敏^[19]利用深度卷积神经网络获得十字线中心点,袁狄剑^[20]提出了基于自构卷积核改进模板匹配的红外十字靶标中心定位算法。传统直线拟合和模板匹配方法在十

字边缘完整、对比度较高时具有较好的定位效果,但在红外成像中,十字靶标常出现边缘模糊、弱对比度及伪直线干扰等问题,使直线检测和交点计算的稳定性下降。深度学习方法通常依赖大量样本,训练成本较高,工程部署较复杂^[21-22]。总体来看,现有方法虽然能够在理想光斑或清晰十字靶标条件下实现较高精度,但在目标形态发生畸变、边缘模糊或背景干扰增强时,其检测误差、重复性和工程适应性仍难以同时满足高精度多光轴标校需求。因此,亟需结合标校场景中目标的时序特征和几何结构特征,构建具有更强鲁棒性的中心检测方法。

针对以上问题,本文面向多光轴标校过程中的两类典型目标,提出了具有针对性的中心检测方法。对于激光器与可见光相机光轴标校中的脉冲激光光斑,本文利用连续帧中大光斑与灼痕光斑之间的位置关联关系,构建“连通域粗定位—加权质心精定位”的分阶段检测流程,实现由大光斑初始定位到灼痕光斑精确定位的逐级优化,从而降低单帧光斑形态变化及背景干扰对中心提取结果的影响。对于可见光相机与红外相机光轴标校中的十字靶标,本文针对红外图像中十字线边缘模糊和伪直线干扰等问题,在霍夫直线检测结果的基础上进一步引入直线夹角筛选、方向约束和交点优化机制,从多条候选直线中筛选出更符合十字结构几何特征的有效直线,并通过交点融合获得稳定的靶标中心。实验结果表明,所提方法能够在复杂成像条件下实现稳定、鲁棒的目标中心定位,定位精度达到亚像素级,可满足高精度多光轴标校的应用需求。

2 多光轴平行性标校方法

本文光电吊舱多光轴平行性标校采用大口径平行光管法,其装置如图 1 所示,主要由光源、十字分划板/靶标板和大口径平行光管组成。

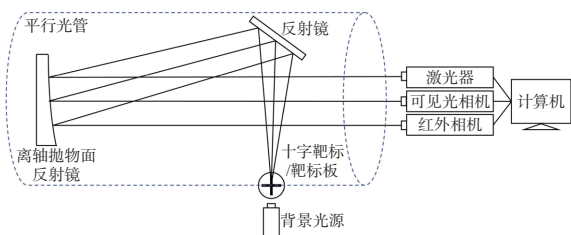


图1 大口径平行光管多光轴标校装置

Fig. 1 Multi-optical-axis calibration setup based on a large-aperture collimator

大口径平行光管法是一种基于“无穷远目标等效”的高精度光轴标校方法,其基本原理是将十字线或点靶标放置在平行光管物镜的焦平面上,使出射光束近似为平行光,从而在被测光学系统中等效为来自无穷远处的理想目标。可见光相机与红外相机在成像过程中,其像面上目标的位置由各自光轴方向决定,因此不同系统对同一平行光目标的成像中心差异,本质上反映了各光轴之间的指向偏差。在小角度条件下,像面偏移量与光轴夹角近似满足线性关系,可实现由像素偏差到角度误差的精确转换,进而通过机械调整实现多光轴校正。

本标校流程主要分为激光器-可见光相机光轴标校、可见光相机-红外相机光轴标校两部分。第一部分,启动激光器与可见光相机,使激光器发出脉冲激光打在靶标板上,可见光相机采集靶标板的脉冲激光画面。若激光光斑中心与可见光相机视场中心重合,则认为激光器与可见光相机光轴平行;否则根据偏移量对激光器进行机械调整,直至激光光斑中心与可见光相机视场中心重合,完成激光器与可见光相机的光轴平行性标校。第二部分,启动红外相机与光源,将靶标板切换为十字靶标。微动吊舱平台,使十字靶标中心与可见光相机视场中心重合,采集红外相机的十字靶标画面。若十字靶标中心与红外相机视场中心重合,则认为可见光相机与红外相机光轴平行,否则根据偏移量对红外相机进行机械调整,直至十字靶标中心与红外相机视场中心重合,完成标校。

以上标校流程表明,可见光相机中激光光斑中心、红外相机中十字靶标中心的检测精度与稳定性,直接决定了光电吊舱多光轴平行性标校的精度与效率。因此,本文针对以上流程,提出了基于分阶段加权质心法的脉冲激光光斑中心检测方法和基于霍夫直线筛选的十字靶标中心检测方

法,为光电吊舱多光轴平行性标校的精度提升与效率优化提供有力支撑。

3 基于分阶段加权质心法的脉冲激光中心检测

在可见光相机获取的图像中,既有由激光器发出的脉冲激光在靶标板表面形成的大光斑,也有在闪烁过程中由于能量集聚效应造成物理灼伤而留下的光斑灼痕(如图2所示)。该成像特性为中心检测提供了两类互补信息源:一是激光发光阶段形成的大尺度光斑,二是激光作用后遗留的灼痕区域。前者具有显著的区域特征,便于快速定位,但形态不规则,无法精准测定其中心坐标。后者边界清晰、尺度较小,有利于精确定位,但易受背景多光斑干扰导致识别错误。基于此,本文构建“连通域粗定位—加权质心精定位”的分阶段检测框架,以实现脉冲激光中心的高精度检测。

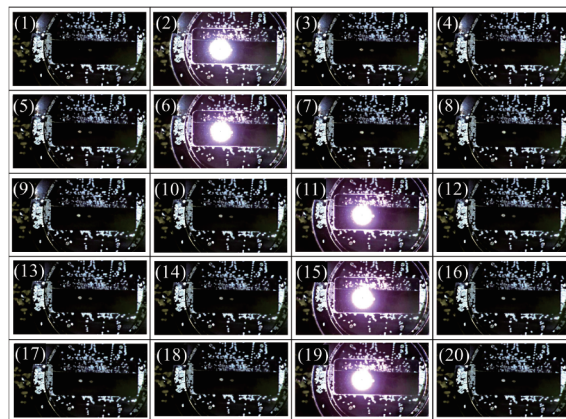


图2 脉冲激光光斑图像采集序列

Fig. 2 Acquired image sequence of pulsed laser spots

基于分阶段加权质心法的脉冲激光中心检测流程如图3所示。首先利用可见光相机以每秒约20帧的频率采集脉冲激光连续帧序列图像(如图2所示)。读取一帧图像并进行预处理,根据预设区域或兴趣区域(ROI)进行裁剪,去除无关背景区域。将彩色图像转换为灰度图像,保留亮度信息,以利于后续强度特征分析。

如图4(a)所示,采用Otsu自适应阈值算法将灰度图像转化为二值图像,增强光斑与背景之间的对比度。对二值图像中所有连通域进行提取与分析,判断是否存在面积大于阈值(根据大光斑像素面积设定)的区域。若存在,则认为该帧为大

光斑图像, 继续进行后续处理; 否则为激光闪烁后遗留的灼痕图像, 读取下一帧图像再次进行预处理与连通域阈值判断, 直到找到大光斑图像。

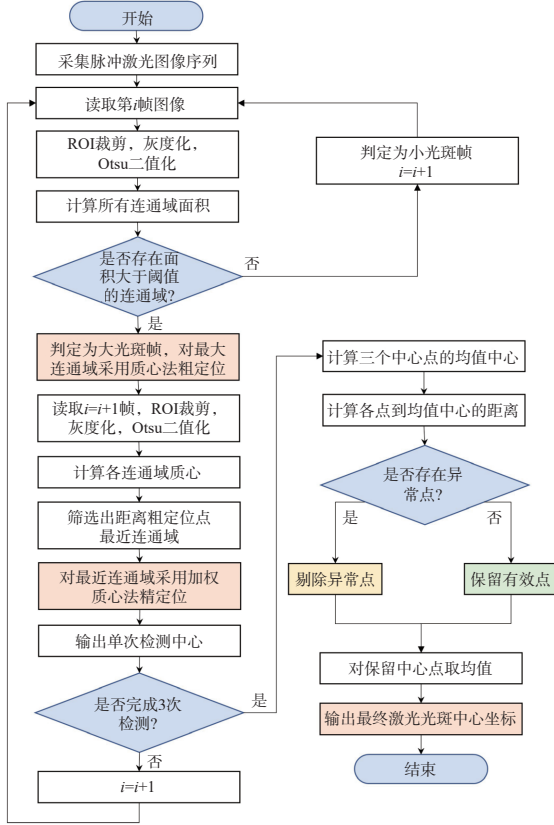


图3 脉冲激光中心检测流程图

Fig. 3 Flowchart of pulsed laser spot center detection

对二值化后的大光斑区域, 采用传统质心法计算其几何中心。设目标连通域为 Ω_L , 其中像素坐标为 (x_i, y_i) , 像素总数为 N 。对连通域内所有像素坐标求算术平均, 则其质心坐标 (x_c, y_c) 可表示为^[23]:

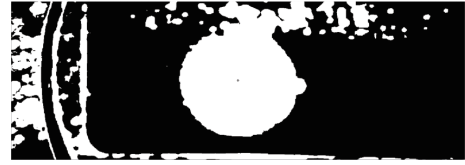
$$\begin{aligned} x_c &= \frac{\sum_{(x_i, y_i) \in \Omega_L} x_i}{N} \\ y_c &= \frac{\sum_{(x_i, y_i) \in \Omega_L} y_i}{N} \end{aligned} \quad (1)$$

计算结果用红色点标记在图4(b)中。从图中可以看出, 由于大光斑边界受噪声及成像畸变影响呈不规则形态, 直接采用质心法识别的光斑中心明显偏移。因此该阶段所得结果仅作为粗定位参考, 用于后续精定位过程中的候选区域筛选。

读取下一帧图像并进行预处理, 计算二值化图像(图4(c))中所有连通域质心与粗定位点的距离, 筛选出最近者, 即为激光光斑灼烧所形成的灼

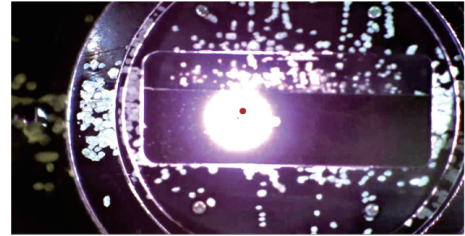
痕。考虑到灼痕本身并非标准圆形, 传统质心法在边缘模糊或灰度分布不均时容易产生偏移; 最小二乘圆拟合法更依赖边缘提取精度, 在非规则光斑情况下易失真; 高斯拟合法在理想高斯分布光斑中精度最高, 但计算复杂度较高, 在实际畸变光斑中鲁棒性下降。因此本文引入加权质心模型, 将像素灰度视为权重参与中心计算, 使灰度较高的光斑核心区域在中心计算中占据更大比重。设灼痕目标区域为 Ω_B , 像素点对应灰度值为 $I(x_i, y_i)$, 则灼痕中心坐标 (x_ω, y_ω) 可表示为:

$$\begin{aligned} x_\omega &= \frac{M_{10}}{M_{00}} = \frac{\sum_{(x_i, y_i) \in \Omega_B} x_i I(x_i, y_i)}{\sum_{(x_i, y_i) \in \Omega_B} I(x_i, y_i)} \\ y_\omega &= \frac{M_{01}}{M_{00}} = \frac{\sum_{(x_i, y_i) \in \Omega_B} y_i I(x_i, y_i)}{\sum_{(x_i, y_i) \in \Omega_B} I(x_i, y_i)} \end{aligned} \quad (2)$$



(a) 大光斑图像预处理

(a) Preprocessing of the large laser spot image



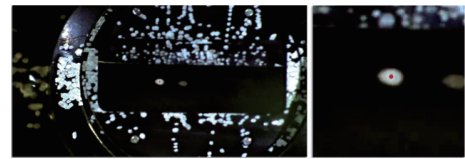
(b) 大光斑中心定位结果

(b) Center localization result of the large laser spot



(c) 激光灼痕图像预处理

(c) Preprocessing of the laser burn-mark image



(d) 光斑中心定位结果及放大图

(d) Center localization result of the laser spot and its magnified view

图4 脉冲激光中心检测过程及结果

Fig. 4 Detection process and results of pulsed laser spot center localization

其中, M_{10} 和 M_{01} 分别表示关于 x 和 y 方向的灰度加权一阶矩, M_{00} 为灰度加权零阶矩, 即目标区域内像素灰度权重之和。计算结果如图 4 (d) 所示, 与传统质心法相比, 该方法通过增强高灰度(通常对应光斑核心区域)的贡献, 有效抑制边缘干扰, 提高中心检测精度。

为提高检测稳定性, 本文对同一激光重复以上过程检测 3 次, 并采用基于欧氏距离的几何一致性判据剔除异常中心点。计算三次检测中心之间的两两欧氏距离 D_{ij} 。设距离一致性阈值为 δ , 若三点间最大距离 $D_{\max} \leq \delta$, 则保留全部点并取均值; 若其中一点到其余两点中点的距离大于阈值 δ , 且其余两点之间距离不大于 δ , 则将该点判定为异常点并剔除。本文取 $\delta = 0.5$ 像素, 最终对保留中心点取均值作为脉冲激光中心坐标。若三次采样结果均不满足一致性条件, 则重新采样。

4 基于霍夫直线筛选的十字靶标中心检测

由于红外相机的热成像机制, 其获取的十字靶标常表现出边缘模糊、弱对比甚至局部断裂等特点。而传统的边缘检测与霍夫直线拟合等方法在此类场景下容易造成识别精度降低或误识别的问题。为解决该难点, 本文提出一种以霍夫直线筛选与中心点迭代优化为核心的十字靶标中心检测算法, 采用“全局估计—局部优化”的分阶段处理策略, 以增强在弱边缘条件下的中心检测稳定性。

首先利用红外相机采集图 5 (a) 所示的十字靶标图像, 将原图转为灰度图, 以统一像素强度维度。采用 7×7 的高斯核进行平滑操作, 降低高频噪声干扰, 提升边缘连续性。应用 Otsu 自适应阈值算法进行图像分割, 自动确定最优阈值, 将图像转换为图 5 (b) 所示的黑白二值图, 强化目标结构的可分性, 为后续边缘提取和直线检测提供高质量图像基础。如图 5 (c) 所示, 对预处理后的二值图像应用 Canny 算法提取边缘轮廓。Canny 算法具有良好的抗噪能力与边缘连接性, 能够在低对比度区域提取出连续的边缘信息。随后采用标准霍夫变换进行全图直线提取, 提取到的直线以极坐标参数 (ρ, θ) 表示, 其中 ρ 为坐标原点到直线

的垂直距离, θ 为该垂线与 x 轴正方向的夹角。

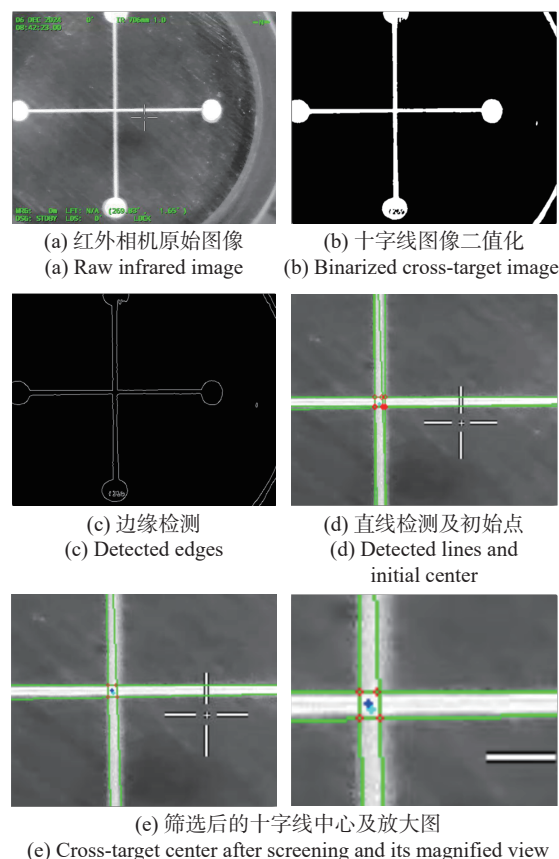


图 5 十字靶标中心检测过程及结果

Fig. 5 Process and results of cross-target center localization

标准霍夫变换在宽线或模糊边缘情况下容易造成参数空间累积峰值扩散, 从而引起直线定位偏移, 并可能检测到多条非目标直线。因此, 为提高候选直线组合的可靠性, 本文在霍夫直线检测结果的基础上引入方向约束进行二次筛选。对所有检测到的直线进行两两组合, 计算两直线相交后形成的较小夹角, 仅保留较小夹角大于 60° 且小于等于 90° 的直线对, 从而保证所选直线对具有近似正交关系, 有效排除共线、平行以及由背景纹理、噪声边缘等非靶标结构引起的干扰。需要说明的是, 60° 作为宽松的方向筛选阈值, 主要用于剔除明显不满足十字靶标几何特征的直线组合; 在合理范围内适当增大该阈值时, 对算法中心定位结果无本质影响。对于每组符合要求的直线对, 构建二维线性方程组求解交点, 并对所有有效交点的坐标取均值, 得到几何中心, 作为靶标中心的初始估计点, 如图 5 (d) 中浅蓝色点所示。

以初始中心估计点 (x_0, y_0) 为参考, 设计一种

“方向性筛选”策略,用于从候选直线中进一步确定十字靶标的上、下水平边缘线以及左、右竖直边缘线。霍夫变换检测得到的直线在笛卡尔坐标系下的直线方程为: $x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta = \rho$, 可通过代入初始中心点坐标判断候选直线与初始中心之间的相对位置关系。对于第 i 条候选直线 (ρ_i, θ_i), 若 $|\sin \theta_i| > |\cos \theta_i|$, 则其法向量更接近 y 轴方向, 直线本身更接近水平。定义其水平性评价量为 $S_h = |\sin \theta_i|$, S_h 越大, 说明该直线越接近水平。将 x_0 代入直线方程, 得到:

$$y_i^0 = \frac{\rho_i - x_0 \cos \theta_i}{\sin \theta_i}, \quad (3)$$

在图像坐标系中, 原点位于左上角, y 轴向下增大, 因此当 $y_i^0 < y_0$ 时, 该直线位于初始中心点上方; 当 $y_i^0 > y_0$ 时, 该直线位于初始中心点下方。由此, 在满足 $y_i^0 < y_0$ 的近水平候选直线中, 选取 S_h 最大的直线作为上方最优水平线; 在满足 $y_i^0 > y_0$ 的近水平候选直线中, 选取 S_h 最大的直线作为下方最优水平线。

同理, 若 $|\cos \theta_i| > |\sin \theta_i|$, 则其法向量更接近 x 轴方向, 直线本身更接近竖直。定义其竖直性评价量为 $S_v = |\cos \theta_i|$, S_v 越大, 说明该直线越接近竖直。将 y_0 代入直线方程, 得到

$$x_i^0 = \frac{\rho_i - y_0 \sin \theta_i}{\cos \theta_i}, \quad (4)$$

当 $x_i^0 < x_0$ 时, 该直线位于初始中心点左侧; 反之该直线位于初始中心点右侧。由此, 在满足 $x_i^0 < x_0$ 的近竖直候选直线中, 选取 S_v 最大的直线作为左侧最优竖直线; 在满足 $x_i^0 > x_0$ 的近竖直候选直线中, 选取 S_v 最大的直线作为右侧最优竖直线。

最终, 将上、下两条最优水平线与左、右两条最优竖直线分别求交, 得到四个有效交点。对这四个交点的坐标再次进行几何平均, 作为最终十字靶标中心坐标输出, 如图 5 (e) 中深蓝色点所示。该方法通过全局搜索与局部精化相结合的方式, 可以显著提升在边缘模糊场景中的定位精度, 减少由噪声、断裂边缘或背景纹理带来的误差传递。

5 实验验证

5.1 脉冲激光光斑中心检测

本文采用口径为 $\Phi 500$ mm 的大口径平行光

管, 重复频率为 5 Hz 的脉冲激光器进行实验验证。将可见光相机的视场中心与理论激光光轴对齐, 打开激光器, 脉冲激光束持续照射平行光管末端的靶标板, 可见光相机同步采集脉冲激光照射下形成的光斑图像序列。本实验共采集脉冲激光图像序列 5 组 (第 1 组如图 2 所示, 第 2~5 组如附录所示), 每组包含连续图像帧 20 帧, 图像分辨率为 1920×1080 。为评估不同方法的定位精度, 对五组脉冲激光图像序列分别采用分阶段最小二乘圆拟合法、分阶段传统质心法、分阶段加权质心法进行光斑中心检测; 另外为验证分阶段光斑中心检测方法的有效性, 在每一组中随机截取一帧采用加权质心法进行光斑中心检测。

各方法检测结果如表 1 所示, 坐标单位均为像素。其中单帧加权质心法在第 1、3、4 组的检测结果同分阶段加权质心法基本一致, 而在第 2、5 组的检测结果分布离散性较大, 存在明显偏移现象。出现该异常的原因主要是该两组截取的单帧图像为大激光光斑, 受光斑形变及靶标板上历史灼痕影响较大, 定位结果波动明显。相比之下, 基于分阶段策略的方法通过引入前后帧约束, 检测结果在空间分布上更加集中, 表现出更好的稳定性。

表 1 脉冲激光光斑中心检测结果

Tab. 1 Center localization results for pulsed laser spots

检测方法	单帧加权质心法	分阶段最小二乘圆拟合法	分阶段传统质心法	分阶段加权质心法
1	(957.552, 543.071)	(957.389, 542.921)	(957.706, 542.979)	(957.549, 543.066)
2	(952.031, 586.218)	(955.593, 543.174)	(954.87, 543.369)	(955.447, 543.356)
3	(1032.806, 537.849)	(1033.310, 538.026)	(1033.520, 537.696)	(1032.810, 537.841)
4	(811.101, 551.459)	(811.072, 550.995)	(811.182, 551.06)	(811.103, 551.452)
5	(806.737, 559.560)	(811.046, 558.098)	(811.486, 557.654)	(811.360, 557.792)
RMSE (pixel)	/	0.256	0.292	0.237

由于脉冲激光光斑在靶标板上的真实物理中心难以直接测量, 无法获得严格意义上的物理真值, 因此本文选取三种分阶段检测结果的均值作为相对参考基准。该基准综合了不同算法对边缘几何特征和灰度分布特征的检测结果, 可在一定程度上降低单一算法偏差对评价结果的影响, 适用于无物理真值条件下不同算法定位一致性和稳定性的相对比较。在此基础上, 计算各方法相对于参考基准的均方根误差 (RMSE), 用于表征不

同算法检测结果与综合参考中心之间的偏差。结果表明, 最小二乘圆拟合法对边缘提取形状依赖较高, 在非理想光斑条件下误差相对略大; 传统质心法未考虑灰度分布差异, 导致误差波动明显; 相比之下, 加权质心法通过对高灰度区域赋予更高权重, 实现了更优的定位精度与稳定性。

为评估本文所提方法的重复精度, 连续采集同一激光光斑 500 帧图像, 每 50 帧作为一组, 对其进行光斑中心检测。将算法识别结果与目前生产线采用的人工标校(工人鼠标点击)结果进行比较, 检测结果如图 6 所示。该结果表明, 分阶段加权质心法检测结果的极差远低于人工标校结果, 且在光电吊舱本身存在偏移振动的情况下, 算法检测结果的波动仍控制在 1 个像素以内。因此, 分阶段加权质心法在复杂非规则脉冲激光光斑中心检测任务中表现最优, 显著提升了光轴标校精度与鲁棒性, 为高速、精确的光学系统标定提供了可靠技术支撑。

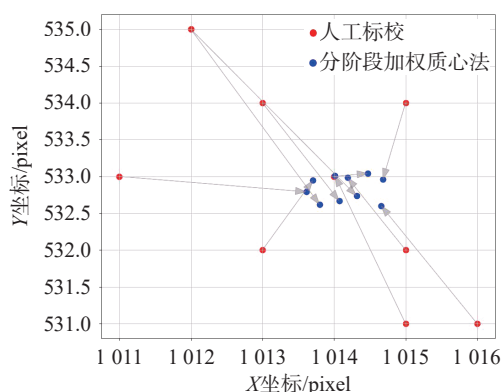


图 6 检测结果散点-箭头分布图

Fig. 6 Scatter-arrow distribution plot of detection results

5.2 十字靶标中心检测

为了验证本文所提基于霍夫直线筛选的十字靶标中心检测方法的精度, 使用红外相机采集 15 张不同噪声水平和不同位置下的十字靶标图像, 如图 7 所示, 图像分辨率为 640×512 。对图像分别采用最小二乘中心线拟合法、行列灰度投影法以及霍夫直线筛选法进行靶标中心定位。利用 Windows 画图软件放大十字靶标中心, 可以较为准确地得到其中心像素坐标。但由于该方法步骤繁琐且效率低下, 无法在生产线实际标校过程中应用, 因此在这里仅作为参考中心对三种算法精度进行比较验证。参考中心及三种算法检测结果如表 2 所列, 单位均为像素。

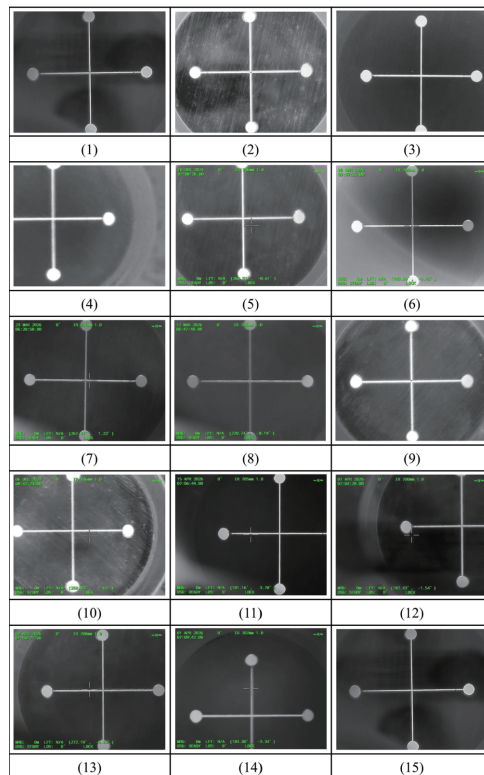


图 7 十字靶标原始图像

Fig. 7 Original cross-target images

表 2 十字靶标中心检测结果对比

Tab. 2 Comparison of cross-target center localization results

编号	参考中心	最小二乘线拟合法	行列灰度投影法	霍夫直线筛选法
1	(321.0, 259.0)	(320.922, 259.102)	(320.997, 258.984)	(320.568, 258.945)
2	(319.0, 254.0)	(319.836, 253.964)	(320.287, 254.472)	(319.641, 253.267)
3	(357.5, 275.5)	(357.613, 275.781)	(357.495, 275.933)	(357.500, 275.500)
4	(167.0, 226.0)	(166.813, 226.352)	(167.407, 225.945)	(167.00, 226.120)
5	(284.0, 225.0)	(284.472, 224.840)	(284.485, 225.021)	(283.563, 224.378)
6	(323.0, 254.5)	(322.359, 255.164)	(322.429, 255.046)	(322.991, 254.500)
7	(303.0, 254.0)	(303.385, 255.088)	(303.486, 254.978)	(303.099, 254.829)
8	(320.0, 259.0)	(320.130, 258.848)	(320.410, 258.447)	(319.500, 259.308)
9	(321.0, 259.0)	(321.231, 259.626)	(321.458, 259.471)	(320.568, 258.945)
10	(248.0, 237.5)	(249.054, 237.619)	(248.981, 237.460)	(247.308, 237.359)
11	(440.5, 249.5)	(440.826, 250.121)	(440.952, 250.051)	(440.273, 250.000)
12	(532.5, 217.0)	(532.112, 217.571)	(532.055, 217.940)	(531.933, 216.875)
13	(377.5, 260.5)	(377.149, 260.004)	(377.449, 259.968)	(377.000, 260.000)
14	(324.0, 370.0)	(323.466, 370.227)	(323.413, 369.575)	(323.799, 369.703)
15	(318.5, 259.0)	(318.519, 259.175)	(318.535, 259.000)	(318.068, 258.988)

从表 2 中可以看出, 在图 7 (2) 中背景噪声较

多且靶标出现残影的情况下,霍夫直线筛选法依然能达到亚像素级定位精度;如图 7 (6) 所示,当画面中存在鬼影时,霍夫直线筛选法在 X 、 Y 方向的误差仅为 (0.009, 0); 如图 7 (8) 所示,即使画面暗淡、靶标模糊,霍夫直线筛选法的误差仅为 (0.5, 0.308); 而在图 7 (3) 所示图像较清晰的情况下,霍夫直线筛选法检测结果与参考中心完全一致。

为统一误差评价标准,定义定位误差 $d = \sqrt{(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2}$, 其中 (x_1, y_1) 为算法检测结果, (x_s, y_s) 为参考中心点,单位为像素。以参考中心点作为基准,分别统计计算三种算法检测结果的平均距离误差、欧氏距离 RMSE 以及最大误差,所得结果如图 8 所示。

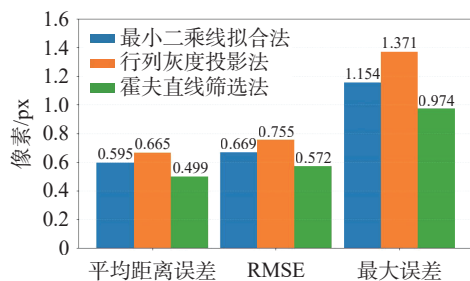


图 8 三种算法检测误差柱状图

Fig. 8 Bar chart comparing the detection errors of the three algorithms

实验结果表明,霍夫直线筛选法在平均距离误差、RMSE 以及最大误差三项指标上均取得最优结果。其通过对候选直线进行角度、位置及交点约束筛选,能够有效剔除由边缘模糊、局部噪声或虚假边缘引起的干扰直线,从而提高十字靶标中心定位精度和检测稳定性。尤其在最大误差指标上,该方法能够将定位偏差控制在更小范围内,表明其对异常样本具有更好的抑制能力。

为进一步测试高斯滤波核尺寸对霍夫直线筛选算法的影响,本文在保持其他算法参数不变的条件下,分别选取 5×5 和 9×9 高斯核对图 7 中 15 幅红外十字靶标图像中心进行检测,与前文 7×7 高斯核检测结果进行比较,结果如表 3 所示。

由以上结果可知,当高斯核为 5×5 时,较小的滤波核对红外图像噪声和局部边缘断裂的抑制能力相对不足,导致后续边缘提取和霍夫直线检测结果稳定性降低。当高斯核增大至 9×9 时,过大的滤波核会造成边缘过度平滑,使十字线边缘位置发生一定偏移,从而影响中心定位精度。相比

之下, 7×7 高斯核对应的平均误差、RMSE 和最大误差三项指标均优于其他核尺寸,说明其能够在噪声抑制和边缘结构保持之间取得较好平衡,为后续霍夫直线筛选与中心定位提供了较为可靠的预处理基础。

表 3 不同高斯核下的检测误差对比

Tab. 3 Detection error comparison under different Gaussian kernel sizes

高斯核尺寸	平均距离误差/pixel	RMSE/pixel	最大误差/pixel
5×5	0.542	0.672	1.581
7×7	0.499	0.572	0.974
9×9	0.638	0.688	1.118

关于实时性与硬件部署方面,由于本文方法主要由阈值分割、边缘提取、直线检测及中心计算等经典图像处理步骤组成,算法结构清晰,计算复杂度较低,便于在 OpenCV 及 Qt 等工程环境下实现,也具备在工控机或嵌入式视觉平台中进一步部署的可行性。因此本文已将所提方法集成至自主编写的多光轴标校视觉定位软件中,并完成了软件层面的实时验证。该软件能够实时采集可见光或红外相机图像,并将图像输入至光轴标校中心检测算法进行处理,检测结果可在软件界面中实时显示,包括靶标中心坐标及其与视场中心的偏差。实验测试表明,本文算法处理单帧图像的平均耗时约为 30 ms,对应理论处理速度约为 33 帧/s,能够满足光轴标校过程中实时显示与快速反馈的需求。

6 结 论

为提高光电吊舱多光轴平行性标校过程中的靶标中心提取精度与稳定性,本文针对脉冲激光动态闪烁、形态不规则以及红外十字靶标边缘模糊、噪声干扰等问题,分别提出两种高精度中心检测方法。在脉冲激光检测中,利用连续帧中大光斑与灼痕光斑之间的时序关系,提出了基于分阶段加权质心的脉冲激光中心检测方法,构建“粗定位—精定位”分阶段策略,降低单帧光斑形变及背景灼痕对检测结果的影响。十字靶标检测中,在霍夫直线检测基础上引入夹角筛选、方向约束和交点优化机制,提出了基于霍夫直线筛选

的十字靶标中心检测方法, 有效剔除非目标边缘和干扰直线, 提高弱边缘条件下十字结构提取的可靠性。

经实验验证, 分阶段加权质心法对 5 组脉冲激光图像序列检测的 RMSE 为 0.237 像素, 优于分阶段最小二乘圆拟合法和分阶段传统质心法。且在连续 500 帧重复性测试中将检测结果波动控制在 1 个像素以内, 具有较好的重复精度。霍夫直线筛选法对 15 幅红外十字靶标图像中心检测的平均误差、RMSE 和最大误差分别为 0.499、

0.572 和 0.974 像素, 均优于最小二乘线拟合法和行列灰度投影法。

综上, 本文方法在多光轴标校中脉冲激光和红外十字靶标的中心检测上具有亚像素级定位精度和较好的鲁棒性, 可以提高标校过程的一致性和效率, 具备较好的实时性与硬件部署优势, 具有较好的工程应用前景。后续可进一步结合自适应图像增强、形态学结构约束和检测置信度评价机制等, 提升算法在强噪声、靶标严重形变等极端图像条件下的适应能力。

参考文献:

- [1] 刘莹奇, 陆红强, 舒营恩, 等. 一种机载多光谱共口径瞄准吊舱光学系统设计[J]. *中国光学(中英文)*, 2025, 18(4): 850-858.
LIU Y Q, LU H Q, SHU Y E, *et al.*. Design of an optical system for airborne multispectral common-aperture targeting pod[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(4): 850-858. (in Chinese).
- [2] 吴依伦, 孙春生. 军用无人机载紧凑型光电吊舱发展及作战运用[J]. *激光与红外*, 2023, 53(10): 1568-1574.
WU Y L, SUN CH SH. Development and operational application of compact photoelectric pod for military UAV[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(10): 1568-1574. (in Chinese).
- [3] 邹韵, 朱运东, 王劲松. 宽光谱多传感器轴一致性检测系统设计[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(2): 148-157.
ZOU Y, ZHU Y D, WANG J S. Design of wide spectrum multi-sensor axis consistency detection system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(2): 148-157. (in Chinese).
- [4] 张勇, 吴浩, 马飒飒. 大间距轴线一致性检测技术进展与分析[J]. *光电工程*, 2019, 46(2): 180409.
ZHANG Y, WU H, MA S S. Development and analysis of large spacing axis consistency detection technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(2): 180409. (in Chinese).
- [5] 陈志斌, 肖文健, 马东玺, 等. 大间距多光轴一致性野外在线检测方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0112006.
CHEN ZH B, XIAO W J, MA D X, *et al.*. A method for large distance multi-optical axis parallelism online detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0112006. (in Chinese).
- [6] 张磊, 邱伟, 张凯. 基于双五棱镜组件的大间距光轴平行性检测方法[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(7): 0717005.
ZHANG L, QIU W, ZHANG K. Detection method of large space optical axis parallelism based on double pentaprism components[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0717005. (in Chinese).
- [7] 温中凯, 张庆君, 李爽, 等. 空间光电跟瞄系统多光轴平行性标校研究[J]. *中国光学*, 2021, 14(3): 625-633.
WEN ZH K, ZHANG Q J, LI SH, *et al.*. Multi-optical axis parallelism calibration of space photoelectric tracking and aiming system[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 625-633. (in Chinese).
- [8] 王春艳, 姜会林, 王陆, 等. 用于火控动态性能测试的多光轴光学系统[J]. *兵工学报*, 2011, 32(6): 746-751.
WANG CH Y, JIANG H L, WANG L, *et al.*. The multi-axial optical system study for fire control dynamic performance testing[J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(6): 746-751. (in Chinese).
- [9] 王若帆, 张国玉, 曹秒, 等. 红外脉冲激光测距仪收发光轴一致性测试方法研究[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 41(1): 60-62.
WANG R F, ZHANG G Y, CAO M, *et al.*. Research on measurement method of optical coherence of transmitting and receiving infrared pulse laser range finder[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 41(1): 60-62. (in Chinese).
- [10] KANG CH CH, FANG Y, WANG H W, *et al.*. Online optical axis parallelism measurement method for continuous zoom camera based on high-precision spot center positioning algorithm[J]. *Photonics*, 2024, 11(11): 1017.
- [11] 杨耀权, 施仁, 于希宁, 等. 用 Hough 变换提高激光光斑中心定位精度的算法[J]. *光学学报*, 1999, 19(12): 1655-1660.
YANG Y Q, SHI R, YU X N, *et al.*. An algorithm to raise the locating precision of laser spot center based on hough

- transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(12): 1655-1660. (in Chinese).
- [12] 李天宇, 王明泉, 郝利华, 等. 基于高斯拟合的信号弹光斑中心定位方法[J]. *激光与红外*, 2022, 52(3): 422-426.
LI T Y, WANG M Q, HAO L H, *et al.*. Signal flare spot center location method based on Gaussian fitting[J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(3): 422-426. (in Chinese).
- [13] 潘登, 李艳丽, 高东, 等. 基于椭圆拟合的多光斑/重叠光斑中心提取方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(14): 1410001.
PAN D, LI Y L, GAO D, *et al.*. Center extraction method of multiple and overlapping faculae based on ellipse fitting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1410001. (in Chinese).
- [14] 任守峰, 唐新明, 祝小勇, 等. 一种高分七号卫星激光足印光斑质心的高精度提取算法[J]. *光学学报*, 2021, 41(10): 1012001.
REN SH F, TANG X M, ZHU X Y, *et al.*. A high-precision extraction algorithm for centroid of laser footprint spot of GF-7 satellite[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(10): 1012001. (in Chinese).
- [15] 刘靖翰, 赵梦阳, 杨润, 等. 探测器噪声对光斑中心定位精度的影响分析及实验验证[J]. *中国光学 (中英文)*, 2025, 18(3): 650-660.
LIU J H, ZHAO M Y, YANG R, *et al.*. Analysis and experimental verification of the influence of detector noise on the precision of spot center positioning[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(3): 650-660. (in Chinese).
- [16] 蔡旭明, 李笑, 刘玉县, 等. 基于灰度直方图的激光光斑中心定位算法[J]. *激光技术*, 2023, 47(2): 273-279.
CAI X M, LI X, LIU Y X, *et al.*. Laser spot center location algorithm based on gray histogram[J]. *Laser Technology*, 2023, 47(2): 273-279. (in Chinese).
- [17] 万科, 黎荆梅, 韩启金, 等. “句芒号”激光光斑质心提取方法与稳定性分析[J]. *光学学报*, 2024, 44(6): 0628005.
WAN K, LI J M, HAN Q J, *et al.*. Laser spot centroid extraction method and stability analysis of “Gou Mang”[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(6): 0628005. (in Chinese).
- [18] 张吉璇, 刘雪亚. 十字激光图像的中心定位算法研究[J]. *信息与电脑*, 2019(16): 48-49.
ZHANG J X, LIU X Y. Research on the center positioning algorithm of cross laser image[J]. *China Computer & Communication*, 2019(16): 48-49. (in Chinese).
- [19] 武华敏, 杨漠雨, 黄晓雪, 等. 基于 CNN 的十字像中心检测[J]. *光学仪器*, 2019, 41(5): 38-46, 58.
WU H M, YANG M Y, HUANG X X, *et al.*. Cross-center detection based on deep learning[J]. *Optical Instruments*, 2019, 41(5): 38-46, 58. (in Chinese).
- [20] 袁狄剑, 许新科, 刘通, 等. 基于自构卷积核改进模板匹配的红外十字靶标中心定位算法[J]. *红外与毫米波学报*, 2025, 44(3): 469-476.
YUAN D J, XU X K, LIU T, *et al.*. An improved template matching algorithm for infrared cross-target center positioning based on self-constructed convolution kernels[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2025, 44(3): 469-476. (in Chinese).
- [21] 张景源, 陈北北, 杨永兴, 等. 融合遗传算法和 BP 神经网络的光斑定位方法[J]. *中国光学 (中英文)*, 2023, 16(2): 407-414.
ZHANG J Y, CHEN B B, YANG Y X, *et al.*. Positioning algorithm for laser spot center based on BP neural network and genetic algorithm[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(2): 407-414. (in Chinese).
- [22] WANG J Q, MENG X SH, ZHOU SH, *et al.*. SPRNet: laser spot center position and reconstruction under atmospheric turbulence based on deep learning enhancement[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2025, 186: 108775.
- [23] MU S D, WANG L Y, WANG CH, *et al.*. Accelerated motion star spot centroid localization method for star tracker under high dynamic conditions[J]. *Optics Express*, 2025, 33(25): 52000-52018.

作者简介:



安兴起 (1996—), 男, 山东济南人, 博士研究生, 现于北京航空航天大学攻读博士学位, 主要从事精密装配自动检测及图像处理方面的研究。E-mail: anxq456@163.com