

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508536

法线引导和优化邻域角度划分的线结构光中心提取

吴国新^{1,2} 祁垠燕^{1,2} 左云波^{1,2} 董远秋^{1,2} 陈炫宇^{1,2}

(1. 北京信息科技大学现代测控技术教育部重点实验室 北京 100192; 2. 北京信息科技大学机电工程学院 北京 100192)

摘要:航空发动机叶片属于发动机核心组件高精密部件之一,保障其型面快速、精确的测量至关重要。激光光条中心线的精确提取是三维测量过程中的关键环节,对测量精度具有直接影响。针对现有光条中心提取方法在光条宽度不均、高曲率及噪声环境下精度和鲁棒性不足的问题,提出一种结合法线引导的极值法与改进的空间灰度重心推进法,优化提取中心精度。该方法首先基于 Steger 法判断中心线预估位置;随后利用极值法识别潜在重要特征区域,并在法线方向上通过改进的空间灰度重心法进行加权计算,完成光条中心初步提取;再应用改进八邻域区域角度方法筛选有效点,并结合 3σ 准则过滤异常数据点,最终获得精确中心点坐标。采用对比实验验证,算法在标准测试图像上的中心提取均方根误差为 0.058 pixel,有效保留了光条细节;每帧运算时间约为 0.755 ms,较 Steger 算法提升约 6 倍,较传统灰度法提升约 3 倍,有效解决了曲率中心倾斜问题。此外,在模糊样本及加入高斯噪声图像的测试中,拟合准确率较 Steger 法提高了 3.7%,噪声鲁棒性 RMSE 相比传统算法下降了 6.9%,显示了算法在复杂环境下的优越性和实用性,为航空航天制造及光学精密仪器的高精度测量工程应用提供有效技术支持。

关键词: 线结构光;法线引导;改进灰度重心法;极值法; 3σ 准则;八邻域

中图分类号: TN741;TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Normal-guided optimized angle-based center extraction for line structured light

Wu Guoxin^{1,2} Qi Yinyan^{1,2} Zuo Yunbo^{1,2} Dong Yuanqiu^{1,2} Chen Xuanyu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Modern Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: Aero-engine blades, as one of the core high-precision components of the engine, require rapid and accurate surface measurement to ensure engine performance. Accurate extraction of laser stripe centerlines is a critical step in three-dimensional measurement, directly affecting measurement accuracy. To address the limitations of existing center extraction methods under uneven stripe width, high curvature, and noisy conditions, this study proposes a centerline extraction algorithm combining normal-guided extremum method with an improved spatial grayscale centroid propagation approach to optimize extraction precision. The method first estimates the centerline position using the Steger method; potential key feature regions are then identified via the extremum method, and weighted spatial grayscale centroid calculation along the normal direction is applied to obtain the initial stripe center. An improved eight-neighborhood angular selection is subsequently used to screen effective points, and outliers are removed using the 3σ criterion, ultimately yielding precise center coordinates. Comparative experiments demonstrate that the algorithm achieves a root mean square error (RMSE) of 0.058 pixel on standard test images, effectively preserving stripe details; 1 frame processing time is approximately 0.755 ms, achieving a 6-fold speed improvement over the Steger method and a 3-fold improvement over the conventional grayscale method, effectively addressing the curvature-induced centerline tilt problem. Furthermore, tests on blurred samples and images with added Gaussian noise show a 3.7% increase in fitting accuracy and a 6.9% decrease in RMSE compared with traditional methods, indicating superior robustness and practical applicability. The proposed algorithm provides effective technical support for high-precision

measurement applications in aerospace manufacturing and optical precision instruments.

Keywords: line structured light; normal guidance; improve the grayscale centroid method; extreme value method; 3σ criterion; eight neighborhood

0 引言

在现代航空航天制造和光学精密仪器测量等领域,线结构光测量技术作为一种非接触式主动测量技术而受到关注。其中,中心线提取在三维测量技术中至关重要^[1],它直接决定测量精度高低,线结构光图像反应被测物体表面的多种形态信息。理想的线结构光应为均匀照明的窄线,但由于光扩散以及被测物不规则等因素影响,激光器投射的条纹会发生形变,使得实际测量得到的光带宽度不均,且形成多个曲率变化明显区域。因此,实现对光条纹中心的高精度提取具有重要价值。

现有的光条中心提取方法依据实现原理不同分为3大类,第1类是基于图像处理的方法,主要包括 Canny 边缘检测、阈值分割、轮廓追踪算法等。王福斌等^[2]提出了一种可在曲率剧烈变化区域实现线结构光中心线精确提取的算法,达到亚像素级提取精度,但计算开销大,影响整体效率。Sun 等^[3]提出一种基于能量中心的高曲率条纹提取算法,最大误差 1.6 pixel、重复精度 $8.8 \mu\text{m}$,但实时性及光条宽度不均情况下的适应性仍有限;Wang 等^[4]通过骨架提取与法线加权改进灰度重心法,在提取速度与精度之间取得平衡,但在光条宽度变化大或复杂背景下鲁棒性不足;高秋玲等^[5]提出基于 Otsu 与 DBSCAN 的中心线提取算法,抗噪性较强,但在高曲率或宽度不均场景下适应性仍有限。综上所述,图像处理法亚像素精度高,但实时性及宽度不均、复杂背景下鲁棒性仍不足。通过引入法线引导和空间灰度加权处理,实现了对高曲率和非均匀光条的精确提取。第2类是基于数学模型的方法,主要包括最小二乘法、多项式拟合法和高斯拟合法等。该研究方向的代表算法为 Steger 法和灰度重心法,二者在中心提取精度方面表现优异。在高斯平滑过程中,这些算法通常使用尺寸最小的高斯核(3×3)来有效抑制噪声,近年来已成为线结构光中心提取的研究热点。其中,由郑小钰等^[6]根据 DMD 自适应模型,基于高斯曲线拟合方法,对提取的光条纹与辅助光条纹交点位置进行校正,有效降低中心点定位误差,但光条宽度不均匀时仍难以定位光条中心位置;Sun 等^[7]采用多尺度各向异性高斯核拟合提升噪声环境下的亚像素精度;Li 等^[8]利用 Hessian 矩阵与自适应加权实现弱曝光条件下的高精度提取;Marković 等^[9]基于自卷积模型改进中心估计稳定性。整体上,这类算法在精度上表现优越,但在低信噪

比与实时处理方面仍存在不足。相较之下,通过法线引导与邻域角度优化,能够使数学模型在复杂光条和噪声环境下保持高精度且高效。第3类基于机器学习,通过支持向量机、卷积神经网络或随机森林等模型自动识别光条中心,减少人工干预。Zheng 等^[10]采用深度学习语义分割结合灰度重心法,实现光条区域的自动识别与亚像素定位,提高复杂环境下的提取精度;Ye 等^[11]基于 UNet 网络与 level-set 方法分割条纹,再结合灰度重心法完成中心提取,在噪声、宽条及反射环境下表现稳定。总体来看,机器学习方法虽能自动识别光条中心,但需大量标注数据,计算成本高,实时性和工业应用仍有限。将传统数学模型与空间灰度加权方法结合,可在复杂环境下快速、鲁棒地提取光条中心。

为解决现有光条中心提取方法在光条宽度不均、高曲率及噪声环境下精度和鲁棒性不足的问题,本文提出一种结合法线引导和优化邻域角度划分的线结构光中心提取算法^[12]。首先,基于 Steger 法将图像进行高斯平滑后计算得到 Hessian 矩阵的最大绝对特征值的特征向量,初步定位中心线;Otsu 法与极值法识别潜在重要特征区域,利用改进的灰度重心法对法线方向上的有效像素点进行加权处理,针对三邻域范围内的光条纹执行当前列的空间灰度重心计算;再应用八邻域判定法进行角度划分,计算当前点与法线方向目标点间夹角后比较角度,选择有效点;再应用当前中心点与附近中线点法向量相同的原理进行新的空间灰度重心坐标提取,最后,引入 3σ 准则对异常点进行剔除。

与传统图像处理法相比,本文算法在高曲率区域具备更强的鲁棒性和抗噪能力;与数学模型法相比,既保证了拟合精度,又兼顾了适应性;与机器学习法相比,无需大量标注数据,计算成本低,更适合实时工业应用。

1 算法描述

1.1 法线方向光条中心区域初步选取

法线方向是二维二值目标的一个重要拓扑描述,不仅可以用来描述线结构光的局部结构^[13],还能够为目标的边界提供重要的几何信息。Steger 法是对图像进行高斯滤波后,将其局部视为二次曲面,通过分析 Hessian 矩阵中的特征值与方向信息,推导法线方向,实现对中心线位置的初步估计。

Hessian 矩阵用于确定条纹中心处法线方向,可表示为:

$$H(m, n) = \begin{pmatrix} T_{mm} & T_{mn} \\ T_{mn} & T_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 S(m, n)}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 S(m, n)}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 S(m, n)}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 S(m, n)}{\partial y^2} \end{pmatrix} \otimes G(m, n) \quad (1)$$

式中： m 、 n 分别为像素列与行坐标； T_{mn} 、 T_{mm} 和 T_{nn} 分别表示基于二维高斯模型^[14] 导数项的二阶偏导数、二阶导数、二阶灰度图像在二阶高斯函数中的卷积； $H(m, n)$ 在对应像素位置处具有两个特征值，分别对应局部的二阶极值，其特征向量用于表征特征值的方向信息。此时，设像素中心点为 (T_0, n_0) ，设 (T_0, n_0) 的法线方向为 $E = (e_m, e_n)$ ，将中心点表示为：

$$G(m_0 + te_m, n_0 + te_n) = G(m_0, n_0) + tE(r_m, r_n)^T + \frac{t^2}{2}EH(m, n)E^T \quad (2)$$

式中： r_m 为高斯函数的微分形式； r_m 为 $G(m, n)$ 的卷积； $E(e_m, e_n)$ 表示光条纹中心位置在法线方向上，光条中心特征点对应于二阶导数绝对值达到最大位置，沿法线方向从像素点 (T_0, n_0) 出发，根据一阶偏导结果确定步长因子，计算出理想阈值 t 。

$$t = - \frac{e_m r_m + e_n r_n}{e_m r_{mm} + 2e_m e_n r_{mn} + e_n^2 e_{nn}} \quad (3)$$

最终，得到中心坐标为 $(m_0 + te_m, n_0 + te_n)$ 。

1.2 中心线提取

为了提升中心点定位精度，通过检测光带横截面的极大值区域，选取具备像素级精度的关键特征区域作为光带中心参考，结合 Otsu 法与极值法进行线结构光中心特征区域提取^[15]。在自然环境中，由于折射、辐射及温湿度等因素引入的噪声，灰度峰值能量可能出现衰减，导致最大光强与横截面峰值不完全一致，同时部分随机噪声点可能超过真实峰值。为提高中心提取的稳定性并抑制干扰峰值，先对图像应用高斯滤波进行平滑处理，再结合 Otsu 法设立阈值将灰度值的最大类间方差确定为阈值进行低峰值剔除^[16]。应用高斯滤波公式：

$$I'(x, y) = G(x, y, \sigma) \cdot I(x, y) \quad (4)$$

式中： $G(x, y, \sigma)$ 为高斯核， σ 为标准差； $I(x, y)$ 为原始图像像素点灰度坐标。记 $P_0(t)$ 、 $P_1(t)$ 分别为无效像素和有效像素出现概率，类间方差 δ 为：

$$\delta = P_0[u_0 - u]^2 + P_1[u_1 - u]^2 \quad (5)$$

式中： u 、 u_1 、 u_2 分别为全图像、环境像素、感兴趣像素的平均值，当类间方差最大时，记作最优阈值 T 。

如图 1 所示，设置阈值剔除无关噪声峰值 1，提取激光条纹内有效像素区域^[17]。规定最大允许能量峰值为虚线部分标示出的红线，经过滤波处理后，能量峰值均收

敛在红色虚线内。阈值处理能够剔除无关噪声峰值，同时锁定激光条纹内的有效像素区域^[18]。极值法通过局部亮区域的膨胀和收缩操作提取局部极值，并在预设的条纹宽度范围内锁定激光条纹中心位置，同时进一步提取局部重构区域及其对应的极值特征^[19]。为了确保局部极值的有效性，仅保留灰度值对应激光条纹中心和背景的最大极值点 (>180) 和最小极值点 (<50)，对满足阈值条件的多个极值点进行标识，其中暗点以红色横线区域表示，亮点主要分布在光条区域内，用蓝色标注，随极值增加颜色加深。

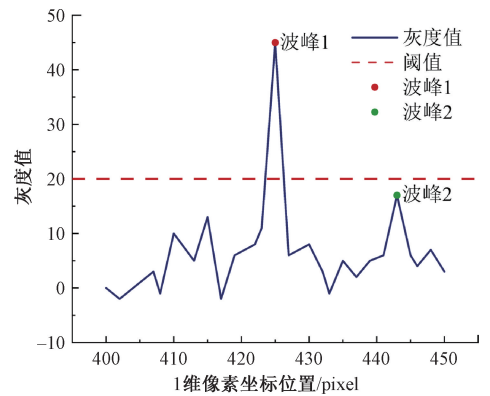


图 1 中心点提取示意图

Fig. 1 Schematic diagram of center point extraction

为了验证该方法的优越性，在原始光条图像基础上引入算法模块进行分步对比分析。图 2(a) 为未经任何处理的基准图像，可直观观察图像上亮度变化、光条区域及局部噪声特征；图 2(b) 为采用 Otsu 法进行阈值分割后的二值图像，通过基于灰度统计的动态阈值划分，使前景结构得以突出，同时有效抑制背景噪声，为后续的极值检测提供清晰的光条区域边界；在此基础上，图 2(c) 引入局部极值标定策略，通过对光条横截面灰度分布的逐像素极值响应分析，实现对中心线位置的精确锁定与连续性保持。该处理过程在保留光条细节结构的同时，提高了中心线定位的稳定性与分辨率。

1.3 亚像素空间灰度重心推进

传统的灰度重心法通常基于单列像素的灰度值加权结构光条纹计算光条中心，虽然实现简单，但在激光条纹存在形变或噪声干扰时，定位结果易产生偏移与跳变^[20]。为增强中心定位的连续性与抗噪稳定性，结合激光条纹的局部相关特性，引入相邻三列光条纹的协同推进机制^[21]。假设条纹灰度值为 $I(x_i, y_i)$ ，三列像素的灰度分布分别对应列索引 $n-1$ 、 n 、 $n+1$ ，在当前列 n 的条纹中心提取过程中，综合利用相邻两列的灰度分布信息，得到光条中心位置如式(6)。

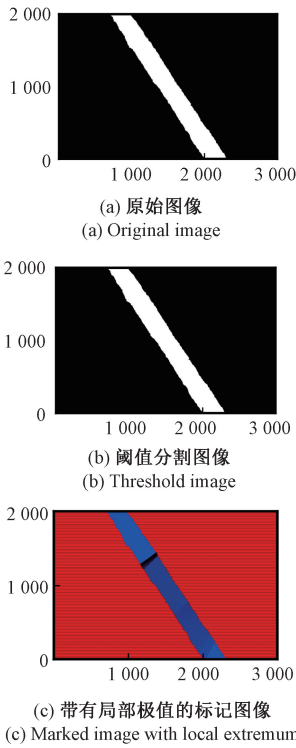


图 2 光条原图及算法提取效果对比

Fig. 2 Comparison of light bar original image and algorithm extraction effect

$$x_c^{(n)} = \frac{\sum x_i \cdot I(x_i, y_i)}{\sum I(x_i, y_i)}, y_c^{(n)} = \frac{\sum (y_i^{(n-1)} + y_i^n + y_i^{(n+1)}) \cdot I(x_i, y_i)}{\sum I(x_i, y_i)} \quad (6)$$

式中： $x_c^{(n)}$ 和 $y_c^{(n)}$ 分别表示当前列 n 的灰度重心位置，实现对条纹中心位置的初步识别^[22]； $I(x_i, y_i)$ 为像素点灰度强度值。该方式在计算当前中心点时引入了局部灰度关联，使中心点估计具备更高的稳定性与连续一致性。假设阈值分割后的激光条纹如图 3 所示，中心点推进方式如图 4 所示。

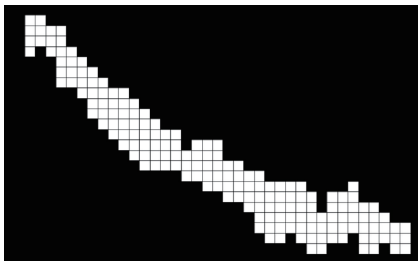


图 3 阈值分割后光条图像

Fig. 3 Light strip image after threshold segmentation

以初始列中心点为起始基准，融合相邻左右两列的

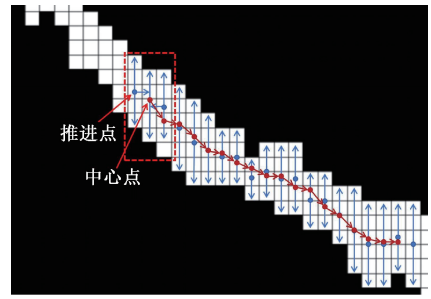


图 4 推进方式示意图

Fig. 4 Schematic diagram of promotion mode

灰度重心信息^[23]，对局部区域灰度分布 $g(y)$ 进行高斯函数拟合。

$$g(y) = A \cdot \exp\left(-\frac{(y - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

式中： A 为灰度幅值； μ 为拟合的条纹中心亚像素位置； σ 为条纹宽度参数，为进一步平滑中心点序列并抑制噪声扰动，对相邻三列中心点采用加权平均方式进行自适应更新^[24]。

$$y_{final} = w_1 \cdot y_{n-1} + w_2 \cdot y_n + w_3 \cdot y_{n+1} \quad (8)$$

式中： y_{n-1} 、 y_n 、 y_{n+1} 分别为三列的初步中心点； w_1 、 w_2 、 w_3 为加权系数，取 $w_1 = w_3 = 0.25$ ， $w_2 = 0.5$ ； y_{final} 作为当前列最终中心点，重复此操作，直至构建出完整的中心线轮廓^[25]。

1.4 八角度邻域划分系统

为进一步提高光条中心点提取的方向连续性与空间一致性，相邻三列推进法获得的中心点集合在局部区域内仍可能出现方向漂移或断裂。为此，在中心点优化过程中引入梯度方向约束机制，依据激光条纹局部梯度方向一致性特征，对中心点进行方向筛选与邻域优化，如图 5 所示。

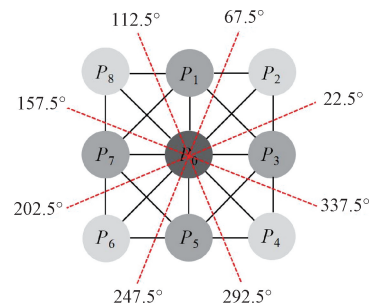


图 5 八角度划分提取

Fig. 5 Octagonal division extraction

将中心点周围邻域划分为 8 个方向区域（各区域代表 45° 的角度范围），限定各区域内像素梯度方向与中心点梯度方向之间的夹角差不超过设定阈值 22.5° ^[26]，以保证局部方向场的连续性。结合方向一致性约束，对由

相邻三列推进法提取的中心点集进行八角度邻域划分优化筛选,在各区域中优先保留梯度方向相容性最强的像素点。假设当前点的梯度方向 \vec{G} 与下一点的梯度方向 \vec{G}' 之间的夹角 θ 满足式(9)。

$$|\theta| = \left| \arccos\left(\frac{\vec{G} \cdot \vec{G}'}{|\vec{G}| |\vec{G}'|}\right) \right| \leq \Delta\theta \quad (9)$$

式中: $\Delta\theta$ 为梯度方向上允许的偏差范围,仅当梯度方向差值处于该范围内的点被选入候选集合。为进一步抑制中心点跳跃现象,对邻域搜索范围施加约束,设置当前点的上下 2 像素范围内搜索下一列的候选中心点,候选点 P' 的位置与当前点 P 的位置满足式(10)。

$$k = \frac{|(x - x_{prev})(y_{next} - y) - (y - y_{prev})(x_{next} - x)|}{\sqrt{((x - x_{prev})^2 + (y - y_{prev})^2)((x_{next} - x)^2 + (y_{next} - y)^2)}} \leq k_{max} \quad (13)$$

在实际处理中,曲率上下限根据条纹弯曲程度及具体场景动态调整,以兼顾复杂结构光区域的稳定性与连续性。

图 6 为逐点跟随光条方向并提取完整中心线的示意图,算法以局部梯度与邻域角度信息为引导,通过八角度划分与曲率约束的协同作用,实现中心点的自适应修正与连续追踪。该机制在局部复杂光强环境下仍能保持中心线结构的连贯与稳定。

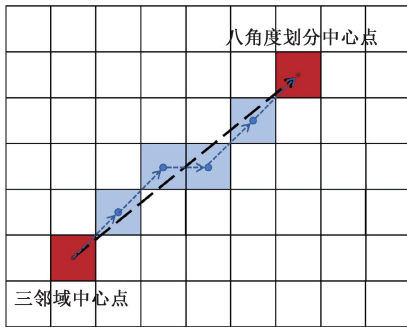


图 6 搜寻有效划分中心点

Fig. 6 Search for effective partition center points

在极端曲率区域或不适当的曲率阈值条件下,为避免误检和断裂,对异常中心点进行剔除^[27]。图 7 为基于 3σ 准则的异常点剔除示意。

假设灰度值的均值 $\mu = 100$ 和标准差 $\sigma = 15$;生成像素位置范围为 $x \in [0, 50]$,共采样 100 个点,手动添加异常点,通过计算该范围上下限 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 来定义异常点的判别标准,绘制 3σ 区间上下限的虚线作为基准并标注异常点。

2 实验与分析

2.1 实验环境

本结构光图像采集系统采用了分辨率为 $3\ 072 \times$

$$|y(P') - y(P)| \leq d \quad (10)$$

式中: d 为邻域范围的宽度。考虑到光强、梯度幅值与中心线连续性在中心点定位中的共同影响,构建综合约束评分模型。

$$S_1(x, y) = \alpha \cdot I(x, y) + \beta \cdot \|\nabla I(x, y)\| \quad (11)$$

式中: $S_1(x, y)$ 、 α 与 β 分别代表候选点综合评分、光强和梯度幅值的权重。在邻域内选择具有最高评分的点作为中心点。

$$S_2(x, y) = \max_{i, j \in \text{邻域}} S(x + i, y + j) \quad (12)$$

为保持中心线的平滑性与结构一致性,引入曲率连续性约束,要求当前点 $P(x, y)$ 、上一点 $P_{prev}(x_{prev}, y_{prev})$ 下一点 $P_{next}(x_{next}, y_{next})$ 构成的三点曲率 k 满足式(13)。

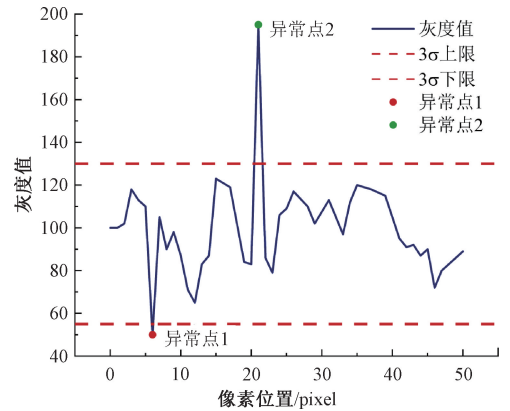


图 7 异常中心点剔除

Fig. 7 Abnormal center point removal

2 048 pixels 的海康工业相机采集图像和以中心波长为 660 nm 的红色激光线作为光源。为了验证本文算法的有效性,搭建了线结构光的采集与测量系统,实验配置的软件环境如表 1 所示。

表 1 环境配置

Table 1 Environmental configuration

实验环境	具体描述
系统	Window10
语言	C++, Python
编译器	Microsoft Visual Studio 2017、Pycharm
处理库	OpenCV

所有实验均部署在 CPU 为 Intel Core i9-13900HX,内存为 16 GB 的标准计算机上, Visual Studio 2019 在 win64 Debug 模式下使用 openCV4.4 通过 C#语言进行本文算法的编写,以及 Pycharm 环境下运用 python 语言进行编写。本实验所用样本由 HF-E 系列焦距 50 mm 的海康工业相机采集,线激光光源为波长 660 nm 红光一字线激光器。使用 MVS 进行线结构光图像采集,如图 8 所示,此平台初步完成线结构光提取工作。

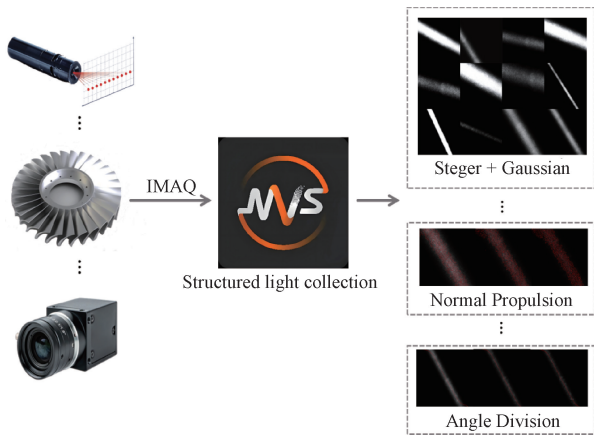


图 8 结构光图像采集系统

Fig. 8 Structured light image acquisition system

2.2 线结构光条纹中心提取实验

为了验证本文算法的有效性,设计了线结构光中心提取对比实验,旨在评估算法在复杂光照及曲率条件下的提取精度、鲁棒性与稳定性,并与典型的灰度重心法、空间灰度重心法、高斯灰度法、高斯空间灰度法进行对比。实验平台采集投射在叶片表面的线结构光图像,分别采用极值法与 Otsu 分割进行预处理后,对图像进行中心提取。图 9 为各算法的提取效果图,其中图 9(a)为原始激光条纹图像,图 9(b)~(f) 分别对应 5 种算法的提取结果。

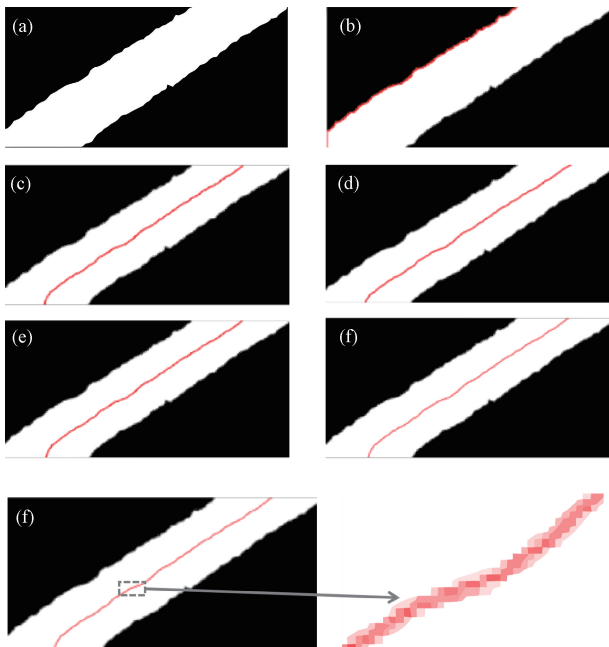


图 9 各算法提取效果

Fig. 9 Extract effect maps for each algorithm

由图 9 可知,灰度重心法提取结果中产生大量离群

点,与理论中心位置的偏差均值为 2.36 pixel,外点占比达到 18.7%,精度明显低于其他算法;其余 3 种算法整体拟合精度较高,但中心曲线仍存在波动, RMSE 范围为 0.95~1.24 pixel,需要通过曲线拟合进行优化,计算量较大。本文方法提取的条纹中心线平滑性与稳定性更优,异常离群点偏差均值为 1.73 pixel,外点占比达到 13.7%,整体轮廓更契合理论条纹形态。

为进一步验证算法的普遍性,在相同环境条件下以 1 s 间隔采集 4 幅线结构光图像,分别应用 5 种算法进行中心提取,结果如图 10 所示。

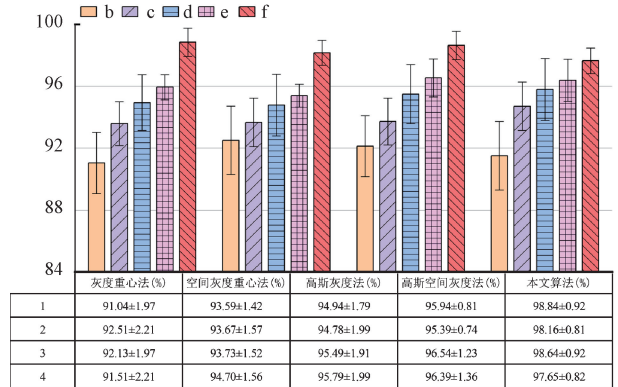


图 10 各算法提取准确率

Fig. 10 Extraction accuracy of each algorithm

实验表明,本文算法在所有图像中均取得最高精度,提取准确率均超过 95%,较其他方法平均提升 2.7%~6.7%。

此外,在图 9(f) 的提取结果中应用 3σ 准则对异常点进行剔除,处理结果如图 11 所示。与原结果相比,剔除异常点后中心线位置更为稳定一致,算法的鲁棒性与精度进一步提升。

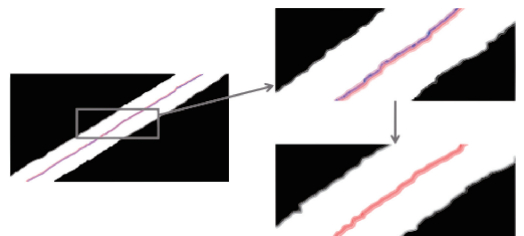


图 11 异常点剔除结果

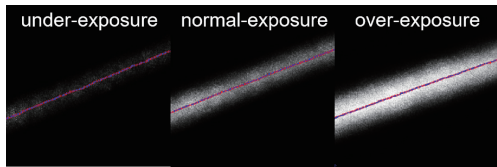
Fig. 11 Abnormal point removal result chart

实验结果表明,所提算法在本测量系统中具备良好的稳定性与抗噪性能,能够在复杂光照及表面条件下准确提取光条中心位置,验证了算法在实际测量环境下的有效性。

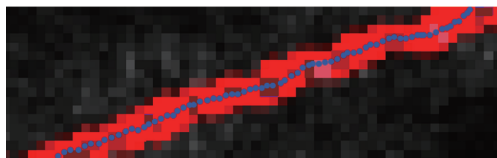
2.3 提取不同曝光程度对比实验

为验证所提算法在不同曝光条件下的光条中心提取

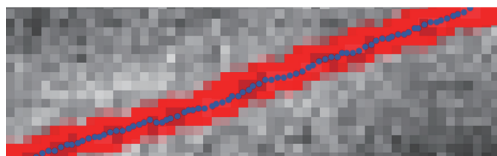
精度和鲁棒性,选取实际测量平台采集的欠曝光、正常曝光及过曝光 3 类光条图像作为实验对象。图 12(a)为原始光条图像,图 12(b)~(d)为局部放大视图。



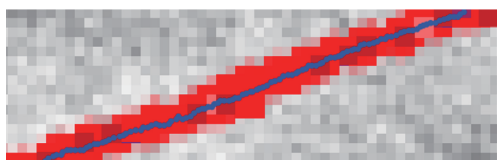
(a) 原始光条图像
(a) Original light stripe image



(b) 欠曝光光条中心提取图像
(b) Underexposed light strip center extraction image



(c) 正常曝光光条中心提取图像
(c) Normal exposure light strip center extraction image



(d) 过曝光光条中心提取图像
(d) Over-exposure light strip center extraction image

图 12 不同曝光程度光条中心提取效果

Fig. 12 Effect diagram of extracting the center of light strips with different exposure levels

由图 12 可知,本文算法在 3 类曝光条件下均能准确提取光条中心,保持光条宽度细节完整性。随着曝光强度增加,本文算法的提取结果曲线更加连续光滑,能够精确确定光条中心位置。

为进一步验证本文方法在不同曝光条件下的像素级提取精度优势,分别采用 Steger 法、灰度重心法以及本文算法,对 3 种不同曝光程度的激光条纹图像进行中心点提取。对每组提取的中心点,使用最小二乘法进行直线拟合,拟合模型为 $y=kx+b$,其中 k 为斜率, b 为截距。为避免异常点干扰,拟合前剔除位于 2 倍标准差范围外的离群点。以拟合后的直线为基准,计算各中心点到拟合直线的垂直距离,进一步求取均方根误差 (RMSE),作为评估中心点提取精度的指标。通过对比不同方法在各曝光条件下的均方根误差值,可量化所提方法的准确性和鲁棒性。标准差公式为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n - 1}} \quad (14)$$

式中: d_i 表示第 i 个光条纹中心点到拟合直线的距离; n 为提取像素中心点个数。拟合结果如表 2 所示。

表 2 光条中心提取的拟合结果

Table 2 Fitting results extracted from the center of the light strip

激光	拟合方法	拟合直线	RMSE/pixel
欠曝光	Steger 法	$y=0.3322x+75.1662$	0.2383
	灰度重心法	$y=0.3319x+74.1835$	0.0917
	本文算法	$y=0.3302x+74.2704$	0.0671
正常曝光	Steger 法	$y=0.3321x+127.1068$	0.2253
	灰度重心法	$y=0.3316x+125.6754$	0.0861
	本文算法	$y=0.3307x+125.0076$	0.0653
过曝光	Steger 法	$y=0.3326x+297.1022$	0.2523
	灰度重心法	$y=0.3315x+295.8475$	0.0894
	本文算法	$y=0.3285x+295.0703$	0.0532

由表 2 可知,Steger 法在光条中心提取中偏离高能中心线较多;灰度重心法虽有所改善,但条纹中心仍存在波动;本文算法的 RMSE 最小,像素定位更精准,提取的光条中心线与真实结构光形状最为贴合。图 13 为 3 种算法在不同曝光条件下的 RMSE 对比。

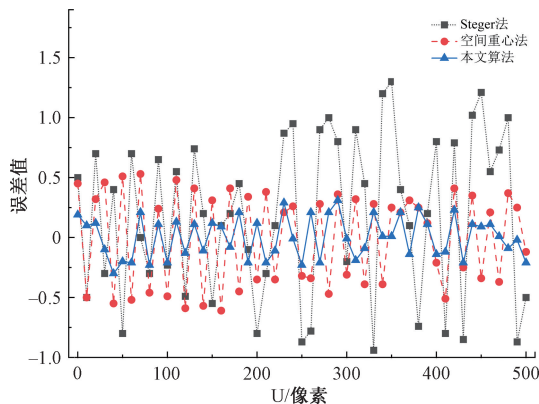


图 13 光条中心提取 RMSE 比较

Fig. 13 Comparison of RMSE of the center of light strips

由图 13 可知,本文算法的 RMSE 最小,提取精度最高,分别较 Steger 法和灰度重心法提高约 3.7 倍和 1.9 倍。通过引入法线引导与邻域角度分析,本文算法显著减少了误差干扰,提高了中心点提取的稳定性和一致性。

实验结果表明,所提方法在不同曝光条件下均能实现高精度、稳定的光条中心提取,验证了其鲁棒性及可行性。

2.4 提取不同类型激光对比实验

为验证本文算法在不同类型激光图像下的适应性和精度,本研究设计了多组对比实验,包括不同曝光、不同

类型光条以及算法运行速度和精度对比。实验效果如图 14 所示。

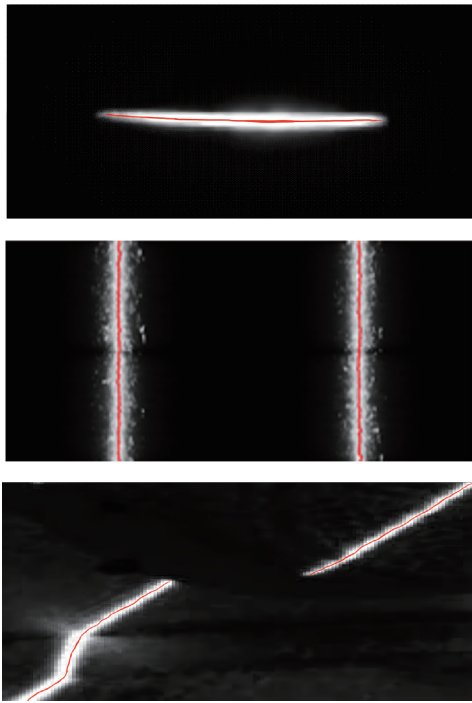


图 14 不同类型光条图像的提取结果

Fig. 14 The extraction results of the algorithm applied to different types of light stripe images in this article

由提取结果可知,本文算法能够准确定位光条中心,提取线条连续且符合光条走向。在灰度分布不均匀光条图像中,提取的光条中心线连通性良好,保证了高曲率区域准确性;在双光条图像中,算法能够准确提取各条光条中心,并保持条纹信息完整,无杂点干扰;在存在间断区域的光条图像中,算法可有效判断断点位置,中心点波动较小,提取的线段平滑且稳定,能够在光条中心线两侧识别有效点集,与其他区域客观分离。

为进一步评估本文算法精度,在保持相机和激光器位置固定的条件下,对上述 3 幅光条图像分别应用空间灰度重心法、高斯灰度重心法、本文方法进行光条中心线提取。根据每幅光条图像中各列光条中心的行坐标来计算每幅图像的标准误差 e 并统计,测量结果如表 3 所示。

表 3 拟合点的距离方差对比

Table 3 Comparison of distance variance of fitting points (pixel²)

图像	算法的方差		
	空间灰度重心法	高斯灰度重心法	本文算法
1	0.293	0.252	0.201
2	0.217	0.185	0.165
3	0.228	0.231	0.197
均值	0.246	0.223	0.188

由表 3 可知,本文算法在 3 幅图像的拟合点距离方差均为最小值,平均方差为 0.188 pixel²,相较空间灰度重心法和高斯灰度重心法分别降低约 23.6% 和 15.7%,显示出显著精度优势。

光条中心提取算法的运行速度同样是关键指标。在 3 幅光条图像上测试灰度法、空间灰度法、高斯灰度法、高斯空间灰度法及本文算法的运行时间,结果如表 4 所示。

表 4 各算法运行时间

Table 4 Running time of each algorithm (s)

图像	灰度法	空间灰度法	高斯灰度法	高斯空间灰度法	本文算法
1	0.283 5	0.196 5	0.127 4	0.072 1	0.052 9
2	0.312 1	0.225 3	0.137 6	0.087 3	0.059 6
3	0.295 3	0.206 7	0.128 7	0.071 5	0.052 7
均值	0.284 9	0.209 5	0.131 2	0.061 9	0.055 1

进一步计算各算法在定位精度、噪声鲁棒性以及模糊适应性下的精度提升率,结果如图 15 所示。

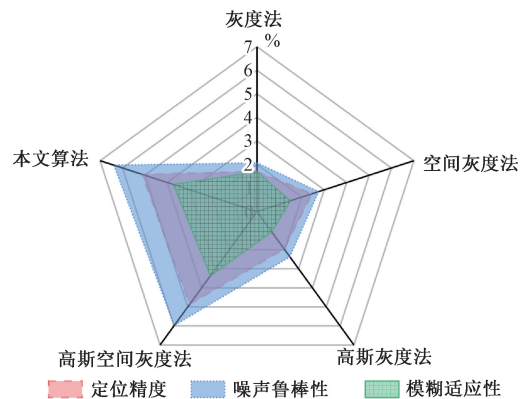


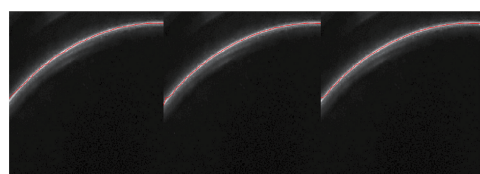
图 15 精度提升效果

Fig. 15 Precision improvement effect image

由图 15 可知,本文算法在定位精度,噪声处理能力以及对模糊环境的适应性方面均明显优于对比算法,极大的增强了算法处理各类复杂光条图像的稳定性,证明了本文算法在线结构光中心提取,具有更好的实用性。

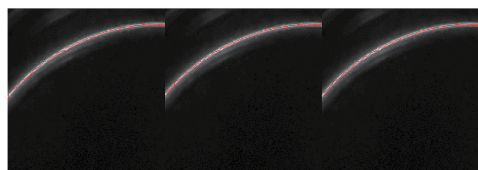
为进一步验证本文算法在非直线形态结构光条中的适应性,对灰度重心法、高斯空间灰度法及本文算法的中心线提取过程进行了对比。实验样本选取直径分别为 5、7、15 mm 的 3 种环形标准块的弧形光条图像。结果如图 16 所示,依次为灰度重心法、高斯空间灰度法及本文算法的提取效果。

由图 16 可知,本文算法提取的中心线更加连续和平滑,能够在不同曲率区域实现稳健跟踪,有效抑制噪声干扰,整体提取效果明显优于其他算法。



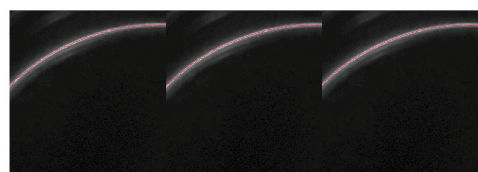
(a) 5 mm 光滑环规标准块提取效果

(a) Extraction result of 5 mm smooth ring-shaped standard block



(b) 7 mm 光滑环规标准块提取效果

(b) Extraction result of 7 mm smooth ring-shaped standard block



(c) 15 mm 光滑环规标准块提取效果

(c) Extraction result of 15 mm smooth ring-shaped standard block

图 16 各环形标准块光条中心提取方法对比

Fig. 16 Comparison of extraction methods for the center of each ring-shaped standard block light strip

为量化各算法在不同曲率环规光条上的提取精度,验证本文算法在复杂视角条件下的稳定性和鲁棒性,在保持其他条件不变的情况下进行了 10 组不同拍摄角度的重复性试验,对比结果如表 5 所示。

表 5 不同曲率环规光条中心线提取精度对比

Table 5 Centerline extraction accuracy comparison of ring gauges with varying curvatures

环规直径/mm	算法	RMSE/pixel	断点率/%	外点占比/%
5	灰度重心法	1.27	7.3	4.7
	高斯空间灰度法	1.02	5.8	3.6
	本文算法	0.51	1.3	0.9
7	灰度重心法	1.09	5.6	3.7
	高斯空间灰度法	0.85	4.3	2.9
	本文算法	0.39	0.9	0.7
15	灰度重心法	0.85	3.6	2.9
	高斯空间灰度法	0.72	2.7	2.0
	本文算法	0.35	0.8	0.6

由表 5 可知,本文算法在不同曲率环规光条提取的均方根误差最小,断点率与外点占比最低,中心线连续平滑,噪声抑制明显,鲁棒性优于对比方法。

3 结论

为提升激光线提取的精度与速度,并保留原光条纹

细节信息,提出了一种基于法线引导和优化邻域角度划分的线结构光中心提取方法。该算法结合法线方向与邻域像素角度关系,应用 Hessian 矩阵计算像素有效点,并引入 Otsu 法与极值法,借助邻近像素中心点信息融合周边像素,实现空间梯度重心精确求取,同时对异常点应用 3σ 准则进行剔除。实验通过不同曝光条件、不同类型光条以及与 Steger 法、灰度重心法等主流算法的对比验证了所提方法的有效性。实验结果表明,所提算法达到最佳提取精确度,较其他算法精度提高了 2.3%~6.1%,提取准确度平均提升 3 倍;适应性明显提高,对光强适应性能达到 96.6%,对图像模糊适应性提高了 3.7%,在不同曝光图像中均保持优异表现;运算速度明显提高,比 Steger 法提高了 5 倍,比其他算法综合提高 2.7 倍;像素偏差与均方误差降低了近一倍;噪声鲁棒性提高了 6.3%。相较于现如今主流算法,本文提取方法更接近实际光条中心位置且提取宽度更具有细节性。对于不同类型的复杂光条图像,有较好的连通性,能准确提取光条中心并反映条纹细节,适用于高曲率光条的测量场景,具有显著的工程应用价值和发展前景。

参考文献

- [1] 刘涛,关添航,杜宏旺,等. 基于线结构光的水下旋转扫描高精度测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(7): 260-270.
LIU T, GUAN T H, DU H W, et al. Research on the high precision measurement method of underwater rotary scanning based on linear structured light [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44 (7): 260-270.
- [2] 王福斌,刘贺飞,王蕊,等. 线结构光条纹中心亚像素自适应提取算法[J]. 激光技术, 2021, 45(3): 350-356.
WANG F B, LIU H F, WANG R, et al. Adaptive sub-pixel extraction algorithm for the center of line structured light stripes [J]. Laser Technology, 2021, 45 (3): 350-356.
- [3] SUN H, DU X, LYU N, et al. High curvature stripe profile extraction algorithm of line structured light measuring system [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2023, 28(5): 560-568.
- [4] WANG J, WU J J, JIAO X, et al. Research on the center extraction algorithm of structured light fringe based on an improved gray gravity center method [J]. Journal of Intelligent Systems, 2023, 32(1): 20220195.
- [5] 高秋玲,成巍,李文龙,等. 复杂背景下的结构光条纹中心提取算法研究[J]. 山东科学, 2024, 37(2): 65-73.
GAO Q L, CHENG W, LI W L, et al. Centerline

- extraction algorithm of structured light streak in a complex background [J]. *Shandong Science*, 2024, 37 (2): 65-73.
- [6] 郑小钰,董祉序,杨赫然,等. 基于结构光测量技术的DMD自适应掩膜生成[J]. *电子测量与仪器学报*, 2023, 37(7): 148-155.
- ZHENG X Y, DONG ZH X, YANG H R, et al. DMD adaptive mask generation based on structured light measurement technology [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2023, 37 (7): 148-155.
- [7] SUN J, LIU Y, ZHOU F, et al. A High-precision and noise-robust subpixel center extraction method of laser stripe based on multi-scale anisotropic gaussian kernel[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 176: 108060.
- [8] LI J L, WANG L, WAN Y Y, et al. An adaptive weighted width extraction method based on the hessian matrix for high-precision detection of laser stripe centers in low-exposure[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 181: 108436.
- [9] MARKOVIĆ B R, CERTIĆ J D. Improving sub-pixel estimation of laser stripe reflection center by autoconvolution on FPGA [J]. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2022, 31(4): 2250063.
- [10] ZHENG X, LI J, HE C. Research on algorithm of light strip center extraction based on deep learning [J]. *Academic Journal of Science and Technology*, 2024, 9(1): 101-103.
- [11] YE C, FENG W, WANG Q, et al. Laser stripe segmentation and centerline extraction based on 3D scanning imaging[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(18): 5409-5418.
- [12] 张铤,夏雨风,王梓琦,等. 基于骨架邻近像素匹配的光条中心提取方法[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(11): 1529-1536.
- ZHANG Y, XIA Y F, WANG Z Q, et al. Light Strip center extraction method based on skeleton adjacent pixel matching [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2023, 44(11): 1529-1536.
- [13] 夏鑫,付生鹏,夏仁波,等. 基于改进灰度重心法的线结构光中心提取算法[J]. *激光杂志*, 2024, 45(1): 75-79.
- XIA X, FU SH P, XIA R B, et al. Line structured light center extraction algorithm based on improved grayscale centroid method [J]. *Laser Journal*, 2024, 45 (1): 75-79.
- [14] 曾超,王少军,卢红,等. 线结构光光条中心提取算法[J]. *中国图象图形学报*, 2019, 24(10): 1772-1780.
- ZENG CH, WANG SH J, LU H, et al. Line structured light strip center extraction algorithm [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2019, 24(10): 1772-1780.
- [15] WAN Z R, LAI L J, YIN X Q, et al. Robot line structured light vision measurement system: Light strip center extraction and system calibration [J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(11): 114102-114102.
- [16] 赵文培,程进,王梦莹,等. 高精度线结构光光条中心快速提取算法[J]. *激光与红外*, 2024, 54(12): 1920-1927.
- ZHAO W P, CHENG J, WANG M Y, et al. High precision line structure light fast extraction algorithm[J]. *Laser & Infrared*, 2024, 54(12): 1920-1927.
- [17] 黄凌锋,刘光东,张超,等. 基于灰度权重模型的激光条纹中心提取算法[J]. *激光技术*, 2020, 44(2): 190-195.
- HUANG L F, LIU G D, ZHANG CH, et al. Laser stripe center extraction algorithm based on gray-weighted model[J]. *Laser Technology*, 2020, 44(2): 190-195.
- [18] SONG L M, HE J SH, LI Y P. Center extraction method for reflected metallic surface fringes based on line-structured light [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2024, 41(3): 550-559.
- [19] 王磊杰,罗伟文,张鸣,等. 恒光强扫描干涉光刻条纹锁定系统设计[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(8): 938-947.
- WANG L J, LUO W W, ZHANG M, et al. Design of a constant-intensity scanning interferometric lithography fringe locking system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(8): 938-947.
- [20] 杨毅,闫兵,董大伟,等. 基于二次平滑算法的线结构光中心线提取方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(10): 309-315.
- YANG Y, YAN B, DONG D W, et al. Method for extracting the center line of line-structured light based on quadratic smoothing algorithm [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(10): 309-315.
- [21] ZHANG M M, LI Z N, ZHANG F Q, et al. Adaptive bidirectional gray-scale center of gravity extraction algorithm of laser stripes [J]. *Sensors*, 2022, 22(24): 9567.
- [22] 宫本兴,王国宇. 基于水下结构光扫描系统的结构光带中心提取方法初步研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(16): 62-68.
- GONG B X, WANG G Y. Preliminary study on structured light strip center extraction method based on underwater structured light scanning system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(16): 62-68.

- [23] 韩佳鑫,王生怀,钟明,等. 基于改进 SegFormer 网络的线激光分割和中心提取方法[J]. 电子测量技术, 2024, 47(21): 62-71.
HAN J X, WANG SH H, ZHONG M, et al. Improved SegFormer network-based line laser segmentation and center extraction method [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(21): 62-71.
- [24] 张佳,陆永华,梁立鹏,等. 线结构光条纹自适应中心提取优化算法[J]. 应用激光, 2019, 39(6): 1028-1034.
ZHANG J, LU Y H, LIANG L P, et al. Optimization method of adaptive center extraction of linear structured light stripe [J]. Applied Laser, 2019, 39(6): 1028-1034.
- [25] 刘创,王立忠,陈香,等. 复合材料铺丝表面激光中心线快速提取算法[J]. 电子测量技术, 2025, 48(23): 58-68.
LIU CH, WANG L ZH, CHEN X, et al. Rapid laser centerline extraction algorithm for composite tow placement surface [J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(23): 58-68.
- [26] 周亚罗,章洁,靳城楠,等. 基于 PCA 的金属工件表面线激光中心提取算法[J]. 电子测量技术, 2024, 47(18): 71-79.
ZHOU Y L, ZHANG J, JIN CH N, et al. laser center extraction algorithm of metal workpiece surface line based on principal component analysis [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(18): 71-79.
- [27] XU X B, FEI Z W, YANG J, et al. Line structured light calibration method and centerline extraction: A review[J]. Results in Physics, 2020, 19(1): 103637.

作者简介



吴国新(通信作者), 1999 年于北京信息科技大学获得学士学位, 2003 年于北京信息科技大学获得硕士学位, 2011 年于北京理工大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学现代测控技术教育部重点实验室研究员, 主要研究方向为图像处理与人工智能。

E-mail: wxg1977@bistu.edu.cn

Wu Guoxin (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beijing Information Science and Technology University in 1999, M. Sc. degree from Beijing Information Science and Technology University in 2003, and Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2011, respectively. Now he is a researcher in key Laboratory of Modern Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include image processing and artificial intelligence.



祁垠燕, 2023 年于沧州师范学院获得学士学位, 现为北京信息科技大学研究生, 主要研究方向为图像处理、光学检测与测量。

E-mail: luckyxy0410@163.com

Qi Yinyan received her B. Sc. degree from Cangzhou Normal University in 2023. Now she is a M. Sc. candidate at Beijing Information Science and Technology University. Her main research interests include image processing, optical inspection and measurement artificial intelligence.



左云波, 2001 年于北京信息科技大学获得学士学位, 2005 年于北京信息科技大学获得硕士学位, 2008 年于北京理工大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学现代测控技术教育部重点实验室副研究员, 主要研究方向为机器视觉及目标跟踪。

E-mail: zuoyunbo@126.com

Zuo Yunbo received his B. Sc. degree from Beijing Information Science and Technology University in 2001, M. Sc. degree from Beijing Information Science and Technology University in 2005 and Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2008, respectively. Now he is an associate research fellow in key Laboratory of Modern Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include machine vision and object tracking.



董远秋, 2022 年于滨州学院(现山东航空学院)获得学士学位, 现为北京信息科技大学研究生, 主要研究方向为智能运维、故障诊断与预测。

E-mail: 951531718@qq.com

Dong Yuanqiu received his B. Sc. degree from Binzhou University (Shandong University of Aeronautics) in 2022. Now he is a M. Sc. candidate at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include intelligent operation and maintenance, fault diagnosis and prediction.



陈炫宇, 2023 年于天津理工大学获得学士学位, 现为北京信息科技大学研究生, 主要研究方向为图像处理与旋转设备剩余寿命预测。

E-mail: xuanyuc2023@163.com

Chen Xuanyu received his B. Sc. degree from Tianjin University of Technology in 2023. Now he is a M. Sc. candidate at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include remaining life prediction of image processing and rotating equipment.