

基于线结构光的圆柱型筛框缝宽尺寸检测系统研究

史 腾¹, 路绳方¹, 岳佳慧¹, 王 彬², 王海彬³,
戚柯俊¹, 唐群博¹, 钱予阳¹

(1. 南京工程学院 人工智能产业技术研究院, 南京 211167;

2. 南京泉峰科技有限公司, 南京 211106;

3. 南京工程学院 机械工程学院, 南京 211167)

摘要: 由于缝宽尺寸直接影响筛缝的过滤能力和筛分精度, 为确保纸浆的处理质量, 提高筛缝缝宽检测效率, 提出了一种基于线结构光扫描的圆柱型筛框筛缝检测技术; 搭建筛框回转实验平台, 采用直射式激光三角测量法采集筛框间隙轮廓信息, 针对金属表面高反光等图像噪音的难点, 结合了中值滤波、双边滤波和自适应权重调整的图像预处理方法, 利用基于大津法的灰度图阈值分割法, 确定最优的阈值, 提取光斑区域, 利用 Steger 算法提取激光光条中心线; 测量系统对 10 条筛缝的 16 组尺寸进行了重复精度测量, 结果显示极差最大为 0.27 mm, 最大标准差为 0.012 466 mm, 通过对比系统测量值与人工实测值, 最大误差值为 15 μm ; 经实验测试验证了激光扫描法在旋转平台带动筛框恒速转动时筛缝尺寸测量的可行性, 对提高纸张的质量和筛框的筛分效率具有很大生产效益和经济效益。

关键词: 激光三角测量; 激光中心提取; Steger 算法; 大津法; 筛框筛缝检测; 结构光; 双边滤波

Research on Measurement System of Cylindrical Screen Frame Slit Width Based on Line Structured Light

SHI Teng¹, LU Shengfang¹, YUE Jiahui¹, WANG Bin², WANG Haibin³,
SHENG Kejun¹, TANG Qunbo¹, QIAN Yuyang¹

(1. Artificial Intelligence Industrial Technology Research Institute, Engineering,

Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. Nanjing Chervon Industry Co. Ltd., Nanjing 211106, China;

3. School of Mechanical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: The slit width directly impacts the filtering capability and screening accuracy of screen frames. To ensure the processing quality of pulp and enhance the efficiency of slit width detection, a cylindrical screen frame slit detection technology based on line structured light scanning is proposed. This paper builds a screen frame rotation experimental platform, and uses direct laser triangulation to collect the contour information of the screen frame gaps. To address image noise such as high reflectivity on metal surfaces, the system combines the image preprocessing algorithms of median filtering, bilateral filtering, and adaptive weight adjustment. The Otsu's grayscale threshold segmentation algorithm is used to determine optimal threshold and extract spot region, the Steger algorithm is applied to extract the center line of the laser stripe. Through the precision measurements of 10 slits, with one slit measuring 16 sets of data, the maximum range of the results is 0.27 mm, with a

收稿日期:2024-09-17; 修回日期:2024-10-27。

基金项目:教育部中国高校产学研创新基金——腾讯科技创新教育专项(2022TX020);江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心开放基金项目(XTCX202411)。

作者简介:史 腾(1992-),男,硕士研究生。

通讯作者:路绳方(1985-),男,博士,副教授。

引用格式:史 腾,路绳方,岳佳慧,等. 基于线结构光的圆柱型筛框缝宽尺寸检测系统研究[J]. 计算机测量与控制,2025,33(2):71-79.

maximum standard deviation of 0.012 466 mm. The maximum error between the system measurement and the manual measurement is 15 μm . Experimental results show while the screen frame rotates at a constant speed on the rotary platform, this laser scanning method has the feasibility of slit width measurement, which has the significant substantial production and economic benefits for improving paper quality and the screening efficiency of screen frames.

Keywords: laser triangulation; laser center extraction; Steger algorithm; Otsu's method; screen slit detection; structured light; bilateral filtering

0 引言

纸浆筛框主要用于纸浆的清洁和分离,它通过筛缝过滤纸浆中的杂质、废料或纤维团块,以确保纸浆的质量和一致性,通过提高纸张的质量,减少生产过程中的问题,缝宽尺寸直接影响筛缝的过滤能力和筛分精度^[1]。定期检测缝宽尺寸可以确保筛缝的均匀性和一致性,从而保证最终纸张的质量和性能。因此,检测纸浆圆柱形筛框的缝宽尺寸对于确保筛缝的筛分效果和纸浆的处理质量有着重要意义^[2-3]。

目前在筛框测量领域,主要是人工测量方法:一种为塞规测量,即放入塞缝隙内进行测量;另一种为游标卡尺测量,然而人工测量方法受主观和经验影响比较大,检测效率较低。由于筛框杆的剖面为楔形面,楔形面的角度会导致部分光线产生镜面反射,而非漫反射,反射光直接进入摄像头,会造成强光点或噪声,使得图像处理更加困难,另一方面,角度较大的楔形面可能引起较多的散射光,导致光条纹模糊或失真,此外,单位长度下的楔形杆数量分为 3、4 和 5 个,所以缝隙宽度有所差异。

在此背景下,现阶段国内研究人员针对金属表面强光点噪音或光条纹模糊或失真的视觉检测技术已经取得了较好的研究成果。纪运景等人^[4]对工业相机、线结构光平面和旋转扫描中心轴进行标定,采用基于缺失区域自适应灰度增强的光条纹中心线提取算法,修复了被测零部件的线结构光投影条纹,但算法的鲁棒性和对不同缺陷类型的适应能力需要进一步验证。王清晨等人^[5]采用双边滤波以增强裂纹信息,然后进行图像分块操作,通过计算各分块的灰度差异确定裂纹备选区域,最后使用形态学处理滤除细小干扰,提取裂纹,该方法虽然能提高金属表面横向裂纹的检测精度,减少人工操作的繁琐,但其在鲁棒性、通用性和实时性方面仍有改进空间。滕传超等人^[6]利用改进的灰度重心法对线激光的光条中心进行提取,对采集的点云数据沿 y 轴切片,分别对多组切片上的点集进行拟合,从而完成波峰高度和平均波间距的测量,虽然改进的灰度重心法提高了光条中心的提取精度,但该方法可能在光条灰度变化较大的区域表现不足。当光线不均匀、存在噪声或被部分遮挡时,光条中心提取算法的稳定性可能受到影响,可能需要进一步优化以应对各种复杂情况。

针对以上的问题,该系统利用激光三角法采集物体轮廓图像,针对金属表面高反光的特点,该系统将中值滤波和双边滤波结合使用,并引入自适应权重调整机制对采集图像进行预处理,提取光条的中心线,生成点云图像,最后测量筛缝距离,分析系统测量与实际测量的误差,对圆柱型筛框缝宽尺寸检测系统重复精度和准确度进行评估。

1 激光三角法测量原理

激光三角测量法的核心原理是几何三角测量^[7-8]。通过已知激光发射器、检测器和物体之间的几何关系,利用反射光线的角度变化,可以计算出物体表面的距离。

通过分析图 1,重点探讨基于激光三角测量法的倾斜角测量系统。在直射式和斜射式两种配置方式中,该检测系统选择直射式激光三角测量法作为基础。如图 1 所示,激光束在参考面上的光点为 M ,其在光敏元件上的对应成像点为 M' 。当光束射向实际测量面时,在该面上的光点为 N ,相应的在光敏元件上的成像点为 N' 。参考面到实际测量面的距离 MN 为 y ,激光束从参考面反射后,光束 MM' 与法线的夹角为 α , MM' 与光敏元件之间的夹角为 β 。从接收透镜的光心到入射光点的距离 MO ,即物距为 l_1 ;激光光点通过透镜在光敏元件上的成像距离 OM' ,即像距为 l_2 。随着参考面不断移动,距离 y 将发生变化,此时光斑在光敏元件上的位移也将随之变化,位移距离为 x ,透镜的焦距为 f 。过

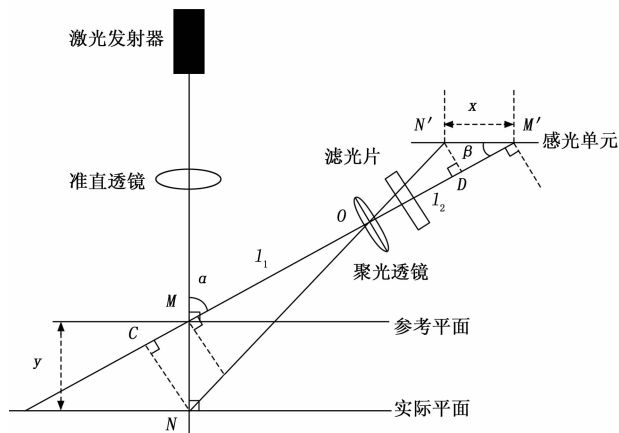


图 1 激光三角法直射式光路理论图

N 、 N' 点分别作 $M'M$ 、 MM' 延长线的垂线, 垂足分别为 C 、 D 。

根据图 1 推导可以得出如下关系式:

$$y = \frac{x(l_1 - f) \sin \beta}{f \sin \alpha + x(1 - \frac{f}{l_1}) \sin(\alpha + \beta)}$$

(1)

2 坐标映射与相机标定

在完整的测量系统中, 激光三角测量前通常需要完成相机标定, 以获取相机的内参和外参, 从而将二维像素坐标准确转换为三维空间坐标^[9-11]。

2.1 相机内外参数

相机内参数(焦距、主点位置、像素比例等)通过拍摄标定板图像(如棋盘格)计算, 能消除镜头畸变和几何失真。外参数(旋转和平移信息)表示相机相对世界坐标的定位信息, 通过标定板或与激光发射器的相对位置确定。设物理世界坐标为 $Q [X_w, Y_w, Z_w]$, 像素坐标为 $[u, v]$, 图像和物理坐标的映射关系见图 2。

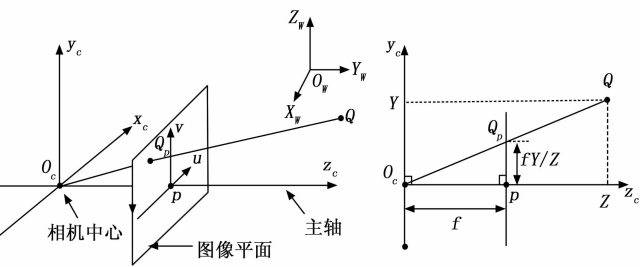


图 2 摄像机成像几何关系

2.2 相机畸变

相机畸变分为径向和切向畸变^[12-13]。径向畸变导致图像中的直线弯曲, 具体表现为桶形畸变(图像直线向外弯曲, 多见于广角镜头)和枕形畸变(图像直线向内弯曲, 多见于长焦镜头), 见图 3。

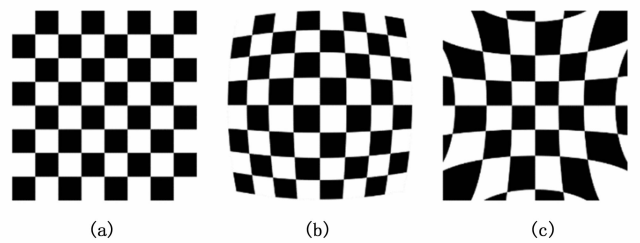


图 3 相机径向畸变的主要类型

切向畸变由于镜头和传感器的微小倾斜引起, 影响图像中点的位置, 通常表现为非径向的扭曲, 见图 4, 在高精度测量中尤为明显。

2.3 校正方法

在相机标定过程中, 获得相机内外参系数, 也可以

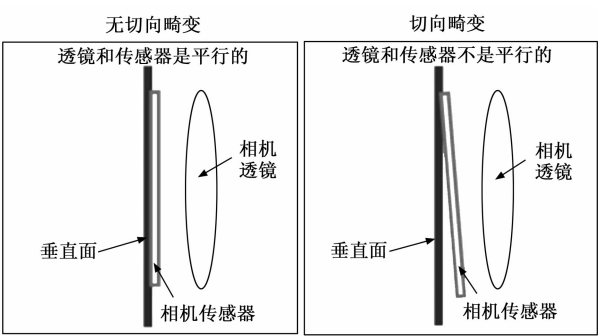


图 4 相机切向畸变的主要成因

同时校正径向和切向畸变, 使用标定板(如棋盘格图案)拍摄多张图像, 通过拟合相应的畸变模型, 可以得到畸变系数, 利用这些系数, 图像处理算法可以在后续处理中对畸变进行校正, 使得成像更加准确, 如下面公式(2)~(5)所示。

1) 世界坐标—摄像机坐标:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + \mathbf{T}$$

(2)

$\mathbf{R}$ 为相机的旋转矩阵; $\mathbf{T}$ 为相机的平移矩阵。

2) 摄像机坐标—图像坐标:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{1}{z_c} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix}$$

(3)

小孔成像为理论图像坐标。

3) 理论图像坐标—实际图像坐标:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = (1 + k_1 s^2 + k_1 s^4) \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2p_1 x_a y_a + p_2 (s^2 + 2x_a^2) \\ p_1 (s^2 + 2x_a^2) + 2p_2 x_a y_a \end{bmatrix}$$

(4)

引入畸变模型, 其中:

$$s = \sqrt{x_a^2 + y_a^2}$$

k_1 、 k_2 、 p_1 、 p_2 为畸变系数。

4) 实际图像坐标—像素坐标:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ 1 \end{bmatrix}$$

(5)

f_x , f_y 为相机焦距与单个像元宽、高之比; u_0 为像素平面中心点横坐标 (Pixel); v_0 为像素平面中心点纵坐标 (Pixel)。

相机标定中获取的内外参数和畸变系数, 可用于图像畸变校正。张正友标定法^[14]是一种基于平面标定板的常用方法。通过拍摄 15 张标定板图像并提取角点坐标, 如图 5 所示, 估计相机内参数(焦距、主点等)和

外参数（旋转和平移）。

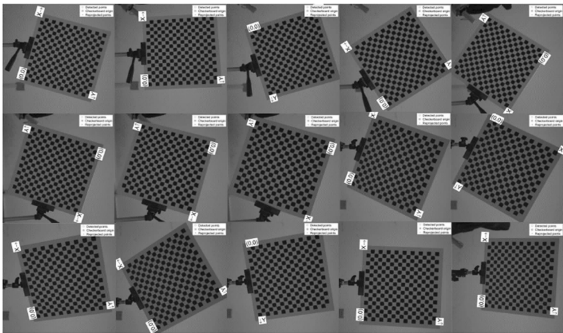


图 5 标定板不同位姿标定

接下来通过全局优化（如 Levenberg-Marquardt 算法）提升标定精度。图 6 左侧展示了不同位置下相机视角的变化，右侧为以标定板为中心的视图。

根据公式（2）～（5）所建立的映射关系，通过在图像中采集标定板原点位置，得到标定板所在基准平面的世界坐标，从而推导出相机与基准平面的相对位置，确定相机内外参数，标定结果如表 1 所示。

表 1 CCD 相机的内参矩阵和畸变系数

内参矩阵系数	参数值/mm	畸变系数	参数值/mm
f_x	10 329	k_1	-0.011 1
f_y	10 337	k_2	-0.043 6
u_0	2 455.6	p_1	0
v_0	2 630.4	p_2	0

3 图像预处理与激光中心提取

3.1 图像预处理

由于受到硬件和计算复杂度的限制，直接用 CCD

相机采集的金属板图像，难以直接进行图像处理，需要对图像进行预处理。

首先，对采集的图像进行 ROI（Region of Interest，感兴趣区域），ROI 是图像处理中的一个术语，用来指在图像中选定的一部分区域进行处理或分析^[15-17]。通过只处理 ROI，减少了处理和计算的量，从而提高了处理速度和效率，同时，ROI 也可以帮助专注于图像中重要的部分，忽略无关的信息，提升任务的准确性。

再将 RGB 图像转换成灰度图，降低图像处理的复杂度。将 RGB 图像转换为灰度图的原理是通过对 RGB 三个颜色通道进行加权平均，从而将每个像素点的颜色信息转化为单一的亮度值。这一亮度值用于表示图像的灰度级。灰度图像只有一个通道（灰度通道），而 RGB 图像则由红（R）、绿（G）、蓝（B）3 个通道组成。这种转换方法在图像处理、计算机视觉等领域中广泛应用，确保转换后的灰度图既具有良好的视觉效果，又保留了原始图像的亮度信息，得到公式（6）：

$$Gray = 0.299 \times R + 0.587 \times G + 0.114 \times B \quad (6)$$

其中：红色（R）权重为 0.299，表明红色对灰度值有较大的贡献，但不如绿色；绿色（G）权重为 0.587，表明绿色对灰度值的影响最大，因为人眼对绿色的敏感度最高；蓝色（B）权重为 0.114，表明蓝色对灰度值的影响最小，这是因为人眼对蓝色的敏感度最低。

在工厂较恶劣的环境下，在金属表面进行线结构光测量时，滤波处理要面临诸多挑战，需要特别关注高反射、高光点、表面纹理噪声等问题，针对金属表面高反光的特点，该系统将中值滤波和双边滤波结合使用，并引入自适应权重调整机制，能够有效处理光条的噪声和

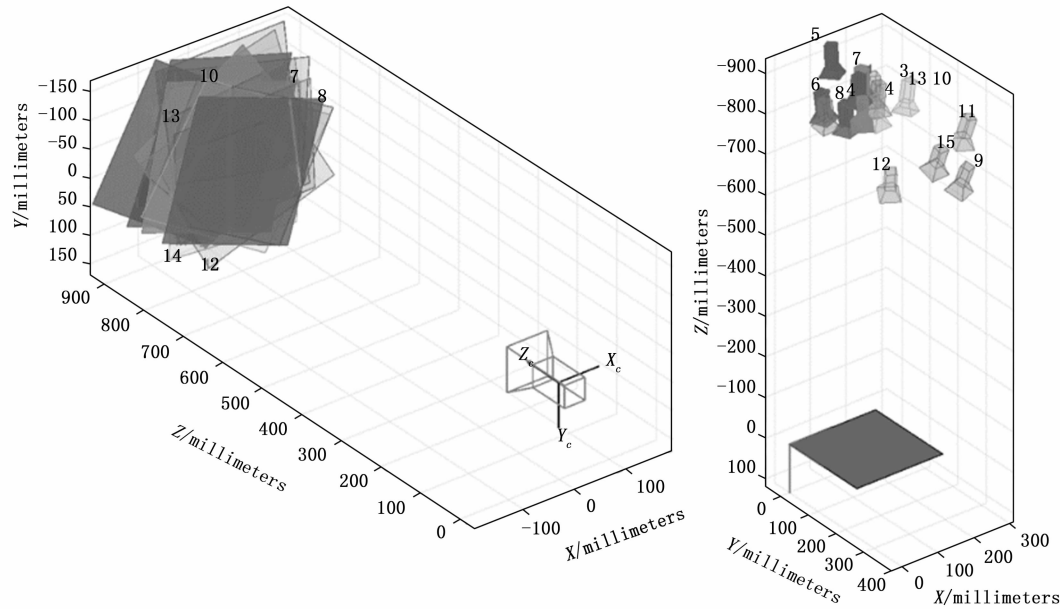


图 6 以摄像机为中心的视图与以模式为中心的视图

畸变问题。

结合了中值滤波、双边滤波和自适应权重调整的图像预处理方法, 通过多种滤波方式的结合, 既去除了金属表面高反光区域的噪声, 又保留了结构光光条的细节^[18-21]。该方法的核心思想是: 基于局部光条区域的反射强度, 自适应地调整不同滤波器的权重, 从而获得更加稳定且精确的光条中心提取效果。

3.1.1 中值滤波公式

中值滤波的作用是去除图像中的孤立噪声点, 尤其是高光噪声。中值滤波的公式表示为:

$$I_{\text{median}}(p) = \text{median}\{I(q): q \in W(p)\} \quad (7)$$

$I_{\text{median}}(p)$ 为经过中值滤波后像素 p 的值; $W(p)$ 为像素 p 周围的局部窗口; $I(q)$ 为局部窗口内像素 q 的灰度值。

中值滤波通过将局部窗口内的像素值排序, 并取其中的中间值, 避免了极端噪声对滤波结果的影响。

3.1.2 双边滤波公式

双边滤波不仅考虑像素的空间距离, 还考虑像素灰度值之间的差异, 双边滤波的公式如下:

$$I_{\text{bilateral}}(p) = \frac{1}{W_p}$$

$$\sum_{q \in S(p)} I(q) \cdot G_s(\|p - q\|) \cdot G_r(|I(p) - I(q)|) \quad (8)$$

$I_{\text{bilateral}}(p)$ 为像素 p 经过双边滤波后的值; $S(p)$ 为像素 p 的局部邻域窗口; $G_s(\|p - q\|)$ 为基于空间距离的高斯权重, 距离越远的像素权重越小, 控制空间上的平滑程度; $G_r(|I(p) - I(q)|)$ 为基于灰度值差异的高斯权重, 灰度值相差越大的像素权重越小, 避免跨越边缘时模糊; W_p 为权重的归一化因子, 使得所有像素权重之和为 1; 双边滤波的优点是能够在保持图像细节的同时进行平滑处理, 特别适用于保持光条纹边缘的连续性。

3.1.3 自适应权重调整的原理

自适应权重调整是根据局部光条反射强度, 在中值滤波和双边滤波之间进行加权混合, 以达到最优的噪声去除和细节保留效果。

设定局部对比度(如局部标准差)作为光条反射强度的度量, 使用该强度值来动态调整两个滤波器的权重:

$$I_{\text{final}}(p) = \omega_{\text{median}}(p) \cdot I_{\text{median}}(p) + \omega_{\text{bilateral}}(p) \cdot I_{\text{bilateral}}(p) \quad (9)$$

$I_{\text{final}}(p)$ 为经过混合滤波后的像素值; $\omega_{\text{median}}(p)$ 和 $\omega_{\text{bilateral}}(p)$ 分别为中值滤波和双边滤波的权重, 满足 $\omega_{\text{median}}(p) + \omega_{\text{bilateral}}(p) = 1$; 局部对比度 $C(p)$ 用于控制权重分配。对比度高的区域使用较大的中值滤波权重以

去除高光噪声, 而对比度低的区域则增强双边滤波的权重以保持细节。

自适应权重调整的公式为:

$$\omega_{\text{median}}(p) = \alpha + \beta \cdot C(p) \quad (10)$$

$$\omega_{\text{bilateral}}(p) = 1 - \omega_{\text{median}}(p) \quad (11)$$

α 和 β 是控制中值滤波和双边滤波权重的调节参数; $C(p)$ 是局部对比度, 可以通过局部标准差或局部亮度变化计算得到。

3.1.4 局部对比度的计算

局部对比度 $C(p)$ 反映了局部区域内亮度的变化程度, 高对比度区域往往代表强反射或光条强度变化较大的区域。可以通过以下公式计算局部对比度:

$$C(p) = \frac{\text{std}[W(p)]}{\text{mean}[W(p)] + \epsilon} \quad (12)$$

$\text{std}[W(p)]$ 为局部窗口内像素的标准差; $\text{mean}[W(p)]$ 为局部窗口内像素的平均值; ϵ 是防止分母为零的小常数。

3.1.5 结合滤波器的效果

通过上述自适应权重调整机制, 不同的滤波器在不同区域起到互补的作用:

在高反光区域, 中值滤波器能有效去除孤立的高亮噪声, 而双边滤波则能保留光条边缘细节。

在光条边缘区域, 双边滤波能更好地保持光条纹的完整性, 而中值滤波在细节区域的作用较弱。

然后利用大津法 (Otsu's Method), 进行获取灰度图的阈值。大津法是一种用于自动计算图像二值化阈值的算法^[22-26]。它通过最大化类间方差, 从而确定最优的阈值, 将图像划分为前景和背景。

1) 对灰度图像的像素值进行统计, 得到像素强度的直方图, 将直方图归一化, 使得所有像素的概率总和为 1, 记灰度级为 L , 像素的总数为 N , 各灰度级的归一化频率(概率)为 p_i , 其中 $i=0, 1, \dots, L-1$;

2) 设定阈值: 设定一个阈值 t , 将图像分为两类, 类 1 (背景): 所有灰度值小于或等于 t 的像素, 类 2 (前景): 所有灰度值大于 t 的像素;

3) 类 1 (背景) 的概率 $\omega_1(t)$ 和类均值 $\mu_1(t)$, 如公式 (13) (14) 所示:

$$\omega_1(t) = \sum_{i=0}^t p_i \quad (13)$$

$$\mu_1(t) = \frac{\sum_{i=0}^t i \cdot p_i}{\omega_1(t)} \quad (14)$$

类 2 (前景) 的概率 $\omega_2(t)$ 和类均值 $\mu_2(t)$, 如公式 (15) ~ (17) 所示:

$$\omega_2(t) = \sum_{i=t+1}^{L-1} p_i \quad (15)$$

$$\mu_2(t) = \frac{\sum_{i=t+1}^{L-1} i \cdot p_i}{\omega_2(t)} \quad (16)$$

图像的全局均值 μ_T :

$$\mu_T = \sum_{i=0}^{L-1} i \cdot p_i \quad (17)$$

4) 类间方差: 大津法通过最大化类间方差来寻找最佳阈值 t , 类间方差 $\sigma_b^2(t)$ 的公式 (18) 为:

$$\sigma_b^2(t) = \omega_1(t) \cdot \omega_2(t) \cdot [\mu_1(t) - \mu_2(t)]^2 \quad (18)$$

其中: $\omega_1(t)$ 和 $\omega_2(t)$ 分别为类 1 和类 2 的概率, $\mu_1(t)$ 和 $\mu_2(t)$ 分别为类 1 和类 2 的均值。

5) 最大化类间方差: 遍历所有可能的阈值 t , 找到使类间方差 $\sigma_b^2(t)$ 最大的阈值 t^* , 即公式 (19):

$$t^* = \arg \max_t \sigma_b^2(t) \quad (19)$$

该阈值 t^* 就是将图像二值化的最佳阈值。

然后, 对图像进行形态学处理, 使用闭操作填充光条中的小孔洞^[27-31]。形态学闭操作是图像处理中的一种基本操作, 属于数学形态学中的概念。它是通过膨胀 (Dilation) 操作后再进行腐蚀 (Erosion) 操作的组合来实现的, 推出公式 (20):

$$A \cdot B = (A \oplus B) \ominus B \quad (20)$$

由于光条区域较亮, 背景较暗, 而图像的反转操作将图像中亮的部分变暗, 暗的部分变亮。这有助于在后续处理中将光条区域更好地提取出来, 有助于简化中心线提取、边缘检测等后续处理步骤。这套流程特别适用于光条较亮、背景较暗或存在强反射区域的图像, 能够消除不必要的干扰, 聚焦于光条的提取, 确保提取效果更准确。

3.2 光条中心提取

由于激光照射在金属板上的光斑是多像素构成的光斑, 所以必须要通过算法确定其中心点位, 才能提取金属板的正确高度。Steger 算法是一种用于提取结构光条纹中心线的算法, 主要应用于激光三角测量或其他类似的光学测量技术中^[32-33]。在这些技术中, 光条纹的中心线提取是至关重要的, 因为它能够提供测量对象的几何信息。Steger 算法的目标是准确定位光条纹的中心, 通常在受噪声影响较大的环境中, 能够更有效地处理由于高反光、光条模糊等问题造成的中心线偏移。

Hessian 矩阵的计算:

Steger 算法基于 Hessian 矩阵来提取光条的中心^[35-36]。Hessian 矩阵是描述图像二阶导数的矩阵, 用于检测图像的曲率和边缘特征。对于二维图像 $I(x, y)$, Hessian 矩阵定义, 如式 (21) 所示:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 I}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2}$ 为沿 x 方向的二阶导数; $\frac{\partial^2 I}{\partial y^2}$ 为沿 y 方向的

二阶导数; $\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y}$ 和 $\frac{\partial^2 I}{\partial y \partial x}$ 为混合二阶导数。

Hessian 矩阵描述了图像局部的曲率信息, 可以通过它来分析光条的方向和位置。

光条方向的确定: 通过计算 Hessian 矩阵的特征值和特征向量, 可以确定图像中局部区域的主要方向和法线方向。具体地, Hessian 矩阵的两个特征值 λ_1 和 λ_2 及其对应的特征向量 $\mathbf{v}_1$ 和 $\mathbf{v}_2$ 描述了局部图像强度变化的主要方向: 如果 λ_1 和 λ_2 的符号不同, 说明该点位于一个边缘或条纹上。特征向量对应的方向描述了光条的方向。

光条中心的亚像素提取, 在计算出光条的法线方向后, 可以沿法线方向计算光条的灰度变化。Steger 算法使用图像的一阶和二阶导数来找到光条灰度变化的最大位置, 这一位置即为光条中心。由于该方法使用了二阶导数, 可以精确定位到亚像素级别。一阶导数 D' : 表示灰度值的变化趋势。二阶导数 D'' : 表示灰度值变化的曲率。在中心线处, 光条的灰度值变化达到极值。因此, 通过分析沿法线方向的一阶导数为零且二阶导数为负的点, 可以定位到光条的精确中心。

中心位置 x_c 通过以下公式 (22) 进行亚像素级别的修正:

$$x_c = x_0 - \frac{D'(x_0)}{D''(x_0)} \quad (22)$$

其中: $D'(x_0)$ 和 $D''(x_0)$ 分别是一阶导数和二阶导数, x_0 是初步估计的像素位置。

通过 Hessian 矩阵和灰度极值点的计算, Steger 算法能够在亚像素精度上提取光条的中心位置。由于算法基于二阶导数信息, 对噪声有较好的鲁棒性, 特别适合于处理复杂的光条纹图像。该算法不仅可以处理规则的光条纹, 还可以应对复杂场景下的光条提取问题。

在实验室搭建激光光条中心提取实验设备, 该设备由型号为 LBAS-GE250-4C-02 的 CCD 相机、线激光发射器、回转平台、金属筛框和相机支架组成。

如图 7 所示, 首先, 要将 CCD 相机拍摄的金属筛框表面激光条纹图像 (a), 转化为灰度图像 (b), 降低图像数据处理的复杂度, 将转换好的灰度图进行中值滤波和双边滤波结合处理, 并引入自适应权重调整机制, 得到图 (c), 然后使用大津法自动计算阈值, 得到图 (d), 对图像进行形态学处理, 使用闭操作填充光条中的小孔洞, 使光条更加完整, 再接着, 进行背景分割, 通过图像反转将光条较暗的区域视为背景, 得到与 (e), 最后一张图展示 Steger 算法提取的中心线叠加在原始图像 (f) 上。

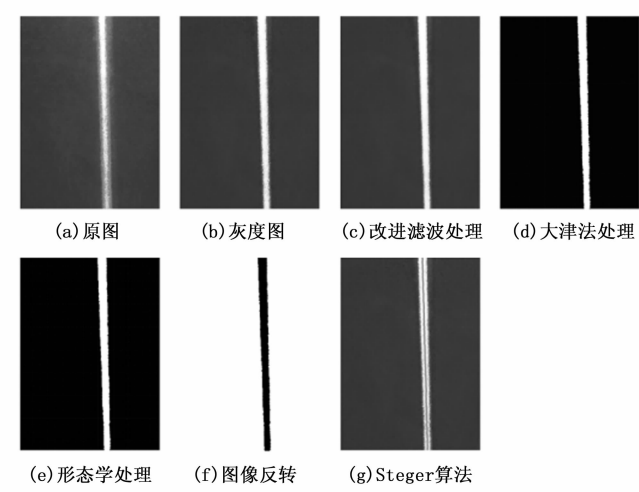


图 7 激光光条中心提取算法

4 实验系统与测量结果

4.1 实验平台搭建

为验证真实厂房中圆柱型筛框筛宽尺寸检测精度，搭建了筛框回转实验平台，将视觉检测设备以安装在回转平台旁，回转平台带动圆柱型筛框以恒定转速旋转，从而实现对筛宽尺寸检测。平台选用 1 台型号为 LBAS-GE250-4C-02 的 CCD 面阵相机，分辨率为 5 120 pixel×5 120 pixel，近端 FOV 为 21.2 mm，远端 FOV 为 24 mm，景深为 5.8 mm，传输方式为 GigE 接口传输。根据相机安装高度和所需视野范围，搭配 1 颗焦距 8 mm 的定焦镜头。采用型号为 ZLM100L650-22CQG 的激光发射器，可以发射波长为 650 nm 的红色激光，由于红色激光较为常见，价格相对便宜，容易制造，大多数相机对红色激光敏感度较高。

筛缝视觉检测系统由硬件部和软件两大部分组成，硬件部分由线激光器、相机、镜头，计算机和回转平台组成；软件系统由测量系统标定和尺寸测量组成，如图 8 所示。

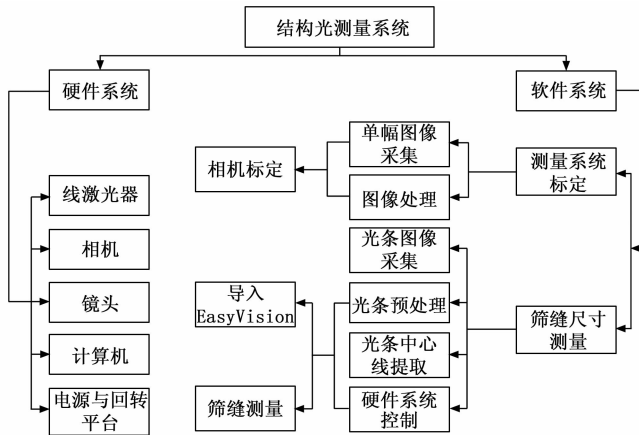


图 8 筛缝视觉检测系统

对圆柱型筛框进行扫描并重建其点云图的流程包括以下步骤：首先，将筛框固定在旋转平台上，通过旋转平台带动筛框旋转，利用结构光或激光扫描技术采集筛框表面的图像数据。在固定角度下拍摄图像，以确保筛框的整个表面被完整扫描。然后，将扫描得到的图像导入 EasyVision 软件，并通过已知的相机内外参数，对图像进行畸变校正，消除透镜产生的扭曲。接着，使用软件中的旋转和位姿调整工具，对每张图像的角度和位置进行调整，使得这些图像可以准确拼接，并投影到三维空间中，随后，利用这些调整后的图像，生成筛框表面的三维点云图，如图 9 所示。最终，拼接所有的点云图，将圆柱面表面模型平铺成条状模型，用于分析筛框的缝隙尺寸及其分布等参数，从而优化生产或质量控制。

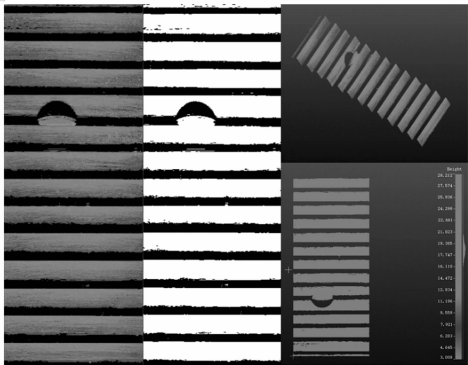


图 9 筛框圆柱面点云图

4.2 测量结果及分析

实验通过扫描金属筛框圆柱表面生成点云图，获得金属圆柱表面的三维坐标信息，通过测量同一 Y 坐标 (mm) 上的两 3D 点云的筛缝间隙两个 X 坐标，筛缝间隙两边的 X 坐标相减即可得到筛缝缝宽距离，左边 X 坐标为 20.788 mm，右边的 X 坐标为 20.404 mm，得到的距离值为 0.384 mm，通过此算法测出一组筛缝间隙尺寸，如图 10 所示。

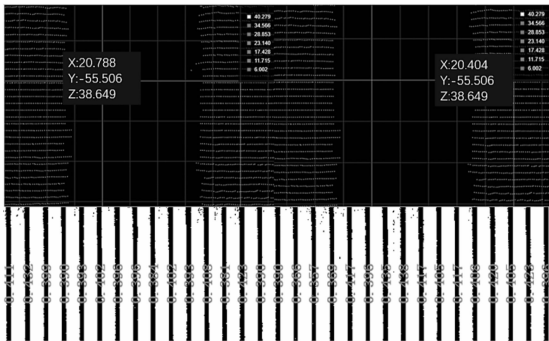


图 10 筛缝 3D 点云尺寸测量原理

通过对直径 400 mm，重量为 100 kg，标准筛缝间隙尺寸为 0.37 mm 的金属纸浆筛框进行扫描测量，调整转台转速以恒定转速 0.002 69 rad/s，将筛框旋转一

周, 用时 1 166 s, 测得 401 个不同的筛缝间距尺寸数据, 生成折线图。分析图 11 的测量数据, 在 401 个筛缝尺寸中, 最大间隙距离为 0.407 mm, 最小间隙距离为 0.333 mm, 以 0.37 mm 理想的间隙尺寸为标准, 尺寸的实际最大加工误差在 10% 以内。

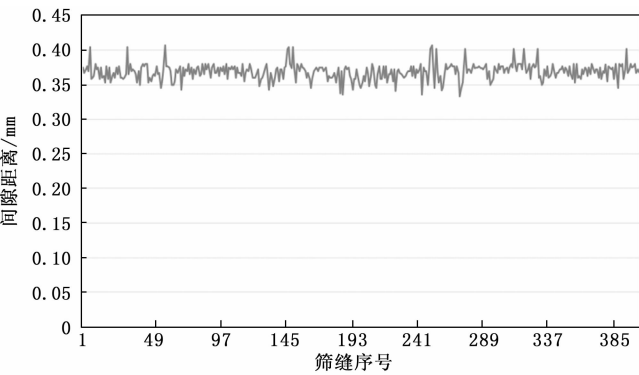


图 11 401 条筛缝间隙尺寸折线图

为了验证筛框回转实验平台对同一筛缝间隙尺寸的重复精度和与实际测量尺寸的误差大小, 选取 10 条筛缝, 测量 16 组数据, 分析每一间隙的极差和标准差大小。采用测量精度为 0.01 mm 的塞规验证, 如图 12 所示, 测量这 10 条筛缝, 得到间隙距离尺寸为 0.36、0.36、0.37、0.37、0.38、0.39、0.36、0.36、0.36、0.37 mm。

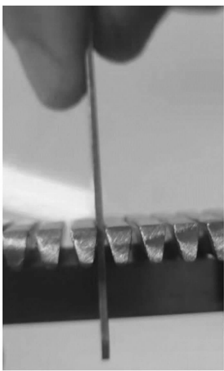


图 12 塞规测量间隙示意图

在回转平台带着筛框以恒定线速度 1.076 mm/s 旋转, 相机采集频率为 1 076 Hz/s (采集频率正比与线速度), y 方向分辨率 $\Delta d=0.001$ mm, 通过分析表 2 测量数据, 该测量系统测量精度和精准度, 测得的 10 条筛缝尺寸的极差最大值为 0.027 mm, 对比 10 条筛缝的标准差折线图, 如图 13 所示, 最大标准差为 0.012 466 mm。系统测量值与人工实测值最大误差值为 15 μm , 测量误差在 20 μm 以内。

5 结束语

该系统采用线结构光扫描技术实现了圆柱型筛框筛缝尺寸检测。实现了筛框的 PCL 点云信息的采集和重

表 2 重复测量数据 mm

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.375	0.367	0.372	0.377	0.37	0.404	0.358	0.36	0.363	0.38
2	0.365	0.365	0.375	0.377	0.375	0.404	0.358	0.36	0.367	0.375
3	0.37	0.365	0.372	0.372	0.37	0.404	0.358	0.365	0.367	0.375
4	0.37	0.363	0.372	0.375	0.375	0.402	0.353	0.363	0.363	0.372
5	0.372	0.363	0.375	0.372	0.37	0.379	0.358	0.363	0.37	0.375
6	0.365	0.365	0.372	0.375	0.387	0.402	0.355	0.363	0.365	0.375
7	0.353	0.365	0.377	0.375	0.372	0.379	0.358	0.358	0.367	0.372
8	0.375	0.365	0.37	0.372	0.37	0.379	0.355	0.36	0.365	0.377
9	0.363	0.36	0.375	0.375	0.372	0.402	0.36	0.363	0.365	0.375
10	0.365	0.367	0.372	0.372	0.372	0.377	0.353	0.355	0.363	0.377
11	0.354	0.37	0.375	0.38	0.37	0.379	0.353	0.358	0.363	0.377
12	0.367	0.363	0.367	0.38	0.387	0.382	0.358	0.355	0.363	0.375
13	0.363	0.365	0.372	0.377	0.37	0.379	0.365	0.358	0.36	0.377
14	0.366	0.365	0.37	0.377	0.37	0.402	0.365	0.353	0.363	0.375
15	0.365	0.367	0.37	0.38	0.37	0.377	0.358	0.355	0.36	0.375
16	0.365	0.367	0.37	0.38	0.37	0.377	0.358	0.355	0.36	0.375
Max	0.375	0.37	0.377	0.38	0.387	0.404	0.365	0.365	0.37	0.38
Min	0.353	0.36	0.367	0.372	0.37	0.377	0.353	0.353	0.36	0.372
极差	0.022	0.01	0.01	0.008	0.017	0.027	0.012	0.012	0.01	0.008

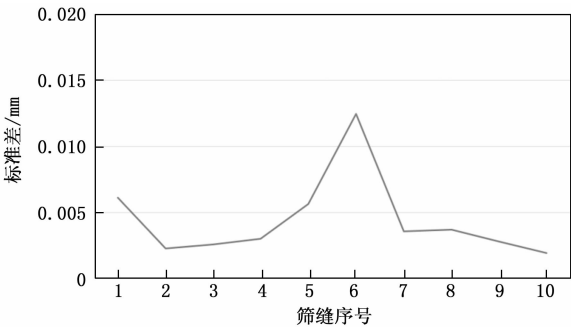


图 13 重复测量数据的标准差

建, 利用点云图提取筛缝轮廓的间距大小, 对确保纸浆的质量和一致性有着重要意义。

提出基于大津法的灰度图阈值分割法, 通过最大化类间方差, 从而确定最优的阈值, 将图像划分为前景和背景。针对在金属表面进行线结构光测量时金属表面高反光的特点, 该系统将中值滤波和双边滤波结合使用, 并引入自适应权重调整机制, 对图像进行形态学处理, 使用闭操作填充光条中的小孔洞, 使光条更加完整, 有效提取激光 ROI 区域后, 使用 Steger 算法提取激光光条中心线。

通过搭建的筛框回转实验平台, 选取 10 条不同筛缝, 对同一条筛缝测量 16 组数据, 验证了筛框回转实验平台对同一筛缝间隙尺寸的重复精度和与测量的精准度, 也验证了激光三角法的测量精度。纸浆圆柱形筛框

的缝宽尺寸进行检测,对确保生产稳定性、提高产品质量和降低生产成本有着重要意义。

参考文献:

- [1] 陈庆蔚. 废纸处理技术的现状及其发展 [J]. 上海造纸, 2005 (2): 14-22.
- [2] 陈庆蔚. 废纸处理设备的新进展 (上) [J]. 中华纸业, 2005 (2): 41-45.
- [3] 宋 蓓. 废纸制浆的节能 [J]. 国际造纸, 2011, 30 (1): 23-29.
- [4] 纪运景, 杜思月, 宋 旸, 等. 基于线结构光旋转扫描和光条纹修复的三维视觉测量技术研究 [J]. 红外与激光工程, 2022, 51 (2): 470-478.
- [5] 王清晨, 景军锋. 采用机器视觉的金属表面横向裂纹检测 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32 (11): 71-77.
- [6] 滕传超, 庞 茂. 基于线结构光的填料板尺寸检测系统研究 [J]. 激光杂志, 2024, 45 (3): 237-242.
- [7] BAIFZ, ZHANG X Y, TIAN C. Surface roughness measurement with laser triangulation [C] //Proceeding of SPIE, 8th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test, Measurement Technology, and Equipment. Bellingham: SPIE, 2016: 96843A.
- [8] CUI F K, SONG Z B, WANG X Q, et al. Study on laser triangulation measurement principle of three dimensional surface roughness [J]. Advanced Materials Research, 2010, 136: 91-94.
- [9] 迟德霞, 王 洋, 宁立群, 等. 张正友法的摄像机标定试验 [J]. 中国农机化学报, 2015 (2): 287-289.
- [10] 刘 艳, 李腾飞. 对张正友相机标定法的改进研究 [J]. 光学技术, 2014 (6): 565-570.
- [11] 贾 丹. 摄像机现场标定算法研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2007 (4): 1-80.
- [12] 刘松林, 韦 华. 基于基本矩阵的相机畸变差校正方法研究 [J]. 遥感信息, 2009 (3): 7-10.
- [13] AHMED M, FARAGA. Nonmetric calibration of camera lens distortion: differential methods and robust estimation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14 (8): 1215-1230.
- [14] 卢 英, 王慧琴, 佟 威, 等. 基于 Harris-张正友平面标定法的摄像机标定算法 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2014 (6): 860-864.
- [15] 张红梅, 卞正中, 郭佑民, 等. 感兴趣区域高效提取算法 (英文) [J]. 软件学报, 2005 (1): 77-88.
- [16] 胡珊珊, 肖 勇, 王保帅, 等. 基于深度学习的 PCB 缺陷检测研究 [J]. 电测与仪表, 2021 (3): 139-145.
- [17] 高 贵. SAR 图像目标 ROI 自动获取技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [18] 刘国宏, 郭文明. 改进的中值滤波去噪算法应用分析 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46 (10): 187-189.
- [19] 张 恒, 雷志辉, 丁晓华. 一种改进的中值滤波算法 [J]. 中国图象图形学报, 2004 (4): 26-29.
- [20] 高浩军, 杜宇人. 中值滤波在图像处理中的应用 [J]. 电子工程师, 2004 (8): 35-36.
- [21] 张旭明, 徐滨士, 董世运. 用于图像处理的自适应中值滤波 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005 (2): 295-299.
- [22] 董 璇. 机器视觉在药品包装缺陷检测中的应用研究 [J]. 中国新技术新产品, 2022 (14): 36-38.
- [23] PANDEY B. Separating the blue cloud and the red sequence using Otsu's method for image segmentation [J]. Astronomy and Computing, 2023: 44.
- [24] 刁子健, 张寿明. 基于 OpenCV 的气泡检测系统设计 [J]. 电子测量技术, 2021 (12): 6-11.
- [25] 刘 涛, 张 炜, 何付军, 等. 红外热波检测方法图像增强环节研究 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41 (7): 1922-1927.
- [26] 李 雪, 刘 悦, 王青正. 基于残差密集块的激光遥感图像中目标检测方法 [J]. 激光杂志, 2024, 45 (8): 98-102.
- [27] 张宏博, 王帅钦, 李发伟, 等. 模板抛光机器人三维视觉识别方法 [J/OL]. 机械设计与制造, 1-5 [2024-11-08]. <https://doi.org/10.19356/j.cnki.1001-3997.20240824.003>.
- [28] 肖福坤, 刘欢欢, 单 磊. 基于连通性阈值分割的煤岩裂隙识别方法 [J]. 工矿自动化, 2024, 50 (8): 127-134.
- [29] 黄启华, 杜玉晓. 基于 HSV+Canny 模型、HED 网络模型的衣物轮廓提取算法研究 [J]. 自动化与信息工程, 2024, 45 (4): 1-9.
- [30] 李雪梅, 霍聪颖, 车爱静. 基于 LabVIEW 的车牌自动识别算法研究 [J]. 山东工业技术, 2024 (4): 32-37.
- [31] 张名华, 张洪军, 石 建, 等. 基于道路轨迹预测模型的遥感影像分类方法研究 [J]. 山东国土资源, 2024, 40 (8): 37-41.
- [32] 南 方, 李大华, 高 强, 等. 改进 Steger 算法的自适应光条纹中心提取 [J]. 激光杂志, 2018, 39 (1): 85-88.
- [33] STEGER C. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1996, 20 (2): 113-125.
- [34] 陈新禹, 孙晓雨, 孙延鹏. 改进 U-Net 的激光条纹中心线高精度提取 [J]. 光电子·激光, 2024: 1-8.
- [35] 胡 坤, 周富强, 张广军. 一种快速结构光条纹中心亚像素精度提取方法 [J]. 仪器仪表学报, 2006 (10): 1326-1329.
- [36] 冀振燕, 宋晓军, 付文杰, 等. 激光光条中心线提取研究综述 [J]. 测控技术, 2021, 40 (6): 1-8.