

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306783

基于改进 Zernike 矩的海洋绞车排缆间隙 亚像素检测方法^{*}

敬明洋 赵延明 王 亮 刘晓进
(湖南科技大学信息与电气工程学院 湘潭 411201)

摘 要:针对海洋绞车现有排缆方式易受环境干扰、接触摩擦磨损影响排缆精度问题,采用非接触式视觉检测直接表征排缆质量的排缆间隙的排缆方式,提出了一种基于改进 Zernike 矩的海洋绞车排缆间隙亚像素测量方法。首先将二维图像梯度信息垂直投影为一维波形,提出基于 Scharr 梯度信息的垂直投影排缆间隙定位方法,快速定位间隙区域;然后通过主梯度方向插值改进 Zernike 矩的亚像素边缘检测,提高亚像素边缘检测精度;最后采用基于 DBSCAN 的最小二乘曲线拟合方法实现多条不相交曲线拟合,实现排缆间隙大小测量。实验结果表明,本文方法相比于拟合法、插值法、传统 Zernike 矩法亚像素检测具有较高的准确度和测量精度,排缆间隙测量误差在 0.1 mm 内,相对误差可达 8.60% 以内,为有效实现精准排缆提供前提保证。

关键词: 海洋绞车;排缆间隙;视觉检测;改进 Zernike 矩;亚像素测量

中图分类号: TH89;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Sub-pixel measurement method for marine winch cable arrangement clearance based on improved Zernike moment

Jing Mingyang Zhao Yanming Wang Liang Liu Xiaojin
(School of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Aiming at the problem that the cable arrangement accuracy of the current cable arrangement methods for ocean winch is easily affected by environmental interference and contact friction and wear, the cable arrangement method is used by the non-contact visual detection method to measure the cable arrangement clearance which directly characterize the quality of the cable arrangement, and a sub-pixel measurement method for marine winch cable arrangement clearance based on improved Zernike moments is proposed in the paper. Firstly, the two-dimensional image gradient information is vertically projected into the one-dimensional waveform, and a vertical projection cable arrangement clearance location method based on Scharr gradient information is proposed to quickly locate the clearance area. Secondly, an improved sub-pixel edge detection method based on Zernike moments is developed by the main gradient direction interpolation to enhance the sub-pixel edge detection accuracy. Finally, a least-squares curve fitting method based on DBSCAN is used to fit multiple non-intersecting curves for measuring the cable arrangement clearance size. Experimental results show that the proposed method has higher accuracy and measurement precision by comparing with sub-pixel detection methods based on fitting method, interpolation method, and traditional Zernike moment, its measurement error is less than 0.1 mm and relative error is less than 8.60%, which provides a prerequisite guarantee for achieving accurate cable arrangement.

Keywords: marine winch; cable arrangement clearance; visual detection; improved Zernike moment; sub-pixel measurement

0 引 言

海洋绞车是海洋工程技术装备中关键的甲板机械装备,广泛应用于海洋作业装备的下放与回收^[1],随着海洋装备作业深度不断加深,海洋绞车缆绳随之变长,缆绳缠绕层数增多,特别是海洋绞车工作于复杂多变海况、工况条件下,时常出现乱缆现象^[2-3],引起缆绳磨损甚至断裂,对海洋绞车、海洋作业装备的安全可靠运行造成极大威胁^[4-5]。

为了避免海洋绞车排缆乱缆问题,国内外学者对如何提高排缆精度开展了大量研究。唐宗勇^[6]检测卷筒转速、排缆器位移,由卷筒转速与排缆器位移关系得出排缆器给定位移,控制卷筒转速与排缆器位移相匹配。孔繁增^[7]采用编码器检测储缆卷筒、排缆丝杆的转速,采用 PID 控制算法实现储缆卷筒和排缆丝杆间的速度匹配。Kang 等^[8]进一步针对不同缆绳直径推导出卷筒转速与丝杆转速之间的匹配关系,确保了不同直径的缆绳在储缆卷筒上有序排列。上述文献均是根据卷筒旋转一周排缆机构沿卷筒轴向平移一个缆绳直径位移量的原理,确定储缆卷筒、排缆丝杆的转速/位移之间的固定匹配关系,然后通过检测转速/位移来进行排缆有效控制,但是受恶劣海洋环境影响,检测卷筒转速/位移或丝杆转速/位移一旦受到干扰,而按上述固定匹配关系继续运行,就会出现排缆误差,进而造成乱缆。为了克服检测转速/位移来进行排缆控制的不足,陈琦等^[9]通过在缆绳进入导向轮的入口处安装偏角检测装置检测缆绳偏角,根据缆绳偏角大小设计恒张力控制器,保证缆绳在收放过

程中与导向轮保持零偏角。Mortensen 等^[10]检测即将绕入滚筒的缆绳与滚筒轴线的夹角,计算其夹角与 90° 的偏差,将偏角转换为速度指令实现排缆控制。通过检测缆绳偏角的排缆效果优于通过检测转速/位移的,但缆绳偏角检测为接触式检测,即通过缆绳拨动偏角检测装置来实现偏角的检测,排缆过程中缆绳与偏角检测装置之间的反复摩擦磨损将影响缆绳偏角检测精度,进而不能实现精准排缆。

上述排缆方式易受环境干扰、接触摩擦磨损影响排缆效果,而采用非接触式视觉检测直接表征排缆质量的排缆间隙,并将其作为控制量来进行排缆控制,能有效克服现有排缆控制方法的不足。因此,本文提出了基于 Zernike 矩的海洋绞车排缆间隙测量方法,首先在对图像进行预处理与增强的基础上,提出基于 Scharrr 梯度信息的垂直投影排缆间隙定位方法,快速定位排缆间隙区域;其次改进基于 Zernike 矩的亚像素点检测方法,实现排缆间隙亚像素边缘检测;最后采用基于 DBSCAN 的最小二乘曲线拟合方法,将亚像素点分类、拟合得到排缆间隙左、右边缘直线,结合相机标定测量排缆间隙大小,为有效实现精准排缆提供前提保证。

1 排缆间隙视觉测量方法

排缆间隙视觉测量流程如图 1 所示,主要包括图像获取、图像预处理、图像增强、间隙定位、边缘初检测、亚像素点检测、分类与拟合,再通过相机标定实现像素宽度与实际宽度的转换,最后测得排缆图像间隙大小。

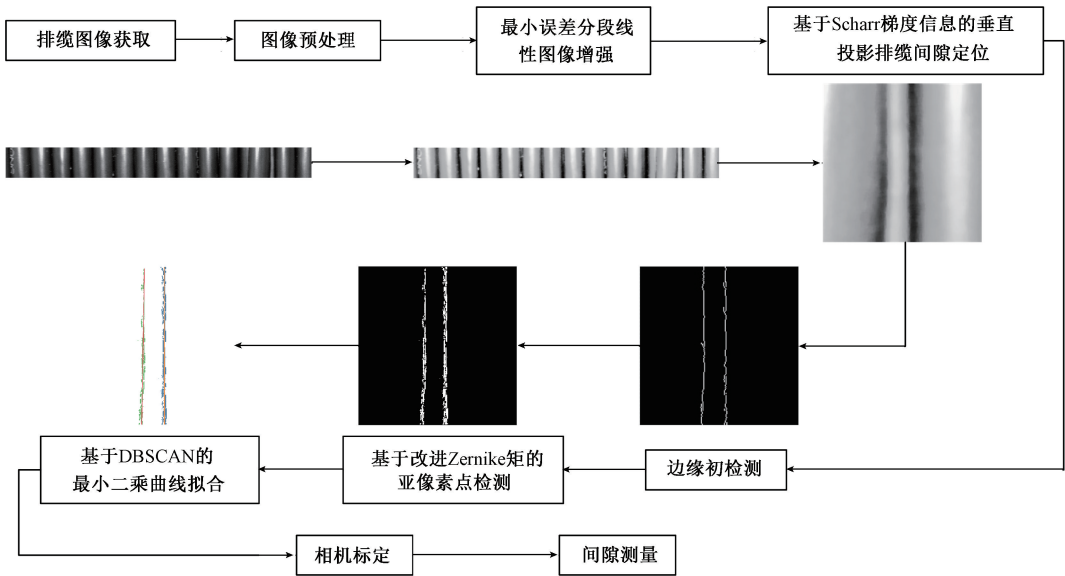


图 1 排缆间隙测量流程

Fig. 1 Clearance measurement process of cable arrangement

1.1 图像预处理

由于海洋绞车长期作业于海洋环境,海洋温湿度、盐雾以及缆绳表面附着颗粒物等会对获取图像产生大量噪声,严重降低图像质量。为了减少噪声干扰,根据排缆图像的特点采用自适应中值滤波方法进行图像预处理^[11],其能够根据噪声敏感度自适应改变窗口大小,既滤除噪声又保护图像中的细节信息,避免图像边缘细化或粗化,有利于提取完整的缆绳边缘以提高测量精度。

1.2 基于最小误差的分段线性图像增强方法

灰度图像一般由目标区域、背景区域以及两者之间的过度区组成,分段线性变换是将图像的灰度区间分成多段,分别对每一段的灰度区间进行线性变换^[12],其变换原理图如图 2 所示,其中 k_1 、 k_2 、 k_3 分别为目标区域、过度区域、背景区域的变换比例,通常对目标区域进行拉伸,当 $k_1 > 1$ 时,变换将目标区域灰度区间 $[0, s_1]$ 拉伸为 $[0, w_1]$ 灰度区间,增强目标区域细节;对背景区域进行收缩,当 $0 < k_3 < 1$ 时,变换将背景区域灰度区间 $[s_2, M_g]$ 收缩为 $[w_2, M_h]$ 灰度区间,抑制背景区域干扰信息;对过度区域进行保持或收缩且收缩率不低于 k_3 ,即 $k_3 < k_2 \leq 1$,变换将过渡区域 $[s_1, s_2]$ 保持或收缩为 $[w_1, w_2]$ 。在分段线性变换中,通常参数 s_1 、 s_2 由目标区域和背景区域的灰度分布决定,参数 w_1 、 w_2 由预期的变换效果决定,但在实际应用中由于处理对象不同,参数 w_1 、 w_2 选取没有统一准则,通常采用先验法来确定;而对于参数 w_1 、 w_2 的选取,通常是通过反复调整 w_1 、 w_2 的值进行试算以达到最佳变换效果来最终确定。先验法和反复试算法的人为设置的分段点自适应能力差,且选取的目标区域与实际目标区域存在误差较大。因此,为解决排缆图像中缆绳表面区域与缆绳边缘区域对比度低、边缘不易识别的问题,本文在分段线性灰度增强方法的基础上,利用最小误差阈值分割方法自适应确定分段点 s_1 、 s_2 ,再选取变换比例系数 k_2 确定分段点 w_1 、 w_2 ,减少参数选择的人为干预,提高分段点选取的自适应性以及目标选取精度,增大缆绳表面与缆绳边缘的对比度,突显缆绳边缘。

基于最小误差的分段线性图像增强方法具体步骤如下:

步骤 1) 最小误差阈值分割方法求解分段点 s_2

选取排缆图像作为待增强图像,其中像素点 (i, j) 的灰度值为 $f(i, j) \in \{0, 1, \dots, L-1\}$, p_k 为灰度值 $f(i, j)$ 的概率,且满足 $\sum_{k=0}^{L-1} p_k = 1$,以 s 为区域 I 和区域 II 的分割阈值,按式(1)求解最小误差阈值分割模型 $J(s)$,得到分段点 s_2 ,将待增强图像分割为区域 I 和区域 II,分别对应背景区域和其他区域。

Find s

$$\min J(s) = 1 + 2 \left[P_1(s) \cdot \ln \frac{\sigma_1(s)}{P_1(s)} + P_2(s) \cdot \right]$$

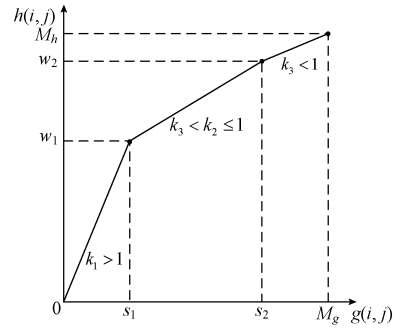


图 2 分段线性变换原理

Fig. 2 Schematic diagram of piecewise linear transformation

$$\begin{aligned} & \ln \frac{\sigma_2(s)}{P_2(s)} \Big] \\ & \text{s. t. } \begin{cases} P_1(s) + P_2(s) = 1 \\ 0 \leq s \leq M_f \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $P_1(s)$ 为区域 I 分布概率, $P_1(s) = \sum_{k=0}^s p_k$; $P_2(s)$ 为区域 II 分布概率, $P_2(s) = \sum_{k=s+1}^{L-1} p_k$; $\sigma_1(s)$ 分别为区域 I 的方差, $\sigma_1^2(s) = \frac{1}{P_1(s)} \sum_{k=0}^s p_k \cdot [k - \mu_1(s)]^2$; $\mu_1(s)$ 为区域 I 的均值, $\mu_1(s) = \frac{1}{P_1(s)} \sum_{k=0}^s k \cdot p_k$; $\sigma_2(s)$ 为区域 II 的方差, $\sigma_2^2(s) = \frac{1}{P_2(s)} \sum_{k=s+1}^{L-1} p_k \cdot [k - \mu_2(s)]^2$; $\mu_2(s)$ 为区域 II 的均值, $\mu_2(s) = \frac{1}{P_2(s)} \sum_{k=s+1}^{L-1} k \cdot p_k$ 。

步骤 2) 最小误差阈值分割方法求解分段点 s_1

选取步骤 1) 获得的其他区域为待增强图像,按式(1)求解最小误差阈值分割模型 $J(s)$,得到分段点 s_1 ($s_2 > s_1$),将待增强图像分为区域 I 和区域 II,分别对应目标区域和过度区域。

步骤 3) 选取变换比例系数 k_2 自适应求解 w_1 、 w_2

假设目标区域比例系数 k_1 、背景区域比例系数 k_3 满足 $k_1 k_3 = 1$ 且 $k_1 > 1$,结合几何关系联立方程解得:

$$\begin{aligned} w_1 &= M_g - \frac{M_g - k_2(s_2 - s_1) - \sqrt{\Delta}}{2} - k_2(s_2 - s_1) \\ w_2 &= M_g - \frac{M_g - k_2(s_2 - s_1) - \sqrt{\Delta}}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\Delta = [M_g - k_2(s_2 - s_1)]^2 - 4s_1(M_f - x_2) > 0$ 。

步骤 4) 分段线性变换增强

对排缆图像按分段点 s_1 、 s_2 、 w_1 、 w_2 进行分段线性灰度变换增强。

1.3 基于 Scharr 梯度信息的垂直投影排缆间隙定位方法

排缆图像中缆绳边缘和缆绳表面、间隙由于光照、

纹理不同而表现出不同的梯度分布,缆绳表面、间隙光线充足且表面平坦光滑具有较低的梯度值,而缆绳边缘区域狭小、光照不均,具有较高的梯度值,如图 3 所示。本文针对排缆图像梯度分布,提出了基于 Scharr 梯度信息的垂直投影排缆间隙区域定位方法,快速定位间隙区域,减少后续无效的边缘检测计算量,具体步骤如下:

步骤 1) Scharr 算子计算排缆图像梯度图像 $g(i, j)$ 。

步骤 2) 设排缆图像像素宽度为 M_0 , 统计梯度图像 $g(i, j)$ 每列像素的梯度值之和, 绘制梯度信息垂直投影波形 $G(j)$, 归一化处理后可得定位区域幅值权重 $W_a(j)$, 如式 (3) 所示。

$$W_a(j) = \frac{G(j) - \min(G(j))}{\max(G(j)) - \min(G(j))} \quad j \in [1, M_0] \quad (3)$$

步骤 3) 设定位区域像素宽度为 $N_0 (M_0 > N_0)$, 由图 3 可知理想间隙区域列像素梯度分布符合双峰正太分布, 可得定位区域位置权重 $W_p(k)$ 为:

$$W_p(j) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_3} \cdot \exp\left(-\frac{(j-\mu_3)^2}{2\sigma_3^2}\right) + \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_4} \cdot \exp\left(-\frac{(j-\mu_4)^2}{2\sigma_4^2}\right) \quad j \in [1, N_0] \quad (4)$$

式中: μ_3, μ_4 为双峰正太分布均值; σ_3^2, σ_4^2 为双峰正太分布方差。

步骤 4) 假设 z 为定位区域左端点的列像素坐标, 同时考虑幅值信息和位置信息建立区域定位模型 $L(z)$, 求解 $L(z)$ 取最大值, 则最佳定位区域为 $[z, z+N_0]$ 。

Find z

$$\max L(z) = \frac{\sum_{h=z}^{z+N_0} W_a(h) \cdot W_p(h-z)}{N_0} \quad z \in [1, M_0 - N_0] \quad (5)$$

1.4 基于改进 Zernike 矩的亚像素排缆间隙边缘检测方法

1) Canny 边缘初检测

获取缆绳边缘的单像素精度边缘可快速获取缆绳边缘位置, 为亚像素边缘检测提供初值, 从而提高检测效率。本文采用 Canny 算子获取单像素精度缆绳边缘, 主要步骤包括: Sobel 算子计算梯度幅值与方向; 对梯度冗余点进行非极大值抑制; 最后通过高、低阈值连接边缘。

2) 传统 Zernike 矩亚像素点检测

为准确测量排缆间隙大小, 通过亚像素边缘检测方法将检测精度提高至亚像素级别。常见的亚像素边缘检测方法主要有: 基于拟合法的亚像素边缘检测^[13-14]、基于插值法的亚像素边缘检测^[15]、基于矩法的亚像素边缘检测^[16-17]等。Zernike 矩具有抗噪能力强、

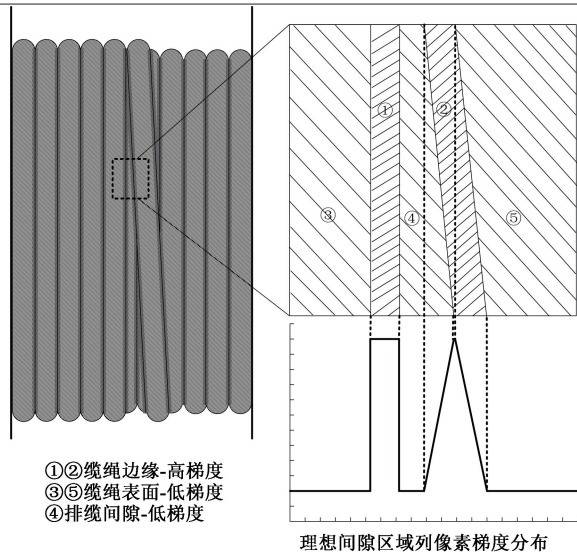


图 3 排缆图像梯度分布

Fig. 3 Gradient distribution of cable arrangement image

稳定性好、计算速度快等优点, 被广泛应用于视觉检测研究。李江昀等^[18]采用 Zernike 矩亚像素精度边缘检测对钢板尺寸进行高精度测量。闫钧华等^[19]利用 Zernike 矩等构建 123 维特征向量描述跑道, 在复杂背景下机场跑道检测准确率在 87.845% 以上。刘明佩等^[20]分析卷积不对称性和卷积窗口中心局限性使用多级奇偶模板改进 Zernike 矩亚像素边缘检测算法精确定位小模数齿轮边缘。

Sugata 等^[21]根据 Zernike 矩的正交性以及旋转不变性建立了理想边缘模型, 如图 4 所示, 其中 u 为图像背景灰度值, v 为背景与前景灰度差值, 即前景灰度值为 $u+v$, R 为理想边缘, d 为原点到理想边缘 R 的垂直距离, d_1, d_2 分别为原点到理想边缘起始、终止位置的垂直距离, α 为理想边缘垂线与 x 轴的夹角。图像 $h(x, y)$ 的 n 阶 m 次 Zernike 矩定义为:

$$Z_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} h(x, y) V_{nm}^*(\rho, \theta) dx dy \quad (6)$$

式中: $h(x, y)$ 为点 (x, y) 处的灰度值; $V_{nm}^*(\rho, \theta)$ 为极坐标单位圆内 Zernike 多项式的复共轭。

Zernike 矩具有旋转不变性:

$$Z'_{nm} = Z_{nm} e^{-im\alpha} \quad (7)$$

将边缘模型顺时针旋转 α 角度, 边缘模型关于 x 轴对称将满足如下条件:

$$\iint_{x^2+y^2 \leq 1} h'(x, y) dx dy = 0 \quad (8)$$

式中: $h'(x, y)$ 为顺时针旋转 α 角度后图像。

根据上述关系及 Zernike 矩的性质, 求解 $Z'_{00}, Z'_{11}, Z'_{20}, Z'_{30}, Z'_{40}$ 。

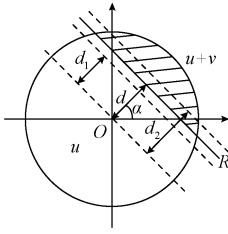


图 4 理想边缘模型

Fig. 4 The ideal edge model

$$\begin{cases} Z'_{00} = u\pi + \frac{v\pi}{2} - \nu \arcsin(d) - \nu d \sqrt{1-d^2} \\ Z'_{11} = \frac{2\nu(1-d^2)^{3/2}}{3}, Z'_{20} = \frac{2\nu d(1-d^2)^{3/2}}{3} \\ Z'_{31} = \nu(1-d^2)^{3/2} \left(\frac{4}{5}d^2 - \frac{2}{15} \right) \\ Z'_{40} = \nu(1-d^2)^{3/2} \left(\frac{16}{15}d^3 - \frac{2}{5}d \right) \end{cases} \quad (9)$$

理想边缘模型参数 $\alpha, d, d_1, d_2, u, v$ 通过式(9)求得:

$$\begin{cases} \alpha = \arctan\left(\frac{\text{Im}[Z_{11}]}{\text{Re}[Z_{11}]}\right), \nu = \frac{3Z'_{11}}{2(1-d^2)^{3/2}} \\ d = \frac{Z_{20}}{Z'_{11}}, d_1 = \sqrt{\frac{5Z'_{40} + 3Z'_{20}}{8Z'_{20}}}, d_2 = \sqrt{\frac{5Z'_{31} + Z'_{11}}{6Z'_{11}}} \\ u = \frac{Z_{00} - \frac{\nu\pi}{2} + \nu \arcsin(d_2) + \nu d_2 \sqrt{1-d_2^2}}{\pi} \end{cases} \quad (10)$$

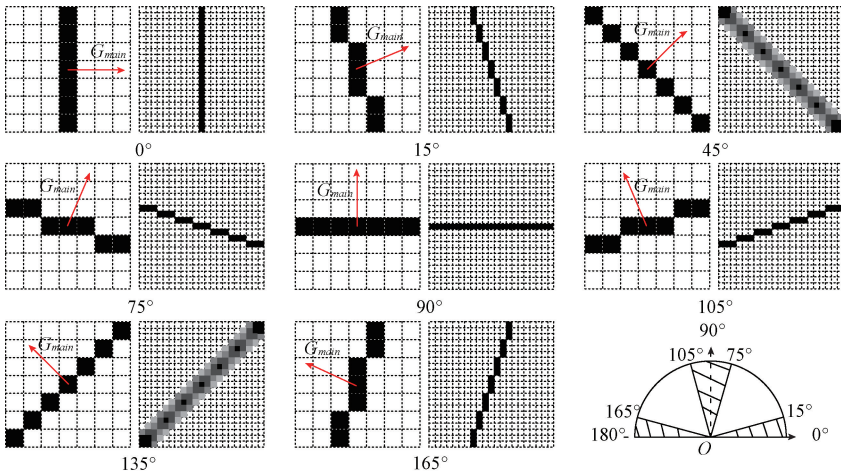


图 5 主梯度方向插值

Fig. 5 The main gradient direction interpolation

Zernike 矩由模板与图像卷积得到,考虑到 $N \times N$ 模板的放大效应,求得图像边缘的亚像素坐标 (x_s, y_s) 。

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \frac{Nd}{2} \begin{bmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{bmatrix} \quad (11)$$

边缘点判定条件为: $\nu \geq T_\nu \cap d \leq T_d$, 其中 T_ν 为阶跃灰度阈值, T_d 为原点到理想边缘距离阈值。

3) 改进 Zernike 矩亚像素点检测

由于图像的离散性,边缘检测必然存在误差,为了提高检测精度,一种有效且简单的方法是使用更大尺寸的模板^[22],如果图像仅具有简单且稀疏的边缘,大模板可以提高精度;然而,当图像有复杂且密集的边缘时,边缘之间相互干扰,边缘检测误差将进一步增大。为解决上述问题,提高边缘检测精度,本文改进 Zernike 矩亚像素边缘检测方法,根据单像素边缘的梯度方向对边缘进行插值,以丰富其边缘信息,使大模板能够发挥其精确的边缘定位能力。

将单像素边缘图像划分为 7×7 的小单元,按式(12)计算每个单元的梯度主方向 G_{main} (取 $[0^\circ, 180^\circ]$),当梯度主方向介于 $[0^\circ, 15^\circ]$ 、 $[75^\circ, 105^\circ]$ 、 $[165^\circ, 180^\circ]$ 时,保持梯度方向不变;当梯度主方向介于 $(15^\circ, 75^\circ)$ 、 $(105^\circ, 165^\circ)$ 时,应用双线性插值法将 7×7 的单元扩展为 21×21 的单元,如图 5 所示。

$$\begin{aligned} G_\theta &= \arctan \frac{G_y}{G_x} \\ G_m &= \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \\ G_{main} &= \max \{ G_\theta \cdot \sum G_m^\theta \} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: G_x, G_y 分别为 Sobel 算子计算的水平、垂直梯度;

G_θ, G_m 分别为 7×7 的单元内每个像素点的梯度方向、梯度幅值; $\sum G_m^\theta$ 为梯度方向为 θ 的梯度幅值之和。

同时传统 Zernike 矩法在边缘点判定条件中未考虑高阶矩,提取的边缘线条较粗^[23],本文在边缘点判定条件中引入高阶矩增强细节描述能力,边缘判定条件修改为: $\nu \geq T_\nu \cap |d_1 - d_2| \leq T_d$ 。

1.5 基于 DBSCAN 的最小二乘曲线拟合方法

排缆间隙边缘为两不相交直线,亚像素边缘点检测结果为两不相交线状数据点,鉴于常规曲线拟合方法对于一组数据包含多条曲线的拟合计算复杂度高^[24],本文采用基于密度的有噪空间聚类(density-based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN)将排缆间隙亚像素点聚类为有限簇,每个簇分别代表排缆间隙内各条边缘直线,再分别对每个簇进行最小二乘曲线拟合,得到间隙边缘直线。

- 本文选择 DBSCAN 算法的原因如下:
- 1) DBSCAN 剔除异常点能力强,可有效剔除亚像素点检测中的异常数据。
 - 2) DBSCAN 不需要指定类别数,它通过数据空间中的密集区域自适应确定类别数,可有效应对排缆间隙区域过大出现下层缆绳边缘的情况,即待拟合边缘直线条数大于 2。
 - 3) DBSCAN 可划分出任意形状的簇,对于本文多条不相交直线状数据点有较好的聚类效果^[25]。

DBSCAN 算法伪代码如表 1 所示。

表 1 DBSCAN 伪代码

Table 1 Pseudocode of DBSCAN

输入:数据集 D , 领域半径 ε , 领域内最少点数目 Minpts
输出:聚类 C
算法
步骤:
(1) 类标签 $f=1$;
(2) Do
(3) 随机选取 D 中一个未观测点 p , 将 p 点标为已观测点
(4) If p 点 ε 领域内至少有 Minpts 个点
(5) 将 p 点添加到新簇 C ;
(6) 将 p 点 ε 领域内所有点添加到新集合 Q ;
(7) For Q 中每个点 e
(8) If e 点是未观测点或 e 点 ε 领域内至少有 Minpts 个点
(9) 将 e 点 ε 领域内所有点添加到 Q ;
(10) If e 点不是任何簇成员
(11) 将 e 点添加到簇 C ;
(12) End for
(13) 将簇 C 标记为 f 类, $f++$;
(14) else 将 p 点标记为异常点;
(15) While 直到所有点被观测;

常见的直线拟合方法有 Hough 直线变换和最小二乘法直线拟合,最小二乘法计算速度快、稳定性高,虽易受噪声点干扰^[26],但 DBSCAN 聚类方法可有效剔除噪声点获得准确数据,本文采用最小二乘法按式(13)对每个簇 $\{C_1, C_2, \dots, C_e\}$ 进行直线拟合得到边缘直线 $\{L_1, L_2, \dots, L_e\}$ 。

$$\begin{bmatrix} a_k \\ b_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{q=1}^{n_1} x_q^2 & \sum_{q=1}^{n_1} X_q \\ \sum_{q=1}^{n_1} x_q & n_1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{q=1}^{n_1} X_q Y_q \\ \sum_{q=1}^{n_1} Y_q \end{bmatrix} \tag{13}$$

式中: a_k 为直线斜率; b_k 为直线截距; n_1 为直线簇 L_c 的亚像素点数目。

2 实验与结果分析

本文排缆间隙测量平台如图 6 所示,将直径为 6 mm 缆绳缠绕于储缆滚筒上,采用 3 840×2 748 pixels CMOS 工业相机、8 mm 焦距光学镜头、环形光源,三者固定在滚筒正上方同一直线上,该直线与滚筒法向重合,上位机环境为 Intel(R) Core i5 1.60 GHz, Microsoft VS2015 C++。

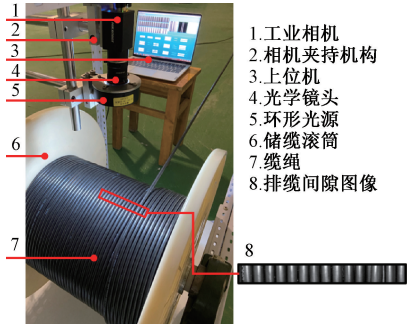


图 6 排缆间隙测量平台

Fig. 6 Measuring platform for cable clearance

2.1 相机标定

将间隙大小转换为实际物理尺寸,需要对本测量平台进行标定,获得像素当量,即每个像素代表的实际物理尺寸。使用棋盘格标定板,利用小孔成像原理将相机坐标系与图像坐标系对应,得到标定板每一小格所占的像素数 P ,已知标定板每一小格的实际长度为 l ,则像素当量 r 为:

$$r = l/P \tag{14}$$

经标定得到像素当量为 0.058 74 mm/pixel,将像素当量与间隙区域像素数相乘得到间隙实际宽度。

2.2 排缆间隙测量

本节以 1.500 mm 间隙排缆图像为例,按图 1 所示流程测量排缆图像间隙大小,主要包括图像预处理与图像增强、间隙定位、亚像素边缘检测与分类拟合。

1) 图像预处理与图像增强

图像预处理与图像增强结果如图 7 所示。图 7(a) 为原排缆图像,其中缆绳为螺旋式自右向左交错缠绕,右

侧缆绳 I、II、III 为上层,缆绳 II、III 之间存在人工设置的 1.500 mm 间隙;图 7(b)为预处理图像;图 7(c)为图像增强结果。

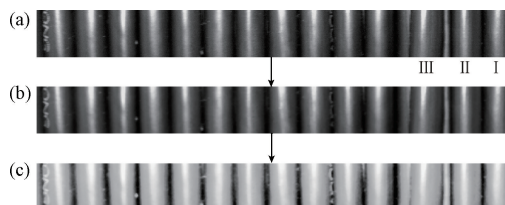


图 7 图像预处理与图像增强

Fig. 7 Image preprocessing and enhancement

从图 7 可见,图 7(b)预处理图像相较于图 7(a)原排缆图像缆绳表面细小尘埃得到明显的清除,较大的附着颗粒有一定的弱化,缆绳表面更光滑,噪声得到明显抑制,但是缆绳表面存在反光干扰、缆绳表面与缆绳边缘对比度低的问题。从图 7(c)图像增强结果可以看出图 7

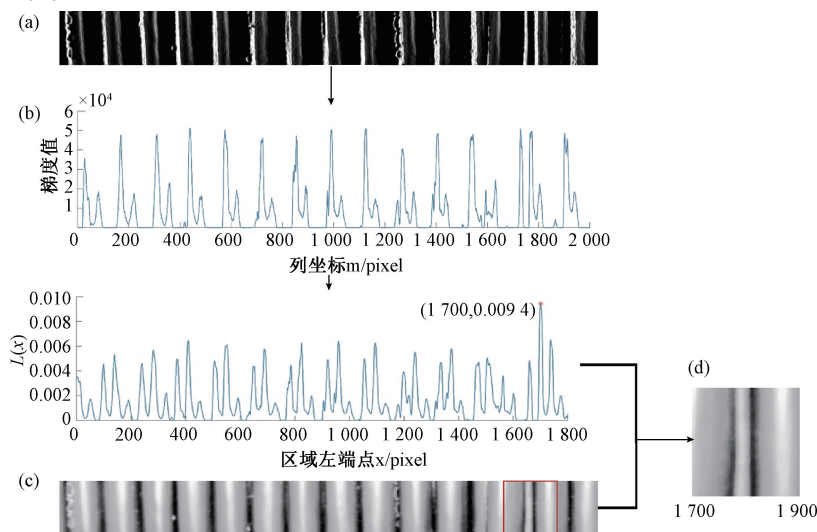


图 8 间隙区域定位

Fig. 8 Clearance area locating

(b)存在反光干扰、对比度低的问题已经有效解决。这是因为基于最小误差的分段线性增强方法拉伸缆绳边缘区域灰度分布,收缩反光干扰区域灰度分布,优化全局灰度分布,有效抑制缆绳表面反光区域,突显缆绳边缘细节,增强缆绳表面与缆绳边缘的对比度,有利于后续排缆间隙的定位与测量。

2) 间隙区域定位

基于 Scharr 梯度信息垂直投影的间隙区域定位结果如图 8 所示。图 8(a)为 Scharr 算子检测的排缆图像的梯度图像;图 8(b)为梯度幅值垂直投影的梯度波形 $G(j)$;图 8(c)为间隙定位模型函数 $L(z)$;图 8(d)为间隙区域。排缆图像像素宽度为 2 000,像素高度为 200,目标定位区域像素宽度为 200,像素高度为 200,从图 8(c)定位模型 $L(z)$ 计算结果可见在 $x=1\ 700$ 时, $L(z)$ 取得最大值,间隙区域定位为 1 700~1 900 pixels,高度为 200 pixels 的矩形区域。即 1 700~1 900 列像素区域梯度波形最符合如图 3 所示的理想间隙区域列像素梯度分布。

3) 亚像素边缘检测与分类拟合

为验证本文改进 Zernike 矩的亚像素边缘检测方法的有效性,选择拟合法、插值法、传统 Zernike 矩方法与本文方法进行对比实验,实验结果如图 9 所示。从图 9(a)拟合法边缘检测结果可见,由于排缆间隙左右边界存在过度区域,其灰度变化较小与高斯边缘拟合模型存在较大差异,该方法检测出的亚像素点坐标过多,极大的影响边缘曲线的拟合精度。图 9(b)为插值法边缘检测结果,该方法可有效解决过度区域左右边界模糊的问题,但依然存在局部边缘细碎残缺且受噪声干扰等问题。传统 Zernike 矩边缘检测结果在排缆间隙的左边界取得较好效果,右边界效果较差,这是因为图 8(d)间隙区域的右

边界的过度区域宽于左边界的过度区域,相较于左边界具有更复杂且密集的边缘。图 9(d)为本文方法边缘检测结果,在双线性插值丰富边缘位置信息并在边缘判定条件中引入高阶矩阈值,能够有效提取到完整的排缆间隙左右边缘。

针对排缆间隙区域为竖直方向,在对其左右边缘亚像素点进行拟合、曲线拟合后,为避免拟合的边缘直线斜率无穷大的情况,将图像逆时针旋转 90° 便于后续图像处理。对上述 4 种方法的亚像素点检测结果进行 DBSCAN 分类,快速选定间隙区域左右边缘对应的亚像素点类别并对每一类亚像素点最小二乘法曲线拟合,4 种亚像素点的基于 DBSCAN 的最小二乘曲线拟合如图 10 所示。

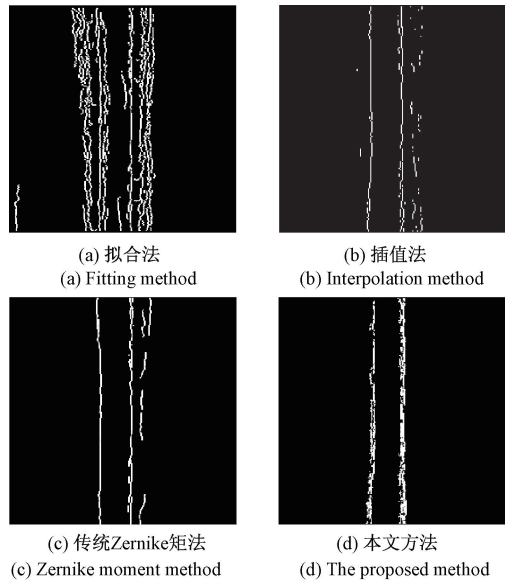


图 9 亚像素边缘检测算法对比

Fig. 9 Comparison of sub-pixel edge detection algorithms

沿每列计算间隙左、右边缘拟合曲线之间的像素宽度,取平均值即为间隙像素宽度 W_1 ,定义间隙测量宽度 W_2 、测量误差 m_e 、相对误差 ε_e 。按式 (15) 计算。1.500 mm 排缆间隙测量结果与误差如表 2 所示。

$$\begin{aligned} W_2 &= W_1 \cdot r \\ m_e &= |W_2 - W_0| \\ \varepsilon_e &= \frac{|W_2 - W_0|}{W_0} \times 100\% \end{aligned} \tag{15}$$

从表 2 可知,拟合法的间隙像素宽度 41.620 2 pixels,间隙测量宽度 2.445 mm,测量误差 0.945 mm,相对误差 63.00%,与间隙实际宽度 1.500 mm 偏差最大,这是因为在图 10(a)拟合法亚像素点分类与拟合结果中,亚像素点数量大且分散,导致亚像素点被分为 3 类,拟合出 3 条边缘直线,间隙测量宽度中增加了左边缘拟合曲线于其他拟合曲线之间的距离。插值法的间隙像素宽度 29.910 2 pixels,间隙测量宽度 1.757 mm,测量误差 0.257 mm,相对误差 17.13%;传统 Zernike 矩法的间隙像素宽度 28.776 2 pixels,间隙测量宽度 1.690 mm,测量误差 0.190 mm,相对误差 12.67%,与间隙实际宽度偏差较小,这是因为在图 10(b)插值法、(c)传统 Zernike 矩法亚像素点分类与拟合结果中,亚像素点均被正确的分类为左边缘亚像素点、右边缘亚像素点,但插值法左、右边缘拟合曲线分别受左、右边缘亚像素点附近残缺点和噪声影响均存在一定偏移,传统 Zernike 矩法仅右边缘拟合曲线存在偏移,因此传统 Zernike 矩法的测量误差小于插值法的测量误差。本文方法的间隙像素宽度 26.739 5 pixels,间隙测量宽度 1.571 mm,测量误差

0.071 mm,相对误差 4.73%,与间隙实际宽度误差最小,相比于传统 Zernike 矩法相对误差减少了 7.94%,这是因为在图 10(d)为本文方法亚像素点分类与拟合结果中,左、右边缘亚像素点紧凑分布于左、右边缘拟合曲线附近,与左、右边缘曲线拟合度高,可准确测量间隙区域宽度。

表 2 1.500 mm 排缆间隙测量结果与误差

Table 2 Measurement results and errors of 1.500 mm cable arrangement clearance				
亚像素检测方法	间隙像素宽度 W_1/pixel	间隙测量宽度 W_2/mm	测量误差 m_e/mm	相对误差 $\varepsilon_e/\%$
拟合法	41.620 2	2.445	0.945	63.00
插值法	29.910 2	1.757	0.257	17.13
传统 Zernike 矩	28.776 2	1.690	0.190	12.67
本文方法	26.739 5	1.571	0.071	4.73

2.3 测量结果分析

为有效测量海洋绞车排缆过程中不同间隙宽度,人工设置排缆间隙实际宽度 W_0 。依次为 1.000、1.500、2.000、2.500、3.000 mm 分别以本文方法进行排缆间隙测量,结果与误差如图 10、表 3 所示。从表 3 可知,不同间隙宽度的测量误差均在 0.1 mm 内,测量相对误差可达 8.60%以内,本文方法可准确测量排缆间隙大小。由图 11 可见,间隙测量宽度 W_2 随着间隙实际宽度 W_0 的增大而增大,但相对误差 ε_e 与间隙实际宽度 W_0 呈负相关。这是因为当间隙宽度较小时,光线较难进入狭窄的间隙区域,如 1.000 mm 间隙图像所示,导致间隙区域灰度与间隙左右边缘灰度接近,进而影响边缘亚像素点检测与拟合,增大测量误差。随着间隙宽度的增大,间隙区域的光线更充裕,间隙区域与间隙边缘的对比度较高,如 3.000 mm 间隙图像所示,利于间隙边缘亚像素点检测与拟合。

3 结 论

本文针对现有排缆方式易环境干扰、接触摩擦磨损影响,以排缆间隙表征海洋绞车排缆质量,提出了基于改进 Zernike 矩的海洋绞车排缆间隙亚像素测量方法。将二维图像梯度信息垂直投影为一维波形,建立排缆间隙区域定位模型,快速定位间隙区域;通过主梯度方向插值改进基于 Zernike 矩的亚像素边缘检测方法,丰富细节边缘,提高亚像素边缘检测精度;结合 DBSCAN 算法与最小二乘曲线拟合解决多条不相交曲线拟合复杂度高的问题,实现高精度测量排缆间隙大小。实验结果表明:本文方法相较于拟合法、插值法、传统 Zernike 矩法亚像素检测具有较高的准确度和测量精度,排缆间隙测量误差在

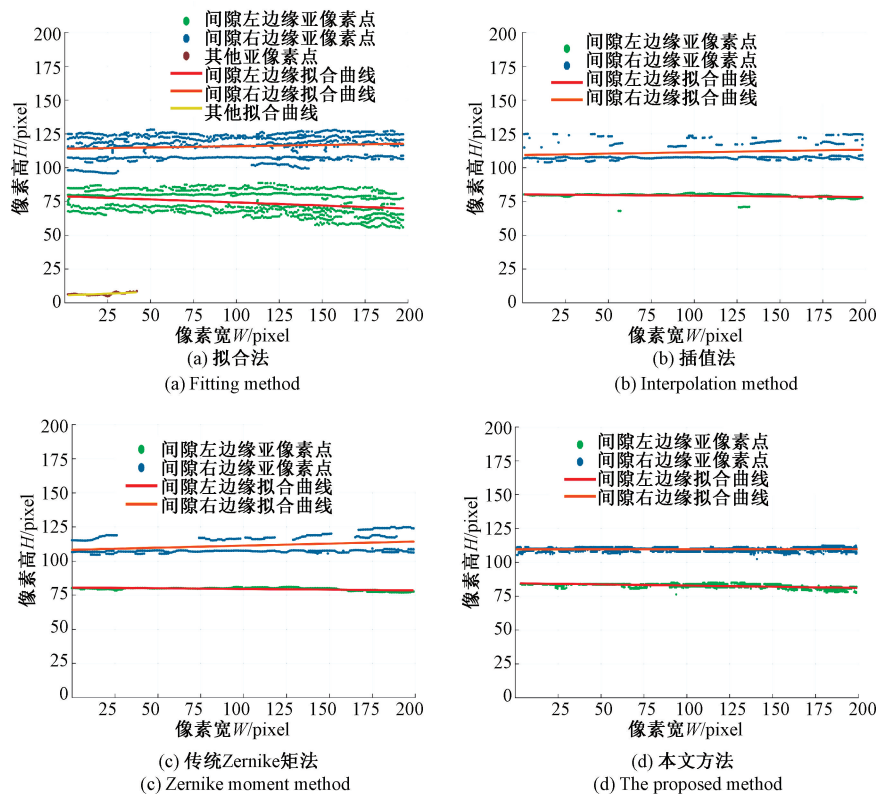


图 10 亚像素点分类与曲线拟合对比

Fig. 10 Comparison of sub-pixel point classification and curve fitting

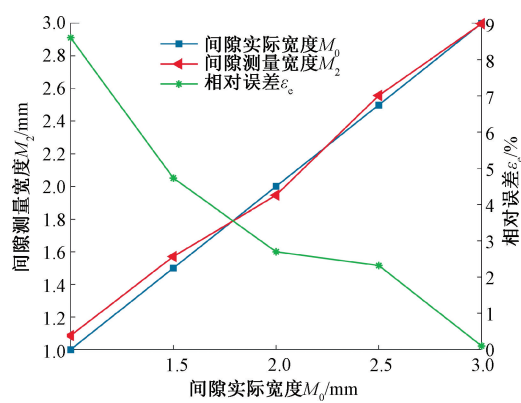
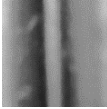
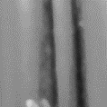
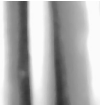


图 11 排缆间隙测量结果与误差

Fig. 11 Measurement results and error of cable arrangement clearance

0.1 mm 内,相对误差可达 8.60% 以内,为后续开展以排缆间隙为反馈的海洋绞车自抗扰排缆协同控制提供前提供保证,有效实现精准排缆。

表 3 排缆间隙测量结果与误差					
Table 3 Measurement results and error of cable arrangement clearance					
间隙 图像					
间隙实 际宽度 W_0/mm	1.000	1.500	2.000	2.500	3.000
间隙像 素宽度 W_1/pixel	18.492 8	26.739 5	33.130 5	43.541 8	51.012 4
间隙测 量宽度 W_2/mm	1.086	1.571	1.946	2.558	2.997
测量 误差 m_e/mm	0.086	0.071	0.054	0.058	0.003
相对 误差 $\varepsilon_e/\%$	8.60	4.73	2.70	2.32	0.10

参考文献

- [1] 谢天财, 黄良沛, 邹东升, 等. 海洋绞车主动升沉补偿控制系统建模与仿真分析[J]. 海洋工程, 2021, 39(1): 153-161.
XIE T C, HUANG L P, ZOU D SH, et al. Modeling and simulation analysis of active heave compensation control system of marine winch[J]. Ocean Engineering, 2021, 39(1): 153-161.
- [2] ALAN J J, FANG J S, CUI W C. Exploring the hadal zone: Recent advances in hadal science and technology[J]. Deep Sea Research Part II, 2018, 155: 1-3.
- [3] 赵延明, 李成, 邓毓珊. 海洋船载电驱动绞车控制系统建模与仿真分析[J]. 计算机仿真, 2016, 33(11): 244-249.
ZHAO Y M, LI CH, DENG Y B. Modeling and simulation analysis of control system of marine shipboard electric drive winch[J]. Computer Simulation, 2016, 33(11): 244-249.
- [4] DRUMOND G P, PASQUALINO I P, PINHEIRO B C, et al. Pipelines, risers and umbilicals failures: A literature review [J]. Ocean Engineering, 2018, 148(15): 412-425.
- [5] 王哲骏, 谢金辉, 高剑, 等. 波浪补偿技术现状和发展趋势[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(11): 1-7.
WANG ZH J, XIE J H, GAO J, et al. Current situation and development trend of wave compensation technology[J]. Ship Science and Technology, 2014, 36(11): 1-7.
- [6] 唐宗勇. 绞车混合自动排缆控制设计[J]. 机电工程技术, 2015, 44(4): 10-12.
TANG Z Y. Design of hybrid cable-arrangement control on the winch[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2015, 44(4): 10-12.
- [7] 孔繁增. 电动光电复合缆绞车储缆控制系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
KONG F Z. Study on the control system of storage cable of electric optic/electric composite cable winch [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [8] KANG K, ZHANG T X. The design of cable arrangement system for towing winch and its control algorithm[C]. 3rd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), 2019: 1026-1029.
- [9] 陈琦, 李格伦. 新型布缆船拖曳绞车控制系统[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(8): 990-999.
CHEN Q, LI G L. Towing winch control system for a new cable laying ship [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2019, 53(8): 990-999.
- [10] MORTENSEN N B, JOHNSON J A, SHTURMAKOV A J. Precision cable winch level wind for deep ice-coring systems [J]. Annals of Glaciology, 2014, 55 (68): 99-104.
- [11] 黄梦涛, 连一鑫. 基于改进 Canny 算子的锂电池极片表面缺陷检测[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10): 199-209.
HUANG M T, LIAN Y X. Lithium battery electrode plate surface defect detection based on improved Canny operator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10): 199-209.
- [12] 陈龙, 赵巍. 一种改进的自适应分段线性变换算法[J]. 激光与红外, 2020, 50(8): 1020-1024.
CHEN L, ZHAO W. An improved adaptive piecewise linear transformation algorithm[J]. Laser and Infrared, 2020, 50(8): 1020-1024.
- [13] 李华, 孙永荣, 赵科东, 等. 锥套定位的高精度点圆特征提取算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(9): 190-196.
LI H, SUN Y R, ZHAO D K, et al. High-precision point-circle feature extraction algorithm for refueling drogue positioning [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36 (9): 190-196.
- [14] 鲁沛昕, 杨开明, 鲁森, 等. 用于晶圆键合的对准标记定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 220-229.
LU P X, YANG K M, LU S, et al. A high-precision positioning algorithm of alignment mark for wafer bonding[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11): 220-229.
- [15] 张伟, 韩宗旺, 程祥, 等. 基于机器视觉零件轴线直线度误差测量的研究[J]. 光学精密工程, 2021, 29(9): 2168-2177.
ZHANG W, HAN Z W, CHENG X, et al. Research on straightness error measurement of part axis based on machine vision[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(9): 2168-2177.
- [16] 朱维斌, 刘明佩, 叶树亮. 基于邻域特性分析的小模数齿轮亚像素图像边缘检测[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(3): 148-156.
ZHU W B, LIU M P, YE SH L. Sub-pixel image edge detection based on neighborhood characteristic analysis for small modulus gear[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(3): 148-156.
- [17] 吴一全, 邹宇, 刘忠林. 基于 Franklin 矩的亚像素级图像边缘检测算法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5): 221-229.
WU Y Q, ZOU Y, LIU ZH L. Sub-pixel level image

- edge detection algorithm based on Franklin moments[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(5): 221-229.
- [18] 李江昀, 王宇浩, 童朝南. 一种 Zernike 矩的高精度板材尺寸测量方法[J]. 电子学报, 2015, 43(7): 1432-1436.
LI J Y, WANG Y H, TONG CH N. An accurate Zernike moment-oriented method for measuring flat strip dimension[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(7): 1432-1436.
- [19] 闫钧华, 许俊峰, 艾淑芳, 等. 基于局部多特征的机场跑道检测算法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8): 1714-1720.
YAN J H, XU J F, AI SH F, et al. Airport runway detection algorithm based on local multi-features [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8): 1714-1720.
- [20] 刘明佩, 朱维斌, 叶树亮. 基于改进 Zernike 矩的小模数齿轮亚像素边缘检测[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(8): 259-267.
LIU M P, ZHU W B, YE SH L. Sub-pixel edge detection based on improved Zernike moment in the small modulus gear image [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8): 259-267.
- [21] SUGATA G, RAJIV M. Orthogonal moment operators for subpixel edge detection[J]. Pattern Recognition, 1993, 26(2): 295-306.
- [22] 曲迎东, 李荣德, 白彦华, 等. 高速的 9×9 尺寸模板 Zernike 矩边缘算子[J]. 光电子. 激光, 2010, 21(11): 1683-1687.
QU Y D, LI R D, BAI Y H, et al. A high-speed Zernike moments edge operator based on 9×9 masks[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2010, 21(11): 1683-1687.
- [23] 高世一, 赵明扬, 张雷, 等. 基于 Zernike 正交矩的图像亚像素边缘检测算法改进[J]. 自动化学报, 2008, 34(9): 1163-1168.
GAO SH Y, ZHAO M Y, ZHANG L, et al. Improved algorithm about subpixel edge detection of image based on Zernike orthogonal moments [J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(9): 1163-1168.
- [24] KIROV S, SLEPČEV D. Multiple penalized principal curves: Analysis and computation [J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2017, 59: 234-256.
- [25] SHI L, TAN J, XUE S, et al. Inspection method of rope arrangement in the ultra-deep mine hoist based on optical projection and machine vision [J]. Sensors, 2021, 21(5): 1769.
- [26] 孔盛杰, 黄翔, 周蒯, 等. 基于机器视觉的齿形结构齿顶圆检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 247-255.
KONG SH J, HUANG X, ZHOU K, et al. Detection method of addendum circle of gear structure based on machine vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 247-255.

作者简介



敬明洋, 2019 年于淮阴工学院获得学士学位, 现为湖南科技大学硕士研究生, 主要研究方向为现代检测技术与智能装置。

E-mail: 1186222803@qq. com

Jing Mingyang received his B. Sc. degree from Huaiyin Institute of Technology in 2019. Now he is a M. Sc. candidate at Hunan University of Science and Technology. His main research interests include modern detection technology and intelligent device.



赵延明 (通信作者), 1998 年于陕西科技大学获得学士学位, 2004 年于中南大学获得硕士学位, 2013 年于中南大学获得博士学位, 现为湖南科技大学教授, 主要研究方向为智能检测与控制、模式识别与智能系统。

E-mail: ymzhao@hnust. edu. cn

Zhao Yanming (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shaanxi University of Science & Technology in 1998, M. Sc. degree from Central South University in 2004, and Ph. D. degree from Central South University in 2013, respectively. Now he is a professor in Hunan University of Science and Technology. His main research interests include intelligent detection and control, pattern recognition and intelligent system.