

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508655

铝合金焊接接头的形貌特征抗干扰检测*

黄永¹ 甘世明¹ 邢满禧² 王瑞¹ 孙振邦³

(1. 内蒙古工业大学机械工程学院 呼和浩特 010051; 2. 北奔重型汽车集团有限公司 包头 014030;

3. 内蒙古工业大学材料科学与工程学院 呼和浩特 010051)

摘要:接头形貌特征参数是铝合金焊接质量评估的核心指标之一。针对铝合金焊接接头形貌检测中的反光现象及焊后板材表面污染而导致的光条纹亮度不均、中心线提取失真的问题,提出一种融合线结构光与特征辅助贴纸的双目视觉抗干扰检测方法,并采用 U-Net 神经网络焊接件区域定位与改进骨架化-灰度重心法相结合的光条中心线亚像素提取策略,实现了在复杂干扰下的高质量条纹图像获取。结果表明,所提方法有效抑制了板材反光与污染干扰,焊接件区域定位准确率稳定超过 99%,实现了接头形貌的高精度三维重建,对焊缝余高和宽度的检测相对误差分别不超过 6.0% 和 4.0%,显著提升了条纹信息的解析精度与鲁棒性。为了探究铝合金激光-熔化极惰性气体保护电弧(metal inert gas, MIG)复合焊接工艺参数与接头形貌质量的关系,以 6 mm 厚 6061 铝合金板材为对象,设计 8 组不同能量配比参数下的激光-MIG 复合焊接实验,并依据 ISO 10042: 2018 国际标准评价接头质量。结果表明,随着能量配比的增加,焊缝余高和宽度逐渐减小并趋于稳定;当激光与 MIG 电弧的能量比为 1.01~1.36 时,接头质量均满足 ISO 10042: 2018 的 B 级要求,接头质量优良。显示了所提方法在复杂环境下接头形貌特征检测的可靠性,为铝合金接头质量的自动化评定提供技术支撑。

关键词: 铝合金焊接接头;形貌特征;双目视觉;线结构光;能量配比

中图分类号: TG441.7; TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Interference-resistant detection of morphological characteristics in aluminum alloy welded joints

Huang Yong¹ Gan Shiming¹ Xing Manxi² Wang Rui¹ Sun Zhenbang³

(1. School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. Beiben Heavy Truck Group Co., Ltd., Baotou 014030, China; 3. School of Materials Science and Engineering,

Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: The morphological characteristics of the weld joint are a core indicator for assessing the quality of aluminum alloy welds. To address issues in the morphological detection of aluminum alloy weld joints, specifically specular reflection and the uneven brightness of light stripes caused by surface contamination after welding, which lead to distortions in extracting the centerline, an anti-interference detection method using binocular vision combined with line-structured light and feature-assisted stickers is proposed. This approach integrates a U-Net neural network for welding zone localization with an improved skeletonization-gray-gravity method for sub-pixel extraction of the light stripe centerline, enabling high-quality stripe image acquisition under complex interference. The results demonstrate that the proposed method effectively suppresses interference from plate reflection and contamination, with a consistent positioning accuracy exceeding 99% for the welding zone. This approach achieves high-precision 3D reconstruction of the joint morphology, with relative errors in the detection of weld reinforcement and width not exceeding 6.0% and 4.0%, respectively, significantly enhancing the analytical accuracy and robustness of the stripe information. To investigate the relationship between process parameters and joint morphology quality in laser-metal inert gas (MIG) hybrid welding of aluminum alloy, experiments were conducted on 6-mm thick 6061 aluminum alloy plates using eight sets of parameters with different energy ratios. The joint quality was evaluated

收稿日期: 2025-08-10 Received Date: 2025-08-10

* 基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金(2024MS05043, 2022ZD03)、内蒙古工业大学科学研究项目博士基金(BS2021033)资助项目

according to the ISO 10042:2018 international standard. The results indicate that as the energy ratio increases, the weld reinforcement and width gradually decrease and stabilize. When the energy ratio between the laser and the MIG arc ranges from 1.01 to 1.36, the joint quality meets the ISO 10042:2018 Level B requirements, indicating excellent joint quality. This confirms the reliability of the proposed method for detecting joint morphological features in complex environments, providing technical support for the automated assessment of aluminum alloy joint quality.

Keywords: aluminum alloy welded joint; morphological characteristics; stereo vision; line-structured light; energy ratio

0 引言

随着制造业、加工业的迅速发展,铝合金材料已经广泛应用于各行各业,其中铝合金焊接接头的形貌特征质量检测对于保证焊接后铝合金焊件整体稳定性、安全性有着至关重要的作用^[1-2]。线结构光技术因其具有结构简单、测量精度高等优势^[3],在工业检测、机器人视觉、自动化制造等领域展现出显著优势。线结构光光条中心线的提取是铝合金焊接接头表面形貌特征检测的关键。但由于铝合金焊接件表面光滑平整,对光照敏感,易发生镜面反射,使得线结构光光条在铝合金焊接件母材区表面易发生反光现象,且焊接后铝合金板材表面局部污染,易导致线结构光在焊接件表面光条亮度不均匀,严重影响光条中心线提取。

在线结构光光条中心线提取算法研究中,赵文培等^[4]提出一种改进 Steger 快速高精度光条纹中心线提取方法。通过对光条纹图像进行图像预处理获得光条纹宽度,并对光条纹区域进行 Canny 边缘检测,结合几何中心法对条纹边缘图进行计算,获得像素初始点;最后对初始点进行一维卷积构建 Hessian 矩阵,在法线上进一步精确提取中心线。实现亚像素级精度光条纹提取。叶涛等^[5]提出一种基于卷积神经网络的鲁棒三维测量方法,有效解决了传统线结构光三维测量方法在复杂环境下受背景噪声干扰及标定耦合性强的问题。肖苏华等^[6]开发了一套基于 3D 视觉的风电塔筒焊缝自动化检测系统,通过递归粗提取改进算法精确定位焊缝特征点,结合点云滤波、连通域分割与自适应精简处理技术,实现了微米级精度的焊缝宽度、错边及直线度等多缺陷高效评判。郭北涛等^[7]改进基于 Steger 算法架构的 V 型焊缝检测框架,提高计算效率,实现结构光条纹特征亚像素级定位精度。Song 等^[8]提出了一种基于自适应阈值分割的亚像素条纹中心提取方法和梯度加权策略,实现了对存在散射现象的金属表面条纹中心线亚像素级提取。Huang 等^[9]针对被测物体表面存在显著起伏和严重反射时,提出了一种改进的基于单边跟踪的结构光中心线提取算法,对于中心线高精度三维重构具有较好鲁棒性。周亚罗等^[10]提出一种基于主成分分析的改进 Steger 算法,通过主成分分析构建梯度向量的协方差矩阵以估计条纹法线方向,并在法线方向上运用二阶泰勒展开式求解条纹中心

的亚像素级精确坐标。

上述方法在线结构光中心线提取算法上进行了重点改进,解决了焊接件反光等干扰因素对中心线提取算法造成的影响,但对于焊接件自身的反光、表面亮暗不均等问题并没有进行改善,而本文设计一种线结构光与特征辅助贴纸相结合的双目抗干扰检测方法,结合 U-Net 神经网络训练焊接件区域快速准确定位模型,融合改进骨架化-灰度重心法,克服线结构光在铝合金焊接件母材区的反光、亮度不均匀现象,实现焊接接头形貌特征的高精度三维重建,为焊接接头质量评定提供支持。主要研究工作如下:

1) 设计 U-Net 神经网络训练流程,解决多边形标注的解析与格式兼容、标注工具差异性问题。在数据增强阶段同步验证图像-尺寸一致性,防止维度失配。通过非对称类别权重有效缓解光条-背景的样本不平衡问题。高效实现了铝合金焊接件整体区域的快速准确定位,避免环境带来的噪声干扰;

2) 对光条中心线提取设计采用融合改进骨架化-灰度重心法。采用自适应高斯滤波增强图像平滑性,结合双尺度 Sobel-Gaussian 混合边缘检测算子(权重比 6:4)。构建垂直线性结构元素进行形态学开运算,辅以矩形闭运算填充孔洞,有效保留细长光条特征的同时抑制散斑噪声。之后进行提取光条形态学骨架,确定中心线拓扑结构,骨架点邻域内进行灰度重心计算,实现亚像素级定位;

3) 在光条点云进行多约束融合的特征匹配及三维重建后,设计双权重高斯模型实现焊缝顶点高精度定位,基于向量投影建立余高精确计算模型,采用众数修正法消除特征辅助贴纸厚度而引入的系统误差,实现焊接接头的高精度测量。

1 实验方案设计

实验流程如图 1 所示,采用分辨率为 $1\,280 \times 800$ pixel 的英特尔 D455 双目深度相机与线结构光、特征辅助贴纸结合的方式,获取焊接件原始图像。构建具有多尺度特征融合机制的 U-Net 神经网络模型,准确定位焊接件区域位置。基于改进形态学骨架化获取光条拓扑结构后,采用改进灰度重心法进行光条中心线亚像素级坐标计算。结合特征匹配算法进一步提高光条中心线点

的三维重建准确性,设计双权重高斯模型实现铝合金焊接件焊接接头的形貌特征高精度检测。

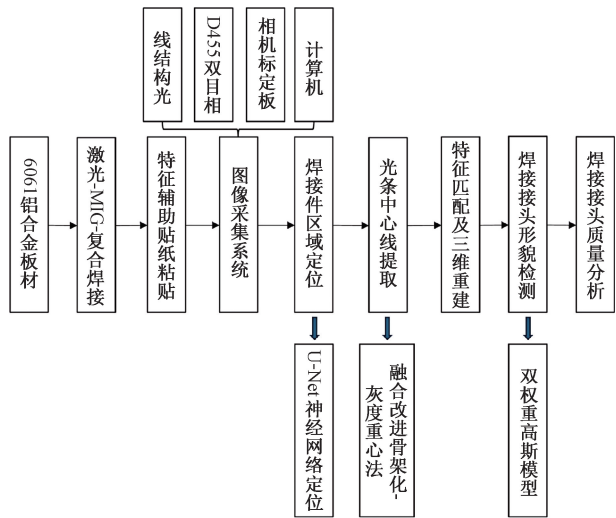


图 1 实验流程

Fig. 1 Experimental flowchart

实验选用型号为 6061 的铝合金平板作为试样,尺寸为 150 mm×100 mm×6 mm。焊接方式采用平板对接焊,焊接工艺为激光-熔化极惰性气体保护电弧 (Metal Inert Gas, MIG) 复合焊接技术^[11-12],设计 8 组焊接实验。通过控制焊接热输入不变 (约 439.21 J),调节能量配比 η (激光焊接功率与 MIG 焊接功率的比值),分析焊后焊缝的形貌特征,以优化焊接工艺。焊接参数设置如表 1 所示,激光-MIG 复合焊接实验如图 2 所示。

表 1 焊接参数

Table 1 Welding parameters					
实验组别	激光功率 P/W	MIG 电流 I/A	电压 U/V	焊速 $v/(m \cdot min^{-1})$	能量配比 η
1	3 600	191	19.7	1	0.96
2	3 700	187	19.6	1	1.01
3	3 800	180	19.4	1	1.09
4	3 900	177	19.3	1	1.14
5	4 000	173	19.2	1	1.20
6	4 100	170	19.1	1	1.26
7	4 200	163	18.9	1	1.36
8	4 300	160	18.8	1	1.43

铝合金光纤激光-MIG 复合焊接实验系统的核心组成部分包括 KUKA 公司的 KR 60HA-3 型工业机器人、IPG 公司的 YLS-10000-S4 型号激光发生器以及福尼斯公司的 TPS-5000 数字焊接电源。焊接时采用激光在前、MIG 电弧在后的焊接顺序,为实现激光与 MIG 电弧两种热源旁轴复合,激光与 MIG 焊枪呈一定的角度,其中

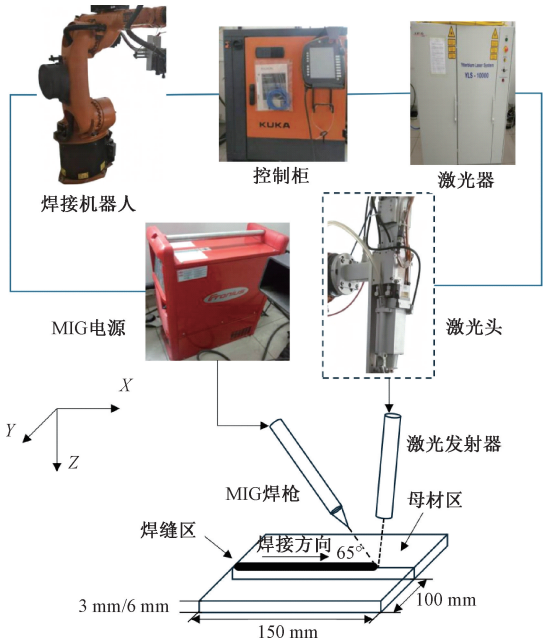


图 2 激光-MIG 复合焊接实验

Fig. 2 Experiment of laser-MIG hybrid welding

MIG 焊枪与工件的夹角为 65°,激光与工件的夹角为 95°。

焊接过程中,铝合金板材表面会受焊接影响而形成局部污染,且母材区因表面光滑、平整,极易发生高反光现象而焊缝区域表面粗糙,反光现象不易发生,因此在铝合金焊接件表面距离焊缝区 10 mm 的母材区进行粘贴特征辅助贴纸。焊缝在焊接起始位置与结束位置处成形不稳定,其形貌特征不具有代表性,故特征辅助贴纸需避开焊接起始位置及结束位置。每个辅助光条按 10 mm 间距进行等间距平行排列,粘贴区域覆盖焊接件母材区表面,两侧各 7 条特征辅助贴纸一一对应,如图 3 所示。8 组焊接件各自的特征辅助贴纸位置通过线结构光打线粘贴,确保每组焊接件的贴纸位置相同。

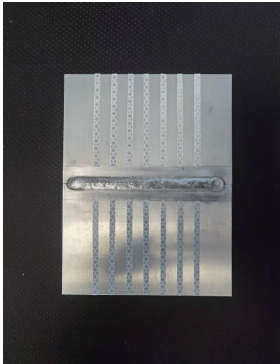


图 3 带有特征辅助贴纸的焊接件

Fig. 3 Welded assembly with reference stickers

2 抗干扰检测算法

2.1 U-Net 神经网络图像分割

传统的分割方法根据实现的原理不同,可以分为基于阈值、边缘检测、区域、图论和聚类法的图像分割算法等,但是由于背景复杂,成像质量较低,目标特征模糊等干扰,始终较难实现目标和背景区域间准确高效的划分^[13-15]。U-Net 是属于卷积神经网络的特定架构,专为图像分割任务设计,由 1 个编码器(下采样)和 1 个解码器(上采样)组成,形成 U 形结构^[16],通过编码器-解码器结构和跳跃连接实现高精度像素级分割。与传统算法和其他神经网络相比,U-Net 在分割任务中具有不可替代的优势。U-Net 神经网络原理图如图 4 所示。

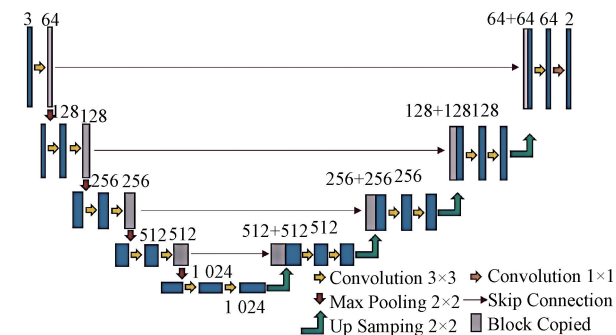


图 4 U-Net 神经网络原理图

Fig. 4 Architecture of U-Net neural network

为了实现焊接件区域像素级分割定位任务,文中设计了 U-Net 神经网络训练流程框架,重点优化数据预处理流程、网络架构设计及训练策略。在数据处理阶段,通过 poly2mask 算法实现多边形标注到像素掩码的自适应转换,支持单/多边形结构解析,解决了标注格式不一致问题;构建了用于焊接件区域分割的数据集,共包含 500 张原始焊接接头图像(由双目相机同步采集,左、右目图像各 250 张)。按照 7:2:1 的比例,将数据集随机划分为训练集(350 张)、验证集(100 张)和测试集(50 张),以确保模型评估的客观性。数据集图像经过预处理,统一缩放至 256×256 pixel,引入包含随机翻转(±20°)、缩放(0.8~1.2 倍)的几何增强策略,通过管道验证机制确保增强后图像与标签尺寸一致性,有效提升数据多样性。

针对图像分割中背景像素数量远大于目标像素数量的类别不平衡问题,在输出层引入像素分类层,通过加权交叉熵损失函数提升对小目标类的关注度,计算公式为:

$$L = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{c=1}^C w_c y_{i,c} \log(p_{i,c}) \quad (1)$$

式中: L 是模型预测的整体误差,函数会对一个批次中的 N 个样本逐个计算,每个样本会遍历所有 C 个类别。最

终得到的 L 值越小,说明模型的预测与真实情况越吻合。

训练开始时,训练准确率与验证准确率均处于相对较低的水平,随着训练的进行(迭代次数增加),两者均呈现出显著的上升趋势。在经历快速提升后,训练准确率趋于平稳,并在后续迭代中稳定在 99% 左右的高水平,验证准确率表现出类似的稳定趋势,最终焊接件区域定位模型训练准确率为 99.53%。经多次训练与验证,焊接件区域定位准确率稳定在 99% 以上。图 5 为焊接件区域分割模型训练集与验证集的结果。

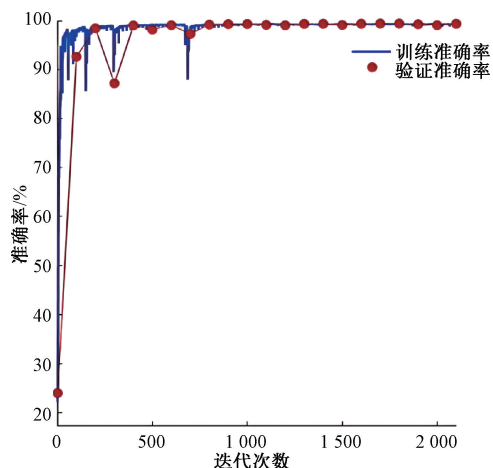


图 5 焊接件分割模型训练-验证结果

Fig. 5 Training and validation results for weldment segmentation model

模型在训练集上达到了接近饱和的准确率,同时在独立验证集上也保持了高度一致的优异性能,训练过程稳定收敛。综合以上特征,表明模型训练中未表现出明显的过拟合问题,在训练数据上学习到的模式具有良好的泛化能力,能够有效地推广到未见过的验证数据上。实验中对采集到的左右相机图像进行焊接件区域 U-Net 神经网络定位,以焊接件如图 6 所示。

图 6 表明,设计的 U-Net 模型在双目视觉系统中展现出良好的区域定位性能。通过原始图像(图 6(a)~(b))与分割区域图(图 6(c)~(d))的对比分析可知,模型精准锁定目标物体的关键位置区域(红色框),且左/右视角定位结果保持高度空间一致性。定位结果验证了 U-Net 神经网络在目标定位任务中的准确性,其像素级定位精度为后续三维重建提供了可靠输入。

2.2 骨架化-灰度重心法中心线提取

骨架化(Skeletonization)结构是图像处理中的一种形态学操作,旨在将物体(如二值图像中的线结构光与特征辅助的光条区域)压缩成其几何中心线(称为“骨架”),同时保留物体的拓扑结构和关键形状特征。基于迭代腐蚀-开运算差集法的骨架化定义如下:

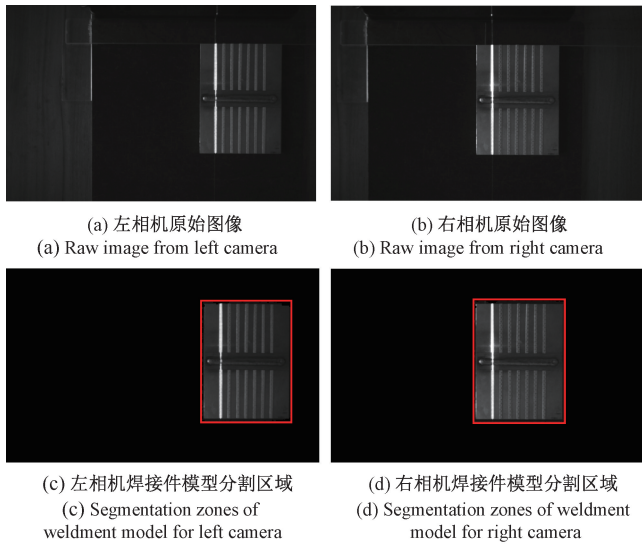


图6 U-Net神经网络定位结果

Fig. 6 Localization results using U-Net network

$$s(A) = \bigcup_{n=0}^N [(A \ominus nB) - ((A \ominus nB) \circ B)] \quad (2)$$

式中: A 是输入的二值图像; B 是结构元素; nB 表示对 B 进行 n 次膨胀; $A \ominus nB$ 表示用膨胀后的结构元素对 A 进行腐蚀操作; 符号 $\circ$ 表示开运算。骨架化算法是一种提取图像信息的方法, 主要原理是提取待研究图像的区域中

轴线, 使用中轴的概念来定义骨架^[17]。对腐蚀后的区域执行开运算, 并计算腐蚀结果与开运算结果的差集, 将所有迭代步骤的差集合并, 最终得到光条区域的完整骨架。

对光条骨架点 (x_i, y_i) 进行 3×3 邻域灰度值进行加权平均, 计算亚像素坐标:

$$x_{sub} = \frac{\sum_{u=-1}^1 \sum_{v=-1}^1 (x_i + u) \times I(x_i + u, y_i + v)}{\sum_{u=-1}^1 \sum_{v=-1}^1 I(x_i + u, y_i + v)} \quad (3)$$

$$y_{sub} = \frac{\sum_{u=-1}^1 \sum_{v=-1}^1 (y_i + v) \times I(x_i + u, y_i + v)}{\sum_{u=-1}^1 \sum_{v=-1}^1 I(x_i + u, y_i + v)} \quad (4)$$

式中: 分子项表征灰度分布的空间加权, 计算 x, y 的加权位置偏移, 分母项为归一化权重。从 x, y 两个方向上进行计算, 光强越高区域对中心位置的贡献越大。通过邻域灰度加权将骨架点的像素级坐标提升至亚像素精度, 消除离散化误差, 对于光照不均、环境噪声具有较好的抗干扰性。

针对图像预处理结果, 采用本文方法与传统灰度重心法对二值化后图像进行中心线提取。双目相机采集的左右图像处理方法、结果一致, 故节选左相机图像处理流程进行对比, 传统方法与本文方法的对比结果如图7所示。

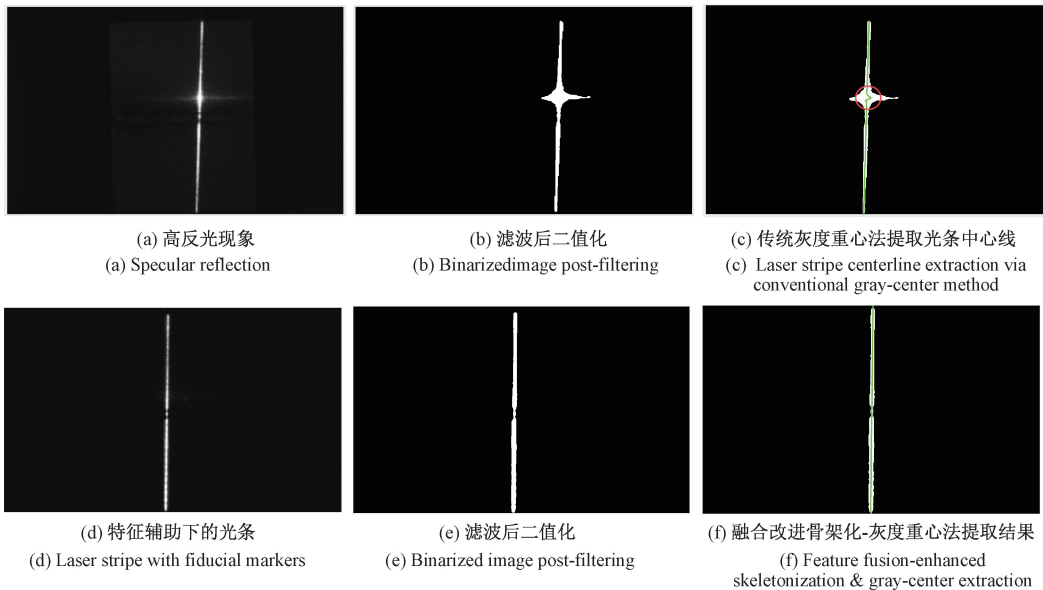


图7 传统方法与文中方法对比结果

Fig. 7 Performance comparison: conventional vs. proposed method

图7表明, 传统线结构光下的铝合金焊接件因母材区表面光滑平整, 易发生反光现象, 且反光区域在中值滤波去噪、二值化后并没有改善。传统灰度重心法因其是按照图像的列(行)方向进行提取, 只能有效提取一定方

向变化内的线结构光中心线。在实际应用中, 由于成像环境和物体表面的不确定性, 形成的线结构光条很难是一条光滑直线^[18]。当焊接件表面发生的反光现象时, 在反光区域提取的光条中心线会发生中心线弯折现象, 如

图7(c)所示,提取的光条中心线并不是实际中心线,在后续三维重建中会引入较大误差,无法对焊接接头实现高精度检测。

由图7(d)~(f)可以看出,焊接件母材区并无反光现象发生,并且光条均匀,滤波及二值化后光条区域轮廓清晰完整。骨架化-灰度重心法结合了骨架化的线条完整性与连通性能力,以及灰度重心法亚像素级的高精度定位和局部噪声抑制能力,有效克服了单一方法的局限性,获得了精度高、清晰度高、抗噪性强的光条中心线提取结果。

2.3 特征匹配及三维重建

根据目标物体预设深度范围($Z_{\min}$, $Z_{\max}$),设置视差约束条件,对提取到的光条中心线点采用归一化互相关(normalized cross-correlation, NCC)计算匹配相似度。NCC特征匹配是通过计算两个图像区域之间的相似度,来实现特征的匹配^[19]。当 $NCC = 1$ 时表示完全匹配, $NCC = -1$ 时表示完全不匹配。设置阈值 $NCC \geq 0.7$ 筛选有效匹配。

$$NCC(x, y) =$$

$$\frac{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [T(i, j) - \bar{T}] [I(x+i, y+j) - \bar{I}_{x,y}]}{\sqrt{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [T(i, j) - \bar{T}]^2 \times \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(x+i, y+j) - \bar{I}_{x,y}]^2}} \quad (5)$$

其中,核心思想是衡量一个大小为 $m \times n$ 的模板图像 T 与目标图像 I 在特定位置 (x, y) 处子窗口的相似程度。通过相机标定参数(焦距 f 、基线距离 T)和场景深度先验信息($Z_{\min}$, $Z_{\max}$),动态计算理论视差范围($d_{\min}$, $d_{\max}$),有效限定匹配搜索空间,相比传统固定视差范围方法大量减少无效候选点,显著提升匹配效率;采用3次样条插值(cubic interpolation),构建亚像素精度匹配窗口,设计归一化互相关系数(NCC)作为相似性度量,引入双向唯一性验证机制,匹配后处理阶段实施双重约束:右图像特征点映射唯一性与左图像特征点反向验证,消除多对一匹配歧义,确保特征点对应关系的严格一一对应,如图8所示。

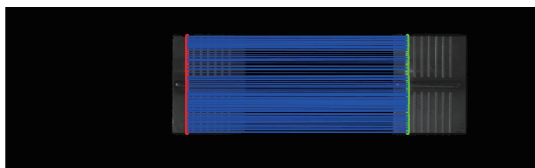


图8 深度约束下的左右图像特征匹配

Fig. 8 Feature matching under depth constraints for left-right stereo image pairs

术已成为焊接领域研究的热点^[20]。利用双目相机标定参数,通过线性三角化计算三维坐标:

$$P = A^{-1} \times b \quad (6)$$

式中: A^{-1} 为投影矩阵; b 为观测向量。采用 Z - Y - X 欧拉角系定义坐标系,通过逆深度映射对齐现实空间。在三维空间中,取相机镜头为零平面, Z 坐标表示深度, Z 值越小代表点离相机越近(即高度越高)。通过上述特征匹配及三维重建方法,可实现母材区及焊缝区域光条中心线点的高精度匹配及三维世界坐标系下的真实重建。对特征匹配后的点云进行三维重建,如图9所示。

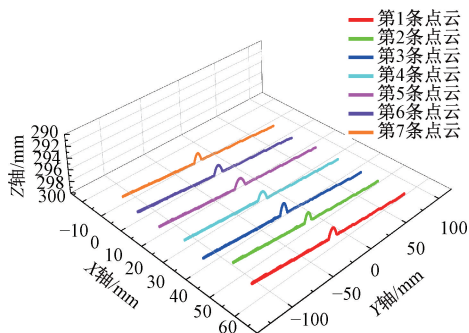


图9 光条点云三维重建

Fig. 9 3D reconstruction of laser stripe point cloud

在焊接质量检测中,焊缝余高和焊缝宽度是评价焊接接头质量的关键几何参数^[21-22]。在焊接接头形貌的光条中心线三维重建中,焊缝顶点的确定对于焊缝余高测量至关重要,因此设计双权重高斯混合模型,综合沿焊缝方向与深度方向进行考量,精确定位焊缝顶点。在焊缝区域(即2个焊趾点 P_1 和 P_2 之间的 Y 坐标范围内)筛选出 Z 值(深度)最小的点(即最高点)。由于点云可能包含噪声,直接选取 Z 最小值点可能不稳定。因此采用加权平均策略优化顶点位置的确定,对 Y 坐标距离焊缝中点 Y_{mid} 和 Z 坐标设置双重权重。焊缝形貌特征示意图如图10所示。

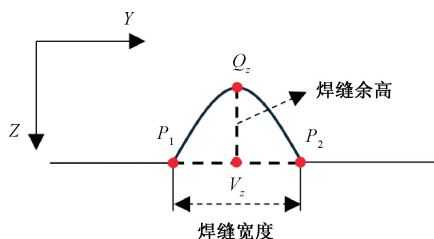


图10 焊缝形貌特征示意图

Fig. 10 Morphological characteristics of weld bead

设置垂直焊缝方向(Y 方向)权重,基于焊缝中点的距离衰减,离焊缝中点越近,比重越大, $\sigma = 5$ mm 控制衰减速度:

由于焊接智能化发展的迫切需求,焊缝三维重建技

$$w_y = \exp\left(-\frac{(Y - Y_{\text{mid}})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

$$Y_{\text{mid}} = \frac{Y_{P1} + Y_{P2}}{2} \quad (8)$$

设置深度方向(Z 方向)权重,采用线性权重强化低 Z 值点:

$$w_z = \max(Z) - Z_i + 1 \quad (9)$$

其中, $\max(Z)$ 是筛选点中最大 Z 值。 Z 值越小(高度越高)的点权重越大。综合权重为:

$$Weight_{\text{total}} = w_y \times w_z \quad (10)$$

焊缝余高定义为焊缝表面最高点与母材表面之间的垂直距离,计算余高需要确定 2 个关键位置:焊缝顶点(最高点) Q_z 和母材表面参考点(垂足点) V_z ,两者高度差即为焊缝余高:

$$h = Q_z - V_z \quad (11)$$

焊缝宽度是指焊缝两侧焊趾点 P_1 与 P_2 在垂直焊缝方向(Y 方向)之间的距离,通常表示为 w :

$$w = |Y_{P2} - Y_{P1}| \quad (12)$$

为消除贴纸厚度影响,提出众数修正法:

$$Z_{\text{实际}} = Z_{\text{众数}} - t \quad (13)$$

对三维重建后焊趾两侧的母材区光条点云进行 Z 坐标值众数计算 $Z_{\text{众数}}$,定制的特征辅助贴纸厚度 t 为 0.4 mm,两者相减即为母材区真实深度。

3 实验结果与分析

3.1 验证实验

为验证文中提出的抗干扰检测方法的精度与可靠性,选用表 1 焊接实验参数中第 5 组的 6061 铝合金焊接件作为检测对象,对其焊缝余高与宽度进行测量及结果验证。

在进行采集线结构光与特征辅助贴纸下的光条图像时,利用固定的直格尺形成基准,以保证在水平移动焊接件时,每个光条相对双目相机的空间位置不变。在线结构光固定的情况下,将焊接件沿直格尺进行水平方向的平移,使得线结构光依次照射在特征辅助光条上,形成无反光现象、亮度均匀的良好光条。实验过程如图 11 所示。

分别使用深度测量仪、游标卡尺进行每个光条焊缝位置处的焊缝余高真实值、焊缝宽度真实值的测量,如图 12 所示。

深度测量仪量程为 0 ~ 12.7 mm,测量精度为 0.01 mm,满足焊缝余高测量要求,测量时先对焊缝光条两侧焊趾点深度进行测量,再根据焊趾点的深度值计算其深度中值点(垂足点),之后测量焊缝光条顶点的深度值,两者之差即为焊缝余高真实值。焊缝宽度测量时使

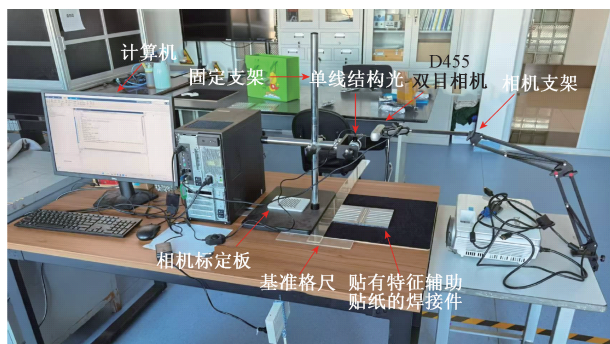
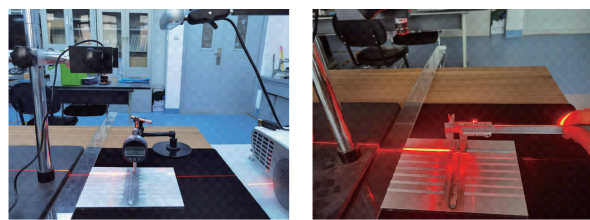


图 11 实验过程图

Fig. 11 Experimental setup diagram



(a) 焊缝余高测量 (b) 焊缝宽度测量
(a) Reinforcement height measurement (b) Bead width measurement

图 12 焊缝余高、宽度真实值测量

Fig. 12 Reference measurement of weld reinforcement & bead width

用分度值为 0.02 mm 的游标卡尺,对每个光条下的焊缝宽度进行高精度测量。本文方法节选第 1 条点云进行测量焊缝余高、焊缝宽度的示意,如图 13 所示。

如图 13 所示,实际测量中焊趾点中间点云分布不理想,未呈现出焊缝区域凸起的轮廓。采用双权重高斯混合模型,对两个焊趾点 P_1 与 P_2 之间的点云数据进行处理,剔除在焊趾点景深坐标 1 mm 范围内的其他点云数据,保留真实焊缝区域的点云高度,之后对其进行加权处理,实现焊缝顶点的精确定位并采用众数修正法消除焊缝两侧母材区贴纸厚度引入的系统误差。

表 1 中的第 5 组焊接件接头特征参数测量结果如表 2 所示。从表 2 可以看出,焊缝区域不同位置处的焊缝余高、焊缝宽度是不相等的,符合实际焊接情况。焊缝余高、宽度整体波动较小,说明焊接过程稳定,引入的环境干扰较少。焊缝余高、焊缝宽度的测量相对误差整体处于较低水平,表明本文方法可以精准反映焊缝余高与焊缝宽度实际情况,实现了焊接接头外观质量的高精度测量。

3.2 不同能量配比下的焊接接头参数测量

为进一步评估文中提出的抗干扰检测算法在不同焊接工艺条件下的稳定性,对 6 mm 厚度的 8 组 6061 铝合金焊接件进行焊缝余高、宽度的焊接接头高精度检测,以

观察不同能量比对焊缝余高、宽度的影响变化,结果如

图 14、15 所示。

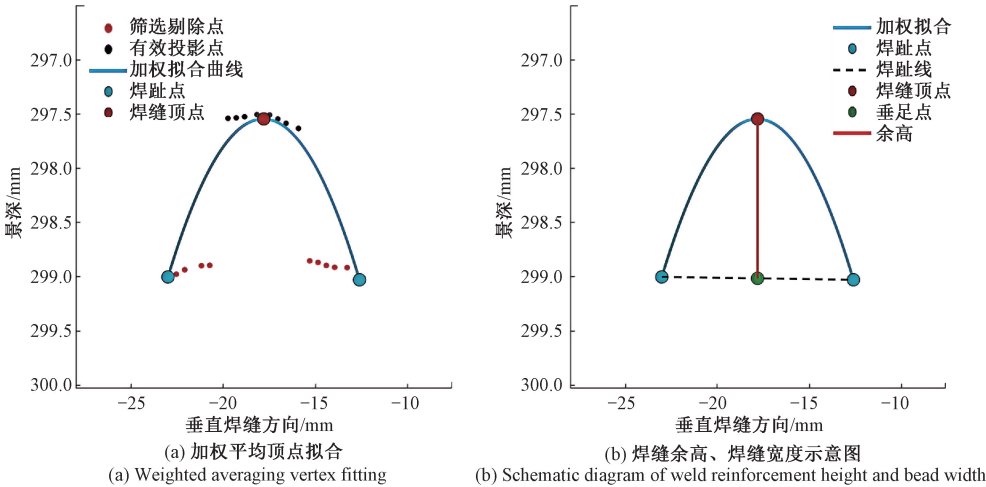


图 13 焊缝余高、焊缝宽度计算
Fig. 13 Calculation of weld reinforcement height and bead width

表 2 焊缝余高、焊缝宽度测量结果

光条点云编号	焊缝余高			焊缝宽度		
	测量值/mm	真实值/mm	相对误差/%	测量值/mm	真实值/mm	相对误差/%
1	1.47	1.56	5.77	10.41	10.24	1.66
2	1.44	1.38	4.35	9.05	9.14	0.99
3	1.38	1.46	5.48	9.49	9.34	1.61
4	1.31	1.37	4.38	9.99	9.80	1.94
5	1.45	1.41	2.84	9.64	9.62	0.21
6	1.45	1.54	5.84	10.51	10.16	3.44
7	1.44	1.52	5.26	9.33	9.58	2.61

根据图 14 与 15 所示,随着能量配比 η 从 0.96 逐步增至 1.43,焊缝余高与焊缝宽度随能量配比 η 的增加而呈现下降并趋于稳定的变化规律。这是由于当 η 值较小时,焊接工艺以 MIG 电弧为主导。电弧热源具有较大的加热斑点和相对较低的能量密度,热量主要通过热传导在工件表面横向扩散,易于形成宽而浅的熔池,焊缝宽度较大。随着 η 值增大,激光功率相对增强。激光具有极高的能量密度,能够快速形成匙孔,使能量得以沿深度方向高效传输。此时,焊接过程逐渐转变为以激光匙孔效应为主导,热量更集中于焊缝中心轴线,横向热扩散受到抑制,导致焊缝形貌向窄而深转变。同一能量配比 η 下,8 组焊接件的焊缝余高与宽度在焊接开始阶段较大,之后减小并趋于稳定。这是由于初始阶段,焊缝熔池从无到有,其内部的液态金属流动需要时间才能建立起稳定的流场。在流场稳定前,熔池的铺展行为可能更为剧烈且不规则,倾向于形成较宽、较浅的熔池,对应较大的焊缝余高和宽度。8 组铝合金焊接件焊缝余高、宽度的相对测量误差如图 16、17 所示。

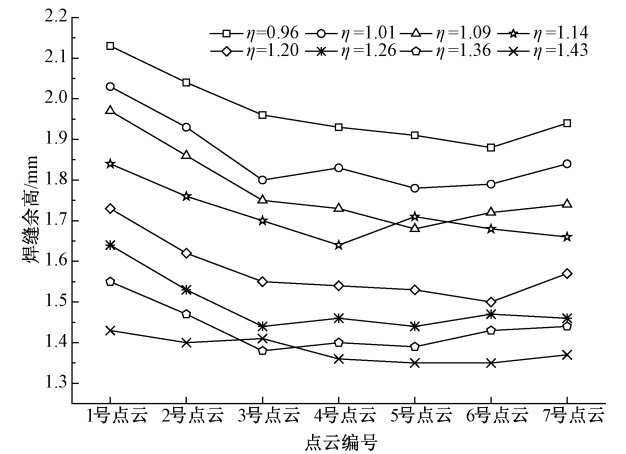


图 14 不同能量配比下的焊缝余高测量结果
Fig. 14 Measurement results of weld reinforcement at different energy ratios

根据图 16 和 17 所示的焊缝余高、宽度相对测量误差,可以观察到在 6 mm 厚度的 8 组 6061 铝合金焊接件

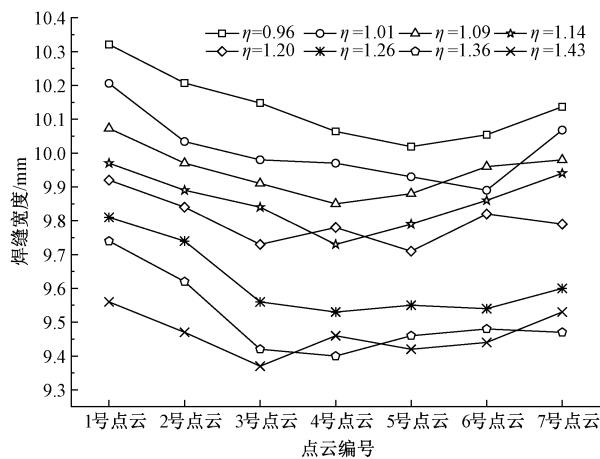


图 15 不同能量配比下的焊缝宽度测量结果
Fig. 15 Measurement results of weld width
at different energy ratios

检测中,焊缝余高的相对测量误差在 1.0%~6.0% 之间波动,焊缝宽度的相对测量误差在 0.2%~4.0% 之间波动,且误差分布较为集中稳定,焊缝宽度的误差范围更小,其测量精度相对更高。这表明本文抗干扰检测算法对焊缝几何参数的测量具有较高的精度和良好的重复性,能够有效支持焊接接头的高精度检测需求。

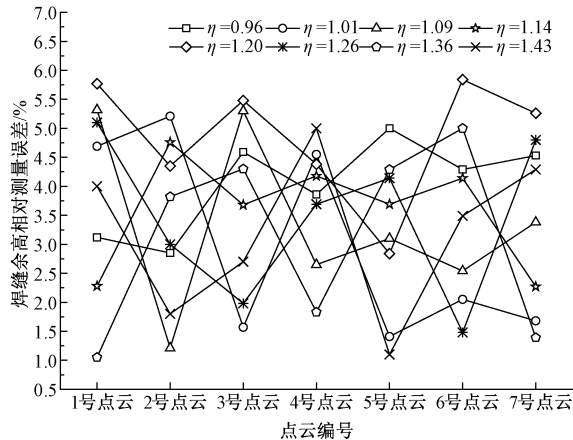


图 16 焊缝余高相对测量误差

Fig. 16 Relative measurement error of weld reinforcement

为了评价铝合金焊接接头的外观质量,使用国际上现行的 ISO 10042: 2018《铝及铝合金的弧焊接头缺陷质量分级》作为焊接接头外观质量检测标准,将焊缝余高、宽度作为焊接质量的评价参数,如表 3 所示,其中 h 为焊缝余高, b 为焊缝宽度。

表 3 焊接接头国际标准

Table 3 International welding standards for joint quality

国际标准	B 级	C 级	D 级
尺寸大小	$h \leq 1.5 \text{ mm} + 0.1b$	$h \leq 1.5 \text{ mm} + 0.15b$	$h \leq 1.5 \text{ mm} + 0.2b$

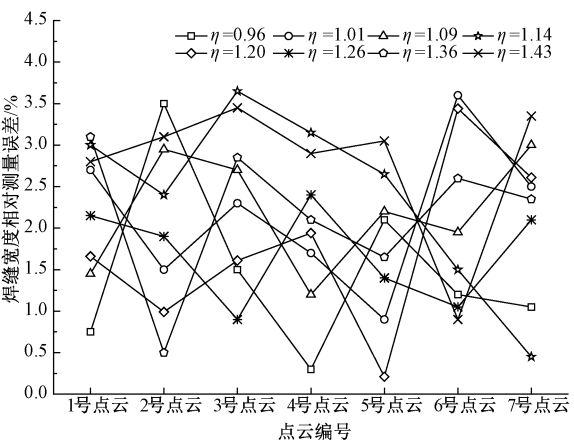


图 17 焊缝宽度相对测量误差

Fig. 17 Relative measurement error of weld width

依据表 3 计算可知,能量配比 η 为 1.01、1.09、1.14、1.20、1.26、1.36 的 6 组焊接接头质量满足 B 级国际标准,能量配比 η 为 0.96、1.43 的焊接接头质量满足 C 级国际标准。表明在激光-MIG 复合焊接工艺中,能量配比 η 的控制对于实现高质量的焊接接头具有重要影响。

以上测量结果表明,能量配比的调整通过改变热输入分布与熔池动力学行为,直接影响焊缝的几何尺寸,合理配置能量参数可实现焊缝余高与宽度的协同控制,从而提升焊缝成形质量。通过分析不同能量配比下焊缝几何特征的测量结果,一方面验证了本文算法在变工艺环境中的鲁棒性与可靠性,另一方面也为建立焊接工艺参数与焊缝成形质量之间的量化关系提供数据支撑,体现了文中算法在实际焊接质量检测与工艺优化中的应用潜力。

4 结 论

依据提出的融合线结构光与特征辅助贴纸的双目视觉抗干扰检测方法,采用 U-Net 神经网络焊接件区域定位与改进骨架化-灰度重心法相结合的光条中心线亚像素提取策略,有效地抑制了铝合金板材反光与污染干扰问题,能获取高质量焊接接头的条纹信息。提出的接头形貌检测方法实现了焊缝形貌的高精度三维重建,且有效、可靠地检测出了铝合金激光-MIG 复合焊接接头的焊缝余高和焊缝宽度。焊缝余高检测结果的相对误差不超过 6.0%,焊缝宽度检测结果的相对误差不超过 4.0%。采用提出的接头形貌检测方法探究了铝合金激光-MIG 复合焊接工艺参数与接头形貌质量的关系。随着激光与 MIG 电弧的能量比增大,焊缝余高与焊缝宽度呈现逐渐减小并趋于稳定的变化规律。当能量配比为 1.01、1.09、1.14、1.20、1.26、1.36 时,焊后接头质量均满足 ISO 10042:2018 的 B 级标准,接头质量优良。

参考文献

- [1] 梁峰, 赵伦, 王森. UWD-Net: 一种轻量级超声波焊接表面缺陷检测网络设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(6): 65-77.
LIANG F, ZHAO L, WANG S. UWD-Net: A lightweight network design for ultrasonic welding surface defect detection[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(6): 65-77.
- [2] 赵云亮, 唐东林, 何媛媛, 等. 基于 CNN 融合 PGW-Attention 的金属表面缺陷识别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(8): 46-55.
ZHAO Y L, TANG D L, HE Y Y, et al. Metal surface defect recognition method based on CNN with PGW-Attention[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(8): 46-55.
- [3] 梅天灿, 肖尧, 毛索颖, 等. 基于线结构光的三维垂线位移测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(4): 189-196.
MEI T C, XIAO Y, MAO S Y, et al. Three dimensional vertical displacement measurement method based on line structured light [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(4): 189-196.
- [4] 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. Fast extraction algorithm of high precision line structured light stripe center [J]. Laser & Infrared, 2024, 54(12): 1920-1927.
- [5] 叶涛, 何威燃, 刘国鹏, 等. 基于卷积神经网络的线结构光高精度三维测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(2): 183-195.
YE T, HE W R, LIU G P, et al. High precision 3D measurement method based on convolutional neural network using linear structured light[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(2): 183-195.
- [6] 肖苏华, 乔明娟, 赖南英, 等. 基于 3D 视觉的风电塔筒焊缝检测系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(2): 122-130.
XIAO S H, QIAO M J, LAI N Y, et al. Design of wind power tower weld detection system based on 3D vision[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(2): 122-130.
- [7] 郭北涛, 刘磊, 张丽秀, 等. 基于改进 Steger 算法的 V 型焊缝识别方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2025(3): 182-186.
GUO B T, LIU L, ZHANG L X, et al. V-type weld identification method based on improved Steger algorithm[J]. Modular Machine Tool and Automatic Processing Technology, 2025(3): 182-186.
- [8] SONG L, HE J, LI Y. Center extraction method for reflected metallic surface fringes based on line structured light. [J]. Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision, 2024, 41(3): 550-559.
- [9] HUANG Y, KANG W, LU Z. Improved structured light centerline extraction algorithm based on unilateral tracing[J]. Photonics, 2024, 11(8): 723-723.
- [10] 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. Extraction algorithm of laser center of metal workpiece surface line based on PCA[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(18): 71-79.
- [11] 吕可, 杨冰, 王栓程, 等. 6005 铝合金激光-MIG 复合焊接接头裂纹扩展行为[J]. 焊接学报, 2025, 46(4): 82-93.
LYU K, YANG B, WANG SH CH, et al. Crack propagation behavior of laser MIG hybrid welded joint of 6005 aluminum alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2025, 46(4): 82-93.
- [12] 杨志斌, 盛立康, 谢廷祺. 高速列车铝合金横梁构件激光-MIG 复合焊与 MIG 焊焊接特性对比研究[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(21): 266-272.
YANG ZH B, SHENG L K, XIE Y Q. Comparative study on welding characteristics of laser MIG hybrid welding and MIG welding for aluminum alloy beam components of high-speed train [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(21): 266-272.
- [13] 徐晓龙, 俞晓春, 何晓佳, 等. 基于改进 U-Net 的街景图像语义分割方法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(9): 117-123.
XU X L, YU X CH, HE X J, et al. Semantic segmentation method of street view image based on improved u-net[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(9): 117-123.
- [14] 干王杰, 翟翊君, 詹礼新, 等. 基于 U-Net 卷积神经网络的焊缝激光条纹提取[J]. 南昌大学学报(工科版), 2024, 46(2): 247-254.
GAN W J, ZHAI Y J, ZHAN L X, et al. Laser stripe extraction of weld based on u-net convolutional neural network [J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2024, 46(2): 247-254.
- [15] 张介滨, 曾上游, 雷松檀. 基于改进 U-net 多尺度注意力的多曝光图像融合算法[J]. 国外电子测量技

- 术, 2022, 41(10): 8-14.
- ZHANG J B, ZENG SH Y, LEI S T. Multi exposure image fusion algorithm based on improved U-net multi-scale attention [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(10): 8-14.
- [16] 邹磊, 冯治国, 梁鹏翔, 等. 基于 U-Net 的启闭机钢丝绳缺陷定位方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2024, 43(9): 155-160.
- ZOU L, FENG ZH G, LIANG P X, et al. Research on defect location method of hoist wire rope based on U-Net [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2024, 43(9): 155-160.
- [17] 袁操, 周德云, 张堃. 一种骨架提取的无人机航迹规划法[J]. 电光与控制, 2012, 19(6): 5-7, 31.
- YUAN C, ZHOU D Y, ZHANG K. A route planning method for UAV Based on skeleton extraction [J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(6): 5-7, 31.
- [18] 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 gray centroid method [J]. Laser Journal, 2024, 45(1): 75-79.
- [19] 张伟. 基于 NCC 特征匹配的类脑视觉识别记忆算法[J]. 电脑编程技巧与维护, 2025(3): 151-153.
- ZHANG W. Brain like visual recognition memory algorithm based on NCC feature matching [J]. Computer Programming Skills & Maintenance, 2025(3): 151-153.
- [20] 朱明生. 基于 3D 结构光视觉的焊缝缺陷检测[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2024.
- ZHU M SH. Weld defect detection based on 3D structured light vision [D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2024.
- [21] 苏郑昌, 李吉娃. 对接焊缝余高对焊接变形和残余应力影响研究[J]. 焊接技术, 2025, 54(5): 31-40.
- SU ZH CH, LI J W. Study on the influence of butt weld reinforcement on welding deformation and residual stress [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2025, 54(5): 31-40.
- [22] 邹刚. 基于线结构光视觉的焊缝表面质量检测方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
- ZOU G. Research on weld surface quality detection method based on line structured light vision [D]. Wuhan: Huazhong University of science and technology, 2024.

作者简介



黄永, 2023 年于内蒙古工业大学获得学士学位, 现在内蒙古工业大学机械工程学院攻读硕士学位, 主要研究方向为视觉测量与图像处理。

E-mail: 2733179248@qq.com

Huang Yong received his B. Sc. degree from Inner Mongolia University of Technology in 2023, Now he is a M. Sc. candidate in College of mechanical engineering, Inner Mongolia University of Technology. His main research interest is visual measurement and image processing.



甘世明 (通信作者), 2020 年于内蒙古工业大学获得博士学位, 现为内蒙古工业大学机械工程学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为焊接应力、焊接声电信号与焊接质量监测研究。

E-mail: 447172542@qq.com

Gan Shiming (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Inner Mongolia University of Technology in 2020, Now he is an associate professor and M. Sc. supervisor in College of mechanical engineering, Inner Mongolia University of Technology. His main research interests include welding stress, acoustic and electrical signals in welding, and welding quality monitoring.