

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.05.004

基于机器视觉的焊缝焊前定位算法研究

陈甦欣, 赵毅, 姚俊杰

(合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:在汽车动力锂离子电池的生产中,中间侧板和端板的焊接是一个重要环节,焊缝质量很大程度影响着整体模组质量。为保证焊接的定位精度,文章提出一种基于机器视觉的焊缝焊前定位算法。首先,对采集到的图像进行灰度化、滤波去噪声、感兴趣区域设置、二值化的预处理;然后,通过改进的 Boudaoud 骨架细化算法提取待焊区域骨架,用灰度投影法结合亚像素双插值法分离无关点,筛选出所需亚像素点集,并利用随机抽样一致性算法拟合 2 条直线;最后,利用长度和角度信息确定焊接位置坐标。实验结果证明,文章算法可以精确提取出待焊区域焊缝中心线骨架,对于焊缝的焊前定位精度高、定位速度快,可以很好地满足实际工业生产需求。

关键词:机器视觉;骨架细化;像素投影;亚像素;直线拟合

中图分类号:TP391.4;TG441.1

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2026)05-0598-06

Research on pre-weld positioning algorithm of weld based on machine vision

CHEN Suxin, ZHAO Yi, YAO Junjie

(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The quality of the weld between the septum and end plates is a crucial factor in the production of automotive traction lithium-ion batteries. This weld significantly impacts the overall module quality. To ensure welding accuracy, this paper proposes a pre-weld positioning algorithm based on machine vision. The captured image undergoes pre-processing, including grayscaling, filtering, denoising, setting the region of interest, and binarization. The improved Boudaoud skeleton refinement algorithm is then used to extract the skeleton of the area to be welded. The irrelevant points are separated using the grayscale projection method combined with the sub-pixel bi-interpolation method, screening out the required sub-pixel point set, and two straight lines are fitted using the random sample consensus algorithm. Finally, the welding position coordinates are determined based on length and angle information. The experiments have demonstrated that the algorithm can accurately extract the weld centerline in the target welding area, ensuring high accuracy and speed for pre-weld positioning, which satisfies the requirements of industrial production.

Key words: machine vision; skeleton refinement; pixel projection; sub-pixel; linear fitting

0 引言

随着新能源汽车行业的发展,动力锂离子电池凭借其高性能占据了新能源汽车大部分市场^[1],在锂离子动力电池模组的生产中,焊缝质量

是关乎模组质量的重要因素,因此焊前定位的准确性尤为关键。

传统的焊接定位方法往往依赖于人工操作或者固定的机械设备,但面对电池模组复杂的结构和高要求的生产速度,传统方法往往难以满足精

收稿日期:2024-03-12;修回日期:2024-04-22

基金项目:安徽省重点研究与开发计划资助项目(202304a05020079)

作者简介:陈甦欣(1970—),男,江西宜春人,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:chensuxin2003@163.com.

准定位的需求。因此,借助机器视觉技术来实现电池模组焊接定位成为了一种具有巨大潜力的解决方案。

机器视觉技术通过使用摄像头、图像处理和人工智能算法,能够实时捕捉和分析电池模组的图像,精准识别焊接位置和形状,从而实现焊接过程的自动化和精准定位。相较于传统方法,以机器视觉技术为基础的电池模组焊接定位具有定位精度高、生产效率高、适应性强等优势,可以有效提升电池模组生产的质量和效率。

目前利用机器视觉进行焊缝焊前定位的研究广受关注,逐渐成为机器视觉研究中一个重要分支。文献[2]提出了一种先粗后精、将识别算法与深度相机测距算法相融合的算法进行焊缝的焊前定位,但该方法只适用于特殊形状;文献[3]提出了一种基于点对点标定法提取定位点进行焊缝焊前定位的方法,但该方法受激光传感器和环境因素影响较大,在环境较为复杂的实际生产中受限较大;文献[4]提出了一种基于深度学习的定位方法,但该方法需要大量的数据集进行训练,所需成本较高,不适用于实际生产活动中。

在实际生产活动中,要求算法具备普适性、受环境因素影响较小、成本低、速度快、精度高。为满足上述要求,本文提出一种基于焊缝中心线提取的定位算法,采用改进的 Boudaoud 细化算法进行中心线提取,然后提取亚像素点集进行直线拟合,最后利用坐标定位焊接起点与终点。该算法具有很好的定位精度和鲁棒性。

1 系统方法

工业生产中现场实物图以及工业 CCD 相机采集的焊缝图像如图 1 所示。

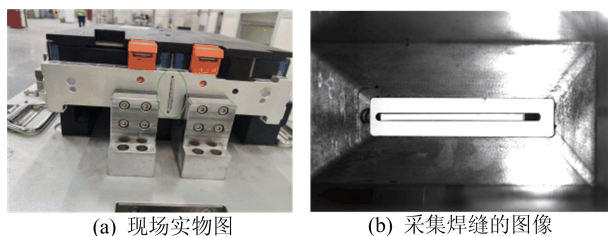


图1 现场实物图和采集的图像

本文基于机器视觉的焊缝焊前定位算法流程描述如下。

1) 图像预处理阶段。为简化后续处理过程,提高检测精度,降低后续算法的复杂度,主要进行

以下预处理步骤:首先,将图像转换为灰度图像;然后,利用双边滤波器进行滤波去除噪声,保留边缘信息的同时平滑图像;最后,设定感兴趣区域,将所提取到的感兴趣区域图像二值化,便于后续骨架提取。

2) 图像分析阶段。利用改进的 Boudaoud 细化算法对待焊区域二值化图像进行骨架细化提取;然后利用灰度投影法分离无关点,筛选点集,利用双插值法获得最终亚像素点集;最后用随机抽样一致性算法拟合出中间侧板边缘和待焊区域中心线 2 条直线。

3) 图像定位阶段。根据拟合出的两直线求出交点坐标,再根据偏移距离和焊接长度计算出焊接起点与终点坐标完成定位。

2 定位方法

2.1 图像预处理

首先为排除色彩的干扰,将相机获取的图像进行灰度化处理。在实际工业生产中图像质量会受到环境和设备等多种因素的影响,而各种噪声也随着图像信号的形成和传输而存在,且这些噪声对于图像特征的准确提取会造成严重干扰,因此,为确保正确提取图像特征并降低噪声影响,需对灰度化图像进行降噪,本文采用双边滤波的方法进行降噪,以有效保留高质量的细节特征。由于待焊区域只是图像中的一部分,为减少无关图像处理时间,提高效率,利用掩膜图像设置感兴趣区域,只处理待焊区域图像。最后利用二值化算法将待焊区域图像进行二值化处理,本文采用的是 Otsu 算法^[5]。Otsu 算法自适应性强,得到的二值化图像较传统固定阈值算法更加快速,所得图像区域分割更加明显。

预处理后的图像如图 2 所示。



图2 预处理结果图

2.2 待焊区域骨架中心线的提取

骨架中心线是待焊区域的关键特征,它可以减少图像中的无关数据,从而提高图像处理的效率,同时能够更准确方便地获取焊缝位置及方向信息。因此需提取待焊区域骨架中心线^[6]。

目前应用较广泛的骨架细化算法包括 ZS 并行细化算法^[7]、Guo-Hall 细化算法^[8]、Boudaoud 细化算法^[9]等,其中 Boudaoud 细化算法细化性

最好。故本文使用 Boudaoud 细化算法提取待焊区域焊缝骨架中心线。

2.2.1 Boudaoud 细化骨架提取算法

Boudaoud 算法是一种二次迭代的细化算法,相较于之前的细化算法,它首次将像素点的坐标纳入迭代计算中,并将像素分为奇、偶像素,比传统 ZS 算法的细化性更好,也避免了 ZS 算法误删像素导致断联以及一些漏删轮廓点等问题。

像素点 P_1 周围邻域如图 3a 所示,在第 1 个子迭代中,若像素点 P_1 满足以下条件,则将此点删除,即

$$\begin{aligned} (i+j) \bmod 2 &= 0, \\ 2 \leq B(P_1) \leq 7, \quad C(P_1) &= 1, \\ P_2 P_4 P_6 &= 0, \quad P_4 P_6 P_8 = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

在第 2 次子迭代中,若 P_1 点满足以下条件,则将此点删除,即

$$\begin{aligned} (i+j) \bmod 2 &\neq 0, \\ 1 \leq B(P_1) \leq 7, \quad C(P_1) &= 1, \\ P_2 P_4 P_8 &= 0, \quad P_2 P_6 P_8 = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $B(P_1)$ 为 P_1 周围 8 个邻域内的前景像素个数; $C(P_1)$ 为 P_1 周围 8 个邻域内相邻像素均为背景像素的前景像素的个数。 $C(P_1)$ 定义如下:

$$C(P_1) = \overline{P_1} \cap (P_3 \cup P_4) + \overline{P_4} \cap (P_5 \cup P_6) + \overline{P_6} \cap (P_7 \cup P_8) + \overline{P_8} \cap (P_9 \cup P_2) \quad (3)$$

Boudaoud 细化算法所提取的待焊区域焊缝骨架及其局部放大细节图如图 3b 所示。从算法运行结果来看,该算法对待焊区域骨架细化速度较快,但从具体的放大细节看,图像出现了骨架冗余的毛刺等现象,对图像骨架确定造成了极大的干扰。因此,在 Boudaoud 算法基础上,本文提出了一种改进算法。

P_9 ($i-1, j-1$)	P_2 ($i-1, j$)	P_3 ($i-1, j+1$)
P_9 ($i, j-1$)	P_1 (i, j)	P_4 ($i, j+1$)
P_7 ($i+1, j-1$)	P_6 ($i+1, j$)	P_5 ($i+1, j+1$)

(a) 8邻域像素示意图



(b) Boudaoud算法提取的骨架及局部细节图

2.2.2 改进的骨架提取算法

首先将骨架单像素化。由于约束条件不足,细化后的图像会出现冗余像素的问题,为方便后续的毛刺去处应将图像单像素化。本文采用增加约束条件来消除冗余像素,目标点周围 8 邻域内像素满足以下任一条件即删除,使得细化后的图像转为单像素骨架(1 表示前景像素,0 表示背景像素):

$$\begin{aligned} (P_1 P_7 = 1) \cup (P_4 = 0), \\ (P_3 P_5 = 1) \cup (P_8 = 0), \\ (P_5 P_7 = 1) \cup (P_2 = 0), \\ (P_3 P_5 = 1) \cup (P_8 = 0) \end{aligned} \quad (4)$$

为消除骨架出现的毛刺,在原有算法基础上增加 8 链码,如图 4a 所示,并设置链码像素阈值筛掉骨架冗余毛刺,因为节点和端点的邻域像素情况不同,所以前景和背景像素的数目不等,对于骨架端点只有 1 个前景像素,而骨架节点至少有 3 个前景像素。

消除毛刺的具体步骤如下:

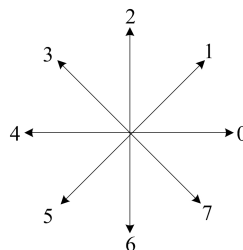
1) 根据骨架端点只有 1 个前景像素、骨架节点有至少 3 个前景像素的准则,对骨架上所有的端点和节点进行迭代和判断,并记录其坐标。

2) 设定毛刺的像素阈值为 m ,用 8 连通链码对骨架进行追踪,记录分支坐标。若从节点追踪到节点,则记为主干,并从终点向节点进行编码;若从节点追踪到端点,则标记为分支,并从起点向终点进行编码。然后对所追踪到标记为分支的像素数进行求和计算,记为 n 。

3) 对追踪到的同一节点的分支链码像素数 n 与毛刺像素数阈值 m 进行比较。若分支像素数 n 小于 m ,则将该分支分类为毛刺,并删除毛刺;若各分支 n 均大于 m ,则计算下一个节点。

4) 遍历所有节点,结束后得到最终的骨架图像。

经改进后的细化算法所提取的待焊区域骨架结果如图 4b 所示,可以看出,改进后的算法提取的骨架中心线比较平滑,无毛刺和分叉,待焊区域焊缝中心线特征可以完整、准确地突出。



(a) 8连通链码示意图

图 3 Boudaoud 算法 8 邻域像素和算法提取的骨架及局部细节图



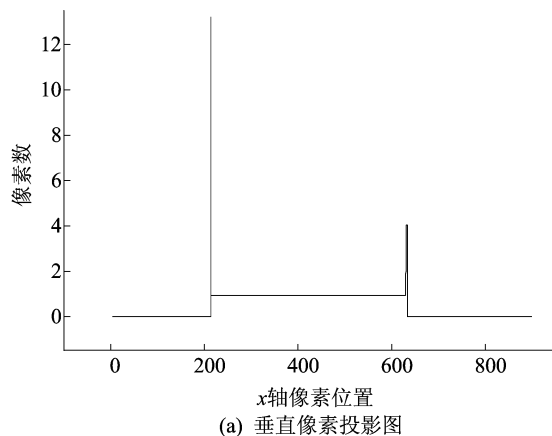
(b) Boudaoud算法改进后提取的骨架及局部细节图

图4 改进后算法8连通链码和算法提取的骨架及局部细节图

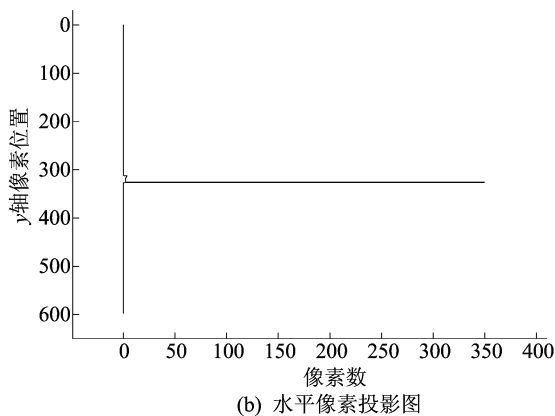
2.3 筛选点集

在实际生产中,由于骨架细化提取中心线后的图像会有因阴影、噪声的影响产生的多余轮廓,为保证后续定位的准确性,需筛选出待焊区域中心线点集以及中间侧板侧边投影轮廓线点集。由于所得到的骨架图像十分近似水平和垂直2个方向,本文采用像素投影^[10],通过统计2个方向上各位置白色像素数来确定所需轮廓线点集,分离无关点。

分别统计骨架中心线图像中每列及每行白色像素的个数,得到像素投影图如图5所示。



(a) 垂直像素投影图



(b) 水平像素投影图

图5 像素投影图

图5a所示为统计骨架中心线图像中每列白色像素个数得到的白色像素垂直像素投影图。从

图5a可以看出,靠近原点的峰值 x 轴像素位置为214,其对应的中间侧板侧边投影轮廓线的 x 轴坐标为214。然后选择该坐标左、右各5个像素单位区域的所有白色像素点作为拟合中间侧板侧边投影轮廓线的点集 M 。

同理,图5b所示为统计骨架中心线图像中每行白色像素个数得到的白色像素水平像素投影图。从图5a可以看出,峰值轴像素位置为325,其对应的待焊区域焊缝中心线 y 轴坐标为325。然后选择该坐标左、右各5个像素单位区域的所有白色像素点作为拟合待焊区域焊缝中心线的点集 N 。

2.4 提取亚像素点

由于焊接是一个长距离进行的过程,即使起始偏差1个像素,焊接完也可能累积为较大的位置偏差,导致焊接不牢固,进而影响模组质量。因此本文采用亚像素级方法^[11]来提高点的提取精度,从而保证焊接质量。

一般的亚像素方法有矩方法、拟合法、插值法等,由所提取到的点集图像可以看出2个方向点集中均为连续点,因此本文选择其中精度更好、速度更快的插值法,同时由于单个维度的线性插值误差较大,选用双线性插值方法^[12]。双线性插值方法的插值多项式计算公式为:

$$f(x) = \sum_{k=0}^n \frac{(x-x_0) \cdots (x-x_{k-1})(x-x_{k+1})(x-x_n)}{(x_k-x_0) \cdots (x_k-x_{k-1})(x_k-x_{k+1})(x_k-x_n)} \times y_k = \sum_{k=0}^n \sum_{i=0, i \neq k}^n \frac{(x-x_i)}{(x_k-x_i)} y_k \quad (5)$$

其中: $f(x)$ 为插值函数; x_k 为水平方向插值点; y_k 为垂直方向插值点。

双线性插值方法是对2个不同方向分别进行线性插值后再进行组合叠加。由此对分离后的点集 M 、 N 中的点每一个像素进行双线性插值,得到新的亚像素点集 M' 、 N' 。

2.5 直线拟合

在获得亚像素点集 M' 、 N' 后,为实现对焊缝的焊接定位,需对提取到的待焊区域焊缝中心线进行直线拟合。常见的直线拟合方法有最小二乘法、霍夫变换、随机抽样一致性算法等。本文采用随机抽样一致性算法^[13]对中间侧板侧边以及待焊区域焊缝中心线进行直线拟合,该方法对于含有大量离群值的数据集仍能够找到较好的拟合模型,并且比传统拟合方法有更好的鲁棒性,较符合实际生产中产生较多无关点的情况。

利用随机抽样一致性算法进行拟合直线的步骤为:从数据集中随机选择一小部分样本作为内点集合,使用这些选定的样本集合拟合模型,并计算模型对于数据集中所有样本的拟合误差;寻找符合模型的样本点,计算内点的数量,即符合拟合模型的样本数量;若内点数量超过预先设定的阈值或达到一定的迭代次数,则认为找到了较好的拟合模型,进入下一步,否则重新随机选择样本并拟合模型;最后使用所有内点重新拟合模型,得到拟合结果。

3 定位原理

由分析可知,若要定位到正确的焊接位置,则需得出侧缝焊接的基准原点、焊接起点、焊缝长度及焊缝直线的倾斜角等信息。焊缝焊前定位原理如图 6 所示。

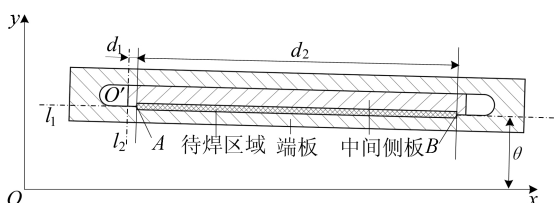


图 6 定位原理图

图 6 中:点 O 为采集到的图像原点; O' 为焊接基准原点; A 、 B 分别为焊接起点和终点; l_1 为拟合得到的焊缝中心线近似直线; l_2 为拟合得到的中间侧板侧边的近似直线; d_1 为焊接起点距焊接基准原点的偏移距离; d_2 为焊接长度; θ 为 l_1 与 x 轴之间的夹角,即焊接方向与 x 轴之间的夹角(实际生产中 θ 一般在 $-0.22^\circ \sim 0.22^\circ$ 之间)。

焊缝焊前定位具体步骤为:首先通过拟合的 2 条直线确定交点坐标,将此位置作为焊接基准原点,直线方向作为焊接方向,根据焊接标准,利用从基准原点沿焊接方向确定的偏移距离来计算焊接的起点坐标;然后,根据起点位置以及焊接生产中所需的焊接长度计算出焊接的终点坐标。两点间的线段即为最终的定位线段。

设直线 l_1 、 l_2 两直线的表达式为:

$$\begin{cases} a_1x + b_1y + c_1 = 0, \\ a_2x + b_2y + c_2 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中: a_1 、 b_1 、 c_1 为拟合后的直线 l_1 的参数; a_2 、 b_2 、 c_2 为拟合后的直线 l_2 的参数。

由于两直线不会出现平行或重合的可能,由式(6)可得两拟合直线交点焊接基准原点 O' 的坐

标和两直线夹角 θ 为:

$$\begin{aligned} r_{O'} &= \left(\frac{b_1c_2 - b_2c_1}{a_1b_2 - a_2b_1}, \frac{a_2c_1 - a_1c_2}{a_1b_2 - a_2b_1} \right), \\ \theta &= \arccos\left(\frac{b_1}{\sqrt{b_1^2 + a_1^2}}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

由平面两点之间直线距离公式可以求得焊接起点 $A(x_a, y_a)$ 和焊接终点 $B(x_b, y_b)$ 坐标分别为:

$$\begin{cases} x_A = \frac{b_1c_2 - b_2c_1}{a_1b_2 - a_2b_1} + \frac{b_1d_1}{\sqrt{b_1^2 + a_1^2}}, \\ y_A = \frac{a_2c_1 - a_1c_2}{a_1b_2 - a_2b_1} + \frac{a_1d_1}{\sqrt{b_1^2 + a_1^2}} \end{cases} \quad (8)$$

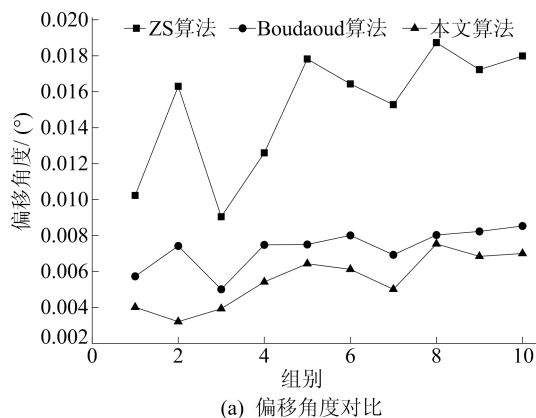
$$\begin{cases} x_B = \frac{b_1c_2 - b_2c_1}{a_1b_2 - a_2b_1} + \frac{b_1(d_1 + d_2)}{\sqrt{b_1^2 + a_1^2}}, \\ y_B = \frac{a_2c_1 - a_1c_2}{a_1b_2 - a_2b_1} + \frac{a_1(d_1 + d_2)}{\sqrt{b_1^2 + a_1^2}} \end{cases} \quad (9)$$

综上可知,利用所需长度和角度信息即可确定焊接位置坐标,实现焊缝焊前精确定位。

4 实验验证与分析

本文算法主要采用 C++ 编程语言并且调用 OpenCV 库实现,代码实现环境为 Ubuntu18.04、Intel Core i7 处理器,软件编译器为 Visual Studio 2022。对 ZS 算法、Boudaoud 算法和本文改进 Boudaoud 算法的性能进行实验对比。实验图片选自某公司实际生产中采集到的图片,为避免偶然性,本文选用 10 组实验图像,采用偏移角度绝对值、时间以及焊接基准原点实际像素坐标与按此算法所求得的像素坐标的偏差这 3 个指标作为算法性能检测指标。实验结果如图 7 所示。

从图 7 的实验结果可以看出:虽然传统 ZS 算法速度较快,但其像素坐标偏差较大,精度低;改进的 Boudaoud 算法由于增加单像素化和去除毛刺步骤导致速度较慢,但也因此改进使得骨架提取较为准确,所得像素坐标偏差较小,精度较高,并且波动较小,比较稳定。



(a) 偏移角度对比

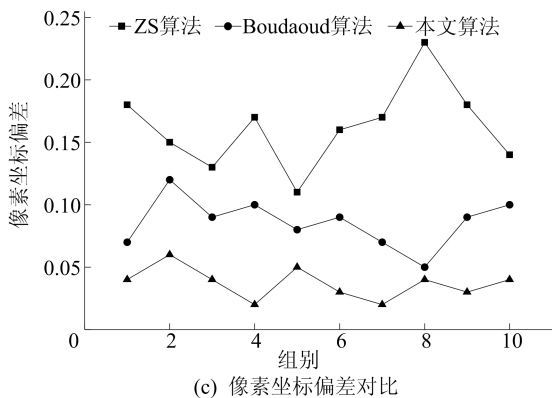
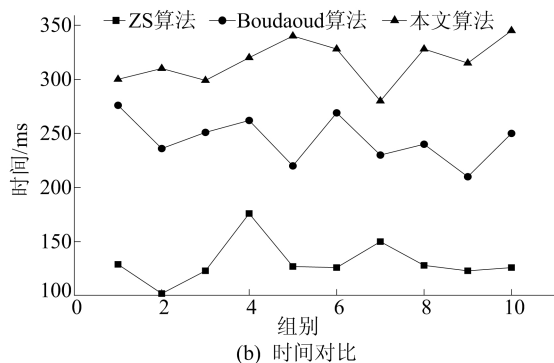


图7 实验结果

从图7可以看出,本文改进的Boudaoud算法综合性能最好,更能满足实际工业生产中的需要。

5 结 论

在实际工业生产中,焊缝的焊前定位需要高精度和高效率。为使焊缝焊前定位有更好的综合性能,本文提出了一种基于机器视觉的焊缝焊前的定位算法。首先,对采集到的图像进行预处理,得到待焊区域二值化图像;然后,利用改进的Boudaoud骨架细化算法对二值化图像进行骨架提取,得到焊缝中心骨架,用像素投影法结合双线性插值法提取出亚像素点集;最后采用随机抽样一致性算法对2个点集进行拟合,并利用长度和

角度信息确定焊接位置坐标,实现精确定位。实验结果表明,本文算法对于焊缝焊前定位具有较好的精度和效率,综合性能良好,满足实际工业生产需求。

[参 考 文 献]

- [1] 全军. 新能源汽车电池工业的发展现状分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(3): 21-22.
- [2] 李茂勇. 基于视觉的焊缝坡口自动识别与定位技术研究[D]. 北京: 北京石油化工学院, 2023.
- [3] 樊豪. 基于多源数据融合的焊缝识别定位及纠偏方法[D]. 西安: 长安大学, 2023.
- [4] 贾文龙. 基于机器视觉的多层多道动态排道规划及焊缝定位[D]. 北京: 北京石油化工学院, 2023.
- [5] 王仕儒. 基于分数阶布谷鸟优化的Otsu图像分割算法研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2023.
- [6] 施霖, 张家玮. 毛笔书写中的笔墨提取与骨架生成[J]. 现代电子技术, 2023, 46(23): 144-148.
- [7] 胡鑫, 欧阳华, 侯卓成, 等. 基于改进ZS细化算法的指针骨架提取[J]. 自动化与仪表, 2021, 36(12): 51-56.
- [8] 任熠. 基于 k 最近邻居的二值图骨架化算法及其应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [9] BEN B L, SOLAIMAN B, TARI A. A modified ZS thinning algorithm by a hybrid approach[J]. The Visual Computer, 2018, 34(5): 689-706.
- [10] HAN S, LEE T B, HEO Y S. Semantic-aware face deblurring with pixel-wise projection discriminator[J]. IEEE Access, 2023, 11: 11587-11600.
- [11] 陈甦欣, 万寿祥, 刘伟. 基于区域生长和融合特征SVM的涂胶缺陷检测[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2023, 46(9): 1171-1177.
- [12] 吕艳辉, 方亮. 基于双线性插值的单目标检测算法[J]. 火力与指挥控制, 2024, 49(1): 73-79.
- [13] 张岩, 孙世宇, 胡永江, 等. 基于特征距离与内点的随机抽样一致性算法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(4): 928-935.

(责任编辑 胡亚敏)