

文章编号:1001-5078(2025)03-0350-09

· 激光应用技术 ·

激光视觉引导的智能焊缝识别方法

王梦莹¹, 陆安江¹, 赵文培¹, 李庞跃², 姚依莹¹, 马青青¹, 彭熙舜³, 张正平¹

(1. 贵州大学 大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710016;

3. 贵州省光电子技术与应用重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 焊缝识别是实现自动化焊接的重要步骤, 针对现有焊缝识别算法中缺少可自动识别多种焊缝的高效识别方法的问题, 本文提出一种针对多种焊缝类型的激光视觉引导的焊缝识别算法。采用激光视觉系统采集得到焊缝点云图像, 通过点云预处理去除无效点云, 改进点云分割及拟合算法快速分割焊缝各特征区域, 最后由分割拟合得到直线模型对焊缝接头进行自主分类, 实现焊缝特征点的直接提取。通过对不同类型焊缝特征点提取测试, 结果表明, 本文算法识别对接、角接、T接、搭接接头特征点误差均小于0.7 mm, 双特征线焊缝识别时间小于0.63 s, 在满足焊接生产需求的同时解决了多类型焊缝识别问题, 提高了焊接智能化程度。

关键词: 机器视觉; 焊缝识别; 特征提取; 直线分割; 点云处理

中图分类号: TP391; TG43 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2025.03.005

Intelligent weld recognition with laser vision guidance

WANG Meng-ying¹, LU An-jiang¹, ZHAO Wen-pei¹, LI Pang-yue², YAO Yi-ying¹,
MA Qing-qing¹, PENG Xi-shun³, ZHANG Zheng-ping¹

(1. School of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710016, China;

3. Guizhou Provincial Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Application, Guiyang 550025, China)

Abstract: Welding seam identification is an important step to realize automatic welding. In view of the lack of automatic identification methods in the existing weld recognition algorithm, an algorithm of weld recognition based on laser vision guidance for various types of welds is proposed. The point cloud image of the weld seam is collected using a laser vision system, and invalid point clouds are removed through point cloud preprocessing. The point cloud segmentation and fitting algorithm is improved to quickly segment the feature areas of the weld seam. And the straight-line models are obtained through segmentation and fitting to autonomously classify the weld seam joints, achieving direct extraction of weld seam feature points. Through testing the extraction of feature points for different types of weld seams, the results show that the algorithm in this paper has an error of less than 0.7 mm in identifying feature points for butt joints, corner joints, T joints, and lap joint, and the identification time of the double characteristic line weld is less than 0.63 s, which not only meets the demand of welding production, but also solves the problem of multi-type welding seam identification and improves the degree of welding intelligence.

Keywords: machine vision; weld recognition; feature extraction; straight line segmentation; point cloud processing

基金项目: 贵州省自然科学基金项目 (No. 黔科合基础-ZK[2023]一般055); 贵州省科技支撑计划项目 (No. 黔科合支撑[2023]一般465) 资助。

作者简介: 王梦莹 (2001 -), 女, 硕士研究生, 研究方向为计算机视觉与图像处理。E-mail: wmy_0320@163.com

通讯作者: 陆安江 (1978 -), 男, 博士, 教授, 研究方向为三维测量, 计算机视觉, 嵌入式系统等。E-mail: 1621806451@qq.com

收稿日期: 2024-07-01

1 引言

随着工业 4.0 和智能制造的快速发展,对生产制造过程的自动化需求日益增强。焊接作为工业生产制造中最为重要的技术之一,对其自动化及精确度要求也越来越高^[1-2]。近年来,机器视觉的发展给焊接领域带来新的冲击,基于机器视觉的自主焊接机器人大大提高了焊接自动化程度,有效减少了工人在环境恶劣的生产环境中的劳作时间。激光视觉作为一种无接触、主动式视觉检测技术,由于其灵活性、实时性较高,在大多数工业焊接领域,成为了自主机器人焊接视觉系统的首选^[3-5]。

自主焊缝识别技术是实现自动化焊接的基础^[6],由于实际工作环境的多变性,对于焊缝识别算法的研究必不可少。目前,基于激光视觉的自主焊缝识别技术,国内外学者进行了大量研究,通常采用图像处理算法或深度学习方法提取与分析激光线条的几何特征提取焊点坐标^[7-8]。Li 等^[9]利用最小二乘法拟合提取中心点,提出字符串方法定性描述焊缝轮廓区域,区分焊缝类型,提取 V 型坡口焊接平均误差在 X 轴方向为 1.098 mm, Y 轴方向为 0.676 mm;王树强等^[10]针对相贯线焊缝特征点,提出结合顶帽变换、概率 Hough 变换等算法进行提取的方法,精度达到 0.26 mm,但处理时间较长;成佳明等^[11]基于焊缝图像灰度特征提出比较相邻像素灰度值的方法提取激光条纹图像及特征点坐标,实验误差小于 0.7 mm,但只适用于带有间隙的焊缝图像;吕学勤等^[12]通过优化支持向量机,识别不同类型焊缝,识别准确率达 99.63%,运行时间需 4.13 s。

以上学者的识别结果存在精度不足、速度过慢、适用范围较窄等缺点,且因其皆是针对焊缝二维图像处理获取特征点坐标,无法检测到小焊缝坡口区域的特征,从而影响焊接质量。已有部分学者提出基于点云分析识别焊缝可以解决这个问题,李茂勇^[13]基于激光点云提取 V 型焊缝与角接焊缝特征点,郑伟斌^[14]基于多重局部特征匹配的焊缝点云配准算法分析大直径相贯线焊缝特征,但都需要提前设定焊缝形状以提取特征点。

针对以上问题,本文提出一种基于焊缝点云图像的自动识别算法,包括对焊缝点云图像的预处理、点云分割以及焊缝特征点提取三个部分。通过改进

点云分割拟合算法,可以完整分割焊缝不同区域特征直线,无需预设焊缝类型即可自动提取焊缝特征点,提取精度及速度符合焊接生产需求,为自动化实时焊接提供了强有力的技术支持。

2 原理与方法

针对焊缝点云图像进行识别的过程如图 1 所示。主要包括:点云预处理、点云分割、焊缝特征点提前三各主要步骤。

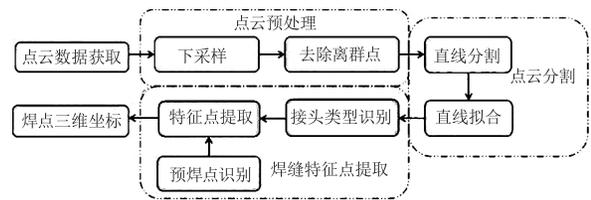


图 1 焊缝识别算法流程图

Fig. 1 Flow chart of the weld identification algorithm

2.1 点云预处理

2.1.1 点云下采样

相机采集初始点云密度较大且分布散乱,致使在后期处理点云数据时需要耗费大量时间,通常需要对点云进行下采样以简化点云数量,达到减少处理时间、平滑点云数据的目的。最远点采样(Farthest Point Sampling, FPS)可规定采样点云数目,保证点云覆盖率,是点云分割领域常用的采样方法^[15]。

随机选取点云中一点作为初始点;计算剩余点云到达已采样点的距离,选取距离和最远点记为下一个采样点;依次重复上述操作,直至采样点云数量达到要求点云数量。算法实现过程如图 2 所示。

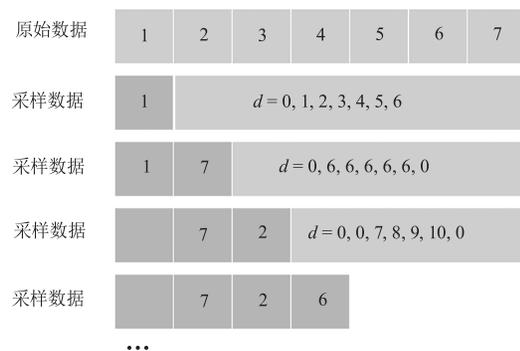


图 2 FPS 算法示意图

Fig. 2 Schematic representation of the FPS algorithm

由于 FPS 算法自身特点,在进行采样时可以最大程度保持点云特征,本文采用 FPS 算法将原始点云由 1920 点采样到 800 点,极大程度降低后续点云

分割迭代的复杂度。

2.1.2 离群点去除

受到相机精度、被测工件材料及工作环境等的影响,在采集数据的过程中会存在随机分布的离群点,从而导致后续点云分割分类及特征点的提取不准确等问题,本文选择统计滤波去除离群点。

统计滤波根据离群点在空间分布较为稀疏这一特点,将点云数据中密度较小部分点云视为离群点,该部分点云所携带特征信息量可忽略不计^[16]。具体方法原理如下:

遍历计算每个点 p_i 到其 k 个邻域点 p_j 的平均距离 d_i , 计算所有平均距离的平均值 μ 及标准差 σ , 计算公式如式:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (1)$$

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

设定标准差系数 s , 则距离阈值如下式:

$$d_{th} = \mu \pm \sigma \cdot s \quad (3)$$

若采样点与其近邻点的平均距离处于距离阈值范围之内,则判断采样点处的点云与整体点云密度相似,保留该采样点;反之,则将其视为离群点去除。通过统计滤波得到的点云数据如图 3 所示,该处理步骤可有效去除离群点,保证后续点云处理顺利进行。



图 3 滤波结果对比

Fig. 3 Comparison of filtering results

2.2 点云分割

2.2.1 直线点云分割

根据激光视觉点云成像无明显曲率、法向量等特点,此处选取鲁棒性较强的随机抽样一致性算法 (RANdom SAMple Consensus, RANSAC) 对焊缝点云数据进行直线分割,为后续类型识别及特征提取做准备。传统的 RANSAC 算法通过不断地迭代选取最优的数据模型^[17],在针对不同条件循环分割多条点云数据时容易出现分割不完全或过度分割现象。针对传统 RANSAC 算法对点云数据分割处理过程中的弊端,本文在该算法上进行相应的改进,具体描

述如下:

(1) 随机在点云数据中选取两点建立空间直线模型,计算其余各点到该直线的距离 d_{st} ,将小于距离阈值 Th 的点归为内点;

(2) 迭代 N 次过程(1),提取内点数量最多的一组数据,为一个初始分割模型;

(3) 设置一个小于待测工件间宽度的阈值 ε ,检查过程(2)提取到的模型内相邻两点间的距离 l_i ,取距离中的最大值 l_{max} ,当最大距离大于设定阈值 l_i 时,对大于阈值 l_{max} 的左右部分进行分割,取分割后数据量最大的部分为一个分割模型;

(4) 提取分割模型的最大索引点及最小索引点的坐标,在原始点云中去除该最大及最小索引点中间部分的所有点云,减少后续迭代数据,提高处理速度与分割准确率;

(5) 将剩余点云重复(1)~(4)过程,直到最终剩余点云数量小于设定的最小分割点云数量,得到所有的直线分割模型。具体分割流程如图 4 所示。

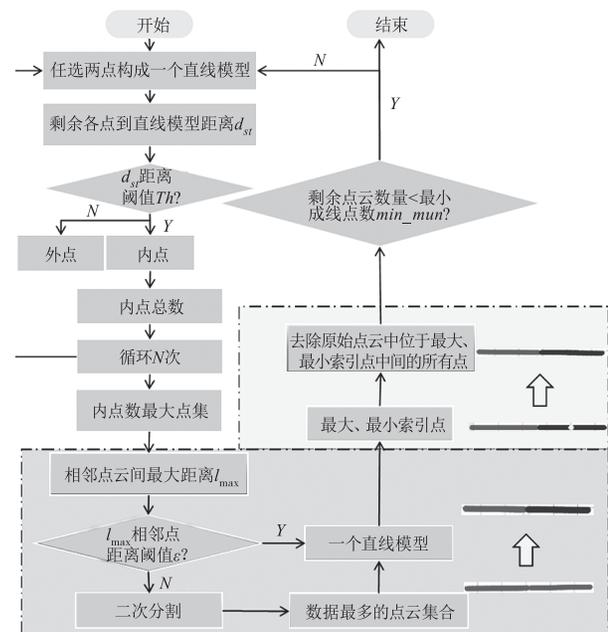
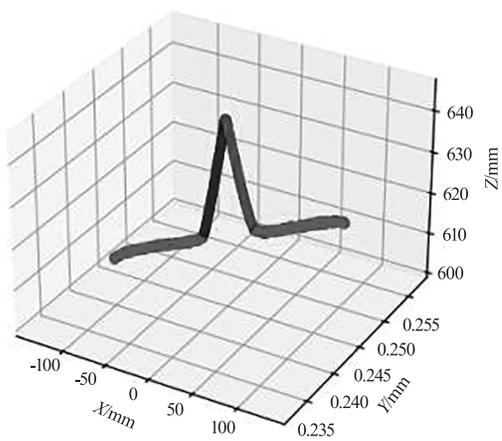


图 4 改进 RANSAC 算法流程图

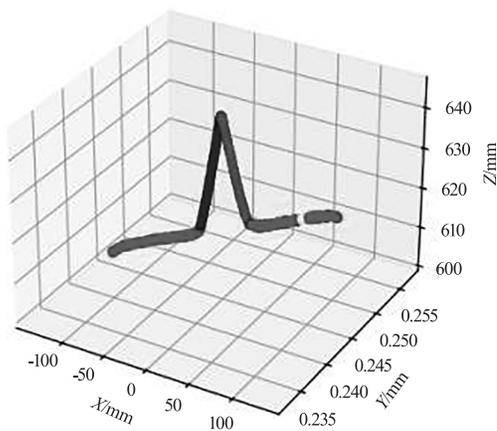
Fig. 4 Flowchart of the improved RANSAC algorithm

由上述 RANSAC 算法流程图可知,改进后的分割方法在分割近似于同一条直线的点云数据时,可根据其位置关系对其进行二次分割,并滤除部分偏离直线点云对分割结果的影响,避免欠分割及过分割现象,达到完整分割焊缝点云各部分的目的,得到符合要求的直线模型。如图 5 所示为 RANSAC 算法对 V 型坡口对接接头进行分割结果图,使用改进

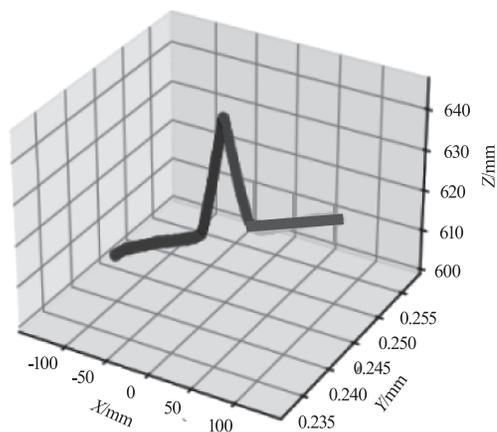
后的分割算法可以在未知焊缝具体类型情况下,完整分割出不同区域特征直线,进而实现多种类型焊缝的特征提取。



(a) 传统算法欠分割结果



(b) 传统算法过分割结果



(c) 改进算法分割结果

图5 RANSAC 算法分割结果

Fig.5 Results of RANSAC segmentation

2.2.2 直线点云拟合

需要提取上述点云分割后焊缝各部分模型参数,以往大多选取最小二乘法进行拟合^[18]。但最小二乘法在计算过程中易受噪声点影响,导致拟合直

线偏离实际模型,影响焊缝特征点的提取。

已知两点确定一条直线,且点云密度相对较大。针对分割好的直线点云数据,本文选取每个分割模型的首尾端点确立直线即可大致表示这一部分点云的整体走向。分别由最小二乘法与本文提出端点法拟合5组点云数据,计算每次拟合交点误差,5组实验的X、Y、Z轴误差平均值与拟合算法平均用时如表1所示。

表1 拟合算法性能对比

Tab.1 Performance comparison of the fitting algorithm

拟合方法	X轴误差 X error/mm	Y轴误差 Y error/mm	Z轴误差 Z error/mm	处理时长 T/s
最小二乘法	1.139	0.466	0.555	5.040×10^{-3}
端点法	0.390	0.497	0.209	2.025×10^{-4}

对表中数据进行分析,可知由本文提出的端点法进行特征直线拟合结果较为准确,且拟合用时较之最小二乘法提高了一个数量级。该算法简单,可在提高拟合精度的同时提高处理速度,更加符合焊缝识别的根本要求。

2.3 焊缝特征点提取

焊缝接头是指两个工件之间焊接形成的接合部分,激光照射在不同类型接头时会形成不同特征的结构光条纹,不同特征的结构光条纹对应不同的焊接特征点^[19]。在正式点焊前通常会预焊几个合适的点固定焊件位置,如图6所示,预焊点的存在会破坏原有焊缝结构,故在提取焊点的同时引入预焊点部分的识别,可根据实际焊接环境对预焊部分做相应处理,节省一部分资源浪费。

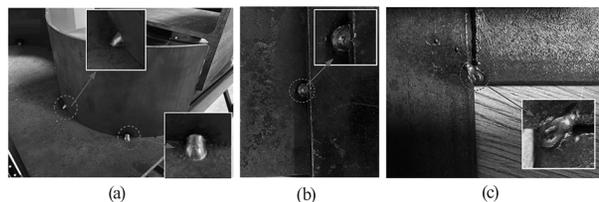


图6 预焊点图示

Fig.6 Pre-welding points diagram

常规接头特征主要分为带角度的角接接头、T接接头、V型坡口对接接头,有明显端面差的搭接接头,以及有间隙的I型坡口对接接头,可根据接头特征提取不同类型焊缝特征点。将上述提取的直线模型按照X轴坐标的大小,从左至右存储到数组G中,在数组G中取出第一个模型与最后一个模型代

表的端面计算其夹角关系。

2.3.1 点线距法

当端面夹角接近垂直关系时,判断接头为 T 接头;当两端端面形成夹角在 $30^\circ \sim 135^\circ$ 之间时,判断接头为角接头;当端面接近平行且端面间存在角度坡口时,判断接头为 V 型坡口对接接头。

由于激光视觉系统采集点云图像近似为同一平面内,以二维图像特征近似焊缝点云图像特征,焊缝特征点如图 7 所示,针对上述接头,均可采用点线距法计算焊缝特征点。

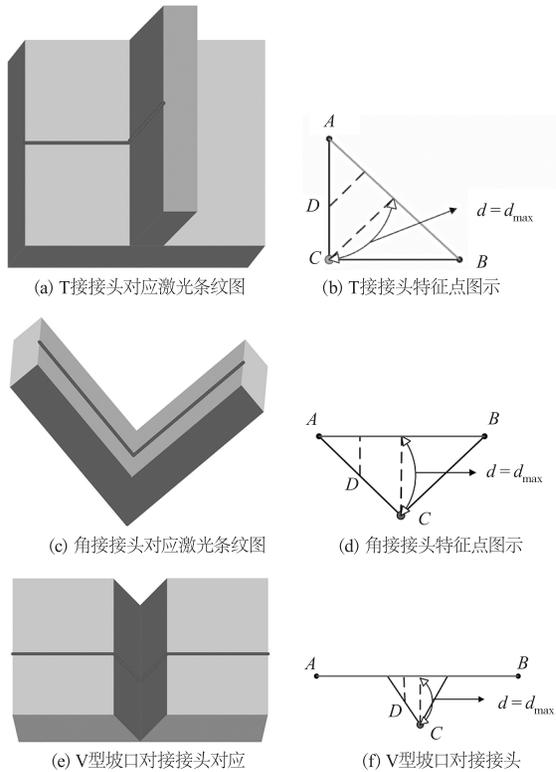


图 7 接头图示

Fig. 7 Diagram of joints

由已知焊缝图像可提取两端端点 $A(X_0, Y_0, Z_0)$ 、 $B(X_1, Y_1, Z_1)$ 连线构成一个空间直线模型,计算其余各点到该直线的距离 d ,距离最大点,记为一个拐点。直线外一点记为 $C(X_2, Y_2, Z_2)$,计算公式如下:

$$\begin{aligned}
 d &= \sqrt{\frac{(|X_0 - X_2| \times |X_1 - X_0|)^2}{|X_1 - X_0|^2}} \\
 &= \frac{|(X_0 - X_2) \times (X_1 - X_0)|}{|X_1 - X_0|} \\
 &= \frac{|(X_2 - X_0) \times (X_2 - X_1)|}{|X_1 - X_0|} \quad (4)
 \end{aligned}$$

在采集到预焊点与非预焊点区域时,点云图像

特征有明显不同。如图 8 所示,针对无预焊点的情况,端点拟合直线求交法与点线距法所求焊缝特征点近似位于同一位置;而在预焊点区域,端点拟合直线求交法与点线距法求得特征点位置有明显不同。可通过计算两种方法求得特征点之间的欧氏距离来判断是否存在预焊点,即通过点线距法计算得到特征点位置 C ,再由直线拟合方式求得交点位置 C' ,当两点坐标的欧氏距离相差较大时,判断该处存在预焊点,做出标注,如公式(5)所示;若无预焊点,可直接提取点线距法计算得到的特征点坐标。

$$\begin{cases}
 p = \sqrt{(X_C - X_{C'})^2 + (Y_C - Y_{C'})^2 + (Z_C - Z_{C'})^2} \\
 < p_{limit} \cdot N \\
 \geq p_{limit} \cdot Y
 \end{cases} \quad (5)$$

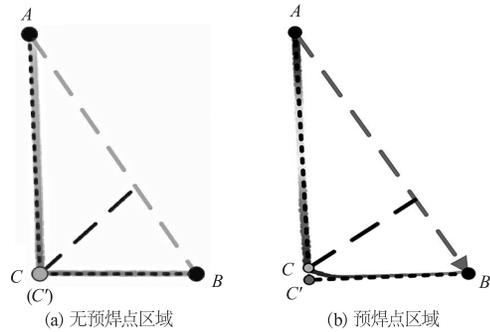


图 8 焊缝点云图像

Fig. 8 Weld point cloud image

2.3.2 插值计算法

当端面接近平行且具有明显高度差时,判断接头为搭接接头。对于搭接接头,焊缝特征点位于上方工件与下方工件重叠边缘处,如图 9 所示,可在提取焊点前判断是否存在预焊点。

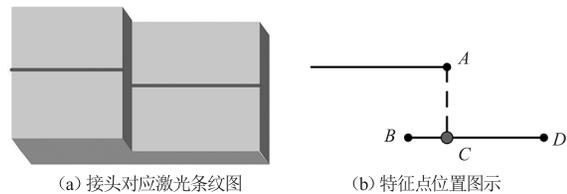


图 9 搭接接头图示

Fig. 9 Diagram of lap joint

其点云图像分析如图 10 所示,可明显看出,对于无预焊点区域的焊缝图像直线点云部分在 X 轴方向上连续,对于预焊点处焊缝图像直线点云部分在 X 轴方向存在明显断点。故通过前述点云分割得到的端点坐标计算已分割直线点云端点间的 X 轴方向是否存在明显间断,如公式(6)计算,即可判断是否存在预焊点。

$$P = |X_A - X_B| \begin{cases} < P_{limit}, N \\ \geq P_{limit}, Y \end{cases} \quad (6)$$



图 10 焊缝点云图像

Fig. 10 Weld point cloud image

对于无预焊点焊缝区域,在计算焊缝特征点时,由于采集点云数据为有序,可通过上方边缘点 A 在 X 轴方向坐标映射到底部工件 BD 上的线性插值点 C 获得。

由前述点云分割已知端点 A、B、D 的空间坐标,此处记为 (X_A, Y_A, Z_A) 、 (X_B, Y_B, Z_B) 、 (X_D, Y_D, Z_D) ,故可由插值计算公式计算得:

$$\begin{cases} X_C = X_A \\ Y_C = Y_B + (Y_D - Y_B) \times \frac{X_C - X_B}{X_D - X_B} \\ Z_C = Z_B + (Z_D - Z_B) \times \frac{X_C - X_B}{X_D - X_B} \end{cases} \quad (7)$$

即得到焊缝特征点 $C(X_C, Y_C, Z_C)$ 。

2.3.3 中点法

当端面接近平行且无其他明显特征信息时,判断接头为 I 型坡口对接接头。对于 I 型坡口对接接头,焊缝特征点位于两端面边缘点的中点处,如图 11 所示,亦可在提取特征点前判断是否存在预焊点。

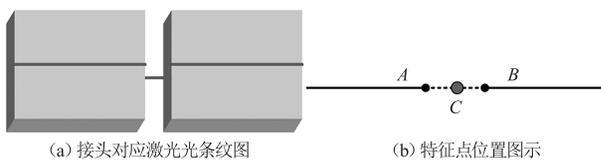


图 11 I 型坡口对接接头图示

Fig. 11 Diagram of type I groove butt joint

点云图像如图 12 所示,与搭接接头有无预焊点特征相反,直线点云有明显断点时,判断不存在预焊点;当直线点云无明显断点时,判断该处存在预焊点。当判断为 I 型坡口对接接头后,可直接根据已分割直线点云数量来判断是否存在预焊点,对于存在预焊点区域的焊缝点云图像,只能分割出一条直线点云;对于无预焊点区域焊缝点云图像,通常可以分割出多于一条的直线点云。

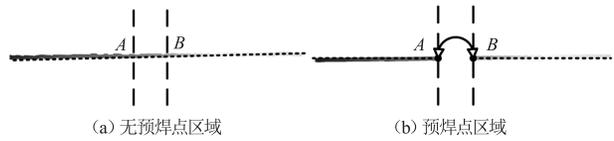


图 12 焊缝点云图像

Fig. 12 Weld point cloud image

若判断为无预焊点区域,可直接由边缘点坐标计算中点得到。由点云分割可提取到端点 $A(X_A, Y_A, Z_A)$ 、 $B(X_B, Y_B, Z_B)$ 的空间坐标, C 点坐标取 A、B 中点即可,计算公式如下:

$$\begin{cases} X_C = \frac{X_B - X_A}{2} \\ Y_C = \frac{Y_B - Y_A}{2} \\ Z_C = \frac{Z_B - Z_A}{2} \end{cases} \quad (8)$$

即得到焊缝特征点 $C(X_C, Y_C, Z_C)$ 。

3 实验与讨论

为了验证算法的有效性,搭建如图所示实验平台,包括计算机、机械臂以及视觉传感器三部分。计算机采用 Windows11 操作系统,图像采集使用微视传感相机自带 SDK,点云图像处理由 Python3.7 联合 Open3D 库开发;机械臂选用 FANUC-M10iD/12 六轴机器人;视觉传感器安装在机械臂前端,选用微视传感公司 PSN0600GA1 激光视觉传感器,由 PGL-L-660-100mW 一字线激光器与 MV-GE232GM 工业相机共同组成。

实验平台如图 13 所示,首先移动机器人,记录标记焊点在机器人基坐标系下实际坐标;再移动机器人,使激光线条与焊缝标记位置重合,采集点云图像,同时记录工业机器人焊枪末端位姿,对采集图像进行处理计算得到焊点坐标。

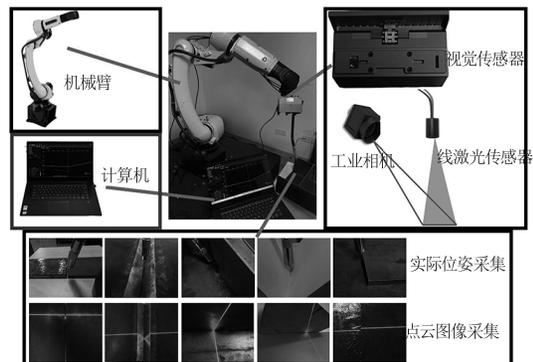
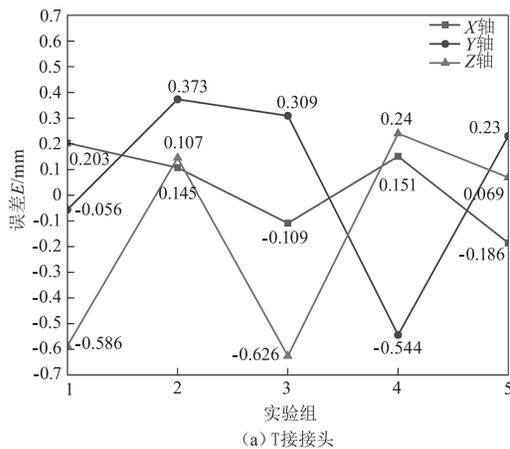


图 13 实验平台及流程图示

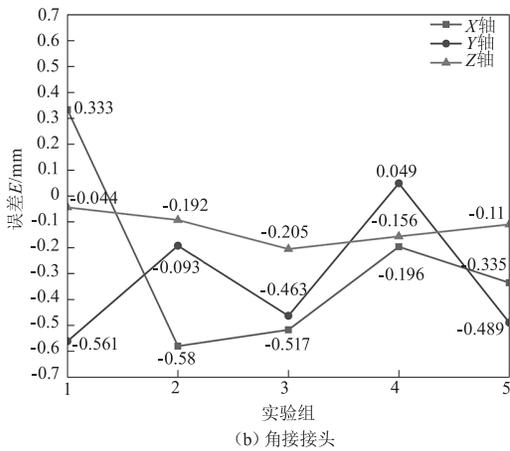
Fig. 13 Experimental platform and flow diagram

分别采集五组 T 型接头、角接头、V 型坡口对

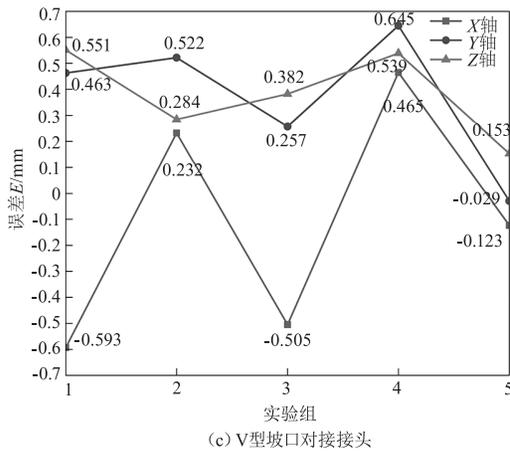
对接头图像,验证特征点提取位置坐标准确性,如图 14 所示。由实验结果可以看出,点线距法求得焊点 X 、 Y 、 Z 轴坐标系误差均在 0.7 mm 内,可以满足焊接精度要求。对于 T 对接头的提取结果优于角接头与 V 型坡口对接接头,造成此种现象的主要原因是由于实验过程中,构成角接头与 V 型坡口对接接头的两工件无法完全匹配达到理想效果,致使采集图像过程中有部分激光透过工件间缝隙照射到工作台表面,与真实寻位位姿存在小范围内偏差。



(a) T 接头



(b) 角接头



(c) V 型坡口对接接头

图 14 实验误差分析

Fig. 14 Experimental error analysis

采集五组搭接接头图像,验证特征点坐标准确度,如图 15 所示。由实验结果可以看出,插值法计算特征点坐标在 X 轴、 Y 轴、 Z 轴方向误差在 0.6 mm 内,造成误差的主要原因是实验过程中搭接接头上方工件遮挡下方工件,采集图像过程中无法与标记特征点完全匹配,造成识别结果存在细微误差,但不影响常规焊接,在实际焊接时也可通过多次调整拍摄位姿避免遮挡等方向改进对搭接接头特征点的识别效果。

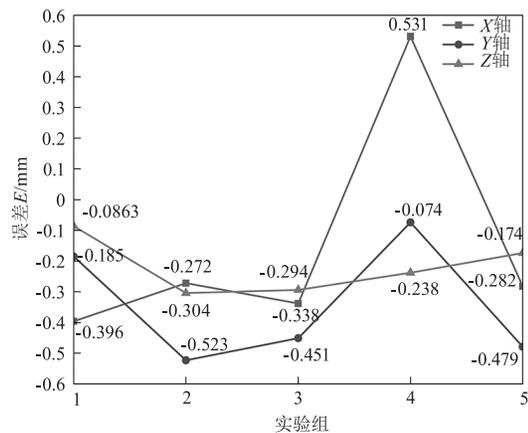


图 15 搭接接头误差分析

Fig. 15 Experimental error analysis of lap joint

采集五组 I 型对接接头图像,验证特征点提取精度,如图 16 所示。由实验结果可以看出,中点法求得特征点误差在 X 、 Y 、 Z 轴误差均小于 0.7 mm,大部分生产焊接精度要求在 1 mm 以内,本文提出方法可以满足 I 型对接接头焊接精度要求,应用于普通焊接生产线中。

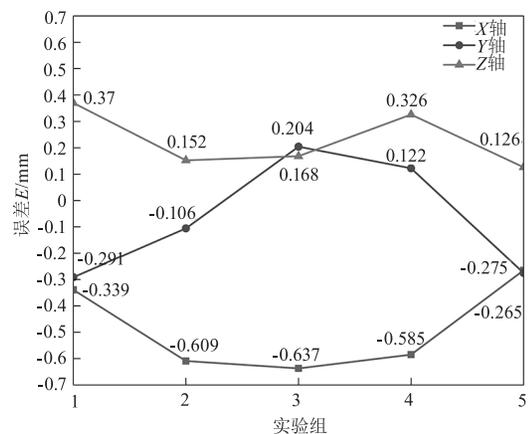


图 16 I 型对接接头误差分析

Fig. 16 Experimental error analysis of I-groove butt joint

由以上各结果可知,本文算法获取 T 接头、角接头、对接接头特征点结果在 X 、 Y 、 Z 轴误差均

小于 1 mm, 满足焊接生产要求。由于实验求得误差为系统误差, 机械臂自身精度误差、相机内参误差、算法提取误差及手眼标定误差均被计入结果误差中, 后续亦可通过提升系统标定等算法精度, 达到更为精确提取特征点的目的。

算法平均运行时间如图 17 所示, 本文算法在提取不同种类焊缝特征点的时间均小于 1 s。由于本文采取 RANSAC 算法, 识别时间与接头类型有关。因 V 型坡口对接接头有四条特征直线, 故其相对于其余四种接头的识别速度较慢, 平均识别时间为 0.874 s, 其余接头平均识别时间均在 0.7 s 内。

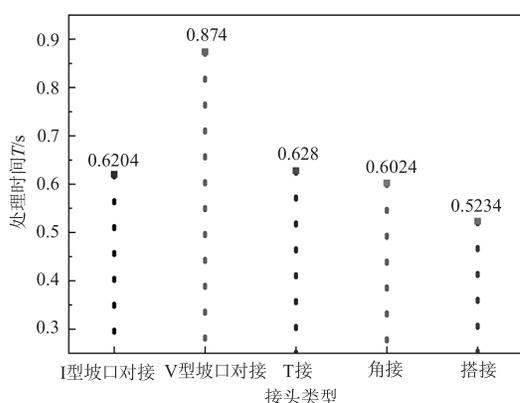


图 17 特征点提取平均时间

Fig. 17 Average extraction time of feature points

4 结论

本文提出了一种焊缝特征点智能识别算法, 基于激光视觉焊缝采集系统, 引入焊缝点云处理方法获取特征点坐标。在此基础上, 改进 RANSAC 分割直线模型, 并提出由端点法拟合焊缝点云数据, 提高分割及拟合的精度与速度。分别对五种不同类型接头做五组特征点提取实验, 结果表明, 本文算法可自主识别多种接头类型并提取特征点, 对于角接接头和搭接接头特征点提取误差小于 0.6 mm, 对接接头、T 接接头、角接接头特征点提取误差小于 0.7 mm, 双特征线接头平均提取时间小于 0.63 s, 四特征线接头平均提取时间小于 0.9 s, 满足焊接生产要求, 证明了本文算法的有效性。总体来看, 本文所提出的方法可以极大程度提高焊接自动化水平, 节省焊接时间, 避免资源浪费, 具有一定的实际应用价值, 可以为高精度高自动化焊接的实现提供一种可靠的解决方案。

参考文献:

[1] Wu K, Wang T, He J, et al. Autonomous seam recognition

and feature extraction for multi-pass welding based on laser stripe edge guidance network [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 111 (9): 1-13.

[2] Zou Y B, Zhou W L. Automatic seam detection and tracking system for robots based on laser vision [J]. Mechatronics, 2019, 63: 102261-102261.

[3] Zhao Z, Luo J, Wang Y, et al. Additive seam tracking technology based on laser vision [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116 (1-2): 1-15.

[4] Yang L, Liu Y H, Peng J Z, et al. A novel system for off-line 3D seam extraction and path planning based on point cloud segmentation for arc welding robot [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 64: 101929-101929.

[5] Wang N F, Zhong K F, Shi X D, et al. A robust weld seam recognition method under heavy noise based on structure-light vision [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2020, 61: 101821-101821.

[6] Lei T, Rong Y M, Wang H, et al. A review of vision-aided robotic welding [J]. Computers in Industry, 2020, 123 (2): 103326.

[7] Lu X Q, Gu D X, Wang Y D, et al. Feature extraction of welding seam image based on laser vision [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(11): 4715-4724.

[8] Deng L Y, Lei T, Wu C Q, et al. A weld seam feature real-time detection [J]. Measurement, 2023, 207: 112424.

[9] Li X D, Li X H, Ge S S, et al. Automatic welding seam tracking and identification [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7261-7271.

[10] Wang Shuqiang, He Jiuzhou, Gao Yuande, et al. Feature extraction method of intersecting line weld based on vision sensor [J]. Journal of Shenyang University of Chemical Technology, 2022, 36(4): 368-375. (in Chinese)

王树强, 贺久洲, 高元德, 等. 基于视觉传感器的相贯线焊缝特征提取方法 [J]. 沈阳化工大学学报, 2022, 36(4): 368-375.

[11] Cheng Jiaming, Jin Hui, Zheng Zijian, et al. Welding seam groove recognition of steel structure on construction site based on machine vision [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2023, 53(1): 86-93. (in Chinese)

成佳明, 靳慧, 郑子健等. 基于机器视觉的施工现场钢结构焊缝坡口识别 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2023, 53(1): 86-93.

- [12] Lv Xueqin, Long Liyuan, He Xianghuan, et al. Robot weld type recognition based on improved grey wolf algorithm optimizing SVM[J]. *Welding & Joining*, 2023, (8): 14 – 21, 36. (in Chinese)
吕学勤, 龙力源, 何香还等. 基于改进灰狼算法优化 SVM 的机器人坡口类型识别[J]. *焊接*, 2023, (8): 14 – 21, 36.
- [13] Li Maoyong. Research on automatic detection and positioning technology of weld groove based on vision[D]. Beijing: Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2023: 63 – 70. (in Chinese)
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: 63 – 70.
- [14] Zheng Weibin. Research on 3D modeling and feature extraction of weld groove based on laser scanning[D]. Fujian: Fujian University of Technology, 2023: 30 – 47. (in Chinese)
郑伟斌. 基于激光扫描的焊缝坡口三维建模与特征提取研究[D]. 福建: 福建工程学院, 2023: 30 – 47.
- [15] Li Haipeng, Xv Dan, Fu Yuting T, et al. A scattered point cloud simplification algorithm based on FPFH feature extraction[J]. *Journal of Graphics*, 2022, 43 (4): 599 – 607. (in Chinese)
李海鹏, 徐丹, 付宇婷等. 基于 FPFH 特征提取的散乱点云精简算法[J]. *图学学报*, 2022, 43 (4): 599 – 607.
- [16] Han Dongsheng, XvMaolin, Jin Yuanhang. Filtering and accuracy analysis of multi-source hetero geneous point cloud registration data[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2020, 37 (5): 503 – 508. (in Chinese)
韩东升, 徐茂林, 金远航. 多源异构点云配准数据的滤波及精度分析[J]. *测绘科学技术学报*, 2020, 37 (5): 503 – 508.
- [17] Bao Jianqiang, Zhang Xianzhou, Li Yuan, et al. Applied analysis of various space linear fitting methods[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2020, 45 (5): 132 – 139, 151. (in Chinese)
包建强, 张献州, 李圆等. 多种空间直线拟合方法应用分析[J]. *测绘科学*, 2020, 45 (5): 132 – 139, 151.
- [18] Xv Ziheng, Xia Rnbo, Zhao Jibin, et al. Narrow weld spot recognition based on RANSAC and Kalman filter[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2022, 37 (5): 50 – 53, 58. (in Chinese)
徐子恒, 夏仁波, 赵吉宾, 等. 基于 RANSAC 和卡尔曼滤波的窄焊缝识别[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2022, (2): 50 – 53, 58.
- [19] Wang Dongsheng. Design and implementation of weld detection system based on structured light vision[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022: 39 – 40. (in Chinese)
王东升. 基于结构光视觉的焊缝检测系统设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022: 39 – 40.