

文章编号:1001-5078(2024)06-0891-08

· 激光应用技术 ·

# 基于点云的马鞍形焊缝提取和轨迹生成方法

方怡哲<sup>1</sup>, 缪海楠<sup>2</sup>, 茅建军<sup>2</sup>, 高金锋<sup>1</sup>, 梁冬泰<sup>1</sup>

(1. 宁波大学机械与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 金丰(中国)机械工业有限公司, 浙江 宁波 315221)

**摘要:** 马鞍形焊缝自动焊接存在焊缝难以识别定位以及焊枪姿态难以规划的问题, 为了实现马鞍形焊缝的自动焊接, 选取实际装配的管类交叉结构件作为研究对象, 提出一种基于点云的马鞍形焊缝识别与规划方法。根据马鞍形焊缝的空间语义特征, 提出基于法向量和空间距离的紧耦合约束的方法提取焊缝关键点, 之后用三次 B 样条曲线对关键点进行近似拟合, 得到最终的空间焊接曲线。实验表明, 提取出的焊缝轨迹与真实轨迹相比, 最大误差为 0.68 mm, 最大均方根误差为 0.29。该方法具有较高的精度和鲁棒性, 可满足实际焊接的需求。此方法的实用性不仅局限于马鞍形焊缝, 也能处理其他具有曲线变化的焊缝。

**关键词:** 马鞍形; 识别与规划; 空间语义特征; 法向量; 三次 B 样条

**中图分类号:** TN249; TG456 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.06.008

## A method for saddle shaped welds extraction and trajectories generation based on point cloud

FANG Yi-zhe<sup>1</sup>, MIU Hai-nan<sup>2</sup>, MAO Jian-jun<sup>2</sup>, GAO Jing-feng<sup>1</sup>, LIANG Dong-tai<sup>1</sup>

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Chin Fong (China) Machine Industry Co., Ltd., Ningbo 315221, China)

**Abstract:** Automatic welding of saddle-shaped welds has the problems of difficult identification and localization of the weld seam, and difficult planning of welding torch posture. In order to realize the automatic welding of saddle-shaped welds, a saddle weld identification and planning method based on point cloud is proposed using the actual assembly of pipe cross structures as the research object. This method utilizes tight coupling constraints between the normal vector and spatial distance to extract the key points according to the spatial semantic features. And the key points are approximated by three-times cubic B-spline curves to obtain the final spatial welding curve. Experiments show that the maximum error of the extracted weld trajectory compared with the real trajectory is 0.68 mm, and the maximum root mean square error is 0.29. The method has high accuracy and robustness, which can meet the needs of practical welding. The practicality of this method is not only limited to saddle-shaped weld seams, but also can deal with other weld seams with curvilinear variations.

**Keywords:** saddle shaped; recognition and planning; spatial semantic features; normal vector; cubic B-spline

### 1 引言

在船舶制造、建筑和桥梁建设、管道工程和能源等领域, 对马鞍形焊缝焊接存在巨大的需求, 如今中

大型装备生产和装配时, 对于马鞍形焊缝还是采用人工焊接, 不但工作效率低而且焊接质量受工人技能经验影响较大<sup>[1]</sup>。与传统焊接方法相比, 机器人

**基金项目:** 浙江省公益技术应用研究计划项目 (No. LGG21E050008); 宁波市公益性科技计划项目 (No. 2022S004); 宁波市科技创新 2025 重大专项项目 (No. 2022Z075) 资助。

**作者简介:** 方怡哲 (1999 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为三维点云处理, 视觉伺服技术。E-mail: 1048496190@qq.com

**通讯作者:** 梁冬泰 (1981 -), 男, 副教授, 主要从事工业视觉检测, 机器人感知及操控技术研究。E-mail: liangdongtai@nbu.edu.cn

**收稿日期:** 2023-10-07

焊接具有轨迹精度高、焊接一致性好、生产效率高等优点。“示教-回放”模式和离线编程(OLP)仍然是现代焊接机器人的两种主要工作模式<sup>[2]</sup>,对于马鞍形焊缝而言,其形状容易受工件尺寸误差和拼接精度的影响,当重新焊接新的焊件时需要重新示教或者编程,对完成大批量焊件的焊接任务存在效率低的问题。因此,研究马鞍形焊缝的焊接自动化、智能化焊接具有重要意义<sup>[3]</sup>。

近年来,机器视觉已经逐渐应用于机器人焊接领域。谢盛、魏昕等针对被动视觉焊缝跟踪系统的图像去噪问题,提出了基于帧间匹配的去噪方法<sup>[4]</sup>,通过将旋转不变性二进制描述算法(ORB)与随机采样一致性算法(RANSAC)<sup>[5]</sup>结合,得到两帧图像间的单应矩阵,并以此对齐两帧的焊件图像;采用帧间图像灰度替换的方式,用焊件图像替换飞溅区域得到无飞溅的焊缝图像。Xu等分析了焊接光谱,调整了窄带滤光片的中心波长,最终获得了间隙较窄焊缝相对清晰的图像<sup>[6]</sup>。贾振威针对弧光对焊缝识别的影响,提出一种相贯线焊缝的特征点识别算法<sup>[7]</sup>,可以在强弧光环境下对焊缝特征点进行有效识别提取。Banafian等开发出基于激光和立体视觉结构光的焊缝跟踪系统,利用改进的图像处理方式实现精确跟踪<sup>[8]</sup>。激光焊缝跟踪方法往往适用于传统的简单焊缝,因其原理具有超前误差,难以适用于焊接路径与焊接姿态多变的复杂空间焊缝<sup>[9]</sup>。随着结构光视觉传感技术的发

展,研究人员逐渐使用平面结构光传感器来获取物体的深度信息和纹理信息,进行物体表面的三维信息处理。Yang等提出了一种基于点到平面距离提取V形焊缝特征点的算法<sup>[10]</sup>,Rusinkiewicz等使用平面结构光传感器完成机器人焊接路径规划,以拍摄两个空间对接板的点云<sup>[11]</sup>。

虽然目前基于三维视觉的焊缝提取和轨迹规划取得了一定的效果,但是主要的研究对象还是简单的焊缝,应用于马鞍形焊缝的焊缝提取和轨迹规划方法是需要进一步研究的工作。针对这个问题,本文提出一种基于三维视觉的马鞍形焊缝提取及轨迹生成方法,通过结构光相机获取管类交叉结构件的精细化点云数据<sup>[12]</sup>,根据马鞍形焊缝的空间几何特征(点云密度、法向量、空间距离)建立语义提取规则,通过该规则自动识别并生成马鞍形焊缝的焊接轨迹。提高了焊缝识别的精度,相比传统的机器人焊接作业,提高了焊接效率。

## 2 算法总体设计

本文提出的马鞍形焊缝提取及焊接轨迹生成的流程图如图1所示,主要分为数据采集和拼接、点云预处理、焊接区域提取、关键点提取、焊接轨迹优化五个模块。首先考虑到配准后的点云数据庞大<sup>[13]</sup>,有噪点等问题,采取点云预处理操作;其次对预处理后的点云引入马鞍形焊缝的空间语义约束提取焊缝关键点;最后对关键点进行插值拟合,生成优化后焊接轨迹。

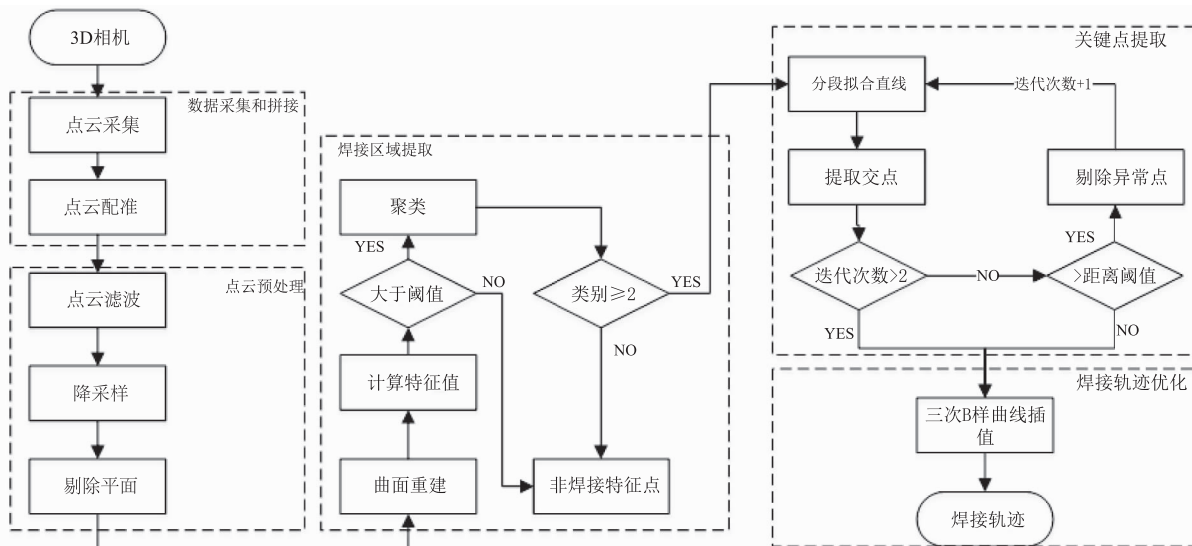


图1 焊缝提取及焊接轨迹生成流程图

Fig. 1 Weld seam extraction and welding trajectory generation flow chart

## 3 焊缝识别与规划算法实现

### 3.1 点云数据预处理

本文通过机器人示教的方法获取拍照位姿并采集多帧点云数据,利用手眼矩阵将点云坐标统一转换至机器人基坐标系下<sup>[14]</sup>,利用迭代最近点

算法<sup>[15]</sup>对点云进行精细配准。点云配准后的点云模型存在冗余点云,为减少算法运行时间,采用体素格滤波器将点云划为多个小立方体,使用每个小立方体的重心作为一个点,简化整个点云<sup>[16]</sup>。对于点云存在离群点及噪点的现象,本文采用高

斯滤波和直通滤波进行处理。

### 3.2 基于法向量和空间距离的紧耦合约束

由于马鞍形焊缝基本是母管与支管相交形成,模型表面鲁棒性差,因此本文采用MLS(移动最小二乘法)方法进行曲面重建,以平滑和重采样噪声数据<sup>[17]</sup>。马鞍形焊缝的局部示意图如图2所示。深色的点为曲面 $S_1$ 的点云,浅色的点为曲面 $S_2$ 的点云。 $\vec{n}_1$ 是特征点在曲面 $S_1$ 的近邻点的法向量, $\vec{n}_2$ 是特征点在曲面 $S_2$ 的近邻点的法向量, $\vec{n}_i$ 是焊缝特征点 $p_i$ 的法向量<sup>[18]</sup>,法向量由基于协方差矩阵的法线估计方法获取。

由图2所示,焊缝特征点的法向量与其附近的邻域的点的法向量存在较大的角度差异,本文受FPFH<sup>[19]</sup>特征子启发,设计了一种基于法向量和空间距离的紧耦合约束的三维点云提取马鞍形焊缝的方法,用于焊缝特征点的提取。

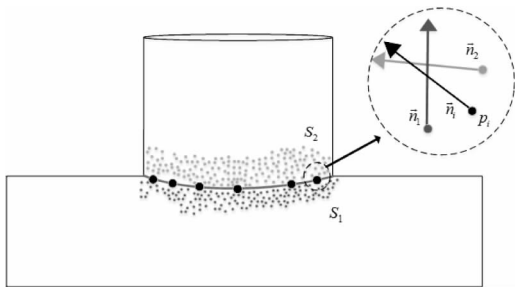


图2 马鞍形焊缝的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of saddle weld

定义一个半径为R的球邻域,以当前点为中心,用kdTree方法搜索其他相邻点。相邻点之间被视为一个单独的对,每个对的特征描述 $P_w$ : $[d_{[i,j]}, \theta_{[i,j]}]$ 。中心点与所有其他相邻点配对,每对有两个单位向量,形成一个包含的角度 $\theta_{[i,j]}$ ,根据欧式距离的计算公式,计算每对的两个点之间的欧式距离 $d_{[i,j]}$ ,如图3所示。

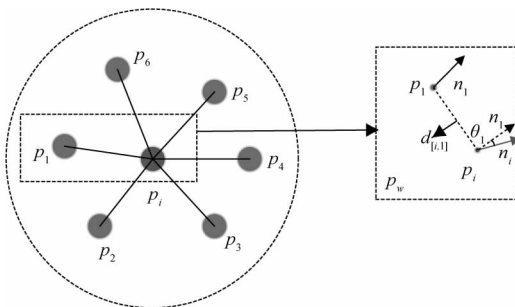


图3 点对的特征描述

Fig. 3 Characterization of point pairs

角度 $\theta_{[i,j]}$ 和距离 $d_{[i,j]}$ 是第j对点对计算如下:

$$\theta_{[i,j]} = \arccos \frac{\vec{n}_i \cdot \vec{n}_j}{|\vec{n}_i| \cdot |\vec{n}_j|} \quad (1)$$

$$d_{[i,j]} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (2)$$

其中 $p_i = (x_i, y_i, z_i), p_j = (x_j, y_j, z_j)$ ;  $\vec{n}_i$ 是球邻域中心点的法向量;  $\vec{n}_j$ 是与中心点成对中另一个点的法向量,如图3中, $p_1$ 的法相量为 $n_1$ ,使用公式(1)迭代每对相邻点,将所有计算结果都排列为一个集合 $\theta = \{\theta_{[i,1]}, \theta_{[i,2]}, \dots, \theta_{[i,n]}\}$ , $n$ 是相邻点对数。

定义 $\beta$ 变量表示球域内特征值的变化,计算公式如下:

$$\beta = \frac{\sum_{j=1}^n w_j \theta_{[i,j]}^2}{n} \quad (3)$$

其中, $w_j$ 是根据邻域内第j个点到中心点的距离设置的权重。 $n$ 是邻域内点对的数量。通过遍历表面的点,处于边缘的点云不在本方法的应用范围内,相同半径的邻域内,边缘点邻域内点对个数相比非边缘点的点对个数少,为去除边缘点云,本文设计邻域内点对数量作为阈值筛选边缘点和非边缘点,当 $n < 4$ 时,视作该点为边缘点。焊缝特征点区域是疑似为焊接区域的点,由于焊接区域的点云与非特征点之间的法向量存在较大差异, $\theta$ 越大, $\theta$ 大的点对其两点距离越近,被视作为特征点的置信度越高,故焊接特征点的 $\beta$ 值大于非特征点的 $\beta$ 值。如图4(a)所示,黑色为待测点,灰色为待测点周围的点,箭头指代各个点估计的法向量,计算非边缘点的 $\beta$ 值,设置一定的阈值 $T$ ,当 $\beta \geq T$ 时,将该点纳入焊接的特征点区域。将新得到的点集命名为 $PE, PE = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 。因为圆柱体表面点云的法向量垂直于表面,方向持续变换,所以经过阈值筛选后的点集可能存在一些异常点如图5(a)所示。考虑焊缝特征点在同一曲面上的近邻点的法向量基本

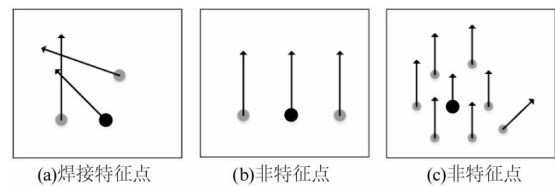


图4 特征点与非特征点示意图

Fig. 4 Schematic diagram of feature and non-feature points

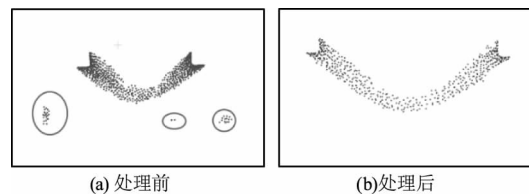


图5 聚类处理

Fig. 5 Clustering

近似一致,采用聚类的思想描述法向量的一致性<sup>[20]</sup>,具有相似的法向量的点被视为一类,故以焊接特征点为中心的球邻域可以至少被分为两类,而非焊接区域的点,对其邻域点进行聚类,有且只有一个。

$$W_{(p_i)} = \begin{cases} 1, & |C| \geq 2 \\ 0, & |C| = 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $C$  是聚类的数量,当  $C > = 2$  时候,  $W$  置为 1,将  $W = 1$  的点  $p_i$  置为新的点集  $PW$ ,经过聚类处理完的点云数据如图 5(b) 所示。

### 3.3 焊缝关键点提取

真实的焊缝曲线应该穿过特征点区域,考虑到圆柱形表面的点云在局部范围内可以近似的看作无数条直线点云拼接而成。考虑到存在生成的特征点与实际焊缝曲线位置存在一定的偏差,本文采用初步提取的关键点利用迭代的思想去消除特征点中的异常值。如图 6 所示沿着侧管的轴线方向,将点集  $PW$  按照点云密度设置成  $N$  个区域点云,最后在不同区域的点云用随机抽样一致性算法拟合两条直线,取两直线相交点为提取相贯线焊缝的关键点  $Q_i$ ,如图 7 所示;将初步提取的关键点放入点集  $Q$ ;将关键点  $Q_i$  与点集  $PW$  的所有点  $p_i$  计算空间欧式距离,最后将距离最小的值标记为  $D_i$ ;如果  $D_i$  大于设定的阈值  $D_T$ ;就将  $D_i$  对应的点  $p_i$  置为异常点。点集  $PW$  去除掉异常点后再次计算  $Q_i$ 。对焊缝关键点提取的算法流程图如图 8 所示。

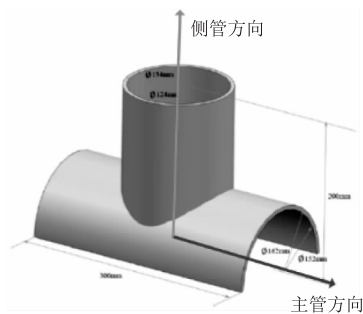


图 6 待测工件的三维模型

Fig. 6 3D model of the workpiece to be tested



图 7 直线拟合

Fig. 7 Straight line fitting

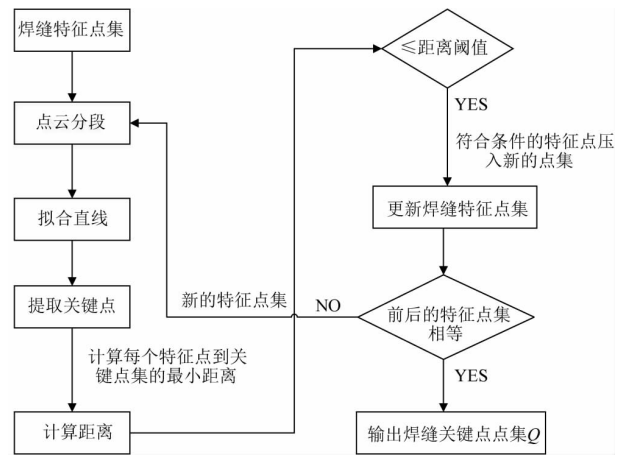


图 8 焊缝关键点提取算法流程图

Fig. 8 Weld key point extraction algorithm flow chart

### 3.4 焊缝轨迹生成

本文以提取的焊缝关键点集  $Q$  为采样对象,为保证采样数据的轨迹精度,需要对焊缝关键点进行数据拟合,最后对拟合后的数据再进行数据插值操作可以有效提高焊缝的轨迹精度。本文采用三次 B 样条插值算法,其在拟合插值节点处连续且可导,可以保证焊接路径的光滑性要求。对于数据拟合,以采样数据作为控制点计算三次 B 样条曲线,而数据插值则以采样数据反计算样条曲线的控制点,再计算三次 B 样条曲线。具体原理如下:

三次 B 样条曲线方程:

$$Q_3(u) = \sum_{k=i-3}^i N_{k,3}(u)P_k \quad (5)$$

其中,  $P_k (k = 0, 1, 2, 3, \dots, n)$  为控制点,  $N_{k,3}(u)$  为三次 B 样条曲线基函数,由于 B 样条曲线的形状由控制点决定但不经过控制点,而在进行焊接路径的插值时,需要保证插值曲线过焊接特征点,因此需要根据焊接特征点数据反求曲线控制点<sup>[21]</sup>。

设有  $m$  个焊接关键点  $T_i (i = 0, 1, 2, \dots, m - 1)$ ,则过该特征点的三次 B 样条曲线需要  $m + 6$  个控制点  $P_k (k = 0, 1, 2, \dots, m + 5)$ ,  $m + 4$  个节点矢量  $u_i (i = 0, 1, 2, \dots, m + 3)$ ,根据三次 B 样条曲线原理得到节点矢量:

$$\begin{cases} u_0 = u_1 = u_2 = u_3 = 0 \\ u_m = u_{m+1} = u_{m+2} = u_{m+3} = 1 \end{cases} \quad (6)$$

令焊接关键点和节点  $[u_3, u_m]$  一一对应。此时三次 B 样条曲线方程可以得到:

$$Q_3(u) = \sum_{k=i-3}^i N_{k,3}(u)P_k = T_{i-3}, i = 3, 4, \dots, m - 2 \quad (7)$$

该方程包含  $m - 2$  个未知数,但只有  $m - 4$  个方程。故采用非节点构建方程:

$$\begin{cases} P_0 N_{0,3}(\varepsilon_1) + P_1 N_{1,3}(\varepsilon_1) + P_2 N_{2,3}(\varepsilon_1) + P_3 N_{3,3}(\varepsilon_1) = D_0 \\ P_{n-3} N_{n-3,3}(\varepsilon_2) + P_{n-2} N_{n-2,3}(\varepsilon_2) + P_{n-1} N_{n-1,3}(\varepsilon_2) + P_n N_{n,3}(\varepsilon_2) = D_{m-1} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $\varepsilon_1 \in [u_3, u_4], \varepsilon_2 \in [u_{m-1}, u_{m-2}]$

联立(7),(8)反求控制点,如图9所示。通过控制点代入(5)得到经过焊接关键点的三次样条曲线表达式,得到最终的焊接路径,点为焊接的关键点,曲线为最终拟合的焊件轨迹。

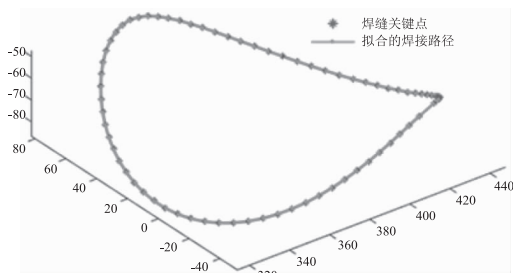


图9 焊接轨迹拟合效果图

Fig. 9 Welding trajectory fitting effect diagram

如图10所示,构建相贯线焊缝焊接坐标系  $\{O_s\}$ , 焊炬姿态  $\{O_g\}$ 。轴  $X_s$  与两个最近的路径点的移动矢量重合,轴  $Z_s$  平行于二面角  $\phi$  的角平分线并指向远离焊缝的地方,轴  $Y_s$  由右手定轴决定。焊炬姿态  $\{O_g\}$  和坐标系  $\{O_s\}$  关系如公式(10)所示:

$$Z_s = \frac{\vec{n}_1 + \vec{n}_2}{|\vec{n}_1 + \vec{n}_2|} \quad (9)$$

$$\begin{cases} X_g = X_s \\ Z_g = -Z_s \\ Y_g = X_g \times Z_g \end{cases} \quad (10)$$

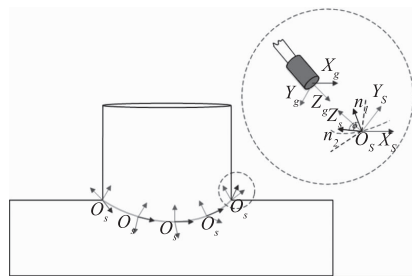


图10 焊接坐标系示意图

Fig. 10 Schematic diagram of welding coordinate system

## 4 实验结果与分析

### 4.1 实验硬件平台搭建

实验所采用的三维视觉机器人平台如图11所示,由六自由度协作机器人 UR5、Mech Eye Pro S 结构光相机以及 PC 组成。其中 PC 的 CPU 为 Intel i5-7300H,显卡为 NVIDIA GeForce GTX 1050。数据处理端为 Ubuntu 18.04 的操作系统。

### 4.2 标定实验

为了获取点云在机器人基坐标系下的位置,需

要对进行相机的内参标定和手眼标定。手眼标定矩阵采用 TSAI 算法求解,标定物采用  $12 \times 9$  棋盘格。棋盘网格边长为 20 mm。标定结果如下:

相机内部参数矩阵:

$${}^c T_d = \begin{bmatrix} 2447 & 0 & 968.4 \\ 0 & 2447 & 607.3 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

手眼标定矩阵:

$${}^g T_c = \begin{bmatrix} 0.001865 & -0.0100 & -0.9999 & -0.1369 \\ 0.9999 & -0.005405 & 0.001921 & 0.08593 \\ -0.005424 & -0.9999 & 0.01008 & 0.03119 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

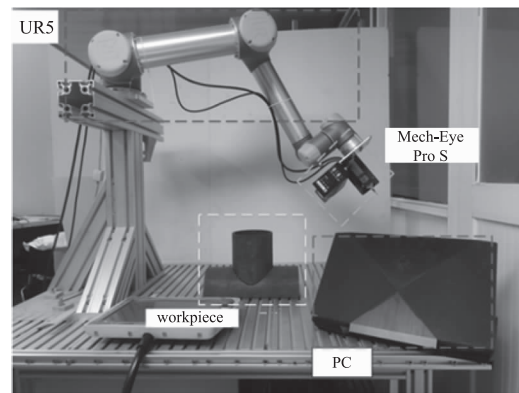


图11 三维机器人视觉平台

Fig. 11 3D robot vision platform

为了重建完整的工件模型,我们从多个角度收集的点云,图12(a)~(e)显示了多个角度未进行坐标变化的点云图,然后对每个点云进行坐标变换,并重建模型,图12(f)显示了完整的工件模型重建的点云图。模型重建的结果也验证了相机标定结果的正确性。为了提取单独的焊件的点云数据,本文还

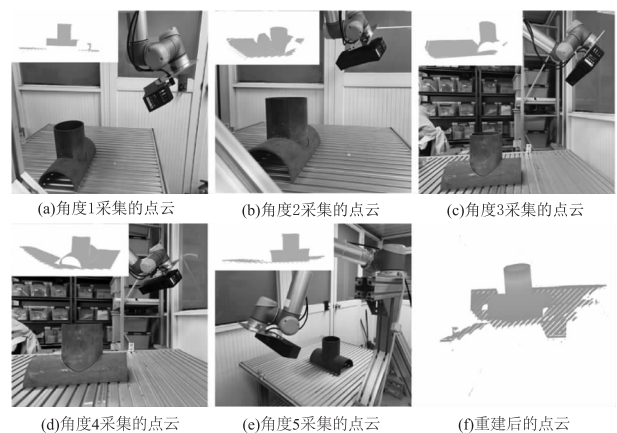


图12 点云模型重建

Fig. 12 Point cloud model reconstruction

需要对降噪后的数据进行平面剔除的工作,本文采用 RANSAC 算法实现对工作台的平面的剔除。图 13 显示的是去除地面和滤波后的工件点云模型。

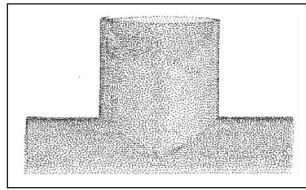


图 13 预处理后的点云  
Fig. 13 Preprocessed point cloud

### 4.3 马鞍形线焊缝提取实验

为了验证本文方法提取的马鞍形焊缝的精度,利用 JEAMN 公司的 KingScanM2 手持式 3D 扫描仪对待测工件进行三维重建,扫描结果如图 14 所示,KingScanM2 的扫描精度最高为 0.01 mm,从扫描的点云数据人为提取焊点作为真值,并利用 3 次 B 样条算法对提取的焊点数据进行插值密化后的数据作为焊缝曲线的真实值。图 15 显示了本文中方法每个步骤的结果。对预处理后的点云模型通过算法拟合的焊缝曲线作为测量值。如图 15 (e) 所示,灰色线状区域为拟合的焊缝曲线,线状区域周围的点云是算法搜索到的焊缝特征点的点云。焊缝曲线的测量值和真实值对比如图 16 (a) 所示。

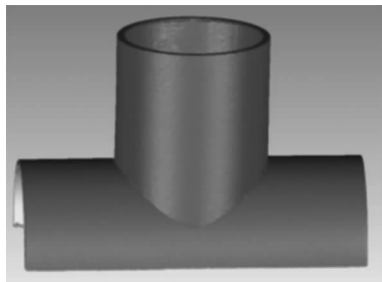
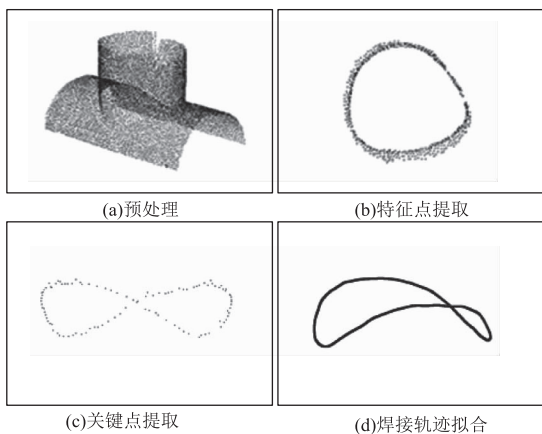
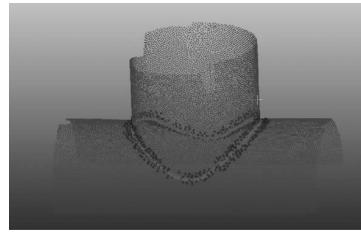


图 14 待测工件的扫描结果  
Fig. 14 Scan results of the workpiece to be tested



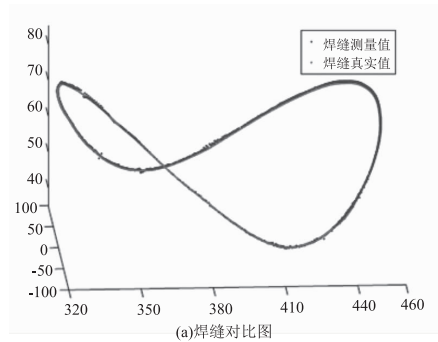
(a) 预处理 (b) 特征点提取  
(c) 关键点提取 (d) 焊接轨迹拟合



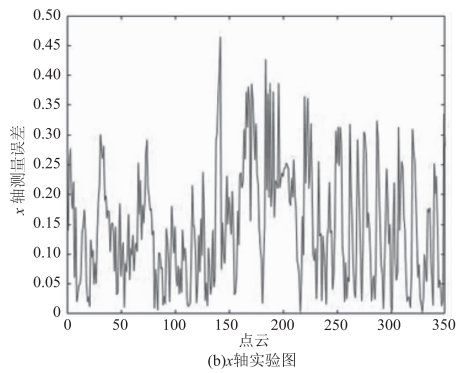
(e) 马鞍形焊缝拟合结果

图 15 马鞍形焊缝提取步骤

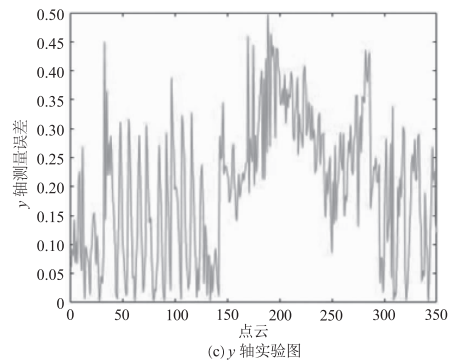
Fig. 15 Saddle weld extraction steps



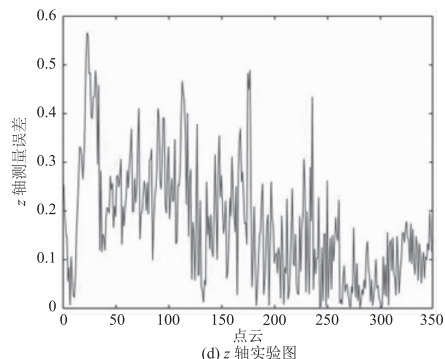
(a) 焊缝对比图



(b) x 轴实验图



(c) y 轴实验图



(d) z 轴实验图

图 16 最大误差实验结果图

Fig. 16 Maximum error experiment result graph

为分析本文提出算法拟合的焊缝曲线和真实曲线的位置精度的偏差,通过坐标系变换统一在机器人基坐标系下,通过计算最大误差(ME)和均方根误差(RMSE)来测试精度。将待测焊件摆放在不同的位置,进行了五组实验,从提取的相贯线焊缝随机选取300个点来计算偏差,表1记录了4组实验结果,图16(b)、图16(c)和图16(d)分别显示了第一组实验在XYZ三轴上的最大误差实验结果图,由表可知,所提方法采集的焊接曲线和真实曲线之间的ME小于1 mm, RMSE小于0.4,满足基本焊接要求。

表1 4组实验的误差

Tab. 1 Error of 4 sets of experiments

实验序号	误差/mm	x	y	z
1	ME	0.46	0.49	0.56
	RMSE	0.18	0.23	0.21
2	ME	0.48	0.42	0.57
	RMSE	0.17	0.13	0.16
3	ME	0.52	0.22	0.55
	RMSE	0.11	0.08	0.11
4	ME	0.50	0.68	0.55
	RMSE	0.19	0.29	0.22

#### 4.4 焊接模拟实验

利用本文算法拟合的焊缝轨迹,将其发送给机器人进行焊接模拟运动,通过使用 Moveit 包的笛卡尔路径规划,以胶枪末端坐标系作为机器人末端TCP,采用“六点法”对机器人末端进行TCP标定,机器人焊接模拟仿真过程如图17所示,机器人焊接模拟过程如图18所示。



图17 焊接模拟仿真

Fig. 17 Welding simulation

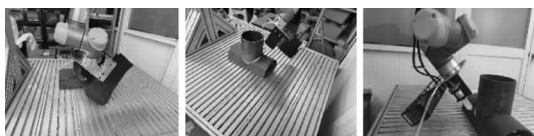


图18 焊接模拟过程

Fig. 18 Welding process

## 5 总结

本文提出一种基于三维视觉的马鞍形焊缝提取和轨迹生成方法。经点云拼接、点云预处理和基于RANSAC的地面剔除获得用于焊缝提取的点云数据;利用马鞍形焊缝空间语义特征设计的方法有效的提取了焊缝关键点;利用三次B样条曲线算法对焊缝关键点进行插值计算从而拟合出焊接曲线。为了验证本算法的有效性,算法生成的焊接轨迹跟精

密的3D扫描仪生成的真值作对比,经计算,轨迹精度满足焊接要求,且用胶枪实现马鞍形焊缝的焊接模拟任务。

实验中发现,工作平台存在其他干扰物体的情况下,机器人运动可能会发生碰撞,焊接质量与焊接速度和焊枪姿态等工艺参数有关,下一步将研究在考虑避障和碰撞检测的条件下,结合全位置焊接工艺量化优化目标,建立机器人与焊接工件的碰撞模型,优化焊接路径。

## 参考文献:

- [1] Sun Haoyi, Liang Dongtai, Li Guoping, et al. Weld seam identification algorithm based on Kalman filter [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(8): 1006 - 1013. (in Chinese)  
孙浩益, 梁冬泰, 李国平, 等. 基于卡尔曼滤波器的焊缝识别算法 [J]. 激光与红外, 2016, 46(8): 1006 - 1013.
- [2] Geng Y, Lai M, Tian X, et al. A novel seam extraction and path planning method for robotic welding of medium-thickness plate structural parts based on 3D vision [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2023, 79: 102433.
- [3] Dai Weizhi, Yu Haitao, Wang Jiwen. Current status and development direction of steel structure welding robots [J]. Metal Processing (Thermal Processing), 2021(12): 7 - 12. (in Chinese)  
戴为志, 俞海涛, 王继文. 钢结构焊接机器人的现状及发展方向 [J]. 金属加工(热加工), 2021(12): 7 - 12.
- [4] Xie Sheng, Wei Xin, Liang Ziming. Fillet weld recognition based on inter-frame matching denoising [J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(6): 48 - 53. (in Chinese)  
谢盛, 魏昕, 梁梓铭. 基于帧间匹配去噪的角接焊缝识别 [J]. 电焊机, 2020, 50(6): 48 - 53.
- [5] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381 - 395.
- [6] Xu Y, Na L, Gu F, et al. Welding seam tracking in robotic gas metal arc welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 248: 18 - 30.
- [7] Jia Zhenwei. Real time tracking welding of intersecting line weld based on structured light stereo vision [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2020. (in Chinese)  
贾振威. 基于结构光立体视觉的相贯线焊缝实时跟踪焊接 [D]. 天津: 天津工业大学, 2020.
- [8] Banafian N, Fesharakifard R, Menhaj M B. Precise seam

- tracking in robotic welding by an improved image processing approach[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 114:251-270.
- [9] Gong Qinhui. Analysis of the research status and development of weld tracking technology[J]. *Journal of Chengdu Aviation Vocational and Technical College*, 2019, 35(2): 53-56, 60. (in Chinese)  
龚勤慧. 对焊缝跟踪技术研究现状与发展的分析[J]. *成都航空职业技术学院学报*, 2019, 35(2): 53-56, 60.
- [10] Yang L, Liu Y. A novel 3D seam extraction method based on multi-functional sensor for V-type weld seam[J]. *IEEE Access*, 2019, 7:182415-182424.
- [11] Patil V, Patil I, Kalaichelvi V, et al. Extraction of weld seam in 3D point clouds for real time welding using 5 dof robotic arm[C]//2019 5th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). IEEE, 2019:727-733.
- [12] Liu Deer, Si Xuanxuan, Yang Dahai, et al. Intelligent identification and application of characteristic surfaces of point cloud model of I-beam bridge[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(4):528-536. (in Chinese)  
刘德儿, 司玄玄, 杨大海, 等. 大桥工字梁点云模型特征面智能识别及应用[J]. *激光与红外*, 2023, 53(4): 528-536.
- [13] Xia Jinze, Sun Haoming, Hu Shenghui, et al. Three-dimensional laser point cloud clustering method based on image information constraints [J]. *Optoelectronic Engineering*, 2023, 50(2):38-49. (in Chinese)  
夏金泽, 孙浩铭, 胡盛辉, 等. 基于图像信息约束的三维激光点云聚类方法[J]. *光电工程*, 2023, 50(2): 38-49.
- [14] Wu Mengnan, Li Lihong. Kinect vehicle outline point cloud registration based on robotic arm[J]. *Computer Engineering*, 2019, 45(11):315-320. (in Chinese)  
武梦楠, 李丽宏. 基于机械臂的 Kinect 车辆轮廓点云配准[J]. *计算机工程*, 2019, 45(11):315-320.
- [15] Rusinkiewicz S, Levoy M. Efficient variants of the ICP algorithm[C]//Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling. IEEE, 2001: 145-152.
- [16] Liu Changwen, Li Bo, Pan Jiangtao, et al. Research on NDT three-dimensional point cloud registration algorithm based on ISS-3DSC[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(5): 777-783. (in Chinese)  
刘畅文, 李波, 潘江涛, 等. 基于 ISS-3DSC 的 NDT 三维点云配准算法研究[J]. *激光与红外*, 2023, 53(5): 777-783.
- [17] Lu S, Shi X, Tian X, et al. Weldseam extraction of intersecting pipelines based on point cloud entropy[C]//2022 IEEE 11th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS). IEEE, 2022:385-390.
- [18] Liu Y, Tang Q, Tian X, et al. A novel offline programming approach of robot welding for multi-pipe intersection structures based on NSGA-II and measured 3D point-clouds[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2023, 83:102549.
- [19] Rusu R B, Blodow N, Beetz M. Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration[C]//2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2009:3212-3217.
- [20] Yang S, Shi X, Tian X, et al. An approach to the extraction of intersecting pipes weld seam based on 3D point cloud[C]//2022 IEEE 11th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS). IEEE, 2022: 53-58.
- [21] Liu Jing, Shi Kanle, Yong Junhai, et al. Smooth B-spline curve construction method using controlled vertex interpolation[J]. *Journal of Computer-Aided Design and Graphics*, 2011, 23(5):813-819. (in Chinese)  
刘晶, 施侃乐, 雍俊海, 等. 利用控制顶点插值的光滑 B 样条曲线构造方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2011, 23(5):813-819.