

大型构件 V 型结合缝的移动机械臂自动跟踪*

鲁苑凯¹ 李舒婷¹ 陈志强¹ 何祖恩² 李扬森² 吴海彬¹

(1. 福州大学机械工程及自动化学院 福州 350116; 2. 福建省特种设备检验研究院 福州 350008)

摘要: 航空航天、舰船制造等领域的大型构件通常具有大量 V 型结合缝, 需要通过焊接或涂胶等手段进行填充连接。为实现大型构件结合缝特征的精确识别与跟踪, 提出了基于移动机械臂的多站位分段式自动跟踪方法, 即沿着缝隙走向顺序拍摄多帧 V 型结合缝点云图像, 基于关键特征点 (ISS) 与点对点迭代最近点 (ICP) 配准算法进行点云数据拼接, 生成构件局部三维点云模型。基于此, 提出一种表面变化特征描述子 (SVFD) 用于表征构件表面凹凸变化情况, 识别出 V 型坡口点云集, 基于对称约束和距离约束获取结合缝特征点。再利用 NURBS 曲线拟合和等弧长插补方法, 获取均匀、离散的结合缝路径点。在此基础上, 结合工艺要求, 进一步完成结合缝路径点上机器人末端工具 (如胶枪) 的姿态规划。最后, 结合机械臂可操作度与移动底盘姿态约束条件, 规划出移动底盘的期望移动路径。搭建硬件实验平台, 针对 4 种不同类型的 V 型结合缝特征, 通过涂胶实验进行验证。实验结果表明, 结合缝轨迹提取精度平均误差不超过 0.857 mm, 移动底盘路径跟踪精度平均误差不超过 8.577 mm, 能实现对大型构件结合缝的精确提取与跟踪。不仅可以应用在焊接、涂胶等领域, 还可以应用于结构特征类似的大型构件的跟踪。

关键词: 移动机械臂; 自动跟踪; 点云数据处理; 特征提取; 轨迹规划; V 型结合缝

中图分类号: TN911.73; TP242.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.40; 460.50

Automatic mobile manipulator tracking of V-groove seams on large-scale components

Lu Yuankai¹ Li Shuting¹ Chen Zhiqiang¹ He Zuen² Li Yangsen² Wu Haibin¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. Fujian Special Equipment Inspection and Research Institute, Fuzhou 350008, China)

Abstract: Large-scale components in aerospace and shipbuilding industries often feature extensive V-groove seams requiring filling processes such as welding or glue dispensing. To achieve precise identification and tracking of groove seam features on large-scale components, a multi-station segmented automatic tracking method based on a mobile manipulator is proposed. This approach involves sequentially capturing multi-frame point cloud images of the V-groove seam along its trajectory. A local 3D point cloud model of the component is then generated by stitching the point cloud data using a registration algorithm combining key feature points (ISS) and the point-to-plane iterative closest point (ICP) algorithm. Subsequently, a novel surface variation feature descriptor (SVFD) is proposed to characterize surface concavity and convexity, enabling the identification of the V-groove point cloud set. Groove seam feature points are then accurately acquired based on symmetry constraints and distance constraints. A uniform and discrete seam path is generated by fitting these feature points with NURBS curves and performing equal-arc-length interpolation. To meet process requirements, the tool end-effector orientation (e.g., glue gun pose) at each path point is further planned. Finally, considering both the manipulator's manipulability and the mobile platform's pose constraints, the desired path for the mobile platform is planned using an equidistant offset strategy. A hardware experimental platform was established, and glue dispensing experiments were conducted on four distinct types of V-groove seam features. Experimental results demonstrate that the average groove seam trajectory extraction error does not exceed 0.857 mm, and the average mobile platform path tracking error is within 8.577 mm, confirming the method's capability for precise

extraction and tracking of large component seams. This technique is applicable not only to welding and glue dispensing but also to tracking analogous structural features on other large-scale components.

Keywords: mobile manipulator; automatic tracking; point cloud data processing; feature extraction; trajectory planning; V-groove seam

0 引言

在“制造强国”战略目标的引领下,舰船舱体、航空航天设备、球罐(储罐)等大型构件的需求与日俱增,这些构件往往不是一体成型,而是多块拼接而成,拼接处通常具有典型的 V 型结合缝特征。这类拼接工作往往需要在施工现场进行,拼接工艺通常以焊接为主,也有涂胶等其他工艺方法。由于工作环境非结构化,且大多均为单件生产,因此当前主要以人工操作为主,自动化程度极低。不仅劳动强度大,而且工作性质也带有较高的危险性。

当前国内外为实现大型构件结合缝的跟踪与拼接,将机器人搭载于导轨是常用方案,可借助轨道有效拓展机器人的工作空间。Zhu 等^[1]基于 Pieper 准则,设计了一种轨道式五自由度管道焊接机器人。通过齿轮和齿条机构在刚性轨道上行驶,可满足管道任意焊接位置符合焊接工艺参数的焊枪位置和姿态控制要求。Pessi 等^[2]设计了一款移动并联式焊接机器人,其能够沿着安装在真空容器内部的轨道移动,从而实现真空容器的自动化焊接作业。Guo 等^[3]开发设计了一种轨道式新型现场全位置焊接机器人系统。基于永磁吸附固定轨道,集成运动机构与四自由度机械手,可实现箱钢梁全工位焊接。Li 等^[4]设计用于聚变反应堆焊接和加工的七自由度移动并联机器人,该机器人由小车与并联机械手构成,焊接时其托架通过下端齿条齿轮机构沿扇区轨道移动,保障焊接作业的连续性。上述这些依托轨道的机器人虽能有效拓展工作空间,且具备定位精度高的突出优势,但普遍存在成本高昂、灵活性欠佳、安装调试复杂等问题。

由 AGV 移动平台加工业机器人组成的移动机械臂,运动方式灵活多变,近年来成为大型构件 V 型结合缝跟踪与拼接的首选。但是 AGV 移动平台的定位精度往往不能满足大尺度构件精细的拼接操作要求,实际应用存在诸多困难。近年来国内外也研制出了^[5]可应用于不同大型构件的移动焊接机器人。Liu 等^[6]开发的智能移动焊接机器人由四轮移动平台与协作机械手组成,结合 SLAM 技术可自主导航、检测并跟踪坡口完成焊接。Choi 等^[7]提出适用于大型液化天然气货舱激光自动焊接的方法,其所采用的移动机器人集成移动底座、六自由度机械手与焊头,通过模拟人工操作保障焊接质量。Xu 等^[8]基于自主研发的由四轮攀爬移动平台和六自由度机械手组成的移动机器人,提出移动机械手全局空间运动规划算

法,保证了高机动性和作灵活性,实现大型钢结构内部的自动化焊接。文献[9]介绍了在大型构件结构特征的视觉识别常采用三维点云技术,该技术通过面结构光相机、激光轮廓仪等设备获取大型构件表面带有三维坐标信息的点云集合,再通过提取目标结构特征的算法有以下 3 步分别为^[10]:点云预处理、滤波、配准等,为机器人实现结构特征的自动跟踪提供可靠的三维信息支持。但是移动机械臂具有自由度冗余特性^[11-12],且由于作业场景多变,环境特征少,其底盘在移动过程中不可避免会出现抖动、打滑现象,使其通过移动底盘与机械臂协同运动实现焊枪末端轨迹的精确跟踪极为困难。

鉴于此,本文面向大型构件的 V 型结合缝特征,采用双目结构光相机,并安装在机器人末端,通过 AGV 移动底盘与机械臂的多站位分步式运动,实现结合缝结构特征的采集、图像拼接、定位及运动跟踪。

1 移动机械臂结合缝自动跟踪系统

大型构件结合缝的移动机械臂自动跟踪系统由移动底盘、六自由度机械臂、面结构光相机、末端工具以及计算机控制器等核心部件构成,如图 1 所示。面结构光相机和末端工具固定安装于机械臂末端。

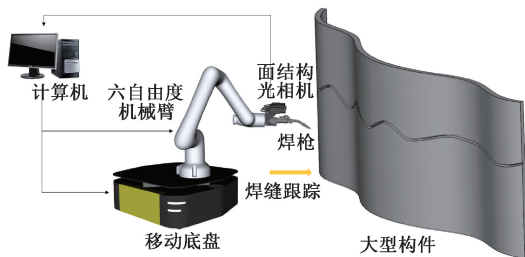


图 1 移动机械臂 V 型结合缝自动跟踪系统

Fig. 1 Automatic V-type seam tracking system using mobile robot

系统软件基于 Linux Ubuntu20.04 操作系统与 ROS Noetic 框架开发,构建模块化 3 层软件架构,分设信息感知、运动规划、驱动控制层,分别实现传感器数据采集处理、坡口特征提取与轨迹规划、移动底盘及机械臂协同控制,各功能以独立 ROS 节点部署,通过话题通信方式完成数据交互。

受最佳操作空间概念的启发,对移动机械臂使用的控制策略为^[13]分散式控制策略,拟采用移动机械臂多站位分段式结合缝自动跟踪的总体方案,该方案通过“移动

底盘静止—局部扫描跟踪—全局切换站位”的迭代过程实现对大尺度空间结合缝的跟踪,如图2所示。该系统的整体工作流程为:首先,移动机械臂运动至初始站位,保持移动底盘静止,机械臂带动面结构光相机顺结合缝方向采集多帧构件表面点云图像,通过点云处理算法提取结合缝信息;其次,基于结合缝信息,规划机器人末端工具姿态,驱动机械臂带动末端工具跟踪结合缝轨迹;然后,规划移动底盘期望移动路径,控制移动底盘沿期望移动路径从当前站位移动到下一站位。系统通过迭代执行上述闭环控制流程,当检测到结合缝终点时终止控制流程。

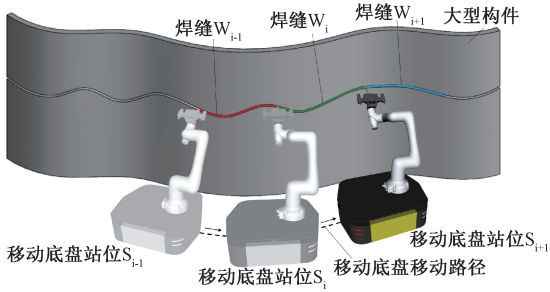


图2 移动机械臂多站位分段式结合缝自动跟踪方案

Fig. 2 The multi-station segmented automatic seam tracking scheme using mobile manipulator

2 空间结合缝自动识别算法

2.1 基于ISS和点对面ICP算法的点云拼接

为得到大视场的构件三维成像,需要对多个视角拍摄到的多帧点云图像进行拼接。本文通过手眼标定^[14-15]、机械臂坐标系转换将各视角成像的点云转换至机械臂基坐标系下,实现点云粗拼接^[16]。然而由于相机外参标定、手眼标定、机械臂绝对定位存在误差,粗拼接后的点云图像仍不能完全精准地拼接在一起。为保证结合缝提取的精度,需要进行更为准确的精拼接以减少配准误差。

点对面的迭代最近点(iterative closest point, ICP)配准算法以“点到切平面距离”来最小化误差损失函数,通过迭代计算对应点对之间的变换矩阵,并将每次的计算结果代入误差损失函数,直至获取最优刚体变换矩阵 $M_{opt}(R, T)$,从而实现点云的精准定位。设定误差损失函数为:

$$M_{opt}(R, T) = \operatorname{argmin}_M \sum_{i=1}^k [(Mp_j - q_i) \cdot n_i]^2 \quad (1)$$

式中: M 表示旋转矩阵 $R(\alpha, \beta, \gamma)$ 和平移矩阵 $T(t_x, t_y, t_z)$ 组成的变换矩阵; q_i 与 p_j 分别表示目标点云与源点云中的对应点对; k 表示目标点云的点云数量; n_i 表示点 q_i 所在切平面的法向量。

因为两帧点云的差异较大,难以直接使用点云配准算法进行点云拼接,先采用基于八叉树的邻域搜索方法提取两帧点云图像的重叠区域点云集。但若直接对重叠区域点云集进行配准,点云数据量大,耗时较长,故本文通过提取关键特征点(intrinsic shape signatures, ISS)^[17]分别作为目标点云与源点云,可以在保留点云重要特征的同时有效减少点云处理数据量。

构建点 p_i 与其所有邻域点 p_{ij} 的加权协方差矩阵 $COV(p_i)$:

$$COV(p_i) = \frac{\sum_{j=1}^k \omega_{ij} (p_i - p_{ij})(p_i - p_{ij})^T}{\sum_{j=1}^k \omega_{ij}} \quad (2)$$

式中: k 表示点 p_i 的邻域点数量。

求解点 p_i 的加权协方差矩阵,获取其特征值 $\{\lambda_i^1, \lambda_i^2, \lambda_i^3\}$, 其中 $\lambda_i^1 > \lambda_i^2 > \lambda_i^3$, 若特征值满足给定阈值条件,则点 p_i 被视为 ISS 关键特征点,将其放入 ISS 特征点集中,阈值条件如下:

$$\begin{cases} \frac{\lambda_i^2}{\lambda_i^1} < \varepsilon_1 \\ \frac{\lambda_i^3}{\lambda_i^2} < \varepsilon_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: 阈值 ε_1 和 ε_2 经多次实验对比和分析,都设置为 0.8。

最后提取出两帧关键点云集数量分别为 607 和 625 个,有效减少了点云集数量,提升配准精度和计算效率。

对于提取后的关键点,式(1)中的 $(Mp_j - q_i) \cdot n_i$ 项能够线性变化为:

$$(Mp_j - q_i) \cdot n_i = \begin{pmatrix} M \cdot \begin{pmatrix} p_{ix} \\ p_{iy} \\ p_{iz} \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} q_{ix} \\ q_{iy} \\ q_{iz} \\ 1 \end{pmatrix} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} n_{ix} \\ n_{iy} \\ n_{iz} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

式(1)可以重新写为:

$$\min_M \sum_{i=1}^k \|(Mp_j - q_i) \cdot n_i\|^2 = \min_x |Ax - b|^2 \quad (5)$$

因此, $M_{opt}(R, T)$ 的求解可以转化为求解 x_{opt} 的线性最小二乘问题:

$$x_{opt} = \operatorname{argmin}_x |Ax - b|^2 \quad (6)$$

以大尺度曲面构件曲线型结合缝为例,设置采集点云图像帧数为 3 帧,应用上述方法获得点云间的精准坐标变换矩阵 $M_{opt}(R, T)$, 将源点云变换到目标点云的坐标系下,从而实现多视角点云图像的精拼接,经过体素滤波降采样后获取的三维点云模型效果如图3所示。

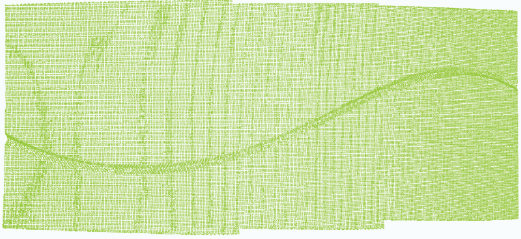


图 3 三维点云拼接效果

Fig. 3 Result of the 3D point cloud matching

基于 V 型坡口点云,提取的法向量代表着^[18]该点云所在局部邻域表面的法线方向。本文利用的方法为^[19]主成分分析法进行法向量估计,且通过分析点云邻域内的法向量方向变化情况可知,在平整的非特征区域,点云的法向量方向趋近一致、两点间法向量夹角值比较小;而在几何突变的特征区域,点云的法向量方向呈现明显的突变,两点间法向量夹角值比较大。因此,本文提出一种基于点间法向量夹角方差的表面变化特征描述子(surface variation feature descriptor, SVFD),来描述结合缝表面起伏变化情况,从而实现坡口区域点云的划分。

SVFD 的计算原理如图 4 所示,提取坡口点云的具体步骤如下。

1) 对给定查询点 p_i 进行半径搜索,获取其半径为 r 的球形范围内的邻域点集 $M = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ik}\}$;遍历邻域点集,计算点 p_i 与每个邻域点 p_{ij} 的法向量夹角值及其算术平均值:

$$\begin{cases} \theta_{ij} = \arccos \frac{\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_{ij}}{|\mathbf{n}_i| \cdot |\mathbf{n}_{ij}|} \\ \bar{\theta}_i = \frac{\sum_{j=1}^k \theta_{ij}}{k} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{n}_i$ 为点 p_i 的法向量; $\mathbf{n}_{ij}$ 为邻域点 p_{ij} 的法向量; θ_{ij} 为法向量夹角; $\bar{\theta}_i$ 为其算术平均值。

2) 使用方差表征点 p_i 与其邻域点集法向量夹角的波动情况,从而建立点 p_i 的局部 SVFD:

$$\sigma_i = \frac{\sum_{j=1}^k (\theta_{ij} - \bar{\theta}_i)^2}{k} \quad (8)$$

式中: σ_i 表示邻域点 p_i 的局部 SVFD。

3) 当点云表面存在连续均匀形变(如母材表面)或孤立噪声点时,局部 SVFD 可能产生相似的高响应值,导致错误提取特征区域,需分析邻域内各点局部 SVFD 值的空间分布特性,扩大局部 SVFD 的描述范围,从而能够更好地反映点云的全局几何特征。分别对点 p_i 的每个邻域点 p_{ij} 进行半径搜索,寻找其各自的邻域点集,并以同样的方式建立起其局部 SVFD。依据点 p_i 与其所有邻域

点的局部 SVFD,构建点 p_i 的全局 SVFD:

$$\begin{cases} \bar{\sigma}_i = \frac{\sum_{j=1}^k \sigma_{ij}}{k} \\ SVFD(p_i) = \frac{\sum_{j=1}^k (\sigma_{ij} - \bar{\sigma}_i)^2}{k} \end{cases} \quad (9)$$

式中: σ_{ij} 表示邻域点 p_{ij} 的局部 SVFD; $\bar{\sigma}_i$ 表示点 p_i 所有邻域点局部 SVFD 的算术平均值; $SVFD(p_i)$ 表示构建点 p_i 的全局 SVFD。

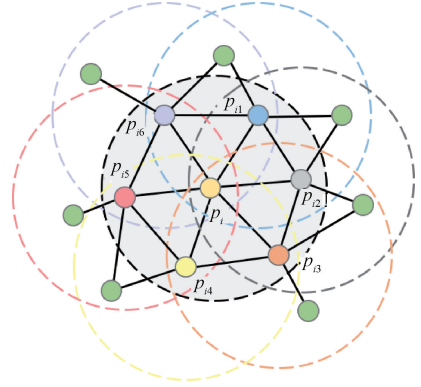


图 4 SVFD 计算原理

Fig. 4 Schematic diagram of SVFD

在构件坡口区域,由于法向量变化特征,其全局 SVFD 值会显著高于平坦区域而低于噪声区域。根据上述步骤,通过计算每个点的全局 SVFD,距离阈值的取值与坡口尺寸强关联,取坡口宽度的 1/3(本文实验中坡口宽度为 5~10 mm),确保邻域范围能覆盖坡口斜面的局部凹凸特征,同时避免过大半径引入平坦区域的干扰。最终选择距离阈值 2 mm 进行半径搜索。通过统计分析平坦区域与坡口区域的 SVFD 值分布确定,平坦区域(无坡口)的 SVFD 值约为 0.000 002,坡口区域的 SVFD 值约为 0.000 015,取两者差值的中点作为筛选阈值 $T = 0.000 008 5$,将 SVFD 大于该值的点筛选出来即为边缘点。计算如图 4 所示的点云数据的表面变化特征描述子 SVFD,坡口点云提取效果如图 5 所示。

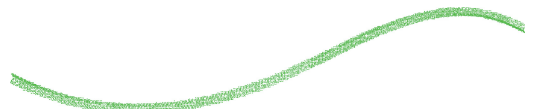


图 5 结合缝坡口区域提取效果

Fig. 5 Result of V-type region extraction on the seam

2.2 结合缝边缘点提取

在获得分割好的坡口区域点云集后,本文采用基于夹角判定的直接方法提取坡口点云边缘点。该算法的原

理是,通过计算给定查询点与其邻域点在拟合切平面上投影构成的向量夹角的大小,来判别给定查询点是否为边缘点。边缘点通常出现存在与之相邻两邻域点间构成的向量夹角远大于与其他邻域点构成的向量夹角的情况。其原理如图 6 所示。

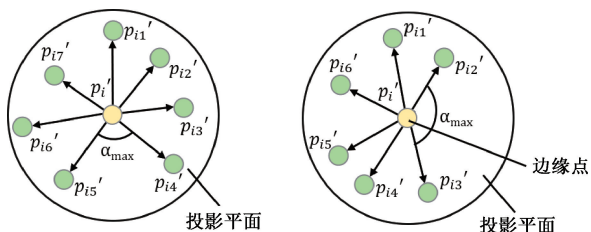


图 6 边缘提取算法示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the edge extraction algorithm

以给定查询点 p_i 为例,坡口点云的边缘点提取过程具体如下:将点 p_i 与其邻域点集 M 中的所有点向其切平面投影,以点 p_i 的投影点 p_i' 为角点,按照顺时针顺序,将投影后的邻域点集 M' 中的所有点与点 p_i' 两两连接形成一系列向量,依次计算两两向量间形成的夹角大小,获得夹角集合 J ,取 J 中的最大值 $\alpha_{\max}$,设定角度阈值 β 为 60° ,若 $\alpha_{\max} \geq \beta$,则判定该点 p_i 为边缘点。

本文利用坡口区域边缘点云沿结合缝特征点对称分布的关系,提出一种结合缝特征点提取方法,如图 7 所示,算法流程如下。

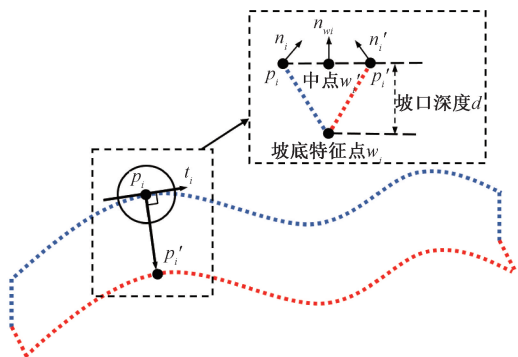


图 7 结合缝特征点提取方法示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the groove seam feature point extraction method

1) 遍历坡口边缘点集,对于每个点 p_i 获取其邻域点集,其搜索半径 r 远小于坡口宽度。建立已处理点的索引集合 δ ,遍历坡口边缘点集合,若点 $p_i \notin \delta$,将满足式(8)条件的邻域点 p_j 放入对应点候选点集 N 中。再从点集 N 中,选择与点 p_i 欧式距离最近的点作为两侧边缘对应点 p_i' 。若未找到满足式(8)条件的对应点,则视点 p_i 为无效边缘点,将其索引加入 δ ,同样不再参与遍历搜索。

$$\begin{cases} p_j \notin \delta \\ 0.8w \leq \|p_j - p_i\| \leq 1.2w \\ \left| \arccos\left(\frac{(p_j - p_i) \cdot \mathbf{t}_i}{\|p_j - p_i\|}\right) - 90^\circ \right| \leq \Delta\theta \\ \left| \arccos\left(\frac{(p_j - p_i) \cdot \mathbf{n}_i}{\|p_j - p_i\|}\right) \right| \geq \Delta\theta \end{cases} \quad (10)$$

式中: w 为坡口宽度值; $\mathbf{t}_i$ 为点 p_i 的局部切向量,角度阈值 $\Delta\theta = 5^\circ$ 。

2) 计算点 p_i 与对应点 p_i' 的几何中点 w_i' 与其法向量 $\mathbf{n}_{wi}$:

$$\begin{cases} w_i' = \frac{p_i + p_i'}{2} \\ \mathbf{n}_{wi} = \frac{\mathbf{n}_i + \mathbf{n}_i'}{\|\mathbf{n}_i + \mathbf{n}_i'\|} \end{cases} \quad (11)$$

3) 根据中间点的法向量 $\mathbf{n}_{wi}$ 与已知的坡口深度 d ,计算出结合缝特征点 w_i ,并将结合缝特征点放入结合缝特征点集 W 中。

$$w_i = w_i' - d \cdot \mathbf{n}_{wi} \quad (12)$$

此时,结合缝特征点集 W 中的数据较为密集,需对其进行体素滤波,用蓝色点云表示提取得到的结合缝特征点,提取效果如图 8 所示。

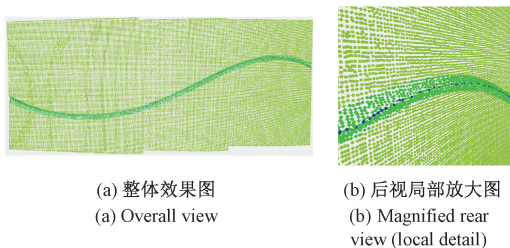


图 8 结合缝特征点提取效果

Fig. 8 Result of groove seam feature point extraction

3 结合缝轨迹规划与跟踪

3.1 基于 NURBS 曲线的结合缝轨迹优化

前文提取到的结合缝特征点相对离散且不均匀,为保证移动机械臂跟踪结合缝过程的连续性与平稳性,需对提取到的结合缝特征点进行平滑处理,获取理想的结合缝路径点序列。

本文使用 NURBS(non-uniform rational B-spline)曲线拟合结合缝特征点,获取结合缝轨迹。NURBS 曲线是一种非均匀有理 B 样条曲线,它在传统 B 样条曲线的理论基础之上引入权因子 ω 调整控制点作用于曲线的权重,拟合更为精确,曲线形状更为灵活。

使用 NURBS 曲线拟合结合缝特征点集 W 获取结合缝轨迹后,基于等弧长原则^[20],将 W 中两端的点作为曲

线的起止点,对结合缝轨迹进行离散化处理获取结合缝路径点,并确保相邻结合缝路径点之间的弧长严格相等,得到结合缝路径点序列 W 。

3.2 末端工具姿态规划

要控制机械臂搭载末端工具(如焊枪、胶枪)跟踪结合缝,需为结合缝路径点规划合适的跟踪姿态。不同的拼接工艺,所需机器人末端姿态也不同。本文以焊接为例,结合焊接工艺要求,提出一种焊枪姿态规划方法。以结合缝上两相邻路径点 w_i 与 w_{i+1} 为例,焊枪基准姿态示意图如图 9 所示。

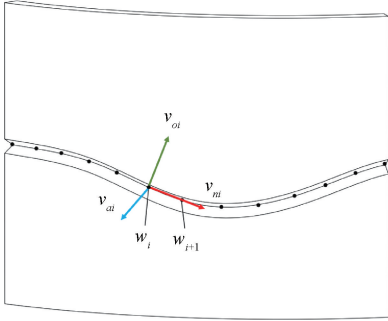


图 9 焊枪基准姿态示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the welding torch reference orientation

焊枪的基准前进矢量 $\mathbf{v}_n$ 为结合缝的局部切线方向,基准接近矢量 $\mathbf{v}_a$ 为路径点法向量,基准法线矢量 $\mathbf{v}_o$ 则可通过基准接近矢量 $\mathbf{v}_a$ 与基准前进矢量 $\mathbf{v}_n$ 叉乘计算。则路径点 w_i 上的焊枪基准姿态为:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_{ni} = \frac{\overrightarrow{w_i w_{i+1}}}{|\overrightarrow{w_i w_{i+1}}|} \\ \mathbf{v}_{oi} = \mathbf{v}_{ai} \times \mathbf{v}_{ni} \end{cases} \quad (13)$$

焊枪的前进矢量 $\mathbf{T}_n$ 、法线矢量 $\mathbf{T}_o$ 可分别由式(14)、(15)计算得到。

$$\begin{cases} \mathbf{v}_n' = \mathbf{v}_n \cos \alpha + (\mathbf{v}_o \cdot \mathbf{v}_n) \sin \alpha + (1 - \cos \alpha) (\mathbf{v}_o \cdot \mathbf{v}_n) \mathbf{v}_o \\ \mathbf{T}_n = \frac{\mathbf{v}_n'}{|\mathbf{v}_n'|} \end{cases} \quad (14)$$

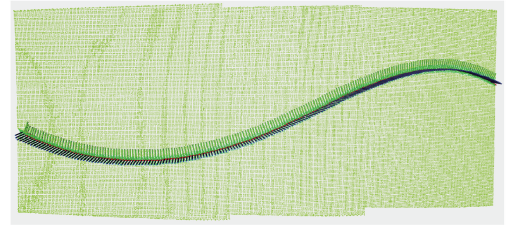
$$\begin{cases} \mathbf{v}_o' = \mathbf{v}_o \cos \beta + (\mathbf{T}_n \cdot \mathbf{v}_o) \sin \beta + (1 - \cos \beta) (\mathbf{T}_n \cdot \mathbf{v}_o) \mathbf{T}_n \\ \mathbf{T}_o = \frac{\mathbf{v}_o'}{|\mathbf{v}_o'|} \end{cases} \quad (15)$$

焊枪的接近矢量 $\mathbf{T}_a$ 则可通过前进矢量 $\mathbf{T}_n$ 和法线矢量 $\mathbf{T}_o$ 叉乘计算:

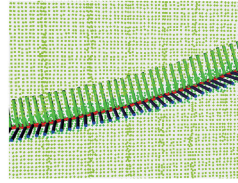
$$\mathbf{T}_a = \mathbf{T}_n \times \mathbf{T}_o \quad (16)$$

重复上述计算过程求出所有结合缝路径点的焊枪跟

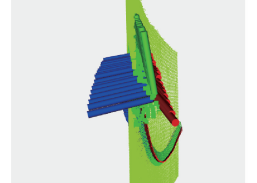
踪姿态。结合缝路径点的焊枪姿态规划效果如图 10 所示。



(a) 整体正视效果
(a) Overall front view



(b) 局部正视放大图
(b) Magnified front view
(local detail)



(c) 局部侧视放大图
(c) Magnified side view
(local detail)

图 10 焊枪姿态规划效果

Fig. 10 Result of the welding torch orientation planning

3.3 移动底盘路径规划

由于大型构件的曲率可能存在不规则变化,移动底盘的运动必须贴近结合缝,并始终与其走向保持一致,才能确保移动机械臂的工作空间始终覆盖到结合缝。因此,本文基于结合缝和机械臂可操作度约束条件,提出一种移动底盘移动路径规划方法。

可操作度是定量描述机械臂运动学性能的重要指标之一,反映了^[21-22]机械臂整体的运动灵活性。本文使用机械臂运动学雅可比矩阵 $\mathbf{J}(\theta)$ 的行列式分析机械臂的可操作度 ω , 具体计算方法如式(17)所示。

$$\omega = \sqrt{\det(\mathbf{J}(\theta) \mathbf{J}^T(\theta))} = \sqrt{\lambda_1 \lambda_2 \cdots \lambda_n} \quad (17)$$

使用蒙特卡洛法在 MATLAB 软件中绘制出工具中心点(tool central point, TCP)的可操作度分布如图 11 所示。

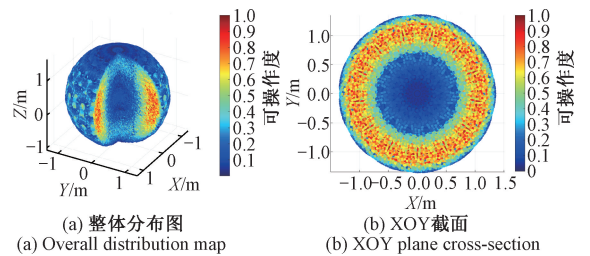


图 11 TCP 的可操作度分布

Fig. 11 Distribution of the TCP manipulability index

可操作度越接近于 1,机械臂灵活性越好,离奇异位

形越远。故依据图 11(b) 所示,选取 $\omega > 0.7$ 的区域,作为机械臂的灵活工作空间,其外径约为 $R_1 = 1\,250\text{ mm}$,内径约为 $R_2 = 800\text{ mm}$ 。

如图 12 所示,本文基于等距偏置思想对移动底盘的移动路径进行动态规划。将结合缝路径点序列 W 从机械臂基坐标系变换至移动底盘坐标系,用 ${}^M W$ 表示,在机械臂灵活工作空间内设定偏置半径 R 。以结合缝路径点 ${}^M w_i$ 为例,令移动底盘的移动路径点 M_i 收敛于以 ${}^M w_i$ 为圆心、半径为 R 的圆上。同时考虑移动底盘姿态,移动底盘的前进方向与结合缝路径点 w_i 切线方向的偏差角收敛于 0。

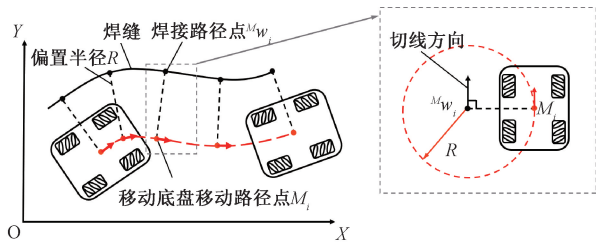


图 12 移动底盘的期望移动路径规划示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the planned path for the mobile platform

此时,移动底盘移动路径 $M_i(x_{M_i}, y_{M_i}, \varphi_{M_i})$ 、结合缝路径点 ${}^M w_i({}^M x_{w_i}, {}^M y_{w_i}, {}^M z_{w_i})$ 切线方向基本一致,直观验证了底盘运动轨迹能持续向结合缝目标走向收敛,未出现发散或偏移现象,如图 13 所示。

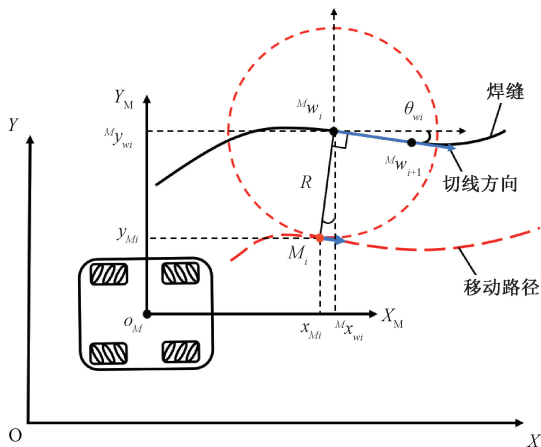


图 13 移动底盘跟踪结合缝的位置关系图

Fig. 13 Positional relationship diagram for the mobile platform tracking a groove seam

此时,移动底盘移动路径点 $M_i(x_{M_i}, y_{M_i}, \varphi_{M_i})$ 为:

$$\begin{cases} x_{M_i} = {}^M x_{w_i} + K_{off} \cdot R \sin \theta_{w_i} \\ y_{M_i} = {}^M y_{w_i} - K_{off} \cdot R \cos \theta_{w_i} \\ \varphi_{M_i} = \theta_{w_i} = \arctan\left(\frac{{}^M y_{w_{i+1}} - {}^M y_{w_i}}{{}^M x_{w_{i+1}} - {}^M x_{w_i}}\right) \end{cases} \quad (18)$$

式中: K_{off} 为偏置系数,当移动底盘在结合缝右侧偏置跟踪时, $K_{off} = 1$;当移动底盘在结合缝左侧偏置跟踪时, $K_{off} = -1$ 。

由于结合缝曲率存在变化,等距偏置后获得的移动底盘移动路径点分布可能不均匀,使用线性插值方法对移动路径点进行位置与角度插补,以保证移动底盘按照均匀、平滑的路径点移动。

4 实验

4.1 实验设备

为验证本课题提出的结合缝特征提取算法与移动机械臂结合缝跟踪方法的有效性 with 适用性,搭建移动机械臂实验平台,其中 AGV 小车选用 Clearpath 公司开发的 Ridgeback 全向移动底盘,其采用麦克纳姆轮驱动,最大速度 1.1 m/s ,最大负载 100 kg ,本体重量 135 kg ;工业机器人选用珞石 xMate CR7 柔性协作机械臂,该机械臂为六自由度,重复定位精度 $\pm 0.02\text{ mm}$,最大臂展 988 mm ,最大负载 7 kg ;相机选用如本科技有限公司研发的 RVC-X E10 3D 面结构光相机,其抗环境光干扰为 $5\,000\text{ Lux}$,点云采集速度 15 fps 。

实验场景选择 4 种典型大尺度构件,均带有对称 V 型坡口,分别是平板带直线结合缝、平板带曲线结合缝、曲面板带直线结合缝,以及曲面板带曲线结合缝,如图 14 所示。

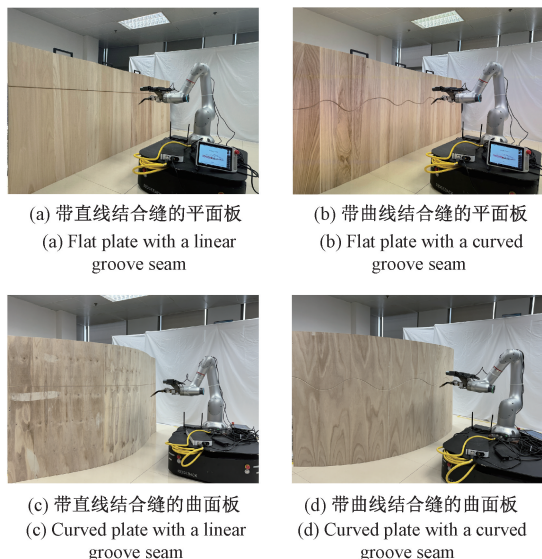


图 14 待跟踪大型构件实物

Fig. 14 Photograph of the large-scale component to be tracked

4.2 结合缝提取实验

使用激光跟踪仪及其 T-Probe 测头采集构件结合缝

信息,作为结合缝的实际基准。为避免实验过程中存在偶然性,移动机械臂跟踪每种大尺度构件结合缝 10 次,对结合缝进行提取实验。以曲面板曲线型结合缝第 1 组提取实验为例,将获取的结合缝路径点与激光跟踪仪获取的实际结合缝路径点进行对比,结果如图 15 所示。

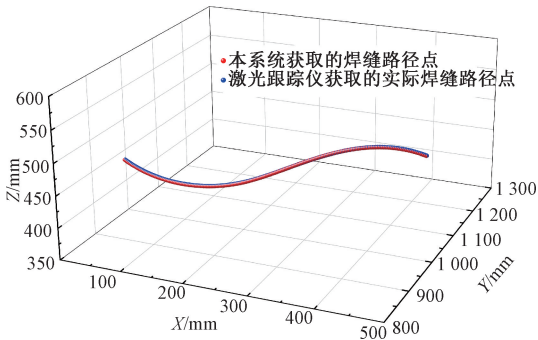


图 15 本文方法获取的结合缝路径点与激光跟踪仪获取的实际结合缝路径点对比

Fig. 15 Comparison of seam path points obtained by the proposed method and actual path points acquired by laser tracker

图 16 为 4 种结合缝类型在 10 组实验中的各组提取平均误差与 10 组提取平均误差。表 1 是 4 种结合缝类型在 10 组实验中的平均误差、最大误差与均方根误差。

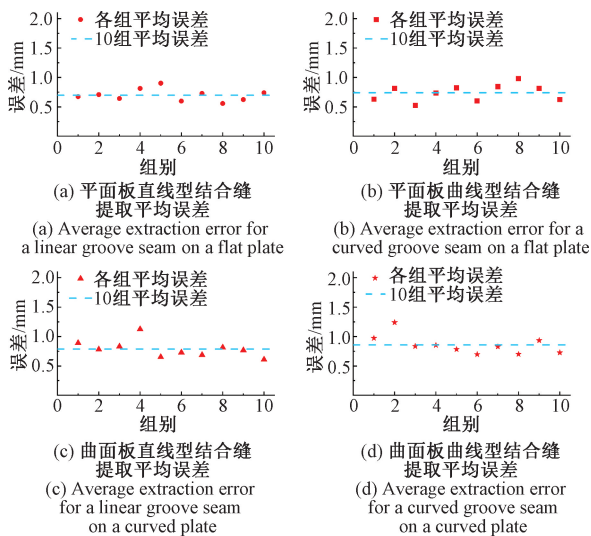


图 16 10 组实验结合缝提取平均误差

Fig. 16 Average groove seam extraction errors across ten experimental trials

针对 4 种结合缝类型,在 10 组实验中,结合缝提取的平均误差不超过 0.857 mm,最大误差不超过 1.239 mm,均方根误差不超过 0.871 mm,能够满足实际跟踪需求。

表 1 10 组实验结合缝提取误差			
Table 1 Groove seam extraction errors from ten experimental trials (mm)			
结合缝类型	平均误差	最大误差	均方根误差
平面板直线型结合缝	0.698	0.901	0.705
平面板曲线型结合缝	0.740	0.978	0.752
曲面板直线型结合缝	0.789	1.127	0.801
曲面板曲线型结合缝	0.857	1.239	0.871

4.3 结合缝跟踪实验

为进一步直观展示结合缝提取与跟踪的可靠性,使用涂胶的方式来展示机械臂跟踪结合缝效果。将无线电动胶笔通过工装固定在机械臂末端法兰上,并对其进行工具坐标系标定。以曲面板曲线型结合缝为例,机械臂跟踪涂胶效果如图 17 所示,机械臂涂胶效果良好,可以满足实际跟踪需求。

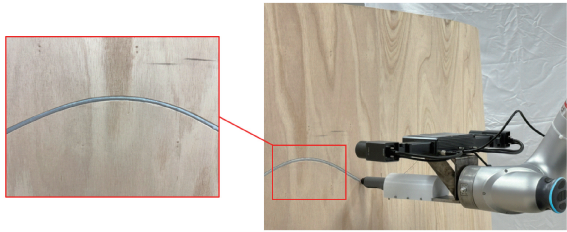


图 17 机械臂跟踪涂胶效果

Fig. 17 Glue dispensing effect achieved by manipulator tracking

将激光跟踪仪的靶球通过磁吸的方式固定在移动底盘上,实时测量移动底盘在激光跟踪仪坐标系下的位置,进一步测量移动底盘对期望移动路径的跟踪精度。移动底盘从当前站位切换到下一站位的移动效果如图 18 所示。

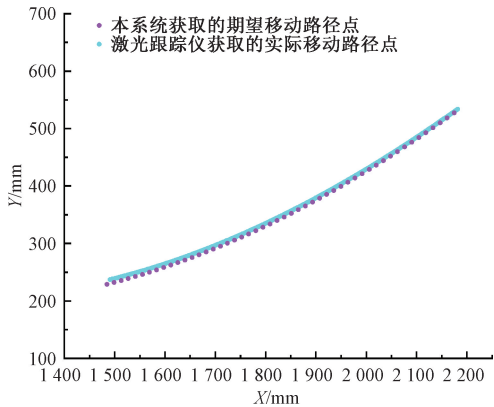


图 18 本文获取的期望移动路径点与激光跟踪仪获取的实际移动路径点对比

Fig. 18 Comparison of the desired mobile platform path points obtained by the proposed method and actual path points acquired by laser tracker

同样,为避免实验过程中存在偶然性,针对 4 种结合缝类型,让移动机械臂分别位于大尺度构件的 10 个不同相对位置,进行 10 次移动底盘路径跟踪实验。图 19 为针对 4 种结合缝类型,在 10 组实验中移动底盘路径跟踪的各组平均误差与 10 组平均误差图。表 2 是移动底盘在 10 组实验中的路径跟踪平均误差、最大误差与均方根误差。

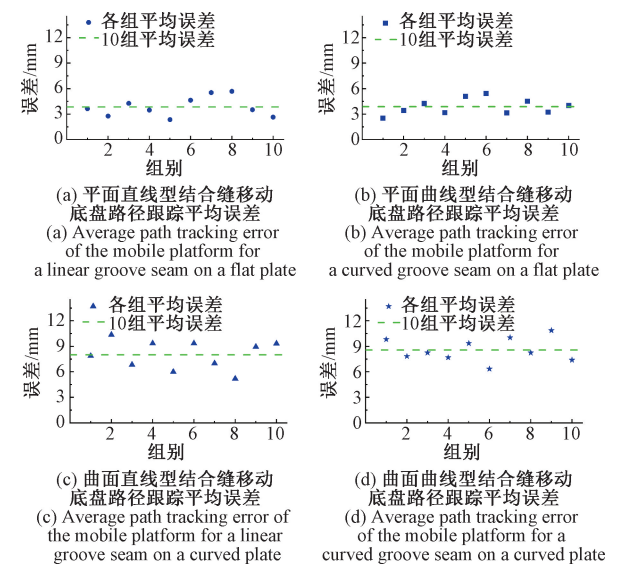


图 19 10 组实验移动底盘路径跟踪平均误差
Fig. 19 Average mobile platform path tracking errors across ten experimental trials

表 2 10 组实验移动底盘路径跟踪误差

Table 2 Mobile platform path tracking errors from ten experimental trials (mm)			
结合缝类型	平均误差	最大误差	均方根误差
平面板直线型结合缝	3.852	5.682	4.006
平面板曲线型结合缝	3.884	5.437	3.972
曲面板直线型结合缝	8.012	10.351	8.167
曲面板曲线型结合缝	8.577	10.864	8.680

针对各类型结合缝,移动底盘能够顺利沿着期望路径点移动,在 10 组实验中,平均误差不超过 8.577 mm,最大误差不超过 10.864 mm,均方根误差不超过 8.680 mm。低于该行业指标阈值,故移动底盘路径跟踪精度满足作业需求。

以曲面板曲线型结合缝为例,对整条结合缝移动机械臂跟踪涂胶效果如图 20 所示。在整个曲面板涂胶过程中,移动底盘共切换站位 4 次。由此可以看出,本文搭建的移动机械臂可以实现对大型构件的大尺度空间结合缝的跟踪作业,跟踪效果基本满足实际跟踪需求。



图 20 曲面板曲线型结合缝整体涂胶效果
Fig. 20 Overall glue dispensing effect on a curved plate with a curved groove seam

5 结 论

面向大尺度构件拼接结合缝的自动化跟踪需求,本文提出一种大型构件 V 型结合缝的移动机械臂自动跟踪方法。本文首先通过 ISS 算法提取坡口关键特征点,随后借助 SVFD 描述子实现坡口区域精准分割,最后通过 ICP 算法完成点云配准,为后续轨迹规划与协同控制提供了可靠的数据基础。基于该特征数据,本文采用 NURBS 曲线对结合缝中心线进行平滑拟合,生成了兼具精度与运动平顺性的机械臂跟踪轨迹;同时结合“底盘粗定位 + 机械臂精补偿”的分层控制体系,实现了移动底盘路径与机械臂末端轨迹的协同联动。针对 4 种不同类型的结合缝借助涂胶进行结合缝提取实验、结合缝跟踪实验和移动底盘路径跟踪实验。实验结果表明,机械臂涂胶成型质量优良,跟踪精度完全满足实际工程作业要求,为大型构件拼接结合缝自动化处理提供了可靠技术支撑。

本文对面向大型构件的移动机械臂自动跟踪技术的研究虽取得一定成果,但仍存在可以进一步优化与完善的地方。下一步研究将开发角接、搭接等典型类型的结合缝特征识别与跟踪算法,提高系统的智能化处理能力。

参考文献

[1] ZHU CH H, WANG Z H, ZHE Z M, et al. Design and modeling of pipeline welding robot based on Pieper criterion and construction of integrated intelligent welding system [J]. Welding in the World, 2025, 69: 2853-2867.

[2] PESSI P, HANDROOS H, WU H. Mobile parallel robot for assembly and repair of ITER vacuum vessel [J]. Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application, 2008, 35(2): 160-168.

- [3] GUO J C, ZHU Z M, SUN B W, et al. A novel field box girder welding robot and realization of all-position welding process based on visual servoing [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 63: 70-79.
- [4] LI C Y, WU H P, ESKELINEN H, et al. Mobile parallel robot machine for heavy-duty double-walled vacuum vessel assembly [J]. *Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application*, 2021, 48(4): 523-531.
- [5] KERMORGANT O. A magnetic climbing robot to perform autonomous welding in the shipbuilding industry [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, 53: 178-186.
- [6] LIU CH, WANG H, HUANG Y, et al. Welding seam recognition and tracking for a novel mobile welding robot based on multi-layer sensing strategy [J]. *Measurement Science and Technology*, 2022, 33(5): 055109.
- [7] CHOI T, PARK J, BAK J, et al. The development of software to automate the laser welding of a liquefied natural gas cargo tank using a mobile manipulator [J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(1): 134.
- [8] XU Y, LIU Y Q, LIU X, et al. Research on motion planning system for wall-climbing mobile manipulator for large steel structures welding operation [J]. *Industrial Robot: The international journal of robotics research and application*, 2024, 52(1): 73-83.
- [9] 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.
- [10] 冯田, 冯志辉, 南亚明, 等. 基于特征向量提取的点云配准算法 [J]. *电子测量技术*, 2022, 45(15): 57-62.
- FENG T, FENG ZH H, NAN Y M, et al. Point cloud registration algorithm based on feature vector extraction [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(15): 57-62.
- [11] DIONE A C A, HASEGAWA S. Stable posture tracking for modular spatial hyper-redundant serial arms using selective control points [J]. *Advanced Robotics*, 2024, 38(1): 14-28.
- [12] 魏丽君, 吴海波, 刘海龙, 等. 基于 D-H 算法的移动机械臂正运动学研究 [J]. *计量与测试技术*, 2020, 47(10): 1-5.
- WEI L J, WU H B, LIU H L et al. Research on trajectory planning of mobile manipulator based on improved gradient projection algorithm [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2020, 47(10): 1-5.
- [13] FAREH R, SAAD M R, SAAD M, et al. Trajectory tracking and stability analysis for mobile manipulators based on decentralized control [J]. *Robotica*, 2019, 37(10): 1732-1749.
- [14] 马伯瑞, 杨明来, 曹振丰. 基于局部平均的钢轨轮廓点云精简方法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2025, 39(2): 205-212.
- MA B R, YANG M L, CAO ZH F. Rail profile point cloud simplification method based on local averaging [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2025, 39(2): 205-212.
- [15] 毛成林, 于瑞强, 宋爱国. 一种结合 TCP 标定的深度相机手眼标定方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(3): 280-286.
- MAO CH L, YU R Q, SONG AI G. A hand-eye calibration method of depth camera combined with TCP calibration [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(3): 280-286.
- [16] 张自杰, 张国良, 曾静, 等. 基于双视角点云拼接的机械手抓取方法 [J]. *国外电子测量技术*, 2022, 41(11): 102-108.
- ZHANG Z J, ZHANG G L, ZENG J, et al. Grasping method of manipulator based on two registered point clouds [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2022, 41(11): 102-108.
- [17] 汤慧, 周明全, 耿国华. 基于扩展的点特征直方图特征的点云匹配算法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(24): 203-210.
- TANG H, ZHOU M Q, GENG G H. Point cloud registration algorithm based on extended point feature histogram feature [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(24): 203-210.
- [18] SANCHEZ J, DENIS F, COEURJOLLY D, et al. Robust normal vector estimation in 3D point clouds through iterative principal component analysis [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 163: 18-55.
- [19] 于喜俊, 段勇. 基于 PointCloudTransformer 和优化集成学习的三维点云分类 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(6): 143-153.
- YU X J, DUAN Y. 3D point cloud classification based on PointCloudTransformer and optimized ensemble learning [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(6): 143-153.
- [20] LIU Y, SHI L, TIAN X CH. Weld seam fitting and welding torch trajectory planning based on NURBS in intersecting curve welding [J]. *The International Journal*

of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95(5): 2457-2471.

[21] ZHANG X L, FAN B H, WANG CH J, et al. Analysis of singular configuration of robotic manipulators [J]. Electronics, 2021, 10(18): 2189.

[22] SHI X H, GUO Y, CHEN X CH, et al. Kinematics and singularity analysis of a 7-DOF redundant manipulator[J]. Sensors, 2021, 21(21): 7257.

作者简介



鲁苑凯, 2015 年于西南大学获得学士学位, 2018 年于山东建筑大学获得硕士学位, 现为福州大学机械工程及自动化学院博士研究生, 主要研究方向为机器人技术。
E-mail: 850650193@qq.com

Lu Yuankai received his B. Sc. degree from Southwest University in 2015 and M. Sc. degree from Shandong Jianzhu University in 2018. He is now a Ph. D.

candidate in the College of Mechanical Engineering and Automation at Fuzhou University. His main research interest includes robotics technology.



吴海彬 (通信作者), 1996 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 1999 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位, 2002 年于浙江大学获得博士学位, 现为福州大学机械工程及自动化学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为机器人技术。
E-mail: 25659480@qq.com

Wu Haibin (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 1996, M. Sc. degree from Liaoning Technical University in 1999, and Ph. D. degree from Zhejiang University in 2002. He is now a professor and Ph. D. supervisor in the College of Mechanical Engineering and Automation at Fuzhou University. His main research interest includes robotics technology.