

DOI: 10.3901/JME.2022.14.116

# 基于轨迹在线识别的3D折线焊缝机器人摆动 GMAW实时跟踪方法\*

贾爱亭 洪波 李湘文 高佳篷 吴格飞 屈原缘  
(湘潭大学机械工程学院 湘潭 411105)

**摘要:** 3D折线焊缝大量存在于海工装备、大型起重装备、物流运输装备等制造领域中,属于典型的复杂轨迹焊缝,主要通过示教再现的方式进行自动焊接。大量的重复示教工作严重限制了焊接效率和质量,实现焊缝实时跟踪是提高焊接质量和效率的有效途径。针对3D折线焊缝实时跟踪问题,建立一种基于轨迹在线识别的机器人摆动熔化极气体保护焊(Gas metal arc welding, GMAW)实时跟踪系统。首先,提出一种基于点云数据处理的3D折线焊缝起焊点焊枪位姿检测方法,获取焊缝起焊点焊枪位姿;利用3D折线焊缝位姿信息在线快速提取方法获取焊接过程中焊缝位姿信息,实现焊缝轨迹在线识别。然后,利用摆动电弧偏差识别方法获取焊缝偏差。最后,提出一种基于轨迹在线识别的3D折线焊缝机器人摆动GMAW实时跟踪方法,利用模糊PID控制方法实现焊缝实时跟踪。针对折角范围为 $130^{\circ} \sim 230^{\circ}$ 的典型3D折线焊缝的焊接试验表明,起焊点寻位位置检测误差小于0.4 mm,姿态估计误差小于 $1.8^{\circ}$ ,焊缝跟踪误差不超过0.4 mm,满足3D折线焊缝实时跟踪的要求。

**关键词:** 3D折线焊缝; GMAW; 轨迹在线识别; 焊缝跟踪

**中图分类号:** TG409

## Real Time Tracking Method of 3D Zigzag Welding Robot Swing GMAW Based on Online Trajectory Detection

JIA Aiting HONG Bo LI Xiangwen GAO Jiapeng WU Gefei QU Yuanyuan  
(College of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105)

**Abstract:** 3D zigzag-line welding seams are extensively found in the manufacturing of marine engineering equipment, heavy lifting equipment, and logistics transportation equipment. They are typical complex trajectory welds, and they are mainly automatically welded through teaching. A large number of repeated teaching work severely limits welding efficiency and quality. Realizing real-time tracking of welds is an effective way to improve welding quality and efficiency. Aiming at the problem of real-time tracking of 3D zigzag-line welding seams, a robot swinging GMAW real-time tracking system based on trajectory detection is established. Firstly, a method based on point cloud data processing is proposed to detect the starting pose of 3D zigzag-line welding seam, and the pose information is obtained by the online fast extraction method to realize the online detection of 3D zigzag-line welding seam trajectory. Secondly, the weld deviation is obtained by using the swing arc deviation identification method. Finally, a real-time tracking method of 3D zigzag-line welding seam robot swing GMAW based on on-line trajectory detection is proposed, and the fuzzy PID control method is used to realize the real-time tracking of 3D zigzag-line welding seam. Welding experiments for typical 3D zigzag-line welding seams with a folding angle range of  $130^{\circ} \sim 230^{\circ}$  show that the detection error of the starting position is less than 0.4 mm, the attitude estimation error is less than  $1.8^{\circ}$ , and the welding seam tracking error does not exceed 0.4 mm, satisfying the

\* 国家自然科学基金(51575468)、长株潭标志性工程计划重大标志性创新示范工程(2019XK2303)、潭市科技计划(ZD-ZD20191007)、湖南省自然科学基金(2020JJ4089)、2019年湖南省研究生科研创新(XDCX2019B099)和2020年湖南省研究生科研创新(XDCX2020B128)资助项目。20210701收到初稿,20211210收到修改稿

Requirements for real-time tracking of 3D zigzag-line welding seams.

**Key words:** 3D zigzag-line welding seam; gas metal arc welding; online trajectory detection; seam tracking

## 0 前言

3D 折线焊缝大量存在于海工装备、大型起重装备、物流运输装备等制造领域中,属于典型的复杂轨迹焊缝。3D 折线焊缝工件由不同折角角度的折线板和平板通过定位焊缝装配而成,通常为大型构件,难以使用高精度夹具严格固定其位姿,在焊接过程中焊缝位姿在三维空间中无规律变化,且 3D 折线焊缝工件板材中厚板居多,要求摆动 GMAW 工艺。目前,3D 折线焊缝几乎全部通过工人手工焊接完成,与此同时,也存在机器人离线编程模式或示教模式实现机器人自动焊接。但是,机器人离线编程模式和示教模式存在编程效率低、示教工作量大以及不能实时获取焊缝偏差等缺点,严重影响了 3D 折线焊缝焊接的效率和质量<sup>[1-3]</sup>。实现 3D 折线焊缝实时跟踪是提高其焊接效率和质量的有效途径<sup>[4-6]</sup>。

近年来,基于视觉的三维焊缝识别技术成为了研究的热点<sup>[7-10]</sup>。PENG 等<sup>[11]</sup>针对机器人弧焊利用 RGB-D 传感器,提出了一种基于三维点云数据处理的坡口自动识别和焊缝轨迹生成方法,该方法可以很好的适应 V 型坡口焊缝的识别以及轨迹生成。ZENG 等<sup>[12]</sup>提出了一种基于视觉的窄对接焊缝焊前三维路径检测方法,该方法适用于窄对接焊缝焊接前的坡口识别,可应用于三维复杂零件的路径示教领域。YAN 等<sup>[13]</sup>提出了一种基于激光结构光扫描的搭接焊缝路径自动生成方法,通过激光扫描工件获取焊缝路径上焊接接头的点云数据,并利用三次光滑样条算法精确重建焊缝的三维模型,该方法对间隙为 0~2 mm 的复杂曲线焊缝具有很好的适应性。VRUSHALI 等<sup>[14]</sup>提出了一种独立于工件形状的三维点云焊缝聚类提取算法,使用点云库(Point cloud library, PCL)进行点云数据处理,该方法可以实现三维焊缝提取和焊缝姿态估计,在 5 轴机器人上实现了对接头焊缝实时跟踪。YANG 等<sup>[15]</sup>融合待焊工件的形状信息,提出了一种基于点云分割的离线 3D 焊缝提取算法,根据焊缝的空间结构,建立了焊缝的数学模型,实现了 3D 焊缝离线路径规划和姿态估计。然而,以上基于视觉的三维焊缝检测方法基本都是通过离线的方式针对三维结构相对简单的对接、搭接焊缝,且都没有针对摆动焊接工艺,难以实现 3D 折线焊缝机器人摆动 GMAW。

基于电弧<sup>[16-18]</sup>的焊缝跟踪方法不需要外加传感器、成本低廉以及实时性好等得到了较广泛的应用,由于其只能获取焊缝很小的局部信息,单一电弧传感的焊缝跟踪方法难以实现三维焊缝实时跟踪。针对 3D 折线焊缝机器人摆动 GMAW 焊缝实时跟踪的难题,本文提出了一种基于轨迹在线识别的 3D 折线焊缝机器人摆动 GMAW 实时跟踪方法,通过点云数据处理在线快速获取 3D 折线焊缝轨迹,利用电弧传感实时获取焊缝偏差。

## 1 3D 折线焊缝跟踪方法工作原理

为了实现焊缝实时跟踪,提出了一种基于轨迹在线识别的 3D 折线焊缝机器人摆动 GMAW 实时跟踪方法,工作原理如图 1 所示,其中主要包括 3D 折线焊缝起焊点焊枪位姿检测、3D 折线焊缝位姿信息在线提取、3D 折线焊缝偏差检测与调节。3D 折线焊缝典型工件如图 2 所示。

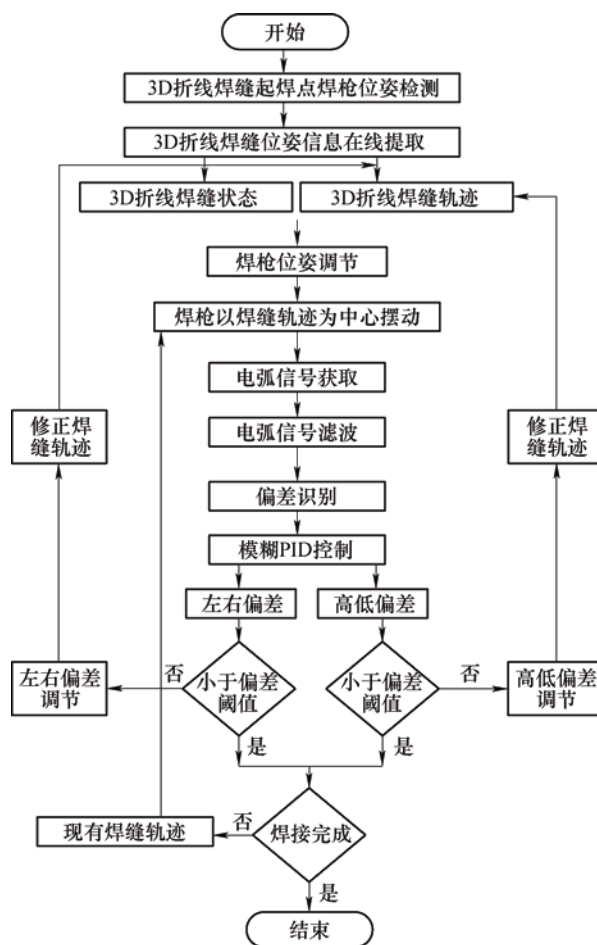


图 1 3D 折线焊缝实时跟踪原理

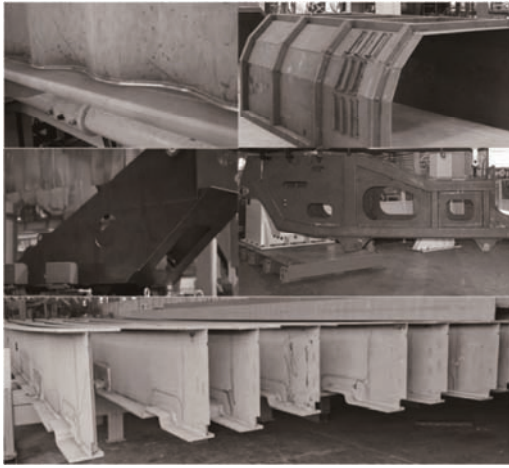


图 2 3D 折线焊缝典型工件

## 2 焊缝起焊点焊枪位姿检测方法

针对 3D 折线焊缝起焊点焊枪位姿检测的问题, 本文提出了一种基于激光位移传感的焊缝起焊点焊枪位姿检测方法。首先, 利用激光位移传感器获取工件二维信息, 使用斜率分析法实现焊缝起焊点位置检测。然后, 利用基于 RANSAC 三维点云平面提取的焊缝姿态估计方法实现起焊点焊枪姿态估计。

### 2.1 3D 折线焊缝起焊点位置检测

开始进行起焊点寻位时激光位移传感器从工作台开始扫描, 如图 3 所示。机器人在扫描方向上移动速度为 25 mm/s, 激光位移传感器采样时间间隔为 15 ms。

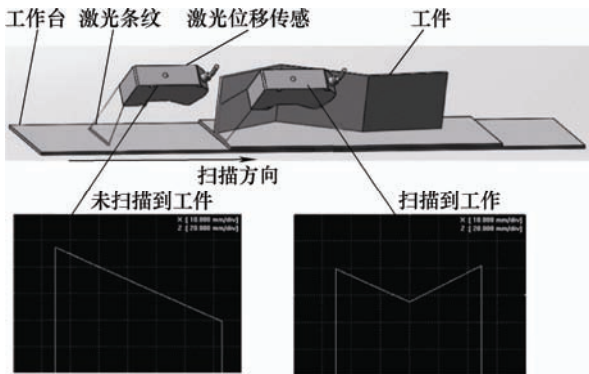


图 3 起焊点位置检测模型

由图 3 可见激光位移传感器在工件上扫描时获取的数据的特点, 未扫描到工件时每帧数据的斜率变化较小, 数据较平缓; 当扫描到工件时每帧数据上存在斜率突变的现象。鉴于以上数据特点, 对激光位移传感器数据进行斜率分析, 每个点处的斜率通过式(1)计算。

$$K_i = \frac{\frac{z_{i+1} - z_{i-1}}{2} + \frac{z_{i+2} - z_{i-2}}{2} + \frac{z_{i+3} - z_{i-3}}{2} + \frac{z_{i+4} - z_{i-4}}{2}}{4} \quad (1)$$

式中,  $z_{i-4}$ 、 $z_{i-3}$ 、 $z_{i-2}$ 、 $z_{i-1}$ 、 $z_{i+1}$ 、 $z_{i+2}$ 、 $z_{i+3}$ 、 $z_{i+4}$  分别为传感器  $x$  轴坐标,  $i-4$ 、 $i-3$ 、 $i-2$ 、 $i-1$ 、 $i+1$ 、 $i+2$ 、 $i+3$ 、 $i+4$  对应传感器  $z$  轴坐标值。利用式(1), 可以得到激光条纹中心线的所有  $K$  值, 如图 4 所示, 其中图 4a 为未扫描到工件时的数据图, 图 4b 为扫描到工件时的数据图。计算出每个点的  $K$  值后, 再比较相邻点的  $K$  值, 若激光条纹  $y_i$  满足式(2), 则起焊点位置为  $(x_{j+1}, y_i, z_{j+1})$ 。

$$|K_{j+1} - K_j| > k_{thd} \quad (2)$$

式中,  $k_{thd}$  为 3D 折线焊缝起焊点位置检测阈值, 通过大量试验获取的经验值。

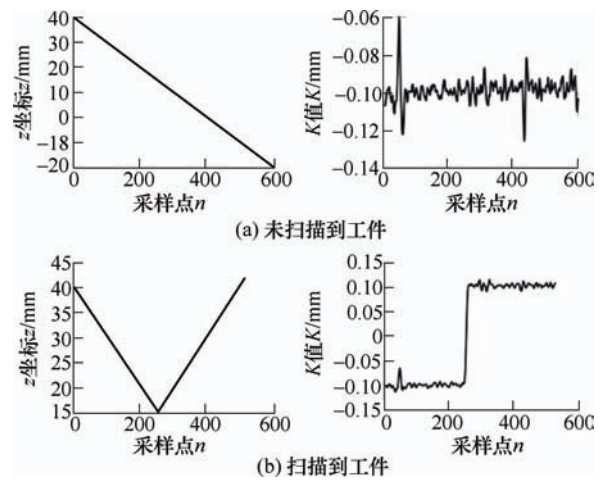


图 4 起焊点位置检测

### 2.2 基于 RANSAC 三维点云平面提取的 3D 折线焊缝起焊点焊枪姿态估计方法

模型参数估计可以分为线性法、迭代法和鲁棒法。随机抽样一致性(Random sampling consensus, RANSAC)算法<sup>[19]</sup>是一种鲁棒性方法, 在模式识别、特征提取、场景重建以及矩阵估计等计算机视觉领域得到了广泛的应用。该方法是在假设和检验的基础上实现的, 是一种功能强大、结构简单的模型参数估计方法。首先, 通过随机采样从测试点集中选取一个子集作为参数估计样本, 进行参数估计。然后, 运用所有测试数据集对该估计模型进行检验, 根据测试样本集中数据对模型的支持度, 确定该模型估计的准确性。

3D 折线焊缝起焊点焊枪的姿态是由构成焊缝的折线板和平板在起焊点附近平面的法向决定的。3D 折线焊缝点云数据平面提取是实现其起焊点焊枪姿态估计的关键。本文提出一种基于 RANSAC 算法的 3D 折线焊缝点云平面提取方法。利用 RANSAC 算法通过迭代选择原始点云数据中的一组随机子集, 选取包含局内点数目最多的点云子集, 得到最佳的模

型参数,从而有效剔除误差和异常点云,实现 3D 折线焊缝点云平面提取,其具体步骤如下。

(1) 对原始数据进行降采样,减少算法运行时间。

(2) 在 3D 折线焊缝点云数据中随机选取不共线的三个点,计算得出其构成的平面方程,如式(3)所示

$$Ax + By + Cz = D \quad (3)$$

式中,  $\sqrt{A^2 + B^2 + C^2} = 1$ 。

(3) 通过式(4)计算 3D 折线焊缝点云到此平面的距离  $d_i$ , 其中  $(x_i, y_i, z_i)$  是第  $i$  个数据点的坐标值。

$$d_i = |Ax_i + By_i + Cz_i - D| \quad (4)$$

(4) 设置阈值  $d_{thd}$ , 当  $d_i > d_{thd}$  时点  $i$  存储在数据集  $S_{out}$  中, 若  $d_i \leq d_{thd}$  时点  $i$  存储在数据集  $S_{in}$  中, 统计数据集  $S_{in}$  中数据个数。

(5) 重复上述步骤  $k$  次, 选择  $S_{in}$  中数据点个数  $N$  最多的平面作为最佳模型参数, 得出平面模型, 如式(5)所示

$$A_1x + B_1y + C_1z = D_1 \quad (5)$$

(6) 以数据集  $S_{out}$  作为原始数据集重复步骤(2)~(4)得出平面模型, 如式(6)所示

$$A_2x + B_2y + C_2z = D_2 \quad (6)$$

平面提取结果如图 5 所示。

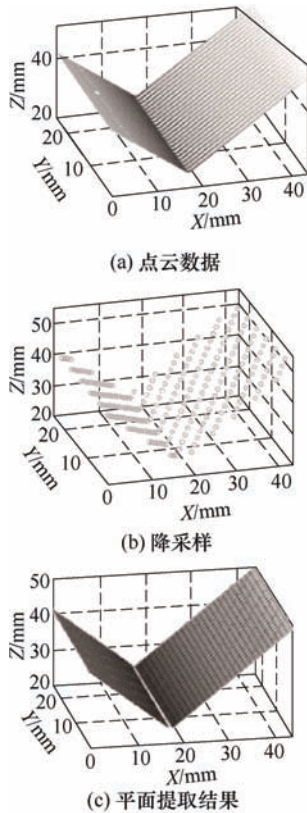


图 5 基于 RANSAC 算法的折线角焊缝点云平面提取

### 2.3 3D 折线焊缝起焊点焊枪姿态估计

3D 折线焊缝由不同的折线段组成, 不同的折线段具有不同的焊缝姿态; 实际焊接过程中, 由于焊接工件装夹、装配、变形等复杂的焊接条件的影响, 焊缝的姿态会发生不可预测的变化, 而焊炬的姿态也是影响焊缝成形的关键因素, 因此, 在起焊点寻位过程中估计 3D 折线焊缝的姿态是必要的。3D 折线焊缝姿态估计模型如图 6 所示, 包括方向向量和法向量, 分别通过式(7)和(8)计算。

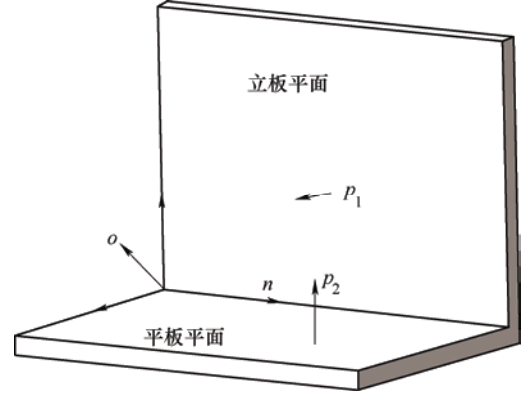


图 6 3D 折线焊缝起焊点姿态模型

$$n = \frac{\frac{df_x}{dt}i + \frac{df_y}{dt}j + \frac{df_z}{dt}k}{\left\| \frac{df_x}{dt}i + \frac{df_y}{dt}j + \frac{df_z}{dt}k \right\|} \quad (7)$$

$$o = \frac{p_1 + p_2}{\|p_1 + p_2\|} \quad (8)$$

式中,  $n$  为焊缝方向向量,  $o$  为焊缝法向量,  $p_1 = (A_1, B_1, C_1)$ ,  $p_2 = (A_2, B_2, C_2)$ ,  $f(x, y, z)$  如式(9)所示

$$f(x, y, z) = \begin{cases} A_1x + B_1y + C_1z = D_1 \\ A_2x + B_2y + C_2z = D_2 \end{cases} \quad (9)$$

图 7 为折线焊缝姿态估计结果。面对复杂的 3D 折线焊缝工件, 焊接机器人可以根据焊缝的姿态进行起焊点寻位, 以保证焊接质量。

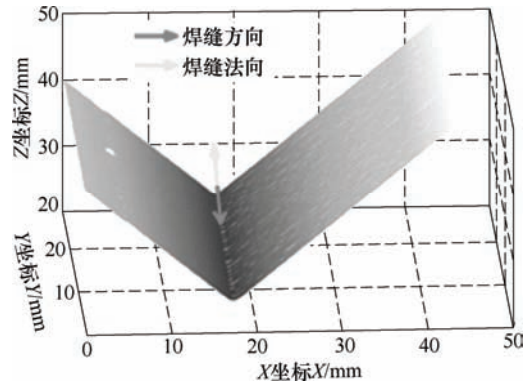


图 7 3D 折线焊缝起焊点姿态估计结果

### 3 3D 折线焊缝实时跟踪

#### 3.1 3D 折线焊缝位姿信息在线快速提取

针对 3D 折线焊缝实时跟踪问题, 采用 HONG 等<sup>[20]</sup>提出的 3D 折线焊缝位姿信息在线快速提取方法在焊接过程中获取 3D 折线焊缝位姿信息。3D 折线焊缝位姿信息快速提取原理如图 8 所示, 通过焊缝点云分割、焊缝点云数据提取、焊缝轨迹拟合、焊缝姿态估计等步骤实现 3D 折线焊缝位姿信息在线快速提取。焊缝位置检测误差小于 0.35 mm, 焊缝姿态估计误差小于 2°, 主要算法运行时间不超过 120 ms。

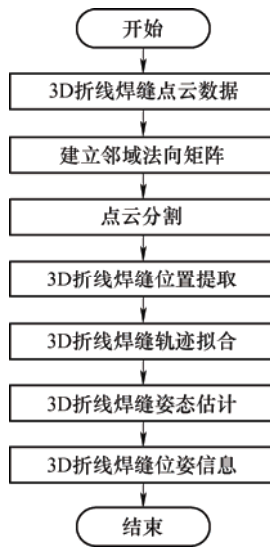


图 8 3D 折线焊缝位姿信息快速提取流程

#### 3.2 摆动电弧焊缝偏差识别

针对电弧焊缝跟踪过程中的焊缝偏差识别, 研究人员提出了多种基于电弧信号的焊缝偏差识别算法, 例如特征谐波偏差识别算法、左右偏差识别算法、平面偏差识别算法、模糊聚类偏差识别算法以及神经网络偏差识别算法等, 但是这些方法计算较复杂。通过计算一个摆动或旋转周期上的所有数据来计算焊缝偏差, 没有考虑焊缝装配间隙、焊缝表面杂物以及定位焊缝对偏差识别的影响。然而, 3D 折线焊缝通常通过定位焊缝进行装配, 焊缝中心位置存在不均匀的凸起; 大型 3D 折线焊缝很难控制其装配间隙, 焊缝中心位置会出现不均匀的凹陷。传统的电弧焊缝偏差识别方法很难保证焊缝偏差的识别精度。

针对 3D 折线焊缝 GMAW 摆动电弧偏差识别, 为了克服上述难点, 本文提出了一种 3D 折线焊缝摆动电弧焊缝偏差识别方法。如图 9 所示, 一个摆

动周期的电弧信号, 本文通过等效点  $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ 、 $(x_3, y_3)$  和  $(x_4, y_4)$  的比例因子  $k$  来识别焊缝偏差, 其中  $x_1=15$ 、 $x_2=145$ 、 $x_3=175$ 、 $x_4=305$ 。 $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$  和  $y_4$  通过式(10)~(13)计算。

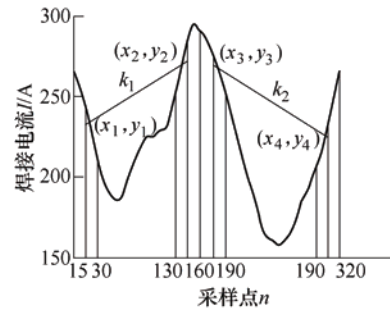


图 9 偏差识别

$$y_1 = \frac{I_1 + I_2 + \cdots + I_{30}}{30} \quad (10)$$

$$y_2 = \frac{I_{131} + I_{132} + \cdots + I_{160}}{30} \quad (11)$$

$$y_3 = \frac{I_{161} + I_{162} + \cdots + I_{190}}{30} \quad (12)$$

$$y_4 = \frac{I_{291} + I_{292} + \cdots + I_{320}}{30} \quad (13)$$

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} - \frac{y_4 - y_3}{x_4 - x_3} \quad (14)$$

式中,  $I_i$  为采样点  $i$  的焊接电流值。  $k > 0$  时右偏,  $k < 0$  时左偏,  $k$  的绝对值越大偏差越大。

#### 3.3 3D 折线焊缝实时跟踪控制器设计

在焊接过程中由于焊接变形、工件晃动等因素的影响, 导致焊缝轨迹与视觉传感器获取的焊缝轨迹产生偏差。为了避免偏焊等焊接缺陷, 本文设计一种控制器, 结合 3D 折线焊缝轨迹和摆动电弧偏差信息实现 3D 折线焊缝实时跟踪。

PID 控制器具有算法简单、稳定性好等优点, 对于线性定常系统控制是非常有效的。离散 PID 的表达式如式(15)、(16)所示, “增量式 PID” 表达式如式(17)所示。

$$u(k) = k_p(e(k) + k_i \sum_{j=0}^k e(j) + k_d(e(k) - e(k-1))) \quad (15)$$

$$u(k-1) = k_p(e(k-1) + k_i \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + k_d(e(k-1) - e(k-2))) \quad (16)$$

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) \quad (17)$$

式中,  $q_0$ 、 $q_1$  和  $q_2$  如式(18)所示

$$\begin{cases} q_0 = K_p \left[ 1 + \frac{T_s}{T_I} + \frac{T_D}{T_s} \right] \\ q_1 = -K_p \left[ 1 + 2 \frac{T_D}{T_s} \right] \\ q_2 = K_p \frac{T_D}{T_s} \end{cases} \quad (18)$$

在焊接过程, 3D 折线焊缝工件会产生不可预测的热变形甚至会随机产生晃动, 因此, 3D 折线焊缝跟踪控制系统具有时变性和非线性等特性。传统的 PID 控制器很难适应 3D 折线焊缝跟踪过程中不同焊缝偏差调节的系统控制, 为了满足焊缝跟踪过程中不同焊缝偏差  $e$  和焊缝偏差变化率  $ec$  对 PID 参数自整定的要求, 本文使用二维模糊控制规则(一维模糊控制器的输入量只有一个误差值  $e$ , 稳定性不好, 维度过高的模糊控制器会导致模糊控制规则过于复杂)对 PID 参数 ( $K_p, K_i, K_d$ ) 进行在线整定, 设计了参数模糊自整定焊缝跟踪 PID 控制器, 如图 10 所示。

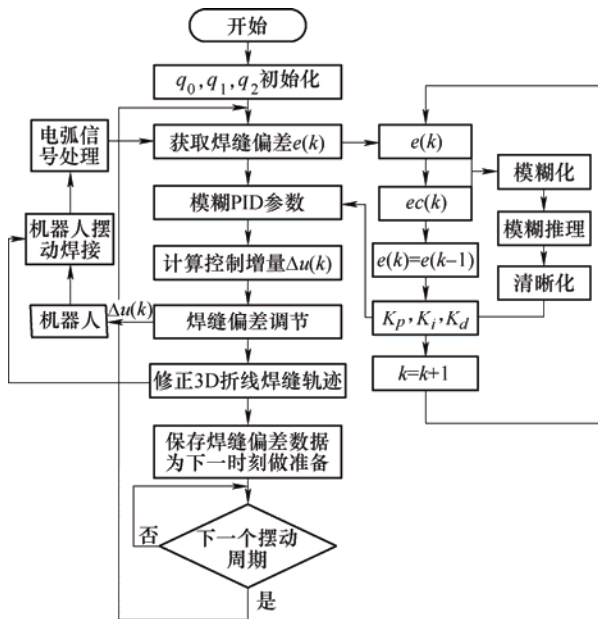


图 10 3D 折线焊缝跟踪模糊 PID 控制器

3D 折线焊缝模糊 PID 控制器设计的主要步骤是, 在 PID 控制的基础上, 通过模糊规则自整定 PID 参数, 使控制参数 ( $K_p, K_i, K_d$ ) 成为最佳值<sup>[21]</sup>。首先, 找出 PID 参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  与焊缝偏差  $e$  和焊缝偏差变化率  $ec$  之间的模糊关系(模糊化)。然后, 在焊接过程中焊枪以焊缝轨迹为中心进行摆动, 不断的检测焊缝偏差  $e$  并计算焊缝偏差变化率  $ec$  ( $ec(k) = e(k) - e(k-1)$ ), 利用模糊控制规则对  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  进行在线整定, 从而实现 PID 参数在线自

适应整定, 进而满足焊缝跟踪机器人控制的动态性能要求。根据模糊规则对 PID 参数  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  进行在线调节, 其调节方程<sup>[22]</sup>如式(19)~(21)所示

$$K_p = k_p + \Delta k_p \quad (19)$$

$$K_i = k_i + \Delta k_i \quad (20)$$

$$K_d = k_d + \Delta k_d \quad (21)$$

式中,  $k_p$ 、 $k_i$  和  $k_d$  为 PID 控制系统的预设值;  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$  和  $\Delta k_d$  为通过模糊规则在线整定的变量值;  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  是用于 PID 控制器的优化后的参数。

## 4 试验结果与分析

### 4.1 系统平台

图 11 为焊缝跟踪机器人系统实物图, 图 12 为焊缝跟踪机器人系统结构图。该系统由 5 轴焊接机器人系统、点云数据处理计算机 (Intel(R) Core(TM)i5-7300HQ CPU @2.5GHz, 8G(RAM))、三维重建计算机 (Intel(R) Core(TM)i5-7300HQ CPU @2.5GHz, 8G(RAM))、激光位移传感器 (model LJ-G200 with controller model LJ-G5001)、机器人控制器、滤波电路、霍尔传感器、焊接电源 (Panasonic YD-350FR)、送丝机以及保护气瓶等组成。机器人系统由五个自由度组成, 焊接过程中焊枪的位置在 X 轴、Y 轴和 Z 轴方向进行调整, 焊枪姿态由转轴 4 和转轴 5 调整, 同时转轴 5 可以控制焊枪摆动以适应摆动焊接工艺。转轴 5 和激光位移传感器分别装配在转轴 4 上, 摆动焊接不干扰激光位移传感器对工件的测量。激光位移传感器超前焊枪 50 mm 安装, 实时对焊接工件进行检测获取焊缝数据。激光位移传感器控制器将数据传输给三维重建计算机完成焊缝的三维重建然后将三维点云数据传输给点云数据

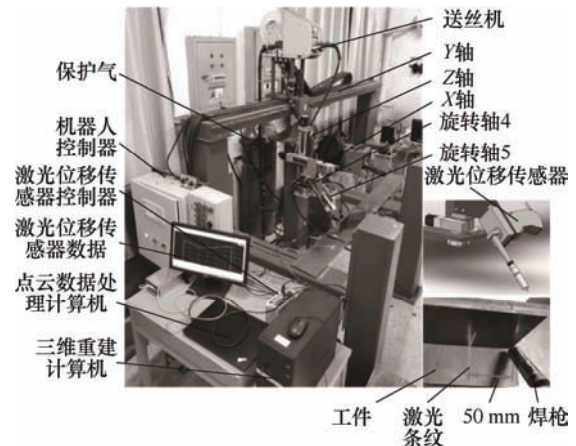


图 11 3D 折线焊缝跟踪机器人系统实物图

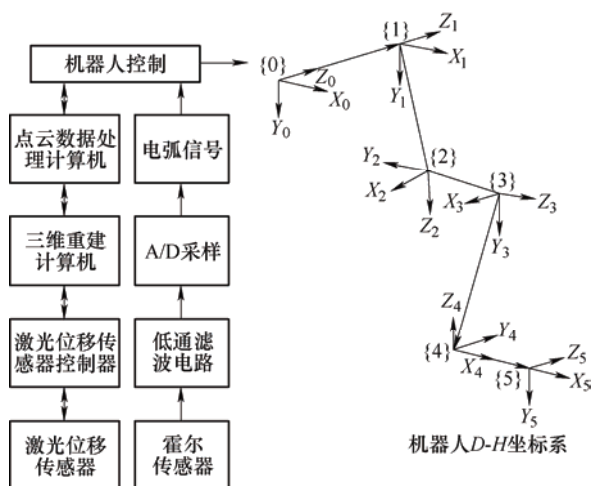


图 12 3D 折线焊缝跟踪机器人系统结构图

处理计算机，点云数据处理计算机完成点云数据处理，将焊缝三维位姿信息传输给焊接机器人控制器，焊接机器人系统完成焊接任务。

#### 4.2 起焊点焊枪位姿检测试验

利用图 11 所示的试验平台，对 4 种具有典型折角类型的 3D 折线焊缝工件进行起焊点焊枪位姿检测试验。试验中，机器人在扫描方向行走速度为 25 mm/s，激光位移传感器采样时间间隔为 15 ms。每种工件进行 10 次重复性试验以检验寻位结果的稳定性，每一次寻位结束记录寻位误差(精确示教值与计算值的差值)如图 14 所示。每种工件的寻位结果如图 13 所示。由寻位结果可见，实现了不同位姿 3D 折线焊缝的起焊点寻位。

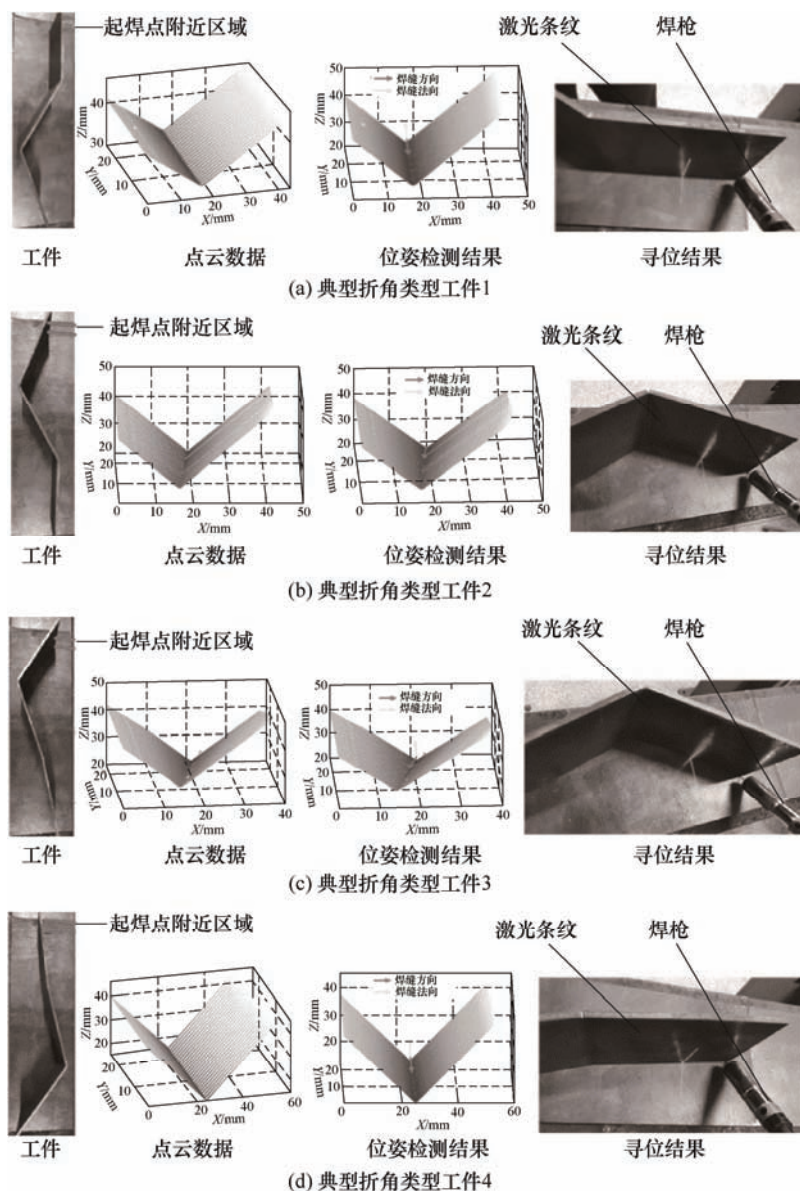


图 13 3D 折线焊缝跟踪机器人起焊点寻位结果

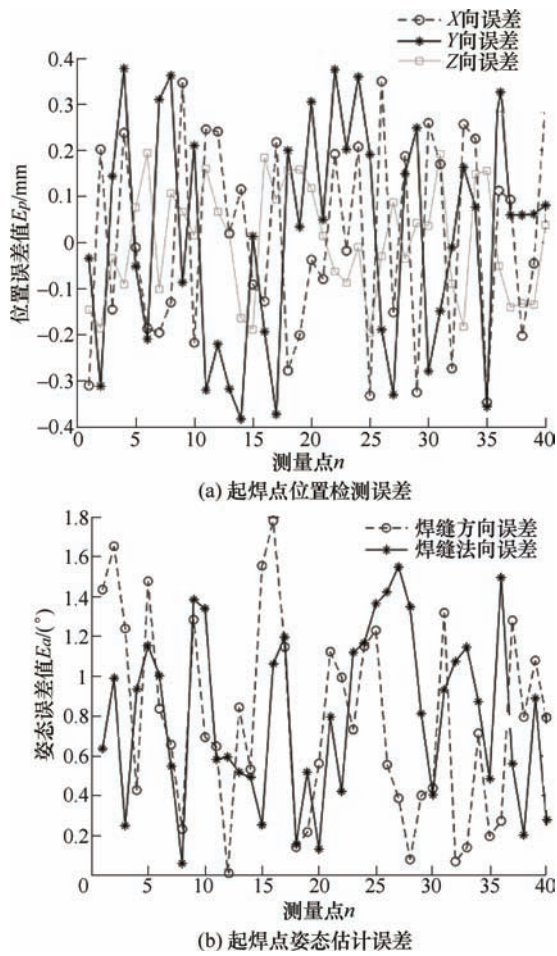


图 14 折线焊缝起焊点寻位误差

不同位姿 3D 折线焊缝每次寻位试验的误差如图 14 所示。以不同工件焊缝起焊点寻位误差的最大值(ME)作为本文焊缝起焊点寻位的误差。位置误差和姿态误差分别通过式(22)和式(23)计算, 计算误差如表 1 所示。不同位姿 3D 折线焊缝寻位位置误差小于 0.4 mm, 姿态误差小于  $1.8^\circ$ , 满足 3D 折线焊缝自动寻位的要求。

$$\begin{cases} X_{ME} = \max_{i \in [1, n]} |X_{c,i} - X_{m,i}| \\ Y_{ME} = \max_{i \in [1, n]} |Y_{c,i} - Y_{m,i}| \\ Z_{ME} = \max_{i \in [1, n]} |Z_{c,i} - Z_{m,i}| \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} n_{ME} = \max_{i \in [1, n]} (\arccos(\frac{\mathbf{n}_{c,i} \cdot \mathbf{n}_{m,i}}{\|\mathbf{n}_{c,i}\| \cdot \|\mathbf{n}_{m,i}\|})) \\ o_{ME} = \max_{i \in [1, n]} (\arccos(\frac{\mathbf{o}_{c,i} \cdot \mathbf{o}_{m,i}}{\|\mathbf{o}_{c,i}\| \cdot \|\mathbf{o}_{m,i}\|})) \end{cases} \quad (23)$$

式中,  $n$  是寻位试验次数,  $(X_{c,i}, Y_{c,i}, Z_{c,i})$  为第  $i$  次寻位的计算位置坐标,  $\mathbf{n}_{c,i}$  为计算方向向量,  $\mathbf{o}_{c,i}$  为计算法向向量。  $(X_{m,i}, Y_{m,i}, Z_{m,i})$ 、 $\mathbf{n}_{m,i}$ 、 $\mathbf{o}_{m,i}$  为第  $i$  次寻位前对工件起焊点的精确示教值。

表 1 3D 折线焊缝起焊点位姿检测误差

误差	X/mm	Y/mm	Z/mm	焊缝方向	焊缝法向
ME	0.35	0.39	0.2	$1.8^\circ$	$1.6^\circ$

### 4.3 焊缝跟踪试验

为了验证所提出 3D 折线焊缝实时跟踪方法的有效性, 分别对存在折角为  $130^\circ$ 、 $150^\circ$ 、 $170^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $190^\circ$ 、 $210^\circ$  和  $230^\circ$  的典型 3D 折线焊缝进行焊接试验。焊接工艺参数如表 2 所示。在焊接过程中通过激光位移传感器对焊接工件进行测量, 在线对 3D 折线焊缝位姿信息进行提取, 并为焊缝实时跟踪提供位姿信息, 为改善焊接工艺并实现焊缝偏差实时识别, 使用摆动焊接方法, 摆动幅度为 3 mm, 摆动频率为 3 Hz。焊缝实时跟踪效果如图 15 所示。

表 2 焊接参数

参数	名称或数值
焊接方法	GMAW
电压/V	28
电流/A	290
焊速/(mm/min)	1 000
焊丝直径/mm	1.2
工件材料	Q235
板厚/mm	5
保护气体	80%Ar+20%CO <sub>2</sub>

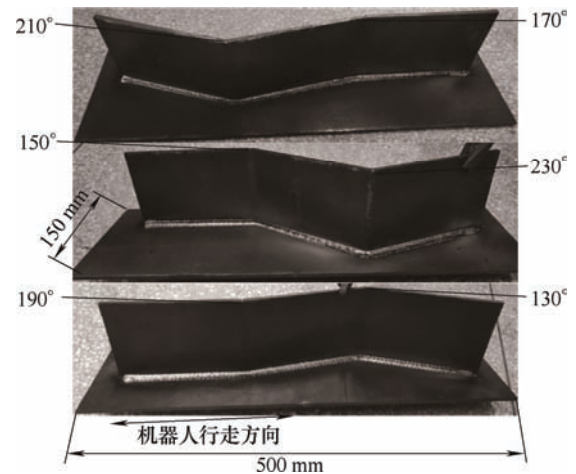


图 15 3D 折线焊缝实时跟踪效果

为了检测焊缝跟踪的精度, 焊接试验完成后, 待工件冷却, 使用线切割机在工件上随机切开并进行焊缝误差计算<sup>[23]</sup>。焊缝偏差如图 16a、16b 所示。当  $L_1 = L_2$  时  $e = 0$ ;  $L_1 > L_2$  时, 焊缝误差  $e$  通过式(24)计算;  $L_1 < L_2$  时, 焊缝误差  $e$  通过式(25)计算。在焊接过程中, 工件会产生变形, 为了保证精度计算的准确性, 使用高精度游标卡尺测量焊缝尺寸  $L_1$ 、 $L_2$

和  $L_3$ 。

$$e_1 = \frac{L_1^2 - L_2^2}{2L_3^2} \quad (24)$$

$$e_2 = \frac{L_2^2 - L_1^2}{2L_3^2} \quad (25)$$

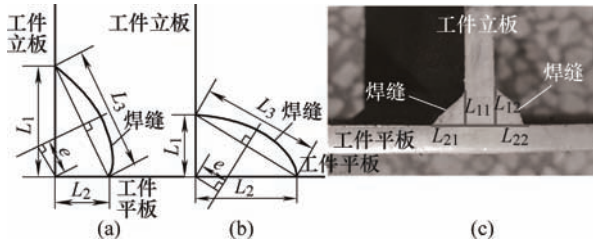


图 16 焊缝偏差计算

使用上述方法获取 40 组焊缝误差数据, 如图 17 所示。使用式(26)计算焊缝误差的最大值, 使用式(27)计算焊缝误差的标准差。

$$E_{\max} = \max_{i \in [1, n]}(e_i) \quad (26)$$

$$E_{sd} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - \mu)^2} \quad (27)$$

式中,  $e_i$  是第  $i$  个焊缝误差,  $n$  是测量的焊缝误差总个数。

由图 17 可见, 焊缝跟踪误差最大值不超过 0.4 mm, 焊缝跟踪误差标准差为 0.093 7 mm。本文提出的 3D 折线焊缝跟踪方法, 焊缝跟踪精度高, 稳定性好, 满足 3D 折线焊缝实时跟踪的要求。

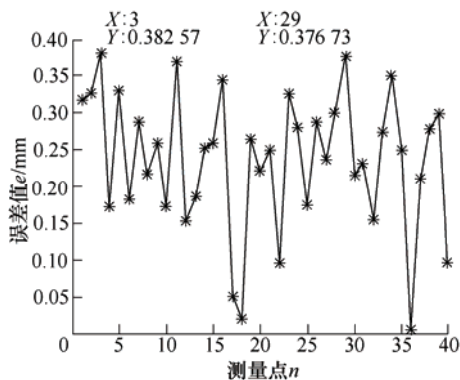


图 17 焊缝误差

## 5 结论

本文提出了一种基于轨迹在线识别的 3D 折线焊缝机器人摆动 GMAW 实时跟踪方法, 主要得出以下几个结论。

(1) 提出了一种 3D 折线焊缝起焊点焊枪位姿信息检测方法。利用激光位移传感器获取工件二维

信息, 使用斜率分析法实现了 3D 折线焊缝起焊点位置检测, 利用基于 RANSAC 三维点云平面提取的 3D 折线焊缝姿态估计方法实现了起焊点焊枪姿态估计。

(2) 提出了一种基于轨迹在线识别的 3D 折线焊缝机器人摆动 GMAW 实时跟踪方法, 设计了基于模糊 PID 的 3D 折线焊缝跟踪控制器, 实现了 3D 折线焊缝实时跟踪。

(3) 针对具有不同位姿的 3D 折线焊缝进行了起焊点自主寻位性能测试试验, 结果表明, 当机器人行走速度为 25 mm/s 时不同位姿的 3D 折线焊缝寻位位置误差小于 0.4 mm, 姿态误差小于  $1.8^\circ$ , 满足 3D 折线焊缝自动寻位的要求。

(4) 针对折角范围为  $130^\circ \sim 230^\circ$  的典型 3D 折线焊缝的焊缝跟踪试验表明, 焊速高达 1 000 mm/min 时, 焊缝跟踪误差不超过 0.4 mm, 满足 3D 折线焊缝跟踪的要求。本焊缝跟踪方法有望在海工装备、大型起重装备、物流运输装备等领域中厚板焊接中得到广泛应用。

## 参 考 文 献

- [1] PEDRO N, NUNO M. Direct off-line robot programming via a common CAD package[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2013, 61(8): 896-910.
- [2] KHELIFA B, SASA C, JAMSHED I, et al. IROSIm: Industrial robotics simulation design planning and optimization platform based on CAD and knowledge technologies[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2016, 42: 121-134.
- [3] XU Yanling, LV Na, FANG Gu, et al. Welding seam tracking in robotic gas metal arc welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 248: 18-30.
- [4] 邹焱飏, 周卫林, 王研博. 基于概率连续模型的激光视觉焊缝自动跟踪[J]. 机械工程学报, 2017, 53(10): 70-78.  
ZOU Yanbiao, ZHOU Weilin, WANG Yanbo. Laser vision seam automatic tracking based on probability continuous model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(10): 70-78.
- [5] WANG Nianfeng, ZHONG Kaifan, SHI Xiaodong, et al. A robust weld seam recognition method under heavy noise based on structured-light vision[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 61: 101821.
- [6] 郭亮, 张华. 狭小空间不连续折线焊缝识别移动机器人跟踪系统[J]. 机械工程学报, 2019, 55(17): 8-13.  
GUO Liang, ZHANG Hua. Discontinuous fold line

- welding seam recognition and mobile robot tracking system in narrow space[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(17): 8-13.
- [7] LI Jinqun, CHEN Zhe, RAO Gang, et al. Structured light-based visual servoing for robotic pipe welding pose optimization[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 138327-138340.
- [8] LI Gaoyang, HONG Yuxiang, GAO Jiapeng, et al. Welding seam trajectory recognition for automated skip welding guidance of a spatially intermittent welding seam based on laser vision sensor[J]. *Sensors*, 2020, 20(13): 3657.
- [9] ZOU Yanbiao, CHEN Jiaxin, WEI Xianzhong. Research on a real-time pose estimation method for a seam tracking system[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 27: 105947.
- [10] DINHAM M, FANG G. Autonomous weld seam identification and localisation using eye-in-hand stereo vision for robotic arc welding[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2013, 29(5): 288-301.
- [11] PENG R, NAVARRO-ALARCON D, WU V, et al. A point cloud-based method for automatic groove detection and trajectory generation of robotic arc welding tasks[C]// 2020 17th International Conference on Ubiquitous Robots (UR). Kyoto: IEEE, 2020: 380-386.
- [12] ZENG Jinle, CHANG Baohua, DU Dong, et al. A vision-aided 3D path teaching method before narrow butt joint welding[J]. *Sensors*, 2017, 17(5): 1099.
- [13] YAN Minzhi, ZHANG Ke, LIU Di, et al. Autonomous programming and adaptive filling of lap joint based on three-dimensional welding-seam model by laser scanning[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 53: 396-405.
- [14] VRUSHALI P, INDRANEEL P, 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). Beijing: IEEE, 2019: 727-733.
- [15] YANG Lei, LIU Yanhong, PENG Jinzhu, 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.
- [16] 石永华, 王国荣, YOO W, 等. 高速旋转电弧传感器的数学模型[J]. *机械工程学报*, 2007(11): 217-223.
- SHI Yonghua, WANG Guorong, YOO W, et al. Mathematic model of high speed rotational arc sensor[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2007(11): 217-223.
- [17] 乐健, 张华, 张奇奇, 等. 基于机器人旋转电弧传感器跟踪仰焊缝[J]. *焊接学报*, 2016, 37(9): 56-60, 131.
- LE Jian, ZHANG Hua, ZHANG Qiqi, et al. Overhead weld tracking by robots based on rotating arc sensor[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2016, 37(9): 56-60, 131.
- [18] 洪波, 易世洪, 庞争林, 等. 间隙 CO<sub>2</sub> 气体保护焊的磁控焊缝跟踪方法[J]. *焊接学报*, 2017, 38(11): 1-6, 129.
- HONG Bo, YI Shihong, PANG Zhenglin, et al. A seam tracking method which is controlled by magnetic field for CO<sub>2</sub> gas shielded welding with narrow gap[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(11): 1-6, 129.
- [19] MARTIN A, ROBERT 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.
- [20] HONG Bo, JIA Aiting, HONG Yuxiang, et al. Online extraction of pose information of 3D zigzag-line welding seams for welding seam tracking[J]. *Sensors*, 2021, 21(2): 375.
- [21] SRIVASTAVA S, AISWARYA P G, GUPTA M, et al. A comparative study of PID and neuro-fuzzy based control schemes for a 6-DoF robotic arm[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2018, 35(5): 5317-5327.
- [22] MEZA J L, SANTIBANEZ V, SOTO R, et al. Fuzzy self-tuning PID semiglobal regulator for robot manipulators[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 59(6): 2709-2717.
- [23] LE Jian, ZHANG Hua, CHEN Xiaoqi. Realization of rectangular fillet weld tracking based on rotating arc sensors and analysis of experimental results in gas metal arc welding[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, 49: 263-276.

作者简介: 贾爱亨, 男, 1991 年出生, 博士。主要研究方向为焊接机器人及自动化。

E-mail: jat0929@163.com

洪波(通信作者), 男, 1960 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为焊接机器人及自动化。

E-mail: hongbo@xtu.edu.cn