



面向三维复杂焊缝的焊接机器人焊缝跟踪方法

曹学鹏 张弓 杨根 吴月玉 陶浩 王传玺

Welding seam tracking method of welding robot oriented to three-dimensional complex welding seam

CAO Xue-peng, ZHANG Gong, YANG Gen, WU Yue-yu, TAO Hao, WANG Chuan-xi

引用本文:

曹学鹏, 张弓, 杨根, 吴月玉, 陶浩, 王传玺. 面向三维复杂焊缝的焊接机器人焊缝跟踪方法[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(2): 310–317. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2021.09.02.001

CAO Xue-peng, ZHANG Gong, YANG Gen, WU Yue-yu, TAO Hao, WANG Chuan-xi. Welding seam tracking method of welding robot oriented to three-dimensional complex welding seam[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(2): 310–317. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2021.09.02.001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.09.02.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

矿区废弃地移动机器人全覆盖路径规划

Complete coverage path planning of mobile robot on abandoned mine land

工程科学学报. 2020, 42(9): 1220 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.09.09.004>

高速公路绿篱修剪机器人手臂避障路径规划

Obstacle avoidance path planning for expressway hedgerow pruning robot manipulator

工程科学学报. 2019, 41(1): 134 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.01.01.015>

焊接速度对机器人搅拌摩擦焊AA7B04铝合金接头组织和力学性能的影响

Effect of the welding speed on the microstructure and the mechanical properties of robotic friction stir welded AA7B04 aluminum alloy

工程科学学报. 2018, 40(12): 1525 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2018.12.01.011>

不锈钢中夹杂物三维形貌及其热力学计算

Three-dimensional morphology and thermodynamic calculation of inclusions in stainless steel

工程科学学报. 2020, 42(S): 14 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.03.25.s13>

能源桩三维螺旋线热源的瞬态传热模型

Transient heat transfer model of a three-dimensional spiral heat source in an energy pile

工程科学学报. 2021, 43(11): 1569 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.05.03.003>

具有状态约束与输入饱和的全向移动机器人自适应跟踪控制

Adaptive tracking control for omnidirectional mobile robots with full-state constraints and input saturation

工程科学学报. 2019, 41(9): 1176 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.09.00.009>

面向三维复杂焊缝的焊接机器人焊缝跟踪方法

曹学鹏¹⁾, 张 弓^{2,3)}✉, 杨 根²⁾, 吴月玉²⁾, 陶 浩²⁾, 王传玺¹⁾

1) 长安大学, 西安 710064 2) 广州先进技术研究所, 广州 511458 3) 中国科学院大学, 北京 100049

✉通信作者, E-mail: gong.zhang@giat.ac.cn

摘 要 机器人焊接技术具有质量稳定、效率高等特点, 为实现空间内的三维复杂焊缝跟踪, 提出基于分段扫描、滤波、特征点采集、路径规划的焊缝四步跟踪方法。通过安装于焊接机器人末端的激光传感器, 以分段扫描方式连续多段采集焊缝数据; 为提高跟踪精度, 采用组合滤波的方式修正数据, 有效降低焊件表面毛刺、数据失真和噪声等影响; 通过特征点采集与坐标系标定确定焊接点; 最后结合焊接机器人路径规划获得空间焊接路径。对二维 S 型焊缝与三维复杂焊缝进行了实验研究, 结果表明提出的四步焊缝跟踪方法可形成完整的焊接路径, 两种焊件平均跟踪误差约为 0.296 mm 和 0.292 mm, 满足机器人焊接跟踪误差低于 0.5 mm 的精度要求。表明所提出焊接跟踪方法的有效性, 可为复杂焊缝的高精度跟踪和自动焊接研究提供有益参考。

关键词 焊缝跟踪; 三维复杂焊缝; 分段扫描; 特征点提取; 路径规划

分类号 TP242.2

Welding seam tracking method of welding robot oriented to three-dimensional complex welding seam

CAO Xue-peng¹⁾, ZHANG Gong^{2,3)}✉, YANG Gen²⁾, WU Yue-yu²⁾, TAO Hao²⁾, WANG Chuan-xi¹⁾

1) Chang'an University, Xi'an 710064, China

2) Guangzhou Institute of Advanced Technology, Guangzhou 511458, China

3) University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

✉ Corresponding author, E-mail: gong.zhang@giat.ac.cn

ABSTRACT Welding robot is widely used in many kinds and working conditions of welding production in the current machinery manufacturing industry. It plays an essential role in the machinery manufacturing industry. At the moment, in most industries, welding robots still work by teaching and payback. When the welding object or conditions change, the robot cannot make corresponding adjustments in time, which makes the welding gun deviate from the weld center, resulting in the decline of welding quality. The realization of automatic and intelligent welding is the inevitable development trend in the future. The application of machine vision in the welding field will promote the transformation of welding technology from rigid welding automation to flexible welding intelligence. Welding automation and intelligence are intended to improve the working conditions and environment, reduce labor costs, and improve product quality. Robotic welding technology is known for its great efficiency and consistent quality. A four-step welding seam tracking system is suggested based on segmented scanning, filtering, feature points extraction, and path planning. Through the laser sensor installed at the end of the welding robot, the welding seam data is continuously collected in multiple segments in a segmented scanning manner. To improve the tracking accuracy, a combined filtering method is used to correct the data to reduce the effects of burrs, data

收稿日期: 2021-09-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62073092); 广东省自然科学基金资助项目(2021A1515012638); 陕西省重点研发计划资助项目(2021ZDLGY09-02); 广州市基础研究计划资助项目(202201011619, 202102080650, 202002030320)

distortion, and noise on the surface of the weldment. Then the feature points are collected, and the coordinate system is calibrated in order to identify the welding points. Finally, the spatial welding path is obtained by path planning. Two-dimensional type S and three-dimensional complex welding experimental investigations are carried out. The results show that the proposed method can form a complete welding path. The average errors of the two weldments are about 0.296 mm and 0.292 mm, respectively, which are close enough to fulfill the required accuracy of 0.5 mm. It shows that the proposed tracking method is effective and can provide a reference for the research of high-precision tracking and automatic welding.

KEY WORDS seam tracking; 3D complex welding; segmented scanning; feature points extraction; path planning

随着制造业和工业技术的进步,焊接机器人逐渐替代传统手工焊接,并广泛应用于各种场合,大大提高了制造效率^[1]。应用于焊接机器人的焊缝跟踪技术可实现焊接的自动化与智能化^[2]。目前焊缝跟踪技术存在跟踪精度不高,跟踪实时性不强等问题,国内外学者对此开展了研究。

Chang 等^[3] 开发出差分特征点检测算法与折线式路径规划方法,搭建了便携式机器人跟踪焊接系统,成功应用于双壳船壁结构。Zhao 等^[4] 提出基于 ERFNet 网络算法的焊缝跟踪系统,解决了强背景噪声下的焊缝特征点提取,实现在线路径规划与偏差实时修正,实验验证误差在 0.25 mm 内。Banafian 等^[5] 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,实验验证误差小于 0.4 mm。Zhang 等^[6] 针对复杂二维焊缝进行焊接实验研究,对特征点精确定位后,焊接路径的平均误差为 0.387 mm。针对焊接时焊枪与焊缝中心线不对中的情况, Park 和 Moon^[7] 提出基于移动平均算法的模块化焊缝跟踪系统,成功应用于海上管道焊接,并控制误差在 0.3 mm 内。对于跟踪过程中产生的噪声干扰, Zou 等^[8] 提出基于深度学习的高鲁棒性焊缝检测器,实现了连续强噪声干扰下的高精度焊缝跟踪。

上述研究促进了焊缝跟踪技术的发展,但研究对象大多以二维平面焊缝为主^[9-11],空间焊缝仅面向螺旋线、相贯线等规则曲线^[12-14],对空间内任意复杂焊缝的研究较为缺乏。为此,本文以三维复杂焊缝为研究对象,提出一种焊缝四步跟踪法,通过分段扫描的方式采集三维焊缝数据,并利用二阶导数最值法与组合滤波的方法提取特征点,通过三次非均匀有理 B 样条拟合(NURBS)的方式实现焊枪的路径规划,完成焊缝跟踪。

1 组成与原理

焊缝跟踪系统包含机器人、激光传感器、焊接设备、工控机、控制柜等,其构成原理如图 1 所示。本文使用基于结构光的激光传感器作为视觉工

具,具有响应快、抗干扰能力强等优点^[15]。

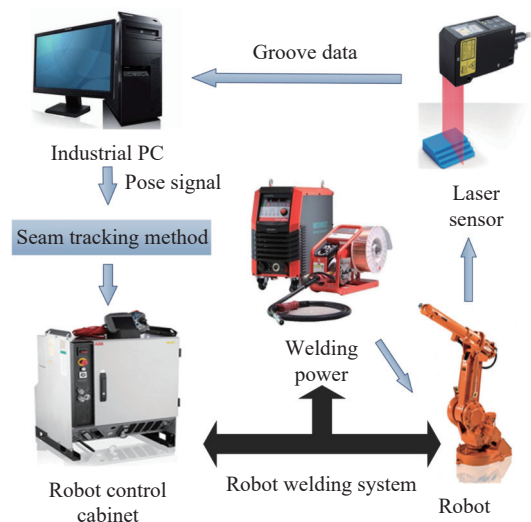


图 1 焊缝跟踪系统构成图

Fig.1 Structure diagram of seam tracking system

从图中可以看出,六轴机器人、控制器与焊接设备组成机器人焊接系统,激光传感器装配于机器人末端,并由机器人带动采集信息,焊缝信息通过激光传感器与上位机间的连接传输,经过焊缝跟踪方法的运算输出焊接路径,信息传输至机器人控制器指挥焊接,从而实现焊缝跟踪。

2 焊缝跟踪方法

本文提出的焊缝跟踪系统通过分段扫描、组合滤波处理、特征点提取、焊接路径规划四个步骤实现三维复杂焊缝的跟踪。首先通过分段扫描采集焊缝坡口原始数据;经过 Lowess 平滑处理^[16]去除毛刺及失真,还原焊缝坡口轮廓形貌;随后进行连续两次求导与高斯^[17]、限幅^[18]滤波获取传感器坐标系下的坡口特征点坐标;通过标定,将位于传感器坐标系下的特征点二维坐标转化为基坐标系下三维坐标^[19-20];将一系列焊接点进行 NURBS 拟合^[21]处理,形成焊接路径,整体流程如图 2 所示。

2.1 分段扫描与组合滤波

分段扫描的目的在于提取三维空间焊缝数

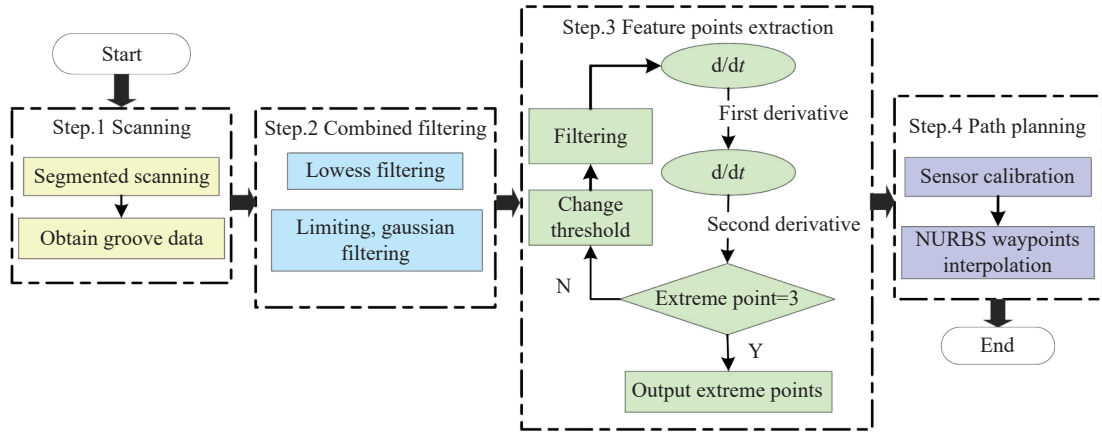


图 2 焊缝跟踪流程图

Fig.2 Flow chart of welding seam tracking

据,是实现三维复杂焊缝跟踪的基础. 机器人带动激光传感器以折线分段的方式连续扫描焊缝,获取原始数据. 本文实验对象为平面 S 型焊缝与三

维复杂焊缝(通过直线焊缝与 S 型焊缝搭接而成),其中, S 型焊缝的分段扫描原理及效果如图 3 所示.

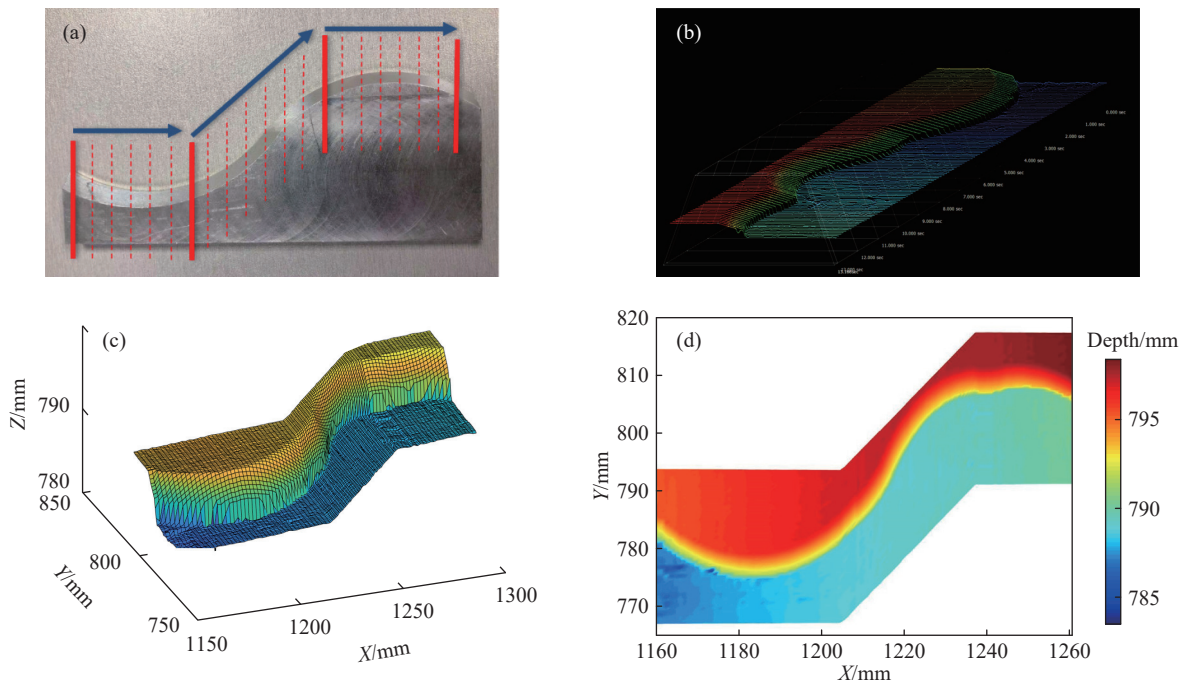


图 3 分段扫描原理.(a) 实物扫描图; (b) 原始数据图像; (c) 点云图; (d) 伪彩图

Fig.3 Segmented scanning: (a) weldment scanning; (b) raw data; (c) point cloud; (d) pseudo-color picture

激光传感器采集数据时受到自然光线、焊件表面反光、毛刺凸起等影响,导致采集的数据失真. 组合滤波采用 Lowess 滤波、限幅滤波、高斯滤波三种方法,以平滑修正数据图形.

Lowess 滤波为加权线性最小二乘结合一阶多项式模型,能较好的平滑处理波动性数据,用于处理焊件表面毛刺等失真. 坡口数据经由式 (1) 进行平均回归,过程中引入式 (2) 加权平滑,推导得 Lowess 估计值公式 (3).

$$\hat{f}(x) = \text{Ave}(y_i | x_i \in N_k(x_i)) \quad (1)$$

$$\hat{f}(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^N K_\lambda(x_0, x_i) y_i}{\sum_{i=1}^N K_\lambda(x_0, x_i)} \quad (2)$$

式中: $\hat{f}(x)$ 为激光传感器扫描得到的坡口上所有点的 Y 轴坐标平均值, y_i 为激光传感器扫描得到的坡口上某点的 Y 轴坐标, x_i 为激光传感器扫描得到的坡口上某点的 X 轴坐标, $N_k(x_i)$ 为某一剖面上所有点的集合, x_0 为初始扫描点的横坐标, N 为扫描面点数量. $K_\lambda(x_0, x_i) = D(|x_0 - x_i|/\lambda)$, $D(t) = 0.75(1 - t^2)$,

t 为参数且 $|t| < 1$, λ 为窗口宽度.

$$\hat{f}(x_0) = \sum_i \omega_i(x_0) y_i \quad (3)$$

式中: $\omega_i(x_0)$ 为权重.

限幅滤波原理如式 (4), 用于处理偶然因素引起的脉冲干扰.

$$y = \begin{cases} y_n, & |y_n - y_{n-1}| \leq \Delta T \\ y_{n-1}, & |y_n - y_{n-1}| > \Delta T \end{cases} \quad (4)$$

式中: y_n 与 y_{n-1} 为采样值, ΔT 为阈值.

高斯滤波可有效抑制正态分布的干扰信号,

防止检测到局部峰值, 高斯函数的一维表达如式 (5):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

式中: μ 为均值, 决定函数的位置; σ 为标准差, 决定分布的幅度.

处理三维空间焊缝坡口过程中, Lowess 滤波用于平滑焊件坡口原始图形, 限幅、高斯滤波用于处理一阶、二阶导数, 使局部极大极小值更为显著. 组合滤波效果如图 4 所示. x, y, z 分别代表坐标 X 轴, Y 轴, Z 轴上的值.

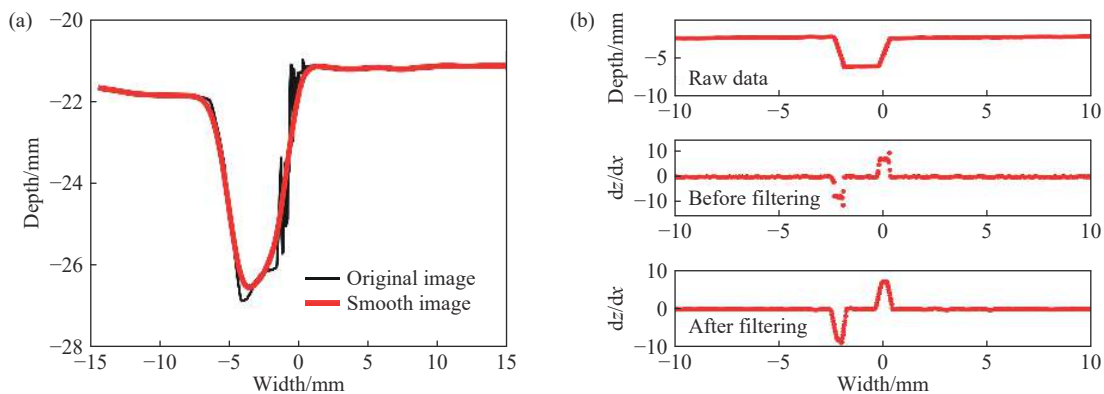


图 4 滤波效果. (a) Lowess 滤波; (b) 限幅、高斯滤波

Fig.4 Filter effect: (a) Lowess filtering; (b) limiting, Gaussian filtering

2.2 特征点提取

特征点提取的速度与精度影响焊缝跟踪最终效果. 针对三维复杂焊缝, 特征点提取算法包括五个步骤, 如图 5 所示. 首先 Lowess 滤波平滑焊缝坡口; 求导得焊缝坡口轮廓的一阶导数; 使用限幅、高斯滤波平滑一阶导数; 求二阶导并平滑处理; 寻找全局极大、极小值确定特征点坐标.

2.3 路径规划

各坐标系的空间转换关系是后续研究与计算的基础, 通过坐标转换, 可实现将实验数据从传感器坐标系 {S} 下的二维坐标转化为基坐标系 {B} 下的三维坐标, 从而进行路径规划. 转换过程涉及到末端坐标系 {E} 与焊枪坐标系 {T}, 机器人工作站中各坐标系如图 6 所示.

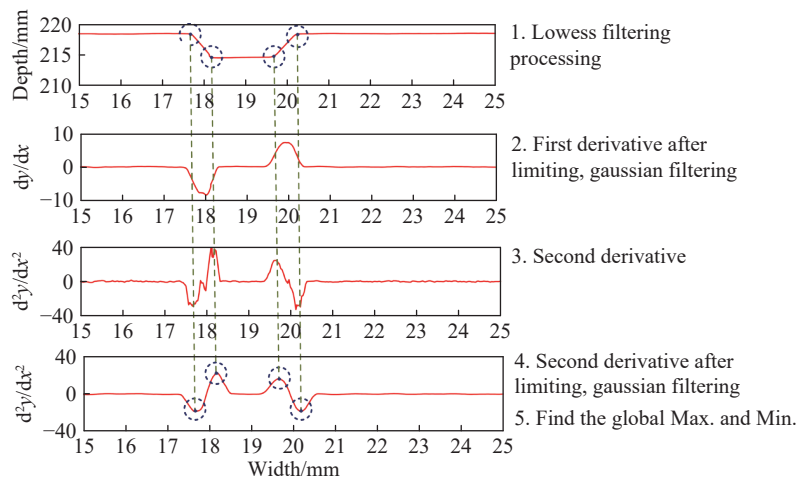


图 5 特征点提取

Fig.5 Feature points extraction

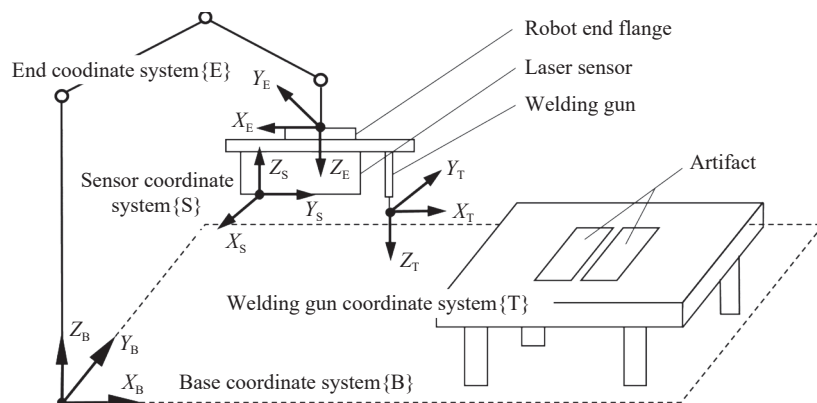


图 6 机器人工作站坐标系

Fig.6 Robot workstation coordinate system

首先进行焊枪 TCP 标定^[22], 使用六点法求得转换矩阵 E_T , 继而后用三点法进行传感器标定, 求得转换矩阵 E_S , 结果如式 (6), 式 (7) 为坐标变换核心公式. 由于非本文的重点内容, 故不再赘述.

$${}^E_T = \begin{bmatrix} 0.561 & -0.267 & 0 & 119.60 \\ 0 & 0.972 & -0.754 & -0.32 \\ -0.825 & 0 & 0.658 & 352.01 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^E_S = \begin{bmatrix} 0.568 & -0.423 & -0.590 & 75.098 \\ -0.521 & 0.278 & -0.026 & 6.693 \\ 0.199 & 0.865 & -0.814 & 303.137 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$${}^B_P = {}^B_T \cdot {}^E_S \cdot S_P \quad (7)$$

式中, ${}^B_P = (x_B, y_B, z_B, 1)^T$, $S_P = (x_S, 0, z_S, 1)^T$.

三次非均匀有理 B 样条 (NURBS) 拟合方法在拟合复杂图形时有较大便利, NURBS 曲线的拟合和插值也是领域内研究重点. NURBS 曲线拟合公式如式 (8):

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n w_i d_i M_{i,p}(u)}{\sum_{i=0}^n w_i M_{i,p}(u)}, \quad 0 < u < 1 \quad (8)$$

式中: $w_i, i=0, 1, 2, \dots, n$ 称为权因子, 分别与控制点 d_i 联系; 首末全因子 $w_0, w_n > 0$, 其余 $w_i \geq 0$, 且顺序 k 个全因子不同时为零; $M_{i,p}(u)$ 是由节点矢量 $V = [v_0, v_1, \dots, v_{n+p+1}]$ 上按 de Boor-Cox 递推公式决定的 p 次规范 B 样条基函数.

3 实验研究

文中焊缝跟踪系统实验平台的组成, 如图 7 所示. 主要包含: 六轴机器人 ABB IRB 1410、控制器 IRC5、激光传感器 LS-100CN、焊接电源及焊枪、上位机等.

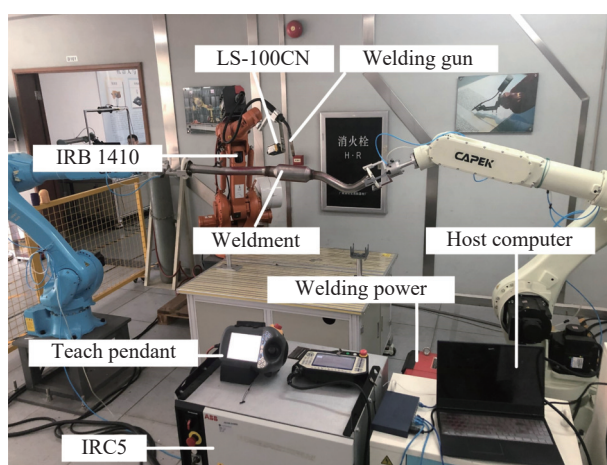


图 7 焊接实验系统组成

Fig.7 Welding experimental system composition

实验对象设置为 S 型焊缝和通过直线焊缝与 S 型焊缝搭接而成的三维复杂焊缝, 以验证实验方法在不同维度的可行性, 并测量不同类型焊缝跟踪精度. 焊缝类型如图 8 所示.

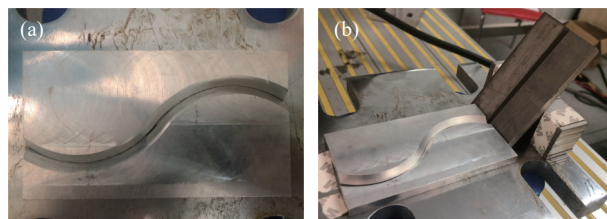


图 8 实验对象. (a) S 型焊缝; (b) 三维复杂焊缝

Fig.8 Test subject: (a) type S; (b) three-dimensional (3D) curve

实验过程中, 设置机器人移动速度为 $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[23-24], 采集频率设为 12 Hz (机器人位姿数据采集频率同为 12 Hz), 采集焊缝的二维信息, 以时间为第三维信息将其可视化, 分段扫描采集原始数据如图 9 所示. 可以看出, 未经过坐标转换的焊缝整体特征表现不明显, 并未显示出焊缝的整体形貌 (S 型), 但是坡口特征并未被掩盖. 随后对原始数据进行坐标转换, 以还原焊缝空间特征.

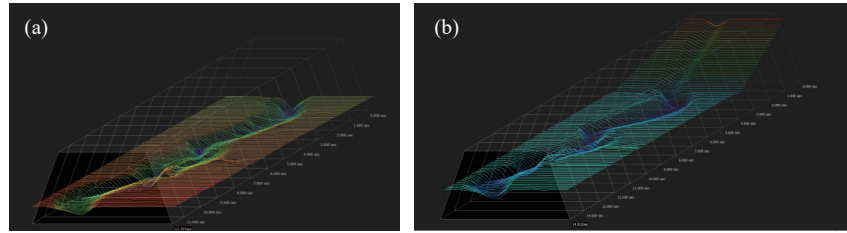


图9 原始数据图。(a) S型焊缝; (b) 三维复杂焊缝

Fig.9 Raw data graph: (a) type S; (b) 3D curve

激光传感器采集的焊缝信息为焊缝的二维坐标数据, 由于受实验环境干扰、激光散射等影响, 存在部分失真、毛刺, 故采用 2.1 节所述方法, 对原始数据进行组合滤波, 以得到相对还原的焊缝形貌数据。采用 2.2 节和 2.3 节所述方法, 对焊缝特征点进行定位, 得到传感器坐标系下特征点坐标, 再根据转换矩阵 (6) 与式 (7), 计算得到基坐标系下的特征点坐标。对每对特征点求取中心点得到焊接点, 实验采用 NURBS 函数拟合焊接点获取焊接路径。使用焊枪末端落于焊缝中心线, 记录位置数据作为基准。将跟踪方法下获得的焊接路径与基准进行比对, 从而获得跟踪误差。拟合出的焊接路径结合焊件三维点云图, 如图 10 所示。与图 9 对比可以看出, 焊缝整体特征被还原, 为实现焊缝跟踪提供了基础。

机器人焊接过程中需将跟踪误差保持在 0.5 mm

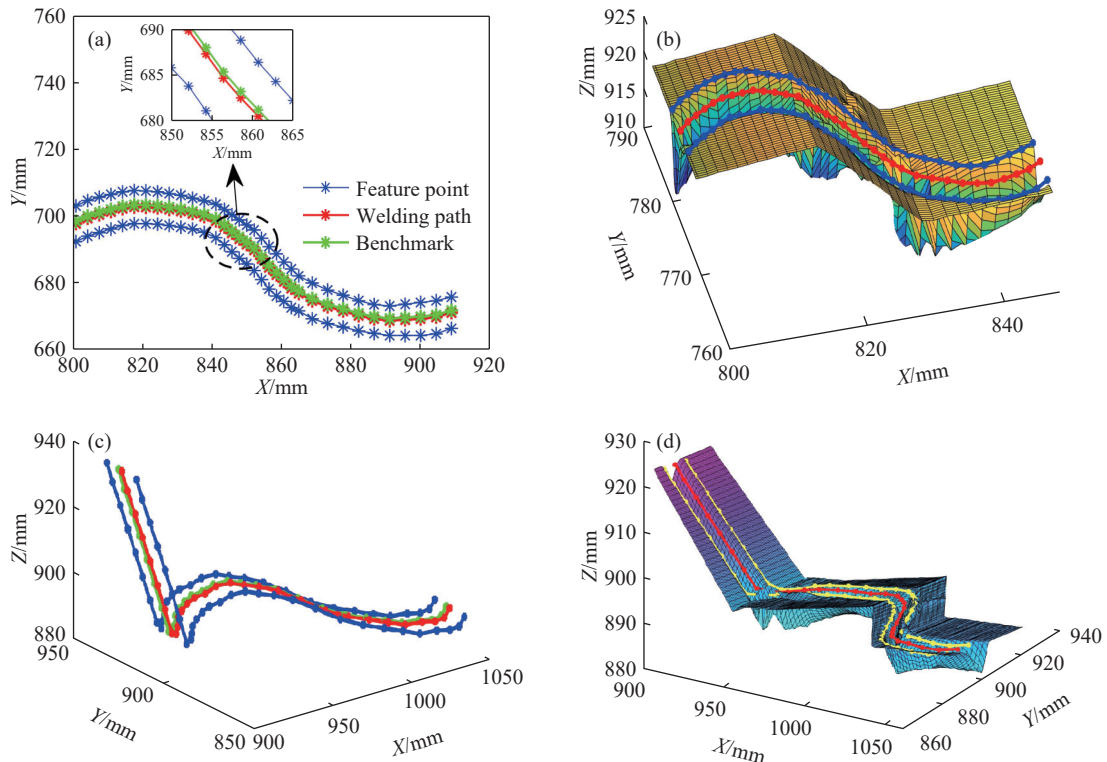


图10 焊接路径。(a) S型焊缝; (b) S型焊缝点云图; (c) 三维复杂焊缝; (d) 三维复杂焊缝点云图

Fig.10 Welding path: (a) type S; (b) point cloud of type S; (c) 3D curve; (d) point cloud of 3D curve

以内^[25], 文中实验所得焊缝跟踪误差, 如图 11 所示。从图中数据可得其平均误差与标准差如表 1 所示, 两种类型焊件实验平均误差分别为 0.296 mm 与 0.292 mm, 均满足机器人焊接的精度要求, 标准差分别为 0.0779 和 0.1129, 其值越小表示焊接过程中误差波动越小。以上实验结果, 验证了文中焊缝跟踪方法的有效性。

4 结论

(1) 本文介绍了焊缝跟踪系统组成与结构, 分析了其工作原理与流程, 提出基于激光传感器的焊缝四步跟踪方法。

(2) 采用四步法对焊缝进行分段扫描, 获取原始数据; 使用组合滤波平滑处理数据; 提取特征点继而得到焊接点坐标; 将焊接点插值处理获得焊接路径。

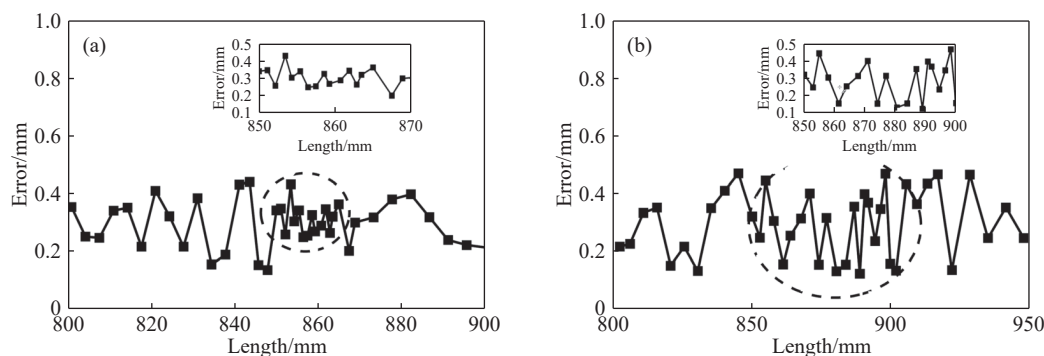


图 11 误差分析. (a) S 型焊缝; (b) 三维复杂焊缝

Fig.11 Error analysis: (a) type S; (b) 3D curve

表 1 误差分析

Table 1 Error analysis

Welding type	Mean error/mm	Standard deviation
Type S	0.296	0.0779
3D curve	0.292	0.1129

(3) 对 S 型焊缝与三维复杂焊缝进行了跟踪实验, 在焊接速度为 $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 情况下, 跟踪误差分别为 0.296 mm 和 0.292 mm , 满足机器人焊接的精度要求, 表明所提出方法的有效性。

(4) 实现了三维复杂焊缝跟踪, 未来可将多传感器信息融合技术应用于焊缝跟踪系统, 同时引入深度学习和神经网络, 应用于焊缝跟踪技术的图像处理过程以及焊件的质量检测。

参 考 文 献

- [1] Parameshwaran R, Tony Thomas A, Madhu Vishal V. Vision based self adaptive algorithm for 6 axis ABB industrial welding robot. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng*, 2021, 1123(1): 012038
- [2] Wang B C, Hu S J, Sun L, et al. Intelligent welding system technologies: State-of-the-art review and perspectives. *J Manuf Syst*, 2020, 56: 373
- [3] Chang D, Son D, Lee J, et al. A new seam-tracking algorithm through characteristic-point detection for a portable welding robot. *Robotics Comput Integr Manuf*, 2012, 28(1): 1
- [4] Zhao Z, Luo J, Wang Y Y, et al. Additive seam tracking technology based on laser vision. *Int J Adv Manuf Technol*, 2021, 116(1-2): 197
- [5] Banafian N, Fesharakifard R, Menhaj M B. Precise seam tracking in robotic welding by an improved image processing approach. *Int J Adv Manuf Technol*, 2021, 114(1-2): 251
- [6] Zhang G, Zhang Y H, Tuo S H, et al. A novel seam tracking technique with a four-step method and experimental investigation of robotic welding oriented to complex welding seam. *Sensors*, 2021, 21(9): 3067
- [7] Park J H, Moon H S. Advanced automatic welding system for offshore pipeline system with seam tracking function. *Appl Sci*, 2020, 10(1): 324
- [8] Zou Y B, Zhu M Q, Chen X Z. A robust detector for automated welding seam tracking system. *J Dyn Syst Meas Control*, 2021, 143(7): 071001
- [9] Parameshwaran R, Maheswari C, Nithyavathy N, et al. LABVIEW based simulation on welding seam tracking using edge detection technique. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng*, 2021, 1055(1): 012026
- [10] Lei T, Huang Y, Wang H, et al. Automatic weld seam tracking of tube-to-tubesheet TIG welding robot with multiple sensors. *J Manuf Process*, 2021, 63: 60
- [11] Xue K X, Wang Z J, Shen J Q, et al. Robotic seam tracking system based on vision sensing and human-machine interaction for multi-pass MAG welding. *J Manuf Process*, 2021, 63: 48
- [12] Hong B, Jia A T, Hong Y X, et al. Online extraction of pose information of 3D zigzag-line welding seams for welding seam tracking. *Sensors*, 2021, 21(2): 375
- [13] Inoue F, Derakhshandeh J, Lofrano M, et al. Fine-pitch bonding technology with surface-planarized solder micro-bump/polymer hybrid for 3D integration. *Jpn J Appl Phys*, 2021, 60(2): 026502
- [14] Shao W J, Huang Y, Zhang Y. A novel weld seam detection method for space weld seam of narrow butt joint in laser welding. *Opt Laser Technol*, 2018, 99: 39
- [15] Xiao R Q, Xu Y L, Hou Z, et al. An automatic calibration algorithm for laser vision sensor in robotic autonomous welding system. *J Intell Manuf*, 2021: 1
- [16] Yi Z G, Pan N, Liu Y, et al. Study of laser displacement measurement data abnormal correction algorithm. *Eng Comput*, 2017, 34(1): 123
- [17] Zheng X G. GPNRBNN: A robot image edge detection method based on Gaussian positive-negative radial basis neural network. *Sens Imaging*, 2021, 22(1): 1
- [18] Aadhi A, Kovalev A V, Kues M, et al. Highly reconfigurable hybrid laser based on an integrated nonlinear waveguide. *Opt Express*, 2019, 27(18): 25251
- [19] Xu J, Hoo J L, Dritsas S, et al. Hand-eye calibration for 2D laser profile scanners using straight edges of common objects. *Robotics Comput Integr Manuf*, 2022, 73: 102221

- [20] Li M Y, Du Z J, Ma X X, et al. A robot hand-eye calibration method of line laser sensor based on 3D reconstruction. *Robotics Comput Integr Manuf*, 2021, 71: 102136
- [21] Liu Y, Shi L, Tian X C. Weld seam fitting and welding torch trajectory planning based on NURBS in intersecting curve welding. *Int J Adv Manuf Technol*, 2018, 95(5-8): 2457
- [22] Cakir M, Deniz C. High precise and zero-cost solution for fully automatic industrial robot TCP calibration. *Ind Robot Int J Robotics Res Appl*, 2019, 46(5): 650
- [23] Zhang K, Jiang H T, Meng Q, et al. Effect of the welding speed on the microstructure and the mechanical properties of robotic friction stir welded AA7B04 aluminum alloy. *Chin J Eng*, 2018, 40(12): 1525
(张坤, 江海涛, 孟强, 等. 焊接速度对机器人搅拌摩擦焊 AA7B04铝合金接头组织和力学性能的影响. 工程科学学报, 2018, 40(12): 1525)
- [24] Cao X Y, Luo K L, Lu Y H, et al. Effect of welding speed on the microstructure and hardness distribution of laser beam welding joints. *Chin J Eng*, 2015, 37(6): 714
(曹鑫源, 罗奎林, 陆永浩, 等. 激光焊接速度对焊缝组织和硬度分布的影响. 工程科学学报, 2015, 37(6): 714)
- [25] Zhang S B, Zhang Y M, Kovacevic R. Noncontact ultrasonic sensing for seam tracking in arc welding processes. *J Manuf Sci Eng*, 1998, 120(3): 600