

文章编号:1001-5078(2023)11-1650-07

· 激光应用技术 ·

基于3D激光扫描传感器的焊缝区域跟踪方法设计

李诺薇, 邹维科, 种法力

(徐州工程学院物理与新能源学院, 江苏 徐州 221018)

摘要:一般二维数据传感器在智能焊接领域应用中,跟踪焊缝区域时,焊接枪抖振会导致跟踪误差大的问题,提出基于3D激光扫描传感器的激光焊缝自动跟踪方法,应用3D激光扫描传感器获取到完整的激光焊缝3D位置数据。对采集到的焊缝位置信息展开全局最优解处理,提取激光焊缝的相关特征。对激光焊缝跟踪相关的距离特征进行分类处理:设计模糊跟踪算法,利用基本论域方法建立目标边缘特征模型,调整激光焊缝隶属度参数,实现目标融合特征分类。在激光焊缝特征分类的基础上,利用变论域理论提高焊接跟踪控制准确率和焊缝成形检测效率,完成焊缝区域的控制跟踪,实现无人化焊接。实验结果表明:这种方法在减小跟踪误差中有明显的效果。

关键词:3D激光扫描传感器;激光焊缝;自动跟踪;数据拼接;免疫反馈算法

中图分类号:TP391.41;TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.11.005

Design of seam tracking method based on 3D laser scanning sensor

LI Nuo-wei, ZOU Wei-ke, CHONG Fa-li

(School of Physics and New Energy, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221018, China)

Abstract: In general, two-dimensional data sensors are used in the field of intelligent welding, where tracking of the weld seam area can lead to large tracking errors due to welding gun vibration. In this paper, a laser weld seam automatic tracking method for laser weld seam based on 3D laser scanning sensor is proposed, applying the 3D laser scanning sensor to obtain the complete 3D position data of laser weld seam. The collected weld position information is processed by the global optimal solution to extract the relevant features of the laser weld. The distance features related to laser weld seam tracking is classified. And a fuzzy tracking algorithm is designed to establish the target edge feature model using the basic universe method, to adjust the membership parameters of laser weld seam, and to achieve target fusion feature classification. On the basis of laser weld feature classification, the variable universe theory is used to improve the accuracy of welding tracking control and the efficiency of weld shape detection, to complete the control tracking of the weld area, and to realize unmanned welding. The experimental results show that this method has a significant effect in reducing the tracking error.

Keywords: 3D laser scanning sensor; laser weld; automatic tracking; data splicing; immune feedback algorithm

基金项目:江苏省高等学校自然科研究面上项目(No. 20KJD610002);激光与物质相互作用国家重点实验室基金项目(No. SKLL11-02)资助。

作者简介:李诺薇(1980-),女,硕士研究生,讲师,研究方向为电子通信技术。E-mail: uiuipo9@163.com

收稿日期:2023-01-06

1 引言

激光焊接因其焊接效率和焊缝深宽比高、焊接热变形和热影响范围小等众多优点^[1-2],在航空航天、汽车轮船制造等大型结构的焊接中均表现优异。将激光焊接技术与传感器技术相融合促进了自动化、智能化焊接技术进一步发展,由于激光焊接要求较高的精度和效率,所以多采用激光扫描传感器对激光焊缝数据检测,以完成后期跟踪^[3],从而实现焊接轨迹的实时控制与调整。目前激光焊缝自动跟踪技术已成为自动化焊接技术中重要的研究课题。

陈新禹^[4]等人将传感器收集的位置信息转换至焊接机器坐标系中,得到空间绝对对焊接轨迹并计算其与焊接枪之间的误差,通过非均匀有理B样条插值并检索数据,再将偏差数据转换为焊接枪坐标,完成焊缝自动跟踪。李毅^[5]等人对比上一周期中两侧半周期积分和当前周期对应积分,分离高度误差,通过二分法解耦焊接枪水平误差和工作角并计算偏差值,依据偏差值实现焊缝跟踪。黎扬进^[6]等人预处理图像后采用Kalman滤波构建离子采样提议分布函数,通过粒子滤波定位焊缝中心坐标,完成焊缝自动跟踪。以上方法没有考虑焊接枪抖振引起的轨迹偏差问题,导致跟踪误差大。

为了解决上述方法中存在的问题,提出应用3D激光扫描传感器的激光焊缝自动跟踪方法。

2 3D激光扫描传感器激光焊缝自动跟踪方法设计原理

3D激光扫描传感器主要由工业相机、图像处理控制器、半导体激光器、激光保护镜片、防飞溅挡板、风冷装置组成如图1所示^[7]。根据光学传播与成像原理,以激光结构光线为依托,按照移动轨迹进行区域激光扫描,获取焊枪与焊缝之间的位置信息。通过计算得到移动差值,完成实时通讯跟踪激光焊缝进行焊接,实现无人化焊接^[8-9]。

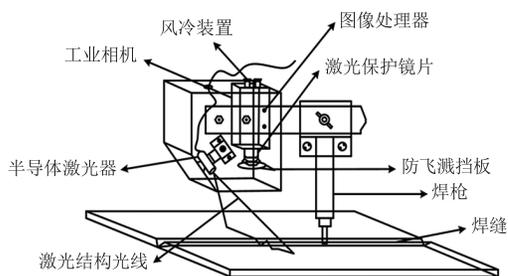


图1 3D激光扫描传感器结构组成

Fig.1 Structure composition of 3D laser ranging sensor

3D激光扫描传感器在落实激光焊缝自动跟踪过程时,通过激光三角反射式原理获取视场位置移动信息。以被测表面距离(z 轴)和沿着激光线位置信息(x 轴)为基准(如图2所示),将激光结构光线投射至被测物体表面,依据反射光学原理获取三维成像数值,在得到大量三维成像数据,为焊缝自动搜索、定位、跟踪提供理论支撑。从获得三维成像数据中,提取和焊缝相关的图像特征,并对这些特征分类,结合分类后的特征,利用变论域理论,在控制器中设计相关算法,提高焊接参数跟踪控制稳定性,完成跟踪优化。控制器的核心系统硬件电路图如图2所示。

受3D激光扫描传感器的工作环境和自身因素影响,传感器获取的数据中含有一些杂散数据,利用传感器获取数据在竖直方向上的分层特点,分组筛选杂散数据。以其中任意一层为例,杂散数据筛选具体流程如下所示:

- ①将该层中全部数据排序;
- ②结合数据坐标和位置特性,设定距离阈值 S 和数量阈值 M ;
- ③计算曲线上第 g 个数据与第 $g-1$ 个数据之间的距离 S_g ,若 $S_g > S$,则判定第 g 个数据与第 $g-1$ 个数据属于不同组,反之属于同一组,重复计算直至该层中全部数据均计算完成,得到分组若干个;
- ④统计每组中的数据总数 m ,若 $m > M$,则将保留本组中全部数据,反之为杂散数据,删除该组数据;
- ⑤重新组合保留数据,得到新数据序列。

在采集激光焊缝数据时由多个3D激光扫描传感器同时测量^[10],从而得到激光焊缝的多角度数据信息,因此需要对全部传感器采集的3D数据拼接处理,剔除冗余数据,获取激光焊缝完整3D位置信息。引入坐标平均法,结合重合端点判定重叠区域,具体步骤如下所示:

- ①依据3D激光扫描传感器相对位置和采集的数据,可得到曲线 $E1-F1$ 和 $E2-F2$ 重合区域端点 $F1$ 和 $E2$;
- ②将 $F1$ 和 $E2$ 作为基准点,搜寻另一条曲线上最近点 $G2$ 和 $G1$,即曲线 $G2-F1$ 和 $E2-G2$ 为曲线 $E1-F1$ 和 $E2-F2$ 重合区域;

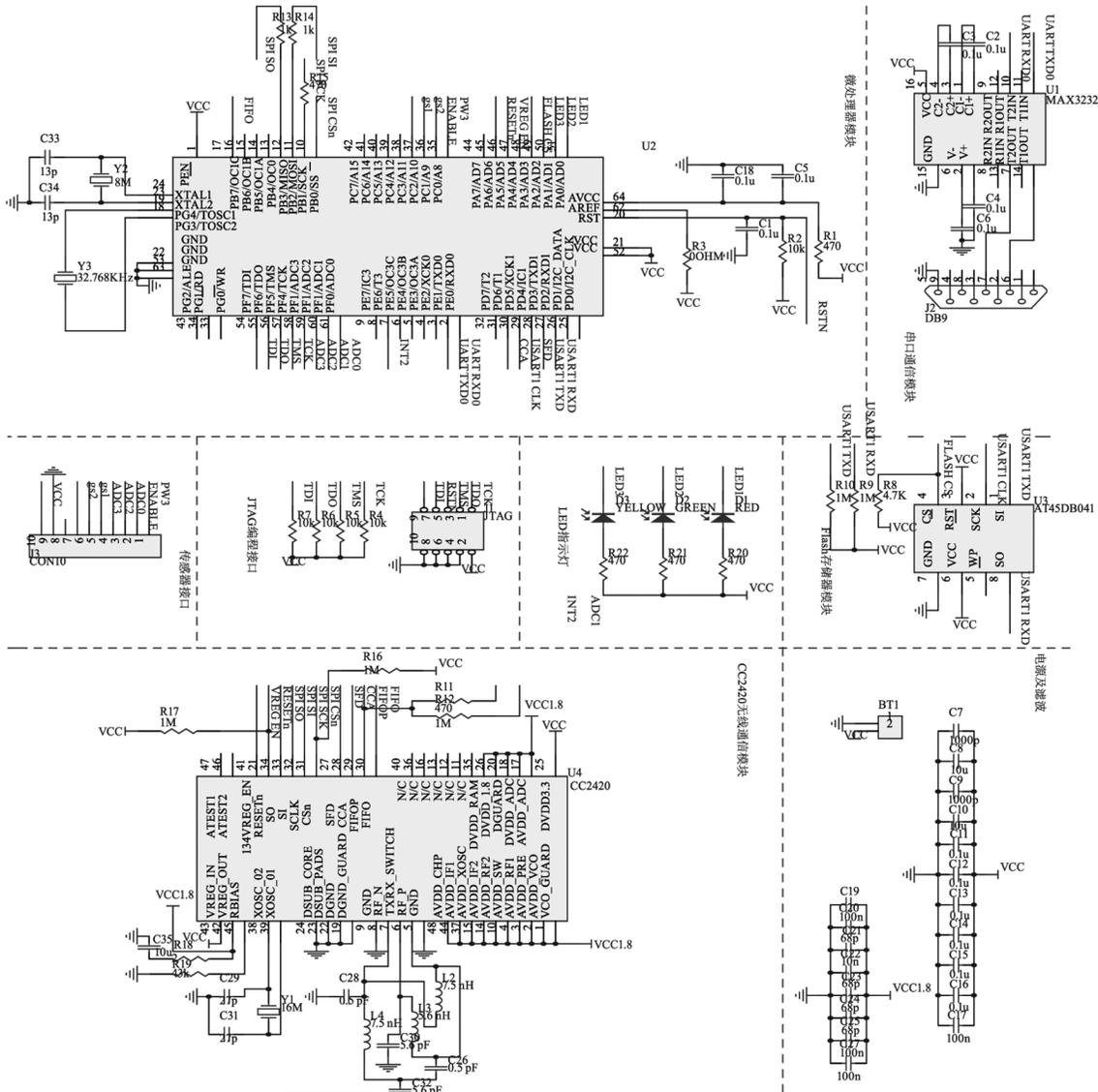


图 2 硬件电路图

Fig. 2 Hardware circuit diagram

③将 G2 - F1 和 E2 - G2 作为基准, 搜寻其上所有点 $H(X, Y)$ 在另一条曲线上对应的最近点 $H_0(X_0, Y_0)$, 用直线连接 $H(X, Y)$ 和 $H_0(X_0, Y_0)$ 并计算直线中心点坐标值, 采用该值作为点 H 新坐标, 从而得到新曲线 J_{new} ;

④拼接新曲线 J_{new} 和曲线 E1 - F1、E2 - F2 的剩余区域, 得到拼接后新曲线;

将全部传感器曲线数据按照以上方式拼接, 直到得到完整的激光焊缝 3D 位置数据, 用于后续焊缝自动跟踪。

3 激光焊缝自动跟踪控制

在理想状态下, 焊缝跟踪控制系统能够结合跟踪误差完全解决偏移问题, 但实际的应用中难免存

在不可避免的问题, 因此本文设一种免疫反馈算法, 结合模糊控制和变论域策略^[11-12]实时优化跟踪控制。

3.1 基于免疫反馈算法的激光焊缝特征提取

对采集到的焊缝完整 3D 位置信息展开全局最优解处理, 提取激光焊缝特征, 增强自适应焊接参数控制能力。本文设计一种免疫反馈算法: 其是一种全局优化算法, 能得到一组最优的控制参数, 使整个免疫控制系统达到最优。该算法设计的基本原理是: 当抗原攻击机体时, 免疫 T 细胞和 B 细胞对抗原产生免疫反应, 其中, T 细胞中的 T_h 细胞通过生成细胞因子传递抗原信息促使 B 细胞增殖分化并产生抗体抵御抗原, 当抗原攻击得到有效控制后, T

细胞中的 T_s 细胞数量上升,抑制 B 细胞继续增殖分化,降低免疫作用,恢复机体动态平衡。

用 $m(j)$ 表示第 j 次攻击的抗原总数, δ_1 表示活化因子, δ_2 表示抑制因子, $f(\cdot)$ 为描述抑制性能的非线性函数, ΔR 表示邻近两次 B 细胞受到 T 细胞刺激的变化量,则本次攻击中 B 细胞受到 T 细胞的刺激总量 $R(j)$ 如下所示:

$$R(j) = \{\delta_1 - \delta_2 f[R(j-1)], \Delta R(j-1)\} m(j) \quad (1)$$

将公式(1)用于激光焊缝搜索、定位、跟踪控制中,焊接过程中采样时刻 j 对应第 j 次攻击,时刻 j 期望值误差 ε_j 对应 $m(j)$,控制反应速率的参数 μ_1 和 μ_2 对应 δ_1 和 δ_2 ,最终控制输出 $\gamma(j)$ 对应 $R(j)$,则激光焊缝特征提取表达式如下所示:

$$\gamma(j) = \mu_1 \left\{ 1 - \frac{\mu_2}{\mu_1} f[\gamma(j-1), \Delta \gamma(j-1)] \right\} \varepsilon_j \quad (2)$$

通过免疫反馈算法的均匀交叉操作,完成激光焊缝特征提取,将特征参数上传至机械手单元,提高焊枪与焊缝之间偏差的自动识别能力,为后续激光焊缝特征分类提供支持。

3.2 基于模糊控制的激光焊缝特征分类

通过上述分析,需要对激光焊缝提取到的特征进行分类处理,避免焊接质量偏差的问题。引入模糊控制,利用基本论域方法建立目标边缘特征模型,调整激光焊缝隶属度参数,实现特征分类。

用 $C = [-c, c]$ 和 $D = [-d, d]$ 表示模糊控制器中输入值的基本论域, $O = [-o, o]$ 表示输出基本论域, $P = [-p, p]$ 和 $Q = [-q, q]$ 表示经量化后的实际论域对应的模糊集论域, $E = [-e, e]$ 表示输出论域折算成受控对象实际作用范围阈值,在阈值范围内完成物理论域和模糊论域之间的双向转化,如图3所示。

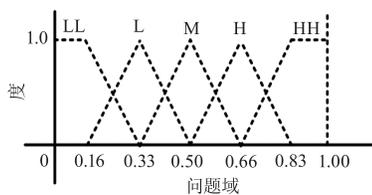


图3 模糊控制示意图

Fig. 3 Fuzzy control diagram

采用 Sigmoid 函数和高斯函数^[13-14]在物理论域和模糊论域转化的基础上,构建目标边缘特征分

类模型 W ,具体表达式为:

$$W = \sigma_1 \varepsilon_r + \frac{1}{\rho} \|\varepsilon\|^2 \sigma_2 \quad (3)$$

式中, $\sigma_1 = p/c$ 和 $\sigma_2 = q/d$ 表示模糊控制量化因子, $\rho = e/o$ 比例因子, ε 表示控制误差; ε_r 表示误差变化率。将论域的模糊子集作为目标边缘特征分类模型的输入值,以控制器微分系数增量 $\Delta\phi$ 作为判定标准,完成特征集的自适应分类,如图4所示。

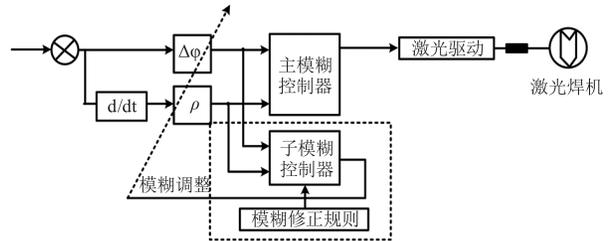


图4 基于模糊控制的特征集分类原理图

Fig. 4 Updating schematic diagram of feature set based on fuzzy control

建立模糊控制规则, X_i, Y_j, Z_{ij} 表示输入和输出论域的模糊子集;若 $P = X_i, Q = Y_j$,则 $O = Z_{ij}$ 。规则库中共包含 n 条规则, c_i 表示 O_i 隶属度函数的中心, ω_i 表示规则 i 的隶属度值, ϕ 表示上一采样时刻的调整微分系数。依据 Mamdani 模糊推理法^[15],采用重心法解模糊,得到调整微分系数 ϕ ,完成激光焊缝特征分类,表达式如下所示:

$$\begin{cases} \phi = \phi' + \Delta\phi \\ \Delta\phi = \frac{\sum_{i=1}^{\psi} c_i \omega_i}{\sum_{i=1}^o c_i} \end{cases} \quad (4)$$

根据微分系数结果获取焊缝成形检测特征信息,以此完成特征自适应更新及分类。

3.3 基于变论域策略的激光焊缝自动跟踪

在激光焊缝特征分类的基础上,利用变论域理论提高焊接参数控制准确率和焊缝成形检测效率,完成自适应焊缝跟踪,实现无人化焊接。变论域策略是在规则形状不变的前提下,通过伸缩论域使其随着误差的变化而相应变化,以此调整系统结构参数,如图5所示。

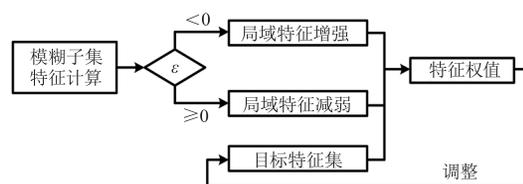


图5 变论域策略工作流

Fig. 5 Domain-changing strategy workflow

在系统结构控制过程中量化因子和比例因子为固定值,但固定化参数会影响焊缝自动跟踪控制的效果,所以引入变伸缩因子 τ_1 、 τ_2 和 t' 动态调整输入和输出邻域,用 β_1 和 β_2 表示充分小的正数,参数 η_1 、 η_2 和 ξ_1 、 ξ_2 为 $(0,1)$ 中的取值,得到变伸缩因子如下所示:

$$\begin{cases} \tau_1 = \left(\frac{|\varepsilon|}{P}\right)\eta_1 + \beta_1 \\ \tau_2 = \left(\frac{|\varepsilon_r|}{Q}\right)\eta_2 + \beta_2 \\ t' = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{|\varepsilon|}{P}\right)\xi_1 + \left(\frac{|\varepsilon_r|}{Q}\right)\xi_2 \right] \end{cases} \quad (5)$$

根据公式(5)自适应调节输入和输出邻域,得到:

$$\begin{cases} C = [-\tau_1 c, \tau_1 c] \\ D = [-\tau_2 d, \tau_2 d] \\ E = [-t' e, t' e] \end{cases} \quad (6)$$

通过公式(5)和公式(6)调节变伸缩因子对输入和输出论域动态控制。根据变伸缩因子调节焊缝自动跟踪系统量化因子,生成焊缝轨迹路径,抑制输出偏差数据,完成激光焊缝自动跟踪。至此完成了激光焊缝自动跟踪方法设计,结合 3D 激光扫描传感器设计,实现应用 3D 激光扫描传感器的激光焊缝自动跟踪方法。

4 实验与结果

为了验证应用 3D 激光扫描传感器的激光焊缝自动跟踪方法的整体有效性,需要测试应用 3D 激光扫描传感器的激光焊缝自动跟踪方法。

实验平台由自动化焊接机、控制器、3D 激光扫描传感器、驱动和传动等模块仿真构成。如图 6 所示。



图 6 实验仿真平台设计

Fig. 6 Design of the experimental simulation platform

为了避免实验中由于摄像机镜头畸变引起的成像失真和机械安装引起的误差问题,需要事先标定传感器参数,如表 1 所示。

表 1 激光扫描传感器参数标定

Tab. 1 Laser ranging sensor parameter calibration

Parameter	Numerical value
Focal length/mm	8.43965
Distortion $1/m^2$	-1659.94
The height of a single pixel/mm	0.00530
The width of a single pixel/mm	0.00530
The abscissa of the center point of the image/pix	635.584
The ordinate of the image center point/pix	489.352
Camera and measurement target distance/mm	90.1493
The angle between the laser and the camera/rad	0.35086

分析对比所提方法、文献[4]方法和文献[5]方法在实际激光焊接中的焊缝跟踪效果,采用三种方法分别焊接 V 型坡口对接接头,实验中采用 260 A 电流,激光条纹和焊接枪之间距离 23 mm。分别记录三种方法在焊接过程中焊缝中心所在坐标系中数据变化,得到水平 x 方向与 y 方向坐标关系和水平 x 方向与 z 方向坐标关系如图 7 和图 8 所示。

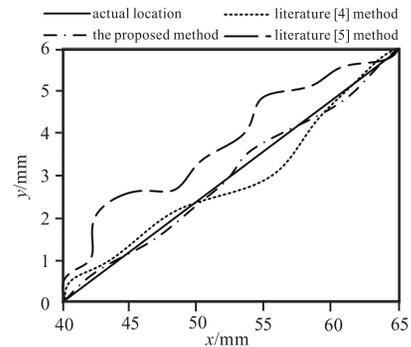


图 7 y 方向跟踪位置坐标图

Fig. 7 Coordinate diagram of tracking position in y direction

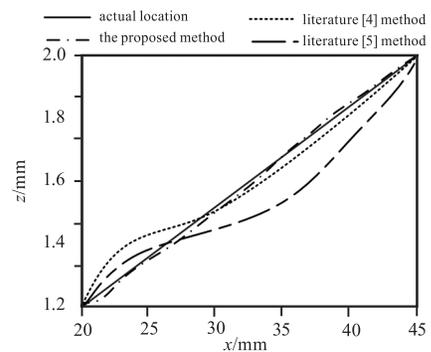


图 8 z 方向跟踪位置坐标图

Fig. 8 Coordinate diagram of tracking position in z direction

由图 7 和图 8 可以看出,采用所提方法的焊缝跟踪轨迹始终在实际焊缝中心坐标附近轻微波动,与实际位置基本吻合,只存在不影响焊接效果的微

小误差,文献[4]方法和文献[5]方法的焊接轨迹虽然也围绕实际值波动,但与所提方法相比误差较大,在对焊接要求精密的场景中无法发挥出优异的效果。所提方法引入免疫反馈算法、模糊控制和变论域策略对跟踪控制算法实时调整,解决焊接枪抖动引起的偏差问题,从而得到精度更好的跟踪效果。

用 ε_{y_n} 和 ε_{z_n} 表示第 n 次采样时 y 方向和 z 方向的激光焊缝跟踪误差,得到焊缝中心与实际中心的绝对误差 E_n 计算方式如下:

$$E_n = \sqrt{\varepsilon_{y_n}^2 + \varepsilon_{z_n}^2} \quad (7)$$

根据公式(7)计算全部采样的绝对误差,构建误差与方向之间的关系图,如图9所示。

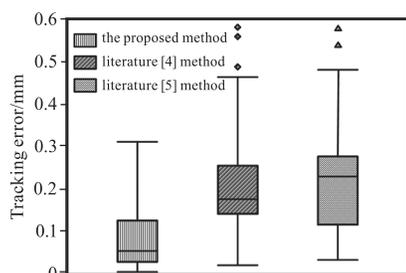


图9 跟踪误差检测结果

Fig. 9 Tracking error detection results

由图9可以看出,所提方法绝对误差大多集中在0.05~0.13之间,文献[4]方法绝对误差大多在0.15~0.26之间,文献[5]方法绝对误差大多在0.12~0.28之间,所提方法的大多数绝对误差值均低于文献[4]方法和文献[5],且所提方法未出现异常点,而文献[4]方法和文献[5]方法均出现了异常点,说明所提方法的跟踪效果更加稳定,在多次采样中均能保持较小的误差,更加适用于精度要求较高的实际应用场景之中。

5 结语

自动化焊接设备能够解放传统人工劳动力、提高工作效率和焊接质量,在制造业发展中起到重要作用,对促进国民经济持续增长也具有积极的意义。为了解决目前存在的跟踪误差大问题,提出应用3D激光扫描传感器的激光焊缝自动跟踪方法,结合3D激光扫描传感器的工作原理标定传感器参数,预处理传感器采集的数据,得到完整激光焊缝3D位置数据,采用免疫反馈算法、模糊控制和变论域策略控制参数,完成激光焊缝的自动跟踪。该方法能够有效地减小跟踪误差,为自动化焊接技术更好地应用

与发展提供思路。

参考文献:

- [1] Wang Lei, Zhao Yang. Design of automatic laser welding system for anode flake and negative flake of the batteries [J]. Applied Laser, 2020, 40(2): 271 - 275. (in Chinese)
王蕾, 赵阳. 电池正负极片激光自动焊接设备的研制 [J]. 应用激光, 2020, 40(2): 271 - 275.
- [2] Huang Wei. Safety configuration scheme and application of laser welding production line for pressure vessel [J]. Applied Laser, 2021, 41(3): 537 - 542. (in Chinese)
黄伟. 压力容器激光焊接生产线的安全配置方案与应用 [J]. 应用激光, 2021, 41(3): 537 - 542.
- [3] Lu Changliang, Cui Aiyong, Liu Haodong. Research on effects of ultrasonic vibration on microstructure of laser welding joints [J]. Applied Laser, 2021, 41(4): 687 - 690. (in Chinese)
卢长亮, 崔爱永, 刘浩东. 超声振动对激光焊接焊缝组织影响的研究 [J]. 应用激光, 2021, 41(4): 687 - 690.
- [4] Chen Xinyu, Zhang Qingxin, Zhu Linlin, et al. The method of real time seam tracking for robotic welding system based on laser vision sensor [J]. Laser & Infrared, 2021, 51(4): 421 - 427. (in Chinese)
陈新禹, 张庆新, 朱琳琳, 等. 基于激光视觉传感器的机器人实时焊缝跟踪方法 [J]. 激光与红外, 2021, 51(4): 421 - 427.
- [5] Li Yi, Deng Yaowen, Hong Bo, et al. Swing arc weld seam tracking method based on double periodic integral difference method [J]. Hot Working Technology, 2020, 49(13): 123 - 127. (in Chinese)
李毅, 邓耀文, 洪波, 等. 基于双周期积分差值法的摆动电弧焊缝跟踪方法 [J]. 热加工工艺, 2020, 49(13): 123 - 127.
- [6] Li Yangjin, Gao Xiangdong, Zhang Yanxi, et al. Kalman particle filter seam tracking method under color noise [J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2020(12): 106 - 109. (in Chinese)
黎扬进, 高向东, 张艳喜, 等. 色噪声下卡尔曼粒子滤波焊缝跟踪方法 [J]. 制造技术与机床, 2020(12): 106 - 109.
- [7] Li Bing, Lei Leijie, Chen Chao. A calibration method of biaxial magnetic sensor based on ellipse fitting [J]. Journal of Detection & Control, 2020, 42(3): 20 - 23. (in Chinese)

- 李冰,雷洸杰,陈超. 基于椭圆拟合的双轴磁传感器标定方法[J]. 探测与控制学报,2020,42(3):20-23.
- [8] Zhao Renjie, Hu Boqing, Lv Xu, et al. Filtering algorithm of UKF integrated navigation based on dual-Euler angles [J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(7): 1912-1920. (in Chinese)
- 赵仁杰,胡柏青,吕旭,等. 基于双欧拉角的 UKF 组合导航滤波算法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(7):1912-1920.
- [9] Li Lin, Wang Peipei, Gu Peng, et al. Distributed singular value decomposition recommendation algorithm based on LU decomposition and alternating least square[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2020, 33(1):32-40. (in Chinese)
- 李琳,王培培,谷鹏,等. 基于 LU 分解和交替最小二乘法的分布式奇异值分解推荐算法[J]. 模式识别与人工智能, 2020, 33(1):32-40.
- [10] Yang Pengcheng, Gao Xiangdong, Lin Shaoduo, et al. 3D reconstruction of laser scanning at weld surface defects [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(3):59-63,100. (in Chinese)
- 杨鹏程,高向东,林少铎,等. 焊缝表面缺陷激光扫描三维重构测量[J]. 焊接学报, 2020, 41(3):59-63,100.
- [11] Yang Mingkun, Long Shike, Mu Dejun, et al. Design of liquid cooling control system based on virtual instrument and fuzzy control strategy [J]. Computer Simulation, 2021, 38(7):251-255,285. (in Chinese)
- 杨鸣坤,龙诗科,慕德俊,等. 基于虚拟仪器和模糊控制的液冷控制系统设计[J]. 计算机仿真, 2021, 38(7):251-255,285.
- [12] Xuan Menghui, Zhang Jianhua, Wang Sijie, et al. Electric spring control strategy based on variable universe fuzzy PI control [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(18):7297-7302. (in Chinese)
- 轩梦辉,张建华,汪士杰,等. 基于变论域模糊 PI 控制的电力弹簧控制策略[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(18):7297-7302.
- [13] Yu Liping, Ruan Xianpeng, Wu Xianhao, et al. A study on evaluation criteria of bibliometric indicators based on sigmoid function [J]. Journal of Intelligence, 2020, 39(9): 176-182. (in Chinese)
- 俞立平,阮先鹏,吴贤豪,等. 基于 Sigmoid 函数的文献计量指标评价标准研究[J]. 情报杂志, 2020, 39(9): 176-182.
- [14] Shi Sheng, Du Dongsheng, Wang Shuguang, et al. Gaussian function based evolutionary power spectral density model for fully non-stationary seismic waves and application [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(5): 198-206. (in Chinese)
- 石晟,杜东升,王曙光,等. 基于高斯函数的完全非平稳地震动多峰模型及其应用[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(5):198-206.
- [15] Wu Mengcheng, Sun Yan, Liu Qian. Research on wind farm site selection based on entropy modified G2 weighting-Mamdani fuzzy inference [J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(10):1347-1353. (in Chinese)
- 吴梦成,孙燕,刘倩. 基于熵值修正 G2 赋权-Mamdani 模糊推理的风电场选址研究[J]. 可再生能源, 2021, 39(10):1347-1353.