DOI: 10.3901/JME.2019.17.048

基于视觉传感的机器人焊缝纠偏控制系统

王志江^{1,2} 薛坤喜^{1,2} 吴定勇³ 杨辉³ 申俊琦^{1,2} 刘杰^{1,2} 胡绳荪^{1,2}

- (1. 天津大学天津市现代连接技术重点实验室 天津 300350;
2. 天津大学材料科学与工程学院 天津 300350;
3. 中交天和机械设备制造有限公司 苏州 215557)

摘要: 针对工业机器人多层多道焊缝纠偏问题,提出一种基于视觉传感的人机互动机器人焊缝纠偏方法,并建立相应的视觉传感焊缝纠偏控制系统。该系统主要包含视觉传感采集及标定和机器人焊缝纠偏控制两个子系统。将工业相机安置在焊枪上得到拍摄的实时焊接图像,然后利用 Windows Forms 开发的焊接监控软件,工作人员通过观察监控界面,能够对焊枪偏离焊缝是否超过允许范围做出判断,再通过控制面板发出纠偏指令传送至可编程逻辑控制器(Programmable logic controller, PLC),PLC 向机器人控制器发出控制信号,机器人调用“机器人传感器接口”(Robot sensor interface, RSI)的信息流,将 PLC 控制信号转化为机器人末端偏移量并执行,使焊枪调整至合适位置,达到焊缝纠偏控制目标。在验证试验过程中,该系统反应较灵敏,焊缝纠偏准确度较高,整个过程运行平稳,焊缝成形质量良好。

关键词: 视觉传感; 纠偏控制; 焊缝跟踪; 多层多道焊; 工业机器人

中图分类号: TG409

Robotic Weld Seam Correction Control System Based on Visual Sensing

WANG Zhijiang^{1,2} XUE Kunxi^{1,2} WU Dingyong³ YANG Hui³ SHEN Junqi^{1,2}
LIU Jie^{1,2} HU Shengsun^{1,2}

- (1. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin University, Tianjin 300350;
2. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350;
3. Tianhe Mechanical Equipment Manufacturing Co., Ltd., Suzhou 215557)

Abstract: Regarding multi-pass weld seam tracking for industrial robots, a robotic weld seam correction control strategy is proposed based on visual sensing and the corresponding visual sensing weld seam correction control system is established. The system mainly consists of two subsystems: Visual sensing acquisition and calibration system, and robotic weld seam correction control system. Placed together with the welding torch, the industrial camera can obtain the groove or weld images in real time. The operators can observe the monitor software screen, which is designed by Windows Forms, to judge whether the welding torch deviates from target beyond the allowable range. If so, a correction command will be sent to a programmable logic controller (PLC) from the control panel; the PLC will send a control signal to the robot controller; the robot will read the information flow from the robot sensor interface (RSI) to convert the signal from PLC into the robot end offset which can be executed by the robot; in such way, the welding gun can be adjusted to a proper position to achieve weld seam correction control. During the verification test, the system is sensitive and has a reasonable accuracy in weld seam correction; the system works smoothly and steadily with good weld formation during the whole process.

Key words: visual sensing; correction control; seam tracking; multi-pass welding; industrial robot

0 前言

随着社会生产力的发展和科技力量的进步,对焊接机器人自动化水平的要求越来越高,特别

是“中国制造 2025”的提出,焊接过程质量传感、信息处理和控制在焊接装备发展的必然要求,数字化、智能化和自动化成为焊接过程的重点发展方向^[1-2]。

目前,工业机器人在焊接领域已经有了大范围应用,但是在实际焊接应用过程中常常因为存在大热量输入导致焊缝变形、变间隙、变错边以及工件

的加工误差和装配误差等因素造成焊缝位置和尺寸发生变化, 以致焊缝与机器人示教路径有偏差^[3-4]。对于该问题较好的解决方法是能够根据焊缝的变形信息, 实时观察并能够做出调整以纠正焊枪路径, 从而保证焊接质量^[5]。实现机器人焊接路径的实时纠偏, 一般需要三个过程: 实时焊缝信息的获取、对焊缝信息的分析处理并发出相应的控制信号、机器人接收信号并做出调整。通常, 根据反馈信息类型的差别, 机器人视觉伺服一般分为基于位置的视觉伺服控制、基于图像的视觉伺服控制和混合视觉伺服控制 3 类^[6-8]。LI 等^[9]采用的是利用结构光视觉来设计自动焊缝跟踪和识别。DING 等^[10-11]通过观察焊缝中心的焊接预测偏差建立了视觉神经网络模型, 有助于焊缝跟踪的发展。PRECUP 等^[12]采用混合视觉控制技术设计了焊缝跟踪系统, 基于图像的视觉控制方式进行焊缝纠偏, 基于位置的视觉控制方式控制焊接机器人沿焊缝方向行走。

现在焊接机器人在多层多道焊接中的填充焊道和盖面焊道, 因为参照物特征不明显或焊接状态复杂等原因, 均只能按照既定规划的路径(通常以根焊路径为基准进行规划)进行焊接, 无法在焊接过程中实时改变焊接路径, 焊接成形效果较差。针对此问题, 文中提出了一种人机交互进行机器人焊缝纠偏的方式, 来解决多层多道焊接焊缝跟踪问题。以坡口特征明显的根焊缝来初步实现该系统功能, 并逐步改善该系统功能以实现填充焊道、盖面焊道的人工交互焊缝跟踪。文中仅涉及根焊焊缝跟踪功能。首先对机器人视觉传感纠偏控制系统进行了总体设计, 着重分析了该系统工作原理和 workflows。并对该系统进行了误差检测和焊接效果检验, 以期达到人机交互机器人焊缝跟踪功能。

1 系统设计与开发

1.1 系统设计要求分析

该人机交互机器人焊缝纠偏系统是在盾构机大型筒体结构件机器人多层多道焊接(图 1)需求基础上提出的。该构件直径大, 壁厚也大, 以某一型号盾构机 B 环为例, 直径为 6 620 mm, 高度为 3 180 mm, 板厚为 55 mm, 因此, 该构件焊接过程中存在长直的纵缝、环缝, 并且需要多层多道焊接。焊接过程中, 存在长时间的热积累, 加上大型构件坡口精度、装配精度等问题, 会使得焊接过程结构件存在变形、焊缝偏离等问题, 因此, 需要在焊接过程中对焊缝对齐进行实时控制, 即实时纠偏。

图 1 盾构机筒体结构件机器人焊接工作站

现有基于视觉的多层多道焊缝跟踪方案主要有两种: ① 每一层均采用相机进行扫描、焊缝及坡口信息获取、重新规划层内焊道排布和后续层数规划、层内焊接等操作, 这样逐层进行规划焊接, 每层规划通常需要更换作业工具(即相机和焊枪), 过程相对繁复, 算法复杂; ② 采用激光扫描方式实时跟踪根焊坡口信息、调整焊枪并进行焊接, 而填充焊道、盖面焊道因为参照物特征不明显或焊接状态复杂等原因, 仅能根据根焊缝信息进行简单规划, 设定固定路径, 不再进行实时跟踪, 焊枪上下左右偏移沿规定路径进行焊接。填充焊道和盖面焊道路径是固定的, 没有考虑大量填充焊道、盖面焊道中热积累造成的变形, 会造成焊缝质量问题。

方案 2 在实际过程中应用较多。但是该方案中存在: ① 焊缝对中机器判断困难; ② 焊枪在焊接过程中, 路径固定后难以调节焊枪偏移等问题。因此, 拟借助“人”的智能来判断相机采集图像中焊缝对中问题, 并对机器人开放接口进行编程实现焊接过程中的焊枪手动实时偏移, 以人机交互方式解决多层多道焊接焊缝跟踪问题。

1.2 总体设计

KUKA 机器人运行时的焊缝纠偏是通过其控制器的“机器人传感器接口”(Robot sensor interface, RSI)实现的。为实现焊接时能够控制焊枪路径, 拟采用人为判断偏差及其大小并向 RSI 传入模拟偏差信号, 使机器人在原有路径基础上进行小范围调节, 以达到焊缝纠偏的目的, 实现多层多道焊的实时跟踪纠偏控制, 得到合适的路径和较好的焊接质量。

为达到上述目标, 该系统需要实现如下功能。

(1) 偏移量的获取。机器人自动焊接过程中, 在监控界面中能实时观察焊缝形状及位置, 并能判断焊枪位置, 以确定焊枪是否存在平行于工件表面并垂直于焊缝的偏移(简称“横向偏移”)和垂直于工件表面方向的偏移(简称“垂直偏移”), 且能确定偏移大小。

(2) 纠偏控制调节。焊枪发生偏移后, 通过控

制面板发送指令信号至机器人内部调整程序,从而实现焊枪位置调节。

因此,机器人视觉传感纠偏控制系统主要包括两个子系统:视觉传感采集及标定系统和机器人焊缝纠偏控制系统。视觉传感采集及标定系统实时获取焊接过程焊缝信息,并通过监控界面的标定窗口进行判断,为机器人纠偏焊缝控制系统做前期铺垫。机器人焊缝纠偏控制系统实现控制信号传递和转换,并执行纠偏。

1.3 控制模块划分及工作流程

两个子系统可以细划分为四个模块,分别是视频采集模块、人机交互模块、可编程逻辑控制器(Programmable logic controller, PLC)控制模块和机器人控制器(KUKA robot controller, KRC)模块,如图2a所示。信号传递如图2b所示,它们实现功能如下。

(1) 视频采集模块。安置在焊枪上的工业相机实时传递焊接坡口、焊缝形状、焊枪位置等信息至人机交互模块。

(2) 人机交互模块。由工控机和控制面板组成,工控机将采集的视频信息通过处理显示在监控界面,工作人员通过监控界面判断当前焊枪是否偏离焊接路径并确定偏差值。如若发生偏移,通过控制面板发出纠偏控制指令,并传递至PLC。

(3) PLC控制模块。PLC接收到纠偏控制指令后,将纠偏控制指令转化为KRC能够识别的控制信号,并将该信号传递至KRC,同时监控机器人运行状态。

(4) KRC模块。KRC收到PLC信号后,RSI信息流将处理该信号,并最终将纠偏量赋值给机器人调节量,对机器人末端位置进行调节纠偏。

图2 系统组成及控制过程

纠偏后的效果画面通过视频采集模块传递到人机交互模块的监控界面。

PLC与KRC通信方式采用新一代基于工业以太网技术的自动化总线标准ProfiNet通信协议。在PLC侧PN-IO接口创建ProfiNet通路,导入机器人控制器KRC4到ProfiNet通路上并进行组态,在KRC侧配置输入信号对应的数字通信量,便可实现PLC与KRC间通信,如图3所示。

图3 PLC与KRC通信设置

2 视觉传感采集及标定系统

2.1 工业相机画面标定

实时监控画面由工业相机拍摄获得。在判断偏差量之前,需要对相机拍摄图像大小进行标定,以确定监控画面对应的实际尺寸。

(1) 横向偏移方向尺寸标定。调节焊枪至焊接时设定高度,对相机拍摄的图像宽度进行标定,得到结果如图4所示,其宽度为121 mm。因此,可在监控界面窗口下方添加121 mm的标尺,方便监控实际偏移量大小。

图4 相机监控界面的横向宽度

(2) 垂直偏移方向尺寸标定。由于相机与焊枪相对位置固定,所以随着焊枪高度变化,相机拍摄的监控界面会随之变大或变小:焊枪越高,拍摄界面越广;反之,越小。因此可以计算视野宽度与焊枪高度之间的关系探寻其规律。

将焊枪从距离工件为零时开始逐渐增大高度(h),并记录相机视野中对应的宽度(x),将所得数据进行处理得到图5。

由图5可知在一定范围内,视野宽度与焊枪高度可看成线性关系,关系如表达式(1)或式(2)所示

$$x = 0.63h + x_0 \quad (1)$$

$$h = \Delta x / 0.63 \quad (2)$$

$$\Delta x = x - x_0 \quad (3)$$

式中, x 为监控界面对应的实际视野宽度, h 为焊枪高度, x_0 为焊枪高度为零时的视野宽度, Δx 为视野横向宽度变化量。

图5 焊枪高度变化时图像宽度变化

焊枪高度每升高 1 mm, 视野宽度约增大 0.63 mm。对于宽度为 d mm 的坡口, 焊枪高度变化 1 mm, 坡口图像变化 $0.63d$ mm。因此, 可根据视野横向宽度变化量 Δx 来确定焊枪高度及变化。

2.2 监控界面设计

监控界面是利用 Windows Forms 开发设计的应用程序。监控界面窗口如图 6 所示, 与相机连接并实时获取图像, 并能够使相机根据亮度实现自动曝光和自动调节增益, 使合适亮度的图像显示在监控界面。

图6 人机交互监控界面

焊缝横向是否发生偏移可以由视野中焊缝与下侧滑块的相对位置来确定, 偏移量大小可以由下侧标尺读出; 焊枪垂直偏移量可由上侧滑块位置与坡口宽度变化对比来确定。

2.2.1 焊枪横向偏移量获取

相机与焊枪位置相对固定, 焊枪在屏幕中位置也固定, 因此, 只要对焊枪位置在屏幕横向位置中标定, 就能由图中焊枪标志代表真实焊枪位置。根据焊缝与焊枪标志的位置关系即可得到偏差方向和大小, 具体步骤如下。

(1) 移动机器人焊枪到焊缝中心位置。

(2) 在应用程序的窗口中移动焊枪标志到焊缝中心, 如图 7 所示, 在整个焊接过程中切勿移动焊枪标志。

图7 焊枪标志处于焊缝中心

(3) 在焊接过程中, 通过对比屏幕上的焊枪标志与实际焊缝中心相对位置确定是否发生偏移。若偏移超过允许范围, 则通过操作控制面板使焊枪归位。

图 8a、8b 分别为焊枪左偏和右偏时图像, 规定偏移超过 1 mm 时则需要对焊枪位置进行调节。

(a) 焊枪左偏

(b) 焊枪右偏

图8 焊枪所处位置

2.2.2 焊枪垂直偏移量获取

当焊枪高度发生变化时, 监控窗口中坡口图像宽度便会发生变化。实际焊接过程中获得焊枪的具体高度是难以实现的, 而通过观察监控窗口中的焊缝坡口尺寸变化, 可判断焊枪高度是否发

生变化。具体实现步骤如下。

(1) 移动焊枪到焊缝中心位置, 并调整焊枪至正常焊接高度。

(2) 移动窗口上方两个滑块到坡口两端, 使滑块卡住坡口, 如图 9 所示, 焊接过程中切勿移动滑块。

图 9 初始焊枪高度

(3) 焊接过程中通过观察坡口边沿与两个滑块的相对位置来确定焊枪高度是否发生变化。当监控窗口中坡口图像横向尺寸小于两个滑块宽度时(图 10a), 说明焊枪偏高, 需要降低焊枪高度; 反之, 当监控窗口中坡口图像横向尺寸超过两个滑块宽度时(图 10b), 说明焊枪偏低, 需要提高焊枪高度。

(a) 焊枪高度偏高

(b) 焊枪高度偏低

图 10 焊枪高度调节

通过上述方式, 可直接在监控窗口判断并获得焊枪相对于工件的横向偏移和垂直偏移, 便于给纠偏控制系统发出反方向调节指令。

3 机器人焊缝纠偏控制系统

操作人员根据视觉传感监控窗口来判断焊枪的偏移方向及大小, 然后操控控制面板发出反方向调节指令, 该指令传递至 PLC 并处理后向 KRC 发送控制信号, 机器人接收到信号后由 RSI 处理转化为机器人末端偏移量并执行, 实现控制纠偏过程。

3.1 PLC 控制

以焊枪偏右, 需向左调节焊枪说明 PLC 控制过程。如果焊枪偏右, 则 PLC 接收到来自控制面板的左调焊枪指令, 然后 PLC 利用延时断开继电器控制左移输出端口持续输出 ds 的闭合信号, 向作为输出的 KRC 发出控制信号, 且控制面板上左移指示灯亮。PLC 信号处理流程设计如图 11 所示。

图 11 PLC 处理信号设计

3.2 RSI 信息流

RSI 信息流控制移动方式有相对移动和绝对移动两种, 文中采用绝对移动方式, 偏移量为绝对量, 当偏差量为定值时, 系统会向减小偏差的方向移动该定值的距离。该移动方式每次调节都是在上次偏差量的基础上进行纠偏。RSI 信息流中偏差量是无法保持的, 给定偏差后, 机器人会移动相应距离; 当停止信号时, 偏差值会归零, 这时系统会向归零的方向移动, 偏离理想路径, 纠偏失败。为此, 在 RSI 信号流中采用积分指令, 使积分得到的结果保存, 在停止偏差信号时焊枪仍处于调节后位置, 而不是返回调整前状态。

由于 PLC 与 KUKA 控制器之间只有数字信号, 所以 PLC 只能向 KRC4 发送开关量。因此需要将输入信号通过变换转变为 d 的积分值。

如图 12 所示, PLC 将控制信号传递过来后, 通过 DIGIN1 接口和 SUM1 运算将输入信号转化为大小为 1 的模拟信号, 再与 SOURCE1 固定信号源相乘, 能够改变积分的基数, 得到移动量传给偏移量 CorrY, 从而控制机器人焊枪末端移动 CorrY 距离, 达到机器人纠偏控制的目的。

焊枪的高度调节原理与上述调节原理相同。

另外, 实现机器人纠偏控制运动过程需要通过编程调用 RSI 信息流文件, 调用代码如图 13 所示。

RSI_CREATE()将信号流配置文件加载到 RSI 容器中。加载激活成功后, 调用焊接程序, 开始焊接。此时已经开通机器人运动修正。焊枪偏离合理路径时对焊枪位置进行调节, 完成机器人焊缝纠偏实时控制调节目标。

焊接结束后, RSI_OFF()关闭信号处理。纠偏系统不再进行机器人运动修正。

图 12 RSI 信息流设计

```

1 DEF test ( )
2   DECL INT ret
3   DECL INT CONTID
4   IN1
15
16 PTP HOME VEL= 100 % DEFAULT
24
25 ret=RSI_CREATE("CorrSystem.rsi")
26 IF(ret<>RSIOK) THEN
27   HALT
28 ENDIF
29
30 ret=RSI_ON(#ABSOLUTE,#IPO,#TTS)
31
32 IF(ret<>RSIOK) THEN
33   HALT
34 ENDIF
35
36 RSI_MOVECORR()
37
38 ret=RSI_OFF()
39
40 IF(ret<>RSIOK) THEN
41   HALT
42 ENDIF
43 PTP HOME VEL= 100 % DEFAULT
51
52 END
53

```

图 13 调用 RSI 文件

4 试验结果及讨论

4.1 试验平台

机器人视觉传感焊缝跟踪纠偏系统是由 KUKA 16 L8 arc HW 工业机器人、海康 MV-CA060-11GM 工业相机、研华 IDS31-190 型工控机及控制面板、西门子 S7-300 系列 PLC、EDS-205A 交换机组成。

4.2 焊缝横向纠偏控制效果

在测试过程中，通过控制面板按钮控制机器人焊枪每次横向移动 1 mm，连续移动 10 次计入调节总量，然后获得机器人记录值、游标卡尺测量值，

并分别计算它们与设定值的误差，以此来评估测试系统的可靠性。

横向纠偏测量结果及其误差，如表 1 所示。无论是机器人测量数据还是游标卡尺测量数据，误差都控制在 1% 以内，移动 10 mm 最大误差为 0.07 mm，能够满足焊接精度需要。

表 1 控制系统横向纠偏结果及误差

调节方向	机器人记录值/ mm	卡尺测量值/ mm	记录值误差 (%)	测量值误差 (%)
左	9.96	10.07	-0.4	0.7
	9.97	10.01	-0.3	0.1
右	-9.99	10.06	-0.1	0.6
	-9.99	9.98	-0.1	-0.2

将焊接工件平放在工作台上，焊缝末端相对规划路径左偏 8 mm，模拟焊缝偏斜。焊接开始后，根据监控界面调节控制面板，发出指令调节焊枪横向位置，焊枪能及时纠偏到焊缝正上方。调整过程中的监控界面窗口如图 14 所示，相机自动调整后，视觉传感监控界面清晰可见焊缝；焊接效果如图 15 所示，该过程没有表现出明显调整痕迹，过渡比较平稳，焊接成形良好。

图 14 横向纠偏监控界面

图 15 横向纠偏焊接效果

4.3 焊枪垂直纠偏控制效果

在垂直方向上, 也通过控制面板控制机器人焊枪在垂直方向每次移动 1 mm, 连续移动 10 次计入调节总量。

在垂直方向测量结果及其误差, 如表 2 所示。无论是机器人测量数据还是游标卡尺测量数据, 误差都控制在 1% 以内, 移动 10 mm 最大误差为 0.10 mm, 能够满足焊接精度需要。

表 2 控制系统垂直纠偏结果及误差

调节方向	机器人记录值/ mm	卡尺测量值/ mm	记录值误差 (%)	测量值误差 (%)
上	9.95	9.99	-0.4	-0.1
	9.98	9.99	-0.2	-0.1
下	-9.97	9.90	-0.3	-1.0
	-9.94	9.98	0.6	-0.2

将工件放在工作平台上, 焊缝末端抬高 8 mm, 模拟焊缝高度发生变化, 进行焊接试验测试纠偏效果。焊接纠偏过程中监控界面如图 16 所示, 图像清晰, 根据边缘可以判断焊枪仍需要向下适当调节。焊缝成形如图 17 所示, 焊接稳定后成形较为一致, 效果良好。

图 16 垂直纠偏监控界面

图 17 垂直纠偏焊接效果

5 结论

(1) 开发了实时监控应用程序, 并提出了从监控界面人为获得焊枪偏移量的方法。通过观察焊枪标志与焊缝中心相对位置确定焊枪横向偏移方向及大小; 通过工件坡口在监控窗口中成像大小确定焊枪垂直偏移方向及大小, 以此来确定焊接路径是否需要调整。

(2) 通过 PLC 实现了向已设定好焊接路径的机器人内部输入路径纠偏指令, 通过 RSI 信号流处理得到纠偏量, 实现焊缝纠偏。

(3) 开发了基于视觉传感的人机互动机器人焊缝纠偏控制系统, 纠偏精度达到 0.1 mm, 纠偏过程运行平稳, 焊接效果良好。

参 考 文 献

- [1] 陈健, 苏金花, 张毅梅. 《中国制造 2025》与先进焊接工艺及装备发展[J]. 焊接, 2016(3): 1-5.
CHEN Jian, SU Jinhua, ZHANG Yimei. Development of advanced welding procedure and equipment with "Made in China 2025" [J]. Welding & Joining, 2016(3): 1-5.
- [2] 骆敏舟, 方健, 赵江海. 工业机器人的技术发展及其应用[J]. 机械制造与自动化, 2015(1): 1-4.
LUO Minzhou, FANG Jian, ZHAO Jianghai. The Development and the application of the industrial robot technology [J]. Machine Building & Automation, 2015(1): 1-4.
- [3] 许燕玲. 基于视觉及电弧传感技术的机器人 GTAW 三维焊缝实时跟踪控制技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
XU Yanling. Research on real-time tracking and control technology of three dimension welding seam during welding robot GTAW process based on vision sensor and arc sensor [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [4] 何银水, 孔萌, 陈华斌, 等. 基于视觉注意机制的机器人厚板焊接焊缝轮廓的识别[J]. 焊接学报, 2015, 36(12): 51-55.

- HE Yinshui, KONG Meng, CHEN Huabin, et al. Weld seam profile identification based on visual attention mechanism in robotic thick-plate welding[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2015, 36(12): 51-55.
- [5] 华天润, 郭蕴华, 吴业振, 等. 焊接机器人焊缝视觉跟踪修正系统开发与实验研究[J]. 热加工工艺, 2016(15): 196-199.
- HUA Tianrun, GUO Yunhua, WU Yezhen, et al. Development and experimental research of weld visual tracking correction system of welding robot[J]. Hot Working Technology, 2016(15): 196-199.
- [6] 尹湘云, 殷国富, 胡晓兵, 等. 基于支持矢量机回归的机器人视觉系统定位精度[J]. 机械工程学报, 2011, 47(1): 48-54.
- YIN Xiangyun, YIN Guofu, HU Xiaobing, et al. Positioning accuracy of robot vision system based on support vector machine regression[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(1): 48-54.
- [7] 贾丙西, 刘山, 张凯祥, 等. 机器人视觉伺服研究进展: 视觉系统与控制策略[J]. 自动化学报, 2015, 41(5): 861-873.
- JIA Bingxi, LIU Shan, ZHANG Kaixiang, et al. Survey on robot visual servo control: Vision system and control strategies [J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(5): 861-873.
- [8] 陶波, 龚泽宇, 丁汉. 机器人无标定视觉伺服控制研究进展[J]. 力学学报, 2016, 48(4): 767-783.
- TAO Bo, GONG Zeyu, DING Han. Survey on uncalibrated robot visual servoing control[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(4): 767-783.
- [9] LI X, LI X, GE S, et al. Automatic welding seam tracking and identification [J]. IEEE T. Ind. Electro., 2017, 64(9): 7261-7271.
- [10] DING D. Visual neural network model for welding deviation prediction based on weld pool centroid[J]. Int. J. Pattern Recogn., 2018, 32(8): 1859014.
- [11] LEE S K, NA S J. A study on automatic seam tracking in pulsed laser edge welding by using a vision sensor without an auxiliary light source[J]. J. Manuf. Syst., 2002, 21(4): 302-315.
- [12] PRECUP R E, PREITL S, RUDAS I J, et al. Design and experiments for a class of fuzzy controlled servo systems [J]. IEEE-ASME T. Mech., 2008, 13(1): 22-35.
-
- 作者简介: 王志江, 男, 1981 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为焊接新方法工艺、焊接过程传感及控制、焊接自动化。
E-mail: wangzj@tju.edu.cn
- 胡绳荪(通信作者), 男, 1956 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为焊接设备及自动化、焊接新方法工艺等。
E-mail: huss@tju.edu.cn