

基于模糊自适应 PID 焊缝轨迹跟踪的机器人焊接前瞻控制方法^①

谢 光^{②*} 熊禾根* 陶 永^{③**} 刘 辉** 高进芃* 陈友东**

(* 武汉科技大学机械自动化学院 武汉 430081)

(** 北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100191)

摘 要 研究了机器人焊接的控制。针对当前传统焊接工业机器人通常仅按照示教点进行既定轨迹运动,不能适应小批量多品种的柔性性与智能生产线的问题,将工业相机、图像处理技术与智能机器人相结合,提取出焊缝轨迹发送给机器人,同时为提高机器人焊接过程中的轨迹跟踪精度问题,提出了一种基于模糊自适应 PID 焊缝轨迹跟踪的前瞻控制方法。在工程大型薄壁结构件的焊接过程中,该方法将视觉检测与识别用于焊缝轨迹跟踪,以提高焊接机器人的作业精度。最后通过实验,验证了该方法具有良好的自适应性和控制精度,能够实现前瞻偏差补偿控制。

关键词 视觉指引, 轨迹跟踪, 模糊 PID 调节, 偏差补偿, 焊缝

0 引 言

当前焊接工艺复杂、劳动强度大而且环境艰苦,焊接品质严重依赖操作者的技能、技术和经验。工程应用中亟待开发出能够取代工人手工操作的焊接设备,以减少焊接过程中人为操作引起的误差,提高焊缝质量^[1,2]。目前,工业机器人只能在规划好的路径中执行预定义的指令动作,缺乏对环境的感知与应变能力,不能适应小批量多品种的柔性性与智能生产线,这极大地限制了机器人的应用。随着先进制造技术的发展,焊接自动化、机器人化、柔性化和智能化已成为发展的必然趋势^[3]。

随着计算机计算能力的显著提高,视觉作为一种重要的传感方法^[4]受到越来越多国内外学者的青睐,其在扩展机器人的环境感知与应对外界环境变化的能力上具有重要作用。周律^[5]根据图像特点定义了焊缝的位置偏差和角度偏差,在此基础上

设计了位置跟踪控制器,其中反馈控制采用经典的 PD 控制,实现了机器人持焊枪自主地沿焊缝运动。付涛^[6]等提出了一种改进型神经网络自适应滑模控制机器人轨迹跟踪方法,该方法采用粒子群优化算法对径向基函数(radical basis function, RBF)神经网络结构参数进行优化,实验表明,基于该方法的控制系统具有良好的鲁棒性和控制精确度,同时能有效地削弱机器人的抖振现象。徐鹏飞^[7]等人设计了一种用于机器人焊缝跟踪的复合型 Fuzzy-PID 控制器,根据焊缝偏差大小来选择性地采用 PID 控制或者模糊 PID 控制,此控制器的优点是动态响应快、超调量小,但不足是其精度不够。针对当前焊接机器人不够智能化等问题,本研究利用视觉处理提取出焊缝轨迹,在基于位置的视觉伺服思想上提出了一种基于模糊自适应 PID 焊缝轨迹跟踪的前瞻控制方法,提高了焊缝轨迹跟踪的补偿精度,实现了焊接机器人前瞻性偏差补偿控制。

① 科技部支撑计划(2015BAF01B03)资助项目。
② 男,1991 年生,硕士;研究方向:机械现代设计与智能控制。
③ 通讯作者,E-mail: 596538691@qq.com
(收稿日期:2016-08-20)

1 系统构成

本文焊接机器人整体构成如图 1 所示,主要分为机器人系统与视觉测量系统。在机器人运动过程

中,实时采集传感器图像并进行处理,将从图像中获得的拼缝信息和原始的示教焊接路径轨迹综合建模,再进行运动分解。同时在运动缓冲区中,生成焊接运动轨迹以形成闭环控制。

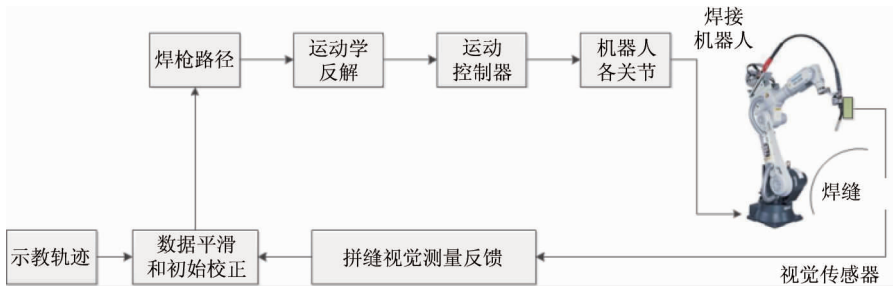


图 1 焊接系统构成

1.1 视觉系统的组成

焊接机器人的视觉系统主要由三部分组成:视觉传感器、视觉处理器、视觉控制器。视觉传感器主要由一个工业相机和光源组成,相机主要完成焊缝的采集工作。为了得到清晰的焊缝视觉图像,在相机前方安装了 LED 照明装置。同时为了更好地观测焊枪偏离焊缝的情况,使相机光轴与焊枪平行并垂直于焊接面。为了避免焊接过程中对相机采集图像的影响,在镜头前安装了保护罩和一滤光片。

1.2 焊缝图像处理与坐标提取

根据张正友棋盘标定法^[8]对相机进行标定,得出相机的内外参数,进而计算出计算机图像坐标系与机器人坐标系之间的转换关系。为实现机器人自动焊接功能,首先需要对相机拍摄得到的图像进行处理得到焊缝坐标,然后将得到的焊缝坐标输入到机器人控制器中,机器人控制器根据焊缝坐标生成路径,进而实现自动焊接。

原始焊缝图像是在未燃烧焊条的情况下获得的,噪声干扰小,此时拍摄效果较好。然而由于焊件表面凹凸不平,光照情况下难免会造成图像质量下降,因此如果想要准确提取焊缝边缘,首先需对图像进行预处理。从相机得到原始图像后首先进行图像中值滤波,消除掉噪声。然后进行图像增强处理,将有用的信息增强同时减弱不需要的信息。图像预处理最后就是需要对图像进行二值化处理,二值化是将图像黑白化处理的操作,方便接下来的边缘检测。

本文采用 Otsu 方法^[9]进行图像二值化,Otsu 方法的优点是可以快速地得到优良的二值化效果。

由于传统 Canny 边缘检测算法具有局限性,本文采用一种自适应的 Canny 边缘检测算法^[10]——根据图像的灰度均值与方差均值自动计算 Canny 算子的高低阈值。其高阈值获取主要算法如下:

$$\begin{cases} T_h = k \times (E_{ave}/F_{ave}) \\ E_{ave} = \frac{1}{L_w \times L_h} \sum_{m=1}^{L_w \times L_h} E_m \\ F_{ave} = \frac{1}{L_w \times L_h} \sum_{m=1}^{L_w \times L_h} f_m(i, j) \end{cases} \quad (1)$$

其中, T_h 即为所求的高阈值; E_{ave} 、 F_{ave} 、 L_w 和 L_h 分别为图像的平均方差、平均灰度、图像的宽度和高度, $f_m(i, j)$ 为区域内任一像素,通过实验得知 $k \in (0.2, 0.5)$ 时检测效果较好。低阈值仍利用传统的方法求取,即为 $T_l = T_h/2$ 。基于一种自适应的 Canny 边缘检测算法处理后得到的结果如图 2 所示。

为方便机器人对焊缝轨迹跟踪,需要得到连续且准确的焊缝坐标,故需对边缘检测后的图像进行拟合,得到一条方便坐标提取的线。在上位机得到焊缝提取线后,将焊缝坐标发送给机器人控制器,控制机器人沿固定轨迹运动。在本文基于视觉的焊接系统中,由于视觉测量装置和焊接头安装在不同的位置,有一定的前视距离。因此,测量点往往超前于焊接点。另一方面,视觉测量系统中图像的采集和

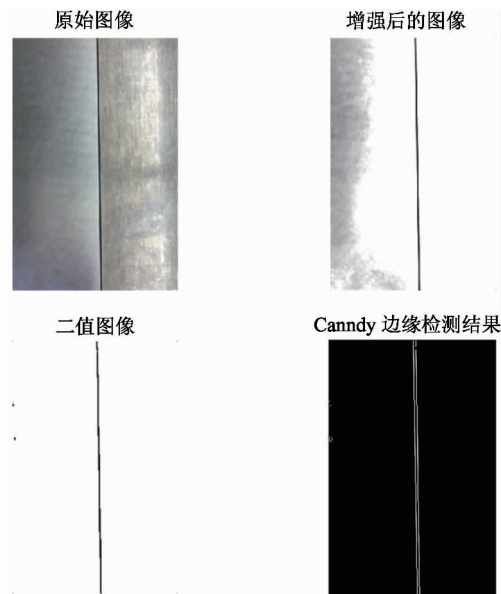


图 2 处理后得到的焊缝图像

处理往往需要一定的时间,从而会造成系统滞后。滞后量越大,控制系统将越不稳定^[11]。焊接控制的滞后以及焊接过程中热变形等非线性因素的综合影响,导致一般的 PID 调节方法很难达到高精度跟踪补偿。另一方面,一组固定的 PID 参数很难同时满足不同焊缝的补偿精度要求。为此,本文提出了一种基于模糊自适应 PID 焊缝轨迹跟踪的前瞻控制方法。

2 焊缝轨迹跟踪系统控制模型

2.1 基于视觉测量的焊缝轨迹补偿流程

设计的焊缝轨迹偏差补偿控制流程如图 3 所示,在进行焊接前,首先要对焊接机器人进行示教。

示教完成后,系统将自动测量得到的示教点信息,如焊缝中心、宽度等信息,存储到文件中。焊接开始后,相机按照固定的周期进行焊缝的位置检测,分析采集到的图像中焊缝的中心位置和宽度信息。将测量信息与示教路径对比,如果超过阈值则对焊接头进行位姿的调整。

焊缝测量系统将测量到的焊缝偏差信息发送给补偿运动控制系统,补偿运动控制器对补偿伺服驱动进行插补控制,各驱动电机负责补偿运动执行。因此,跟踪补偿系统的整体模型如图 4 所示。其中,

$X_i(s)$ 是系统的输入, $X_o(s)$ 是系统的输出, $W(s)$ 是焊缝变形的干扰。 $G(s)$ 是伺服驱动系统和机械结构的总传递函数, e^{-t_1s} 是焊缝变形测量和图像特征提取的延时反馈环节。

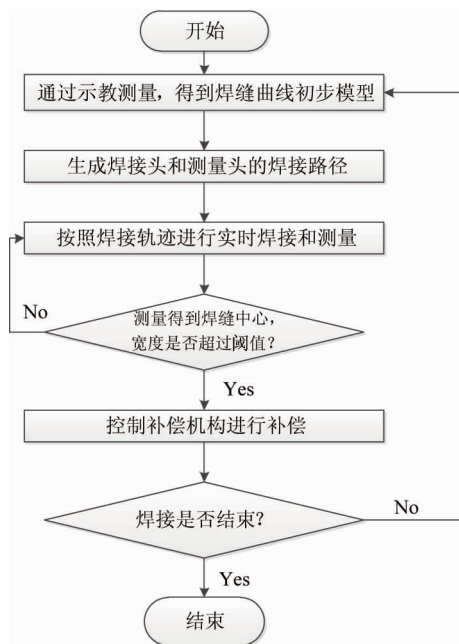


图 3 焊缝轨迹的补偿控制流程

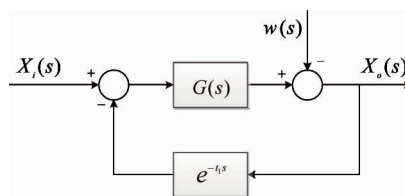


图 4 控制系统整体模型

不失一般性,这里用一个二阶系统来近似表示该总传递函数 $G(s)$, 故表达式如下:

$$G(s) = \frac{k}{(s+a)(s+b)}e^{-t_1s} \quad (2)$$

其中,对于本文的控制系统, k 取值为 25, a 为 12.6, b 为 2.4。令反馈函数 $H(s) = e^{-t_1s}$ 。若令干扰 $W(s) = 0$, 则系统的传递函数公式为

$$G_{x1}(s) = \frac{X_{o1}(s)}{X_i(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (3)$$

同理,当输入 $X_i(s) = 0$ 时,则系统的传递函数公式为

$$G_{x1}(s) = \frac{X_{o1}(s)}{X_i(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (4)$$

因此,当 $X_i(s)$ 和 $W(s)$ 同时工作时,系统输出公式为

$$X_o(s) = \frac{G(s)X_i(s) + W(s)}{1 + G(s)H(s)} \tag{5}$$

由于文本偏差系统是一个非常典型的二阶时滞系统,如对补偿系统设置一组固定的 PID 调节参数,

那么将很难兼顾各种变形形式的偏差调节精度需求。因此,这里采用一种模糊自适应的 PID 调节算法。为了对偏差进行自适应调节,需建立焊缝偏差补偿的数学模型。结合本文焊接过程,设计的焊缝偏差补偿模型如图 5 所示。

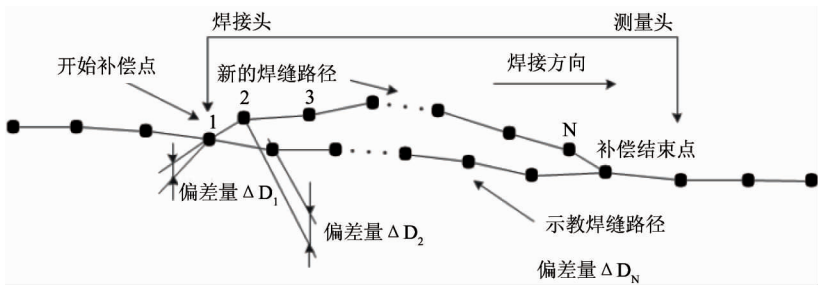


图 5 偏差补偿示意图

记焊接速度为 V_c , 前视距离为 L , 处理一幅焊缝图片时间为 T_f , 则可求出第一个前视距离内的偏差点的个数

$$N = \frac{L}{V_c T_f} \tag{6}$$

第一个偏差量 $\Delta D_1 = 0$, 则第一个偏差点补偿量记为 E_1 , 则由下式可计算 E_2 :

$$E_2 = \Delta D_2 - \Delta D_1 = \Delta D_2 \tag{7}$$

同理,可推出第一段前视距离上,每个偏差点对应的补偿值 $E_i (i = 1, 2, \dots, N)$, 可计算得出 E_i 表达式为

$$E_i = \Delta D_i - \sum_{i=1}^{i-1} S_{i-1}, S_0 = 0 \tag{8}$$

其中, S_i 为第 i 次偏差补偿的实际运动量,可通过补偿电机编码器的反馈获得每次真实的补偿值 S_i 。

2.2 焊缝轨迹偏差模糊自适应 PID 调节算法

在获得焊缝偏差模型后,就要对偏差进行实时控制。该模糊 PID 控制器较传统的 PID 控制器,能进一步提高系统跟踪误差以及改善系统响应速度。本文设计的模糊 PID 控制器如图 6 所示。

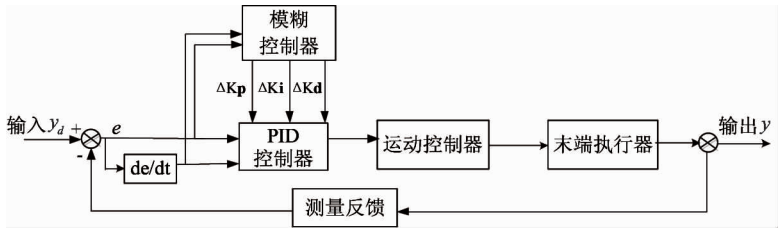


图 6 焊缝偏差补偿模糊控制器

2.2.1 模糊分割及论域选择

针对本文的跟踪系统的控制精度和稳定性要求,将输入和输出的论域均分为 7 档,即 $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ 。结合本文的语言变量数目和跟踪精度要求,设定模糊输入和模糊输出的论域均为 $\{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$ 。最后建立的模糊

规则共包括 49 条规则,所示规则如图 7 所示。

2.2.2 模糊控制规则及解模糊

根据实验分析结果表明,初始参数设置 $k_p = 100, k_i = 10, k_d = 120$ 是传统 PID 和模糊 PID 最适合的初值。在模糊 PID 控制中,模糊条件语句为多重条件语句,这里给出模糊控制调整规则,如表 1,

表 2,表 3 所示。

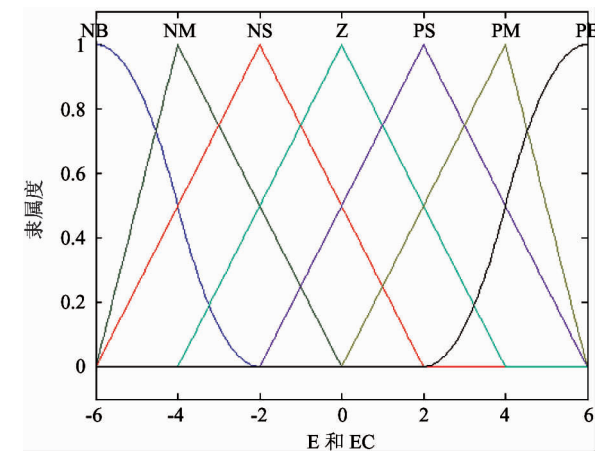


图 7 E 和 EC 隶属度函数曲线

表 1 Δk_p 的调整规则表

e/ec	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	Z	Z
NM	PB	PB	PM	PS	PS	Z	NS
NS	PM	PM	PM	PS	Z	NS	NS
ZE	PM	PM	PS	Z	NS	NM	NM
PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
PM	PS	Z	NS	NM	NM	NM	NB
PB	Z	Z	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 Δk_i 的调整规则表

e/ec	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	Z	Z
NM	NB	NB	NM	NS	NS	Z	Z
NS	NB	NM	NS	NS	Z	PS	PS
ZE	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM
PS	NM	NS	Z	PS	PS	PM	PB
PM	Z	Z	PS	PS	PM	PB	PB
PB	Z	Z	PS	PM	PB	PB	PB

表 3 Δk_d 的调整规则表

e/ec	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	Z
NS	Z	NS	NM	NM	NS	NS	Z
ZE	Z	NS	NS	Z	NS	NS	Z
PS	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
PM	PB	NS	PS	PS	PM	PB	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

通过模糊推理得到一个模糊集合,本文通过重心法计算模糊推理最终输出值,输出值 u 计算式如下:

$$du = \frac{\sum_{i=1}^n du_i u_{Ai}}{\sum_{i=1}^n u_{Ai}} \tag{9}$$

其中 $du = \{dk_p, dk_i, dk_d\}$ 表示输出隶属函数的中心, u_{A1} 表示输入隶属函数 e 的中心; u_{A2} 表示输入隶属函数 ec 的中心, n 表示输入量的数目。如果输入已知,输出可由式(9)计算得出,这样即可在线调整 k_p, k_i, k_d 的值。

3 实验仿真与分析

根据建立的跟踪补偿系统的传递函数模型 $G(s)$ 和设计的焊缝偏差补偿模糊控制器模型,在 Matlab 下建立相应的模糊自适应 PID 调节控制框图,如图 8 所示。

为验证本文算法的有效性,将本文的模糊自适应 PID 控制算法与传统的 PID 控制算法进行比对,设定采样时间 $t = 0.01s$ 。

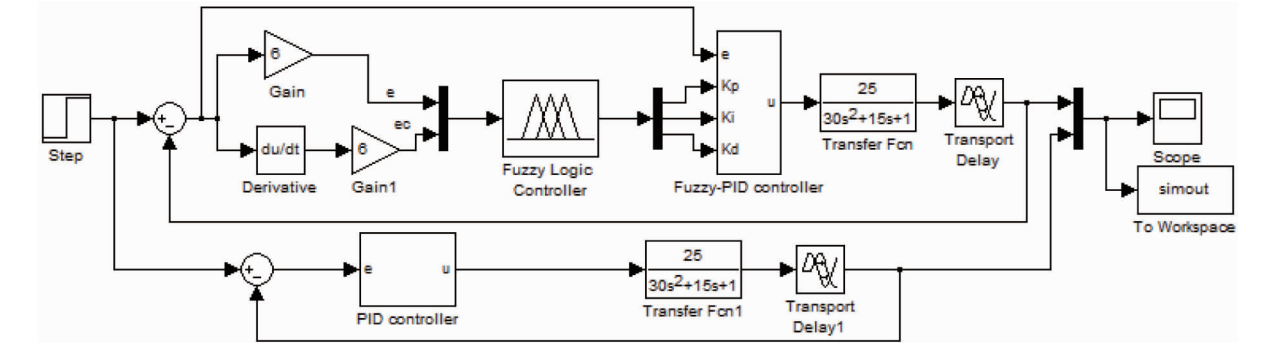


图 8 模糊自适应 PID 调节控制框图

3.1 对阶跃输入的仿真

图 9 给出了两种算法对阶跃信号影响的比较。通过观察对阶跃偏差信号的调节可以看出,本文模糊自适应 PID 调节控制方法在 $t = 0.07\text{s}$ 即达到稳定跟随状态,超调量几乎为零。传统 PID 控制方法在 $t = 0.15\text{s}$ 才达到稳定跟随状态,超调量较大,且有一定的震荡现象。故本文模糊自适应 PID 调节控制方法在超调量、上升时间和稳定时间上都优于传统 PID 的控制方法。

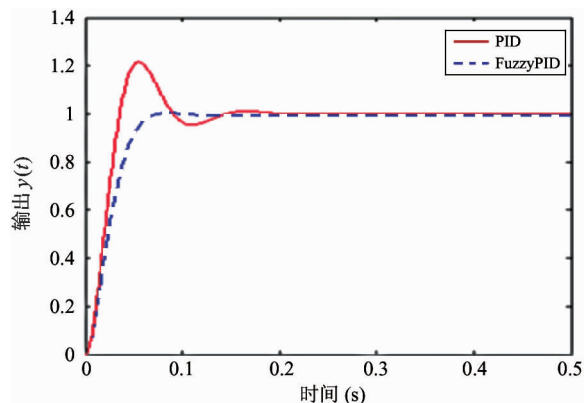


图 9 两种算法对阶跃信号影响的比较

3.2 抗扰动能力的仿真

当系统恢复稳态后,在 $t = 0.25\text{s}$ 时间施加一个 20% 的阶跃信号,持续时间为一个采样周期的扰动。从图 10 中可看出,加入干扰信号后,模糊自适应 PID 控制方法在 $t = 0.28\text{s}$ 就达到稳定跟随状态,稳定后没有任何震荡。传统 PID 控制方法在 $t = 0.37\text{s}$ 才达到稳定跟随状态,响应速度较慢且有震荡现象。

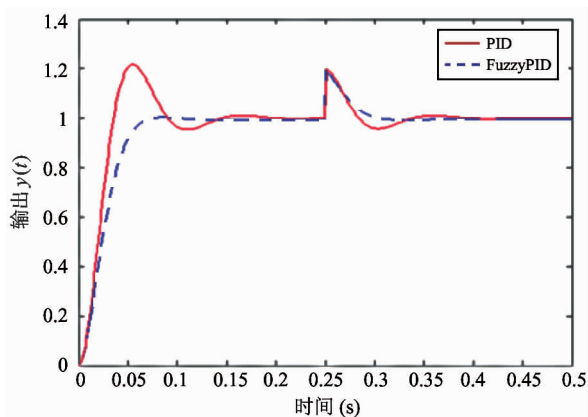


图 10 两种算法对干扰信号响应的比较

4 结 论

为实现焊接自动化、柔性化和智能化,本文利用视觉图像处理方法提取出焊缝轨迹坐标,并利用视觉信息实时反馈实际焊缝轨迹偏差。基于焊接过程中的补偿原则和补偿流程,抽象出了系统的二阶时滞系统模型,提出了焊缝偏差前瞻控制模型对偏差进行补偿预处理。同时为了提高机器人焊接作业精度,提出了一种基于模糊自适应 PID 焊缝轨迹跟踪的前瞻控制方法来提高焊接机器人轨迹跟踪精度,通过在线调整 PID 的三个参数,实现对偏差小且变化平缓 and 偏差大而变化剧烈的偏差形式进行精确的跟踪补偿。通过仿真实验证明,本文提出的模糊自适应偏差补偿算法的各项指标均优于传统 PID 控制算法。

参考文献

- [1] 陈善本,吕娜. 焊接智能化与智能化焊接机器人技术研究进展. 电焊机,2013,43(5):28-36
- [2] 王军波,孙振国,陈强等. 基于 CCD 传感器的球罐焊接机器人焊缝跟踪. 焊接学报,2001,22(2):31-35
- [3] Sung Hoon Ko, Jeom Goo Kim, Hyeong Soon Moon. Automatic welding robot system for the horizontal position in the shipyard. In: Proceedings of the 12th International Conference on Control, Automation and Systems, Jeju Island, South Korea, 2012. 240-245
- [4] Liu Y K, Zhang Y M. Toward welding robot with human knowledge: A remotely-controlled approach. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2015, 12(2):769-774
- [5] 周律. 基于视觉伺服的弧焊机器人焊接路径获取方法研究: [博士学位论文]. 上海:上海交通大学材料科学与工程学院,2009. 80-88
- [6] 付涛,王大镇,弓清忠等. 改进神经网络自适应滑模控制的机器人轨迹跟踪控制. 大连理工大学学报,2014,54(5):523-530
- [7] 徐鹏飞,张华,贾剑平. 复合 FUZZY-PID 焊缝跟踪控制算法. 控制系统, 2009, 25(5):20-24
- [8] Zhang Z Y. A Flexible New Technique for Camera Calibration: [Technical Report], Microsoft Research, USA,

- 1998
- [9] OtsuNobuyuki. Threshold selection method from grey-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1):62-66
- [10] 薛丽霞,李涛,王佐成. 一种自适应的 Canny 边缘检测算法. *计算机应用研究*,2010, 27(9):3588-3590
- [11] 龚时华,喻俊峰,杨建中等. 三维拼缝激光焊接的变形动态补偿. *焊接学报*,2011,32(2):89-92

A method for foresighted control of welding robots based on fuzzy adaptive PID welding seam tracking

Xie Guang^{*}, Xiong Hegen^{*}, Tao Yong^{**}, Liu Hui^{**}, Gao Jinpeng^{*}, Chen Youdong^{**}

(^{*} School of Mechanical Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

(^{**} School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract

The study aimed at welding robot control. In consideration of the problem that traditional industrial welding robots usually work according to the teaching points of established tracks, and can not adapt to the flexible and intelligent welding lines for small batch and more variety production, the industrial camera and image processing technology were combined with an intelligent robot, and the welding seam trajectories were extracted and sent to the robot. In order to improve the robot's trajectory tracking accuracy in its welding process, a method for foresighted control of welding robots based on fuzz adaptive PID welding seam tracking was proposed. In the process of welding large thin structure parts, the visual inspection and recognition were used in the welding seam tracking to improve the welding operation accuracy of the welding robot. The experimental results show that the method has a good self-adaptation and control precision, and can realize the foresighted deviation-compensation control.

Key words: visual guidance, trajectory tracking, fuzzy-PID control, deviation compensation, welding seam