

文章编号 1004-924X(2016)11-2689-10

## 焊缝跟踪应用的线激光视觉伺服控制系统

邹焱彪\*, 王研博, 周卫林

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

**摘要:**设计了一套由三轴直角坐标机器人、线激光传感器和工业计算机组成的焊缝跟踪系统。研究了该系统所涉及的测量原理、特征点测量方法和基于模糊自适应的控制方法。通过高斯核相关算法(KCF)在焊接过程中实时检测焊缝特征点,并根据测量原理计算获得特征点相对于相机坐标系的三维坐标值。设计了一种自适应模糊控制器,通过自适应模糊控制器计算坐标的偏差值和偏差变化率得到焊枪末端运动轨迹的控制量,同时对模糊控制器的输入输出论域、模糊规则和隶属函数进行实时动态更新。实施了焊缝跟踪实验。结果显示:采用最大焊接电流为 350 A 的惰性气体保护焊(MIG),在强烈弧光和飞溅的干扰下,该系统能实时跟踪焊接工件,跟踪精度为 0.325 3 mm,传感器测量频率为 20 Hz。焊接过程中焊枪末端运行平稳,焊缝轨迹跟踪准确,且抗干扰能力,能满足焊接应用要求。

**关键词:**线激光传感器;焊缝跟踪;自适应模糊控制;焊缝特征点;高斯核相关算法

**中图分类号:**TN249;TP273.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162411.2689

## Line laser visual servo control system for seam tracking

ZOU Yan-biao\*, WANG Yan-bo, ZHOU Wei-lin

(*Institute of Mechanical and Automotive Engineering,  
South China University of Technology, Guangzhou 510640, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: ybzou@scut.edu.cn*

**Abstract:** A real-time seam tracking system consisting of a three-axis cartesian robot, a line laser sensor, and an industrial computer was designed and its measuring principle, feature point measuring method and adaptive fuzzy control were researched. The Guassian Kernelized Correlation Filter(KCF) was adopted to detect the weld feature points in real time in welding process and 3D coordinate values of industrial camera were obtained by 2D pixel coordinate values based on measuring principle. A adaptive fuzzy controller was designed. On the basis of the adaptive fuzzy controller, the deviation values and deviation rate of the coordinate system were calculated to obtain the control values of movement trajectory for torch end. Meanwhile, the inputs and outputs on the domain and fuzzy membership functions of fuzzy controller were updated in real time. The experiments on seam tracking were performed. The experimental results show that the system realizes accurate seam tracking in real-time under the conditions of strong arc light and splash when the largest welding current is 350 A in Metal-Inert Gas Welding (MIG). The tracking error is less than 0.325 3 mm and the metrical frequency of sensor is up to 20 Hz. In welding processing, the end of the torch runs smooth the weld trajectory can be tracked accurately and the system shows strong anti-interference ability, so it meets

收稿日期:2016-06-02;修订日期:2016-08-01.

基金项目:国家科技重大专项基金资助项目(No. 2015ZX04005006-03)

the requirements of welding applications.

**Key words:** line laser sensor; seam tracking; adaptive fuzzy control; weld feature point; Gaussian kernelized correlation filter

## 1 引言

随着焊接自动化技术的发展,焊缝自动跟踪技术变得愈发重要。常见的焊接机器人由于大多采用“示教再现”的操作模式而存在加工误差和焊接热变形,从而造成焊接质量下降和焊接缺陷,具备焊缝实时跟踪功能的焊接机器人是解决该问题的主要手段。

激光视觉伺服技术<sup>[1-2]</sup>因为具有高精度和抗干扰能力强等优点而被广泛应用于焊缝实时跟踪系统。线激光传感器在焊缝跟踪系统中主要用于实时测量焊缝特征点的位置。激光条纹和焊接熔池之间的距离  $d$  是影响跟踪精度的主要计算指标, $d$  越小,跟踪精度越高,通常希望  $d < 30$  mm。但是这会导视觉系统检测的图像信息中存在强烈的弧光和飞溅,产生大量错误数据,从而造成测量精度降低。当焊接电流超过 300 A 后,此现象更加明显。

同时焊缝跟踪过程中存在时延以及其他非线性因素的影响,因此根据实时测量的焊缝特征点来设计高精度的控制器是实现焊缝自动跟踪的关键<sup>[3-5]</sup>。Yong-Tae Kim 等<sup>[6]</sup>采用变结构控制思想设计了鲁棒自学习控制器,控制效果良好,但是该控制方法需要被控对象精确的数学模型,一旦被控对象改变或者模型不准确则会使控制失效。H. Y. Shen<sup>[7]</sup>等采用 PID 控制,在一定的整流电压条件下获得了良好的焊接效果,但是实际应用中需要反复试验才能得到 PID 各参数的理想值。

美国 MTI 公司<sup>[8]</sup>的 PRO 2D 型条纹式激光传感器和德国 Leuze Electronic 公司<sup>[9]</sup>的 LPS 36HI/EN 线激光传感器的跟踪精度为 0.2 ~ 0.6 mm,采样频率为 100 Hz,但无法应用在大电流焊接等存在强烈弧光和飞溅的场合。国内学者也对此类传感器进行了研究,许燕玲<sup>[10]</sup>采用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,跟踪误差可以控制在 ±0.4 mm,但该系统的采样频率仅为 2 Hz。颜厚

银<sup>[11]</sup>提出了一种基于虚拟仪器的窄间隙 TIG 焊缝跟踪系统,其跟踪误差可以达到 0.3 mm,采样频率为 5 Hz,但是焊接速度仅为 4 mm/s,且焊接精度随着焊接速度的增加而降低,很难满足实际焊接条件下的使用要求。

本文提出了基于线激光传感器的焊缝跟踪系统,该系统在强烈弧光和飞溅的工况下,能实现焊缝特征点的实时准确检测;并设计了面向焊缝跟踪应用的自适应模糊控制器。该模糊控制器<sup>[12]</sup>无需被控对象的数学模型,其自适应模块<sup>[13]</sup>可根据偏差值和偏差变化率实时调整控制器的量化因子和比例因子,从而对模糊规则的权系数进行动态调整,通过实时改变模糊规则获得最优的跟踪效果。

## 2 系统构成

焊缝跟踪系统的原理如图 1 所示,该系统由三轴直角坐标机器人、线激光传感器、焊接电源和工业计算机等组成。其中,三轴直角坐标机器人由 3 套相互垂直的线性模组组成,焊枪固定在机器人的 Z 轴上,线激光传感器固定在焊枪上,并跟随焊枪一起运动,如图 2 所示。

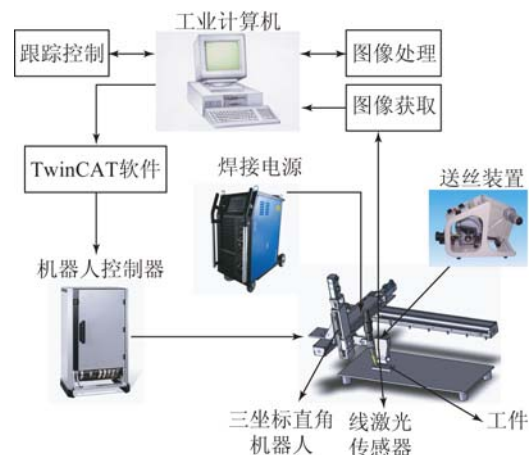


图 1 基于线激光传感器的焊缝跟踪系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of weld seam tracking system based on line laser sensor

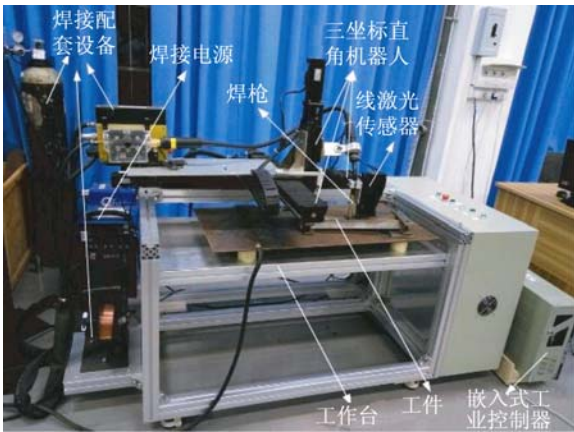


图 2 焊缝跟踪装置实物图

Fig. 2 Physical diagram of seam tracking devices

线激光传感器由线激光发生器和工业相机等构成, 如图 3 所示。根据焊接时的光谱特性以及波的衍射性质, 选择波长为 660 nm, 功率为 100 mW 的线激光器 (NanolineLaser, NL-660-100-01L-30)。工业相机选择分辨率为 1 282 pixel × 1 026 pixel 的 Basler acA1280-60gm。为了减少焊接时弧光的干扰, 在 M0814-MP2 的镜头前加装红外滤光片和透光率为 91% 的聚碳酸酯板。

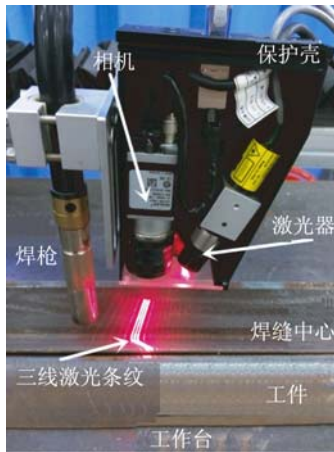


图 3 线激光传感器实物图

Fig. 3 Physical diagram of line laser sensor

### 3 线激光传感器

#### 3.1 工作原理

线激光传感器的工作原理如图 4 所示。工业相机与工件表面相互垂直, 线激光发生器中心线

与相机光轴在同一平面且两者之间的夹角为  $\theta$ , 这样可以减少焊接熔池产生的高亮度弧光噪声对相机采集图像的影响, 以提高测量精度。 $P(x, y, z)$  为激光条纹与焊缝的交点, 根据小孔成像原理, 可得到  $P$  在相机感光芯片上的像素坐标值  $P'(c, r)$ 。

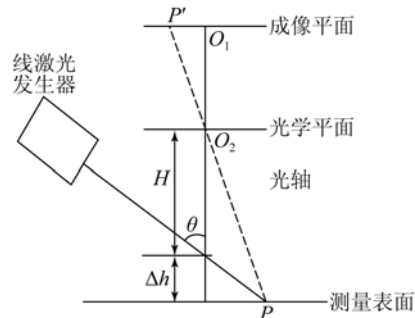


图 4 线激光传感器的测量原理图

Fig. 4 Principle diagram of line laser sensor

像素坐标  $P'(c, r)$  和相机坐标系下的三维坐标值  $P(x, y, z)$  的数学表达式为<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} x = \frac{-mH \tan \theta}{f \tan \theta + m} \\ y = \frac{-nH \tan \theta}{f \tan \theta + m} \\ z = \frac{-H f \tan \theta}{f \tan \theta + n} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $m = S_x c - C_x S_x$ ,  $n = S_y r - C_y S_y$ ,  $l = k C_y^2 S_x^2 - 2k C_x S_x^2 c + k C_y^2 S_y^2 - 2k C_y S_y^2 r + k S_x^2 c^2 + k S_y^2 r^2 + 1$ ,  $(S_x, S_y)$  表示图像传感器在水平和垂直方向上相邻像素之间的距离,  $(C_x, C_y)$  表示投影中心在成像平面的垂直投影位置,  $k$  表示镜头径向扭曲系数,  $f$  表示镜头焦距。

#### 3.2 焊缝特征点检测算法

由于焊缝跟踪系统需在焊接过程实时运行, 为了提高跟踪精度, 通常要求激光条纹和焊接熔池之间的距离  $d < 30$  mm, 因此视觉系统检测的图像信息中不可避免地存在弧光和飞溅, 如图 5 所示。

在此情况下准确检测焊缝特征点成为难点。由于焊缝跟踪系统为视觉伺服系统, 影响系统动态响应的主要因素是传感器的响应速度。针对此

问题,本文采用基于核相关滤波器(Kernelized Correlation Filter,KCF)的实时焊缝特征点检测算法,该算法能在存在大噪声的图像中快速准确地确定焊缝特征点的位置。

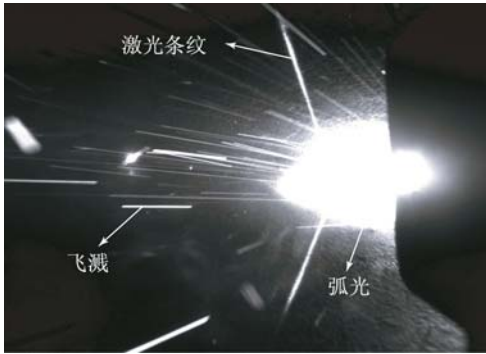


图 5 焊接噪声图  
Fig. 5 Image of welding noise

KCF<sup>[15]</sup>是一种主流的视频目标跟踪算法。该算法根据序列图像中的视频信息在空间和时间上的相关性,为处于同一视频的每帧图像中的目标分配相应的标签,以确定目标的位置,目前广泛应用于运动识别、自动视频监控和视频检索<sup>[16]</sup>等领域。

KCF 算法的基本原理如下:

(1)确定特征点目标的初始位置和正负样本。焊缝的特征点如图 6 所示。焊接开始前,线激光传感器采集一帧无噪声的焊缝图像,如图 7 所示。确定初始状态下焊缝特征点的像素坐标值  $P'_0(c, r)$ ,并由式(1)计算得到三维坐标值  $P_0(x, y, z)$ ,作为初始目标值。以特征点为中心提取  $M \times N$  的灰度图像块作为训练的正样本,而负样本是通过正样本进行循环偏移得到的,一维循环偏移原理如下式所示:

$$\mathbf{X} = C(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \cdots & x_n \\ x_n & x_1 & x_2 & \cdots & x_{n-1} \\ x_{n-1} & x_n & x_1 & \cdots & x_{n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_2 & x_3 & x_4 & \cdots & x_1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{x}$  为矩阵的第 1 行,  $\mathbf{X}$  为  $\mathbf{x}$  经过循环偏移得到的循环矩阵。同理,将二维的正样本进行循环偏移可得到所需的负样本。

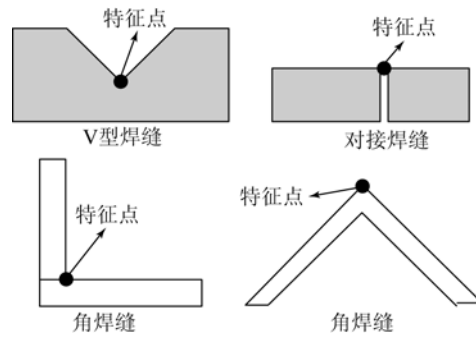
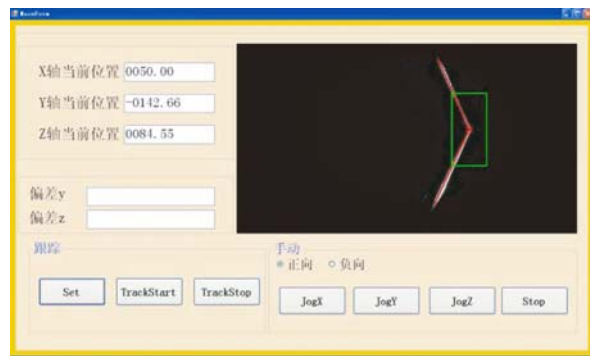


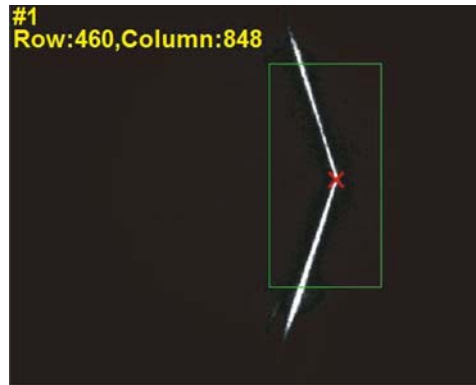
图 6 各类型焊缝的特征点图

Fig. 6 Feature points of various types of seam



(a)程序接口图

(a)Program interface



(b)捕捉到图像和所得正样本

(b)Captured image and positive sample

图 7 程序界面和所得图像

Fig. 7 Program interface and seam image

(2)焊缝跟踪、焊缝特征点的动态检测,及测量参数的实时调整。

焊接开始后,以(1)中得到的正样本为目标模型训练正则化最小二乘分类器(Regularized Least-Squares Classification, RLS)<sup>[13,17]</sup>,并在新一帧图像中选取  $n$  个训练样本  $x_i$ ,根据样本中心

离目标的距离,在 $[0,1]$ 区间内赋值,作为样本回归值,从而得到不同偏移下样本的权重。假设给出训练样本  $x_i$  和回归值  $y_i$  如下所示:

$$\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_n, y_n)\}. \quad (3)$$

训练样本的目的是计算函数  $f(z) = w^T z$ , 即找到一个权重向量  $w$ , 使得残差函数最小, 即:

$$\min_w \sum_i (f(x_i) - y_i)^2 + \lambda \|w\|^2, \quad (4)$$

式中  $\lambda$  为防止过拟合的正则化参数, 其解为:

$$\hat{w}^* = \frac{\hat{x}^* \odot \hat{y}}{\hat{x}^* \odot \hat{x} + \lambda}, \quad (5)$$

式中: 列向量  $y$  由回归值  $y_i$  组成,  $\hat{x}$  为  $x$  的傅里叶变换,  $x^*$  为  $x$  的共轭矩阵,  $\odot$  代表向量对应元素相乘。为了提高分类器的性能, 本文引入高斯核函数<sup>[13,15]</sup>, 从而将输入  $x$  映射到特征空间  $\varphi(x)$  上。定义  $\kappa(x, x') = \varphi^T(x)\varphi(x')$ ,  $\kappa$  为核函数, 那么高斯核函数的表达式为:

$$\kappa(x, x') = e^{-\frac{1}{2} \|x - x'\|^2}, \quad (6)$$

则分类器的权重向量  $w$  变为:

$$w = \sum_i \alpha_i \varphi(x_i). \quad (7)$$

这样最终要求解的参数就由  $w$  变为  $\alpha$ , 这里  $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_j, \dots\}^T$ , 不同样本之间乘积的核函数如下:

$$K_{ij} = \kappa(x_i, x_j). \quad (8)$$

最终的回归函数为:

$$f(z) = w^T z = \sum_{j=1}^n \alpha_j \kappa(z, x_j). \quad (9)$$

式(9)的解为:

$$\hat{\alpha}^* = \frac{\hat{y}}{\hat{k}^{xx} + \lambda}, \quad (10)$$

式中  $k^{xx}$  是核函数矩阵  $K$  第一行元素组成的向量。根据式(2)构建的核函数矩阵为:

$$K^z = C(k^{xz}). \quad (11)$$

因此基于初始目标模型  $z$  当前帧的所有样本  $x_i$  的响应为:

$$\hat{f}(z) = (\hat{k}^{xx})^* \odot \hat{\alpha}. \quad (12)$$

由式(12)可计算出新一帧中特征点的坐标如下:

$$(c_i, r_i) = \max f(z). \quad (13)$$

式(13)中  $f(z)$  可由  $\hat{f}(z)$  的傅里叶逆变换得到, 并对  $\alpha$  和目标模型  $z$  进行更新:

$$\begin{cases} \hat{\alpha}_i = (1 - \beta) \hat{\alpha}_{i-1} + \beta \alpha_i \\ \hat{z}_i = (1 - \beta) \hat{z}_{i-1} + \beta z_i \end{cases}, \quad (14)$$

式中:  $0 < \beta < 1$  为学习因子;  $\hat{\alpha}_i$  和  $\hat{\alpha}_{i-1}$  表示当前帧和上一帧更新获得的  $\alpha$ ,  $\hat{z}_i$  和  $\hat{z}_{i-1}$  表示当前帧和上一帧更新获得的目标模型  $z$ 。跟踪过程如图 8 所示。

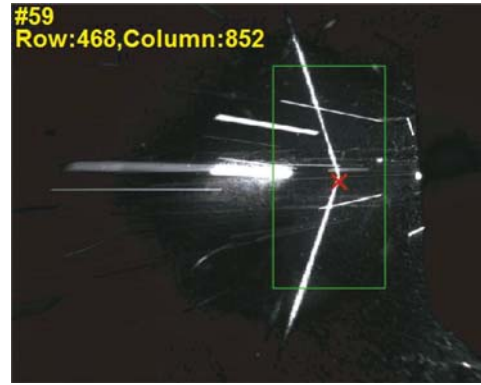


图 8 跟踪过程图

Fig. 8 Diagram of tracking process

(3) 采集下一帧图像, 基于目标模型  $z$  和新一帧图像的样本  $x_i$ , 重复步骤(2)中的计算, 得到新一帧图像的特征点  $(c_{i+1}, r_{i+1})$ , 如此不断采集计算, 实现焊缝跟踪过程中的特征点检测。

## 4 焊缝跟踪控制方法

如图 9 所示,  $abcde$  为焊缝的实际位置曲线, 由于机械系统与视觉检测系统相比存在滞后性, 焊枪沿着曲线  $ab'cd'f$  运动, 在焊缝跟踪过程中表现为焊枪末端出现周期性抖振现象。本文采用自适应模糊控制算法来解决此问题。

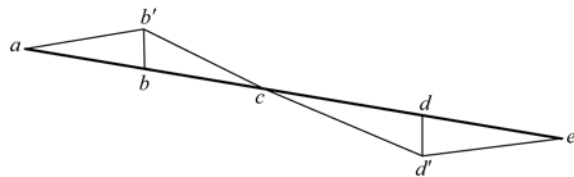


图 9 焊缝与焊接轨迹

Fig. 9 Seam and welding track

4.1 模糊控制

常见的二维模糊控制器<sup>[18]</sup>原理如图 10 所示,模糊控制器由模糊化、模糊规则库、模糊推理机和解模糊化组成。 $s$ 为系统的期望值, $y$ 为系统的实际输出值,系统偏差  $e = s - y$ ,偏差变化率  $e_c = de/dt$ 。首先通过模糊化将  $e$  和  $e_c$  的精确值变为模糊语言变量  $E$  和  $E_c$ ,经过模糊推理之后输出模糊量  $U$ 。解模糊化利用最大值法将  $U$  转换为精确输出量  $u$ ,对被控对象进行控制。

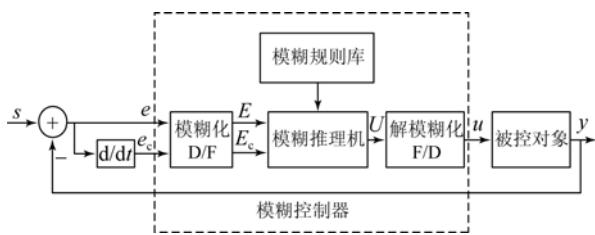


图 10 二维模糊控制器原理图

Fig. 10 Principle schematic of 2D fuzzy controller

本文中覆盖  $e$  的模糊论域为  $E = \{-2, -1, 0-, 0+, +1, +2\}$ ,对应的模糊子集为  $\{NB, NS, NO, PO, PS, PB\}$ ,覆盖  $e_c$  的模糊论域为  $E_c = \{-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3\}$ ,对应的模糊子集为  $\{NB, NM, NS, O, PS, PM, PB\}$ ,覆盖  $u$  的模糊论域为  $U = \{-2, -1, 0, +1, +2\}$ ,对应的模糊子集为  $\{NB, NS, O, PS, PB\}$ 。

模糊子集由隶属函数  $\mu(x)$  来描述,本文选用的  $\mu(x)$  为高斯型分布函数。对于偏差  $E$  来说,设计的初始隶属函数如下<sup>[19]</sup>:

- (1)  $\mu_{NB}(x) = \frac{1}{1 + e^{5(8x-1)}}, x \in [0, 0.3]$ ;
- (2)  $\mu_{NS}(x) = e^{-8(x-0.3)^2}, x \in [0, 0.6]$ ;
- (3)  $\mu_{NO}(x) = e^{-8(x-0.6)^2}, x \in [0.3, 0.9]$ ;
- (4)  $\mu_{PO}(x) = e^{-8(x-0.9)^2}, x \in [0.6, 1.2]$ ;
- (5)  $\mu_{PS}(x) = e^{-8(x-1.2)^2}, x \in [0.9, 1.5]$ ;
- (6)  $\mu_{PB}(x) = \frac{1}{1 + e^{-5(8(x-1.5)+1)}}, x \in [1.2, 1.5]$ 。

对于偏差变化率  $E_c$  和输出论域  $U$  可得到类似的初始隶属函数。本文设计的初始模糊规则如表 1 所示。

表 1 模糊规则

Tab.1 Fuzzy rules

偏差 变化率 $E_c$	偏差 $E$					
	NB	NS	NO	PO	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	NS	O
NM	NB	NS	NS	NS	O	O
NS	NB	NS	NS	O	O	PS
O	NS	NS	O	O	O	PS
PS	NS	O	O	O	PS	PS
PM	O	O	O	PS	PS	PB
PB	O	O	PS	PS	PB	PB

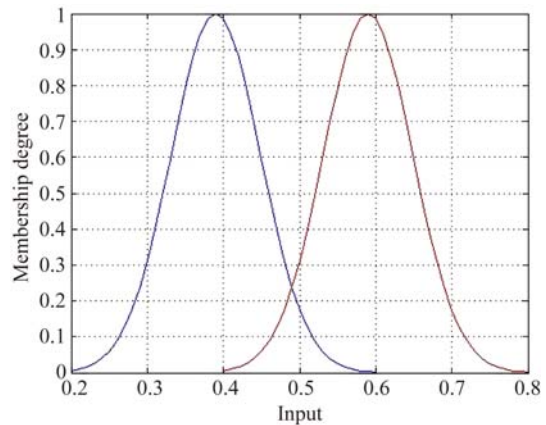
表 1 中每条模糊规则都可以给出一个模糊蕴含关系  $R_i (i=1, 2, \dots, 42)$ ,由此可知总的模糊蕴含关系为:

$$R = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_{42} = \bigcup_{i=1}^{42} R_i. \quad (15)$$

由模糊规则表中的模糊蕴含关系构成的模糊推理规则为:

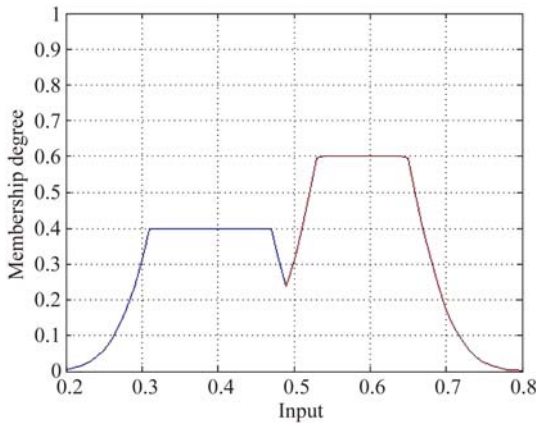
$$U = (E \times E_c) \circ R = ((E \wedge E_c) \circ R_1) \vee ((E \wedge E_c) \circ R_2) \vee \dots \vee ((E \wedge E_c) \circ R_{42}). \quad (16)$$

对于输入的  $E$  和  $E_c$ ,图 11(a)为推理前的隶属函数,图 11(b)为经过推理后的模糊输出。



(a)原始隶属函数

(a)Original membership function



(b) 模糊输出  
(b) Fuzzy output  
图 11 隶属函数曲线  
Fig. 11 Membership function curves

4.2 自适应模糊控制

由于模糊控制器鲁棒性差, 因此在控制过程中加入自适应模块, 采用多输入单输出的模糊控制器, 输入初始论域为  $X_i = [-x_i, x_i], i = 1, 2, \dots, n$ , 输出的初始论域为  $Y = [-u, u]$ 。当输入  $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$  和输出  $u$  发生变化时, 输入和输出论域也随之发生变化, 即变论域模糊控制。引入量化因子  $k_i (i = 1, 2, \dots, n)$  和比例因子  $k_u$  对  $X_i$  和  $Y$  进行实时调整, 即:

$$\begin{cases} k_i = \frac{n_i}{x_i}, i = 1, 2, \dots, n \\ k_u = \frac{u}{l} \end{cases}, \quad (17)$$

式中:  $k_i$  的作用是将模糊控制输入的实际论域范围  $[-x_i, x_i]$  量化到对应的模糊集论域范围  $[-n_i, n_i], k_u$  的作用是将模糊控制器的输出论域  $[-l, l]$  转换成被控对象实际所能接受的控制范围  $[-y_u, y_u]$ , 因此  $k_i$  和  $k_u$  的值都会影响论域的范围, 变论域如图 12 所示。

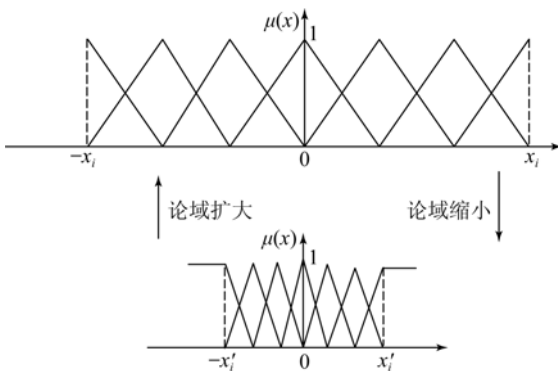


图 12 输入变论域  
Fig. 12 Input variable universe

调整之后的输入论域为  $X_i(x_i) = [-\alpha(x_i)x_i, \alpha(x_i)x_i], \alpha(x_i)$  为论域伸缩因子, LI 等<sup>[20]</sup> 发现  $\alpha(x_i)$  的最佳取值为:

$$\alpha(x_i) = 1 - \lambda_i e^{-k_{ci}x_i^2}, \quad (18)$$

式中  $\lambda_i \in (0, 1), k_{ci} > 0$ 。

利用表 1 的控制规则, 取初始的量化因子  $k_{e0} = \frac{5}{3}, k_{ec0} = 1$ , 初始的比例因子  $k_{u0} = 0.24$ 。焊缝跟踪开始后, 每个视觉伺服周期均对量化因子和比例因子等参数进行更新:

$$\begin{cases} k_e = \frac{K}{\alpha_1 e + (1 - \alpha_1) e_c} \\ k_u = A \cdot (\alpha_1 e + (1 - \alpha_1) e_c) \\ \alpha_1 = N \cdot (\alpha_s - \alpha_0) |e| + \alpha_0 \end{cases}, \quad (19)$$

式中:  $K = 0.8004, A = 0.4998, 0 < \alpha_1 < 1$  为偏差权重系数,  $N = 3, \alpha_s = 0.8, \alpha_0 = 0.5$ 。

实时更新模糊规则, 即:

$$U = -\lfloor \beta_i E + (1 - \beta_i) E_C \rfloor, \beta_i \in (0, 1), \quad (20)$$

式中: 运算符  $\lfloor \cdot \rfloor$  表示正向或负向取整,  $\beta_i$  为误差的权重系数, 通过改变  $\beta_i$  可实时改变控制规则。

输入偏差  $E$  的隶属函数的实时更新规则为:

$$(1) \mu'_{NB}(x) = \frac{1}{1 + e^{5(12\frac{k}{n_i}e_i - 1)}}, x \in \left[0, \frac{n_i}{5k_e}\right],$$

.....

$$(5) \mu'_{PB}(x) = \frac{1}{1 + e^{-5(12\frac{k}{n_i}(e_i - \frac{n_i}{k_e}) + 1)}},$$

$$x \in \left[\frac{4n_i}{5k_e}, \frac{n_i}{k_e}\right].$$

同理, 对于偏差变化率  $E_C$  和输出论域  $U$  的隶属函数也进行实时更新。

由图 9 可知, 偏差量呈现周期性变化, 且一个周期内偏差的平均值接近实际偏差量, 因此可以取前  $n$  个周期, 求出其平均偏差值  $e_0$  作为基准偏差, 即:

$$e_0 = \frac{\sum_{i=1}^m e(x_i)}{m} = \frac{e(x_1) + e(x_2) + \dots + e(x_m)}{m}, \quad (21)$$

式中  $m$  为前  $n$  个周期中偏差点的总个数。对  $n$  个周期之后的偏差值进行惯性均值滤波处理, 即:

$$e'(x_i) = \gamma e_0 + (1 - \gamma) e(x_i), i > m, \quad (22)$$

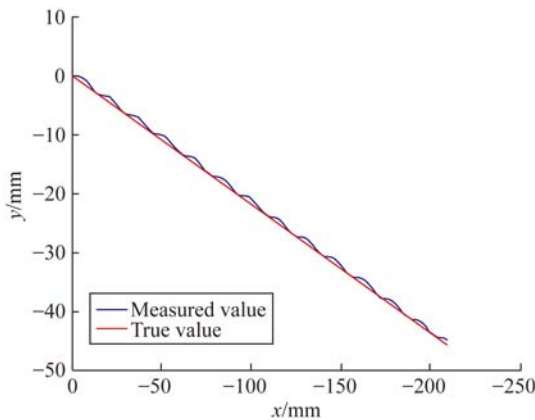
式中: 权重系数  $0 < \gamma < 1, e(x_i)$  是模糊控制得到的偏差值,  $e'(x_i)$  为惯性均值滤波之后的偏差值。由于焊接工件的焊缝直线度较高, 因此选择  $\gamma = 0.6$ 。

### 5 实 验

焊机采用山东奥太的 Pulse MIG-350RP, 最大焊接电流为 350 A, 焊接工件为 V 型角焊缝, 焊接速度为 5 mm/s, 焊丝直径为 1.0 mm。工业计算机为研华 IPC-510, Intel i7-3770 四核处理器, 主频为 3.4 GHz。首先采用 H. Y. Shen<sup>[7]</sup> 等使用的 PID 控制算法进行焊缝跟踪实验, 控制算法如式(23)所示, 实验结果如图 13 所示。

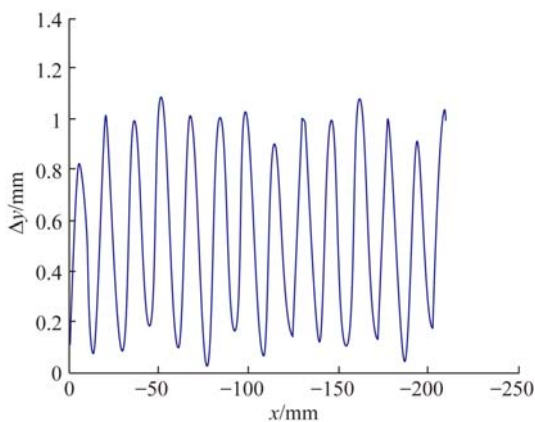
$$v(k) = k_p e(k) + k_i \sum_{j=0}^k e(j) + k_d [e(k) - e(k-1)], \quad (23)$$

式中:  $v(k)$  表示焊枪末端的偏移量,  $k_p$  为比例增益,  $k_i$  为积分增益,  $k_d$  为微分增益。



(a) 坐标值对比

(a) Comparison of coordinate values



(b) 误差曲线

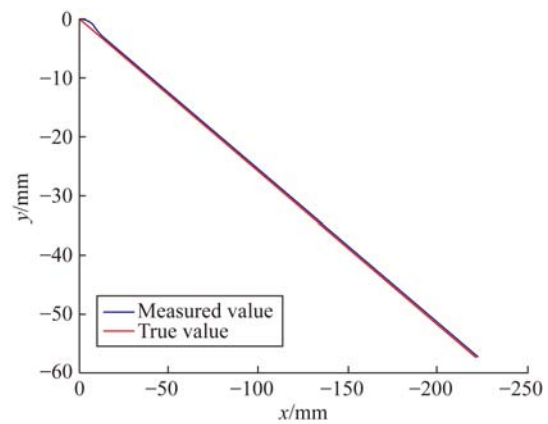
(b) Error curve

图 13 采用 PID 控制得到的跟踪数据

Fig. 13 Tracking data under PID control

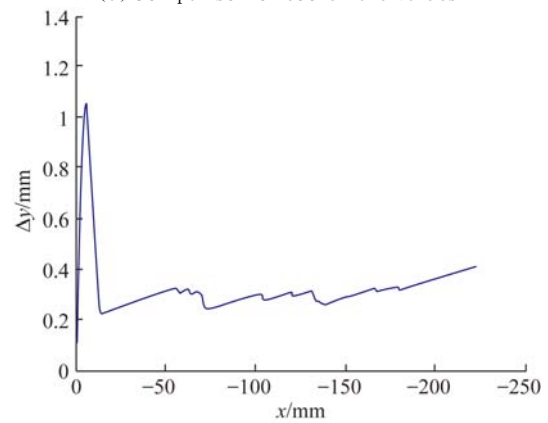
图 13(a)是在  $y$  轴方向焊枪末端的实际运动路径和工件焊缝特征点轨迹的对比, 图 13(b)是在  $y$  轴方向焊枪末端的实际运动路径和工件焊缝特征点轨迹的偏差值。经计算发现, 偏差平均值  $\Delta y = 0.5376 \text{ mm}$ , 偏差方差  $\text{var}_y = 0.0998 \text{ mm}^2$ 。同理可得  $z$  轴方向的偏差平均值  $\Delta z = 0.9948 \text{ mm}$ , 偏差方差  $\text{var}_z = 0.0449 \text{ mm}^2$ 。由图 13 可知, 跟踪过程中焊枪末端出现周期性的抖动。

本文提出的自适应模糊控制算法得到的实验结果如图 14 所示。



(a) 坐标值对比

(a) Comparison of coordinate values



(b) 误差曲线

(b) Error curve

图 14 采用自适应模糊控制得到的数据结果

Fig. 14 Tracking data under adaptive fuzzy control

图 14(a)为  $y$  轴方向焊枪末端的实际运动轨迹和工件焊缝特征点轨迹的对比, 图 14(b)为  $y$  轴方向焊枪的实际运动轨迹和工件焊缝特征点轨迹的偏差值。经计算发现, 偏差平均值  $\Delta y = 0.3253 \text{ mm}$ , 偏差方差  $\text{var}_y = 0.0134 \text{ mm}^2$ 。同理可得  $z$  轴方向的偏差平均值  $\Delta z = 0.0157 \text{ mm}$ , 偏差方差  $\text{var}_z = 2.2558 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$ 。

自适应模糊控制算法极大地改善了焊缝的跟踪效果,使  $y$  轴方向精度提高了 39.49%, $z$  轴方向精度提高了 98.42%,解决了焊枪末端在焊缝跟踪过程中的抖振问题,能满足实际焊接要求,焊接后的工件如图 15 所示。



图 15 采用自适应模糊控制得到的焊接结果

Fig. 15 Weld seam under fuzzy adaptive control

## 5 结 论

本文提出了由线激光传感器、三轴直角坐标机器人和工业计算机组成的焊缝跟踪系统,利用 KCF 算法,在存在强烈的弧光和飞溅的实时焊缝跟踪过程中,能够准确检测到每一帧图像中焊缝特征点的位置,每帧图像的处理时间小于 50 ms,满足一般焊接的实时性要求。然后建立了模糊规则和隶属函数,在焊接电流为 350 A 的焊接实验中通过实时地调节输入输出论域、模糊规则以及隶属函数,使焊枪末端平稳的运行,焊缝轨迹跟踪准确,增强了系统的抗干扰能力。最后对自适应模糊控制算法进行了实验研究。实验结果表明,采用自适应模糊控制算法后, $y$  轴方向的误差精度提高了 39.49%, $z$  轴方向的误差精度提高了 98.42%,总体平均误差小于 0.325 3 mm,跟踪频率达到 20 Hz。

## 参考文献:

- [1] 郝继贵,郭磊,刘常杰,等. 基于机器人的柔性电子检具测量系统[J]. 光学精密工程,2011,19(8): 1787-1793.  
ZHU J G, GUO L, LIU CH J, *et al.*. Measurement system of flexible electronic checking fixture on robot [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(8): 1787-1793. (in Chinese)
- [2] FENNANDER H, KYRKI V, FELLMAN A, *et al.*. Visual measurement and tracking in laser hybrid welding [J]. *Mach. Vis. Appl.*, 2009,20:103-118.
- [3] 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]. *Manuf. Syst.*, 2002, 21:302-315.
- [4] FANG Z J, XU D, TAN M. A vision-based self-tuning fuzzy controller for fillet weld seam tracking [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2011,16(3):540-550.
- [5] XU D, WANG L K, TU Z G, *et al.*. Hybrid visual servoing control for robotic arc welding based on structured light vision [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2005,31:596-605.
- [6] KIM Y T, ZEUNGNAM B. Robust self-learning fuzzy controller design for a class of nonlinear MIMO systems [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2000, 111(2):117-135.
- [7] SHEN H Y, LIN T, CHEN S B, *et al.*. Real-time seam tracking technology of welding robot with visual sensing [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2010,59:283-298.
- [8] MTI instrument. *Meltrax for MTI Pro 2D* [EB/OL]. <http://www.mtiinstruments.com/>.
- [9] LEUZE ELECTRONIC. *Line Profile Sensor* [EB/OL]. <http://www.leuze.com/>.
- [10] 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 Y L. *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. (in Chinese)
- [11] 颜厚银. 窄间隙 TIG 焊焊缝跟踪系统设计及研究 [D]. 上海:上海交通大学,2013.  
YAN H Y. *Study on Seam Tracking System of NO-TIG Welding* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013. (in Chinese)
- [12] YAO L, HUANG P Z. Learning of hybrid fuzzy con-

- troller for the optical data storage device [J]. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 2008,13(1):3-13.
- [13] 张雷,王延杰,孙宏海,等. 采用核相关滤波器的自适应尺度目标跟踪[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(2): 448-459.  
ZHANG L, WANG Y J, SUN H H, *et al.*. Adaptive scale object tracking with kernelized correlation filters [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2): 448-459. (in Chinese)
- [14] 邹焱飏,龚国基. 面向焊缝跟踪的线激光检测技术研究[J]. *应用激光*, 2015(4):500-507.  
ZOU Y B, GONG G J. Research on line laser detecting technology for seam tracking [J]. *Applied laser*, 2015(4):500-507. (in Chinese)
- [15] HENRIQUES J F, CASEIRO R, MARTINS P, *et al.*. High-speed tracking with kernelized correlation filters [J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, 37(3): 583-596.
- [16] 李静宇,刘艳滢,田睿,等. 视频监控系统中的概率模型单目标跟踪框架[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 2093-2099.
- LI J Y, LIU Y Y, TIAN R, *et al.*. Probabilistic model single target tracking framework for video surveillance system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 2093-2099. (in Chinese)
- [17] HENRIQUES J F, CASEIRO R, MARTINS P, *et al.*. Exploiting the circulant structure of tracking-by-detection with kernels [C]. *European Conference on Computer Vision*, 2012:702-715.
- [18] 黄卫华. 模糊控制系统及应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2012.  
HUANG W H. *Fuzzy Control System and Its Application* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012. (in Chinese)
- [19] 刘金琨. 机器人控制系统的设计与 MATLAB 仿真[M]. 北京:清华大学出版社, 2008.  
LIU J K. *Design and MATLAB Simulation of Robot Control System* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)
- [20] LI H X, MIAO Z H, LEE E S. Variable universe stable adaptive fuzzy control of a nonlinear system [J]. *Computers and Mathematics with Applications*, 2002, 44: 799-815.

#### 作者简介:



邹焱飏(1971—),男,福建古田人,博士,副教授,硕士生导师,1991年于中国石油大学获得学士学位,2005年于华南理工大学获得博士学位,主要从事机器人理论及工程应用方面的研究。  
E-mail: ybzou@scut.edu.cn



王研博(1991—),男,山东潍坊人,硕士研究生,2014年于江南大学获得学士学位,主要研究方向为机器视觉和焊缝跟踪。E-mail: mewyb@mail.scut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)