

研究 与 设计

塔吊臂架角钢外角接焊缝跟踪系统

莫胜撼,喻宁娜,钟义广,戴建树

(广西机电职业技术学院,广西 南宁 530007)

摘要:为实现塔吊臂架角钢外角接焊缝的自动化焊接,设计了一套具有可靠性高、能够在工业现场长期应用的激光视觉焊缝跟踪系统。介绍了系统的组成和工作原理。根据外角接接头几何特点,设计了一套专门图像处理算法,能够快速准确可靠地提取焊缝特征和中心位置,并对焊缝中心检测结果进行数字滤波,以提高抗干扰性。在焊枪纠偏控制中,针对检测传感器前置的特点,水平方向的焊缝跟踪采用一种基于实时焊缝斜率的跟踪算法,并运用 PD 算法进行焊枪调整;针对高度方向上的焊缝跟踪特点,采用带智能积分的模糊控制器进行焊枪调整。经现场试用表明,该系统运行稳定,能够满足焊接精度要求,具有较高的实用价值。

关键词:激光视觉;图像处理;焊缝跟踪

中图分类号: TG409

文献标识码: A

文章编号: 1001-2303(2009)09-0029-05

Laser vision tracking system for external fillet weld on angle steel of arm frame on tower crane

MO Sheng-han, YU Ning-na, ZHONG Yi-guang, DAI Jian-shu

(Guangxi Technological College of Machinery and Electricity, Nanning 530007, China)

Abstract: To realize automatic welding in the tower crane manufacture, a high reliable and durable laser vision based seam tracking system is proposed for welding of the external fillet joint between angle steel of arm frame. This paper simply introduces hardware constitutes and working principle. With a particularly designed image processing algorithm, characteristics and centre position information of groove can be calculated quickly and exactly, and the result measured is denoised with digital filtering. To the leading sensor, a tracking method through calculating seam track slope is put forward and PD control algorithm is applied in horizontal direction, and a fuzzy controller with intelligent integration is designed in vertical direction. Practices show that the system can run steadily, and the tracking precision satisfies the need of welding quality completely. It is highly practical.

Key words: laser vision; image processing; seam tracking

0 前言

随着建筑行业的蓬勃发展,建筑塔吊的需求和使用与日俱增。在塔吊的生产环节中,臂架的生产要求两条角钢组合成方形,焊接两条焊缝形成一个

整体的方形柱,因此,两条外角接接头焊缝的焊接质量至关重要。采用埋弧焊焊接时,其焊缝跟踪基本采用人工手动调整焊枪和控制小车。其缺点是:一方面,由于人的视觉局限性会造成焊缝跟踪的不准确;另一方面,焊接过程中由于角钢焊件受热应力影响,变形成为拱形,在纵向(高度方向),其变形量最大可达 300 mm,且焊接速度快(焊接速度为 0.6~1.3 m/min),这就要求焊接工人根据跟踪效果实时纠正焊枪在水平方向和高度方向的偏移,劳动强

收稿日期: 2009-06-17

基金项目: 广西教育厅科技资助项目(200808LX371)

作者简介: 莫胜撼(1978—),男,广西河池人,硕士,讲师,主要从事焊接设备智能控制、计算机控制方面的研究工作。

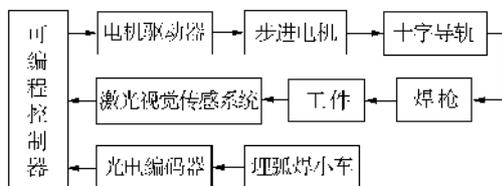
度很大。因此,实现焊缝自动跟踪成为亟待解决的技术问题。

目前,焊缝跟踪所采用的传感方法有机械式、电磁式、超声波式、电弧式、激光测距式和视觉式等。其中,视觉式由于具有非接触、信息量大等优点,倍受人们的关注和青睐。其中激光视觉检测方法的抗电磁场干扰能力较强、灵敏度高、精度高,能检测出焊缝的截面形状和尺寸^[1],被认为是焊缝检测的主要发展方向,是很有发展前途的视觉传感技术之一^[2]。

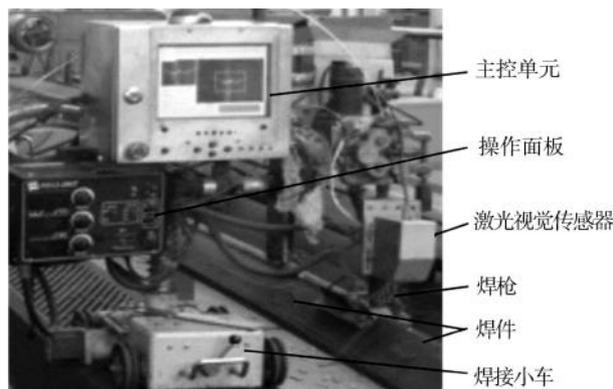
因此,本研究采用了激光视觉传感方式,构建了一套具有体积小、可靠性高等优点的焊缝跟踪系统。经过生产现场长期试用表明,该系统工作稳定可靠,跟踪精度能够达到塔吊臂架角钢外角接头焊缝焊接的要求。

1 系统组成

系统由埋弧焊机小车、激光视觉传感系统、西门子 PLC、步进电机及其驱动器、光电编码器、导轨机构、焊枪等组成,如图 1 所示。



a 系统结构



b 系统实物

图 1 激光视觉焊缝跟踪系统

该系统中,激光视觉传感器与焊枪固定在一起,距离工件表面 120 mm,由于受到焊剂的影响,其发出的激光束超前焊枪 100 mm 的距离投射到工件上,形成表征焊缝三维位置的图像信息,采集该图像并进行实时图像处理,计算出焊缝中心位置偏差

信息,通过 PPI 串口通信方式发送给 PLC,由 PLC 完成纠偏控制算法,纠偏信息以脉冲信号的形式输出给电机驱动器,驱动步进电动机旋转,使焊枪在导轨机构的水平方向和高度方向上移动,实现焊接过程中焊枪始终对中焊缝,并保持一固定的高度。在焊接不同厚度的角钢时,焊接速度可能不同,而速度影响纠偏控制参数,为了实现控制参数的自调整,通过光电编码器检测小车速度并反馈至 PLC,作为参数调整的依据。

2 焊缝特征检测

2.1 焊缝图像处理

在焊缝跟踪的过程中,只有采用具有较强抗干扰能力的图像处理算法,才能获得准确的焊缝信息。本研究针对外角接接头的焊缝特点,专门设计了一套焊缝图像处理算法。其具体步骤为:图像截取→图像预处理→中心线提取→特征点和焊缝中心位置提取。

(1) 图像截取。

为了提高图像处理的速度,减少图像噪声,需要对所关心的部分图像进行截取。图像截取区域通过触摸屏来设定选取。

(2) 图像预处理。

图像预处理的目的是尽可能地提高信噪比,即增强焊缝特征的同时抑制噪声干扰。该焊接过程中,焊缝图像干扰主要表现为焊剂、焊渣、焊件表面划痕以及局部反光等。对此,采用中值滤波和图像增强的预处理方法。

(3) 中心线提取。

中心线的提取是后续特征提取的前提,直接影响焊缝中心提取的准确性,是整个图像处理过程中至关重要的步骤。提取中心线的方法主要有上下边缘检测法、重心法以及霍夫变换法等。考虑到焊缝图像特点和算法速度,采用了最大值搜索法。焊缝图像中,灰度值最大的区域为激光条纹。通过搜索灰度值最大的作为中心线,然后采用中值滤波和滑动平均值滤波去除中心线上的干扰。

(4) 特征点和焊缝中心位置提取。

外角接接头焊缝特征如图 2 所示。该焊缝特征的提取就是确定图中 B、O 和 C 三点的位置坐标。

其具体步骤是:首先,利用霍夫变化法分别求取拟合直线 AB 和 DC,并利用最小二乘法进行滤波,确定它们的直线方程;其次,从坡口区域开始向左

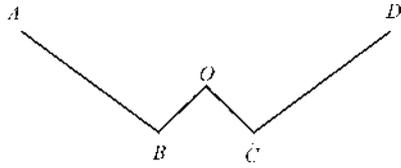


图2 外角接焊缝特征

右两个方向搜索,分别以两条拟合直线为中心,设置拟合直线邻域阈值,当首次搜索到中心线的点在拟合直线所包含的邻域内,则为特征点 B 或 C;最后,在折线 BOC 范围内,比较中心线上各点在纵坐标的大小,具有最大值的便是中心点 O。

外角接接头焊缝图像处理结果如图 3 所示。图中,两条交叉的细直线为所求的拟合直线,三条竖直短线为焊缝特征点,其中左右两条短线表征坡口边缘,中间的短线则表征焊缝中心位置。

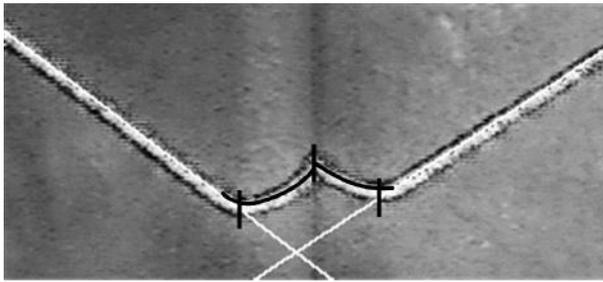


图3 外角接焊缝图像处理结果

2.2 检测结果数字滤波

由于在实际焊接过程中存在各种干扰和不确定性,造成焊缝中心位置检测失败或不准确,因此,需要对检测结果进行处理,才能得到可靠的数据。对焊件某一位置的焊缝中心检测时发现,在受到干扰时检测结果会发生突变,而无干扰时则有小范围的波动。所以本研究采用了智能限幅滤波和加权滑动平均值滤波对检测结果进行数字滤波。

首先,对检测结果进行智能限幅滤波,其计算公式为

$$y_n = \begin{cases} x_n, & \text{if } |x_n - |y_{n-1}|| \leq \delta \\ \text{OR } & \text{if } |x_n - |y_{n-1}|| > \delta \text{ AND } \text{count} > m_c \\ y_{n-1}, & \text{if } |x_n - |y_{n-1}|| > \delta \text{ AND } \text{count} \leq m_c \end{cases} \quad (1)$$

式中 x_n 为本次检测值; y_{n-1} 为该滤波算法上次计算值; δ 为连续两次检测值的最大允许偏差值; count 为连续两次检测值的偏差大于 δ 的计数次数,其最大计数允许值为 m_c 。

智能限幅滤波不仅具备常规限幅滤波能克服

随机脉冲干扰的能力,同时具备克服因 δ 设定不当造成有效信号误判的能力。

其次,采用加权滑动平均值滤波对上述滤波结果进行数字滤波,其计算公式为^[3]

$$z_n = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} c_i y_{n-i} \quad (2)$$

式中 N 为计算所需连续检测数据的个数; c_i 为常数,且满足以下条件

$$\begin{cases} c_0 + c_1 + \dots + c_{n-1} = 1 \\ c_0 < c_1 < \dots < c_{n-1} \end{cases} \quad (3)$$

式中 常数 c_0, c_1, \dots, c_{n-1} 的值可以采用加权系数法选取。

在实际应用中,可以将循环队列作为检测数据存储单元,设定队列的长度固定为 N ,每进行一次新的数据采样,都把采样结果放于队尾,而扔掉原来队首的数据(先进先出规则),这样在队列中始终有 N 个最新的数据。把队列中的 N 个数据进行平均值运算,就可以得到新的平均值。

采用上述方法对检测结果进行数字滤波,既能克服随机脉冲干扰引起的检测误差,又可以平滑检测结果,提高系统的精度和稳定性。

3 焊缝轨迹实时跟踪

在焊接过程中,焊枪会在水平方向和高度方向上偏离焊缝中心,因此必须根据实时提取的焊缝中心位置信息设计有效的焊枪纠偏控制器,才能达到焊缝自动跟踪的目的。由于在水平方向和高度方向焊缝跟踪特点和要求不同,因此,对它们分别设计了不同的焊枪纠偏控制器。

3.1 水平方向纠偏控制器设计

由于传感器前置,焊缝中心检测位置超前焊枪在较大距离,因此,直接将偏差作为控制回路的反馈信息来调整焊枪,会出现焊枪没有到达另一直线焊缝之前进行调整而产生偏差,即超前现象,尤其是跟踪斜线焊缝或曲线焊缝时这种现象特别明显。通过深入的研究发现,在焊缝跟踪过程中,焊枪偏离焊缝最重要的原因是焊缝轨迹方向与小车行走方向不一致即两者产生了夹角(以后称斜率)。因此,本研究提出通过计算焊缝实时斜率来调整焊枪位移量的方法。对于焊缝斜率的求取,可以假定在某一小段焊缝轨迹上的所有点都在相同斜率焊缝上,对最近连续 N_T 次采样周期计算出的 N_T 个焊缝偏差进行统计计算,可以求出在

该段焊缝轨迹上的平均斜率 k , 并将其作为纠偏控制器的反馈量。水平方向焊枪纠偏控制原理如图 4 所示。

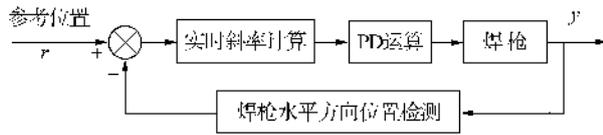


图 4 水平方向焊枪纠偏控制原理

基于焊缝实时斜率的轨迹跟踪方法具有时滞性, 某一次甚至几次由于干扰造成的偏差窜动对于在该段焊缝轨迹的斜率影响并不大, 具有很强的抗干扰能力。其时滞性和抗干扰性与焊缝偏差的个数 N_T 有很大关系, N_T 越大, 延时越长, 抗干扰越强, 反之, 则延时越短, 抗干扰越弱。 N_T 的取值与焊接速度 v 、检测位置与焊枪距离 l 以及采样周期 T_s 有直接的关系。 N_T 的值可以按下式计算

$$N_T = \text{int}\left(\frac{\alpha \cdot l}{T_s \cdot v}\right) \quad (4)$$

式中 $\text{int}()$ 为取整函数; α 为修正系数, 取值范围为 $[0.5, 1.0]$, 可根据现场实际应用情况来确定。

由于水平方向焊缝跟踪采用焊缝实时斜率跟踪方法, 即有了数学模型, 因此采用 PD 控制器来确定纠偏量的大小, 可以达到很好的效果。系统采用的 PD 控制器的数学表达式为^[4]

$$u(n) = K_p k(n) + K_d [k(n) - k(n-1)] \quad (5)$$

式中 $k(n)$ 和 $k(n-1)$ 分别为当前和前一次的焊缝斜率; K_p 为比例增益; K_d 为微分增益。PD 控制参数采用试验的方法进行整定。

3.2 高度方向纠偏控制器设计

在焊接过程中, 因工件本身摆放和受热应力等原因会引起高度的变化。由于高度变化, 一方面, 造成焊枪碰撞或远离焊件, 影响焊接; 另一方面, 使激光条纹与焊枪的相对位置发生变化, 从而影响获取偏差的准确度, 因此必须对高度进行调整。

激光传感系统没有直接获取焊枪高度的信息, 而是通过分析图像中焊缝三维位置信息来计算高度位置变化。与水平方向跟踪相比, 高度跟踪要求即时调整, 无需延时。

由于焊接过程中高度变化具有非线性、时变及不确定性, 难以建立精确的数学模型, 很难用经典和现代控制理论完成纠偏, 因此, 高度纠偏采用了带智能积分的模糊控制器方法来完成。高度方向焊

枪纠偏控制原理如图 5 所示。

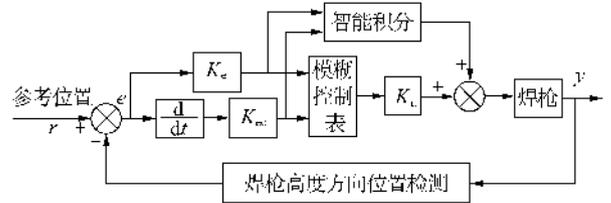


图 5 高度方向焊枪纠偏控制原理

系统采用双输入单输出的模糊控制器, 把焊缝高度变化(像素范围为 $[-60, 60]$)及其变化率(像素范围为 $[-60, 60]$)作为两个输入量, 控制步进电机脉冲频率(脉冲频率范围为 $[-3 \text{ kHz}, 3 \text{ kHz}]$)作为输出, 论域都定为 $[-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]$, 因此, 可以确定量化因子 $K_e=0.1, K_{ec}=0.1$ 和比例因子 $K_c=500$ 。

模糊控制器语言变量模糊子集定为 $[NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB]$, 其隶属度函数采用稳定性高、非均匀分布的三角形隶属度函数, 其超调量和稳态误差较小, 对比均匀三角隶属度, 可以使系统稳定误差更小, 响应更灵敏, 曲线上升速度更快^[5]。

模糊控制器的核心是模糊控制规则, 它的选取关系到系统控制性能的优劣。总结手工控制焊枪跟踪焊缝的经验, 可以得出模糊控制规则如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

U	EC						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	ZE	ZE	PS
NM	NB	NB	NB	NM	ZE	ZE	PM
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
E ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NM	ZE	ZE	PM	PB	PB	PB
PB	NS	ZE	ZE	PB	PB	PB	PB

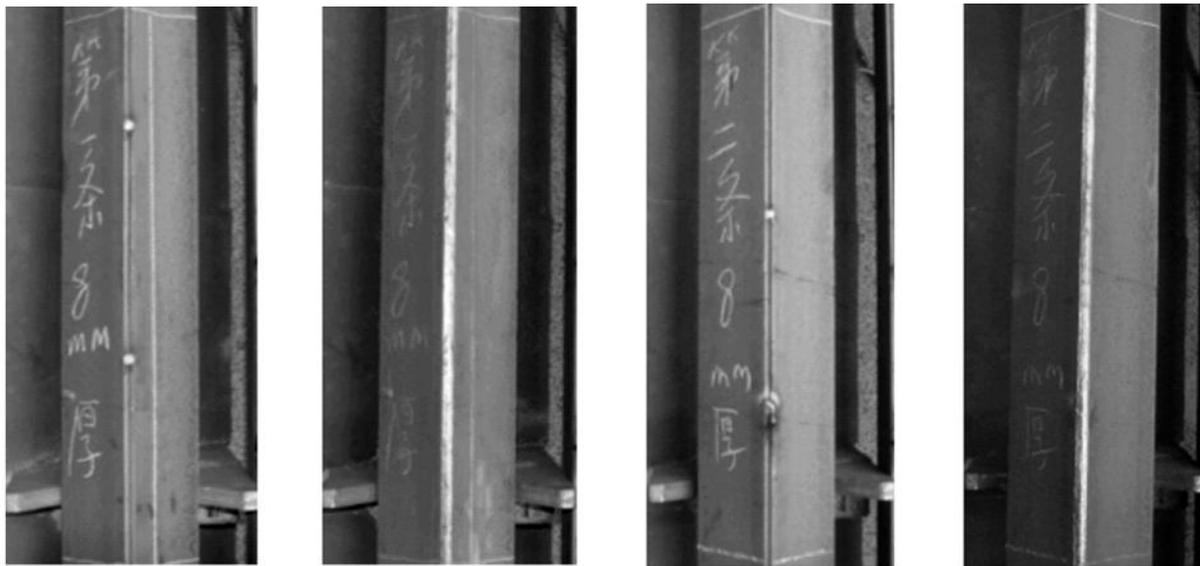
根据表 1, 按照模糊合成算法, 采用最大隶属度法, 再经人工修整, 可以得出 13×13 的二维模糊控制查询表。

为了提高模糊控制器的稳态性能和控制精度, 必须加入积分控制作用。但积分的比例系数选取很难, 过大将使系统振荡, 过小积分不起作用。为了解决这一问题, 引入智能积分。带智能积分的模糊控制算法为^[6-7]

$$\begin{cases} \text{Fuzzy Control, if } E \times EC < 0 \text{ OR } E = 0 \\ \text{Fuzzy Control} + k_i \sum_{j=0}^n e_j, \\ \text{if } E \times EC > 0 \text{ OR } EC = 0, E \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中 k_i 为积分增益系数; e_j 为高度方向上的偏差精确值。

采用带智能积分的模糊控制器较好地兼顾了动、静态特性,具有超调小、响应快、稳态精度高等优点。



a 第一条(正面)待焊外角接焊缝 b 第一条(正面)焊后外角接焊缝 c 第二条(正面)待焊外角接焊缝 d 第二条(正面)焊后外角接焊缝

图6 角钢外角接焊接效果

5 结论

(1)设计了一套激光视觉传感焊缝跟踪系统,具有体积小、可靠性高等优点。既能实现焊接过程图像监控,又能分析图像特征信息,实现焊枪对焊缝的自动跟踪。

(2)设计了专门的图像处理算法,成功提取了焊缝特征及其中心点位置信息,运用智能限幅滤波和加权滑动平均值滤波对检测结果进行数字滤波,保证数据的稳定性,在检测精度和图像处理速度上,满足控制系统实时性要求。

(3)针对在水平方向和高度方向焊缝跟踪特点和要求不同,分别设计了基于焊缝实时斜率的PD控制器和带智能积分的模糊控制器。所设计的纠偏控制器合理、实现简单,能够满足焊接精度要求。

经过生产现场长期使用表明,该系统工作稳定

4 现场应用效果

该系统已在塔吊臂架角钢外角接焊接生产中投入使用,图6为实际生产中角钢焊接时某一段的焊接效果图。焊接时,所焊角钢厚度8 mm,长度12 m,焊接电压29 V,焊接电流410 A,焊接速度1 m/min。

从图6b、图6d的焊接效果可知,焊缝成形良好,外形美观,焊道与焊缝吻合较好,跟踪精度和焊接质量均能够达到臂架外角接焊缝焊接的生产要求。

可靠,适用于工业现场的应用。

参考文献:

- [1] 谷春艳,张立斌,胡宝坚,等.图像处理技术在CO₂焊自动跟踪中的应用[J].焊接学报,2004,25(4):70-72.
- [2] 李原,徐德,李涛,等.一种基于激光结构光的焊缝跟踪视觉传感器[J].传感技术学报,2005,18(3):488-492.
- [3] 胡文金.计算机测控应用技术[M].重庆:重庆大学出版社,2003.
- [4] 陶永华.新型PID控制及应用[M].北京:机械工业出版社,1987.
- [5] 张国梁,曾静,柯熙政,等.模糊控制及其MATLAB实现[M].西安:西安交通大学出版社,2002.
- [6] 王军平,王安,李教,等.延时时间未知的延时系统Fuzzy-Gray预测控制[J].空军工程大学学报,2002,3(1):71-74.
- [7] 杨世勇,刘文才.具智能积分器的模糊控制方案[J].重庆大学学报,2002,25(4):65-67.