

# 专题讨论——焊缝跟踪技术

## 基于主动光视觉法的实时焊缝跟踪控制系统的研究

朱六妹<sup>1</sup>, 杨先林<sup>1</sup>, 王伟<sup>1</sup>, 李广辉<sup>1</sup>, 辛勤<sup>2</sup>, 邱跃峰<sup>2</sup>

(1.华中科技大学 焊接研究所, 湖北 武汉 430074; 2.武汉钢铁集团公司, 湖北 武汉 430083)

**摘要:**采用 LOG 滤波、中值滤波等图像预处理方法,有效去除了实时焊缝跟踪控制系统中的各种噪声;采用 Robert 算子作边缘检测,较好地保留了激光光带的边缘,并且处理速度快;设计了参数自整定模糊控制器,实现了量化因子和比例因子的在线自调整。

**关键词:**视觉传感;焊缝跟踪;图像处理;模糊控制;参数自整定

**中图分类号:** TG409 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2006)10-0001-06

### Research on real time seam tracking and control system based on active vision technique

ZHU Liu-mei<sup>1</sup>, YANG Xian-lin<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, LI Guang-hui<sup>1</sup>, XIN Qin<sup>2</sup>, QIU Yue-feng<sup>2</sup>

(1. Welding Institute, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China; 2. Wuhan Iron and Steel (Group) Corp., Wuhan 430083, China)

**Abstract:** In the real time seam tracking and control system, the LOG filtering and median filtering techniques are used in image pre-processing to gain better effect. The Robert operator, an effective and high speed processing methods, is used to keep the edge of laser light belt. A fuzzy controller with self-adjusting parameters is designed.

**Key words:** vision sensor; seam tracking; image processing; fuzzy control; parameters self-setting

### 0 前言

随着焊接自动化的发展,基于各种传感技术的焊缝跟踪技术在精度和自动化程度上都有了实质性的提高,目前已成为焊接自动化的一个重要研究方向<sup>[1-3]</sup>。其中,基于视觉传感的焊缝跟踪技术具有信息量大,不与工件接触,适合各种坡口形状,灵敏度和精度高,抗电磁干扰能力强等优点,并且可以同时焊缝跟踪控制和焊接质量控制,已成为目前最有发展前景的传感技术。

收稿日期:2006-08-22

基金项目:华中科技大学研究生资助项目

作者简介:朱六妹(1947),女,上海市人,副教授,主要从事焊接自动化设备研究及智能控制系统的软件开发与设计,发表论文 50 余篇。

在此采用主动光视觉法设计了一套焊缝跟踪控制系统,能克服焊接过程中飞溅、烟尘、电弧光等干扰,方便地从 CCD 图像中提取特征信息,并具有较强的自适应能力和较好的鲁棒性。

### 1 系统概述与工作原理

该焊缝跟踪控制系统的组成如图 1 所示。

整个系统包括视觉传感系统、图像预处理与焊缝识别系统、智能控制系统和执行系统 4 个部分。其中硬件系统由 40 mW 半导体激光器、光学滤波系统、CCD 摄像机、OK-C30 图像采集卡、工控机、运动控制卡以及执行电机组成;软件系统由图像采集和预处理子系统、焊缝智能识别子系统、模糊控制子系统组成。

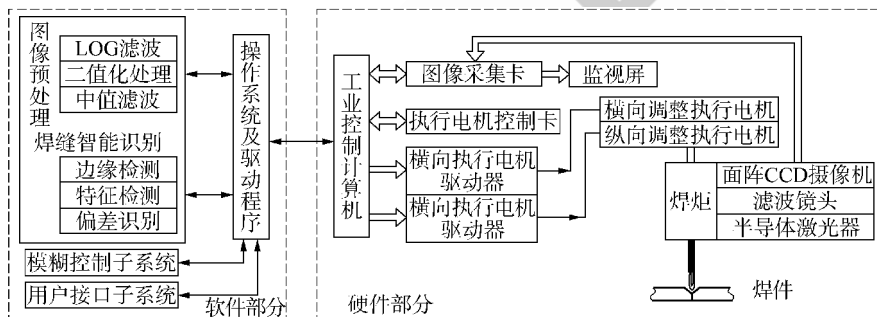


图 1 实时焊缝跟踪控制系统结构框图

Fig.1 Principle block-diagram of real time seam tracking and control system

焊接过程中, CCD 摄像机安装在焊炬前方, 并且与之保持固定的相对位置。系统工作时由 CCD 摄取焊缝图像, 经图像采集卡转换成数字图像, 然后由系统软件中的图像预处理部分进行滤波去噪、图像增强、边缘检测和二值化处理之后, 再送入焊缝智能识别系统进行焊缝偏差识别。根据偏差信号由模糊控制系统给出控制信号, 再通过执行电机控制焊炬向焊缝中心方向运动。

## 2 焊缝信息的采集

在焊接过程中, 采用外加辅助光源的视觉传感方法称为主动视觉法。其中的结构光法不仅能检测出焊缝的中心位置, 而且还能获得焊缝截面的形状和尺寸等特征参数, 适合于不同的焊缝坡口形式和各种焊接方法。

### 2.1 CCD 光路结构

结构光法的原理如图 2 所示。激光二极管发出的点光源经柱状镜转换成条形光, 投射到工件表面, 光带随坡口形状发生相应的变形, 并向工件上方漫反射。CCD 接收从工件表面漫反射的条形光, 通过图像采集和处理环节, 提取焊缝中心线的位置。若将光源安装到焊接机头上, 在开始焊接前让条形光的中心位置对应焊炬的位置, 则可根据 CCD 接收到的变形条形光反映的中点位置与焊炬位置的关系, 获得焊炬与焊缝中心线的偏离方向和偏离量大小的信息。

本研究选用激光源垂直照射, 摄像机倾斜接收的方案, 其中倾斜角  $\beta = 37.5^\circ$ 。这样的优点是能根据摄像机所采集到的某一幅图像来确定焊接接头垂直截面的形状和尺寸, 给后面的图像处理带来方便, 提高处理速度。

### 2.2 CCD 图像采集

在拍摄焊缝图像时, 由于弧焊区易受强弧光的

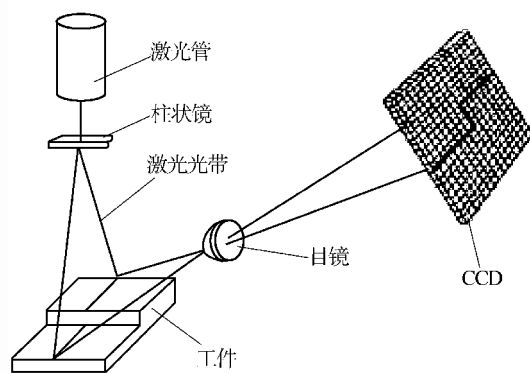


图 2 结构光法原理

Fig.2 Principle of active vision system imaging

干扰, 故难以得到信噪比高的图像。通过把摄像机固定在熔池前方 30 mm 处可以基本消除金属蒸汽的辐射。对于保护气体的辐射主要依靠在 CCD 摄像机前加滤光镜头进行消除。根据各种弧光光谱曲线的分布图(见图 3)可知, 当弧光波长在 6 000~7 000 Å 时最弱, 同时也最稳定, 因此在接收光路中采用峰值波长为 6 328 Å 的干扰滤光片, 该滤光片的峰值透光率高达 63%, 能有效地排除焊接区弧光的干扰, 防止焊缝的特征信号被弧光淹没。而选用的激光二极管的波长为 6 320 Å, 既能保证激光顺利进入 CCD, 又可以达到最大的信噪比。

系统中 CCD 的拍摄频率是 30 帧/s, 每拍摄 6 幅图传送一次, 这样在 1 s 内可以得到 5 幅数字图像, 后面的图像处理过程(包括预处理、特征检测、偏差识别、控制量的产生及执行)的时间保证在 200 ms 之内, 可以满足焊缝跟踪实时性要求。

CCD 拍摄到的原始图像中包含了太多噪声和干扰, 图 4 是一幅典型的被噪声干扰的焊缝图像。图像中间又细又亮的竖线是激光光带, 是焊缝跟踪中要利用的信号。分布在整幅图像上的不规则的、亮度较低、宽度较大的是各种噪声干扰。

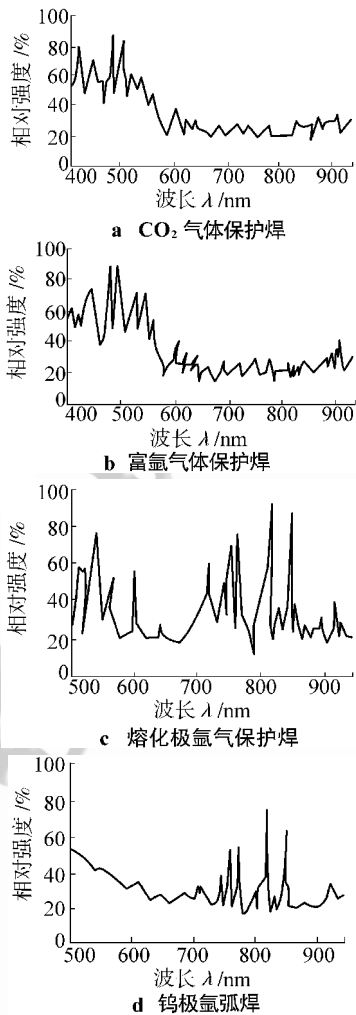


图 3 不同焊接方法的弧光光谱分布

Fig.3 Distribution of several welding arc spectrum

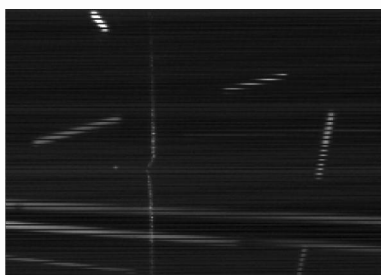


图 4 含有大量噪声的原始图像

Fig.4 Original image

### 3 焊缝 CCD 图像处理

CCD 摄像机摄取的焊缝图像中包含大量冗余信息,计算机如何从中提取有价值的焊缝信息是焊缝跟踪控制系统的重要基础。

#### 3.1 CCD 图像中的干扰

通过对采集到的焊接现场图像的分析,结合 CO<sub>2</sub>

焊接理论,发现 CCD 图像中的干扰主要有飞溅干扰、弧光干扰、烟尘干扰、横道干扰等几种。对于飞溅干扰,通过把 CCD 摄像机固定在焊炬前方 30 mm 处的方法可减少大部分的飞溅干扰。图 4 中的噪声主要是飞溅噪声,其特征是宽度较大,一般占几十个像素的位置,大大超过激光带的宽度,在图像预处理中可以利用这个特征将其处理掉。对于弧光干扰,可通过 CCD 摄像头前的干扰滤光镜头,使得只有光强最弱的 6 328 Å 附近的弧光才能进入。总的来说,弧光和烟尘的影响都降低了图像的信噪比,而激光带的亮度一般都高于背景亮度,因此可以通过二值化时设定一定的阈值来进行降噪处理。

此外,对图像进行局部放大后发现存在一道道明暗相间的条纹,如图 5 所示,这种干扰称为横道干扰。成因可能与熔滴过渡过程对 CCD 的成像影响有关,熔滴过渡时间短,导致焊接电弧周期性闪烁,形成相同频率的点光源的相干光,CCD 在相干光照射下,摄取的图像形成明暗相间的条纹。横道干扰使得图像背景每一行的灰度值近似为一个常数,而每一行各常数互不相同,差值也不大,基本分布在 40 以下,可通过设定阈值来去除。

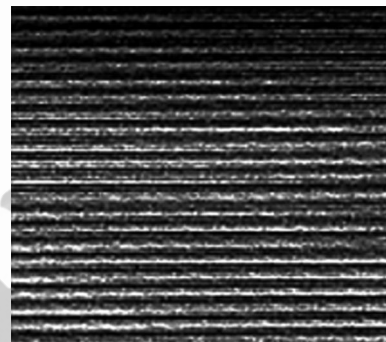


图 5 图像的横道干扰

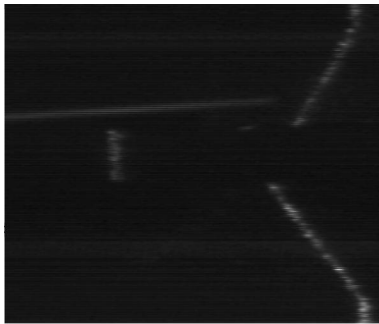
Fig.5 Horizontal interference

#### 3.2 CCD 图像预处理

在 CCD 图像处理前要对图像进行预处理,目的是改善图像质量,增强信噪比,是后续边缘检测和特征提取的基础。预处理主要有滤波和增强等步骤。采用的方法主要有基于傅立叶变换的频域法和直接对图像像素进行处理的空域法 2 种。前者在处理时耗费时间多,不适于图像实时处理;后者的处理方法众多且算法成熟。本系统根据前面的干扰特征,先采用 LOG(Laplacian of Gaussian)滤波滤除各种干扰(效果很好)。图 6 为 V 形坡口在 LOG 滤波前后的对比图。此外,由原始图像的灰度直方图(见图 7)可

专题讨论  
焊缝跟踪技术

发现,图像的灰度值都集中在 40 以下,即背景和噪声的灰度值为 40,因此选用此值作为灰度阈值进行二值化处理,可使像素点的灰度为 0 或 255,从而较好地地区分信号和噪声,大大加快了后续的中值滤波的速度。



a 原始图像



b LOG 滤波

图 6 V 形坡口 LOG 滤波

Fig.6 LOG filter of V groove welding

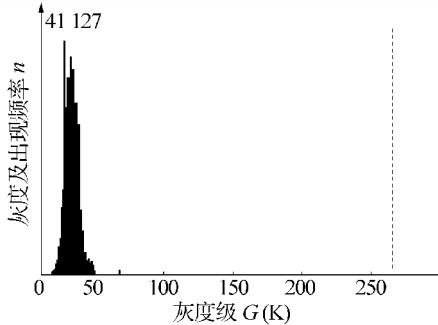


图 7 原始图像灰度

Fig.7 Histogram of original image

图 8 为对 LOG 滤波后的图像进行二值化、中值滤波后的效果图。

一个连续的函数  $f(x, y)$ , 它在某一位置  $(x, y)$  的梯度可表示为一个矢量

$$\nabla f(x, y) = [G_x \ G_y]^T = \left[ \frac{\partial f}{\partial x} \ \frac{\partial f}{\partial y} \right]^T, \quad (1)$$

该矢量的幅度(简称为梯度)和方向角分别为

$$\nabla f = \text{mag}(\nabla f) = [G_x^2 + G_y^2]^{1/2}, \quad (2)$$

$$\varphi(x, y) = \arctan(G_y/G_x). \quad (3)$$



图 8 二值化、中值滤波

Fig.8 Binary processing and median filtering

以上 3 式的偏导数需要对每一个像素位置进行计算,实际处理中常用小区域的模板卷积运算。Roberts 算子为  $2 \times 2$  模板,如图 9 所示,实际处理中可表示为

$$g(i, y) = \{ [f(i, y) - f(i+1, j+1)]^2 + [f(i, j+1) - f(i+1, j)]^2 \}^{1/2}, \quad (4)$$

式中  $f(i, j)$  为输入图像;  $g(i, j)$  为输出图像。

1			1
	-1	-1	

图 9 Roberts 算子模板

Fig.9 Roberts operator template

处理结果如图 10 所示。由图可知,Roberts 算子能够检测到激光带的边缘,且是  $2 \times 2$  模板,所耗时间较少,能够满足实时处理的要求。



图 10 Roberts 边缘检测

Fig.10 Weld edge detection image by roberts arithmetic operator

经过边缘提取后的图像是断续的,不规则的,必须提取出激光带的中心线才能用于偏差识别。这种检测直线的常用方法为 Hough 变换,其计算速度快、方法简单。在进行 Hough 变换时,首先把参数平面离散化,并建立一个参数矩阵  $P(a, b)$ ,  $a_1 \leq a \leq a_k, b_1 \leq b \leq b_l$  ( $a_1, b_1$  是参数平面离散化后的起始点坐标;  $a_k, b_l$  为终点坐标;  $K, L$  分别为  $a, b$  的量化级数),对于二值图像上每一个值为 255 的像素点  $(x_i, y_i)$ ,建立方程  $b = -ax_i + y_i$ ,并对参数  $a$  在  $a_1 \leq a \leq a_k$  上的每个值,计算出相应的  $b$  值,然后将参数矩阵的元素  $P(a, b)$  的值加 1

专题讨论  
——  
焊缝跟踪技术

$$P(a,b)=P(a,b)+1. \quad (5)$$

重复这个过程,直到扫描过所有的像素点。在过程结束时,参数矩阵元素  $P(a,b)$  的值表明在二值图像上满足方程  $y=ax+b$  的像素点的个数,如果这个数值大于某一个阈值,则表示检测到了直线  $y=ax+b$ 。该方法的准确性取决于参数  $a,b$  的量化间隔或矩阵  $P(a,b)$  的大小  $K \times L$ 。Hough 变换在最坏情况下的计算复杂性为  $O(KN)$ ( $K$  是  $a$  的量化级数; $N$  是边缘检测输出图像,即边缘二值图像的像素点数)。参数模型式(5)不适合处理垂直直线,因为垂直直线的  $a$  值趋近于无穷大。为此,系统中引进直线的极坐标形式

$$r=x\cos\theta+y\sin\theta, \quad (6)$$

式中  $-\sqrt{N_1^2+N_2^2} \leq r \leq \sqrt{N_1^2+N_2^2}$ ,  $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ 。

如图 11 所示,式(6)表示一条方向角为  $\theta$ , 与原点距离为  $r$  的直线。所有经过点  $(x_i, y_i)$  的直线在参数平面上都对应于一条三角函数曲线  $r=x_i\cos\theta+y_i\sin\theta$ 。

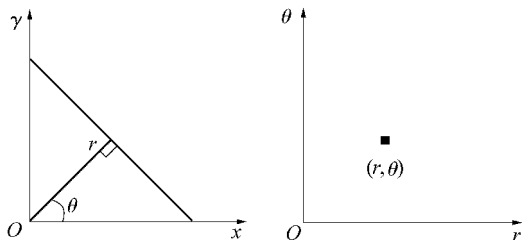


图 11 Hough 变换示意  
Fig.11 Hough transformation

但是 Hough 变换得到的  $(r,\theta)$  很多,如何确定阈值是个问题。结合本实验中得到的图像特点,可以直接对每一行分别搜索左右两个边界点,然后求其平均值作为激光带中心点,建立激光带中心直线。对于可能存在的断点,采用记住前一行的中心点坐标,然后进行匹配的算法,以保证所得结果的连续性。试验证明此方法简单有效,由此得到了由单像素组成的连续直线如图 12 所示。

在焊接过程中,当传感器与工件(焊缝)相对位置变化时,激光带成像随之发生变化,因此,确定激光带上某个特征点,根据其坐标的变化,就可以确定焊枪与焊缝位置的变化。由此识别出偏差量,经控制算法得到控制量。发送控制量给执行电机,调整焊枪自动对准焊缝,达到实时跟踪的目的。

由图 12 可知,焊缝的边缘(即激光带上下两个拐点处)与其他地方最大的区别就是焊缝边缘处的斜率变化很大(与所开坡口的角度有关)。因此,决定采用斜率分析的方法来进行特征点的提取<sup>[9]</sup>。在搜索上



图 12 特征检测(激光带中心线提取)

Fig.12 Character detection(laser stripe center curve extraction)

下 2 个斜率突变点的过程中,采用分别从上及下开始搜索,搜到了就记住坐标地址并停止的方法。这样就可以避开坡口内部(即上下两个拐点之间)可能存在的不太规则的特征信号带来的误差,不仅简化了算法,而且程序的通用性也大大提高。处理结果如图 13 所示,图中作了标记的两点即为检测所得的特征点。



图 13 偏差识别

Fig.13 Declination recognition

#### 4 参数在线自整定模糊控制器设计

常规模糊控制器由于其良好的动态性能和无需建立被控对象数学模型的特点而被广泛地应用在工业过程控制中。但其量化、比例因子一经确定后,在控制过程中就固定不变,自适应能力低,不能适应被控对象的变化。虽然采用 FUZZY-PID、自适应模糊控制等方法可以适当调整参数,但是其调整的范围有限。综合比较多种模型后,引入在数控领域应用非常广泛的参数自整定模糊控制技术<sup>[9]</sup>,可以实时调整量化因子和比例因子,取得了良好的效果。

图 14 为设计的参数在线自整定模糊控制器的结构框图。其中  $e, ec$  和  $u$  分别为误差、误差变化、控制量; $K_e$  和  $K_{ec}$  为量化因子; $K_u$  为比例因子; $E, EC$  和  $U$  分别为误差、误差变化和 control 量的模糊语言变量。

焊缝自动跟踪系统的动态响应过程可分为启动、误差绝对值增大、误差绝对值减小 3 个阶段。不同控制阶段量化因子和比例因子对系统性能的影响

专题讨论  
——  
焊缝跟踪技术

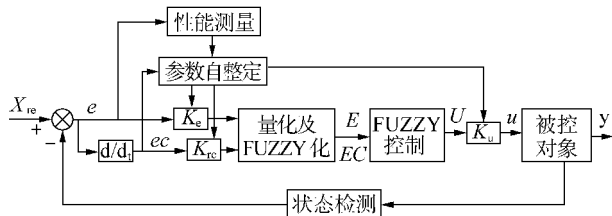


图 14 参数自整定模糊控制器结构框图

Fig.14 Principle diagram of the fuzzy controller with self-adjusting parameters

程度不同,采用固定量化、比例因子的常规模糊控制器不可能取得优良的动态品质和稳态性能,为此可通过对被控对象进行在线性能测量实时地调整其量化、比例因子,以适应被控对象的变化,使控制系统具有较强的自适应能力和较好的鲁棒性,从而获得优良的控制效果。

## 5 结论

(1)采用 LOG 滤波对原始图像进行平滑去噪处理,可以有效地滤除飞溅、烟尘、横波等干扰,保留激光光带的有用信号。

(2)对 LOG 滤波后的图像进行二值化处理,可以使后续的中值滤波在保证滤波效果的基础上显著提高处理速度,以满足实时处理要求。

(3)采用 Roberts 算子作边缘检测,可以较好地保留激光光带的边缘,并且处理速度快。

(4)利用改进的 Hough 变换特征检测和斜率法偏差识别等图像处理方法,可以有效地提取焊缝特征点并且识别出偏差量,方法简单可靠。

(5)对于存在许多不确定因素的焊缝跟踪过程,通过采用量化因子和比例因子能够在线自调整的参数自整定模糊控制器,从而有效地改善跟踪的精度和稳定性,提高控制的智能程度。

## 参考文献:

- [1] 张富巨,王 朋,罗传红.基于面阵 CCD 图像处理的窄间隙焊自动跟踪系统[A].湖北省武汉市 2000 年焊接学术年会论文集[C].湖北:[出版地不详],2000:13-15.
- [2] Smith Dr J S, Lucas W. Vision based systems for controlling the arc welding operation and inspecting the weld bead profile[J]. Welding in the world, 1999, 43(7/8): 10-22.
- [3] 梁 明,石永华,廖 霄,等.药芯焊丝水下焊接视觉传感焊缝自动跟踪系统[J].电焊机,2001, 31(10): 17-19.
- [4] 王 伟,邹奇仕,朱六妹,等.视觉传感焊缝跟踪技术的发展状况及实施方案探讨[J].电焊机,2002, 32(5): 1-8.
- [5] 姚河清,陆跟成.参数自整定模糊控制器在弧焊焊缝跟踪中的应用[J].自动化与仪器仪表,2005(6): 30-32.

专题讨论  
——  
焊缝跟踪技术