

采用微型排水罩的药芯焊丝水下焊接 焊缝自动跟踪系统*

梁 明 王国荣 钟继光

(华南理工大学机械工程学院 广州 510641)

摘要: 针对水下焊接图像噪声大、清晰度差的特殊情况, 设计并研制成功一套药芯焊丝水下焊接的视觉传感焊缝自动跟踪系统。该系统由视觉传感、图像预处理及偏差识别系统, 控制系统和执行机构等组成。采用小波多尺度变换进行水下焊缝图像边缘提取, 结果保留大多数的细节, 得到有利于焊缝位置特征提取的预处理图像, 在一种基于二值图像的焊缝中心位置识别算法计算后, 得出焊缝偏差。在理论分析视觉传感焊缝自动跟踪系统模型的基础上, 设计满足跟踪精度要求的规则自调整模糊算法。对影响跟踪系统精度的因素进行分析, 并采用相应的措施以提高系统的精度。通过药芯焊丝湿法水下焊接焊缝自动跟踪试验表明, 采用规则自调整模糊控制能够达到较高的焊缝跟踪精度。在斜线、折线和曲线三种不同形状待焊焊缝的跟踪试验中, 系统都能满足药芯焊丝水下自动焊接的要求。经过改进微型排水罩, 进行微型排水罩局部干法药芯焊丝水下焊接焊缝跟踪试验, 采用规则自调整模糊控制, 不仅得到满意的焊缝跟踪效果, 还改善焊缝成形质量。

关键词: 视觉传感 焊缝跟踪 水下焊接 图像处理 模糊控制 微型排水罩

中图分类号: TG456.5

0 前言

水下焊接是海洋工程建设(包括海上石油平台和海底输油气管线施工、海上舰船维修等)的关键技术之一。伴随海洋工程的大规模建设, 越来越需要提高水下焊接的质量和生产效率, 降低建造成本。提高水下焊接质量需要研究新的焊接材料、方法和工艺, 而提高焊接效率和降低焊接成本还需要实现水下焊接的机械化和自动化。

采用药芯焊丝进行水下焊接不仅可以提高焊接质量, 由于其采用连续送丝, 还显著提高了生产效率并易于实现焊接的自动化。采用药芯焊丝电弧焊, 华南理工大学水下焊接课题组已成功研制出一套采用微型排水罩的水下局部干法焊接设备和工艺^[1], 初步解决了水下焊接的焊接质量问题, 使用这种新型的焊接方法, 工艺简单方便, 生产成本低, 得到的焊接接头较湿法焊接成形美观、性能良好, 为进一步发展成适合我国国情的水下焊接方法打下了基础。很明显, 偏离待焊位置的焊缝是没有任何意义的。而对于局部干法焊接来说, 由于在焊枪上安装了一个微型排水罩, 阻碍了焊接时对焊接位置(待焊焊缝、焊丝位置)的观察, 当焊缝偏离待焊位置中心

时, 无法及时察觉并作适当调整, 因此必须研制水下焊接焊缝自动跟踪系统。

目前, 只有日本学者利用超声波传感器对水下焊接的焊缝跟踪进行过研究, 但使用超声波传感器易受干扰、操作复杂、接头适应能力差^[2]。近年来, 随着固体摄像器件特别是电荷耦合器件(Charge coupled device, CCD)集成光电器件的应用以及计算机图像处理技术的飞速发展, 视觉传感器在焊接过程控制、焊缝跟踪以及焊接质量检测等领域得到了广泛的应用。因此, 本课题组拟设计并研制一套药芯焊丝水下焊接的视觉传感焊缝自动跟踪系统, 采用小波多尺度变换进行水下焊缝图像边缘提取, 在焊缝中心位置识别算法计算后, 得出焊缝偏差。通过药芯焊丝湿法水下焊接焊缝自动跟踪试验, 在斜线、折线和曲线三种不同形状待焊焊缝的跟踪试验中, 检验系统是否能满足药芯焊丝水下自动焊接的要求。然后改进微型排水罩, 进行微型排水罩局部干法药芯焊丝水下焊接焊缝跟踪试验, 检验系统的焊缝跟踪精度以及焊缝成形效果的改善。

1 焊缝自动跟踪系统

图 1 为所研制的药芯焊丝水下焊接焊缝跟踪系统结构示意图。系统分为视觉传感系统、焊缝图像处理系统、控制器以及执行机构等四个部分。整个硬件部分由 50 W 卤钨灯辅助光源, 滤光系统,

* 国家自然科学基金(50175027)、广东省自然科学基金(0133002)和高等学校博士学科点专项科研基金(20010561013)资助项目。20060223 收到初稿, 20061222 收到修改稿

MTC-510型水下 CCD 摄像头(焦距 $f=4.0\text{ mm}$)，Flyvideo' 98 EZ 型视频捕获卡，ADT830 型运动控制卡， x 、 y 二维运动平台以及 Pentium II 400 工控机组成，其中二维运动平台的 x 、 y 轴分别由步进电动机驱动^[3]。

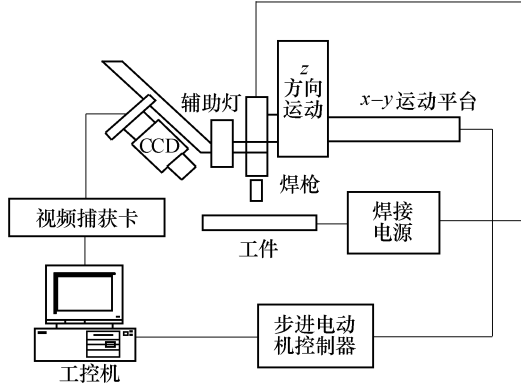


图1 药芯焊丝水下焊接焊缝跟踪系统结构示意图

卤钨灯辅助光源对焊接熔池前方附近区域进行照明，经滤光系统后由水下 CCD 拍摄焊接区域图像。

焊接过程中 CCD 与焊炬的相对位置固定，在焊炬的前方以一定角度(约 45°)摄取焊缝。由 CCD 摄取焊缝图像经图像捕获卡将视频模拟信号转换成 8 位数字图像信号。本系统的 Flyvideo 图像卡可将数字图像的灰度分为 256 个级别(0 对应黑色，255 对应白色)。图像大小为 320 像素 \times 240 像素或 160 像素 \times 120 像素。图像卡捕获焊缝图像的频率为 30 帧/s。研究表明^[4]，使用帧获取速度为 1/30 s 的 CCD 就可满足焊缝实时跟踪的需要。

焊接过程中，焊缝图像处理系统首先对视觉传感系统实时拍摄的焊缝图像进行中值滤波、二值化处理和边缘检测，再进行偏差识别，识别出的偏差信号由规则自调整模糊控制器计算后得出输出控制信号，经过运动卡输出脉冲信号驱动 y 轴运动，从而实现焊缝纠偏。

2 小波边缘检测

采用视觉传感技术实现焊缝跟踪，如何得到准确的焊缝边缘形状进而确定焊枪位置是实现准确跟踪的关键所在。传统的边缘检测算子，如梯度算子、Robert 算子、拉普拉斯算子、Sobel 算子、Marr 算子等，对噪声比较敏感，因而用于干扰较为严重的图像(如水下焊缝图像)，其检测效果较差。近年来迅速发展起来的小波理论为图像处理带来了新的理论和方法，本文讨论了采用 Bubble 函数过零点检测

来提取焊缝图像的边缘小波多尺度方法^[5]。

对应于 Gauss 平滑函数 $G_\sigma(x,y)$ ，小波基函数为 Bubble 函数 $\psi^2(x,y)$

$$\psi^2(x,y) = \frac{\partial^2 G_\sigma}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G_\sigma}{\partial y^2} = -\frac{1}{\pi\sigma^4} \left(1 - \frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right)$$

上式经过推导^[4]，可以求得

$$\alpha_\sigma(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp\left(-\frac{3\sigma^2}{2}\xi + i\xi\right) d\xi = \frac{1}{\sqrt{6\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{k^2}{6\sigma^2}\right)$$

$$\beta_\sigma(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \xi^2 \exp\left(-\frac{3\sigma^2}{2}\xi + i\xi\right) d\xi = \frac{1}{3\sqrt{6\pi}\sigma^3} \left(1 - \frac{k^2}{3\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{k^2}{6\sigma^2}\right)$$

式中 G_σ ——尺度 σ 时的 Gauss 平滑函数

$\alpha_\sigma(k), \beta_\sigma(k)$ ——分别为 x 、 y 维度平滑函数

σ ——小波变换的尺度参数

k ——以 e 为底的幂系数，通常 $|k| \leq 3$

σ 小时，函数集中，图像在一个小范围内得到平滑，有利于提取出细致的边缘细节； σ 大时，平滑范围大，有利于抑制噪声但是获得的边缘比较粗糙。因此，试验中 σ 从 0.2~1.0 进行变化，得到多组二进制 x 、 y 维度平滑函数 $\alpha(k), \beta_2(k)$ 的值，见表 1。

表1 $\alpha(k), \beta_2(k)$ 的数值

系数 k	尺度参数 $\sigma=0.2$		尺度参数 $\sigma=0.5$		尺度参数 $\sigma=1.0$	
	$\alpha(k)$	$\beta_2(k)$	$\alpha(k)$	$\beta_2(k)$	$\alpha(k)$	$\beta_2(k)$
-3	5.96×10^{-17}	-3.7×10^{-14}	0.001	-0.017	0.051	-0.034
-2	6.65×10^{-8}	-1.8×10^{-5}	0.032	-0.185	0.118	-0.013
-1	0.018	-1.091	0.237	-0.105	0.195	0.043
0	1.152	9.597	0.461	0.614	0.230	0.077
1	0.018	-1.091	0.237	-0.105	0.195	0.043
2	6.65×10^{-8}	-1.8×10^{-5}	0.032	-0.185	0.118	-0.013
3	5.96×10^{-17}	-3.7×10^{-14}	0.001	-0.017	0.051	-0.034

通过试验调整 σ 的值，得到焊缝边缘提取效果最好的 σ 的范围是： $0.4 \leq \sigma \leq 0.6$ 。图 2 所示为焊缝图像小波边缘检测结果，其中 σ 取值分别为 0.4, 0.5 和 0.6。随着 σ 增大，平滑范围增大，有利于抑制噪声但是获得的边缘比较粗糙。可以看到当 $\sigma=0.5$ 时小波分解处理结果最好，因此在实际应用中，取 $\sigma=0.5$ 的值时的小波对焊缝图像进行边缘分析。

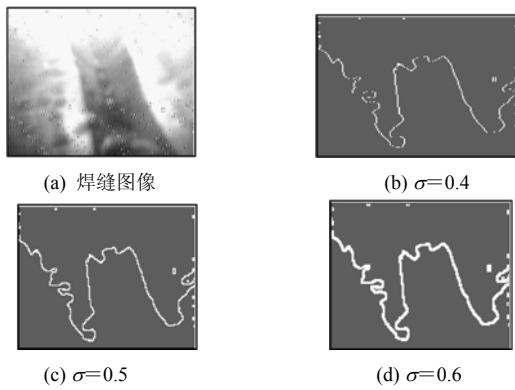


图 2 焊缝图像小波边缘检测结果

3 规则自调整的模糊控制算法

简单的模糊控制器具有设计比较简单、控制性能比较好的特点。但这种控制器的模糊控制表由输入输出变量及其论域和模糊变量的赋值表决定，一旦模糊控制表确定之后，这种模糊控制器的控制规则就固定下来，对于不同的被控对象，简单的模糊控制器采用不变的控制规则不能获得预期的控制效果，导致系统的控制精度降低和动态品质变差，其使用范围受到限制。在较小偏差时可以得到足够高的调节速度，而在较大偏差时，其调节速度仍然不能满足实际焊接的需要，即控制规则不能根据偏差的实际情况进行在线调整，其自学习能力差，因而其自适应性能受到限制，控制精度不是很理想。为扩大其应用范围，就必须对语言变量取更多的语言值，即分档越细，性能越好，使用范围越宽。但同时带来的缺点是规则数和系统的计算量大大增加，以至模糊控制规则更难以把握，调试更为困难。为此，引入了一种带修正函数的控制规则自调整模糊控制器(Fuzzy control, FC)，如图 3 所示(y 为焊枪垂直于焊接方向的运动量)。该模糊控制器具有自学习、自组织和自适应的能力，将模糊控制规则以解析形式表述出来，并通过引进调整因子 α 来调整控制规则，进而将调整因子变为多种形式的调整函数，从而进一步改善模糊控制器的性能^[6]。

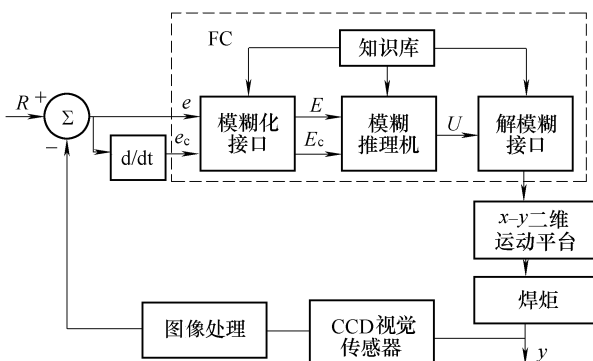


图 3 带修正函数的控制规则自调整模糊控制器

带修正函数自调整模糊控制器的控制规则如下

$$U = \begin{cases} \alpha E & |E| > E_1 \\ \alpha E + (1-\alpha)E_c & E_1 < |E| \leq E_2 \\ \alpha E + (1-\alpha)E_c + \beta \sum E & |E| \leq E_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 U ——模糊控制器的输出

E ——系统误差 e 归一化值

E_c ——误差变化 e_c 归一化值

α ——修正函数

β ——误差积分权重

E_1, E_2 ——系统设定的偏差阈值(模糊量)，且 $E_2 > E_1$

首先将系统误差 e 和误差变化 e_c 归一化为 e/R 及 e_c/R ，并将它们在各自的基本论域中分成若干等级，以完成模糊量化。其中 R 为控制系统的设定值，对于恒值系统 R 为一常数。

控制策略的基本思想是：当误差大时，对误差的控制作用应给予较大的权重，以尽快消除误差提高响应速度；当误差小时，为避免系统响应的超调，提高系统的阻尼性能，对误差变化的控制作用给予较大的加权，以尽快进入稳态。为此，建立了修正函数

$$\alpha = k_1 \left| \frac{e}{R} \right|^p \quad (2)$$

式中 α ——修正函数

e ——误差

R ——控制系统的设定值

k_1, p ——待定参数

通过设置合理的 k_1, p 值，修正函数 α 可以根据误差 e 的变化，灵活地调整模糊控制规则。

由式(1)可看出，该控制器采用的是三模分段控制策略，即在大偏差范围内采用比例控制，以提高整个系统的响应速度；偏差居中时采用模糊自适应控制，以提高系统的阻尼性能，减小响应过程的超调；而在小偏差范围内转换成 PID 控制，PID 调节器的积分作用理论上可使系统的稳态误差控制为零，有着很好的消除误差作用。三者相结合可以增加系统动态、稳态控制性能。三种控制方式之间的转换是由程序根据预先设定的偏差阈值自动实现。

4 微型排水罩设计

文献[7]介绍了一套采用微型排水罩的水下局部干法药芯焊丝焊接设备和工艺，其原理是借助于一个随焊枪移动的微型排水罩(如图 4 微型排水罩局部干法水下焊接原理图所示)。焊枪通过绝缘套和

连接套与排水罩紧密联接在一起，排水罩与工件接触的表面是一层具有弹性的密封垫。焊接时，将排水罩压在工件上，依靠焊接过程自身所产生的气体和部分水汽化分解产生的气体充满排水罩，罩体内部空腔的水通过密封垫排出罩外，在空腔内形成一个稳定的局部无水区域，使得电弧能在其中稳定地燃烧。当采用微型排水罩水下局部干法焊接时，排水罩不透明，因此阻挡了弧光的干扰，对实现焊缝跟踪有利。但是为了保证焊接过程稳定，提高焊缝质量，必须使得焊接时排水罩内部形成稳定的无水空腔，因此排水罩的尺寸和密封垫的选择至关重要。

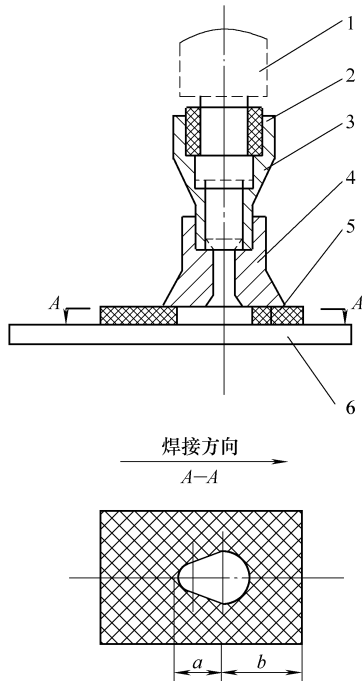


图4 微型排水罩局部干法水下焊接原理图
1. 焊枪 2. 绝缘套 3. 连接套 4. 微型罩
5. 密封垫 6. 试板

排水罩的前部尺寸 a 决定了视觉传感检测点的位置提前量。前部尺寸过大，则容易引起大的传感前误差；而前部尺寸过小，容易导致密封垫烧穿，无法形成稳定的局部空腔，必须从焊接质量和跟踪效果两方面进行选择。排水罩的内腔体积直接决定了焊接时形成的无水区的大小。无水区越小，焊接时空腔内药芯焊丝本身产生的气体分压越高，排水效果越好；但空腔不可以无限制地减小，必须留出电弧燃烧所需的足够空间。而当排水罩内腔大到一定程度时，仅靠药芯焊丝产生的气体无法排干净罩内的水，同时罩内水的分解量增加，导致焊缝出现气孔。考虑到焊接过程中对刚刚凝固的焊缝起到缓冷作用，密封垫中部空腔存在有一定的后拖部分。后拖尺寸 b 对焊缝的冷却速度、组织和性能有较大影响。后拖尺寸越大，焊缝的缓冷效果越好。但过大的后拖尺寸会加大排水罩的整体尺寸，同时给焊

接操作带来不便。通过多次试验，最后确定微型排水罩空腔体积为 6.56 mm^3 ，前部尺寸 a 为 25 mm ，后拖尺寸 b 为 17.5 mm 。

密封垫由石棉板和石棉布以“三明治”的结构组成。石棉具有 $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右的耐高温性能，而且石棉板的弹性保证密封垫具有一定的压缩量，但由于石棉板韧性不够好，容易撕裂，所以在石棉板两侧各加两层石棉布以保证其使用寿命。将石棉板和石棉布通过 502 胶水粘合成一体，最后粘合在排水罩上。本试验焊接工艺参数如表 2。

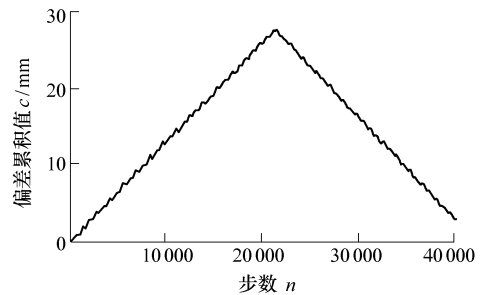
表2 焊接工艺参数

焊接电流 I/A	焊接电压 U/V	焊接速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	焊丝直径 d/mm	干伸长度 l/mm
220~250	30~32	4	1.2	20

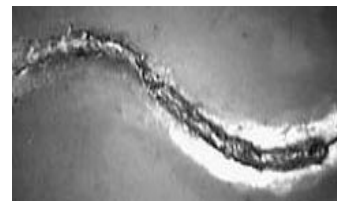
对有坡口的两种焊缝(折线和 S 形曲线)采用自调整模糊调节方法分别进行跟踪控制，并在焊后给出它们的输出量累积曲线，湿法焊接与微型排水罩局部干法焊接焊缝跟踪结果分别列于图 5、6。



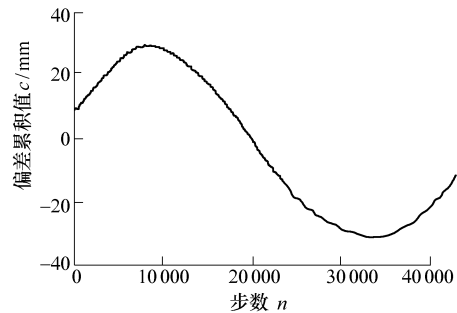
(a) 湿法焊接自动跟踪折线焊缝



(b) 湿法焊接自动跟踪折线偏差图

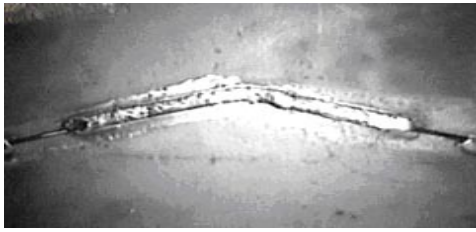


(c) 湿法焊接自动跟踪曲线焊缝

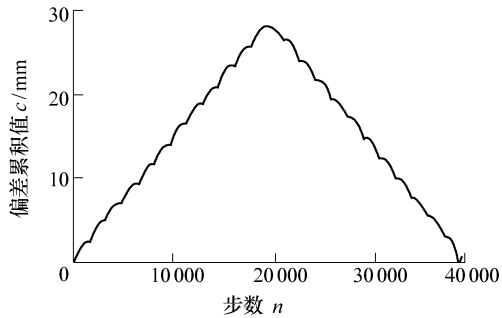


(d) 湿法焊接自动跟踪曲线偏差图

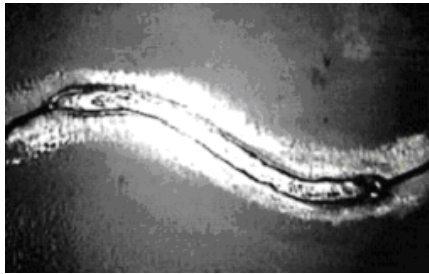
图5 水下湿法焊接焊缝跟踪结果



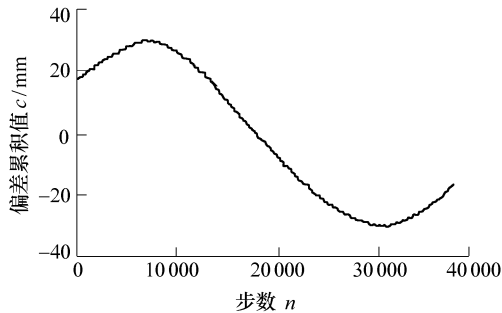
(a) 局部干法焊接自动跟踪折线焊缝



(b) 局部干法焊接自动跟踪折线偏差图



(c) 局部干法焊接自动跟踪曲线焊缝



(d) 局部干法焊接自动跟踪曲线偏差图

图 6 微型排水罩焊接焊缝跟踪结果

由偏差累积曲线可以看出,跟踪曲线焊缝时检测到的偏差较大,尤其是在曲线的中间处,即两段弧相切之处,偏差最大;折线焊缝由于具有大的转折点,由于二维调整机构和视觉检测位置等原因容易造成此处产生的偏差较大,而在没有大的形状变化的区段偏差相对较小。

由图 5、6 可见,尽管湿法焊接的跟踪最大误差较小,但是微型排水罩局部干法的焊缝成形质量较好,跟踪的最大误差也只在 0.45~0.54 mm 之间,平均误差在 0.48~0.52 mm 之间,能够满足实际工程需要。

5 结论

(1) 对噪声大、清晰度差的水下焊接焊缝图像首次采用小波多尺度变换进行图像边缘提取,并且设计了满足跟踪精度要求的规则自调整模糊算法。对药芯焊丝湿法焊接的平板对接接头(折线、和曲线)进行了实时跟踪试验。试验结果表明:采用规则自调整模糊控制能够达到较高的焊缝跟踪精度。

(2) 采用改进的微型排水罩,进行了局部干法药芯焊丝水下焊接焊缝跟踪试验,采用自调整因子模糊控制,不仅得到了满意的焊缝跟踪效果,还改善了焊缝成形质量。

(3) 进一步研究的建议:研制水下湿法和局部干法焊接的专用药芯焊丝,以提高焊缝的质量。

参 考 文 献

- [1] 张彤,钟继光,王国荣.药芯焊丝微型排水罩局部干法水下焊接的研究[C]//第九次全国焊接会议论文集(第二册),哈尔滨,1999,10:354-357.
- [2] 菅泰雄,町田光.水中における溶接線の自動追跡制御に対する超音波センシング法の適用[C]//日本機械学会论文集(C集),日本,1995,61(3):494-500.
- [3] 石永华.基于视觉传感的药芯焊丝水下焊接焊缝自动跟踪系统[D].广州:华南理工大学,2001.
- [4] SUGA Y. Effect of some image processing on the seam tracking by a welding robot with visual sensor[C]// Proceedings of the 5th International Offshore and Polar Engineering Conference, The Hague, Netherlands, 1995: 456-459.
- [5] 梁明.水下焊接焊缝图像处理与跟踪技术的研究[D].广州:华南理工大学,2002.
- [6] 鲁守荣.参数在线自调整模糊控制器[J].湖北汽车工业学院学报,1998,12(2):51-54.
- [7] 张彤.药芯焊丝微型排水罩局部干法水下焊接的研究[D].广州:华南理工大学,1999.

VISION-BASED SEAM TRACKING SYSTEM OF THE UNDERWATER FLUX-CORED ARC WELDING

LIANG Ming WANG Guorong ZHONG Jiguang
(School of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641)

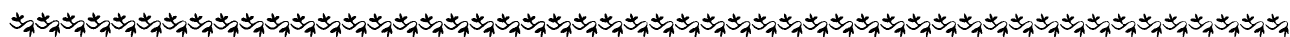
Abstract: To track seam automatically during underwater flux-cored arc welding(UFCAW), a vision-based seam tracking system has been studied. This seam tracking system consists of a vision sensing system, an image processing and seam recognizing system, a control system and executive unit. The edge of the weld line is precisely detected by a wavelet transform method. The seam position error is calculated by a seam position recognition algorithm based on the binary image. Based on the theoretic analyze of the structure model of the vision-based seam tracking system, a control rule self-adjust fuzzy controller is designed. The factors of decreasing the precision of the seam tracking system are analysed, and some measures are adopted to improve the tracking precision. The tracking experiments results of the UFCAW confirm that the control rule self-adjust

fuzzy controller meet the demand of the tracking precision. In the tracking trials of sidelong, reflex and curve weld line, the system can all meet the demand of the tracking precision. With the improved mini drain water cap, the tracking experiments of the underwater local dry welding are carried. The results indicate that this process can not only meet the demand of improve welding quality but also satisfy the tracking results.

Key words: Visual sensing Seam tracking
Underwater welding Image processing
Fuzzy control Mini drain cap

作者简介: 梁明, 男, 1974年出生, 博士。主要研究方向为焊接自动化、图像处理以及嵌入式系统开发。

E-mail: leungming@163.com



(上接第147页)

Abstract: To utilize the deformation of the vehicle and the collision objects in the accidents fully, a new vehicle crash accident reconstruction method by means of the finite element method and neural networks techniques is presented. In the present method, the digital measurement technology is adopted to acquire the deformation of key points on the main energy-absorbing parts as the indices to evaluate the accident. And the non-linear explicit finite element code is adopted to simulate the crash accidents in order to acquire the calculation values of these indices. On the basis of the numerical results of the crash accidents, a three-layer recurrent neural network is applied to generate an approximated function of the initial crash parameter and the deformation index. The finite element analyses are used to generate the examples for the training and test

sets of the neural network. These results could be used to train the neural network by back-propagation learning rule. Application the present method to one vehicle-to-wall accident, at first, the finite element model of the auto-body, wall and the surrounding are finished, then the eleven key points on the frontal longitudinal beam and the mudguard are chosen, reconstruction result are solved by comparing the deformation of measuring in the real accident with the data of the simulation results. It is proved to be effective on analysis of this kind of accidents, and so can provide a scientific foundation for accident judgments.

Key words: Finite element Neural networks Crash
Accident reconstruction Simulation

作者简介: 张晓云, 男, 1975年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为汽车碰撞事故再现。2005年获上海市科技进步一等奖。

E-mail: general_zhang@sjtu.edu.cn