

小波变换的多层多道焊接拐角跟踪点的识别研究

蔡志勇^{1),2)} 陈荣³⁾ 余伏章²⁾ 张华⁴⁾ 胡保安¹⁾

¹⁾(南昌大学信息工程学院,南昌 330031) ²⁾(洪都航空工业集团飞机设计研究所,南昌 330024)

³⁾(江西教育学院,南昌 330029) ⁴⁾(南昌大学机电研究所,南昌 330031)

摘要 利用小波变换检测信号边缘的优势,对V型坡口焊接激光图像以及多层多道焊激光图像的焊缝识别方法进行了系统的研究,给出了基于小波变换的焊缝识别算法,并提出了多层多道焊拐角跟踪点的识别算法,同时进行了大量的实验研究;分析了多层多道焊接激光图像的特点,在V型坡口识别算法的基础上进行了改进,利用模板匹配技术,实现拐角跟踪点的识别。

关键词 边缘检测 小波变换 多层多道焊接 焊缝识别 焊缝跟踪

中图法分类号:TP391.4 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2008)12-2344-07

Study on Multipass Welding Seam Recognition Based on Wavelet Transform

CAI Zhi-yong^{1),2)}, CHEN Rong³⁾, YU Fu-zhang²⁾, ZHANG Hua⁴⁾, HU Bao-an¹⁾

¹⁾(School of Information & Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031)

²⁾(Aircraft Design Department of Hongdu Aviation Industry Group, Nanchang 330024)

³⁾(Jiangxi Institute of Education, Nanchang 330029)

⁴⁾(Institute of Machinery and Electronic Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031)

Abstract Wavelet analysis is advantageous in detecting edges. This paper presents a systematic study on V-groove welding laser image and the seam recognizing method of multi-pass welding image. We propose a seam recognizing algorithm based on wavelet transformation and an algorithm to recognize the corner tracking in a multi-pass V-groove. According to the characteristic of multi-pass V-groove, our algorithm outperforms the algorithm of seam recognition in V-groove and uses the technology of template matching, can recognize the corner tracking.

Keywords edge detecting, wavelet transform, multi-pass welding, seam recognition, seam tracking

1 引言

目前对焊接图像的处理方法有直方图变换技术、图像滤波技术、图像增强技术、图像骨架提取等,这些方法在处理焊接图像方面取得了一定的成效。焊接图像具有明显的边缘信息,本文将尝试用边缘检测技术对焊接图像进行处理,以提取焊缝信息。边缘检测技术对于处理数字图像非常

重要,因为边缘是目标和背景的分界线,提取出边缘才能将目标和背景区分开来。在图像中,边界表明一个特征区域的终结和另一个特征区域的开始,边界所分开区域的内部特征或属性是一致的,而不同区域内部的特征或属性是不同的,边缘的检测正是利用物体和背景在某种图像特性上的差异来实现的,这些差异包括灰度、颜色或者纹理特征。边缘检测实际上就是检测图像特性发生变化的位置。

基金项目:国家自然科学基金项目(50075037);国家863计划基金项目(2001AA422220)

收稿日期:2006-12-18;改回日期:2007-07-10

第一作者简介:蔡志勇(1967~),男,研究员,硕士生导师,室主任。2004年于南昌大学获数字信号处理专业博士学位。主要从事数字信号处理、无线电通信和飞机航电系统设计研究。E-mail:czyong@263.net, czy@hongdu.com.cn

2 小波变换提取图像边缘原理

信号 $f(x)$ 在尺度 s 和位置 x 的小波变换是:

$$W_s f(x) = f(x) * \psi_s(x) = \int f(\tau) \psi_s(x - \tau) dt$$

其中, $\psi_s(x) = \frac{1}{s} \psi\left(\frac{x}{s}\right)$ 是满足容许条件的母小波经尺度因子伸缩所得。

设平滑函数 $\theta(x)$ 是一个实值函数, 满足积分为 1 且无穷远处趋于 0 的条件, 即 $\int_{-\infty}^{+\infty} \theta(x) dx = 0$

令 $\theta_s(x) = \frac{1}{s} \theta\left(\frac{x}{s}\right)$ 。定义两个小波函数如下:

$$\begin{aligned} \psi^1(x) &= \frac{d\theta(x)}{dx} \\ \psi^2(x) &= \frac{d^2\theta(x)}{dx^2} \end{aligned} \quad (1)$$

以 $\psi^1(x)$ 和 $\psi^2(x)$ 为小波函数, 则对于 $f(x) \in L^2\mathbf{R}$, 小波变换为

$$W_s^1 f(s, x) = f * \psi_s^1(x) = s \frac{d(f * \theta_s)}{dx}(x) \quad (2)$$

$$W_s^2 f(s, x) = f * \psi_s^2(x) = s^2 \frac{d^2(f * \theta_s)}{dx^2}(x) \quad (3)$$

可见这样的小波变换实质上是信号被平滑函数低通滤波后的导数。因此, 小波变换的大小反映了信号上升或下降的速率的大小, 小波模最大值处对应着信号的突变点, 如果 $f(x)$ 是图像信号也就是图像的边缘点。若 x_1 是 $f(x)$ 突变点, $f(x)$ 进行上述的小波变换后, 则 x_1 对应于 $W_s^1 f(s, x)$ 的局部极大值点、 $W_s^2 f(s, x)$ 的零点。因此通过分析 $W_s^1 f(s, x)$ 极大值点和 $W_s^2 f(s, x)$ 零点, 就可以找出信号突变点, 从而找到图像的边缘。

3 多层多道焊接

在厚钢板的焊接过程中, 由于受到焊接功率的影响, 不能够一次完成焊接, 必须采用分几层、每层又分几道来完成焊接, 这就叫多层多道焊接, 三层六道焊接实验结果如图 1 所示。焊接工作的环境条件相当恶劣, 尤其是对于球罐等焊件的焊接, 环境就更为恶劣。由于焊件厚, 需实行多层多道焊接, 这样焊接时间长, 用人工焊接就显得很不合适了。因此, 实

现多层多道的自动焊接是必由之路。在多层多道焊接自动跟踪系统中, 有一种较流行的方案是: 利用装在焊枪后面的视觉传感器捕获坡口图像, 然后对捕获的图像进行处理, 找到坡口拐角点位置, 以此点为参考点进行焊缝跟踪^[1,2]。要实现多层多道的自动焊接, 首先必须恰当地进行图像处理, 准确地识别出拐角跟踪点的位置。没有足够精度的拐角跟踪点的识别, 就谈不上焊缝的自动跟踪。多层多道焊接图像识别处理现在还存在不少困难, 主要表现在: 每经过一道焊接, 坡口形状就变了, 对图像处理带来了复杂性; 受弧光干扰影响, 坡口特征形状往往被弧光淹没, 给焊缝识别带来困难; 在焊接过程中, 焊件受热变形使得识别精度受到影响。所以, 研究出可靠性高、抗干扰能力强和满足精度要求的多层多道焊接的图像识别算法, 就显得非常必要和有意义。

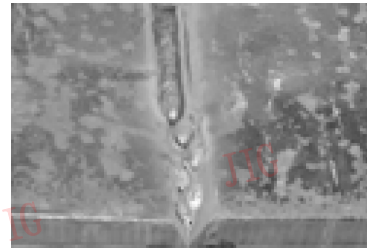


图 1 三层六道焊实验试件

Fig. 1 Multipass experiment apparatus

4 多层多道焊缝识别方法

4.1 利用小波变换提取多层多道焊缝光纹

当平滑函数 $\theta(x)$ 为三次 B 样条函数时就有和高斯函数十分相似的时域局部化, 又因为高斯函数的一阶导数的无穷积分为 0, 满足小波函数的定义, 随着分辨率的提高, 高斯函数的微分与信号卷积所得到的极值在保持原有的基础上增加, 因此用高斯函数作平滑函数来提取边缘, 能够较好地抑制噪声, 保持有用的边缘^[3]。但是其滤波系数复杂, 模板较长, 不适合用作实时检测。4 阶 (3 次) B 样条的局部时频性能能满足大多数实际应用场景, 并且较 Gaussian 函数而言, 3 次 B 样条具有更优的较紧性。所以采用 4 阶 B 样条函数的导数——三次样条小波作为检测焊缝位置的小波。

小波变换主要是两种操作, 即小波滤波和尺度滤波^[4]。从数字信号处理的角度来看, 滤波实际上就是对输入信号进行卷积运算, 它可以用下式来表示:

$$\begin{cases} a_{i+1} = a_i * h(n) \\ d_{i+1} = a_i * g(n) \end{cases} \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

式中, $g(n)$ 是尺度滤波器系数, $h(n)$ 是小波滤波器系数。

根据实验经验, 三次样条小波较二次样条小波在对 V 型图像边缘检测具有优势, 其对应的小波滤波器系数 $h(n)$ 和尺度滤波器系数 $g(n)$ ^[5], 如表 1 所示。

表 1 三次样条小波滤波器系数

Tab.1 Cubic spline wavelet filter efficient

n	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
$g(n)$	0.000 0	0.062 5	0.250 0	0.375 0	0.250 0	0.062 5	0.000 0	0.000 0
$h(n)$	-0.000 08	-0.016 43	-0.108 72	-0.592 61	0.592 61	0.108 72	0.016 43	0.000 08

根据离散小波变换的 Mallat 算法可用待分析列灰度信号 a_0 经过滤波器组来进行多分辨分析, 分解为 5 层, 这种算法又名小波变换多孔算法, 如图 2 所示。

取图 3(a) 中的多层多道焊原始图像中的每一列灰度曲线(图 4 是图 3(a)中原始图像第 100 列灰度曲线)进行尺度 1 和尺度 2 上的尺度滤波, 分别得到 a_1 、 a_2 ; 再进行尺度 1、尺度 2、尺度 3 上的三层小波滤波, 凸现出灰度曲线突变点的位置, 分别得到 d_1 、 d_2 、 d_3 。为增强边缘提取的抗干扰能力, 在小波滤波及尺度滤波处理的基础上, 将二者结合起来: $a_1 * d_1$ 、 $a_1 * d_2$, 从而分别将小波滤波提取的结果进一步锐化, 如图 4 中 $(a_1 * d_1)$ 及 $(a_1 * d_2)$ 曲线; 最后将这两条曲线再相乘, 得到 $(a_1 * d_1) * (a_1 * d_2)$ 曲线^[6]。该曲线上不同的极值及位置分别映射出原始灰度曲线的突变程度及突变点位置。

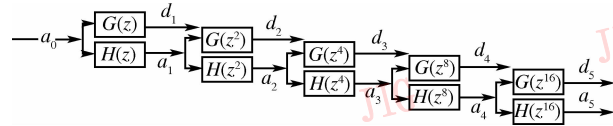


图 2 对列灰度信号的 5 层多分辨分析

Fig.2 Five layers of analysis to column gray curve

从图 3 中可以看出, 多层多道焊接激光光纹亮度明显, 其两边的灰度变化陡峭。根据小波变换的小波滤波突出图像灰度突变点和尺度滤波突出图像亮度的特点, 将小波滤波及尺度滤波相结合对图片进行处理。

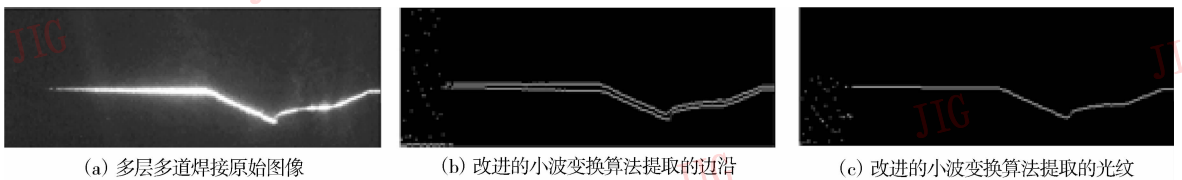


图 3 多层多道焊接光纹的提取

Fig.3 Multipass welding seam distill

比较图 4 中的灰度曲线和 $(a_1 * d_1) * (a_1 * d_2)$ 曲线可以看出, 第 100 列原始灰度曲线上灰度变化大的位置已经被凸显出来, 即 $(a_1 * d_1) * (a_1 * d_2)$ 曲线上的两峰值点位置, 曲线上的两峰值点的值在 10^7 数量级, 而其他信号的值接近 0, 可见信噪比很高, 所以这种算法的抗干扰能力足够强。提取出曲线上两峰值点位置, 即得到第 100 列图像上灰度突变点的位置, 最后进行中心取样(实现中心取样很简单, 只要把条纹同一纵向坐标的边缘值相加除以 2 就得到中心值的纵坐标, 再将除中心点外的点全部变为黑色)作为该行图像识别得出的唯一亮点。

图 4 描述了这种算法的过程。整幅图片的每列灰度图像进行改进的小波变换处理后, 首先提取出边缘亮线, 中心取样后提取出多层多道焊接光纹图样。处理结果如图 3(c) 所示。

为了验证上述改进小波变换算法在提取多层多道焊光纹方面具有强抗干扰能力, 下面抽取了几幅受强弧光干扰的图片进行实验, 实验结果如图 5 所示。从图 5 中的原始图片 3 的情况看, 在强弧光干扰下, 识别结果仍然受到影响, 尤其是拐角处的干扰, 将导致不能识别拐角跟踪点。下面将会提到改进措施。

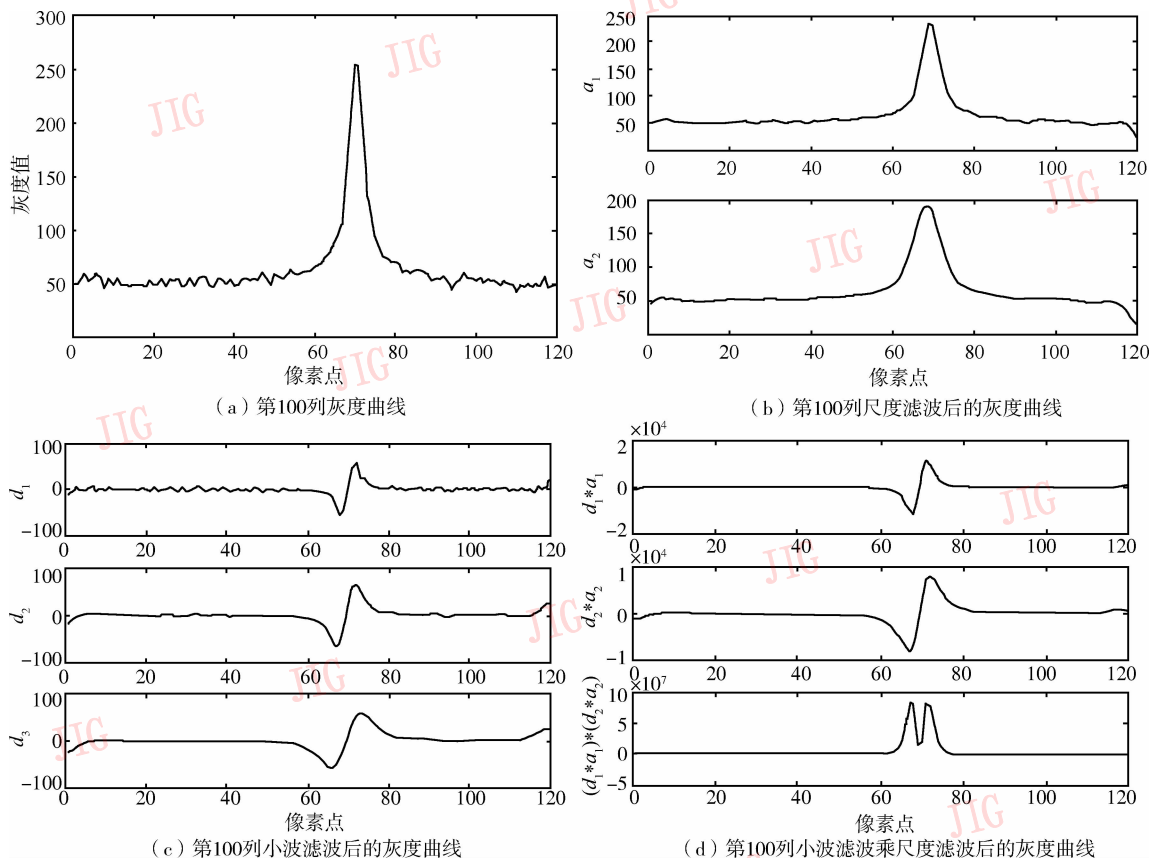


图 4 改进的小波变换算法图示过程

Fig. 4 Sketch map of improve on wavelet transform algorithm

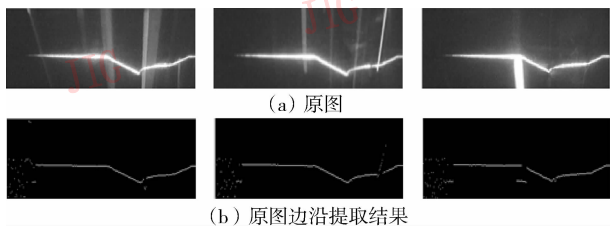


图 5 改进的小波变换算法提取的强弧光干扰的多层多道焊接光纹

Fig. 5 Improve on wavelet transform algorithm distill multipass welding seam from noise of arc light

4.2 拐角跟踪点的识别算法

原始图片在通过改进的小波变换算法处理得到多层多道焊轮廓光纹之后,还不能准确找出焊缝位置。在整个多层多道焊接过程中,激光 V 型图像有一个拐角必须始终保留,不能被破坏,这个拐角作为焊缝跟踪的参考点。因此,多层多道焊的 V 型激光图像的处理和识别,就是要确定这个拐角跟踪点的位置。可以将这个拐角作为模板,与提取出来的多层多道焊光纹进行匹配,用图形匹配法识别每一道拐角跟踪点的位置。所以,为得到拐角跟踪点,必须

首先将匹配图形识别并提取出来。当光纹提取出来后,线条不是很直,对选取拐角匹配图形不利。对于 V 型光纹,可以采用 Hough 变换方法,使其直线化;对于非 V 型光纹,可以采用直线拟合的方法,将拐角的两条射线直线化。

下面以拐角顶点为中心,选定匹配图形窗口的大小。窗口的大小将要根据实际情况来定。窗口太大,将影响拐角识别能力;窗口太小,将影响识别精度。这里选取的窗口为宽 60 个像素点,高 40 个像素点。V 型坡口的匹配图形如图 6(a)中虚线框的拐角所示,非 V 型坡口的匹配图形如图 6(b)中的虚线框的拐角所示。

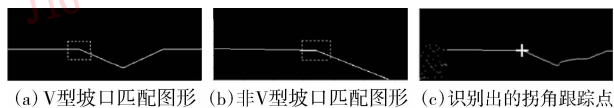


图 6 拐角跟踪点

Fig. 6 Corner tracking point

利用改进的小波变换算法提取出多层多道焊接光纹图形后,用已提取出的匹配图形进行拐角匹配,可以

识别跟踪点的位置。原始图像经过处理后,得到多层多道焊接光纹图形,在光纹线条上其灰度值是 255,其余各点值为 0。对于待处理的光纹图形,从第 1 个像素点开始,判断每一像素点的灰度值,若某点灰度值为 255,则将匹配窗口移至该点,并使窗口内拐角顶点与该点重合。在匹配窗口范围内,将窗口内所有像素点灰度值与待处理图片中对应像素点灰度值相乘,再将各像素点相乘结果累加,保存累加结果。由于待处理图片中及匹配窗口上所有像素点灰度值均为 0 或 255,因此各组像素点相乘结果只有在两对应像素点灰度值均为 255 时才不为 0,所以上述累加结果直接反映了如下信息:在匹配窗口范围内,窗口上灰度值与待处理图片中灰度值均等于 255 的对应像素点的个数。

如图 6(a)、(b)所示,不妨设匹配窗口大小为 a 行、 b 列,匹配窗口内像素点灰度值用函数 f_w 表示,待处理图片中像素点灰度值用函数 f_k 表示,则待处理图片中各灰度值为 255 的像素点对应的累加结果 F_k 可用下式表示:

$$F_k(I, J) = \sum_{i=-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \sum_{j=-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} f_w(i, j) \cdot f_k(I + i, J + j) \quad (5)$$

式中, (I, J) 表示待处理图片中灰度值为 255 的各像素点位置坐标。

在对待处理图片中所有像素点进行计算处理之后,判断并找出 F_k 的最大值,并记录该最大值所对应像素点的位置 (I', J') ,该位置即是匹配窗口与待处理图片最匹配的位置,从而 (I', J') 就是待处理图片中所识别得出的拐角顶点。对图 3 采用上述方法处理之后,识别提取出的拐角位置,见图 6(c)所示的亮“十”字的中心位置。根据式(5)可知,窗口 $a \times b$ 的大小对识别拐角跟踪点位置的精度有影响。窗口大,识别位置的精度高,但运算速度将下降。

改进小波变换法及图形匹配法提取焊缝虽然具

有一定的抗干扰能力,但对比较强的弧光干扰则无法抗拒。为此,需对上述方法加以改进,提高该方法识别焊缝的抗干扰能力。

通常,如图 7(a)所示的强弧光使上述算法抗干扰能力最弱,其特点是弧光正好落在预期要识别的拐角顶点处。对图 7(a)采用改进小波变换算法处理后,得到图 7(b)所示的光纹,再利用图形匹配法,识别的拐角跟踪点的结果如图 7(c)中亮“十”字,可以看出识别结果明显不对,这是由于图 7(c)中光纹在预期的拐角顶点处出现断裂,使图形匹配过程中窗口核心点无法移到预期的拐角顶点处,也就无法准确识别出实际的拐角顶点。因此本算法改进的就是要使匹配窗口能移到预期的拐角顶点处。

对同一焊接过程中的原始图片系列,两次采样的图像拐角点的列位置是在某一范围之内内的(该范围由两次图像采样间隔决定)。根据这一特点,当前一幅图片拐角顶点位置识别出后,位置设为 (S, T) ;在下一图片采用改进小波变换法得到的光纹图如图 7(b),找出第 T 列上灰度为 255 的点的像素的行坐标 U ,当 U 减 S 大于某一定值时,则认为弧光干扰引起光纹在实际拐角顶点出现偏离,无法准确识别拐角顶点。考虑到前后两幅图片实际拐角顶点位置偏差在一定误差范围之内,在后一幅图片光纹图中,为使匹配窗口能移到预期的拐角顶点处,可以以 (S, T) 为参考点,在其适当范围内进行光纹补偿,补偿的像素区域应根据实际的干扰确定。对补偿处理后的光纹图再进行图形匹配法处理,即可准确地识别出原始图片中的拐角顶点。图 7(d)即为图 7(b)进行补偿后的结果,补偿的范围为 $S - 2$ 至 $S + 2$ 行、二分之一匹配窗口列至 $T + 5$ 列。对图 7(d)再采用图形匹配法,提取焊缝结果如图 7(e)中亮“十”字的中心位置,可见拐角跟踪点位置识别结果是正确的。

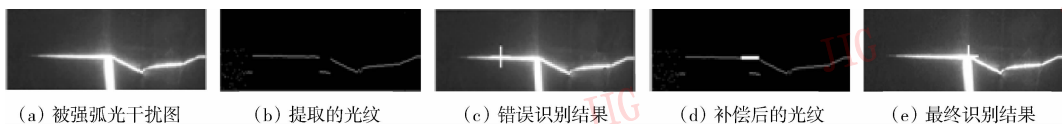


图 7 拐角跟踪点识别结果

Fig. 7 Result of corner tracking point recognized

5 二层四道平板焊实验

5.1 实验原理

如图 8 所示,半导体激光器的出射光经柱透镜

形成一光片。光片与母材成一定角度,与坡口相交成一单光纹。由于坡口各处与母材在垂直方向深度不同,故从垂直母材的方向看去,反射光成一折线。

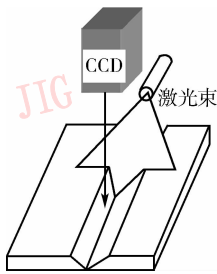


图 8 视觉传感系统原理图

Fig. 8 Elements of vision sensor system

折线反映了光纹中心与焊缝坡口中心的 3 维位置关系。光片与 CCD 摄像机光轴成一定角度投射到开有 V 型坡口的钢板上,与 V 型坡口交成一折线光纹。这个光纹反映了焊缝与光源中心的 3 维位置关系,左右光纹长度不等说明对中偏差;V 字的顶角到水平光纹的距离反映焊缝坡口的深度信息。位于母材垂直方向的 CCD 摄像机摄取折线光纹图样,送

计算机经小波变换等处理及计算,得出焊缝位置信息,通过执行机构进行焊缝跟踪。

5.2 实验分析

利用多层多道焊缝识别实验系统,在如表 2 所示的焊接实验条件下,进行了二层四道焊的样本数据采集,二层四道平板焊实验结果如图 9 所示,采集到的有效图像样本整理为 4 组(每道一组)。

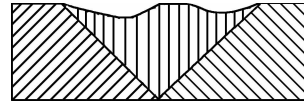


图 9 二层四道平板焊实验试件

Fig. 9 Multipass flat welding experiment

在整个多层多道焊接过程中,激光 V 型图像有一个拐角必须始终保留,不能被破坏,这个拐角作为焊缝跟踪的参考点。因此,多层多道焊的 V 型激光图像的处理和识别,就是要确定这个拐角跟踪点的位置。

表 2 二层四道平板焊实验条件

Tab. 2 Condition of multipass flat welding experiments

焊接方法	试件		焊丝		保护气体			焊接参数			
	材料	厚度(mm)	安装	加工	直径(mm)	种类	流量(L/min)	电流(A)	电压(V)	速度(cm/min)	采样(ms)
CO ₂ 气体保护焊	低碳钢	15	无间隙对接焊	45°V 型坡口	1	CO ₂	20	110	22	20	500

图 10 中 101 ~ 105 号图片是首次焊接时,CCD 获取的激光 V 型图像,即第 1 道焊图片,左角标注的“十”字表示识别的拐角跟踪点位置;201 ~ 205, 301 ~ 305, 401 ~ 405 号图片分别是第 2 道、第 3 道和第 4 道焊的实验图片。显示的是在焊接过程中,熔滴逐渐填满坡口时,各道焊接的激光图像,经过上述的焊缝识别算法识别出拐角跟踪点的位置(亮“十”字表示),相对应为处理后图片的竖线。拐角位置识别精度依赖于整个识别系统。本文的多层多道激光图像,每个像素代表 0.125mm。

表 3 列出了识别的各图片在拐角处位置的横坐标及其与实测值的对比,从中可以看出拐角跟踪点横坐标识别误差在 0 ~ ± 2 个像素点,即 0 ~ ± 0.25mm。

最后一道焊的识别能力也是考核识别算法的重要指标即定义拐角高度体现算法的识别能力,拐角高度为拐角跟踪点的纵坐标与斜坡最低点纵坐标的差,如图 11 所示。第 4 道拐角高度如表 4 所示。拐角高度为 7 ~ 8 个像素,相当于 0.875 ~ 1mm,此时拐角的识别是可靠而稳定的。

表 3 二层四道焊实验拐角跟踪点位置识别误差

Tab. 3 Deviation error of multipass corner tracking point position recongized

单位:像素

	图片号																			
	101	102	103	104	105	201	202	203	204	205	301	302	303	304	305	401	402	403	404	405
实验值	116	117	117	118	117	170	171	172	172	172	113	113	113	113	114	164	163	162	165	163
实测值	117	117	117	117	117	170	170	170	170	170	112	112	112	112	112	163	163	163	163	163
误差值	-1	0	0	1	0	0	1	2	2	2	1	1	1	2	1	0	-1	2	0	0

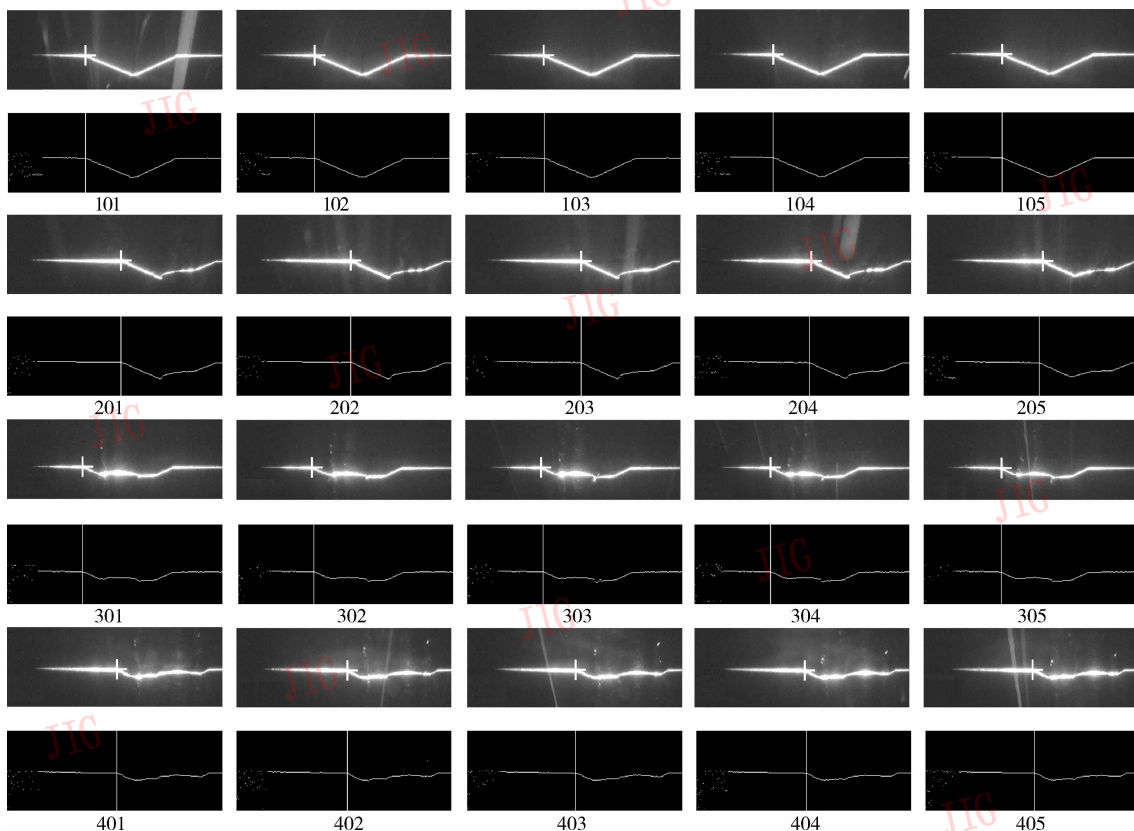


图 10 二层四道焊拐角跟踪点识别结果

Fig. 10 Result of multipass corner tracking point recognized

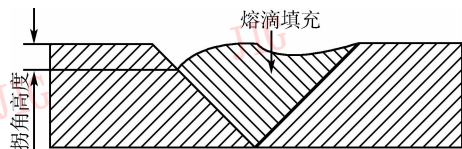


图 11 拐角高度定义

Fig. 11 The definition of corner height

表 4 第 4 道焊实验第 4 道拐角高度

Tab. 4 The fourth layer welding corner height

单位:像素

	图片号				
	401	402	403	404	405
实验值	8	8	7	8	7

6 结 论

多层多道焊接拐角跟踪点的识别方法具有以下优点。

- (1) 拐角跟踪点的识别算法抗干扰能力强。
- (2) 拐角跟踪点的识别误差为 $0 \sim \pm 2$ 个像素点,即 $0 \sim \pm 0.25\text{mm}$ 。
- (3) 拐角跟踪点的识别能力为 $7 \sim 8$ 个像素点,即 $0.875 \sim 1\text{mm}$ 。

该方法适用于强弧光拐角跟踪点的识别和 V 型坡口焊缝识别。

参考文献 (References)

- 1 Li Y F, Chen S Y. Automatic recalibration of an active structured light vision system [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, **19**(2):259 ~ 268.
- 2 Wu J, Smith J S, Lucas J. Weld bead placement system for multipass welding[J]. IEE Proceedings-Science, Measurement & Technology, 1996, **143**(2):85 ~ 90.
- 3 Chen Dong, Zhou Da-wei, Wang Yan, et al. Using multiscale wavelet transform for edge detection[J]. Computer Engineering and Design, 1998, **19**(2):35 ~ 37. [陈东,周大威,王炎等.用多尺度小波变换进行边缘检测算法的研究[J].计算机工程与设计, 1998, **19**(2):35 ~ 37.]
- 4 Charles K Chui. An Introduction to Wavelets [M]. New York: Academic Press, 1992.
- 5 Yang Fu-sheng. Engineering Analysis and Application of Wavelet Transform[M]. Beijing: Science Press, 2001:151 ~ 153. [杨福生.小波变换的工程分析与应用[M].北京:科学出版社, 2001:151 ~ 153.]
- 6 Cai Zhi-yong. The study on the Arc Welding Seam Recognition Based on Computer Vision Implemented by DSP[D]. Nanchang: Nanchang University, 2004:57 ~ 89. [蔡志勇.基于计算机视觉的焊缝识别及其 DSP 实现[D].南昌:南昌大学, 2004:57 ~ 89.]