

基于自动阈值的窄间隙端接焊缝识别技术

雷正龙*, 沈健雄, 黎炳蔚, 周恒, 陈彦宾**

哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 特征点提取是焊缝视觉检测与定位的关键技术,特别是针对实际生产中间隙较小,尤其是超窄间隙的焊缝位置,现阶段的处理算法往往无法保证提取精度,误差大;对于一些间隙极小的细节位置甚至会忽略。本文针对端接接头提出一种基于自动阈值处理的自适应中值滤波算法和特征点提取算法对激光扫描图像进行处理的焊缝识别技术;在传统的中值滤波法的基础上,通过计算局部数据点的均值和方差确定有效阈值范围,在剔除噪声点的同时很好地保护了焊缝图像窄间隙细节特征;提出一种“细节放大”的特征点提取算法,将图像细节进行放大,增大窄间隙特征点与周围数据点的差异,显著降低提取难度;利用特征点时域分析,进一步将误差减小到原来的 $1/\sqrt{5}$ 。结果表明,本文方法能准确识别 0.1~0.5 mm 之间的窄间隙焊缝,具有提取精度高、误差小(<0.08 mm)、抗干扰能力强等优点,对于实现较小间隙焊缝的自动化焊接具有重要意义。

关键词 机器视觉; 窄间隙; 自动阈值; 特征点检测; 端接焊缝

中图分类号 TG409

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0815011

Recognition of Narrow-Gap Edge Welding Seam Based on Autonomous Threshold Value

Lei Zhenglong*, Shen Jianxiong, Li Bingwei, Zhou Heng, Chen Yanbing**

State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract Feature point extraction is the key technology for visual detection and location of weld seam, especially for micro gap in commercial production. Most of the current methods have considerable errors and cannot guarantee the highly-required extracting precision, even fail to recognize the position of micro gaps. Based on autonomous threshold value, the improved median filtering algorithm and feature points extraction algorithm are proposed to deal with the scanning image. Firstly, on the basis of traditional median filtering, the range of threshold value is set by calculating regional mean value and variance, this method is good at protecting the image detail of narrow gap as well as removing noise points. Then, a new method named magnifying details by threshold value is proposed. This method enlarges the gap between feature points of micro gap and nearby data, which enhances seam image details and makes the process of extraction easier. Finally, the error is reduced to $1/\sqrt{5}$ of that before utilizing time-domain analysis. Experimental results show that this method meets the requirement of high precision, which can greatly recognize the weld seam varying from 0.1 mm to 0.5 mm with an error less than 0.08 mm. It also has the advantages of good adaptability, strong anti-interference ability along with great practical significance in the field of automatic welding of narrow gap.

Key words machine vision; narrow gap; autonomous threshold; feature points extracting; edge welding seam

OCIS codes 150.3040; 100.3008; 330.1880; 150.1135

1 引 言

激光焊接广泛应用于航空航天制造、汽车制造、民用等多个领域^[1-2]。结合机器人的自动化激光焊

接已经成为焊接自动化的研究热点。与传统的焊接方法相比,激光焊接的高能量密度需要更严格的装配质量^[3]。就激光焊接本身特性而言,激光聚焦光斑直径大约为 0.3 mm。为了避免焊缝中心线产生

收稿日期: 2018-03-22; 修回日期: 2018-05-24; 录用日期: 2018-05-28

* E-mail: leizhenglong@hit.edu.cn; ** E-mail: chenyb@hit.edu.cn

不对称的热源,激光聚焦中心与焊缝中心之间的偏移量应小于 0.1 mm,否则容易导致焊接质量下降,甚至失败。在工业生产制造过程中,端接接头多用于 2 mm 厚的高强合金箱体密封件的连接,其连接间隙往往小于 0.5 mm。因此,激光焊接端接接头对焊缝位置和焊缝宽度的提取精度提出了更高要求。

焊接自动化过程中的视觉传感可以分为主动传感和被动传感^[4]。Xu 等^[5]采用被动视觉传感器,利用弧光或辅助光源捕捉图像,通过改进的边缘检测算法,获得 0.3 mm 以内的焊缝位置精度。Chen 等^[6]提出了一个视觉传感器系统,该系统由 CCD 摄像机和一个白色 LED 光源组成,主要用于检测宽度小于 0.2 mm 的窄缝。但是,焊接过程中焊接飞溅、等离子体等带来的噪声对被动视觉传感的影响很大,往往不易得到高质量的图像^[7]。

另外,高向东等^[8]设计了一种利用磁光传感器检测出对接焊缝的方法,精度能达到 0.1 mm 以下,但这种方法仅适用于磁性材料。Shao 等^[9]设计了一种新型的视觉传感器,实现了 0.1 mm 以下窄间隙焊缝的识别,这种新的视觉传感器目前还停留在实验室阶段,尚未在工业领域大量应用。最近,Wang 等^[10]开发了一套采用多个光学放大器探测窄间隙焊缝的焊缝测量系统,其焊缝宽度和焊缝位置的测量精度分别为 6 μm 和 8 μm ,但是镜头的视野范围仅有 1.3 mm²,使其应用范围受限。以上所介绍的视觉传感方法虽然能精确地识别焊缝间隙,但是由于其设备的复杂性或较差的实时性难以满足自动化焊接过程的工业化需求。

要实现自动化焊接生产,不仅需要系统能精确地识别焊缝间隙,而且还应能实时根据扫描结果做出相应调整,因此对图像采集、处理和特征提取的速度要求较高。Qu 等^[11]采用基于 symlet 小波函数的小波分析算法提取焊后表面窄间隙缺陷,对于 0.2 mm 左右的间隙识别误差较小。Chen 等^[6]采用了轮廓提取、霍夫变换和最小二乘拟合等一系列算法,提取焊缝位置。上述图像处理算法比较复杂,且在实际应用时缺乏足够的稳定性,难以稳定快速地应用于常用的工业图像处理软件中。通过分析扫描式视觉传感器采集图像的识别难点,本文从图像滤波和特征点提取算法入手,在传统方法的基础上引入阈值,突出焊缝窄间隙处的图像特征,并结合相邻多次扫描对识别结果进行时域分析,从理论上减小焊缝窄间隙特征的提取误差。

2 实验设计

2.1 扫描式激光视觉传感器

现阶段工业上广泛应用于焊接自动化的主动式视觉传感器主要有两大类:结构光式和扫描式。结构光式传感器由于成像特征较好,被广泛应用于焊缝跟踪领域^[12]。相关研究表明,结构光往往无法准确识别较窄的焊缝间隙,尤其是那些小于 0.1 mm 的缝隙,特别容易忽略^[6,8],其原因在于结构光式视觉传感器测量的视场深度较浅,造成表面与底部光强不一致,从而很容易导致小缝隙的漏检。此外,结构光对于高反射性材料容易发生二次反射,增大后续图像处理的难度。扫描式视觉传感器的水平方向分辨率独立于垂直方向的分辨率,视场宽度大,且点扫描激光功率高,可获得良好的图像质量。由于点光源比线光源更容易达到较高的亮度,因此,扫描式激光传感器具有更高的信噪比和更强的抗弧光干扰能力^[13]。

本文采用辅助光源为点状激光的激光扫描视觉传感器。系统工作时,内部的点状激光横向扫描焊接接头,经线阵 CCD 转换得到一组 512 pixel 点阵列。计算机接收数据并实时显示焊缝截面轮廓,再经图像滤波处理和特征点位置提取后得到当前图像焊缝中心线,与原先焊缝中心线相比较得到的偏差量作为反馈输出信号,系统响应并实时调整焊枪姿态。实验所用接头试样为端接接头,系统扫描过程如图 1 所示。

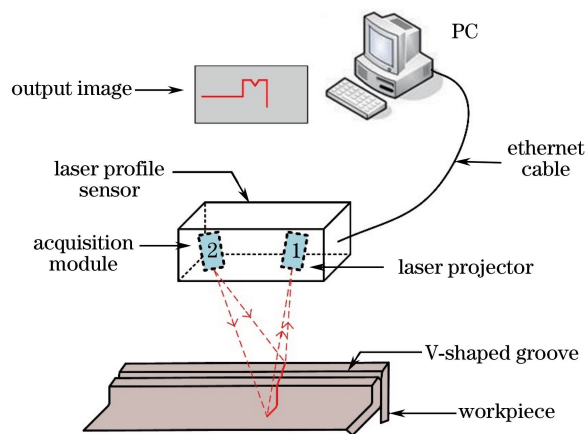


图 1 激光扫描视觉传感系统扫描过程

Fig. 1 Laser scanning process of vision sensor system

2.2 任务分析

传统的光学三角测量的焊缝测量原理如图 2 所示。激光条纹的形状、位置将在焊接面的坡口或缝

隙中被改变。通过图像处理,可根据焊缝图像的相应变化获得焊缝宽度和焊缝中心位置。由图 2 可知,激光条纹被 V 型坡口对接接头或含错边的对接接头严重扭曲,从而降低了焊缝特征提取的难度,此时对焊缝宽度和焊缝位置的测量非常精确和稳定。

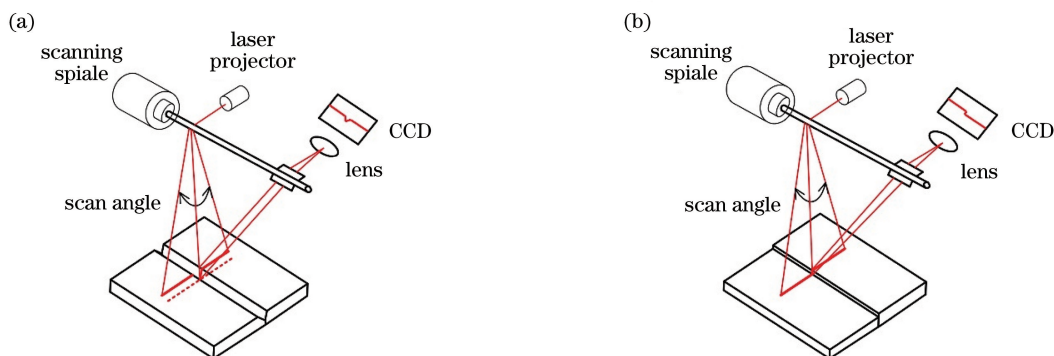


图 2 扫描光的光学三角法测量焊缝。(a) V 型坡口角接头;(b)含错边的对接接头

Fig. 2 Seam measurement by optical triangulation with scanning light.

(a) V-shaped groove butt joint; (b) butt joint with misalignment

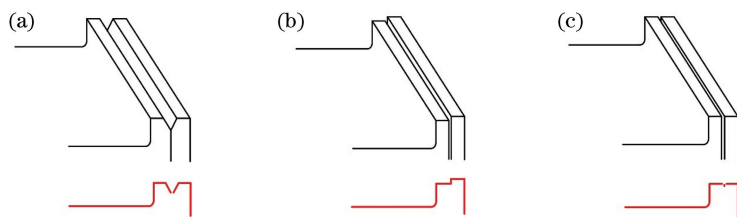


图 3 不同焊缝下扫描光变形量的比较。(a) V 型坡口;(b)含有错边;(c)缝隙宽度小于 0.5 mm 且没有错边偏差

Fig. 3 Comparison of deformation amount under different weld joints. (a) V-shaped groove; (b) with misalignment;

(c) small gap less than 0.5 mm and without misalignment

端接接头是指两焊件重叠或两焊接表面之间夹角不大于 30° 构成的端部接头。在工业生产制造过程端接接头多用于 2 mm 厚的高强合金箱体密封件的连接,其连接间隙往往小于 0.5 mm,其扫描图像与图 3 (c)类似。图 4 为端接接头的原始焊缝扫描

然而,由图 3 可知,当连接接头的缝隙宽度小于 0.5 mm 且没有错边偏差时,激光条纹的变形太小,无法检测到。在此之前,对于这种类型的焊缝来说,通过激光条纹精确、稳定地获得焊缝的宽度和位置非常困难。

图像及间隙处的局部放大图,可以看出,图像存在明显噪声且间隙特征不明显,这给间隙的准确识别造成了很大困难。因此,本文提出的窄间隙测量方法应该能精确、稳定地测量此类焊缝宽度和焊缝中心位置。

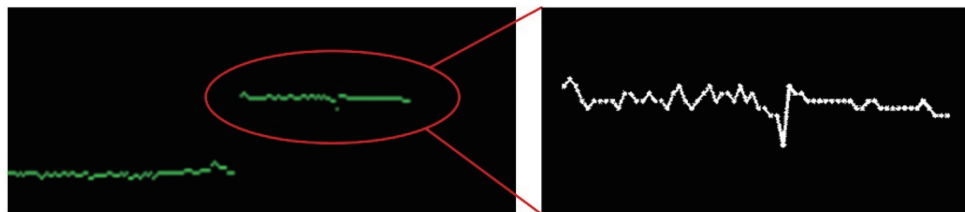


图 4 原始焊缝扫描图像及局部放大图

Fig. 4 Original weld seam image captured by vision sensor and its local large map

3 图像处理

根据激光扫描得到的焊缝图像,准确识别焊缝宽度和焊缝位置是图像处理的目的是。这主要包括图

像滤波去噪处理和焊缝特征点提取。其中,图像滤波去噪处理是在尽可能保留图像细节的情况下对图像进行去除噪声和平滑处理,以减小焊接过程中飞溅、等离子体等带来的噪声干扰;在此基础上,利用

相应的算法提取焊缝间隙两端特征点从而得到焊缝宽度和焊缝位置。

3.1 图像滤波去噪处理

传统的中值滤波法的整体滤波效果很好,数据波动范围较小,但是没有很好地保护图像细节,将某些重要的真实像素点也进行了中值替换,破坏了真实数据特征,增大了识别难度,尤其对窄间隙焊缝特征点的提取非常不利。

提出了一种基于自动阈值的自适应中值滤波法:通过设定阈值的方式,建立动态变化的图像细节保护区间,以有效减小真实像素点的丢失,保护条纹细节。合适的阈值能够准确区分真实像素和噪声^[14],而标准差 σ 反映的是一组数据信号流偏离真实值的平均程度,因此可用 σ 作为评定噪声的标准。

一组测量数据的标准差定义为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - u)^2}{n^2}}, \quad (1)$$

式中 u 为平均值, y_i 为第 i 个像素点对应的纵坐标, n 为数据点个数。

将平均值和标准差作为区分真实像素和噪声的阈值,正负信号的分离阈值分别为

$$Y_{\max} = u + k_1 \sigma, \quad (2)$$

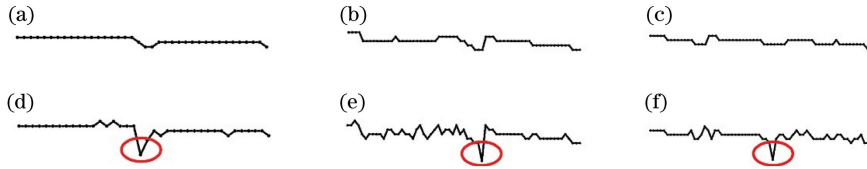


图 5 不同中值滤波法处理效果比较。(a)~(c)传统中值滤波法处理效果;(d)~(f)为改进中值滤波法处理效果

Fig. 5 Comparison of results using different median filterings. (a)-(c) Results of traditional median filtering; (d)-(f) results of improved median filtering

3.2 图像窄间隙特征点提取

3.2.1 斜率分析法

目前研究大多采用分析斜率的方法提取焊缝特征点。如图 6 所示,V形坡口特征点为 a 、 b 、 c 三点,焊缝最低点即为 c 点,将 c 点与 O 点相连作直线 L_1 ,过 c 点和 O 点之间的其余点作直线 L_1 的平行线,比较这些平行线的截距 Y_i ,截距最大值对应点即为点 a 。同理可求出图像右半部分的特征点 b 。

斜率分析法算法简单、计算量小,但在用于提取窄间隙特征点时由于间隙处往往特征点过于集中,计算所得截距变化较小,算法定位误差较大。

3.2.2 “细节放大”思想提取焊缝特征点

由于窄间隙处特征点过于集中,且特征不明显

$$Y_{\min} = u - k_1 \sigma, \quad (3)$$

式中 Y_{\max} 和 Y_{\min} 分别为判断正负信号的阈值。当像素点纵坐标 $y > Y_{\max}$ 或 $y < Y_{\min}$ 时,确定该点为噪声点,用中值替换; k_1 为调节系数,平衡去噪能力和细节保护能力,应根据实际情况选择,若太大则不能识别有效特征点,若太小则滤波效果较差。算法的具体实施步骤如下:

1) 选择合适的固定区间,包含 $2m + 1$ 个点($m = 1, 2, \dots$),求出局部标准差 σ 、均值 u 及中值

$$M = \text{Median}(y_{i-m}, \dots, y_{i-2}, y_{i-1}, y_i, y_{i+1}, y_{i+2}, \dots, y_{i+m}). \quad (4)$$

2) 根据实际情况选择 k_1 ,利用(2)式和(3)式分别计算区间内正负信号的分离阈值 Y_{\max} 和 Y_{\min} 。

3) 判断该点是否为噪声点。如果 $y > Y_{\max}$ 或 $y < Y_{\min}$ 时,则确定该点为噪声点,将中值作为输出,即 $y_i = M$;否则该点不是噪声点,输出不变。

4) 重复步骤 3),直至 $i = 512$ 时,算法结束。

通过图 5 对比发现,传统的中值滤波法处理后,图 5(a)~(c)中窄间隙特征点位置几乎消失,对接下来的特征点提取十分不利。而利用基于自动阈值的的中值滤波法可以很好地保护图像细节信息,如图 5(d)~(f)所示,图像窄间隙特征点得到了很好的保留。

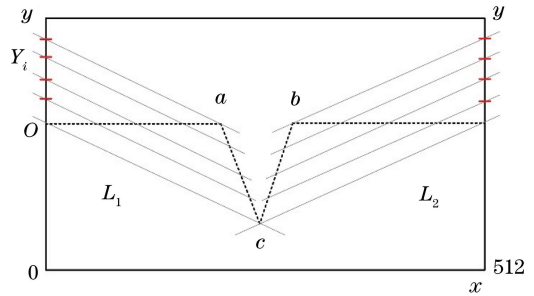


图 6 斜率分析法提取 V 型坡口示意图

Fig. 6 V-shaped groove diagram extracted by slope analysis (图 3),斜率分析法提取误差往往较大,再加上中值滤波法在去除噪声的同时减弱了图像细节,使焊缝窄间隙特征点更加不明显。因此,在提取窄间隙特征点前

将图像细节进行相应还原乃至放大,可以克服斜率分析法在提取窄间隙时的缺点。所谓“细节放大”,就是通过设定阈值,将窄间隙焊缝中心附近的较小波动数据进行放大。首先求出包含焊缝特征点的局部区间的均值 u 和均方差 σ ,设定阈值范围:

$$y_{\max} = u + k_2\sigma, \quad (5)$$

$$y_{\min} = u - k_2\sigma, \quad (6)$$

式中 k_2 为阈值调节系数,此时滤波已经结束, k_2 应取较小值,不宜过大。当纵坐标超出阈值范围后,则放大为

$$y_i = \begin{cases} y_i + M(y_i - y_{\max}), & y_i > y_{\max} \\ y_i + M(y_i - y_{\min}), & y_i < y_{\min} \end{cases}, \quad (7)$$

式中 M 为放大系数。

图 7 为基于阈值判断的“细节放大”方法的示意

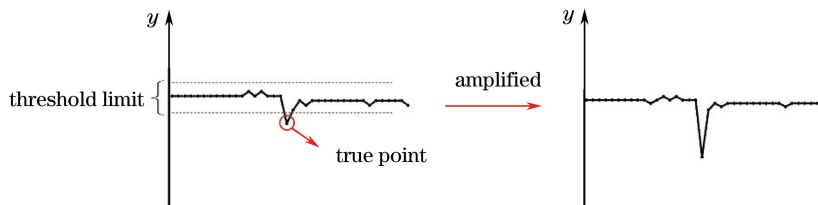


图 7 基于阈值的“细节放大”方法原理图

Fig. 7 Principle diagram of magnifying details method based on threshold

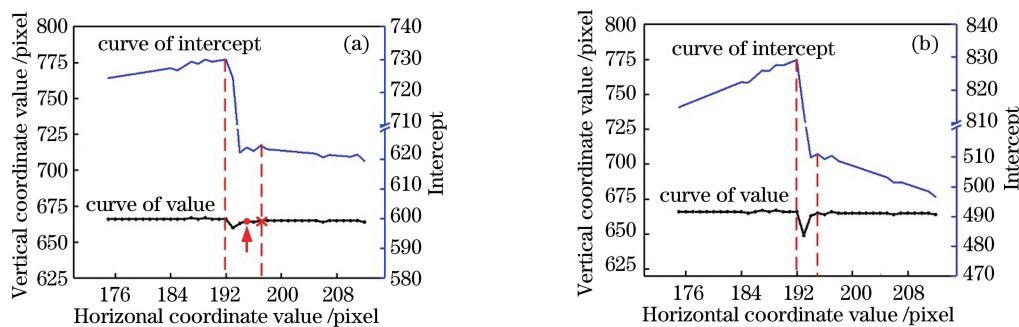


图 8 (a) 未经过“细节放大”算法和(b)经过“细节放大”算法计算截距变化曲线

Fig. 8 Curves of intercept (a) without magnifying details and (b) with magnifying details

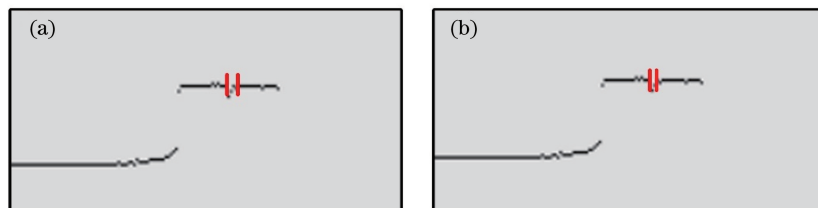


图 9 (a) 未经过“细节放大”算法和(b)经过“细节放大”算法窄间隙特征点提取结果

Fig. 9 Extracted results of narrow-gap feature points (a) without magnifying details and (b) with magnifying details

3.2.3 特征点时域分析与误差抑制

为进一步抑制噪声、提高特征点精度,对短时间内多次扫描得到的特征点进行时域平均,即焊前在

图,对超出阈值范围的真实细节点进行放大。然后利用斜率分析法找到焊缝间隙位置的特征像素点(图 8),根据扫描值曲线运用斜率分析法计算得到图中截距变化曲线。由计算原理可知,焊缝间隙左右端点处分别对应图中截距曲线两侧的最大值。对比可以发现,图 8(a)中未经过“细节放大”处理计算得到的截距曲线纵向波动小,尤其是最值附近数据变化极小,导致间隙位置难以确定,使得间隙右侧端点处出现了误判;而图 8(b)中经过“细节放大”处理后计算得到的截距曲线更陡,数据波动大,有利于找到截距最值,从而准确定位焊缝间隙位置。图 9(a)和(b)分别为未经过和经过“细节放大”算法处理的窄间隙特征点提取结果。可以看出,“细节放大”算法有利于准确确定焊缝窄间隙宽度。

该点附近邻域内综合若干次扫描图像,对提取得到的多个焊缝特征点进行时域分析,经过数据平均得到该位置的精确定位,得

$$x_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{x}_{a,i}, \quad (8)$$

式中 $\hat{x}_{a,i}$ 为第 i 次扫描所得特征点横坐标值, x_a 为真实特征点的横坐标位置。由概率论^[15]得知, $\sigma_m^2 = \sigma^2/n$, 因此噪声的方差降低到原来的 $1/n$, 噪声的标准偏差相应地降低到原来的 $1/\sqrt{n}$ 。为保证计算机响应速度和该点的时效性, 通常对较短扫描时间内的 5 次提取结果进行平均, 即取 $n=5$, 此时噪声下降至原来的 $1/\sqrt{5}$ 。

4 实 验

将扫描式视觉传感器安装在激光焊接的焊枪运动前方。表 1 为焊接参数和焊接材料的选择, 并给

出了相应的尺寸。为了验证焊缝宽度的测量精度, 实验过程中对焊缝宽度进行了人工调整。首先, 用游标卡尺分别测量钢板装夹前后的板厚, 其差值即为焊缝窄间隙宽度。然后, 利用扫描式视觉传感器扫描焊缝, 将得到的焊缝图像按照图 10 所示的图像处理流程进行处理: 1) 对原始扫描图像进行局部放大, 发现焊缝窄间隙位置附近含有大量噪声点; 2) 设定阈值范围, 利用改进的自适应中值滤波法进行滤波处理; 3) 获得滤波处理后的图像; 4) 设定阈值范围, 利用“细节放大”算法处理将焊缝窄间隙处的特征点差异化; 5) 获得“细节放大”处理后的图像; 6) 利用斜率分析法求得截距最大值, 得到相应焊缝窄间隙特征点 a 和 b , 并计算实际焊缝窄间隙宽度。

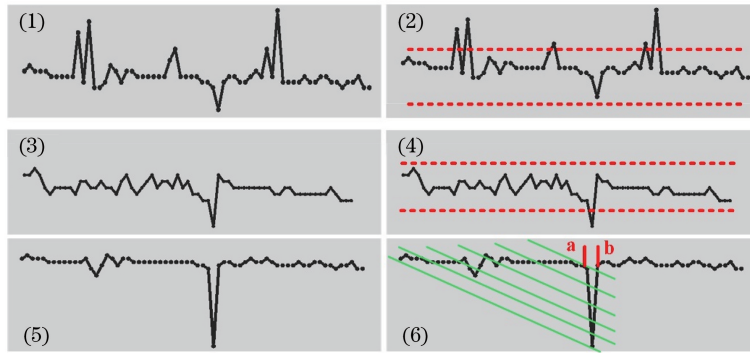


图 10 图像处理过程

Fig. 10 Image process and feature extraction

表 1 焊接过程参数

Table 1 Configuration of weldment

Parameter	Setting
Welding type	Laser welding
Type of joint	Edge joint
Plate thickness /mm	2 or 3
Seam width /mm	0.1-0.5

为了验证算法精度及其抗干扰能力, 进行了两组共 8 次实验, 实验材料分别为一对 2 mm 厚和一对 3 mm 厚的钢板, 每次实验结果为 5 次扫描的平均值。如图 11 所示, 柱状图显示为实际间隙宽度和算法提取的间隙宽度, 折线图为间隙宽度误差曲线。

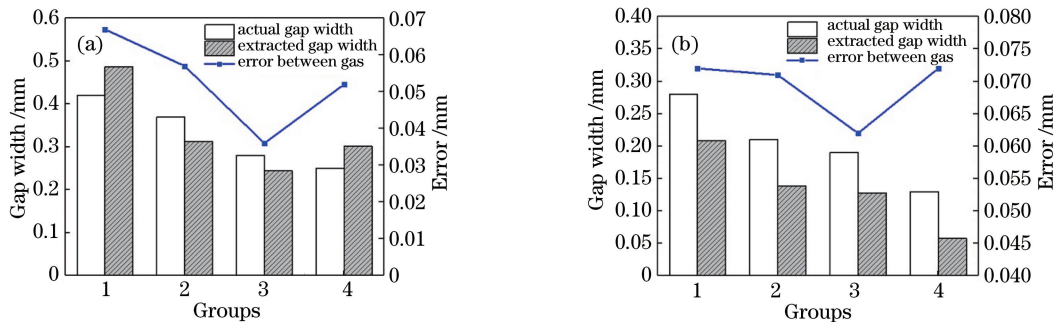


图 11 不同板厚条件下的实验结果及误差曲线。(a)板厚为 2 mm;(b)板厚为 3 mm

Fig. 11 Experimental results and error curves under different thickness conditions.

(a) Thickness is 2 mm; (b) thickness is 3 mm

5 结果与讨论

图 11 结果表明,通过对焊缝宽度的算法计算结果与实际测量结果进行比较,其最大偏差为 0.072 mm,小于 0.08 mm。通过两组不同板厚条件下的实验,进一步验证了本文算法的抗干扰性。与现阶段的处理方法进行对比^[5,6,8,11],本文算法精度较高。由于激光聚焦光斑直径大约为 0.3 mm,为了避免焊缝中心线产生不对称的热源,激光聚焦中心与焊缝中心之间的偏移量应小于 0.1 mm,因此本实验精度能满足激光焊接薄板的要求。0.1~0.5 mm 之间的焊缝间隙宽度可以准确测量。由于焊缝中心位置取自焊缝宽度中心点,因此焊缝中心的识别精度与焊缝宽度相同。另外,该算法结构简单,仅仅在传统方法的基础上做了相应改进,因而不会对系统的实时性产生影响,且能够方便地在工业上进行应用。经测量,该算法处理时间为 25 ms,满足焊缝跟踪的实时性要求。该算法涉及的视觉传感系统由激光扫描传感器、数据采集部分和 PC 端算法处理部分组成。与改造传感器设备^[8-10]相比,仅优化算法,实现更容易。

本研究采用的扫描式传感器精度有限,限制了该算法测量精度的提高,在实际应用时提高传感器分辨率,采用此图像处理算法可以进一步减小视觉测量误差。

另外,利用本文方法进行自动化激光焊接跟踪实验,得到的焊缝微观形貌如图 12 所示。图 12(a)为采用本算法得到的焊缝微观图像,焊缝基本对称分布在板的两侧,强度高,满足自动化激光焊接的要求;而图 12(b)为采用传统的均值滤波法得到的图像,焊缝偏离一侧,识别误差大,大大降低了结合强度。

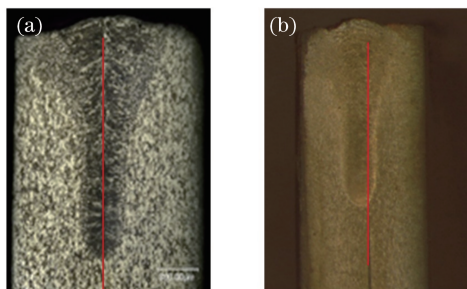


图 12 端接焊缝微观形貌。

(a) 焊缝对称分布;(b) 焊缝偏离中心

Fig. 12 Microtopography of weld seam.

(a) Symmetric distribution; (b) off center

6 结 论

基于传统的均值滤波法,提出了一种基于自动阈值的改进均值滤波法,只对那些超出设定阈值范围的像素点进行均值替换。与传统均值滤波法的滤波效果进行对比,发现该方法在一定程度上保护了那些真实像素点,焊缝窄间隙特征点得以保留,为准确提取特征点提供了必要条件。

通过分析现有的斜率分析法在提取窄间隙特征点过程中的不足,提出了一种“细节放大”的特征点提取方法,通过设定阈值将焊缝窄间隙特征点与周围点的差异放大,增大了截距曲线的变化幅度,减小了窄间隙特征点误判的可能性,大大降低了特征点提取的难度。然后利用时域分析,通过计算同一焊缝窄间隙位置相邻 5 次扫描所得特征点的平均值,进一步将误差减小到原来的 $1/\sqrt{5}$ 。

实验后将焊缝宽度的算法计算结果与实际测量结果进行比较,得到其最大偏差为 0.072 mm,小于 0.08 mm,满足激光焊接薄板的要求。焊缝窄间隙宽度在 0.1~0.5 mm 之间可以准确测量。由于焊缝中心位置取自焊缝宽度中心点,因此焊缝中心的定位精度与焊缝窄间隙宽度测量精度相同。

利用本方法进行了自动化激光焊接跟踪实验,结果表明,焊缝基本对称分布在板的两侧,强度高,满足自动化激光焊接的要求。

参 考 文 献

- [1] Chen Y B. Modern laser welding technology [M]. Beijing: Science Press, 2005: 1-4.
陈彦宾. 现代激光焊接技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 1-4.
- [2] You D Y, Gao X D. Studies and prospect of laser welding technology [J]. Welding Technology, 2008, 37(4): 5-9.
游德勇, 高向东. 激光焊接技术的研究现状与展望 [J]. 焊接技术, 2008, 37(4): 5-9.
- [3] Xu E J, Gao X D, Xiao Z L, et al. Sensing methods of seam tracking in laser welding process [J]. Electric Welding Machine, 2016, 46(1): 28-35.
许二娟, 高向东, 萧振林, 等. 激光焊接过程焊缝跟踪传感方法 [J]. 电焊机, 2016, 46(1): 28-35.
- [4] Qi X B. State-of-arts of visual sensing technology to monitor laser welding process [J]. Transactions of the China Welding Instruction, 2008, (29): 108-112, 118.
齐秀滨. 激光焊接过程视觉传感技术的发展现状

- [J]. 焊接学报, 2008, (29): 108-112.
- [5] Xu Y, Fang G, Chen S, *et al.* Real-time image processing for vision-based weld seam tracking in robotic GMAW [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73: 1413-1425.
- [6] Chen H, Liu K, Xing G, *et al.* A robust visual servo control system for narrow seam double head welding robot [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71: 1849-1860.
- [7] Chen Y B, Li L Q, Chen F D, *et al.* Application and prospect of image processing in welding [J]. Materials Science & Technology, 2003, 11(1): 106-112.
陈彦宾, 李俐群, 陈凤东, 等. 图像处理在自动焊接中的应用和展望 [J]. 材料科学与工艺, 2003, 11(1): 106-112.
- [8] Gao X, Chen Y. Detection of micro gap weld using magneto-optical imaging during laser welding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73: 23-33.
- [9] Shao W J, Huang Y, Zhang Y. A novel weld seam detection method for space weld seam of narrow butt joint in laser welding [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 99: 39-51.
- [10] Wang P J, Shao W J, Gong S H, *et al.* High-precision measurement of weld seam based on narrow depth of field lens in laser welding [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2016, 21(4): 267-274.
- [11] Qu Z G, Chong A Y B, Chacon J L F, *et al.* Study on the laser-based weld surface flaw identification system employing wavelet analysis methodology [J]. Research in Nondestructive Evaluation, 2016, 27(3): 137-154.
- [12] You D Y, Gao X D, Katayama S. Review of laser welding monitoring [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2014, 19(3): 181-201.
- [13] Zhao J, Lin S B. Introduction to laser sensors for automated welding [J]. Electric Welding Machine, 2010, 40(11): 1-5.
赵菁, 林三宝. 用于焊接自动化过程的激光视觉传感器 [J]. 电焊机, 2010, 40(11): 1-5.
- [14] Wang H, Wang X H. An improved adaptive median filter based on noises detection [J]. Journal of China University of Metrology, 2011, 22(4): 382-385.
王欢, 王修晖. 基于阈值判断的自适应中值滤波算法 [J]. 中国计量学院学报, 2011, 22(4): 382-385.
- [15] Papoulis A, Pillai S U. Probability, random variables, and stochastic processes [M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, Inc., 1991.