

## 激光与光电子学进展

## 基于线阵相机的多特征激光焊接焊缝轨迹识别方法

王瑞琦<sup>1</sup>, 赵艳<sup>1</sup>, 吴世凯<sup>1,2\*</sup>, 陆洪涛<sup>3</sup><sup>1</sup>北京工业大学材料与制造学部, 北京 100124;<sup>2</sup>齐鲁工业大学(山东省科学院)激光研究所, 山东 济南 250353;<sup>3</sup>沧州宏涛智能设备有限公司, 河北 沧州 061600

**摘要** 焊缝跟踪是实现自动化焊接的关键, 针对激光焊接下的近无间隙焊缝轨迹, 提出了基于线阵相机和特征识别算法的焊缝追踪方法。通过线阵相机获取工件表面图像, 使用均值滤波对图像进行降噪处理。通过分析图像的灰度值、图像灰度值变化、图像的灰度值梯度、焊缝区域宽度识别焊缝轨迹, 实现了无间隙焊缝的识别和跟踪。通过焊接试验测试得到基于线阵相机的焊缝识别方法误差小于 0.05 mm。通过对不同间隙的焊缝进行焊缝追踪试验证明了该方法对于间隙小于 0.3 mm 的焊缝具有良好的识别效果。

**关键词** 激光技术; 激光焊接; 无间隙焊缝; 线阵相机; 焊缝识别

中图分类号 TG456.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220803

## Multifeature Recognition Methods of Laser Welding Based on Line Array Camera

Wang Ruiqi<sup>1</sup>, Zhao Yan<sup>1</sup>, Wu Shikai<sup>1,2\*</sup>, Lu Hongtao<sup>3</sup><sup>1</sup>Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;<sup>2</sup>Laser Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250353, Shandong, China;<sup>3</sup>Cangzhou Houtall Intelligent Equipment Co., Ltd., Cangzhou 061600, Hebei, China

**Abstract** Weld seam tracking is the key technology for achieving automated welding. In this paper, a seam tracking method based on a line array camera and a feature recognition algorithm is constructed to provide gapless seam recognition under laser welding. The workpiece surface image is captured by a line array camera and denoised by mean filtering. By analyzing the gray value of the image, the change in the gray value of the image, the gray gradient of the image, and the width of the weld area, the weld track is identified, and the identification and tracking of the gapless weld are realized. Welding experiments are conducted, and the results show that the error of the weld identification method based on a line array camera is less than 0.05 mm. Weld seam tracking experiments on welds with different a gap are conducted, and the results show that the proposed method has a good recognition effect for welds with a gap less than 0.3 mm.

**Key words** laser technique; laser welding; gapless weld; line array camera; welded identification

## 1 引言

激光焊接作为一种先进的焊接方式广泛应用于航空航天、轨道交通、汽车、船舶制造等领域, 相较于传统的焊接技术, 激光焊接对于焊接接头的装配精度、焊缝跟踪精度要求较高, 在进行激光焊接时, 聚焦后的光斑直径一般不超过 0.3 mm<sup>[1]</sup>, 为避免焊缝两边未熔合或

产生孔洞, 需要保证激光中心与焊缝轨迹偏差小于 0.1 mm, 否则会导致焊接质量下降, 因此准确识别焊缝位置成为保证焊接精度的关键。

视觉传感器因其具有非接触性、获取信息丰富等优点, 成为了激光焊接焊缝识别与追踪的主要手段<sup>[2-3]</sup>。视觉传感器分为主动视觉和被动视觉两种: 主动视觉的方式依赖线激光条纹照射到工件表面发生形

收稿日期: 2022-02-23; 修回日期: 2022-03-07; 录用日期: 2022-03-14; 网络首发日期: 2022-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(52175370)、聊城市重点研发计划(2021GGJBG002)、齐鲁工业大学(山东省科学院)-威海市产学研协同创新基金(2020GC06)

通信作者: \*wushikai@bjut.edu.cn

变,并利用计算机将激光条纹的形变转换成工件表面高度信息,进而识别焊缝位置<sup>[4]</sup>,目前实际应用中也主要是这一类方法。但激光焊接薄板时,为保证焊接质量,一般要求其焊缝间隙尽可能小甚至间隙为零,线激光条纹照射到工件表面不会发生明显形变,无法追踪焊缝轨迹<sup>[5-6]</sup>。而被动视觉的方式不依赖工件表面的高度变化,因此可以应用于激光焊接下的焊缝识别<sup>[7]</sup>。

Fan等<sup>[8]</sup>提出了一种追踪窄间隙对接焊缝的方法,该方法利用线激光和LED照明,分别计算了焊缝中心线和结构光条纹的拟合方程,通过联立二者得到准确的焊缝位置。该方法还利用模糊控制方法跟踪焊缝,精度达到了 $\pm 0.30$  mm。Ma等<sup>[9]</sup>提出了一种基于CCD视觉传感器的实时接缝跟踪系统,计算机可以在熔池前方捕获清晰的焊缝图像。通过图像恢复、中值滤波、边缘搜索、伪边缘去除、最小二乘法拟合等过程实现焊缝识别,并针对各种偏移量设计了模糊比例-积分-微分(PID)控制器以保证焊枪平稳运动。Wang等<sup>[10]</sup>提出了一种基于窄景深透镜的窄间隙对接焊缝检测系统。该方法可以实现焊缝三维坐标测量,焊缝宽度和焊缝位置的测量精度分别为 $6\ \mu\text{m}$ 和 $8\ \mu\text{m}$ 。方灶军等<sup>[11]</sup>使用数字信号处理(DSP)智能摄像头完成了焊缝图像的采集,提出了基于图像处理的焊缝识别方法,并利用可编程逻辑控制器(PLC)完成了焊缝跟踪纠偏控制。杜健准等<sup>[12]</sup>利用核相关/卡尔曼滤波算法在强噪声的环境下识别了对接和搭接的焊缝轨迹,试验结果表明,对接和搭接焊缝的轨迹中心线识别误差分别小于 $0.137$  mm和 $0.105$  mm。杨国威等<sup>[13]</sup>设计了焊缝特征点提取的神经网络并通过引入循环矩阵循环移位样本使网络达到充分的训练。试验结果表明,焊缝特征点识别的均方根误差为 $0.207$  mm,最大误差为

$0.71$  mm。

虽然基于视觉的焊缝识别方法已经为一些焊缝识别问题提供了解决方案,但在某些方面仍存在一定提升空间,如识别精度、识别速度。本文构建了一种基于线阵相机和特征识别算法的焊缝追踪方法,利用机床带动线阵相机获取长焊缝表面图像,使用均值滤波对图像进行预处理,之后通过分析图像的灰度值、图像的灰度值变化、图像的对比度、焊缝区域宽度识别焊缝轨迹并反馈给运动机构,实现了焊缝的追踪,通过对比不同识别参数下的识别准确率和程序运行时间,找到了最优的参数范围。焊缝追踪试验结果表明,本文提出的焊缝识别方法对于间隙小于 $0.3$  mm的焊缝具有良好的识别效果,在扫描速度小于 $300$  mm/s时具有较好的识别效果,该方法对普通钢板也具有较好的适用性。焊接试验结果表明,本文提出的焊缝识别方法误差小于 $0.05$  mm,具有精度高、可靠性强的优点。

## 2 试验装置及方法

焊缝检测装置如图1所示。装置由计算机、机床、机床控制柜、激光器和视觉采集装置组成,视觉采集装置包括线阵相机、增距环、镜头、照明光源以及保护镜片。相机使用海康威视公司的线扫工业相机MV-CL042-90GM,相机分辨率为 $4096$  pixel、最大行频率 $29$  kHz,相机感光芯片方向为垂直焊接方向。为实现成像系统高放大率成像,在相机和下方安装 $84$  mm增距环,成像系统的放大率为 $205.9$  index/mm。镜头为安耐公司生产的 $75$  mm定焦标准c接口工业镜头,使用 $5$  mm的M42转c口转接环与增距环连接。在镜头下方安装有红外截止的滤光片,可以防止飞溅和激光散射光损坏相机。为保证视场亮度足够,使用高亮度

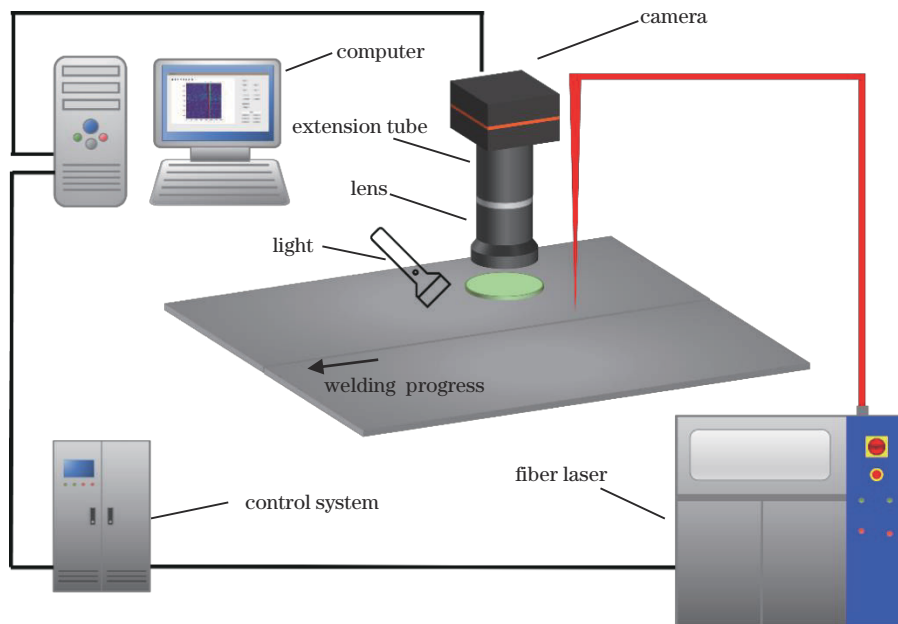


图1 焊缝追踪试验装置

Fig. 1 Welding seam tracking experimental device

LED光源照亮相机拍摄位置。

试验用镀锌板厚度为 0.8 mm, 长度为 930 mm, 钢材牌号为 DX51D+Z, 通过机械剪切对板材加工后进行焊接试验, 其表面状态如图 2 所示。焊接激光器为创鑫激光 MFSC-4000 光纤激光器, 波长范围为 1070~1090 nm, 纤芯直径为 200  $\mu\text{m}$ , 激光加工头为万顺兴

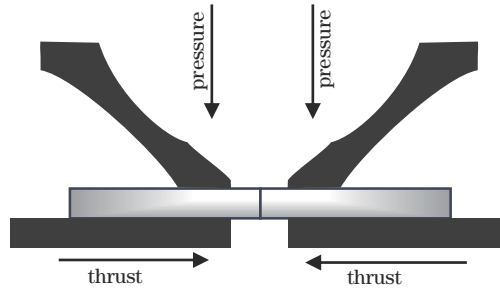


图 2 焊缝表面状态和工装夹具

Fig. 2 Weld surface condition and welding fixtures

### 3 试验结果及讨论

#### 3.1 焊缝追踪算法

试验中相机单次曝光可以拍摄分辨率为 4096 pixel  $\times$  1 pixel 的图像, 拍摄的图像灰度值如图 3 中的曲线所示, 在单次曝光的图像中焊缝位置的像素点特征不明显, 在相机运动的同时进行多次曝光, 就可以对工件的感兴趣区域 (ROI) 成像, 成像结果如图 3 下方照片所示。从图 3 可以看出, 在焊缝位置的像素点灰度值较小, 呈现先下降后升高的趋势且在焊接方向上灰度值变化不大, 根据这些特征就可以区分焊缝区域的像素点和其他位置的像素点。

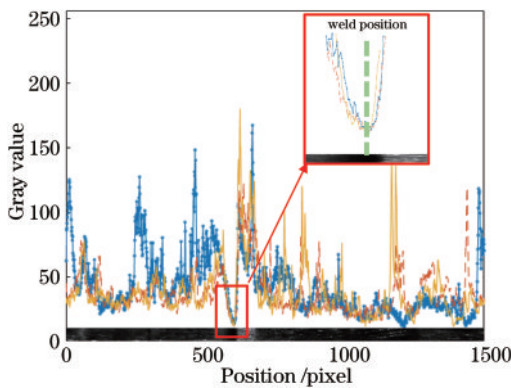


图 3 ROI 图像和灰度分布

Fig. 3 ROI image and grayscale distribution

在相机拍摄的图像中, 大部分为非焊缝区域的像素点, 这些像素点不仅不会影响对焊缝区域像素点的特征分析, 还会加大计算机的计算开销。在本文所使用的焊接系统中, 每次试验焊缝位置不会有太大的偏差, 因此, 可以根据预先确定的激光中心在

ND-60, 准直镜焦距为 200 mm, 聚焦镜焦距为 250 mm, 运动装置使用工业机床。焊接试验采用平板对接焊接方式, 焊接功率为 2400 W, 光斑摆幅为 0.9 mm, 采用图 2 所示的工装夹具将对接试板对齐, 保证无间隙和错边。激光入射方向垂直于焊接试板。

图像中的位置来确定 ROI 区域以提高计算机的处理效率。

由于镀锌板表面纹理结构复杂且有一些划痕, 因此拍摄的图像中会含有一定的噪声。这些噪声将极大地影响识别算法的准确性。本文对相机拍摄的图像按行使用均值滤波并按列求平均值, 滤波后的图像数据  $L_k$  计算方法为

$$L_k = \frac{1}{32M} \sum_{i=1}^{32} \sum_{j=k-l}^{k+l} L_{ij}, \quad (1)$$

式中:  $M = 2l + 1$  为均值滤波器尺寸;  $L_{ij}$  为滤波中心点的灰度值。结果如图 4(a) 所示, 可以看到, 图像的灰度值分布变得更为光滑且焊缝区域的特征得到了很好的保留。

本文使用特征分析的方法识别焊缝位置, 从经过降噪的数据中不难看出, 焊缝位置最明显的特征是该部分的灰度值呈现一个凹陷, 通过对比灰度值梯度找到了所有的凹陷, 并将处于凹陷内的数据点命名为种子点, 用  $S_k$  表示位置  $k$  处的数据点是否为种子点,  $S_k$  的计算方式为

$$S_k = \text{sgn}[(L_k - 40 - L_{k-1})(L_k - L_{k+1} + 40)], \quad (2)$$

式中:  $\text{sgn}()$  为符号函数。若  $S_k = -1$  则表示  $k$  处的数据点为种子点。结果如图 4(b) 所示。由于工件表面纹理结构复杂, 所以找到的种子点并不全位于焊缝区域。进一步分析焊缝区域的特征不难发现焊缝区域的灰度值较小; 焊缝区域宽度相较于工件表面纹理细节较大; 在相机运动时焊缝区域的灰度值在平行于焊枪运动方向上变化不大; 焊缝区域的灰度值明显小于周围。使连续的种子点构成若干个待定焊缝区域  $L_t (a \leq t \leq b)$ ,  $a$  和  $b$  分别为该待定焊缝区域的左右端点, 通过以上特征利用下式对待定焊缝区域进行筛选,

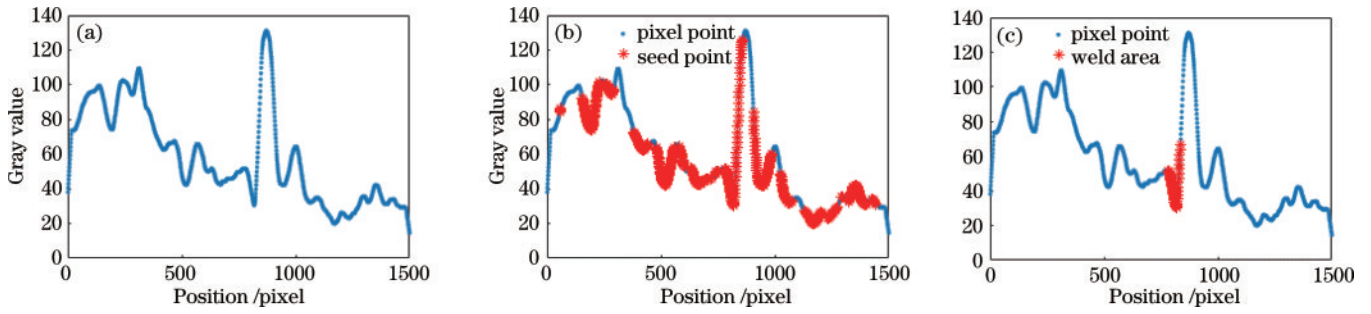


图 4 焊缝识别过程。(a)均值滤波;(b)提取种子点;(c)筛选焊缝区域

Fig. 4 Weld identification process. (a) Mean filtering; (b) extract seed points; (c) screening weld area

结果如图 4(c)所示,此时焊缝中心就是焊缝区域灰度值最小的点的位置。

$$L_t < 1.2\bar{L}, \quad (3)$$

$$b - a \geq m, \quad (4)$$

$$\max(L_{ii}) - \min(L_{ii}) \leq n, \quad (5)$$

$$\min(L_a, L_b) \geq \min(L_t) + p, \quad (6)$$

式中: $\bar{L}$ 为待定焊缝区域亮度平均值; $m$ 为设定的最小焊缝区域宽度; $L_{ii}$ 为种子点所在列的灰度值; $n$ 为在相机运动方向上灰度值差值最大值; $L_a$ 和 $L_b$ 分别为一个待定焊缝区域的左右端点; $p$ 为设定的焊缝区域最小灰度值差值。

为进一步提升算法的稳定性,通过比较相邻两次的识别结果来去除可能出现的识别错误。每次拍摄图像并执行焊缝识别算法的时间间隔约为 2 ms,在相机运动速度小于 20 m/min 时,相邻两次执行算法相机移动距离小于 1 mm。工件的拼缝基本为直线且相邻两次执行算法时相机位置较为接近,因此相邻两次执行算法得出的焊缝位置基本一致。若某次的识别结果与上一时刻的识别结果出现太大的偏差,则用前一次的识别结果代替本次的识别结果,这样即使在个别位置识别错误也不会影响后续的焊接。

本文所提出的焊缝追踪算法需要利用 4 个特征参数对待定焊缝区域进行筛选,并对多条焊缝扫描拍摄的 68218 帧图像进行了统计分析,图像灰度值、焊接方向上的灰度值变化、灰度梯度和焊缝区域宽度 4 个特征值在焊缝区域和其他待定焊缝区域的数值大小分布如图 5 所示。从图中不难看出,4 个特征值在焊缝区域和其他待定焊缝区域有明显不同,其中大多数图像焊缝区域的灰度值小于其他待定焊缝区域,焊缝区域的灰度值在焊接方向上的变化集中在 50 以下,有较多的焊缝区域的灰度梯度在 10 以上,而焊缝区域宽度在 40 以下少有分布。因此,本文所选用的这 4 个特征参数可以对焊缝区域进行有效判别,进而完成焊缝追踪。

### 3.2 焊缝识别算法参数与性能

图像降噪时所使用的滤波器尺寸会影响算法的复杂度,进而影响降噪效果以及程序运行时间,滤波器太小不足以去除图像的噪声,滤波器太大会导致图像丢

失细节以及程序运行时间增加。本文使用不同尺寸的滤波器对多块钢板进行了焊缝追踪试验,滤波器尺寸对识别效果和运行时间的影响如图 6(a)所示,当滤波器的尺寸大于 31 时,识别准确率开始下降,因此滤波器的尺寸应小于 31。

找到种子点后,需要根据阈值判断种子点是否位于焊缝区域内,阈值的选取会影响算法的准确度,而阈值选取的不同也会影响程序的复杂度,从而影响程序运行时间。因此,只有当阈值选取合适时,程序才能在较短的时间内准确地识别焊缝位置。经过测试,对识别准确度和程序运行时间影响较大的参数有焊缝区域内的最小灰度值、相机运动方向上灰度值最大最小差值以及焊缝区域的最小宽度,这三个参数对识别准确率和运行时间的影响如图 6(b)~(d)所示。测试结果表明,当最小灰度值阈值为 8,灰度值差值为 19,最小焊缝区域宽度为 22 时,程序运行时间最短且识别准确率为 100%。

### 3.3 工件状态对焊缝追踪结果的影响

在实际焊接过程中,往往受装配误差、对接面不平整等因素影响,焊缝间隙不为零。然而使用塞尺可以准确地控制焊缝间隙,进而对不同间隙的焊缝进行焊缝追踪试验。相机拍摄的照片以及焊缝追踪结果如图 7 所示,由于光线和拍摄角度的问题,照片中心黑色区域的宽度并不代表实际拼缝间隙。从图 7 可以看到:本文提出的焊缝识别方法在焊缝间隙为 0~0.2 mm 时,均有良好的准确率;在焊缝间隙为 0.3 mm 时,识别得到的焊缝位置虽然在焊缝区域内,但出现了一定程度的抖动;在焊缝间隙为 0.4 mm 时,识别得到的焊缝位置是完全错误的。较大间隙焊缝的灰度特征与较小间隙焊缝的灰度特征差异较大,在含有较大间隙焊缝的灰度图中,工件表面的纹理结构的特征更接近于无间隙焊缝的特征,因此本文方法会误将工件表面的纹理识别为焊缝,出现识别错误。但是,对于 0~0.3 mm 间隙的焊缝,本文方法具有良好的准确率,可以满足常见的激光焊接需求

另一方面,相机的抖动使得识别得到的焊缝轨迹偏离真实位置,当机床运行速度加快时其产生的震动也会变大,本文选取了两块边缘为直线的镀锌钢板进

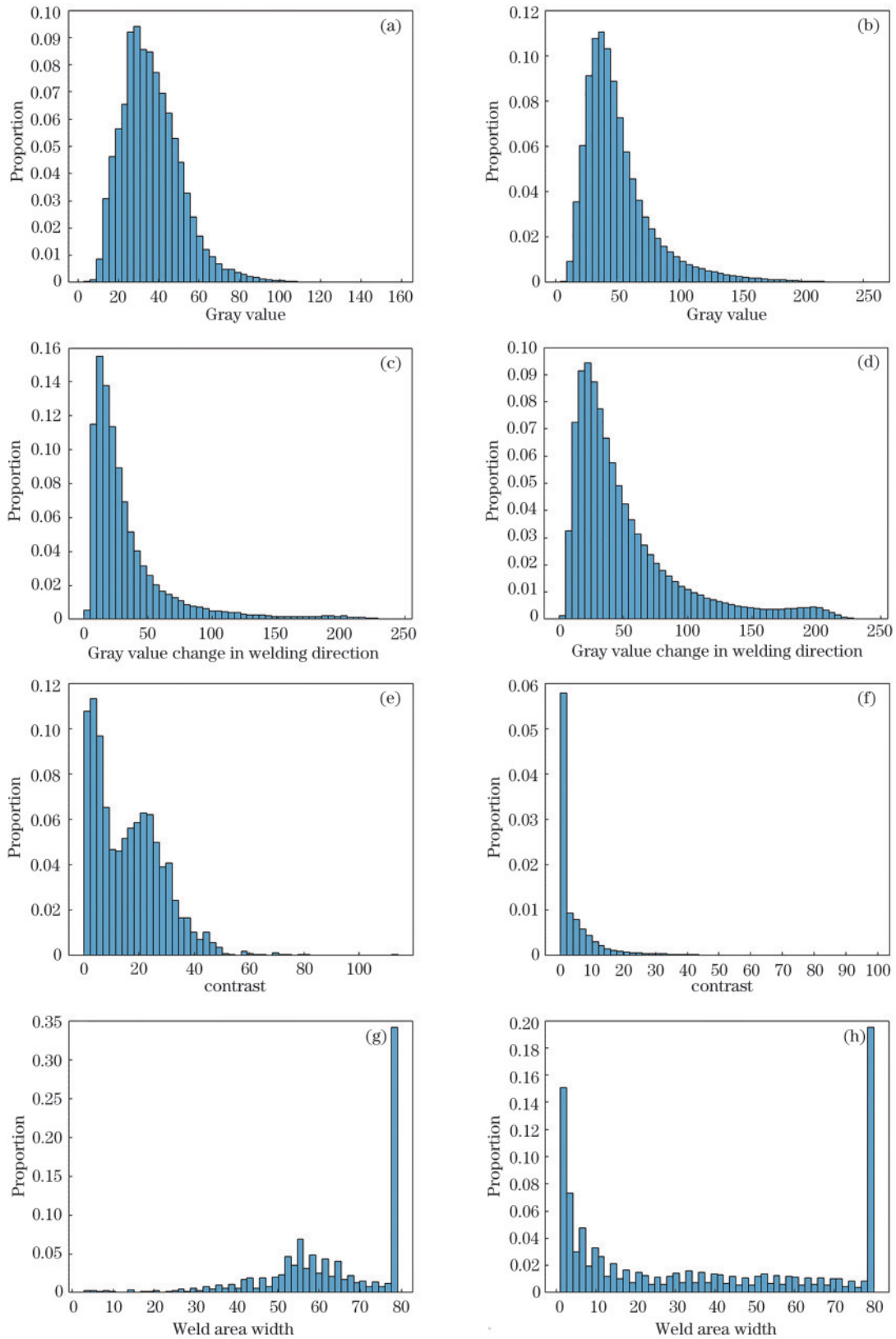


图 5 特征参数分布。(a) 焊缝区域灰度值; (b) 待定焊缝区域灰度值; (c) 焊缝区域焊接方向上的灰度值变化; (d) 待定焊缝区域焊接方向上的灰度值变化; (e) 焊缝区域灰度梯度; (f) 待定焊缝区域灰度梯度; (g) 焊缝区域宽度; (h) 待定焊缝区域宽度

Fig. 5 Distribution of characteristic parameters. (a) Gray value of weld area; (b) gray value of undetermined weld area; (c) gray value change in the welding direction of the weld area; (d) gray value change in welding direction of undetermined weld area; (e) gray gradient of weld area; (f) gray gradient of undetermined weld area; (g) width of weld area; (h) width of undetermined weld area

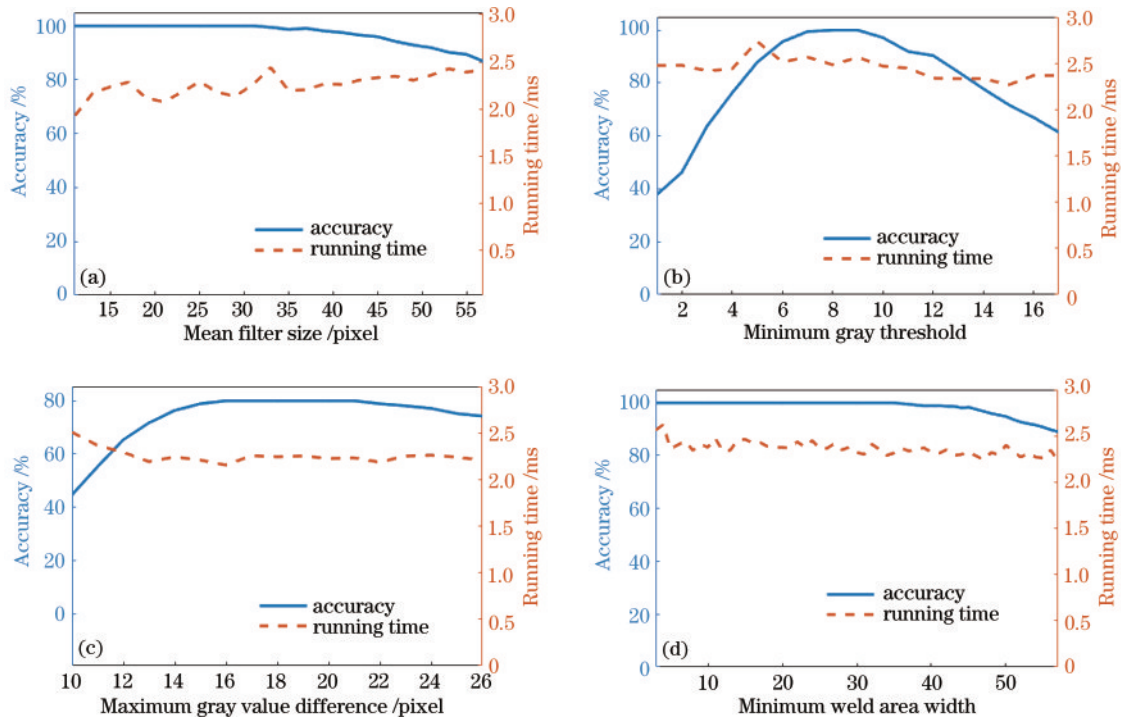


图 6 算法中的参数对识别效果和运行时间的影响。(a)均值滤波器尺寸;(b)最小灰度阈值;(c)最大灰度值差值;(d)最小焊缝区域宽度

Fig. 6 Influence of parameters in the algorithm on recognition effect and running time. (a) Mean filter size; (b) minimum gray threshold; (c) maximum gray value difference; (d) minimum weld area width

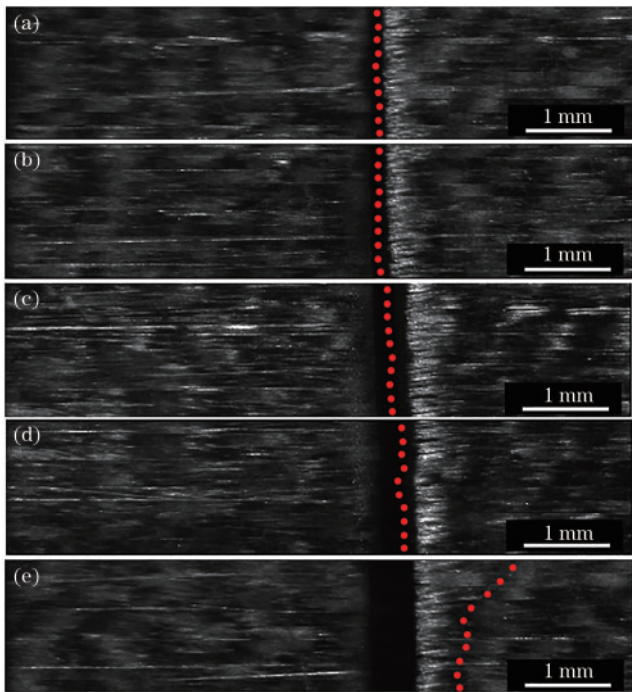


图 7 不同间隙的焊缝识别结果。(a) 0.05 mm; (b) 0.1 mm; (c) 0.2 mm; (d) 0.3 mm; (e) 0.4 mm

Fig. 7 Weld recognition results of different gaps. (a) 0.05 mm; (b) 0.1 mm; (c) 0.2 mm; (d) 0.3 mm; (e) 0.4 mm

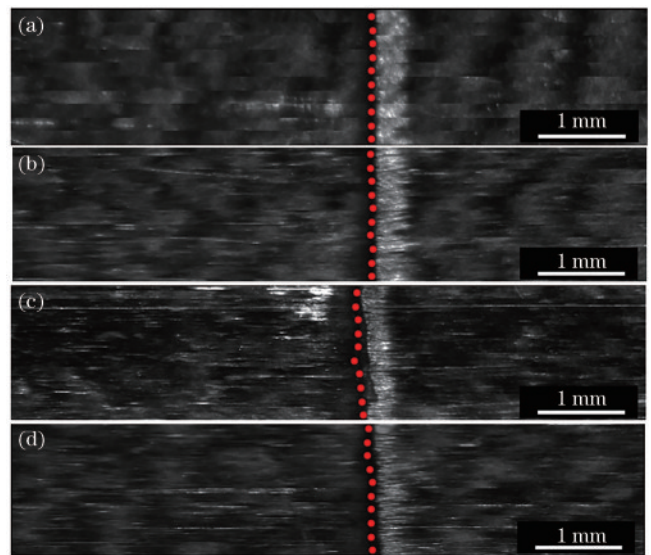


图 8 不同扫描速度的焊缝识别结果。(a)100 mm/s; (b)200 mm/s;(c)300 mm/s;(d)350 mm/s

Fig. 8 Weld recognition results of different scanning speeds. (a) 100 mm/s; (b) 200 mm/s; (c) 300 mm/s; (d) 350 mm/s

行不同扫描速度下的焊缝追踪试验,结果如图 8 所示,可以看到,在相机扫描速度达到 300 mm/s 以上时,拍摄到的图片出现了明显的抖动,识别得到的焊

缝轨迹也开始偏离直线。通过计算可知,图 8(a)~(d)中的焊缝位置偏离直线的最大值为 0.007 mm、0.013 mm、0.049 mm、0.032 mm。这是因为机床在运行时会产生震动,且本文所用的成像装置长度较长,因此在机床的震动传导至成像系统远离固定点的镜头时会被放大,表现为照片的抖动。又因为本文所

使用的成像系统放大倍率较高,因此镜头的震动会在照片上进一步放大。

为了验证不同表面纹理结构下焊缝追踪算法的适用性,使用普通钢板作为试验材料并进行焊缝追踪试验,其结果如图 9 所示,识别得到的焊缝轨迹与工件拼缝重合,表明本文算法对常规普通钢板焊接具有更好的适应性。

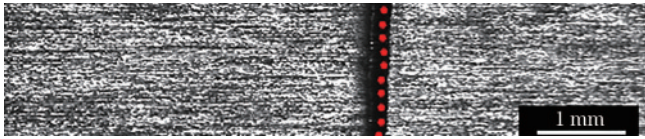


图 9 普通钢板焊缝追踪结果  
Fig. 9 Common steel plate weld tracking results

### 3.4 焊缝追踪结果及焊接试验

使用本文方法追踪焊缝并进行焊接试验,焊接材料为镀锌钢板,相机扫描速度为 200 mm/s,焊缝间隙为 0,算法中的阈值参数选取上文中的最佳值。图 10 为焊缝追踪的结果,其中图 10(a)为相机拍摄到的原始图片照片拼接的图像,图 10(b)为算法识别到的焊缝轨迹以及局部细节放大图,图中红点为算法识别到的焊缝位置,可以看出,红点和拼缝位置基本重合,表明本文算法具有良好的准确率。

对焊接后的镀锌钢板在 40 mm、240 mm、440 mm、640 mm、920 mm 的位置进行切片以及金相试验。焊缝横截面照片如图 11 所示,取激光位置为焊缝融化区左右边界中点,由于选用了较小的激光功率进行试验,在工件底部有一定的未融化部分,其中可以清晰分辨拼缝的位置。图片放大率为 1025 pixel/mm,再根据图片中激光中心位置和拼缝位置的差值即可确定识别误差。识别得到的焊缝轨迹和实际焊缝轨迹以及二者差值如图 12 所示,可以看到,识别到的焊缝轨迹和实际焊缝轨迹基本重合,焊接的偏差值在 0.05 mm 以下,证明了焊缝追踪方法具有良好的准确性。

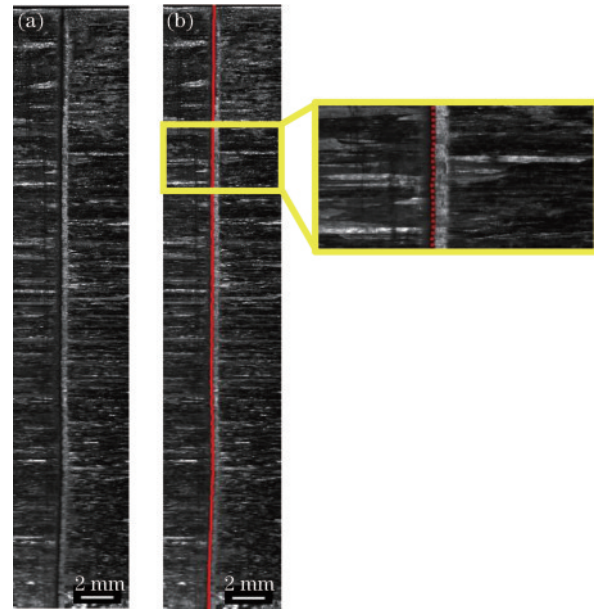


图 10 焊缝追踪的结果。(a)原始图像;(b)算法识别到的焊缝轨迹以及局部细节放大图  
Fig. 10 Results of weld tracking. (a) Original picture; (b) weld track identified by the algorithm and the enlarged image of local details

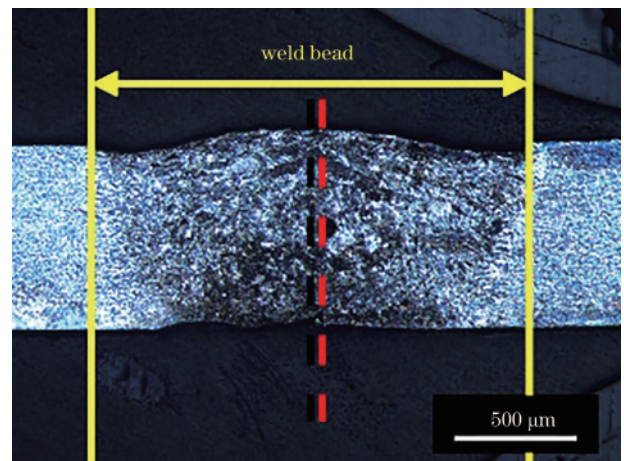


图 11 焊缝横截面  
Fig. 11 Weld cross section

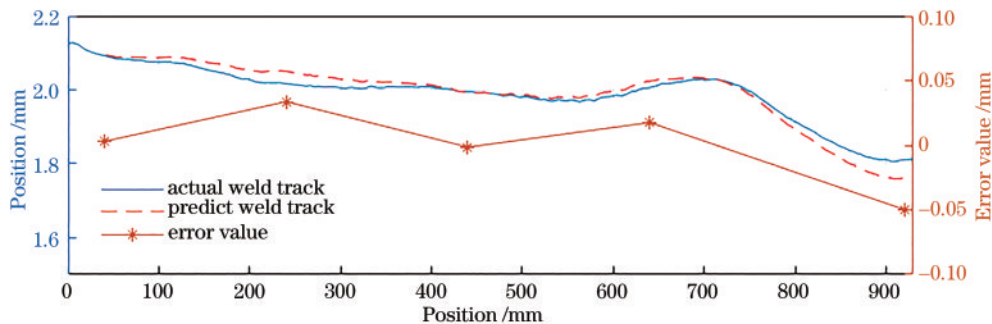


图 12 焊缝轨迹和偏差值  
Fig. 12 Weld trajectory and deviation value

## 4 结 论

本文在激光焊接机床上搭建了基于线阵相机的对接无间隙焊缝识别和跟踪装置,通过机床带动线阵相机实现了长焊缝的扫描,提出了基于特征提取的焊缝识别方法,通过分析图像的灰度值、图像在焊接方向上的灰度值变化、图像的灰度梯度、焊缝区域宽度实现了无间隙焊缝识别。在识别过程中用到的阈值会影响识别算法的准确度和程序运行时间,阈值参数在一定范围内可以快速、准确地识别焊缝位置。通过对不同间隙的焊缝进行焊缝追踪试验,证明了本文提出的焊缝追踪方法对于 0~0.3 mm 的焊缝均有较好的识别效果,焊缝扫描速度加快会导致拍摄的图片抖动,在扫描速度大于 300 mm/s 时会导致识别误差变大。通过焊接和金相试验,表明本文所述焊缝追踪方法精度较高,识别误差小于 0.05 mm,满足实际生产需求。

### 参 考 文 献

- [1] 雷正龙, 沈健雄, 黎炳蔚, 等. 基于自动阈值的窄间隙端接焊缝识别技术[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815011. Lei Z L, Shen J X, Li B W, et al. Recognition of narrow-gap edge welding seam based on autonomous threshold value[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0815011.
- [2] 孙浩益, 梁冬泰, 李国平, 等. 基于卡尔曼滤波器的焊缝识别算法[J]. 激光与红外, 2016, 46(8): 1006-1013. Sun H Y, Liang D T, Li G P, et al. Weld seam recognition algorithm based on constraint Kalman filter [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(8): 1006-1013.
- [3] 朱云, 凌志刚, 张雨强. 机器视觉技术研究进展及展望 [J]. 图学学报, 2020, 41(6): 871-890. Zhu Y, Ling Z G, Zhang Y Q. Research progress and prospect of machine vision technology[J]. Journal of Graphics, 2020, 41(6): 871-890.
- [4] Zou Y B, Chen X Z, Gong G J, et al. A seam tracking system based on a laser vision sensor[J]. Measurement, 2018, 127: 489-500.
- [5] Chen H Y, Liu K, Xing G S, 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(9/10/11/12): 1849-1860.
- [6] Gao X D, Chen Y Q. Detection of micro gap weld using magneto-optical imaging during laser welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(1/2/3/4): 23-33.
- [7] 刘超, 邵文军, 黄禹, 等. 激光焊接中窄拼缝被动光视觉检测方法[J]. 小型微型计算机系统, 2019, 40(4): 798-801. Liu C, Shao W J, Huang Y, et al. Weld seam detection method based on passive vision sensor in laser welding[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2019, 40(4): 798-801.
- [8] Fan J F, Jing F S, Yang L, et al. A precise seam tracking method for narrow butt seams based on structured light vision sensor[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 109: 616-626.
- [9] Ma H B, Wei S C, Sheng Z X, et al. Robot welding seam tracking method based on passive vision for thin plate closed-gap butt welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 48(9/10/11/12): 945-953.
- [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] 方灶军, 鄢治国, 徐德. 集装箱薄板的对接焊缝视觉跟踪系统[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(S1): 80-83. Fang Z J, Yan Z G, Xu D. Visual tracking system for narrow butt seams on thin plate of container[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2008, 42(S1): 80-83.
- [12] 杜健准, 张艳喜, 王静静, 等. 核相关/卡尔曼滤波焊缝路径识别新方法研究[J]. 中国激光, 2022, 49(2): 0202009. Du J Z, Zhang Y X, Wang J J, et al. Weld path identification based on kernel correlation/Kalman filters [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(2): 0202009.
- [13] 杨国威, 周楠, 杨敏, 等. 融合卷积神经网络和相关滤波的焊缝自动跟踪[J]. 中国激光, 2021, 48(22): 2202011. Yang G W, Zhou N, Yang M, et al. Automatic weld tracking based on convolution neural network and correlation filter[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(22): 2202011.