

基于改进Steger算法和霍夫检测的激光条纹特征提取

刘晨曦 熊凌

Weld feature extraction based on improved Steger algorithm and Hough detection

LIU Chenxi, XIONG Ling

引用本文:

刘晨曦, 熊凌. 基于改进Steger算法和霍夫检测的激光条纹特征提取[J]. 应用光学, 2026, 47(1): 98–105. DOI: 10.5768/JAO202647.0102001

LIU Chenxi, XIONG Ling. Weld feature extraction based on improved Steger algorithm and Hough detection[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(1): 98–105. DOI: 10.5768/JAO202647.0102001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202647.0102001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于投影分割的激光告警光斑中心快速提取算法

Rapid extraction algorithm of laser alarm spot center based on projection segmentation

应用光学. 2024, 45(6): 1170–1178 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0602001>

基于特征提取和改进ICP的点云配准方法

Point cloud registration algorithm based on feature extraction and improved ICP

应用光学. 2025, 46(4): 805–812 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0402003>

基于特征定位的航空航天制孔多视测量拼接方法

Multi-view measurement registration method of aerospace hole making based on feature location

应用光学. 2023, 44(4): 834–841 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0403004>

改进YOLOX的桥梁病害检测识别

Bridge disease detection and recognition based on improved YOLOX algorithm

应用光学. 2023, 44(4): 792–800 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0402004>

基于法线引导的激光中心线提取方法

Laser center-line extraction method based on normal guidance

应用光学. 2023, 44(1): 211–218 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0107003>

基于区域霍夫变换的机弹分离初始信息提取研究

Research on initial information extraction of aircraft and missile separation based on regional Hough transformation

应用光学. 2021, 42(1): 65–70 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0102003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2026) 01-0098-08

引用格式: 刘晨曦, 熊凌. 基于改进 Steger 算法和霍夫检测的激光条纹特征提取 [J]. 应用光学, 2026, 47(1): 98-105.

LIU Chenxi, XIONG Ling. Weld feature extraction based on improved Steger algorithm and Hough detection[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(1): 98-105.



在线阅读

基于改进 Steger 算法和霍夫检测的 激光条纹特征提取

刘晨曦^{1,2}, 熊 凌^{1,2}

(1. 武汉科技大学 机器人与智能系统研究院, 湖北 武汉 430081; 2. 武汉科技大学 人工智能与自动化学院, 湖北 武汉 430081)

摘 要: 为了准确实时地获取焊缝信息来实现智能焊接, 提出了一种基于改进 Steger 算法和霍夫检测的激光条纹特征提取框架。首先, 对采集的激光条纹进行焊缝图像预处理, 采用中值滤波和双边滤波的组合滤波去噪, 用 Otsu 阈值分割提取激光条纹, 并通过形态学运算去除小噪点。然后, 由于传统 Steger 算法提取效率低, 采用改进 Steger 算法设置阈值专注于感兴趣区域以提高算法效率, 初步提取出存在断点的光条中心线。最后, 通过 Hough 变换检测出光条中心线中所有直线, 通过设定特征点所在的特定区域来从不同直线之间的交点筛选出焊缝特征角点。实验结果表明: 去噪后峰值信噪比均大于 30 dB。改进的 Steger 算法平均提取时间为 0.070 093 s, 比传统 Steger 算法提速了 1 倍以上, 满足实时性要求。最终提取出的焊缝特征角点坐标误差为毫米级, 满足焊接要求。

关键词: 激光条纹; 图像处理; Steger; 霍夫变换; 特征提取

中图分类号: TN247

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202647.0102001

Weld feature extraction based on improved Steger algorithm and Hough detection

LIU Chenxi^{1,2}, XIONG Ling^{1,2}

(1. Institute of Robotics and Intelligent Systems, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. College of Artificial Intelligence and Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081)

Abstract: In order to accurately and in real-time obtain weld seam information for intelligent welding, a laser stripe feature extraction framework based on improved Steger algorithm and Hough detection was proposed. First, the collected laser stripes were preprocessed for the weld image, utilizing a combination of median filtering and bilateral filtering for denoising, employing Otsu's thresholding to extract the laser stripes, and removing small noise points through morphological operations. Then, to address the low extraction efficiency of traditional Steger algorithm, the improved Steger algorithm was used to set thresholds focusing on the region of interest (ROI) to enhance algorithm efficiency, initially extracting the centerline of the light stripe where breakpoints existing. Finally, all straight lines in the light stripe centerline were detected through Hough transformation, and weld seam feature corner points were filtered from the intersection points of different lines by setting specific areas where feature points were located. Experimental results indicate that the peak signal-

收稿日期: 2024-09-14; 修回日期: 2025-01-20

基金项目: 武汉市重点研发计划项目 (2023010402010603)

第一作者: 刘晨曦, E-mail: 2959616746@qq.com

通信作者: 熊凌, E-mail: xiongl@wust.edu.cn

to-noise ratio after denoising is greater than 30 dB. The average extraction time of the improved Steger algorithm is 0.070093 s, which is more than twice as fast as the traditional Steger algorithm, meeting the real-time requirements. The coordinate error of the extracted weld seam feature corner points is at the millimeter level, satisfying the welding requirements.

Key words: laser stripe; image processing; steger; hough transformation; feature extraction

引言

焊接机器人的智能化显著提升了焊接生产效率, 增强了焊接方式的灵活性并降低了成本, 因此机器人智能化焊接将成为未来激光焊接行业发展的主流^[1]。焊缝特征的准确实时提取是智能化焊接的关键。目前, 光电技术在获取待焊件信息时有主动视觉传感和被动视觉传感两种方式。主动视觉通过发射光源, 接收并分析反射数据来精确获取物体三维结构信息。这种方法克服了被动视觉传感技术的局限性, 提供了更为准确和可靠的三维信息^[2]。常见的主动视觉有激光视觉传感和结构光视觉传感, 其中激光视觉技术较成熟且系统相对简单, 不需要复杂的校准和配置, 对于预算和技术资源有限的场景尤为重要; 而且 2D 相机可以实时捕获激光条纹图像, 数据量远小于 3D 点云信息, 能迅速响应焊接变化, 满足焊接实时性要求。因此本文针对激光视觉传感系统进行研究。

在实际进行操作时, 飞溅和电弧噪声会导致视觉传感器获取的焊接图像无法保证稳定性和精确性。因此, 光条中心线提取技术受到国内外学者关注。WANG N^[3] 等人提出一种基于 nurbs-蛇模型的算法, 在动态感兴趣区域(简称 ROI)中在线检测激光中心线, 通过分割和直线拟合来确定特征点, 并根据特征点计算出焊缝的位置。GAO Z^[4] 等人对图像的直方图进行处理, 提出一种自适应的阈值分割法使背景和结构光条纹分离开, 通过边缘检测和直线检测得到条纹的方程, 从而求出光条中心线。WANG H F^[5] 等人采用了差分图像和区域增长法来削弱背景和噪声的影响, 准确提取出高质量的激光条纹区域, 采用灰度重心法完成了中心线提取。XI J^[6] 等人设计了一种卷积模板, 利用两步卷积的方式去除图像信息中的噪声, 然后通过找到光条像素点的法线方程确定阈值, 使用灰度重心法完成中心线的提取。MUHAMMAD J^[7] 等人采用图像增强手段, 提出了顺序图像处理和基于像素分布的邻域搜索特征提取算法, 可有效识别到焊缝特征点。在光条区域光条提取精度的算法领域内, 学者们虽已进行了诸多优化与创

新, 但聚焦于提升算法实时性的研究却相对较少。

因此, 为实时提取出焊缝特征, 本文在以上基础上提出一种基于改进 Steger 算法和霍夫检测的焊缝特征提取方法。针对弧光干扰, 对采集的图像进行去噪和阈值分割, 在传统 Steger 算法基础上设置感兴趣区域以减少算法计算量, 从而提高效率, 用改进的 Steger 算法提取出光条中心线, 通过霍夫检测识别出中心线中断裂的所有直线, 计算得到两两直线的交点, 并通过设置特征点所在的区域来筛选出正确的特征点。

1 基于组合滤波方法的焊缝图像预处理

为实现焊接起始点的自动定位与导向, 对工件进行视觉识别是不可或缺的步骤。考虑到焊接过程中弧光飞溅可能造成的干扰, 首先通过图像滤波技术有效去除了噪声干扰, 确保了图像质量的提升; 随后利用最大类间方差法(Otsu)进行阈值分割, 提取出激光条纹; 最后采用形态学处理中的腐蚀与膨胀操作, 成功去除了孤立的噪点。

1.1 图像滤波

考虑到焊接过程中弧光飞溅可能造成的干扰, 激光传感器采集图像的噪声主要来源于弧光、烟尘、飞溅等, 主要噪声类型为斑点噪声和椒盐噪声。在激光跟踪中常用的滤波算法有中值滤波、均值滤波、高斯滤波等^[8]。

中值滤波是一种非线性滤波方法, 能在有效滤除椒盐、斑点噪声的同时保留边缘细节。高斯滤波只有在噪声呈高斯分布时效果才显著, 且它在滤除噪声信号的同时会对图像中的边缘信息进行平滑, 会损失掉有用的边缘信息。在激光焊缝跟踪中, 边缘信息对光条中心提取至关重要。而双边滤波器^[9]在设计时融合了两种考量因素: 一是空间邻近度, 这类似于传统的高斯滤波, 即两个像素的物理距离越大, 其之间的权值就越小, 反之权值则越大; 二是像素值相似度, 这是双边滤波器特有的特性。当两个像素的灰度值相差较小时, 表明它们不太可能是边缘的一部分, 因此应当进行平

滑处理,这意味着它们在滤波器中的权值应当被提高;相反,如果像素值相差较大,则更有可能是边缘的一部分,此时滤波器应尽量减少对它们的处理,以保留边缘的锐利度,即权值应相应降低,因此可以有效地保护图像的边缘信息。双边滤波原理图如图 1 所示。

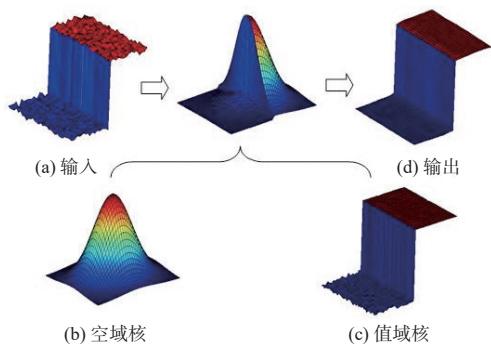


图 1 双边滤波原理图

Fig. 1 Schematic diagram of bilateral filtering

通过上述分析得出,双边滤波具有较好的去噪和保留细节信息效果,但由于保留了过多的高频信息,双边滤波器无法有效滤除彩色图像中的椒盐噪声等高频噪声,需要与中值滤波器一起使用。因此,本文采用双边滤波和中值滤波的组合滤波方法来滤除噪声,部分样本滤波结果如图 2 所示。

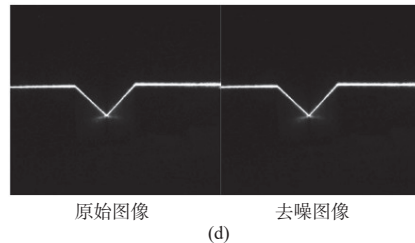
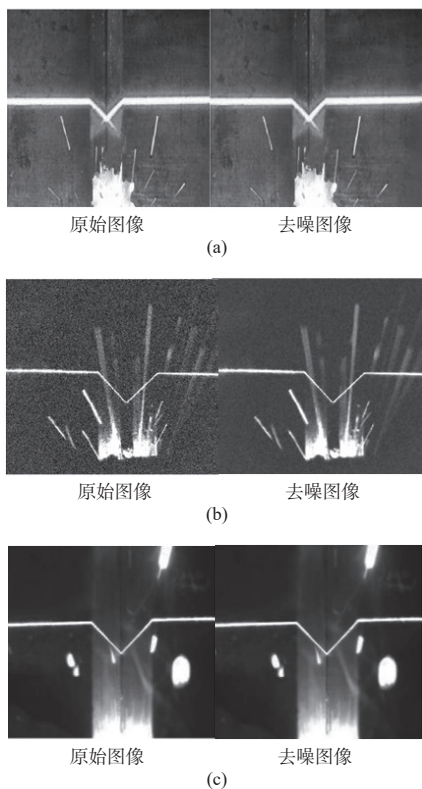


图 2 图像滤波结果

Fig. 2 Results of image filtering

图像压缩中典型的峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)值应大于 30 dB,愈高愈好^[10]。本文计算了处理前后图像的峰值信噪比,如表 1 所示,PSNR 均大于 30 dB。

表 1 滤波后图片性能指标评价

Table 1 Image performance index evaluation after filtering

图像样本	图2(a)	图2(b)	图2(c)	图2(d)
PSNR/dB	49.0793	30.5567	49.0793	31.5845

1.2 图像分割

图像二值化能让灰度图像特征信息更加突出^[11],它在压缩数据量的同时简化了图像信息的分析和处理步骤,对于焊缝图像分割来说就是分割出激光条纹。最大类间方差法,又称为大律法(Otsu法),是一种自适应阈值分割算法,它以最佳阈值 θ 将图像的灰度值分割成 A(阈值 $<\theta$)、B(阈值 $>\theta$)两部分,使图像中的目标焊缝与背景两部分之间的方差最大化,以实现最佳的分离效果。这种方法通过计算阈值,将图像划分为两个灰度级范围,确保目标焊缝和背景具有最大的区分度,从而优化图像的分割效果。假设这两类像素各自的均值就为 a_1 、 a_2 ,图像全局均值为 a_G ,同时像素被分为 A、B 类的概率分别为 P_1 、 P_2 。因此就有:

$$\begin{cases} P_1 \cdot a_1 + P_2 \cdot a_2 = a_G \\ P_1 + P_2 = 1 \end{cases} \quad (1)$$

类间方差表达式为

$$\sigma^2 = P_1(a_1 - a_G)^2 + P_2(a_2 - a_G)^2 \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)可得:

$$\sigma^2 = P_1 P_2 (a_1 - a_2)^2 \quad (3)$$

式中:

$$P_1 = \sum_{i=0}^k P_i \quad (4)$$

$$a_1 = \frac{\sum_{i=0}^k i P_i}{P_1} \quad (5)$$

$$a_2 = \frac{\sum_{i=k+1}^{L-1} iP_i}{P_1} \quad (6)$$

求出使式 (3) 最大时对应的灰度值 k 作为最佳阈值 θ , 即可实现图像二值化。采用 Otsu 法对图像进行分割后的图像如图 3 所示。

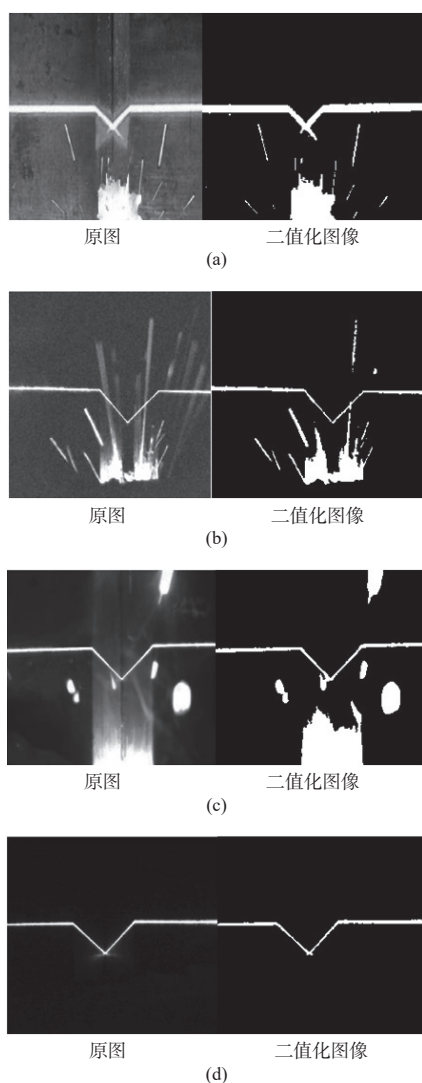


图 3 Otsu 法阈值分割

Fig. 3 Threshold segmentation by Otsu's method

1.3 形态学处理

由二值化结果可知, 图像中存在很多孤立的小点, 因此需要进行形态学处理。图像形态学源于 20 世纪对数理形态的深入研究^[12], 其理念对现代数字图像处理技术产生了深远影响。开闭运算在图像处理中至关重要, 能显著提升图像质量, 为后续分析提供精准数据。本文运用开运算技术有效消除孤立小噪点, 处理后图片如图 4 所示。

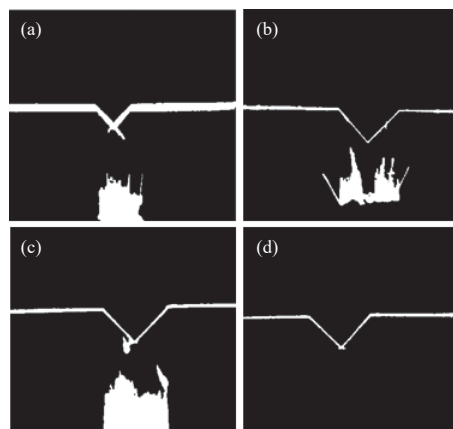


图 4 形态学处理

Fig. 4 Morphological processing

2 改进 Steger 算法的激光条纹中心线提取

2.1 传统 steger 算法

Steger 算法的核心在于利用 Hessian 矩阵来实现线结构光条纹中心线的亚像素级定位。在光平面的厚度方向上, 光强近似服从高斯分布, 因而在相机采集到的光条图像中, 在沿着光条宽度的方向或光条的法线方向上, 其灰度也会呈现出类似的高斯分布特点, 即光条中心的灰度值大而光条边缘的灰度值小^[13], 如图 5 所示。

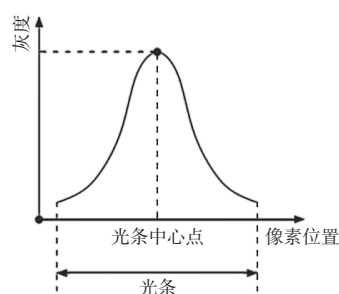


图 5 光条宽度方向上的灰度分布

Fig. 5 Grayscale distribution in width direction of light strip

因而光条中心线的提取任务就是要找到图像中, 光条灰度的高斯分布中心。先通过 Hessian 矩阵确定光条的法线方向, 然后在光条法线方向上进行泰勒级数展开, 特征点一阶导数为 0, 二阶导数在一定范围, 那么就可以确定光条中心线的亚像素位置^[12]。基于 Steger 算法, 定义当前像素坐标 (u_0, v_0) 处的光强值为 $I(u_0, v_0)$, 沿光条法线方向 $e = [e_u, e_v]$ 的光强分布, 即灰度值多项式函数经泰勒展开为

$$I(u_0 + t \cdot e_u, v_0 + t \cdot e_v) = I(u_0, v_0) + t \cdot e [I_u, I_v]^T + \frac{t^2}{2} \cdot e \cdot \mathbf{H}(u, v) \cdot e^T \quad (7)$$

式中: $[I_u, I_v]$ 为一阶偏导数; $\mathbf{H}(u, v)$ 为 Hessian 矩阵。

Hessian 最大矩阵特征值的特征向量 (u_u, v_v) , 即为光强变化最快的方向^[13]。对式 (7) 求导并令其一阶导数为 0, 如式 (8) 所示:

$$\frac{\partial I}{\partial t} = e \cdot \begin{bmatrix} I_u & I_v \end{bmatrix} + t \cdot e \cdot \mathbf{H}(u, v) \cdot e^T = 0 \quad (8)$$

继续改写为

$$\begin{bmatrix} e_u & e_v \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_u \\ I_v \end{bmatrix} + t \cdot \begin{bmatrix} e_u & e_v \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{uu} & I_{uv} \\ I_{uv} & I_{vv} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_u \\ e_v \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

故可得到 t 如式 (10), 最后再将 t 代入式 (9) 即可求出激光条纹中心的亚像素坐标。

$$t = \frac{e_u \cdot I_u + e_v \cdot I_v}{e_u^2 \cdot I_{uu} + 2e_u \cdot e_v \cdot I_{uv} + e_v^2 \cdot I_{vv}} \quad (10)$$

2.2 感兴趣区域 (ROI) 提取

根据激光条纹大致平行于图像 u 轴, 所以图像的感兴趣区域可以通过对每行像素灰度值进行求和得到:

$$J_v(i) = \sum_{j=1}^w I(i, j), (i = 1, 2, \dots, h) \quad (11)$$

式中: $J_v(i)$ 是图像第 i 行像素灰度值之和; w 和 h 分别为图像的宽度和高度。

然后图像的感兴趣区域可以通过式 (12) 得到:

$$\begin{cases} [x_{\min}, x_{\max}] = [1, w] \\ [y_{\min}, y_{\max}] = [v_c - y, v_c + y] \end{cases} \quad (12)$$

式中: $[x_{\min}, x_{\max}]$ 和 $[y_{\min}, y_{\max}]$ 分别是图像 ROI 的 x 范围和 y 范围; v_c 是像素灰度值之和最大所对应的行数。

提取结果如图 6 所示。

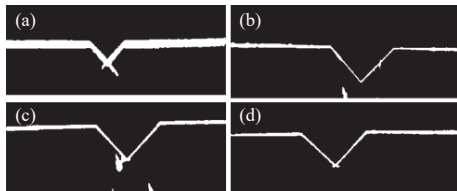


图 6 ROI 提取

Fig. 6 ROI extraction

2.3 改进 Steger 算法

对于工业要求下的焊缝信息获取, 采用传统 Steger 算法很难实现快速提取包含焊缝轮廓的结构光条纹中心线^[14]。考虑到焊接过程中算法的实

时性, 本文采用了改进的 Steger 算法进行中心线提取。算法流程图如图 7 所示。

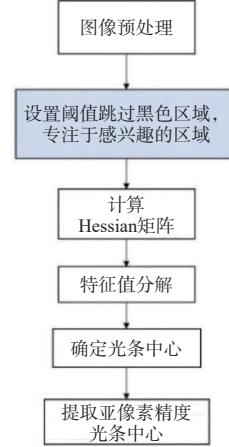


图 7 改进 Steger 算法流程图

Fig. 7 Flow chart of improved Steger algorithm

本文主要进行了如图 7 中蓝色部分改进, 有助于减少计算量并专注于感兴趣区域, 加快算法, 即: 通过设定阈值来跳过黑色区域, 该阈值根据每一张输入图像的灰度分布直方图计算类间方差, 将最大化类间方差得到的 $[0, 1]$ 之间的值转换为 $[0, 255]$ 范围, 作为新的自适应阈值, 从而更好地适应不同图像的特征。而传统 Steger 算法通常侧重于从噪声中分离出边缘, 不会特别强调速度优化。为了验证本文改进 Steger 算法的准确性和快速性, 分别用几何中心法、灰度重心法、传统 Steger 算法以及本文算法做了一系列 V 型坡口焊缝识别实验。图 8 是一组 V 型焊缝激光条纹图像实验样本和提取出的中心线的效果图。

由图 8 可以看出, 本文提取算法和传统 Steger 算法提取的激光条纹中心线和激光条纹基本吻合。为了更客观地证明本文算法的准确性, 计算拟合中心线上的点到实际中心线之间的均方差, 求取均方差的数学表达式如式 (13):

$$e_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (13)$$

式中: x_i 为测量值; y_i 为实际值; n 是中心线像素点的个数。

同时记录不同算法提取中心线的平均耗时。由表 2 可知, 本文算法比几何中心法和灰度重心法提取结果误差小, 与传统 steger 算法的误差接近。本文改进的 Steger 算法和灰度重心法速度相近, 与

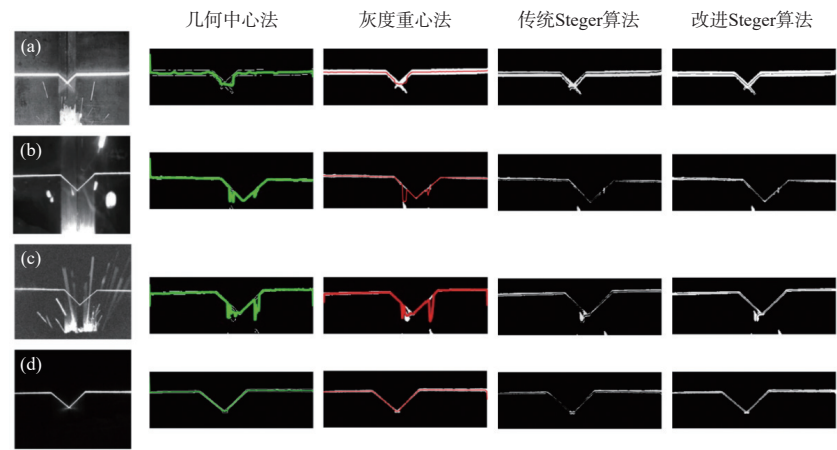


图 8 不同算法提取中心线效果图

Fig. 8 Effect diagrams of centerline extraction by different algorithms

传统的 Steger 算法相比提高了算法速度。综合分析, 本文所采用的改进的 Steger 算法可以在正确提取条纹中心线的同时加快提取速度, 满足焊接实时性要求。

表 2 不同算法中心线平均提取误差及时间
Table 2 Average extraction error and time for centerline extraction by different algorithms

方法	e_{RMS} /像素	t/s
几何中心法	3.16	0.013 27
灰度重心法	3.73	0.064 59
传统Steger算法	0.34	1.416 99
改进的Steger算法	0.31	0.070 093

3 基于 Hough 变换的焊缝特征角点提取

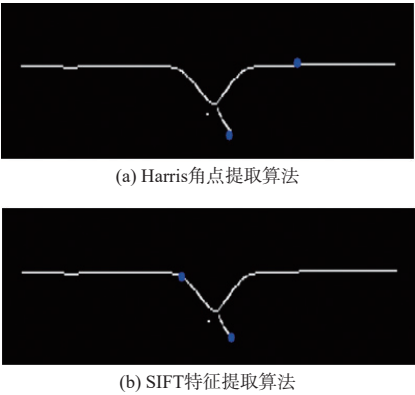
由于边缘毛刺的影响, 导致提取出的激光条纹中心线仍存在误差。为增加焊缝跟踪的精度, 需要进一步进行特征点提取^[15]。针对 V 型焊缝的激光条纹图像, 研究主要集中在 3 个关键特征点的识别上, 即: V 型坡口的上边边缘点及其最低点。Hough 变换是一种广泛应用的图像处理技术, 它通过巧妙的坐标变换, 将图像空间的信息映射到参数空间, 进而检测图像中的特定形状, 如直线或圆。该方法的核心在于转换图像空间中的每个点至参数空间内对应的直线或曲线表示。在直线检测场景中, Hough 变换通过检测参数空间内多条直线的交点来确定图像空间中直线的存在和位置, 从而实现了直线检测问题的有效转换和简化。Hough 变换主要优势在于其对噪声和直线中可能

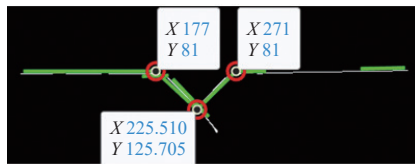
存在的间隙的鲁棒性, 即使在图像受到噪声污染或直线存在不连续性的情况下, Hough 变换仍能稳定地提取出直线特征。其工作原理基于坐标变换, 将图像中的点(如激光条纹的中心线)映射到参数空间中的特定位置, 并在这些位置上形成峰值, 从而实现了直线段的准确识别。通过使用参数方程, 直线可表示为

$$x\cos\theta+y\sin\theta=r \tag{14}$$

式中: r 是原点到该直线的距离; θ 是 r 相对 x 轴的转角; (x,y) 是直线上的坐标。

由于提取的中心线的坐标点是已知的, 因此在参数方程中是常量, 针对每一个坐标点 (x_i,y_i) 就会有可能的 (r,θ) 参数值对, 可将笛卡儿坐标图像空间转换为 Hough 极坐标参数空间。本文通过 Hough 变换检测出光条中心线上各部分直线, 然后采用最小二乘法拟合直线, 再找出相邻直线的交点坐标, 即为焊缝特征点的位置。为验证本文特征点提取的有效性, 采用 Harris 角点检测和 SIFT(scale-invariant feature transform) 特征提取与本文算法进行对比, 不同方法提取特征点结果如图 9 所示。





(c) 本文算法

图9 特征点提取结果

Fig. 9 Feature point extraction results

由图9可知, Harris角点检测和SIFT特征提取算法都未能正确识别3个特征点, 存在特征点丢失的情况, 其中针对V形激光条纹的最低点提取, 只有本文算法可以提取正确, 另外两种算法都受到了激光条纹中心线断线的影响。本文提取的特征角点坐标如表4所示。

表4 特征角点坐标

Table 4 Characteristic corner coordinates

特征点	像素坐标
(x_1, y_1)	(177, 81)
(x_2, y_2)	(225.51, 125.705)
(x_3, y_3)	(271, 81)

为证明提取的准确性, 将实际测量的焊缝宽度与算法得到的宽度对比计算误差, 焊缝宽度即为V型坡口的上边边缘点之间的距离, 计算公式如式(16):

$$W = |(x_1 - x_3)| \quad (15)$$

式中 x_1 、 x_3 为V型坡口的上边边缘点的横坐标。

实际测量到的焊缝宽度为3.750 mm, 计算得到的宽度由像素转换为毫米后得到的参数误差为0.12 mm, 满足实际焊接要求。

4 结论

本文提出了一种基于改进的Steger算法和霍夫检测的焊缝特征提取方法, 在传统Steger算法流程上进行了改进, 首先通过图像滤波和最大类间方差阈值分割相结合, 降低图像的复杂程度。其次通过提取感兴趣区域ROI, 设置阈值来跳过黑色区域并专注于感兴趣的区域, 有效解决了传统Steger算法遍历整幅图耗时长的弊端。通过与几何中心法、灰度重心法以及传统Steger算法进行对比, 实验表明改进后的算法具有较强的抗噪性, 和灰度重心法速度相近, 与传统的Steger算法相比速度提高了1倍以上。最后通过Hough变换拟合直线, 计算所有检测到的直线之间的交点, 并基于

特征点所在的特定区域, 从直线交点中筛选出特征点, 最终提取坐标满足实际的焊接要求, 为后续实现焊缝跟踪提供了技术基础。

参考文献:

- [1] 陈德喜. 焊接机器人技术研究与应用现状[J]. 科技风, 2020(35): 11-12.
CHEN Dexi. Research and application status of welding robot technology[J]. Science and Technology Wind, 2020(35): 11-12.
- [2] 蒋宝, 徐冬至, 黄瑞生, 等. 基于视觉传感的焊接机器人焊缝识别跟踪技术研究现状[J]. 金属加工(热加工), 2022(1): 10-17.
JIANG Bao, XU Dongzhi, HUANG Ruisheng, et al. Research status of welding robot seam recognition and tracking technology based on vision sensing[J]. Metal Working (Hot Working), 2022 (1): 10-17.
- [3] WANG N, ZHONG K, SHI X, et al. A robust weld seam recognition method under heavy noise based on structured-light vision[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 61: 101821.
- [4] GAO Z, LU Q, LI Z, et al. Extraction method of weld centerline based on fast median filtering and morphological processing[C]//2nd International Conference on Computer Vision, Image, and Deep Learning. Liuzhou, China: IEEE, 2021: 453-458.
- [5] WANG H F, WANG Y F, ZHANG J J, et al. Laser stripe center detection under the condition of uneven scattering metal surface for geometric measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 69(5): 2182-2192.
- [6] XI J, BAO H, LI T. Research on the algorithm of noisy laser stripe center extraction[C]// 2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Shenyang, China: IEEE, 2018: 6297-6300.
- [7] MUHAMMAD J, ALTUN H, ABO-SERIE E. A robust butt welding seam finding technique for intelligent robotic welding system using active laser vision[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94: 13-29.
- [8] 张宝, 童文超, 姜建伟, 等. 改进自适应双边滤波Canny算子在自动化设备中的应用[J]. 河南工程学院学报(自然科学版), 2024, 36(1): 76-80.
ZHANG Bao, TONG Wenchao, JIANG Jianwei, et al.

- Application of improved adaptive bilateral filter Canny operator in automation equipment[J]. *Journal of Henan Institute of Engineering (Natural Science Edition)*, 2024, 36(1): 76-80.
- [9] 刘欢, 刘骁佳, 赵耀邦, 等. 基于图像形态学的焊缝区域提取与对比度提升技术[J]. *中国材料进展*, 2024, 43(2): 175-180.
- LIU Huan, LIU Xiaojia, ZHAO Yaobang, et al. Weld region extraction and contrast improvement based on image morphology[J]. *Advances in Materials in China*, 2024, 43(2): 175-180.
- [10] 尤勇. 基于线激光相机视觉引导的焊接技术研究[D]. 江苏: 苏州大学, 2021.
- YOU Yong. Research on welding technology based on line laser camera visual guidance [D]. Jiangsu: Soochow University, 2021.
- [11] 孔玲君, 孙叶维. 基于图像感兴趣区域的图像压缩方法[J]. *包装工程*, 2015, 36(19): 103-109.
- KONG Lingjun, SUN Yewei. Image compression method based on image region of interest[J]. *Packaging Engineering*, 2015, 36(19): 103-109.
- [12] 杨书娟, 蒋毅, 俞建峰, 等. 激光视觉引导的管道焊缝识别与跟踪系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(16): 245-253.
- YANG Shujuan, JIANG Yi, YU Jianfeng, et al. Laser vision-guided pipeline weld recognition and tracking system[J]. *Advances in Laser and Optoelectronics*, 2022, 59(16): 245-253.
- [13] 毕超, 周鹏, 郝雪. 十字线结构光的光条中心线提取算法研究[J]. *航空精密制造技术*, 2020, 56(6): 15-18.
- BI Chao, ZHOU Peng, HAO Xue. Research on optical strip center line extraction algorithm for reticle structured Light[J]. *Aeronautical Precision Manufacturing Technology*, 2020, 56(6): 15-18.
- [14] 廉杰, 吕学勤, 顾冬霞, 等. 基于焊缝图像信息的光条纹中心线提取[J]. *上海电力大学学报*, 2021, 37(2): 195-199.
- LIAN Jie, LYU Xueqin, GU Dongxia, et al. Optical fringe center line extraction based on weld image information[J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2021, 37(2): 195-199.
- [15] 蒙禹舟. 基于主动视觉的激光焊接焊缝跟踪系统研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- MENG Yuzhou. Research on laser welding seam tracking system based on active vision [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.