

抗焊渣飞溅干扰的线结构光光条中心快速提取算法

胡增, 李伟明, Alaa Aldeen Housein, 高兴宇*, 尹炳强, 韦传嫩

桂林电子科技大学机电工程学院广西制造系统与先进制造技术重点实验室, 广西 桂林 541004

摘要 线结构激光 3D 成像技术已广泛用于焊接检测。飞溅干扰下快速、准确、实时地提取光条中心图像是实现焊缝在线检测的关键问题。针对传统方法难以有效解决强弧光和焊渣飞溅干扰的问题, 提出一种新的抗飞溅光条中心快速提取方法。首先, 根据激光光条宽度约束条件提取条纹几何中心, 采用快速连通域提取算法筛选出有效轮廓, 利用改进的局部边缘连接算法连接飞溅导致的断点; 然后, 搜索相邻轮廓, 将其构成有序对, 并生成有向图, 查找光条中心投影长度最大的路径作为真实的光条中心轮廓; 最后, 在粗提取的中心轮廓局部, 沿法向计算亚像素中心。实验结果表明, 所提方法能有效抵抗焊接时的飞溅干扰, 即使拆除线结构光传感器的挡板, 仍能实时准确地提取光条中心线, 与多种算法相比, 具有更高的运行速度和提取精度。

关键词 成像系统; 激光条纹中心提取; 线结构光; 焊接; 连通域; 边缘连接

中图分类号 TP391

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1611011

Fast Center Extraction Algorithm for Line Structured Laser Stripe of Antiwelding Slag Spatter

Hu Zeng, Li Weiming, Housein Alaa Aldeen, Gao Xingyu*, Yin Bingqiang, Wei Chuannan

Guangxi Key Laboratory of Manufacturing Systems and Advanced Manufacturing Technology, School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China

Abstract Line structured laser three-dimensional (3D) imaging technology has been widely used in welding detection. The fast, accurate, and real-time image extraction of the laser stripe center is the key element for online detection of weld quality under splash interference. Aiming at the problem that the traditional method is difficult to effectively solve the interferences of strong arc light and welding slag spatter, a novel robust and fast laser stripe center extraction algorithm is proposed. First, the geometric center of the stripe is extracted in line with the width constraint of the laser stripe. The fast connected region extraction algorithm is used to screen the effective contour, and the breakpoints caused by splashing are linked by the improved local edge linking algorithm. Second, adjacent contours are searched to create ordered pairs and oriented graphs. The path that has the largest projection length is the real stripe center. Finally, the subpixel center is calculated along the normal direction around the roughly extracting the central contour. The experimental results show that the proposed method can effectively resist spatter interference during welding. The centerline of the light strip can be extracted in real-time and accurately regardless of the removal of the baffle plate of the light sensor. The proposed method has a higher running speed and extraction accuracy compared with some traditional algorithms.

Key words imaging systems; laser stripe center extraction; line structured light; welding; connected domain; edge linking

1 引言

线结构激光 3D 成像技术具有非接触、速度快、精度高的优点^[1-2], 是焊接机器人应用最多的视觉传感

器。实际工业生产中, 焊接工况复杂, 存在大量弧光与飞溅干扰, 如何快速准确地提取光条中心, 是焊接机器人视觉引导与在线焊缝质量检测的关键。

国内外学者对结构光条纹中心线提取方法进行了

收稿日期: 2021-06-08; 修回日期: 2021-06-19; 录用日期: 2021-06-28

基金项目: 广西创新驱动发展专项资金项目(桂科 AA18118002-3)、广西自然科学基金(2018JJA170110)、桂林电子科技大学研究生创新项目(2020YCXB01)

通信作者: *gxy1981@guet.edu.cn

广泛的研究,已有的算法主要包括极值法、灰度重心法、几何中心法、曲线拟合法等^[3],但是它们都不能很好地处理光条图像中带有强烈干扰的情况^[4]。王胜春等^[5]结合深度学习和分区域模板匹配,有效克服了铁路场景中照明变化、反射不均匀以及表面不平顺等干扰信息,准确提取钢轨条纹中心。李涛涛等^[6]提出高斯-洛伦兹分峰拟合的中心提取方法,该方法对强漫反射和镜面反射的场景有明显的优势。李程辉等^[7]提出一种光条灰度调整方案,该方案有效缓解了物体法向变化等因素造成的条纹非对称现象,提高了中心提取的精度。周渊等^[4]采用密度聚类,从像素层级提取出可能构成光条中心的像素点,结合改进的图像接缝算法,对中断、光斑和火花等干扰进行了仿真实验,涉及的算法具有较好的抗干扰能力,但是没有给出实际焊接场景下的提取效果。Zhao等^[8]提出一种基于深度学习的中心提取方法,首先采用卷积神经网络分割出光条区域,再结合基于Hessian矩阵的灰度重心法精确提取光条中心,该深度学习算法能有效解决交叉反射、断线、光条模糊等缺陷,但是需要投入较多人力制作数据集。Zhang等^[9]提出一种自适应阈值的方法,解决了测量大型工件时环境光不均匀的影响。Fang等^[10]利用噪声的随机性,对相邻两帧条纹图进行逐像素比较,取像素值较小的点生成一张新的图像,作为中心提取的输入图像,但是会损失一部分光条信息。Yu等^[11]通过分析图像序列每个像素点在时域分布规律,判断该点是否为噪声点,并乘以正则化系数对噪声进行抵消,这个算法能有效去除焊接时的强飞溅干扰,但是运算量较大且占用较大内存空间。

上述方法在一定程度上提高了中心提取算法的抗干扰能力,但是针对焊接弧光和飞溅干扰的光条中心提取方法的相关研究依然较少,还存在运算速度慢或抗干扰能力弱的问题。本文提出一种抗飞溅的快速中心提取方法,利用线结构光视觉传感器条纹图像的几何特性,运用改进的连通域提取算法和边缘连接算法,筛选出真实光条中心轮廓,再沿法向采用加权灰度重心法^[12],精确提取出亚像素光条中心。

2 基本原理

2.1 光条分布特点

线结构激光 3D 成像传感器主要由相机、镜头、线激光器和外壳等组成,如图 1 所示。如图 1(a)所示,将相机、镜头和线激光器安装在一个外壳中,线激光器与相机的安装位置要保证投射出的线结构光近似平行于相机坐标系的 X 或 Y 坐标轴,本文均以平行于 Y 轴进行论述。图 1(b)为传感器拍摄的一张对接焊缝的线激光条纹图像。通过分析传感器布局 and 实际焊接时采集的图像发现,光条在图像 Y 坐标轴上的投影长度远大于在 X 轴的投影长度。焊接时的飞溅以熔池为中心在图像中呈放射状,极少出现与光条平行的情形。飞

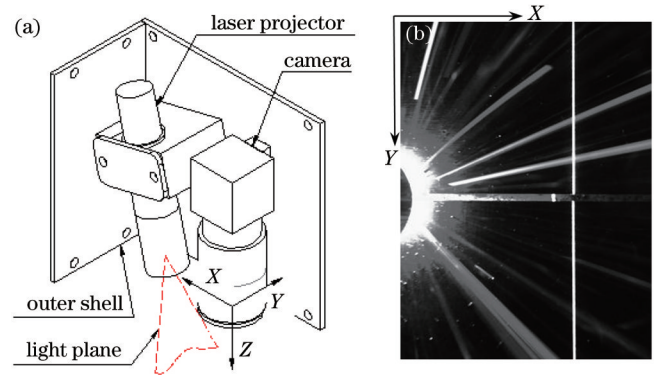


图 1 线结构光传感器结构和图像样本。(a)传感器结构简图;
(b)采集的图像

Fig. 1 Mechanical structure of line structured light sensor and image sample. (a) Mechanical structure of sensor;
(b) image captured by sensor

溅产生的光条在图像 Y 轴的投影长度远小于结构光条纹的投影长度。由于工件高度的突变,光条存在分段现象,相邻断点的 Y 轴坐标值接近。

通过总结光条图像的特性,提出两条假设:

- 1) 光条在图像 Y 轴的投影长度近似等于图像高度;
- 2) 光条中心轮廓相邻断点的 Y 坐标值接近。

根据上述假设,可得

$$\sum_{i=1}^N L_i \approx H, \quad (1)$$

$$|y_n - y_{n-1}| < T_p, \quad (2)$$

式中: L_i 为第*i*个中心轮廓在图像 Y 坐标轴的投影长度; N 为中心轮廓分段的数目; H 为图像高度; y_n, y_{n-1} 分别为相邻断点的 Y 轴坐标; T_p 为大于 0 的距离阈值。

2.2 几何中心提取

线结构激光 3D 成像传感器采集的图像包含大量弧光和飞溅噪声,通过设定合适的阈值 T_g ,将灰度值小于 T_g 的像素点置 0。逐行扫描图像,搜索不为 0 的连续区域,并记录该区域连续不为 0 的像素点数目,设置合适的条纹宽度上下阈值,分别记为 T_H, T_L 。当像素点数目在宽度阈值范围内,则认为该区域为条纹区域。然后根据条纹宽度计算条纹几何中心,并依次存储中心点坐标,记条纹几何中心点序列为 V_c ,可以描述为

$$V_c = \left\{ (x, y) \mid x = \frac{x_a + x_b}{2}, y = 0, 1, \dots, R - 1 \right\}, \quad (3)$$

式中: x 为几何中心点的横坐标, y 为纵坐标; x_a, x_b 分别为连续非零区域的起始点、末尾点的横坐标; R 为图像行数。

几何中心的提取原理如图 2 所示,大于阈值的像素点以灰色表示,小于阈值的像素点以白色表示,条纹几何中心点以圆形实心点标记。所取的条纹宽度上阈值为 30,下阈值为 5。图 2 中第 5 行存在两处满足条件

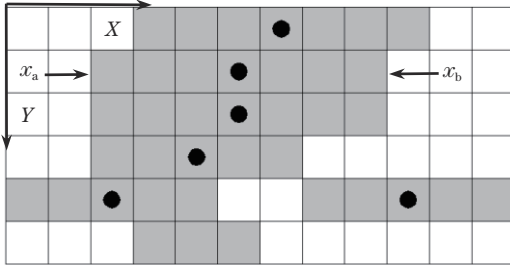


图 2 光条几何中心提取原理
Fig. 2 Principle of strip geometric center extraction

的非零像素区域,其中心像素都作为候选条纹中心,最后 1 行存在三个连续非 0 像素,但是小于条纹宽度阈值,因此被舍弃。

2.3 连通域快速提取

粗提取的几何中心点包含较多噪声,真实的条纹中心具有局部连通的特性。对粗提取的几何中心进行连通域提取,统计每一个连通域内像素点的数目,当像素点数目小于一定阈值(T_c)时,则认为该连通域内的像素点为噪声。

传统的连通域提取算法通过扫描二值图像的方式寻找连通区域,至少需要遍历图像一次^[13]。利用条纹宽度约束提取光条几何中心像素点,在图像 X 轴方向不存在连通的中心点,提取连通域时,只需要考虑 Y 方向的连通点。针对这一特性,提出一种快速的连通域提取方法:只遍历中心点序列,不需要遍历整幅图像,对于任一中心点,依次判断该点是否在各个连通域末尾元素的 8 邻域内,若在某连通轮廓末尾元素的 8 邻域内,则将该点加入到该连通轮廓的末尾,否则创建新的连通轮廓并将该中心点加入到新连通域。判断中心点是否属于某连通域的条件为

$$f_{(x,y)} = \begin{cases} 1, & y - y_e^m = 1 \cap |x - x_e^m| \leq 1, m = 1, 2, \dots, M \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: x_e^m 和 y_e^m 分别为第 m 个连通域末尾元素的横坐标和纵坐标; M 为连通域数目。当 $f_{(x,y)}=1$ 时,则该中心点属于第 m 个连通域。

如图 3 所示,分别记左右两侧圆形标记的 4 个中心像素点组成的连通域为 A、B,末尾元素分别为 a、b,当

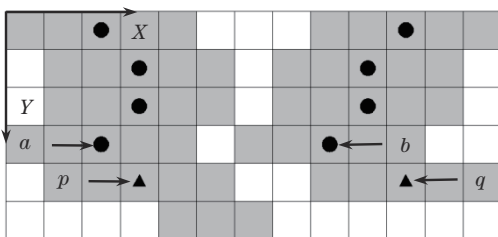


图 3 光条中心轮廓连通域提取原理
Fig. 3 Principle of connected domain extraction for strip center contour

遍历到三角形标识的中心像素点 p 时,分别比较 p 点与 a 、 b 两点的坐标,其中 a 点在 p 点的 8 邻域,因此将 p 点添加到连通域 A。点 q 不在 a 、 b 元素的 8 邻域内,故创建新的连通轮廓并存储。

按照上述方法得到的连通域的像素点存储顺序与中心轮廓沿图像 Y 轴排列顺序相同,定义中心轮廓首元素为中心轮廓沿 Y 轴的起点,末尾元素为中心轮廓沿 Y 轴的终点。分别取首元素和末尾元素邻域内 5 个中心点,通过直线拟合计算首末元素的单位方向向量,用于边缘连接。

2.4 附加约束的局部边缘连接

由于焊接时的飞溅干扰,按照上述方法得到的有效光条中心轮廓存在断点,局部边缘连接算法适用于小裂缝的连接,当梯度和方向角小于一定阈值则进行连接^[14]。然而在焊接工况下,直接应用该方法,容易造成误连接。如对接焊时,两光条之间存在较小间隙,局部边缘连接算法将两相邻断点连接起来,将无法识别焊缝。针对该问题,本文引入附加约束条件,只有当两断点连线上对应原始图像像素点的灰度值大于一定阈值时才进行连接。针对光条中心轮廓的特点,边缘连接算法只考虑中心轮廓的末尾元素与另一中心轮廓的首元素,记轮廓 i 与轮廓 j 构成的组合为轮廓对 (i, j) ,边缘连接的轮廓对需满足的条件为

$$\begin{cases} \sqrt{(x_e^i - x_s^j)^2 + (y_e^i - y_s^j)^2} < d \\ \angle(\mathbf{V}_e^i, \mathbf{V}_s^j) < \theta \end{cases}, \quad (5)$$

式中: x_e^i 和 y_e^i 分别为第 i 个中心轮廓末尾元素的横坐标和纵坐标; x_s^j 和 y_s^j 为第 j 个中心轮廓首元素的横坐标和纵坐标; d 为距离阈值; \mathbf{V}_e^i 为第 i 个中心轮廓末尾元素的方向向量; \mathbf{V}_s^j 为第 j 个中心轮廓首元素的方向向量; θ 为角度阈值。

改进的边缘连接算法的流程如下:

1) 从轮廓 $i=0$ 开始,遍历轮廓 i 与其他轮廓的组合,记轮廓组合为 (i, j) ,其中 $j=0, 1, 2, \dots$,计算轮廓 i 末尾元素与轮廓 j 首元素的距离和方向向量的角度,若距离和角度都小于阈值,则将轮廓对 (i, j) 存入数组 V_i ;

2) 按照角度值对数组 V_i 进行排序;

3) 按数组 V_i 的顺序,对轮廓 i 尝试边缘连接,当两断点连线上对应原始图像像素点的灰度值大于阈值,则连接两轮廓;

4) 若轮廓 i 成功连接或数组 V_i 遍历完成,重新从轮廓 $i+1$ 开始重复以上步骤,直到所有轮廓遍历完成。

图 4 为边缘连接前与边缘连接后截取的部分光条中心图像,由于飞溅的干扰,图 4(a)中 A、B 两点处条纹宽度超出阈值,光条几何中心发生断裂。从图 4(b)

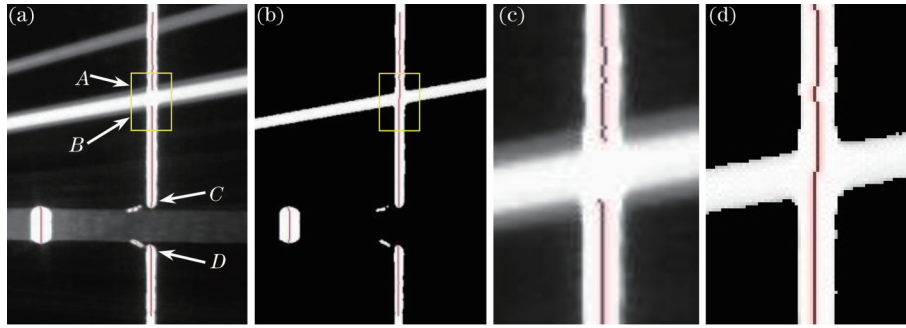


图 4 边缘连接效果。(a)光条几何中心提取效果;(b)边缘连接效果;(c)图4(a)的局部放大图;(d)图4(b)的局部放大图
Fig. 4 Result of edge linking. (a) Extracted geometric center of stripe; (b) image after edge linking; (c) enlarged view of Fig. 4(a); (d) enlarged view of Fig. 4(b)

可以看出,通过附加约束条件的边缘连接算法,断点 A、B 被成功连接,而断点 C、D 路径上对应的原始图像灰度值低于阈值,不满足边缘连接的条件,有效防止了误连接。

2.5 中心轮廓筛选

焊接工况下的结构光条纹图像一般不是连续的,通常由多个断开的条纹组成,如拼接焊缝、搭接焊缝等。当中心轮廓 i 的末尾元素与中心轮廓 j 的首元素的 Y 坐标满足式(2),即在 Y 轴方向上的投影距离小于一个足够小的阈值 (T_p),则将这两组轮廓组成一个有序对,记为 $\langle i, j \rangle$;遍历所有经过边缘连接后的中心轮廓,记录所有有序对,然后生成有向图;根据假设1),搜索有向图中每一条路径,挑选出中心轮廓投影长度最大的路径,并与投影长度最大的单个连通的中心轮廓进行比较,取投影长度较大的一组作为真实光条中心轮廓。

图5(a)为对接焊缝的光条图像,为说明轮廓筛选的原理,人为添加了多条纵向的曲线。图5(b)为编号后的中心轮廓,搜索得到10组有序对,如表1所示。

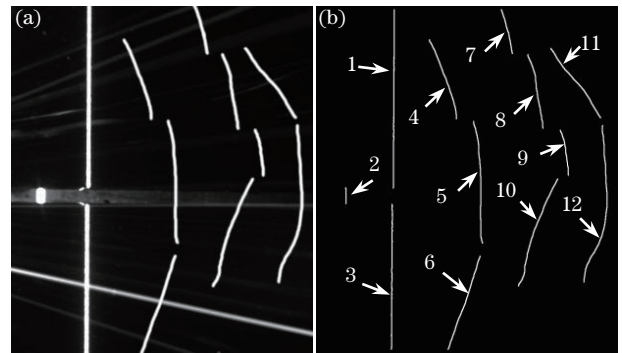


图 5 仿真图像效果图。(a)人为添加条纹的仿真图像;(b)编号后的中心轮廓
Fig. 5 Simulation image. (a) Simulated image with artificial stripes; (b) labeled stripe center

表 1 有序对搜索结果
Table 1 List of ordered pairs

Type of contours	List
Ordered pair	$\langle 1, 2 \rangle$ $\langle 2, 3 \rangle$ $\langle 4, 5 \rangle$ $\langle 7, 8 \rangle$ $\langle 7, 11 \rangle$ $\langle 8, 9 \rangle$ $\langle 8, 12 \rangle$ $\langle 11, 9 \rangle$ $\langle 11, 12 \rangle$ $\langle 9, 10 \rangle$
Independent contour	6

根据表1生成图6所示的有向图,其中路径1-2-3组成的中心轮廓在图像 Y 坐标轴投影长度最大,作为真实的光条中心轮廓。

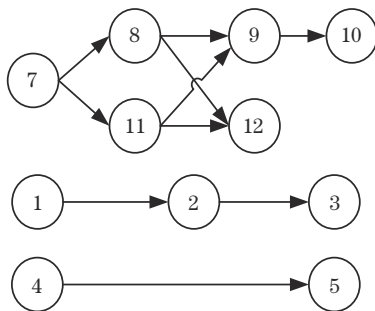


图 6 有序对构成的有向图
Fig. 6 Directed graph created by ordered pairs

2.6 法向精提取条纹中心

筛选得到的中心点只能达到像素级精度,还需采用亚像素级中心提取方法进一步求精,如曲线拟合法^[15]、Hessian矩阵法^[16]等。采用稳定性和速度较好的加权灰度重心法^[12],首先利用相邻的中心点计算各点处的法线方向,为保证运算速度,避免图像插值运算,按照方向模板法将光条法向分成4类^[17];然后沿法向采用加权灰度重心法提取亚像素中心坐标;最后,对提取的光条中心曲线作高斯平滑处理,减少噪声影响。记中心点为 P_n ,相邻4个中心点分别为 P_{n-2} 、 P_{n-1} 、 P_{n+1} 和 P_{n+2} ,中心点 P_n 处的法向量 V_n 以及与 X 轴的夹角计算方法为

$$V_1 = \frac{P_{n-1}P_{n+1}}{\|P_{n-1}P_{n+1}\|}, \quad (6)$$

$$\mathbf{V}_2 = \frac{\mathbf{P}_{n-2} \mathbf{P}_{n+2}}{\|\mathbf{P}_{n-2} \mathbf{P}_{n+2}\|}, \quad (7)$$

$$\mathbf{V} = [x, y]^T = \frac{0.5\mathbf{V}_1 + 0.5\mathbf{V}_2}{\|0.5\mathbf{V}_1 + 0.5\mathbf{V}_2\|}, \quad (8)$$

$$\mathbf{V}_n = [-y, x]^T, \quad (9)$$

$$\theta_x = \arccos(-y), \quad (10)$$

式中： \mathbf{V} 和 \mathbf{V}_n 分别为点 \mathbf{P}_n 的方向向量和法向量； θ_x 为 \mathbf{V}_n 与 X 轴的夹角。

3 实验和结果分析

为验证光条中心提取的精度,采用计算直线拟合误差的方法^[18],将结构光投影到一个高精度平板,在忽略光束平面和标准平板的平面度误差的情况下,两平面的交线为一理想直线。射影变换后,光条中心线在去畸变的图像中为一条直线,通过计算实际提取光条中心点的直线拟合误差,评价算法的准确性。实验所采用的相机型号为陕西维视 MV-EM500C,线激光投射器的中心波长为 650 nm,功率为 100 mW,线宽为 0.1 mm。在 CPU 为 Intel(R) Core(TM) i5-10400F 2.9 GHz,内存为 8 G 的计算机上,对投射到平板的分辨率为 2596×1944 的 20 张光条图像进行实验。加权灰度重心法^[12]、Steger 法^[13]、改进的高斯拟合法^[15]与所提方法运行 10 次,得到的光条中心直线平均拟合误差和平均运行时间如表 2 所示。

表 2 直线拟合误差和运行时间的比较结果

Table 2 Comparison results of line fitting error and running time

Method	Fitting error / pixel	Running time /ms
Weighted gray-gravity method	0.2272	4.200
Steger method	0.2465	89.340
Improved Gaussian fitting method	0.2302	11.595
Proposed method	0.2238	3.570

实验结果表明,所提方法具有更高的提取精度。加权灰度重心法提高了光条中心区域的权重,减少了光条边缘不平滑对中心提取精度的影响,而所提方法在此基础上对中心曲线作高斯平滑,进一步降低了噪声的影响。同时,所提方法具有最快的运行速度,只需要在提取几何中心时遍历图像一次;精提取中心时,只计算初始中心点局部的像素点;并且将高斯平滑步骤调整到中心提取之后,避免了对图像进行卷积运算的步骤,有效提高了运算速度。

为验证所提方法的抗干扰能力,在不安装防飞溅挡板的情况下,对拼接焊缝的光条图像进行中心提取实验,表 3 为算法的参数设置值,焊缝中心提取效果如图 7(a)所示。利用焊接机器人逆向焊接,传感器在焊枪后侧实时采集图像,提取光条中心并重建点云,效果如图 7(b)、(c)所示。实验结果表明,在实际焊接工况下,所提方法能有效抵抗弧光飞溅干扰,稳定地提取光条中心,重构出高精度焊缝图像。

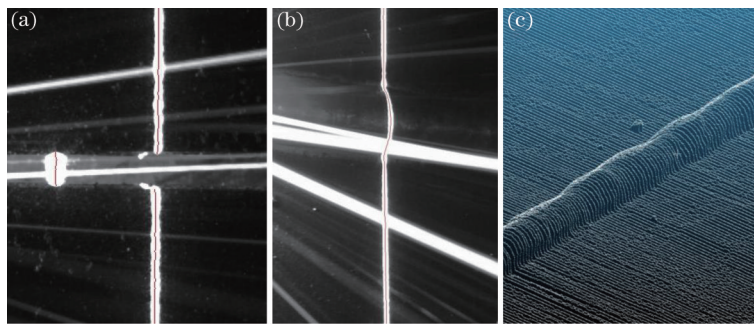


图 7 中心提取和重建效果。(a)对接焊缝提取效果;(b)焊缝轮廓提取效果;(c)焊缝三维重建效果

Fig. 7 Results of center extraction and reconstruction. (a) Extracted stripe center of weld seam; (b) extracted stripe center of weld bead; (c) reconstructed cloud point of weld bead

表 3 算法参数设置值

Table 3 Parameter values of proposed algorithm

Parameter	Value
Threshold value of gray-scale image T_g	200
High threshold value of stripe width T_H /pixel	30
Low threshold value of stripe width T_L /pixel	5
Threshold value of connected domain T_c	9
Distance threshold value of edge linking d /pixel	40
Angle threshold value of edge linking θ /rad	$\frac{\pi}{6}$
Threshold value of ordered pair T_p /pixel	30

4 结 论

所采用的连通域提取方法只需要遍历几何中心点序列;求解亚像素中心坐标时,只计算几何中心邻域内的像素点,有效减少了运算量;为避免对图像进行卷积操作,在中心提取之后再行高斯滤波处理。实验结果表明,所提方法具有较高的中心提取精度和运行速度。

在局部边缘连接算法的基础上引入路径灰度值约束,既能有效连接飞溅导致的断点,也能避免光条中心轮廓的误连接;利用光条的几何特性,引入有向对和有

向图,对光条中心轮廓作进一步筛选。实验结果表明,该方法对飞溅具有良好的抗干扰能力,在实时焊接场景下能有效提取光条中心,将有助于线结构光传感器结构简化、成本降低。

参 考 文 献

- [1] Zhou P, Xu K, Wang D D. Rail profile measurement based on line-structured light vision[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 16423-16431.
- [2] Gao H P, Xu G L. Robust analysis and laser stripe center extraction for rail images[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(5): 2038.
- [3] 李莹莹, 张志毅, 袁林. 线结构光光条中心提取综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(10): 100002.
Li Y Y, Zhang Z Y, Yuan L. Survey on linear structured light stripe center extraction[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(10): 100002.
- [4] 周渊, 孟祥群, 江登表, 等. 复杂干扰情况下的结构光条纹中心提取方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(12): 1204004.
Zhou Y, Meng X Q, Jiang D B, et al. Centerline extraction of structured light stripe under complex interference[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 1204004.
- [5] 王胜春, 韩强, 王昊, 等. 行车环境下钢轨轮廓激光条纹中心的提取方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(2): 0212004.
Wang S C, Han Q, Wang H, et al. Laser stripe center extraction method of rail profile in train-running environment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 0212004.
- [6] 李涛涛, 杨峰, 李石庚, 等. 基于高斯-洛伦兹分峰拟合的线结构光条中心的提取方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(7): 071201.
Li T T, Yang F, Li S G, et al. Extraction method of line-structured light stripe center based on Gauss-Lorenz decomposition peak fitting[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(7): 071201.
- [7] 李程辉, 张英杰, 韩江涛, 等. 应用于条纹中心提取的非对称条纹调整方法[J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0504005.
Li C H, Zhang Y J, Han J T, et al. Asymmetric stripe adjustment method for stripe center extraction[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0504005.
- [8] Zhao C Y, Yang J N, Zhou F Q, et al. A robust laser stripe extraction method for structured-light vision sensing[J]. *Sensors*, 2020, 20(16): 4544.
- [9] Zhang Y, Liu W, Wang W Q, et al. Extraction method of a nonuniform auxiliary laser stripe feature for three-dimensional reconstruction of large components[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(22): 6573-6583.
- [10] Fang Z J, Xu D, Tan M. Visual seam tracking system for butt weld of thin plate[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 49(5/6/7/8): 519-526.
- [11] Yu H T, Peng C C, Zhao Z, et al. Laser stripe extraction in additive manufacturing based on spatiotemporal noise regularization[J]. *Optical Review*, 2020, 27(6): 521-529.
- [12] 王文成, 徐建强, 司书春. 一种改进的重心法在光带中心提取中的应用[J]. *光电子·激光*, 2005, 16(10): 1239-1242.
Wang W C, Xu J Q, Si S C. A improved barycenter method used in light-trap center acquiring[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2005, 16(10): 1239-1242.
- [13] 张国和, 徐快, 段国栋, 等. 一种适于硬件实现的快速连通域标记算法[J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(8): 95-101.
Zhang G H, Xu K, Duan G D, et al. A fast labeling algorithm of connected components applicable for hardware implementation[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(8): 95-101.
- [14] 王睿, 漆泰岳, 胡燊, 等. 隧道衬砌裂缝检测中的背景处理和断点连接算法[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2017, 25(4): 742-750.
Wang R, Qi T Y, Hu S, et al. Background processing of tunnel lining crack detection and breakpoint connection algorithm[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2017, 25(4): 742-750.
- [15] 吴頔, 吕且妮, 卢琳, 等. 基于互相关和改进高斯拟合的光斑中心提取方法[J]. *光电子·激光*, 2017, 28(2): 202-210.
Wu D, Lü Q N, Lu L, et al. Spot center extraction based on cross correlation and improved Gaussian fitting[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2017, 28(2): 202-210.
- [16] Steger C. An unbiased detector of curvilinear structures[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(2): 113-125.
- [17] 胡斌, 李德华, 金刚, 等. 基于方向模板的结构光条纹中心检测方法[J]. *计算机工程与应用*, 2002, 38(11): 59-60, 109.
Hu B, Li D H, Jin G, et al. New method for obtaining the center of structured light stripe by direction template[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2002, 38(11): 59-60, 109.
- [18] 李玥华, 刘朋, 周京博, 等. 基于 BP 神经网络的结构光光条中心提取[J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1212005.
Li Y H, Liu P, Zhou J B, et al. Center extraction of structured light stripe based on back propagation neural network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1212005.