DOI: 10.3901/JME.2019.17.056

基于视觉特征的厚板机器人焊接焊缝轮廓的有效提取*

何银水¹ 余卓骅² 李健¹ 马国红¹

(1. 南昌大学江西省轻质高强结构材料重点实验室 南昌 330031;

2. 华东交通大学理工学院 南昌 330100)

摘要: 基于结构光的主动视觉传感技术是用于厚板机器人自动焊接中检测焊缝信息的一种有效途径。针对焊接过程中采集的焊缝图像包含或不包含电弧区域的两种情形,提出了一种基于视觉特征的适用于典型接头的激光条纹提取的通用算法。该算法利用 Gabor 滤波生成方向特征图,阈值分割后利用最近邻聚类算法对激光条纹和干扰数据进行聚类,根据聚类结果获得各类数据点在图像中的空间跨度,且只保留跨度值大于平均跨度的类,实现激光条纹的粗略提取;在从粗略提取结果中获取首个激光条纹分段的前提下,利用后续待识别的类与前一次已提取的激光条纹分段的欧式距离和类的自身跨度,设计了一个能提取激光条纹后续分段的竞争策略,从而实现激光条纹主体轮廓的准确提取;根据激光条纹视觉投射特点,设计了一个提取主体轮廓各分段之间的激光条纹细节的有效规则,实现激光条纹细节的提取。利用厚板 T 形接头和对接接头焊接中采集的焊缝图像验证了文中激光条纹提取算法的有效性,为厚板机器人自主焊接智能系统面向多种接头焊接应用的集成提供了可能。

关键词: 激光条纹提取; 视觉特征; 厚板焊接; 聚类; 方向特征图

中图分类号: TG409

Effective Weld Seam Profile Extraction via Visual Features for Robotic Welding with Thick Steel Plates

HE Yinshui¹ YU Zhuohua² LI Jian¹ MA Guohong¹

(1. Key Laboratory of Lightweight and High Strength Structural Materials of Jiangxi Province,

Nanchang University, Nanchang 330031;

2. Institute of Technology. East China Jiao Tong University, Nanchang 330100)

Abstract: The active visual sensor system based on structured-light is an effective method to detect weld seam profiles used in robotic automatic welding with thick steel plates. A general algorithm is presented to extract the typical laser stripes via visual features from the images with or without entire arc regions, which contains three steps as follows. Gabor filtering with appropriate filtering angles is used to produce the orientation feature map, which is segmented by Otsu algorithm and clustered via nearest neighbor clustering. The clusters whose lengths are over the average one are kept whereas those clusters with small lengths are eliminated, through which the approximate major parts of the laser stripe are first extracted. The first part of the laser stripe is discerned through the visual features of the laser stripe from the above approximate extraction result. By using the discerned part a competitive strategy that can guide how to discern subsequent parts of the laser stripe step by step, is developed. The strategy depends on two factors—the Euclidean distance between the candidate clusters and the last discerned cluster, and the lengths of every cluster, through which the major parts of the laser stripe can be then extracted. A rule of how to identify the small parts that lie between two adjacent major parts of the laser stripe is investigated. To verify the effectiveness of the proposed method, two types of images that are captured in the welding process with T-joints and butt joints, are applied to the tests. The proposed method affords the possibility of integrating different functions into an intelligent robotic welding system for weld profile extraction with different joints.

Key words: laser stripe extraction; visual features; thick-steel-plate welding; clustering; orientation feature map

* 国家自然科学基金资助项目(51665037)。20181120 收到初稿, 20190522 收到修改稿

0 前言

厚板机器人传统弧焊自动化焊接中多采用基于结构光的主动视觉传感检测不同焊道下的横截面上的焊缝轮廓^[1-4]。根据不同研究需要,采集的焊缝图像主要包括两种情况,其一是图像中不包括电弧和熔池区域^[5-8],其二是激光条纹和完整电弧均存在于同一图像中^[9-14],借以实时指示焊枪位置和反馈焊接过程,如图1所示。

图1 角接和对接接头焊接中的激光条纹

无论采用哪种焊缝图像,激光条纹的有效提取都是实现自动化焊接的关键。诸多研究针对不同接头下的激光条纹的提取提出了众多算法和方案。对于图像中无电弧区域情况下激光条纹的提取,如MOON等^[15]在厚板T形接头角焊缝轮廓提取中,采用滤波去噪和模式匹配方法获取激光条纹;文献[6, 16]通过中值滤波、阈值分割的流程获取激光条纹;秦涛等^[17]利用中值滤波和拉普拉斯高斯滤波噪声,利用动态开窗、二值化和孤点滤波二值化图像中的干扰数据获取激光条纹;文献[18]利用采样上相邻的几幅图像合成运算去除噪声进行激光条纹的提取;采用Radon变换和逆变换来去噪进行激光条纹的提取也是一种较为新颖的方法^[19]。上述焊缝图像由于没有电弧区域干扰,采用合适的滤光和减光设置可以使激光条纹亮度最大化,所以激光条纹提取难度较小,主要需要解决飞溅干扰问题。

对于图像中包含了完整电弧区域的激光条纹的提取,文献[9]首先获取感兴趣区域ROI,然后在ROI中通过遍历搜索最大灰度值法获取激光条纹;文献[13-14]提出采用Bottom-up视觉注意模型从电弧背景中凸显激光条纹显著性,然后借助自动阈值分割和聚类技术获取激光条纹;文献[10-11]利用Gabor滤波获取方向特征图,仅根据方向特征抑制电弧干扰,同样利用Otsu分割和最近邻聚类间接获取激光条纹。上述方法在抗干扰能力和提取激光条纹局部细节上有待加强。

本研究的重点在于提高电弧区域背景干扰下激光条纹提取算法的鲁棒性和准确性,同时针对

典型的T形接头和对接接头下的激光条纹,提出一种通用算法,并通过图像试验验证该算法的有效性。

1 算法流程

文中激光条纹提取算法流程主要包括三个部分:方向特征图的获取、激光条纹主体轮廓提取和激光条纹细节信息的辨认,如图2所示。

图2 激光条纹提取算法流程

1.1 方向特征图的获取

Gabor滤波因能检测图像中目标的方向特征信息而被大量采用来生成方向特征图。通过大量的离线试验发现,当板厚小于30 mm时,滤波角度分别设置在 $[0, 10^\circ]$ 和 $[-10^\circ, 0]$ 内用来检测坡口的不同方向信息,并将两次滤波结果进行线性叠加生成最终方向特征图的效果更好;当板厚超过30 mm时,由于坡口深度增加,在上述处理基础上需要增加一次滤波处理(滤波角度在 $[70^\circ, 80^\circ]$ 内),并将三个滤波结果进行线性叠加产生最终方向特征图。

图3显示激光条纹已有效地从背景中被凸显出来。为简化数据处理,同时进一步消除干扰,采用Otsu算法对方向特征图进行阈值分割,如图4所示。

图3 图1对应的焊缝图像的方向特征图

图4 图3对应的阈值分割结果

1.2 激光条纹主体轮廓的提取

激光条纹主体轮廓是指空间跨度大、视觉显著性更高的部分。提取过程主要分为五个步骤：基于欧式距离的最近邻聚类、空间跨度大于平均跨度的类的提取、激光条纹首个分段的确定、逐步提取其它分段的过程以及停止提取激光条纹分段的准则。下面主要介绍后面三个步骤。

激光条纹首个分段的确定。T形接头和平板对接接头下的两种激光条纹，其形貌特征迥异。通过特征统计分析，对于T形接头下的激光条纹，在聚类结果已知的情况下，各个类经过细化处理^[13-14]后激光条纹的首个分段满足如下两个条件即可从众多类中被辨认出

$$L(H_i^j \leq H_{i+1}^j) \geq 100 \quad (1)$$

$$L(S_i^j \leq 0) \geq 100 \quad (2)$$

式(1)、(2)中的相关变量的意义如图5所示(图中第*i*、*i+1*个数据成员之间的距离被放大)，且 $L(\cdot)$ 表示某类满足相应条件的数据成员的数目；标号*j*表示第*j*个类(来自聚类结果)，*i*表示第*j*个类中的第*i*个数据成员； S_i^j 表示第*j*个类中的数据成员*i*的斜率。

图5 细化处理后T形接头激光条纹第一个分段的特征示意

激光条纹后续分段逐步提取过程。该过程是一个循环过程。每次循环开始时，首先获取位于上次已辨别的激光条纹分段的右边的类；然后计算这些类与上次已辨别的类的欧式距离，并从小到大排序，只选取前3个作为候选类(在最后几次循环中因类的数目的减少，候选类的数目也逐渐减少到1)；最后将上述欧式距离和候选类的空间跨度均归一化至 $[0, 255]$ ，并进行线性叠加，将与叠加数值最大对应的候选类作为本次循环辨别出的属于激光条纹的类。后续过程依此进行。

激光条纹分段辨别终止准则。仍以T形接头激光条纹提取过程为例。通过离线测试并进行统计分析确定，细化后的激光条纹的最后分段(或最后分段

末端跨度超过100个像素的部分)斜率大于0(计算方法可参考文献[14])，且基本接近一个常数(波动在0.5以内)。图5消除干扰后激光条纹数据斜率计算如图6所示。

图6 图5消除干扰后激光条纹最后分段斜率变化特征

因此，T形接头激光条纹分段提取终值准则满足：① 斜率大于0；② 斜率波动范围在0.5以内；③ 类中斜率波动范围在0.5以内的数据数目大于100。

对于V形坡口激光条纹，其首个分段确定的要求满足

$$H_{\max} - H_{\min} \leq 8 \quad (3)$$

$$L_j \geq 100 \quad (4)$$

V形坡口激光条纹分段辨别终止条件与T形接头的终止准则类似，其激光条纹的最后分段(或该分段的末端跨度超过100个像素的部分)的斜率波动范围也在0.5以内，且斜率值接近于0，图7消除干扰后激光条纹数据斜率如图8所示。

图7 V形坡口激光条纹细化后首个分段的特征示意

图8 图7消除干扰后激光条纹最后分段斜率变化特征

提取图4中的T形接头和V形坡口激光条纹的主体轮廓如图9所示。

图9 采用文中算法提取图4中激光条纹的主体轮廓

1.3 激光条纹细节信息的提取规则

激光条纹主体轮廓提取中由于每次循环是从候选类中选取跨度较大同时与已识别的类距离较近的种类,因此存在丢失跨度较小的条纹细节的情况,而这些丢失的细节数据通常位于激光条纹主体轮廓之间,且与相邻的主体轮廓形成平滑过渡。因此,算法上先连接细化后相邻的各主体轮廓,并将连接线膨胀至激光条纹平均厚度,以此确定各激光条纹主体轮廓之间的多个区域;当某个类与已确定的区域有交集时可判定该类属于激光条纹的细节部分,由此可提取所有激光条纹细节数据。对图4的前两个激光条纹进行细节提取,结果如图10所示。

图10 采用文中算法提取图4激光条纹的细节数据

2 图像处理试验

为验证提出的算法的有效性,同时与已有算法进行对比,选取图1a、1b作为试验图像,激光条纹提取结果对比如图11所示。

图11 自左向右依次为采用文献[13-14]的算法和本文提出的算法提取的激光条纹

试验结果显示,文献[13-14]难以有效消除空间跨度较大的干扰,同时由于激光条纹在原始图像中亮度不一,亮度较低的细节部分容易被丢失。文中提出的算法在抗干扰能力及辨别激光条纹细节能力方面均有所提升。

当然,文中提出的算法也适用于焊缝图像中无电弧区域的情形。以图1c为试验对象,激光条纹提取结果如图12所示。

图12 图1c中无电弧区域干扰下激光条纹提取结果

3 讨论

无论焊缝图像中是否有电弧区域,就显著性而

言焊缝图像中的激光条纹的方向显著性要明显高于亮度显著性,因此文中主要以方向显著性作为提取激光条纹的出发点,这与文献[11, 13-14]不同。

另外,在众多涉及激光条纹提取的研究中阈值分割多被用来消除更多干扰和简化数据处理,但处理后往往遗留了部分干扰数据。文献[11-14]提出采用聚类方法对阈值分割后的数据进行聚类,然后指定空间跨度阈值区分激光条纹数据和干扰数据,并最终消除跨度较小的干扰。这种方法易消除激光条纹细节部分,不利于最终焊缝轮廓特征点的提取,且跨度阈值难以有效确定。文献[14]另外提出,利用聚类结果中空间跨度大于平均跨度的类的位置进一步效果干扰,但当干扰数据空间跨度也较大时难以获取好的效果,例如焊接中的飞溅会产生空间跨度大的干扰。

文中在获取属于激光条纹第一个分段的条件下,结合激光条纹空间分布及视觉特点,在小范围内采用竞争的方式逐段辨别属于激光条纹的数据,可以有效去除干扰数据,并能辨别激光条纹细节部分,提高了不同采样时刻对激光条纹提取的准确率和鲁棒性,利于后续自动焊接过程的开展和焊接精度的提高。

经离线测试,文中提出的算法对中厚板角接和对接焊接不同焊道下激光条纹的提取均有效。

4 结论

(1) 激光条纹提取中利用 Gabor 滤波获取方向特征信息可以有效使激光条纹从电弧干扰背景中凸显出来。

(2) 当工件厚度小于 30 mm 时, Gabor 滤波中的两个滤波角度设置在 $[0, 10^\circ]$ 和 $[-10^\circ, 0]$ 范围内,并将两次滤波结果进行线性叠加可较好凸显激光条纹;当工件厚度大于 30 mm 时,将滤波角度分别设置在 $[0, 10^\circ]$ 、 $[-10^\circ, 0]$ 和 $[70^\circ, 80^\circ]$ 内的 Gabor 滤波结果进行线性叠加效果更好。

(3) 提出采用局部范围内的竞争方式提取激光条纹的主体轮廓,然后通过精确划定各主体轮廓之间的提取区域来辨别激光条纹细节部分,有助于最大限度消除干扰数据。

(4) 文中算法的有效性依赖首段激光条纹识别的准确性,因此在首段激光条纹的甄别中应该研究更有效的算法以确保激光条纹提取有效。

参 考 文 献

[1] 刘明友,刘南生,郭昌荣,等. 基于结构光视觉传感的

- 焊缝视觉信息检测和识别研究[J]. 焊接, 2007(1): 28-31.
- LIU Mingyou, LIU Nansheng, GUO Changrong, et al. Study of weld seam detection and recognition based on structured-light visual sensing[J]. Welding & Joining, 2007(1): 28-31.
- [2] JAE B P, SEUNG H L. Precise 3D lug pose detection sensor for automatic robot welding using a structured-light vision system[J]. Sensors, 2009, 9(9): 7550-7565.
- [3] LI T T, YANG F, XU X L. Method of large-scale measurement based on multi-vision line structured light sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1104003.
- [4] 莫毅. 基于结构光视觉传感器的弧焊机器人视觉检测方法 & 试验结果分析[J]. 热加工工艺, 2017(1): 238-242.
- MO Yi. Visual detection method and experimental result analysis of arc robot based on structured-light sensors[J]. Hot Working Technology, 2017, (1): 238-242.
- [5] 何银水, 杨杰, 余卓骅. 基于激光视觉系统的水下焊接焊缝识别[J]. 电焊机, 2012, 42(11): 15-19.
- HE Yinshui, YANG Jie, YU Zhuohua. Recognition for underwater welding seam based on laser vision system[J]. Electric Welding Machine, 2012, 42(11): 15-19.
- [6] GU W P, XIONG Z Y, WAN W. Autonomous seam acquisition and tracking system for multi-pass welding based on vision sensor[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2013, 69(1-4): 451-460.
- [7] WANG X, BAI R, LIU Z. Weld seam detection and feature extraction based on laser vision[C]// The Chinese Control Conference, July 28-30, 2014, the Nanjing International Conference Centre, Nanjing. New York, NY, USA: IEEE, 2014: 8249-8252.
- [8] YIN X Q, TAO W, FENG Y Y, et al. Laser stripe extraction method in industrial environments utilizing self-adaptive convolution technique[J]. Applied Optics, 2017, 56(10): 2653-2660.
- [9] CHEN H, LIU W, HUANG L, et al. The decoupling visual feature extraction of dynamic three-dimensional V-type seam for gantry welding robot[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2015, 80(9-12): 1741-1749.
- [10] HE Y S, CHEN Y X, WU D, et al. A detection framework for weld seam profiles based on visual saliency[M]. Springer International Publishing, 2015.
- [11] 何银水, 孔萌, 陈华斌, 等. 基于视觉注意机制的机器人厚板焊接焊缝轮廓的识别[J]. 焊接学报, 2015, 36(12): 51-55.
- HE Yinshui, KONG Meng, CHEN Huabin, et al. Weld seam profile identification based on visual attention mechanism in robotic thick-plate welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(12): 51-55.
- [12] HE Y, CHEN H, HUABNG Y, et al. Parameter self-optimizing clustering for autonomous extraction of the weld seam based on orientation saliency in robotic MAG welding[J]. J. Intell. Robot Syst., 2016, 83(2): 219-237.
- [13] HE Y, CHEN Y, XU Y, et al. Autonomous detection of weld seam profiles via a model of saliency-based visual attention for robotic arc welding[J]. J. Intell. Robot Syst., 2016, 81(3-4): 395-406.
- [14] HE Y, XU Y, CHEN Y, et al. Weld seam profile detection and feature point extraction for multi-pass route planning based on visual attention model[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 37: 251-261.
- [15] MOON H S, KIM Y B, BEATTIE R J. Multi sensor data fusion for improving performance and reliability of fully automatic welding system[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2006, 28(3-4): 286-293.
- [16] 黎咸西, 熊震宇. 基于视觉传感的多层多道焊缝图像特征的识别[J]. 南昌航空大学学报, 2011, 25(1): 53-57.
- LI Xianxi, XIONG Zhenyu. Identification of image characters for multi-pass welding seam based on vision sensing[J]. Journal of Nanchang Hangkong University, 2011, 25(1): 53-57.
- [17] 秦涛, 张轲, 邓景煜, 等. 基于改进最小二乘法的焊缝特征直线提取方法[J]. 焊接学报, 2012, 33(2): 33-36.
- QIN Tao, ZHANG Ke, DENG Jingyu, et al. Algorithm of extracting feature lines in welding seam image based on improved least-square method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(2): 33-36.
- [18] 李宁, 喻宁娜, 莫胜撼, 等. 激光视觉传感焊缝跟踪系统[J]. 电焊机, 2013, 43(5): 105-108.
- LI Ning, YU Ningna, MO Shenghan, et al. Research on seam tracking system based on laser vision[J]. Electric Welding Machine, 2013, 43(5): 105-108.
- [19] 刘习文, 洪波, 戴铁峰. 激光视觉焊缝跟踪图像处理与坡口识别[J]. 激光与红外, 2011, 41(7): 804-807.
- LIU Xiwen, HONG Bo, DAI Tiefeng. Image processing and groove recognition in weld seam tracking based on laser vision[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(7): 804-807.

作者简介: 马国红(通信作者), 男, 1975 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为先进焊接方法。

E-mail: my_126_my@126.com

何银水, 男, 1979 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为机器人智能化焊接技术。

E-mail: heyingshui117@163.com