



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2022.12.01

强噪声下的激光视觉焊缝跟踪图像处理 研究现状及展望

董金枋^{1,2}, 汤大赞³, 吴 頔^{1,2,4}, 张培磊^{1,2}, 于治水^{1,2}, 许燕玲⁴

1. 上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620

2. 上海市激光先进制造技术协同创新中心, 上海 201620

3. 江苏省特种设备安全监督检验研究院, 江苏 南京 210036

4. 上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200240

摘要: 激光视觉焊缝跟踪系统已经成为机器人焊接必不可少的关键环节之一, 但焊接过程中存在的金属飞溅、烟尘以及强弧光等常见的强噪声干扰, 给激光视觉焊缝跟踪的稳定性和精确性带来极大挑战。分别对比了焊缝跟踪最为关键的图像预处理、激光中心线提取、特征点识别三个环节中传统算法与新兴算法的区别, 总结归纳各类图像处理算法的检测精度、实时性以及适用场景。并对激光焊缝跟踪技术在焊接领域未来的发展方向进行了展望。

关键词: 强噪声; 机器人焊接; 激光视觉; 焊缝跟踪; 图像处理

中图分类号: TP216 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2022)12-0001-16

Research Status and Prospect of Laser Vision Weld Seam Tracking Image Processing Under Strong Noise

DONG Jinfang^{1,2}, TANG Dayun³, WU Di^{1,2,4}, ZHANG Peilei^{1,2}, YU Zhishui^{1,2}, XU Yanling⁴

1. School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

2. Shanghai Collaborative Innovation Center of Laser of Manufacturing Technology, Shanghai 201620, China

3. Special Equipment Safety Supervision and Inspection Institute of Jiangsu Procedure, Nanjing 210036, China

4. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract: Laser vision seam tracking system has become an indispensable key technical equipment for robot welding. Due to the inherent strong noise conditions such as spatter, narrow gap and strong arc light in welding processing, it brings great challenges to the stability and accuracy of laser vision seam tracking system. This paper compares the differences between traditional and emerging algorithms in the three key links of weld seam tracking system: image preprocessing, centerline extraction of weld line structured light stripe and feature point extraction, and summarizes the detection accuracy, real-time performance and applicable scenarios of various image processing algorithms. Finally, the future development direction of laser welding seam tracking technology in the field of welding is prospected.

Keywords: strong noise; robotic welding; laser visual sensor; welding seam tracking; image preprocessing

引用格式: 董金枋, 汤大赞, 吴 頔, 等. 强噪声下的激光视觉焊缝跟踪图像处理研究现状及展望[J]. 电焊机, 2022, 52(12): 1-16.

* 收稿日期: 2022-05-02 修回日期: 2022-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(51905333); 中国博士后科学基金(2021M692039); 上海市青年科技英才扬帆计划(19YF1418100)

作者简介: 董金枋(1994—), 男, 硕士, 主要从事激光增材过程监测的研究。

通信作者: 吴 頔(1988—), 男, 博士, 硕士生导师, 主要从事先进焊接技术过程监测及质量诊断的研究。

Citation: DONG Jinfang, TANG Dayun, WU Di, et al. Research Status and Prospect of Laser Vision Weld Seam Tracking Image Processing Under Strong Noise[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(12): 1-16.

0 前言

机器人焊接是工业智能焊接制造的关键技术之一^[1-2]。在工程机械^[3]、轨道交通^[4]、钢结构^[5]、航空航天等^[6]领域中,机器人焊接有焊接效率高、焊接区疲劳寿命高、焊接更均匀、焊接区域面积小、质量稳定性高等优点,已被广泛用于代替传统手工焊接^[7]。但由于热变形、装配误差、加工误差的存在且不可消除,基于示教回放的焊接机器人无法适应工件偏移引起的焊接轨迹变化,导致焊接过程中出现焊偏、气孔、未熔合等焊接缺陷以及机器人撞枪等事故^[8-12]。因此,在焊接过程中迫切需要通过焊缝跟踪来感知焊缝的变化,以便工业机器人可以针对焊缝变化实时做出反馈,调整焊枪位置保证焊缝对中,确保工件焊接质量^[13-14]。

焊缝跟踪作为机器人焊接领域的一个关键技术,类似于给机器人装上眼睛,主要功能是在起始焊接点识别定位焊缝位置,焊接过程中根据焊缝的高低左右变化将偏差信息实时反馈给执行机构,保证焊枪时刻与焊缝对中,保证焊接质量。经过多年发展,目前主流的跟踪技术路线主要有:机械仿形跟踪^[15]、电弧传感^[16-17]、被动视觉^[18-21]、主动视觉^[22-24]、磁传感^[25-26]。机械仿形和探针跟踪因为使用过程中存在磨损问题,同时容易受到飞溅和焊缝光洁度、划痕的影响,精度较低,并且需要焊缝有明显的物理特征才可工作,应用场景有限,通常用在厚板直缝、环缝一次焊接成形等对精度要求不高的场景。电弧跟踪虽然集成度高,但是在实际应用过程中受材料、焊接工艺、焊机品牌功率、制造环境的差异影响,无法精准地确定电弧长度与焊接电流、电弧电压之间的相关性数学模型,难以确保精度和稳定性;同时电弧跟踪在定位起始点时需缓慢靠近工件定位,耗时较长,效率较低。再者电弧跟踪因工作原理要求,仅针对角接、开坡口焊缝,且需要搭配摆焊工艺,效率和精度偏低,主要集中在开坡口的厚板电弧焊,局限性较大^[27]。磁光检测在窄间隙焊缝中优势明显,无论多小间隙的焊缝,材料是否

反光、吸光都能检测,但是目前磁光检测在焊缝跟踪中的应用还处于探索阶段,应用研究还不成熟。同时磁光焊缝检测系统组成复杂、集成度低、不可控环节过多,比如光路结构设计、磁光薄膜材料的均匀性、焊接平台的振动、工件膨胀系数等方面都还未形成统一的设计规范,系统稳定性不足,目前依然处于实验室阶段,预计将来可能在激光薄板对接焊接中有极高的应用价值^[25]。被动视觉检测由于直接摄取了熔池图像,所以基本上不存在导前误差,在激光焊接中,其原理是利用金属熔滴流向焊缝间隙时的尖角特征进行定位,但是要求焊缝间隙大于1 mm,否则尖角特征不明显,检测困难。同时金属熔滴在焊缝间隙的熔滴尖角特征并不稳定,工件在焊接过程由于热胀冷缩会出现形变,导致熔滴尖角有时是椭圆,有时消失,所以此方法在原理上有缺陷,无法准确稳定地判断焊缝具体的位置信息,而且工业相机在飞溅、弧光干扰下,抗干扰能力有限,应用受到限制,故被动视觉跟踪主要应用于TIG焊等低飞溅场景^[28-30]。

激光视觉焊缝跟踪的原理是基于相机接受激光条纹在工件表面的漫反射光条轮廓对焊缝进行定位,在焊缝坡口检测、焊缝余高、焊缝轮廓、熔池表面轮廓、焊枪姿态检测等领域应用广泛^[31-32]。相较被动视觉检测和磁光成像检测,结构光焊缝检测技术更为成熟,主动光源具有单色性好、相干性好、信噪比高等优点,所以抗干扰能力强,易于提取图像信息,检测精度更高。目前随着工业机器人的应用推广,面临工况复杂、干扰因素多且杂、工装重复定位精度低等问题,迫切要实现激光视觉在强噪声、窄间隙下的焊缝准确识别,实现柔性自动化焊接加工。焊接过程中能根据焊缝变化实时纠偏的焊接工作站通常由机械臂、控制柜、焊接电源、焊缝跟踪系统组成,可以实现焊缝图像采集、图像处理、实时纠偏功能^[33-34]。在工业现场执行机构除了机器人,也有用电机加导轨气缸的焊接专机。控制器除了机器人控制柜,激光焊缝跟踪也有工控机或者FPGA、SDSP等嵌入式处理器^[35-37]。除此之外不同

的工件还需要匹配不同的夹具,整个工作流程是机器人示教编程,工件装夹、激光跟踪采集焊缝图像、图像处理定位焊缝位置,位置信息反馈到机械臂实时纠偏确保焊枪时刻与焊缝保持对中。

激光跟踪最关键的环节即为图像处理,焊缝图像采集包含很多干扰信息,需要先进行预处理,灰度二值化之后通过中值滤波筛去干扰信息,再提取 ROI(Region of Interest)区域对光条边缘进行提取,然后通过灰度重心法等对光条进行细化提取中心点信息,再通过曲线拟合连接成线,最后通过斜率分析法等对光条中心进行特征点提取。特征点提取之后进行坐标转换,与标定的焊缝轨迹进行对比计算偏差值,然后把偏差值传输给到机械臂等执行机构,进行实时调整^[32,38]。但是由于焊接过程中存在强烈的辐射、弧光、烟尘、飞溅等干扰,增加了图像处理的难度。比如,钢结构焊缝的打磨、划痕导致的光条强度不均匀,检测图像干扰大,导致焊缝特征提取困难^[39]。Lu^[40]等人通过脊线跟踪方法,仅从激光条纹附近的线提取中心线,排除背景噪声的干扰,图像处理面积小,采用斜率分析法和最小二乘法提取焊缝特征点,抗干扰能力强,能满足焊缝跟踪的高精度要求。Li^[41]提出了一种序列重力法 SGM(Semi Global Matching)来提取更平滑的焊缝中心线,可以减少干扰的影响,采用双阈值递归最小二乘法对 SGM 得到的曲线进行拟合,以提高系统的实时性和准确性。Zou^[42]等人采用加权局部余弦相似度的目标跟踪算法检测接缝特征点,有效防止弧线和飞溅物的干扰。但是这些算法过于消耗计算机资源,实时性上有所欠缺,急需能够兼顾实时性和准确性的图像处理方法。

激光焊缝跟踪的图像处理环节主要由图像预处理、激光光条提取、特征点识别三部分组成,本文介绍了这三部分的传统图像处理算法,同时总结近年的一些特色算法应用及其处理效果,包括精度与延迟,并对激光焊缝跟踪的未来发展方向进行展望。

1 图像预处理

图像采集之后需要进行预处理滤波去除异常

数据方可进入下一环节。如图 1 所示,由于在焊接加工过程中剧烈的弧光、飞溅、烟尘都会影响图像采集的信噪比和清晰度,同时工件材料本身的反光吸光特性、表面油污、打磨划痕都会对激光条纹的信号采集造成影响。除此之外,如采用工控机进行图像处理还涉及传输过程的高频电磁干扰。这些干扰都将直接影响后续激光条纹的提取以及焊缝特征点的提取,直接决定跟踪精度与焊接质量,所以在正式图像特征提取之前必须进行图像预处理,包括滤波、二值化、ROI 选取等,以提高图像质量及信噪比。

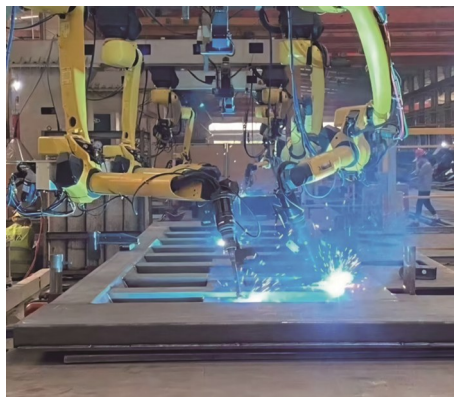


图 1 焊接飞溅、强弧光、烟尘干扰

Fig. 1 Welding spatters, strong arc light, smoke and dust interference

滤波之前需要了解图像处理主要的噪声类型和特征,以便有针对性地选择滤波算法。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^[43-44]。因此图像预处理的核心就是滤除或减弱飞溅和弧光对焊缝图像的影响,即以不破坏原有数据为原则尽可能去除图像噪声,滤波降噪是预处理的重要一步,降噪效果会直接影响到后期图像分类识别的准确率。目前图像去噪方法主要有空域滤波和频域滤波两种^[45]。频域滤波需要经过傅里叶变换与逆变换^[46],在视觉效果上会降低原有精度,并丢失重要的特征信息,在智能领域应用中频域滤波的稳定性和实时性都难以满足要求。空域滤波算法主要利用卷积模板和目标图像进行卷积运算来实现图像异常数据的清除降噪^[47],相较而言,该算法更加快速精确,适合对激光条纹轮廓图像进行滤波。在激光跟踪中常用的空域滤波算法有中值滤波、均值滤波、高

斯滤波等^[48]。均值滤波^[49]和高斯滤波^[50]的滤波效果取决于模板核的大小,一般来说,模板核的尺寸越大,滤波效果就越强,但同时计算耗时也越长。高斯滤波只有在噪声呈高斯分布时效果才显著。均值滤波和高斯滤波等线性滤波算法均能有效去除图像中强光噪点以及飞溅干扰等噪声,但同时也会模糊光条的边缘特征。对于激光焊缝跟踪的结构光图像,边缘信息的准确性非常重要,直接决定下一环节光条中心提取精度。因此为了提高焊缝图像处理精度,需要尽可能保留焊缝结构光图像的边缘信息。经过广泛的研究总结,一般利用中值滤波算法对激光光条图像进行滤波处理,以便得到清晰的光条轮廓图像^[51]。中值滤波是一种非线性信号处理技术,其基本原理是通过选取数字图像序列中一点的值来代替一定邻域范围的像素值,使周围的值接近真实值来消除孤立的突变值,以此消除噪点,实现滤波。中值滤波能有效滤除常见的椒盐噪声、斑点噪声等,同时能够保留图像相对清晰的边缘细节信息。如图2所示,原始图像包含大量的焊接飞溅干扰,同时还有弧光噪点,经过滤波之后可以有效滤除噪点,保留较为清晰的焊缝光条轮廓,方便后续光条提取和特征点提取^[52]。



图2 滤波前(左)与滤波后(右)

Fig 2 Image filtering before (left) and after (right)

表1 各类滤波降噪算法对比

Table 1 Comparison of various filtering noise reduction algorithms

滤波算法	原理	优点	缺点
中值滤波 ^[58]	利用邻域内像素的中间值代替原像素	适用性广、能消除孤立噪声	无法在滤除噪声与保留图像细节两方面兼顾
空域滤波 均值滤波 ^[59]	利用邻域内平均值代替原像素值	对频率高的尖锐噪声有很好的降噪效果	滤除噪声的同时,会使图像的细节变模糊
高斯滤波 ^[60]	利用邻域内加权平均值代替原像素值	滤除噪声的同时能保留更加完整的边缘信息	仅对高斯噪声效果较好、局限性大
频域滤波	首先对图像进行傅式变换进行滤波处理,再将图像数据进行傅式反变换获取目标图像	处理周期性特征较强的噪声十分有效	在处理过程中难以辨别一些与噪声信息频率相近的图像信息;运算量比较大,处理速度比较慢

彭宏等^[53]提出一种改进的均值滤波算法,利用图像像素点邻域灰度值的相似特征,在一定范围内选择用平均值代替噪点处灰度值,同时结合 Canny 算子对图像边缘进行检测,可以有效去除图像中的高密度脉冲噪声。Piao 等^[54]提出一种基于高斯滤波和双边滤波的混合图像去噪算法,首先利用高斯滤波器对噪声图像进行滤波得到参考图像,然后将参考图像和噪声图像作为双边滤波器的范围核函数的输入,该算法能够有效克服阶梯效应,滤波后的图像更加平滑,纹理特征也更加接近原始图像,能够取得更高的 PSNR(峰值信噪比)值。袁新星^[55]通过实验对比了不同密度椒盐噪声下中值滤波的处理效果,结果证明,中值滤波算法即使在强噪声情况下降噪效果也非常显著。申俊琦^[56]使用自适应中值滤波法对采集的焊缝图像进行降噪处理,实验证明该算法针对不同性质及强度的噪声均表现出很强的降噪能力,同时还能很大程度上保持原有焊缝边缘的特征信息。张杰飞^[57]采用高斯滤波器对含噪声的焊缝图像进行滤波降噪处理,并通过实验分别比较了高斯滤波、均值滤波法与中值滤波法对强噪声焊缝图像的处理效果,结果证明,中值滤波更适合用于强噪声图像处理过程。

本文归纳总结了常用的滤波算法并进行对比,如表1所示。

Wu 等^[61]通过实验测试了不同的滤波技术,以此确定图像处理过程中去除噪声的最佳滤波技术。采用高斯、维纳和中值三种滤波技术进行了比较,为了检验效率,使用了四种统计算法,即 MSE(均方误差)、RMSE(均方根误差)、PSNR 和信噪比。通过比较发现,中值滤波器的 MSE 和 RMSE 值最小,且 PSNR 和信噪比值最大,这说明在弧光环境下中值

滤波器是最有效的去除噪声技术。

2 光条中心提取

由于激光器自身发射的激光条纹亮度的不均匀性,以及工件表面反光、划痕等因素导致的光条变形和亮度不均匀,光条大小粗细时刻都处于变化之中。同时光条的亮度是从中心线向外逐次递减,

导致如果直接对结构光进行图像处理,需要处理的数据庞大且不稳定,会极大影响焊缝数据采集的准确性、鲁棒性。因此,为节省计算机资源,同时降低数据处理延时,一般先对光条边缘进行提取,再骨架细化提取光条中心线,减少后续焊缝特征提取数据处理量^[62]。如图 3 所示,不同的光条提取方法提取的焊缝情况各不相同,需要根据具体的干扰噪声情况来选择合适的光条提取算法。

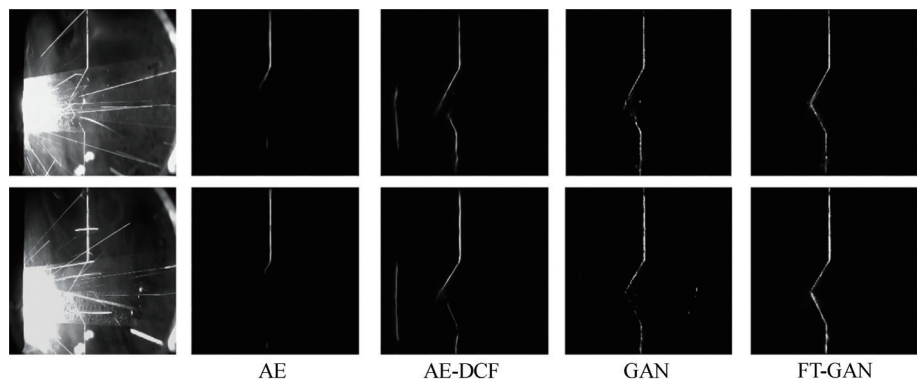


图 3 不同算法的结构光光条提取情况^[63]

Fig. 3 Extraction of structured light stripe by different algorithms

光条中心提取分为两步:首先进行光条边缘识别,锁定光条区域,然后进行中心线提取。边缘识别的原理根据图像像素点的灰度阶跃变化来确定,当灰度值导数较大或出现极值时,即定义为边缘。目前常用的基于一阶导数的边缘检测算子,包括

Roberts 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子等;基于二阶导数的边缘检测算子主要是 LOG (Laplacian of Gaussian) 边缘检测算子^[64]。激光结构光光条边缘提取算法的原理及优缺点如表 2 所示。

在成功获取图像的单像素边缘后,快速、稳定

表 2 激光结构光光条边缘提取算法

Table 2 Edge extraction algorithm of laser structured light stripe

边缘检测算法		原理	优势	劣势
一阶边缘检测算法	Robert ^[65]	采用相邻像素之差近似梯度幅值来检测边缘	图像边缘检测效果良好, 运算速度快	存在抗噪声能力弱、精度不高的问题, 适用于背景噪声
	Sobel ^[66]	考察像素点上、下、左、右四邻域灰度值的加权差		
	Prewitt ^[67]	在水平和垂直方向上对图像进行差分和滤波运算		
二阶边缘检测算法	LOG ^[68]	先将图像用高斯函数进行平滑处理, 再进行拉普拉斯滤波, 采用边缘点处的二阶导函数出现零穿越的原理检测边缘	边缘定位上更加准确, 边缘较细	相对较小的环境
		Canny ^[69]	利用 Canny 法提取结构光条纹的上下边缘	

的激光中心线提取算法是保证整个图像处理系统稳定、实时和精确地获得特征点坐标值的关键。常用的激光中心线提取方法有极值法、阈值法、灰度重心法、形态学细化、方向模板法、霍夫变换、Steger 法等^[70],各算法的原理及优缺点如表 3 所示。

由表 3 可知,极值法、灰度重心法的实时性较好,但是抗干扰性能较差,极易受焊接过程噪声影

响;阈值法容易导致光条信息缺失,影响焊缝轮廓提取定位;曲线拟合法、方向模板法虽然提取精度较高,但是实时性较差。Steger 方法虽然精度较高、能达到亚像素级,但是算法复杂,运算量大,延时严重。形态学细化、霍夫变换算法简单、对硬件要求也低,实时性也能满足要求,但是精度上略有欠缺,还有较大改进空间。

上述图像处理算法仅在理想条件或激光条干

表3 光条提取算法

Table 3 Light stripe extraction algorithm

提取算法	原理	优势	劣势
灰度极值法 ^[71]	将结构光条纹图每列的灰度极值出现的位置作为条纹中心位置	原理简单,运算速度快	仅适用于灰度值分布严格服从高斯分布的情形,且易受噪声影响,精度较低
灰度重心法 ^[72]	各列的灰度分布的重心作为该列的条纹中心	具有亚像素级的精度	要求光条横截面呈完整的高斯分布,且对噪声的敏感度较高,精度低
阈值法 ^[73]	通过阈值筛选后获得的信息计算光条中心点	解决了光条光强分布不均信息易缺失的问题,可实时提取中心点	受噪声影响较大
曲线拟合法 ^[74]	通过光条横截面灰度值进行拟合高斯曲线,把高斯曲线顶点所在的像素点作为光条中心点	有提取精度高、适用性较强	当结构光条横截面光强不严格对称时,所得光条中心偏差较大,提取速度慢
方向模板法 ^[75]	通过多个方向模板同时做卷积运算,提取响应值最大的区域中心	对白噪声鲁棒性较强,且具有一定的断线修补作用	计算效率低,延时大,提取精度受限于有限的模板方向的影响
Steger法 ^[76]	采用Hessian矩阵计算光条中心法向量,然后通过泰勒展开得到光条中心坐标	精度高	容易丢失数据点,计算过程需要进行大量的高斯卷积运算,计算效率低
形态学细化 ^[77]	通过迭代形态学处理方法,将具有宽度的激光条纹细化为一条连通线	算法简单、可并行处理、硬件实现容易、速度快	易产生毛刺、断纹等缺陷
霍夫变换 ^[78]	先通过上下平均法找到直线中心位置的这些离散点,再用霍夫变换对直线进行拟合	引入了检测阈值以及链表存储,能够有效提高提取效率和提取精度	易受强光干扰,应用在强反射工件表面时精度低

扰弱的情况下进行提取识别工作,识别稳定性低,可靠性差。而在工程应用中,焊缝跟踪第一要务是稳定,然后才是精度,因此在实际焊接中强干扰噪声下的图像处理具有重要的工程应用价值。传统的激光中心线提取方法虽然具有普适性,但易受环境、设备等复杂因素干扰,因此在许多情况下很难满足实时性与精确性要求^[79]。因此,鉴于传统算法在应用上的局限性,机器学习方法越来越受到研究者的关注,许多学者也陆续提出了一些更具特征性、稳定性、高精度的激光中心线提取方法,具体如下表4所示。

由表4可知,在提取精确性方面,新的基于神经网络等提取算法的平均置信度值均高于传统算法,对强漫反射和强镜面反射光条图像的优势尤为明显,适合用于反光材料如铝合金、不锈钢等的焊缝光条提取,也适用于激光焊等强干扰条件下的焊缝光条提取。同时基于形态特征、遗传算法等算法在焊缝识别上有极大的自适应能力,能够在多变的强噪声环境下准确识别焊缝位置,且大部分为矩阵运算,计算效率高,将极大提升中心线提取的实时性和适应性。但是相对于传统算法,新兴算法在准确性上相对工业自动化要求的稳定性还有距离,同时新兴算法在数据处理能力、算法复杂程度上都过于

消耗计算机资源,实时性上还有待工业现场考验。未来可考虑在硬件上升级以进一步提升运算效率,同时优化算法提高可靠性。

3 特征点提取

焊缝特征点是确定结构特性的点,如焊缝激光线的拐点,可以表征焊缝的宽度、深度和坡口边缘等位置信息,如图4所示。

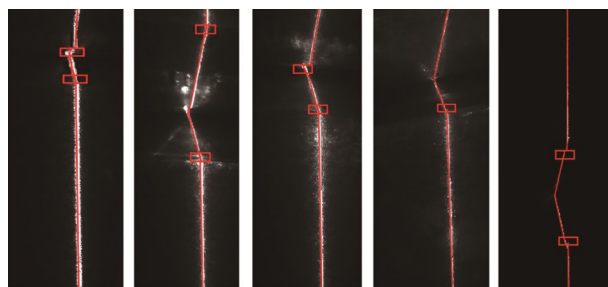
图4 特征点提取示意^[89]

Fig. 4 Feature point extraction diagram

针对不同坡口类型的焊缝,提取其关键位置信息的方法也不同。传统方法主要是基于图像处理的提取方法(例如分割、中心提取、斜率分析和直线相交等)来获取焊缝关键位置^[30,90-92],如表5所示。

传统的基于几何特征的接缝特征点采集方法

表 4 激光中心线提取算法

Table 4 Algorithm of laser structured light stripe center extraction

文献作者	算法	优势	精度
李玥华 ^[80]	提出了一种基于 BP 神经网络的线结构光光条中心提取方法	具有高精度、高效率,能够满足复杂光条中心提取的要求	提取误差的均方根值小于 0.02 pixel,用时 0.04 s
宫海坤 ^[81]	研究了一种改进的基于 Hessian 矩阵的亚像素精度的中心线提取算法	对窄间隙焊缝的识别处理速度可达 60 帧/秒,实时性高	焊缝跟踪精度可达 0.07 mm
杜健准 ^[82]	利用高斯核相关算法跟踪焊缝特征区域,由跟踪的特征区域求解焊缝中心位置	提高焊接环境噪声干扰下的焊缝轨迹定位精度	误差可达到±0.13 mm
张斌 ^[83]	采用改进的遗传算法提取激光条纹骨架	有效消除图像中多种噪声的干扰	拼接窄焊缝平均误差达到 0.13 mm
Xuc ^[84]	设计了一种精确的霍夫变换算法来提取接缝中心	可用于检测宽度小于 0.2 mm 的窄对接接头	位置误差不超过±0.15 mm,角度误差不超过±1.5 mm
张光先 ^[85]	设计了基于形态特征滤波的激光焊缝跟踪图像处理算法用于提取条纹中心线	抗噪声干扰,有效减少滤波过程冗余运算,实时性高、支持多种类型焊缝检测	耗时约为 20 ms,跟踪绝对平均误差为 0.135 8 mm
林少铎 ^[71]	提出一种基于极值法的边界约束灰度平方加权重心法提取激光条纹中心	减少噪声干扰,提高跟踪系统的稳定性和精度	精度在 0.16 mm
Wang ^[87]	基于 NURBS-snake 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	焊接噪声较大的情况下效率更高,鲁棒性更强	角接、搭接、对接分别为 99.33%、96.67%、94.67%
郭雁蓉 ^[88]	采用主流的 CNN(卷积神经网络)提取光条中心,提出两段式的编码-解码 CNN,第一段网络负责光条的目标检测,第二段网络负责中心线提取	能够解决提取中心线断裂的问题,并且相对于灰度重心法,Hessian 矩阵法有较明显的速度优势	总体精度约为 93%

表 5 传统焊缝特征点提取算法

Table 5 Traditional weld feature point extraction algorithm

文献作者	特征点提取算法	特点
Kiddee ^[93]	模板匹配法	需遍历整个焊缝图像,效率低
He ^[94] 、Lei ^[95]	斜率分析法	运算较快,对噪声敏感,提取精度差
丛焕武 ^[96] 、汪涛 ^[97]	霍夫变化检测法	效率低、延时大
孙博文 ^[64]	直线相交法	检测相对较慢,精度高

存在灵活性和鲁棒性差的缺点。采用传统的形态学方法检测焊缝特征点时,特别是在具有强弧光和飞溅干扰的环境中,难以保证鲁棒性和准确性,只能解决特定条件下的图像特征识别问题,面对强干扰噪声环境,存在通用性差和抗干扰能力不足等缺

陷。近些年来,深度学习、神经网络等技术已在很多领域得到了广泛应用,也逐渐被应用于焊接领域,如焊缝分类、焊缝缺陷检测和焊接过程控制等^[98-100]。周卫林等^[101]使用 VGGNet(深层卷积神经网络)实现了焊接过程中焊缝特征点的跟踪。Xiao 等^[28]提出了一种自适应的特征点定位方法,使用 Faster R-CNN 经典的目标检测网络识别并定位焊缝,根据识别结果进一步选择相应的特征点提取方法,该方法能够识别特定的连续焊缝和非连续焊缝,具有一定的适应性,更多焊缝特征点提取的研究成果如表 6 所示。

表 6 近年强干扰环境特征点提取相关算法优劣对比

Table 6 Comparison of feature point extraction algorithms for strong interference environment in recent years

文献	原理	精度	优势
Gao ^[102]	提出了一种优化的随机采样一致性(RANSAC)算法	y轴和z轴方向平均误差分别为 0.19 mm 和 0.23 mm	表面不均匀、强反射条件下仍具有良好的鲁棒性
张斌 ^[83]	基于遗传算法的平面焊缝特征点提取方法	拼接窄焊缝平均误差达到 0.13 mm	抗环境杂光、电弧、飞溅干扰
Du ^[89]	建立多层卷积神经网络对强噪声干扰下的焊缝特征区域进行识别,利用快速图像分割、CNN 的特征区域识别和特征搜索技术来准确识别焊缝特征	平均误差为 0.26 mm 和 0.29 mm	抗强噪声
Zou ^[103]	提出一种基于时空上下文(STC)模型的焊缝特征点检测算法	跟踪误差在 0.5 mm	解决跟踪漂移问题,提高鲁棒性
杜健准 ^[104]	提出一种核相关/卡尔曼滤波算法的焊缝路径识别方法	误差能分别控制在 0.137 mm 和 0.105 mm	强烈弧光和飞溅工况下良好的准确性和实时性

续表

文献	原理	精度	优势
Fan ^[105]	提出了一种基于高效卷积算子(ECO)和粒子滤波器(PF)的焊缝特征点采集方法	误差小于0.15 mm	精度和实时性能优于KCF和C-COT、基于几何特征的传统算法
Zou ^[106]	提出了一种基于多相关滤波器协同检测机制的实时焊缝搜索和定位策略	误差小于0.25 mm	抗强光和飞溅干扰
Xu ^[63]	提出了一种特征监督跟踪驱动的生成对抗网络(FT-GAN)来修复噪声干扰的激光条纹图像,用于判别相关滤波器网络(DCFnet)自动跟踪激光特征点	跟踪速度达到15 fps,平均误差控制在0.236 mm以内	在精度、效率和鲁棒性方面均优于传统方法
Zhao ^[107]	利用实时语义分割的高效残差分解卷积神经网络(ERFNet)进行结构光及其相应的特征点提取	误差在一个像素以内(0.25 mm)	抗强光和飞溅干扰
杨智 ^[39]	提出一种基于激光线段方向聚类与核相关滤波器的焊缝特征点定位的方法	误差在4个像素以内	抑制跟踪漂移、抗强光、飞溅
Zou ^[108]	提出了一种将卷积滤波器和深度强化学习(CF-DRL)相结合的两阶段焊接特征点定位方法	平均跟踪误差0.189 mm	焊炬在强弧光和飞溅干扰下运行平稳
杨国威 ^[109]	通过卷积、池化操作对图像中焊缝激光线的位置信息和拐点特征信息进行提取	均方根误差0.207 mm,最大定位误差0.71 mm	抗噪声干扰能力较强
Li ^[110]	提出了一种利用叠加去噪自动编码器(SDAE)对强焊接噪声焊缝轮廓进行去噪和特征提取的方法	平均宽度误差分别为0.042 mm和0.061 mm	抗强噪声干扰
Zou ^[111]	提出了一种基于深度学习框架的视觉跟踪与目标检测相结合的方法,利用来自各个卷积神经网络层的特征,通过多个特征层之间的相似性匹配来确定焊缝特征点	跟踪误差可达 ± 0.5 mm	抗弧光、焊接飞溅干扰能力强
Jia ^[23]	提出了一种扩展的、采用时空上下文算法的卡尔曼滤波算法,用于在焊接过程中激光条纹被强电弧和飞溅噪声遮挡时提取焊缝特征点	最大提取误差为6像素,最大定位误差为0.7 mm	抗强弧光飞溅
Zou ^[112]	提出了一种基于形态学图像处理方法和连续型卷积操作滤波器算法(CCOT)用于检测焊缝特征点	跟踪误差可达 ± 0.2 mm	比基于形态学的方法和TLD目标跟踪鲁棒性更好
Xiao ^[113]	提出了一种基于改进的Snake模型的特征提取算法	平均跟踪误差为0.23 mm	在焊接烟尘、强弧光和飞溅射噪声干扰下,对多种焊缝类型有良好的适应性和鲁棒性
Hou ^[114]	提出了一种基于先验模型和Steger方法的改进图像处理算法	焊接图像特征在20 ms内提取,具有亚像素精度	与传统算法相比,在速度、精度和鲁棒性上有了很大的提高
高向东 ^[115]	提出以改进的均值漂移算法提取焊缝特征点的算法	平均绝对误差0.046 mm,平均耗时55 ms	比传统算法在识别结构光条纹焊缝特征点方面有更好的效率和准确性
张永帅 ^[116]	提出了一种基于全卷积神经网络的焊缝特征提取方法	与灰度重心法、Steger算法相比,FCN-8s的提取效果图相对于标准图的误差更小	强烈弧光和烟尘干扰下准确地提取出焊缝位置
Yang ^[117]	提出了一种基于核相关滤波(KCF)算法的焊缝提取算法	运行速度高于40 fps,具有良好的通用性,可应用于对接缝、搭接缝、圆角缝等多种焊缝中	与传统的算法相比,具有更快的处理速度,可以保证实时提取需求

目标跟踪算法正不断被应用到焊缝跟踪领域,按原理而可分为生成式模型与辨别式模型。生成式模型一般通过建立模型来描述光条特征,跟踪时通过图像识别找到与目标模型相似度最大的区域,模拟焊工经验识别,定位焊缝位置。这种方法存在两个问题:首先,准确的焊缝模型建立难度较大,因

为工业生产中焊缝一致性较差,甚至有锯齿型焊缝特征,所以应用上对工况有一定要求;其次,该方法极其消耗计算资源,采用工控机进行运算时实时性不足,且当焊缝结构光线存在断点、分叉等情况识别很容易失效,稳定性有待提高。

辨别式模型则是先将样本图像采集分类训练

算法,再通过工作过程对图像进行识别分类匹配,以提高焊缝识别精度,主要的算法包括TLD算法、深度学习类、核相关滤波算法等^[118]。邹焱飏等人^[119]采用高斯核相关算法检测焊缝,能在强弧光、大飞溅工况下精确获取焊缝位置,其最小前置距离能做到20 mm,极大地降低前置误差。然而此方法稳定性欠缺,一旦出现跟踪误差,误识别焊缝位置,很难再次自我纠正,考虑工业应用现场工况,不利于长期稳定应用。文献^[111]利用来自各个卷积神经网络层的特征,通过多个特征层之间的相似性匹配来确定焊缝特征点。但是输入噪声图像会导致跟踪器积累干扰信息,从而使得模型漂移,导致检测精度不稳定。

除了以上应用人工智能算法的研究证明在强噪声(强弧光、大飞溅)下具有较好的抗干扰作用,同时也有学者进行传统算法结合深度学习强大的特征识别和自学习能力进行焊缝跟踪相关研究,通过深度卷积神经网络结构提取目标的高级深度抽象特征,克服了传统的像素级特征分析和单几何特征识别或统计决策方法的局限性,减少了特征的模糊性,免于光条提取这一步骤,直接进行特征识别提取。周跃龙^[120]等人提出了一种基于无错分类回归孪生网络的跟踪算法。通过焊前初始焊缝特征点确定目标区域,然后焊接过程中通过回归网络进行相似性计算精准预测焊缝位置。在弧光和烟雾等强干扰下,平均绝对跟踪误差为0.3 mm,相较于传统图像处理和ECO算法等跟踪精度和速度有所提高,有效提高了复杂薄板构件的焊接效率和质量。杜荣强^[24]等人利用快速图像分割、卷积神经网络特征区域识别与特征搜索技术相融合的方法,准确地识别焊缝特征。针对焊前强噪声图像与焊接过程强噪声进行特征提取完成V形焊缝与T形焊缝跟踪实验,得到跟踪精度分别为0.50 mm、0.62 mm。徐宁^[121]等人为提高效率,不使用特征点提取网络定位每帧焊缝图像中的特征点,而是融合核相关滤波(KCF)来跟踪特征点的位置。将特征点的定位转移到先验区域内,提高了定位精度,同时将焊缝特征点位置的定位与特征点存在的置信度结合起来,进一步抑制了焊接过程中的噪声,有效提升了网络的抗噪声干扰能力,提高了对多坡口类型焊缝的适应

性。Zou^[122]等人提出了多特征组合网络(MFCN),该网络综合利用多层特征承载的局部信息和全局信息进行焊缝检测,以准确检测连续超强噪声下的接缝,实现在连续的超强噪声下仍能保持极高的检测精度,平均检测误差小于6个像素,标称间距下的像素分辨率为0.08 mm。

上述特征点识别跟踪算法在强噪声环境下具有较高的特征识别精度,自适应能力也有一定提高,但算法复杂度较高,需要配备高性能工业计算机,综合成本较高,同时缺乏工业现场的实际应用案例,稳定性和实际准确性还有待验证。

4 总结与展望

综上所述,传统的图像处理虽然算法简单,但是极易受环境干扰,且随着激光焊缝跟踪设备的普及,越来越恶劣的工业环境对传感器以及图像处理算法提出了更高的要求。新兴的基于人工智能和深度学习的算法,可以通过图像中的焊缝特征总结,自动选择提取,自适应能力得到很大提高,可以实现复杂工况、强噪声、多种焊缝类型自主检测识别,且能达到较好的精度水平,满足工业要求。但是新兴的算法由于其复杂性和数据处理量的增加对计算机资源提出了更高的要求,也影响到激光焊缝跟踪的实时性。为了推进焊接制造的智能化、数字化,对激光焊缝跟踪技术进行了展望。

(1)随着“中国制造2025”的出台,我国焊接技术的高速发展对技术的自主性提出了更高的要求,为了减少对进口激光焊缝跟踪传感技术的依赖,迫切需要加大对高速、高精度、窄间隙、高反光材料工况下激光结构光检测技术的研发工作,解决高端重大国防、海工装备的智能化、数字化生产加工难题。

(2)伴随高速相机、嵌入式、激光器等技术的发展,为智能焊接技术的升级换代提供了新思路,可以结合焊接相关传感器零部件的最新技术发展,积极将最新的技术应用到智能焊接技术中,以实现在数据采集频率、数据采集质量、计算平台的更新迭代,推动焊接向更加智能化、先进的方向发展。

(3)在算法上传统的图像处理、特征提取算法稳定性欠缺,具体效果在很大程度上依赖于研究人

员的模型经验。不同学者面对的工况不同,模型侧重点不同,不够灵活,一旦出现未曾预料的噪声非常容易出现不稳定的情况。随着人工智能技术的发展,如何把新兴的人工智能技术应用到智能焊缝跟踪技术图像处理中,简化图像处理步骤,使算法模型更灵活、更有效是未来的主要研究方向之一。

(4)在应用上基于国家针对复杂大型结构件的自动化焊接技术的发展要求,针对航空航天、军工船舶等行业相当一部分大型结构件,焊缝类型、坡口形式多变的问题,依然缺乏有效的基于多传感器的信息融合技术的智能焊缝跟踪技术,急需综合各类传感的优缺点,实现复杂工件的全位置,强干扰、各种槽类型(I型槽、V型槽、Y型槽、U型槽等)以及接头类型(对接接头、搭接接头、圆角接头等)的焊缝跟踪检测,在灵活性和多功能性上更进一步。

参考文献:

- [1] 许燕玲,张本顺,侯震.海工装备机器人智能化焊接关键问题及技术研究[J].金属加工(热加工),2021(06):1-10.
XU Y L,ZHANG B S,HOU Z. Research on key problems and technology of intelligent welding for marine equipment robot[J]. MW Metal Forming, 2021(06): 1-10.
- [2] 刘丹,罗震,敖三三,等.国际焊接技术发展新趋势——第24届北京·埃森焊接与切割展览会焊接国际论坛综述(下)[J].焊接技术,2020,49(10):1-4.
LIU D,LUO Z,AO S S, et al. New Trend of International Welding Technology Development—Summary of the 24th Beijing Essen Welding and Cutting Exhibition Welding International Forum (Part 2) [J]. Welding Technology, 2020, 49(10): 1-4.
- [3] 王彩凤,丁志远,雷宁宁,等.焊接机器人在工程机械行业的应用现状及发展趋势[J].金属加工(热加工),2020(06):3-6.
WANG C F,DING Z Y,LEI N N, et al. Application status and development trend of welding robot in construction machinery industry[J]. MW Metal Forming, 2020(06): 3-6.
- [4] 朱志民,方孝钟,周勇,等.工业机器人在轨道交通制造中的应用现状及发展趋势[J].金属加工(热加工),2021(01):7-12.
ZHU Z M,FANG X Z,ZHOU Y, et al. Application status and development trend of industrial robot in rail transit manufacturing [J]. MW Metal Forming, 2021(01): 7-12.
- [5] 戴为志,俞海涛,王继文.钢结构焊接机器人的现状及发展方向[J].金属加工(热加工),2021(12):7-12.
DAI W Z,YU H T,WANG J W. Current status and development direction of welding robots for steel structures[J]. MW Metal Forming, 2021(12): 7-12.
- [6] 林尚扬,杨学勤,徐爱杰,等.机器人智能化焊接技术发展综述及其在运载火箭贮箱中的应用[J].上海航天(中英文),2021,38(03):8-17.
LIN S Y,YANG X Q,XU A J, et al. Recent Advances in Intelligentized Robotic Welding Technologies and Its Application in Launch Vehicle Tank [J]. Aerospace Shanghai(Chinese&English), 2021, 38(03): 8-17.
- [7] 陈华斌,黄红雨,林涛,等.机器人焊接智能化技术与研究现状[J].电焊机,2013,43(04):8-15.
CHEN H B,HUANG H Y,LIN T, et al. Situation and development of intelligentized technology for arc welding robot[J]. Electric Welding Machine, 2013, 43(04): 8-15.
- [8] Han C, Yang C, Kim H, et al. The effects of robot welding and manual welding on the low- and high-cycle fatigue lives of SM50A carbon steel weld zones [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11(3): 1687814019828266.
- [9] Xu Y, Lv N, Fang G, et al. Welding seam tracking in robotic gas metal arc welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 248: 18-30.
- [10] 魏秀权,王胜华,蒋启祥,等.多机器人柔性焊接的主从协调运动控制系统设计[J].电焊机,2021,51(08):160-163.
WEI X Q,WANG S H,JIANG Q X, et al. Design of master-slave coordinated motion control system for multi-robot flexible welding [J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(08): 160-163.
- [11] Chen S B, Lv N. Research evolution on intelligentized technologies for arc welding process [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2014, 16(1): 109-122.
- [12] Maiolino P, Woolley R, Branson D, et al. Flexible robot sealant dispensing cell using RGB-D sensor and offline programming[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, 48: 188-195.
- [13] Rout A, Deepak B B V L, Biswal B B. Advances in weld seam tracking techniques for robotic welding: A review [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 56: 12-37.

- [14] Wenming Z, Zhihai D, Zhanqi L. Present situation and development trend of welding robot [C]. Proceedings of the 2017 2nd International Conference on Materials Science, Machinery and Energy Engineering (MSMEE 2017), 2017: 933–936.
- [15] 吴兴华. 焊缝跟踪技术的发展与应用现状[J]. 金属加工(热加工), 2020(06): 7–9.
WU X H. Development and application status of welding seam tracking technology[J]. MW Metal Forming, 2020(06): 7–9.
- [16] Le J, Zhang H, Chen X. Realization of rectangular fillet weld tracking based on rotating arc sensors and analysis of experimental results in gas metal arc welding[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 49: 263–276.
- [17] 乐健. 基于旋转电弧传感焊接机器人跟踪矩形焊缝的研究[D]. 江西:南昌大学, 2018.
LE J. Research of Rectangular Welding Seam Tracking by the Welding Robot Based on the Rotating Arc Sensor [D]. Jiangxi: Nanchang University, 2018.
- [18] Chen X, Chen S, Lin T, et al. Practical method to locate the initial weld position using visual technology [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 30(7): 663–668.
- [19] Kim C-H, Ahn D-C. Coaxial monitoring of keyhole during Yb: YAG laser welding [J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(6): 1874–1880.
- [20] Dinham M, Fang G. Autonomous weld seam identification and localisation using eye-in-hand stereo vision for robotic arc welding [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29(5): 288–301.
- [21] Xu Y, Fang G, Lv N, et al. Computer vision technology for seam tracking in robotic GTAW and GMAW [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2015, 32: 25–36.
- [22] Xu Y, Lv N, Han Y, et al. Research on the key technology of vision sensor in robotic welding [C]. 2016 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO), 2016: 121–125.
- [23] Jia Z, Wang T, He J, et al. Real-time spatial intersecting seam tracking based on laser vision stereo sensor [J]. Measurement, 2020, 149: 106987.
- [24] 杜荣强. 基于激光视觉的机器人焊接区噪声图像处理及快速寻位与焊缝跟踪研究[D]. 上海:上海交通大学, 2019.
DU R Q. Research on Noise Image Processing and Rapid Location and Seam Tracking of Robot Welding Zone Based on Laser Vision [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2019.
- [25] Gao X, Huang G, You D, et al. Magneto-optical imaging deviation model of micro-gap weld joint [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2017, 42: 82–92.
- [26] 雷伟成. 磁控窄间隙埋弧焊跟踪传感器及熔宽自适应方法的研究[D]. 湖南:湘潭大学, 2017.
LEI W C. Research on Magnetic Control Narrow Gap Submerged arc welding Tracking Sensor and Weld Width Adaptive Method [D]. Hunan: Xiangtan University, 2017.
- [27] Du J-H, Deng J-X, Huang K-J, et al. Seam tracking system based on rotating arc sensor for robot arc welding [J]. Journal of Discrete Mathematical Sciences and Cryptography, 2018, 21(6): 1407–1412.
- [28] Xiao R, Xu Y, Hou Z, et al. An adaptive feature extraction algorithm for multiple typical seam tracking based on vision sensor in robotic arc welding [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 297: 111533.
- [29] Ye Z, Fang G, Chen S, et al. Passive vision based seam tracking system for pulse-MAG welding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(9): 1987–1996.
- [30] Lei T, Rong Y, Wang H, et al. A review of vision-aided robotic welding [J]. Computers in Industry, 2020, 123: 103326.
- [31] 孙博文, 朱志明, 郭吉昌, 等. 基于激光结构光的视觉传感器的图像处理技术研究应用及展望[J]. 焊接, 2018(09): 10–14, 65.
SUN B W, ZHU Z M, GUO J C, et al. Image processing technology of visual sensor based on laser structured light [J]. Welding & Joining, 2018 (09): 10–14, 65.
- [32] Zou Y, Chen T. Laser vision seam tracking system based on image processing and continuous convolution operator tracker [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 105: 141–149.
- [33] 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.
- [34] Xu Y, Wang Z. Visual sensing technologies in robotic welding: Recent research developments and future interests [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 320: 112551.

- [35] 刘呈龙, 闫志鸿, 卢振洋. 基于 Linux 嵌入式系统的焊缝激光结构光视觉传感系统[J]. 电焊机, 2016, 46(10): 56-60, 65.
LIU C L, YAN Z H, LU Z Y. Structure light vision sensing system of weld laser based on Linux embedded system[J]. Electric Welding Machine, 2016, 46(10): 56-60, 65.
- [36] 吕兴宇. 基于 DSP 焊缝实时图像处理的研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工程大学, 2015.
LV X Y. Research on DSP Real-time Processing Of Welding Seam image[D]. Heilongjiang: Harbin Engineering University, 2015.
- [37] 石弟军. 机器人焊接自动跟踪及 FPGA 控制器的研究[D]. 广东: 华南理工大学, 2016.
SHI D J. Study on automatic seam tracking and a FPGA controller of robot welding [J]. Guangdong: South China University of Technology, 2016.
- [38] Fan J, Jing F, 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.
- [39] 杨智, 於双飞, 李坚, 等. 基于线结构光的强干扰下焊缝特征跟踪算法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(11): 35-38.
YANG Z, YU S F, LI J, et al. Research on weld Feature Tracking Algorithm Based on Line Structured Light under Strong Interference[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021(11): 35-38.
- [40] X L, Gu D, Wang Y, et al. Feature Extraction of Welding Seam Image Based on Laser Vision[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(11): 4715-4724.
- [41] Li X, Li X, Khyam M O, et al. Robust Welding Seam Tracking and Recognition[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(17): 5609-5617.
- [42] Zou Y, Li J, Chen X. Seam tracking investigation via striped line laser sensor[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2017, 44(5): 609-617.
- [43] Seelamantula C S, Blu T. Image denoising in multiplicative noise[C]. 2015 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 2015: 1528-1532.
- [44] Chen S, Chen B, Liu J. Accurate and robust sub-pixel refinement for fillet weld joint based on directional maximum projection[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022.
- [45] 李盼池, 孙昊. 量子彩色图像的频域滤波[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(03): 594-601.
LI P C, SUN H. Quantum Color Image Filtering in the Frequency Domain[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(03): 594-601.
- [46] 张华良, 谢永杰, 张颂, 等. 基于自适应频域滤波的红外弱小目标检测技术[J]. 应用光学, 2015, 36(04): 630-634.
ZHANG H L, XIE Y J, ZHANG S, et al. Detection of small, low contrast targets based on adaptive frequency filter[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(04): 630-634.
- [47] 李佳, 马静因, 李少娟, 等. 基于时空域滤波的红外弱小目标背景抑制[J]. 半导体光电, 2017, 38(03): 396-400, 444.
LI J, MA J N, LI S J, et al. Background Suppression for Infrared Dim Small Target Detection Based on Spatial-Temporal Filter [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(03): 396-400, 444.
- [48] Yang L, Li E, Long T, et al. A High-Speed Seam Extraction Method Based on the Novel Structured-Light Sensor for Arc Welding Robot: A Review [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(21): 8631-8641.
- [49] Zhang G, Yun T-J, Oh W-B, et al. A study on seam tracking in robotic GMA welding process[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 22: 1771-1777.
- [50] 王海菊, 谭常玉, 王坤林, 等. 自适应高斯滤波图像去噪算法[J]. 福建电脑, 2017, 33(11): 5-6.
WANG H J, TAN C Y, WANG K L, et al. Adaptive gaussian filtering algorithm for image denoising[J]. Fujian Computer, 2017, 33(11): 5-6.
- [51] 王红宇, 游敏娟, 李琪, 等. 一种中值滤波图像去噪的改进算法[J]. 中国科技信息, 2019(1): 84-85.
WANG H Y, YOU M J, LI Q, et al. An improved algorithm of median filter for image denoising [J]. China Science and Technology Information, 2019(1): 84-85.
- [52] Ding D. Design of integrated neural network model for weld seam tracking and penetration monitoring [J]. Cluster Computing, 2017, 20(4): 3345-3355.
- [53] 彭宏, 赵鹏博. 边缘检测中的改进型均值滤波算法[J]. 计算机工程, 2017, 43(10): 172-178.
PENG H, ZHAO P B. Improved Mean Filtering Algorithm in Edge Detection [J]. Computer Engineering, 2017, 43(10): 172-178.
- [54] Piao W, Yuan Y, Lin H, et al. A Digital Image Denoising Algorithm Based on Gaussian Filtering and Bilateral Filtering[J]. Itm Web of Conferences, 2018, 17:

- 01006.
- [55] 袁新星. 基于中值滤波的高密度椒盐噪声图像去噪算法研究[D]. 湖北:湖北工业大学, 2014.
- YUAN X X. Research on Denoising Algorithm for Images with High Density Salt and Pepper Noise Based on Median Filter[D]. Hubei: Hubei University of Technology, 2014.
- [56] 申俊琦. 基于激光视觉传感的CO₂横焊焊缝图像处理研究[D]. 天津:天津大学, 2010.
- SHEN J Q. Research on seam image processing for CO₂ horizontal position welding based on laser vision sensing[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [57] 张杰飞. 基于OpenCV的焊缝图像处理研究[D]. 黑龙江:哈尔滨理工大学, 2019.
- ZHANG J F. Research on Weld Image Processing Based on Open CV[D]. Heilongjiang: Harbin University of Science and Technology, 2019.
- [58] Banafian N, Fesharakifard R, Menhaj M B. Precise seam tracking in robotic welding by an improved image processing approach [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114(1): 251–270.
- [59] 张新明, 程金凤, 康强, 等. 迭代自适应权重均值滤波的图像去噪[J]. 计算机应用, 2017, 37(11): 3168–3175.
- ZHANG X M, CHENG J F, KANG Q, et al. Iterative adaptive weighted-mean filter for image denoising [J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(11): 3168–3175.
- [60] Hai X, Cao S, Cui S, et al. Image Filter Processing Algorithm Analysis and Comparison [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1820(1): 012192.
- [61] Wu Q Q, Lee J P, Park M H, et al. A Study on Development of Optimal Noise Filter Algorithm for Laser Vision System in GMA Welding [J]. Procedia Engineering, 2014, 97: 819–827.
- [62] 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(02): 195–199.
- LIAN J, LV X Q, GU D X, et al. Extraction of Laser Stripe Center Line Based on Weld Image Information [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2021, 37(02): 195–199.
- [63] Xu F, Zhang H, Xiao R, et al. Autonomous weld seam tracking under strong noise based on feature-supervised tracker-driven generative adversarial network [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 74: 151–167.
- [64] 孙博文, 朱志明, 郭吉昌, 等. 基于组合激光结构光的视觉传感器检测算法及图像处理流程优化[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(06): 445–452.
- SUN B W, ZHU Z M, GUO J C, et al. Detection algorithms and optimization of image processing for visual sensors using combined laser structured light [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2019, 59(06): 445–452.
- [65] 唐阳山, 徐忠帅, 黄贤丞, 等. 基于Roberts算子的车道线图像的边缘检测研究[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2017, 37(06): 383–386, 390.
- TANG Y S, XU Z S, HUANG X C, et al. Research on Edge Detection for the Lane Line Image Based on Roberts Operator [J]. Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 37(06): 383–386, 390.
- [66] 王云艳, 周志刚, 罗冷坤. 基于Sobel算子滤波的图像增强算法[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(12): 184–188.
- WANG Y Y, ZHOU Z G, LUO L K. Image Enhancement Algorithm Based on Sobel Operator Filtering [J]. Computer Applications and Software, 2019, 36(12): 184–188.
- [67] 安建尧, 李金新, 孙双平. 基于Prewitt算子的红外图像边缘检测改进算法[J]. 杭州电子科技大学学报(自然科学版), 2018, 38(05): 18–23, 39.
- AN J Y, LI J X, SUN S P. Improved Algorithm for Infrared Image Edge Detection Based on Prewitt Operator [J]. Journal of Hangzhou Dianzi University: Natural Sciences, 2018, 38(05): 18–23, 39.
- [68] 罗萍, 胡光宝, 吕霞付, 等. 基于改进LOG算子的图像增强算法[J]. 微电子学与计算机, 2019, 36(09): 26–29.
- LUO P, HU G B, LV X F, et al. An image enhancement algorithm based on improved LOG operator [J]. Microelectronics & Computer, 2019, 36(09): 26–29.
- [69] 谢志孟, 高向东. 基于Canny算子的焊缝图像边缘提取技术[J]. 焊接学报, 2006(01): 29–32, 36, 114.
- XIE Z M, GAO X D. Edge detection of weld image based on Canny operator [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006(01): 29–32, 36, 114.
- [70] 王福斌, 刘贺飞, 王蕊, 等. 线结构光条纹中心亚像素自适应提取算法[J]. 激光技术, 2021, 45(03): 350–356.

- WANG F B, LIU H F, WANG R, et al. Sub-pixel adaptive center extraction of line structured light stripe [J]. Laser Technology, 2021, 45(03): 350–356.
- [71] 林少铎. 激光视觉传感的焊缝跟踪方法研究[D]. 广东: 广东工业大学, 2019.
- LIN S D. Research on Seam Tracking Based on Laser Vision Sensing [D]. Guangdong: Guangdong University of Technology, 2019.
- [72] 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, 2020, 69(5): 2182–2192.
- [73] 韩洁, 刘亚文. 线结构光光条中心提取的变阈值分割算法[J]. 测绘地理信息, 2020, 45(03): 20–23.
- HAN J, LIU Y W. Multi-Threshold Segmentation for Center Extraction of Structured Light Stripe [J]. Journal of Geomatics, 2020, 45(03): 20–23.
- [74] Liu S, Zhang Y, Zhang Y, et al. Research on 3D measurement model by line structure light vision [J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2018, 2018(1): 88.
- [75] 王泽浩, 张中炜. 自适应方向模板线结构光条纹中心提取方法[J]. 激光杂志, 2017, 38(01): 60–64.
- WANG Z H, ZHANG Z W. Adaptive direction template method to extract the center of structured light [J]. Laser Journal, 2017, 38(01): 60–64.
- [76] Pan X, Liu Z. High dynamic stripe image enhancement for reliable center extraction in complex environment [C]. Proceedings of the International Conference on Video and Image Processing, 2017: 135–139.
- [77] He-Ping L. Detection of structured light strip center line based on genetic algorithm [J]. Optics and Precision Engineering, 2004.
- [78] 邓汛. 基于线结构光视觉的六轴机器人焊缝跟踪研究[D]. 广东: 华南理工大学, 2016.
- DENG X. Research on 6-Dof Robot Seam Tracking Based on Structured Light Vision [D]. Guangdong: South China University of Technology, 2016.
- [79] 冀振燕, 宋晓军, 付文杰, 等. 激光光条中心线提取研究综述[J]. 测控技术, 2021, 40(06): 1–8.
- JI Z Y, SONG X J, FU W J, et al. Review on Centerline Extraction for Laser Stripe [J]. Measurement & Control Technology, 2021, 40(06): 1–8.
- [80] 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): 186–194.
- 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): 186–194.
- [81] 宫海坤. 薄壁件窄间隙焊缝的识别与跟踪方法研究[D]. 辽宁: 沈阳理工大学, 2020.
- GONG H K. Research on Identification and Tracking Method of Narrow Gap Welds of Thin-Walled Parts [D]. Liaoning: Shenyang Ligong University, 2020.
- [82] 杜健准, 王静静, 张艳喜, 等. 高斯核相关结合粒子滤波的对接焊缝跟踪方法[J]. 焊接, 2021(08): 12–16, 28, 62.
- DU J Z, WANG J J, ZHANG Y X, et al. Butt weld tracking method based on gaussian kernel correlation combined particle filtering [J]. Welding & Joining, 2021(08): 12–16, 28, 62.
- [83] 张斌, 常森, 王桔, 等. 基于遗传算法的激光视觉焊缝特征点提取[J]. 中国激光, 2019, 46(01): 80–90.
- ZHANG B, CHANG S, WANG J, et al. Feature Points Extraction of Laser Vision Weld Seam Based on Genetic Algorithm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(01): 80–90.
- [84] Xue B, Chang B, Peng G, et al. A Vision Based Detection Method for Narrow Butt Joints and a Robotic Seam Tracking System [J]. Sensors, 2019, 19(5): 1144.
- [85] 张光先, 刘亚辉, 张一鹏, 等. 基于形态特征滤波的激光焊缝跟踪图像处理方法及系统: CN2020101874 57.3[P]. 2020-03-17.
- [86] 陈汉, 任杰亮, 闫帅. 面向机器人激光增材制造的机器视觉系统标定算法[J]. 电焊机, 2022, 52(2): 36–41.
- CHEN H, REN J L, YAN S. Laser Additive Manufacturing Machine Vision System Development [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(2): 36–41.
- [87] 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(2): 101821.1–101821.9.
- [88] 郭雁蓉, 杨剑, 宋文爱, 等. 复杂环境中的线结构光中心提取方法[J]. 计算机工程与设计, 2019(4): 1133–1138.
- GUO Y R, YANG J, SONG W A, et al. Method for extracting line structured light center in complex environment [J]. Computer Engineering and Design, 2019(4): 1133–1138.
- [89] Du R, Xu Y, Hou Z, et al. Strong noise image pro-

- cessing for vision-based seam tracking in robotic gas metal arc welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101(5): 2135-2149.
- [90] 余卓骅,周启兴,陈涛.V形焊缝轮廓特征点的有效提取[J].焊接技术,2016,45(12):17-20.
YU Z H, ZHOU Q X, CHEN T. Effective Extraction of V-shaped Weld Contour Feature Points [J]. Welding Technology, 2016, 45(12): 17-20.
- [91] 杨雪君,许燕玲,黄色吉,等.一种基于结构光的V型坡口焊缝特征点识别算法[J].上海交通大学学报,2016,50(10):1573-1577.
YANG X J, XU Y L, HUANG S J, et al. A Recognition Algorithm for Feature Points of V-Groove Welds Based on Structured Light [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016, 50(10): 1573-1577.
- [92] 毛志伟,赵滨,周少玲.线结构光视觉传感焊缝跟踪图像处理[J].热加工工艺,2016,45(15):233-235.
MAO Z W, ZHAO B, ZHOU S L. Image Processing of Line Structured Light Vision Sensing Seam Tracking [J]. Hot Working Technology, 2016, 45(15): 233-235.
- [93] Kiddee P, Fang Z, Tan M. An automated weld seam tracking system for thick plate using cross mark structured light [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(9): 3589-3603.
- [94] He Y S, Xu Y L, Chen Y X, 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(2): 251-261.
- [95] 洪磊,杨小兰,钟冬平.基于斜率分析法的焊缝条纹直线特征提取分析[J].焊接学报,2017,38(08):91-94,133.
HONG L, YANG X L, ZHONG D P. Feature extraction and analysis of weld seam stripe line on slope analysis method [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(08): 91-94, 133.
- [96] 丛焕武,郭福娟,吕飞,等.基于CCD图像处理的焊缝识别技术研究[J].电子测量技术,2012,35(03):73-77.
CONG H W, GUO F J, LV F, et al. Research on weld seam recognition technology based on CCD image processing [J]. Electronic Measurement Technology, 2012, 35(03): 73-77.
- [97] 汪涛,成孝刚,李德志,等.基于霍夫变换与角点检测的叶脉特征提取算法[J].计算机技术与发展,2019,29(11):159-162.
WANG T, CHENG X G, LI D Z, et al. A Feature Extraction Algorithm for Leaf Vein Based on Hough Transform and Corner Detection [J]. Computer Technology and Development, 2019, 29(11): 159-162.
- [98] 吴桐,杨金成,廖瑞颖,等.基于线阵图像深度学习的电池组焊缝瑕疵检测[J].激光与光电子学进展,2020,57(22):315-322.
WU T, YANG J C, LIAO R Y, et al. Weld Defect Inspection of Battery Pack Based on Deep Learning of Linear Array Image [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(22): 315-322.
- [99] 刘美菊,运勃.深度卷积网络压缩算法在焊缝识别中的应用[J].激光与光电子学进展,2019,56(05):89-96.
LIU M J, YUN B. Application of Deep Convolution Network Compression Algorithm in Weld Recognition [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(05): 89-96.
- [100] Hou W, Wei Y, Jin Y, et al. Deep features based on a DCNN model for classifying imbalanced weld flaw types [J]. Measurement, 2019, 131: 482-489.
- [101] 周卫林.基于深度分层特征的激光视觉焊缝检测与跟踪系统的研究[D].广东:华南理工大学,2018.
ZHOU W L. Research of Laser Vision Seam Detection and Tracking System Based on Depth Hierarchical Feature [D]. Guangdong: South China University of Technology, 2018.
- [102] Gao J, Hong Y, Hong B, et al. A Method of Feature Extraction of Position Detection and Weld Gap for GMAW Seam Tracking System of Fillet Weld With Variable Gaps [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(20): 23537-23550.
- [103] Zou Y, Chen X, Gong G, et al. A seam tracking system based on a laser vision sensor [J]. Measurement, 2018, 127: 489-500.
- [104] 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(02):95-104.
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(02): 95-104.
- [105] Fan J, Deng S, Ma Y, et al. Seam Feature Point Acquisition Based on Efficient Convolution Operator and

- Particle Filter in GMAW[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(2): 1220–1230.
- [106] Zou Y, Zhou W. Automatic seam detection and tracking system for robots based on laser vision[J]. Mechatronics, 2019, 63: 102261.
- [107] Zhao Z, Luo J, Wang Y, et al. Additive seam tracking technology based on laser vision[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116(1): 197–211.
- [108] Zou Y, Chen T, Chen X, et al. Robotic seam tracking system combining convolution filter and deep reinforcement learning[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 165: 108372.
- [109] 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): 111–121.
- 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): 111–121.
- [110] Li R, Gao H. Denoising and feature extraction of weld seam profiles by stacked denoising autoencoder[J]. Welding in the World, 2021, 65(9): 1725–1733.
- [111] Zou Y, Lan R, Wei X, et al. Robust seam tracking via a deep learning framework combining tracking and detection[J]. Appl Opt, 2020, 59(14): 4321–4331.
- [112] Zou Y, Chen T J O, Engineering L I. Laser vision seam tracking system based on image processing and continuous convolution operator tracker[J], 2018, 105 (JUN.): 141–149.
- [113] Xiao R, Xu Y, Hou Z, et al. A feature extraction algorithm based on improved Snake model for multi-pass seam tracking in robotic arc welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 72: 48–60.
- [114] Hou Z, Xu Y, Xiao R, et al. A teaching-free welding method based on laser visual sensing system in robotic GMAW[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 109(5): 1755–1774.
- [115] 高向东, 黎扬进, 刘秀航, 等. 改进均值漂移算法的焊缝特征点识别分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(04): 132–137.
- GAO X D, LI Y J, LIU X H, et al. Weld Seam Feature Point Recognition Analysis Based on Improved Mean-shift Algorithm[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(04): 132–137.
- [116] 张永帅, 杨国威, 王琦琦, 等. 基于全卷积神经网络的焊缝特征提取[J]. 中国激光, 2019, 46(03): 36–43.
- ZHANG Y S, YANG G W, WANG Q Q, et al. Weld Feature Extraction Based on Fully Convolutional Networks[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(03): 36–43.
- [117] YANG L, LI E, LONG T, et al. A High-Speed Seam Extraction Method Based on the Novel Structured-Light Sensor for Arc Welding Robot: A Review[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 21(18): 8631–8641.
- [118] 孟球, 杨旭. 目标跟踪算法综述[J]. 自动化学报, 2019, 45(07): 1244–1260.
- MENG L, YANG X. A Survey of Object Tracking Algorithms[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(07): 1244–1260.
- [119] 邹焱飏, 王研博, 周卫林. 基于高斯核相关的线激光焊缝跟踪方法研究[J]. 应用激光, 2016, 36(05): 578–584.
- ZOU Y B, WANG Y B, ZHOU W L. Research on Line Laser Seam Tracking Method based on Guassian Kernelized Correlation Filters[J]. Applied Laser, 2016, 36(05): 578–584.
- [120] 周跃龙. 基于激光视觉的焊缝检测与跟踪系统研究[D]. 广东: 广东工业大学, 2021.
- ZHOU Y L. Research on Weld Seam Detection and Tracking System Based on Laser Vision[D]. Guangdong: Guangdong University of Technology, 2021.
- [121] 徐宁, 王娟娟, 郭晓雨, 等. 判别式相关滤波器的目标跟踪综述[J]. 小型微型计算机系统, 2020, 41(12): 2484–2493.
- XU N, WANG J J, GUO X Y, et al. Survey of Visual Tracking Based on Discriminative Correlation Filters[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2020, 41(12): 2484–2493.
- [122] Zou Y, Zhu M, Chen X. A Robust Detector for Automated Welding Seam Tracking System[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 2021, 143(7): [页码不详].