



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.09.01

机器视觉辅助机器人焊接全过程研究进展

高振泽¹, 李俊¹, 李欢^{1*}, 李哲^{2*}

1. 长江大学 机械工程学院, 湖北 荆州 434023
2. 广州铁路职业技术学院 机电工程学院, 广东 广州 511300

摘要: 机器视觉在机器人焊接中可以使整个焊接过程图像化, 并具有较高的扫描精度、较快的检测速度、较好的场景适应性等优点, 能结合焊接机器人的可编程性和数字化应用, 提高机器人本体的灵活性, 增强焊接机器人的场景适应能力。针对机器视觉辅助焊接全过程包括焊前焊缝识别、焊接过程焊缝跟踪、熔池检测以及焊后缺陷检测, 总结了基于机器视觉的智能焊接机器人的研究进展, 分析了机器视觉在弧焊、激光焊及电阻点焊机器人等不同焊接场景中的应用实际, 阐述了机器视觉在不同算法及视觉硬件下的焊接应用效果; 最后分析了机器视觉在机器人焊接领域包括虚拟技术与视觉相机的结合、焊接图像处理算法的优化、多机器人协作焊接平台的搭建、多样化传感器信息的融合以及焊接参数自主学习优化等未来应用。

关键词: 机器视觉; 焊接机器人; 深度学习; 焊缝识别

中图分类号: TG409 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)09-0001-18

Research Progress on the Application of Machine Vision in the Whole Process of Robot Welding

GAO Zhenze¹, LI Jun¹, LI Huan^{1*}, LI Zhe^{2*}

1. College of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023, China
2. School of Mechanical and Electronics, Guangzhou Railway Polytechnic, Guangzhou 511300, China

Abstract: Machine vision in robot welding can visualize the entire welding process and has advantages such as high scanning accuracy, fast detection speed, and good scene adaptability. By combining the programmability and digital application of welding robots to improve the flexibility of the robot body and enhance the scene adaptability of welding robots. The research progress of intelligent welding robots based on machine vision for the entire welding process, including pre weld seam recognition, welding seam tracking, melt pool detection, and post weld defect detection were summarized. The practical application of machine vision in different welding scenarios such as arc welding, laser welding, and resistance point welding robots, and elaborates on the welding application effects of machine vision under different algorithms and visual hardware were also analyzed. Finally, the future applications of machine vision in the field of robot welding were given, including the combination of virtual technology and visual cameras, optimization of welding image processing algorithms, construction of multi robot collaborative welding platforms, fusion of diverse sensor information, and autonomous learning optimization of welding parameters.

收稿日期: 2024-07-18 修回日期: 2024-09-24

基金项目: 广东省普通高校毕业生创新创业项目(2022KQNCX224); 国家自然科学基金项目(51605103); 湖北省教育厅科研计划重点项目(D20221306)

通讯作者: 李欢(1983—), 男, 博士, 副教授, 主要从事焊接设备及工艺的自动化与智能化研究。E-mail: lihuan@yangtzeu.edu.cn。

Keywords: machine vision; welding robot; deep learning; welding seam extraction

引用格式:高振泽,李俊,李欢,等. 机器视觉辅助机器人焊接全过程研究进展[J]. 电焊机,2025,55(9):1-18.

Citation:GAO Zhenze, LI Jun, LI Huan, et al. Research Progress on the Application of Machine Vision in the Whole Process of Robot Welding[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(9): 1-18.

0 引言

随着机器视觉技术与机器人技术的发展,机器视觉辅助型焊接机器人被广泛应用于自动化焊接场景,能大幅提高工作效率,减少人工劳动和降低生产成本。然而,传统的焊接机器人依赖于示教回放和预编程,缺乏灵活性,难以适应大规模、灵活性较高的应用场景^[1]。随着加工制造向医疗、航空航天等高端领域拓展,对焊接机器人本体的工作精度及算法运算速度提出了更高的要求^[2]。焊接机器人可以将机器视觉与焊接机器人相结合,通过相机获取焊接过程中的具体图像,再从中识别焊缝类型、焊缝参数、焊接位置等数据,可实现焊缝识别、轨迹规划、熔池检测、质量检测等功能,是目前焊接机器人领域的研究热点。目前,针对视觉辅助机器人的综述研究较为匮乏,且现有文献多集中于视觉传感器应用和焊缝轨迹识别,缺乏对机器视觉在焊接全过程中应用的系统性总结。本文旨在填补这一空白,系统梳理了机器视觉在焊接前、中、后全流程的应用,包括焊缝识别、焊缝跟踪、熔池检测和质量检测等环节。此外,本文还将探讨不同视觉传感器硬件在不同焊接场景中的应用效果,并分析不同算法的优缺点,最后展望机器视觉在机器人焊接领域的未来发展方向,为相关研究和应用提供参考。

1 视觉辅助焊接机器人系统

视觉相机作为机器视觉感知的关键硬件,其种类繁多,在不同焊接场景中承担的功能各异。目前,结构光视觉相机因其高精度与强鲁棒性,在焊接机器人中应用最为广泛。根据安装位置的不同,视觉传感器可分为两类^[3]:一类是将视觉传感器固定在工作台外(eye-to-hand),常悬挂于焊件上方,用于全局焊缝信息获取,如图1工业相机1位置所示;另一类是安装在机械臂上(eye-in-hand),主要

是安装在焊枪旁边,以实现高精度局部跟踪,如图1工业相机2位置所示。不同的焊接方式与焊接场景的视觉安装方式区别较大,需要结合实际工况进行配置。

一个典型的视觉辅助焊接机器人系统主要由机器人本体、机器视觉模块和焊接电源三部分构成。三者通过信息协同,完成自主焊接作业:工业相机1扫描焊件表面,获取初始图像并传输至计算机,通过图像处理算法提取焊缝几何参数与初始点位置;计算机再将处理结果发送至机器人工控机(IPC),调用机器人拟合焊缝的轨迹;同时,机械臂前端的工业相机2实时采集焊缝精细信息,反馈至计算机以动态修正规划焊接轨迹,并协同焊接电源进行焊接。

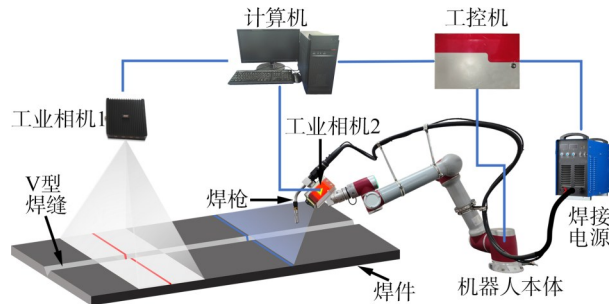


图1 智能化焊接系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of automatic welding system

2 机器视觉辅助机器人焊接全过程

2.1 焊前焊缝识别研究进展

2.1.1 焊缝识别特征提取

在焊接准备阶段,机器视觉主要应用于焊缝识别和焊缝参数提取。通过相机硬件捕获到激光条纹图像,再通过图像处理算法实现焊缝种类的识别及焊缝跟踪,LV等人^[4]提出了一种结合脊线跟踪法(ridge line tracking)和方向模板法的焊缝中心提取方法。该方法在焊缝图像中心线的基础上,基于斜率分析的最小二乘法对图像进行特征检测,得到焊

缝坡口的几何特征信息。实验结果表明,相较于单一方向模板法(运行时间 212.708 ms),该算法将运算时间缩短至 22 ms,能够满足实时性的要求,适用于 Y 型焊缝的特征点提取与直线拟合,其结果如图 2 所示。

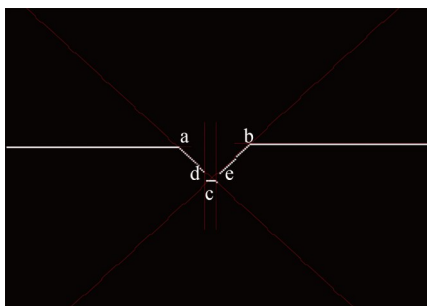


图 2 Y型焊缝提取特征点的直线拟合结果^[4]

Fig. 2 Results of line fitting to extract feature points from Y-shape weld^[4]

为进一步提升多样化焊缝坡口类型的识别能力, Tian 等人^[5]开发了一种基于视觉传感器的多类型焊缝自动识别系统,该系统采用两种不同的激光光源,以合适的姿势获得有效的轮廓映射特征图像。基于轮廓映射数据(条纹映射和点映射),提出基于条纹映射图像的双向偏差搜索方法以精确定位点映射区域。针对采集图像的特点,研究团队设计了卷积神经网络(CNN)模型进行焊缝类型分类。实验结果表明,该方法对焊缝类型的预测正确率高达 97.6%,能够有效识别方形坡口焊缝、单 V 坡口焊缝、单破口焊缝、角焊缝及搭接焊缝多种类型,为焊接质量检测提供了可靠的前期信息支持。方形坡口焊缝与角焊缝的预测结果如图 3 所示。

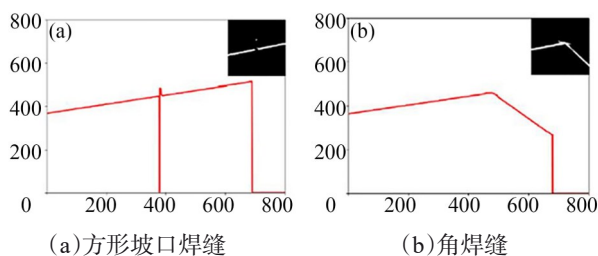


图 3 两种焊缝类型预测结果^[5]

Fig. 3 Prediction results of two types of welds^[5]

在焊缝提取识别方面,近年来也出现了很多的途径。在硬件处理方面:区别于常见的双目结构光相机, Lu 等人^[6]提出了一种基于单目结构光相机的快速准确的离线三维焊缝提取方法,对弧形焊缝的

三维路径拟合结果如图 4 所示。该方法通过将格雷码和相移码的栅格图像投影至工件表面,采集带有栅格图案的工件图像并计算焊缝的三维坐标,再利用多项式拟合完成焊接机器人的路径规划。由于采用单目结构光相机,该系统结构紧凑、体积较小、对于多种场合下的焊接适应性较强,并且基于格雷码和相移码结合的处理手段,使得测量更加快速精准,实验结果表明,在不同光照条件下,最大拟合误差均小于 0.8 mm,能够较好地完成焊缝的三维路径提取。

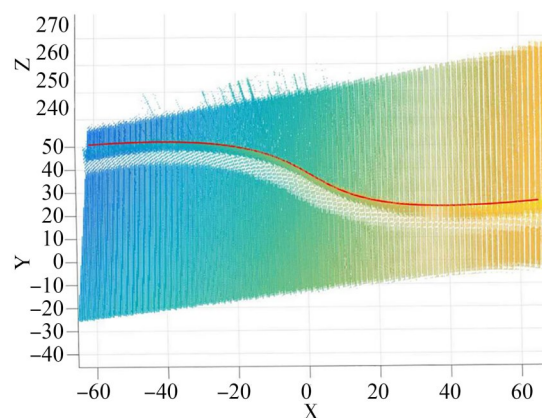


图 4 焊缝拟合结果^[6]

Fig. 4 Weld fitting result^[6]

此外, Liu 等人^[7]为了解决焊缝倾斜及多类型焊缝形状的定位问题,设计了一种集成视觉传感器,通过交叉激光条纹与平行激光条纹的联合映射,实现了四种典型焊缝类型在定义区域内的一次初始点定位。其中,交叉条纹用于提取工件边缘参数,平行条纹用于提取接缝参数。研究团队在视觉传感器核心部分,提出了一种区间受限的搜索算法来提取接缝点,并将其与边缘参数相结合来获得初始点。实验证明,即使在工件倾斜或错位的情况下,交叉和平行条纹的联合映射对于四种接缝类型的初始点定位也能实现较高的定位精度,其条纹特征差异如图 5 所。

焊缝轮廓的焊前识别不仅能够有效减少弧光与飞溅等噪声干扰,还能提前评估焊缝形貌与参数,判断其是否符合焊接条件。然而,焊缝识别不仅限于焊前阶段,在焊接过程中同样需要进行实时识别,且易受多种动态因素干扰,这对识别算法的鲁棒性与实时性提出了更高要求。

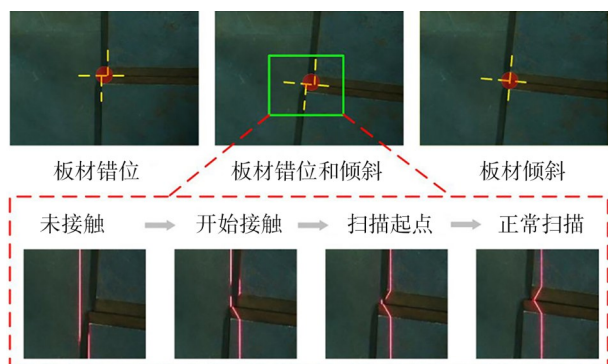


图5 可变的工件姿势和焊接起始点附近的条纹特征差异^[7]

Fig. 5 Variable workpiece postures and stripe feature differences near the welding initial point^[7]

2.1.2 噪声条件下的焊缝识别提取

在机器人智能焊接过程中,准确识别焊缝位置是实现有效跟踪与高质量焊接的前提。然而,焊接过程中常受到环境光照、弧光干扰、飞溅噪声及算法稳定性等多重因素的影响,导致无法有效提取焊缝图像,从而影响焊缝跟踪的精度与稳定性。针对上述挑战,学术界提出了多种解决方案。硬件层面,研究者们提出采用双目视觉系统^[8]、光学相干层^[9]和多传感器融合^[10]等手段以增加系统的抗干扰能力;软件层面,则主要通过改进识别算法^[11-12]和图像降噪方法^[13-14]等来提升焊缝识别的鲁棒性。Zhen等人^[15]针对强噪声环境下的焊缝提取问题,开发了一种基于先验窗口的焊缝识别算法。该方法通过为焊缝区域设置窗口,结合滤波和边缘算子提取边缘信息,并基于焊缝特征的先验知识,提出了一系列焊缝边缘识别与表示计算方法。实验表明,该方法能够有效从噪声污染的图像中提取不同偏差的焊缝,且处理耗时少、速度快,具备良好的实时性,适用于实际焊接场景。带有先验分析窗口的焊接图像如图6所示。

在结构光视觉传感器的应用中,焊接过程中产生的弧光和飞溅等强噪声会大幅降低焊缝的能见度,导致激光条纹模糊、图像失真,使得跟踪失败。为此,巩书青等人^[16]提出了一种基于改进核相关滤波器(KCF)的焊缝跟踪算法。该算法首先通过Steiger算法提取焊缝激光条纹中心线,再对中心线图像进行滤波处理以获取焊缝初始特征点,并实现特征点的学习与跟踪。实验结果显示,在强噪声干扰下,该算法的平均跟踪误差为0.305 mm,最大跟踪

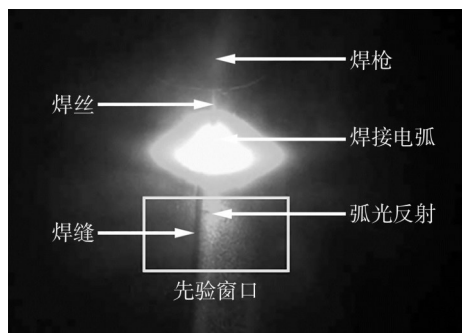


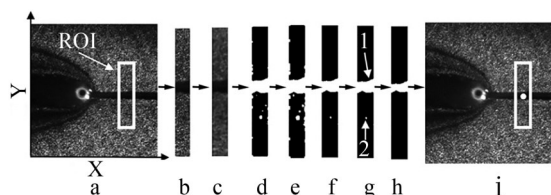
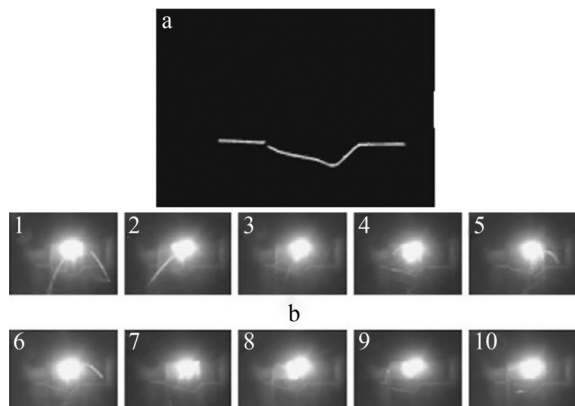
图6 带有先验分析窗口的焊接图像^[15]

Fig. 6 Welding image with a priori analysis window^[15]

误差为0.479 mm,降低了因跟踪偏移对焊接质量的不利影响。

为进一步克服光照干扰、材料缺陷等复杂激光环境对焊缝检测的影响,拓宽有源光同轴视觉传感器在焊缝跟踪中的应用,Zhang等人^[17]在激光焊接数字化孪生环境中,提出了一种基于有源光同轴视觉传感器的焊缝检测与标定方法。该方法在激光焊头上安装808 nm辅助照明视觉传感器和定制透镜,以滤除噪声并清晰捕获焊缝与熔池图像,然后通过图像处理提取焊缝位置和宽度参数,并结合人工神经网络的卡尔曼滤波方法消除测量误差和降低测量噪声。实验证明,该方法在复杂多变的焊接条件下的检测效果优于传统Hough变换法,有效提升了焊缝检测的准确性与稳定性。Li等人^[18]为拓宽焊缝识别种类的范围并提升焊缝识别的灵活性和稳定性,提出了一种快速、准确、稳定的多类型焊缝识别算法。该算法主要包括动态ROI方法、局部自适应阈值方法、内推进中心提取(IPCE)算法、焊缝边缘点检测算子和中心分析方法,焊缝信息提取流程如图7所示。实验结果表明,即使在强电弧和飞溅噪声环境下,该算法仍能稳定识别多种类型的焊缝,包括I型坡口对接焊缝、V型坡口对接焊缝、单斜角对接焊缝、搭接焊缝等,为机器人焊接应用提供了重要技术支持。

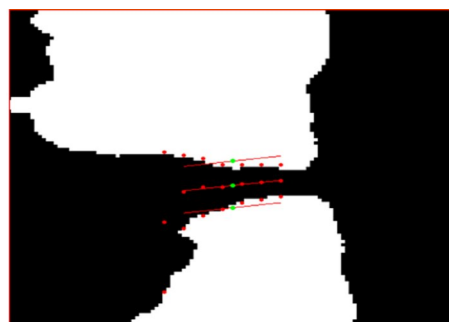
而对于机器人焊接,焊缝识别的实时性与准确性尤为重要。He等人^[19]利用显著注意模型提出了在MAG焊熔池背景下的焊缝自动检测方法,完整焊缝轮廓提取结果如图8所示。他们首先利用结构光激光传感器有效检测出焊缝图像,再在每一帧图像中捕捉激光条纹和熔池信息,随后从熔池背景中

图7 焊缝信息提取具体流程^[18]Fig. 7 Specific flow chart of weld information extraction^[18]图8 焊缝轮廓检测结果^[19]Fig. 8 Weld profile inspection results^[19]

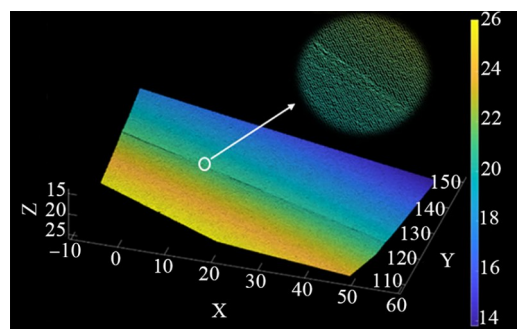
有效检测出焊缝轮廓,以便下一步自主指导初始焊接位置和焊缝跟踪。实验表明,该方法提取的焊缝轮廓基本能够满足焊缝跟踪和焊枪导引的要求。

在焊缝识别的领域,窄焊缝的高精度检测识别仍是一个研究难题。由于常规线激光识别方法仅能获取单一焊缝位置,且当焊缝宽度小于0.1 mm时几乎无几何变形,导致检测效率低下,强噪声条件下识别难度更大。为此,Shao等人^[20]提出了一种基于视觉传感器的窄对接空间焊缝测量方法。该方法在焊接件上投射三条不同波长的激光条纹,其中两条红色激光条纹基于光学三角测量原理获取焊缝的三维轮廓,第三条绿色激光条纹则作为光源,通过被动视觉传感原理测量焊缝边缘和中心线。实验表明,该方法可在单幅图像中同时获取空间焊缝的三维位置信息,满足空间窄对接的精度要求。焊缝中心点、中心线及边界点的提取结果如图9所示。

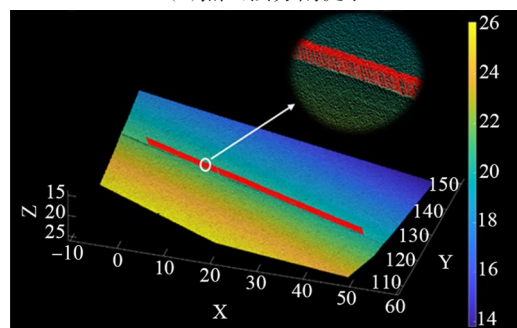
Wang等人^[21]为更有效地提取窄对接焊缝,提出了一种基于双目一致性分析的三维窄对接焊缝检测系统。该系统采用条纹投影轮廓术的主动光法获取工件的三维信息,并设计了基于双目空间信息挖掘(BSMNet)的焊缝提取网络,对相应的激光数据进行分析,定位出焊缝位置。此外,研究团队还提出了一

图9 焊缝中心点、中心线、边界线提取结果^[20]Fig. 9 Weld center point, center line, and boundary line extraction results^[20]

种基于双目一致性校正的数据标注方法,为BS-MNet训练提供更准确的数据支持,实验结果显示,该方法的最大误差约为0.081 mm,平均误差约为0.021 mm,可适用于窄焊缝的定位提取。点云分割与双目视觉系统的焊缝提取结果如图10所示。



(a)点云法分割提取



(b)双目视觉系统提取

图10 双目视觉检测系统以及焊缝提取结果^[21]Fig. 10 Binocular vision inspection system and weld extraction results^[21]

Zhang等人^[22]针对小孔深熔钨极气体保护焊(K-TIG)中的窄焊缝识别问题,提出了一种结合高动态范围摄像机与多种图像处理算法的焊缝跟踪方法。该方法首先通过基于噪声模型分析的双边滤波对图像进行去噪,并设定固定感兴趣区域

(ROI),随后利用改进的Otsu算法与抛物线拟合算法提取圆弧中心线,基于HOG+LBP算法将焊缝区域提取为自适应ROI,最后通过Canny算法提取单像素边缘轮廓,并结合轮廓曲率估计方法获取像素坐标。实验结果表明,该方法能够有效检测焊接偏差,平均测量误差控制在 ± 0.04 mm以内,在小孔深熔TIG焊接领域具有良好的应用前景。检测偏差与实际偏差的比较结果如图11所示。

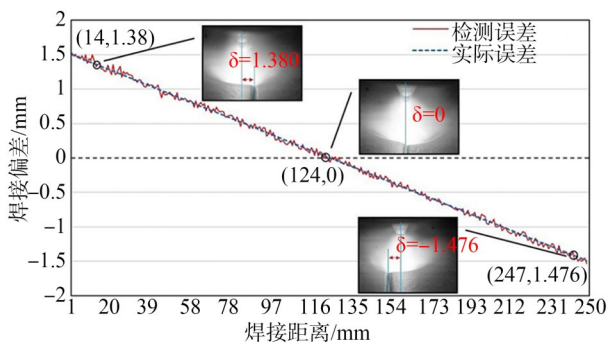


图11 检测到的偏差与实际偏差的比较结果^[22]

Fig. 11 Comparison between detected deviations and actual deviations^[22]

近年来,焊缝特征识别技术得到了极大的发展,识别范围从传统的对接焊缝^[23]、搭接焊缝^[24]、角焊缝^[25-26]逐步扩展至多层多道焊缝^[27-28]、管道焊缝^[29]、D型焊缝^[30]及曲线焊缝^[31]等复杂类型。在机器人焊接领域,焊缝识别作为机器焊接的关键预处理步骤,其识别精度与识别速度将直接影响焊接轨迹规划的准确性、焊接参数配置的合理性,进而影响着焊接质量。

2.2 焊接过程视觉识别研究进展

在机器人焊接过程中,视觉识别技术是实现焊缝精确跟踪与焊接质量控制的核心环节。根据视觉传感方式的不同,焊接过程中的视觉识别主要分为基于被动视觉和主动视觉的焊缝跟踪,以及基于视觉相机的熔池检测。以下将从这三个方面对相关研究进展进行系统阐述。

2.2.1 基于被动视觉焊缝跟踪

工业机器人作为现代制造业的重要标志之一,近年来在焊接领域不断突破技术瓶颈,逐步应用于更为复杂的焊接场景中,以应对恶劣工作环境、高劳动强度及低生产效率低等挑战。然而,传统工业弧焊机器人多依赖示教编程模式,其灵活性与环境

感知能力有限^[32],将被动视觉技术引入焊接机器人系统,可实现焊接场景的图像化感知,通过视觉相机实时采集焊接过程中的关键信息,从而提升系统的智能化水平。然而,焊接过程中产生的强烈弧光、飞溅及热变形等干扰因素,对图像处理和特征提取提出了严峻挑战^[33]。

在焊缝特征提取完成后,如何合理引导焊接机器人执行合适的焊接轨迹,成为机器视觉研究的另一重要方向。Ma等人^[34]针对薄板闭环间隙的脉冲TIG焊时,在常规的示教回放焊接机器人上加装被动视觉传感器,并提出了一种基于被动视觉传感的焊缝跟踪方法。该方法通过在一定周期内视觉测量焊枪与焊缝中心的偏移量,结合ARX(自回归外生输入)模型,设计了考虑不同偏移量的模糊比例积分导数(PID)焊缝跟踪控制器。实验结果表明,该方法对直线焊缝具有良好的跟踪能力,但对其他焊缝的适应性较差,且跟踪精度有待提升。直线焊缝的焊缝跟踪结果如图12所示。

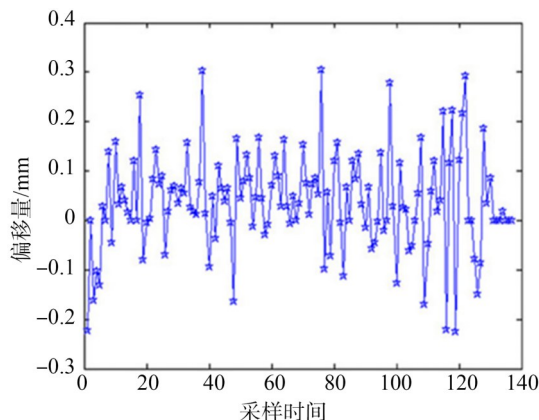


图12 焊缝跟踪结果^[34]

Fig. 12 Seam tracking result diagram^[34]

被动视觉相机在焊接过程中主要依赖环境光源与焊接光源进行图像采集,但由于弧光、飞溅等强噪声干扰,图像质量往往较差,噪声较多,合理的降噪处理有助于精准识别焊缝。部分学者通过引入滤波器和其他神经网络算法进行降噪处理,将相机视觉与焊枪运动控制相结合,实现对焊枪运动的动态引导与自动规划,从而根据焊缝的具体几何参数实时调整焊接轨迹。然而,焊缝类型多样且焊接工况复杂,传统的“示教回放”无法满足个性化焊缝规划的需求,Shen等人^[35]针对钨极氩弧焊机器人,

开发了一种无需标定的视觉传感焊缝跟踪系统,该系统通过设计一种具有双层滤光结构的视觉传感器,能够在不同焊接电流水平下有效抑制弧光干扰,获取高质量焊接图像。基于该传感器,研究团队还开发了专用的图像处理算法,用于从铝合金板带坡口的焊接图像中提取焊缝轨迹和焊枪偏移量。通过大量实验数据分析,找出了所用机器人的纠偏规律,并构建了相应的焊缝跟踪控制器。实验结果表明,该系统对直线焊缝和曲线焊缝均表现出良好的跟踪能力,跟踪精度分别达到 $\pm 0.3\text{ mm}$ 、 $\pm 0.5\text{ mm}$,证实其能够有效地进行焊缝跟踪。

针对示教回放焊接机器人在GTAW中焊缝跟踪控制不足的问题,Xu等人^[36]设计了一套实时焊缝跟踪视觉传感系统,并提出了一种改进的Canny算法用于焊缝和熔池边缘检测。结合分段自适应PID控制器,该系统实现了 $\pm 0.3\text{ mm}$ 以内的实时跟踪精度,基本满足焊缝成形质量控制的要求,但跟踪精度仍需进一步优化。

由于被动视觉的标定较为困难且视觉系统不易移动,Ye等人^[37]为实现焊接机器人在脉冲MAG焊接过程中能够适应自然焊接环境因素引起的焊缝位置变化,提出了一种基于被动视觉的自适应焊缝跟踪系统。该系统在图像采集阶段采用滤光片以减轻强弧光干扰,并提出稳定的图像处理算法,从含有大量噪声的图像中提取偏移量。带有两个分析窗口的焊接图像处理示意如图13所示。为进一步实现准确定位,对变换公式进行了标定,建立了图像坐标系与机器人坐标系之间的映射关系,并设计了相应的跟踪策略。此外,系统还根据机器人的运动方向对熔池中心位置进行动态修正,以减小超前距离带来的误差,提高了跟踪精度和焊接过程的稳定性。

在视觉相机与熔池距离较近的应用场景中,Lu等人^[38]为了提高视觉识别精度,提出了一种基于语义分割的等离子弧焊(PAW)被动视觉焊缝跟踪系统,采用轻量级网络结构BiseNetV2和在线难例挖掘(OHEM)策略,增强图像分割效果并有效提取焊缝图像特征。根据算法分割结果,可以计算出焊缝与焊枪之间的偏移量,结果表明,该方法在实时性方面达到57 FPS,偏移计算的平均误差在 0.07 mm

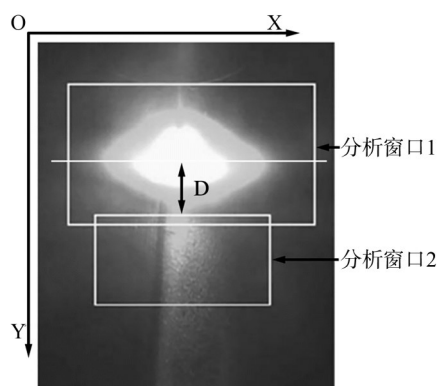


图13 带有两个分析窗口的焊接图像^[37]

Fig. 13 Welding image with two analysis windows^[37]

以内,满足实时焊缝跟踪需求。

Wang等人^[39]将被动视觉与虚拟现实(VR)技术相结合,提出了一种基于数字孪生(DT)原型的人机交互焊接操作和焊工行为分析的平台。该平台通过双向信息流实现人类用户与机器人之间的实时交互,提升操作效率与用户体验。系统通过运动跟踪手柄记录场外人工的操作轨迹,然后执行演示焊接操作的机器人,根据运动手柄传过来的数据完成现场的物理焊接任务。为了验证其有效性,将三名具备手工焊接经验的熟练焊工与三名未经培训的非熟练焊工,要求完成相同的焊接任务。测试结果表明,三名熟练焊工生产出满意的焊件,而非熟练焊工均未能达到预期标准。因此也开发了分类算法以判断焊工的焊接操作水平,训练后的模型在测试数据集中表现出94.44%的分类准确率,该研究有助于新手焊工的培训工作。

尽管被动视觉系统的结构相对简单、组装成本较低且实时性较好^[40],但其对光源的依赖性强,易受光照波动影响,导致图像噪声增加,影响焊缝的三维重建与参数提取。此外,被动视觉系统在焊接应用中不能随意移动,相机标定有较大的技术难度,难以适应复杂的三维测量场景,因此实际焊接应用中存在较大的局限性^[41]。

2.2.2 基于主动视觉焊缝跟踪

主动视觉焊缝跟踪技术,尤其是采用“眼在手(Eye-in-Hand)”安装模式的结构光视觉跟踪技术,已在机器人焊接领域广泛应用。在实际焊接过程中,工件受热变形,实际轨迹偏离示教轨迹,导致焊接精度低。因此,实时获取焊点位置信息并引导焊

接机器人动态调整运动轨迹,成为提升焊接精度与效率的关键技术路径。而激光条纹的精确提取作为激光视觉焊缝自动跟踪系统的基础环节,其精度与抗干扰能力直接决定了整个跟踪系统的性能。

传统的基于图像处理的激光条纹提取方法普遍存在灵活性和鲁棒性差的缺点,且视觉扫描精度容易受到焊接过程中大量图像噪声(如弧光、烟雾、飞溅等)的干扰,难以满足要求^[42]。近年来,研究趋势逐渐转向将焊接视觉技术与深度学习、神经网络等智能算法相结合,构建智能化焊接系统,以应对高精度自动焊接的实际需求。

针对焊接过程中的强噪声干扰与异型焊缝特征识别难的问题,Du 等人^[43]在机器人气体保护焊(GMAW)焊缝跟踪研究中发现,当采集图像含有大量噪声时,传统算法的识别稳定性下降,直接影响焊缝成形质量的一致性。为此,该团队提出一种基于视觉传感系统的焊缝特征准确识别算法:首先运用快速图像分割技术初步筛选焊缝区域,再利用卷积神经网络(CNN)实现对焊缝特征区域的精准定位与特征搜索。该算法将阈值选取范围从 0.5×10^7 扩大到 0.9×10^7 ,大幅降低了参数调整难度,提高了焊缝跟踪系统的稳定性。对于非典型焊缝的识别,CNN模型的准确率为 98.0%。对两幅典型强噪声图像进行识别实验,焊缝特征点的识别效果如图 14 所示,特征提取精度的平均误差分别为 0.26 mm 和 0.29 mm,也表明该算法能够准确有效地提取强噪声下的焊缝图像特征。

Ma 等人^[44]在曲面焊缝焊接时,由于曲面焊缝的曲率较大,为提高焊缝跟踪精度并解决视觉传感器扫描推进问题,提出一种高效、准确的弧形焊缝起始点引导和焊缝跟踪方法。该方法根据结构光视觉传感器采集的焊缝图像特征,针对曲线 V 形坡口焊缝和曲线搭接焊缝,判断该点是否为焊缝起点,在起始点搜索过程中合理规划机器人的速度,提升起始点引导精度;同时,为了克服视觉超前的问题,提出了一种基于三次 B-样条(B-Spline)曲线拟合的滑动数据队列方法,该方法通过自动规划数据队列减少数据处理量,提升计算效率,同时利用三次 B 样条拟合有效减小测量误差与数据波动,生成平滑的焊接轨迹。结果表明,该方法在三个空间

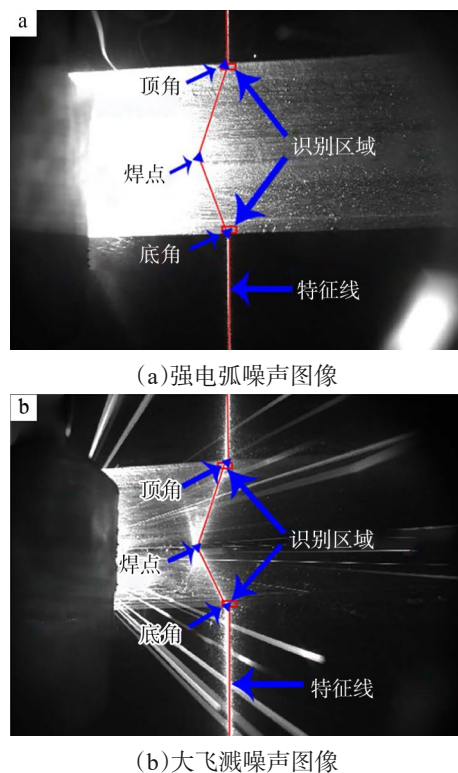


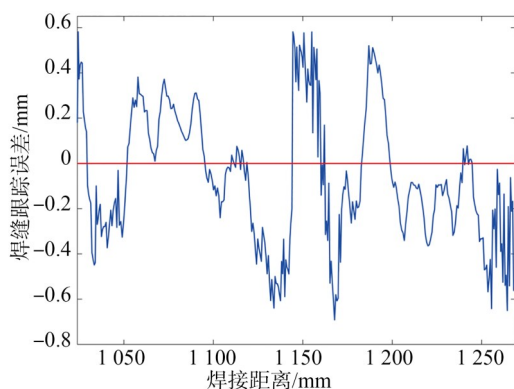
图 14 特征点识别效果^[43]

Fig. 14 Effect diagram of feature point recognition^[43]

方向上的导向误差均小于 0.58 mm,焊缝跟踪平均误差小于 0.41 mm。V 形焊缝的跟踪误差如图 15 所示。

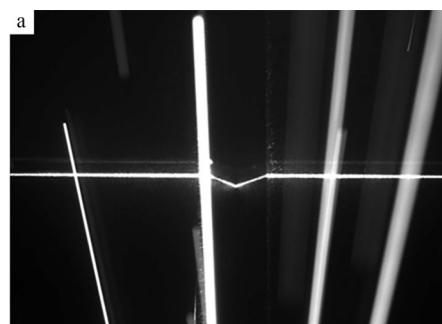
为了实现对接、搭接、角接等多种焊缝类型特征的提取,Fan 等人^[45]提出了一种基于高效卷积算子(ECO)和粒子滤波器(PF)的焊缝特征点获取方法。该方法采用结构光视觉传感器获取焊接图像,利用 ECO 算法对 GAMW 过程中的焊缝区域进行跟踪,获取焊缝特征点,在此基础上建立了焊缝位置的状态方程和测量方程,并应用 PF 算法对特征点坐标进行优化,进一步提升提取精度。为验证该方法性能,搭建了焊接实验系统并进行对接、搭接、角接等一系列焊缝特征点采集实验,如图 16 所示。结果表明,该方法的图像处理速度可达 35 Hz,焊缝特征点获取误差小于 0.15 mm,能够满足后续初始点引导和焊缝跟踪的实时性和精度要求。

多层多道焊因焊接道次多、热效应明显,焊缝图像受噪声干扰更为复杂,传统方法难以实现稳定的特征提取。Liu 等人^[46]针对多层多道 MAG 焊焊接精度低的问题,设计了一套基于激光视觉和条件

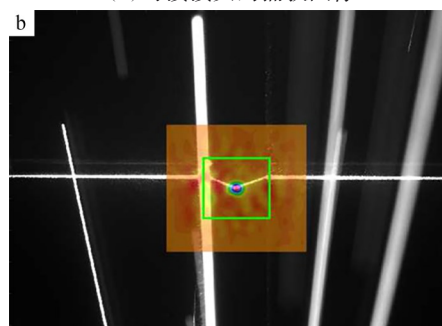
图15 V形焊缝跟踪误差^[44]Fig. 15 V-weld tracking error^[44]

生成对抗网络(CGAN)的机器人焊缝跟踪系统,用于从强干扰的焊缝图像中快速、可靠地提取焊缝特征信息。该焊缝跟踪系统由激光视觉(LV)、服务器端(ST)和机器人端(RT)三个模块组成,通过基于KUKA 机器人传感器接口(RSI)的焊缝特征点提取、坐标转换、偏差计算和焊枪位置修正,实现了多层多道焊的实时焊缝跟踪。为提升对多种工次品的适应性,建立多层多道焊接图像数据集,用于训练恢复与提取网络(REN),使其能够输出焊缝特征点的像素坐标,再基于焊缝特征点的坐标,计算了多层多道焊焊缝偏差,平均修正误差小于0.6 mm,焊枪位置的调整过程可在1 s内完成,所提出的基于CGAN原理的REN 不仅能够有效恢复焊缝特征信息,还能在强噪声环境下实现焊缝特征点的精确提取,确保焊枪平稳运行且焊缝外观无明显纠偏痕迹。图17对比了FCN-32s、U-net和REN 三种算法的平均跟踪绝对误差,进一步验证REN 的优越性。

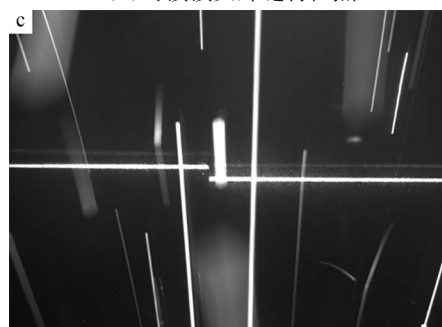
深度学习在图像降噪领域已有应用。Yang 等人^[47]受图像分割方法的启发,利用深度卷积神经网络(DCNN)强大的上下文特征表达能力,提出一种基于DCNN 的焊缝图像去噪方法,用于自动提取激光条纹,以辅助焊缝跟踪与检测。针对传统DCNN 中多次卷积和汇集操作易导致特征信息丢失的问题,该方法设计了注意力密集卷积块,用于提取和积累多尺度特征映射以完善算法。同时,引入残差双向ConvLSTM 块(BiConvLSTM),从局部特征地图中学习多尺度、多长度范围的上下文特征,强化条纹特征表达;此外,为解决不同类型焊缝识别效果差异较大的问题,设计加权损失函数优化模型训



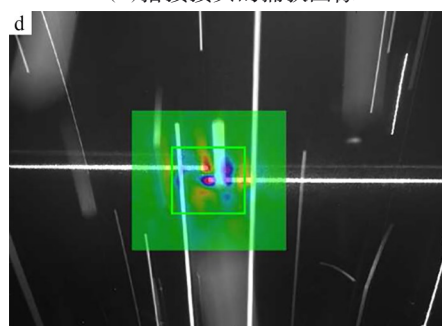
(a)对接接头的捕获图像



(b)对接接头焊缝特征点



(c)搭接接头的捕获图像



(d)搭接接头焊缝特征点

图16 焊缝特征点采集结果^[45]Fig. 16 Acquisition weld feature points^[45]

练过程。实验结果表明,该图像去噪网络能够有效抑制强噪声干扰,正确提取焊缝图像中的激光条纹,具有较高的检测精度和鲁棒性。焊缝图像的检测结果如图18所示。

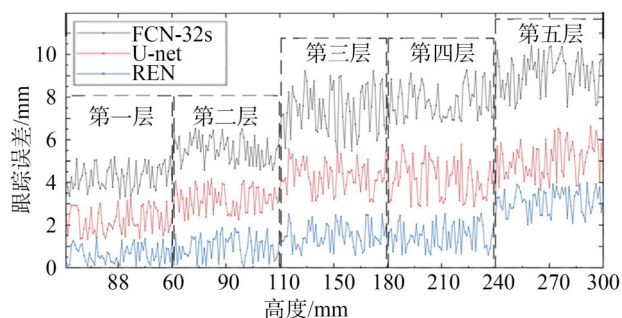


图 17 FCN-32s、U-net 和 REN 的平均绝对误差^[46]

Fig. 17 The mean absolute error of FCN-32s, U-net and REN^[46]

针对经典激光条纹跟踪方法灵活性低、对多类型焊缝适应性差的问题, Xiao 等人^[48]提出一种基于孪生网络的激光条纹特征点跟踪器 (LSFP-tracker)。该 LSFP-tracker 首先构建轻量级特征提取网络, 生成同时包含低级几何细节和高级语义信息的高分辨率特征图, 在保证模型轻量化的同时, 兼存跟踪精度与抗噪声能力; 其次通过通道注意力机制强化有效特征通道, 增强特定接缝的跟踪稳定性。最后引入条纹曲率和三个预设模板, 实现初始特征点和相应边界框的自适应检测, 扩大 LSFP-

tracker 的适用范围。试验验证表明, 即使在焊接噪声的干扰下, LSFP-tracker 在对接焊缝、V 型焊缝、角焊缝、多道焊缝等六种焊缝的平均跟踪误差仅为 1.1 像素, 平均消耗时间为 18.7 ms, 具有较好的跟踪性能。

2.2.3 基于视觉相机的熔池检测

除焊缝轨迹跟踪外, 视觉相机在焊接过程中还可用于熔池动态监测。焊接过程中, 母材受热熔化形成熔池, 其形态与流动状态直接影响焊接质量和接头性能。借助视觉相机对熔池进行实时扫描, 能够有效提取熔池轮廓特征, 监测熔池动态流动行为^[49], 并进一步分析熔深、熔宽等信息。

然而, 熔池呈熔融状态, 伴有高温、强弧光、大量飞溅等干扰, 且其形态随焊接进程持续动态变化, 检测难度较大^[50-51]。因此, 熔池图像的检测必须具备出色的鲁棒性与准确性, 以实现熔池图像与熔透状态的准确对应关系, 并将焊接图像的变化过程可视化^[52]。

为推测 GMAW 过程中熔池的几何形状, 部分学

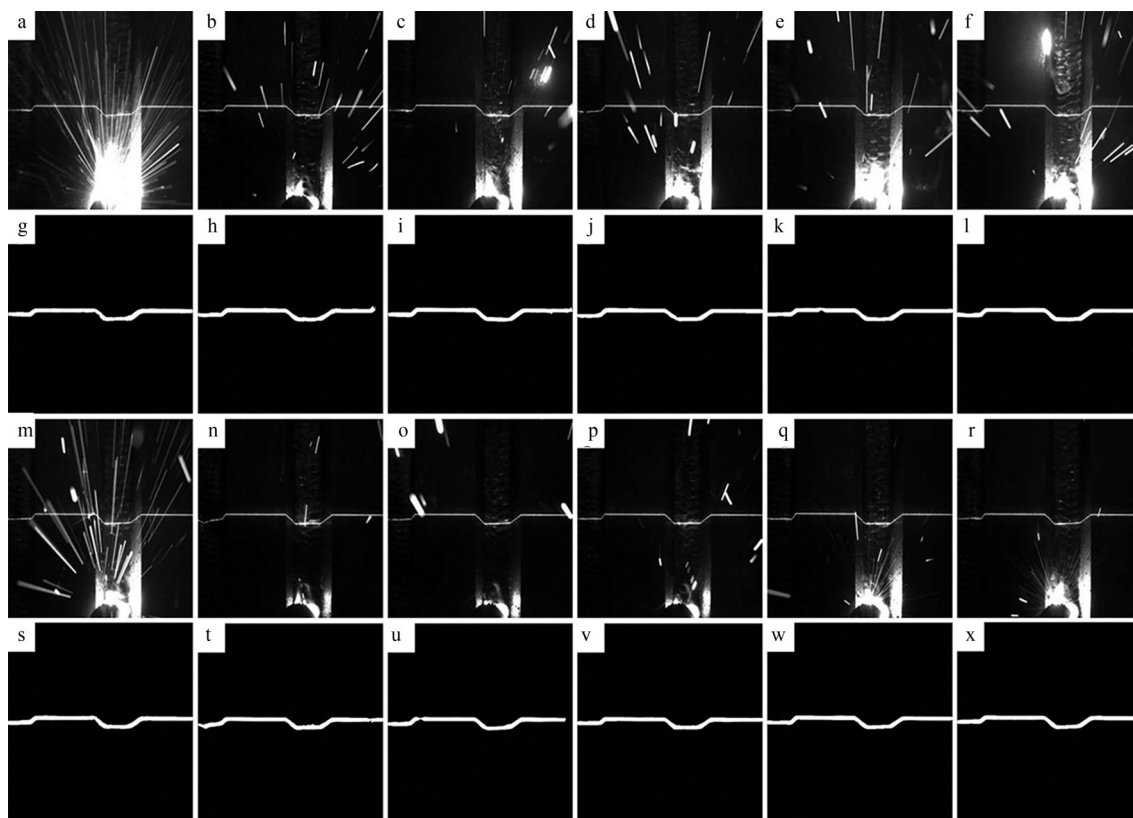


图 18 焊缝图像的检测结果: (a-f, m-r) 为原始图像; (g-l, s-x) 为预测图像^[47]

Fig. 18 The detection result of the seam image: (a-f) is the original image, (s-x) is the prediction image^[47]

者尝试利用平行光照射镜面熔池,再接收反射到镜面熔池和反射到漫射面上的激光谱线,分析平行光反射光谱的变形结果,从而获得熔池的形状信息,但是该方法易受环境光与强弧光的影响,扫描精度较差^[53]。另有学者将视觉传感器靠近熔池,采用由对数特性感光芯片构成的宽动态范围(WDR)工业相机,结合基于快速混合重建的形态学算法与Hough变换,实现熔池的自动检测^[54]。还有学者将带有复合滤光玻璃的焊接摄像机置于熔池侧面,获取到清晰的焊接图像,并基于LabVIEW视觉模块提取熔宽特征。该方法虽能获得可靠的熔池宽度信息,但无法定量获取熔池的具体几何参数,尤其是熔深参数^[55]。

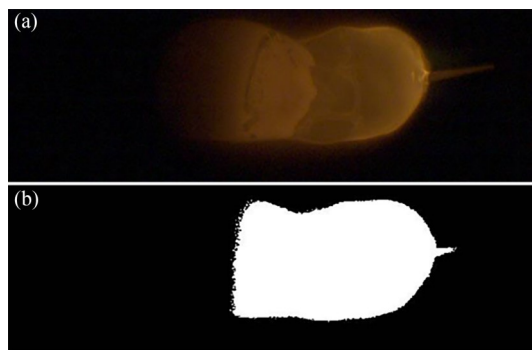
为解决熔池深度参数获取难题,Yu等人^[56]提出了一种基于熔池二维视觉特征的焊缝熔深分析方法与实时预测模型。该研究搭建单目视觉传感系统,提取熔池的面积、长度和宽度作为关键的二维视觉特征,以提取的熔池实时图像帧特征为输入,以图像帧对应的焊缝熔深为输出,分别基于支持向量机和BP神经网络建立了焊缝熔深分析方法和深度的实时预测模型。通过得到的二维数据预测结果表明,所建模型能够实时、准确地预测焊缝的熔接形式和熔池深度,为熔池深度检测技术奠定基础,不过在其他类型焊缝中的适用性有待提升。实验过程中的熔池图像处理结果如图19所示,其中图19a为原始彩色焊接图像,图19b为特征提取结果。

当前工业焊接机器人多为具备预先编程运动集的关节臂,缺乏熟练焊工的智能反应机制。为此,Liu等人^[57]设计了一种基于远程操作虚拟焊接

平台的3D熔池传感系统,利用视觉相机获取熔池图像及反射激光点的位置信息,重建熔池3D模型,并由焊工进行动态训练实验,记录其手臂运动以及3D熔池的特征参数。通过自适应神经模糊推理系统(ANFIS)训练模糊分类器,将3D熔池特征参数与焊工对焊接速度的调整相关联,最终将获得的模型传输至焊接机器人作为智能控制器执行自动化焊接的任务。实验验证了该模型在不同焊接电流、速度和测量干扰下的鲁棒性,为智能化焊接机器人开发提供了新思路。

在大型结构焊接中,噪声干扰将更为明显。Jiao等人^[58]针对船体结构GMAW焊接过程中熔池轮廓提取易受干扰的问题,提出了一种基于光谱传感技术与视觉采集系统的熔池图像处理办法。该方法通过建立弧光辐射模型,检测连续识别谱线的强度,并结合高速电荷耦合器件(CCD)摄像机搭建视觉采集系统,有效降低弧光对熔池图像采集的外部干扰。在图像处理阶段,研究团队融合空间信息模糊C均值(FCM)聚类分析与Sobel边缘检测算子,建立了图像处理融合模型。该模型对感兴趣区域(ROI)进行清晰分割,成功实现了对目标轮廓的边缘检测和准确提取。并采用Hough变换分析建立了熔池几何特征提取模型,其核心技术涵盖角点检测、转换和摄像机标定,通过对图像轮廓的左视图和右视图进行标定,实现角点像素坐标与物理坐标的无损转换。为验证所提方法的有效性,研究团队设计了三种不同的图像处理方法进行对比实验。结果表明,融合模型在边缘轮廓的分割效果优于传统方法,验证了熔池几何特征提取的准确性。不同焊接参数下采集的熔池图像处理结果如图20所示。

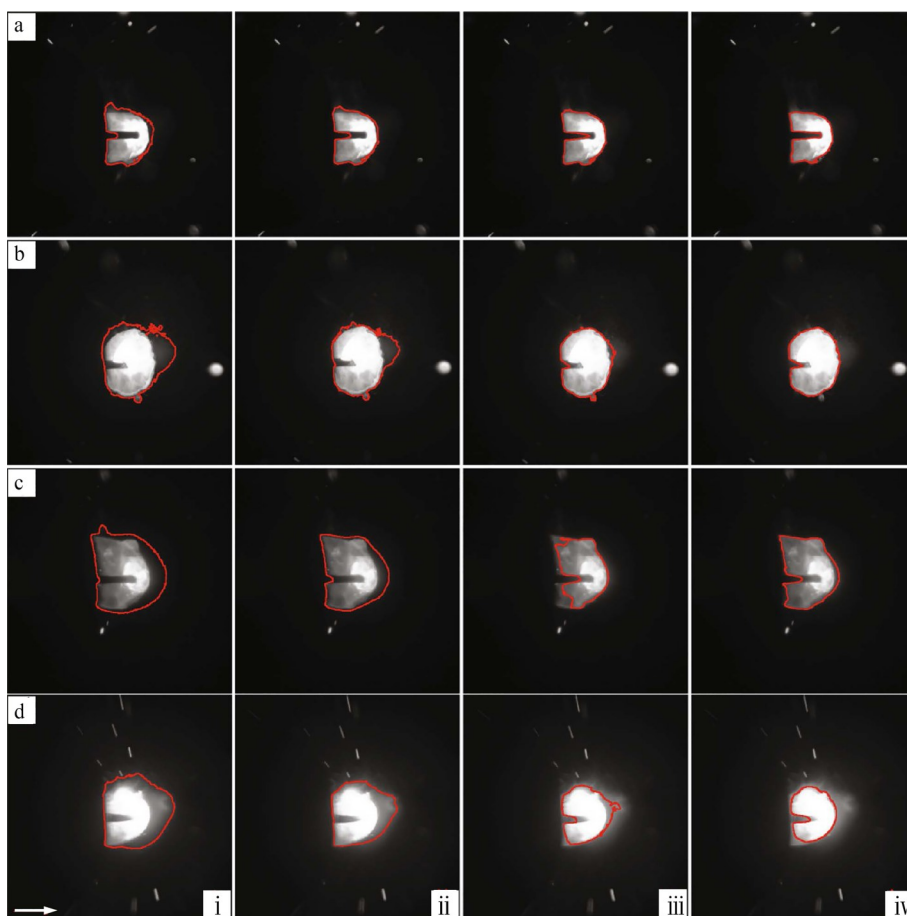
为探究不同焊接场景对焊接质量的影响,Feng等人^[59]提出了一种基于深度学习网络多源传感图像熔透状态检测框架,该框架能够同时分析多种类型的光学传感图像,整体流程由图像预处理、图像选择和熔池深度分类三个依次执行的深度学习环节组成。在预处理阶段,采用产生式对抗性网络(Pix2pix)进行图像去噪;在图像选择阶段,采用经典卷积神经网络(AlexNet)进行图像选择。尽管Pix2pix和AlexNet都实验出令人满意的性能,然而,当保持由特定实验设置生成的多源图像时,5个不



(a)原始彩色图像;(b)特征提取图像

图19 熔池图像处理^[56]

Fig. 19 Results of image processing of molten pool^[56]



(a) 95 A, 19 V, 23 cm/min; (b) 150 A, 21 V, 23 cm/min; (c) 150 A, 23 V, 26 cm/min; (d) 125 A, 19 V, 26 cm/min

图 20 不同焊接参数下采集的熔池图像^[58]

Fig. 20 Image processing results of molten pool collected under different working conditions^[58]

同结构的单独神经网络在不同阶段表现出不同的泛化能力。因此,研究人员设计了两种集成多个神经网络的方法,以提升模型对不同实验环境收集的未知数据的处理性能。

为了能够快速精确地提取出焊接熔池图像,胡继涛等人^[60]提出了一种基于轻量级 DeepLabV3+网络的焊接熔池图像分割方法,利用优化后的 MobileNetV2 网络替代 DeepLabV3+ 的主干网络,提高模型的运算效率,再引入坐标注意力(Coordinate Attention, CA)机制,增强模型对焊接熔池图像的识别提取能力。并通过迁移学习的训练方法,解决熔池图像稀缺问题,提高网络模型精度和泛化能力。熔池原图和人工标注的熔池区域检测结果如图 21 所示,改进后的模型在熔池数据集下平均交并比为 94.65%,平均像素精度为 96.67%,单张图片识别时间为 11.09 ms,模型参数量为 5.81 Mb,表明所提出



图 21 熔池原图和人工标注的熔池区域检测^[60]

Fig. 21 Original drawing of molten pool and manually marked molten pool area^[60]

的方法图像识别能力较强,具有良好的图像分割精度与实时性。

2.3 焊后焊缝质量检测研究进展

目前,焊缝表面检测主要依靠人工目视检查,

检测标准多基于工作人员的经验判断。在焊接缺陷识别方面,常见方法包括射线检测^[61]、超声波检测、视觉检测和磁力检测^[62]。射线检测是一种无损检测手段,利用辐射能量,借助射线传感器实现对焊接件的检测,适用于多数焊接件检测;然而,射线传感器无法直接安装在机械臂上进行实时检测记录。超声波检测是利用超声波束在异种界面间的反射、折射、波形转换等特性进行焊缝检测,具有较好的灵活性和经济性,但对检测技术要求较高。磁性检测法根据磁化后焊接件的磁力线分布来判断缺陷情况,不过仅适用于铁磁性材料,在厚板焊件检测中并不适用。

视觉检测基于视觉传感器和计算机视觉处理,所扫描到的焊缝图样能够及时上传至计算机储存,且适合安装在机械臂上,进行实时扫描^[63]。焊接过程中,焊缝区域会出现不同类型的缺陷,需要进行打磨修整,利用机器视觉可实现抛光自动化,保证连续高效工作,识别并处理焊接缺陷^[64]。利用视觉传感器检测焊缝缺陷,关键在于缺陷的精确定位,由于焊接缺陷分布无规律,在扫描所得的焊接图样中,需要确认焊接缺陷的位置。针对此问题,众多学者提出了新的识别方法。Jia等人^[65]采用栅格型的激光网照射焊缝表面,通过相机采集因焊缝变形的激光图像,对栅格激光照射下、无需额外光源的焊缝图像进行融合分析,并提出新的三维重建算法。该算法使用网格激光器在焊接表面形成 9×9 正交光束网格,并使用单个相机确保图像在同一坐标系中捕获。对于每个网格,计算网格激光束点处的高度值,并将图像的高度值与灰度值相结合,通过非线性拟合算法重建焊缝的三维轮廓。该方法通过拍摄图像获取焊缝表面的3D信息,取代了线激光传感器的连续采集方法,能够提供满意的精度和可靠性测量焊缝,消除了测量系统与工件之间的偏转引起的误差。采集到的激光图像、焊缝图像提取结果图及单像素骨架图如图22所示。

在焊接缺陷分类方面,Je-Kang Park等人^[66]提出一种基于卷积神经(CNN)网络的方法,利用单个RGB相机检查发动机变速箱表面上的非图案焊接缺陷,如凹坑、气孔、异物和裂纹等。首先,从捕获的图像中提取待检查的焊接区域,然后确定提取的

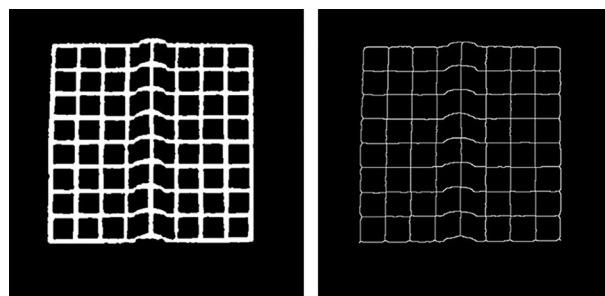
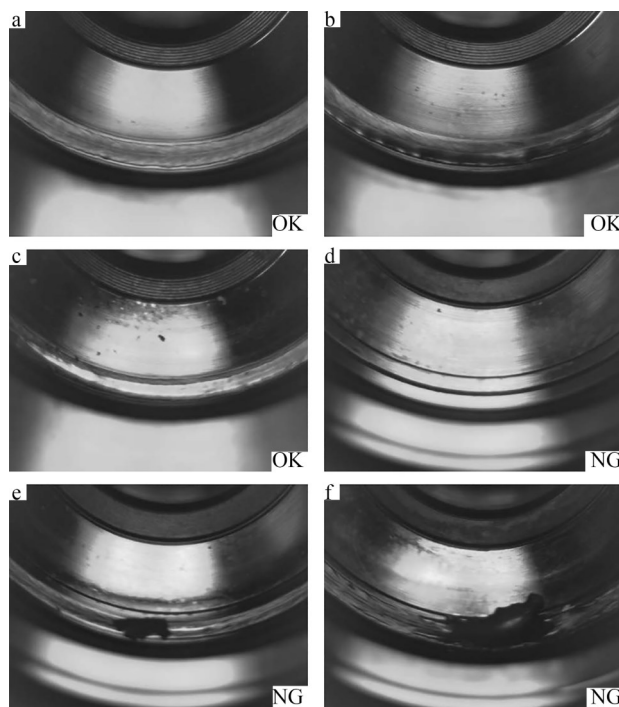


图22 焊缝图像提取结果图及单像素骨架图^[65]

Fig. 22 Weld image extraction result and single pixel skeleton image^[65]

区域是否包含缺陷,为了从捕获的图像中提取焊接区域,基于CNN的方法先识别检测图像中发动机变速箱的中心,再由另一个CNN网络对提取的中心区域进行缺陷有无的分类识别。为了稳定地训练判断缺陷有无的CNN网络,提出了一种批量采样方法,有效避免因数据不平衡(收集到的缺陷图像数量远少于无缺陷图像的数量)引起的偏差学习。通过对生产线手动收集的大量样本(约32 000张图像)进行系统评估实验,结果表明该系统能有效分辨焊接缺陷的种类。有缺陷和无缺陷样本图像识别结果如图23所示。

目前,利用神经网络进行焊接自动定位是主流



(a)正常;(b)黑烟;(c)光亮;(d)漏焊;(e)有异物;(f)弧坑

图23 无缺陷(OK)和有缺陷(NG)样本图像^[66]

Fig. 23 Various patterns of OK and NG sample images^[66]

方法,常用算法包括 CNN^[67]、Faster RCNN^[68]、Steger^[69]、U-Net^[70]、YOLO^[71]、Canny^[72]等。Wang 等人^[73]改进传统的 Faster R-CNN 网络,在其中加入 FPN 金字塔结构、可变卷积网络和背景抑制功能,大大缩短了下层和上层之间的路径,更好地保留了位置信息。仿真测试显示,改进后的神经网络模型检测精度提高,检测时间缩短,损失值降低,平均精度均值(mAP)提升至 0.935,单张图片检测时间为 0.044 s。对气孔、裂纹、咬边、焊穿、焊缝偏移这 5 种焊缝缺陷的检测精度显著提高,其中焊缝偏差的精度提高尤为明显。实验表明,改进后的模型具有良好的收敛性,能够满足实际生产中焊缝缺陷检测的要求。Li 等人^[74]为了实现焊接质量的快速识别,提高钢铁生产效率,在弧焊机器人的端部关节处安装被动视觉传感器,设计成像模块来捕获弧焊过程后的支架焊件图像,并在生产线中创建合格图像的数据集用于深度学习。在云边缘计算环境中,提出并开发基于机器人视觉的缺陷检测系统的框架,改良设计轻量级检测网络,采用 YOLOv5 目标检测算法来检查多尺度缺陷,同时加入 YOLO-SPD-Conv 模块进一步保留小缺陷的判别信息。实验结果表明,新框架能满足焊接质量检测的相关要求。

关于不同算法的使用,Zhu 等人^[75]提出了一种焊缝表面缺陷主动可视化监测方法,用于机器人焊接时实时监测焊缝表面缺陷。该方法通过 Gabor 滤波器去除焊缝中心线图像的电弧、噪声干扰信号后,采用斜率分析方法提取焊缝缺陷峰谷系数,再根据 Douglas-Puke 算法提取焊缝表面质量的 5 个特征点,分析焊缝激光条纹图像中不同类型缺陷的几何和空间布特征,利用焊缝特征提取的 8 个特征向量,设计基于决策树的焊缝缺陷识别随机森林模型,用于焊缝表面缺陷的识别与分类。试验结果显示,焊缝缺陷识别率高达 96%,单幅图像处理时间仅为 5.3 ms,该模型更能够符合如今智能焊接的实际应用要求。

总体而言,机器人焊接产量大,焊接质量自动检测至关重要。安装在机器人手臂上的视觉传感器可确保质量检测的实时性与标准性,焊接质量结果可作为负反馈信息用于调整焊接参数。实时焊接质量检测的难点集中于缺陷分类与识别^[76]。获

取清晰的图像需选择合适的相机,再利用不同的识别算法提取图像特征,的处理速度及对特征的提取速率是保证检测实时性的基础。此外,焊接过程中的弧光、飞溅、高温、烟雾等干扰因素给图像特征提取带来挑战。为此,可通过加装滤光片、更换光源、切割原始图像、使用滤波器、优化识别算法等手段获取更加清晰的原始图像。在图像处理阶段,引入注意力机制、正交化处理^[77]、深度学习、决策树算法、焊缝纹理预测、图像增强等方法,对焊缝图片进行细致分析,替代人工目视检测并修正焊接参数。

3 结论及展望

焊接机器人加入视觉处理将改善机器人焊接依赖于示教回放的现状,当前主要是基于主动视觉对焊缝进行识别,通过图像分割、二值化、引入注意力机制等能有效提取出焊缝特征,同时加入力传感器、热传感器、位姿传感器等多种传感器相互通信,协作配置焊接参数。主要结论及展望如下:

(1)在焊接前,现有的焊缝识别技术主要集中于焊接过程中的噪声处理。虽已针对曲线焊缝、窄焊缝和多层多道焊缝开发出相应的算法,但这些算法通常需要人工指定识别起点,缺乏自动化的起点判断机制。与单一的图像处理算法(如 Steger、Canny 和 IPCE)相比,融合多种算法并引入轻量化的处理模型,可以有效屏蔽图像中的焊接噪声,减少算法参数量,从而降低处理时间。对于自动化焊接起点的判定,可以采用模板匹配、SURF、ORB 等算法,这些算法能够自动匹配特定形状的焊接起点,并计算初始焊接位置,从而实现自动化的焊接起点判断,提高焊接效率。

(2)焊接过程中,针对焊接机器人在焊缝跟踪、图像降噪和熔池检测方面进行分析。在焊缝跟踪方面,目前主要依赖结构光视觉传感器识别焊缝,但针对焊接热变形的纠偏算法尚不完善,视觉超前问题的研究也相对匮乏。图像降噪方面,图像分割方法显著降低了噪声影响。熔池检测通过使用滤光片,能在强弧光环境下获取较为清晰的熔池图像,但熔池形貌与焊接质量之间的关系,以及基于熔池形貌修正焊接参数的研究仍显不足。针对焊

接视觉超前问题,引入高帧率相机搭建实时焊接系统,并结合高速图像处理算法,如Prewitt算子、快速霍夫变换和分块处理等,或融合多种算法(如在Canny算法后引入轻量化结构),有望显著提高准确率。探索熔池形貌与焊接质量的关系时,可引入预测算法,搭建集成视觉系统,同步监测实时焊接参数,记录焊接轨迹并进行比对分析。

(3)在焊接后,机器视觉用于焊接质量检测的研究逐渐受到重视。通过机器视觉直接分类检测焊接缺陷,可替代传统的人工目视检测,并依托于各种先进算法优化数据处理。目前,机器学习和神经网络技术已被广泛应用于焊接缺陷检测,能够实现焊缝的三维重建,并有效扫描和识别较小的焊接缺陷。引入机器学习优化识别算法,可进一步提高检测速度和准确率。然而,现有的视觉相机扫描分析多停留在外观检测层面,无法全面评估实际焊接结果。因此,结合实时检测获取的熔池参数,建立熔池三维模型,可视化熔池变化,从而更准确地预测焊接质量。

(4)对于焊接参数的优化、焊接轨迹的合理设置、焊接质量的合理分析等,引入大模型技术在焊接领域的应用,可以显著提升生产效率和焊接质量。通过特定的参数训练以及优化模型结构,大模型能够识别匹配出最优的焊接参数组合,并通过改进学习算法适应不同焊接场景。数据的可视化和界面反馈能够增强人机交互,提升操作人员对传感器数据的理解,降低焊接门槛。未来,虚拟焊接、远程焊接、多机器人协作焊接及人机交互焊接等新型焊接模式有望得到广泛应用,改善现有的焊接方式。

参考文献:

- [1] 王文楷,石玟,张刚,等. 基于激光视觉检测的焊缝轨迹离线规划[J]. 电焊机,2023,53(9):55-60.
WANG W K, SHI Y, ZHANG G, et al. Weld seam trajectories offline planning based on laser vision sensing [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(9): 55-60.
- [2] Liu S, Qiu Z C, Zhang X M. Singularity and path-planning with the working mode conversion of a 3-DOF 3-RRR planar parallel manipulator [J]. Mechanism and Machine Theory, 2017, 107: 166-182.
- [3] 李鹤喜,石永华,王国荣. 采用SVR-雅可比估计器的焊接机器人视觉导引[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2013,41(7):19-25.
LI H X, SHI Y H, WANG G R. Visual guidance of welding robot using SVR-Jacobian estimator [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(7): 19-25.
- [4] LV X Q, Gu D X, Wang Y D, et al. Feature extraction of welding seam image based on laser vision [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(11): 4715-4724.
- [5] Tian Y Z, Liu H F, Li L, et al. Automatic identification of Multi-Type weld seam based on vision sensor with Silhouette-Mapping [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 21(4): 5402-5412.
- [6] Lu Z F, Fan J F, Hou Z X, et al. Automatic 3D seam extraction method for welding robot based on monocular structured light [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(14): 16359-16370.
- [7] Liu H F, Tian Y Z, Li L, et al. One-shot, integrated positioning for welding initial points via co-mapping of cross and parallel stripes [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2023, 84: 102602.
- [8] Ou J, Zou L, Wan Q H, et al. Weld-seam identification and model reconstruction of remanufacturing blade based on three-dimensional vision [J]. Advanced Engineering Informatics, 2021, 49: 101300.
- [9] Maiwald F, Roeder C, Schmidt M, et al. Optical coherence tomography for 3D weld seam localization in Absorber-Free laser transmission welding [J]. Applied Sciences, 2022, 12(5): 2718.
- [10] Tran C C, Lin C Y. An intelligent path planning of welding robot based on multisensor interaction [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(8): 8591-8604.
- [11] Kim J W, Jeong J L, Chung M Y, et al. Multiple weld seam extraction from RGB-depth images for automatic robotic welding via point cloud registration [J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 80(6): 9703-9719.
- [12] Li R, Gao H M. Denoising and feature extraction of weld seam profiles by stacked denoising autoencoder [J]. Welding in the World, 2021, 65(9): 1725-1733.
- [13] Chen Y K, Shi Y H, Cui Y X, et al. Narrow gap deviation detection in Keyhole TIG welding using image processing method based on Mask-RCNN model [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112: 2015-2025.
- [14] He Y S, Yu Z H, Li J, et al. Discerning weld seam pro-

- files from strong arc background for the robotic automated welding process via visual attention features[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33(1):21.
- [15] Zhen Y, Fang G, Chen S B, et al. A robust algorithm for weld seam extraction based on prior knowledge of weld seam[J]. Sensor Review, 2013, 33(2): 125–133.
- [16] 巩书青, 章国宝, 朱宏伟. 基于核相关滤波器的强噪声焊缝跟踪[J]. 激光技术, 2024: 1–13.
- GONG S Q, ZHANG G B, ZHU H W. A weld seam tracking method under strong noise based on kernel correlation filters[J]. Laser Technology, 2024: 1–13.
- [17] Zhang Z H, Zhang Y, Chen C, et al. Seam detection method design and automatic calibration based on an active light coaxial visual sensor[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 160: 107304.
- [18] Li W M, Mei F, Hu Z, et al. Multiple weld seam laser vision recognition method based on the IPCE algorithm[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 155: 108388.
- [19] He Y S, Chen Y X, Xu Y L, et al. Autonomous detection of weld seam profiles via a model of Saliency-based visual attention for robotic arc welding[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2016, 81(3–4): 395–406.
- [20] Shao W J, Huang Y, Zhang Y. A novel weld seam detection method for space weld seam of narrow butt joint in laser welding[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 99: 39–51.
- [21] Wang X G, Chen T Y, Wang Y M, et al. The 3D narrow butt weld seam detection system based on the binocular consistency correction[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2022, 34(5): 2321–2332.
- [22] Zhang B R, Shi Y H, Gu S Y. Narrow-seam identification and deviation detection in keyhole deep-penetration TIG welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101(5–8): 2051–2064.
- [23] Rout A, Deepak B, Biswal B B, et al. Weld seam detection, finding, and setting of process parameters for varying weld gap by the utilization of laser and vision sensor in robotic arc welding[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(1): 622–632.
- [24] Huang W, Kovacevic R. Development of a real-time laser-based machine vision system to monitor and control welding processes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63(1–4): 235–248.
- [25] Liu J P, Jiao T, Li S, et al. Automatic seam detection of welding robots using deep learning[J]. Automation in Construction, 2022, 143: 104582.
- [26] 周海宇, 刘兴德, 蔚芳鑫, 等. 基于双目视觉的L型板几何参数测量研究[J]. 吉林化工学院学报, 2022, 39(3): 83–87.
- ZHOU H Y, LIU X D, WEI F X, et al. Research on geometric parameter measurement of L-shaped plate based on binocular vision[J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2022, 39(3): 83–87.
- [27] Lei Y L, Zhang L, Deng H S, et al. Multi-Layer welding path correction of Medium-Thick plate based on vision system[J]. IEEE Access, 2023, 11: 104520–33.
- [28] 王飞, 盛仲曦, 陈弈, 等. 基于 WebGL 的焊接机器人仿真及多层多道路径规划[J]. 焊接学报, 2023, 44(1): 27–32.
- WANG F, SHENG Z X, CHEN Y, et al. Welding robot simulation and multi-layer and multi-channel path planning based on WebGL[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(1): 27–32.
- [29] 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 S J, JIANG Y, YU J H, et al. Laser visual guided pipeline weld seam identification and tracking system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(16): 245–253.
- [30] Gao J, Li F, Zhang C, et al. A method of D-Type weld seam extraction based on point clouds[J]. IEEE Access, 2021, 9: 65401–65410.
- [31] Fang W H, Xu X L, Tian X C. A vision-based method for narrow weld trajectory recognition of arc welding robots[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121(11–12): 8039–8050.
- [32] 杨秀焯, 方金祥, 何鹏. 自动焊接传感技术研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2022, 36(3): 160–167.
- YANG X Y, FANG J X, HE P. Research status and development trend of automatic welding sensor technology[J]. Materials Reports, 2022, 36(3): 160–167.
- [33] 王中任, 王小刚, 刘德政, 等. 基于焊枪轮廓特征提取的焊接偏差测定方法[J]. 焊接学报, 2020, 41(7): 59–64+100.
- WANG Z R, WANG X G, LIU D Z, et al. Welding deviation measurement method based on welding torch

- contour feature extraction [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(7): 59–64+100.
- [34] 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(9–12): 945–53.
- [35] Shen H Y, Lin T, Chen S B, et al. Real-Time seam tracking technology of welding robot with visual sensing [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2010, 59(3–4): 283–298.
- [36] Xu Y L, Yu H W, Zhong J Y, et al. Real-time seam tracking control technology during welding robot GTAW process based on passive vision sensor [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(8): 1654–1662.
- [37] Ye Z, Fang G, Chen S B, et al. Passive vision based seam tracking system for pulse-MAG welding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(9–12): 1987–1996.
- [38] Lu J, Yang A D, Chen X Y, et al. A seam tracking method based on an image segmentation deep convolutional neural network [J]. Metals, 2022, 12(8): 1365.
- [39] Wang Q Y, Jiao W H, Wang P, et al. Digital Twin for Human-Robot Interactive Welding and Welder Behavior Analysis [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2021, 8(2): 334–343.
- [40] 谢忠奇, 丁超, 吴涛, 等. 基于被动视觉的窄间隙管道焊熔池特征分析 [J]. 热加工工艺, 2024, 53(9): 18–22.
- XIE Z Q, DING C, WU T, et al. Analysis on weld pool characteristics of narrow gap pipe welding pool based on passive vision [J]. Hot Working Technology, 2024, 53(9): 18–22.
- [41] 郑太雄, 黄帅, 李永福, 等. 基于视觉的三维重建关键技术研究综述 [J]. 自动化学报, 2020, 46(4): 631–652.
- ZHENG T X, HUANG S, LI Y F, et al. Key techniques for vision based 3D reconstruction: a review [J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(4): 631–652.
- [42] 王仕仙. 深度视觉技术在焊接轨迹识别中的研究综述 [J]. 装备制造技术, 2023(4): 309–312+316.
- WANG S X. A Summary of the Research on depth Vision Technology in Welding track recognition [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2023(4): 309–312+316.
- [43] Du R Q, Xu Y L, Hou Z, et al. Strong noise image processing for vision-based seam tracking in robotic gas metal arc welding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 101(5–8): 2135–2149.
- [44] Ma Y K, Fan J F, Deng S, et al. Efficient and accurate start point guiding and seam tracking method for curve weld based on structure light [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1–10.
- [45] Fan J F, Deng S, Ma Y K, 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.
- [46] Liu C F, Shen J Q, Hu S S, et al. Seam tracking system based on laser vision and CGAN for robotic multi-layer and multi-pass MAG welding [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2022, 116: 105377.
- [47] Yang L, Fan J F, Huo B Y, et al. Image denoising of seam images with deep learning for laser vision seam tracking [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(6): 6098–6107.
- [48] Xiao R Q, Xu Y L, Xu F J, et al. LSFP-Tracker: An autonomous laser stripe feature point extraction algorithm based on siamese network for robotic welding seam tracking [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(1): 1037–1048.
- [49] 黄健康, 潘伟, 孙天亮, 等. 不锈钢/碳钢 TIG 焊熔池表面流动行为 [J]. 焊接学报, 2019, 40(8): 18–25.
- HUANG J K, PAN W, SUN T L, et al. Flow behavior of stainless steel/carbon steel TIG welding pool surface [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(8): 18–25.
- [50] 梁志敏, 高旭, 任政, 等. 基于变分立体匹配算法的 GMAW 熔池形貌三维重建 [J]. 焊接学报, 2024, 45(2): 61–66+132.
- LIANG Z M, GAO X, REN Z, et al. Three-dimensional reconstruction of GMAW weld pool appearance based on variational stereo matching algorithm [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(2): 61–66+132.
- [51] 韩庆麟, 李大用, 李鑫磊. 基于分区减光的电弧增材制造熔敷道尺寸主被动联合视觉检测 [J]. 焊接学报, 2020, 41(9): 28–32.
- HAN Q L, LI D Y, LI X L. Bead geometry measurement for wire and arc additive manufacturing using active-passive composite vision sensing based on regional filter [J]. Transactions of the China Welding In-

- stitution, 2020, 41(9):28-32.
- [52] 陈宸,周方正,李成龙,等. 融合空间和通道特征的等离子弧焊熔池熔透状态预测方法[J]. 焊接学报, 2023, 44(4):30-38+131.
- CHEN C, ZHOU F Z, LI C L, et al. Prediction method of plasma arc welding molten pool melting state based on spatial and channel characteristics[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(4):30-38+131.
- [53] Wang Z Z. Monitoring of GMAW weld pool from the reflected laser lines for Real-Time control[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(4):2073-2083.
- [54] Guo B, Shi Y H, Yu G Q, et al. Weld deviation detection based on wide dynamic range vision sensor in MAG welding process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(9-12):3397-410.
- [55] Jiang C, Zhang F B, Wang Z M. Image processing of aluminum alloy weld pool for robotic VPPAW based on visual sensing[J]. IEEE Access, 2017, 5:21567-21573.
- [56] Yu R W, Han J, Zhao Z, et al. Real-Time Prediction of Welding Penetration Mode and Depth Based on Visual Characteristics of Weld Pool in GMAW Process[J]. IEEE Access, 2020, 8:81564-81573.
- [57] Liu Y K, Zhang Y M. Supervised learning of human welder behaviors for intelligent robotic welding[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017, 14(3):1532-1541.
- [58] Jiao Z Q, Qin H J, Gao X Y, et al. Image Processing and feature extraction for hull structure GMAW based on weld pool visual sensing[J]. Journal of Sensors, 2023, 2023:1-23.
- [59] Feng Y H, Chen Z Y, Wang D L, et al. DeepWelding: A deep learning enhanced approach to GTAW using multisource sensing images[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(1):465-474.
- [60] 胡继涛,马晓锋,赵荣丽,等. 基于轻量级DeepLabV3+网络的焊接熔池图像分割方法[J]. 计算机集成制造系统, 2024:1-17.
- HU J T, MA X F, ZHAO R L, et al. Welding pool image segmentation method based on lightweight DeepLabV3+network[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2024:1-17.
- [61] 樊丁,胡桢得,黄健康,等. 基于改进卷积神经网络的管焊缝X射线图像缺陷识别方法[J]. 焊接学报, 2020, 41(1):7-11+97.
- FAN D, HU A D, HUANG J K, et al. X-ray image defect recognition method for pipe weld based on improved convolutional neural network[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(1):7-11+97.
- [62] 魏明贤,郭冠华,王俊涛,等. 激光焊缝无损检测技术研究现状[J]. 无损探伤, 2022, 46(1):25-30.
- WEI M X, WU G H, WANG J T, et al. Research status of laser weld nondestructive testing technology[J]. Nondestructive Testing, 2022, 46(1):25-30.
- [63] Li Y, Li Y F, Wang Q L, et al. Measurement and defect detection of the weld bead based on online vision inspection[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(7):1841-1849.
- [64] Liu C H, Chen S, Huang J Q. Machine Vision-Based object detection strategy for weld area[J]. Scientific Programming, 2022, 2022:1-12.
- [65] Jia N N, Li Z Y, Ren J L, et al. A 3D reconstruction method based on grid laser and gray scale photo for visual inspection of welds[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 119:105648.
- [66] Park J K, An W H, Kang D J. Convolutional neural network based surface inspection system for Non-patterned welding defects[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2019, 20(3):363-74.
- [67] 王浩,赵小辉,徐龙哲,等. 结构光视觉辅助焊接的轨迹识别与控制技术[J]. 焊接学报, 2023, 44(6):50-57+132.
- WANG H, ZHAO X H, XU L Z, et al. Research on trajectory recognition and control technology of structured light vision-assisted welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(6):50-57+132.
- [68] 张臣,胡佩佩,朱新旺,等. 基于高密度点云的激光焊接缺陷智能在线检测(特邀)[J]. 中国激光, 2024, 51(4):85-96.
- ZHANG C, HU P P, ZHU X W, et al. Intelligent online detection of laser welding defects based on high density point Clouds (Invited)[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(4):85-96.
- [69] 南方,李大华,高强,等. 改进Steger算法的自适应光条纹中心提取[J]. 激光杂志, 2018, 39(1):85-88.
- NAN F, LI D H, GAO Q, et al. Implementation of adaptive light stripe center extraction of improved Steger algorithm[J]. Laser Journal, 2018, 39(1):85-88.