

焊接视觉传感及自动跟踪技术的现状与发展*

Current Status and Development of Welding Visual Sensor and Automatic Tracking Technology

清华大学机械工程系 都东 邹怡蓉 常保华



都东

清华大学机械工程系教授和博士生导师,现任清华大学材料加工工程及自动化研究所所长,焊接研究中心主任。还担任教育部高校教指委委员、中国焊接学会熔焊专委会主任委员以及中国自动化学会机器人专委会委员。

焊接在航空航天制造中占据着重要位置,是实现复杂结构设计方案、保证设计选材灵活性的重要技

术。采用先进焊接工艺、实现焊接过程机械化和自动化、扩大计算机技术和机器人在焊接中的应用,是提高航空航天产品质量,保证飞行器的安全、可靠性,改善结构设计和加工工艺性的关键所在^[1]。在焊接过程中采用视觉传感方法实时获取焊接区及邻域信息,具有信息量大、灵敏度和精度高、抗电磁干扰能力强、传感器与工件不接触等优点,通过先进合理的图像处理,可在焊缝跟踪、质量控制、焊后无损检测等方面发挥重要作用,在航天航空制造等众多行业领

域中有着广阔的应用前景^[2]。

航空航天制造领域焊接特点及其对焊缝自动跟踪的要求

在航空航天制造领域,飞行器承力构件、发动机构件、燃料贮箱、机载设备等的制造都离不开焊接。对产品制造精度的高标准要求、待焊工件的安装误差、出于某些力学考虑对被焊工件进行软态约束从而导致焊接过程中产生的变形,这些因素都使得有必要对焊缝进行自动跟踪。与其他应用场合相比,航空航天制造中的

* 国家自然科学基金项目(50875145)资助。

焊接在以下几个方面具有特殊性:

(1) 焊接路径的复杂性。

由于航空航天结构的特殊性,焊接轨迹常为复杂的空间曲线,如运载火箭燃料贮箱结构。此时采用有效的焊缝跟踪和焊炬姿态调节是焊接过程稳定性和焊接质量可靠性的保证。为提高结构性能或实现特殊功能,在航空航天制造中常需要使用焊接手段将小型元部件组合连接成特定的大型复杂结构,如运载火箭尾喷管结构,这同样需实现对复杂空间路径的自动跟踪,同时进行焊枪姿态的相应调整。航空航天制造过程中的多位姿焊接对视觉传感及信息处理的准确性和实时性提出很高要求。

(2) 被焊工件材料的光学特性。

航空航天制造所涉及到的被焊工件,既有合金结构钢和不锈钢,也有高温合金、铝合金、钛合金、甚至复合材料等。对于视觉传感而言,这些材料所表现出的光学特性(反射强度、纹理质地、颜色特征等等)都值得关注和研究。某些材料对电弧等外部光源有强烈的反射,就必须在视觉传感的光路设计中采取措施降低其负面影响。而某些材料在焊接中因氧化等原因会具有新的颜色特征^[1],可为焊缝无损检测轨迹视觉自动引导提供基础。另外,不同材料在焊接过程中的熔化现象也各不相同,熔池和邻域信息以及焊缝成形的光学特征也是焊接视觉传感重点关注的对象。

(3) 焊接工艺方法的特点。

航空航天制造涉及了多种电弧焊、电阻焊、激光焊、电子束焊等^[3-6]。不同的工艺方法在工件材料、坡口形式、焊缝特征、光学环境和视觉信息等方面有不同特点,在焊缝跟踪精度和速度方面也有不同要求。例如,激光焊热源集中,坡口间隙小,对视觉识别精度要求较高;焊接速度快,对焊缝跟踪实时性要求较高。而各种材料的明弧焊及其他熔化焊,弧光和熔池的光强及光谱特征也各不相同,

对焊缝视觉自动跟踪的光学系统和处理算法都提出了挑战^[7]。另外,在需要进行多层多道焊的场合中,为实现填充焊和盖面焊的跟踪,需要对前道焊缝表面形貌进行识别。航空航天领域制造质量意义重大,经常进行的焊后无损检测也对已完成焊接的焊缝自动跟踪提出需求。

以往常常根据是否外加辅助光源而将焊缝跟踪方法分为主动视觉和被动视觉。但从有利于技术创新的角度,应关注基于对象特征(焊接坡口宏观几何特征、工件区域光学特征等)对焊接视觉方法进行分类的思路^[8]。

基于焊接坡口宏观几何特征的焊缝视觉跟踪

最常见的跟踪方法是结构光法,即采用特定的结构光(点、线、圆弧以及光栅等形式)作为辅助光源照射待识别区域,通过图像中的光斑畸变获取焊接坡口几何结构信息。基于线结构光法的焊缝跟踪视觉系统曾应用于 Ariane 5 运载火箭发动机尾喷管的自动 TIG 焊接^[9]。在对接、

光的方法,可获得焊缝的多点信息,有利于增强可靠性^[13]。

结构光法在焊接自动化中获得了实际应用,但也存在局限性。在待识别区域结构特征不明显(如极窄间隙的对接焊、多层焊中的盖面焊等)的情况下,光斑图像难以产生明显畸变。在实际焊接生产过程中,焊工经常用眼睛经适当减光措施直接观测焊接区域工件光学特征(质地、纹理、颜色和光影等)从而实现有效的手动跟踪。可以基于人工智能的思路研究发展新的焊缝视觉跟踪技术方法。

基于纹理特征的焊缝识别方法

纹理可看作是物体在一定尺度上表面微观特征规律性分布的宏观表现。重复出现的微观特征可被称为纹理基元,而图像纹理则是由大量基元按照一定规律排列而成的,可以通过对纹理基元及其组合方式实现对纹理的描述。焊缝经常呈现鱼鳞状波纹,可研究基于图像纹理基元模板匹配的搜索算法进行焊缝跟踪^[14],

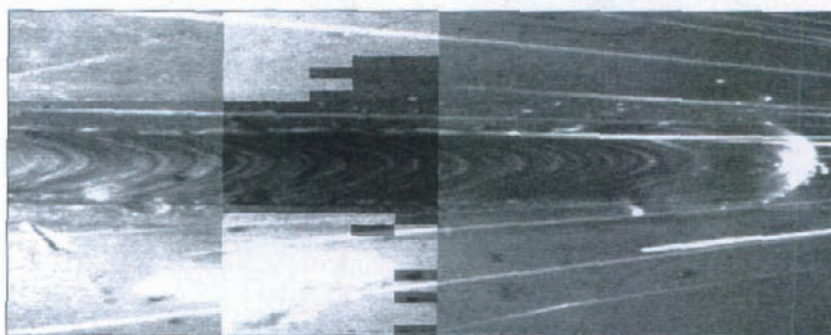


图1 焊缝区识别结果

搭接、外角接、内角接、V形坡口和U形坡口的情况下,线结构光法的图像特征和处理方法均有不同^[10]。采用圆形扫描结构光传感器以及利用环形结构光进行三维结构重建,可以得到更多的坡口位置和深度信息^[11-12]。将激光光源通过光栅生成一组平行光投射到工件表面的多直线形结构

在焊后的自动无损检测中得到应用。

纹理也可被认为是一种反映区域中像素灰度级空间分布规律的属性。可基于灰度共生矩阵方法建立对焊缝图像纹理特征的描述,自动将焊缝与母材区分出来^[15]。由于考虑了子图像的区域特征,基于纹理特征值的描述比基于灰度值的描述更能

够反映焊缝区与母材区的特征差别。根据上述原理,以实际焊接过程中拍摄的视频图像为素材,编写图像采集和处理程序并进行焊缝识别测试,得到如图 1 所示的识别结果,显示了该方法焊缝视觉跟踪方面的应用前景。

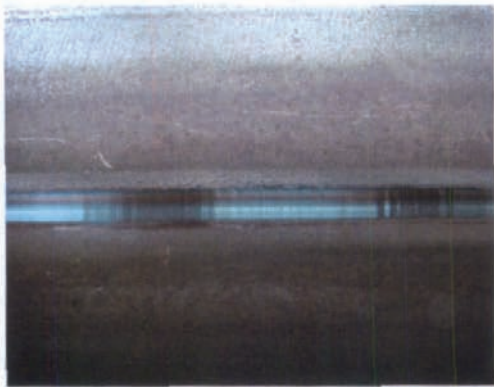


图2 焊缝区域彩色图像

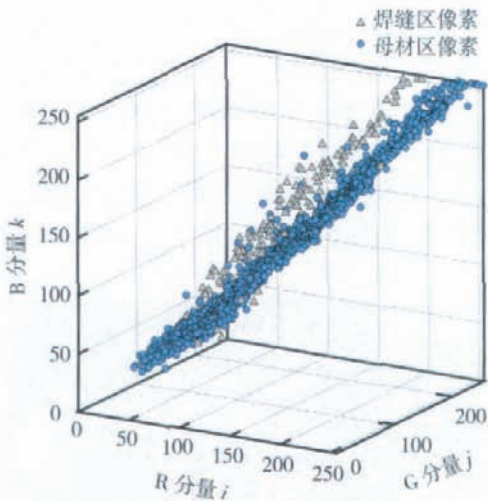


图3 图像中各像素在RGB彩色空间中的分布情况

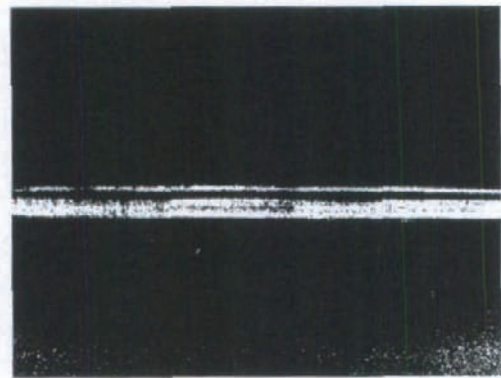


图4 图像阈值分割结果

基于色彩信息的焊缝识别方法

随着彩色摄像技术的进步和普及,如何充分利用图像的色彩信息进行目标识别成为焊接视觉传感技术中的重要思路。彩色图像比黑白图像包含更多的信息,为了有效地表达和处理彩色信息,需要建立相应的彩色表达模型,也需要研究适用的彩色图像处理方法。

在焊接视觉中,某些识别对象因材料特点、热加工过程、氧化反应等原因具有特定的颜色特征,可利用其进行焊缝识别以及焊缝质量的判断。例如,在钢管水耦合自动超声波无损检测中,母材表面因氧化作用而呈现黄褐色,而待检测焊缝经过铣削加工呈现淡青色,可通过颜色空间的分析将焊缝区与母材区进行区分^[16]。通过设定新的基准色构造出新的彩色空间,新生成的色彩表达分量矩阵突出了焊缝区与母材区的不同特点,较好地实现了图像分割和焊缝识别。彩色 CCD 拍摄的原始图像如图 2 所示,在 RGB 彩色空间中每个像素可表示为三维坐标空间中的一个点,如图 3 所示,经彩色空间转换后进行图像分割,得到分割结果如图 4 所示。又如,钛合金焊缝因氧化层厚度的不同,其颜色随氧化层的增厚按银白、浅黄、深黄、金紫、深蓝、灰蓝、灰红、灰黑的顺序进行变化。在钛合金焊缝成型质量的

检测中,其中一项重要的工作就是通过其颜色判断焊接质量,焊件的焊缝和热影响区的表面变色应符合航空工业标准的相关规定^[1]。再如,在航空制造中,常面临异种材料的连接,这增强了选材设计的灵活性,实现结构的更高性能。不同材料在颜色上的差异性可以用于其间接缝的识别与跟踪,基于色彩信息的视觉方法的研究在该领域具有可观的前景。

多传感器信息融合

信息融合是指对多源信息进行综合处理,从而得出更为准确、可靠的结论。它是在多个级别上对传感器数据进行综合处理的过程,每个处理级别都反映了对原始数据不同程度的抽象;可以对多个传感器的数据进行多级别、多方面、多层次的处理,从而产生新的有意义的信息^[17]。针对焊缝识别问题,我们可以在一个焊接过程中关注多个不同的传感器进行信息融合,也可以利用一个传感器获得工件焊接区域不同类型的特征信息进行融合处理,增加焊缝自动识别的适应性和可靠性。信息融合为焊缝识别与跟踪技术沿人工智能方向的发展提供了可能。

结束语

航空航天制造领域的焊接在材料、结构、焊接工艺方法等方面都有其特征,对焊缝自动识别与跟踪的准确性、实时性和适应性也有专门要求。基于结构光法焊缝视觉跟踪技术已经得到实际应用。焊接视觉技术未来的发展应更关注和利用工件焊接区域光学特征。探索多传感信息融合的视觉跟踪方法是航空航天制造焊接自动化的重要研究方向。

本文有参考文献 17 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 侧卫)