

焊接领域激光结构光视觉传感技术的研究及应用

郭吉昌, 朱志明, 于英飞, 孙博文

清华大学机械工程系先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084

摘要 基于激光结构光的视觉传感技术是实现焊接坡口检测、焊缝跟踪和焊接机器人路径规划等的主要技术手段和基础。介绍了基于激光结构光的视觉传感技术应用于焊接领域的优势, 分析了其基本检测原理, 归纳总结了该技术在焊接领域的研究热点和发展方向。通过探讨各种激光结构光视觉传感器的原理和特征, 对其进行了全面的总结和全新的分类, 并详细介绍了它们各自的技术特点及研究进展。最后, 对基于激光结构光的视觉传感技术存在的问题进行了探讨, 以期促进该技术的进一步研究和应用。

关键词 机器视觉; 视觉传感器; 激光结构光; 焊接领域

中图分类号 TP212.9

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1200001

Research and Application of Visual Sensing Technology Based on Laser Structured Light in Welding Industry

Guo Jichang, Zhu Zhiming, Yu Yingfei, Sun Bowen

Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract The visual sensing technologies based on the laser structured light are the main technical means and foundation for the realization of welding groove detection, seam tracking and robot path planning in the welding industry. Their technical advantages applied in the welding industry are introduced, the basic detection principles are analyzed, and the research focuses and developing directions in the welding industry are concluded and summarized. Through discussion on the operational principles and characteristics of various visual sensors based on the laser structured light, the comprehensive summary and a novel classification are proposed, and their respective technical characteristics and research progress are introduced in detail. Finally, the existing problems of visual sensing technology based on the laser structured light are discussed in order to promote further research and application of this technology.

Key words machine vision; visual sensor; laser structured light; welding industry

OCIS codes 150.0155; 150.5495; 150.3045

1 引言

目前, 工业生产中广泛应用的焊接机器人以传统示教型为主。然而, 由于工件加工和装卡精度、焊接热变形等导致的尺寸误差, 机器人在很多情况下不能完全适应实际工况变化, 从而造成生产效率低、焊接质量无法全面保证等问题。在美国、德国等工业发达国家, 焊接自动化程度已高达 80%, 而我国的焊接自动化率仅为 40% 左右^[1]。可见, 我国的焊接自动化和智能化水平亟待提高。采用传感技术获得焊接工件和坡口的准确信息, 实现柔性化和智能化焊接是保证接头质量、提高焊接自动化水平的重要手段, 是目前研究的热点和前沿。基于激光结构光的视觉传感技术具有独特的优势, 逐渐成为焊接传感技术研究和应用的主流。

收稿日期: 2017-07-04; **收到修改稿日期:** 2017-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(51075231)、国家科技重大专项(2012ZX04012011)

作者简介: 郭吉昌(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事焊接机器人及视觉传感技术方面的研究。E-mail: gby7560@126.com

导师简介: 朱志明(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事焊接设备及工艺方面的研究。

E-mail: zzmdme@mail.tsinghua.edu.cn(通信联系人)

2 激光结构光视觉传感应用于焊接领域的优势

电弧式传感器和视觉传感器是焊接领域研究和应用最多的两类传感器。根据检测方式的不同,电弧式传感器可分为双丝、摆动和旋转三种类型,如图 1 所示^[2]。电弧式传感器利用焊炬与工件之间的距离变化引起的电弧自身物理特性(电弧电压、电弧电流和弧光辐射等)的变化进行检测,具有良好的实时性和灵活性,没有超前误差,且不受弧光、飞溅等因素影响。但是,弧长与电弧电压或焊接电流之间的精确模型较难建立,且适用的焊缝类型有限,不能用于薄板工件的搭接焊、对接焊以及非对称坡口和坡口较小时的焊接^[3],从而影响了电弧式传感器的应用和适用范围。

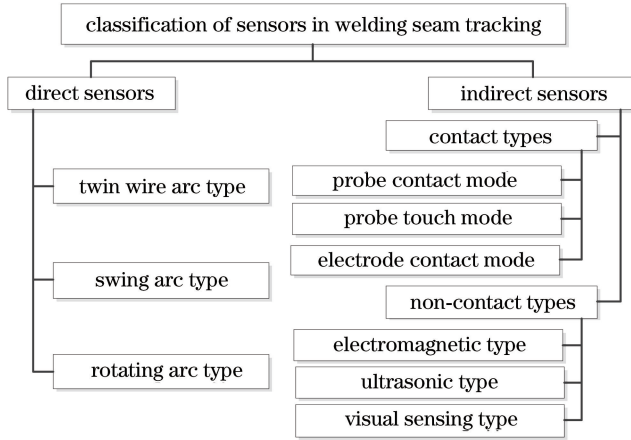


图 1 焊缝跟踪技术中传感器的分类

Fig. 1 Classification of sensors in welding seam tracking technology

自 1977 年 Marr 提出全新的计算机视觉理论^[4]以来,随着计算机、光电和图像处理技术的不断发展,视觉传感技术也获得了长足进步。根据不同的对象特征,邹怡蓉^[5]对视觉传感技术进行了如图 2 所示的分类。根据是否人为施加外部光源,视觉传感技术又可分为被动视觉法和主动视觉法。被动视觉法直接利用环境光源或弧光作为背景光源,通过工业相机获取感兴趣的焊接区域图像;主动视觉法的概念由 Bajcsy 于 1982 年首次提出^[6],它依靠外加辅助光源来获取焊接区域的特征信息。因激光具有方向性、单色性和相干性好,能量集中等优点,外加辅助光源多采用激光结构光形式。

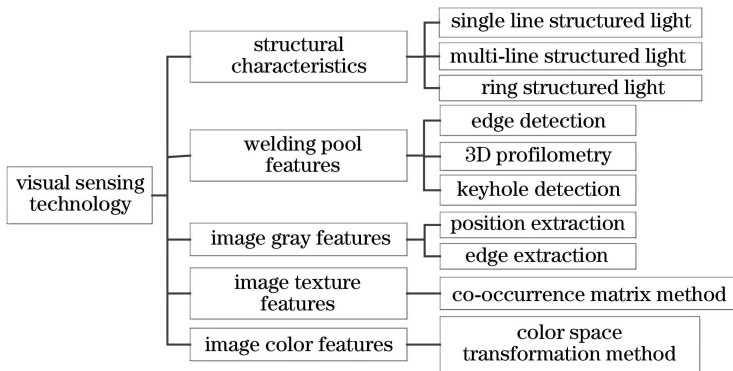


图 2 基于对象特征的视觉传感技术分类

Fig. 2 Classification of visual sensing technology based on object features

激光光源的可控性使得视觉图像中的干扰信息容易去除,图像处理相对简单、稳定,真实性和实时性较好。在焊接工业中,基于激光结构光的视觉传感技术同其他传感技术相比,具有以下优势:1) 信息量大,精度高,可获得焊接坡口或接头截面的精确参数信息和空间位置姿态信息,可同时用于焊缝跟踪、焊接参数控制和焊后接头(焊缝)的外观检查;2) 易于智能化应用,如能够检测焊接起止点,辅助焊接机器人实现轨迹规划,通过视觉传感器实现闭环控制等;3) 与工件非接触,对焊接工艺的实施影响较小;4) 抗干扰能力强,可有效防止电磁、弧光、飞溅和烟尘等干扰,环境适应性强;5) 通用性好,适用于各种接头类型和坡口形式的焊

接,还可用于多层多道焊的焊道自动规划和焊接参数自适应控制。

3 激光结构光视觉传感器检测原理

基于激光结构光的视觉传感属于主动视觉中的立体视觉范畴,能够测量物体的三维空间参数^[7]。根据测量原理可分为两大类:激光三角测量法和基于成像原理的光学三角测量法。

3.1 激光三角法测量原理

为了达到最佳的聚焦效果和测量精度,激光三角法要求传感器的光路设计满足 Scheimpflug 条件,即成像面、物面和透镜主面必须相交于同一直线。根据激光发射器入射角度的不同,激光三角法可分为直射式和斜射式两种,如图 3(a)和图 3(b)所示。直射式激光三角法适合测量散射性能较好的表面。斜射式激光三角法比较适合测量表面接近镜面的物体,其分辨率高于直射式,缺点是测量范围较小,体积和光斑较大^[8]。

以斜射式激光三角法为例,其测量原理为

$$\delta = \frac{l_1 D \sin(\theta_1 + \theta_2)}{l_2 \sin \phi \cos \theta_1 + D \sin(\theta_1 + \theta_2 + \phi)}, \quad (1)$$

式中 ϕ 为光电探测器的光敏面与成像透镜轴线的夹角, δ 为光敏面上成像的偏移距离, D 为被测物面的深度移动距离, l_1 为像距, l_2 为物距, θ_1 为激光束光轴与被测面法线之间的夹角, θ_2 为成像透镜光轴与被测面法线之间的夹角。 θ_1 、 θ_2 与 ϕ 应满足 Scheimpflug 条件,以保证被测点成像在光敏面上。

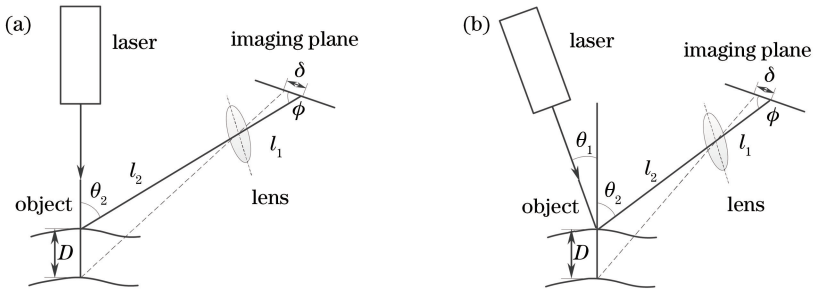


图 3 激光三角法测量原理示意图。(a)直射式;(b)斜射式

Fig. 3 Schematics of laser triangulation measurement principle. (a) Straight incidence mode; (b) oblique incidence mode

3.2 光学三角法测量原理

与激光三角测量法相比,基于小孔成像原理的光学三角测量法的测量精度较低。根据结构设计的不同,光学三角测量法分为直射-斜接收式、斜射-直接接收式和斜射-斜接收式三类。这里以斜射-直接接收式为例分析其测量原理,传感器系统示意图如图 4(a)所示^[9],摄像机小孔成像模型如图 4(b)所示。二维坐标系 uO_1v 为像坐标系,三维坐标系 xyz 为光学坐标系, O_1O_2 为等效焦距 f ,设待测点 P 在光学坐标系 xyz 内的坐标值为 (x, y, z) ,其成像点 P' 在像坐标系 uO_1v 内的坐标值为 (u, v) ,则系统测量原理^[10]为

$$\begin{cases} x = \frac{-Hu \tan \theta}{f \tan \theta + u} \\ y = \frac{-Hv \tan \theta}{f \tan \theta + v} \\ z = \frac{Hu}{u - f \tan \theta} \end{cases} \quad (2)$$

4 焊接领域激光结构光视觉传感技术的研究与应用

计算机视觉是视觉传感器结合计算机和图像处理技术发展起来的,是焊接领域传感技术研究和应用的前沿以及未来的发展方向。而视觉伺服技术是基于计算机视觉,结合机器人技术发展而来的。激光视觉伺服技术因具有高的精度和抗干扰能力而被广泛应用于焊接工业中^[11-12]。目前,基于激光结构光的视觉传感技术在焊接领域的研究和应用主要集中在坡口识别、焊缝跟踪、初始焊接位置检测与引导、焊枪位姿调节、焊

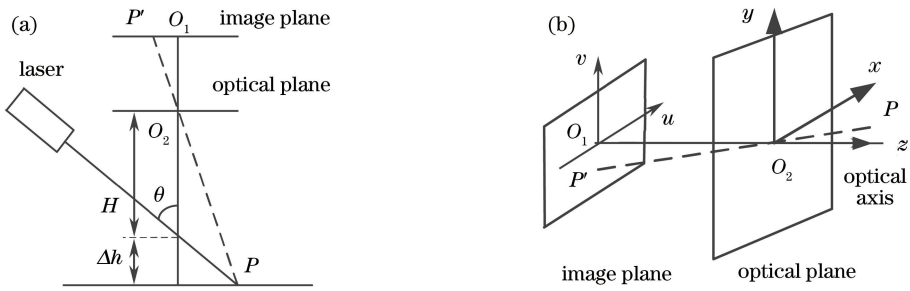


图 4 光学三角法。(a)系统示意图;(b)小孔成像模型

Fig. 4 Optical triangulation measurement method. (a) Schematic of system; (b) pinhole imaging model

缝成形及熔透控制、多层多道焊识别及焊接路径规划、焊接熔池三维检测与测量等方面。

焊接坡口特征识别和以此为基础的焊缝跟踪技术,在焊接视觉传感中研究得最多,且相对较为成熟。目前,基于激光结构光视觉传感的焊缝跟踪技术研究主要涉及以下方面:1)快速稳定的图像处理方法;2)传感器的结构设计;3)激光跟踪的稳健性和通用性;4)焊缝跟踪控制方法,主要为神经网络控制和模糊控制以及二者的结合。文献[13]运用 LabVIEW 和 Vision Builder 实现了焊接坡口间隙检测;文献[14]将 VC++ 与 MATLAB 相结合,完成了坡口识别图像处理,整个过程耗时约 0.23 s。文献[15]的研究显示,激光视觉传感器对焊缝错边的检测精度可达 ± 0.2 mm,对焊缝跟踪精度可达 ± 0.69 mm。国外对基于激光视觉传感的焊缝跟踪技术研究得较早,美国 Worthington Industries 公司开发了一种焊缝跟踪设备,其跟踪精度可达 0.1 mm^[16];韩国的 Kim 等人研制的基于视觉的焊缝跟踪控制系统,能够根据实际工况在焊接过程中实时调整焊枪的位置,其焊缝跟踪精度为 ± 0.5 mm^[17-18]。

对初始焊接位置的检测与引导也有较多的研究,对基于激光结构光视觉的焊枪空间位姿控制的研究则主要体现在对焊枪高度的控制上,以及对焊枪与工件单方向夹角的控制上,而对焊接过程中焊枪高度和三维空间位姿的综合控制研究目前尚未见文献报道。文献[19]采用激光条扫描焊缝的方法自动识别定位焊接初始点,建立了曲线焊缝视觉跟踪过程中焊接机器人期望位姿的数学模型,并设计了上下层结构的模糊视觉伺服控制器,实现了焊枪自动定位到焊缝初始点以及焊接过程中焊枪位姿的实时调整。

基于激光结构光的焊缝成形及熔透控制,主要体现在对熔池宽度、焊道高度等表面几何尺寸的闭环控制上。文献[20]设计了一套基于线结构光的视觉传感器,通过对快速成形熔敷焊道结构光图像进行处理,获得了熔敷焊道的高度和宽度信息,使用面积法辨识堆敷速率与熔敷焊道宽度的一阶传递函数,据此设计了比例-积分-微分(PID)控制器,并对焊道宽度进行控制,实现了 ± 0.7 mm 以内的控制精度。汪岩峰等^[21]采用激光光栅条纹投射焊接熔池表面的方法,通过对熔池图像进行标定,提取熔池边缘信息,采用逐行(列)扫描方法计算熔池的最大宽(长)度,进而求得熔池面积和熔池后拖角,成功提取到了熔池正面的几何参数。

多层多道焊的视觉识别及辅助轨迹规划是视觉传感技术应用于机器人自动化焊接的一个研究难点,基于被动视觉法或结构光的主动视觉法各具特色。张华军等^[22]建立了基于激光视觉传感的多层多道焊的焊缝形状参数自动提取系统,设计了相应的图像处理和识别流程。黎咸西^[23]在基于激光结构光的视觉传感基础上,设计了比例控制和模糊控制相结合的 Fuzzy-P 控制器,并进行了针对 V 形坡口的多层多道焊试验,跟踪精度可达 ± 0.3 mm。目前,基于激光结构光的视觉传感技术应用于多层多道焊的研究主要侧重于图像处理,特别是多层多道焊图像的特征点识别及快速、有效的图像处理流程。

基于视觉的熔池表面三维检测与测量技术主要有结构光三维视觉法、阴影恢复形状法以及双目立体视觉法等^[24]。基于激光结构光的视觉传感技术用于焊接熔池三维检测的研究相对较少,主要以美国肯塔基大学张裕明课题组为代表。他们以非熔化极气体保护焊为研究对象,采用激光结构光条纹或点阵投射到焊接熔池表面,熔池表面反射结构光从而在成像屏上成像,拍摄成像屏上结构光图像的变化并通过图像处理实现熔池表面三维形貌的重塑^[25-26],系统原理如图 5 所示^[27]。该方法比较复杂,目前还处于研究阶段。另外,文献[28]使用图像处理和移动点跟踪的方法,实现了基于激光结构光视觉传感器的焊接熔池表面的三维重建。文献[29]提出了一种基于灰度局部最大梯度的边界检测算法,并采用该算法实现了基于绿色激光束视觉传

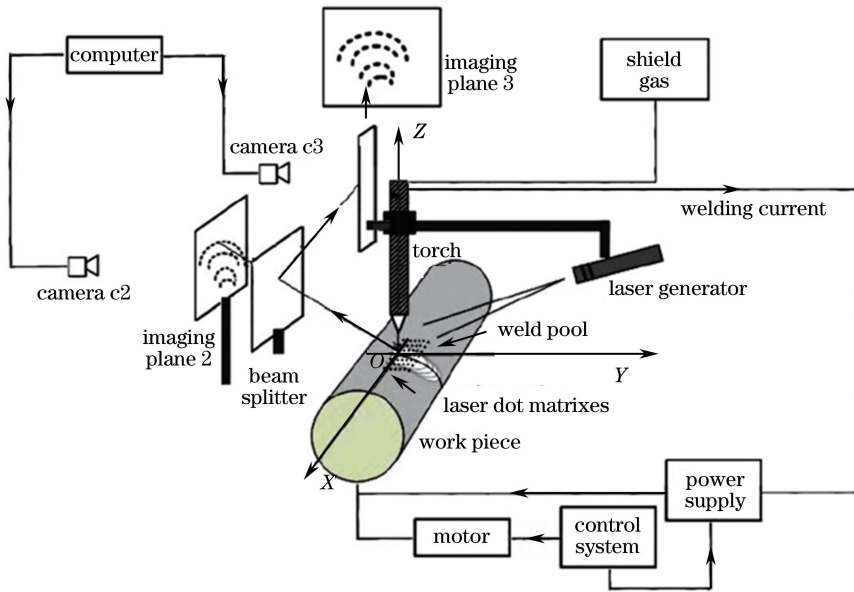


图 5 基于激光结构光的熔池表面三维重建技术

Fig. 5 Three-dimensional reconstruction technology of weld pool surface based on laser structured light

传感器的熔池边界提取和宽度测量。

结构光视觉传感技术能够有效提高焊接机器人的自动化、智能化和生产的柔性化水平,其工业化产品以加拿大 Servo-Robot 公司和英国 Meta 公司的视觉传感器为代表;此外,美国 MTI 和 Worthington Industries、德国 Leuze Electronic、日本 FANUC、瑞典 ASEA 等公司也都有成熟的系列化产品。国内见于报道的有南京远新自动科技有限公司和北京赛诚工控科技有限公司等,这些公司相继开发出了工业化产品。

5 基于激光结构光的视觉传感器分类

常用的三维视觉测量与检测技术有结构光测量、立体视觉测量、单摄像机测量、光束平差测量等方法^[30],基于激光结构光的视觉传感器在焊接中的应用属于三维视觉测量范畴。通过分析焊接中弧光的光谱可知,在 600~700 nm 波长之间无突出的特征谱峰值,连续谱幅值低且波动小,因此主动视觉传感中常用的激光结构光波长集中在此波段范围内,在实际应用中以 650 nm 左右居多。根据不同的标准和特征,对焊接中研究和应用得较多的激光结构光视觉传感器进行了如图 6 所示的分类。

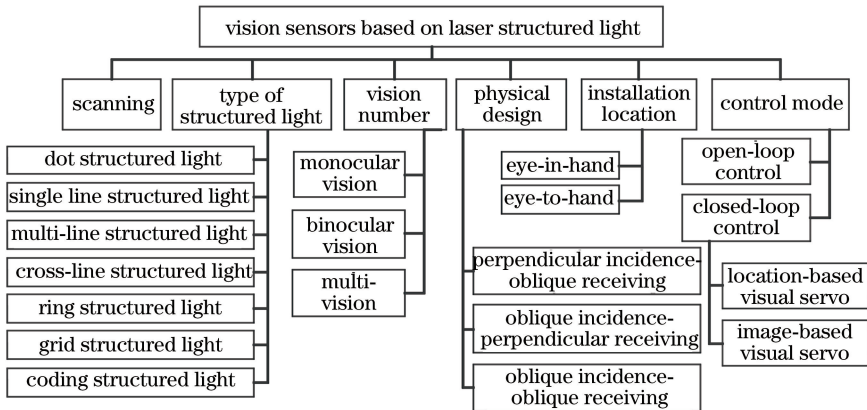


图 6 焊接中激光结构光视觉传感器的分类

Fig. 6 Classification of visual sensors in welding based on laser structured light

5.1 根据激光结构光的类型分类

焊接中应用的激光视觉传感器主要有扫描式和结构光式两种。扫描式激光传感器的视场深度大,但是

检测精度较低;受扫描速率的影响,实时性相对较差;主要用于机器人的引导定位^[31]及中厚板焊接中的焊缝跟踪和自适应控制。在高精度控制或高频跟踪场合以结构光视觉传感器的应用为主。

传感器所使用的激光结构光可分为点结构光、单线结构光、多线结构光(光栅)、网格结构光、环形结构光(圆锥光面)、编码结构光等。点结构光由于可获取的特征信息较少,多与扫描法结合使用。单线结构光相对可获取更多的检测信息,且结构相对简单,故而研究和应用得最多。较之单线结构光,多线结构光具有更高的测量效率和覆盖面积,但同时增加了标定的复杂性和图像处理的难度^[32]。乔东虢等^[33-34]研究了双线结构光传感器在焊缝跟踪与焊枪定位中的应用,提出了相应的检测算法。Xiao^[35]研究了基于三线结构光的传感器在曲线焊缝跟踪中的应用,并提出了相应的跟踪算法。Sung 等^[36]设计了一种应用于高速焊接场合焊缝外形检测的多激光条纹视觉传感器,该传感器可获得较大范围内的焊缝尺寸信息。英国 Meta 公司开发的 SCOUT 系列激光结构光视觉传感器采用 5 条激光条纹,配合控制系统可以控制机器人的位姿,实现了六维焊缝跟踪。

徐培全等^[37-39]研究开发了一种基于环形激光的视觉传感器,并将其应用于机器人焊接的焊缝跟踪与焊枪定位。该传感器利用圆半径与深度关系求解焊缝特征点的深度值和焊枪高度信息,根据结构光对不同类型焊接接口的表现形态不同进行坡口识别,其缺点是结构较为复杂。网格结构光法又称为网格编码法,由 Will 和 Pennington 于 1971 年提出^[40],将编码后的网格结构光投射到被测物体表面,由于覆盖面积大而不需要进行扫描,根据标定参数、位置参数和编码方式,利用三角法即可得到被测物表面的三维信息,常用于焊接熔池和焊缝形貌检测。编码结构光法按编码方法的不同,可分为空间编码、时间编码和彩色编码等类型,具有分辨率高、测量速度快、误差小等优点,缺点是限制了被测物表面特征以及场景照明状况等^[41-43]。编码结构光法主要应用于接头特征和焊缝检测中。

5.2 根据所用视觉传感器的数量分类

根据传感器采用视觉数量的不同,视觉传感系统有单目视觉、双目视觉和多目视觉之分。目前,绝大多数的研究及工程应用以单目视觉为主。基于激光结构光的单目视觉传感技术虽然属于立体视觉的范畴,可以利用结构光形变获得相应的深度信息,但是严格来说仍属于“二维半”技术。当对焊接的控制要求和精度进一步提高时,需要工件、焊缝、熔池等目标的空间坐标、位置姿态等三维信息,此时,双目视觉或多目视觉的优势更加明显,但存在图像处理数据量大、实时性较难保证的问题。

双目视觉使用双摄像机从不同角度同时获取目标信息,由两幅存在视差的平面图像还原目标的三维信息;或使用单目视觉在不同位置成像,进而模拟双目立体视觉获得被测物的空间三维信息^[44]。三目视觉方法通过增加一台摄像机提供额外约束,避免了双目视觉难以解决的假目标、边缘模糊、误匹配等问题,重建效果优于双目视觉;但由于其结构复杂,控制难度大,不及双目立体视觉法应用广泛^[45]。基于激光结构光的双目视觉法在焊接领域的应用以华南理工大学石永华教授课题组的研究较为深入,该课题组实现了焊缝识别、三维重建和轨迹规划等功能^[46-47]。目前,基于激光结构光的多目视觉传感技术以测量应用为主^[48-49],在焊接领域的应用相对较少。

5.3 根据传感器结构设计分类

根据传感器结构设计的不同,可将激光结构光视觉传感器分为直射-斜接收式、斜射-直接接收式、斜射-斜接收式三种结构类型,如图 7 所示^[50]。目前,视觉传感器的三种结构形式在工业上都有应用,也各有优缺点。直射-斜接收式传感器的坐标变换相对简单,但图像易受弧光干扰;斜射-直接接收式传感器确定焊接接头的深度信息较麻烦,但它的测量误差相对较小^[51],且系统体积明显减小;斜射-斜接收式传感器的测量精度相对较高,但体积较大,且坐标变换相对较复杂。

摄像机中轴与激光器中轴夹角的大小会直接影响传感器的测量精度,该角度的设计须配合传感器的结构形式而定,目前对该角度的设计研究并没有统一的定论。文献[7]的研究显示,视觉传感器采用直射-斜接收式,且摄像机中轴与激光器中轴夹角大于 65° 时,视觉传感器的测量误差较小。文献[52]的试验研究显示,视觉传感器采用斜射-斜接收式,且摄像机中轴与激光器中轴夹角在 $55^\circ \sim 90^\circ$ 之间时,激光条纹的变形度和成像效果较为理想。而文献[53]的研究表明:若激光器与 CCD 传感器二者之一倾斜,则激光器与竖直方向夹角取 20° 左右时,传感实验结果与实际测量值比较接近;若 CCD 与激光器都倾斜,当激光器与竖直方向夹角仍为 20° 左右时,误差较小。

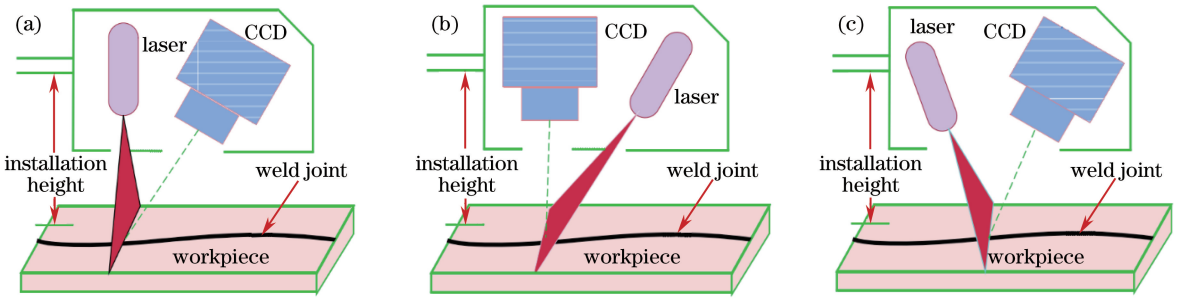


图 7 激光结构光视觉传感器的 3 种结构。(a) 直射-斜接收式；(b) 斜射-直接接收式；(c) 斜射-斜接收式

Fig. 7 Three structures of vision sensors based on laser structured light. (a) Perpendicular incidence-oblique receiving; (b) oblique incidence-perpendicular receiving; (c) oblique incidence-oblique receiving

此外,根据在焊接机器人上安装位置的不同,视觉传感器可以分为 eye-in-hand 和 eye-to-hand 两种形式。eye-in-hand 式结构将视觉传感器固连于机械手末端并跟随其运动,eye-to-hand 式结构将视觉传感器独立于机器人之外,与机械手非固连。安装方式的选择需要根据具体的应用场合和使用要求而定。此外,将基于激光结构光的视觉传感器用于闭环控制系统中,结合计算机和图像处理技术进一步构成计算机视觉伺服系统,根据反馈信号的不同将计算机视觉伺服系统分为基于位置的视觉伺服和基于图像的视觉伺服。基于位置的视觉控制的反馈偏差在三维笛卡尔坐标空间中进行补偿,而基于图像的视觉控制的反馈偏差在二维图像空间中进行计算^[54]。

6 结 论

由于焊接过程传感与控制的复杂性,即使目前最先进的视觉传感技术仍然不能完全满足焊接过程控制的要求。基于激光结构光的视觉传感技术目前主要存在以下几方面的问题,需要进一步研究和发

展。
1) 导前误差问题。视觉传感器清晰成像须使激光结构光避开电弧中心,其前置距离会带来导前误差问题,目前针对这一问题并没有很好的解决方案。在结构光视觉传感器的设计中,应在满足测量要求的前提下尽可能缩短前置距离,以减小导前误差。

2) 实时性与精确性问题。传感精度要求越高的场合,对图像处理的要求越高,耗时越长,因而复杂图像或多特征图像的处理很难同时兼顾实时性与精确性。

3) 复杂性与可靠性问题。激光结构光视觉传感器集成了光学系统、成像系统和激光发射系统,有的甚至集成了微处理系统,这使得其系统结构复杂,因此如何保证传感器系统的可靠性是工业应用中的一个难题。

4) 图像多义性与知识引导问题。焊接工况的复杂性往往会给图像引入干扰,从而造成图像解释的多义性和歧义性;基于不同的图像处理算法,同样的图像在不同的知识引导下会产生不同的识别结果。

5) 可控性与智能化问题。焊接过程中复杂的物理现象和信号传感无法用准确的数学模型来表达,因此通过视觉传感器提高焊接控制系统的可控性和智能化水平,开发基于视觉传感的新型控制方法十分必要,如近几年发展起来的人工智能和神经网络技术等。

总之,基于激光结构光的视觉传感技术具有很好的发展和应用前景,在焊接领域中的应用可以大幅提高焊接机器人的智能化水平,基于视觉伺服的焊接机器人能够有效提升焊接的质量和效率。随着科技的进步,基于激光结构光的视觉传感器将朝着更加智能化、高精度、高可靠性、集成化和小型化方向发展。具有视觉功能的智能机器人未来必将在深水、高温及核辐射等环境条件恶劣的工作场合中逐渐代替人工完成焊接生产任务。

参 考 文 献

[1] Lin Shangyang. Present situation of welding production and development trend of welding technology in China[J]. Ship Engineering, 2005, 27(s1): 15-24.

- 林尚扬. 我国焊接生产现状与焊接技术的发展[J]. 船舶工程, 2005, 27(s1): 15-24.
- [2] Shen Junqi. Research on seam image processing for CO₂ horizontal position welding based on laser vision sensing[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
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.
- [3] Wang Wei, Zou Qishi, Zhu Liumei, *et al.* The development state and implementing method of seam tracking system with optical sensor[J]. Electric Welding Machine, 2002, 32(5): 1-8.
王伟, 邹奇仕, 朱六妹, 等. 视觉传感焊缝跟踪技术的发展状况及实施方案探讨[J]. 电焊机, 2002, 32(5): 1-8.
- [4] Marr D. Vision: a computational investigation into the human representation and processing of visual information[M]. New York: Henry Holt and Co., 1982.
- [5] Zou Yirong. Research on visual method for weld seam recognition and tracking based on multi-feature extraction and information fusion[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
邹怡蓉. 面向焊缝视觉识别及自动跟踪的多特征获取与信息融合[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [6] Li Yangchun. Research on computer active vision theory[J]. Journal of Xianning College, 2008, 28(6): 63-66.
厉阳春. 计算机主动视觉理论研究[J]. 咸宁学院学报, 2008, 28(6): 63-66.
- [7] Wu Zhangliang, Sun Changku, Yang Zhongdong. Analysis and design of structure parameters of vision measuring sensor system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(12): 56-61.
吴彰良, 孙长库, 杨中东. 视觉测量传感器系统结构参数设计分析[J]. 光电工程, 2009, 36(12): 56-61.
- [8] Wan Jin, Huang Yuanqing. Study on laser triangulation method measurement[J]. Journal of Sanming University, 2006, 23(4): 361-364.
万瑾, 黄元庆. 激光三角法测量的研究[J]. 三明学院学报, 2006, 23(4): 361-364.
- [9] Guo Zhipeng, Yu Zhishui, Zhang Peilei, *et al.* Research status of seam tracking technology based on visual sensing[J]. Light Industry Machinery, 2016, 34(5): 95-100.
郭志鹏, 于治水, 张培磊, 等. 基于视觉传感的焊缝跟踪系统研究现状[J]. 轻工机械, 2016, 34(5): 95-100.
- [10] Zou Yanbiao, Gong Guoji. Researcher on line laser detecting technology for seam tracking[J]. Applied Laser, 2015, 35(4): 500-507.
邹焱飏, 龚国基. 面向焊缝跟踪的线激光检测技术研究[J]. 应用激光, 2015, 35(4): 500-507.
- [11] Zhu Jigui, Guo Lei, Liu Changjie, *et al.* Measurement system of flexible electronic checking fixture on robot[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(8): 1787-1793.
郝继贵, 郭磊, 刘常杰, 等. 基于机器人的柔性电子检具测量系统[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1787-1793.
- [12] Fennander H, Kyrki V, Fellman A, *et al.* Visual measurement and tracking in laser hybrid welding[J]. Machine Vision & Applications, 2009, 20(2): 103-118.
- [13] Shi Yu, Wang Haitao, Xue Cheng, *et al.* Visual detection of welding groove gap with linear laser source[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2009, 35(6): 29-32.
石玕, 汪海涛, 薛诚, 等. 采用激光光源的焊接坡口间隙视觉检测[J]. 兰州理工大学学报, 2009, 35(6): 29-32.
- [14] 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.
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.
- [15] Zhao Sujuan. Research on laser of seam detection and automatic seam tracking system[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2015.
赵素娟. 激光视觉传感焊缝识别与自动跟踪系统[D]. 长春: 长春工业大学, 2015.
- [16] Zhou Lü. Research on the acquisition method of welding path for arc welding robot based on visual servoing[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
周律. 基于视觉伺服的弧焊机器人焊接路径获取方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [17] Yu J Y, Na S J. A study on vision sensors for seam tracking of height-varying weldment: Part 1 mathematical model[J]. Mechatronics, 1997, 7(7): 599-612.
- [18] Yu J Y, Na S J. A study on vision sensors for seam tracking of height-varying weldment: Part 2 applications[J]. Mechatronics, 1998, 8(1): 21-36.
- [19] Yan Wencai. Research and development of robot welding seam tracking control technology based on visual guide[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.
闫文才. 视觉引导的焊接机器人焊缝跟踪控制技术的研究与开发[D]. 无锡: 江南大学, 2014.
- [20] Li Yongzhe. On-line detection and control system of GMAW rapid prototyping process based on structured light[D].

- Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- 李永哲. 基于结构光视觉传感的 GMAW 快速成形焊道形貌检测及控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [21] Wang Yanfeng, Liu Nansheng, Lin Haoliang, *et al.* Image taking and processing of welding pool based on structured light projection[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(10): 81-84.
- 汪岩峰, 刘南生, 林浩亮, 等. 基于结构光投影的焊接熔池图像获取与处理[J]. 焊接学报, 2008, 29(10): 81-84.
- [22] Zhang Huajun, Zhang Guangjun, Cai Chunbo, *et al.* Laser-based visual recognition of multi-pass seam in robot arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(4): 105-108.
- 张华军, 张广军, 蔡春波, 等. 机器人多层多道焊缝激光视觉焊道的识别[J]. 焊接学报, 2009, 30(4): 105-108.
- [23] Li Xianxi. Multipass seam tracking based on vision sensor[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2011.
- 黎咸西. 基于视觉的多层多道焊缝跟踪[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2011.
- [24] Wang Zhijiang, Zhang Guangjun, Liang Zhimin, *et al.* Current status and development trend of tridimensional monitoring and measurement technology for weld pool surface[J]. Welding & Joining, 2007(8): 15-19.
- 王志江, 张广军, 梁志敏, 等. 熔池表面三维检测与测量技术现状及发展趋势[J]. 焊接, 2007(8): 15-19.
- [25] Wang Zhijiang, Zhang Guangjun, Zhang Yuming, *et al.* 3D sensing of gas tungsten arc weld pool surface and sensing device design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(10): 300-303.
- 王志江, 张广军, 张裕明, 等. 非熔化极气体保护焊接熔池表面形貌三维传感及其装置设计[J]. 机械工程学报, 2008, 44(10): 300-303.
- [26] Song H S, Zhang Y M. Measurement and analysis of three-dimensional specular gas tungsten arc weld pool surface[J]. Welding Journal, 2008, 87(4): 85s-95s.
- [27] Wang Z, Zhang Y M, Yang R. Analytical reconstruction of three-dimensional weld pool surface in GTAW[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2013, 15(1): 34-40.
- [28] Saeed G, Lou M, Zhang Y M. Computation of 3D weld pool surface from the slope field and point tracking of laser beams[J]. Measurement Science & Technology, 2003, 15(2): 389-403.
- [29] Luo M, Shin Y C. Vision-based weld pool boundary extraction and width measurement during keyhole fiber laser welding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 64(12): 59-70.
- [30] Yang Jianhua. Key technologies research on 3D surface measurement system based on linear structured light vision sensor[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2013.
- 杨建华. 基于线结构光视觉传感器的三维表面测量系统关键技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2013.
- [31] Xie Zexiao, Chen Wenzhu, Chi Shukai, *et al.* Industrial robot positioning system based on the guidance of the structured-light vision[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 1015001.
- 解则晓, 陈文柱, 迟书凯, 等. 基于结构光视觉引导的工业机器人定位系统[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1015001.
- [32] Zhang Guangjun. Machine vision[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [33] Qiao Dongxiao, Zheng Jun, Pan Jiluan. Dual structure laser vision sensor and its character[J]. Electric Welding Machine, 2010, 40(11): 14-16.
- 乔东晓, 郑军, 潘际奎. 双线结构光焊缝跟踪传感器及其特性[J]. 电焊机, 2010, 40(11): 14-16.
- [34] Mao Zhiwei, Zhou Shaoling, Zhao Bin, *et al.* Welding torch position and seam orientation deviation based on two stripes laser vision sensing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(2): 35-38.
- 毛志伟, 周少玲, 赵滨, 等. 双线激光传感焊枪定位与焊缝走向识别[J]. 焊接学报, 2015, 36(2): 35-38.
- [35] Xiao Z. Research on a triline laser vision sensor for seam tracking in welding [J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2011, 88: 139-144.
- [36] Sung K, Lee H, Choi Y S, *et al.* Development of a multiline laser vision sensor for joint tracking in welding [J]. Welding Journal, 2009, 88(4): 79s-85s.
- [37] 徐培全, 唐新华, 卢凤桂, 等. 基于环形激光视觉传感的焊缝自动定位方法: CN200510030453.X[P]. 2005-10-13.
- [38] Xu P, Xu G, Tang X, *et al.* A visual seam tracking system for robotic arc welding [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 37(1/2): 70-75.
- [39] Xu P, Tang X, Yao S. Application of circular laser vision sensor (CLVS) on welded seam tracking [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205(1/2/3): 404-410.
- [40] Will P M, Pennington K S. Grid coding: a preprocessing technique for robot and machine vision [J]. Artificial Intelligence, 1971, 2(3): 319-329.
- [41] Jin Ming. Study on structured light multi-view measurement[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.

- 金明. 结构光多视角测量技术的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [42] Wang Zongyi. Structured light sensor and underwater 3D inspecting system [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005.
王宗义. 线结构光视觉传感器与水下三维探测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.
- [43] Boyer K L, Kak A C. Color-encoded structured light for rapid active ranging[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2009, 9(1): 14-28.
- [44] Wei Shanchun. Study of autonomous guidance of initial welding position based on vision sensing [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
卫善春. 基于视觉传感的初始焊接位置自主导引研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [45] Wang Kehong, Yang Jiajia, Sun Ke. The research status of visual-based three-dimensional reconstruction technology in welding[J]. Machine Building & Automation, 2013, 42(1): 1-5.
王克鸿, 杨嘉佳, 孙科. 基于视觉的焊接三维重建技术研究现状[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(1): 1-5.
- [46] Li Xuerui. Research of three-dimensional reconstruction of corrugated board weld seam based on laser binocular vision for arc welding robot[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
李学瑞. 基于激光双目视觉的焊接机器人波纹板焊缝三维重建的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [47] Chen Xiyin. Research on seam recognition and path planning of robot based on binocular vision[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
陈熙引. 基于双目视觉的机器人焊缝识别及轨迹规划研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [48] Zhang T, Liu J, Liu S, *et al.* A 3D reconstruction method for pipeline inspection based on multi-vision [J]. Measurement, 2017, 98: 35-48.
- [49] Jia Z, Wang L, Liu W, *et al.* A field measurement method for large objects based on a multi-view stereo vision system [J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2015, 234: 120-132.
- [50] Li Deling. Investigation on visual seam tracking system based on laser structured light [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2014.
李德玲. 基于激光结构光的视觉焊缝跟踪系统研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014.
- [51] Zou Yuanyuan, Zhao Mingyang, Zhang Lei, *et al.* Error analysis and structural analysis of structured-light visual sensor for seam tracking[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(12): 2605-2610.
邹媛媛, 赵明扬, 张雷, 等. 结构光视觉传感器误差分析与结构分析[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(12): 2605-2610.
- [52] Wang Hanyu, Han Chong, Zhang Bichao. Key technology for designing weld seam tracking system based on the structured light method[J]. Electric Welding Machine, 2013, 43(8): 1-7.
王含宇, 韩冲, 张碧超. 结构光焊缝跟踪传感器设计的关键问题[J]. 电焊机, 2013, 43(8): 1-7.
- [53] Liu Nansheng, Guo Changrong, Liu Mingyou, *et al.* The internal layout experiment research of structural light visual sensor used in crawling arc welding robot[J]. Jiangxi Science, 2005, 23(4): 325-327.
刘南生, 郭昌荣, 刘明友, 等. 爬行式弧焊机器人结构光视觉传感器内部布局实验研究[J]. 江西科学, 2005, 23(4): 325-327.
- [54] Flandin G, Chaumette F, Marchand E. Eye-in-hand/eye-to-hand cooperation for visual servoing[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, 2000, 3: 2741-2746.