

# 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

孙博文 朱志明 郭吉昌 于英飞

(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目前实现焊接过程自动化和智能化的主流传感技术。简要介绍了基于激光结构光的不同类型的视觉传感器及其在焊接领域的典型应用。针对图像处理过程中的图像预处理、激光中心线提取、特征点识别这3个阶段,分别详述了每个阶段的传统图像处理算法,并针对一些焊接领域应用的典型场景,举例说明了更具特色的图像处理算法及其应用所获得的图像处理效果,包括检测精度和实时性。最后,对基于激光结构光的视觉传感技术在焊接领域的进一步研究和应用以及未来的发展方向进行了展望。

**关键词:** 激光结构光 视觉传感器 图像处理 焊接领域

**中图分类号:** TG47

## 0 前言

自动化和智能化是未来制造业发展的必然趋势,机器人替代工人进行加工制造的自动操作,不仅可以显著提高生产效率,而且可以有效改善制造质量。在焊接领域,机器人和自动化焊接技术已成为研究和发展的方向<sup>[1]</sup>。目前,国内的机器人焊接仍以传统示教式为主,在被焊工件(坡口)存在加工和装配误差、焊接过程中因热变形而导致工件尺寸变化时,难以很好地满足实际焊接需求<sup>[2]</sup>。据统计,欧美等发达国家的焊接自动化率已达80%,而国内的焊接自动化率只有40%左右。因此,国内的焊接自动化和智能化水平还有待进一步提高。

信息传感是提高焊接自动化和智能化水平的重要手段和基础。在焊接领域中,目前应用最为广泛的传感手段是电弧传感器和视觉传感器。电弧传感器通过检测焊接电流(焊接电源具有恒压输出特性)和电弧电压(焊接电源具有恒流输出特性)的变化,来表征电弧长度的变化,获得焊枪高度及其与焊接坡口(焊缝)的关系,进而实现对焊枪高度的调整和焊接坡口(焊缝)的跟踪,但电弧长度与焊接电流、电弧电压之间的精准关系模型难以确定(特别是在熔化极电弧焊接过程中),焊接坡口(焊缝)的准确尺寸也难以在线实时检

测。由于存在检测信息的全面性和实时性不足等问题,电弧传感器的应用范围具有很大局限性。

自计算机视觉理论于1977年提出以来,随着计算机和图像处理技术的发展,视觉传感技术取得了长足的进步。依据是否施加外部光源,视觉传感技术分为主动视觉和被动视觉2大类。其中,被动视觉法不额外施加外部光源,工业相机仅依靠环境自然光或背景光获取图像;主动视觉的概念由Bajesy<sup>[3]</sup>于1982年首次提出,依靠施加外部光源照射,进而获取感兴趣区域的图像信息。因激光具有良好的方向性、单色性、相干性和能量集中等特点,从而广泛应用于主动视觉的外部光源。

图像处理技术是基于激光结构光的视觉传感器的传感功能实现的基础。对焊接坡口(焊缝)图像进行处理所得到的特征点的精度,直接决定了传感器系统的检测精度,因此,采取合适的图像处理方法尤为关键,它直接影响着图像传感系统的实时性与精度。

文中首先简要介绍基于不同类型激光结构光的各种视觉传感器及其在焊接领域的典型应用。然后,针对图像处理过程的3个阶段——图像预处理、激光中心线提取、特征点识别<sup>[4]</sup>,在分别介绍每个阶段传统图像处理算法的基础上,对一些典型场景,阐述并对比分析各种更具特色的图像处理方法及其处理效果——实时性及精度。最后,对基于激光结构光的视觉传感技术在焊接领域的研究和发展进行了展望。

收稿日期: 2018-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775301)

### 1 激光结构光的视觉传感器分类及在焊接领域的典型应用

激光结构光有多种类型,基于激光结构光的视觉传感器分类如图 1 所示。其中,基于单线激光结构光的视觉传感器,结构简单,图像处理难度相对较低,实时性较好,通过图像处理可获得一定检测信息,应用最为广泛,但存在检测信息有限等问题,主要应用于焊缝跟踪、坡口检测、焊缝识别等<sup>[5-6]</sup>。多线激光结构光在结构上较单线激光结构光复杂,但覆盖面积更为广泛,可以获得更多检测信息,当然,也加大了图像处理和标定难度,因此,大多用于需要提取较多信息的场合<sup>[7-8]</sup>。十字线激光结构光相对于单线激光结构光,也能获取相对更多的检测信息,但同时也增加了标定和图像处理难度,就目前而言,一般应用于工件的形貌检测<sup>[9]</sup>。圆形激光结构光在焊缝识别和焊枪高度测量上也有所研究和应用<sup>[10]</sup>。激光点阵则在医疗领域应用较多,在焊接领域,大多应用于熔池表面三维形貌测量<sup>[11-12]</sup>。

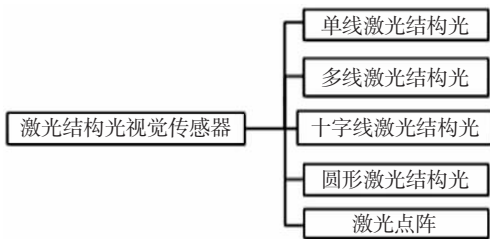


图 1 激光结构光视觉传感器分类

基于激光结构光的视觉传感器广泛应用于熔池表面几何参数提取、焊接坡口检测、焊缝跟踪和焊枪空间位姿调整等,尤其在焊接坡口检测和焊缝跟踪方面更为突出。对工件的焊接坡口进行检测(如图 2 所示)的基本原理为:首先,通过图像处理获得多个特征点的坐标值,然后,根据基于光学三角法导出的算法进行坐标变换,进而可计算获得坡口宽度、坡口角度、坡口面积、钝边间隙、错边等一系列尺寸参数<sup>[13]</sup>。焊缝跟踪系统主要由图像采集、图像处理和运动控制系统等组成<sup>[14]</sup>,如图 3 所示。实现焊缝跟踪的基本原理为:通过计算焊枪末端与焊缝(坡口)中心或预期轨迹之间的距离,对焊枪与焊缝(坡口)中心或预期轨迹的相对位置进行实时纠偏,进而确保焊枪始终与焊缝(坡口)中心或预期轨迹重合,实现对焊缝(坡口)或预期轨迹的跟踪<sup>[15]</sup>。

在基于激光结构光的视觉传感系统中,传感器获

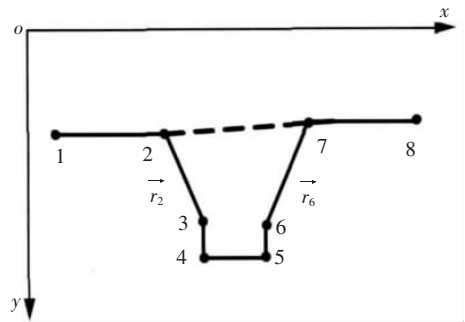


图 2 具有间隙的 V 形坡口及其特征点

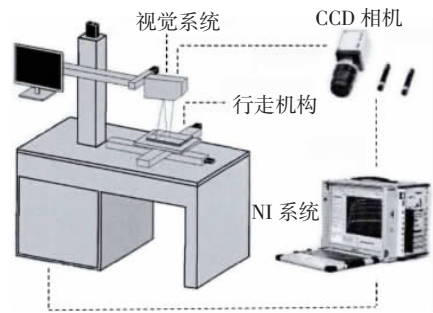


图 3 焊缝跟踪系统的构成示意图

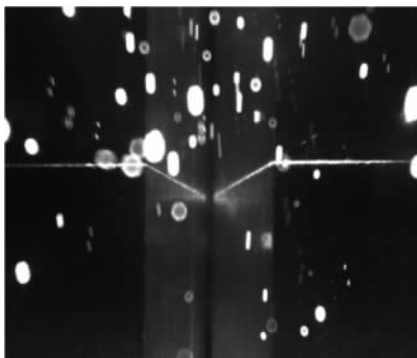
取的焊接坡口(焊缝)图像经模→数转换后,以矩阵→数字图像的形式存入计算机。由于电弧焊接会产生声、光、电、热、飞溅以及烟尘等大量干扰<sup>[16]</sup>,实际焊接过程采集的坡口(焊缝)图像较自然光下获取的图像有很大差别,不可避免地会存在大量噪声以及传输过程所带来的畸变,显著影响图像的清晰度,从而无法从图像中直接提取坡口(焊缝)的特征信息。而基于激光结构光的视觉传感器无论是应用于焊缝跟踪、坡口检测还是焊缝识别,准确地获取焊接坡口(焊缝)图像中激光结构光的特征信息是实现有效应用的前提。因此,有必要运用如图像滤波、分割、边缘检测、形态学变换等一系列的图像处理算法来获取较为清晰的图像。基本的数字图像处理过程主要包括图像预处理、图像中的激光中心线提取以及图像特征点识别 3 个阶段<sup>[17]</sup>。

### 2 图像预处理

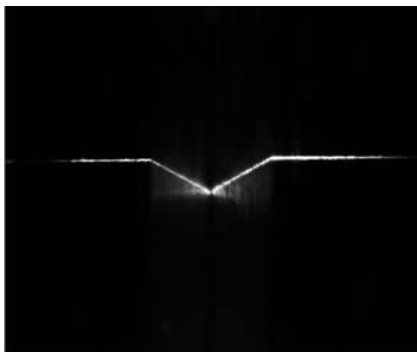
焊接过程伴随的大量飞溅、弧光以及烟尘等干扰,导致采集获得的焊接坡口(焊缝)图像中包含有大量噪声信号,从而对焊接坡口(焊缝)特征的提取造成较大困难,同时也会对提取精度产生很大影响<sup>[18]</sup>。为此,在进行图像特征提取前,首先要对数字图像进行预处理,以除去噪声对图像的干扰<sup>[19]</sup>。图像预处理可以采用频域法,也可以采用空域法。频域法的基本原理是对图像进行傅里叶变换和反变换,对周期性噪声具有良好

的去噪效果,但因计算量大、耗时较长,且容易造成特征损失等,应用并不广泛。空域法则是直接对图像的像素进行处理,主要包括均值滤波、中值滤波、算子滤波等方法<sup>[20]</sup>。

为了进一步提高对电弧焊接过程中拍摄的焊接坡口(焊缝)图像的处理速度和处理效果,针对所获得焊接坡口(焊缝)图像中电弧干扰所产生的噪声信息的特殊性,研究人员提出了一些有针对性的图像预处理方法。王平运用基于时间序列的多帧图像几何运算方法对噪声点进行去除,由于连续多帧图像的噪声分布位置随机,而激光线位置基本不变,因此将连续多帧图像进行两两相乘便可以达到很好的去噪效果,且图像处理速度较快,实时性较好<sup>[21]</sup>。所处理图像的前后对比如图4所示。



(a) 处理图像前



(b) 处理图像后

图4 基于时间序列的图像处理方法

刘习文等人<sup>[22]</sup>考虑到激光条纹在竖直方向上,而噪声信号具有随机性、不具有方向性,因此采用 $1 \times 3$ 模板对焊接坡口(焊缝)图像在竖直方向上进行中值滤波,该模板很好地保留了竖直方向上的激光条纹,并有效地抑制了水平方向上噪声的干扰,且目标信息并没有因此变得模糊。孙立新等人<sup>[23]</sup>为了消除因电弧干扰和飞溅所带来的影响,采用LOG滤波和图像分割的组

合预处理方法。其中,LOG算子(即高斯-拉普拉斯算子)在采用拉普拉斯算子之前先进行高斯低通滤波,有效克服了拉普拉斯算子抗噪声能力差的缺点。该组合方法有效地去除了弧光噪声干扰,并且精度高,鲁棒性强,但存在图像处理时间较长、实时性不足的缺点。邓景煜<sup>[24]</sup>为提高图像预处理速度,首先进行感兴趣(ROI)区域提取,将感兴趣的区域从整幅图像中提取出来,然后采用开窗处理的方式将图像分割成3个部分,如图5所示,分别进行卷积、二值化以及先腐蚀再膨胀的形态学开运算组合处理,将激光图像清晰地提取出来,去噪效果显著,实时性较好。

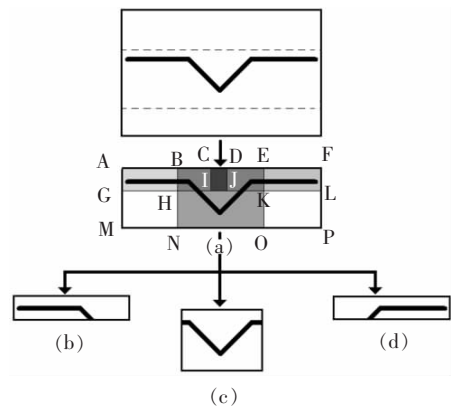


图5 开窗处理的焊接坡口图像分割过程

### 3 激光中心线提取

基于激光结构光的视觉传感器所采集的焊接坡口(焊缝)图像中包含着若干个坡口(焊缝)特征点,图像预处理的目的是为了更有效地提取这些特征点的坐标值。而从整幅图像中对这些特征点的坐标值进行提取有很大难度,因此,首先需要找到激光中心线的位置,再利用几何关系对特征点坐标值进行提取。快速、稳定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、中轴变换、边缘检测、霍夫变换、最小二乘法等<sup>[25]</sup>。传统的激光中心线提取方法具有普适性,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。为此,许多学者提出了一些更具特征性的激光中心线提取方法。林欣堂等人<sup>[26]</sup>针对多层多道焊接图像的激光中心线进行提取,利用激光光条强度呈拟高斯分布的特点,提出了一种各向异性热扩散方程的中心线提取方法。将图像灰度值等同成温度,从而将光条中能量极值提取出来,完成对激

光中心线的提取,如图 6 所示。该方法具有较强的抗干扰性和实用性。

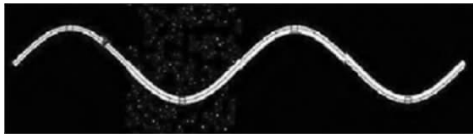


图 6 基于各向异性热扩散方程的中心线提取方法

吴家勇等人<sup>[27]</sup>提出了一种基于梯度中心法的亚像素激光中心线提取方法,采用低通平滑滤波和幂次变换降低激光带强度不均的影响,运用自适应阈值法确定临界阈值,并采用梯度中心法对激光中心线进行亚像素精确提取。该方法的提取精度可达到微米级别。赵相宾等运用中轴变换的方法直接对激光中心线进行提取。中轴变换是一种骨架细化技术,通过不断的迭代运算精准地获取中心轴线。首先,通过中轴变换确定区域骨架,计算边界点到所有区域内部点的距离,然后利用迭代细化算法对其进行细化,最终经过多次迭代消除过程,得到激光中心线。该方法将提取误差控制在 0.6 mm 之内。李春明等人<sup>[28]</sup>提出了一种速度较快的中心线提取方法。利用局部梯度  $G$  和边缘方向的双阈值 canny 算子对激光边缘进行识别,运用 Hessian 矩阵法对激光法线进行判断,然后利用灰度重心法对中心线进行提取。用该方法的提取精度可达亚像素级别。邓汛<sup>[29]</sup>基于霍夫变换对激光中心线进行提取。霍夫变换是图像处理中识别几何形状的基本方法,广泛应用于黑白图像中检测直线。作者提出了一种通过上下平均法改进的霍夫变换直线检测的方法,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。该方法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。

#### 4 特征点坐标识别

图像处理的最终目的是对从图像中提取的激光中心线上的特征点坐标值进行识别,常用的识别方法有斜率法、直线相交法等。斜率法的基本原理是利用拐点处斜率变化陡增,通过寻找斜率变化最大值的方法对拐点进行识别,特征点一般包含于拐点之中,再对识别出的拐点进行简单剔除与选取便得到特征点坐标值。

设图像中的激光中心线上第  $n$  列的像素位置坐标为  $f(n)$ ,则该点的斜率为

$$k(n) = \frac{f(n) - f(n-k)}{k}$$

斜率法一般检测速度快,但精度相对较低。岳建峰等人<sup>[30]</sup>利用斜率法对激光线的特征点坐标值进行提取。针对已经提取出激光中心线的图像,从左至右进行扫描,并计算相邻点的行坐标差值,当这个差值大于给定阈值时则认为是激光中心线的特征点。该方法针对拐点检测效果较好,同时也会检测出一些无关键点,需要进一步剔除无关键点<sup>[31]</sup>。

直线相交法则是通过先拟合得到直线方程,再通过两两方程的联立,求解出直线交点,从而得到激光中心线的特征点坐标值。假设检测得到 3 组直线方程,通过求每组方程的解析解,即可得到 3 个特征点坐标。

$$\begin{cases} y_1 = k_1x_1 + b_1 \\ y_1 = k_2x_1 + b_2 \\ y_2 = k_3x_2 + b_3 \\ y_2 = k_4x_2 + b_4 \\ y_3 = k_5x_3 + b_5 \\ y_3 = k_6x_3 + b_6 \end{cases}$$

直线相交法需要先检测得到直线方程,因此检测速度较斜率法相对较慢,但精度高。赵素娟<sup>[32]</sup>运用拟合直线求交点的方法对特征点坐标值进行提取。首先运用最小二乘法对提取的激光中心点进行直线拟合,得到直线方程后两两联立,通过求解数值解的方式获得特征点的坐标值。

#### 5 发展与展望

(1) 对于不同的激光结构光类型,它们分别有各自对应的视觉传感器。虽然基于单线激光结构光的视觉传感器的研究较为成熟,已经可以解决焊接领域的基本问题,但由于获取的信息有限,不能对所有的焊接坡口(焊缝)关键信息进行全面检测,这促进了对其它类型的基于激光结构光的视觉传感器的研究,但研究深度和应用范围还有待继续深化和扩展。

(2) 在对基于激光结构光的视觉传感器获得的图像进行处理时,图像处理方法的选择与搭配较为关键。对传感精度要求高的场合,对图像处理的要求也越高,普适的图像处理算法往往达不到精度要求,因此要选取更具特征性的图像处理算法来确保精度要求。然而,一味地追求精度便会牺牲系统的实时性,因此面对不同的传感环境和硬件设备,如何选择合适的图像处理算法,兼顾精度与实时性是未来图像处理技术研究和发展的关键。

(3) 基于激光结构光的视觉传感器在焊接领域的应用较为广泛,在焊接坡口检测、焊缝跟踪、熔池几何参数提取等领域已有较多和深入研究,形成较为成熟的体系,但尚需针对焊接过程中所获得的焊接坡口(焊缝)图像中包含大量噪声信号的特殊性,开展更有针对性的图像处理 and 特征点坐标值提取算法。此外,在焊枪的空间位姿检测方面还有待研究,以适应焊接坡口空间位置的变化,进一步保证和提高焊缝成形质量。

### 参考文献

- [1] 陈媛媛,徐浩,魏庆丰. 智能弧焊机器人在汽车生产中的应用[J]. 金属加工: 热加工, 2018(5): 6-8.
- [2] 杨丽娟. 基于视觉传感的机器人管道焊接关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学硕士学位论文, 2016.
- [3] Marr D. Vision: a computational investigation into the human representation and process of visual information [M]. Henry Holt and Co. Inc., New York, USA, 1982.
- [4] 刘子腾,白瑞林,王秀平. 基于激光视觉的角焊缝图像特征点提取[J]. 焊接学报. 2016, 37(2): 89-93.
- [5] 于英飞,郭吉昌,朱志明. 焊接可视化技术的发展与研究现状[J]. 焊接, 2017(12): 4-8.
- [6] 郭吉昌,朱志明,于英飞,等. 焊接领域激光结构光视觉传感技术的研究及应用[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 7-16.
- [7] 章妍. 基于铝合金 GTAW 焊三光路视觉传感的熔池特征提取[D]. 上海: 上海交通大学硕士学位论文, 2014.
- [8] 刘志辉. 坡口及焊缝数字轮廓的激光光栅视觉测量[D]. 兰州: 兰州理工大学硕士学位论文, 2018.
- [9] 杨明敏. 基于十字激光的中厚钢板平直度检测方法研究[D]. 杭州: 浙江理工大学硕士学位论文, 2015.
- [10] 鲁建波,徐培全,姚舜,等. 圆形扫描结构光传感器的标定和焊缝检测[J]. 焊接学报, 2006, 27(4): 53-57.
- [11] 张刚,石玢,黄健康,等. 基于激光点阵的 TIG 焊熔池自由表面三维形貌测量方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(24): 10-16.
- [12] 李春凯,石玢,顾玉芬,等. GTAW 熔池三维表面激光点阵反射特征的仿真与优化[J]. 焊接学报, 2017, 38(9): 42-46.
- [13] 罗璐,林三宝,伏喜斌,等. 基于激光视觉的焊缝特征信息检测技术研究[J]. 焊接, 2008(7): 33-38.
- [14] 李佳璇. 基于结构光成像的焊缝跟踪与检测系统[D]. 太原: 中北大学硕士学位论文, 2017.
- [15] 张欣. 基于视觉的焊缝特征识别与自动跟踪研究[D]. 昆明: 昆明理工大学硕士学位论文, 2017.
- [16] 王立伟. 基于视觉信息的钢板连续生产线激光焊接关键技术的研究[D]. 天津: 河北工业大学博士学位论文, 2012.
- [17] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods. Digital Image Processing [M]. 北京: 电子工业出版社. 2011.
- [18] 刘明友,刘南生,郭昌荣,等. 基于结构光视觉传感的焊缝视觉信息检测和识别研究[J]. 焊接, 2007(1): 28-31.
- [19] 李艳东,刘涛,郑毅,等. 基于视觉的智能切割钢板边缘跟踪研究[J]. 焊接, 2009(6): 33-36.
- [20] 张铮,徐超,任淑霞,等. 数字图像处理与机器视觉[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
- [21] 王平. 基于激光结构光视觉传感的焊缝图像处理[D]. 上海: 上海交通大学硕士学位论文, 2010.
- [22] 刘习文,王国荣,石永华. 单条纹激光引导焊缝跟踪图像处理[J]. 焊接学报, 2006, 27(6): 25-28.
- [23] 孙立新,戴士杰,李慨,等. 基于线结构光多道焊跟踪系统图像处理[J]. 焊接学报, 2002, 23(3): 53-57.
- [24] 邓景煜. 激光结构光视觉传感器焊缝跟踪的图像处理方法研究[D]. 上海: 上海交通大学硕士学位论文, 2012.
- [25] 李莹莹,张志毅,袁林. 线结构光光条中心提取[J]. 激光与光电子学进展, 2013(10): 13-22.
- [26] 林欣堂,朱莉,张海波. 多层多道焊结构光中心线提取[J]. 焊接学报, 2016, 37(7): 105-110.
- [27] 吴家勇,王平江,陈吉红,等. 基于梯度重心法的线结构光中心亚像素提取方法[J]. 中国图像图形学报, 2009(7): 1354-1360.
- [28] 李春明,王萌萌,刘海洋,等. 精确的线结构光中心提取算法研究[J]. 机械与电子, 2017(6): 29-31.
- [29] 邓汛. 基于线结构光视觉的六轴机器人焊缝跟踪研究[D]. 广州: 华南理工大学硕士学位论文, 2016.
- [30] 岳建峰,杜博宇,王天琪,等. 基于激光单目视觉系统的焊缝提取[J]. 天津工业大学学报, 2015(6): 84-88.
- [31] 赵素娟. 激光视觉传感焊缝识别与自动跟踪系统[D]. 长春: 长春工业大学硕士学位论文, 2015.

---

**作者简介:** 孙博文,1993 年出生,硕士研究生。主要从事机器视觉与图像识别方面的研究。

**通讯作者:** 朱志明,1964 年出生,工学博士,教授,博士研究生导师。主要研究方向为焊接过程控制及自动化、现代电能变换技术与先进材料加工装备等,已发表论文 100 余篇。