

类 号： TP242

学校代码： 10109

密 级： 公 开

太原科技大学硕士学位论文

(学术型)

学位论文题目： 机器视觉引导的中厚板焊接机器人焊缝识别
技术研究

英 文 题 目： Research on Welding Seam Recognition
Technology of Medium and Thick Plate
Welding Robot Guided by Machine Vision

研 究 生 姓 名： 王旭炎

导师姓名及职称： 范沁红 教授

培 养 单 位： 机械工程学院

学科/专业名称： 机械工程

论文提交日期： 2024 年 5 月

论文答辩日期： 2024 年 6 月

答辩委员会主席： 赵俊生 教授

摘要

中厚板是厚度为 4.5 到 25.0mm 的钢板，在船舶、桥梁、建筑等领域的焊接需求量较大。因为传统人工焊接中厚板的劳动强度大、生产效率低、工作环境恶劣，所以焊接机器人是解决前述难题最为有效的方法。目前焊接机器人大都采用“示教-再现”的模式，不仅需要焊接工人频繁进行示教，而且智能化程度低，无法自主获得焊件坡口信息。为了提高焊接机器人智能化程度，本文结合机器视觉技术和激光检测技术，从视觉系统标定、图像处理算法和焊接轨迹规划三个方面进行研究，开发一套焊接机器人智能化系统，实现中厚板自动化焊接目的。主要研究内容如下：

(1) 设计一套机器视觉引导的智能焊接机器人系统，由焊接机器人和激光视觉传感系统组成。为了实时获得焊接过程中高质量、低噪声和特征明显的焊缝坡口图像，对相机和激光器型号以及二者布置方案进行了确定；同时利用 C++、Opencv 库和 Qt 等工具，完成视觉系统标定程序、图像处理程序和上位机软件开发，为机器视觉引导的焊接机器人智能化系统提供软件支持。

(2) 实现视觉系统的精确标定。首先基于相机成像理论建立非线性成像模型，使用张正友标定方法求解非线性成像模型参数，并且利用畸变系数对标定板图像进行矫正；接着，对激光平面标定和手眼标定理论进行公式推导，完成整个视觉系统的标定操作，实现二维像素坐标到三维空间坐标的转换；最后，利用高精度量块实验进行验证。结果表明，整个视觉系统的检测误差在 0.24mm 内，可以满足实际焊接的精度要求。

(3) 提出一种激光条纹中心线和特征点提取算法。针对焊缝坡口反光噪声导致激光条纹中心线提取出现偏差的问题，利用列灰度峰值法与方向模板法对灰度重心法进行改进，以便提取到精确的激光条纹中心线；为了获得中厚板多层多道焊接过程中不规则的激光条纹特征点，提出了一种基于 Douglas-Peucker 算法的特征点提取算法，实验表明特征点的整体误差在 1.3mm 以内，可以满足特征点识别要求。

(4) 提出一种适应中厚板焊接的轨迹规划方法。首先通过实验法确定多层多道焊的焊接参数；接着，在传统焊道规划模型的基础上，结合焊一次扫一次的焊接方式和上位机系统，从层数与道数、焊接顺序和焊枪姿态三方面完成轨迹规划；最后，搭建平台进行中厚板焊接实验。实验验证了本文轨迹规划方法的有效性，为中厚板焊接机器人的智能化发展提供了参考。

关键词：中厚板；焊接机器人；机器视觉；图像处理；多层多道焊

ABSTRACT

In the field of welding, the demand for thick plate welding is large, which is usually used in ships, Bridges, construction and other manufacturing industries. Traditional manual welding has high labor intensity, low production efficiency and poor working environment, while welding robots are the most effective way to solve the above problems. However, at present, welding robots mostly adopt the mode of "teaching and reproducing", which not only requires frequent teaching by welding workers, but also has a low degree of automation and cannot obtain the groove information of weldparts independently. In order to improve the intelligent degree of welding robot, this paper combined with machine vision inspection technology, from the vision system calibration, image processing algorithm and welding planning three aspects of research, develop a set of intelligent welding robot system, to achieve the purpose of automatic welding of medium and thick plate. The main research contents are as follows:

(1) Design a set of intelligent welding robot system guided by machine vision, which is composed of welding robot and laser vision sensing system. In order to obtain high quality, low noise and clear characteristic images of weld groove in real time, the model of camera and laser and their arrangement scheme were determined. At the same time, C++, Opencv library, Qt and other tools are used to complete the development of vision system calibration software, image processing software and upper computer software, and provide software support for machine vision guided automatic welding robot system.

(2) Achieve accurate calibration of the vision system. Firstly, the nonlinear imaging model is established based on the camera imaging theory, and the parameters of the nonlinear modeling model are solved by Zhang Zhengyou calibration method, and the distortion coefficient is used to correct the calibration plate image. Then the principle of laser plane calibration and hand-eye calibration is theoretically derived, the whole vision system is calibrated, and the conversion from 2D pixel coordinates to 3D space coordinates is realized. Finally, the measure block experiment is used to verify. The results show that the detection error of the whole vision system is within 0.24mm, and the proposed calibration method meets the actual welding requirements.

(3) A laser fringe center line and feature point extraction algorithm is proposed. Aiming at the deviation of laser fringe center line extraction caused by the reflective noise of weld groove, the gray center of gravity method and direction template method are used to improve the gray center of gravity method in order to extract the accurate laser fringe center line. A feature point extraction algorithm based on Douglas-Peucker algorithm was proposed in order to obtain the irregular laser fringe feature points in the process of multi-layer and multi-pass welding of medium and thick plate. The experimental results show that the overall error

of the feature points is less than 1.3mm, which can meet the actual welding requirements.

(4) A trajectory planning method suitable for welding of medium and thick plates is proposed. Firstly, the welding parameters of multilayer and multipass welding were determined by experiments. Then using the traditional pass planning model, combined with the welding mode of once-sweep welding and the upper computer system, the trajectory planning is completed from three aspects: the number of layers and passes, the welding sequence and the attitude of the torch. Finally, the experimental platform is set up for the welding experiment of medium and thick plate. The experiment verifies the validity of the trajectory planning method in this paper, and provides a useful reference for the intelligent development of medium and thick plate welding robot.

Key words: Medium thick plate; Welding robot; Machine vision; Image processing; Multi-layer and multi-pass welding

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 基于视觉传感的焊缝识别研究现状.....	2
1.2.2 中厚板焊接智能化研究现状.....	4
1.3 本文主要研究内容.....	6
1.4 本文组织框架.....	7
第二章 焊接机器人智能化系统研究	9
2.1 系统构成.....	9
2.2 相机与激光器的选型.....	10
2.2.1 相机选型	10
2.2.2 激光器选型	13
2.3 布置方式.....	13
2.4 程序化设计.....	14
2.4.1 软件简介	14
2.4.2 软件界面设计.....	15
2.4.3 程序功能实现.....	16
2.5 本章小结.....	17
第三章 视觉系统标定	19
3.1 成像模型.....	19
3.1.1 线性相机模型.....	19
3.1.2 非线性相机模型.....	23
3.2 视觉系统内标定.....	25
3.2.1 相机标定	25
3.2.2 激光平面标定.....	27
3.2.3 方法实现步骤.....	30
3.3 视觉系统外标定.....	30
3.3.1 手眼标定	30
3.3.2 方法实现步骤.....	32
3.4 视觉系统标定实验.....	33
3.4.1 视觉系统内标定实验.....	33
3.4.2 视觉系统外标定实验.....	34
3.4.3 标定精度验证实验.....	36
3.5 本章小结.....	38

第四章 图像采集及特征提取	39
4.1 焊缝图像采集和预处理.....	39
4.1.1 焊缝图像采集.....	39
4.1.2 ROI 区域提取和灰度化.....	39
4.1.3 图像去噪.....	40
4.1.4 图像分割.....	44
4.1.5 形态学处理.....	45
4.2 激光条纹中心线提取.....	46
4.2.1 传统的中心线提取方法.....	46
4.2.2 改进的中心线提取方法.....	48
4.3 焊缝特征点提取算法.....	51
4.3.1 传统的特征点提取方法.....	51
4.3.2 基于 Douglas-Peucker 算法的特征点提取算法.....	52
4.4 本章小结.....	56
第五章 多层多道焊接路径规划	57
5.1 多层多道焊接工艺.....	57
5.2 多层多道焊路径规划.....	58
5.2.1 层数与道数的确定.....	58
5.2.2 焊接顺序确定.....	60
5.2.3 焊枪姿态规划.....	61
5.3 焊接实验.....	63
5.3.1 实验条件和方法.....	63
5.3.2 焊道编排和工艺规划.....	63
5.3.3 实验结果分析.....	64
5.4 本章小结.....	68
第六章 总结与展望	69
6.1 总结.....	69
6.2 展望.....	70
参考文献.....	71

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

近年来,中国在道路交通、海洋工程、特种船舶等产业领域发展迅速,对焊接需求不断增加,大型船舶分段制造尤为显著,其中对接焊和角焊的中厚板焊接约占有所有焊接任务的80%^[1]。目前,中厚板焊接多采用手工方式进行焊接,以保证在焊接过程中更好的控制焊缝形状、尺寸和焊接质量^[2]。然而,手工焊接效率不高,需要焊工长时间在烟尘弥漫的恶劣环境下工作,使得经验丰富的焊工成为稀缺资源^[3]。随着焊工劳动成本的上升,为了提高焊接过程中的稳定性和效率,很多企业选择使用机器人来代替工人实现中厚板焊接^[4]。

由于电子信息技术和人工智能不断进步,机器人技术日臻成熟。通过提升定位精度、降低成本以及拓展应用范围,机器人已成为工业生产自动化不可或缺的重要组成部分。在政府大力推动制造业智能化和自动化的政策下,工业机器人行业迎来了蓬勃发展,使得机器人技术在焊接领域取得了长足进步,比如家电、汽车、航空航天、工程机械、钢结构建筑等行业正积极探索通过自动化焊接以提高生产效率。因此,研发智能化焊接机器人系统显得至关重要^[5,6]。在现有的政策和时代背景下,智能化焊接机器人的研究和应用在提升中国制造业的自动化水平中扮演着不可或缺的重要角色^[7-9]。

到目前为止,工业机器人在技术方面经历了从“示教-再现”模式的机器人,到基于传感器在线识别和具有一定离线编程能力的机器人^[10],再到基于传感器获得信息并进行处理做出合适决策的机器人^[11,12]。在现有的焊接机器人应用于中厚板焊接时,有两种方式进行焊接,一种是先对焊缝坡口使用等高型或者等面积型进行多层多道焊规划,获得每一道的焊接起始点,然后使用示教器示教焊接轨迹,最后输入焊接工艺参数完成中厚板焊接^[13];另一种方法是需要工人对每一道焊接轨迹进行示教,并且调整每一道的焊接参数^[14]。前者随着焊接层数的增加,坡口会由于焊接过程中的热量导致变形,使得提前规划好的焊接轨迹出现偏差,导致焊接无法继续进行;后者则是需要工人反复示教焊接轨迹,这样不仅浪费人力,而且也会使得生产效率低下。因此,需要开发一种可以实时获得每一层焊接完成后的坡口形状,以及能够实时调整焊接参数和焊接轨迹的智能焊接机器人系统。

所以,针对焊接机器人智能化程度不高的问题,本文设计了一套机器视觉引导的智能焊接机器人系统,并且结合机器视觉技术和激光检测技术,从视觉系统标定、图像处理算法和焊接轨迹规划三个方面进行研究,完成焊接机器人智能化系统的开发,实现中厚板自动化焊接目的。

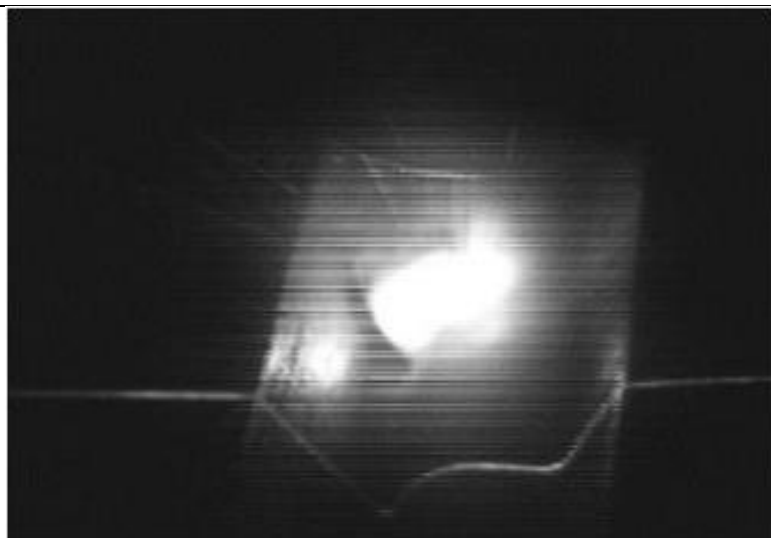
1.2 国内外研究现状

1.2.1 基于视觉传感的焊缝识别研究现状

基于视觉传感的焊缝识别技术是机器人焊接领域中的关键技术之一。随着制造业向智能化、自动化方向发展,焊接作为一项重要的生产工艺也面临着更高质量、更高效率的要求。传统焊缝检测主要依靠人工目视检查或使用特定传感器进行检测,这种方法存在效率低、精度不高、易受主观因素影响等问题。而基于视觉传感的焊缝识别技术可以通过实时采集焊接过程中的图像信息,结合图像处理算法和机器学习算法对焊缝进行自动识别和跟踪,实现对焊接质量的监控和控制。这种技术不仅可以提高焊接质量和稳定性,降低人力成本、提高生产效率,还可以对复杂结构件中隐蔽位置或曲面上的焊缝进行准确检测,避免了人工检测难度大、漏检率高等问题;其次该技术也可以实现对不同类型焊接过程中产生的各种形状和尺寸的焊缝进行智能分类和分析,为后续自动化控制和优化提供了重要数据支持。因此国内外许多学者对基于视觉传感的焊缝识别技术进行了研究。

国外对这一技术的研究开始于 1950 年并且到 1990 年,视觉传感技术开始形成产业化,许多视觉传感器的企业成立,并且在各行各业都得到了应用。比如对物体进行搬运和分拣,Hong s H^[15]等将视觉传感技术和机器人相结合,进行图像识别,获取三维坐标从而实现对物体的整齐堆叠;Xu E^[16]等通过在机器人上安装视觉传感器,对焊缝进行定位,达到了使机器人能够沿着焊缝进行焊接的目的。Qian^[17]等针对气体金属弧焊,基于视觉传感技术对焊缝跟踪中的图像处理算法进行了改进。到 21 世纪初深度学习技术的出现为实现更加准确和高效的处理图像提供了强大工具,因此该技术也应用在了焊接领域。Moinuddin^[18]使用 Faster-RCNN 模型来识别各种类型的焊缝并精确定位 ROI 区域,然后利用 Steger 算法提取感兴趣区域内激光条纹的中心线,将条纹断边和焊缝边缘交点的中点作为焊缝的特征点。Xiao R^[19]等通过使用卷积神经网络(CNN)对图像中的焊缝类型进行分类识别,解决了在 GMAW 焊接中高噪声的非典型焊缝识别问题,然后采用快速图像分割方法对 V 型焊缝进行 ROI 区域提取,并利用斜率分析法对焊缝的特征点进行定位。由于深度学习需要大量的样本且所占内存较多,因此深度学习在焊缝识别应用中还是处于发展和不成熟的阶段。

国内在这一领域的研究与国外相比起步比较慢,但也取得了一定的研究成果。张洵^[20]设计了一款可以在水平 80mm,竖直 75mm 的范围内调整位置的激光传感器,而且为了同时获得焊接过程中激光条纹和熔池区域的图像,在激光传感器中添加了滤光片和减光片,如图 1-1 所示,然后通过灰度重心法和二阶导数法分别得到激光条纹中心线和焊缝特征点。

图 1-1 经过减光滤光后的图像^[20]Fig. 1-1 Image after reduced light filtering^[20]

彭铖^[21]等提出了一种新的线结构光条纹中心亚像素提取方法,通过灰度重心法和均方灰度梯度法初步获得中心线,然后采用加权灰度重心法获得最终的中心线。王健^[22]针对传感器的设计和工件本身特点,通过形态学处理结合简单 Hough 变换获得激光条纹中心线。王年丰^[23]等提出了一种通过获得前一帧图像的信息处理当前帧图像的方法,来得到焊接工件的焊缝信息。吕学勤^[24]等将脊线跟踪和方向模板应用于激光条纹中心线的提取上,并用斜率分析法和最小二乘法来得到特征点。范俊峰^[25]等提出了一种基于高效卷积算子和粒子滤波器的焊缝特征点采集方法。张永帅^[26]等利用 FCN(全卷积神经网络)完成对各种焊缝的预测和特征提取,并且通过传统的提取算法做对比,验证了 FCN 的精度和提取速度。曹学鹏^[27]等人提出了四步法识别焊缝特征点,通过滤波、二阶导数初定位、拟合精确定位和三维坐标转化来得到特征点,解决了焊缝坡口有缺陷的问题。雷正龙^[28]等根据不同的特征点设计了不同的提取算法,其中直角拐点使用斜率分析法,斜角拐点使用斜率截距法。王树强^[29]等利用霍夫变化提取到激光条纹的中心线,然后对中心线进行直线拟合,并将直线的交点提取出来作为特征点。刘燕^[30]等根据 V 型坡口特征点的特点,即在特征点附近中心线的斜率会发生较大变化,然后通过采用斜率分析法寻找坡口拐点和焊缝中心点。上述算法在中厚板焊缝识别中只能应用在打底焊的 V 型坡口的焊缝识别上,无法识别填充焊不规则焊缝的特征点。

顾帆^[31]在厚板多层多道焊的轨迹规划中,利用线结构光视觉检测获得焊缝图像,通过特征点提取算法得到焊缝的特征点,如图 1-2 所示为焊接机器人视觉跟踪系统。肖润泉^[32]等通过基于视觉注意力模型来获得中厚板焊接过程中不同焊缝的中心线和特征点,该算法可以识别中厚板焊接过程中不规则曲线的特征点,但是其算法过于复杂,实用性不高,具有一定的局限性。

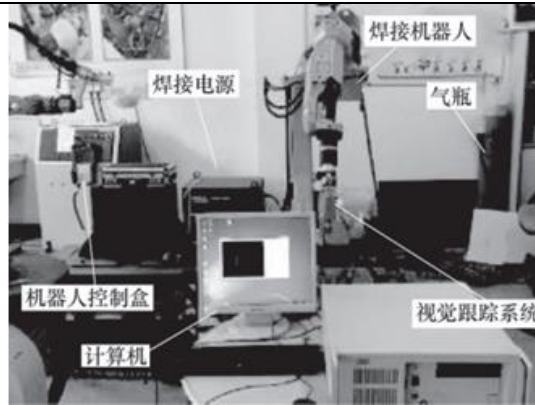


图 1-2 基于视觉的焊缝识别跟踪系统^[31]

Fig. 1-2 Welding seam identification and tracking system based on vision^[31]

1.2.2 中厚板焊接智能化研究现状

为了实现厚板焊接的智能化,提高生产效率和质量,焊接工艺参数和路径规划是至关重要的。目前,多层多道焊的路径规划主要依赖于数据库,其灵活性不足,无法满足实际的生产需求。为了简化焊缝坡口布置,准确的反映出每道焊缝的特征,提高焊缝坡口规划的精度和适用性,人们对多层多道焊的规划方法进行了研究。杨光远^[33]提出了等截面积填充方法,首先使每一道焊缝的截面积大小相等,然后每层的焊道数随着焊接层数的增加而增加,该方法不需要频繁的调整焊接参数,保证了焊接质量的稳定性。唐新华^[34]等人利用自动离线编程技术,将焊缝轨迹定义为宏存储在库中,提高了编程效率,模拟了填充效果。张华军^[35]开发了一种自适应的多层多道焊接路径规划策略,并将其应用于单面 V 型坡口多道次 S 型焊接。温永策^[36]基于等高型填充策略建立了厚板 V 型坡口焊接路径规划模型。该模型包括焊枪位置、倾角、摆幅、焊接电流等参数,实现了每层只需 2 种不同横截面积的焊道,就能完成坡口的填充,避免了焊接工艺参数的频繁变更。杨乘东^[37]等基于视觉识别对多层多道路径规划修正,其原理是在每一条焊接完成过后,用激光扫描坡口填充形貌获得坡口实时填充信息,再将实时填充信息与路径规划结果对比,当存在较大偏差时就对路径规划进行修正。

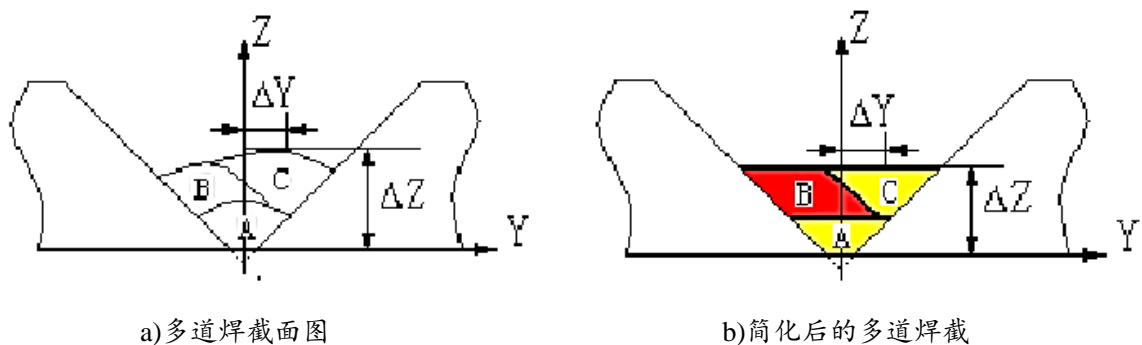


图 1-3 多层多道焊填充截面示意图^[33]

Fig. 1-3 Schematic diagram of filling section of multi-layer and multi-pass welding^[33]

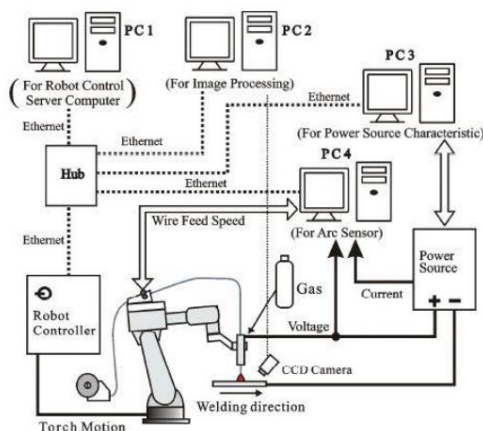
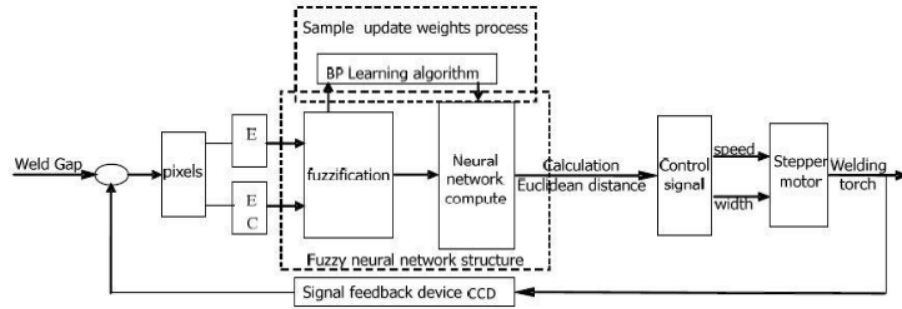


Fig.1-4 Schematic diagram of oscillating welding adaptive system^[38]

图 1-5 模糊神经控制网络结构图^[41]Fig. 1-5 Structure of fuzzy neural control network^[41]

为了解决在中厚板焊接时的焊枪路径规划和焊接过程中的稳定性问题，需提出了一种适应中厚板焊接的轨迹规划方法。

1.3 本文主要研究内容

针对目前焊接机器人智能化程度不高的问题，本文结合机器视觉技术和激光检测技术，研究了视觉系统标定方法、图像处理算法和焊接轨迹规划方法，开发一套焊接机器人智能化系统，实现焊接机器人对中厚板的自动化焊接。首先设计一套基于机器视觉引导的智能焊接机器人系统；接着为了实现二位像素坐标到三维空间坐标的转换，对视觉系统精确标定方法进行了研究；最后提出一种激光条纹中心线和特征点提取算法和适应中厚板焊接的轨迹规划方法。

本文章节如下：

第一章结合文献对焊接机器人的研究背景和意义进行阐述，综述焊接机器人智能化焊接技术国内外研究现状，在前人的研究基础上，结合本文拟解决的关键技术问题确定本课题的研究内容。

第二章搭建焊接机器人智能化系统。因焊接过程需要实时采集高质量、低噪声和特征明显的焊缝坡口图像，因此确定相机和激光器型号以及二者的布置方案；利用 C++、Opencv 库和 Qt 等工具以及模块化的思想，完成对标定软件、图像处理软件 and 上位机软件的设计。

第三章开展视觉系统精准标定方法研究。首先，建立相机的非线性成像模型，使用张正友标定方法对求解非线性成像模型的参数，并利用畸变系数对标定板图像完成矫正；然后，对激光平面标定和手眼标定原理进行理论推导，利用矫正后的标定板图像完成整个视觉系统的标定；最后实现二维像素坐标到实际三维坐标的转换，为后续的机器人焊接提供位置依据。

第四章研究图像处理算法。首先结合实际情况对焊接图像进行预处理；接着针对焊缝坡口反光噪声导致激光条纹中心线提取出现偏差的问题，利用列灰度重心法与方向模

板法对灰度重心法进行改进，以便提取到精确的激光条纹中心线；最后，对中厚板多层多道焊接过程中不规则的激光条纹特征点的提取问题，提出了一种基于 Douglas-Peucker 算法的特征点提取算法。

第五章分析中厚板的焊接工艺和焊接规划方法。提出一种适应中厚板焊接的轨迹规划方法；同时开发上位机系统，结合第三章和第四章得到的特征点实现中厚板的自动化焊接；最后通过实验验证方法的可行性。

第六章对本文研究内容进行总结，同时对本课题今后的研究内容进行展望。

1.4 本文组织框架

本文组织框架如下：

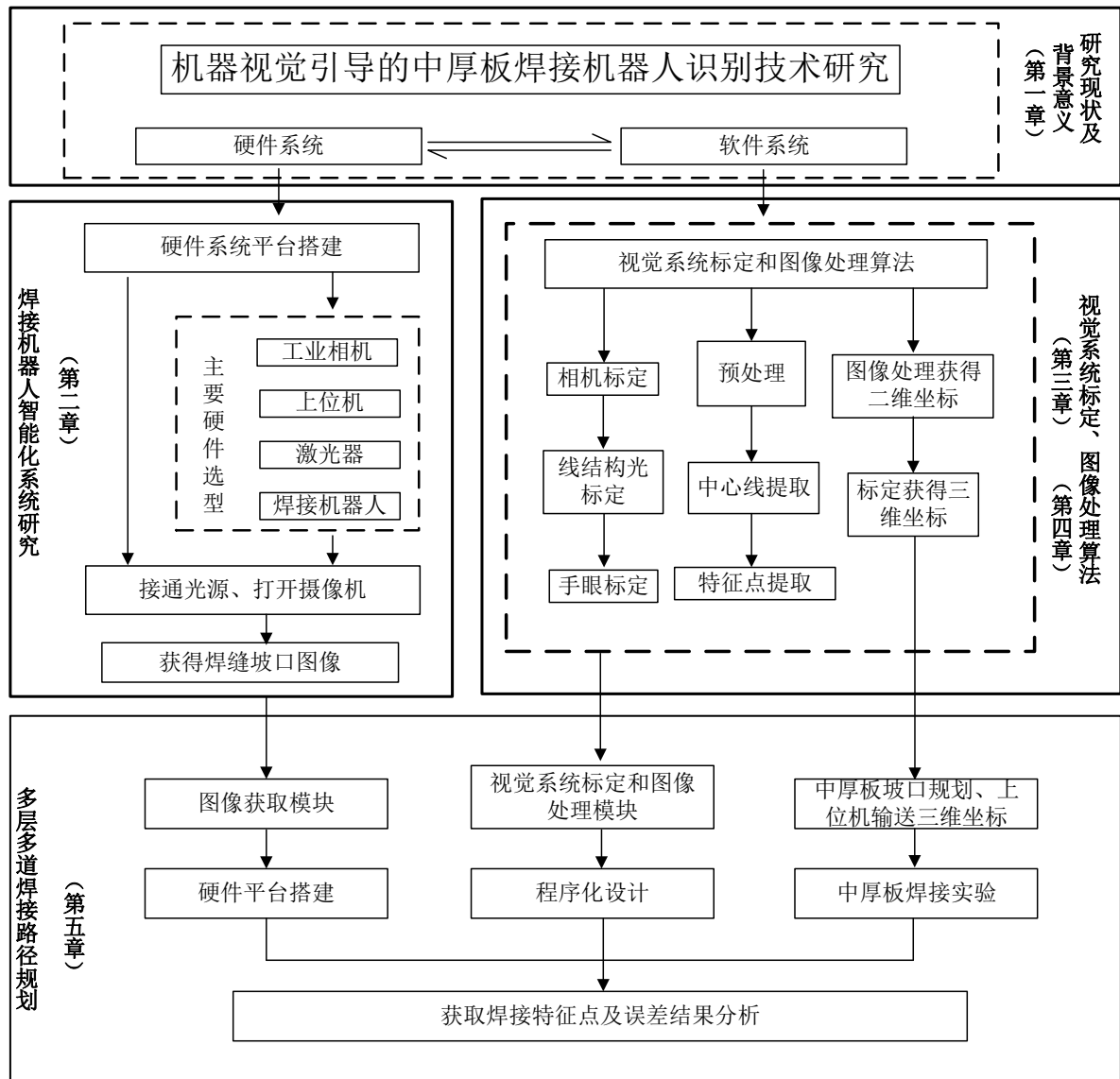


图 1-6 论文结构图

Fig 1-6 Paper structure diagram

第二章 焊接机器人智能化系统研究

机器人系统是进行焊接工艺实验、获得焊缝坡口信息和在线控制焊接的基础，在中厚板焊接中需实现焊缝识别、坐标转换、路径规划等功能。本章针对中厚板多层多道焊接设计了一套焊接机器人智能化系统，适应于焊接类型为对接 V 型坡口的中厚板多层多道焊接。

2.1 系统构成

焊接机器人是一种自动化设备，用于执行焊接任务。如图 2-1 所示，系统组成主要为焊接机器人、激光视觉传感器、工业计算机、机器人控制器和焊接设备。自动化焊接机器人系统主要由以焊接机器人为主体的硬件设施和以激光视觉系统为主的软件系统构成，其结构图如图 2-2 所示。在完成中厚板的焊接任务中，焊接机器人和焊接设备是完成焊接任务的重要组部分，主要是为了能够高效快捷的完成焊接；而激光视觉传感系统是充当机器人眼睛的核心部分，是为了感知环境而对机器人进行反馈。图 2-3 展示了智能化焊接系统的实物布局，清晰展示了各组件之间的连接关系。通过这些硬件部件之间的协同作用，智能化焊接系统可以高效准确地执行各种复杂的焊接任务，并且具备先进功能：如自动化控制和智能感知，从而提升生产效率和产品质量水平。

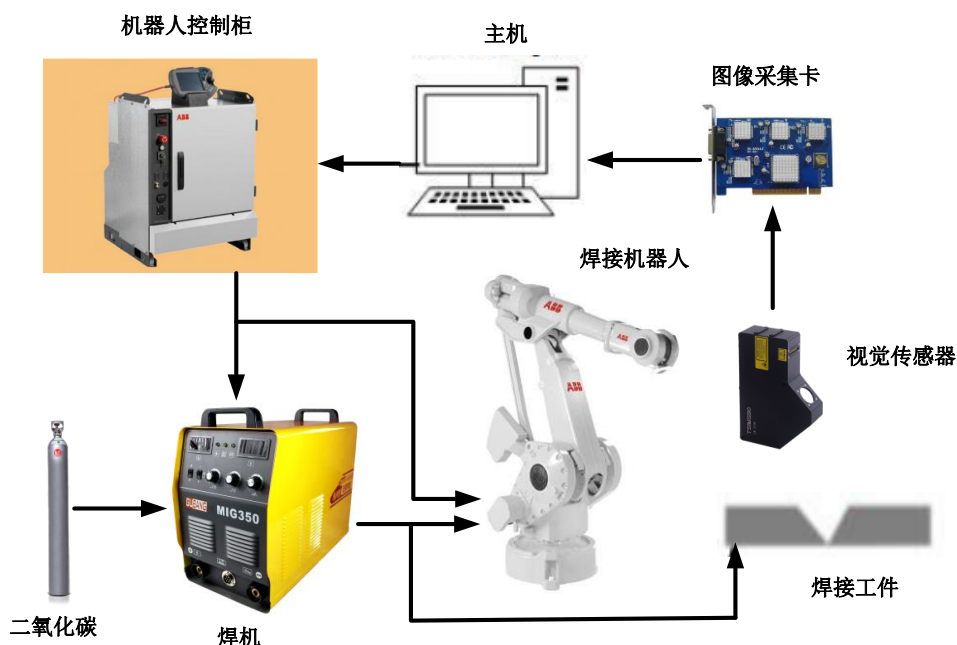


图 2-1 机器人焊接系统示意图

Fig. 2-1 Schematic diagram of robot welding system

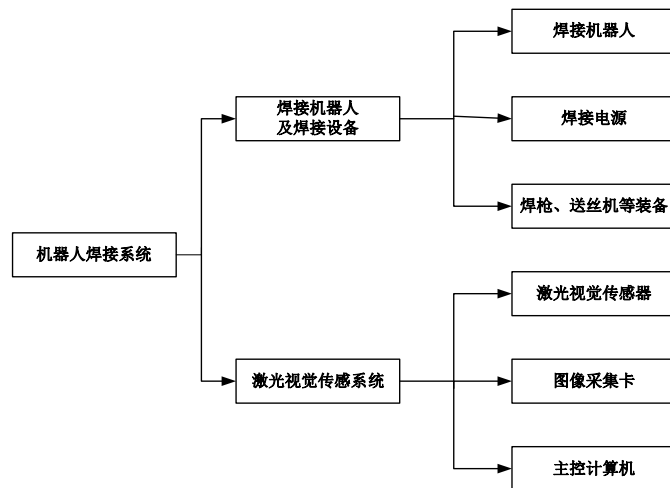


图 2-2 系统结构图

Fig.2-2 System structure diagram

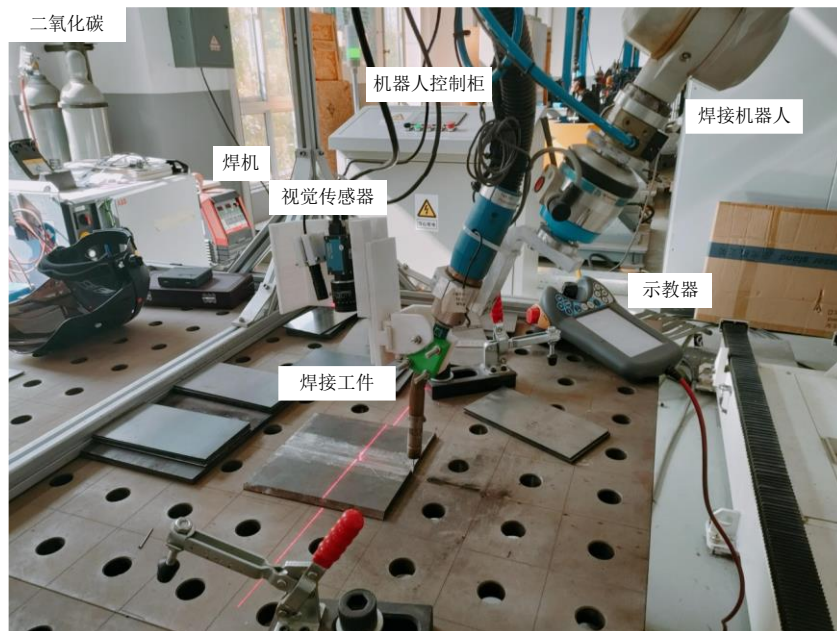


图 2-3 机器人焊接系统实物图

Fig. 2-3 Physical picture of robot welding system

2.2 相机与激光器的选型

激光视觉传感系统主要由相机、激光器和主控计算机三部分组成，是整个焊接机器人系统的眼睛，是获得焊接过程中焊缝信息、熔池等信息的基础，因此相机和激光器的选型决定着焊缝图像的质量和整个焊接系统的工作方式。

2.2.1 相机选型

工业相机在机器视觉控制系统中扮演关键作用，其主要任务是将光线信息转化为电

信号。不同于一般的单反相机，工业相机外形更小巧简洁，如图 2-4 所示。



图 2-4 工业相机

Fig. 2-4 Industrial camera

工业相机主要有四个特点，分别为软件开发工具包、成像精度、稳定性和可靠性、专业应用。这些特点主要体现在：

（1）用户可以根据自己的实际需求来编写代码调整分辨率、曝光时间等相机参数。

（2）与常规的相机不同的是，工业相机是通过逐行扫描的方式获得图像的，该方法获得的图像具有色彩精度更高，失真现象不明显的特点，非常适用于工作环境复杂的工业领域。

（3）由于工业相机结构紧凑、易于安装的特点，使它具有更好地稳定性和可靠性，从而保证它在各种复杂的环境中长时间工作。

（4）放大工业相机的某一个特点可以用于一些专业领域，例如炼钢炉中的红外相机就是通过特定的光谱来定制的工业相机。

如图 2-5 所示，工业相机主要有电源接口、镜头接口、数据接口三种。其中电源接口就是为相机供电，镜头接口连接镜头，数据接口传输采集到的图像数据。当然也有一些相机为了方便会将数据接口和电源接口合在一起。

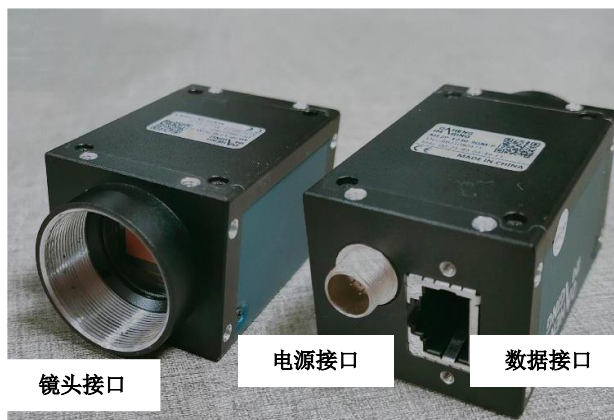


图 2-5 相机接口

Fig. 2-5 Camera interface

因为在购买工业相机的时候通常不会佩戴镜头，因此在实际应用中需要根据自己的情况选择合适的镜头。为了选择合适的相机型号，需要对相机的参数进行了解。常见的参数有以下几种：分辨率、像元大小、靶面尺寸、像素深度、最大帧率、曝光时间和信噪比。其中主要的是像素深度、曝光时间、光谱响应特性和信噪比，它们分别影响着相机采集图像的分辨率，捕捉物体影像的时间间隔，采集图像中物体的特征是否明显，图像质量和相机性能。

结合上述相机的主要参数和实际的应用场景，选择大恒水星系列相机，其型号为 ME2P-1230-9GM-P，表 2-1 为相机参数。在相机型号确定后，从工作距离、视场范围和视场角三个方面对镜头型号进行选择。如图 2-6 所示，工作距离 w 是镜头表面与拍摄工件表面的实际垂直距离；视场范围 I 是指镜头实际拍摄到的范围；视场角 b 则表示镜头边缘线的夹角，并且通过图 2-6 得到三者之间关系如式（2-1）所示：

$$I \approx w \times \tan(b/2) \quad (2-1)$$

首先对拍摄的工件进行尺寸测量，不仅需要保证视场范围能够完整的覆盖整个工件，同时也需要确保被测工件的视野占整个视野的四分之三；然后根据实际工作过程，确定工作距离；最后确定视场角。确定完成后需要对焦距进行调整，焦距的大小直接影响到采集图像的大小。从图 2-6 中可知 $w/I=h/f=\tan(w/2)$ ，其中 h 为感光元件尺寸，一般不会发生变化，因此在视场范围和工作距离确定的情况下，就能够计算得到焦距 f 。本文选择 KOWA LM35FC24M 系列的定焦镜头，至此完场工业相机和镜头的选择。

表 2-1 相机参数

Table 2-1 Camera parameters

参数	数值
分辨率	4096*3000
传感器类型	CMOS
光学尺寸	1/1.2inch
像素尺寸	3.45 μ m \times 3.45 μ m
帧率	9fps
像素深度	8bit
快门时间	20us~1s
信噪比	44.79Db
工作温度	0~45 $^{\circ}$ C
镜头接口	C
数据接口	千兆以太网
可编程控制	图像尺寸、增益、曝光时间、触发极性

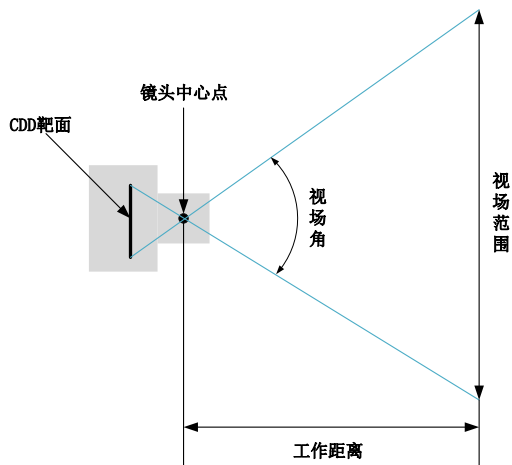


图 2-6 工作距离、视场角、视场范围

Fig. 2-6 Working distance, field of view Angle, field of view range

2.2.2 激光器选型

在激光视觉检测系统中，激光器也是一个至关重要的部件。因它具有单色性、强指向性、高相干性和高亮度等优点，所以被普遍用于军工领域和民事领域。目前市面上的激光器有很多种，比如固体、液体、气体、半导体、燃料和光纤等多种传感器，每种传感器其特定的材料形态决定着其发射出的激光波长、管芯功率和寿命等参数^[48]。此外，不同类型的激光器还会产生不同的光点形状，比如常见的点状、一字线状和十字线状等。结合本课题以及在实际应用中，本章将半导体红色一字线的激光器作为最佳选项^[49,50]，其型号为 FU650AB100-GD16-015。

如图 2-7 所示，圆柱体为主体，黑色电源线和开关调节器组成，在实际应用过程中，通过不断地调试开关调节器来得到合适的激光线亮度，从而满足实际的需求。



图 2-7 激光器

Fig. 2-7 Laser

2.3 布置方式

在视觉传感系统中，激光器一般布置在机器人末端上，而相机的布置方式有两种，一种是跟激光器一起布置在机器人末端上，一种是将相机固定在支架上。二者的区别在

于手眼标定的方式不同,第一种相机布置方式采用的是手在眼上的标定方式,第二种布置方式则是手在眼外的标定方式。

但是在焊接机器人中为了保证实现焊接过程中的实时监测和控制,确保焊缝的准确位置和质量,通常选用手在眼上的布置方式,因此相机和激光器需要一起布置在机器人末端上。

确定了相机与激光器的安装位置后,则需要确定二者之间的相对位置关系。如图 2-8 所示,分别展示了二者之间的位置关系,图 2-8 (a) 展示了激光器和激光器都倾斜的布置方式;图 2-8 (b) 展示了激光器倾斜布置,相机垂直的布置方式;图 2-8 (b) 展示了激光器垂直布置、相机倾斜的布置方式。

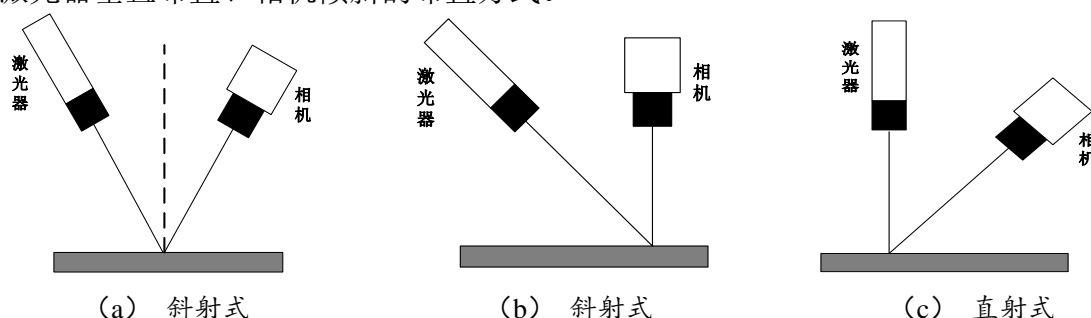


图 2-8 线结构光测量系统原理图

Fig. 2-8 Schematic diagram of linear structured light measurement system

在焊接过程中,由于存在大量的干扰,为了确保获得较为理想的激光条纹图像就需要选择合适的布置方式。考虑到相机在倾斜布置的时候非常容易受到弧光的干扰,影响采集到的焊缝激光条纹的图像质量,因此选择相机垂直拍摄的布置方式来避免出现这种情况。同时激光器的斜向布置可以让相机捕捉更多的光线,有益于提高图像的信噪比。综上,选择图 2-8 (b) 中激光器倾斜布置,相机垂直的布置方式。

2.4 程序化设计

为了实现视觉系统对焊缝的检测以及坐标转换,需要使用计算机软件进行配合,特别是在图像处理算法部分。因此为了实现视觉系统标定和图像处理算法,其系统的软件部分使用 VS2022 作为主要的开发工具,通过 C++语言、Opencv 库、Eigen 库等实现图像处理算法和视觉系统标定的功能。然后通过 VS2022 中的 QT 进行界面化的设计,将视觉系统标定和图像处理算法的功能界面化,为智能化系统提供软件支持。

2.4.1 软件简介

VS2022 是一个包含了许多编程语言的综合开发环境,其中的编程语言有 C#、C++、VB、VF 和 Python 等,本文主要使用 C++语言来实现所需要的功能。其次 VS2022 中的

QT 工具可以完成应用程序的界面设计, 并且使用了其中丰富的 C++ 类的功能函数。本章充分利用了 QT 的特性, 设计了视觉标定和图像处理的应用界面, 并且通过添加各种控件, 对每个控件进行编程从而实现相应的功能。其中视觉系统标定和图像处理需要输入图像, 因此还需要在 VS2022 中配置 OpenCV 库, 并且包含头文件, 本章配置了 OpenCV3.4.7 库, 并且调用其中的图像处理算法实现视觉系统标定和图像处理的功能。

2.4.2 软件界面设计

为了实现对中厚板焊缝激光条纹图像的采集、图像处理和坐标变换, 因此在软件方面设计了视觉系统标定软件和图像处理软件。二者通过 VS2022+QT 工具完成界面化设计和代码编写, 从而实现视觉系统的标定和焊缝特征点获取的功能, 为智能化焊接机器人系统提供软件支持。

如图 2-9 所示为设计的视觉系统标定软件, 首先点击打开图片的按钮, 选取棋盘格照片, 然后经过图像细化和直线拟合等一系列处理完成激光平面的标定, 获得激光平面方程。

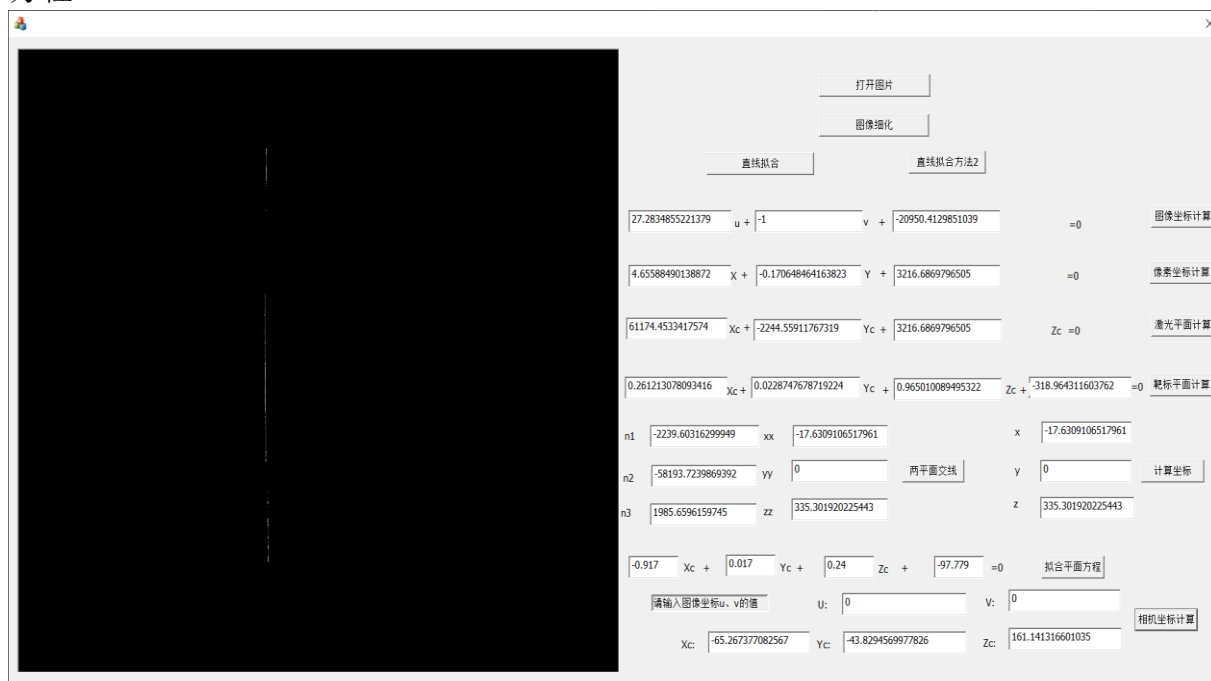


图 2-9 标定软件

Fig. 2-9 Calibration software

图 2-10 为焊缝图像采集和处理软件, 通过焊枪的移动速度、焊缝的长度和需要采集的图像数量计算得到相机的采集频率, 然后通过相机参数按钮设置, 实现图像的连续采集, 然后将采集到的每张图像进行图像处理, 得到每张焊缝图像的特征点, 最后将特征点进行储存。

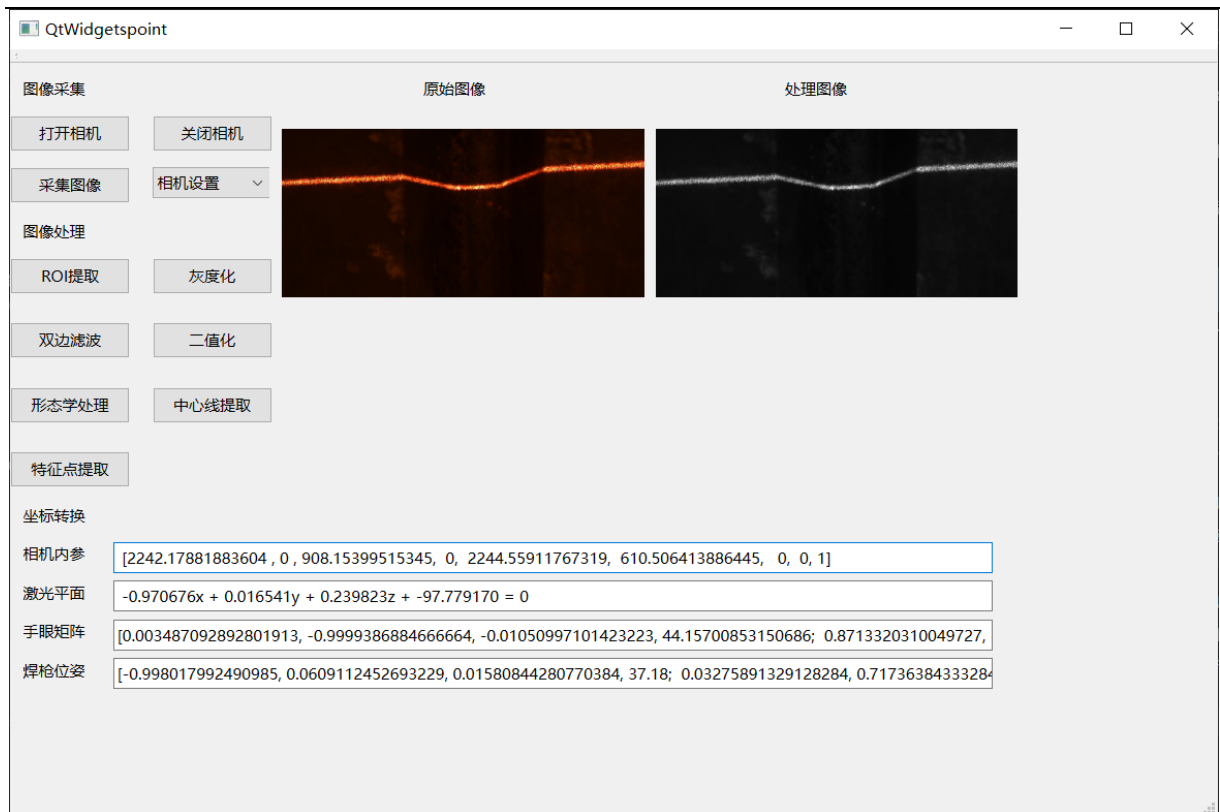


图 2-10 焊缝采集和图像处理

Fig. 2-10 Welding seam acquisition and image processing

2.4.3 程序功能实现

程序的实现依赖于严谨的数学理论基础，如在视觉系统标定中，它是基于典型的相机成像原理，通过最小二乘法原理拟合棋盘格上的激光线，然后将所有棋盘格上的激光线条拟合得到拟合激光平面，最终确定激光平面与相机的转换关系，实现二维坐标到三维坐标的转换。图 2-9 展示了激光平面标定软件，左侧为棋盘格图片的显示区域，用于展示每次处理后的照片；右侧为数据处理区，用于数据处理和显示。标定程序实现流程可用下图解释：

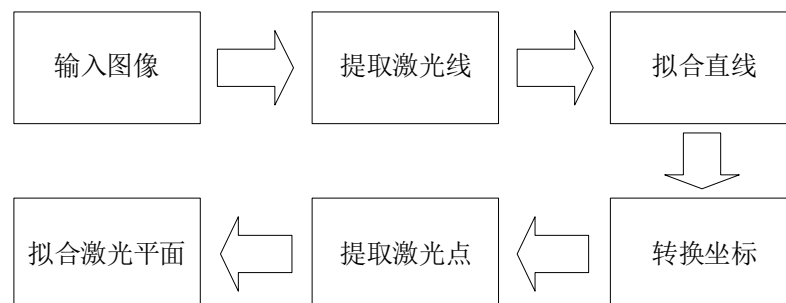


图 2-11 标定流程

Fig. 2-11 Calibration process

图像采集和处理程序实现的功能就是打开、关闭相机、采集图像、处理图像，最后

得到焊缝的特征点坐标以及焊缝轮廓，并根据特征点对焊缝位置进行大致规划。其流程图如图 2-12 所示。

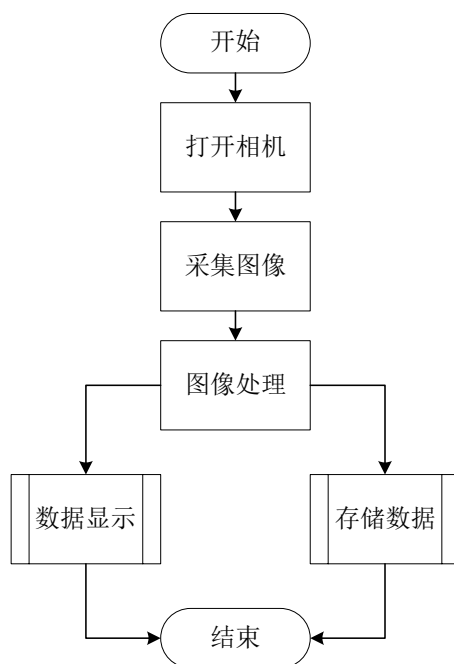


图 2-12 图像处理流程

Fig. 2-12 Image processing flow

2.5 本章小结

本章主要介绍了智能化焊接机器人系统的硬件部分和软件部分。在硬件部分的组成方面，结合实际情况，对激光视觉传感系统中的相机和激光器进行选型，并且确定布置方案，完成硬件部分的组成；在软件方面，利用 VS2022、Opencv 库、QT 组件等，并且使用 C++ 语言完成视觉系统标定和图像处理算法的界面化设计，实现视觉系统标定和图像处理算法的功能，为整个系统提供软件支持。

第三章 视觉系统标定

视觉系统的标定是实现后续焊缝识别和获得三维坐标的重要部分，系统的标定主要包括两部分的内容：一部分是相机的内外参数标定和线结构光平面标定，我们称之为系统的内标定；另一部分是机器人焊枪与工业相机的手眼标定，我们称之为系统的外标定。根据系统内标定的参数，将焊缝特征点在成像平面坐标系下的二维坐标转换为在相机坐标系下的三维坐标，再根据系统外标定的手眼矩阵，将相机坐标系下的坐标转换为焊枪坐标系下的坐标，完成焊缝识别和特征点的三维转化。

3.1 成像模型

相机的成像模型如图 3-1 所示，其原理是小孔成像原理。图 3-1 中 P 点为实际存在的三维坐标点，通过小孔在相机的像素平面上形成与之对应的二维像素坐标点 p ，并且相机的光心在两点间的连线上。

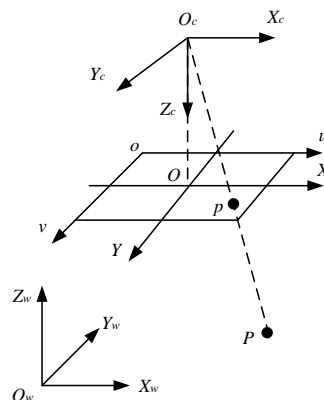


图 3-1 图像传感器成像模型

Fig. 3-1 Imaging model of image sensor

图中一共有四个坐标系，分别为世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ ；相机坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ ；图像坐标系 $O-XY$ 和像素坐标系 $o-uv$ 。其中 O_c 和 O 均在相机的光轴上， P 为世界坐标系中的某一个点， p 为与之对应的像素坐标系上的点。

3.1.1 线性相机模型

上述四个坐标系是线性相机模型的基础，因此利用小孔成像原理和各个坐标系间的位置关系，借助点 P 和 p 推导出各个坐标系之间的转换关系。

(1) 世界坐标系与相机坐标系的转换

由于物体在世界坐标系和相机坐标系之间转换时形状大小不会发生任何变换，因此世界坐标系与相机坐标系之间的转换只需要进行旋转和平移，如图 3-2 所示。世界坐标

系先绕 Z_w 轴顺时针旋转 ε 度, 如图 3-3 所示。此时 p_1 点通过旋转转换到了 p_2 的位置, 并且 p_1 与 X_w 轴的角度为 ε_1 , 则点 p_1 与点 p_2 的转换关系如式 (3-1) 所示:

$$\begin{cases} \begin{cases} x_1 = \cos \varepsilon_1 \\ y_1 = \sin \varepsilon_1 \\ z_1 = 0 \end{cases} \\ \begin{cases} x_2 = \cos \varepsilon_1 \cos \varepsilon - \sin \varepsilon_1 \sin \varepsilon \\ y_2 = \sin \varepsilon_1 \cos \varepsilon + \cos \varepsilon_1 \sin \varepsilon \\ z_2 = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (3-1)$$

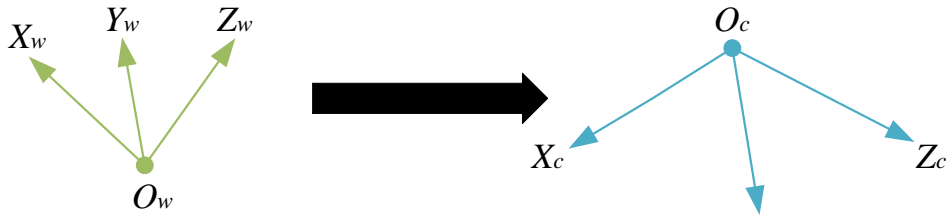


图 3-2 转换关系

Fig. 3-2 Transformation relationship

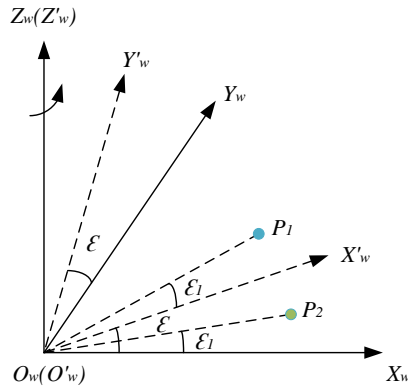


图 3-3 世界坐标系绕 Z_w 轴旋转示意图

Fig. 3-3 Schematic diagram of rotation of the world coordinate system around the Z_w axis

将式(3-1)整理得:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon & -\sin \varepsilon & 0 \\ \sin \varepsilon & \cos \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

设世界坐标系顺时针旋转 ε 度得旋转矩阵为 $R_Z(\varepsilon)$, 则 $R_Z(\varepsilon)$ 可表示为式 (3-3):

$$R_Z(\varepsilon) = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon & -\sin \varepsilon & 0 \\ \sin \varepsilon & \cos \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

再将世界坐标系先绕着 Y_w 轴顺时针旋转 β 度, 最后绕着 X_w 轴顺时针旋转 α 度, 且

二者的旋转矩阵分别为 $R_Y(\beta)$ 、 $R_X(\alpha)$ ，其表达式分别为 (3-4) 和 (3-5)：

$$R_Y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

$$R_X(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

经过依次绕 X_w 、 Y_w 、 Z_w 轴旋转不同的角度后，得到旋转矩阵 R ，其矩阵的表达式 (3-6) 是关于 α 、 β 、 ε 的 3×3 的正交单位矩阵：

$$R = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon \cos \beta & -\sin \varepsilon \cos \alpha + \cos \varepsilon \sin \beta \sin \alpha & \sin \varepsilon \sin \alpha + \cos \varepsilon \sin \beta \cos \alpha \\ \sin \varepsilon \cos \beta & \cos \varepsilon \cos \alpha + \sin \varepsilon \sin \beta \sin \alpha & -\sin \alpha \cos \varepsilon + \sin \varepsilon \sin \beta \cos \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

最终得到两个坐标系的转换矩阵，其转换矩阵分别为旋转矩阵和平移矩阵，二者的转换关系如式 (3-7) 所示：

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

(2) 相机坐标系与图像坐标系的转换

如图 3-4 所示相机坐标系与图像坐标系属于透视投影关系，其坐标从 3D 转换为 2D。已知成像平面与相机平面平行，且二者之间的距离为镜头的焦距 f ，点 P 与点 p 在同一直线上，根据投影关系可以得到 $\triangle ABO_c \sim \triangle oCO_c$ 、 $\triangle PBO_c \sim \triangle pCO_c$ ，从而得到式 (3-8)：

$$\frac{AB}{oC} = \frac{AO_c}{oO_c} = \frac{PB}{pC} = \frac{X_c}{x} = \frac{Y_c}{y} = \frac{Z_c}{z} \quad (3-8)$$

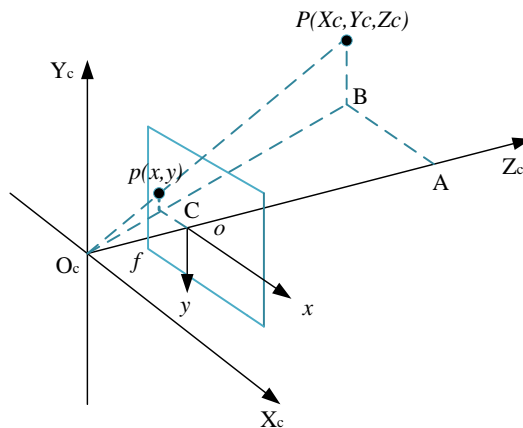


图 3-4 相机坐标系转换到图像坐标系示意图

Fig. 3-4 Schematic diagram of converting camera coordinate system to image coordinate system

将式 (3-8) 整理得到式 (3-9):

$$\begin{cases} x = f \cdot \frac{X_c}{Z_c} \\ y = f \cdot \frac{Y_c}{Z_c} \end{cases} \quad (3-9)$$

再将式 (3-9) 整理成矩阵形式, 得到相机坐标系与图像坐标系的转换关系, 如式 (3-10) 所示:

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

(3) 图像坐标系与像素坐标系的转换

如图 3-5 展示了图像坐标系与像素坐标系之间的关系, 两个坐标系都为二维坐标系, 并且都在一个平面上, 二者不同的是图像坐标系上的单位是 mm, 像素坐标系的单位是 pixel。所以二者之间的转换关系本质上是单位之间的转换, 即 mm 和 pixel 之间的转换。设 dx 和 dy , 分别表示图像坐标系中的每一列和每一行是多少 mm, 因此图像坐标系与像素坐标系之间的转换关系如式 (3-11) 所示:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

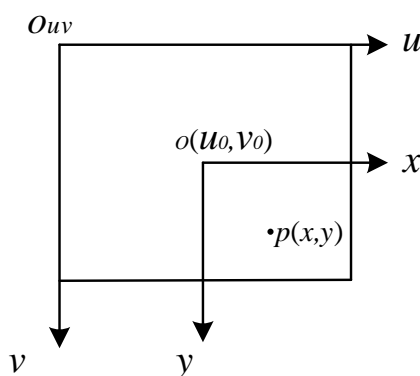


图 3-5 图像坐标系与像素坐标系示意图

Fig. 3-5 Schematic diagram of image coordinate system and pixel coordinate system

(4) 世界坐标系与像素坐标系的转换

结合上述两两坐标系的转换关系表达式 (3-7)、(3-10)、(3-11), 整理可得世界坐标系与像素坐标系的转换关系, 如式 (3-12) 所示:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

记 $f_x=f/d_x$, $f_y=f/d_y$, 且 f_x, f_y 分别为 u 轴、 v 轴的有效焦距, 整理可得式 (3-13) :

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

式中, M_1 为相机的内参, 即 u_0, v_0, f_x, f_y , 代表着像素坐标系与相机坐标系间的转换关系, 并且这些参数都是固定不变的, 但是需要通过标定来得到参数的值; M_2 为相机的外参, 即 R, T , 代表着相机坐标系与世界坐标系间的转换关系; u, v 为需要转换为三维坐标的像素坐标; Z_c 为所求点的相机坐标系中的 Z 坐标的值, 从上式中可以看出, 如果 Z_c 的值已知, 那么就可以实现二维像素点到三维世界点的转化。

3.1.2 非线性相机模型

在实际应用过程中, 由于工业相机中硬件的制作问题, 尤其是镜片, 会引起畸变导致像素点的实际位置与理论位置出现偏差, 进而影响相机坐标系中实际位置点的获取。因此为了获得准确的相机内、外参, 需要将线性的成像模型转换为非线性的成像模型, 实现畸变的矫正。通常情况下, 相机的畸变有径向畸变、离心畸变和薄棱镜畸变三种, 如图 3-6 所示为像素点的理想位置发生畸变后的实际位置。图中 dr 为径向偏差, dt 为切向偏差, p_1 为理想位置且坐标为 (x, y) , p_2 为实际位置且坐标为 (x', y') , 其中 $r^2=x^2+y^2$ 。

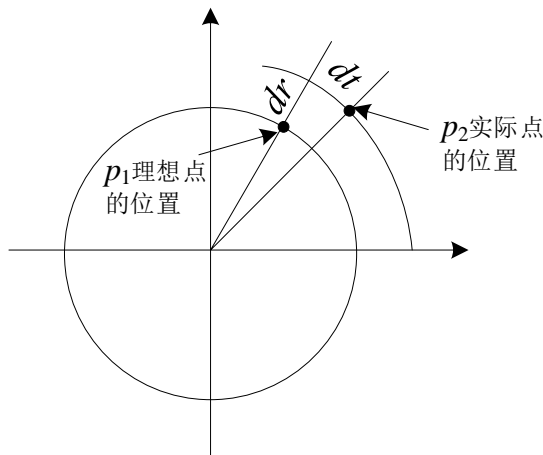


图 3-6 径向畸变和离心畸变

Fig. 3-6 Radial distortion and centrifugal distortion

(1) 径向畸变

径向畸变是因镜头缺陷引起的像素点沿着径向方向产生的偏差，它是镜头畸变中最常见的畸变，并且该畸变根据偏移的正负方向可分为枕形畸变和桶形畸变两类，其规律是畸变程度与半径 r 的大小呈线性关系，即半径 r 越大畸变程度越大，越小畸变程度就越小，其表达式如式 (3-14) 所示：

$$\begin{cases} \delta_{xr}(x, y) = k_1 x(x^2 + y^2) + O[(x, y)^5] \\ \delta_{yr}(x, y) = k_2 y(x^2 + y^2) + O[(x, y)^5] \end{cases} \quad (3-14)$$

式中， $\delta_{xr}(x, y)$ 和 $\delta_{yr}(x, y)$ 分别表示像素点在 x 方向上和 y 方向上的径向畸变； $O[(x, y)^5]$ 为 5 次以上的高阶项； k_1 和 k_2 为径向畸变系数； x, y 为图像坐标。

(2) 离心畸变

离心畸变是由于光学系统的光学中心和几何中心不重合而引起的一种畸变，是切向畸变的一种，这种畸变是由于镜头主光轴不对称造成的。离心畸变的数学公式如式 (3-15)：

$$\begin{cases} \delta_{xd}(x, y) = (p_1(3x^2 + y^2) + 2p_2xy) + O[(x, y)^4] \\ \delta_{yd}(x, y) = (p_2(3x^2 + y^2) + 2p_1xy) + O[(x, y)^4] \end{cases} \quad (3-15)$$

式中， p_1 和 p_2 为离心畸变的系数； $O[(x, y)^4]$ 为 4 次以上的高阶项。

(3) 薄棱镜畸变

薄棱镜畸变为线性畸变，通常是因为加工误差和镜片设计有缺陷引起的，由于该畸变对像素点的影响较小，因此可以忽略不计。其数学表达式如式 (3-16) 所示：

$$\begin{cases} \delta_{xp}(x, y) = s_1 x(x^2 + y^2) + O[(x, y)^4] \\ \delta_{yp}(x, y) = s_2 y(x^2 + y^2) + O[(x, y)^4] \end{cases} \quad (3-16)$$

式中， s_1, s_2 为薄棱镜畸变的系数。因为其畸变影响较小，仅有切向畸变，所以本文不考虑切向畸变，仅考虑影响较大的径向畸变。引入畸变后的矫正补偿如式 (3-17)，并将其带入式 (3-11) 得到校正后的图像坐标系到像素坐标系的转换矩阵，如式 (3-18) 所示。

$$\begin{cases} x' = x + \delta_{xr}(x, y) + \delta_{xd}(x, y) + \delta_{xp}(x, y) \\ y' = y + \delta_{yr}(x, y) + \delta_{yd}(x, y) + \delta_{yp}(x, y) \end{cases} \quad (3-17)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

综上,结合式(3-12)和(3-17),如果得到参数 f_x 、 f_y 、 u_0 、 v_0 ,畸变系数 k_1 、 k_2 和外参 R 、 T ,即可以根据像素坐标系中的任意二维坐标点得到对应的世界坐标系下的三维坐标点。

3.2 视觉系统内标定

3.2.1 相机标定

根据以上分析,在建立非线性模型后,为了实现像素坐标点到世界坐标点的转换。这就需要确定相机非线性模型中的参数,包括内参 f_x 、 f_y 、 u_0 、 v_0 、外参 R 和 T ,以及径向畸变系数 k_1 和 k_2 ,因此需要对相机进行标定。

在1999年,张正友教授提出了一种新的相机标定方法,该方法是通过使用单平面的棋盘格来完成相机标定的^[51]。而传统的标定方法是需要精度特别高的三维物体来进行标定的,其标定物的制作难度大,这也是传统方法受限的主要原因之一。与传统标定法^[52,53]和自标定方法^[54,55]相比,张氏标定法介于两者之间,在不需要精确三维物体的情况下完成了准确度较高和鲁棒性较好的相机标定,只需使用一个印刷的棋盘格即可实现该目的。这种方法提高了准确性并且易于操作,在计算机视觉领域得到广泛应用。因此本章采用张正友标定算法进行相机标定,来获得相机的内外参和畸变系数。

张氏标定法的原理是首先建立世界坐标系,其坐标系的原点为棋盘格中的某一个角点, $O-XY$ 平面为棋盘格平面, Z 轴按照右手定则确定,建立好坐标系后设旋转矩阵为 $R=[r_1, r_2, r_3]$,同时引入尺度因子是 s 和由于制造误差导致两个坐标之间偏斜倾斜的倾斜因子 η ,加入式(3-12)可得式(3-19):

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} f_x & \eta & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} f_x & \eta & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

由于相机的内参是不变的,外参随着棋盘格图片的变化而变化,所以在求解相机内参和外参的问题上,我们先求解内参再求外参。在求解内参和外参前,我们已知世界坐标系和像素坐标系之间的位置是映射关系,因此我们引入一个非常重要的概念—单应性(Homography)变换,其用来表示两个坐标系之间的位置映射关系,即有映射关系的两个坐标系之间的转换矩阵为单应性矩阵。设单应性矩阵为 H ,结合式(3-19),单应性矩阵的定义为式(3-20):

$$H = s \begin{bmatrix} f_x & \eta & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & T \end{bmatrix} = sM \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & T \end{bmatrix} = [h_1 \quad h_2 \quad h_3] \quad (3-20)$$

式中, M 为内参矩阵; h_1 、 h_2 、 h_3 为矩阵 H 的三个列向量,且 H 矩阵为 3×3 的矩阵。

因为求解使用的是齐次坐标系，也就是说可以进行任意尺度的缩放，因此 H 矩阵为 8 个自由度，所以每张棋盘格图片至少需要 4 对对应的点才能计算出单应矩阵，从而解出内参和外参^[56]。

利用旋转向量的约束关系，结合式 (3-20)，按元素对应关系可得式 (3-21)：

$$\begin{cases} h_1 = sMr_1 \\ h_2 = sMr_2 \\ h_3 = sMT \end{cases} \quad (3-21)$$

根据旋转向量在构造中相互正交的特征，即 r_1 和 r_2 正交，可以得到每个单应性矩阵的两个约束条件：旋转向量的长度相等且点积为 0，如式 (3-22) 是通过这两个约束对式 (3-21) 进行变换得到的。

$$\begin{cases} h_1^T (M^{-1})^T (M^{-1}) h_2 = 0 \\ h_1^T (M^{-1})^T (M^{-1}) h_1 = h_2^T (M^{-1})^T (M^{-1}) h_2 \end{cases} \quad (3-22)$$

结合上述内参矩阵 M ，设 $B=(M^{-1})^T(M^{-1})$ ，展开计算可得矩阵 B 的公式为式 (3-23)：

$$B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{f_x^2} & -\frac{\eta}{f_x^2 \cdot f_y} & \frac{\eta v_0 - f_y u_0}{f_x^2 \cdot f_y} \\ -\frac{\eta}{f_x^2 \cdot f_y} & \frac{\eta^2}{f_x^2 \cdot f_y^2} + \frac{1}{f_y^2} & -\eta \frac{\eta v_0 - f_y u_0}{f_x^2 \cdot f_y^2} - \frac{v_0}{f_y^2} \\ \frac{\eta v_0 - f_y u_0}{f_x^2 \cdot f_y} & -\eta \frac{\eta v_0 - f_y u_0}{f_x^2 \cdot f_y^2} - \frac{v_0}{f_y^2} & \frac{(\eta v_0 - f_y u_0)^2}{f_x^2 \cdot f_y^2} + \frac{v_0}{f_y^2} + 1 \end{bmatrix} \quad (3-23)$$

分析可得矩阵 B 为对称矩阵，有用的元素为主对角线任意一侧的 6 个元素；定义 3*3 的单应矩阵 $H=[h_1, h_2, h_3]$ 的第 i 列列向量： $h_i=[h_{i1}, h_{i2}, h_{i3}]^T$ ；结合前面两个约束条件和式 (3-23) 可得式 (3-24) 和式 (3-25) 的表达形式：

$$h_i^T B h_j^T = \begin{bmatrix} h_{i1} \cdot h_{j1} \\ h_{i2} \cdot h_{j1} + h_{i1} \cdot h_{j2} \\ h_{i2} \cdot h_{j2} \\ h_{i3} \cdot h_{j1} + h_{i1} \cdot h_{j3} \\ h_{i3} \cdot h_{j2} + h_{i2} \cdot h_{j3} \\ h_{i3} \cdot h_{j3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{12} \\ B_{22} \\ B_{13} \\ B_{23} \\ B_{33} \end{bmatrix} = V_{ij}^T b \quad (3-24)$$

$$\begin{bmatrix} v_{12}^T \\ v_{11}^T - v_{22}^T \end{bmatrix} b = 0 \quad (3-25)$$

式中， b 是由对称矩阵 B 中的 6 个未知元素组成的矩阵； V_{ij} 为 6*1 矩阵，其中的元素是由单应性矩阵中各元素计算得到的 6 个元素。在上述过程中单应性矩阵根据现有条件是已知的，因此每张图片中的 v_{11} ， v_{12} ， v_{22} 的值可以根据单应性矩阵中的列向量 h_1 ， h_2 ， h_3 得到，再通过至少 3 张棋盘格图像结合式 (3-24) 和 (3-25) 便可以得到唯一解 b ，从而可以推算出相机的内参 f_x 、 f_y 、 u_0 、 v_0 、 η 以及尺度因子 s ，其数学模型如式 (3-26) 所示：

$$\left\{ \begin{array}{l} s = B_{33} - [B_{13}^2 + v_0(B_{12}B_{13})] / B_{11} \\ f_x = \sqrt{s / B_{11}} \\ f_y = \sqrt{s B_{11} / (B_{11}B_{22} - B_{12}^2)} \\ \eta = -B_{12}f_x^2 f_y / s \\ u_0 = \eta v_0 / f_y - B_{13}f_x^2 / s \\ v_0 = (B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23}) / (B_{11}B_{22} - B_{12}^2) \end{array} \right. \quad (3-26)$$

通过式(3-26)便可求出相机的内参,进而得到相机的内参矩阵 M ,然后通过(3-21)和旋转矩阵 $R=[r_1, r_2, r_3]$ 的正交性,得到每张棋盘格图片对于相机的外部参数,进而得到外参矩阵,如式(3-27)所示:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_1 = sM^{-1}h_1 \\ r_2 = sM^{-1}h_2 \\ T = sM^{-1}h_3 \\ r_3 = r_1 r_2 \end{array} \right. \quad (3-27)$$

为了获得准确的相机参数,我们通常在实际的相机标定中使用最大似然估计的方法对畸变系数进行优化,从而降低畸变系数对畸变的影响。首先通过拍摄多张棋盘格图片,每张棋盘格包含多个角点,其中棋盘格上的角点为世界坐标 P ,则与该点对应的像素坐标为 p 。在经过坐标变换后得到实际的像素坐标点 p' 。然后计算点 p' 和 p 之间的距离,通过将距离最小化来求解最大似然估计方法的优化问题,具体表达式如式(3-28)所示:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|p_{ij} - p'(M_{ij}, K_1, K_2, R_i, T_i, P_j)\|^2 \quad (3-28)$$

LM 算法^[57]是一种常用于非线性最小二乘问题求解的优化算法,在相机标定中被广泛应用。因此在实际的相机标定过程中,先将畸变系数的初始值设置为 0,然后使用 LM 算法对式(3-26)和式(3-27)进行迭代求解,最终得到相机的内参和外参。

3.2.2 激光平面标定

在相机内参和外参都求出,相机标定完成后,还缺少一个约束条件才能完成二维坐标到三维坐标的转换,这个约束条件就是激光平面标定,简单来说就是所有的点都在激光平面上,结合式(3-12)我们就可以完成视觉系统的内标定。传统的激光平面标定方法有向量叉积法^[58]、交比不变性^[59]、消失点和消失线^[60]以及通过最小二乘法拟合数据点得到激光平面的方法^[61]。本文选择使用最小二乘法拟合数据点得到激光平面的方法,求得激光平面标定的参数。

得到了激光平面方程就可以得到相机坐标系与激光平面的位置关系,同时也可以得到物体在相机坐标系下的三维坐标。其标定原理如下:

打开激光器和相机,得到激光线条照射在棋盘格上的图像,再通过图像处理算法得到激光条纹中心线在像素坐标系下的像素坐标,对提取到的像素坐标进行线性拟合从而

得到激光条纹中心线在像素坐标系下的线性方程，如式（3-29）所示：

$$au + bv + c = 0 \quad (3-29)$$

式中， a, b, c 为中心线上的像素点拟合的直线方程系数； u, v 为像素点的坐标。

然后根据式（3-11），将像素点拟合的线性方程转换到图像坐标系下，其转换关系如式（3-30）所示：

$$\begin{bmatrix} a & b & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-30)$$

对式（3-30）进行整理结合式得到图像坐标系下激光条纹中心线的线性方程，如式（3-31）所示：

$$Ax + By + C = 0 \quad (3-31)$$

式中， A, B, C 为中心线上的像素点拟合的线性方程在图像坐标系下的直线方程系数；并且与像素点拟合的线性方程在像素坐标系下的直线方程系数系数 a, b, c 之间的转换关系如式（3-32）所示：

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-32)$$

接着根据相机的焦距 f ，结合式（3-31）得到激光条纹中心线在相机坐标系下的直线方程，如式（3-33）所示：

$$\begin{cases} Ax_c + By_c + C = 0 \\ z_c = f \end{cases} \quad (3-33)$$

式中， (x_c, y_c, z_c) 为相机坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 下的坐标，单位：mm。

通过图 3-7 可以看出 O_c 与 l_{ab} 可以组成一个平面，并且该平面的方程如式（3-34）所示：

$$A \cdot f \cdot x_c + B \cdot f \cdot y_c + C \cdot z_c = 0 \quad (3-34)$$

接着以棋盘格上的最边缘的某一个角点为世界坐标系的原点 O_w ，根据右手定则建立世界坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ ，并且保证 $O_w - X_w Y_w$ 平面在棋盘格的平面上，如图 3-7 所示。然后通过式（3-7）得到棋盘格平面中激光线条上的中心点在相机坐标系与世界坐标系上的转换表达式，如式（3-35）所示：

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (3-35)$$

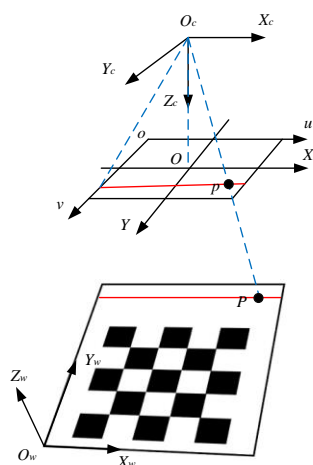


图 3-7 线结构光成像模型

Fig. 3-7 linear structured light imaging model

式中, r_{11} 、 r_{12} 、 r_{13} 、 r_{21} 、 r_{22} 、 r_{23} 、 r_{31} 、 r_{32} 、 r_{33} 为世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵 R 中的元素; t_x 、 t_y 、 t_z 平移矩阵 T 中的元素。

通过测量得到棋盘格平面中激光线条的中心点的横坐标, 即 X_w 轴上的值, 则结合式 (3-34) 和式 (3-35) 得到对应的 Y_w 轴上值的公式, 如式 (3-36) 所示:

$$y_w = -\frac{A \cdot f(r_{11} \cdot y_w + t_x) + B \cdot f(r_{21} \cdot x_w + t_y) + C(r_{31} \cdot x_w + t_z)}{A \cdot f \cdot r_{12} + B \cdot f \cdot r_{22} + C \cdot r_{32}} \quad (3-36)$$

将测量得到的 X_w 轴上的值带入式 (3-36) 得到对应的 Y_w 轴上的值, 从而得到该点在世界坐标系中的坐标值, 知道世界坐标系中的坐标后通过式 (3-34) 就可以得到相机坐标系下的坐标了。

最后将多个激光条纹中心点的数个特征点的坐标在相机坐标系下使用最小二乘法进行空间平面拟合, 如式 (3-37) 所示, 为所求得的激光平面方程。

$$A_c x_c + B_c y_c + C_c z_c + D_c = 0 \quad (3-37)$$

至此, 根据已经得到的在相机坐标系下的激光平面方程, 结合式 (3-10) 和 (3-11), 可以求出在空间中激光条纹中心上某一点在像素坐标系 $o-uv$ 下的坐标与相机坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 下坐标之间的转换关系, 如式 (3-38) 所示:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ -\frac{A_c}{C_c} & -\frac{B_c}{C_c} & 0 & -\frac{D_c}{C_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-38)$$

最终，只要知道了像素坐标就可以通过式（3-38）计算得到与之相对应的相机坐标系下的三维坐标。

3.2.3 方法实现步骤

通过对相机标定和激光平面标定的分析后，本文对视觉系统内标定的实现过程如下所示：

（1）将相机和激光器按照斜照式安装在机器人末端，水平放置棋盘格标定板，先调整激光器位置，使激光能够照射在标定板的空白位置上，然后调整相机位置，使激光条纹与相机坐标系的 y 轴平行，同时保证相机的光心垂直于标定板，且光心与激光条纹在 $O-YZ$ 平面上，最后调整相机光圈和焦距。

（2）操作者手动调整标定板，保证在调整过程中，激光线条的位置在空白位置上，确保采集到的标定板图像能够清晰的看到激光条纹，同时也要保证图像上棋盘格的完整性。

（3）每调整一次标定板，进行一次图像采集，采集 10 至 20 组照片，先进行相机标定得到内参和外参，然后结合得到的内参进行激光平面标定。至此完成视觉系统的内标定。

3.3 视觉系统外标定

在通过内标定得到相机坐标系下的三维坐标后，还需要进行手眼标定，也就是确定焊枪与相机的转换关系，其目的是为了保证焊接机器人能够找到焊接坐标，从而完成焊接。大多数机器人基坐标系与焊枪坐标系之间的转换关系一般都会在示教器上通过欧拉角和平移向量显示，因此通过手眼标定知道相机与焊枪的转换关系后就可以得到相机与机器人基坐标系的转换关系，从而控制机器人进行焊接。

3.3.1 手眼标定

在介绍手眼标定前，需要先了解手眼标定的四个坐标系以及它们之间的关系。四个坐标系分别是以机器人基座为原点的基坐标系；以焊枪工作点为原点的焊枪坐标系；以相机光心为原点的相机坐标系；以工件上某一点为原点的工件坐标系。如图 3-8 所示，它们之间的关系如式（3-39）所示：

$${}^oM = {}^sM \times {}^cM \times {}^oM \quad (3-39)$$

式中， oM 、 sM 、 cM 、 oM 分别为工件坐标系与基坐标系的转换矩阵、焊枪坐标系与基坐标系的转换矩阵、相机坐标系与焊枪坐标系的转换矩阵、工件坐标系与相机坐标系之间的转换矩阵。其中 sM 可以通过机器人示教器得到； cM 为手眼标定矩阵； oM

可以通过相机标定得到。

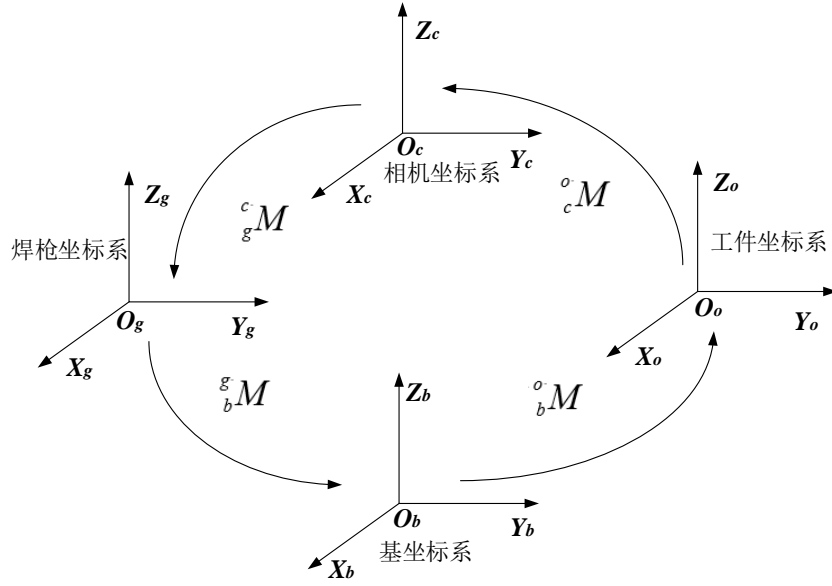


图 3-8 手眼标定坐标系关系图

Fig. 3-8 Relationship diagram of hand-eye calibration coordinate system

因此式 (3-39) 中只有 ${}^o_b M$ 和 ${}^c_g M$ 无法得到, 而工件坐标系与机器人基坐标系之间的相对位置关系是不变的, 所以通过拍摄的多张图像来进行 ${}^c_g M$ 的求解, 然后用 M_1, M_2, \dots, M_n 表示不同图像的转换矩阵, 结合拍摄的多组图像结合式 (3-39) 进行方程式的联立, 消除 ${}^o_b M$ 得式 (3-40):

$$\begin{aligned} {}^g_b M_1 \times {}^c_g M \times {}^o_c M_1 &= {}^g_b M_2 \times {}^c_g M \times {}^o_c M_2 \\ &\dots \end{aligned} \quad (3-40)$$

$${}^g_b M_{n-1} \times {}^c_g M \times {}^o_c M_{n-1} = {}^g_b M_n \times {}^c_g M \times {}^o_c M_n$$

将式 (3-40) 进行变换, 得到式 (3-41):

$$\begin{aligned} {}^g_b M_2^{-1} \times {}^g_b M_1 \times {}^c_g M &= {}^c_g M \times {}^o_c M_2 \times {}^o_c M_1^{-1} \\ &\dots \end{aligned} \quad (3-41)$$

$${}^g_b M_n^{-1} \times {}^g_b M_{n-1} \times {}^c_g M = {}^c_g M \times {}^o_c M_n \times {}^o_c M_{n-1}^{-1}$$

然后通过用 $AX=XB$ 的形式来表示整个变换, 其中 X 为 ${}^c_g M$, A 为 ${}^g_b M_n^{-1} \times {}^g_b M_{n-1}$, B 为 ${}^o_c M_n \times {}^o_c M_{n-1}^{-1}$, 其中 n 为采集到的图像数量。

将 A, B, X 表示为其次阵的形式, 如式 (3-42) 所示:

$$\begin{bmatrix} R_A & T_A \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_X & T_X \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_X & T_X \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_B & T_B \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-42)$$

对式 (3-42) 进行拆解得到的公式如式 (3-43) 所示:

$$\begin{aligned} R_A R_X &= R_X R_B \\ (R_A - I) T_X &= R_X T_B - T_A \end{aligned} \quad (3-43)$$

通过求解 (3-43) 来得到手眼标定矩阵, 本文通过 TSAI 文献^[62]所述求解该方程组,

也就是两步法来进行求解, 先求解 R_X , 在求解 T_X 。在 Tsai 等人的文献中, 引入了旋转轴-旋转角系统来描述旋转运动, 并利用该系统来求解方程组。以下是简要的计算步骤:

(1) 将旋转矩阵转换为旋转向量:

$$\begin{cases} r_A = \text{rodrigues}(R_A) \\ r_B = \text{rodrigues}(R_B) \end{cases} \quad (3-44)$$

(2) 将旋转向量进行归一化处理:

$$\begin{cases} \theta_A = \|r_A\|_2 & N_{r_A} = \frac{r_A}{\theta_A} \\ \theta_B = \|r_B\|_2 & N_{r_B} = \frac{r_B}{\theta_B} \end{cases} \quad (3-45)$$

(3) 对归一化后的参数进行修正:

$$\begin{cases} P_A = 2 \sin \frac{\theta_A}{2} N_{r_A} \\ P_B = 2 \sin \frac{\theta_B}{2} N_{r_B} \end{cases} \quad (3-46)$$

(4) 使用修正后的参数计算初始的旋转向量 P_X' :

$$\text{skew}(P_A + P_B)P_X' = P_B - P_A \quad (3-47)$$

(5) 通过初始的旋转向量 P_X' 计算得到旋转向量 P_X :

$$P_X = \frac{2P_X'}{\sqrt{1 + |P_X'|^2}} \quad (3-48)$$

(6) 利用旋转向量 P_X 通过式 (3-49) 计算得到旋转矩阵 R_X :

$$R_X = (1 - \frac{|P_X|^2}{2})I + \frac{1}{2}(P_X P_X^T + \sqrt{4 - |P_X|^2} \text{skew}(P_X)) \quad (3-49)$$

(7) 最后通过式 (3-50) 得到平移向量 T_X :

$$T_X = (R_A - I)^{-1}(R_X T_B - T_A) \quad (3-50)$$

至此完成手眼标定矩阵的求解。

3.3.2 方法实现步骤

(1) 检查机械臂是否能够按照位姿正常移动, 机械臂能够正确读取焊枪的位姿 (焊枪坐标系在基座坐标系上的位姿), 机械臂搭载相机成功, 相机能够检测到物体, 得到物体在相机中的位姿。

(2) 记录当机械臂移动到某个位姿, 示教器读取机器臂在当前位置时焊枪的末端姿态和使用机械臂上的相机采集到待检测物体在相机中的位姿。从而得到一对位姿了, 即机械臂的位姿 X + 机械臂在位姿 X 时相机采集到物体在相机中的位姿。

(3) 重复 1、2 步骤, 采集 10 到 20 组图像完成手眼标定。

3.4 视觉系统标定实验

3.4.1 视觉系统内标定实验

在视觉系统内标定中，我们先进行相机标定得到内外参和畸变系数，然后进行激光平面标定。在进行内标定前，先准备好标定板，本文选用方格数为 12×9 的棋盘格， 11×8 的角点数， $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ 的方块格， $\pm 0.01\text{mm}$ 的制造误差，然后安装好相机和激光器，放置好标定板使激光器的激光照射在标定板的空白部分，调整好相机光圈和焦距使其能够清楚地拍摄到标定板图像，完成后开始进行棋盘格图像采集，采集到的图像如图 3-9 所示。对标定板姿态进行变换，每变换一次采集一次标定板图像，最终采集 20 张不同位姿的标定板图像。

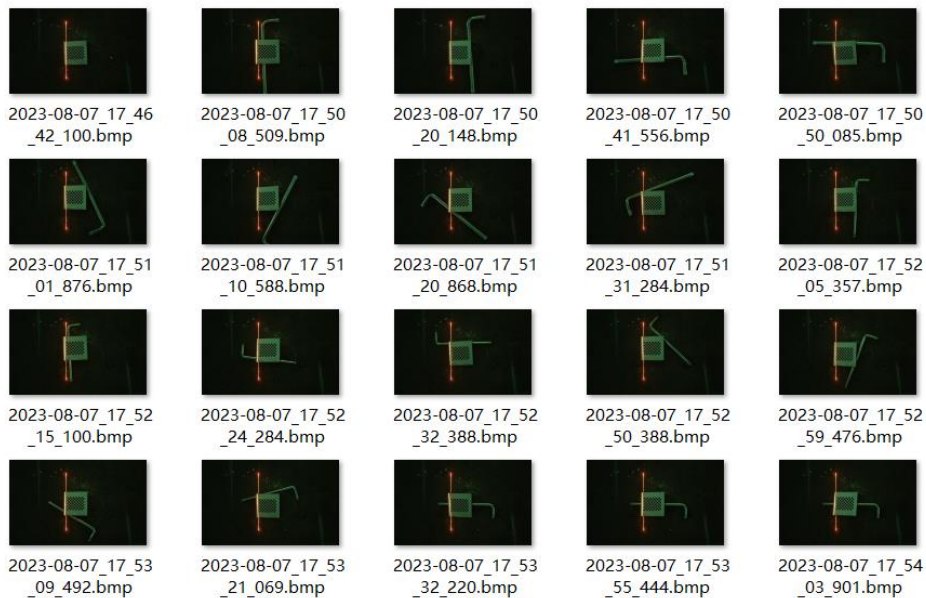


图 3-9 内标定棋盘格图片

Fig. 3-9 Inside calibration checkerboard picture

如图 3-10 所示，将采集到的所有图像输送给 MATLAB 软件中 Camera-Calibrator 工具箱，标定完成后相机内部参数如表 3-1 所示。



图 3-10 相机标定工具箱

Fig. 3-10 Camera calibration toolbox

表 3-1 相机内部参数

Table 3-1 Internal camera parameters

参数	f_x	f_y	u_0	v_0	k_1	k_2
数值	2243.4202	2245.8300	906.3247	610.8367	-0.3848	2.5048

完成相机标定后则相机的内参和外参可以计算得到，然后使用畸变系数对采集到的 20 张图像校正，将校正后的图像结合各个位姿下棋盘格的外参进行激光平面标定。在 VS2022 中对 20 张激光条纹图像使用 Steger 算法进行激光条纹中心线的提取，接着将提取到的多条激光条纹中心线上的点进行平面拟合，得到激光平面方程如式 (3-51) 所示，拟合平面如图 3-11 所示。

$$-0.971x + 0.017y + 0.24z - 97.779 = 0 \quad (3-51)$$

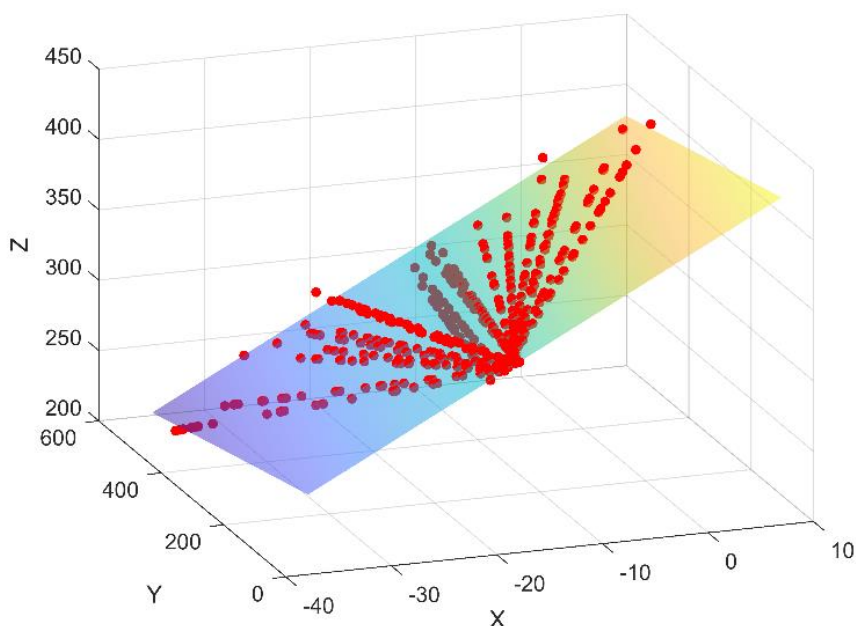


图 3-11 拟合的激光平面

Fig. 3-11 Fitted laser plane

3.4.2 视觉系统外标定实验

完成视觉系统内标定后，接下来进行视觉系统外标定实验。前面已经安装好了相机和激光器，先将激光器关闭，避免激光条纹对手眼标定造成影响，然后放置好标定板，控制机器臂选取标定板任一角点进行工件坐标的建立，建立完成后控制机器臂进行移动。每移动一次进行一次标定板图像采集，并且记录在该位姿时焊枪坐标系在机器人基座坐标系下的位姿，记录完成后进行下一次移动。通过采集 20 张标定板图像，如图 3-12 所示，并且记录每张图像对应的焊枪位姿，如表 3-2 所示。

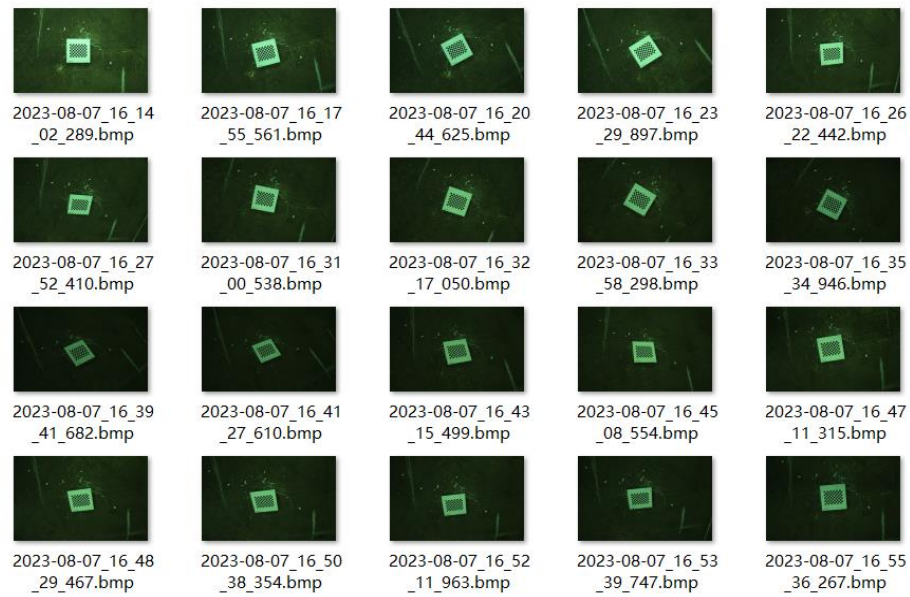


图 3-12 外标定棋盘格图片

Fig. 3-12 Outside calibration checkerboard picture

表 3-2 焊枪位姿

Table 3-2 Welding gun position

x/mm	y/mm	z/mm	EX	EY	EZ
68.28	779.18	652.3	-135.99	3.05	177.6
100.55	784.87	651.87	-135.45	3.18	-172.4
140.32	802.64	664.51	-134.88	3.2	-162.35
154.27	816.65	664.27	-134.54	3.17	-156.3
176.47	828.39	664	-134.12	3.08	-148.42
16.12	785.54	679.06	-136.69	2.73	163.68
-3.09	791.2	679.28	-136.93	2.55	158.18
-39.18	799.91	679.6	-137.27	2.25	149.85
-58.41	801.9	679.89	-137.52	1.97	143.45
-87.77	820.31	680.23	-137.8	1.52	134.04
48.18	784.83	680.01	-136.97	6.12	176.34
34.81	784.58	683.51	-137.1	11.2	177.29
17.69	787.42	692.41	-137.56	17.74	178.4
2.75	779.33	672.17	-138.2	22.52	179.1
-8.78	775.21	667.29	-139.29	28.18	179.97
86.69	780.1	674.56	-138.03	-9.12	172.38
96.56	767.54	646.3	-138.46	-15.63	171.16
106.98	761.29	639.32	-139.05	-20.36	170.11
97.76	753.56	604.06	-140.25	-27.71	168.48
107.61	753.34	599.75	-141.2	-32.51	167.17

同时还需要对 20 张标定板图像进行相机标定得到每张图像所对应的外参，如表 3-3 所示。

表 3-3 图像的外参

Table 3-3 External parameters of images

x/mm	y/mm	z/mm	EX	EY	EZ
-13.6254	-12.0679	311.6195	0.064974	0.260455	0.01516
-9.30829	-8.59167	308.0015	0.089735	0.264841	0.187514
-5.50481	-15.387	317.3162	0.113958	0.266949	0.361703
-8.1	-11.3542	316.8387	0.128795	0.26769	0.466127
-1.60667	-7.28308	313.1997	0.149118	0.2679	0.602373
-16.6458	-8.90741	343.0709	0.026758	0.254865	-0.22459
-20.2152	-7.21284	345.3288	0.013573	0.250566	-0.32031
-18.5066	1.68517	347.1826	-0.00831	0.243932	-0.46444
-14.4272	-2.4253	348.156	-0.02511	0.233969	-0.57495
-15.837	0.320693	349.5417	-0.0501	0.228959	-0.7375
-14.2849	-7.78016	342.1548	0.114571	0.245924	-0.01245
-13.0284	-8.2336	343.8257	0.205198	0.241994	-0.00646
-14.3832	-11.7412	354.1237	0.320745	0.22979	0.000819
-11.9669	-3.88834	337.7966	0.405447	0.214573	0.00533
-11.3697	-5.70769	338.8167	0.505382	0.188841	0.014368
-17.4682	-10.4322	356.9318	-0.16108	0.220469	-0.05191
-13.7249	-10.7624	338.6618	-0.27599	0.205566	-0.06124
-12.1353	-12.7502	343.0707	-0.3599	0.188196	-0.07213
-14.1124	-4.37687	321.0373	-0.4876	0.1514	-0.09189
-19.2723	-6.08907	333.1604	-0.57176	0.122017	-0.11025

最终通过 VS2022 软件完成手眼标定，即视觉系统外标定。如式 (3-52) 所示为求得的手眼标定矩阵。

$$\begin{bmatrix} 0.003487092892801913 & -0.9999386884666664 & -0.01050997101423223 & 44.15700853150686 \\ 0.8713320310049727 & -0.002118844637394535 & 0.4906893133563762 & 111.9992936042779 \\ -0.4906814974379066 & -0.01086875360681322 & 0.8712712196940331 & -313.3985389565329 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-52)$$

3.4.3 标定精度验证实验

在完成视觉系统标定后，为了验证标定的精度，选取 10 个不同的向量块，精度为 $1\mu\text{m}$ ，向量块的高度与宽度如表 3-4 所示。然后通过相机和激光器获得每个向量块的图

像，如图 3-13 所示。

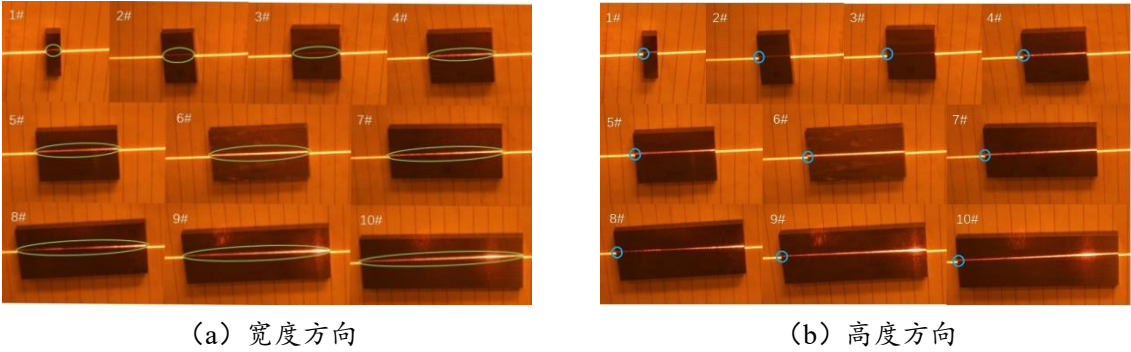


图 3-13 向量块的测量位置

Fig. 3-13 Measurement position of vector block

表 3-4 10 种向量块的高度和宽度

Table 3-4 Height and width of 10 vector blocks

量块编号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#
宽度值/mm	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
高度值/mm	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

获得每个向量块图像的特征点的像素坐标，然后根据视觉系统标定得到的参数计算得到每个向量块的高度和宽度，与实际值进行差值计算，确定视觉系统标定的精度，如表 3-5 所示。

表 3-5 向量块误差

Table 3-5 Vector block errors

量块编号	宽度			高度		
	实际值	计算值	差值/mm	实际值	计算值	差值/mm
	/mm	/mm		/mm	/mm	
1#	10	9.915	0.085	10	9.712	0.288
2#	20	19.852	0.148	10	9.725	0.275
3#	30	29.625	0.375	10	9.824	0.176
4#	40	39.829	0.171	10	9.723	0.277
5#	50	49.623	0.377	10	9.811	0.189
6#	60	59.723	0.277	10	9.741	0.259
7#	70	69.725	0.275	10	9.843	0.157
8#	80	79.83	0.17	10	9.845	0.155
9#	80	89.744	0.256	10	9.832	0.168
10#	100	99.834	0.166	10	9.744	0.256

通过对表 3-5 分析可以看到, 本文的视觉检测系统的误差, 宽度误差最大值为 5 号向量块的 0.377mm, 高度的最大误差值为 1 号向量块的 0.288mm。宽度和高度的平均误差分别为 0.23mm 和 0.22mm, 均小于 0.24mm。与本文选择 20mm 的中厚板焊缝坡口相比, 误差占比为 1.2%, 可以用于中厚板多层多道焊的路径规划和中厚板焊缝坡口宽度和高度的检测。

3.5 本章小结

本章从相机成像模型和平面靶标标定原理, 完成机器人视觉系统的整体标定, 为焊缝检测和坐标点确定奠定基础。首先对相机线性成像模型进行公式推导, 分析了四个坐标系之间的关系, 再根据张正友相机标定原理推导了相机畸变系数, 建立更加准确的非线性成像模型。其次选用张氏标定法对相机进行标定, 同时对激光平面标定方法进行了公式推导, 并且加入畸变系数建立更加精确的激光平面标定模型。然后对相机坐标系与焊枪坐标系之间的转换关系即手眼标定矩阵的求解进行公式推导, 建立手眼标定模型。最后通过相机、激光器、机器人及示教器按照标定方法步骤进行了实验, 并验证了实验精度。

第四章 图像采集及特征提取

视觉系统标定后就可以完成从二维像素坐标转换为焊缝的三维实际坐标，但是由于相机在拍摄焊缝原始图像的过程中会受到许多影响，导致焊缝原始图像不能直接用于焊缝特征点的提取，所以需要进行预处理，提取到准确的激光条纹中心线，为特征点的提取奠定基础。为此，提取到准确的特征点，除了特征点提取算法外，预处理和激光条纹中心线的提取算法也是非常重要的环节。

4.1 焊缝图像采集和预处理

4.1.1 焊缝图像采集

在使用相机采集原始图像之前，设置合理的参数可以使获得的图像中激光条纹的特征更加明显，避免因为自然光的照射影响到激光条纹，同时也能够避免激光条纹丢失细节和质量太差的问题。因此，为了保证采集图像的质量，将相机的图像采集频率设置为 50HZ，曝光时间设为 $1000\mu\text{s}$ 。首先控制机器人调整焊枪位置找到相机采集到原始图像质量最好的焊枪坐标，然后保证焊枪在机器人基坐标系下的 Z 坐标和 X 坐标不变，沿着 Y 轴匀速前进采集焊缝图像。在实验中，本章的焊枪初始坐标为 (649.51,1054.9,166.38)，采集到的中厚板 V 型焊缝的原始图像如图 4-1 所示。图 (a) 为打底焊焊缝图像，图 (b) 为填充焊第二层的焊缝图像。

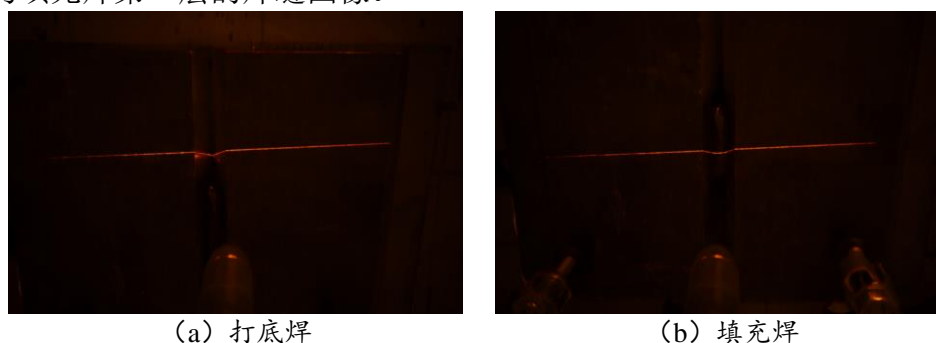


图 4-1 焊缝原始图像

Fig. 4-1 Original image of weld

4.1.2 ROI 区域提取和灰度化

在获得原始焊缝图像后，为了减少计算量，需要对原始图像进行 ROI 区域（又称感兴趣区域）提取和灰度化。ROI 区域是通过在原始图像中的激光条纹特征明显的规划一个矩形区域，排除矩形区域外的干扰，降低图像的计算量。结合实际情况，如图 4-2 所示，本文设置 ROI 提取区域的大小为 $750 \times 350\text{pixel}$ ，在保留焊缝主要信息的同时也减

少了 60% 的图像计算量

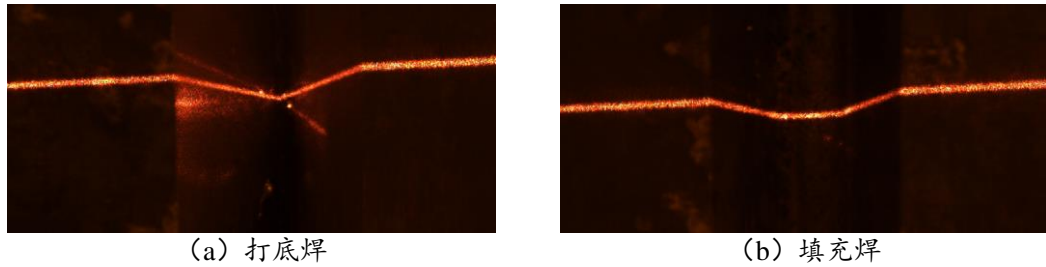


图 4-2 ROI 提取图像

Fig. 4-2 ROI extraction image

获得 ROI 区域后，由于图像为彩色图像，需对彩色图像进行灰度化处理，从而进一步降低后续处理的计算量。将彩色图像转换为灰度图像本质上来讲就是将 R-G-B 三个通道变成一个通道。灰度化的处理方法主要有以下三种：

(1) 最大值法：在三个分量中，通过对比选出彩色图像中亮度最大的值作为灰度值。如式 (4-1) 所示：

$$H(i, j) = \max\{R(i, j), G(i, j), B(i, j)\} \quad (4-1)$$

(2) 平均值法：获得彩色图像三个分量的亮度值，然后计算这三个值的平均值，最后将平均值作为灰度值。如式 (4-2) 所示：

$$H(i, j) = (R(i, j) + G(i, j) + B(i, j)) / 3 \quad (4-2)$$

(3) 加权均值法：将彩色图像的三个分量以不同的权值进行加权平均作为灰度值，然后通过调整权值，得到实际过程中所需要的灰度图像。如式 (4-3) 所示：

$$H(i, j) = (a \cdot R(i, j) + b \cdot G(i, j) + c \cdot B(i, j)) / 3 \quad (4-3)$$

对比三种方法。其中加权均值法更适合在实际应用过程中进行灰度处理。因此本文选用第三种方法进行灰度处理，其中 a 、 b 、 c 的取值分别为 0.9、0.8、0.5。如图 4-3 所示，为使用第三种方法的得到的灰度图像。

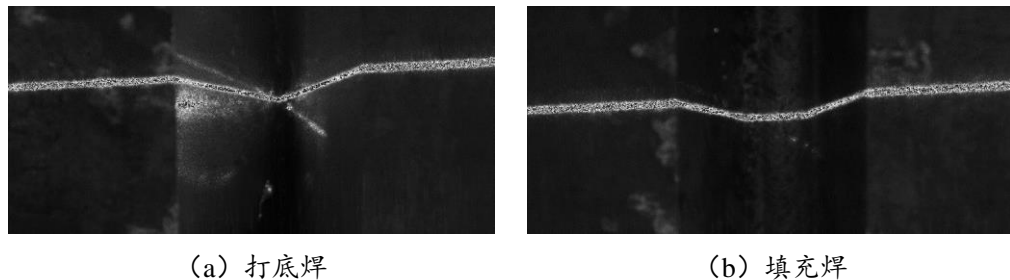


图 4-3 灰度化图像

Fig. 4-3 Grayscale image

4.1.3 图像去噪

图像去噪的目的是为了减少图像在传输过程中受到设备和外部环境或者杂质信息

的干扰。目前常用的去噪方法按照处理的不同值域，主要有分为空间域去噪、变换域去噪、基于稀疏编码和压缩方法的去噪和最后的超分辨率方法去噪等几类。其中空间域去噪算法^[63]简单，资源消耗低，运行速度快，非常适合相机获得的焊缝激光条纹图像。空间域去噪算法又分为均值滤波、高斯滤波和双边滤波。

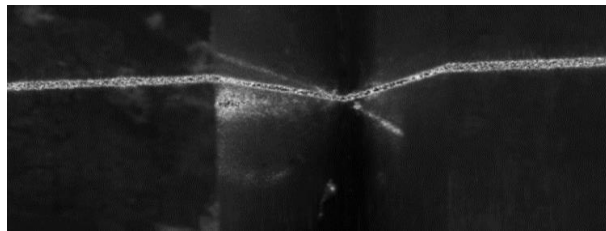
(1) 均值滤波

均值滤波^[64]原理是在当前像素点的位置上，以该点为中心计算在大小 $m \times n$ 模板内所有像素的平均值，并且将计算得到的平均值代替该点的像素值，其数学公式如式 (4-4) 所示：

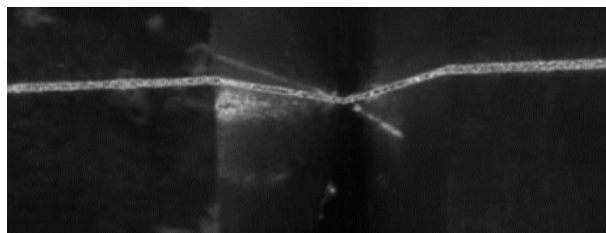
$$g(u,v) = \frac{1}{mn} \sum_{s=-\frac{m}{2}}^{s+\frac{m}{2}} \sum_{t=-\frac{n}{2}}^{t+\frac{n}{2}} f(u,v) \quad (4-4)$$

式中， $g(u,v)$ 为均值滤波处理后的图像灰度值； $f(u,v)$ 为均值滤波前的图像灰度值； u, v 为像素坐标。

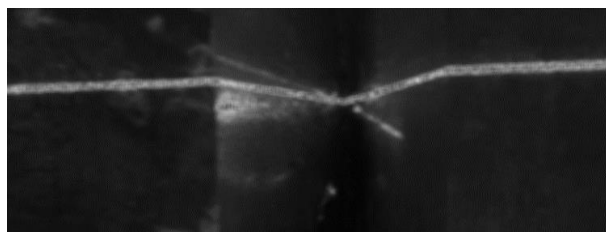
用此方法分别选用 3×3 、 5×5 和 7×7 的滤波模板对图 4-3(a)进行均值滤波处理，如图 4-4 所示为处理后的滤波图像。从均值滤波的原理来看，该滤波方法能够有效地消除一些尖锐的噪声。从 3×3 、 5×5 和 7×7 三个模板滤波后的效果来看，模板越大滤波后的图像激光条纹边缘变得更加模糊。



3×3 模板



5×5 模板



7×7 模板

图 4-4 均值滤波

Fig. 4-4 Mean filtering

(2) 高斯滤波

高斯滤波^[65]抑制高斯噪声非常有效，其原理与均值滤波的原理相似，都是通过将模板邻域内的像素值均值代替当前的像素值，而高斯滤波与均值滤波不同的是，它考虑到图像是连续的，所以对模版内的像素值使用二维高斯函数进行了加权。其数学表达式如式（4-5）所示：

$$g(u,v) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{u^2+v^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4-5)$$

式中， σ 为服从高斯分布的标准差。

同样的选取 3×3 、 5×5 和 7×7 的滤波模板对焊缝灰度图进行高斯滤波处理，处理后的效果图如图 4-5 所示。从高斯滤波的原理来看，使用时运算量较大，因此效率不高。从 3×3 、 5×5 和 7×7 三个模板滤波后的效果来看，滤波后的图像可以有效地抑制高斯噪音，但是会使激光条纹边缘信息和整个图像变得模糊，并且随着模板的增大，图像边缘与均值滤波一样都变得越来越模糊。

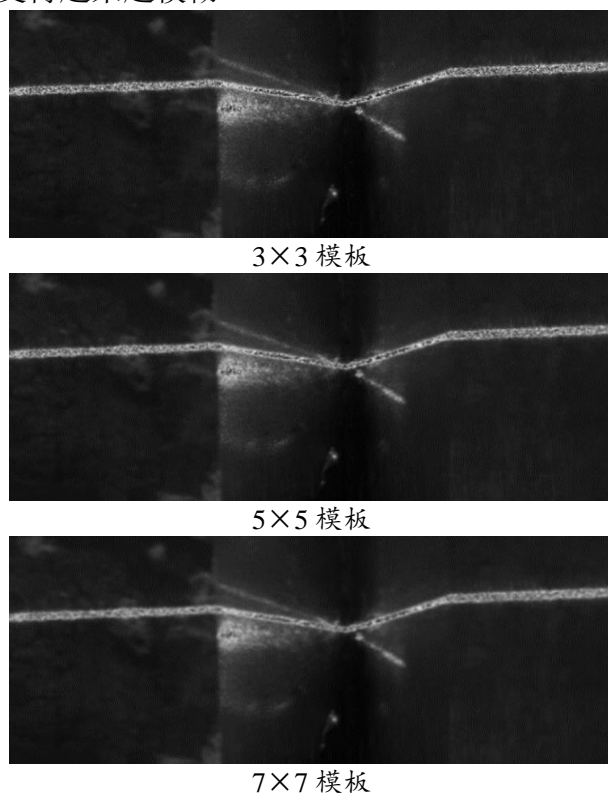


图 4-5 高斯滤波

Fig. 4-5 Gaussian filtering

(3) 双边滤波

双边滤波^[66]是一种非线性的滤波方法，通过同时考虑像素空间差异和强度差异来达到去噪保边的目的。和高斯滤波一样，双边滤波也是采用加权平均的方法进行处理。但

是双边滤波不仅考虑了像素范围域的辐射差异的权重,而且也考虑到了像素的欧氏距离的权重。其数学表达式如式(4-6)所示:

$$g(u,v) = \frac{\sum_{k,l} f(k,l)w(u,v,k,l)}{\sum_{k,l} w(u,v,k,l)} \quad (4-6)$$

式中, w 为权重系数; $f(k,l)$ 为邻域像素位置; 权重系数取决于空间域核 d 和值域核 r 的乘积。其数学公式如式(4-7)和(4-8)所示:

$$d(i,j,k,l) = \exp\left(-\frac{(u-k)^2 + (v-l)^2}{2\sigma_d^2}\right) \quad (4-7)$$

$$r(u,v,k,l) = \exp\left(-\frac{\|f(u,v) - f(k,l)\|^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (4-8)$$

同样的选取 3×3 、 5×5 和 7×7 的滤波模板对焊缝灰度图进行中值滤波处理, 处理后的效果图如图 4-6 所示。从双边滤波的原理来看, 可以有效地消除图像中孤立的噪声。从 3×3 、 5×5 和 7×7 三个模板滤波后的效果来看, 滤波后的图像的边缘信息保留程度优于前两种算法, 而且随着模板的增大, 图像边缘信息的保留程度也没有变得模糊起来。

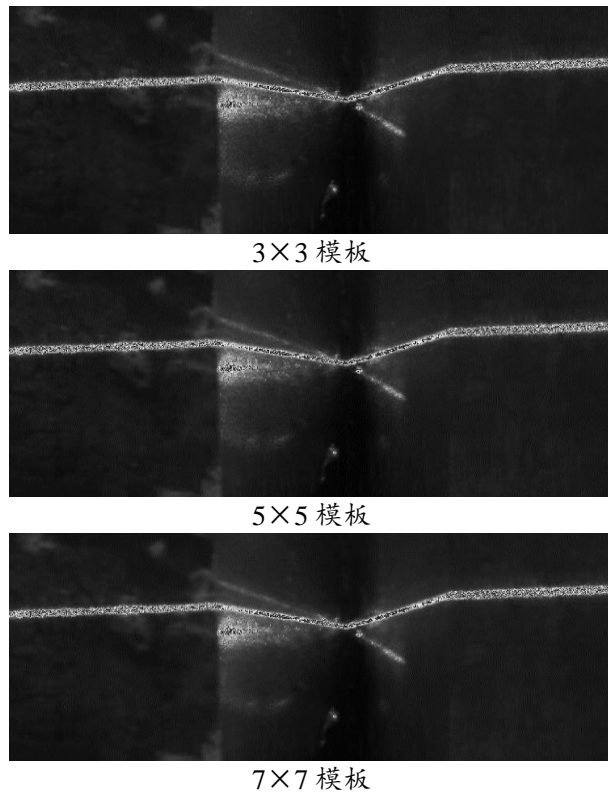


图 4-6 双边滤波

Fig. 4-6 Bilateral filtering

在通过对上述滤波算法的分析后, 通过引入信噪比 (SNR) 模型^[67]来进行客观的评估。信噪比的数值大小与噪声干扰程度呈负相关, 即信噪比数值越大, 噪声干扰越小, 图像质量也越好。

$$SNR(dB) = 10 \lg \frac{\sum_{i=0}^{H-1} \sum_{j=0}^{W-1} f(u,v)^2}{\sum_{i=0}^{H-1} \sum_{j=0}^{W-1} [f(u,v) - g(u,v)]^2} \quad (4-9)$$

式中, H 和 W 分别为在图像中激光条纹长和宽方向上的像素点; $f(u,v)$ 和 $g(u,v)$ 分别为原始图像和滤波后的图像在 (u,v) 处的灰度值。

表 4-1 滤波后图像的 SNR 值

Table 4-1 SNR values of filtered images

滤波方式	3×3 模板的 SNR	5×5 模板的 SNR	7×7 模板的 SNR
均值滤波	12.053dB	10.8952dB	10.2059dB
高斯滤波	10.47dB	9.75369dB	9.30309dB
双边滤波	24.6102dB	22.9576dB	22.3942dB

结合表 4-1 中的不同滤波图像信噪比 (SNR) 和每种滤波后的实际效果进行综合评价, 可以发现模板为 3×3 的双边滤波不仅信噪比 (SNR) 最高, 同时也能有效地抑制图像中的孤立点、边缘信息的保留效果好。所以本文的滤波方法选择模板为 3×3 双边滤波对图像进行处理。

4.1.4 图像分割

为了将焊缝激光条纹区域精确的提取出来, 需要将图像分为目标区域和背景区域, 其中目标点区域为焊缝激光条纹区域。而将目标区域和背景区域分割的方法为图像分割^[68], 其原理是通过设置一个合适的阈值, 然后通过该阈值将图像分割成目标区域和背景区域两个部分。最常用的方法有两种, 一种是固定阈值法, 另一种是自适应阈值法。

固定阈值法的原理是先通过计算得到图像的灰度值直方图, 然后通过直方图的灰度值分布设置一个阈值完成对图像的分割, 将大于阈值的像素点赋为 255, 小于阈值的像素点赋为 0, 其公式如式 (4-10) 所示:

$$g(u,v) = \begin{cases} 255 & f(u,v) \geq T_h \\ 0 & f(u,v) < T_h \end{cases} \quad (4-10)$$

通过式 (4-10) 得到阈值分割后的图像, 也称为二值化图像^[69], 虽然固定阈值法分割图像简单快速, 并且可以根据实际情况灵活的使用阈值。但是它需要通过直方图来判断, 不断地选取合适的阈值, 如果阈值选择的不好, 就会丢失图像中一些重要的细节, 因此固定阈值法的普适性不是很高。

而自适应阈值算法是在灰度直方图中找出一个最佳阈值的方法^[70], 自适应算法又称为最大类间方差法 (Otsu) 其原理是使找到的最佳阈值 $T_h=m$ 分割图像后的背景区域和目标区域这两部分的类间方差 σ_b^2 最大, σ_b^2 按照公式 (4-11) 计算得到。

$$\sigma_b^2 = \frac{[u_M w(m) - u(m)]^2}{w(m)[1 - w(m)]} \quad (4-11)$$

式中, u_M 为整个图像的灰度平均值; $u(m)$ 为在背景区域中灰度值为 m 的累计平均值; $w(m)$ 则为背景区域占整个图像的比例。

如图 4-7 所示为固定阈值法和自适应算法处理的图像, 通过分析处理后的图像可以看出, 使用固定阈值法处理后的图像会导致激光条纹断裂、不连续, 而自适应算法处理后的图像激光条纹不仅连续而且特征明显。这是因为固定阈值法需要通过直方图来判断, 不断地选取合适的阈值, 如果阈值选择不合理就会导致图像中的细节丢失, 使得激光条纹图像出现断点, 毛刺等问题。而自适应算法则没有这类问题, 因此本文选择 Otsu 算法对图像进行分割。

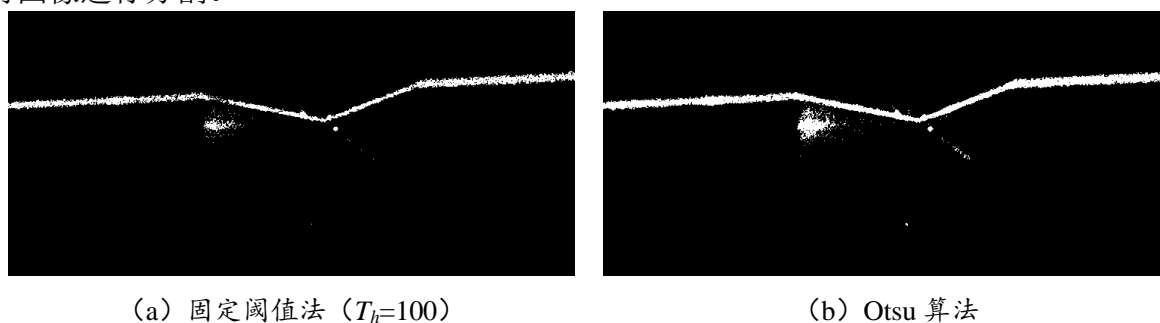


图 4-7 二值化图像

Fig. 4-7 Binary image

4.1.5 形态学处理

在图像分割完成后, 虽然激光条纹在图像中的特征比较明显, 但是在激光条纹边缘还是有一些毛刺和细小的光斑, 因此对图像再进行形态学处理, 平滑激光条纹的边缘曲线, 消除一些细小的光斑。其形态学处理一般有腐蚀、膨胀、开运算和闭运算四种^[71]。通过实际的处理效果, 本文选择先闭运算, 再开运算, 最后膨胀完成对激光条纹图像的形态学处理。闭运算实现对图像中的断裂点进行拓展, 提高激光条纹的连续性; 开运算能够降低图像中激光条纹边缘的毛刺; 最后膨胀是为了进一步突出激光条纹的特征信息。其形态学的处理效果图如图 4-8 所示。最终效果图与图 4-7 相比, 经过形态学处理后的激光条纹毛刺变少、激光条纹平滑并且特征更加明显。

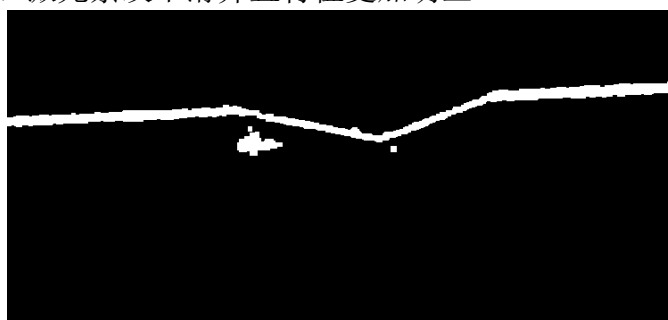


图 4-8 形态学处理

Fig. 4-8 Morphological processing

4.2 激光条纹中心线提取

在采集到图像，并对图像进行预处理后，激光条纹的轮廓在焊缝图像中的特征更加明显。在得到激光条纹轮廓的基础上获得激光条纹中心线可以降低后续特征点提取算法的复杂性、提高算法的运行速度。因此激光条纹中心线的提取算法是激光视觉检测系统中的关键。目前提取中心线的算法分为两类：基于传统算法和基于深度学习算法。二者各有优缺点，传统算法运行速度快，但是容易受到噪声影响；深度学习算法受到噪声的影响较小，但是需要大量的数据，占的内存空间多，不利于视觉检测系统的创建。所以大多数情况下选择传统算法，然后结合应用对象对传统算法进行改进。

4.2.1 传统的中心线提取方法

(1) 极值法

极值法的原理是找到每一列的最大灰度值，然后将对应的像素点作为中心点。其极值法示意图如图 4-9 所示。但是在实际应用过程中极值法很少使用，这是因为极值法太过于理想化，对噪声又极为敏感，无法适应实际环境中的各种噪声，使得提取到的中心线出现偏移。因此该方法在实际应用过程中很少使用。

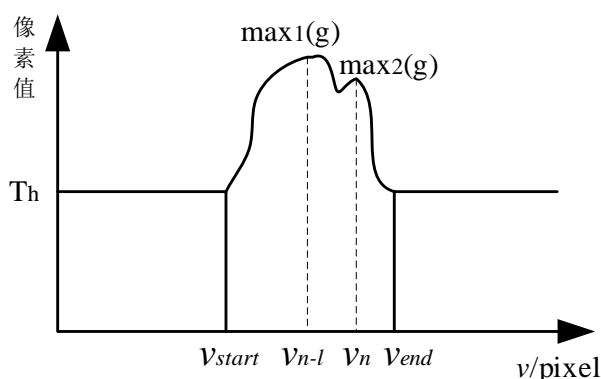


图4-9 极值法示意图

Fig. 4-9 Schematic diagram of extreme value method

(2) 几何中心法

几何中心法^[72]是一种最简单的中心线提取算法，它需要先使用 canny 算法提取到激光条纹的轮廓，然后遍历整个图像，得到每一列激光条纹的上下坐标点，最后通过上下坐标点计算得到中心坐标 (u_c, v_c) ，其中 v_c 为计算得到的中线点的纵坐标。其几何中心法的示意图如图 4-10 所示，如式 (4-12) 所示，为其数学表达式。

$$\begin{cases} u_c = u_i \\ v_c = \frac{v_{up} + v_{down}}{2} \end{cases} \quad (4-12)$$

式中, v_{up} 为每列激光条纹的上坐标; v_{down} 为每列激光条纹的下坐标; u_i 为当前列的坐标。

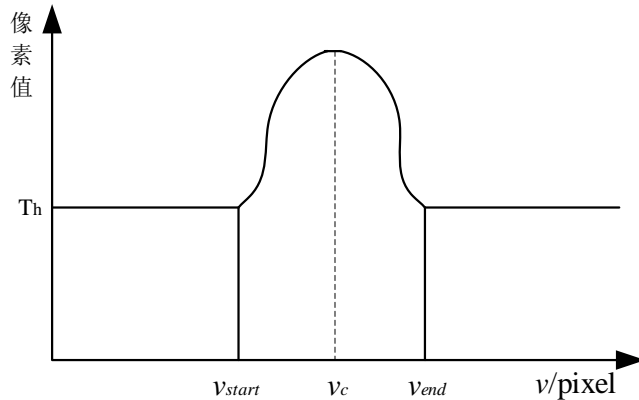


图4-10 几何中心法示意图

Fig. 4-10 Schematic diagram of geometric center method

算法简单、容易实现是几何中心法非常明显的优点, 并且它非常适应于一些需要计算速度快的场合。但是其缺点也非常明显, 他需要通过 canny 算法提取边缘来确定条纹的上下坐标位置, 然而当 canny 算法受到噪声影响时会使得条纹的上下坐标出现误差, 从而导致激光条纹中心线与实际的激光条纹形状出现较大的差异, 使得提取的准确度大大降低。

(3) 灰度重心法

灰度重心法^[73]的本质是通过物理学上的重心公式得到激光条纹的中心, 该算法是先得到图像中每一列的所有灰度值, 然后使用重心法公式计算得到每一列的重心。其原理图如图 4-11 所示, 数学表达式如式 (4-13) 所示:

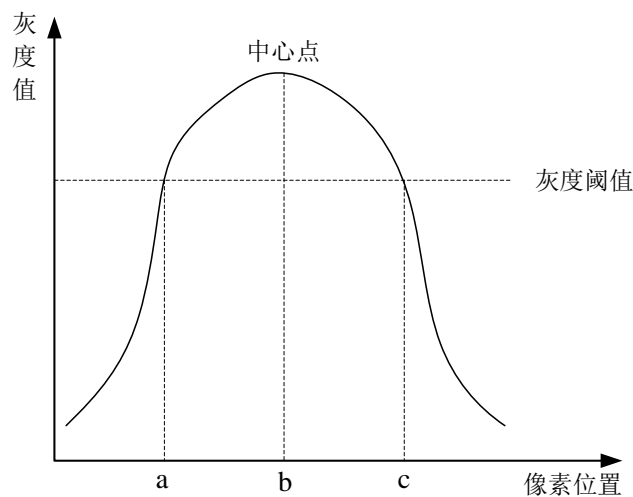


图4-11 灰度重心法原理图

Fig. 4-11 Principle diagram of gray gravity center method

$$\begin{cases} u_c = u_i \\ v_c = \frac{\sum_1^N g(u,v) \cdot v}{\sum_1^N g(u,v)} \end{cases} \quad (4-13)$$

式中， N 为图像中每一列的所有像素点的数量总和； $g(u,v)$ 坐标为 (u,v) 的像素点的灰度值。

通过对极值法、几何中心法和灰度重心法分析，得出灰度重心法不仅考虑了在激光条纹区域内每一列的像素点，有效地降低了因激光条纹分布不均导致的计算偏差，而且灰度重心法的提取精度也达到了亚像素级别。但是在实际应用过程中灰度重心法提取的中心线会由于反射噪音导致提取的激光条纹中心线出现偏差，如图 4-12 所示。因此对灰度重心法进行了改进。

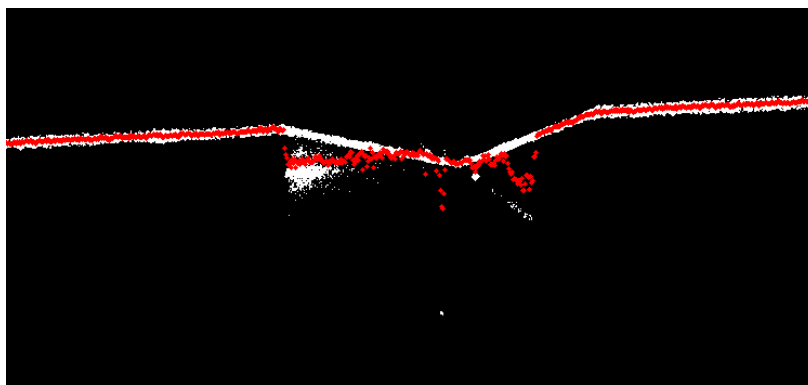


图4-12 灰度重心法

Fig. 4-12 Gray gravity center method

4.2.2 改进的中心线提取方法

针对焊缝坡口反光噪声导致激光条纹中心线提取出现偏差的问题，先利用列灰度重心法初步提取激光条纹中心线，然后使用方向模板法对初步提取的中心线进行法线方向的确定，最后使用灰度重心法提取到精确的激光条纹中心线。

(1) 中心线初步提取

灰度重心法因反光噪声问题会导致提取的部分激光条纹中心线出现偏移，从而无法进行特征点的判断。本文通过使用列灰度峰值法减少反光噪声对提取激光条纹中心线的影响。列灰度峰值法的原理是遍历图像的每一列，提取出每列的灰度峰值对应的像素坐标。如图 4-13 所示，分别展示了有反射噪音的列和没反射噪音的列的灰度值分布。在第 45 列的灰度分布中可以看到，只有一个峰值，而再第 200 列和第 460 列的灰度分布中可以看出，其灰度分布具有两个峰值。其中第 45 列是没有反射噪声的，第 200 列和第 460 列是有反光噪声的。通过分析得知，反光噪声一般出现在激光条纹的下方，因此在有反光噪声的列中，选择列坐标值小的点作为中心点。

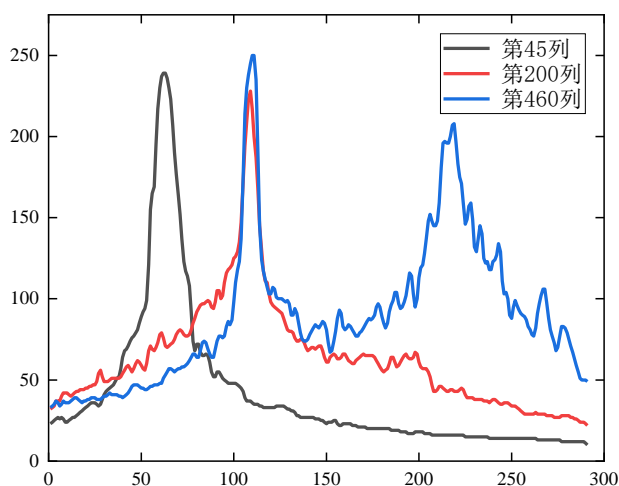


图4-13 灰度峰值图

Fig. 4-13 Gray peak value

使用列灰度峰值法减少反光噪声的影响，完成对激光条纹中心线的初步提取，如图4-14所示。

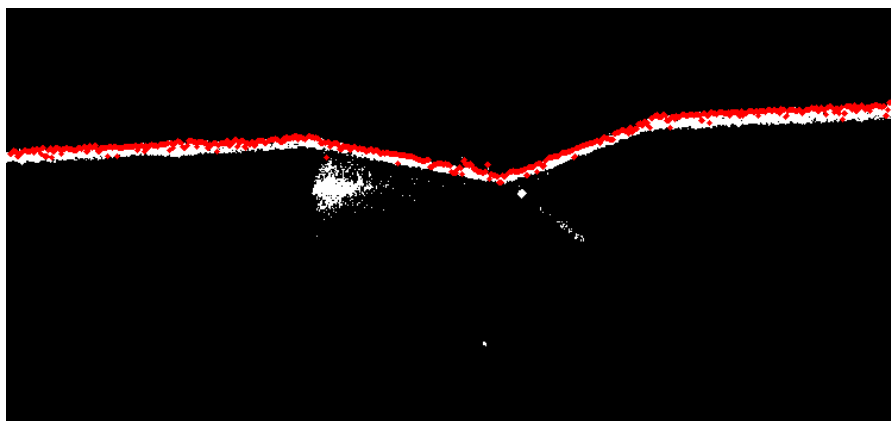


图4-14 列灰度峰值法

Fig. 4-13 column gray peak method

(2) 中心线法线确定

在确定中心线法线前，需要对初步提取的激光条纹中心线进行处理，通过激光条纹的宽度使初步提取的中心线靠近激光条纹的中间位置。遍历初步提取的所有中心点，每个点的 x 坐标不变，将与 x 坐标对应的 y 坐标带入式 (4-14) 中进行计算，从而得到新一轮的中心线，如图4-15所示。

$$N_1(y) = \begin{cases} N_0(y_{i+1}) + \frac{W}{4} & N_0(y_{i+1}) - N_0(y_i) < \frac{W}{4} \\ N_0(y_i) - \frac{W}{4} & N_0(y_{i+1}) - N_0(y_i) \geq \frac{W}{4} \\ N_0(y_i) + \frac{W}{4} & N_0(y_{i+1}) - N_0(y_i) \leq -\frac{W}{4} \end{cases} \quad (4-14)$$

式中, $N_1(y)$ 为新一轮中心点集的 y 坐标; $N_0(y)$ 为初始中心点集的 y 坐标; W 为激光条纹宽度; $i=1, 2, \dots, n$; n 为中心点集中点的数量。

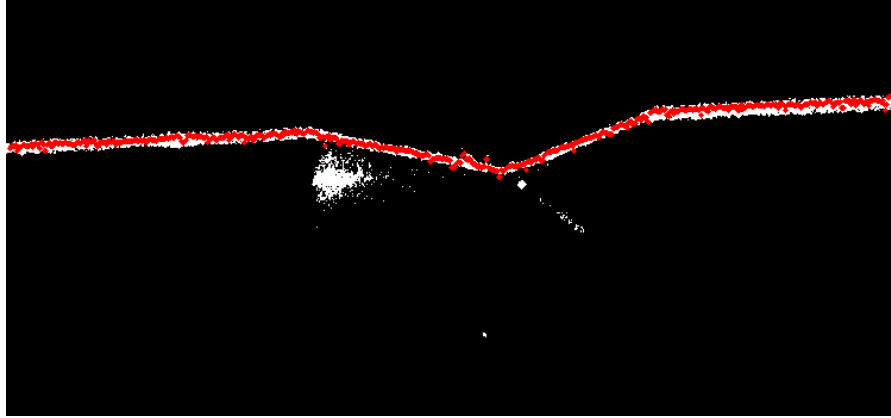


图4-15 新一轮中心线

Fig. 4-15 New center line

得到新一轮的中心线后, 使用方向模板法确定中心线的法线方向。建立 4 个 5×5 的模板, 这四个模板分别表示激光条纹四个方向: 水平、垂直、左倾 45° 、右倾 45° , 记四个模板分别为 T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4 。

$$T_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad T_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

然后结合上述的四个模板和式 (4-15) 求得中线点的法线方向。

$$G_K(u, v) = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 I(u-5+i, v-5+j) \times T_K(i, j) \quad (4-15)$$

式中, $K=1, 2, 3, 4$; $I(u, v)$ 为像素坐标; $T(i, j)$ 为模板上的值。通过式 (4-15) 可以得到每个模板与每个像素点的相关值 G , 且这个相关值主要代表图像中像素点的方向与模板之间的相关性, G 值越大, 相关性越高。因此在 G_1, G_2, G_3, G_4 中取最大值, 认为改值为这个像素点处的图像的斜率, 从而确定该像素点的法线方向。

(3) 中心线精确提取

通过式 (4-15) 确定中心线的法线方向后, 沿着法线方向, 以每个点为中心, 在两边各选 $W/2$ 个点, W 为激光条纹的宽度, 通过式 (4-16), 即灰度重心法来精确求取激

光条纹的中心点。

$$\begin{cases} x = \frac{\sum_{(i,j) \in s} g(i,j) \cdot i}{\sum_{(i,j) \in s} g(i,j)} \\ y = \frac{\sum_{(i,j) \in s} g(i,j) \cdot j}{\sum_{(i,j) \in s} g(i,j)} \end{cases} \quad (4-16)$$

式中, $g(i, j)$ 为图像在坐标 (i, j) 处的像素值, s 为像素点区域, 且该区域为在条纹法线方向上选取的 $W/2$ 个像素点的区域。最终提取到的中心线如图 4-16 所示。

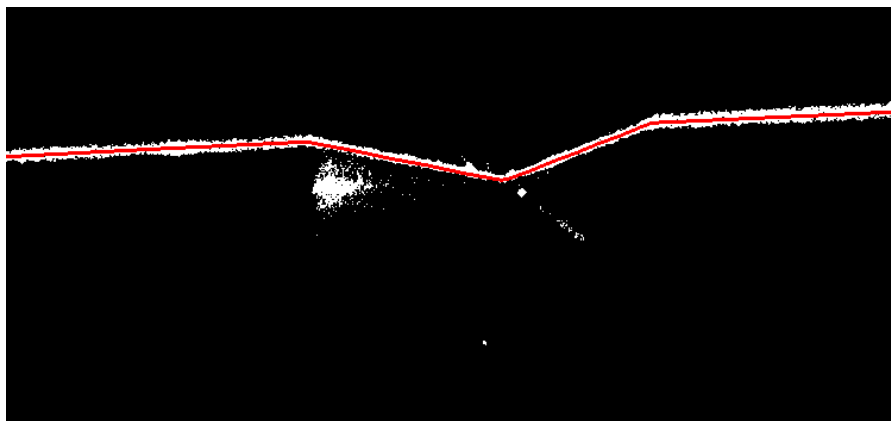


图4-16 改进的灰度重心法

Fig. 4-16 Improved gray gravity center method

4.3 焊缝特征点提取算法

通过预处理和提取到激光条纹中心线后, 接下来就是提取到特征点, 焊缝图像中的特征点主要分为可以用于计算焊缝坡口尺寸的特征点和进行焊接的特征点。计算坡口实际尺寸可以为坡口规划提供依据, 而焊接特征点为焊接轨迹规划提供依据。通过观察实际焊缝可以得到这两类的特征点通常为激光条纹曲线的极值点、拐点和端点。

4.3.1 传统的特征点提取方法

常用的特征点提取算法为斜率分析法^[75], 其原理是将中心线上的点作为离散的像素点, 然后通过斜率法计算得到每个点的斜率, 将每个点的斜率值放到一起进行综合分析, 通过分析比较, 判断每个点的斜率是否发生较大的变化, 最后将斜率变化较大的点作为焊缝的特征点。斜率分析法的步骤如下所示:

第一步: 通过式 (4-17) 计算每个点的斜率:

$$k(x) = \frac{f(x) - f(x-t)}{\Delta x} \quad (4-17)$$

式中, $f(x)$ 为第 x 列的像素点的纵坐标; $f(x-t)$ 为第 $x-t$ 列的像素点的纵坐标; Δx 为

第 x 列和第 $x-t$ 列的差值。

为了加强斜率法的鲁棒性,本文通过选取前后 5 列的斜率,对这 5 个斜率值求平均值,将该平均值设置为该点的斜率。改进后的公式如式 (4-18) 所示:

$$k(x) = \frac{1}{5} \left[\frac{f(x+1) - f(x-1)}{2} + \frac{f(x+2) - f(x-2)}{4} + \dots + \frac{f(x+5) - f(x-5)}{10} \right] \quad (4-18)$$

通过改进后的算法计算图 4-16 中心线的斜率,得到每个点的斜率曲线,如图 4-17 所示,然后分析斜率发生较大变化的点。

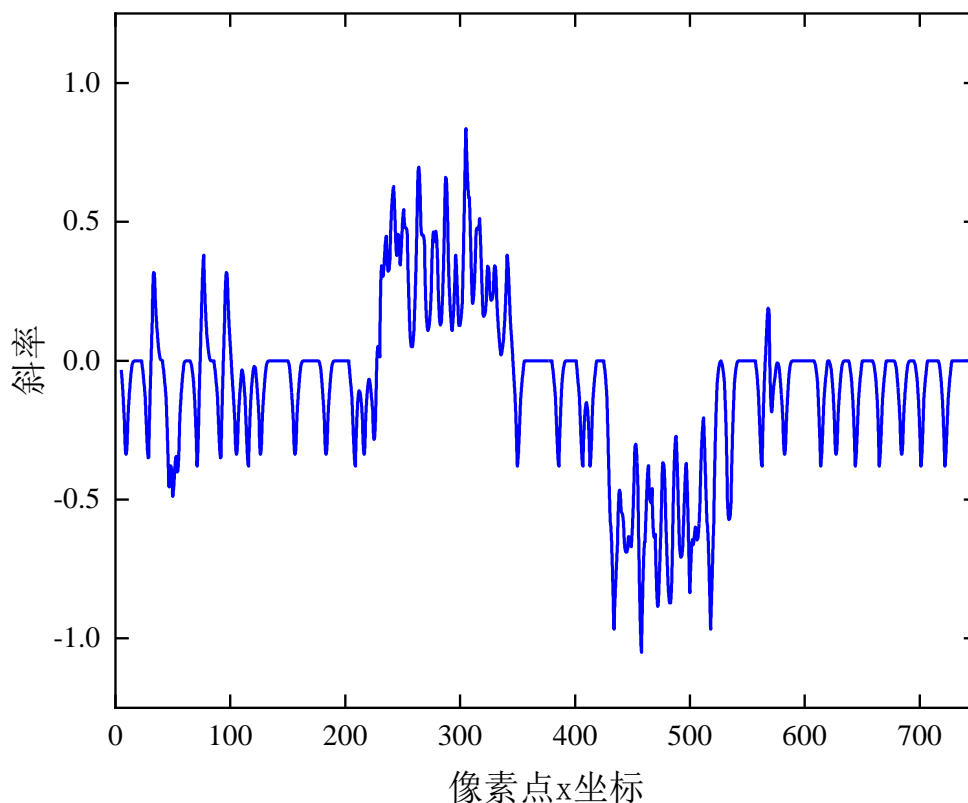


图4-17 斜率变化曲线

Fig. 4-17 Slope change curve

第二步:通过式 (4-19) 判断像素点的斜率突变的位置。

$$|k(i+10) - k(i)| > \sigma \quad (4-19)$$

式中, $10 \leq i \leq x-10$, σ 为判断斜率是否突变的值。该值根据斜率变化曲线的特点通过实际测试得到。然而在实际测试过程中由于斜率突变点太多而无法确定 σ 的范围,导致无法确定特征点。

4.3.2 基于 Douglas-Peucker 算法的特征点提取算法

Douglas-Peucker 算法作为一种传统的折线简化算法,可以快速的简化中心线,从而得到特征点。然而该算法应用在不规则曲线焊缝特征点提取上时,使用固定值会造成曲线过度简化,导致遗漏重要的特征点。因此本文在此算法的基础上进一步扩展,使拓展

后的算法可以提取到不规则曲线的特征点。

对 Douglas-Peucker 算法引入动态阈值机制和迭代算法,避免传统的 Douglas-Peucker 算法使用固定值导致过度简化或者遗漏一些重要的关键点,完成初步简化,然后使用二次 Bezier 曲线拟合初步简化得到的关键点,计算曲线上的控制节点与实际数据点的距离,进一步优化关键点的提取精度。

设置最大迭代次数 $\max(n)$, 初始阈值 $T_0=0.5$, 先使用一次 Douglas-Peucker 算法进行简化后得到简化后的子区间和关键点数量 M , 通过式 (4-20) 计算动态误差阈值:

$$T = T_0 * (1 + \log(M / N)) \quad (4-20)$$

式中, N 为目标关键点数量。然后通过式 (4-21) 计算拟合直线的距离:

$$d(x) = \frac{((y_2 - y_1)x_0 - (x_2 - x_1)y_0 + x_2y_1 - y_2x_1)}{\sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}} \quad (4-21)$$

式中, (x_0, y_0) 为待测点坐标; (x_1, y_1) 为拟合直线上左端点坐标; (x_2, y_2) 为拟合直线上右端点坐标。

如果 $d(x)$ 小于动态阈值 T 或者达到最大迭代次数 \max , 停止迭代 Douglas-Peucker 算法, 完成初步简化, 否则继续迭代。

在完成初步简化后, 使用二次 Bezier 曲线对关键点进行进一步优化。

对于相邻三个关键点 P_0, P_1, P_2 , 在 P_0 和 P_2 之间生成一条二次 Bezier 曲线, 设二次 Bezier 曲线为:

$$C(t) = (1-t)^2 \times P_0 + 2 \times t \times (1-t) \times P_1 + t^2 \times P_2 \quad (4-22)$$

式中, t 的取值范围为 $[0, 1]$ 。

设中间的控制节点记为 Q :

$$Q = a \cdot P_0 + b \cdot P_1 + c \cdot P_2 \quad (4-23)$$

式中, $a=(1-t)^2$; $b=2t(1-t)$; $c=t^2$ 。

为了对中间控制节点的参数 a, b, c 进行求解, 定义一个距离函数:

$$D(a, b, c) = (|C(t) - P_t|) \quad (4-24)$$

式中, P_t 为 $[P_0-P_2]$ 区间内的中心线上的点; $(|C(t)-P_t|)$ 为 Bezier 曲线与 P_t 之间距离值。

因为 Bezier 曲线上各控制节点与实际数据点之间的最大距离 $d(t)$ 小于设定阈值, 所以对距离函数进行最小化求解, 及求解式 (4-28)

$$\min(D(a, b, c)) \quad (4-25)$$

求解得到最优的 a, b, c 值, 即可确定中间控制节点 Q 。

在得到中间控制节点 Q 后, 若 $d(t)$ 小于阈值 T , 则将中间控制节点作为新的关键点, 否则保留原来的关键点, 最后跑完所有相邻的三个关键点完成关键点的优化。算法流程图如图 4-18 所示。

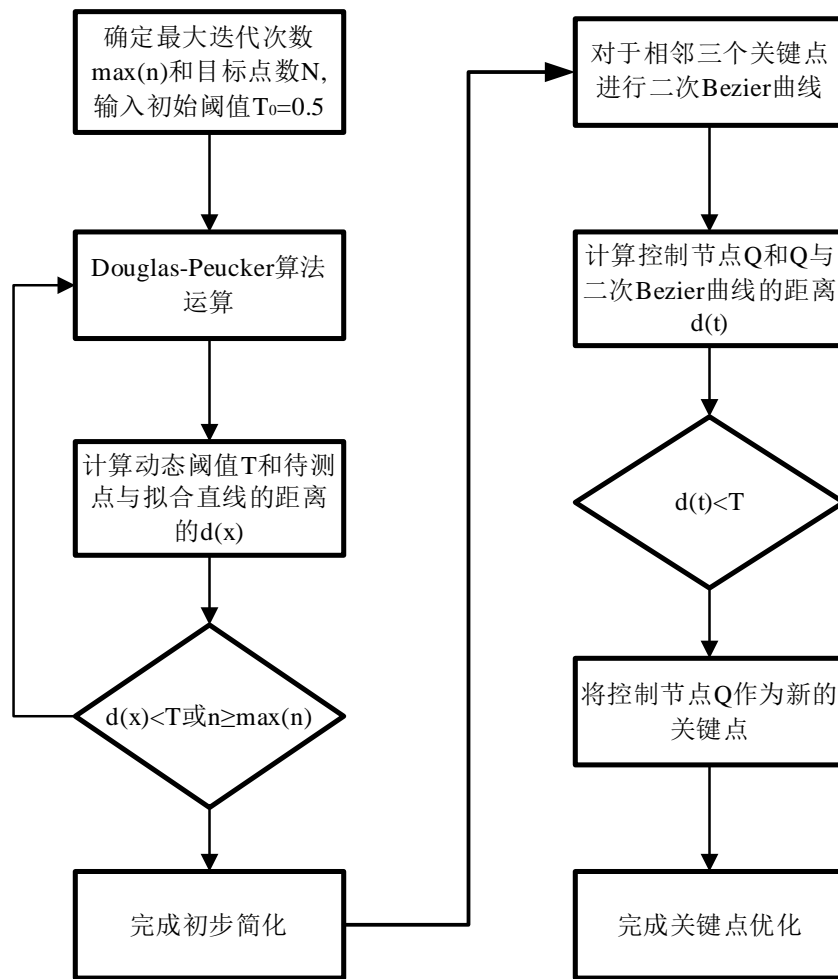


图4-18 自适应简化算法流程图

Fig. 4-18 Flow chart of adaptive simplification algorithm

为了进一步精确定位特征点，将优化得到的特征点对图像进行区域划分，如表 4-1 所示，然后对每个区域进行点进行最小二乘法拟合，最后得到的交点为精确定位特征点。

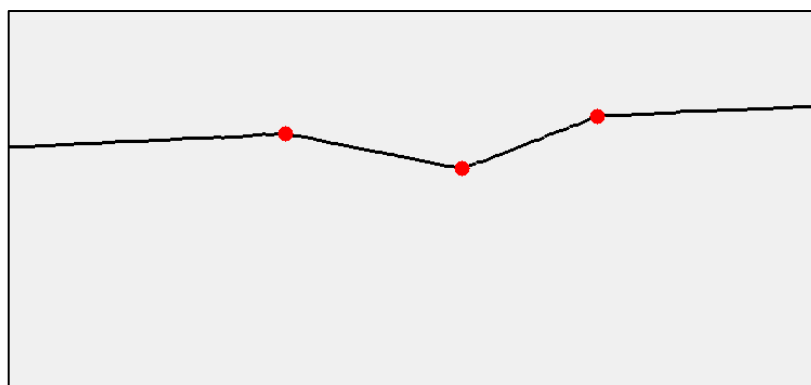
表4-1 区域划分

Table 4-1 Regional division

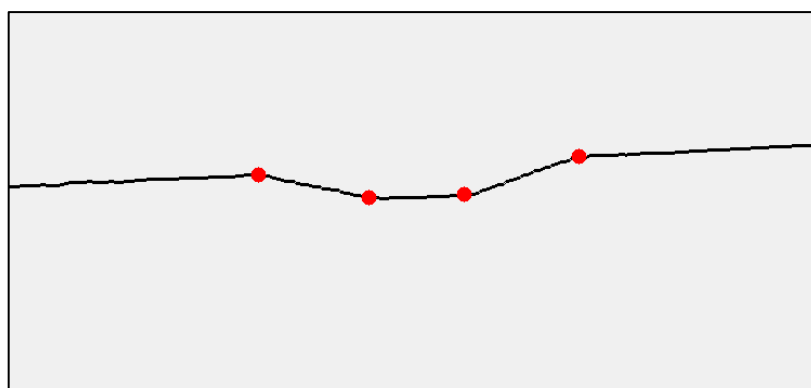
区域	左边界	右边界
S_1	x_1	x_2
S_2	x_2	x_3
S_3	x_3	x_4
\vdots	\vdots	\vdots
S_{n-1}	x_{n-1}	x_n

表中 x_n 为每个点对应的横坐标。通过分析 V 型坡口焊接过程中每一道的焊缝图像

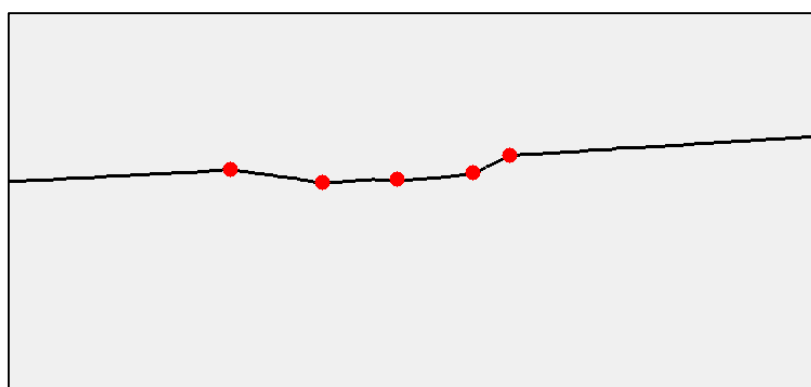
得出，区域 S_1 、 S_2 、 S_{n-2} 、 S_{n-1} 采用最小二乘法直线拟合，剩下的区域采用最小二乘法抛物线拟合。通过拟合得到每个区域的表达式之后，求取相邻两个区域的交点，从而得到精确的特征点。如图 4-19 为提取到的特征点。



(a) 第一层的特征点



(b) 第二层的特征点



(c) 第三层的特征点

图4-19 特征点提取

Fig. 4-19 Feature point extraction

通过图 4-19 可以看出本文的特征点提取算法具有很强的适应性，不仅可以提取出打底焊的特征点，同时也可以提取出第二层、第三层不规则曲线的特征点。

4.4 本章小结

本章主要完成了三个工作，首先选择合适的预处理方法，对相机采集到的焊缝图像进行 ROI 提取、灰度化、双边滤波、二值化和形态学处理，进而提高图像质量，降低图像的计算量，提取到特征明显的激光条纹图像。其次分析对比提取激光条纹中心线的传统算法，最终选取灰度重心法，并根据实际激光条纹提取过程中的反光噪声问题，结合列灰度峰值法和方向模板法对灰度重心法进行改进，使提取的中心线符合实际的坡口形状。最后对特征点提取算法进行研究，分析了斜率法在提取过程中问题，提出了一种基于 Douglas-Peucker 算法的特征点提取算法，并对打底焊和第二层的特征点进行提取，精度验证放在第五章的焊接实验中。

第五章 多层多道焊接路径规划

在完成了上述章节的内容后，就可以对中厚板进行焊接。先控制机器人扫描打底焊的焊缝图像，然后使用图像处理算法得到二维像素特征点，最后通过坐标变换得到特征点的三维坐标，进而计算得到焊缝的高度、宽度和坡口角度，从而确定中厚板多层多道焊的层数、道数以及焊枪姿态和焊接轨迹。

5.1 多层多道焊接工艺

焊接工艺在中厚板焊接中有着重要的作用，它决定着焊接质量，避免在焊接过程中焊透或者焊接缺陷的发生，因此在焊接前确定好焊接工艺是非常重要的一步。焊接工艺参数主要包括四个方面：热输入参数、运动参数、工件参数和位姿参数。热输入参数主要为三个参数：焊接电流、焊接电压、送丝速度；运动参数为焊接速度、摆动频率、摆动幅度以及侧停时间；工件参数为焊件的高度、宽度、坡口角度和钝边等；位姿参数为姿态角（焊枪的角度）、TCP 点（焊接点）和干伸长。其焊接参数如表 5-1 所示。

表5-1 焊接工艺参数

Table 5-1 Welding process parameters

参数类型	参数名称	符号	单位	参数类型	参数名称	符号	单位
热输入参数	焊接电流	I	A	位姿参数	姿态角	θ	($^{\circ}$)
	焊接电压	U	V		TCP	p	
	送丝速度	W	m/min		干伸长	d_d	mm
工件参数	工件高度	d_h	mm	运动参数	焊接速度	V	cm/min
	工件宽度	d_w	mm		摆动幅度	A	mm
	坡口角度	β	($^{\circ}$)		摆动频率	f	Hz
	钝边	de	mm		侧停时间	t	s

在上述参数中有的参数之间有耦合关系，比如焊接电流、焊接电压必须与送丝速度相互配合，姿态角和干伸长会影响焊接电压和焊接电流的输出。但是其中有些参数是固定的，比如工件参数，因此在进行焊接工艺确定时，只需要考虑存在耦合关系的参数。

在热输入参数中，保持送丝速度和焊接电压不变，通过调整焊接电流来保证焊接质

量。针对运动参数中的四个参数,使用固定的摆动幅度和侧停时间和摆动频率保持焊接效率,焊接速度为调整变量。位姿参数中的干伸长为焊丝长度,其长度的变化决定着电弧电压的变化,电弧电压的变化又影响着熔池的穿透能力,进而影响焊接质量的稳定性。因此在正常的焊接过程中会保持干伸长的长度稳定,本文选择 15mm,为固定参数。TCP 点为焊接的轨迹点,是结合三、四章中的内容确定得到的,为固定参数。姿态角的调整影响着焊接电压和电流的输出,如果在焊接过程中不调整姿态角就会导致焊接电流和焊接电压输出量降低,出现焊接质量问题,而姿态角的参数由焊接道数和焊缝侧壁的关系得到。

由于焊接参数之间的耦合关系,因此直接分析焊接工艺参数对实际焊接的作用不大。在实际的生产过程中,焊接工艺存在着一个工艺范围,在此范围中选择合适的焊接参数,使其满足实际的焊接要求。经过实验得到的本文的部分工艺参数如表 5-2 所示。

表5-2 焊接工艺参数

Table 5-2 Welding process parameters

参数	值	参数	值
焊接电流/I	130~150 A	焊接速度/V	4~6 mm/s
焊接电压/U	21.3~22.8 V	干伸长/d _d	15mm
送丝速度/W	3.9 m/min	姿态角/ θ	-10° ~10°

5.2 多层多道焊路径规划

在确定好焊接工艺参数后,就可以开始对中厚板焊接进行多层多道焊规划了。规划主要分为焊接层数与道数的确定、焊接顺序和焊枪轨迹三部分。目前多层多道焊规划主要分为两种:一种是通过焊接参数计算得到焊道截面积,然后将焊道截面简化为三角形、菱形和梯形,结合焊道截面积完成规划,最后通过机器人离线编程完成焊接;另一种是控制机器人焊接一道,然后再通过示教,焊接下一个道次完成中厚板焊接。前者焊接效率高,但是焊接过程中的热变形会使得焊接轨迹发生变化,导致预设的焊接轨迹与实际焊接轨迹不匹配,进而导致焊接质量出现问题。后者可以避免前者轨迹不匹配的问题,但是每焊接一道都需要进行人工示教,焊接效率不高。因此本文通过开发上位机结合视觉检测系统提出一种新的轨迹规划方法。

5.2.1 层数与道数的确定

根据视觉检测扫描获得焊缝坡口的尺寸,对焊缝层数和道数计算。先确定层数,再确定道数,层数的确定由层高来确定,层高则通过焊接参数计算得到。

(1) 焊接层数

如图 5-1 所示先简化焊缝坡口的焊道截面积。其中打底焊的截面简化为三角形；填充焊和盖面焊的截面简化成菱形和梯形。然后将表 5-2 得到的焊接工艺参数带入焊道截面积计算公式 (5-1) 中^[76]，从而得到不同焊接道次的截面积。

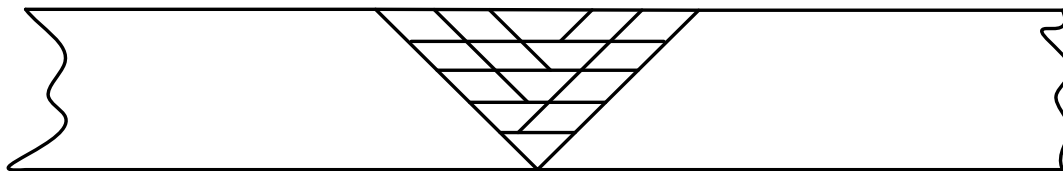


图5-1 坡口焊道截面积简化图

Fig. 5-1 Simplified cross section of bevel bead

$$S = \frac{\pi d^2 V a}{4W} \quad (5-1)$$

式中, S 焊道截面积; d 为焊丝直径, 本文取值 1.2mm; a 为熔覆系数, 一般取经验值, 为 91%~95%, 本文选取选取 92%。

由于打底焊和填充焊的焊接参数不一样, 因此先通过式 (5-2) 计算打底焊的层高, 然后再计算填充焊的层高。

$$h_1 = \sqrt{\tan \beta \times S_1} \quad (5-2)$$

式中, S_1 为打底焊的截面积; h_1 为打底焊的层高。

填充焊层高 h_2 的求解示意图如图 5-2 所示。根据图 3 中参数的几何关系的式 (5-3) 和式 (5-4)。

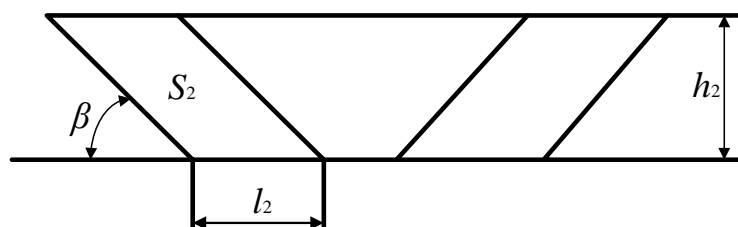


图5-2 填充焊层高示意图

Fig. 5-2 Schematic diagram of filling welding height

$$l_2 \times h_2 = S_2 \quad (5-3)$$

$$h_2 = l_2 \sin \beta \quad (5-4)$$

式中, S_2 为填充焊的截面积。

联立式 (5-3) 和式 (5-4) 可以求得填充焊的层高 h_2 , 然后根据视觉系统测得的坡口高度 d_h 和打底焊层高 h_1 确定填充焊的层数 n , 计算公式如 (5-5) 所示。

$$n = (d_h - h_1) / h_2 \quad (5-5)$$

当 n 为整数时, 焊接的总层数为 $n+1$; 当 n 不是整数时, 遵循四舍五入的原则, 即

当 $n \leq [n] + 0.5$ 时, 焊接总层数为 $[n] + 1$, 盖面焊层高为 $h_3 = (n - [n]) \times h_2$ 。当 $n > [n] + 0.5$, 焊接层数为 $[n] + 2$, 盖面焊层高为 $h_3 = (n - [n]) \times h_2$ 。

(2) 焊接道数规划

打底焊的焊层空间比较小, 并且焊接质量要求高, 通常情况下只需要焊接一次就可以完成打底焊, 因此打底焊的焊道数为 $N_1 = 1$ 。然后通过式 (5-6) 计算得到每层下底层的焊缝宽度。

$$i_w = \begin{cases} 0, & i = 1 \\ \frac{2(h_1 + h_2 \times (i - 2))}{\tan \beta}, & 2 \leq i \leq n \end{cases} \quad (5-6)$$

式中, i_w 为第 i 层的下底层焊缝宽度, h_1 和 h_2 为层高。得到每层的下底层宽度后, 通过焊道宽度计算得到每层的道数。焊接道数 $N_i = i_w / l$, 当 i 为 2 时, $l = l_2$, 当 i 为 3 时, $l = l_3$ 。在实际规划过程中, 焊接道数为整数, 因此当 i_w / l 不能整除时, 遵循四舍五入的原则。

至此确定焊缝坡口的层数和道数, 为后续焊枪姿态规划中的轨迹规划奠定基础。

5.2.2 焊接顺序确定

焊接顺序的确定, 不仅关系着后续焊枪姿态角的角度规划, 同时也关系着热变形对坡口的影响。因此焊接顺序的确定非常重要。对中厚板的焊接顺序一般有两种顺序, 一种是顺序型焊接, 每一层的最后一个道次位于侧壁处, 如图 5-3 (a) 所示, 一种是对称型焊接, 每一层的最后一个道次位于每一层的中间, 如图 5-3 (b) 所示。

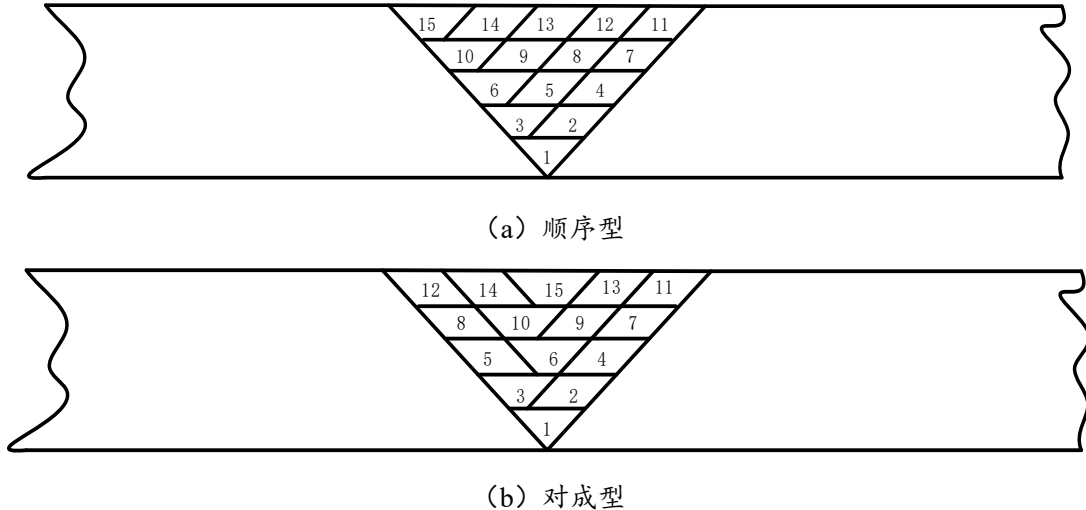


图5-3 焊接顺序

Fig. 5-3 Welding sequence

本文为了保证焊缝质量, 选用对称型焊接, 使得焊缝左右两边受热均匀, 降低变形量。因此本文采用 (5-3) (b) 的焊接顺序编号进行中厚板焊接。

5.2.3 焊枪姿态规划

焊枪姿态规划主要分为两部分：焊接轨迹和焊枪姿态角。焊接轨迹的功能主要是完成每一道次的焊缝坡口扫描和焊接完成每一道次。而焊枪姿态角主要是为了保证焊接电流和焊接电压的输出，进而确保焊接质量。

(1) 焊枪姿态角规划

确定好层数和道数以及焊接顺序后，设置每一个道次的焊枪姿态角。将焊枪垂直与工件时，姿态角为 0° 。根据设置的焊接顺序，焊枪姿态角除了焊接每层的最后一个道次和打底焊时不需要调整，焊接其他道次都需要做出相应的调整。

焊枪姿态角主要由焊道的位置和焊缝的侧壁之间的关系得到的。在图 5-1 中将焊接道次的截面积简化为三角形、菱形和梯形。由于打底焊为三角形且每一个层的最后一个道次为梯形，因此焊枪姿态角只针对菱形的焊接道次进行规划。

将菱形截面焊道对角线的交点作为 TCP 点，也就是焊接点，然后将焊枪绕着远离侧壁的方向旋转 10° （顺时针旋转为正，逆时针旋转为负），完成焊枪姿态规划。如图 5-4 所示，为焊枪姿态角位置调整示意图。

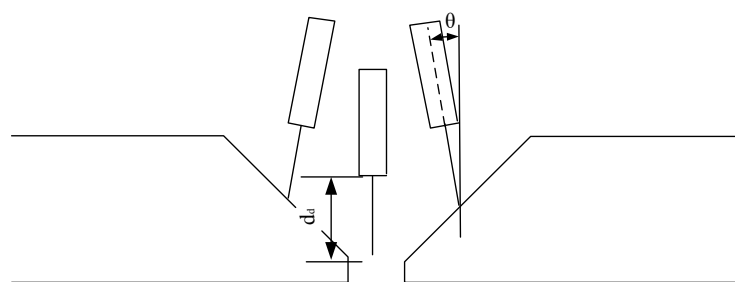


图5-4 焊枪姿态角

Fig. 5-4 Attitude Angle of welding torch

(2) 焊接轨迹规划

焊接轨迹的功能主要是完成每一道次的焊缝坡口扫描和焊接完成每一道次。焊缝扫描的轨迹由示教器进行示教得到，保证每次扫描得到的焊缝图像，焊枪的位姿都是一样的，从而提高采集效率和坐标转换的效率。焊接轨迹则是由相机采集每一道次的焊缝图像，通过前三章的内容确定焊接的起始点和终止点。

由于扫描一次焊接一次方法需要不断地计算每一层的焊接轨迹，使得焊接效率较低，因此本文针对这个问题，采用焊接机器人离线编程对机器人的焊接轨迹进行重新规划。首先控制机器人对焊接工件的打底焊进行轨迹示教，示教完成后接着进行焊缝扫描的轨迹进行示教，最后将两个轨迹合成一个轨迹，完成打底焊的焊接轨迹规划。然后通过上位机将每个道次的起点坐标与相应的姿态角发送给机器人，使机器人自动调整轨迹完成每个道次的规划。如图 5-5 和 5-6 分别为焊接轨迹的部分离线编程代码和上位机开发界面。

```

30 *****
31 PROC main()
32     !Add your code here
33     SocketSever;
34 ENDPROC
35
36 PROC SocketSever()
37     VAR socketdev server_socket;
38     VAR socketdev client_socket;
39     VAR string receiveFormClientMsg;
40     VAR bool timeout;
41     !robot movement max waittime(s)
42     VAR num WAIT_MAX:=3600;
43     !socket receive message max waittime(s)
44
45     SocketClose server_socket;
46     WaitUntil SocketGetStatus(server_socket)=SOCKET_CLOSED;
47     SocketCreate server_socket;
48     SocketBind server_socket,"127.0.0.1",8082;
49     SocketListen server_socket;
50     SocketAccept server_socket,client_socket;
51     WHILE TRUE DO
52         SocketReceive client_socket\Str:=receiveFormClientMsg;
53         rHandleData(receiveFormClientMsg);
54         Path_10;
55     ENDWHILE
56     ERROR
57     RETURN ;

```

图5-5 部分离线编程代码

Fig. 5-5 Part of the offline programming code

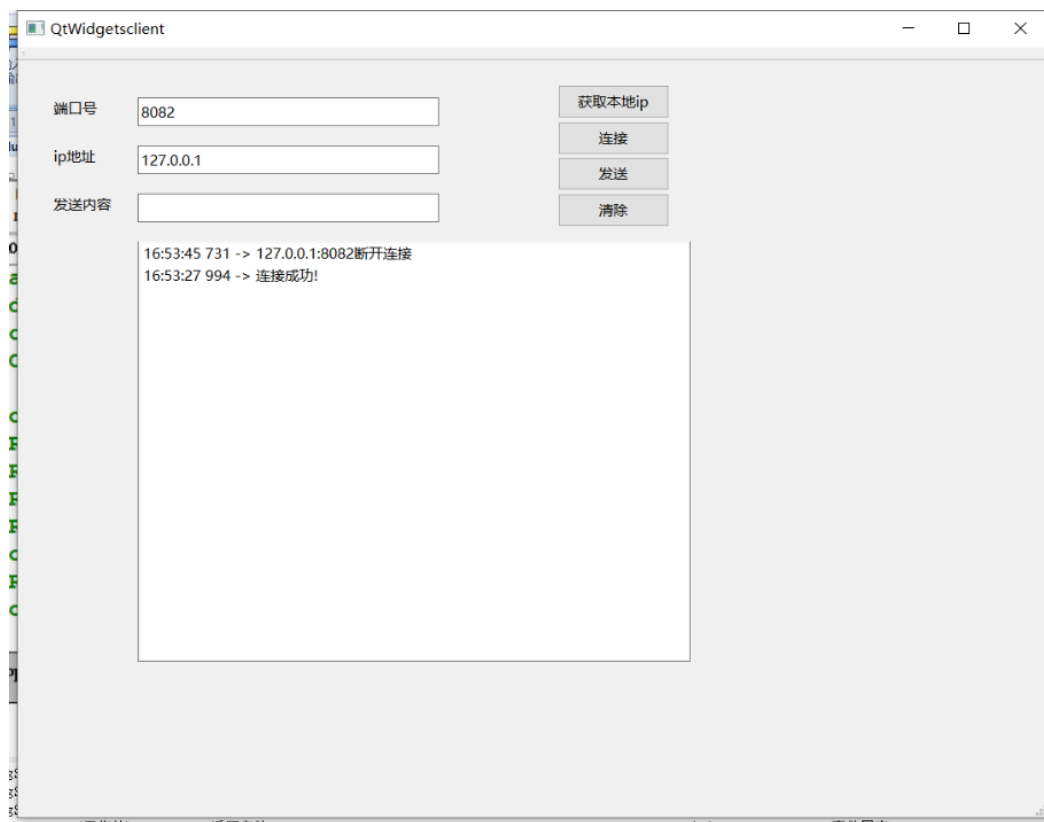


图5-6 上位机开发界面

Fig. 5-6 Upper computer development interface

5.3 焊接实验

在完成视觉系统标定、图像采集及图像处理和多层多道焊规划后,就可以控制机器人进行焊接实验。首先通过上位机与机器人建立 socket 通讯,然后控制机器人进行焊缝扫描,采集图片,计算特征点和三维坐标点,最后将每个道次的焊接起点发送给机器人完成焊接。

5.3.1 实验条件和方法

搭建实验平台,进行焊接实验,实验平台基于第二章的焊接系统构成,如图 5-7 所示焊接工件的高度、宽度和长度分别为 20mm、100mm、200mm,测量误差在 1mm 左右,将两个焊接工件对接形成的焊缝长 200mm、坡口高度 20mm,宽度 20mm,坡口角度为 60° 。焊接方式采用 MAG 焊,保护气体采用 CO_2 。



图5-7 焊接工件

Fig. 5-7 Welding workpieces

使用示教器对焊缝的打底焊轨迹和焊缝扫描轨迹进行示教,完成焊缝轨迹规划;然后结合视觉检测系统和图像处理算法得到焊缝的宽度、高度和每个道次的焊接点。根据得到的焊缝坡口数据得到焊接的道数、层数和每个道次焊枪的姿态角,通过上位机将每个道次的焊接点坐标和焊枪的姿态角发送给机器人,完成中厚板的焊接。最后将机器视觉获得的焊缝高度、宽度和焊接点坐标与实际焊接过程中人工测量的宽度、高度和焊接点做误差分析。

5.3.2 焊道编排和工艺规划

根据中厚板的焊接经验,结合实验工件的坡口角度、高度和宽度,将焊层和焊道规

划为 4 层 10 道，焊接顺序采用对称式焊接，如图 5-8 所示。

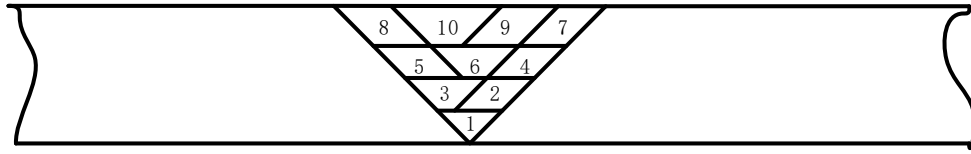


图 5-8 焊道编排

Fig. 5-8 Weld pass arrangement

焊枪轨迹由示教器进行示教，完成焊接轨迹和焊缝扫描轨迹。然后根据工艺实验确定每一个道次的焊接参数，如表 5-4 所示。

表5-4 焊接工艺参数

Table 5-4 Welding process parameters

焊接序号	焊接电流/A	焊接电压/U	送丝速度/W	焊接速度/V	姿态角/ θ
1	150	22.8	3.9	6	0
2	130	21.3	3.9	5	-10
3	130	21.3	3.9	5	0
4	130	21.3	3.9	5	-10
5	130	21.3	3.9	5	10
6	130	21.3	3.9	5	0
7	130	21.3	3.9	5	-10
8	130	21.3	3.9	5	10
9	130	21.3	3.9	5	-10
10	130	21.3	3.9	5	10

在焊接完一个道次后，扫描获得焊缝图像，然后通过图像处理算法和坐标变换得到下一个焊接道次的焊接点的坐标，最后再通过上位机控制机器人进行焊接。

5.3.3 实验结果分析

扫描打底焊获得其焊缝图像，通过图像处理和特征点算法得到打底焊的特征点，然后通过坐标变换得到三维坐标。由于打底焊的特征点不仅需要确定焊接点，而且也需要获得焊缝坡口的高度和宽度来完成焊接轨迹规划，因此，先控制机器人末端沿着焊缝移动，每移动 10mm 采集一张照片，总共采集 21 组照片，计算出高度和宽度，并且与实

际测量值进行对比,分析其误差。如表 5-5 所示,坡口的高度误差和宽度误差均在 1mm 以内。

表5-5 焊缝高度和宽度

Table 5-5 Weld height and width

图像序号	计算宽度/mm	误差/mm	计算高度/mm	误差/mm
1	20.17	0.17	19.94	-0.06
2	19.75	-0.25	19.31	-0.69
3	19.83	-0.17	19	-1
4	20.58	0.58	19.72	-0.28
5	19.4	-0.6	20.198	0.198
6	19.841	-0.159	19.899	-0.101
7	20.16	0.16	20.089	0.089
8	19.834	-0.166	18.92	-1.08
9	20.629	0.629	20.005	0.005
10	19.845	-0.155	19.1	-0.9
11	19.36	-0.64	19.625	-0.375
12	20.626	0.626	19	-1
13	19.38	-0.62	20.38	0.38
14	20.629	0.629	19.812	-0.188
15	19.375	-0.625	19.623	-0.377
16	19.678	-0.322	19.1	-0.9
17	20.324	0.324	19.81	-0.19
18	21.118	1.118	19.318	-0.682
19	19.681	-0.319	19.75	-0.25
20	20.629	0.629	19.243	-0.757
21	19.676	-0.324	19.431	-0.569

分析完坡口的高度与宽度误差后,通过上位机对机器人发送打底焊的焊接指令,在

焊接完成后，焊枪走完焊接轨迹，接着进行扫描轨迹，获得第二层的焊缝图像，通过图像处理算法和坐标变换得到第二层焊接点的三维坐标。然后控制机器人测量第二层焊接点的实际三维坐标，测量完成后。按照焊接顺序，将计算得到的三维坐标与其对应的姿态角发送给机器人完成第二次焊接。按照第二层的焊接实验步骤完成后续的第三层、第四层焊接，如图 5-9 为实际焊接过程的焊缝照片。

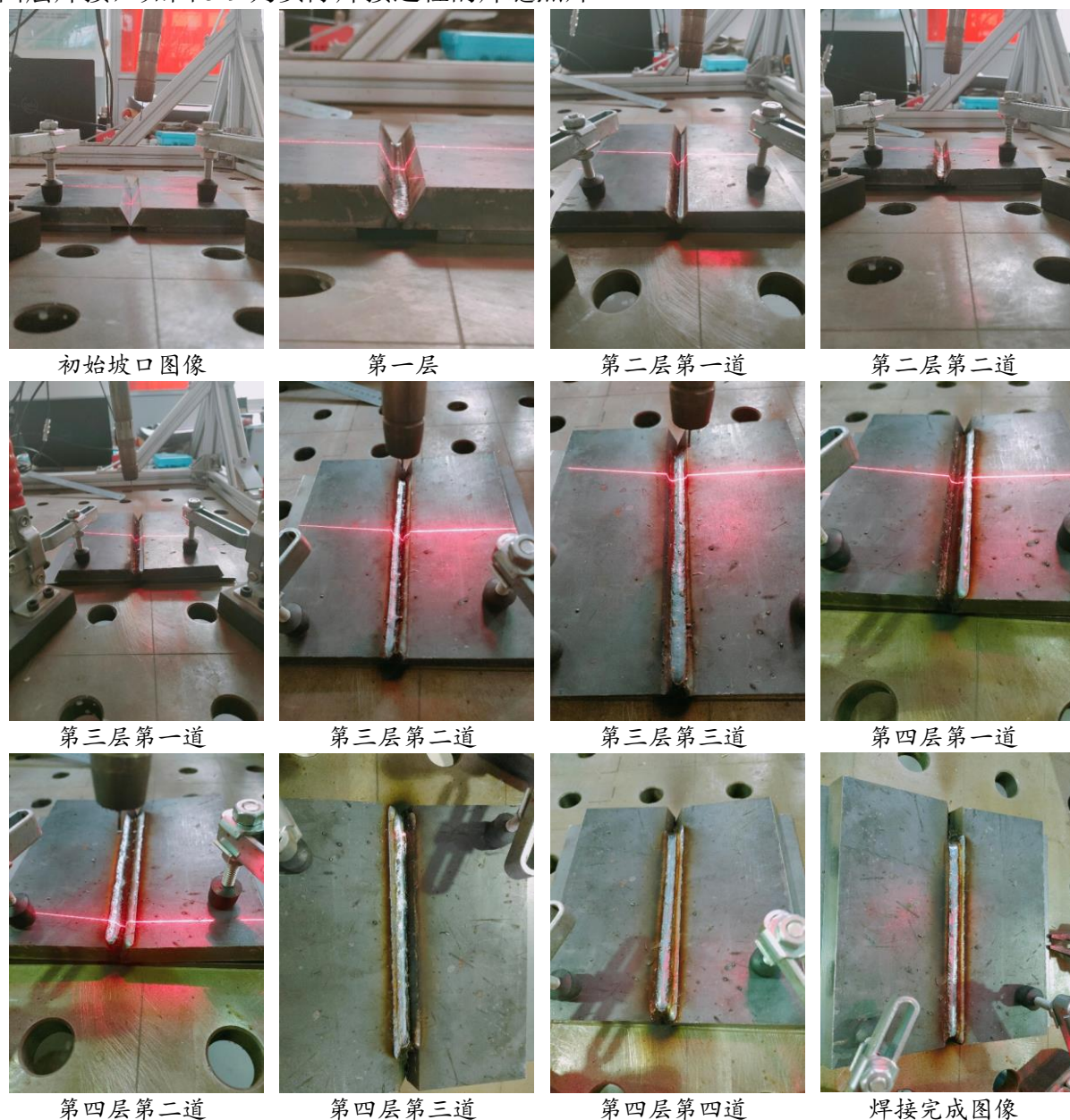


图5-9 焊接过程图像

Fig. 5-9 Welding process image

结合第四章获得的第一层和第二层和第三层的焊接特征点，通过坐标变换计算的焊接点的三维坐标，与实际测量的坐标做误差分析。分别从 x 、 y 、 z 三个方向进行误差分析，最后对空间的整体误差做分析，如表 5-6 所示。

表5-6 焊缝数据

Table 5-6 Weld data

图像采集位置	焊接层数	实际坐标	计算坐标	实际偏差	
(649.16,1060.76,166.3)	第一层	(649.16,1060.83,79.5)	(649.944,1060.582,78.76)	1.106236864	
	第二层	(647.66,1060.61,83.4)	(647.873,1060.397,82.958)	0.534885034	
		(651.81,1060.75,83.6)	(650.868,1060.178,83.079)	1.219011485	
		(646.79,1060.77,87.14)	(645.779,1061.161,86.664)	1.183882596	
	第三层	(649.46,1060.45,87.12)	(649.836,1061.099,86.531)	0.953676046	
		(652.35,1060.52,88.04)	(652.939,1060.645,87.59)	0.751695417	
		(645.32,1060.56,91.23)	(646.043,1060.129,90.779)	0.95492984	
	第四层	(648.83,1060.88,91.02)	(649.321,1061.103,90.349)	0.860843191	
		(651.23,1060.34,91.13)	(651.102,1060.902,90.985)	0.594350906	
		(654.77,1060.54,91.31)	(655.211,1060.418,90.318)	1.09244176	
	(649.2,1110.83,166.41)	第一层	(649.06,1110.93,87.59)	(649.187,1109.913,87.109)	1.132156791
		第二层	(647.56,1110.53,79.52)	(646.672,1109.794,78.896)	1.311341298
(641.75,1110.55,83.55)			(641.096,1111.374,83.177)	1.116163518	
(646.56,1110.82,87.13)			(646.137,1111.125,86.712)	0.668339734	
第三层		(649.34,1110.36,88.24)	(649.496,1110.858,87.973)	0.586198772	
		(652.26,1110.68,87.08)	(652.992,1109.724,86.581)	1.30336526	
		(645.24,1060.42,91.2)	(645.663,1060.563,90.749)	0.634648722	
第四层		(648.51,1060.31,91.29)	(648.854,1059.964,90.756)	0.723331183	
		(651.33,1060.22,92.01)	(651.105,1059.588,91.679)	0.748070852	
		(654.21,1060.65,91.45)	(654.542,1060.974,91.029)	0.626451115	
(649.19,1160.55,166.27)		第一层	(649.09,1160.89,79.44)	(649.405,1161.068,78.817)	0.720442919
		第二层	(647.65,1160.54,83.59)	(648.228,1161.267,82.854)	1.185035443
	(651.85,1160.82,83.44)		(651.607,1161.453,82.882)	0.878124137	
	(646.8,1160.71,87.25)		(646.175,1161.158,86.657)	0.971070543	
	第三层	(649.61,1160.59,88.31)	(649.432,1161.571,87.99)	1.047112697	
		(652.44,1160.47,87.11)	(653.161,1160.635,86.729)	0.832001803	
		(645.62,1060.34,91.11)	(646.071,1060.095,90.558)	0.753743988	
	第四层	(648.33,1060.52,91.16)	(647.818,1060.985,90.793)	0.782980204	
		(651.19,1060.8,91.32)	(651.903,1060.468,91.026)	0.83966005	
		(654.52,1060.32,91.6)	(653.868,1060.861,91.049)	1.010636433	

通过表 5-6 得到焊缝位置的 x , y , z 三个方向的误差以及空间整体误差如图 5-10 所示。通过分析特征点在 x 、 y 、 z 三个方向的误差分别在 0.50mm、0.468mm、0.495mm 以内, 整体误差在 1mm 左右, 最大误差为 1.3mm, 符合实际的焊接要求。

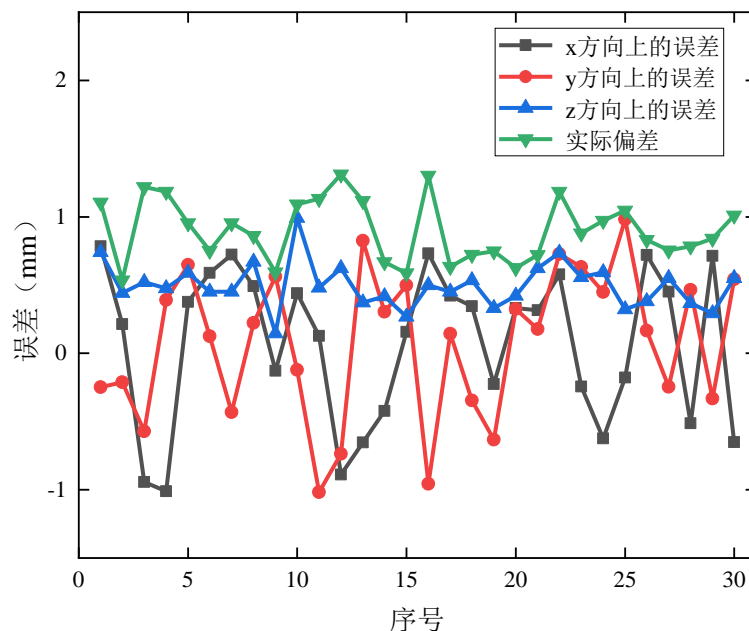


图 5-10 焊缝位置误差

Fig. 5-10 Weld position error

5.4 本章小结

本章首先分析了中厚板的焊接工艺参数, 然后结合上位机从层数与道数、焊接顺序和焊枪姿态规划三个方面提出一种新的轨迹规划方法, 从而对中厚板进行多层多道焊规划。通过实验得到焊接过程中每个道次的焊接工艺参数, 结合第三章和第四章的内容对计算得到的焊接点的三维坐标与实际焊接点的三维坐标进行误差分析, 实际焊接点的三维坐标是控制焊接机器人进行测量得到的。最后使用新的轨迹规划方法完成中厚板的焊接, 同时通过误差对自动化焊接计算得到的三维坐标进行修正。

第六章 总结与展望

6.1 总结

针对焊接机器人智能化程度不高的问题。设计了一套机器视觉引导的智能焊接机器人系统。研究了视觉检测系统的工作原理,对视觉系统进行了内标定和外标定;提出了一种激光条纹中心线和特征点提取算法,并结合视觉系统的标定参数得到焊缝坡口和焊接点的信息;分析了中厚板焊接路径,提出了一种适应中厚板自动化焊接的轨迹规划方法;最后对 V 型坡口进行了焊接实验,初步验证本文智能焊接机器人系统的可行性。本文的工作总结如下:

(1) 基于机器视觉引导的智能焊接机器人系统设计。基于焊缝图像质量要求选择 MER-231-41GC-P 的大恒水星相机、FU650AB100-GD16-015 激光器,并且选用激光器倾斜、相机垂直的布置方案,以便实时获得焊接过程高质量、低噪声和特征明显的焊缝坡口图像;利用 C++、Opencv 库和 Qt 等工具以及模块化的思想,开发了视觉系统标定软件、图像处理软件 and 上位机软件;最终完成中厚板焊接机器人智能化系统的设计。

(2) 视觉系统标定方法研究。首先,在相机成像理论的基础上建立非线性成像模型,使用张正友标定方法求解非线性成像模型的参数,并且利用畸变系数对标定板图像进行矫正;接着对激光平面标定和手眼标定参数求解公式进行推导,通过最小二乘法和 TSAI 两步法完成标定,实现二位像素坐标到三维空间坐标的转换;最后利用 10 个型号不同的量块进行实验验证。结果表明整个视觉系统的检测误差在 0.24mm 内,可以满足实际焊接要求。

(3) 图像处理算法研究。根据实际情况选择合适的预处理方法,进而得到准确的焊缝激光条纹图像;接着,使用改进的灰度重心法提取激光条纹中心线,通过与传统的灰度重心法对比,改进后的算法鲁棒性更高,提取的中心线更加符合坡口形状;针对中厚板焊接过程中不规则的激光条纹特征点的提取问题,提出了一种基于 Douglas-Peucker 算法的特征点提取算法。实验证明特征点在 x 、 y 、 z 三个方向的误差分别在 0.50mm、0.468mm、0.495mm 以内,空间整体误差在 1.3mm 以内,可以满足实际焊接要求。

(4) 焊接轨迹方法研究。通过实验法确定多层多道焊的焊接参数;首先利用视觉传感系统获得焊缝坡口的三维信息;接着使用等高法确定焊接层数和道数;然后焊接过程中热变形的影响确定焊接顺序;最后根据焊接道数确定焊枪姿态,完成中厚板焊接的轨迹规划。搭建实验平台,结合上位机系统进行自动化焊接实验。实验表明本文设计的智能焊接机器人系统能够很好的完成焊接任务,验证了系统的有效性,为进一步发展中厚板焊接机器人的自动化提供了参考。

6.2 展望

本文设计了一套中厚板焊接机器人智能化系统，从视觉系统的标定、焊缝特征点的获取和机器人的轨迹规划方法三个方面进行了研究，并通过实验验证了这三部分在智能化焊接机器人系统中的有效性，但是还是有许多不足之处和深入研究的地方：

（1）在视觉检测系统方面，本文通过采集两组照片完成系统的内标定和外标定，操作复杂、效率低下。后续可以研究通过采集一组照片，在保证精度的同时完成视觉系统的内标定和外标定，减少因采集图片导致标定过长的时间，提高标定效率。

（2）由于在实际应用过程中因弧光、飞溅等不利的影响导致数据在采集过程中受到影响，不利于后续的图像处理，导致图像处理算法无法正常运行，其次相机长时间运行产生的高温会对设备的稳定性产生影响，因此从硬件方面可以考虑选取适应性更强、性能更好的设备；从软件方面来看，可以开发更多的算法，来提高标定精度、中心线和特征点的提取精度。

（3）建立更加符合中厚板实际焊接过程的坡口模型，提高焊接质量，同时进一步设计和优化标定算法界面、图像处理算法界面，完善自动化系统，使焊接机器人在焊接过程中通过反馈信息实时调整焊接工艺参数，保证焊接质量和焊接路径的稳定性。

参考文献

- [1] 孙斌,王海晨,李建萍,等.45mm 厚板 EH36 级钢 SEGARC 法焊接工艺试验及应用[J].造船技术,2010,(04):36-39.
- [2] HanSur Bang,HeeSeon Bang,ChanSeung Ro, et al. Mechanical Behavior of the Weld Joints of Thick Steel Plates Produced by Various Welding Processes[J]. Strength of Materials, 2015, 47: 213-220.
- [3] S.B. Chen,N. Lv. Research evolution on intelligentized technologies for arc welding process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2014, 16: 109-122.
- [4] X. Wan,Y. Wang,D. Zhao. Quality evaluation in small-scale resistance spot welding by electrode voltage recognition[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2016, 21: 358-365.
- [5] Sotiris Makris,Kosmas Alexopoulos,George Michalos, et al. An Agent-Based System for Automated Configuration and Coordination of Robotic Operations in Real Time—A Case Study on a Car Floor Welding Process[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2020, 4(3): 95.
- [6] Sanders D, Tewkesbury G, Ndzi, et al. Improving automatic robotic welding in shipbuilding through the introduction of a corner-finding algorithm to help recognise shipbuilding parts [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2012, 17(2): 231-238.
- [7] 吴林,陈善本.智能化焊接技术[M].北京.国防工业出版社,2000:20-25.
- [8] Lv N, Xx Y L, Zhang Z, et al. Audio sensing and modeling of arc dynamic characteristic during pulsed Al alloy GTAW process [J]. Sensor Review, 2013, 33(2): 141-156.
- [9] Chen S. On Intelligentized Welding Manufacturing [M].Advances in intelligent systems and computing. Cham: Springer International Publishing, 2015: 3-34.
- [10] Spennenberg D, Kirchner F. Scorpion: A biomimetic walking robot[J]. Robotik, 2002, 1679: 677-682.
- [11] Sharma V, Simpson R, Lopresti E, et al. Evaluation of semiautonomous navigation assistance system for power wheelchairs with blindfolded nondisabled individuals [J]. Journal of Rehabilitation Research and Development, 2010, 47(9): 877-890.
- [12] Fernando Valdés,Roberto Iglesias,Felipe Espinosa, et al. Implementation of robot routing approaches for convoy merging manoeuvres[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2012, 60: 1389-1399.
- [13] Tam T J, Chen S B, Zhou C J. Robotic welding, Intelligent and automation. Springer Verlag, 2004, 15(3): 180-195.
- [14] Fang Zaojun,Xu De,Tan Min. A Vision-Based Self-Tuning Fuzzy Controller for Fillet Weld Seam Tracking[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16: 540-550.
- [15] Hong s H, Park J H, Kwon K H. A distance learning system for robotics[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2007: 523-530.
- [16] Xu E, Xu G, Tang X. A visual seal T1 tracking system for robotic arcwelding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 37(12): 70-75.
- [17] Qian Qian Wu,Jong-Pyo Lee,Min-Ho Park, et al. A study on the modified Hough algorithm for image processing in weld seam tracking[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29: 4859-4865.
- [18] Syed Quadir Moinuddin,Syed Shaul Hameed,Ashok Kumar Dewangan, et al. A study on weld defects classification in gas metal arc welding process using machine learning techniques[J]. Materials Today:

- Proceedings, 2021, 43: 623-628.
- [19] 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. Physica*, 2019, 297: 111-533.
- [20] 张洵. 基于激光视觉传感的机器人焊接系统及多层多道规划研究[D]. 上海交通大学, 2015.
- [21] 彭铖, 张爱军. 一种线结构光亚像素中心坐标提取方法[J]. *激光杂志*, 2023, 44(01): 56-61.
- [22] 王健. 基于单目视觉的机器人焊缝识别与轨迹规划[D]. 上海交通大学, 2012.
- [23] Nianfeng Wang, Kaifan Zhong, Xiaodong Shi, et al. A robust weld seam recognition method under heavy noise based on structured-light vision[J]. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 2020, 61: 101-821.
- [24] Lu X, Gu D, Wang Y, et al. Feature Extraction of Welding Seam Image Based on Laser Vision[J]. *IEEE sensors journal*, 2018(11): 18-37.
- [25] Fan Junfeng, Deng Sai, Ma Yunkai, et al. Seam Feature Point Acquisition Based on Efficient Convolution Operator and Particle Filter in GMAW[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17: 1220-1230.
- [26] 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.
- [27] 曹学鹏, 脱帅华, 张弓等. 焊接机器人焊缝跟踪方法及路径规划研究[J]. *工程科学与技术*, 2022, 54(02): 196-204.
- [28] 雷正龙, 吕涛, 陈彦宾等. 基于扫描激光视觉传感的焊缝图像特征信息识别[J]. *焊接学报*, 2013, 34(05): 54-58+115-116.
- [29] 王树强, 周游, 陈昊雷等. 基于激光视觉的钢结构焊缝图像处理系统[J]. *焊接学报*, 2022, 43(02): 101-105+112+120.
- [30] 刘燕, 王刚, 王国栋等. 用于机器视觉的焊缝图像获取及图像处理[J]. *计算机工程与应用*, 2014, 50(03): 135-140.
- [31] 顾帆. 基于激光传感的机器人 MAG 焊变间隙自适应规划方法[D]. 上海交通大学, 2017.
- [32] Runquan Xiao, Yanling Xu, Zhen Hou, 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.
- [33] 杨光远. 多层多道焊路径自动规划及双机器人协调研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2008..
- [34] 唐新华, Paul Drews. 机器人三维可视化离线编程和仿真系统[J]. *焊接学报*, 2005, (02): 64-68+8.
- [35] 张华军. 大厚板高强度钢双面双弧焊新工艺及机器人自动化焊接技术[D]. 哈尔滨工业大学, 2011.
- [36] 温永策. 厚板机器人多层多道焊接路径规划研究[D]. 山东大学, 2019.
- [37] 杨乘东, 钟继勇, 陈玉喜等. 基于视觉识别的多层多道路径规划修正[J]. *上海交通大学学报*, 2015, 49(03): 297-300.
- [38] S. Yamane, H. Yamamoto, T. Ishihara, T. Kubota, K. Eguchi, K. Oshima. Adaptive control of back bead in V groove welding without backing plate. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2004(9): 138-148.
- [39] Satoshi YAMANE, Toru NAKAJIMA, Hikaru YAMAMOTO. Cooperative Control of Robotic Welding System in One Side Backing less V Groove Welding. *Materials Science Forum*. 2008. 580: 339-342.
- [40] Akihiko ASAL, Fujisawa-shi. Arc Welding Robot Control System and Method Thereof [P]. 美国专利: US20080240034. 2013-07-16.
- [41] Hu Hualin, Li Jing, Li Fang, Zhu Wei, Neural-fuzzy variable gap control method for GMAW pipe-line welding with CCD camera, *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 130: 2358-2363.

- [42] 潘海鸿,李睿亮,刘冠良,等.基于激光视觉系统的多层多道焊接路径规划[J].组合机床与自动化加工技术,2021,(11):23-26+30.
- [43] 朱灯林,肖胜,侯胡的等.弧焊机器人焊枪姿态的自动规划[J].上海交通大学学报,2004,(09):1472-1475.
- [44] 孙俊龙.工业机器人焊缝识别与轨迹规划方法研究[D].陕西科技大学.
- [45] 范明洋,嵇保健,洪磊.基于线结构光的曲线焊缝焊接技术[J].组合机床与自动化加工技术,2017,(09):142-145.
- [46] Doyoung Chang,Donghoon Son,Jungwoo Lee, et al. A new seam-tracking algorithm through characteristic-point detection for a portable welding robot[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2012, 28: 1-13.
- [47] 李振雨,王好臣,王泽政等.基于激光跟踪的 V 形坡口焊接机器人[J].科学技术与工程,2018,18(17):39-43.
- [48] 朱晓丽.基于 WinCE 的线激光图像采集与处理的研究与实现[D].南昌大学,2016.
- [49] Zhang Y C, Han J X, Fu X B, et al. An online measurement method based on line laser scanning for large forgings[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70(1-4): 439-448.
- [50] Takhtfooladi M A, D Sharifi. A comparative study of red and blue light-emitting diodes and low-level laser in regeneration of the transected sciatic nerve after an end to end neurorrhaphy in rabbits[J]. Lasers in Medical Science, 2015, 30(9): 2319-2324.
- [51] Zhang Zheng you. A Flexible New Technique for Camera Calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2000,22(11) : 1330-1334.
- [52] 胡韵松,王军民,付嘉玮等.基于线结构光的亚像素精度焊缝提取方法研究[J].计算机测量与控制,2020,28(07):162-166.
- [53] 马喜平,李迪,姚侠楠等.基于 Tsai 两步法的视觉点胶系统相机标定方法[J].自动化与仪表,2018,33(05):1-4+18.
- [54] T. Moons, L. Van Gool, M. Proesmans, et al. Affine Reconstruction from Perspective Image Pairs With a Relative Object-Camera Translation in Between[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(1): 77-83.
- [55] 杨亚男, 贾渊.基于改进遗传算法的摄像机自标定方法[J].计算机测量与控制, 2020, 28(02):188-191+196.
- [56] 贾华宇,崔海华,程筱胜,等.基于单应性矩阵的线结构光传感器标定方法[J].传感器与微系统, 2018,37(09):148-150+154.
- [57] 高彤,陈鸿,王晋祺,等.基于 LM 算法的接触式轮廓扫描系统参数标定[J].电子测量技术, 2021, 44(01):65-69.
- [58] F. Zheng, B. Kong. Calibration of Linear Structured Light System by Planar Checkerboard[C]. Proceedings of International Conference on Information Acquisition. Washington, IEEE Computer Society, 2004: 344-346.
- [59] Z.X. Xie, X.M. Wang, S.K. Chi. Simultaneous Calibration of the Intrinsic and Extrinsic Parameters of Structured-Light Sensors[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 58:9-18.
- [60] Z.Z. Wei, M. Xie, G.J. Zhang. Calibration Method for Line Structured Light Vision Sensor Based on Vanish Points and Lines[C]. International Conference on Pattern Recognition. Proceedings, IEEE, 2010, 794-797.

-
- [61] 于龙龙,李艳文,栾英宝,等.基于二维平面靶标的线结构光标定[J].仪器仪表学报,2020,41(06):124-131.
 - [62] Tsai R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1987, 3: 323-344
 - [63] 景晓军,李剑峰,熊玉庆.静止图像的一种自适应平滑滤波算法[J].通信学报,2002,(10):6-14.
 - [64] 郑佳慧.基于均值和中值滤波的关联成像去噪方法研究[D].南京邮电大学,2023.
 - [65] 朱伟.OpenCV 图像处理编程实例[M].北京电子工业出版社,2016.
 - [66] 顾文娟,丁灿,魏金等.基于双边滤波 MSR 与 AutoMSRCR 融合的低光照图像增强[J].光学精密工程,2023,31(24):3606-3617.
 - [67] Wang Z, Wang E, Zhu Y. Image segmentation evaluation: a survey of methods[J]. Artificial Intelligence Review, 2020, 53: 5637-5674.
 - [68] 贺国旗,陈向奎,韩泉叶等.一种自动提高图像信噪比的方法[J].计算机技术与发展,2015,25(12):60-63.
 - [69] 王强,马利庄.图像二值化时图像特征的保留[J].计算机辅助设计与图形学学报,2000,(10):746-750.
 - [70] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
 - [71] 柳林.基于 OpenCV 的数字图像处理技术[M].杭州:浙江大学出版社,2020.
 - [72] 郭蓓蓓.接缝激光跟踪特征快速识别图像处理技术研究[D].南京理工大学,2013.
 - [73] Yuehua Li, Jingbo Zhou, Fengshan Huang, et al. Sub-Pixel Extraction of Laser Stripe Center Using an Improved Gray-Gravity Method †[J]. Sensors, 2017, 17(2): 8-14.
 - [74] 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.
 - [75] 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.
 - [76] Hua jun Zhang, Hanzhong Lu, Chun bo Cai, Robot Path Planning in Multi-pass Weaving Welding for Thick Plates, in, T.-J. Tarn, Robotic Welding, Intelligence and Automation, Berlin, 2011: 351-359.