

西安工业大学

硕士学位论文

基于图像技术的焊接机器人视觉算法研究

姓名：张海刚

申请学位级别：硕士

专业：控制理论与控制工程

指导教师：谭宝成

20090505

基于图像技术的焊接机器人视觉算法研究

学 科：控制理论与控制工程

研究生签字：1128 海刚

指导教师签字：谭文斌

摘 要

目前国内核电站所采用的焊接工艺基本为大坡口的手工焊和半自动焊接方法,对于核岛主冷却剂管道壁厚大管件而言,往往一个对接焊缝需要数位焊工通过连续数日的高强度施焊才能完成且质量难以保证。国内的部分核电安装企业为了解决这个问题引进了自动焊接机器人。焊接机器人通过接触式传感器实时检测焊缝的偏差来调整焊炬的位置,但其有跟踪精度不高、对坡口加工要求高的缺点。视觉传感器具有跟踪精度高,动态响应快的特点,再结合现代图像处理技术能够很好的完成焊缝偏差自动检测、自动跟踪的任务。本文主要对主管道焊缝图像处理算法和焊缝偏差控制器的设计进行研究。

本论文对焊缝图像处理的方法进行对比分析,找出了适合主管道焊缝图像提取的算法。首先,焊缝图像经过快速中值滤波除去图像的噪声干扰,然后利用基于迭代阈值分割和轮廓提取的边缘检测算法提取完整焊缝图像边缘信息,最后利用改进的 Hough 变换算法找出焊缝的左右边缘,进一步计算出焊炬的偏差大小和方向为偏差的调整打下了基础。模糊自适应 PID 控制充分结合普通 PID 控制和模糊逻辑控制的优点,是在一般 PID 控制系统的基础上附加一个模糊控制规则环节对 PID 参数进行在线修改的自适应控制系统,具有动态性能好、上升时间短的优点。本文采用自适应模糊 PID 控制作为焊缝偏差控制器,利用 Matlab 软件对控制器性能加以动态仿真,结果表明模糊 PID 控制器的控制性能优于 PID 控制性能。

本论文的研究结果为进一步改进主管道焊接机器人焊缝跟踪的方式提供了技术准备。随着国家核电投入的加大,加快施工安装机械的自动化改造迫在眉睫。焊接自动化的进步将加快工程的施工进度和施工质量,这也是本文研究的意义所在。

关键词：焊缝跟踪；图像处理；模糊控制

Study of Welding Robot Vision Algorithms Based on Image Technique

Discipline: Control Theory and Control Engineering

Student Signature: Zhang Haigang

Supervisor Signature Tan Bao cheng.

Abstract

So far the welding techniques adopted in NPP construction are manual welding and half-automatic welding with large grooves. As for welding of large pipeline such as the primary coolant pipeline in reactor building, usually it will take many welders dozens of days of intensified hard working to complete only a butt joint. And the quality of the welded joint is hard to control due to many uncertain factors such as the working environment, the state of welders, etc.

Some construction companies introduced automatic welding robot for domestic NPP construction in order to solve the mentioned problem. Though the welding robot adjusts the position of welding torch by using contact sensors to detect the real-time deviation, it can not satisfy the demand for welding due to the facts that it is low in tracking accuracy and demands a lot for groove processing. However, visual sensors are high in tracking accuracy, quick in dynamic response, they can better complete the tasks of automatic tracking and automatic checking the deviations of the welds, combining the modern image processing technology. This thesis makes a research in calculating the image processing of primary coolant pipeline welds and in designing weld deviation controller.

This thesis provides a calculating method for drawing images of primary coolant pipeline welds. At first, remove the noise distraction from the weld image by quick median filter. Then, collect the image information about the edges of the whole weld by using the calculating method for edge detection based on iterative threshold segmentation and contour extraction. And at last, find out the left and right edges of the welds by applying the improved Hough conversion formula and calculate the size and direction of the deviation of the welding torch in order to be prepared for adjusting the deviation. Adaptive fuzzy PID controller, combining the strong points of the ordinary PID control and fuzzy logic control, is an adaptive controlling system which will make a real-time modification of the PID parameters by adding a fuzzy

controller on an ordinary PID controlling system and, which is of the advantages of good dynamic performance and quick acceleration time. Adaptive fuzzy PID controller is used as weld deviation controller in this thesis. The result of simulation test on the designed controller by using the software MATLAB proves that the performance of adaptive fuzzy PID controller is better than that of ordinary PID controller.

The improvement of welding automation will definitely accelerate the NPP construction process and enhance the construction quality. The significance of this thesis lies in that its research result provides theoretical support for improving the way of weld tracking of welding robot.

Key Words: Seam Tracking; Image Processing; Fuzzy Control

学位论文知识产权声明

本人完全了解西安工业大学有关保护知识产权的规定，即：研究生在校攻读学位期间学位论文工作的知识产权属于西安工业大学。本人保证毕业离校后，使用学位论文工作成果或用学位论文工作成果发表论文时署名单位仍然为西安工业大学。学校有权保留送（提）交的学位论文，并对学位论文进行二次文献加工供其他读者查阅和借阅；学校可以在网络上公布学位论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存学位论文。

（保密的学位论文在解密后应遵守此规定）

学位论文作者签名：明海朋

指导教师签名：谭忠明

日期：2009年5月6日

学位论文独创性声明

秉承学校严谨的学风与优良的科学道德,本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知,除了文中特别加以标注和致谢的地方外,学位论文中不包含其他人已经发表或撰写过的成果,不包含本人已申请学位或他人已申请学位或其他用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了致谢。

学位论文与资料若有不实之处,本人承担一切相关责任。

学位论文作者签名: 1128 海彤

指导教师签名: 谭志明

日期: 2009年5月6日

1 绪 论

1.1 论文研究背景

近年来我国加大了对核电设施的投入,核电行业发展迅速,全国核电建设部门面临着大量的电站建设和安装任务。与之不配套的是,目前国内核电所采用的焊接工艺基本为大坡口的手工焊和半自动焊接方法,对于核岛主冷却剂管道、常规岛主蒸汽及高压旁路管道等厚壁大管件而言,往往一个对接焊缝需要数位焊工通过连续数日的高强度施焊才能完成,焊工劳动强度大,焊接效率低;同时,手工焊也受到工作环境及焊工状态等诸多不确定因素的影响,焊缝质量难以控制。

随着核电管道安装用钢管管径和壁厚的增大,我国在管道施工中也逐渐开始应用自动焊技术。管道自动焊技术由于焊接效率高,劳动强度小,焊接过程受人为因素影响小等优势,在大口径、厚壁管道建设的应用中具有很大潜力。但我国的管道自动焊接技术正处于起步阶段,自动焊问题尚未解决,管端坡口整形机等配套设施尚未成熟,这些都限制了自动焊技术的大规模应用。

焊接机器人施焊过程中,如果焊接条件基本稳定,则焊接机器人能够保证焊接质量。但由于各种因素的影响,实际的焊接条件经常发生变化,例如强烈的弧光辐射、高温、烟尘、飞溅、坡口状况、加工误差、夹具装夹精度、表面状态和工件热变形等影响会使焊炬偏离焊缝,从而造成焊接质量下降甚至失败。因此,焊接条件的这种变化要求焊接机器人能够实时检测出焊缝的偏差,并调整焊接路径和焊接参数,保证焊接质量的可靠性。人们为了使机器人在焊接过程中能实时地检测出焊缝的实际位置,开始了弧焊机器人焊缝自动跟踪技术的研究。

1.2 国内外研究成果

1.2.1 国外研究成果

1989年,日本学者 S.Murakami 等研究了基于模糊控制的弧焊机器人焊缝跟踪控制系统。系统采用电弧传感器,在强烈的弧光、高温、烟尘下,电弧传感器获得的机器人焊枪的位置和方向信息中含有很多噪声。为此,采用基于语言规则的模糊滤波器和模糊控制器来设计焊缝跟踪控制系统。1990年日本的 N.Nayak 等人采用分级控制方法设计了自适应、实时和智能焊缝跟踪器,该系统能够对未知的三维焊缝进行识别和跟踪。1994年日本人 Y.Suga 等人将神经网络运用于焊缝跟踪中,在该系统中采用了视觉传感器并用神经网络进行图像处理以获得焊缝的形状数据,实验结果表明此系统具有较强的鲁棒性,能有效地进行焊缝跟踪。此外,日本的 DALHEN 公司利用电极接触式传感器实现对焊接起始点与

终止点的自动检测,配合电弧传感器开发了 ALMEGA.GO 1 弧焊机器人配套的 LINE MASTER 系统。J.Karal 和 S.Riko 进行了一种神经网络型跟踪控制,设计了机器人关节空间和笛卡尔空间两种神经网络控制器,通过一个 2 关节 SCARA 机器人的实验表明,神经网络型控制器的路径跟踪精度比传统的机器人计算力矩控制法高的多。1995 年 H.B.Smartt 将人工神经网络和模糊控制技术同时应用于焊缝跟踪的控制,通过测量焊炬和焊缝的位置与方向偏差,应用模糊控制概念,实现焊炬的位置控制。^{[1][2]}

1.2.2 国内研究成果

在国内,清华大学潘际蜜院士、陈强教授和何方殿教授等人对弧焊跟踪系统中传感器和其中的控制系统分别进行了研究,详尽论述了用于焊缝跟踪系统的各种传感器,并提出一种基于焊缝 CCD 图像模式特征的焊缝轨迹识别的新算法,该算法将焊缝分成段,每段的灰度分布用特征向量来描述,利用前一段的特征向量来识别下一段的特征向量,从而实现焊缝识别,具有对各种坡口快速、准确地识别并能自适应局部和整体噪声等特点。天津大学赵家瑞等人利用声电匹配和聚焦透镜技术,研究出 1.15MHz 高灵敏度、高分辨率空气超声波传感器,设计了单片机信号采集、处理控制软硬件系统和纠偏执行机构,首次实现了扫描式、固定式超声传感二维自动跟踪。华南理工大学在焊缝跟踪方面主要侧重于应用视觉传感器来检测焊缝,不采用辅助光源获取焊缝图像,利用视觉传感器所获信息量大,接近人的视觉等突出优点,并将神经网络和模糊控制应用到焊缝跟踪系统中,提出了一种基于自适应共振理论神经网络的焊缝跟踪算法,即把焊缝横截面方向上的灰度分布归为若干种空间模式,并使之记忆在 ART 神经网络中,在实际焊接中获取的图像空间模式与之进行匹配程度检测,根据模式分布情况确定出焊炬与焊缝中心的偏差,以此偏差为模糊变量设计了自调整 PID 模糊控制器。该算法能够在强噪声环境中保持很高的跟踪精度,在对 TIG 焊缝跟踪进行控制实验中取得良好效果。^{[1][2][5]}

1.2.3 基于视觉的焊缝跟踪方法的发展

随着计算机视觉,图像处理以及模式识别等技术的发展,视觉信息的自适应控制弧焊机器人成了人们热衷的一个目标。在焊接过程中研究与应用的电视监视、光电传感已经是焊接中机器视觉应用的雏形,从此掀开了研究视觉跟踪的漫漫历史。70 年代末 80 年代初,涌现出了大量的光电传感控制焊接过程,由于受当时计算机运行速度的影响,机器人视觉还是基于视觉信息巨馈而进行的路径补偿。例如,由美国 Unimation 公司和日本 Kawasaki 公司合作开发的 MODEL79 系统。配置了这种视觉系统的焊接机器人,在焊接前首先需要严格地示教,然后在批量焊接中,对每一个待焊工件,先让机器人手持摄像机沿示教的路径走一遍,根据摄得的图像记下实际路径和示教路径的差别,然后沿着被校正后的路径进行焊接。同时问世的还有英国 W.F.Clocksine 等人开发的产品,基本原理是一样的。Clocksine 在总结他的系统时也认为这种方法有很多缺点,比如不能检测到实际焊接时的热畸变,而且费时费事。他提到,要做到边看边焊接就要求视觉系统在 100ms 内处理完一幅图像,

而他的系统要 2s 才能处理一幅图像。但是无论如何,在批量焊接中,由于工件安装位置偏移而带来的焊接误差已大大降低了, Clocksin 系统焊接误差低于 $\pm 0.3\text{mm}$ 。1982 年 3 月,美国的 Automatrix 公司开发了一种“单道”视觉系统 AutoVision I。这种基于视觉的焊缝跟踪系统能够一边扫描焊缝,一边完成焊接。它的摄像机装在焊枪前 4cm 处,在机器人移动过程中,摄像机不断摄取图像,并据此求出实际的焊接路径。这种系统速度达 100cm/min。但是这种焊缝跟踪系统也免不了预先示教,所以并不是真正的实时焊接。自 20 世纪 80 年代以来,由于第二代机器人研究,机器视觉作为焊接机器人智能部件得到更迅速的发展,并在焊接领域的研究与应用方面展现出更广阔前景,真正不需要任何示教的焊缝视觉跟踪系统是由瑞典 ASEA 公司首先推出的。ASEA 在 1978 年就推出了它的第一台由视觉传感制的自适应弧焊机器人,1986 年又推出了 Laser Trak 视觉跟踪系统,这种系统无须对焊缝路径进行预先示教,能自动找到焊缝的起点,并跟踪焊缝直到最后完成焊接。它能焊接 Butt, Lap, Fillet 三种类型的焊缝,焊接精度 $\pm 0.4\text{mm}$ 。焊接现在,基于视觉的焊缝跟踪技术已取得了长足的进步。但无论哪一个现存的系统都需要一定程度的示教。纵使先进的 LARS 或 Laser Trak 也还需要告诉焊缝,缺乏一定的在线识别与判断的能力。[1][5][6]

1.3 焊缝视觉跟踪系统

1.3.1 焊缝视觉跟踪系统总体结构

焊缝跟踪系统的结构一般包括视觉传感器、PC 处理机、机器人专用控制器、机器人本体及焊接设备等。视觉传感器采集到信号传送到 PC 机,经过一系列的数据处理过程和图像显示后,PC 机与机器人专用控制器进行数据通讯,然后将控制信号传送给机器人本体控制焊接过程的正确运行。在系统结构中,焊枪与机器人本体是固定在一起的,由多自由度的机械手来控制焊枪的方向、位移和速度。视觉传感器的位置一般通过机械接口与机器人本体连接,甚至采用刚性连接并一起移动。在系统的跟踪过程中,PC 机可以对传感器接收的信号进行预处理,通过图像处理软件在可视化界面上显示焊接过程的工作状态,PC 机与机器人专用控制器进行数据通讯,可以按照用户的要求在离线编程的情况下对焊接过程进行跟踪控制,系统框图如图 1.1 所示:

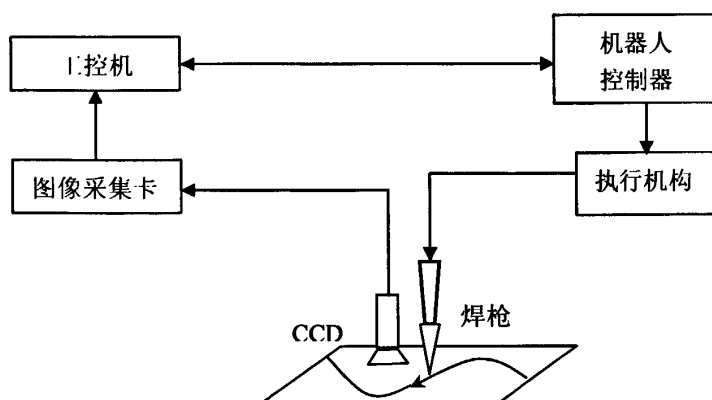


图 1.1 焊缝跟踪系统结构图

1.3.2 本论文研究所需的硬件和软件环境

1) 本论文研究所需的硬件环境

a、CCD 视觉传感器

本论文中的 CCD 视觉传感器采用 12 V 电源供电的 MTV-1881EX-3 1/3 英寸黑白低照度高解析工业摄像机。总像素为 795(水平)X 596(垂直)。

b、滤光片、钢化玻璃

在拍摄弧焊图像时，由于电弧、熔池、焊缝三者之间存在着较大的光强梯度，且弧焊区易受强弧光的干扰，故难以得到信噪比高的图像。在 CCD 摄像机前加设了滤光片和钢化玻璃片。滤光片它能有效地排除焊接区弧光的干扰，防止焊缝的特征信号被弧光淹没。钢化玻璃防止焊点的飞溅对镜头损伤。

c、图像采集卡

本论文选用的是北京嘉恒中自图像技术有限公司 OK_M10A 图像采集卡。它是基于 PCI 总线的标准视频黑白图像采集卡。它采用高效总线分享技术，提高 CPU 并行处理能力，并有高带宽输入，数字抗混叠、滤波等多项先进技术，是一款专业级的标准黑白采集卡。该卡通过 PCI 总线把数字图像传送到计算机内存实时存储。图像采集的最大分辨率为 768x576 量化等级为 256 级，0 代表最暗，255 代表最亮。OK_M10A 适用于科学研究、工业检测等的图像处理系统的通用性高质量黑白图像采集。

d、图像处理机

图像处理工作一般由计算机来完成。由于数字图像信息大，要求计算机系统具有运算速度快、存储容量大(包括内存及外存)，稳定性高等特点。根据图像处理系统的不同用途，可以采用不同类型的计算机。本论文中所选图像采集卡上集成了强大的函数扩展性能可以建成基于 PC 的系统，并根据试验用焊缝图像的实际情况，实验采用主频为 2.60GHz，内存为 512M 的个人计算机。

2) 本论文研究所需的软件环境

a、焊缝图像处理编程软件

Visual c++是 Microsoft 公司推出的一种高度综合性能的开发 Win32 环境程序,面向对象的可视化集成编程系统。用它开发的程序有着运行速度快、可移植能力强等特点。由于 VisualC ++本身就是一个图形的开发界面,它提供了丰富的关于位图操作的函数,对开发图像处理系统提供了极大的方便。因此,它现在已经成为开发图像处理程序的主要开发工具。

b、焊缝跟踪控制器仿真工具

MATLAB 语言是当今国际上科学界(尤其是自动控制领域)最具影响力、也是最有活力的软件。它起源于矩阵运算,并已经发展成一种高度集成的计算机语言。它提供了强大的科学运算、灵活的程序设计流程、高质量的图形可视化与界面设计、便捷的与其他程序和语言接口的功能,具它有丰富的应用功能大量实用的辅助工具箱适合不同专业、不同研究方向及各种工程技术研人员使用。是工程技术与科研人员不可或缺的软件。Matlab 本身拥有丰富的库函数,使得程序设计语言编程效率高,并具有结构化流程控制语句和运算符,使用户在使用过程中能方便自如地应用。

c、图像采集卡驱动

OK_M10A 图像采集卡提供各种 WINDOWS 系统的驱动程序、开发库及演示程序。:支持 WINDOWS 动态库的常用开发语言的二次开发,如 VC、VB、Delphi、LABVIEW、MATLAB 等。

3) 本论文焊缝图像处理流程

图像采集系统采集到的原始焊缝图像,经图像采集卡进行 A/D 转换成数字图像,由计算机进行实时图像处理。由于原始图像中含有烟尘、飞溅等各种干扰,为了从图像中获得焊缝位置信息,需要利用计算机图像处理系统对图像进行处理与识别,处理流程见图 1.2 焊缝图像处理流程图。

a、焊缝图像滤波去噪

现场采集得到的原始图像上存在大量由飞溅、焊件烟尘及焊接电噪声产生的噪声信号。这些噪声会使特征信号被严重干扰淹没,不利于特征量的提取,因此必须进行预处理。图像预处理的主要作用就是去除干扰和噪声,以得到相对较清晰的图像,为实现图像边缘信息的提取提供良好的基础,常用的方法有:直方图变换法、邻域平均法、中值滤波法等

b、焊缝图像阈值分割和边缘检测

边缘检测是图像分析中的一个重要内容,焊缝图像往往需要通过检测焊缝边缘对焊缝图像进行区域分割,将焊缝和焊件区别开来。常用的图像阈值分割方法有:最大类间方差法、最小误差法、自适应阈值选取法、迭代法等。常采用的边缘检测算法有边缘模型参考法(梯度算子检测法、拉普拉斯算子检测法)等。

c、焊缝的特征提取和焊炬偏差检测

焊缝图像的边缘提取出来后,利用 Hough 变换找到焊缝左边缘和右边缘。根据左右

焊缝直线的坐标求其平均值的方法找到焊缝中心。在开始提取焊缝位置偏差时,由于 CCD 摄像机固定在焊接机器人的焊炬上,经校正后,焊缝在视频窗口中的成像应处于窗口正中位置,若焊缝位置发生了偏差,其在视频窗口中的成像就相应的偏左或偏右。

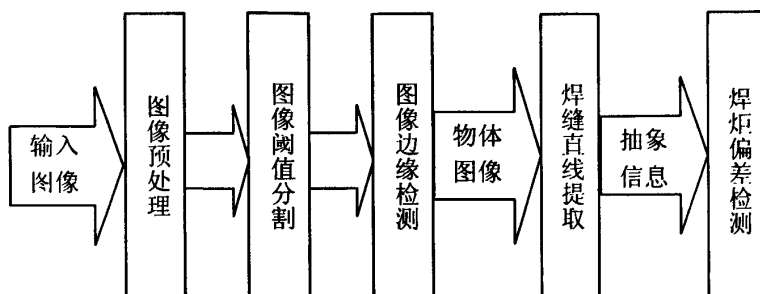


图 1.2 焊缝图像处理流程图

1.4 论文研究的主要内容

针对目前国内外的管道自动焊接视觉跟踪技术基本情况,本论文主要研究视觉跟踪系统中的图像处理技术和跟踪控制技术,所以本论文的研究内容为:

1) 本文针对当前焊缝图像处理技术进行分析,找出适合主管道焊缝图像提取的方法。图像通过滤波去噪、阈值分割、边缘检测、直线提取、偏差测量等一系列处理,最终能够准确的检测出焊缝中线的坐标以及焊炬偏差的大小和方向。

2) 分析 PID 控制器和模糊控制的基本原理和结构,设计出将二者相结合的模糊 PID 控制器,运用仿真软件仿真检验控制器对系统的控制实时性、控制精度和抗干扰性。

2 焊缝图像预处理

由于焊接过程中的弧光和飞溅等大量干扰因素的影响,使得采集的原始图像存在很多噪声,这就需要对图像进行预处理以滤除图像中存在的噪声。图像去噪分为频域去噪和空域去噪。^{[1][9]}频域去噪是基于图像的傅里叶变换,常采用频域高(低)通滤波法、同态滤波法等。采取频域处理的方法进行滤波的主要缺点就是所有的滤波方法的流程中都附加了对图像的傅立叶正变换和反变换,对于数据量比较大的二维图像来讲需占较大的内存,而且运算时间也较长,特别是对于具有实时性要求的焊缝图像的处理,这是极为不利的。因此,本文将不讨论这类滤波方法。空域去噪是直接对图像像素进行处理,在实时图像处理时,因为对速度的要求多采用空域去噪。常用的方法有直方图修整法、邻域平均法、中值滤波法等。

2.1 图像滤波

实际应用中摄取的焊缝图像都会因为受到干扰而含有噪声。必须将原始焊缝图像经过滤波去噪才能进一步对图像处理。本论文介绍直方图修整法、邻域域平均法、中值滤波法。分析他们的滤波去噪效果,找出适合主管道焊缝图像去噪的算法。

2.1.1 直方图修整法

直方图修整法是图像灰度级变换的最常用的一种方法,为了研究方便,往往先将直方图归一化,即让源图像灰度范围 $[Z_1, Z_K]$ 归一化为 $[0, 1]$ 。设其中任一灰度级 Z 归一化为 r ,变换后的图像的任一灰度级 Z 归一化为 s ,显然 r 、 s 应当满足:

$$0 \leq r \leq 1, \quad 0 \leq s \leq 1$$

因此直方图修整就是对下列公式的计算过程:

$$s = T(r) \quad \text{或} \quad r = T^{-1}(s) \quad (2.1)$$

式中 $T(r)$ 为变换函数,它必须满足下列两个条件:

- 1) $T(r)$ 在 $0 \leq r \leq 1$ 区域内是单值函数,且单调增加。
- 2) $T(r)$ 在 $0 \leq r \leq 1$ 区域内满足 $0 \leq T(r) \leq 1$ 。

条件 1)保证了灰度级从黑到白的次序,而条件 2)保证变换的像素灰度级仍在允许的灰度级范围内。 $T^{-1}(s)$ 为逆变换函数,同样需要满足上面两个条件。

假定用 $P_r(r)$ 和 $P_s(s)$ 分别表示源图像和变换后图像的灰度级概率密度函数,根据概率论的知识,在已知 $P_r(r)$ 和 $T^{-1}(s)$ 时,且 $T^{-1}(s)$ 也是单调增长,则 $P_s(s)$ 可由下式求出:

$$P_s(s) = P_r(r) \frac{dr}{ds} = T^{-1}(s) \quad (2.2)$$

可见,使用灰度直方图修整法进行图像增强技术的实质就是选用合适的变换函数 $T(r)$ 来修正图像灰度级概率密度函数 $P_r(r)$,从而得到灰度级具有 $P_s(s)$ 分布的新图像。如图 2.1 和图 2.2 为焊缝图像修正前后的灰度图

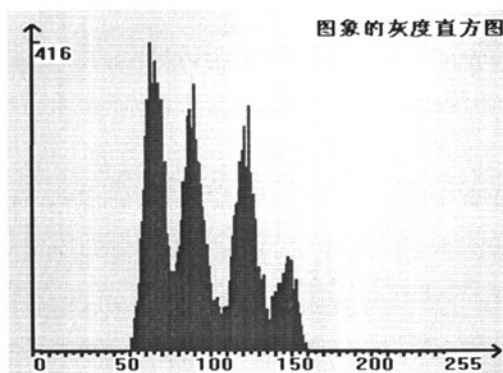


图 2.1 原始焊缝图像灰度图

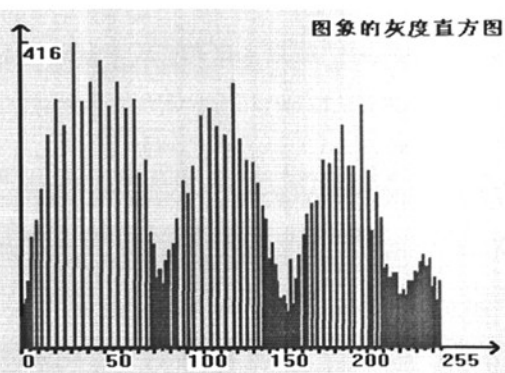


图 2.2 直方图修整后图像的灰度图

从修正前后灰度图对比上看,修正后的图像灰度分布更加均匀。

2.1.2 邻域平均法

邻域平均法是一种空域平滑技术。邻域平均处理技术,是用邻点灰度的平均值取代该点的灰度。假设待处理图像为 $f(x,y)$,处理后图像为 $g(x,y)$,邻域平均法图像平滑处理的数学表示为:

$$g(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{(m,n) \in S} f(x-m, y-n) \quad (2.3)$$

M 为邻域内所包含的像素总数, S 为事先确定的邻域,该邻域不包括 (x,y) 点。

例如图 2.3 半径为 1 的邻域表示为:

$$S = \{(x,y+1), (x,y-1), (x+1,y), (x-1,y)\} \quad (2.4)$$

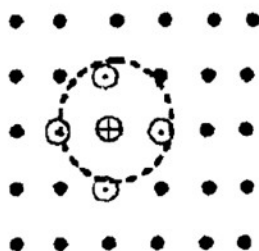


图 2.3 中心点的临域半径=1

邻域半径可任意选择,如 1、2、4 等,但需要注意的是,邻域平均法在去噪声的同时,对图像的边缘和细节会造成模糊效应,特别是邻域半径增大时,去噪声同时所产生的模糊效应愈加严重。可用取阈值的邻域平均法。

取阈值的邻域平均法的基本原理:一个窗口如 3×3 窗口沿图像移动(逐行逐列),先求出窗口中除了待处理像元之外的全部像元灰度值的平均值。如果待处理像元灰度值与这个平均值之差的绝对值超过了某一预先确定的阈值,则该像元的灰度使用平均值代替;否则,保持该像元的灰度不变。

2.1.3 中值滤波

中值滤波是一种非线性信号处理方法,与其对应的中值滤波器当然也就是一种非线性滤波器。中值滤波器是在 1971 年由 J.W.Jukey 首先提出并应用在一维信号处理技术中,后来被二维图像信号处理技术所引用(它在一定的条件下,可以克服线性滤波器如最小均方滤波、平均值滤波(平滑滤波)等所带来的图像细节模糊。向且对滤除脉冲干扰及图像扫描噪声最为有效、在实际运算过程中并不需要图像的统计特性,这也带来了不少方便。^[16]

中值滤波的原理是以某个像素为中心求出与它相邻的的像素矩阵的中值,以该值来代替它本身像素值。中值滤波的思想以中值滤波为基础,先对一个窗口内的所有像素的灰度值进行排序,取排序结果的中间值作为原窗口中心点处的像素的灰度值。

滤波的关键在于选择合适的窗口大小、窗口形状,窗口尺寸一般先用 3 再取 5,逐点增大,直到其滤波效果满意为止。窗口的形状可有各种式样,可以是十字形的、正方形的。见图 2.4 常用的滤波窗口。窗口大小及形状有时对滤波效果影响很大。

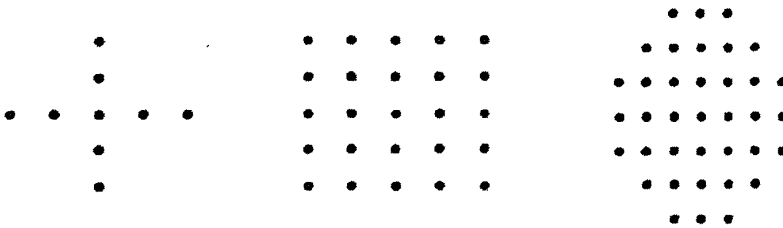


图 2.4 中值滤波窗口


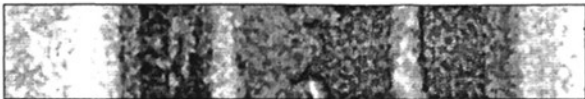


中值滤波的工作步骤如下:

- 1)将模板在图像中漫游,并将模板中心与图中某个象素位置重合;
- 2)读取模板各个对应象素的灰度值;
- 3)将这些灰度值从小到大排成一列;
- 4)找出这些值中排在中间的一个;
- 5)将这个中间值赋给对应模板中心位置的像素。

2.1.4 图像滤波处理结果

如表 2.1 为各种图像滤波去噪的效果对照,通过对照可以明显看到各种处理结果的优劣,从而找到适合本论文的图像处理方法。

表 2.1 图像滤波对照表

序号	处理步骤	处理结果
1	原始图像	
2	直方图修整法	
3	邻域平均法	
4	中值滤波	

直方图修整法可以使目标图像更加明显,但同时使噪声背景加强。邻域平均法虽然可以消除噪声,同时会使图像中的一些细节变得模糊,而中值滤波既可以消除噪声同时还能保持图像中的细节部分,防止图像边缘模糊,所以我们在这里采用中值滤波。

2.2 基于改进的主管道焊缝图像中值滤波算法

从中值滤波的过程可以看出,在模板每次漫游中,处理程序都必须经过一次排序操作,这个过程是比较耗时的,如果模板取得大,耗时将更长。所以在视觉焊缝跟踪中采用中值滤波,对其算法优化是必要的。

本论文采用 3×3 模板,当它在图中从左到右移动时,每次变化的仅仅只是第三列的 3 个值,而后两列的值已经在上一次操作中排好了序的,因此只需要在这个有序序列中利用相关算法依次插入这三个新值即可。同理,在模板从上到下漫游过程中也只需要改变第 3 行的 3 个值。通过以上分析,我们只需要对模板范围内的所有值进行排序一次,以后根据模板的移动方向,依次插入 3 个值即可。在此我们采用冒泡排序法,在使用 3×3 模板的情况下,对 9 个像素值排序,需要经过 36 次比较才能完成。而将 3 个像素值一次插入到 6 个有序序列中,利用折半查找插入,最多需要进行 10 次比较操作可以完成,所以此算法提高了执行效率,实时性较好。

2.3 本章小结

本章对焊缝图像的预处理的方法进行了分析和对比滤波后的图像效果，可以看出中值滤波法能够有效去除噪声并不会使图像模糊化。通过对中值滤波算法的改进，可以提高滤波的执行效率。

3 焊缝图像边缘检测

对焊缝图像的处理过程中,往往仅对焊缝图像中的焊缝特征部分感兴趣,这些部分常称为目标或前景(其他部分称为背景),它们一般对应焊缝图像中特定的、具有独特性质的区域。为了辨识和分析焊缝图像中的目标,需要将它们从焊缝图像中分离提取出来,在此基础上才有可能进一步对目标进行识别。

3.1 图像阈值分割

图像的阈值分割是一种广泛使用的图像分割技术,它利用了图像中要提取的目标物与其背景在灰度特性上的差异,把图像视为具有不同灰度级的两类区域(目标和背景),选取一个阈值,以确定图像中每一个像素点应该属于目标还是背景区域,从而产生相应的二值图像。阈值分割不仅可以大量压缩数据,减少存储容量,而且能大大简化在其后的分析和处理步骤。

不同种类的图像、不同的应用所要求提取的特征是不相同的,当然特征提取方法也就不同,因此并不存在一种普遍适用的最优方法。目前已经提出的图像分割方法很多,从分割依据角度出发,图像分割方法大致可分为相似性分割和非连续性分割。所谓相似性分割就是将具有同一灰度级或相同组织结构的像素凝聚在一起,形成图像中的不同区域,通常也称为基于区域相关的分割技术。所谓非连续性分割就是首先检测局部不连续性,然后将其连接起来形成边界,这些边界把图像分成不同的区域,通常也称为基于点相关的分割技术。^[18]

图像阈值分割的基本原理可用下式作一般表示:

$$g(x, y) = \begin{cases} Z_E & f(x, y) \in Z \\ Z_B & \text{其他} \end{cases} \quad (3.1)$$

式中: Z 为阈值, Z_E 和 Z_B 为任意选定的目标和背景灰度级。

要从复杂的景物中分辨出目标并将其形状完整地提取处理,阈值的选取是阈值分割技术的关键。如果阈值选取过高,则过多的目标点被误归为背景,阈值选得过低,则会出现相反情况。迄今为止,已经研究出很多阈值选取的方法,但至今还未能找到一种对所有图像都能有效分割的阈值选取方法,某种阈值方法只能适用于某一类图像,而对其他图像分割的效果并不理想。

本论文主要研究基于点相关的分割技术,主要分析几种阈值选取方法,找出适合主管道焊缝图像分割的阈值算法。

3.1.1 最大类间方差法

由 Otsu 于 1978 年提出的最大类间方差法。其基本思想是对像素进行划分, 通过使划分得到的各类之间的距离达到最大, 来确定合适的阈值。其计算步骤如下:

设图像 f 中, 灰度值为 I 的像素数目是 n , 总像素数为: $N = \sum_{i=1}^L n_i$ (3.2)

各灰度出现的概率为: $P_i = n_i / N$ (3.3)

$$\omega_A = \sum_{i=1}^K P_i \quad \text{和} \quad \omega_B = \sum_{i=k+1}^L P_i \quad (3.4)$$

这里为了简便, 定义 $\omega_A = \omega(K)$

区域 A 和 B 的平均灰度为:

$$u_A = \frac{1}{\omega_A} \sum_{i=1}^L i^* P_i \frac{\Delta u(k)}{\omega(k)} \quad \text{和} \quad u_B = \frac{1}{\omega_B} \sum_{i=k+1}^L i^* P_i \frac{\Delta u - u(k)}{1 - \omega(k)} \quad (3.5)$$

其中 u 为全图的平均灰度, $u = \sum_{i=1}^L i^* P_i = \omega_A u_A + \omega_B u_B$ (3.6)

$$\text{两个区域的方差为 } \sigma^2 = \omega_A (u_A - u)^2 + \omega_B (u_B - u)^2 = \frac{[u\omega(k) - u(k)]^2}{\omega(k)[1 - \omega(k)]} \quad (3.7)$$

按照最大类间方差的准则, 从 1 至 L 改变 k , 并计算类间方差, 使上式最大的 k 即是区域分割的阈值。

3.1.2 最小误差阈值分割法

最小误差阈值分割的基本思想是找到一个门限阈值, 按照这个阈值划分目标和背景的错误分割概率最小。该算法适用于图像灰度分布图有明显双峰的图像。图 3.1 为焊缝图像的灰度分布图。

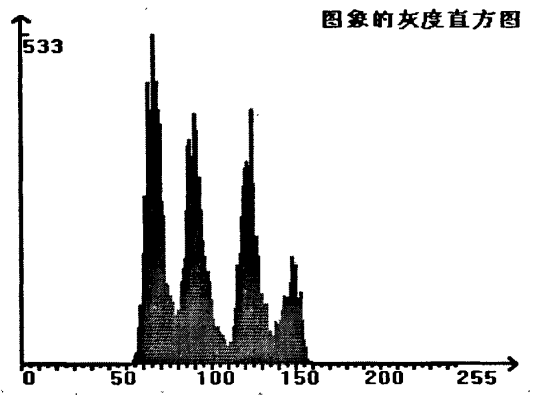


图 3.1 焊缝灰度分布图

设目标的像素点灰度服从正态分布，密度为 $P_1(x)$ ，均值和方差为 μ_1 和 σ_1^2 ，设背景点的灰度也服从正态分布，密度为 $P_2(x)$ ，均值和方差为 μ_2 和 σ_2^2 。设目标的像素数占图像总点数的百分比为 Q ，背景点占 $(1-Q)$ ，则混合概率密度为：

$$P(x) = QP_1(x) + (1-Q)P_2(x)$$

$$= \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left[-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right] + \frac{1-Q}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left[-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right] \quad (3.8)$$

当选定门限为 T 时，目标点错划为背景点的概率为：

$$E_1(T) = \int_T^{\infty} P_1(x) dx \quad (3.9)$$

把背景点错划为目标点的概率为：

$$E_2(T) = \int_{-\infty}^T P_2(x) dx \quad (3.10)$$

总的错误概率为：

$$E(T) = QE_1(T) + (1-Q)E_2(T) \quad (3.11)$$

$$\text{令 } \frac{\delta E(T)}{\delta T} = 0$$

$$\text{则有 } -QP_1(T) + (1-Q)P_2(T) = 0$$

$$\text{由此得到 } \ln \frac{Q\sigma^2}{(1-Q)\sigma_1^2} - \frac{(T-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2} = \frac{-(T-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2} \quad (3.12)$$

当 $\sigma^2 = \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ 时

$$T = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2} + \frac{\sigma^2}{\mu_2 - \mu_1} \ln \frac{Q}{1-Q} \quad (3.13)$$

此时 T 为图像最佳阈值。

3.1.3 自适应阈值选取法

当照明不均匀、有突发噪声，或者背景灰度变化比较大时，整幅图像分割将不可能具有合适的单一阈值。这时可采用这种方法即对图像按照区域坐标分块，分别对每一块区域单独选取阈值进行分割，这种与坐标相关的动态阈值方法，也称为自适应阈值方法。这种算法比较耗时，计算量较大但其抗噪声能力比较强。

其基本计算思路是，对图像中的每个像素，选取以它为中心的一个邻域窗口(如 8 邻域窗口等)，对这个窗口的像素灰度按照一定的准则选取阈值，以此判断该处理像素是属于目标物还是背景，如图 3.2

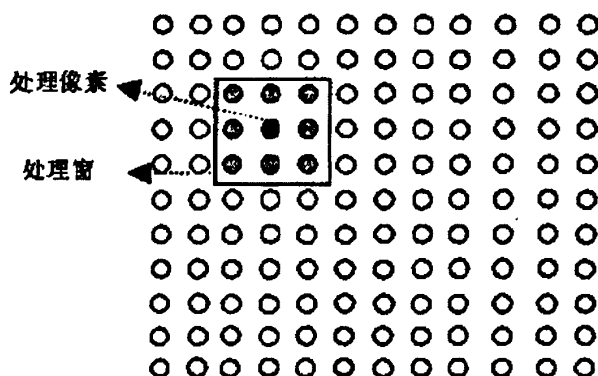


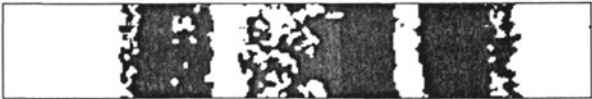
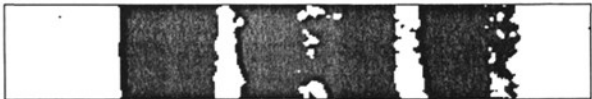

图 3.2 自适应阈值选取示意图

每个邻域窗口中阈值的选取也有很多方法，比较简单的可以选取窗口各像素灰度的最大值和最小值的均值；也可以选取窗口所有像素灰度的均值。此外也可以前面介绍的最大类间方差法、最小误差阈值分割法等等。

3.1.4 图像分割结果

下表 3.1 是各种图像分割算法分割的结果。

表 3.1 图像分割效果对照表

序号	阈值分割方法	焊缝图像
1	最大类间方差法	
2	最小误差法	
3	自适应阈值选取法	

从焊缝图像对比上看,最大类间方差法处理的焊缝边缘比较模糊,丢失的信息比较多。最小误差法适用于灰度分布图有明显双峰的图像,主管道焊缝图像的灰度分布图没有明显的双峰。自适应阈值选取法每个领域采用最小误差法处理其效果和最小误差法近似。

3.2 图像边缘检测

图像的边缘是图像的最基本特征,它是指其周围像素灰度有阶跃变化或屋顶变化的那些像素的集合,是图像分割所依赖的重要特征。图像边缘检测是提取焊缝中心的核心工作,它直接影响焊缝中心提取的结果,越合适的边缘提取算子,它所得到的焊缝中心就与实际焊缝中心位置越接近,精度越高。^[29]故选取一个合适的边缘提取算子有重要的意义。

现在比较常用的边缘检测算子有梯度算子、Roberts 算子、Prewitt 算子、Kirsch 算子、Sobel 算子、Gauss-Laplace 算子等,下面介绍常用边缘梯度检测算子的原理。

3.2.1 Sobel 算子

Sobel 算子能够使特征边缘得到锐化,但是由于噪声点处也存在灰度梯度。这种处理势必使噪声得到增强,这是我们不希望看到的。Sobel 算子则在一定程度上克服了这个问题。Sobel 算法的主要思想就是将平均和差分结合起来。

在边沿检测中,常用的一种模板是 Sobel 算子。Sobel 算子有两个,一个是检测水平

边沿的 $\begin{pmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}$; 另一个是检测垂直平边沿的 $\begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 2 & 1 \end{pmatrix}$ 。与 $\begin{pmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}$ 和

$\begin{pmatrix} -1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ 相比, Sobel 算子对于象素的位置的影响做了加权, 因此效果更好。Sobel 算

子另一种形式是各向同性 Sobel(Isotropic Sobel)算子, 也有两个, 一个是检测水平边沿的

$\begin{pmatrix} -1 & -\sqrt{2} & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & \sqrt{2} & 1 \end{pmatrix}$, 另一个是检测垂直平边沿的 $\begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -\sqrt{2} & 0 & \sqrt{2} \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ 。各向同性 Sobel 算子和普通

Sobel 算子相比, 它的位置加权系数更为准确, 在检测不同方向的边沿时梯度的幅度一致。

3.2.2 Prewitt 算子

Prewitt 算子用卷积模板来描述:

$$G(i, j) = |P_x| + |P_y| \quad (3.14)$$

其中 $P_x = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, $P_y = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$, 前者为水平模板, 后者为垂直模板。图像中每点

都用这两个模板进行卷积, 取最大值作为输出, 最终产生一副边缘幅度图像。

3.2.3 Gauss-Laplace 算子

高斯拉普拉斯(LOG)算子把高斯平滑滤波器和拉普拉斯锐化滤波器结合了起来, 先平滑掉噪声, 再进行边沿检测。

常用的 Gauss-Laplace 算子是 5×5 的模板, 如下所示 $\begin{pmatrix} -2 & -4 & -4 & -4 & -2 \\ -4 & 0 & 8 & 0 & -4 \\ -4 & 8 & 24 & 8 & -24 \\ -4 & 0 & 8 & 0 & -4 \\ -2 & -4 & -4 & -4 & -2 \end{pmatrix}$ 。到中心点的

距离与位置加权系数的关系用曲线表示为图 3.3。很象一顶墨西哥草帽。所以, LOG 又叫墨西哥草帽滤波器。

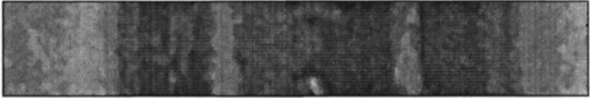

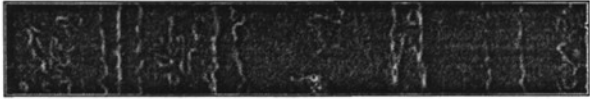



图 3.3 LOG 到中心点的距离与位置加权系数的关系曲线

3.2.4 图像边缘检测结果

如表 3.4 为图像边缘检测的结果的对比表。

表 3.2 图像边缘检测的结果的对比表

序号	处理算法	处理结果
1	原图	
2	Sobel 算子	
3	Prewitt 算子	
4	Gauss-Laplace 算子	

从表 3.2 中可以看出, Sobel 算子根据像素点上下、左右邻点灰度加权差,在边缘处达到极值这一现象检测边缘。对噪声具有平滑作用,提供较为精确的边缘方向信息,边缘定位精度不够高,不适合对边缘定位的准确性要求很高的应用。Prewitt 算子利用像素点上下、左右邻点灰度差,在边缘处达到极值检测边缘。对噪声具有平滑作用,同 Sobel 算法类似,定位精度不够高。Gauss-Laplace 是二阶微分算子,利用边缘点处二阶导数出现零交叉原理检测边缘,不具有方向性,定位精度高,不能获得边缘方向等信息,对灰度突变敏感。利用传统的边缘边缘检测算子难以得到准确的主管道焊缝的边缘信息。

3.3 基于迭代阈值分割和轮廓提取的主管道焊缝边缘检测算法

在焊缝图像边缘检测过程中,有效地抑制噪声和正确地选取阈值对边缘检测结果至关重要。本论文提出基于迭代阈值分割和轮廓提取的主管道焊缝边缘提取算法。首先通过迭代法求得最佳阈值对图像进行分割,将图像分为目标和背景两部分,然后利用轮廓提取算法,除去焊缝图像中目标的内部点,提取焊缝图像边缘。该算法抗噪声干扰性强、定位准确,克服了传统边缘检测算法对噪声敏感、边缘定位不够精确的缺点。

3.3.1 迭代求最佳阈值分割法

迭代法是基于逼近的思想,这种算法是利用程序自动搜寻出比较合适的值。此阈值选取方法首先选取图像灰度范围的中值作为初始值 T^0 ,把原始图像中全部像素分成前景和背景两大类,然后分别对其进行积分并将结果取平均值以获得新的阈值,并按此阈值将图像分为前景和背景,如此反复迭代下去,当阈值不再发生变化,即迭代已经收敛于某个稳定的阈值时,此刻的阈值即作为最终结果用于对图像的分割。^[33]

假设图像中灰度值为 $i(i=0, \dots, 255)$ 的像素点个数为 P_i , T_n 和 T_{n-1} , 分别为第 n 次、第 $n-1$ 次迭代的结果,那么利用迭代法求取最佳阈值可表示:

$$T_n = \left(\frac{\sum_{i < T_{n-1}} P_i \times i}{\sum_{i < T_{n-1}} P_i} + \frac{\sum_{i > T_{n-1}} P_i \times i}{\sum_{i > T_{n-1}} P_i} \right) / 2 \quad (3.15)$$

通过多次迭代可以求得图像的最佳阈值,从而使图像中目标和背景的误分割率达到最小,精确地分割出目标和背景,同时,经过二值化分割以后,增强了目标和背景的对比,可以精确地定位图像边缘。我们还可以论证,迭代阈值并没有受到噪声的影响。

我们假设一幅含有随机噪声的图像 $g(x,y)$ 是由原始图像 $f(x,y)$ 和噪声 $n(x,y)$ 叠加而成,即 $g(x,y)=f(x,y)+n(x,y)$ 。由于噪声是随机、互不相关的,且具有零均值,则可以认为在分割出的目标 g_1 和背景 g_2 的图像上噪声干扰仍为 $n(x,y)$ 。

在每次迭代过程中,对分割出图像的目标和背景分别求灰度均值,我们可以得到下式:

$$E\{g_1(x,y)\} = E\{f_1(x,y) + n(x,y)\} = E\{f_1(x,y)\} \quad (3.16)$$

$$E\{g_2(x,y)\} = E\{f_2(x,y) + n(x,y)\} = E\{f_2(x,y)\} \quad (3.17)$$

上式说明,随着迭代次数的增加,平均灰度值将趋向于真值,即用迭代算法求得的最佳阈值不受噪声干扰的影响。

3.3.2 轮廓提取算法

轮廓提取的目的是获得图像的外部轮廓特征,为图像的形状分析做准备。轮廓提取的原理就是对二值图像掏空内部点,对图像中的每一个点都进行扫描,如果扫描到一点为黑,其他的8个相邻点都是黑色,可以判定此点为图像的内部点,将该点删除,扫描处理结束

后,留下的点就是图像的轮廓,也就实现了图像的边缘检测。该方法检测到的边缘宽度仅为一个像素,因此具有较高的定位精度,同时,由于二值化处理的图像具有完整的轮廓,所以轮廓提取的边缘具有连续性。^[34]

3.3.3 焊缝边缘检测算法计算步骤

1)求出图像中最小和最大灰度值 Z_1 和 Z_K , 令图像的初始阈值为

$$T^0 = \frac{Z_1 + Z_K}{2} \quad (3.18)$$

2)根据阈值 T^K 将图像分割成目标和背景两部分, 求出两部分的平均灰度值 Z_A 和 Z_B :

$$Z_A = \frac{\sum_{Z(i,j) < T^K} Z(i,j) \times N(i,j)}{\sum_{Z(i,j) < T^K} N(i,j)} \quad (3.19)$$

$$Z_B = \frac{\sum_{Z(i,j) > T^K} Z(i,j) \times N(i,j)}{\sum_{Z(i,j) > T^K} N(i,j)} \quad (3.20)$$

上式中 $Z(i,j)$ 是图像上 (i,j) 点的灰度值, $N(i,j)$ 是 (i,j) 点的权重系数, 一般

$$N(i,j) = 1.$$

3)求出新的阈值:

$$T^{K+1} = \frac{Z_A + Z_B}{2} \quad (3.21)$$

4)如果 $T^K = T^{K+1}$, 则结束, 否则 $K \rightarrow K+1$, 转第 2 步;

5) 经过了 1 至 4 步骤焊缝图像变为二值图像。二值图像中,背景像素灰度值为 0,景物像素灰度值为 255,从图像左上角开始依次扫描;

6)若中心像素值为 0,不管相邻其余 8 个像素为何值,一律保留中心像素值 0;

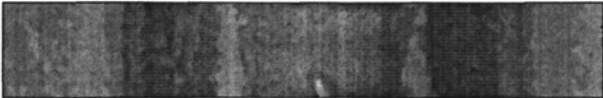
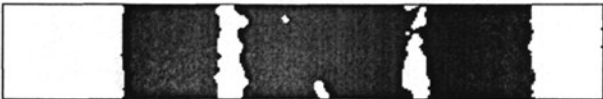
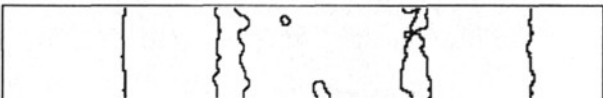
7) 若中心像素值为 255,且相邻的其余 8 个像素值全为 255,则改变中心像素值为 0;

8) 除上述情况外,全部将中心像素值改为 255。根据上述规则,即可得到焊缝图像中焊缝的轮廓边缘。

3.3.4 焊缝图像边缘检测结果

下表 3.3 为主管道焊缝图像边缘检测结果。

表 3.3 主管道焊缝图像边缘检测效果表

序号	处理步骤	处理结果
1	中值滤波	
2	迭代阈值分割	
3	轮廓提取	

从焊缝图像边缘检测结果上看，本论文提出的算法提取的主管道焊缝图像信息定位准确，能够有效抑制噪声干扰的影响，适合主管道焊缝图像边缘检测。

3.4 本章小结

本章对几种图像分割和边缘检测算子进行的对比分析，提出了基于迭代阈值分割和轮廓提取的图像边缘检测算法，该算法能够比较完整的提取焊缝边缘图像。图像边缘检测算法很多，很难用统一标准来衡量好坏。对于主管道焊缝图像边缘检测的准确性直接影响到后续的焊缝直线检测的精度。

4 焊缝图像特征提取

焊缝图像经过处理后,下一步就要进行焊缝的特征分析,即焊缝中心的提取。提取焊缝中心一般是通过垂直于焊缝方向扫描来获取焊缝边缘点作为特征点,然后计算出焊缝中心坐标。目前,直线提取算法主要有:启发式连接、Hough 变换法、层次编组法等。各种算法都有各自的优缺点,比如 Hough 变换的抗噪性能较好,能把共线的短线段连接起来,但易出现过连接现象,分辨率较高;层次编组法的提取速度快,可连接短直线,但参数选择困难,分辨率低。

Hough 变换是利用图像全局特性而将边缘连接起来促成封闭边界的一种方法。在预先知道区域形状的条件下,可以很方便地得到边界曲线而将不连续的边缘像素点连接起来。其优点是受噪声和曲线间断的影响小。我们在此选 Hough 变换对焊缝边缘直线提取。

4.1 Hough 变换基本原理

Hough 变换是 Hough 于 1962 年提出的一种形状匹配技术,运用两个坐标之间的变换来检测平面内的直线和规律曲线,这种变换具有在变换空间所希望的边缘凝聚在一起形成峰点的特性。^[29]它对随机噪声和部分遮盖现象不敏感,具有较强的抗干扰能力,允许待检测的边界曲线不连续,且适用于并行处理。其主要思想是点线对偶性。^[40]假定二维数字图像用直角坐标系来表示,任一像素点可以用 (x_i, y_i) 来表示,直线在直角坐标系中可以用斜截式、一般式、极坐标式来表示。具体如下:

$$\text{一般方程式: } Ax + By + C = 0 \quad (4.1)$$

$$\text{斜截式方程: } y = mx + b \quad (4.2)$$

$$\text{极坐标方: } \rho = x \cos(\theta) + y \sin(\theta) \quad (4.3)$$

其中, (x, y) 为直角坐标系中的坐标, (m, b) 、 (ρ, θ) 、 (A, B, C) 为描述直线的参数。图像平面上的一条直线若用像素点来描述,要涉及到多个像素点,描述起来很不方便,在参数空间一条直线只需一个参数点来描述。不同的参数描述方式对处理的时间有影响,下面将着重介绍以 (ρ, θ) 为参数空间的 Hough 变化原理。

设一条直线的一般参数方程式: $Ax + BX + C = 0$ ($A^2 + B^2 \neq 0$),不妨设 $B \neq 0$,
方程两边同时除以 $\sqrt{A^2 + B^2}$,可得:

$$\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}x + \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}}y = -\frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (4.4)$$

与极坐标方程 $\rho = x \cos(\theta) + y \sin(\theta)$ 比较,可以知道:

$$\rho = -\frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad \cos(\theta) = \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad \sin(\theta) = \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (4.5)$$

由直角坐标系中点到直线的公式:

$$d_0 = \frac{|C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (4.6)$$

可知, 原点坐标(0,0)到直线 $Ax + By + C = 0$ 的距离 d_0 与 ρ 的绝对值相等。 ρ 的几何意义就是 $Ax + By + C = 0$ 的代数距离, θ 为直线与 Y 轴负半轴的夹角。 θ 的取值范围为 $[0, \pi]$, ρ 的取值范围与图像大小有关。对于一副 $N \times N$ 的图像, ρ 的最大取值为 $\rho_{\max} = \sqrt{2}N$, 因此 ρ 的取值范围为 $[-\rho_{\max}, \rho_{\max}]$, (ρ, θ) 的几何意义如图 4.1 所示。

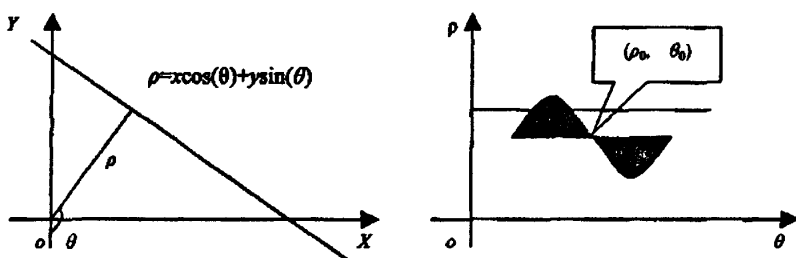


图 4.1 (ρ, θ) 的几何意义

如图图 4.1 所示, 图像中的一条直线对应于参数空间的一点 (ρ, θ) , 图像平面上的一个点 (x_0, y_0) 对应参数空间的一条正弦曲线 $\rho = x_0 \cos(\theta) + y_0 \sin(\theta)$, 如图 4.2 所示二值图像中 n 个共线点 ($i=1, 2 \dots n$) 对应于参数平面上的 n 条正弦曲线, 这 n 条正弦曲线的相交点 (ρ_0, θ_0) 就是 n 条共线点所在直线的极坐标参数。

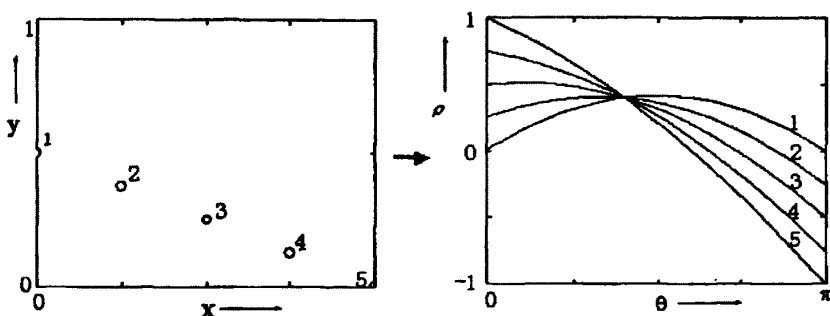


图 4.2 x, y 平面与 ρ, θ 平面对应图

4.2 Hough 变换具体算法步骤

运用 Hough 变换进行焊缝识别的一般步骤如下：

先将 (ρ, θ) 参数平面离散化，建立相应的计算矩阵 P ，对二值图像上每一个非零像素点 (x_i, y_i) 建立方程 $\rho = x_i \cos(\theta) + y_i \sin(\theta)$ ，对 θ 参数的每一个离散值计算 P 值，将 (ρ, θ) 相对应的计数矩阵 P 中的元素加 1，重复上述过程，直到计算完整幅图像。此时计数矩阵 P 的值表示二值图像中满足该对应元素的以 (ρ, θ) 为参数的直线方程上的像素点，设定一阈值，如果这个值大于阈值，就可以认为检测到了一条直线，该直线方程的参数为 (ρ, θ) 。

4.3 基于 Hough 变换的主管道焊缝中线提取算法


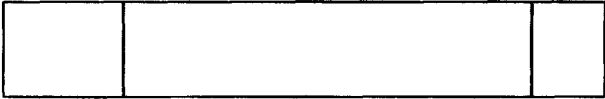
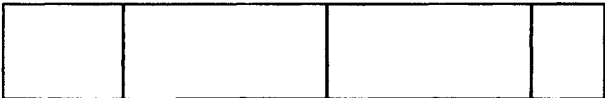
主管道焊缝图像边缘对应是两条边界线，实际的焊缝在小范围内可近似为直线且正好是两条直线，本论文利用基于 Hough 变换检测焊缝图像的算法检测两条左右焊缝的直线，具体算法步骤如下：

- 1) 初始化一个变换域 ρ, θ 空间的数组， ρ 方向上的量化数目为图像对角线方向像素数， θ 方向上的量化数目为 90（角度从 0-180，每格 2 度）；
- 2) 顺序搜索图像中的所有黑点，对每一个黑点，在变换域的对应各点加 1；
- 3) 求出变换域中最大点并记录；
- 4) 将最大点及其附近的点清零；
- 5) 求出变换域中第二个最大点并记录；
- 6) 判断这两个最大值点是否对应两条平行的直线。如果是，则画出这两条平行直线。否则结束；
- 7) 利用两条左右直线的坐标取平均值就是焊缝中心的坐标，并画出焊缝中心线。

4.4 提取焊缝的结果

下表 4.1 为 Hough 提取焊缝的结果。

表 4.1 焊缝中线提取效果表

序号	处理方法	处理结果
1	轮廓提取	
2	Hough 变换	
3	特征提取	

从焊缝图像处理结果看，Hough 变换提取直线算法受噪声和曲线间断的影响小，提取的直线精度高，对于较差图像分割带来的随机数据的加入，该算法具有较强的鲁棒性。

4.5 偏差检测

4.5.1 偏差检测原理

在开始提取焊缝位置偏差时，由于 CCD 摄像机固定在焊接机器人的焊矩上，经校正后，焊缝在视频窗口中的成像应处于窗口正中位置，若焊缝位置发生了偏差，其在视频窗口中的成像就相应的偏左或偏右，如下图 4.3 所示。

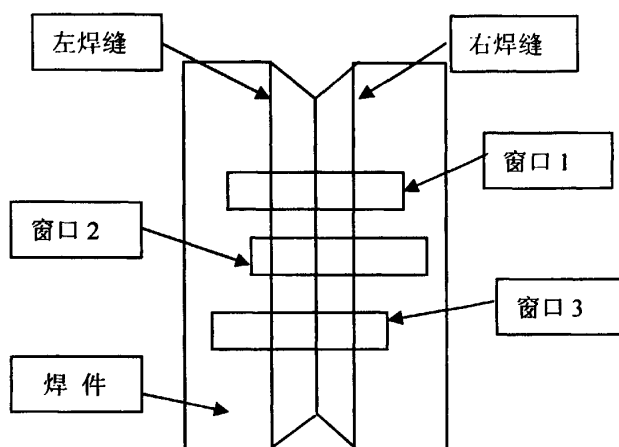


图 4.3 焊缝偏差检测示意图

如图 4.3 所示，视频窗口 1 刚好处于焊缝中线上，表示焊炬的偏差为 0。视频窗口 2 中的焊缝图像偏左，表示焊炬偏向中线右边。视频窗口 3 中的焊缝图像偏右，表示焊件偏向中线左边。分别计算左右焊缝距窗口边缘的距离，两者之差可以表示焊炬偏离中线的距离，偏差的符号表示偏离的方向。

4.5.2 焊缝偏差计算步骤

焊缝偏差计算步骤具体算法为：

1) 找到图像中心的行指针，得到上下偏移 10 行内的行指针；

2) 对第 n 行进行从左到右进行行扫描，用累加器对包含灰度值为 0 的像素累加，一旦遇到灰度值为 255 的点，将累加器的值存入变量 $left[n]$ 中，累加器清零；

3) 继续从左到有进行行扫描，当发现像素点灰度值变为 0 时，重新用累加器计数。一行扫描结束后，将累加器的值存入变量 $right[n]$ 中，累加器清零。

$$line(n) = left[n] - right[n] \quad (4.7)$$

4) 对第 $n+1$ 行进行扫描，重复 2、3 步骤，则：

$$\text{焊缝偏差} = \frac{\sum_{n=1}^{21} line[n]}{21} \times \text{标定系数} \quad (4.8)$$

其中标定系数为每个像素代表的实际焊缝宽度值。

按照上述偏差算法得到焊缝偏差的值判断焊缝偏离中线的距离和方向。若焊缝偏差为 0 时，表示焊缝在中线上，若焊缝偏差为正数，表示焊炬向左偏离中线。若焊缝偏差为负数，表示焊炬向右偏离中线。焊缝偏差的大小代表焊炬偏离中线的距离。

如表 4.2 为焊缝偏差计算的结果。

表 4.2 焊缝偏差检测对比表

序号	焊缝偏差	焊缝图像		
1	偏差>0,焊缝图像偏右，则焊炬偏左			
2	偏差=0, 焊缝图像居中，则焊炬居中			
3	偏差<0, 焊缝图像偏左，则焊炬偏右			

表 4.2 列出了三种焊缝偏差的情况，根据公式可以准确地得到偏差的大小和方向。

4.6 本章小结

本章介绍了 Hough 变化的基本原理，通过分析焊缝的特点提出了利用 Hough 检测焊缝的方法。当检测到焊缝边缘时，利用偏差检测算法可以精确的计算出焊炬偏离焊缝中线的方向和距离。

5 焊缝偏差跟踪控制器设计

5.1 PID 原理

在工程实际中,应用最为广泛的调节器控制规律为比例、积分、微分控制,简称 PID 控制,又称 PID 调节。PID 控制器问世至今已有近 70 年历史,它以其结构简单、稳定性好、工作可靠、调整方便而成为工业控制的主要技术之一。当被控对象的结构和参数不能完全掌握,或得不到精确的数学模型时,控制理论的其它技术难以采用时,系统控制器的结构和参数必须依靠经验和现场调试来确定,这时应用 PID 控制技术最为方便。即当我们不完全了解一个系统和被控对象,或不能通过有效的测量手段来获得系统参数时,最适合用 PID 控制技术。PID 控制器就是根据系统的误差,利用比例、积分、微分计算出控制量进行控制的。[43]

自从计算机进入控制领域以来,用数字计算机代替模拟计算机调节器组成计算机控制系统,不仅可以用软件实现 PID 控制算法,而且可以利用计算机的逻辑功能,使 PID 控制更加灵活,因而 PID 控制在生产过程中获得了广泛的应用。尤其现在国家大力发展核电,国内许多核电设备制造企业纷纷引进现代化的自动焊接设备以提高设备的焊接效率和焊接质量。PID 控制技术相当成熟,很适应用到焊接自动化当中。下面本论文将详细介绍 PID 控制技术。

5.1.1 模拟 PID 基本原理

在模拟控制系统中,模拟 PID 控制系统由模拟 PID 控制器和被控对象组成,如图 5.1 所示

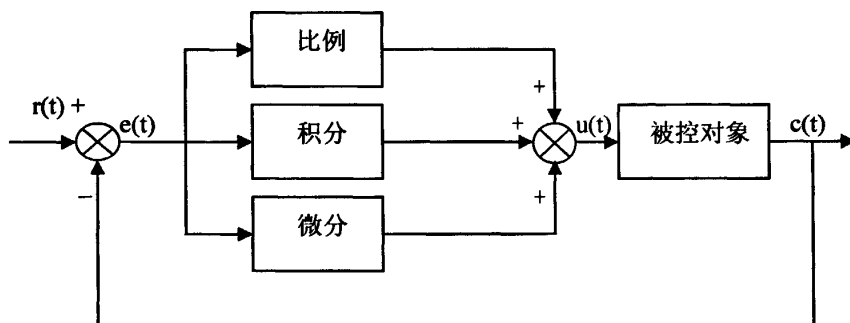


图 5.1 模拟 PID 控制系统原理框图

PID 控制器是一种线性控制器,它根据给定值 $r(t)$ 与实际输出值 $c(t)$ 构成控制偏差

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (5.1)$$

将偏差的比例(P)、积分(I 和微分(I))通过线性组合构成控制量, 对被控对象进行控制, 故称 PID 控制器。其控制规律为:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + \frac{T_D de(t)}{dt} \right] \quad (5.2)$$

其中 K_p —比例系数;

T_i —积分时间常数;

T_D —微分时间常数。

PID 控制器各校正环节的作用如:

1) 比例环节即时成比例地反映控制系统的偏差信号 $e(t)$, 偏差一旦产生, 控制器立即产生控制作用, 以减少偏差。

2) 积分环节主要用于消除静差, 提高系统的无差度。积分作用的强弱取决于积分时间常数 T_i , T_i 越大, 积分作用越弱, 反之则越强。

3) 微分环节能反映偏差信号的变化趋势(变化速率), 并能在偏差信号值变得太大之前, 在系统中引入一个有效的早期修正信号, 从而加快系统的动作速度, 减小调节时间。

5.1.2 数字 PID 控制算法

在计算机控制系统中, 使用的是数字 PID 控制器, 数字 PID 控制算法通常又分为位置式 PID 控制算法和增量式 PID 控制算法。

1) 位置式 PID 控制算法

由于计算机控制是一种采样控制, 它只能根据采样时刻的偏差值计算控制量, 因此式 5.2 中的积分和微分项不能直接使用, 需要进行离散化处理。按模拟 PID 控制算法的算式 5.2, 现以一系列的采样时刻点 T 代表连续时间 t , 以和式代替积分, 以增量代替微分, 则可作如下近似变换:

$$\left\{ \begin{array}{l} t \approx kT \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \\ \int_0^t e(t) dt \approx T \sum_{j=0}^k e(jT) = T \sum_{j=0}^k e(j) \\ \frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(kt) - e[(k-1)T]}{T} = \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \end{array} \right. \quad (5.3)$$

式中 T 为采样周期。

很明显上述离散化过程中, 采样周期 T 必须足够短, 才能保证有足够的精度。为书写方便, 将 $e(kT)$ 简化表示成 $e(k)$ 等。将式 5.3 代入式 5.2, 可得离散的 PID 表达式为

$$u(k) = K_p \left[e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D [e(k) - e(k-1)]}{T} \right] \quad (5.4)$$

或

$$u(k) = K_p e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)] \quad (5.5)$$

式中

$u(k)$ —第 k 次采样时刻的计算机输出值;

$e(k)$ —第 k 次采样时刻输入的偏差值;

$e(k-1)$ —第 $(k-1)$ 次采样时刻输入的偏差值;

K_I —积分系数, $K_I = \frac{K_p T}{T_I}$

K_D —微分系数, $K_D = \frac{K_p T_D}{T}$

由 Z 变换性质

$$z[e(k-1)] = z^{-1}E(z)$$

$$z\left[\sum_{j=0}^k e(j)\right] = \frac{E(z)}{(1-z^{-1})}$$

得到式 5.5 的 Z 变换式为

$$U(z) = K_p E(z) + K_I \frac{E(z)}{1-z^{-1}} + K_D [E(z) - z^{-1}E(z)] \quad (5.6)$$

由式 5.6 可以得到数字 PID 控制器的 Z 传递函数为

$$G(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = K_p + \frac{K_I}{1-z^{-1}} + K_D(1-z^{-1})^2 \quad (5.7)$$

或者

$$G(z) = \frac{1}{1-z^{-1}} [K_p(1-z^{-1}) + K_I + K_D(1-z^{-1})^2] \quad (5.8)$$

由于计算机输出的 $u(k)$ 直接去控制执行机构(如阀门), $u(k)$ 的值和执行机构的位置时一一对应的, 如图 5.2 为位置 PID 控制系统示意图。

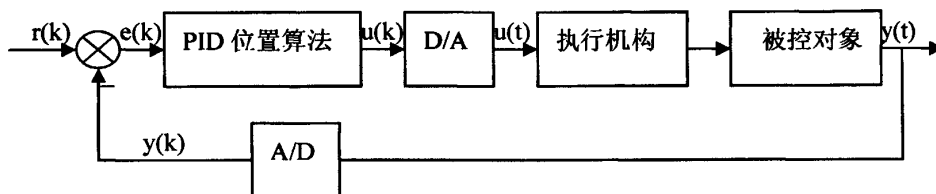


图 5.2 位置 PID 控制系统示意图

这种算法的缺点是, 由于全量输出, 所以每次输出均与过去的状态有关, 计算时要对

$e(k)$ 进行累加, 计算机运算工作量大。而且, 因为计算机输出的 $u(k)$ 对应的是执行机构的实际位置, 如计算机出现故障, $u(k)$ 的大幅度变化, 会引起执行机构位置的大幅度变化, 这种情况往往是生产实践中不允许的, 在某些场合, 还可能造成重大的生产事故, 因而产生了增量式 PID 控制的控制算法。所谓增量式 PID 是指数字控制器的输出只是控制量的增量 $\Delta u(k)$ 。下面将介绍增量式 PID 控制算法。

2) 增量式 PID 控制算法

当执行机构需要的是控制量的增量(例如驱动步进电动机)时, 可由式 5.5 导出提供增量的 PID 控制算式。根据递推原理可得:

$$u(k-1) = K_p e(k-1) + K_i \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + K_D [e(k-1) - e(k-2)] \quad (5.9)$$

用式 5.5 减去式 5.9 得到

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \\ &= K_p \Delta e(k) + K_i e(k) + K_D [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \end{aligned} \quad (5.10)$$

式中 $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$

式 5.10 称为增量式 PID 控制算法。下图 5.3 给出了增量式 PII 控制系统示意图。

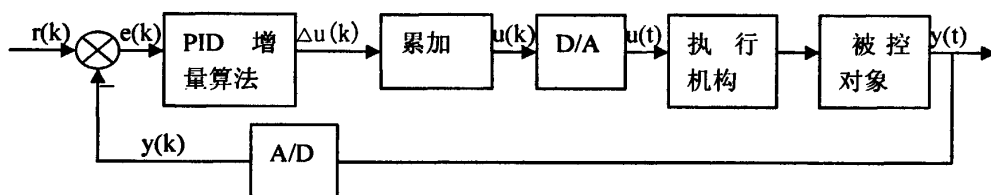


图 5.3 增量式 PID 控制系统框图

可以将式 5.10 进一步改写成

$$\Delta u(k) = A e(k) - B e(k-1) + C e(k-2) \quad (5.11)$$

$$\text{式中 } A = K_p \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_D}{T}\right), \quad B = K_p \left(1 + 2 \frac{T_D}{T}\right), \quad C = \frac{K_p T_D}{T}$$

它们都是与采样周期、比例系数、积分时间常数、微分时间常数有关的系数。可以看出, 由于一般计算机控制系统采用恒定的采样周期 T , 一旦确定了 K_p 、 K_i 、 K_D , 只要使用前后 3 次测量值的偏差, 即可由式 5.10 或式 5.11 求出控制增量。采用增量式算法时, 计算机输出的控制增量 $\Delta u(k)$ 对应的是本次执行机构位置(例如阀门开度)的增量。

位置式与增量式控制算法并无本质区别增量式控制虽然只是算法上作了一点改进, 却带来了不少优点:

a、由于计算机输出增量, 所以误动作时影响小, 必要时可用逻辑判断的方法去掉。

b、手动/自动切换时冲击小，便于实现无扰动切换。此外，当计算机发生故障时，由输出通道或执行装置具有信号的锁存作用，故能仍然保持原值。

c、算式中不需要累加。控制增量 $\Delta u(k)$ 的确定仅与最近 2 次的采样值有关，所以较容易通过加权处理而获得比较好的控制效果。

焊缝跟踪系统具有非线性、时变不确定性，存在滞后和随机干扰，难以建立精确的数学模型，应用常规 PID 控制器不能达到理想的控制效果；在实际生产现场中，由于受到参数整定方法烦杂的困扰，常规 PID 控制器参数往往整定不良、性能欠佳，对运行现场工作状况的适应性很差。针对这些问题，必须寻求 PID 控制器参数的自动整定技术，以适应复杂的现场工作状况和高指标的控制要求。随着微处理机技术的发展和现代控制理论(诸如自适应模糊控制)研究和应用的发展与深入，为控制复杂无规则系统开辟了新途径。

5.2 模糊控制器

模糊控制器是一种近年来发展起来的新型控制器，其优点是不要求掌握受控对象的精确数学模型，而根据人工控制规则组织控制决策表，然后由该表决定控制量的大小。将模糊控制和 PID 控制器两者结合起来，扬长避短，既具有模糊控制灵活而适应性强的优点，又具有 PID 控制精度高的特点。这种 Fuzzy—PID 复合型控制器，对复杂控制系统和高精度伺服系统具有良好的控制效果，也是近年来十分热门的研究课题。^[42]

本节将介绍模糊控制的基本原理、构成方式。

5.2.1 模糊控制的基本原理

模糊控制是以模糊集合论、模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础的计算机智能控制，其基本概念是由美国加利福尼亚大学著名教授 L.A.Zadeh 首先提出的。

模糊控制的基本原理框图如图 5.4 所示。它的核心部分为模糊控制器，如图中点划线框中部分所示，模糊控制器的控制规律由计算机的程序实现。

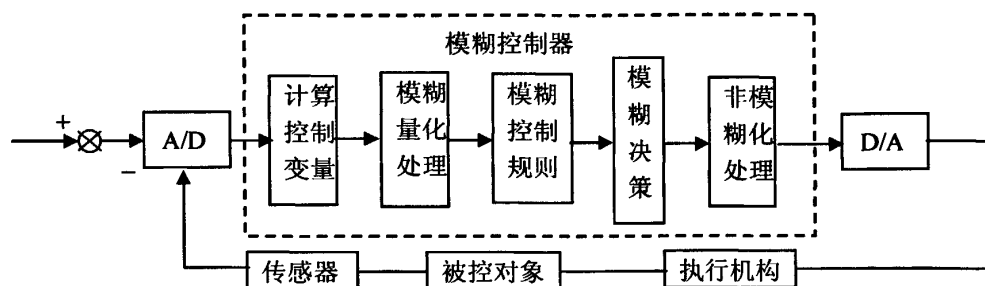


图 5.4 模糊控制原理框图

模糊控制算法的过程描述如下：微机经中断采样获取被控制量的精确值，然后将此量与给定值比较得到误差信号 e ，一般选误差信号 e 作为模糊控制器的一个输入量。把误差信号 e 的精确量进行模糊化变成模糊量。误差 e 的模糊量可用相应的模糊语言表示，得到

误差 e 的模糊语集合的一个子集 (e 是一个模糊矢量), 再由 e 和模糊控制规 R (模糊算子) 根据推理的合成规则进行模糊决策, 得到模糊胜制量 u 。

$$u = e \cdot R \quad (5.12)$$

5.2.2 模糊控制器的组成结构

模糊控制器由模糊化模块、数据库和规则库构成的知识库、模糊推理模块和解模糊模块组成。如图 5.5 所示为模糊控制器结构图。

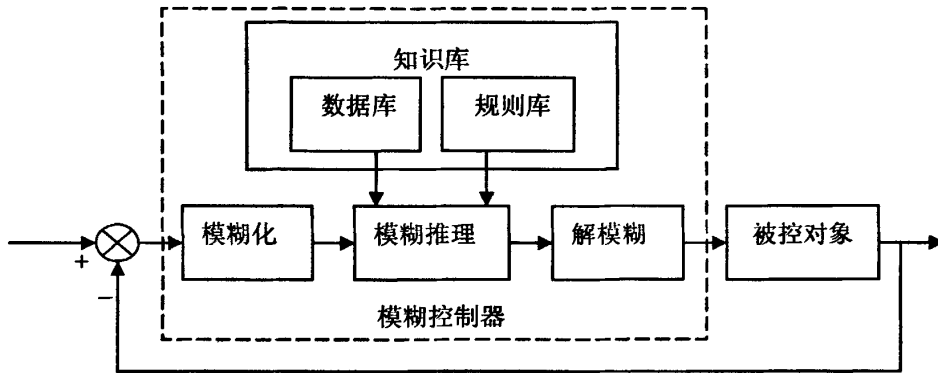


图 5.5 模糊控制器结构图

1) 模糊化接口

所谓模糊化, 就是通过传感器把被控对象的相关物理量转换成电量, 若传感器的输出量是连续的模拟量, 还要事先通过 A/D 转换器转换成数字量作为计算机的输入测量值; 接着再将此输入测量值进行标准化处理, 即把其变化范围映射到相应内部论域中, 然后将内部论域中的该输入数据转换成相应语言变量的概念, 并构成模糊集合, 这样就把输入的精确量转换为用模糊集合隶属函数表示的某一模糊变量的值。由此才能用检测到的输入量作为模糊控制规则中的条件来运用模糊控制规则进行推理, 完成这部分功能的模块就称作模糊化接口。

焊缝跟踪系统控制器模糊化接口接受的输入信号是焊缝的偏差 e 。和偏差变化率 ec , 模糊化接口的主要功能是将输入变量的精确值变换成其对应论域上自然语言描述的模糊集合, 以便进行模糊推理和决策。具体包括:

a、测量输入变量。

b、完成将输入变量值的实际论域向相应内部论域变换的比例映射, 即论域变换。

误差 e 和误差变化率 ec 都是非模糊的普通变量, 它们的论域(即变化范围)是实数域上的一个连续闭区间, 称为实际论域。在模糊控制器中, 实际论域要变换到内部论域。如果内部论域是离散的(有限个元素), 则模糊控制器称为“离散论域的模糊控制器”; 如果内部论域是连续的(无穷多个元素), 则模糊控制器称为“连续论域的模糊控制器”。实际论域经过论域变换后变为内部论域, 相当于乘了一个比例因子。

c、实现模糊化。

将测量输入数据转换成相应语言变量描述的项，并构成模糊集合。

2) 模糊推理机

模糊推理机由知识库(数据库和规则库)与提供模糊推理算法的模糊推理决策逻辑构成，

a、知识库

知识库由数据库和语言控制规则库两部分组成，它存储着有关模糊控制器的所有相关知识，它们决定着模糊控制器的性能，是模糊控制器的核心，其中知识库包括应用领域的知识和相应控制目标的知识。数据库是用来定义模糊控制器中语言控制规则和模糊数据操作的，它虽然称做数据库，但它存储着有关模糊化、模糊推理、解模糊等相关知识。规则库包含若干组模糊控制规则。即以“if.....then.....”形式表示，对专家控制经验集成而成的模糊条件语句。语言控制规则库通过一系列语言控制规则来表征控制目标和该领域一专家的控制策略，它是根据被控系统的行为特性和专家的控制经验总结编写而成的。

b、模糊推理机

模糊推理机的主要功能是模仿人的思维特征。根据事先制定好的由专家知识或控制经验取得的若 F 组模糊条件语句构成的模糊控制规则，运用模糊数学理论对模糊控制规则进行计算推理，实际上是根据模糊控制规则对输入的一系列条件进行综合评估，以得到一个定性的用语言表示的决策输出量，这个结果给出某一个确定的输出范围，即所谓模糊输出量，完成这部分功能的模块就称做模糊推理机。在模糊推理机中，模糊推理决策逻辑是核心，它能模仿人的模糊概念和运用模糊蕴涵运算以及模糊逻辑推理规则对模糊控制作用的推理进行决策。

3) 解模糊接口

通过模糊推理得出的模糊输出量是不能直接去控制执行机构的，在这确定的输出范围中，还必须要确定一个最具有代表性的值作为真正的输出控制量，这就是所谓解模糊判决。完成这部分功能的模块就称做解模糊接口，它的主要功能包括：

a、比例映射

比例映射将输出变量的量值从内部论域转化为相应的实际论域。

b、解模糊

解模糊的主要功能是把经模糊推理所得到的模糊控制量转化为精确的控制作用，解模糊可以看做是模糊化的反过程，它从模糊推理结果中产生控制数位，作为模糊控制器的输出。焊缝跟踪系统模糊 PID 的输出就是 PID 的参数 K_p 、 K_I 、 K_D 。

c、PID 控制模块

用模糊推理来调整 PID 控制算法中的参数，那么经模糊推理得到的结果就不是直接作为系统的输出，而是用该结果来决定 PID 控制器参数，再根据 PID 算法来决定实际系统的控制输出。这就构成一种称为“支持型”的间接模糊控制器。

5.3 模糊 PID 控制

5.3.1 模糊 PID 控制器的结构

由于操作者经验不易精确描述,控制过程中各种信号量以及评价指标不易定量表示,模糊理论为解决这一问题的有效途径,所以人们运用模糊数学的基本理论和方法,把规则的条件、操作用模糊集表示,把这些模糊控制规则以及有关信息(如评价指标、初始 PID)参数等)作为知识存入计算机知识库中,然后计算机根据控制系统的实际响应情况(即专家系统的输入条件),运用模糊推理,即可自动实现对 PID 参数的最佳调整,这就是模糊自适应 PID 控制器。

自适应模糊 PID 控制器以误差 e 和误差变化 ec 作为输入,可以满足不同时刻的 e 和 ec 对 PID 参数自整定的要求。利用模糊控制规则在线对 PID 参数进行修改,便构成了自适应模糊 PID 控制器,其结构如图 5.6 所示。

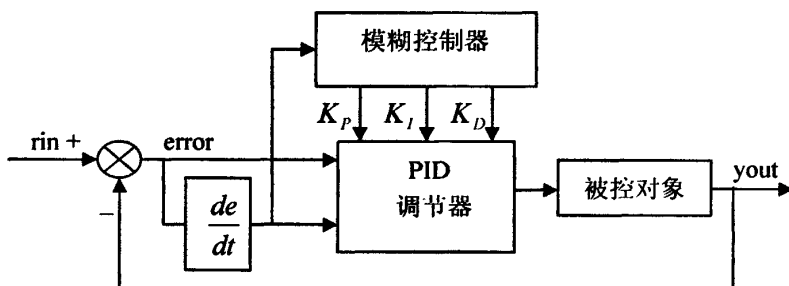


图 5.6 自适应模糊 PID 控制器结构图

5.3.2 模糊 PID 控制的设计

焊缝跟踪系统模糊推理计算的为两输入,三输出模糊控制器。以焊缝偏差及其偏差变化率为输入, PID 控制器参数调整量 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 为输出量。利用 MATLAB 的模糊控制工具箱来建立模型。

1) 模糊 PID 输入输出变量模糊化

在模糊控制应用中,被观测量通常是确定的量,即测量得到的该确定量是在一定精度范围内的精确的数值,由于在模糊控制中的操作是基于模糊集合理论的,因此,首先必须进行模糊化。

模糊化的基本思想是定义一个模糊语言映射作为从数位域至语一域(符号域)的模糊关系,从而在数位测量的基础上,将数值域中的数值信号映射到语言域上,为实现模糊推理奠定基础。模糊化与自然语言的含糊和不精确相联系,这是一种主观评价,把测量值(数值量)转换为主观量值(模糊量)的过程称为模糊化,也即把物理量的精确值转换成语言变量值。由此,它可以定义为在确定的输入论域中将所观测的输入空间转换为模糊集的映射,

以便实现模糊控制算法。

模糊概念从本质上来说就是语言变量的语言值，而语言位多用模糊集合描述，模糊集合一般由论域和隶属函数构成。因此，模糊化的实质就是求取相应概念对应数值域的模糊集合隶属函数。为了便于工程上的实现，通常把输入变量范围人为地定义成离散的若干级，所定义级数的多少取决于所需输入量的分辨率。定义输入量的隶属函数可采用吊钟型、梯形和三角形。下面对控制器的输入输出变量进行模糊化：

a、确定模糊子集

设描述输入变量及输出变量的语言值的模糊子集为：{负大，负中，负小，零，正小，正中，正大}，为了方便，采用字母形式简记：{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB}

b、确定模糊变量论域

输入变量 e 的论域为 $[-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3]$

输入变量 e 的论域为 $[-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3]$

输出变量 ΔK_p 的论域为 $[-0.3, 0.3]$

输出变量 ΔK_i 的论域为 $[-0.06, 0.06]$

输出变量 ΔK_D 的论域为 $[-3, 3]$

c、确定模糊变量的隶属度函数

本论文采用三角形隶属度函数。下图 5.7 至图 5.9 为输入输出变量的 MATLAB 仿真的隶属度函数图。

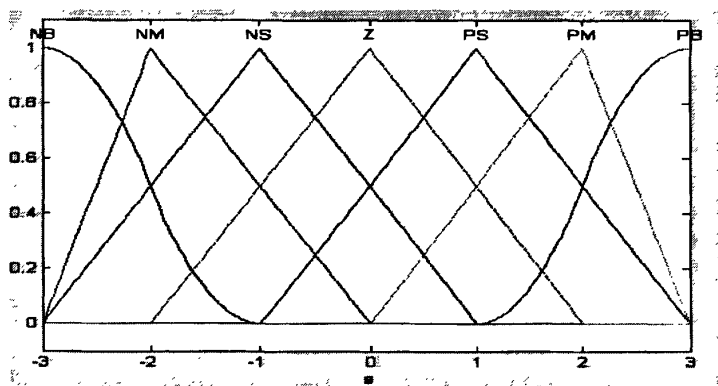


图 5.7 e 隶属度函数图

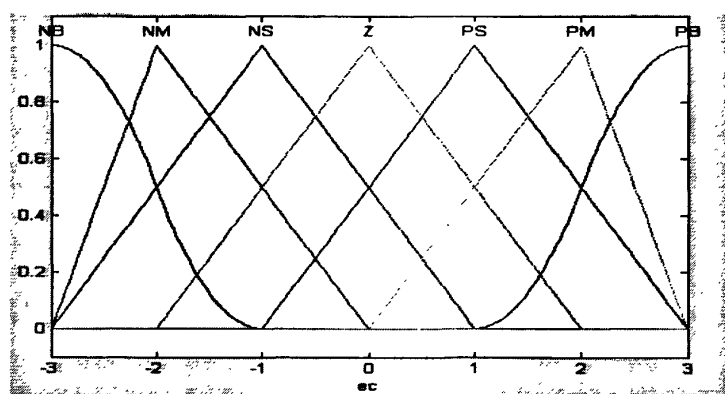


图 5.8 ec 隶属度函数图

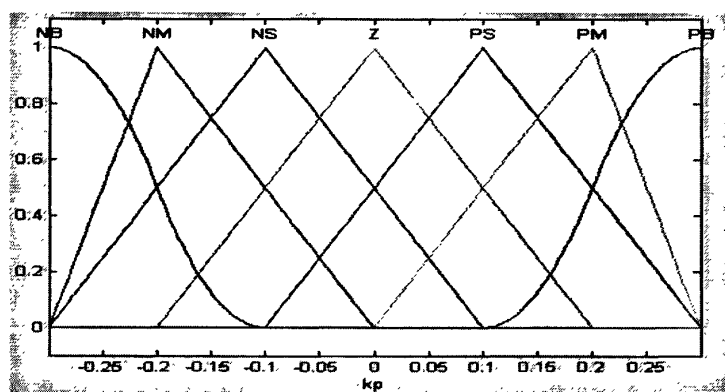


图 5.9 K_p 隶属度函数图

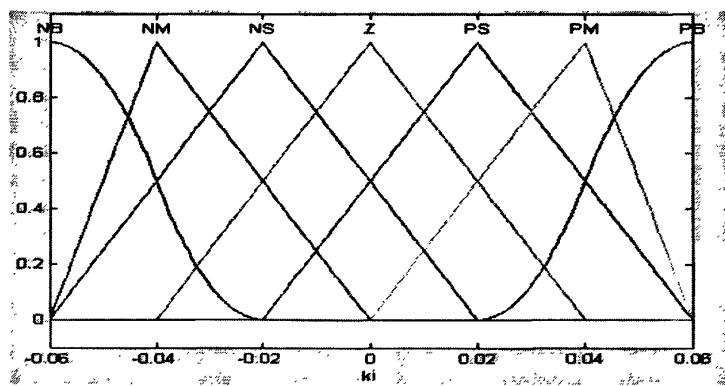
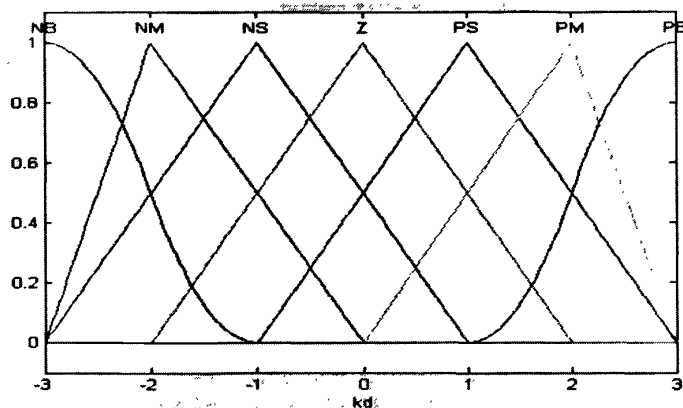


图 5.10 K_i 隶属度函数图

图 5.11 K_D 隶属度函数图

2) 模糊 PID 推理机的实现

模糊控制规则是基于手动操作人员长期积累的控制经验和领域专家的有关知识,它是对被控对象进行控制的一个知识模型。这个模型建立的是否准确,将决定模糊控制器性能的好坏。在模糊控制中,通过一组语言描述的规则来表示专家的知识,专家知识通常具有如下的形式:

IF(满足一组条件)THEN(可以推出一组结论)

在 IF-THEN 规则中的前提和结论均是模糊的概念,常常称这样的 IF-THEN 规则为模糊条件句。因此在模糊控制中,模糊控制规则也就是模糊条件句。模糊控制规则的一般形式通常如下:

R1:如果 x 是 A_1 and y 是 B_1 , 则 z 是 C_1

.....

Rn:如果 X 是 A_n and y 是 B_n , 则 Z 是 C_n

模糊规则是设计模糊控制器的核心,建立模糊控制规则的常用方法是经验归纳法。所谓经验归纳法,就是根据人的控制经验和直觉推理,经整理、加工和提炼后构成模糊规则系统的方法。这些规则实质是人类控制行为的一种语言描述。在本课题中,PID 参数的整定必须考虑在不同误差和误差变化率时三个参数的作用以及相互之间的互联关系。

根据参数 K_p , K_i 和 K_D 对系统输出特性的影响情况,可归纳出在一般情况下,在不同的 E 和 EC 时,被控过程对参数 K_p , K_i 和 K_D 的自整定要求为:

a、 K_p 的作用是增大控制量,加快系统的响应速度,提高系统的响应精度。过大会引起超调过大甚至系统振荡或失稳。它的调整原则应是,主要取决于 e , 系统输出偏小则增反之则减,增减的幅度由偏差的程度决定,当偏差较小时结合考虑 ec 。

b、 K_i 的作用是提高控制精度,但会减小系统的响应频带和响应速度,影响稳定性,使用时要防止积分饱和。它的调整原则应是,当偏差较大且继续变大时,为了防止积分饱和就减小 K_i , 当偏差较大但朝减小它的方向变化时则保持 K_i ; 当偏差较小时应增大 K_i 。

c、 K_p 的作用是改善系统的动态性能，加快响应速度，减少超调，提高系统的稳定性，但其值过大会加大系统的调节时间。它主要反映偏差的变化情况，阻碍偏差的进一步变化。

根据 K_p 、 K_I 和 K_D 的相互关系，建立三个参数的模糊控制规则表，见表 5.1 至表 5.3。

表 5.1 ΔK_p 模糊控制规则表

ΔK_p		E						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
EC	NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	NS
	NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NS
	ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
	PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
	PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
	PB	ZE	ZE	NM	NM	NM	NB	NB

表 5.2 ΔK_I 模糊控制规则表

ΔK_I		E						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
EC	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE
	NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZE	ZE
	NS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
	ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	ZM
	PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
	PM	ZE	ZE	PS	PS	PM	PB	PB
	PB	ZE	ZE	PS	PM	PM	PB	PB

表 5.3 ΔK_D 模糊控制规则表

ΔK_D	E						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
EC	NB	PS	NS	NB	NB	NM	PS
	NM	PS	NM	NS	NS	NS	PS
	NS	ZE	NS	NM	NM	NS	ZE
	ZE	ZE	NS	NS	NS	NS	ZE
	PS	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PS	PS	PB

3) 模糊 PID 解模糊

通过模糊推理得到的结果是一个模糊集合，也可以说是一个模糊量。但实际模糊控制系统所需要的控制信号必须是精确量，本论文就是要根据 e 和 ec 的变化，实时调整 PID 三个参数。求取一个相对最能代表这个模糊集合的单值的过程称为解模糊。^[42]解模糊的方法很多，常用的主要有如下几种：

a、中位数法

中位数法是全面考虑推理结论模糊集合各部分信息作用的一种方法，即把隶属函数曲线与横坐标所围成的面积分成两部分，在两部分相等的条件下，将两部分分界点所对应的论域元素作为判决结果。

设模糊推理的输出为模糊 C 。如果存在 u^* ，并且使：

$$\sum_{u_{\min}}^{u^*} \mu_c(u) = \sum_{u^*}^{u_{\max}} \mu_c(u) \quad (5.13)$$

则取 u^* 为解模糊后所得的精确值。

b、最大隶属度法

最大求属度法是指在推理结论的模糊集合中选取隶属度最大的元素作为精确控制量的方法，如果论域上多个元素同时出现最大隶属度值，则取它们的平均值作为解模糊判决结果。

设存在模糊集 C ，所选择的隶属度最大的元素 u^* 应满足：

$$\mu_c(u^*) \geq \mu_c(u), u \in U \quad (5.14)$$

如果该模糊集合隶属函数曲线是梯形平项的，那么具有最大隶属度的元素就可能不止一个，这时就要对所有取最大隶属度的元素求取平均值。

c、重心法

重心法,也称力矩法。它取推理结论模糊集合隶属函数曲线与横坐标轴所围成面积的重心作为代表点,即

$$u = \frac{\int x \mu_N(x) dx}{\int \mu_N(x) dx} \quad (5.15)$$

当输出变量的隶属函数为离散单点集时,则为:

$$u = \frac{\sum x_i \cdot \mu_N(x_i)}{\sum \mu_N(x_i)} \quad (5.16)$$

用上述各种解模糊判决方法进行解模糊判决,对于同一个推理结论的模糊集合而言,显然会得到不同的结果,不同解模糊判决方法的性能可以比较如下:

(1) 中位数法虽然比较充分地利用了模糊集合提供的信息量,考虑了所有信息的作用;但是,它的计算过程较为麻烦,而且缺乏对隶属度较大元素提供主导信息的充分重视,这是这种方法的不足之处。因此,中位数法在实际的控制系统中应用并不普遍。

(2) 最大隶属度法的明显优点是简单易行,使用方便,算法实时性好;但是,它的一个明显的缺点是:仅仅利用了最大隶属度的信息,忽略了较小隶属度元素的影响和作用,输出信息量利用的太少,代表性不好。这种方法常用于简单控制系统。

(3) 重心法不仅有公式可循,而且在理论上比较合理。它涵盖和利用了模糊集合的所有信息,并根据隶属度的不同而有所侧重,很适合高精度的控制系统。

综合各种解模糊的方法,本论文采用重心法解模糊,表 5.4 至表 5.6 为 PID 参数修正表。

表 5.4 ΔK_p 参数修正表

ΔK_p		E						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
EC	NB	0.21	0.21	0.16	0.16	0.06	0	0
	NM	0.21	0.21	0.16	0.06	0.06	0	-0.06
	NS	0.16	0.16	0.16	0.06	0	-0.06	-0.06
	ZE	0.16	0.16	0.06	0	-0.06	-0.16	-0.16
	PS	0.06	0.06	0	-0.06	-0.06	-0.16	-0.16
	PM	0.06	0	-0.06	-0.16	-0.16	-0.16	-0.21
	PB	0	0	-0.16	-0.16	-0.16	-0.21	-0.21

表 5.5 ΔK_I 参数修正表

ΔK_I		E						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
EC	NB	-0.053	-0.053	-0.033	-0.033	-0.02	0	0
	NM	-0.053	-0.053	-0.033	-0.02	-0.02	0	0
	NS	-0.053	-0.033	-0.02	-0.02	0	0.02	0.02
	ZE	-0.033	-0.033	-0.02	0	0.02	0.033	0
	PS	-0.033	-0.02	0	0.02	0.02	0.033	0.053
	PM	0	0	0.02	0.02	0.033	0.053	0.053
	PB	0	0	0.02	0.033	0.033	0.053	0.053

表 5.6 ΔK_D 参数修正表

ΔK_D		E						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
EC	NB	0.6	-0.6	-2.1	-2.1	-2.1	-1.6	0.6
	NM	0.6	-1.6	-0.6	-0.6	0	-0.6	0.6
	NS	0	-0.6	-1.6	-1.6	-0.6	-0.6	0
	ZE	0	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	0
	PS	0	0	0	0	0	0	0
	PM	2.1	-0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	2.1
	PB	2.1	1.6	1.6	1.6	0.6	0.6	2.1

4) PID 参数在线调整

模糊自整定 PID 是在 PID 算法的基础上，通过计当前焊缝误差 e 和误差变化率 ec ，利用模糊规则进行模糊推理，查询模糊矩阵表进行 PID 三个参数在线调整。将查出的修正参数代入下式计算出修正后的 PID 参数。

$$\begin{aligned} K_P &= K'_P + \{e_k, ec_k\}_P \\ K_I &= K'_I + \{e_k, ec_k\}_I \\ K_D &= K'_D + \{e_k, ec_k\}_D \end{aligned} \tag{5.17}$$

在线运行过程中，控制系统通过对模糊逻辑规则的结果处理、查表和运算，完成对 PID 参数的在线自校正。其工作流程图如图 5.12 所示

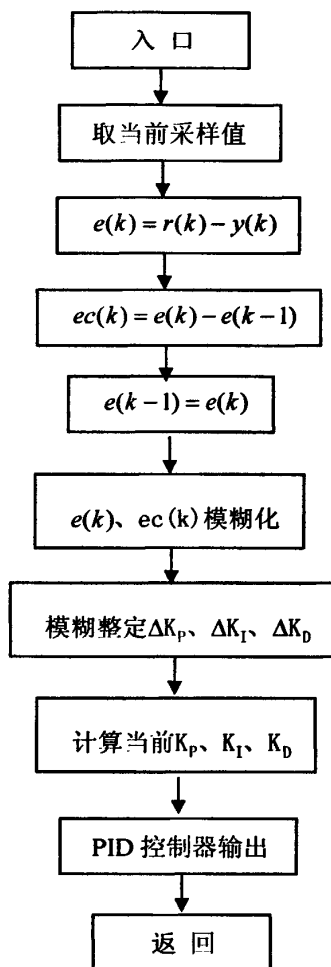


图 5.12 模糊 PID 在线参数自校正流程图

5.4 本章小结

本章介绍了 PID 控制器的基本原理和结构，通过分析 PID 控制应用上的局限性引入了模糊控制器，将二者有机的结合起来形成了模糊自适应 PID 控制器。利用 Matlab 仿真软件对 Fuzzy-PID 控制器进行仿真，这为工程的进一步应用打下了基础。

6 焊缝跟踪系统仿真分析

6.1 焊缝跟踪图像算法仿真

6.1.1 焊缝跟踪图像算法结构

由于主管道材质不同,以及焊接现场环境变化,使得 CCD 传感器获取的图像在不同程度上受到噪声的污染。在同一地点同一材质所采用的焊缝图像分析算法到条件不同的地方很可能效果不理想。为了提高图像算法分析软件通用性,我们可以设计一个焊缝边缘提取系统,以一个图像处理算法库为核心,利用人机交互系统输入焊缝图像。由输入焊缝图像的特点调用相应的图像处理算法,最终获得焊缝中线的特征信息。

图像算法库是在 Windows 平台下,用 VC++6.0 编程,所有的算法编程为 Cimage 类的成员函数。图像算法类库的如下图 6.1 所示,在实际中根据图像的特点合理调用不同的图像算法组合以便达到图像特征提取的目的。本论文提取的是主管道焊缝图像,根据实验结果采用如图的图像处理方法可以得到焊缝的中线。

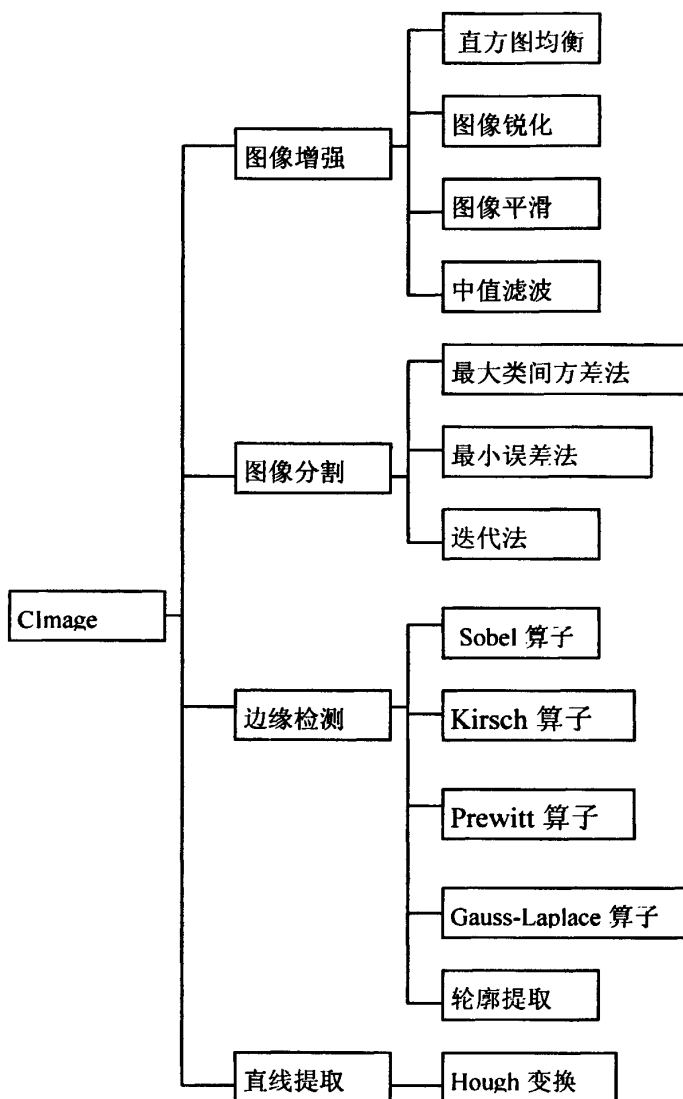


图 6.1 图像算法类库结构图

6.1.2 主管道焊缝提取算法


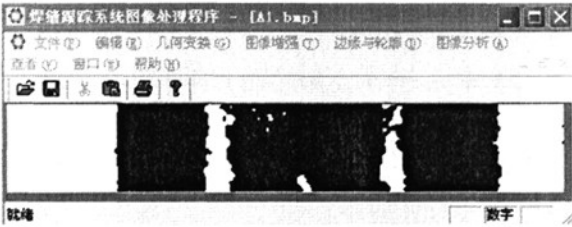
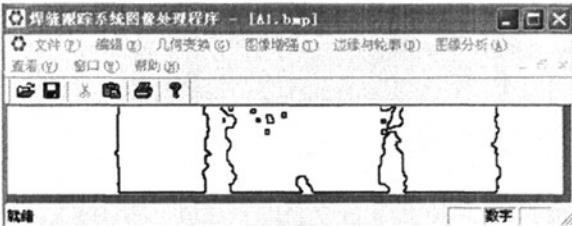
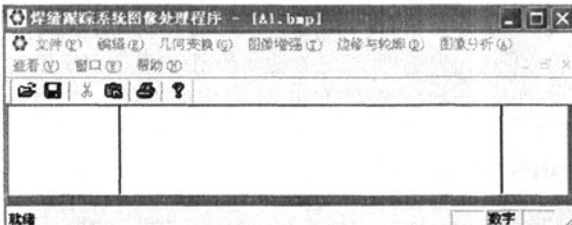
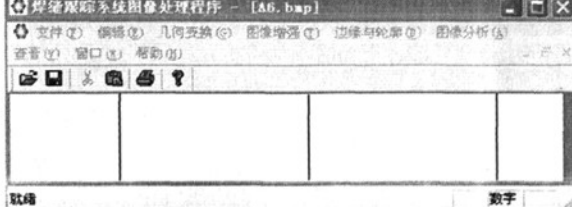
主管道焊缝提取算法的工作过程为：

- 1) 获得焊缝原始灰度图像；
- 2) 对原始图像采用快速中值滤波（ 3×3 模板）方法除去原始图像的噪声，使图像平滑；
- 3) 将经过滤波后的图像进行迭代法阈值分割，使有用的信息从图像背景中分离出来。分割后的焊缝图像在经过轮廓提取，产生焊缝边缘大致图像；
- 4) 再利用改进 Hough 变换找出左右两条焊缝直线；
- 5) 根据左右焊缝直线的坐标采用平均法计算出焊缝中线的位置。

6.1.3 主管道焊缝图像处理结果

下表 6.1 是焊缝图像处理步骤结果：

表 6.1 主管道焊缝图像处理

序号	图像处理步骤	图像处理结果
1	中值滤波	
2	阈值分割	
3	轮廓提取	
4	HOUGH 变换	
5	提取中线	

通过将原始焊缝图像经过滤波、阈值分割、轮廓提取、Hough 变换一系列图像处理，可以精确得到焊缝中线的特征信息。

6.2 模糊 PID 控制器仿真结果

本论文分别对经典 PID 和模糊自适应 PID 控制器进行阶跃相应仿真, 采样时间为 1ms, 通过对比输出波形进行性能分析。

1) 分别用阶跃信号对普通 PID 和模糊自适应 PID 进行仿真

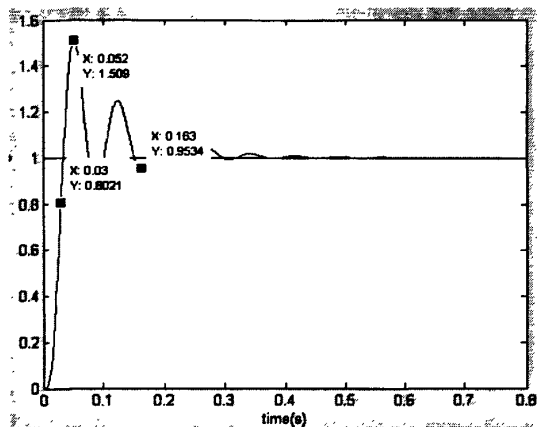


图 6.2 PID 控制器的阶跃相应

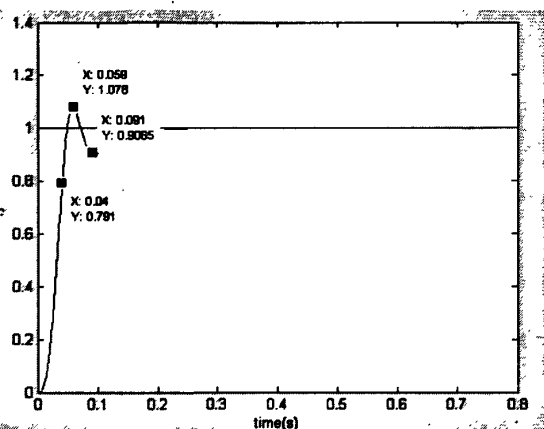


图 6.3 模糊 PID 控制器的阶跃相应

对比图 6.2 和图 6.3 很明显可以看出, 模糊 PID 的响应速度较快, 调节时间更短, 超调量也很小, 和常规 PID 控制算法相比有着明显的优越性。

2) 在第 500 个采样时间时, 给控制器输出加 1.0 的干扰。

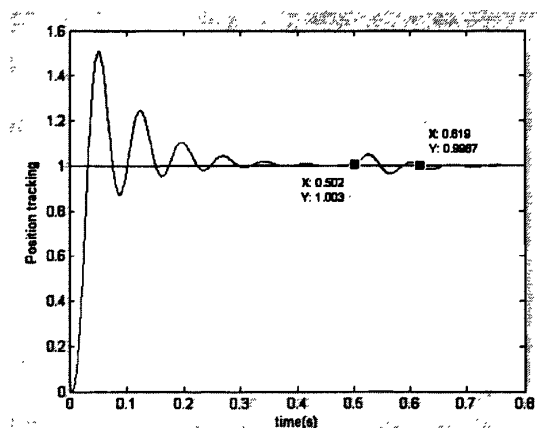


图 6.4 PID 控制器对干扰的相应

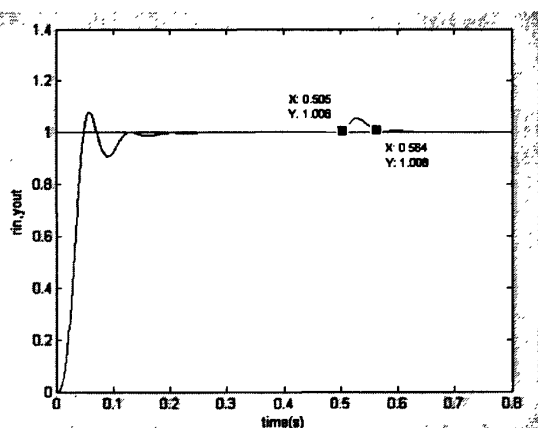


图 6.5 模糊 PID 控制器对干扰的相应

通过对比图 6.4 和图 6.5, 可以明显看出模糊 PID 控制器比 PID 控制器重新回到稳态的时间小, 对干扰的抵抗能力强。

3) PID 参数随输入自适应调整

如图 6.6 至图 6.8 为 PID 三个参数在线自适应调整的仿真图。

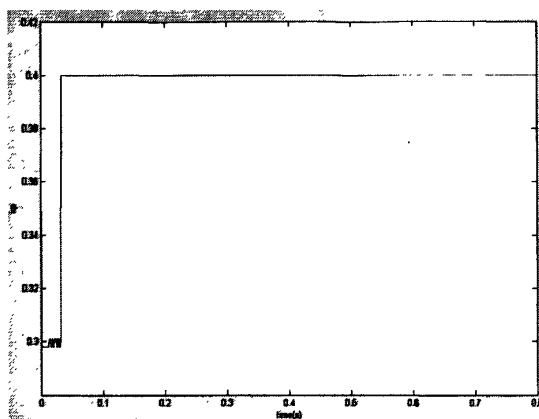


图 6.6 K_p 自适应调整

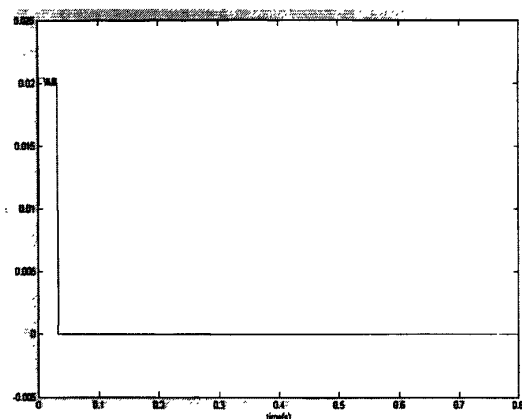


图 6.7 K_i 自适应调整

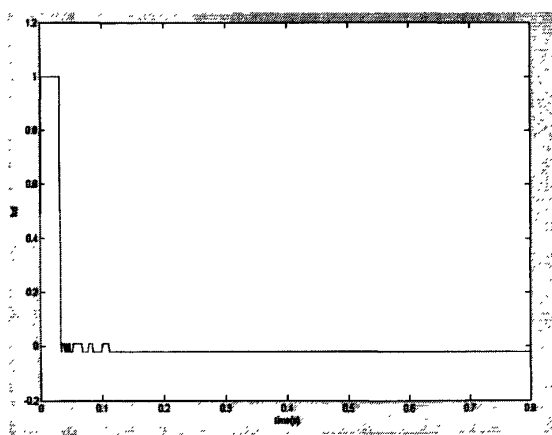


图 6.8 K_d 自适应调整

6.3 本章小结

本章利用 VC++ 编程实现了对焊缝图像的处理，找出了焊缝的中线。通过对比 PID 控制器和模糊 PID 控制器的 Matlab 仿真图，得到模糊 PID 控制器的控制性能更加优越的结论。

7 总 结

7.1 焊缝图像处理算法

1) 速度问题

图像处理中, 图像识别是关键步骤, 它使用一定的数学算法对数字图像进行运算, 数字图像的运算量是十分大的, 要实现焊接质量的实时控制, 图像处理速度是不得不考虑的一个问题, 需要高效的图像处理算法。使用快速傅立叶变换、小波变换等数学工具进行图像分割和边缘提取, 可以降低图像处理算法的总体复杂性。但它需要进行复数计算, 一般进行复数运算要比进行实数运算费时得多, 还是存在速度问题。因此, 在焊缝自动跟踪系统中, 使通用性的算法达到图像处理过程中的速度要求、满足实时性是亟待解决的问题。

2) 精度问题

图像处理部分的精度是由图像的整个运算过程决定的: 在数字图像采集、处理和分析的过程中, 由于各种因素的作用和影响, 原始的和连续的信息有所损失。从客观场景到测量数据的整个图像处理和分析过程中, 有许多因素会对特征测量的精度产生影响, 误差是不可避免的。在图像分割过程中, 选择合适的阈值进行图像分割, 采用合适的图像边缘检测算法将有用的信息提取出来是整个图像处理精度的关键。

因此, 寻找一种适合焊缝图像特点的能够满足高精度实时焊缝跟踪要求的处理算法已经成为目前研究的主要方向。

7.2 焊缝偏差控制器

实时精确跟踪轨迹并调整焊接参数的智能焊接机器人已经成为焊接领域的重要发展趋势之一。焊接跟踪控制器的设计是焊接执行机构的核心。在线实时调整控制器参数使之能够适应复杂多变的焊接环境, 本论文使用的模糊自适应 PID 控制器就是一种智能型的控制器, 在实际应用中, 上位机可以实时调节控制器的参数, 并把计算好的结果出给下位机, 这样可以适用多种焊接环境。焊接控制器接收焊接视觉系统传来的偏差信息, 将使得焊接过程通过闭环反馈控制而实现完全自动化, 保证焊接质量, 提高焊接生产效率。

7.3 下一步要做的工作

视觉传感器具有获取的信息量大、精度高优点, 本文在完成焊缝偏差检测的基础上要充分挖掘图像处理信息的潜力, 可以进一步实现多层的焊道自动规划、焊接起始位置定位和焊后的接头外观检查。对图像处理算法还要优化以提高焊缝跟踪系统的跟踪精度和反应速度。

参考文献

- [1] 林尚扬, 陈善本, 李成桐. 焊接机器人及其应用.[M]北京:机械工业出版社, 2000, 1-3
- [2] 王彬., 我国焊接自动化技术的现状与发展趋势[J].焊接技术, 2002, (6): 28-32
- [3] 唐向阳, 张勇, 李江有等. 机器视觉关键技术的现状及应用展望.[J]昆明理工大学学报(理工版), 2004, 29(2): 36-39
- [4] 贾云得, 机器视觉.[M]北京:科学出版社, 2000, 1-2
- [5] 宋晓梅, 张勃. 针对焊缝跟踪传感器的研究与探索[J]. 沈阳大学学报, 2002, 14(4): 22-24
- [6] 毛鹏军, 黄石生, 薛家祥等. 弧焊机器人焊缝跟踪系统研究现状及发展趋势.[J]电焊机, 2001, 31(10): 9-12
- [7] S. Murakami. Weld Line Tracking Control of Arc Logic Controller. [J] Fuzzy Sets and Systems 1989 Welding Robot Using Fuzzy 32(2): 221-237
- [8] 李宪政, 长输管线高效焊接技术及焊机特点[J]. 焊接技术. 2000, 29(增刊)
- [9] 王秀媛, 焊缝视觉图像处理与跟踪技术的研究.[C]. 广州: 华南理工大学, 2001
- [10] J Mahajan, Ajay Figueroa, Fernando. Intelligent seam tracking using ultrasonic [J] sensors for robotic welding. Robotics. 1997, 15(3): 275-281
- [11] 张华, 陈强, 潘际奎. 基于焊缝 CCD 图像模式特征的焊缝轨迹识别[J]. 机械工程学报. 1996, 22(6): 31-36
- [12] Mike Wilson. Vision systems in the automotive industry. [J] Industrial Robot. 1999, 26(5): 354-357
- [13] Hsing-Chia Kuo, Li-Jen Wu. An image tracking system for welded seams using . [J] Journal of Materials Processing Technology. 2, 120: 169-185
- [14] Jasjit S. Suri. Computer Vision, Pattern Recognition and Image Processing in Left Ventricle segmentation: [J] The Last 50 Years. Pattern Analysis & Application. 2000, 3: 209-242
- [15] 何广平, 智能机器人[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 53-56
- [16] 国澄明, 吴人育, 乌日图, 李晓琦. 机器人焊接视觉跟踪[J]. 天津大学学报. 1995 28 (1): 12-15
- [17] 王国荣, 石永华, 刘桑. 焊缝自动跟踪系统中的智能控制[J]. 电焊机. 2000. 30 (8): 17-20
- [18] 钟继光, 刘桑, 王国荣. 视觉传感及图像处理技术在焊接中的应用[J]. 电焊机, 1999 29(9)
- [19] Wu Minsheng. A new scanning method of optical sensor system for seam tracking in three dimensions. [J] Welding the world. 1994, 34: 333-339
- [20] Effect of some image processing on the seam tracking by a welding robot with visual sensor. [J] Proceedings of the International Offshore and Polar 1995, 6: 11-16

- [21]Georg von Wichert. Can robots learn to see. [J]Control Engineering Practice. 1999, 7:783-795
- [22]陈丙森, 计算机辅助焊接技术[M].北京:机械工业出版社, 1999: 243-245
- [23]潘际蜜, 现代弧焊控制[M].北京:机械工业出版社, 2000: 1-12
- [24]胡胜刚, 李俊岳.光电弧焊传感器的发展状况及其控制技术[J].焊管.1998,21(1):10719.
- [25]吴林, 陈善本.智能化焊接技术[M].北京:国防工业出版社, 2000: 208-210
- [26]黄松涛, 球罐焊接机器人视觉跟踪技术的研究:[C].北京:石油大学, 2003
- [27]袁详辉, 固体图像传感器及其应用[M].重庆:重庆大学出版社.1996
- [28]章疏晋, 图像工程(上):图像处理和分析[M].北京:清华大学出版社.1999
- [29]乔秉新, 李树青.机器人视觉技术[M].北京:国防工业出版社.1994
- [30]王秀媛, 黄石生, 薛家祥.小波分析在焊缝检测图像处理中的应用[J].电焊机.2000, 30(5): 27-29
- [31]陈念, 孙振国, 陈强.基于视觉图像传感的精密脉冲 TIG [J].焊接学报, 2001, 22(4):17-20
- [32]王秀媛, 黄石生, 薛家祥.基于图像分割的图像处理法在焊缝识别中的应用[J].电焊机.2000 30(10): 32-34
- [33]钟玉琢, 乔秉新, 李树青.机器人视觉技术[M].北京:国防工业出版社, 1994
- [34]Wilson, Mike. Vision systems in the automotive industry. [J]Industrial robot. 1999, 26(5):354-357
- [35]王庆有, CCD 应用技术[M]天津:天津大学出版社, 2000
- [36]苏金明, 黄国明, 刘波.MATLAB 与外部程序接口[M].北京:电子工业出版社, 2004
- [37]孙兆林.MATLAB 6.x 图像处理[M].北京:清华大学出版社, 2002
- [38]张兆礼, 赵春晖, 梅晓丹.现代图像处理技术及 Matlab 实现[M].北京:人民邮电出版社, 2001
- [39]W. K.普拉特, 葛成辉.数字图像处理学[M].北京:科学出版社, 1984
- [40]Tung-Hsu, Ming-Der Pem. A Computer Vision Based Shape-Classification System [J]Using Image Processing and a Neural Network. Advanced Manufacturing Technology.1999, 15: 843-850
- [41]韩俊峰, 李玉惠, 模糊控制技术[M].重庆: 重庆大学出版社, 2001
- [42]刘金坤, 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M].北京: 电子工业出版社, 2004
- [43]胡绳荪, 孟英谦, 单平.焊缝跟踪 Fuzzy-P 控制规则的研究.机械工程学报[J]2000, 36(12): 50-53
- [44]岳宏, 孙立新, 蔡鹤高.基于结构光的机器人焊接实时图像处理方法的研究[J].机器人.1999 2}(3): X44-X47

攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] 张海刚. 基于图像技术的焊缝跟踪系统算法研究[C]. 科技信息. 2008.34: 12-13.

致 谢

感谢导师谭宝成教授的关心、指导和教诲。谭宝成教授追求真理、献身科学、严于律己、宽以待人的崇高品质对学生将是永远的鞭策。

作者在攻读硕士学位期间的工作自始至终都是在谭宝成教授的全面、具体的指导下进行的。谭老师渊博的知识、敏锐的思维、民主而严谨的作风，使学生受益匪浅，终生难忘。

感谢山东核电设备制造公司焊接组的张春华高工对我的帮助和提供数据支持。

感谢孙景峰、廉春原、徐艾三位同学对我的关心和帮助。

感谢我的父母和妻子对我一直的无私支持与关怀、照顾。