

分类号: TP24  
UDC:

密级:   
编号: 13-080200-29M

# 学 位 论 文

## 焊接机器人焊缝信息视觉检测系统研究

王 璇

指导教师姓名: 李 慨      副教授    河北工业大学

申请学位级别: 硕 士      学科、专业名称: 机械工程

论文提交日期: 2013 年 2 月    论文答辩日期: 2013 年 3 月

学位授予单位: 河北工业大学

答辩委员会主席:

评 阅 人:

2013 年 3 月



Thesis Submitted to  
Hebei University of Technology  
for  
The Master Degree of  
Mechanical Engineering

**RESEARCH ON VISUAL DETECTION SENSOR OF  
WELDING ROBOT**

by  
Wang Xuan

Supervisor: Associate Prof. Li Kai

March 2013



## 原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文不包含任何他人或集体已经发表的作品内容，也不包含本人为获得其他学位而使用过的材料。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人或集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：



日期：2013.3

## 关于学位论文版权使用授权的说明

本人完全了解河北工业大学关于收集、保存、使用学位论文的以下规定：学校有权采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供本学位论文全文或者部分内容的阅览服务；学校有权将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流；学校有权向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名：



日期：2013.3

导 师 签 名：



日期：2013.3



# 焊接机器人焊缝信息视觉检测系统研究

## 摘 要

焊接技术的自动化、柔性化和智能化是提高焊接质量、提高生产效率、降低制造成本的保证。采用机器人焊接已经成为焊接技术自动化的主要标志。由于视觉传感器为非接触测量,可获得的信息量大,具有强灵敏度、高精度和强抗干扰能力等优点,已成为焊接机器人的必然发展趋势。要实现焊缝自动跟踪控制,焊缝信息视觉检测技术是其中的核心技术。目前焊缝视觉跟踪仍存在实时性不强、智能性不高、存在导前误差等应用性难题。因此开发一种智能化高、抗干扰能力强、处理速度快、能够减小导前误差的焊缝信息视觉检测系统是十分必要的。

本文主要完成以下几方面内容:

针对视觉传感系统的各种干扰因素对图像的影响及视觉传感器体积较大的问题,研制结构光视觉传感器,对视觉传感器硬件进行选型,对光路和结构进行设计,减小视觉传感器体积,并且滤除因工件反光产生的干扰,提高其抗干扰能力。

针对焊缝跟踪系统输入量为实际值这一特点,对该视觉检测系统进行标定,主要包括摄像机标定、手眼标定和结构光标定,建立从二维图像中获取三维实际坐标的关系。

针对具有强干扰的结构光焊缝图像,深入研究各种处理方法,采用基于背景校正的方法改进最大类间方差阈值分割法,并与中值滤波、孤点滤波等处理方法组成针对具有强干扰的焊缝图像预处理组合方法,能够快速准确地提取出焊缝信息。经过大量实验证明,该图像处理方法处理一幅  $537(H) \times 597(V)$  图像的时间不大于 25ms,完全能够满足焊缝跟踪的实时性要求。

针对焊缝视觉跟踪存在导前误差的问题,采用了一种拟合焊枪前后一段距离内焊缝路径的方法来减小导前误差。经大量实验证明,此方法精度较高,能够有效的减小导前误差。

采用 LabVIEW 和 Matlab 混合编制了一套基于结构光视觉传感器的焊缝信息检测系统,系统人机界面友好。实验表明,该检测系统检测精度高、处理速度快。

**关键词:** 焊接机器人, 视觉传感器, 视觉系统标定, 图像处理, 导前误差

# RESEARCH ON VISUAL DETECTION SENSOR OF WELDING ROBOT

## ABSTRACT

The automation, flexibility and intelligence of welding technology ensure the high quality, high production efficiency and low production cost. Robot welding has become the main feature of automation welding technology. Because vision sensor has noncontact measurement, more information, sensitive, accurate and high anti-jamming performance, it becomes the inevitable developing trend of welding robot. In order to realize auto-track control, the detection is the core technology. Now the seam vision tracking still has poor real-time, poor intelligent and has the error brought by the preposed sensor, so it is necessary to develop a high-intelligent, high anti-interference performance and fast detection system, the system also can reduce the error.

This paper mainly completed the following contents:

To solve the influence by all kinds of interference factors and the size of vision sensor issues, a structure light sensor is developed. The main hardwares of vision sensor are selected, and the light path and structure is designed. As a result, the size of sensor is decreased, and the anti-interference performance is enhanced.

Considering the input of seam tracking is actual value, the vision detection system is calibrated. It mainly include camera calibration, eye-in-hand calibration and structure light calibration. The relationship between the two dimensional image to three dimensional actual coordinate is established.

Otsu based on background correction is developed for strong interference welding image. A compounding process method including this developed method, median filter, solitary point filter is to be used to pre-process seam images. As a result, the welding seam information is extracted rapidly and stably. Experiments show that using this compounding process, the seam detecting system has powerful anti-jamming ability. Within 25ms, a  $537(H) \times 597(V)$  image can be processed, so it can meet the requirement of real time seam tracking.

A fitting methods for front and back welding gun distance is developed, aimed at eliminating the error brought by the preposed sensor. Experiments show that this method has high accuracy, and can effectively reduce error.



A seam information detecting system based on structured light sensor and using LabVIEW and Matlab are taken in practice. The system human-computer interface is friendly. Experiments show that the system is with high accuracy, and fast detecting.

**KEY WORDS:** welding robot, vision sensor, calibration, image process, error brought by the preposed sensor

# 目录

第一章 绪论	1
§ 1-1 课题研究背景和意义	1
§ 1-2 焊接机器人发展现状	2
§ 1-3 焊接信息视觉传感技术	5
1-3-1 被动视觉传感器	6
1-3-2 主动视觉传感器	6
§ 1-4 视觉传感焊缝跟踪技术的发展现状和前景	6
1-4-1 焊缝视觉传感商业化产品	7
1-4-2 焊缝视觉跟踪图像处理技术的研究现状	7
§ 1-5 本文目标及内容	8
第二章 结构光视觉传感系统	10
§ 2-1 实验系统的总体构件设计	10
§ 2-2 结构光视觉传感原理	11
§ 2-3 结构光视觉传感系统的设备选择	12
2-3-1 传感器壳体	12
2-3-2 激光器的选择	12
2-3-3 CCD 摄像机及镜头的选择	12
2-3-4 滤光片组的选择	14
2-3-5 图像采集卡的选择	14
2-3-6 挡板和防飞溅透明片	15
§ 2-4 结构光视觉传感器的结构设计	15
2-4-1 CCD 摄像机与半导体激光器位置布局关系	15
2-4-2 激光器与 CCD 摄像机夹角设计	16
§ 2-5 结构光视觉传感器的数学模型	17
§ 2-6 结构光视觉传感器的机械设计	18
§ 2-7 结构光视觉传感器的安装	20
§ 2-8 本章小结	20
第三章 移动焊接机器人视觉系统标定	21
§ 3-1 摄像机模型	21
3-1-1 理想状态下的摄像机模型	21

3-1-2 实际摄像机模型.....	22
§ 3-2 摄像机的成像变换.....	23
3-2-1 摄像机坐标系和世界坐标系关系.....	23
3-2-2 摄像机坐标系和图像坐标系之间变换关系.....	23
3-2-3 世界坐标系和图像坐标系之间关系.....	24
§ 3-3 摄像机标定.....	25
3-3-1 内部参数.....	25
3-3-2 外部参数.....	25
3-3-3 传统摄像机标定方法概述.....	25
3-3-4 摄像机标定实验及结果.....	27
§ 3-4 “手眼”关系标定.....	30
3-4-1 手眼标定数学模型.....	30
3-4-2 手眼标定实验与结果.....	31
§ 3-5 结构光参数标定.....	31
3-5-1 结构光参数标定数学模型.....	31
3-5-2 结构光参数标定实验与结果.....	34
§ 3-6 本章小结.....	35
<b>第四章 焊缝图像处理.....</b>	<b>36</b>
§ 4-1 焊缝图像的特点.....	36
§ 4-2 图像处理的整体过程.....	36
§ 4-3 图像的预处理.....	37
4-3-1 加窗处理.....	37
4-3-2 图像增强.....	38
4-3-3 焊缝图像的滤波.....	40
4-3-4 图像分割.....	43
4-3-5 焊缝图像的孤点滤波.....	48
§ 4-4 焊缝图像特征点的提取.....	48
4-4-1 焊缝图像中心的提取.....	48
4-4-2 焊缝特征信息提取.....	49
§ 4-5 焊缝路径的拟合.....	52
4-5-1 超前检测.....	52
4-5-2 曲线拟合的方法.....	52
4-5-3 焊缝的曲线拟合.....	54
4-5-4 跟踪过程分析.....	54
§ 4-6 本章小结.....	55

第五章 焊缝检测系统软件设计及实验	56
§ 5-1 软件开发工具的选择	56
§ 5-2 检测系统设计	56
5-2-1 硬件系统	56
5-2-2 软件系统	57
§ 5-3 焊缝视觉信息检测的实验与分析	60
5-3-1 焊接实验	60
5-3-2 误差分析	63
§ 5-4 本章小结	64
第六章 结论与展望	65
§ 6-1 全文结论	65
§ 6-2 展望	65
参考文献	66
致谢	70

# 第一章 绪论

## § 1-1 课题研究背景和意义

焊接技术作为传统加工技术，在机械制造业中占有重要地位，除装配和机加工外，焊接技术位列第三。随着先进制造技术的发展，实现焊接产品制造的智能化、自动化与柔性化已经成为必然趋势，采用机器人焊接技术进行焊接作业已成为焊接自动化的重要标志<sup>[1,2]</sup>。焊接机器人不仅稳定性好、生产效率高，而且还能够降低工人的劳动强度和适应各种恶劣的工作环境，广泛应用于船舶、汽车、化工、炼油、冶金、压力容器、机械、航空航天等民用和军用工程及制造领域。我国是制造业大国，但我国的智能焊接水平与发达国家相比还有一定差距，大力发展智能焊接技术是提高我国工业水平的关键所在<sup>[3]</sup>。

在自动化焊接过程中，如何保证焊接质量是移动焊接机器人所面临的问题。由于焊接过程中工件受热变形和加工、装配误差都会使焊枪偏离焊道，而焊接机器人无法识别这种偏移量，从而导致焊接质量的下降。通常需要使用传感器将位置偏差传递给机器人，进行实时调整焊枪位置。据统计，焊工在进行手工焊接时，有 80% 的信息来自眼睛，其通过观察焊缝、熔池、电弧形状等来调节焊接参数和工艺，保证了焊接的稳定性<sup>[4,5]</sup>。所以，机器视觉控制技术已成为焊接机器人的必然发展趋势。

虽然目前在各类生产线中存在大量的视觉焊接机器人，但是随着对焊接质量的要求日益严格，还需要解决如下三个应用性难题：

### (1) 视觉跟踪系统控制的实时性<sup>[6]</sup>

信息图像的提取和焊缝跟踪都要求计算机视觉传感与控制有很强的实时性和很高的控制精度，但由于光学传感器科技水平和引入只能控制因素的限制，都会增加计算机处理时间，影响焊接的实时性，因此为了加快机器人响应速度，不得不以牺牲控制精度为代价。

### (2) 视觉跟踪系统的智能性<sup>[6]</sup>

由于实际焊接过程复杂多变，许多条件的改变会造成焊缝变形，使焊枪偏离焊缝。针对这些问题，焊接机器人如不能做出相应调整，将导致焊接质量的下降，故需选择高精度传感器，但机器人成本也会随之上升，如何寻求一个平衡点是个关键问题。

### (3) 视觉跟踪系统的导前误差

由于熔池图像的亮度较高，如果将结构光照射在焊枪当前位置时，熔池光强会淹没结构光，很难提取到焊缝信息。故目前的视觉传感器都会超前焊枪一段距离，这样就不可避免的引入导前误差。在进行实际焊接作业时，导前误差会影响焊接质量。

针对以上问题，开发一种智能程度高，抗干扰能力强，处理速度快，能够减小导前误差的焊缝信息视觉检测系统是十分必要的，其对完成水下、核辐射、空间环境等不适于人类参与的，且需要保证质量的焊接工作具有重大意义。

## § 1-2 焊接机器人发展现状

由世界工业机器人的应用统计可知，工业机器人的重点应用领域为：搬运、焊接、喷涂、上下料及装配等；根据行业情况可知，主要应用领域为：机车车辆、工程机械、汽车制造业等，其中汽车制造业应用最为广泛，图 1.1 为美洲各行业对机器人的需求分析<sup>[7]</sup>。

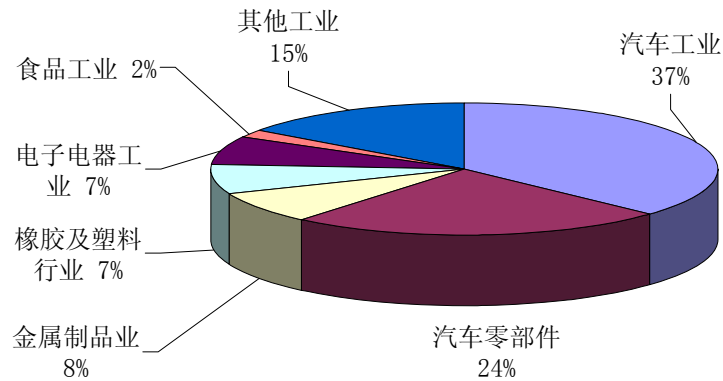


图 1.1 美洲各行业对机器人需求分布<sup>[7]</sup>

Fig. 1.1 The needs to robot distribution of America industries<sup>[7]</sup>

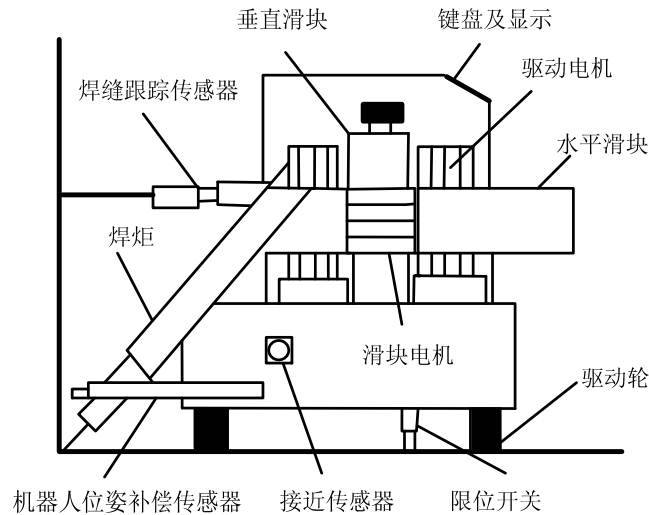
焊接机器人是由计算机控制的取代焊工完成自动焊接工作的机器，一般由能够进行两维、三维、或多个自由度运动的焊接机械手，数控焊接变位器和中央控制器等组成。初级的为示教型，常用的为数字控制型，高级的为智能型。

目前焊接机器人主要有三种形式：焊接机器人生产线、焊接机器人工作站和焊接专机<sup>[7]</sup>。焊接机器人生产线主要是用于种类多、数量少的产品；焊接机器人工作站主要用于焊缝较短、数量较多、形状较复杂的产品；焊接专机主要适用于批量大、改型慢的产品，也适用于焊缝较长、数量较少、形状规则的产品。

国外工业发达国家焊接机器人已得到广泛应用，我国近十几年应用也越来越多，尤其是在汽车工业应用电阻焊（点焊）机器人较多。日本和德国是提供焊接机器人商品最多的国家，我国也已研制出多种型号、性能先进的焊接机器人，并取得自主知识产权<sup>[8]</sup>。

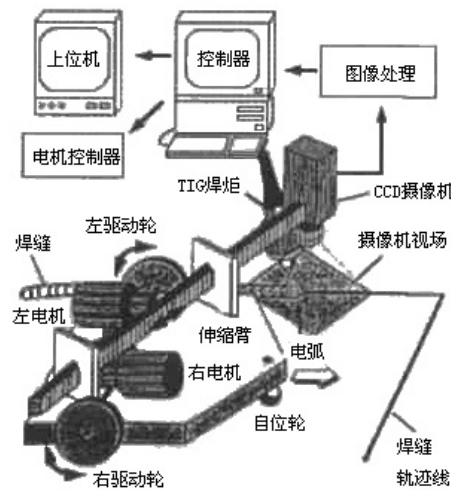
### 1 舱体格子构件焊接机器人

韩国的 Kam B.O. 等人研制了一种轮式移动焊接机器人<sup>[9]</sup>。此机器人主要用于焊接舱体格子结构的构件。此机器人的优点是体积小、重量轻，即使在狭小空间也能够进行自主焊接，可自动寻找焊缝的起始位置。在焊接格子形框架的拐角处时，能够在保持焊接速度不变的情况下，协调控制移动平台和十字滑块的运动以确保焊炬对准焊缝。如图 1.2 所示。

图 1.2 舱体格子形构件焊接机器人<sup>[9]</sup>Fig. 1.2 Shipyard welding robot<sup>[9]</sup>

## 2 平板对焊自主焊接机器人

日本庆应大学学者 Suga 等研制了自主性三轮移动焊接机器人，主要用于平面薄板焊接<sup>[10]</sup>。通过差速驱动两驱动轮来实现转弯，CCD 视觉传感器安装在移动平台上焊枪机械手末端，来检测焊缝的位置与形状，采集到焊缝信号经过处理后输入到控制器以控制机械手运动，来实现对焊缝的精确跟踪。如图 1.3 所示。

图 1.3 平板对焊移动焊接机器人<sup>[10]</sup>Fig. 1.3 Slab welding mobile robot<sup>[10]</sup>

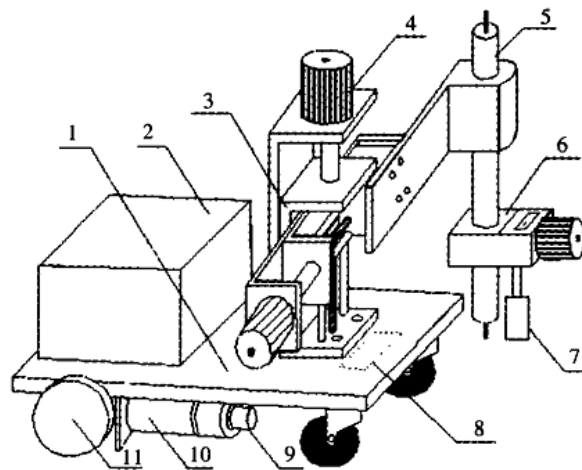
## 3 管道焊接机器人

河北工业大学岳宏、李慨等学者研发了基于视觉传感的管道焊接机器人<sup>[11,12]</sup>，如图 1.4 所示。该机器人采用永磁吸附技术将机器人吸附在管道上，无须事先铺设轨道；采用双 CCD 视觉传感器避免在焊接过程中频繁调头；采用一种焊枪侧置形式的结构，与骑跨式结构相比，使焊缝跟踪精度不受管道对口精度的影响，并可以实现管道弯角对接焊缝的焊接。该机器人焊接精度高，工作范围大。

图 1.4 管道焊接机器人<sup>[11-12]</sup>Fig.1.4 Pipeline welding robot<sup>[11-12]</sup>

#### 4 甲板焊接机器人

上海交通大学研制的轮式移动焊接机器人<sup>[13]</sup>，此机器人具有自寻迹功能。该机器人主要用于舰船甲板的焊接。在焊接前，机器人能够自主的寻找焊缝的起始位置，通过一定的轨迹推算后自动调节机器人移动平台和焊枪到待焊状态。移动平台与焊缝坡口平行，焊枪位于焊缝的坡口中心。该机器人可以实现甲板的高效自动化焊接，保证焊接质量。如图 1.5 所示。



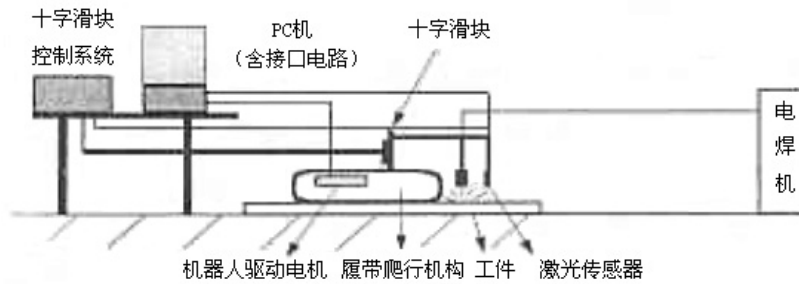
1. 机器人本体 2. 控制器 3. 十字滑块 4. 步进电动机 5. 焊炬 6. 扫描机  
构 7. 传感器 8. 永磁体 9. 编码器 10. 直流伺服电动机 11. 磁轮

图 1.5 自寻迹舰船甲板焊接移动机器人系统组成<sup>[13]</sup>Fig. 1.5 Auto-searching weld line ship deck mobile welding robot<sup>[13]</sup>

#### 5 无导轨全位置爬行式弧焊机器人

南昌大学研制的履带式爬壁弧焊机器人<sup>[14]</sup>，能够在垂直的平面上进行焊接作业。该机器人系统由爬行机构、视觉传感系统、控制电路及 PC 处理控制系统组成。视觉传感与 PC 处理控制组成焊缝识别系统，用于识别焊缝，将检测到的焊缝信息输入到焊缝跟踪系统中，实时控制移动平台和十字滑块运动以实现焊缝跟踪。如图 1.6 所示。



图 1.6 履带式爬壁弧焊机器人<sup>[14]</sup>Fig. 1.6 Pedrail mobile welding robot<sup>[14]</sup>

### § 1-3 焊接信息视觉传感技术

在焊接过程中，由于坡口的加工误差、装配误差、热变形、焊缝走向等，往往会使焊枪偏离焊缝中心，降低焊接质量。为了实现焊接自动化并且保证焊接质量，机器人必须检测出焊缝当前的偏差，然后反馈给控制器，驱动焊枪消除偏差。检测偏差必须需要传感器，焊缝传感器可分为以下几种，如图 1.7 所示。

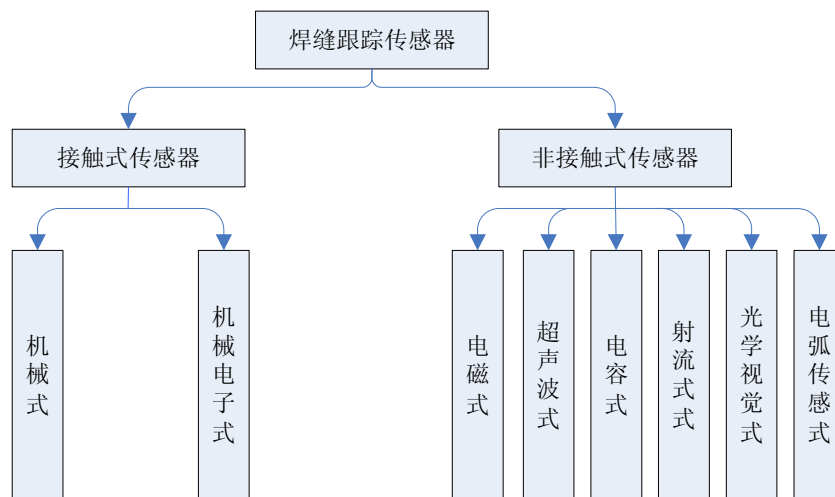


图 1.7 焊缝跟踪传感器

Fig.1.7 Seam tracking sensors

随着计算机技术的迅猛发展，图像处理技术的不断提高，并且视觉传感器具有高精度、提供丰富信息量、非接触测量等优点，适合于各种焊接形式，而且在焊接时视觉传感器还可以检测焊缝质量，其越来越受到重视，在焊缝跟踪过程中得到了大量的应用。焊接中应用视觉的有三个方面：焊缝初始位置检测与引导、焊缝跟踪及焊接质量检测。与其他传感器相比，视觉传感器非常适合于焊接过程中需要大量视觉信息检测的场合。焊接机器人在焊前的路径规划，焊接过程中焊接参数和偏差的实时调整<sup>[15]</sup>，焊接过程中附近温度场的检测<sup>[16-18]</sup>，焊后焊缝表面形状和焊接质量的分析，熔透和熔深的信息检测<sup>[19]</sup>，熔池信息检测等方面都有成功的案例<sup>[20-22]</sup>。

目前，在移动焊接机器人上使用的视觉传感器主要是 CCD 摄像机和 CMOS 摄像机<sup>[23]</sup>，由于 CCD

的技术成熟,已成为焊接视觉传感器的主流。根据是否加辅助光源可分为以自然光或者弧光为光源的被动式直接传感器和以激光或其他辅助光源照明的主动式直接传感器。

### 1-3-1 被动视觉传感器

被动视觉传感器不加辅助光源,直接使用自然光、弧光作为光源,CCD 摄像机直接采集焊接熔池图像,提取熔池信息,从而进行跟踪控制。其优点是不存在检测对象和被控对象的位置差,即不存在导前误差,设备简单,成本低<sup>[24]</sup>。缺点是干扰强烈,在焊接过程中弧光辐射强度高于熔池辐射强度,有时甚至会超过 CCD 上限,而且图像噪声经常会淹没熔池信息。因此,如何获取清晰的熔池几何信息是被动视觉跟踪的一个关键问题。

由于被动视觉传感器受弧光干扰强烈,其采集信息的准确性有待提高,且较难提取三维信息,因而在视觉焊缝跟踪系统中,主动视觉是视觉焊缝跟踪的主要方法。

### 1-3-2 主动视觉传感器

主动视觉传感器采用外加辅助光源,常采用激光为辅助光源。根据辅助光源的类型,可将主动视觉传感器分为激光扫描法视觉传感器和结构光法视觉传感器。

#### 1-3-2-1 激光扫描法视觉传感器

激光扫描法视觉传感器采用三角测量原理来获得精确距离。工作时激光光束经过反射镜的反射,将光束反射到工作表面上,在扫描振动的作用下,形成一条光带。这个光带的任意一点光强都等于激光束本身的光强。这种方法将光强集中于一点,信号处理速度快,故可得到很高信噪比<sup>[25]</sup>。

#### 1-3-2-2 结构光法视觉传感器

结构光法视觉传感器可以获取工件的二维半信息,即可以获得图像的深度。其光路系统主要由 CCD 摄像机、滤光系统、激光器组成,CCD 摄像机和激光器之间的夹角一定。在焊接过程中,激光经过组合透镜和柱状透镜后形成一条线照射在焊缝表面上,经过滤光系统滤除干扰信息,由 CCD 摄像机采集进工控机,通过图像处理便可得焊缝中心线位置。将激光器安装在和焊枪有固定距离的位置,开始焊接前移动机器人,使焊缝中心位置在图像中心成像,则可根据条纹光的变形反映出焊枪偏离焊缝的值,将其送入控制器消除偏差。结构光方法主要分为三种:干涉法、衍射法和三角测量法。基于三角法的激光视觉传感器与其他视觉传感器相比,具有以下优点<sup>[26]</sup>:(1) 获取信息量丰富,精度高,可获得截面集合形状;(2) 检测范围大;(3) 具有智能性,可检测焊接起点和终点;(4) 适用于各种坡口形状;(5) 处理速度快,实时性好。

主动视觉法的缺点是存在检测超前问题,即为了避免强烈弧光淹没有用信息,传感器会超前焊枪一段距离。这是结构光视觉传感急需解决的一个问题。

## § 1-4 视觉传感焊缝跟踪技术的发展现状和前景

随着机器人技术和图像处理技术的迅猛发展,焊缝视觉跟踪已取得了十足的进步<sup>[27]</sup>。焊缝视觉自动跟踪系统一般由视觉传感器、信息处理系统和执行机构组成。要实现焊缝的实时跟踪,有两方面技术起着决定性作用:一是图像处理技术。该技术可快速准确地提取焊缝或熔池的信息。二是焊缝的跟踪技

术。视觉传感器检测出焊缝偏差，以一定的方式控制执行机构去消除偏差。目前，市场上已经有了基于视觉传感的焊缝跟踪商业化产品。

#### 1-4-1 焊缝视觉传感商业化产品

国外焊缝视觉跟踪发展的比较早，也比较快。美国 Worthington Industries 公司开发了一种焊缝跟踪设备，其跟踪精度为  $0.1\text{mm}$ <sup>[28]</sup>。英国 Meta Machines Ltd 的 Meta Torch200 系列产品跟踪精度可达  $0.1\text{mm}$ <sup>[29]</sup>。加拿大 Servo-robot Group 公司的 ROBO-TRAC 产品可根据不同类型的焊缝来控制送丝速度，以提高焊接质量。韩国的 Jae Seon Kim、Young Tak Son、Hyung Suck Cho 等人深入研究了焊缝结构光图像处理的算法，并研制了一种基于视觉的焊缝跟踪控制系统<sup>[30-32]</sup>，其在焊接过程中能够根据焊接条件实时调整焊枪位置从而获取良好的焊接质量，该系统的焊缝跟踪精度为  $\pm 0.50\text{mm}$ 。印度的研究者 A. De 和 D. Parle 利用弧光为光源采集图像，并识别焊缝偏差，进而控制系统进行偏差消除，该系统跟踪精度可达  $\pm 0.20\text{mm}$ <sup>[33]</sup>。

虽然国内对焊缝视觉跟踪研究起步比较晚，但在一直不断的研究这一课题，目前已有了一些商业化的产品。例如南京远新自动科技有限公司的 YXAWST 系列焊缝跟踪产品，跟踪精度为  $\pm 0.02\text{mm}$ 。长春工业大学的 WSATA-0905 型焊缝视觉跟踪系统可适用于各种形式的焊接，其跟踪精度为  $\pm 0.5\text{mm}$ 。

#### 1-4-2 焊缝视觉跟踪图像处理技术的研究现状

焊缝视觉跟踪的图像处理技术的关键是运用数字图像处理技术，将采集到的各类干扰滤除，只留下焊缝信息，然后提取出具有偏差量信息的特征点。

韩国的 Doyoung Chang 等人采用高斯滤波算子的方法检测出焊缝的特征点<sup>[34]</sup>，进而设计跟踪器，结果比较精确，能用于危险场合的焊接机器人。S.K Lee 等人<sup>[35]</sup>针对摄像机提取熔池前方焊缝存在的问题，根据高密度脉冲 Vd:YAG 激光在脉冲期间强度高于弧光强度这一特点，通过频闪高速 CCD 摄像机捕捉瞬时清晰的熔池图像来进行焊缝追踪。

由于焊接的高温以及需要气体来保护焊接区域防止氧化，操作者不能紧密的观察和焊接工件，操作人员的失误和环境的变化等因素会导致焊接的失败。Hsing-Chia Kuo 等人<sup>[36]</sup>通过在图像处理技术上应用模糊控制理论来精确的进行焊缝追踪。他们首先用 CCD 采集焊缝图像，然后对图像进行灰度处理，通过模糊控制和边缘算子检测出焊缝中心线。

三维图像包含的信息丰富，所以很多研究者都通过复原三维图像进行焊缝跟踪。Piquance Xu 等人<sup>[37]</sup>通过循环的激光摄像机，从二维图像中提取出三维图像，通过三维图像来研究焊缝跟踪。

对于气体保护钨极氩弧焊，存在强烈的电弧光干扰，采用传统的图像处理方法很难得到清晰的熔池图像。X.D.Gao 等人<sup>[38]</sup>对熔池图像进行了卡尔曼滤波，滤除了干扰信号，提取准确的焊缝信息，并在计算机上进行了仿真，结果符合实际焊接需求。

Xiangdong Gao 等人<sup>[39]</sup>研究了一种基于红外热像特征的焊缝识别新方法，该方法定量分析焊接区域的温度场，根据等温线信息来确定焊枪是否偏离焊道，根据梯度信息来获得焊缝中心位置。该方法适用于非精密焊接中，即对于焊缝间隙小于  $0.2\text{mm}$  的情况下跟踪识别效果较差。

广东工业大学莫玲等人<sup>[40]</sup>通过建立一个熔池动态信息的近红外图像检测系统，用于焊接熔池视觉信息检测，应用可见光波和红外光波段滤光组合技术解决了焊接过程中飞溅、等离子体和红外辐射的干

扰,在近红外高速摄像机获取清晰的熔池区域图像的基础上,提出大功率光纤激光焊接熔池图像特征的提取方法,为焊缝跟踪和焊接质量控制提供可靠的信息。

清华大学的研究者陈新征等人改进了视觉传感器光路结构,增强了视觉传感器的抗干扰能力,通过对采集到的图像分别从软件和硬件两方面进行数字滤波和图像处理,去除了较强的干扰,从而可以准确的获取焊缝信息。通过“学习-纠错”的控制策略有效地提高了系统的稳定性和抗干扰能力,该系统的焊接速度为 100mm/min,焊接过程中 95%以上的宽度值集中在偏离给定值 $\pm 10\%$ 范围内<sup>[41]</sup>。

南昌大学的贾剑平、刘明友、刘南生等对视觉焊接机器人存在导前误差问题进行了研究,提出了可行性的解决办法,并分析了不同坡口焊缝图像处理的方法,焊缝跟踪精度在 2mm 以内<sup>[42-45]</sup>。何银水采用图像预处理,根据模糊推理的阈值自动选取的算法<sup>[46]</sup>,有效的去除了水下焊接 V 形焊缝图像中的强干扰。

哈尔滨理工大学的温建力<sup>[47]</sup>放弃了常用的建立直线的 Hough 变换,采用从图像的上面开始依列从上至下一行一行扫描,找出第一个点,然后对该列从下至上扫描,找出第二个点,这两个点的平均值为中心,该方法运行时间短,提高了计算的速度和精度,并且采用斜率分析的方法提取特征点。

哈尔滨工业大学的学者们对焊接图像处理有着丰富的研究<sup>[48-51]</sup>,其开发的基于条形激光光源 CCD 视觉传感多道焊缝自动检测系统能够准确的提取出焊缝信息,无辅助光源图像法 TIG 焊缝跟踪系统采取了一系列有效措施,即使系统在高温环境中也能稳定的工作,系统检测精度为 $\pm 0.07\text{mm}$ ,其提出的多重斜率平滑处理算法和三点接缝定位技术可准确的求取焊缝信息。

天津大学的申俊琦等人<sup>[52]</sup>通过最小二乘法建立了 Otsu 法所选阈值与焊缝激光带区域灰度平均值的直线回归方程,从而得到焊缝图像处理最佳阈值,更利于后续的焊缝特征点提取。此方法二值化的提取时间为 50ms。

通过以上分析,学者们大量地研究了焊缝跟踪技术,尤其是研究结构光图像处理方法,并且取得了一定的研究成果,但目前在实际工程中应用还比较少,还有必要对结构光图像处理算法继续进行研究。

综上所述,基于视觉传感的焊缝跟踪技术已经取得了一定的成果,但基本都处于理论阶段,对于实际应用中算法可能存在的问题考虑不全,然而视觉跟踪已经成为焊接机器人的必然发展趋势,可以预知,随着数字图像处理技术的不断发展,视觉跟踪技术将大量地应用于实际焊接作业中。

## § 1-5 本文目标及内容

随着计算机视觉技术的发展,焊缝跟踪过程中越来越多的应用到了视觉传感技术。研究焊缝视觉跟踪技术将会推动焊接机器人的发展。由于焊接机器人在进行焊接作业时是完全自动化的,为了保证焊接质量,能够准确的提取出焊缝信息是前提,故本课题研究焊缝信息视觉检测系统,研究的主要内容包括:

(1) 研究视觉传感器的结构,针对本系统对传感器各硬件进行选型并设计视觉传感器,使其能够在狭小的空间内高质量的完成焊接作业,提高传感器的抗干扰能力。

(2) 针对焊缝跟踪控制量为实际值这一特点,研究该视觉系统中采集到的图像像素点与实际坐标之间的关系,即对视觉系统进行标定。

(3) 针对焊缝图像的特点,研究基于结构光视觉传感的焊缝图像处理方法。该方法应在强干扰的情况下能准确快速的提取焊缝特征。

(4) 针对视觉传感器超前焊枪一定距离的特点, 研究如何减小或减小焊缝视觉跟踪中存在的导前误差的问题, 提高焊接质量。

(5) 设计焊缝图像实时采集与处理的软件系统。该检测系统应具有良好的人机对话界面, 并且能快速有效的提取焊缝信息。

## 第二章 结构光视觉传感系统

本章介绍了结构光视觉传感器原理及测量系统的组成,对现结构光视觉传感器进行优化和设计。焊接过程中存在多种强烈干扰,例如弧光、飞溅、烟尘等,由于各种干扰相互影响,从而会使焊枪偏离焊缝中心,导致焊接质量下降。为了实现焊接自动化及智能化,必须消除这种偏差,目前采用传感器来获取偏差信息,然后通过纠偏控制,使焊枪始终保持在焊缝的中心位置上。其中因视觉传感器具有高精度、可提供丰富的信息量、非接触测量、适于各种坡口等优点,在实际应用较广。对视觉传感器进行设计和优化需要解决的问题:

- (1) 如何使视觉传感器获取清晰的图像,提高抗干扰能力;
- (2) 如何减小传感器体积。

### § 2-1 实验系统的总体构件设计

基于结构光视觉传感的焊缝跟踪系统,其硬件主要由焊件、焊接系统、视觉传感器、图像采集卡、工控机、labVIEW 运动控制卡、移动焊接机器人、十字滑块组成。系统结构图如 2.1 所示。

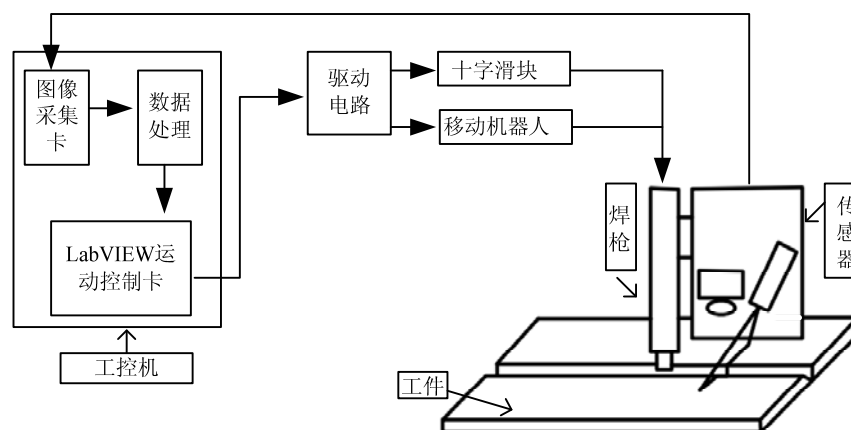


图 2.1 焊缝跟踪系统硬件组成

Fig.2.1 Hardware structure of seam tracking system

本系统视觉传感器与焊枪固定在十字滑块上,由十字滑块调整焊枪位置,上下、左右两组步进电机驱动十字滑块。在焊接作业时,CCD 摄像机采集坡口上的结构光图像,将模拟信号送入工控机中的图像采集卡,图像采集卡将模拟信号转化为数字信号,再由工控机进行一系列图像处理,得出焊枪在焊缝中的位置,计偏差偏差,并将偏差传送给 LabVIEW 多轴运动控制卡,根据一定的控制策略来驱动十字滑块或移动机器人电机,最终消除偏差。十字滑块由电机和螺杆组成,具有两个自由度,可上下、左右运动,其目的是跟踪较小的焊缝偏差。

## § 2-2 结构光视觉传感原理

半导体激光器发出的光经过组合透镜和柱状透镜后形成“一”字形结构光，其结构如图 2.2 所示。

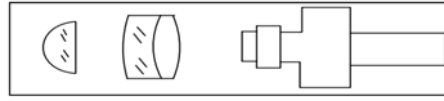


图 2.2 线性激光器结构图

Fig. 2.2 The structure of line laser

在气体保护氩弧焊中，弧光波长在 150-200nm、590-650nm 和 890-935nm 范围内较弱<sup>[53]</sup>。图 2.3 为 CCD 的光谱响应曲线，从中可以看出激光器的波长在 400-650nm 范围内时，摄像机有较大的响应。故本课题选用中心波长为 635nm、功率为 100mw、红光激光器。

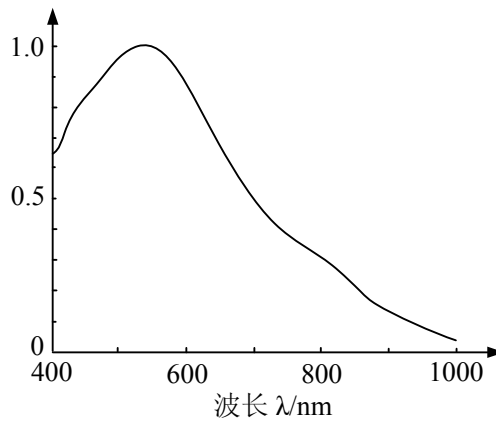


图 2.3 CCD 摄像机的光谱响应曲线

Fig. 2.3 Spectrum curve of CCD camera

线结构光视觉传感器主要由半导体激光器和 CCD 摄像机等元件组成，其中 CCD 摄像机和半导体激光器成已知角度  $\beta$ <sup>[54]</sup>，这样可以直接获取焊缝的二维半信息。在焊接过程中，半导体激光器发出“一”字形结构光照射在待焊工件表面上，经过滤光系统保留有效波长的光，然后由 CCD 摄像机采集进工控机。由于激光器和摄像机成一定角度  $\beta$ ，当“一”字形光照射到工件表面时，由于坡口各处与母材深度不同，故反射到摄像机上的位置就不同，即 CCD 摄像机采集到的“一”字形结构光图像会发生变形，变形的程度反映出待焊焊缝信息。线结构光视觉传感器结构原理如图 2.4 所示。

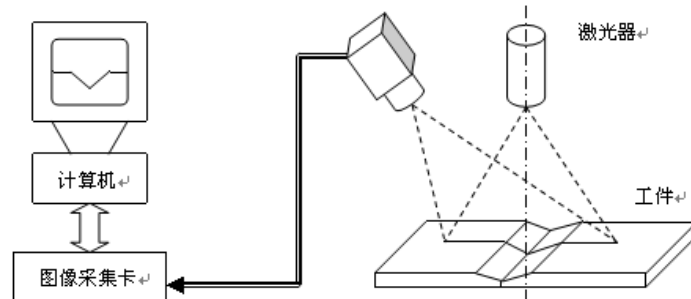


图 2.4 结构光视觉传感器结构原理图

Fig. 2.4 The principle of the structured light visual sensor

## § 2-3 结构光视觉传感系统的设备选择

### 2-3-1 传感器壳体

传感器壳体材料是经煮黑处理的铝板，煮黑处理后可减弱光线在壳体内反射，尽量避免因反射产生的干扰。

### 2-3-2 激光器的选择

激光器是利用受激辐射原理使光在某些受激发的物质中放大或振荡发射的器件，其具有高亮度、高方向性，很适合做为主动光源。激光器按工作物质可分为：自由电子激光器、气体激光器、液体激光器、固体激光器、半导体激光器这五类。考虑到视觉传感器体积应尽量小，而半导体激光器激光器具有体积小、重量轻、运转可靠、耗电少、效率高等优点，所以本系统采用红光“一”字形半导体激光器，如图 2.5 所示。由于线的宽度会影响到后续的图像处理，并且较宽的条纹不能检测小间隙或小坡口的焊缝，故线宽应越细越好。本系统激光器的主要技术参数如表 2.1 所示。



图 2.5 红光“一”字激光器

Fig. 2.5 Line laser with red light

表 2.1 激光器主要技术参数

Table 2.1 Main technical parameters of laser

型号	波长	工作电压	发散角	线宽(1M 处)	光学系统	工作温度	外形尺寸
LH-L6353DL	635 nm	3DCV	$\geq 90^\circ$	2mm	光学镀膜 玻璃透镜	$-10^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$	$\Phi 12 \times 50$

### 2-3-3 CCD 摄像机及镜头的选择

选择 CCD 时需要考虑其体积应小、功耗小、寿命长、抗干扰能力强等方面，目前市场上常见的 CCD 尺寸如表 2.2 所示。



表 2.2 CCD 尺寸

Table 2.2 The specifications of CCD

规格 (Inch)	长 (mm)	宽 (mm)	对角线 (mm)
1/4"	3.2	2.4	16
1/3"	4.8	3.6	6
1/2"	6.4	4.8	8
2/3"	8.8	6.6	11
1"	12.7	9.6	16

本系统的工作距离为 60mm, 考虑实际坡口大小, 摄像机的视场大小大于  $50 \times 50 \text{ mm}$  即可满足要求。由式 (2.1) 可以计算出镜头焦距。

$$f = \frac{P \times H}{W} \quad (2.1)$$

式中,  $f$  为镜头焦距;  $P$  为 CCD 传感器的长度;  $H$  为工作距离;  $W$  为视场范围。

所以本系统 CCD 摄像机选用 WAT-704R 型号的超低度黑白摄像头, 如图 2.6 所示。



图 2.6 WAT-902DM2 型 CCD 摄像机

Fig. 2.6 WAT-902DM2 CCD camera

此型号 CCD 摄像机的主要参数如表 2.3 所示:

表 2.3 CCD 摄像机主要参数

Table 2.3 Main technical parameters of camera

有效像素数	像素尺寸	最低照度	传感器
537(H)×597(V)	$7.3 \mu\text{m}(H) \times 4.7 \mu\text{m}(V)$	0.08Lux F2.0	1/4" Interline CCD
自动电子快门时间	解析度	信噪比	尺寸
1/50~1/100000	380Lines	>46dB	$37 \times \phi 18$

摄像机镜头选用固定焦距为  $f = 3.8 \text{ mm}$  的配套镜头。

### 2-3-4 滤光片组的选择

在焊接过程中不可避免的要产生强烈的弧光，弧光的强度远远大于激光器产生的强度，有可能会淹没信号。为了减少弧光的影响，通常会在摄像机前增加滤光片或滤光片组，这样可使激光特定波长范围的光通过，进入 CCD 摄像机。由上文可知，激光器的波长为 635nm，所以选择中心波长为 635nm，带宽为  $\pm 10\text{nm}$  的滤光片。但仅安装带通滤波片的滤波效果并不理想，因为波长在 635nm 附近的弧光也会通过滤光片，弧光的干扰还是十分严重。中性滤光片均匀减弱光强度而不改变光谱成分，这种滤光作用是非选择性的，只起到减弱光线的作用。所以使用中性滤光片可以消除通过带通滤光片的弱光干扰。

半导体激光器发出的光是线偏振光<sup>[55]</sup>，线偏振光是有方向性的，同样偏振片也具有方向性。当偏振光透过偏振片时，如果偏振光的振动方向和偏振片的投射方向平行时几乎不受阻挡，如果偏振光的振动方向与偏振片的投射方向成  $90^\circ$  时几乎不能通过。所以可以在摄像机镜头前加偏振片，可有效的减少进入 CCD 的干扰信号，使后续图像处理简单，加快图像处理速度。

因此本系统选用带通滤光片、中性滤光片和偏振片组成的滤光片组。主要技术参数如表 2.4 所示：

表 2.4 滤光片组主要技术参数

Table. 2.4 Main technical parameters of optical filters

表 2.4.1 带通滤光片主要技术参数					
中心波长	带宽FB	透射比 (%)	截止区间	截止深度 (%)	尺寸(mm)
635nm	$\pm 10\text{nm}$	$> 88$	200-1100nm	$\leq 0.05$	$\phi 12 \times 50$

表 2.4.2 中性滤光片主要技术参数		
衰减波长	平均透射比	尺寸(mm)
635nm	$50 \pm 5\%$	$\phi 12 \times 1$

表 2.4.3 偏振片主要技术参数				
偏振波长	透射率 (%)	消光比 (%)	视场角 ( $^\circ$ )	尺寸 (mm)
635nm	$> 50$	$> 100$	$> 45$	$\phi 12 \times 1$

### 2-3-5 图像采集卡的选择

选择图像采集卡需要考虑其支持的视频格式是否与 CCD 摄像机相匹配，接口的形式和最大分辨率是否满足要求及选择色彩模式。本系统选用的图像采集卡为大恒图像公司开发的基于 PCI 接口的 DH-CG410 彩色/黑白采集卡，如图 2.7 所示。

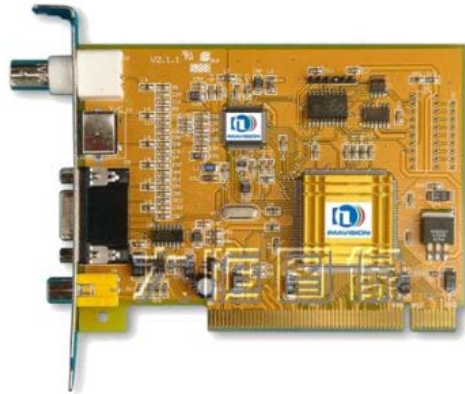


图 2.7 DH-CG410 图像采集卡

Fig. 2.7 DH-CG410 image capture card

主要性能指标如下：

- 标准PAL、NTSC制彩色/黑白视频信号
- 图像采集最大分辨率：  
768×576×32 bit (PAL)  
640×480×32 bit (NTSC)
- 通过填写屏蔽(MASK)模板，可实时显示和存储任意形状的输入图像
- 灵活采集图像：可接单场、单帧、连续场、连续帧、间隔几场或几帧等多种方式

### 2-3-6 挡板和防飞溅透明片

视觉传感器前端有滤光组合镜片，激光照射到镜片上会产生折射和反射，部分反射光很可能进入 CCD，影响传感器精度。为了提高传感器采集图像质量，减少激光反射的影响，除了将传感器外壳进行煮黑处理外，还需在 CCD 侧面加一挡板，阻挡玻璃反射的激光，使其不能被 CCD 采集。

在焊接过程中，由于飞溅和弧光的干扰强烈，CCD 采集到的焊缝坡口图像具有很强的噪声，增加了图像处理难度和处理时间。因此也需要在传感器与焊枪间加一挡板，阻挡一部分弧光和飞溅在焊接时进入 CCD 的采集范围。

防飞溅透明片的作用是保护滤光片组不受飞溅的损伤。

## § 2-4 结构光视觉传感器的结构设计

### 2-4-1 CCD 摄像机与半导体激光器位置布局关系

视觉传感器的重要组成部分是 CCD 摄像机和半导体激光器，所以首先要确定 CCD 摄像机和半导体激光器的位置关系。CCD 摄像机与半导体激光器的相互位置关系主要有以下三种：（1）CCD 摄像机倾斜，光源垂直；（2）CCD 摄像机倾斜，光源倾斜；（3）CCD 摄像机垂直，光源倾斜。典型布局如图 2.8 所示。

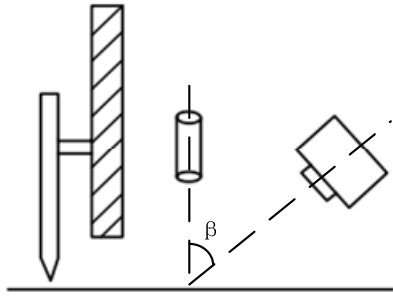


图 2.8.1 CCD 摄像机倾斜，光源垂直

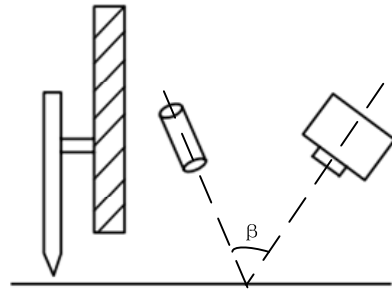


图 2.8.2 CCD 摄像机倾斜，光源倾斜

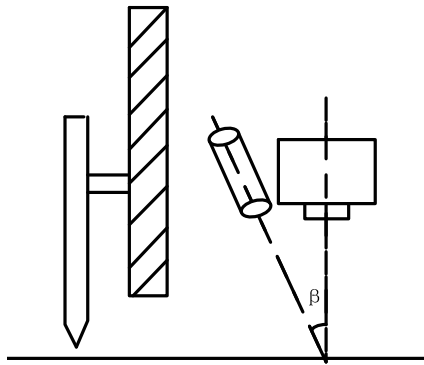


图 2.8.3 CCD 摄像机垂直，光源倾斜

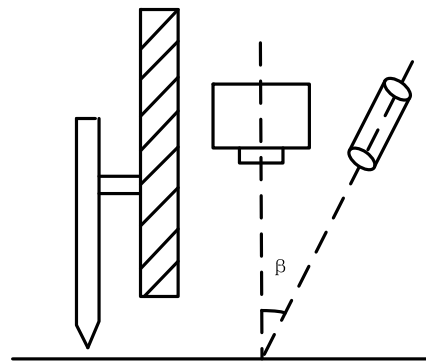


图 2.8.4 CCD 摄像机垂直，光源倾斜

图 2.8 CCD 摄像机与半导体激光器的相互位置关系

Fig. 2.8 The positional relation between camera and laser

目前，视觉传感器的三种结构方式都有应用，例如瑞典 Selcom 公司的 Laser Track 和 Seam Finder 焊接视觉传感器采用第一种方式，英国 Meta 公司的 Meta Torch 系列焊接视觉传感器采用的是第三种方式<sup>[56]</sup>。若采用 CCD 摄像机倾斜，光源垂直照射，虽然坐标变换简单<sup>[57]</sup>，但在焊接过程中会有大量的弧光进入 CCD，对图像产生强烈干扰，不利于提取图像；若采用双斜机构，虽然可以减少弧光干扰，但是传感器的体积会很大，不满足传感器体积小量的要求；若采用 CCD 摄像机垂直，光源倾斜的结构方式，虽然在确定焊接接头垂直截面的形状和尺寸比较麻烦，但这种方式传感器测量误差明显小于第一种情况<sup>[58]</sup>，而且尺寸较小。虽然图 2.8.3 也属于 CCD 摄像机垂直，光源倾斜的结构，但这种结构 CCD 离焊枪较远，对跟踪精度及实时性影响很大。故选用图 2.8.4 为视觉传感器内部结构。

#### 2-4-2 激光器与 CCD 摄像机夹角设计

根据上面的结论，CCD 摄像机垂直工件，激光器倾斜放置，然后确定两者之间的夹角  $\beta$ 。国内南昌大学的刘南生和郭昌荣等人对此进行了详细的研究，他们通过进行 CCD 摄像机垂直接收、激光器倾斜照射的试验证明了两者的夹角  $\beta$  为  $20^\circ$  时，实验结果和实际测量值最为接近<sup>[59]</sup>。如图 2.9 所示。

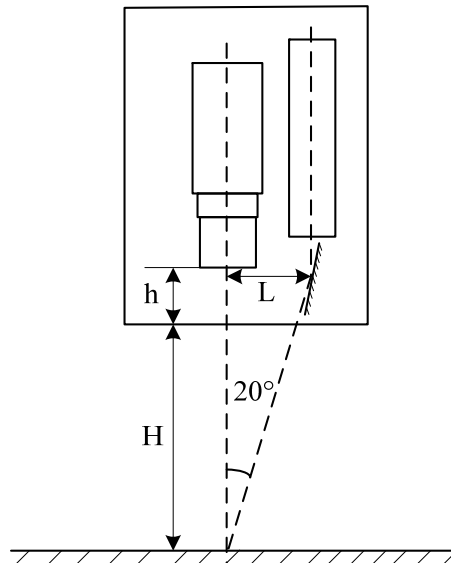


图 2.9 结构光视觉传感器光路图

Fig. 2.9 Light path of structure light vision sensor

激光器射出的条形光照射到工件上的位置应正好垂直于 CCD 摄像机的光轴，这样图像受摄像机畸变的影响才最小。根据实际焊接要求，传感器与工件的距离 H 为 50mm 左右；利用 CCD 摄像机与激光器夹角  $\beta$ ，可以计算出激光器出射点与摄像机光轴的距离 L：

$$L = (H + h) \bullet \tan \beta \approx 22(mm) \quad (2.2)$$

由于在 CCD 侧面需加一挡板, 所以设计 CCD 摄像机与镜片之间距离  $h$  为 10mm。

### § 2-5 结构光视觉传感器的数学模型

如不考虑镜头畸变的影响因素，建立如图 2.10 所示的线结构光视觉传感器的数学模型。

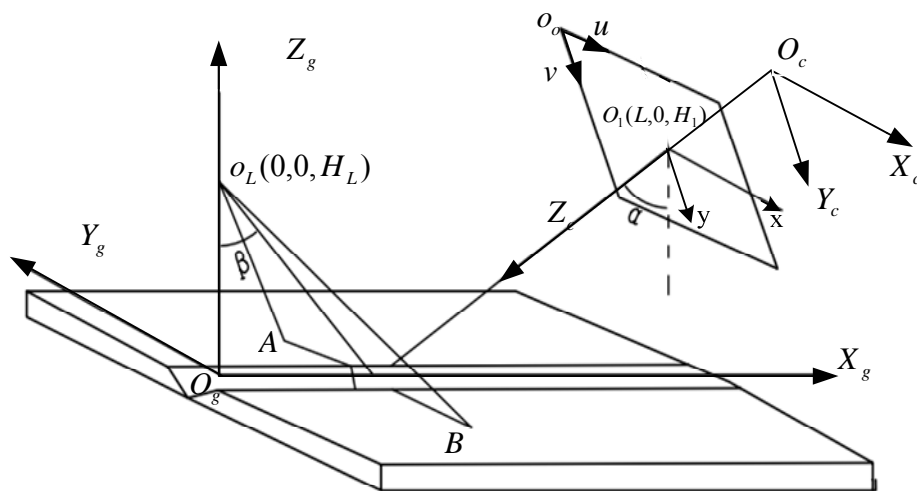


图 2.10 线结构光视觉传感器数学模型

Fig. 2.10 The model of the line structured light visual sensor

图 2.10 中, 建立  $O_g - X_g Y_g Z_g$  物体坐标系, 原点  $O_g$  为激光器发射点  $O_L$  的垂直投影,  $X_g$  轴平行焊缝方向、 $Y_g$  轴垂直焊缝方向、 $Z_g$  垂直工件表面。建立  $O_c - X_c Y_c Z_c$  摄像机坐标系, 其原点  $O_c$  为摄像机光学中心,  $Z_c$  轴为摄像机光轴, 与工件垂直方向成  $\alpha$  角。建立成像平面坐标系  $o_1 - xy$ , 原点  $o_1$  为  $Z_c$  轴与成像平面的交点,  $X_c$ 、 $Y_c$  轴分别平行成像平面水平轴和垂直轴。结构光平面与  $Z_g$  轴成  $\beta$  角, 与工件表面相交形成 AB 线并与  $Z_c$  交与一点。根据正视投影变换及坐标变换和结构光平面方程, 最后推导出结构光视觉传感器的一般数学模型, 如式 (2.3) 所示:

$$\begin{cases} x_g = \frac{x [\cos\alpha(H_L - H_1) - f + L\sin\alpha] + f[\sin\alpha(H_L - H_1) - L\cos\alpha]}{x (\sin\alpha + \cos\alpha \cot\beta) + f(\sin\alpha \cot\beta - \cos\alpha)} \\ y_g = \frac{\tan\beta(f \cos\alpha + H_1) - (f \sin\alpha - L) - H_L \tan\beta}{x (\cos\alpha + \sin\alpha \tan\beta) + f(\sin\alpha - \cos\alpha \tan\beta)} \cdot y \\ z_g = \frac{x (H_L \sin\alpha \tan\beta + H_1 \cos\alpha + f - L\sin\alpha) + f(H_1 \sin\alpha - H_L \cos\alpha \tan\beta + L\cos\alpha)}{x (\sin\alpha \tan\beta + \cos\alpha) + f(\sin\alpha - \cos\alpha \tan\beta)} \end{cases} \quad (2.3)$$

式中,  $(x_g, y_g, z_g)$  为某点在物体坐标系下的坐标;  $(x, y)$  为对应于成像平面坐标系下坐标;  $\alpha$  为摄像机光轴与工件垂直面的夹角;  $\beta$  为激光器与工件垂直面的夹角;  $H_L$  为激光器距工件的高度;  $H_1$  为成像平面距工件的高度;  $L$  为成像平面原点距激光器的水平距离;  $f$  为镜头焦距。

## § 2-6 结构光视觉传感器的机械设计

传感器各部件的选型和结构确定后, 需要对视觉传感器进行机械设计, 包括各部件的固定装置和传感器外壳。为了减小传感器体积, 设计 CCD 摄像机和半导体激光器的安装位置关系如图 2.11 所示。

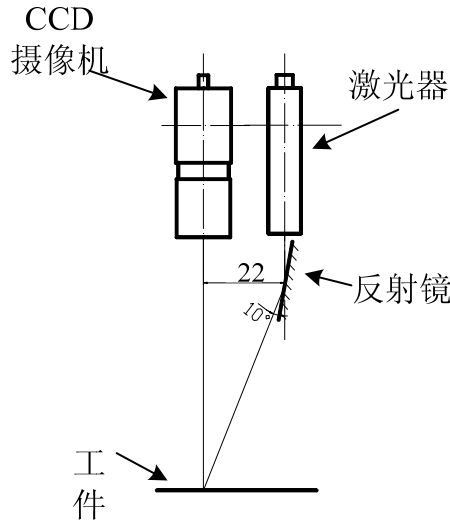


图 2.11 CCD 摄像机和半导体激光器安装位置关系

Fig. 2.11 The installation position of CCD camera and laser

根据以上安装位置关系设计视觉传感器整体结构。

### (1) 底座

底座的主要功能是保证摄像机与激光器的相对位置不发生变化, 并且对摄像机与激光器起保护作用

用。

### (2) CCD 摄像机固定

CCD 摄像机的固定装置需要根据 CCD 摄像机的尺寸及安装位置进行设计，此外还需要保证 CCD 摄像机固定不动。本系统使用的 CCD 摄像机加镜头总长为 53mm，直径为  $\phi 18\text{mm}$ 。设计固定结构如图 2.12 所示。

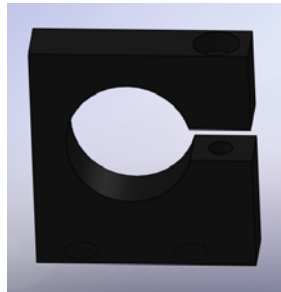


图 2.12 CCD 摄像机固定装置

Fig. 2.12 The fixed device for CCD camera

### (3) 激光器固定

如同固定 CCD 摄像机一样，也需要根据激光器的尺寸及视觉传感器的宽度尺寸进行设计。激光器的固定需要使激光器垂直固定不动，且光源点在传感器宽度的中线上。其固定结构如图 2.13 所示。

激光器的直径为  $\phi 12\text{mm}$ ，长为 50mm。中间大孔的直径为 12mm，用于套住激光器，顶部设计了一紧固装置，使激光器不会移动。底部有两个螺纹孔用于连接传感器底座。



图 2.13 半导体激光器固定装置

Fig. 2.13 The fixed device for laser

### (4) 反射镜固定装置

反射镜固定装置需要角度可调，所以设计如图 2.14 的反射镜固定装置。



图 2.14 反射镜固定装置

Fig. 2.14 The fixed device for mirror

除了以上几个重要部件外，还有滤光片组、挡光板、传感器盖等。与之前的传感器相比，结构更加紧凑，使传感器尺寸减小。整体内部结构如图 2.15 所示，实物图如图 2.16 所示。

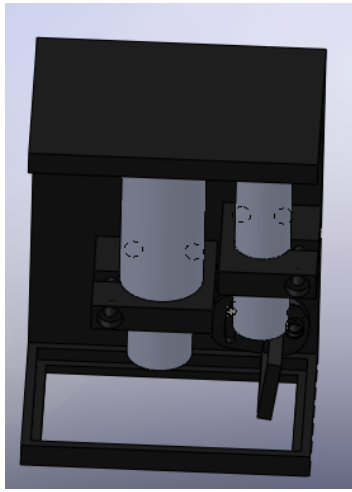


图 2.15 传感器整体内部结构

Fig. 2.15 The internal structure of sensor



图 2.16 视觉传感器实物图

Fig. 2.16 The picture of vision sensor

## § 2-7 结构光视觉传感器的安装

视觉传感器的安装主要考虑的因素有传感器与焊枪的距离以及传感器距工件的高度。由于视觉传感器采用的基本原理是半导体激光器倾斜照射、CCD 摄像机垂直接收的方式，所以传感器到焊枪的距离主要是指焊枪与 CCD 摄像机光轴中心之间的距离。在焊接过程中，若传感器与焊枪的距离太近，则弧光、飞溅等干扰因素对焊缝图像的影响会增强；而当传感器与焊枪之间的距离太远时，误差增大，焊接质量下降。本文所设计的传感器与焊枪之间的距离为 30mm。由 2-4 节可知，传感器距焊枪的高度为 50mm。

## § 2-8 本章小结

本章介绍了焊接跟踪系统的总体结构及视觉传感器工作原理，对视觉传感器的硬件进行了选型，并且针对视觉传感器体积庞大这一问题，详细分析了传感器的结构设计，使得其体积进一步减小，并且采用带通滤光片、中性滤光片及偏振片组成滤光镜组，提高视觉传感器的抗干扰能力，确定了视觉传感器的安装位置。



### 第三章 移动焊接机器人视觉系统标定

移动焊接机器人的标定是机器人视觉的一项基本任务,它的目的是求取与图像中的像素点与实际点之间的关系。系统的视觉标定包括摄像机标定,手眼标定和结构光标定。所谓的摄像机标定,就是根据给定的摄像机模型求取摄像机的内、外参数;手眼标定目的是获得摄像机与机器人末端焊枪之间的关系;结构光标定即求出结构光平面的参数,从而可从图像中读取深度信息。

#### § 3-1 摄像机模型

##### 3-1-1 理想状态下的摄像机模型

理想状态下的摄像机模型是线性模型或针孔模型。在三维空间景物成像中主要用到四个坐标系。

##### (1) 世界坐标系 ( $O_w - X_w Y_w Z_w$ )

由于摄像机可以安放在三维空间中任意位置,所以选择一基准坐标系来描述摄像机位置,用  $O_w - X_w Y_w Z_w$  表示。

##### (2) 摄像机坐标系 ( $O_c - X_c Y_c Z_c$ )

为了分析几何成像的关系,该坐标系的坐标原点  $O_c$  为摄像机光学中心,  $X_c$  与  $Y_c$  与成像平面坐标系的  $x$ 、 $y$  轴平行,  $Z_c$  与摄像机的光轴重合,光轴与成像平面交点为成像平面坐标系原点  $O_1$ ,如图 3.1 所示。

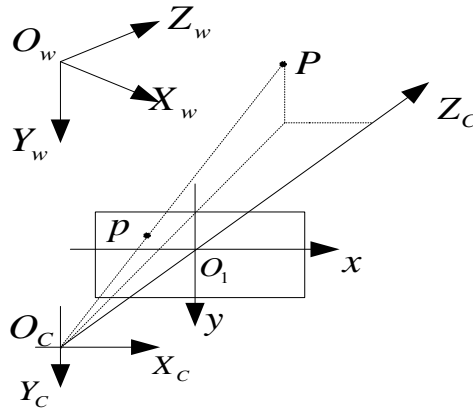


图 3.1 世界坐标系和摄像机坐标系

Fig. 3.1 WCS and CCS

##### (3) 图像坐标系 ( $o_o - uv$ ) 和成像平面坐标系 ( $o_1 - xy$ )

由 CCD 摄像机采集到的图像以二维数组的形式保存在计算机中,将其设为  $M$  行  $N$  列。建立以图像左上角为原点  $o_o$  的直角坐标系,向右为  $u$  轴正方向,向下为  $v$  轴正方向,则  $(u, v)$  是图像坐标系坐标(以像素为单位),并没有用物理单位表示出该像素在图像中的位置。摄像机标定使用的是图像物理坐

标系，即成像平面标系，横坐标  $x$ 、纵坐标  $y$  以 mm、 $\mu\text{m}$  等物理单位描述像点位置，并将图像与光轴的交点当成原点  $o_1$ ，横坐标轴  $x$ 、纵坐标轴  $y$  分别平行于图像坐标系中的  $u$  轴和  $v$  轴的正方向。如图 3.2 所示。

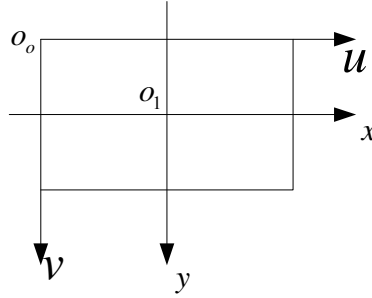


图 3.2 图像坐标系和成像平面坐标系

Fig. 3.2 Image coordinate system and retinal coordinate system

设定  $o_1$  在  $(u, v)$  坐标系中的坐标为  $(u_0, v_0)$ ，每一像素在  $x$  轴与  $y$  轴上的物理尺寸分别记为  $dx$  和  $dy$ ，则图像中任意像素在  $(x, y)$  和  $(u, v)$  两个坐标系下的坐标关系可以表示为：

$$\begin{cases} x = dx(u - u_0) \\ y = dy(v - v_0) \end{cases} \quad (3.1)$$

矩阵形式为：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

### 3-1-2 实际摄像机模型

在使用广角镜头或焦距小于 2.5mm 的镜头时，在图像边缘处会产生较大的畸变，如图 3.3 所示，

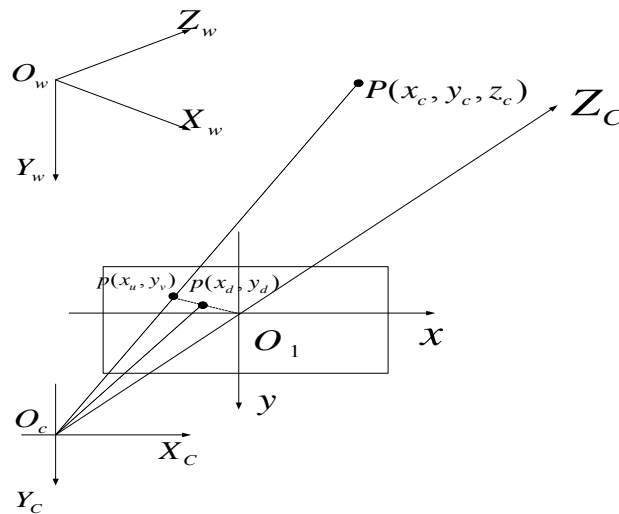


图 3.3 非理想状态摄像机模型

Fig. 3.3 Non-ideal condition camera model

成像点不是  $O_c$  与  $P$  点连线与图像平面的交点，而是有了一定的偏移，这种偏移就是镜头畸变。镜头畸变主要有径向畸变和切向畸变及偏心畸变<sup>[60]</sup>，这些畸变都属于非线性畸变。考虑非线性畸变时如果引入过多的非线性参数不仅不能提高精度，还会引起解的不稳定<sup>[61]</sup>。若仅考虑径向畸变，一般可以使标定精度更加准确，误差减小一个数量级；若考虑畸变过多时，其效果不但不明显，而且使求解过程变得十分复杂<sup>[62]</sup>。径向畸变，用数学公式表达如下：

$$\begin{aligned} x_d &= x(1 + k_1 r^2) \\ y_d &= y(1 + k_2 r^2) \end{aligned} \quad (3.3)$$

式中， $r^2 = x^2 + y^2$ ； $(x, y)$  为理想摄像机模型下的成像点的坐标； $(x_d, y_d)$  为具有径向畸变的实际成像点的坐标； $k_1, k_2$  为径变系数。

## § 3-2 摄像机的成像变换

### 3-2-1 摄像机坐标系和世界坐标系关系

摄像机坐标系和世界坐标系之间关系可以表示为：

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

式中， $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{t}$  分别为世界坐标系到 CCD 摄像机坐标系的旋转和平移变换矩阵； $\mathbf{R}$  为  $3 \times 3$  的正交单位矩阵； $\mathbf{t}$  为  $3 \times 1$  的平移变换向量。

### 3-2-2 摄像机坐标系和图像坐标系之间变换关系

假设在理想情况下，摄像机坐标系和图像坐标系之间的关系如图 3.4 所示。

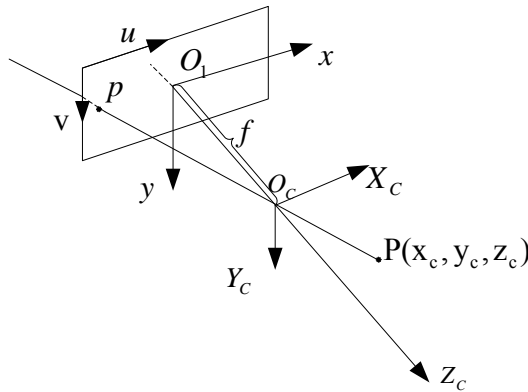


图 3.4 理想状态下摄像机坐标系与图像坐标系关系

Fig. 3.4 The relationship between CCS and ICS without distorted

根据透视投影定理，摄像机坐标系中点  $P(x_c, y_c, z_c)$  在成像平面坐标系中的像点  $p(x, y)$  的坐标为：

$$\begin{cases} x = f \frac{x_c}{z_c} \\ y = f \frac{y_c}{z_c} \end{cases} \quad (3.5)$$

写成矩阵形式为：

$$z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

定义摄像机坐标系中坐标  $(x_n, y_n, 1)$  为归一化图像坐标：

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

式中， $\alpha_x = f/dx$ ， $\alpha_y = f/dy$  分别称作  $x$  方向和  $y$  方向尺度因子； $(u_0, v_0)$  为图像中心坐标。

### 3-2-3 世界坐标系和图像坐标系之间关系

理想情况下，世界坐标系与图像坐标系的关系：

$$\begin{aligned} z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \mathbf{X}_w = \mathbf{M} \mathbf{X}_w \end{aligned} \quad (3.8)$$

其中， $\mathbf{M}$  为  $3 \times 4$  的投影矩阵。

实际情况下，由于 CCD 安装平面与光轴不垂直，存在倾角误差，故图像坐标系与成像平面坐标系的变换关系为：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & \mu & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

其中， $\mu$  为倾斜因子。

综合上述，空间一点  $P(x_w, y_w, z_w)$  到图像平面上的投影点  $p(u, v)$  间的关系为：

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \mathbf{X}_w \quad (3.10)$$

其中， $\mathbf{M}$  为  $3 \times 4$  的投影矩阵，可分解为：

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \alpha_x & \mu & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}[\mathbf{R} \quad \mathbf{t}] \quad (3.11)$$

### § 3-3 摄像机标定

摄像机标定是指确定摄像机本身的几何模型和光学参数（内部参数 Intrinsic parameters）及其在世界坐标系中的空间位置和方向（外部参数 Extrinsic parameters）的过程。下面将对内部参数和外部参数分别进行简要介绍。

#### 3-3-1 内部参数

摄像机的内部参数主要有图像中心点坐标（以像素为单位）、方向尺度因子、倾斜形变系数（Skew coefficient）和镜头畸变系数（Distortions）。用上述参数表示的内部参数矩阵记为  $\mathbf{A}$ ，即式（3.11）所示。

#### 3-3-2 外部参数

外部参数是指摄像机相对于世界坐标系的方位。

摄像机的标定技术目前已经相当成熟，有很多种分类，目前比较常用的一种分类方法就是将摄像机的标定分为：传统标定方法、主动视觉标定法和自标定方法。由于移动焊接机器人有一定的运行速度，使得摄像机的标定不可能采用实时的在线标定即摄像机自标定，因而采用传统的摄像机标定。

摄像机标定实际上是确定 6 个外参数  $\mathbf{R}$ ， $\mathbf{t}$ ，5 个内参数（ $\alpha_x = f/dx$ 、 $\alpha_y = f/dy$ 、 $\mu$ 、 $u_0$ 、 $v_0$ ）以及径向畸变系数  $k_1, k_2$ 。

#### 3-3-3 传统摄像机标定方法概述

传统摄像机标定方法有：透视变换法、直接线性变换法、两步法（Tsai）<sup>[63]</sup>、张正友法<sup>[64]</sup>和双面法。直接线性变化法是最优化算法的标定方法，双平面法的优点是合理的运用了摄像机模型。目前应用较多的是 Tsai 法和张正友法。Tsai 提出的两步法进一步考虑了畸变补偿，标定精度较高，但求解复杂，用时时间长。张正友提出的基于平面靶标的标定方法具有方法简单、灵活、鲁棒性好、成本低等优点，成为摄像机标定中的热门方法。

##### 3-3-3-1 Tsai 两步标定法

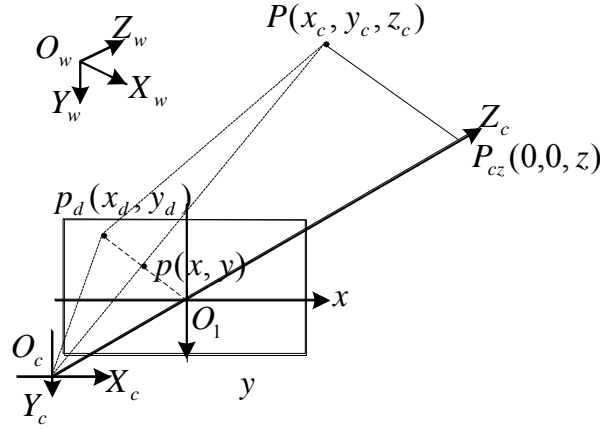


图 3.5 摄像机实际成像情况

Fig.3.5 Actual imaging situation

在图 3.5 中, 根据理论光学可知, 空间任意点  $P(x_c, y_c, z_c)$  在摄像机平面上的成像点为  $p(x, y)$ , 但是由于畸变的原因, 实际的成像点为  $p_d(x_d, y_d)$ 。径向排列约束(RAC)是指实际成像点  $p_d$  与理论成像点  $p$  及图像坐标系原点  $O_1$  在一条直线上, 且这条直线与  $P(x_c, y_c, z_c)$  和  $P_{cz}(0,0,z)$  的连线平行。Tsai 两步标定法就是以径向排列约束(RAC)为基础, 分两步进行。第一步是通过最小二乘法解超定线性方程, 求出外部参数  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{t}$ 。第二步是假设摄像机为理想摄像机, 即不存在畸变的情况下解超定线性方程得出内部参数, 如果镜头存在畸变, 则可以结合非线性优化的方法求出全部内参。

### 3-3-3-2 张正友平面模板标定法

张正友标定法是介于传统标定方法和自标定方法之间的一种方法。

根据摄像机成像模型, 世界坐标点到理想坐标点的齐次坐标变换如(3.8)所示。为了简化计算, 取模板所在的平面为世界坐标系的  $Z_w = 0$  平面。用  $\mathbf{r}_i$  表示  $\mathbf{R}$  的第  $i$  列矢量, 那么对于模板上的点有:

$$z \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 & \mathbf{r}_2 & \mathbf{r}_3 & \mathbf{t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 & \mathbf{r}_2 & \mathbf{r}_3 & \mathbf{t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

模板平面上的点及其像点之间的映射由矩阵  $\mathbf{H} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 & \mathbf{r}_2 & \mathbf{r}_3 & \mathbf{t} \end{bmatrix}$  确定, 这个矩阵称为单应性矩

阵。设  $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}$ , 式 (3.12) 可写为:

$$\begin{cases} zu = h_{11}x_w + h_{12}y_w + h_{13} \\ zv = h_{21}x_w + h_{22}y_w + h_{23} \\ z = h_{31}x_w + h_{32}y_w + 1 \end{cases} \quad (3.13)$$

消去  $z$ , 并写成矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} x_w & y_w & 1 & 0 & 0 & 0 & -ux_w & -uy_w \\ 0 & 0 & 0 & x_w & y_w & 1 & -vx_w & -vy_w \end{bmatrix} \mathbf{h} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

式中  $\mathbf{h} = [h_{11} \ h_{12} \ h_{13} \ h_{21} \ h_{22} \ h_{23} \ h_{31} \ h_{32}]^T$ 。

令  $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1 \ \mathbf{h}_2 \ \mathbf{h}_3]$ ，则

$$[\mathbf{h}_1 \ \mathbf{h}_2 \ \mathbf{h}_3] = \lambda \mathbf{A} [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{t}] \quad (3.15)$$

因为  $\mathbf{r}_1$  和  $\mathbf{r}_2$  是单位正交矢量，即  $\mathbf{r}_1^T \mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_2^T \mathbf{r}_2 = 1$ ， $\mathbf{r}_1^T \mathbf{r}_2 = 0$ ，所以

$$\mathbf{h}_1^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 = 0 \quad (3.16)$$

$$\mathbf{h}_1^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1 = \mathbf{h}_2^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 \quad (3.17)$$

令

$$\begin{aligned} \mathbf{B} = \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} &= \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha_x^2} & -\frac{\mu}{\alpha_x^2 \alpha_y} & \frac{v_0 \mu - u_0 \alpha_y}{\alpha_x^2 \alpha_y} \\ -\frac{\mu}{\alpha_x^2 \alpha_y} & \frac{\mu^2}{\alpha_x^2 \alpha_y} + \frac{1}{\alpha_y^2} & -\frac{\mu(v_0 \mu - u_0 \alpha_y)}{\alpha_x^2 \alpha_y} - \frac{v_0}{\alpha_y^2} \\ \frac{v_0 \mu - u_0 \alpha_y}{\alpha_x^2 \alpha_y} & -\frac{\mu(v_0 \mu - u_0 \alpha_y)}{\alpha_x^2 \alpha_y} - \frac{v_0}{\alpha_y^2} & \frac{(v_0 \mu - u_0 \alpha_y)^2}{\alpha_x^2 \alpha_y^2} + \frac{v_0^2}{\alpha_y^2} + 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.18)$$

定义  $\mathbf{b} = [b_{11} \ b_{12} \ b_{22} \ b_{13} \ b_{23} \ b_{33}]$ ，则有

$$\mathbf{h}_i^T \mathbf{B} \mathbf{h}_j = \mathbf{v}_{ij}^T \mathbf{b} \quad (3.19)$$

式中  $\mathbf{h}_i = [h_{i1} \ h_{i2} \ h_{i3}]^T$ ；

$$\mathbf{v}_{ij} = [h_{i1} h_{j1} \ h_{i1} h_{j2} + h_{i2} h_{j1} \ h_{i2} h_{j2} \ h_{i3} h_{j1} + h_{i1} h_{j3} \ h_{i3} h_{j2} + h_{i2} h_{j3} \ h_{i3} h_{j3}]^T。$$

根据(3.18)(3.19)可得到关于  $\mathbf{b}$  的两个齐次方程，即

$$\begin{bmatrix} v_{12}^T \\ (v_{11} - v_{12})^T \end{bmatrix} \mathbf{b} = 0 \quad (3.20)$$

若有  $n$  个平面模板图像，根据线性方程组  $\mathbf{V} \mathbf{b} = 0$ ，可以求出  $\mathbf{b}$ ，根据(3.19)可求得  $\mathbf{B}$ ，根据(3.18)可以求出摄像机内部参数；利用  $\mathbf{A}$  和单应性矩阵  $\mathbf{H}$  可按如下公式求出摄像机外参。

$$\mathbf{r}_1 = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1; \ \mathbf{r}_2 = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2; \ \mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_1 \mathbf{r}_2; \ \mathbf{t} = \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_3; \ \lambda = 1 / \|\mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1\| = 1 / \|\mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2\|。$$

### 3-3-4 摄像机标定实验及结果

由于 Tsai 标定靶制作成本高，故受到限制较大。而张正友法的标定板制作简单，成本低，标定结

果精确，所以本文选用基于张正友标定方法的 MATLAB 标定工具箱进行摄像机标定。本文采用  $9 \times 9$  的  $5\text{mm} \times 5\text{mm}$  大小的黑白格相间的棋盘作为标定摄像机参数的标定板。棋盘格图像如图 3.6 所示。

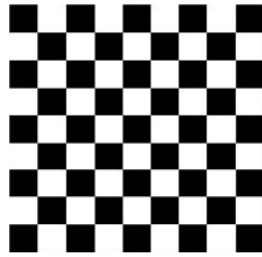


图 3.6  $9 \times 9$  黑白棋盘格

Fig. 3.6  $9 \times 9$  black and white checkerboard

标定时首先将标定用的图像放置到一个单独的文件夹下，图像格式为.bmp 格式，标定的图像在命名时按照 Image+数字格式排列。将图像读取至内存中，再逐一对图像提取角点完成标定。

标定摄像机时拍摄 20 幅标定板图像如图 3.7 所示。

Calibration images

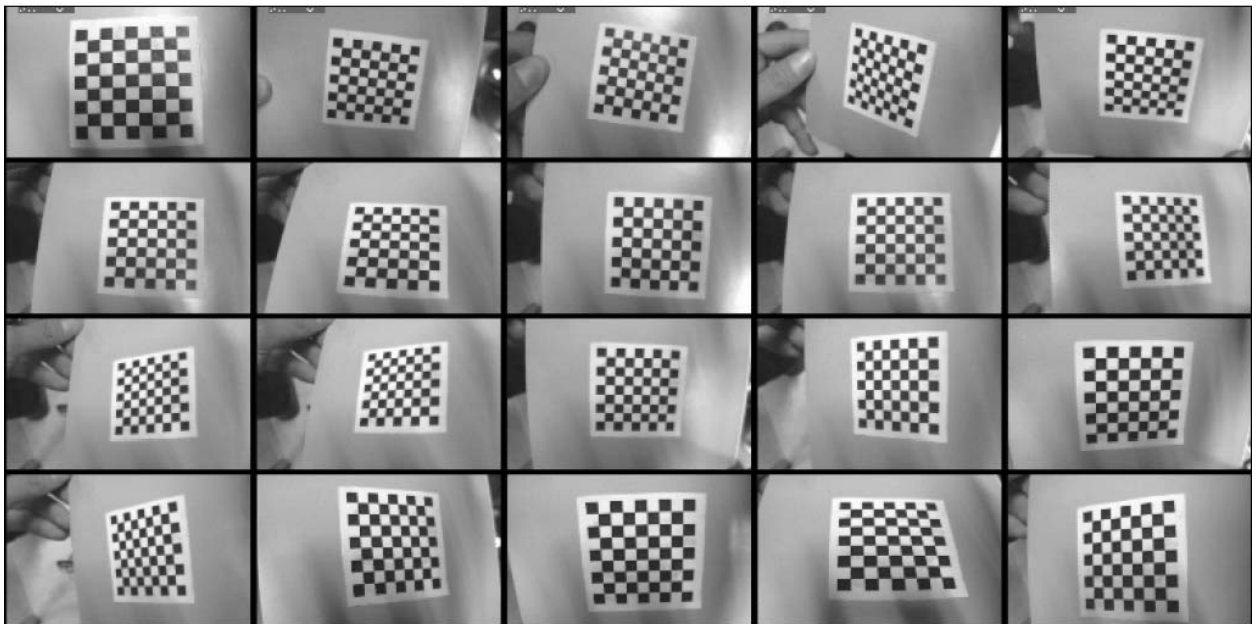


图 3.7 标定用图像

Fig. 3.7 Calibrating images

以第一幅标定板图像为例进行角点提取的过程描述。以同样的方法对拍摄的 20 幅图像依次进行角点提取工作。角点提取完成之后，运行主标定程序即可得到标定结果。图 3.8 为角点提取后的图像。标定得到的摄像机的内部参数如表 3.1 所示。



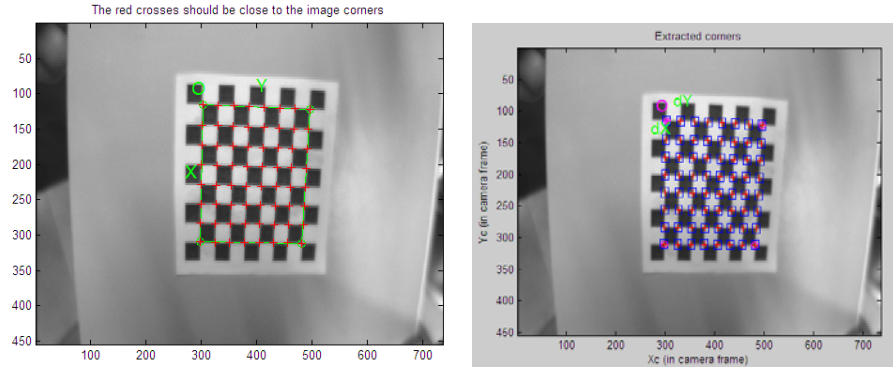


图 3.8 角点提取后的图像

Fig. 3.8 Images after corner extraction

表 3.1 摄像机内部参数

Table 3.1 Internal parameters of camera

$\alpha_x$	$\alpha_y$	$u_0$	$v_0$	$\mu$
520.5479	808.5106	370	325	0.0000
$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$
-0.6034	2.6130	-0.0015	-0.0053	0.0000

将上述各参量代入到摄像机内部参数矩阵，可以得到：

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 520.5479 & 0 & 410.54 \\ 0 & 808.5106 & 352.07 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

畸变系数  $k_c = [-0.6034 \ 2.613 \ -0.0015 \ -0.0053]$ ，其中前两项表示径向畸变系数，后两项表示切向畸变系数。

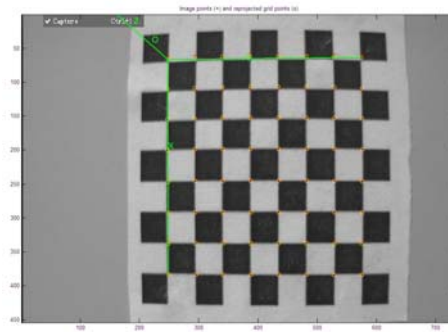


图 3.9 外部参数标定

Fig. 3.9 Calibration for extrinsic

由图 3.9 所标定的外参矩阵为：

$$[\mathbf{R} \ \mathbf{t}] = \begin{bmatrix} 0.0026 & 0.9996 & -0.0289 & 17.9160 \\ 0.9910 & 0.0012 & 0.1239 & 15.3259 \\ 0.1339 & -0.0290 & -0.9906 & 60.5306 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

## § 3-4 “手眼”关系标定

### 3-4-1 手眼标定数学模型

本系统中, 摄像机固定在移动焊接机器人末端, 属于“手眼”系统。摄像机的外参矩阵随着机器人的运动而改变。手眼关系是指刚性安装在焊接机器人末端的摄像机与机器人执行器末端之间的关系。传统的手眼关系标定方法是控制机器人末端在不同的位置观察空间一个已知的标定参照物, 利用  $\mathbf{AX} = \mathbf{BX}$  来求解机器人手眼关系, 但这种方法需要摄像机拍摄至少两张图片进行标定。本系统采用的标定方法只需采用一次坐标变换就可以推导出机器人的“手眼”关系。机器人在车体不动的前提下, 手眼标定示意图如图 3.10 所示。

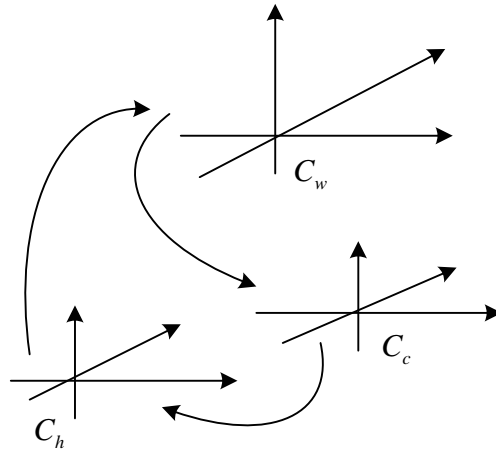


图 3.10 手眼标定示意图

Fig. 3.10 Calibrating diagram for Eye in hand

图中,  $C_w$  表示世界坐标系,  $C_c$  表示摄像机坐标系,  $C_h$  表示机器人末端焊枪坐标系。  $C_w$  与  $C_c$  的关系即为摄像机标定中的外参,  $C_w$  与  $C_h$  的关系可以由控制器读取, 进而可以求得  $C_h$  与  $C_c$  之间的位置关系, 即“手眼”关系。

根据空间不同坐标系之间的坐标变换关系, 对于空间任意一点  $p$ , 其在摄像机坐标系  $\{C_c\}$  和世界坐标系  $\{C_w\}$  下的描述分别为  ${}^{C_c}p$  和  ${}^{C_w}p$ , 如果摄像机坐标系  $\{C_c\}$  和世界坐标系  $\{C_w\}$  之间的相对位置关系已知, 则可得:

$${}^{C_c}p = \begin{bmatrix} {}^{C_c}R & {}^{C_c}t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} {}^{C_w}p = {}^{C_c}T_{{}^{C_w}}p \quad (3.21)$$

其中,  ${}^{C_c}R$  是旋转矩阵,  ${}^{C_c}t$  是平移矢量,  ${}^{C_c}T_{{}^{C_w}}$  为机器人世界坐标系相对于摄像机坐标系的关系。

若已知机器人世界坐标系相对于摄像机坐标系的关系为  ${}^{C_c}T_{{}^{C_w}}$ , 机器人末端焊枪坐标系相对于机器人世界坐标系的关系为  ${}^{C_h}T_{{}^{C_w}}$ , 则

$${}^{C_w}p = {}^{C_h}T_{{}^{C_w}} {}^{C_h}p \quad (3.22)$$

由 (3.21) 和 (3.22) 可得

$${}^{c_c}p = {}^{c_c}T_{{}^{c_w}} {}^{c_w}T_{{}^{c_h}} {}^{c_h}p \quad (3.23)$$

设

$${}^{c_c}T_{{}^{c_h}} = {}^{c_c}T_{{}^{c_w}} {}^{c_w}T_{{}^{c_h}} \quad (3.24)$$

则,

$${}^{c_c}T_{{}^{c_h}} = \begin{bmatrix} {}^{c_c}R_{{}^{c_w}} & {}^{c_c}t \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{c_w}R_{{}^{c_h}} & {}^{c_w}t \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{c_c}R_{{}^{c_w}} {}^{c_w}R_{{}^{c_h}} & {}^{c_c}R_{{}^{c_w}} {}^{c_w}t + {}^{c_c}t \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

摄像机标定可以得出外参,即旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移矢量  ${}^{c_c}t$ , 这样世界坐标系与摄像机坐标系之间的关系已知,即  ${}^{c_c}T_{{}^{c_w}}$  已知;在摄像机标定取像时可以实时读取机器人末端焊枪坐标系相对于世界坐标系的位姿矩阵,从而得到机器人末端焊枪坐标系相对于机器人世界坐标系的描述,即  ${}^{c_w}T_{{}^{c_h}}$  可知。根据(3.25)求得机器人末端焊枪坐标系相对于机器人摄像机坐标系的关系  ${}^{c_c}T_{{}^{c_h}}$ , 即“手眼”关系。

### 3-4-2 手眼标定实验与结果

将焊枪对准标定板一个角点,移动焊枪到达一个指定位置。采集的图像如图 3.11 所示。

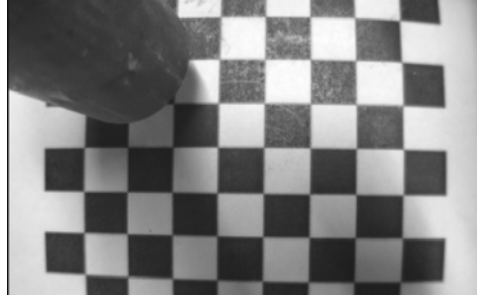


图 3.11 手眼标定采集的图像

Fig. 3.11 The images for eye in hand calibration

根据控制器中计算出焊接机器人末端焊枪相对于世界坐标系的关系,通过计算可以得到“手眼”关系,即:

$${}^{c_c}T_{{}^{c_h}} = \begin{bmatrix} -0.9932 & -0.0549 & 0.1698 & -58.1386 \\ 0.0529 & -0.9984 & 0.0029 & 10.6583 \\ 0.1601 & 0.0127 & 0.9841 & -55.3262 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

## § 3-5 结构光参数标定

### 3-5-1 结构光参数标定数学模型

摄像机标定确定了内外参数,只需要知道结构光平面方程,提供一个约束条件,便可以通过单幅图像确定激光条纹点上的三维坐标<sup>[65]</sup>。在结构光标定中,按使用的标靶不同可分为两种:一种是基于特定标定靶的方法<sup>[66-68]</sup>,另一种是基于普通标定靶或无标定靶的方法<sup>[69-72]</sup>。本文采用的是一种简便的线

性结构光标定方法。

设激光条纹上 P 点在摄像机坐标系下的坐标为  $(x_c, y_c, z_c)$ ，可以得到 P 点在世界坐标系下的坐标  $(x_w, y_w, z_w)$ ：

$$\begin{bmatrix} x_w & y_w & z_w & 1 \end{bmatrix}^T = \mathbf{C}_h^w \mathbf{T} \mathbf{C}_w^c \mathbf{T} \begin{bmatrix} x_c & y_c & z_c & 1 \end{bmatrix}^T \quad (3.26)$$

式中， $\mathbf{C}_h^w \mathbf{T}$  为机器人末端坐标系相对于机器人世界坐标系的关系， $\mathbf{C}_w^c \mathbf{T}$  为机器人世界坐标系相对于摄像机坐标系的关系。

设在摄像机坐标系下结构光平面方程为：

$$ax_c + by_c + cz_c + 1 = 0 \quad (3.27)$$

式中， $a, b, c$  为结构光平面的参数。

设在世界坐标系下结构光平面的方程为：

$$Ax_w + By_w + Cz_w + 1 = 0 \quad (3.28)$$

式中， $A, B, C$  为结构光平面的参数。

令，

$$\mathbf{C}_h^w \mathbf{T} \mathbf{C}_w^c \mathbf{T} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{n} & \mathbf{o} & \mathbf{a} & \mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

由式 (3.26)，得

$$\begin{cases} x_w = n_x x_c + o_x y_c + a_x z_c + p_x \\ y_w = n_y x_c + o_y y_c + a_y z_c + p_y \\ z_w = n_z x_c + o_z y_c + a_z z_c + p_z \end{cases} \quad (3.30)$$

将 (3.30) 代入 (3.28)，得：

$$\begin{aligned} & A(n_x x_c + o_x y_c + a_x z_c) + B(n_y x_c + o_y y_c + a_y z_c) + \\ & C(n_z x_c + o_z y_c + a_z z_c) + Ap_x + Bp_y + Cp_z + 1 = 0 \end{aligned} \quad (3.31)$$

因摄像机与工件有一定距离，即摄像机光心  $(p_x, p_y, p_z)$  不在工件上，所以

$$Ap_x + Bp_y + Cp_z + 1 \neq 0$$

令  $D = Ap_x + Bp_y + Cp_z + 1$ ，式(3.31)除以 D 得：

$$A_1(n_x x_c + o_x y_c + a_x z_c) + B_1(n_y x_c + o_y y_c + a_y z_c) + C_1(n_z x_c + o_z y_c + a_z z_c) - ax_c - by_c - c = 0 \quad (3.32)$$

式中， $A_1 = \frac{A}{D}$ ； $B_1 = \frac{B}{D}$ ； $C_1 = \frac{C}{D}$ 。

因为结构光平面的摄像机夹角为  $20^\circ$ ，即  $c \neq 0$ 。式 (3.32) 除以 c，得：

$$A_2(n_x x_c + o_x y_c + a_x z_c) + B_2(n_y x_c + o_y y_c + a_y z_c) + C_2(n_z x_c + o_z y_c + a_z z_c) - a_1 x_c - b_1 y_c = 1 \quad (3.33)$$

式中,  $A_2 = \frac{A_1}{c}$ ;  $B_2 = \frac{B_1}{c}$ ;  $C_2 = \frac{C_1}{c}$ ;  $a_1 = \frac{a}{c}$ ;  $b_1 = \frac{b}{c}$ 。

结构光照射到平面上, 摄像机采集的结构光图像是一条直线。在这条直线上任意取两个点, 代入式 (3.33), 得到的两个含有结构光平面参数的方程。保持摄像机光心  $(p_x, p_y, p_z)$  相对于焊枪的位置不变, 改变传感器的姿态, 在焦距归一化成像平面上取结构光上的两个点, 再代入式 (3.33) 得到两个方程。经过三次及以上改变传感器的姿态, 得到  $n$  个线性方程 ( $n \geq 5$ ) 组成的线性方程组, 通过最小二乘法可以求出  $A_2$ ,  $B_2$ ,  $C_2$ ,  $a_1$ ,  $b_1$ , 数学模型如式 (3.34) 所示。

$$\mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{N} \Rightarrow \mathbf{X} = (\mathbf{K}^T \mathbf{K})^{-1} \mathbf{K}^T \mathbf{N} \quad (3.34)$$

式中,  $\mathbf{K}$  为式 (3.33) 中系数构成的  $n \times 5$  矩阵;  $\mathbf{N}$  为所有元素为 1 的  $n \times 1$  矩阵;  $\mathbf{X}$  为参数矩阵, 即  $\mathbf{X} = [A_2 \ B_2 \ C_2 \ a_1 \ b_1]^T$ 。

平面工件的结构光线上两点间的距离为:

$$d = \sqrt{(x_{w1} - x_{w2})^2 + (y_{w1} - y_{w2})^2 + (z_{w1} - z_{w2})^2} = \sqrt{(d_x)^2 + (d_y)^2 + (d_z)^2} \quad (3.35)$$

结构光条纹上的点  $p_j$  在过光轴中心与点  $(x_{cj}, y_{cj}, 1)$  的连线上, 因此

$$\begin{cases} x = x_{cj}t \\ y = y_{cj}t \\ z = t \end{cases} \quad (3.36)$$

由式 (3.27) 和式 (3.36) 可求出点  $p_j$  在摄像机坐标系下的坐标  $(x, y, z)$ , 即

$$\begin{cases} x = \frac{-x_{cj}}{ax_{cj} + by_{cj} + c} \\ y = \frac{-y_{cj}}{ax_{cj} + by_{cj} + c} \\ z = \frac{-1}{ax_{cj} + by_{cj} + c} \end{cases} \quad (3.37)$$

将式 (3.30) 和式 (3.37) 代入式 (3.35) 中的  $d_x$ 、 $d_y$ 、 $d_z$ , 得

$$\begin{cases} d_x = n_x(x_1 - x_2) + o_x(y_1 - y_2) + a_x(z_1 - z_2) = \frac{1}{c}d_{x1} \\ d_y = n_y(x_1 - x_2) + o_y(y_1 - y_2) + a_y(z_1 - z_2) = \frac{1}{c}d_{y1} \\ d_z = n_z(x_1 - x_2) + o_z(y_1 - y_2) + a_z(z_1 - z_2) = \frac{1}{c}d_{z1} \end{cases} \quad (3.38)$$

其中,

$$\begin{cases} d_{x1} = n_x \left( \frac{x_{c2}}{a_1 x_{c2} + b_1 y_{c2} + 1} - \frac{x_{c1}}{a_1 x_{c1} + b_1 y_{c1} + 1} \right) + o_x \left( \frac{y_{c2}}{a_1 x_{c2} + b_1 y_{c2} + 1} - \frac{y_{c1}}{a_1 x_{c1} + b_1 y_{c1} + 1} \right) + a_x \left( \frac{1}{a_1 x_{c2} + b_1 y_{c2} + 1} - \frac{1}{a_1 x_{c1} + b_1 y_{c1} + 1} \right) \\ d_{y1} = n_y \left( \frac{x_{c2}}{a_1 x_{c2} + b_1 y_{c2} + 1} - \frac{x_{c1}}{a_1 x_{c1} + b_1 y_{c1} + 1} \right) + o_y \left( \frac{y_{c2}}{a_1 x_{c2} + b_1 y_{c2} + 1} - \frac{y_{c1}}{a_1 x_{c1} + b_1 y_{c1} + 1} \right) + a_y \left( \frac{1}{a_1 x_{c2} + b_1 y_{c2} + 1} - \frac{1}{a_1 x_{c1} + b_1 y_{c1} + 1} \right) \\ d_{z1} = n_z \left( \frac{x_{c2}}{a_1 x_{c2} + b_1 y_{c2} + 1} - \frac{x_{c1}}{a_1 x_{c1} + b_1 y_{c1} + 1} \right) + o_z \left( \frac{y_{c2}}{a_1 x_{c2} + b_1 y_{c2} + 1} - \frac{y_{c1}}{a_1 x_{c1} + b_1 y_{c1} + 1} \right) + a_z \left( \frac{1}{a_1 x_{c2} + b_1 y_{c2} + 1} - \frac{1}{a_1 x_{c1} + b_1 y_{c1} + 1} \right) \end{cases}$$

所以,

$$d = \frac{1}{c} d_1 \Rightarrow c = \frac{d_1}{d} \quad (3.39)$$

其中,  $d_1$  为用  $a_1$ 、 $b_1$  计算出的结构光两点间的距离;  $d$  为直接测出的结构光两点的距离。

因为  $c$  已知, 可求出  $a$ 、 $b$ :

$$\begin{cases} a = a_1 c \\ b = b_1 c \end{cases} \quad (3.40)$$

### 3-5-2 结构光参数标定实验与结果

(1) 将结构光条纹投射到一个平面上, 采集其图像, 随意取条纹上的两个点, 根据式 (3.7) 计算出这两个点在归一化成像面上的坐标, 代入式 (3.33) 得到两个方程。

(2) 调整机器人末端位姿, 保持摄像机光学中心点的位置不变, 改变三次视觉传感器的位置, 每次改变都重复步骤(1)。获得的数据如表 3.2 所示。

表 3.2 结构光标定实验数据

Table. 3.2 The experimental data of structured light calibration

编号	摄像机在世界坐标系下的位姿	条纹上第 1 个点的坐标	条纹上第 2 个点的坐标
1	$\begin{bmatrix} 0.9932 & 0.0549 & -0.1698 & -99.1386 \\ 0.0529 & -0.9984 & -0.0029 & 2.6583 \\ -0.1601 & 0.0127 & -0.9841 & 65.3262 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	(128,451)	(393,381)
2	$\begin{bmatrix} 0.9902 & 0.0589 & 0.0498 & -99.1386 \\ 0.0929 & -0.9984 & -0.2029 & 2.6583 \\ 0.2001 & 0.1127 & -0.8741 & 65.3262 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	(119,397)	(391,420)

3	$\begin{bmatrix} 0.9702 & 0.0589 & -0.1498 & -99.1386 \\ -0.0629 & -0.9684 & -0.3029 & 2.6583 \\ -0.1201 & 0.2127 & -0.9701 & 65.3262 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	(112,439)	(376,435)
4	$\begin{bmatrix} 0.9702 & 0.0589 & -0.1498 & -99.1386 \\ -0.0629 & -0.9684 & -0.3029 & 2.6583 \\ -0.1201 & 0.2127 & -0.9701 & 65.3262 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	(112,407)	(388,412)

(3) 求解  $a_1, b_1$ 。

$$a_1 = -3.7597, \quad b_1 = 15.0111 \times 10^{-3}$$

(4) 计算出两点长度  $d_1$ ,  $d_1 = 0.1607$ , 用卡尺测出两点的实际距离。图 3.12 为测量结构光条纹两点间的实际长度  $d$ ,  $d = 10mm$ 。经计算,  $c = -1.607 \times 10^{-2}$ ,  $b = -0.9352 \times 10^{-4}$ ,  $a = 2.3423 \times 10^{-2}$ 。故结构光平面方程为:  $2.3423 \times 10^{-2}x - 0.9352 \times 10^{-4}y - 1.607 \times 10^{-2}z + 1 = 0$ 。

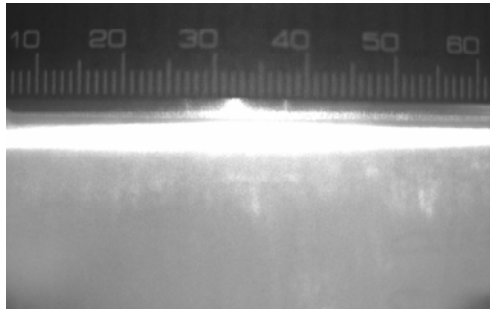


图 3.12 测量结构光两点长度

Fig. 3.12 Measuring the actual length between two points

### § 3-6 本章小结

本章分析和介绍了本移动焊接机器人所用到的视觉传感器系统中的摄像机、手眼和结构光的数学模型。并通过实验确定了视觉传感器系统中的各个参数, 确定了焊缝图像上像素点与实际坐标之间的关系, 是机器人跟踪焊缝的前提。

## 第四章 焊缝图像处理

焊缝的图像处理主要目的是从焊缝表面的结构光上提取出焊缝相关信息,并将提取出的信息经过处理后传送给机器人执行机构,进行焊缝跟踪,保证焊接能够顺利进行,实现焊接自动化。机器人在焊接过程中,为了保证焊接质量,视觉传感器在处理焊缝图像时应具有很强的实时性,要求处理图像的时间应该在 100ms 以内。目前很难满足焊接过程中实时性的要求,通常以牺牲控制精度的方式来加快机器人响应速度。

本章针对焊接过程中图像的特点,开发了一套适用于焊接实时跟踪的图像处理方法,为焊接控制提供了必要条件。

### § 4-1 焊缝图像的特点

焊接过程中,由于其环境恶劣,采集的焊缝图像存在着各种各样的干扰,如何准确的提取出焊缝相关信息,就必须了解焊缝图像的特点。焊接过程中的焊缝图像有以下几种特点:

(1) 焊接过程中焊缝图像的灰度值主要分布在 40 以下的范围,结构光的灰度值分布在 100~255 之间。

(2) 飞溅噪声是焊接过程中最为常见的,其占焊接图像的一行中几十个像素,其在图像中占高灰度值(即高亮度)的像素点的宽度与图像特征信号的宽度相比,要宽得多,这是飞溅噪声的重要特征。所以消除飞溅噪声对提取图像焊缝信息起着至关重要的作用。

(3) 焊接过程中,会产生大量烟尘,整个图像都具有烟尘噪声,其覆盖面积广,灰度值较小。

(4) 采集到的焊接图像是由明暗相间的条纹组成,这种干扰称为横道干扰。由于焊接电弧周期性闪烁,形成相同频率的点光源的相干光,CCD 摄像机在相干光的照射下获取的图像就具有横道干扰。横道干扰的每一行灰度值都不相同,但值都很小,可以进行二值化来消除横道干扰。

### § 4-2 图像处理的整体过程

在图像处理过程中,只使用一种方法就能解决问题的情况很少,大多是几种方法组合起来共同解决。图像处理的一般步骤如图 4.1 所示。但是对于焊缝图像的处理,因为有强烈的干扰因素,所以需要进行特殊处理。

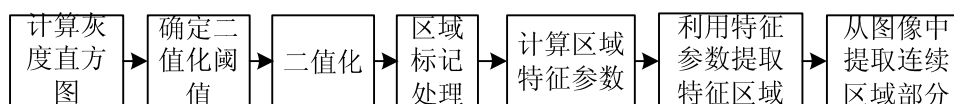


图 4.1 图像处理的一般步骤

Fig. 4.1 General steps of image processing

焊缝图像处理的方法步骤包括感觉、量化、图像预处理、形态学变换、焊缝提取等。感觉指摄像机



获取图像的过程；量化是指将图像函数的连续数值（亮度）转变为其数字等价量的过程；预处理是指基于空域或频域的图像处理的过程，空域图像处理是指直接在采集到的图像上进行；而频域是指将采集到的图像转换成频域然后进行处理。因为焊接机器人实时性要求比较高，所以采用空域图像处理。形态学变换和焊缝提取属于图像处理的后处理部分，是提取焊缝信息的重要过程。图 4.2 表示焊缝图像处理的过程。

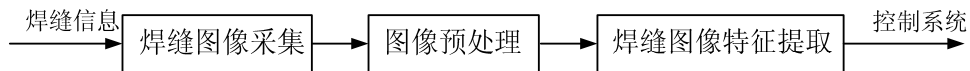


图 4.2 焊缝图像处理过程

Fig. 4.2 The image processing of welding

### § 4-3 图像的预处理

预处理是指在最低层次的图像上进行的操作，这时处理的图像都是与传感器采集的原始数据同类的亮度图像。预处理不会增加图像的信息量，如果信息用熵来度量，那么预处理一般都会降低图像的信息量<sup>[73]</sup>。因此，从信息论的角度来看，最好的预处理是没有预处理。但是，预处理又是非常有用的，其目的就是根据需求去除原始图像的没用信息，保留或增强有用信息的过程。

虽然视觉传感器中存在抑制噪声的元件，但在焊接过程中，图像仍然存在飞溅、电弧光等干扰，无法直接提取焊缝相关信息，原始焊接图像如图 4.3 所示。焊缝图像的预处理是针对原始图像的特点，最大程度的消除噪声，快速获得清晰焊缝图像的过程，图像预处理的好坏直接影响后续焊缝特征点提取质量，好的预处理效果能减少提取焊缝特征点的时间，提高提取结果的准确性。本课题研究中，焊缝图像的预处理流程图如图 4.4 所示。

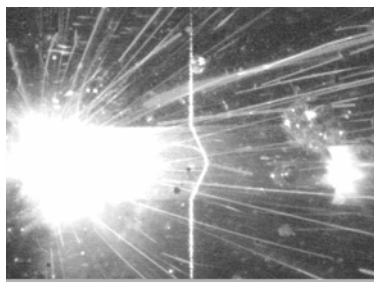


图 4.3 强干扰的原始焊接图像

Fig.4.3 The original welding picture with strong interferences



图 4.4 焊缝图像预处理流程图

Fig.4.4 The flow chart of the image preprocessing

#### 4-3-1 加窗处理

摄像机获得的焊缝图像大小为  $500 \times 582$  pixel，若对整个图像进行处理必然会降低处理速度，影响焊接的实时性，所以进行加窗处理是必要的。根据不同的焊缝形式来确定取出尺寸。例如，对于直线 V

形焊缝，在原始图像上提取 $122 \times 300$  pixel 的图像，如图 4.5 所示，就可以满足后续图像处理的要求。

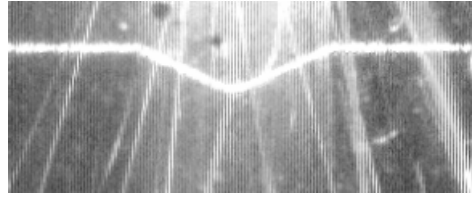


图 4.5 加窗处理的图像

Fig.4.5 The picture after set ROI

#### 4-3-2 图像增强

图像增强是为了改善图像的视觉效果，突出图像中的感兴趣信息。图像增强的主要目的有两个：一是提高图像的清晰度；二是有选择地突出图像中感兴趣区域，使其变得更有利于计算机进行处理。

根据处理的作用区域不同，图像增强可分为空域增强方法和频域增强方法。空域增强是指对像素域进行处理；频域增强是指在图像的变换域内对图像进行处理，然后反变换后得到增强后的图像，一般不适合实时性要求高的场合。具体的图像增强方法有：数学查找表（Math Look-up）、直方图均衡化等。

##### 4-3-2-1 数学查找表（Look-up table）

查找表变换是基本的图像处理功能，能够使图像中的重要信息亮度高于其他像素。这个图像处理功能包含的函数有伽马纠正，对数纠正，线性纠正等。

##### (1) 伽马纠正

伽马纠正的基本形式为： $s = cr^\gamma$ 。其中  $c$ 、 $r$  是常数，指数  $\gamma$  为伽马值。 $\gamma > 1$  与  $\gamma < 1$  纠正有相反的效果。如果图像整体偏暗，灰度需要扩大时，可由  $\gamma < 1$  进行校正；相反可由  $\gamma > 1$  进行校正。伽马纠正可以增大动态范围，提高图像对比度，图像特征明显。

##### (2) 对数纠正

对数纠正是用来扩大低灰度范围或者压缩高灰度范围。对数纠正变换如图 4.6 所示。

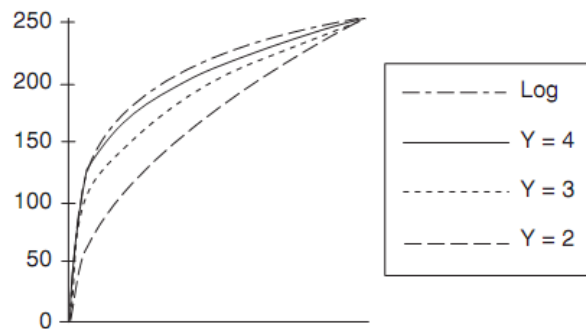


图 4.6 对数纠正变换

Fig. 4.6 Logarithmic correcting transformation

图中横坐标代表输入灰度范围，纵坐标代表输出灰度范围。

##### (3) 线性纠正

线性纠正是空间域图像增强的一种，通过分段线性变换函数来调整图像灰度级的动态范围。通过点  $(r_1, s_1)$  和点  $(r_2, s_2)$  的位置控制变换函数的形状。点  $(r_1, s_1)$  和点  $(r_2, s_2)$  的中间值将产生输出图像中灰度级不同程度的展开，因而影响其对比度，以达到图像增强的目的。

分段线性纠正公式如式 (4.1) 所示:

$$g(x, y) = \begin{cases} r_1 f(x, y) + b_1, & 0 < f(x, y) < f_1 \\ r_2 f(x, y) + b_2, & f_1 < f(x, y) < f_2 \\ r_3 f(x, y) + b_3, & f_2 < f(x, y) < f_3 \end{cases} \quad (4.1)$$

其中,  $r_1 = \frac{g_1}{f_1}$ ;  $b_1 = 0$ ;  $r_2 = \frac{g_2 - g_1}{f_2 - f_1}$ ;  $b_2 = g_1 - r_2 f_1$ ;  $r_3 = \frac{g_3 - g_2}{f_3 - f_2}$ ;  $b_3 = g_2 - r_3 f_2$ 。

#### 4-3-2-2 直方图均衡化

在数字图像处理中, 灰度直方图是最简单且最有用的工具。直方图均衡化是把原始图像的直方图变成均匀分布的形式, 这样增加了像素灰度值的动态范围, 从而达到增强图像整体对比度的效果。

输入的直方图用  $H(p)$  表示, 输入的灰度级范围是  $[p_0, p_k]$ 。设  $q = \tau(p)$  使得输出的直方图  $G(q)$  均匀分布在输出亮度范围  $[q_0, q_k]$ 。

$$\sum_{i=0}^k G(q_i) = \sum_{i=0}^k H(p_i) \quad (4.2)$$

式(4.2)中的求和为离散分布函数。假设图像有  $N$  行和  $N$  列, 那么均衡化的直方图  $G(q)$  就对应着均衡的概率密度函数  $f$ , 其函数值是个常数:

$$f = \frac{N^2}{q_k - q_0} \quad (4.3)$$

用式 (4.3) 的值代替式 (4.2) 左边, 得

$$N^2 \int_{q_0}^q \frac{1}{q_k - q_0} ds = \int_{p_0}^p H(s) ds \quad (4.4)$$

$$q = \tau(p) = \frac{q_k - q_0}{N^2} \int_{p_0}^p H(s) ds + q_0 \quad (4.5)$$

式 (4.5) 即为累积的正方图。离散化后, 得:

$$q = \tau(p) = \frac{q_k - q_0}{N^2} \sum_{i=p_0}^p H(s) + q_0 \quad (4.6)$$

由于直方图均衡化可以自动地找到使对比度增强的灰度级变换, 不需要确定参数, 所以本课题采用直方图均衡化进行图像增强, 算法如下:

- (1) 对于有  $G$  个灰度级 (一般是 256) 大小  $M \times N$  的图像, 创建一个长为  $G$  的数组  $H$  并初始化为 0;
- (2) 形成图像直方图: 扫描每一个像素, 增加相应的  $H$  成员, 当像素  $p$  具有亮度  $g_p$  时, 做  $H[g_p] = H[g_p] + 1$ ;
- (3) 形成累积的正方图  $H_c$ :

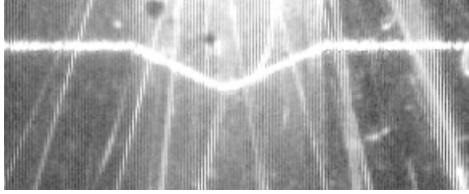
$$H_c[0] = H[0]$$

$$H_c[p] = H_c[p-1] + H[p] \quad p = 1, 2, \dots, G-1;$$

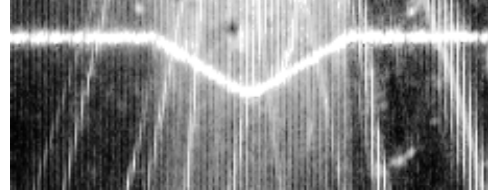
(4) 置  $T[p] = \text{round}(\frac{G-1}{NM} H_c[p])$ ;

(5) 重新扫描图像, 写一个具有灰度级  $g_q$  的输出图像, 设置  $g_q = T[g_p]$ 。

采用直方图均衡化处理图像得到的结果如图 4.7 所示。通过比较图 4.7.1 和图 4.7.2 可以看出焊缝信息得到了增强。



4.7.1 原始图像



4.7.2 增强后的图像

图 4.7 直方图均衡化处理后的图像

Fig. 4.7 The result of histogram equalization

### 4-3-3 焊缝图像的滤波

由于恶劣的焊接环境通常使获取的焊缝图像存在着大量的噪声, 为了尽可能多地消除噪声, 而又保留有用的激光光带的信息, 应当选取合适的滤波方法。滤波主要分为频域滤波和空域滤波。频域滤波是将信息进行傅立叶变换, 选取适当的频域带通滤波器进行滤波, 然后再进行傅氏反变换获得去噪后的图像, 其处理时间较长, 故在此我们选择空域滤波, 即直接对图像像素进行处理, 消除噪声干扰, 其主要方法有邻域平均滤波、旋转掩膜平均滤波、中值滤波等。

#### 4-3-3-1 邻域平均值滤波

邻域平均值滤波法是最简单的空间域处理方法, 属于线性低通滤波器。这种方法的基本思想是用每个像素周围几个像素的平均值代替当前像素的灰度。设一幅图像  $f(x, y)$  经平滑处理后得到的图像为  $g(x, y)$ , 则有:

$$g(x, y) = \frac{1}{M} \sum_{(m,n) \in S} f(x, y) \quad (4.7)$$

其中,  $x, y = 0, 1, 2, \dots, M-1$ 。S 是  $(x, y)$  点邻域中点的坐标的集合, 但其中不包括  $(x, y)$  点。M 是集合内坐标点的总数。

以  $3 \times 3$  的模板为例, 最简单的是取所有的系数都为 1, 如式(4.8)。邻域平均值滤波就是将图像中的一个像素的灰度值加上它周围邻近 8 个像素灰度值, 求出平均值作为新图像中该像素灰度值。

$$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

这种方法对噪声小于图像中感兴趣的最小物体的尺寸时, 效果比较理想, 但是上述模板在去噪的同时, 会造成边缘和细节的模糊, 且对噪声敏感。图 4.8 为邻域滤波处理后的图像。

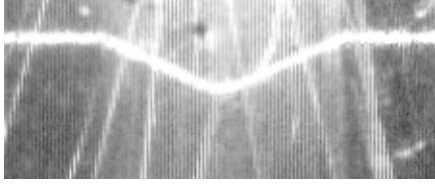


图 4.8.1 原始图像

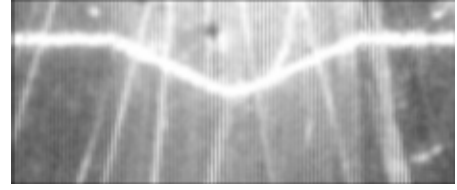


图 4.8.2 邻域平均值滤波后的图像

图 4.8 邻域平均值滤波处理后的图像

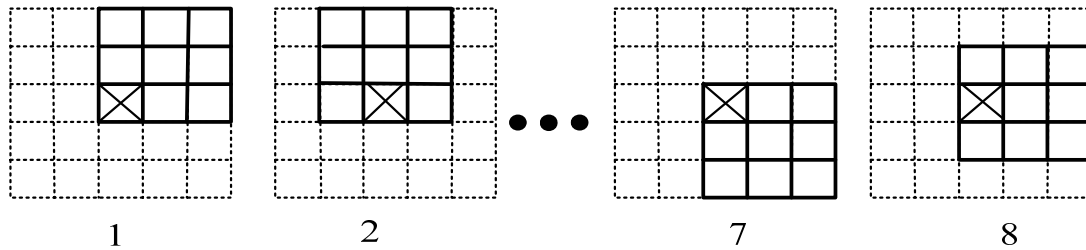
Fig. 4.8 The result of neighborhood averaging filter

#### 4-3-3-2 旋转掩膜平均滤波

旋转掩膜平均滤波是一种非线性的滤波方法,通过搜索当前像素邻域的同态部分,可以避免边缘模糊。亮度散布  $\sigma^2$  用于度量区域的一致性。散布  $\sigma^2$  的计算公式如下:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \left\{ \sum_{(i,j) \in R} \left[ g(i,j) - \frac{1}{n} \sum_{(i,j) \in R} g(i,j) \right]^2 \right\} \quad (4.9)$$

图 4.9 为  $3 \times 3$  掩膜的 8 种可能的旋转,覆盖了当前像素(标记为小交叉)的一个  $5 \times 5$  的邻域。第 9 个掩膜是当前像素自身的一个  $3 \times 3$  邻域。

图 4.9  $3 \times 3$  掩膜的 8 种可能的旋转Fig. 4.9 8 possible rotations of  $3 \times 3$  template

旋转掩膜平均滤波的算法如下:

- (1) 考虑图像的每个像素  $(i, j)$ ;
- (2) 根据式(4.9)计算像素  $(i, j)$  所有可能的旋转掩膜的散布;
- (3) 选择具有最小散布的掩膜;
- (4) 将所选掩膜内的平均亮度赋给输出图像中的像素  $(i, j)$ 。

虽然旋转掩膜平均滤波避免了均值滤波中的边缘模糊的缺点,但其散布  $\sigma^2$  求取复杂,不满足实时性。

#### 4-3-3-3 中值滤波

中值滤波是一种非线性平滑滤波器,其主要功能是改变与周围像素灰度值差别较大的像素,将其取为与周围像素相近的值,从而消除孤立的噪声点。中值滤波的主要流程如图 4.10 所示。

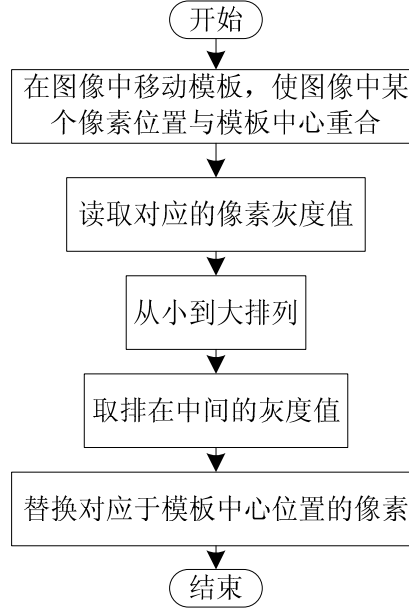


图 4.10 中值滤波流程图

Fig. 4.10 The flow chart of median filter

传统的中值滤波是在每个像素位置上必须对一个矩形内部的所有像素进行排序，这样会浪费很长时间。图像在进行中值滤波时，我们注意到当模板沿着行移一列时，模板内容只是去掉了最左边的列，并且添加了一个新的右侧列，对于  $m$  行  $n$  列的中值滤波模板， $mn - 2m$  个像素并没有变化，所以不需要重新排列，故提出一个高效的中值滤波算法，算法如下：

- (1) 置  $th = \frac{mn}{2}$ ；如果  $m, n$  都为奇数，则对  $th$  取整；
- (2) 将模板移至一个新行的开始，对其内容排序。建立模板像素的直方图  $H$ ，确定其中值  $m$ ，记下亮度小于或等于  $m$  的像素数目  $n_m$ ；
- (3) 对于最左列亮度是  $p_g$  的每个像素  $p$ ，做：  $H[p_g] = H[p_g] - 1$ 。如果  $p_g < m$ ，置  $n_m = n_m - 1$ ；
- (4) 将模板右移一列，对于最右列亮度是  $p_g$  的每个像素  $p$ ，做：  $H[p_g] = H[p_g] + 1$ 。如果  $p_g < m$ ，置  $n_m = n_m + 1$ ；
- (5) 如果  $n_m = t$ ，则跳转到步骤 (8)；
- (6) 如果  $n_m > t$ ，则跳转到步骤 (7)，否则重复  $m = m + 1, n_m = n_m + H[m]$ ，直到  $n_m \geq t$ ；
- (7) 重复  $m = m - 1, n_m = n_m - H[m]$ ，直到  $n_m \leq t$ ；
- (8) 如果模板的右侧列不是图像的右边界，跳转到步骤 (3)；
- (9) 如果模板的底行不是图像的下边界，跳转到步骤 (2)。

图 4.11 给出了焊缝图像经过中值滤波后的效果，可见抑制了一定程度的噪声，并且保持了图像的细节，平滑处理的时间仅需 0.001s。所以我们在这里采用中值滤波。

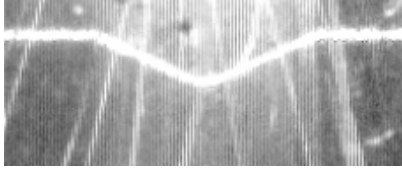


图 4.11.1 原始图像



图 4.11.2 中值滤波后的图像

图 4.11 中值滤波处理后的图像

Fig. 4.11 The results of median filter

#### 4-3-4 图像分割

通过图像增强、中值滤波，焊缝图像中表征坡口的结构光条纹与背景有了强烈的对比，为了提高焊缝信息提取的精度和速度，希望预处理的最终结果使图像只存在含有焊缝信息的结构光条纹，而噪声等其他无关信息被去除。图像分割就是指按照图像中不同特性进行区域分割，提取出感兴趣目标的技术和过程，所以对焊缝图像进行图像分割是十分必要的。图像分割的方法有很多，常见的分割方法包括基于有关图像或部分的全局知识的分割、基于边缘的分割、和基于区域的分割等。有关图像或部分的全局知识一般由图像特征的直方图来表达。基于边缘的分割依赖于由边缘算子找到的图像边缘，再采用后续的处理将边缘连成轮廓，从而构成分割区域，其难点在于边缘检测的准确性。基于区域的分割的基本思想是将图像划分为最大一致性的分区。常用的区域分割方法有阈值法<sup>[74]</sup>、区域生长法<sup>[75-77]</sup>、分裂合并法<sup>[78]</sup>、分水岭分割法<sup>[79]</sup>等。综合上述图像分割方法的优缺点，并在实际应用中多次实验比较，本系统采用图像阈值分割法。

##### 4-3-4-1 阈值分割法原理

阈值分割是一种最简单的分割方法。很多物体或图像区域特性为不变，可以确定一个阈值来分割目标和背景。阈值化计算速度快，其基本原理是：选择一个合适的阈值  $T$ ，通过图像中每个像素与阈值  $T$  进行比较来确定该像素点是属于目标还是背景，即为我们通常所说的二值化。用数学公式表示为：

$$g(i, j) = \begin{cases} 0, & f(i, j) \geq T \\ 1, & f(i, j) < T \end{cases} \quad (4.10)$$

其中  $g(i, j)$  为输出图像， $f(i, j)$  为输入图像， $T$  为阈值，1 为目标，0 为背景。

##### 4-3-4-2 阈值分割方法

阈值的选择可分为手动阈值分割和自动阈值分割。手动阈值分割是指手动的输入阈值，其确定方法简单，但在不适用于连续采集图像，因为每幅图像的灰度直方图各不相同，如果用固定的阈值来进行图像分割，效果不理想。故本系统采用自动阈值分割的方法。自动阈值分割方法有：直方图自适应阈值分割法、迭代阈值分割法、Otsu 自适应阈值分割、Pal 自适应阈值分割等。

##### (1) 直方图自适应阈值分割法

直方图阈值分割是最经典、最直观、最简单、最常用的分割方法。其基本思想是根据图像的直方图，选择峰间的谷点对应的灰度值作为阈值。显然，如果图像的直方图拥有明显的双峰结构，则图像可以获得很好的分割效果。焊接图像灰度直方图如图 4.12 所示。

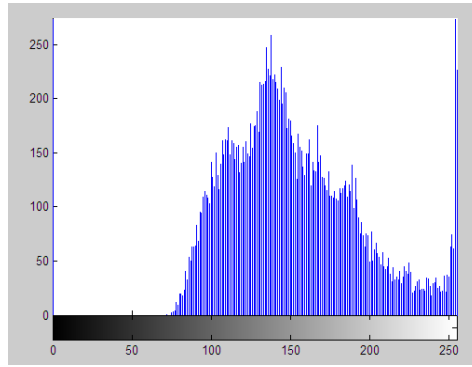


图 4.12 焊接图像灰度直方图

Fig. 4.12 Gray histogram of welding image

由图可见，焊接图像没有明显的双峰，故根据直方图的峰谷选择阈值比较困难。

## (2) 迭代阈值分割法

该方法的基本思想是：图像中前景与背景之间的灰度分布为相互不重叠，在这个前提下，实现对两类对象的阈值分割。具体流程图如图 4.13 所示：

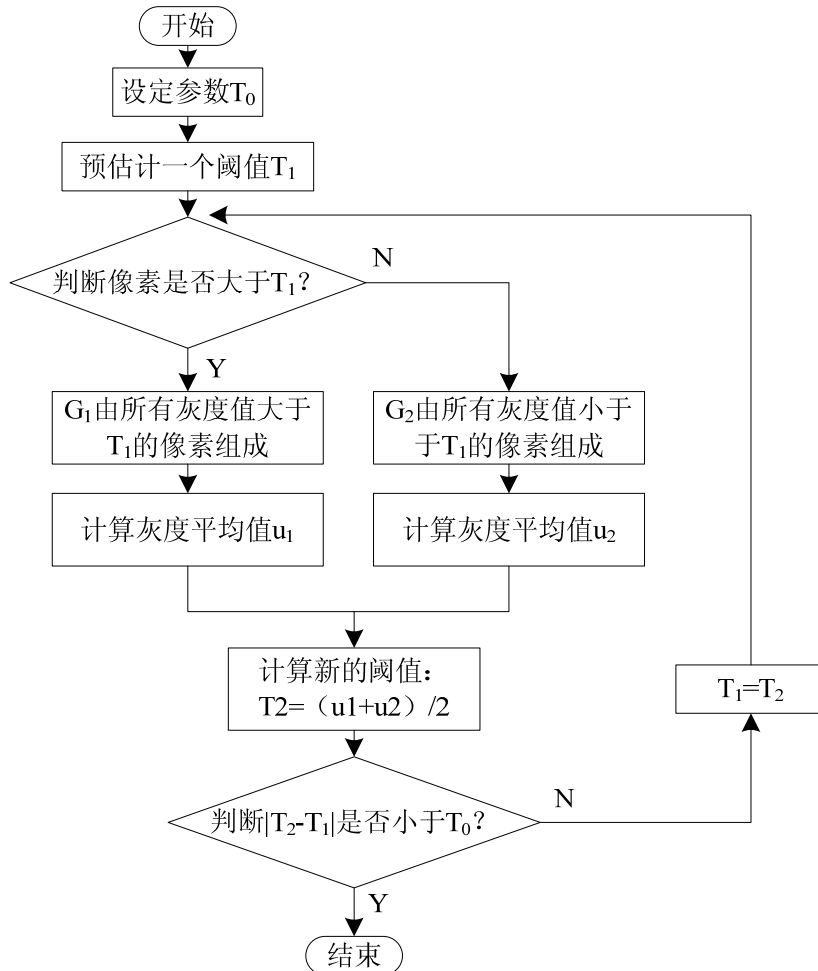


图 4.13 迭代阈值分割法流程图

Fig. 4.13 The flow chart of iterative algorithm

利用迭代阈值分割法对强干扰焊缝图像进行分割的结果，如图 4.14 所示：





图 4.14 迭代阈值分割

Fig. 4.14 The segmentation result of iterative algorithm

经试验比较,对于焊缝图像这种直方图双峰不明显,或图像目标与背景之间比例差异悬殊,用迭代法所选取的阈值不理想。

### (3) Otsu 自适应阈值分割

Otsu 法又称最大类间方差法,也称大津法。该算法是在灰度直方图的基础上利用最小二乘法,具有统计意义上的最佳分割阈值。其基本原理是把直方图从某个阈值处分割成两组,当被分成的两组之间的方差最大时所对应的阈值为最佳阈值。具体算法如下:

设  $X$  是一幅具有  $L$  级灰度级的图像,其中第  $i$  级像素为  $N_i$  个其中  $i$  的值在  $0 \sim L-1$  之间,图像的总像素点个数为:

$$N = \sum_{i=0}^{L-1} N_i \quad (4.11)$$

第  $i$  级出现的概率为:

$$P_i = \frac{N_i}{N} \quad (4.12)$$

阈值  $T$  将所有的像素分为目标  $C_0$  类和背景  $C_1$  类。其中,  $C_0$  类的像素灰度级为  $0 \sim T-1$ ,  $C_1$  类的像素灰度级为  $T \sim L-1$ 。

图像的总平均灰度级为:

$$\mu = \sum_{i=0}^{L-1} iP_i \quad (4.13)$$

$C_0$  类像素所占面积的比例为:

$$w_0 = \sum_{i=0}^{T-1} P_i \quad (4.14)$$

$C_1$  类像素所占面积的比例为:

$$w_1 = 1 - w_0 \quad (4.15)$$

$C_0$  类像素的平均灰度为:

$$\mu_0(T) = \mu_0(T) / w_0 \quad (4.16)$$

$C_1$  类像素的平均灰度为:

$$\mu_1(T) = \mu_1(T) / w_1 \quad (4.17)$$

其中,

$$\mu_0(T) = \sum_{i=0}^{T-1} iP_i$$

$$\mu_1(T) = \sum_{i=T}^{L-1} iP_i = 1 - \mu_0(T)$$

类间方差公式为:

$$\delta^2(T) = w_0(\mu - \mu_0)^2 + w_1(\mu - \mu_1)^2 \quad (4.18)$$

令  $T$  从  $0 \sim L-1$  变化, 类间方差  $\delta^2(T)$  最大时对应的  $T$  即为最优阈值。

利用 Otsu 自适应阈值分割法对强干扰焊缝图像进行分割的结果, 如图 4.15 所示:



图 4.15 Otsu 自适应阈值分割

Fig. 4.15 The segmentation result of Otsu

#### (4) Pal 自适应阈值分割

Pal 自适应阈值分割的基本思想是: 根据图像的灰度信息, 定义图像  $I$  的线性模糊度  $\gamma_1(I)$ , 二次模糊度  $\gamma_\mu(I)$  和模糊熵  $E(I)$ , 然后计算出使得图像的  $\gamma(I)$  和  $E(I)$  最小的灰度值  $T$  做为阈值进行图像分割。具体算法如下:

用  $\mu_1[f(i, j)]$  表示像素  $(i, j)$  拥有特定性质的程度, 设阈值为  $T$ , 则图像  $f(i, j)$  的隶属度  $\mu_1[f(i, j)]$  为:

$$\mu_1[f(i, j)] = S[f(i, j); a, b, c] = \begin{cases} 0, & f(i, j) \leq a \\ 2 \left[ \frac{f(i, j) - a}{c - a} \right]^2, & a < f(i, j) \leq b \\ 1 - 2 \left[ \frac{f(i, j) - a}{c - a} \right]^2, & b < f(i, j) \leq c \\ 1, & f(i, j) > c \end{cases} \quad (4.19)$$

其中,  $b = (a + c) / 2$ 。

根据  $\mu_1[f(i, j)]$  可以把图像  $I$  从图像空间变换到模糊空间, 按下式计算图像  $I$  的模糊度  $\gamma(I)$  和模糊熵  $E(I)$ :

$$\gamma(I) = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \text{MIN}\{\mu_1[f(i, j)], 1 - \mu_1[f(i, j)]\} \quad (4.20)$$

$$E(I) = \frac{1}{MN \ln 2} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \text{Sn}\{\mu_1[f(i, j)]\} \quad (4.21)$$

当模糊度  $\gamma(I)$  和模糊熵  $E(I)$  取最小值时  $b$  对应的灰度值就是最佳阈值  $T$ 。

利用 Pal 自适应阈值分割对强干扰焊缝图像进行分割的结果, 如图 4.16 所示:



图 4.16 Pal 自适应阈值

Fig. 4.16 The segmentation result of Pal adaptive threshold

从实验结果来看, 处理的效果理想, 但是该类方法有两个问题: 一是需要一定的先验知识; 二是计算复杂不适于实时性。

#### (5) 基于背景校正的最大方差阈值法

这种方法结合了背景校正与最大类间方差法来确定阈值。基于背景校正分割算法流程图如图 4.17 所示。

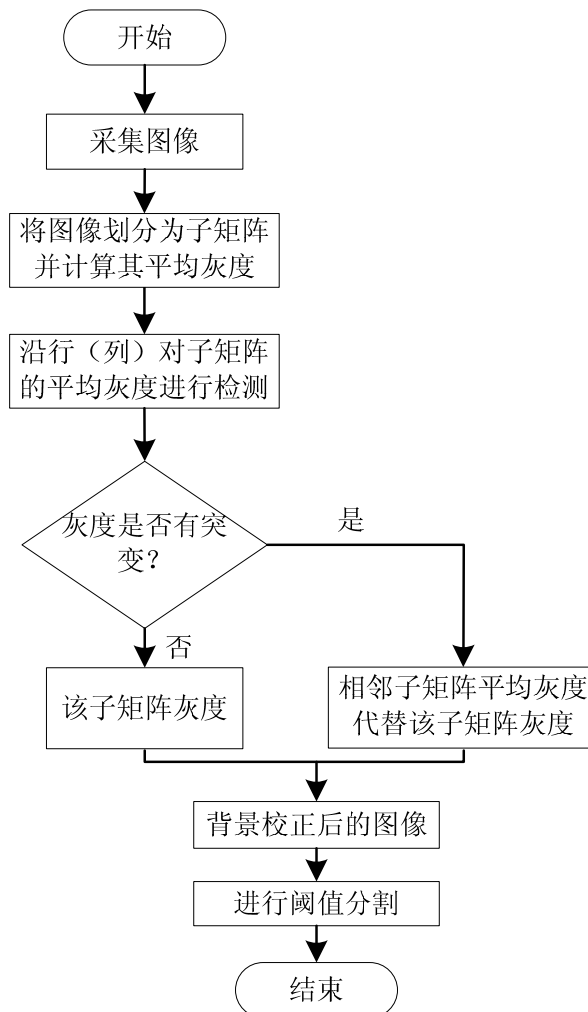


图 4.17 背景校正算法流程图

Fig. 4.17 Background correcting algorithm flow chart

图 4.18 为基于背景校正的最大方差阈值法的结果。



图 4.18 基于背景校正的最大方差阈值法

Fig. 4.18 The result of Otsu with background correction

由以上几种自适应算法分析和比较可以得知，自适应阈值分割可以产生动态的阈值，适用于连续采集的图像。采用直方图自适应阈值分割、迭代法阈值分割、Otsu 法阈值分割对强干扰的焊缝图像处理效果并不是十分理想；而采用 Pal 自适应阈值分割的焊缝图像能得到理想的结果，但其算法复杂，不适用于实时性。基于背景校正的最大方差阈值法对强干扰焊缝图像处理，其效果不仅理想，而且还具有 Otsu 法的处理速度较快的特性，所以本系统采用基于背景校正的最大方差阈值法。

#### 4-3-5 焊缝图像的孤点滤波

阈值分割后的图像经常存在小的孤立点和孤立区域，这些点和区域影响提取的焊缝信息精度，所以需要滤掉。本系统采用的是形态学去除小物体的方法。其基本原理为：图像大小为  $\{I_{m \times n}\}$ ，图像中连续的块为  $\{K_{i \times j}, i \in (0, m), j \in (0, n)\}$ 。

$$\begin{cases} K_{i \times j} = K_{i \times j}, i \times j > T \\ K_{i \times j} = O_{i \times j}, i \times j < T \end{cases} \quad (4.22)$$

其中， $O_{i \times j}$  为与背景同灰度值矩阵；T 为阈值。

孤点滤波后的图像如图 4.19 所示



图 4.19 孤点滤波后的焊缝图像

Fig. 4.19 The result of acnode filter

### § 4-4 焊缝图像特征点的提取

#### 4-4-1 焊缝图像中心的提取

传统的提取焊缝图像中心线使用的方法是 Hough 变换，而采用此种方法需要预先知道变换系数，应用最小二乘法 and 图像分割技术实现，计算量大，因而运行时间较长，从而难以保证焊接实时性的要求。

综合上述因素考虑，本系统采用形态学中的提取骨架的方法。所谓骨架(Skeleton)，是在中轴的定义下，满足以下条件的所有区域点的集合：它至少与两个分开的边界点具有相同的到区域边界的最小距离。例如孤立点和直线的骨架是它自身；圆的骨架是它的圆心；正方形的骨架是它的中心点；长方形的骨架是它的长方向上的中轴线。

首先介绍一下形态学基本变换：

膨胀： $X \oplus B = \{p \in \xi^2, p = x + b, x \in X \text{ 且 } b \in B\}$

腐蚀： $X \ominus B = \{p \in \xi^2, p = x + b, x \in X \text{ 且 } \forall b \in B\}$

开运算：先对图像进行腐蚀，然后膨胀其结果。数学表达式如下：

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B$$

闭运算：先对图像进行膨胀，然后腐蚀其结果。数学表达式如下：

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B$$

集合  $A$  使用结构元素  $B$  进行细化用  $A \otimes B$  表示。根据击中/击不中变换定义：

$$A \otimes B = A - (A \ominus B) = A \cap (A \ominus B)$$

细化可以用两步来实现。第一步是正常的腐蚀，被标为去除的像素点并不立即消失；第二步，只讲那些消除后并不破坏连同性的点消除，否则保留。

集合  $A$  的骨架可用腐蚀和开操作表达，即骨架可以表达为：

$$S(A) = \bigcup_{k=0}^K S_k(A) \quad (4.23)$$

$$S_k(A) = (A \ominus k B) - (A \ominus k B) \circ B \quad (4.24)$$

其中， $B$  为一个结构元素； $A \ominus k B$  为对  $A$  的连续  $k$  次腐蚀。

提取焊缝的骨架如图 4.20 所示。

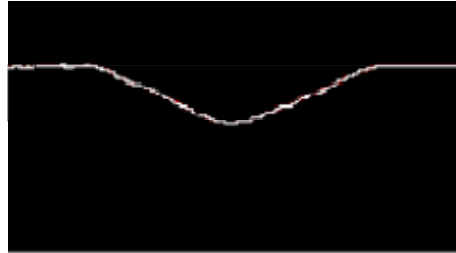


图 4.20 焊缝骨架

Fig. 4.20 The skeleton of welding seam

#### 4-4-2 焊缝特征信息提取

通过对采集到的焊缝图像进行预处理、提取骨架等处理得到焊缝骨架后，还需要提取焊缝的中心点和两侧的边缘点。V 形焊缝图像结构示意图如图 4.21 所示，其特征检测主要是获得图中  $a, b, c$  三个点的二维坐标，即  $(a_x, a_y)$ ， $(b_x, b_y)$ ， $(c_x, c_y)$ 。

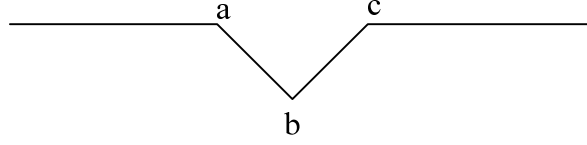


图 4.21 V 形焊缝结构示意图

Fig. 4.21 The sketch of V groove welding seam

常用的焊缝特征提取的方法有：斜率分析法和模板匹配法。

#### (1) 模板匹配法

模板匹配法是将已知模板在视觉传感器不同时间采集到的图像上进行搜寻的一种方法，通常用归一化互相关匹配算法（NC）算法进行匹配。设模板  $T(m, n)$  在待匹配图  $S(M, N)$  上平移，被模板覆盖下的那块待匹配图称作子图  $S^{ij}$ ，通过归一化相关系数  $R(i, j)$  的数值来体现匹配的程度：

$$R(i, j) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N S^{ij}(m, n) \times T(m, n)}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S^{ij}(m, n)]^2} \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [T(m, n)]^2}} \quad (4.25)$$

其中， $1 < i < M - m + 1; 1 < j < N - n - 1$ 。

分母中  $\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S^{ij}(m, n)]^2$  为子图能量， $\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [T(m, n)]^2$  为模板能量，是个常数。分子为模板与子图的互相关，随  $(i, j)$  变化而变化。当模板与子图完全一样时，归一化相关系数  $R(i, j)$  为 1。在待匹配图  $S(M, N)$  中完成全部搜索后找出  $R(i, j)$  的最大值，其所对应的子图即为匹配目标。用模板匹配的方法检测焊缝特征点如图 4.22 所示。



图 4.22 模板匹配法

Fig. 4.22 The result of template matching method

如果检测的焊缝形状，大小是不变的，应用这种方法能快速有效的提取出焊缝特征点，但是对于多层多道焊则需要经常更换模板。

#### (2) 斜率分析法

将骨架上每一点的二维坐标信息存入一个二维数组中，依次比较数组中的纵坐标  $y$  值大小，纵坐标最小值即是拐点  $b$ 。由焊缝图像可知，焊缝特征曲线上直线段的斜率近似为 0，V 形坡面上的点斜率不为 0，故运用斜率分析法来确定拐点  $a$ 、 $c$ 。

设 V 形焊缝图像上第  $i$  列的位置像素纵坐标为  $f(i)$ ，则该点的斜率为

$$k(i) = f(i) - f(i-1) \quad (4.26)$$

其中,  $f(i-1)$  表示前一列的像素纵坐标。

由于 V 形焊缝骨架存在细小的凹凸点, 为了提高抗干扰性, 取中间相隔  $n$  列的像素求取斜率, 即

$$k(i) = \frac{f(i) - f(i-n)}{n} \quad (4.27)$$

本系统采用求取指定点左右各  $n(n=1,2,3,4\cdots)$  列的平均斜率作为该点的斜率, 如式 (4.28) 所示。

$$k(i) = \left[ \frac{f(i+1) - f(i-1)}{2} + \frac{f(i+2) - f(i-2)}{4} + \cdots + \frac{f(i+n) - f(i-n)}{2n} \right] / n \quad (4.28)$$

当取  $n_{\max} = 3$  时, V 形焊缝曲线上各点的斜率较为平滑, 抗干扰能力强, 求取斜率较快。故式 (4.28)

可写为:

$$k(i) = \left[ \frac{f(i+1) - f(i-1)}{2} + \frac{f(i+2) - f(i-2)}{4} + \frac{f(i+3) - f(i-3)}{6} \right] / 3 \quad (4.29)$$

图 4.23 为提取的焊缝特征点

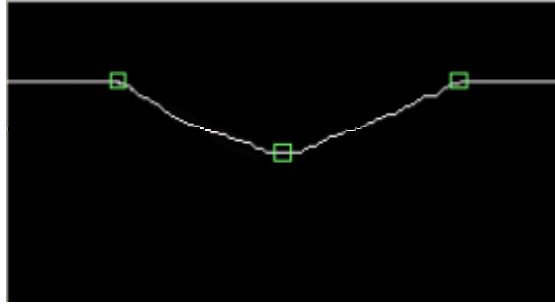


图 4.23 斜率分析法

Fig. 4.23 The result of slope analysis

这种方法的缺点是在图像含有大量噪声时, 提取的中心点往往是不准确的, 影响跟踪效果。

综上所述, 本焊接机器人主要的对象是大型结构件, 经常会进行多层多道焊, 故模板匹配法并不适用。由于经过前面的处理, 即使原始图像存在大量的噪声, 也能提取出理想的焊缝骨架, 故本系统采用斜率分析法提取特征点。图 4.24 为进行多层多道焊过程中采用斜率分析法提取特征点的情况。

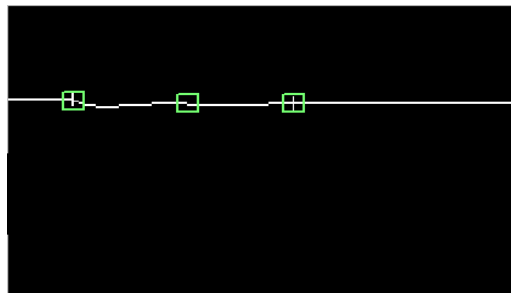


图 4.24 斜率分析法在多层多道焊中的提取结果

Fig. 4.24 The extraction result of multi-layer welding with slope analysis

## § 4-5 焊缝路径的拟合

视觉传感器发射的结构光条纹距离焊枪还有一定的距离（前视距离），这样不可避免的引入了导前误差。目前国内外对导前误差的研究比较少，减小导前误差的方法大体可分为两类：一是双线性结构光法<sup>[80~81]</sup>和入栈出栈法<sup>[82]</sup>。双线性结构光法的基本思想是采用两个线状激光作为光源，同时在不同位置测量焊缝的图像，便可得到焊缝相对于传感器的角度。这种方法需要进行预扫描，也就是离线扫描。入栈出栈法的基本思想是提取到的特征点的信息并不立即使用，而是入栈存储起来，等到焊枪到达该点附近位置时，数据进行出栈才可以使用。这种方法的缺点是提取出的焊缝特征点信息不能保证就是焊枪当前点的位置信息，而且入栈出栈需要延时，跟踪精度不准确。

### 4-5-1 超前检测

焊枪和传感器为固定相连，焊枪与图像中心位置相距  $\lambda$  mm。视觉传感器所采集的数据之间的关系如图 4.25 所示。

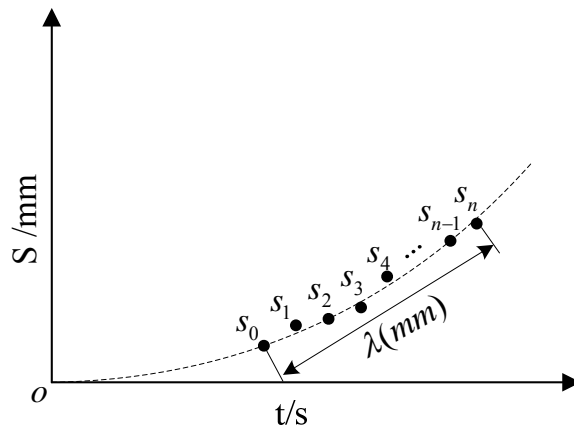


图 4.25 采集数据之间的关系

Fig. 4.25 The relationship of collecting datum

图中， $o$  点为焊缝的起点；横坐标为焊枪行走的时间；纵坐标为焊枪行走的距离；虚线为待焊工件焊缝坡口中心线，为未知曲线； $s_0, s_1, \dots, s_n$  为视觉传感器采集到的曲线上的点，由于存在误差，这些点并不全都位于焊缝曲线上。假设焊枪能够准确的到达视觉传感器的采样点，在  $t$  时刻，焊枪位置在  $s_0$  点，视觉传感器检测点的位置在  $s_n$  点。此时作为输入信号输入到控制器的数值为在  $s_n$  点检测出的偏差值，而不是焊枪位置  $s_0$  点的偏差值，故在进行曲焊缝跟踪时，焊接质量较低，有时可能会导致焊接失败。

### 4-5-2 曲线拟合的方法

假设焊枪在匀速焊接的情况下，本文采用一种拟合焊缝路径的方法来减小导前误差，其基本思想是将焊缝特征点拟合出一条光滑的曲线，可从曲线中读取焊枪当前理想位置，从而减小导前误差。下面给出了两种曲线拟合的方法：

#### (1) 最小二乘法拟合曲线



最小二乘法通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配。其原理为：

设  $f(x)$  为  $m$  次多项式，即

$$f(x) = \sum_{j=0}^m a_j x^j \quad (4.30)$$

$$\varphi(a_j) = \sum_{i=1}^n [f(x_i) - y_i]^2 = \sum_{i=1}^n \left[ \sum_{j=0}^m a_j x_i^j - y_i \right]^2 \quad (4.31)$$

当误差平方和  $\varphi(a_j)$  最小时，所求的系数  $a_j$  为最佳的估计值。即

$$\frac{\partial \varphi}{\partial a_k} = 2 \sum_{i=1}^n \left[ \left( \sum_{j=0}^m a_j x_i^j - y_i \right) x_i^k \right] = 0, \quad (k = 0, 1, 2, \dots, m) \quad (4.32)$$

故系数  $a_0, a_1, \dots, a_m$  的线性方程组为

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^m \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^{m+1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^m & \sum_{i=1}^n x_i^{m+1} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^{2m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \cdots \\ a_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \cdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^m y_i \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

## (2) 三次样条插值拟合曲线

样条是指通过一组给定点集来生成平滑曲线的柔性带。样条曲线是指由多项式曲线段连接而成的曲线，通常用式 (4.34) 来描述  $N$  次样条参数多项式曲线。

$$\begin{cases} x(t) = a_n t^n + \cdots + a_2 t^2 + a_1 t^1 + a_0 \\ y(t) = b_n t^n + \cdots + b_2 t^2 + b_1 t^1 + b_0 \\ z(t) = c_n t^n + \cdots + c_2 t^2 + c_1 t^1 + c_0 \end{cases} \quad t \in [0, 1] \quad (4.34)$$

$N$  次样条曲线计算复杂，不满足实时性，而三次样条曲线具有更多的灵活性和较少的计算，故大多数形状都是采用三次多项式来表示。式 (4.34) 可以写为：

$$\begin{cases} x(t) = a_x t^3 + b_x t^2 + c_x t + d_x \\ y(t) = a_y t^3 + b_y t^2 + c_y t + d_y \\ z(t) = a_z t^3 + b_z t^2 + c_z t + d_z \end{cases} \quad t \in [0, 1] \quad (4.35)$$

将式 (4.35) 写成向量形式，为：

$$p(t) = at^3 + bt^2 + ct + d \quad t \in [0, 1] \quad (4.36)$$

其中  $a, b, c, d$  为系数向量； $p(t)$  是曲线上任一点的位置向量。

对于三次参数曲线，可用其端点向量  $P(0)$ ， $P(1)$  和端点切向量  $P'(0)$ ， $P'(1)$  描述，则

$$\begin{cases} a = 2P(0) - 2P(1) + P'(0) + P'(1) \\ b = -3P(0) + 3P(1) - 2P'(0) - P'(1) \\ c = P'(0) \\ d = P(0) \end{cases} \quad (4.37)$$

在实际焊接中,焊缝的形状可能是复杂的曲线,即由多段曲线组合而成。最小二乘法能拟合出比较简单的曲线,对于拟合复杂焊缝则不满足要求;而三次样条曲线可以平滑的拟合出多段曲线组合而成的曲线,故本系统采用三次样条插值拟合曲线。

#### 4-5-3 焊缝的曲线拟合

设前视距离为  $\lambda = 30mm$ , 图像的处理时间为  $\Delta T = 80ms$ , 机器人伺服周期为  $\Delta t = 15ms$ , 焊接速度为  $V = 5mm/s$ 。

相邻两个采样点的距离为

$$\Delta x = V \cdot \Delta T = 0.4(mm) \quad (4.38)$$

在间距为  $\lambda$  的距离内采集的个数为

$$n = \lambda / \Delta x = 75 \quad (4.39)$$

故前视距离长度内可以采集 75 个焊缝特征点。因为需要判断焊缝曲率走向,需再取焊枪后 75 个特征点,将这 150 个特征点进行曲线拟合。当焊枪到达某位置时,从拟合出曲线方程上读取焊枪在当前位置的特征点信息,进行焊缝跟踪。

#### 4-5-4 跟踪过程分析

焊缝起始跟踪过程如图 4.26 所示。

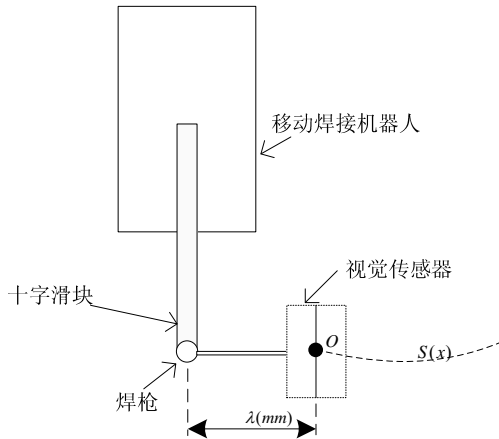


图 4.26.1 开始焊接前

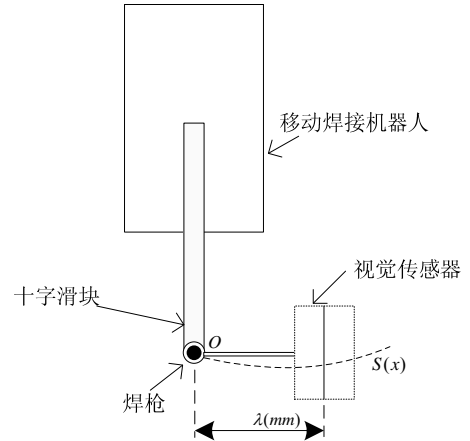


图 4.26.2 行走  $\lambda$  mm 后开始焊接

图 4.26 焊缝起始跟踪过程

Fig. 4.26 The beginning of weld seam tracking

图中,  $S(x)$  为焊缝轨迹,  $O$  点为焊缝起点。

焊缝跟踪过程流程图如图 4.27 所示。

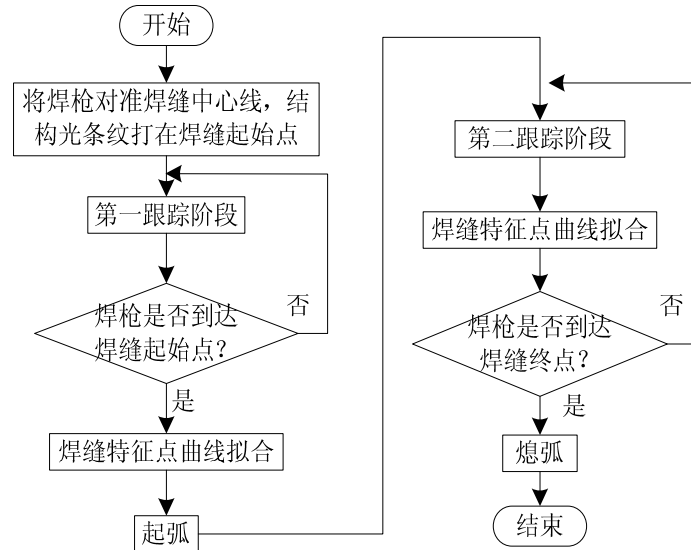


图 4.27 焊缝跟踪过程流程图

Fig. 4.27. The flow chart of weld seam tracking

首先, 将机器人焊枪调至焊缝中心线上, 结构光打在焊缝起始点上, 开始检测特征点, 将特征点送入工控机进行储存。在焊枪到达焊缝起点这一阶段为第一跟踪阶段, 此时焊枪不进行跟踪, 只采集数据存储数据。当焊枪达到起始点后, 将存储的数据进行曲线拟合, 开始焊接, 进入第二跟踪阶段。第二跟踪阶段是根据从拟合曲线上读取焊枪当前位置焊缝的信息进行跟踪, 同时工控机继续存储视觉传感器采集到的焊缝信息。当焊枪到达焊缝末端, 熄弧, 跟踪结束。

## § 4-6 本章小结

本章全面研究了焊缝图像处理的方法, 针对传统的 Otsu 法分割具有强干扰图像效果不理想的情况, 提出基于背景校正的最大类间方差阈值分割方法, 并与中值滤波、图像增强和孤点滤波去噪的处理方法组成焊缝图像的预处理组合方法, 能够快速获得清晰的焊缝图像, 保证后处理能够顺利的进行。采用数学形态学细化方法来提取焊缝图像中心线, 由于图像处理的效果好, 可通过斜率分析法提取焊缝特征信息。

本章针对视觉传感焊接机器人存在导前误差的问题进行研究, 提出拟合焊枪前后一段距离内的焊缝路径的方法来减小导前误差, 提高焊接质量。

## 第五章 焊缝检测系统软件设计及实验

### § 5-1 软件开发工具的选择

开发工具的选择是十分重要的，选择的好坏直接影响到系统开发的难易程度。目前可进行图像处理的软件有 OpenCV、Matlab、C++、LabVIEW 等。

本系统主要采用的是 LabVIEW 编制的。LabVIEW 经过 20 多年的持续创新，已经从单纯的仪器控制软件发展成为面向设计、测量和控制的综合性图形化开发平台，在汽车、通信、航空、半导体、电子产品设计生产、过程控制和生物医学等各个领域得到了广泛的应用。LabVIEW 是一种图形化编程语言，俗称 G 语言。使用 LabVIEW 进行编程时基本上不用写程序代码，而是用图标、连线构成程序框图，类似一个搭积木的过程。LabVIEW 不仅提供了遵从 RE-232、VXI、GPIB 和 RS485 协议的硬件以及数据采集卡通信的全部功能，还内置了支持 TCP/IP、ActivX 等软件标准的库函数，其广泛应用于各种台式、移动、工业级计算机和嵌入式系统中，以其强大的图形化编程界面为工程师和科学家提供直观的编程语言。软件中还使用了 Matlab 来完成一部分图像处理功能。Matlab 是集数值计算、符号运算及图像处理等强大功能于一体的科学计算语言，便于与其他程序和语言连接。

### § 5-2 检测系统设计

#### 5-2-1 硬件系统

本文所采用的焊接机器人是自主研发的移动焊接机器人，其中焊缝视觉信息检测系统只是焊缝跟踪实验系统中的一部分，主要由工控机、焊接机器人、视觉传感器系统组成，如图 5.1 所示。

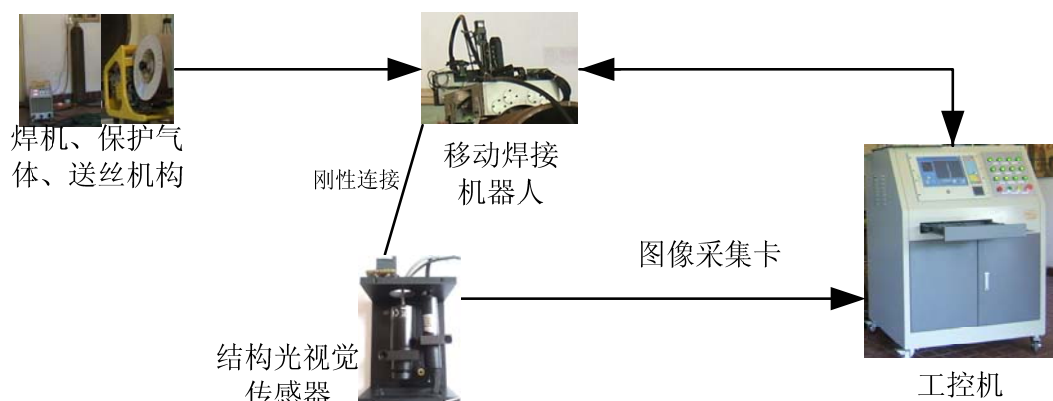


图 5.1 焊缝视觉信息检测系统硬件组成框图

Fig. 5.1 The hardware structure diagram of welding seam detection system

其中，工控机为主控设备，负责获取图像、图像处理、命令处理等功能，是整个系统的核心部分。

### 5-2-2 软件系统

本软件系统采用模块化设计方法，包括视觉系统标定模块、焊缝检测模块、焊缝跟踪模块。软件系统的结构如图 5.2 所示。

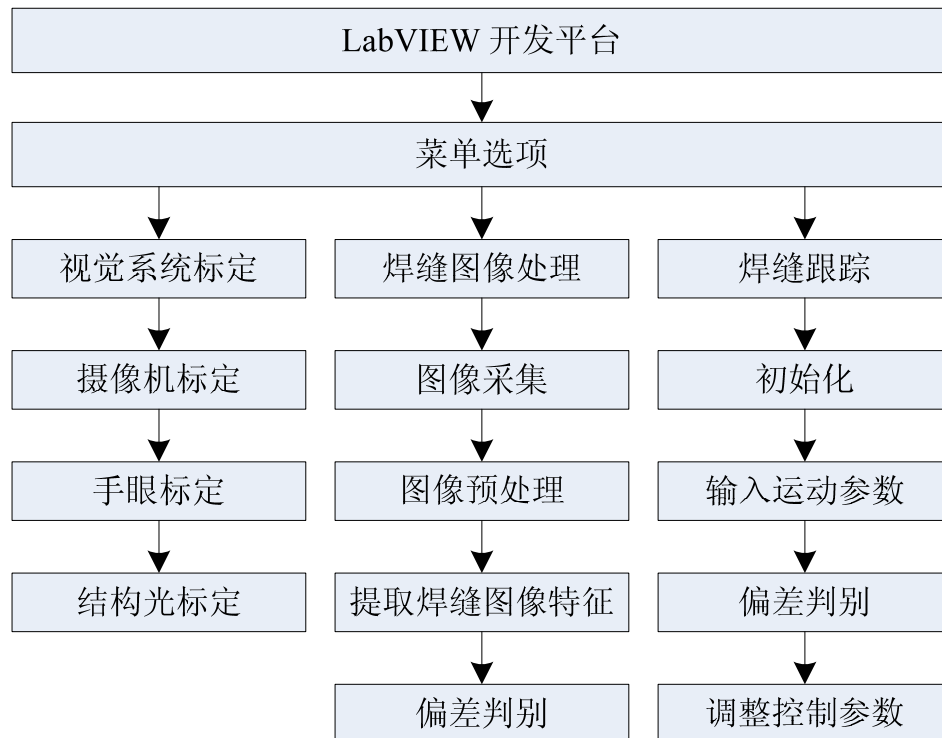


图 5.2 软件系统结构图

Fig. 5.2 The structure diagram of software system

系统软件的功能模块基本上是按照视觉焊接机器人焊接工艺进行划分的，其流程图如图 5.3 所示。

系统开机运行后，首先系统自行检查每个传感器，如发现故障就会及时报警，以确保整个系统能够正常运行。本系统有三个主要功能：一是视觉系统标定；这是移动焊接机器人工作的前提，可建立起图像像素点与空间的位置坐标关系。二是焊缝图像处理；这是系统检测的关键，主要是选择方法，提取特征点，判断是否有偏差。三是焊缝跟踪；控制部分的核心，根据得到的偏差，控制机器人运动从而消除偏差，保证焊接质量。视觉系统标定界面如图 5.4 所示。

焊接过程中存在大量的强干扰，并且不同的焊接参数、不同的焊接方法、不同的焊接材料、不同的坡口形式采集到的焊缝图像有很大的差别，用一种图像处理的方法是不能实现的。故在焊接开始前需要针对焊接参数、接头形式和坡口属性对软件进行系统设置来选择一组合适的焊缝图像处理算法。ROI 设置区域根据焊缝的形状来设置感兴趣区域。图像处理界面如图 5.5 所示。

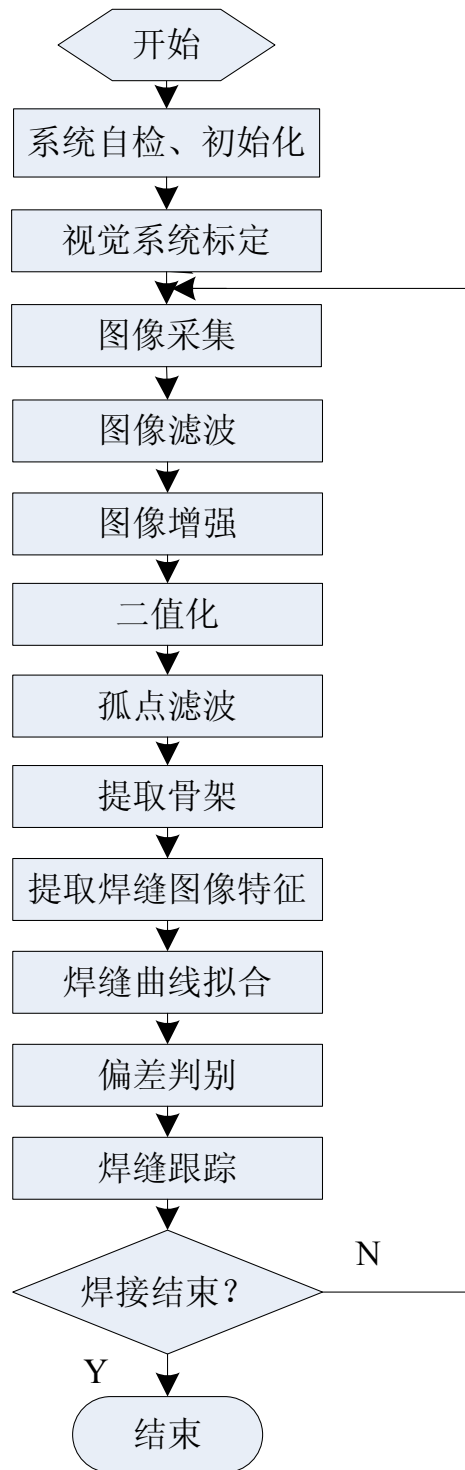


图 5.3 焊缝图像处理流程图

Fig. 5.3 The flow diagram of welding image process



图 5.4 视觉系统标定界面

Fig. 5.4 The calibration GUI for vision system

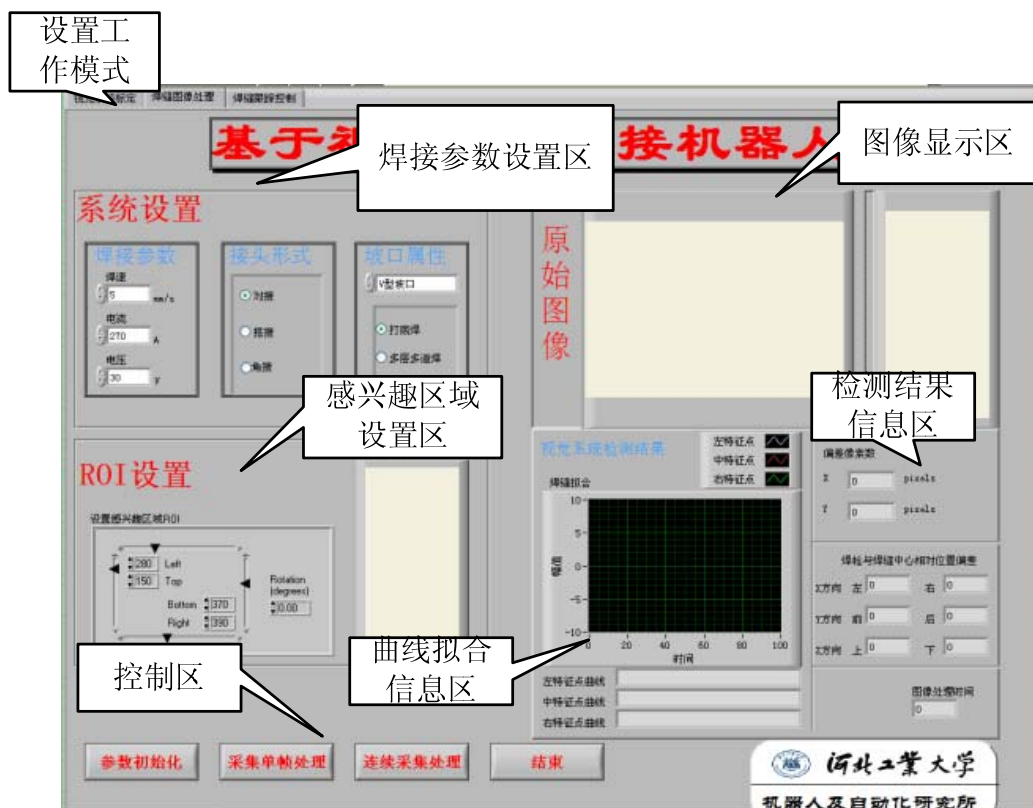


图 5.5 软件系统主界面

Fig. 5.5 The main GUI for the hardware system

### § 5-3 焊缝视觉信息检测的实验与分析

焊缝视觉信息检测系统在实验室条件下进行了焊接试验,以考察系统的稳定性和检测的准确性。实验系统包括:

1.焊接系统 本系统采用的焊机是北京时代科技股份有限公司生产的全数字半自动气体保护焊机 NB-500(A161-500),该焊机具有电源电压适应范围宽、焊接过程稳定等特点,可以预设送丝速度和焊接电压,适用于铝焊丝、钢焊丝、药芯焊丝和各种焊条的全位置焊接,满足焊接机器人焊接的要求。采用的焊丝天津大桥焊材有限公司生产的牌号为 THQ50-4 气保焊丝,直径 1.2mm,保护气体为 100%的二氧化碳。

2.焊接试件 使用的模拟焊缝为水平放置的折角和 S 形焊缝工件,坡口为 V 形坡口,规格为长 130mm、宽 50mm、高 10mm,焊缝深 5mm、宽 10mm。

#### 5-3-1 焊接实验

图 5.6 为焊接过程中 V 型焊缝图像的原始图像和特征识别的结果。图左可以看出,由于采用了滤光片组进行滤波,可以采到清晰的焊缝图像。采取第四章所述的方法进行处理,结果图右所示。

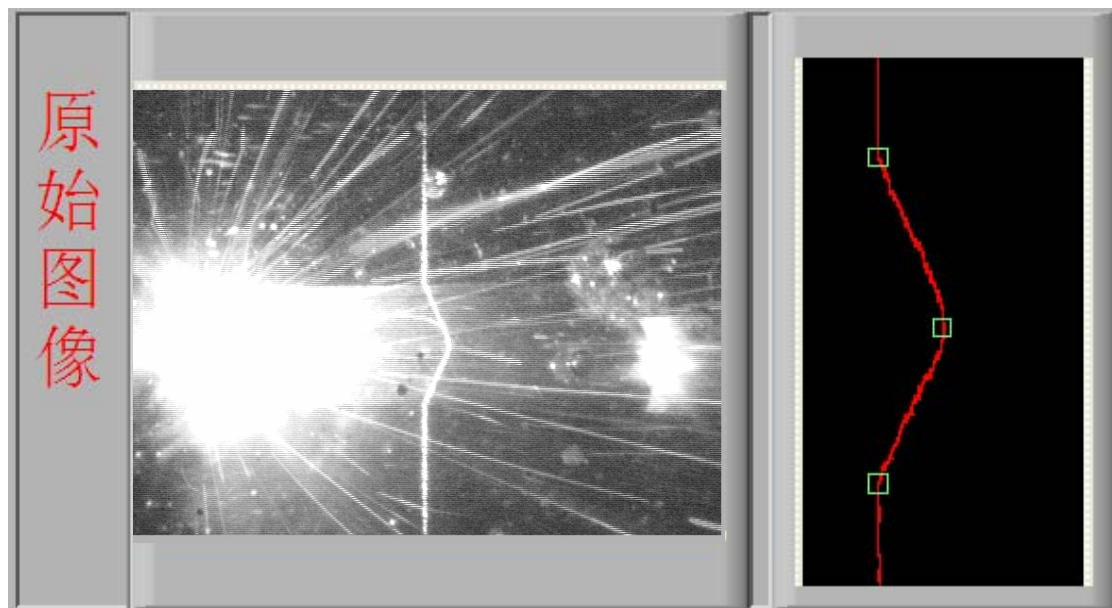


图 5.6 V 型坡口原始图像和特征识别

Fig. 5.6 The original image and feature identification image of V groove weld



偏差像素数	
X	6 pixels
Y	39 pixels
焊枪与焊缝中心相对位置偏差	
X方向	左 0 右 1.32
Y方向	前 0 后 8.58
Z方向	上 12.4 下 0
图像处理时间	
18	

图 5.7 焊缝信息及处理时间

Fig. 5.7 The information of welding seam and processing time

由图 5-7 可知，提取的焊缝参数：X 偏差为 6 个像素，Y 偏差为 39 像素；焊枪与焊缝中心相对位置偏差为 X 方向右偏 1.32，Y 方向后偏 8.58，Z 方向上偏 12.4；图像处理的时间为 18ms。

焊接对象为 S 形焊缝时，采用本文提出的方法，焊缝路径拟合（实际坐标）结果如图 5.8 所示，焊接结果如图 5.9 所示。

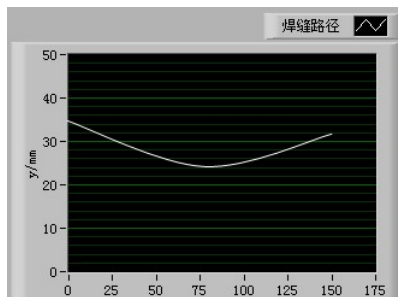


图 5.8 拟合的焊缝轨迹

Fig. 5.8 The result of weld seam fitting



图 5.9 曲焊缝焊接跟踪的结果

Fig. 5.9 The result of bending seam tracking

从结果可以看出，本文提出的方法能够有效的减小导前误差，曲焊缝跟踪平滑，焊接质量可靠。

焊接对象为折线形焊缝时，采集的特征点信息如表 5.1、表 5.2、表 5.3 所示。

表 5.1 左特征点信息

Table 5.1 The information of left feature point

x(mm)	28.21	28.665	29.12	29.575	30.03	30.485	31.395	31.85	32.305	.....
y(pixel)	200	200	199	199	199	199	199	200	200	.....
.....	81.445	81.9	82.355	82.81	83.265	83.72	84.175	84.63	85.085	85.54
.....	205	205	206	206	207	207	208	208	209	209

表 5.2 中特征点信息

Table 5.2 The information of middle feature point

x(mm)	25.935	26.39	26.845	27.3	27.755	28.21	28.665	29.12	29.575	.....
y(pixel)	260	260	259	259	259	259	260	259	260	.....
.....	79.17	79.625	80.08	80.535	80.99	81.445	81.9	82.355	82.81	82.81
.....	260	260	260	260	260	260	261	261	260	261

表 5.3 右特征点信息

Table 5.3 The information of right feature point

x(mm)	28.21	28.665	29.12	29.575	30.03	30.485	31.395	31.85	32.305	.....
y(pixel)	324	324	323	323	323	323	324	323	324	.....
.....	81.445	81.9	82.355	82.81	83.265	83.72	84.175	84.63	85.085	85.54
.....	323	323	324	324	324	324	324	323	324	323

拟合的焊缝曲线如图 5.10 所示。

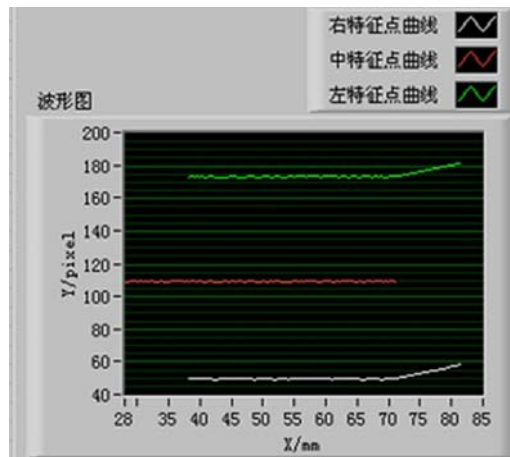


图 5.10 拟合的三个特征点曲线

Fig. 5.10 The fitting lines for three feature points

图 5.11 为检测的焊缝信息与实际值进行的比较。

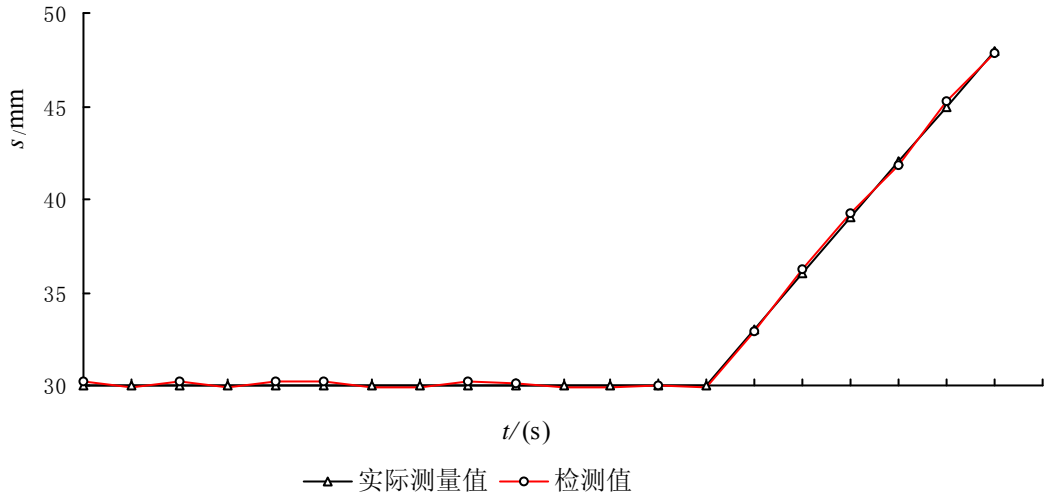


图 5.11 实际测量值与检测值比较

Fig. 5.11 The result of comparing detecting data with actual data

从图 5.11 可以分析出检测最大误差范围为： $\pm 0.25\text{mm}$ 。

实验表明，该焊缝视觉信息检测系统抗干扰能力强，焊接速度可根据焊接工艺调整，精度高，用时短，可以满足实时性和高精度的要求。

### 5-3-2 误差分析

实验过程中，产生误差的原因包括以下几个方面：

#### (1) 传感器测量误差。

由第二章可知，本系统传感器的数学模型为

$$\begin{cases} x_g = \frac{(H_L - H_1 - f)x - fL}{x \cot \beta - f} \\ y_g = \frac{(f + H_1) \tan \beta + L - H_L \tan \beta}{x - f \tan \beta} \times y \\ z_g = \frac{x(H_1 + f) + f(L - H_L \tan \beta)}{x - f \tan \beta} \end{cases} \quad (5.1)$$

式中  $H_L$  为激光器距离工件的高度， $H_1$  为成像平面距工件的高度， $f$  为焦距。

测量误差公式为：

$$\Delta = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (5.2)$$

即

$$\Delta = \sqrt{\left(\frac{\partial x_g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial x_g}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial y_g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial y_g}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial z_g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z_g}{\partial y}\right)^2} \quad (5.3)$$

经计算得，该系统传感器测量图像中心点的误差  $\Delta = 48\mu\text{m}$ 。

#### (2) 曲线拟合引入的误差。

本系统采用了焊缝曲线拟合的方式来减小导前误差的影响。但在拟合过程中，为了提高拟合速度，

采用的焊缝拟合方法为三次样条曲线拟合，忽略了样条曲线拟合中的高次项，从而引起误差。

(3) 焊接机器人的运动精度也会影响系统的检测精度。

## § 5-4 本章小结

从系统开发的难易程度和运行效率上考虑，本系统选用了 LabVIEW 为主要开发工具，其中有一些程序是与 Matlab 混合编程的。该软件系统有三个特点：一是良好的人机交互界面；二是具有 Matlab 强大的图像处理功能；三是能对焊缝进行实时检测。

对 V 型焊缝的图像处理方法进行了大量的实验研究，本系统所采用的图像处理算法能有效准确的提取出强干扰下的焊缝信息，具有较高的抗干扰性。实验表明采用上述的焊缝图像组合处理方法处理一幅焊缝图像的时间不大于 25 毫秒，采用曲线拟合的方法能够有效的减小导前误差，提高跟踪精度，能够满足焊接焊缝实时跟踪的要求。

## 第六章 结论与展望

### § 6-1 全文结论

由于焊接广泛应用于民用和军用制造领域，跟人们的生活息息相关，随着人们对焊接质量的要求越来越严格，解决焊接机器人的实时性和准确性之间的矛盾和提高智能化具有重大意义。

本文针对焊缝信息视觉检测进行了研究，从搭建实验平台到进行多次试验研究，从理论研究到具体编程实现，研制出了移动焊接机器人焊缝信息视觉检测系统软件平台，取得了很好的效果。具体的工作和成果如下：

本文分析了结构光视觉传感器工作原理，针对视觉传感系统主要硬件进行了选型，并对视觉传感器进行了结构分析和设计，改进了传统的视觉传感器，使得视觉传感器体积减小，抗干扰能力得到提高。

标定技术是视觉控制系统的关键技术之一，其标定的结果直接影响到提取焊缝特征点的精确性。本文分析了视觉传感系统中的摄像机模型、手眼关系模型和结构光模型，并针对每个模型提出了标定方法，标定结果满足焊接要求。

分析了处理焊缝图像的方法及算法原理，包括滤波平滑、图像增强、图像分割以及基于数学形态学的处理方法。通过大量实验，针对强干扰下焊缝图像的自动阈值分割的结果不理想的情况，提出了一种基于背景矫正的最大方差阈值分割法，并与中值滤波、形态学孤点滤波、提取骨架进行最优组合，能够快速提取出清晰的焊缝图像。经实验证明，采取上述措施后，处理一幅强干扰的焊缝图像的时间不大于 25ms，满足焊接实时性的要求。

针对基于视觉的焊接机器人导前误差问题，本文提出在焊枪的前后取 150 个点进行光滑曲线拟合，当焊枪达到某位置时，根据曲线方程读取该位置特征点参数，从而减小导前误差。经大量实验证明，此方法精度较高，能够有效的减小导前误差。

设计开发了一套焊缝图像实时采集和处理的软件系统，采用 LabVIEW 与 Matlab 混合编程，系统人机界面友好、操作简单。实验表明，该检测系统检测精度高，处理速度快，能满足焊缝跟踪实时性要求。

### § 6-2 展望

由于时间、精力等方面的限制，本文研究的焊缝信息视觉检测系统能够实时地、准确地检测到 V 型焊缝特征参数，但是要提高焊接智能化还需进行编写其他焊缝形式的检测程序，同时要实现焊缝自动跟踪，还必须要与控制系统进行紧密联合，控制系统通过视觉检测得到的偏差来控制焊枪运动，从而实现焊缝的自动跟踪控制。

实验中图像的采集和处理都是在工控机上完成的，由于工控机体积庞大，不便于携带，需要将焊缝图像检测程序及控制程序移植到嵌入式平台上，例如移植到 NI Compact RIO 平台上或 ARM 平台上，以实现其工作的灵活性。

## 参考文献

- [1] 沈鸿源, 林涛, 陈善本, 等. 运载火箭燃料贮箱的机器人焊接技术研究. 航天制造技术, 2007, 8(4): 1-4
- [2] 张正兵, 李晓娜. 机器人在焊接中的应用. 电焊机, 2008, 38(6): 44-47
- [3] 宋金虎. 焊接机器人现状及发展趋势. 现代焊接, 2011, 03: J1-J4
- [4] 许燕玲, 林涛, 陈善本. 焊接机器人应用现状与研究发展趋势. 金属加工, 2010, 08: 32-36
- [5] 李来平. 弧焊机器人视觉传感技术. 现代焊接, 2008, 08: J1-J4
- [6] 都东, 邹怡蓉, 常保华. 焊接视觉传感及自动跟踪技术的现状与发展. 航空航天焊接技术. 2010, 09: 40-42
- [7] 张正兵. 机器人在焊接中的应用. 电焊机, 2008, 38(6): 44- 47
- [8] 闫爱辉, 胡志强. 自主品牌焊接机器人之殇. 现代零部件, 2011, 7: 28-29
- [9] KAM B O, JEON Y B, KIM S B. Motion control of two Wheeled welding mobile robot with seam tracking sensor. IEEE International SymPosiumon Industrial Eleetronies, June12-16, 2001 Pusan, South Korea. New York: IEEE, 2001: 850-856
- [10] Yasuo Suga, Akifumi Muto. Automatic tracking of welding line by autonomous mobile robot for welding of plates (Tracking of linear and angled welding lines). Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers(Part C), 1997, 612(63): 2918-2924
- [11] YUE Hong, Li Kai, at el. Vision-based pipeline girth-welding robot and image processing of weld seam. Industrial Robot, 2009, 36(3): 284-289
- [12] 李慨, 岳宏, 赵海文, 等. 基于虚拟仪器的管道焊接机器人测控系统. 仪器仪表学报增刊. 2006, 27(6s1): 416-418
- [13] 张轲, 吕学勤, 吴毅雄, 等. 自寻迹舰船甲板焊接移动焊接机器人. 焊接学报, 2005, 26(4): 55-59
- [14] 张华, 翟因虎, 陈茂华, 等. 履带式爬行机器人运动轨迹跟踪模糊控制系统. 上海交通大学学报, 2002, 36: 19-21
- [15] Yang Boe Jeon. Seam tracking and welding speed control of mobile robot for lattic type welding. ISIE, 2001
- [16] Charalabos. Multivariable adaptive control of the bead profile geometry in gas metal arc welding with thermal scanning. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2002, 4: 25-31
- [17] Chinju. An optical sensing system for seam tracking and weld pool control in gas metal arc welding of steel pipe. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 120: 458-465
- [18] L.H.Sharif. Sensing and digital control of weld pool with visual welding robot. IEEE, 2000
- [19] Iskandar Baharin. Adaptive Control of Seam Tracking through Progressive HAZ and Weld Pool Penetration using Thickness Measurement. IEEE, 1995
- [20] J.Y.Jeng. Gap Inspection and Alignment Using a Vision Technique for Laser Butt Joint Welding.

- Advanced Manufacturing Technology, 2000: 32-45
- [21] R A White. Vision-based gauge for online weld profile metrology. IEEE, 1994
- [22] 高向东, 张勇, 游德勇等. 大功率光纤激光焊熔池形态及焊接稳定性分析. 焊接学报, 2011, 32(9): 13-16
- [23] 齐秀滨. 激光焊接过程视觉传感技术的发展现状. 焊接学报, 2008, 29(2): 108-112
- [24] 谢志孟, 高向东. 基于视觉传感的焊缝跟踪技术研究展望. 焊接, 2005, 4, 5-9
- [25] 高向东, 刘明涛, 陈建辉. 视觉传感及图像处理技术在焊接控制中的应用. 现代焊接, 2006, 11: 15-17
- [26] 王晓嘉, 高隽, 王磊. 激光三角法综述. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 601-604
- [27] 温玉春. 计算机图像处理技术应用研究. 现代商贸工业, 2011, 22(12): 178-179
- [28] 周律. 基于视觉伺服的弧焊机器人焊接路径获取方法研究: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2007
- [29] DU Xin, ZHAO Xiaoguang. Robot Tracking by Color Image. Geo-spatial Information Science, 2007, 10(1): 33~36
- [30] Je-Yong Yu, Suck-Joo Na. A study on vision sensors for seam tracking of height-varying weldment. Part 1: mathematical model, Mechatronics, 1997, 7(7): 599-612
- [31] Je-Yong Yu, Suck-Joo Na. A study on vision sensors for seam tracking of height-varying weldment. Part 2: Applications, Mechatronics, 1998, 8: 21-36
- [32] Jae Seon Kim, Yong Tak Son, Hyung Suck Cho, et al. A Robust Visual Seam Tracking System for Robotic Arc Welding. Mechatronics, 1996, 6(2): 141-163
- [33] A De, D Parle. Real time seam tracking system for automated fusion arc welding. Science and Technology of Welding and Joining, 2003, 8(5): 340-346
- [34] Chang Doyoung, Son Donghoon, Lee Jungwoo, et al. A new seam-tracking algorithm through characteristic-point detection for a portable welding robot. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2012, 28: 1-13
- [35] S.K.Lee, S.J.Na. A Study on Automatic Seam Tracking in Pulsed Laser Edge Welding by Using a Vision Sensor Without an Auxiliary Light Source. Journal of Manufacturing Systems, 2008, 21(04): 302-315
- [36] Kuo Hsing-Chia, Wu Li-Jen. An image tracking system for welded seams using fuzzy logic. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 120:169-185
- [37] Xu Peiquan, Tang Xinhua, Yao Shun. Application of circular laser vision sensor (CLVS) on welded seam tracking. Journal of Materials processing technology, 2008, 205: 404-410
- [38] Gao X.D., Na S.-J. Detection of Weld Position and Seam Tracking Based on Kalman Filtering of Weld Pool Images. Journal of Manufacturing Systems, 2005, 24(01): 1-12
- [39] Gao Xiangdong, You Deyong, Seiji Katayama. Infrared image recognition for seam tracking monitoring during fiber laser welding. Mechatronics xxx 2011:1-11
- [40] 莫玲, 高向东, 仲训杲, 等. 大功率光纤激光焊接熔池特征提取技术研究. 现代焊接, 2011, 04:

## J20-J23

- [41] 陈新征, 王克争. 线阵 CCD 焊缝跟踪系统的应用研究. 焊管, 2003, 26(4): 12-14
- [42] 贾剑平, 张华, 叶建雄. 高速旋转电弧传感焊缝偏差信息识别的研究. 传感器与微系统, 2007, 26: 48-56
- [43] 刘明友. 弧焊机器人焊缝视觉信息检测与识别研究: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2007
- [44] 刘明友, 刘南生, 郭昌荣, 等. 基于结构光视觉传感的焊缝视觉信息检测和识别研究. 焊接, 2007, 01: 28-30
- [45] 刘明友, 刘南生, 郭昌荣, 等. 基于结构光视觉传感的 V 形焊缝信息提取. 南昌大学学报(工科版), 2006, 28(4): 336-338
- [46] 何银水, 张华, 周国发, 等. V 型焊缝图像处理中阈值自动选取的一种算法. 电焊机, 2009, 39(04): 97-99
- [47] 温建力. V 型坡口对接焊接图像处理方法的研究. 实验室科学, 2010, 13(03): 94-96
- [48] 张华军, 张广军, 蔡春波, 等. 机器人多层多道焊缝激光视觉焊道的识别. 焊接学报, 2009, 04: 105-108
- [49] 赵菁, 林三宝. 用于焊接自动化过程的激光视觉传感器. 电焊机, 2010, 40(11): 1-5
- [50] 张广军, 冷孝宇, 吴林. 弧焊机器人结构光视觉传感焊缝跟踪. 焊接学报, 2008, 29(9): 8-10
- [51] 张华军, 张广军, 蔡春波, 等. 机器人多层多道焊缝激光视觉焊道的识别. 焊接学报, 2009, 30(04): 105-109
- [52] 申俊琦, 胡绳荪, 冯胜强. 激光视觉焊缝跟踪中图像二值化处理. 天津大学学报, 2011, 44(04): 308-312
- [53] G Agapiou, C Kasiouras, A. A. Serafetinides. A Detailed Analysis of the MIG Spectrum for the Development of Laser-Based Seam Tracking Sensors. Optics and Laser Technology, 1999, 31: 157-161
- [54] 王宝光, 贺忠海, 陈林才, 等. 结构光传感器模型及特性分析. 光学学报, 2002, 22(4): 481-484
- [55] 马兆瑞, 刘正文, 程柏, 等. 基于偏振片的结构光传感器光学系统建立. 电焊机, 2007, 37(11): 37-43
- [56] Laser Probe 2000 Operating Manual Meta Vision Systems Ltd. Vision 1. 2, 2001
- [57] 孙立新, 韩炜, 李慨, 等. 结构光焊缝检测传感器设计理论的研究. 光学学报, 2003, 23(2): 225-229
- [58] 邹媛媛, 赵明扬, 张雷, 等. 结构光视觉传感器误差分析与结构分析. 仪器仪表学报, 2008, 29(12): 2605-2610
- [59] 刘南生, 郭昌荣, 刘明友, 等. 爬行式弧焊机器人结构光视觉传感器内部布局实验研究. 江西科学, 2005, 23(4): 325-327, 355
- [60] Dapeng Gao, Fuliang Yin. Computing a complete camera lens distortion model by planar homography. Optic& Laser Technology, 2013, 49: 95-107
- [61] 林尚杨. 从第 13 届埃森焊接展览会看焊接技术的走向. 中国机械工程, 1994, (03): 67-69
- [62] J. Hollingum. Programming complex welds fast. Industrial Robot. 1995, 22(3): 35-36.
- [63] Tsai, R.Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision. In Proc CV PR86, 1986: 364-374.



- [64] Zhang Z.Y. A flexible new technique for camera calibration. IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334
- [65] Jiang Z, Xu D, Tan M, et al. MEMS assembly with the simplex focus measure. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Ontario, Canada, July 29-August 1, 2005: 1118-1122.
- [66] 王春和, 邹定海. 三维视觉检测与结构光传感器的标定. 仪器仪表学报, 1994, 15(2): 119-123
- [67] 徐光, 刘立峰, 曾建超, 等. 一种新的基于结构光的三维视觉系统标定方法. 计算机学报, 1995, 18(6): 450-456 .
- [68] 陶国智, 刘雯. 线结构光传感器的数学模型及其测试方法. 宇航计测技术, 1999, 19(6): 51-54
- [69] Zou Dinghai, Ye Shenghua, Wang Chunhe. Structured lighting surface sensor and its calibration . Optical Engineering, 1995, 34 (10) : 3040-3043 .
- [70] 许立, 张之江. 基于共面靶标的结构光标定方法. 光电子.激光, 2009, 20(8): 1063-1069
- [71] 张广军, 王红. 结构光三维视觉系统研究. 航空学报, 1999, 20(5): 365-376
- [72] 周会成, 陈吉红, 周济. 标定线结构光视觉测头基本参数的一种新方法. 仪器仪表学报, 2000, 21(2): 125-127
- [73] Milan Sonka, Vaclav Hlavac, Roger Boyle. Image Processing, Analysis and Machine Vision. Chapman & Hall, 2011
- [74] 杨怀义. 图像分割中算法的应用研究. 计算机仿真, 2012, 29(2): 229-232
- [75] 刘俊, 马燕, 陈坤. 一种改进的基于区域生长的彩色图像分割方法. 计算机应用与软件, 2012, 29(11): 288-291
- [76] 张铭钧, 历妍, 杨杰. 基于子区生长的移动机器人视觉图像分割. 北京理工大学学报, 2009, 29(7): 608-613
- [77] 张乐, 项安. 区域生长算法的改进及其在异物检测中的应用. 无损检测, 2010, 32(7): 490-492
- [78] 邵健萍, 陈丽芳. 基于分裂合并法和 Ncut 法的图像分割. 江南大学学报, 2011, 10(5): 556-559
- [79] 徐国保, 尹怡欣, 王骥, 等. 基于融合自适应形态滤波的分水岭分割新算法. 计算机应用研究, 2009, 26(8): 3143-3145
- [80] 乔东虬, 郑军, 潘际奎. 双线结构光焊缝跟踪传感器及其特性. 电焊机, 2010, 40(11): 14-16
- [81] 肖增文, 刘极峰, 陈志超, 等. 激光预扫描技术在曲焊缝跟踪中的应用. 焊接学报, 2008, 29(12): 20-24
- [82] 张广军, 冷孝宇, 吴林. 弧焊机器人结构光视觉传感焊缝跟踪. 焊接学报, 2008, 29(9): 8-10

## 致谢

时光流逝，岁月如梭，三年的研究生生涯马上就要告一段落了。这几年的求学经历让我学会了如何提出问题、分析问题、解决问题和遇到挫折时刻牢记“为什么”“做什么”“怎么做”“结果怎样”这四个基本思想。这段学习和生活中，对我来说这是人生中一段最为珍贵和难忘的日子。谨以此篇献给曾经关心、支持、帮助、鼓励过我的师长、同学、朋友以及亲人。

本文是在我的导师李慨副教授的悉心指导下完成的。在此，衷心地感谢我的导师李慨副教授。当我面对科研的高峰有些彷徨时，是导师在鼓励我，“攻坚莫畏难，只怕肯登攀”；当我在科学的殿堂中步履蹒跚时，是导师在指点我，“问渠哪得清如许，为有源头活水来”；当我埋头于书本执迷不悟时，是导师在明示我，“纸上得来终觉浅，绝知此事要躬行”；当我在实际工作中遇到困难时，是导师在引导我，“壁立千仞无欲则刚，海纳百川有容乃大”。我的导师，学识渊博，对专业孜孜以求，精益求精，对前沿学术拥有着敏锐洞察力。百忙之余仍然读书不辍，不断探求；为人师表，率先垂范；传道授业，呕心沥血。如果说我从导师那里学会了怎样做好学问，那么首先应该说我从导师那里领略了真正的学术精神，导师严谨的治学态度和坚韧的探索精神将使我终生受益。

本论文的完成也离不开其他各位老师、同学和朋友的关心与帮助。感谢戴士杰老师在论文的写作中给予了许多指导与建议，感谢李德仲老师在零件的制图中给了许多宝贵意见。感谢葛胜强、邵猛、及闫相群等师弟师妹们在科研过程中给予我许多鼓励和帮助。

还要感谢父母和我的女友杨洋在我求学生涯中给与我无微不至的关怀和照顾，一如既往地支持我、鼓励我。同时，还要感谢李乃密、董凯夫、程妍妍、裴鹏、林琳、张乐、陈正华、张绪成、张萌等同学两年半来对我的支持和帮助，愿友谊长存！

最后，感谢在百忙之中对我论文进行指导的评审专家和教授。