

密级: \_\_\_\_\_



中国科学院大学  
University of Chinese Academy of Sciences

# 博士学位论文

基于视觉传感技术的爬壁机器人跟踪系统研究

作者姓名: 张立国

指导教师: 焦建彬 教授

中国科学院大学

学位类别: 工学博士

学科专业: 计算机应用技术

研究所: 电子电气与通信工程学院

二零一三年十月



**Research on Video-Based Tracking System**

**for Wall Climbing Robot**

**By**

**Zhang Liguo**

**A Dissertation Submitted to**

**The University of Chinese Academy of Sciences**

**In partial fulfillment of the requirement**

**For the degree of**

**Doctor of Computer Application Technology**

**School of Electronic, Electrical and Communication Engineering**

**October, 2013**



## 中国科学院大学直属院系

### 研究生学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名：

日期：

## 中国科学院大学直属院系

### 学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以公布该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、汇编本学位论文。

涉密的学位论文在解密后适用本声明。

作者签名：

导师签名：

日 期：

日 期：



## 摘 要

本文的研究是以风机塔筒的焊缝检测为实验目标，开发一台模仿壁虎肢体形态功能并集成先进的激光传感器、嵌入式设备和自动焊缝图像识别技术的四履带永磁吸附壁面移动机器人，该机器人具有壁虎的肢体形态特征，可以适应小半径圆柱面或圆锥面等复杂的壁面环境。

为使机器人在焊缝检测过程中实时获取有效的焊缝信息，本文设计一套基于十字型交叉结构光传感器的图像采集设备。其原理为由激光器投出一对正交的激光束平面，投影到焊缝表面形成十字激光线，并由摄像机实时采集焊缝表面信息。在被采集的图像中，激光线的弯曲变化反映了焊缝的表面 3D 信息，为焊缝识别与跟踪提供输入信息。当机器人运动到横纵焊缝交叉区域时，十字型激光线可以同时检测到两条焊缝，机器人可以根据测量结果控制机器人的运动姿态。

根据激光线和焊缝的时空连续性，本文构建一套基于时空级联隐马尔可夫模型的焊缝跟踪与测量系统。空域和时域上的两个级联的隐马尔可夫模型分别用于提取激光线和在激光线上跟踪焊缝位置。根据传感器设计过程中的模型和参数，焊缝表面的 3D 信息可被计算获得。同时，对焊缝特征点的跟踪可以规划机器人的运行路径和超声波探头的检测范围。

本文介绍爬壁机器人的结构并建立机器人力学模型和运动学模型，分析机器人运动学的动能方程。根据机器人运动学模型和力学模型，再结合视觉传感器及焊缝跟踪结果，构建基于混合视觉伺服模型的机器人控制系统。建立图像坐标系、摄像机坐标系、机器人坐标系、塔筒坐标系等空间的对应关系，并计算从图像坐标系到摄像机坐标系再到机器人坐标系上焊缝特征点的运动微分方程、建立雅可比矩阵。最终通过李雅普诺夫第二方法的稳定性判据分析爬壁机器人焊缝跟踪系统及控制模型的稳定性，以及对系统中所涉及各个参数值的约束条件。

**关键词：**爬壁机器人，焊缝跟踪，十字型结构光，时空级联隐马尔可夫模型，混合视觉伺服。



## Abstract

The research objective of this paper is to detect the weld line of the wind power tower. We make a wall climbing robot that has four caterpillars made up of permanent magnet, imitating the geckos' limbs and morphology. The robot is equipped with advanced laser sensor, embedded devices and automatic weld line recognition system. The robot can work on the cylindrical surface or circular conical surface with small radius.

To obtain the information of the weld line in real-time, an image collecting equipment, i.e. the cross structured light sensor, is designed. The sensor includes a laser projector and a CCD camera. The laser projector projects two orthogonal light planes onto the surface of the weld line to form two orthogonal laser stripes which can be captured by the CCD camera. The curves of the laser stripes reflect 3D information of the surface of the weld line which is feed into the weld line recognition and tracking system. When the robot is close to an intersection of a vertical and a horizontal weld lines, two weld lines will appear on the stripes in the captured images. In this condition, the system can identify a weld line intersection, and then the system can control the motion attitude of the robot.

According to the continuity characteristics of the laser stripe and the weld line, the paper presents a weld line tracking and measuring system based on the spatial-temporal cascaded Hidden Markov Models. Two Hidden Markov Models on space and time domain are used to extract the laser stripe and track the weld line, respectively. According to the model and parameters of the sensor, the 3D information of the weld line can be obtained. Tracking the feature points of the weld line can plan the motion path and restrict detection range of the ultrasonic probe.

The construction, mechanical model and kinematics model of the robot are structured in the paper then the kinetic energy equation of the robot is analyzed. Based on the mechanical model and kinematics model of the robot and combined with the model of the structured light sensor and tracking results of the weld line, we structure the hybrid visual servoing model to control the robot. The transfer equations between the image coordinate system, the camera coordinate system, the robot coordinate system and the wind power tower coordinate system are structured which can be used to calculate the motion differential equations of the feature points in the image space, the camera space and the robot space and structure the Jacobian matrix. Finally,

Robot's stability about weld line tracking and control model is proved by the Lyapunov stability theory.

**KEY WORDS:** Wall Climbing Robot, Weld Line Tracking, Cross Structured Light, Spatial-Temporal Cascaded Hidden Markov Models, Hybrid Visual Servoing.

## 目 录

摘要	I
目录	IV
图目录	VII
表目录	X
第一章 绪论	1
1.1 课题背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 爬壁机器人技术研究现状	3
1.2.2 信息传感技术研究现状	3
1.2.3 焊缝跟踪技术研究现状	5
1.2.4 视觉控制技术研究现状	6
1.2.5 无损探伤技术研究现状	7
1.3 本文的主要研究内容和贡献	8
1.4 本文组织结构	10
1.5 小结	11
第二章 结构光传感器设计	12
2.1 引言	12
2.2 摄像机模型	12
2.3 结构光传感器的原理与结构	14
2.4 CSL 传感器的测量模型	16
2.5 CSL 传感器的标定	19
2.6 CSL 传感器标定实验结果与误差分析	21
2.6.1 摄像机和激光束平面标定	21
2.6.2 CSL 传感器标定精度	22
2.6.3 CSL 传感器的测量精度	24
2.7 小结	29
第三章 基于空域隐马尔可夫模型的激光线提取	30
3.1 引言	30
3.2 激光线投影的特性分析	31
3.3 图像预处理	33

---

3.4 HMM 的基本原理 .....	35
3.5 改进的 S-HMM .....	38
3.6 实验结果与误差分析 .....	43
3.7 小结 .....	46
第四章 基于时域隐马尔可夫模型的焊缝跟踪 .....	47
4.1 引言 .....	47
4.2 焊缝候选位置选择 .....	48
4.3 基于 T-HMM 的焊缝跟踪 .....	49
4.4 焊缝跟踪、测量的实验结果与分析 .....	51
4.5 陡峭误差消除 .....	55
4.6 小结 .....	59
第五章 爬壁机器人的跟踪控制 .....	60
5.1 引言 .....	60
5.2 爬壁机器人结构与受力分析 .....	60
5.3 爬壁机器人的运动模型 .....	65
5.3.1 机器人竖直运动方式 .....	65
5.3.2 机器人水平运动方式 .....	66
5.3.3 机器人任意方向的运动方式 .....	67
5.3.4 机器人原地转动方式 .....	68
5.4 爬壁机器人的视觉跟踪控制 .....	70
5.4.1 图像坐标系与机器人坐标系之间的运动关联 .....	71
5.4.2 机器人的混合视觉控制模型 .....	73
5.4.3 系统稳定性分析 .....	75
5.5 爬壁机器人系统实验 .....	77
5.5.1 机器人吸附单元实验 .....	77
5.5.2 机器人通信单元实验 .....	78
5.5.3 焊缝跟踪实验 .....	81
5.5.4 超声波探伤实验 .....	82
5.6 小结 .....	84
第六章 总结与展望 .....	85
6.1 工作总结 .....	85
6.2 未来工作展望 .....	86
参考文献 .....	88

目录

---

附录 1 .....	99
致 谢 .....	100



## 图目录

图 1-1 机器人作业环境中的风机塔筒、直焊缝和交叉焊缝.....	1
图 1-2 本文研究内容框图.....	9
图 2-1 摄像机投影成像示意图.....	13
图 2-2 结构光传感器的三种光源模式.....	14
图 2-3 结构光传感器的基本结构.....	14
图 2-4 焊缝检测与跟踪系统平台和 CSL 传感器结构 .....	16
图 2-5 CSL 传感器的测量模型 .....	17
图 2-6 CSL 传感器标定示意图 .....	19
图 2-7 激光束平面标定和特征点坐标计算流程图.....	21
图 2-8 三对有激光线投影和无激光线投影的标定板图像.....	21
图 2-9 在摄像机坐标系下标准值和测量值的 3D 坐标.....	23
图 2-10 在 $x, y$ 和 $z$ 方向上的标定误差 .....	24
图 2-11 测试集在摄像机坐标系下标准值和测量值的 3D 坐标.....	25
图 2-12 测试集数据在 $x, y$ 和 $z$ 三个方向上的测量误差 .....	25
图 3-1 基于 S-HMM 的激光线提取流程图 .....	30
图 3-2 点激光成像原理和投影面亮度分布.....	31
图 3-3 线光源激光产生原理和投影面亮度分布.....	32
图 3-4 十字型激光线的能量分布.....	32
图 3-5 激光线的能量分布及其在 CCD 上的亮度分布 .....	33
图 3-6 CSL 传感器采集的焊缝图像及其在 R, G, B 三个颜色空间的亮度分布 .....	34
图 3-7 焊缝图像的 R 分量图, 二值图和 Canny 边缘图 .....	35
图 3-8 三个状态的离散时间马尔可夫模型.....	35
图 3-9 有四个观测量三个隐状态的隐马尔可夫模型.....	36
图 3-10 观测概率的计算示意图.....	37
图 3-11 激光线亮度分布.....	38
图 3-12 $v$ 方向上重心提取结果.....	38
图 3-13 用于提取激光线的 S-HMM 示意图 .....	39
图 3-14 权值 $w_1$ 和 $R$ 分量均值之间的关系 .....	41
图 3-15 S-HMM 提取到的激光线骨架 .....	42
图 3-16 中值滤波和形态学处理后的激光线骨架.....	42

---

图 3-17 五种方法的激光线提取结果对比.....	43
图 3-18 五种方法的激光线分割统计误差.....	44
图 3-19 五种方法的平均执行时间.....	45
图 3-20 直焊缝区域的测量结果.....	45
图 3-21 焊缝交叉区域的测量结果.....	46
图 4-1 T-HMM 焊缝跟踪过程信号处理流程图.....	47
图 4-2 设置焊缝候选窗口.....	48
图 4-3 用于焊缝跟踪的 T-HMM 示意图.....	49
图 4-4 焊缝跟踪与测量结果.....	52
图 4-5 特征点 A 和 B 的跟踪误差.....	53
图 4-6 对比 STC-HMMs 的焊缝宽度测量与机械测量结果 .....	53
图 4-7 基于 STC-HMMs 跟踪结果的焊缝宽度测量误差 .....	54
图 4-8 陡峭误差消除前后的误差对比.....	56
图 4-9 焊缝跟踪示例.....	57
图 4-10 焊缝交叉区域的跟踪与测量结果.....	58
图 5-1 爬壁机器人系统结构框图.....	60
图 5-2 模仿壁虎结构的仿生学机器人形态的演化过程.....	61
图 5-3 机器人传感器伺服装置.....	62
图 5-4 永磁吸附单元.....	62
图 5-5 爬壁机器人沿纵焊缝移动时的力学模型.....	62
图 5-6 爬壁机器人沿横焊缝移动时的力学模型.....	63
图 5-7 机器人防倾覆机构功能示意图.....	64
图 5-8 防倾覆机构的结构图.....	64
图 5-9 机器人竖直运动描述.....	65
图 5-10 机器人水平运动描述.....	66
图 5-11 机器人任意方向上的运动描述.....	68
图 5-12 机器人原地转动描述.....	69
图 5-13 视觉焊缝跟踪系统信号流程图.....	70
图 5-14 机器人混合视觉伺服控制.....	74
图 5-15 机器人混合视觉伺服控制简化形式.....	74
图 5-16 吸附单元吸附力测试.....	77
图 5-17 吸合在壁面上的吸附单元数量与吸附力的关系.....	78
图 5-18 一对 Zigbee 无线通信模块 .....	79

图 5-19 Zigbee 无线通信模块及外围电路结构原理图 .....	80
图 5-20 视频无线通信模块 .....	80
图 5-21 爬壁机器人及其工作状态 .....	81
图 5-22 爬壁机器人焊缝跟踪结果 .....	82
图 5-23 超声波探伤仪、扫描探头及探伤检测示意图。 .....	83
图 5-24 超声波探伤仪应用示例 .....	84



## 表目录

表 2-1 CSL 传感器配置 .....	17
表 2-2 需判定的 CSL 传感器参数 .....	19
表 2-3 CSL 传感器标定结果 .....	22
表 2-4 CSL 传感器的标定精度 .....	26
表 2-5 CSL 传感器的测量精度 .....	28
表 4-1 焊缝宽度测量性能对比 .....	55
表 5-1 机器人系统控制指令 .....	79



# 第一章 绪论

## 1.1 课题背景及意义

工业领域为了实现不断提高质量安全和质量管理的目标，往往在质检系统中投入大量的人力物力。在这种大背景下，针对特定作业任务的特种机器人被相关行业给予越来越多的关注。随着社会工业化的不断进步，机器人替代人工作业已经是大势所趋。机器人学作为一个交叉学科集成了机械、电子、自动化、通信、人工智能、信号处理和心理学等诸多学科的研究成果。一个国家的机器人发展水平基本上能够体现出这个国家的工业综合实力。如同现在的社会分工越来越细一样，机器人的种类和应用领域也越来越多。但是，稳定、智能、高精度和低失误率则一直是工业生产部门对机器人的要求和期望。

在风力发电场、石化企业以及造船厂等部门，风机塔筒、储油/气罐和轮船甲板的焊接质量是保证设备稳定运行的基础。针对焊缝的无损探伤检测需要定期执行，而传统的检测手段基本上是由操作人员手持探伤仪进行检测。除耗费大量人力和时间之外，这种工作方式还经常要面对高空作业、有毒有害气体或液体等恶劣的工作环境，如图 1-1 所示。因此在类似这种极端环境下，爬壁机器人代替人工作业有助于提高工作效率，保障人身安全和降低生产成本。检测机器人的研究和开发也将成为仪器与测试技术现代化的一个重要手段。

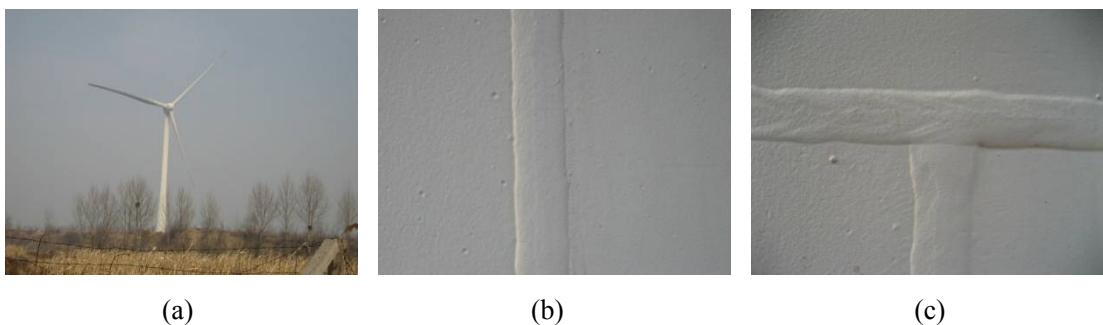


图 1-1 机器人作业环境中的风机塔筒、直焊缝和交叉焊缝。

到目前为止，机器人最多的应用领域是在焊接行业，关于焊缝检测的研究与应用大多也是在焊接领域。而专门针对成型焊缝的探伤检测机器人基本上还是研究的空白。随着社会安全生产标准的提高和人力资源日益短缺，自动焊缝检测机器人已经在上述几个领域中出现需求。虽然焊缝检测机器人和焊接机器人在应用领域上非常接近，但是由于工作环境和作业对象的区别，两者的结构与性能有着本质的不同。首先，焊接机器人多数工作在室内环境，而检测机器人则多数工作在室外环境；第二，焊接过程中的焊缝跟踪大多是在固

定平台或轨道上，而检测过程的焊缝跟踪需要工作在移动平台上；第三，焊接机器人面对的焊缝通常是固定的、已知的，可以通过示教再现方式控制机器人，而焊缝检测机器人需要根据被检测工件外形和焊缝方向来自动跟踪焊缝。根据这些需求可知：焊缝跟踪与测量技术的效果在很大程度上决定着机器人的工作质量。传统的焊缝跟踪技术很难直接用于检测领域，因此开发适合于多种作业环境，具备自动焊缝跟踪、自主导航能力的移动机器人将是目前机器人应用研究的一个重要发展方向。

### 本文课题来源：

- 1) “危险化学品事故全过程遥测预警的关键科学问题研究”，国家973计划，2011~2015；
- 2) “基于多源数据的飞行器进近威胁目标检测跟踪及行为预测”，国家自然科学基金重点项目，2011~2014；
- 3) “复杂环境下动态目标检测及跟踪技术研究”，中国科学院“百人计划”择优支持项目，2009~2011；
- 4) “基于 DaVinci TMS320DM6467 的爬壁机器人控制与数据处理单元”，中国科学院研究生创新项目，2010~2012；
- 5) “风机塔筒焊缝自动检测装置”，哈尔滨市科技攻关项目，2010~2013；

## 1.2 国内外研究现状

自上世纪50年代，在欧美就已经开始关注焊缝检测与跟踪技术，并不断摸索实践。目前，在一些新兴工业化国家和地区或工业化水平较高的发展中国家，如韩国、中国台湾、巴西、印度和中国大陆等，也在这方面的研究中取得了丰硕成果。CMU机器人研究所(The Robotics Institute of Carnegie Mellon University)的 Pradeep Khosla 等人在1984年曾研制出用于弧焊机器人的焊缝检测系统，其算法适用于固定的作业场所，需要足够的先验知识支持[1]。加拿大Sevorobot公司和英国Meta Machines公司开发了激光传感器焊缝跟踪设备。巴西里约大学多位学者针对储油罐的焊缝检测与跟踪进行了深入研究，采用被动视觉和多信息融合等多种手段进行焊缝信息的采集[2-6]。韩国的H.C. Kou等人采用模糊逻辑进行焊缝的定位[7]。国内的清华大学、哈尔滨工业大学、北京理工大学、中科院自动化所等高校院所在机器人自动焊缝跟踪检测方面也做了大量研究[7-18]

许多国际学术期刊和国际会议也包含了这一领域的最新研究成果，如：IEEE Transactions on Robotics, IEEE Transactions on Industry Applications, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Machine Vision and Application, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE Int. Conf. on Instrumentation and Measurement Technology (I<sup>2</sup>MTC), IEEE Int. Conf. on Signal Processing(ICSP)等等。

### 1.2.1 爬壁机器人技术研究现状

在本文中，爬壁机器人作为执行焊缝检测任务的实验平台，也是各种传感器和检测装置的载体。因此，爬壁机器人的性能对系统稳定性和可靠性有着重要影响。作为一种特种机器人，爬壁机器人能够工作在各种墙体表面，可以在高空、有毒等危险环境代替人工作业。这方面的研究工作已经进行了许多年，其成果已在许多工业领域得以应用，例如检测大型油气罐[19-21]、风机塔筒的焊接质量[22][23]、锅炉冷却塔的维护[24][25]、核电站检修[26]、大型建筑物的表面清理[27]以及反恐营救[28]等。

正所谓立得稳才能站得直，爬壁机器人的吸附性能是机器人能够工作的基本条件。截止目前，现有的吸附技术包括四种类型：①真空或负压吸附[29-32]；②螺旋桨推进吸附[35-37]；③仿生吸附[38][39]；④磁吸附[40-44]。真空或负压吸附的效果取决于吸盘的内外压力差，这种机器人可以工作在垂直墙面上，但是对墙壁表面的光滑程度要求较高，表面粗糙或者有灰尘、破损、异物等情况都可能造成机器人吸附失败。螺旋桨吸附是通过相对墙面倾斜的螺旋桨高速旋转产生推力，利用推力和壁面摩擦力保证机器人稳定吸附。这种方法的优点是不存在类似真空吸附的压力泄露问题，可以使机器人稳定的吸附在壁面上。但缺点是这种机器人的尺寸非常庞大，耗能高，而且有非常大的噪音。仿生机器人是模仿壁虎或昆虫吸附于墙面的方法。这种方法的优点在于耗能低，噪声小，构思奇特；缺点是难以负重，载荷小，同时对材料和加工工艺要求很高。磁吸附是人们最容易想到的吸附方法，具有吸附力强、负载高、材料简单和成本低廉等优点，但是只局限于吸附在铁磁质墙面。在本文中，被检测对象为风机塔筒和储油/气罐等设备，这些设备都是由钢板或钢管焊接而成，表面为圆柱面或圆锥面，对机器人的吸附要求要高于平面环境。因此，这种工作环境既需要机器人保持稳定性又要拥有足够的灵活性。基于对上述四种吸附方式的分析，本文设计一种模仿壁虎身体结构的仿生爬壁机器人，并采用四履带式永磁吸附方式。

### 1.2.2 信息传感技术研究现状

目前应用于焊缝检测与跟踪领域的传感器大致可分为机械触点式[45][46]、电磁感应式[47][48]、电弧传感式[49][50]、距离感应式[51][52]和视觉感应式[53][54]五种。机械触点式是利用压力开关等接触式传感器“摸”着焊缝走，这种方法由于跟踪精度低和机械触点的使用寿命问题一直没有得到广泛应用，而且触摸式传感器的机械结构也过于复杂。电磁感应式是通过两组变压器检测焊缝两端的电压值来定位焊缝位置，这种方法对工件表面环境过于敏感，而且存在能耗问题。电弧传感器是利用焊炬与工件之间距离变化引起的焊接参数变化来估计焊炬高度和左右偏差，这种方法在焊接机器人上得到了很好的应用，但很难直接引用到检测领域。距离感应式传感器是通过一排的红外（或激光）测距仪垂直焊缝表面测量焊缝深度信息，这种方法能够感知焊缝表面的3D数据，但是缺点也很明显。首先，

即使传感器排列的非常密集，这种测量方式得到数据毕竟还是一系列离散的点；其次，这种传感器和上述三种感应方式一样，都是不可视的，在作业过程中，当需要人工干预时非常不方便。

从 20 世纪 80 年代开始，随着半导体技术、自动控制技术和数字图像处理技术的发展，视觉焊缝检测与跟踪开始引起人们的兴趣。采用视觉传感器实时获取焊缝区域信息，具有信息量大、灵敏度高、精度高、抗电磁干扰能力强、传感器与工件不接触等优点。通过计算机或专用处理器（DSP）进行数字图像处理，可在焊缝检测与跟踪、探伤检测或焊接控制等方面发挥重要作用。因此，视觉焊缝检测与跟踪技术在机器人视觉领域被大量应用。

在视觉焊缝检测与跟踪方法中，根据获得信息的手段不同可分为单目视觉（被动视觉）[55]、双目视觉（被动视觉）[56][57]和摄像机+激光器（结构光，主动视觉）[58-67]三大类，其中主动视觉的辅助设备除激光器外还可以应用红外或雷达等传感器。

单目视觉系统在进行焊缝检测与跟踪的过程中只利用自然光或室内的普通光源，由摄像机采集工件表面图像，在图像中寻找焊缝位置，判断焊缝方向。可通过最小熵（Minimum Entropy）原理进行阈值分割[68]，确定焊缝位置。然后用霍夫变换（Hough Transform）检测焊缝线[69-71]，确定焊缝方向。也有人根据焊缝表面的鱼鳞状的纹理信息做图像分割从而检测焊缝位置[2]，这种方法较上一种精度要更高一些。但这种被动视觉手段受外界光照影响较大，尤其在高噪声环境下精度很低。在野外作业环境中，被检工件的表面通常是非常脏的，据实地考察发现，风机塔筒或储油/气罐表面大多覆盖着灰尘、泥土、鸟粪、油污、锈迹等污染物，这些对基于单目摄像机的焊缝定位造成很大影响。

双目视觉成像技术也常被用于机器人视觉传感系统，但是双目成像的关键技术——图像匹配过程中的特征点提取——依赖于图像上的纹理信息，没有纹理信息的图像是不能得到准确的 3D 信息的[72]。本文中涉及的爬壁机器人主要工作在风机塔筒或油罐焊缝区域，这些工件表面都有油漆喷涂，焊缝和背景的有着相同的颜色，几乎没有多少纹理信息，特征点的选取和匹配都非常困难。况且双目成像的精度较低，而焊缝较之工件表面的凸起并不明显，一般 $<5\text{mm}$ ，因此这种方法也不适合我们的系统。

主动视觉是利用激光等具有特定模式的光源和摄像机构成结构光(Structured Light)系统。例如将一束激光平面照射在被检工件上形成一条激光线，激光线在摄像机成像单元中的偏移数据反映了工件表面的形状信息，用这种方法可以精确地获取工件表面的 3D 信息。结构光方法很好地融合了激光和数字图像的信息，受噪声影响较小。由于激光的单色性和高亮度特点，它非常适合于局部范围内需要精确测量的情况，常被用做不规则表面的三维建模[73-75]。就本文涉及的焊缝检测与跟踪系统而言，理论上，塔筒表面除焊缝之外几乎再无别的凸起，因此结构光的方法更适合基于视觉特征的焊缝检测与跟踪。

### 1.2.3 焊缝跟踪技术研究现状

如上文所述，基于视觉技术的焊缝检测与跟踪技术目前已经展开了广泛研究，很多方法已经在焊接和检测领域进行应用实践。例如巴西的 Carvalho 和 Molina 等人在面向探伤检测的焊缝跟踪领域进行了多年研究并有多篇论文发表。他们分别采用基于被动视觉的阈值分割+Hough 变换技术在图像中检测焊缝位置并计算焊缝延伸方向[2]；在文献[3-5]中，作者则采用距离传感器阵列对焊缝进行深度测量获取焊缝凸起的位置信息，并应用容错卡尔曼滤波器进行滤波去噪和焊缝跟踪工作。

在结构光视觉技术方面，焊缝跟踪质量主要取决于两点：激光线的提取和在被提取的激光线上定位感兴趣区域（焊缝区域）。许多研究人员在摄像机前加上滤光片来过滤激光线的环境噪声。具体来说就是将滤光片当做一个带通滤波器，它只允许通过一定量的和激光线波长相近的光。理想状态下，其他背景在图像上都不显示[76]。这可以在很大程度上去除背景噪声，提高系统的精度。但是这种方法增加了硬件成本，鲁棒性不高，尤其在野外作业环境中，以太阳光为主的自然光频率范围很宽，各种波长的光都存在，滤光片很难把激光线之外的噪声都滤除掉，仍然需要后续的数字图像处理技术来完成激光线提取。因此，很多研究者致力于不依赖滤光片，直接运用数字图像处理技术提取激光线。

在文献[77-79]中，R. Fisher 对比了五种激光线亮度峰值定位的算法：Gaussian approximation, Center of Mass, Linear Interpolation, Parabolic Estimator 和 Blais and Rioux Detectors。在无噪声环境下 Gaussian approximation 性能最好，在噪声环境下 Blais and Rioux Detectors 性能最好，在各种环境下 Center of Mass 的实时性最好而且性能也仅次于 Gaussian approximation，因此这种方法在很多实验中被采用。德国宇航局的 K. H. Strobl 等人开发了一种结构光 3D 重构的手持设备，并将其作为机器人的视觉传感器[80-82]。作者利用了激光线的边缘、宽度、颜色和骨架位置作为先验信息，设计了一个查表法。这种方法精度和鲁棒性可以满足基本的测量要求，而且运行速度很快。在文献[83-87]中，R. Usamentiaga 等人将结构光技术应用在轧钢过程的钢板表面质量检测中。作者采用重心法分割前景信息；再用两个梯形窗口相对运动来搜索激光线骨架；采用 Split-Remove-Fill 过程来修补激光线缺口并剔除线上噪声；最终采用 Linear segments, Quadratic segments 和 Akima splines 三种方法进行激光线拟合。作者随后将实验手段扩展到 3D 信息重构和焊缝跟踪领域，取得了很好的实验效果。

精确提取激光线的下一步是在激光线上检测和跟踪焊缝区域。很多研究者在实验过程中比较注重焊缝形状的描述，例如在文献[11]中，李原等人计算激光线的二阶导数，计算过零点的位置来确定焊缝的拐点。在噪声滤波方面作者没有局限于单帧图像的处理，而是建立了一系列视频帧之间的关联，通过计算不同帧之间相同位置处像素的亮度最低值来滤

除焊接火花和飞溅的噪声。文献[88]中，作者 X. Wang 等人计算激光线上的最大角点来定位焊缝突出于工件表面部分的趾点位置，并根据两趾点处激光线角度之差来计算焊缝中心线。这种方法简单易行，精度却严重依赖于激光线的提取效果，对光照噪声非常敏感。文献[89]中，Y. Gong 等人将焊缝图像自下而上分为像素层、几何层和轮廓层，分别从图像上进行激光线分割，焊缝初级提取和焊缝识别。这种方法对于几何形状比较固定的焊缝而言，定位精度很高，很适合于焊接过程，对于成型焊缝的识别处理上精度会明显降低。

#### 1.2.4 视觉控制技术研究现状

机器人视觉控制是机器人领域的一个重要的研究方向，视觉控制集合了数字图像处理，计算机视觉和控制理论等学科的知识成果且随着计算机技术的发展而不断进步。视觉控制的定义是：根据视觉检测获得目标的位置和姿态，将其作为给定或反馈，对机器人的位置和姿态进行控制。控制系统将被测目标的 3D 信息通过坐标系转换反馈给执行终端的各个关节，根据终端作业要求对相应关节进行力矩控制。

在以往的工业应用领域，机器人作业一般采用示-教再现或数控编程的形式，机器人的运动轨迹和姿态被事先规划好，因此作业过程只是简单的重复执行既定方案。毫无疑问，这种方式的鲁棒性不会很高，当工作场景或作业对象发生变化时，工作质量往往达不到规范要求。视觉控制技术可以使机器人在各种作业环境中实时地检测目标的位置和 3D 信息，并根据得到的数据进行路径规划及调整自身姿态。因此，以视觉信号作为反馈的闭环控制系统被引入到机器人控制模型，以增强机器人系统的鲁棒性和精度。

执行作业的终端和获取信息的视觉传感器可以看作一对“手-眼”，如果视觉传感器安装在机器人上，我们称之为“Eye-in-Hand”[90]；如果视觉传感器固定于机器人本体之外，我们称之为“Eye-to-Hand”[91]。Eye-in-Hand 系统的传感器坐标系和机器人坐标系是固定的转换关系，计算简单；而且在机器人逐渐接近目标的过程中检测和测量的误差会越来越小。缺点是传感器受到机器人本体振动的影响，另外在随着机器人运动过程中目标可能会从视场中丢掉。Eye-to-Hand 系统的传感器坐标系和机器人坐标系时刻在发生变化，坐标转换计算比较复杂。系统中的传感器不会受到机器人振动的影响，也可以保证目标位于视场之内，但是在机器人作业过程中机器人可能会遮挡目标从而造成失掉目标。此外，面对复杂的野外环境，我们很难找到一个合适的“点”来放置一台摄像机作为“Eye”。因此 Eye-to-Hand 系统比较适合于固定的简单场所，例如其在带机械手臂的焊接机器人中被广泛应用。

依据用于计算控制系统的误差的不同，视觉控制系统的控制模型可以分为：3D 视觉控制模型（基于位置的视觉伺服）[92][93]、2D 视觉控制模型（基于图像的视觉伺服）[94][95]、

$2\frac{1}{2}D$  视觉控制模型（混合视觉伺服）[96][97] 和  $\frac{d^2D}{dt}$  视觉控制模型（基于运动的视觉伺

服) [98-100]。基于位置的视觉伺服是在三维笛卡尔空间内计算摄像机位置到目标位置之间的误差, 从而得到机器人执行终端的调节量。这种方法的优点是可以在同一笛卡尔坐标系内直接将误差作为输入量来控制机器人的轨迹和姿态, 计算起来比较简单。但这种方法的精度受机器人力学模型和摄像机标定误差的影响很大; 如果摄像机只是粗略的标定一下, 将导致目标的3D模型存在较大误差, 从而执行终端的当前和下一步姿态都将很难被准确估计。基于图像的视觉伺服是一种无模型控制方法, 因为它不需要计算目标的3D模型, 控制误差函数是直接表达于2D图像空间中。这种方法有很高的鲁棒性, 对于摄像机标定误差和机器人模型的误差不敏感。然而, 它的收敛性在理论上只能保证在期望点附近的邻域范围内, 且难以进行稳定性的判定分析。因为这种系统基本上都是非线性系统, 所以除极简单的情况外, 涉及到标定误差的稳定性分析都被看作是不可能完成的任务。面对上述两种方法中难以克服的缺点, 一种混合视觉伺服控制模型被人提出[101]。对比基于位置的视觉伺服, 混合模型不需要建立目标的几何3D模型; 对比基于图像的视觉伺服, 混合模型保证了控制系统在整个任务空间内的收敛性。它是基于局部摄像机位移估计, 控制6个自由度中的一部分, 余下部分采用其他的控制方法。基于运动的视觉伺服是一种无模型控制技术, 它不依赖于目标的任何先验信息, 主要是测量图像中的光流。这种方法依赖于运动估计算法的计算速度, 大多执行速度比较慢, 适合于微型机器人的速度控制。

### 1.2.5 无损探伤技术研究现状

无损检测是在不损害或不影响被检测对象使用性能的前提下, 利用物体的声、光、电磁等原理技术对材料、零件、设备进行缺陷、化学、物理参数的检测技术。无损检测在检测工业领域已经成为一种必不可少的测量手段, 其重要性已得领域内的到公认。常见的无损检测主要有射线检测 (RT) [102]、超声检测 (UT) [103]、磁粉检测 (MT) [104]和液体渗透检测 (PT) [105]四种。此外在一些特定领域还有涡流检测 (ET) [106]、声发射检测 (AT) [107]、热像/红外 (TIR) [108]、泄漏试验 (LT) [109]、交流场测量技术 (ACFMT) [110]、漏磁检验 (MFL) [111]、远场测试检测方法 (RFT) [112]、超声波衍射时差法 (TOFD) [113]等其他无损检测方法。

与破坏性检测相比, 无损检测具有以下显著特点:

- (1) 非破坏性
- (2) 全面性
- (3) 全程性
- (4) 可靠性问题

射线检测 (RT) 是采用电离辐射形式 ( $X$  射线或  $\gamma$  射线) 来照射被测工件, 以胶片作为载体记录检验信息的无损检测方法。相对其他检测方法, RT 的准确性更高、图像直观、

且可以长期保存，但其成本相对较高、检验速度慢、而且射线会危害操作者的身体健康。

超声波检测（UT）是采用超声波发射器（超声波探头）扫描被测工件，超声波与工件相互作用，跟进超声波的反射、透射或散射情况判断工件质量。这种方法可用于金属、非金属或复合材料等多种材质设备的无损检测，可检测试件表面或内部的缺陷且定位准确。超声波检测仪器具有易于操作、检测速度快、设备轻便、无害无污染、不受现场条件制约等显著优点。

磁粉检测（MT）适用于检测铁磁质材料构成的工件，可以测量工件表面或浅表面的细微瑕疵，甚至尺寸极小，肉眼难以察觉的细微裂纹；还可发现夹杂、发纹、白点、折叠、冷隔和疏松等缺陷。但其那一检测表面划痕、工件深层孔洞、与工件表面夹角小于 $20^{\circ}$ 的分层和折叠。

渗透检测（PT）是在零件表面施涂含有荧光染料或着色染料的渗透剂，使之渗透进表面缺陷中，可出缺陷的位置和表面分布状态。这种方法只能检测表面的开口的缺陷，不能检测工件内部缺陷，对于多孔疏松材料制成的工件或表面粗糙的工件则无法执行检测工作；对于检测到的表面缺陷也无法得到深度信息；而且检测结果需要等待一定的渗透时间，实时性不好。

涡流检测（ET）是利用通有交流电的线圈产生的交变磁场在工件的浅表面产生涡流来检测试件的裂纹，砂眼等缺陷。对于流水线上的金属管材、棒料或轴承钢珠、汽门工件涡流检测可以实现很好的探伤检测或产品分级等工作，也可在电镀领域用来测量镀层或涂膜的厚度。涡流检测的线圈不要求与被测工件紧密接触，也无需耦合剂等传导介质，可实现高速、自动化测量。但其对工件表面形状要求严格，而且只能检测导电材料的浅表层缺陷，检测结果容易受到电磁干扰的影响。

### 1.3 本文的主要研究内容和贡献

本文主要设计了一套十字型结构光(Cross Structure Light, 以下简称CSL)传感器和基于时空级联隐马尔可夫模型(Spatial-Temporal Cascaded Hidden Markov Models, 以下简称STC-HMMs)的焊缝跟踪与测量方法，并将跟踪与测量结果作为反馈信号对爬壁机器人进行视觉控制，如图1-2所示。为适应风机塔筒和储油/气罐的焊缝结构，我们将传感器设计成十字型激光面投影，焊缝信息则包含在传感器捕捉的图像中。激光线和焊缝在图像与视频中都具有时空连续性，二者分别可以被看作一个马尔可夫链。由于噪声的干扰，在计算机看来激光线和焊缝的很难直接识别，即这个马尔可夫链的状态是不能直接确定的，需要通过观测序列（颜色、位置和形状等信息）的随机过程来表现。这恰好符合隐马尔可夫模型(HMM)的双重随机过程：①用转移概率描述的马尔可夫链；②用观测概率描述的一般随机

过程。

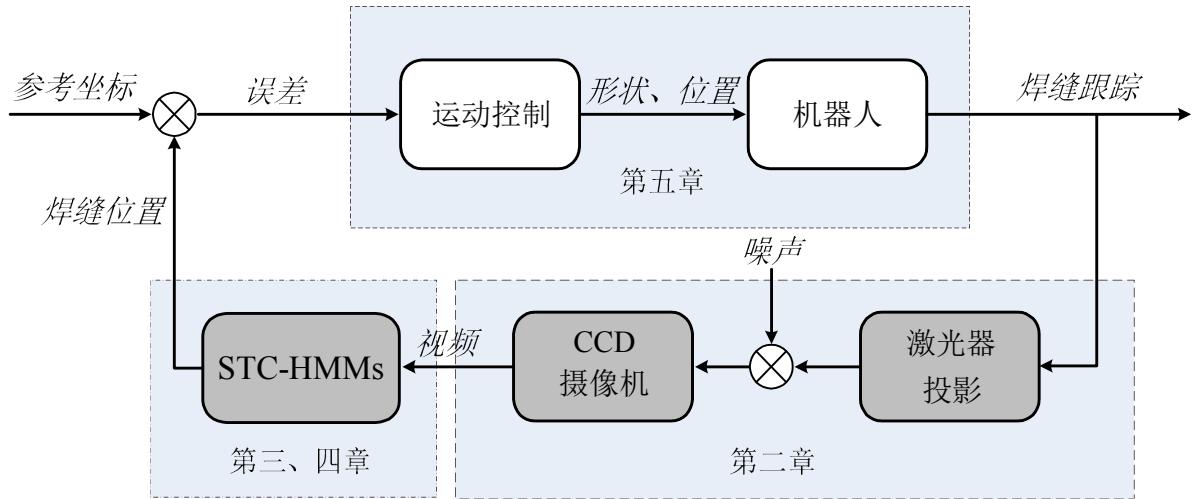


图 1-2 本文研究内容框图。

本文的具体研究内容如下：

- 1) 设计了一套十字型结构光传感器。传感器由一只激光发射器和一台CCD摄像机组成，激光器与摄像机的主轴成 $45^{\circ}$ 夹角。由激光器垂直投射一束十字型激光到工件的焊缝表面，摄像机采集焊缝表面图像，图像中的激光线很好的反映了焊缝表面的3D信息。传感器系统采用张正友标定法计算摄像机的内参和外参，通过大量实验数据来拟合两束激光的空间平面方程并分析误差的产生原因及影响。
- 2) 基于空间隐马尔可夫模型(Spatial Hidden Markov Model, 以下简称 S-HMM)的激光线提取。由结构光传感器获取的图像中，水平和垂直的两条激光线分别被看作一个马尔可夫链。在带有噪声的图像中，通过重心法实现模型中每个状态量的亚像素定位。根据状态量的位置和颜色信息以及激光线的边缘宽度信息定义模型中的转移概率和观测概率的计算方程。在水平和垂直两个方向上分别用 Viterbi 算法解码模型方程，得到激光线的最优路径。通过与其他方法及 ground truth 的对比，验证激光线提取精度，运算时间和系统鲁棒性。
- 3) 基于时间隐马尔可夫模型(Temporal Hidden Markov Model, 以下简称 T-HMM)的焊缝跟踪。沿着提取到的激光线设计一个测度函数在滑动窗口内计算焊缝位置的相似度。将相似度从高到底的各个窗口作为一系列状态量，将焊缝视为一个马尔科夫链，最后在一系列视频帧上构建 T-HMM。每个窗口的测度函数值，窗口位置和面积等信息被用于设计转移概率和观测概率的计算方程。同 S-HMM 类似，Viterbi 算法仍被用来解码模型方程，从而实现焊缝特征点的跟踪。通过两种方法修正系统误差，提高误差的收敛速度。在实验中介绍模型对直焊缝和交叉焊缝的跟踪结果，并对比本文方法与 ground

- truth、无时间关联的测量系统及机械测量手段的跟踪和测量结果。
- 4) 基于混合伺服模型的爬壁机器人视觉控制。建立爬壁机器人的力学模型和运动学模型，分析机器人吸附单元特性，建立机器人水平、垂直、任意角度及原地转弯等四种运动状态的动能模型。根据传感器标定结果，焊缝跟踪结果和机器人运动学模型建立图像坐标系到机器人坐标系的运动微分方程和雅可比矩阵。构建基于混合视觉伺服模型的机器人控制模型并借助李雅普诺夫方程分析控制系统的稳定性。在实验中分析机器人吸附单元性能和参数；介绍传输图像信息和控制指令的无线通信模块；验证在机器人的焊缝跟踪结果；介绍超声波探伤系统的实验设备概况。

## 1.4 本文组织结构

本文章节一共分为六章，具体组织结构如下介绍：

第一章：绪论。主要介绍了本文的课题背景和来源，综述了爬壁机器人平台、视觉传感器、视觉跟踪算法和视觉控制方法在国内外的研究现状，分析了各部分目前存在的难题，论述了机器人视觉算法的目的和意义，引出了本文主要研究内容和研究目的，总结了本文的主要贡献。

第二章：视觉传感器建模。提出 CSL 传感器的设计思路，搭建实验平台，标定摄像机系统和结构光的激光束平面方程，在实验中对比和分析传感器的标定精度和测量精度。

第三章：基于 S-HMM 的激光线提取。简要综述目前流行的激光线提取算法，对采集的视频做必要的预处理，根据激光线的空间连续性特征构建 HMM，Viterbi 解码得到激光线分割结果，滤波器去噪、并用形态学方法弥补激光线断点。在实验中分析系统的精度，速度和鲁棒性，对比其他几种方法的实验结果。

第四章：基于 T-HMM 的焊缝跟踪。设计焊缝相似程度的测度函数，按相似性提取若干候选焊缝窗口；将众窗口作为 HMM 的状态量输入，将构建好的 HMM 用 Viterbi 解码，从而得到焊缝跟踪结果；最后对陡峭误差做后续处理尽量消除其影响。在实验中与多种跟踪测量方法做实验对比。

第五章：基于混合伺服模型的爬壁机器人视觉控制。分析机器人的力学模型和运动学模型；计算位置微分量的空间转换关系；构建机器人的混合视觉伺服控制模型并分析系统稳定性；在实验中展示机器人的力学性能，运动学性能，控制信号传输系统构成和焊缝跟踪的实验结果。

第六章：总结与展望。

## 1.5 小结

本章对论文题目的背景来源做了简要介绍，分析了爬壁机器人的作业环境和面临的挑战。介绍了国内研究学者在相关课题领域的历史进程和最新成果，综述了机器人视觉跟踪领域涉及到的几个单元，包括机器人平台的发展状况与功能对比；传感器的选择与设计；视觉焊缝跟踪技术的发展，应用领域及其面临的挑战；介绍了四种基于视觉的控制模型，对比了各自优缺点，选择一种混合伺服模型作为本文中机器人的视觉控制方式；介绍了无损探伤技术所涉及到的几种方法，分析各自的特点，对比性能之后本文选择超声探伤作为机器人的作业手段。

在本章的最后部分介绍了 HMM 算法的引出和论文的主要研究内容，以及论文的系统框架。对论文的组织结构作了简要介绍。



## 第二章 结构光传感器设计

### 2.1 引言

机构光传感器是一种主动视觉的光学测量技术，测量结果是得到被测目标的表面轮廓信息。这种方法因其具有非接触、抗电磁干扰、测量精度高等优点在工业测量领域被广泛应用，尤其在机器人视觉领域，结构光传感器经常被当作机器人的“眼睛”用于完成目标识别、零件测量、质量控制和运动避障等工作。在焊接领域的焊缝跟踪中结构光技术是应用最广泛的方法；截至目前，在探伤工作中的焊缝检测与跟踪方面，结构光传感器仍然有着其他视觉传感器无法取代的优势。

本章首先介绍摄像机成像模型和结构光传感器的结构与原理，在此基础上建立传感器的数学模型，系统可根据数学模型将摄像机拍摄的图像信息转换为世界坐标系下的焊缝信息。最后将介绍传感器的标定和校准的过程，并在实验中分析传感器的标定精度和误差。

### 2.2 摄像机模型

图像采集就是将物理世界里的 3D 景物投影到视觉传感器（摄像机）的 2D 成像平面上的过程，这个投影可以描述为几何投影变换，当景物到摄像机之间的深度距离发生改变时，像平面上的投影也随之变化。这种成像变换涉及到几个不同的坐标系之间的转换，但最终目标还是要得到计算机显示的数字图像[114]。一般来说 3D 景物投影变换时涉及到四个常见的坐标系：

- 1) 世界坐标系：  $W[X_w, Y_w, Z_w]$ ，这是物理世界里的绝对坐标，世界坐标系是人们在实际生活中接触最多的坐标系。
- 2) 摄像机坐标系：  $C[x_c, y_c, z_c]$ ，这是一个以摄像机光心为原点的坐标系， $z$  坐标轴通常选择光轴， $z$  轴正方向被定义为从摄像机沿光轴方向向外。
- 3) 像平面坐标系：  $I[x_i, y_i]$ ，在摄像机像平面上形成的平面坐标系，在 CCD 摄像机上体现为 CCD 的感光平面， $x_i, y_i$  方向平行于  $x_c, y_c$  方向。
- 4) 数字图像坐标系：  $I[u, v]$ ，显示在计算机上的数字图像的平面坐标系，尺寸和方向同像平面坐标系，只是图像的度量单位要从毫米变成像素。

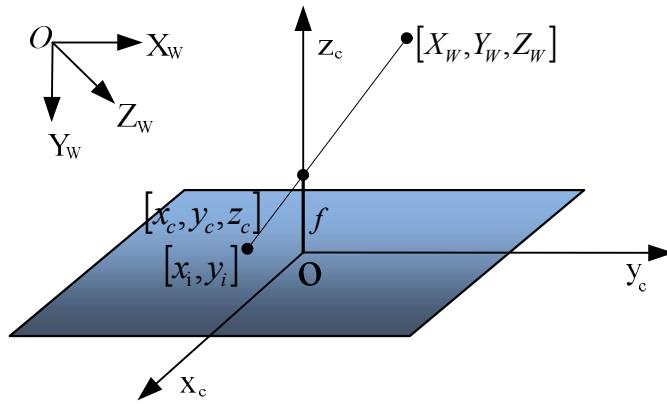


图 2-1 摄像机投影成像示意图。

图 2-1 描述了一个摄像机投影成像的示意图，图中显示的是理想摄像机的小孔成像模型。假设将摄像机坐标系与世界坐标系重合，需要根据平移矩阵  $T$  将世界坐标系原点平移到摄像机坐标系原点到的原点，并根据旋转矩阵  $R$  做相应的旋转量来实现。 $T$  和  $R$  描述为：

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -D_x \\ 0 & 1 & 0 & -D_y \\ 0 & 0 & 1 & -D_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

$$R = R_\alpha R_\gamma = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 & 0 \\ -\cos \alpha \sin \gamma & \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha \sin \gamma & -\sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

$D_x, D_y, D_z$  分别表示在  $x, y, z$  三个方向上的平移距离； $\alpha$  和  $\gamma$  分别表示绕着  $x$  轴和  $z$  轴的旋转角度。因此可以得到从世界坐标系  $W$  到摄像机坐标系  $C$  的转换方式如公式(2-3)所示：

$$C = PRTW \quad (2-3)$$

这里的  $P$  是透视变换矩阵，

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1/f & 1 \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

其中， $f$  表示摄像机焦距。

在实际操作中，由于摄像机镜头透镜的物理属性，理想的小孔成像模型是不存在的，透镜都存在不同程度的畸变情况，因此在涉及到图像坐标系与其他坐标系转换过程中，将要考虑引入摄像机的畸变校正模型，这将在本文后面章节进行具体分析。

### 2.3 结构光传感器的原理与结构

常见的结构光传感器系统都是由一个光源发射器和一台摄像机所组成。光源发射器发出的可以是多种模式的光，如点光源、线光源或多条纹光源等，如图 2-2 所示。在一些特殊应用场合，一些不常见的如斑点、圆环、网格等投影模式的光源也被使用[115]。

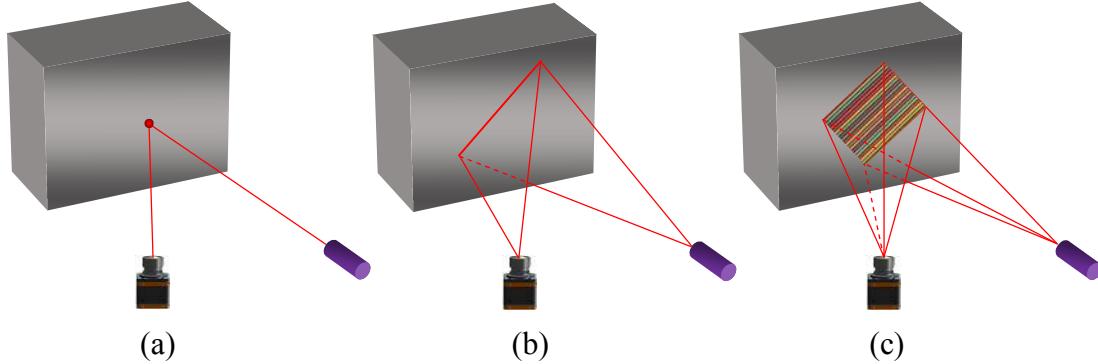


图 2-2 结构光传感器的三种光源模式。(a)点光源, (b)线光源, (c)多条纹光源。

结构光传感器的光源通常用激光器或投影仪，激光器发射的光束简单，精度高易于标定，适合于一些工业环境，例如焊缝检测；投影仪相对比较笨重，但可以发出多种模式的光线投影，适合于实验室环境，例如三维重构。基于本文面对的课题性质，在下面的介绍中我们主要以线光源模式的激光器作为光源发射器进行介绍。

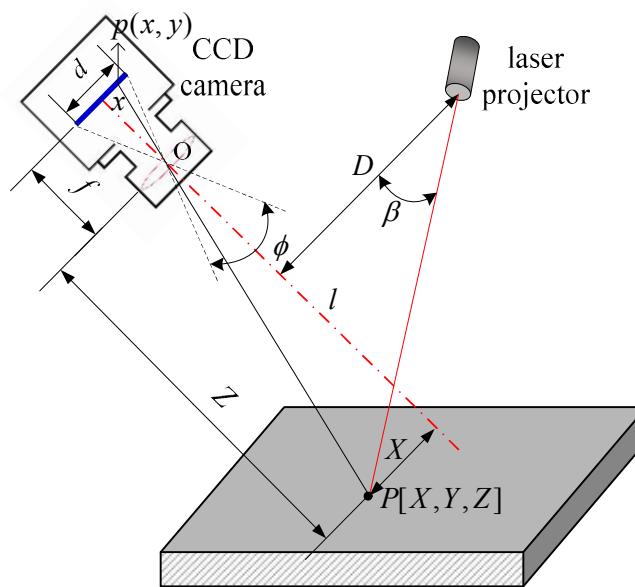


图 2-3 结构光传感器的基本结构。

如图 2-3 所示，摄像机与激光器分别固定于被测工件上方，摄像机光轴与激光器主轴成一固定角度  $\theta$ 。在摄像机获取的图像中，激光器投影到工件上的激光线随着工件表面的

凹凸不平而反映出相应的曲线形状，根据三角测量原理可以计算出工件表面的 3D 信息。

图 2-3 中  $d$  表示 CCD 尺寸， $f$  表示摄像机镜头焦距， $O$  表示镜头光心， $h$  表示沿光轴方向上光心到工件交点的距离， $\phi$  表示摄像机视场角， $l$  表示摄像机光轴。在摄像机坐标系下， $P[X,Y,Z]$  为激光线上一点， $p(x, y)$  是  $P$  在 CCD 上的像点。激光器原点到摄像机光轴之间的距离  $D$  由系统决定， $\beta$  是光线方向和  $X$  方向的夹角。

首先视场角  $\phi$  可以由焦距  $f$  和 CCD 尺寸  $d$  计算得到：

$$\frac{\phi}{2} = \tan^{-1}\left(\frac{d}{2f}\right) \quad (2-5)$$

根据相似三角形原理， $P(X,Y,Z)$  可以被计算

$$x = f \frac{X}{Z} \quad (2-6)$$

$$D + X = Z \cot \beta \quad (2-7)$$

于是有

$$X = \frac{Dx}{f \cot \beta - x} \quad (2-8)$$

同理  $y = f \frac{Y}{Z}$ ，另有  $\frac{x}{y} = \frac{X}{Y}$  可得到：

$$\begin{cases} Y = \frac{Dy}{f \cot \beta - x} \\ Z = \frac{-Df}{f \cot \beta - x} \end{cases} \quad (2-9)$$

在图像坐标系中，像素坐标  $(u, v)$  到距离单位坐标  $(x, y)$  的计算由两个放大系数  $dx, dy$  决定， $dx, dy$  也是单个像素在  $x$  和  $y$  方向上的具体尺寸。

$$\begin{cases} x = dx \cdot u \\ y = dy \cdot v \end{cases} \quad (2-10)$$

$$\begin{cases} X = \frac{Ddxu}{f \cot \beta - x} \\ Y = \frac{Ddyv}{f \cot \beta - x} \\ Z = \frac{-Df}{f \cot \beta - x} \end{cases} \quad (2-11)$$

## 2.4 CSL 传感器的测量模型

应用于焊缝跟踪方面的结构光传感器传统的线光源模式为一字线型，适合于直焊缝的检测，但在本文面对的作业环境中包括横纵焊缝交叉的“T”型接头部分，因此我们将光源改造为十字型激光投影模式。当机器人沿着一条焊缝行进时，在水平的激光线上检测当前焊缝位置；当机器人接近焊缝交点时，在垂直的激光线上会检测到另一条焊缝。这样机器人可以很方便的计算出交叉点的位置和方向，控制机器人转弯。

图 2-4(a)显示了焊缝检测与跟踪系统平台——爬壁机器人的工作环境和传感器部分的细节描述。由图可见，该平台包括一台四履带爬壁机器人，一台便携式超声探伤仪和一套 CSL 传感器。CSL 传感器的激光器安装于机器人前方并垂直于被测工件表面，摄像机固定在激光器斜前方，其光轴与激光器主轴成  $45^\circ$  夹角。CSL 传感器的具体配置情况如表 2-1 中所列。图 2-4(b)和(c)分别表示 CSL 传感器的激光器和摄像机在直焊缝和交叉焊缝环境下的检测情况。

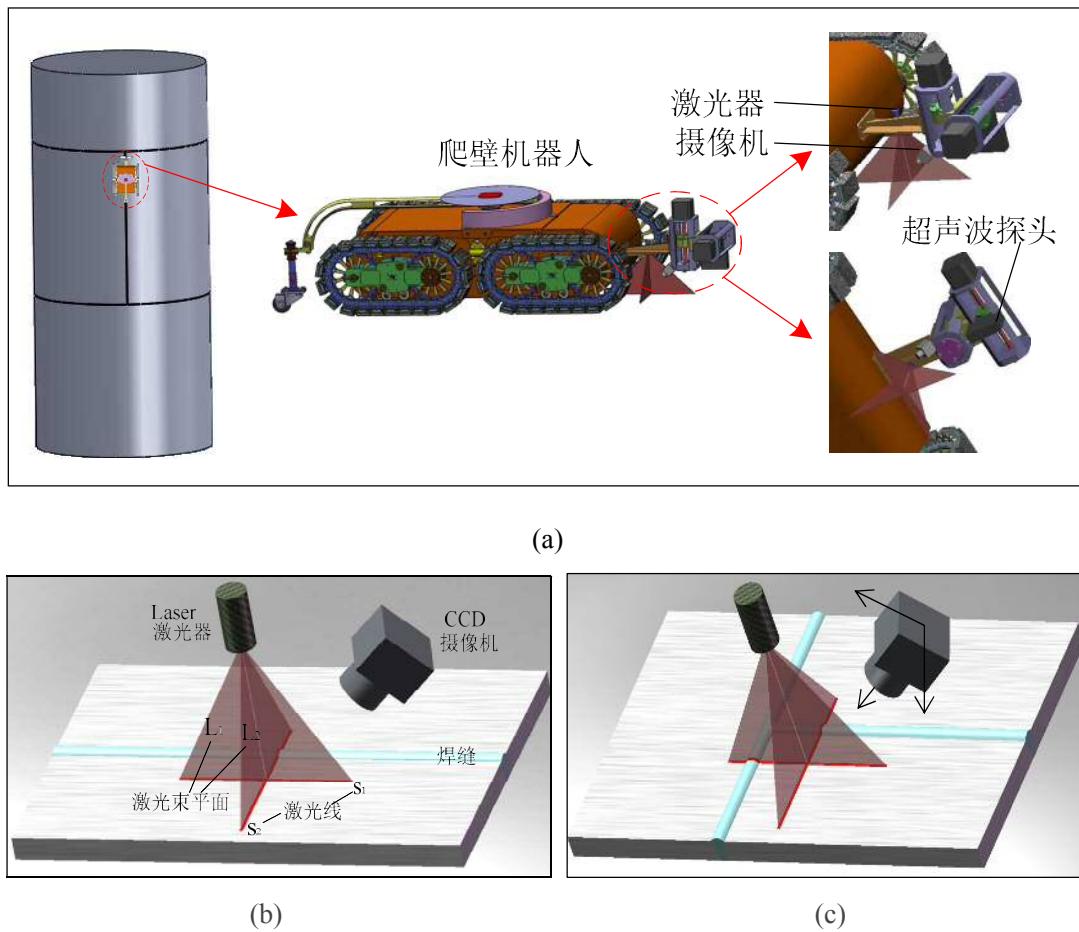


图 2-4 焊缝检测与跟踪系统平台和 CSL 传感器结构。

十字型激光线投影到工件表面上，在焊缝附近随着隆起的焊缝余高会出现一个  $\Omega$  型的

小弧线，如图 2-4(b)所示。当机器人走到焊缝交叉位置附近时，在相互垂直的两条激光线上会各自出现一个小弧线，如图 2-4(c)所示。准确跟踪这两个小弧线的位置也就跟踪到了焊缝。

表 2-1 CSL 传感器配置

设备	参数
摄像机	CCD: SONY, 1/4 inch 分辨率: $640 \times 480$ pixels 像素尺寸: $5.6\mu\text{m} \times 5.6\mu\text{m}$ 帧率: 20fps 焦距: 8mm 视场角: $43.7^\circ$
激光器	尺寸: $\phi 9 \times 23$ mm 波长: 635nm 额定电压: DC 5V 额定电流: 20-50mA 输出功率: 5mW 投影扇角: $60^\circ$

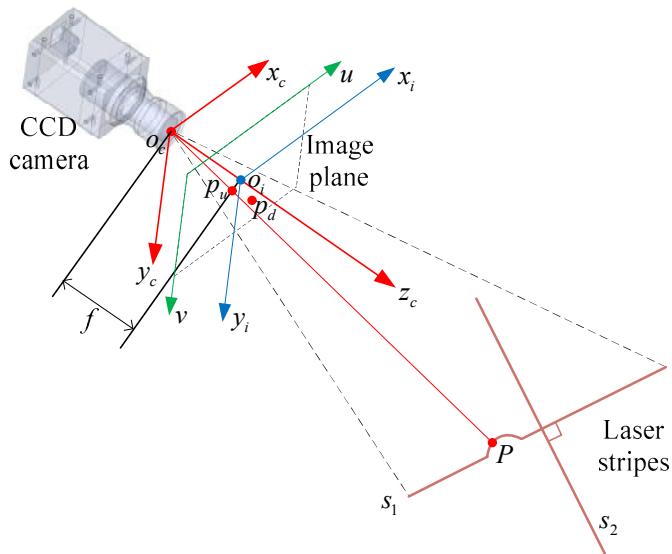


图 2-5 CSL 传感器的测量模型。

结合 2.1 节介绍的结构光原理，图 2-5 详细描述了 CSL 传感器的测量模型。 $o_c - x_c y_c z_c$  表示摄像机坐标系， $o_i - x_i y_i$  表示图像空间坐标系，摄像机镜头焦距  $f = o_c o_i$ ， $s_1$  和  $s_2$  分别

表示两条激光线。在摄像机坐标系下，两个正交的激光束平面方程分别被描述为：

$$L_1 : a_1 x_c + b_1 y_c + c_1 z_c + 1 = 0 \quad (2-12)$$

$$L_2 : a_2 x_c + b_2 y_c + c_2 z_c + 1 = 0 \quad (2-13)$$

平面  $L_1$  和  $L_2$  相互垂直，于是有：

$$a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2 = 0 \quad (2-14)$$

假设存在任意一点  $P$  位于激光线  $s_1$  上， $P_c = [x_{cp}, y_{cp}, z_{cp}]^T$  表示  $P$  点在摄像机坐标系下的坐标， $p_u = [x_{up}, y_{up}]^T$  表示  $P$  的像点在图像坐标系下的坐标。 $p_u$  的图像坐标可以由  $[x_{up}, y_{up}]^T$  表示，根据单个像素的宽  $dx(\text{mm})$  和高  $dy(\text{mm})$ ，在图像坐标系下由毫米到像素的转换关系可写成：

$$\begin{cases} u_{up} - u_0 = x_{up}/dx \\ v_{up} - v_0 = y_{up}/dy \end{cases} \quad (2-15)$$

其中  $[u_0, v_0]$  是图像的主点坐标即摄像机光轴和像平面的交点坐标。图像坐标系到摄像机坐标系的转换关系是：

$$\begin{bmatrix} u_{up} \\ v_{up} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & u_0 \\ 0 & k_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{cp}/z_{cp} \\ y_{cp}/z_{cp} \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} x_{cp}/z_{cp} \\ y_{cp}/z_{cp} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

这里的  $k_x = \frac{f}{dx}$ ,  $k_y = \frac{f}{dy}$ ,  $K$  表示摄像机的内参矩阵。

由于光学透镜非线性畸变的存在，镜头真实的透射情况并非是理想的小孔成像模型，而且越是靠近图像边缘区域畸变越严重，只有在摄像机视场角很小或摄像机距离景物很远时，镜头畸变的影响才相对较小。因在图像中像点的几何位置受镜头畸变的影响很大，尤其本文应用的 CCD 为  $640 \times 480$  像素，分辨率不是特别高，镜头畸变会严重影响 3D 测量的结果，如果忽略镜头畸变对于测量结果来说其精度很难接受。因此在本文中采用的摄像机模型是带有畸变的非线性模型。本文涉及的摄像机主要考虑两类畸变形式：径向畸变和切向畸变，它们都是由透镜的固有特性决定的，在任何一台摄像机拍摄的照片上都或多或少的存在着畸变导致的失真。如图 2-5 中摄像机坐标系下的  $P$  点在图像坐标系下的理想无畸变像点应该是  $p_u(x_u, y_u)$ ，点  $p_d(x_d, y_d)$  则是受畸变影响的真实像点坐标。 $p_u$  和  $p_d$  都是位于图像平面的点，并且有如公式(2-17)描述的关系：

$$\begin{cases} x_{up} = k_1 x_d (x_d^2 + y_d^2) + k_2 x_d (x_d^2 + y_d^2)^2 + p_1 (2x_d^2 + (x_d^2 + y_d^2)^2) + p_2 (2x_d y_d) \\ y_{up} = k_1 y_d (x_d^2 + y_d^2) + k_2 y_d (x_d^2 + y_d^2)^2 + p_2 (2y_d^2 + (x_d^2 + y_d^2)^2) + p_1 (2x_d y_d) \end{cases} \quad (2-17)$$

其中参数  $k_1, k_2$  是摄像机系统的镜像畸变系数，参数  $p_1, p_2$  是切向失真系数[116]。综合上述公式(2-12)~(2-17)摄像机的测量模型和激光线的坐标可以被计算。

## 2.5 CSL 传感器的标定

在传感器标定的过程中，需要对模型的各个参数如内参矩阵，外参矩阵和激光束平面参数进行估计，这些参数的种类和物理意义在表 2-2 中被列出。

表 2-2 需判定的 CSL 传感器参数

参数种类	参数	物理意义
摄像机内参	$(f_x, f_y)$	在 $x, y$ 方向上的焦距
	$(u_0, v_0)$	主点坐标
	$(k_1, k_2)$	径向畸变参数
	$(p_1, p_2)$	切向畸变参数
激光束平面方程	$(a_1, b_1, c_1)$	$L_1$ 平面参数
	$(a_2, b_2, c_2)$	$L_2$ 平面参数
	$\angle l_1 o_l l_2$	$L_1$ 和 $L_2$ 之间的夹角

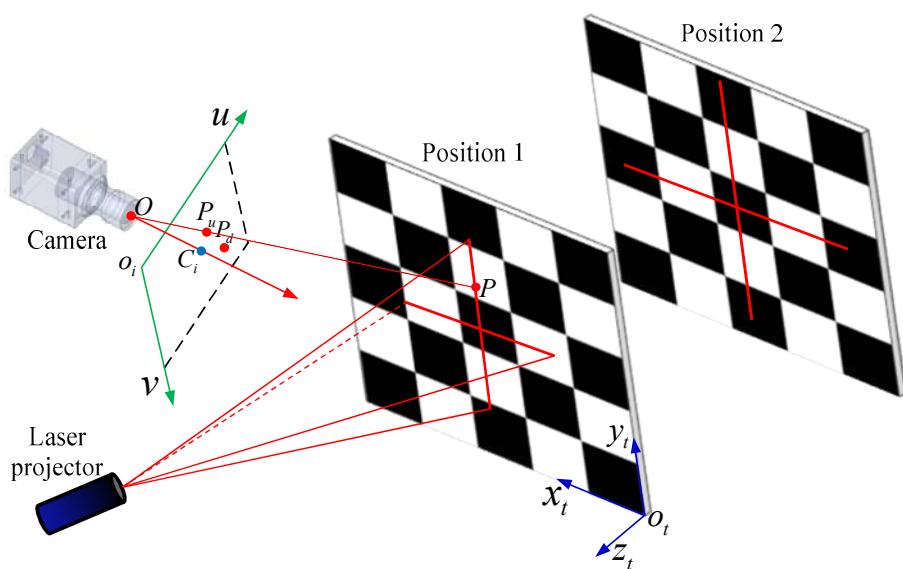


图 2-6 CSL 传感器标定示意图。

摄像机内参的计算我们采用经典的张正友标定法，张正友在文献[117]和[118]中提出一种灵活的标定方法：一个黑白方格的棋盘标靶作为标定板，摄像机从不同的位置和角度来观察标定板，摄像机和标定板都可以自由移动，并且相对于摄像机的位置来说，标定板的位置都是未知的，如图 2-6 所示。这个标定过程给出了一个闭式解(closed-form solution)，随后基于极大似然法对标定结果进行非线性优化。

除标定摄像机外，在图 2-6 中的标定板也被用来标定激光束平面。 $o_t - x_t y_t z_t$  表示标定板坐标系，在这里也被当作世界坐标系。在标定板上所有点的  $z$  坐标都是零。从 3D 标定板坐标系到 2D 图像坐标系，存在转换关系：

$$s\tilde{m} = A[r_1 \ r_2 \ r_3 \ t] \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \\ 1 \end{bmatrix} = A[R \ t]\tilde{M} \quad (2-18)$$

这里的  $\tilde{m} = [u \ v \ 1]^T$  是在 2D 坐标系下  $m = [u \ v]^T$  的齐次坐标， $\tilde{M} = [x_t \ y_t \ z_t \ 1]^T$  是  $M = [x_t \ y_t \ z_t]^T$  的齐次坐标； $s$  是一个任意的尺度因子； $3 \times 3$  矩阵  $R = (r_1 \ r_2 \ r_3)$  和  $3 \times 1$  矩阵  $t = (t_1 \ t_2 \ t_3)^T$  分别是两个坐标系之间的旋转矩阵和平移向量。由于在标定板上  $z_t = 0$ ，则  $\tilde{m}$  和  $\tilde{M}$  之间的转换关系可以表示成

$$\tilde{m} = \frac{1}{s} A[r_1 \ r_2 \ t] \tilde{M}' = H \tilde{M}' \quad (2-19)$$

此处的单应矩阵(homography matrix)  $H$  被定义为  $H = [h_1 \ h_2 \ h_3]^T$  ( $h_i$ ,  $i=1, 2$  or  $3$ )，是  $H$  的列向量；标定板上的坐标  $\tilde{M}'$  被定义为  $\tilde{M}' = [x_t \ y_t \ 1]^T$ 。矩阵  $H$  可以通过公式(2-18)计算得到，但需要至少四组不共线的点。然后将一个目标函数  $F$  最小化，用极大似然估计来精确求解  $H$ 。 $F$  的表达式为：

$$F = \min \sum_i \left\| m_i - \frac{1}{h_3^T M_i} \begin{bmatrix} h_1^T M_i \\ h_2^T M_i \end{bmatrix} \right\|^2 \quad (2-20)$$

这里的  $m_i = (u_i \ v_i \ 1)^T$  和  $M_i = (x_i \ y_i \ 1)^T$  分别表示在图像坐标系任意选择的第  $i$  个特征点坐标和该特征点在标定板坐标系下的相应坐标。函数  $F$  最小化问题可以通过 Levenberg-Marquardt 方法求解[119]。 $F$  的初始值可以通过线性最小二乘方法(LSM)获得。

在完成摄像机标定之后，执行图 2-7 所示的步骤去计算激光束平面方程，我们将标定板放在几个不同的位置来获取激光线上足够多的不共线特征点在摄像机坐标系下的坐标。

根据这些点的坐标，采用最小二乘法拟合激光束平面  $L_1$  和  $L_2$  方程

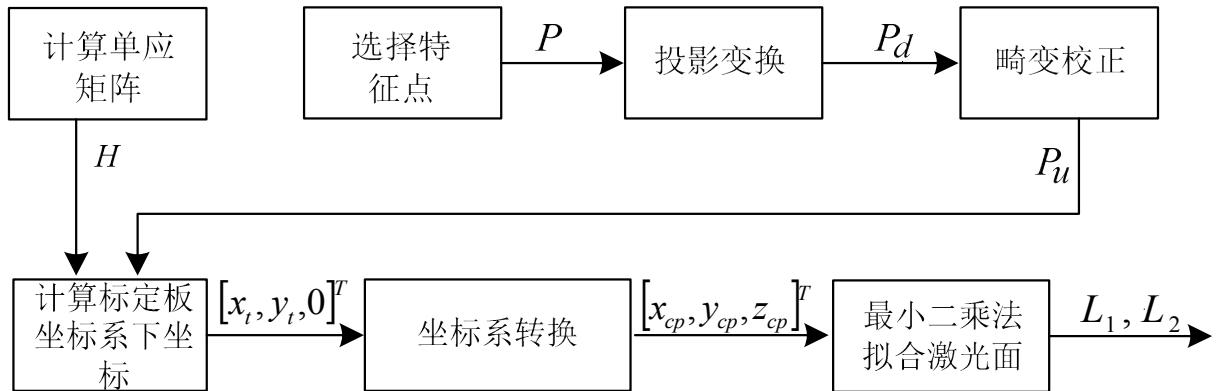


图 2-7 激光束平面标定和特征点坐标计算流程图。

## 2.6 CSL 传感器标定实验结果与误差分析

### 2.6.1 摄像机和激光束平面标定

在实验中一个  $11 \times 8$  的黑白格棋盘被用作摄像机和激光器的标定板，棋盘上的黑白格尺寸为  $25\text{mm} \times 25\text{mm}$ ，在这个标定板内共  $10 \times 7$  个角点。我们从 16 个不同的位置和角度采集图片，在每个位置上分别采集一对有激光线投影和无激光线投影的图片，如图 2-8 所示。于是实验得到两组图片集合（有激光线投影和无投影），分别用于标定摄像机和激光器。

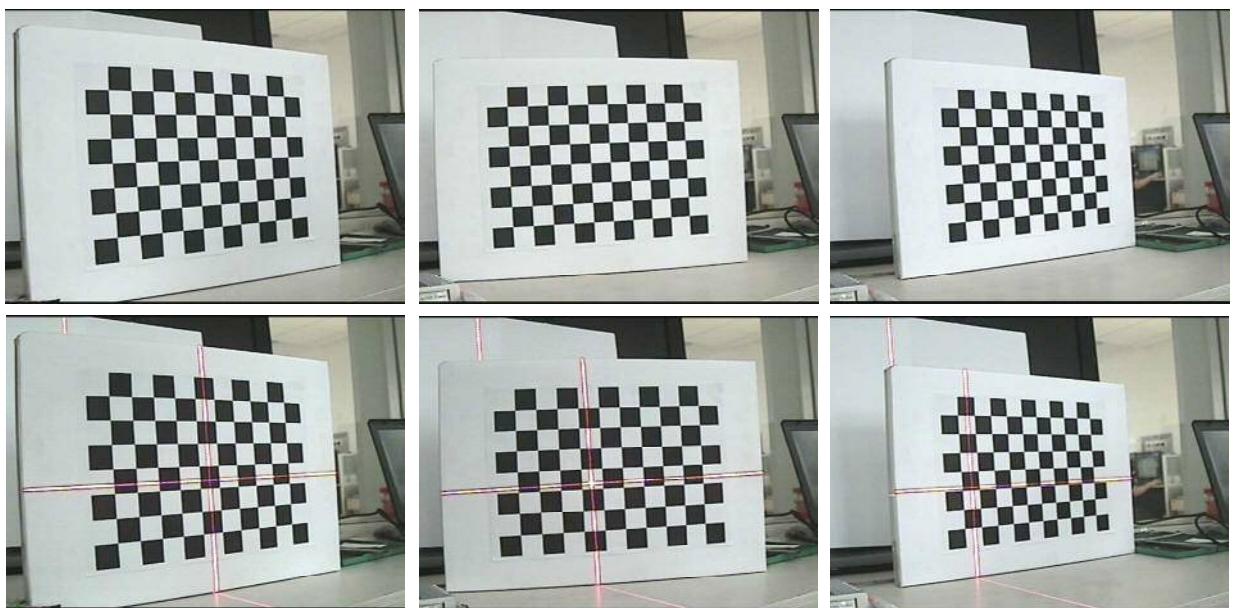


图 2-8 三对有激光线投影和无激光线投影的标定板图像。

对于在 16 个不同位置上采集的图片，在图像坐标系下的激光线上任意采集 16 组共 300 个特征点（激光线提取及特征点选择方法将在第三章介绍）作为标定数据。根据 2.3 节介绍的标定方法，这些特征点在摄像机坐标系下的坐标可以计算获得，然后通过最小二乘法拟合激光束平面。CSL 传感器的标定结果如表 2-3 所示（包括摄像机内参和激光束平面参数）：

表 2-3 CSL 传感器标定结果

设备	参数种类	参数数值
摄像机	$(f_x, f_y)$	(922.4530, 917.3560)
	$(u_0, v_0)$	(329.1680, 270.5660)
	$(k_1, k_2)$	( $-291.459 \times 10^{-3}$ , $157.027 \times 10^{-3}$ )
	$(p_1, p_2)$	( $-0.1354 \times 10^{-3}$ , $0.2682 \times 10^{-3}$ )
激光器	$(a_1, b_1, c_1)$	( $-0.18 \times 10^{-3}$ , $1.86 \times 10^{-3}$ , $1.39 \times 10^{-3}$ )
	$(a_2, b_2, c_2)$	( $-90.11 \times 10^{-3}$ , $2.463 \times 10^{-3}$ , $8.935 \times 10^{-3}$ )
	$\angle l_1 o l_2$	89.9981°

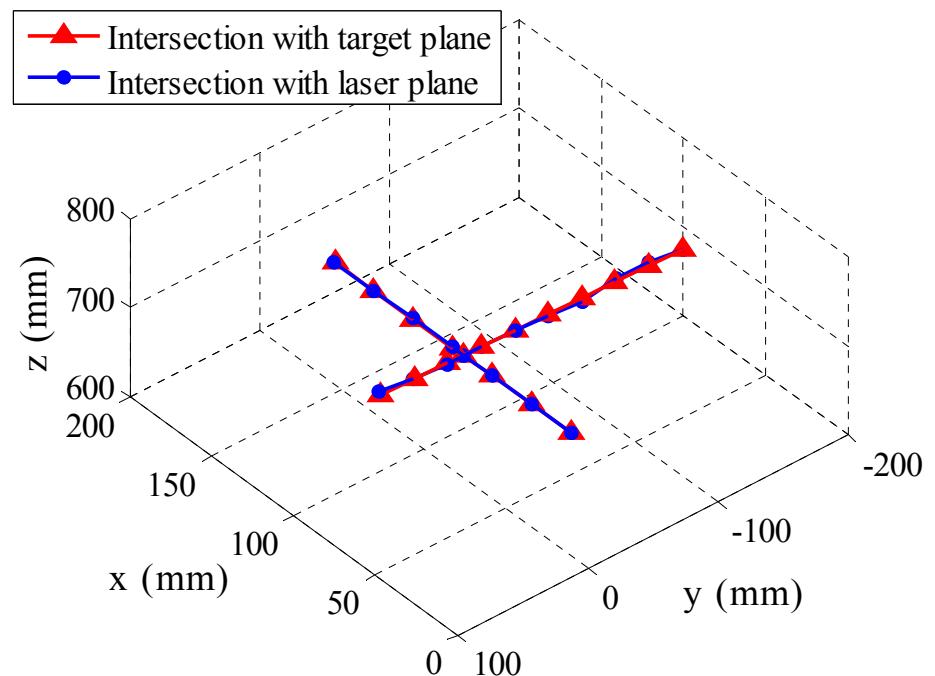
由表 2-3 中两激光面法向量参数得到两者的点积等于：

$$(a_1, b_1, c_1) \cdot (a_2, b_2, c_2) = a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2 = 3.322 \times 10^{-5}, \text{ 这是一个非常接近于 } 0 \text{ 的小数。}$$

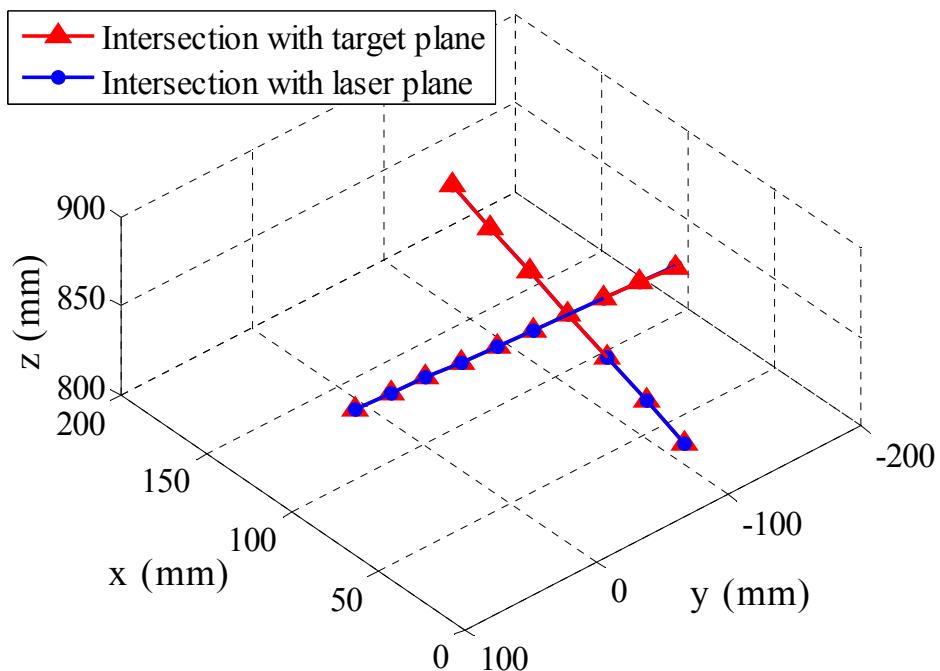
## 2.6.2 CSL 传感器标定精度

如 2.6.1 节一样，任选两个位置上的测量数据（共 34 个特征点）估计 CSL 传感器的标定精度。以标定板上特征点在摄像机坐标系下的坐标作为标准值，将特征点和光心之间连线（如图 2-6 中的线段  $PO$ ）所在直线与标定好的激光束平面的交点作为测试值。通过计算两组数据的偏差和统计均方差分析传感器的标定精度[120]。

如表 2-4 所示，两组数据在  $x, y, z$  方向上的均方差分别为 (0.173, 0.198, 1.526) 和 (0.011, 0.008, 0.077)。图 2-9(a)(b) 显示了两组特征点的 3D 坐标，从图中可以观察到测量值与标准值之间有很好的重合度，在图 2-10(a)、(b) 上分别显示了两组数据的偏差情况，在深度距离大约 700mm~850mm 范围内， $x, y, z$  三个方向上的最大测量误差为  $\Delta z = 4.174\text{mm}$ ，这是一个可以被接受的测量误差。在  $x$  和  $y$  方向上的误差  $\Delta x$  和  $\Delta y$  基本上都小于  $z$  方向上的误差，这是因为特征点的  $x$  和  $y$  的坐标值远小于  $z$  值，误差随着深度距离的增加被相应的放大了。

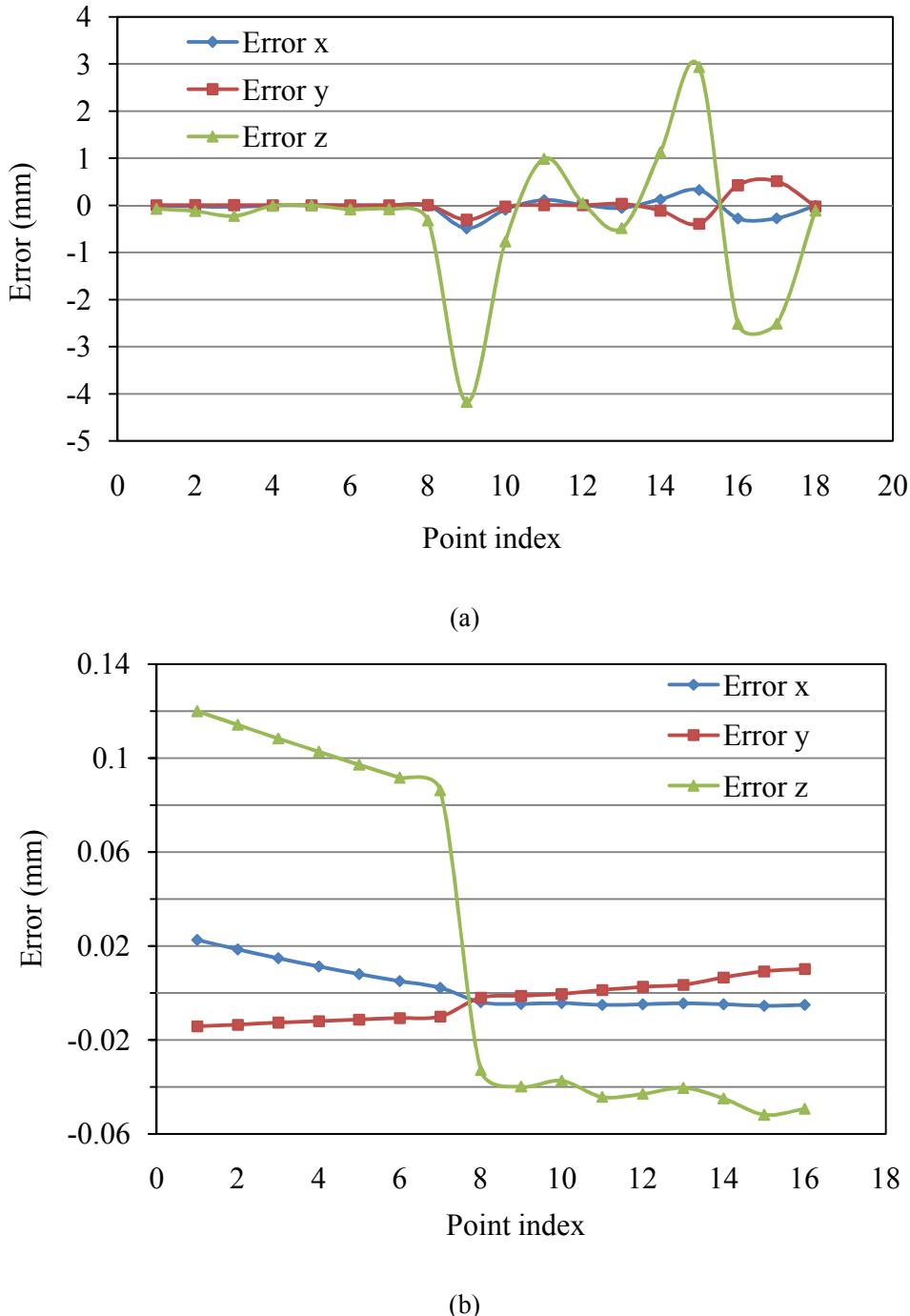


(a)



(b)

图 2-9 在摄像机坐标系下标准值和测量值的 3D 坐标。(a) 位置 1; (b) 位置 2。

图 2-10 在  $x, y$  和  $z$  方向上的标定误差。 (a)位置 1; (b)位置 2。

### 2.6.3 CSL 传感器的测量精度

为了评估传感器的测量精度，我们用一组未参与传感器标定的测试数据集来定量分析 CSL 传感器的测量精度。即在不同于上述 16 个图像采集位置的新位置上取一帧图像，在被提取的激光线上任选 18 个特征点。分别计算特征点在标定板和激光束平面上的坐标，仍然以标定板坐标为基准来对比测量结果。如表 2-5 所示，实验结果显示在  $x, y$  和  $z$  三个方

向上均方误差分别为 0.107, 0.036 和 0.407。测试集特征点的 3D 空间坐标和测量误差分别如图 2-11 和图 2-12 所示。

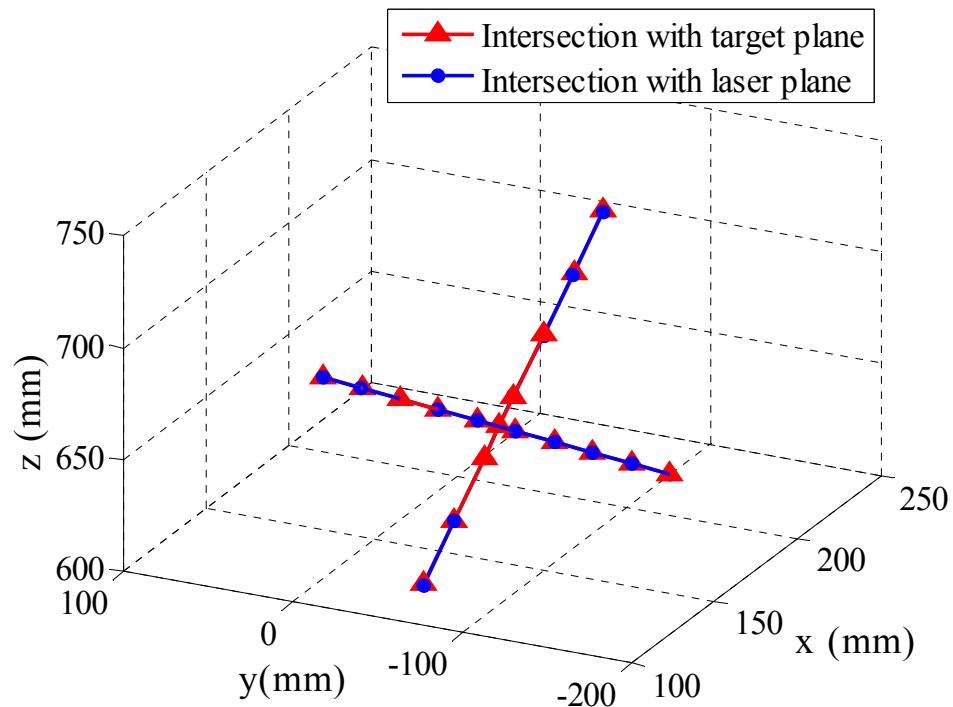


图 2-11 测试集在摄像机坐标系下标准值和测量值的 3D 坐标。

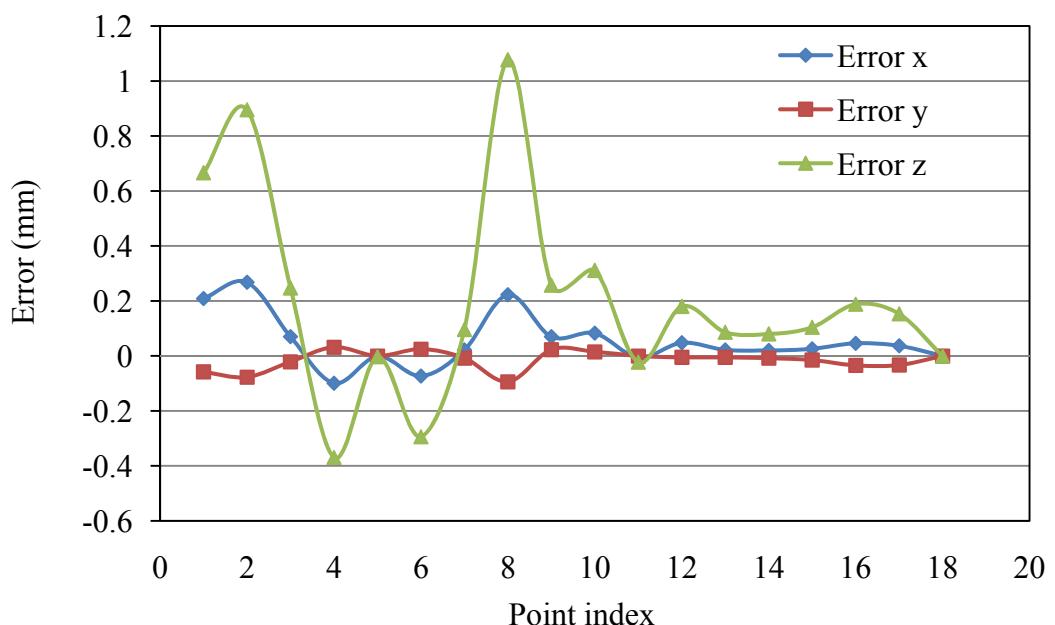


图 2-12 测试集数据在  $x$ ,  $y$  和  $z$  三个方向上的测量误差。

表 2-4 CSL 传感器的标定精度

图像坐标 (u,v)/(pixels)	与标定板平面的交点			与激光束平面的交点			坐标误差			平面 $L_i$
	x(mm)	y(mm)	z(mm)	x(mm)	y(mm)	z(mm)	$\Delta x$ (mm)	$\Delta y$ (mm)	$\Delta z$ (mm)	
<b>位置 1</b>										
460.751, 335.462	164.013	-12.358	715.797	164.030	-12.359	715.870	-0.017	0.001	-0.073	$L_1$
459.293, 302.781	139.099	-11.389	717.654	139.123	-11.391	717.776	-0.024	0.002	-0.122	$L_1$
457.397, 273.486	114.184	-10.460	719.511	114.219	-10.464	719.737	-0.035	0.004	-0.226	$L_1$
455.191, 241.971	89.280	-9.292	721.365	89.281	-9.292	721.374	-0.001	0	-0.009	$L_1$
454.704, 233.089*	82.424	-9.009	721.875	82.424	-9.008	721.875	0	-0.001	0	$L_1, L_2$
453.134, 211.396	64.365	-8.343	723.222	64.373	-8.344	723.307	-0.008	0.001	-0.085	$L_1$
450.753, 180.022	39.453	-7.335	725.078	39.458	-7.335	725.160	-0.005	0	-0.082	$L_1$
448.104, 150.019	14.533	-6.506	726.938	14.539	-6.509	727.258	-0.006	0.003	-0.320	$L_1$
527.350, 227.396	84.210	53.089	720.774	84.698	53.396	724.948	-0.488	-0.307	-4.174	$L_2$
499.698, 229.251	83.512	28.097	721.216	83.601	28.127	721.982	-0.089	-0.030	-0.766	$L_2$
469.536, 231.634	82.794	3.106	721.659	82.681	3.102	720.668	0.113	0.004	0.991	$L_2$
438.771, 234.059	82.196	-21.891	722.093	82.191	-21.889	722.046	0.005	-0.002	0.047	$L_2$
409.476, 237.016	81.538	-46.884	722.532	81.593	-46.916	723.015	-0.055	0.032	-0.483	$L_2$
377.858, 239.002	80.940	-71.881	722.966	80.813	-71.769	721.835	0.127	-0.112	1.131	$L_2$
346.985, 241.499	80.371	-96.879	723.398	80.045	-96.486	720.462	0.326	-0.393	2.936	$L_2$
315.000, 243.500	79.683	-121.872	723.839	79.96	-122.295	726.351	-0.277	0.423	-2.512	$L_2$
283.036, 245.994	79.085	-146.868	724.273	79.359	-147.378	726.784	-0.274	0.510	-2.511	$L_2$
253.213, 247.974	78.407	-171.861	724.713	78.419	-171.887	724.823	-0.012	0.026	-0.11	$L_2$
RMS errors (mm)	--	--	--	--	--	--	0.173	0.198	1.526	--

续表 2-4 CSL 传感器的标定精度

图像坐标 (u,v)/(pixels)	与标定板平面的交点			与激光束平面的交点			坐标误差			平面 $L_i$
	x(mm)	y(mm)	z(mm)	x(mm)	y(mm)	z(mm)	$\Delta x$ (mm)	$\Delta y$ (mm)	$\Delta z$ (mm)	
<b>位置 2</b>										
388.505, 328.662	162.480	-102.514	865.645	162.456	-102.500	865.525	0.024	-0.014	0.120	$L_1$
387.231, 301.868	138.915	-101.188	857.410	138.894	-101.174	857.295	0.021	-0.014	0.115	$L_1$
385.278, 274.185	115.350	-99.862	849.170	115.332	-99.849	849.060	0.018	-0.013	0.110	$L_1$
383.796, 246.583*	91.785	-98.536	840.930	91.770	-98.524	840.825	0.015	-0.012	0.105	$L_1, L_2$
382.084, 218.982	68.220	-97.210	832.690	68.207	-97.199	832.590	0.013	-0.011	0.100	$L_1$
380.332, 191.419	44.650	-95.884	824.450	44.644	-95.873	824.355	0.006	-0.011	0.095	$L_1$
378.177, 164.690	21.085	-94.558	816.210	21.081	-94.548	816.120	0.004	-0.010	0.090	$L_1$
501.055, 240.841	101.140	51.150	838.250	101.144	51.150	838.280	-0.004	0	-0.030	$L_2$
479.406, 242.050	99.580	26.205	838.695	99.585	26.202	838.735	-0.005	0.003	-0.040	$L_2$
456.570, 243.119	98.020	1.255	839.140	98.024	1.253	839.180	-0.004	0.002	-0.040	$L_2$
432.967, 244.302	96.465	-23.694	839.590	96.465	-23.695	839.635	0	0.001	-0.045	$L_2$
408.778, 245.455	94.905	-48.641	840.035	94.905	-48.644	840.080	0	0.003	-0.045	$L_2$
357.951, 248.033	93.345	-73.589	840.480	93.345	-73.592	840.520	0	0.003	-0.040	$L_2$
331.581, 248.972	90.225	-123.483	841.375	90.226	-123.490	841.420	-0.001	0.007	-0.045	$L_2$
304.445, 250.285	88.665	-148.431	841.820	88.667	-148.440	841.875	-0.002	0.009	-0.055	$L_2$
276.665, 251.784	87.105	-173.378	842.265	87.107	-173.388	842.315	-0.002	0.010	-0.050	$L_2$
RMS errors (mm)	--	--	--	--	--	--	0.011	0.009	0.077	--

\*表示两条激光线的交点。

表 2-5 CSL 传感器的测量精度

图像坐标 (u,v)/(pixels)	与标定板平面的交点			与激光束平面的交点			坐标误差			平面 $L_i$
	x(mm)	y(mm)	z(mm)	x(mm)	y(mm)	z(mm)	$\Delta x$ (mm)	$\Delta y$ (mm)	$\Delta z$ (mm)	
<b>测试位置</b>										
434.812, 216.242	224.751	-61.644	713.681	224.542	-61.586	713.015	0.209	-0.058	0.666	$L_1$
521.702, 339.656	208.124	-60.198	695.059	207.856	-60.121	694.164	0.268	-0.077	0.895	$L_1$
520.861, 304.699	191.494	-58.802	676.438	191.424	-58.781	676.191	0.07	-0.021	0.247	$L_1$
519.817, 272.006	174.863	-57.407	657.818	174.962	-57.439	658.187	-0.099	0.032	-0.369	$L_1$
518.237, 238.050*	166.850	-56.695	648.842	166.851	-56.695	648.845	-0.001	0	-0.003	$L_1, L_2$
516.309, 220.555	158.236	-55.971	639.196	158.309	-55.996	639.490	-0.073	0.025	-0.294	$L_1$
515.171, 204.063	141.610	-54.515	620.575	141.588	-54.507	620.479	0.022	-0.008	0.096	$L_1$
512.486, 170.342	124.986	-53.019	601.952	124.763	-52.925	600.875	0.223	-0.094	1.077	$L_1$
508.894, 138.080	177.332	57.495	649.622	177.262	57.472	649.365	0.07	0.023	0.257	$L_2$
577.181, 225.223	175.097	32.586	649.509	175.014	32.571	649.198	0.083	0.015	0.311	$L_2$
565.821, 224.684	172.689	7.687	649.202	172.695	7.687	649.225	-0.006	0	-0.023	$L_2$
554.325, 223.663	170.521	-17.226	649.164	170.473	-17.221	648.984	0.048	-0.005	0.18	$L_2$
539.553, 223.101	168.219	-42.131	648.977	168.197	-42.126	648.891	0.022	-0.005	0.086	$L_2$
525.946, 222.546	165.957	-67.039	648.834	165.937	-67.031	648.754	0.02	-0.008	0.08	$L_2$
510.778, 220.525	163.709	-91.947	648.706	163.683	-91.932	648.602	0.026	-0.015	0.104	$L_2$
494.025, 219.462	161.487	-116.857	648.608	161.441	-116.823	648.420	0.046	-0.034	0.188	$L_2$
477.062, 218.398	159.212	-141.763	648.451	159.175	-141.730	648.298	0.037	-0.033	0.153	$L_2$
457.027, 217.322	156.884	-166.667	648.234	156.884	-166.667	648.235	0	0	-0.001	$L_2$
RMS errors (mm)	--	--	--	--	--	--	0.107	0.036	0.407	--

## 2.7 小结

本章首先基于针孔成像原理介绍了摄像机投影模型和结构光传感器模型；摄像机坐标系，世界坐标系，像平面坐标系和图像坐标系之间存在的线性转换关系；结构光传感器的3D测量原理。根据本文面对的焊缝环境，提出一种十字型结构光传感器模型，为提高传感器系统测量精度，引入径向畸变和切向畸变的校正方法，基于张正友标定法计算摄像机的内参。

在实验中用一个 $11 \times 8$ 的黑白格棋盘作为摄像机和激光器的标定板，分别计算摄像机内参矩阵和外参数，通过300个特征点的坐标值来拟合相互正交的两个激光束平面方程，列举两组数据点分析传感器的标定精度。最后选择一组训练集以外未参与标定的特征点作为测试样本分析传感器系统的测量精度，并分析误差形成原因和对系统工作的影响。

### 第三章 基于空域隐马尔可夫模型的激光线提取

#### 3.1 引言

激光线提取作为焊缝图像处理的第一步，承担了精确反映焊缝表面 3D 信息的任务，这对后续工作中检测和跟踪感兴趣区域（焊缝位置）有着决定性的影响。目前，在结构光 3D 重构方面，很多工作者积累了大量激光线提取经验，例如最常见的亮度直方图分割方法 [121][122]，作者在焊缝图像中水平或垂直扫描每列/行像素，寻找亮度最大值点作为激光线的亮度峰值，扫描得到的一系列峰值串联在一起构成被提取到的激光线骨架。这种方法思路简单，计算量小，速度快，但缺点是对噪声很敏感，受环境影响大，精度低。在文献 [123] 中，R. Ofner 等人设计了一套 Line-Walking 算法，人工标定一个激光线的起点，设定一个小的搜索窗口沿着相邻列/行逐步推进，寻找比某一阈值更高的最大值，直到搜索不到激光线为止。该方法的缺点是激光线的很多区域的强度可能是在阈值之下，这样检测结果体现为一系列激光片段而不是一条线。如果被测目标由不同材质构成、表面存在腐蚀或机械加工的工艺不同，对于在这些区域形成的测量数据则很可能造成缺口，只有当被测目标有已知的几何形状时这种方法才值得推荐。在文献[124]中，Jost Schnee 根据弹簧的力学模型(Mass-Spring Model)和蛇形曲线 (Snakes Model) 模型提出了两种新的激光线骨架提取方法。这两中方法提取到的激光线具有非常理想的平滑性，对于缺口部分的处理也比插值方式的效果好的多。但是该方法对于噪声影响比较敏感，需要一个很好的图像预处理工作。

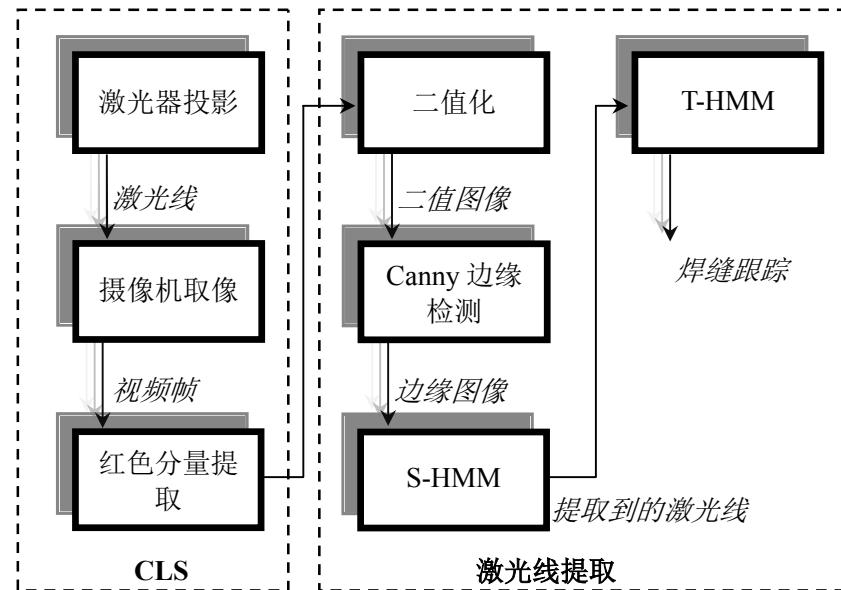


图 3-1 基于 S-HMM 的激光线提取流程图。

参考以上所述研究者的现有工作基础，本章先从分析激光的光谱特性和 CCD 摄像机成像性质入手，同时考虑激光线信号与环境噪声的信噪比，合理的选择一种改进的隐马尔可夫模型提取激光线，并对比参考文献中提到的四种方法，分析激光线的提取精度。具体流程如图 3-1 所示。

### 3.2 激光线投影的特性分析

激光因其具有非常良好的连续性、单色性、紧致性以及很高的亮度等优点经常被当作结构光传感器的首选光源，其特性对比普通光源的优势不言而喻。一个点光源激光投射到物体表面形成的光斑的能量分布（也是亮度分布）符合标准的高斯模型，其分布函数表现为：

$$I(r, z) = I_0 e^{\left(-\frac{2r^2}{w(z)^2}\right)} \quad (3-1)$$

这里的  $I$  表示亮度值， $I_0$  是光轴点的亮度值， $r$  是到光轴点的半径， $z$  表示从焦点到投影点的距离， $w(z)$  是  $z$  处的光束半径。具体投影形式如图 3-1 所示。

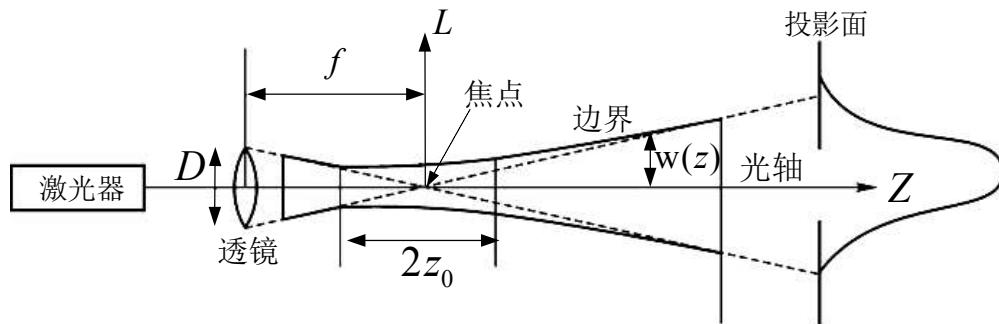
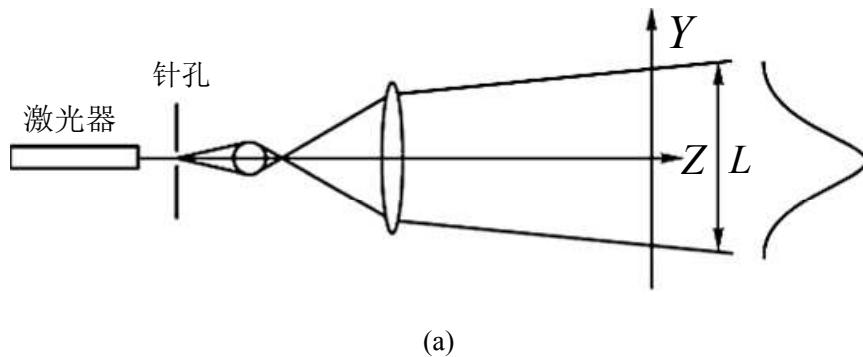


图 3-2 点激光成像原理和投影面亮度分布。

线光源的激光器是在点光源模型的透镜前加一个圆柱形透镜构成的，投影到目标上的激光线无论在激光线垂直方向还是在平行方向上其亮度分布都满足高斯分布。如图 3-3 所示[125]。



(a)

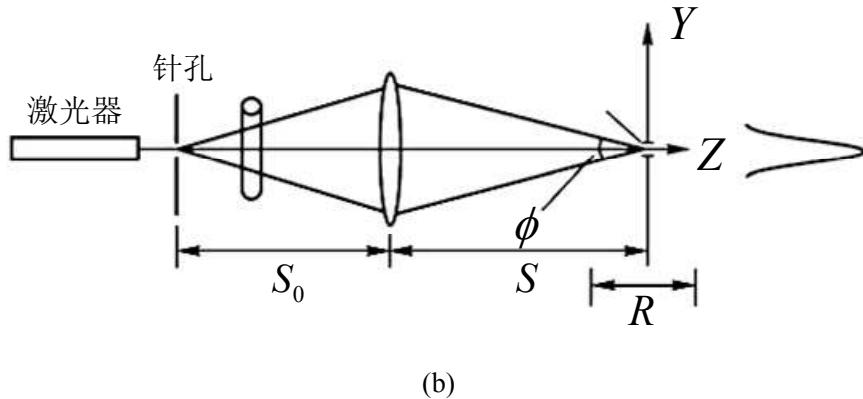


图 3-3 线光源激光产生原理和投影面亮度分布。(a)平行于激光线方向, (b)垂直于激光线方向。

十字型激光线相当于两个线光源的垂直叠加, 其投影的激光线在两条激光线各自的  $x$  和  $y$  方向上都符合高斯分布, 如图 3-4 所示, 其亮度在平面上的投影是一系列的能量值的等高线。但是对于图像采集装置来说, CCD 得到的图像上的亮度分布却并不完全正比于真实的能量谱。因为 CCD 上分布着方阵形式的感光单元, 每个感光单元都有一个能量饱和的上限。而激光的亮度通常是非常高的, 这将导致在激光线亮度未曾达到峰值点的周围区域的亮度值就已经使 CCD 上的感光单元能量饱和。由于这种过饱和失真的原因, 如图 3-5(a) 所示的亮度分布的激光线在 CCD 成像后的亮度分布会表现为一个被削顶的高斯分布曲线, 如图 3-5(b) 所示。因此, 如文献[132]中提到的方法: 检测激光线亮度分布方程的一阶导数过零点位置, 以定位最大亮度点; 在实际应用中将面对极大挑战。

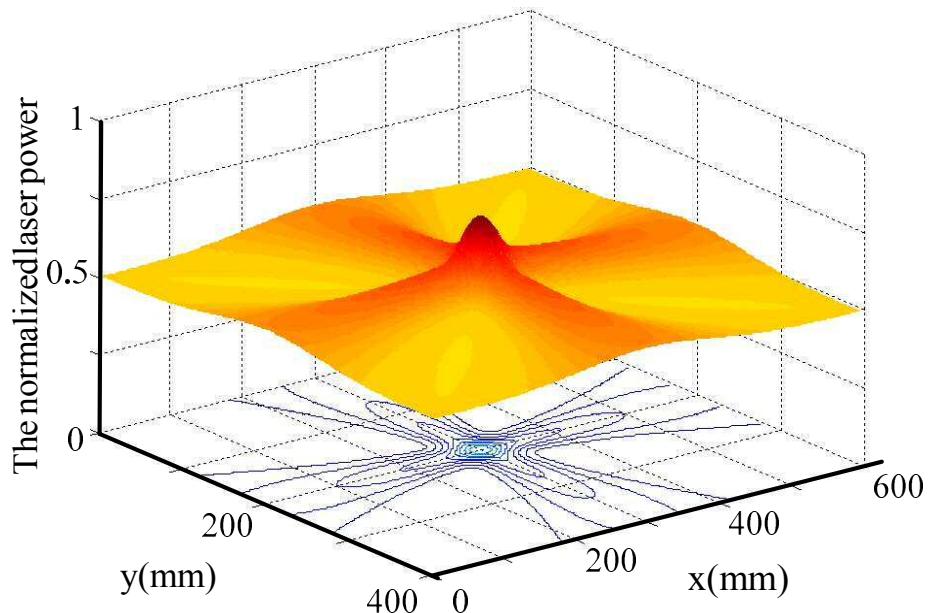


图 3-4 十字型激光线的能量分布。

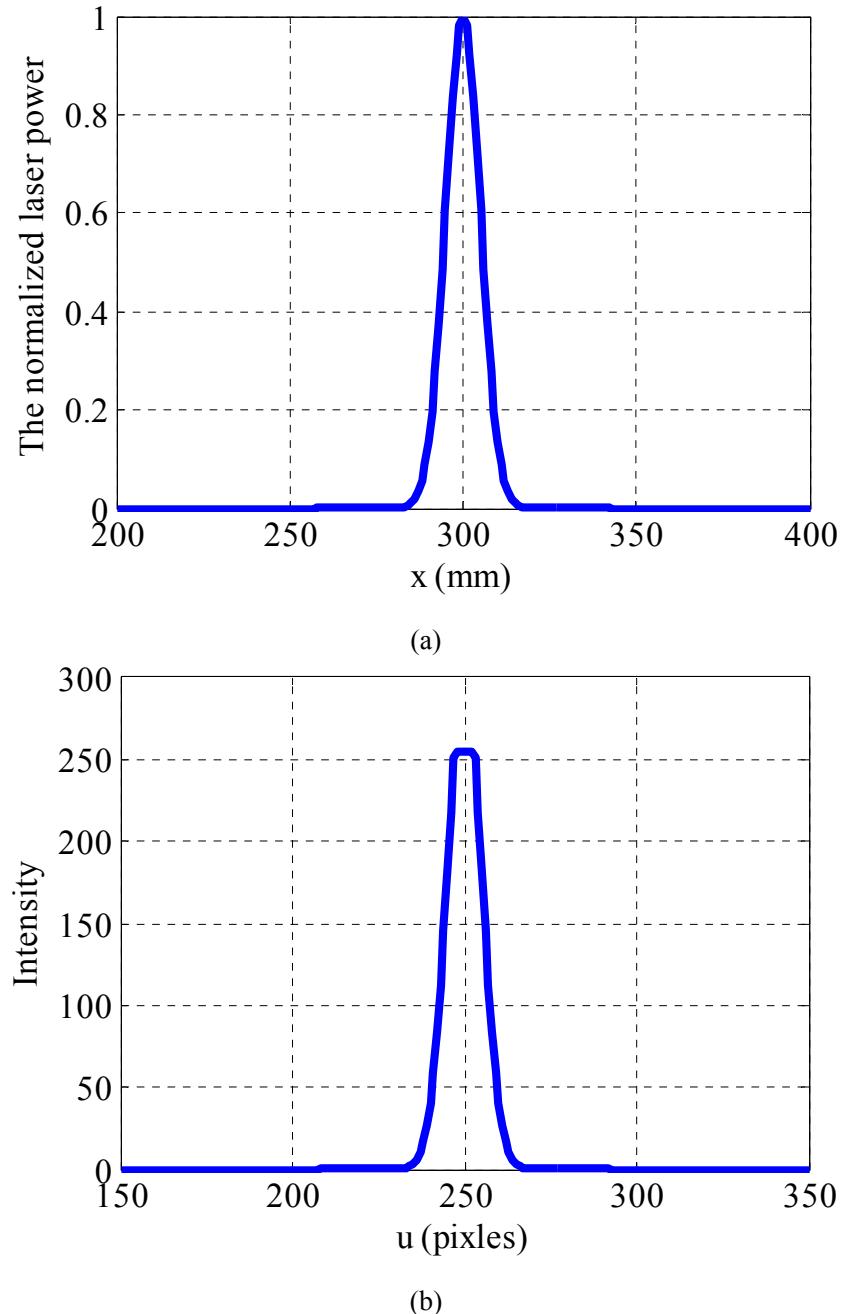


图 3-5 激光线的能量分布及其在 CCD 上的亮度分布。

### 3.3 图像预处理

爬壁机器人工作在野外环境中, CSL 传感器采集的图像要包含各种环境噪声, 如阳光、阴影、焊缝表面反光等。因此即使我们选择能量很高的激光器, 反映到 CCD 摄像机采集的图像上, 信噪比还是很低的。如图 3-6(a)所示, 一幅  $640 \times 480$  像素的图像, 在强烈的阳光照射下, 白色油漆喷涂的工件表面上本身亮度就非常高, 采集到的图像中 R, G, B 分量都很高。和背景相比激光线的颜色显得非常淡, 其实是被淹没在一片环境噪声里。图 3-6(b), (c), (d)分别显示了图(a)在 R, G, B 三个颜色空间的亮度分布, 由于我们选用的是红色激光器,

所以 R 空间的激光线的信噪比要略高一些，但也存在着大量环境噪声的干扰。我们随后的图像处理工作都将集中于 R 空间进行。

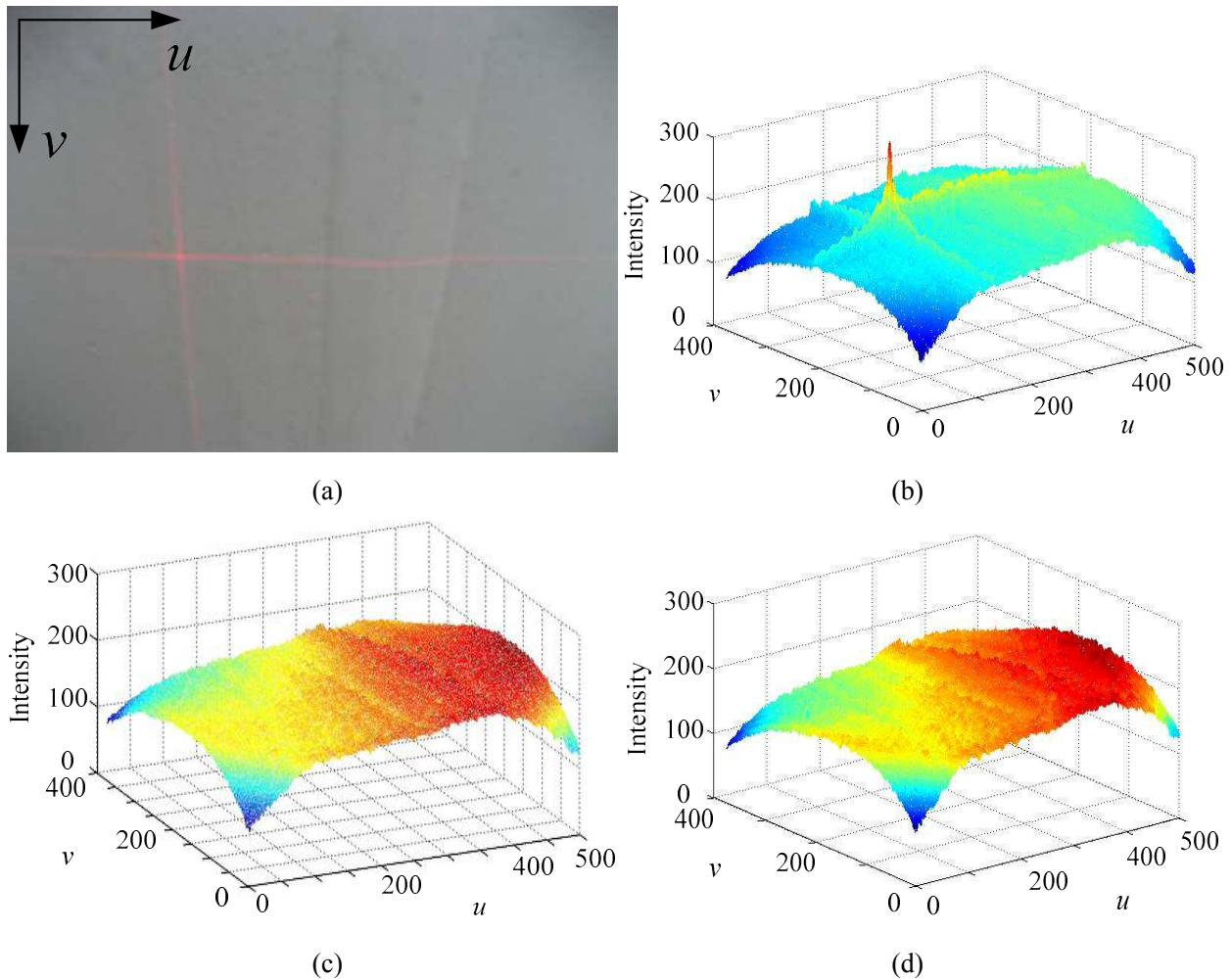
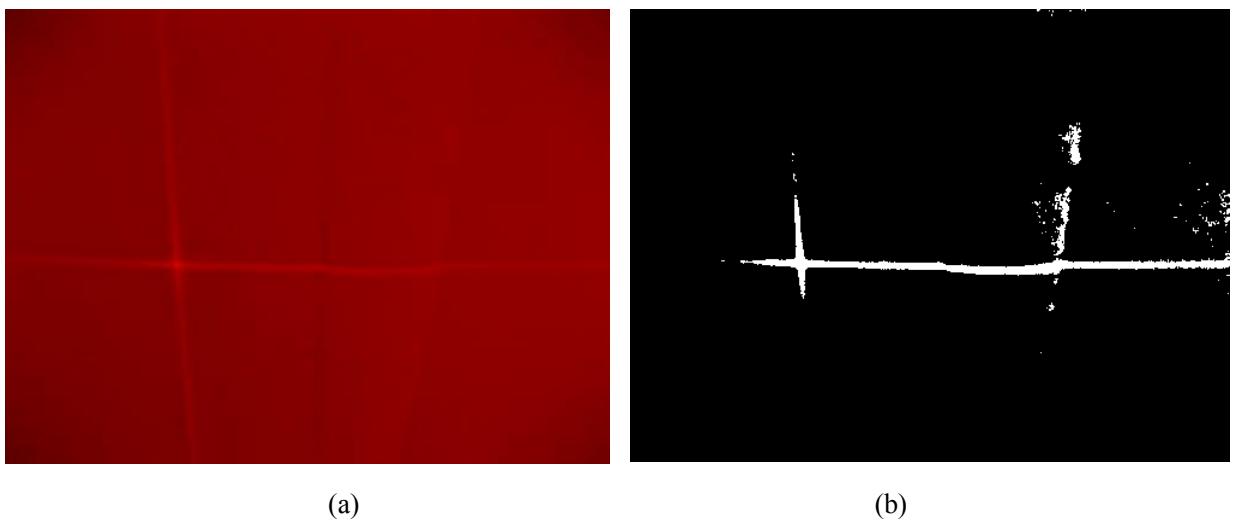


图 3-6 CSL 传感器采集的焊缝图像及其在 R, G, B 三个颜色空间的亮度分布。



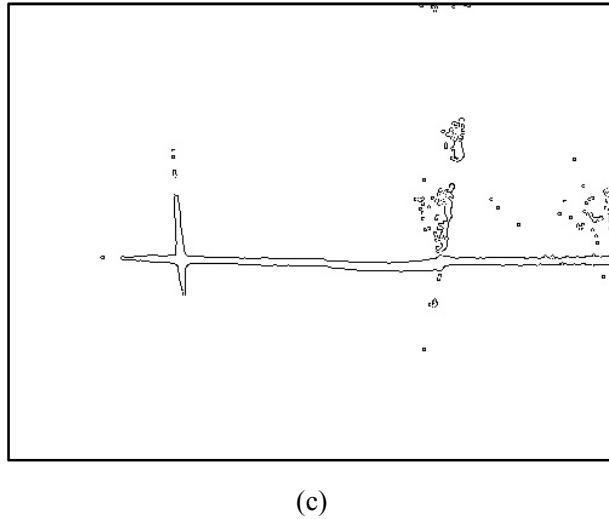


图 3-7 焊缝图像的 R 分量图, 二值图和 Canny 边缘图。

首先采用基于直方图最小熵的阈值分割方法对 R 空间的图像进行初步的阈值分割[68], 分割得到二值化图像, 再将二值图像用 Canny 边缘检测算子检测边缘[126]。得到的处理结果如图 3-7 所示。从图 3-7(c)可以看到激光线的边缘有非常连续的几何特性和连通的位置信息。在后面的处理中我们再辅以图 3-7(a)中的颜色信息, 将进一步高激光线的分割精度。

### 3.4 HMM 的基本原理

在统计学中, 马尔可夫模型是一种与时间相关状态转移模型, 具体来说可以解释为在某一时刻  $t$  发生的事件  $\omega(t)$  直接取决于  $t-1$  时刻的时间  $\omega(t-1)$  的状态,  $\omega(t)$  和  $\omega(t-1)$  可能处于同一状态, 也可能处于不同状态。在  $T$  个时间节点上的状态序列可以记为  $\omega^T = \{\omega(1), \omega(2), \omega(3), \dots, \omega(T)\}$ , 相邻时间节点之间状态的转移关系可以用转移概率来描述, 记为  $P(\omega_j(t+1) | \omega_i(t)) = a_{ij}$ , 且  $\sum_j a_{ij} = 1$ 。这表示系统在  $t$  时刻处于  $\omega_i$  状态而下一时刻处于  $\omega_j$

状态的概率。如图 3-8 所示, 表示三个状态之间的转换关系[127]。

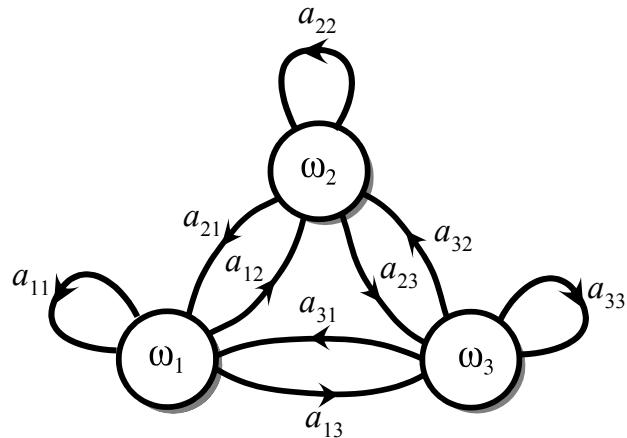


图 3-8 三个状态的离散时间马尔可夫模型。

在马尔可夫模型中每个状态都是已知的、确定性的，但是在很多情况下状态量是不能直接观测到的，却可以通过一些现象来间接判断，我们把这些现象叫做模型的观测量，模型的状态量则被视为一系列隐状态。与状态序列的定义一样，将观测序列定义为  $V^T = \{v(1), v(2), v(3), \dots, v(T)\}$ ，如图3-9所示。从状态量到观测量之间的转移概率被定义为观测概率  $P(v_k(t) | \omega_j(t)) = b_{kj}$ ，且  $\sum_k b_{kj} = 1$ 。隐马尔可夫模型就是这个可以由观测量间接估计状态量的统计学模型。

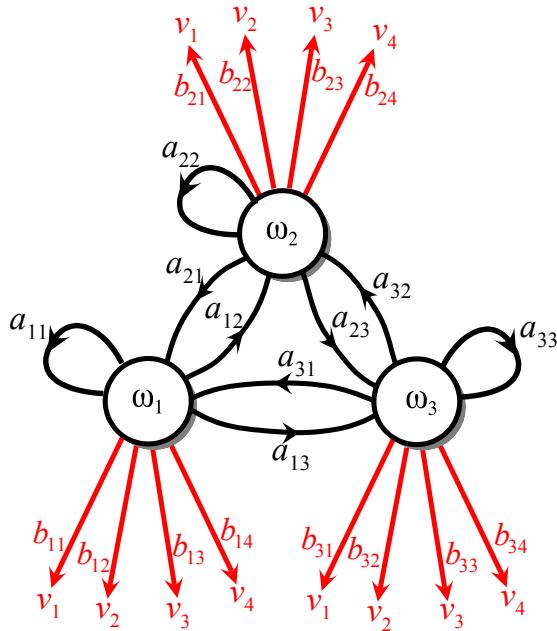


图 3-9 有四个观测量三个隐状态的隐马尔可夫模型。

隐马尔可夫模型有五个基本要素，包括：

状态量集合：  $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N\}$ ；

观测量集合：  $V^T = \{v_1, v_2, \dots, v_M\}$ ；

初始状态概率：  $\pi = P(\omega_i(1))$ ；

状态转移概率：  $P(\omega_j(t+1) | \omega_i(t)) = a_{ij}$ ；

观测概率：  $P(v_k(t) | \omega_j(t)) = b_{kj}$ 。

隐马尔可夫模型还包括三个核心问题：估值问题，解码问题和学习问题。估值问题是存在某一观测序列  $V^T$  并已知概率  $a_{ij}$  和  $b_{kj}$ ，计算产生这一观测序列的观测概率  $P(V^T)$  的过程。解码问题是已知一个HMM及其产生的一个观测序列，判断产生这一观测序列的最大概率的隐状态序列  $\omega^T$  的过程。学习问题是已知HMM的基本结构，根据现有的观测序列  $V^T$  和状态序列  $\omega^T$  训练得到  $a_{ij}$  和  $b_{kj}$  的过程。估值问题将产生观测序列的概率定义为：

$$P(V^K) = \sum_1^{r_{\max}} P(V^K | \omega_r^K) P(\omega_r^K) = \sum_1^{r_{\max}} \prod_{t=1}^K P(v(t) | \omega(t)) P(\omega(t) | \omega(t-1)) \quad (3-2)$$

此处 $r$ 表示状态量的索引。存在一个递归算法来简化  $P(V^T)$  的计算过程：

$$\alpha_i(t) = \begin{cases} 0 & t=0, i \neq \text{初始状态} \\ 1 & t=0, i = \text{初始状态} \\ \sum_j \alpha_j(t-1) a_{ij} b_{jk} & \text{其他} \end{cases} \quad (3-3)$$

这里的  $\alpha_i(t)$  表示模型在  $t$  时刻，位于  $\omega_i(t)$  状态且已经产生了观测状态序列  $V^T$  的前  $t$  个符号的概率。这个递归公式的计算过程可以在前向算法或后向算法中得到使用[127]，如图3-10 所示。

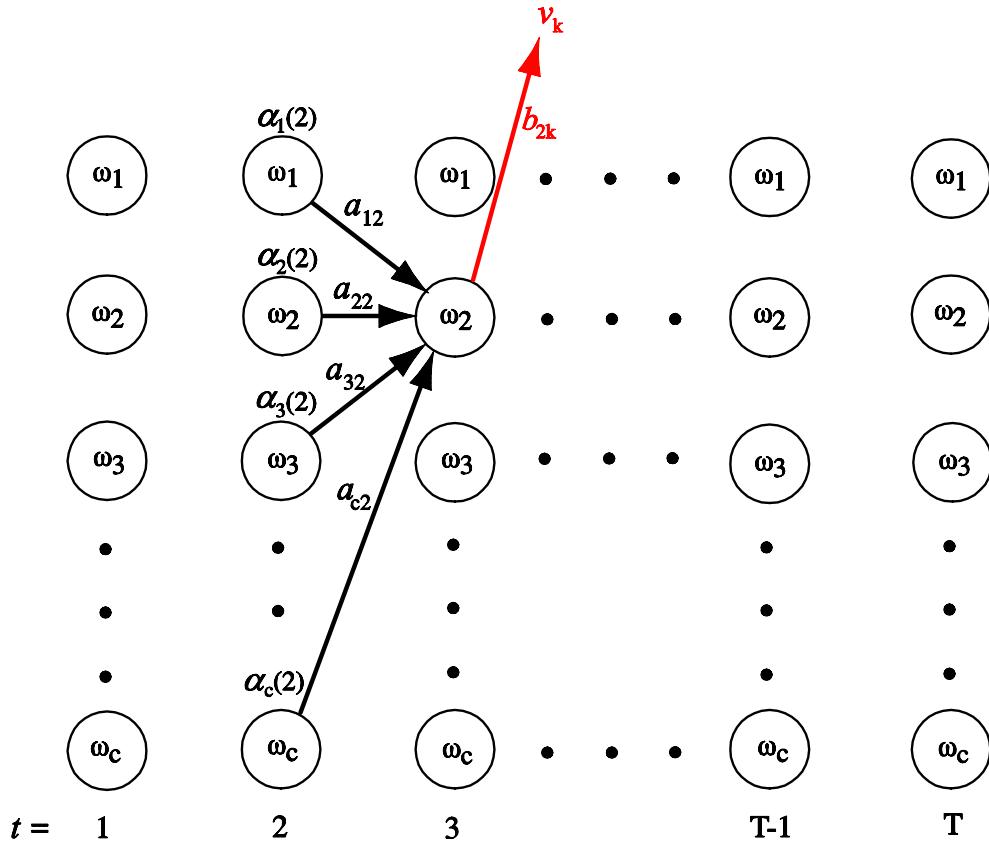


图 3-10 观测概率的计算示意图， $t=3$  时刻系统处于  $\omega_2$  状态的观测概率  $\alpha_2(3) = b_{2k} \sum_{i=1}^c \alpha_i(2) \alpha_{i2}$ 。

在解码问题中，Viterbi 方法是一种经典的解码算法，这种算法通过动态规划的方法来寻找产生最大概率的隐状态序列[128]。学习问题的目的是为了确定 HMM 的参数，通过大量的训练样本来计算状态转移概率  $a_{ij}$  和观测概率  $b_{kj}$ 。虽然训练得到的参数集合很难都是最优值，但这一方法基本上能够使人得到一组满意的答案。最经典的训练算法当属 Baum 等人提出的 Baum – Welch 算法即前向-后向算法 (forward – backward algorithm)。传统的训练方法得到的训练参数都是定值，但是在我们设计的改进算法中，模型参数都是变量，这一点与传统方式不同，具体细节将在下一小节介绍。

### 3.5 改进的 S-HMM

本小节将以图 3-7 中的边缘图像为处理目标，提出一种改进的隐马尔可夫模型实现激光线的提取。将图像上的每一列/行像素作为一个时间节点，对比上一小节中提到的马尔可夫链模型，我们将时间上的相邻节点用图像空间上的相邻列/行像素来替代。在图 3-7(c)所示的边缘图像上，分别对水平方向( $u$ )和垂直方向( $v$ )上的激光线进行提取。先将  $u$  和  $v$  方向上的相邻边缘像素点两两组合成一个“边缘点对”，这样在激光线上就会体现出一系列的边缘点对。这些边缘点对之间的距离应该是相对比较小而且位置相对集中。另外，在对应的图 3-7(a)上，激光线上各个边缘点对位置间的信息也非常相似。基于这些可观测到的信息，本文采用重心法(center of mass)计算每个边缘对之间的红色分量重心位置，求得一系列亮度峰值之后，激光线就被细化为一连串的激光线骨架信息。针对如图 3-11 所示的激光线剖面亮度分布，重心法具体计算方式如公式(3-4)所示。



图 3-11 激光线亮度分布。

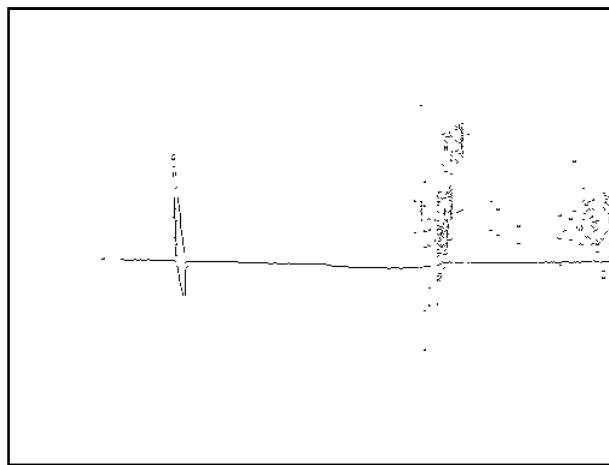


图 3-12  $v$  方向上重心提取结果。

$$M_i(w) = \frac{\sum_{j=\frac{j_{\max}^i-w}{2}}^{\frac{j_{\max}^i+w}{2}} I_{i,j} \times j}{\sum_{j=\frac{j_{\max}^i-w}{2}}^{\frac{j_{\max}^i+w}{2}} I_{i,j}}, i \in [0, n), j \in [0, m) \quad (3-4)$$

这里的  $w$  表示重心计算区域的窗口数值（单位：像素）； $I_{i,j}$  表示在图像上第  $i$  行第  $j$  列处像素的亮度值； $M_i(w)$  表示在第  $i$  行上窗口  $w$  内的亮度重心的列坐标。图 3-12 显示了在  $v$  方向上对图像做重心提取得到的重心点。在  $u$  方向上的处理过程和  $v$  方向上一样，因

此在本文余下部分的处理过程主要以提取水平激光线为例，对垂直激光线的处理除特殊情况外不再赘述。

为提取水平方向上的激光线，我们将每列像素（时间节点（步））上得到的所有重心位置作为当前时间点上模型可能会处在位置的状态集合。例如在第  $t$  列像素上存在  $R(t)$  个重心点，则每个重心点作为一个状态  $\omega_r(t)$ ， $r$  表示在第  $t$  步上的状态索引。在整幅图像  $\omega$  的状态集合表示为  $\omega = \{\omega(1), \omega(2), \dots, \omega(T)\}$ ， $T$  为图像总列数。每一列上的重心数量不可能完全一样，因此整个状态阵列  $\omega$  是一个非齐次矩阵。我们假设这些状态可以通过一个观测序列  $V = \{v(1), \dots, v(T)\}$  来观测得到。

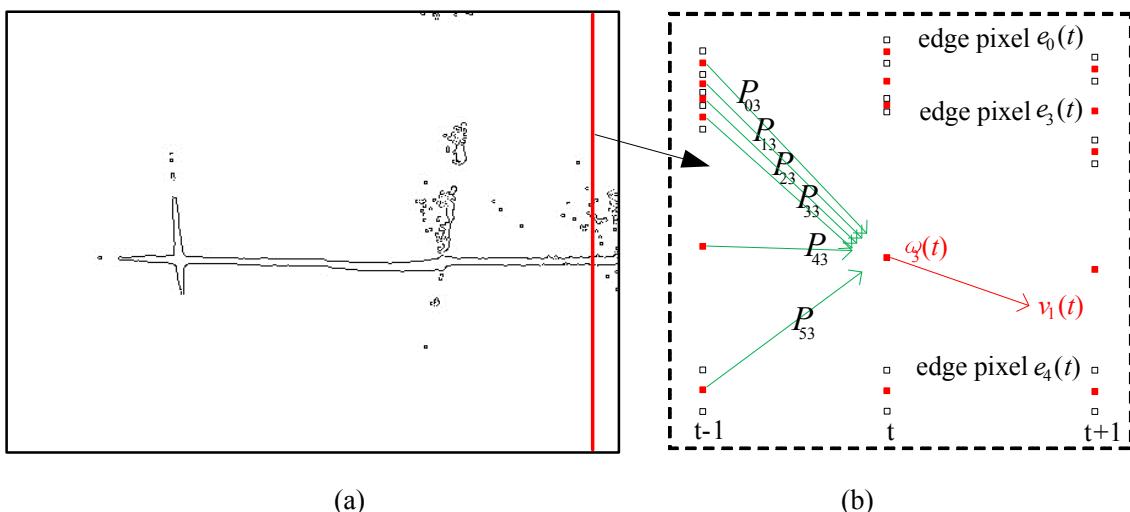


图 3-13 用于提取激光线的 S-HMM 示意图。(a)边缘图像；(b)从(a)中任取三列状态量（图中红线处）为例说明状态转换关系。□：边缘点，■：重心点（S-HMM 的状态量）。 $P_{ij}$  表示从  $t-1$  步的第  $i$  个状态到第  $t$  步上第  $j$  个状态的转移概率。

在第  $t$  步上的边缘像素点的坐标为  $[t, e_r(t)]$   $t = 1, 2, \dots, T, r = 1, 2, \dots, R(t)$ ，如图 3-13(b) 上用 □ 表示。则在边缘点对  $([t, e_r(t)], [t, e_{r+1}(t)])$  之间的重心点被定义为状态量  $\omega_r(t)$ ，在图 3-13(b) 上用 ■ 表示。这里的重心数量  $R(t)$  也就是在  $t$  步上的状态数量。将边缘点对  $([t, e_r(t)], [t, e_{r+1}(t)])$  之间的距离定于为 S-HMM 的观测量

$$v_r(t) = |e_r(t) - e_{r+1}(t)|, t = 1, 2, \dots, T, r = 1, 2, \dots, R(t) \quad (3-5)$$

如果在某一列上没有任何边缘点，这一列可以直接跳过。再对应图 3-7(a) 的  $R$  分量图，边缘对  $([t, e_r(t)], [t, e_{r+1}(t)])$  相应位置间所有像素的  $R$  分量值取平均值为  $m_r(t)$ ， $t = 1, \dots, T$ ，例如在  $([t, e_3(t)], [t, e_4(t)])$  之间的像素  $R$  分量均值等于  $m_3(t)$ ，这个均值量将用于计算状态转移概率。

在 S-HMM 模型中，给定了一个观测序列  $V$ ，模型方程的目的是选择一组状态序列  $\omega_r(t) = \{\omega_r(1), \dots, \omega_r(T)\}$ ， $r = 1, \dots, R(T)$ ， $t = 1, \dots, T$  作为激光线延伸的一个最优路径，其产生观测序列  $V$  的概率定义为：

$$P(V) = \prod_{t=1}^T \sum_{r=1}^{R(t)} P(v_r(t) | \omega_r(t)) P(\omega_r(t) | \omega_r(t-1)) \quad (3-6)$$

同上面定义一样，这里的  $R(t)$  表示在第  $t$  步上的隐状态数量， $T$  表示序列长度（等于图像宽度）。

根据上述定义，一个 S-HMM 将被构建起来用于提取水平方向上的激光线。因为 HMM 的收敛性非常好，模型的初始状态概率的赋值对系统影响不大，根据实验观察，系统可以在两到三步之后就很快收敛。为了尽量不忽略初始步上的每一状态，在 S-HMM 中，初始概率分布被定义为等概率分布，即

$$P(\omega(t=1)) = \frac{1}{R(1)} \quad (3-7)$$

在本文面对的实验环境中，S-HMM 的观测量只有两种情况：位于激光线上和不在激光线上。因此我们将观测概率设计成一个贝努利分布（0-1 分布）形式。观测概率方程：

$$P(v(t) | \omega(t)) = \begin{cases} 1.0, & \text{if } (v_r(t) \leq H_e) \\ 0.0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3-8)$$

这里的  $H_e$  是经验性地定义的一个上限宽度阈值，例如在  $640 \times 480$  像素的图像中， $H_e$  可以被设定为 10 个像素，这个值大概是实际宽度的两倍，因为在世界坐标系下激光线的宽度一般为 2mm 左右，反映在图像坐标系下是 5~6 个像素，因此  $H_e$  的设置为系统保留了足够的裕量。当观测量大于  $H_e$  时转移概率为 0。

在机器人运动过程中，摄像机到焊缝的距离是不变的，机器人和 CSL 传感器自身的抖动也非常小，因此激光线在图像上反映的尺度几乎没有什么变化。但是在高光照、噪声的干扰下，图像的信噪比会降低，使激光线在图像中看起来非常“淡”，这对预处理过程中最小熵分割影响很大，容易导致激光线被分割的过“细”。所以为了尽量不漏掉任何可能的状态量，在公式(3-8)中模型并没有设置一个下限阈值，尽管在理想环境下，增加一个下限阈值可以在一定程度上提高系统的运算速度。

S-HMM 基于状态之间的空间位置信息和颜色信息计算相邻步状态之间的转移概率，如公式(3-9)：

$$P(\omega_j(t) | \omega_i(t-1)) = \exp \left\{ - (w_1, w_2) \cdot \left( \frac{d_{ij}^2}{\sigma_d^2}, \frac{f_{ij}^2}{\sigma_f^2} \right) \right\}, \quad i, j \in [1, R(t)] \quad (3-9)$$

此处  $d_{ij}$  是两个相邻步（边缘图像上的两个相邻列像素）状态间的是欧式距离； $f_{ij}$  是两个相邻步（边缘图像上的两个相邻列像素）状态间的  $R$  分量均值之差；即  $w_1$  和  $w_2$  是一对权值，用于权衡状态间空间距离和颜色差的重要性，并且有  $w_1 + w_2 = 1.0$ 。

$d_{ij} = \sqrt{(c_i(t-1) - c_j(t))^2 + 1}$  是图像上从第  $t-1$  步第  $i$  个重心点到第  $t$  步第  $j$  个重心点的距离， $c_i(t-1)$  和  $c_j(t)$  分别表示两个重心点的垂直坐标（图像上的行索引）。 $f_{ij} = |m_i(t-1) - m_j(t)|$ ，

其中  $m$  是前文中定义的像素  $R$  分量均值,  $f_{ij}$  的物理意义为第  $t-1$  步上第  $i$  个状态量和第  $t$  步上第  $j$  个状态量的环境  $R$  分量均值  $m_j(t-1)$  和  $m_i(t)$  之差。距离值  $d_{ij}$  的方差记为  $\sigma_d^2$ 。

$$\sigma_d^2 = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i,j=1}^{R(t)} [d_{ij}(t) - \bar{d}]^2}{\prod_{t=0}^T R(t)}, i, j \in [1, \dots, R(t)] \quad (3-10)$$

这里的  $\bar{d}$  表示  $d_{ij}$  的均值; 所有的  $R$  分量均值差值  $f_{ij}$  的方差记为  $\sigma_f^2$ 。

$$\sigma_f^2 = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i,j=1}^{R(t)} [f_{ij}(t) - \bar{f}]^2}{\prod_{t=1}^T R(t)}, i, j \in [1, \dots, R(t)] \quad (3-11)$$

这里的  $\bar{f}$  表示  $f_{ij}$  的均值。

$w_1$  和  $w_2$  这一对权值, 可以通过极大似然估计法或最大后验概率估计法来训练数据得到。在实验中我们发现  $w_1, w_2$  和图像  $R$  分量均值之间的关系非常接近于双曲正切函数, 如图 3-14 所示。这种定义在计算上有一定优势, 较之前两种方法大大降低了系统的复杂度。因此  $w_1$  和  $w_2$  定义为:

$$\begin{cases} w_1 = \frac{1 + \tanh(\bar{R} - 128)}{2} \\ w_2 = \frac{1 - \tanh(\bar{R} - 128)}{2} \end{cases} \quad (3-12)$$

这里的  $\bar{R}$  是整幅图像的  $R$  分量均值。

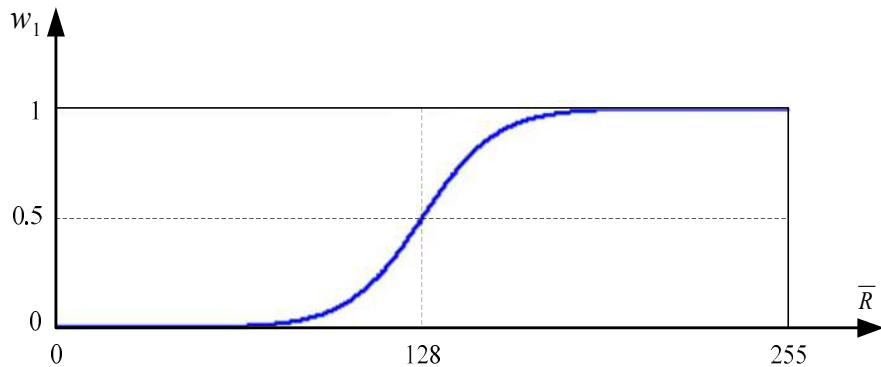


图 3-14 权值  $w_1$  和  $R$  分量均值之间的关系。

根据 HMM 的性质, 将每一步的转移概率都归一化, 即

$$P(\omega_j(t+1)|\omega_i(t)) = \frac{P(\omega_j(t+1)|\omega_i(t))}{\sum_j P(\omega_j(t+1)|\omega_i(t))} \quad (3-13)$$

基于上述定义, 激光线的提取问题可以通过最大化公式(3-6)求解, Viterbi 解码算法被

用来解决这个被构建出来的动态规划问题[128]。在 Viterbi 解码之后，一系列滤波后的激光线重心点被提取出来，构成一幅激光线骨架图像，如图 28 所示。被 S-HMM 处理之后的激光线非常平滑，噪声点被大量滤除，得到了一条比较清晰的激光线骨架。

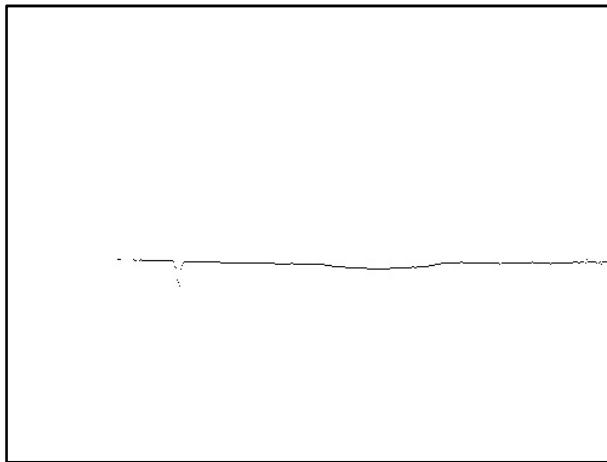


图 3-15 S-HMM 提取到的激光线骨架。

上述过程是采用 S-HMM 提取水平方向上的激光线骨架，垂直的激光线骨架提取过程也可以用同样的方法实现。事实上，两条激光线是互为噪声的，在提取水平激光线时，垂直方向上的激光线是一个非常大的噪声。在图 3-15 中可以看到，两条激光线相交处的激光线提取结果不理想，产生了很多跳跃的点，这是由于在这个小区域内垂直激光线干扰了水平激光线的重心计算过程，使计算得到的重心位置偏离了真实的激光线骨架位置。有时如果一块较大的噪声恰巧位于激光线上也容易导致类似的结果。在后续处理中，我们采用一个  $3 \times 1$  的中值滤波器模板将这些跳跃的孤立点滤掉，然后根据激光线的生长方向采用形态学处理中的闭操作方法弥补激光线上的豁口[129]，得到如图 3-16 所示的一个更加平滑的激光线。

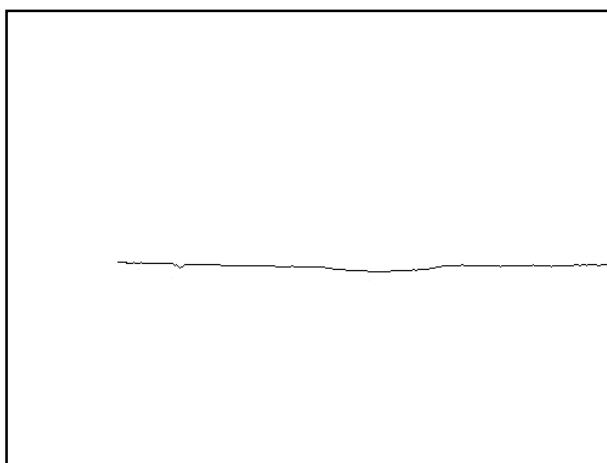


图 3-16 中值滤波和形态学处理后的激光线骨架。

### 3.6 实验结果与误差分析

应用本章提出的 S-HMM 算法，在 CSL 传感器系统采集的 1000 帧图像（ $640 \times 480$  像素）上提取激光线，并统计提取误差。再人工分割这 1000 帧图像上的激光线作为标准值 (ground-truth)。按照文献[80]和[84]描述的激光线分割过程，将其算法实现，最后定量对比 S-HMM 的激光线提取方法和文献[80]、[84]中提出的四种激光线分割方法。

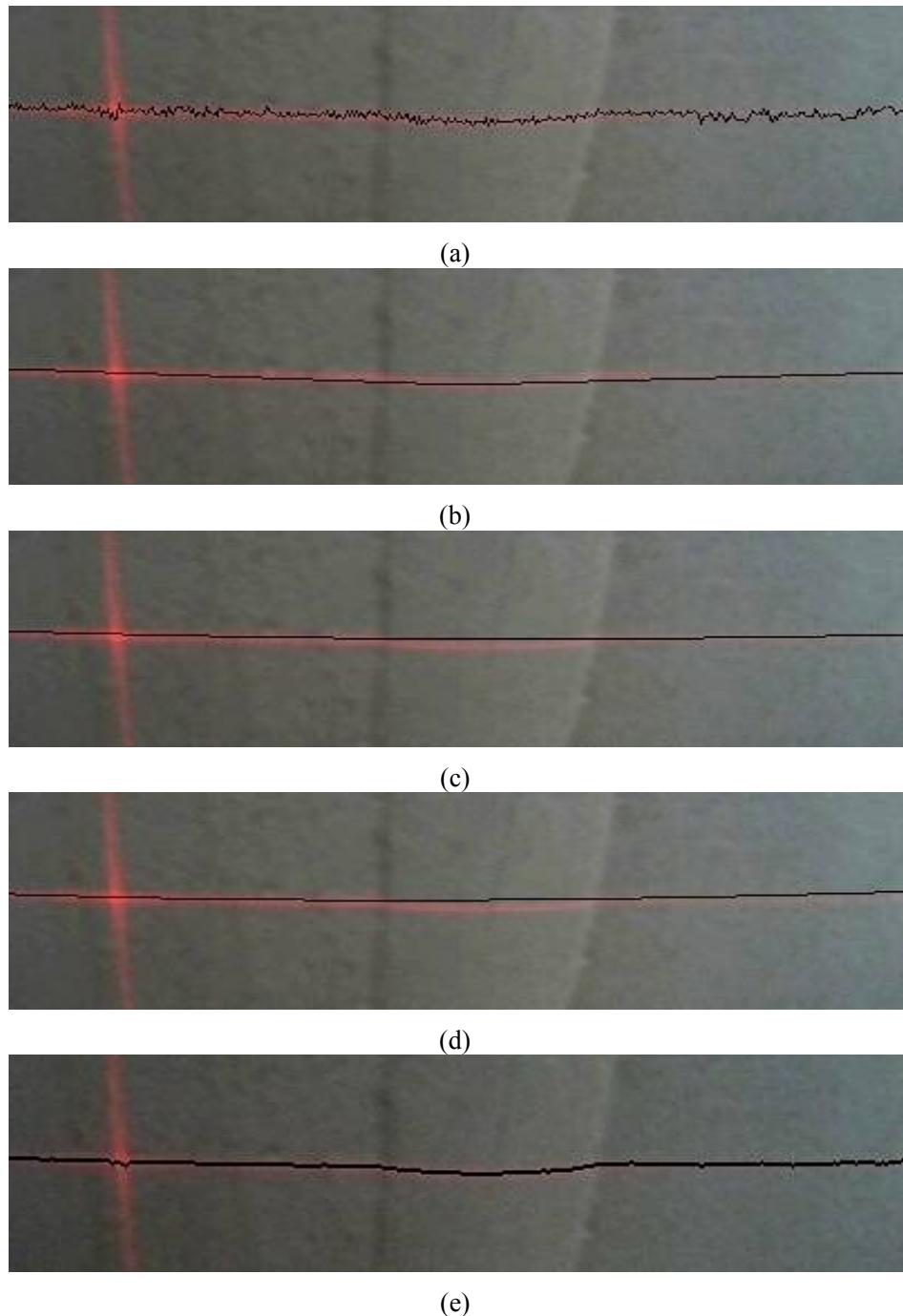


图 3-17 五种方法的激光线提取结果对比。(a).Strobl 方法的处理结果 [80], (b).线性分割处理结果 [84], (c).二次方分割处理结果[84], (d).Akima 插值处理结果[84], (e).S-HMM 的处理结果。

在文献[80]中, K. Strobl 提出的激光线分割方法是在 Sobel 边缘检测算子基础上实现的。在文献[84]中, 作者 R. Usamentiaga 等人在提取激光线上进行 split-remove-fill 过程之后又通过线性分割(linear segments)、二次方分割(quadratic segments)和 Akima 样条插值(Akima splines)分别对提取到的激光线进行拟合。图 3-17 显示了 S-HMM 方法和上述四种方法的水平激光线的提取结果。从图中可以看到 S-HMM 的处理结果对激光线和焊缝形状的吻合度非常高, 非常好的描述出了在焊缝位置处激光线的小凸起。拟合过程则很容易将这个焊缝位置的激光线凸起当成噪声滤掉, 图 3-17(c)和(d)就出现了这种情况。

为了对比几种激光线提取方法的分割精度, 实验中对比了这五种方法的激光线提取误差。评价误差的定义方法是统计每种方法的激光线分割结果与标准值之间的平均误差。在图 3-18 中可以看到 S-HMM 的处理结果有很高的精度, 对比次优的实验结果(线性分割方法), S-HMM 将统计误差从 1.8 个像素降低到 0.94 个像素。

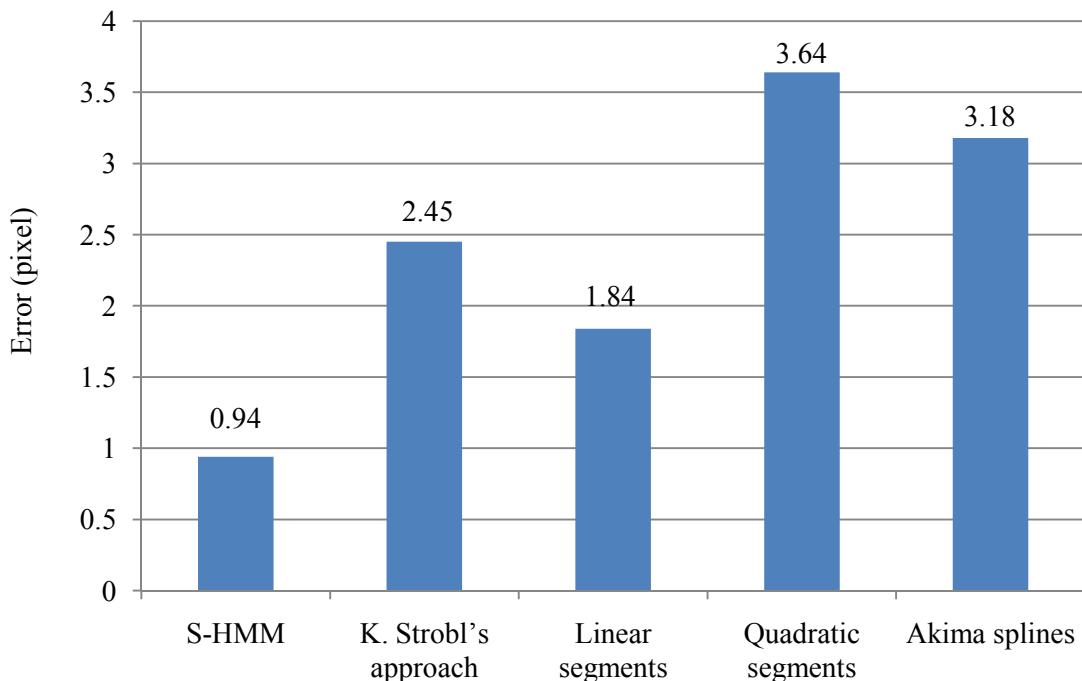


图 3-18 五种方法的激光线分割统计误差。

上述五种算法都是用 C++ 语言实现, 在 VC6.0 环境编译, 处理平台配置是 Intel Core i3-2130CPU, 主频 3.4GHz 的 PC 机。在此基础上对比五种算法处理 1000 帧图像的平均执行时间, 其结果如图 3-19 所示。Strobl 方法凭借查表法(table up)的快速特点很大程度上优于其他方法。S-HMM 的平均执行时间是 20ms, 但是这个速度已经足够保证系统的实时性, 大大快于  $25 \text{frames}$  的常规视频采集速度。这也意味着算法为下一步移植到嵌入式平台上做了非常好的实时性工作。

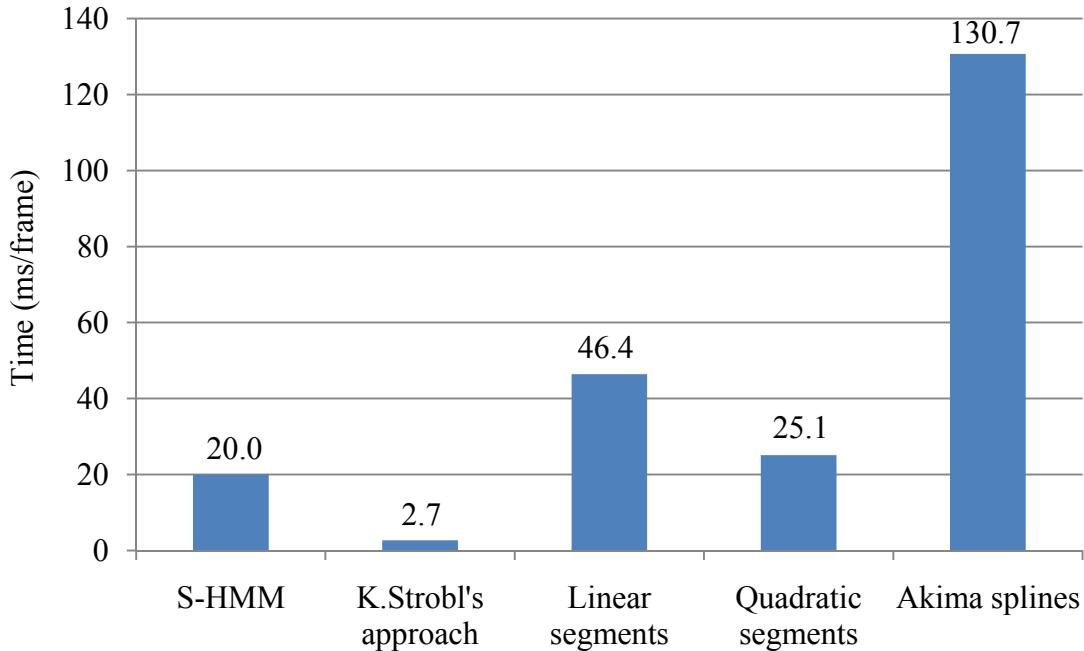


图 3-19 五种方法的平均执行时间。

图 3-20 和图 3-21 分别显示了在爬壁机器人在检测直焊缝和交叉焊缝时，CSL 传感器采集的焊缝图像和 S-HMM 提取到的激光线。图 3-20(a)是从摄像机采集的一段直焊缝视频中随机抽取的一帧图像作为示例，图 3-20(b)是将机器人在这一段焊缝（大约 1000mm）行进过程中扫描到的焊缝表面信息做了 3D 信息重构，实验结果显示重构信息与真实的焊缝表面的重合度非常好。图 3-21(a)是机器人检测到焊缝交叉区域的一段测量结果，图 3-21(b)显示了在大约  $0.5\text{m}^2$  范围内机器人对两条焊缝的检测工作，这个 3D 信息可以保证机器人在焊缝交叉处准确地转弯并继续检测垂直方向的另一条焊缝。

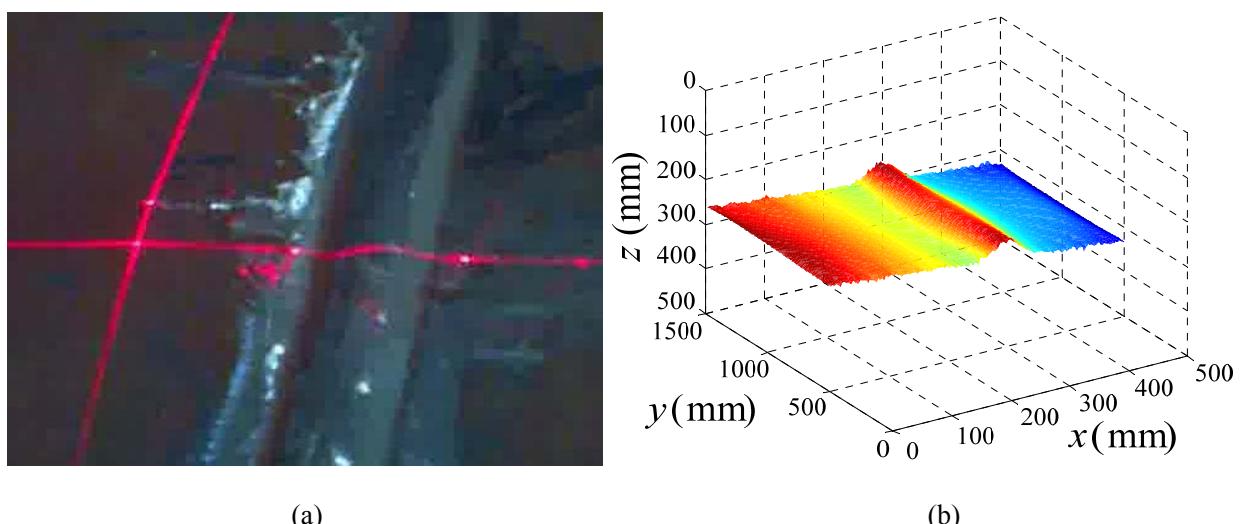


图 3-20 直焊缝区域的测量结果。(a).直焊缝及激光线检测图像；(b).直焊缝的 3D 信息重构结果。

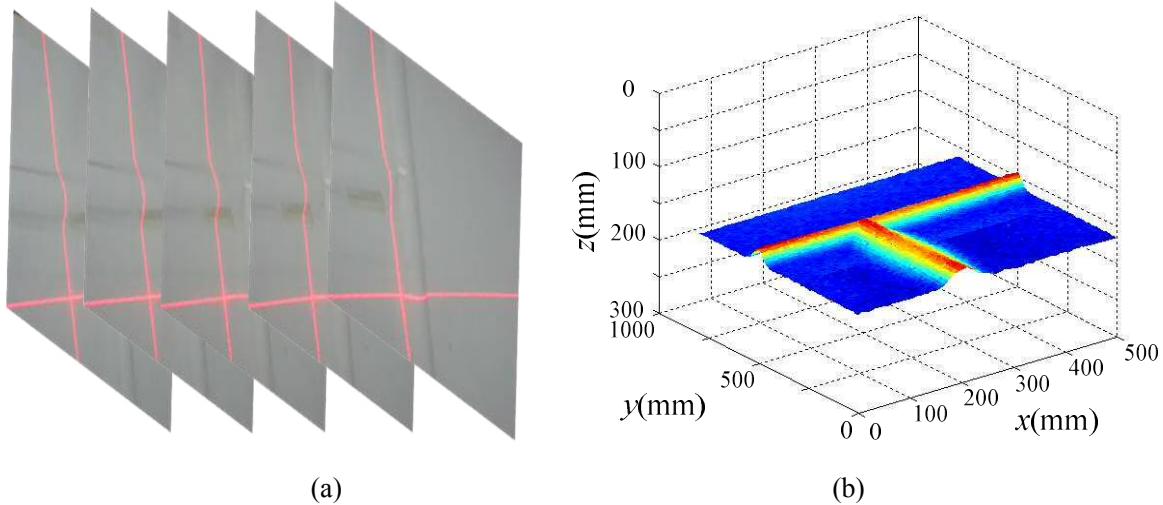


图 3-21 焊缝交叉区域的测量结果。(a).一系列交叉焊缝区域的激光线检测图像；(b).交叉焊缝的 3D 信息重构结果。

### 3.7 小结

本章在引言部分综述了激光线提取的流行算法及其结果，对比了各自的异同点并分析相应存在的问题，以及本文涉及的焊缝环境噪声对于分割结果的影响。本章首先从激光的光谱特性分析入手，有区别地对待投影激光线的能量（亮度）分布和体现在 CCD 传感器上的亮度分布。考虑到 CCD 成像单元的过饱和失真情况，将激光线成像后的亮度分布描述为一个削顶的高斯函数模型。

在图像预处理环节分别对照结构光图像在 R,G,B 三个颜色空间的亮度分布，与激光线颜色一致的 R 分量空间的信噪比高于 G,B 空间，因而选择 R 空间作为图像处理的通道。在 R 分量图像上做最小熵阈值分割和 Canny 边缘检测，在 R 分量图上对应边缘范围内的像素亮度，用重心法实现最大亮度峰值点的亚像素定位，将各个重心作为状态量输入到 HMM，最后用 Viterbi 算法解码 HMM 得到激光线骨架。对得到的骨架再做滤波和形态学处理，最终得到激光线的精确分割结果。

实验显示 S-HMM 方法提取的激光线对比其他文献中提到的 4 种方法在速度、精度和鲁棒性上都具有明显优势，本方法作为激光线的分割手段亦可拓展到 3D 信息重构领域。



## 第四章 基于时域隐马尔可夫模型的焊缝跟踪

### 4.1 引言

在传统的焊缝跟踪系统中，研究者更多的关注于单帧上的激光线分割和特征点提取，但很少有学者致力于建立帧间的特征关联。在文献[11]中，Y. Li等人在连续帧间寻找亮度最小值以消除焊接过程中火花和弧光的噪声；在文献[15]中，D. Xu等人通过拟合前N帧的特征点位置来预测焊缝的延伸方向；在文献[85]中，R. Usamentiaga等人在结构光测量钢板表面平面度过程中利用Monte Carlo算法滤除噪声并建立帧间信息的关联。这些现有的研究工作为本文提供了建立帧间时序关联的实践经验。焊缝在视频序列上是一个连续的时序信号，体现在视频帧的激光线上则是一段段形状相似、区域面积接近、颜色相似的小弧线；通过对形状、颜色、面积等观测信息来判断焊缝位置，从而建立起一个时间序列上的隐马尔可夫模型(Temporal-Hidden Markov Model，简称T-HMM)来进一步完成焊缝跟踪工作。本章首先在激光线上定位一组若干个焊缝相似区域作为候选焊缝位置，作为一个粗分类结果；将粗分类获得的焊缝候选位置窗口当作状态量输入到T-HMM系统进行精分类，得到精确的焊缝跟踪结果；最后针对个别帧上的产生的较大的跟踪误差采用一种插值策略来修正跟踪结果。在实验中对比几种跟踪和测量方法的精度，证明本文所采用的算法在速度、精度、鲁棒性和操作难度等方面都有明显优势。其T-HMM系统的处理过程如图4-1所示。

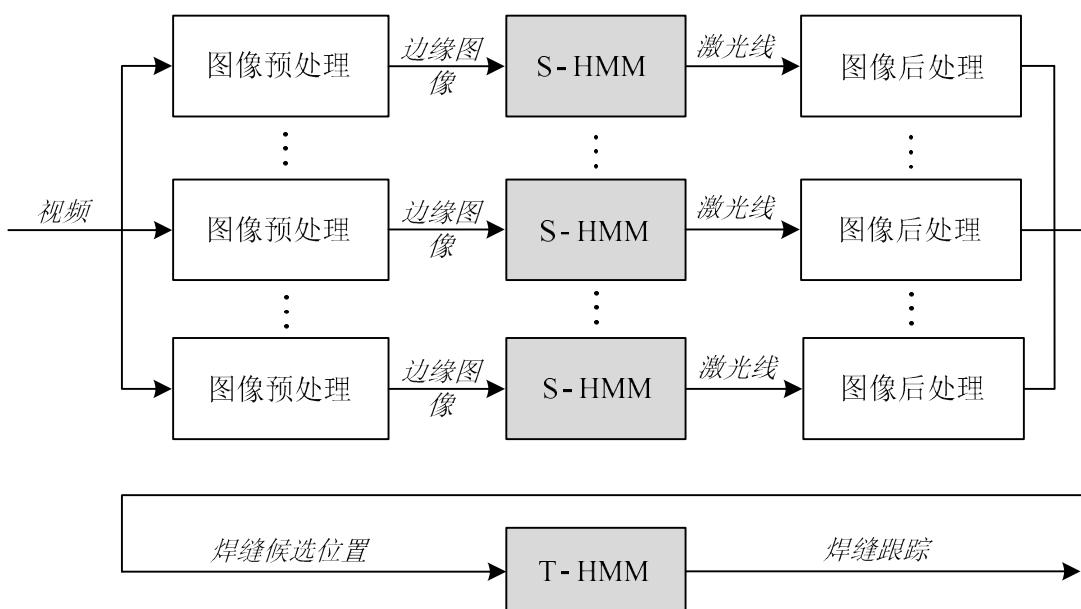


图 4-1 T-HMM 焊缝跟踪过程信号处理流程图。

## 4.2 焊缝候选位置选择

在提取的激光线上，焊缝位置可以通过检测激光线上凸起的小弧段来估计。我们首先检测激光线的直线部分，对激光线做 Hough 变换[130][131]，通过调节 Hough 参数得到若干个直线段，将这些直线段收尾相连即可得到一条基线。如图 4-2(a)所示，红线代表得到的基线。

然后，定义一个测度函数在激光线上定位焊缝的候选位置，记为

$$M(w) = \frac{1}{|w| \cdot \sigma^2} \left( s(w) \cdot \sum_{t \in w} (P(\omega(t) | \omega(t-1)))^{-1} \right) \quad (4-1)$$

其中  $w$  表示当前的候选窗口，其窗口宽度为  $|w|$ ，窗口的定义如图 4-2(b)中蓝色方框所示； $\sigma^2$  表示窗口内凸起的弧线上所有的点到基线之间的距离值的方差； $s(w)$  表示弧线与基线之间封闭区域的面积（面积值等于该区域内的像素数量）； $P(\omega(t) | \omega(t-1))$  的定义与公式 (3-9)一样，取其倒数表示状态之间的转移代价。

理论上， $M(w)$  的值越大， $w$  所在窗口的形状与焊缝位置越相似，因为理想焊缝为一小段光滑的弧线，没有跳跃的点，也不是直线，在这个窗口内方差  $\sigma^2$  比较小，包含的面积  $s(w)$  很大，状态间的转移代价  $P(\omega(t) | \omega(t-1))$  最大，窗口的范围  $|w|$  值相对比较固定。执行这个滑动窗口检测任务时，再为系统定义两个约束条件来剔除检测区域的噪声：①激光线上凸起弧线与基线之间的区域为封闭区域；②面积值  $s$  必须大于一个先验的阈值，在实验中采用  $640 \times 480$  像素的图像情况下设定此阈值为 200 像素。

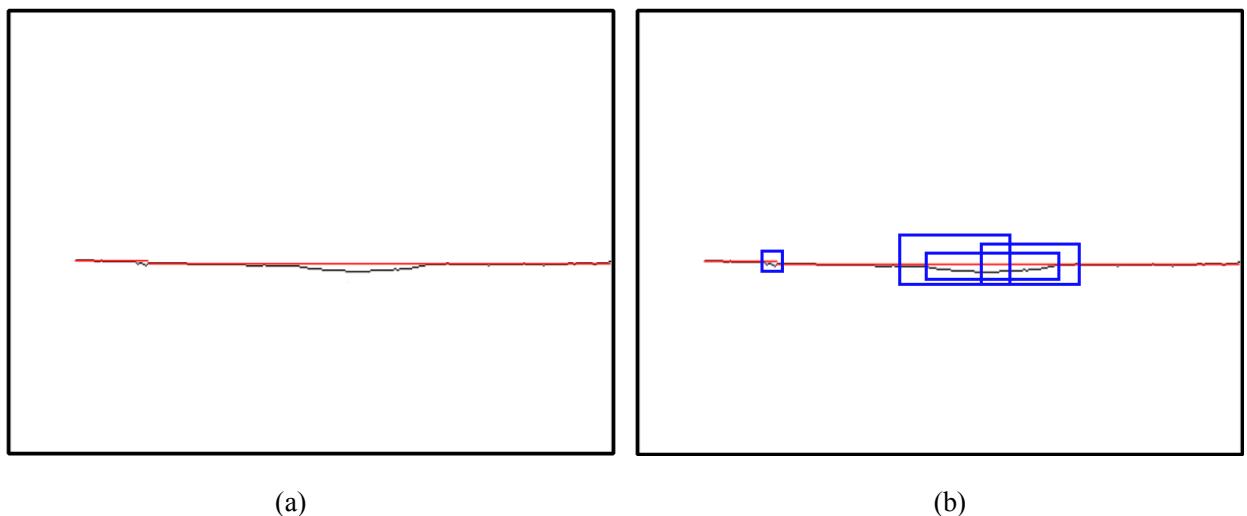


图 4-2 设置焊缝候选窗口。(a).基线获取结果（红色的 Hough 线）；(b).用于检索焊缝候选位置的滑动窗口示意图。

### 4.3 基于 T-HMM 的焊缝跟踪

有时焊缝上可能出现一些类似咬边、夹渣、焊瘤等焊接瑕疵导致焊缝形状出现不规则的情况，这种情况下单独使用公式(4-1)的最大值来检测焊缝位置很可能得不到满意效果，也就是说这个公式的鲁棒性是不高的。因此，应该把这些检索窗口内的位置、面积、颜色和宽度等信息综合利用起来，寻找一个与焊缝处最接近的窗口。我们进一步引入窗口的尺度因素，也就是说用从小到大不同尺度的窗口循环地在激光线上扫描，各个尺度上窗口的最大  $M(w)$  值作为焊缝的候选位置，并作为当前时刻的状态量输入到 T-HMM 中用于实现焊缝跟踪，如图 4-3(a)所示。图 4-3(b)表示从图(a)视频中抽取的 6 帧图片的焊缝跟踪结果。

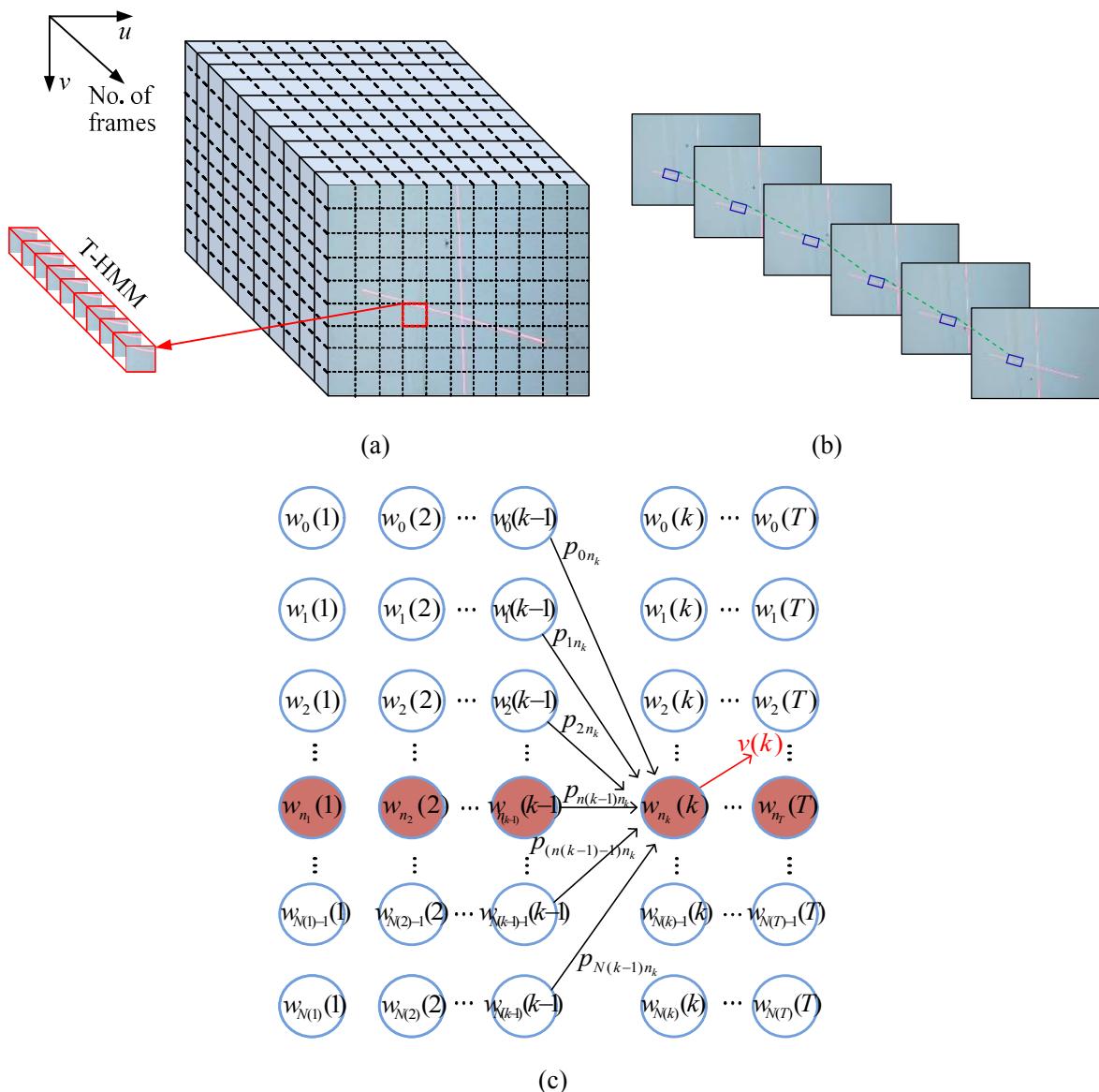


图 4-3 用于焊缝跟踪的 T-HMM 示意图。(a).应用第三章的处理结果构建 T-HMM 示意图；(b).焊缝跟踪示意图；(c).T-HMM 状态量与观测量示意图，每个状态表示一个焊缝位置的候选窗口，有颜色填充效果的状态量表示焊缝位置。

在  $T$  个连续的视频帧中，假设焊缝位置为状态  $\{w_n(1), \dots, w_n(T)\}$ ，这里的  $n$  表示在每一时刻（步）上的状态量索引，对应于在第  $t$  帧上的第  $n$  个候选窗口； $T$  表示时间序列的长度（即帧数）。在第  $t$  步（第  $t$  帧图像）上共有  $N(t)$  个状态量  $\{w_1(t), \dots, w_{N(t)}(t)\}$ ，对应公式 4-1 上的  $N(t)$  个焊缝候选位置。显然阵列  $w_n(t)$  也是非其次的，可以对个别步上的状态量数不足的进行补零，使之成为一个齐次矩阵，即对一些步上补上若干 0 向量，使各步向量等长： $N_{max} = \max(N(t)), t=1, \dots, T$ 。这个齐次的 T-HMM 的观测序列的观测概率形式描述为：

$$P(V^T) = \sum_{n=1}^{N_{max}} \prod_{t=1}^T P(v_n(t)|w_n(t)) P(w_n(t)|w_n(t-1)). \quad (4-2)$$

与 S-HMM 类似，状态的初始概率也采用均匀分布形式，记为

$$P(w(t=1)) = \frac{1}{N(1)} \quad (4-3)$$

与公式(3-8)一样，在 T-HMM 阶段我们也定义两个观测状态：窗口属于焊缝位置和窗口不属于焊缝位置。因此观测概率也可以用一个贝努利分布（0-1 分布）来表示。对假设属于焊缝位置的观测量赋予最大的观测概率 1.0，这样很便于算法实现并降低了系统的复杂度。

设  $\delta_{w_n}(t)$  表示在第  $t$  步上第  $n$  个候选窗口  $w_n(t)$  的左侧第一个点坐标， $|w_{t-1}|$  表示该候选窗口宽度，假设  $\Delta_l(t-1)$  和  $\Delta_r(t-1)$  分别表示在第  $t-1$  步上跟踪结果窗口的左侧和右侧的端点坐标。那么模型的观测概率被定义为：

$$P(v(t)|w(t)) = \begin{cases} 1.0, & \text{if } \left( (H_{min} < |w_n(t)| < H_{max}) \cap \left( \left( \Delta_l(t-1) - \frac{|w_{t-1}|}{2} \right) < \delta_{w_n}(t) < \left( \Delta_r(t-1) + \frac{|w_{t-1}|}{2} \right) \right) \right) \\ 0.0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4-4)$$

其中  $H_{min}$  和  $H_{max}$  是  $w_n(t)$  的两个经验阈值，用来约束候选窗口的宽度。如果候选窗口的宽度不符合阈值范围或位置不符合位置范围，则该窗口不能被分类为一个焊缝位置的状态，即  $P(v(t)|w(t)) = 0.0$ 。如果在某一步上所有的观测概率都为 0，表示在这一帧上没够跟踪到焊缝，针对这种情况，在下一节中将介绍两种补偿手段。

模型中任意状态  $w_i(t-1)$  和状态  $w_j(t)$  之间的转移概率被定义为

$$P(w_j(t)|w_i(t-1)) = \exp \left\{ -\frac{1}{\mu \cdot s(t)} \left( \frac{d_l + d_r}{2} \right) (|s(t) - s(t-1)|) \right\} \quad (4-5)$$

其中  $s(t)$  表示第  $t$  步上第  $j$  个窗口内凸起的激光线与基线之间的封闭区域面积（见公式 4-1 定义）； $\mu$  是一个常参数，用于反映帧间转移的重要性；考虑到机器人的移动速度和方向，在跟踪垂直激光线上的焊缝和水平激光线上焊缝的过程中，要对二者的处理有所区分。在水平激光线上( $u$  方向上)， $(x_l, y_l)$  和  $(x_r, y_r)$  分别表示被跟踪窗口左右端点的坐标， $d_l$  和  $d_r$

表示相邻两帧（第  $t-1$  步和第  $t$  步）间的左右端点投影到同一 2D 平面上的欧式距离，表达式为

$$d_l = \sqrt{(x_l(t) - x_l(t-1))^2 + (y_l(t) - y_l(t-1))^2} \quad (4-6)$$

$$d_r = \sqrt{(x_r(t) - x_r(t-1))^2 + (y_r(t) - y_r(t-1))^2} \quad (4-7)$$

在垂直激光线上( $v$  方向上)定义转移概率则要考虑机器人的运动问题。相邻帧间垂直窗口的差异表现为：

$$d_{top} = \sqrt{\left(x_{top}(t) - \left(x_{top}(t-1) + \int_0^\tau du\right)\right)^2 + \left(y_{top}(t) - \left(y_{top}(t-1) + \int_0^\tau dv\right)\right)^2} \quad (4-8)$$

$$d_{btm} = \sqrt{\left(x_{btm}(t) - \left(x_{btm}(t-1) + \int_0^\tau du\right)\right)^2 + \left(y_{btm}(t) - \left(y_{btm}(t-1) + \int_0^\tau dv\right)\right)^2} \quad (4-9)$$

其中  $(x_{top}, y_{top})$  和  $(x_{btm}, y_{btm})$  分别表示窗口的上下两个端点；  $du$  和  $dv$  表示在图像空间上机器人在  $u$  和  $v$  方向上的速度；  $\tau$  表示相邻帧的间隔时间。观测概率和状态转移概率也相应的有所调整，记为：

$$P(v(t) | w(t)) = \begin{cases} 1.0, & \text{if } \left( H_{min} < |w_n(t)| < H_{max} \right) \cap \left( \left( \Delta_{top}(t-1) - \frac{|w_{t-1}|}{2} \right) < \left( \delta_{w_n}(t) + \int_0^\tau dv \right) < \left( \Delta_{btm}(t-1) + \frac{|w_{t-1}|}{2} \right) \right) \\ 0.0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4-10)$$

$$P(w_j(t) | w_i(t-1)) = \exp \left\{ -\frac{1}{\mu \cdot s(t)} \left( \frac{d_{top} + d_{btm}}{2} \right) (|s(t) - s(t-1)|) \right\} \quad (4-11)$$

其中  $\Delta_{top}(t-1)$  和  $\Delta_{btm}(t-1)$  分别表示在第  $t-1$  步上跟踪结果窗口的上沿和下沿的端点坐标。

归一化转移概率：

$$P(w_j(t+1) | w_i(t)) = \frac{P(w_j(t+1) | w_i(t))}{\sum_j P(w_j(t+1) | w_i(t))} \quad (4-12)$$

根据上述公式(4-1)~(4-12)，焊缝跟踪问题可以通过最大化公式(4-2)求解，这也表述为一个动态规划问题并可以利用 Viterbi 解码算法来求解最优解。在 Viterbi 解码之后，焊缝位置在连续的视频帧中被定位，即实现焊缝跟踪。利用第二章介绍的坐标系转换方法，可以计算跟踪焊缝的 3D 空间信息，这一系列测量值可以用于机器人的位置和姿态控制。

#### 4.4 焊缝跟踪、测量的实验结果与分析

为了评估 STC-HMMs 系统的性能，选取焊缝窗口的两个端点作为特征点，对比一系列位置误差来分析跟踪精度。如图 4-4(a)所示，端点 A 和端点 B 对应于激光线与焊趾的两

个交点，对照跟踪点和基准点（手工标定的 ground-truth）之间的欧式距离，在两个交点上分别评测跟踪性能。

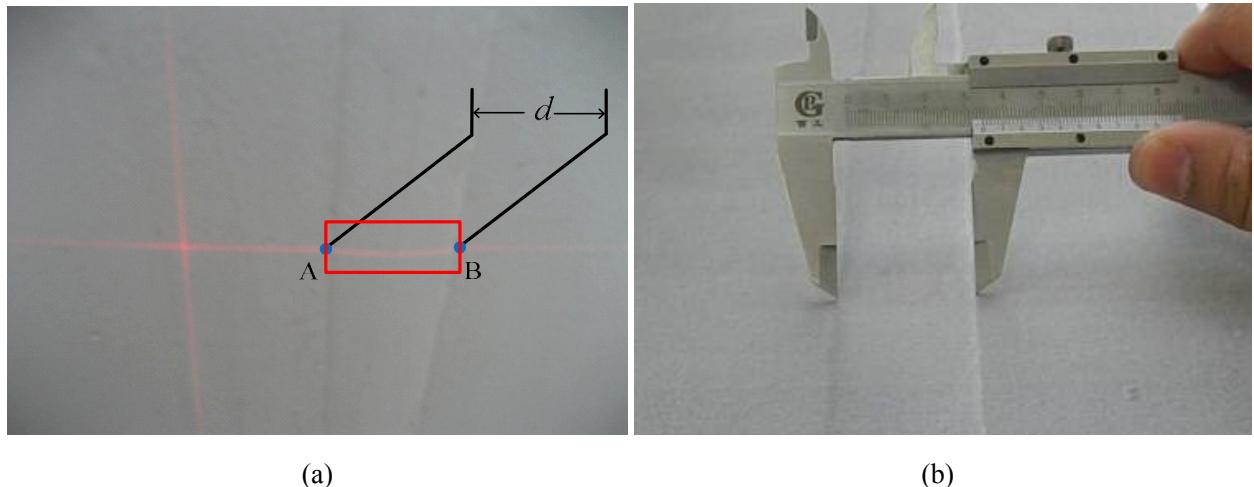
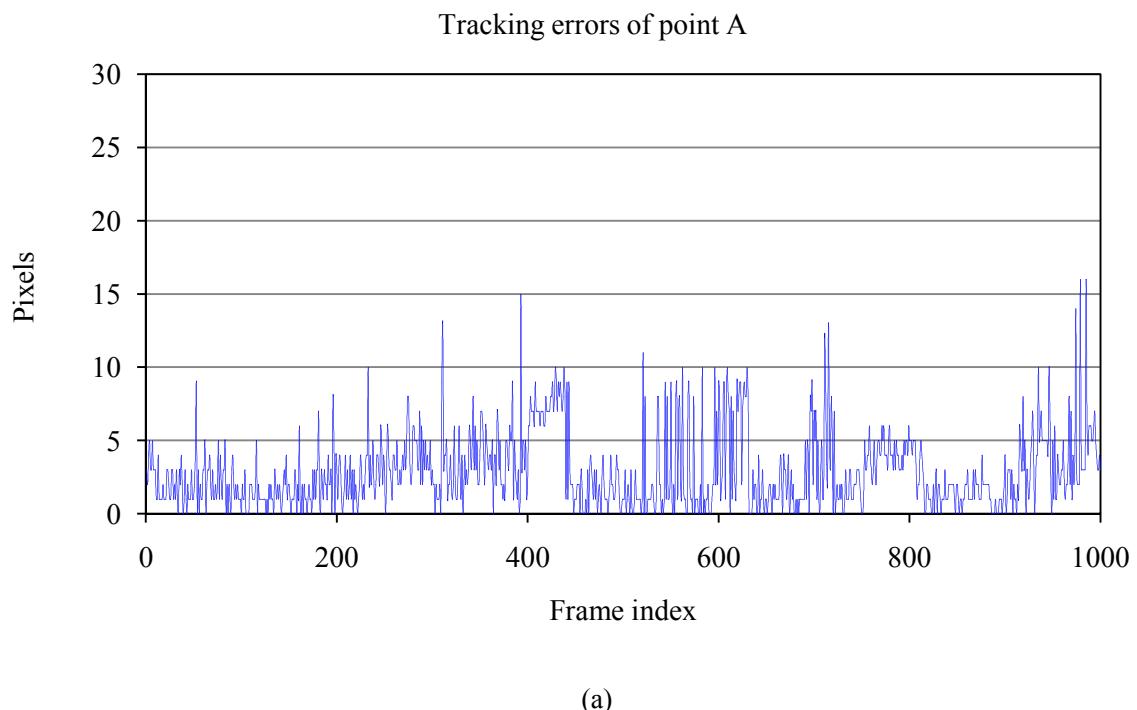


图 4-4 焊缝跟踪与测量结果。(a).焊缝跟踪位置, 特征点 A、B 和测量得到的焊缝宽度  $d$ ; (b).游标卡尺测量焊缝宽度  $d'$ 。

在跟踪焊缝的过程中, 各种随机噪声, 如光照变化、表面污染、焊接缺陷等情况都可能引入跟踪误差, 但 STC-HMMs 都可以快速的实现误差收敛。图 4-5 表示在 1000 帧内, 特征点 A、B 与标准值之间的绝对误差即焊缝跟踪误差。特征点的跟踪结果大多数都随机地出现在标准点附近的一个小邻域里, 从图 4-5 中可见, A 和 B 的最大测量误差分别为 16.5 个像素(在世界坐标系下约 5.5mm) 和 19 个像素(在世界坐标系下约 6.5mm)。这个误差对机器人导航中影响非常小。



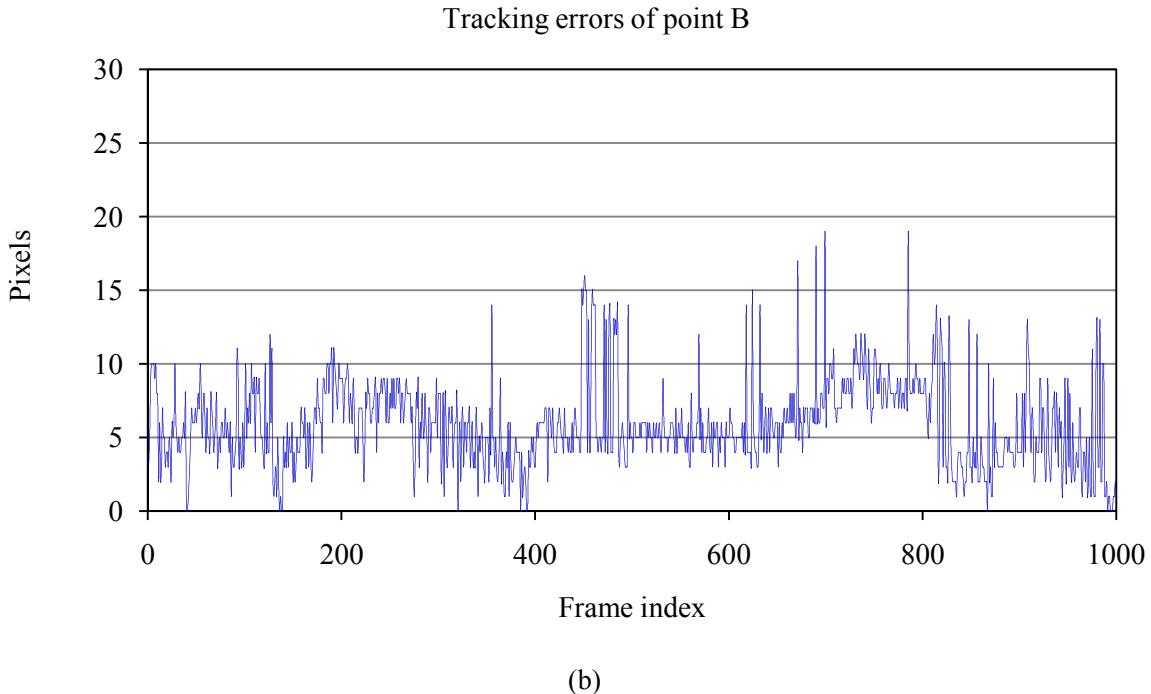


图 4-5 特征点 A 和 B 的跟踪误差。

从图4-5(a)和(b)中可以看到B点的跟踪误差要大于A点的跟踪误差。其原因是：在我们用到的实验集合中焊缝的右侧边缘更接近与图像边缘，由第二章内容可知，B点处图像畸变较之A点更严重。此外，B点处亮度也比A点处更低。这些意味着激光线在B点有着比A点更低的信噪比，因此在处理结果中显示B点的跟踪误差要大于A点的跟踪误差。

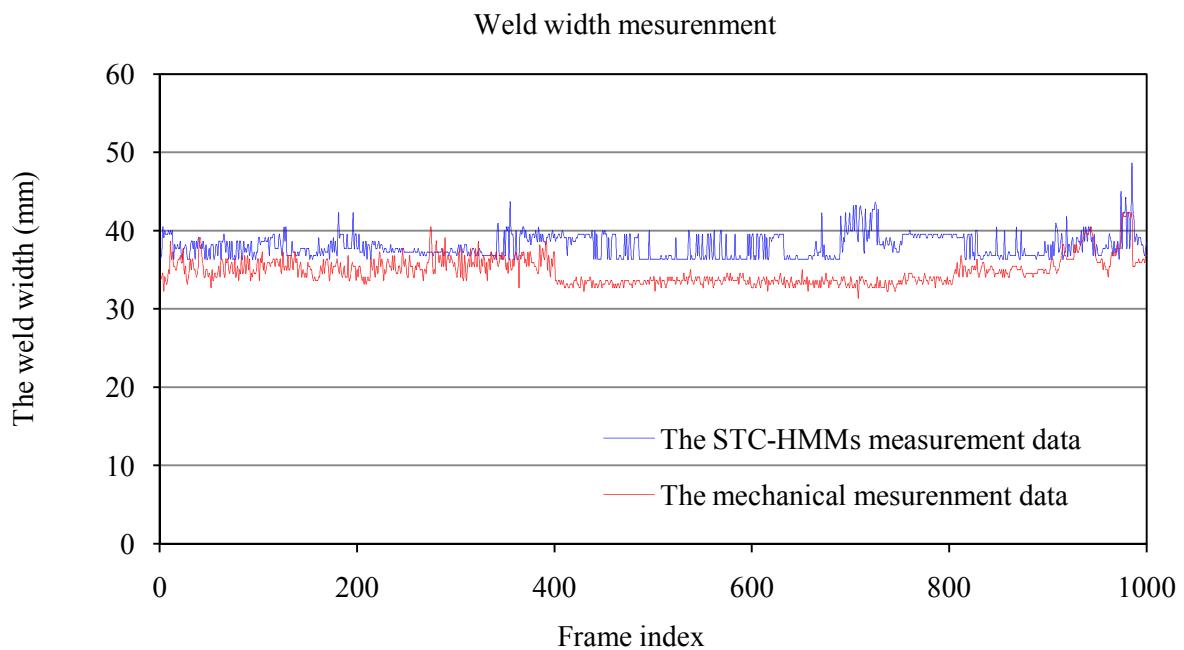


图 4-6 对比 STC-HMMs 的焊缝宽度测量与机械测量结果。

焊缝宽度的测量结果对比如图4-6所示，蓝色曲线表示STC-HMMs的视觉测量结果，红色曲线表示在焊缝相同位置处使用游标卡尺的测量结果。通过计算图4-4(a)中的A、B点的欧氏距离得到焊缝宽度 $d$ ，然后从图像坐标系转换到世界坐标系。对照两种测量手段的结果发现，大部分的图像测量值要大于游标卡尺的测量值。这是因为在跟踪实验中，要尽量保证超声波探头往复运动的宽度要完全覆盖焊缝位置并且不能有漏检情况出现。所以我们测量的阈值尽量调大一些，这是一种基于实践经验的保险手段。

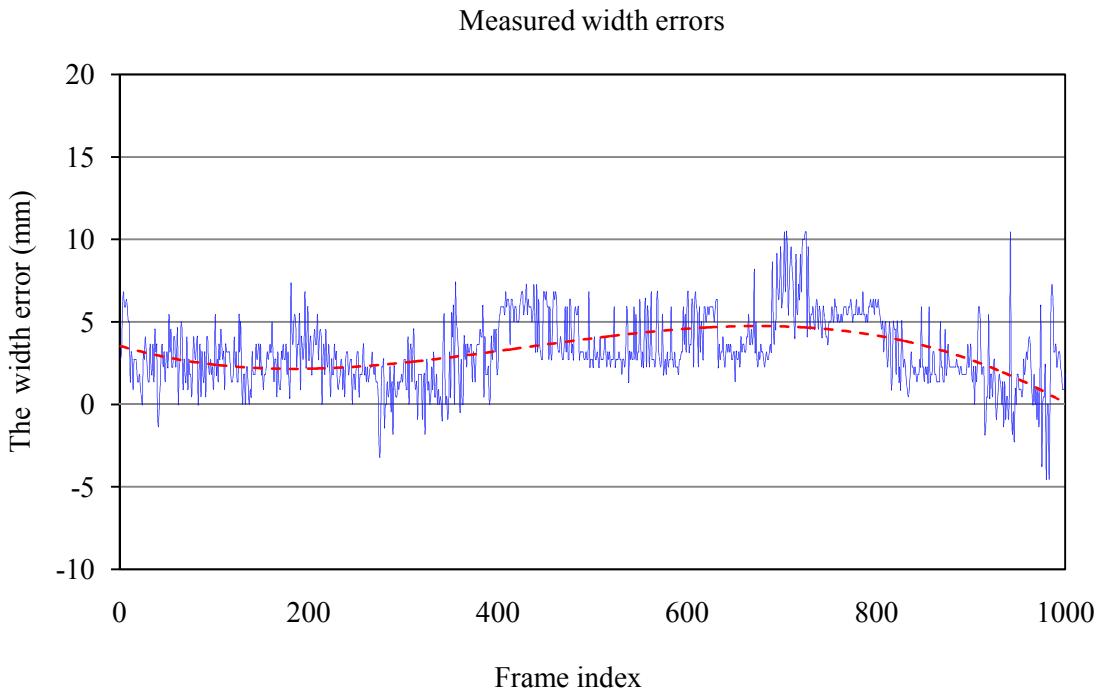


图 4-7 基于 STC-HMMs 跟踪结果的焊缝宽度测量误差。

在图4-7中，游标卡尺的测量值作为焊缝宽度的标准值，基于STC-HMMs的焊缝宽度测量值与基准值之间的绝对误差如图中曲线所示。误差曲线的绝大部分都小于7.5mm，趋势线（图中虚线）都在5mm以下。考虑到我们选择的超声波探头晶片尺寸，7.5mm是在我们系统中可容许的最大测量偏差。从图4-7中可见，环境噪声及CSL传感器标定误差带来的若干大于7.5mm的误差在个别帧上还是存在，但是数量极少，而且在随后的几帧内很快收敛。

表4-1列出了几种测量方法的统计信息，包括平均宽度、最大误差、最小误差、平均误差、方差和定位误差率。在本文涉及的实验条件下，7.5mm的宽度误差被定义为一个误差上限，因为超过7.5mm的测量误差可能导致超声波探头在扫描过程中不能完整的覆盖焊缝区域或覆盖区域过宽而导致机器人行进过程中漏掉若干焊缝区域的扫描。因此，当焊缝宽度测量误差大于7.5mm时，当前帧上的焊缝定位结果被视为跟踪失败，在图4-7描述的实验中，在1000帧图像内，超过7.5mm的焊缝跟踪帧数是36帧，因此系统的定位误差率为3.6%。

表 4-1 焊缝宽度测量性能对比

统计量 测量 方法	平均宽度 (mm)	最小误差 (mm)	最大误差 (mm)	平均误差 (mm)	误差方差 (mm <sup>2</sup> )	定位误差率
游标卡尺	34.8	--	--	--	--	--
S-HMM	40.8	0	49.8	6.0	11.4	14.0%
STC-HMMs	38.1	0	10.5	3.3	4.5	3.6%

如果不考虑时序上的信息关联（即系统不包括T-HMM），仅采用S-HMM，根据公式(4-1)取最大值进行焊缝检测，焊缝的跟踪和测量结果都比STC-HMMs差很多。从表4-1可见，引入T-HMM的时序滤波模块之后，系统的整体性能有了很大提高。使用游标卡尺的测量结果作为标准值时，T-HMM将系统的平均误差从6.0mm降低到3.3mm；误差方差从11.4降低到4.5，焊缝定位误差从14.0%降低到3.6%，这个性能可以满足系统的精度、速度和鲁棒性要求。

#### 4.5 陡峭误差消除

从图 4-5 和图 4-7 中可以看到，一些脉冲形式的陡峭误差出现在个别帧中。通过对系统的分析发现，这些陡峭误差的出现是因为在设计 T-HMM 的过程中观测量的选择上漏掉了有用信息，造成在一些帧上出现候选状态的空缺。在这种情况下，系统会自动选择公式(4-1)的最大值窗口作为焊缝跟踪结果。文中设置的两个阈值  $H_{min}$  和  $H_{max}$  是用来计算焊缝窗口的观测概率的约束条件，一般情况下系统被经验的设定  $H_{min}$  等于焊缝估计宽度的 50%； $H_{max}$  等于焊缝估计宽度的 200%。由于焊接缺陷造成的焊缝畸形或光照变化等条件引起的图像噪声导致焊缝的凸起形状在个别帧里很不明显或严重错位，这种情况导致 T-HMM 在某一步上的状态数量非常匮乏甚至完全消失。

综合上述原因，个别帧上的焊缝跟踪结果和宽度测量值将超出  $[H_{min}, H_{max}]$  的范围，这种情况下系统就得到了一些错误的跟踪和检测结果。

为了消除这些陡峭误差，从而提高系统的跟踪和测量精度，我们分别采用一个插值策略和一个 Kalman 容错滤波器方法对 STC-HMMs 的结果做后处理。在实际情况下，焊缝都是连续的并近似于一条直线，爬壁机器人的移动速度大约是 30mm/s（大约 1.5mm/帧，按帧率为 20fps 计算）。这意味着在相邻帧间激光线的位置和形状变化会非常小，焊缝也不可能出现瞬间的跳跃。因此当系统在某一帧上没有检查到任何焊缝时，我们可以采用上一帧的跟踪和测量结果作为一个当前位置的估计量进行插值。插值法保证了 T-HMM 结果误差

曲线的平滑性并在相应的视频帧上消除了陡峭误差，如图 4-8 中红色曲线所示。

类似文献[4]中提到的 Kalman 容错滤波器方法也被用于改善跟踪结果的误差曲线，首先将误差引入一个离散控制系统，并用一个线性随机微分方程来描述：

$$x(k+1) = x(k) + av(k) + \frac{1}{2}a^2w(k) \quad (4-13)$$

其中  $x(k)$  表示  $k$  时刻的误差位置； $a$  表示采样周期，即相邻帧的时间间隔； $w(k)$  表示误差变化的加速度； $v(k)$  表示  $k$  时刻的误差变化速度，记为

$$v(k+1) = v(k) + aw(k) \quad (4-14)$$

用 STC-HMMs 得到的误差位置信息来建立系统观测值：

$$z(k) = x(k) + n(k) \quad (4-15)$$

其中  $z(k)$  表示真实的误差位置， $n(k)$  表示系统的测量噪声。根据公式(4-13)~(4-15)构建 Kalman 滤波器模型平滑焊缝跟踪结果并消除陡峭误差。图 4-8 上的绿色曲线为 Kalman 滤波器对误差的处理结果。

很显然，Kalman 滤波器的性能优于插值算法。根据统计结果，在 1000 帧图像数据的实验中，Kalman 滤波器带来了 52.7ms 的时间延迟，平均处理一帧图像仅延迟  $5.27 \times 10^{-5}$  s，插值算法则基本上没有任何时间延迟。虽然两种方法都不会影响系统的实时性，但是 Kalman 滤波器带来的系统复杂性增加却不容忽视。

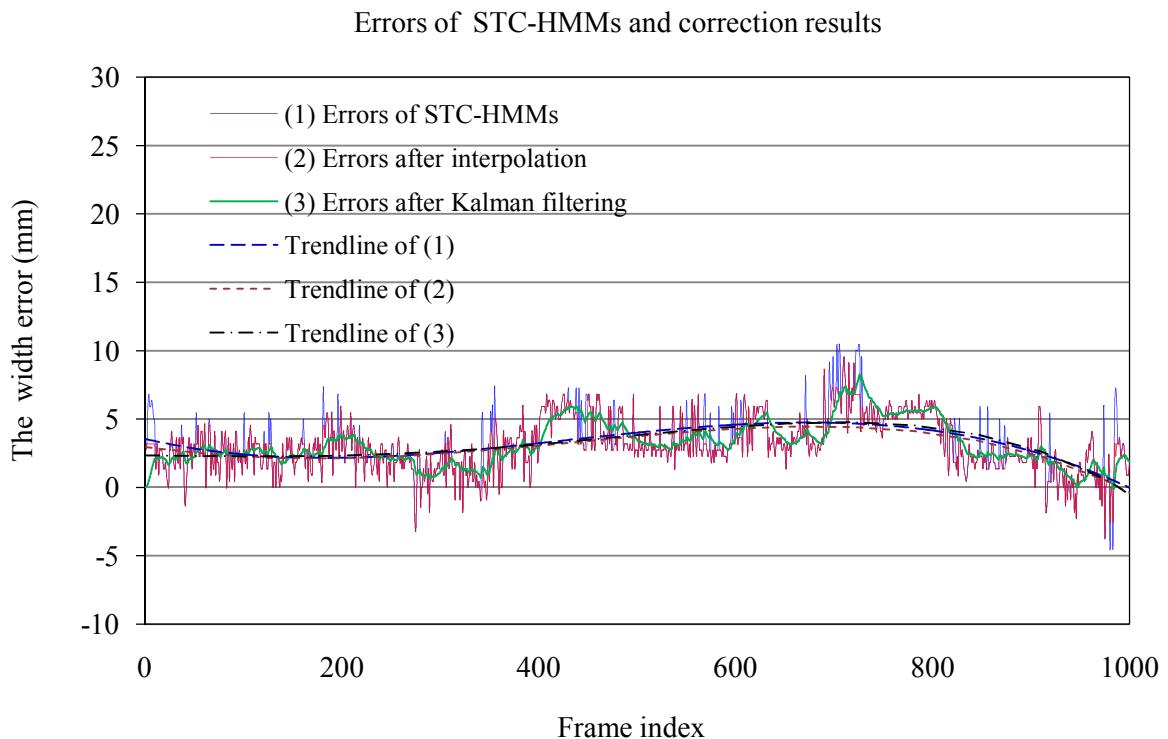


图 4-8 陡峭误差消除前后的误差对比。

在图 4-9 中显示了在野外环境中一段视频数据上的若干跟踪结果，尽管在实验环境中

存在着高光照、反光、焊缝缺陷等噪声，但系统还是能够很好的检测和跟踪焊缝，体现了系统良好的鲁棒性。

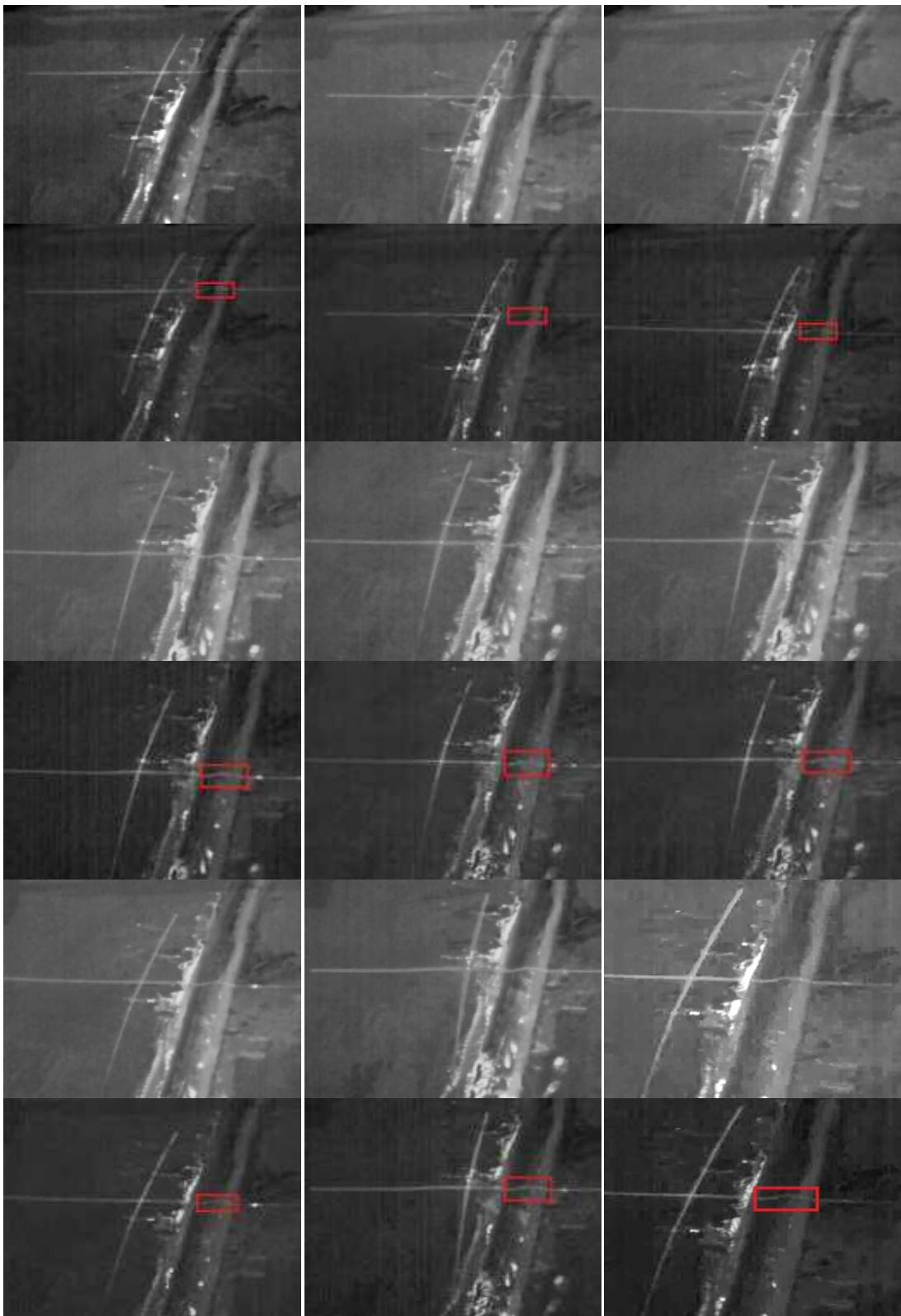


图 4-9 焊缝跟踪示例。第 1, 3, 5 行包括了高噪声, 反光及焊缝缺陷的焊缝图像。第 2, 4, 6 行为第 1, 3, 5 行上图像的跟踪结果。

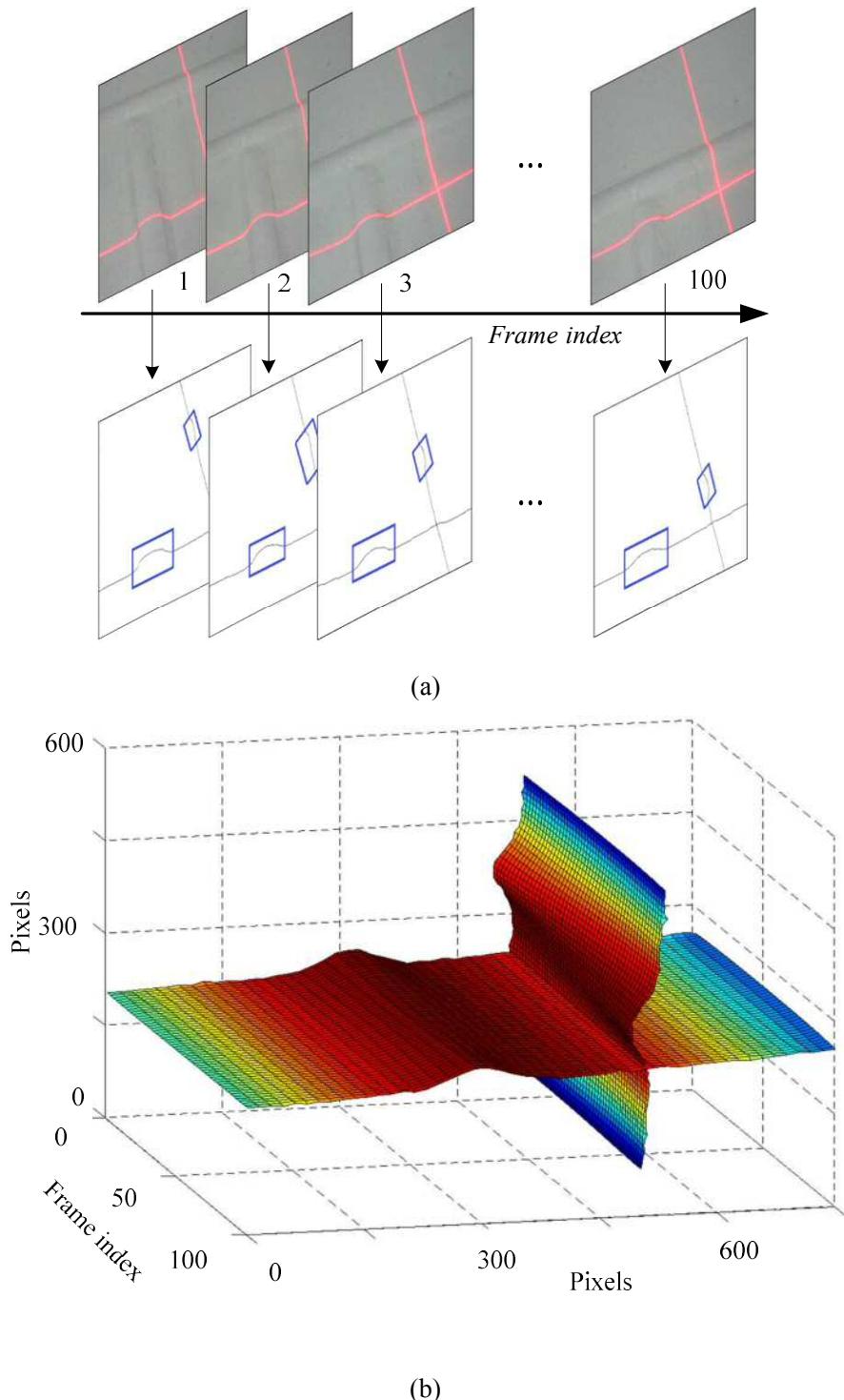


图 4-10 焊缝交叉区域的跟踪与测量结果。(a).从左到右为机器人移动到焊缝交叉区域时 CSL 传感器采集的图像和焊缝跟踪结果；(b).在 100 帧连续图像上的焊缝跟踪结果累积。

图 4-10(a)表示 100 个连续视频帧上激光线提取和焊缝跟踪结果，工作环境是横纵焊缝交叉区域。从图中可以看到随着时间的推移，机器人逐渐接近焊缝交叉点，STC-HMMs 系统同时跟踪两个焊缝， $\nu$  方向上的激光线上的焊缝位置逐步下移。图 4-10(b)显示了 100 帧图像中激光线的提取结果，100 条水平激光线重构了这一区域焊缝的表面 3D 信息，垂直

激光线的累计结果显示焊缝凸起位置在逐步下降，即机器人正在逐渐接近横焊缝。这个跟踪和测量结果可以精确控制机器人在焊缝交叉区域转弯。

#### 4.6 小结

本章基于第三章激光线提取的结果设计一个焊缝相似度的测量函数，用一个带有尺度变化的滑动窗口沿激光线搜索，窗口内的函数值越大表示与焊缝相似度越高。为提高系统鲁棒性，选者多个跟踪窗口作为焊缝候选位置，当作状态量输入到时间隐马尔可夫模型。参考窗口内的区域位置，面积，颜色，宽度等信息构建状态转移概率矩阵和观测概率矩阵，用 Viterbi 解码算法解码 T-HMM，最终得到焊缝位置和方向。

在实验中统计 1000 组焊缝特征点的跟踪结果，通过与标定值的对比并分析 STC-HMMs 的精度发现：焊缝定位的最大偏移量不超过 6.5mm，完全满足机器人跟踪要求。焊缝几何尺寸转换到摄像机坐标系之后与游标卡尺的测量结果对照，平均误差仅 3.3mm，误差方差  $4.5\text{mm}^2$ 。

分别采用插值算法和 Kalman 滤波器算法进一步消除跟踪结果中的陡峭误差，通过现场真实环境下的实验结果验证 STC-HMMs 对与高光照，高噪声，焊缝缺陷等干扰因素具有很好的适应能力。



## 第五章 爬壁机器人的跟踪控制

### 5.1 引言

焊缝跟踪与测量的主要目的是为了实现机器人的运动控制，引导机器人沿焊缝轨迹行进并约束超声波探头的工作范围，实现高质量的自动化焊缝无损探伤工作。本文将基于混合视觉伺服模型的机器人运动控制系统引入到风机套筒焊缝检测的高空作业环境，实现机器人无轨道自动导航，减轻操作者的劳动强度，降低高空作业风险。针对机器人在圆锥形塔筒上沿焊缝的垂直与水平环形运动特点，提出四履带永磁吸附的移动机器人结构，将三维坐标系内的机器人路径规划展开为二维直角坐标系。

本章首先分析机器人的结构和力学模型，研究爬壁机器人移动平台的运动学模型，构建机器人视觉焊缝跟踪模型，最终采用李亚普诺夫第二方法稳定性判据分析系统的稳定条件。机器人系统结构如图 5-1 所示

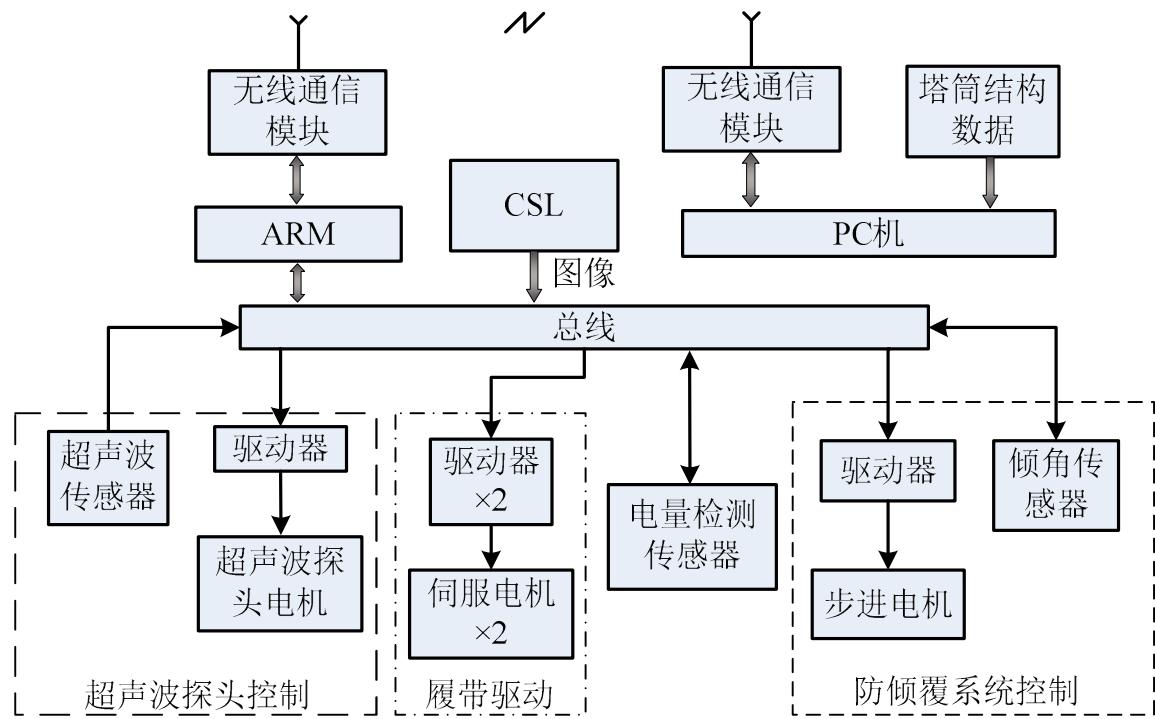


图 5-1 爬壁机器人系统结构框图。

### 5.2 爬壁机器人结构与受力分析

在现有的研究成果中，爬壁机器人的工作表面通常是平面或大直径柱面，这种环境对

机器人的吸附装置和本体结构要求比较低。本文研究的爬壁机器人的工作环境是风力发电机组的锥形塔筒，筒身分为若干节，每节直径在 2~4 米范围内，都是由单块厚钢板卷板焊接而成。这种壁面材质和外形对机器人的吸附性能和结构提出非常苛刻的要求。在常见的移动方式中，爬壁机器人有轮式[133][134]、履带式[135][136]、多足式[137][138]等几种移动方式，其中履带式移动方式以其对壁面的适应性强，负载能力大，结构简单，控制方便等优点在爬壁机器人领域被广泛应用。因此，本文所涉及的机器人采用履带式移动方式，并将永磁吸附模块结合到履带上；不仅结构简单，还可以保证当机器人遇到塔筒表面的焊渣突起或焊接凹陷等障碍时具有良好的越障能力。

本文基于仿生学中壁虎爬墙的运动方式设计了一种壁面可伺服的柔性机构，爬壁机器人的壁虎结构形态如图 5-2 所示。

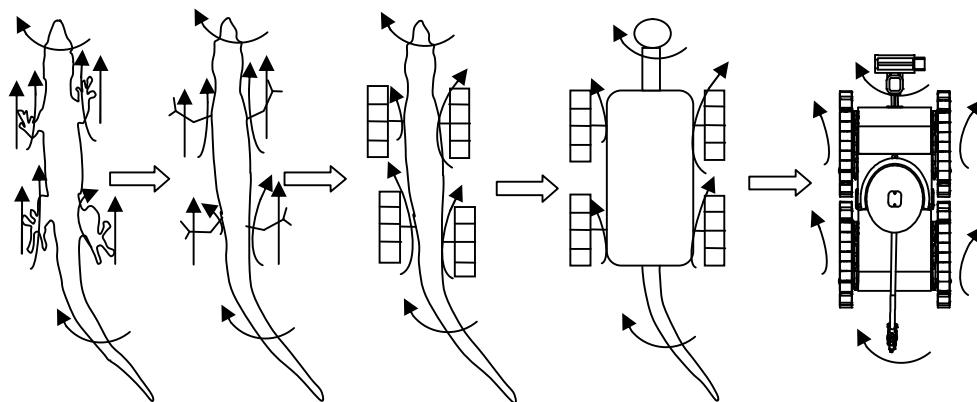


图 5-2 模仿壁虎结构的仿生学机器人形态的演化过程。

首先从技术角度把壁虎的腿逐步演化成具有柔性的履带结构，履带结构的柔性即保证了该机构可像壁虎的腿一样运动，又保证了履带与壁面的大面积贴合。用于吸附壁面的壁虎脚掌演化为永磁铁的履带单元，这些履带单元以最简单的形式保证爬壁机器人可以稳定地吸附在塔筒锥形壁面上。参考壁虎尾巴的支撑、稳定和平衡作用，我们为爬壁机器人设计了一个防倾覆杆。对应视觉感知和觅食作用的头部被演化为一对运动伺服装置，安装着 CSL 传感器和超声波探头。壁虎的躯干被相应的演化为机器人箱体。

据此方案设计的机器人如图 2-4 所示。从结构角度分析，机器人主要包括以下几个部分：超声和视觉传感单元及其伺服机构；柔性吸附履带及其伺服传动系统；机器人箱体；机器人防倾覆装置及其伺服机构；电池供电系统；电路与控制系统；数据处理系统和无线通信系统。

传感器伺服系统如图 5-3 所示，包括装置安装支架，步进电机，滑块，丝杠等结构。关于传感器系统的技术细节在前面章节已做详细描述，此处不再赘述。

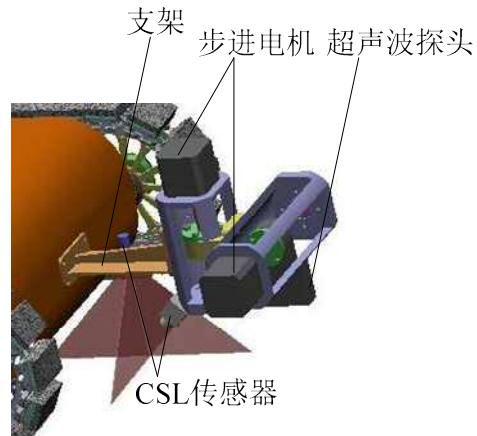


图 5-3 机器人传感器伺服装置。

机器人履带的吸附材料选用铷铁硼永磁材料，这是到目前为止已知的磁性最好的永磁体，具有磁性能高、资源丰富、价格低廉、力学性能出色等优点。履带上的每一节为一个永磁吸附单元，该单元的结构和永磁体安装方式如图 5-4 所示。

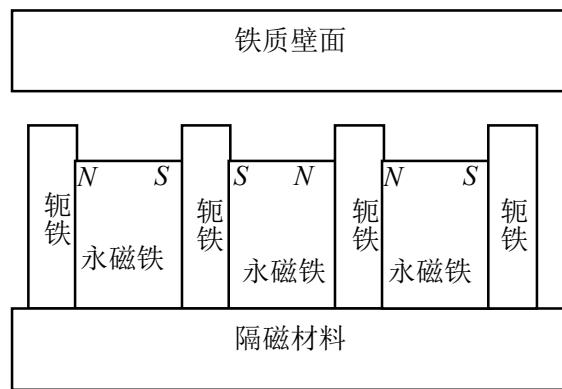


图 5-4 永磁吸附单元。

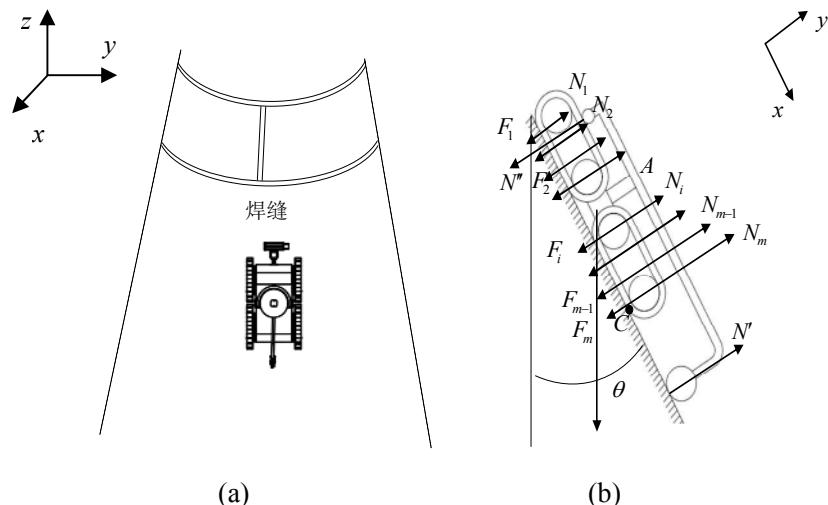


图 5-5 爬壁机器人沿纵焊缝移动时的力学模型。

机器人在风机塔筒上工作时存在两种典型运动方式：沿纵焊缝垂直行走和沿横焊缝做圆周运动。垂直行走中机器人两排履带受力情况相同，理想状态下机器人履带为柔性装置，各吸附单元之间并不产生力矩传递；塔筒壁面为坚硬的刚体，机器人的每个吸附单元都能与壁面紧密贴合。其力学模型如图 5-5 所示。

图 5-5 中  $\theta$  表示风机塔筒壁面的圆锥角，设机器人自重为  $G$ ，则单侧履带在  $x$  和  $y$  方向上承受的重力分别为

$$\begin{cases} G_x = \frac{G}{2} \cos \theta \\ G_y = -\frac{G}{2} \sin \theta \end{cases} \quad (5-1)$$

设第  $i$  块磁吸附单元的吸力为  $F_i$ ，因为磁铁材料是统一选择且磁路为统一设计的，所以各磁吸附单元的吸附力可视为是等值的。机器人吸附单元受到的来自墙面的支撑力  $N_i$  是不一样的，履带底部的吸附单元所受到的支撑力要高于顶部履带所受到的支撑力。

水平行走中的机器人是另一个受力状态，其分析如图 5-6 所示。在  $z$  方向上，机器人受重力和履带与墙壁间摩擦力的作用。在  $x, y$  平面上，机器人受磁吸附单元的吸引力和墙面的支撑力。在机器人履带的翻滚自由度及其柔性的作用下，机器人的吸附单元可以与墙面紧密贴合。

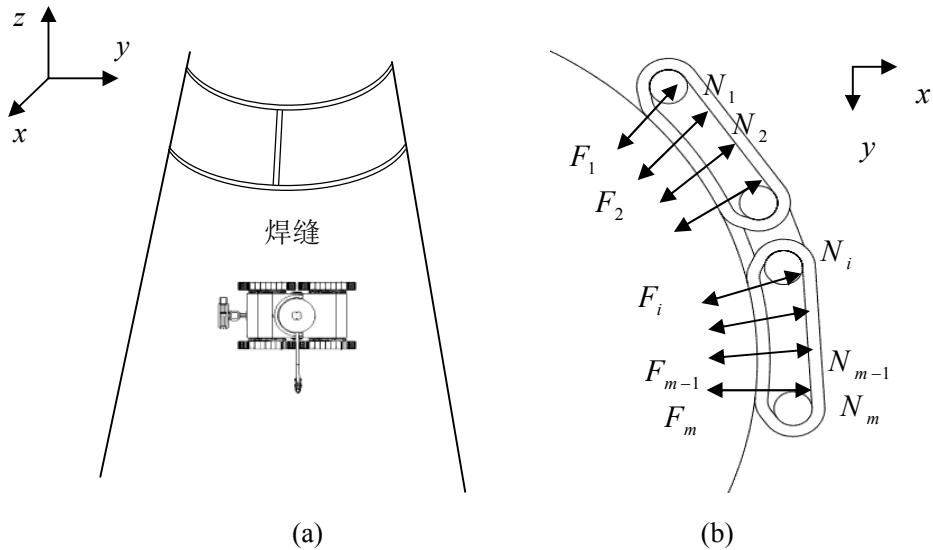


图 5-6 爬壁机器人沿横焊缝移动时的力学模型。

当机器人如图 5-6 (b) 所示水平行走时，为了防止倾覆，机器人下面一排履带所受到的支撑力要高于上面一排履带所受到的支撑力。由于履带是水平的，因此同一排履带上的磁吸附单元所受到的支撑力是相同的。

风机塔筒壁面是一个圆锥面，当机器人在上面行走时，它与竖直方向会有一个角度。这个角度就是风机塔筒的圆锥角，将重力沿着壁面切线和法线方向进行分解，可以得到：

$$\begin{cases} G_t = G \cos \theta \\ G_r = G \sin \theta \end{cases} \quad (5-2)$$

其中  $G_t$  是重力  $G$  沿壁面切线方向的分量,  $G_r$  是重力  $G$  沿壁面法线方向的分量。

爬壁机器人在垂直壁面上工作时要面临坠落的两种风险: 从壁面上滑落和从壁面上倾覆。履带吸附机构可以保证机器人不从壁面滑落, 倾覆问题则需要防倾覆机构来完成。如图 5-7 所示。当机器人运动时, 机器人的防倾覆机构始终保持竖直向下。机器人的防倾覆机构的具体结构如图 5-8 所示, 它由步进电机、倾角传感器、防倾覆杆、万向轮和防倾覆控制系统组成。万向轮安装在防倾覆杆的底端, 与壁面接触。由于万向轮的作用, 防倾覆杆可以无阻力地向任意方向转动。倾角传感器安装在防倾覆杆上, 检测防倾覆杆与竖直方向的角度, 然后通过安装在机器人内部的防倾覆控制系统控制步进电机补偿防倾覆杆与竖直方向的角度。从而保证防倾覆杆始终竖直向下, 完成稳定机器人姿态、防止机器人倾覆的作用。

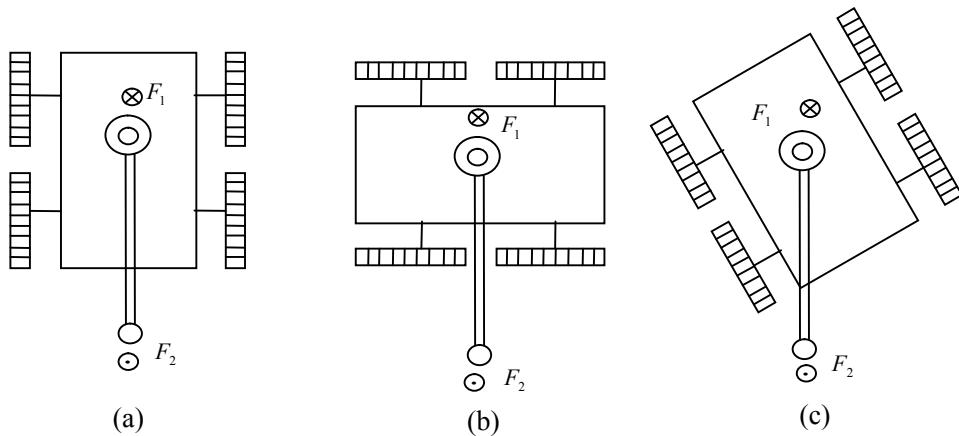


图 5-7 机器人防倾覆机构功能示意图。(a).垂直移动; (b).水平移动; (c).任意方向移动。

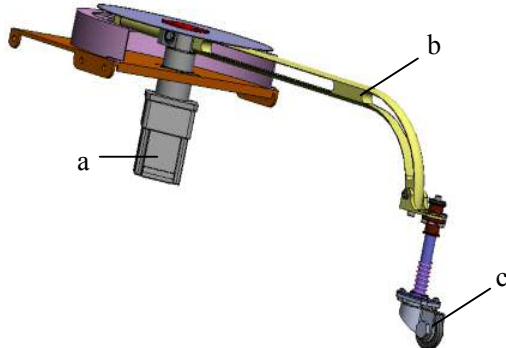


图 5-8 防倾覆机构的结构图。a.步进电机; b.防倾覆杆; c.万向轮。

### 5.3 爬壁机器人的运动模型

机器人运动模型是机器人系统特征和变化规律的一种数学抽象，是一种定量分析。建立机器人的运动模型就是把机器人的行为用数学的函数关系进行表示，揭示机器人系统间的变量关系。当机器人在圆锥壁面上运动时，它有四种典型运动状态：在壁面上竖直运动；在壁面上水平运动；在壁面上以任意方向运动；机器人原地转动。本节针对这几种典型的运动状态，深入分析机器人的运动模型，为实现机器人的视觉控制做好理论基础。

#### 5.3.1 机器人竖直运动方式

当机器人在壁面上竖直运动时，它的运动轨迹是沿纵焊缝行走在圆锥塔筒壁面的母线上，理想状态下是做直线匀速运动。

如图 5-9 所示，将世界坐标系  $[X_w, Y_w, Z_w]$  原点设在圆锥底面的圆心， $Z_w$  正方向垂直向上。以机器人的中心为原点建立一个机器人坐标系  $[x_R, y_R, z_R]$ ，机器人坐标系统绕世界坐标系 Z 轴的旋转夹角为  $\theta_3$ 。 $b$ 、 $a$  和  $h$  分别表示锥体的上下半径和高。

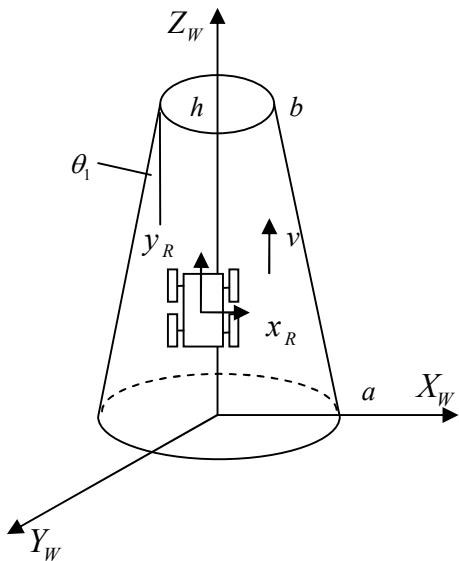


图 5-9 机器人竖直运动描述。

机器人竖直行走时， $\theta_3=0$ 。由几何关系可以得出，坐标系  $[X_w, Y_w, Z_w]$  和坐标系  $[x_R, y_R, z_R]$  的关系应满足：

$$\begin{cases} x_R = X_w \sin \theta_2 - Y_w \cos \theta_2 \\ y_R = Z_w \cos \theta_1 - (X_w \cos \theta_2 + Y_w \sin \theta_2) \sin \theta_1 \end{cases} \quad (5-3)$$

用矩阵形式表示：

$$\begin{bmatrix} x_R \\ y_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & 0 \\ -\cos \theta_2 \sin \theta_1 & -\sin \theta_2 \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} \quad (5-4)$$

其中  $\theta_1 = \frac{1}{2}$  圆锥顶角,  $\theta_2$  是机器人原点和坐标  $Z_W$  轴的连线与坐标系  $X_W$  轴之间的夹角。

由此可得到导数关系为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_R \\ \dot{y}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & 0 \\ -\cos \theta_2 \sin \theta_1 & -\sin \theta_2 \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_W \\ \dot{Y}_W \\ \dot{Z}_W \end{bmatrix} \quad (5-5)$$

其中  $X_W, Y_W, Z_W$  是机器人原点在世界坐标系坐标系下的坐标值。

在机器人竖直行走时, 理论上机器人的行走单元 (机器人冗余的磁吸附履带) 与圆锥塔筒的壁面无滑动。即, 机器人冗余的履带与圆锥壁面接触点的速度为 0。机器人竖直运动时的动能由车体运动的动能和履带轮转动的动能组成, 机器人四个履带轮转过的角度相同, 因此机器人的动能可以表示成下面所示的关系式:

$$T = \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) + 4J\dot{\varphi}^2 \quad (5-5)$$

其中  $m$  是机器人的质量,  $J$  是机器人轮子的转动惯量,  $\varphi$  是机器人的履带轮绕着自身的轴所转过的角度。

机器人吸附单元提供足够的吸附力就可以保证机器人紧密地吸附在壁面上。当机器人竖直运动时, 机器人吸附单元提供的吸附力需要克服机器人重力的影响, 但并不会影响机器人的运动。

### 5.3.2 机器人水平运动方式

当机器人在壁面上水平运动时, 其行走在圆锥塔筒壁面的截面圆环上, 它的运动轨迹是沿横焊缝的一个圆周, 理想状态下是做匀速圆周运动。机器人水平运动的情况如图 5-10 所示。

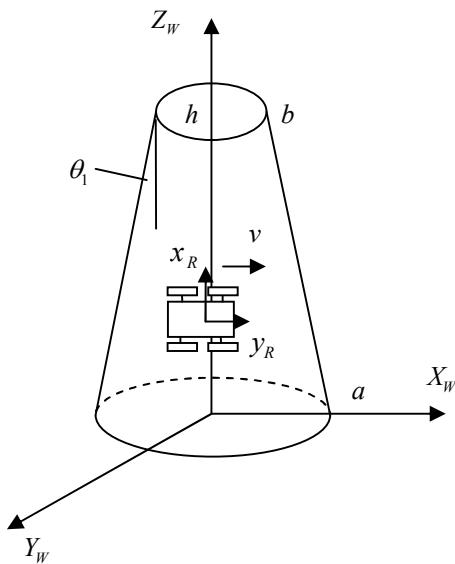


图 5-10 机器人水平运动描述。

机器人水平运动时,  $\theta_3 = 90^\circ$ , 由几何关系可知, 坐标系  $[X_w, Y_w, Z_w]$  和坐标系  $[x_R, y_R, z_R]$  的关系应满足:

$$\begin{cases} x_R = Z_w \cos \theta_1 - (X_w \cos \theta_2 + Y_w \sin \theta_2) \sin \theta_1 \\ y_R = X_w \sin \theta_2 - Y_w \cos \theta_2 \end{cases} \quad (5-6)$$

写成矩阵形式, 即:

$$\begin{bmatrix} x_R \\ y_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \theta_2 \sin \theta_1 & -\sin \theta_2 \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \\ \sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} \quad (5-7)$$

同样可以得出导数关系式:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_R \\ \dot{y}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \theta_2 \sin \theta_1 & -\sin \theta_2 \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \\ \sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_w \\ \dot{Y}_w \\ \dot{Z}_w \end{bmatrix} \quad (5-8)$$

机器人沿着壁面做水平运动, 此时其参数  $Z_w$  和  $\theta_2$  是随着时间的变化而变化的, 因此, 可以得出如下关系式:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_w \\ \dot{Y}_w \\ \dot{Z}_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{ah}{a-b} - Z_w\right) \tan \theta_1 \sin \theta_2 & -\tan \theta_1 \cos \theta_2 \\ \left(\frac{ah}{a-b} - Z_w\right) \tan \theta_1 \cos \theta_2 & -\tan \theta_1 \sin \theta_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_2 \\ \dot{Z}_w \end{bmatrix} \quad (5-9)$$

因此, 机器人水平运动时, 其运动轨迹是一个与壁面半径, 圆锥角和履带轮角速度有关的圆环。同样, 水平运动时机器人吸附单元的吸引力保证机器人的稳定吸附, 但并不能影响机器人的运动。

### 5.3.3 机器人任意方向的运动方式

机器人任意方向上运动时它的运动轨迹既不是直线也不是圆, 而是一条圆锥螺旋线。其情况如图 5-11 所示。

当机器人在任意方向运动时, 坐标系  $[X_w, Y_w, Z_w]$  和坐标系  $[x_R, y_R, z_R]$  的关系应满足:

$$\begin{cases} x_R = (\sin \theta_2 \cos \theta_3 + \cos \theta_2 \sin \theta_1 \sin \theta_3) X_w + \\ (\sin \theta_2 \sin \theta_1 \sin \theta_3 - \cos \theta_2 \cos \theta_3) Y_w - Z_w \cos \theta_1 \sin \theta_3 \\ y_R = (\sin \theta_2 \sin \theta_3 - \cos \theta_2 \sin \theta_1 \cos \theta_3) X_w - \\ (\cos \theta_2 \sin \theta_3 + \sin \theta_2 \sin \theta_1 \cos \theta_3) Y_w + Z_w \cos \theta_1 \cos \theta_3 \end{cases} \quad (5-10)$$

用矩阵形式表示, 即:

$$\begin{bmatrix} x_R \\ y_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta_2 \cos \theta_3 + \cos \theta_2 \sin \theta_1 \sin \theta_3 & \sin \theta_2 \sin \theta_1 \sin \theta_3 - \cos \theta_2 \cos \theta_3 & -\cos \theta_1 \sin \theta_3 \\ \sin \theta_2 \sin \theta_3 - \cos \theta_2 \sin \theta_1 \cos \theta_3 & -\cos \theta_2 \sin \theta_3 - \sin \theta_2 \sin \theta_1 \cos \theta_3 & \cos \theta_1 \cos \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} \quad (5-11)$$

其中

$$\begin{cases} s\theta_1 = \sin \theta_1 \\ c\theta_1 = \cos \theta_1 \\ s\theta_2 = \sin \theta_2 \\ c\theta_2 = \cos \theta_2 \\ s\theta_3 = \sin \theta_3 \\ c\theta_3 = \cos \theta_3 \end{cases}$$

机器人在壁面上任意方向行走，它并没有发生转动，因此  $\theta_3$  是不变的，其导数关系为：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_R \\ \dot{y}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s\theta_2 c\theta_3 + c\theta_2 s\theta_1 s\theta_3 & s\theta_2 s\theta_1 s\theta_3 - c\theta_2 c\theta_3 & -c\theta_1 s\theta_3 \\ s\theta_2 s\theta_3 - c\theta_2 s\theta_1 c\theta_3 & -c\theta_2 s\theta_3 - s\theta_2 s\theta_1 c\theta_3 & c\theta_1 c\theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_W \\ \dot{Y}_W \\ \dot{Z}_W \end{bmatrix} \quad (5-12)$$

机器人运动时， $Z_w$  和  $\theta_2$  都是随着时间的变化而变化的。则可以得到下面所示的关系式：

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_W \\ \dot{Y}_W \\ \dot{Z}_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{ah}{a-b} - Z_w\right) \tan \theta_1 \sin \theta_2 & -\tan \theta_1 \cos \theta_2 \\ \left(\frac{ah}{a-b} - Z_w\right) \tan \theta_1 \cos \theta_2 & -\tan \theta_1 \sin \theta_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_2 \\ \dot{Z}_w \end{bmatrix} \quad (5-13)$$

机器人任意方向的运动方式分析与焊缝跟踪任务本身无关，但与机器人断电后充电再复位，机器人检测完毕后从塔筒撤下等情况有直接关系。

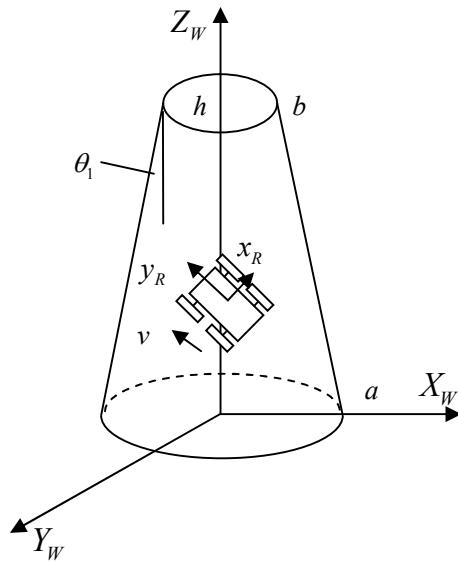


图 5-11 机器人任意方向上的运动描述。

### 5.3.4 机器人原地转动方式

当机器人运动到横纵焊缝的交叉点区域时，机器人的运动伴随转动，这种情况的运动

模式比较复杂，其履带与壁面之间必然会产生滑动。如图 5-12 所示，机器人在壁面上运动的时候伴随着转动。

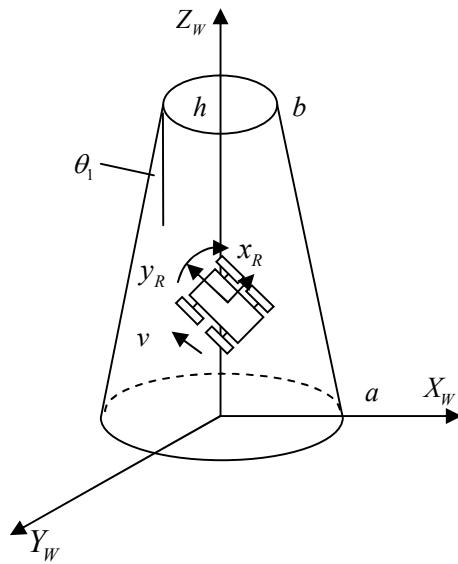


图 5-12 机器人原地转动描述。

机器人在任意方向上运动且伴随有转动时，根据几何关系可以得出如下所示的关系式。

$$\begin{cases} x_R = (\sin \theta_2 \cos \theta_3 + \cos \theta_2 \sin \theta_1 \sin \theta_3) X_w + \\ \quad (\sin \theta_2 \sin \theta_1 \sin \theta_3 - \cos \theta_2 \cos \theta_3) Y_w - Z_w \cos \theta_1 \sin \theta_3 \\ y_R = (\sin \theta_2 \sin \theta_3 - \cos \theta_2 \sin \theta_1 \cos \theta_3) X_w - \\ \quad (\cos \theta_2 \sin \theta_3 + \sin \theta_2 \sin \theta_1 \cos \theta_3) Y_w + Z_w \cos \theta_1 \cos \theta_3 \end{cases} \quad (5-14)$$

写成矩阵形式，则：

$$\begin{bmatrix} x_R \\ y_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s\theta_2 c\theta_3 + c\theta_2 s\theta_1 s\theta_3 & s\theta_2 s\theta_1 s\theta_3 - c\theta_2 c\theta_3 & -c\theta_1 s\theta_3 \\ s\theta_2 s\theta_3 - c\theta_2 s\theta_1 c\theta_3 & -c\theta_2 s\theta_3 - s\theta_2 s\theta_1 c\theta_3 & c\theta_1 c\theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} \quad (5-15)$$

其中

$$\begin{cases} s\theta_1 = \sin \theta_1 \\ c\theta_1 = \cos \theta_1 \\ s\theta_2 = \sin \theta_2 \\ c\theta_2 = \cos \theta_2 \\ s\theta_3 = \sin \theta_3 \\ c\theta_3 = \cos \theta_3 \end{cases}$$

其导数关系式为：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_R \\ \dot{y}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s\theta_2 c\theta_3 + c\theta_2 s\theta_1 s\theta_3 & s\theta_2 s\theta_1 s\theta_3 - c\theta_2 c\theta_3 & -c\theta_1 s\theta_3 \\ s\theta_2 s\theta_3 - c\theta_2 s\theta_1 c\theta_3 & -c\theta_2 s\theta_3 - s\theta_2 s\theta_1 c\theta_3 & c\theta_1 c\theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_w \\ \dot{Y}_w \\ \dot{Z}_w \end{bmatrix} \quad (5-16)$$

理想状态下，在机器人向任意方向伴随转动时，其履带在切线方向不会产生滑动。机器人的动能可以表示为：

$$T = \frac{1}{2}m(\dot{X}_w^2 + \dot{Y}_w^2 + \dot{Z}_w^2) + \frac{1}{2}m(v_1^2 + v_2^2) + J\dot{\phi}_1^2 + J\dot{\phi}_3^2 + \frac{1}{2}J_{car}\dot{\theta}_3^2 \quad (5-17)$$

其中  $m$  是机器人的质量， $v_1$ 、 $v_2$  是机器人产生的侧向滑动的速度， $\dot{\phi}_1$ 、 $\dot{\phi}_3$  是机器人履带轮，即电机驱动的角速度。 $J$  为机器人履带轮的转动惯量， $J_{car}$  是机器人车身的转动惯量。

#### 5.4 爬壁机器人的视觉跟踪控制

前面两小节简要介绍了爬壁机器人系统的结构、力学模型和运动学模型。对于本文设计的机器人，工作对象是对焊缝质量进行无损探伤检测。理论上，纵焊缝是平行于塔筒锥体的母线方向，与重力方向成  $\frac{1}{2}$  锥角；横焊缝在水平方向上，是一个绕塔筒圆周的环形。机器人竖直运动时做直线匀速运动，左右两组履带速度相同；水平运动时机器人做圆周运动，由于塔筒是一个圆锥体，为保证机器人的水平状态，上下两组履带需保持一个与锥角和焊缝环直径相关的速度差，即在水平运动时机器人需时刻保持差动状态。然而在实际的检测工作中必然存在塔筒直径和圆度的误差、两侧履带的速度偏差、表面凹凸障碍物导致的运动延迟等情况。当机器人两侧履带未按照预定速度运动时，机器人轴线与焊缝之间必然出现一个偏角，这个偏角会引起超声波探头偏离预定的检测区域。如果偏离距离在小范围内，可以通过控制机器人头部的水平丝杠转速来调节滑块位置以实现偏差弥补，但是如果偏离过大的话则需要调整机器人的运动速度和姿态。

综上，爬壁机器人进行焊缝跟踪过程中需要实现的控制目标有两方面：(1)机器人本体的运动控制，保证机器人轴线平行于焊缝方向；(2)控制滑块丝杠等调整机构来补偿焊缝偏差。具体控制流程如图 5-13 所示。

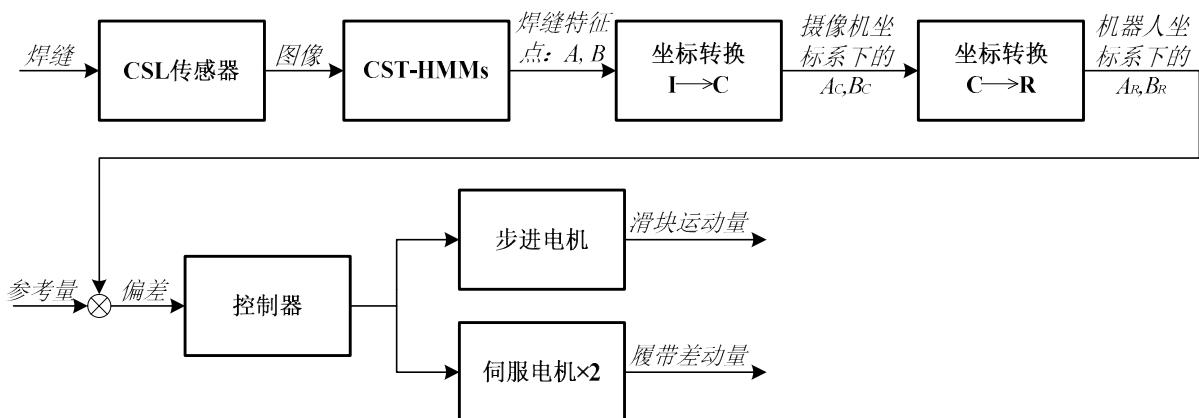


图 5-13 视觉焊缝跟踪系统信号流程图。

其中, I 表示图像坐标系; C 表示摄像机坐标系; R 表示机器人坐标系;  $A_C, B_C$  表示特征点在摄像机坐标系下的坐标;  $A_R, B_R$  表示特征点在机器人坐标系下坐标。

在绪论综述中已经对比过几种视觉伺服模型的优劣点, 本文为克服基于位置和基于图像的视觉伺服中的难点, 采取了混合视觉伺服模型。

#### 5.4.1 图像坐标系与机器人坐标系之间的运动关联

继续以十字型线光源结构光测量原理图 (图2-5) 为例, 笛卡尔空间坐标系中的特征点  $P$  在机器人坐标系下的坐标为  $P_R = [x_{Rp}, y_{Rp}, z_{Rp}]^T$ , 摄像机坐标系下的坐标为  $P_c = [x_{cp}, y_{cp}, z_{cp}]^T$ , 图像坐标系下坐标为  $P_I = [u_{up}, v_{up}]^T$ 。P在机器人坐标系下的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_{Rp} \\ y_{Rp} \\ z_{Rp} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{cp} \\ y_{cp} \\ z_{cp} \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_{cp} \\ y_{cp} \\ z_{cp} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5-18)$$

其中,  $R$  为摄像机坐标系到机器人坐标系的旋转矩阵;  $t$  摄像机坐标系到机器人坐标系的平移向量;  $M$  为摄像机相对于机器人坐标系的外参矩阵。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \end{bmatrix} \quad (5-19)$$

$$t = [-D_x \quad -D_y \quad -D_z]^T \quad (5-20)$$

$$M = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} & D_x \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} & D_x \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} & D_x \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-21)$$

公式(5-18)的导数形式为

$$\begin{bmatrix} x'_{Rp} \\ y'_{Rp} \\ z'_{Rp} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_{cp} \\ y'_{cp} \\ z'_{cp} \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow R \begin{bmatrix} x'_{cp} \\ y'_{cp} \\ z'_{cp} \end{bmatrix} \quad (5-20)$$

将  $P_c = [x_{cp}, y_{cp}, z_{cp}]^T$  投影到归一化焦平面上得到成像点  $P_{lc} = [x_{lc}, y_{lc}, 1]^T$ ,  $P_c P_{lc}$  是一条穿过光心  $O$  的直线段, 即满足

$$\begin{cases} x_{cp} = x_{lc}t_1 \\ y_{cp} = y_{lc}t_1 \\ z_{cp} = t_1 \end{cases} \quad (5-21)$$

将公式(5-21)分别带入公式 (2-11)和(2-12)有:

$$\begin{cases} x_c = \frac{-x_{lc}}{a_1 x_{lc} + b_1 y_{lc} + c_1} \\ y_c = \frac{-y_{lc}}{a_1 x_{lc} + b_1 y_{lc} + c_1} \\ z_c = \frac{-1}{a_1 x_{lc} + b_1 y_{lc} + c_1} \end{cases} \Rightarrow -\begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ & & \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x_{lc} \\ y_{lc} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5-22)$$

$$\begin{cases} x_c = \frac{-x_{lc}}{a_2 x_{lc} + b_2 y_{lc} + c_2} \\ y_c = \frac{-y_{lc}}{a_2 x_{lc} + b_2 y_{lc} + c_2} \\ z_c = \frac{-1}{a_2 x_{lc} + b_2 y_{lc} + c_2} \end{cases} \Rightarrow -\begin{pmatrix} a_2 & b_2 & c_2 \\ & & \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x_{lc} \\ y_{lc} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5-23)$$

根据公式(2-15)有

$$\begin{bmatrix} x_{lc} \\ y_{lc} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & u_0 \\ 0 & k_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_{up} \\ v_{up} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5-24)$$

将公式 (5-24)分别带入公式(5-22)和(5-23)并求方程导数有

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x'_c \\ y'_c \\ z'_c \end{bmatrix} &= -\left( \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{lc} \\ y_{lc} \\ 1 \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} x'_{lc} \\ y'_{lc} \\ 0 \end{bmatrix} + \left( \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{lc} \\ y_{lc} \\ 1 \end{bmatrix} \right)^{-2} \left( \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_{lc} \\ y'_{lc} \\ 0 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} x_{lc} \\ y_{lc} \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{\left[ \frac{a_1}{k_x}(u-u_o) + \frac{b_1}{k_y}(v-v_o) + c_1 \right]^2} \begin{bmatrix} -\frac{b_1(v-v_o)}{k_x k_y} - \frac{c_1}{k_x} & \frac{b_1(u-u_o)}{k_x k_y} & 0 \\ \frac{a_1(v-v_o)}{k_x k_y} & -\frac{a_1(u-u_o)}{k_x k_y} - \frac{c_1}{k_y} & 0 \\ \frac{a_1}{k_x} & \frac{b_1}{k_y} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{D_1^2} \begin{bmatrix} -\frac{b_1(v-v_o)}{k_x k_y} - \frac{c_1}{k_x} & \frac{b_1(u-u_o)}{k_x k_y} \\ \frac{a_1(v-v_o)}{k_x k_y} & -\frac{a_1(u-u_o)}{k_x k_y} - \frac{c_1}{k_y} \\ \frac{a_1}{k_x} & \frac{b_1}{k_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = J_1 \begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} \quad (5-25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} x'_c \\ y'_c \\ z'_c \end{bmatrix} &= - \left( \begin{bmatrix} a_2 & b_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{lc} \\ y_{lc} \\ 1 \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} x'_{lc} \\ y'_{lc} \\ 0 \end{bmatrix} + \left( \begin{bmatrix} a_2 & b_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{lc} \\ y_{lc} \\ 1 \end{bmatrix} \right)^{-2} \left( \begin{bmatrix} a_2 & b_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_{lc} \\ y'_{lc} \\ 0 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} x_{lc} \\ y_{lc} \\ 1 \end{bmatrix} \\
&= \frac{1}{\left[ \frac{a_2}{k_x}(u-u_o) + \frac{b_2}{k_y}(v-v_o) + c_2 \right]^2} \begin{bmatrix} -\frac{b_2(v-v_o)}{k_x k_y} - \frac{c_2}{k_x} & \frac{b_2(u-u_o)}{k_x k_y} & 0 \\ \frac{a_2(v-v_o)}{k_x k_y} & -\frac{a_2(u-u_o)}{k_x k_y} - \frac{c_2}{k_y} & 0 \\ \frac{a_2}{k_x} & \frac{b_2}{k_y} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 0 \end{bmatrix} \\
&= \frac{1}{D_2^2} \begin{bmatrix} -\frac{b_2(v-v_o)}{k_x k_y} - \frac{c_2}{k_x} & \frac{b_2(u-u_o)}{k_x k_y} \\ \frac{a_2(v-v_o)}{k_x k_y} & -\frac{a_2(u-u_o)}{k_x k_y} - \frac{c_2}{k_y} \\ \frac{a_2}{k_x} & \frac{b_2}{k_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 0 \end{bmatrix} = J_2 \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5-26}
\end{aligned}$$

其中  $D_1$  和  $D_2$  分别为激光束平面  $L_1$  和  $L_2$  的约束方程,  $J_1$  和  $J_2$  是从图像坐标系到摄像机坐标系的雅可比矩阵。再将图像坐标系转换到机器人坐标系有

$$\begin{bmatrix} x'_{Rp} \\ y'_{Rp} \\ z'_{Rp} \end{bmatrix} = R J \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 0 \end{bmatrix}, J \in \{J_1, J_2\} \tag{5-27}$$

其中,  $R$  表示从摄像机坐标系到机器人坐标系的旋转矩阵; 公式(5-27)描述了图像上的一个特征点的运动速度与机器人运动之间的计算关系。

#### 5.4.2 机器人的混合视觉控制模型

对于爬壁机器人的控制方法本文采用基于混合视觉伺服的控制模型, 包括一个笛卡尔坐标系下的位置控制环; 一个基于位置的视觉伺服控制环, 用于控制机器人沿焊缝方向移动; 一个基于图像的视觉伺服控制环, 用于消除跟踪误差, 如图 5-14 所示[139]。假设在  $i$  时刻跟踪到激光线上的特征点  $P_i$ , 图像坐标为  $P_i = [u_{pi}, v_{pi}]$ , 机器人坐标系下坐标为  $P_{Ri} = [x_{Ri}, y_{Ri}, z_{Ri}]$ 。根据  $i-1$  到  $i$  时间段上机器人的运动量  $\Delta_i$  可以计算得到  $P_{i-1}$  在当前时刻坐标系下的坐标  $P_{Ri-1} = [x_{Ri-1}, y_{Ri-1}, z_{Ri-1}]$ 。有  $P_{i-1}$  和  $P_i$  可计算出焊缝方向。为提高精度, 可计算连续时间段上的多个特征点在当前坐标系下的坐标值, 通过最小二乘拟合焊缝方向。 $K$  是一比例系数, 输出量  $\Delta_i$  为机器人的运动量, 由此控制机器人运动。对于运动中产生的偏差则利用图像空间的视觉伺服控制来调整焊缝偏移量。由给定的特征点坐标  $(u, v)$  和特征点坐标  $P_i = [u_{pi}, v_{pi}]$  计算偏差量  $(du_i, dv_i)$  以及当前时刻从图像坐标系到机器人坐标系的雅可比矩阵的

估计量  $\hat{J}$ 。由公式(5-27)可计算得到机器人位置量估计值的微分形式  $(d\hat{x}_R, d\hat{y}_R, d\hat{z}_R)$  即机器人的位置误差。经 PID 控制器计算得到运动量的微分值  $\Delta_{si}$ 。于是得到机器人运动量

$$\vec{\Delta}_i = \vec{\Delta}_{si} + \vec{\Delta}_{li} \quad (5-28)$$

给定运动量  $\Delta_i$ ，利用 5.2 节中涉及的机器人运动模型求逆计算即可得到机器人的位姿信息。理想状态下履带机器人不会在  $x$  方向上发生移动，也不会发生侧翻和倾覆。运动量只有  $y$  方向和绕  $z$  轴的转角  $\gamma$ ，因此空间的六个自由度在本模型中只留两个。以  $y$  和  $\gamma$  作为输入量，利用 PID、放大器、伺服电机惯性环节单元等机器人自身装置控制机器人位姿。超声探头的扫描终端如图 5-3 所示可以看作一个十字滑块，滑块坐标系  $S = [x_s, y_s, z_s]$ ，在  $S$  坐标系下运动量只存在  $x$  和  $z$  两个方向，即滑块在  $x$  方向上沿丝杠 1 滑动和在  $z$  方向上沿丝杠 2 抬起与降落。

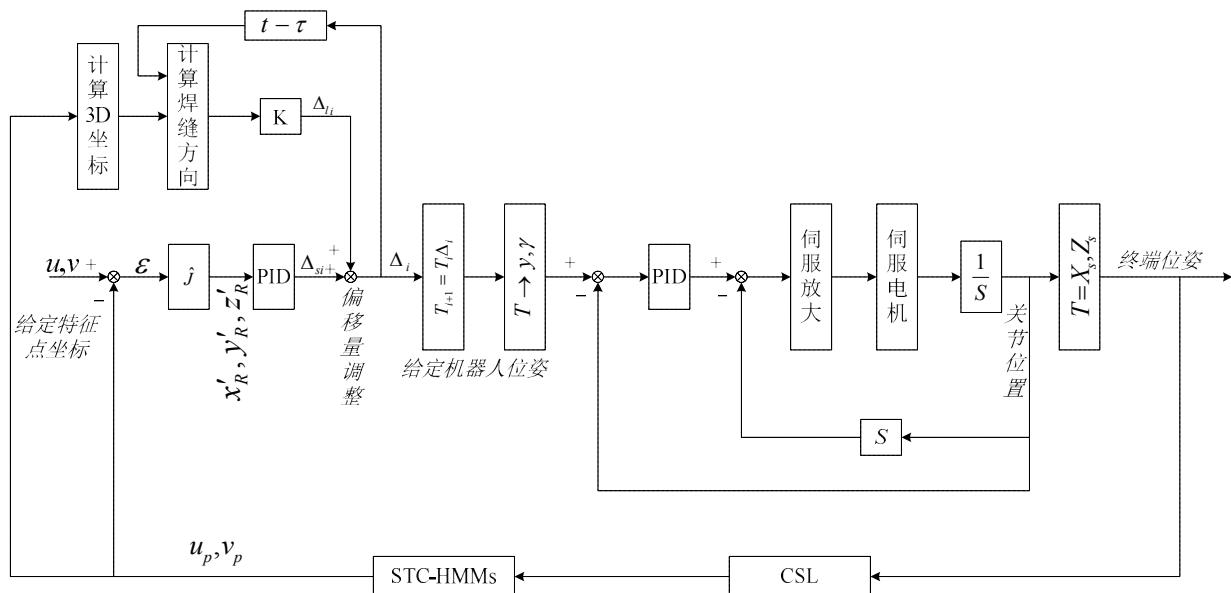


图 5-14 机器人混合视觉伺服控制。

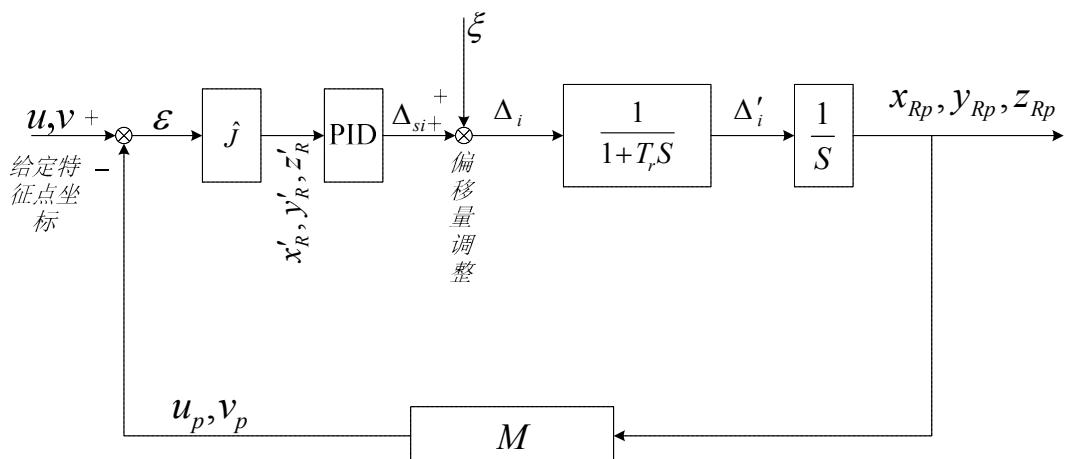


图 5-15 机器人混合视觉伺服控制简化形式。

在机器人为焊缝做超声波扫描的工作状态下，其前进速度约为  $2m/min$ ，这个速度可看作机器人在一个极低的运动速度下工作。因此可以将机器人运动视为一个一阶惯性环节，将机器人焊缝跟踪的运动量看作基于图像的视觉伺服控制模块的一个扰动量  $\xi(t)$ 。机器人的位置控制只取决于给定的速度和终端滑块按固定速度与范围的往复运动。于是图 5-14 的混合控制模型可以简化为 5-15 形式[139]。图像采集及处理系统用  $M$  作为模型。

### 5.4.3 系统稳定性分析

在机器人坐标系下，激光束平面方程可以表示为

$$a_R x + b_R x + c_R x + 1 = d_R, a_R \in \{a_{R1}, a_{R2}\}, b_R \in \{b_{R1}, b_{R2}\}, c_R \in \{c_{R1}, c_{R2}\} \quad (5-29)$$

$$\begin{bmatrix} a_R \\ b_R \\ c_R \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ar_{11} + br_{21} + cr_{31} \\ ar_{12} + br_{22} + cr_{32} \\ ar_{13} + br_{23} + cr_{33} \end{bmatrix} \quad (5-30)$$

$$d_r = ar_1 p + br_2 p + cr_3 p \quad (5-31)$$

其中  $(a_{R1}, b_{R1}, c_{R1}), (a_{R2}, b_{R2}, c_{R2})$  分别为激光束平面  $L_1, L_2$  的法向量； $R$  是从摄像机坐标系到机器人坐标系的旋转矩阵， $r_1, r_2, r_3$  的定义同公式(2-18)； $p = [p_1, p_2, p_3]^T$  是上述两坐标系之间的平移向量。

对于激光线上的特征点  $P_i$ ，在第  $i$  帧图像上的坐标转换到机器人坐标系下记为

$$\begin{cases} x_{Ri} = x_{R0} + v_x t \\ y_{Ri} = y_{R0} + v_y t \\ z_{Ri} = z_{R0} + v_z t \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_{Ri} = x_{R(i-1)} + v_x \tau \\ y_{Ri} = y_{R(i-1)} + v_y \tau \\ z_{Ri} = z_{R(i-1)} + v_z \tau \end{cases} \quad (5-32)$$

其中  $(x_{R0}, y_{R0}, z_{R0})$  为初始坐标， $\tau$  的定义同公式(4-8)和(4-9)，为相邻帧的时间间隔， $(v_x, v_y, v_z)$  为机器人在三个坐标方向上的速度，因  $v_x = 0, v_z = 0$ ，(5-32)可记为

$$\begin{cases} x_{Ri} = x_{R(i-1)} \\ y_{Ri} = y_{R(i-1)} + v_y \tau \\ z_{Ri} = z_{R(i-1)} \end{cases} \quad (5-33)$$

因此机器人如果移动了  $\Delta'_i = (\Delta'_{xi}, \Delta'_{yi}, \Delta'_{zi})$  后，在第  $i$  帧到第  $i+1$  帧间，特征点  $P_i$  在机器人坐标系下坐标为

$$\begin{cases} x_{R(i+1)} = x_{R0} + \Delta'_{xi} \\ y_{R(i+1)} = y_{R0} + \Delta'_{yi} + v_y \tau \\ z_{R(i+1)} = z_{R0} + \Delta'_{zi} \end{cases} \quad (5-34)$$

由(5-29)~(5-34)可得到机器人速度微分矩阵的齐次形式

$$\begin{bmatrix} dx_R \\ dy_R \\ dz_R \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{Ri} - x_{R(i-1)} \\ y_{Ri} - y_{R(i-1)} \\ z_{Ri} - z_{R(i-1)} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & v_x \tau \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta'_{xi} \\ \Delta'_{yi} \\ \Delta'_{zi} \\ 1 \end{bmatrix} = D\Delta \quad (5-35)$$

这里的  $D$  描述了特征点在机器人坐标系下的速度方程，即位置变化关系。

设图 5-14 和 5-15 中的误差矢量  $\vec{\varepsilon} = [u - u_p, v - v_p]^T$ ，令  $x_1 = \vec{\varepsilon}$ ， $x_2 = \Delta_i = [\Delta_{xi}, \Delta_{yi}, \Delta_{zi}]^T$ ， $x_3 = \Delta'_i = [\Delta'_{xi}, \Delta'_{yi}, \Delta'_{zi}]^T$ 。构建三元二次形式的李雅普诺夫方程：

$$V(x) = \frac{1}{2}x_1^2 + \frac{1}{2}x_2^2 + \frac{1}{2}x_3^2 \quad (5-36)$$

根据图 5-15 可知  $X'_1 = -MDX_3$ ， $X'_2 = K_r \hat{J}X_1 - \frac{K_d}{T_r} \hat{J}MDX_2 + \left( \frac{K_d}{T_r} - K_p \right) \hat{J}MDX_3$ ， $X'_3 = \frac{1}{T_r} X_2 - \frac{1}{T_r} X_3$ 。这里的  $X_1$ ， $X_2$ ， $X_3$  分别是  $x_1, x_2, x_3$  的齐次形式； $K_r$ ， $K_d$ ， $K_p$  为 PID 控制器的调节参数。方程(5-36)的导数形式为

$$\begin{aligned} V'(X) = & \left( \frac{1}{2} X_1^T X_1 + \frac{1}{2} X_2^T X_2 + \frac{1}{2} X_3^T X_3 \right)' = -X_1^T MDX_3 + \\ & X_2^T \left( K_r \hat{J}X_1 - \frac{K_d}{T_r} \hat{J}MDX_2 + \left( \frac{K_d}{T_r} - K_p \right) \hat{J}MDX_3 \right) + X_3^T \left( \frac{1}{T_r} X_2 - \frac{1}{T_r} X_3 \right) \end{aligned} \quad (5-37)$$

其中

$$-X_1^T MDX_3 = -\frac{1}{2} X_1^T MDX_1 + \frac{1}{2} (X_1 - X_3)^T MD(X_1 - X_3) - \frac{1}{2} X_3^T MDX_3 \quad (5-38)$$

$$X_2^T K_r \hat{J}X_1 = \frac{1}{2} X_2^T K_r \hat{J}X_2 - \frac{1}{2} (X_2 - X_1)^T K_r \hat{J}(X_2 - X_1) + \frac{1}{2} X_1^T K_r \hat{J}X_1 \quad (5-39)$$

$$\begin{aligned} X_2^T \left( \frac{K_d}{T_r} - K_p \right) \hat{J}MDX_3 = & \frac{1}{2} X_2^T \left( \frac{K_d}{T_r} - K_p \right) \hat{J}MDX_2 - \\ & \frac{1}{2} (X_2 - X_3)^T \left( \frac{K_d}{T_r} - K_p \right) \hat{J}MD(X_2 - X_3) + \frac{1}{2} X_3^T \left( \frac{K_d}{T_r} - K_p \right) \hat{J}MDX_3 \end{aligned} \quad (5-40)$$

$$\frac{1}{T_r} X_3^T X_2 = \frac{1}{2T_r} X_3^T X_3 - \frac{1}{2T_r} (X_3 - X_2)^T (X_3 - X_2) + \frac{1}{2T_r} X_2^T X_2 \quad (5-41)$$

由于  $(X_1 - X_3)^T (X_1 - X_3)$ ， $(X_2 - X_1)^T (X_2 - X_1)$ ， $(X_2 - X_3)^T (X_2 - X_3)$ ， $(X_3 - X_2)^T (X_3 - X_2)$  等都是高阶无穷小量，因此可以忽略不计。公式(5-37)可以简化为

$$\begin{aligned}
V'(X) = & -\frac{1}{2}X_1^T M D X_1 - \frac{1}{2}X_3^T M D X_3 + \frac{1}{2}X_2^T K_i \hat{J} X_2 + \frac{1}{2}X_1^T K_i \hat{J} X_1 - X_2^T \frac{K_d}{T_r} \hat{J} M D X_2 + \\
& \frac{1}{2}X_2^T \left( \frac{K_d}{T_r} - K_p \right) \hat{J} M D X_2 + \frac{1}{2}X_3^T \left( \frac{K_d}{T_r} - K_p \right) \hat{J} M D X_3 + \frac{1}{2T_r} X_3^T X_3 + \frac{1}{2T_r} X_2^T X_2 + \frac{1}{T_r} X_3^T X_3 \\
= & \frac{1}{2} \left( -MD + K_i \hat{J} \right) X_1^T X_1 + \frac{1}{2} \left( K_i \hat{J} - K_p \hat{J} MD + \frac{1}{T_r} \right) X_2^T X_2 + \\
& \frac{1}{2} \left( -MD + \left( \frac{K_d}{T_r} - K_p \right) \hat{J} MD + \frac{1}{T_r} \right) X_3^T X_3
\end{aligned} \tag{5-42}$$

显然,  $V(X)$  是正定的, 除  $X = 0$  之外, 对于任何  $X \neq 0$  的情况,  $V'(X)$  不恒等于 0。而且当  $\|X\| \rightarrow \infty$  时,  $V(X) \rightarrow \infty$ 。根据李雅普诺夫第二方法, 当  $V'(X)$  为负定时, 系统渐进稳定, 即

$$\begin{cases} -MD + K_i \hat{J} < 0 \\ K_i T_r \hat{J} - K_p T_r \hat{J} MD + 1 < 0 \\ -T_r MD + (K_d - K_p T_r) \hat{J} MD + 1 < 0 \end{cases} \tag{5-43}$$

被满足时, 系统渐进稳定。其中  $D, M, \hat{J}, T_r$  均为定值, 因此当  $K_i, K_d, K_p$  的值满足不等式 (5-43) 时, 系统即为李雅普诺夫意义下的渐进稳定。

## 5.5 爬壁机器人系统实验

### 5.5.1 机器人吸附单元实验

图 5-4 显示了爬壁机器人吸附单元的安装方式, 尽管存在灰尘、气隙等影响吸附单元吸附力的一些影响因素, 但通过图 5-16 的测试方法测得单个吸附单元能够提供的最大吸附力为 140N。实验证明, 吸附单元所能提供的吸附力足以支持机器人稳定吸附。



图 5-16 吸附单元吸附力测试。

爬壁机器人自重为 24Kg, 为使其稳定吸附于塔筒表面, 每个吸附单元所要提供的吸附

力与参与吸附的单元的数量之间属于单调递减关系，如图 5-17 所示。机器人吸附在壁面上的吸附单元数量增多时，每个吸附单元要分担的重力分量会呈指数形式急剧下降。机器人吸附在壁面上的吸附单元数量越多，机器人对单个磁吸附单元所需的吸附力越小。因此，增加吸附于塔筒表面的吸附单元数量，是提高机器人的吸附稳定性的一个有效解决方法。

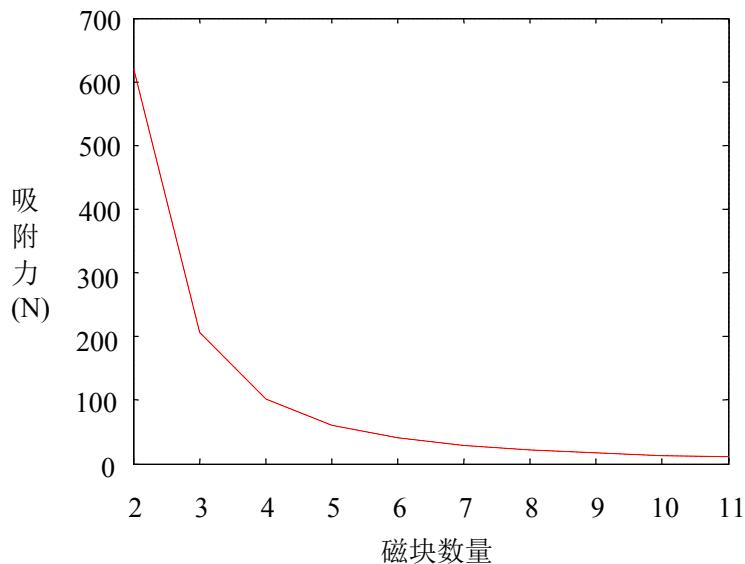


图 5-17 吸合在壁面上的吸附单元数量与吸附力的关系。

吸附力的另一个影响因素是由于吸附单元与壁面之间的间隙，本文涉及的机器人结构可以保证每条履带上至少有六个磁吸附单元与壁面紧密吸合。吸附单元的固有性质，为保证机器人稳定吸附，最大间隙的可以达到 3mm，足以克服塔筒表面的油漆、灰尘、焊渣等干扰因素的影响。

### 5.5.2 机器人通信单元实验

机器人通信单元采用 Zigbee 通信模块和专用无线视频传输模块两个部分，Zigbee 模块承担机器人控制指令、电量信息、码盘计数、超声波信号和倾角值的发送，为机器人和地面控制主机之间的半双工通信；视频模块负责将 CSL 传感器采集的视频传给主机，是从机器人到主机的单工通信。

Zigbee 网络基于 IEEE 802.15.4 国际标准、上层协议为 ZigBee 协议栈，具有低功耗，低速率，高可靠性，网络路由功能强大，自恢复及冗余性能优异等特点。本文系统直接采用美国 CEL 公司的 MeshConnect™ 模块，额定电压 1.5V，最高数据传输速率 1Mbps，传送范围 3000 英尺。模块外观如图 5-18 所示，两个 Zigbee 无线通信模块，一个装在机器人控制卡上，另一个与地面主机相连，二者进行点对点通信。本文设计的芯片管脚和外围电路如图 5-19 所示。通过 Zigbee 模块的控制命令如表 5-1 所列。



图 5-18 一对 Zigbee 无线通信模块。

表 5-1 机器人系统控制指令

帧头 (一字节)	指令 (一字节)	数据	帧尾 (一字节)
0xff	前进 0x00	0x0000---0xffff (mm, 两字节)	0xee
0xff	后退 0x01	0x0000---0xffff (mm, 两字节)	0xee
0xff	左转 0x02	0-90 0x00 (°, 两字节)	0xee
0xff	右转 0x03	0-90 0x00 (°, 两字节)	0xee
0xff	探头升 0x04	0x00 0x00-0x14 (mm, 两字节)	0xee
0xff	探头降 0x05	0x00 0x00-0x14 (mm, 两字节)	0xee
0xff	控制喷头打标记 0x06	0x00 0x00 (空, 两字节)	0xee
0xff	零点位置设置 0x07	0x00 0x00 (空, 两字节)	0xee
0xff	设置速度 0x08	0x00 0x00-0x05 (两字节)	0xee
0xff	探头左移 0x09	0x00 0x00-0x14 (mm, 两字节)	0xee
0xff	探头右移 0x0a	0x00 0x00-0x14 (mm, 两字节)	0xee
0xff	开始喷耦合液 0x0b	0x00 0x00 (空, 两字节)	0xee
0xff	停止喷耦合液 0x0c	0x00 0x00 (空, 两字节)	0xee
0xff	设置剩余电量 0x0d	0-100 (%, 两字节)	0xee
0xff	剩余电量 0x50	0-100 (%, 四字节)	0xee
0xff	倾角值 0x52	0-360 (°, 四字节)	0xee
0xff	成功接收命令 0x53	0x53 0x53 0x53 0x53 (°, 四字节)	0xee
0xff	前进绝对距离 0x51	m (前两字节), cm (第三字节), mm (第四字节)	0xee

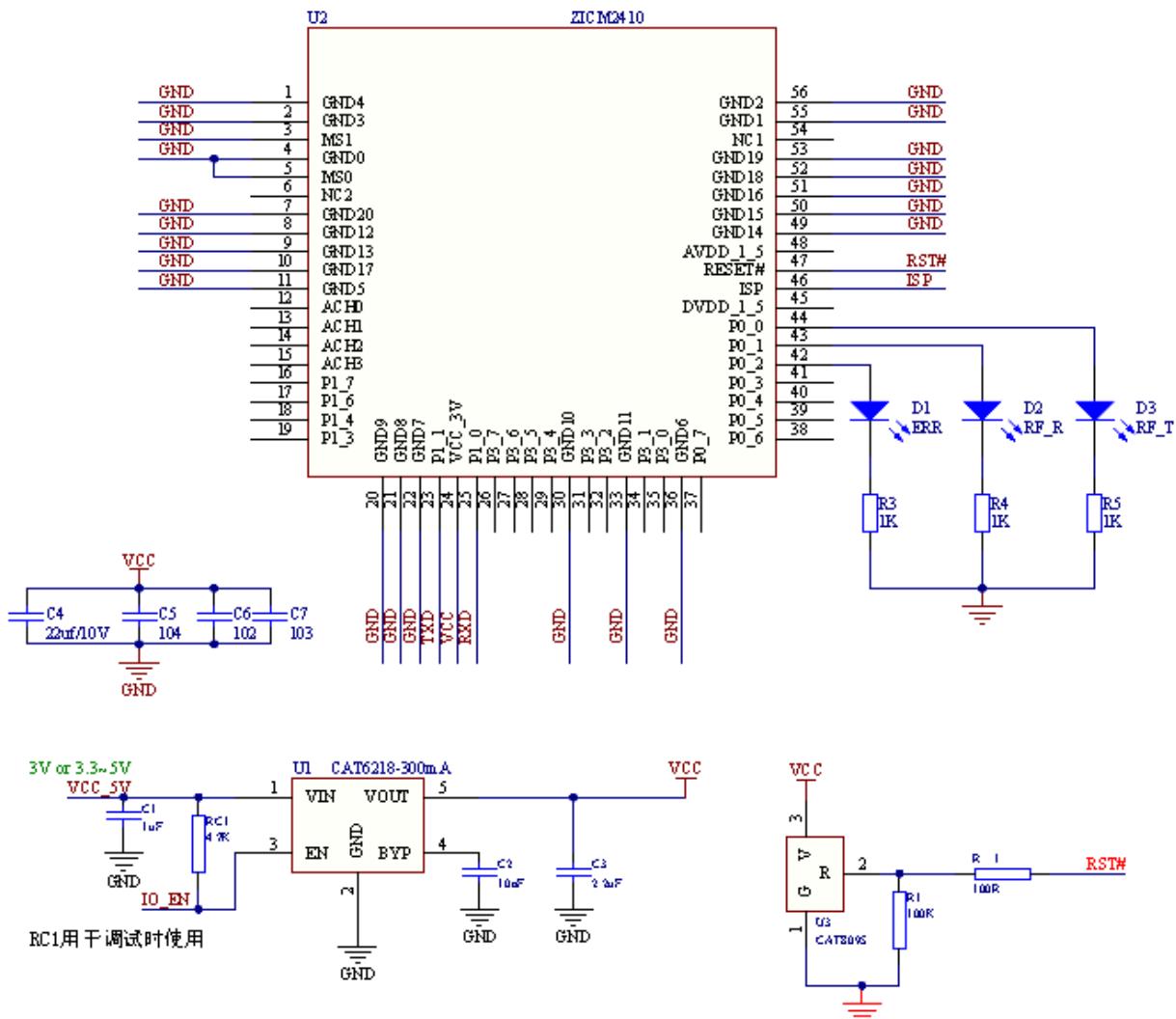


图 5-19 Zigbee 无线通信模块及外围电路结构原理图。



图 5-20 视频无线通信模块。

Zigbee 模块的最大传输速率为  $1\text{Mb/s}=128\text{KB/s}$ , 一帧  $640\times480$  像素的 24 位图片大小约为  $9.25\text{KB}$ 。 $20\text{f/s}$  的情况下, 每秒至少需要传输  $185\text{KB}$  数据量, 因此 Zigbee 现有的带宽不足以满足通信需求, 因此从机器人到主机的视频通信采用无线视频传输模块, 如图 5-20 所示。该模块发射功率:  $800\text{mW}$ , 工作频段:  $1.3\text{G}$ , 最大发射距离: 1500 米, 工作电压/电流: DC12V/250mA, 帧率:  $25\text{f/s}$ , 最大带宽:  $1\text{MB/s}$ 。其性能完全可以满足实时通信的需要。

### 5.5.3 焊缝跟踪实验

本文提出的视觉焊缝跟踪算法在如图 5-21(a)所示的爬壁机器人系统上执行, 图 5-21(b)和图 5-21(c)显示爬壁机器人在焊缝跟踪工作中的垂直和水平运动状态。

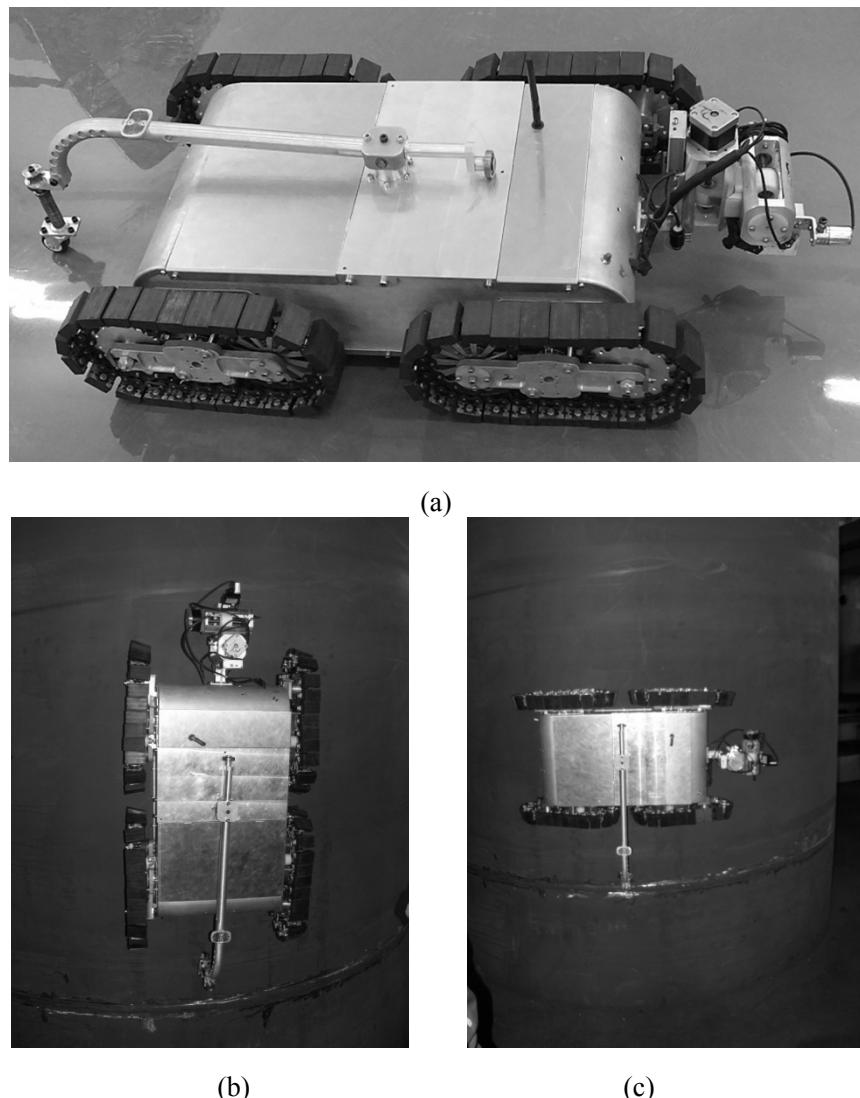


图 5-21 爬壁机器人及其工作状态。

将第四章的 STC-HMMs 系统在图像空间的焊缝跟踪结果转换到机器人坐标系下，作为计算焊缝走向的输入量，并根据混合伺服模型将焊缝图像特征点作为反馈量计算机器人空间的速度微分量，控制机器人及超声探头的位姿。取 A, B 两个特征点的中点作为焊缝中心线，控制过程中尽量调整机器人中线与焊缝中心线重合。在机器人开始工作前，由操作者将机器人摆放到塔筒底部焊缝上。尽量对准焊缝中线，并调整好超声波探头的位置，将底部的焊缝擦拭干净，这样有利于得到一个比较准确的初始特征点图像坐标，可以将其作为焊缝图像坐标的参考值( $u, v$ )，而且一个准确的起点有利于算法模型快速收敛。

在图 5-22 中显示了爬壁机器人的焊缝跟踪结果，图 5-22(a)为一段四节风机塔筒焊缝结构示意图，用绿线勾勒的焊缝为机器人上升过程中行走的路径，红线表示机器人下降过程中的行走路径。这是一个机器人运行的最优路径，可以使机器人的行走距离最小化，没有重复检测情况，也没有漏检（上下的两次不能算重复）。图 5-22(b)表示局部焊缝的理想中心线，在实验中作为基准值。图 5-22(c)显示机器人在图 5-22(b)部分的真实运行轨迹，尽管在第四章的实验中可以看到在图像处理阶段有些跟踪误差还比较大，但是机器人本身是一个很大的惯性环节，在一定程度上克服了部分误差的影响，因此机器人的运行轨迹与基准线重合度非常高。

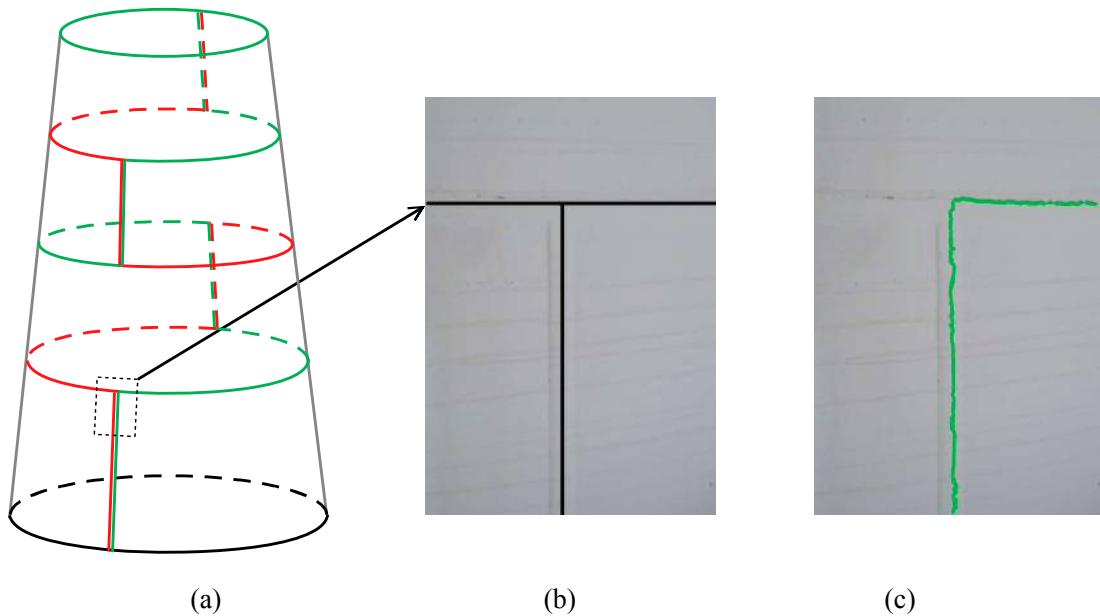


图 5-22 爬壁机器人焊缝跟踪结果。(a).四节风机塔筒焊缝结构示意图；(b).焊缝中心线(作为焊缝跟踪的基准线)；(c).爬壁机器人焊缝跟踪轨迹。

#### 5.5.4 超声波探伤实验

本文实验中涉及的超声波探伤仪采用汕头超声所生产的便携式 CTS-9009 数字超声探伤仪，超声波扫描探头采用斜波直探头，型号 5Z14X14A70，晶片尺寸 14×14mm，如图 5-23

所示。在焊缝检查过程中机器人沿焊缝方向移动，超声波探头在与焊缝垂直方向上做往复运动，在世界坐标系下超声波探头的移动轨迹为Z字形。

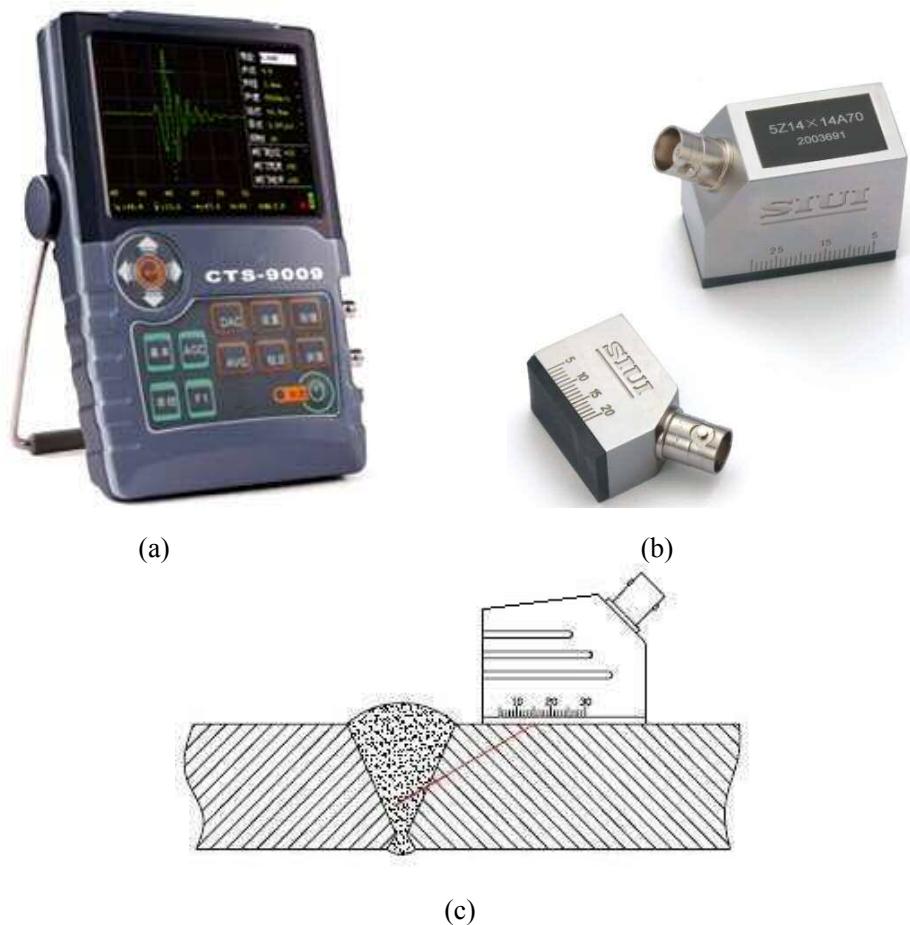
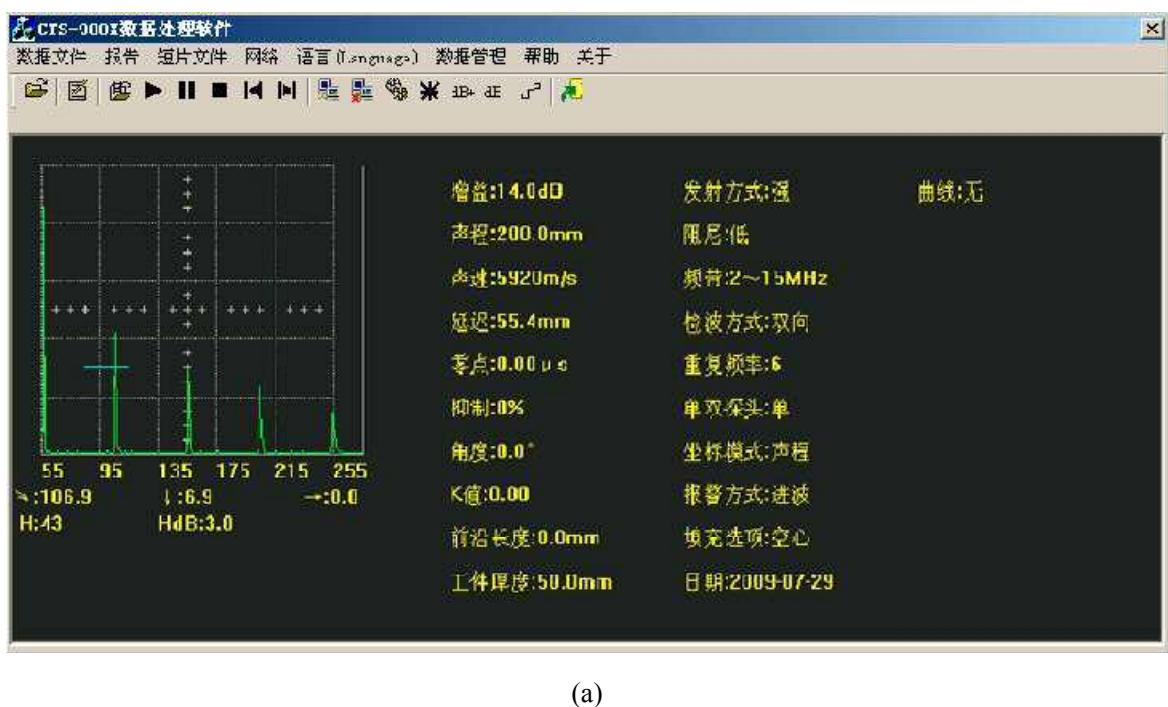
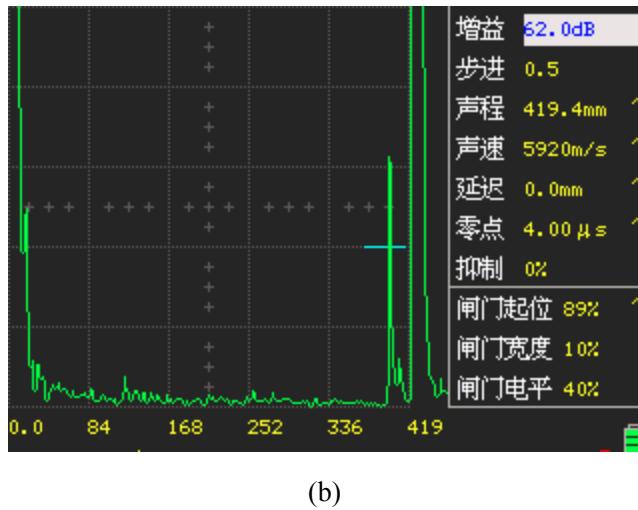


图 5-23 超声波探伤仪、扫描探头及探伤检测示意图。



(a)



(b)

图 5-24 超声波探伤仪应用示例。(a)超声检测软件界面; (b).平底孔试件的回波。

图 5-24 为超声波检查软件界面，该设备具备自动记录，报警，分类，检索等功能。如图 5-3 所示，超声波探头固定在机器人前端水平丝杠上的滑块下面，丝杠长 120mm，滑块左右可移动范围 100mm，当机器人偏离焊缝中轴线未超过滑块所能覆盖的范围时，系统可以仅通过调整滑块滑动范围继续进行焊缝检测，无需调整机器人位姿。

## 5.6 小结

本章首先介绍了爬壁机器人的结构设计灵感，模仿壁虎爬墙的仿生学设计方式。分析了爬壁机器人的力学模型和动力学模型，对机器人在竖直方向和水平方向上做受力分析，通过对永磁吸附单元的吸附力计算，保证了机器人在塔筒表面吸附的稳定。在塔筒上作业过程中，机器人可能出现 4 种运动方式：竖直行走，水平行走，任意角度运动和原地转弯，文中分别对四种运动方式的做出运动学分析，并建立以塔筒为世界坐标系的运动模型。

然后，根据运动学模型和焊缝跟踪结果，视觉图像特征点坐标到机器人坐标系的运动微分方程被建立，计算出反应两坐标系之间特征点运动关联的雅可比矩阵。采用一个混合视觉伺服模型控制机器人跟踪焊缝并做超声检查工作。最终，建立 CSL 传感器坐标系与机器人坐标系的运动关联，再结合混合视觉伺服模型分析系统稳定性。根据李雅普诺夫第二方法的稳定性判据，选择符合负定条件的 PID 参数可保证系统的渐近稳定。

在实验中根据实验数据介绍了吸附单元的力学特性；控制系统的通信单元结构和指令系统；机器人焊缝跟踪轨迹优化与跟踪效果；超声波探伤仪的软硬件选择。



## 第六章 总结与展望

本文面向焊缝跟踪过程中的信息采集、特征获取和控制反馈过程中的理论基础，针对成型焊缝的结构特征设计了一套特殊的激光结构光传感器；面对野外作业中的高光照、高噪声等环境因素构建了基于时空级联隐马尔可夫模型的焊缝跟踪系统；最后结合机器人的力学和运动学模型提出机器人的混合视觉伺服控制模型，并验证系统的稳定性。

### 6.1 工作总结

在论文涉及的理论与实验过程中，作者共取得了如下研究成果：

1. 在爬壁机器人平台上设计一套十字型结构光传感器，该传感器除能够准确跟踪和测量直焊缝之外，更重要的是该传感器的十字型激光投影设计非常适合于检测横纵焊缝的交叉区域，即可以同时检测到横纵正交的两条焊缝。在实验中，我们在 16 个位置上分别采集两组带激光投影和不带激光投影的图像，共提取 300 组特征点作为标定工作的训练集合，分别用于标定激光束平面和摄像机。计算激光束的平面方程和摄像机内外参数，并分析系统的标定精度。然后，选择未参与标定工作的 18 组特征点作为测试集计算传感器系统的测量精度，实验结果显示该设备在 700mm 深度的测量范围内精度可达到毫米级，而机器人平台上的传感器测量深度大概在 150mm 左右，这个测量精度完全可以满足机器人视觉导航的要求。
2. 分析激光线能量函数和 CCD 成像性质，有区别的对待激光投影的能量分布形式和激光线在 CCD 成像过程中的亮度分布形式。在 CCD 成像过程中，由于感光单元过饱和失真的情况，激光线亮度分布在 CCD 上呈现为一个被削顶的高斯分布形式。这种情况对于定位激光线峰值位置非常重要，因而在此基础上采用重心法对激光线亮度峰值进行亚像素定位。由于重心法直接计算得到的重心点包含着若干环境噪声，于是将重心法得到的亮度重心作为状态量输入到用空域隐马尔可夫模型，模型系统的转移概率和观测概率分别采用状态量之间的距离和颜色差异计算。经过由 Viterbi 算法解码得到的激光线延伸的最优路径，这个路径即为被初步提取的激光线骨架。最后经过中值滤波和形态学处理可得到一条非常平滑又反映了焊缝表面 3D 信息的激光线骨架。在与参考文献中提到的 4 种方法做定量对比发现：S-HMM 方法在精度、实时性、鲁棒性三个方面都具备良好的工作特性。
3. 在提取得到的激光线上设计一个测量函数，由一个具有尺度变化的滑动窗口循环扫描激光线，计算窗口内的测量函数值，函数值的大小反映了所在窗口位置处为焊缝位置

的相似程度，函数值越大，窗口所在位置符合焊缝位置的相似度越高。将各窗口按相似度从高到低排列，作为系统的状态量输入到一个时域隐马尔可夫模型，此时的模型系统转移概率和观测概率由窗口之间的面积，位置和颜色信息来计算。在跟踪过程中需要考虑机器人的运动速度和方向因素，有所区别的对待垂直激光线和水平激光线上的焊缝跟踪情况。在实验中，通过统计焊缝特征点的跟踪效果并对比游标卡尺的测量结果发现：STC-HMM 的焊缝跟踪在  $640\times480$  分辨率的图像空间里，跟踪结果均方误差可控制在 1.5 像素（在笛卡尔坐标系下约 4.5mm）范围内，焊缝跟踪误差率不高于 3.6%。

4. 分析机器人平台的力学和运动学模型，计算机器人在竖直方向上和水平方向上的吸附效果和受力情况。针对机器人可能存在的滑动坠落和倾覆坠落情况，分别计算了永磁吸附单元的吸附力和介绍防倾覆机构的设计形式。对于机器人存在的竖直运动、圆周运动、任意方向运动和原地转动四种运动方式进行受力分析并建立动能方程。结合机器人的运动学模型和视觉跟踪测量结果，本文提出采用混合视觉伺服控制模型进行机器人移动控制和超声波焊缝检测控制方案，并通过李雅普诺夫稳定性判据分析系统稳定的充分必要条件。在实验中验证机器人移动轨迹与焊缝中心线高度重合，很好的实现了焊缝跟踪与检测工作。实验环节还验证了机器人永磁吸附的稳定性，无线通信方案设计及超声波探伤设备的应用方案。

研究结果显示本文提出的爬壁机器人平台、视觉传感器、焊缝跟踪系统具有很好的实际应用价值，可在恶劣的野外环境中实现焊缝跟踪检测作业。

## 6.2 未来工作展望

现实工业环境下的焊缝视觉跟踪工作是一项充满挑战的研究课题，本文对其中的几个主要问题做了探索性的尝试或技术上的革新，但我们承认，在视觉跟踪和控制模型设计方面还有很多问题亟待解决或尚需完善。机器人是一个涉及到材料、机械、电气、通信、软件等诸多学科的系统工程，由于作者的学识和精力有限，只在上述 4 个点上做了相关的研究。在未来的工作中，本人希望以博士阶段的研究成果为起点继续深入研究，同时扩大到相关的研究领域。

在数据处理方面，目前的空间坐标转换、TSC-HMMs 滤波、视觉控制等还依赖于 PC 机处理，需要机器人与上位机之间时刻保持无线通信。在未来的工作中，我们计划将数据处理单元固化到机器人本体上，采用 DSP 或 FPGA 等高速计算单元实现软件部分的大量计算工作。这也需要我们在嵌入式技术上继续深入研究，未知的难题可能会在以后工作中不断涌出。

基于结构光技术的视觉焊缝跟踪系统，面对长时间的目标遮挡和长距离的焊缝焊接缺陷的处理能力还有明显不足，尤其是面对表面固体污染物造成的噪声干扰，系统的鲁棒性还有待提高。在未来的工作中我们可以在处理结构光信息的基础上辅以图像上的分类算法，采用多元数据融合的方式提高焊缝的识别和跟踪精度。



## 参考文献

- [1] Khosla P K, Neuman C P, Prinz F B. An algorithm for seam tracking applications[J]. The International Journal of Robotics Research, 1985, 4(1): 27-41.
- [2] Molina L, Carvalho E A N, Freire E O, et al. A Robotic Vision System Using a Modified Hough Transform to Perform Weld Line Detection on Storage Tanks[C]//Robotic Symposium, 2008. LARS'08. IEEE Latin American. IEEE, 2008: 45-50.
- [3] Carvalho E, Molina L, Freire E, et al. Fillet weld identification for automatic inspection of spherical tanks[C]//Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2007. IMTC 2007. IEEE. IEEE, 2007: 1-6.
- [4] Molina L, Freire R C S, Carvalho E A N, et al. A Model-Based Fault-Tolerant Weld Line Detection for Automatic Inspection of Storage Tanks Using Visual Information and a- $\beta$  Filter[C]//Robotics Symposium and Intelligent Robotic Meeting (LARS), 2010 Latin American. IEEE, 2010: 25-29.
- [5] Carvalho E, Luciano B A, Freire R, et al. Fault-tolerant weld line detection for automatic inspection of storage tanks based on distance and visual information fusion[C]//Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2009. I2MTC'09. IEEE. IEEE, 2009: 791-796.
- [6] Molina L, Carvalho E Á N, Freire E O, et al. Fault-Tolerant Weld Line Detection Using Image Processing and Fusion of Execution Monitoring Systems[J]. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 2013: 1-11.
- [7] Kuo H C, Wu L J. An image tracking system for welded seams using fuzzy logic[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 120(1): 169-185.
- [8] 田兰图, 陈恩. 油罐检测爬壁机器人技术及系统研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [9] 李慨. 基于视觉传感管道焊接机器人跟踪系统研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2007.
- [10] 岳宏, 孙立新, 李慨. 基于结构光焊缝跟踪系统的研究[J]. 河北工业大学学报, 1999, 28(4): 21-24.
- [11] Li Y, Li Y F, Wang Q L, et al. Measurement and defect detection of the weld bead based on online vision inspection[J]. Instrumentation and Measurement, IEEE

- Transactions on, 2010, 59(7): 1841-1849.
- [12] Li Y, Wang Q L, Li Y F, et al. On-line visual measurement and inspection of weld bead using structured light[C]//Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2008. IMTC 2008. IEEE. IEEE, 2008: 2038-2043.
- [13] Gao X, Shao J, Dai F, et al. Strong Magnetic Units for a Wind Power Tower Inspection and Maintenance Robot[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2012, 9.
- [14] Shao J, Li X, Zong C, et al. A wall-climbing robot with gecko features[C]//Mechatronics and Automation (ICMA), 2012 International Conference on. IEEE, 2012: 942-947.
- [15] Xu D, Wang L, Tu Z, et al. Hybrid visual servoing control for robotic arc welding based on structured light vision[J]. Acta Automatica Sinica, 2005, 31(4): 596.
- [16] Xu D, Jiang Z, Wang L, et al. Features extraction for structured light image of welding seam with arc and splash disturbance[C]//Control, Automation, Robotics and Vision Conference, 2004. ICARCV 2004 8th. IEEE, 2004, 3: 1559-1563.
- [17] Xu D, Li Y F, Shen Y, et al. New pose-detection method for self-calibrated cameras based on parallel lines and its application in visual control system[J]. Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on, 2006, 36(5): 1104-1117.
- [18] Xu D, Tan M, Zhao X, et al. Seam tracking and visual control for robotic arc welding based on structured light stereovision[J]. International Journal of Automation and Computing, 2004, 1(1): 63-75.
- [19] Shen W, Gu J, Shen Y. Proposed wall climbing robot with permanent magnetic tracks for inspecting oil tanks[C]//Mechatronics and Automation, 2005 IEEE International Conference. IEEE, 2005, 4: 2072-2077.
- [20] 田兰图, 杨向东, 赵建东, 等. 油罐检测爬壁机器人结构与控制系统设计[J]. 机器人, 2004, 26(5): 385-390.
- [21] 丈怀洛, 件仕忠, 付贵诱, 等. 立式金属罐容积检定爬壁机器人的研制[J]. 自动化仪器仪表, 2007, 28 (8): 45-47.
- [22] Zhang L, Jiao J, Ye Q, et al. Robust weld line detection with cross structured light and Hidden Markov Model[C]//Mechatronics and Automation (ICMA), 2012 International Conference on. IEEE, 2012: 1411-1416.

- [23] Zhang L, Ke W, Han Z, et al. A cross structured light sensor for weld line detection on wall-climbing robot[C]//Mechatronics and Automation (ICMA), 2013 IEEE International Conference on. IEEE, 2013: 1179-1184.
- [24] 沈为民, 张稳. 水冷壁清扫检测爬壁机器人[J]. 机器人, 1999, 21(5): 375-378.
- [25] 潘焕焕, 赵言正, 高学山, 等. 水冷壁爬壁机器人的本体结构设计[J]. 机械设计与制造工程, 2000, 29(5): 7-10.
- [26] Briones L, Bustamante P, Serna M A. Wall-climbing robot for inspection in nuclear power plants[C]//Robotics and Automation, 1994. Proceedings., 1994 IEEE International Conference on. IEEE, 1994: 1409-1414.
- [27] Zhang H, Zhang J, Zong G, et al. Sky cleaner 3: a real pneumatic climbing robot for glass-wall cleaning[J]. Robotics & Automation Magazine, IEEE, 2006, 13(1): 32-41.
- [28] 许少强. 爬壁侦察机器人控制系统设计[D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2008.
- [29] 孟宪超, 王祖温, 包钢, 等. 一种多吸盘爬壁机器人原型的研制 [J]. 机械设计, 2003, 20(8).
- [30] 潘沛霖, 廖国水. 单吸盘真空吸附式爬壁机器人密封性能的分析[J]. 机器人, 1996, 18(4): 217-220.
- [31] 张国平, 杨杰, 高婧宇. 爬壁机器人真空吸附及运动方式探讨[J]. 液压气动与密封, 2007, 27(1): 11-14.
- [32] 潘雷, 赵言正, 钱志源, 等. 具有双负压吸盘的爬壁机器人吸附特性[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(6): 873-876.
- [33] 刘荣, 田林. 影响负压爬壁机器人性能的关键因素分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(5): 608-611.
- [34] Xiao J, Sadegh A, Elliott M, et al. Design of mobile robots with wall climbing capability[C]//Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on. IEEE, 2005: 438-443.
- [35] Nishi A. A wall climbing robot using propulsive force of propeller[C]//Advanced Robotics, 1991.'Robots in Unstructured Environments', 91 ICAR., Fifth International Conference on. IEEE, 1991: 320-325.
- [36] Nishi A, Miyagi H. Mechanism and control of propeller type wall-climbing robot[C]//Intelligent Robots and Systems' 94.'Advanced Robotic Systems and the

- Real World', IROS'94. Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on. IEEE, 1994, 3: 1724-1729.
- [37] Xilun D, Yushu Y. A Multi-propeller and Multi-function Aero-robot and Its Motion Planning of Leg-wall-climbing [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2010, 10: 023.
- [38] 王田苗, 孟偲, 裴葆青, 等. 仿壁虎机器人研究综述[J]. 机器人, 2007, 29(3): 290-297.
- [39] Kim S, Spenko M, Trujillo S, et al. Whole body adhesion: hierarchical, directional and distributed control of adhesive forces for a climbing robot[C]//Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on. IEEE, 2007: 1268-1273.
- [40] Hirose S, Tsutsumitake H. Disk rover: A wall-climbing robot using permanent[C]//Intelligent Robots and Systems, 1992., Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 1992, 3: 2074-2079.
- [41] Xu Z, Ma P. A wall-climbing robot for labelling scale of oil tank's volume[J]. Robotica, 2002, 20(02): 209-212.
- [42] Shen W, Gu J, Shen Y. Permanent magnetic system design for the wall-climbing robot[J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2006, 3(3): 151-159.
- [43] Fischer W, Tâche F, Siegwart R. Magnetic wall climbing robot for thin surfaces with specific obstacles[C]//Field and Service Robotics. Springer Berlin Heidelberg, 2008: 551-561.
- [44] Kalra L P, Guf J, Meng M. A wall climbing robot for oil tank inspection[C]//Robotics and Biomimetics, 2006. ROBIO'06. IEEE International Conference on. IEEE, 2006: 1523-1528.
- [45] 桂仲成, 陈强, 孙振国. 多体柔性永磁吸附爬壁机器人[J]. 机械工程学报, 2008, 44(6): 177-182.
- [46] Yasumoto K. Industrial robot with contact sensor: U.S. Patent 5,562,843[P]. 1996-10-8.
- [47] 曹莹瑜, 黄民双, 蒋力培, 等. 一种新颖的接触式光电焊缝跟踪传感器[J]. 电焊机, 2008, 38(2): 21-23.
- [48] You B H, Kim J W. A study on an automatic seam tracking system by using an electromagnetic sensor for sheet metal arc welding of butt joints[J]. Proceedings

- of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2002, 216(6): 911-920.
- [49] Kim J W, Shin J H. A study of a dual-electromagnetic sensor system for weld seam tracking of I-butt joints[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2003, 217(9): 1305-1313.
- [50] Kim J W, Na S J. A self-organizing fuzzy control approach to arc sensor for weld joint tracking in gas metal arc welding of butt joints[J]. WELDING JOURNAL-NEW YORK-, 1993, 72: 60-s.
- [51] 熊震宇, 张华, 贾剑平, 等. 旋转电弧传感器的研制[J]. 仪表技术与传感器, 2003, 7(1): 1-3.
- [52] 王晓东, 刘洪乾. 用于焊缝跟踪的激光扫描测距传感器的设计[J]. 焊接学报, 1996, 17(3): 183-187.
- [53] Nachev G N, Angelov A S, Petkov B I. Method and apparatus for seam tracking in arc welding: U.S. Patent 4,417,127[P]. 1983-11-22.
- [54] Kim J S, Son Y T, Cho H S, et al. A robust visual seam tracking system for robotic arc welding[J]. Mechatronics, 1996, 6(2): 141-163.
- [55] Xu P, Xu G, Tang X, et al. A visual seam tracking system for robotic arc welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 37(1-2): 70-75.
- [56] Kim J S, Son Y T, Cho H S, et al. A robust visual seam tracking system for robotic arc welding[J]. Mechatronics, 1996, 6(2): 141-163.
- [57] Ma H, Wei S, Lin T, et al. Binocular vision system for both weld pool and root gap in robot welding process[J]. Sensor Review, 2010, 30(2): 116-123.
- [58] 陈希章. 基于双目视觉的弧焊机器人焊缝三维信息获取研究 [D]. 上海交通大学博士学位论文, 2007.
- [59] 岳宏, 孙立新, 蔡鹤皋. 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, 21(2): 144-147.
- [60] Saeed G, Zhang Y M. Weld pool surface depth measurement using a calibrated camera and structured light[J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18(8): 2570.
- [61] 李原, 徐德, 李涛, 等. 一种基于激光结构光的焊缝跟踪视觉传感器 [J]. 传感技术学报, 2005, 18(3): 488-492.

- [62] 徐德, 赵晓光, 涂志国, 等. 基于结构光立体视觉的焊缝测量[J]. 焊接学报, 2004, 25(5): 45-48.
- [63] Bonser G, Parker G A. Robotic gas metal arc welding of small diameter saddle type joints using multistripe structured light[J]. Optical Engineering, 1999, 38(11): 1943-1949.
- [64] 李原, 徐德, 沈扬, 等. 一种焊缝结构光图像处理与特征提取方法[J]. 焊接学报, 2006, 27(9): 25-30.
- [65] 孙立新, 戴士杰, 李慨, 等. 基于线结构光多道焊跟踪系统图像处理[J]. 焊接学报, 2002, 23(3): 53-55.
- [66] Fang Z, Xu D, Tan M. A vision-based self-tuning fuzzy controller for fillet weld seam tracking[J]. Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, 2011, 16(3): 540-550.
- [67] Fang Z, Xu D, Tan M. Visual seam tracking system for butt weld of thin plate[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49(5-8): 519-526.
- [68] Yang W, Zhang L, Ke W, et al. Minimum Entropy Models for Laser Line Extraction[C]//Computer Analysis of Images and Patterns. Springer Berlin Heidelberg, 2013: 499-506.
- [69] Illingworth J, Kittler J. A survey of the Hough transform[J]. Computer vision, graphics, and image processing, 1988, 44(1): 87-116.
- [70] Illingworth J, Kittler J. The adaptive Hough transform[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 1987 (5): 690-698.
- [71] Kiryati N, Eldar Y, Bruckstein A M. A probabilistic Hough transform[J]. Pattern recognition, 1991, 24(4): 303-316.
- [72] 侯建. 月球车立体视觉与视觉导航方法研究 [D], 哈尔滨工业大学博士论文, 2007.
- [73] Qu X J, Song Y W, Wang Y. 3D Measurement Method Based on Binocular Vision and Linear Structured Light[J]. Advanced Materials Research, 2012, 422: 17-23.
- [74] Gühring J. Dense 3D surface acquisition by structured light using off-the-shelf components[C]//Photonics West 2001-Electronic Imaging. International Society for Optics and Photonics, 2000: 220-231.

- [75] Furukawa R, Kawasaki H. Laser range scanner based on self-calibration techniques using coplanarities and metric constraints[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2009, 113(11): 1118-1129.
- [76] Bodenmüller T. Streaming surface reconstruction from real time 3D-measurements [D]. Technical University Munich, 2009.
- [77] Fisher R B, Naidu D K, Singhal D. Rejection of spurious reflections in structured illumination range finders[C]//Optical 3D Measurement Techniques II: Applications in Inspection, Quality Control, and Robotics. International Society for Optics and Photonics, 1994: 467-474.
- [78] Fisher R B, Naidu D K. A comparison of algorithms for subpixel peak detection[M]//Image Technology. Springer Berlin Heidelberg, 1996: 385-404.
- [79] Trucco E, Fisher R B, Fitzgibbon A W, et al. Calibration, data consistency and model acquisition with laser stripers[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 1998, 11(4): 293-310.
- [80] Strobl K H, Sepp W, Wahl E, et al. The DLR multisensory hand-guided device: The laser stripe profiler[C]//Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on. IEEE, 2004, 2: 1927-1932.
- [81] Strobl K H, Mair E, Bodenmuller T, et al. The self-referenced DLR 3D-modeler[C]//Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2009: 21-28.
- [82] Strobl K H, Mair E, Hirzinger G. Image-based pose estimation for 3-D modeling in rapid, hand-held motion[C]//Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on. IEEE, 2011: 2593-2600.
- [83] Molleda J, Usamentiaga R, Garcia D F, et al. Uncertainty analysis in 3D shape measurement of steel strips using laser range finding[C]//Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2011 IEEE. IEEE, 2011: 1-6.
- [84] Usamentiaga R, Molleda J, García D F. Fast and robust laser stripe extraction for 3D reconstruction in industrial environments[J]. Machine Vision and Applications, 2012, 23(1): 179-196.
- [85] Molleda J, Usamentiaga R, Bulnes F G, et al. Uncertainty Propagation Analysis in 3-D Shape Measurement Using Laser Range Finding[J]. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, 2012, 61(5): 1160-1172.

- [86] Molleda J, Usamentiaga R, Garcia D F, et al. Shape measurement of steel strips using a laser-based three-dimensional reconstruction technique[J]. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 2011, 47(4): 1536-1544.
- [87] Usamentiaga R, Molleda J, García D F, et al. Machine vision system for flatness control feedback[C]//Machine Vision, 2009. ICMV'09. Second International Conference on. IEEE, 2009: 105-110.
- [88] Wang X, Liang D, Zhang T. A Robust Vision Based Weld Center Finding Method In Automatic Ultrasonic Nondestructive Test[C]//Control and Automation, 2007. ICCA 2007. IEEE International Conference on. IEEE, 2007: 162-165.
- [89] Gong Y, Dai X, Li X. Structured-light based joint recognition using bottom-up and top-down combined visual processing[C]//Image Analysis and Signal Processing (IASP), 2010 International Conference on. IEEE, 2010: 507-512.
- [90] Desmurget M, Périsson D, Rossetti Y, et al. From eye to hand: planning goal-directed movements[J]. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 1998, 22(6): 761-788.
- [91] Flandin G, Chaumette F, Marchand E. Eye-in-hand/eye-to-hand cooperation for visual servoing[C]//Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on. IEEE, 2000, 3: 2741-2746.
- [92] P. K. Allen, A. Timcenko, Y. B., and P. Michelman. Automated tracking and grasping of a moving object with a robotic hand-eye system. *IEEE Trans. On Robotics and Automation*, 9(2):152-165, April 1993.
- [93] Gangloff J A, De Mathelin M, Abba G. 6 DOF high speed dynamic visual servoing using GPC controllers[C]//Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on. IEEE, 1998, 3: 2008-2013.
- [94] B. Espiau, F. Chaumette, and P. Rives. A new approach to visual servoing in robotics. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 8(3):313-326, June 1992.
- [95] K. Hashimoto, T. Kimoto, T. Ebine, and H. Kimura. Manipulator control with image-based visual servo. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 3, pages 2267-2271, Sacramento, California, USA, April 1991.
- [96] E. Malis, F. Chaumette, and S. Bouabdallah. 2 1/2 d visual servoing. *IEEE Trans. On Robotics and Automation*, 15(2):234-246, April 1999.

- [97] E. Malis, F. Chaumette, and S. Boudet. 2 1/2 d visual servoing with respect to unknown objects through a new estimation scheme of camera displacement. International Journal of Computer Vision, 37(1):79-97, June 2000.
- [98] Colombo C, Allotta B, Dario P. Affine visual servoing: A framework for relative positioning with a robot[C]//Robotics and Automation, 1995. Proceedings., 1995 IEEE International Conference on. IEEE, 1995, 1: 464-471.
- [99] Crétual A, Chaumette F. Positioning a camera parallel to a plane using dynamic visual servoing[C]//Intelligent Robots and Systems, 1997. IROS'97., Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 1997, 1: 43-48.
- [100]P. Questa, E. Grossmann, and G. Sandin. Camera self orientation and docking maneuver using normal flow. In SPIE AeroSense, Orlando, Florida, April 1995.
- [101]Espiau B, Chaumette F, Rives P. A new approach to visual servoing in robotics[J]. Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 1992, 8(3): 313-326.
- [102]Mery D, Berti M A. Automatic detection of welding defects using texture features[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2003, 45(10): 676-681.
- [103]Deutsch W A K, Schulte P, Joswig M, et al. Automatic inspection of welded pipes with ultrasound[J]. Proceedings of the 9th ECNDT, 2006: 1-14.
- [104]Peterson R A. MAGNETIC PARTICLE INSPECTION: U.S. Patent 2,495,545[P]. 1950-1-24.
- [105]Magistrali G. Liquid penetrant inspection[J]. 1975., 1975: 169-180.
- [106]Prakash R. Eddy current testing[J]. Elsevier Science Publishers, Non-Destructive Testing of Fibre-Reinforced Plastics Composites., 1990, 2: 299-325.
- [107]Beattie A G. Acoustic emission, principles and instrumentation[R]. Sandia National Labs., Albuquerque, NM (USA), 1983.
- [108]Luong M P. Infrared thermographic scanning of fatigue in metals[J]. Nuclear Engineering and Design, 1995, 158(2): 363-376.
- [109]Fisher M M D, Raper R F. The ‘cuff - leak’test for extubation[J]. Anaesthesia, 1992, 47(1): 10-12.
- [110]Smith M, Laenen C. Inspection of nuclear storage tanks using remotely deployed ACFMT[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2007, 49(1): 17-20.
- [111]Mandal K, Atherton D L. A study of magnetic flux-leakage signals[J]. Journal of

- Physics D: Applied Physics, 1998, 31(22): 3211.
- [112]牟彦春, 金南辉, 成德芳. 电站锅炉水冷壁管远场涡流检测技术[J]. 中国特种设备安全, 2008, 24(5): 54-57.
- [113]何莎, 袁宗明, 喻建胜, 等. 超声衍射时差法检测技术研究[J]. 中国测试 ISTIC, 2009, 35(3).
- [114]高文, 陈熙霖. 计算机视觉: 算法与系统原理[M]. 清华大学出版社, 1999: 20-27.
- [115]Gan Z, Tang Q. Characteristics of Laser Structured-Light Sensors[M]//Visual Sensing and its Applications. Springer Berlin Heidelberg, 2011: 21-40.
- [116]章毓晋. 图像工程[M]. 清华大学出版社, 2005: 37-42.
- [117]Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [118]Zhang Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]//Computer Vision, 1999. The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on. Ieee, 1999, 1: 666-673.
- [119]Moré J J. The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory[M]//Numerical analysis. Springer Berlin Heidelberg, 1978: 105-116.
- [120]Zhou F, Peng B, Cui Y, et al. A novel laser vision sensor for omnidirectional 3D measurement[J]. Optics & Laser Technology, 2012.
- [121]Zhang L, Zhao M, Zhao L. Vision-Based Profile Generation Method of TWB for a New Automatic Laser Welding Line[C]//Automation and Logistics, 2007 IEEE International Conference on. IEEE, 2007: 1658-1663.
- [122]陈福海. 基于线结构光的视觉检测相关技术研究[D]. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2009.
- [123]Ofner R, O'Leary P, Leitner M. A collection of algorithms for the determination of construction points in the measurement of 3D geometries via light-sectioning[C]//2nd Workshop on European Scientific and Industrial Collaboration Promoting: Advanced Technologies in Manufacturing. 1999: 505-512.
- [124]Schnee J, Futterlieb J. Laser line segmentation with dynamic line models[C]//Computer Analysis of Images and Patterns. Springer Berlin Heidelberg, 2011: 126-134.
- [125]苏显渝, 光学, 李继陶. 信息光学[M]. 四川大学出版社, 1995: 318.

- [126]Canny J. A computational approach to edge detection [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 1986 (6): 679-698.
- [127]Duda R O, Hart P E, Stork D G. Pattern classification[M]. John Wiley & Sons, 2012: 42-53.
- [128]Lou H L. Implementing the Viterbi algorithm[J]. Signal Processing Magazine, IEEE, 1995, 12(5): 42-52.
- [129]Gonzalez R C, Woods R E 著, 阮秋琦, 阮宇智译, 数字图像处理[J]. 2006: 427-430.
- [130]Illingworth J, Kittler J. A survey of the Hough transform[J]. Computer vision, graphics, and image processing, 1988, 44(1): 87-116.
- [131]Kiryat N, Eldar Y, Bruckstein A M. A probabilistic Hough transform[J]. Pattern recognition, 1991, 24(4): 303-316.
- [132]Forest J, Salvi J, Cabruja E, et al. Laser stripe peak detector for 3D scanners. A FIR filter approach[C]//Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004. Proceedings of the 17th International Conference on. IEEE, 2004, 3: 646-649.
- [133]Kojima H., Toyama R., Kobayashi K.. Development of wall climbing robot[J]. Ishikawajima-Harima Engineering Review, 1992, 32(2): 123-128.
- [134]Hirose S., Tsutsumitake H.. Disk rover: A wall-climbing robot using permanent[C]. Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1992, 3: 2074-2079.
- [135]Shen W, Gu J, Shen Y. Proposed wall climbing robot with permanent magnetic tracks for inspecting oil tanks[C]//Mechatronics and Automation, 2005 IEEE International Conference. IEEE, 2005, 4: 2072-2077.
- [136]李岩, 杨向东, 陈恩. 履带式移动机器人动力学模型及其反馈控制. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(8): 1376-1380.
- [137]罗怡, 钱晋武. 多足爬壁机器人新型足—掌机构运动学和力解析[J]. 上海大学学报: 自然科学版, 1997, 3(1): 67-73.
- [138]Go Y, Yin X, Bowling A. Navigability of multi-legged robots[J]. Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, 2006, 11(1): 1-8.
- [139]徐德, 谭民, 李原. 机器人视觉测量与控制[M]. 国防工业出版社, 2011: 274-275.



## 附录 1

研究生期间发表论文：

1. **L. Zhang**, Q. Ye, W. Yang, J. Jiao<sup>✉</sup>, “Weld Line Detection and Tracking via Spatial-Temporal Cascaded Hidden Markov Models and Cross Structured Light,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. DOI: 10.1109/TIM.2013.2283139. (SCI)
2. **L. Zhang**, J. Jiao<sup>✉</sup>, Q. Ye, Z. Han, W. Yang, “Robust weld line detection with cross structured light and Hidden Markov Model,” in *Proc. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Chengdu, China, Aug. 2012. (EI)
3. **L. Zhang**, W. Ke, J. Jiao<sup>✉</sup>, “A Cross Structured Light Sensor for Weld Line Detection on Wall-climbing Robot,” in *Proc. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Takamatsu, Japan, Aug. 2013. (EI)
4. W. Yang, **L. Zhang**, C. Li, W. Ke, J. Jiao<sup>✉</sup>, “Minimum Entropy Models for Laser Line Extraction,” in *Proc. International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns*, York, UK, Aug. 2013. (EI)
5. B. Xiao, X. Liu, **L. Zhang**<sup>✉</sup>, “Research on Honeycomb Emergency Management Model for Quality Events,” *Systems Engineering Procedia*, Elsevier, 2012. (ISTP)
6. B. Xiao, X. Liu, **L. Zhang**<sup>✉</sup>, “Accident Management Reinforcing with Qualitative and Quantitative Analysis,” in *Proc. IEEE International Conference on Management Science & Engineering*, Harbin, China, Jul. 2013. (EI)

已投稿论文：

**L. Zhang**, W. Ke, J. Jiao<sup>✉</sup>, “A Novel Laser Vision Sensor for Weld Line Detection on Wall-Climbing Robot,” *Optics & Laser Technology*, Elsevier. (二审中) (SCI)

申请专利：

1. 基于改进 SIFT 特征匹配的全景监控系统及其监控方法, 201110420866.4, 发明型专利, 第一发明人。
2. 用于焊缝检测的爬壁机器人的视觉导航系统及焊缝的焊接定位方法及焊缝偏移量获取方法, 201210150845.X, 发明型专利, 第一发明人



## 致 谢

在中国科学院攻读研究生的五年时间是我人生旅途中非常难忘的一段经历，我把生命中宝贵的青春岁月留在这里，换回了学业和人格的双重收获。在此毕业论文即将完成之际，由衷感谢在五年里给过我帮助的每一个人。

感谢焦建彬老师和叶齐祥老师的辛勤指导，本文的所有研究工作都是在焦老师悉心指导下完成，从理论到实践方面焦老师都倾注了大量心血。在研究生院的学习和生活中，两位老师曾给我无尽的关怀与鼓励。在撰写学术论文和毕业论文期间，焦老师和叶老师将对待每一个细节都精益求精的治学态度贯彻始终，他们对待学术问题认真负责的精神让我和我的同学们受用终身。

感谢肖波研究员在我读书期间给予我无私的支持与资助，肖老师还为机器人的加工和实验提供了大量人力物力，使我得到了许多宝贵的第一手数据。感谢于华老师在学习和生活中给我的帮助与支持，于老师对待生活的乐观态度和对待工作的认真精神深刻鼓舞了我。感谢北京理工大学的高学山老师在机器人设计方面给予的技术支持，高老师严谨的工作态度和高尚的学术节操使我深受感染。

感谢中科院自动化所的赵冬斌老师和徐德老师，UC Berkeley 的朱光宇老师，北京交通大学的李晓峰老师和 Duke University 的 Q. Qiu 老师，几位老师中有的甚至素未谋面，却对我撰写的论文给出了宝贵的修改意见或无偿的赠予资料。

感谢韩振军、陈孝罡、张振凯、杨威、柯炜等实验室的同学，感谢同学们在学习和生活中给我的帮助与关心。感谢机器人课题组里的邵洁和戴福权同学，我们曾团结一心解决了一个又一个技术难题。

最后，感谢我的家人，一个温暖的家庭给了我无穷的动力和勇气，没有你们的默默支持就没有我今天的成绩，我所有的收获属于家里的每一个人。

张立国

2013 年 10 月