

密级★保密期限: _____

浙江理工大学

Zhejiang Sci-Tech University

硕士学位论文

Master's Thesis



中文论文题目: 插秧机视觉导航关键技术的研究

英文论文题目: Research on key technology of visual
navigation on rice transplanter

学科专业: 机械工程

作者姓名: 金海龙

指导教师: 武传宇 教授

递交日期: 2015.1.4

浙江理工大学学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得浙江理工大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：金海龙

签字日期：2015年3月10日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解浙江理工大学有权保留并向国家有关部门或机构送交本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权浙江理工大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索和传播，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

学位论文作者签名：金海龙

签字日期：2015年3月10日

导师签名：武明

签字日期：2015年3月10日

摘 要

随着世界人口的不断增长,人们对粮食等农业产品的需求量越来越大,传统的农业耕种方式已经越来越不能适应当今的时代要求了。伴随着自动化技术和传感等技术的发展,智能化、机械化耕种方式逐渐取代了传统耕种方式。自主导航技术也顺应着这种趋势,被人们应用于水稻耕种中。为此本文针对插秧机的视觉导航系统做了如下研究:

1) 秧苗行中心线的提取

通过超绿变换(2G-R-B)和阈值处理将图像灰度化,然后利用 **Meanshift** 算法去除秧苗种植间隙,最后利用 **Hough** 变换提取基准导航秧苗行。并将此种方法与传统提取方法的实验结果进行比较,分析两种提取方法的优劣,以及产生的原因。实验证明本文选用的图像处理方法更适于水田环境。

2) 摄像机的标定研究

针对现有的 **MATLAB** 和 **OpenCV** 摄像机标定方式做了对比研究,通过分析标定结果的误差大小,最终选择相对较稳定的 **MATLAB** 标定法。通过标定获得了摄像机的内部参数,结合外部参数获得导航的关键参数。

3) 摄像机导航控制方法的研究

通过获取的导航参数,将秧苗行与插秧机的相对位置分三种情况进行路径规划。引入光电编码器,测量插秧机轮子的实际转角,作为反馈环调节。在电机转速方面结合 **PID** 控制提高插秧机导航的稳定性。

4) 开展视觉导航实验

通过搭建起的插秧机导航试验平台,开展了插秧机视觉导航初步试验。通过实验最终确定 **PID** 控制参数 $K_p=10$ 、 $K_i=0.025$ 、 $K_d=0.4$ 。试验结果表明,目前该系统平均角度误差在 1° 左右,平均位置偏差小于 3.2mm ,角度标准差约为 2.5° 以内,位置偏移标准差小于 34.80mm 。并对实验数据进行了分析总结,得到了该视觉导航系统存在的问题及解决方案。

关键词: 插秧机; 视觉导航; 机器视觉; 中心线提取

Abstract

As the world population continues to grow, the demand on food and other agricultural products also grow. Traditional farming methods have become increasingly unsuited to meet the requirements of the current time. Along with the development of automation technology, sensor technology and intelligent, mechanized farming method gradually replaced the traditional method. Autonomous navigation technology is also conform to this trend, also it has been applied in agriculture in current time. This paper aiming at visual navigation of transplanting research done as follows:

1) Extraction the center line of seedlings of crop

This article first use 2G-R-B transform and threshold processing to get gray image, and then use the Meanshift algorithm to removal of seedling planting shadow, finally use Hough to extraction the center line of seedlings of crop. Then comparison is made between this method and the traditional method of extracting the experimental results. We analysis of two kinds of extraction methods, and we discuss the causes of disadvantages of the traditional method of extracting.

2) calibration of camera

Doing a comparative study of MATLAB and OpenCV camera calibration. By analyzing the size error of calibration results, the final choice is relatively stable in the MATLAB method. Through the calibration of camera intrinsic parameters were obtained, the key parameters to obtain combined with external parameters of navigation.

3) control method of camera navigation

By the navigation parameters acquisition, we classify the path planning into three cases. We introduce a photoelectric encoder, and use it to measure the actual angle of transplanter wheels. The actual angle can be used as the feedback loop regulating.

4) develop visual navigation experiment

The hardware platform and software platform is constructed to carry out the experiment on land on transplanting machine vision navigation system. The experiment is made to lay the groundwork for the paddy field of vision navigation. After the experiment we make sure the parameter of PID control: $k_p=10$ 、 $k_i=0.025$ 、 $k_d=0.4$. The experimental results show that, the current average angle of the system error in 1 degrees, the average position error less than 3.2mm, the angle of the standard deviation of about 2.5 degrees, offset the standard deviation is less than 34.80mm. Through the analysis of the obtained data summary, we obtained the navigation system, and project the next improvement scheme.

Keywords: transplanter; vision navigation; machine vision; center line extraction

目 录

第 1 章 绪论 1

1.1 研究背景和意义 1

1.1.1 农业机械智能化发展趋势 1

1.1.2 农业机械自动化导航发展 1

1.1.3 插秧机视觉导航研究意义 2

1.2 农业车辆视觉导航国内外研究现状 2

1.2.1 农业车辆视觉导航国外研究现状 2

1.2.2 农业车辆视觉导航国内研究现状 4

1.3 课题研究的主要内容 5

第 2 章 秧苗行中心线的提取 7

2.1 传统中心线提取方法 7

2.2 基于 MEANSHIFT 算法和 HOUGH 变换的秧苗行中心线提取方法 8

2.2.1 图像预处理 8

2.2.2 种植间隙和细小噪声的去除 10

2.2.3 Hough 变换提取秧苗行中心线 13

2.3 实验结果与分析 14

2.4 本章小结 18

第 3 章 CCD 网络摄像机标定 19

3.1 摄像机标定方法概述 19

3.2 摄像机标定原理 20

3.3 摄像机标定方法 22

3.3.1 常见的摄像机标定方法 22

3.3.2 基于 MATLAB 摄像机标定法 22

3.3.3 基于 OpenCV 摄像机标定法 25

3.3.4 MATLAB 标定法和 OpenCV 标定法的对比选择 27

3.4 本章小结 28

第 4 章 插秧机导航控制方法研究 29

4.1 插秧机导航控制原理 29

4.2 插秧机视觉伺服系统 30

4.3 插秧机的导航信息的获得	30
4.4 插秧机的路径控制	32
4.5 插秧机转向控制	34
4.5.1 转向控制系统的组成	35
4.5.2 光电编码器转角测量	35
4.5.3 PID 算法电机控制	35
4.6 本章小结	37
第 5 章 插秧机视觉导航平台搭建与实验	38
5.1 导航实验样机设计	38
5.1.1 电机计算选型	38
5.1.2 其他硬件设备	40
5.2 插秧机视觉导航实验	40
5.2.1 震动对导航系统影响的分析	41
5.2.2 PID 参数确定	42
5.3 插秧机导航试验总结与分析	46
5.4 本章小结	46
第 6 章 总结与展望	48
6.1 研究结论	48
6.2 展望	49

第1章 绪论

1.1 研究背景和意义

1.1.1 农业机械智能化发展趋势

新世纪以来世界人口不断增长,全球对农作物的需求量不断增大,因此从上世纪 50-60 年代开始,发达国家开始逐步推进农业机械化种植,农业机械化走上了一条快速发展的道路。但相对于工业机械化而言农业机械化起步晚、起点低。在农业机械化初期,过度、无序化的使用农业机械,使得原有土地资源被破坏,过度使用的农药和化肥也对生态环境造成了破坏。因此人们提出了农业机械智能化的假设,农业智能化假设要求农业机械能够自动控制行走、自动识别农田作业环境、确定操作目标,并且能通过传感器辨别气味、颜色等特征^[1]。近年来伴随着计算机技术、电子传感技术、图像处理以及通信科技的迅猛发展和传感器灵敏度的提高,新兴了许多自动控制方法。这些技术和科技的进步都给农业机械化、智能化的假设的顺利实施提供了强大的理论技术支持。

农业耕种效率的提高、农业生产的精细化作业、节省农业资源等都要依靠现代智能农业机械的发展。智能农业机械作为 20 世纪 90 年代发展起来的新兴的跨学科综合技术,它在带给人们更高的经济效益和显著的环境改善的同时,还能够有效的协调各类农业资源,更好的处理经济效益、社会效益和生态效益的关系。因此农业机械智能化越来越受到人们的关注^[2,3]。

农田自动耕种技术是农业机械智能化种植技术重要组成部分,农业自动耕种的实施常需要农业机械具有比较精确的导航功能、定位功能。通过导航功能使农业机械自主识别农田信息,并根据识别的信息规划农业机械应该执行的操作,准确的完成计划任务。农田导航技术是开展农业机械自动化与智能化的基础,是实现农业信息准确采集及定位作业的保证,是开展农业精细化种植的前提,所以进行农业机械自主导航技术的研究具有非常重要的意义^[4]。

1.1.2 农业机械自动化导航发展

农田机械自动导航技术先后经历了农田触杆导航、引线电缆导航、地磁导航、无线电导航和激光导航等多种导航方式^[5]。地磁导航是利用地磁场的矢量性,利用地球近地点任意一点的地磁矢量都不同于其他地点的矢量的特性来实现导航^[6]。引线电缆导航技术是通过在行驶路线下埋设电缆或磁钉来为导航车辆提供导航信息,其优点是能够很好的适应各种路面环境,同时它在雨天、光照不足、冰雪覆盖、无光照等天气情况下都可以稳定地提供导航信息,但引线电缆导航的缺点在于探测范围小,且需要对导航的道路设施做较大的

变动^[7]。激光导航利用激光发射器发射激光束照射目标，安装在车辆上激光接收装置接收激光信号，计算出车辆偏离照射或反射激光束的程度，从而不断调整车辆行进方向完成导航，缺点是受大气条件影响较大，不能全天候工作等。有了上述多种导航方式的发展后，迎来了两种比较成熟的导航技术：GPS 导航和视觉导航^[8]。

1.1.3 插秧机视觉导航研究意义

GPS 技术研究始于 1958 年，在上世纪 90 年代才被应用于农业机械导航中。GPS 导航系统能够全天候的提供车辆三维信息，但其需要多个卫星定位，成本较高，在林荫、高层建筑附近及受气候影响时会造成 GPS 信号丢失，从而影响其使用^[9]。20 世纪 80 年代车辆视觉技术被应用于农业机械导航。视觉导航相比于 GPS 导航成本较低，且不受地形影响；但其对光照条件要求比较苛刻，在光照较强和较暗的情况都不能很好的获得导航参数。相比于 GPS 导航，视觉导航实时性好、平台搭建方便、造价便宜等优点；对光照敏感的缺点可以通过对获取的图像进行相关的处理得到较好的去除，且插秧机耕种的环境较为恶劣，存在林荫等多种干扰，影响 GPS 导航信号的获取。

由此可以得出，进行插秧机视觉自主导航系统的研究具有很重要的意义。

1.2 农业车辆视觉导航国内外研究现状

经过各种导航技术的多年技术积累，视觉导航基本可以满足各种田间操作的要求。视觉导航方面，美国和日本处于领先地位，且日本在视觉导航方面发展迅速。国内的视觉导航技术起步较晚，但在近几年也取得了很好的发展。

1.2.1 农业车辆视觉导航国外研究现状

机器视觉理论于 20 世纪 70 年代末，由美国麻省理工大学 D.Marr 教授创立，他指出了视觉理论理解的三个不同层面^[10]。随着计算机在 20 世纪 80 年代的快速发展，机器视觉逐渐被应用在很多领域。Searcy^[11,12]等，于 1985 年首先将机器视觉运用到农业处理中，他们运用图像阈值分割技术和贝叶斯分类器成功分离了棉花与土壤背景，第二年，他们又提出可以利用 Hough 变换来提取农田图像中的直线信息，在 1987 年实施了农业机械的自主导航。他们运用的阈值分割、Hough 变换等方法仍是当今农田图像处理和导航所采用的方法。1995 年 Gerrish^[13]等，利用作物与土壤颜色的差别完成了基于 Case7110 型拖拉机的玉米秧苗行视觉导航实验，拖拉机在 1.3m/s 和 3.6m/s 两种速度行驶，分别取得了均方差为 6cm 和 12cm 的导航精度。1999 年 Slaughter^[14,15]等，对于西红柿种植开发了一套视觉导航种植系统，系统在杂草较少的情况下精度可以达到 7mm，杂草较多时导航精度可达到 12mm，系统最高行驶速度可以达到 4.6m/s。2001 年 Benson^[16,17]等，开发的 CMCA 算法能有效模

拟收割机操作人员的操作, 实验证明此种算法的导航精度与运用 GPS 导航的收割机相当。2004 年 M. Kise^[18,19]等, 研制了一套双目视觉农田导航系统, 此导航系统在 3m/s 的行进速度时, 横向偏移误差在 5cm 左右, 同时该系统能够检测出作物垄的 3D 信息。2007 年 Hannan 等, 运用区域标记、阈值分割、直径提取和边缘检测等常用的图像处理算法, 完成了在不同光照条件下的目标定位, 并根据双目视觉成像模型, 计算出目标物的位置信息, 而且讨论了存在遮挡的目标物的检测方法^[20]。

日本等亚洲国家在农业视觉导航方面同样也取得了显著的成果。1993 年北海道大学的 Hata^[21]等, 设计了一套单目视觉的作物行检测系统经过仿真实验验证, 该系统能够控制横向误差在 0.02m, 偏移角误差在 1° 以内。1996 年东京大学的 Torii 等^[22,23], 提出了一种农业中耕图像处理算法, 该算法是在 HIS 空间中利用作物与田地的背景差异, 进行阈值分割, 然后运用最小二乘法提取出作物的位置信息, 实验表明, 在行进速度为 0.25m/s 时, 横向偏移误差在 2cm, 导航角偏移误差在 0.5° 之内。1999 年, 鸟取大学的 M. Yoshiaki^[24]等, 设计了一台视觉导航水稻移栽机, 该移栽机运用无线通信方式实现计算机对移栽机的控制。2002 年, 东京大学的 B.Q. Chen^[25,26]等, 运用线形分析原理对处于不同生长阶段的秧苗作物进行分析, 在分离出目标像素后运用 Hough 变换实现导航基准线的提取。1999 年, 韩国首尔大学的 Cho^[27]等, 研制了一台基于视觉导航的自动果树喷药机器人, 它利用图像处理算法进行路径辨识, 并利用超声波传感器技术进行障碍物检测, 最后利用模糊控制算法实现自主导航和障碍物躲避。



图 1.1 日本北海道大学研制的秧苗行视觉检测系统

除美国和亚洲外, 欧洲各国家在农业视觉导航也取得了很大的进步。1995 年, 丹麦的 H.J. Olsen^[28]等, 提出利用正弦函数模板结合灰度曲线检测农作物中心线, 实验证明运用此

种方法检测农作物行位置偏差范围在 10mm 以内。德国的 Keicher、H. Seufert^[29]等,研制了视觉锄草机系统,该系统根据距离锄草机最近的两条基准作物行来确定导航线,实验表明在 12km/h 的行驶速度下,误差在 5cm 以内。意大利热那亚大学(University of Genoa)的 Sandini^[30]等,开发了一款视觉西红柿播种机。该播种机运用双目摄像头完成在温室内的驾驶导航和目标定位。瑞典的 B. Astrand^[31,32]等,利用黑白摄像机的近红外滤波器的特性,采集农作物图像,然后利用膨胀腐蚀和阈值分割等图像形态学处理方法获得较为理想的二值图像,最后用 Hough 变换提取基准作物行。后续实验证明在速度为 2km/h 时,误差能够控制在 4.5cm 左右。2002 年,瑞典的 Astrnad 等^[33]在机械除草方面的研究取得了显著的成果,他们使用了杂草识别和导航两个独立的视觉系统,进而成功去除了光照变化对杂草识别的影响。两个独立系统的使用把识别杂草的视觉系统单独封闭,以便引入人工光源去除光照影响。在杂草比较多的情况下(作物与杂草的最高比例可以达到 1/12),此种视觉导航系统的精度也达到了 2cm 左右。同年, H.J. Olsen 和 H.T. Sogaard^[34]提出一种机器图像识别作物行的方法,算法运用了 (2G-R-B) 将图像灰度化并将其按行分格,将分格的像素纵向相加,然后运用线性回归确定基准作物行位置。应用该方法导航的纵向误差在 6-12mm 之间。

1.2.2 农业车辆视觉导航国内研究现状

与国外先进的农业车辆视觉导航技术相比,国内农业视觉导航技术的研究还在初始阶段,主要还是停留在理论研究和样机实验过程^[35]。

南京农业大学的沈明霞^[36-39]等,在农田图像分割方面运用图像形态学分析理论提取图像形态特征,然后依据先验知识完成图像分类识别;检测农作物边缘方面,利用小波变换提取作物边缘,并运用虚点定位的方法实现机器人导航。南京农业大学的周俊^[40,41]等,利用 mallat 小波降低农田图像的分辨率,然后通过阈值分类法得到在不同分辨率下作物行或垄的大致轮廓,后续的实验结果表明在行驶速度为 0.27m/s 和 0.94m/s 时都能很好跟踪绿色草坪。中国农业大学张卫^[42]设计了基于视觉导航的 Hough 变换定位系统。华南农业大学张志斌^[43]等提出了一种动态目标检测和跟踪的算法,运用改装过的久保田 WP60D 型插秧机(如图 1.2)进行了田间实验,实验中该算法较好的消除了光照对图像处理系统的影响,并且成功消除了阴影、杂草等田间导航干扰信息。江苏大学的于国英^[44]提出了 Radon 改进算法,并用此方法与感兴趣区域算法相结合提取导航参数,在以 KH-100 型 AVG 引导小车为平台的实验中取得了较好的实验结果。西安交通大学的杨为民^[45]等,运用基于动态窗口的 Hough 变换提取导航基准作物行,经仿真证明:该算法处理单帧图像的耗时为 100ms 左右,导航均方根误差在 10cm 左右。中国农业大学的袁佐云^[46]等,根据作物的绿色特征将作物与背

景分离，然后通过投影法得到导航基准直线。中国农业大学的张卫^[47]等，针对白菜作物图像，先进行超绿变换，然后运用最大间方差法将图像二值化，最后利用 Hough 变换获得导航参考作物基准线。赵颖^[48,49]等，依据农田不同耕种区间颜色不同对农田进行图像区域分割，最后运用改进 Hough 变换提取基准线作物行。



图 1.2 华南农业大学研制的插秧机自主导航系统

1.3 课题研究的主要内容

根据上述对农业机械智能化以及视觉导航的描述，结合国内外农业机械视觉导航发展情况的分析，可以得出进行农业视觉导航研究的必要性，因此本文计划围绕插秧机导航做如下研究：

1) 秧苗行中心线的提取

选择一种新颖的图像去噪和图像分割方法获取水稻图像的秧苗信息，然后通过 Hough 变换提取秧苗行的在图像坐标内的位置信息。并将本文提出的方法与传统的获取秧苗行中心线方法进行对比，通过提取中心线的质量判定两种方法的优劣。

2) 摄像机标定方法的研究

讨论摄像机产生各种畸变的原因，介绍常用的摄像机标定方法。通过多种标定方法的比较，选择其中一种符合农田图像导航精度要求的标定方法，通过摄像机标定去除摄像机的镜头畸变，并获取摄像机坐标系转换所需要的各种内部参数。

3) 导航控制方法的研究

将摄像机提取到的导航基准秧苗行位置信息转换到世界坐标系中，计算出其在该坐标系中与插秧机的相对位置。根据相对位置关系，规划插秧机的行进路线，并考虑插秧机转向控制原理，以及如何使插秧机快速响应路径控制。

4) 开展插秧机陆地导航实验

完成图像处理程序设计和硬件平台的搭建，开展针对插秧机视觉导航实验，验证视觉导航处理算法的准确性和有效性，并对出现的问题进行分析，提出相应解决方案。

第2章 秧苗行中心线的提取

2.1 传统中心线提取方法

在图像处理中，并不是图像中所有包含的信息都对人们有利用价值，往往只有部分区域含概有价值的信息，这部分就是我们常说的目标区域。针对一个图像除去目标外还有很多无关信息，我们需要将无关信息去除并保留目标这就是我们常说的图像分割。图像分割是将图像内部信息按照一定的特性进行划分，提取出目标区域的图像处理方法。常用的划分标准包括灰度、阈值、边缘、区域频谱等特征，提取的目标可以是一种或是多种。水稻作为我们所要分离的目标，由于其生长的环境相对于其它作物的特殊性，使其中心线的提取方法有别于其它作物。

目前，针对目标提取的方法很多，这些方法基本上是基于灰度图像的不连续性和相似性完成对目标的提取。根据灰度图像的不连续性进行目标分离的方法包括微分法、模板匹配法和频谱分析等。根据灰度图像的相似性分进行目标分离的方法包括阈值分割法、灰度直方图分割法和区域增长法等。上述的每种方法都有其使用局限，因此常需要针对使用环境进行方法选择或者方法组合^[50,51]。这些方法都是一些传统的分割图像方法。随着新的数学工具和方法的提出，人们又提出了神经网络、支持向量机等新型的图像分割方法^[52]。上述的单一分割方法往往不能很好的适应某一特定图片的分割要求，所以有时往往需要组合运用上述的分割方法。

秧苗行中心线提取是水稻自动种植的关键技术，主要分为秧苗目标与农田背景的分离和秧苗行中心线直线特征提取两步。在水田图像处理中，由于植株间隙、波纹和光照等问题，使得中心线提取非常困难。在目标分离方面，美国伊利诺斯州立大学的 Reid^[53]等利用贝叶斯分类器分离了棉花和农田背景；南京农业大学的王玲^[54]采用 HIS 和 La^*b^* 彩色空间，基于形态学去噪，分离了棉籽和农田背景；中国农业大学赵颖^[55,56]根据农田颜色特点进行图像分割；针对不规整农田环境，南京农业大学的周俊^[57,58]提出用小波变换改变图像分辨率，再经过边缘检测和阈值分类得到不同分辨率下作物行的轮廓。上述方法算法复杂，处理速度慢。H.T. Sogaard^[59]等提出在 RGB 颜色空间进行超绿变换(2G-R-B)将图像灰度化，分离了玉米和农田背景；南京农业大学的安秋^[60]利用颜色恒常性原理处理农业机器人视觉导航中的光照问题，然后利用 2G-R-B 变换进行目标分离。上述增大 G 值减少 R 和 B 值的超绿变换(2G-R-B)算法简洁，实用性强，较为适合农田图像处理。目标分离后，已有文献常采用 Sobel 和 Canny 算子进行边缘提取，如山东理工大学的张辉^[61]等通过 6 方向模板

Sobel 边缘算子提取叶片边缘；程有娥^[62]利用 Canny 算子提取了大米的边缘。但由于种植间隙、光照不均匀等干扰，2G-R-B 变换后的图像含有噪声，不适合直接进行边缘提取。Meanshift 变换是作为一种全局迭代运算，对图像的分类是基于像素及周围像素点的变换趋势，而不是依据单个像素点的特征^[63]，这种特性能有效去除田间的各种细小噪声和秧苗种植间隙等对图像产生的干扰，利于后续的中心线提取。针对提取陆地作物中心线，H.J. Olsen^[64]提出使用正弦函数模板匹配灰度曲线去检测作物行中心线，但该方法要求图像质量较高；Hough 变换作为图像处理中提取线性几何形状的最重要方法，主要用于提取图像中形状确定的目标。相比于其他检测算法，Hough 变换具有较强的鲁棒性。Reid 等提出了利用 Hough 变换来进行导航基准直线的提取^[51]；A. Bandera^[65]提出了一种先运用 Hough 变换寻找有可能成为中心线的线段，然后用聚类算法将这些线段聚类从而提取中心线。Junhong Ji^[66]提出了一种基于特征分布的 Hough 变换，无需对原始图像进行预处理。可见 Hough 变换是中心线提取研究重点。针对水田图像的秧苗行中心线提取，本文设计了一种将 Meanshift 变换和 Hough 变换集成，对 2G-R-B 变换后的图像进行中心线提取算法。

2.2 基于 Meanshift 算法和 Hough 变换的秧苗行中心线提取方法

作物中心线作为农业车辆导航参考的重要参数如何准确快速得提取一直是人们研究探索的重点。在水稻秧苗图像处理中，由于水稻叶片尺寸较小、轮廓不规则、种植间隙大，且水田存在波纹干扰和光照不均匀等问题，使得水稻秧苗中心线提取非常困难。单一的图像分割方法不能够准确的提取水稻秧苗。因此本文先运用超绿变换（2G-R-B）将图像灰度化，然后对图像阈值处理去除了波纹噪声，而后运用 Meanshift 变换去除秧苗种植间隙。实验结果表明运用上述方法能够较好的去除水田噪声干扰，成功提取出水稻秧苗直线，为后续提取水稻秧苗行直线提供良好的图像基础。

2.2.1 图像预处理

RGB 彩色模型作为照明光源的三种基本色彩，三种色彩按照不同的比例混合能够获得自然界中的任何色彩^[67]。除 RGB 彩色模型外还有许多诸如 YUV、HIS 等彩色模型。上述彩色模型一般是由 RGB 模经过线性或非线性变换得到的，其中非线性变换存在奇异点，在奇异点附近即使 RGB 参数值有很小的变化也会导致变换结果有很大的改变，从而可能使 RGB 变换到其它彩色模型时呈现假模式分布^[68]。RGB 模型的分量在现实世界能够找到相对应的如绿色对应植物，红色对应鲜花等^[69]。水田中的图像反差较大，需要提取的秧苗行大部分为绿色 G 值高，因此我们可以适当加大图像的 G 值减小 B 值和 R 值，以提高秧苗与背景的对比度。因此 RGB 色彩空间能更好的适合水田图像处理。

视频流是通过海康网络摄像机获取的，摄像机传输的是经过 H.264 标准压缩编码的 YUV 格式的视频流，需将其转化成我们常用的 RGB 格式的视频流。转换公式为

$$\begin{cases} R = Y + 1.402 * V \\ G = Y - 0.344 * U - 0.714 * V \\ B = Y + 1.772 * U \end{cases} \quad 2-(1)$$

获取单帧图像的 RGB 信息后，需将图像灰度化，灰度化能够减少图像中信息的处理量。灰度图像的获取质量同时也影响到后续中心线提取的效果。摄像机采集水稻早期生长图像如图 2.1 所示。作物行 G 值高，而背景则 R 值和 B 值高。Otha^[70]等人通过统计不同彩色图像的方差归纳出了针对不同环境应选择对 RGB 进行不同的变换，从而减少处理的信息量。其中 2G-R-B 模型比较适合水田图像处理，因此我们选用此种模型。为了增大目标作物和背景的分离性，本文也采用 2G-R-B 方法进行图像灰度化，如图 2.2 所示。经过 2G-R-B 变换我们成功的分离了目标与背景，滤除了图像中的彩色信息，并且去掉了大噪声的干扰。但可以看到变换后在图像底部还有由波纹产生的白色噪声，作物周围还有由倒影产生的噪声。其灰度图如图 2.2，考虑到波纹噪声和倒影灰度值都比秧苗行小且数量较少，因而可以进行阈值处理，经处理后的图像如图 2.4 所示。由图 2.4 可见，经阈值处理后，图像底部由波纹产生的白色噪声及作物周围的倒影噪声得到较好的去除；但秧苗行的种植间隙依旧没有得到很好的缓解，会影响后续秧苗中心线的提取。Meanshift 算法刚好能够弥补这个问题，同时也可以去除剩余残留倒影的问题。



图 2.1 原始图像



图 2.2 2G-R-B 灰度化反色图像

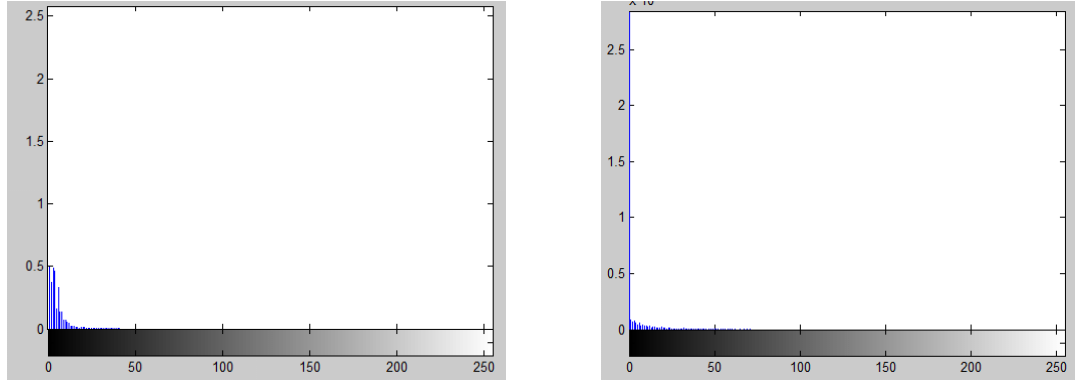


图 2.3 灰度直方图



图 2.4 阈值处理后的图

2.2.2 种植间隙和细小噪声的去除

Meanshift 的概念最早是由 Fukunaga 和 Hosteler 在一篇概率密度函数估计的文章中提出的^[71]，而后经算法改进才被应用于图像平滑^[72]、图像分割和目标追踪等方面。针对水田图像细小波纹和秧苗倒影等高频噪声都会被有效的修正，这些去除的信息正是插秧机视觉导航中的干扰，因此 Meanshift 算法更适合水田图像的噪声去除。

设定 D 维空间 R^D 中的所有点的集合 $\{x_i\}$, $i=1,2,\dots,n$, 可以得出样本点 x 关于带宽矩阵 H 和核函数 $K(x)$ 的核函数密度估计可以表达为:

$$f(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_H(x - x_i) \quad 2-(2)$$

2-(2)中, $K_H(x) = |H|^{-\frac{1}{2}} K\left[|H|^{-\frac{1}{2}} x\right]$, H 表示 $D \times D$ 带宽矩阵。

设核函数每次处理的窗口半径为 h , 则可用比例单位矩阵 $h^2 I$ 来表示 H , 因此核函数密度估计公式2-(2)可以表达为:

$$f(x) = \frac{1}{nh^D} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad 2-(3)$$

采用剖面函数 k 来表达核函数, 则有 $K(x) = k(\|x\|^2)$, 则式2-(3)写成关于核函数的轮廓

函数形式：

$$f(x) = \frac{c_k}{nh^2} \sum_{i=1}^n k\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right) \quad 2-(4)$$

式中， c_k 为归一化常量。

由式2-(3)和式2-(4)可见，核函数是一种权值函数，其作用是将每个样本点按到中心 x 点距离的远近进行加权。距离中心点近的样本点概率密度估计影响大，赋予大的权值，反之，赋予小的权值。由核函数估计出来一个样本集合概率密度，根据此概率密度，分析数据集合中密度最大的数据的分布位置。

对密度轮廓函数2-(4)求导：

$$\begin{aligned} \nabla f(x) &= \frac{2c_{k,d}}{nh^{d+2}} \sum_{i=1}^n (x-x_i) k\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right) \\ &= \frac{2c_{k,d}}{nh^{d+2}} \left[\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right) \right] \left[\frac{\sum_{i=1}^n x_i g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right)} - x \right] \end{aligned} \quad 2-(5)$$

式中， $g(x)$ 为核函数， x 为当前处理点。

令导数 $\nabla f(x) = 0$ ，则可以得到概率密度最大的点 x 为：

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right)} \quad 2-(6)$$

设函数 $m_h(x)$ ，令

$$m_h(x) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n g\left(\left\|\frac{x-x_i}{h}\right\|^2\right)} \quad 2-(7)$$

定义 $M_h = m_h(x) - x$ ，则 $M_h(x)$ 为 **Meanshift** 向量，将一个大小为 h 的窗口定义为要处理的范围，依据窗口内像素点的位置赋给不同的比重值。求这些点值的加权平均，然后求出二者差值，当两者差值小于一个设定值（ ε ）时停止运算。两者差值反映了当前点的梯度变换。由此可见 $m_h(x_t) = M_h(x_t) + x_t = x_{t+1}$ ， x 点向着密度大的方向移动。点在密度小的地方，移动速度快，在密度大的地方，移动速度慢，最终 **Meanshift** 算法收敛于一个

$m_h(x)$ 。由于 Meanshift 算法决定了 $M_h(x)$ 会向着像素值最相似的方向移动，所以最终会使得核函数 $g(x)$ 移动到像素值定义区域内像素最相似的位置。最终收敛到的点具有概率密度的近似零梯度。

Meanshift 滤波迭代运算过程如图 2.5 所示。

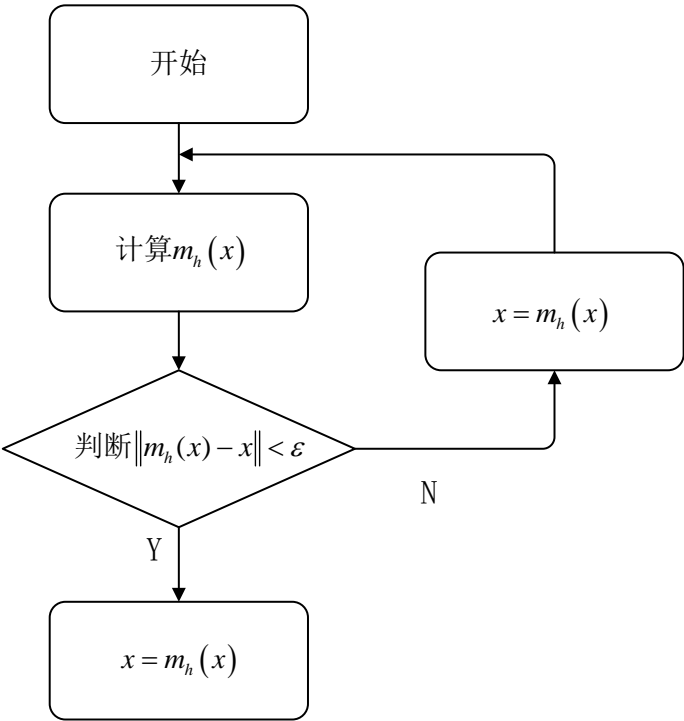


图 2.5 Meanshift 滤波迭代算法流程图

上述迭代停止时，就能够找到符合要求的初始 x 的 $m_h(x)$ 值，将 $m_h(x)$ 赋值给 x 。对每个像素点都进行这样的操作，完成整个图像的 Meanshift 迭代运算。

农作物图像经过 Meanshift 运算以后会出现聚类团块。针对以上描述 Meanshift 函数，选取高斯函数作为核函数 $g(x)$ ，韩永华的文章中论述了选用高斯核函数 Meanshift 算法的迭代速度，基本能满足导航的需求。图 2.6 为经过 Meanshift 变换后图像。



图 2.6 Meanshift 变换后图像

由图 2.6 可见，图像中秧苗间隙比较大的问题得到有效的缓解，从而为后面的 Hough

变换提供了较好的图像基础。

2.2.3 Hough 变换提取秧苗行中心线

最小二乘法和 Hough 变换是识别线性几何形状的最基本方法, 越来越多被运用在导航基准线的提取上。相比于最小二乘法, Hough 变换具有更高的鲁棒性, 能够更好的被应用在农业图像处理方面。

Hough 变换的基本思想是利用点-线的对偶性, 将参数平面映射到极坐标中。如图 2.7 所示:

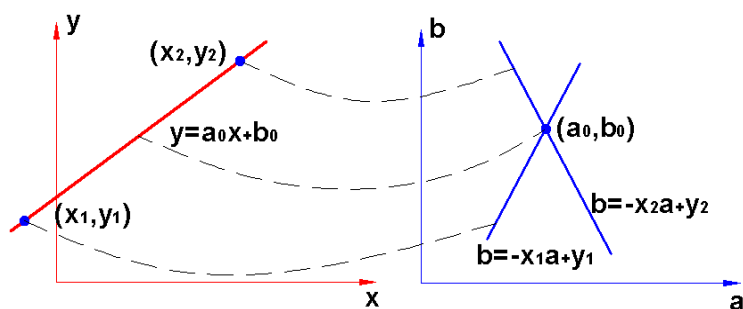


图 2.7 Hough 变换空间转换

观察图 2.7 可发现, x - y 坐标和 k - b 坐标有一一对应关系。 x - y 坐标系中位于 $y = a_0x + b_0$ 的点 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 对应于 k - b 坐标系中的 $b = -x_1a + y_1$ 和 $b = -x_2a + y_2$; 而 k - b 坐标系中的点 (a_0, b_0) 对应于 x - y 坐标系中的线 $y = a_0x + b_0$ 。

由于 x - y 坐标系中的垂直于 x 轴的直线的 k 值为无穷大, 不方便计算, 所以使用点—正弦曲线对偶变换的方法解决这一问题。直角坐标系 x - y 中的一点 (x, y) , 经过点-正弦曲线对偶变换:

$$p = x \times \cos(a) + y \times \sin(a) \quad 2-(8)$$

可将其变换为在极坐标系 a - p 下一条正弦曲线, a 取值范围为 0 - 180° 。可以证明, 直角坐标系 X - Y 中一条直线上的点经过 Hough 变换后, 经过对偶变换得到的正弦曲线在极坐标 a - p 有一个公共交点, 如图 2.8 所示。

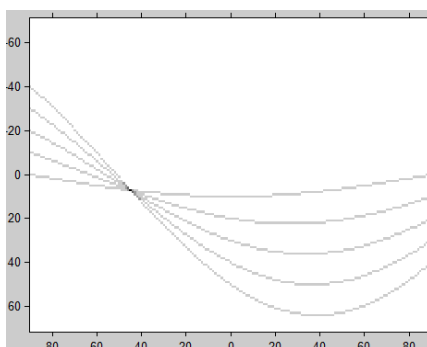


图 2.8 直线 $y = x + 10$ 上的 5 个点对应在极坐标正弦曲线

由图 2.8 可以看出 $y = x + 10$ 上的 5 个点在 $\alpha - \rho$ 图像中分别对应 5 条正弦曲线且 5 条曲线相交于一点。由此可以看出，极坐标系 $\alpha - \rho$ 上的一点 (a, p) ，对应于直角坐标系 X-Y 中的一条直线，而且它们是一一对应的。

该算法应用到经过 Meanshift 变换后的二值化图像，可将图像中像素等于 1 的 n 个点转换为极坐标下的 n 条曲线，通过这 n 条曲线在一定范围的一个或几个交点，确定有最多曲线相交的点，从而获得对应 ρ ，进而获得对应的中心线的方程。具体算法如下：

(1) 扫描经 Meanshift 变化后的二值图，将图像中所有像素为 1 的点转化到 $\alpha - \rho$ 平面上；

(2) 将 $\alpha - \rho$ 平面划分成网格，在 $a = 0 \sim 180^\circ$ 内，根据公式 $\rho = x \cos(a) + y \sin(a)$ 计算 ρ 的值， ρ 值落在某个网格内，便使该网格的累加计数器加 1；

(3) 对所有网格的累加计数器进行比较，得到次数最大的网格 (α, ρ) ，并将该网格映射到直角坐标中获取相应的直线。

2.3 实验结果与分析

实验采用各种光照条件下的水稻早期生长图像，将经过本文叙述的处理方法（Meanshift 算法中 ε 取值 0.1）和常用的农田图像处理方法（二值化后 canny 或 sobel 算子边缘提取）图像分别进行 Hough 变换，最后比较两种方法秧苗中心线的提取情况。

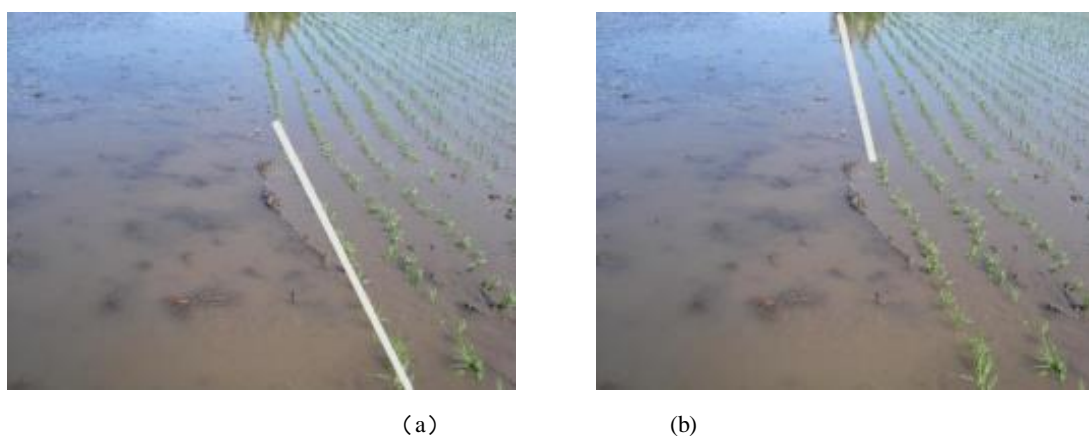


图 2.9 秧苗行比较弯曲的实验结果

水稻秧苗种植时由于插秧机行进中路面颠簸或水稻种植人员操作不规范易造成水稻秧苗行弯曲，如图 2.9 所示。对于种植弯曲且存在噪声的水稻秧苗行图像，经过本文叙述的处理方法或 Canny 算子后运用 Hough 变换都可以提取秧苗行的部分中心线，但经过本文叙述的处理方法后 Hough 变换提取的直线（如图 2.9a）距离摄像机较近，对于插秧机导航具有更高的参考价值；而且相比 Canny 算子边缘处理结果经过本文的方法提取的中心线长度更长（如图 2.9b）。



(a)



(b)

图 2.10 噪声严重秧苗的实验结果

水稻种植环境复杂，存在淤泥、倒影和波纹等干扰和噪声，如图 2.10 中图像所示，图像底部由于距摄像机较近，淤泥、秧苗倒影和波纹比较清晰。Canny 边缘算子没有较好的去除噪声的功能，且经过超绿变换和阈值处理后图像底部的噪声没能得到完全去除。使

得 Canny 算子和 Hough 变换的算法组合没能提取出图像底部的秧苗中心线, 而本文叙述的算法提取的中心线则比较准确。

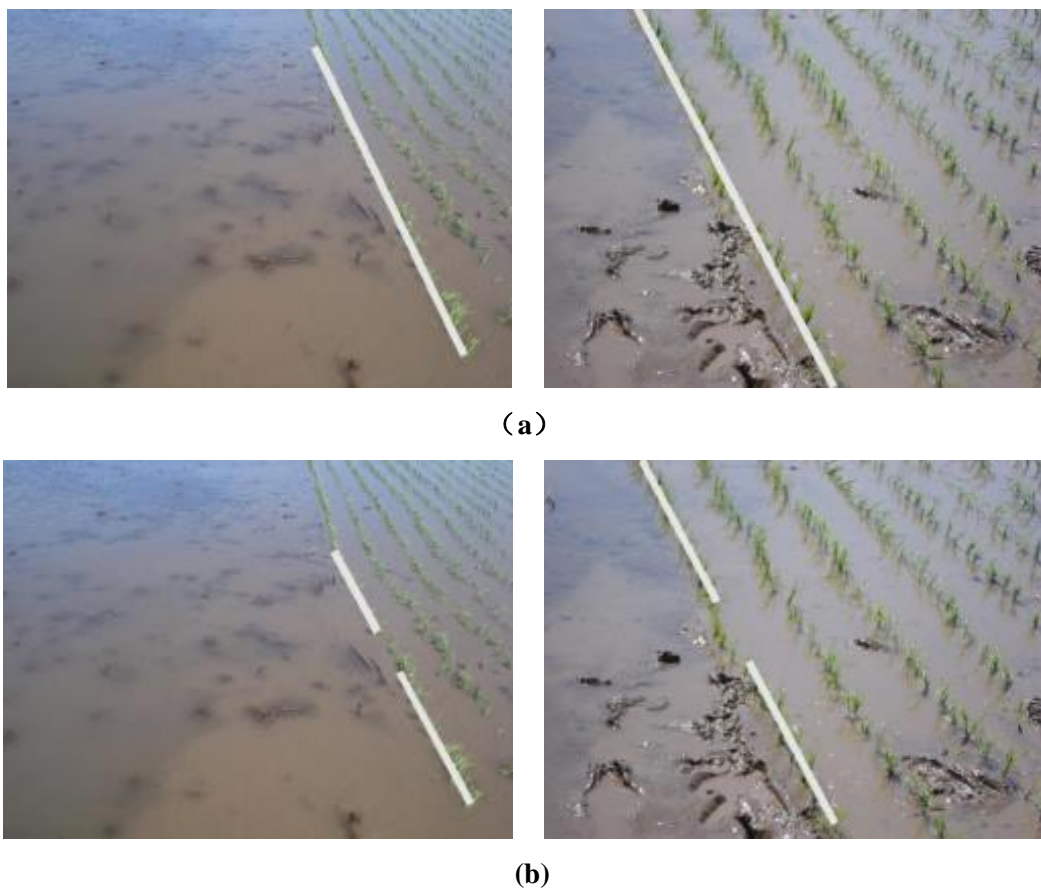


图 2.11 秧苗背景变化较大的实验结果

由于光照和天气等环境因素的因素使得图像容易存在阴影。如图 2.11 所示, 图像中存在较大的阴影、秧苗种植间隙较大且存在少许弯曲。图 2.11a 为经本文叙述的算法后 Hough 变换提取直线的结果, 算法克服了上述影响且比较准确的提取出了目标直线。图 2.11b 为经 Canny 算子处理后 Hough 变换提取直线结果, 直线在秧苗行弯曲处出现了间断。

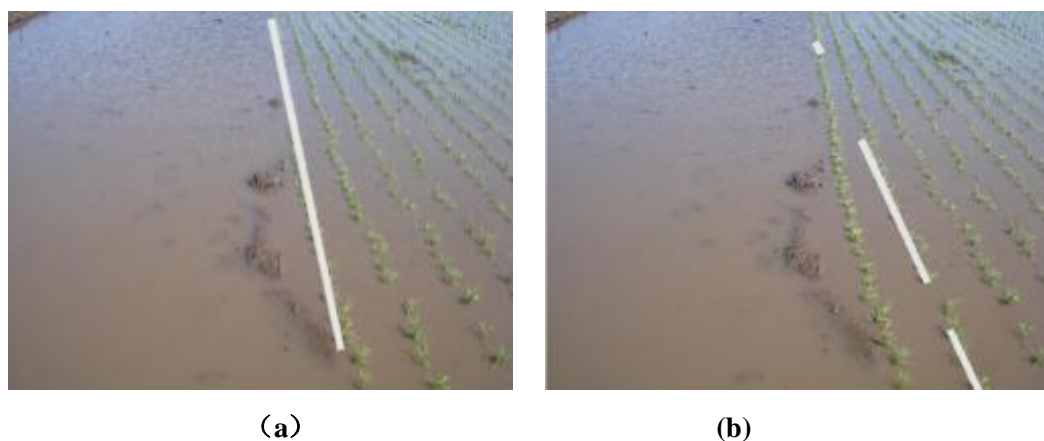


图 2.12 间隙较大秧苗的实验结果

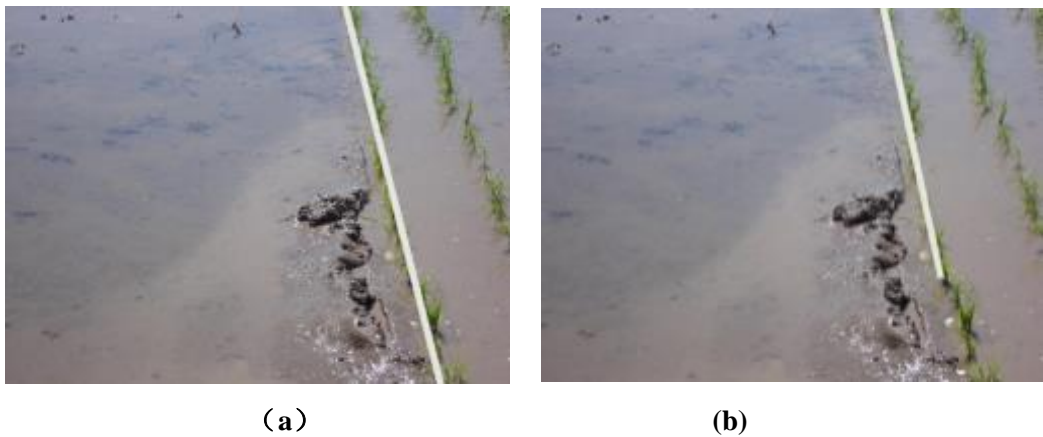


图 2.13 强光照下秧苗的实验结果

由于机器或者人为的操作不当容易造成水稻种植时秧苗间隙过大的情况。在如图 2.12a 光照条件较为理想、秧苗的种植间隙较大的情况下图像经过 Meanshift 算法后利用 Hough 变换提取的中心线能较好的满足导航需要。而如图 2.12b 所示，经过 Canny 算子边缘提取后用 Hough 变换提取的中心线明显偏离了最左侧秧苗行且中心线存在较多间断，基本不能用来作为导航参考依据。

图 2.13 中光照强度较高时，水田中的波纹和阳光的散射是影响作物中心提取的首要问题。图像底部淤泥部分散射光照较强，灰度化后的图像散射光成为图像中的主要噪声。Canny 边缘提取算子不能很好去除灰度图中散射光的影响，提取的中心线不完整。而 Meanshift 算法和 Hough 变换的算法组合则较为完整地提取出了秧苗中心线。

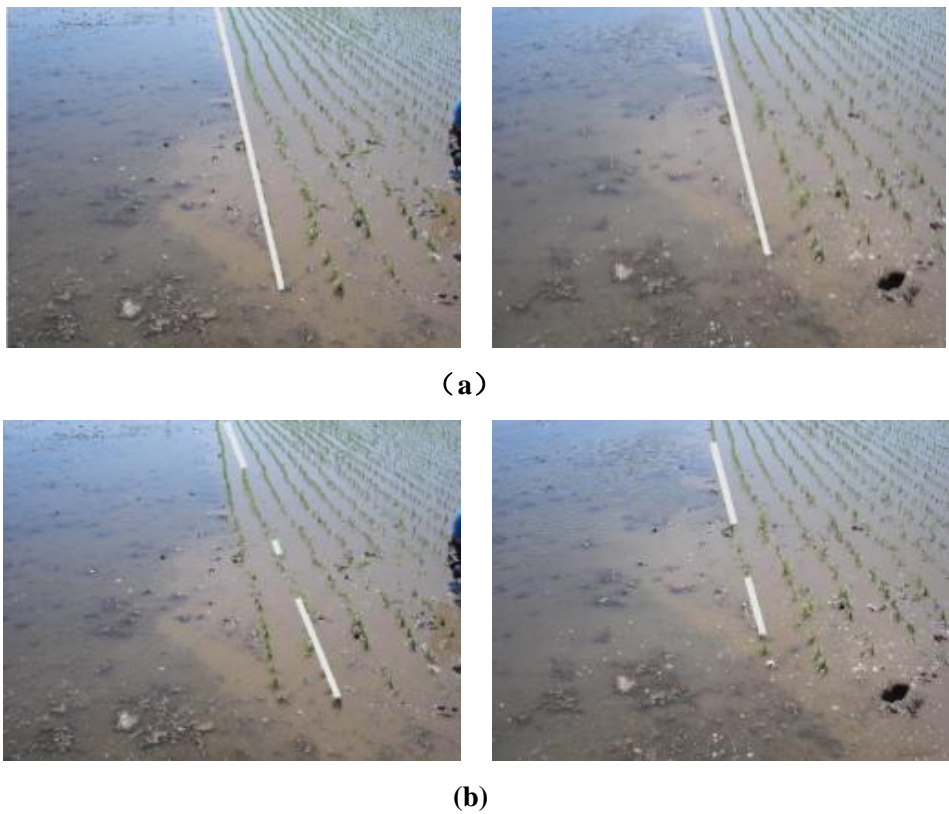


图 2.14 复杂环境图像的处理结果

水田图像的噪声往往是同时存在的，如图 2.14 所示，图像阴影较多、光照不均匀、波纹较多且水稻的种植间隙较大。但如图 2.14a 列所示，针对这种复杂的、噪声较多的图像环境 Canny 边缘算子后提取的直线存在明显的间断，不能用于导航参数的提取，而经过本文叙述的算法处理后，Hough 变换提取的水稻秧苗中心线符合导航要求。

2.4 本章小结

针对传统的作物中心线提取方法易受作物种植间隙和噪声的影响，本文利用 Meanshift 算法能有效去除作物种植间隙和细小噪声的影响和 Hough 变换抗干扰能力强的特点，提出了基于 Meanshift 和 Hough 变换的秧苗行中心线提取方法。实验表明：

(1) 本算法对水稻图像进行 $2G-R-B$ 变换和阈值处理，成功分离了目标与背景，减少了噪声并且提取出秧苗行的二值图。

(2) Meanshift 算法相比于边缘提取能够更好的去除水田图像噪声，更加适用于水田图像的分割。

(3) Meanshift 和 Hough 变换的算法组合相对传统的边缘提取和 Hough 变换的算法组合能够更好地应对水田光照不均匀、作物种植间隙大等问题，具有更好的鲁棒性，精度更高。

第3章 CCD 网络摄像机标定

3.1 摄像机标定方法概述

由于工艺水平的限制,使得摄像机不能满足线性摄像机模型。摄像机实际成像与理想成像存偏差。而且为了能够收敛足够的光线快速成像,摄像机大部分采用弯曲的透镜,这些透镜就是俗称的“球面”透镜,透镜和成像仪很难保持平行,存在各种畸变。主要畸变为^[73]:

径向畸变:成像点沿透镜半径方向偏离理想位置,摄像机镜头中心一般径向畸变为0,距离中心越远径向畸变越严重。径向畸变一般分为枕形畸变和桶形畸变(如图3.1)。径向畸变一般对称于摄像机镜头的主光轴。摄像机标定的主要目的就是去除径向畸变。

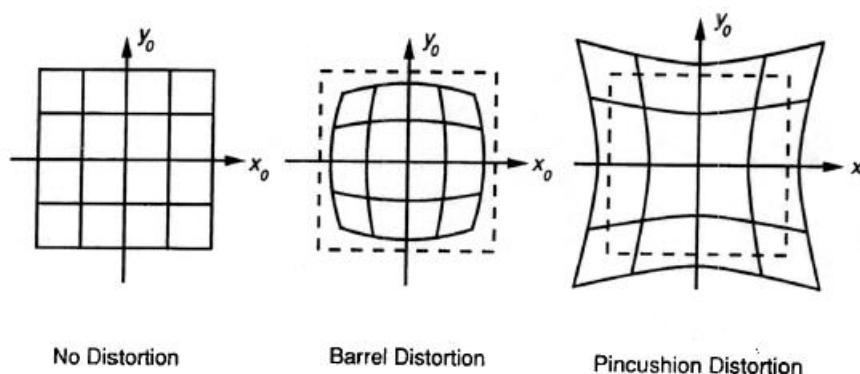


图 3.1 摄像机径向畸变类型

可以定量描述为:

$$\begin{cases} x_x = k_1 x (x^2 + y^2) \\ y_y = k_2 y (x^2 + y^2) \end{cases} \quad 3-(1)$$

其中, x_x 、 y_y 为矫正后的坐标, k_1 、 k_2 为径向畸变系数, x 、 y 为原始坐标。(下同)

切向畸变:切向畸变是由于摄像机制造上的缺陷使得透镜本身与图像平面不平行而产生的,可定量描述为:

$$\begin{cases} x_x = x + [2p_1 y + p_2 (r^2 + 2x^2)] \\ y_y = y + [p_1 (r^2 + 2y^2) + 2p_2 x] \end{cases} \quad 3-(2)$$

r 为点 (x,y) 到主光轴的距离, p_1 、 p_2 为切向畸变系数。

薄棱镜畸变:薄棱镜畸变是由于镜头设计、制造缺陷和加工安装的误差造成的,这类畸变相当于在光学系统中附加了一个薄棱镜,不仅会引起径向偏差,而且引起切向偏差。可描述为:

$$\begin{cases} x_x = s_1(x^2 + y^2) \\ y_y = s_2(x^2 + y^2) \end{cases} \quad 3-(3)$$

其中, s_1 、 s_2 为非线性畸变系数。

由3-(1)、3-(2)、3-(3)可得摄像机非线性畸变用数学表达式如下:

$$\begin{cases} x_x = k_1 x(x^2 + y^2) + x + [2p_1 y + p_2(r^2 + 2x^2)] + s_1(x^2 + y^2) \\ y_y = k_2 y(x^2 + y^2) + y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 x] + s_2(x^2 + y^2) \end{cases} \quad 3-(4)$$

式3-(4)中 k_1 、 k_2 、 p_1 、 p_2 、 s_1 和 s_2 统称为非线性畸变系数。

针对本文插秧机的视觉导航系统, 视频采集是通过海康 CCD 网络摄像头进行的, CCD 网络摄像头采用光电耦合作为主要传感部件。网络摄像机非线性畸变系数一般较大、需手工对焦, 且透镜中心在感光原件上的投影位置多变, 基于上述原因采用非线性模型对网络摄像头进行标定是可行的^[74]。Tsai^[75] (1986) 在文章中指出, 使用线性畸变方程3-(4)对摄像机标定, 可能会降低标定的精度, 还会使标定结果不稳定。因此我们只校正径向畸变。

3.2 摄像机标定原理

摄像机作为机器视觉中的眼睛, 担负起获得图像的功能。因为摄像机制作过程中的问题, 使我们获得的图像与真实图像存在偏差。同时我们需要将图像中的信息转换为真实世界的信息。这种矫正图像偏差和转换信息的过程, 我们叫做相机标定。标定的过程我们需要获得相机的内部参数(焦距、畸变系数、成像坐标原点)和外部参数(平移矩阵、旋转矩阵)。

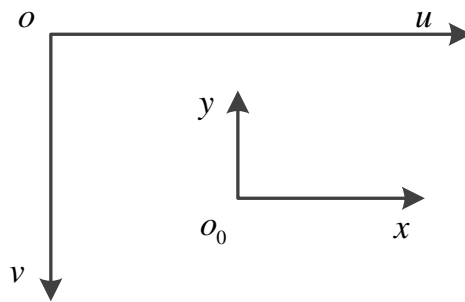


图 3.2 图像平面坐标系

本文采用针孔模型来模拟摄像机成像模型。如图 3.2, uov 为图像像素坐标系, u 轴平行于像素的行, v 轴平行于像素列, (u, v) 为以像素值为单位的坐标系。 xoy 为图像物理坐标系, 其原点的坐标 o_0 (u_0, v_0) 为摄像机主光轴与像素平面的交点。则有

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad 3-(5)$$

d_x 、 d_y 表示像素在 x 、 y 方向上的物理尺寸。

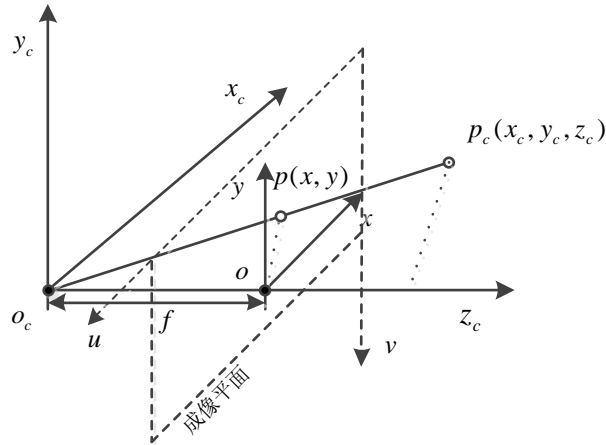


图 3.3 摄像机坐标系与图像平面位置关系

如图 3.3, 在摄像机坐标系中一点 $p(x_c, y_c, z_c)$, p 点在图像物理坐标系中的坐标为 $p(x, y)$, 摄像机的焦距 f 我们也已知, 则根据三角形相似原理有

$$\frac{x}{f} = \frac{x_c}{z_c} \quad 3-(6)$$

$$\frac{y}{f} = \frac{y_c}{z_c} \quad 3-(7)$$

因此可以建立摄像机坐标系和图像物理坐标系关系式的

$$z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad 3-(8)$$

再由式3-(6)、3-(7)可得

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad 3-(9)$$

其中 $f_x = \frac{f}{d_x}$, $f_y = \frac{f}{d_y}$ 。

摄像机坐标系通过平移矩阵 T 和旋转矩阵 R 可以转换到世界坐标系。 T 和 R 矩阵与摄像机的安放有关。

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T \quad 3-(10)$$

整理成齐次式，

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad 3-(11)$$

由3-(9)，3-(11)式可得

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad 3-(12)$$

3.3 摄像机标定方法

3.3.1 常见的摄像机标定方法

常见的摄像机标定方法分为动态标定方法和静态标定方法。静态标定方法将一个已知各种参数的模板放置在摄像机前供摄像机拍摄图像，然后根据图像坐标系与空间坐标系之间一一对应的关系，最终求解出摄像机的内、外参数，其标定方法包括直线性变换标定法、2D、3D 标靶标定法等。动态标定依靠摄像机在移动状态下拍摄的环境图像间对应关系进行摄像机标定。静态标定优点是精度高，但标定过程繁琐。动态标定较方便，但标定精度较低^[76]。由于摄像机标定的结果直接影响导航参数的提取，因此选用静态标定方法。

常用的静态摄像机标定方法：MATLAB 标定法、OpenCV 标定法等。

3.3.2 基于 MATLAB 摄像机标定法

1) 标定特点与原理

张正友^[77]等提出的运用 2D 标靶的平面方格标定法是平面标定方法的典型代表。该标定方法是使用一个平整、规则的平面方格板作为标定参照，实验选用的方格标定板如图 3.4 所示。将摄像机对准方格标定板，从多个方位和角度（ ≥ 3 ）提取图片，提取图片过程中方格标定板可以任意移动，但应保证方格标定板的中心在图像的中心位置，且方格标定板应尽量布摄像机提取的画面。

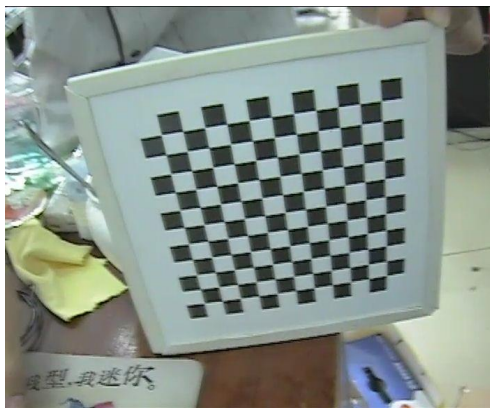


图 3.4 本文选用的标定板

平面方格标定法在摄像机标定中得到了广泛的应用，方格标定板可以任意移动是该种标定方法相比于传统标定方法的优点，且该标定方法操作具有快速便捷、鲁棒性好、简单易行等优点，能够达到摄像机标定的需求。

2) 标定流程

开始标定前，需确定方格标定板的详细参数。标定实验选用了 12 行 12 列的棋盘格标定板，其单元方格尺寸为 $11\text{mm} \times 11\text{mm}$ 。将棋盘格标定板贴在表面光滑平整的厚铝板上，以保证标定板表面平整。标定的流程如图 3.5。

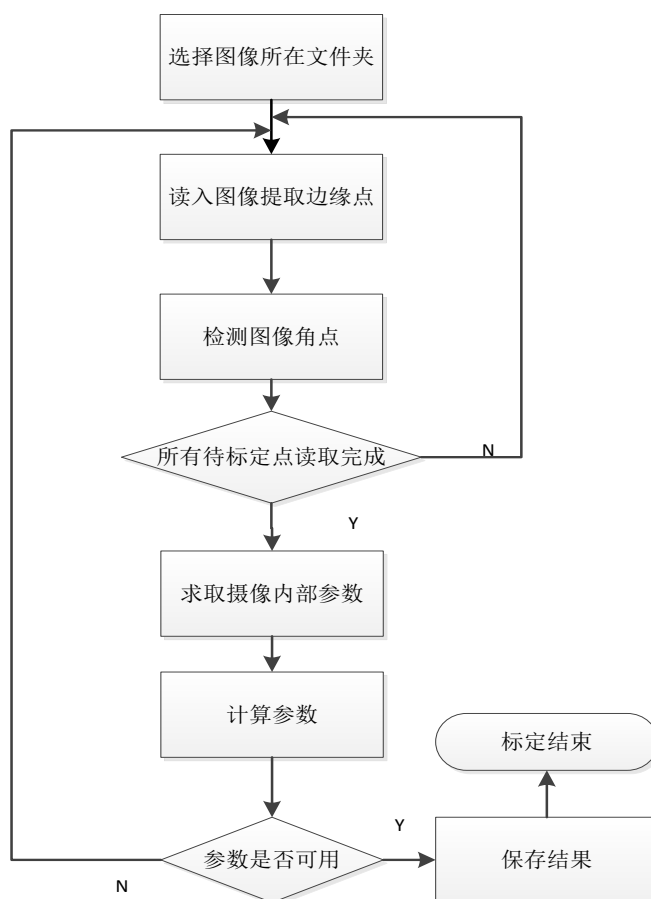


图 3.5 MATLAB 标定法流程图

3) 实验过程及结果分析

待标定图片分辨率为 704*576 像素，如图 3.6

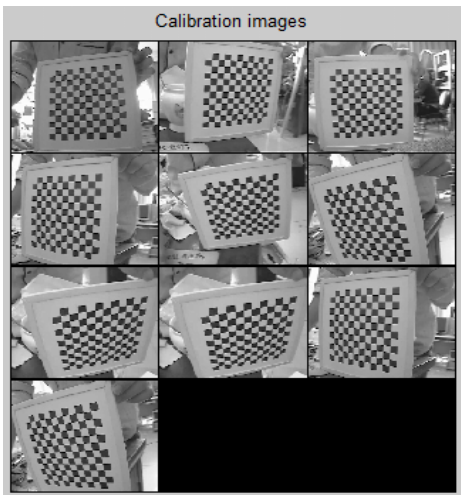


图 3.6 待标定图像

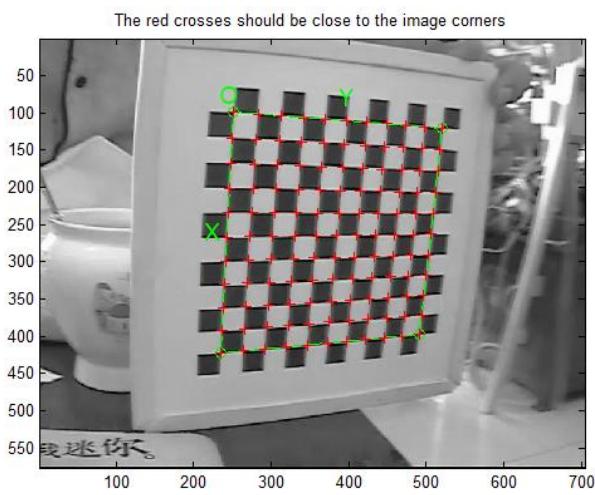


图 3.7 角点提取过程

(1) 确定待标定图片后，需要设定搜索区域的边长，每幅图像的边缘的角点是按逆时针顺序提取的，提取完成后程序会自动查找标定板剩余的所有角点，角点全部提取后如图 3.7 所示。在本次标定实验中搜索窗口的边长设定为 5x5，方格标定板上的方格边长为 11mm×11mm，所以 dy 和 dx 均设定为 11。角点检测结果如图 3.8 所示。

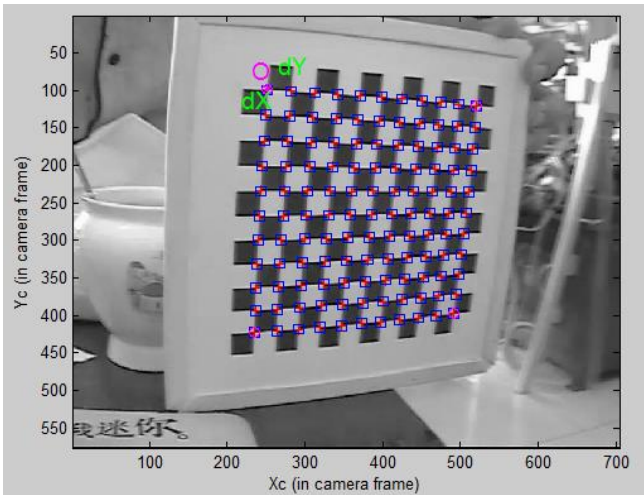


图 3.8 角点检测结果

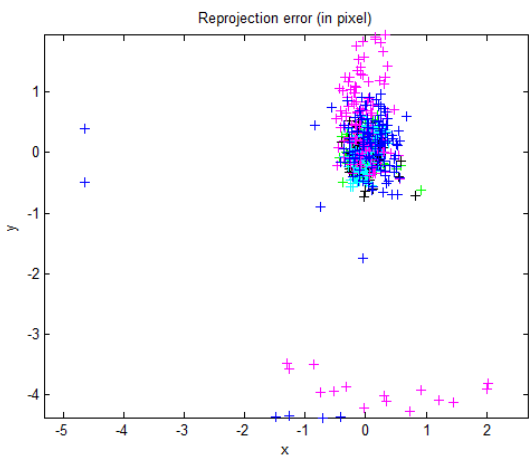


图 3.9 角点检测误差

(2) 角点提取完成之后，便可开始摄像机标定，检测的角点误差如图 3.9 所示。经过多次迭代后可求得到摄像机的内部参数。

(3) 利用标定所得的摄像机参数矫正图像畸变，如图 3.10 为标定前的图像，图 3.11 为去畸变后的图像，与图 3.10 相比，去畸变以后边缘的鱼眼效应被有效改善了。

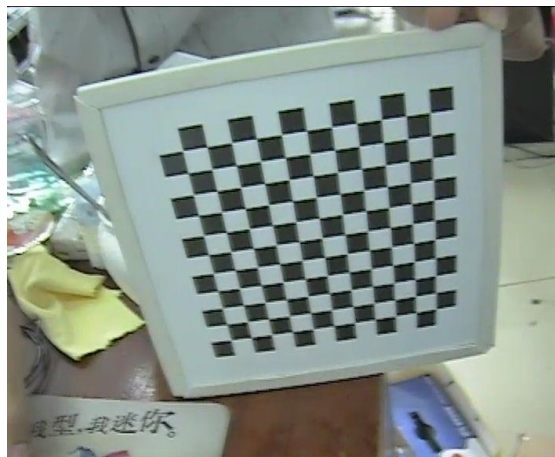


图 3.10 原始图像

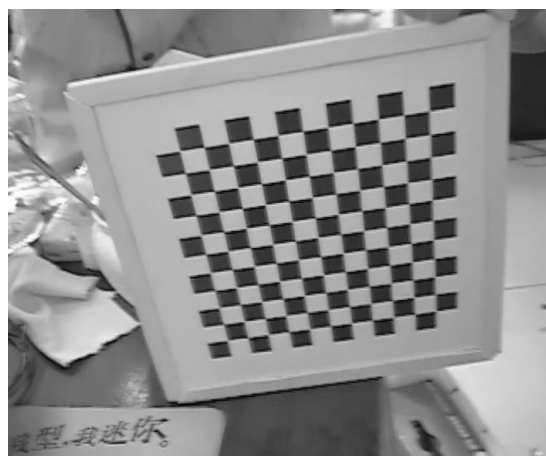


图 3.11 去畸变后的图像

以上便是 MATLAB 平面方格点标定法的实验流程。通过实验可得出如下结论：采用平面方格点标定法时，应尽量增加图片数量，这样可以多次得到摄像机的畸变参数信息。在提取角点时，角点的搜索窗口可以稍微选大一些，这样便于提取。由于图像采集角度和光线问题，可能会导致角点提取误差较大或者不能提取，需要经过多次实验获得最佳标定结果，提高精度。

3.3.3 基于 OpenCV 摄像机标定法

OpenCV 标定法是另外一种常用的摄像机标定方法。OpenCV 是 Inter 建立的跨平台开源视觉计算机视觉库函数，OpenCV 函数库提供了 Python 等多种语言的接口，实现了图像处理 and 计算机视觉方面的很多通用算法。库函数由 c 和 c++ 语言编写，供人们二次开发使用。

在运用 OpenCV 标定法标定时，只需要导入待标定图像，程序会自动提取角点完成标定，因此操作比较简便。但 OpenCV 标定法在考虑径向畸变的同时还引入了切向畸变，使其运算量变大，但畸变矫正模型与现实中的透镜更加接近。因此 OpenCV 标定方法与 MATLAB 标定法相比更加简单易行、智能程度更高。

1) 标定步骤

本次标定采用和 MATLAB 标定法相同的标定样本，在 vs2008 环境下开发了基于 OpenCV 2.0 版本的摄像机标定程序，实现流程如图所示。

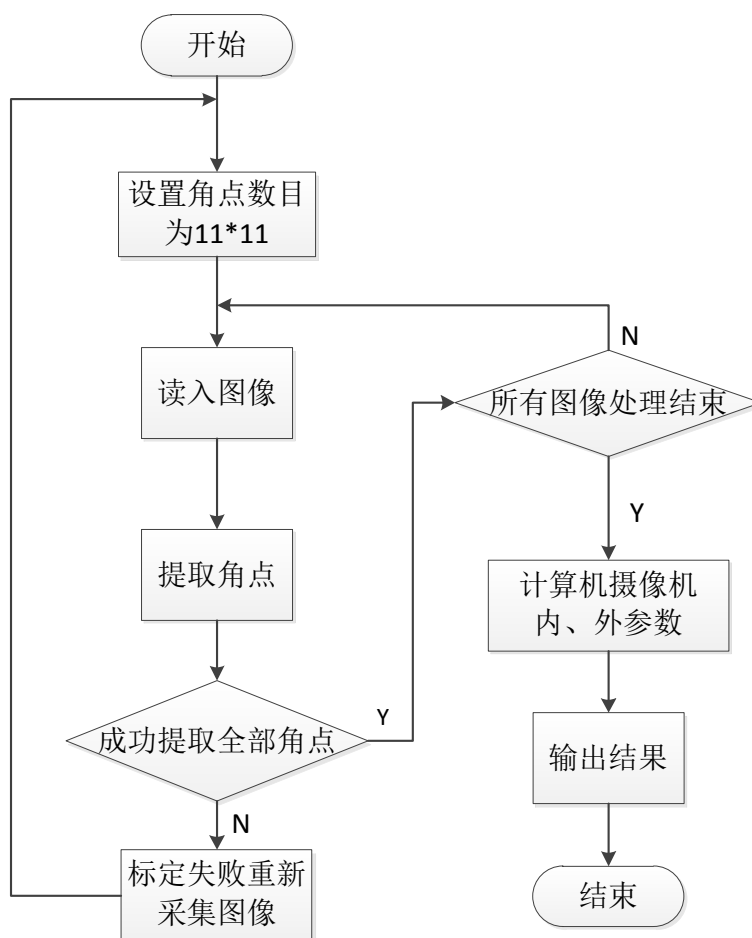


图 3.12OpenCV 摄像机标定流程

OpenCV 摄像机标定实验过程及结果分析:

- 1) 使用函数 `cvLoadImage` 读取待标定的所有图像;
- 2) 使用函数 `cvFindChessboardCorners` 提取标定的图像中的全部角点。标定的图像需采用 8 位灰度图像,所以在提取角点前要将原始 RGB 彩色图像转化成二值图,在这里采用了自适应二值化方法。
- 3) 利用函数 `cvFindCornerSubPix` 提取亚像素角点位置。
- 4) 利用函数 `cvDrawChessboardCorners` 提取标定板的角点并记录坐标,提取结果如图 3.13

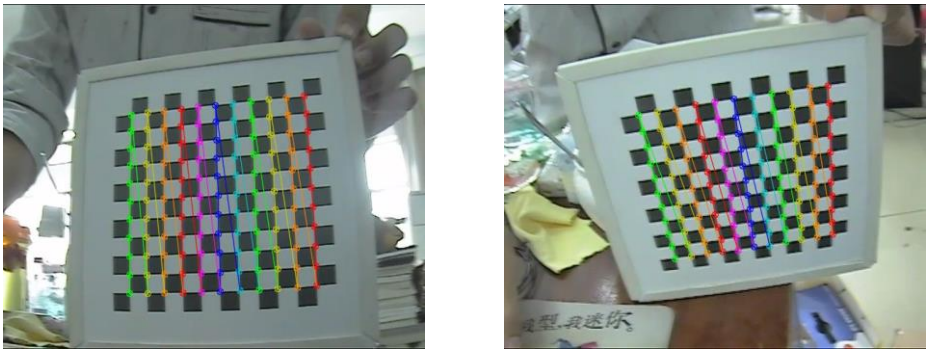


图 3.13 角点提取流程

5) 运用 cvCalibrateCamera2 进行标定，计算机通过多次计算推算出摄像机的焦距、平移向量、旋转向量和畸变系数等参数，最后储存结果。

3.3.4 MATLAB 标定法和 OpenCV 标定法的对比选择

标定实验选用上述两种方案，每次标定的图片数量要大于等于 3 张，所以每组实验在拍摄的图像中随机选取 4 张，分别进行 7 组实验，两种方法的实验结果分别见表 3.1、表 3.2。

表 3.1 基于 MATLAB 平面方格标定的结果

焦距	成像原点	畸变系数	像素误差
[857.98;887.91]	[339.10;248.30]	[-0.45730;0.28503;0.00006;0.00092;0]	[0.12849;0.20387]
[853.62;884.42]	[337.96;251.39]	[-0.56416;0.03488;0.02339;0.00372;0]	[0.12921;0.20453]
[852.75;783.45]	[343.85;251.78]	[-0.53323;0.44335;0.01495;0.00582;0]	[0.12893;0.20637]
[845.25;876.82]	[330.11;244.53]	[-0.56932;0.52779;0.00481;0.00489;0]	[0.13220;0.20672]
[846.44;879.42]	[347.77;255.42]	[-0.54732;0.55379;0.01421;0.00532;0]	[0.12728;0.20145]
[757.98;888.36]	[339.22;249.88]	[-0.03542;0.57854;0.00569;0.02768;0]	[0.12859;0.20312]

表 3.2 基于 OpenCV 平面方格标定的结果

焦距	成像原点	畸变系数	像素误差
[863.72;891.86]	[333.22;256.68]	[-0.4781;0.4021;-0.0010;-0.0010;0]	0.58175
[907.90;914.13]	[337.66;251.39]	[-0.7858;0.8314;-0.0003;-0.0494;0]	0.15426
[903.75;918.45]	[334.87;247.98]	[-0.5345;0.6538;-0.0015;-0.0052;0]	0.45168
[894.28;900.34]	[333.91;246.55]	[-0.6589;0.7785;-0.0008;-0.0048;0]	0.74950
[865.52;889.35]	[328.57;251.45]	[-0.6245;0.5237;-0.0042;-0.0053;0]	0.62154
[890.58;910.77]	[325.55;249.31]	[-0.5233;0.3360;-0.0056;-0.0276;0]	0.55124

分析两种标定方法的标定误差如图 3.14

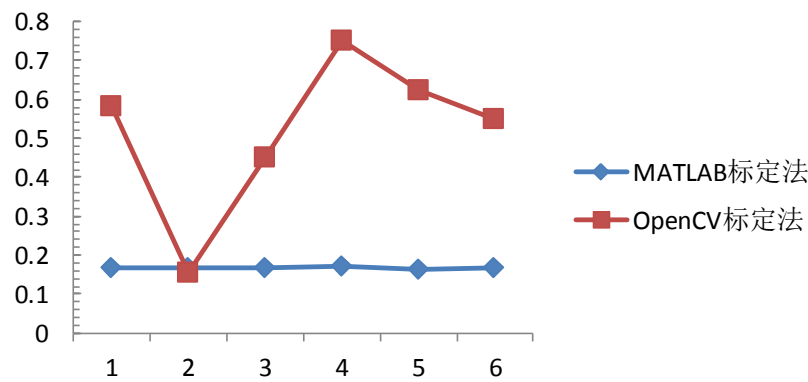


图 3.14 两种标定误差

通过对两种标定结果的误差分析及实验过程，可以得出以下结论：**OpenCV** 平面方格标定法较简单，程序可以自动提取角点，但提取角点不是很稳定容易出现角点不能提取的情况，导致标定失败，且标定结果误差较大，标定误差的大小很大程度上由标定所采用图像的质量直接决定；基于 **MATLAB** 的平面方格标定方法程序虽不能自动提取角点，但手工提取角点的准确性高，且出现角点提取不准确的时候可以修订，鲁棒性高，误差比较稳定。相比较下本文最终选择了 **MATLAB** 标定方法完成摄像机标定，并通过该方法计算出摄像机的平移旋转矩阵等参数。

3.4 本章小结

本章主要内容是介绍摄像机标定方法，并分析了摄像机畸变机产生的原因及畸变的类型，然后介绍了摄像机的标定原理，分析了图像坐标系、摄像机坐标系和世界坐标的成像模型，以及他们之间的转换关系。摄像机标定方法初步选定两种常用标定方法：**MATLAB** 标定法和 **OpenCV** 的标定方法。并介绍了这两种标定方法的特点、原理以及标定过程，并分别进行了基于平面方格法的标定实验，通过两种标定方法的实验结果对比，得出以下结论：在 **MATLAB** 标定法中边缘角点需要手工提取，其标定结果稳定、误差小。**MATLAB** 标定法操作简便，软件使用方便。**OpenCV** 标定法可以自动提取角点，但存在角点提取不准，标定结果不稳定的情况。考虑到导航精度要求较高，因此最后选用了相对比较稳定的 **MATLAB** 标定法。

第4章 插秧机导航控制方法研究

基于视觉导航的无人驾驶的插秧机工作过程中要求视觉导航系统能够根据秧苗行的位置得获得插秧机关于其的相对位置关系，然后快速调整插秧机的行进位姿，以保证插秧机沿着准确秧苗行进行作业。插秧机和秧苗行的相对位置的衡量依靠两者间的角度和位移偏差，同时他们也为插秧机的位姿调整提供依据。然后根据获得位姿信息，调用电机快速调整插秧机的位姿，完成导航任务。

4.1 插秧机导航控制原理

为了使插秧机沿以经过图像处理获取的秧苗行中心线为参照行驶，保证插秧机的路径与导航路径偏差较小，除了准确快速得通过图像处理获取秧苗中心线外，还要对车辆进行精确的转向控制。车辆偏离导航路径的显著表现为车辆行驶的方向与秧苗行中心线不平行或者车辆与秧苗行的距离过大。在此两种情况下都要对车辆位置进行调控，使其重新回到导航路径上。插秧机的位置偏差是由车辆的航向角引起的，航向角的变化与插秧机的前轮转角有直接的关系，所以为了保证插秧机能够沿着导航路径行驶，我们需要实时对插秧机的前轮转角进行控制。

本研究采用直流步进电机对插秧机进行转向控制，首先利用摄像机提取出水稻秧苗的图像，将图像经进行去噪、Hough 变换等处理，根据获得的秧苗行中心线位置确定当前时刻插秧机与其相对位置的关系，根据位置关系将控制指令发送给运动控制卡，运动控制卡通过控制步进电机的转向实现车辆的转向控制，进而使车辆沿导航路径自动行驶。

通过摄像机标定，我们建立起像素坐标系与世界坐标系的联系，可将像素坐标系下的直线方程转换到世界坐标系，进而获得插秧机相对于秧苗行的相对位置、提取导航参数，通过控制步进电机的转速控制方向盘转动，进而达到控制插秧机行进方向的目的。

方向盘与插秧机的旋转比例是非线性的，步进电机运行可能会存在丢步的情况，这些都会影响插秧机的控制，因此可以引入一个反馈控制去除误差累积。因此我们加入光点编码器用来测量插秧机前轮转动的实际角度。车辆导航控制原理如图 4.1。

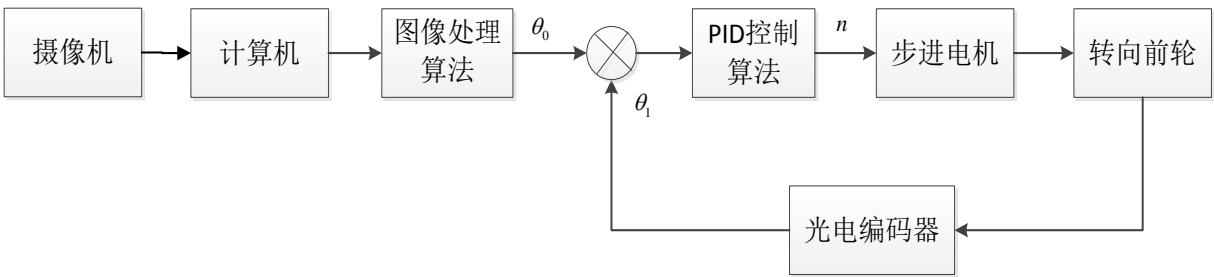


图 4.1 车辆控制原理图

首先根据插秧机与秧苗行中心线相对位置关系计算出插秧机行进方向与秧苗行的夹角，根据夹角的大小调节电机转速，电脑将转速信息发送给运动控制卡控制步进电机转动，步进电机带动插秧机方向盘控制插秧转向，安装在车轮上的光电编码器用于测量车轮实际转动的角度，根据发出的脉冲数对应的转角与实际车轮转角差值计算出误差，将误差换算成脉冲数，将其累加到下次电脑发出的脉冲数中（其具体情况在下文中描述）。

根据上述分析可以知道，插秧机控制主要是转向控制和误差控制。转向控制的实质是针对转向控制步进电机进行控制，通过控制发出的脉冲数量，实现对插秧机航向角的控制；误差控制主要通过控制光电编码器降低误差累积。

4.2 插秧机视觉伺服系统

视觉伺服系统级采用视觉传感器来间接获取当前导航物体的相对位姿。应用到插秧机视觉导航中，即根据摄像机采集的秧苗行信息来实时调整插秧机的位姿。视觉伺服系统是闭环控制系统，能够有效减小误差累积。插秧机视觉伺服系统的原理如图 4.2。

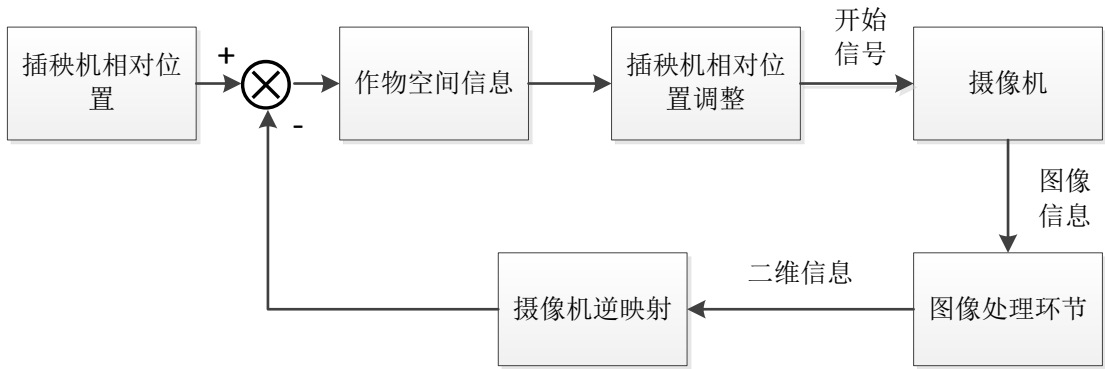


图 4.2 插秧机视觉伺服系统

4.3 插秧机的导航信息的获得

插秧机导航流程图如下：

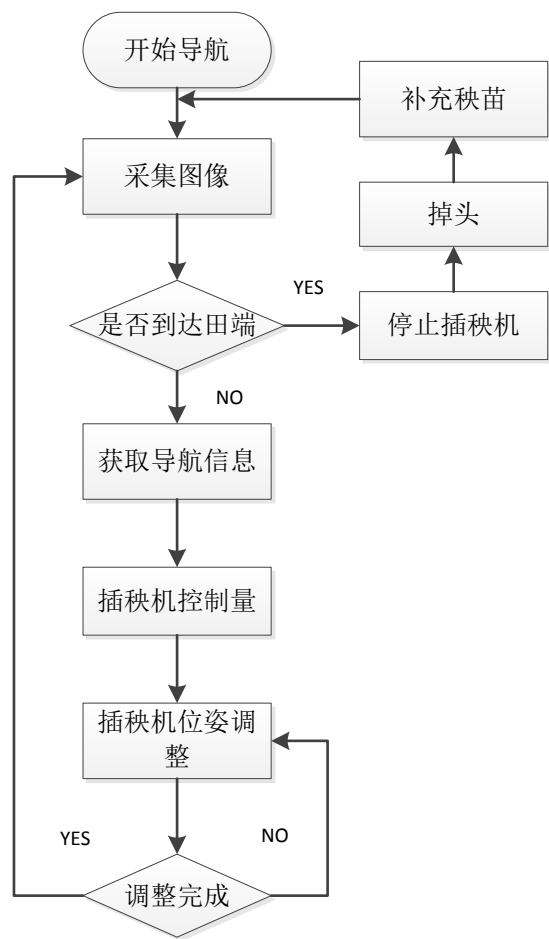


图 4.3 插秧机导航流程图

根据我们在第三章摄像机标定中获得的世界坐标系图像坐标系之间的关系

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4-1}$$

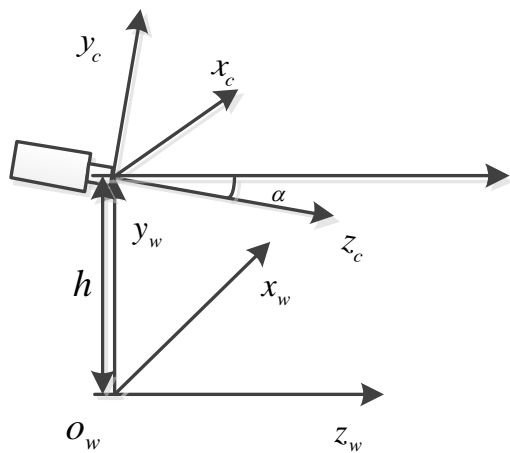


图 4.4 摄像机坐标与世界坐标系位置关系

定义世界坐标系与插秧机相连， z_w 轴与插秧机行进方向平行， y_w 轴竖直向上垂直插

秧机行进方向, x_w 垂直于 $z_w y_w$ 平面。摄像机安装在 o_w 正上方 h 处, 光轴 z_c 与行进方向 z_w 下倾 α 。摄像机坐标系和世界坐标系之间的关系如图 4.4, 将摄像机坐标系绕 x_c 轴逆时针旋转 α 角, 然后沿旋转后坐标系的 y 轴移动 $-h$, 便可将摄像机坐标系转换到世界坐标系。容易得到两坐标系转换的旋转矩阵 R 和平移矩阵 T ,

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 4-(2)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & h \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 4-(3)$$

所以4-(1)可得

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & -h \cos \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & -h \sin \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad 4-(4)$$

要提取的秧苗行在世界坐标系中, $y_w=0$, 则

$$z_w = -\frac{(v-v_0)h(1+\cos^2 \alpha)}{f_y \sin \alpha - (v-v_0) \cos \alpha} + h \cot \alpha \quad 4-(5)$$

$$x_w = \frac{(u-u_0) \left[\frac{(v-v_0)h}{f_y \sin \alpha - (v-v_0) \cos \alpha} + h \right]}{f_x \sin \alpha} \quad 4-(6)$$

通过上面的参数我们可以获得在世界坐标系下的参考秧苗行的直线方程, 进而可以获得导航所需要的角度和位移偏差等导航信息。

4.4 插秧机的路径控制

插秧机的路径控制意旨在于根据电脑发出的控制信号控制插秧机的行驶方向, 使插秧机沿着规定的路线行驶。由于插秧机航向的改变是由前轮转角变换所引起的, 所以插秧机路径导航控制, 还要引入光电编码器测量前轮转角的变换, 避免误差累积, 使插秧机偏离预定航向, 影响后续操作。

插秧机与基准秧苗行的位置关系存在以下三种情况如图 4.5 所示,

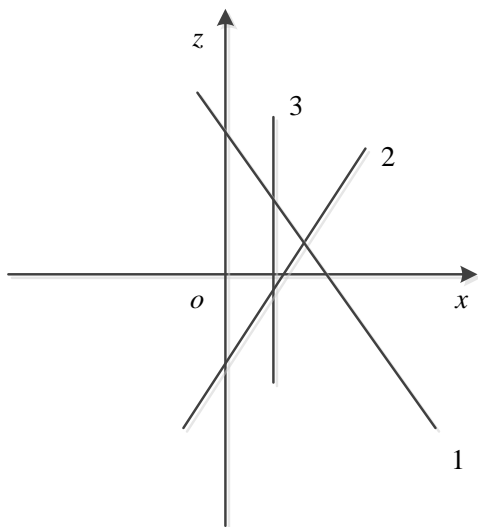


图 4.5 秧苗行与插秧机的三种位置关系

图 4.5 中 z 方向表示插秧机行驶的方向，坐标轴上的直线表示基准秧苗行相对于插秧机可能存在的三大类位置，坐标原点 o 为摄像机投影点，根据上节的内容我们可以获得基准秧苗行在世界坐标系中具体直线方程，进而获得相对应的导航信息。下面将具体讨论上述三种导航信息的获取。

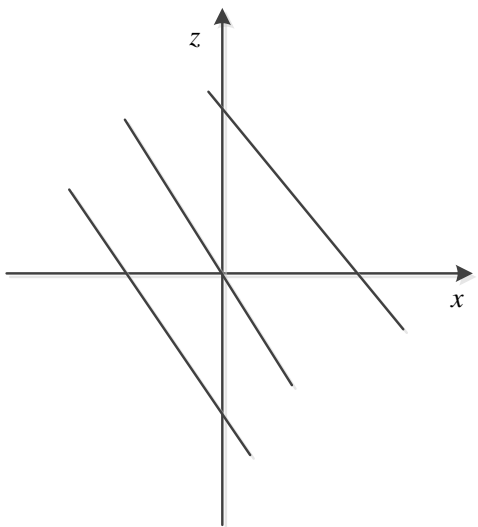


图 4.6 秧苗行 1 与插秧机的位置关系

图 4.6 的三条直线表示图 4.5 第 1 条直线相对于插秧机的三种位置情况，三种情形下的秧苗行在世界坐标系下对应的方程斜率均为负，可以控制方向盘逆时针旋转，调整插秧机行进方向，使其尽量与秧苗行平行。通过直线方程还可以知道秧苗行直线与 z 轴的夹角，根据夹角的大小相应的调整电机的转速，当夹角较大时调整电机快速转动、夹角较小时使电机慢速转动，进而使插秧机快速进入预定的插秧轨道。

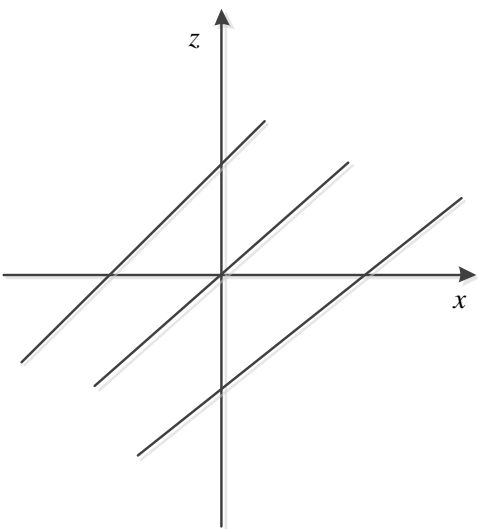


图 4.7 秧苗行 2 与插秧机的位置关系

图 4.7 是图 4.5 第 2 条直线相对于插秧机的三种位置关系，其处理方式与图 4.6 的处理方式基本相同，但因为秧苗行直线斜率为正，故方向盘应顺时针方向旋转，秧苗行直线与 z 轴夹角较大时使电机快速转动、夹角小时降低转速。

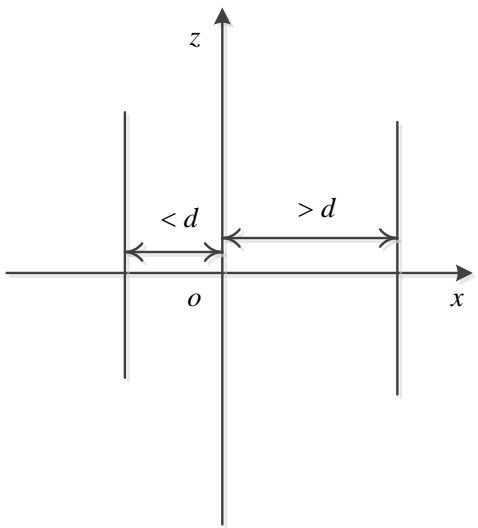


图 4.8 秧苗行 3 与插秧机的位置关系

图 4.8 为图 4.5 第 3 条直线相对于插秧机的两种位置关系，秧苗行直线与插秧机行进方向平行，设标准种植情况下秧苗行之间的距离为 d 。当秧苗行直线与 x 轴交点在 x 轴正方向时，秧苗行直线与 z 轴距离大于 d 时，应控制方向盘顺时针旋转，小于 d 时应控制方向盘逆时针旋转， d 的具体数值将在实验中确定。

4.5 插秧机转向控制

插秧机导航控制最终是通过转向控制实现的，转向控制系统的响应速度和准确性直接影响车辆控制的精度，所以必须保证转向控制系统能够快速、准确的执行控制指令。

4.5.1 转向控制系统的组成

转向控制系统主要由计算机、电机驱动器、步进电机、光电编码器等组成。系统结构如图 4.9。

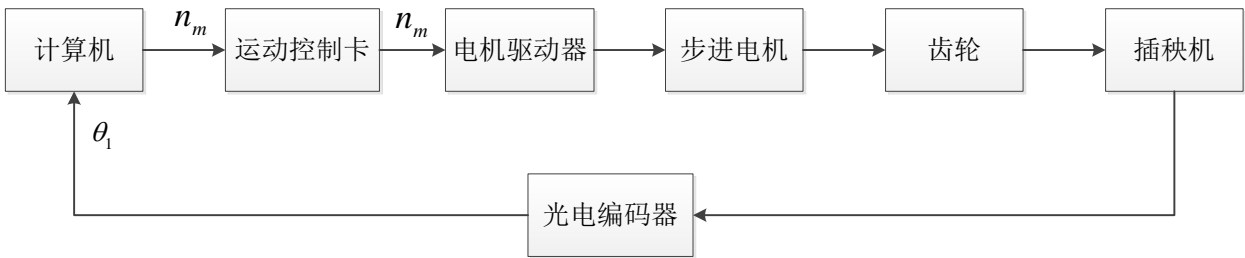


图 4.9 转向控制原理图

计算机通过计算插秧机与秧苗行基准线的相对位置关系控制，计算出驱动电机应该响应的转速，通过运动控制卡发出脉冲控制步进电机转动相应的角度，步进电机上的齿轮带动方向盘转动实现插秧机的转向。因为方向盘与转角的关系是非线性的，步进电机存在丢步的现象，所以要加入光电编码器做反馈调节。

4.5.2 光电编码器转角测量

插秧机转向控制意旨是根据图像提取的信息快速地调整插秧机的行进姿态，使其按照规定的路线行走，进而完成插秧任务。落实到具体的运动就是根据信息快速地控制插秧机方向盘使车轮做出相应的转动。但因为方向盘与车轮之间的转动关系是非线性的，控制方向盘转动的步进电机存在丢步等问题，使得车轮的实际转动量与理想转动量有偏差，因此引入光电编码器测量车轮实际转动的角度。光电编码器测量角度是通过调用电机运动控制卡上的隔离通用输入口通过计数的方式获得的。

4.5.3 PID 算法电机控制

PID 控制自上世纪中旬开始应用到工业控制领域，至今仍然被广泛应用，是一种高效的控制技术，它以反馈为基础，组成闭环控制系统，能够增强导航系统的稳定性和控制精度。反馈过程包括测量、比较和执行三个步骤。经过周期性的测量变量值、与期望值比较、利用控制算法减小误差。

1) PID 算法原理

在控制算法中 PID 及其衍生算法是应用最广泛、生命力最顽强的算法之一，原理如图 4.10 所示。其中 $r(t)$ 为输入的期望信号， $e(t)$ 为反馈后的误差信号， $u(t)$ 为经 PID 控制算法计算出的控制信号， $c(t)$ 为被控对象当前的实际输出信号。使被控制对象按照要求进行工作。比例环节主是实现误差的比例放大和调节控制系统的响应速度。积分环节是

使系统在稳定状态的输出值与设定值一直，使系统进入稳态后没有稳态误差。微分环节负责预测误差的变化趋势，避免被控制量超调，改善 PID 控制系统的稳定性。

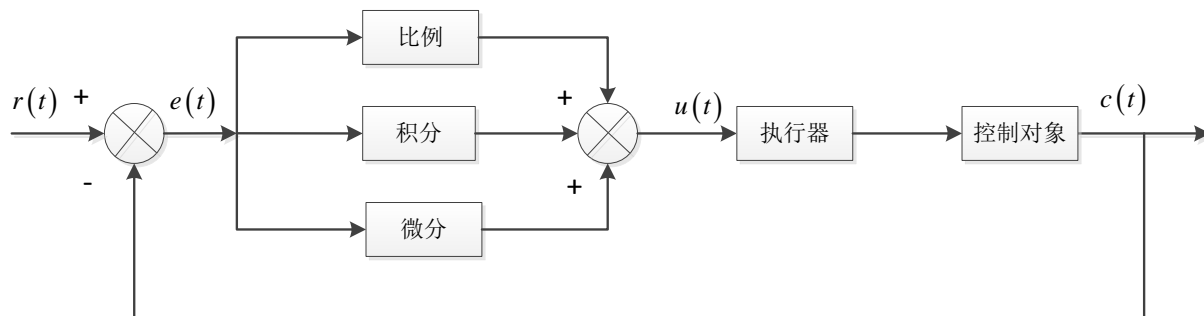


图 4.10 PID 控制原理图

常规的 PID 控制算法方程为

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad 4-(7)$$

其中 $e(t) = r(t) - c(t)$ 。

增量式 PID 的计算结果是相对上一个控制量的增量 $\Delta u(k)$ 。增量 $\Delta u(k)$ 的计算式如下：

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = K_p \Delta e(k) + T_i e(k) + T_D [\Delta e[k] - \Delta e(k-1)] \quad 4-(8)$$

式中 $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$ 。

一般来说，控制系统的采样周期 T 确定以后，在 PID 的增量式 K_p 、 T_D 、 T_i 三个参数确定后，只需三次测量偏差值就可求出控制增量。增量式 PID 算法的优点有：(1)算式中不需要累加。控制增量 $\Delta u(k)$ 仅与最近 3 次的测量值有关：减小了累计误差，增强了控制算法的稳定性和精度。(2)控制值是一个相对量，即对应执行机构位置的相对变化量，执行器一次性执行范围变化相当较小，从而机器磨损率较低，减小硬件出问题的可能性，进一步延长执行器工作寿命。PID 控制参数的具体调控将在第六章中具体叙述。

2) PID 参数调整规律

PID 控制算法因其众多优势在工业领域得到了广泛的应用与传播。一般说来，比例环主要是减小被控制量的误差；积分环主要用于减小被控量的误差；微分环一般用来减小超调。适当减少积分量有增大比例的作用，适当增加微分使系统阻尼增大。如果不要求误差为 0，那么积分环就不需要使用；如果系统具有长时延或者系统特性为一阶系统，那么微分环则不需要使用。三个参数协作共同调节系统提高稳定性。在 PID 控制器实际设计过程中，一般有三种方法：经验法、频域法和基于主导极点的时域设计方法^[78]。其中由于在工业控制领域以及对象模型不太精确的情况下，人们一般都是基于先验知识和自身经历，应用经

验法最多。而后两种设计方法常常需要较精准的数学模型，因此不太常用。

由于插秧机是一个高度非线性的，输入和输出很难有一个准确的数学模型，因此本文采用经验法来调节 PID 控制算法的 K_p 、 T_d 、 T_i 三个参数，以达到精确控制的目的。

4.6 本章小结

本章提出了插秧机自动导航信息的提取，分析图像处理中需要提取的导航信息。分析了秧苗行与插秧机可能存在的三种相对位置，并分别对在不同的相对位置下插秧机的转向控制进行了介绍。然后介绍了插秧机视觉导航控制系统的组成，以及系统从采集信息到完成控制所经历的步骤。为了消除误差累积控制系统引入了光电编码器。然后分析 PID 控制原理及其特点。

第5章 插秧机视觉导航平台搭建与实验

在前面章节的论述中，对水田作物的图像处理、摄像机标定、以及导航参数的获取进行了研究，并对插秧机自动导航的控制方法进行了讨论。本章将在上述理论基础上，进行插秧机视觉导航试验，通过实验验证图像处理及摄像机标定的正确性，并且确定 PID 控制的参数。实验选用井关 PZ60 型高速插秧机如图 5.1，实验场地选择浙江理工大学植保实验室附近的空地，实验材料选用绿色装饰葡萄藤。



图 5.1 井关 PZ60 型高速插秧机

5.1 导航实验样机设计

5.1.1 电机计算选型

井关 PZ60 型插秧机的转弯和路线变更都是通过旋转液压方向盘完成。本文采用在直流步进电机上加装摩擦装置（齿轮，胶皮套），使摩擦装置带动方向盘转动。假设摩擦装置和方向盘没有打滑现象。可以近似看作一个齿轮系（插秧机电控操作机构和控制算法设计）。

因此有

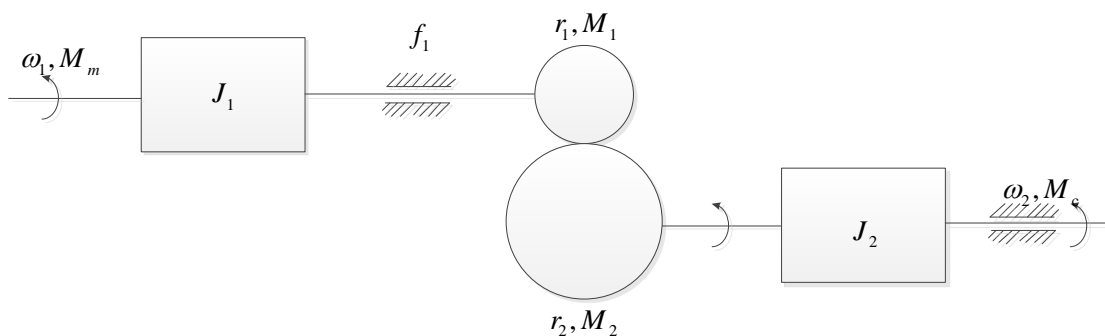


图 5.2 导航系统等效齿轮系

$$M_1 = \frac{r_1}{r_2} M_2 \quad 4-(9)$$

式4-(9)中 r_1 、 r_2 代表齿轮和方向盘半径， M_1 、 M_2 代表齿轮和方向盘的转矩。

$$J \frac{d\omega_1}{dt} + f\omega_1 + M'_c = M_m \quad 4-(10)$$

f 、 J 、 M_m 及 M'_c 是等效到齿轮上的等效摩擦系数、等效转动惯量、擦轮的原动转矩和等效复杂转矩摩； ω_1 为齿轮转速。

据测定，水田插秧机正常作业时方向盘转动所需力矩为 $2.6 \text{ N} \cdot \text{m}$ ^[79]。转向机构中齿轮外径为 44mm，方向盘直径为 350mm，两者比为 0.126，由4-(9)计算得 $M_1 = 0.326 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，即齿轮处输出的转矩必须大于 $0.326 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。齿轮与电机通过键连接，由于4-(10)中等效转动惯量等参数比较难以确定，因此将近似利用齿轮处的转矩作为电机的输出转矩。经多次试验最终选用直流步进电机 86BYGH450A-405A，该电机的步进角为 1.8° ，额定扭矩 $4.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，大于 $2.6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。电机额定转速为 700r/min。在水田实验中测得在额定转速下电机控制插秧机前轮从左极限位置转至右极限位置耗时 3.9 s，速度与人工操作持平，可满足设计要求，步进电机的安装如图 5.3。



图 5.3 步进电机的安装

5.1.2 其他硬件设备

运动控制卡选用雷赛 DMC1380 型,该运动控制卡是 PCI 总线三轴脉冲式运动控制卡,其编程简易、稳定可靠。DMC1380 型适合于控制各种步进电机,其每轴位置指令脉冲频率可达 1.2MHz。运动控制卡包含 55 路 I/O 端口。其中 15 路为光电隔离输入、8 路为光电隔离输出。该运动控制卡可以直接控制小型继电器、电磁阀、指示灯等开关器件。

为了避免误差累积,实验时在插秧机前轮安装光电编码器用来测量前轮的实际转角。考虑到车轮的转动特性选用欧姆龙 E6CP-AH5C 型绝对编码器(如图 5.4)。将光电编码器连接到运动控制卡的光电隔离输入,通过 QueryPerformanceFrequency()函数来提取系统内部时钟,其计时精度为毫秒。并通过函数 d1000_in_bit()来调取光电编码器连入接口处开关量的变化情况,通过开关量的变化数量来计算插秧机前轮实际转动角度。



图 5.4 光电编码器

5.2 插秧机视觉导航实验

根据第二章中心线提取方法、第四章的控制原理以及上述的硬件选择,运用 visual studio 编写了针对农田环境的图像处理程序和转向控制程序。在实验环境下,该程序能够稳定提取作物秧苗行,并且能够快速调用电机控制插秧机转向,其实验结果如图 5.5。振动对导航参数提取的影响、PID 控制参数的确定,以及实验中发现的问题,将在下面的各个小节中进行讨论。

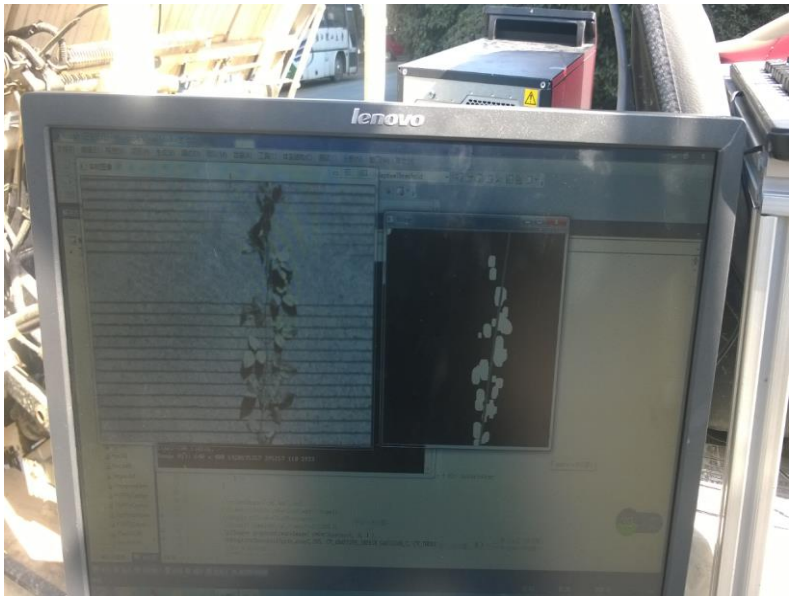


图 5.5 实验中提取秧苗行结果

5.2.1 振动对导航系统影响的分析

插秧机在开动时会随发动机一起振动，插秧机振动有可能会影响图像采集的准确性，因此在发动机停止和空转的情况下分别采集图像提取导航信息。图 5.6 为实验得到的角位移的过程曲线，图 5.7 为偏移量的过程曲线，横坐标代表视频的帧数。表 5.1 给出了这些参数的均值和标准差。

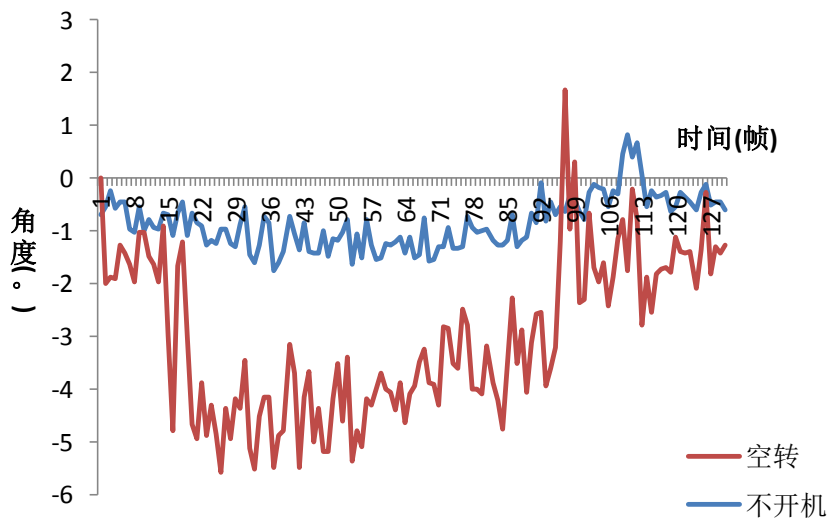


图 5.6 插秧机开机与不开机时航向角偏差

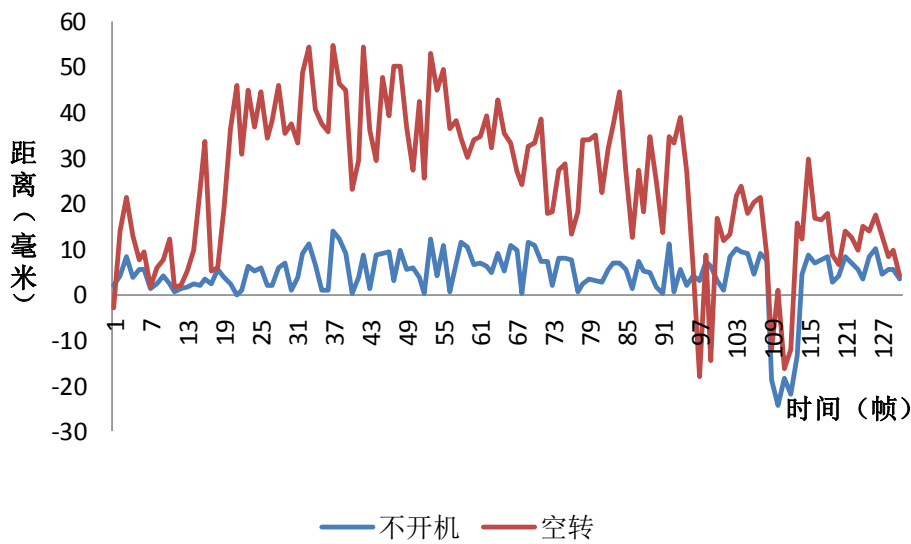


图 5.7 插秧机开机与不开机时偏移量曲线

表 5.1 插秧机开机与不开机时曲线数据

	角度-平均值(度)	角度-标准差	偏移-平均值(mm)	偏移-标准差
发动机关闭	-0.85098	0.491	6.03207	4.251072
发动机空转	-2.15818	1.271786	21.06437	13.42431
两者差值	1.30720	-0.78079	-15.0312	-9.17324
实际测量值	0		0	

由于实验环境的限制，提取导航参数时，风和光照条件的改变会影响实验数据的准确性，故获取的数据存在系统误差。通过上述数据分析可知：(1)发动机在空转和停止状态下角度平均值相差 1.3°、标准差相差 0.8°，距离平均值相差 15mm、标准差相差 9mm。因此发动机振动对获得的导航信息干扰较小，基本可以忽略(在不同档位和油门的情况下误差可能会变化)。(2)由于摄像机的固定存在偏差和环境导致的误差存在，使得插秧机与基准秧苗行距离和角度的计算存在误差。

在后续实验中发现插秧机行进中摄像机的振动远小于发动机空转的情况。

5.2.2 PID 参数确定

插秧机转向控制实验通过不断调整 PID 控制参数，使得步进电机能够按照图像处理获得的导航参数快速调整步进电机转速，完成控制指令。PID 控制参数采用采用经验法确定。由于在每次进行实验时插秧机导航起始位置不同，且提取导航参数时外界环境存在干扰，所以通过基准秧苗行直线在世界坐标系下与插秧机前进方向的夹角变换的稳定性来衡量参数的合理性。实验中井关 PZ60 型插秧机均以一档行驶速度行进。下面只罗列了三个具有代表性的参数： $K_p=1$ 、 $K_p=10$ 、 $K_p=20$ 。当 $K_p=1$ 时，夹角随时间变换的曲线如图 5.8 (图

像横坐标为图像帧数)。



图 5.8 $K_p=1$ 时基准秧苗行与插秧机前进方向夹角的变化曲线

当 $K_p=10$ 时，夹角随时间变换的曲线如图 5.9(图像横坐标为图像帧数)。

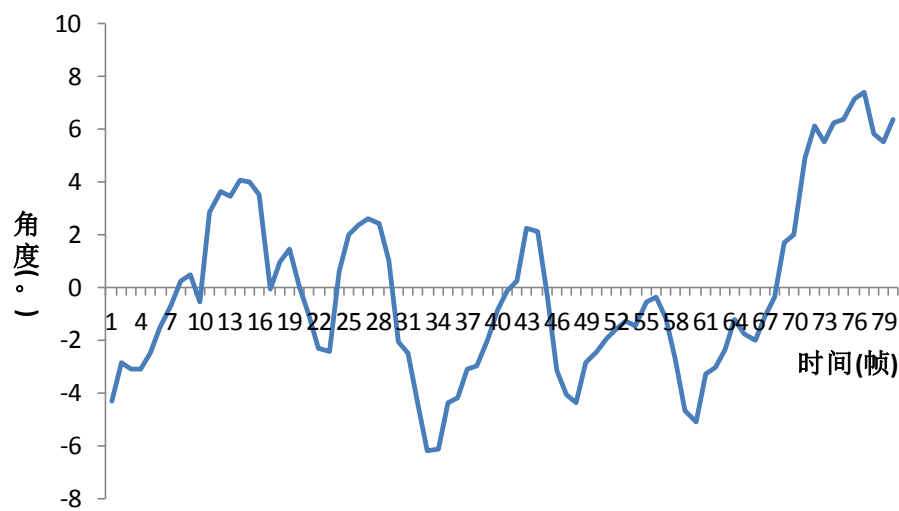


图 5.9 $K_p=10$ 时基准秧苗行与插秧机前进方向夹角的变化曲线

当 $K_p=20$ 时，夹角随时间变换的曲线如图 5.10(图像横坐标为图像帧数)。

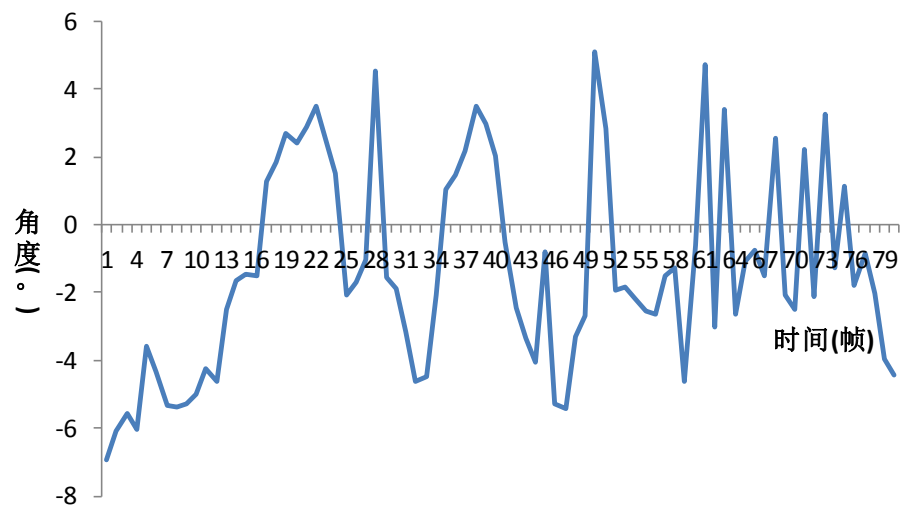


图 5.10 $K_p=20$ 时基准秧苗行与插秧机行进方向夹角的变化曲线

表 5.2 不同 K_p 时基准秧苗行与插秧机行进方向夹角平均值与标准差

	角度-平均值(度)	角度-标准差
$K_p=1$	-0.23361	5.36339
$K_p=10$	-0.15118	3.350683
$K_p=20$	-1.3433	2.973423

通过分析图 5.8、图 5.9、图 5.10 曲线的变化可发现：随着 K_p 的增大，夹角曲线震荡越频繁，与 0° 所在的直线交点越多，且在实验过程中转向频率变高。随着 K_p 增大，基准秧苗行与插秧机行进方向夹角从初始位置变换到 0° 所需要的帧数越少，即插秧机转向效率越高。但 K_p 过大时转向系统不稳定，转向系统在 0° 附近动抖动严重(如图 5.10)，同时 K_p 过小时，插秧机转向效率低。根据表 5.2、图 5.8、图 5.9、图 5.10 数据的定量分析，可见 K_p 取上述值时，基本都能满足导航需求，但 $K_p=1$ 时，转向效率较低； $K_p=20$ 时，转向系统不稳定。表 5.3 为不同输入角度时，不同 K_p 所对应的电机转速，可得， $K_p=10$ 时电机转速基本满足转插秧机向需求。综合上述，选取 $K_p=10$ 。

表 5.3 PID 控制下夹角与电机转速的关系

输入角度	O=-1.2223835	O=-27.648081	O=15.358851
$K_p=1$	1	27	-15
$K_p=10$	12	264	-151
$K_p=20$	26	541	-307

PID 的其他控制参数，也是采用相同的方法进行选择，最终确定 $K_i = 0.025$ 、 $K_p=0.4$ 。
当 $K_p=10$ 、 $K_i = 0.025$ 、 $K_d=0.4$ 时秧苗行与插秧机行进方向夹角变化曲线如图 5.11。

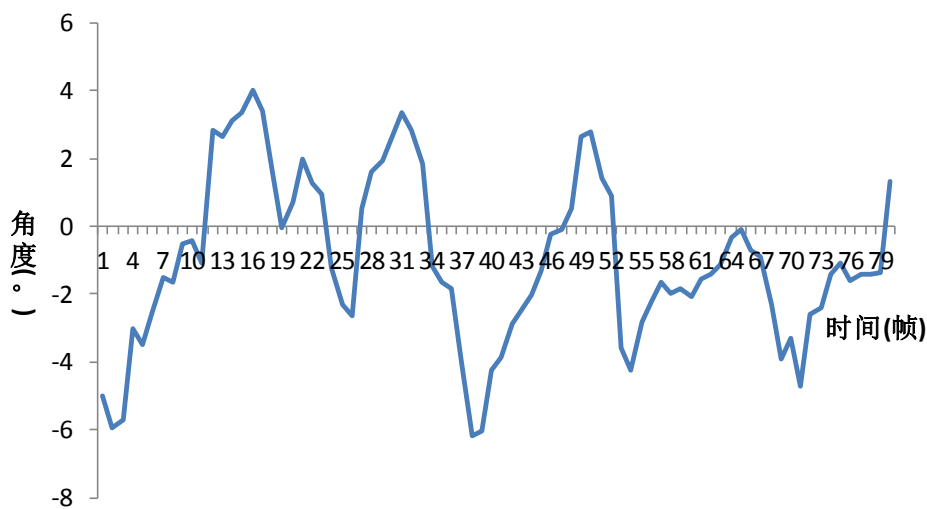


图 5.11 $K_p=10$ 、 $K_i = 0.025$ 、 $K_d=0.4$ 时秧苗行与插秧机行进方向夹角变化曲线
偏移量的变化如图 5.12。

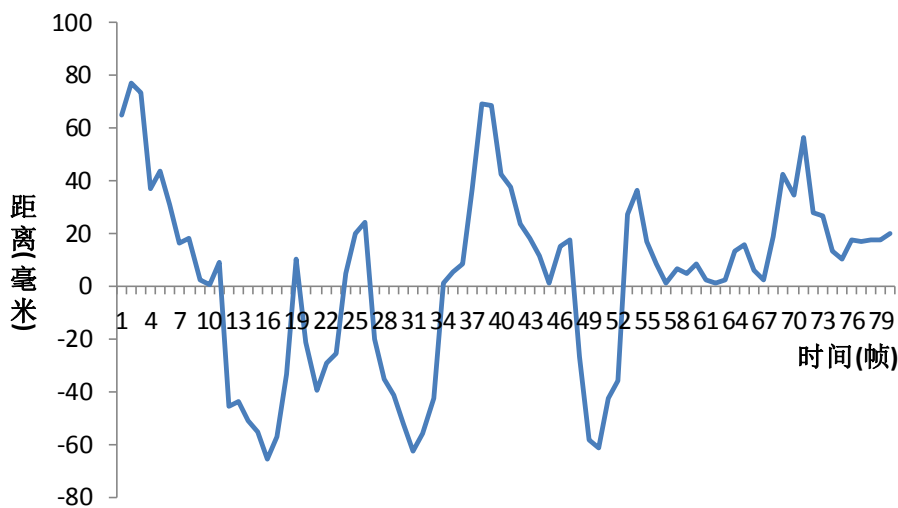


图 5.12 $K_p=10$ 、 $K_i = 0.025$ 、 $K_d=0.4$ 时插秧机与基准秧苗行的偏移量曲线

表 5.4 $K_p=10$ 、 $K_i = 0.025$ 、 $K_d=0.4$ 插秧机导航数据

	平均值	标准差
夹角(度)	-0.98485	2.468785
偏移量(毫米)	3.15848	34.79942

由表 5.4 可以得出，插秧机以一档行速度行驶，在 $K_p=10$ 、 $K_i = 0.025$ 、 $K_d=0.4$ 时该

系统平均角度误差在 1° 左右，平均位置偏差小于 3.2mm ，角度标准差在 2.5° 左右，位置偏移标准差小于 34.80mm 。

5.3 插秧机导航试验总结与分析

在进行导航实验时，发现如下问题：(1)编写的图像处理程序对光照条件较为敏感，在不同光照条件下需要设定不同的阈值，来提获取二值图：光照较强时需要增大阈值，光照弱时则需减小阈值。(2)摄像头获取的图像较不稳定，导航过程中有少数图像噪点较多的现象，且噪点多存在于图像边缘的现象，易干扰导航参数的提取。(3)通过运动控制卡光电隔离输入口读取光电编码器转数时，计数不稳定，易出现漏读。(4)方向盘与车轮之间的传动较慢，使得实验成功率低。(5)基准秧苗行与插秧机行进方向平行的情况在实验过程中没有出现，因此章节 4.2 中的距离 d 没有确定。

在进行插秧导航实验的时候发现基准秧苗行出现如图 5.13、如图 5.14 的情形时候易发生基准秧苗行丢失的情况。按照第四章插秧机导航控制方法，出现图 5.13 情况时电机使插秧机方向盘逆时针旋转，插秧机会朝着图像的左上方前进，过一段时间摄像机便不能捕捉到基准秧苗行。在图 5.14 的情形时插秧机方向盘顺时针转动，基准秧苗行也易丢失。因此在导航参数确定的时候需要检测上述两种情况。检测的方法：测量图像中线与基准秧苗行的距离与基准秧苗行的斜率，当斜率为负且距中线距离 x 大于规定距离(即图 5.13 的情形)时，控制插秧机方向盘顺时针旋转 1 秒；当斜率为正且距中线距离 x 大于规定距离(即图 5.14 的情形)控制插秧机方向盘逆时针旋转 1 秒。经多次测量并考虑到安装过程的误差取 $x=170\text{mm}$ 。其余的情形可按照第四章路径规划的方法进行方向盘控制。

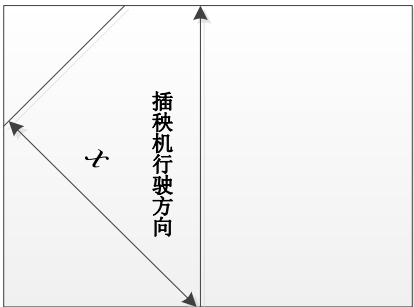
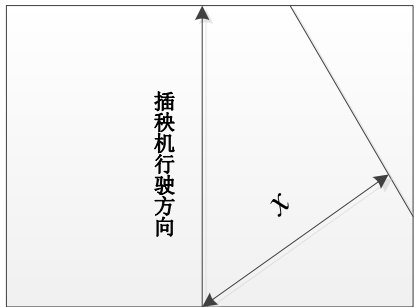


图 5.13 导航基准秧苗行易丢失情况一 图 5.14 导航基准秧苗行易丢失情况二

5.4 本章小结

本章进行了陆地导航实验，分析了插秧机振动对图像采集系统的影响，实验结果表明在插秧机没有开动时角度平均值为 -0.85098° ，标准差为 0.491° ；位置偏移的平均值为 6.03207mm ，标准差为 4.251072mm 。插秧机空转时角度平均值为 -2.15818° ，标准差为

1.271786°；位置偏移的平均值为 21.06437mm，标准差为 13.42431mm。然后确定了 PID 控制中比例环、积分环和微分环的比例系数，考虑到插秧机导航控制时的稳定性需求最终选择 $K_p=10$ 、 $K_i=0.025$ 、 $K_d=0.4$ 。导航实验结果表明插秧机在以一档行速度行驶时，该系统平均角度误差在 1° 左右，平均位置偏差小于 3.2mm，角度标准差约在 2.5° 左右，位置偏移标准差小于 34.80mm。基本可以满足导航要求。

第6章 总结与展望

6.1 研究结论

20 世纪以来人口不断增长,人们对粮食等农业产品的需求量越来越大,农业机械种植自动化成为热点。从上世纪 70-80 年代开始,发达国家开始将农业机械视觉导航技术应用于水稻种植,而国内水稻自动种植则起步较晚。基于上述原因,本文开展了插秧机视觉导航的关键技术研究,并得出了以下结论及实验结果:

Meanshift 和 **Hough** 变换的算法组合能够很好的去除水田噪声干扰成功提取基准秧苗行中心线。针对传统的作物中心线提取方法易受作物种植间隙和噪声的影响这一现象,本文利用 **Meanshift** 算法能有效去除作物种植间隙及细小噪声的影响和 **Hough** 变换抗干扰能力强的特点,提出了基于 **Meanshift** 和 **Hough** 变换的秧苗行中心线提取方法,并将该方法与传统的中心线提取方法进行对比。实验结果表明:(1)本算法对水稻图像进行 $2G-R-B$ 变换和阈值处理,成功分离了目标与背景、减少了噪声并且提取出秧苗行的二值图。(2)**Meanshift** 算法相较于边缘提取能够更好的去除图像水田图像噪声;且更加适用于水田图像的分割。(3)**Meanshift** 和 **Hough** 变换的算法组合相对传统的边缘提取和 **Hough** 变换的算法组合能够更好地应对水田光照不均匀、作物种植间隙大等问题,具有更好的鲁棒性,精度更高。

MATLAB 摄像机标定的误差低于 **OpenCV** 的标定方法,更加适用于农田导航系统的摄像机标定。文章中讨论了摄像机产生的畸变的原因及畸变的类型,然后介绍了摄像机的标定原理,分析了图像坐标系、摄像机坐标系和世界坐标的成像模型,以及他们之间的转换关系。摄像机标定方法初步选定两种常用标定方法:**MATLAB** 标定法和 **OpenCV** 的标定方法。并介绍了这两种标定方法的特点、原理以及标定过程,并分别进行了基于平面方格法的标定实验,通过两种标定方法的实验结果对比,得出以下结论:在 **MATLAB** 标定法中边缘角点需要手工提取,其标定结果稳定、误差小。**MATLAB** 标定法操作简便,软件使用方便。**OpenCV** 标定法可以自动提取角点,但存在角点提取不准,标定结果不稳定的情况。因此最后选用了相对比较稳定的 **MATLAB** 标定法完成了摄像机的标定。

在实验前的理论分析过程中,提出了插秧机自动导航信息的提取流程,分析了图像处理中需要提取的导航信息。根据秧苗在农田中的分布位置,分析了秧苗行与插秧机可能存在的三种相对位置,并分别对在不同的相对位置下插秧机的转向控制进行了介绍。然后介绍了插秧机视觉导航控制系统的组成,以及系统从采集信息到完成控制所经历的步骤。为了消除误差累积控制系统引入了光电编码器。然后讨论了 **PID** 控制原理及其特点。

最后进行了插秧机视觉导航实验，确定了 PID 控制中比例环、积分环和微分环的比例系数，考虑到插秧机导航控制时的稳定性需求最终选择 $K_p=10$ 、 $K_i=0.025$ 、 $K_d=0.4$ 。导航实验结果表明该系统平均角度误差在 1° 左右，平均位置偏差小于 2.4mm，角度标准差约为 2.4° 以内，位置偏移标准差小于 34.80mm。基本可以满足导航精度需求。

6.2 展望

虽然本课题在图像处理及路径控制方面作取得了一些研究成果，但由于作者本身对控制理论知识认识的局限以及时间的限制，已完成的导航控制系统距离实际投产应用还有相当大的差距。为了改进控制以及图像处理方面的缺陷和不足，对后续的研究工作做以下几点展望：

- 1) 对插秧机的控制液压转向机构进行改造，使转向电机直接控制油缸进而控制插秧机转向，提高插秧机转向响应速度。
- 2) 完善程序，使图像处理程序能够根据不同的光照强度自动调节参数设置，成功提取导航参数。
- 3) 进一步改进图像处理程序，可以尝试采用视觉导航技术结合 GPS 导航技术或其他导航技术实现多重导航控制技术，提高导航的准确性，也可以通过添加减震装置减小机械振动对图像获取的影响，进而提高插秧机视觉导航的稳定性和适应性。
- 4) 完善控制系统，在控制系统中加入模糊控制器等控制方法，形成多闭环控制系统。增强系统的实时性、稳定性和可靠性。

参考文献

- [1] 沈明霞. 自主行走农业机器人视觉导航信息处理技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2001.5.
- [2] 汪懋华. 精细农业发展与工程技术创新[J]. 农业工程学报, 1999, 15(1): 1-8
- [3] 朴献淑, 马成林. 精准农业——一种全新的农业生产管理技术[J]. 农业机械学报, 1999, 30(5): 112-118.
- [4] 罗锡文, 臧英, 周志艳. 精细农业中农情信息采集技术的研究进展[J]. 农业工程学报, 2006: 22(1):167-173.
- [5] Hague T, Marchant J A, Tillett N D. Ground based sensing systems for autonomous agricultural vehicles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25:11-28.
- [6] 郭才发, 胡正东. 地磁导航综述[J]. 宇航学报, 2009: 4: 82-85.
- [7] 李旭, 张为公. 智能车辆导航技术的研究进展[J]. 机器人技术与应用, 2007: 4: 54-58.
- [8] Hague T, Marchant J A, Tillett N D. Ground based sensing systems for autonomous agricultural vehicles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25: 11-28.
- [9] 吴延霞, 赵博, 毛恩荣. 农业车辆自动导航系统综述[J]. 农机化研究, 2009: 23-27.
- [10] 钟玉琢. 机器人视觉技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994, 60-90.
- [11] Reid J F, Searcy S W. An algorithm for computer vision sensing of a row crop guidance directrix[J]. SAE Transactions, 1991, 100(2): 93-105.
- [12] Fontaine V, Crowe T G. Development of line-detection algorithms for local positioning in densely seeded crops[J]. Canadian Biosystems Engineering, 2006, 48: 719-729
- [13] Gerrish J B, Fehr B W, Van-Ee G R, et al. Self-steering tractor guided by computer vision[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1997, 13(5): 559-563
- [14] Lee W S, Slaughter D C, Giles D K. Robotic weed control system for tomatoes[J]. Precision Agriculture, 1999, 1(1): 95-113
- [15] Slaughter D C, Chen P, Curley R G. Vision guided precision cultivation[J]. Precision Agriculture, 1999, 1(2): 199-216
- [16] Benson E R, Reid J F, Zhang Q. Machine vision based steering system for agricultural combines[C]. Proceedings of the ASAE Annual International Meeting, 2001
- [17] Benson E R, Reid J F, Zhang Q. Machine vision-based guidance system for agricultural grain harvesters using cut-edge detection[J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(4): 389-398
- [18] Kise M, Zhang Q, Mas F R. Stereovision-based 3D field recognition for agricultural automatic guidance tractor[C]. CIGR International Conference, 2004
- [19] Kise M, Zhang Q, Mas F R. A stereovision-based crop row detection method for tractor-automated guidance[J]. Biosystems Engineering, 2005, 90(4): 357-367
- [20] Hannan M W, Burks T F, Bulanon D M. 2007. A real-time machine vision algorithm for robotic citrus harvesting[A]. St. Joseph, Mich.: ASAE, 2007, ASAE Paper No. 073125
- [21] Hata S, Takai M, Kobayashi T. Crop-row detection by color line sensor[C]. Proceedings International Conference for Agricultural Machinery and Process Engineering, Seoul, Korea: Korean Society for Agricultural Machinery, 1993: 19-22

- [22] Torii T, Kitade S, Teshima T, et al. Crop row tracking by an autonomous vehicle using machine vision(part 1)[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2000, 62(2): 41-48
- [23] Torii T, Takamizawa A, Okamoto T, et al. Crop row tracking by an autonomous vehicle using machine vision(part 2)[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2000, 62(5): 37-42
- [24] Yoshiaki M, Motomu K. An image processing based automic steering rice transplanter[C]. ASAE eds. Presentation at the 1999 ASAE Annual International Meeting, Ontario, Canada, 1999: 19-21
- [25] Chen B Q, Tojo S, Watanabe K, et al. Detection of rice seedling in the image of paddy field[J]. JSAM, 1999, 61(5):57-63
- [26] Chen B Q, Tojo S, Watanabe K. Detection algorithm for traveling route in paddy field for automated managing machines[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2002, 45(1): 239-246
- [27] Cho S I, Ki N H. Autonomous speed sprayer guidance using machine vision and fuzzy logic[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1999, 42(4): 1137-1143
- [28] Olsen H J. Determination of row position in small-grain crops by analysis of video images[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1995, 12: 147-162
- [29] Keicher R, Seufert H. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25: 169-94
- [30] Sandini G, Buemi F, Massa M. Visually guided operations in green-houses[C]. IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS'90, 1990: 279-285
- [31] Astrand B, Baerveldt A -J. Mechatronics in agriculture - robust recognition of plant rows[C]. The 2nd International Conference on Recent Advances in Mechatronics, ICRAM'99, Istanbul, Turkey, 1999: 135-141
- [32] Astrand B, Baerveldt A -J. An agricultural mobile robot with vision-based perception for mechanical weed control[J]. Autonomous Robots, 2002, 13: 21-35
- [33] Bjorn Astrand, Albert-Jan Baerveldt. An Agriculal Mobile Robot with Vision-Based Pecreption For Mehcanical Weed Control[J]. Autonomous Robors, 2002, 13: 21-35
- [34] S øgaard H T, Olsen H J. Determination of crop rows by image analysis without segmentation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2003, 38: 141-158
- [35] 邵刚, 毛罕平. 农业机械机器视觉导航研究进展[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(14): 4394-4396
- [36] 沈明霞, 张瑞台, 姬长英. 农作物边缘提取方法研究[J]. 农业机械学报, 2000, 31(6): 49-51
- [37] 沈明霞, 姬长英. 基于小波变换的农田景物边缘检测[J]. 农业机械学报, 2001, 32(2): 27-29
- [38] 沈明霞, 姬长英, 张瑞合. 基于农田景物边缘的农业机器人自定位方法[J]. 农业机械学报. 2001, 32(6): 49-51
- [39] 沈明霞, 李秀智, 姬长英. 基于形态学的农田景物区域检测技术[J]. 农业机械学报, 2003, 34(1): 92-94
- [40] 周俊, 姬长英. 农业机器人视觉导航中多分辨率路径识别[J]. 农业机械学报, 2003, 34(6): 120-123
- [41] 周俊, 姬长英, 刘成良. 农用轮式移动机器人视觉导航系统[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3): 90-94

- [42] 张卫, 杜尚丰. 机器视觉对农田中定位基准线的识别[J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(4): 75-77.
- [43] 张志斌. 机器视觉导航技术在农用智能移动平台上的应用研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2005
- [44] 于国英. 农业 AGV 视觉导航参数提取与轨迹控制的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2007
- [45] 杨为民, 李天石, 贾鸿社. 农业机械机器视觉导航研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 160-165
- [46] 袁佐云, 毛志怀, 魏青. 基于计算机视觉的作物行定位技术[J]. 中国农业大学学报, 2005, 10(3): 69-72
- [47] 张卫, 杜尚丰. 机器视觉对农田中定位基准线的识别[J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(4): 75-77
- [48] 赵颖, 陈兵旗, 王书茂. 基于机器视觉的耕作机器人行走目标直线检测[J]. 农业机械学报, 2006, 37(4): 83-86
- [49] 赵颖, 王书茂, 陈兵旗. 基于改进 Hough 变换的公路车道线快速检测算法[J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(3): 104-108
- [50] 杨杰. 数字图象处理及 MATLAB 实现[M]. 1. 北京: 电子工业出版社, 2010, 147-222
- [51] 赵颖. 农业自主行走机器人视觉导航技术的研究[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2006
- [52] 许新征, 丁世飞, 等. 图像分割的新理论和新方法[J]. 电子学报, 2010, 38(2A): 76-82
- [53] Reid J F, Searcy S W. Algorithm for separating guidance information from row crop images[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1988.37(4):57-62
- [54] 王玲, 王萍, 陈兵林, 等. 基于颜色阈值的田间籽棉图像分割技术[J]. 作物学报, 2010, 36(3): 502-507
- [55] 赵颖, 陈兵旗, 王书茂. 基于机器视觉的耕作机器人行走目标直线检测[J]. 农业机械学报, 2006, 37(4): 83-86
- [56] 赵颖, 王书茂, 陈兵旗. 基于改进 Hough 变换的公路车道线快速检测算法[J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(3): 104-108
- [57] 周俊, 姬长英. 农业机器人视觉导航中多分辨率路径识别[J]. 农业机械学报, 2003, 34(6): 120-123
- [58] 周俊, 姬长英, 刘成良. 农用轮式移动机器人视觉导航系统[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3): 90-94
- [59] S øgaard H T, Olsen H J. Determination of crop rows by image analysis without segmentation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2003, 38: 141-158
- [60] 安秋, 李志臣, 姬长英, 等. 基于光照无关图的农业机器人视觉导航算法[J]. 农业工程学报, 2009 (11): 208-212
- [61] 张辉, 马明建. 基于改进 sobel 算法的叶片图像边缘检测[J]. 农机化研究, 2012 (5): 46-48
- [62] 程有娥, 钱月晶, 张永刚. 基于 Canny 算子的大米边缘检测[J]. 计算机系统应用, 2011, 20(5): 206-209
- [63] Wang J, Thiesson B, Xu Y, et al. Image and video segmentation by anisotropic kernel mean shift[M]. Computer Vision-ECCV 2004. Heidelberg, Springer Berlin: Czech Republic, 2004: 238-249
- [64] N ørremark M, Olsen H J, Andreassen N W, et al. The development of a computer vision based and real-time plant tracking system for dot spraying[C]. IAC (Joint International Agricultural

- Conference)-7th European Conference on Precision Agriculture. 2009: 777-784
- [65] Bandera A, P érez-Lorenzo J M, Bandera J P, et al. Mean shift based clustering of Hough domain for fast line segment detection[J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(6): 578-586
- [66] Ji J, Chen G, Sun L. A novel Hough transform method for line detection by enhancing accumulator array[J]. Pattern Recognition Letters, 2011, 32(11): 1503-1510
- [67] Y. Wang , J . Ostermann , Y.Q .Zhang.Video Proeessing and Communieations [M].Beijing : Tsinghua University Press,2004,1-7
- [68] 周俊. 农用轮式移动机器人视觉导航系统的研究[D].南京:南京农业大学.2008
- [69] 韩永华. 农田图像的统计迭代分割方法研究[D].浙江:浙江大学.2012
- [70] Ohta et al. Color information for region segmentation.[M].CGPI,1980,13:222-241
- [71] K.Fukunaga, L.D.Hostetler. The Estimation of the Gradient of a Density Function, With Applications in Patten Recognition [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1975, 21, 32-40
- [72] Y.Cheng. Mean Shift, Mode Seeking, and Clustering[J]. IEEE Transactions on Information Theory. On Pattern Analysis and Machine Intelligenee,1995,17(8),790-799
- [73] 行麦玲.大视场短焦距物镜 CCD 摄像系统畸变测量技术研究.[D].北京:北京理工大学.2003
- [74] 王秀坤, 魏焱淮, 等.CMOS 网络摄像头标定方法研究[J]. 科技信息, 2008, 35:407-408.
- [75]Tsai, Roger Y. Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1986: 364-347.
- [76] 张伟华, 陈军.CDD 摄像机标定传感器与微系统[J].2009,6,32-40
- [77] 马颂德, 张正友.1998.计算机视觉——理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社
- [78] 王惠娟. 基于自主视觉的轮式移动机器人路径跟踪控制[D]. 南京: 南京理工大学.2005
- [79] 胡炼, 罗锡文, 赵祚喜. 插秧电控操作机构和控制算法设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 118-122.

致 谢

关于本论文的研究工作从确定开题到完成所需研究，均与导师武传字教授的热情指导与细心关怀莫不可分。诚挚感谢导师在学术研究、问题思考和待人处事等方面给予的启迪。导师宽以待人的品格、严以治学的态度、诲人不倦的精神，必将让我铭记于心。

于此同时，同样感谢周志宇、李革、杜小强等老师对于作者研究生生涯里在学习、实验、生活中给予的耐心指导和帮助。老师们以耐心的引导，贴合实际的指导，锻炼学生的安排，让我从科研过程中实现快速成长。

对于整个课题的顺利完成，师兄何磊盈、师弟泮金辉也同样给予了诸多帮助，在此也表示对你们的感谢。另外，我还想对薛明瑞、何国权、吴珊珊、倪柯南等同学，以及 339 实验室的全体同窗和机械工程一班的所有同学们说，是你们在生活上带给我无尽快乐和勇气，支持我乐此不疲的从事科研，同样感谢你们。

在我即将离别母校，开始新的征程之际，我一定还要感谢的就是自己的双亲，他们为我的成长已经付出太多太多，只就希望你们能够康健，我定会更加努力。

最后，对所有帮助过我的老师、同学、朋友们再道一声谢谢：谢谢你们！

攻读硕士期间科研成果

- [1] 基于 Meanshift 和 Hough 变换的秧苗行中心线提取[J]. 2014 浙江理工大学学报, .
- [2] 可适应崎岖路面爬行的仿蜘蛛机器人躯干装、 CN102923207A. 中国发明专利
- [3] 嫁接苗定位夹持装置、CN203467267U 中国实用新型专利
- [4] 一种简间接驱动的旋转夹持器、CN203467266U 中国实用新型专利
- [5] 一种嫁接苗排序机构、CN203581986U 中国实用新型专利
- [6] 嫁接苗定位夹持装置、CN103461010A 中国发明专利
- [7] 一种间接式驱动的旋转夹持器、CN103461009A 中国发明专利
- [8] 一种嫁接苗排序机构、CN103496586A 中国发明专利