

**Master's Degree Dissertation**

**RESEARCH ON OMINI-VISION NAVIGATION  
SYSTEM OF AGRICULTURAL MOBILE ROBOT**

**By  
Sun Hong**

**Supervisor: Prof.Yin Wenqing**

**Major: Agricultural Electrification and Automation**

**Nanjing Agricultural University**

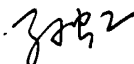
**December, 2009**





## 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。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作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者（需亲笔）签名：  2009年12月14日

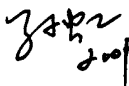
## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权南京农业大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

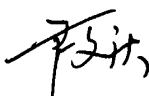
保密 ☐，在\_\_\_年解密后适用本授权书。本学位论文属于不保密 ☒.

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者（需亲笔）签名：

 2009年12月14日

导师（需亲笔）签名：



2009年12月14日



# 目录

摘要 .....	I
ABSTRACT .....	II
第一章 绪论 .....	1
1.1 农业移动机器人的研究目的和意义 .....	1
1.2 农业移动机器人视觉导航的研究现状 .....	1
1.2.1 国外研究现状 .....	2
1.2.2 国内研究现状 .....	5
1.3 本文主要研究内容 .....	7
第二章 移动机器人全景视觉系统结构及标定 .....	8
2.1 全景视觉系统的结构 .....	8
2.1.1 实现全景成像的方法 .....	8
2.1.2 基于折反射原理的全景视觉系统的结构和分类 .....	8
2.2 全景视觉系统的距离和角度标定 .....	10
第三章 农田场景图像采集和处理 .....	15
3.1 农田场景图像采集 .....	16
3.1.1 视觉系统硬件设备 .....	16
3.1.2 视觉系统软件设计 .....	17
3.2 图像预处理 .....	18
3.3 农作物和非农作物区域的识别 .....	23
3.3.1 彩色图像表示方法 .....	23
3.3.2 图像灰度化 .....	26
3.3.3 图像二值化 .....	29
3.4 滤波处理 .....	31
3.5 对农作物区域进行距离和角度变换 .....	35
3.6 本章小结 .....	37
第四章 导航参考路径与导航控制参数的提取 .....	38
4.1 建立模拟的农田作物行环境 .....	38
4.2 导航参考路径提取 .....	39
4.3 计算导航控制参数 .....	45
第五章 导航控制策略设计 .....	53
5.1 农业机器人的运动学模型 .....	53
5.2 模糊控制器的设计 .....	55
5.2.1 模糊控制的基本原理 .....	55
5.2.2 模糊控制器设计的基本过程 .....	56

5.2.3 基于全景视觉导航的模糊控制器的设计 .....	56
5.2.4 模糊控制器的效果验证 .....	61
第六章 导航控制试验 .....	63
6.1 农业移动机器人的硬件平台结构 .....	63
6.2 视觉导航软件平台设计 .....	64
6.2.1 界面设计 .....	64
6.2.2 视觉导航软件流程设计 .....	64
6.3 基于全景视觉的农作行路径跟踪导航试验 .....	66
第七章 结论和展望 .....	67
7.1 研究结论 .....	67
7.2 展望 .....	68
参考文献 .....	69
致谢 .....	73
攻读学位期间发表的学术论文 .....	75

# 基于全景视觉的农业移动机器人自主导航研究

## 摘要

农业智能移动机器人是实现农业自动化的有效手段之一,它是大部分农业作业任务的移动作业平台。农业智能移动机器人的自主导航技术是一个首先要解决的问题,本文研究的主要内容是基于折反射全景视觉系统的农业移动机器人自主导航技术,包括全景视觉系统的结构和距离角度标定,农作物行图像采集和处理,作物行路径识别和导航控制参数提取以及导航控制方法的研究。

分析了基于折反射原理的全景视觉系统主要的组成部分。根据农业机器人自主导航的要求和全景视觉系统的特点,采用通过对已知参考点分段抛物插值的方法进行了距离和角度标定,得到了物像点之间的对应关系。

利用全景视觉系统对农业机器人周围的环境信息进行成像;用灰度世界假设算法对原始图像进行颜色校正处理,这对室外或环境不可控的机器视觉系统是关键的一步;然后利用归一化过绿特征值  $2 \times g-r-b$  对图像进行灰度化,进而利用最大类间方差法对图像进行二值化处理,得到了农作物行环境的二值图像;进一步用中值滤波算法去除二值图像中的脉冲噪声点的干扰,得到了较理想的农作物行目标和背景的二值化图像;最后利用全景视觉系统距离和角度标定的结果对绿色农作物目标像素进行了距离和角度校正,恢复了农作物行图像的空间直线特征。

设计了农作物行导航参考路径识别和导航控制参数提取算法。在图像采集和处理的结果上,利用 Hough 变换识别农作物行导航路径的方向信息,结合数字罗盘的初始航向角度信息和当前航向角度信息,计算出了导航控制参数——航向角度偏差和横向距离偏差。

设计了农业移动机器人的自主导航控制器。在分析农业移动机器人常用的导航控制方法特点的基础上,根据农业作业环境的特点,选择模糊控制作为本文农业移动机器人的导航控制方法,设计了模糊导航控制器。模拟农作物行导航试验表明,本文设计的视觉导航控制系统能够准确地识别农作物行导航参考路径,并稳定地跟踪导航路径线。

**关键词:** 农业机器人; 视觉导航; 图像处理; Hough 变换; 模糊控制

# RESEARCH ON OMNI-VISION NAVIGATION SYSTEM OF AGRICULTURAL MOBILE ROBOT

## ABSTRACT

Intelligent mobile robots or vehicles for agriculture are one effective way to achieve the automation of agriculture, they are basic mobile platforms for most tasks of agriculture production. The automated guidance technology is one that must be dissolved as the basic technology. The paper has focused on the automated guidance of the agricultural mobile robot with a set of omni-vision system, including the structure and the distance and angle calibration of the omni-vision system, image capturing and processing of the crop row environment, the row detection and extracting the navigation parameters, automatic guidance controller.

Analyzing the structure and the functions of key components that composed of the omni-vision system. According the demand of the automated guidance and the character of the omni-vision system, method of interpose is using to calibration of the distance and the angle relations of object and the image point.

Capturing image of crop row environment around the robot using the omni-vision system, then Gray World, a simple colour constancy algorithm has used to correct the image which was distorted caused by the illumination variation. It is necessary for the outdoor agricultural mobile robot that recognizing the essential colour of the object under variational illumination condition. Then using the normalized excess-green feature and automatic threshold choosing algorithms to segment the images of crop row into two parts, object and background. The media-filter was designed to remove the impulse points. Finally distance and angle transformation is essential for the omni-vision image to revert the line character of the crop row in the real-world space.

Designed the row detection and the navigation parameters extracting algorithm. First, use the Hough transform to detect the orientation of the crop rows, then combine the initialization and current value of the digital compass to evaluate the navigation parameters —the error of angle and distance.

Designed the automatic guidance controller. Comparing some useful auto-control



methods find that the fuzzy control is suitable for the automatic guidance of the mobile robot for agriculture. The basic principle of fuzzy control is introduced, then a fuzzy controller for vision-guided mobile robot's automatic navigation system is designed and has a good performance in the simulative automatic row-following tests.

**KEY WORDS:** Agricultural Robot; Vision Navigation; Image Processing; Hough Transfer; Fuzzy Control



# 第一章 绪论

## 1.1 农业移动机器人的研究目的和意义

随着农业机械的广泛普及,农业生产规模的扩大,科学技术的不断发展,农业生产正逐步向现代化农业方向发展。农业作业环境的恶劣、作业任务的繁重、农药化肥的不合理的利用造成对环境的污染以及有毒物体对人体造成的伤害已成为制约农业发展的主要障碍,越来越多的人希望从繁重的农业生产中解脱出来,造成劳动力的短缺,这种种现象正促使着农业生产发生着变革。精细农业,农业生产自动化、无人化应运而生,而要实现农业生产自动化就需要能代替人类完成部分或全部农业作业任务的智能农业机械或农业机器人。

近年来,农业机器人技术得到了极大的关注。在国外,特别是欧美和日本等发达国家,劳动力短缺,加之占有技术的优势,有关农业机器人的研究起步较早,到目前为止,已经取得了一定的研究成果,有一些成果已经投入了实际生产,比如水果采摘机器人、果实收获机器人等。研究主要集中在提高农业生产效率,减少化肥农药的误用上。

我国是一个发展中的农业大国,农业问题是关系到中国社会发展的根本问题,解决三农问题一直是党和国家的头等大事。农业作为国民经济最重要的基础产业,对经济社会的发展和人民的生活起着极为重要的支撑和保障作用。我国的农业人口众多,人均占有土地资源较少,长期以来一直保持着小块土地种植模式,造成了大量资源的浪费或不合理的利用,严重制约了我国农业高科技的发展,特别是农业机器人的发展。随着我国经济的发展,农村劳动力大量转移,以及国家政策的导向作用将使得我国广泛开展农业生产自动化的研究成为可能。

为了适应社会发展的需要,提高农业生产效率,减轻农民的负担,研究各领域的农业机器人势在必行。农业机器人田间自主行走是农业机器人完成大部分农业生产任务(施肥,除草,收获等)的前提。因此,田间机器人自主导航被提升到一个迫切需要解决的基础研究课题。目前,现代化农业领域已吸引了国内众多企业、科研机构 and 大学投身到实现农业生产自动化的研究中来。

## 1.2 农业移动机器人视觉导航的研究现状

随着农业现代化的快速发展,农业机器人自主导航吸引了世界各国研究人员的注意。受传统工业机器人、家庭机器人的启发,针对农业机器人作业环境的特点,研究人员尝试了各种不同的导航传感器和控制方法,取得了一定的成果。

从移动机器人平台角度来看,主要有两种方式:一是在现有农业机械,比如拖拉机、收割机等平台上进行安装改造,这种方式虽然省去了平台的设计时间和成本,但是一般的农业机械体积大,控制困难,因此在一些农业作业中并不是很适用;另一种是针对特定的作业任务和作业环境设计新型的移动平台,这种方式在灵活性方面具有明显的优势。

从使用的传感器角度来看,主要经历了机械触杆导航、惯性导航、GPS 导航、视觉导航和使用几种传感器组合导航等几种导航方式。在经历了多种导航方式的探索过程后,目前国内外对农业机器人的自主导航的研究主要集中在机器视觉导航和 GPS 导航这两种最具发展前途的导航方式上。机器视觉导航和 GPS 导航各有优缺点:GPS 可以形成整个作业区域的全局地图,它不受光照、阴影的影响,而且随着我国北斗卫星导航系统的逐步完善,卫星导航的精度和成本会进一步显现出优势;而机器视觉系统可以为作业任务提供局部的信息,在导航的同时还可以采集其它的信息。

20 世纪 80 年代开始,随着图像传感器的性价比不断提高,计算机技术、微电子、以及信号处理等学科的发展,加上农业现代化发展的需要,机器视觉技术被越来越多的应用到农业发展领域:主要包括病虫害检测、水果收获分级和视觉导航等领域。下面主要讨论一下农业机器人视觉导航技术的国内外研究发展概况。

### 1.2.1 国外研究现状

农业机械或农业机器人的视觉导航技术在北美、欧洲和日本等发达国家起步较早,并得到了深入的研究,一些技术已经转化为商品化产品,并应用在除草、施肥和草坪修剪等作业中。

在北美<sup>[1]</sup>,农业机械自主导航可以追溯到拖拉机出现的早期,在上世纪 20 年代,Willrodt 便设计了一套算法,使农业机械可以沿着犁沟自主行走并穿越整个田块,并申请了专利。在随后的几十年间,研究者不断尝试各种导航传感器和导航控制算法,有机械触杆导航,地下预埋金属信号线导航和惯性导航等,取得了一定的进展。到了 20 世纪 80 年代,计算机的发展和图像传感器的出现给机器视觉导航提供了发展的机会,80 年代中期密西根州立大学和德克萨斯州的 A&M 便开发了机器视觉导航系统。90 年代初期,精确农业的提出促进了机械车辆自主导航的发展。随后农业车辆自主导航便吸引了很多的研究机构和高校的注意,卡耐基梅农大学、斯坦福大学、伊利诺斯州立大学先后组织了研究团队。一直到今天,机器视觉导航已成为最有潜力的导航方式之一,研究者把机器视觉导航应用在各种农业作业任务中。

在欧洲<sup>[2]</sup>,研究者们尝试了包括机械接触传感器、GNSS(全球导航卫星系统)、机器视觉、激光传感器、超声波传感器和里程计等在内的导航传感器,用来产生导航

控制算法所依赖的位置、姿态和运动方向等信息。在欧盟的领导和推动下,欧洲各国的高校、政府研究单位以及一些企业的研究机构纷纷投入了农业机械的自主导航研究,以推动作业效率和保护环境。

在亚洲的日本<sup>[3]</sup>,在 JSAM (Japanese Society of Agricultural Ma) 年会上有许多关于农业自动化的研究。在日本的许多高校、政府机构和农业机械生产厂家都有相关的研究。由于资金的限制,高校主要集中在理论的研究上,比如导航、传感器和控制理论等。北海道大学开发了一维的图像传感器、神经网络和遗传算法;东京大学开发了视觉引导和模糊逻辑控制系统;京都大学研制了一种自主跟踪车辆。依靠大量财政的支持,政府研究机构和农业机械生产厂家开发了更多的实际系统。Bio-oriented Technology Research Advancement Institute (BRAIN)、Ministry of Agriculture, Forestry, and Fishery (MAFF)、Kubota Co. Ltd 等机构都开发了自主耕种机器人、自主洒水机器人等一些实用的农业自主作业工具。在亚洲的韩国也有相关的研究。

下面列举一些近几年来国外在农业机械或农业机器人视觉导航方面的研究:

美国的 S.Han 和 Q.Zhang 等人在文献中提出了一种获取导航基准线的方法<sup>[4]</sup>。利用 K 聚类的方法分割作物行,矩算法进行行检测,最后由价值函数选择导航基准线。在 30 幅大豆图像中,行的标准误差在 1.0cm,在 15 幅玉米图像中标准误差为 2.4cm。

D.C.SLAUGHTER 和 P.CHEN 等人设计了农业耕田机精确导航系统<sup>[5]</sup>。该系统依靠一套彩色视觉系统来识别作物行作为导航路径,被设计用在第一次耕种时多杂草的作物行环境中。田间试验测试,以 16km/s 的速度在杂草较少时跟踪误差为 7mm,在杂草较多时跟踪误差在 12mm。

德克萨斯州 A&M 大学的 Reid 和 Searcy 采用近红外滤镜,在 800nm 波段对农田进行成像,获取绿色植物的高对比度图像,用 Bayes 判决分类器来区分农作物和土壤,并利用作物行的消失点分析来计算农业车辆的位置和方向角偏差。另外还开发了一种类似 Hough 变换的算法来检测导航信号,田间实验表明其方向角精度科大 0.5deg,位置偏差小于 5cm<sup>[1]</sup>。

Gerrish 等人在拖拉机后轴的左侧安装了一彩色 CCD 摄像机,离地面高度 2.79m,仰俯角为 15°。系统初始化时,由使用者首先选出代表作物和土壤的像素点,然后视觉系统根据初始化信息进行自动识别,导航信息由图像中固定的某一点进行计算。在速度为 12.9km/h 和 4.8km/h 两种条件下,跟踪直线状玉米行时,均方差分别为 12cm 和 6cm<sup>[6]</sup>。

英国的 T.Hague 和 N.D.Tillett 设计的农作物行定位算法<sup>[7]</sup>,不需要用绝对的亮度特征或颜色特征将植物从背景中分割出来,而是利用了由平行的作物行产生的周期性的幅度变化的特征。根据图像传感器的排列结构和作物行的空间结构,设计了一种增

强作物行而削弱部分阴影和杂草等的影响的滤波器。最后利用扩展的卡尔曼滤波进行作物行位置和方向跟踪。在冬小麦地里以 1.6m/s 的速度行走误差为 15.6mm。

荷兰的 Tijmen Bakker 和 Kees van Asselt 等人设计了一个自动除草机器人<sup>[8]</sup>，如图 1-1 所示。该机器人采用结构化设计，在此基础上采用开发了一种用于作物行跟踪的机器视觉算法。该算法首先利用绿色农作物和土壤背景的颜色差异将 RGB 彩色图像转化为灰度图像，然后对灰度图像进行校正，再用灰度 Hough 变换提取作物行。在温室甜菜环境下测试表明，该算法可以找到作物行，平均误差为 25mm。

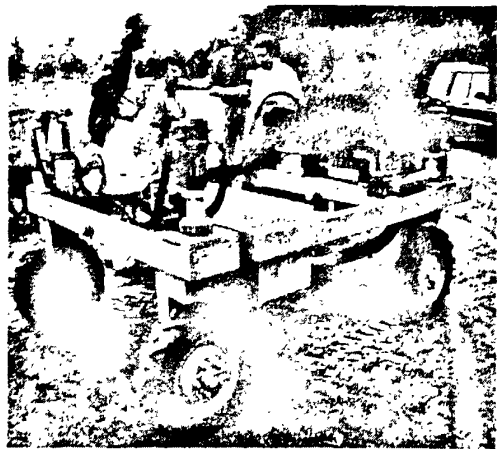


图 1-1 除草机器人(Tijmen Bakker 和 Kees van Asselt 等人设计)

Fig. 1-1 Weed robot(designed by Tijmen Bakker and Kees van Asselt)

比利时的 V.Leemans 和 M.-F.Destain 开发了一种在播种时可以测量机械相对先前播种时留下的行线的位姿，如图 1-2 所示<sup>[9]</sup>。该位姿是由一套机器视觉系统负责测量，并将它用在反馈控制环路中。

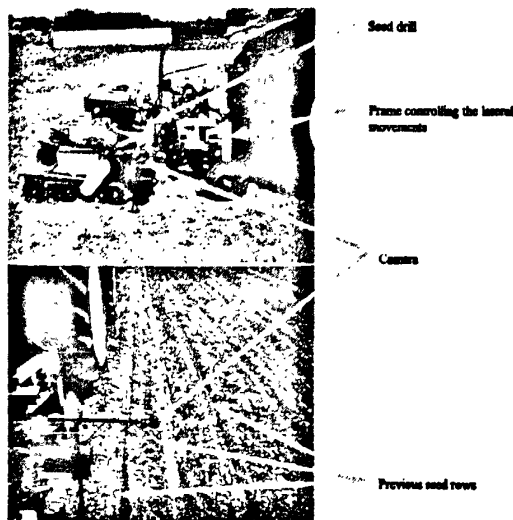


图 1-2 自主播种机器人(V.Leemans 和 M.-F.Destain 开发)

Fig. 1-2 Automatic seed robot(designed by V.Leemans and M.-F.Destain)

瑞典的 Halmstad 大学的 BJORN ASTRAND 和 ALBERT JAN BAERVELDT 开发的室外除草机器人<sup>[10]</sup>。该机器人装配有两套视觉系统：一套灰度视觉系统用来识别由农作物形成的行结构并引导机器人沿着作物行行走，另一套彩色视觉系统可以识别出杂草和农作物，并利用除草机构将杂草从作物行中去除。该作物行识别算法在大量的户外田地进行测试表明跟踪误差在 $\pm 2\text{cm}$ 。整套系统在温室进行首次试验表明，该系统可以在跟踪作物行的基础上稳定地进行除草控制。

日本的京都大学的 Torii 等人研制了一种具有定点作业能力的智能农药喷洒机器人。在 HSI 颜色空间中，基于几条水平扫描线，结合最小二乘法识别出农田中的农作物行作为导航基准线。在导航控制中，根据视觉系统获取的横向偏差和航向偏差以及角位移传感器测出的导向轮转角等 3 个状态设计横向反馈控制。在人工草坪标定实验中取得了最大横向误差为  $0.024\text{m}$ ，航向角误差为  $1.5^\circ$  行进速度为  $0.25\text{m/s}$ <sup>[11,12]</sup>。

此外，韩国和澳大利亚也涉及农业机器人视觉导航的相关研究<sup>[13,14]</sup>。

### 1.2.2 国内研究现状

在国内，关于农业机械或农业机器人自主导航的研究起步较晚，目前主要集中在一些高校的研究机构，由于受市场条件和资金的限制，目前集中在图像处理理论方法的研究和模拟的环境试验或局部的室外环境试验，还没有真正用于实际田间应用测试。

南京农业大学的沈明霞分析了实际农田环境的特点，认为图像中农作物水渠、田埂等特征受光照条件、图像噪声、摄取角度、距离等因素的影响大部分丧失了细节轮廓特征，边缘也远非理想，并针对这些特征采用低通滤波对原始图像进行预处理，然后采用给定阈值的图像二值化，再利用数学形态学理论二值膨胀滤除了细小纹理，结合先验知识获得了较完善的农田景物不同的区域。在此基础上提出了一种定位性能良好的小波边缘检测算法，准确地提取了农田景物边缘轮廓线。并通过对机器人的近景成像几何进行建模，最终确定了机器人与路径的相对位姿，获得了自定位信息<sup>[15]</sup>。

周俊探讨了基于区域和边缘的两种农用轮式移动机器人视觉导航跟踪路径的检测方法。利用 (2G-R-B) 特征对农田环境图像进行分割，对分割结果利用形态学闭运算消除个体植株间形成的小空洞区域。研究了应用 Hough 变换把图像空间中的线映射成导航参数空间中的点，直接获取所需导航参数的方法，提高了路径检测实时性。最后以校园里一段人工绿篱作为路径，进行了轮式移动机器人原型的视觉导航横向跟踪实验，结果表明各种算法的实时性和鲁棒性能够满足导航需要<sup>[16]</sup>。

安秋分析了视觉导航的难点，即如何从复杂的开放式非结构的农田环境中提取出导航信息，认为光照变化和阴影的存在是使导航信息提取算法变得不稳定的主要因

素。首次将颜色恒常性理论用于解决视觉导航中的光照问题,并总结出两种解决思路:一种是转化到标准光照下的图像;另一种是获得光照不变特征量。研究测试了几种将非标准光照下的图像校正到标准光照下的图像的颜色恒常性算法和基于光照无关图的阴影去除方法,获得了较理想的分割效果。并设计了导航路径跟踪算法和地头检测和地头转向控制,验证了算法的有效性和可靠性<sup>[17]</sup>。

中国农业大学孙元义在室内进行了棉田喷药机器人自主行走的仿真试验<sup>[18]</sup>。袁佐云针对基于计算机视觉的作物行中心线定位困难问题,提出了基于垂直投影法的作物行定位方法<sup>[19]</sup>。张卫开发了基于 Hough 变换的农业机器人视觉定位导航处理系统<sup>[20]</sup>。赵颖对复杂农田场景和道路场景进行了描述和合理假设,通过对图像信息的处理和理解提取出导航路径,并根据导航路径信息对机器人的自定位技术进行了研究,最终求得机器人相对于导航路径的横向偏离和角度偏差<sup>[21]</sup>。张红霞研究了小麦和玉米中耕管理期间农业自主行走机器人的视觉导航技术,实现了多目标行走路径和作业目标的直线提取<sup>[22]</sup>。赵博研究了田间地头/天空以及树木等复杂环境对路径识别的影响。提出了用一种行扫描去中心点的方法检测中心线代替原来的细化算法,用腐蚀算法代替原有的中值滤波,试验证明该算法能够快速、可靠、准确地提取导航路径特征<sup>[28]</sup>。

江苏大学的于国英采用了归一化的超绿特征和固定阈值法分别对温室行栽黄瓜图像和大田行栽葡萄图像进行了分割,利用中值滤波的方法对分割后的图像进行去噪处理,利用形态学的方法进行了孔洞的填充并提取作物的边界。提出了基于改进的 Radon 变换的方法进行导航参数的提取,建立了农业 AGV 的运动学数学模型,采用模糊控制方法对不同位姿情况下的直线进行轨迹跟踪仿真研究,使车体能够快速纠偏,达到期望的位姿<sup>[23]</sup>。

浙江大学的张方明提出基于相关分析的图像分割算法通过构造小窗口,利用相关系数阈值分割图像。在立体视觉的田间环境识别与导航方法中在匹配之前基于 2D 小波分解算法提取待匹配区域,在匹配之后,采用了极小/次极小的比较方法消除误匹配,提高了匹配准确率。最后用基于 CMAC 神经网络的姿态估计方法得到高精度的车辆姿态<sup>[24]</sup>。

华南农业大学的罗锡文和张志斌等在动态阈值化的图像中,采用改进 C 均值聚类算法,确定“垄”的中心轨迹,去除了背景石块、杂草等随机离散点给系统导航参数带来的噪声;接着把聚类后的目标中心轨迹点划分成 3 段依次进行 Hough 变换,以提取出每一直线段的导航信息,组成弯道导航参变量序列,提供移动平台转向控制信息。同时,在实验室进行了田间导航试验,结果表明田间实验航向角标准差为  $4.6^\circ$ ,位置标准差为  $0.0018\text{mm}$ ,平台移动速度为  $0.5\text{m/s}$ ,处理速度为  $2.5\text{fps}$ <sup>[25]</sup>。

南京林业大学的侯学贵利用了植物颜色特征在 RGB 颜色空间完成了图像分割,



并利用形态学完成图像滤波,并用优化的 Hough 变换检测出了农作物行的中心线,根据摄像头的姿态和透视变换成像原理,计算出除草机器人相对农作物行中心线的位置,使得除草机器人以农作物行中心线为基准线进行自主行走<sup>[26]</sup>。

此外,还有西安交通大学<sup>[27]</sup>、国内的一些农业研究所的众多研究学者从事农业机械人的视觉导航研究工作,为我国农业现代化不断探索。

### 1.3 本文主要研究内容

本文以两轮差动式移动机器人作为研究平台,以模拟农作物行环境为背景,对移动机器人的图像采集处理、导航路径识别、导航控制参数提取、导航控制方法设计以及底层驱动实现进行详细的介绍,主要研究内容如下:

- 1、对比分析各种机器视觉解决方案的特点,阐述基于折反射原理的全景视觉系统的优势,分析其组成结构和成像特点,并对其进行距离和角度标定,以获得物像点之间的对应关系。

- 2、设计基于折反射全景视觉系统的图像采集和处理系统。针对农作物行环境的特点,设计识别农作物区域和非农作物区域的图像分割方法,并进行相应处理得到理想的农作物行二值图像。

- 3、导航参考路径识别和导航参数提取。在图像处理结果的基础上,设计农作物行导航参考路径的识别和导航控制参数的提取方法。

- 4、导航控制方法研究,设计适合两轮差速控制的移动机器人的导航控制器,并进行验证。

- 5、导航试验。从整体上进行模拟农作物行环境视觉导航试验,以验证本文设计的图像处理、导航路径识别、导航参数提取和导航控制器的效果。

## 第二章 移动机器人全景视觉系统结构及标定

视觉是人类观察世界、认识世界的重要功能手段。据统计,人类从外界获得的信息约有 75%来自视觉系统,这表明视觉信息量较其它信息量是巨大的,人类对视觉信息有较高的利用率。机器视觉是指用计算机实现人的视觉功能——对客观世界的三维场景的感知、识别和理解。机器视觉自上世纪 60 年代出现以来,随着半导体集成技术的飞速发展,图像传感器的性价比不断提高,至今已吸引国内外众多企业、科研机构 and 高校学者投身到研究机器视觉系统的行业,设计开发出了许多成熟的机器视觉系统解决方案。

机器视觉技术从使用传感器的个数不同来划分可以分为:单目视觉系统、双目视觉系统、多目视觉系统和全景视觉系统<sup>[29,30,31,32]</sup>。在传统的单目视觉系统中,机器人只通过一个视觉传感器来获取外界的环境信息。该类系统结构比较简单,在非特定的环境中只能获得二维空间的信息;而双目或多目视觉系统一般具备获取三维空间信息的能力,因此系统比较复杂;全景视觉系统具有 360 度的水平视场角和一定角度的垂直视场角,是其它常规镜头无法比拟的,是机器视觉领域中的一个重要的研究内容,目前已在视频会议、视频监控和足球机器人等领域得到应用和发展。

### 2.1 全景视觉系统的结构

#### 2.1.1 实现全景成像的方法

全景视觉系统可以获得传统视觉系统不可比拟的环境信息,因此得到了重视和发展。目前实现全景成像主要有以下三种方法<sup>[33,34,35,36]</sup>。

1、使用特殊的光学元件扩大图像传感器视野的方法。特殊的光学元件可以是透镜(如鱼眼透镜、环形透镜),也可以是凸面反射镜(其反射镜结构可以是球面、圆锥面、抛物面和双曲面等),即折反射全景成像系统。采用特殊的光学元件的全景成像方法,成像速度快,能够达到实时成像,但是成像的分辨率较低。

2、使用多个摄像机成像的方法。使用多个摄像机对不同方向的场景成像,再将这些不同方向场景的图像拼接成一幅全景图像。这种方法,成像分辨率高,但是,图像拼接算法复杂,成像速度较慢,价格昂贵。

3、使用单个摄像机和旋转平台(云台),即旋转相机成像的方法。这种方法和使用多个摄像机实现全景成像的原理相似,只是降低了成本,但是同样需要将不同方向场景的图像进行拼接,因此,成像速度较慢,不适合一些实时性要求较高的应用场合。

#### 2.1.2 基于折反射原理的全景视觉系统的结构和分类

由于基于折反射原理的全景成像方法无论在价格和实时性等方面都占有绝对优势,因此本文采用基于这种方法的全景视觉系统实现对模拟农作物行环境进行全景成像。折反射全景成像方法就是使用特殊的光学元件——凸面反射镜,扩大成像设备的视野范围,达到水平 360 度和一定角度的垂直视场角范围内的环境图像,使系统获得更多的信息,便于做出更合理的决策。

折反射全景视觉系统主要由三部分组成,如图 2-1 所示:

- 1、光敏元件:如 CCD、CMOS 图像传感器。
- 2、成像透镜:起折射光线的作用。如常规成像透镜或远心透镜。
- 3、凸面反射镜:起反射光线的作用。其面形为二次曲面,如球面、双曲面,或高次旋转对称曲面。

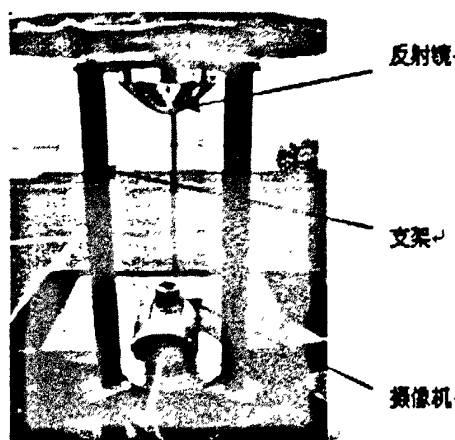


图 2-1 折反射全景视觉系统结构

Fig. 2-1 The structure of the catadioptric omni-vision system

折反射全景成像系统根据是否满足单视点成像约束分为单视点成像系统和非单视点成像系统<sup>[33]</sup>。单视点成像系统是指进入折反射全景视觉系统成像的光线在进入系统时交于一点;而非单视点成像系统指的是进入折反射全景视觉系统成像的光线在进入系统时没有唯一的交点。

由于计算机视觉通常采用单视点(针孔)成像模型,因此现有的计算机视觉理论、算法适用于单视点成像的折反射全景成像系统。目前使用的单视点折反射全景视觉系统根据反射镜的面形分为抛物面折反射全景视觉系统和双曲面折反射全景视觉系统。

单视点折反射全景成像系统能用针孔成像模型进行成像分析,但要获得透视全景图像必须对采集的实时图像逆投影,因此计算量大。为了满足应用对实时性的要求和特殊应用场合的需要出现了非单视点折反射全景视觉系统,如使场景中的物点坐标与成像平面内像点坐标成线性关系,实现全景成像的水平场景和柱面场景空间无畸变、

角放大率不变的折反射全景视觉系统和分辨率不变的折反射全景视觉系统<sup>[37,38]</sup>等。但是这种成像系统的设计复杂,加工困难。因此,在一些精确性要求不苛刻的应用场合,可以使用普通的拟合二次曲面组成折反射全景视觉系统。

本文采用的是普通的经过已知点二次曲线拟合的方法确定的反射镜面形,由这种镜面组合而成的折反射全景视觉系统对摄像机和曲面镜之间相对位置关系的安装要求较低。因此本文利用这种视觉系统获取模拟农作物行环境信息,采集的室内环境图片如图 2-2 所示。

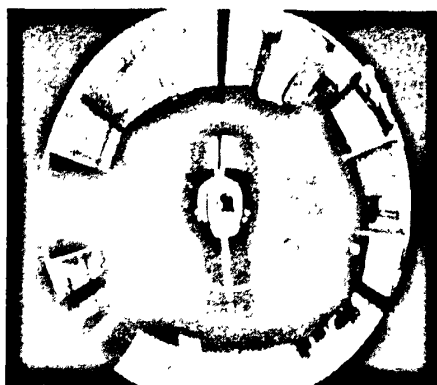


图 2-2 全景视觉系统采集的室内环境图像

Fig. 2-2 The image of indoor environment captured by the omini-vision system

## 2.2 全景视觉系统的距离和角度标定

在利用图像处理软件提取出目标特征点(绿色农作物)之后,为了达到定位跟踪的目的还需要估计目标特征点与其在实际场景中的位置坐标之间的对应关系,即需要进行距离和角度标定。

在标定之前需要建立相应的坐标系,包括机器人坐标系  $O_w X_w Y_w Z_w$ , 摄像机坐标系  $O_c X_c Y_c Z_c$ , 计算机图像坐标系  $UV$  和计算机图像平面坐标系  $XOY$ , 它们之间的关系如图 2-3 和图 2-4 所示。定义机器人前进方向为  $Y_w$  轴正方向, 机器人右方为  $X_w$  轴正方向, 原点  $O_w$  为摄像机光轴的反向延长线与地面的交点, 从原点  $O_w$  垂直地面指向摄像机的方向为  $Z_w$  轴正方向。摄像机坐标系的原点  $O_c$  在光心位置,  $X_c \parallel X_w$  且反向,  $Y_c \parallel Y_w$  且反向,  $Z_c \parallel Z_w$  同向。计算机图像坐标系  $UV$  以计算机屏幕左下角为原点, 横向往右为行像素增加的方向  $U$ , 纵向向上为列像素增加的方向  $V$ 。计算机图像平面坐标系  $XOY$  的原点为机器人坐标系原点  $O_w$  在摄像机成像平面上的投影位置,

$X // X_w, Y // Y_w。$

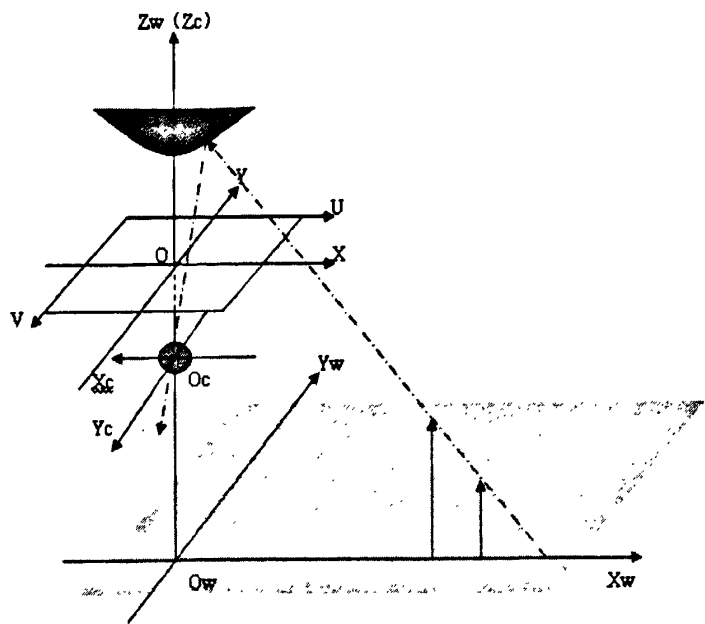


图 2-3 全景视觉系统各坐标系的定义

Fig. 2-3 The coordinates of the omni-vision system

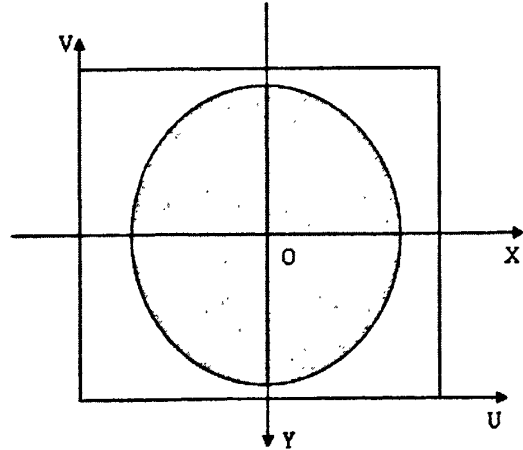


图 2-4 计算机图像坐标系和计算机图像平面坐标系之间的关系

Fig. 2-4 The relationship between the computer image coordinate and the image plane coordinate

全景视觉系统距离标定的目的是得出物点坐标离机器人中心点，即机器人坐标系原点  $O_w$  的实际距离与其在摄像机成像平面上的成像点据计算机图像平面坐标系原点  $O$ ，即成像中心点的像素距离之间对应关系。常用的距离标定方法有理论算法<sup>[33]</sup>

和实验法<sup>[39,40]</sup>两种。理论计算方法是在已知摄像机的参数方程和镜面方程以及它们之间的安装位置关系的情况下从理论上推导出目标点与其在全景视觉系统成像平面上的像素点之间的对应关系。实际上,受镜头畸变、加工精度、安装精度等诸多因素的影响,理论上的方法往往难以使用。实验法是一种近似逼近的方法,通过一些已知的信息来估计目标特征点与其在全景视觉系统成像平面上的像素点之间的对应关系。

从图 2-3 所示各坐标系的关系可以看出,全景视觉系统获得的是以机器人坐标原点  $O_w$  为中心点,水平 360 度范围和垂直一定角度范围内的环境信息图像,设图像传感器每个像素点的物理尺寸近似为正方形,即横向尺寸  $d_x$  近似等于纵向尺寸  $d_y$ 。

这样在全景视觉系统安装误差范围内可以近似认为系统具有各向同性的性质,因此可以选择一个方向对其进行距离标定。另外,由于单目视觉系统的缺点,无法得到物体的深度信息,因此,只有对和摄像机图像平面平行的某一平面内标定才有意义,因此,需假设机器人作业环境近似平坦且和摄像机平面近似平行。

采用实验法对全景视觉系统进行距离标定,首先要选取样本点,根据全景视觉系统成像的特点,要求选择的样本点在同一个方向的直线上,且分布要均匀,而且这些点应该都在和摄像机成像平面平行的某一平面内,即机器人的作业环境平面。针对以上的要求,在某一特定方向上距机器人原点 0mm, 500mm, 1000mm, 1500mm, 2000mm, 2500mm, 3000mm, 3500mm, 4000mm 的地方设置已知参考点,然后在视觉系统软件上分别获取这些已知参考点的像素坐标,并根据这些像素坐标计算出各自距成像中心的像素距离,如表 2-1 所示。

表 2-1 距离标定样本参考点

Table 2-1 The given referenced points for the distant calibration								
实际距离(毫米)	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
像素坐标	(166,97)	(166,79)	(164,69)	(165,63)	(165,60)	(165,57)	(165,54)	(165,53)
像素距离(毫米)	33	51	61.0328	67.0075	70.0071	73.0068	76.0066	77.0065

注:成像中心点为 (166, 130)

获得表 2-1 所示的样本点之后,利用数学方法对其进行处理就可以得到它们之间的关系。在生产和科研实践所碰到的大量的函数中,相当一部分是通过实验和观测得到的。虽然其函数关系是客观存在的,但是却不知道具体的解析表达式,只能得到一些离散点上的值(包括函数值和导数值等)。因此希望能对这样的函数用比较简单的表达式近似地给出整体上的描述。还有些函数,虽然有明确的解析表达式,但因其过于复杂,不便于进行分析和计算,同样希望构造一个既能反映函数的特性又便于计算的简单函数,近似代替原来的函数。插值法就是寻求近似函数的方法之一。

在用插值法寻求近似的简单函数的过程中，对简单函数的类型可有不同的选取，如多项式、有理式、三角函数等<sup>[41]</sup>，其中多项式结构简单，并有良好的性质，便于数值计算和理论分析，因此被广泛采用。选用插值函数的类型应考虑系统实际的情况。这里采用了分段插值的方法。通常抛物线插值比线性插值的误差小，可以通过增加节点的个数提高多项式的次数来提高精度，但是并非插值多项式的次数越高，精度越高。所以，在实际问题中进行插值时，通常把区间分成若干段，然后在每个分段上使用低阶插值，即分段插值。

已知单变量函数  $y=f(x)$  在  $n$  个节点  $X_k(k=1,2,\cdots,n)$  上的值  $Y_k(k=1,2,\cdots,n)$ ，对于插值区间内任意  $x$ ，可按公式 2.1 近似计算函数值。

$$f(x)=\frac{(x-x_{k+1})(x-x_{k+2})}{(x_k-x_{k+1})(x_k-x_{k+2})}+\frac{(x-x_k)(x-x_{k+2})}{(x_{k+1}-x_k)(x_{k+1}-x_{k+2})}+\frac{(x-x_k)(x-x_{k+1})}{(x_{k+2}-x_k)(x_{k+2}-x_{k+1})} \cdots (2.1)$$

式中： $x_k, x_{k+1}, x_{k+2}$  为最靠近  $x$  的三个已知节点，可以按照公式 2.2 确定插值节点  $x_k, x_{k+1}, x_{k+2}$ ：

$$k=\begin{cases} 1, & x < x_2 \\ i-1, & x_i < x < x_{i+1}, \text{ 且 } |x-x_{i-1}| \leq |x-x_{i+1}| (i=2,\cdots,n-2) \\ i, & x_i < x < x_{i+1}, \text{ 且 } |x-x_{i-1}| > |x-x_{i+1}| (i=2,\cdots,n-2) \\ n-2, & x > x_{n-1} \end{cases} \cdots (2.2)$$

式中： $n$  为插值节点的个数。距离标定结果如图 2-5 所示。

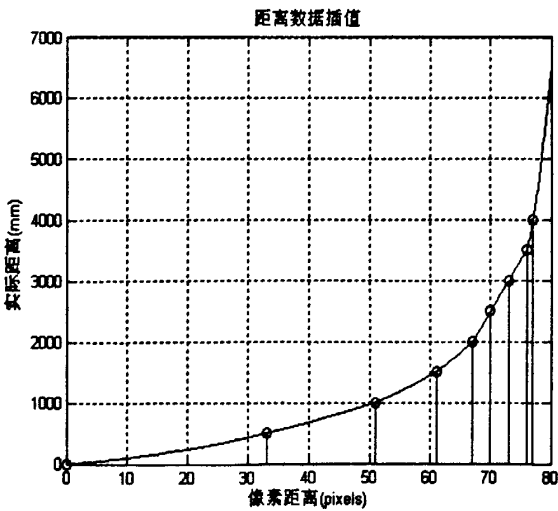


图 2-5 距离标定结果

Fig. 2-5 The result of the distant calibration

利用分段抛物插值法对表 2-1 的样本参考点数据进行计算处理得到如图 2-5 所示的距离标定关系图。从图中可以看出,物点的实际距离与其在摄像机成像平面中的像素距离成非线性关系,且离机器人中心点越远出,图像分辨率下降越严重,即图像上每个像素代表的实际距离越大,因此,往往在实际距离大于一定值时,标定结果误差比较大,视具体硬件设备情况有所不同。本文采用的全景视觉系统在机器人 4 米范围外误差偏大,因此,第三章的图像处理模块只对 4 米范围内的目标进行处理。

从各坐标系之间的关系可以看出,物点在机器人坐标系中的方位角就等于其像点在计算机图像平面坐标系中的方位角,因此可以直接由像点的坐标  $(u, v)$  计算得到其物点的方位角  $\theta$ , 如式 2.3 所示。

$$\theta = \begin{cases} \arctan \frac{|v-v_0|}{|u-u_0|}, u-u_0 > 0 \text{ 且 } v-v_0 \leq 0 \\ 180 - \arctan \frac{|v-v_0|}{|u-u_0|}, u-u_0 > 0 \text{ 且 } v-v_0 < 0 \\ 180 + \arctan \frac{|v-v_0|}{|u-u_0|}, u-u_0 < 0 \text{ 且 } v-v_0 < 0 \\ 360 - \arctan \frac{|v-v_0|}{|u-u_0|}, u-u_0 < 0 \text{ 且 } v-v_0 > 0 \\ 270, u-u_0 = 0 \text{ 且 } v-v_0 > 0 \\ 90, u-u_0 = 0 \text{ 且 } v-v_0 < 0 \end{cases} \quad \dots (2.3)$$

式中:  $(u_0, v_0)$  为成像中心, 即机器人坐标系的原点  $O_w$  在计算机图像坐标系内的坐标。



### 第三章 农田场景图像采集和处理

图像采集和处理模块是机器视觉系统的核心，图像采集处理效果的好坏直接影响整个系统的性能。对农业移动机器人视觉导航系统而言，视觉系统主要的任务是获取机器人周围农田环境信息，进行相应的处理得到可供参考的导航路径线。本章详细介绍从图像采集到得到农田环境二值图像的过程，最后利用第二章的标定结果对目标像素进行距离和角度变换，恢复农作物行的空间直线结构特征。图像采集处理流程如图 3-1 所示。

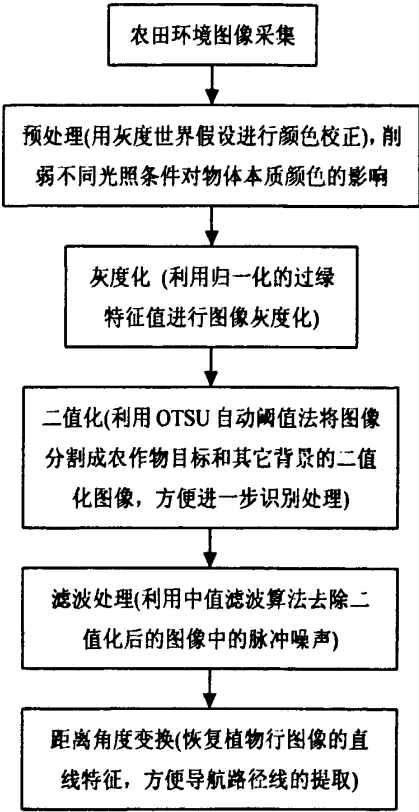


图 3-1 图像处理流程图

Fig. 3-1 The flow chart of the image processing

首先利用 Microsoft 公司的 DirectShow 技术进行摄像头图像采集，得到机器人周围环境信息的数字图像；经过预处理恢复物体本身所固有的颜色；然后根据农田环境的特点，采用归一化过绿特征值对图像进行灰度化处理；利用类间最大方差自动阈值选择法将灰度图像分割成两部分：农作物部分和非农作物部分；针对可能存在的孤立点干扰，采用中值滤波和腐蚀运算进行去噪处理，得到较理想的农作物行分割效果；最后对农作物目标像素进行距离和角度变换，将由于全景视觉系统成像而变形的作物

行信息转换到实际距离和对应的像素距离成线性变化的图像空间，恢复作物行的直线特征，为后面提取导航路径作准备。

3.1 农田场景图像采集

图像采集是将外部环境的模拟信息转换到计算机中用数字量进行存储的过程，主要涉及到硬件的选择和软件的设计。图像采集硬件设备主要包括图像传感器和相应的光学镜头、图像采集卡等。其中图像传感器是图像采集系统的核心，目前主要有 CCD(Charge-Coupled Device, 电荷耦合元件)和 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor, 互补金属氧化物半导体)两种类型的图像传感器。各种光学镜头和 CCD 传感器配合可以将不同视场内的景物目标成像在 CCD 靶面上，图像采集卡负责将图像传感器获得的模拟电信号转化成数字信号并发送给计算机进行存储显示和处理。视觉软件设计主要是通过相应操作系统平台提供的 API(Application Programming Interface, 应用程序编程接口)函数或厂商提供的 SDK(Software Development Kit, 软件开发包)进行设计，已到达存储、显示或处理的目的<sup>[42]</sup>。一般的图像采集过程如图 3-2 所示。

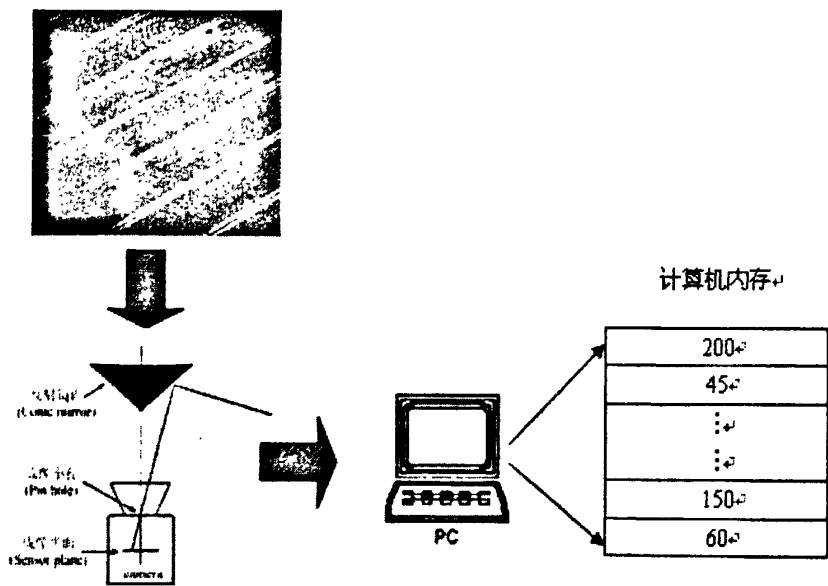


图 3-2 图像采集过程示意图

Fig. 3-2 The process of the image capturing

3.1.1 视觉系统硬件设备

为降低成本，选择 Philip PCVC 840K 的 CCD 摄像头为图像传感器的折反射全景视觉系统作为图像采集硬件，该摄像头最大静态分辨率为 640×480，最高帧频为 30 帧/秒，内置数字化转化模块，USB 接口方便与笔记本电脑连接。

### 3.1.2 视觉系统软件设计

本文的选择微软的 Microsoft Visual Studio.NET 2003 作为视觉应用软件开发平台，在平台上选择微软公司提供的 DirectX 软件开发包中的 DirectShow 技术进行设备初始化和捕捉图像等工作。DirectShow 是一个 WINDOWS 平台上的流媒体框架，提供了高质量的多媒体流采集和回放等功能。其基本思想是：多媒体数据在过滤器图表(Filter Graph)中流动，通过过滤器图表中各过滤器(Filter)实现功能，最终实现多媒体数据在渲染过滤器(Rendering Filters)中的显示和回放。

DirectShow 使用一种叫 Filter Graph 的模型来管理整个数据流的处理过程。参与数据处理的各个功能模块叫做 Filter，按照功能来分，Filter 大致分为 3 类：源过滤器(Source Filters)、转换过滤器(Transform Filters)和渲染过滤器(Rendering Filters)。它们分别完成数据提供、数据格式转换(压缩编码等)和数据渲染和回放功能<sup>[43]</sup>。

DirectShow 使用系统枚举来支持系统中不可预知性的硬件。系统枚举的过程如图 3-3 所示。具体步骤如下：

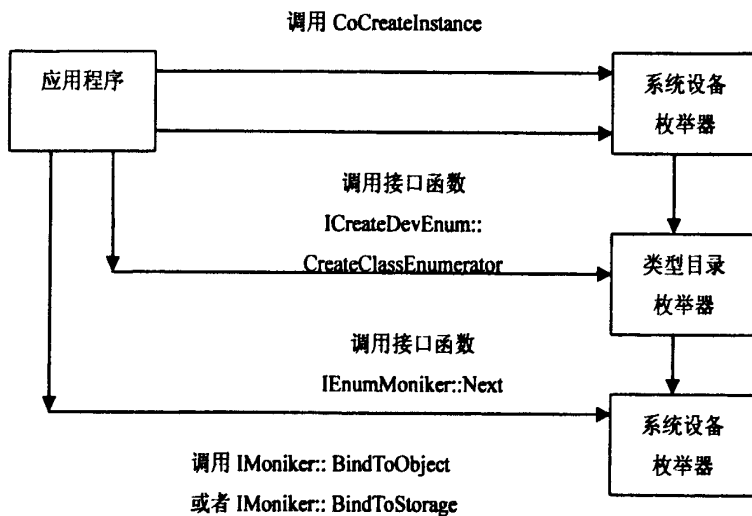


图 3-3 系统枚举过程

Fig. 3-3 The process of system enumerating

- 1、使用 CoCreatInstance 函数创建系统枚举器组件对象 (CLSID 为 CLSID\_SystemDeviceWnum)，并获得 ICreateDevEnum 接口；
- 2、使用接口方法 ICreateDevEnum::CreateClassEnumerator 为指定的 Filter 注册类型目录创建一个枚举器，并获得 IEnumMoniker 接口；
- 3、使用 IEnumMoniker 接口方法枚举指定类型目录下所有设备标识 (DeviceMoniker)；

4、调用 IMoniker:: BindToObject 可以将设备标识生成一个 DirectShow Filter, 随后调用 IFilterGraph::AddFilter, 并将之加入到 FilterGraph 中就可以参与工作了;

5、创建用于管理 Filter 的视频采集过滤器图表然后再将它添加到 IGraphBuilder 图表管理器中;

6、使用 CoCreateInstance 函数创建用来捕获图像的 Sample Grabber 过滤器, 然后用 ISampleGrabber:: SetMediaType 来设置媒体类型。

由此完成视频媒体的采集获取。采集的模拟农作物行环境图像如图 3-4 所示。



1—机器人本体成像; 2—摄像头自身成像; 3—笔记本电脑;  
4—模拟农作物行; 5—全景视觉系统框架

图 3-4 全景视觉系统成像

Fig. 3-4 The image captured by the omni-vision system

## 3.2 图像预处理

不同的物体在受到光照射的情况下会呈现出不同的特性, 相同的物体在不同的光源照射下也有可能表现出不同的特性。光照的变化使世界变得美妙多彩, 但是也给研究机器视觉问题带来了困难。传统的工业机器人或大部分室内移动机器人的视觉系统都有固定的照射光源或在相对稳定的光照条件下工作, 这使得机器视觉系统变得相对简单。而应用在农业领域的机器视觉系统大部分工作在室外, 设置单独的光源不太现实, 因此就要求视觉系统具有比工业机器视觉系统更高的鲁棒性和适应性。

人的视觉系统具有颜色恒常性, 在不同的光照条件下, 人可以正确地反应物体本身所固有的颜色。在室外太阳光下、室内白织灯下或室内蜡烛光下我们看同一物体表现出相同的颜色, 这跟人的经验有很大的关系。但是机器视觉系统本身不具备这种功能, 白纸在太阳光下成像为白色, 而在烛光下可能就成像为黄色, 因此就需要设计颜色校正模型, 把偏色的图像校正到或近似校正到物体本身所固有的颜色。

Von Kries 色适应理论<sup>[44]</sup>最初是对人的视觉适应性提出的对角模型, 它认为可用一个对角变换来描述两种光照下同一物体表面颜色之间的关系, 后来研究者发现在机器视觉中这种模型同样可以达到与  $3 \times 3$  线性模型同样的效果。现在, 这种对角模型称为了大多数颜色校正算法的基础。它通过对 RGB 三个通道分别进行简单的比例运算, 把一种未知光照下的颜色转换到已知的或标准光照下的颜色, 这些比例因子便是对角矩阵的对角线元素。

彩色图像的成像是一个很复杂的过程, 涉及到辐射度学、光度学和传感器制造等方面的知识。首先入射光照照射到不透明物体表面, 再由物体表面反射到摄像机中, 最后由摄像机的光敏传感器来测量光的能量大小来表示物体表面的颜色。因此, 物体表面呈现的颜色主要取决于三个因素: 物体表面的反射率、光照的条件以及摄像机的光敏函数<sup>[45,46]</sup>。

假定  $\lambda$  为波长, 物体表面反射系数是  $S(\lambda)$ , 光照为  $E(\lambda)$ , 摄像设备的光敏函数为  $\sigma_k(\lambda)(k=r, g, b)$ , 那么三个颜色通道 ( $R, G, B$ ) 的响应值  $p_k(\lambda)(k=r, g, b)$  为光敏函数、反射系数、光照三者的乘积在可见波段的积分:

$$\begin{cases} p_r = \int \sigma_r(\lambda) E(\lambda) S(\lambda) d\lambda \\ p_g = \int \sigma_g(\lambda) E(\lambda) S(\lambda) d\lambda \\ p_b = \int \sigma_b(\lambda) E(\lambda) S(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad \dots (3.1)$$

在此基础上 von Kries 提出, 可用一个对角矩阵变换描述两种光照条件下同一物体表面颜色之间的关系。假定在光照  $E_1(\lambda)$  和  $E_2(\lambda)$  下感知到的物体  $R$ 、 $G$ 、 $B$  值分别为  $(p_r^1, p_g^1, p_b^1)$ ,  $(p_r^2, p_g^2, p_b^2)$ , 根据 von Kries 色适应理论有:

$$\begin{bmatrix} p_r^1 \\ p_g^1 \\ p_b^1 \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} p_r^2 \\ p_g^2 \\ p_b^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_r & 0 & 0 \\ 0 & k_g & 0 \\ 0 & 0 & k_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_r^2 \\ p_g^2 \\ p_b^2 \end{bmatrix} \quad \dots (3.2)$$

式中:  $D$  是一个对角矩阵,  $k_r$ 、 $k_g$ 、 $k_b$  为对角元素。

Von Kries 色适应理论隐含了以下假设: 三个通道的响应值独立进行修正。Von Kries 色适应理论作为很多颜色恒常性算法的基础, 但是受摄像机通道响应曲线、光照等因素的影响并不是所有情况下都能有很好的效果。

利用 Von Kries 色适应理论进行色彩校正, 首先就是要获得转换对角矩阵  $D$ 。目

前获得转换对角矩阵  $D$  的方法有多种, 有基于物理模型的方法<sup>[47]</sup>, 有基于经典图像统计理论的方法<sup>[48,49,50]</sup>, 其中根据统计区域的不同经典图像统计理论方法可以分为全局统计法和局部统计法。下面重点尝试两种基于全局统计经典理论获取转换对角矩阵  $D$  的方法: 灰度世界假设算法和白平衡算法。

灰度世界假设理论是颜色恒常性中的一种比较简单的方法, 该理论认为对于一幅有着大量色彩变化的图像, 整个场景的所有像素颜色的平均是灰色的, 即  $R$ 、 $G$ 、 $B$  三个分量各自的平均值趋于同一个灰度, 并且认为光源的颜色会引起这个灰度值的变化<sup>[51]</sup>。在客观世界中, 一般来说物体及周围环境的色彩变化是随机的, 因此这一假说是合理的。该方法的基本思想是通过计算图像  $R$ 、 $G$ 、 $B$  三个分量各自的平均值  $R_{ave}$ 、 $G_{ave}$ 、 $B_{ave}$  确定图像的平均灰度  $K$ , 得到对角校正矩阵的系数  $k_r$ 、 $k_g$ 、 $k_b$ , 然后调整每个像素的  $R$ 、 $G$ 、 $B$  值, 使得调整后的图像中三个分量的平均值都趋于平均灰度。具体流程如图 3-5 所示。

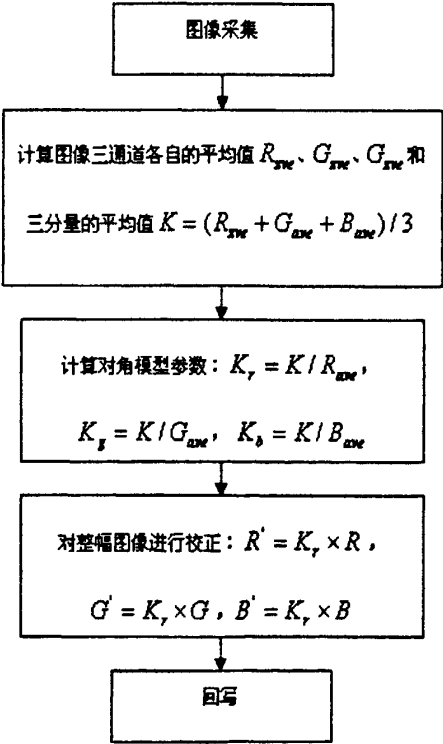


图 3-5 灰度世界假设算法流程图

Fig. 3-5 The flow chart of the gray world algorithm

利用该算法对偏色 Lena 图像进行校正, 结果如图 3-6 所示。校正前 Lena 图像的 RGB 三通道的平均值分别为: 133.676、80.0661、67.1597; 校正后 Lena 图像的 RGB

三通道的平均值分别为：93.6288、93.6356、93.6155。可以看出利用灰度世界假设算法可以把偏色的 Lena 图像近似校正到本身所固有的颜色，使图像处理识别系统能更稳定地完成处理识别任务。



(a) 偏色 Lena 图像      (b) 校正后 Lena 图像

图 3-6 灰度世界假设算法处理效果图

Fig. 3-6 The result of image corrected by the gray world algorithm

白平衡是另一种有效的简单的颜色恒常性算法，了解白平衡首先需要了解色温的概念。人眼之所以能够看到物体的颜色，处理人眼本身的生理机能，还必须有光的照射以及物体对入射光进行有选择地吸收和反射。色温是描述光的不同色彩的一个重要的概念，它借助完全辐射体的温度来表示光源的光谱成分，以绝对黑体温度  $K$  来度量。

物体在不同的光源照射下呈现的颜色是不同的。这是由光源的不同色温决定的，它使得物体的反射光谱较真实色彩有一定的偏差。对同一个白色物体而言，在低温光源照射下，其变得偏红；而在高温光源照射下显得偏蓝。人类视觉可以在不同色温光源的照射下，分辨出物体的本质颜色，这是由于人眼具有颜色恒常性，能将白色物体还原成白色，这就是白平衡功能。一般将  $6500\text{ K}$  的光源作为标准白光，在这种光源下物体所表现出的颜色是物体的本质颜色。要是图像采集设备具有自动调整白平衡的功能，需要知道测量照射光源的色温，这在现实中往往很难做到，一般的彩色图像采集设备也只是在几个典型的色温等级具备调整白平衡功能，而实际拍摄的环境色温千差万别，所以需要从图像数据本身估计出环境的色温，从而达到颜色校正的目的。

根据是否需要在环境中放置标准白板，白平衡方法又可以分为监督白平衡方法和非监督白平衡方法。监督白平衡方法是在物体所在环境中放置一块标准白板进行成像，然后对标准白板的成像像素值进行统计分析，从而估计出光源的色温，在利用对角模型进行颜色校正；而非监督白平衡就是认为场景中存在白色区域，通过对图像中像素值大于一定值的像素点进行统计分析，得到光源色温的参考值。

白平衡算法原理：如果原始像素中的某些像素点应该是白色的 ( $R = G = B = 255$ )，

但是由于在不同色温的光源照射下, 所获得图像中相应相应像素点存在色偏, 这些点的  $R$ 、 $G$ 、 $B$  三个分量的值不再保持相同, 通过调整这三个颜色分量的值, 使之达到平衡, 由此获得对整幅图像的彩色平衡映射关系, 即对角校正矩阵的系数  $k_r$ 、 $k_g$ 、 $k_b$ , 通过该映射关系对整幅图像进行处理, 即可达到彩色平衡的目的。

对监督白平衡有: 监督白平衡就是在拍摄场景中始终存在一块白板或其它白色参照物体, 通过对这些白色物体部分的像素进行校正以使其在不同光照条件下恢复本来的白色, 得到对整幅图像进行校正的对角模型的系数  $k_r$ 、 $k_g$ 、 $k_b$ 。具体流程如图 3-7 所示。

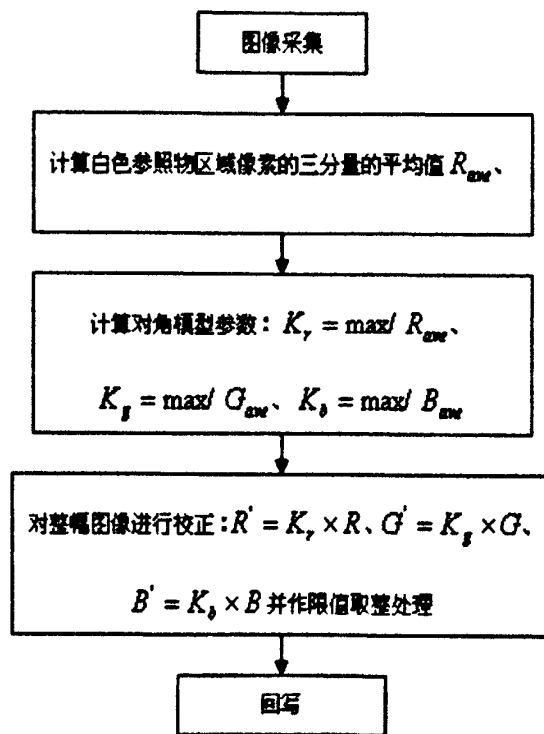


图 3-7 监督白平衡算法流程图

Fig. 3-7 The flow chart of the white balance algorithm

利用监督白平衡算法对图 3-8(a)所示的放置在绿色地毯上的书本颜色进行校正, 场景中放置一块标准或参考白板, 结果如图 3-8(b)所示。校正后图像中偏色的参考白板被恢复到白色或接近白色, 这样目标也被校正到接近真实的色彩, 这样就可以削弱光照条件变化的影响, 使开发出的系统具有更高的鲁棒性。



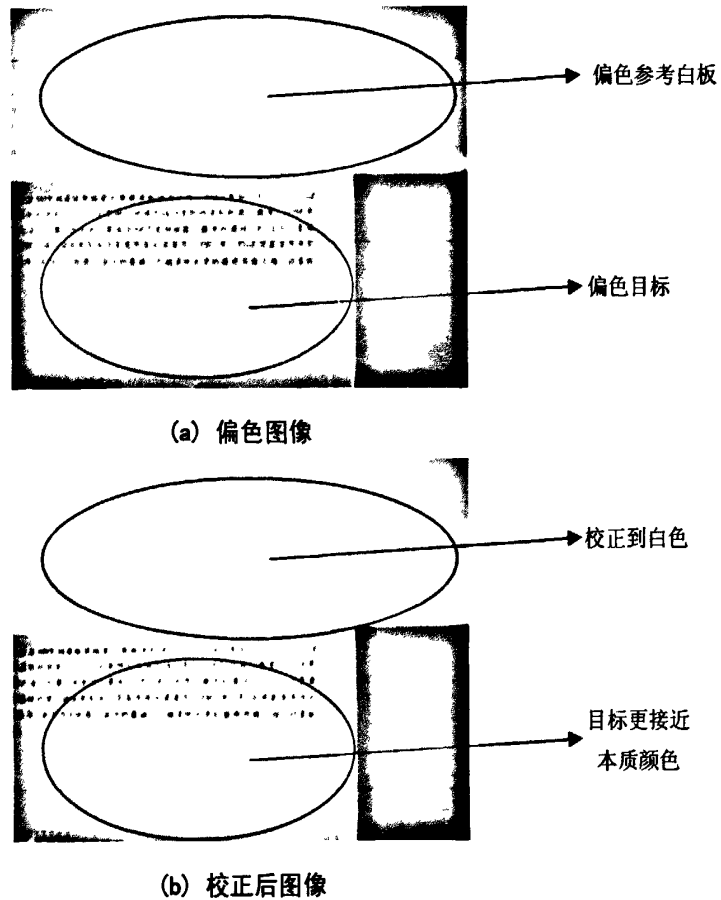


图 3-8 监督白平衡算法处理效果图

Fig. 3-8 The result of the image corrected using the white balance algorithm

对非监督白平衡有：非监督白平衡是指场景中没有事先放置好的白板或白色参照物，而是假设场景中总存在一些白色区域，通过对图像所有像素每个分量大于一定阈值的像素进行统计计算，和监督白平衡方法相比只是统计区域不同，非监督白平衡方法灵活，不需要设置白色参照物，但是当场景中不存在白色区域时效果往往不理想。此外，还有很多颜色恒常性算法，基于统计计算的颜色恒常性算法：Retinex 算法<sup>[52]</sup>、Bayesian 决策算法、色域映射算法等；基于物理模型的颜色恒常性算法：双色彩反射模型等。这些方法各有特点，但是都不是能适应所有的应用场合。

### 3.3 农作物和非农作物区域的识别

#### 3.3.1 彩色图像的表达方法

为了用科学的手段，尤其是用计算机来处理彩色图像信息时，必须能用定量的方法来描述彩色图像信息，即建立定量描述彩色图像的颜色模型，目前人们对于彩色图像的描述方法有很多种，常用的有 RGB、rgb、HIS、YUV 和 Lab 等。这些不同的彩

色模型是从不同的角度来描述彩色信息，都有自己的特性。RGB 是我们最熟悉的一种彩色模型，它在彩色监视器和彩色摄像机等领域被广泛采用；rgb 是 RGB 的一种归一化模型；HIS 是比较符合人的感知习惯的彩色模型，它将色彩信息和亮度信息相分离；YUV 是为电视传输的 PAL 制而建立；Lab 是一种非线性均匀的彩色模型；m1m2m3 是 gever 为了利用直方图来识别物体而提出的颜色率彩色模型。如何在众多的彩色模型中选取合适的模型进行彩色分析必须根据各种模型的特点，再结合实际运用条件做出决定。刘关松、陆宗骥等<sup>[53]</sup>利用二色反射模型对几种彩色模型的光照稳定性进行了分析，然后用颜色试验进行验证，结果表明，rgb 和 HS 在白光下具有光强不变性，m1m2m3 在不同强度和颜色的光照下都表现了较高的稳定性，经改进后的 m1m2m3 减弱了噪点的影响，稳定性更好。

下面分析几种常见的颜色模型，并对它们之间的关系进行说明，主要包括 RGB、HSI、rgb 等，并着重分析 rgb 彩色模型对光照强度变化稳定的原理。

1、RGB 颜色模型：光谱中最重要的颜色是红(R)、绿(G)、蓝(B)三基色，所有的颜色都可以由三基色相加而产生。RGB 颜色模型是一个立方体三维坐标空间结构，如图 3-9 所示，分别用红、绿、蓝表示三个坐标轴，如图所示。坐标轴的原点  $R=G=B=0$  处为黑色，顶部与其相对角  $R=G=B=255$  处为白色。由于图像采集和显示设备使用的是 RGB 颜色空间，所以 RGB 颜色空间是彩色图像处理中最基础、最常用的颜色空间。

RGB 颜色空间在一些光照等环境因素相对稳定的工业应用场合使用广泛，但是在一些环境因素不稳定的场合，如农业领域，就显得力不从心。RGB 颜色空间的主要缺点是受光照等环境因素变换的影响大且对硬件设备具有依赖性。因此为了克服 RGB 空间的缺点，许多应用场合需将 RGB 颜色空间转换成所需的其它颜色空间。

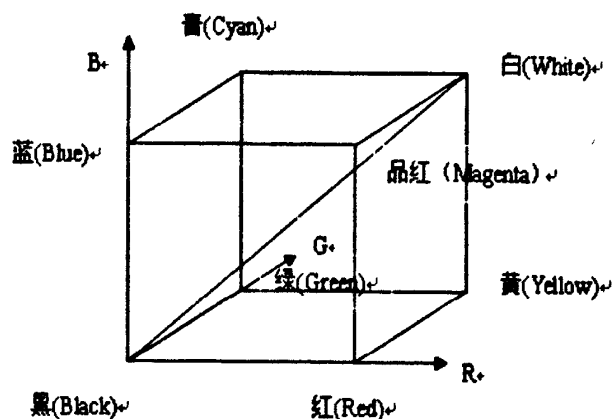


图 3-9 RGB 模型示意图

Fig. 3-9 The model of the RGB

2、HSI 颜色模型：HSI 颜色空间是从人的心理感知角度建立的。H(色调)是指一种颜色在色谱中所对应的主波长，S(饱和度)相当于颜色的纯度，I(亮度)是感觉的均匀量，如图 3-10 所示。与 HSI 颜色空间相似的还有 HSV，HCV，HSB 等颜色空间，它们都属于极坐标空间结构，这些颜色空间的优点是能直观的描述颜色。其中多数与 RGB 颜色空间都是线性关系。

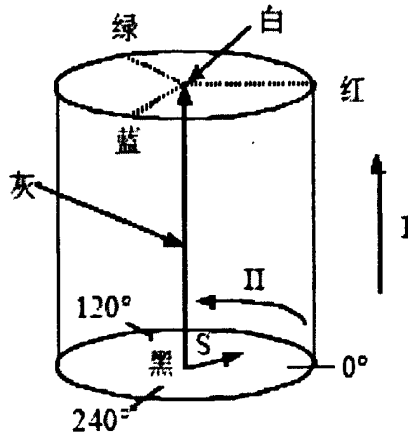


图 3-10 HSI 模型示意图

Fig. 3-10 The model of HSI

HSI 模型有两个重要的特点：首先亮度分量与色度分量是分开的，I 分量与图像的彩色信息无关；其次是 H 和 S 分量与人感受彩色的方式紧密相连。这些特点使得 HIS 颜色空间非常适合基于人的颜色感知特性进行处理和分析的图像处理算法。其中，H 分量对彩色的描述能力相对来说最与人的视觉接近，区分力比较强。HSI 颜色空间的坐标系接近圆柱坐标系，如图所示。对其中的人一个颜色点 P，其 H 的值对应指向该点的向量与 R 轴的夹角。这个点的 S 与指向该点的向量长度成正比。I 的值与该点所在平面与最下对应黑色点的距离成正比。奇异点的存在是 HSI 模型的一个缺陷，而且在奇异点附近，RGB 数值的微小变化会引起 H、S、I 数值的明显变化。HSI 颜色空间与 RGB 颜色空间可以通过公式相互转换<sup>[54]</sup>。

3、rgb 颜色模型：rgb 颜色模型是 RGB 颜色模型的归一化表示法，设 r、g、b 分别表示一幅彩色图像的三个归一化颜色分量，则有：

$$r = \frac{R}{R+G+B}$$

$$g = \frac{G}{R+G+B}$$

$$b = \frac{B}{R+G+B} = 1 - r - g$$

由于反射光的成分是由物体的表面性质所决定的, 因此, 在光源只发生强度变化时, 同性质的表面所反射光的成分不变, 即对一个性质均匀的表面, 若其明亮部分的光强为  $I_1$ , 阴影部分的光强为  $I_2$ , 则有  $I_1 = CI_2$ , 其中  $C > 1$  为常数。现假设一个物体的统一颜色区域在两次摄像时, 由于光照变化引起了光强的变化  $\Delta R$ ,  $\Delta G$ ,  $\Delta B$ , 则所得两幅图像的归一化分量  $r_1$ ,  $g_1$ ,  $b_1$  和  $r_2$ ,  $g_2$ ,  $b_2$  分别计算如下:

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{R}{R+G+B} \\ g_1 &= \frac{G}{R+G+B} \\ b_1 &= \frac{B}{R+G+B} \\ r_2 &= \frac{R+\Delta R}{R+G+B+\Delta R+\Delta G+\Delta B} \\ g_2 &= \frac{G+\Delta G}{R+G+B+\Delta R+\Delta G+\Delta B} \\ b_2 &= \frac{B+\Delta B}{R+G+B+\Delta R+\Delta G+\Delta B} \end{aligned}$$

由于当光照发生变化时, 有

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta G}{G} = \frac{\Delta B}{B} = K, \text{ 其中 } K \text{ 是常数}$$

从而有

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{R(1+K)}{(R+G+B)(1+K)} = r_2 \\ g_1 &= \frac{G(1+K)}{(R+G+B)(1+K)} = g_2 \\ b_1 &= \frac{B(1+K)}{(R+G+B)(1+K)} = b_2 \end{aligned}$$

在实际应用中, 由于摄像机的成像条件等因素的干扰会导致上式不成立, 但采用归一化颜色分量相对其它特征而言, 能在一定程度上克服光照强度变化、阴影等不可预知的因素对图像分割算法造成的影响<sup>[17]</sup>。

### 3.3.2 图像灰度化

由对 rgb 颜色模型分析可知, 如果光源只发生强度变化, 那么的反射光的成分不

变。经过上述的色彩校正方法预处理后能基本消除光照色彩的变化对图像的影响,使得物体能基本恢复到本身所固有的颜色特征。在农田环境图像中,只存在农作物区域和非农作物区域,两个区域之间的色彩区别很明显,农作物区域的颜色 RGB 值中 G 分量明显偏大  $G > R$  且  $G > B$ ,而非农作物区域的 R、G、B 值不存在上述特点,因此可以利用超绿特征值  $2 \times G - R - B$  以及农作物区域  $G > R$  且  $G > B$  的特征进行图像的灰度化,可以得到农作物区域较非农作物区域亮度较明显的灰度图像,方便图像的分割。具体算法如下:

对图像中每一个像素  $f(i, j)$

IF  $G(i, j) > R(i, j)$  AND  $G(i, j) > B(i, j)$

$C(i, j) = 2 \times G(i, j) - R(i, j) - B(i, j)$

IF  $C(i, j) > 255$  THEN  $C(i, j) = 255$

ELSE IF  $C(i, j) < 0$  THEN  $C(i, j) = 0$

ENDIF

$p(i, j) = C(i, j)$

ENDIF

其中  $f(i, j)$  为图像中  $(i, j)$  位置处的像素值,  $R(i, j)$ 、 $G(i, j)$ 、 $B(i, j)$  分别为  $f(i, j)$  的 R、G、B 三分量值。 $p(i, j)$  为处理后  $(i, j)$  处的灰度值,  $C(i, j)$  存放灰度值的中间变量。

利用常规的过绿特征值  $2 \times G - R - B$  对图像进行灰度化在场景受光照相对均匀的情况下,可以取得不错的效果,但是,当场景的光照强度不均匀,比如受阴影的影响时,阴影部分目标像素的过绿特征值可能很小,这样在就会产生错误的分割。因此利用归一化的过绿特征值  $2 \times g - r - b$  作为图像灰度化的依据,在一定程度上可以避免出现上面的问题,使误分割率减小。本文利用上述归一化过率特征值对彩色图像进行灰度化,具体算法如下:

对图像中每一个像素  $f(i, j)$

IF  $G(i, j) > R(i, j)$  AND  $G(i, j) > B(i, j)$

$$r(i, j) = \frac{R(i, j)}{R(i, j) + G(i, j) + B(i, j)}$$

$$g(i, j) = \frac{R(i, j)}{R(i, j) + G(i, j) + B(i, j)}$$

$$b(i, j) = \frac{R(i, j)}{R(i, j) + G(i, j) + B(i, j)}$$

$$c(i, j) = \frac{2 \times g(i, j) - r(i, j) - b(i, j)}{0.001}$$

IF  $c(i, j) > 255$  THEN  $c(i, j) = 255$

ELSE IF  $c(i, j) < 0$  THEN  $c(i, j) = 0$

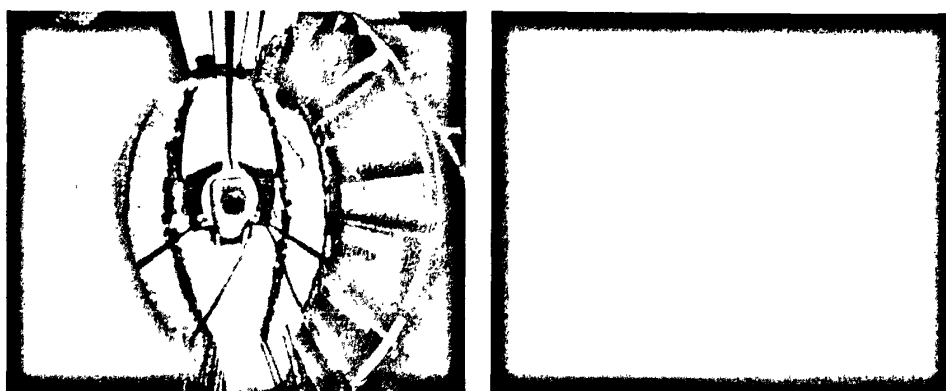
ENDIF

$p(i, j) = c(i, j)$

ELSE  $p(i, j) = 0$

ENDIF

其中  $f(i, j)$  为图像中  $(i, j)$  位置处的像素值,  $R(i, j)$ 、 $G(i, j)$ 、 $B(i, j)$  分别为  $f(i, j)$  的 R、G、B 三分量值。 $R(i, j)$ 、 $G(i, j)$ 、 $B(i, j)$  分别为 R、G、B 三分量的归一化值。 $p(i, j)$  为处理后  $(i, j)$  处的灰度值,  $c(i, j)$  存放灰度值的中间变量, 结果如图 3-11 所示。



(a) 原图像

(b) 归一化过绿特征值灰度图像

图 3-11 使用归一化过绿特征值进行图像灰度化结果

Fig. 3-11 The gray level image using the excess green feature

### 3.3.3 图像二值化

在数字图像中,除了彩色图像、灰度图像,二值图像也占有重要的地位,特别是在一些图像分析处理领域,为了分析图像的特征,常常需要从图像中分离出目标物体,从而把图像看作仅由对象部分区域与背景部分区域所构成。图像二值化就是将图像分成对象与背景两部分的一种操作。

最常用的分割方法是利用灰度值的大小进行二值化。设原始图像为  $f(x,y)$ , 以一定的准则确定一个灰度值  $t$  作为分割阈值,然后将大于等于  $t$  值的像素判为对象并用 1 来表示,而将小于  $t$  值的像素判为背景并用 0 来表示,如式 3.3 所示。

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & f(x,y) \geq t \\ 0 & f(x,y) < t \end{cases} \quad \cdots (3.3)$$

或者反之,对象与背景像素的大小关系对调。

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & f(x,y) \leq t \\ 0 & f(x,y) > t \end{cases} \quad \cdots (3.4)$$

二值化操作实际上是一种特殊的灰度变换。它的变换函数是两条水平线,一条幅值为 0,另一条幅值为 1,重要的问题是阈值确定方法。确定阈值的方法称为阈值选择,有多种选取阈值的方法,如人机交互、简单二值化、 $p$ -参数法、(直方图)波形分析法、平均微分直方图法、判别函数法、直接计算法、综合法与局部阈值法等<sup>[55]</sup>。

在一些系统应用程序中,人机交互是使用相当广泛并使用十分容易实现的手段。人们可以通过键盘、鼠标等输入设备直接向应用程序输入或者选择所需的数据,程序做出相应的反应。这种方法的缺点是离不开人工干预,难以实现自动化。

最简单的办法是通过视觉软件事先确定好分割的阈值,采用固定的阈值将图像分割成两部分,这种方法在光照条件稳定的环境下可以达到很好的分割效果,又易于实现,因此在环境可控的工业机器视觉系统上被广泛采用。但是,在农业应用领域,环境不可控制,采用这种方法在一种光线下选择的阈值,在另一种光照条件下往往难以取得满意的效果,且同一幅场景图像中光照往往不均匀,更加剧了分割的难度,因此,这种方法不适合在农业应用领域使用。

在灰度图像的直方图中,假定把灰度值的集合用阈值  $t$  分成两组( $t$  以上与  $t$  以下)。这两组值对于特定的判别函数得到相应的结果。阈值  $t$  由 0 变化到 255,判别函数的值构成一条曲线,阈值就取曲线的最高点(或最低点)所在位置的灰度值。使用最为广泛的方法有大津法、最小误差法和最小偏态法等。这些方法的相对于固定阈值法的

优点在于它们可以根据环境的变化自动确定相对该环境条件下最佳的分割阈值,因此很适合应用在环境不可预知的农业机器视觉系统上。本文利用类间方差法选择一幅图像的最佳分割阈值对农田作物行环境图像进行二值化处理。

根据农业作业环境的特点,可以把农作物行看成前景,把其它的看成背景,这样整个农业作业环境图像可以看成由前景作物行和背景组成。最大类间方差法以最佳门限将图像直方图分割成两部分,使两部分类间方差取最大值,即分离性最大<sup>[56]</sup>。最大类间方差法的优点是能根据图像的像素值自动确定图像二值化分割的阈值,改善了人工设定阈值的不稳定性缺点。

最大类间方差法的基本原理是,对一幅灰度图像,取某个灰度值,以它为分界将图像分为灰度值大于和小于等于该灰度值两类,分别计算这两类中的像素个数及平均灰度值。然后,计算它们的类间方差,最后取所有灰度的类间方差中最大值对应的灰度为阈值。类间方差的计算公式如下:

$$w(i) = n_1(i)n_2(i)[v_1(i) - v_2(i)]^2 \quad \dots (3.5)$$

式中:  $n_1(i)$ ,  $n_2(i)$  分别为灰度小于等于  $i$  的像素与大于  $i$  的像素的个数,  $v_1(i)$ ,  $v_2(i)$  分别为它们的平均值。

$$thre = \text{Max}(w(i)) \quad \dots (3.6)$$

式 3.6 的意思是,取  $w(i)$  中的最大值时的下标,即对应的灰度值,作为二值化的分割阈值。 $w(i)$  实际上是一个以灰度值为自变量的函数,求阈值就是找出函数值取最大值时对应的灰度值。利用最大类间方差法对灰度图像进行二值化,结果如图 3-13 所示,对应的分割阈值选取过程如图 3-12 所示。

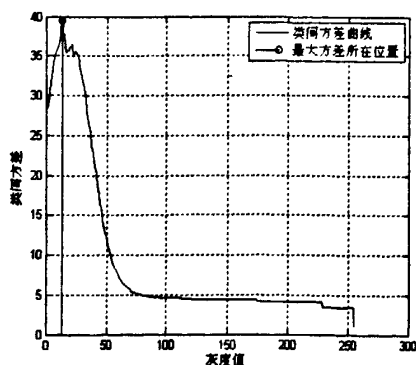


图 3-12 最大类间方差法灰度—方差图

Fig. 3-12 The gray level—variance figure





图 3-13 利用最大类间方差法二值化图像

Fig. 3-13 The binary image using the OTSU algorithm

### 3.4 滤波处理

图像在采集处理过程中,不可避免地受到噪声的干扰,导致在分割后的二值图像中存在误分割的像素。如果对二值化后的图像直接进行下一步处理,务必使图像的处理时间增加,且会影响图像的识别效果。因此,在对图像进一步处理之前需要进行滤波处理,以消除或减少噪点。

二值化后的图像中最主要的噪点形式表现为单块孤立的噪声点,一般农作物块比噪点像素块要大得多,利用这一特性就可以利用中值滤波和二值形态学的腐蚀运算进行滤波处理。

中值滤波:中值滤波<sup>[57]</sup>是图像平滑中有特殊功效的处理方法,属于非线性信号处理方法。它通过从图像中的某个采样窗口取出奇数个数据进行排序得出结果。常用的几种采样窗口如图 3-14 所示,每个窗口中都有奇数个点。中值是指将窗口中奇数个数据按大小顺序排列后处于中心位置的那个数。中值滤波是以窗口的中值作为处理的结果。这种算法用在灰度图像上则可以起到平滑图像的效果,用在二值图像中则可以消除脉冲干扰和孤立噪声,同时对克服图像细节的模糊特别有效。但对于一些细节多,特别是点、线、尖顶细节多的图像不宜采用中值滤波。分别采用图 3-14 所示的采样窗口对二值图像进行滤波的结果如图 3-15 所示。

不同的采样窗口滤波的效果不同,窗口太小,会形成欠滤波,窗口太大会形成过滤波,因此,实际采样窗口的选择需根据具体的应用,通过大量的试验确定。

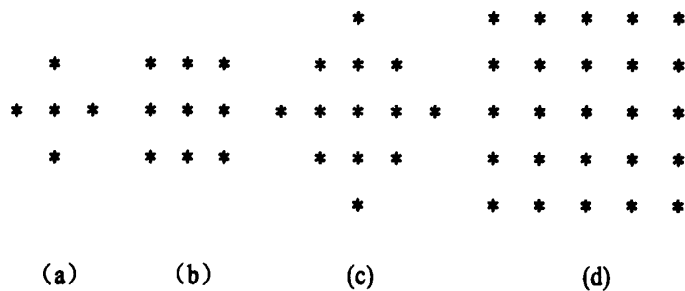


图 3-14 中值滤波的几种常用窗口

Fig. 3-14 The common windows of the middle filter

不同采样窗口的滤波效果:

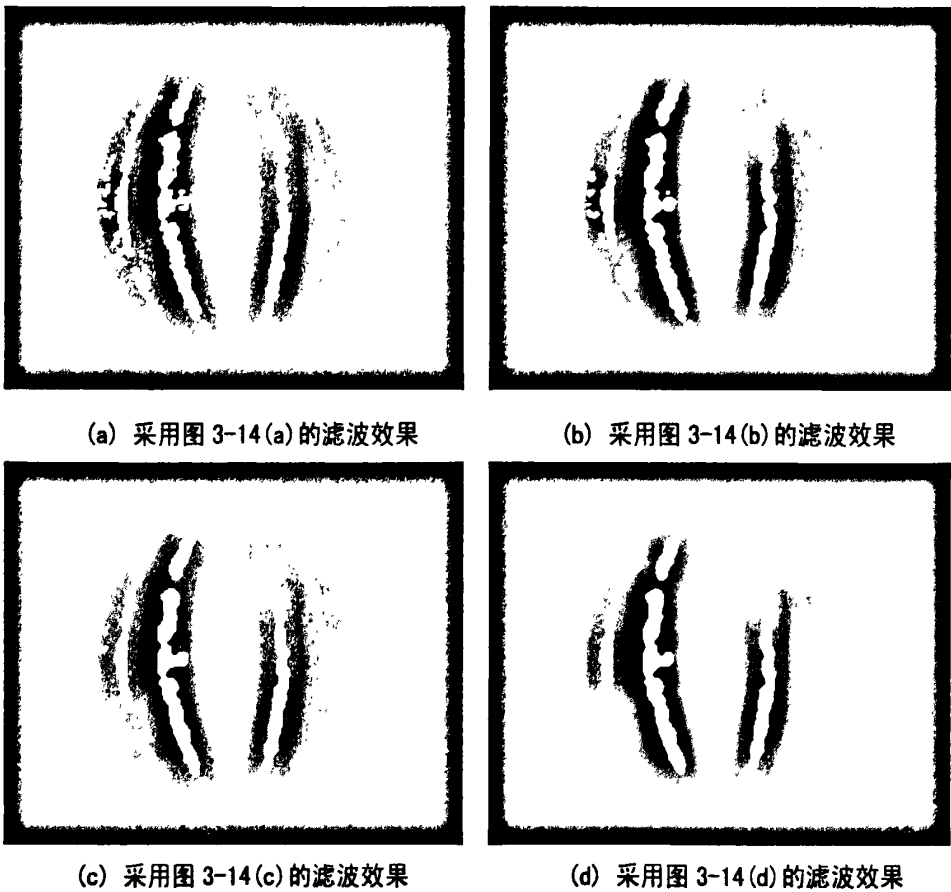


图 3-15 不同采样窗口的滤波效果

Fig. 3-15 The result of the filter using different windows

形态学一般是生物学中研究动物和植物结构的一个分支。人们后来用数学形态学表示以形态为基础对图像进行分析的数学工具。它的基本思想是用具有一定形态结构的结构元素去度量和提取图像中的对应形状以达到对图像分析和识别的目的<sup>[58]</sup>。

数学形态学的基本运算有 4 个：膨胀、腐蚀、开启和闭合。它们在二值图像和灰

度图像中各有特点。基于这些基本运算还可以推导和组合成各种数学形态学使用算法。

二值形态学中的运算对象是集合，但实际运算中当涉及两个集合时并不把它们看作是互相对等的。一般设  $A$  为图像集合， $B$  为结构元素，数学形态学是用  $B$  对  $A$  进行操作。选取的结构元素不同会得到不同的效果。形态学的腐蚀和开运算同样有去除噪点的功能，下面介绍它们各自的原理和特点。

膨胀：设  $A$  为需要进行操作的图像集合， $B$  是根据实际情况而选择的结构元素，本质上也是一个图像集合。用  $\oplus$  表示腐蚀的算符， $A$  用  $B$  来腐蚀写作  $A \oplus B$ ，其定义为：

$$A \oplus B = \{x | [(B)_x \cap A] \subseteq A\}$$

膨胀运算图解如图 3-16 所示。

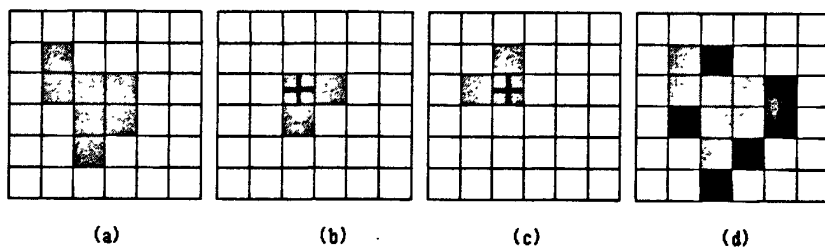


图 3-16 膨胀运算图解

Fig. 3-16 inflate algorithm

腐蚀：用  $\ominus$  表示腐蚀的算符， $A$  用  $B$  来腐蚀写作  $A \ominus B$ ，其定义为：

$$A \ominus B = \{x | (B)_x \subseteq A\}$$

上述表明  $A$  用  $B$  腐蚀的结果是所有  $x$  的集合，其中  $B$  平移  $x$  后仍在  $A$  中。换句话说，用  $B$  来腐蚀  $A$  得到的集合是  $B$  完全包括在  $A$  中时  $B$  的原点位置的集合。腐蚀运算的图解如图 3-17 所示。

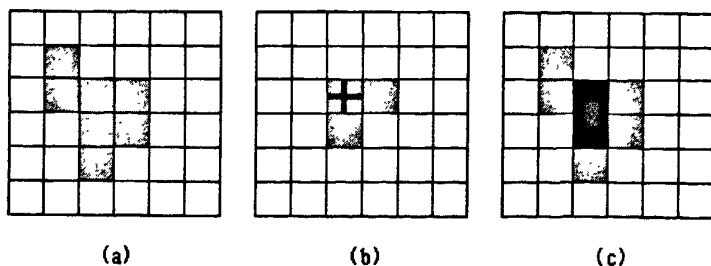


图 3-17 腐蚀运算图解

Fig. 3-17 erode algorithm

开启：用 $\circ$ 表示开启的算符， $A$ 用 $B$ 来开启写作 $A \circ B$ ，其定义为：

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

闭合：用 $\bullet$ 表示开启的算符， $A$ 用 $B$ 来开启写作 $A \bullet B$ ，其定义为：

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

腐蚀运算滤波效果：

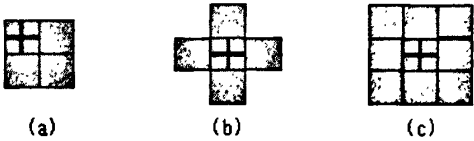


图 3-18 腐蚀结构元素

Fig. 3-18 The elements of the erode algorithm

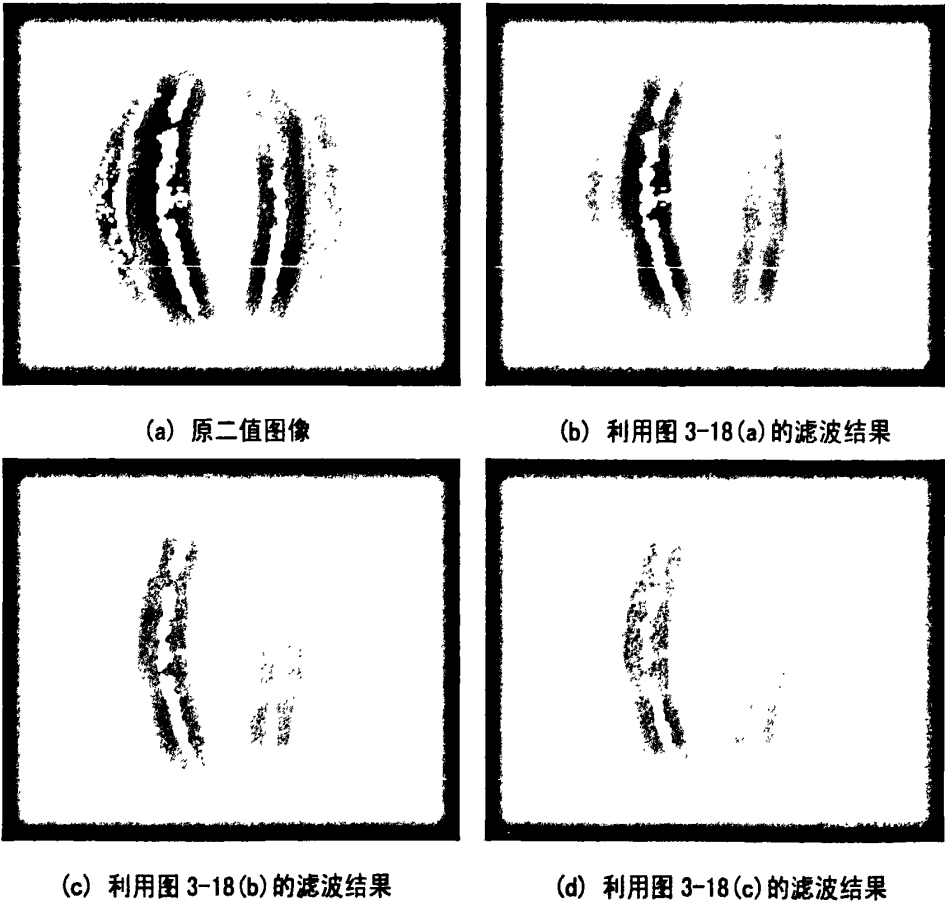


图 3-19 腐蚀滤波效果图

Fig. 3-19 The result of image using erode algorithm

(a)原图像 (b) (c) (d) 分别对应 3-18 (a) (b) (c) 腐蚀结构元素的滤波效果

由图 3-19 可以看出腐蚀运算在消除图像的同时,也使图像目标像素减少。因此,单独运用腐蚀运算往往不合适。虽然可以由腐蚀、膨胀等二值图像形态学基本运算组合成较复杂的滤波器,但是对于全景视觉成像系统的特点——物体形状发生不可预知的变形,很难设计出合适的滤波器。因此,本文选择 3-14(c)的采样窗口的中值滤波器对二值化后的图像进行滤波处理,削弱脉冲噪声的影响。

### 3.5 对农作物区域进行距离和角度变换

折反射全景视觉系统中的凸面反射镜使得对空间场景的压缩而变形,本来物理空间中具有直线特征的农作物行经全景视觉系统成像后存在很严重的变形,对后期导航线的提取很不利,因此,利用第二章的距离角度标定结果对目标像素进行适当的变换以恢复农作物行的空间直线特征很有必要。

由于直线经过折反射全景视觉系统成像后呈现不同程度的变形,呈一定弧度的曲线,这就给识别这些特征带来了困难。本文根据目标像素点距成像中心点的像素距离与该点对应的实际物点距机器人中心的实际距离之间的关系和它们之间对应的角度关系对农作物行的目标像素进行适当的转换,使其尽可能地恢复空间直线特征,即将这些目标像素点变换到像素距离和实际距离呈线性变换关系的图像空间,这里变换后的图像空间的大小和原图像空间大小相等,为  $320 \times 240$ 。由于硬件条件的限制,全景视觉系统的观察范围有所限制,根据硬件条件的不同而不同。经测试,本文采用的全景视觉系统在 4 米范围外由于分辨率下降严重导致距离标定不准确,因此只对 4 米范围内的目标像素点进行角度和距离变换,对工作在农作物行环境背景下的农业机器人来说,可以满足要求。根据图 2-1 和 2-2 所示的坐标关系,得出式 3.7 的变换公式。

$$\begin{cases} u = \frac{realdistx}{4000} \times 120 + u_0 \\ v = v_0 - \frac{realdisty}{4000} \times 120 \end{cases} \quad \dots (3.7)$$

式中:  $u, v$  为变换后的像素坐标,  $u_0, v_0$  为成像中心点,这里取图像的中点,  $realdistx$ ,  $realdisty$  为目标像素点在坐标轴方向投影对应的实际距离。本文对机器人周围 4 米范围内的目标像素进行变换。

具体变换算法如下:

新建标记数组  $newimage[height][width]$ , 并初始化为 0

对每一个农作物目标像素  $f(i, j)$

计算该目标像素对应的物点距离机器人的实际距离  $realdist = GetRealDist(i, j)$

IF  $realdist < 4000$

$realdistx = realdist \times \cos(angle);$

$realdisty = realdist \times \sin(angle);$

$u = \frac{120 \times realdist}{4000} + u_0;$

$v = v_0 - \frac{120 \times realdisty}{4000};$

新图像空间作标记  $newimage[v][u] = 1;$

ELSE continue;

ENDIF

回写

IF  $newimage[v][u] == 0$  THEN  $pbuffer[v][u] = 0;$

ELSE IF  $newimage[v][u] == 1$  THEN  $pbuffer[v][u] = 255;$

ENDIF

其中,  $newimage[height][width]$  是用来标记新图像空间对应位置的二维标记数组, 维数与图像空间的大小相同, 即  $320 \times 240$ 。  $f(i, j)$  为图像中  $(i, j)$  位置处的像素值。  $realdist$  就是图像位置  $(i, j)$  处的像素点对应的物点到机器人中心点的实际距离。  $realdistx$ ,  $realdisty$  分别是  $realdist$  在机器人坐标系中 X 轴和 Y 轴的投影值。  $pbuffer$  为原图像空间内存空间。变换结果如图 3-20 所示。

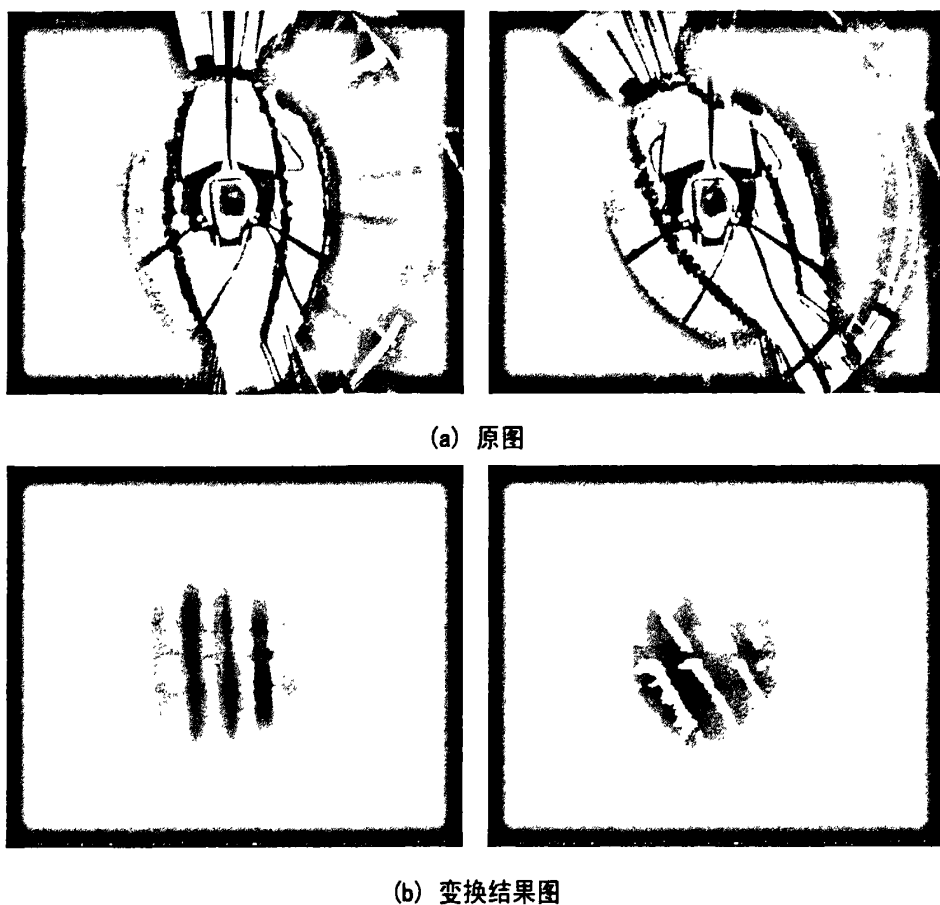


图 3-20 距离角度变换结果图

Fig. 3-20 The result of the distant and angle transform

### 3.6 本章小结

本章详细介绍了全景视觉系统的图像采集和处理的过程，针对农作物行环境的特点，设计了合适的图像处理方法，得到了较理想的农作物和非农作物的二值图像，为导航路径线的提取做好了准备工作。

## 第四章 导航参考路径与导航控制参数的提取

农业移动机器人的自然导航路径主要有田埂、田垄、作物行、犁沟、行茬等几种主要的形式<sup>[59,60,61]</sup>，应根据农业机器人不同的作业任务、不同的作业环境选择合适的导航特征作为导航路径。虽然在不同的环境中选择的不同的自然导航特征作为农业机器人的导航路径，但是导航的方法非常相似。

农作物行主要是在作物的生长阶段需要对其进行监测、施肥、喷药和除草等作业任务时农业机器人的选择的主要的自然导航特征，它占据大部分农作物生长周期，因此得到了重视和发展，许多研究者都以此为目标进行农业机器人的自主导航试验研究。

本章首先建立模拟的农作物行环境，结合全景视觉系统的特点，对其作一定的假设，比如农作物的高度，行之间的距离等。然后通过第三章获取的农作物行的二值图像，利用 Hough 变换得到最有可能的作物行直线在图像空间中的角度信息，利用数字罗盘事先确定作物行的大概的方向，然后根据识别出的直线角度信息、数字罗盘初始航向角度值和当前的航向角度值，确定机器人的导航控制参数——航向偏差  $angle\_err$ 。再利用航向偏差  $angle\_err$  信息和机器人中心点到各条可能的导航参考线的距离计算另一个导航控制参数——横向偏差  $distant\_err$ 。

具体算法流程如图 4-1 所示。

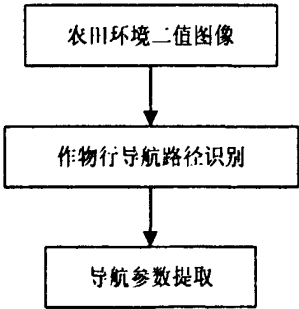


图 4-1 导航路径和导航参数提取流程图

Fig. 4-1 The flow chart of extracting crop rows and navigation parameters

### 4.1 建立模拟的农田作物行环境

农作物以行为单位条播种植，移动机器人在行之间行走，机器人的尺寸为  $500\text{mm} \times 520\text{mm} \times 600\text{mm}$ ，受机器人尺寸影响，假设农作物行间距为  $800\text{mm}$ ，如图 4-2 所示。其中沿作物行方向行走导航是机器人最主要的任务之一，本章在建立农作物环境模型



的基础上进行导航路径识别和导航参数提取。

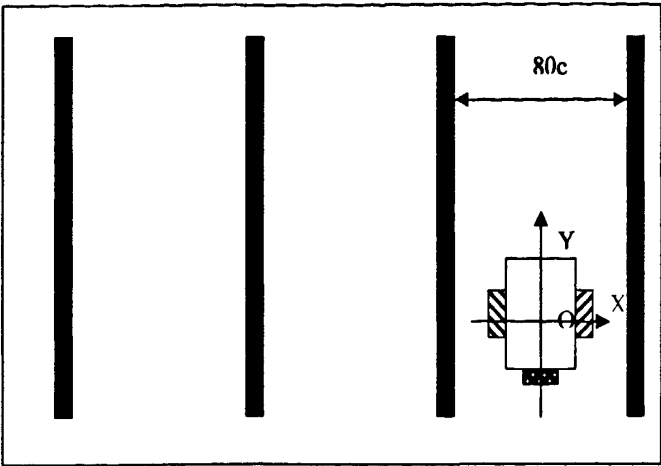


图 4-2 农田环境模拟结构图

Fig. 4-2 The simulate structure of the cropland environment

4.2 导航参考路径提取

Hough 变换<sup>[62]</sup>是一种特殊的在不同空间之间进行的变换。设在图像空间有一个目标，其轮廓可以用代数方程表示，代数方程中既有图像空间坐标的变量也有属于参数空间的参数。Hough 变换就是图像空间和参数空间之间的一种变换。

基于 Hough 变换，可利用图像全局特性将目标边缘像素连接起来组成目标区域的封闭边界，或直接对图像中已知形状的目标进行检测。Hough 变换的主要优点是：由于利用了图像的全局特性，所以受噪声和边界间断的影响较小，鲁棒性好。

Hough 变换的基本原理是利用点—线对偶性，如图 4-3 所示，在图像空间 XOY 里所有过点 (x, y) 的直线都满足方程：

$$y = px + q \tag{4.1}$$

式中：p 为斜率，q 为截距。如果对 p 和 q 建立一个参数空间，则 (p, q) 表示参数空间 POQ 中的一个点。这个点和式 4.1 表示的直线是一一对应的，即 XOY 空间中的一条直线对应 POQ 空间中的一个点。另一方面，式 4.1 也可以写成：

$$q = -px + y \tag{4.2}$$

式 4.2 代表参数空间 POQ 中的一条直线，此时它对应 XOY 中的一个点 (x, y)。

图 4-3 中 (a) 图为图像空间，(b) 图为参数空间。在图像空间 XOY 中过点 (x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>) 的

通用直线方程按式 4.1 可写为  $y_i = px_i + q$ ，也可按式 4.2 写为  $q = -px_i + y_i$ ，后者表示在参数空间  $POQ$  里的一条直线。同理过点  $(x_j, y_j)$  有  $y_j = px_j + q$ ，也可写成  $q = -px_j + y_j$ ，它表示在参数空间  $POQ$  里的另一条直线。设这两条直线在参数空间  $POQ$  里点  $(p', q')$  相交，这里点  $(p', q')$  对应图像空间  $XOY$  中一条过点  $(x_i, y_i)$  和  $(x_j, y_j)$  的直线，因为它们满足  $y_j = p'x_j + q'$  和  $y_i = p'x_i + q'$ 。由此可见图像空间  $XOY$  中过点  $(x_i, y_i)$  和  $(x_j, y_j)$  的直线上的每个点都对应参数空间  $POQ$  里的一条直线，这些直线都相交于点  $(p', q')$ 。

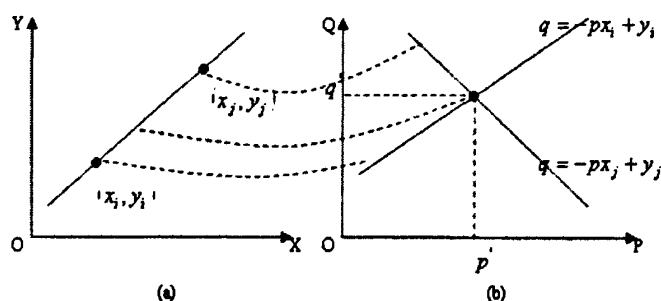


图 4-3 图像空间和参数空间中点和线的对偶性

Fig. 4-3 Duality property of point versus line

由此可知在图像空间中共线的点对应在参数空间里相交的线。反过来，在参数空间中相交于同一个点的所有直线在图像空间里都有共线的点与之对应。这就是点—线的对偶性。Hough 变换根据这些关系把在图像空间中的检测问题转换到参数空间里，通过参数空间里进行简单的累加统计完成检测任务。

式 4.1 和式 4.2 所给图像空间和参数空间中点和线的对应性就是点—线对偶性。根据点线对偶性可将  $XOY$  空间中对直线的检测转化为在  $POQ$  空间中对点的检测。

设已知  $XOY$  空间的一些点，则利用 Hough 变换检测它们是否共线的具体步骤如下：

1、对参数空间中参数  $p$  和  $q$  的可能取值范围进行量化，根据量化结果构造一个累加数组  $A(p_{\min}: p_{\max}, q_{\min}: q_{\max})$ ，如图 4-4 所示，并初始化为零；

2、对每个  $XOY$  空间中的给定点让  $p$  取遍所有可能值，用式 4.2 计算出  $q$ ，根据  $p$

和  $q$  的值累加  $A$ :  $A(p, q) = A(p, q) + 1$ ;

3、根据累加后  $A$  中最大值所对应的  $p$  和  $q$ , 由式 4.1 定出  $XOY$  中的一条直线,  $A$  中的最大值代表了在此直线上给定点的数目, 满足直线方程的点就是共线的。

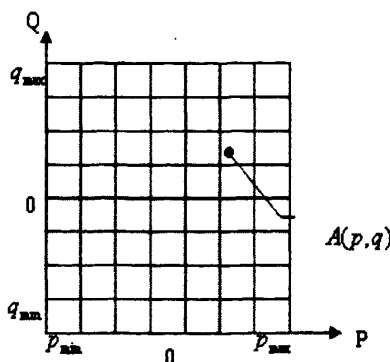


图 4-4 参数空间里的累加数组

Fig. 4-4 The accumulating array of the parameter space

Hough 不仅可用来检测直线, 还可以用来检测满足解析式  $f(x, c) = 0$  形式的各类曲线, 如检测圆  $(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2$ , 并把曲线上的点连接起来。换句话说, 如果能写出曲线方程, 就可以利用 Hough 变换检测。

在使用  $y = px + q$  形式的直线方程时, 如果直线接近竖直方向, 则会由于  $p$  和  $q$  的值都可能接近无穷大而使计算量大增 (累加器的尺寸会很大), 不便于用计算机实现计算。因此, 对于任意方向和任意位置直线的检测, 实际应用中, 往往采用极坐标  $(\rho, \theta)$  作为变换空间, 直角坐标到极坐标的转换如图 4-5 所示。

根据直线的极坐标方程  $\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$ , 原图像空间中的点对应新参数空间  $\rho\theta$  中的一条正弦曲线, 即原来的点—直线对偶性变成了现在的点—正弦曲线对偶性, 如图 4-6 所示。检测在图像中共点的线需要在参数空间里检测正弦曲线的交点。具体就是让  $\theta$  遍取  $\theta$  轴上所有可能的值, 根据直线的极坐标方程算出对应的  $\rho$ 。再根据  $\theta$  和  $\rho$  的值 (设都已经取整) 对累加数组  $A$  累加, 由  $A(\theta, \rho)$  的数值得到共线点的个数。这里在参数空间建立累加数组的方法与上述直角坐标系下的方法类似, 只是无论直线如何变化,  $\theta$  和  $\rho$  的取值范围都是有限区间。

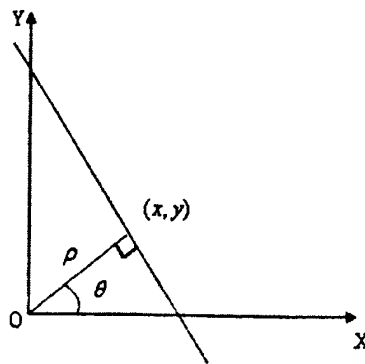


图 4-5 直线的极坐标表示

Fig. 4-5 The express of line in polar coordinate

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$$

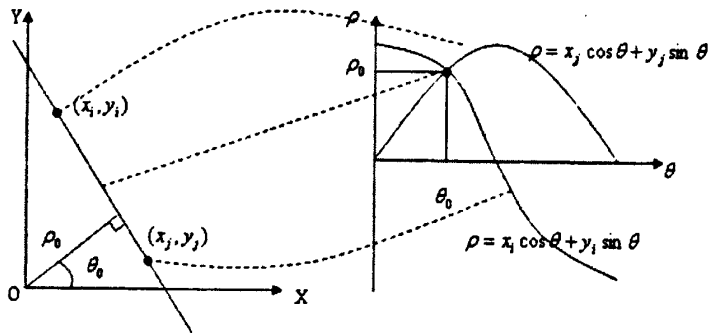


图 4-6 图像空间中的点和其在参数空间里对应的正弦曲线

Fig. 4-6 Line denoted in polar coordinate and duality property of point versus sinusoid

传统的 Hough 变换采用穷尽式搜索，导致算法复杂性高，且峰值点检测经常出现误检测问题，在实际使用时往往需要对传统的 Hough 变换进行优化处理。主要在以下几个方面进行改进：

1、参数空间的取值范围的确定：参数空间的范围由原始图像的大小决定，设原始图像的分辨率为  $W \times H$ ，那么选择极坐标下参数空间为  $(\rho, \theta)$ ，其中  $-\sqrt{W^2 + H^2} \leq \rho \leq \sqrt{W^2 + H^2}$ ， $0 \leq \theta < 180$ 。由于参数空间的大小由原始图像大小决定，因此是一定的，只需要对  $\rho$  和  $\theta$  进行量化处理。如果  $\rho$  和  $\theta$  量化得过细，那么计算量将增大；如果量化的过疏，计算量减小，但是又会影响到系统的准确性。因此，需要根据实际的情况，兼顾各个方面，取合适的量化值。一般原始图像尺寸较大则量化应该稀疏点，原始图像尺寸较小则应只要考虑准确性的要求。

2、减少图像数据量的优化方法：一般 Hough 变换是针对的是图像分割后的目标像素，而分割后的目标像素往往比较多，对于提取轮廓等信息的要求往往呈现出信息过剩的现象，因此可以通过适当地减少图像的目标像素来达到节省时间的目的，比如，如果要提取目标的形状特征，则可以先利用边缘提取或细化等方法进行预处理，以减少计算量，实际应用时应该根据实际情况而定。

3、对实现语言算法的优化：在 Hough 变换实现过程中存在大量的重复的计算工作，比如正弦和余弦计算。把这些计算预先计算好存放在计算机的内存中，在用到时利用查表操作即可。在计算机中正弦和余弦操作相比查表操作要耗时得多，这样便可以达到节省时间的效果，一般实现过程都应利用查表操作。

4、其它方法。概率 Hough 变换<sup>[63]</sup>、随机 Hough 变换<sup>[64]</sup>。

根据图像采集和处理结果，本文设计的基于 Hough 变换导航路径提取算法的步骤如下：

1、根据图像的尺寸（320×240）确定 Hough 变换参数空间的大小为  $\theta \in [0, 180)$ ， $\rho \in [-400, 400]$ 。并将参数空间按整数离散化为许多小格，这样根据离散的数目定义 Hough 变换累加器数组，并分配内存。

2、以 1 度为步长，对图像中每一个目标点  $(u_i, v_i)$ ，计算出对应的参数  $\rho = u_i \cos \theta + v_i \sin \theta$ ，所得的结果进行取整后落入某个小格内，使该小格的值加 1，这样遍历图像中所有的目标点后，便得到了该幅图像的空间累加器数组。

3、由于全景视觉系统看到机器人周围 360° 范围内的场景信息，因此，成像中可能有不止一条的作物行方向的导航路径信息。这和一般的单目俯视视觉导航系统不同。因此，这里对第二步得到的空间累加器数组作进一步的分析处理，对于条播的农作物，一般作物行方向直线上的目标像素数目要远大于其它的方向，利用这一特点，本文对每一个角度值统计在该角度上大于一定阈值的直线条数，最后选择直线最多的那个角度作为机器人导航路径的航向角度信息。

4、第三步的结果是得到了导航路径在计算机图像坐标系中的角度信息，在这个角度下可能存在多条可能的导航线，因此根据本文采用的实验平台的特点——机器人需在两作物行之间行走，选择最靠近机器人中心点的那条直线作为此刻机器人的参考导航路径，即在图像中离成像中心最近的那条直线。

5、根据检测到的直线参数在图像中绘制参考导航路径线。

导航路径提取算法流程如图 4-7 所示。图像识别结果如图 4-8 所示。

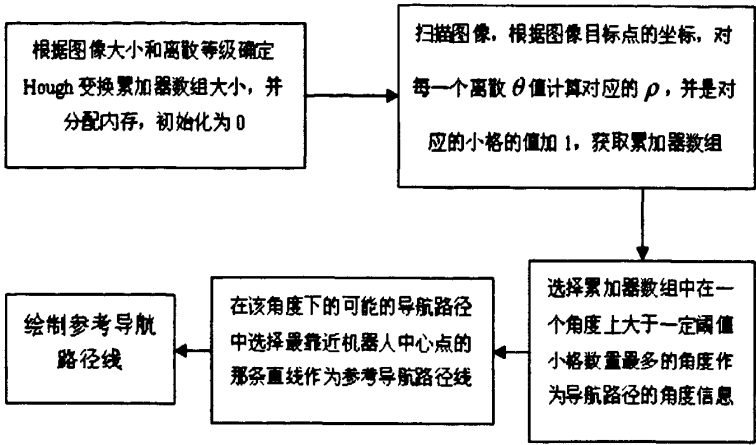


图 4-7 Hough 变换检测参考导航路径的算法流程

Fig. 4-7 The flow chart of the line detection using Hough transfer

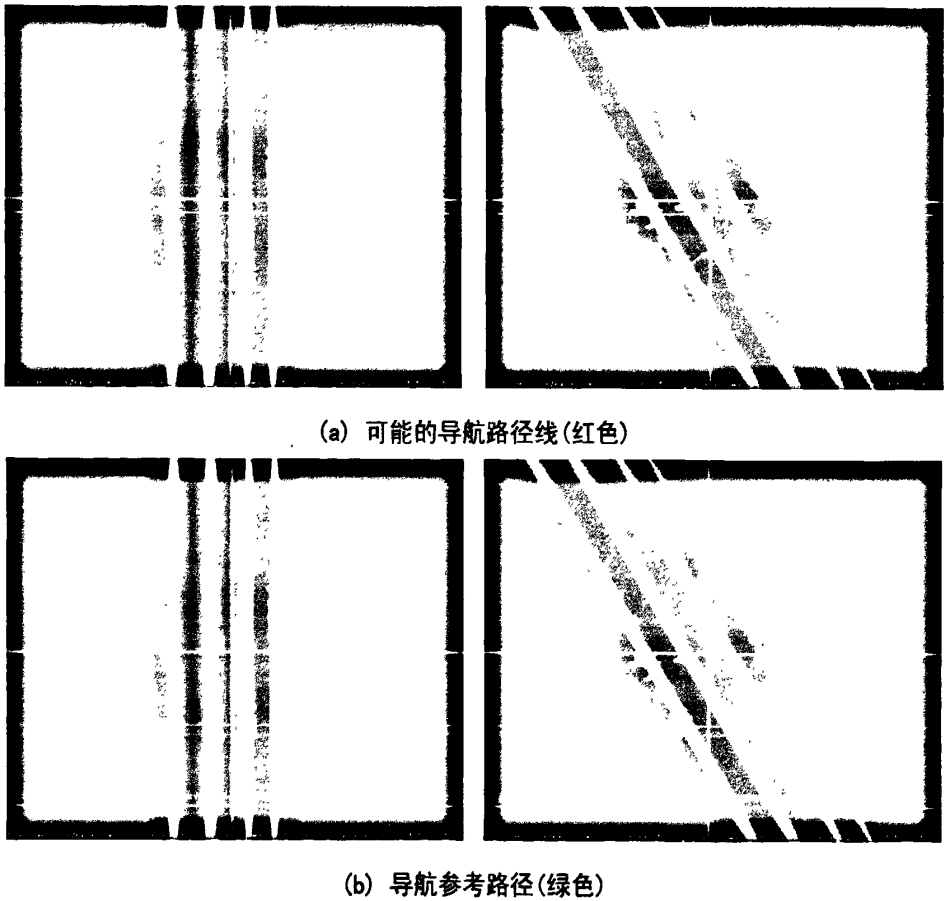


图 4-8 直线识别结果

Fig. 4-8 Line detection result

4.3 计算导航控制参数

农业移动机器人跟踪作物行路径自主行走，主要要获得机器人与路径的相对位姿关系，即航向偏差 `angle_err` 和横向偏差 `distant_err`。航向偏差是指机器人前进方向（机器人正前方向）与导航路径路径方向之间的差值；横向偏差是指机器人中心点距导航路径的垂直距离。

要计算机器人导航控制参数——航向偏差 `angle_err` 和横向偏差 `distant_err`，需要数字罗盘的先验航向角度信息作为参考。

数字罗盘的原理及作用：电子罗盘的工作原理是通过磁传感器感应地球磁场的磁分量，从而得出方位角度信息。可以为许多应用领域提供必要的角度信息，如天线定位、边扫描声纳、测量装置、机器人系统和自主导航车控制等。

虽然电子罗盘有很多优点并得到了广泛的应用，但是它容易受到外来环境磁场的干扰，从而使检测到的角度信息不准确，因此，在环境确定的、精确要求较高的场合需要进行标定。本文利用数字电子罗盘的航向角度信息作为农业机器人导航路径方向判断的参考信息，且环境多变，因此只需要罗盘提供一个参考信息，无需进行标定。

采用 PNI 公司的 TCM2.5 三维数字罗盘，如图 4-9 所示，这三维信息分别为方向角信息 NORTH，倾斜角 PITCH 和翻滚角 ROLL，如图 4-10 所示。本文只用到了方向角信息。相关参数如表 4-1 所示：

表 4-1 数字罗盘相关技术参数表

Table 4-1 The relational parameters of digital compass		
项目	参数	单位
方向角测量范围	0—360	度(°)
方向角精度	0.8	度(°)
方向角分辨率	0.1	度(°)
最高采样速率	20	次/秒
接口	RS232	

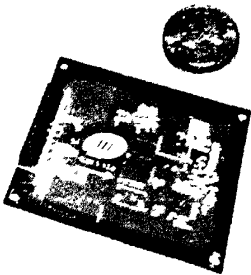


图 4-9 TCM2.5 数字罗盘

Fig. 4-9 The TCM2.5 digital compass

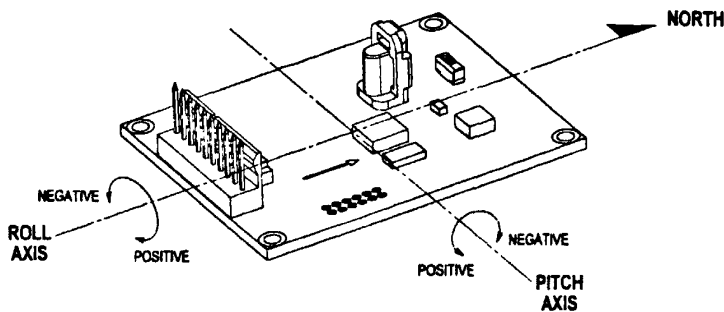


图 4-10 TCM2.5 数字罗盘结构图

Fig. 4-10 The structure of TCM2.5 digital compass

数字罗盘信息读取程序设计：TCM2.5 数字罗盘可以设置成连续读取模式，这样在模块上电后数字罗盘就会一直向串口发送数据，在上位机应用软件中就可以一直读取需要的信息，具体的开发流程如图 4-11 所示。信息格式为 go: \$C0.4P-0.6R0.7T19.6\*03，其中 C 和 P 之间的数据是需要的方向角信息。

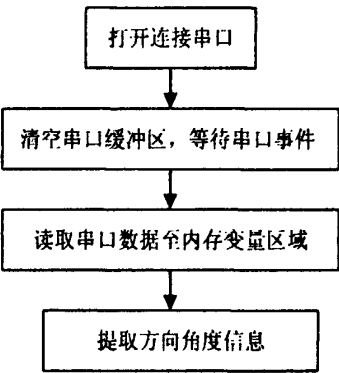


图 4-11 数字罗盘方向角信息串口读取流程图

Fig. 4-11 The flow chart of reading angle data

通过对农作物行环境的二值图像进行 Hough 变换得到最有可能的导航路径直线群，通过进一步处理得到一条最靠近机器人中心点的直线作为机器人导航的参考路径，由于机器人在两作物行之间行走，因此，进一步地把离导航参考路径一定距离的同方向的直线作为真正的机器人导航路径，如图 4-12 所示。真正的导航路径和导航参考路径的方向相同，它与机器人的前进方向的角度就是导航控制参数航向偏差  $angle\_err$ ，但是相对机器人成像中心的位置不同，机器人中心距导航路径线的距离就是导航控制参数横向偏差  $distant\_err$ 。下面详细描述导航控制参数航向偏差  $angle\_err$ ，横向偏差  $distant\_err$  的计算方法。



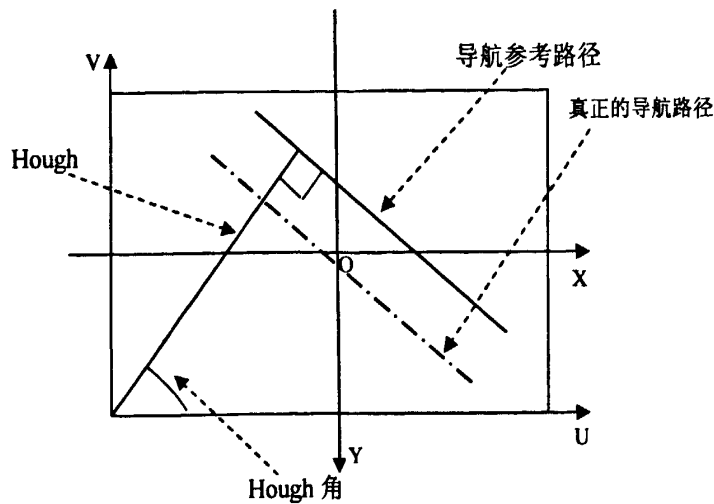


图 4-12 导航参考路径和真正导航路径的位置关系

Fig. 4-12 The relationship between the reference and the true navigation path

导航控制参数航向偏差  $angle\_err$  计算方法: 将农业机器人与导航参考路径线的位置分为图 4-13 所示的 (a1) 至 (a8) 共 8 种情况, 每种情况对应的图像分别如图 4-13 中 (b1) 至 (b8) 所示。根据 4.2 节得到的导航参考路径线在图像中的极坐标参数, 为方便叙述这里记该导航参考路径线的两个极坐标参数为 Hough 角和 Hough 距, 如图 4-12 所示。

首先利用数字罗盘初始角度 (平行于农作物行且同向时的角度) 对罗盘进行校零处理。再利用导航路径线的极坐标参数 Hough 角与校零后的罗盘值计算出导航控制参数机器人航向偏差  $angle\_err$ 。

根据导航参考路径的 Hough 角、先验数字罗盘角度值  $Lp\_Init$  (初始化时使机器人尽量平行于作物行且向着前进方向时数字罗盘的角度值) 和数字罗盘的当前值  $Lp\_Current$  即可以得到导航控制参数的航向偏差  $angle\_error$  的值。规定机器人相对导航路径线右偏为正, 左偏为负。

将罗盘角度信息按照图 4-14 所示方法进行校零处理。

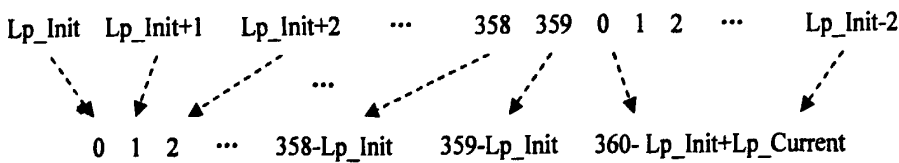


图 4-14 数字罗盘角度校零

Fig. 4-14 Zeroing the compass angle value

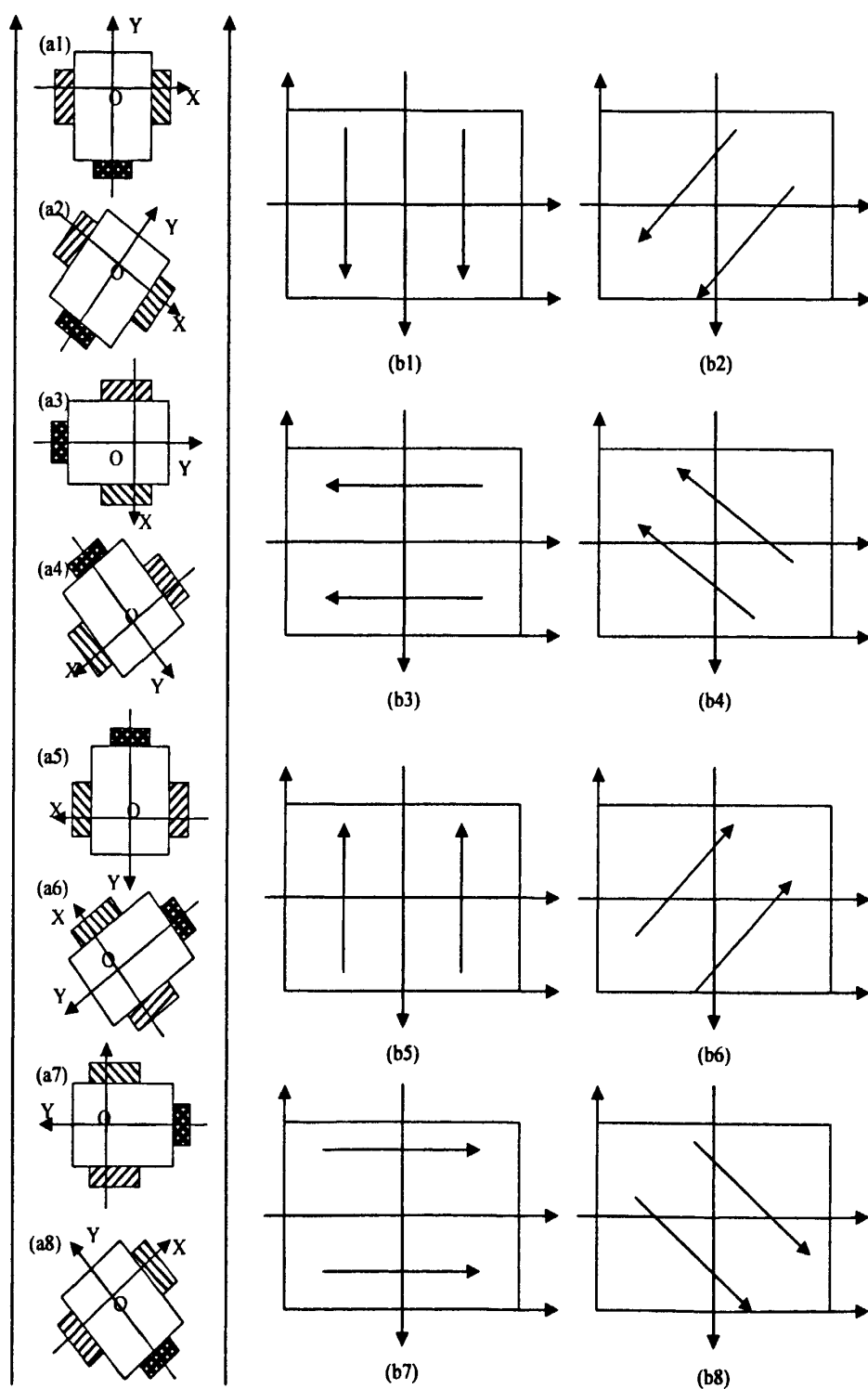


图 4-13 机器人与参考路径相对位置关系

Fig. 4-13 The relative relationship between the robot and the reference navigation path

根据 Hough 角将图中 (a1) 至 (a8) 分成 4 组, 每组的 Hough 角相同, 然后根据校零后的数字罗盘信息确定  $\text{angle\_err}$  的值。具体计算过程如图 4-15 所示。

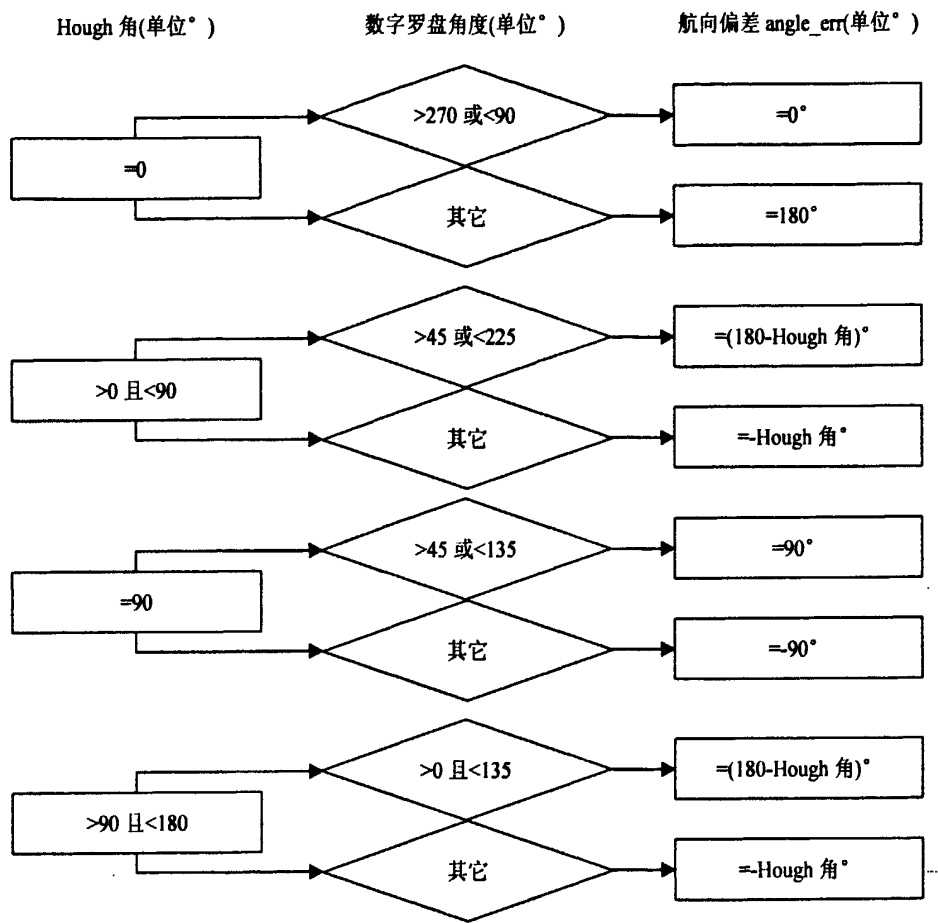


图 4-15 求取导航控制参数航向偏差  $\text{angle\_err}$  过程

Fig. 4-15 The course of computing the navigation parameter—angle error

导航控制参数横向偏差  $\text{distant\_err}$  计算方法: 计算以 Hough 角为方向经过中心点的直线的极坐标方程参数, 其中角度值和导航参考路径以及导航路径的角度值相同, 仍以 Hough 角表示。中心点到该直线的距离用  $\text{Center\_to\_Line}$  表示。根据导航控制参数航向偏差  $\text{angle\_err}$  和  $\text{Center\_to\_Line}$  与导航参考路径的 Hough 距之间的关系就可以确定导航控制参数横向偏差  $\text{distant\_err}$  的大小和方向。规定机器人在导航路径的左边为负, 右边为负。不失一般性, 选择航向偏差为零时进行分析, 如图 4-16 所示, 其它角度计算过程类似。

具体计算过程如下:

IF Hough 距  $< \text{Center\_to\_Line}$  //对应图 5-16 中的 L1 和 L2

IF  $\text{abs}(\text{Center\_to\_Line} - \text{Hough 距}) < \text{const}$  //对应图 5-16 中的 L2

```

distant_err = -(const - abs(Center_to_Line - Hough距));

ELSE                                     //对应图 5-16 中的 L1
    distant_err = abs(Center_to_Line - Hough距) - const;

ENDIF

ELSE                                     //对应图 5-16 中的 R1 和 R2
    IF abs(Center_to_Line - Hough距) < const //对应图 5-16 中的 R2
        distant_err = const - abs(Center_to_Line - Hough距);

    ELSE                                 //对应图 5-16 中的 R1
        distant_err = -(abs(Center_to_Line - Hough距) - const);

    ENDIF

ENDIF
    
```

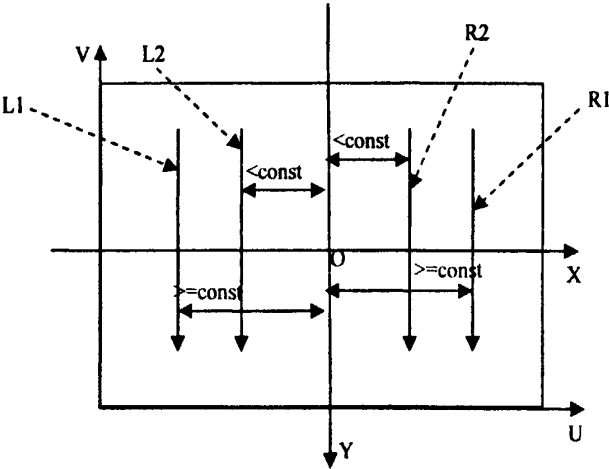


图 4-16 angle\_err 为零时导航参考路径线在图像中的位置示意图

Fig. 4-16 The navigation path position in image when the angle error equal to zero

这样就得到了农业机器人与导航路径之间的相对位姿关系，即导航控制参数航向偏差  $angle\_err$  和横向偏差  $distant\_err$  的大小。机器人控制系统就可以根据这两个导航控制参数进行推理决策，最终控制机器人按照预设的路径自主跟踪导航。为验证本章系统导航参考路径和导航参数的提取效果，分别采集机器人不同初始方向和位置的图片，识别结果如图 4-17 所示。导航控制参数的实验值和实测值比较结果如表 4-2 所示。

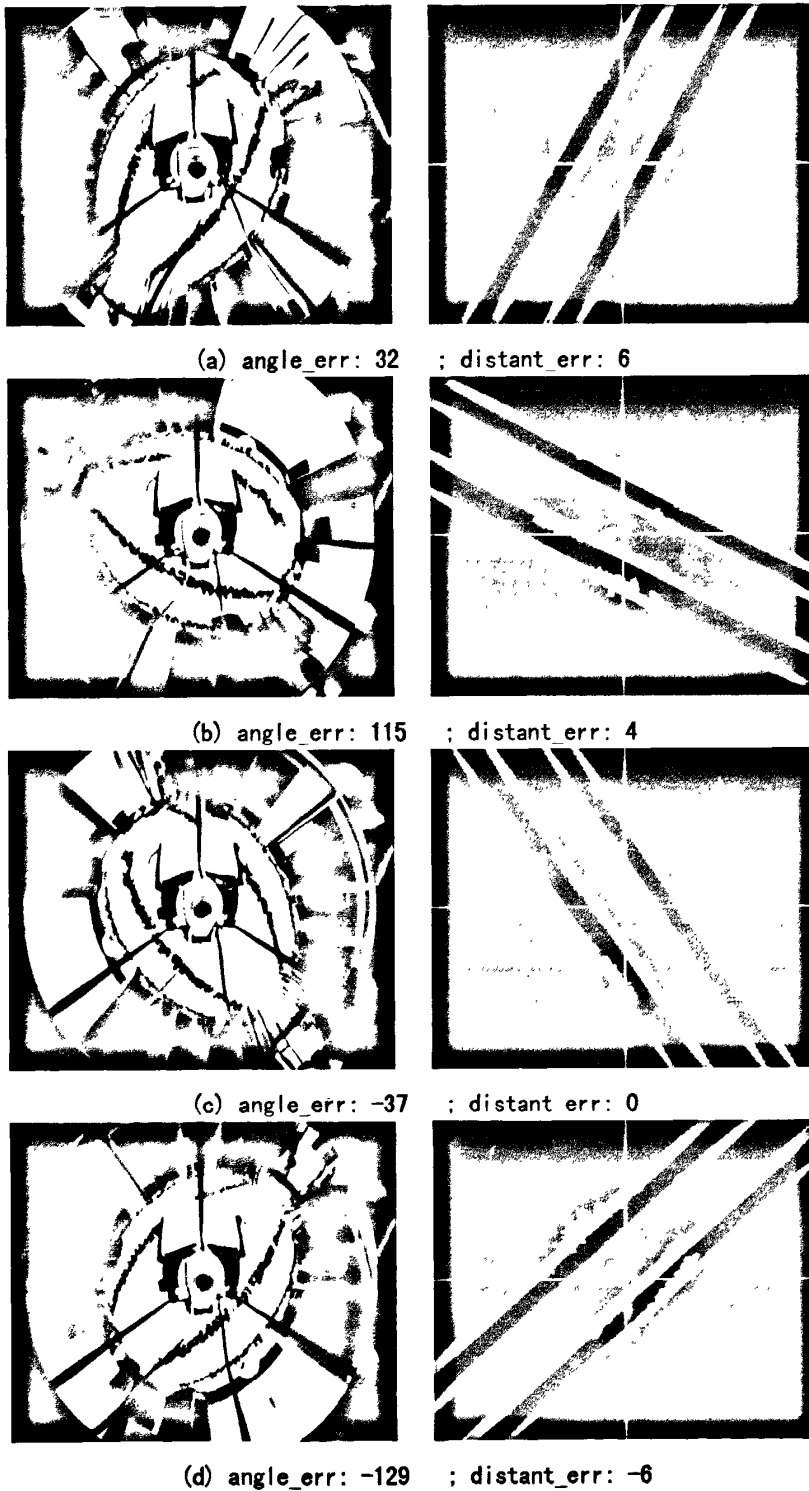


图 4-17 导航路径识别和导航参数提取结果

Fig. 4-17 The result of navigation path detection and the navigation parameter extracting

表 4-2 导航参数的实验值和实测值比较结果

Table 4-2 The compared result of extracting navigation parameter via experiment and measurement

图片序列	导航参数实验值		导航参数实测值	
	angle_err(度)	distant_err(pixels)	angle_err(度)	distant_err(cm)
图 4-17 (a)	32	6	30	18
图 4-17 (b)	115	4	110	11
图 4-17 (c)	-37	0	-35	2
图 4-17 (d)	-129	-6	-132	17

注：导航参数的实验值中 distant\_err 的每个像素代表实际距离大约 33.33mm。

从图 4-17 和表 4-2 可以看出本章设计的导航路径识别和导航参数提取算法能稳定地识别导航参考路径线并准确地提取出导航控制参数。

## 第五章 导航控制策略设计

农业机器人导航的目的是使机器人沿着期望的路径行走,其效果不仅仅依靠导航路径识别和导航控制参数的精确性,还和控制方法的选择有关。目前,在农业机器人的控制方法上主要有 PID 控制、最优控制、滑模控制和智能控制等控制方法<sup>[65,66,67,68]</sup>。PID 控制算法比较简单,在工业应用上也比较成熟,可以实现农业机器人的基本控制,但是 PID 控制需要被控制对象精确的数学模型,且干扰不能太多,因此很少被单独使用在农业机器人控制器上,一般结合其它的控制方式共同实现控制目的,比如和专家系统、模糊控制等结合,以提高运动的准确性和稳定性。利用最优控制作为农业机器人导航控制方式时同样需要先建立被控制对象的数学模型,在农田非结构化的复杂背景下,很难建立精确的数学模型。智能控制是人们模仿人的一种有效的控制方式。特别是模糊控制用在对农业机器人的控制上显现出很大的优势,首先,模糊控制不需要被控制对象的精确的数学模型,其次,模糊控制的思想 and 人类判断决策的思想很吻合,可以说是将人类的控制思想在计算机上的实现。

本研究中的农业机器人平台为两轮差速驱动方式来控制行进方向和速度的自主式移动机器人。机器人在直线运动过程中,由于驱动电机和安装的精度的差异,其左右轮的运动速度不可能被十分精确的控制为等速,且受到室外环境地面状况的影响,所以,机器人在运动过程中,肯定会产生偏离。基于机器视觉引导的农业机器人利用 CCD 等成像设备获得导航路径的图像信息,来实现对导航路径的闭环跟踪控制。因此,农业机器人的控制效果,不仅涉及到图像处理 and 识别的精度、电气系统的技术特性等问题,还涉及到对机器人数学模型的精确描述。但是,在实际应用中,建立机器人及环境的精确的数学模型往往是十分困难的。因此,本文采用模糊控制对农业机器人进行控制。

### 5.1 农业机器人的运动学模型

农业机器人小车模型如图 5-1 所示。机器人采用两轮差动的方式,机器人的运动学模型为<sup>[69,70,71]</sup>:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \quad \dots (5.1)$$

机器人遵守刚体运动约束,有:

$$w = \frac{(v_r - v_l)}{l} \quad \dots (5.2)$$

$$v = \frac{(v_r + v_l)}{2} \quad \dots (5.3)$$

式中:  $(x, y)$ ——机器人的位置坐标;  $\theta$ ——机器人的方向角;  $v$ ——机器人的速度;  
 $\omega$ ——机器人转动的角速度;  $v_r$ 、 $v_l$ ——分别为机器人右轮和左轮的速度;  $l$ ——机器人的两轮间的距离。

联合式 (5.1) 式 (5.3) 可得下式:

$$\begin{cases} x(t) = \frac{1}{2} \int_0^t [(v_r + v_l) \cos \theta] dt + x(0) \\ y(t) = \frac{1}{2} \int_0^t [(v_r + v_l) \sin \theta] dt + y(0) \\ \theta(t) = \frac{1}{l} \int_0^t (v_r - v_l) dt + \theta(0) \end{cases} \quad \dots (5.4)$$

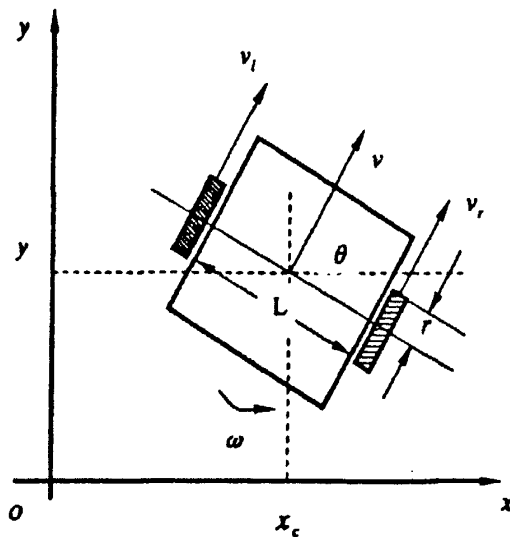


图 5-1 机器人小车模型图

Fig. 5-1 The robot model

通过机器人运动学模型可知, 通过控制左右轮的力矩来控制机器人的位置姿态, 从而实现机器人的路径跟踪控制。由于控制板卡接收机器人左右轮的转速设定值后, 对电机进行速度和电流双闭环控制, 输出力矩和, 从而改变机器人的姿态, 实现路径或目标跟踪的目的。因此本研究要求上位机导航控制决策系统根据全景视觉系统和其它传感器的输入值, 经过适当处理输出机器人左右轮的转速值, 再通过 RS232 串口向下位机电机智能控制板卡发送设定值, 从而实现路径跟踪控制。



5.2 模糊控制器的设计

模糊控制是一种以模糊集合论、模糊语言变量以及模糊推理为数学基础的新型计算机智能控制方法。随着人工智能科学、计算机等学科的发展，模糊控制得到了越来越多的应用<sup>[72]</sup>。模糊控制在一些利用传统控制手段难以解决的非线性控制系统上发挥了优势。近年来，模糊控制以已成功的运用于移动机器人导航控制上。模糊控制的优点就是不需要建立被控对象的数学模型，因此，很适合于农业移动机器人的导航控制。

5.2.1 模糊控制的基本原理

模糊控制算法是一种新型的计算机数字控制算法<sup>[73]</sup>，因此，模糊控制系统具有数字控制系统的一般结构形式，其系统组成如图 5-2 所示。

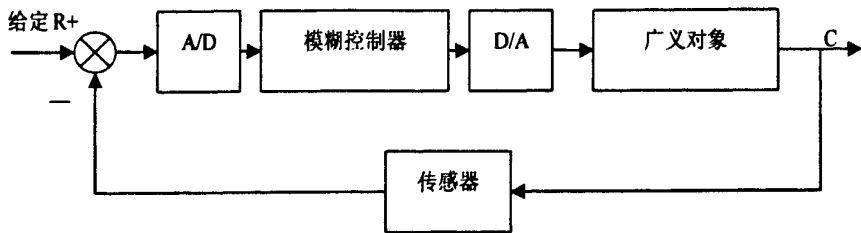


图 5-2 模糊控制系统结构框图

Fig. 5-2 The block diagram of fuzzy control system

由图 5-2 所示，模糊控制系统由以下四个部分组成：

1、模糊控制器：它是整个系统的核心，实际上由一台微控制器，主要完成输入量的模糊化、模糊关系运算、模糊推理以及模糊推理结果的精确化等重要过程。模糊控制器的结构如图 5-3 所示。可以说，一个模糊控制系统性能指标的优劣在很大程度上取决于模糊控制器的“聪明”程度。

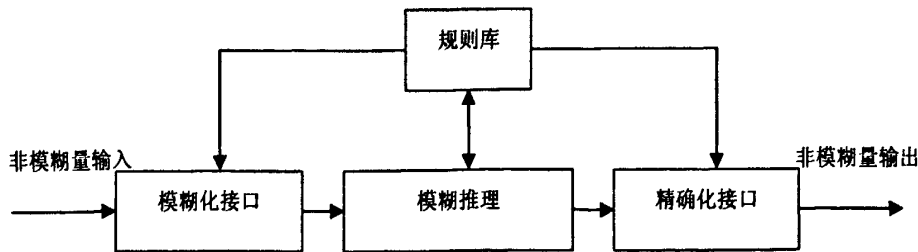


图 5-3 模糊控制器结构框图

Fig. 5-3 The block diagram of fuzzy controller

2、输入输出接口电路：主要包括前向通道的 A/D 转换电路和后向通道的 D/A 转换电路等两个信号转换电路。

3、广义对象：广义对象包括执行机构和被控对象。常见的执行机构包括电磁阀、伺服电机等。被控对象可以为线性的，也可以是非线性的，可以是定常的，也可以是非定常的系统。

4、传感器：传感器就是检测装置，它负责把被控对象的输出信号转换为电信号或图像信号。在农业机器人视觉导航系统中，最重要的传感器就是视觉传感器。

### 5.2.2 模糊控制器设计的基本过程

由模糊控制的原理可以得出设计一个模糊控制器的基本过程，主要分为以下几个步骤：

1、确定模糊控制器的输入变量和输出变量，即模糊控制器的结构设计。可以是单输入—单输出系统，也可以是多输入—多输出系统，通常将模糊控制器输入变量的个数称为模糊控制器的维数，从理论上讲，模糊控制器的维数越高，控制的效果也越好，但是维数高的模糊控制器实现起来相当复杂和困难，需根据实际情况而定。

2、归纳和总结模糊控制器的控制规则。模糊控制器的控制规则是以手动控制策略为基础的。规则的获取主要通过以下几种途径：专家的经验 and 知识、操作员的操作模式和自学习等几种方式。

3、建立模糊化和精确化的方法。模糊化一般采用的方式有两种：一是把精确量离散化，这样使模糊化过程比较简单，否则，将每一精确量对应一个模糊子集，有无穷多个模糊子集，使模糊化过程复杂化；二是将在某区间的精确量模糊化成这样的一个模糊子集，它在该精确量点处的隶属度值为 1，除该点外其余各点的隶属度都取 0，这种方法相对粗略一点。

非模糊化的方法一般有：选择最大隶属度方法、取中位数法和加权平均判决方法等。

4、选择模糊控制器输入变量和输出变量的论域并确定模糊控制器的相关参数（如量化因子、比例因子等）。

5、建立模糊控制查询表，软硬件实现。

### 5.2.3 基于全景视觉导航的模糊控制器的设计

根据模糊控制器的原理及设计过程，机器人的结构和第 4 章得到的导航控制参数，设计基于全景视觉自主导航的模糊控制器。

1、模糊控制器的输入输出变量：基于全景视觉导航的农业机器人是利用视觉传感器系统获取导航路径信息来实现对路径跟踪控制的闭环控制。由第四章分析可知，

通过对机器人周围农田图像的处理识别可以获取机器人相对于导航路径的位姿信息，即航向偏差  $\text{angle\_err}$  和横向偏差  $\text{distant\_err}$ 。控制的目的是使偏差量在尽量短的时间内趋于零。因此我们选择模糊控制器的输入变量为航向偏差  $\text{angle\_err}$  和横向偏差  $\text{distant\_err}$ ，选取二维模糊控制器。

由 5.1 节的农业机器人结构和动力学分析可知，对两轮差速控制移动机器人，只要对两个驱动轮设定不同的转速就可以达到改变机器人姿态，实现路径或目标跟踪的目的。因此，选择左右轮转速  $Lw$  和  $Rw$  作为模糊控制器的输出变量。这样模糊控制器就是一个双输入—双输出的二维结构，如图 5-4 所示。

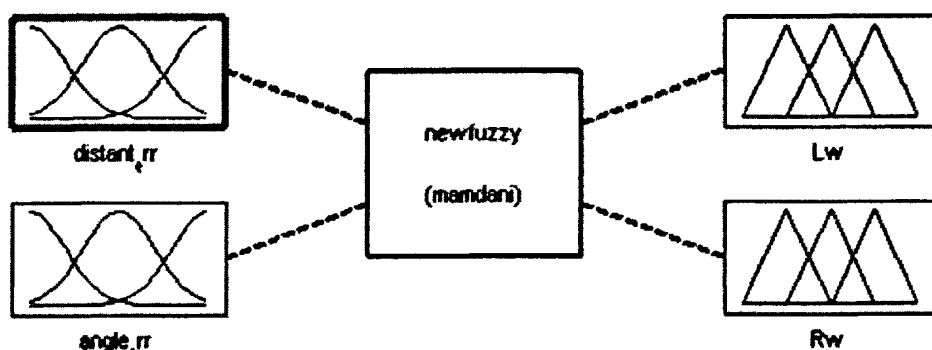


图 5-4 模糊控制器结构

Fig. 5-4 The structure of fuzzy controller

2、选择描述输入输出变量的模糊词集：首先选择描述输入输出变量的模糊词集，一般要求词集中词汇少，并且利用这些词汇又可以对各种自然现象进行准确的描述。选择描述横向偏差  $\text{distant\_err}$  的模糊词集为  $\{\text{NB}, \text{NS}, \text{Z}, \text{PS}, \text{PB}\}$ ，分别表示横向偏差负大，负小，零，正大，正小。描述航向偏差  $\text{angle\_err}$  的模糊词集为  $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{Z}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$ ，分别表示航向偏差负大，负中，负小，零，正小，正中，正大。描述输出变量左右轮转速  $Lw$  和  $Rw$  的模糊词集为  $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{Z}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$ ，分别表示左右轮转速负大，负中，负小，零，正小，正中，正大。

3、模糊控制规则的设计：模糊控制器的控制规则是设计模糊控制器的关键，它是基于手动控制策略，而手动控制策略又是人们通过学习、试验以及长期的经验积累而逐渐形成的，存储在操作者头脑中的一种技术知识集合。手动控制过程一般是通过被控对象（过程）的一些观测，操作者在根据已有的经验和知识，进行综合分析并作出控制决策，调整加到被控对象的控制作用，从而使系统按照预定的要求运动。

利用模糊集合理论将手动控制策略上升为具体的数值运算，采用微机代替人的手动控制，实现模糊自动控制。本研究根据自身的经验设计模糊控制规则如表 5-1 所示。

表 5-1 左右轮 Lw 和 Rw 的模糊控制规则表

Table 5-1 The Lw and Rw rule table of fuzzy controller

		航向偏差 angle_err						
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
横向偏差 distant_err	NB	PB/NB	PM/NS	PS/Z	PB/PM	PM/PM	PS/PM	NB/PB
	NS	PB/NB	PM/NS	PS/Z	PM/PS	PS/PS	Z/PS	NB/PB
	Z	PB/NB	PM/NM	PS/NS	PS/PS	NS/PS	NM/PM	NB/PB
	PS	PB/NB	PS/Z	PS/PS	PS/PM	Z/PS	NS/PM	NB/PB
		PB	PB/NB	PM/PS	PM/PM	PM/PB	Z/PS	NS/PM
								NB/PB

4、定义各模糊变量的基本论域和模糊子集的论域：定义一个模糊子集，实际上就是要确定模糊子集隶属函数曲线的形状。将确定的隶属函数曲线离散化，就得到了有限个点上的隶属度，便构成了一个相应的模糊变量的模糊子集，这些有限个点就是模糊子集的论域。模糊控制器的输入变量和输出变量的实际范围称为这些变量的基本论域，基本论域中的量是精确量。定义输入变量和输出变量各模糊子集的论域都为{-3,-2,-1,0,1,2,3}。在模糊子集的论域范围上定义各变量的模糊子集如图 5-5 至 5-8 所示。各模糊子集的隶属函数均采用三角函数的形式。输入变量 distant\_err 的基本论域为[-10,10]，单位为像素。输入变量 angle\_err 的基本论域为[-30,30]，单位为度。输出变量 Lw 和 Rw 的基本论域定义为与输出变量模糊子集的论域相对应的离散的几个点{-20,-15,-10,0,10,15,20}，单位为弧度/秒。

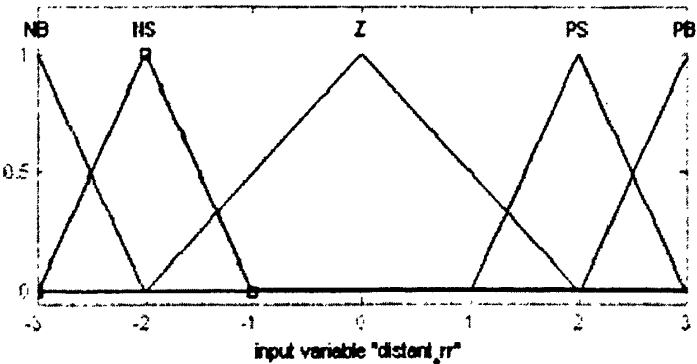


图 5-5 输入变量 distant\_err 的隶属函数曲线

Fig. 5-5 The subjection function curve of input variable—distant\_err

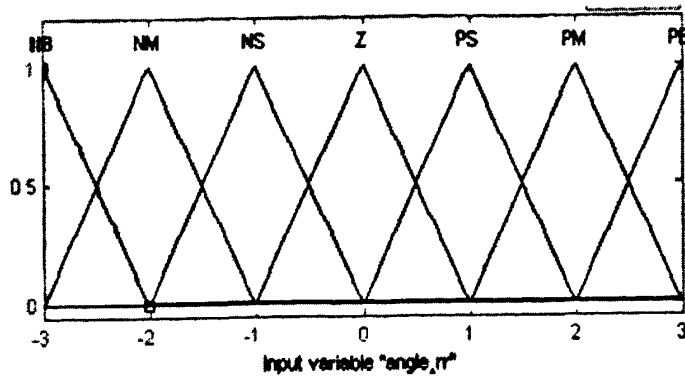


图 5-6 输入变量 angle\_err 的隶属函数曲线

Fig. 5-6 The subjection function curve of input variable—angle\_err

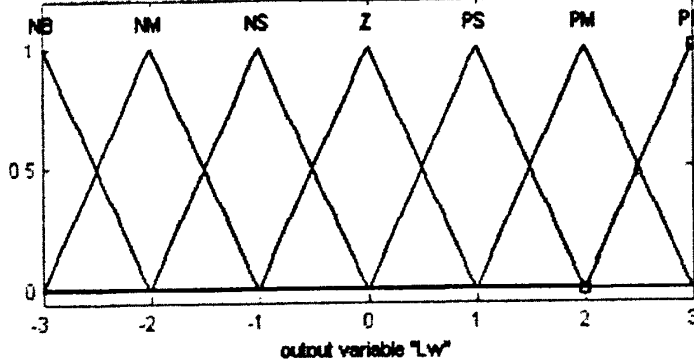


图 5-7 输出变量 Lw 的隶属函数曲线

Fig. 5-7 The subjection function curve of output variable—Lw

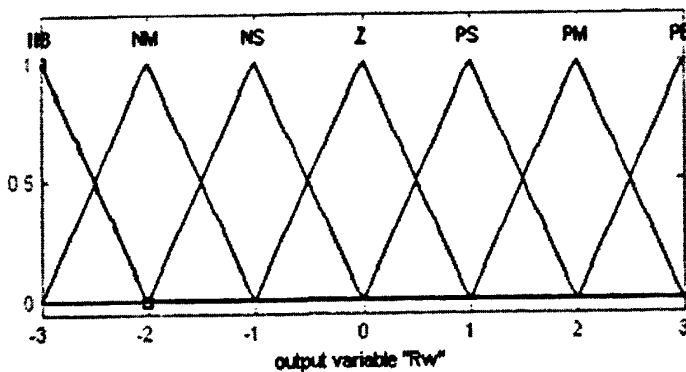


图 5-8 输出变量 Rw 的隶属函数曲线

Fig. 5-8 The subjection function curve of output variable—Rw

5、确定模糊化和精确化方法及有关参数：由模糊控制器的结构框图可知，模糊控制器的输入和输出信号均是精确量，而进行模糊推理需要模糊量，这就需要在模糊控制算法实现过程中，能够进行精确量与模糊量之间的相互转换。

模糊化方法：选择在有限个离散值点上把精确量离散化的方法。

精确化方法：采用加权平均判决方法把模糊推理得到的模糊量转化为精确量，精确量对应的左右轮值见表 5-2 所示。

表 5-2 Lw/Rw 的输出精确值

Table 5-2 The exact values of the output variable—Lw/Rw							
Lw/Rw	-3	-2	-1	0	1	2	3
精确值	-20	-15	-10	0	10	15	20

有关参数：输入变量  $\text{angle\_err}$  量化因子为： $\frac{3}{30}$ ，输入变量  $\text{distant\_err}$  量化因子为： $\frac{3}{10}$

6、获取模糊控制响应表：利用 MATLAB 图形界面工具建立本文的 Mamdani 型模糊推理系统<sup>[74]</sup>，得到模糊控制器的输入输出曲面如图 5-9 和 5-10 所示。最后获得模糊控制响应表如表 5-3 所示。在应用时将该模糊控制响应表存储在计算机的内存当中，方便调用，节省计算机处理时间，提高系统的实时性。

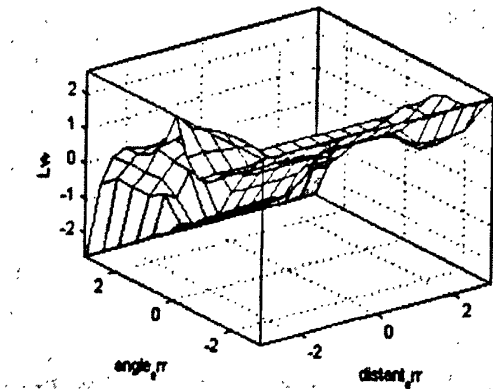


图 5-9 模糊控制的左轮转速输出曲面

Fig. 5-9 The output surface of left wheel

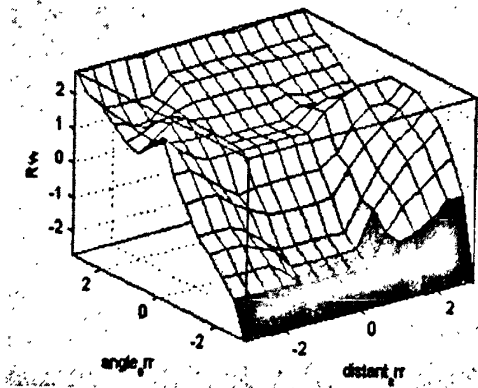


图 5-10 模糊控制的右轮转速输出曲面

Fig. 5-10 The output surface of right wheel

表 5-3 左右轮 Lw 和 Rw 的模糊控制响应表

Table 5-3 The response table of fuzzy controller

		航向偏差 angle_err						
		-3	-2	-1	0	1	2	3
横向偏差 distant_err	-3	3/-3	2/-1	1/0	3/2	2/2	1/2	-3/3
	-2	3/-3	2/-1	1/0	2/1	1/1	0/1	-3/3
	-1	3/-3	2/-2	1/-1	1/1	-1/1	-2/2	-3/3
	0	3/-3	2/-2	1/-1	1/1	-1/1	-2/2	-3/3
	1	3/-3	2/-2	1/-1	1/1	-1/1	-2/2	-3/3
	2	3/-3	1/0	1/1	1/2	0/1	-1/2	-3/3
	3	3/-3	2/1	2/2	2/3	0/1	-1/2	-3/3

5.2.4 模糊控制器的效果验证

对图 4-17 和图 5-11 所示的 6 个不同位置和方向的图片进行处理得到相应的导航控制参数，对应的左右轮转速和农业移动机器人动作描述见表 5-4 所示。

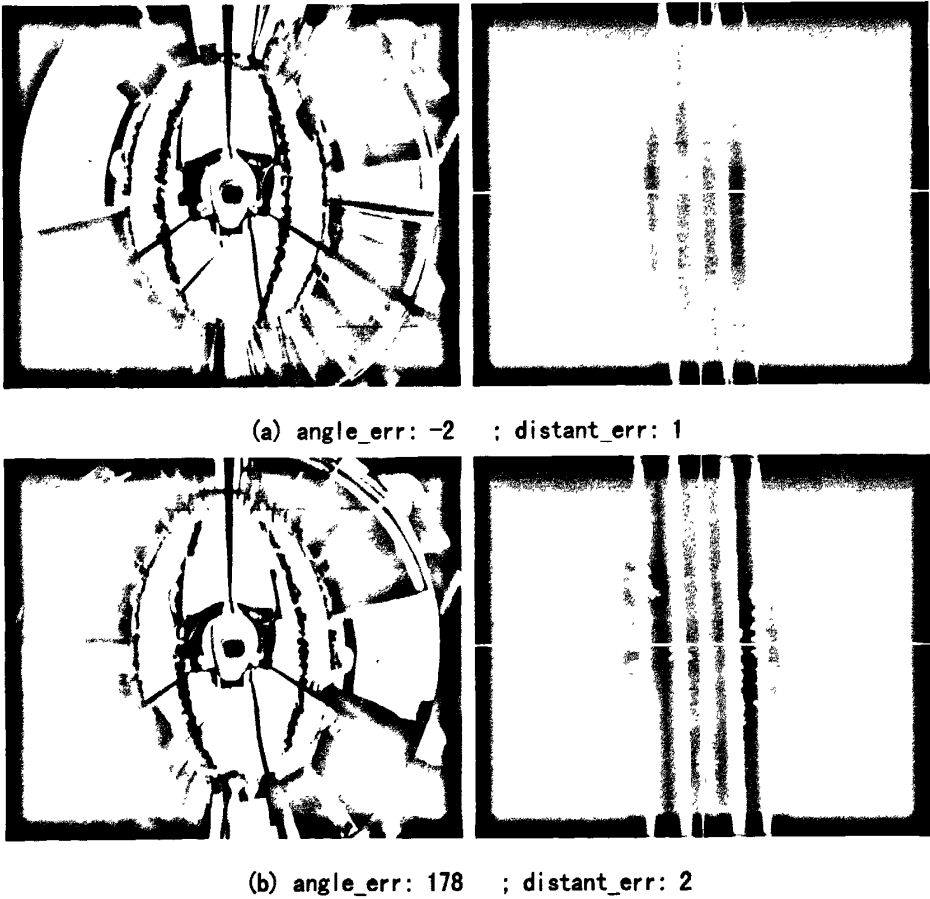


图 5-11 导航参考路径识别和导航参数提取结果

Fig. 5-11 The result of navigation path detection and the navigation parameter extracting

表 5-4 左右轮速度和机器人动作描述

Table 5-4 The speed of the wheels and the action description of the robot					
图片序列	导航参数		速度信息		动作描述
	angle_err(度)	distant_err(pixels)	Lw	Rw	
图 4-17 (a)	32	6	-20	20	原地右转
图 4-17 (b)	115	4	-20	20	原地右转
图 4-17 (c)	-37	0	20	-20	原地左转
图 4-17 (d)	-129	-6	20	-20	原地左转
图 5-11(a)	-2	1	10	10	前进
图 5-11(b)	178	2	-20	20	原地右转

从表 5-4 的导航控制参数和得到的机器人左右轮的速度比较得出机器人的动作描述，符合人的控制思路。



## 第六章 导航控制试验

本章的概述了农业移动机器人的硬件平台，并在第三章至第五章的基础上设计了视觉导航软件平台，并进行了模拟农作物行路径跟踪实验，结果显示机器人能稳定地跟踪农作物行导航路径。

### 6.1 农业移动机器人的硬件平台结构

农业机器人的结构示意图如图 6-1 所示。采用前面两轮独立驱动，后面小轮为起支撑作用的万向轮，这样的结构控制比较灵活。硬件电路采用模块化设计，主要的功能模块如图 6-2 所示，主要包括电源模块、电机驱动模块、通讯模块、主控单元模块和传感器模块。

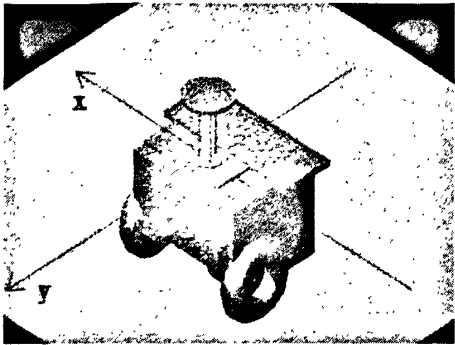


图 6-1 农业移动机器人车体结构图

Fig. 6-1 The structure of the agricultural mobile robot

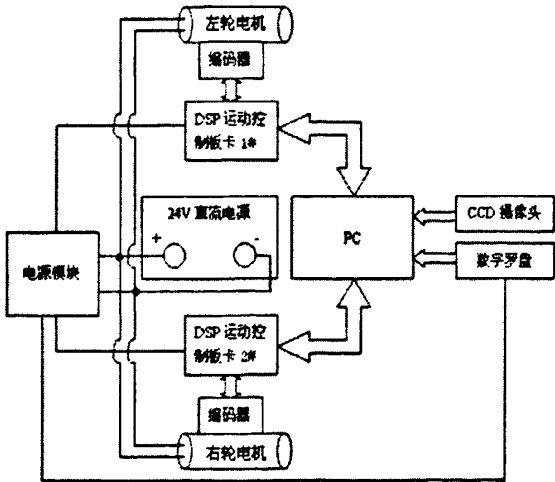


图 6-2 农业移动机器人硬件平台框图

Fig. 6-2 The hardware platform of agricultural mobile robot

1、电源模块采用两块铅酸蓄电池（12 伏特/块）串联供电，以及相应的电源管理模块构成。电源模块是机器人的动力来源，负责向两驱动轮电机和其它电子模块提供能量。电源管理模块主要负责蓄电池电量的监控和显示、通过 DC-DC 模块把 24 伏的电压转换成电子器件或板卡所需要的电压，如 5 伏或 3 伏等，以保证电路正常工作。

2、电机驱动模块采用两个 24 伏配有光电编码器和减速器的直流有刷伺服电机分别驱动一个轮子和两块智能运动驱动板卡。两个驱动电机的运动状态决定了机器人的速度和方向。从动轮设计成方向轮结构，主要作用是支撑移动机器人和随驱动轮的运行状态的改变而改变机器人的运动状态。

3、通讯模块是负责上位机和下位机之间数据的交换，主要采用 RS232 串口通讯的方式完成。上位机将控制信息发送到驱动电机的控制板卡，驱动板卡负责电机的运动控制。从而将决策和控制分离开，实现模块化设计。

4、主控单元模块是普通笔记本电脑，负责信息的采集和处理和决策，并将控制信号通过通讯模块和下位机控制板卡进行通讯。相当于人的大脑。

5、传感器模块是机器人实现智能控制的不可缺少的环节，它主要收集机器人周围环境的信息以及机器人自身的运动状态信息，经适当的处理后供机器人决策系统使用。本文采用的传感器主要有一套负责采集机器人周围环境信息的全景视觉系统和负责辅助确定机器人运动方向的数字电子罗盘。

## 6.2 视觉导航软件平台设计

导航控制软件是本课题的核心部分，主要分为界面设计和基于全景视觉导航的软件流程开发设计两个部分。

### 6.2.1 界面设计

本文选择的软件开发环境是 Microsoft Visual Studio .NET 2003，可视化的开发环境方便开发基于 Windows 的人机交互应用程序，本课题基于 MFC 开发的视觉导航平台软件界面如图 6-3 所示。

共分五个部分，分别是图像显示部分、控制部分、导航控制参数显示部分、手动控制部分和图像参数显示部分。其中，图像显示部分、导航控制参数显示部分和图像参数显示部分可以方便在开发调试阶段查看图像识别处理的效果和相关的参数；手动控制部分方便调试机器人的运动状态；控制部分采用事件触发的方式完成系统的初始化、视觉导航等任务。

### 6.2.2 视觉导航软件流程设计

视觉导航软件主要完成设备的初始化、农业机器人周围环境图像的采集、图像的

处理和识别以及导航控制等任务，具体的流程如图 6-4 所示。

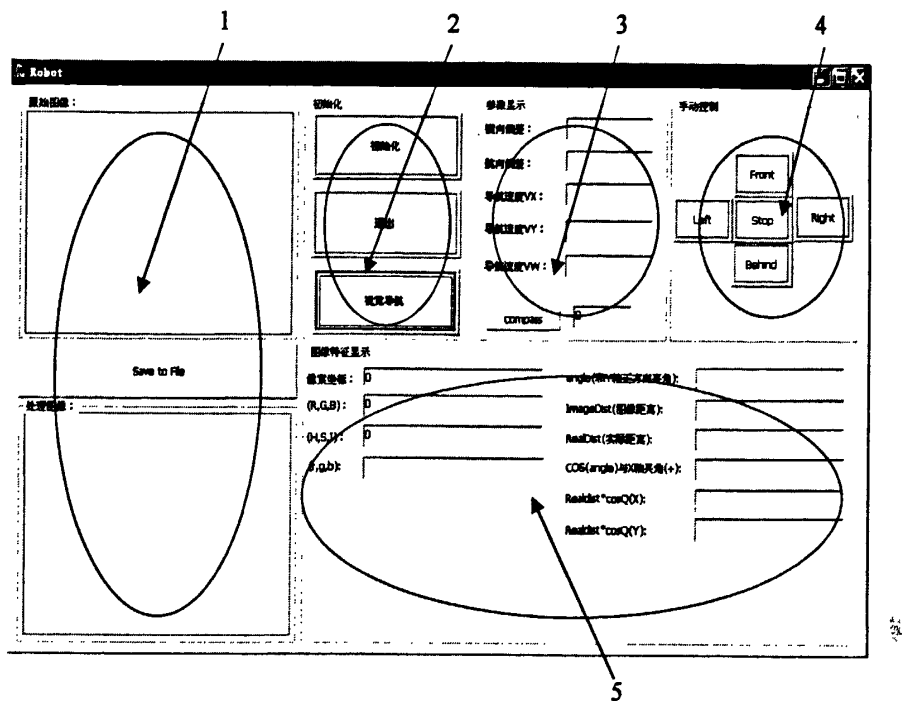


图 6-3 视觉导航软件界面

Fig. 6-3 The software Interface of vision-based navigation

1—图像显示部分；2—控制部分；3—导航控制参数显示部分；4—手动控制部分；5—图像参数显示部分

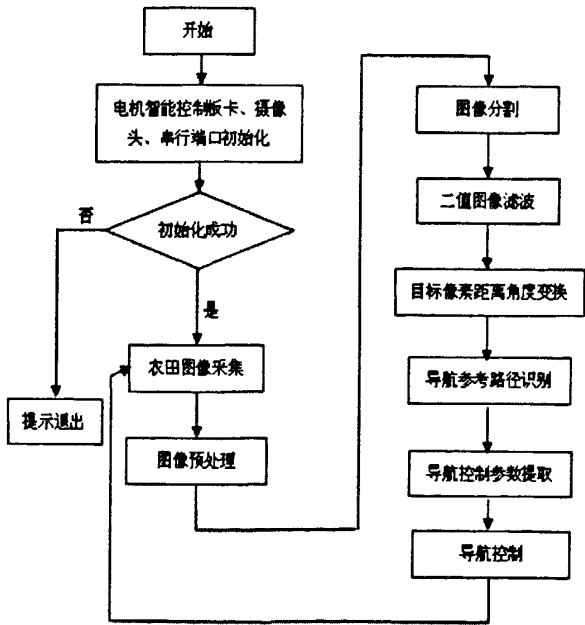


图 6-4 视觉导航控制流程图

Fig. 6-4 The flow chart of vision-based navigation

### 6.3 基于全景视觉的农作行路径跟踪导航试验

采用本文设计的导航路径识别、导航参数提取以及模糊控制算法对不同初始角度和位置时的路径跟踪效果如图 6-5 所示。

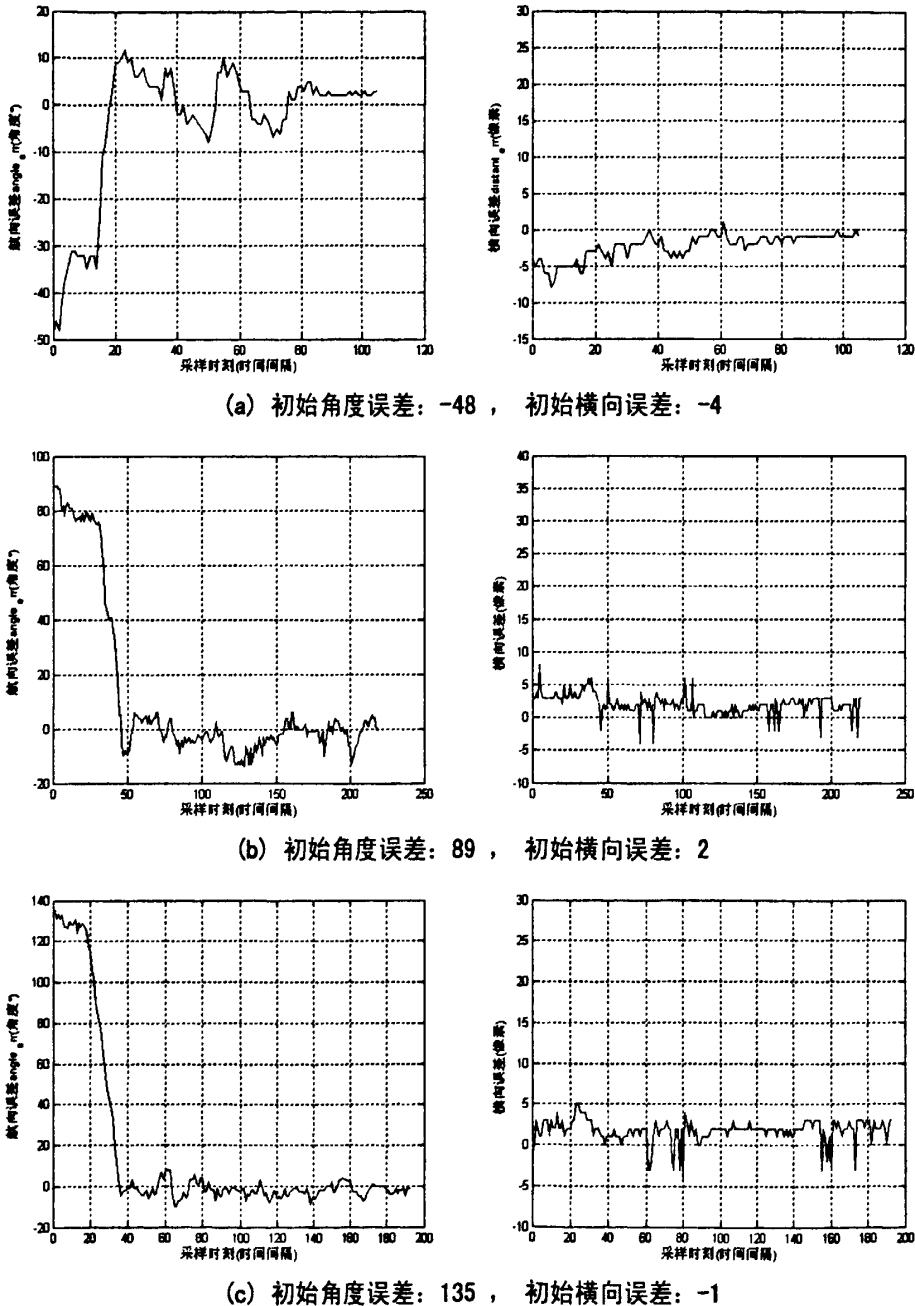


图 6-5 导航控制试验效果

Fig. 6-5 The result of navigation tests

导航跟踪试验结果表明, 机器人能够在一定的允许误差范围内稳定跟踪模拟农作物行路径。

## 第七章 结论和展望

### 7.1 研究结论

本文分析了国内外的农业自动化的发展形势,总结了国内外关于农业车辆自主导航的方式,重点分析了国内外关于视觉导航的研究现状和进展,在此基础上借鉴国内外先进的技术,结合本研究课题的特点,提出了将基于折反射原理的全景视觉系统应用到农业车辆或农业机器人的自主导航中。以折反射全景视觉系统为核心,在现有的硬件平台上,研究设计了针对农作物行环境的导航路径识别算法和导航控制算法,主要的工作有:

1、分析了各种机器视觉系统的特点,在此基础上,总结了全景视觉系统相对于传统机器视觉系统的优势,全景视觉系统的三种主要的构成方式:使用特殊的光学镜头;使用多摄像机成像后拼接和使用单个摄像机加旋转云台的方式。根据各种方式的优缺点,选择基于折反射原理的全景视觉系统作为机器人的导航传感器,该系统成本低、成像速度快,非常适合对实时性要求较高的场合。基于折反射原理的全景视觉系统利用一定面形的凸面反射镜将机器人周围环境的信息反射进摄像机进行成像,得到水平 360 度和一定角度垂直视野范围内的环境图像。由于凸面反射镜对场景环境信息存在压缩而使物体在摄像机成像平面中存在着径向变形,使得实际场景中一些规则的物体发生成像形变。针对基于折反射原理的全景视觉系统的成像特点,比较了常用的几种全景视觉系统的标定方法,并通过实验法对平行于摄像机平面的某一实际平面内的场景图像进行距离和角度标定,得出物像点之间的对应关系。这种方法无需知道摄像机的内外部参数和反射镜面的参数方程,对系统的安装要求较低,且标定方便。

2、设计了基于折反射原理的全景视觉系统的农作物行环境图像采集和处理算法。利用 Microsoft 公司的 Directshow 技术进行摄像头图像采集;针对农业机器人作业环境的特点,对采集的图像进行预处理,利用灰度世界假设算法和白平衡算法和对角校正模型对采集的偏色图像进行色彩校正,近似还原物体的本质颜色;在此基础上利用归一化的过绿特征值  $2 \times g-r-b$  对图像进行灰度化处理,进而利用最大类间方差法得到农作物行环境的二值图像;再利用中值滤波去除了图像中的脉冲噪声点,得到了较理想的农业机器人周围环境的二值图像;最后针对全景系统成像的特点,利用第二章的标定结果,对农作物目标像素进行距离和角度变换,以恢复农作物行的空间直线特征,方便对导航路径线的提取。

3、利用 Hough 变换识别导航参考路径,并结合数字罗盘航向角度信息计算出了导航控制参数——航向误差 `angle_err` 和横向误差 `distant_err`。在图像采集处理的基础

上,结合折反射全景视觉系统成像的特点,利用 Hough 变换得到了导航参考路径线的方向信息,选择最靠近机器人中心点,即离成像中心距离最近的一条直线作为机器人导航参考路径线。由于机器人在两行农作物之间行走,因此,结合了数字罗盘的初始角度信息,计算导航控制参数——航向偏差  $\text{angle\_err}$  和横向偏差  $\text{distant\_err}$ 。

4、设计了基于模糊控制方法的农业移动机器人的导航控制器,并进行了试验验证。分析了机器人导航中常用的导航控制方法,对比研究了各种方法的特点。针对农田作业环境的特点,因模糊控制无需建立被控对象精确的数学模型,且和人的思维方式相似,因此,运用模糊控制作为本设计的导航控制方法。详细分析了模糊控制器的设计过程,设计了基于两轮差速控制的农业移动机器人的二维模糊控制器,输入为导航控制参数航向偏差  $\text{angle\_err}$  和横向偏差  $\text{distant\_err}$ ,输出为机器人左右轮的转速,并用 MATLAB 进行设计和进行了实验验证,结果表明,本文设计的模糊控制器可以准确跟踪导航路径线。

5、在室内无固定光源照射的自然环境下进行了模拟农作物行导航控制试验。对农业移动机器人整体进行了调试,在室内无固定光源照射的自然环境下进行了模拟农作物行导航控制试验,结果表明系统能准确识别出农作物导航路径线并能稳定跟踪识别出来的导航路径线。

## 7.2 展望

由于时间和水平的原因,在理论和实际应用方面还需要进行很大的改进:

1、由于全景视觉系统成像存在变形,且只能在平行于摄像机成像平面的某一平面内进行距离和角度标定,因此,在应用中需假设农作物行高度基本相同,农作物高度要远小于机器视觉系统的安装高度。实际应用受到了一定的限制。

2、由于全景视觉系统中的摄像机朝上安装,在室外光照强度很大的时候,容易得到高光图像,不易于图像处理和识别,且长时间作业易损坏设想机等硬件设备。

3、由于在目标点距离和角度变换过程中的量化原因、硬件设备的本身误差的因素的影响,导致整个系统的精度受到限制,因此误差相比其它采用常规的单目视觉导航系统要大一点。

## 参考文献

- [1] John F.Reid,Qin Zhang,NoBoru Noguchi,Monste Dickson.Agricultural automatic guidance research in North America[J]. Computer and Electronics in Agriculture,2000,25:155-167
- [2] R.Keicher,H.Seufert. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe[J]. Computer and Electronics in Agriculture,2000,25:169-194
- [3] Toru Torii. Research in autonomous agriculture vehicles in Japan[J]. Computer and Electronics in Agriculture,2000,25:133-153
- [4] S.Han,Q.Zhang,B.Ni,J.F.Reid. Aguidance directrix approach to vision-based vehicle guidance systems[J]. Computer and Electronics in Agriculture,2004,43:179-195
- [5] D.C.SLAUGHTER,p.CHEN,R.G.CURLEY. Vision Guided Precision Cultivation[J]. Precision Agriculture,1999,1:199-216
- [6] Gerrish J.B.,Fehr B.W.,Van Ee G.R. Self-steering tractor guided by computer vision[J]. Appl.Eng.Agric,1997,13(5) :559-563
- [7] T.Hague,N.D.Tillett. A bandpass filter-based approach to crop row location and tracking[J]. Mechatronics,2001,11:1-12
- [8] Tijmen Bakker,Kees van Asselt,Jan Bontsema,Joachim Muller,Gerrit van Straten. An Autonomous Weeding Robot for Organic Farming[J]. Field and Service Robotics,2006,25:579-590
- [9] V.Leemans,M.-F.Destain. A computer-vision based precision seed drill guidance assistance[J]. Computer and Electronics in Agriculture,2007,59:1-12
- [10] BJORN ASTRAND,ALBERT-JAN BAERVELDT. An Agricultural Mobile Robot with Vision-Based Perception for Mechanical Weed Control[J]. Autonomous Robots,2002,13:21-35
- [11] Toru Torii,Satoshi Kitade,Tsukasa Teshima. Crop row tracking by autonomous vehicle using machine vision(part 1)[J]. Journal of JSAE,2000,62(2):41-48
- [12] Toru Torii,Akira Takamizawa,Tsuguo Okamoto. Crop row tracking by autonomous vehicle using machine vision(part 2)[J]. Journal of JSAE,2000,62(5):37-42
- [13] Cho S I.,Lee J H. Autonomous speed sprayer using differential global positioning system[J]. Journal of Agriculture Engineering and Research,2000,76:111-119
- [14] Shin B.S.,S.H.Kim. Autonomous Guidance System for Agricultural Machine by Machine Vision[C]. Proceeding of ASAE Annual International Meeting,Sacramento,California,USA,2001:01-1194
- [15] 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
- [16] 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, 2003

- [17] 安秋.农业机器人视觉导航系统及其光照问题的研究[D].南京:南京农业大学, 2008
- [18] 孙元义.机器视觉在棉田农药喷洒机中应用的研究[D].北京:中国农业大学, 2006
- [19] 袁佐云.基于计算机视觉的作物行中心线识别研究[D].北京:中国农业大学, 2005
- [20] 张卫.农业机器人视觉定位导航技术的研究[D].北京:中国农业大学, 2006
- [21] 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, 2006
- [22] 张红霞.基于机器视觉的旱田多目标直线检测方法的研究[D].北京:中国农业大学, 2007
- [23] 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, 2006
- [24] 张方明.田间路径识别算法和基于立体视觉的车辆自动驾驶方法研究[D].杭州:浙江大学, 2006
- [25] 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
- [26] 侯学贵.除草机器人杂草识别与视觉导航技术研究[D].南京:南京林业大学, 2007
- [27] 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
- [28] 赵博, 朱忠祥, 宋正河, 谢斌, 毛恩荣.农用车辆视觉导航路径识别方法[J].江苏大学学报(自然科学版), 2007, 28(6): 482-486
- [29] 徐德, 谭民, 李原.机器人视觉测量与控制[M].国防工业出版社, 2008
- [30] 张广军.视觉测量[M].科学出版社, 2008
- [31] 潘华, 郭戈.立体视觉研究的进展[J].计算机测量与控制, 2004, 12(12): 1121-1124
- [32] Simon Baker, Shree K. Nayar. A theory of catadioptric image formation[A]. In: Processings of the 6th International Conference on Computer Vision, 1998: 35-42
- [33] 曾吉勇.折反射全景立体视觉[D].成都:四川大学, 2003
- [34] 吴自新.全景视觉系统设计与图像处理技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2005
- [35] 凌云峰.移动机器人全景视觉应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2007
- [36] 周宗思.全方位视觉技术及其在移动机器人导航中的应用[D].杭州:浙江工业大学, 2008
- [37] R.A. Hicks, R. Bajcsy. Reflective Surfaces as Computational Sensors[J]. Image and Vision Computing, 2001, 19(11): 773-777
- [38] R.A. Hicks, R. Bajcsy. Catadioptric Sensors That Approximate Wide-angle Perspective Projections[A]. Proc. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Hilton Head Island, South Carolina, 2000, 545-551
- [39] 许俊勇.移动机器人全景 vSLAM 研究[D].上海:上海交通大学, 2008
- [40] 刘伟. RoboCup 中型组机器人全景视觉系统设计与实现[D].长沙:国防科学技术大学, 2004
- [41] 曹德欣, 曹璆珞.计算方法(第二版)[M].中国矿业大学出版社, 2001
- [42] 路锦正, 周冬梅. Visual C++ 音频/视频处理技术及工程实践[M].电子工业出版社, 2009
- [43] 陆其明. DirectShow 开发指南[M].清华大学出版社, 2003
- [44] Von Kries J. Chromatic Adaptation[A]. MacAdam D L ed. Sources of Color Vision.



Cambridge:MIT Press,1970

[45] Horn BKP. Robot Vision[M]. Cambridge: The MIT Press,1986

[46] 金伟其.辐射度学 光度与色度及其测量[M].北京理工大学出版社, 2006

[47] Finlayson GD,Schaefer G. Solving for colour constancy using a constrained dichromatic reflection model[J]. International Journal of Computer Vision,2001,42(3):127-144

[48] K Barnard. Practical colour constancy[D].Simon Frasier University,1999

[49] Funt B,Barnard K,Martin L. Is machine colour constancy good enough?[C]. In Fifth European Conference on Computer Vision(ECCV'98),Freiburg,Germany,1998

[50] Forsyth DA. A novel approach to colour constancy[C].Second International Conference on Computer Vision, Tampa, FL, 1988

[51] Buchsbaum G. A Spatial Processor Model for Object Colour Perception[J]. Journal of the Franklin Insistute,1980,310(1):1-26

[52] E.Land. The retinex theory of color vision[J]. Scientific American, 1977,237(6):108-128

[53] 刘关松, 陆宗骐, 徐建国, 高敦岳.几种彩色模型在不同光照条件下的稳定性分析[J].小型微型计算机系统, 2007, 7(23): 882-885

[54] 张学习, 杨宜民.彩色图像工程中常用颜色空间及其转换[J].计算机工程与设计, 2008, 5(29): 1210-1212

[55] 陆宗骐, 金登男.Visual C++.NET 图像处理编程[M].清华大学出版社, 2006

[56] 张卫, 杜尚丰.霍夫变换在农田机器人视觉导航中的应用[A].中国农业工程学会 2005 年学术年会论文集, 2005, 382-386

[57] 章毓晋.图像工程(上册) 图像处理(第二版)[M].清华大学出版社, 2005

[58] 章毓晋.图像工程(上册) 图像处理和分析[M].清华大学出版社, 1999

[59] 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

[60] 张磊, 王书茂, 陈兵旗, 祝青园.基于机器视觉的麦田边界检测[J].农业机械学报, 2007, 2(38): 111-114

[61] 赵颖, 陈兵旗, 王书茂, 代峰燕. 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, 4(37): 83-86

[62] 章毓晋.图像工程(中册) 图像分析(第二版)[M].清华大学出版社, 2005

[63] Kiryati,N.Eldar,Bruckstein,A.M.. A probabilistic Hough Transform[J]. Pattern Recognition, 1991, 24:303-316

[64] L.Xu,E.Oja,Kultanen.A new curve detection method: randomized Hough transform(RTH)[J]. Pattern Recognition Letters,1990:331-338

- [65] 李进, 陈无畏, 李碧春, 王檀彬.自动导引车视觉导航的路径识别和跟踪控制[J].农业机械学报, 2008, 2(39): 20-24
- [66] 周俊, 姬长英.基于机器视觉导航的轮式移动机器人横向最优控制[J].机器人 ROBOT, 2002, 3(24): 209-212
- [67] 储江伟, 王荣本, 郭克友, 顾柏园, 马累.基于机器视觉引导的两轮差速转向 AGV 控制问题的研究[J].机械与电子, 2002, 5
- [68] 谢守勇, 鲍安红, 管在林, 杨国才.温室移动机器人导航和避障模糊控制[J].农业机械学报, 2002, 2(33): 74-76
- [69] 南景富, 刘延斌, 牛广林.轮式移动机器人的运动及定位分析[J].机械设计与制造, 2007, 7: 148-150
- [70] 许松清, 吴海彬, 杨兴裕.两轮驱动移动机器人的运动学分析[J].电子机械工程, 2005, 6(21): 31-34
- [71] 朱金辉, 毕盛, 闵华清, 钟汉如.Robocup 中型足球机器人运动控制[J].机电产品开发与创新, 2005, 5(18): 4-6
- [72] 张恩勤, 施颂椒, 高卫华, 翁正新.模糊控制系统近年来的研究预案发展[J].控制理论与应用, 2001, 1(18): 7-11
- [73] 冯冬青, 谢宋和.模糊智能控制[M].化学工业出版社, 1998
- [74] 吴晓丽, 林哲辉.MATLAB 辅助模糊系统设计[M].西安电子科技大学出版社, 2002

## 致谢

回首三年的硕士研究生求学生涯，有过疑惑，有过困难，有过痛苦，但最后是成功的，是幸福的，是快乐的，这些成功、幸福和快乐离不开所有关心，支持我的老师、同学、朋友和我的家人。这些财富将一直伴随着我以后的生活。值此论文完稿之际，衷心地向你们表示感谢，感谢你们的无私帮助、感谢你们的默默支持、感谢你们的陪伴！

首先要感谢我的指导老师尹文庆教授！本文是在尹老师的悉心指导下完成的。三年来，尹老师给了我很大的关心和帮助，从论文的选题、构思、实验、直到最后的论文撰写，无不渗透着尹老师的心血，在此对老师说一声“您辛苦了”！尹老师严谨的治学态度，求真务实的作风，渊博的知识和敏锐的洞察力，乐观的生活态度是我学习的榜样和追求的目标。再次表示衷心的感谢和由衷的敬意！

自动化教研室丁永前副教授在论文的研究过程中和平时的生活中给予了热情的帮助，在此向丁老师表示真诚的感谢！

在三年的学习生活中，得到了同实验室同学的无私帮助，向你们表示谢意！感谢你们的帮助和陪伴！

最后感谢我的家人对我的默默支持！



## 攻读学位期间发表的学术论文

- [1] 第一作者. 一种足球机器人场地白线的提取方法[J]. 科学技术与工程. (已录用)

