

南京林业大学

硕士学位论文

除草机器人杂草识别与视觉导航技术研究

姓名：侯学贵

申请学位级别：硕士

专业：检测技术与自动化装置

指导教师：陈勇

20070601

摘 要

农业设备的自动化和智能化是我国农业在 21 世纪发展的趋势。2007 年中央一号文件明确提出,发展现代农业是新农村建设的首要任务,要加强农业科技研发投入。精确农业 (Precision Agriculture、Precision Farming) 是一个新的农业生产概念,它优化化肥、除草剂、水等的使用,最大程度减少对生态环境的破坏。本文主要研究了除草机器人利用机器视觉识别农田行间杂草和视觉导航技术,进而提高农业设备的自动化和智能化。

本文在综述机器视觉在杂草识别和农业设备导航方面国内外的研究基础上,采用北京环宇飞扬公司的 USB 接口摄像头采集农作物行间图像,尝试利用杂草的颜色特性在 RGB 颜色空间直接完成图像分割,再利用数学形态学完成图像滤波。通过将摄像头的视场区域分成 25 区,根据欲除杂草的大小和试验确定每区面积阈值,确定了杂草位置,完成了利用机器视觉杂草识别的过程。

本文还研究了除草机器人以农作物行中心线为基准线进行自动行走。选择美国 3Com 公司生产 Model0776 型 USB 接口摄像头采集导航图像,利用植物颜色特征在 RGB 颜色空间完成图像分割,利用数学形态学完成图像滤波。尝试利用优化的 Hough 变化检测出了农作物行中心线,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除草机器人位姿。

为了验证除草机器人杂草识别和导航算法的可行性,制作了室内除草机器人模型,主要由导航摄像头、杂草识别摄像头、计算机、本体、机械臂等组成。经试验表明除草机器人杂草识别率为 100%,实时性好。除草机器人位姿计算精度高,实时性好。杂草识别和导航算法能够适应室外条件变化。

关键词: 农业机器人、除草机器人、机器视觉、导航、杂草识别、Hough 变换

RESEARCHES ON WEED RECOGNITION AND VISION NAVIGATION OF WEEDING ROBOT

Abstract

Automation and intelligence of agricultural machinery is the trend of China's agriculture in 21 century. In 2007, China's central government proposes that Developing the modern agriculture would be the primary task of construction of "New Countryside" and investment on the agriculture technology would be increased. Precision Agriculture is a new concept, and it will optimize the use of fertilizer, herbicide and water, etc., and at most reduce the destruction on the environment. This dissertation is to have a research on weed recognition and navigation of weeding robot based on machine vision with a view to improve the intelligence and automation of agricultural devices.

In this paper, it elaborates the domestic and international research on weed recognition and navigation based on machine vision. This research uses USB interface camera to acquire the images, and carry out image segmentation using color factor in RGB color space directly. After image segmentation, the binary image could be filtered to delete the noise by mathematics morphology. Dividing the image by 25 regions, we can get the position of weed according to region area threshold, and finish the job of weed recognition based on machine vision.

This dissertation is also to have a research on vision navigation of weeding robot. The research uses Model 0776 manufactured by 3Com company in America to acquire image, carry out image segmentation using color factor in RGB color space directly. After image segmentation, the binary image could be filtered to delete the noise by mathematics morphology, detect central line of crop rows by optimized Hough transformation. At last, compute the pose of weeding robot according to the pose of navigation camera and perspective principle of camera.

Indoor weeding robot prototype was developed in this research, which consist of navigation camera, weed recognition camera, computer, body, a robotic arm and etc. Test shows that weeding robot can recognize the weed by the rate of 100%, and algorithm is good real time and also the precision of pose of weeding robot is high. The algorithm of weed recognition and vision navigation is insensitive to outside condition change.

Keyword: Weeding robot, Machine vision, Navigation, Weed recognition, Hough transformation

本学位论文知识产权声明

本学位论文是在导师（指导小组）的指导下，由本人独立完成。文中所引用他人的研究成果均已注明出处。对本论文研究有所帮助的人士在致谢中均已说明。

基于本学位论文研究所获得的研究成果的知识产权属于南京林业大学。对本学位论文，南京林业大学有权进行交流、公开和使用。

研究生签名：

徐子萱

导师签名：

陈勇

日期：

07.6.25

致 谢

本文是在导师陈勇副教授的悉心指导下完成的。在导师严格的要求和指导下，我顺利完成了科研工作和论文。导师严谨的治学学风，高深的学术造诣，灵活的科研思路和丰富的工作经验，将使我受益终生。同时感谢导师给我学习，生活和工作上无微不至的关怀和照顾。借此论文完成之际，我衷心的向导师表示最诚挚的谢意和深深的祝福。

感谢机电学院的各位老师对我的关心，支持和帮助。在攻读硕士学位期间，尤其得到了杨家富副教授，姜树海副教授，徐兆军老师和张慧春老师的帮助。在此表示深深的谢意。

感谢郭伟斌在课题研究过程中不厌其烦的帮助我测量数据；感谢王红星在程序调试过程中给予的帮助；感谢胡娜帮我画了除草机器人模型；感谢张春娜在论文编写过程中帮助我耐心的修改论文格式。

感谢在求学过程中所有帮助过我的人，祝他们一生平安幸福。

特别感谢我的父母和姐姐，在漫长的求学生涯中，是他们的理解和支持，我才能完成我的学业。

侯学贵

2007年6月

第一章 绪论

1.1 农业机器人及其研究

1.1.1 引言

农业设备的自动化和智能化是我国农业在 21 世纪发展的趋势。2007 年中央一号文件明确提出,发展现代农业是新农村建设的首要任务,要加强农业科技研发投入。农业是作为国民经济中最基础的产业,对经济社会的发展和人民生活起着极为重要的支撑和保障作用。中国人口众多,随着世界生态环境的恶化,中国农业面临严峻的考验。提高农业资源利用率和农业产出率,提高农业经济效益,是现代农业的发展趋势。

精确农业(Precision Agriculture、Precision Farming)是一个新的农业生产概念,它优化化肥、除草剂、水等的使用,最大程度减少对生态环境的破坏。精确农业的实现必须依现代科学技术,农业机器人的利用将大大提高农业生产效率,降低农民的劳动强度;防止农药、化肥对人的伤害;提高农业生产的质量等。农业机器人将是精确农业生产中重要的组成部分。

1.1.2 农业机器人特点

由于农业生产环境的自然性,服务于农业生产的农业机器人相对于工业机器人相比具有下列独特的特点^[1]:

(1) 农业机器人作业对象的娇嫩性

生物具有软弱易伤的特性,必须轻柔地对待和处理。且其种类繁多,形状复杂,在三维空间里的生长发育程度不一,相互差异很大。

(2) 农业机器人的作业环境的非结构性。由于农作物随着时间和空间的不同而变化,机器人的工作环境是变化的、未知的,是开放性的环境。作物生长环境除受园地、倾斜度等地形条件的约束外,还直接受季节、大气和时间等自然条件的影响。这就要求生物农业机器人不仅要具有与生物体柔性相对应的处理功能,而且还要能够顺应变化无常的自然环境。要求农业机器人在视觉、知识推理和判断等方面具有相当的智能。

(3) 农业机器人作业动作的复杂性。农业机器人一般是作业、移动同时进行,农业领域的行走不是连接出发点和终点的最短距离,而是具有狭窄的范围,较长的距离及遍及整个田间表面等特点。

(4) 农业机器人的使用者农业机器人的使用者是农民,不是具有机械电子知识的工程师,因此要求农业机器人必须具有高可靠性和操作简单的特点。

(5) 农业机器人的价格特性工业机器人所需大量投资由工厂或工业集团支付,而农业机器人以个体经营为主,如果不是低价格,就很难普及。

1.1.3 农业机器人研究与发展

在美国、日本等发达国家,从20世纪70年代中期开始,由于农业机械设计

和制造技术已趋于成熟, 电子信息技术的快速发展, 一批面向生产者应用的各种机电一体化技术产品开发出来并装备到农业机械上, 使得诸如耕整、插秧、小麦收获等工作对象是均质平面的农业生产作业实现了机械化和自动化。但是, 要实现工作对象是分散的、并且需根据判断进行选择的上作如除草、间苗、蔬菜收获和水果收获等作业的机械化和自动化则是极为困难的, 这些作业要求农业机械具备一定的智能。

进入20世纪90年代, 随着计算机技术和信息采集与处理技术的发展, 人工智能、机器视觉等新技术在农业机械中的应用研究得到了重视。结合了农艺技术、机械技术、电子技术、信息技术和人工智能技术的农业机械机器人的研制是当前国内外农业机具研究领域研究热点之一。

根据解决问题的侧重点不同, 将农业机器人概括为两大类: 行走系列机器人和机械手系列机器人^[2]。对于一般田间的耕耘、收获等作业, 用拖拉机、联合收割机等农业机械效率已经很高, 所以对这些作业的机械主要研究的是无人驾驶、自主行走问题。即研究的重点不是在作业部件上, 而是信息的采集、处理、传递及机器工作部件的调控等方面, 称为行走系列机器人。对于应用于蔬菜、水果生产作业的机器人, 研究的重点是目标的识别和定位以及机器人的核心工作部件—机械手, 称为机械手系列机器人。

日本的N Kondo等人研制了番茄收获机器人, 该机器人由机械手、末端执行器、视觉传感器、移动机构和控制部分组成^[3]。机械手末端执行器是带有软衬垫的吸引器, 中间有压力传感器, 把果实吸住后, 利用机械手的腕关节把果实拧下。从识别到采摘, 该番茄采摘机器人完成的速度大约为15个/秒, 成功率为70%左右。

在我国, 东北林业大学研制了林木球果采集机器人^[4]。该机器人可以在较短的林木球果成熟期大量采摘球果, 很好的解决了目前在林区主要采用人工上树手持专用工具来采摘林木球果的做法, 克服了工人劳动强度大、作业安全性差、生产率低, 且对母树损伤较大的问题, 大大提高了林木球果的采集效率。

中国农业大学率先在我国开展了蔬菜自动嫁接机器人技术^[5,6,7], 解决了蔬菜幼苗的柔嫩性、易损性和生长不一致性等难题, 实现了蔬菜幼苗嫁接的精确定位、快速抓取、良好切削。嫁接机器人能完成砧木、穗木的取苗、切苗、接合、固定、排苗等嫁接过程的自动化作业。操作者只需把砧木和穗木放到相应的供苗台上, 其余嫁接作业均由机器人自动完成。蔬菜嫁接机器人采用独特的嫁接方法, 用穴盘所育砧木苗可直接带根和土团嫁接, 嫁接速度达到600棵/小时, 成功率为95%以上, 可大大促进果蔬生产规模化、产业化和效益。

美国伊利诺依大学^[8], 肯塔基大学^[9], 乔治亚大学^[10]等在农业机械人的自动导航方面作了很多研究。自动导航技术包括机械导航、光学导航、无线电导航、超声波导航、地磁导航、机器视觉导航及基于GPS(Global Position System)系统的自动导航技术。

田间作业时经常使用两台, 甚至若干台机器人, 例如收获谷物时收割机与装

载谷物的货车协同作业。日本的Noboru Noguchi和美国的Jeff Will等人研究了农业田间管理很重要的主、从机器人系统^[11]，如图1-1所示。主车辆机器人具有决策功能并向从车辆机器人发送命令。从车辆机器人服从前者命令并反馈自己的状态信息，包括方位、姿态和运行状态等。他们主要研究多机器人系统的障碍避让算法，使得机器人能探测到障碍（包括它的伙伴）并采取避让措施（减速或改道）。

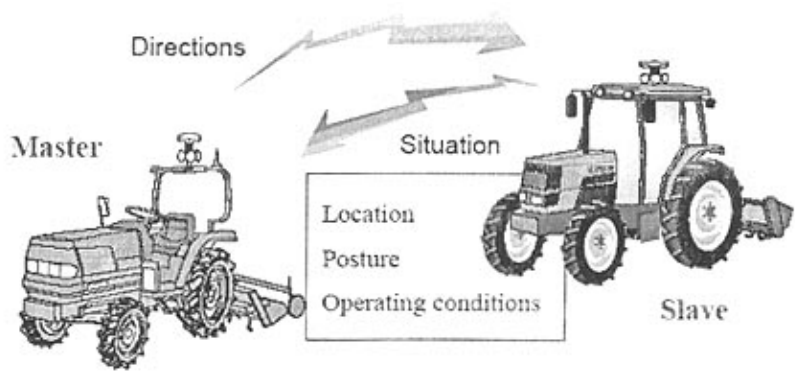


图1-1 主-从机器人系统

Fig.1-1 Master-Slave robot system

目前，由于农业生产所具有技术和经济方面的特殊性，农业机器人还没有达到实用化，绝大多数农业机器人处于研究阶段。

1.2 机器视觉

1.2.1 机器视觉概述

机器视觉就是用各种成像系统代替视觉器官作为输入敏感手段，由计算机来代替大脑完成处理和解释。机器视觉的最终研究目标就是使计算机能象人那样通过视觉观察和理解世界，具有自主适应环境的能力，要经过长期的努力才能达到的目标。因此，在实现最终目标以前，人们努力的中期目标是建立一种视觉系统，这个系统能依据视觉敏感和反馈的某种程度的智能完成一定的任务。

机器视觉是一个相当新且发展十分迅速的研究领域，并成为计算机科学的重要研究领域之一。机器视觉是在 20 世纪 50 年代从统计模式识别开始的，当时的工作主要集中在二维图像分析和识别上，如光学字符识别、工件表面、显微图片和航空图片的分析和解释等。60 年代，Roberts 通过计算机程序从数字图像中提取出诸如立方体、楔形体、棱柱体等多面体的三维结构，并对物体形状及物体的空间关系进行描述。到了 70 年代，已经出现了一些视觉应用系统。70 年代中期，麻省理工学院(MIT)人工智能(AI)实验室正式开设“机器视觉”(Machine Vision)课程。同时，MIT AI 实验室吸引了国际上许多知名学者参与机器视觉的理论、算法、系统设计的研究。可以说，对机器视觉的全球性研究热潮是从 20 世纪 80

年代开始的，到了 80 年代中期，机器视觉获得了蓬勃发展，新概念、新方法、新理论不断涌现，比如，基于感知特征群的物体识别理论框架、主动视觉理论框架、视觉集成理论框架等^[12]。

实质上，机器视觉是通过光学的装置和非接触的传感器自动地接收和处理一个真实物体的图像，以获得所需信息或用于控制机器人动作的装置。机器视觉借助于计算机软件对图像进行定量分析，其处理的速度与被处理图像的复杂程度有关。它具有快速、可靠、一致性高的优点。对于大批量生产有很好的经济效益。

1.2.2 机器视觉系统的组成

典型的机器视觉系统由图像采集部件、图像信息处理器（计算机）、信息输出（机机接口和人机接口）三大部分组成^[13,14]。图 1-2 是比较典型的机器视觉系统示意图。

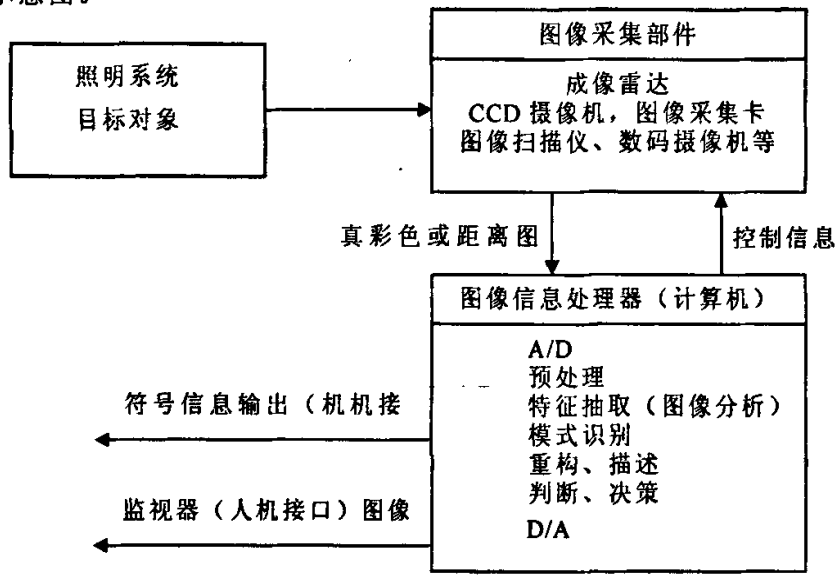


图 1-2 典型机器视觉系统示意图

Fig.1-2 Typical structure of a machine vision system

(1) 图像采集部件

原始的图像数据是通过图像采集部件进入计算机的，因而图像采集部件的作用是采集原始的模拟图像数据，并将模拟信号转换成数字信号。计算机在接收到图像的数字信号后，将其存入内存区。常用的图像采集部件有成像雷达、CCD 摄像头加上图像采集卡、图像扫描仪、数码摄像机等。

(2) 图像信息处理器

图像的处理工作通常是由计算机完成的，经过采集卡将模拟信号转换为数字信号后，图像信息在计算机中实现预处理、特征抽取（图像分析）、模式识别、重构、描述、判断、决策等一系列的处理。

(3) 信息输出（机机接口和人机接口）

识别信息的输出是图像处理的最终目的。从广义的角度讲，信息的输出形式可分为两种：一种是根据识别的结果作出判断，通常以符号信息的形式输出；另一种是以图像形式输出。

1.2.3 与机器视觉相关的学科领域

有不少学科的研究目标与机器视觉相近或有关。这些学科中包括图像处理、模式识别或图像识别、景物分析、图像理解等。由于历史发展或领域本身的特点这些学科互有差别，但又有某种程度的相互重叠。为了清晰起见，我们与机器视觉有关的学科研究目标和方法的角度加以归纳^[12,15,16,17]

(1) 图像处理

图像处理技术把输入图像转换成具有所希望特性的另一幅图像。例如，可通过处理使输出图像有较高的信-噪比，或通过增强处理突出图像的细节，以便于操作员的检验。在机器视觉研究中经常利用图像处理技术进行预处理和特征抽取。

(2) 模式识别（图像识别）

机器视觉的最重要目的之一就是识别，这也是图像技术非常重要的原因。模式识别技术根据从图像抽取的统计特性或结构信息，把图像分成给定的类别。例如，文字识别或指纹识别。在机器视觉中模式识别技术经常用于对图像中的某些部分，例如分割区域的识别和分类。

(3) 图像理解（景物分析）

给定一幅图像，图像理解程序不仅描述图像本身，而且描述和解释图像所代表的景物，以便对图像代表的内容作出决定。在人工智能视觉研究的初期经常使用景物分析这个术语，以强调二维图像与三维景物之间的区别。图像理解除了需要复杂的图像处理以外还需要具有关于景物成像的物理规律的知识以及与景物内容有关的知识。

(4) 人工智能

人工智能涉及到智能系统的设计和智能计算的研究。在经过图像处理和图像特征提取过程后，接下来要用人工智能方法对场景特征进行表示，并分析和理解场景。人工智能有三个过程：感知、认知和行动。感知是把反应现实世界的信息转换成信号，并表示成符号，认知是对符号进行各种操作，行动则把符号转换成影响周围环境的信号。人工智能的许多技术在机器视觉的各个方面起着重要作用。事实上，机器视觉通常被视为人工智能的一个分支。

(5) 人工神经网络

人工神经网络是一种信息处理系统，它是由大量简单的处理单元（称为神经元）通过具有强度的连接相互联系起来，实现并行分布式处理。人工神经网络的最大特点是可以通过改变连接强度来调整系统，使之适应复杂的环境，实现类似人的学习、归纳和分类等功能。人工神经网络已经在许多工程技术领域得到了广泛的应用。神经网络作为一种方法和机制将用于解决机器视觉中的许多问题。

在建立机器视觉系统时需要用到上述学科中的有关技术,但机器视觉研究的内容要比这些学科更为广泛。机器视觉的研究与人类视觉的研究密切相关,目前,许多机器视觉研究者对研究人类视觉计算模型比研究机器视觉系统更感兴趣,希望机器视觉更加自然化,更加接近生物视觉。为实现建立与人的视觉系统相类似的通用机器视觉系统的目标需要建立人类视觉的计算机理论。

1.3 基于机器视觉的杂草识别国内外研究

从 20 世纪 80 年代至今,基于机器视觉的杂草检测和识别技术研究经历了从室内到田间;从非实时到实时的发展过程。机器视觉主要是通过对植物的特性进行检测和识别,如:形状特征,纹理特征,多光谱特性和颜色特征,位置特征等。

机器视觉对杂草的识别目前在国内外基本还处于研究开发阶段。

Woebbecke D.M.等^[18]将几种植物和土壤的图像像素R,G,B(Red,Green,Blue)值分别用色度坐标系和HSI(Hue,Saturation,Illumination)坐标系表示。发现使用色度坐标值可以减少阴影的影响,植物与背景土壤和残茬的色度坐标值差异很大,利用 $r-g$ 、 $g-b$ 、 $(g-b)/(r-g)$ 和 $2g-r-b$ 等因子来区别植物与非植物背景是非常有效的,其中 $2g-r-b$ 这一因子用于植物检测最为有效。此外,他们还利用HSI模型中经变化后的色调值 H 来进行植物与背景分割,获得了较好的结果,但是要比 $2g-r-b$ 这一因子费时间。Shearer S. A.等^[19]研究了在波长1100~2500 nm范围内植物与背景(土壤和残茬)的反射特性、4种滤光片的透射特性以及光电探测器的灵敏度,提出了选取滤光片和探测器的方法。选用锗探测器,波长为1100 nm和1600nm的滤光片,通过获得反射率的比值分离植物与背景,准确率达100%。Meyer G.E.等^[20]利用像素的R,G,B值建立了一个 ExG 参数来区分植物和土壤背景,分析得出植物的平均 ExG 值为 113 ± 99 ,而土壤的平均 ExG 值为 -15 ± 10 ,利用此参数可以很好地实现植物与土壤的背景分离,准确率为99%。Burks T.F.等^[21]在利用颜色特性对杂草分类时发现,色调值 H 可以很准确地区分植物(包括5种杂草)和土壤。土壤的色调均值为26.6(0~63级),方差为3.5,植物的色调均值为39.1(0~63级),方差为711。作出植物与土壤的色调直方图,发现分割植物和土壤的色调最佳阈值为34。

以上课题的研究都是通过颜色特征值实现杂草和土壤的分离,研究的背景都是在室内而且是在静态情况摄取图像,图像的处理也是离线的。

纹理是图像中的一个重要特征,在图像上表现为灰度或颜色分布的某种规律性。Hayes J.C.等^[22]利用纹理分析中的灰度共生矩阵进行了植物检测,发现当植物与背景颜色特征相差不明显时,纹理分析的分割效果要好于颜色分析。另外,与彩色图像系统相比,纹理分析可以减少成本。

目前,大多数用于植物检测的机器视觉系统在人为控制的光照条件下,而自然光照由于易受外部环境的干扰,会影响获取图像的质量和信

等^[23]在田间自然光照下获取图像有效完成了对杂草的检测。Tang L.等^[24]在室外自然光照条件下,以人工分割的结果为导师信号,在色调、饱和度、亮度(HSI)彩色坐标下,利用遗传算法进行了植物和背景的分割。实验中的图像分别在天气晴朗和多云的条件下获取,结果表明:该算法(GAHSI)在HSI空间下检测植物,可克服室外自然光引起的影响。以上研究对杂草的识别从室内走出了室外,但依然是在静态情况下摄取的图像进行处理。

在中国,基于机器视觉的杂草识别技术处于研究探索阶段,与国外差距比较大。相阿荣等人^[25]研究了利用颜色特征从土壤背景中识别杂草的方法以及形状特征识别杂草的方法。龙满生等人^[26]以玉米苗期杂草为研究对象,分析了不同的颜色指标分割背景的可行性以及应用形状因子识别玉米和杂草的方法。刘敏等人^[27]把分形维数引入自然光照条件下田间杂草图像纹理的分析中,用分形维数来表征微观杂草叶子纹理和宏观杂草丛纹理的粗糙程度,取得了一定的区分识别效果,与传统的纹理分析方法相比,该方法在时间复杂度和识别效果上具有明显的优势。

纪寿文等人^[28]在光照明亮充足的条件下,利用开发的机器视觉系统实地采集了玉米苗期的田间图像,提取了投影面积、最大叶长和最大叶宽3个形状特征来识别玉米苗中的杂草,试验结果表明:此方法可有效地识别出玉米苗期(五叶期)田间细长的单子叶杂草,根据田间杂草的投影面积可较有效地判定田间杂草的生长情况;但是,该算法不适用于玉米的植株比杂草矮小的情况和田旋花等叶片比较宽大的双子叶杂草的识别,识别准确性受太阳光光照强度和土壤种类及其含水量的影响。尚卓等人^[29]应用图像处理技术及自动控制技术完成在自然光条件下对旱田作物(棉花、小麦、玉米等)及果树(或道路两旁林木)实时喷药的农药喷洒系统初步探索。首先通过VFW(Video for Windows)技术进行图像和视频的获取,然后,对采集的数字图像利用改进的绿色像素分割法分割二值化,通过计算出绿色像素占整个采集面积的百分比决定是否喷洒农药。

总的来说,利用机器视觉对杂草的识别,国外的研究比较先进,但国内的研究也很活跃,但都局限在单一技术上,本课题尝试将对杂草识别融合到除草机器人上,为它提供杂草的位置信息。

1.4 基于机器视觉的农田导航技术国内外研究

Kanuma等人^[30,31,32]于1997年底研制的旱地自主行走结球菜收获机器人样机,采用了根据菜地田间图像确定作物行与机器人的相对位置,规划出行走基准线的无线引导视觉导航方法。该方法通过适当的二值化处理,将色调和亮度两要素设定为二值条件,通过二值图像的压缩和滤波处理,除去图像上的细小干扰;并通过从图像中央向左右两边巡查的方式查出边界点,利用两条道路边界线平行的特点,求得图像上无限远处的点和机器人的自身位置及行走方向。

Reid^[33]研究应用Bayesian估算法在黑白二值图像上分离作物畦和沟的面积,

并应用Hough变换抽取边缘线,作为机器人行走基准线。Marchant等^[34]以二值化图像的中间行各斑块的中心点作为特征点,并应用Hough变换,提取出直线参数。这种方法的图像处理频率可达10Hz, RMS(Root Mean Square)误差为:侧向偏差小于12.5 mm,偏向角小于 1.0° 。

沈明霞等提出:以小波并加入模糊检测算法来检测农作物行边缘^[35];基于纹理谱的方向度参数的图像分割^[36];基于形态特征的图像分割^[37]。周俊^[38]提出在用小波多尺度方法分解图像后,用融合的思路综合各个尺度下的边缘检测结果的方法。

以上的导航研究只是单一视觉导航技术研究,没有考虑农业机器人行走的实时性,采集的图像数量大,计算机处理的时间比较长。

1.5 课题的研究内容及意义

1.5.1 课题来源

本课题来源于江苏省科学技术厅国际科技合作项目:除草机器人关键技术研究(项目编号: BZ2005044)。该项目综合国外最新精确农业研究成果,创造性地研究基于直接施药方法的除草机器人的关键技术。力图使得农田除草工作主要由除草机器人来完成。可以大大减少人们的烦琐劳动;有选择地、精确地施用除草剂,避免伤及作物;与传统的喷雾施药方法相比,大幅减少除草剂的用量,保护了环境。

1.5.2 研究内容

本课题主要研究能够自主行走、能够实现定点除草的除草机器人。具体内容是:①基于机器视觉技术,研究杂草目标的实时动态检测。②基于机器视觉技术,研究除草机器人以农作物行中心线为基准线的自动导航技术,实现其自主行走。

农田作物,如玉米、大豆都是以行为单位进行种植,行间有一定的间距。在农作物生长的同时,一些杂草生长在农作物的行间和行内,本课题主要研究行间杂草的识别。除草机器人上安装的视觉传感器识别出农作物的行中心线,并计算出除草机器人位姿,除草机器人以农作物行中心线为基准线,沿行自主行走。在行走规定长度(除草机械手在行走方向上的工作长度)后,除草机器人停止行走,利用机器视觉技术检测农作物行间杂草,并确定杂草位置,机械手臂移动到杂草位置,自动进行除草,除草动作结束后,机器人继续沿农作物行行走。

1.5.3 研究意义

本课题的动态杂草检测是在室外自然光条件下,除草机器人利用视觉传感器对行间杂草进行在线实时检测,除草机器人进行除草任务。本课题通过机器视觉对杂草的识别从静态走向了动态,从室内可控光条件走向了室外自然光条件下。

本课题另一个研究重点是通过机器视觉识别出农作物行中心线,并以此为基准线,引导除草机器人沿行行走。此技术研究成功,可以使农业机械在作业过程中沿行自主行走,大大提高农业机械的自动化程度,减少操作人员的操作时间和

减轻劳动强度，并且向农业机械设备的完全自主行走前进了一步，从长远角度看能够减少农业作业成本，有利于农业的智能化和自动化。除草机器人利用“直接施药方法”除草研制成功，将大大减少除草剂的施用量，而且消除了雾滴飘移，对于环境保护具有重要的意义。

第二章图像处理与识别技术

2.1 图像获取

图像获取是进行图像处理的前提。图像分为模拟图像和数字图像，将模拟图像采样量化进行数字形成的图像称为数字图像。由于计算机科学和微电子技术的发展，数字图像成为主要方式。图像的数字化主要涉及成像及模数转换（A/D Converter）技术，随着计算机与微电子特别是固体成像设备（电耦合设备 CCD(Charge Coupled Devices)）的快速发展，使得图像获取设备的成本显著降低，因而越来越普及。

以 CCD 技术为核心，目前图像获取设备有黑白摄像机、彩色摄像机、扫描仪、数字相机等，性能与价格主要取决于 CCD 的规格，如尺寸等。除了这些常见的类型外，目前有许多厂商提供各种其它的专用设备，如显微摄像设备、红外摄像机、高速摄像机、胶片扫描器等等。此外，遥感卫星、激光雷达等设备提供其它类型的数字图像。CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)即“互补金属氧化物半导体”图像传感器的出现，使成像成本更低，而且易于大规模生产。

目前，图像的数字化设备可分为两类，一类是基于图像采集卡或图像卡将模拟制式的视频信号采集到计算机，另一类是摄像机本身带有数字化部件可以直接将数字图像通过计算机端口（如并口、USB 接口）或标准设备（如磁盘驱动器）传送给计算机。

在其自然的形式下，图像并不能直接由计算机分析。因为计算机只能处理数字而不是图像，所以一幅图像在用计算机进行处理前必须先转化为数字形式。

图像转化为数字形式的方法是将物理图像经过采样划分为称作图像像素的小区域，即像素（pixel）。最常见的划分方案是方形采样网格，图像被分割成由相邻像素组成的许多水平线。经过采样后的图像还不是数字图像，因为这些像素上的灰度值仍是一个连续量，必须进行量化。所谓量化就是将每个像素的亮暗程度用一个整数值来表示，即像素的灰度离散化。完成上述转化后，图像被表示为一个整数矩阵。每个像素具有两个属性：位置和灰度。在采样与量化处理后，一幅图像完成了数字化，运用电脑上的图像处理软件可以对图像进行各种处理。

2.2 图像处理的基本方法

图像处理就是以各种形式的运算符 Q 来对图像 F 进行处理，也即图像处理可表达为 $Q(F)$ ，算符 Q 的形式决定于图像处理的目的以及 F 的数学模型，为此首先应该对图像的数学模型进行描述。一幅图像可表达成三种不同的数学模型，它们是连续模型、离散模型和随机场模型。这些数学模型都建立在把图像看作像素点的集合的基础上。

连续模型是从一维的时间函数引伸出来的一种表达方式。对于一幅图像来

说，它以灰度图像 F 在 (x, y) 二维空间的连续变化来描述，

即图像 $=f(x, y)$

对于序列图像来说，

图像序列 $=\{f_1(x, y), f_2(x, y), \dots, f_i(x, y)\}$

或

图像序列 $=f(x, y, t)$

二维的图像函数 $f(x, y)$ 经过系统 S 变成另外一个二维图像函数 $g(x, y)$ 是图像处理的基本形式，如图 2-1 所示。

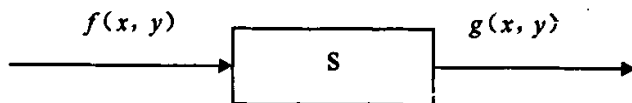


图 2-1 图像处理的基本框图

Fig.2-1 Basic procedure of image processing

对图 2-1 来说，可以有

$$g(x, y) = S[f(x, y)] \quad (2-1)$$

这里系统 S 可以是某种处理方法，也可以是某种招致图像变质的原因。因此随着任务的不同，式 (2-1) 也可写为：

$$g(x, y) = S^{-1}[f(x, y)] \quad (2-2)$$

以表示对图像的复原。对于连续数学模型来说，无论是式 (2-1) 或式 (2-2) 的求解都建立在一维线性时不变系统的基础上。

2.3 图像处理与识别概述

数字图像处理最早的应用之一是在报纸业，当时，图像第一次通过海底电缆从伦敦送往纽约。数字图像处理技术在 20 世纪 60 年代末和 70 年代初开始应用于医学、地球遥感监测和天文学领域，数字图像处理技术开始崭露头角。数字图像处理的目的是在机器上实现生物特别是人类所具有的视觉信息处理和加工功能。近年来，图像处理和识别的研究在我国受到了广泛的重视，取得了卓有成效的进展，已经开始走上实用化的阶段。一方面，在我们能最终在机器上实现各种视觉信息功能之前还需要很多理论和技术上的突破。

数字图像处理的研究内容概括起来可包括以下几个方面^[39]：

1. 图像数字化

其目的是将模拟形式的图像通过数字化设备变为数字计算机可用的离散的图像数据，它主要包括采样和量化技术。

2. 图像变换

为了便于后续的工作，需要进行图像变换以改变图像的表达域和表示数据。它主要包括傅里叶变换、余弦变换、沃尔什-哈达玛变换、奇异值分解、KL 变

换等。

3. 图像增强

图像增强是一种改善人们的视觉效果，或便于人或机器分析、理解图像内容为主要目的的改善图像质量的方法。它主要包括对比度增强、直方图修正、平滑、锐化、同态增晰、几何校正、伪彩色、图像间的算术运算等。

4. 图像恢复

图像恢复对失真的图像进行处理，使处理后的图像尽量接近原始的未失真的图像。

5. 图像分割

图像分割是指根据选定的特征将图像划分成若干个有意义的部分，从而使原图像表达上更为简单明了，后续图像分析和理解打下了基础。

6. 图像分析与描述

对已分割的或正在分割的图像中各部分属性及各部分关系的描述。

7. 图像数据压缩

由于图像通常存在空间上、时间上或内容上的冗余性，为了利于传输和存储，要减少图像数据量，将一个大的数据文件转换成较小的同性质的文件。它主要包括轮廓编码压缩，行程编码压缩，预测误差编码压缩，自适应编码压缩，混合编码压缩，子带编码技术，基于人工神经网络的技术，基于分形几何理论的压缩方法，运用小波技术数据压缩。

8. 图像重建

图像重建是由一组关于目标某一部面的一维投影曲线重构该部面二维图像的技术。

2.4 一般的图像处理与识别过程

1. 图像的预处理

图像预处理是相对于图像识别、图像理解而言的一种前期处理。通常输入的图像不能令人满意，如：按检测对象物大小和形状的要求看，图像的边缘过于模糊；作为农产品的质量检验员，常常企望图像中对象物的正常组织与质变组织之间有最大的辨别力；在图像总体很清晰的情况下，有时需要重点识别的部分却并不突出；在一幅图像上发现多了一些不知来源的黑点或白点；图像的失真、变形等等。总之，输入图像在视觉效果和识别方便性等方面可能存在诸多问题，这类问题不妨统称为“质量”问题。由于目的、观点、爱好等的不同，图像质量很难有统一的定义和标准，根据应用要求改善图像质量却是一个共同的愿望。改善图像质量的处理称为图像预处理，图像预处理在工程上大致包括以下2种类型：

(1) 图像增强处理

图像增强处理是指按需要突出某些有用的信息，去除或削弱有害无益的信息，如改变图像对比度，去除噪声或强调边缘的处理等都属于这一类。这

类处理在图像预处理中占有重要的地位。

(2) 图像恢复处理

由于种种原因,输入计算机的图像与实际图像相比,其面貌发生了变化,如信息丢失、噪声污染、形态模糊等,这些现象被认为是图像的退化。当噪声引起的图像质量下降的原因能用数学模型来描述时,或者说图像退化模型是已知的或可建立的,则采用图像降质的相反过程进行处理,可有效地消除噪声,将图像恢复其原来的面貌,这类处理被称为图像复原处理。

2. 图像的分割

图像中的区域是指相互连结的具有相似特性的一组像素。由于区域可能对应场景中的物体,因此,区域的检测对于图像解释十分重要。一幅图像可能包含若干个物体,而每一个物体又可能包含对应于物体不同部位的若干个区域。为了精确解释一幅图像,首先要把一幅图像划分成对应于不同物体或物体不同部位的区域。

图像分割是图像分析和机器视觉低层次处理中最基本最重要的研究内容,是成功地进行下一步图像分析和理解的关键技术,因此图像分割结果的质量直接影响以后进行的分析和理解的质量。

对灰度图像的分割常基于图像灰度值的两个性质:不连续性和相似性。图像分割有三种不同的途径,其一是将各像素划归到相应物体或区域的像素聚类方法即区域法,其二是通过直接确定区域间的边界来实现分割的边界方法,其三是首先检测边缘像素再将边缘像素连接起来构成边界形成分割。

3. 图像识别

图像识别的主要方法可分为两大类,这就是统计学方法和语言学方法。前一种方法是建立在被研究对象的统计知识上,也就是对图像进行大量的统计分析,抽出图像本质的特征而进行识别。这是一种数学方法,它是受数学中的决策理论的启发而产生的识别方法。在这种方法中很大的力量用在抽取图像特征方面,也就是把图像大量的原始信息减缩为少数特征,然后再提取这些特征,把它作为识别的依据。另外一种方法是语言学法或句法结构识别法。它是立足于分析图像结构

2.3 图像处理软件编程

2.3.1 面向对象和 Windows 编程

面向对象技术是目前流行的系统设计开发技术,它包括面向对象分析和面向对象程序设计。面向对象程序设计技术的提出,主要是为了解决传统程序设计方法——结构化程序设计所不能解决的代码重用问题。面向对象程序设计从所处理的数据入手,以数据为中心而不是以服务(功能)为中心来描述系统。它把编程问题视为一个数据集合,数据相对于功能而言,具有更强的稳定性。

面向对象的编程方法具有四个基本特征^[40]:

- 抽象性:抽象就是忽略一个主题中与当前目标无关的那些方面,以便更

充分地注意与当前目标有关的方面。抽象并不打算了解全部问题，而只是选择其中的一部分，暂时不用部分细节。

- 继承性：继承是一种联结类的层次模型，并且允许和鼓励类的重用，它提供了一种明确表述共性的方法。对象的一个新类可以从现有的类中派生，这个过程称为类继承。继承性很好地解决了软件的可重用性问题。
- 封装性：封装是面向对象的特征之一，是对象和类概念的主要特性。封装是把过程和数据包围起来，对数据的访问只能通过已定义的界面。
- 多态性：多态性是指允许不同类的对象对同一消息作出响应。多态性语言具有灵活、抽象、行为共享、代码共享的优势，很好地解决了应用程序函数同名问题。

面向对象程序设计具有许多优点：

- 开发时间短，效率高，可靠性高，所开发的程序更强壮。由于面向对象编程的可重用性，可以在应用程序中大量采用成熟的类库，从而缩短了开发时间。
- 应用程序更易于维护、更新和升级。继承和封装使得应用程序的修改带来的影响更加局部化。

2.3.2 MFC 编程

微软基础类库 MFC (Microsoft Foundation Class) 是微软为 Windows 程序员提供的一个面向对象的 Windows 编程接口，它大大简化了 Windows 编程工作。使用 MFC 类库的好处是：首先，MFC 提供了一个标准化的结构，这样开发人员不必从头设计创建和管理一个标准 Windows 应用程序所需的程序；其次，它提供了大量的代码，指导用户编程时实现某些技术和功能。

基础类库 MFC，其中包含用来开发 C++ 和 C++ Windows 应用程序的一组类。基础类库的核心是以 C++ 形式封装了大部分的 Windows API (Application Program Interface)。类库表示窗口、对话框、设备上下文、公共 GDI (Graphical Device Interface) 对象如画笔、调色板、控制框和其他标准的 Windows 部件。这些类提供了一个面向 Windows 中结构的简单的 C++ 成员函数的接口。

MFC 可分为两个主要部分：(1) 基础类，(2) 宏和全程函数。

2.3.3 Visual C++ 数字图像处理编程

1. Windows 调色板

PC 机上显示的图像是由一个个像素组成的，每个像素都有自己的颜色属性。在 PC 的显示系统中，像素的颜色是基于 RGB 模型的，每一个像素的颜色由红 (R)、绿 (G)、蓝 (B) 三原色组合而成。每种原色用 8 位表示，这样一个的颜色就是 24 位的。以此推算，PC 的适配器可以同时显示 2^{24} 约一千六百万种颜色。24 位的颜色通常被称作真彩色，用真彩色显示的图像可达到十分逼真的效果。

但是，真彩色的显示需要大量的视频内存，一幅 640×480 的真彩色图像需要约 1MB 的视频内存。由于数据量大增，显示真彩色会使系统的整体性能迅速下

降。为了解决这个问题，计算机使用调色板来限制颜色的数目。调色板实际上是一个有 256 个表项的 RGB 颜色表，颜色表的每项是一个 24 位的 RGB 颜色值。使用调色板时，在视频内存中存储的不是的 24 位颜色值，而是调色板的 4 位或 8 位的索引。这样一来，显示器可同时显示的颜色被限制在 256 色以内，对系统资源的耗费大大降低了。

2. 位图文件

Windows 用位图 BMP (Bitmap) 来显示和保存图像，从单色的到 24 位真彩色图像都可以存储到位图中。位图实际上是一个像素值阵列，像素阵列存储在一个字节数组中，每一个像素的位数可以是 1、4、8 或 24。单色位图的字节数组中的每一位代表一个像素，16 色位图的字节数组中每一个字节存储两个像素，256 色的位图每一个字节存储一个像素，而真彩色位图中每个像素用三个字节来表示。在 256 色以下的位图中存储的像素值实际上是调色板索引，在真彩色位图中存储的则是像素的 RGB 颜色值。

在 Windows 环境下运行的所有图像处理软件都支持 BMP 图像文件格式。位图一共有两种类型，Windows 3.0 以前的 BMP 图文件格式与显示设备有关，因此把这种 BMP 图像文件格式称为设备相关位图 DDB(Device Dependent Bitmap)文件格式。Windows 3.0 以后的 BMP 图像文件与显示设备无关，因此把这种 BMP 图像文件格式称为设备无关位图 DIB(Device Independent Bitmap)格式。其中，设备无关位图(DIB)文件格式具有更强的灵活性与完整的图像数据，它包含下列的颜色和尺寸信息：

- 原始设备（即创建图片的设备）的颜色格式；
- 原始设备的分辨率；
- 原始设备的调色板；
- 一个位数组，由红、绿、蓝（RGB）三个值代表一个像素；
- 一个数组压缩标志，用于表明数据的压缩方案（如果需要的话）。

BMP 图像文件的结构可以分为如下三个部分：文件头、调色板数据以及图像数据。其中文件头的长度为固定值 54 个字节；调色板数据对所有不超过 256 色的图像模式都需要进行设置，即使是单色图像模式也不例外，但是对于真彩色图像模式，其对应的 BMP 文件结构中却不存在相应调色板数据的设置信息；图像数据既可以采用一定的压缩算法进行处理，也可以不必对图像数据进行压缩处理，这不仅与图像文件的大小相关，而且也与对应的图像处理软件是否支持经过压缩处理的 BMP 图像文件相关。以下将分别介绍 BMP 图像文件结构中的这三个重要组成部分。特别值得注意的是：BMP 图像文件结构设计得相当简单，这无疑有利于图像文件的处理速度，但是同时也使得 BMP 图像文件格式具有一定的局限性，即一个 BMP 图像文件只能存储一幅图像。

BMP 文件格式

位图文件可看成由 4 个部分组成：位图文件头(Bitmap file header)、位图信息头(Bitmap information header)、颜色表(RGBQUAD)和定义位图的字节阵列，如表 2-1 所示。

表 2-1 Windows 位图文件结构示意图

Tab2-1 Structure of Windows Bitmap

位图文件组成	结构名称	符号
位图文件头 (Bitmap file header)	BITMAPFILEHEADER	bmfh
位图信息头 (Bitmap information header)	BITMAPINFOHEADER	bmih
颜色表 (Color table)	RGBQUAD	aColors[]
图像数据阵列字节	BYTE	aBitmapBits[]

第一部分：位图文件头包含有关于文件类型、文件大小、存放位置等信息，在 Windows 3.0 以上版本的位图文件中用 BITMAPFILEHEADER 结构来定义：

```
typedef struct tagBITMAPFILEHEADER {  
    WORD    bfType;  
    DWORD   bfSize;  
    WORD    bfReserved1;  
    WORD    bfReserved2;  
    DWORD   bfOffBits;  
} BITMAPFILEHEADER;
```

这个结构的长度是固定的，为14个字节

- bfType: 指定文件类型，必须是0x424D，即字符串"BM"，也就是说所有.bmp文件的头两个字节都是"BM"；
- bfSize: 指定文件大小，包括这14个字节；
- bfReserved1, bfReserved2: 为保留字，必须设置为0；
- bfOffBits : 说明从文件头开始到实际的图像数据之间的字节的偏移量，即表2-1中前三个部分的长度之和。这个参数是非常有用的，因为位图信息头和调色板的长度会根据不同情况而变化，所以你可以用这个偏移值迅速从文件中读取到位数据。

位图文件头后面紧跟的是第二部分：位图信息头(Bitmap information header)是用 BITMAPINFOHEADER 结构定义的，BITMAPINFOHEADER 结构包含有位图文件的大小、压缩类型和颜色格式，其结构定义为：

```
typedef struct tagBITMAPINFOHEADER{  
    DWORD   biSize;  
    LONG    biWidth;  
    LONG    biHeight;  
    WORD    biPlanes;
```

```

WORD    biBitCount
DWORD   biCompression;
DWORD   biSizeImage;
LONG    biXPelsPerMeter;
LONG    biYPelsPerMeter;
DWORD   biClrUsed;
DWORD   biClrImportant;
} BITMAPINFOHEADER;

```

这个结构的长度是固定的，为40个字节，其中：

- **biSize**: 指定这个结构的长度，为40；
- **biWidth**: 说明图像的宽度，单位是像素；
- **biHeight**: 说明图像的高度，单位是像素；
- **biPlanes**: 为目标设备说明位面数，其值将总是被设为1；
- **biBitCount**: 说明颜色时要用到的位数，常用的值为1（黑白二色图），4（16色图），8（256色），24（真彩色图）；
- **BiCompression**: 说明图像数据压缩的类型，其值可以是：**BI_RGB**: 没有压缩；**BI_RLE8**: 每个像素8比特的RLE压缩编码，压缩格式由2字节组成（重复像素计数和颜色索引）；**BI_RLE4**: 每个像素4比特的RLE压缩编码，压缩格式由2字节组成；**BI_BITFIELDS**: 每个像素的比特由指定的掩码决定；
- **BiSizeImage**: 说明图像的大小，以字节为单位。当用**BI_RGB**格式时，可设置为0。其实也可以从以下的公式中计算出来： $biSizeImage = biWidth' * biHeight$ ；
- 要注意的是：上述公式中的 $biWidth'$ 必须是4的整倍数（所以不是 $biWidth$ ，而是 $biWidth'$ ，表示大于或等于 $biWidth$ 的，离4最近的整倍数。举个例子，如果 $biWidth=240$ ，则 $biWidth'=240$ ；如果 $biWidth=241$ ， $biWidth'=244$ ）；
- **biXPelsPerMeter**: 说明目标设备的水平分辨率，用像素/米表示；
- **biYPelsPerMeter**: 说明目标设备的垂直分辨率，用像素/米表示；
- **BiClrUsed**: 说明位图实际使用的彩色表中的颜色索引数，如果该值为零，则用到的颜色数为2的 $biBitCount$ 次方；
- **BiClrImportant**: 说明对图像显示有重要影响的颜色索引的数目，如果是0，表示都重要。

第三部分为颜色表(RGBQUAD)，包含的元素与位图所具有的颜色数相同，像素的颜色用RGBQUAD结构来定义。对于24位真彩色图像就不使用调色板（同样也包括16位和32位位图），因为位图中的RGB值就代表了每个像素的颜色。调色板中的颜色按颜色的重要性排序，这可以辅助显示驱动程序为不能显示足够多颜色数的显示设备显示彩色图像。

颜色表实际上是一个数组，共有 $biClrUsed$ 个元素（如果该值为零，则有2的

biBitCount次方个元素)。数组中每个元素的类型是一个RGBQUAD结构，占4个字节，其定义如下：

```
typedef struct tagRGBQUAD {  
    BYTE    rgbBlue; //该颜色的蓝色分量  
    BYTE    rgbGreen; //该颜色的绿色分量  
    BYTE    rgbRed; //该颜色的红色分量  
    BYTE    rgbReserved; //保留值  
} RGBQUAD;
```

第四部分就是实际的图像数据了。紧跟在调色板之后的是图像数据字节阵列。图像的每一扫描行由表示图像像素的连续的字节组成，每一行的字节数取决于图像的颜色数目和用像素表示的图像宽度。扫描行是由底向上存储的，这就是说，阵列中的第一个字节表示位图左下角的像素，而最后一个字节表示位图右上角的像素。

第三章基于机器视觉的杂草识别

3.1 图像的色彩模式

据统计,在人类接收的信息中,听觉信息占 20%,视觉信息占 60%,其它如味觉、触觉、嗅觉总的加起来不过占 20%。所以,占传递信息的重要媒体和手段-图像信息十分重要。

为了正确使用颜色和对颜色进行量化处理,需要建立色彩模式。色彩模式(色彩空间)是表示色彩以及它们之间相互联系的方式。根据需要,不同的图像处理系统使用不同的色彩模式。彩色印刷使用 CMY 模式,CRT 显示器以及绝大部分计算机系统使用 RGB 模式,对于要分别处理色度、饱和度 and 亮度的系统则使用 HSI 模式。

色彩模式还有 YCbCr、XYZ、Lab、YUV、YIQ、和 UVW 模式。

3.1.1 RGB 模型

这个模式基于笛卡尔坐标系统,3 个轴分别为 R、G、B,如图 3-1。我们感兴趣的部是个正方体。原点对黑色,离原点最远的顶点对应白色。在 RGB 模型中,从黑到白的灰度值分布在从原点到离原点最远顶点间的连线上,而立方体内其余各点对应不同的颜色,可用从原点到该点矢量表示。为方便,我们将立方体归一化为单位立方体,这样所有的 RGB 的值都在区间[0,1]中。

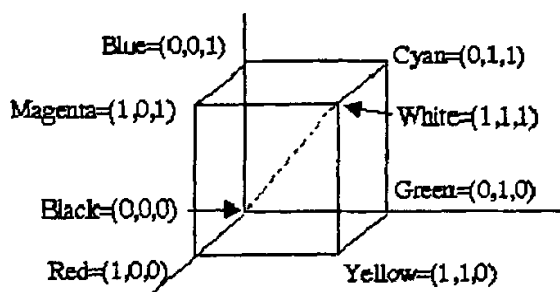


图 3-1 RGB 彩色立方体

Fig.3-1 Cube of RGB model

我们经常要将 RGB 图像转换成灰度图像,如用打印机做图像的硬拷贝。可以用下面两个表达式将 RGB 图像转换成灰度图像:

$$\text{灰度} = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (3-1)$$

或

$$\text{灰度} = 0.333R + 0.333G + 0.333B \quad (3-2)$$

RGB 模型简化了计算机图形系统的设计,但是有其局限性。由于红绿蓝三原色高度相关,因此不适宜某些图像处理系统。

3.1.2 HSI 模型

利用色度 (Hue)、饱和度 (Saturation)、亮度 (Illumination) 三个参数描述色彩模型，称为 HSI 模型。在 HSI 模型中，我们不需要知道多少蓝色或绿色来调制一个色彩，只需要调节色度就可以得到我们需要色彩了。调节饱和度就可以将深红色变成粉红，调节亮度就可以改变图像的明和暗。许多设备使用 HSI 色彩模式。机器视觉使用 HSI 模式来识别不同物体的色彩。

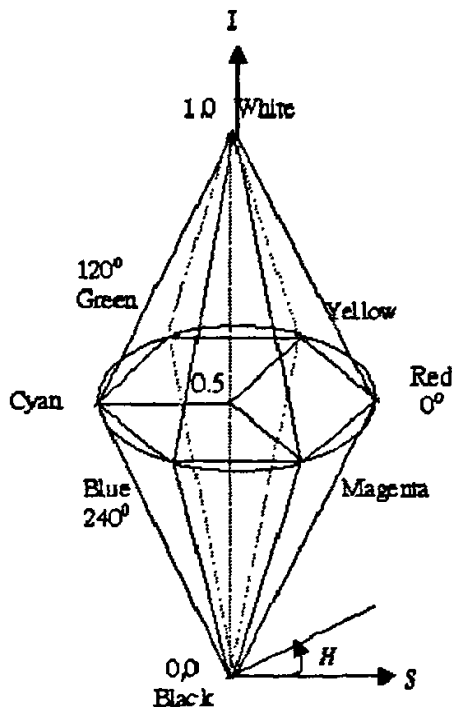


图 3-2 HSI 色彩模型

Fig. 3-2 HSI Color mode

如图 3-2 所示，HSI 模式用圆柱坐标表示，色度 H 用角度表示，从 0 度到 360 度；饱和度 S 对应半径，从 0 到 1；亮度 I 沿纵轴从黑到白。

当 S=0 时，色彩的灰度为 1；当 S=1 时，色彩位于圆锥边缘，饱和度增加，色彩离纵轴越远。

调节色度时，0 对应红色；120 度对应绿色；240 度对应蓝色；360 度又返回红色。当 I=0 时，色彩为黑色，因此 H 没有定义。当 S=0 时，色彩为灰度级，此时 H 也没有定义。

可以用下列表达式将 RGB 图像转换成 HSI 图像：

$$H = \begin{cases} \theta \\ 360 - \theta \end{cases} \quad (3-3)$$

此处 θ 值为:

$$\theta = \arccos \left[\frac{1/2[(R-G)+(R-B)]}{\sqrt{(R-G)^2 + (R-B)(G-B)}} \right] \quad (3-4)$$

色度分量由下式给出:

$$S = 1 - \frac{3}{R+G+B} [\min(R, G, B)] \quad (3-5)$$

强度分量由下式给出:

$$I = 1/3(R+G+B) \quad (3-6)$$

3.2 图像处理与杂草识别算法

随着生态环境的恶化,人类在农业生产活动提出了“精确农业”生产概念。田间杂草的生长会严重影响农作物的生长和质量,所以除草活动是农田生产中必不可少的生产活动。现代农业设备技术的发展大大提高了农业机械化,然而精确农业要求现代农业设备具有智能化。

机器视觉技术的发展为农业设备的智能化提供了可能。对于除草活动可以利用机器视觉技术判定杂草位置来代替人眼的功能。本课题的研究内容之一就是利用机器视觉技术确定杂草位置,然后进行除草。本课题杂草识别的研究主要研究农作物行间杂草的识别。

3.2.1 图像分割

基于像素的灰度值对图像进行分割,适用于灰度图像。对于一幅由不同颜色组成的彩色图像或者由多光谱扫描器获得的图像的分割,通常采用的方法是基于颜色或频谱标记图对像素进行分类,从而达到对图像进行分割的目的。基于几个特征值对图像进行分类,会产生更精确的分类。

在彩色图像中,颜色均匀的区域也能够彩色空间中形成聚类。自然界中的颜色五光十色,但均可由红、绿、蓝(R、G、B)三基色混合而成。当以红、绿、蓝三基色构成彩色空间时,彩色图像中的每个像素均是彩色空间中的一个点。若图像中存在颜色相近或近似相同的区域,如 (r_0, g_0, b_0) ,那么,就会在 (r_0, g_0, b_0) 附近形成聚类。因此,可通过抽取给定颜色坐标范围内的像素,达到分割彩色图像的目的。

颜色特征是在图像检索中应用最为广泛的视觉特征,主要原因在于颜色往往和图像中所包含的物体或场景十分相关。此外,与其他的视觉特征相比,颜色特征对图像本身的尺寸、方向、视角的依赖性较小,从而具有较高的鲁棒性。

在行间杂草检测时,摄像头拍摄的图像中杂草的颜色为绿色,而土壤通常为非绿色,所以容易想到利用颜色特征完成对图像的分割,从而完成对杂草的分类。彩色图像分割面临如下 2 个主要问题:(1)选取合适的颜色空间;(2)选择恰当的

分割方法[41]。

利用 $r-g$ 、 $g-b$ 、 $(g-b)/(r-g)$ 和 $2g-r-b$ 等因子来区别植物与非植物背景是非常有效的，其中 $2g-r-b$ 这一因子用于植物检测最为有效。利用 HSI 模型中经变化后的色调值 H 来进行植物与背景分割，获得了较好的结果，但要比 $2g-r-b$ 这一因子费时间。利用 $2g-r-b$ 因子来完成植物检测，首先要将彩色图像利用这一因子转换成灰度图像，再利用灰度阈值来完成图像分割。利用色调值来分割图像时还需要将 RGB 颜色空间转换到 HSI 空间。本文尝试将直接利用植物的颜色特性将土壤和植物分割，直接生成二值图像，减少图像处理步骤，从而提高实时性。

为了杂草识别的实时性，本课题的杂草识别尝试在 RGB 颜色空间完成图像分割，为了找到合适的分割算法，用数码相机在室外田间拍摄了不同条件下田间杂草图像，用数码相机拍摄的图像格式为 JPEG，需要利用 ACDSee 软件将图像转换成 BMP 格式。利用 Visual C++ 编程应用软件像素观察器发现杂草的像素点属性中： $G>R$ 且 $G>B$ (其中 R 、 G 、 B 分别为真彩色图像中 RGB 颜色空间中 Red、Green、Blue 值)，因此可以利用此颜色特征设计杂草识别的图像分割算法，将杂草从背景中（土壤）分割出来。

杂草识别分割算法说明如下：

图像分割时，顺序搜索图像中每一个像素点，如果当前像素 RGB 值中 $G>R$ 且 $G>B$ ，则将该像素值置 1（杂草），否则为 0（背景），从而完成图像分割。为了改善分割效果，可以加入一个因子 f ，即如果 $G>(R+f)$ 且 $G>(B+f)$ ，则将该像素值设为 1，否则为 0。在不同的农田环境中，可以通过试验确定 f 值，以获得最佳的分割效果。在下面的图像分割试验中选取 $f=10$ 。

3.2.2 图像分割试验

图 3-3 (a) 是正午时分用柯达数码相机在室外农田中拍摄的一幅真彩色图像 ($2304 \times 1728 \times 24\text{bit}$)，(b) 为利用该分割算法处理的结果 ($2304 \times 1728 \times 8\text{bit}$)。

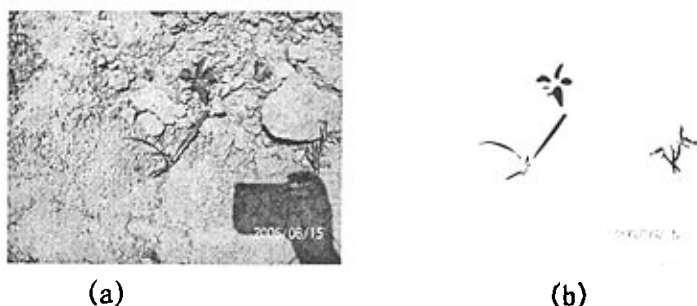


图 3-3 正午时分田间杂草原始图像(a)以及处理后图像(b)

Fig.3-3 Original weed image at noon and the processed image

在拍摄原始图像时，时间为正午，阳光充足，太阳直射，无风，土壤干燥。在图像中主要有杂草、土块和阴影。观察分割后的图像(b)所示，尽管原始图像

中有阴影、枯叶等，该算法依然成功地将杂草从土壤背景中分割出来。图像分割处理时间为 860ms（Pentium M 型 CPU 主频 1.6G，内存 256M）。

图 3-4(a)是傍晚用数码相机拍摄的一幅真彩色图像（2304×1728×24bit），阳光不充足，阴影面积大，(b)为利用该算法处理的结果（2304×1728×8bit）。

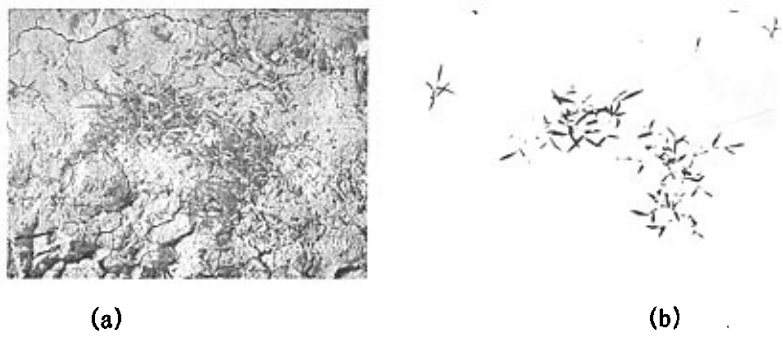


图 3-4 傍晚时分田间杂草原始图像 (a) 以及处理后图像 (b)

Fig.3-4 Original weed image at dusk and the processed image

在拍摄原图像时，时间为下午，阳光不充足，太阳斜射，无风，土壤干燥，有板结。在图像中主要杂草、干枯的杂草。观察分割后的图像(b)所示，绿色杂草成功从土壤背景分割出来，干枯的杂草被分割成了背景，原图像的土壤裂缝没有影响图像的分割质量。

图 3-5(a)是中午时分用美国 3Com 公司生产的 Model 0776 型 USB 接口摄像头拍摄的一幅真彩色图像（320×240×24bit）。(b)为利用该算法处理的结果(320×240×8bit)。



图 3-5 中午时分田间杂草原始图像(a)以及处理后的图像(b)

Fig. 3-5 Original weed image at noon and the processed image

拍摄原图像时，天气阴，无阳光。土壤中多为砂石和土块，因为摄像头质量较差，在图像周围区域畸变比较大。观察分割后的图像(b)所示，杂草成功从土壤中分割出来，砂石和阳光分割算法的影响不大。图像分割处理时间为 59ms(CPU 1.6G，256M)。

图 3-6(a)是中午用 USB 接口摄像头拍摄的一幅真彩色图像（320×240×24bit）。(b)为利用该算法处理的结果(320×240×8bit)。

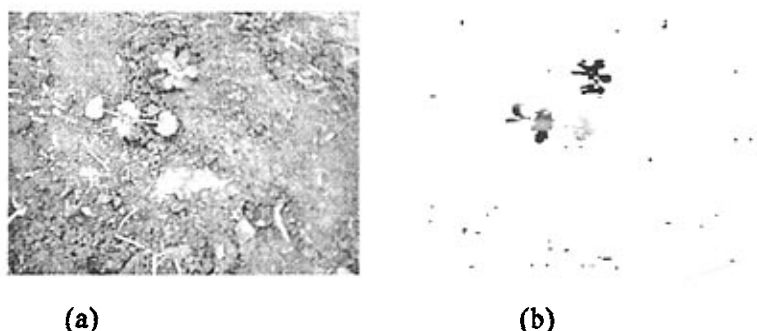


图 3-6 中午时分田间杂草原始图像(a)以及处理后的图像(b)

Fig.3-6 Original weed image at noon and the processed image

拍摄原图像时，天气晴，阳光比较弱，土壤平整，湿度大。原图像中有颗杂草，还有一些干枯的叶子。观察分割后图像(b)所示，杂草成功从土壤中分割出来，土壤的湿度不影响分割的效果。图像分割的处理时间为 50ms(CPU1.6G, 256M)。

从以上图像分割的实验分析，无论利用数码相机拍摄的图像还是利用低价的USB口采集的图像利用此分割算法都能得到有效的分割。该图像分割算法对农田农作行行间杂草的分割效果对土壤、天气、阳光的依赖较小，同时可以有效的去除阴影的影响。分割试验证明此杂草分割算法可以有效的适应室外环境工作。拍摄的图像经过设计的算法进行图像分割以后，彩色图像成为二值图像，杂草部分显示为黑色，背景显示为白色。

3.2.3 图像去噪

采集的杂草图像经过图像分割后成为二值图像。二值化后的图像不可避免的会存在一些噪声，需要进行滤波处理进行去除噪声，在图像中只有杂草和背景。图像滤波算法比较多，如平均值、中值法、卷积法、数学形态法等。在本课题杂草识别研究中，分割后的图像为二值图像，图像噪声主要为块状散点噪声，而且图像数据只有“0”和“1”，因此采用数学形态学进行滤波以去除噪声。

1964年法国的 G.Metheron 和 J.Serra 在积分几何研究成果的基础上，创产了数学形态学。此后，研制了基于数学形态学的图像处理系统。图像形态学是数学形态学的应用和发展。

数学形态学认为，所谓对集合进行分析，即是对集合进行变换以突出所需要的信息。其采用的是主观“探针”与客观物体相互作用的方法。“探针”也是一个集合，它由我们依据分析的目的来决定。术语上，这个“探针”集合称为结构元素。数学形态学的运算就是利用结构元素对物体集合进行变换。数学形态学在图像处理中应用的基本思想是将图像看成是点的集合，用另一个图像元素（结构元素）对其进行交、并、非等各种集合运算构成形态学的各种处理算法。

数学形态学有四种基本运算定义如下：

设有一集合（即图像） X 和另一个集合（即结构元素） B ，则图像 X 和结构元素 B 的基本形态如下定义^[42]：

1. 膨胀

$$X \oplus B = \bigcup_{x \in X} B[x]$$

膨胀可以看作是将图像 X 中的每一个点 x 扩大为 $B[x]$ 。

2. 腐蚀

$$X \ominus B = \{x | B[x] \subseteq X\}$$

腐蚀可以看作是将图像 X 中每一个与结构元素 B 全等的子集 $B[x]$ （并行的）收缩为点 x 。

3. 开

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

形态开运算是先腐蚀后膨胀的过程。它具有消除细小物体、在纤细处分离物体和平滑较大物体的边界时又不明显改变其面积的作用。

4. 闭

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

形态闭运算是先膨胀后腐蚀的过程。它具有填充物体内部细小空洞、连接邻近物体、在不明显改变物体面积的情况下平滑其边界的作用。

二值图像的各种形态运算都是以腐蚀和膨胀这二种最基本的运算为基础，这二种运算的串行复合和并行复合可组成多种形态变换。例如，形态的开、闭运算就是形态和差的串行复合。

在利用设计的分割算法完成对杂草图像的分割以后，我们可以分割后的图像存在一些块状噪声。我们可以利用腐蚀算法完成去除噪声的目的。我们选用八邻域算子完成对分割图像的去噪。结构算子如图 3-7 所示。

利用图 3-7 结构算子对图 3-6(b) 分割后图像进行滤波，滤波结果如图 3-8 所示。

1	1	1
1	1	1
1	1	1



图 3-7 腐蚀结构算子

Fig.3-7 Erosion structure

图 3-8 滤波后图像

Fig.3-8 Eroded image

观察滤波后的图像可以发现，大多数块状噪音已经去除，但是杂草的面积在图像中减少，为了减少图像的处理时间，本课题没有通过膨胀算法对杂草的面积

进行恢复，而是在后面的杂草识别过程中减少杂草阈值面积依然可以成功的识别出杂草。

3.3 杂草识别与导航系统平台

我们将各种图像处理的算法集成在图 3-9 所示的杂草识别与导航系统当中，可以为用户提供一个静态图像处理的平台，用户可以根据自己的需要调用不同的算法实现对静态图像的处理。使用该系统菜单中 File->Open 打开要处理的图像文件，此时图像会显示在客户区当中。接着用户就可以选择不同的菜单完成相应的图像处理任务。

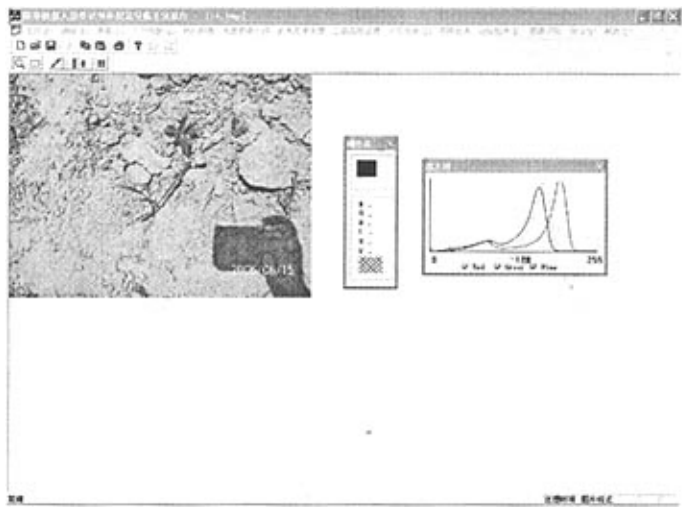


图 3-9 静态图像处理界面

Fig.3-9 interface of processing of static image

主菜单条由文件、编辑、查看、几何变换、色彩转换、灰度图像处理、彩色图像处理、二值图像处理、正交变换、图像检测、边缘检测、图像识别、窗口、帮助 14 项构成，如图 3-10 所示。

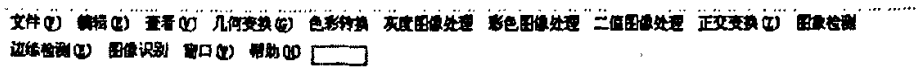


图 3-10 主菜单条

Fig.3-10Main menus

各下拉菜单条如图 3-11 所示。

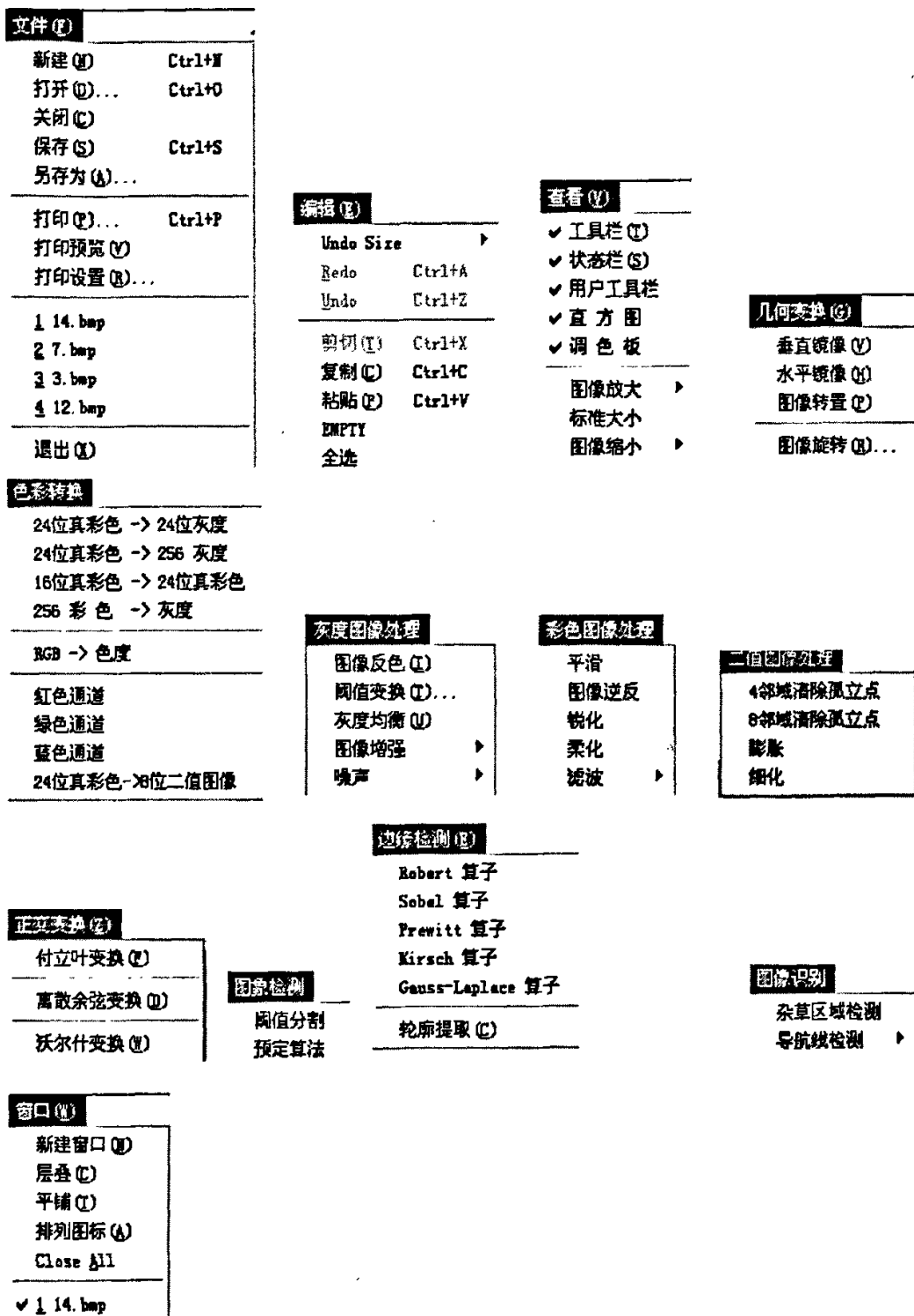
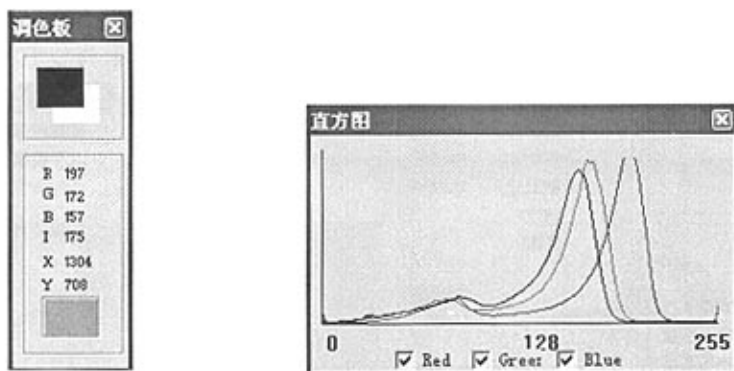


图 3-11 图像处理系统各下拉菜单条
Fig.3-11 Sub-menu of static image processing software system

系统还包括图 3-12 所示的两个浮动对话框，【调色板】对话框和【直方图】对话框。【调色板】对话框中的 R、G、B 项分别显示当前光标所指图像中某像素点的 R、G、B 值；I 项显示了当前光标所指图像中某像素点的亮度值；X、Y 项分别显示当前光标所指图像中某像素点的 X、Y 坐标值。【直方图】对话框分别用红、绿、蓝三种颜色画出了当前图像的 R、G、B 通道的直方图。



a) 【调色板】对话框

b) 【直方图】对话框

图 3-12 系统浮动对话框

Fig.3-12 Float dialog of system

为了查看在图像处理时各个菜单条的每个命令的处理时，编写了一个计时器，计时图像处理时每个菜单命令的运行时时，并在状态栏上显示；打开的图像大小及深度也可以在状态栏上显示，如图 3-13 所示。

图像处理时间:Time (s): 0.914 图像大小及深度:2304x1728x8

图 3-13 状态栏

Fig.3-13 Status Column

第四章基于机器视觉的导航

4.1 农业机器人导航

农业机器人在室外农田环境中作业,农田环境是一种非结构化的自然环境,情况复杂多样。农业机器人可以利用机器视觉导航,以农作物行为基准线。以农作物行作为引导路径时,首先需要对路径的形状做一些合理的假设,这是我们普遍的经验。适当合理的假设会简化我们的模型,将有助于问题的解决。

当 CCD 摄像头摄取的范围不大时,可以认为视野内的路径近似为直线^[43]。农作物如玉米、大豆都是以行为单位种植,行与行存在一定的距离(依农作物生长和操作要求决定)。农田环境中行中心线作为跟踪路径时,曲率一般较小,很多时候近似为零。因此在本课题的研究中,以农作物行中心线做为机器人跟踪路径,认为它是一条直线,来引导除草机器人进行行走。

相对于农作行的“偏移距”和“偏移角”通常作为农业机械人的姿态。偏移距指机器人重心距农作行中心线的距离;偏移角指机器人中心线与行中心的的夹角。由于导航算法的不同,对偏移距和偏移角的定义也有所不同。农业机器人利用导航传感器进行导航的流程如图 4-1 所示。导航系统的主要组成部分有:导航传感器、车辆运动模型、导航规划器和转向控制器。有的导航传感能够提供车辆的绝对位置,如 GPS(Global Position System);有的传感器能够测出相于导航线的相对位置,如视觉传感器(CCD)。本课题研究利用机器视觉对机器人进行导航,计算除草机器人的位姿。

基于机器视觉的农业机器人导航研究从八十年代起,国外有人已经开始研究。Gerrish 通过研究自动导航的精度和评估几种图像处理技术,并提出了基于机器视觉的拖拉机自动导航的可行性^[44,45]。Pinto 和 Reid 利用机器视觉检测出农作物行,并利用主成分分析法(Principal Component Analysis)计算出相对于农作物行的偏移角和偏移距^[46]。Benson 等开发了基于机器视觉的联合收割机导航系统,并进行室内和室外试验,试验表明该系统能够确定图像中农作物行位置,并计算出联合收割机的侧向位置^[8]。Francisco 等利用立体视觉系统获取三维农图像能够检测出农田农作物行,并计算了导航参数,提出了利用立体视觉系统导航的可能性。杨为民等对农业机械的机器视觉导航的关键问题图像处理和路径控制进行了深入的研究^[47],采用基于 Hough 变换和动态窗口技术的图像处理算法提取自然环境下的导航特征,根据系统辨识试验的结果和农业机械机器视觉导航的特点建立了仿真模型,并在通用型轮式拖拉机上建立试验系统对图像处理和算法进行验证,取得了良好的试验结果。

国内外关于农业机器人导航的研究多处于基础研究阶段,鲜见已投入市场的基于机器视觉导航的农业设备。现将作者基于机器视觉导航所做的一些研究进行陈述。

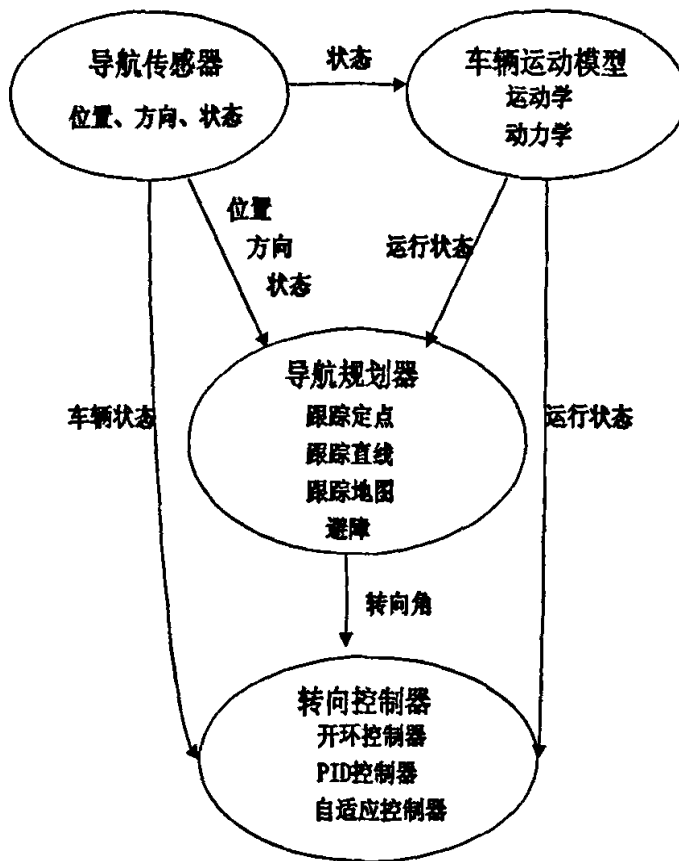


图 4-1 农业机器人导航系统组成

Fig.4-1 Basic elements of agricultural robot navigation system

4.2 导航算法

4.2.1 引言

农作物的种植因为生长和人工操作的原因，大多以行为单位进行种植，行与行之间有一定的距离，如大豆、玉米，在一行内每颗作物之间也有一定的距离。农作物的中心线是指农作物在播种和栽培过程中，其种子和幼苗植入点的位置所构成的直线。本课题研究农作物导航时是指农作物在幼小时期作为导航参照物，本研究采集的图像中只有二行农作物。利用机器视觉进行农业设备导航时，导航系统必须在短时间内识别出农作物行中心线，并根据摄像头的位置和光学成像的原理确定农业设备的姿态（偏移距和偏移角）。本章将基于机器视觉农作物行中心线的提取和农业机器人姿态确定展开研究。

4.2.2 图像分割

采集的图像中只有绿色的农作物和非绿色的土壤，绿色是植物的属性，土壤多呈土褐色。在不同的光照条件下，图像中植物和土壤颜色会有一些差异。从作物行的几何分布来看，作物行表现为一系列条块，作物行的中心线近似收敛于一点，土壤区域和作物行相间分布。

图像分割的目的就是能够使农作物和土壤区别开来。彩色图像分割方法与灰度图像分割方法在分割思想上是一致的，然而彩色图像包括着更丰富的信息，并有多种彩色空间的表达方式。本课题研究的图像都是 RGB 模型图像，为彩色图像。

可以利用图像中颜色的特征完成图像的分类，将绿色的物体分成一类，非绿色分成一类。下面利用 3.2.2 节阐述的算法以采集的导航图像进行分割，直接生成二值图像。绿色植物显示为黑色，背景为白色。

图 4-2(a)是利用数码相机在室外玉米田拍摄的一幅真彩色图像 ($768 \times 576 \times 24\text{Bit}$)，(b)为利用分割算法分割后二值图像($768 \times 576 \times 8\text{Bit}$)。

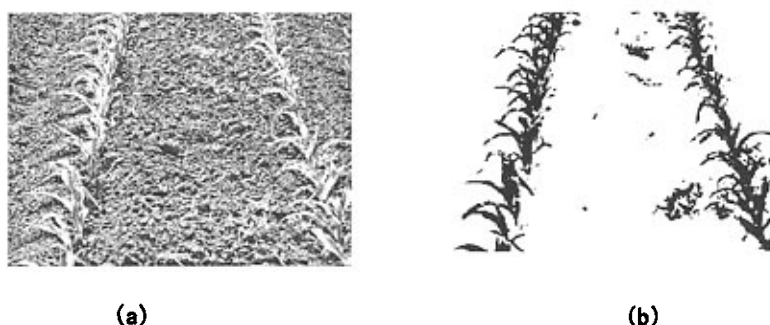


图 4-2 田间导航原始图像(a)以及处理后图像(b)

Fig.4-2 Original navigation image(a)Processed image

图 4-2(a)拍摄原始图像时天气晴，无风。图像中有二行玉米，平均有 4 叶，行间有一部分杂草。背景为褐色土壤，其中有一些土块。图像分割后如图 4-2 (b) 农作物和行间杂草都显示为黑色，背景显示为白色。分割效果良好。图像分割处理时间 202ms(CPU1.6G, 256M)。

图 4-3(a)是利用 3Com 公司生产的 USB 接口摄像头(图像分辨率设置为 320×240 像素)在室内拍摄的一幅真彩色图像 ($320 \times 240 \times 24\text{Bit}$) ,(b)为分割后的图像 ($320 \times 240 \times 8\text{Bit}$)。

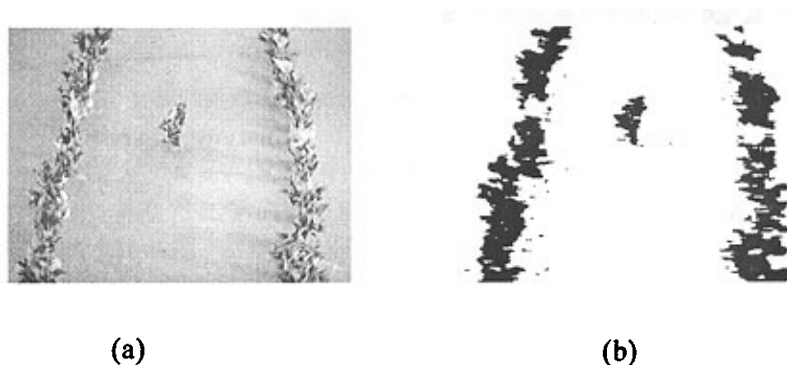


图 4-3 室内导航图像(a)及处理后图像(b)

Fig.4-3 Indoor navigation image(a)Processed image(b)

购买了一些绿色塑料假草以当作农作物，并在试验室内排成了农作物行。图 4-3(a)是在试验室内自然光条件下拍摄的图像，图像的背景是地砖，在中间位置放置了一颗塑料草作为杂草。图像分割后如图 4-3(b)所示，绿色的“植物”被成功的分割出来，显示为黑色，地砖做为背景分割后显示为白色,分割效果良好。图像的处理时间 40ms(CPU1.6G, 256M)。

图 4-2(a)和 4-3(a)经过图像分割后效果良好，但是观察处理后图像中有一些噪音点，为了后续处理，应对分割后图像滤波。

4.2.3 图像去噪

分割后的导航图像含有一定的块状噪声，这些噪声不被滤除会影响后期的图像处理工作。这些噪声主要是：一是图像在二值化过程中产生的噪声，一是在分割作物时剩留的零星的叶片，也可能是很小的杂草。利用数学形态学方法完成滤除这些噪声，以减少对导航处理的影响。

数学形态学的运算以腐蚀和膨胀这二种运算为基础，引出了其它几个常用的数学形态学运算。数学形态学中最常见的基本运算只有七种：腐蚀、膨胀、开运算、闭运算、击中、细化和粗化，它们是全部形态学的基础。

本课题需要消除二值图像中的散点噪声，利用数学形态学的腐蚀运算完成去噪声的目的，采用八邻域腐蚀算子完成对分割图像的去噪。腐蚀算子如图 3-7 所示。为了有效的去除块状噪声点，可以多次利用腐蚀算子对分割后的图像进行滤波。如图 4-4、4-5 所示进行滤波后的图像。

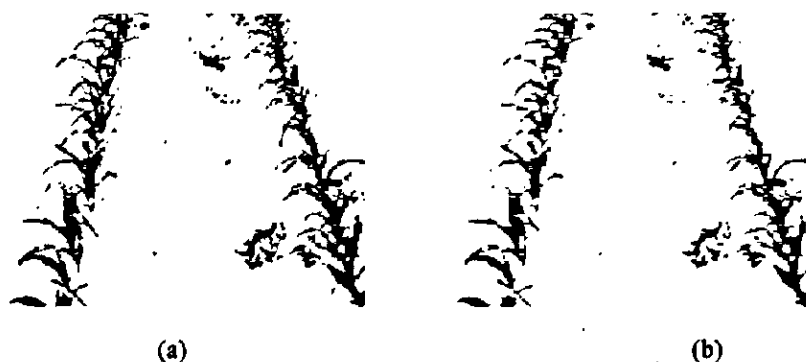


图 4-4 图 4-2(b)次腐蚀滤波 (a)二次腐蚀滤波 (b)

Fig.4-4 First eroded image (a)Second eroded image of Fig4-2 (b)

观察腐蚀后图像图 4-4 和 4-5，在滤波后的图像中，一些块状噪声被去除。对于图 4-2(b)图像是因为在室外拍摄的图像，我们进行了二次滤波，而图 4-3(b)原图像是在室内拍摄的，进行一次腐蚀滤波，滤波效果良好。图 4-4(a)滤波时间：70ms, (b)时间为：60ms, 图 4-5 滤波时间为：11ms. 计算机参数为：CPU1.6G, 256M 内存。



图 4-5 图 4-3(b)一次腐蚀后图像

Fig.4-5 First eroded image from Fig.4-3(b)

4.2.4 导航线检测

经过图像分割和滤波，图像中有植物（农作物和杂草），显示为黑色，背景为白色。农作物行在图像中显示为一条黑色条形块，是不规则的形状。如上一章所述，当摄像头的视场范围不大时，可以认为农作物行为一条直线。我们可以提取农作物行的中心线为导航线，作为农业设备导航的标准线，以确定农业设备的姿态。对于农作物中心线的提取常用的是 Hough 变换，检测直线还可以利用最小二乘法来完成。下面利用最小二乘法和 Hough 变换来检测农作物行中心线。

4.2.4.1 最小二乘法

最小二乘法 (Ordinary Least Square, 简称 OLS) 是应用最多的参数估计方法。在已经获得样本观测值， $y_i, x_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 的情况下（见图 4-6 中的散点），假如模型（4-6）的参数估计量已经得到，为 $\hat{\beta}_0$ 和 $\hat{\beta}_1$ ，并且是最合理

的参数估计量，那么直线方程（见图 4-6 中的直线）

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (4-1)$$

应该能够最好的拟合样本数据。其中 \hat{y}_i 为被解释变量的估计值，它是由参数

估计量和解释变量的观测值计算得到的。那么被解释变量的估计值与观测值应该在总体上最为接近，判断的标准是二者之差的平方和最小。

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2 = \sum u_i^2 = Q(\beta_0, \beta_1)$$

$$Q_{\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1} = \sum u_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_i)^2 = \min Q(\beta_0, \beta_1) \quad (4-2)$$

平方和能够反映两者在总体上的接近程度，这是最小二乘原则，从最小二乘原

则和样本观测值出发，可以求得参数估计量。在 4-2 式中 Q 是 $\hat{\beta}_0 \hat{\beta}_1$

的二次函数并且非负，所以其极小值总是存在的。根据罗彼塔法则，当 Q 对 $\hat{\beta}_0 \hat{\beta}_1$ 的一阶导数为 0 时， Q 达到最小。即：

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial Q}{\partial \beta_0} \right|_{\beta_0=\hat{\beta}_0, \beta_1=\hat{\beta}_1} = 0 \\ \left. \frac{\partial Q}{\partial \beta_1} \right|_{\beta_0=\hat{\beta}_0, \beta_1=\hat{\beta}_1} = 0 \end{cases} \quad (4-3)$$

所以有：

$$\begin{cases} \hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \\ \hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \end{cases} \quad (4-4)$$

其中：

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{n} \sum x_i \\ \bar{y} &= \frac{1}{n} \sum y_i \end{aligned} \quad (4-5)$$

至此,由已经知离散点的坐标,根据最小二乘法原理,拟合了一条直线,直线的方程如式 4-1 所示。所以已知点坐标距这条直线的距离的平方和最小。

经过分割和滤波以后导航图像为二值图像。导航图像中只有二行农作物,显示为黑色., 将图像分为左右二部分图像,二侧图像中各有一行农作物。为了拟合左右二侧的农作物行直线, 首先建立图像坐标系如图 4-7 所示。

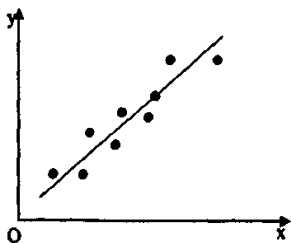


图 4-6 最小二乘法原理图

Fig.4-6 Principle of ordinary least square

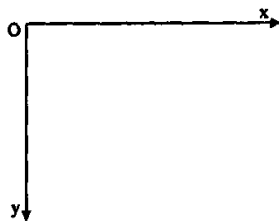


图 4-7 图像坐标系

Fig.4-7 Image coordinate

本文以左侧为例，阐述左侧农作物行利用最小二乘法进行直线拟合的原理。设图像的大小为： $M \times N$ （像素）。

1) 为了减少计算量，首先计算左侧图像每行的平均坐标值：

$$x_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{N/2} x_j \quad i=1,2,3,\dots,M \quad (4-6)$$

其中 n 为各行的有效点个数，即黑色像素点的个数。当 x_i 为零时，则该行无效，则该行点坐标无效。

2) 计算左侧坐标值的平均值。

$$\bar{x} = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^M x_i \quad (4-7)$$

其中 s 为行的有效个数，当该平均坐标为零时，该行无效。

3) 设定杂草干扰阈值 M ，以减少中间杂草对拟合直线的影响，则可以判别 x_i

在 $[\bar{x} - M, \bar{x} + M]$ 区间的，可以当作是导航的有效点。

4) 利用求出的有效点坐标和最小二乘法原理可以拟合左侧导航直线。

利用上面的方法同样可以拟合出右侧导航直线。

利用此方法对一些图像进行了实验。

利用最小二乘法检测图 4-4(b)、4-5 导航线分别如图 4-8(a) (b)所示：



图 4-8 图 4-4(b)最小二乘法导航线检测(a) 图 4-5 最小二乘法导航线检测(b)

Fig.4-8 Directrix from Fig.4-4(b) (a) Directrix from Fig.4-5 (b)

图 4-8 导航线检测时，图像处理时间分别为：14ms,4ms(CPU1.6G,256M)

在图 4-8 图像中，有二条绿色的直线，是利用最小二乘法检测出的导航线。如(a)中所示，左侧的直线基本上在农作物行中心线上，右侧直线上端由于中间杂草的影响，偏离了农作物行中心线。如(b)所示，图像二条绿色直线基本上在农作物行的中心上。

4.2.4.2 Hough 变换

Hough 变换是利用图像的全局特性而检测已知图形参数的一种方法。在预先知道区域形状的条件下,利用 Hough 变换可以方便地得到边界曲线而将不连续的边缘像素点连接起来。Hough 变换的主要优点是受噪声和曲线间断的影响较小,这对农田环境中检测机器人跟踪路径非常有效。利用 Hough 变换还可以直接检测某些已知形状的目标,并有可能确定到亚像素精度^[48]。

Hough 变换包括将笛卡尔坐标空间中的直线变换到极坐标空间中^[49]。参见图 4-9(a),一条直线可以用参数方程表示为:

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (4-8)$$

式中 ρ 是直线到原点的距离, θ 是直线 OA 与水平轴 X 的夹角。直线的 Hough 变换可以简化为一个点 (ρ, θ) , 如图 4-9 (b) 所示。如图 4-9(c) 所示的一簇通过一公共点的直线可以对应图 4-9(d) 中一系列 $\rho-\theta$ 点集。现在考虑图 4-9(e) 中的三个共线点。9(f) 所示, 这三条曲线都经过一个共同的点 (ρ_0, θ_0) , 该点对应于图 4-9(e) 中的点划线。

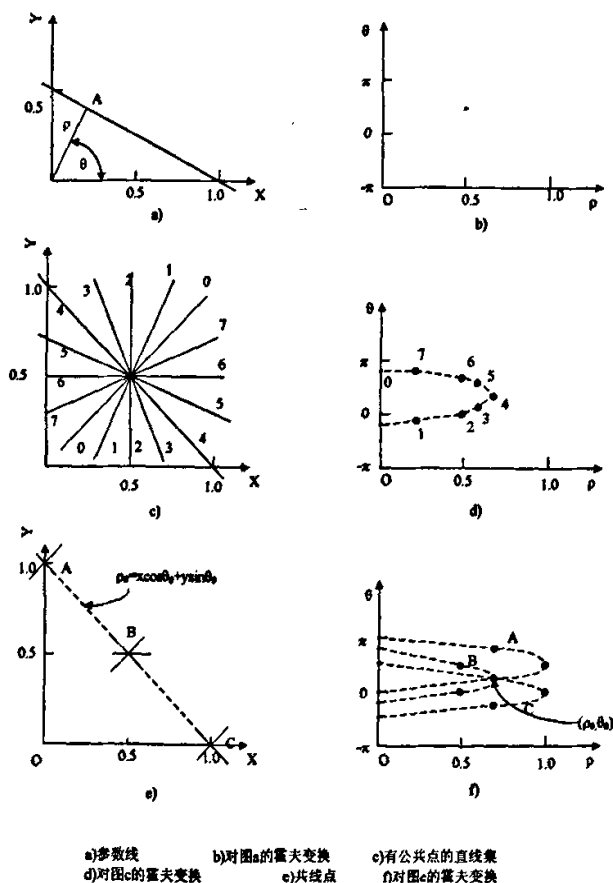


图 4-9 Hough 变换

Fig.4-9Hough transformation

利用 Hough 变换获得导航路径时,把参数空间设计成一个累加器来表示参数空间。依照 Hough 变换原理,图像中每一个像素点都可以表示成多个参数。而参数空间(或累加器)的最大值就是表示一条直线的参数,也就是说在导航线上的离散点最多。我们拍摄的图像中有二条农作物,图像经过分割和滤波后,理论上应该农作物行中心线具有最多的有效点。根据上面的特点,本人设计了利用 Hough 变换检测导航线的算法。图像坐标系如图 4-7 所示,图像平均分为左右二侧,以左侧为例说明算法过程为:

1) 定义直线结构体

```
typedef struct{
    int topx;
    int topy;
    int botx;
    int boty;
}MYLINE;
```

结构体包含直线的起点和终点坐标。分配图像对角线长度 Dist(像素为单位)*91 个 int 类型变量内存,并初始化为 0,首地址为 lpDistAlpha(int 类型指针);再分配图像对角线长度 Dist*91 个数量的直线结构体 MYLINE,并将各个结构体变量初始化为 0,首地址 lpMyLine(MYLINE 类型指针)

2) 搜索图像左侧(右侧同样方法处理)所点像素点,如果该点为 1(是杂草),根据公式

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

计算 θ (从 -45° 至 45°) 时的 ρ 值,并将 $(lpDistAlpha+(\theta+45)*Dist+\rho)$ 内存值加 1,并将 $(lpMyLine+(\theta+45)*Dist+\rho)$ 内存结构体终点坐标设为当前点坐标值。

3) 搜索 lpDistAlpha 首地址开始的内存 $(Dist*91)$ 中的最大值,此时该点对应的 ρ_0 是左侧图像中作物行中心线到原点的距离, $(lpMyLine+(\theta+45)*Dist+\rho_0)$ 内存结构体中参数 topx,topy 为该条直线顶点, 就可以确定图像左侧的直线和直线参数。

4) 将该直线上的所有点像素数据改为 3, 显示为绿色。

利用上述方法可以检测出右侧图像的农作物行中心线。

在图 4-10(a)和(b)中有二条绿色的直线,是经过 Hough 变换检测出的农作物行中心线。在图像中,二条绿色的直线基本在农作物行中心线上,直线代表了农作物行的走向和趋势。从检测效果来说,利用 Hough 变换检测农作物中心线是成功的,能够有效的去除杂草和农作物行缺少植的影响,鲁棒性强。

利用 Hough 变换检测图 4-4(b)、4-5 导航线分别如图 4-10(a),(b)所示:



图 4-10 图 4-4(b)Hough 导航线检测(a) 图 4-5Hough 导航线检测(b)

Fig.4-10 Directrix from Fig.4-4(b) (a) Directrix form Fig.4-5 (b)

图 4-10(a)、(b)导航线检测所耗时间：1192ms, 447ms(CPU1.6G,256M)

4.2.4.3 结论

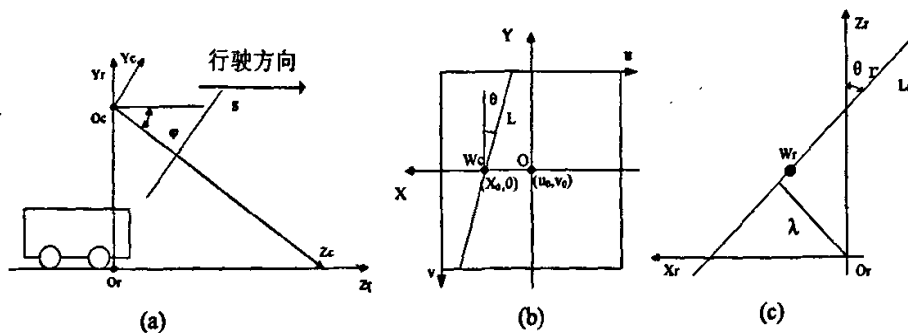
上二节分别利用最小二乘法和 Hough 变换检测了经过图像处理的图像，都成功的检测出了农作物行中心线。利用最小二乘法，耗时非常少，但是易受到行间杂草的影响。利用 Hough 变法，耗时比较多，但是鲁棒性好，不受行间杂草影响。为了导航的可靠性，本课题利用 Hough 变换检测农作物行中心线，并选择较少分辨率图像和优化 Hough 变换以减少图像处理时间，提高图像处理的实时性。

4.2.5 农业机器人位姿确定

拍摄的图像经过处理获得导航路径，可以根据摄像头的姿态确定导航信息，即农业机器人的位姿^[50]。导航控制信息主要包括导航路径与农业机器人中心线偏移距和偏移角。

利用单目摄像头完成农业机器人视觉导航主要用到坐标系有：

- 1)世界坐标系 ($O_r-X_r-Y_r-Z_r$)。它是客观世界的绝对坐标（所以也称客观坐标系）。将世界坐标系建立在机器人的基坐上，摄像头光心正下方与地面的交点为坐标系原点 O_r , Z_r 指向机器人行驶方向，在农业机器人的中心线上， X_r 垂直机器人行驶方向指向左侧， Y_r 经过 O_r 垂直向上。如图 4-11(a)所示。
- 2)摄像机坐标系 ($O_c-X_c-Y_c-Z_c$)。以摄像机光心为原点 O_c ,光轴方向为 Z_c 轴， X_c 经过 O_c 指向垂直机器人行驶方向， Y_c 如图 4-11(a)所示。 O_c 距离地面的高度为 h ,水平倾斜角度为 φ 。
- 3)图像平面坐标系 ($X-Y$)。在摄像机内形成的像平面坐标，如图 4-11(a)所示， s 为成像平面，且于 Z_c 垂直，其到 O_c 的距离为 f (摄像机的焦距)。如图 4-11(b)是在 s 像平面建立的图像平面坐标系。
- 4)计算机图像坐标系统：在计算机内部数字图像所用的坐标系统(M,N)数字图像最终由计算机的存储器存放，所以要将像平面的投影坐标转换到计算机图像坐标系统中。



(a)坐标系组成 (b)图像坐标系 (c)世界坐标系

图 4-11 农业机器人坐标系

Fig.4-11 Coordinate of agricultural robots

根据以上几个坐标系不同的相互关系可以得到农业机器人相对位姿。图 4-11(c)是利用导航路径获得控制信息的示意图， O_r 为世界坐标系的原点， Z_r 为车体中心线方向， X_r 轴指向车体左侧。直线 L_r 为农作物行中心线， λ 和 θ 分别为农业机械人的偏移距和偏移角，其中 λ 为 O_r 到导航线的垂直距离， θ 为农业机器人中心线与导航线的夹角。

每幅数字图像在计算机内为 $M \times N$ 数组， M 行 N 列的图像中每一个像素的数值即是图像点的亮度（或称为灰度）。如图 4-11(b)所示，在图像上定义直角坐标系 u, v ，每一像素的坐标 (u, v) 分别是该像素在数组中的列数及行数。所以， (u, v) 是以像素为单位的图像坐标系统。由于 (u, v) 只表示像素位于数组中的列数与行数，并没有用物理单位表示该像素在图像中的位置。因此二者之间的关系。 (u, v) 表示以像素为单位的图像坐标系坐标， (X, Y) 表示以毫米为单位的图像坐标系坐标。如图 4-11(b)所示。原点 O 定义在摄像机光轴与图像平面的交点，原点 O 在 $u-v$ 坐标系中坐标为 (u_0, v_0) ，每一个像素在 X 与 Y 方向物理尺寸为 d_x, d_y 。利用齐次坐标和矩阵形式可以像素坐标系和物理尺寸坐标系关系如下：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -d_x & 0 & u_0 d_x \\ 0 & -d_y & v_0 d_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

摄像机的成像几何关系如图 4-12 所示。 $(O_r-X_c-Y_c-Z_c)$ 坐标系为摄像机坐标系， $O-X-Y$ 坐标系为图像坐标系。其中 O_c 称为摄像机光心。摄像机的成像模型可以利用针孔成像模型。空间中任意一点 P 在在图像中成像位置可用针孔成像模型近似表示，即任意点 P 在图像中的投影位置 p 为光心 O_r 与 P 点的连线的 O_c 与图像平面的交点。这种关系也称为中心射影和透视投影 (Perspective Projection)。

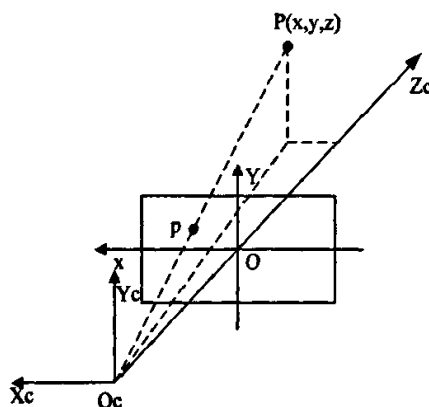


图 4-12 摄像机成像几何原理

Fig.4-12 Camera geometry principle

摄像头可以安放在环境中任何位置，在环境中可以选择一个基准坐标系来描述摄像头的位置，并用它描述环境中任何物体的位置，该坐标系为世界坐标系如图 4-11(a)所示。摄像机坐标系与世界坐标系之间的关系可以用旋转矩阵和平移向量 t 来描述。因此，空间中某一点 P 在世界坐标系与摄像机坐标系下的齐次坐标分别是： $(X_r, Y_r, Z_r, 1)^T$ ， $(X_c, Y_c, Z_c, 1)^T$ ，于是存在如下关系：

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \\ 1 \end{bmatrix} = M_2 \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-10)$$

根据以上坐标系的定义，则容易得出世界坐标系相对于摄像机坐标的齐次变换矩阵为^[51]：

$$M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & \sin \psi & -h \cos \psi \\ 0 & -\sin \psi & \cos \psi & h \sin \psi \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-11)$$

图 4-11(b)中，直线 L 为利用 Hough 变换得到的农作物行中心线在图像上的投影。规定直线 L 与 X 轴的交点为 $(X_0, 0)$ （以像素为单位），我们定义 θ 为锐角，在图 4-11(b)图像坐标系统中，当斜率为负是 $\theta > 0$ ；当斜率为正时 $\theta < 0$ 。则直线 L 上的点可以表示为：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 d_x \\ 0 \end{bmatrix} + k_s \begin{bmatrix} -\frac{d_x}{d_y} \tan \theta \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

其中 k_s 为任意实数。

根据图 4-11 对坐标系的定义，世界坐标系和摄像机坐标系的关系及透视投

影的原理可知, 摄像机坐标系中 $X_cO_cZ_c$ 平面与地面的交线在图像中的投影是图像坐标系中 X 轴, 因此图 4-11(b)中 W_c 点在地面上的物点在世界坐标系中坐标为:

$$\begin{cases} X_{w_r} = \frac{X_o d_x h}{f \sin \psi} \\ Y_{w_r} = 0 \\ Z_{w_r} = \frac{h}{\tan \psi} \end{cases} \quad (4-13)$$

图 4-11(b)中直线 L 是图 4-11 中直线 L_r 在图像中的投影, 直线 L_r 经过点 W_r , 如图(c)中所示定义直线 L_r 与 Z_r 夹角为 θ_r , 当直线向右倾斜时, $\theta_r > 0$; 当直线向左倾斜时, $\theta_r < 0$, 则直线 L_r 任一点可以表示为:

$$\begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{w_r} \\ Y_{w_r} \\ Z_{w_r} \end{bmatrix} + k_r \begin{bmatrix} -\tan \theta_r \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-14)$$

其中 k_r 为任意实数。

根据世界坐标系和摄像机坐标系关系, 如式 4-10 所示, 直线 L_r 上的点在摄像机坐标系中的坐标为:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = M_2 \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X_o d_x h}{f \sin \psi} - k_r \tan \theta_r \\ k_r \sin \psi \\ \frac{h}{\sin \psi} + k_r \cos \psi \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4-15)$$

根据透视投影的原理, 上式中的点在图像坐标系中的坐标值为:

$$\begin{cases} X = f \frac{X_c}{Z_c} = \frac{\frac{X_o d_x h}{\sin \psi} - k_r f \tan \theta_r}{\frac{h}{\sin \psi} + k_r \cos \psi} \\ Y = f \frac{Y_c}{Z_c} = \frac{k_r f \sin \psi}{\frac{h}{\sin \psi} + k_r \cos \psi} \end{cases} \quad (4-16)$$

式 4-16 表示的是一个直线, 与式 4-12 表示的是同一条直线, 由这二个式子可以

得出结论：

$$\theta = \arctan\left(\frac{a_y}{a_x} \tan \theta \sin \psi - \frac{X_0}{a_x} \cos \psi\right) \quad (4-17)$$

其中：

$$a_x = \frac{f}{d_x}, a_y = \frac{f}{d_y} \quad (4-18)$$

θ 为农作物中心线在图像投影直线 L 的倾斜角， X_0 为直线 L 与 X 轴的交点坐标，如图 4-11(b) 所示。 φ 为摄像头水平倾斜角，如图 4-11(a) 所示。

a_x, a_y 分别称为 u 轴和 v 轴上的尺度因子或称为归一化焦距， u_0 和 v_0 只与摄像机内部参数有关，因此这些参数为摄像机内部参数；而 M_2 由摄像机相对于世界坐标系的方位决定，称为摄像机外部参数。确定摄像机内外部参数，可以利用摄像机定标获得。

利用式 4-17 得到农业机器人中心线相对于农作物行中心线的偏移角 θ ，如图 4-11(c) 所示容易求出农业机器人的偏移距 λ 。偏移距 λ 定义为 Or 原点距离农作物行中心线的垂直距离，由于直线 Lr 已确定， λ 值为：

$$\lambda = |Xw_0 \cdot \cos \theta + Zw_0 \cdot \sin \theta| = \left| \frac{X_0 dx h}{f \sin \psi} \cos \theta + \frac{h}{\tan \psi} \sin \theta \right| \quad (4-19)$$

其中 h 为摄像机光心距离地面的高度，可能通过摄像机定标获得。

利用式 4-17 和 4-19 可以求出 θ 与 λ 值，它们分别是除草机器人相对于左侧农作行的偏移角与偏移距，由此可以确定农业机器人相对农作物行中心线的位置。

第五章 除草机器人系统设计

5.1 引言

目前除草的主法有：人工除草（手工拔草、锄草）、机械除草、覆盖除草、热水和蒸汽除草、杂草检疫、生物除草和化学除草。

机器人是人类 20 世纪的伟大发明之一。作为一种新型的生产工具，在减轻人们的劳动强度，提高劳动效率，把人从危险、恶劣的环境解放出来等方面显示出极大的优越性。

除草机器人可以代替人类进行除草活动，减轻农民的劳动强度，也可以减少农业从业人口数量，提高农业设备的自动化和智能化。国外较早开展了除草机器人研究；在国内，陈勇率先提出了基于直接施药方法的除草机器人，研究了除草机器人的杂草识别、视觉导航、机械臂控制等关键技术。

1999 年美国加利佛里亚大学戴维思分校生物与农业工程 D.C. Slaughter 教授、D.K. Giles 教授和 W.S. Lee 研制出如图 5-1 所示的除草机器人原型^[52]。

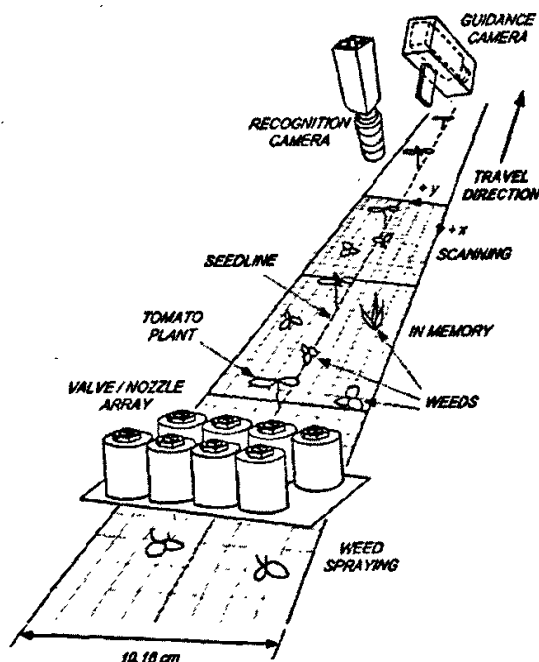


图 5-1 除草机器人的一种原型

Fig.5-1 Conceptual schematic for a robotic weed control system

该系统由两个基本模块构成：作物识别模块和杂草控制模块。作物识别模块包括 CCD 摄像头、计算机及图像处理组件；杂草控制模块包括一个由微控制器控制的精确的喷雾系统和距离传感器等。其中，喷雾系统有 8 个喷头，每个喷头

分别电磁阀控制。

Astrand 和 Baerveldt 开发了如图 5-2 所示的除草机器人[53],除草机器人能够沿农作物进行自动行走并去除行内杂草。除草机器人前侧装有灰度摄像头完成农作物行识别引导除草机器人沿农作物行行走;除草机器人中间装有一个彩色摄像头,能够识别农作物行内单株农作物,当检测到单株农作时,除草机械手抬起以免伤害到农作物。



图 5-2 除草移动机器人

Fig.5-2 Mobile weeding robot

如图 5-3 所示,美国伊利诺依大学农业与生物工程系研究的智能喷雾机。该智能喷雾机应用机器视觉系统来采集和计算杂草分布特性,根据这些特性进施用量决策,然后利用这些决策控制喷头工作。

该系统能在 3.7 米×0.43 米的范围内分辨出作物、杂草和土壤,并在 0.24 秒内做出喷雾决策。这样喷雾机能在 14 千米/小时的速度进行行进,分辨目标准确率为 91%。

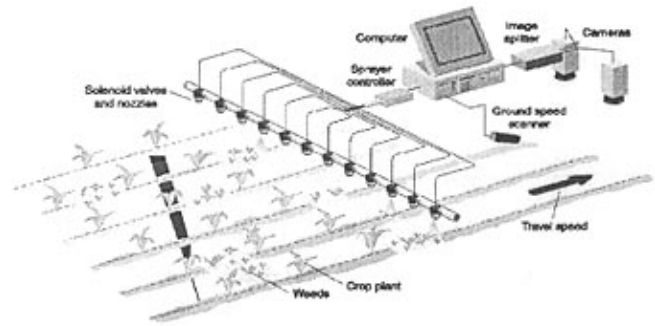


图 5-3 智能喷雾机

Fig.5-3 Smart sprayer

陈勇等设计了自动施药除草机器人^[54]，如图 5-4 所示，除草机器人由主体、机械臂、轮子和摄像头组成。机器视觉检测出杂草以后，利用机械臂进行“直接施药方法”除草，利用“机械”和“化学”除草，大大减少了化学除草剂使用量，从而有效的减少对环境的污染。

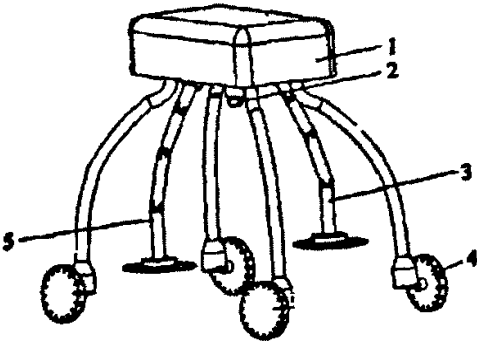


图 5-4 除草机器人简图

Fig.5-4 Weeding robot

1. 主体 2. 摄像头 3. 机械臂 4. 轮子

本课题研究除草机器人杂草识别和视觉导航技术。除草机器人能够沿农作物行在行间间歇性行走，当停下来时，检测杂草识别摄像头的视场内是否有杂草，当有杂草时机械手运动到杂草位置时，末端执行器利用“直接施药方法”进行除草。除草机器人模型如图 5-5 所示，由本体、四关节机械臂、杂草识别摄像头和导航摄像头等组成。

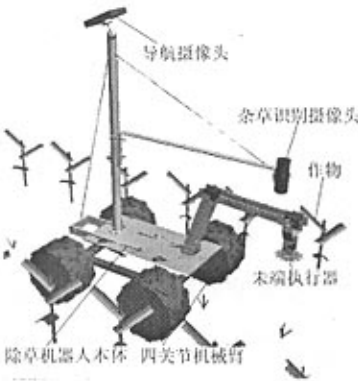


图 5-5 除草机器人结构图

Fig.5-5 Frame of Weeding Robot

5.2 系统设计

5.2.1 系统构成

本课题制作了室内除草机器人，并且在室内进行除草机器人试验。制作的除草机器人如图 5-6 所示，由本体、杂草识别摄像头、导航摄像头、四关机械臂和除草末端执行器等。



图 5-6 除草机器人

Fig.5-6 Weeding Robot

为了简化机器视觉系统和降低成本，导航摄像头选用了美国 3Com 公司生产一款 Model 0776 型 USB 接口摄像头，输出图像格式为 RGB，图像分辨率设置 320×240 ，根据导航的要求，导航摄像头的安装高度约为 1500mm，水平倾斜角度约为 45° ，具体参数通过摄像头定标获得；杂草识别摄像头选用了环宇飞扬（北京）公司生产的“电脑眼”USB 接口摄像头，图像分辨率设置 320×240 ，根据除草机械臂工作范围的要求和末端执行器设计，杂草识别摄像头安装高度为 400mm（光心距地面高度），光轴垂直地面。采用一款 1:8 的汽车模型作为除草机器人本体，前侧二轮转向，后侧二轮驱动。设计的机械臂为四关节，末端安装执行器，用以旋转切割杂草并涂抹除草剂。利用一台方正台式计算机作为图像处理（Pentium 4 CPU 主频：2.93G，256M 内存），CRT 显示器显示采集的图像和处理结果。因为农田工作环境的非结构性，采集图像时未使用特殊光源，而是自然光情况下采集图像。

按照完成任务的不同，如图 5-7 所示可以分以分为三个部分：杂草识别图像和导航图像采集部分，完成图像的实时采集，图像数据保存在内存中等待处理；图像处理部分，完成对采集的图像进行规定算法处理；处理图像和结果输出和进行决策控制，通过图像处理识别完成杂草识控制机械手运动进行除草，完成除草机器人位姿计算，并进行导航控制。

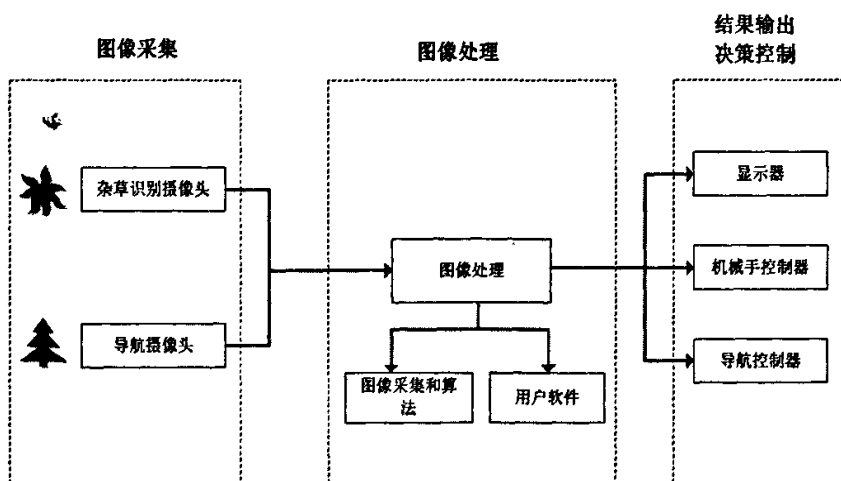


图 5-7 除草机器人系统结构

Fig.5-7 Systematic structure of the Weeding Robot

5.2.2 系统模块

5.2.2.1 引言

模块化是计算机软件开发和创作的基础。因为计算机的硬件生产和中大型软件的制作是复杂的系统工程，均需要使用大量的人力物力，而很难由个人来完成。所以采用模块化设计方式，将大的系统工程拆分为较小的部分，交专人或小组来完成后，再调节组装起来。从使用角度来说，一方面计算机的硬件是以模块的形式生产的，要适应硬件的要求，软件必须具有模块化的形式；另一方面软件采用模块化形式，可以在软件创造、更新及开发时运用局部修改、移植及模块重组的方式，从而提高效率，并使软件的专业化开发方便易行。

本系统在软件开发过程中采用了模块化的结构设计方法，把主要的任务封装在了CCapture和CDibImage两个类中，分别集成了图像的采集和图像处理任务。

系统主要的功能模块由图5-8所示。大致分为图像采集模块、读DIB文件模块、图像处理模块（由图像预处理、图像增强、图像分割、杂草识别模块、导航模块、导航摄像头参数设置模块、显示模块、控制模块、RS232通信模块）。

图像采集模块完成图像采集，并将图像存储在视频缓冲区当中，供图像处理模块调用并处理。图像采集模块采集到的数字图像是DIB格式，将采集的数据直接存放到计算机内存，供图像处理模块调用。

图像处理模块是该系统的核心模块，可以完成对DIB格式位图文件的各种操作、图像的灰度运算、几何变换、以及图像的增强处理、图像的边缘检测和轮廓提取、图像分割，并能实现图像形状参数的计算。

由图5-8所示，图像采集模块和读取DIB文件模块可以将DIB图像调入到内存中的某个缓冲区以供图像处理模块处理。对于在缓冲区中的图像，可以通过图像预处理模块、图像增强模块、图像分割模块进行相应的处理。

杂草识别模块主要根据杂草识别算法，确定杂草位置。

导航模块主根据导航算法计算除草机器人位姿。

导航摄像头参数设置模块主要是根据摄像头的标定结果设定导航摄像头参数。当摄像头位置变动时，方便设置摄像头内外部参数。

控制模块可以由杂草识别和导航位姿计算结果利用各自控制算法计算各自的控制参数。

RS232通信模块将控制参数发送到转向和机械手控制器。

原始图像、处理后的图像和图像识别后的参数显示模块负责在显示器上进行显示，以给用户直观的认识。

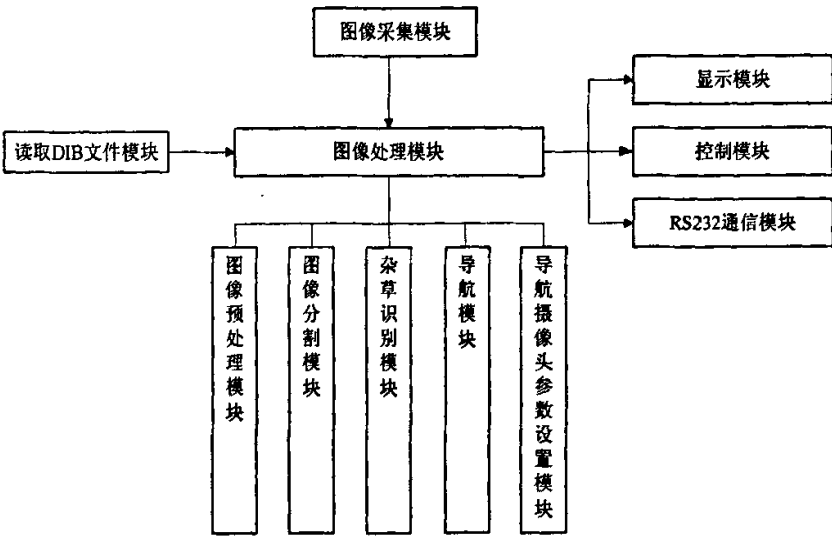


图5-8 软件系统模块图

Fig.5-8 Models of software system

5.2.2.2 图像采集模块

在机器视觉中，获得数字视频是一个关键的前提。在VFW(Video for Windows)出现之前，捕获数字视频是一项极其复杂的工作。Microsoft 的Visual C++自从4.0版就开始支持VFW，这给视频捕获编程带来了很大的方便。

VFW是Microsoft 1992年推出的关于数字视频的一个软件包，主要包括vfw.h和vfw32.lib。它能使应用程序数字化并播放从传统模拟视频源得到的视频剪辑。VFW的一个关键思想是播放时不需要专用硬件，为了解决数字视频数据量大的问题，需要对数据进行压缩。它引进了一种叫AVI的文件标准，该标准未规定如何对视频进行捕获、压缩及播放，仅规定视频和音频该如何存储在硬盘上，在AVI文件中交替存储视频帧和与之相匹配的音频数据。VFW给程序员提供.VBX和AVICap窗口类的高级编程工具，使程序员能通过发送消息或设置属性来捕获、播

放和编辑视频剪辑。现在用户不必专门安装VFW了,Windows本身包括了Video for Windows1.1,当用户在安装Windows时,安装程序会自动地安装配置视频所需的组件,如设备驱动程序、视频压缩程序等。

VFW主要由以下六个模块组成:

- AVICAP.DLL: 包含了执行视频捕获的函数,它给AVI文件I/O和视频、音频设备驱动程序提供一个高级接口;
- MSVIDEO.DLL: 用一套特殊的DrawDib函数来处理屏幕上的视频操作;
- MCIAVI.DRV: 此驱动程序包括对VFW的MCI命令的解释器;
- AVIFILE.DLL: 支持由标准多媒体I/O (mmio) 函数提供的更高的命令来访问AVI文件;
- 压缩管理器 (ICM): 管理用于视频压缩—解压缩的编解码器 (CODEC);
- 音频压缩管理器ACM: 提供与ICM相似的服务,不同的是它适于波形音频。

Visual C++在支持VFW方面提供了功能强大、简单易行的窗口类AVICap。AVICap为应用程序提供了一个简单的、基于消息的接口,使之能访问视频和波形音频硬件,并能在将视频流捕获到硬盘上的过程中进行控制。

1. AVICap 编程简介

(1) AVICap窗口类的基本功能

AVICap支持实时的视频流捕获和单帧捕获并提供对视频源的控制。AVICap在捕获视频方面具有一定的优势,它能直接访问视频缓冲区,不需要生成中间文件,实时性很强,效率很高,是完成由视频捕获硬件获取数据,并按照需要的格式进行存储、转换的重要手段。它提供的主要功能包括:

- 1) 动态地同视频和音频输入器连接或断开;
- 2) 设置视频捕获速率;
- 3) 提供设置视频源、视频格式以及是否采用视频压缩的对话框;
- 4) 设置视频采集的显示模式为Overlay或者Preview模式;
- 5) 实时获取每一帧数字视频数据;
- 6) 将一视频流和音频流捕获并保存到一个AVI文件中;
- 7) 按用户要求捕获某一帧数字的视频数据,并将单帧图像以DIB格式的文件保存;
- 8) 创建、保存或载入RGB格式下的调色板;
- 9) 将捕获图像和相关的调色板拷贝到剪贴板;
- 10) 指定捕获数据的文件名,并能够将捕获的内容拷贝到另一个文件。

合理使用以上主要功能是实现实时视频应用的关键。

(2) AVICap窗口类函数分类

1) 回调函数

在Windows系统中,回调函数是一类特殊的函数,功能类似于中断函数。

回调过程由系统完成,而函数的具体内容则由用户自己设定。在系统

中当某一回调函数被设定后，在某一特定的条件满足时，系统自动调用该回调函数。在AVICap窗口类中的回调函数，如capVideoStreamCallback、capStatusCallback等函数，在使用之前需要先由用户设定函数的内容，然后将其注册到系统中，判断调用条件是否满足以及对该函数的调用都由系统自动完成，不需要显式的调用命令。

2) 宏

在AVICap窗口类中，宏的使用完全类似于普通的函数，其功能等同于发送相应的窗口消息。例如capsetCallbackonVideostream与显式发送WM_CAP_SET_CALLBACK_VIDESTREAM消息所完成的功能完全相同。

3) 普通函数

AVICap窗口类中的普通函数只有两个：

CapCreateCaptureWindow;

CapGetDriverDescription

(3) AVICap窗口类中常用的结构

在AVICap窗口类中有4种常用的结构：对于前三个结构都有对应的函数来设置和获得结构包含的信息：

- CAPSTATUS：定义了捕获窗口的当前状态，如图像的宽、高等；
- CAPDRIVERCAPS：定义了捕获驱动器的能力，如有无视频叠加能力、有无控制视频源、视频格式的对话框等；
- CAPTUREPARMS：包含控制视频流捕获过程的参数，如捕获帧频、指定键盘或鼠标键以终止捕获、捕获时间限制等；
- VIDEOHDR：定义了视频数据块的头信息，在编写回调函数时常用到其数据成员lpData（指向数据缓存的指针）和dwBufferLength（数据缓存的大小）。

2. 视频捕获基本结构流程

图像采集及处理应用软件直接采用微软公司基于Windows操作系统的视频软件开发工具VFW (Video for Windows)进行开发。对采集的图像进行实时处理，可以利用到AVIcap 的回调函数。AVIcap 在显示视频时提供两种模式，预览模式（PreView）和叠加模式（OverLay）。在预览模式中，视频帧先从视频捕获卡传到系统内存，接着采用GDI函数在捕获窗中显示，要占用CPU 资源，该显示模式所支持的视频采集格式为RGB格式因为对采集的图像在回调函数中进行处理，只能采用预览模式进行显示。

应用程序利用VFW进行视频捕捉和实时图像处理的流程见图5-9。首先建立视频捕获窗口，用以显示采集的图像。再将此窗口与采用的摄像头驱动进行关联，在连续采集前可以利用capCaptureGetSetup()、capCaptureSetSetup()对捕获窗的一些参数进行设置。本实验中设置每秒采集10帧图像。当启动视频捕获的时候，在

捕获窗口会显示当前捕获的图像，当捕获当前帧结束后，CapsetCallbackonFrame()宏的单帧回调函数会进行响应，在回调函数中进行图像处理并在控制界面上输出处理后的图像和识别结果。VFW将采集的图像放在内存中，每帧图像在内存缓冲区首地址是相同的，所以在进行回调处理时必须先将图像数据放入另一个内存缓冲区，以防下帧图像回调时将当前图像帧数据覆盖。

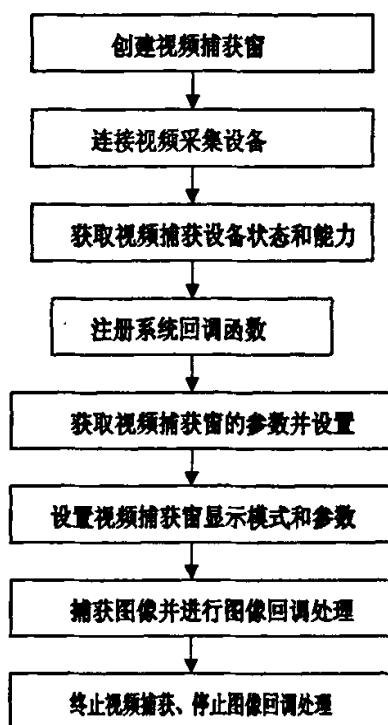


图 5-9 图像采集与处理流程图

Fig.5-9 Image acquisition and processing

5.2.2.3 除草机器人杂草识别

第三章详细阐述了对拍摄的单帧图像进行图像处理和滤波的过程，并对多种情况采集的图像进行分割试验，证明分割效果良好，处理后图像滤波后可以得到良好二值图像，杂草显示为黑色，背景为白色。然而对于除草的目的，我们必须利用机器视觉确定杂草的相对于机器人的位置才能进行除草，下面讲述除草机器人确定杂草位置的过程。在进行工作之前，为了减化模型有必要做一些假设：1) 摄像头的镜头是理想的透视成像，不考虑镜头的径向和切向畸变。2) 除草机器人行走地面是平的。3) 每个像素代表的地面面积是相等的。

除草机器人识别过程如下：

- 1) 连续采集图像。杂草识别摄像头安装在除草机器人中心上，光轴垂直地面，光心距离地面高度为 400mm。摄像头图像分辨率设置为 320×240(像素)，经过标定，视场范围为 400×300mm, 中心线方向为 300mm, 垂直中心线方向

为 400mm。根据机械手的工作范围要求，只将图像中间 240×240(像素)做为有效杂草识别区域，视场范围为 300×300mm. 采集的图像以 DIB 格存放在内存中。

2) 图像分割。图像采集完成后，在单帧回调函数中完成采集图像的图像分割。

3) 滤波。在单帧回调函数中完成对图像的八邻域滤波。

4) 杂草识别。参考除草机器人末端执行器的设计，将有效图像 240×240(像素)分成 25 个区域(5 行 5 列)如图 5-10 所示，分区的目的是当杂草重叠时消除杂草识别难度和除草机器人末端执行器定位简单。设定每区面积阈值为 A, 搜索每区“1”的数量 K 作为该区杂草面积，当 $K > A$ 时认为该区为有杂草，将该区状态设置为 1，否则为 0。依次对每个区域进行计算，在控制界面上“杂草识别区域”显示。除草机器人的机械臂经过标定，可以到达指定的区域进行除草。杂草识别流程如图 5-11 所示。根据欲去除杂草的大小进行试验可以确定杂草面积阈值 A。

0-0	0-1	0-2	0-3	0-4
1-0	1-1	1-2	1-3	1-4
2-0	2-1	2-2	2-3	2-4
3-0	3-1	3-2	3-3	3-4
4-0	4-1	4-2	4-3	4-4

图 5-10 图像分区

Fig.5-10 Region of an image

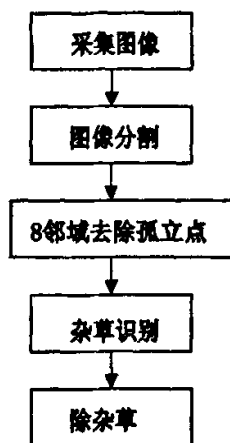


图 5-11 杂草识别流程图

Fig.5-11 Flowchart of weed recognition

5.2.2.4 除草机器人导航

第四章详细阐述农业机器人导航定位的方法，将该方法用于除草机器人上，使机器人能够自主行走并且自动除草，完全代替人类的除草活动。本课题对除草

机器人导航做了初步的研究，只是利用机器视觉确定除草机器人位姿，控制方面有待进一步研究。为了导航的实时性和经济性，选用美国 3Com 公司生产的一款 Model 0776 型 USB 接口摄像头来连续采集图像，图像分辨率设置 320×240（像素）。在进行工作之前，为了简化模型有必要做一些假设：1）摄像头的镜头是理想的透视成像，不考虑镜头的径向和切向畸变。2）除草机器人行走地面是平的。除草机器人位姿确定的步骤如下。

- 1) 连续采集图像。摄像头安装在除草机器人中心线上，光心距地面高度约为 1500mm，水平倾斜角为 45° 左右，具体数值通过摄像机标定获得。采集的图像以 DIB 格式存放到内存中。
- 2) 图像分割。图像采集完成后，在单帧回调函数中完成对采集图像的图像分割。
- 3) 滤波。在单帧回调函数中完成对图像的滤波。根据田间的工作环境设定滤波次数，由滤波效果而定。
- 4) 导航线检测。在单帧回调函数中利用 Hough 变换检测导航线。
- 5) 导航参数计算。在单帧回调函数中利用第四章算法求出除草机器人位姿。除草机器人在行间行走，采集的图像中有二行农作物，分别位于图像纵向中心线的二侧，我们以左侧的农作物行为基准线确定除草机器人位姿。图4-2图像的图像分割与导航线的检测，都需要较长的时间，在进行机器视觉导航时无法达到实时性，为减少图像处理时间和导航方案的经济性，选择3Com公司生产一款USB接口摄像头，图像分辨率为320×240像素；在进行Hough变换检测直线时，只检测图像左侧的直线，考虑到除草机器人行走的范围，在Hough变换时检测直线时检测倾斜的角度范围为：-45°至45°，这样将大大减小图像处理的时间

除草机器人位姿确定原理流程如图 5-12 所示。

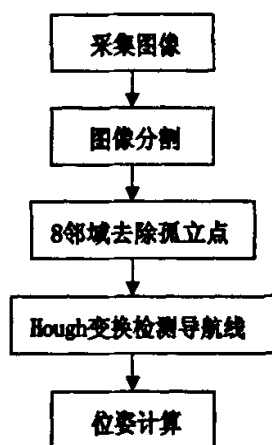


图 5-12 导航位姿计算流程图

Fig.5-12 Flowchart of pose calculation

5.2.3.除草机器人杂草和导航试验

图 5-7 是本课题小组设计的除草机器人原型，试验在室内进行。地面为地板砖，购买假塑料草当作农作物，排成二行，行的间距为 500mm；一些绿色的扁状塑料草做为杂草散落在行间，除草机器人在二行“农作物”间行走。除草机器人室内试验环境如图 5-14 所示。除草机器人杂草识和导航位姿计算所获得数据是在 IBM R50e 1834-KCC 笔记本电脑上试验获得的，主能参数为：Pentium M 型 CPU，主频为 1.6G，内存 256M。

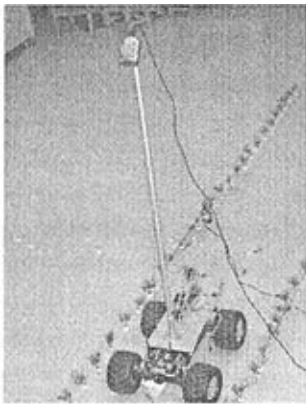


图 5-13 除草机器人试验

Fig. 5-13 Test of Weeding Robot

5.2.3.1 除草机器人杂草识别试验

为了验证杂草识别算法的可行性，在室内进行了试验，设定区域面积阈值每区面积的 1/20,除草机器人沿直线行走，每次行 5m,共进行 5 次试验，试验结果表明杂草的识别率为 100%,除草机械手能够正确到达“杂草”位置进行“直接施药方法”除草。试验证明这是一种可行的杂草识别算法，具有可行性。图 3-5 利用杂草识别算法识别所耗用的时间如表 5-1 所示。

表 5-1 图像处理时间

Tab. 5-1 Image processing time

项目	时 间	百分比(%)
	(ms)	
图像分割	39	75
8 邻域消除孤立点	10	19.2
杂草识别	3	5.8
总和	52	100

5.2.3.2 除草机器人导航位姿试验

除草机器人导航位姿试验，采用塑料草代替农作物模拟被跟踪的直线路径，同时比较实际测量的机器人位姿和对应的计算值之间的差异。

首先完成如图 4-11 坐标下摄像机标定。摄像机标定是指建立图像像素位置和场景点位置之间的关系，其途径是根根据摄像机模型，由已知特征点的图像坐标和世界坐标求解摄像机的内外部模型参数^[55]。本课题采用基于 3D 立体靶标的摄像机标定方法进行标定。由于我们在图 4-11 建立除草机器人坐标系时，对转换矩阵 M_2 的多个参数进行了约束，这大减少所求参数的个数。

经过标定后，结果：

$$\left\{ \begin{array}{l} ax = 450 \\ ay = 471 \\ uo = 161 \\ v0 = 118 \\ h = 1448mm \\ \varphi = 46.4^\circ \end{array} \right. \quad (5-1)$$

采用塑料草代替农作物进行试验，可以方便试验过程进行调整。考虑到制作的除草机器人刚度不够，我们采用移动塑料草的位置来进行导航位姿试验，相对比较简单，其实验结果见表 5-2.。图 4-3 作为导航图像进行位姿计算时，所耗时如表 5-3 所示。

表 5-2 导航试验结果
Tab5-2Result of navigation experiment

位姿计算值		位姿实测值	
λ (mm)	θ ($^\circ$)	λ (mm)	θ ($^\circ$)
258	0.4	250	0
198	-0.2	200	0
533	0.5	530	0
534	5.1	515	5
518	10.2	505	10
456	15.2	475	15
758	20.3	755	20
700	25	725	25
941	29.2	965	30
235	-0.2	240	0
286	-5.2	250	-5
237	-7.5	215	-7
312	-15.8	330	-15
322	-23	325	-24

表 5-3 图像处理时间

Tab. 5-3 Image processing time

项目	时间 (ms)	百分比 (%)
图像分割	38	35.2
8邻域去除孤立点	11	10.2
Hough变化检测直 线、计算位姿	59	54.6
总和	108	100

由表 5-2 试验数据可知, 测量得到的 λ 和图像处理得到的 λ 之间差的均值误差为 -0.6mm, 最大误差为 -36mm; 测量得到的 θ 和图像处理得到的 θ 之间差的均值误差为 0, 最大误差为 -1°。试验结果验证了计算的准确性。表 5-3 说明图 4-3 进行导航试验时所耗时间, 总消耗时间仍然有点过大, 但随着计算机速度的提高或利用专用图像处理芯片, 消耗时间会大大减少。

5.3 除草机器人杂草识别与导航系统平台

基于 MFC 用 Visual C++ 开发了除草机器人杂草识别与导航系统平台, 如图 5-14 所示。

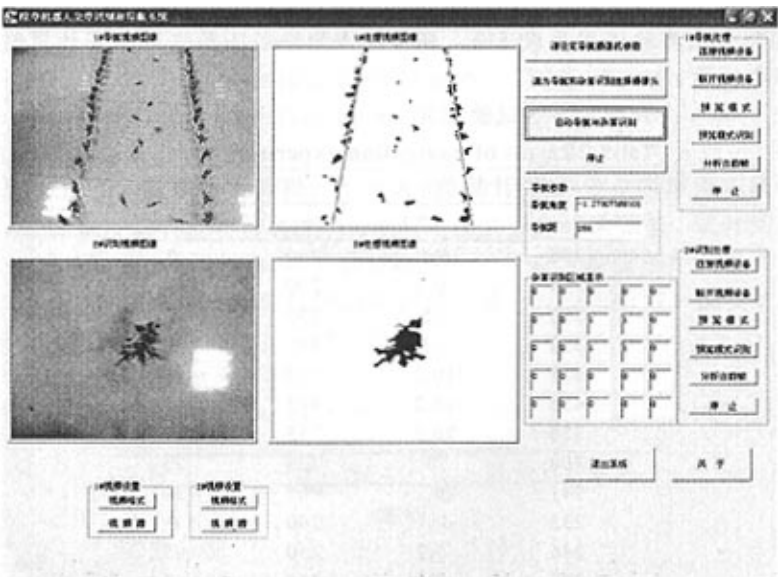


图 5-14 除草机器人杂草识别与导航控制

Fig.5-14 Interface of weed recognition and vision navigation of weeding robot

单击如图 5-14 所示图中左上侧“1#导航处理”栏中的“连接视频设备”按钮, 即可完成导航摄像头与计算机系统的连接, 此时在“导航视频图像”窗口中

即出现当前摄像头采集到的图像，点击“预览模式”按钮摄像头连续工作采集图像，在 Preview 模式下工作。点击“预览模式识别”按钮将对采集的图像进行处理，处理后的二值图像在“1#处理视频图像”窗口中显示，并将除草机器人姿态参数在图 5-14 “导航参数”窗口中显示。点击“分析当前帧”按钮，将对当前帧图像进行处理，并显示图像处理结果。如果想断开视频设备单击“断开视频设备”按钮即可。

单击如图 5-14 所示图中左下侧“2#识别处理”栏中的“连接视频设备”按钮，即可完成杂草识别摄像头与计算机系统的连接，此时在“2#识别视频图像”窗口中即出现当前摄像头采集到的图像，点击“预览模式”按钮摄像头连续工作采集图像，在 Preview 模式下工作。点击“预览模式识别”按钮将对采集的图像进行处理，处理后的二值图像在“2#处理视频图像”窗口中显示，并将杂草识别结果在图 5-14 “杂草识别区域显示”窗口中显示。点击“分析当前帧”按钮，将对当前帧图像进行处理，并显示图像处理结果。如果想断开视频设备单击“断开视频设备”按钮即可。

当导航摄像头和杂草识别摄像头连接计算机系统以后，单击图 5-14 中“1#视频设置”、“2#视频设置”中“视频格式”和“视频源”按钮，可以分别对导航摄像头和杂草识别摄像头采集的图像格式进行设置。点击按钮后出现在的设置对话框根据摄像头的驱动而定。具体的设置方法参看所用摄像头的使用说明。

点击图 5-14 “请设定导航摄像机参数”按钮，会出现如图 5-15 所示的导航摄像头的参数设定对话框，可以输入导航摄像头标定以后的内外部参数，以确定摄像头位置变动后获得正确定的位姿。

请输入导航摄像机参数

请设定导航摄像机内部参数

请设定导航摄像机安装参数

水平 t_{dx} :

450

光心距地面高度(mm):

1448

垂直 t_{dy} :

471

垂直倾斜角(度):

46.4

水平光学中心 u_0 :

161

垂直光学中心 v_0 :

118

OK

图 5-15 导航摄像机参数设定对话框

Fig.5-15 Parameter setting dialog of navigation camera

点击图 5-14 “请为导航和杂草识别选择摄像头”按钮，可以为导航和杂草识别选择摄像头驱动。

点击图 5-14 “自动导航与杂草识别”按钮，可以分时对导航图像和杂草识别图像处理。即连续采集导航图像并进行处理（此时不对采集的杂草识别图像处理）确定除草机器人位姿并行导航，行走规定时间后，除草机器人停止行走，此时对采集的杂草识别图像处理，并确定当前杂草位置，并进行除草，除草结束后，再进自动导航图像处理，进行自主沿农作物行行走。此按钮启动除草机器人的自动行走和除草功能。

点击图 5-14 “停止”按钮，除草机器人停止行走和除草。

第六章 总结

6.1 结论

农田中杂草影响农作物的生长,降低农产品质量。除草剂的使用,有效地抑制了杂草,但影响了生态环境。开发有效地去除杂草、而且能够减轻农民劳动强度和提高农业设备的自动化除草机器人是一项新的研究。

本课题制作了除草机器人模型,开发了基于机器视觉的除草机器人杂草识别和导航软件系统。制作的除草机器人在室内进行了除草和位姿确定试验。

开展了下列研究:

1. 开发了静态图像处理系统。本系统可以完成对 BMP 位图文件的各种操作,包括了图像的灰度变换、几何变换、平滑、锐化、滤波、腐蚀、膨胀、细化、各算子的边缘检测、图像的轮廓提取、图像分割、色彩转换、图像识别等,为图像分析处理提供了良好的测试平台。本课题利用此系统完成了图像分割、滤波试验;利用最小二乘法和 Hough 法检测农作物行中心线,并且对个图像处理命令的效果和时间进行查看,以分析代码的效率的效果。
2. 尝试在 RGB 颜色空间完成植物和土壤分割。经过对多种条件下图像的试验,表明此分割方法是可行的。有效的减少了图像处理时间,减少了图像处理步骤。
3. 利用北京环宇飞扬公司生产的 USB 接口摄像头连续采集杂草图像,在 RGB 颜色空间完成图像分割。再根区域分割和面积阈值确定杂草位置。试验表明杂草识别率为 100%。
4. 采用美国 3Com 公司 USB 接口摄像头连续采集导航图像,在 RGB 颜色空间完成图像分割,再根据导航摄像头姿态和成像原理,完成除草机器人位姿计算。试验表明,导航算法简单,实时性好,位姿精度高。
5. 对图像的实时连续采集进行了深入地研究,并且没有利用图像采集卡完成了多个 USB 接口摄像头同时连续采集图像并进行处理。
6. 开发了除草机器人杂草识别与视觉导航系统。该系统可以手动和自动控制除草机器人杂草识别和导航。

6.2 创新点

本课题研究的有下列创新:

1. 开展了基于直接施药方法的除草机器人深入研究,制作了室内除草机器人模型。
2. 在 RGB 色彩空间,将采集的图像直接完成图像的彩色分割,使植物直接从土壤背景中分离出来。图像分割算法简单,对阴影、阳光强度、土壤背景变化依赖较小,实时性好。

3. 杂草位置的定位采用视场区域分区，并利用面积阈值确定杂草位置，方法简单有效，有效排除了杂草重叠时杂草识别的困难。
4. 导航算法简单。直接利用了 Hough 变换检测出农作物行中心线，利用 320×240 的图像分辨率和优化的 Hough 变换减小了图像处理时间，提高了图像处理的实时性，而且测量精度比较高。

6.3 后续研究展望

国外研究除草机器人比较早，而我国目前研究资料相对比较少。在江苏省科学技术厅国际科技合作项目资助下开展了除草机器人的部分研究。由于研究时间、条件限制，以及作者本人知识水平有限，一些不足之处有待完善：

1. 利用 Hough 变换检测出农作物行中心线，再根据摄像头的姿态计算出除草机器人位姿后，对计算的结果的进行可靠性分析，当超出可能性范围时，抛弃当前位姿数据。
2. 根据机器视觉获得的位姿，设计除草机器人行走控制算法，并进行室内外试验，使除草机器人真正的自主行走。
3. 采用专用图像处理芯片，制作除草机器人嵌入式图像处理和控制系统，减少除草机器人制作成本和提高效率。
4. 系统开发完成后，代码的测试需要大量时间，作者未能完成所有测试工作，使用过程中可能会出现内存泄露、除法溢出等问题。

参考文献

- [1] 冈本嗣男.生物农业智能机器人[M].北京:科学技术文献出版社.1994.
- [2] 沈明霞,姬长英.农业机器人开发背景及技术动向[J].农机化研究.2000,(2):31-35.
- [3] 赵匀,武传宇,胡旭东等.农业机器人的研究进展及存在的问题[J].农业工程学报,2003,19(1):20-24.
- [4] 陆怀民.林木球果采集机器人设计与试验[J].农业机械学报.2001,32(6):52-54.
- [5] 张铁中.蔬菜自动嫁接技术研究I[J].中国农业大学学报.1996,1(6):26-28
- [6] 张铁中.蔬菜自动嫁接技术研究II[J].中国农业大学学报.1996,1(6):30-33
- [7] 张铁中,徐丽明,方贤法.蔬菜自动嫁接技术研究III[J].中国农业大学学报.1997,2(6):63-65.
- [8] Benson,E R,J F Reid,and Q Zhang.Machine vision-based guidance system for agricultural small-grain harvester.Trans. of the ASAE,2003,46(4):1255-1264
- [9] Timothy S.,S.A. Shearer.DGPS-Based guidance of high-speed application equipment.2001 ASAE annual international meeting.Sacramento,Californina,USA.
- [10] Samuel G M,Rex L Clark,DGPS-Based automatic guidance-implementation and economical analysis.2001 ASAE annual international meeting.
- [11] Noboru Noguchi,Jeff Will,Kazunobu Ishii and John Reid.Development of Master-slave Robot System-Obstacle avoidance algorithm.2002.ASAE Internaltional Conference.Chicago,Illinois,USA.
- [12] 贾云得.机器视觉.北京:科学出版社[M]. 2000.
- [13] 刘曙光,刘明远. 机器视觉及应用[J]. 机械设计与制造工程.2000,(7):20~23.
- [14] 戴 君,赵海洋,冯心海. 机器视觉[J]. 机械设计与制造工程.1998,(4):52~53.
- [15] 阮秋琦. 数字图像处理学[M]. 北京:电子工业出版社. 2001.
- [16] 刘富强,钱建生,曹国清,2000. 多媒体图像技术及应用[M]. 北京:人民邮电出版社.
- [17] 章毓晋. 图像理解与计算机视觉[M]. 北京:清华大学出版社. 2000.
- [18] Weobbecke D M,Meyer G E,Von Bargaen K,et al. Color indices for weed identification under various soil, residue and lighting conditions[J].Transaction of the ASAE.1995a ,38(1) :259~269.
- [19] Shearer S A,Thomasson J A ,Mcneill S G. Filter selection for NIR sensing of plant and soil materials[J] . Transaction of the ASAE.1996,39(3) :1209-1214.
- [20] Meyer G E,Mehta T ,Kocher M F. Textural imaging and discriminant analysis for distinguishing weeds for spot spraying[J] . Transaction of the ASAE .1998,41(4) :1189~1197.
- [21] Burks T F ,Shearer S A ,Payne F A. Classification of weed species using color texture features and discriminant analysis [J].Transaction of ASAE.2000,43(2):441~448.
- [22] Hayes J C ,Han YJ.Comparison of crop cover measyring system[A] .ASAE Paper[C] ,St .

- Joseph, Mich. 1989.
- [23] Tian L, Slaughter D C, Norris R F. Outdoor field machine vision identification of tomato seedlings for automated weed control[J]. Transaction of the ASAE, 1997, 40(6): 1761~1768.
- [24] Tang L, Tian L, Steward B L. Color image segmentation with genetic algorithm for field weed sensing[J]. Transaction of the ASAE. 2000, 43(4): 1019~1027.
- [25] 相阿荣. 识别杂草和土壤背景物的图像处理方法研究:[D]. 北京: 中国农业大学. 2001
- [26] 龙满生. 玉米苗期杂草识别的机器视觉研究:[D]. 杨凌: 西北农林科技大学. 2002
- [27] 刘敏. 基于分形的田间杂草图像分析与识别的研究:[D]. 北京: 北京工业大学. 2002
- [28] 张健钦. 计算机视觉技术在杂草识别中的应用研究:[D]. 河北: 河北农业大学. 2003
- [29] 尚卓. 图像处理与自动控制技术在农药喷洒机中的研究:[D]. 北京: 中国农业大学. 2003.
- [30] Marchant J. Tracking of row structure in three crops using image analysis. Computer and Electronics in Agriculture. 1996, (15): 161-179
- [31] To rii T, Kitani O, Inou N. A nalysis of crop row for agricultural mobile robot (part 2). Journal of the Japanese Society of A gricultural Machinery, 1995, 57 (6) : 53-59
- [32] Kanuma T, To rii T. Image analysis of crop row and posit ion identification. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1997, 59 (2) : 57-63
- [33] To rii T, Kitade S, Tesh ima T. Crop row t racking by an autonomous vehicle using machine vision (part 1). Journal of the Japanese Society of A gricultural Machinery. 2000, 62 (2) : 41-48
- [34] Marchant J A, Brivo t R. Real time tracking of plant rows using a hough Transform. Real Time Imaging, 1995, (1): 363-371
- [35] 沈明霞, 姬长英. 农作物边缘提取方法研究[J]. 农业机械学报. 2000, 31(6): 45-47.
- [36] 沈明霞, 姬长英. 基于纹理频谱的农田景物区域检测[J]. 农机化研究. 2000, 8(3) : 43-47
- [37] 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
- [38] 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.
- [39] 孙即祥. 图像处理. 北京: 科学出版社. 2004.
- [40] H.M. D, P.J. Deitel, 2004. C++程序设计教程. 施平安译. 北京: 清华大学出版社.
- [41] 林开颜, 吴军辉, 徐立鸿. 彩色图像分割方法综述[J]. 中国图象图形学报. 2005, 10(1): 1~10
- [42] 龚炜, 石膏去, 程民德. 数字空间中的数学形态学[J]. 理论及应用. 1997, (5): 2-9.
- [43] 王荣本, 李兵, 徐友春. 基于视觉的智能车辆自主导航最优控制器设计[J]. 汽车工程. 2001, 23(2): 97-100
- [44] Gerrish, J.B., Stockman. G.C., 1985. Image processing for path-finding in agricultural field operations. ASAE. Paper 85-3037. ASAE, St. Joseph, MI.
- [45] Gerrish, J.B., Surbrook T.C., 1984. Mobile robots in agriculture in Proc. of First International Conf. on Robotics and Intelligent Machines in Agriculture. ASAE. St

Joseph,MI.pp.30-41.

- [46] Pinto,F.,Reid,J.F.,1998.Heading angle and offset determination using principal component analysis.ASAE Paper 983113.ASAE,St. Joseph,MI.
- [47] 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): 160-164.
- [48] 傅卓,章毓晋.一种新的亚像素边缘检测方法及其性能研究[J].电脑应用技术.1995,(35): 1-5.
- [49] William K.Pratt.邓鲁华等译.数字图像处理.机械工业出版社,2005: 387-390.
- [50] H.Okamoto,K.Hamada,T.Kataoka.Automatic guidance system with crop row sensor[J].For off-road equipment.2002,4(2):307-316.
- [51] 周俊,刘成良,姬长英.农用轮式移动机器人相对位姿的求解方法[J].中国图象图形学报.2005,10(3):310-314
- [52] W.S. Lee,D.C. Slaughter and D.K. Giles.Robotic Weed Control System For Tomatoes precision Agriculture,1999,(1):95-113.
- [53] Bjorn astrand,Albert-jan Baerveldt.An Agricultural Mobile Robot With Vision-Based Perception For Mechanical Weed Control[J].Autonomous Robots,2002,(13):21-35.
- [54] 陈勇,田磊,郑加强.基于直接施药方法的除草机器人.农业机械学报[J].2005,36(10): 91-93.
- [55] 张广军.机器视觉.北京: 科学出版社. 2005.

附录1：攻读硕士学位期间论文发表及科研情况

1. 陈勇,侯学贵,郭伟斌等.除草机器人关键技术研究.科学技术成果鉴定.苏教鉴字[2006]第029号.
2. 侯学贵,陈勇,郭伟斌. 基于机器视觉的除草机器人导航.农业机械学报.(待发表)
3. 侯学贵,陈勇,郭伟斌. 基于机器视觉的除草机器人杂草识别.农业工程学报.(待发表)