

硕士学位论文

农机视觉与 GPS 组合导航方法研究

RESEARCH ON COMBINED NAVIGATION OF AGRICUTURAL MACHINE BASED ON VISUAL NAVIGATION AND GPS NAVIGATION

吴超

哈尔滨工业大学

2020 年 6 月

国内图书分类号: TN967.2
国际图书分类号: 627.3.387

学校代码: 10213
密级: 公开

工学硕士学位论文

农机视觉和 GPS 组合导航方法研究

硕 士 研 究 生: 吴超

导 师: 王玲教授

申 请 学 位: 工学硕士

学 科: 计算机技术

所 在 单 位: 计算机科学与技术学院

答 辩 日 期: 2020 年 6 月 20 日

授予学位单位: 哈尔滨工业大学

Classified Index: TN967.2

U.D.C: 627.3.387

Dissertation for the Master's Degree in Engineering

**RESEARCH ON COMBINED NAVIGATION OF
AGRICUTURAL MACHINE BASED ON VISUAL
NAVIGATION AND GPS NAVIGATION**

Candidate:	Wu Chao
Supervisor:	Prof.Wang Ling
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality:	Computer Technology
Affiliation:	School of Computer Science and Technology
Date of Defence:	June, 2020
Degree-Conferring-Institution:	Harbin Institute of Technology

摘 要

农机导航是实现农机自动行驶，提升农业智能化程度的重要技术。农机导航技术是通过一些传感器，利用光、电磁波以及卫星信号等来测量获取周围信息，以实现自身的定位，按照预先已有知识（如地图等）规划的路线进行运动的技术。如今常见的导航技术有视觉导航和 GPS 导航等，视觉导航技术波动的关键原因是光照因素，且图像中包含的数据较多，难以做到实时性；GPS 导航在室内信号差，且想要实现精准定位需要价格较高的接收设备。

针对上述问题，本文拟提出一种基于视觉和 GPS 导航的组合导航方法，结合两者的优点来提升定位精度，利用无迹卡尔曼滤波器（UKF）来融合两种导航方式获取的数据，完成数据滤波，提升导航定位的精度。本文基于阿克曼转弯模型，为避免农机自动驾驶过程中的压苗问题，提出了基于前进-后退转弯策略的自动转弯方法，同时提出了一种优化算法实现更好的性能。本文利用组合导航方法实现农机在农田中自动行驶的直行，基于自动转弯寻优方法实现农机自动驾驶的转弯，从而避免自动驾驶转弯过程中压苗的损失。

针对农机自动驾驶过程中的直行行驶，本文从视觉导航与 GPS 导航两个部分从环境获取数据并进行处理，得到处理后的数据后将其传递至 UKF 中进行滤波操作实现预测与更新。视觉导航中的处理主要包含图像预处理和导航点提取技术，对于图像预处理部分本文选择效果最好的方法进行处理。针对导航点提取中不同于常见的特征点拟合技术，本文提出一特征点提取方法可以直接在得到预处理图像后就直接得到导航特征点，减少了提取特征点的时间。特征点提取之后，实现像素坐标、图像坐标、农机坐标以及世界坐标的转换，同时 GPS 设备得到的经纬度坐标也需要在世界坐标系下表示。在得到同一坐标系下的导航点数据后，UKF 将 GPS 和视觉数据进行组合并滤波，得到导航点的位置并进行导航。组合导航实验使用模拟方式，以 GPS 数据为标准比对组合导航与视觉导航得到数据的误差。实验表明组合导航相比单一使用视觉导航的定位效果要有较大提升。

针对农机自动驾驶过程中的转弯行驶，本文基于阿克曼转弯模型，设计与实现基于前进-后退策略的转弯算法。为了验证方法的有效性，本文根据实际情况来构建模型，进行模拟实验，对 30 度到 45 度之间的转弯角度进行寻优操作。实验结果表明寻优算法能够快速搜寻出最优转弯方法，并能够有效完成转弯任务。

关键词：组合导航；视觉导航；GPS 导航；转弯模型；寻优算法

Abstract

Agricultural machine navigation is an important way to make the machine driving automatically and improve the intelligence of agriculture. Agricultural machine navigation technology is a technology which uses light, electromagnetic waves and satellite signals which are get from sensors to obtain information about surroundings and locate itself and navigate according to maps. At present navigation technology contains visual navigation, GPS navigation and so on. The effect of visual navigation is influenced by light. Besides, images contain a large amount of data that needs to be processed. The signal strength of GPS is quiet weak indoor and high accuracy positioning requires high price equipment.

Aiming at the problems which are mentioned above, this paper proposes a combined navigation method based on visual navigation and GPS navigation which is combined with advantages of two navigation methods. The combined navigation uses Unscented Karman Filter(UKF) to fuse data from the two methods and filter information with the purpose of improving accuracy of navigation. This paper also researches Ackerman turning model and proposes an auto turning algorithm based on forward-and-backward strategy so that the machine will not drive on crops. Base on this algorithm, this paper proposes a searching optimization algorithm to find out a turning way which has better performance. This paper solves the straight driving problem by combined navigation and solves the turning problem by searching optimization algorithm so that we will avoid the loss of driving on crops.

In the solution of straight driving problem in driving automatically, this paper gets data from environment by visual and GPS navigation and process data. After the data is processed, UKF is used to filter data from two different ways so that the method predicts and update navigation points. The process of visual navigation contains image preprocessing and extracting the feature points. This paper chooses the method which has best performance to preprocess image. This paper proposes a method to extract feature points which costs less time and gets feature points directly. After getting the coordinate of points, it should be transformed to the world coordinate system. The process of transforming involves many coordinate systems, which contain pixel, image, machine and world coordinate system. The GPS coordinate also needs to be transformed to world coordinate system. After the coordinates is in the same

system,UKF is used to fuse and filter two kinds of data.The experiment is runned in a simulated method and uses GPS navigation data as standard to compare the performance of using visual navigation alone and using combined navigation method.The experiment shows that combination navigation improves the effect of location and performs better than visual navigation.

In the solution of turning problem in driving automatically,this paper designs and implements the turning algorithm based on Ackerman turning model and forward-backward strategy.To verify the feasibility of the algorithm,this paper constructs model based on real machine and run simulating experiment.The experiment searches angle between 30 degrees and 45 degrees on which the method has best performance.The result shows that searching optimization algorithm can search the best method quickly and fulfil the turning task.

Keywords:combined navigation,visual navigation,GPS navigation,turning model, searching optimization algorithm

目 录

摘 要.....	IV
Abstract.....	V
第 1 章 绪论.....	- 1 -
1.1 课题研究背景.....	- 1 -
1.2 研究的目的和意义.....	- 1 -
1.3 国内外研究现状.....	- 2 -
1.3.1 国外研究现状.....	- 3 -
1.3.2 国内研究现状.....	- 3 -
1.3.3 关键技术综述.....	- 4 -
1.4 本文的主要研究内容.....	- 7 -
第 2 章 组合导航相关技术.....	- 9 -
2.1 视觉导航技术.....	- 9 -
2.1.1 图像颜色空间模型.....	- 9 -
2.1.2 图像去噪.....	- 10 -
2.1.3 图像灰度化与分割.....	- 12 -
2.1.4 摄像头标定.....	- 13 -
2.2 GPS 导航技术.....	- 14 -
2.2.1 GPS 定位技术.....	- 14 -
2.2.2 经纬度坐标系转换.....	- 15 -
2.3 滤波器技术.....	- 16 -
2.3.1 卡尔曼滤波器.....	- 16 -
2.3.2 扩展卡尔曼滤波器.....	- 17 -
2.3.3 无迹卡尔曼滤波器.....	- 18 -
2.4 本章小结.....	- 19 -
第 3 章 农机视觉与 GPS 组合导航方法.....	- 21 -
3.1 引言.....	- 21 -
3.2 农田图像特征提取方法中的处理与分割技术.....	- 21 -
3.2.1 农田图像特征分析.....	- 21 -
3.2.2 农田图像预处理技术.....	- 21 -
3.3 导航特征点提取与拟合技术.....	- 27 -
3.4 组合导航方法.....	- 29 -

3.4.1 导航特征点的坐标系变换.....	- 29 -
3.4.2 状态转换与滤波计算.....	- 34 -
3.5 实验结果及分析.....	- 36 -
3.5.1 实验数据构建.....	- 36 -
3.5.2 实验结果.....	- 39 -
3.6 本章小结.....	- 43 -
第 4 章 基于前进-后退策略的农机转弯方法.....	- 44 -
4.1 引言.....	- 44 -
4.2 转弯模型.....	- 44 -
4.2.1 差速转弯模型.....	- 44 -
4.2.2 阿克曼转弯模型.....	- 46 -
4.3 转弯寻优算法研究及结果分析.....	- 49 -
4.3.1 基于固定角度的转弯算法.....	- 49 -
4.3.2 转弯寻优算法.....	- 52 -
4.3.3 实验模型构建.....	- 53 -
4.3.4 实验结果及分析.....	- 54 -
4.4 本章小结.....	- 56 -
结 论.....	- 57 -
参考文献.....	- 58 -
攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果.....	- 62 -
哈尔滨工业大学学位论文原创性声明和使用权限.....	- 63 -
致 谢.....	- 64 -

第 1 章 绪论

1.1 课题研究背景

农机近年来在农业中起到的作用越来越为突出，由于农业对于国家的重要性和特殊性，国内外对于农机以及农业智能化的研究都十分重视，研究由浅入深，应用由局限到广泛，农机的种类、作用^[1,2]及应用场景不断扩展，可以用于耕地、播种、插秧、收割等等用途。随着农机的迅速发展，农业智能化逐渐成为处理农业任务的主流方式，农机的应用十分有效地解放了我国农业劳动力，加速农业任务的完成，减轻农业工作者的工作负担，节省时间。对于农机在农业领域的应用，我国目前仍处于人力操控农机进行作业的低智能化^[3]阶段，而大规模的现代农业对控制和计算机方面等技术要求很高，仍需要学者及研究单位对其进行针对性研究，提升农业机械化的程度，提高效率。

我国农田幅度之广，面积之大导致农业任务的艰巨和困难。在大多数农业地区，农业工作仍然采用传统的人力手工方式，处理速度慢，人力、时间资源浪费严重。以上的种种因素使得农业任务与农机的结合成为必然趋势，对农机高水平智能化的研究势在必行。

农机导航是专门针对在农田中工作的农机所设计的导航技术，需要考虑许多实际情况，包含农机工作环境，农田实际情况，农机具体参数及农机作用等等因素。农机导航方法对于提升农机的工作速度，降低人力工作任务负担以及提升农业智能化程度起到十分重要的作用。目前我国农机导航技术发展迅速，但整体水平仍需要提升并且得到应用。

1.2 研究的目的和意义

智能农机发展至今，其功能已经十分全面，包含耕地、除草、收割等，其工作效率远远在人力手工作业之上，对于提升农业效率有着重要意义。但是我国目前农业机械智能化程度很低，绝大多数农机使用都是人力操控，难以实现自动控制、集群规划等高智能化任务，且农机化程度较低，在很大面积的农田才能有少辆农机工作，较于国外的智能化农业^[4]相差较多。农业智能化任务的实现需要规划者对农机进行有规划、大规模的智能农机布置，针对东北农田的实际环境选择相适应的处理算法，通过农机路径规划和自动寻优，减少在农业活动中的人力资源花费，提升效率。通过高智能化地将农机与农业相结合，较多亩的农田以更好

地来进行管理，起到监控农机位置及状态等效果，同时提升完成农业任务的速度。

农机导航能够有效地减少人力资源消耗，通过导航技术规划好工作路径来让农机自动完成工作任务，减轻人员的工作强度。农机导航应用于农业生产可以提升农业活动的效率，利用农机实现高强度长时间的农业活动，提升工作效率。除此之外，有效的农机导航可以帮助农业工作者有效地管理农机，了解农机情况，得到农机位置，同时能够允许我们大规模布置农机，实现农业集群式工作。

视觉导航^[5-7]是指通过视觉传感器（本文中主要为单目摄像头）获取当前路况环境，进行分析处理，通过提取图像中的特征来得到路径信息，根据此信息发出指令命令农机前进。视觉导航的缺点主要为图像包含数据信息量大，处理速度慢，实时性容易受到影响；以及易受到光照等因素的影响。GPS 导航^[8,9]全称为全球定位系统（Global Positioning System），是通过空中卫星进行定位的定位导航方法，是一种使用较为普及的导航方法，较为稳定。GPS 定位的缺点在于在室内使用时接收卫星信号效果很差，一般 GPS 的定位结果误差在米级别。

单一的导航方式都存在某些缺点，在实际的应用时如果只使用单一方式进行导航，不能够实现功能要求，在实际运行时会出现诸多问题。针对单一导航的缺陷问题，可以用两种及以上的导航方式进行组合导航，将多种导航方式的优势结合，弥补劣势。本文拟提出一种组合导航方式，使智能自动车在农田中能够满足需求完成任务，减少误差，同时进行定位，便于用户对农田中大规模分布的智能农机的管理。

我国目前农机的使用大部分是由人力操控，还难以实现自动控制，针对此问题本文拟针对转弯部分进行研究，针对简单智能车与复杂农机不同转弯模型采用不同的转弯方法，在限制作业幅度情况下根据农机实际参数进行寻优，采用前进-后退交替方法，选择转弯时交替次数次数最少的角度，来减少作业时间，提升效率。本文拟结合组合导航和转弯寻优来实现农机自动行驶，提升农业智能化程度。

1.3 国内外研究现状

相比较于国内，国外人数较少而地貌广阔，对于农业自动化、机械化有着更早的要求，所以研究进行相对较早。欧美国家对于农业与智能机器结合使用方面投入了大量研究资源和人力物力，也在农业应用中取得了很大成果。例如美国用不到 300 万，满足美国多达 3.21 亿人口的需求，还能够做到较大规模地向全世界出口农作物，这就与其农业智能化程度高以及农机的广泛应用有重大关系。

我国虽然是农业大国，但这是基于非常多的农业人口的结果。由于我国的历史、实际条件以及思想等因素，我国农业自动化与发达国家相比起步较晚，但是

近来由于对这方面的急切需求和正确认识，我国在农机方向的进展势头迅猛，研究开始逐渐追赶发达国家。

1.3.1 国外研究现状

目前欧美国家对于农业机械导航的研究投入较大，进行的探索也较为深入。GPS 在各个领域的突出应用，使得美国在 70 年代开始利用 GPS 卫星构建导航系统。最开始研究的人如 Michael O'Connor 等人。他们^[10]利用 GPS 为拖拉机开发了一套导航系统，将 4 个 GPS 传感器设置在拖拉机上，实现了较好的导航效果。Benson 等人^[11]同样针对拖拉机的自动行驶问题，他们的做法是同时应用地磁方向传感器（GDS）和精度适中的 GPS 传感器，实现的导航效果误差在 2-3cm 左右。

除了欧美国家，日本由于地狭物稀的特点，需要靠进口满足农业需求，对农业自动化的研究也在积极开展。Yoshida 等人设计了导航系统应用于插秧机，主要使用了高精度定位 GPS 设备 RTK-GPS^[12,13]，同时利用陀螺仪获取机器的前进方向，通过设备的精准定位信息避免了测量误差。

由于一般 GPS 设备的误差较大，需要有较高条件（如确定大规模应用）才能够配置高精度 GPS，只使用 GPS 设备进行导航容易导致较大的误差。相比于 GPS，视觉导航在农田环境中可以得到较好应用。农田中颜色鲜明，信息丰富且易于分离，视觉导航能够获取丰富图片信息，易于提取路况，同时所要求的设备相较于 GPS 导航要求较低，是一种较好的农田导航方式。

欧洲国家对于视觉导航应用于农田环境的研究有着较早的进展，自从 20 世纪 80 年代就开展了相关的研究。Hague T 等人将从里程计获得的环境信息与获取的视觉信息进行融合，在实际的农田中实验的均方差误差在 20mm 左右。Bakker^[14]等人利用了计算机视觉算法应用于导航。他提出新的检测作物行的方法提取一次图像信息的时间在 0.5-1.3s 左右。Astrand^[15]等利用 Hough 变换来融合两行及多行的信息，有效地避免了光照因素等影响，处理效果较佳。除此以外，日本的研究人员还利用立体 3D 相机，获取周围的深度信息，以便于更佳地提取路况信息。

1.3.2 国内研究现状

国内大学研究所等基于 GPS 的研究起步较晚，但也近年来我国学者认知到此方面的重要性，加紧了研究，在此方面进展神速。西北工业大学的庞树杰^[16]等人结合了 GSM 和 SMS 的优点，提出了将 GPS 与 GSM 联合使用的农田导航系统，较好地解决了人力物力浪费等问题；西北农林科技大学的杨凌等人将 GPS 和 GIS

进行结合,提出了一种基于二者的农田机器定位和信息管理系统;孟志军^[17]等人利用 DGPS/背夹式 GPS 接收机和激光扫描仪等设备实现了精准农田信息采集系统,完成了实时通讯、采集农作物生长信息等方法;王壮^[18]等人针对当前作业信息发布慢,资源利用率低等问题提出了一种新型的农机监控系统。此系统结合了 GIS 和 GPS 两者,传输数据使用 GPRS 提升速度,大大提升了对农机的使用效率。

李军峰^[19]等人提出了一种新型的路径提取方法,主要是基于偏移行的中线,利用混合阈值方法提取信息。此方法运算量小,处理一帧图片速度大概在 200ms 完成,作物分辨精确率达 98%;胡静涛等人针对农机的自动导航处理每部分都进行了研究,阐述了农机的定位和农作物行的提取方法发展趋势;王荣本等人针对玉米田,研究了通过机器视觉保障玉米生长状况,精准除草施肥等方面的方法,较为精确地完成除草、施肥任务。

目前视觉导航与 GPS 导航结合的组合导航方法^[20]研究进展较为迅速。刘爱超^[21]等人提出了无人机空中对接时结合两种导航技术的导航方法,先利用 GPS 导航信息实现对无人机的粗略定位,再利用视觉导航识别图标来实现精确定位,利用椭圆检测方法实现近距离的精确导航;贾文渊^[22]等人提出一种结合视觉、GPS 和 MG 姿态测算的组合导航算法,应用卡尔曼滤波器并构建模型,实现盲人行走组合导航。

1.3.3 关键技术综述

自动导航的实现需要多种技术的结合,包括环境感知、信息处理及提取、控制运行等几个部分,一个智能自动行驶农机的正确运行离不开整几个方面的有序配合。

类似于人类通过视觉、嗅觉和味觉等多种感受方式获取外部情况特征,智能农机利用多种传感器在自动行驶的过程中为正确行使获取必要的信息,包含自身状态以及外界环境信息。农机自身状态包括自身的车速、姿态、位置及其他信息,外界环境信息主要包括周边路况信息以及障碍物信息等。为了获取自身及周边环境信息,实际项目中需要多种传感器^[23,24]的配合工作。目前常用的传感器包含摄像头、GPS 定位模块、IMU、激光雷达、红外线及声波传感器等。摄像头用于获取农机行驶路况,以实现农机的路径提取及障碍物的识别等功能。GPS 设备用于测量农机的坐标,以实现定位导航。激光雷达与超声波传感器主要功能是利用其测距功能,实现对周边环境的定位。

农机自动行驶实现的关键就是有效的导航技术。如今常见的定位导航技术有视觉导航、GPS 导航及航迹推算技术等技术。各种定位技术都有自己的优缺点。

(1) 视觉导航 视觉导航的含义为利用视觉获取设备（例如单目、双目或 RGB-D 摄像头）拍摄周围环境，在得到包含路况信息的图像后对图像使用预处理操作，例如灰度化、滤波等，使得到的图像便于提取导航信息，然后通过计算机视觉等技术将信息进行提取处理，根据提取到的导航信息对车辆发出控制指令，实现规划路径的导航方法。视觉导航是目前国内外进行重点探索突破的一项导航方法。

视觉导航的步骤流程模拟人类的操作流程，人类首先通过眼睛（对应视觉获取设备）观察周围环境，充分获取环境信息，然后将获取到的图像信息通过神经传递到大脑（对应处理设备），进行信息处理和提取，从而确定环境信息与自己感兴趣内容的相对位置关系，再通过神经反射来控制自己的身体做出相应操作（对应控制指令）。尽管人类的视觉系统可以被用来模仿来实现视觉导航，但在实际观察与判断中人类的经验对于信息的筛选有着很大的帮助，这是计算机难以模仿实现的。

随着图形元件的逐渐精密化以及图像处理技术的进步，视觉导航在众多导航中的重要性越来越突出。由于视觉导航所需的设备价格相比于其他方式更加低廉，易于获得，而且与其他导航方式不同的是，视觉导航只需要处理图片中的环境信息即可得到特征点，不需要其他额外设备。视觉导航的弱势在于特征获取过程容易受到光照、地面环境等的影响，难以在光线差的工作环境进行导航，光线变化时图像成像效果可能也会发生改变，容易出现偏差，影响定位精度。除此以外，一张高分辨率图像包含的信息很多，处理起来需要较长时间，有可能难以满足导航中的实时性。

目前视觉导航已经应用在机器人路径规划、无人车自动驾驶以及航天器^[25,26]导航等多个方面，其作为一种十分重要的导航技术来弥补其他导航方法的缺陷。智能机器人是通过多种传感设备获取环境信息，即使处于未知的条件下也能进行自主规划路径，完成任务的先进机械。视觉导航为机器人提供了双眼，通过单目或双目摄像头，在运动过程中获取视觉信息来进行局部路径规划，避开行驶路线中的障碍，实现避障操作。无人车是目前世界研究的重点，无人驾驶技术需要完成路况信息获取、路径规划、控制运动等任务，是多个技术领域相交得到的产物，而其突破离不开视觉导航的应用。视觉系统为无人车提供了获取路况的功能，运用视觉导航技术快速识别路况信息。视觉导航在航天领域中也有着较好的发挥，比如登月使用的月球车，在未知复杂的月球表面环境执行任务，利用视觉导航进行自动路径规划，利用自带的科学设备对月球进行科学实验及探测等任务。

(2) GPS 导航 GPS 全称为全球定位系统，是由美国研究开发的卫星定位系

统，研究过程始于 20 世纪 70 年代，研制成本花费巨大，经过约 20 年的研究完成基础建设，然后在多个领域都开始应用。GPS 是一项具有十分重要意义的全新研究成果，其能够对地球各个位置进行定位，24 小时都能进行定位工作，且能够实现三维定位的定位系统。GPS 整体包含的内容不只是导航，它是基于卫星的导航技术与定位技术的结合。

GPS 的功能实现需要三部分的协作实现，包含卫星部分、地面部分和用户接收机部分。

1) 在空间卫星部分中起到主要工作作用的是 24 颗卫星，其中包含备用卫星 3 颗，时刻准备接替工作，用于工作卫星出现故障时来替代工作卫星。另外的卫星为轨道工作卫星，由太阳能提供能量，来保证卫星正常运行。卫星传输 L1 和 L2 的信号，覆盖了地球的一半。卫星采用铯原子钟来记录时间，可以在不用地面控制中心校正的情况下独立工作较长时间。

2) 地面部分由一个主控制站、三个地面天线以及五个监控站和辅助通讯系统组成。地面部分的主要职责是计算星历。

3) 用户接收设备部分是指民用的用来接收卫星信号来计算经纬度信息以及三维坐标等信息的设备。不同于前两部分都是由特定的部门建立的，用户接收部分可以根据使用者的需要来实现。

GPS 系统目前使用较为广泛，具有许多优点。首先其能够面向全球的用户 24 小时不间断工作，用户可以接受连续实时的 3D 位置、3D 速度，它不会受到气候的影响。除此以外，单台设备的定位精度在 10 米之下，使用差分定位方法可以大幅度降低误差级别。GPS 能够根据使用场景的不同来提升接收设备的要求，以提升精度表现。随着 GPS 的概念和使用方法不断被大众所了解，该系统不仅适用于测量、导航、测速、测时等领域，而且其使用场景也越来越普遍。虽然 GPS 定位精度最高可以达到厘米级，24 小时有效，但是信号在室内极差，受到使用环境的限制，想要达到高精度定位需要较为昂贵的 GPS 定位模块。

GPS 之所以能在全球被广泛运用在许多行业，是因为具备以下特性：GPS 是适用于各种天气情况、全球范围都可用的系统，具有三维定速定时的特性，处理速度快，用户数量可以无限且免费使用。正如之前所言，导航只是 GPS 应用领域中较小的一部分。GPS 的运用领域可以分为三大部分，分别为导航，授时校对以及高精度测量。

GPS 导航技术因为其通用性以及精度较高的特性，被普遍使用，具体表现为多个方面，例如服务于海上的船只定位与导航，应用于空中的飞机引导与无人机自动驾驶，以及应用较广的车辆自动行驶等，还包含终端设备，如个人通讯终端

等（结合手机、电子地图）。在不同的使用环境，GPS 的定位精度与定位速度也存在着不同的需求。对于行人利用手机中的 GPS 模块定位和车载型定位，其精度要求较低，且移动速度也较慢。对于航空型导航定位以及卫星定位，其运行速度极快，所以使用的接收机对高速位置变换要能有所适应，较快速地根据位置变换得到新的坐标。

路径规划方法包含全局路径设定以及局部运动规划。全局路径设定指在掌握整体环境情况的基础下，当人为设定好终点之后，通过一些规划算法找到一条最优路径使得消耗最少，并发出指令按照规划好的路线指引机器人前进。局部运动规划则是考虑到在运动过程中的未知情况，如预期之外的障碍物等。这些未知情况可能会出现如果按全局规划好的路径行驶，线程会碰撞上障碍物。相较于全局运动规划的提前规划好，局部运动规划需要具有更好的探索周围环境的能力，获取周围障碍物的位置信息。由于在局部运动规划中周围环境未知，移动机器人需要有准确的信息获取能力和快速的处理信息技术来实现实时局部规划。全局运动规划与局部运动规划相结合构成了移动机器人的自主运动规划。

1.4 本文的主要研究内容

本文的智能农机应用场景为东北旱田，针对单一导航方法难以满足实际导航需求的问题，提出一种应用于农机上的组合导航算法，来实现导航功能。对于农机在农田中的自动行驶，本文采用组合导航来实现直行时的自动行驶，而对于垄头拐弯的方法本文针对本次项目使用的差速模型农机以及复杂转弯模型的农机采用不同的转弯模型，并利用前进后退行进方式来进行寻优，针对特定农机及作业幅度选择最优的角度值，使得转弯行进方式交替次数最小。

本文的研究内容安排如下：

（1）针对本次项目实际应用的农田环境，利用相适应的方式来因地制宜，本文提出适合农田结构化、背景与目标差距较大的特点的图像特征提取方法，对不同方法提取图像的效果和性能等进行比较，找出最优的方法，提取导航点为之后的组合导航做准备。

（2）结合 GPS 导航和视觉导航，本文提出一种组合导航方法，利用 UKF 来融合两个方法获取到的信息，采取预测和更新操作，将两种方式的优势结合，实现更为精确的定位方法。对于农机在农田中的直行运动部分，本文利用提出的组合导航方法来完成其运动任务，并构建模拟数据，统计两种方法中的导航误差，进行结果比较和分析。

(3) 分别针对本次项目中使用的简单农机以及未来的实际应用中结构更为复杂的农机, 研究其使用到的转弯模型。对于转弯模型复杂的农机, 利用相对应的转弯模型设计自动转弯方法, 并在运动的过程中结合上视觉方式来判断其是否触碰到边界位置。针对于特定的农机以及固定的作业幅度, 采用前进-后退算法, 针对不同的转弯角度记录其交替次数, 选择次数最少的方法来进行寻优操作。

第 2 章 组合导航相关技术

2.1 视觉导航技术

2.1.1 图像颜色空间模型

一张图片的构成通常包含多个相对无关的、可能从不同角度去描述的属性。这些属性所组成的描述图像的方式叫做颜色空间^[27]。例如最常见的 RGB 模型，此颜色空间构成的图像包含 R、G、B 分量。常见的颜色空间除了上面所提到的 RGB 模型，还有 HSI 模型、YCbCr 模型和 Lab 模型等。这些模型之间可以相互转换，我们可以根据公式来实现颜色空间的变换。

1) RGB 空间

RGB 空间^[28]是将光的三原色（红、绿、蓝）分别对应笛卡尔坐标系上的坐标轴来建立的。RGB 空间将光在三个坐标的分量进行相加，通过三者的比例来生成实际像素。RGB 空间受光照影响较大，但 RGB 空间的好处在于摄像头所拍摄的图像就是在 RGB 空间表示的，不需要进行额外的操作就能对其进行处理。RGB 空间示意图如图 2-1 所示。

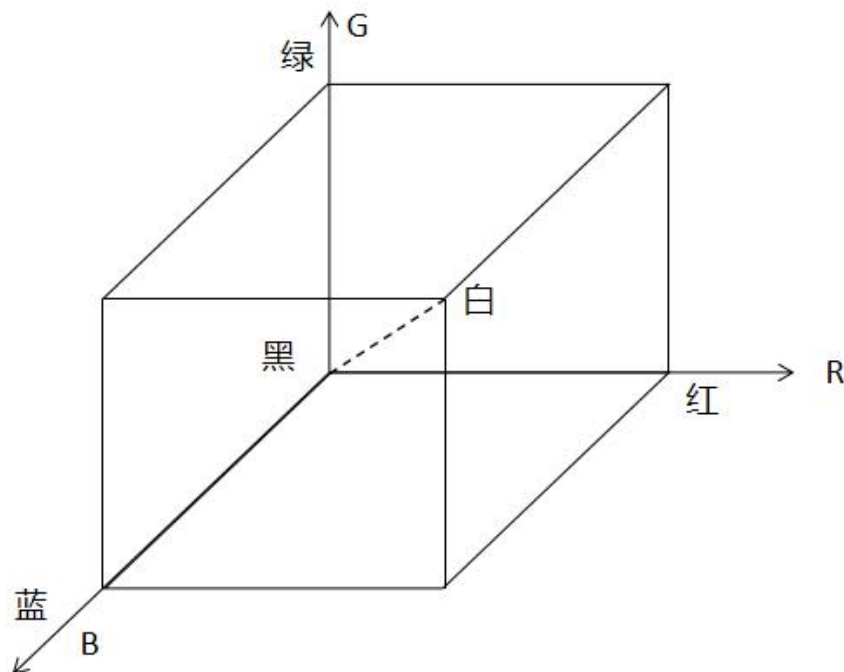


图 2-1 RGB 空间示意图

2) HSI 空间

与 RGB 空间不同, HSI 空间^[29]的表示方法类似于人的视觉系统, 采用色调(H)、饱和度(S)和亮度(I)三个分量来表示颜色。其中 H 与光波的波长相关, 用来表示色调。S 与色彩的纯度相关, 色彩中的白光含量与饱和度成反比。I 表示色彩的亮度。若图像为灰度图像, 则 HSI 空间中只有 I 向量不为 0。若想使用 HSI 颜色空间来处理图像, 需要将获取到的农田图像转化成 HSI 模型表示。RGB 转化为 HSI 的转换方程如下:

H 分量的计算如式(2-1)所示:

$$H = \begin{cases} \theta, & B \leq G \\ 2\pi - \theta, & B > G \end{cases} \quad (2-1)$$

其中对 θ 的定义如式(2-2)所示:

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

S 分量的计算如式(2-3)所示:

$$S = 1 - \frac{\min(R, G, B)}{(R + G + B)/3} \quad (2-3)$$

I 分量的计算如式(2-4)所示:

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B) \quad (2-4)$$

3) YCbCr 空间

YCbCr 空间^[30]应用于多种图像格式, 如 JPEG、MPEG 等。其中 Y 表示亮度信息, Cb 表示蓝色色差, Cr 表示红色色差。若想使用 YCbCr 颜色空间同样需要进行转换, RGB 转化为 YCbCr 空间的转换方程如式(2-5)表示:

$$\begin{cases} Y = 0.257 \times R + 0.564 \times G + 0.098 \times B + 16 \\ Cb = -0.148 \times R - 0.291 \times G + 0.439 \times B + 128 \\ Cr = 0.439 \times R - 0.368 \times G - 0.071 \times B + 128 \end{cases} \quad (2-5)$$

2.1.2 图像去噪

图像去噪是去除图像拍摄时存在的噪声因素对图像成像效果的影响的方法。目前图像去噪技术较为成熟, 有高通滤波、均值滤波、中值滤波、双边滤波方法等, 其作用为提升图像质量, 减少无用的噪声信息对图像处理的影响。对于情况各异的图像, 采用滤波方法时要兼顾处理效果与处理速度。

(1) 高斯滤波

高斯滤波^[31]是一种线性的滤波方法，对于高斯噪声的消除有着良好的效果。高斯滤波的思路为对于要滤波的像素点，其新的像素值由自己和邻域的像素值进行加权平均后得到。由于图像为二维分布，所以高斯滤波也采用二维高斯分布来计算权值，二维高斯分布如式(2-6)所示：

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2-6)$$

对于不同的 σ 值，高斯分布也不同。在计算权值是，要保证权值点的总和为1，所以在求出权值分布后还有对每个值除以权值总和，得到最终的高斯模板。在得到模板后将其乘上待滤波点的周围像素值，将其相加得到滤波结果。

(2) 均值滤波

均值滤波^[32]的类型属于线性滤波算法，其使用的方法是邻域平均法，主要思路为将要滤波的像素以及其周边的 $N \times N$ 的像素值构建成为模板，并计算模板的平均值，将该像素替换为得到的平均值。设 $f(x, y)$ 为 (x, y) 点的像素值，则对于要滤波的点 (x_0, y_0) ，其新的像素值计算公式如式(2-7)所示：

$$f(x_0, y_0) = \frac{1}{N^2} \sum_N f(x, y) \quad (2-7)$$

均值滤波对于处理高斯噪声有着有效的效果，由于均值滤波采用邻域平均法，对于 N 的选择需要进行谨慎考虑， N 过小会导致不能有效抑制噪声， N 过大则会导致图像整体模糊，图像质量下降。均值滤波的优点在于其处理得到结果的时间段，整体方法易于理解，但是算法的特征将导致图像的清晰度下降。

(3) 中值滤波

不同于均值滤波属于线性滤波算法，中值滤波^[33]是一种非线性的滤波技术，其将要滤波的点的像素值定为该点邻域中所有点的像素中值。中值滤波的思路为让像素点值接近周边的像素值，从而消除与环境不相似的噪声点。方法首先将邻域点的像素值呈上升或下降排列，然后将这些值的中值输出作为待滤波点的新像素值。不同于均值滤波，中值滤波可以较好地保留图像的初始结构，同时对脉冲噪声的消除起到优秀效果。

(4) 双边滤波

双边滤波^[34]属于非线性滤波方法，其采用加权平均方法，将周围邻域像素亮度值进行加权平均，使其代表待滤波像素的强度，其加权方法基于高斯分布。不同于其他加权分布，双边滤波不仅与图像内部的关系相关，还与像素范围域中的

辐射差异相关，可以达到有效去噪以及保持图像信息的效果。

图 2-2 为有椒盐噪声的原图和经过不同滤波方法处理之后的图像的对比。

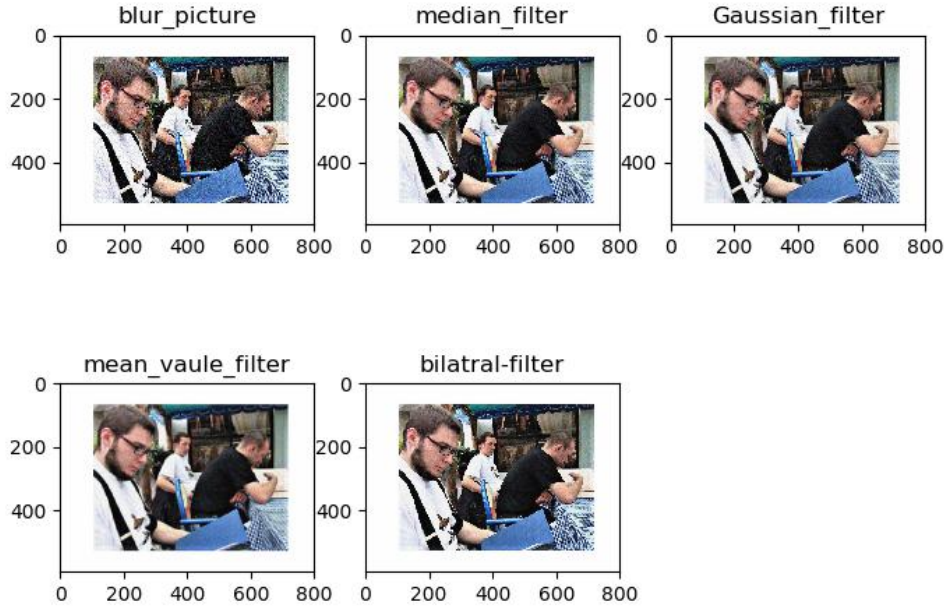


图 2-2 滤波方法处理结果对比

2.1.3 图像灰度化与分割

图像灰度化的含义是选择某个特定的颜色空间模型（如 RGB、HSI 等模型），以某种特定的方式分离图像在此空间下的不同属性，其目的是在得到拍摄的图像后按照其表示的颜色模型来将彩色图片转化为灰度图片，进行提取特征。因为彩色图片包含三通道图像的数据，处理起来数据量大，直接使用彩色图像会导致处理速度慢。使用不同的颜色空间以及不同的灰度化方式可能会有差异较大的提取结果。常见的灰度化思想包含将颜色模型进行分割、取三通道同位置像素值的平均值以及不同的分量占不同的权重相加等思想。对于图像灰度化而言，选择哪一种灰度化方法需要根据其处理效果来确定，在不同的应用环境下使用不同的应用方法。

二值化的含义是将图像根据某种方式，将整个图像的像素值转换为 255 或 0 的方法。二值化与图像分割是紧密相关的，二值化后的图像完成分开背景与前景的任务。图像分割主要通过比对像素值与阈值的大小关系来实现的，存在多种阈值确定方法。设 $f(x,y)$ 为点 (x,y) 的像素值， $g(x,y)$ 为二值化操作后原点的像素值，则两者的关系如式(2-8)所示：

$$g(x, y) = \begin{cases} 0, & f(x, y) \leq T \\ 1, & f(x, y) > T \end{cases} \quad (2-8)$$

其中 T 为用于分割的阈值，好的阈值对于准确分割图像背景与目标有着重要的作用。常用的图像分割方法有灰度平均值法、OTSU 法以及自适应阈值法。

最大类间方差法^[35]（OTSU 法）的主要思想是垄沟与农作物划分的两部分类间方差越大，则误分类垄沟及农作物的可能就越小。设置划分的阈值为 T ，大于 T 的部分被识别为农作物，小于 T 的部分被识别为垄沟。方法进行遍历，选取阈值使得两类之间的方差最大。此方法不用提前设定好值，能够自动计算得到最大方差的 T 值，处理速度快，计算简单。

将目标点在图中的比例记为 ω_0, μ_0 为目标点像素值的平均值；将背景点在图中的比例记为 ω_1, μ_1 为背景中所有点像素值的平均值。将图像的总像素值的平均值记为 μ, g 的含义为两类的像素点之间方差，即类间方差。类间方差的定义如式(2-9)所示：

$$g = \omega_0(\mu_0 - \mu)^2 + \omega_1(\mu_1 - \mu)^2 \quad (2-9)$$

当选取出阈值之后，对图像的像素值进行二值化处理，大于 T 的点新设置为 255，小于 T 的点新设置为 0。

2.1.4 摄像头标定

拍摄图像的过程是将三维点映射到二维图像上的过程，通过二维图像的点来还原三维物体需要得知拍摄图像中的映射方式，拍摄的相机不同，其映射方式也不同。决定三维到二维映射方式的参数为相机内参与相机外参。相机内参描述相机的光学元件、成像方式等参数，比如焦距、畸变系数等。相机外参描述的是相机坐标系通过旋转平移转换到世界坐标系中的矩阵向量参数。

摄像头标定^[36]是视觉导航中数据处理的基础，常用的标定方法包括张正友法、线性法以及 Ahmed 方法。在 opencv 的方法中利用要标定的摄像头进行拍摄棋盘格图像，在不同角度拍摄多张图片，以提升标定的准确度。使用的棋盘格图像如图 2-3 所示。

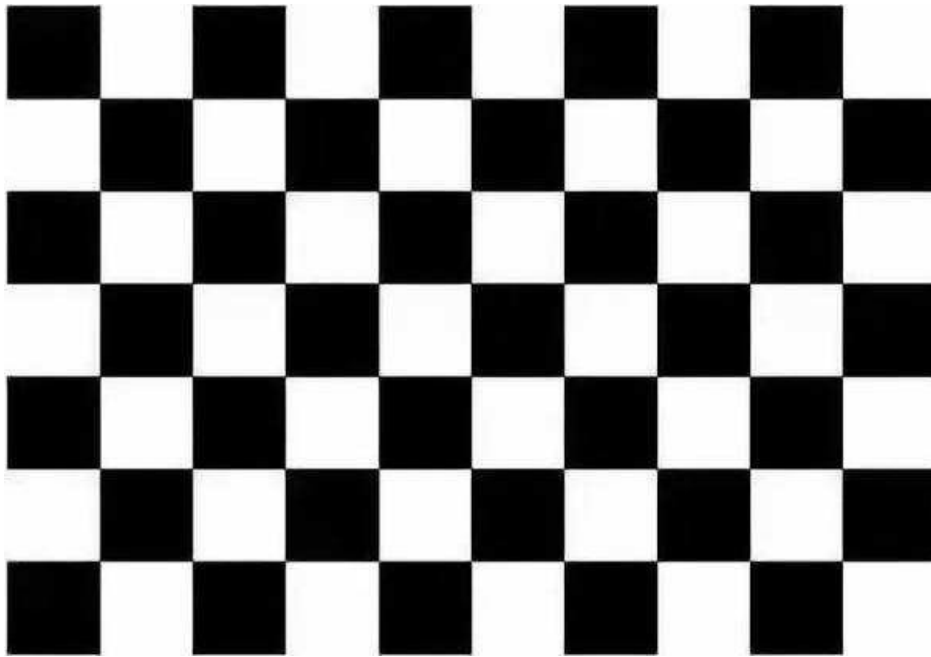


图 2-3 用于标定的棋盘格图像

2.2 GPS 导航技术

2.2.1 GPS 定位技术

GPS 定位是实现导航的关键，其定位方法又分成绝对位置定位和相对位置定位。获取绝对位置直接通过设备得到其相对与地心的坐标，此种方式只需一个信号接收器，其精度是由卫星轨道误差等决定，通常为米级水平。相对位置定位中的重要实现方式为伪差分定位，测距可达厘米级的精度，当前这种方式被广泛使用于精密导航以及大地测量等用途。差分定位的基本原理是通过距离较近的两个以上的接收设备，在计算坐标时利用多个设备来修正坐标，以达到提高定位精度的效果。

GPS 定位是基于计算设备与三个卫星的间隔来实现的。首先假设卫星 O1 的坐标已知，而设备所在的地方 A 与卫星 1 之间的间隔又能正确测量，那么 A 点必定处于以卫星为球心，以测量出的间距为半径的圆球上。进一步，设备所在地点 A 至另一卫星 O2 的间距又被测量出来，则 A 必定处于两个球相交得到的圆环上。同理还可以测算出 A 点与卫星 O3 的间距，这样就可以确定 A 点的位置只能位于三个球相交的两个点上，再通过地理知识来去除一个不可能的坐标，这样就能够实现精确定位。GPS 导航的原理图如图 2-4 所示。

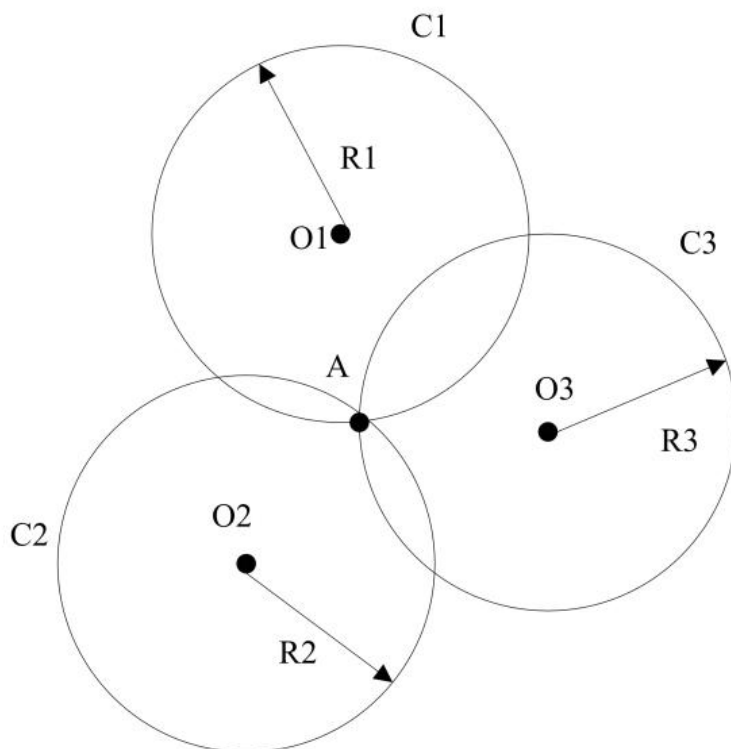


图 2-4 GPS 定位原理图

2.2.2 经纬度坐标系转换

由于经纬度单位跨度较大，直接使用经纬度来进行计算会导致误差较大，不能在平面上直接使用，所以要将经纬度坐标转换为平面坐标。目前常用的经纬度转换方式为高斯-克吕格投影等。

高斯-克吕格投影是由高斯提出，克吕格对公式进行补充和扩容。该方法的几何思路为假设圆柱与地球椭球上的某个经度正切，圆柱的中心轴与赤道面一致，地球的椭圆体条件性地投影在圆柱面上。高斯投影需要满足一些要求，分别为 1) 中心子午线和赤道被投影为相互垂直的直线，是投影的对称轴；2) 满足等距投影的特性；3) 投影后中心子午线维持长度。高斯投影的几何表示图如图 2-5 所示。

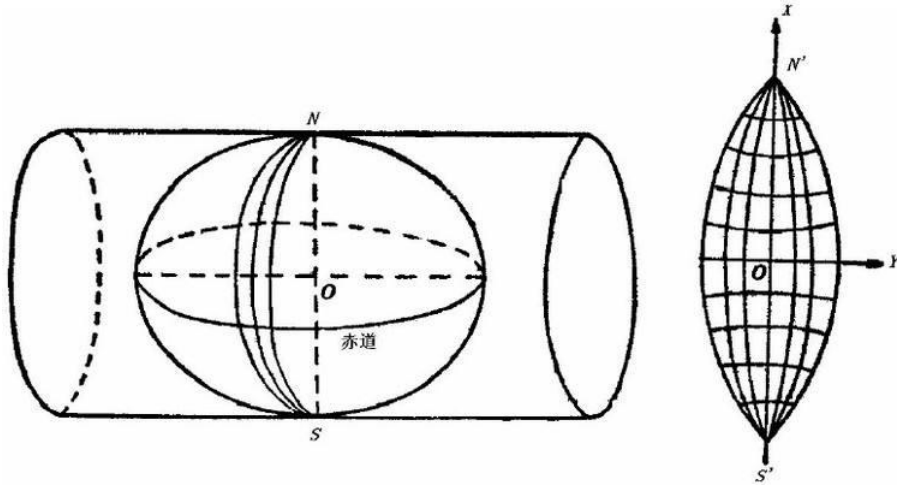


图 2-5 高斯投影的几何表示图

2.3 滤波器技术

2.3.1 卡尔曼滤波器

卡尔曼滤波器^[37] (Kalman Filter, 简称 KF) 是一类结合不确定性下的多源信息进行最佳状态估计的方法, 基本思想为获取大量的并不完整以及含有噪声的测量数据中估计更新系统状态。

对于一个离散系统, 设其状态向量由 x 表示, 卡尔曼滤波的作用就是完成对未来的预测及对预测进行修正两项任务。对未来的预测需要对 KF 输入过去的最优状态 (\hat{x}_{k-1}, P_{k-1}) , 其分别表示 $k-1$ 时刻的状态向量值及协方差, 以及外界的环境噪声 \vec{u}_k 和不确定度 Q_k , 通过 KF 来得到 $k-1$ 时刻预测状态 (\hat{x}_k, P_k) , 预测的过程公式如式(2-10)和(2-11)所示:

$$\hat{x}_k = F_k \hat{x}_{k-1} + R_k \quad (2-10)$$

$$P_k = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_k \quad (2-11)$$

其中 F_k 为状态转换矩阵, R_k 和 Q_k 为环境中存在的噪声影响矩阵。在得到最终预测值后, 我们利用 k 时刻观测到的观测向量 \vec{z}_k 对预测状态 (\hat{x}_k, P_k) 进行修正。由于状态向量与观测向量的维度不一定相同, 我们需要对 x 和 z 做变换, 使得二者在同一尺度下进行比较。转换矩阵 H_k 将状态向量转化为测量信息的维度, 转换方法如式(2-12)和(2-13)所示:

$$z_k = H_k \hat{x}_k \quad (2-12)$$

$$R_k = H_k P_k H_k^T \quad (2-13)$$

这样进行转换之后则得到测量尺度上的两个分布：预测值变换后的分布 $N(x, \mu_0, \sigma_0)$ 以及测量值的分布 $N(x, \mu_1, \sigma_1)$ 。在高维情况下，针对这两种分布组合得到的高斯分布如式(2-14)到式(2-16)所示：

$$\hat{x}_k' = \hat{x}_k + K'(z_k - H_k \hat{x}_k) \quad (2-14)$$

$$P_k' = P_k - K' H_k P_k \quad (2-15)$$

$$K' = P_k H_k^T (H_k P_k H_k^T + R_k)^{-1} \quad (2-16)$$

2.3.2 扩展卡尔曼滤波器

卡尔曼滤波器主要针对的是预测线性系统的状态，当面对非线性系统时其难以发挥作用，处理这些系统是用扩展卡尔曼滤波器^[38]（EKF，Extended Kalman Filter），它的主要思路是利用线性化方法来处理非线性系统。在状态转移方程已经确定的前提下，EKF 在估算非线性系统时有着重大作用。使用 EKF 的原因在于 KF 的条件其中为满足高斯分布的 x 向量在转换到测量向量时依然满足高斯分布，而在非线性系统中此条件将不被满足。

EKF 区别于 KF 的点在于将状态转移方程中使用非线性方程来替换转换矩阵：

1) 预测未来： $x' = Fx + \mu$ 用 $x' = f(x, \mu)$ 代替；其余 F 用 F_j 代替。

2) 修正当下：将状态映射到测量的 Hx' 用 $h(x')$ 代替；其余 H 用 H_j 代替。

在上面非线性函数 $f(x, u)$, $h(x')$ 预测出更为准确的状态值以及转换后的测量值； x , z 在经过线性变换后，其依然满足高斯分布的假设。 F_j , H_j 计算方式如式(2-17)和(2-18)所示：

$$F_j = \frac{\partial f(x, \mu)}{\partial x} \quad (2-17)$$

$$H_j = \frac{\partial h(x')}{\partial x} \quad (2-18)$$

2.3.3 无迹卡尔曼滤波器

无迹卡尔曼滤波器^[39] (Unscented Kalman Filter, 简称 UKF) 是一种有效的多信息融合方法, 用于滤除数据中来自系统的噪声和干扰, 研究对象过去、现在和将来的状态, 从而做出最优估计。UKF 的处理思路来源于卡尔曼滤波, 通过使用无损变换 UT (Unscented Transform) 技术, 使得非线性系统同样能使用滤波方法处理, 适合于处理计算信息的实时融合, 能够提升精度。相比较于 EKF, UKF 更能有效地解决其处理非线性系统时的高阶项忽略导致的低精度问题, 处理效果好。

UT 变换是 UKF 处理非线性系统的关键, UT 变换是计算随机变量的统计特征的新解决方案。UKF 将每个状态 x_k, P_k 用几个关键点 X_{sig} 来表示。当处理非线性函数 $f(x)$ 时, 只需要将关键点 X_{sig} 代入非线性函数 $f(x)$ 计算出 $f(X_{sig})$ 即可。通过得到的 $f(X_{sig})$ 可以计算新的状态 x_{k+1}, P_{k+1} 。

设向量 x 满足统计特性 (\bar{x}, P_x) , 则计算 Sigma 点的步骤如下:

(1) 计算 $2n+1$ 个 Sigma 点及其权值, 如式(2-19)和(2-20)所示:

$$X_0 = \bar{x}, \begin{cases} X_i = \bar{x} + \sqrt{(n+1)P_x}, i = 1, 2, \dots, n \\ X_i = \bar{x} - \sqrt{(n+1)P_x}, i = n+1, n+2, \dots, 2n \end{cases} \quad (2-19)$$

$$\begin{cases} \omega_0^m = \lambda / (n + \lambda) \\ \omega_0^c = \lambda / (n + \lambda) + (1 - \alpha^2 + \beta) \end{cases} \quad (2-20)$$

$$\omega_i^m = \omega_i^c = 1 / 2(n + \lambda), i = 1, 2, \dots, 2n$$

其中 $\lambda = \alpha^2(n+k) - n$, α 的取值与 Sigma 点的离散程度相关, 一般取较小正值; k 一般取 0; β 的取值与 x 的分布信息有关。 $\sqrt{(n+\lambda)P_x}$ 为矩阵平方根第 i 列的值, ω_i^m 为均值的权值, ω_i^c 为方差的权值。

(2) 计算 Sigma 点通过函数 $f(\cdot)$ 的传播结果, 如式(2-21)所示:

$$Y_i = f(X_i), i = 0, 1, \dots, 2n \quad (2-21)$$

由此可得:

$$\bar{y} = \sum_{i=0}^{2n} w_i^m Y_i \quad (2-22)$$

$$P_y = \sum_{i=0}^{2n} w_i^c (Y_i - \bar{y})(Y_i - \bar{y})^T \quad (2-23)$$

$$P_{xy} = \sum_{i=0}^{2n} w_i^c (Y_i - \bar{x})(Y_i - \bar{y})^T \quad (2-24)$$

UKF 进行一次预测与更新的步骤如下：

- (1) 根据 Sigma 点的计算步骤来计算 σ 点 $X_{k-1}^{(i)}$ ，其表示在 k-1 时刻的第 i 个 σ 点，其均值与方差均采用 k-1 时刻的值。
- (2) 根据已经计算出的 Sigma 点来预测计算 k 时刻的 σ 点值以及均值和方差：

$$\begin{cases} X_k^{(i)} = F_{k-1} X_{k-1}^{(i-1)}, i = 1, 2, \dots, 2n \\ \hat{x}_k = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^m X_k^{(i)} \\ \hat{p}_k = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^c (X_k^{(i)} - \hat{x}_k)(X_k^{(i)} - \hat{x}_k)^T + Q_{k-1} \end{cases} \quad (2-25)$$

- (3) 根据(2)中预测得到的均值和方差来更新 Sigma 点 $X_k^{(i)}$ 。
- (4) 根据下列式进行观测值预测计算：

$$\begin{cases} z_k^{(i)} = H_k X_k^{(i)}, i = 1, 2, \dots, n \\ \hat{z}_k = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^m z_k^{(i)} \\ P_z = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^c (z_k^{(i)} - \hat{z}_k)(z_k^{(i)} - \hat{z}_k)^T + R \\ P_{x,z} = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^c (x_k^{(i)} - \hat{x}_k)(z_k^{(i)} - \hat{z}_k)^T \end{cases} \quad (2-26)$$

- (5) 获得视觉导航和 GPS 获取到的观测值，根据观测值对预测值进行更新：

$$\begin{cases} x_k = \hat{x}_k + K_k (z_k - \hat{z}_k) \\ K_k = P_{x,z} P_z^{-1} \\ P_k = \hat{P}_k - K_k P_z^{-1} K_k^T \end{cases} \quad (2-27)$$

其中 K_k 为 k 时刻的滤波增益矩阵。

2.4 本章小结

本章对本文中组合导航要使用到技术的关键技术与基础等相关知识进行了阐述，包含了视觉导航、GPS 导航以及滤波器三个部分。首先对视觉导航相关内容进行展开介绍，从视觉导航概述、关键技术以及其应用三个方面进行讲解，然后

对 GPS 导航部分从同样的角度进行展开叙述，包含概述、关键技术及 GPS 的应用三部分，最后对常用的三种滤波器 KF、EKF 和 UKF 进行介绍，为本文后面要提出的组合导航方法打下基础。

本章的内容是后续论文工作中所应用到的关键技术，通过第 2 章的内容可以在理论方面更好地了解技术，针对项目环境对导航技术选择使用合适的具体方法，以能够得到更好的导航效果，进行优化和效果提升。

第 3 章 农机视觉与 GPS 组合导航方法

3.1 引言

视觉导航的缺点在于图像包含的信息量大，处理速度容易受到影响，以及易受到光照等外部环境的干扰。而 GPS 定位的缺点在于在室内使用时接收卫星信号效果很差，高精度的定位需要高价格的 GPS 设备，一般 GPS 的定位结果误差在米级别。本文基于视觉与 GPS 导航提出一种组合导航方法，将这两种导航方法的优势互补，弥补劣势。

本文拟通过组合这两种导航方法，通过 UKF 来融合两种导航方法获取的传感器信息，来减少通过单一导航方式进行导航的误差。组合导航包含以下几个步骤：

- 1) 将获取到的初始图像按照农田图像中的特征进行预处理和提取特征点
- 2) GPS 设备获取坐标、航向及速度信息
- 3) 将图像中提取到的导航特征点进行坐标系转换
- 4) 设定状态向量与观测向量的初始值及关系矩阵和转换矩阵
- 5) 用 UKF 对数据进行滤波并预测和更新导航点，减少导航误差

3.2 农田图像特征提取方法中的处理与分割技术

3.2.1 农田图像特征分析

本文对应的实际项目的应用场景是在东北的旱田环境，所以对于图像的处理方法也要按照实际农田环境进行分析和选择。由于智能车的主要功能是针对农作物的幼苗期以及成熟时期进行除草工作，因此农田中农作物多呈现绿色状态，而土壤多为黑色或褐色，其他的颜色在农田中占比较少，这种颜色特征有助于实际处理中区分农作物背景，提取导航特征点。除了颜色特征之外，农作物的播种方式多为成行播种或成垄播种，农作物区域与垄沟（智能车行走区域）呈现明显的间隔区分，呈条状分布，这种结构性的分布也有利于背景与目标的分割。

3.2.2 农田图像预处理技术

在视觉导航中，由于拍摄图像受光照因素影响，运动过程中拍摄图像存在噪声影响且图像中存在碎石块、泥点等影响导航特征提取的因素，摄像头拍摄到的图像中包含着较多嘈杂的特征信息，但是其中只有一部分是实际项目中所需要的

用来提取路径信息的导航特征点，从农田中直接拍摄到的图像不能够直接用于提取导航特征点，如果直接提取的话既浪费时间，又不能得到好的特征点提取效果，所以拍摄的原图要先采取预处理操作，使其便于后续特征的提取。本文中图像预处理所包含的流程如图 3-1 所示。

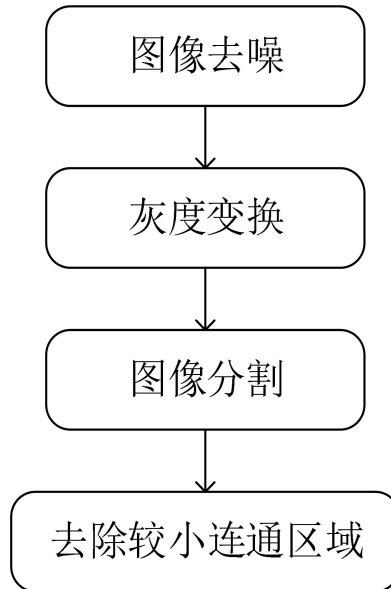


图 3-1 图像预处理流程图

图像预处理技术的目的为去除掉无用的内容，将关注的重点内容突出放大等，方便后续操作。图像在预处理操作后得到的结果可以用于提升特征提取效果。本次项目中图像预处理方法包含的操作为图像去噪、灰度变换、图像分割和去除较小连通区域。

(1) 图像去噪技术

由于农机在农田中的运动可能不稳定，视觉导航中的图像在拍摄过程中可能因为某些因素影响而在图像上包含各种噪声，主要为椒盐噪声以及高斯噪声。此时需要选用合适的去噪方法，常见的方法有高斯滤波、均值滤波、中值滤波与双边滤波等算法。

由于目前没有实际到农田中去拍摄图像，所以采用随机添加噪声的方法来模拟农田图像的噪声情况，添加噪声后的农田图像如图 3-2 所示。



图 3-2 带有噪声的农田图像

对于图 3-2 这张带有噪声的农田图像，本文分别采用 2.1.2 节中提到的四种去噪算法来对其进行去噪处理，来观测去噪效果，如图 3-3 所示。

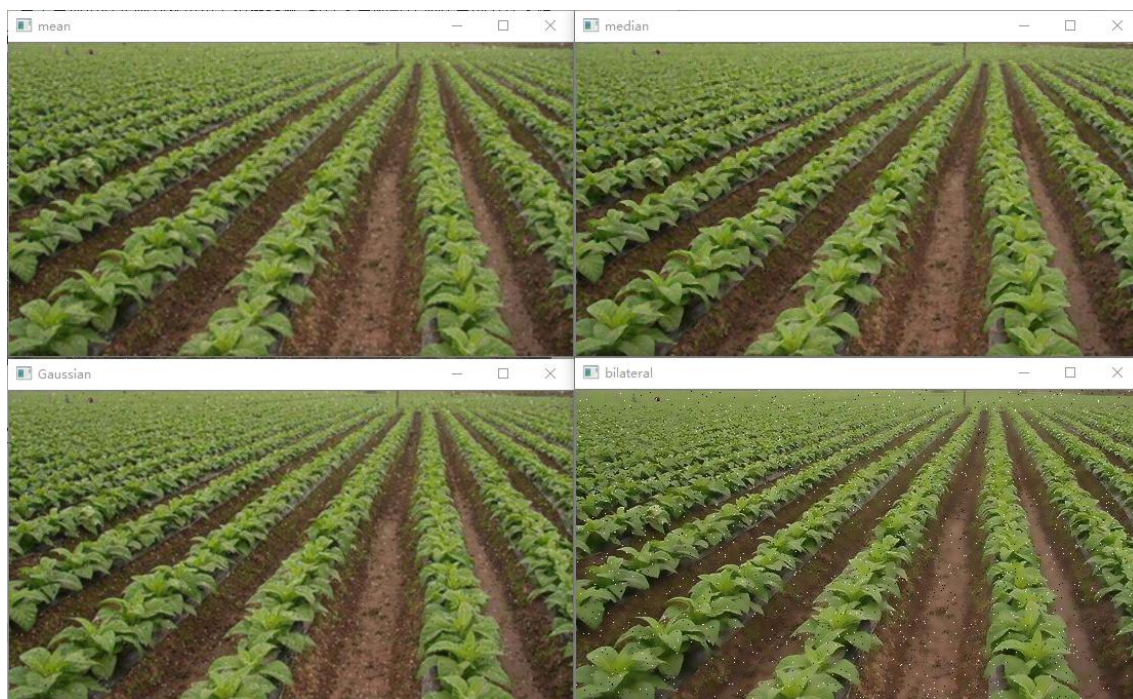


图 3-3 四种滤波算法的处理结果对比

由图 3-3 可以看出，均值、中值及高斯滤波算法均能有效去掉噪音，而双边滤波并不能有效去掉噪音。在这三种有效去噪的方法结果中，高斯滤波算法的处理结果相比较与原图更加保真，保存了较多的图像特征信息。因此本文采用高斯算

法来完成图像去噪任务。

(2) 图像灰度化技术

本节的主要内容为使用常见的几种颜色模型，采用不同的灰度化方法，对得到的效果进行比较，选择最合适的方法。同一张农田图像分别在 RGB、HSI 以及 YCbCr 颜色模型的表示结果如图 3-4 所示。在 RGB 模型表示的农田图片中农作物与垄沟的颜色差异非常明显。然而将图像转换到其他空间中进行表示，其结果差异虽然也有，但是差异程度要小得多。

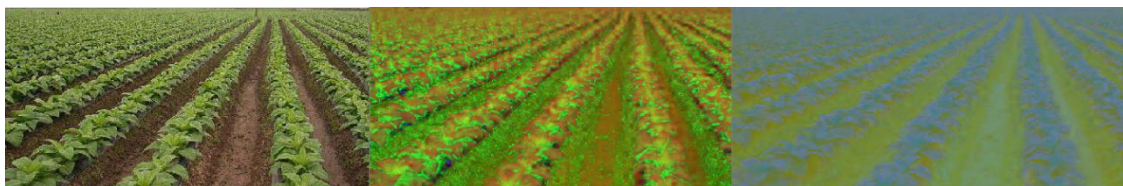


图 3-4 同一张图片在 RGB、HSI 以及 YCbCr 模型下的不同表示

针对于使用不同颜色模型的图像，本文对图像的单一颜色分量进行提取，观察使用不同颜色模型的单变量灰度化效果，对 RGB、HSI 及 YCbCr 颜色模型的处理结果如图 3-5 到图 3-7 所示。



图 3-5 R、G、B 分量



图 3-6 H、S、I 分量



图 3-7 Y、Cr、Cb 分量

根据图 3-5 到图 3-7 的效果，可以得到 RGB 模型分离出每个分量的差异都不

大的结论，很难用单独的分量做灰度化操作。在 HSI 模型中 H 分量图区分作物与垄沟的效果显著，但是由于 RGB 空间转换为 HSI 空间时调用了反三角函数，出现了图像失真的问题。YCrCb 中的 Cr 和 Cb 分量都有效地分离了作物背景与目标路径，但是需要对图像进行增强才能够进行使用。

根据 2.1.1 节中 RGB 转换为 YCrCb 空间的公式可知，Cr 和 Cb 是由 R、G、B 分量的线性运算得到的。这说明在 RGB 空间内三个分量采取线性运算的方式进行图像灰度化，可以得到很好的分割效果。除此以外，直接采用 RGB 空间处理图像也可以减少转换为其他空间的时间，加快算法的处理速度。因此本文预采用 RGB 空间进行后续图像处理。

根据上面的处理结果，我们知道单独采用 R、G、B 分量进行灰度化的效果较差，难以进行作物背景和目标路径的分离，而可以对三个分量进行线性组合来提升分离背景及前景的效果。接下来本文对目前已有的对 RGB 三分量的组合方式进行分析并比较处理效果。

目前提出的颜色特征因子包含 $G - R$ 以及 $2G - R - B$ ^[40]等分割因子，针对以上的分割因子，比较其归一化与未归一化的灰度化效果，其处理结果如图 3-8 和 3-9 所示。



图 3-8 原图与 2G-R-B 灰度化后的对比



图 3-9 原图与 G-R 灰度化后的对比

根据图 3-8 与 3-9 的对比，可以看到虽然两种灰度化方式都能够区分出农作物与垄沟，但是以 $2G - R - B$ 作为分割因子，农作物与垄沟的差异突出较大，识别效

果较好，更为可取，更加适用于农田中作物与垄沟成行排列的环境，所以本次项目采用 2G - R - B（超绿特征）为分割因子，进行灰度化处理，以此来突出垄沟背景与农作物的差别，并且对光照、阴影等因素有一定的抑制效果。

对于 2G - R - B 特征的具体提取，其使用方法主要是首先分别取图像的 R、G、B 单通道的灰度图，然后将对应的灰度图进行 $2 * G - R - B$ 操作，得到超绿特征灰度化处理图。

(3) 图像分割方法

在采用超绿特征对图像灰度化处理完之后，要对图像进行分割，将农作物背景与行驶路径分割出来。将垄沟和作物分割需要一个阈值，将像素点与阈值进行对比，进行划分。本文选用的图像分割方法为最大类间方差法，此方法以类间方差为最大来使垄沟与作物的分离效果最好。图像灰度化及二值化之后的处理结果如图 3-10 所示。

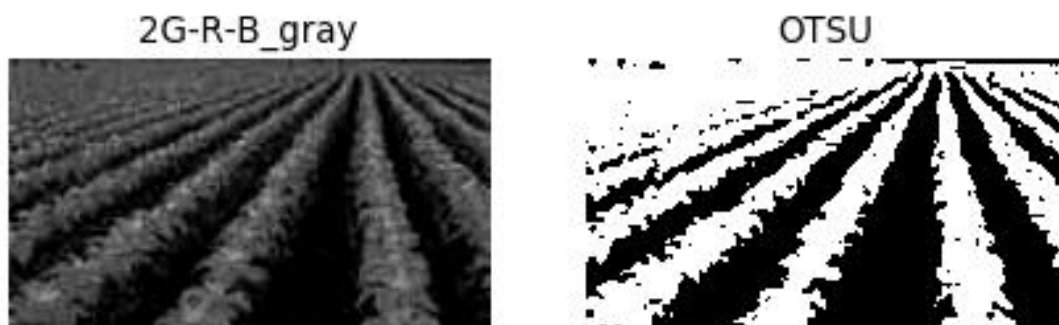


图 3-10 图像灰度化与天津法分割后的对比

(4) 形态学滤波

在分割完之后，由于农田垄沟里的碎石块等因素影响，分割完的图像中区域会出现连通的小白块或黑块，影响后续导航线的提取操作。因此在分割操作之后要对图像去除较小连通区域，本文采用形态学滤波方法来完成。常见的形态学滤波^[41]方法有腐蚀、膨胀、开操作和闭操作等。

图 3-11 是对二值化图像进行腐蚀、膨胀、开操作和闭操作等形态学滤波算法后的结果对比图。由图可以看出膨胀操作对图像中的白色区域起到了扩大放大的效果，而腐蚀操作则是放大了黑色区域，这两种操作的结果都无法得到较好的去除连通区域的效果。而开运算和闭运算能够更好地放大图像的特征，可以有效地去除目标区域及背景区域的较小连通区域。

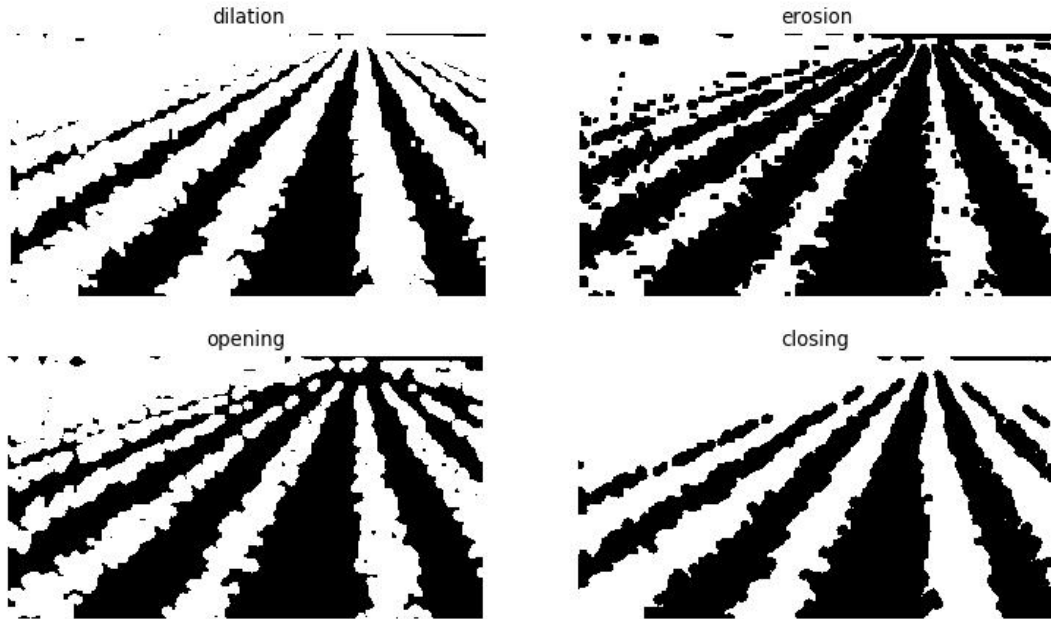


图 3-11 形态学滤波效果图

因此本文将这两种操作结合，先采用闭运算来去除目标区域内的黑色较小联通区域，再利用开运算去除背景区域内的白色较小联通区域，能够有效地去除图像的较小联通区域。两种滤波操作的结合处理非常适用于农田中垄沟有石块，作物上有斑点的应用场景。这样利用两次滤波操作后的图像更能够有效进行提取特征点操作，二值化操作后与经过先闭后开运算后的图像的对比如图 3-12 所示。



图 3-12 二值化后的图像与经过先闭后开运算后的图像对比

3.3 导航特征点提取与拟合技术

最小二乘法^[42]应用场景是针对一些离散的点近似能够看成一条直线，根据其在二维坐标生成一个近似函数 $y = f(x)$ ，使得近似函数值 $f(x_i)$ 与实际值 y_i 差的平方和最小。假设给定一系列散列值（数据集）记为 $D = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots, (x_n, y_n)\}$ ，设函数 $f(x) = ax + b$ 使得 $f(x)$ 函数尽可能拟合 D 。最小二乘法寻找拟合函数 $f(x)$ 的原

理和思想关键是使得 Q 值最小, Q 的表达式如式(3-1)所示:

$$Q = (ax_1 + b - y_1)^2 + (ax_2 + b - y_2)^2 + \dots + (ax_n + b - y_n)^2 \quad (3-1)$$

即求解 Q 最小值如下:

$$Q = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 = \sum_{i=1}^n (ax_i + b - y_i)^2 \quad (3-2)$$

因为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ 均是已知变量, 问题转化为求解 Q 的最小值, 其中 Q 为因变量, a, b 为自变量, 即求解 (a, b) 点, 使得 $f(a, b)$ 值极小。

使用偏导数解 $f(a, b)$ 极小值:

$$\begin{cases} \frac{\partial f(a, b)}{\partial a} = \frac{\partial \sum_{i=1}^n (ax_i + b - y_i)^2}{\partial a} = 0 \\ \frac{\partial f(a, b)}{\partial b} = \frac{\partial \sum_{i=1}^n (ax_i + b - y_i)^2}{\partial b} = 0 \end{cases} \quad (3-3)$$

最终整理简化得 a 值、 b 值公式如下:

$$\begin{cases} a = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \\ b = \bar{y} - a\bar{x} \end{cases} \quad (3-4)$$

对于获取的导航点, 对其采用最小二乘法计算出的直线与导航点的关系图如图 3-13 所示, 其中横纵坐标轴分别表示 X 、 Y 坐标。

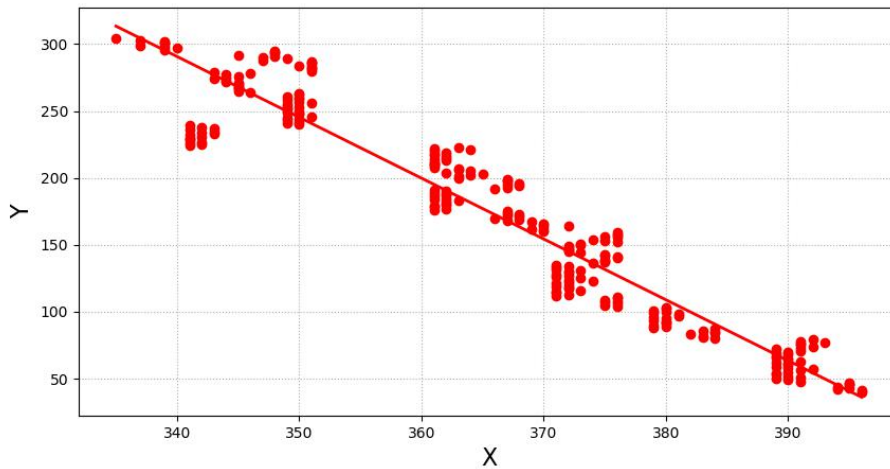


图 3-13 最小二乘化的直线结果与导航点关系图

由于本文后续需要进行模拟数据构建，数据针对的都是导航特征点，因此本文不需要进行拟合特征线，采用分离出白色的垄沟区域后按行来计算垄沟的左右边界，并计算边界的中点作为该行的导航特征点，使其表现垄沟方向特征。对于图像的列方向，本文选择隔一定的像素点来提取，以避免计算模拟数据时前后距离太近导致的误差问题，本次项目采用间隔 4 像素值来提取特征点。采用此方法来提取特征点能够有效减少图像的处理时间，更能够实现算法的实时性。

3.4 组合导航方法

3.4.1 导航特征点的坐标系变换

本次项目中的坐标数据涉及到了多个不同的坐标系，若想要融合视觉导航与 GPS 导航的数据，则需要将视觉导航中获取的特征点坐标转到与农机坐标点相同的坐标系中表示。视觉导航获取到的导航特征点的坐标数据是在像素坐标系中，而 GPS 导航获取到的农机坐标数据则是基于经纬度坐标系。导航特征点转化到世界坐标系下表示需要进行多次坐标系转换，包含的坐标系为像素坐标系、图像坐标系、农机坐标系以及世界坐标系。除此之外由于经纬度单位跨度较大，直接使用经纬度来进行计算会导致误差较大，所以要将经纬度转换到世界坐标系下（本文中使用的 WGS-84 坐标系）。

(1) 像素坐标系到图像坐标系

像素坐标系与图像坐标系都在图像成像的平面上，二者的不同点是像素坐标系的原点在左上角，X 轴正方向从左到右，Y 轴正方向从上到下，而图像坐标系的原点一般在 Z 轴与图像相交的点。而且像素坐标系使用的单位是像素 pixel，而图像使用的单位是 mm。这两者通过 dx 和 dy 转换，分别表示一行和一系列在感光芯片上的单位 pixel 的实际大小。两个坐标系的关系如图 3-14 表示。

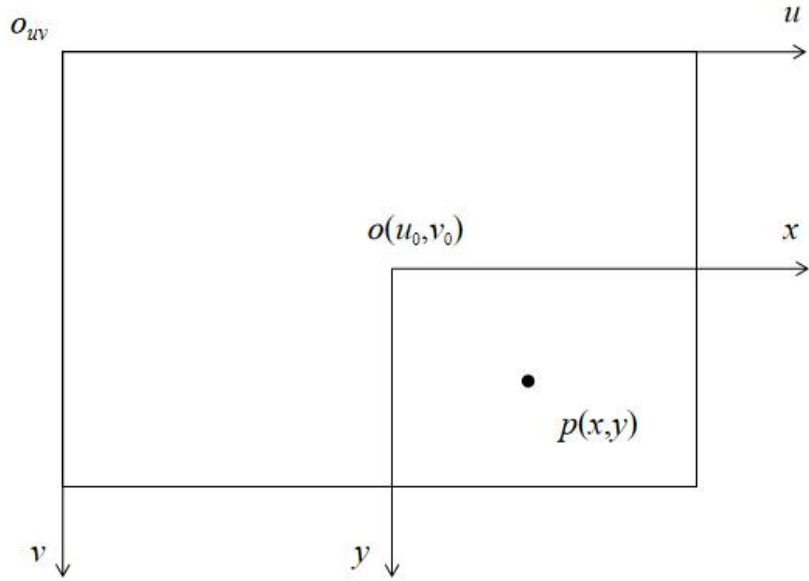


图 3-14 图像与像素坐标系

在图 4-中，o 点 (u_0, v_0) 表示的是图像坐标系的原点，其具体位置为拍摄时下元件产生光的射线与成像平面的交点，单位为 mm。p 点 (x, y) 表示要转换坐标的点在图像坐标系中的坐标。像素坐标系中的坐标表示 (u, v) 与图像坐标系中的坐标表示 (x, y) 的关系为：

$$\begin{cases} u = \frac{x}{dx} + u_0 \\ v = \frac{y}{dy} + v_0 \end{cases} \quad (3-5)$$

根据式(3-5)得到两个坐标系的坐标转换方程如下：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

(2) 图像坐标系到相机坐标系

图像坐标系对应着二维平面，相机坐标系对应着三维立体，二者之间的转换将三维位置的坐标通过成像映射到二维平面中，如图 3-15 所示。

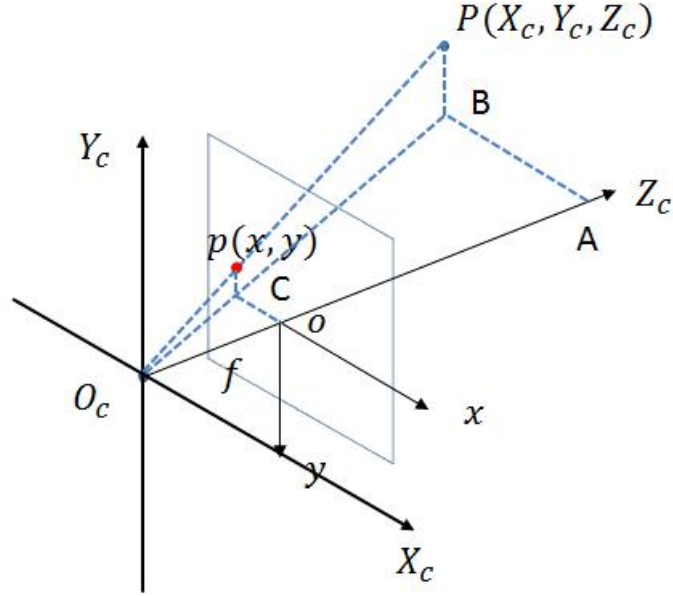


图 3-15 图像成像示意图

相机坐标系以相机的光轴作为 Z 轴，拍摄方向为 Z 轴正方向， X 轴和 Y 轴的方向按照左手坐标系规则确定。在计算两个坐标系的转换方程时，根据图 3-15 可以得到：

$$\triangle ABO_c \sim \triangle oCO_c$$

$$\triangle PBO_c \sim \triangle pCO_c$$

根据这两组相似三角形可以得到： $\frac{AB}{oC} = \frac{AO_c}{oO_c} = \frac{PB}{pC} = \frac{X_c}{x} = \frac{Z_c}{f} = \frac{Y_c}{y}$ ，其中 P

(X_c, Y_c, Z_c) 表示相机坐标系下的坐标表示， p 点 (x, y) 表示目标点成像在图像平面的二维坐标， f 表示焦距。

根据上面相似关系，图像坐标系与相机坐标系的坐标关系如下：

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

(3) 相机坐标系到农机坐标系

农机坐标系的原点始终是农机的位置，因此农机坐标系中的点表示的含义是其与农机之间的相对位置关系。为了方便后续的计算，本文规定农机坐标系中农机的行驶方向为 Y 轴正方向， Z 轴正方向由农机顶部向下， X 轴正方向为垂直于行驶方向的右侧。坐标系的变换矩阵由旋转矩阵和平移向量共同确定，其中旋转矩阵与相机的拍摄角度有关，平移向量与相机的放置高度有关。根据相机坐标系

和农机坐标系的坐标轴方向，可以得到坐标系的旋转是基于 X 轴的，因此旋转矩阵只与 Y 和 Z 方向角度有关。绕 X 轴的旋转矩阵定义如下。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

其中 φ 表示坐标系的旋转角度，本次项目旋转的角度为 45° ，摄像头的高度为

$$1\text{m}, \text{ 因此旋转矩阵为 } \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.707 & 0.707 \\ 0 & -0.707 & 0.707 \end{bmatrix}, \text{ 平移向量为 } [0 \ 0 \ 1]^T。$$

同一个点在相机坐标系中的坐标表示为 (X_c, Y_c, Z_c) ，在农机坐标系中的坐标表示为 (X_w, Y_w, Z_w) 。将旋转矩阵与平移向量相结合，得到两个坐标的转换方程如下：

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ \vec{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

结合上面三部分的坐标系转换方法，将图像中提取出来的导航点在像素坐标系中的坐标 (u, v) 转化为农机坐标系中的相对坐标 (X_w, Y_w) 。像素坐标系坐标转换到农机坐标系中表示的转换方程为：

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

其中右边的矩阵表示相机的外参矩阵，其参数与相机的拍摄角度、相机高度有关，即外参矩阵表示坐标系的旋转矩阵与平移向量的结合；左边的矩阵表示相机的内参矩阵，其参数取值与相机有关，在相机出厂之后就已经确定。

接下来使用标定方法来得到内参矩阵的具体参数。本文采用 `opencv` 中的标定方法来得到参数，采用 8×6 的黑白格棋盘作为标定图像，在不同角度和高度对图

像拍摄。得到的相机标定图像如图 3-16 所示。



图 3-16 用于标定的图像



图 3-17 角点标记效果图

在进行完角点标记之后，程序得到本次项目使用的相机的内参矩阵参数为：

$$\begin{bmatrix} 1643.322 & 0 & 544.862 \\ 0 & 2087.443 & 235.903 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(4) 农机坐标系到世界坐标系

因为 GPS 设备所获取的是经纬度信息，不能直接用于计算坐标，所以需要先将 GPS 坐标转换到世界坐标系中表示，其中最为常见的是 WGS-84 坐标系。WGS-84 坐标系的单位为 m，将经纬度坐标转换为北-东坐标系便于坐标计算。

通过上面 1 到 3 部分，像素坐标系导航点的坐标(X_1 , Y_1)可以被转化为农机坐标系中的坐标(X_2 , Y_2)。因为农机坐标系的原点始终是农机的位置，所以农机坐标系下的坐标表示的是目标点距离农机的相对距离，由此可以得到两个坐标系之间的关系如图 3-18 所示。

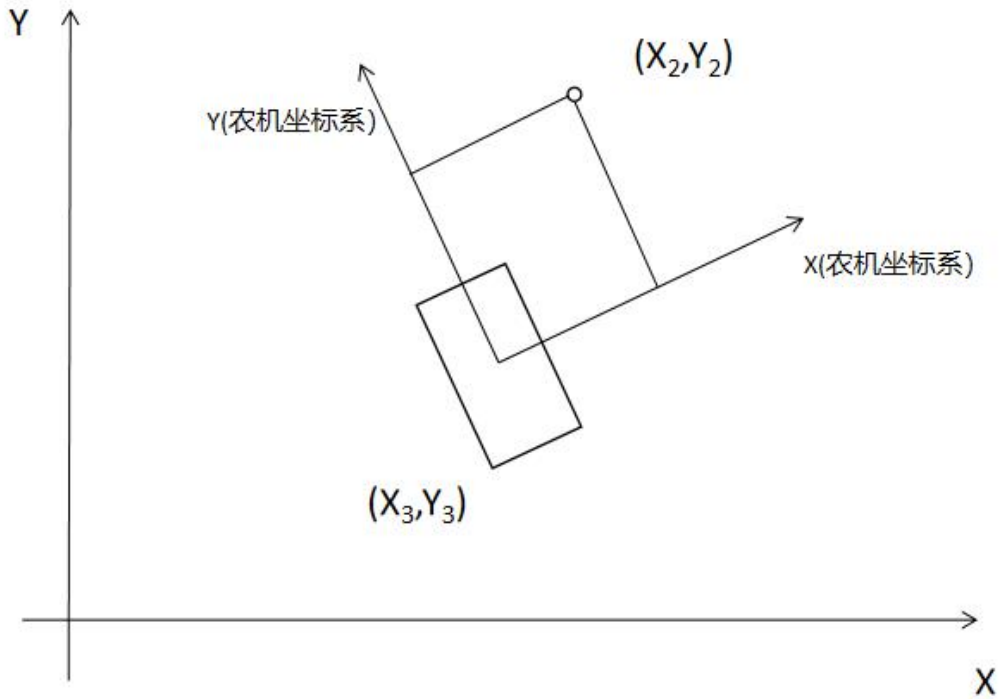


图 3-18 世界与农机坐标系的关系

由图 3-18 可以看出想要将农机坐标系里的坐标 (X_2, Y_2) 转化成世界坐标系的坐标，需要通过 GPS 获取到农机的经纬度信息，并按照上面所述的方法将经纬度坐标转换为世界坐标系下的坐标 (X_3, Y_3) ，以及农机的航向角度 φ 。根据这些参数计算出世界坐标系下的目标点坐标 (X_4, Y_4) ：

$$X_4 = X_3 + X_2 \cos \varphi + Y_2 \sin \varphi \quad (3-10)$$

$$Y_4 = Y_3 - X_2 \sin \varphi + Y_2 \cos \varphi \quad (3-11)$$

3.4.2 状态转换与滤波计算

基于 UKF 方法本文构建以下模型：

$$x_k = F_{k-1} x_{k-1} + w_{k-1} \quad (3-12)$$

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (3-13)$$

其中 x_k 为模型在 k 时刻的状态向量， z_k 为模型在 k 时刻的观测向量， w 为过程噪声， v 为量测噪声，矩阵 Q 和 R 对应噪声的协方差。对于此模型，状态向量 x 和观测向量 z 定义为：

$$x = (X_c, Y_c, X_g, Y_g, V_x, V_y, \phi) \quad (3-14)$$

$$z = (X_c, Y_c, X_v, Y_v, V, \phi) \quad (3-15)$$

状态向量 x 的参数定义是根据农机的运动模型来确定的，其包含了能够根据运动模型来确定状态转换矩阵计算出来的参数，其中 (X_c, Y_c) 的含义是世界坐标系中农机的位置， (X_g, Y_g) 的含义是世界坐标系中导航点的位置， (V_x, V_y) 的含义是农机速度在 x 、 y 方向的分量， ϕ 表示农机的航向角度。

观测向量 z 的参数定义是基于视觉导航和 GPS 导航获取到的观测信息来确定的。其中 (X_c, Y_c) 的含义是世界坐标系中农机的位置， (X_v, Y_v) 的含义是农机坐标系中导航点的位置， V 表示农机速度， ϕ 表示农机的运动角度。

对于定义的向量 x 和 z ，关系方程 F 和转换方程 H 如下：

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & dt & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & dt & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\cos \phi & \sin \phi & \cos \phi & -\sin \phi & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \phi & -\cos \phi & \sin \phi & \cos \phi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{V_x}{V_x^2 + V_y^2} & \frac{V_y}{V_x^2 + V_y^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

其中 dt 表示状态发生变换的时间间隔。

3.5 实验结果及分析

3.5.1 实验数据构建

由于完成本文期间发生的疫情等因素影响，本文的实验不能够较为完整地完，需要进行实验数据的构建，进行模拟实验。本文的实验数据构建包含三个部分：图像拍摄及视觉导航数据构建、GPS 导航数据构建，以及组合导航数据构建。构建此三部分的数据的目的在于在不能实际实验的前提下，以 GPS 设备获取到的坐标位置作为标准，来比对单独使用视觉导航时获得的数据和使用组合导航方法计算得到的数据之间的误差范围与精度情况。这三部分之间并非完全不相关的，而是互相联系，互为因果的。对于多组实验数据，三部分的起点设置在同一个位置，便于比对两种导航结果的误差情况。

(1) 图像拍摄及视觉导航数据构建

为了使得模拟实验更加接近真实情况，在农田中以离地高度 1m，拍摄角度 45° 为摄像头拍摄位置，拍摄朝向向北，拍摄不同位置的实际农田 20 幅图像，并按照本章第 2、3 节中的方法进行图像预处理和特征提取，间隔一定像素来提取特征点，并按照坐标系转换方法以 GPS 获取到的农机坐标来计算得到特征点的世界坐标系坐标。统计图像在像素坐标系、农机坐标系以及 WGS-84 坐标系中的坐标，其数据如表 3-1 所示。

表 3-1 视觉导航数据

序号	X(像素)	Y(像素)	X(农机)	Y(农机)	X(WGS-84)	Y(WGS-84)
1	328	1	3.834085759	8.843425281	348978.5153	4405297.454
2	328	5	3.834085759	8.707893859	348982.9732	4405293.277
3	331	9	3.651510247	8.572362437	348983.3248	4405292.091
4	339	17	3.164642214	8.301299593	348982.1937	4405293.353
5	342	21	2.982066702	8.165768171	348979.5547	4405295.81
6	343	25	2.921208197	8.03023675	348973.7948	4405280.112
7	342	29	2.982066702	7.894705328	348977.0324	4405280.506
8	339	33	3.164642214	7.759173906	348975.3207	4405280.256
9	335	41	3.40807623	7.488111062	348978.0893	4405296.099
10	335	45	3.40807623	7.35257964	348979.7708	4405294.917

续表 3-1 视觉导航数据

序号	X(像素)	Y(像素)	X(农机)	Y(农机)	X(WGS-84)	Y(WGS-84)
11	336	49	3.347217726	7.217048218	348979.6789	4405294.801
12	337	53	3.286359222	7.081516796	348982.3963	4405289.805
13	343	57	2.921208197	6.945985374	348979.1998	4405294.641
14	344	61	2.860349693	6.810453952	348977.5415	4405295.421
15	344	65	2.860349693	6.67492253	348977.5415	4405295.286
16	344	69	2.860349693	6.539391108	348979.0422	4405294.261
17	345	73	2.799491189	6.403859686	348978.9503	4405294.145
18	346	77	2.738632685	6.268328264	348978.8584	4405294.028
19	347	81	2.677774181	6.132796842	348979.8189	4405292.899
20	349	85	2.556057173	5.997265421	348978.6155	4405293.809

(2) GPS 导航数据构建

由于 GPS 导航数据是用来比较单独使用视觉导航方法与组合导航方法的标准,所以 GPS 的数据需要根据视觉导航中提取出来的特征点位置来获取。根据(1)部分中图像提取出的导航特征点,将 GPS 设备放置于图像中的导航点的位置来获取 GPS 坐标。由于 GPS 设备的精度问题,在 GPS 模块放置在指定位置时其获取数据的过程也不是获取到某个确定的值,而是存在一定抖动,但是其误差是在可接受范围内的。因此获取坐标时在放置设备之后需要静置一段时间来减少误差。GPS 获取数据的软件界面如图 3-19 所示。

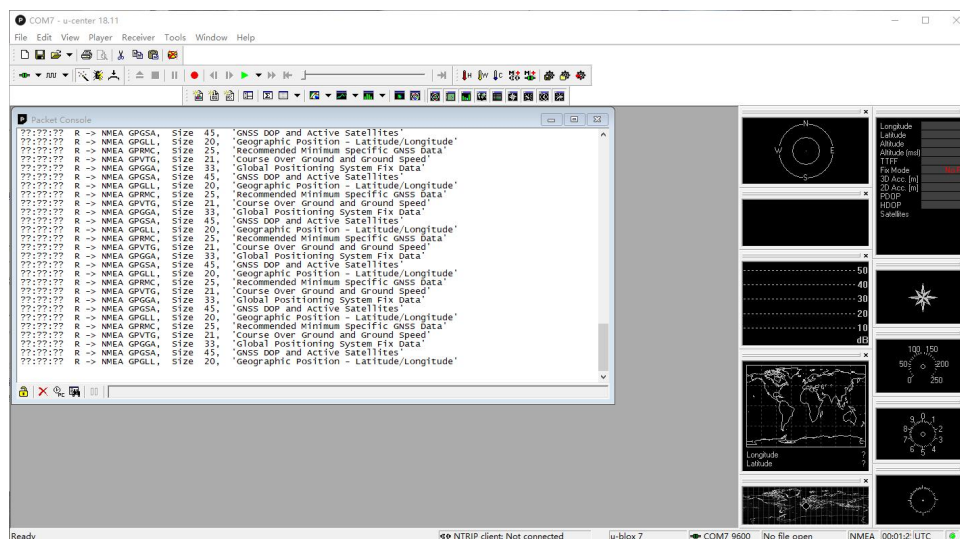


图 3-19 GPS 坐标获取界面

针对(1) 部分提取出图像的导航特征点，将 GPS 设备分别置于对应的特征点位置，统计得到的经纬度以及 WGS-84 坐标系下的 X、Y 坐标，得到的 GPS 数据如表 3-2 所示。由于数据过多，在表 3-2 中只截取部分数据用于显示。

表 3-2 GPS 导航点部分数据

序号	经度	纬度	X (GPS-北_东)	Y (GPS-北_东)
1	118.2387715	39.71568717	348975.776	4405299.912
2	118.2387922	39.71570483	348975.8695	4405304.666
3	118.238758	39.715735	348975.7023	4405296.168
4	118.23876	39.71572033	348975.8776	4405305.081
5	118.2387611	39.715702	348975.8713	4405304.76
6	118.238747	39.7157135	348975.8625	4405304.31
7	118.2387557	39.71573083	348975.8567	4405304.016
8	118.2387702	39.71574567	348975.8497	4405303.662
9	118.238764	39.71575204	348975.8443	4405303.384
10	118.2387745	39.71575204	348975.8466	4405303.505
11	118.2387725	39.7157561	348975.8398	4405303.156
12	118.2387762	39.71575892	348975.8301	4405302.664
13	118.238782	39.71575989	348975.8348	4405302.904
14	118.238773	39.71575136	348975.8322	4405302.77
15	118.2387732	39.71576642	348975.8258	4405302.444
16	118.2387742	39.7157701	348975.8182	4405302.059
17	118.2387799	39.71577361	348975.8079	4405301.535
18	118.2387412	39.71575201	348975.8026	4405301.267
19	118.2387237	39.71577963	348975.5822	4405290.062
20	118.2387727	39.71578241	348975.7165	4405296.888

(3) 组合导航数据构建

构建 UKF 滤波器，其 x 向量和 z 向量按照 3.4.2 部分来构建， x 向量的初始值由农机的起始位置和运动速度确定，农机的初始运动方向设置为正北。在设置完 x 向量的初始值后，我们将视觉导航与 GPS 导航所获取到的值进行计算，并分别设置为不同时刻的 z 向量值，用于更新之前预测的 x 向量的值。更新之后得到 x 向量的值，其含义是组合导航方式用于比对标准的值。

表 3-3 组合导航数据

序号	X(滤波)	Y(滤波)
1	348976.7653	4405302.452
2	348976.821	4405305.648
3	348976.6703	4405299.283
4	348976.8791	4405307.075
5	348976.8745	4405306.735
6	348976.8653	4405306.301
7	348976.8585	4405305.998
8	348976.8506	4405305.653
9	348976.8458	4405305.653
10	348976.851	4405305.486
11	348976.8435	4405305.121
12	348976.8356	4405304.711
13	348976.8457	4405304.909
14	348976.8486	4405304.751
15	348976.8476	4405304.423
16	348976.8458	4405304.03
17	348976.8329	4405303.418
18	348976.7365	4405301.863
19	348976.5561	4405292.926
20	348976.7093	4405299.276

3.5.2 实验结果

将只使用视觉导航方法得到的数据和使用组合导航得到的数据与 GPS 数据进行对比，得到实验结果。将三种方式得到的实验数据进行对比，由于每个间隔之间的差距较小，在二三位小数位置，因此将结果放大比对得到情况如图 3-20 所示。

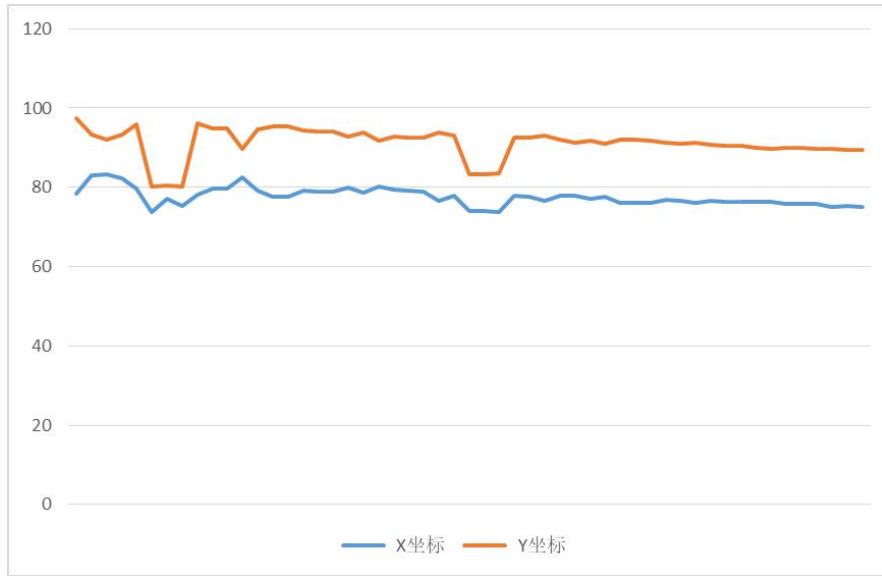


图 3-20 视觉导航数据的放大表示

图 3-20 中横坐标为不同的视觉特征点，纵坐标表示视觉特征点坐标的具体数值，最高位为十位，以更好地观察视觉坐标的整体差异情况。如图可见视觉导航的整体虽然较为平稳，但是出现两个位置存在波动较大的情况，影响整体导航的精度。这是因为视觉导航受光线因素影响，在拍摄时存在抖动等情况，处理得到导航特征点时会受到这些因素而产生偏离平均标准较大的野值点，影响整体的导航精度。

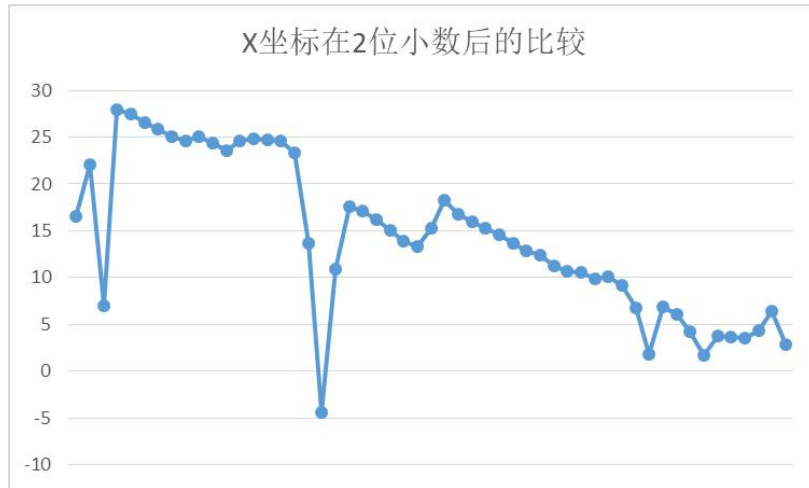


图 3-21 组合导航数据中 X 坐标的比较

如图 3-21 所示为组合导航的 X 坐标在放大时的表示图。横坐标为不同的导航点，纵坐标表示 X 坐标的具体数值，放大 2 位小数后的值，以更好地观察视觉坐标的整体差异情况。放大表示是为了突出显示数据的差异。在 2 位后的表示可以看出 X 坐标的整体差异不大，出现波动的原因是由于 GPS 设备获取的 GPS 坐标存

在抖动，而组合导航是结合 GPS 和视觉两种方式的导航方法，其结果受到两种数据的影响。

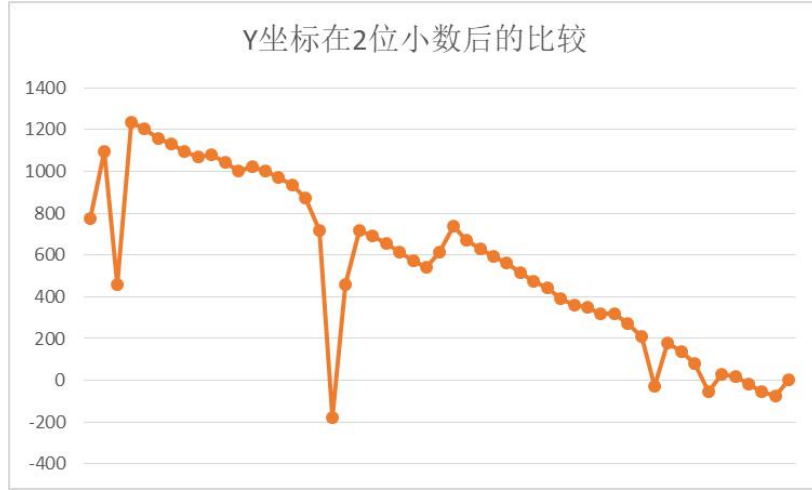


图 3-22 组合导航数据中 Y 坐标的比较

如图 3-22 所示为组合导航的 Y 坐标在放大时的表示图。横坐标为不同的导航点，纵坐标表示 Y 坐标的具体数值，放大 2 位小数后的值，以更好地观察视觉坐标的整体差异情况。相比于 X 坐标，Y 坐标跨度范围更大，这是因为农机是在北方向进行的，而 Y 坐标在世界坐标系中对应北方向。

相比较于单一使用视觉导航得到的数据，组合导航能够通过 UKF 滤波过滤掉野值点因素的影响，计算得到的数据标准偏差要远小于使用视觉导航时的数据，因此在上图中组合导航的坐标差异更小。如图 3-23 所示为两种导航方式的特征点的标准偏差情况，其中蓝色表示视觉导航的情况，橙色表示组合导航的情况，横坐标表示不同方式，纵坐标表示对应指标的值。

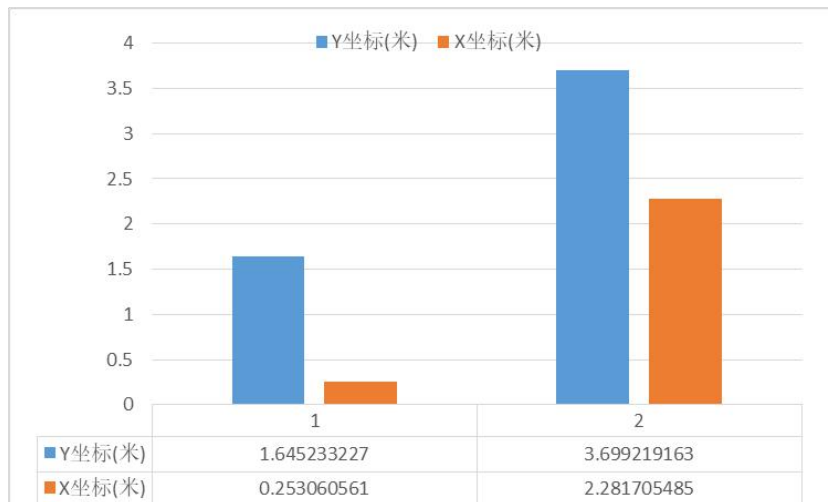


图 3-23 两种导航方式的特征点标准偏差

图 3-24 和图 3-25 分别表示不同导航方式的精度情况，其中横坐标表示不同的点，纵坐标表示具体误差值。由两图的对比可以看出组合导航相比于视觉导航的误差更小，且出现野值的可能性更小。只使用视觉导航的误差数据，X（东）方向平均误差为 1.7201m，Y（北）方向的平均误差为 4.9771m。使用 UKF 融合视觉导航与 GPS 导航得到的数据，X（东）方向平均误差为 1.0608m，Y（北）方向的平均误差为 2.0305m。

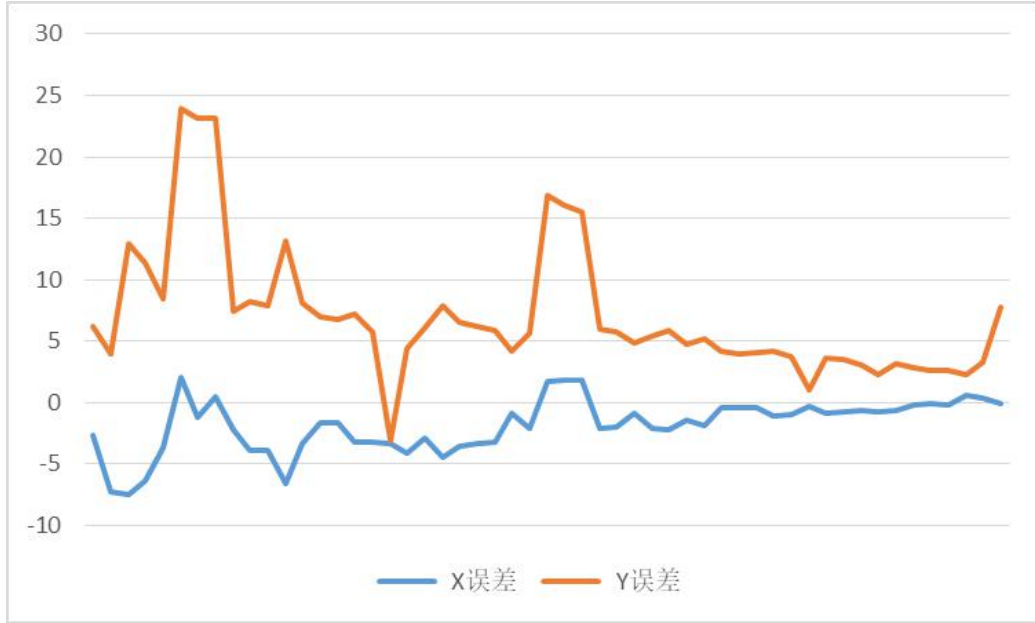


图 3-24 视觉导航的误差情况

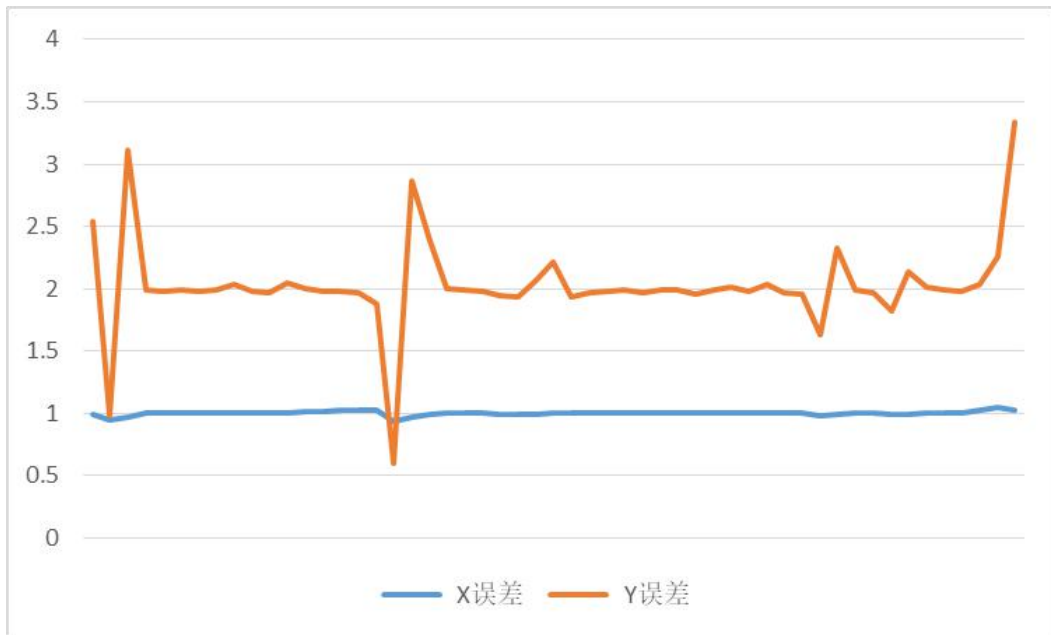


图 3-25 组合导航的误差情况

组合导航能够有效地融合 GPS 导航数据与视觉导航数据,通过 UKF 将两种方式的数据进行滤波,根据模型进行预测和更新,因此得到了更为精确的导航效果,两种导航结果的误差对比如图 3-26 所示,其中蓝色表示视觉导航的情况,橙色表示组合导航的情况,横坐标表示不同方式,纵坐标表示对应指标的值。

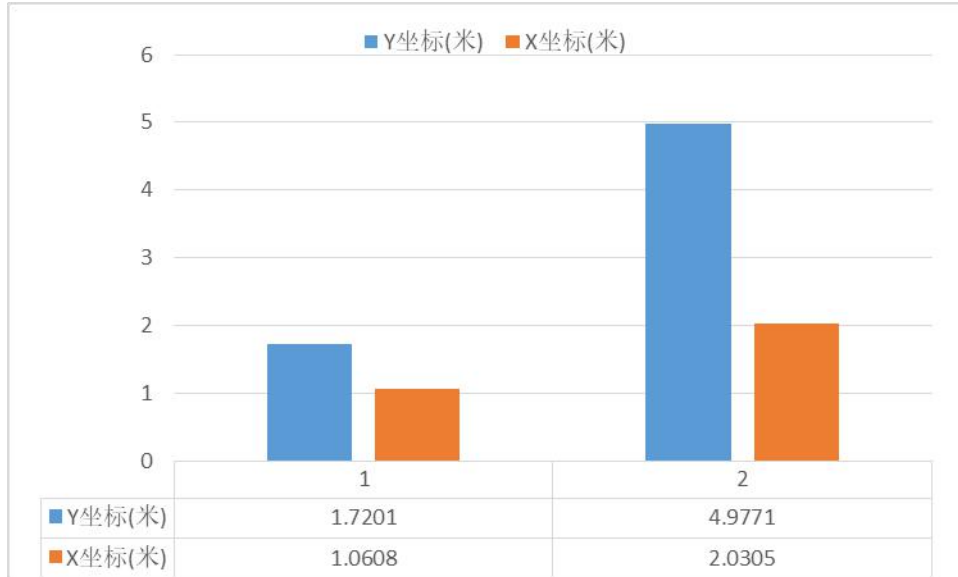


图 3-26 两种导航方式的误差对比

3.6 本章小结

针对单一导航方式存在的缺陷,本章详细地阐述了视觉导航的步骤,如何将视觉导航和 GPS 导航结合应用于实际的项目应用环境以及通过数据构建和模拟实验将使用组合导航时的精度情况与单一使用视觉导航的精度情况进行比对,观察效果。

在视觉导航部分本章采用不同的处理方法对图像进行处理,观察效果并选择效果好的方法,为接下来基于视觉导航与 GPS 导航的组合导航进行打下了基础。接下来本章开始组合导航部分的步骤介绍,包含坐标系转换及滤波计算等步骤。最终针对三种导航方式的特点进行数据采集,针对 20 张不同位置的图片采集 20 组数据,这三种数据之间是相互联系的,对采集到的三种不同方法得到的数据进行比对,得到最终的实验结果,实验结果表明在标准偏差和定位精度两方面,组合导航的表现都优于单一使用视觉导航方法的表现。

第4章 基于前进-后退策略的农机转弯方法

4.1 引言

农机的作业方式是按垄进行的，即农机先沿垄沟直行进行工作，当一垄的任务完成后在垄头进行转弯，开始下一垄的任务。所以农机的运动方式包含了直行和转弯两种方式，此两种运动方式交替进行，完成农机的自动工作任务。对于直行本文采用组合导航的方法来进行路径规划和自动行驶，而对于转弯方法的实现，则需要基于农机自身的情况及垄头的作业范围来实际确定，确定转弯方法。

当农业机械功能复杂化，其体积与占地面积会相应地扩大，这导致农机的转弯半径有可能远大于作业幅度半径，因此转弯任务要在不碾压到作物的情况下进行，需要根据实际转弯模型来进行方法选择。本章将针对本文中使用的农机以及未来可能的拓展（分别对应差速模型和阿克曼转弯模型）进行详细地阐述，针对不同的农机及作业环境选择不同的转弯模型及转弯方法，以求在满足不轧到农作物的基础上合理快速地完成转弯任务，减少作业时间。

4.2 转弯模型

4.2.1 差速转弯模型

顾名思义，差速转弯模型^[43]的实现方法是通过轮胎之间的不同速度导致的速度差来使得左边和右边的轮胎在垂直方向出现位置差，来实现转弯操作。对于差速转弯模型而言，常见的使用差速模型的车辆多为履带式，其特点为通过两边轮子的速度差进行转弯，在履带式车中没有明显的导向结构，两边的车轮呈独立驱动方式，转弯的角度大小通过两边车轮的差速决定，哪边车轮速度快则向相反方向进行转弯。一般轮式车辆的轮子都是独立驱动，想要应用差速模型的轮式车辆一般为两轮车。差速转弯模型的表示如图 4-1 所示。

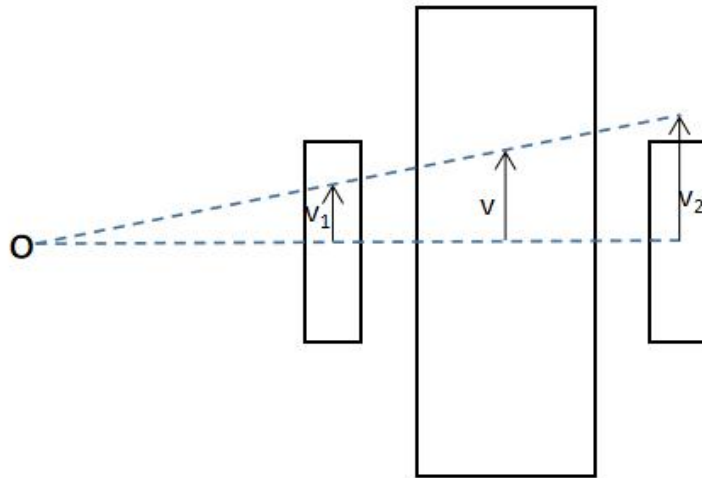


图 4-1 差速转弯模型示意图

本次项目中使用的实际农机的运动模型是差速模型，其前轮的朝向始终不变，两个前轮之间通过差速来进行转弯，后轮为万向从动轮，跟随前轮驱动轮的速度来调整自己的转向，可以实现原地的 90° 转弯操作。

针对于当前项目农机的实际特点，本文设计的转弯逻辑是根据图像中的左上角的植物占比是否超过阈值来判断是否需要进行转弯操作。因此农机的运动方法可以分为两部分，直行与原地转弯，通过转弯逻辑的判断来实现运动逻辑的转换。农机的转弯逻辑流程图如图 4-2 所示。

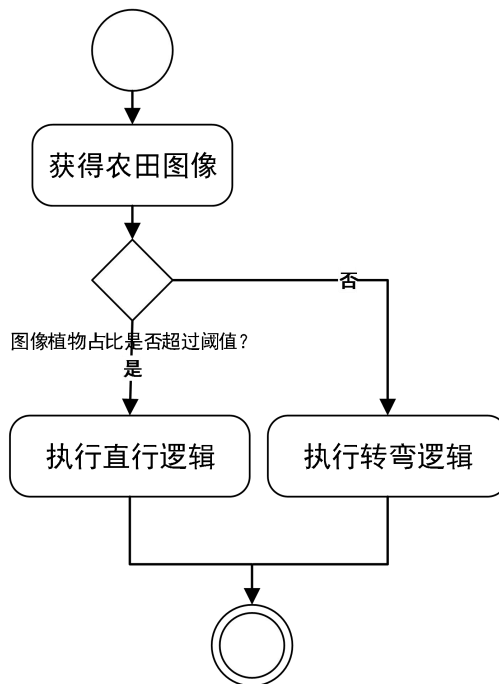


图 4-2 农机转弯逻辑流程图

4.2.2 阿克曼转弯模型

当组合导航算法不仅仅应用于本次项目所采用的农机时，复杂的农用拖拉机与本次项目的农机转弯模型并不相同，多为阿克曼转弯模型^[44]。针对于拖拉机结构，本文预采用阿克曼转弯模型应对未来复杂农机的应用，本节将对阿克曼模型进行详细地阐述，讲解其运动模型等问题。

阿克曼转弯模型提出的目的是为了解决车辆在转弯时，内轮偏离角度时指向的圆心与外轮指向的圆心不同的问题。阿克曼模型是德国的一名工程师兰肯斯佩格在 1817 年提出的思路，后来由其个人的代理商鲁道夫·阿克曼进行实现并申请专利。采用阿克曼转弯模型的车辆在转弯时，由于其转弯时内外轮的圆心都指向同一个位置，转向时内部轮的转向角与外部轮子的转向角大概大上 2 到 4 度，这样可以使得车辆转弯更加顺利。

阿克曼模型主要应用于轮式车辆，其运动模型特点在于四轮转向指向同一个圆心，其示意图如 4-3 所示。其中 o 表示四轮转弯过程中指向的圆心， a 、 b 、 c 、 d 表示农机的轮子， f 表示前两轮之间的距离， r 表示后两轮的轴距， l 表示前后轮所在轴之间的距离， φ_1 表示外侧转向轮的偏向角， φ_2 表示内侧转向轮的偏向角。

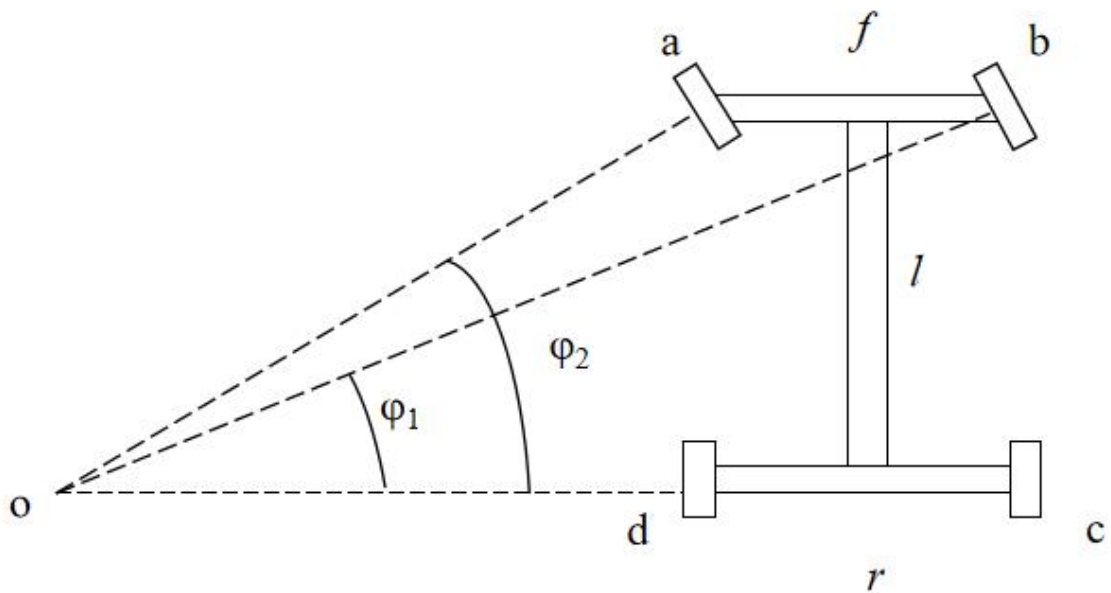


图 4-3 阿克曼模型示意图

基于阿克曼模型实现的农机，农机的转弯半径 R 的含义为外侧车轮 b 在转弯中所处的位置到共同圆心 o 的间距。农机在转弯时需要注意转弯作业幅度的限制，

在转弯时若 R 越小，则农机所需的作业幅度也就越小。由图 5-3 可知， R 与 ϕ_1 之间的关系为 $R = \frac{l}{\sin \phi_1}$ 。根据半径与外轮转向角的关系可知在使用固定的农机时，偏向角越大时，半径越小。

由于四轮在进行转向时其转向圆共用一个圆心，因此 ϕ_1 和 ϕ_2 之间有如下关系：

$$\cot \phi_2 = \cot \phi_1 - \frac{f}{l} \quad (4-1)$$

由于农机在作业过程中的运行速度较慢，所以车轮的运动过程可以视为完全的滚动运动，不考虑侧边滑动问题，在构建模型时只考虑机械的动力学模型即可。将农用拖拉机按照其参数模拟成为一个正方形刚体，对其进行简化，只考虑四轮转弯过程中的在地面上运动时的接触点有可能轧到作物的问题，不考虑外部范围广于四轮的周边影响（即不考虑在空间位置的触碰边界问题），其简化模型示意图如图 4-4 所表示。

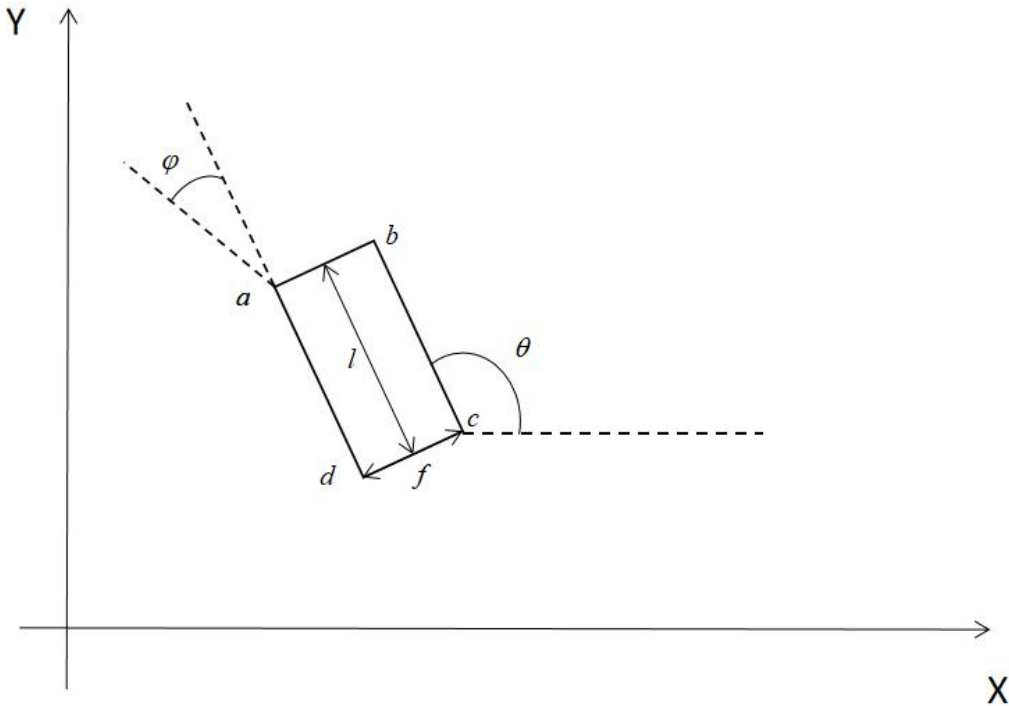


图 4-4 农机简化模型示意图

其中 θ 表示车身与 x 轴正方向构成的角度值， ϕ 表示内侧车轮转弯时的偏向角， θ 的范围为 $0-180^\circ$ ，当车头比车尾的位置更为靠上时 θ 取正角度值。对于简化的模型，后轮轴中心点位置设定为 (x_i, y_i) ，前轮轴中心点位置设定为 (x_j, y_j) ，则前后轮轴中心的位置关系如下：

$$\begin{cases} x_f = x + l \cdot \cos \theta \\ y_f = y + l \cdot \sin \theta \end{cases} \quad (4-2)$$

同理，根据车身的角度值 θ 以及农机的长宽值，由 (x,y) 可以推得四个轮子的坐标值：

$$\begin{cases} x_a = x + l \cdot \cos \theta - \frac{f}{2} \sin \theta \\ y_a = y + l \cdot \sin \theta + \frac{f}{2} \cos \theta \end{cases} \quad (4-3)$$

$$\begin{cases} x_b = x + l \cdot \cos \theta + \frac{f}{2} \sin \theta \\ y_b = y + l \cdot \sin \theta - \frac{f}{2} \cos \theta \end{cases} \quad (4-4)$$

$$\begin{cases} x_c = x + \frac{r}{2} \sin \theta \\ y_c = y - \frac{r}{2} \cos \theta \end{cases} \quad (4-5)$$

$$\begin{cases} x_d = x - \frac{r}{2} \sin \theta \\ y_d = y + \frac{r}{2} \cos \theta \end{cases} \quad (4-6)$$

实际情况下的农机在执行转弯时的速度较慢，因此对 x 和 y 求导有：

$$\dot{y} \cos \theta - \dot{x} \sin \theta = 0 \quad (4-7)$$

对式(4-2)求导得到：

$$\begin{cases} \dot{x} = \dot{x}_f + \dot{\theta} l \sin \theta \\ \dot{y} = \dot{y}_f - \dot{\theta} l \cos \theta \end{cases} \quad (4-8)$$

将（1）式带入（2）式得到：

$$\dot{y}_f \cos \theta - \dot{x}_f \sin \theta - \dot{\theta} \cdot l = 0 \quad (4-9)$$

同时已知：

$$\begin{cases} \dot{x} = v_f \cos \varphi \cos \theta - v_f \sin \varphi \sin \theta \\ \dot{y}_f = v_f \cos \varphi \sin \theta + v_f \sin \varphi \cos \theta \end{cases} \quad (4-10)$$

其中 v_f 表示农机在车轮朝向上的速度值， v 表示农机车身方向上的速度值。由式（4-8）到式（4-10）可得：

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = \frac{v \tan \varphi}{l} \end{cases} \quad (4-11)$$

根据以上式子得到运动状态转换方程：

$$\begin{cases} x = x_0 + L \cot \varphi \sin \theta - L \cot \varphi \sin \theta_0 \\ y = y_0 + L \cot \varphi \cos \theta + L \cot \varphi \cos \theta_0 \\ \theta = (t - t_0) \frac{V \tan \varphi}{L} + \theta_0 \end{cases} \quad (4-12)$$

运动状态转换方程先通过计算在经历运动后新的车身偏离正方向的角度 θ ，通过当前的角度 θ 与之前的角度 θ_0 来计算新的坐标 (x,y) ，从而使得坐标的计算与 V 和 t 不相关，更加方便计算。

4.3 转弯寻优算法研究及结果分析

4.3.1 基于固定角度的转弯算法

4.3.3.1 问题描述

农机的运动方式包含了直行与转弯两种方式，所以农机的自动行驶需要实现转弯方法。对于宽度较大的复杂农机（比如农用拖拉机等），农机在较为狭窄的作业幅度进行转弯难以难以在不轧到作物的情况下一次完成。因此转弯算法输入农机参数和作业幅度，输出基于特定输入下的车辆转弯方式。算法的限制条件为农机运动时所遇到的边界限制，目标函数为农机四轮位置的坐标与边界限制的距离 $f(A_1, A_2, A_3, A_4, B)$ ，其中 A_1 到 A_4 表示四个车轮的位置， B 表示边界位置。算法的时间复杂度为 $O(N)$ ，其中 N 为某种特定转弯方式的交替运动次数。

4.3.3.2 算法描述

针对特定的农机参数、转弯角度以及作业幅度，本次项目拟采用模拟人工操作的思想，以左转掉头为例，车辆在左转前进时观察车轮的位置和边界的位置，当出现内前侧车轮触及边界（对应转弯半径过小）或外前侧车轮触及边界（对应转弯半径过大）时，将轮胎偏向转向右并后退。在后退时出现车轮触及边界时则转换为前进方式运动，重复这种运动模式来完成垄头转弯任务，农机在转弯时监控着自己的车身角度，直到车身角度转换180度时结束转弯。当完成转弯任务时

农机进行运动逻辑的转换，开始执行直行逻辑。

基于前进-后退策略的转弯算法的流程图如图 4-5 所示。

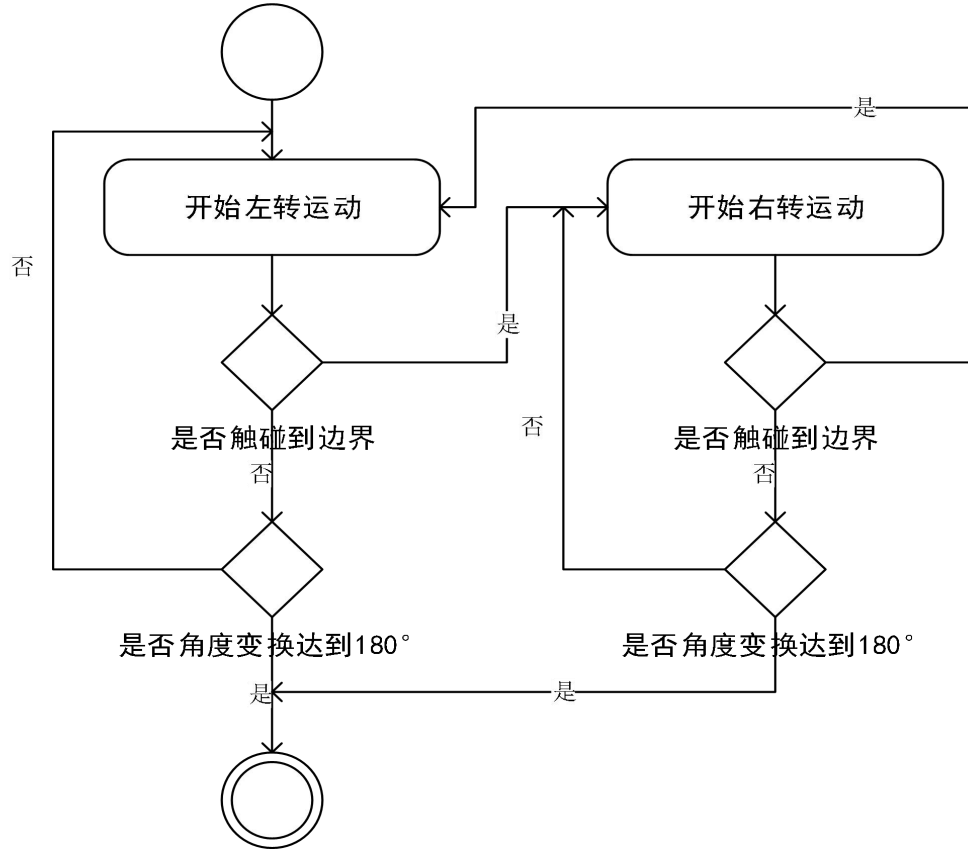


图 4-5 前进-后退方法的流程图

由于模拟实验采用状态转换方式的是让农机运动固定的一段时间，所以存在以下两个问题：

1) 在当前时间农机并没有触碰到边界，而在运动完下一个时间段后农机触碰到了边界，甚至超过了边界。

2) 对农机完成转弯的判断标准为在结束一个时间段的运动时判断农机的车身角度，若达到转弯 180° 则完成转弯。但是由于运动时间段的问题，有可能存在在运动过程中完成转弯 180° ，从而导致永远无法停下的问题。

对于这两个问题，本文拟采用到达一定阈值就结束的做法，对于可能触碰边界的问题，将作业幅度留出安全距离 0.2m ，在模拟运动时间间隔尽可能小的时间段来更新农机位置，使农机的运动一定不会触碰边界甚至超过边界；对于转弯结束判断的问题，本文采用转弯的角度距离转过 180° 足够小作为标准，小于一定阈值时就结束。对于这个阈值，将其设定为当前角度的与标准角度的差距小于 0.01 。

基于前进-后退策略的转弯算法的具体步骤如下。首先将农机的参数进行初始

化, 包含车身长度 l , 前车轮之间的宽度 f , 后车轮之间的宽度 r 以及内侧轮的转弯角度 ang 。对于车身自身的角度 θ , 将其初始化为 90 度。接下来开始更新农机的位置, 以车身角度转过 180 度为结束标志, 允许存在 0.01 度的偏差。然后对农机的位置以 dt 为时间段来更新位置, 判断农机的四轮是否距离边界超过安全距离, 如果是则转换运动方式及角度并将转换次数 t 加 1。在转弯结束后计算车身的实际角度与标准角度的偏差值, 将其作为误差值 err 与转换次数 t 一起返回, 用于后续寻优算法的评判标准。基于前进-后退策略的转弯算法的描述如算法 4-1 所示。

Algorithm 1 Alternately forward-backward turning around algorithm

Input Length l , Front tread f , Rear tread r , Turning angle ang , Operating range $range$, Transition time dt

Output: Times t , Error err

```

1: Initialize the machine's parameters, including  $l$ ,  $f$ ,  $r$  and  $ang$ 
2: The machine's initial body angle  $angle$  is 90 degree.
3: The changing times  $t$  is initialized to 0.
4: while  $angle + 90 \geq 0.01$  or  $angle + 90 \leq -0.01$  do
5:   if The distance between wheels and boundaries  $\leq$  safe distance then
6:     if The machine is moving forward then
7:       Change moving direction to driving forward
8:     else
9:       Change moving direction to driving backward
10:    end if
11:     $ang \leftarrow -ang$ 
12:     $t \leftarrow t + 1$ 
13:  end if
14:  Update position in  $dt$ 
15: end while
16:  $err \leftarrow BodyAngle - StandardAngle$ 
17: return  $t, err$ 

```

算法 4-1 基于前进-后退策略的转弯算法

在算法中需要设定好分别处于前进状态和后退状态时的边界条件。首先针对两种不同的运动状态思考农机运动时会出现哪些可能碰撞边界的情况, 在前进时只需要针对前面两个轮有可能存在的触碰边界情况进行考虑, 而在后退时除了考虑后轮的位置, 还需要考虑农机后退时有可能转过角度过大, 导致其车身转过 180 度时不在其应在的垄沟的问题。本文的设定为农机是始终左转来实现掉头, 因此车头左偏与前进相结合, 车头右偏与后退相结合。下面列出碰撞边界的条件:

(1) 当农机处于前进状态时:

- 农机前方右侧车轮的纵坐标小于作业幅度
- 农机前方左侧车轮的横坐标小于待转到下一垄的左边界
- 农机前方右侧车轮的横坐标小于待转到下一垄的左边界

(2) 当农机处于后退状态时:

- 农机后方左侧车轮的纵坐标大于农作物边界
- 农机后方右侧车轮的纵坐标小于作业幅度
- 当车身所转的度数超过 90 度时, 农机农机前方左侧车轮的横坐标小于待转到下一垄的右边界

4.3.2 转弯寻优算法

4.3.2.1 问题描述

在 4.2.2 章节中本文介绍了阿克曼转弯模型中的转换关系, 其中有一项重要的关系为内测轮转向角与转弯半径的关系。由于转向角的角度越小, 转弯半径越大, 所以转弯角度的选择决定了转弯任务完成时的交替次数, 角度较小则会导致交替次数过多。因此针对特定作业幅度的转弯任务, 转弯角度的选取需要慎重决定。

寻优算法的输入是特定的农机参数和作业幅度, 输出是最优的转弯算法采取的角度值。算法的限制条件为农机运动时所遇到的边界限制, 目标函数关注两个因素, 车身交替次数 $Times$ 和结束时的误差 Err 。其中 $Err = Ang_1 - Ang$, Ang_1 为结束时车身的角度, Ang 为标准角度值; $Times$ 为结束时农机的运动方法交替次数。通过寻优算法得到最优表现的角度值, 以提升农机转弯时的效率, 减少作业时间。算法整体的时间复杂度为 $O(kN)$, 其中 k 为进行寻优范围包含的角度数, N 为某种特定转弯方式的交替运动次数。

4.3.2.2 算法描述

在得到基于前进-后退策略的转弯算法的详细步骤后, 基于此算法构建寻优算法。首先仍需将参数进行初始化, 包含车身长度 l , 前车轮之间的宽度 f , 后车轮之间的宽度 r , 内侧轮的最大转弯角度 ang 以及作业幅度 $range$ 。将农机初始的转弯角度设置为 30 度, 并记录同样的作业幅度中每个角度的作业表现, 包含交替次数 t' 与误差 err' 。将最小交替次数 t 与误差 err 初始化为极大值, 开始计算不同角度转弯方法的表现。若 t 小于 t' 则直接更新 t 和 err 值, 若 t 与 t' 相等而 err' 小于 err 也要更新值。对所有角度计算完后得到表现最好的角度值 $BestAng$ 以及其对应的 t 值和 err 值。寻优算法的描述如算法 4-2 所示。

Algorithm 1 Search best turning angle algorithm

Input Length l , Front tread f , Rear tread r , Operating range $range$, Max angle ang , Transition time dt

Output: MinTimes t , MinError err , Best Function Angle $bestAng$

```

1: Initialize  $l, f, r$  and  $maxAng$ 
2: The machine's initial body angle  $angle$  is 90 degree.
3: The MinTimes  $t$  and MinError  $err$  is initialized to Infinity MAX.
4: Set  $ang$  to 30 degree as  $minAng$ .
5: while  $angle \leq maxAng$  do
6:   Calculate the times  $t'$  and err  $err'$  of turning algorithm with this  $angle$ .
7:   if  $t' \leq t$  then
8:     if  $t' < t$  then
9:        $t \leftarrow t'$ 
10:       $err \leftarrow err'$ 
11:       $bestAng \leftarrow angle$ 
12:    else if  $t' = t$  and  $err' < err$  then
13:       $t \leftarrow t'$ 
14:       $err \leftarrow err'$ 
15:       $bestAng \leftarrow angle$ 
16:    end if
17:  end if
18: end while
19: return  $t, err, bestAng$ 

```

算法 4-2 针对角度的寻优算法

4.3.3 实验模型构建

对于农机模型的构建，本文用于模拟的真实拖拉机型号为 LX904 型拖拉机，其具体参数取值如表 4-1 所示。

表 4-1 拖拉机参数值

参数名称	参数取值
车长	4350 mm
前轮轮距	1562-2000 mm
后轮轮距	1520-2120 mm
前进速度范围	2.2-37.64 km/h
后退速度范围	2.22-37.94 km/h
前轮最大转角	45°

由表 4-1 可以看出由于轮胎存在宽度的问题,拖拉机需要做到适配不同轮胎的效果,实现一定宽度范围内的轮胎都能置于拖拉机上。因此本文对前轮间距取值 1562mm,后轮间距取值 2120mm。因为在转弯过程中需要缓慢行驶以保证不会侧翻以及可以及时刹车调整速度等问题,本文对前进和后退速度取相同的最低值 2.22km/h。转角部分前进与后退时采用相同的转角度数,且满足不超过最大转角限制 45°。

4.3.4 实验结果及分析

实验中农机模型采用 4.3.4 章节中的数据分别对 1m、2m、3m 的作业幅度来进行实验,在同样的作业幅度下采取不同的转弯角度,观察模拟实验下的农机进行行走方式的转换次数,选择转换次数最少时使用的角度作为最优解。在存在多种转换次数相同的转法时,采用作业误差最小的转弯方式作为最优解。由于实验数据较多,以作业幅度为 2m 的实验结果为例观察实验结果,如表 4-2 所示。不同的转弯角度算法的对比如图 4-6 所示。

表 4-2 寻优算法结果

序号	转弯角度	交替次数	角度误差
1	30°	18	0.03585
2	31°	12	0.01988
3	32°	8	0.03879
4	33°	6	0.03638
5	34°	8	0.04040
6	35°	6	0.01883
7	36°	8	0.03500
8	37°	6	0.02344
9	38°	8	0.01645
10	39°	4	0.01415
11	40°	4	0.01667
12	41°	4	0.02415
13	42°	4	0.03675
14	43°	4	0.01177
15	44°	4	0.03363
16	45°	4	0.01516

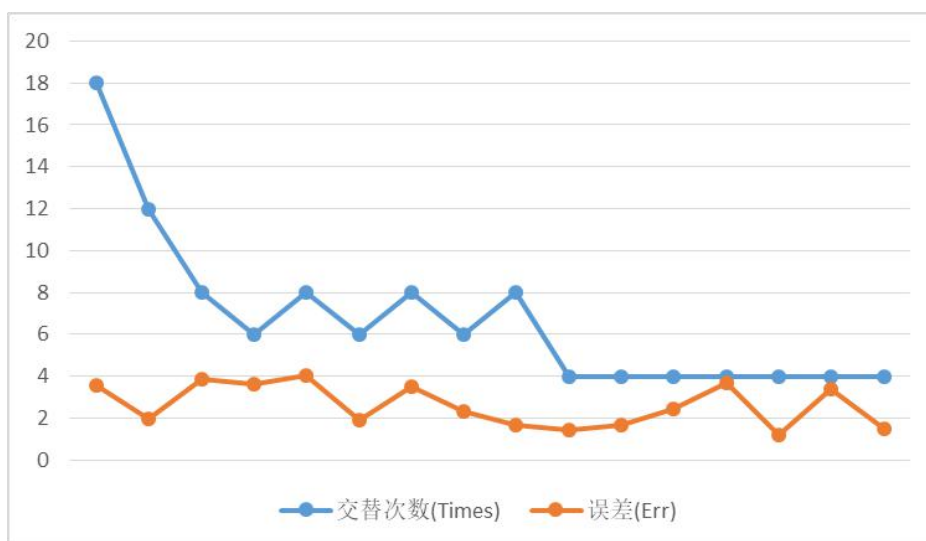


图 4-6 不同角度值的算法表现

图 4-6 中横坐标表示不同角度对应的表现,纵坐标分别对应交替次数及角度误差。根据此图我们可以看出使用不同的转弯角度得到的效果也是不同的。在 30° 到 38° 之间车辆转弯角度较小,导致转换状态次数过多,效率较低;从 39° 到 45° 之间车辆的转弯交替次数相同,而有着不同的作业误差。由表中数据可以得知以 43° 转弯时车辆的表现效果最好。以 43° 为例,位置变换的过程情况如图 4-7 所表示。

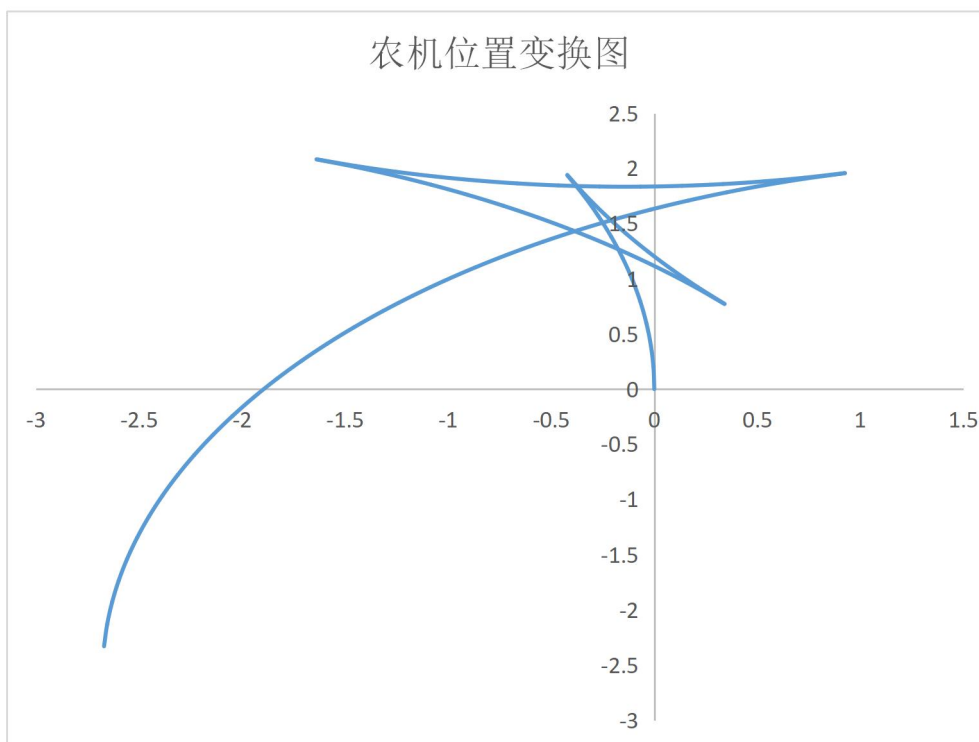


图 4-7 农机位置变换图

表 4-3 所表示的内容为小车在交替运动时的车身角度值。由于转弯方法中对前进与后退时采用的转弯角度相同，且小车是间隔相同的时间来转弯的，因此每个步骤结束后小车的车身角度变化情况是相同的，因此不再表示车身角度值的变化曲线。

表 4-3 交替运动时车身角度值

第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次
65.43°	48.23°	18.76°	-13.17°

4.4 本章小结

本章的主要内容是针对转弯问题选择合适的转弯模型与方法，对其进行研究并进行实验，得到实验结果并分析结果。首先引言部分介绍了本章的主要研究内容与工作，接下来对适用于本次项目的转弯模型差速模型与适用更广的转弯模型阿克曼转弯模型进行研究，了解其模型的转弯特点和方式，对于阿克曼转弯模型还要了解其位置变换方程等。然后本章针对于未来可能存在的应用问题使用对阿克曼模型完成自动转弯任务，基于前进-后退策略来实现方法。对于特定的农机参数与作业幅度，本章提出一种寻优方法来搜寻最优的转弯角度，以实现减少农机的交替次数以及误差等问题。对于这两种算法分别给出其详细描述，包括输入输出、目标函数、伪代码及时间复杂度等。根据实际农机构建模型，进行寻优实验，实验结果表明寻优算法能够有效找出最优的转弯方式并完成转弯任务。

结 论

导航技术有多种实现方式,比如视觉导航以及 GPS 导航等等,经过长时间的发展这些导航技术已经取得了重大突破,有了较为成熟的应用场景。然而对于单一导航方式而言,每种导航方式都有其局限性,如视觉导航处理数据量大, GPS 导航室内信号差等问题,这些问题是只使用一种导航方法无法解决的。针对单一导航方式存在的局限性,本次课题的主要研究内容是结合视觉导航和 GPS 导航实现一种组合导航方法,取两种导航方式的优点,达到更加准确的定位效果。

农机的发展使得农业智能化有了进一步的发展,但目前我国农业智能化程度处于较低水平。针对以上问题本文通过研究农机的直行与转弯两个部分来实现农机在农田中作业时的自动行驶,提升智能化程度。具体而言,本文利用组合导航方式来提升定位精确程度,实现农机的直行逻辑。本文通过研究不同的转弯模型,提出基于前进-后退策略的自动转弯算法,并在此算法的基础上提出自动寻优算法,以得到最好表现的转弯算法。

本文的贡献主要如下几个方面:

(1) 本文提出一种基于视觉导航和 GPS 导航的组合导航方法。组合导航方法的具体实现是通过 UKF 来融合两种导航得到的数据,进行预测和更新来得到导航点位置。将使用这种导航方式得到的导航点数据和只使用视觉导航得到的导航数据跟 GPS 导航数据做对比,误差得到较大减小,精度得到提升。

(2) 本文提出一种基于前进-后退策略的自动转弯算法。转弯模型采用阿克曼转弯模型,考虑实际转弯情况分别针对前进和后退两种运动方式来设定边界条件。在转弯算法基础本文上提出一种寻优算法,能够针对特定转弯作业幅度寻找出最优表现的转弯算法。本文通过构建仿真模型并运行模拟实验来验证结果。对于寻优方法,实验表明其确实能够寻找到最优表现的转弯算法,提升了转弯时的速度,降低了时间成本。

本文在上述内容中取得了一些成果,但是在某些方面还存在着一部分问题待未来解决。首先本次项目的完成时间发生了较为严重的疫情,在不可抗力的影响下本文的完成是在模拟实验的基础上完成的,后续还需要在实际农机上去完成实验以检验效果。其次对于转弯方法的寻优本文只考虑前进与后退时车轮的偏转角度是相同的,这在实际中是可以改进的。未来对农机自动行驶的改进应当基于以上两个方面进行。

参考文献

- [1] 胡静涛, 高雷, 白晓平等.农业机械自动导航技术研究进展[J].农业工程学报, 2015, (10): 1-10
- [2] 罗锡文, 张泰岭, 洪添胜.“精细农业”技术体系及其应用[J].农业机械学报, 2001, 32(2): 103-106
- [3] 葛文杰, 赵春江.农业物联网研究与应用现状及发展对策研究[J].农业机械学报, 2014, 45(7): 222-230
- [4] Benjamin Mallavan,Tim Neale.Verde: Next-generation agricultural intelligence [J].Position magazine: The Australasian magazine of surveying, mapping & geoinformation,2019,(TN.99):26-27
- [5] Reid J F,Qin Z,Noguchi N,et al.Agricultural automatic guidance research in North America[J].Computers and Electronics in Agriculture,2000,25:133-153
- [6] Chen B Q,Watanabe K,Tojo S,et al..Studies on the computer-eye of rice transplant robot.Part 2.Detection of rice plants line using hough transformation[J].Jpn Soc Agric Mach,1997,59(3):23-28
- [7] Carlone Luca, Karaman Sertac.Attention and Anticipation in Fast Visual-Inertial Navigation[J].IEEE Transactions on Robotics,2019,35(1):1-20
- [8] ZHU Wenyao,WANG Xiaoya,CHENG Zongyi.Crustal motion of Chinese mainland monitored by GPS[J].SCIENCE IN CHINA (SERIES D),2000, 43(4):394-400
- [9] GU Qinghua,LU Caiwu,GUO Jinping,JING Shigun.Dynamic management system of ore blending in an open pit mine based on GPS[J].MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY,2010, 20(1):132-137
- [10] O Connor M,Elkaim G,Parkinson B. Kinematic GPS for closed-loop control of farm and construction vehicles[C].Proceedings of ION GPS-95,1995:1261-1268
- [11] Benson E R,Stombaugh T S ,Noguchi N,et al.An evaluation of a geomagnetic direction sensor for vehicle guidance in precision agriculture applications[C].ASAE Paper,1998:983203
- [12] Nagasaka Y,Saito H,Tamaki K,et at.An autonomous rice transplanter guided by global positioning system and inertial measuring unit[J].Journal of Fields Robotics,2009,26(6-7):537-548

- [13] Nagasaka Y,Umeda N,Kanetai Y,et al.Autonomous guidance for rice transplanting using global positioning an gyroscopes[J].Computers and Electronics in Agriculture,2004,43(3):223-234
- [14] Bakker T,Wouters H,Asselta K V,et al.A vision based row detection system for sugar beet[J].Computers and Electronics in Agriculture,2008,60(1):165-175
- [15] Astrand B ,Baerveldt A J.A vision based row-following system for agricultural field machinery[J].Mechatronics,2005,15(2):251-269
- [16] 庞树杰, 杨青, 李莉.基于 GPS 和 GSM 短消息的农田信息采集系统[J].农机化研究,2004, (1):230-231,233
- [17] 孟志军,赵春江,刘卉等.面向农田信息采集的数字照片空间标识索引方法[J].农业工程学报,2011, 27(4):196-200
- [18] 王壮,陈立平,刘永生.农机监控调度系统的设计与实现[J].计算机工程,2010, 36(11):232-234,237
- [19] 肖都,李军峰.一种用于航空物探测量的无人机路径规划方法[J].物探与化探,2017, 41(3):564-569
- [20] Honglei Qin,Li Cong,Xingli Sun.Accuracy improvement of GPS/MEMS-INS integrated navigation system during GPS signal outage for land vehicle navigation[J].Journal of Systems Engineering and Electronics,2012, 23(2):256-264
- [21] 刘爱超,余浩平,杨钦宁等.无人机空中对接中的视觉导航方法[J].导航定位与授时,2019, 6(1):28-34
- [22] 贾文渊,魏彤.基于计算机视觉/GPS/MG 姿态测量的盲人行走组合导航方法研究[J].导航与控制,2017, 16(5):13-20
- [23] Wei Zheng,Fan Zhou,Zengfu Wang.Robust and Accurate Monocular Visual Navigation Combining IMU for a Quadrotor[J].IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica,2015, 2(1):33-44
- [24] Bo Zhang,Weifeng Tian,Zhihua Jin.Joint tracking algorithm using particle filter and mean shift with target model updating [J].CHINESE OPTICS LETTERS, 2006, 4(10):569-572
- [25] Boyong He,Chen Meng,Liaoni Wu.Research on UAV Point Landing based on Visual Navigation[J].IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020,719(1):012077
- [26] YunshuWang,JianyeLiu,JinlingWang,et al.Micro Aerial Vehicle Navigation with Visual-Inertial Integration Aided by Structured Light[J].Journal of Navigation,2

020,73(1):16-36

- [27] 林开颜,吴军辉,徐立鸿.彩色图像分割方法综述[J].JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS,2005, 10(1):1-10
- [28] Charles Kumah,Ning Zhang,Rafiu King Raji,et al.Color Measurement of Segmented Printed Fabric Patterns in Lab Color Space from RGB Digital Images [J].Journal of Textile Science and Technology ,2019,5(01):1-18
- [29] Somenath Bera,Vimal K. Shrivastava.Analysis of various optimizers on deep convolutional neural network model in the application of hyperspectral remote sensing image classification [J].International Journal of Remote Sensing,2020,41(7): 2664-2683
- [30] Liao Juan,Wang Yao,Yin Junnan.Segmentation of Rice Seedlings Using the YCrCb Color Space and an Improved Otsu Method[J].Agronomy,2018,8(11):269
- [31] NIE Yongfang,ZHANG Tao.Improved pruning algorithm for Gaussian mixture probability hypothesis density filter[J].Journal of Systems Engineering and Electronics,2018, 29(2):229-235
- [32] Yuqin Song,Yuqin Song,Jun Liu.An improved adaptive weighted median filter algorithm[J].Journal of Physics: Conference Series,2019,1187(4):042107
- [33] Mei-Sen Pan,Jing-Tian Tang,Xiao-Li Yang.An Adaptive Median Filter Algorithm Based on B-spline Function[J].INTERNATIONAL JOURNAL OF AUTOMATION AND COMPUTING,2011, 08(1):92-99
- [34] Shao Dangguo, Xu Chunrong,Xiang Yan,et al.Improved Bilateral Filter with Application to Artifact Noise Reduction[J].Journal of Medical Imaging and Health Informatics,2019,9(3):628-636
- [35] Ning Ma,Jianxin Wang.Dynamic threshold for SPWVD parameter estimation based on Otsu algorithm[J].Journal of Systems Engineering and Electronics.2013, (6):919-924
- [36] Zhang Z Y.A flexible new technique for camera calibration[J].IEEE Transactions on pattern Analysis and Machine Intelligence,2000,22(11):1330-1334
- [37] D. G. LAINIOTIS F. L. SIMS.Sensitivity analysis of discrete Kalman filters[J]. International Journal of Control,1970,12(4):657-669
- [38] Cui Yi,Zhang Yongbo,Huang Yuliang,et al.Novel WiFi/MEMS Integrated Indoor Navigation System Based on Two-Stage EKF[J].Micromachines 2019,10(3):198
- [39] Ling Yao,Ling Yao,Xia Peng,et al.A High-Precision Moving Target Tracking

Algorithm Based on UKF[J].Journal of Physics: Conference Series,2019,1213(3):032031

[40] 张庭亮,甄倩倩.基于超绿特征与形态学的植保无人机图像农作物分割[J].科技创新与应用.2017,0(26):20-22

[41] Feng Ke,Chen Yuejian,Li Yifan, Zuo Ming J.An enhanced morphology gradient product filter for bearing fault detection[J].Mechanical Systems & Signal Processing,2018,109():166-184

[42] GU Xiangqian,KANG Hongwen,CAO Hongxing.The least-square method in complex number domain[J].PROGRESS IN NATURAL SCIENCE,2006, 16(3):307-312

[43] 裴晓飞,刘志厅,陈祯福,陈可际,杨波.分布式驱动电动汽车的差速转向控制及其适用性[J].汽车安全与节能学报, 2019, 10(4): 423-432

[44] Guangming Xiong,Xiaoyun Li.Dynamic Path Following Control of a Ground Ackerman Steering Robot to Avoid a Collision[J].Journal of Beijing Institute of Technology,2017, 26(2):174-182

攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果

哈尔滨工业大学学位论文原创性声明和使用权限

学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的学位论文《农机视觉与 GPS 组合导航方法研究》，是本人在导师指导下，在哈尔滨工业大学攻读学位期间独立进行研究工作所取得的成果，且学位论文中除已标注引用文献的部分外不包含他人完成或已发表的研究成果。对本学位论文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。

作者签名：  日期： 2020 年 6 月 5 日

学位论文使用权限

学位论文是研究生在哈尔滨工业大学攻读学位期间完成的成果，知识产权归属哈尔滨工业大学。学位论文的使用权限如下：

（1）学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文，并向国家图书馆报送学位论文；（2）学校可以将学位论文部分或全部内容编入有关数据库进行检索和提供相应阅览服务；（3）研究生毕业后发表与此学位论文研究成果相关的学术论文和其他成果时，应征得导师同意，且第一署名单位为哈尔滨工业大学。

保密论文在保密期内遵守有关保密规定，解密后适用于此使用权限规定。

本人知悉学位论文的使用权限，并将遵守有关规定。

作者签名：  日期： 2020 年 6 月 5 日

导师签名：  日期： 2020 年 6 月 5 日

致 谢

时间匆匆，转瞬即逝，我在哈尔滨工业大学的硕士生涯也将画上句点，在此我想向帮助过我的学校以及许多老师同学致谢，谢谢你们陪我走过这匆匆的硕士生活。

首先我要感谢的是我的母校哈尔滨工业大学。哈工大始终秉持着“规格严格，功夫到家”的校训，在学生的培养以及学术研究等部分严谨认真，学校的学术氛围浓厚，在这里学生们可以自由讨论学术，认真研究技术。哈工大的学风和精神也促使着我在硕士阶段乃至以后的工作中同样保持认真严谨的态度，为我树立了正确的科研观。感谢工大为学生的学习生活铺平了道路，感谢宿舍和食堂阿姨的热情服务，也感谢母校对我的栽培。

其次我要感谢的是我的研究生导师王玲教授，很荣幸我能有幸成为王玲老师的学生之一。王玲教授对物联网技术的框架有着深刻的认知，对这方面的发展趋势也有着独到的理解，此外王玲教授对于学术研究保持着认真严谨的态度，对学术研究认真负责。在我的研究生生涯开始时我充满了迷茫与困惑，是王玲教授帮助我一点一点找到自己的研究方向，为我提供所需的软件和硬件资源，在每次组会时都与我仔细交流，为我指点迷津。王玲教授在我的毕业设计完成的过程中总是能提出我的问题并为我指明方向，在撰写毕业论文时她为我逐字逐句地修改并指导我。除了学术方面，王玲教授也非常关心我平时的生活，作为导师她认真负责，作为朋友她能和我敞开心扉，王玲教授对我而言亦师亦友。我感到十分幸运能够做王玲教授的学生。

然后我要感谢我在研究生阶段的同学陪我走过这段旅程，他们是我实验室的同学邹启鸣、线晓东、周义盼、弥林翰、张成、胡鉴和王佳康以及我的舍友丁仁杰、唐成达、王佳麒和于航。我的研究生生活因为你们而充实，你们的帮助和善良让我度过研究生阶段遇到的难关，非常真诚地感谢你们。

最后我要向我的家人朋友说声感谢，当我在学习工作中遇到瓶颈时，你们总是会帮助我鼓励我走过难关，你们的帮助和关心是我前进的动力源泉。感谢你们一直陪伴我。