

分类号 S24

密级 公开

UDC 63

编号 10299S1307067

硕士学位论文

基于北斗定位的农机车载组合导航系统研究

Research on Farm Machinery Integrated Navigation
System Based on Beidou positioning

指导教师 陈志刚

作者姓名 陈艳丽

申请学位级别 学术学位硕士学科(专业) 农业电气化与自动化

论文提交日期 2016/4 论文答辩日期 2016/6

学位授予单位和日期 江苏大学 2016/6

答辩委员会主席 和卫星

评阅人

独 创 性 声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容以外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期：

学位论文版权使用授权书

江苏大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆、中国学术期刊（光盘版）电子杂志社有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致，允许论文被查阅和借阅，同时授权中国科学技术信息研究所将本论文编入《中国学位论文全文数据库》并向社会提供查询，授权中国学术期刊（光盘版）电子杂志社将本论文编入《中国优秀博硕士学位论文全文数据库》并向社会提供查询。论文的公布（包括刊登）授权江苏大学研究生处办理。

本学位论文属于不保密 ☐ 。

学位论文作者签名：

指导教师签名：

年 月 日

年 月 日

摘 要

为实现农业机械的田间作业导航和精确定位,本文主要研究了基于北斗定位的农机车载组合导航系统。由于单独使用北斗导航系统进行定位,难以满足现代农业机械的导航定位精度要求,为了实现农业机械准确定位,提高作业效率和农业生产产品质量,为此设计了以北斗导航系统为主,机器视觉导航系统为辅,将二者有机结合进行组合定位导航的方法,以期控制成本的前提下获得较高的精度。

本文基于北斗定位的农机车载组合导航系统的总体设计方案,分析了基于北斗定位的农机车载组合导航系统的关键技术,研究设计了路径规划算法,基于卡尔曼滤波算法和数据融合算法进行了系统仿真。根据农业机械作业实际情况,选取 2 个优化目标并设计出最短路径规划算法,包括作业区域的直线作业算法和非作业区域的地头转弯作业算法。根据北斗系统特点和组合导航系统原理分别进行系统建模,之后用扩展卡尔曼算法和无迹卡尔曼算法进行了定位数据仿真分析比较,仿真结果表明无迹卡尔曼算法能够较好的满足系统要求。

根据车载组合导航系统的总体设计方案及各功能模块的性能,设计了以车载电脑和北斗导航仪作为核心的组合导航硬件系统。根据该系统特点设计了 EPCS-8980 型工控机及相关配套装置,选取 UM220 北斗模块及其配套天线作为北斗定位接收设备。设计了系统相关软件功能模块,包括北斗接收处理模块、UKF 定位解算模块、导航模块等。在 EVC 和 eSuperMap 环境下设计了系统各部分功能软件程序,主要包括主程序、BDS 接收处理程序、卡尔曼滤波算法程序等。

将所设计的基于北斗定位的农机车载组合导航软件安装于车载电脑上,并将之及其他设备装置安装于拖拉机上组成完整的导航系统试验机组,通过采用本文设计的试验方案对系统进行了试验测试,结果表明该组合导航系统能够实现导航功能正常运行并达到较好的定位精度。

关键词: 北斗定位系统, 组合导航系统, 路径规划, 卡尔曼滤波, 农机车载

ABSTRACT

The agricultural vehicle integrated navigation system based on Beidou positioning is studied for the realization of the automatic navigation and precise positioning of agricultural machinery. Positioning accuracy can not meet the requirements of modern agricultural machinery in condition of just using Beidou navigation system for positioning. In order to get higher precision , improve the operation of agricultural production efficiency and product quality . The Beidou navigation system adopted as the main orientation method and machine vision navigation system selected as auxiliary positioning method are combined together under the low cost.

The key technology of the agricultural vehicle integrated navigation system based on Beidou positioning is analyzed and the path planning algorithm , system simulation based on kalman filter algorithm and data fusion algorithm is conducted . According to the actual circumstance of farm machinery operation, the two optimization objectives is selected and the shortest path planning algorithm , which includes Linear assignment algorithm in Operation area and Turning operation algorithm field in non-Operation area is designed. The simulation of positioning data based on extended kalman algorithm and no trace after kalman algorithm have been compared , and the results show that no trace kalman algorithm can better meet the system requirements.

According to the overall design scheme of vehicular integrated navigation system and the performance of each function module,on-board computer and Beidou navigation board is selected as integrated navigation system hardware. According to the system characteristic , the EPCS - 8980 industrial computer and related auxiliary equipment is chosen as the on-board computer and UM220 Beidou module and antenna is selected as Beidou positioning receiver. the function modules of the system software is designed in this paper, including the Beidou receiver processing module, UKF positioning decoding module, navigation module, etc. All functional software program of the system is designed in the environment of EVC and eSuperMap, which include the main program , BDS receive handler , kalman filtering algorithm procedures, etc.

Agricultural vehicle integrated navigation software based on Beidou positioning system was installed on the on-board computer, and then the on-board computer and other equipment installed on the tractor form a complete navigation test unit . A test had been conducted by using the testing scheme designed in this paper , and the

experimental results show that the system can run normally and achieve its intended function.

Keywords: Beidou Positioning System , Integrated Navigation System , Path Planning, Kalman Filter, Farm Machinery

目 录

第一章 绪 论.....	1
1.1 课题研究背景.....	1
1.2 研究目的及意义.....	2
1.3 关键技术及国内外研究现状.....	3
1.3.1 路径规划国内外研究现状.....	4
1.3.2 北斗系统及其滤波算法国内外研究现状.....	5
1.3.3 多信息融合技术国内外研究现状.....	7
1.4 存在的问题.....	8
1.5 主要研究内容.....	9
1.6 本章小结.....	10
第二章 农机车载组合导航系统设计方案.....	11
2.1 田间导航系统总体设计.....	11
2.2 系统硬件设计.....	11
2.2.1 系统硬件选型分析.....	11
2.2.2 北斗定位接收设备.....	12
2.2.3 车载电脑.....	15
2.2.4 人机对话设备.....	17
2.2.5 基于北斗定位的农机车载组合导航系统的硬件集成.....	17
2.3 本章小结.....	18
第三章 农业机械作业路径规划.....	19
3.1 路径规划算法研究.....	19
3.1.1 农田路径规划.....	19
3.1.2 路径规划算法.....	19
3.1.3 总作业路径最短优化算法.....	21
3.1.4 整体路径规划.....	22
3.2 路径规划软硬件设计及功能设计.....	24
3.2.1 路径规划软硬件设计.....	24

3.2.2 路径规划功能设计.....	26
3.3 路径规划实现结果.....	27
3.3.1 试验方法.....	27
3.3.2 实现结果.....	29
3.4 本章小结.....	29
第四章 基于北斗导航的农田定位算法研究.....	31
4.1 北斗卫星定位导航系统.....	31
4.1.1 北斗系统的组成.....	31
4.1.2 北斗系统的功能.....	32
4.1.3 北斗系统定位误差.....	33
4.2 卡尔曼滤波算法.....	33
4.2.1 扩展卡尔曼滤波.....	34
4.2.2 无迹卡尔曼滤波.....	36
4.3 基于无迹卡尔曼滤波的农田车载北斗导航精度研究.....	37
4.3.1 车载北斗导航系统运动模型.....	37
4.3.2 车载北斗系统的无迹卡尔曼滤波算法.....	40
4.3.3 半物理仿真分析.....	41
4.4 本章小结.....	43
第五章 基于北斗和视觉组合导航系统的算法仿真研究.....	44
5.1 农田环境中多传感器信息融合必要性.....	44
5.2 组合导航工作原理.....	45
5.3 多传感器信息融合研究.....	47
5.3.1 数据融合原理.....	47
5.3.2 信息融合的一般结构.....	48
5.3.3 数据融合常用算法.....	49
5.4 组合导航信息融合模型的建立.....	50
5.4.1 数据校准.....	50

5.4.2 组合导航融合模型的建立.....	51
5.5 仿真实验与分析.....	53
5.6 本章小结.....	55
第六章 田间导航系统软件设计及试验.....	56
6.1 系统软件设计.....	56
6.1.1 农机车载导航系统的软件平台.....	56
6.1.2 系统软件功能设计.....	56
6.2 北斗模块功能设计.....	58
6.3 定位解算模块功能设计.....	61
6.4 导航模块功能设计.....	62
6.5 车载导航系统试验平台的搭建.....	62
6.6 试验方法与结果分析.....	63
6.7 本章小结.....	65
第七章 结论与展望.....	66
7.1 结论.....	66
7.2 展望.....	67
参考文献.....	69
致 谢.....	73
攻读硕士期间发表的论文.....	74

第一章 绪 论

1.1 课题研究背景

我国是一个农业大国，农业自古以来就是国民经济的基础，也是经济发展、社会安定、国家自立的基础，可以说农业的兴衰成败关系到国民经济的全局。近年来，随着工业化进程的加快发展以及人口老龄化问题的日益凸显，现代化智能装备的研究变得越来越迫切。与此同时，随着城市经济的发展和就业机会的增多，越来越多的农村劳动力开始向城市转移，进一步加剧了农村有效劳动力的减少。且现代农业的幅宽越来越大，只靠人劳动力度非常大。所以提高生产效率的问题显得越来越迫切，为了提高生产效率，人类一直都在研究农业生产方式。一方面，人类开始不断研究高效低污的农业生产方式。一直以来，在农林牧业方面对病虫害的防治，农药起到了必不可少的作用。但是很多时候由于我国采用的施药方式主要是粗放式统一施药，即使是机械式施药，由于植保机械的盲目作业以及雾喷或漏喷，造成低效浪费，这严重影响到农业生态环境，更是严重危害人体健康^[1]。所以说实现农业机械自动定位导航代替驾驶员的任务迫在眉睫。另一方面，我国可耕种的土地面积非常大，研究农业机械自动化，实现自动导航，很大程度上能够解决此类问题。除此之外，农业车辆自动导航的实现不但可以使驾驶员减少疲劳、还可减少重复作业，增加操作安全性，从而降低成本、提高农产品质量、避免某些有害（如施药）作业给人身带来的危害，对促进我国农业车辆的自动化和智能化有着重大作用。在 20 世纪，随着信息技术、传感器技术与网络技术等快速发展，农业产业逐步进入到自动化发展时代，导航技术正普遍受到人们的关注，成为许多学者研究的一项重要内容。卫星导航不受光线的限制，天黑也可使用，随着北斗卫星导航位置服务的不断完善和发展，以及随着对农田环境信息的高精细化，研究高精度的组合导航系统势在必行。

技术创新不论是在农业智能化发展还是农业装备的快速发展过程中都起到了至关重要的作用。在精细农业中基于全球定位系统、地理信息系统的研究在全球内正蓬勃开展。我国于 2003 年开始初步建立具有自主知识产权的“北斗一号”卫星定位导航系统，到 2012 年，“北斗 2 号”区域组网完成，北斗卫星定位导航系统逐渐趋于成熟^[2]。北斗系统以下简称为 BDS。现在的卫星导航大部分应用

的是 GPS，我们受制于人，虽精度高但价格昂贵，BDS 安全、经济、低成本，BDS 在我国导航定位产品中的不断应用将打破 GPS 垄断我国市场的局面。利用 BDS 的耕作方法正在逐渐推广，它不但能够改善农业机械性能，还彻底改变了传统的农田作业方式。为科学合理的将资源利用起来，减少能源消耗、提高农产品产量和质量、降低成本、减少农业活动带来的环境污染，实现作物生产系统可持续发展具有重大作用，因此研究高精度定位组合导航系统具有重大意义。

1.2 研究目的及意义

卫星定位系统在农业机械中的应用极大地提高了农业生产和作业的效率，为农用机械提供实时位置信息和速度信息，提高了行走精度及行驶速度，实现准确定位。用卫星定位系统导航，农民可以不受时间和气候的限制，具有极好的作业实时性。有了卫星定位系统为农业机械导航，能够使农业机械实现自动化，具备自定位、自行走的能力；有了农业机械自动导航，驾驶员可以加快行驶速度，提高作业效率，也可实现无人驾驶，让驾驶员把精力放在田间作业上，如种植、喷药、施肥和收割等，可大大提高作业效率；农业机械自动导航使劳动人员从单调繁重的劳作中解放出来，减轻了驾驶员的疲劳，消除了作业重叠或者遗漏的可能，减少了燃料与实用物质的花费。

2012 年 12 月 27 日，我国正式公布了北斗系统空间信号接口控制文件正式版，北斗导航系统正式对亚太地区提供无源定位、导航和授时服务^[3]。北斗卫星导航技术必将在中国精准农业技术应用中发挥重要作用，特别是在广阔平坦的土地上，可以进行大规模的机械化生产，所以应当加强研究 BDS 技术在农业机械和农田作业中的应用。BDS 导航技术作为精准农业概念下的一个部分，对我国农用车辆北斗导航技术的发展进行研究十分有必要。我国农药喷施机械化的历史较短，20 世纪 50 年代才推广使用手动喷雾器，60 年代中期开始发展动力喷雾机。传统农药喷施主要是人工背负式的喷施和中小型喷杆式喷施，在不考虑田间病虫害的细节性情况下全部进行统一喷施，农药有效利用率很低，大部分农药会散落到土壤中，还有一部分会弥散在空气中，造成农药的极大浪费以及生态环境的污染，更重要的是危害了操作人员的生命健康安全。针对以上问题，研究开发出合适的农药喷施车辆，实施植保机械化生产迫在眉睫，为节约资源以及保护劳动

人员安全, 自动驾驶技术无疑是农用车辆研究的重要内容。常见的自动驾驶方式主要有激光导航、视觉导航、卫星导航、超声波导航等等。但是每一种导航传感器单独使用时都会存在各自的缺点, 如视觉导航会存在实时性的问题, 其主要原因是算法的复杂性^[4]; 卫星信号由于天气或遮挡物等的原因, 导航的精度和稳定性会受到一定的影响等。当农用车只使用一种传感器进行导航时, 要达到精度以及可靠性的要求具有一定的困难。因此, 多传感器组合应用在农业车辆导航技术上是发展的必然趋势, 为了满足农业机械作业所需的精度以及稳定性等要求, 每一个传感器都要展现各自的优点, 以达到查漏补缺的效果。因此, 把农业车载导航系统的研究作为智能化喷施装备研究的基础工作具有重要意义。农业车载自动驾驶系统是现代农业科技和信息技术相结合的产物, 是科技经营农业的技术思想革命。

1.3 关键技术及国内外研究现状

自动驾驶技术含括计算机技术、电子通信技术、传感器技术、检测与控制技术等多种学科的知识。这些知识不断应用在现代农业生产中, 逐渐成为农业工程技术必不可少的组成部分^[5]。农业车辆自动驾驶系统的研究已将近 60 年, 是现代智能农业机械必不可少的一个重要组成部分, 在自动喷洒农药肥料、收割作业、中耕除草、插秧耕作等许多方面有着广泛的用途^[6]。目前, 农业车辆自动驾驶的研究的关键技术主要包括环境感知、路径规划和控制方法^[7]。环境感知是农业车辆导航时所需周边环境的信息, 主要通过各种传感器来获取导航信息。目前, 最常用的组合传感器主要是视觉传感器和 GPS 来获得导航定位信息。北美、日本、欧洲等国已经深入的研究了此组合导航系统^[8-12]。有的对已有的多个单个系统进行了组合导航研究; 有的对组合导航任务规划以及操作控制进行了探索; 有的对组合导航系统的软硬件进行了组合。这些研究在许多方面得到了实际应用, 如药物喷洒、除草、种植、收割、车辆自动行走等^[13,14]。而我国对此研究还处在初期阶段, 相较于国外还是比较落后的^[5]。农业车辆自动驾驶在早期有机械触杆导航、预埋引导电缆的有线引导^[15]、地磁导航、无线电或激光导航、用惯性导航进行航程推算等多种导航方式^[16]。目前国内外研究最多的就是机器视觉和卫星导航这两种最有发展前景的组合导航方式上^[7]。本课题利用机器视觉传感器和 BDS 来获

取车辆的导航信息，进行信息融合研究高精度、高稳定性的定位方式，实现农业机械的准确定位。

1.3.1 路径规划国内外研究现状

路径规划是农业车辆导航的最基本的环节之一，它是按照某一性能指标规划一条从起始状态到目标状态的最优或近似最优的无碰路径^[6]。许多如自动喷洒农药、收割作业、插秧耕作等的农田作业，在作业前都需要对操作范围进行预先规划，以使作业高效有序的完成。因此本课题中路径规划是必不可少的，作业前预先规划好路径对提高农田作业的工作效率以及提高农产品品质具有重要的意义。

目前研究的农业车辆导航路径规划主要有直线路径规划和转弯路径规划。农田中作物种植通常都是按照地垄间相互平行的方式进行种植，农田种植整体是整齐的，因此进行路径规划时可以把作物行都当作平行的直线进行处理。美国学者 Reid John F 和 Searcy SW 应用 Hough 变换，检测了农业图像中作物行的线特征，并用这些线特征对拖拉机的转向控制信号进行了计算^[17]。到目前为止，对农业环境图像进行作物行信息提取的基本方法就是 Hough 变换，国内外有许多学者也深入的研究了此方法^[16,18-21]。然而，大量研究证明将 Hough 原理应用在作物行的检测上，计算复杂度是相当大的。因此，周俊将差分里程计等传感器信息进行融合，用 Hough 变换直接给出导航参数，通过这样路径在将来时刻的成像位置就能够预测，以提高对路径探测的可靠性和实时性^[22]。Kise 提出的作物行检测算法证明了无论是在作物缺失还是作物生长正常的情况下，都可以进行可靠的定位^[23]。庄卫东等研究的直线路径规划算法是确定导航 AB 线，机组在开始进入直线行走作业时确定一点 A（开始点），在直线行走作业结束后确定另一点 B（结束点），机组就可以根据 A 和 B 两点确定的直线进行导航^[24]。此方法简单可以进行实时的直线路径规划，本课题选择此方法进行路径规划。

农业车辆在农田中的作业路径主要是田间作业行的直线段路径和非作业区域曲线路径，曲线路径主要指地头转弯。最大限度地减少地头转弯所耗费的时间和能源是提高农业自动化作业效率的重要途径^[6]。Torisu^[25]以最短时间为目标创建最优路径。Kise^[26]根据最小转弯半径和最大转向速度两个目标创建了前向、后退转弯路径，实验证明了在所有地头转弯情况下，误差小于 0.2m。Oksanen^[27]根据拖拉机的机械参数和农田几何约束，创建了地头转向最优路径，详细求解了

在不同宽度、不同角度条件下的最优路径，结果证明了最优转向路径会随着约束条件的不同而不同，以及在极端情况下无解。Zhu^[28]研究了与之相似的方法，通过运用最短时间次优控制创建了参考转向路径。陈济勤提出了针对不同农田作业方式下（如耕地、播种、收割等）的直行、绕形、斜行等作业路径方式^[29]。Zhao Chunjiang 等应用 GIS 组件开发了路径规划软件，可以根据平行作业生成路径，用户可以指定农业机械的作业方向，然后生成作业路径，就可以根据规划路径进行作业导航模拟^[30]。以上方法过于复杂，结合本课题的要求，忽略外界环境因素的干扰，生成简单的路径即可，本课题直接生成半圆的规划算法进行转弯路径规划，直线路径规划采用导航 AB 线的方法。

1.3.2 北斗系统及其滤波算法国内外研究现状

北斗卫星导航系统是由我国独立研发的一个全球卫星导航平台^[31]。自 2003 年投入使用以来，北斗导航产业逐步开发了一批具有自主知识产权的导航定位产品和应用系统。如依赖北斗导航系统作为主信道建立的水文自动测报系统，是北斗导航最早的民用用户之一；物联网领域的动植物生长环境远程监测控制系统、农产品质量追溯等方面^[32]。当然有些通信条件差、信号接收较差的地区，如广大边缘草原地区中对草原水源、火灾、生产力情况的监测，以及赈灾方面、农机作业车辆调度等方面还很少应用北斗导航系统甚至还没有开展应用^[32]。北斗导航系统也有 GPS 无法拥有的优点，它即可以知道我在哪也可以知道你在哪，可以实现双方保持通信联系，在许多领域如海洋渔业行业，可以保证此行业的安全度，GPS 则无法实现。北斗卫星导航系统在各个领域的应用具有巨大的潜力，将带动中国产业飞速发展，中国的卫星导航产业也将进入快速发展阶段^[33]。

BDS 系统可进行全天候工作，能够提供农业机械的位置和速度信息。目前国内研究应用最多的是将 GPS 导航系统应用在车辆中，BDS 导航应用尚少，其关键技术和应用正在深入研究中。BDS 系统在一些情况下存在不足，如林荫、路边高层建筑以及气候的影响等因素会造成 BDS 信号丢失，从而影响其使用。且本课题考虑到成本问题，采用了精度在 1 米左右的低成本接收模块，而采用滤波技术可以改善卫星导航的性能，提高定位精度及稳定性。传统的最小二乘法已很难减少导航数据中存在着的各种影响定位精度的随机误差，BDS 导航数据处理目的就在于尽可能地减小各种误差对动态定位结果的影响，其中最重要的方法

之一就是卡尔曼滤波，目前的卫星导航定位系统中常用的滤波算法是卡尔曼滤波以及其相关的改进算法。所以卡尔曼滤波能够使低成本的东西实现高精度的作业，将其应用在本课题中具有重要的意义。

卡尔曼滤波的发展状况以及在提高北斗卫星定位精度上的应用，国外，1960年的 Kalman^[34]提出使用递归函数的方法来解决关于线性环境下离散数据的滤波问题。卡尔曼滤波算法(Kalman Filter,KF)为了保证状态估计值的最小，通过几个数学递推方程式估计出移动中物体的实时状态，在线性的条件下状态估计可以达到目标状态的实时最优。而最初的卡尔曼滤波算法仅仅适用于线性系统，这样的条件很难满足实际的应用，因为大部分系统都是非线性的。于是国内外学者提出了各种改进的卡尔曼滤波算法，常用到的滤波算法有扩展卡尔曼滤波(EKF)，无迹卡尔曼滤波(UKF)等。这些适用于非线性系统的滤波算法，目前广泛运用在车辆导航定位、航空航天、目标跟踪等各个重要的领域^[35]。基于在非线性环境下的状态估计卡尔曼滤波算法不适用的原因，学者 Bucy 提出了适用于非线性环境下的扩展卡尔曼滤波算法^[36]。EKF 算法主要是根据卡尔曼滤波的基本方程和实现非线性系统中的部分线性化来推导出线性的滤波递推方程，线性化的过程主要是将非线性函数进行泰勒级数展开，展开点是非线性函数的最佳估计点，只留下低阶泰勒级数，去掉高阶泰勒级数。EKF 算法虽然可以应用在非线性环境下，但是对非线性系统的滤波还不能达到所需的要求。由于 EKF 去掉高阶分量只留下低阶泰勒级数，使得运动状态方程与实际系统运动状态相差较大。有学者研究了留下泰勒级数的前两阶对非线性系统进行估计，研究发现对于 EKF 的改进对高度非线性系统没有起到多大作用。有学者提出自适应滤波算法：贝叶斯法，最大似然法，自相关法和协方差匹配法^[37]。但是，影响精度的最大因素是高阶截断误差，因此学者提出了修改状态方程的方法，即无迹卡尔曼滤波方法^[38]。无迹卡尔曼滤波也是一种针对非线性系统的卡尔曼滤波算法，它主要通过 UT(Unscented Transform)变换来处理非线性系统。通过选取均值和协方差等于原来系统状态的均值和协方差的一些带有相应权重的样本点，也就是说选用的样本点能够表示原来系统状态的统计特性。

国内，陈玉峰^[39]等通过降低状态方程的维数改进卡尔曼滤波来剔除动态野值，研究证明该方法改善了卡尔曼滤波器在机载情况下的跟踪能力，提高了滤波

的实时性, 试验说明了利用该方法可以将 BDS 的定位精度提高, 可以满足对于要求精度不高的空中用户的需求。唐浩^[40]等通过对观测值的相位和频率、钟差以及钟差变化率进行预测估计, 提出了闭环自适应卡尔曼滤波算法, 研究结果证明该方法对提高北斗接收机中晶振的钟差和钟差变化率的精度有非常大的作用, 而且估计间隔越长估计精度就越加精确。经过上述讨论本课题决定使用适用于非线性系统的 UKF 滤波算法对 BDS 定位精度进行滤波处理。

1.3.3 多信息融合技术国内外研究现状

虽然 BDS 导航性能可以通过采用卡尔曼滤波等技术来改善, 但无论是在系统导航精度、稳定性还是可靠性, 都依然存在问题, 且卫星信号容易受到其它卫星或大气的干扰。所以当今正在研究的农业车载导航系统中, 除了 BDS 为主外, 必须要有其它定位方法作为辅助, 选择合适的滤波算法对两者进行融合, 以保证机组能够准确定位并能够按照预先规划路径进行作业。机器视觉伴随着图像处理技术的迅速发展得到了许多学者的青睐, 关于机器视觉的研究以及应用已经涉及到多个领域, 其中不乏农业车载导航系统。视觉传感器在导航系统中主要作用是识别路线和检测障碍物, 起到相对定位作用^[41]。视觉传感器既能在田作业识别路线时区分作物和杂草, 还能检测病虫害, 具有多种功能以及优异的工作性能, 适用范围广以及性价比高的优点, 但其缺点是当光线不好时其测量范围和精度会明显降低, 即测量精度受环境影响较大。

多传感器融合技术是指利用多个传感器共同工作, 得到描述同一环境特征的冗余和互补信息, 再运用一定的数据融合算法进行分析、综合和估计, 最后得到能够准确描述这一环境特征所需要的可靠信息。利用此技术方法探测的环境信息具有冗余性、互补性和实时性等特点^[42]。组合导航这一模式是未来导航技术中不可或缺的一部分。因为误差来源的多样性、数据格式的复杂性等原因, 促使组合导航系统必须遵从不同的数据融合方式。所以, 在设计使用组合导航系统对移动目标进行定位时, 滤波算法的选择和应用也需要有更明确的要求。滤波算法既要符合组合导航系统各个子系统的误差模型要求, 又需要体现滤波算法的有效性和稳定性, 并能够最大限度的提高导航系统的定位精度。随着各种新型的预测算法和滤波算法不断涌现, 将为组合导航系统的研究提供高效的理论数学依据^[43]。目前, 常用的多信息融合滤波方法有加权平均法、卡尔曼滤波法、贝叶斯估计法、

统计决策理论、Shafer-Dempster 证据理论、模糊逻辑和神经网络等^[44]。

卡尔曼滤波作为多传感器融合技术中的一种重要的滤波技术，系统可以根据状态估计值去校正，使系统达到稳定和高效。卡尔曼滤波算法广泛应用在多传感器融合技术中，适用于线性、非线性系统，所以可以选择对应的融合滤波算法改变导航系统的性能，提高精度。陈艳^[45]等研究的基于 kalman 滤波器组合自动导航定位算法，将 RTD GPS 信息与机器视觉信息通过 kalman 滤波器进行融合，跟踪误差得到一定程度的减小。陈艳等研究的基于 GPS 和机器视觉的组合导航定位方法，使用 UKF 滤波，滤波效果显示定位曲线比滤波前平滑了许多，可以满足导航系统的定位要求^[46]。本课题开发基于北斗卫星和机器视觉的多信息融合导航技术，在上述陈艳的方法基础之上进行改进，对数据信息进行融合，提高系统定位精度。

提高组合导航定位精度，毋庸置疑选择合适的滤波算法来处理信息，已成为组合导航系统关键技术的核心，而我国对于组合导航的滤波算法的研究刚刚起步。因此，为将滤波理论运用于以 BDS 为核心辅助其它导航方式的导航系统中，对提高定位精度、稳定性和可靠性以及对我国自主研发的北斗卫星导航产业的发展具有重大的意义。

1.4 存在的问题

随着农业机械现代化与自动化技术的不断进步，精准农业中自动导航技术也在不断地研究发展。对于农业车辆在田间的精准定位，既要保证定位精度达到要求，还要注重成本投入的降低。

无论国内还是国外关于北斗导航系统的研究还很少，关于关键技术的研究在理论方面和实际应用方面国内外之间的研究存在很大的差距，因此还需要多借鉴国外先进的技术。除此之外，国内外学者大部分研究的导航系统是基于 GPS 定位或 DGPS 定位技术，且我国大部分产品应用的都是基于此类的，导致 GPS 系统垄断了我国卫星导航市场，且 GPS 价格昂贵。目前，随着我国北斗导航系统的不断完善发展，北斗系统的功能可越来越完整可靠，为国内及周边国提供定位服务，为我国精细农业提供完备的技术基础能力，更符合我国现阶段农业机械自动化和智能化发展的需求，有利于我国北斗导航定位系统在国内乃至世界的发

展。

1.5 主要研究内容

课题主要讨论基于北斗导航的农机车载组合导航系统的设计及其关键技术,结合现有实验研究基础,研究路径规划算法、滤波算法、导航方式等农业车载导航系统的主要研究内容。根据本课题的要求以及各方面因素,在组合导航系统中以北斗定位技术及 GIS 系统为主,使用 ECV(Embedded Visual C++ 4.0)编程工具和 eSuperMap 嵌入式地理信息系统控件,研究设计基于北斗定位的组合导航系统,其主要研究内容和方案如下:

(1) 确定基于北斗定位的农机车载组合导航系统的总体设计方案,完成导航系统的设计及硬件选型,主要是车载电脑及外围设备选型、北斗接收装置等的选择。

(2) 设计路径规划算法,生成农田路径规划图。根据路径规划原理,以转弯数最少和总作业路径最短为优化目标设计了路径优化算法,路径规划算法又划分为直线路径规划算法和转弯路径规划算法,使用 ECV 编程工具和 eSuperMap 嵌入式地理信息系统控件,并选取规则矩形农田地块进行作业路径规划测试,生成农田作业路径规划图。

(3) 研究卡尔曼滤波算法,并将其应用于北斗定位数据处理上,以提高北斗定位精度。基于北斗卫星定位系统和常用的卡尔曼滤波算法以及相应的运动模型进行系统仿真。通过接收北斗定位信息,将 EKF、UKF 算法应用于 BDS 场景中完成仿真验证,以供在 BDS 实际工程应用中参考。

(4) 研究数据融合算法,并将其应用于北斗信息和视觉信息的融合处理上,以提高组合导航系统的定位精度。基于信息融合相关理论知识和概念,针对机器视觉和北斗单一导航的优缺点,构建以北斗导航为主、机器视觉导航为辅的组合导航系统。使用 BDS 获取农机的绝对位置信息,机器视觉获取农机的相对位置信息,建立多传感器融合模型,研究多传感器融合定位方法。采用 EKF 滤波方法和 UKF 滤波方法将 BDS 和机器视觉的信息进行融合比较,完成实验仿真。

(5) 完成北斗定位和机器视觉组合导航系统的软件设计和试验测试。ARM 工控机板预装有正版的 Windows CE 5.0 操作系统、信息处理系统的嵌入式

eSuperMap 软件。其通过 RS-232 串口接收 BDS 实时数据，其解算模块、导航模块应用程序在 EVC 环境下进行编译和调试，并选择江苏大学西山操场进行试验，最后对比分析实验数据结果和系统可行性。

1.6 本章小结

本章主要论述了课题研究背景、目的和意义，阐述了农业车载组合导航系统及其关键技术在国内外的研究现状，分析了路径规划、卡尔曼滤波等关键技术的优缺点以及北斗卫星定位系统在实际应用中存在的问题，最后给出了本文的主要研究内容。

第二章 农机车载组合导航系统设计方案

2.1 田间导航系统总体设计

基于北斗卫星的田间作业组合导航系统的整体设计思路如图 2-1 所示。该系统主要由车载电脑、北斗导航系统、视觉导航系统组成。其中车载电脑由嵌入式设备、嵌入式系统、键盘、LCD 等组成；北斗导航系统主要是北斗接收装置以及配套天线组成；视觉导航系统由摄像头和图像处理模块组成。对于整个导航系统，主要完成对 BDS 信息的接收并通过卡尔曼滤波算法对经纬度信息进行滤波处理、视觉传感器数据的采集处理以及对两者的接收数据进行融合处理。通过 BDS 接收机和其他传感器接收到的位置以及姿态信息数据，在屏幕上显示出地块边界，根据地块情况、作业要求等规划出合理的作业路径；当拖拉机作业时，通过 BDS 和多传感器的动态跟踪数据实时显示作业情况，通过导航功能实现农机车载的自动导航。

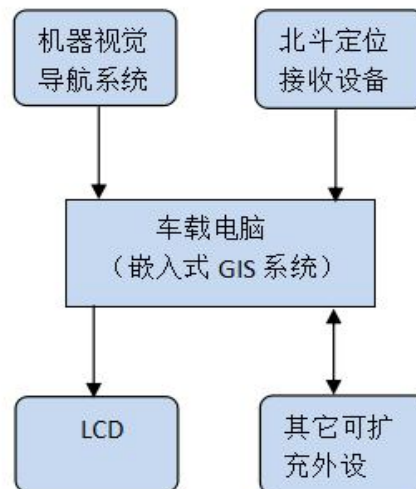


图 2-1 系统结构框图

Fig 2-1 System structure diagram

2.2 系统硬件设计

2.2.1 系统硬件选型分析

根据田间导航系统的设计方案，分别对田间导航系统的硬件构成及实现功能进行分析，总结出系统对硬件的要求，方便系统硬件选型。

田间导航系统主要负责生成农田信息轮廓图并根据路径规划算法进行路径规划，接收处理北斗定位信息和视觉导航信息，同时对北斗信息和视觉信息进行融合处理，故应由处理核心部件工控板，北斗定位接收设备等构成，应具备以下功能：

（1）田间导航系统需要处理农田复杂的位置信息，系统需要运行 GIS 软件，因此需要具有良好的数据处理能力和较快的逻辑运算速度。

（2）田间导航系统需要在大范围农田环境下工作，便于大范围推广，需要低成本高精度北斗定位，同时系统需要对农田各区域地块进行实时准确地定位和长度等的测量，因此系统硬件需要具有良好的稳定性，北斗定位接收设备的定位精度达到亚米级。

（3）田间导航系统需要与北斗接收设备、视觉导航装置、显示屏、鼠标以及其它设备等互联，因此需要具有丰富的外围接口，以便与外围设备进行信息互联。

（4）车载电脑需要安装嵌入式 GIS 软件，生成路径规划图，接收北斗接收设备提供的田间定位信息；此外结合机组当前定位及速度信息，对农业机械进行自动导航。

农机车载组合导航系统由车载电脑、北斗定位接收设备和机器视觉系统组成，本课题机器视觉系统由课题组其它成员设计。根据以上具体分析，选择合适的硬件集成系统。

2.2.2 北斗定位接收设备

综合考虑系统成本和开发难度等因素后，课题北斗模块选用目前我国北斗推广小组成员之一的和芯星通开发的 UM220 模块，该模块体积较小、功耗较低，适用于车载组合导航领域^[47]。UM220 北斗模块属于双系统的 GNSS 模块且具有较高的性能，支持 GPS 系统 L1 频点和北斗二号 BDI 频点。适用于低成本低功耗领域。其结构框图如图 2-2：

UM220 模块的主要参数如下：

电源电压： 3.3 VDC +/- 5%

输入阻抗: 50Ω

天线增益: $15\sim 30\text{dB}$

频率: BD2: B1 GPS: L1

输入/输出数据接口: 2 个 UART, LVTTL 电平, 波特率 $4800\sim 115200\text{bps}$

冷启动: 32s

热启动: 1s

重捕获时间: $<1\text{s}$

定位精度(RMS): 3m

测速精度(RMS): 0.1m/s

授时 (1PPS) 精度(RMS): 20ns

灵敏度: -145dBm

数据更新率: 1Hz (可升级)

导航数据格式: NMEA0183

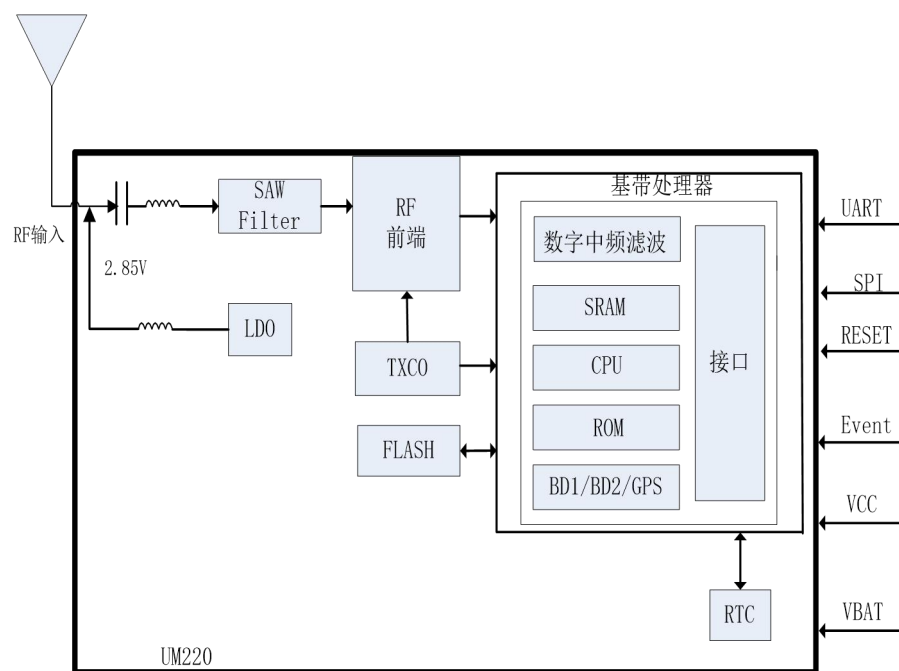


图 2-2 UM220 结构框图

Fig 2-2 structure diagram of UM220

UM220 模块拥有三个串口, 默认情况下波特率为 9600bps , 用户可以自定义串口波特率, 最高速率可达 230400bps , I/O 信号为 LVTTL 电平。UM220 能够提供一个输出或输入极性和脉宽可调节的 1PPS 信号。通过引脚 RF_IN 可以向有

源天线提供 2.85V 的电压。其实物图如图 2-3 所示：

选择好北斗模块硬件设备后，要测试一下该模块是否能够正常工作，测试方法如下。将 UM220 模块连接天线后，通过串口 RS232 转接线与 PC 机相连，对北斗定位接收设备进行试验调试。使用 Unicore Control&Display Tool 和 Power GPS Trial 2.3.3 测试软件进行测试，测试界面如图 2-4 和 2-5 所示。图 2-4 为北斗卫星状态分布图，图 2-5 为定位数据的接收显示图，其测试结果显示北斗接收装置可以正常准确地接收北斗定位信息，可以满足车载导航的需要。



图 2-3 UM220 和北斗天线实物图

Figure 2-3 Physical maps of UM220 and antenna

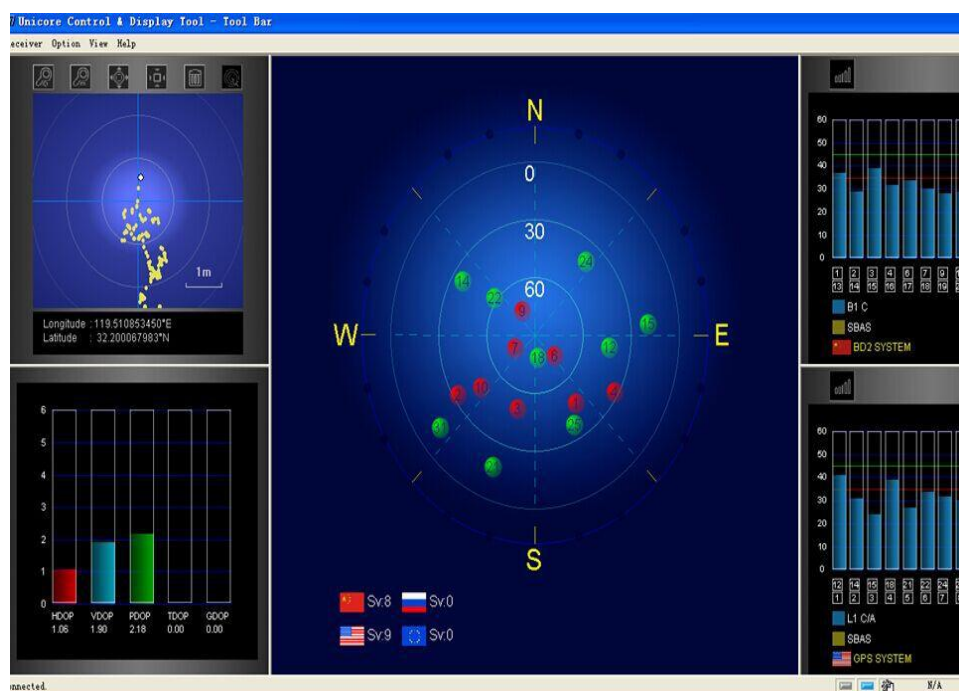


图 2-4 北斗卫星状态分布图

Fig2-4 State of beidou satellite

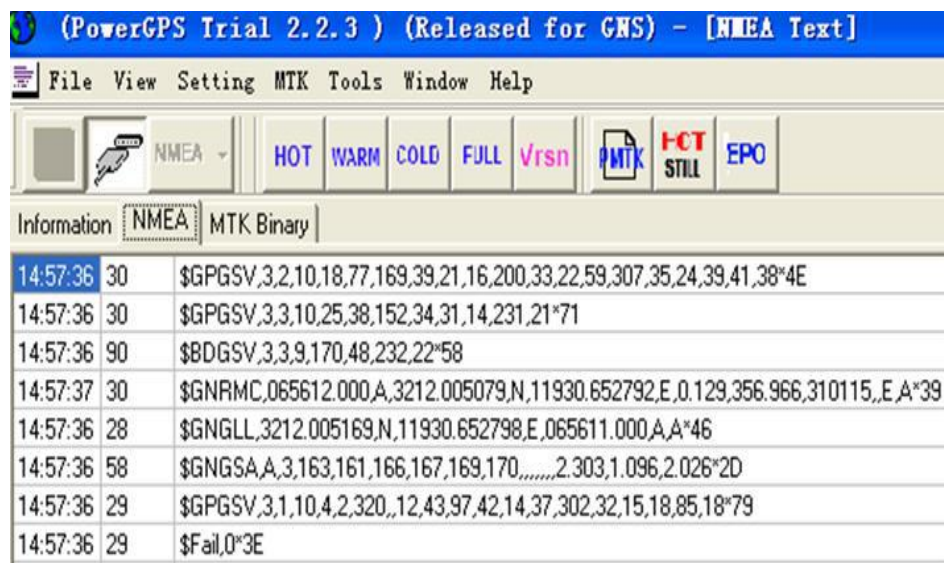


图 2-5 北斗定位数据接收测试

Fig 2-5 Beidou positioning data receiving test

2.2.3 车载电脑

车载电脑是整个系统当中进行各种信息处理的核心部件以及人机对话的中心，由于农田轮廓图的生成或加载是在 GIS 软件上完成的，故车载电脑应能够

运行嵌入式 GIS 系统平台。系统需要运行 GIS 软件，且算法的数据处理存储量较大，因此需要具有良好的数据处理能力和较快的逻辑运算速度的高性能处理芯片；车载电脑需要与北斗定位接收设备、视觉导航系统等设备互联进行数据通讯，上述两种设备都是通过 RS-232 串口进行信息的交换，所以需要交互终端带有 2 个以上的串口即 COM1 和 COM2；导航系统需要与显示屏和鼠标互联，显示及处理各系统的状态信息、农田轮廓图及人机对话信息，因此需要具有丰富的外围接口和良好的人机对话功能。此外，车载电脑需在复杂的农田环境下长期进行车载移动式工作，因而还需要其具有很好的稳定性及体积小、易车载的特点。

广州志远电子有限公司的 EPCS-8980 型嵌入式工控主板作为车载电脑的主板，与配套的液晶显示屏组成系统的车载电脑^[48]。EPCS-8980 型工控主板以 PXA270 处理器(基于 XScale 构架)为核心，预装 Windows CE 或 Linux 操作系统，支持 TFT/STN 液晶屏显示，3 路 RS232 串口，板载 2 路 CAN 总线接口，且拥有 VGA 显示接口。EPCS-8980 型工控主板如图 2-6 所示，其性能完全能够满足系统的要求，性价比较高。

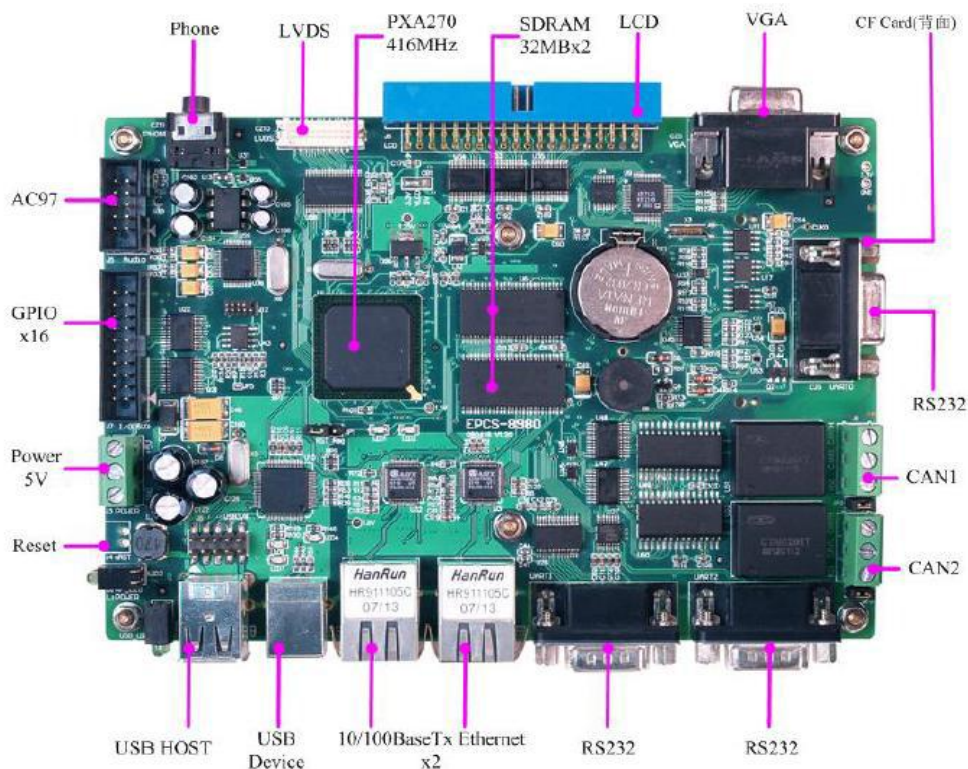


图 2-6 EPCS-8980 型工控板

Fig 2-6 EPCS-8980 typed ARM IPC

EPCS-8980 型工控板主要性能如下：

处理器：XScaleTM PXA270 416MHz/520MHz RISC 处理器

Cache：指令 Cache 32KB，数据 Cache 32KB，mini data cache 2KB

系统内存：64MB SDRAM（32 位总线接口）

硬盘空间：256MB NAND Flash（用户可用空间约为 160MB）

电源电压：5V 单电源

通讯接口：2 路 CAN 总线通讯接口；2 路 10/100M 以太网总线接口；3 个 RS-232 串口，其中一个为全功能串口；

显示接口：LCD 接口，支持 DSTN 和 TFT 液晶屏(3.3V/5V)，LVDS 接口(LCD 信号)；VGA 接口，支持 SVGA 最大分辨率 800x600；

数据接口：1 个 CF 卡接口，只兼容 3.3V 的热插拔 CF 卡；4 个 USB HOST 接口，1 个 USB Device 接口；8 路缓冲数字输入、输出 I/O 接口；

2.2.4 人机对话设备

农机车载导航系统在工作时需要用显示屏来显示农业车辆的相关状态量以及农田电子信息地图等，通过键盘、鼠标等配置一些参数。另外，在农田电子信息地图需要加载一些相关文件时，通过 U 盘或者 CF 卡为媒介来完成笔记本电脑和车载电脑之间文件的相互传递。因此，系统选取了四线电阻式触摸屏、鼠标、U 盘和键盘等输入输出设备，以便实现系统人性化的人机对话功能。

2.2.5 基于北斗定位的农机车载组合导航系统的硬件集成

将所选硬件元器件集成，构成本课题设计的组合导航系统，其系统硬件集成结构如图 2-7 所示，北斗定位接收设备通过 RS232 接口传输定位信息到车载电脑，机器视觉系统通过 RS232 接口将采集信息传输到车载电脑中，农田信息分布图通过 U 盘在车载电脑和笔记本电脑之间进行传输，显示屏、键盘和鼠标进行人机对话功能。

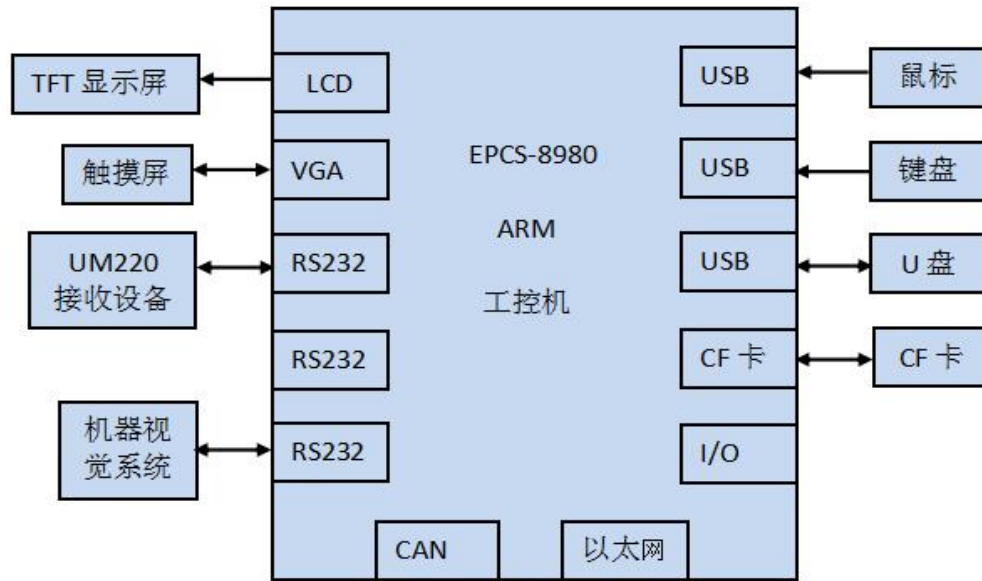


图 2-7 基于北斗定位的农机车载组合导航系统的硬件集成结构

Fig 2-7 Hardware integration structure of Farm Machinery Integrated Navigation System

Based on Beidou positioning

2.3 本章小结

本章主要介绍了基于北斗定位的农机车载组合导航系统的总体设计方案,根据系统结构组成、功能以及对系统的需求分析,完成对系统的硬件选型工作,对系统的硬件做了较为全面的介绍,通过硬件选型和分析后设计了硬件集成总体框架。

第三章 农业机械作业路径规划

3.1 路径规划算法研究

3.1.1 农田路径规划

路径规划是农业机械导航系统的重要组成部分。根据在拖拉机作业前或作业过程中的作业要求,预先或即时地规划出农机作业所需情况下的可行路径。可以描述路径规划问题为:农业机械依据某些优化准则或目标(如工作总消耗量最小、行走路线最短、行走时间最短等),找到一条在运动空间中从起始位置到目标位置以及能够避开障碍物的最优或者接近最优的路径。田间作业路径的规划对农业机械作业质量的提高,生产资料的减少以及减少农机作业能耗具有很大的作用^[49]。对于当前现代农业装备前沿的自动驾驶农业机械研究,田间作业路径规划显得尤为重要。对于自动驾驶农业机械,需要给定明确的田间作业路径,作为系统输入的导航跟踪目标,才能进行正常的行走和作业,并且田间作业路径优化设计有利于更好发挥自动驾驶农业机械在复杂田间环境及作业任务下的作业优势。然而,目前关于此算法的研究还尚少,还没有形成一种通用优化的路径规划算法^[49-52]。本课题研究的农田导航系统是假设在平原地区,一般农田是规则的矩形,所以选择的路径规划算法相对较简单,是由直线路径和转弯路径两部分组成的规划算法。

3.1.2 路径规划算法

由于农田作业的环境和作业的任务是可预知的,因此根据作业田块的几何形状、作业农机具的参数(如作业幅宽)以及地头转弯的模式等先验信息,可以将农业机械作业的农田划分为农机非作业区域和作业区域两个不同区域,规划农田地块路径。地头转弯区是指农业机械进行转弯的区域,通常此区域为非作业区域,不种植农作物;而种植农作物的区域为作业区域。在作业区域内,农业机械采用的方法是常见的直行梭式行走方法,如图 3-1 所示。

根据不同作业任务或特定的作业需求,以及作业田块的形状,可以选择不同的路径优化目标,计算出农业机械田间作业的最优作业方向。再根据一般的直线路径规划算法和转弯路径规划算法生成最优作业路径。

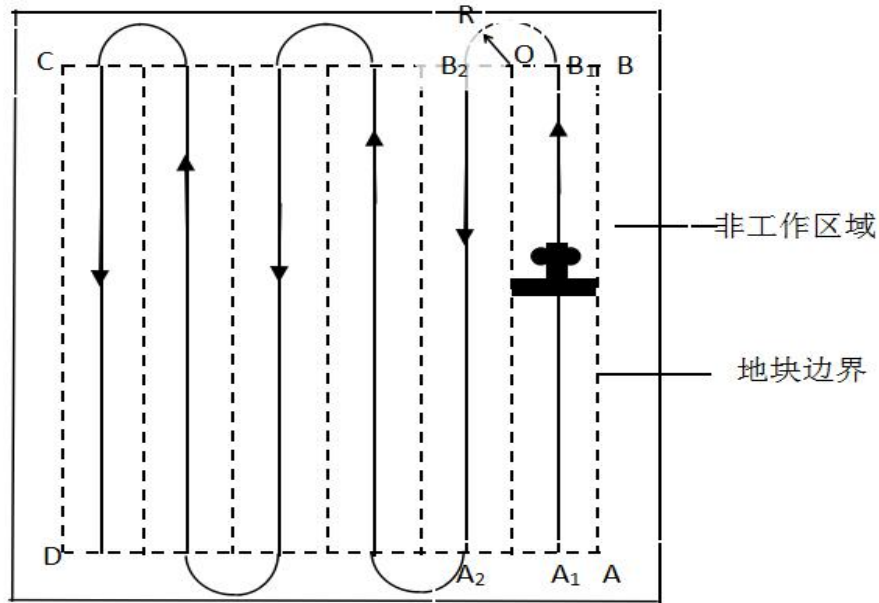


图 3-1 直行梭式行走作业路径示意图

Fig 3-1 Walk straight shuttle operation path diagram

设定预定农机作业路线的方法是：1) 选取田块四边形的四个顶点 A、B、C、D 的定位坐标；2) 根据地块的实际几何形状，以 AB 或 AD 作为边界，同时以该边界为作业行规划的基准线；3) 以幅宽的一半即 $w/2$ 为基准，找到作业起始节点，起始点后面以幅宽 w 为基准，找到作业行间距节点，起始点对面边界同理得到相应节点。计算所有边界 AB、CD 或 AD、BC 的交点，作为规划作业线节点；4) 计算跨行数目，所计算得出的结果四舍五入后取整，根据前面所讲的转弯方法来计算转弯数。

除此之外，还要作如下假设：

(1) 假定拖拉机机组在理想条件下作业，不考虑天气、地形等环境因素对作业过程的影响。

(2) 拖拉机机组进行作业时，是一行接一行的工作方式，同时不能够出现跳跃作业或从田间任意点开始作业的情况。

考虑到为了减少算法的复杂度，以及实际情况下大部分田块都是规则的（假设田地轮廓为矩形）本文提出两种作业路径优化目标。

(1) 实现转弯数总和最少：在进行路径规划之后，拖拉机机组按照规划后的路径行驶，该路径要能够使拖拉机在地块边界转弯数总和最小。

(2) 实现总作业路径最短：总作业路径是指作业机组行驶过的全部路径长

度，要求拖拉机机组能够实现的目标是使总的作业路径长度最短。

路径规划给出如下定义：农田作业环境为无障碍物的矩形地块，矩形地块的边界有 m 条，其中第 i 条边的边长为 $L_i (i=1, 2, \dots, m)$ ，拖拉机机组进行田间作业起始点为 $A_1(x_1, y_1)$ ，且 A_1 是矩形地块轮廓线上的一点，农业车载作业时作业幅宽 w 定义为两相邻作业行之间的垂直宽度。

农机车在田间作业时，通常只选用一种转弯模式，常见转弯模式有半圆形、鱼尾形和梨形^[49]。本文采用半圆形转弯模式，半径为 R ，如图 3-2 所示。

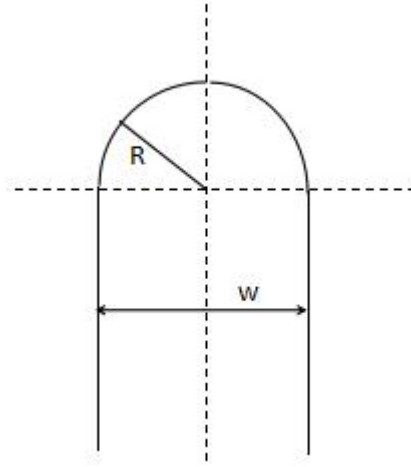


图 3-2 半圆形转弯模式

Fig 3-2 Semicircle turning model

3.1.3 总作业路径最短优化算法

总作业路径 S 指的是整个农田地块农机所走得所有转弯路径长度 S_1 及所有直线作业行路径长度 S_2 的和。如图 3-1 所示，已知农田地块为矩形，四个顶点的坐标已知，可以得出矩形边的方程，如直线 AB 方程为：

$$Ax + By + C = 0 \quad (3.1)$$

其中： $A = y_B - y_A$, $B = x_A - x_B$, $C = x_B * y_A - x_A * y_B$

同理，直线 BC 、 CD 、 DA 的方程如上方法所得。

(1) 直线作业路径长度

通过农机车作业开始点 $A_1(x_1, y_1)$ ，经过 A_1 点的一条直线交于 $B_1(x'_1, y'_1)$ ， B_1 点为起始目标作业路径与农田轮廓矩形的交点，则农业机械第 1 条作业路径长度

为:

$$L1 = \sqrt{(x_1 - x'_1)^2 + (y_1 - y'_1)^2} \quad (3.2)$$

根据矩形边的方程、作业幅宽 w 以及前一个坐标点坐标已知的条件下, 可得出农业机械进行作业的所有直线路径与矩形地块的 2 个交点 $A_m(x_m, y_m)$, $B_m(x'_m, y'_m)$, 那么, 农田矩形地块工作区域内农业机械所要作业的所有直线总长度就是有效作业路径 $S2$ 为:

$$S2 = \sum_{i=1}^m L_i = \sum_{i=1}^m \sqrt{(x_m - x'_m)^2 + (y_m - y'_m)^2} \quad (3.3)$$

(2) 转弯路径长度

如图 3-2 所示, 农业机械机组所行走的路线是半径为幅宽 w 的半圆圆周长。可知如果农田作业有 m 条边, 那么农业机械所转的弯数为 $m-1$, 则农业机械在田块间转弯所走的总路径计算公式如下:

$$S1 = \frac{m-1}{2} * \pi w \quad (3.4)$$

综上所述, 多边形地块作业时拖拉机机组行走的总路径 S 为:

$$S = S1 + S2 \quad (3.5)$$

如果所选的作业方向上总作业路径最短, 则就为最优作业方向。

3.1.4 整体路径规划

农业机械在农田内是往返式的作业, 农业机械的整个作业过程可分两大部分即作业区域内的田间直线行走和非作业区内的地头转弯行走。农业机械在整个田间的行驶路径如图 3-1 所示。农业机械的直线行走路径如图所示的 A_1 点到 B_1 点所形成的直线, 转弯行走路径如图中从 B_1 点到相邻的下一个农田作业行的起始点 B_2 两点间所形成的半圆, 而这个半圆是以两点间直线距离为直径, 两点间形成直线的中间点为圆心形成的圆的一半。通常在农业机械路径规划中直线行走所用到的算法就是点到点路径规划算法即确定导航 AB 线^[24]。而转弯路径中, 有的为了简便算法以及根据系统特点将转弯部分分成若干小部分, 实现以直代曲路径规划算法, 此算法计算点数过多稍显复杂。本文中直接将转弯路径进行转弯规划,

以相邻作业行的中心点为圆心，半圆即为所行驶的路径。

农业机械在直线行走作业前，需要确定一条导航线，即起始点 A_1 和终止点 B_1 所确定的直线。要想确定导航线必须获取所需定位点，定位点的获取方法如下：用卫星导航模块接收机，在农业机械要进行作业的直线两端各采集一组数据，每组数据的平均值作为两端点坐标值，并进行高斯投影得到两端点的平面直角坐标值 $A_1(x_1, y_1)$ 和 $B_1(x'_1, y'_1)$ ，如图 3-3 所示的直线就是通过两端点确定的一条导航直线 $A_1 B_1$ 。

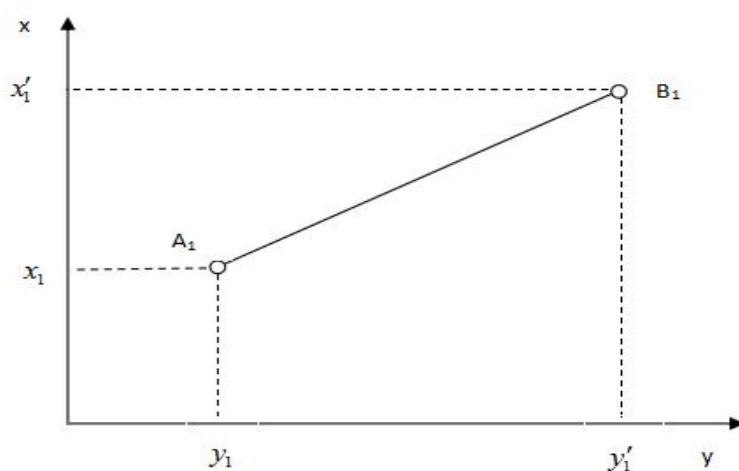


图 3-3 直线路径规划

Fig 3-3 Straight path planning

北斗接收模块接收到的数据是在 WGS-84 大地坐标系下的，因此不能直接用于农业机械的直线导航上，应将接收到的经纬度坐标转换为平面直角坐标系下的经纬度坐标值。国内外最常用的两种投影方法是 UTM（Universal Transverse Mercator）投影与 Gauss-Kruger 投影（简称高斯投影）。本文将采用高斯投影法来对坐标进行转换，高斯投影的具体转换过程将在下节作具体的介绍。需要指出的是，高斯投影直角坐标系和平面直角坐标系的 x 轴和 y 轴是相互对调的，即前者的 x 轴与后者的 y 轴进行互换。因为前者的 x 轴是投影轴子午线，方向指向北方，而后者的 y 轴指向北方。为了让投影后的值与平面直角坐标系表示的值相符合，所以在导航应用中进行了互换。

导航直线方程的确定同矩形边方程方法一致。

农业机械在完成直线作业后到达非作业区，这时如果机组要进行下一行的田

间作业,那么就要进行行与行之间的转弯行走。此时农机行走的路径可视为半圆,如图 2-2 所示,可知转弯半径为幅宽 w 的一半。圆心 $O(a,b)$ 的坐标可由圆心两边的点(规划路径直线与矩形边的交点)求得,圆心坐标公式如下:

$$\begin{cases} a = \frac{x_i - x_{i-1}}{2} \\ b = \frac{y_i - y_{i-1}}{2} \end{cases} \quad (2.6)$$

则圆的方程为:

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = \left(\frac{w}{2}\right)^2 \quad (2.7)$$

3.2 路径规划软硬件设计及功能设计

3.2.1 路径规划软硬件设计

根据课题需要和农田导航系统的特点可知,选择的车载电脑要符合系统要求。PC 机体积大、资源利用率低、成本高,而嵌入式设备体积小、硬件资源足以满足系统需要,且性价比高,在现代农业车载方面应用广泛。车载装置、掌上电脑、手机等都是常见的嵌入式设备,硬件设备有 CPU、ROM、RAM、CF 卡、SD 卡、主电池、备用电池等,其 CPU 可以为 ARM、MIPS、SH3、SH4、x86 等。

路径规划算法的实现也需要嵌入式地理信息系统软件的支持。在嵌入式设备中运行的 GIS,称为嵌入式 GIS (EGIS) [52]。嵌入式 GIS 相较于一般的 GIS 是存在一些区别的,区别主要在于嵌入式设备运行在资源紧缺有限的硬件设备中,所以要在此环境下最大限度的发挥其功能,必须要降低对硬件资源的消耗,包括处理器运算量,内外存储器的消耗量,以此来提高运行效率。

通常 EGIS 的硬件开发平台是以嵌入式设备为主。在嵌入式开发中,一般选用的操作系统为 Linux、PalmOS、Windows CE 等,其中 Linux 较为常见,根据系统设计要求操作系统采用 Windows CE,Windows CE 由微软开发的 32 位嵌入式系统,其具备高效、简洁、完全抢占式、多任务等特点,同时支持 Microsoft Win32 API,在应用程序设计中常用接口有 ActiveX、MFC、ATL、COM 等,使用起来十分方便。EGIS 开发中,常用开发工具有 Microsoft embedded Visual C++ 3.0/4.0、

Microsoft Windows CE Platform Builder、Microsoft Visual Studio.Net 等。EGIS 软件平台有 ArcPad、MapX Mobile、GeoMobile、eSuperMap、SmartInHand 等。

因为嵌入式 GIS 的强大的功能才能使路径规划算法方便简单的实现，嵌入式 GIS 主要功能如下：

（1）源数据的导入

数据格式上，嵌入式 GIS 软件较为独特，难以直接利用外部导入数据，因此需要设计数据导入接口，数据转换格式后再载入到嵌入式 GIS 系统中。

（2）导航定位数据的接收

首先物理连接嵌入式设备和导航定位系统(如 BDS)的接收板，然后将导航定位数据通过串口传送到嵌入式设备中，依据相应格式读入定位数据，最后再把定位数据转换到空间矢量数据坐标系中，实现移动物体的定位。

（3）路径分析功能

包括对农田环境的路径进行规划、对作业路径的属性查询、生成作业路径规划图以及对作业路径轨迹进行记录与回放等。运用最优路径的算法，找出最佳作业起始点以及最佳作业路径。同时为了便于日后的管理和查询，可对农机工作状态和行走的路线进行记录及回放。

（4）导航定位功能

目标移动实时动态导航和定位是导航定位的主要功能。根据接收到的卫星定位数据以及机器视觉导航数据，对农机当前位置进行精确定位，或者根据原先设定好的路径进行比较，当偏离前进方向时，将偏差发送给转向控制器，以便农机修正前进方向。

目前，国外的 EGIS 软件开发平台主要是 ArcPad 和 MapX Mobile 等。国内的主要有武汉大学的 HandMap 和超图公司的 eSuperMap 等。EGIS 软件国内外的研究与开发在同一水平，因此优劣方面国外产品主要是品牌优势，国内则在本土化及技术支持上占据优势，较为突出的是 eSuperMap。eSuperMap^[53]是北京超图公司研发的一个开放性的嵌入式 GIS 软件开发平台，依据嵌入式设备的硬件资源有限的情况下，为了开发的简单化和方便性，以及为了强大设备的功能、减少对资源的消耗、突出设备的性能等，无论是在优化数据结构方面还是优化基本算法方面，都争取做到少资源赢取多功能，以满足开发者的需求。eSuperMap 主要

有数据结构精炼、支持多平台运行环境、功能强大、操作简便、易于开发、应用广泛等特点。其代表了我国在该方面技术的最高水平，具备短小精悍、易于开发、存储需求小、功能强大等特点。因而本文在进行农业机械导航的研究当中采用 eSuperMap 作为软件开发平台。

3.2.2 路径规划功能设计

为满足不同领域的需求，eSuperMap 控件集成了丰富多样的类库资源，内部封装了多种多样的函数方法，可方便的调用函数，二次开发应用快捷简单，减少了开发者的工作量，缩短了开发周期节约了成本。系统的最优路径选择依赖于导航，eSuperMap 中路径分析基类 CSePathAnalyse 可以派生自定义的路径分析类，通过重载 GetDistance 方法实现。根据一定的属性字段和权重规则可以得出最优的分析结果，并用线段的形式标出路径规划算法生成的路径。路径规划模块主要包括以下几个功能：

选择顶点：在路径规划软件中选择农田地块边界的顶点。

选择幅宽：将拖拉机工作的幅宽输入。

最短路径分析：将农田地块的顶点、幅宽进行设置后，根据最短路径算法进行路径规划任务，分析完成后自动生成路径并显示存储最短路径相关信息。

清除路径：如果工作完成或需重新规划作业路径可将已经生成的路径进行清除。

最短路径分析流程如图 3-4 所示

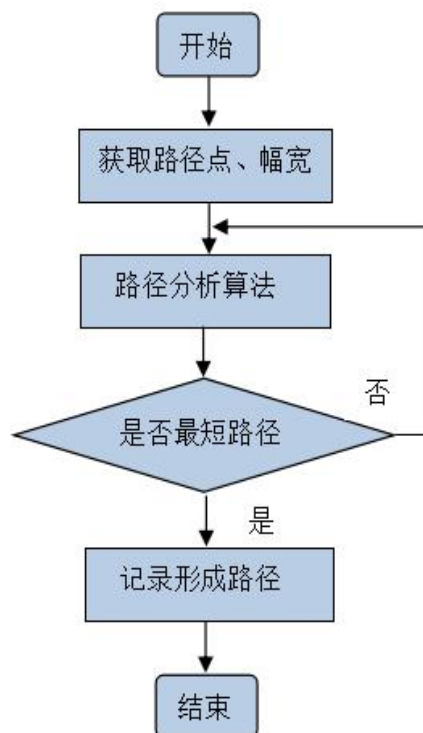


图 3-4 最短路径分析流程图

Fig 3-4 The flow chart of the shortest path analysis

根据系统的工作特点及系统功能的分析,路径规划软件开发平台和开发工具分别选择操作系统为 Windows CE 5.0,嵌入式 GIS 软件为 eSuperMap , 开发工具为 EVC, 对路径规划的实现提供软件资源。

3.3 路径规划实现结果

3.3.1 试验方法

路径规划是系统导航的必要前提条件,路径规划前需要获得农田的轮廓图或获取矩形农田的四个顶点的经纬度。为了能够显示路径规划生成的路径与实际农田地块的形状之间的差别,本文将获取农田轮廓图进行路径规划。考虑到性价比,本课题选择的北斗定位模块 UM220 尚不足以得到精确的农田轮廓图,所以为了得到精确的农田地块边界,为后续研究组合导航系统的精度提供可靠的基础条件,农田轮廓图要通过高精度的 BDS 或 GPS 模块来获取。得到地块边界的方法如下:机组绕农田边缘一圈,借用高精度 RTK-GPS 接收机作为试验装置,在江苏大学西山操场上选一块 $60\times 90\text{m}^2$ 的矩形地块作为农田试验场地,幅宽为 6m,

使 GPS 接收天线的垂直投影最大限度的和试验场地的轮廓边缘重合，绕场一周，利用 eSuperMap 经过二次开发的软件 FieldMapper 的 GPS 绘制点、线、面的功能，即可绘制农田轮廓图。

在精准农业中，田地作业需要考虑的情况很多，比如作业设备的当前速度、位置，农作物的位置，相邻农作物的位置关系等等，这些都需要在小区域内进行考虑，而交通地图中不可能出现也不需要以上信息。所以在精细农业应用中可以直接使用 WGS-84 坐标系统，而不需要将其转换为北京 54 坐标系统或西安 80 坐标系统，直接使用 WGS-84 坐标系统进行投影变换，转换为平面坐标。我国 BDS 采用的坐标系是 2000 中国大地坐标系(CGCS2000)，WGS-84 坐标系的现在的精度能够达到 5cm，CGCS2000 坐标系也能够达到这种水平，可认为属于同一坐标系，所以本文使用 WGS-84 坐标系。

高斯投影正算公式的概念是由已知参考坐标系中点的大地纬度和经度 (B, L) ，求对应的高斯投影直角坐标 (x, y) 的公式；而高斯投影反算公式是由已知的 (x, y) 求相应的 (B, L) 的公式^[54]。

高斯正投影在卫星导航系统领域运用的比较多，所以本文应用高斯正投影将 BDS 导航定位数据进行转换。BDS 获取的定位数据坐标 (B, L) 经过高斯投影转换后为平面坐标 (x, y) ，在不影响实际精度的要求下将有关高次忽略后得到实用公式如下：

$$x = X + \frac{l^2}{2} N \sin B \cos B + \frac{l^4}{24} N \sin B \cos^3 B (5 - t^2 + 9\eta^2 + 4\eta^4) \quad (3.8)$$

$$y = lN \cos B + \frac{l^3}{6} N \cos^3 B (1 - t^2 + \eta^2) + 500000 \quad (3.9)$$

式 (3.8) 与 (3.9) 中： $l = \frac{L - L_0}{\rho}$ ， L 为所求点经度， L_0 为投影带中央子午

线经度（本文选择的 L_0 为 6 度带）， B 为所要求的点的纬度， e 为椭球第一偏心率，

辅助变量 $t = \tan B$ ， N 为卯酉圈曲率半径， $\rho = 206265$ ， $N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}$ ，

$\eta = e' \cos B$ ，其中 e' ， e^2 为定值， X 为赤道至纬度 B 的平行圈的子午线弧长，其

计算公式为 (3.10)。

$$X = c \int_0^B (1 + e'^2 \cos^2 B)^{\frac{3}{2}} dB \quad (3.10)$$

将积分函数展开后, 把 WGS-84 椭球的有关参数, $c = 6399593.6258\text{m}$, $e'^2 = 0.00673949674227$ 代入式 (3.10) 化简为:

$$X = 111132.9525 - 16038.4201 \sin^2 B + 16.8325 \sin^4 B - 0.0220 \sin^6 B + 0.00003 \sin^8 B \quad (3.11)$$

3.3.2 实现结果

其路径规划结果如图 3-5 所示。

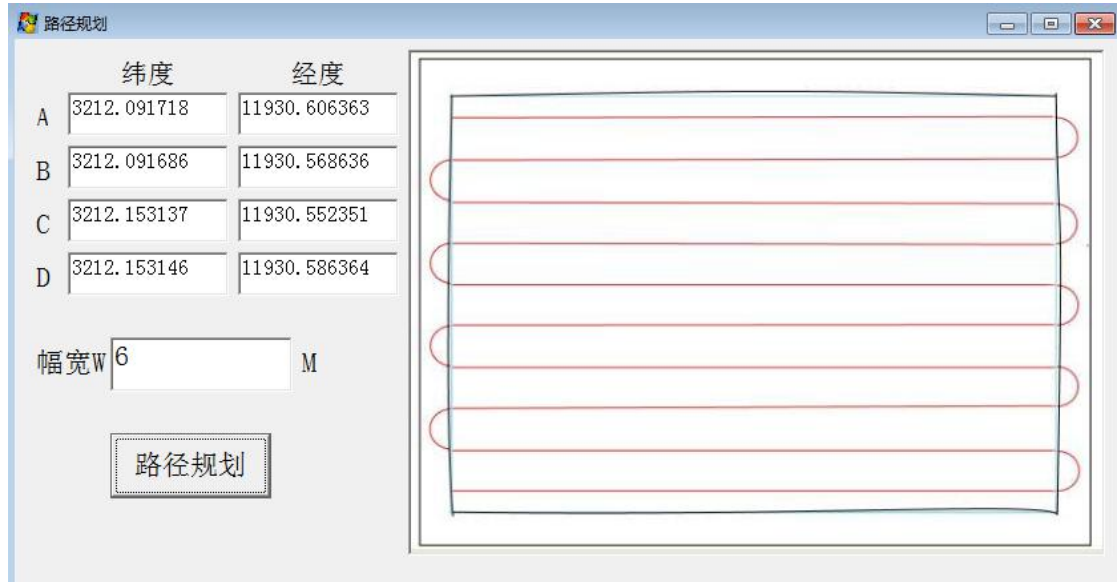


图 3-5 路径规划实现效果图

Fig 3-5 Path planning implementation effect

通过试验结果可以看出, 本课题设计的路径规划算法能够很好地实现预期效果。上述试验地块为规则矩形四边形, 且本课题假设农田地块为规则矩形, 若检验不同几何形状农田地块的路径规划效果, 还应进一步更深入的试验研究。

3.4 本章小结

本章主要分析了路径规划算法, 并根据本课题的研究背景以及系统的工作特

点选择了软硬件系统，设计了路径规划的主要功能；简要介绍了 EGIS 的概念、功能以及简要概述了 eSuperMap 的特点；结合嵌入式 GIS、EVC 编程工具设计了路径规划软件，并通过试验验证了路径规划在嵌入式 GIS 里实现的可行性。

第四章 基于北斗导航的农田定位算法研究

4.1 北斗卫星定位导航系统

我国自主研发的北斗卫星导航定位系统，与美国研制的 GPS 及俄罗斯研制的 GLONASS 并列为三大导航系统。北斗导航系统采用的时间基准为北斗时 (BDT)，其能够为不同需求的用户提供可靠的导航、高精度的定位以及稳定的授时服务，北斗卫星导航定位系统的建设与发展严格遵循了开放性、自主性、兼容性、渐进性这 4 项原则^[56]。

4.1.1 北斗系统的组成

北斗导航系统由中国自主发展、运行，建造完成后，系统将由 5 颗静止轨道卫星和 30 颗非静止轨道卫星构建组成。并网后的卫星定位、测速、授时精准度将达到国际水平。系统还可以为高端需求用户提供高精度、高可靠、高稳定性的导航服务以及通讯和系统信息完好性等服务。

北斗导航系统主要由三大部分组成：地面控制部分、用户终端部分和空间星座部分。如图 4-1 所示。

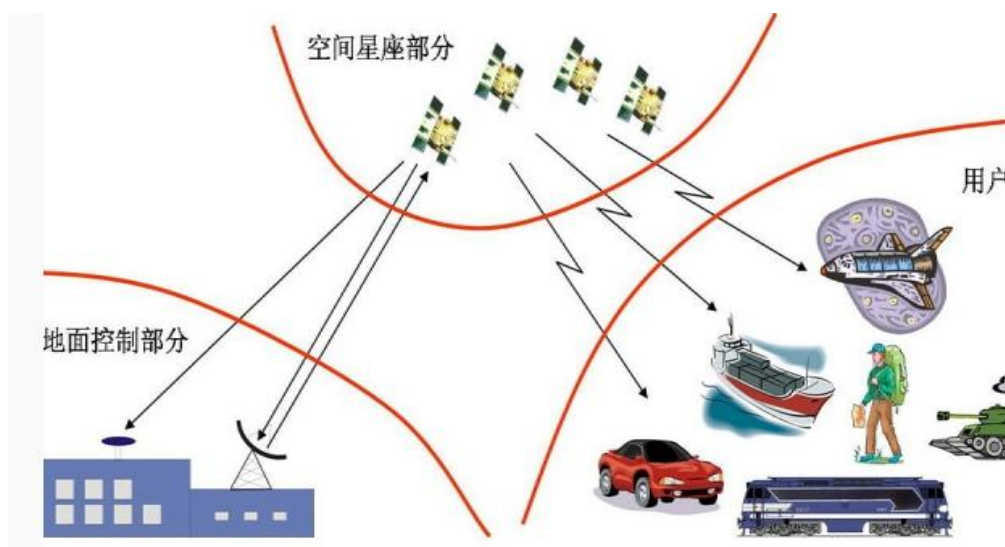


图 4-1 北斗卫星导航系统组成

Fig 4-1 Beidou satellite navigation system

(1) 地面控制部分

数个主控站、监测站及注入站构成了地面控制部分。其中，主控站的职能是

从分布的监测站搜集并对观测数据信息做出处理以及完好性信息、广域差分信息和卫星导航电文的生成，实现任务的调度和规划以及系统运行的管理和控制等等；主控站控制注入站以实现完好性信息、广域差分信息和卫星导航电文的注入，良好地管理与控制负载；监测站的职能是实现连续跟踪监测导航卫星及导航信号的接收，并将接收到的信息传送给主控站，同时还具有确定卫星轨道以及为时间同步提供观测数据的功能。

（2）用户部分

用户部分主要包括支持其他导航系统的终端及北斗导航系统的用户。用户接收机可以跟踪北斗导航卫星实时获取时间信息，计算其自身的位置坐标、移动的速度等，根据不同行业的需求，接收机可以被制造成便携式、机载、船载、车载等等。

（3）空间星座部分

空间星座部分由 5 颗运行在地球同步轨道上的同步卫星（GEO）和 30 颗非同步卫星（Non-GEO）构成。GEO 卫星空间坐标为 $58.75^{\circ}E$ 、 $80^{\circ}E$ 、 $110.5^{\circ}E$ 、 $140^{\circ}E$ 及 $160^{\circ}E$ ，高度在 36000km，3 颗倾斜地球同步轨道（IGSO）卫星和 27 颗中圆地球轨道（MEO）卫星构成了 Non-GEO 卫星组。其中，IGSO 卫星运行在 3 个倾斜同步轨道面上，高度 36000km，轨道倾斜角 55° ，星下点轨迹重叠，交叉点位于 $118^{\circ}E$ ，它们之间的相位差为 120° ；MEO 卫星运行轨道倾斜角 55° ，高度在 21500km 左右，运行在 3 轨道面上。

4.1.2 北斗系统的功能

北斗卫星导航定位系统能为客户提供四大服务功能：短报文通信、快速定位、精密授时及较多的用户数。北斗系统用户终端的通讯是双向的，用户单次发送数据量可达 60 个汉字，可单次接收 120 个汉字，此种数据量对船只远洋航行有重大意义。在服务区域内，北斗系统可为用户提供高精度、全天候、实时定位服务，水平精度为 100m 左右，通过标校站校准后为 20m 左右；北斗系统具有可媲美其他导航系统的精密授时功能，可提供同步时间精度为 20-100 纳秒；单位时间内系统可允许使用的最大用户数量为 540000 户/小时。

4.1.3 北斗系统定位误差

北斗定位系统中存在的误差主要来源于卫星测量过程中所产生的误差，该误差可以归结为：卫星自身时钟的误差、星历误差（卫星的位置误差）、天线多路径效应所致误差、大气传播延迟修正残差、接收机测距产生的误差以及自身的噪声、高程测量误差等等。另外，定位精度也会受到用户接收端所在的地理地形影响。

总的来说，卫星测量误差可归为两类：一种为伴随时间空间迅速变换，较弱关联性的随机误差。另一种则为随时间空间较慢变换，较强关联性的随机偏移误差。在消除随机误差方面应用最优化估计的策略是最常用也是最有效的方法，传统的最小二乘法已很难减少导航数据中存在着的各种影响定位精度的随机误差，BDS 导航数据处理目的就在于尽可能地减小各种误差对动态定位结果的影响，其中最重要的方法之一就是卡尔曼滤波，即利用动态卡尔曼滤波器来消除定位中各种随机误差。

4.2 卡尔曼滤波算法

在测量方差已知的条件下，卡尔曼滤波可以从测量噪声中，估计动态系统的状态，起初提出卡尔曼滤波的思路其前提是噪声需要满足高斯白噪声的要求且只能用来解决线性系统中的问题，卡尔曼滤波是一个递推过程，在这个过程中通过不断地预测并修正最终获得一个比较切合实际的输出。其在计算的过程中无需大量的已观测的测量数据，根据获取的最新数据及时得到结果，为处理器节约了大量的存储空间，因而该滤波方法逐渐广泛地运用到动态数据处理过程当中，特别适用于 GPS、惯性导航以及北斗的动态定位数据处理。卡尔曼滤波的上述特点给其在车载用户端动态定位中带来了极大的优越性，特别是接收机在某个时刻无接收信号时，能够利用该滤波方法预测该时刻的车辆可能的速度或位置。

其滤波模型是：

$$\begin{cases} X(k+1) = \Phi X(k) + W(k) \\ Z(k) = HX(k) + V(k) \end{cases} \quad (4.1)$$

$$E(W) = 0, \quad COV(W) = E(WW^T) = Q$$

$$E(V)=0, \text{COV}(V)=E(VV^T)=R, E(WV^T)=0$$

$X(k)$, $Z(k)$ 分别表示的是系统的 n 维状态向量和 k 时刻的 m 维观测向量, W , V 分别表示的是协方差矩阵为 Q 和 R 的过程噪声以及观测噪声, 且 Q 和 R 分别具有非负定性和正定性且都具有对称性。 Φ , H 分别表示状态转移矩阵和观测矩阵, 此处他们均为常数矩阵, 并且是线性的。

滤波的递推:

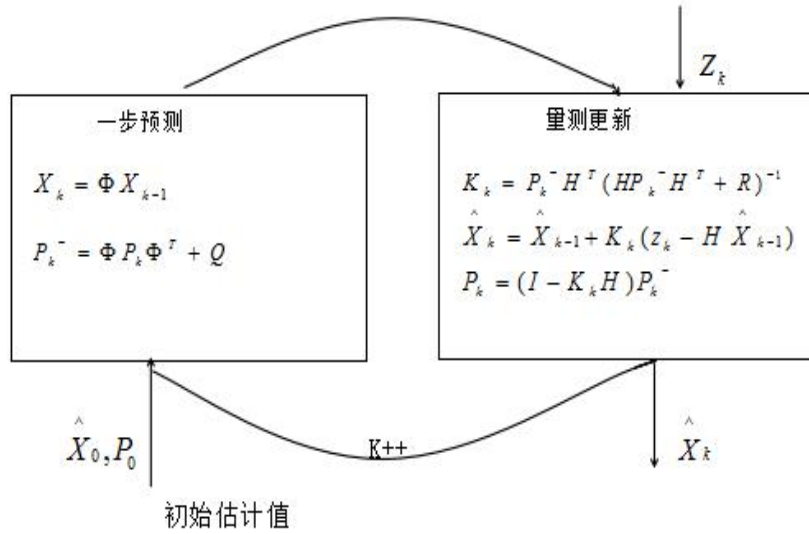


图 4-2 Kalman Filter 递推过程

Fig 4-2 Kalman Filter recursive process

通常在卫星导航处理过程中表示卫星系统的方程是非线性的, 已知标准的 KF 方法不能满足非线性系统的要求, 所以下节的内容主要介绍了较常用的 EKF 以及 UKF 这两种非线性化的方法以及对两种方法的使用。

4.2.1 扩展卡尔曼滤波

EKF 的主要思想是将非线性系统转化为线性方程。转化的方法就是将非线性的系统在最优估计点处进行泰勒级数展开处理, 去掉高阶泰勒级数, 只留下低阶泰勒级数, 所得方程即为所求结果^[35]。

处理完的用户观测方程及状态方程的通用表达式:

$$\begin{cases} X(k) = f(x(k-1), W(k-1)) \\ Z(k) = h(x(k), V(k)) \end{cases} \quad (4.2)$$

$$E(W) = 0, \quad \text{COV}(W) = E(WW^T) = Q$$

$$E(V) = 0, \quad \text{COV}(V) = E(VV^T) = R, \quad E(WV^T) = 0$$

$X(k)$ 和 $Z(k)$ 分别表示的是系统的 n 维状态向量和 k 时刻的 m 维观测向量， W ， V 分别表示的是协方差矩阵为 Q 和 R 的过程噪声以及观测噪声，且 Q 和 R 分别具有非负定性和正定性且都具有对称性。 f 是一步转移矩阵的非线性函数， h 是观测矩阵的非线性函数。

EKF 递推流程是：

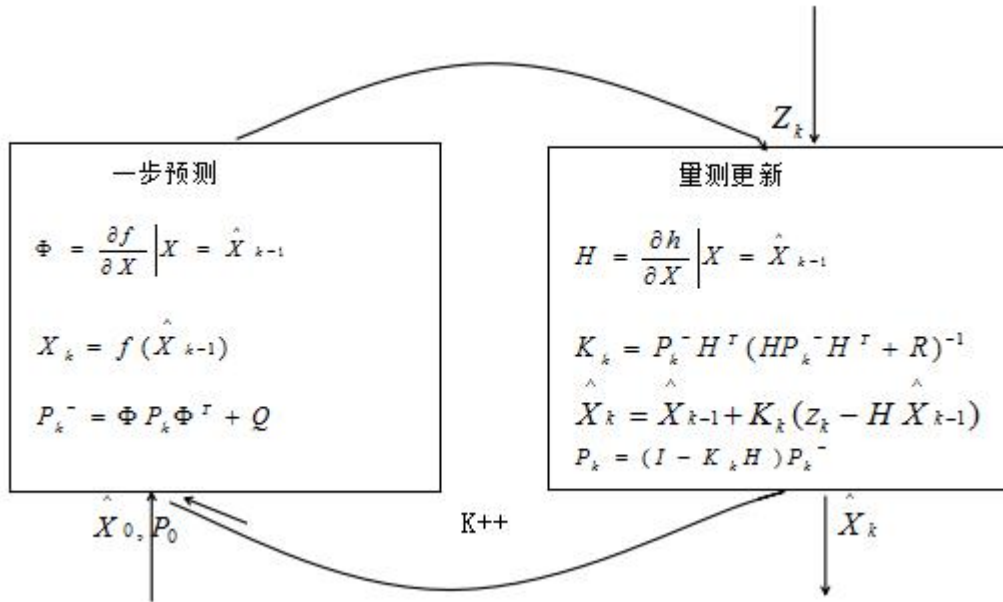


图 4-3 EKF 递推过程

Fig 4-3 EKF recursive process

虽然 EKF 可以运用在非线性系统中，但是 EKF 仍然存在着诸多缺点：只有当泰勒级数展开点和真实值相差不大时，EKF 才能通过泰勒级数展开来将非线性系统近似为局部线性系统。在泰勒级数展开过程中，EKF 只选用了一阶泰勒级数，高级数项省略了，这种理念和方法只适用于弱非线性系统，如果非线性系统非常强且不是高斯系统的估计那么就会展现出较大误差。在非线性系统的实际应用中有些系统需要计算 Jacobi 矩阵且很困难，有的则不需要。而 EKF 需要计算 Jacobi 矩阵且在 EKF 中 Jacobi 矩阵不可或缺，因为每一步迭代都需要非线

性系统在上时刻的该矩阵,这就使得计算变得很困难,由于雅克比矩阵的难解性,EKF 的应用受到了很大程度上的制约。

4.2.2 无迹卡尔曼滤波

UKF 是一种非线性滤波方法且核心是无迹变换(UT)。同 EKF 比较,UKF 不用计算雅克比矩阵,且不用进行线性化这一复杂过程,使得收敛速度以及估计精度均能够提升,实现起来也更容易^[57]。

无迹变换的过程如下:

设 m 维随机向量 Y 是经过非线性变换后形成的,而非线性变换的过程是将 n 维随机向量 X 经过函数 $f(\cdot)$ 的变换,即通过已知 X 的均值 \bar{X} 和方差阵 P_{XX} ,经过无迹变换就可以求出 Y 的均值 \bar{Y} 和方差阵 P_{YY} 。

具体步骤过程如下:

1.依据 X 的均值 \bar{X} 和以及方差阵 P_{XX} 确定出 $2n+1$ 个 X 的 1 倍 σ 样本点:

$$\chi^{(0)} = \bar{X} \quad (4.3)$$

$$\chi^{(i)} = \bar{X} + (\sqrt{(n+\lambda)P_{XX}})_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (4.4)$$

$$\chi^{(i)} = \bar{X} - (\sqrt{(n+\lambda)P_{XX}})_{i-n} \quad i=n+1,n+2,\dots,2n \quad (4.5)$$

2.计算非线性变换产生的样本点:

$$Y^{(i)} = f[\chi^{(i)}] \quad i=0,1,2,\dots,2n \quad (4.6)$$

3.确定权值

$$\omega_0^{(m)} = \frac{\lambda}{n+\lambda} \quad (4.7)$$

$$\omega_0^{(c)} = \frac{\lambda}{n+\lambda} + (1-\alpha^2 + \beta) \quad (4.8)$$

$$\omega_i^{(m)} = \omega_i^{(c)} = \frac{1}{2(n+\lambda)} \quad (i=1,2,\dots,2n) \quad (4.9)$$

4.确定映射的均值和方差阵

$$\bar{Y} = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^{(m)} Y^{(i)} \quad (4.10)$$

$$P_{YY} = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^{(c)} [Y^{(i)} - \bar{Y}][Y^{(i)} - \bar{Y}]^T \quad (4.11)$$

4.3 基于无迹卡尔曼滤波的农田车载北斗导航精度研究

4.3.1 车载北斗导航系统运动模型

因为农机具在作业过程中一般沿预定路线进行匀速直线运动,但也会出现某些机动,如在爬升、转弯的过程中会产生一定加速运动。即当目标作匀速采用常速 CV 模型,当目标作匀加速直线运动采用三阶常加速 CA 模型^[58]。由于田间地形,作物生长不均匀等因素,实际喷雾施药机的运动通常不完全属于等速或常加速范围的运动。为此,本文采用机动载体的“当前”统计模型^[59]。

1. 系统状态方程的建立

农机在田间的运动状态可近似看作是在二维平面内的运动,且能够分解成南北方向和东西方向的运动。当采用“当前”统计模型时,该模型认为在时段内加速度发生变化时会将该变化视作一个零均值随机过程,同时采用一阶 Gauss-Markov 模型来描述随机的加速度变化^[60],即

$$\begin{cases} a_e = -\frac{1}{\tau_{ae}} a_e + \omega_{ae} \\ a_n = -\frac{1}{\tau_{an}} a_n + \omega_{an} \end{cases} \quad (4.12)$$

式(4.18)中的 τ_{a_n} 、 τ_{a_e} 分别是载体北向、东向加速度变化率相关联的时间常数。 ω_{a_e} 、 ω_{a_n} 分别为 $(0, \sigma_{a_e}^2)$ 、 $(0, \sigma_{a_n}^2)$ 的高斯白噪声。

系统状态向量:

$$X = [x_e \quad v_e \quad a_e \quad x_n \quad v_n \quad a_n]^T \quad (4.13)$$

其中 a_n 、 v_n 、 x_n 分别指载体北向的加速度分量、速度分量、位置分量, a_e 、 v_e 、 x_e 分别指载体东向的加速度分量、速度分量、位置分量。

系统的状态方程为:

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_{a_e}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_{a_n}} \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\tau_{a_e}} \bar{a}_e \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{\tau_{a_n}} \bar{a}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_{a_e} \\ 0 \\ 0 \\ \omega_{a_n} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

假设采样周期为 T，把式 (3.20) 离散化之后得到离散化方程：

$$X(k+1) = \Phi X(k) + GU(k) + W(k) \quad (4.15)$$

$$\text{其中：} \quad \Phi = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{1}{\alpha^2}(-1 + \alpha T + e^{-\alpha T}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\alpha}(1 - e^{-\alpha T}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\alpha T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T & \frac{1}{\alpha^2}(-1 + \alpha T + e^{-\alpha T}) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\alpha}(1 - e^{-\alpha T}) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-\alpha T} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$$G = \begin{bmatrix} \left| -T + \frac{\alpha T^2}{2} + \frac{1 - e^{-\alpha T}}{\alpha} \right| \\ \alpha \\ T - \frac{1 - e^{-\alpha T}}{\alpha} \\ 1 - e^{-\alpha T} \\ \left| -T + \frac{\alpha T^2}{2} + \frac{1 - e^{-\alpha T}}{\alpha} \right| \\ \alpha \\ T - \frac{1 - e^{-\alpha T}}{\alpha} \\ 1 - e^{-\alpha T} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$U(k) = \begin{bmatrix} \bar{a}_e & \bar{a}_n \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

\bar{a}_n 、 \bar{a}_e 对应表示载体“当前”时刻北向、东向加速度分量的均值。

W(K)为离散的白噪声序列，且：

$$Q = 2\alpha\sigma_a^2 \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ q_{12} & q_{22} & q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ q_{13} & q_{23} & q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ 0 & 0 & 0 & q_{12} & q_{22} & q_{23} \\ 0 & 0 & 0 & q_{13} & q_{23} & q_{33} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$q_{11} = (1 - e^{-\alpha T} + 2\alpha T + 2\alpha^3 T^3 / 3 - 2\alpha^2 T^2 - 4\alpha T e^{-\alpha T}) / (2\alpha^5)$$

$$q_{12} = (-e^{-2\alpha T} + 1 - 2e^{-\alpha T} + 2\alpha T e^{-\alpha T} - 2\alpha T + \alpha^2 T^2) / (2\alpha^4)$$

$$q_{22} = (4e^{-\alpha T} - 3 - e^{-2\alpha T} + 2\alpha T) / (2\alpha^3)$$

$$q_{23} = (e^{-2\alpha T} + 1 - 2e^{-\alpha T}) / (2\alpha^2)$$

$$q_{33} = (1 - e^{-\alpha T}) / (2\alpha)$$

2. 观测方程的建立

量测方程为：

$$Z(k) = HX(k) + V(k) \quad (4.20)$$

其中：

$$Z = \begin{bmatrix} Z_x \\ Z_y \end{bmatrix}, \quad V = \begin{bmatrix} \omega_{Z_e} \\ \omega_{Z_n} \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

其中设 $V(K)$ 是高斯白噪声，测量噪声的协方差阵为：

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_{Z_e}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{Z_n}^2 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

ω_{Z_n} 、 ω_{Z_e} 分别代表北向、东向的观测噪声，可以将均值近似为 0，方差为 $\sigma_{Z_e}^2$ ， $\sigma_{Z_n}^2$ 的高斯白噪声。

根据式 (4.15) 与式 (4.21) 分别表示系统的观测方程与状态方程，获得 BDS 系统的非线性模型：

$$\begin{cases} X_k = f_{k-1}(X_{k-1}) + W_{k-1} \\ Z_k = h_k(X_k) + V_k \end{cases} \quad (4.22)$$

式中， X_k 、 Z_k 分别表示的是系统的状态变量和观测量， V_k 和 W_k 分别为 m

维、 n 维的观测噪声和过程噪声， f_k 是 n 维向量函数， h_k 是 m 维的向量函数。

4.3.2 车载北斗系统的无迹卡尔曼滤波算法

设系统的初始状态 X_0 与所有噪声不相关联，前者的先验均值为 $E[X_0] = \hat{X}_0$ ，协方差阵 $\text{cov}(X_0) = P_0$ 。基于 BDS 定位系统模型的 UKF 运算步骤如下：

1. 初始化

$$\hat{X}_0 = E[X_0] \quad (4.23)$$

$$P_0 = \text{cov}(X_0) = E[(X_0 - \hat{X}_0)(X_0 - \hat{X}_0)^T] \quad (4.24)$$

2. 计算 sigma 点

$$\chi_{k-1}^{(0)} = \hat{X}_{k-1} \quad (4.25)$$

$$\chi_{k-1}^{(i)} = \hat{X}_{k-1} + (\sqrt{(n+\lambda)p_{k-1}})_i \quad i=1, 2, \dots, n \quad (4.26)$$

$$\chi_{k-1}^{(i)} = \hat{X}_{k-1} - (\sqrt{(n+\lambda)p_{k-1}})_i \quad i=n+1, n+2, \dots, 2n \quad (4.27)$$

式中，比例因子 $\lambda = \alpha^2(n + \kappa) - n$ ，sigma 点的分散程度是由 α 决定的，一般取 0.001， $\kappa=0$ ， $(\sqrt{(n+\lambda)p_{k-1}})_i$ 是矩阵平方根的第 i 列。

3. 时间更新

$$\chi_{k/k-1}^{(X_i)} = f(\chi_{k-1}^{(i)}) \quad i=0, 1, \dots, 2n \quad (4.28)$$

$$\hat{X}_{k/k-1} = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^{(m)} \chi_{k/k-1}^{(X_i)} \quad (4.29)$$

$$P_{k/k-1} = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^{(c)} [(\chi_{k/k-1}^{(X_i)} - \hat{X}_{k/k-1})(\chi_{k/k-1}^{(X_i)} - \hat{X}_{k/k-1})^T] + Q_{k-1} \quad (4.30)$$

$$\xi_{k/k-1}^{(i)} = h(\chi_{k/k-1}^{(X_i)}) \quad (4.31)$$

$$\hat{Z}_{k/k-1} = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^{(m)} \xi_{k/k-1}^{(i)} \quad (4.32)$$

其中， $\omega_i^{(m)}$ 和 $\omega_i^{(c)}$ 分别是求一阶和二阶统计特性的权系数， $\beta=2$ 。

4. 量测更新

$$P_{(ZZ)_{k/k-1}} = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^{(c)} [\xi_{k/k-1}^{(i)} - \hat{Z}_{k/k-1}][\xi_{k/k-1}^{(i)} - \hat{Z}_{k/k-1}]^T \quad (4.33)$$

$$P_{(XZ)_{k/k-1}} = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^{(c)} [\chi_{k/k-1}^{(X_i)} - \hat{X}_{k/k-1}][\xi_{k/k-1}^{(i)} - \hat{Z}_{k/k-1}]^T \quad (4.34)$$

$$K_k = P_{(XZ)_{k/k-1}} P_{(ZZ)_{k/k-1}}^{-1} \quad (4.35)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k/k-1} + K_k [Z_k - \hat{Z}_{k/k-1}] \quad (4.36)$$

$$P_k = P_{k/k-1} - K_k P_{(ZZ)_{k/k-1}} K_k^T \quad (4.37)$$

4.3.3 半物理仿真分析

UM220 北斗模块与车载电脑相连，车载电脑放在电瓶车上模拟喷雾施药机运动。分别依据两组实验数据进行半物理仿真，一组为静态数据，仿真时间为 500s，一组为动态数据，电瓶车沿直线运动，在 300s 处拐弯按原来路线返回，仿真时间总长 500s，采样间隔取 $T=1s$ 。设系统状态初始值取 $X_0=[736537.10 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。系统过程噪声 $\sigma_{a_e}^2 = \sigma_{a_n}^2 = 0.1m/s$ ，在 CS 模型中，取马尔科夫时间常数 $\tau_{a_e} = \tau_{a_n} = 1$ ，滤波参数设为 $\alpha=1$ ， $\beta=2$ ^[39-40]。为了对比实验效果，用 UKF 和 EKF 两种方法分别对两组实验数据进行状态估计，对北斗三星无源定位原始经纬度观测数据进行滤波处理，图 4-4 是用 EKF 方法进行滤波估计得到的静态载体东向位置变化波形与原始数据波形的比较，图 4-5 是用 UKF 方法进行滤波估计得到的静态载体东向位置变化波形与原始数据的比较。图 4-6 是用 EKF 方法进行滤波估计得到的动态载体东向位置变化波形与原始数据波形比较，图 4-7 是用 UKF 方法进行滤波估计得到的动态载体东向位置变化波形与原始数据的比较。

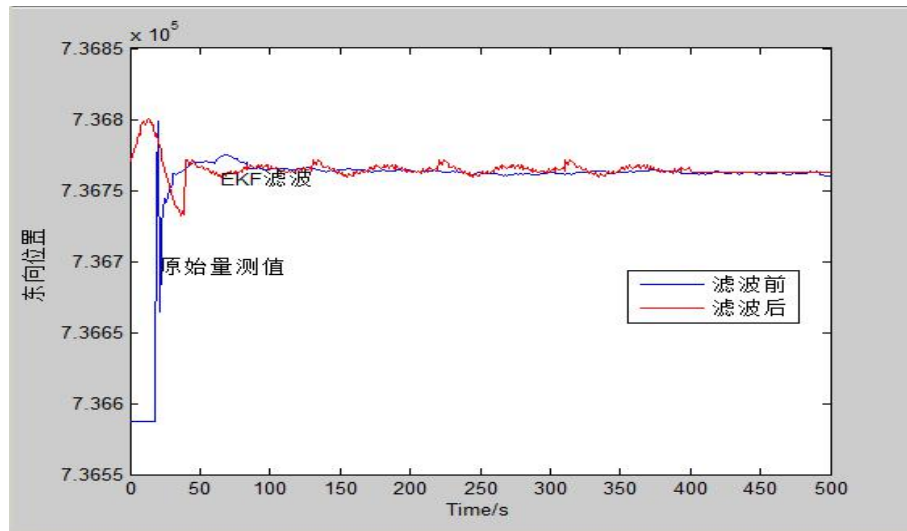


图 4-4 EKF 滤波与量测值比较图

Fig4-4 EKF filtering compared with measured values

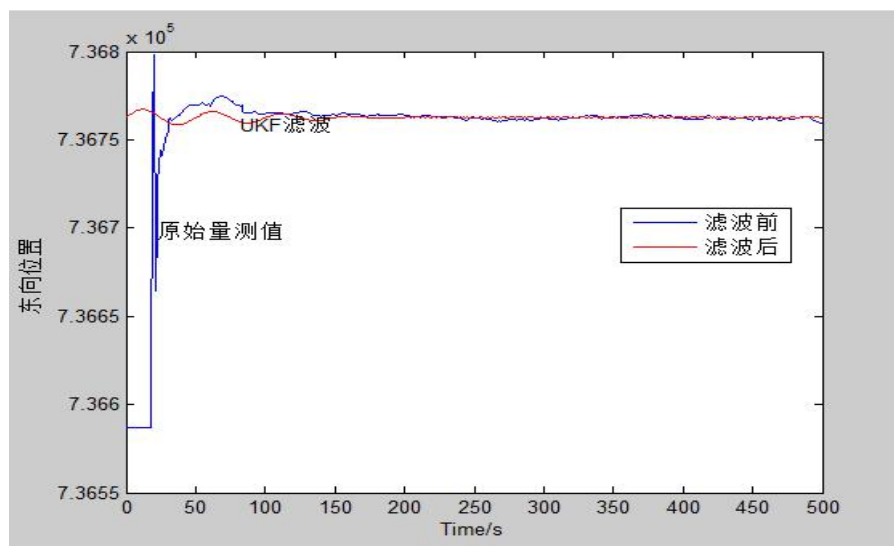


图 4-5 UKF 滤波与量测值比较图

Fig 4-5 UKF filtering compared with measured values

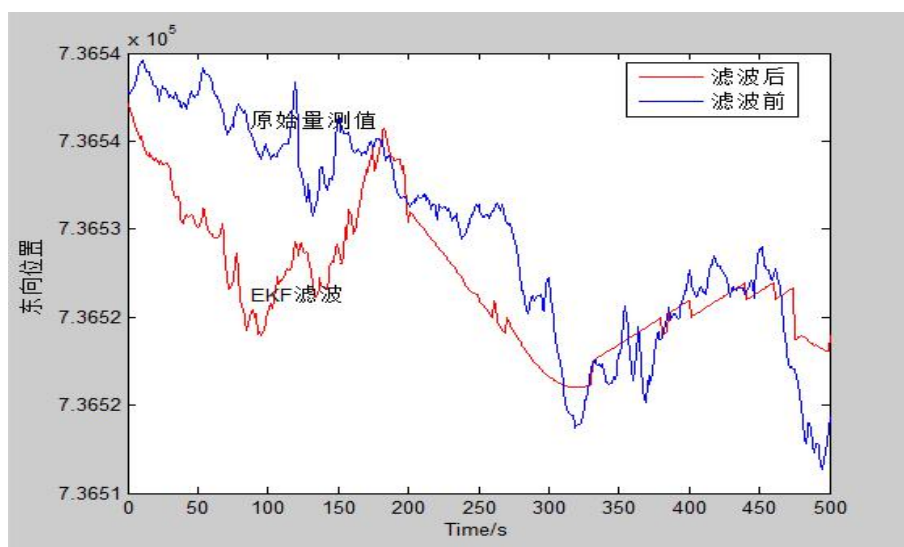


图 4-6 EKF 滤波与量测值比较图

Fig 4-6 EKF filtering compared with measured values

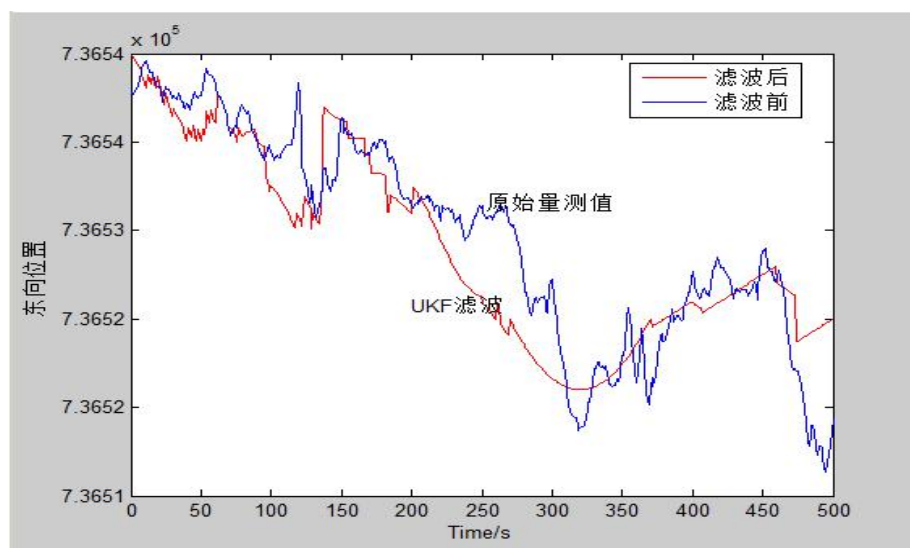


图 4-7 UKF 滤波与量测值比较图

Fig 4-7 UKF filtering compared with measured values

从仿真实验结果来看，对于静态数据的处理，UKF 方法对定位精度的提高和收敛速度的提升作用明显高于 EKF 算法。对于动态数据处理，用 EKF 方法，载体定位精度相比原来有所提高，用 UKF 方法进行滤波估计较用 EKF 滤波有更好的效果。仿真分析及结果表明，基于 UKF 方法在定位精度和收敛速度的提升上较 EKF 更好。

4.4 本章小结

本章主要介绍了北斗导航系统的组成、功能及系统误差来源。根据系统误差，选择卡尔曼滤波理论的相关算法，扩展卡尔曼滤波（EKF）和无迹卡尔曼滤波（UKF）进行分析，基于无迹卡尔曼滤波（UKF），对北斗系统进行建模，对载体的静态定位和动态定位数据用 MATLAB 进行了仿真，并与扩展卡尔曼滤波（EKF）仿真结果作了比较，结果表明 UKF 滤波方法相较于 EKF 可以更好的提高北斗定位精度。

第五章 基于北斗和视觉组合导航系统的算法仿真研究

组合导航技术是为了弥补单一导航性能上的不足,多种导航传感器或导航系统同时使用,对同一信息源做出测量,比较这些测量值得到系统误差并加以校正,通过这些手段和方法来提升整个导航系统的性能。组合导航技术拥有余度功能、互补功能、协合功能^[61]。利用组合导航技术的导航系统或设备称之为组合导航系统,通过整合多种不相同的导航传感器信息,汲取各自的优势互相弥补,以获取较单一传感器更优良的导航性能。组合导航有多种方式比如 GPS+惯性、惯性+航标、GPS+激光雷达、GPS+视觉等等。组合导航系统因其可靠性好、性能高、成本低、精度高等优点受到许多不同应用领域的青睐。本课题采用的导航方式为 BDS 导航和机器视觉导航组合,因这两种导航方式具有各自的优缺点,将两者结合起来进行组合导航可以实现优势互补的作用,结合后的导航系统在可靠性、性能、精度等方面都较单独导航情况下要好。

5.1 农田环境中多传感器信息融合的必要性的必要性

在农田中应用北斗导航定位,有时导航信息易受外界干扰,例如一旦接收机的天线被遮挡或未展开就会出现信号丢失或中断,或者定位误差被认为增大等等,而定位误差的加大会出现不能定位的现象,且载体的姿态信息就难以得到。另外,视野中卫星的几何分布状况(GDOP)、星历误差、时钟误差、多路径误差及接收机噪声等因素都会影响 BDS 的导航精度。再次,在农作物行间进行精确作业时,由于作业区域的路线图并不清楚,而北斗导航系统需要预先精确导航路线图,这使得北斗系统在田间耕作时难以达到定位需求。

在现代农业生产中,机器视觉技术凭借实用性强、功能多及性价比高等特点得到了广泛的应用,例如在农田车辆自动驾驶中的应用已取得了成功,且是该系统中的核心技术组成部分^[62]。机器视觉技术在导航过程中起到的作用主要是检测障碍物及识别路线,用以获取车辆的相对位置信息。

机器视觉导航采用相对坐标的定位原理,具有实时性好和导航精度高的特点,也不需要预先设置好导航路线。在田间有很多的因素如杂草、作物间距等都存在着大量的随机因素,机器视觉能够提供丰富的田间信息,有利于农业自动化

装备的精确自动导航。然而任何传感器都有缺陷，机器视觉传感器也不例外，其对一些因素较为敏感容易造成误判，如光照条件不好可能出现误判导致作物遭到碾压，另外其分辨率、动态范围、噪声及漂移等问题都有待提高和解决。另外田地的一些情况如大面积杂草或植株的缺失都会造成路标导航方式的失灵。

因此，BDS 作为一种绝对位置式传感器因其能够为车辆提供高精度绝对位置信息在车辆自主导航系统中得到了广泛的应用，又由于其自身无法克服的缺陷，可与视觉导航组合，构成以卫星导航为核心的多种传感方式下的导航结构。各个传感器提供的信息是不完整的观测数据，通过相互融合各个传感器的测量值来摒弃各种信息之间的矛盾或冗余，达到优势互补的功能，提升系统判决的准确性，以满足农业装备在田间的复杂作业环境。

5.2 组合导航工作原理

本课题是基于北斗+机器视觉并结合多种传感器的导航定位系统。在此系统中，由于北斗模块 UM220 的定位精度在 1m 左右，即使经过滤波处理，定位精度只能达到 25cm 左右，用第三章中得到的路径规划图，将上一时刻路径上的点与上一时刻的 BDS 定位位置数据的差值得出系统误差，并将此系统误差作为下一时刻的 BDS 定位位置数据的系统误差。农机车进入田间之前，用 BDS 找到机耕道附近然后找到基准点，进去田间导航后，在 BDS 实时导航数据的基础上减去系统误差得到的数据作为最终 BDS 导航的定位数据。所以农机车在未进入田间作业即转弯路径内是靠 BDS 单独导航的，进入田间后 BDS 和视觉系统进行组合导航。

行驶速度、航向角度和绝对位置信息等信息的采集由 BDS 来获取，机器视觉经过处理后生成导航基准线，获取能够表征作物行特征的基本点。这两个操作完成后，两部分获取的信息统一纳入到统一坐标系中，融合后的数据便可以产生新的位置信息，融合的工作流程如图 5-1 所示。

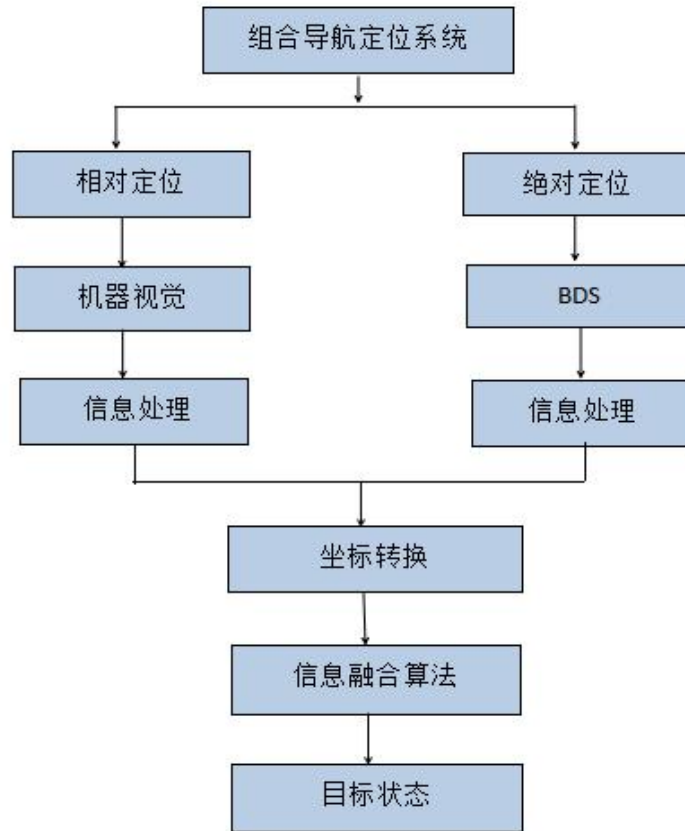


图 5-1 组合式导航定位系统的整体设计

Fig 5-1 The integral design of the combined navigation and positioning system

BDS 相关理论以及滤波算法在第四章节作了具体介绍，本文不对机器视觉定位方法作具体研究，试验研究方法及试验结果由本课题组其他成员提供，为了方便下一节组合导航进行信息融合，下面简要介绍一下机器视觉定位信息的获取思路。

在农机上安装摄像机通过视频处理技术对获取的实时农田作物布局信息运用图像处理算法辨识出作物行的相对位置，并根据该位置信息生成导航基准线进而获取导航路径中基本点。图像在处理的过程中主要操作有图像采集、灰度变换、图像分割、图像去噪、提取候选点、直线拟合、确定已知点^[46]，如图 5-2 所示。

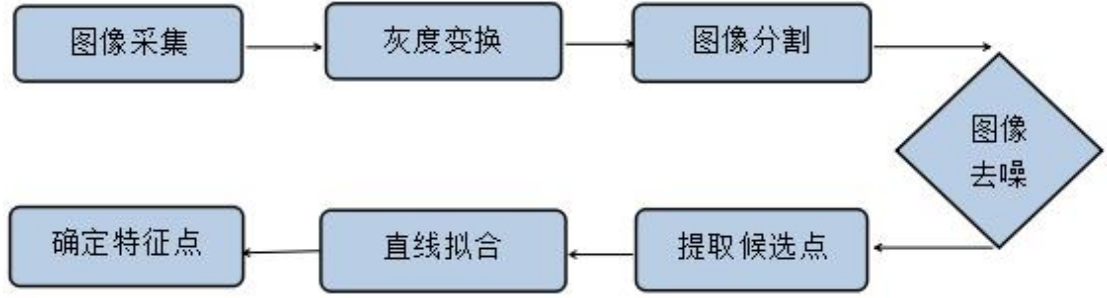


图 5-2 图像处理算法

Fig 5-2 Image processing algorithms

获取农田图像之后，将图像进行灰度变换，接着再将灰度图像二值化，经过以上操作后基本上可以区分作物行及田垄，接下来再采用统计学的方法获取 Hough 变换的候选点。

5.3 多传感器信息融合研究

多传感器融合技术的概念在绪论中已经概述过，这里就不在重复。在越来越多的应用当中，人们发现并从理论上证明了：多传感器采集的信息通过最优理论融合能够获取较单个传感器信息质量更高的状态估计。

5.3.1 数据融合原理

设系统中使用了 N 个传感器测量某一物理参数，传感器 i 测量到的数据是 X_i ，其中 $i=1,2, \dots, N$ 。由于各个传感器的性能各不相同，因此可以认为 X_i 所含噪声按照正态分布 $N(\mu_i, \sigma_i^2)$ ， μ_i 为传感器 i 的数学期望， σ_i 为传感器 i 的数学偏差，这两参数指示该子系统的精度，若 σ_i 越大，则系统精度越低。接着将各传感器获得的测量值作加权平均， ω_i 为加权系数，全部加权系数 ω_i 之和为 1。由多元理论可知，信息融合完成之后得到的融合数据是所有传感器信息的数学期望进行加权平均，此时系统的精度可由式 (5.1) 计算得到：

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N \omega_i^2 \sigma_i^2} \quad (5.1)$$

系统精度函数的条件极值可以通过式(5.2)求得：

$$\omega_i = \left(\sigma_i^2 \sum_{i=1}^N \sigma_i^{-2} \right)^{-1} \quad (5.2)$$

式 (5.2) 代入 (5.1) 式, 可以得到多个传感器数据融合之后所能逼近的最低理论精度值, 该值由 (5.3) 计算得到:

$$\sigma = \left(\sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma_i^{-2}} \right)^{-1} \quad (5.3)$$

若各传感器拥有相同的精度, 式 (5.3) 则可改写为 $\sigma = \sigma_i / \sqrt{N}$, 可看出信息融合完成之后精度提升了 \sqrt{N} 倍。若各传感器精度各不相同, 设最低精度偏差为 $\sigma_2 = \sigma_{\min}$, 最高精度偏差为 $\sigma_1 = \sigma_{\max}$ 则有:

$$\sigma = \left(\sqrt{\sigma_{\max}^{-2} + \sigma_{\min}^{-2} + \sum_{i=3}^N \sigma_i^{-2}} \right)^{-1} \leq \left(\sqrt{\sigma_{\min}^{-2} + \sum_{i=3}^N \sigma_i^{-2}} \right)^{-1} \quad (5.4)$$

式 (5.4) 表明, 采用信息融合方法加工后即便精度很低的传感器也能够提高其精度, 进而可以减少系统总的成本。

5.3.2 信息融合的一般结构

信息融合所要融合的各个传感器的信息在类型或形式上各不相同, 比如一个系统中可能有位移、速度、角速度、角度、方向等等, 最终要求将数据统一转换为一种类型的数据形式。通过一些手段和方法可以实现, 比如单位换算和坐标变换, 转换之后将获得的数据结果按某种算法展开融合, 获得最终的目标状态估计。信息融合的流程如图 5-3 所示。

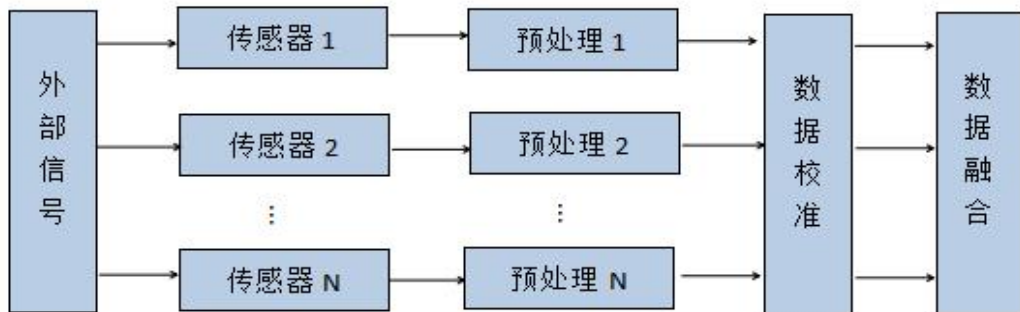


图 5-3 信息融合一般结构

Fig 5-3 General structure of information fusion

5.3.3 数据融合常用算法

信息融合理论解决的问题是：是否对同一目标进行采样和如何完成信息融合。通过信息融合能够让模糊信息清晰化，迄今各国学者研究出许多数据融合的算法，广泛应用的有：可能性理论方法和确定性理论方法、证据论方法、统计决策论方法、模糊推理法、神经网络算法、多贝叶斯估计算法、贝叶斯估计算法、卡尔曼滤波及其改进算法、加权平均算法等等，下面分别概括下这几种数据融合算法。

（1）模糊推理法

若一个系统中使用了多种传感器，由于各传感器性能各不相同，提供的数据会存在一些误差且精度不尽相同，对这些存在误差的数据进行融合的过程实际上是推算出某个尽可能接近实际值的过程。该算法的思想是运用模糊逻辑来对需要的数据进行融合，真实度由一个 0 到 1 之间的数字表征，这相当于隐式的算子前提，之后将信息融合过程中每个传感器的不确定性明确地体现在推导的过程中。

（2）贝叶斯估计算法

贝叶斯估计法一般应用在静态环境下的多传感器信息融合，通过该法各子传感器信息被描述成概率分布，该算法适用于系统噪声为可加的且具有不确定性的高斯噪声的情况下。该算法的原理为：先将各传感器的误差信息消除，接下来计算系统的贝叶斯估计值，在抛出某个假设后，应用该贝叶斯估计值估计优化融合信息。

（3）卡尔曼滤波算法

卡尔曼滤波一般适用于各传感器底层数据的实时动态融合，其应用原理是通过利用系统模型相应的统计特性进行递推，进而计算出在统计学意义上的最优估计与最优数据融合。如果系统模型具有动力学和线性的特点，并且传感器观测噪声和系统过程噪声均符合高斯白噪声随机分布的特点，这种条件下卡尔曼滤波算法能够实现统计意义下的、唯一的最优数据融合。正是因为卡尔曼滤波的递推原理，使得其在数据融合的实际应用当中无需花费过多的数据运算及占用大量的存储单元。实际应用中多采用改进的该算法如无迹卡尔曼滤波、扩展卡尔曼滤波等等。

(4) 加权平均法

该方法相比其他算法较为简单,是一种直观的多种传感器底层数据融合的算法。该算法具体做法为对各传感器采集上来的数据信息进行加权平均,以加权平均后的数值视为信息融合后的数据。若各传感器的输出是标量,各传感器信息所加的权值全都与输出数据的标准差呈反比时,即为贝叶斯算法。

自组合导航系统诞生以来,学者们一直致力于对综合处理多个导航传感器参数数据的方法进行研究,迄今为止,基于卡尔曼滤波理论的融合算法成为运用在组合导航系统中最成功的算法,也是最广泛的方法。此算法能够对要研究的对象不同时段的状态给出最优估计,实时处理动态环境下的信息。然而卡尔曼适用于线性系统,非线性系统中无法取得理想的效果,所以本文在进行信息融合时运用 UKF 滤波算法,其相关知识理论已经在第四章给出介绍。

5.4 组合导航信息融合模型的建立

5.4.1 数据校准

如图 5-4 所示的坐标系就是基于北斗的组合导航系统坐标系,从图中可以看出组合导航系统的坐标系是大地坐标系和视觉坐标系组合而成,此坐标系要经过两个坐标系进行统一,其过程如下:首先将 BDS 接收模块输出的经纬度信息通过高斯投影法转换方法转换到北-东平面坐标系下,然后将平面坐标系作为标准,对两个坐标系进行统一。把农机车车体前端的中心在地面上的投影点作为视觉坐标系的原点,其中把农机行驶的相反方向作为 X 轴的正方向, Y 轴水平向右且正方向垂直于 X 轴。图 5-4 中的目标点就是机器视觉系统通过 5.2 节中所阐述的方法得到的特征点,图像坐标系和视觉坐标系之间的转换是依据摄像机的内参数和外参数来进行转换的。设目标点在视觉坐标系中的坐标为 (x'_p, y'_p) 。本课题所选用的北斗模块主要是基于低功耗、低价格,所以定位精度达不到在田间精确导航的目的,农机车在田间作业导航 k 时刻的定位数据是由 BDS 实时获得的数据与系统误差之间的差值得出,而系统误差是由 BDS 在 k-1 时刻获得的实时数据与 k-1 时刻路径规划上的点相减得到的。因此,摄像机在大地坐标系中的位置是由 BDS 获得的实时数据减去系统误差,其坐标设为 (x_v, y_v) ,通过农机车的航向

和此坐标就可以对视觉坐标系进行转换，转换到大地坐标系下就可以完成对两个坐标系的统一。从而就可求出目标点在大地坐标系下的坐标 (x_p, y_p) 。

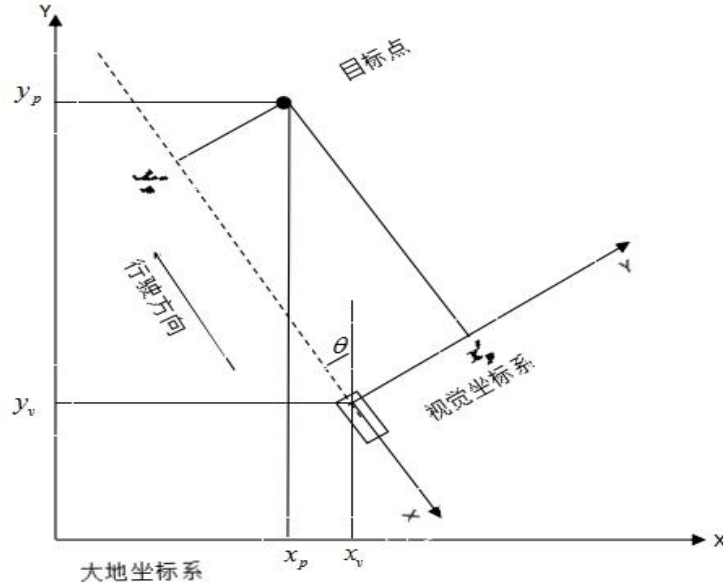


图 5-4 导航系统坐标系图

Fig5-4 Navigation system coordinate system

目标点通过方程组 (5.5) 可以获得其在大地坐标系中的坐标及视觉坐标系下的坐标：

$$\begin{cases} x_p = x_v + x'_p \cos \theta + y'_p \sin \theta \\ y_p = y_v + x'_p \sin \theta + y'_p \cos \theta \end{cases} \quad (5.5)$$

式 (4.5) 中变量 θ 为农业机械设备的行进角度。

5.4.2 组合导航融合模型的建立

组合导航系统为非线性系统，考虑如下非线性模型：

$$\begin{cases} x_k = A_{k-1}x_{k-1} + W_{k-1} \\ z_k = H_k x_k + V_k \end{cases} \quad (5.6)$$

式中， x_k 为系统的状态向量； z_k 为量测向量； H_k 为 x_k 和 z_k 的关系矩阵； W_k 和 V_k 分别是协方差为矩阵 R_k 和 Q_k 的量测噪声和过程噪声，两者为互相独立的零均值白噪声。

结合 UKF 滤波算法与建立的组合导航系统模型，确立第 k 个时刻的状态向

量 x_k 为:

$$x_k = (x_{v,k}, y_{v,k}, u_{v,k}, v_{v,k}, \theta_{v,k}, x_{p,k}, y_{p,k}) \quad (5.7)$$

$$\begin{pmatrix} x_{v,k} \\ y_{v,k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{v',k} \\ y_{v',k} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} m_x \\ m_y \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

式 (5.8) 中 $(x_{v,k}, y_{v,k})$ 是农机车在大地坐标系下的坐标, $(x_{v',k}, y_{v',k})$ 是 BDS 实时导航得到的农机车在大地坐标系中的坐标, (m_x, m_y) 是上一时刻路径规划路线上的点坐标与 BDS 导航设备的定位数据比较得出的 x 、 y 方向的系统误差。

式 (5.7) 中, $(u_{v,k}, v_{v,k})$ 是农机车的速度在 x 、 y 方向的分量, $(x_{p,k}, y_{p,k})$ 是目标点在大地坐标系下的位置坐标, $\theta_{v,k}$ 为农机车的行进角度。

把机器视觉和 BDS 输出的信息作为观测值, 得出第 k 个时刻的量测向量 z_k 为:

$$z_k = (x_{v,k}, y_{v,k}, \theta_{v,k}, v_{v,k}, x_{p,k}, y_{p,k}) \quad (5.9)$$

式中, $(x_{v,k}, y_{v,k})$ 是经过 BDS 实时导航的坐标值和系统误差之间的差值也就是在系统中当作农机车在大地坐标系下的坐标; $\theta_{v,k}$ 、 $v_{v,k}$, 分别为北斗接收模块获得的农机车的航向角度和行驶速度; $(x_{p,k}, y_{p,k})$ 是目标点在视觉坐标系下的坐标。

当农机车辆匀速行驶时, 通过式 (5.10) 确立第 k 时刻到第 $k+1$ 时刻的状态向量与量测向量之间的转移矩阵 H 以及状态转移矩阵 A 。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{u_{v,k}}{\sqrt{u_{v,k}^2 + v_{v,k}^2}} & \frac{v_{v,k}}{\sqrt{u_{v,k}^2 + v_{v,k}^2}} & 0 & 0 & 0 \\ \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 & 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ -\sin \theta & -\cos \theta & 0 & 0 & 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

5.5 仿真实验与分析

为了验证多传感器融合方法对导航定位精度的滤波效果,首先要获取实验所需数据,然后用 MATLAB 对定位数据进行仿真分析。实验数据的获取如下:实验场地选在江苏大学西山操场,道路平坦误差小。在操场上固定宽度为 20 厘米,长度大约 30 米的绿色塑料带,充当预定规划的路径,用以模拟农田中的地况。为了比较融合效果,首先用 RTK GPS 测得预定路径的定位数据,作为与融合数据的参考。将 BDS 天线安装在车体顶部,摄像机固定在电瓶车的前端,与地面保持 1m 高度,与水平线保持约为 30° 的夹角,车载电脑放在电瓶车上模拟喷雾施药机运动。BDS 的输出信息通过 RS-232 接口传送至便携式电脑中,接收的信息减去系统误差之后作为原始测量数据被记录下来。机器视觉的定位信息通过课题组其它成员开发的上位机软件计算得到。

使用单个传感器进行定位实验,计算各传感器的定位偏差。依据计算结果以及多次仿真效果,得出 UKF 滤波器的初始条件为:

$$P = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.5^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8^2 \end{bmatrix}$$

人工驾驶电瓶车以 0.5 m/s 的车速沿模拟的作物行行驶，采集定位数据。总共采集 3 组数据，从中任意选取一组分析，如图 5-5 所示为定位的效果。

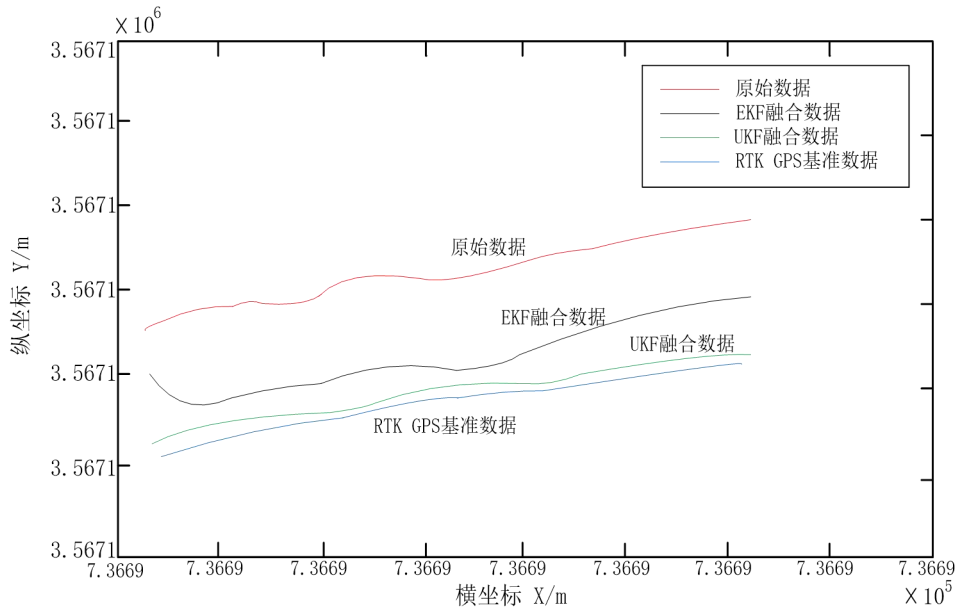


图 5-5 仿真效果图

Fig 5-5 The simulation rendering

图 5-5 中红色线为 BDS 定位数据和系统误差的差值，即原始数据；蓝色线为 RTK GPS 定位数据，即参考数据；黑色线为 EKF 滤波融合后的定位数据；绿色线为 UKF 滤波融合后的定位数据。由图可知，采用 EKF 算法融合后，在开始的一段时间内定位数据偏离较大，稳定后便开始逼近基准数据。采用 UKF 算法融合后，定位数据相较于 EKF 算法能够更快的稳定且更逼近基准数据。

表 5-1 给出了 EKF、UKF 滤波前后定位数据的标准偏差，表中能够直观地显示本文研究的数据融合方法在多传感器信息融合定位系统上的定位效果。

表 5-1 定位数据标准偏差

Table5-1 Standard deviation of location data

	原始定位数据	EKF 滤波数据	UKF 滤波数据	基准定位数据
X 方向标准偏差	2.5562	2.4523	2.4287	2.4033
Y 方向标准偏差	0.130225	0.107855	0.083342	0.069987

表 5-1 中可看出，融合后的标准偏差较融合之前均有所减小，且 UKF 滤波算法定位数据的标准偏差比 EKF 有所减小。使用 EKF 滤波方法和 UKF 滤波方法融合 BDS 和机器视觉信息的方法进行导航，定位精度与单独使用 BDS 导航相比有较大的提高，且 UKF 滤波算法比 EKF 滤波算法的滤波效果更好，基本接近基准定位数据，稳定性较单独使用机器视觉导航也有所增加，总之，其性能较单独使用某一种传感器进行导航，具有更好的精度效果。

5.6 本章小结

本章主要介绍了 BDS 和机器视觉导航各自的优缺点、二者组合的必要性以及组合导航的工作原理，简要概述了机器视觉导航定位方法、数据融合原理、信息融合的一般结构以及数据融合常用算法。根据组合导航系统的特点建立了组合导航信息融合模型，进行试验采集相关数据，采用 EKF 和 UKF 算法对定位数据进行融合，用 MATLAB 进行了仿真分析。

第六章 田间导航系统软件设计及试验

6.1 系统软件设计

6.1.1 农机车载导航系统的软件平台

农机车载导航系统的核心部分为车载电脑，其由嵌入式 EPCS-8980 型 ARM 工控机与显示屏等组成，ARM 工控机板预装有正版的 Windows CE 5.0 操作系统，在该操作系统平台中开发和调试了信息处理系统的嵌入式 GIS 软件及串口通讯程序。计算机安装 EVC 软件、EPCS-8980 软件开发包(Software Development Kit, 简称 SDK)、eSuperMap 二次开发包、软件开发包包含硬件模拟器和 API 函数库，其中应用程序在 EVC 环境下进行编译和调试，软件包通常包含开发程序所需要的头文件、静态链接库文件等。EPCS-8980 型 ARM 工控机与 PC 机之间的连接采用 USB 接口，程序在 EVC 环境下编写，并通过 Microsoft ActiveSync4.2 软件进行与计算机的同步连接，通过 USB 数据线从设备端口将 EPCS-8980 型 ARM 工控机与个人计算机连接，方便文件传输和应用程序开发与调试。

6.1.2 系统软件功能设计

导航系统软件设计是系统的核心部分，农机车载组合导航系统的基本工作过程是：BDS 接收机通过接收卫星每秒钟发来的有关卫星自身坐标的电文数据来得到农业车辆的位置、移动速度和运动方向等信息；同时，机器视觉也将农业车辆的导航信息通过串口传到 EPCS-8980 型工控机。

EPCS-8980 型工控机通过信息融合后把农业车辆定位在农田路径规划图上，并通过液晶显示屏显示出来。使用 eSuperMap 控件，可以读取农田路径规划图的信息，并显示在导航软件界面中。使用 eSuperMap 的类库提供的函数，可以将 BDS 接收机接收到的经度和纬度的信号转换成相应平面坐标。获取平面坐标之后便能在农田路径规划图中显示出当前作业农机的位置。

农机车载组合导航系统按功能可分为定位功能和 GIS 功能。其中，车辆组合定位主要包括 BDS 和视觉信息数据的接收及预处理、不同坐标系的转换、定位数据的融合等模块；GIS 功能信息部分主要包括农田路径规划图的生成、显示、

车辆运行状态信息的显示等模块，系统的主要功能模块包括 BDS 模块、定位解算模块、路径规划模块、图像采集及处理模块、导航模块、人机界面模块等。功能结构图如图 6-1 所示。

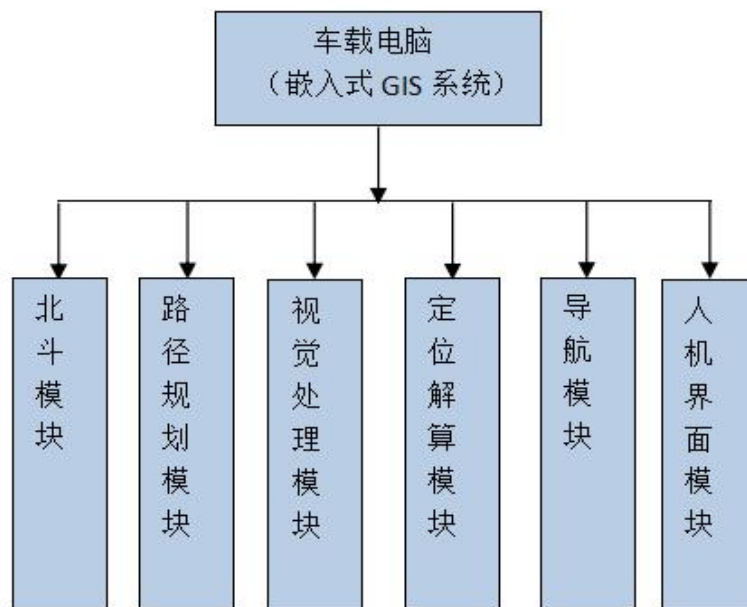


图 6-1 农业车载导航软件功能结构

Fig 6-1 Agricultural vehicle navigation software function structure

BDS 模块：主要实现 EPCS-8980 型车载计算机与 UM220 板的数据传输，数据处理。对 BDS 设备进行管理，包括打开 BDS、关闭 BDS、获取 BDS 的坐标数据以及图上显示 BDS 的定位点。

路径规划模块：根据路径规划算法进行路径分析，给出最短路径，把分析结果直接显示在路径规划图上，供用户参考。

视觉处理模块：车辆在自动导航过程中主要的信息是来自于 CCD 摄像机采集到的农田田垄图像，通过计算机发出指令，采集图像，然后计算机对采集的图像进行各种处理。

定位解算模块：定位解算模块为 UKF 模块。建立两种滤波模型起到两种功能。其一是对北斗接收板输出的位置数据进行处理，不断预测和修正新的观测值，可随时算出新的滤波值，特别适宜实时数据处理，将处理完的数据保存在数据库中。其二是将滤波过的北斗数据和视觉数据进行融合处理并保存。

导航模块：是该系统的核心功能，用户通过路径规划功能选择出最佳路径并

按此路径行走时，系统在图上实时显示出车辆位置信息，并结合规划路径，实时给出所在位置的信息。

人机界面模块：主要完成各功能模块的设置，农田路径规划地图的显示，车辆动态运动时的轨迹显示图。

6.2 北斗模块功能设计

农田车载导航软件在工作的状态下，需要 BDS 实时数据的支持，农业车载导航系统采用 eSuperMap 6.0 作为嵌入式 GIS 系统，在 EVC 中利用 eSupermap 的类库开发之后再加载至 EPCS-8980 工控板中。由于北斗接收机的数据输出方式是通过 RS232 串口输出，而且 EPCS-8980 型 ARM 工控机带有 RS232 串口，所以在数据通讯方面通过 RS232 接口互连。eSupermap 中含有 GPS 功能类，北斗与 GPS 均遵照 NMEA-0183 协议，两者具有相同的数据格式，因此 eSuperMap 一样可以接收北斗定位信息，可对定位数据进行解析和处理。

北斗定位接收设备符合 NEMA-0183 串口通讯协议，在这一点上我国在设计北斗二号系统时特地保持与 GPS 系统的兼容性^[63]。在本系统中的应用中，这种兼容性为北斗接收设备提供了极大的便利。NEMA-0183 协议共有 \$GPZDA、\$GPGGA、\$GPGLL、\$GPVTG、\$GPGSA、\$GPGSV、\$GPRMC 七种语句格式，GPS 信息以字符 GP 作为标识符，北斗信息则是以字符 BD 作为标识符，在全部的导航电文中，我们只需要 \$BDRMC 运输定位数据格式，其他的部分可以忽略掉。RMC 信息齐全但信息数据量很小，其数据格式如下：

\$BDRMC,<1>,<2>,<3>,<4>,<5>,<6>,<7>,<8>,<9>,<10>,<11>,<12>*,<13><CR><LF>

<1> UTC (Coordinated Universal Time)时间，hhmmss (时分秒) 格式；

<2> 定位状态，A = 有效定位，V = 无效定位；

<3> Latitude，纬度 ddmm.mmmm (度分) 格式 (前导位数不足则 补0)；

<4> 纬度半球 N (北半球) 或 S (南半球) ；

<5> Longitude，经度 dddmm.mmmm (度分) 格式 (前导位数不足则补0)；

- <6> 经度半球 E (东经) 或 W (西经);
- <7> 地面速率 (000.0 ~ 999.9 节, Knot, 前导位数不足则补 0);
- <8> 地面航向 (000.0 ~ 359.9, 以真北为参考基准, 前导位数不足则补 0);
- <9> UTC 日期, ddmmyy (日月年) 格式;
- <10> Magnetic Variation, 磁偏角 (000.0 ~ 180.0 度, 前导位数不足则补 0);
- <11> Declination, 磁偏角方向, E (东) 或 W (西);
- <12> Mode Indicator, 模式指示 (仅 NMEA01833.00 版本输出, A = 自主定位), D = 差分, E = 估算, N = 数据无效);
- <13> 校验和。

具体实现过程的程序流程图如图 6-2 示:

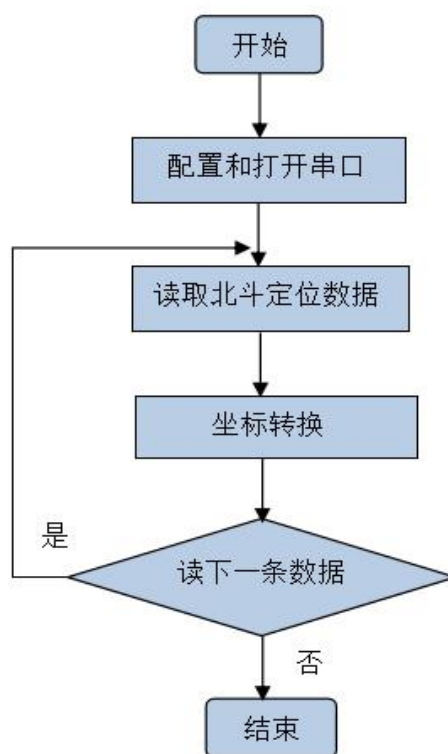


图 6-2 北斗数据接收程序流程图

Fig6-2 Beidou data receiving program flow chart

获取数据前需要对端口进行初始化工作, 用对应的方法 `bool Open ()`, 设定

选定的端口号、波特率等参数以便打开北斗接收设备。采用方法 `bool GetData ()` 来获取定位数据，从北斗接收设备中读取经纬度、速度、航等信息，其由一个字符串来表示。

eSuperMap 中的地图投影功能可以进行经纬度坐标与投影坐标之间的转换，用投影信息类 `CSePJSysInfo` 对北斗经纬度进行高斯-克吕格投影，得到平面坐标数据。

如果数据读取完毕，要关闭端口，用方法 `bool Close ()`，断开北斗接收机。

北斗定位点可以用 `bool ShowGPSonMap` 以及 `DrawGPSonMap` 方法显示。

在农田路径规划图形成的过程中，如果农田轮廓图形成过程中找不到与大地坐标轴平行或正交的边，就要对其进行坐标转换。如图 6-3 所示，以原点 O 为旋转中心，旋转角度为 θ ，旋转坐标轴 Oxy 得到新的坐标系 $Ox'y'$ ，新坐标系 $Ox'y'$ 的横轴与农田边界的作业行平行。设农田中任一点 P 在 Oxy 坐标系下的坐标为 (x, y) ，在新坐标系下坐标为 (x', y') ，则在这两个坐标系下进行相互转换的公式有如下 3 个：

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

$$\theta = \arctan \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (6.3)$$

式中 x, y 是定位接收设备接收的经纬度坐标， x', y' 是坐标系 $Ox'y'$ 下的经纬度坐标， $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 是点 A、点 B 在 Oxy 坐标系下的经纬度坐标。

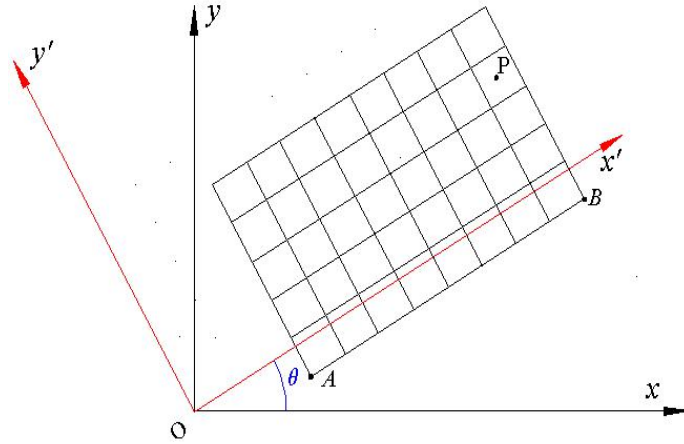


图 6-3 坐标转换示意图

Fig 6-3 Coordinate transformation diagram

6.3 定位解算模块功能设计

本小节主要是完成卡尔曼滤波在 BDS 定位中的实现，以及卡尔曼滤波在 BDS 和机器视觉信息融合中的实现，数据处理及融合程序在 EVC 环境下撰写，编写完后通过 Microsoft ActiveSync4.2 烧写入 EPCS-8980 工控板中完成编译及调试。

定位解算模块主要包括 BDS 定解结算模块和数据融合解算模块。这两个模块的共同点都是采用 UKF 滤波算法，不同点是两种系统模型不同，所以根据第三章和第四章介绍的北斗导航系统模型和多传感器信息融合模型，分别实现两个模块的滤波模型的编写。

UKF 通过选取确定的样本点来实现状态变量沿时间的传播。UKF 主要是 UT 变换，UT 变换的主要代码可参见下面的函数：

```
double UKFX[n][2n+1]; //n为状态变量个数
double UKFsquire_P[n][n], xxUKFsquire_P[n][n];
//UT变换, 采样点
f.matrix_setzero(*UKFsquire_P, n, n);
f.matrix_copy(*xxUKFsquire_P, *UKFP, n, n); //xxUKFsquire_P=UKFP
f.matrix_chol(xxUKFsquire_P, n, UKFsquire_P); //xxUKFsquire_P=chol(xxUKFP)'
F.matrix_muls(*xxUKFsquire_P, *UKFsquire_P, sqrt(n+lamda), n, n);
for(int j=0; j<n; j++)
    UKFX[j][0]=UKFX_kk[j];
for(int j=0; j<n; j++)
    UKFX[k][j+1]=UKFX_kk[k]+UKFsquire_P[k][j];
for(int j=0; j<n; j++)
    for(int k=0; k<n; k++)
        UKFX[k][j+1+n]=UKFX_kk[k]-UKFsquire_P[k][j];
```

定位解算模块中 UKF 滤波类的实现如下：

首先要在新建的工程中创建类，具体操作为：选择insert 菜单 -> new class 创建一个新类，对话框中选择 Class type 组合框，将新类定义为 generic class 并取名 CUKF。选取能够实现基本滤波及参数初始化的特定函数并添加进去，此处特别值得提醒的是初始值的选择要合理。

6.4 导航模块功能设计

系统的导航功能的实现主要是通过使用 eSuperMap 中的自导航功能类 CSePathNavigator 实现导航，在完成路径分析之后（即给出一条指定的路径），判断导航点与路径以及路径上节点之间的关系，依据当前位置给出合适的提示。可以自动纠正误差，使运动物体不偏离规划路径。

6.5 车载导航系统试验平台的搭建

将设计的基于北斗的农业车载导航系统，安装于“上海-50”型拖拉机上构成整套试验机组，将车载电脑安装于拖拉机驾驶舱内，BDS 天线安装在车体顶部，摄像机固定在拖拉机的前端，与地面保持 1m 高度，与水平线保持约为 30° 的夹角，如图 6-4 所示。使用农业车载导航系统测试其系统性能，通过得出的测试结果及数据对该系统进行性能分析。



图 6-4 农业车载导航系统试验机组

Fig6-4 Agricultural vehicle navigation system test unit

6.6 试验方法与结果分析

试验选在江苏大学西山操场内进行，试验场地选取的面积是 $60 \times 90 m^2$ 的矩形地块，作业幅宽为 6m，即第二章中路径规划的试验场地，本次试验直接调用已经生成的农田路径规划图。驾驶喷雾施药机组速度控制在 0.5m/s，分别进行两组不同试验，第一组试验是获得只有 BDS 导航的结果，第二组试验是获得组合导航的定位结果。

第一组试验是将组合导航系统软件打开加载已经规划好的路径图，打开 BDS 接收设备，以及定位解算模块。当接收界面显示有接收到数据后，找到机耕道基准点，输入起始点和终点，打开导航模块，喷雾机开始导航。第二组试验打开视觉导航系统，其它和第一组试验条件一样。其定位效果分别如图 6-5 和 6-6 所示。

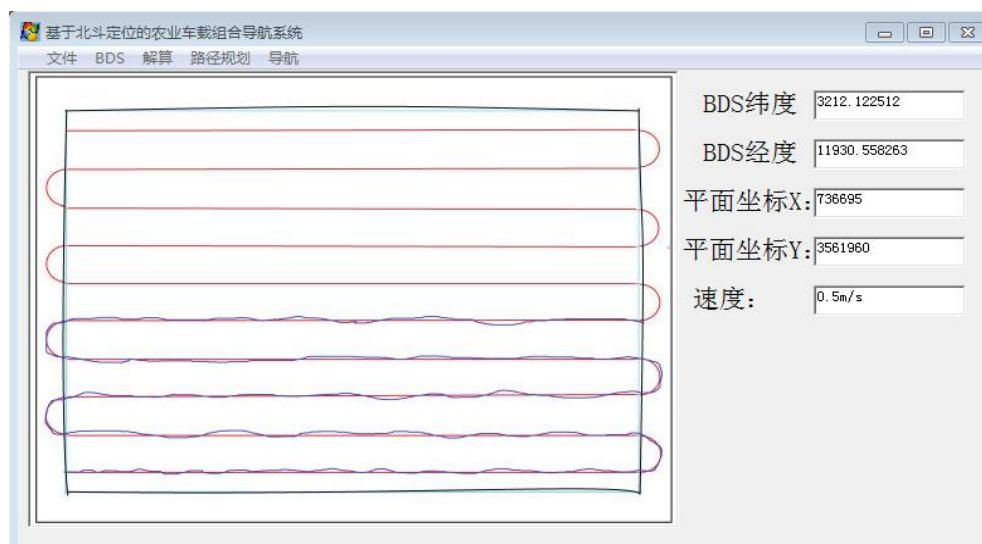


图 6-5 BDS 定位测试图

Fig6-5 BDS test pattern



图 6-6 组合导航测试图

Fig 6-6 Integrated navigation test pattern

通过图 6-5 可以看出只单独使用 BDS 来进行机组的定位总体上可以按照预先规定的路径进行行走，但相比较于图 6-6 可以明显的看出将两系统进行数据融合后定位精度提高了许多，定位曲线更加光滑。

为了更清楚地显示定位效果，图 6-7 所示，列出了两组不同导航方式和规划路径在 X 方向和 Y 方向上的偏差。

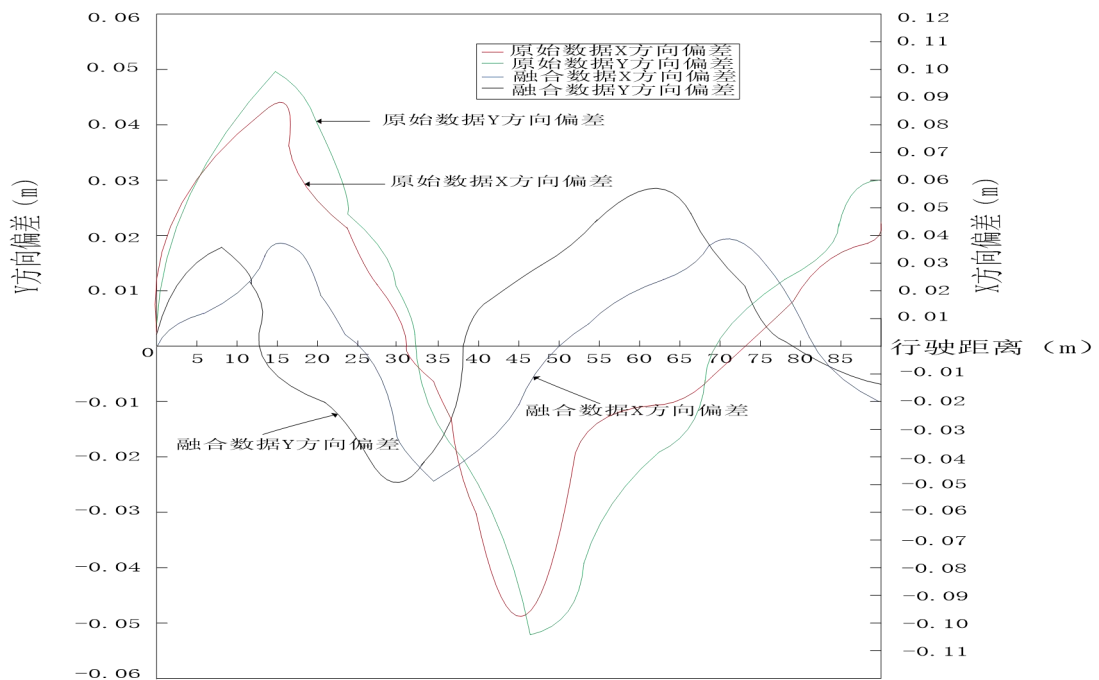


图 6-7 导航偏差图

Fig 6-7 Navigation deviation map

由图 6-7 中看出单独使用 BDS 导航时 X 方向的偏差达到了 10cm 左右, Y 方向偏差 5cm 左右; 组合导航后 X 方向定位最大偏差在 4cm 左右, Y 方向偏差 2.5cm 左右; 总体定位精度提高了许多。通过系统总体试验测试结果分析来看, 系统能够实现较高的精度, 较好的满足田间作业导航系统的要求。

6.7 本章小结

本章介绍了车载组合导航系统的软件开发流程。对该系统的软件开发平台和实现功能模块进行了讲述。选取 Windows CE 作为操作系统, EVC 为开发环境, 加之 eSuperMap 相关类函数, 设计了组合导航系统软件。文章的最后进行了试验以及结果分析, 探讨了组合导航系统的性能, 试验结果显示系统性能良好, 能够很好地实现高精度定位, 满足作业要求。

第七章 结论与展望

7.1 结论

随着农业可持续发展的战略目标的不断接近以及现代农业机械装备的现代化与自动化的快速发展,精细农业机械自动导航技术由于其实时性、可靠性和高效性的优势,成为农机车载自动导航技术研究领域的新方向,已成为国内外广泛关注的焦点。本文采用具有我国自主知识产权的北斗定位技术,设计了一套基于北斗的农机车载组合导航系统,根据实际要求,研究和学习了该系统的关键技术,将结果应用到车载组合导航系统软件的程序设计与功能实现中,完成了软件的功能,并结合外围硬件设备构成了可以有效工作的农业车载组合式导航系统,为农业机械自动化的建设提供了良好的解决方案。通过测试试验对系统性能进行了测试分析,验证了该系统的性能及可行性,结果表明基于北斗的农机车载组合导航系统能够较好的适应农业机械作业导航精度需求。

本文主要完成的工作如下:

(1) 本文设计的基于北斗的农机车载组合导航系统由路径规划模块、北斗接收模块、定位解算模块、导航模块等几部分构成。路径规划作为导航系统的重要组成部分,研究了路径规划算法,使用 ECV 编程工具和 eSuperMap 嵌入式地理信息系统控件,设计开发了相关路径规划软件,并选取了规则四边形地块模拟农田地块进行了作业路径规划测试,生成了农田路径规划图。

(2) 根据北斗系统的特点以及课题的要求选取北斗定位接收设备,获取北斗定位信息;研究了合适的滤波算法,将 EKF 和 UKF 算法应用于 BDS 场景中完成了仿真验证,仿真实验结果证明 UKF 方法可以很好地提高北斗定位数据的精度,滤波效果好于 EKF,能够达到实际工程的应用。

(3) 根据机器视觉和北斗组合导航原理,建立多传感器融合模型,分别采用 EKF 滤波方法和 UKF 滤波方法对 BDS 定位数据和机器视觉的信息进行了融合比较,完成了实验仿真。试验结果证明组合导航定位精度好于单一导航系统,且 UKF 融合算法好于 EKF 算法。

(4) 根据系统对设计功能的要求,对系统所需硬件进行了设计及选型,该系统设计 EPCS-8980 型工控机及配套装置组成车载电脑,UM220 模块及天线作为

北斗定位接收装置, 及该系统所需其他硬件设备。通过设计的系统硬件以及对该系统功能的分析, 设计适合该系统的软件开发平台, 开发系统功能所需软件。在 Windows CE 开发环境下, 组合导航系统选择了 eSuperMap 作为嵌入式 GIS 软件, 并通过 EVC 进行二次开发, 其他应用程序也在 EVC 编程环境下编译及调试。将基于北斗的农机车载组合导航系统安装在拖拉机上形成完整的试验机组, 设计合适的试验方法进行了试验, 测试了系统的性能, 实验结果表明在低成本的前提下系统能够实现较高的精度和准确定位, 满足田间作业导航要求, 在精细农业领域可以加以应用推广。

7.2 展望

基于北斗的农机车载组合导航系统的设计可以说为我国自主研发的北斗卫星定位技术在农业领域的实践应用奠定了重要的基础, 为进一步满足未来农业机械自动化的需要和适应更多复杂的工作环境, 基于北斗的农机车载组合导航系统需要不断用新方法、新技术来完善。但是由于一些条件限制以及时间有限的因素, 本课题的关键技术及方法还需进一步研究和完善, 根据系统不足和今后自动导航技术系统发展趋势, 提出了如下几点建议:

(1) 该系统设计的路径规划软件, 首先 eSuperMap 开发软件的过程中只使用了极少的功能, 这对软件本身来说是一种浪费。其次软件中农田环境信息比较匮乏, 应多一点开发各种农田信息电子地图。且路径规划算法只适用于规则的农田地块, 后续应该改进路径规划算法以实现农用自动化车辆在更加复杂的环境下耕作。

(2) 北斗导航系统以及组合导航系统进行系统建模时比较单一, 进一步可选用多种模型进行仿真研究。尽管总体来说 UKF 在效果上要优于 EKF, 然而前者的条件是系统噪声为高斯白噪声, 实际的应用系统并不能始终满足这一要求, 因而 UKF 仍有较大的改进空间, 以便能够获取更加精确的滤波效果。

(3) 本文对路径规划图的生成、组合导航系统的功能测试进行了校内试验场所上的初步试验测试, 并没有在实际农田多环境因素下进行试验, 对该系统的稳定性和可靠性存在一定的局限性。后续应该在实际农田下对系统进行综合性的测试试验, 优化工作参数, 提高系统的综合工作性能。

(4) 机组在田间作业时，导航功能并不能很好地满足车辆路径跟踪控制的要求，为进一步提高车辆自动驾驶系统的路径跟踪精度，下一步可以研究设计导航控制器，实现自动控制导航的高精度准确定位。

参考文献

- [1]田志会,杨志新.城郊区农业环境问题的成因与对策研究[J].生态经济, 2005, (1): 80-82.
- [2]谢军.北斗导航卫星的技术发展及展望[J].中国报道,2013.
- [3]徐晓波.GPS/BD双模接收机捕获跟踪算法研究及实现[D].西安:西安科技大学, 2013.
- [4]宋怀波,何东健,辛湘俊.基于机器视觉的非结构化道路检测与障碍物识别方法[J]. 农业工程学报, 2011.
- [5]李建平,林妙玲.自动导航技术在农业工程中的应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2006,22(9):232-236.
- [6]苗玉彬,王明军.农业车辆导航系统中路径规划策略的研究进展[J].农机化研究,2011,33(5):12 -15.
- [7]吴延霞,赵博,毛恩荣. 农业车辆自动导航系统综述[J]. 农机化研究, 2009.3.
- [8]Benson E R, Reid J F, Zhang Q. Machine vision-based guidance system for an agricultural small-grain harvester[J].Transactions of the ASAE,2003,46(4):1255-1264.
- [9]Reid J F,Zhang Q,Noguchi N,et al.Agricultural automatic guidance research in North America[J].Computers and Electronics in Agriculture,2000,25:155-167.
- [10]Toru T. Research in autonomous agriculture vehicles in Japan. Computers and Electronics in Agriculture , 2000, 25:133-153.
- [11]Keicher R, Seufert H. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe[J].Computers and Electronics in Agriculture, 2000,25:169-194.
- [12]Wilson JN. Guidance of agriculture vehicles-a historical perspective[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000,25:3-9.
- [13]Ehsani M R, Upadhyaya S K, Mattson M L. Seed location mapping using RTK GPS[J]. Transactions of the ASAE, 2004,47(3):909-914.
- [14]Ollis Mark, Stentz Anthony.Vision-Based perception for an automated harvester Robots and Systems[C]. Grenoble, France,1997:1838-1844.
- [15]Brook D W I. Operating experience with wide-wire leader cable tractors[A]. American Society of Agricultural Engineers[C]. St. Joseph,MI.1972,ASAE Paper:72-119.
- [16] 杨为民,李天石,贾鸿社.农业机械机器视觉导航研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 160- 165.
- [17]Reid J F, Searcy S W. DETECTING CROP ROWS USING THE HOUGH TRANSFORM [C] //Paper - American Society of Agricultural Engineers, San Luis Obispo, CA, USA,1986.

- [18] Marchant J A. Tracking of row structure in three crops using image analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture,1996, 15(2): 161- 179.
- [19] Ryo T, Noboru N, Akira M. Automatic guidance with a laser scanner for a robot tractor in an orchard[C] //Proceedings of the International Conference on Automation Technology for Off- road Equipment, ATOE 2004, Kyoto, Japan, 2004.
- [20] Astrand B, Baerveldt A- J. A vision based row - following system for agricultural field machinery [J]. Mechatronics,2005, 15(2): 251- 269.
- [21] Rovira- M as F, Zhang Q, Reid J F, et al Hough- transform - based vision algorithm for crop row detection of an automated agricultural vehicle [J]. Journal of Automobile Engineering, 2005, 219(8) : 999- 1010.
- [22]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.
- [23] Kise M, Zhang Q, Rovira M as F. A stereo vision - based crop row detection method for tractor- automated guidance[J]. Bio systems Engineering, 2005, 90(4): 357- 367.
- [24]庄卫东,汪春.农机直线行走作业DGPS 导航算法研究[J].黑龙江八一农垦大学学报,2006,18(6):50-53.
- [25] Torisu R, Tanaka K, Imae J, et al. Optimal path o f headland for tractors by optimal control theory(Part 1) [J]. J.Jpn. Soc. Agric. Mach. , 1997, 59(4): 3- 10.
- [26] Kise M, Noguchi N, Ishii K, et al. Field Mobile Robot navigated by RTK - GPS and FOG (Part 3): enhancement of turning accuracy by creating path app lied with motion constrains[J] . J. Jpn. Soc. Agric. Mach. , 2002, 64(2) :102- 110.
- [27] Oksanen T. Path Planning Algorithms for Agricultural Field Machines[D]. Helsinki:Helsinki University of Technology,2007.
- [28] Zhu Z- X, Chen J, Yoshida T, et al. Path tracking control of autonomous agricultural mobile robots[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2007, 8(10): 1596- 1603.
- [29]陈济勤.农业机器运用管理学[M].北京: 中国农业出版社,1999.
- [30]Zhao Chunjiang, Meng Zhijun, Wang Xiu. Development of an object-oriented program for variable rate application performance testing[C] // 2004 CIGR International Conference, Beijing, China, 2004.
- [31]王立灿.北斗卫星导航系统的现状及其发展趋势研究[J]. 城市建设理论研究,2014,8:2095-2104.
- [32]张荣群,张小栓,高万林等.北斗导航系统在农业领域的应用展望[J]. 测绘通报,2012.
- [33]张谷强,田晓峰,李彬彬.北斗导航技术在工程机械车辆领域应用前景及展望[J].

信息通信,2014.

- [34]Kalman RE. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems [J].Trans ASME, Journal of Basic Engineering, 1960,82(1): 35-45.
- [35]Gordon N,Salmond D. Novel Approach to Nonlinear and Non-Gaussian Bayesian State Estimation[J], Proceedings of Institute Electric Engineering,1993,140 (2): 107-113.
- [36]李忠良.基于神经网络的卡尔曼滤波算法研究[D]. 株洲:湖南工业大学,2011.
- [37] Mehra R. On the identification of variances and adaptive Kalman filtering[J]. Automatic Control, IEEE Transactions on, 1970, 15(2): 175-184.
- [38]Julier.SJ,Uhlman.J.K. Unscented filtering and nonlinear estimation. Proc of IEEE Aerospace and electronic systems, 2004,92(3): 401-422.
- [39]陈玉峰,罗继勋,祝晓辉,徐剑.一种基于机载无源北斗系统的改进卡尔曼滤波算法[J].空军工程大学学报, 2008.6.
- [40]唐浩,于永,王华.提高北斗用户接收机授时精度的自适应Kalman 滤波算法[J].军事通信术,2010.6.
- [41] Lei F. Tian , David C. Slaughter Environmentally adaptive segmentation algorithm for outdoor image segmentation[J].Computers and Electronics in Agriculture,1998,(21):153-168.
- [42]沈明霞,姬长英. 农业机器人视觉导航技术发展展望[J]. 农业机械学报.2005,32(1):109-111.
- [43]赵瑞,顾启泰.滤波理论的最新进展及其在导航系统中的应用[J].清华大学学报(自然科学版),2000,40(5): 24-27.
- [44]L Feng , Y He . Study on dynamic model of tractor system for automated navigation applications [J] . Journal of Zhejiang University:Science, 2005, 6A(4) : 270-275.
- [45]陈艳,张漫,刘兆祥. 基于Kalman 滤波器的机器视觉自动导航定位算法研究 [J].农业工程学报,2011.
- [46]陈艳,张漫,马文强. 基于GPS 和机器视觉的组合导航定位方法[J]. 农业工程学报,2011.3.
- [47]费葵栋.车载BD / DR / MM组合导航系统研究[D].镇江:江苏大学,2013.
- [48]陈梦溪.基于北斗定位的田间变量处方喷药控制系统的研制[D].镇江:江苏大学,2015.
- [47]孟志军,刘卉,王华田.作业机械路径优化方法[J].农业机械学报,2012(6):1000-1298.
- [49] Timo Oksanen, Arto Visala. Coverage path planning algorithms for agricultural field machines[J]. Journal of Field Robotics, 2009, 26(8) : 651- 668.
- [50]Oksanen T, Kosonen S, Visala A. Path planning algorithm for field traffic[C]

- // 2005 ASABE Annual Meeting, Paper Number 053087, 2005.
- [51]李进,陈无畏,李碧春等.自动导引车视觉导航的路径识别和跟踪控制[J].农业机械学报,2008,39(2):20 -24.
- [52] 蔡晋辉,才辉,张光新等.复杂环境下自动导引车路径识别算法[J].农业机械学报,2011,42(10):20 -24,89.
- [53]王鹏,王熙. 嵌入式农机GPS导航及变量施肥控制技术的研究[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2014.
- [54]白巧霞,李天文. 基于eSuperMap的车辆导航系统的设计与实现 [D].西安:西北大学,2007.
- [55]阮兴龙,范东明.高精度高斯投影正反算公式及其应用[J].城市建设理论研究, 2011(26): 2095—2104.
- [56]张峻林.卫星导航增强技术[J]. 导航定位与授时,2015.5:2095-8110.
- [57]王满林.自适应衰减记忆UKF算法在三维水下目标跟踪中的应用[J].四川兵工学报, 2012.
- [58]Simon Haykin.. Kalman Filtering and Neural Networks.. Wiley & Sons, 2001.
- [59]Julier S J,Uhlmann J K et al.A new method for the nonlinear transformation of means and covariance in filters and estimators[J].IEEE Trans.A.C.,2000,45(3): 476—481.
- [60]刘婵媛,陈国光.基于GPS的卡尔曼滤波技术研究[J]. 弹箭与制导学报,2006.4.
- [61]魏二虎,张晓峰,安治国. GPS/北斗组合导航保障系统的设计研究[J].测绘通报,2008.7:0494-0911.
- [62]张广军.机器视觉.北京: 科学出版社,2005.
- [63]陈建成.北斗导航系统在我国社会经济发展中的作用[J].中国电子商务, 2007, (10): 47-48.

致 谢

时光如梭，三年硕士研究生学习生活即将结束，走向人生新的征程之际，向老师、同学、家人和朋友表示最真挚的谢意。

衷心感谢我最敬爱的导师陈志刚教授的关怀和悉心指导，让我顺利完成硕士生阶段课程的学习、课题实验以及硕士学位论文的撰写。在论文的研究、撰写过程中，陈老师展示了其严格的科研态度，给与了极大的指导和教诲。陈老师严谨的治学态度、认真务实的工作作风和谦逊的为人给我留下了深刻的印象。在此表以真挚的谢意。

感谢江苏大学农业工程研究院的魏新华教授和电气信息工程学院白雪副教授，感谢两位老师在理论知识和课题实验方面的帮助，在本文的技术路线以及论文修改给予的指导，在此非常感谢。

感谢评议本轮文和出席论文答辩会的各位专家、教授、老师，在百忙之中给予指导和帮助！

感谢师兄姐弟们在学习生活中给予的帮助，另外还要感谢我家人和朋友，他们一如既往的关心、鼓励和支持着我的学业，使我能够顺利的完成学业。

攻读硕士期间发表的论文

- [1] 陈志刚, 陈艳丽, 魏新华, 白雪. UKF滤波在农业车载北斗导航系统中的应用[J].信息技术, 已录用.