

文章编号: 1671-7449(2024)03-0256-08

基于GNSS的农机自动导航系统设计及路径规划

李秋潼, 刘 宾*

(中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 针对目前农机智能化低、机械作业应用不充分的问题, 设计了一种基于Linux系统, 通过图形化界面进行操作的农机自动导航系统, 该系统使用全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)双定位定向模块解决了以往农机自动导航过程中航向不准、定位不稳的问题。依据山西省主要的环扣线耕作模式, 在路径规划方面进行直线以及自动转弯路径算法设计。转弯路径航线使用四阶贝塞尔曲线进行优化, 降低了农机及挂载机械的运行负荷。系统集成角度采集的转向驱动模块, 安装更便捷、性能更稳定。最后, 以精拖奔野604拖拉机作为实验平台, 进行了拖拉机的直线路径作业跟踪、转弯路径跟踪, 经多次试验结果分析, 得到的试验数据可满足田间实际作业的要求。

关键词: 全球导航卫星系统定位; 数据采集; 农机导航; 路径规划

中图分类号: TP31

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-7449.2024033

引用格式: 李秋潼, 刘宾. 基于GNSS的农机自动导航系统设计及路径规划[J]. 测试技术学报, 2024, 38(3): 256-263.

LI QIUTONG, LIU BIN. Design and path planning of agricultural machinery automatic navigation system based on GNSS[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(3): 256-263.

Design and Path Planning of Agricultural Machinery Automatic Navigation System Based on GNSS

LI QIUTONG, LIU BIN*

(College of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In response to the current problems of low intelligence and insufficient application of agricultural machinery, an automatic navigation system for agricultural machinery is designed based on a Linux system that operates through a graphical interface. The system uses the GNSS dual positioning and orientation module to solve the problems of inaccurate heading and unstable positioning in the past agricultural machinery automatic navigation process. Based on the main loop farming mode in Shanxi Province, design algorithms for straight lines and automatic turning paths in path planning. The turning path route is optimized using a fourth-order Bessel curve, which reduces the operating load of agricultural machinery and mounted machinery. The system integrates a steering drive module for angle acquisition, making installation more convenient and performance more stable. Using the Jingtuo Benye 604 tractor as the experimental platform, the tractor's straight path operation tracking and turning path tracking were carried out. After multiple experimental results analysis, the obtained experimental data can meet the requirements of actual field operations.

收稿日期: 2023-07-31

作者简介: 李秋潼(1997—), 男, 硕士生, 主要从事嵌入式开发、农机的自动导航驾驶研究。E-mail: 84037108@qq.com。

* **通信作者:** 刘 宾(1979—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事嵌入式及动态测试以及光场成像研究。E-mail: 18347142116@163.com。

Key words: global navigation satellite system(GNSS) positioning; data collection; agricultural machinery navigation; path planning

0 引言

作为世界上的农业大国之一,我国的农业一直是国民经济的重要支柱和基础产业,农业是粮食安全的基础,也为工业发展提供了重要的原材料和市场^[1]。然而,现代农业面临着劳动力短缺和劳动力成本上升的挑战^[2],传统的人工操作方式已经无法满足农业生产的需求。农业农机科技的发展对于现代农业的可持续发展和提高农业生产效率具有重要的意义和作用^[3-6]。通过应用先进的农机技术,如精准定位、导航技术和自动驾驶技术,可以实现农机的智能化和自动化,提高生产效率、降低生产成本。

国内外学者针对农机自动导航技术开展了大量的研究工作,多集中在农机位置姿态采集以及路径跟踪控制算法方面。由于各地区根据地势和面积不同采用的耕作方式不同,上述工作的跟踪控制算法多为直线追踪,没有因地制宜提出适合本地的路径规划算法以及转弯路径优化算法。刘慧等^[7]采用顺序接行的方式规划路径在实际大地块多农机工作时不易进行开线协调工作,且通过采集前轮角度经计算后进行方向驱动,在工作时模块易损坏,安装极为不便。魏爽等^[8]基于 C++/MFC 开发了农机辅助驾驶系统,对路径规划展开了研究,但没有给出路径参考点的选择过程,且软件系统可移植性极差。Takai 等^[9]设计了基于 RTK-GPS 融合的履带式农机导航系统,但是并不适用于轮式驱动导航。黄沛琛等^[10]提出了一种基于改进纯追踪模型的控制方法,使用 MATLAB 软件仿真结果表明该算法可实现较高精度转向跟踪,但由于农田环境的多样性,算法的适应性及导航控制精度还有待进一步验证提高。

基于以上问题,本系统采用 C++/QT 进行开发,可跨平台使用,移植成本极低;通过绝对式编码器获得方向盘转角信息与控制终端相配合来进行路径追踪,性能更稳定、安装更方便。系统设计时采用轮式农机模型,对于多数轮式农机皆可移植使用。在路径规划方面依据本地农民耕作模式,提出环扣线式路径规划方法,并通过四阶贝塞尔曲线进行转弯路径优化。

1 系统简介

农机自动导航系统框图如图 1 所示。GNSS 天线和板卡接收经纬度信息,并经过计算后将信息发送给显示终端。显示终端机将经纬度航向角信息转换为以车身为原点的直角坐标系中计算作业规划路径^[11],之后进行车身与规划路径之间的位置对比,将位置偏差发送到控制终端,控制终端在接收到车身到航线的距离信息与角度信息后会采集方向盘转角信息,通过 PID(Proportional Integral Derivative)算法^[12]控制电机带动方向盘转动,之后农机前进修正车身,北斗位置刷新并将新的位置信息发送到显示终端机中。

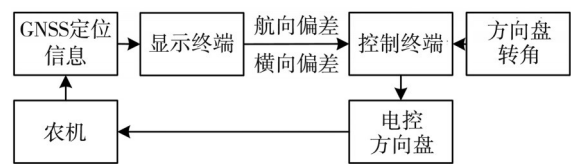


图 1 农机自动导航系统框图

Fig. 1 Block diagram of automatic navigation system for agricultural machinery

2 硬件设计

农机自动导航系统包括固定安装的北斗定位基站和在农机上安装的车载部分^[13]。两部分之间的间距不能超过 50 km,否则定位精度会产生较大偏差^[14]。基站部分由接收北斗定位信息的碟形天线、4G 移动数据天线、北斗数据接收处理机以及连接太阳能供电板的 12 V 电源组成。北斗数据接收处理机通过碟形天线接收北斗卫星定位数据信息,之后通过 4G 天线将接收的数据进行转发。一台北斗基站可以为若干台 GNSS 定位板卡提供定位信息^[15-17]。

车载部分主要包括 GNSS 板卡、定位碟形天线、定向碟形天线、4G 天线、显示屏终端、控制终端、集成了绝对式编码器的电控方向盘。GNSS 定位主天线用于实时接收卫星定位和速度信息^[18],GNSS 定位副天线用于配合主天线实现农机定向,在实际安装过程中主定位天线一般放在农机左侧。

车身通过安装的双 GNSS 定位天线获取位置信息^[19];控制终端接收显示终端发送的的车身和预定航线间的角度和距离信号、绝对式编码器的信号(检

测农机方向盘转动角度值),经计算后发送PWM (Pluse Width Modulation),电控方向盘控制转向,

农机按照规划路径行进。硬件结构如图2所示,安装情况如图3所示。

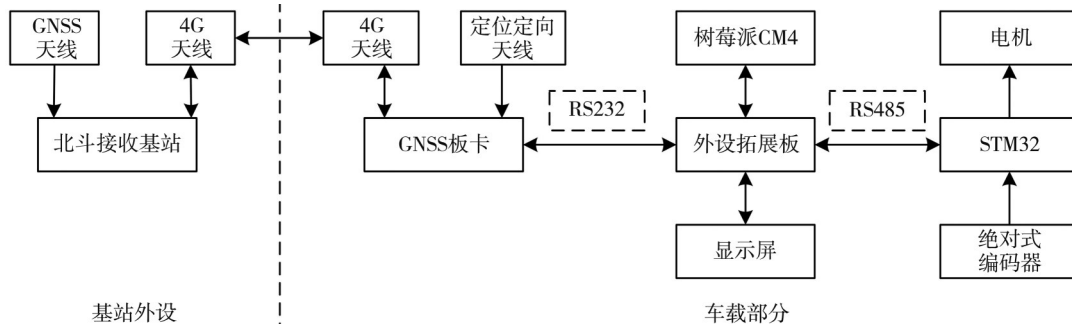


图2 系统硬件结构图

Fig. 2 System hardware block diagram



图3 系统安装示意图

Fig. 3 System installation diagram

2.1 终端mcu选型

农机自动驾驶系统的显示终端选用树莓派CM4核心计算板作为基础平台,并配合量身定制的拓展板,满足了系统对各类接口的需求。整个显示终端的核心构成还包括一块尺寸为7.5英寸的显示屏,为系统提供信息展示和交互界面。本系统控制终端采用STM32F103RCT6作为主控芯片,主要对显示终端发来的车身与预定航线之间的角度与距离信息进行计算,通过应用PID控制方法对方向盘进行控制。

2.2 绝对式编码器

采用BRITER公司的绝对式编码,在编码器轴旋转时,有与位置一一对应的二进制代码输出。与其他自动驾驶系统安装角度传感器在拖拉机前轮转向机构中不同的是,该编码器集成在转向驱动模块中采集传输方向盘转角信号,这种方式避免了拖拉机在工作中角度传感器被植被破坏的情况,也降低了安装成本,稳定性更好。

2.3 转向驱动模块

空心电机选择定制的可编码24V长线驱动

1000脉冲型号。空心电机安装在农机方向盘转向杆上,从下位机接通电源,通过定制的套筒法兰与方向盘转向轴连接。

2.4 GNSS定位模块

GNSS定位模块是一款高可靠、高集成度的北斗高精度定位接收机,产自山东中科泰岳公司,支持BDS/GPS/GLONASS/GALILEO四系统RTK高精度定位^[20]。采用快速载波相位模糊度解算技术和多径抑制算法^[21]能够快速精确地解算出厘米级位置信息,可同时接收多个地面基准站RTCM数据,支持短、中、长基线实时动态(Real-Time Kinematic, RTK)解算。

2.5 各模块供电

本系统可接受12~24V宽幅电压供电,通过设计的电源板将农机电源转换为各分模块需要的电压,流程图如图4所示。控制终端的电机驱动板和空心轴电机使用24V电源适配器进行供电。

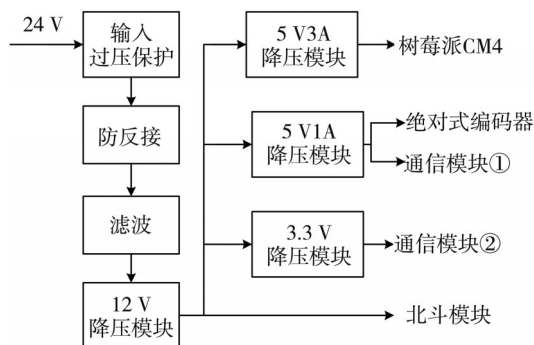


图4 供电板流程图

Fig. 4 Power supply board flowchart

2.6 各模块通信设计

显示终端机中的树莓派与北斗接收板之间采用RS232通信。RS232简单易用,是一种广泛使用的

串行通信协议^[22-24], 传输距离较远, 能保持良好的通信交互, 同时具有高可靠性, 采用差分信号传输可以有效抵抗干扰和噪声^[25]。显示终端与控制终端之间采用 RS485 通信, 具有很高的灵活性和可扩展性。其总线信道是专用的通信信道, 可以在较高的通信速率下仍然保持较好的通信效果。两个通信模块全部集中在供电板上, 同时由供电板进行供电, 通过 6P 接插件分别与北斗信息接收板和电机控制板相连。显示终端与控制终端间的通信和供电集中在一块电路板上, 如图 5 所示。

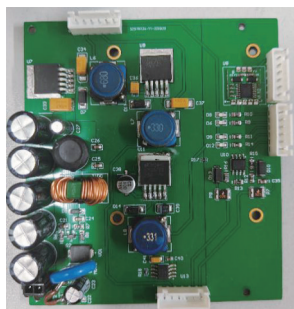


图 5 通信供电电路板

Fig. 5 Communication power supply board

3 软件设计

3.1 操作流程设计

系统中显示终端在 Linux 环境下使用 QT 和 C++ 语言编写, 程序的主要流程如图 6 所示。

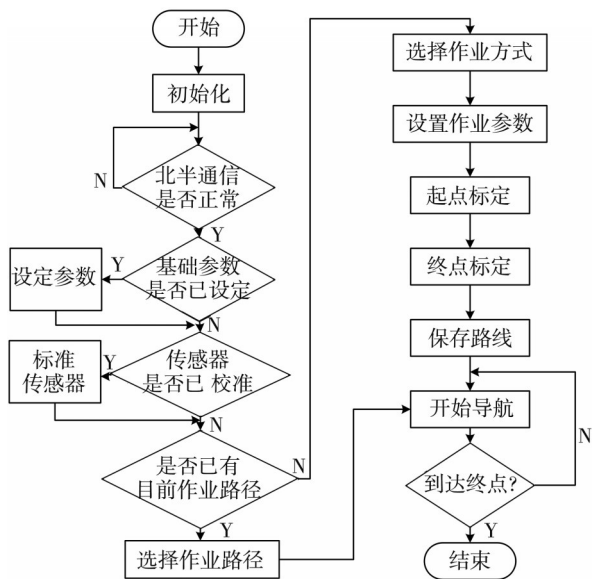


图 6 软件流程图

Fig. 6 Software flowchart

在日常使用过程中, 开机进入界面后操作手首先设置作业参数, 之后操作拖拉机行驶到地块

的边角点, 分别记录 A、B、C、D 四点, 在开始导航之前将拖拉机行至 A 点, 点击开始导航后, 系统开始运行, 进行循线工作, 在工作结束之后可直接进行关机。软件运行操作界面如图 7 所示。



图 7 软件运行界面

Fig. 7 Software running interface

3.2 直线作业路径规划

作业路径规划在辅助驾驶中至关重要, 决定农用机械的工作效果^[22]。操作者在图形化界面设置好农用车的基本参数后, 驾驶其到达田地地理位置边界后进行主要位置经纬度信息记录操作。以山西农民耕作模式之一环扣线作业路径为例, 如图 8 所示, 作业时先在地块四周留出 1~2 倍作业幅宽的空边, 便于农机具作业过程中在地头转向, 待空边区域以内地块全部作业完毕后, 再绕着空边作业 1~2 圈后完成该地块作业。

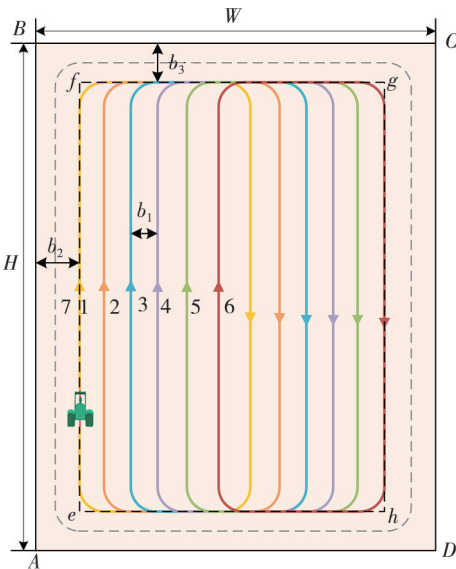


图 8 环扣线作业示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the ring line operation

根据获得的标准规则四边形田地的四点坐标, 计算田地的长和宽。

$$\begin{cases} H = r \frac{\arccos(\sin L_{\text{lat}_A} \sin L_{\text{lat}_B} + \cos L_{\text{lat}_A} \cos L_{\text{lat}_B} \cos(L_{\text{lat}_B} - L_{\text{lat}_A}))}{180} \pi, \\ W = r \frac{\arccos(\sin L_{\text{lat}_A} \sin L_{\text{lat}_D} + \cos L_{\text{lat}_A} \cos L_{\text{lat}_D} \cos(L_{\text{lat}_D} - L_{\text{lat}_A}))}{180} \pi, \end{cases} \quad (1)$$

式中: L_{lat_A} , L_{lat_B} , L_{lat_D} 分别为田地中 A, B, D 的纬度坐标; r 为地球半径。

根据田地的长、宽以及农机所带机具的宽度, 可以得到总工作行数为

$$T = \text{int}\left(\frac{W - 2b_2}{b_1}\right) + 1. \quad (2)$$

若干工作轨迹都由经纬度坐标组成, 其中直线工作第 i 行的点集计算方式为

$$\begin{cases} L_{\text{lon}_i}^{(j)} = \arccos \frac{r \cos L_{\text{lat}_i}^{(j-1)} \cos L_{\text{lon}_i}^{(j-1)} + d \sin \alpha}{\sqrt{(r \cos L_{\text{lat}_i}^{(j-1)} \cos L_{\text{lon}_i}^{(j-1)} + d \sin \alpha)^2 + (r \cos L_{\text{lat}_i}^{(j-1)} \sin L_{\text{lon}_i}^{(j-1)} + d \cos \alpha)^2}}, \\ L_{\text{lat}_i}^{(j)} = \arccos \frac{\sqrt{(r \cos L_{\text{lat}_i}^{(j-1)} \cos L_{\text{lon}_i}^{(j-1)} + d \sin \alpha)^2 + (r \cos L_{\text{lat}_i}^{(j-1)} \sin L_{\text{lon}_i}^{(j-1)} + d \cos \alpha)^2}}{r}, \\ \delta = \arccos \frac{\sin(L_{\text{lat}_B} - L_{\text{lat}_A}) \cos L_{\text{lat}_B}}{\sqrt{1 - (\sin L_{\text{lat}_A} \sin L_{\text{lat}_B} + \cos L_{\text{lat}_A} \cos L_{\text{lat}_B} \cos(L_{\text{lat}_B} - L_{\text{lat}_A}))^2}}, \\ (1 \leq j \leq s, 1 \leq i \leq T), \\ a = \begin{cases} \delta & (i \text{ 为奇数}), \\ \delta + 180^\circ & (i \text{ 为偶数}), \end{cases} \\ s = \frac{H - 2b_3}{d}, \end{cases} \quad (3)$$

式中: $(L_{\text{lon}_i}^{(j)}, L_{\text{lat}_i}^{(j)})$ 为第 i 行中 j 点的经纬度坐标; $(L_{\text{lon}_i}^{(j-1)}, L_{\text{lat}_i}^{(j-1)})$ 为第 i 行中 $j-1$ 点的经纬度坐标; S 为直线中坐标点的数量; α 为农机工作方向与正北方向的顺时针夹角; δ 为导航工作起始时的航向角。

3.3 转弯作业路径规划

转弯路径使用四阶贝塞尔曲线进行优化, 相比于半圆式转弯, 经过四阶贝塞尔曲线优化的路径对于拖拉机来说转弯路径更为平滑, 转弯时对拖拉机以及挂载的机械转弯负荷更低、机械损失更小, 是一种更优的路径规划方式。根据四阶贝塞尔曲线原理, 其曲线包含 5 个控制点, 为 $P(x, y) = \{p_i(x_i, y_i) | i = 0, 1, \dots, 4\}$ 。

曲线表达式为

$$B(t) = \sum_{i=0}^4 \binom{4}{i} p_i (1-t)^{4-i} t^i. \quad (4)$$

设曲线在任一点 $p(x, y)$ 处的曲率为 γ , 则 γ 可表示为

$$\gamma = \frac{x'y'' - x''y'}{(x'^2 + y'^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (5)$$

曲率半径与曲率成反比关系

$$\gamma_{\max} = \frac{1}{r_{\min}}. \quad (6)$$

所以, 曲线在任意一点的曲率 γ 有如下约束,

$$\gamma \leq |\gamma_{\max}|. \quad (7)$$

对贝塞尔曲线的控制点搜索范围进行约束, 如图 9 所示。将起始点 p_0 和终点 p_4 固定, 其余 3 个控制点在图中方框区域搜索, 以防止控制点搜索范围太大, 出现规划路径超过转弯边界的情况, 并且提高搜索速度, 便于应用。为了能够搜索出满足曲率约束的路径, 将搜索矩形的长度设置为 p_0 和 p_4 的距离与两个转弯半径的和, 宽度为转弯边界的宽度。

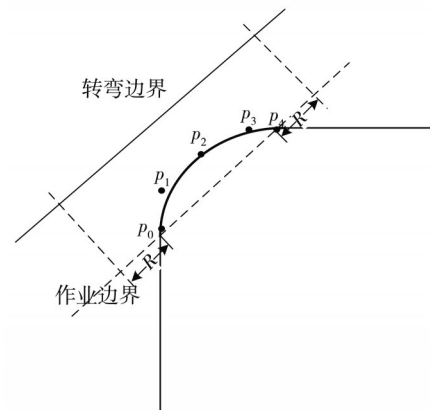


图 9 转弯规划路径示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the turn-by-turn planning path

4 试验测试

为了验证该系统的实际性能, 于 2023 年 3 月

15 日在山西省小店区南马村将该系统装载在精拖奔野 604 拖拉机上进行试验。试验前确保拖拉机已经与北斗基站连接,并且根据拖拉机的机身尺寸以及定位定向天线的安装方式设定好系统的基础参数。

在田地选择试验地块,该直线距离为 200 m。在准备工作完成后点击导航开始,以 1.0 m/s 速度进行自动驾驶。在直线试验线路中每隔 2 m 使用红色小锥桶设置一个监测点,将行驶轮胎印与预定航线进行对比,如图 10 随机选入单条航线的横向偏差为 3.7 cm,总计试验 20 条线,表 1 综合计算得到的平均横向偏差为 3.2 cm。在转弯路径试验中,监测转弯内侧前轮胎的位置,随机选入的单条转弯出行路径监测结果如图 11 所示,平均横向偏差为 5.1 cm,综合 20 条线计算得出转弯出行平均横向偏差为 6.89 cm,转弯入行平均横向偏差为 7.76 cm,如表 2 所示。

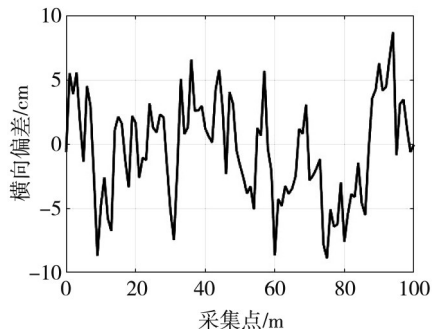


图 10 一条直线导航偏差记录数据

Fig. 10 A straight line navigation deviation records data

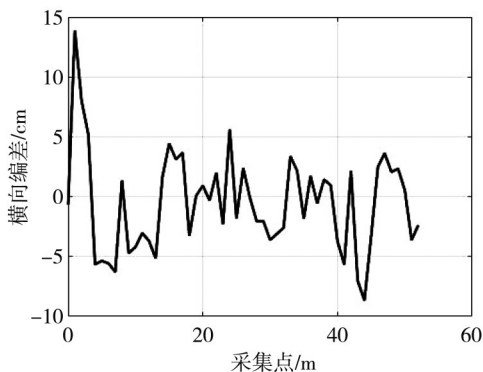


图 11 一条转弯导航偏差记录数据

Fig. 11 A turn navigation deviation records data

表 1 直线导航平均偏差

Tab. 1 Straight-line navigation average deviation

行进路线	采集数据集点/个	最大误差/cm	最小误差/cm	平均误差/cm
直线	2 000	13.60	0.15	3.20

表 2 转弯导航平均偏差

Tab. 2 Turn navigation average deviation

转弯方式	采集数据集点/个	最大误差/cm	最小误差/cm	平均误差/cm
转弯出行	1 017	26.50	0.30	6.89
转弯入行	1 005	35.30	0.70	7.76

5 结 论

经过试验测试,系统硬件选型合理,稳定性强。使用 QT/C++ 语言开发的农机自动驾驶软件系统可以在多个操作系统与平台上运行,大大节约了移植成本。试验表明研制的系统在路径规划巡线方面流畅稳定,路径规划方法适用实际作业情况。在作业时,直线行驶平均横向偏差为 3.2 cm,转弯出行的横向偏差为 6.89 cm,转弯入行的横向偏差为 7.76 cm,作业偏差满足实际农机作业需求。该系统集成了绝对式编码器的电控方向盘,在安装方面大大节省成本。

参考文献:

[1] 崔冰波,魏新华,吴抒航,等. 基于动态路径搜索的农机自动驾驶软件系统研制[J]. 农机化研究, 2022, 44(10): 228-232.
CUI Bingbo, WEI Xinhua, WU Shuhang, et al. Development of agricultural machinery self-driving software system based on dynamic path search [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(10): 228-232. (in Chinese)

[2] 杨宏伟,苏仁忠,解晓琴. 农机自动驾驶设备作业检测系统的设计与实现[J]. 河北工业科技, 2021, 38(4): 280-285.
YANG Hongwei, SU Renzhong, XIE Xiaoqin. Design and implementation of operation performance detection system for agricultural machinery automatic driving equipment [J]. Hebei Journal of Industrial Science & Technology, 2021, 38(4): 280-285. (in Chinese)

[3] 陈治瑛. 基于卫星导航的农机自动驾驶控制技术研究[J]. 农机使用与维修, 2022(4): 38-40.
CHEN Zhiyu. Research on automatic driving control technology of agricultural machinery based on satellite navigation [J]. Agricultural Machinery Using & Maintenance, 2022(4): 38-40. (in Chinese)

[4] 杨涛,李晓晓. 农机自动驾驶系统研究进展与行业竞争环境分析[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(11): 222-231.

- YANG Tao, LI Xiaoxiao. Research progress of agricultural machinery autopilot system and analysis of industry competition environment [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, 42(11): 222-231. (in Chinese)
- [5] 何浩天, 曹阳, 方金祥. 山地农机自动驾驶研究概况 [J]. *现代化农业*, 2022(2): 63-65.
- HE Haotian, CAO Yang, FANG Jinxiang. Overview of research on mountainous agricultural machinery automatic driving [J]. *Modernizing Agriculture*, 2022(2): 63-65. (in Chinese)
- [6] 秦宇, 周宇, 赵亮. 面向农机自动驾驶的5G/大数据技术应用展望 [J]. *邮电设计技术*, 2020(5): 36-40.
- QIN Yu, ZHOU Yu, ZHAO Liang. Application prospect of autonomous agricultural machinery based on 5G and big data [J]. *Designing Techniques of Posts and Telecommunications*, 2020(5): 36-40. (in Chinese)
- [7] 刘慧, 刘宾. 智慧农机的自动驾驶辅助驾驶系统设计 [J]. *单片机与嵌入式系统应用*, 2023, 23(1): 76-79.
- LIU Hui, LIU Bin. Design of intelligent agricultural machinery automatic navigation assistant driving system [J]. *Microcontrollers & Embedded Systems*, 2023, 23(1): 76-79. (in Chinese)
- [8] 魏爽, 李世超, 张漫, 等. 基于GNSS的农机自动驾驶路径搜索及转向控制 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(S1): 70-77.
- WEI Shuang, LI Shichao, ZHANG Man, et al. Automatic navigation path search and turning control of agricultural machinery based on GNSS [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(S1): 70-77. (in Chinese)
- [9] TAKAI R, YANG L L, NOGUCHI N. Development of a crawler-type robot tractor using RTK-GPS and IMU [J]. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2014, 7(4): 143-147.
- [10] 黄沛琛, 罗锡文, 张智刚. 改进纯追踪模型的农业机械地头转向控制方法 [J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(21): 216-219.
- HUANG Peichen, LUO Xiwen, ZHANG Zhigang. Control method of headland turning based on improved pure pursuit model for agricultural machine [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(21): 216-219. (in Chinese)
- [11] 白晋, 刘宾, 刘培, 等. 深松作业信息采集系统设计 [J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(3): 267-272.
- BAI Jin, LIU Bin, LIU Pei, et al. Design of information collection system for subsoiling operation [J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2022, 43(3): 267-272. (in Chinese)
- [12] 王雪松, 李社潮. 韩国农机智能驾驶技术 [J]. *农业机械*, 2022(7): 57-59.
- WANG Xuesong, LI Shechao. Intelligent driving technology of Korean agricultural machinery [J]. *Farm Machinery*, 2022(7): 57-59. (in Chinese)
- [13] 高志伟. 智能农机自动驾驶系统应用与技术分析 [J]. *新型工业化*, 2022, 12(8): 235-238.
- GAO Zhiwei. Application and technical analysis of intelligent agricultural machinery automatic navigation system [J]. *The Journal of New Industrialization*, 2022, 12(8): 235-238. (in Chinese)
- [14] 俞娟, 卢伟, 曾梦洁, 等. 多传感器融合低成本农机自动驾驶方法 [J]. *中国测试*, 2021, 47(12): 106-113.
- YU Juan, LU Wei, ZENG Mengjie, et al. Low-cost agricultural machinery intelligent navigation method based on multi-sensor information fusion [J]. *China Measurement & Test*, 2021, 47(12): 106-113. (in Chinese)
- [15] 张瑞丰. 北斗农机自动驾驶驱动我国精准农业产业升级 [J]. *中国测绘*, 2016(6): 47-49.
- ZHANG Ruifeng. Beidou agricultural machinery automatic driving promotes the upgrading of China's precision agriculture industry [J]. *China Surveying and Mapping*, 2016(6): 47-49. (in Chinese)
- [16] 乔榆杰, 杨鹏树, 孟志军, 等. 面向自动驾驶农机的农田地头边界线检测系统 [J]. *农机化研究*, 2022, 44(11): 24-30.
- QIAO Yujie, YANG Pengshu, MENG Zhijun, et al. Detection system of headland boundary line based on machine vision [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2022, 44(11): 24-30. (in Chinese)
- [17] 芦海涛, 张居同. 农机导航自动驾驶系统的组成和分析 [J]. *农业工程技术*, 2019, 39(36): 67-69.
- LU Haitao, ZHANG Jutong. Composition and analysis of agricultural machinery navigation automatic driving system [J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2019, 39(36): 67-69. (in Chinese)
- [18] 林倍进, 陈新伟, 苏晋荣. 面向5G无线通信的紧凑型高隔离度双频MIMO天线 [J]. *测试技术学报*, 2023, 37(1): 87-92.
- LIN Beijin, CHEN Xinwei, SU Jinrong. Compact high-isolation dual-frequency MIMO antenna for 5G wireless communication [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2019, 37(1): 87-92. (in Chinese)

- [19] 周璇, 成如. 浅析农机自动导航驾驶系统[J]. 农村牧区机械化, 2020(2): 36-38.
ZHOU Xuan, CHENG Ru. Analysis of agricultural machinery automatic navigation driving system [J]. Rural and Pastoral Area Mechanization, 2020(2): 36-38. (in Chinese)
- [20] ZHANG Q, QIU H. A dynamic path search algorithm for tractor automatic navigation [J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(2): 639-646.
- [21] TANG X H, PEI Z H, YIN S M, et al. Practical design and implementation of an autonomous surface vessel prototype: navigation and control [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, 17(3). <https://doi.org/10.1177/1729881420919949>.
- [22] 张美娜, 尹文庆, 林相泽, 等. RTK-DGPS 融合惯性传感器的车辆导航参数计算方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 7-12.
ZHANG Meina, YIN Wenqing, LIN Xiangze, et al. Method for calculating navigation parameters Via RTK-DGPS fusing inertial sensor for agricultural vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 7-12. (in Chinese)
- [23] 刘兆朋, 张智刚, 罗锡文, 等. 雷沃 ZP9500 高地隙喷雾机的 GNSS 自动导航作业系统设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 15-21.
LIU Zhaopeng, ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, et al. Design of automatic navigation operation system for Lovol ZP9500 high clearance boom sprayer based on GNSS [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(1): 15-21. (in Chinese)
- [24] HAN S F, HE Y, FANG H. Recent development in automatic guidance and autonomous vehicle for agriculture: a review [J]. Journal of Zhejiang University, 2018, 44(4): 381-391.
- [25] HUANG Y D, WU X L, BAI Z F. Optimal torque distribution strategy of DDEV based on enhanced exponential sliding mode controller [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2023, 14(3): 306-314.