

基于复合终端滑模的无人农机自主导航系统设计与试验

杨文浩¹ 丁世宏¹ 刘 陆¹ 孙金林¹ 丁 晨² 程 越³
(1. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013; 2. 阜阳师范大学计算机与信息工程学院, 阜阳 236037;
3. 常州东风无级变速器有限公司, 常州 213002)

摘要: 无人农机自主导航系统在推动智慧农业的发展中扮演着至关重要的角色。本文设计了一种基于机器人操作系统 2 (Robot operating system 2, ROS2) 的无人农机自主导航系统, 旨在满足多种典型农业场景的精准作业需求。该导航系统由 3 个核心部分组成: 具有模块化设计的无人农机硬件平台, 基于多传感器融合的环境感知与路径规划系统, 以及采用基于模型设计方法的核心控制系统。设计了一种基于时变参数扩张状态观测器 (Extended state observer, ESO) 的固定时间复合终端滑模控制方法用于核心控制部分。首先, 时变 ESO 能够实时估计农田中的外部干扰, 且抑制传统 ESO 的尖峰现象。其次, 设计积分滑模面来抑制传统终端滑模中的抖振, 并在此基础上得到复合终端滑模控制器。通过仿真分析, 验证了所设计的控制算法具有较好的稳定性和动态响应性能。更进一步, 对东风 1204 - CVT 型拖拉机进行了电动化改造, 并基于所设计的无人农机自主导航系统分别进行低速和高速工况下的田间施药作业实验。最后, 实验结果表明, 以速度 3 km/h 作业时, 直线跟踪横向偏差的最大绝对误差为 0.246 m, 平均绝对误差为 0.068 m, 标准差为 0.049 m; 转弯跟踪横向偏差绝对值的最大值为 0.279 m, 平均值为 0.099 m, 标准差为 0.069 m; 以速度 6 km/h 作业时, 直线跟踪横向偏差的最大绝对误差为 0.400 m, 平均绝对误差为 0.121 m, 标准差为 0.087 m; 转弯跟踪横向偏差绝对值的最大值为 0.488 m, 平均值为 0.158 m, 标准差为 0.101 m。综上, 所设计的复合终端滑模控制方法在路径跟踪精度方面具有显著优势。

关键词: 无人农机; 自主导航; 固定时间复合终端滑模控制; 机器人操作系统 2

中图分类号: S49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)15-0313-11 **OSID:** 

Design and Experiment of Autonomous Navigation System for Unmanned Agricultural Machinery Based on Composite Terminal Sliding Mode

Yang Wenhao¹ Ding Shihong¹ Liu Lu¹ Sun Jinlin¹ Ding Chen² Cheng Yue³
(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
2. School of Computer and Information Engineering, Fuyang Normal University, Fuyang 236037, China
3. Changzhou Dongfeng Continuously Variable Transmission Co., Ltd., Changzhou 213002, China)

Abstract: Autonomous navigation system for unmanned agricultural machinery plays a crucial role in promoting the development of smart agriculture. A precise autonomous navigation system based on robot operating system 2 (ROS2) was developed, aiming to meet the demand for precision operations in a variety of typical agricultural scenarios. The navigation system consisted of three core components: an unmanned agricultural machinery hardware platform with a modularized design, an environment sensing and path planning system based on multi-sensor fusion, and a core control system based on the model based design (MBD) method. A fixed-time composite terminal sliding mode control method based on the time-varying parameter extended state observer (ESO) was designed for the core control part. The time-varying ESO can estimate the external disturbances in the farmland environment in real-time and effectively suppress the peaking phenomenon of the traditional ESO. By designing an integral sliding mode surface, the chattering of the traditional terminal sliding mode was suppressed, and then a

收稿日期: 2025-03-03 修回日期: 2025-05-14
基金项目: 国家自然科学基金项目 (62373170)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (KYCX24_3979) 和国家重点研发计划项目 (2022YFD200150203)
作者简介: 杨文浩 (2000—), 男, 博士生, 主要从事无人农机自主导航、非线性控制及其应用研究, E-mail: yang_wh@stmail.ujs.edu.cn
通信作者: 丁世宏 (1983—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事滑模控制理论及应用、无人农机导航与控制研究, E-mail: dsh@ujs.edu.cn

composite terminal sliding mode controller was constructed to generate smooth path tracking control signals, achieving stable control of the unmanned agricultural machinery. Through simulation analysis, the designed control algorithm was verified to have good stability and dynamic response performance. In order to further verify the practical application of the system, the Dongfeng 1204 - CVT tractor was electrified to carry out field spraying operation experiments under both low and high speed conditions. The experimental results showed that when traveling at speed of 3 km/h, the maximum absolute error of the lateral offset in straight-line tracking was 0.246 m, the mean absolute error was 0.068 m, and the standard deviation was 0.049 m; the maximum absolute error of the lateral offset in turning tracking was 0.279 m, the mean absolute error was 0.099 m, and the standard deviation was 0.069 m. When operating at higher speed of 6 km/h, the maximum absolute error of straight line tracking lateral offset was 0.400 m, the average absolute error was 0.121 m, and the standard error was 0.087 m; the maximum absolute error of the lateral offset in turning tracking was 0.488 m, the mean absolute error was 0.158 m, and the standard deviation was 0.101 m. In summary, the designed fixed-time composite terminal sliding-mode control method adopted had significant advantages in terms of the path tracking accuracy.

Key words: unmanned agricultural machinery; autonomous navigation; fixed-time composite terminal sliding mode control; robot operating system 2

0 引言

在现代农业的发展进程中,农业机械智能化已成为提升生产效率、优化资源配置的核心驱动力。随着全球人口的持续增长和粮食需求的不断攀升,传统农业模式逐渐暴露出人力资源匮乏、生产效率低下以及资源浪费等弊端,难以满足当前对产量和质量的高标准要求^[1-2]。智能农机通过深度融合自动控制、传感器技术、物联网以及人工智能等前沿科技,实现了农业生产的自动化、精细化和智能化转型,有效促进了资源的高效配置,降低了环境污染,提升了作业精度和生产效率^[3]。

虽然智能化技术在农业机械中的应用已取得显著成果,但要迈向更高层次的自动化和精确作业,自主导航技术的创新与突破则显得尤为关键^[4]。无人农机自主导航技术不仅能够实现更为高效、精准的作业控制,还能够在复杂多变的农田环境中进行实时的路径规划与动态调整,是推动农业机械智能化迈向新阶段的关键一环^[5]。

尽管当前已有众多农机自主导航系统的应用实例,如适联技术 TR100、华测导航领航员 NX510、丰疆智能疆驭 AT2 以及司南导航 AG502 等。但这些系统大多集成度有限,往往仅针对特定场景下的某一类农机进行设计,或不同厂家导航系统不能够兼容,难以实现跨农机类型与作业场景的通用性。机器人操作系统(Robot operating system, ROS)凭借其模块化设计理念、强大的数据处理能力和成本优势,在农机自主导航系统的研发中展现出了巨大的潜力^[6]。

然而,ROS 采用的主从架构依赖于单一的

“Master”节点进行通信协调,且其网络通信主要依赖于 TCP/UDP 协议,这在复杂环境下容易导致通信延迟和单点故障问题,同时缺乏数据传输的质量保证,难以满足农机在动态环境中对实时性和稳定性的严苛要求^[7]。相较于 ROS,ROS2 在实时性、数据传输效率和系统安全性方面进行了显著改进。ROS2 采用数据分发服务(Data distribution service, DDS)协议,实现了去中心化的节点通信,大幅提升了导航系统的实时性和鲁棒性,使得农机能够更可靠地执行路径规划、障碍物检测等关键任务^[8]。同时,ROS2 支持分布式系统和多平台运行,更加契合无人农机自主导航的复杂需求,有效应对农田环境中的通信延迟和不稳定性。因此,将 ROS2 框架应用于无人农机自主导航系统的设计,构建一个集成度高、实时性强、鲁棒性优异的农机自主导航系统,可为农机智能化发展提供更加可靠的解决方案^[9]。

无人农机的路径跟踪控制策略在农机自主导航系统中至关重要,它直接影响导航精度、稳定性和自主性,从而决定了农机作业的效率 and 可靠性。众多学者提出了各类控制方法,包括 PID 控制^[10]、模型预测控制^[11]、自适应控制^[12]以及滑模控制^[13]等。目前针对直线路径跟踪的研究已经相对成熟,而曲线路径跟踪成为学术研究的热点^[14-15]。然而,对于全田块路径无人作业场景,转弯时的高精度跟踪也极为重要。其中,滑模控制凭借其强鲁棒性、广泛适应性和快速响应能力,在无人农机路径跟踪控制中表现突出,适用于不同类型的农机设备与复杂多变的农业作业环境,成为无人农机路径跟踪控制的优选方案之一。此外,在非结构化农田环境中,由于存在地面崎岖不平、参考路径曲率变化、车轮打滑、侧

向风等问题,滑模控制器为了压制外界扰动,需要增大控制增益,相应地抖振现象也会更加明显,导致了方向盘快速切换,加快磨损。而使用 ESO 技术,能够将外部扰动实时观测出来并补偿给控制器,从而降低控制增益,有效抑制抖振问题^[16]。

针对上述问题,本文提出一种基于 ESO 的固定时间复合终端滑模路径跟踪控制方法。以东风 1204-CVT 型拖拉机为实验载体,拟设计基于 ROS2 的无人农机自主导航系统方案。

1 系统描述和建模

考虑前轮转向、后轮驱动的轮式农机,可以简化为二轮车模型。在此模型中,假设无人农机速度恒定、始终保持前进方向,其运动学模型如图 1 所示。

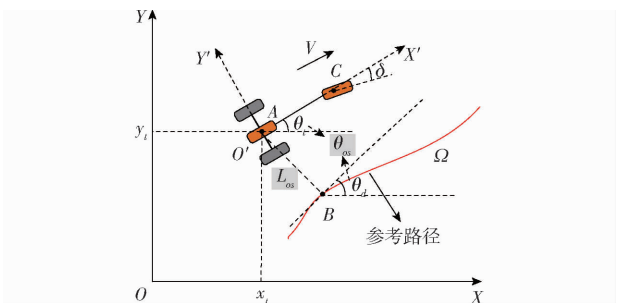


图 1 无人农机运动学模型示意图

Fig. 1 Diagram of unmanned agricultural machinery kinematic model

图 1 中, XOY 为大地坐标系, $X'O'Y'$ 为车体坐标系。其中,点 A 为无人农机后轮中心,点 O' 与点 A 重合,点 C 为前轮中心, AC 的连线距离为无人农机的轴距,并以点 A 代表无人农机的位置, AC 与 X 轴正方向的夹角 θ_i 为无人农机当前的航向角,无人农机的速度 V 与车体 AC 方向相同, δ 为无人农机的前轮转向角,采用阿克曼转向原理; Ω 为参考路径,点 B 为在参考路径 Ω 上距离后轮中心点 A 最近的点(称为“索引点”);点 A 与点 B 的距离定义为横向偏差 L_{os} ,曲线 Ω 在点 B 处的切线方向与 X 轴正方向的夹角 θ_d 为期望航向角, θ_i 与 θ_d 的差值定义为航向偏差 θ_{os} ,即 $\theta_{os} = \theta_i - \theta_d$ 。

根据文献[16]所提出的建模方法,选取横向偏差 L_{os} 和航向偏差 θ_{os} 作为状态变量。同时,考虑到实际农田路面崎岖不平,无人农机轮胎可能发生侧滑以及建模不精确等问题,引入一个有界的扰动项 Δ ,得到无人农机路径跟踪偏差模型

$$\begin{cases} \dot{L}_{os} = -\tau |V| \sin \theta_{os} \\ \dot{\theta}_{os} = \frac{V}{L_t} \tan \delta - \dot{\theta}_d + \Delta \end{cases} \quad (1)$$

式中 τ ——转向系数

L_t ——无人农机轴距, m

当无人农机沿着顺时针方向去跟踪参考路径时, $\tau = -1$, 反之 $\tau = 1$ 。为了便于后续路径跟踪控制方法的设计,假设无人农机仅向前运动,且始终沿着顺时针方向去跟踪参考路径,即 $V \geq 0, \tau = -1$ 。选取新的状态变量为 $x_1 = L_{os}, x_2 = V \sin \theta_{os}$, 系统的状态向量为 $x = [x_1, x_2]^T$, 则模型式(1)可以转换为状态方程

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = g(t, x) u + d(t, x) \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$u = \tan \delta$$

$$g(t, x) = \frac{V^2}{L_t} \cos \theta_{os} > 0$$

$$d(t, x) = -\dot{V} \theta_d \cos \theta_{os} + V \Delta \cos \theta_{os}$$

式中 u ——需要设计的虚拟控制器

$d(t, x)$ ——外部集总扰动

$d(t, x)$ 满足如下假设:集总扰动 $d(t, x)$ 是连续可微的,且存在 2 个正常数 D_1 和 D_2 , 使得 $|d(t, x)| \leq D_1, |\dot{d}(t, x)| \leq D_2$ 。

在满足上述假设的前提下,针对模型式(2),设计适当的路径跟踪控制器 u , 以确保横向偏差 L_{os} 和航向偏差 θ_{os} 能在固定时间内稳定到原点。为了方便描述,定义

$$[\chi]^\alpha = |\chi|^\alpha \text{sign}(\chi) \quad (\forall \chi \in \mathbf{R}, \forall \alpha > 0)$$

2 路径跟踪控制算法设计

基于农机运动学路径跟踪偏差模型,本节设计一种基于时变参数 ESO 的固定时间复合终端滑模控制方法。

2.1 扰动观测器的设计

根据文献[17],设计了一种时变参数扩张状态观测器对外部集总扰动进行观测,具体表达式为

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \mu_1 \tanh(\rho t) (x_1 - \hat{x}_1) + \hat{x}_2 \\ \dot{\hat{x}}_2 = g(t, x) u + \mu_2 \tanh(\rho t) (x_1 - \hat{x}_1) + \hat{d} \\ \dot{\hat{d}} = \mu_3 \tanh(\rho t) \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1) \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\tanh(\rho t) = \frac{e^{\rho t} - e^{-\rho t}}{e^{\rho t} + e^{-\rho t}}$$

式中 t ——时间

μ_1, μ_2, μ_3 ——正常数,由带宽法得出

ρ ——正常数,调节 ESO 带宽的变化速率

$\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{d}$ —— x_1, x_2 与扰动 $d(t, x)$ 的估计值

定义误差变量 $e_1 = x_1 - \hat{x}_1, e_2 = x_2 - \hat{x}_2$ 和 $e_3 = d - \hat{d}$ 。对其进行求导,可得到误差动力学方程

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -\mu_1 \tanh(\rho t) e_1 + e_2 \\ \dot{e}_2 = -\mu_2 \tanh(\rho t) e_1 + e_3 \\ \dot{e}_3 = -\mu_3 \tanh(\rho t) \operatorname{sign}(e_1) + \dot{d} \end{cases} \quad (4)$$

根据文献[17],可得出误差动力学方程式(4)全局渐近稳定,即扰动的观测误差 e_e 能渐近收敛到零。因此,当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\hat{d} \rightarrow d$ 。

根据文献[16],通过带宽法设计参数 μ_1 、 μ_2 、 μ_3 的具体公式为

$$\begin{cases} \mu_1 = 6 \sqrt[3]{n} \\ \mu_2 = 11 \sqrt[2]{n} \\ \mu_3 = 6n \end{cases} \quad (5)$$

式中 n ——正常数,调节误差观测的瞬态性能

2.2 基于观测器的复合终端滑模控制器设计

针对路径跟踪模型式(2),根据滑模控制理论,参考文献[18],选取积分滑模面

$$s = x_2 + \int_0^t (k_1 F_1(x_1(\tau)) + k_2 F_2(x_2(\tau))) d\tau \quad (6)$$

式中 k_1 、 k_2 ——正常数

函数 $F_1(x_1)$ 和 $F_2(x_2)$ 的具体表达式为

$$\begin{cases} F_1(x_1) = \lfloor x_1 \rfloor^{c_1} + x_1 + \lfloor x_1 \rfloor^{c_2} \\ F_2(x_2) = \lfloor x_2 \rfloor^{\frac{2c_1}{c_1+1}} + x_2 + \lfloor x_2 \rfloor^{\frac{2c_2}{c_2+1}} \\ (c_1 \in (1 - \epsilon_{c_1}, 1), c_2 \in (1, 1 + \epsilon_{c_2})) \end{cases} \quad (7)$$

式中 ϵ_{c_1} 、 ϵ_{c_2} ——数值很小的正常数

c_1 、 c_2 ——正常数

接下来给出基于上述积分滑模面的固定时间终端滑模(Fixed time terminal sliding mode, FTTSM)控制器

$$u = -\frac{1}{g(t,x)}(k_1 F_1(x_1(t)) + k_2 F_2(x_2(t)) + l_1 \lfloor s \rfloor^\gamma + l_2 \operatorname{sign}(s)) \quad (8)$$

其中
$$\gamma = \begin{cases} p & (|s| \geq 1) \\ q & (|s| < 1) \end{cases} \quad (9)$$

式中 l_1 、 l_2 ——正常数

p 、 q ——正常数,满足 $p \geq 1, 1 > q > 0$

基于扰动观测器式(3),结合上述终端滑模控制方法,得到复合控制器

$$u = -\frac{1}{g(t,x)}(k_1 F_1(x_1(t)) + k_2 F_2(x_2(t)) + l_1 \lfloor s \rfloor^\gamma + l_2 \operatorname{sign}(s) + \hat{d}) \quad (10)$$

集总扰动的观测值 $\hat{d}$ 由式(3)得到。

基于上述对变换后系统式(2)控制器 u 的设计,通过无人农机前轮转角和控制器之间的关系 $\delta = \arctan(u)$,可以实现对原系统式(1)中无人农机

前轮转角的控制。

对滑模面式(6)进行求导,可以得到

$$\dot{s} = -l_1 \lfloor s \rfloor^\gamma - l_2 \operatorname{sign}(s)$$

选取 Lyapunov 函数为 $W = s^2$,对其求导可得

$$\begin{aligned} \dot{W} &= 2s\dot{s} = 2s(-l_1 \lfloor s \rfloor^\gamma - l_2 \operatorname{sign}(s)) = \\ &= -2l_1 |s|^{\gamma+1} - 2l_2 |s| = \\ &= -2l_1 W^{\frac{\gamma+1}{2}} - 2l_2 W^{\frac{1}{2}} \leq 0 \end{aligned} \quad (11)$$

$W = 0$ 当且仅当滑模面 $s = 0$ 。

由文献[18]和式(11)可知,式(2)中的 x_1 、 x_2 固定时间收敛。证明所提基于时变参数 ESO 的复合终端滑模控制器是稳定的。

由上述分析可知,控制器式(10)能够在固定时间内确保系统式(2)的状态变量 x_1 、 x_2 收敛到零。进一步,由 $x_1 = L_{os}$ 、 $x_2 = V \sin \theta_{os}$ 可知,原路径跟踪系统式(1)中的横向偏差 L_{os} 和航向偏差 θ_{os} 也可以实现固定时间收敛到零。

3 仿真实验与分析

为了验证本文所提出方法的有效性和优越性,利用 Matlab/Simulink 搭建仿真模型进行对比仿真。首先,设计了在实际农田中较为常用的 2 种转弯路径,即 Π 型和 Ω 型。其中, Π 型转弯方式适用于当农机最小转弯半径小于或等于作业行间距一半时的场景; Ω 型转弯方式适用于当农机最小转弯半径大于作业行间距的一半时的场景。

在仿真中,农机轴距设置为 2.4 m,纵向车速给定为 3 m/s,农机的最小转弯半径设置为 1.57 m,农机前轮转角限幅为 $\pm \pi/2$ 。

参考路径的起点为坐标原点(0, 0),初始期望航向角为 $\pi/2$;农机的实际起点位置设为(-0.5, 0)m,初始航向角为 $\pi/2$,由此可以得出初始横向偏差 $L_{os}(0) = 0.5$ m,初始航向偏差 $\theta_{os}(0) = 0$ 。ESO 中 $\hat{x}_1$ 、 $\hat{x}_2$ 、 $\hat{d}$ 初值均设置为 0。

本文的对比仿真是将所设计的 FTTSM + ESO 控制器式(10)与 FTTSM 控制器式(8)以及传统 Stanley 控制器进行对比。其中,Stanley 控制器的形式为^[19]

$$u = \theta_{os} + \arctan\left(\frac{KL_{os}}{V}\right) \quad (12)$$

3 种不同控制器的参数如表 1 所示。

此外,为了进一步验证本文所设计方法的鲁棒性,在仿真时间 $t \in [11, 13]$ s 时引入外部扰动 Δ ,其具体表达式为

$$\Delta = \begin{cases} 1.5 & (11 \text{ s} \leq t < 11.5 \text{ s}) \\ 0.5 + \sin((t-1)\pi + x_1) & (11.5 \text{ s} \leq t < 12.5 \text{ s}) \\ 0.5t - 6.5 & (12.5 \text{ s} \leq t \leq 13 \text{ s}) \end{cases} \quad (13)$$

表 1 3 种不同控制方法对比仿真参数

Tab.1 Simulation parameters for comparison of three different control methods

控制器类型	参数值
Stanley 控制	$K=22.3$
FTTSM 控制	$c_1=q=0.9, c_2=p=1.1, k_1=15.2,$ $k_2=5, l_1=4, l_2=5$
FTTSM + ESO 控制	$c_1=q=0.9, c_2=p=1.1, k_1=15.2, k_2=5,$ $l_1=4, l_2=5, n=2.2, \rho=1$

由此可以得到未知的集总扰动为 $d(t, x) = -V\dot{\theta}_d \cos\theta_{os} + V\Delta \cos\theta_{os}$ 。

图 2~4 为无人农机在 3 种不同控制器作用下的对比仿真结果。可以看出,在没有外部扰动,初始横向偏差为 0.5 m 的情况下,传统 Stanley 方法存在较为明显的超调;而 FTTSM 控制方法则在没有超调的情况下,提高了跟踪精度和上线时间。在第 11~13 秒(最后一段直线参考路径)中引入了外部扰动的情况下,从局部放大图可以看出,在 Stanley 控制方法的作用下,扰动对路径跟踪精度有较大影响,系统鲁棒性较差;而在 FTTSM 控制方法的作用下,系统的抗扰性能有了明显提升,但还是存在一些波动,导致无法满足高精度路径跟踪的要求。在 FTTSM + ESO 复合控制方法作用下,实际行驶路径与参考路径基本重合,保证了系统的抗扰性能,跟踪精度都得到了明显提升。

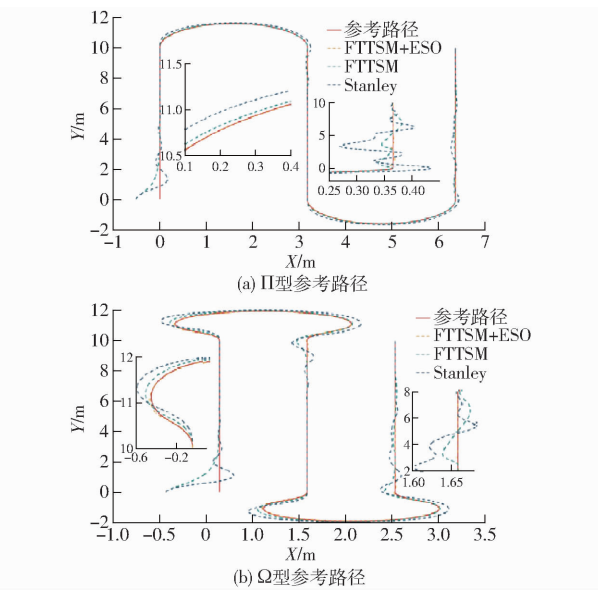


图 2 Π 型和 Ω 型参考路径跟踪轨迹

Fig.2 Tracking trajectory of Π-shaped and Ω-shaped reference paths

从图 3a、3b 的横向偏差和航向偏差结果可以看出,本文所提 FTTSM + ESO 复合控制方法具有最好的跟踪效果。此外,从图 3c 的前轮转角响应曲线可以看出,在 Stanley 控制方法下,无人农机前

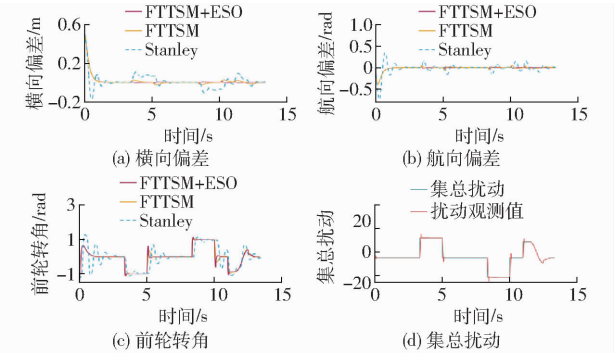


图 3 Π 型参考路径跟踪响应曲线

Fig.3 Tracking response curves of Π-shaped reference path

轮转角存在较大的振荡,不利于实现高精度路径跟踪。相比之下,FTTSM 控制方法的前轮转角较为平滑,便于实现农机转向。最后,从图 3d 的集总扰动及其观测结果可以看出,ESO 对集总扰动具有良好的观测性能,能够实时准确地将连续变化或者阶跃变化的扰动估计出来,以补偿给控制器,提高跟踪精度。

图 4 为 Ω 型参考路径的跟踪响应结果,从图 4a 和图 4b 的横向偏差和航向偏差结果可以看出,与 Π 型路径跟踪结果相同的是,相比于 Stanley 控制和 FTTSM 控制方法,本文所提出的 FTTSM + ESO 复合控制方法可以实现最好的路径跟踪效果,其跟踪精度、抗扰性能等均表现最优。同时,相较于 Π 型参考路径,Ω 型参考路径的曲率更为复杂多变,可以看作是扰动情况更为复杂,从而导致跟踪效果变差,但所提出的方法仍能保持最有效的跟踪性能。

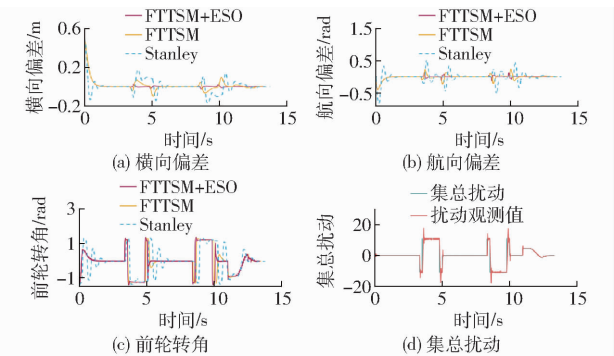


图 4 Ω 型参考路径跟踪响应曲线

Fig.4 Tracking response curves of Ω-shaped reference path

综上所述,在本文所提出的固定时间复合终端滑模控制方法下,路径跟踪系统可以在固定时间内实现对 2 种典型参考路径的精确跟踪。此外,基于 ESO 的固定时间复合终端滑模控制方法不仅保留了固定时间终端滑模快速收敛的优势,而且可以明显提高跟踪系统的抗扰性能,确保了所提控制方法能够在存在较大扰动的情况下,仍然保持良好的跟踪精度。

4 基于 ROS2 的自主导航实验平台搭建

如图 5 所示,自主导航系统的核心构成包括:RTK - GNSS 定位模块、角度传感器模块、基于树莓派 (Raspberry Pi 4B) 的 ROS2 计算模块、上位机可视化与人机交互模块、STM32F4 主控模块、转向控制模块、导航控制模块等。



图 5 导航系统整体架构

Fig.5 Overall architecture of navigation system

4.1 ROS2 架构解析

田间无人农机自主导航系统涵盖众多传感器、核心控制单元及执行机构,这对系统的响应速度、稳定性、复杂通信能力和广泛适用性提出了严格要求。ROS2 作为一款基于 DDS 的跨系统、跨平台实时机器人操作系统,凭借其 DDS 通信协议,实现了消息的零拷贝传递,显著优化了 CPU 和内存资源的使用。本文在 Ubuntu 20.04 系统上部署 ROS2,该系统运行于高性能的 Raspberry Pi 4B 开发板上。该开发板搭载 64 位四核处理器,配备 4 GB RAM,并支持蓝牙 5.0、千兆以太网及 USB 3.0 接口^[6],为系统的流畅运行提供了坚实基础。ROS2 的框架结构如图 6a 所示。

在本文的系统中共部署了 5 个节点 (nodes): rtk_position 负责读取 RTK - GNSS 的经纬度和航向信息,并实时转换为无人农机的位姿信息;calc_local_position 负责设定坐标原点,并将经纬度信息转换为当前局部坐标系下的坐标;upper_computer 为上位机节点,负责发布参考路径,并实时显示无人农机的状态信息;calc_error 负责计算无人农机的横向和航向偏差;to_stm32 则负责将偏差信息发送给 STM32 开发板进行控制指令解算。此外,系统还定义了 9 个话题 (topics),包括 rtk_lls_info (经纬度信息)、local_info (局部坐标系下的农机位置信息)、car_err (农机偏差信息)、path_point (优化后参考路径点信

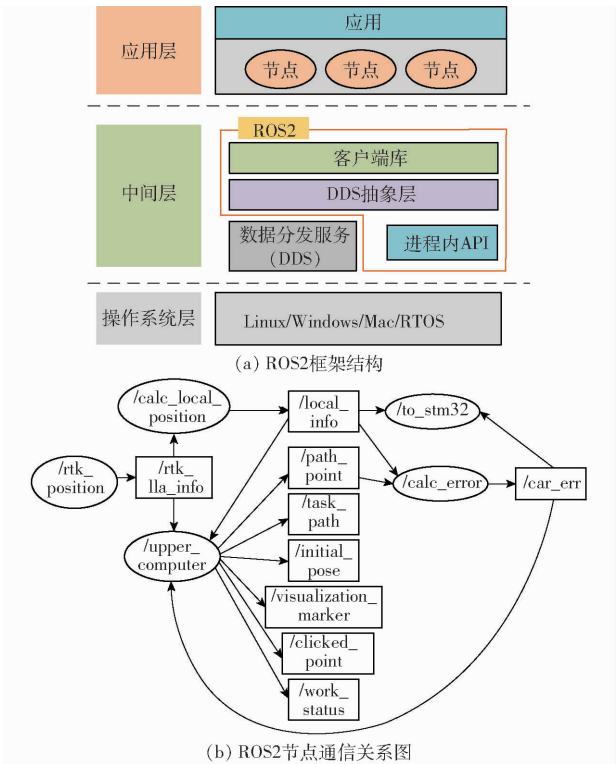


图 6 ROS2 框架结构及节点通信关系图

Fig.6 Architecture and communication relationship of ROS2

息)、task_path (优化前参考路径信息)、initial_pose (初始位置信息)、visualization_marker (路径可视化信息)、clicked_point (鼠标单击信息) 和 work_status (农机工作状态信息),它们之间的关系如图 6b 所示,共同构成了系统的通信框架。

尽管当前 ROS2 系统中接入的传感器仅有 RTK - GNSS 和角度传感器,但在本文设计的系统框架下,其他传感器模块如激光雷达、相机视觉模块等的接入将十分便捷,这使系统在不同场景 (如温室大棚、果园等) 的快速部署成为可能。

4.2 车辆位置和姿态信息获取

借助 RTK - GNSS 模块,能够实时捕获无人农机的精确位置 (经纬度) 及航向角。此模块集成了导航卫星、基站和移动站,并选用北斗星通的高质量产品以确保数据的准确性。基站组件涵盖天线 (GPS500 型)、接收机 (NC502 型)、电台 (HX - DU1601D 型) 及电源等;移动站则包括双天线 (左右对称安装)、电台、接收机及电源等关键部件。

基站部分配置指令如下:

```
LOG COM2 RTCM1075 ONTIME 1
LOG COM2 RTCM1085 ONTIME 1
LOG COM2 RTCM1125 ONTIME 1
```

移动站 COM1 口输出 “GPRMC” 和 “HEADINGA” 信息,其部分配置指令如下:

```
LOG COM1 GPRMC ONTIME 0.1
```

LOG COM1 HEADINGA ONTIME 0.1

通过上述配置,系统能够以 10 Hz 的频率更新无人农机的位置与航向信息。

从 GPRMC 语句中,可以提取到基于 WGS-84 大地坐标系的经纬度数据。为了简化距离计算与位置的可视化过程,并考虑到地心地固坐标系(Earth-centered, earth-fixed, ECEF)在卫星导航及全球范围内高精度计算中的优越性(无投影变形),将经纬度信息(LLA)转换为 ECEF 坐标(XYZ)。这一转换过程不仅提升了计算的准确性,还为后续的导航、路径规划以及可视化界面设计提供了便利。

4.3 作业路径规划

作业路径规划模块实现无人农机的作业路径规划。首先,通过边界打点的方式精确描绘农田轮廓。在此基础上,系统综合考虑作业任务的具体要求、农机的幅宽限制、最小转向半径以及农田的复杂环境信息,规划出能够满足多样化作业需求的参考路径。特别是在转弯区域,采用二阶贝塞尔曲线进行路径优化,确保所生成的路径既符合无人农机的跟踪作业能力,又能够提升作业效率。

此外,可根据不同的作业任务需求、无人农机的最小转弯半径以及作业幅宽等关键参数进行灵活配置,从而得到最适宜的作业路径。设计了 3 种典型的作业方式及其对应的路径规划方式,具体而言,包括“套行作业法”“隔行作业法”以及“回字型作业法”的路径规划方式。这些规划方案均旨在最大化作业效率,同时确保无人农机能够平稳、精准地沿着预定路径进行作业。

为了便于后续任务中对横向偏差和航向偏差的精确计算,从而高效完成路径跟踪任务,在生成平滑的规划路径后,对整条路径进行离散化处理。具体而言,以 2 cm(此间隔可根据实际需求进行调整)为间距,将连续路径分割成一系列离散的点,这些点共同构成了参考路径。同时,对这些离散点进行编号,从 1 开始,依次递增至 N ,以便于后续处理与跟踪。

在确定了参考路径后,需寻找距离无人农机当前位置最近的参考路径点 D 。为了降低计算复杂度,优化计算效率,采取了一种高效的区间搜索方法

$$D(i) = D(\text{Min}(d_{ij})) \quad (j \in (i, i + 100) \cap (1, N))$$
式中 d_{ij} ——当前位置点 D_i 与其他点 D_j 之间距离
该区间搜索方法的核心思想是通过减小搜索区域,快速筛选与比较,并锁定最近的参考点。这种方法大幅减少了计算量,有效节省了计算资源,为实时路径跟踪任务的顺利完成提供了有力保障。

4.4 路径跟踪控制

路径跟踪控制模块采用 MBD 方法设计控制策略,旨在实现无人农机对预设参考路径的稳定、迅速且精确追踪。该研究的路径跟踪控制主要考虑横向控制与纵向控制 2 个方面。为了促进开发流程的顺畅与未来功能的扩展,控制单元 STM32F4 开发板、电控方向盘、导航控制器以及角度传感器均被整合至同一 CAN 网络中。CAN 网络的波特率设定为 250 kb/s,其网络结构如图 7 所示。

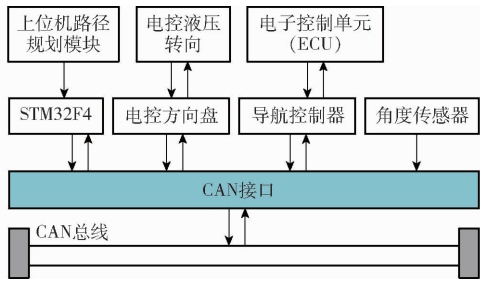


图 7 CAN 网络结构
Fig. 7 Structure diagram of CAN network

在这一架构下,上位机的路径规划模块负责向 STM32F4 控制器发送无人农机当前的横向偏差与航向偏差信息。STM32F4 控制器则基于这些偏差信息,通过设计的控制算法,计算出期望的前轮转角。与此同时,角度传感器能够实时检测无人农机的实际前轮转角,并将该信息通过 CAN 总线反馈给 STM32F4 控制器。控制器将期望前轮转角与实际前轮转角进行对比后,给方向盘的转向舵机发出相应的操作指令。导航控制器则用来实现无人农机的基本操控任务,包括启动、熄火、挡位选择、速度调控、提升器操作以及动力输出等功能的实现^[20]。

在农田非结构化道路环境中,地面条件复杂多变,因此本文采用一种鲁棒控制方法——滑模控制。滑模控制方法具有鲁棒性强、动态响应快、结构简单、易于设计等优点。但是,传统的滑模控制方法往往伴随着明显的抖振问题,而无人农机的执行机构由于存在一定的时延,难以迅速完成状态的切换。因此,本模块设计了一种基于时变参数 ESO 和 FTSM 的复合控制方法,使得控制器输出的信号为连续信号,便于无人农机执行机构快速响应。

4.5 可视化与人机交互界面

本模块融合了 Qt 5.12 与 ROS2 foxy 技术框架,构建了基于 ROS2-Qt 的上位机开发环境。同时,利用 ROS2 的 rviz 功能包,设计的可视化操作界面如图 8 所示。

为了实现上位机与无人农机之间的高效通信,二者之间采用了局域网连接的方式。在上位机界面通过“发布点位”功能设置农机作业的起始点和终



图8 可视化与人机交互界面

Fig.8 Visualization and human-computer interface

止点、通过下拉按钮选择不同的作业方式与不同的农机类型、同时输入农机最小转弯半径以及作业幅宽等对规划路径进行配置,进而生成合适的作业路径,然后通过“发布路径”按钮将已经规划好的参考路径信息作为一个话题发布到 ROS2。

5 实验验证与分析

本实验在江苏省镇江市京口区润果农业的农场进行,如图 9 所示,搭载可容纳 300 L 药液、作业幅宽 12 m 的施药作业箱进行实验。无人农机为东风 1204 - CVT 型拖拉机,作业路径全长 273.38 m (其中直线部分总长 224.72 m,转弯部分总长 48.66 m)。东风 1204 - CVT 型拖拉机的主要参数如表 2 所示。



图9 装备无人农机自主导航系统的东风 1204 - CVT 型拖拉机

Fig.9 Dongfeng 1204 - CVT tractor equipped with autonomous navigation system for unmanned agricultural machinery

表 2 东风 1204 - CVT 型拖拉机的主要参数
Tab.2 Main specifications of Dongfeng 1204 - CVT tractor

技术参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	4 840×2 137×2 775
前轮轮距/mm	1 545~1 980(可调)
后轮轮距/mm	1 550~2 470(可调)
轴距/mm	2 549
最小离地间隙/mm	410(前桥下沿)
最小转向半径/m	5±0.3
结构质量/kg	4 260

实验过程中FTTSM 控制器的参数为: $c_1 =$

$0.95, c_2 = 1.05, q = 0.9, p = 1.1, k_1 = 1.1, k_2 = 0.18, l_1 = 0.2, l_2 = 0.2$;FTTSM + ESO 复合控制器的参数 $n = 1.5, \rho = 1$,其余的同 FTTSM;Stanley 控制器的参数 $K = 22.9$ 。

采用的量化指标有最大绝对误差、平均绝对误差、标准差以及导航误差。其中导航误差 E 根据标准 GB/T 37164—2018《自走式农业机械导航系统作业性能要求及评价方法》,计算式为

$$E = \left| \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} d_i \right| + \sqrt{\frac{1}{N_0 - 1} \sum_{i=1}^{N_0} \left(d_i - \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} d_i \right)^2}$$

(14)

式中 d_i ——第 i 个采样点的横向偏差,cm
 N_0 ——采样总数

实验分别在两组不同工况下进行:一组设定拖拉机为低速行驶,速度为 3 km/h;另一组为高速行驶,速度为 6 km/h。

低速工况下的实验结果如图 10 所示,可以看出,本文所提出的基于复合终端滑模的无人农机自主导航系统在实际农田作业中具有良好的表现,相比传统 Stanley 方法,具有能够同时保证直线和转弯情况下高精度作业的显著优势。直线和转弯跟踪结

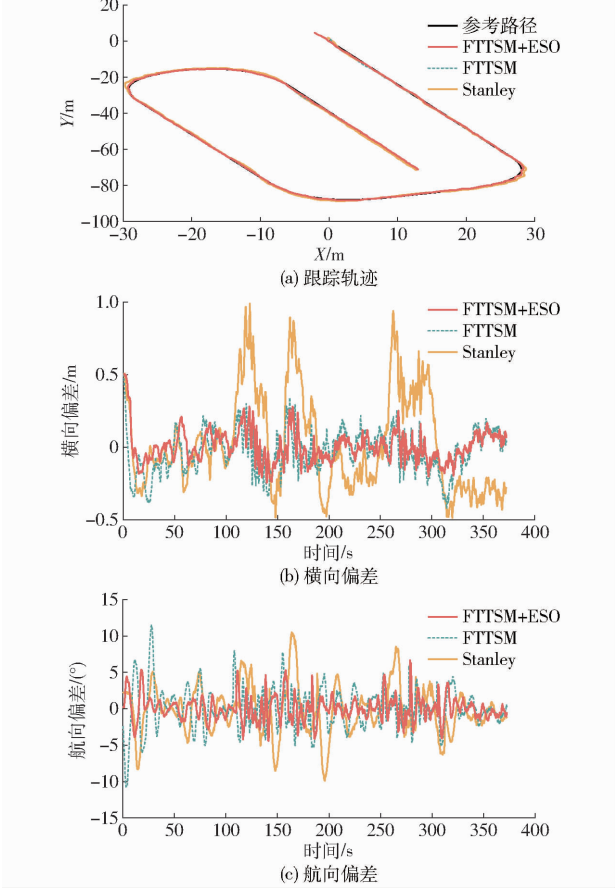


图10 农田低速实验路径跟踪响应曲线

Fig.10 Tracking response curves of path tracking in agricultural fields at low speed

果的实验统计数据如表 3 所示。可以看出,在本文所提出复合控制方法的作用下,直线跟踪横向偏差的最大绝对误差为 0.246 m,平均绝对误差为 0.068 m,标准差为 0.049 m,导航误差为 0.094 m;转弯跟踪横向偏差的最大绝对误差为 0.279 m,平均绝对误差为 0.099 m,标准差为 0.069 m,导航误差为 0.136 m。

表 3 农田实验横向偏差统计结果

Tab. 3 Statistics of lateral offset in agricultural field experiments						
控制方法	作业速度/ (km·h ⁻¹)	路径类型	横向偏差			
			最大绝对误差/m	平均绝对误差/m	标准差/m	导航误差/m
Stanley	3	直线路径	0.487	0.191	0.126	0.323
		转弯路径	0.988	0.471	0.202	0.673
	6	直线路径	1.051	0.301	0.222	0.491
		转弯路径	1.496	0.571	0.335	0.933
FTTSM	3	直线路径	0.321	0.092	0.056	0.129
		转弯路径	0.423	0.115	0.086	0.181
	6	直线路径	0.542	0.131	0.110	0.201
		转弯路径	0.636	0.220	0.143	0.269
FTTSM + ESO	3	直线路径	0.246	0.068	0.049	0.094
		转弯路径	0.279	0.099	0.069	0.136
	6	直线路径	0.400	0.121	0.087	0.152
		转弯路径	0.488	0.158	0.101	0.196

图 11 为低速工况下农田实验的偏差统计对比分析结果。可以看出,在所提 FTTSM + ESO 控制方法下,横向偏差和航向偏差都更集中在 0 附近,跟踪精度相比于传统 Stanley 方法,特别是在转弯等存在较大扰动的场景下,有了大幅提升。作业全过程(包括直线和转弯)中,横向偏差 94.04% 的数据都在 0.2 m 以内,航向偏差 98.98% 的数据都在 5° 以内,满足无人农机自主作业实际需求^[20]。

高速工况下的实验结果如图 12 所示,可以看出,整体跟踪效果相比于低速时有所下降,但相比于传统 Stanley 方法,本文所提出的复合控制具有能够同时保证直线和转弯情况下高精度作业的显著优势。直线和转弯跟踪结果的实验统计数据如表 3 所示。可以看出,在本文所提出复合控制方法的作用下,直线跟踪横向偏差的最大绝对误差为 0.400 m,平均绝对误差为 0.121 m,标准差为 0.087 m,导航误差为 0.152 m;转弯跟踪横向偏差的最大绝对误差为 0.488 m,平均绝对误差为 0.158 m,标准差为 0.101 m,导航误差为 0.196 m。图 13 为高速工况下农田实验的偏差统计对比分析结果。可以看出,在所提 FTTSM + ESO 复合控制方法下,横向偏差和航向偏差都更集中在 0 附近,跟踪精度相比于传统

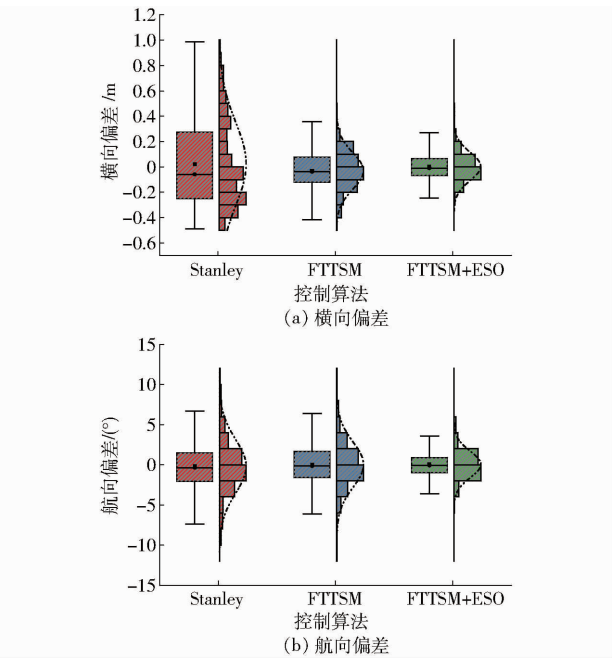


图 11 农田低速实验偏差分析图
Fig. 11 Error analysis diagrams of field experiment at low speed

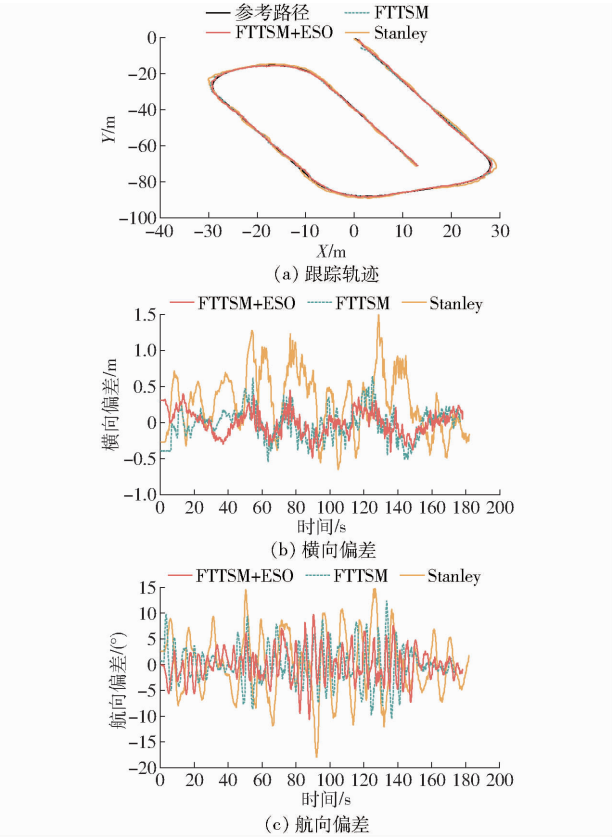


图 12 农田高速实验路径跟踪响应曲线
Fig. 12 Tracking response curves of path tracking in agricultural fields at high speed

Stanley 方法,特别是在转弯等存在较大扰动的场景下,有了大幅提升。作业全过程(包括直线和转弯)中,横向偏差 83.63% 的数据都在 0.2 m 以内,航向偏差 90.24% 的数据都在 5° 以内。

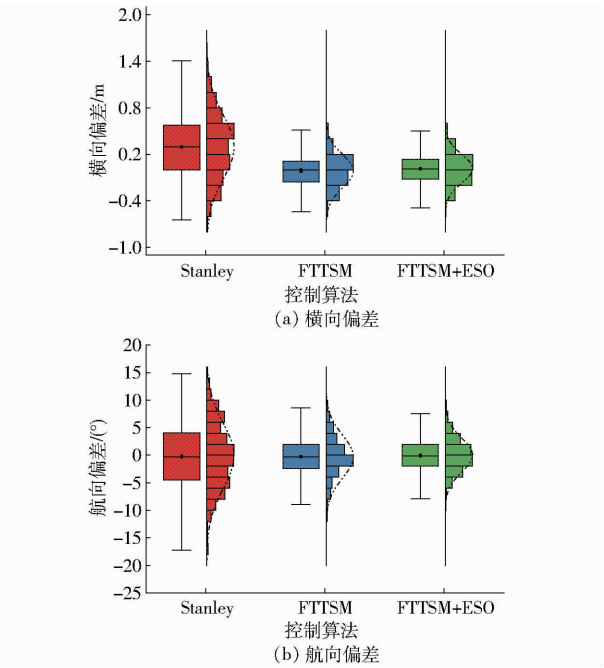


图 13 农田高速实验偏差分析图

Fig. 13 Error analysis diagrams of field experiment at high speed

6 结论

(1) 基于 ROS2 开发设计了一种无人农机自主

导航系统,包括由 RTK-GNSS 和角度传感器组成的农机位置、姿态和前轮转角获取模块,基于 ROS2 和 Qt 开发的上位机模块,在 Raspberry Pi 上运行的 ROS2 导航解算模块和基于 CAN 总线的 STM32 控制模块。其中,控制部分设计了一种基于时变参数 ESO 的固定时间复合终端滑模路径跟踪控制方法。

(2) 理论分析和仿真验证表明,所提方法能够实现高精度的路径跟踪作业要求。此外,对东风 1204-CVT 型拖拉机进行电动化改造,并对设计的无人农机自主导航系统分别进行了低速和高速田间实验测试,验证了所设计系统的可行性和有效性,直线和曲线跟踪精度都满足无人农机实际作业需求。以速度 3 km/h 作业时,直线跟踪横向偏差的最大绝对误差为 0.246 m,平均绝对误差为 0.068 m,标准差为 0.049 m;转弯跟踪横向偏差绝对值的最大值为 0.279 m,平均值为 0.099 m,标准差为 0.069 m;以速度 6 km/h 作业时,直线跟踪横向偏差的最大绝对误差为 0.400 m,平均绝对误差为 0.121 m,标准差为 0.087 m;转弯跟踪横向偏差绝对值的最大值为 0.488 m,平均值为 0.158 m,标准差为 0.101 m。

参 考 文 献

[1] 张漫,季宇寒,李世超,等. 农业机械导航技术研究进展[J]. 农业机械学报,2020,51(9):1-18.
Zhang Man, Ji Yuhao, Li Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 1-18. (in Chinese)

[2] 姬长英,周俊. 农业机械导航技术发展分析[J]. 农业机械学报,2014,45(9):44-54.
Ji Changying, Zhou Jun. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 44-54. (in Chinese)

[3] 贾全,张小超,苑严伟,等. 拖拉机自动驾驶系统上线轨迹规划方法[J]. 农业机械学报,2018,49(4):36-44.
Jia Quan, Zhang Xiaochao, Yuan Yanwei, et al. Guided trajectory planning method for tractor autopilot system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 36-44. (in Chinese)

[4] 沈跃,张亚飞,刘慧,等. 农业装备自动控制技术研究综述[J]. 农业机械学报,2023,54(8):1-18.
Shen Yue, Zhang Yafei, Liu Hui, et al. Research review of agricultural equipment automatic control technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 1-18. (in Chinese)

[5] 戴增辉,何凤琴. 智能农机自动导航系统应用研究[J]. 农机化研究,2018,40(2):202-206.
Dai Zenghui, He Fengqin. Research on the application of intelligent automatic navigation system of agricultural machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(2): 202-206. (in Chinese)

[6] 朱启明,张珍,潘朝勃. 基于 ROS 的 GNSS 定位终端设计与测试[J]. 信息与电脑(理论版),2022,34(17):14-16.
Zhu Qiming, Zhang Zhen, Pan Chaobo. Design and testing of a GNSS positioning terminal based on ROS[J]. China Computer & Communication, 2022, 34(17): 14-16. (in Chinese)

[7] 芦倩,李晓娟,关永,等. 面向数据流的 ROS2 数据分发服务形式建模与分析[J]. 软件学报,2021,32(6):1818-1829.
Lu Qian, Li Xiaojuan, Guan Yong, et al. Modeling and analysis of ROS2 data distribution service for data flow[J]. Journal of Software, 2021, 32(6): 1818-1829. (in Chinese)

[8] 王荣浩,周浩. 基于 ROS2 架构的地面多无人车自主协同编队控制实现[J]. 自动化技术与应用,2025,44(3):7-11, 104.
Wang Ronghao, Zhou Hao. Realization of autonomous cooperative formation control of multi-unmanned ground vehicles based on ROS2 architecture[J]. Techniques of Automation and Applications, 2025, 44(3): 7-11, 104. (in Chinese)

[9] 纪东,魏阳杰,李宇溪,等. ROS2 多线程执行器上 DAG 任务的优先级分配方法[J]. 计算机研究与发展,2023,60(5): 1086-1098.

Ji Dong, Wei Yangjie, Li Yuxi, et al. Priority assignment method of DAG task on ROS2 multithreaded executor[J]. Journal of Computer Research and Development, 2023, 60(5): 1086 – 1098. (in Chinese)

[10] 丁幼春,何志博,夏中州,等. 小型履带式油菜播种机导航免疫 PID 控制器设计[J]. 农业工程学报,2019,35(7):12 – 20.
Ding Youchun, He Zhibo, Xia Zhongzhou, et al. Design of navigation immune controller of small crawler-type rape seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(7): 12 – 20. (in Chinese)

[11] 刘文龙,郭锐,赵静一. 基于预瞄模型的农机路径跟踪预测控制方法[J]. 农业工程学报,2023,39(17):39 – 50.
Liu Wenlong, Guo Rui, Zhao Jingyi. Predictive control method for the path tracking of agricultural machinery based on preview model[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(17): 39 – 50. (in Chinese)

[12] Ding S H, Zhang B B, Mei K Q, et al. Adaptive fuzzy SOSM controller design with output constraints[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2022, 30(7): 2300 – 2311.

[13] 丁晨,魏新华,梅珂琪. 农用拖拉机的自适应二阶滑模路径跟踪控制[J]. 控制理论与应用,2023,40(7):1287 – 1295.
Ding Chen, Wei Xinhua, Mei Keqi. Adaptive second-order sliding mode path tracking control for agricultural tractors[J]. Control Theory & Applications, 2023, 40(7): 1287 – 1295. (in Chinese)

[14] 马悦琦,迟瑞娟,赵彦涛,等. 基于模糊控制的插秧机 LQR 曲线路径跟踪控制器优化方法[J]. 农业机械学报,2023,54 (增刊 1):1 – 8,102.
Ma Yueqi, Chi Ruijuan, Zhao Yantao, et al. Optimization method of LQR curve path tracking controller for unmanned rice transplanter based on fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(S1): 1 – 8, 102. (in Chinese)

[15] 何杰,刘善琪,满忠贤,等. 基于全状态反馈控制的农机自动驾驶曲线路径跟踪方法[J]. 农业机械学报,2025,56(2): 145 – 154.
He Jie, Liu Shanqi, Man Zhongxian, et al. Curve path tracking control of agricultural machinery automatic driving based on full state feedback control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 145 – 154. (in Chinese)

[16] Yang W H, Ding S H, Ding C. Fast super-twisting sliding mode control with anti-peaking extended state observer for path-tracking of unmanned agricultural vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2024, 71(10): 12973 – 12982.

[17] 于洪国,康忠健,陈瑶. 基于双曲正切函数的二阶时变参数扩张状态观测器[J]. 控制理论与应用,2016,33(4):530 – 534.
Yu Hongguo, Kang Zhongjian, Chen Yao. Time-varying parameter second-order extended state observer based on hyperbolic tangent function[J]. Control Theory & Applications, 2016, 33(4): 530 – 534. (in Chinese)

[18] Cui L, Jin N, Chang S P, et al. Fixed-time ESO based fixed-time integral terminal sliding mode controller design for a missile [J]. ISA Transactions, 2022, 125: 237 – 251.

[19] Thrun S, Montemerlo M, Dahlkamp H, et al. Stanley: the robot that won the DARPA grand challenge[J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23(9): 661 – 692.

[20] 陈智博,文龙,杨卫中,等. 基于 DF2204 无级变速拖拉机的农机无人驾驶系统研制[J]. 农业工程学报,2022,38(19): 1 – 9.
Chen Zhibo, Wen Long, Yang Weizhong, et al. Development of the unmanned driving system for agricultural machinery based on DF2204 continuously variable transmission tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(19): 1 – 9. (in Chinese)