

基于扰动观测的 4WSS 电驱动无人农机路径跟踪控制方法

景 亮, 冯 瑞, 沈 跃*, 刘 慧, 何思伟, 张亚飞

(江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013)

摘 要: 为提高四轮独立自转向 (four-wheel self-steering, 4WSS) 电驱动无人农机复杂农田环境下路径跟踪控制精度与抗扰动能力, 该研究提出一种基于非线性扰动观测器的非奇异快速自适应终端滑模复合控制方法。首先, 考虑到农田环境下驱动轮滑移对底盘运动规律的影响, 建立包含未知侧滑速度与转向滑移角的 4WSS 无人农机底盘扩展运动学模型; 其次, 设计非线性扰动观测器, 估计底盘扩展运动学模型中包含未知滑移参数的外部集总扰动, 并引入到滑模面中进行扰动补偿。在此基础上, 针对非奇异快速终端滑模控制的抖振问题, 基于指数趋近律构建一种非线性自适应滑模趋近律, 保证控制器输出转向执行机构可接受的平滑控制量, 并严格证明了所提出复合控制器的稳定性。最后, 分别在农田环境下进行直播作业和喷雾作业场地试验, 结果表明: 当 4WSS 无人农机以 0.4 和 0.6 m/s 的速度跟踪 U 形目标路径时, 相较于传统非奇异快速终端滑模控制方法, 直播作业模式下该方法在不同速度下目标作业路径跟踪的横向误差标准差分别为 8.1 和 9.2 cm。喷雾作业模式下相应的横向误差标准差分别为 5.3 和 7.8 cm。所提方法有效提高了复杂农田场景下 4WSS 无人农机路径跟踪控制的鲁棒性与精度, 且具备良好的抗扰动能力和较强的自适应能力, 满足农业生产的需求。

关键词: 控制; 无人农机; 路径跟踪; 非线性扰动; 观测器; 非奇异快速自适应; 终端滑模控制

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403212

中图分类号: S49

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-23-0073-09

景亮, 冯瑞, 沈跃, 等. 基于扰动观测的 4WSS 电驱动无人农机路径跟踪控制方法[J]. 农业工程学报, 2024, 40(23): 73-81. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403212 <http://www.tcsae.org>

JING Liang, FENG Rui, SHEN Yue, et al. Path tracking control method for 4WSS unmanned agricultural machinery based on disturbance observation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(23): 73-81. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403212 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

农机自主导航技术可有效提高农机作业精度与作业效率, 路径跟踪控制作为农机自主导航的核心技术^[1-4]。国内外已有众多学者展开了大量的研究, 在较为理想的工况下取得了令人满意的效果。但农机需在土壤条件复杂多变, 高度非结构化的农田环境下作业, 如泥泞水田, 崎岖坡地, 湿滑草地等, 在这些场景下农机在作业过程中不可避免地会遇到各种不确定的扰动, 进而影响路径跟踪精度, 甚至影响控制系统的稳定性。因此, 农机自主导航控制方法应具备良好的抗扰动能力和较强的自适应能力。

目前常用的农机路径跟踪控制方法主要包括基于几何模型的控制方法、基于动力学模型的控制方法和基于运动学模型的控制方法^[5]。基于几何模型的控制方法包括纯跟踪控制 (pure pursuit, PP)^[6-7] 和 Stanley 控制^[8-9]。基于简单几何模型的控制方法未考虑车辆动力学特性和转向执行器动态特性, 系统性能依赖于参数的选

择。基于动力学模型的控制方法, 由于机械结构复杂、地面条件动态变化和农机系统参数难以确定等因素, 无法建立准确的农机动力学模型。当系统模型与实际农机模型相差较大时会导致路径跟踪性能恶化。与动力学模型相比, 运动学模型可以简化农机系统的复杂动力学特性, 使控制方法更易设计与实施。运动学模型能够描述农机的位置和姿态信息, 此外, 在较低的作业速度下, 基于运动学模型的路径跟踪控制能够提供快速反馈和实时控制。基于运动学模型的路径跟踪控制精度更高而且便于进行性能优化, 主要有 PID 控制^[10-11]、模型预测控制 (model predictive control, MPC)^[12-13]、反步法 (backstepping)^[14-15]、滑模控制 (sliding mode control, SMC)^[16-17] 以及自适应控制 (adaptive control, APC)^[18-19] 等。其中 SMC 具有快速响应、易于实现且具有较强的鲁棒性和抗扰动能力等优点, 适用于在农田地形崎岖不平、曲率变化大的复杂环境下进行精准的路径跟踪控制任务。

SMC 在农机路径跟踪控制中得到广泛应用, 但存在抖振和收敛时间无限等问题^[20-21]。针对收敛时间无限问题, 可采用终端滑模控制 (terminal sliding mode control, TSMC)。YAO 等^[22] 提出了快速终端滑模控制 (fast terminal sliding mode control, FTSMC), 使系统跟踪误差在有限时间内收敛至平衡点, 提升了瞬态响应性。SHAO 等^[23] 提出了非奇异终端滑模控制 (nonsingular

收稿日期: 2024-03-28 修订日期: 2024-07-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51975260)

作者简介: 景亮, 副教授, 研究方向为智慧农业、农业物联网和智能农业装备。Email: JL517@126.com

*通信作者: 沈跃, 教授, 博士生导师, 研究方向为无人农机智能控制和农业机器人。Email: shen@ujs.edu.cn

terminal sliding mode control, NTSMC), 其控制律中无负指数项, 避免了奇异问题。MOBAYEN 等^[24-25] 提出了非奇异快速终端滑模控制 (nonsingular fast terminal sliding mode control, NFTSMC) 方法, 避免了奇异问题且加快系统收敛速度。学者们采用引入参数可自适应调节的滑模面和改进型趋近律的方法来改善抖振问题。YIN 等^[26] 引入可调参数, 根据系统误差自适应调节滑模面, 减少了抖振现象。李艳等^[27] 提出了一种新型变指数趋近律, 其加入变指数幂次项, 保证系统状态在有限时间内收敛至平衡点, 实现智能小车对目标轨迹的快速跟踪。该研究基于指数趋近律构建一种非线性自适应趋近律, 根据系统状态和滑模面的变化调整指数趋近律中等速趋近项, 以实现系统的快速、稳定的趋近。传统滑模控制方法无法应对农机在实际农田作业中遇到的非匹配性扰动, 导致农机运动学模型理论精度失效, 从而使路径跟踪收敛慢, 跟踪效果差等问题。许多学者将非线性扰动观测器 (nonlinear disturbance observer, NDOB) 与不同的 SMC 结合^[28-29], 在提升路径跟踪控制精度的同时减弱了滑模控制的抖振。

本文以 4WSS 无人农机为研究对象, 针对无人农机复杂农田环境下路径跟踪控制精度低与抗扰动能力弱的问题, 考虑农田环境下驱动轮滑移对地盘运动规律的影响, 建立包含未知侧滑速度与转向滑移角的无人农机地盘扩展运动学模型, 提出一种非线性扰动观测器与非奇异快速自适应终端滑模控制 (nonlinear disturbance observer with nonsingular fast adaptive terminal sliding mode control, NDOB-NFATSMC) 相结合的复合控制方法, 以增强农机在复杂农田环境下的抗扰动能力, 提高农机路径跟踪控制精度, 并进行仿真分析和田间试验验证。

1 4WSS 无人农机运动学模型

本文研究的 4WSS 无人农机底盘结构如图 1 所示, 采用前后轴差速同步转向结构, 基于 4WSS 底盘速度分配驱动原理^[30] 可将该底盘四轮模型简化为前后轮同时转向的两轮自行车模型, 并以车体质心为基准点建立运动学模型, 如图 2 所示。

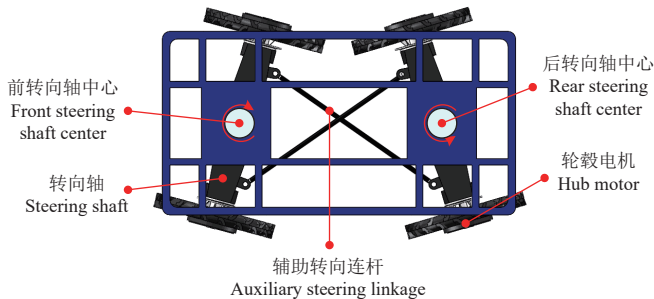


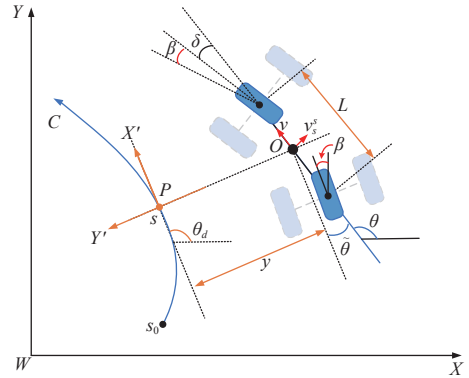
图 1 4WSS 无人农机底盘结构

Fig.1 4WSS(four-wheel self-steering) unmanned agricultural machinery chassis structure

选择 4WSS 无人农机状态量 $(s, y, \tilde{\theta})$, 得到 Frenet 坐标系下农机的运动学跟踪误差模型为

$$\begin{cases} \dot{s} = \frac{v \cos \tilde{\theta}}{c(s)(R-y)} \\ \dot{y} = \rho v \sin \tilde{\theta} \\ \dot{\tilde{\theta}} = \frac{2v \tan \delta}{L} - \frac{v \cos \tilde{\theta}}{(R-y)} \end{cases} \quad (1)$$

式中 ρ 为方向参数, 目标路径在农机左边时 $\rho=1$; 目标路径在农机右边时 $\rho=-1$; 规定路径曲率 $c(s)$ 逆时针方向为正, R 为 P 处曲率半径。



注: YWX 为惯性坐标系; C 为参考路径; O 为车体质心; P 为 O 在 C 上的投影点; Y' 是 P 处路径 C 的法线; X' 是 P 处路径 C 的切线; y 为 O 和 P 之间的横向误差, cm; s 为 C 从初始位置到 P 点的曲线弧长; s_0 是 C 的初始位置; L 为轴距, m; v 为车体速度, $m \cdot s^{-1}$; δ 为前轮转向角, rad; θ 为航向角, rad; θ_d 为目标航向角, rad; $\tilde{\theta}$ 为航向误差, rad; v_s^s 为横向滑移速度, $m \cdot s^{-1}$; β 为滑移角, rad。

Note: YWX is the inertial coordinate system; C is the reference path; O is the vehicle mass centre; P is the orthogonal projection point of O on C ; Y' is the normal line of C at P ; X' is the tangent line of C at P ; y is the lateral deviation between O and P , cm; s is the arc-length of C from an initial position to point P ; s_0 is the initial position of C ; L is the wheelbase, m; v is vehicle speed, $m \cdot s^{-1}$; δ is steering angle of front wheels, rad; θ is the heading angle, rad; θ_d is the target heading angle, rad; $\tilde{\theta}$ is the heading error, rad; v_s^s is transverse slip velocity, $m \cdot s^{-1}$; β is the slip angle, rad.

图 2 4WSS 无人农机运动学模型

Fig.2 4WSS unmanned agricultural machinery kinematic model

引入横向滑移速度 v_s^s 和滑移角 β 得到 4WSS 无人农机地盘扩展运动学跟踪误差模型为

$$\begin{cases} \dot{s} = \frac{v \cos \tilde{\theta}}{c(s)(R-y)} \\ \dot{y} = \rho v \sin \tilde{\theta} - \rho v_s^s \cos \tilde{\theta} \\ \dot{\tilde{\theta}} = \frac{2v \tan(\delta + \beta)}{L} - \frac{v \cos \tilde{\theta}}{(R-y)} + \frac{v_s^s \sin \tilde{\theta}}{(R-y)} \end{cases} \quad (2)$$

定义状态量 $x_1 = y$, $x_2 = \rho v \sin \tilde{\theta}$, 控制量 $u = \tan \delta$, 将误差模型式 (2) 改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + d_1 \\ \dot{x}_2 = a(x_1, x_2) + b(x_1, x_2)u + d_2 \\ a(x_1, x_2) = \rho c(s)(x_2^2 - v^2)/(1 - c(s)x_1) \\ b(x_1, x_2) = [2\rho v^2(1 - x_2^2(\rho^2 v^2)^{-1})^{0.5}]/L \\ d_1 = -\rho v_s^s \cos \tilde{\theta} \\ d_2 = [2\rho v^2(1 - x_2^2(\rho^2 v^2)^{-1})^{0.5}]/L^{-1} \tan \beta + v_s^s \sin \tilde{\theta} (R-y)^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

得到新的系统状态方程为

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u + d \quad (4)$$

$$\begin{cases} f(x) = \begin{bmatrix} x_2 & a(x_1, x_2) \end{bmatrix}^T \\ g(x) = \begin{bmatrix} 0 & b(x_1, x_2) \end{bmatrix}^T \\ d = \begin{bmatrix} d_1 & d_2 \end{bmatrix}^T \end{cases} \quad (5)$$

2 非线性扰动观测器设计

分析状态方程可知, d_1, d_2 为包含漂移扰动的未知外部总扰动。本文基于非线性扰动观测器理论^[31] 对式 (4) 中的未知扰动项 d 进行估计。扰动观测器方程如下:

$$\begin{cases} \dot{l}(x) = \frac{\partial p(x)}{\partial x} \\ \dot{z} = -l(x)z + l(x)(-f(x) - g(x)u - p(x)) \\ \hat{d} = z + p(x) \end{cases} \quad (6)$$

式中 $l(x)$ 为正定增益矩阵, $p(x)$ 为非线性函数, z 是辅助参数向量, $\hat{d}$ 为 d 的估计值, 且:

$$\dot{\hat{d}} = -l(x)\hat{d} + l(x)(\dot{x} - f(x) - g(x)) \quad (7)$$

扰动的观测误差为 $e_d = d - \hat{d}$, 与外部扰动相比, 非线性扰动观测器的动态特性变化更加迅速, 故假设 $\dot{\hat{d}} = 0$, 则有:

$$\begin{aligned} \dot{e}_d &= \dot{\hat{d}} - \dot{d} = \dot{z} + \frac{\partial p(x)}{\partial x} \dot{x} \\ &= -l(x)\hat{d} + l(x)d = -l(x)e_d \end{aligned} \quad (8)$$

令 Lyapunov 函数 $V_1 = \frac{1}{2}e_d^T e_d$, 则:

$$\dot{V}_1 = e_d^T \dot{e}_d = -e_d^T l(x)e_d \leq 0 \quad (9)$$

观测误差 e_d 能渐近收敛于 0, 因此选择适合的增益矩阵 $l(x)$ 可准确估计出系统状态方程中的未知扰动。

3 非奇异快速自适应终端滑模控制器设计

3.1 控制器设计

为保证路径跟踪控制器快速收敛、抖振小, 参考文献 [32], 设计一种 NFTSMC 滑模面 s 如下:

$$s = cx_1 + \alpha x_1^{l/h} + k(x_2 + \hat{d}_1)^{p/q} \quad (10)$$

式中 $\alpha > 0, k > 0, c > 0$; 幂指数项 p, q, h 和 l 是正奇数, 且 $1 < p/q < 2, l/h > p/q$ 。

指数趋近律为

$$\frac{ds}{dt} = -\varepsilon_1 \operatorname{sgn}(s) - k_1 s, \quad \varepsilon_1 > 0, \quad k_1 > 0 \quad (11)$$

式中 $-k_1 s$ 是指数趋近项, k_1 越大, 趋近滑模面速度越快; $-\varepsilon_1 \operatorname{sgn}(s)$ 是等速趋近项, 是为了削弱抖振。联合式 (4) ~ (11) 得到 NFTSMC 控制律 μ :

$$\begin{aligned} u = & \left[-\frac{q}{kp}(x_2 + \hat{d}_1)^{2-p/q} \left(c + \alpha \frac{l}{h} x_1^{l/h-1} \right) + \right. \\ & \left. a(x_1, x_2) + \hat{d}_2 + \varepsilon_1 \operatorname{sgn}(s) + k_1 s \right] b^{-1}(x_1, x_2) \end{aligned} \quad (12)$$

NFTSMC 在快速趋近滑模面时应减小 ε_1 , 但指数趋近律中 ε_1 为定值, 会导致抖振现象。因此, 提出一种非线性自适应滑模趋近律, 根据系统状态和滑模面的变化

自适应调整 ε_1 , 其中 e 为指数函数, 具体如下:

$$\begin{cases} \dot{s} = -f(x_1, s) \operatorname{sgn}(s) - k_1 s \\ f(x_1, s) = \frac{\varepsilon |x_1|}{k_2 + (1 - k_2)e^{-\gamma |s|}} \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |x_1| = 0, \varepsilon > 0, \gamma > 0, k_1 > 0, 0 < k_2 < 1 \end{cases} \quad (13)$$

当 $|s|$ 增大时, 系统状态按照变速趋近律 $f(x_1, s) \operatorname{sgn}(s)$ 和恒速趋近律 $k_1 s$ 到达滑模面; 当 $|s|$ 减小时, $k_1 s$ 逐渐趋近于 0, 这时 $f(x_1, s) \operatorname{sgn}(s)$ 起重要作用, $f(x_1, s)$ 将会收敛于 $\varepsilon |x_1|$, 系统状态 $|x_1|$ 在控制律的作用下逐渐逼近到 0。这表明当系统状态轨迹在接近滑模面表面时, $f(x_1, s) \operatorname{sgn}(s)$ 逐渐收敛到 0, 可有效地减缓了抖振。如图 3 所示, NFATSMC 控制方法不仅可以有效地削弱抖振, 还具有更快的收敛速度。

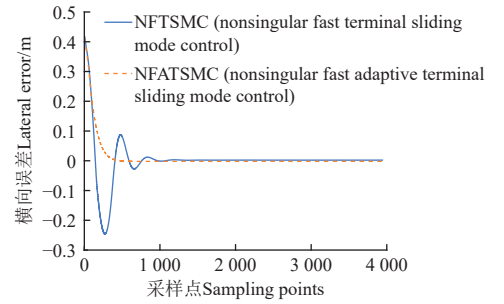


图 3 横向误差

Fig.3 Lateral error

基于非线性自适应滑模趋近律, 设计 NDOB-NFATSMC 控制律为

$$\begin{aligned} u = & -\left[\frac{q}{kp}(x_2 + \hat{d}_1)^{2-p/q} \left(c + \alpha \frac{l}{h} x_1^{l/h-1} \right) + \right. \\ & \left. a(x_1, x_2) + k_1 s + \hat{d}_2 + \frac{\varepsilon |x_1|}{k_2 + (1 - k_2)e^{-\gamma |s|}} \operatorname{sgn}(s) \right] b^{-1}(x_1, x_2) \end{aligned} \quad (14)$$

为进一步削弱抖振, 采用双曲正切函数^[33] $\tanh(s\eta^{-1})$ 代替易引起高频抖振的符号函数 $\operatorname{sgn}(s)$, 双曲正切函数如下:

$$\tanh(s\eta^{-1}) = \frac{e^{s\eta^{-1}} - e^{-s\eta^{-1}}}{e^{s\eta^{-1}} + e^{-s\eta^{-1}}}, \eta > 0 \quad (15)$$

NDOB-NFATSMC 控制律进一步写成:

$$\begin{aligned} u = & -\left[\frac{q}{kp}(x_2 + \hat{d}_1)^{2-p/q} \left(c + \alpha \frac{l}{h} x_1^{l/h-1} \right) + \right. \\ & \left. \frac{\varepsilon |x_1|}{k_2 + (1 - k_2)e^{-\gamma |s|}} \tanh(s\eta^{-1}) + a(x_1, x_2) + \hat{d}_2 + k_1 s \right] b^{-1}(x_1, x_2) \end{aligned} \quad (16)$$

3.2 稳定性证明

选取如下 Lyapunov 函数 V_2 :

$$V_2 = \frac{1}{2}s^2 \quad (17)$$

对于任何给定的 s , 存在 $\eta > 0$, 并且存在以下关系^[34]:

$$\begin{aligned} s \tanh(s\eta^{-1}) &= |s \tanh(s\eta^{-1})| \\ &= |s| |\tanh(s\eta^{-1})| \geq 0 \end{aligned} \quad (18)$$

则有:

$$\begin{aligned}\dot{V}_2 &= s\dot{s} = s(-f(x_1, s)\tanh(s\eta^{-1}) - k_1 s) \\ &= s\left(-\frac{\varepsilon|x_1|\tanh(s\eta^{-1})}{k_2 + (1-k_2)e^{-|y|s}} - k_1 s\right)\end{aligned}\quad (19)$$

$s > 0$ 时:

$$\begin{aligned}\dot{V}_2 &= s\left(-\frac{\varepsilon|x_1|\tanh(s\eta^{-1})}{k_2 + (1-k_2)e^{-|y|s}} - k_1 s\right) \\ &= -\left(\frac{\varepsilon|x_1|\tanh(s\eta^{-1})}{k_2 + (1-k_2)e^{-|y|s}} + k_1 s^2\right) < 0\end{aligned}\quad (20)$$

$s < 0$ 时:

$$\begin{aligned}\dot{V}_2 &= s\left(-\frac{\varepsilon|x_1|\tanh(s\eta^{-1})}{k_2 + (1-k_2)e^{-|y|s}} - k_1 s\right) \\ &\leq s\left(\frac{\varepsilon|x_1|}{k_2 + (1-k_2)e^{-|y|s}} - k_1 s\right) < 0\end{aligned}\quad (21)$$

$s = 0$ 时, $\dot{V} = 0$ 。

通过式 (21) 得到 $\dot{V} \leq 0$, 农机路径跟踪横向误差和航向误差收敛, 并且由终端滑模控制特性可知是全局有限时间收敛。证明 NDOB-NFATSMC 控制器是稳定的。

4 仿真分析

为验证本文 NDOB-NFATSMC 方法的快速收敛性和抗扰动能力, 在动力学仿真软件 Webots 中对比两种方法的控制效果: (1) NFTSMC: $s = cx_1 + x_2 + kx_1^{1/h}$; (2) 本文方法 NDOB-NFATSMC。

4.1 直线路径跟踪仿真分析

综合 4WSS 无人农机的相关参数, 设计直线路径跟踪控制仿真试验的基础参数如下:

车辆轴距 $L=1580$ mm, $v=0.6$ m·s, $c=0.5$, $\alpha=0.6$, $k=0.025$, $l=51$, $h=43$, $p=25$, $q=23$, $\varepsilon=0.025$, $k_1=0.002$, $k_2=0.3$, $\gamma=2.0$, $\eta=0.002$ 。传统 NFTSMC 方法中 $k=0.025$, $c=0.5$, 其余参数保持一致。在仿真第 400 个采样点时加入定值阶跃扰动 $d_1=0.5$, $d_2=0.15$, 在第 500 个采样点停止加入扰动, 仿真结果如图 4 所示。

仿真结果显示, 与 NFTSMC 方法相比, 本文提出的 NDOB-NFATSMC 方法收敛速度更快, 收敛时间也更短。在引入阶跃扰动且未补偿的情况下会出现抖振现象, 但经过扰动观测器对扰动进行精确估计并补偿后, 抖振明显减弱。总体而言, 本文提出的方法具备快速响应能力, 收敛时间由 10.95 s 缩短到 4.27 s, 能够有效地观测外部扰动并减少其引起的抖振, 明显提高了路径跟踪的精度。

4.2 U 形路径跟踪仿真分析

4WSS 无人农机作业模式主要包括喷雾作业和直播作业, 2 种模式的转弯半径分别是 3 和 6 m, 利用 Webots 仿真软件, 分别进行 U 曲线路径跟踪仿真, 路径跟踪结果如图 5 所示。

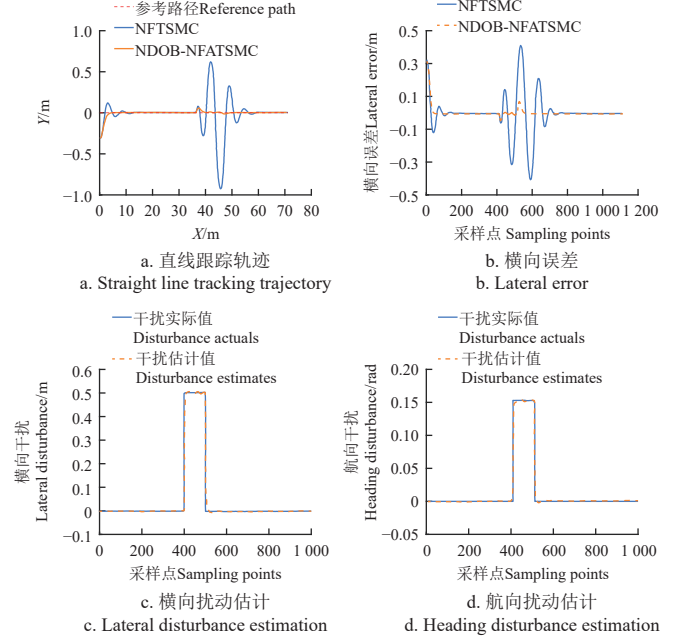


图 4 直线路径跟踪仿真结果
Fig.4 Linear tracking simulation results

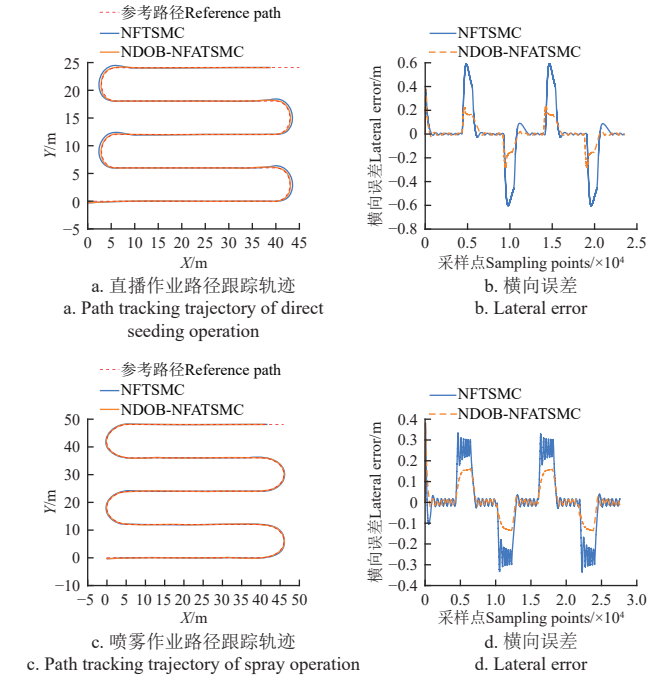


图 5 U 曲线路径跟踪仿真结果
Fig.5 U-curve path tracking simulation results

从 U 曲线路径跟踪结果看出, 本文 NDOB-NFATSMC 方法的误差明显低于 NFTSMC 方法, 横向误差绝对平均值由 12.8 和 8.7 cm 分别减少至 5.1 和 4.2 cm, 横向误差标准差由 23.3 和 13.8 cm 分别减少至 8.2 和 7.8 cm, 并且抖振现象也得到有效降低, 提高了路径跟踪精度。根据跟踪轨迹图可以看出, 尽管存在轻微的横向误差, 但农机作业速度较慢且转向系统响应较缓慢, 轻微抖动对路径跟踪精度没有实质影响, 验证了本文提出的控制方法的适用性。

仿真结果表明, 本文 NDOB-NFATSMC 方法与 NFTSMC 相比有较高的控制精度和较强的抗扰动性能。

5 农田试验

5.1 试验平台

本文 4WSS 无人农机场地试验平台如图 6 所示, 路径跟踪控制系统主要由 RTK-GPS 定位系统、Intel 微型主机和 5G 路由器等构成。通过 RTK-GPS 获得的 4WSS 无人农机位置信息作为状态量数据进行路径跟踪控制; Intel 微型主机借助 RS485 总线实现与整车控制单元 (vehicle control unit, VCU) 之间的信息交互; 5G 移动路由器形成的局域网络实现远程端实时监控 4WSS 无人农机作业; 微型主机搭载了 Ubuntu 系统以及第二代机器人操作系统 (robots operating system, ROS2), 其中 ROS2 是一个专门针对机器人软件开发而设计的通信框架, 能够满足路径跟踪导航控制系统的安全性、可扩展性和容错性要求^[35]。

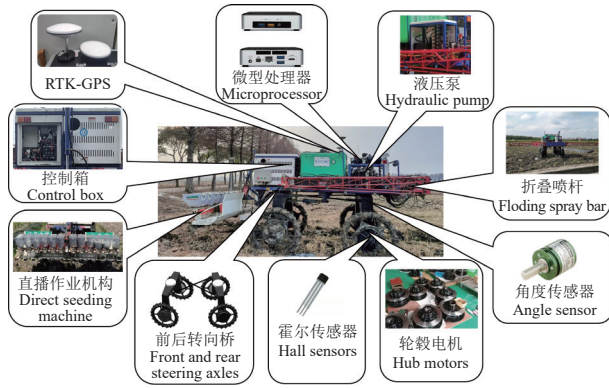


图 6 4WSS 无人农机自主导航控制系统

Fig.6 4WSS unmanned agricultural machinery autonomous navigation control system

5.2 农田作业试验

为进一步验证本文 NDOB-NFATSMC 方法在实际农业环境下的有效性, 2024 年 4 月在上海市松江区土是宝农业合作社农田 (121.035019E, 30.929148N) 分别进行 4WSS 无人农机喷雾作业和直播作业下的路径跟踪控制试验 (图 7), 试验分 2 组进行:

1) 喷雾作业试验: 根据作业机构设置目标作业路径为两段 U 形轨迹 (3 条长度 20 m 的直线与 2 个半径 6 m 的半圆), 4WSS 无人农机作业行驶速度分别为 0.4 和 0.6 m/s。(药箱装载 500 L 水模拟药液, 作业过程喷洒)

2) 直播作业试验: 根据作业机构设置目标作业路径为两段 U 形轨迹 (3 条长度 20 m 的直线与 2 个半径 6 m 的半圆), 4WSS 无人农机作业行驶速度分别为 0.4 和 0.6 m/s。(作业过程直播机构工作)

如图 8 所示, 在直播作业模式下, 转弯半径较小时出现了转弯不及时的情况。在实际作业中, 转弯区域属于非作业区域, 转弯部分的路径跟踪控制精度要求相对较低, 更注重直线段作业区域的跟踪精度。NFTSMC 方法在跨行转向偏离目标路径且转向结束后的上线速度较慢, 导致有效作业面积减少, 降低了作业效率。相比之下, 本文提出的 NDOB-NFATSMC 方法表现出更快的收敛速度和更高的跟踪精度, 保证了农机作业效率, 能够满足农机自主作业的精度需求。

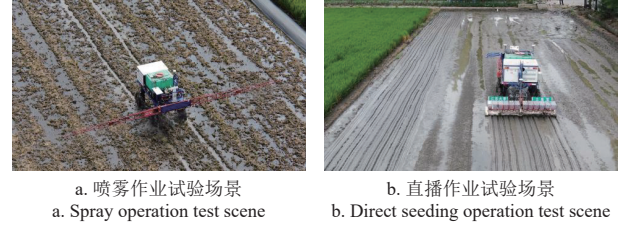


图 7 试验场景

Fig.7 Scene diagram of experiment

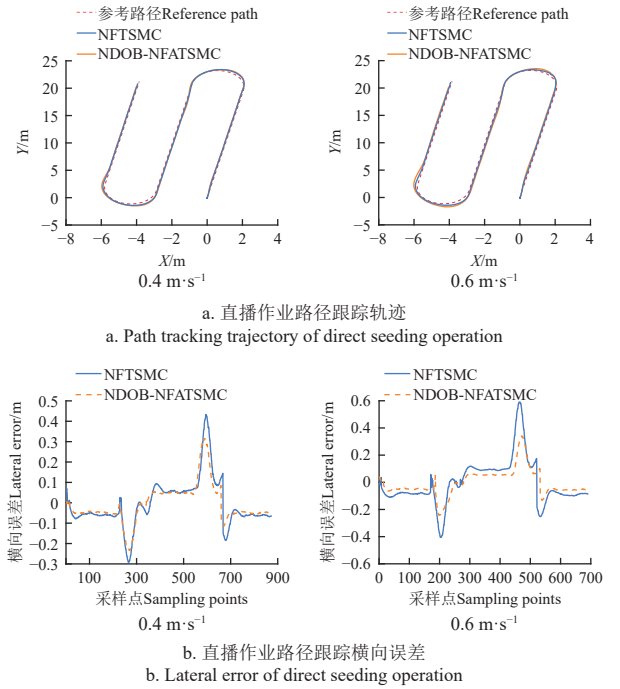


图 8 直播作业路径跟踪

Fig.8 Path tracking trajectory of direct seeding operation

直播作业模式下, 0.4 m/s 时, NFTSMC 方法的最大横向误差为 33.4 cm, 平均绝对横向误差为 8.6 cm, 标准差为 11.6 cm, NDOB-NFATSMC 方法的最大横向误差为 26.3 cm, 平均绝对横向误差为 6.2 cm, 标准差为 8.1 cm, 0.6 m/s 时, NFTSMC 方法的最大横向误差为 43.1 cm, 平均绝对横向误差为 12.4 cm, 标准差为 14.5 cm, NDOB-NFATSMC 方法的最大横向误差为 30.2 cm, 平均绝对横向误差为 7.6 cm, 标准差为 9.2 cm。NDOB-NFATSMC 控制方法的最大横向误差分别减小了 21.26% 和 29.93%, 平均绝对横向误差分别减小了 27.91% 和 38.71%, 横向误差标准差分别减小了 30.17% 和 36.55%。

如图 9 所示, 喷雾作业模式下, 0.4 m/s 时, NFTSMC 方法的最大横向误差为 21.8 cm, 平均绝对横向误差为 7.8 cm, 标准差为 9.3 cm, NDOB-NFATSMC 方法的最大横向误差为 15.3 cm, 平均绝对横向误差为 4.2 cm, 标准差为 5.3 cm。0.6 m/s 时, NFTSMC 方法的最大横向误差为 36.5 cm, 平均绝对横向误差为 11.4 cm, 标准差为 12.5 cm, NDOB-NFATSMC 方法的最大横向误差为 22.2 cm, 平均绝对横向误差为 6.4 cm, 标准差为 7.8 cm。NDOB-NFATSMC 控制方法的最大横向误差分别减小了 29.82% 和 39.18%, 平均绝对横向误差分别减小了 46.15% 和

43.85%，横向误差标准差分别减小了 43.01% 和 37.60%。

6 结 论

1) 建立了四轮独立自转向 (four-wheel self-steering, 4WSS) 电驱动无人农机路径跟踪的运动学跟踪误差模型, 通过引入横向滑移速度和滑移角, 建立 4WSS 无人农机底盘扩展运动学跟踪误差模型, 并设计非线性扰动观测器对系统状态方程中的外部未知集总扰动进行估计补偿。针对非奇异快速终端滑模控制 (nonsingular fast terminal sliding mode control, NFTSMC) 抖振严重问题, 提出了一种非线性自适应滑模趋近律, 根据系统状态和滑模面的变化自适应调整指数趋近律中等速趋近项, 以实现系统的快速、稳定的趋近。以直线和 U 形路径为例, 通过仿真验证了本文提出的非线性扰动观测器与非奇异快速自适应终端滑模控制 (nonlinear disturbance observer with nonsingular fast adaptive terminal sliding mode control, NDOB-NFATSMC) 相结合的复合控制方法能够有效地降低外部扰动引起的抖振现象且能保证农机快速跟踪到参考路径, 跟踪精度明显提高。

2) 农田试验结果表明, 与传统 NFTSMC 控制方法相比, 本文所提的 NDOB-NFATSMC 控制方法使得 4WSS 无人农机在不同作业模式下路径跟踪的最大横向误差分别减小了 21.26%、29.93%、29.82% 和 39.18%, 平均绝对横向误差分别减小了 27.91%、38.71%、46.15% 和 43.85%, 横向误差标准差分别减小了 30.17%、36.55%、43.01% 和 37.60%; 横向误差总体提升明显, 路径跟踪控制精度得到明显改善。此外, 本文提出的 NDOB-NFATSMC 控制器的输出转向角信号更为平滑, 对农机转向机构更为友好。因此, 在复杂农田环境下, 考虑外部扰动的 4WSS 无人农机底盘扩展运动学跟踪误差模型更符合农机的实际运动规律, 基于非线性扰动观测器设计的路径跟踪控制律能够有效提高农机导航精度和自动驾驶的稳定性。

【参 考 文 献】

- [1] 罗锡文, 廖娟, 胡炼, 等. 我国智能农机的研究进展与无人农场的实践[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 8-17. LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Research progress of intelligent agricultural machinery and practice of unmanned farm in China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 8-17. (in Chinese with English abstract)
- [2] 史扬杰, 程馨慧, 奚小波, 等. 农业机械导航路径跟踪控制方法研究进展[J]. 农业工程学报, 2023, 39(15): 1-14. SHI Yangjie, CHENG Xinhui, XI Xiaobo, et al. Research progress on the path tracking control methods for agricultural machinery navigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(15): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- [3] 吴才聪, 吴思贤, 文龙, 等. 拖拉机自动导航变曲度路径跟踪控制[J]. 农业工程学报, 2022, 38(21): 1-7. WU Caicong, WU Sixian, WEN Long, et al. Variable

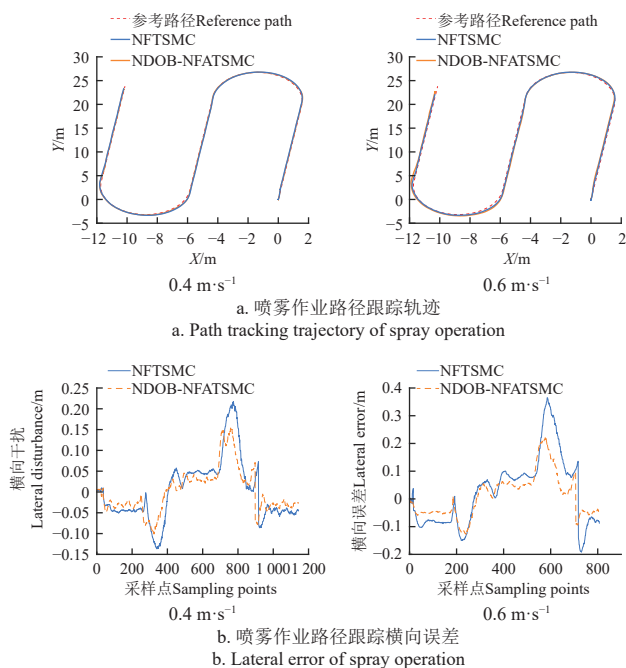


图 9 喷雾作业路径跟踪

Fig.9 Path tracking trajectory of spray operation

如图 10 所示, 不同作业模式下两种控制方法的控制输入曲线, NFTSMC 方法的控制输出信号表现出的抖动现象, 使得农机转向机构难以准确执行, 进而导致农机在作业过程中出现振荡甚至不稳定性, 对作业质量和机械设备造成负面影响。

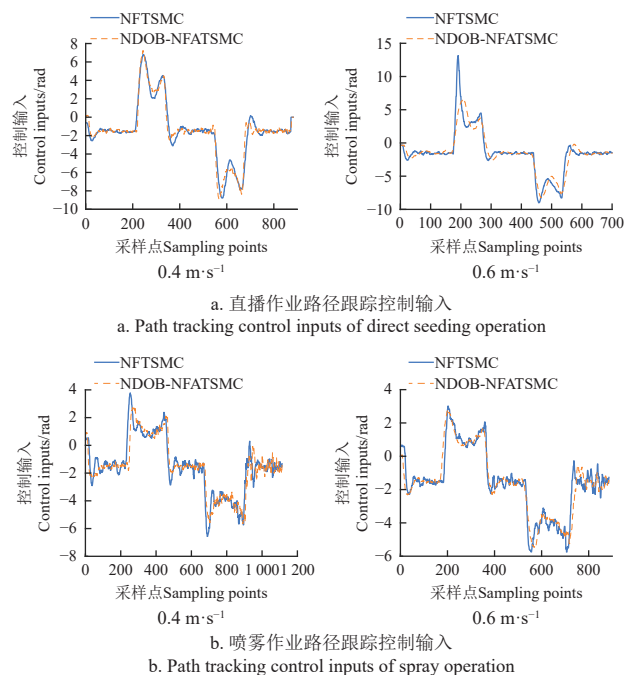


图 10 路径跟踪控制输入

Fig.10 Path tracking control inputs

以上结果表明, 无论是直播作业还是喷雾作业模式, 不同农机作业速度下, 本文提出的 NDOB-NFATSMC 方法在不同作业模式下的目标路径跟踪横向误差和控制输入稳定性均取得了明显改善。

- curvature path tracking control for the automatic navigation of tractors[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(21): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [4] 兰玉彬, 赵德楠, 张彦斐, 等. 生态无人农场模式探索及发展展望[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(9): 312-327.
LAN Yubin, ZHAO Den'an, ZHANG Yanfei, et al. Exploration and development prospect of eco-unmanned farm modes[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(9): 312-327. (in Chinese with English abstract)
- [5] 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 on the research on automatic control of agricultural equipment[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(8): 1-18. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李革, 王宇, 郭刘粉, 等. 插秧机导航路径跟踪改进纯追踪算法[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(5): 21-26.
LI Ge, WANG Yu, GUO Liufen, et al. The navigation path tracking path tracking and improving pure tracking algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(5): 21-26. (in Chinese with English abstract)
- [7] 沈跃, 赵莎, 张亚飞, 等. 基于变前视距离的四轮同步转向农机改进纯跟踪控制[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(3): 1-9.
SHEN Yue, ZHAO Sha, ZHANG Yafei, et al. The four-wheel synchronization of the forefront-based distance to agricultural machinery improvement pure tracking control[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(3): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [8] 崔冰波, 孙宇, 吉峰, 等. 基于模糊 Stanley 模型的农机全田块路径跟踪算法研究[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(12): 43-48.
CUI Bingbo, SUN Yu, JI Feng, et al. The study based on the field of farm machinery of agricultural machinery based on blurring Stanley model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(12): 43-48. (in Chinese with English abstract)
- [9] WANG L, ZHAI Z, ZHU Z, et al. Path tracking control of an autonomous tractor using improved stanley controller optimized with multiple population genetic algorithm[J]. *Actuators*, 2022, 11(1): 22.
- [10] 丁幼春, 夏中州, 彭靖叶, 等. 联合收获机单神经元 PID 导航控制器设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(7): 34-42.
DING Youchun, XIA Zhongzhou, PENG Jingye, HU Ziqian. Design and experiment of the single-neuron PID navigation controller for a combine harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(7): 34-42. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(7): 12-20. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张亮修, 吴光强, 郭晓晓. 自主车辆线性时变模型预测路径跟踪控制[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2016, 44(10): 1595-1603.
ZHANG Liangxiu, WU Guangqiang, GUO Xiaoxiao. Path tracking using linear time-varying model predictive control for autonomous vehicle[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2016, 44(10): 1595-1603. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(17): 39-50. (in Chinese with English abstract)
- [14] HAN Y, LI P, ZHENG Z Q. Sliding-mode and back-stepping control for output tracking systems with unmatched uncertainties via a disturbance observer[J]. *International Workshop on Variable Structure Systems*. 2016, 14(59): 308-311.
- [15] FANG H, FAN R, THUILLLOT B, et al. Trajectory tracking control of farm vehicles in presence of sliding[J]. *Robotics and Autonomous Systems*. 2006, 54(10): 828-839.
- [16] 焦俊, 陈靖, 乔焰, 等. 直流电机驱动农用履带机器人轨迹跟踪自适应滑模控制[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(4): 64-70.
JIAO Jun, CHEN Jing, QIAO Yan, et al. Adaptive sliding mode control of trajectory tracking based on DC motor drive for agricultural tracked robot[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(4): 64-70. (in Chinese with English abstract)
- [17] MATVEEV AS, HOY M, KATUPITIYA J, et al. Nonlinear sliding mode control of an unmanned agricultural tractor in the presence of sliding and control saturation[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2013, 61: 973-987.
- [18] 景亮, 张亚飞, 沈跃, 等. 四轮独立驱动高地隙无人喷雾机轨迹跟踪自适应控制[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(12): 408-416.
JING Liang, ZHANG Yafei, SHEN Yue, et al. Adaptive

- trajectory tracking control of 4WID high clearance unmanned sprayer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(12): 408-416. (in Chinese with English abstract)
- [19] XIN L J, WANG Q L, SHE J H, et al. Robust adaptive tracking control of wheeled mobile robot[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2016, 78: 36-48.
- [20] 黄文岳, 魏新华, 汪岸哲, 等. 基于模糊快速滑模的农用牵引车辆直线路径跟踪控制[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(2): 415-422.
- HUANG Wenyue, WEI Xinhua, WANG Anzhe, et al. The direct line path of the agricultural traction vehicle based on blurred and fast-moving models is tracked and controlled[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(2): 415-422. (in Chinese with English abstract)
- [21] 姜龙腾, 迟瑞娟, 李青君, 等. 基于滑模变结构的农机路径跟踪控制算法研究[J]. *农机化研究*, 2024, 46(2): 229-234.
- JIANG Longteng, CHI Ruijuan, LI Qingjun, et al. The study of the agricultural machine path tracking control algorithm based on sliding mode changes[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2024, 46(2): 229-234. (in Chinese with English abstract)
- [22] YAO M B, XIAO X M, TIAN Y, et al. A fast terminal sliding mode control scheme with time-varying sliding mode surfaces[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2021, 358(10): 5386-5407.
- [23] SHAO X Y, SUN G H, XUE C, et al. Nonsingular terminal sliding mode control for free-floating space manipulator with disturbance[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 181: 396-404.
- [24] MOBAYEN S, MOSTAFAVI S, FEKIH A. Non-singular fast terminal sliding mode control with disturbance observer for underactuated robotic manipulators[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 198067.
- [25] ANH T V, THANH N T, HEE J K. A novel tracking control algorithm with finite-time disturbance observer for a class of second-order nonlinear systems and its applications[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 31373-31389.
- [26] YIN C Q, WANG S R, LI X W, et al. Trajectory tracking based on adaptive sliding mode control for agricultural tractor[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 113021-113029.
- [27] 李艳, 孙蕊. 基于新型变指数趋近律的智能小车轨迹跟踪[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(35): 15114-15122.
- LI Yan, SUN Rui. Intelligent vehicle tracking based on new approach law of variable exponentials[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(35): 15114-15122. (in Chinese with English abstract)
- [28] TAGHIA J, WANG X, LAM S, et al. A sliding mode controller with a nonlinear disturbance observer for a farm vehicle operating in the presence of wheel slip[J]. *Autonomous Robots*, 2013, 41: 71-88.
- [29] 武涛, 李彦明, 林洪振, 等. 基于干扰观测器的直播机路径跟踪快速终端滑模控制[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(12): 24-31.
- WU Tao, LI Yanming, LIN Hongzhen, et al. Fast terminal sliding mode control for autonomous rice seeding machine based on disturbance observer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(12): 24-31. (in Chinese with English abstract)
- [30] HE S W, SHEN Y, ZHANG Y F, et al. Development and evaluation of 4WSS electric-driven chassis for high-clearance sprayer[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1258744.
- [31] CHEN W H, YANG J, GUO L, et al. Disturbance observer-based control and related methods: An overview [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(2): 1083-1095.
- [32] WANG B H, MI G S. Nonsingular fast terminal sliding mode control for manipulator based on combinatorial reaching law[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2170(1): 012026.
- [33] XU B, ZHANG L, JI W. Improved non-singular fast terminal sliding mode control with disturbance observer for PMSM drives[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 7(4): 2753-2762.
- [34] AGHABALA M P, AKBARI M E. A chattering-free robust adaptive sliding mode controller for synchronization of two different chaotic systems with unknown uncertainties and external disturbances[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2012, 218(9): 5757-5768.
- [35] 黄开宏, 杨兴锐, 曾志文, 等. 基于 ROS 户外移动机器人软件系统构建[J]. *机器人技术与应用*, 2013(4): 37-41.
- HUANG Kaihong, YANG Xingrui, ZENG Zhiwen, et al. Construction of outdoor mobile robot software system based on ROS[J]. *Robotic Technology and Application*, 2013(4): 37-41. (in Chinese with English abstract)

Path tracking control method for 4WSS unmanned agricultural machinery based on disturbance observation

JING Liang , FENG Rui , SHEN Yue^{*} , LIU Hui , HE Siwei , ZHANG Yafei

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Agricultural and rural modernization has been ever accelerating with the promotion of rural revitalization strategy. The transformation of agriculture to intelligence, precision, and environmental protection has been the main trend of development in recent years. Among them, autonomous navigation of unmanned agricultural machinery has drawn much attention to effectively improve accuracy and efficiency. Path tracking control is one of the key technologies in the autonomous navigation of agricultural machinery. A lot of research has been done under relatively ideal working conditions. However, agricultural machinery has to operate in complex and various soil conditions, as well as highly unstructured farmland environments, such as muddy paddy fields, rugged slopes, and slippery grasslands. Agricultural machinery can inevitably encounter various uncertain disturbances during operation in these scenarios, leading to the low accuracy of path tracking and the stability of the control system. Therefore, anti-disturbance and strong self-adaptability are required in the autonomous navigation control of agricultural machinery. This study aims to improve the path following control accuracy and anti-disturbance ability of four-wheel self-steering (4WSS) electrically driven unmanned agricultural machinery in complex farmland environments. A control system of non-singular fast adaptive terminal sliding mode was also proposed using a nonlinear disturbance observer. Firstly, a 4WSS chassis extended kinematic tracking error model of unmanned agricultural machinery was established to consider the influence of drive wheel slip on the chassis motion in the farmland environment, including unknown sideslip speed and steering slip angle. Secondly, a nonlinear disturbance observer was designed to estimate the external lumped disturbance with unknown slip parameters, according to the chassis extended kinematic tracking error model. The disturbance compensation was introduced into the controller. A nonlinear adaptive sliding mode was also constructed to slow down the jitter problem of the nonsingular fast terminal sliding mode, according to the exponential approximation. The controller outputs confirmed the acceptable smooth control amount of the steering actuator. The stability of the composite controller was verified at the same time. Once the 4WSS unmanned agricultural machine tracked the U-shaped target path at 0.4 and 0.6 m/s, the standard deviation in the lateral error of the target operation path was reduced to 8.1 and 9.2 cm at different speeds, respectively, compared with the traditional. Furthermore, the standard deviation of lateral error was reduced to 5.3 and 7.8 cm, respectively, in spray mode. The robustness and accuracy of the path tracking control of 4WSS unmanned agricultural aircraft were effectively improved in the complex farmland environment. Better anti-disturbance and strong adaptive ability were achieved to meet the needs of agricultural production.

Keywords: control; unmanned agricultural machinery; path tracking; nonlinear disturbance; observer; nonsingular fast adaptive; terminal sliding mode control