

垄耕模式的无人四驱四转移动作业平台路径跟踪控制

王 阳，朱孝勇^{*}，徐 磊，杨天宇

(江苏大学电气信息工程学院，江苏省 镇江市 212013)

摘 要：为了提高垄耕模式的无人四驱四转（four-wheel independent driving and four-wheel independent steering, 4WID-4WIS）移动作业平台路径跟踪控制精度和稳定性，该研究提出一种基于非线性干扰观测器（nonlinear disturbance observer, NOB）的路径跟踪控制策略。考虑到转弯区域跟踪误差较大，引入原地转向数学模型，设计基于原地转向的航向角 PI 控制与纯追踪控制的切换控制策略，以实现转弯路径精准跟踪。在此基础上，根据横向偏差和路径弯曲度，设计基于前视距离函数的纯追踪算法及模糊比例补偿器，构建基于 NOB 的前馈补偿器，以减小上线距离和位置超调。最后对所设计的跟踪控制策略进行仿真和试验验证，结果表明：与传统纯追踪控制相比，所设计的路径跟踪控制策略在 3 种初始横向偏差下，上线距离、超调、全线平均绝对误差分别减小了 32.2%~43.4%、0~42.4% 和 27.7%~49.5%，且曲线区域平均绝对误差减小 33.7%~39.5%；在颠簸硬石板、草地、农田翻耕路况下的稳态区平均绝对误差分别减小了 6.25%、33.3% 和 41.7%。该路径跟踪控制策略有效提高了系统鲁棒性和作业路径跟踪精度，可为垄耕模式的无人四驱四转农业机械导航系统开发提供创新思路和技术参考。

关键词：无人驾驶；路径跟踪；干扰观测器；前馈补偿；垄耕种植；前视距离

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202308159

中图分类号: S126

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-01-0037-11

王阳, 朱孝勇, 徐磊, 等. 垄耕模式的无人四驱四转移动作业平台路径跟踪控制[J]. 农业工程学报, 2024, 40(1): 37-47.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202308159 <http://www.tcsae.org>

WANG Yang, ZHU Xiaoyong, XU Lei, et al. Path tracking of farming platform with unmanned four-wheel independent driving and four-wheel independent steering in ridge tillage mode[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(1): 37-47. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202308159 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

垄耕种植作为中国农业耕作方式两大体系之一，历史悠久，优势明显^[1]。中国农业农村部 2023 年数据显示，以垄耕种植为主的蔬菜设施农业面积超过 3 200 万亩，但较低的机械化水平对蔬菜产业现代化发展的制约日益突出。无人移动作业平台可有效提高农作物监测、施肥、喷药、收获等生产过程中的能源、时间利用效率，近年来受到广泛关注。然而，传统移动作业平台难以适应垄耕的 Π 型行驶路径，转弯和换行上线时可能造成较大跟踪误差和振荡。同时，曲线、复杂的土壤墒情、颠簸地况等复杂工况^[2]可能导致较为严重的跟踪误差和系统振荡。因此，开展垄耕模式的无人移动作业平台 Π 型路径跟踪控制研究已成为亟待解决的问题之一。

位姿精度足够的情况下，底盘系统和路径跟踪控制是提高移动作业平台导航系统工作性能的关键^[3]。在底盘系统方面，针对传统农业机械机动性不足、灵活性较

低、轮胎打滑等问题^[4]，文献 [5] 提出了一种液压辅助转向方法以协调四轮高效转向，文献 [6] 采用四轮差速同步策略和电动推杆结合的转向控制方法以实现灵活转向，文献 [7] 基于前后桥转向的农业移动平台提出一种扩展阿克曼转向策略，但对垄耕模式、设施农业、丘陵山地等^[8]场景，仍存在农业机械转弯占地较大、转向角不足等诸多挑战。

此外，也有专家学者借鉴汽车领域研究成果，对四驱四转（four-wheel independent driving and four-wheel independent steering, 4WID-4WIS）移动作业平台做了大量研究。文献 [9] 采用自适应模糊 PID 算法协调控制四驱四转样机行走转向，文献 [10] 设计了一种四轮偏心转向控制方法以提高系统的操作性，文献 [11] 和文献 [12] 分别基于阿克曼四轮转向模型设计 PID 和模型预测路径跟踪算法。然而，目前四驱四转研究成果主要集中于转向、驱动协调控制和阿克曼模型的自主导航等，主要依靠人操作实现原地转向、楔形行走等转向灵活性，但实现 Π 型路径近似 0 转弯半径区域内的精准路径跟踪仍然存在诸多挑战。

当前，路径跟踪控制方法主要有与动力学模型相关、与模型无关和与运动学模型相关 3 大类^[13]。与动力学模型相关的方法有模型预测控制、自适应控制、滑模控制等，文献 [14] 在四驱四转车辆动力学模型和力反馈结构基础上设计模型预测路径跟踪控制器；文献 [15] 采用二

收稿日期: 2023-08-21 修订日期: 2023-12-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (51937006); 江苏省农业科技自主创新资金项目 (CX(23)1024)

作者简介: 王阳, 博士生, 研究方向为现代农业装备的高质量精准导航作业技术以及协同控制等。Email: 2112107013@stmail.ujs.edu.cn

*通信作者: 朱孝勇, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代农业装备的电机驱动、智能控制等。Email: zxyff@ujs.edu.cn

轮车模型简化车辆动力学特性并设计鲁棒自适应路径跟踪控制器；文献 [16] 设计了基于滑模的横摆力矩控制器以实现横向稳定路径跟踪控制。该类方法一般需要对车体动力学分析与建模，而复杂的土壤墒情增大了轮胎力、地面附着系数等参数的计算难度，同时作业过程中多维作用力的耦合和载荷转移导致动力学模型不准确，因此系统不确定和鲁棒性不足，仍是垄耕模式的农机导航系统亟待解决的难题。

与模型无关的跟踪控制方法往往忽略环境因素，通过控制算法的鲁棒性满足跟踪精度的要求。其中，PID 控制、模糊控制等已在收获机 [17]、拖拉机 [18]、插秧机 [19] 等自动驾驶控制中取得了良好的应用效果，是农机自动驾驶系统比较普遍的控制方法 [20]。但环境、作业对象等不确定性因素影响突出，往往需要增加额外的补偿机制，该类控制方法面临进一步提高收敛速度、响应速度、抗扰动性等问题。

与运动学模型相关的跟踪控制方法在低速工况的农机运用广泛，包括纯追踪算法、线性二次型调节控制、滑模控制等 [21]。文献 [22] 利用模糊控制解决了农机纯追踪中前视距离难以确定的问题，文献 [23] 设计曲率和位姿偏差的代价函数以实现纯追踪控制中最优预瞄点自适应搜索。然而，现有纯追踪往往忽略农机上线收敛性能，无法满足垄耕模式需频繁换行上线的精度要求，且不具有较好的鲁棒性。此外，鲁棒性和可靠性是无人移动作业平台关键评价指标之一。文献 [24] 提出一种基于线性二次型的反馈方法以实现路径跟踪鲁棒控制；文献 [25] 设计反步法滑模路径跟踪控制器以提高复杂环境下农业机器人系统鲁棒性，文献 [26] 设计非线性干扰观测器 (nonlinear disturbance observer, NOB) 补偿运动学模型以提高滑模路径跟踪控制器的精度，但滑模控制依然面临系统惯性、切换函数等导致车轮转向抖动的问题，进而影响系统稳定性。

综上，针对垄耕模式下 Π 型路径农田环境，为了实现四驱四转移动作业平台在转弯区域路径跟踪精准控制，同时提高频繁换行的快速收敛上线和跟踪性能以及提高系统的鲁棒性能，本文提出一种基于 NOB (nonlinear disturbance observer, NOB) 的无人四驱四转移动作业平台路径跟踪控制策略，通过引入原地转向模型，设计基于原地转向的切换控制策略，以提高转弯跟踪精度。在此基础上，根据横向偏差和路径弯曲度，设计基于前视距离函数的纯追踪算法及模糊比例补偿器，构建基于 NOB 的前馈补偿器，以提高系统鲁棒性和作业路径跟踪精度。并通过仿真和试验，对本策略的有效性、路径跟踪精度进行验证，以为无人四驱四转农业机械导航系统开发提供创新思路和技术参考。

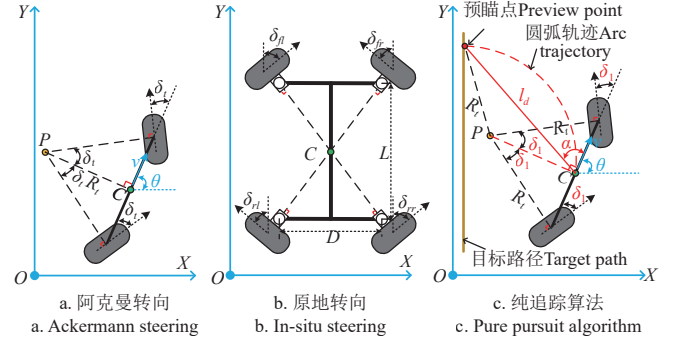
1 运动学建模与路径跟踪控制

1.1 四驱四转运动学模型

针对四驱四转移动作业平台，本文采用阿克曼四轮转向模型和原地转向模型，满足不同转向模式需求。

(1) 基于阿克曼四轮转向的运动学模型

根据文献 [25]，将阿克曼四轮转向模型的移动作业平台简化为二轮车前后转向模型，建立惯性坐标系。二轮车模型如图 1a 所示。



注：C 为移动作业平台前后轴中心；P 为 t 时刻瞬时转向中心； δ_f 为 t 时刻二轮车模型前、后轮转向角，rad； R_t 为 t 时刻转向半径，m； θ 为移动平台航向角，rad； v 为移动平台速度， $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ； δ_{fl} 、 δ_{fr} 分别为左前、右后轮转向角，rad； δ_{rl} 、 δ_{rr} 分别为右前、左后轮转向角，rad； D 为轮距，m； L 为轴距，m； l_d 为前视距离，m； α 为前视距离方向与平台航向夹角，rad； δ_1 为纯追踪算法输出的转向角，rad。

Note: C is the center of the front and rear axles of the farming platform; P is the instantaneous steering center at time t ; δ_f is the steering angle of the front and rear wheels of the two wheeled vehicle model at time t , rad; R_t is the turning radius at time t , m; θ is heading angle of farming platform, rad; v is speed, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; δ_{fl} and δ_{fr} are left front wheel steering angle and right rear wheel steering angle respectively, rad; δ_{rl} and δ_{rr} are right front wheel steering angle and left rear wheel steering angle respectively, rad; D is wheelbase, m; L is axle track, m; l_d is the lookahead distance, m; α is angle between lookahead direction and platform heading, rad; and δ_1 is steering angle output by pure pursuit algorithm, rad.

图 1 转向方式与算法示意图

Fig.1 Schematic diagram of steering mode and algorithm

二轮车模型前、后轮转向角 δ_t 为

$$\delta_t = \arctan(2L/R_t) \quad (1)$$

由式 (1) 可得基于阿克曼四轮转向的运动学模型为

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = v/R_t = (2v \tan \delta_t)/L \end{cases} \quad (2)$$

式中 \dot{x} 为车体在 X 轴方向的速度，m/s； \dot{y} 为车体在 Y 轴方向的速度，m/s； $\dot{\theta}$ 为车体航向角速度，rad/s。

(2) 基于原地转向的运动学模型

转向电机控制前、后车轮分别朝车身内、外侧转向，为行使阻力最小，应满足轮速方向与对角线垂直，如图 1b 所示。以车体中轴线为参考，转向角顺时针为负，逆时针为正，则每个车轮转向角为

$$\begin{cases} \delta_{fl} = \delta_{rr} = -\arctan(L/D) \\ \delta_{fr} = \delta_{rl} = \arctan(L/D) \end{cases} \quad (3)$$

由于车体按给定航向角速度 ω 围绕中心 C 旋转，在 X 轴和 Y 轴方向的速度均为 0，因此原地转向的运动学模型可简化为

$$\dot{\theta} = \omega \quad (4)$$

1.2 垄耕模式的路径跟踪控制策略

为实现垄耕模式的 Π 型路径跟踪控制，分别定义作业路径和转弯路径，作业路径与转弯路径相交形成拐角。

根据农田垄行数量 n ，将整条路径拆分为 $2n-1$ 段，作业路径的序号为 $2i-1$ ($i \leq n, i=1,2,3 \dots n$)，转弯路径的序号为 $2i$ ，如图 2 所示。按照序号顺序每次仅加载一条作业/转弯路径，完成当前作业/转弯路径跟踪后，加载下一条作业/转弯路径。

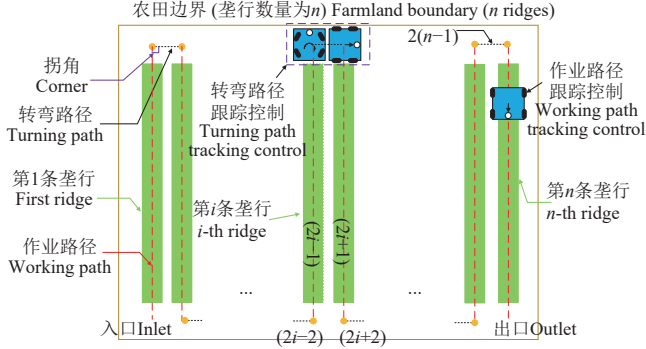


图 2 II 型路径示意图
Fig.2 Schematic diagram of II type path

本文提出的垄耕路径跟踪控制策略分为转弯路径跟踪控制和作业路径跟踪控制 2 部分。将 II 型路径按上文预处理，根据反馈位姿加载作业/转弯路径从而进入作业/转弯路径跟踪控制；作业路径跟踪控制解决换行上线初始偏差、曲线以及复杂地况扰动等导致跟踪精度较差问题，转弯路径跟踪控制解决转弯拐角导致跟踪效果较差问题。控制框图如图 3 所示。

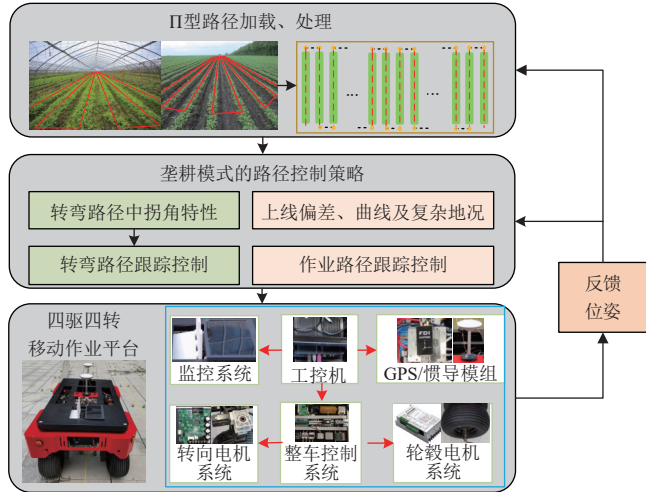


图 3 四驱四转移动作业平台路径跟踪控制框图
Fig.3 Block diagram of path tracking control for 4WID-4WIS farming platform

2 转弯路径跟踪控制

转弯区域由转弯路径和 2 个拐角 (分别位于转弯路径起点、终点，图 2) 组成，这导致拐角位置处车体航向角与目标转弯/作业路径朝向角度偏差较大以及纯追踪控制效果较差。为适应转弯拐角特性和实现转弯路径精准跟踪，本文引入原地转向模型，设计基于原地转向的航向角 PI 控制器、纯追踪控制器以及两者切换控制策略，控制框图如图 4 所示。

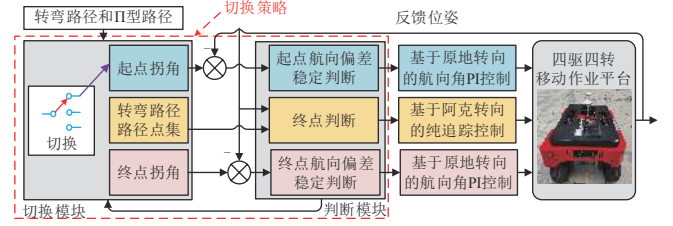


图 4 转弯路径跟踪控制框图
Fig.4 Turning path tracking control block diagram

切换控制策略负责两种控制器切换时机，由切换模块和判断模块组成。首先由当前转弯路径和整条 II 型路径输入至切换模块以计算转弯路径起点处拐角值、终点处拐角值和转弯路径点集，初始默认切换、加载起点拐角值；然后以目标起点拐角与反馈航向角的航向偏差输入至起点航向偏差稳定判断模块，若航向偏差为 0 且稳定，则进入切换模块加载转弯路径点集，否则进入基于原地转向的航向角 PI 控制模块以减小航向偏差。完成起点处航向角调整后，将转弯路径点集和反馈位置输入至终点判断模块，若反馈位置与转弯路径终点距离小于预设值，则进入切换模块加载终点拐角值，否则进入基于阿克曼四轮转向的纯追踪控制模块以跟踪转弯路径。完成转弯路径跟踪后，对终点拐角处的航向偏差控制与起点类似。最终实现转弯路径精准跟踪并为作业路径跟踪控制提供较好的初始位姿。

根据图 1c 可知在转弯路径上输出转向角 δ_1 为

$$\delta_1 = \arctan(L \sin(\alpha)/l_d) \quad (5)$$

基于原地转向的航向角 PI 控制实现拐角处航向偏差快速收敛，输出的航向角速度 ω 为

$$\omega = k_p e(k) + k_i \sum_{j=1}^{j=k} e(j) \quad (6)$$

式中 k_p 、 k_i 分别为比例增益和积分增益， $e(k)$ 、 $e(j)$ 分别为第 j 和 k 次采样的航向角偏差。

3 作业路径跟踪控制

作业路径跟踪控制主要由基于前视距离函数的纯追踪算法及模糊比例补偿器和基于 NOB 的前馈补偿器组成，控制框图如图 5 所示。

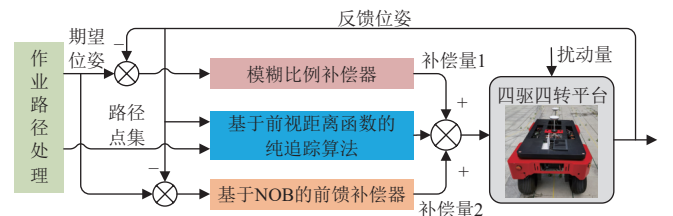


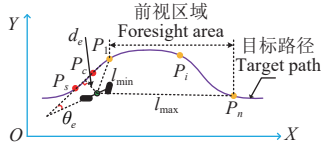
图 5 作业路径跟踪控制框图
Fig.5 Working path tracking control block diagram

3.1 前视距离函数纯追踪算法及模糊比例补偿器

基于前视距离函数的纯追踪算法可减小上线距离，提高曲线跟踪性能，但会造成较为严重的上线位置超调，模糊比例补偿器则可弥补超调缺陷，提高换行上线收敛性能。

(1) 基于前视距离函数的纯追踪算法

上线时航向偏差达到期望值后, 跟踪误差主要源于横向偏差。横向偏差越大, 快速上线则需更大转向角, 反之转向角较小。由纯追踪可知, 前视距离越小, 转向角越大, 反之越小。由此可知, 前视距离与横向偏差应为负相关。由于路径曲率对前视距离影响很大, 曲率越大, 前视距离越小, 跟踪精度越高^[27], 前视距离与曲率也为负相关。由于路径曲率无法准确获取, 本文预设最大和最小前视距离, 将最小、最大前视距离截取的前视区域离散成若干个路径点, 如图 6 所示。



P_i 为第 i 个路径点; l_{\max} 、 l_{\min} 分别为预设的最大、最小前视距离, m ; P_c 、 P_s 分别为目标路径点中距离车体中心的最近点与次近点; d_e 为横向偏差, m , 定义在目标路径上左方为正, 反之为负; θ_e 为航向偏差, rad , 定义逆时针为正, 逆为负。

Note: P_1 and P_n are initial and endpoints of the foresight area, respectively; P_i is the i -th path point; l_{\max} and l_{\min} are the preset maximum and minimum lookahead distances, m ; P_c and P_s are the closest and second closest points in the target path point to the center of the farming platform; d_e is the lateral deviation, m , defined as positive on the left side of the target path and negative on the contrary; θ_e is the heading deviation, rad , defined as counterclockwise as positive and counterclockwise as negative.

图 6 路径弯曲度与姿态偏差示意图

Fig.6 Schematic diagram of path curvature and attitude deviation

计算前视区域积分长度和起点到终点的直线长度, 则路径弯曲度 c 为

$$c = \|P_n - P_1\| - \sum_{i=1}^n \|P_{i+1} - P_i\| \quad (7)$$

结合路径弯曲度、前视距离与纯追踪算法的关系, 为了减小上线距离和提高曲线跟踪精度, 本文设计了一种前视距离函数 l_{nd} 。结合式 (5), 前视距离函数的纯追踪算法输出 δ_2 为

$$\begin{cases} \delta_2 = \arctan(L \sin(\alpha)/l_{nd}) \\ l_{nd} = (l_{\max} - l_{\min}) e^{-k_1 |d_e| - k_2 |c|} + l_{\min} \end{cases} \quad (8)$$

式中 k_1 、 k_2 为预设调节系数。

(2) 模糊比例补偿器

较小的前视距离可减小上线距离, 但会造成较大的超调和振荡^[28], 因为纯追踪算法本质是横向偏差比例控制器^[29], 忽略了对航向偏差的控制, 导致在移动作业平台逼近目标路径附近, 航向角偏差较大。因此本文设计了一种模糊比例补偿器。首先以横向误差 d_e 和航向误差 θ_e 作为二维模糊控制器的输入量, 比例增益 k_{p1} 作为输出, 其中 k_{p1} 、 d_e 、 θ_e 的基本论域由试验确定, 输入输出量的隶属函数均为三角隶属度函数。其次, 为实现在满足稳定性前提下上线距离与超调最小, k_{p1} 模糊控制规则的基本原则为: 当横向偏差 d_e 负值较小、航向误差 θ_e 正值较大, k_{p1} 应输出负值较大; 当横向偏差 d_e 正值较小、航向误差 θ_e 负值较大, k_{p1} 应输出正值较大。最后, 根据模糊输出的比例增益 k_{p1} 和航向偏差 θ_e 确定转向角补偿量 δ_3 :

$$\delta_3 = k_{p1} \theta_e \quad (9)$$

3.2 基于 NOB 的前馈补偿器设计

纯追踪是计算某个时刻下的转向角, 而忽略了相邻时刻间移动作业平台机械振动^[15]、测量误差^[26]、复杂多变的地况^[15,26]、延时误差^[30]、运动学模型不准确^[26,31]等因素对航向角速度造成的扰动量, 可能导致车体偏离纯追踪算法计算的期望路径。为解决扰动问题, 本文设计了一种基于 NOB 的前馈补偿器: 首先在运动学模型引入航向角速度扰动量, 建立位姿误差状态方程; 然后构建 NOB 以实现扰动量精确观测; 最后将观测量通过前馈补偿器解算出转向补偿角, 抵消扰动。

(1) NOB

在运动学模型中引入扰动量 ξ , 有:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = 2v \tan(\delta_i)/L + \xi \end{cases} \quad (10)$$

以横向偏差 d_e 和航向角偏差 θ_e 为状态变量, 建立位姿偏差状态方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{d}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \sin \theta_e \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 2v/L \end{bmatrix} \tan \delta + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \xi \quad (11)$$

定义:

$$\begin{cases} \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 & \dot{x}_2 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \dot{d}_e & \dot{\theta}_e \end{bmatrix}^T \\ u = \tan \delta_i \\ d(t) = \xi \\ \mathbf{g}_1(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & 2v/L \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{g}_2(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}^T \end{cases} \quad (12)$$

式中 x_1 、 x_2 为状态变量, u 为控制输入, $d(t)$ 为扰动量, 则式 (11) 可表示为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}_1(\mathbf{x})u + \mathbf{g}_2(\mathbf{x})d(t) \\ \mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} v \sin x_2 & 0 \end{bmatrix}^T \end{cases} \quad (13)$$

为实现扰动量观测^[32], 定义 NOB 表达式如下:

$$\begin{cases} \dot{z} = -(\mathbf{l}(\mathbf{x})\mathbf{g}_2(\mathbf{x}))z - \mathbf{l}(\mathbf{x})(\mathbf{g}_2(\mathbf{x})\mathbf{p}(\mathbf{x}) + \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}_1(\mathbf{x})u) \\ \hat{d}(t) = z + \mathbf{p}(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (14)$$

式中 $\hat{d}(t)$ 为扰动观测量, z 为观测器的内部状态变量, $\mathbf{p}(\mathbf{x})$ 为观测函数, 定义为

$$\mathbf{p}(\mathbf{x}) = \mathbf{l}(\mathbf{x})\mathbf{x} = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix}^T \quad (15)$$

式中 $\mathbf{l}(\mathbf{x})$ 为观测器增益矩阵。

假设式 (13) 中 $d(t)$ 有界, 相比 $\hat{d}(t)$ 变化缓慢, 则有:

$$\begin{cases} e_d = d(t) - \hat{d}(t) \\ \dot{e}_d = -\dot{\hat{d}}(t) = -\dot{z} - \dot{\mathbf{p}}(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (16)$$

将式 (13)~(15) 带入式 (16) 整理可得:

$$\dot{e}_d + \mathbf{l}(\mathbf{x})\mathbf{g}_2(\mathbf{x})e_d = 0 \quad (17)$$

若 $\mathbf{l}(\mathbf{x})\mathbf{g}_2(\mathbf{x}) > 0$, 则有:

$$e_d = C_0 \exp(-\mathbf{l}(\mathbf{x})\mathbf{g}_2(\mathbf{x})t) \quad (18)$$

式中 C_0 为预设常数。

由式 (18) 可知, $T=1/\mathbf{l}(\mathbf{x})\mathbf{g}_2(\mathbf{x})$, 观测器收敛。为简

化观测器设计, 可设观测器反馈增益 $l_1=0$, $l_2>0$, 满足 $l(x)g_2(x)>0$, 则时间常数为 $T=1/l_2$ 。

(2) 前馈补偿器

前馈补偿器通过输出转向角补偿量 δ_4 抵消 t 时刻下航向角速度扰动量, 则有:

$$2v \tan(\delta_i + \delta_4)/L + \dot{d}(t) = 2v \tan(\delta_i)/L \quad (19)$$

根据式 (19) 可得补偿器控制规律为

$$\tan \delta_4 = -\frac{\dot{d}(t)}{L/2v - \tan(\delta_i) + (L/2v)\tan^2(\delta_i)} \quad (20)$$

最终, 作业路径跟踪控制输出的转向角 δ 、基于前视距离函数的纯追踪算法输出 δ_2 、模糊比例输出的补偿量 δ_3 和基于 NOB 的前馈补偿量 δ_4 满足如下关系:

$$\delta = \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 \quad (21)$$

4 仿真验证

为了验证本文作业路径跟踪控制方法的有效性与正确性, 在 Ubuntu/ROS 环境下进行仿真。移动作业平台轴距 1.0 m, 轮距 0.75 m, 等效的二轮车模型前后轮最大转向角 30° , 速度 1 m/s, 采样周期 20 Hz; 目标路径由曲线与直线组成。图 7 和表 1 为 3 种不同初始位姿偏差本文方法和传统纯追踪 (pure pursuit, PP) 的仿真结果对比, 表 1 中全线平均绝对误差是指跟踪整条目标路径过程中所有横向误差平均绝对误差, 曲线平均绝对误差是指跟踪曲线区路径过程中所有横向误差平均绝对误差。

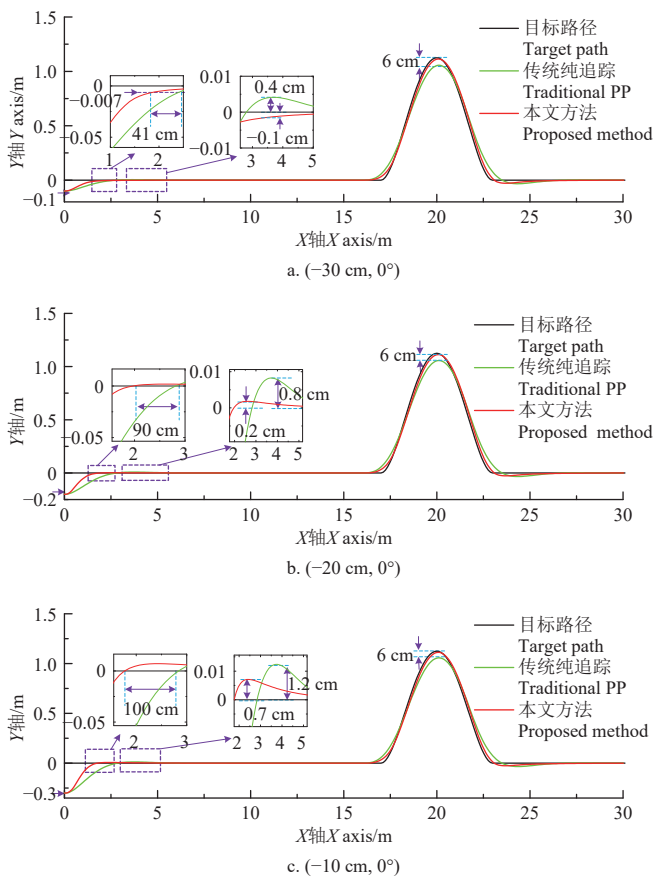


图 7 不同初始偏差下路径跟踪轨迹

Fig.7 Path tracking trajectory under different initial deviations

表 1 不同初始横向偏差的跟踪结果

Table 1 Tracking results under different lateral deviations

初始横向偏差 Initial lateral deviation /cm	控制方法 Control methods	全线平均绝对误差 Mean absolute error of the whole line /cm	曲线平均绝对误差 Mean absolute error of curved area /cm
-30	本文方法	1.83	2.56
	传统纯追踪	2.92	4.66
-20	本文方法	1.25	2.55
	传统纯追踪	2.30	4.63
-10	本文方法	1.02	2.62
	传统纯追踪	1.71	4.67

从图 7 和表 1 可得出, 不同初始偏差下本文方法上线距离减小 41~100 cm, 超调降低 41%~75%, 可快速收敛上线; 曲线最大横向偏差减小 6 cm; 曲线平均绝对误差为 2.55~2.62 cm, 减小 43.9%~45.1%; 全线平均绝对误差为 1.02~1.83 cm, 减小 37.3%~45.6%; 本方法下整体横向误差较小, 曲线跟踪性能得到有效改善。

图 8 和表 2 为引入航向角速度扰动量情况下, 本文 NOB 前馈补偿控制方法与传统无补偿的纯追踪算法仿真结果对比, 表 2 中上线后最大绝对误差是指完成上线过程后, 跟踪目标路径过程中最大横向绝对误差; 观测平均绝对误差是指观测扰动量与实际所有误差平均绝对误差。

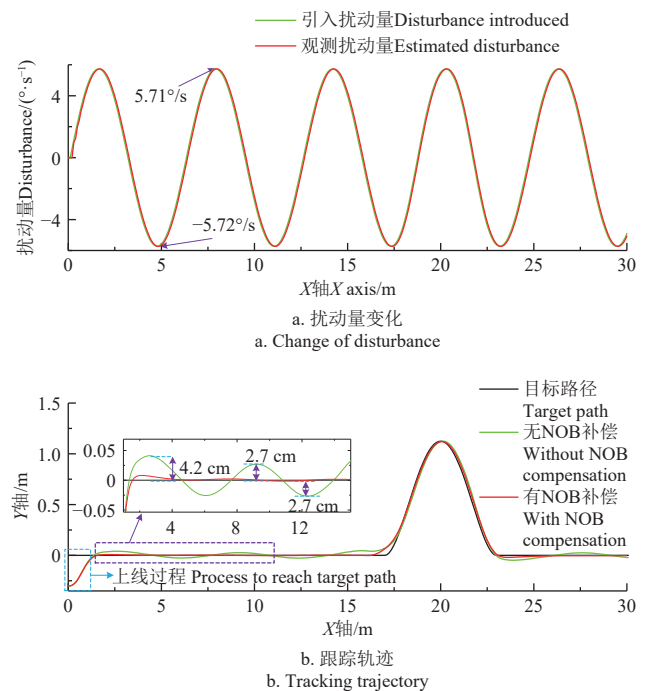


图 8 有无 NOB 前馈补偿器的跟踪效果

Fig.8 Results of feedforward compensator with or without NOB(nonlinear disturbance observer)

表 2 有无 NOB 前馈补偿器的路径跟踪结果

Table 2 Path tracking results of feedforward compensator with or without NOB

控制方法 Control method	全线平均绝对误差 Mean absolute error of the whole line/cm	上线后最大绝对误差 Max absolute error after reaching target path /cm	观测平均绝对误差 Mean absolute observation error (°·s ⁻¹)
有 NOB With NOB	1.6	7.4	0.213
无 NOB Without NOB	3.6	9.0	-

从图8和表2可得出,观测量平均绝对误差仅0.213°,观测的扰动量与引入的扰动量基本吻合,说明观测器对航向角速度扰动量能精准观测;本文方法下直线区域跟踪横向误差减小2.7~4.2 cm,稳定区最大绝对误差为7.4 cm,降低17.8%;全线平均绝对误差为1.6 cm,降低55.6%;本文基于NOB的前馈补偿器方法可有效抑制扰动量,提高路径跟踪精度。

5 试验验证

5.1 无人四驱四转移动作业平台

为了进一步验证本文策略有效性,以课题组设计的纯电动无人四驱四转移动作业平台开展垄耕模拟下Π型路径跟踪试验,如图9所示。

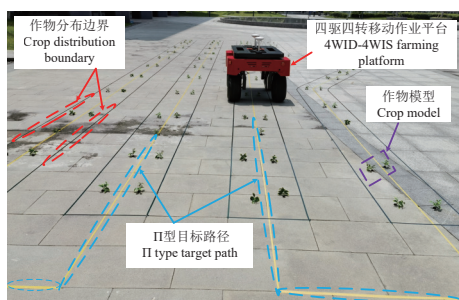


图9 垄耕模拟环境与无人四驱四转移动作业平台

Fig.9 Ridge simulation environment and unmanned 4WID-4WIS farming platform

场景布置:作业路径20 m,转弯路径1.2 m,转弯拐角90°。移动作业平台下层系统:轴距、轮距分别1.0 m和0.75 m,行走系统选用轮毂电机及ASTA4850驱动器,驱动器支持电流、转速双闭环控制,轮毂电机输出转矩大于20 N·m,转速大于200 r/min;转向系统采用伺服电机与精密行星减速机,控制精度0.1°,转向角度小于±90°;整车控制器采用TMS320F28335作为主控,支持多种多路通信接口与MATLAB/Simulink编程。上层系统:全球定位系统模组DETA100获取经纬度、姿态和车速等导航数据,位置精度小于±2.5 cm,航向角误差小于±0.5°,速度精度小于0.02 m/s;工控机采用酷睿i7处理器,主频为2.9 GHz;基于ROS的自主导航系统采用Python和C++语言混编开发,与下层系统RS232通信。

5.2 结果与分析

设置二轮车模型前后轮最大转角为30°;为了保证试验时移动平台启动和停止时安全性和稳定性,离作业路径起点位置小于1.5 m区域,设置车速为0.4 m/s;在离作业路径终点小于2 m区域,设置车速为0.5 m/s;中间区域车速设置为1.0 m/s;采样周期为20 Hz,分别进行转弯和作业路径跟踪控制验证试验。

(1) 转弯路径跟踪控制试验

跟踪试验主要对比本文方法和传统纯追踪算法在转弯区域的跟踪效果。本文方法预设参数: $k_p=5$, $k_t=0.1$;根据文献[33]和实际测试,传统纯追踪算法最佳前视距离设置为1.1 m,跟踪轨迹如图10所示。

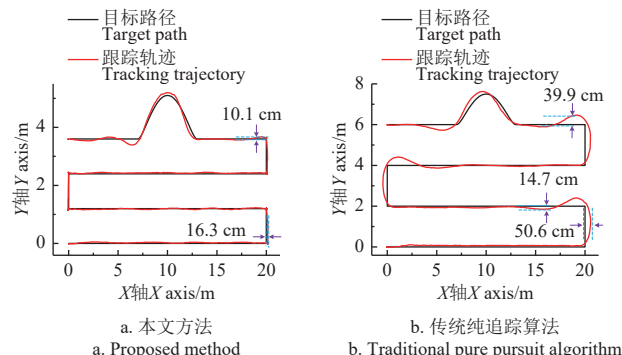


图10 不同方法的Π型路径跟踪轨迹

Fig.10 Π type path tracking trajectory under different strategies

从图10可知,相比于传统纯追踪,本文方法在转弯区域轨迹与目标路径重合度更高,最大横向偏差为16.3 cm,降低67.8%;上线初始最大横向偏差为10.1 cm,降低74.5%,可减小上线振荡;本文方法可提高垄耕模式的转弯跟踪精度和减小上线初始位姿偏差。

(2) 作业路径跟踪控制试验

作业路径跟踪控制试验分为2部分,一是验证前视距离函数的纯追踪算法及模糊比例补偿器换行上线和曲线跟踪的性能,二是验证NOB前馈补偿器的有效性。

前视距离函数的纯追踪算法及模糊比例补偿器(fuzzy proportional, FP)在换行上线和曲线跟踪的性能对比试验照仿真方案进行。模糊控制中 d_e 论域为[-10, 10],量化等级为{-10, -5, 0, 5, 10}, θ_e 论域为[-30, 30],量化等级为{-30, -5, 0, 5, 30}, k_{p1} 基本论域为[-1.2, 1.2],量化等级为{-1.2, -0.8, 0, 0.8, 1.2}。在初始位姿偏差(d_e , θ_e)为(-30 cm, 0°)下的跟踪效果如图11和表3所示,图11e为试验时移动平台速度实时变化;初始位姿偏差(d_e , θ_e)为(-20 cm, 0°)跟踪效果如图12和表3所示;初始位姿偏差(d_e , θ_e)为(-10 cm, 0°)跟踪效果如图13和表3所示。本文方法预设置参数: $l_{max}=1.1$ m, $l_{min}=0.6$ m, $k_1=10$, $k_2=32$ 。

从图11~13和表3可得在不同初始偏差下,相比于传统纯追踪,本文方法上线距离为1.02~1.39 m,减小32.2%~43.4%;超调为4.2~5 cm,降低0~42.4%;曲线最大横向误差为11.8~16 cm,减小26.0%~52.4%;曲线平均绝对误差为5.8~6.7 cm,减小33.7%~39.5%;全线平均绝对误差为4.7~7.0 cm,减小27.7%~49.5%;综上所述,本文方法有效提高了上线收敛和曲线跟踪性能以及路径跟踪精度。

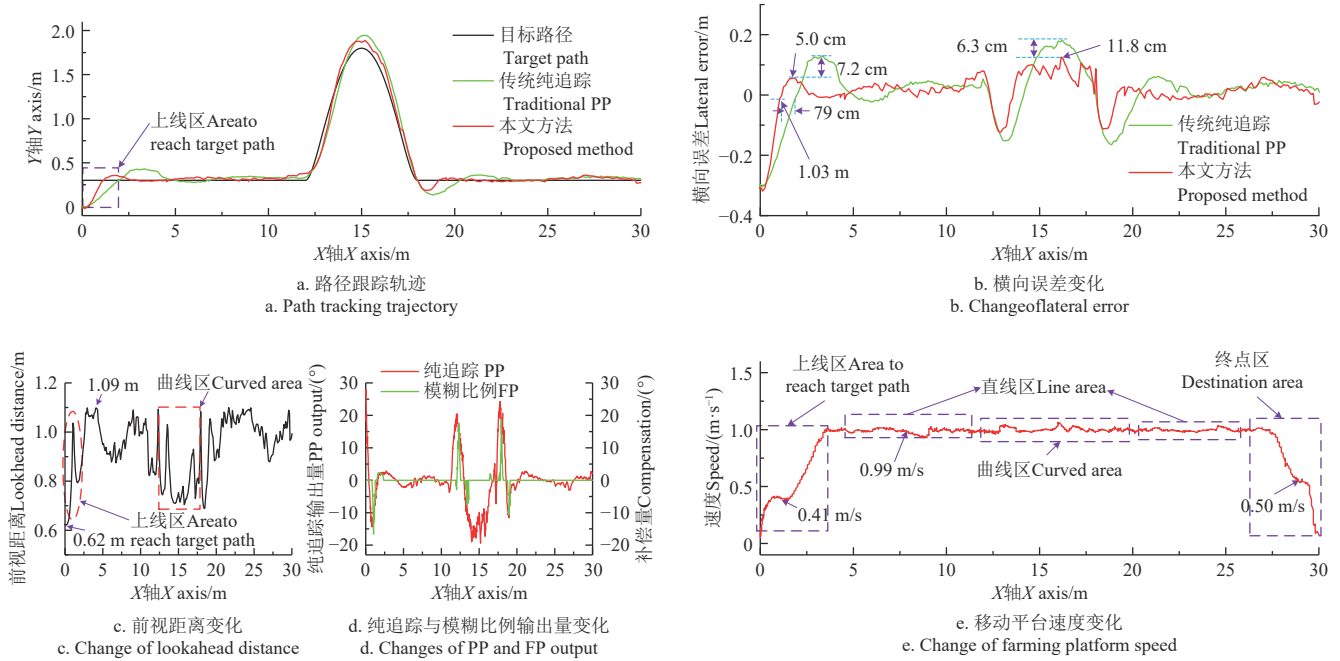
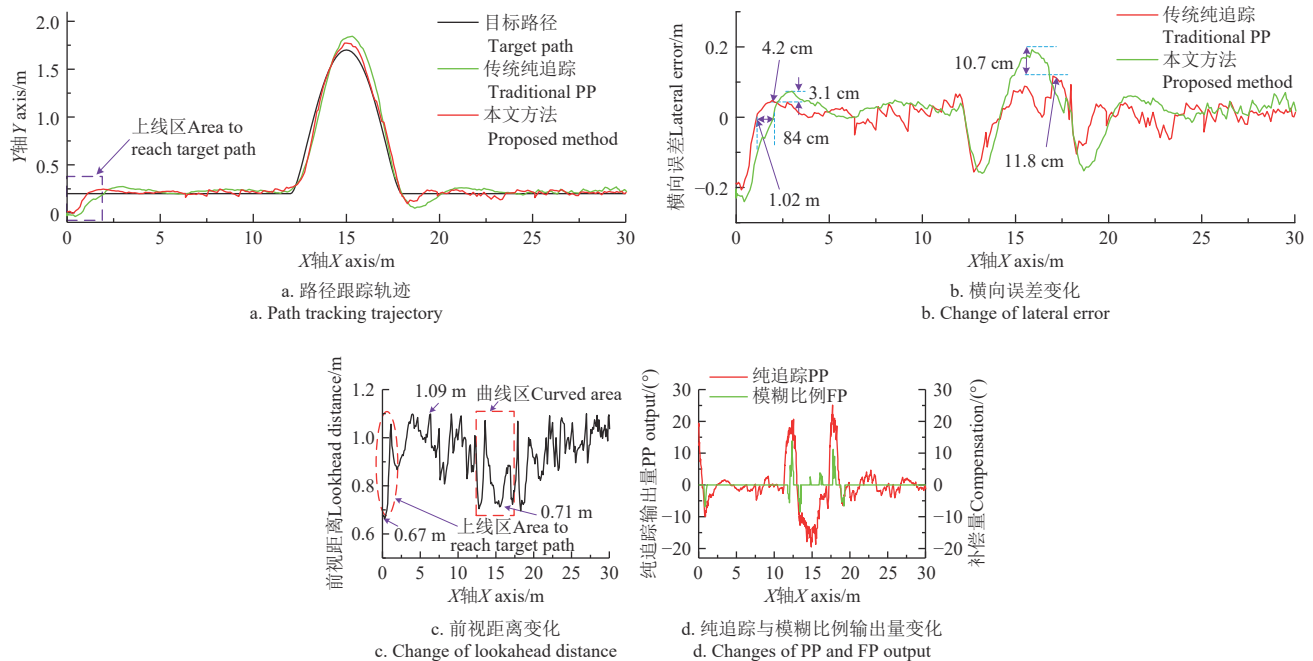
图 11 位姿偏差 $(-30\text{ cm}, 0^\circ)$ 的跟踪结果Fig.11 Tracking results under pose deviation $(-30\text{ cm}, 0^\circ)$

表 3 不同初始横向偏差的跟踪结果

Table 3 Tracking results under different lateral deviations

初始横向偏差 Initial lateral deviation /cm	控制方法 Control methods	全线平均绝对误差 Mean absolute error of the whole line /cm	曲线平均绝对误差 Mean absolute error of curved area/cm
-30	本文方法	5.4	5.8
	传统纯追踪	10.7	9.6
-20	本文方法	7.0	6.2
	传统纯追踪	10.9	9.4
-10	本文方法	4.7	6.7
	传统纯追踪	6.5	10.1

为了验证本文 NOB 前馈补偿器的有效性, 设置 3 种不同的试验路况, 如图 14 所示。图 14a 为颠簸硬石板路况, 离初始位置 5 m 处布置颠簸路况; 图 14b 为草地, 初始位姿偏差 (d_e, θ_e) 为 $(-30\text{ cm}, 0^\circ)$; 图 14c 为翻耕后的农田, 初始位姿偏差 (d_e, θ_e) 为 $(-30\text{ cm}, 0^\circ)$; 分别按本文方法与传统无补偿的纯追踪进行对比试验。NOB 预设置参数: $l(x)=[0, 13]$, 跟踪效果分别如图 15~17 和表 4 所示, 表 4 中稳态区平均绝对误差是指在经过上线和颠簸区域后, 稳定行走过程中所有横向误差平均绝对误差; 颠簸区平均绝对误差是指经过颠簸区域过程中所有横向误差平均绝对误差。

图 12 位姿偏差 $(-20\text{ cm}, 0^\circ)$ 的跟踪结果Fig.12 Tracking results under pose deviation $(-20\text{ cm}, 0^\circ)$

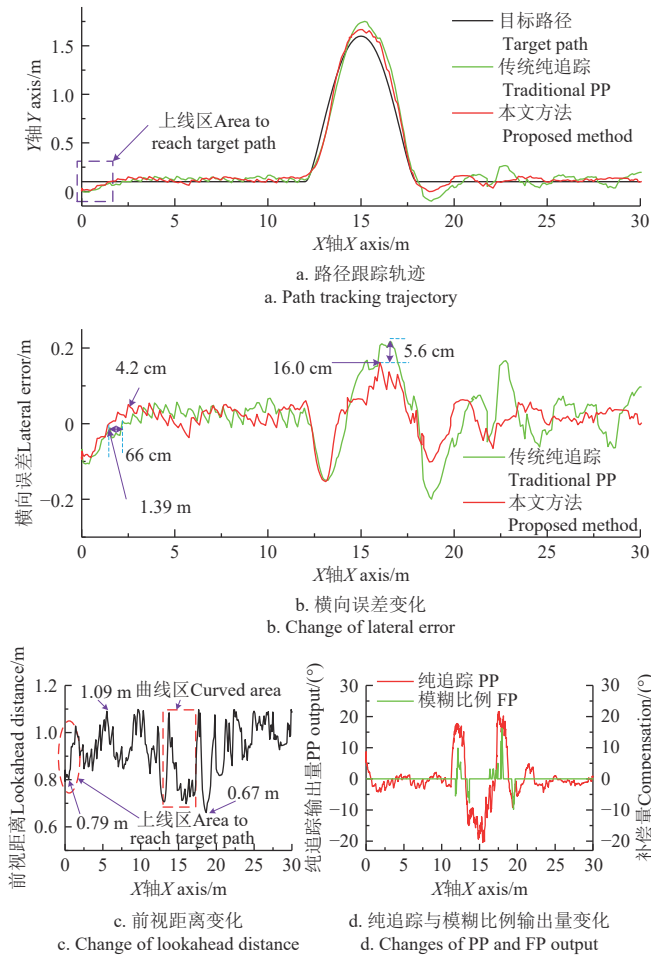


图 13 位姿偏差 (-10 cm, 0°) 的跟踪结果

Fig.13 Tracking results under pose deviation (-10 cm, 0°)

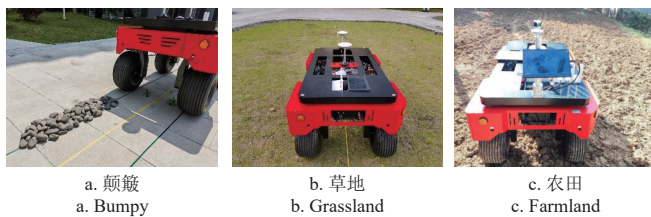


图 14 不同试验路况

Fig.14 Different experiment road conditions

从图 15~17 和表 4 可得出, 在各稳态区域下农田路况扰动量变化幅度最大, 草地次之, 颠簸硬石板最小。相比于传统无补偿纯追踪算法, 本文方法下颠簸硬石板路况颠簸区平均绝对误差为 1.0 cm, 减小 69.7%, 全线跟踪平均绝对误差为 1.4 cm, 减小 50%。相比于传统无补偿纯追踪算法, 本文方法下草地工况稳态区平均绝对误差为 0.8 cm, 减小 33.3%; 上线距离为 1.46 m, 减小 19.7%。相比于传统无补偿纯追踪算法, 本文方法下农田工况稳态区平均绝对误差为 2.1 cm, 减小 41.7%; 上线距离为 1.28 m, 减小 14.1%。综上所述, 本文方法可有效抑制扰动量, 提高了颠簸、草地和农田地况下的路径跟踪性能。

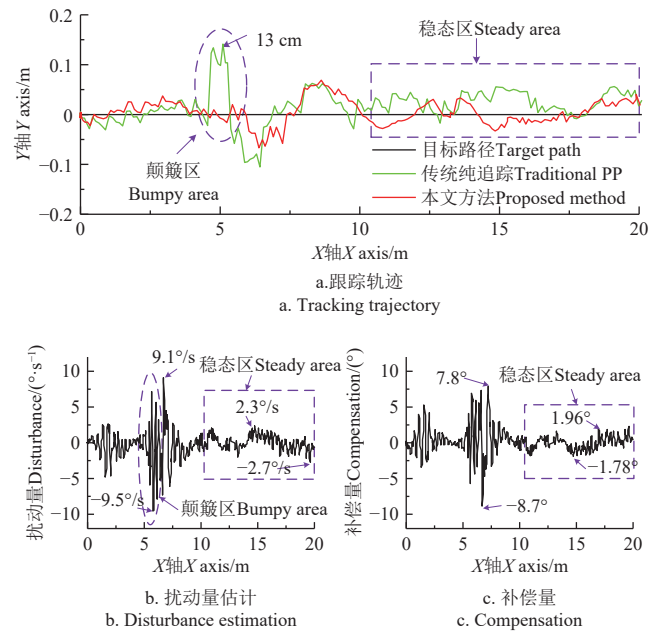


图 15 颠簸硬石板路况的跟踪结果

Fig.15 Tracking results under bumpy hard road condition

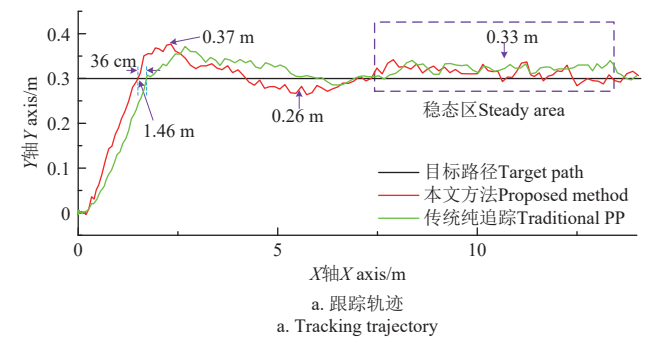


图 16 草地跟踪结果

Fig.16 Tracking results under grassland condition

表 4 不同路况的跟踪结果

Table 4 Tracking results under different road conditions

路况 Conditions	控制方法 Control methods	全线平均 绝对误差 Mean absolute error of the whole line/cm	稳态区平均 绝对误差 Mean absolute error in steady area/cm	颠簸区平均 绝对误差 Mean absolute error in bumpy area /cm	上线距离 Distance to reach target path /m
颠簸 Bumpy	本文方法	1.4	1.5	1.0	—
	纯追踪	2.1	1.6	3.3	—
草地 Grassland	本文方法	15.0	0.8	—	1.46
	纯追踪	15.1	1.2	—	1.82
农田 Farmland	本文方法	9.45	2.1	—	1.28
	纯追踪	11.6	3.6	—	1.49

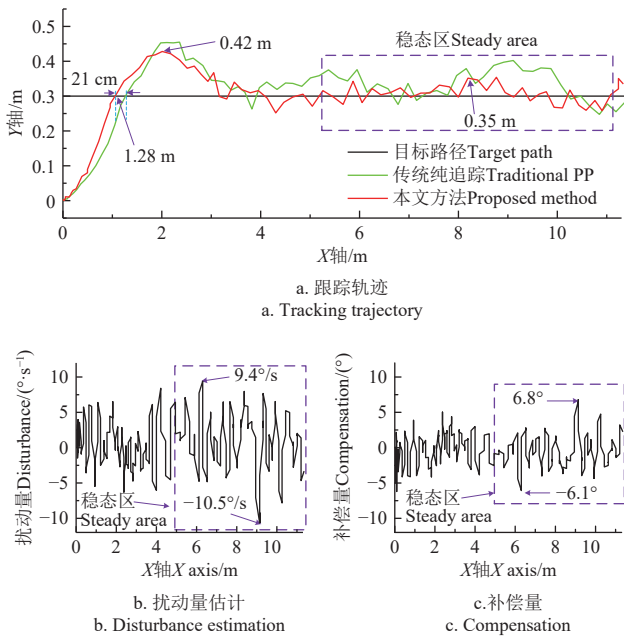


图 17 农田跟踪结果

Fig.17 Tracking results under farmland condition

6 结 论

针对垄耕模式的无人四驱四转移动作业平台 Π 型路径跟踪精度、稳定性等问题, 本文提出一种基于 NOB 的路径跟踪控制策略, 该策略包括转弯路径跟踪控制和作业路径跟踪控制 2 部分。通过仿真与试验验证得以下结论:

1) 考虑到垄耕模式的转弯路径跟踪效果较差, 本文引入原地转向模型, 设计基于原地转向的航向角 PI 控制器、纯追踪控制器以及两者切换控制策略。与传统纯追踪相比, 最大横向偏差降低 67.8%; 上线初始最大横向偏差降低 74.5%, 该方法可提高转弯跟踪精度和减小上线初始位姿偏差。

2) 为提高垄耕模式的作业路径跟踪精度, 本文根据横向偏差和路径弯曲度, 设计基于前视距离函数的纯追踪算法及模糊比例补偿器, 以减小超调和上线距离。与传统纯追踪相比, 上线距离减小 32.2%~43.4%, 超调减小 0~42.4%; 曲线最大横向误差减小 26.0%~52.4%, 曲线平均绝对误差减小 33.7%~39.5%; 全线平均绝对误差减小 27.7%~49.5%, 该方法可有效提高上线收敛和曲线跟踪性能, 及整条路径跟踪精度。

3) 考虑到作业路径上恶劣地况扰动的影响, 本文通过构建 NOB 以实现扰动量精确观测, 利用观测量设计前馈补偿器以抵消扰动量。与传统纯追踪相比, 颠簸硬石板路况下颠簸区平均绝对误差减小 69.7%, 草地路况下稳态区平均绝对误差减小 33.3%, 农田路况下稳态区平均绝对误差减小 41.7%。该方法可有效提高抗系统扰动性、跟踪精度和上线性能。

【参 考 文 献】

[1] 梁玉刚, 胡文彬, 刘焯, 等. 中国垄作栽培模式的研究进

展[J]. 生态杂志, 2022, 41 (7): 1414-1422.

LIANG Yugang, HU Wenbin, LIU Ye, et al. The research progress of ridge cultivation mode in China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(7): 1414-1422. (in Chinese with English abstract)

[2] LOWENBERG-DEBOER J, HUANG IY, GRIGORIADIS V, et al. Economics of robots and automation in field crop production[J]. *Precision Agriculture*, 2020, 21(2): 278-299.

[3] BAYA G, BERGERMAN M, KOKU A, et al. Localization and control of an autonomous orchard vehicle [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 115: 118-128.

[4] WANG Q, HE J, LU C, et al. Modelling and control methods in path tracking control for autonomous agricultural vehicles: a review of state of the art and challenges [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(12): 7155.

[5] 刘慧, 龙友能, 何思伟, 等. 四轮独立电驱动高地隙喷雾机辅助转向系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37 (13): 30-37.

LIU Hui, LONG Youneng, HE Siwei, et al. Design and experiment of the auxiliary steering system for a four-wheel independent electrically driven high clearance sprayer[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(13): 30-37. (in Chinese with English abstract)

[6] 徐琪蒙, 李洪文, 何进, 等. 小麦播种自走式农用移动平台设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37 (14): 1-11.

XU Qimeng, LI Hongwen, HE Jin, et al. Design and experiment of the self-propelled agricultural mobile platform for wheat seeding[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(14): 1-11. (in Chinese with English abstract)

[7] FAN Z, QIU Q, MENG Z. Implementation of a four-wheel drive agricultural mobile robot for crop/soil information collection on the open field[C]//2017 32nd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC). Hefei, China. 2017.

[8] 张京, 陈度, 王书茂, 等. 农用轮式机器人四轮独立转向驱动控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31 (18): 63-70.

ZHANG Jing, CHEN Du, WANG Shumao, et al. Design and experiment of four-wheel independent steering driving and control system for agricultural wheeled robot[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(18): 63-70.

[9] 李翊宁, 周伟, 宋树杰, 等. 温室作业用柔性底盘试验样机的设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33 (19): 41-50.

LI Yining, ZHOU Wei, SONG Shujie, et al. Design of experimental prototype of flexible chassis used in greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(19): 41-50. (in Chinese with English abstract)

- [10] SONG SJ, LI YN, QU JW, et al. Design and test of flexible chassis automatic tracking steering system[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2017, 10(5): 45-54.
- [11] RAIKWAR S, FEHRMANN J, HERLITZIUS T. Navigation and control development for a four-wheel-steered mobile orchard robot using model-based design[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 202: 107410.
- [12] HANG P, LOU BC, LV C. Nonlinear predictive motion control for autonomous mobile robots considering active fault-tolerant control and regenerative braking[J]. *Sensors*, 2022, 22(10): 3939.
- [13] 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): 1-15.
SHI Yangjie, CHENG Xinhui, XI Xiaobo, et al. Agricultural machinery navigation path tracking control method research progress[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(15): 1-15. (in Chinese with English abstract)
- [14] TAN Q, QIU C, HUANG J, et al. Path tracking control strategy for off-road 4WS4WD vehicle based on robust model predictive control[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2022, 158: 104267.
- [15] 李逃昌, 胡静涛, 高雷. 基于级联式控制策略的农业机械鲁棒自适应路径跟踪控制[J]. 机器人, 2014, 36 (2): 241-249.
LI Taochang, HU Jingtao, GAO Lei. Robust adaptive path tracking control of agricultural machines based on cascaded control strategy [J]. Robot, 2014, 36(2): 241-249. (in Chinese with English abstract)
- [16] SUN Y, LI R, LU Z, et al. Design of four wheel steering and direct yaw moment control for unmanned vehicle with path tracking controller in extreme maneuvers[C]//2021 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS). IEEE, 2021: 176-183.
- [17] QIAO N, WANG L, ZHU W, et al. An improved path-tracking controller with mid-angle adaptive calibration for combine harvester[J]. *Journal of Instrumentation*, 2020, 15(1): P01025.
- [18] ZHOU S, ZHAO H, CHEN W et al. Robust path following of the tractor-trailers system in GPS-denied environments [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(2), 500-507.
- [19] 何杰, 朱金光, 张智刚, 等. 水稻插秧机自动作业系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50 (3) : 17-24.
HE Jie, ZHU Jinguang, ZHANG Zhigang, et al. Design and experiment of automatic operation system for rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3) : 17-24. (in Chinese with English abstract)
- [20] SAEED R, TOMASI G, CARABIN G, et al. Conceptualization and implementation of a reconfigurable unmanned ground vehicle for emulated agricultural tasks [J]. *Machines*, 2022, 10(9): 817.
- [21] NETTO M, BLOSSEVILLE J M, LUSETTI B, et al. A new robust control system with optimized use of the lane detection data for vehicle full lateral control under strong curvatures[C]//2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Toronto, Canada, 2006: 1382-1387.
- [22] ZHANG C, GAO G, ZHAO C, et al. Research on 4WS agricultural machine path tracking algorithm based on fuzzy control pure tracking model[J]. *Machines*, 2022, 10(7): 597.
- [23] YANG Y, LI YK, WEN X, et al. An optimal goal point determination algorithm for automatic navigation of agricultural machinery: Improving the tracking accuracy of the pure pursuit algorithm[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 194: 106760.
- [24] TURETSKY V. Robust route realization by linear-quadratic tracking[J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 2016, 170(3): 977-992.
- [25] TU XY, GAI JY, TANG L. Robust navigation control of a 4WD/4WS agricultural robotic vehicle[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 164: 104892.
- [26] 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 i, 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)
- [27] LI B, WANG YZ, MA SJ, et al. Adaptive Pure Pursuit: A real-time path planner using tracking controllers to plan safe and kinematically feasible paths[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2023, 8(9): 4155-4168.
- [28] AHN J, SHIN S, KIM M, et al. Accurate path tracking by adjusting look-ahead point in pure pursuit method[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2021, 22(1): 119-129.
- [29] ERN H, HAJDU C, PÉTER K. Enhancement of pure-pursuit path-tracking algorithm with multi-goal selection[C]//2019 1st IEEE International Conference on Griding and Polytope Based Modeling and Control (GPMC), Budapest, Hungary, 2019: 13-18.
- [30] CHEN DL, LIU GP. Coordinated path-following control for multiple autonomous vehicles with communication time delays[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2020, 28(5): 2005-2012.
- [31] WU Y, WANG LF, ZHANG JZ et al. Path following control of autonomous ground vehicle based on nonsingular terminal sliding mode and active disturbance rejection control[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(7): 6379-6390.
- [32] ZHANG MY, GUAN YL, LI C, et al. Backstepping control for the optoelectronic stabilized platform based on adaptive fuzzy

logic system and nonlinear disturbance observer[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2023, 111(9): 8347-8368.

AGV robotic industrial environments[C]//IEEE International Conference on Industrial Technology. Maribor, Slovenia, 2003: 979-983.

[33] PETRINEC K, KOVACIC Z, MAROZIN A. Simulator of multi-

Path tracking of farming platform with unmanned four-wheel independent driving and four-wheel independent steering in ridge tillage mode

WANG Yang, ZHU Xiaoyong^{*}, XU Lei, YANG Tianyu

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

Abstract: The current farming platform has been widely equipped with unmanned four-wheel independent driving and four-wheel independent steering (4WID-4WIS). However, the control system of path tracking is required for high accuracy and sufficient stability under complex working conditions. There were also complex working conditions under crop ridge cultivation, such as Π type target path, curves, initial pose deviation, various soil moisture, and bumpy ground landscapes. In this study, a control strategy of path tracking was proposed using a nonlinear disturbance observer (NOB). A mathematical in-situ steering model was introduced for the relatively low tracking errors in the turn area of the Π type path, compared with the traditional Ackerman steering model. Two steering methods were then used to realize the turn path tracking. Meanwhile, a switch control strategy was designed between yaw angle proportional integral control and pure pursuit control using in-situ steering. Furthermore, the curve and initial pose deviation shared a relatively significant impact on the accuracy of working path tracking. Moreover, the distance traveled by the 4WID-4WIS farming platform was reduced to reach the working path and the maximum lateral deviation. The tracking accuracy of the work paths was improved to design a pure pursuit control using a lookahead distance function, and a fuzzy proportional compensator using the lateral deviation, as well as the curvature of the foresight area in the work path. Besides, the feedforward compensator with NOB was designed to avoid the relatively large yaw speed disturbances from the complex soil moisture, bumpy ground landscapes, kinematic models, and measurement errors. The NOB was also constructed to achieve the precise observation of disturbance for the expected path of farming platforms. The steering compensation angle was then calculated for the feedforward compensator to counteract the disturbance. Finally, the simulation was carried out in the Ubuntu/ROS environment. The NOB strategy of path tracking effectively reduced the distance traveled by farming platforms to reach the working paths, the maximum lateral deviation, and curve tracking errors. The accuracy and stability of path tracking were achieved in the anti-interference performance, where the disturbance momentum was observed accurately. And, the outdoor experiments show that the switch control strategy performed a smaller error of turn tracking on Π type target path, compared with the traditional pure pursuit control. The tracking performance was also effectively improved. The pure pursuit with the look-ahead distance function and fuzzy proportional compensator under different initial pose deviation states reduced the distance traveled by farming platforms to reach the working paths by 32.2%-43.4%. The maximum lateral deviation, mean absolute errors of the whole line and curved area were reduced by 0-42.4%, 27.7%-49.5%, and 33.7%-39.5%, respectively, indicating the high accuracy of working paths tracking. The NOB-based feedforward compensator was reduced by 6.25% mean absolute error in the steady area under hard slate condition, 33.3% under grassland condition, and 41.7% under farmland condition. This control strategy of path-tracking effectively improved the system's robustness and path-tracking accuracy. The finding can also provide innovative ideas and technical references for the navigation system of unmanned four-wheel drive and four-rotation agricultural machinery in ridge tillage.

Keywords: autonomous driving; path tracking; disturbance observer; feedforward compensation; ridge cultivation; lookahead distance