

基于变前视距离的四轮同步转向农机改进纯跟踪控制

沈跃 赵莎 张亚飞 何思伟 冯瑞 刘慧

(江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013)

摘要: 路径跟踪控制是提高自主导航系统控制精度的关键。针对在复杂农田作业环境下转弯时纯跟踪算法跟踪精度不高的问题,本文提出了一种基于改进纯跟踪模型的四轮同步转向农机路径跟踪控制算法。建立了基于四轮同步转向农机的运动学模型和纯跟踪模型,在此基础上考虑航向误差得到改进纯跟踪模型,进行RTK定位坐标修正,根据量化误差的评价函数搜索前视区域最优目标点,得到最优前视距离。本文算法能实时确定四轮同步转向农机改进纯跟踪模型中的前视距离,使航向误差和横向误差最小化,实现目标点的自适应优化。仿真结果表明,本文方法转弯时平均绝对横向误差减至0.035 m,平均绝对航向误差减至0.212°;水田实验结果表明,当四轮同步转向农机作业速度为3.6 km/h时,四轮转向农机轨迹跟踪平均绝对横向误差减至0.109 m,平均绝对航向误差减至2.799°,转弯跟踪精度显著提高。

关键词: 水田; 四轮同步转向; 改进纯跟踪控制; 前视距离; 自适应优化

中图分类号: S49

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)03-0021-08

OSID:



Improved Pure Tracking Control of Four-wheel Synchronous Steering Agricultural Machinery Based on Variable Forward Looking Distance

SHEN Yue ZHAO Sha ZHANG Yafei HE Siwei FENG Rui LIU Hui

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

Abstract: The autonomous navigation operation of agricultural machinery has become an inevitable trend in domestic and international development, and path tracking control is the key to improving the control accuracy of autonomous navigation systems. In response to the problem of low tracking accuracy of conventional pure tracking algorithms when turning in complex agricultural environments, an novel path tracking control algorithm for the four-wheel synchronous turning agricultural machinery was proposed based on the improved pure tracking model. A kinematic model and a pure tracking model based on four-wheel synchronous steering agricultural machinery were established. On this basis, an improved pure tracking model was obtained by considering heading error. RTK positioning coordinates were modified, and the optimal forward looking distance was derived from the optimal target points in the forward-looking area according to the evaluation function of the quantitative error. The proposed algorithm can obtain the appropriate forward looking distance in real-time for the improved pure tracking model of four-wheel synchronous steering agricultural machinery, which minimized heading and lateral errors and achieved adaptive optimization of target point. The simulation results showed that the average absolute lateral error of the method during turning was reduced to 0.035 m, and the average absolute heading error was reduced to 0.212°. The paddy field experiment showed that when the operating speed of the four-wheel synchronous steering agricultural machine was 3.6 km/h, the average absolute lateral error of the four-wheel steering agricultural machine trajectory tracking was reduced to 0.109 m, the average absolute heading error was reduced to 2.799°, and the turning tracking accuracy was significantly improved.

Key words: paddy field; four-wheel synchronous steering; improved pure tracking control; forward looking distance; adaptive optimization

收稿日期: 2023-08-05 修回日期: 2023-09-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51975260)和江苏高校优势学科项目(PAPD)

作者简介: 沈跃(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事无人农机智能控制和农业机器人研究, E-mail: shen@ujs.edu.cn

通信作者: 刘慧(1980—),女,教授,博士生导师,主要从事智能感知与控制和多传感器信息融合研究, E-mail: alice@stmail.ujs.edu.cn

0 引言

农业机械自动导航技术是实施精准农业的基础,主要解决机器人在复杂自然场景中的移动性和通过性问题,可以有效减轻农机操作人员的劳动强度,提高作业精度与作业效率^[1-4]。系统控制精度的提高为全面推进精准农业发展提供了可靠保障和技术支撑^[5-6],而路径跟踪控制是提高系统控制精度的关键^[7-10]。目前国内外常用的路径跟踪控制方法包括 PID 控制、模糊控制、滑模控制、模型预测控制和纯跟踪控制等^[11-15]。在这些方法中,纯跟踪算法作为一种鲁棒可靠的控制算法,容易调参、控制简单、在路径规划应用中消耗较少的计算时间,适用于对作业速度要求不高的农机自动导航控制。

由于环境和地形特征的不确定性,针对纯跟踪算法收敛速度慢、跟踪精度低的问题,许多学者对纯跟踪算法进行了改进。姚立健等^[16]重新定义前视距离,根据车体航向与前视直线的夹角界定车体偏差程度,在矩形路径跟踪时,当横向偏差和航向偏差均为 0 的初始状态下,全程平均偏差 20.6 cm。XU 等^[17]设计了以横向偏差和航向偏差为输入,以纯跟踪模型中的前视距离为输出的控制器,获得随移动农业机械偏差动态变化的前视距离,测试结果显示平均偏差为 19.7 cm,平均跟踪时间为 5.1 s,稳态偏差为 3.1 cm。张华强等^[18]提出了一种基于改进纯跟踪模型的路径跟踪控制算法,采用粒子群优化算法实时确定纯跟踪模型中的前视距离,直线跟踪最大横向误差为 0.09 m,行驶距离超过 5 m 后最大横向误差为 0.02 m。杨洋等^[19]为实现高拖拉机-播种机联合作业的精准控制,提出了一种基于目标路径的自适应预瞄路径跟踪算法,该算法试验时转向平均误差为 0.45°,直线段横向误差均值为 0.035 m,转向段横向误差最大值为 0.11 m。ZHANG 等^[20]采用模糊算法动态确定纯追踪模型的前视距离,实现在直线路径跟踪时最大超调量为 0.123 m,稳定行驶后,直线跟踪部分最大横向偏差为 0.058 m,稳态偏差为 0.039 m;在转弯路径跟踪过程中,农机实际行驶轨迹与期望路径最大横向偏差绝对值为 0.139 m,平均跟踪偏差为 0.041 m。WANG 等^[21]提出一种改进的纯跟踪搜索策略蚁群优化 ISSACO 算法,在纯跟踪模型中添加航向误差率作为控制方法,选择预测航向误差作为目标函数,实现了改进算法的误差反馈自适应动态调整,与纯跟踪算法相比,收敛时间缩短 18.1%,过冲减少 28.3%。已有研究较多是针对直线路径进行跟踪,针对水田环境下转弯路径的研究较少。

为了提升水田环境农机转弯时路径跟踪控制精度,本文提出一种基于改进纯追踪模型的四轮同步转向农机路径跟踪控制算法。该算法基于纯追踪算法,输出前后轮角度,模拟驾驶员前视行为,并根据量化误差的评价函数在前视区域搜索最优目标点,得到最优前视距离。以四轮同步转向农机为研究平台,对该路径跟踪控制算法进行验证。

1 模型建立

1.1 车辆运动学模型

考虑到农机在水田作业为低速行驶,由于车辆存在最小转弯半径约束,侧向加速度较小,可以采用运动学的控制方法实现路径跟踪控制^[22]。基于以下假设建立四轮同步转向农机运动学模型:①四轮同步转向农机是一个刚体。②左右车轮的转向角相等。③忽略滚动和俯仰运动。④忽略横向滑动。

将四轮同步转向农机简化为惯性坐标系中的两轮车模型,如图 1 所示, L 为前后转向中心距离, δ 为前后轮转向角, θ 为四轮同步转向农机在全局坐标系下的航向角, o 为四轮同步转向农机质心, v 为四轮同步转向农机线速度。根据图中几何关系,可得

$$\dot{\boldsymbol{P}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ 2\tan\delta/L \end{bmatrix} v \quad (1)$$

式中 $\boldsymbol{P}$ ——四轮同步转向农机质心在全局坐标系下的位姿

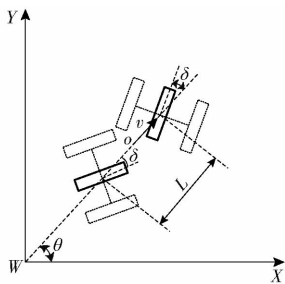


图 1 四轮同步转向农机运动学模型

Fig. 1 Kinematics model of four-wheel synchronous steering agricultural machinery

1.2 纯跟踪模型

基于四轮同步转向农机运动学模型,通过计算将车辆从当前位置移动到某个目标位置的曲率,根据该曲率驱动车辆到达选定的路径点。纯跟踪模型示意图如图 2 所示^[23]。

不同于传统阿克曼转向农机^[24],本文研究四轮独立驱动农机,采用前后轴差速同步转向结构,通过协同控制 4 个轮毂电机转速完成直行与转向^[25],无需加装电动方向盘,转弯半径小,低速性能好。四轮同步转向农机纯跟踪模型如图 2 所示, A 为四轮同

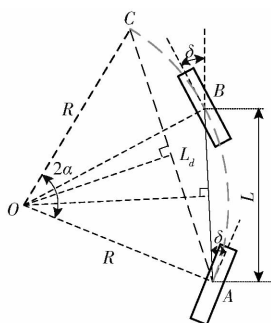


图2 四轮同步转向农机纯跟踪模型示意图

Fig. 2 Schematic of pure tracking model for four-wheel synchronous steering agricultural machinery

步转向农机的当前后轮中心位置, B 为四轮同步转向农机的当前前轮中心位置, C 为参考路径上的预览点, R 为转弯半径。设置逆时针移动 $R > 0$, 顺时针移动 $R < 0$, 2α 为中心角, L_d 为前视距离。

在 $\triangle AOC$ 中, 根据正弦定理可得

$$\frac{L_d}{\sin(2\alpha)} = \frac{R}{\sin(\pi/2 - \alpha)}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{2\sin\alpha}{L_d} \quad (2)$$

转向角为

$$\delta = \arcsin \frac{L}{2R} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3),得四轮同步转向农机转向角为

$$\delta(t) = \arcsin \frac{L \sin \alpha(t)}{L_j} \quad (4)$$

采样时刻,纯跟踪模型根据前视距离确定预览点,根据式(4)计算转向角。在纯跟踪模型中,前视距离是唯一可调的参数,直接影响路径跟踪精度^[21]。

1.3 改进纯跟踪模型

当跟踪误差较大时,纯跟踪模型可能无法有效地控制转向。为了减少前视距离对跟踪精度的影响,在考虑航向误差的基础上对纯跟踪误差模型进行分析,得到基于后轮的改进纯跟踪模型如图3所示。由图3可得

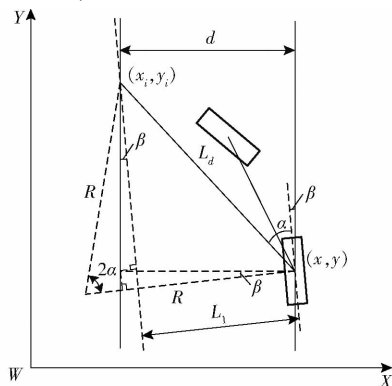


图3 改进纯跟踪模型示意图

Fig. 3 Schematic of improved pure tracking algorithm

$$L_d = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (5)$$

$$L_1 = d \cos \beta - \sqrt{L_d^2 - d^2} \sin \beta \quad (6)$$

$$\sin \alpha = \frac{L_1}{L_d} \quad (7)$$

式中 (x_i, y_i) ——目标点坐标

(x, y) ——后轴中心坐标

L_1 ——车身坐标系下横向误差

 α ——基于后轮的实际航向角 β ——后轮航向误差

d ——后轮横向误差

将式(5)~(7)代入式(4),得到改进纯跟踪模型中转向角为

$$\delta = \arcsin \frac{L(d \cos \beta - \sqrt{L_d^2 - d^2} \sin \beta)}{L_d^2} \quad (8)$$

2 前视距离确定方法

跟踪过程中,较小的前视距离会导致车辆在参考路径附近来回振荡,跟踪状态不稳定;较大的前视距离会导致车辆提前转向,产生较大的横向误差^[26]。纯追踪算法通过绘制一个以后轮中心坐标为圆心、以前视距离为半径的圆,确定前视距离与参考路径的交点为目标点,如图4所示。目标点的选择直接影响纯追踪算法跟踪性能。

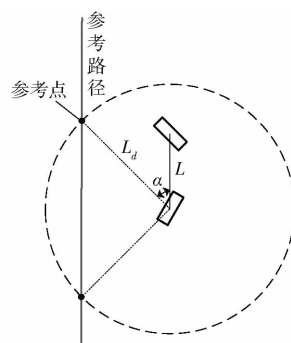


图4 基于纯追踪算法的目标点确定示意图

Fig. 4 Schematic of target point determination based on pure tracking algorithm

假设四轮同步转向农机位置的更新时间间隔为 Δt , 四轮同步转向农机运动学模型的前轮转角作为输入控制变量, 由于四轮同步转向农机的位置数据更新较快, 可以假设速度和前轮旋转角在时间间隔 Δt 内保持不变。可以获得 t 时刻在 Δt 间隔后的农机预测位置为

$$\begin{cases} x(t + \Delta t) = x(t) + v \cos \theta \Delta t \\ y(t + \Delta t) = y(t) + v \sin \theta \Delta t \\ \varphi(t + \Delta t) = \varphi(t) + \frac{2 \tan \delta}{L} v \Delta t \end{cases} \quad (9)$$

安装在四轮同步转向农机车顶的实时动态

(RTK)全球导航卫星系统(GNSS)用于获取四轮同步转向农机的空间位置信息,RTK定位坐标实际上是2个天线连线的中点。当车身处于水平状态时,车身横滚角和俯仰角均为 0° ,测量点与RTK定位坐标点在平面上的投影点一致,从而平面坐标一致^[27]。当农机在水田环境等坑坑洼洼的路面上行驶时,车身往往会发生倾斜,四轮同步转向农机的姿态发生变化,GNSS接收器天线的相位中心投影不再与几何中心投影重合,使得输出的RTK定位坐标并非实际车辆位置坐标,直接将定位系统输出的坐标值作为车辆位置坐标会存在较大误差,如图5所示。当主定位天线位于地面以上2.3 m时,将1 cm的定位误差投影到地面所产生的误差可能高达8 cm^[28]。



图5 车身倾斜时RTK定位坐标与车辆位置坐标误差示意图

Fig.5 Schematic of RTK positioning coordinate and vehicle position coordinate error when vehicle body was tilted

为了有效消除四轮同步转向农机由于车身倾斜

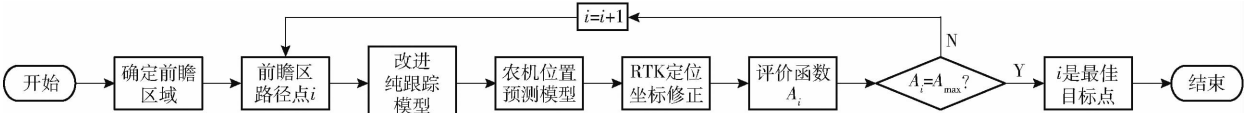


图6 改进纯跟踪算法流程图

Fig.6 Flowchart of improved pure tracking algorithm

横向误差计算式为

$$d_e = \sqrt{(x_r - x_1)^2 + (y_r - y_1)^2} \quad (11)$$

航向误差计算式为

$$\theta_e = \theta - \theta_r \quad (12)$$

式中 (x_1, y_1) ——车辆定位中心坐标

(x_r, y_r) ——当前目标点坐标

θ_r ——下一时刻预测位置的航向角

当前轮角度满足约束条件 $\delta \leq \delta_{\max}$ 时,评价函数为

$$A_i = \frac{1}{0.5e_{d_{i+1}}^2 + 0.5e_{\varphi_{i+1}}^2} \quad (13)$$

式中 $e_{d_{i+1}}$ ——下一时刻预测横向误差

$e_{\varphi_{i+1}}$ ——下一时刻预测航向误差

引起的定位误差,进一步提高RTK-GNSS接收机在水田中的定位精度和稳定性,需处理传感器测量的位置数据。设定位天线安装高度为 H ,横滚角为 φ ,俯仰角为 ψ ,航向角为 θ ,修正后车辆位置 M 坐标为

$$\begin{cases} x_m = x'_m + H\sin\varphi\cos\theta - H\sin\psi\sin\theta \\ y_m = y'_m + H\sin\varphi\sin\theta + H\sin\psi\cos\theta \end{cases} \quad (10)$$

式中 (x_m, y_m) ——修正后点 M 坐标

(x'_m, y'_m) ——RTK定位系统测量点的坐标

在搜索最优目标点前,先确定前瞻区域。前瞻区域由四轮同步转向农机当前位置与参考路径之间的位置关系确定,有助于最小化车辆在路径上的跟踪误差。结合农机作业经验,设置前视距离为1~3 m。设置前瞻区域的起点为四轮同步转向农机当前位置后轮中心坐标为圆心,最小前视距离 $L_{\min}$ 为半径的圆与参考路径的交点,沿着从该点开始的参考路径进行积分,并累积积分线长度,终点为农业机械当前位置后轮中心坐标为圆心,最大前视距离 $L_{\max}$ 为半径的圆与参考路径的交点,得到前瞻区域。

参考路径被离散化为参考路径点列表,通过遍历前瞻区域中的路径点,获得基于每个目标点的下一时刻预测位置,并基于改进纯跟踪模型输出前轮角度,将其代入四轮同步转向农机位置预测模型。对农业机械预测位置和参考路径之间的横向误差和航向误差进行量化,建立用于搜索最佳目标点的评估函数,根据评价函数搜索最优目标点。改进算法流程图如图6所示。

当前轮角度不满足约束条件 $\delta \leq \delta_{\max}$ 时, $A_i = 0$ 。

在前视区域遍历路径点,以获得最大值 $A_{\max}$, $A_{\max}$ 对应路径点到四轮同步转向农机的距离即为最优前视距离。

3 仿真

四轮同步转向农机的田间行走主要由直线和曲线组成,通过设置U形路径来验证跟踪性能。U形路径曲线半径设为6.5 m,行驶速度设置为1 m/s,跟踪的初始位置设置为距参考路径起点2.5 m。同时,与改进纯跟踪算法相比,纯跟踪算法前视距离分别设置为2.0、2.5、3.0 m。路径跟踪仿真结果如图7~9所示。由图7~9可以看出,在农机上线阶段,变前视距离的纯跟踪算法航向误差超调量明显

减小;在直线路径部分,本文变前视距离的改进纯跟踪算法的横向误差比 3 种固定前视距离的纯跟踪算法横向误差都小,在弧线部分,航向误差和横向误差均明显减小,本文提出算法具有较高的导航精度。

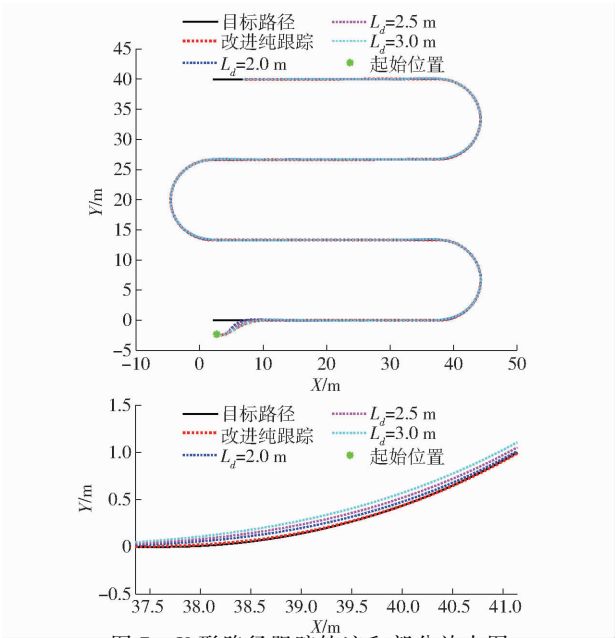


图 7 U 形路径跟踪轨迹和部分放大图

Fig. 7 U-shaped path tracking trajectory and partially enlarged image

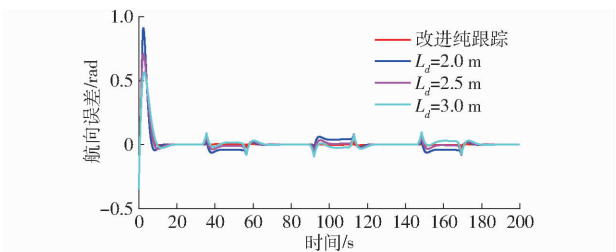


图 8 航向误差

Fig. 8 Heading error

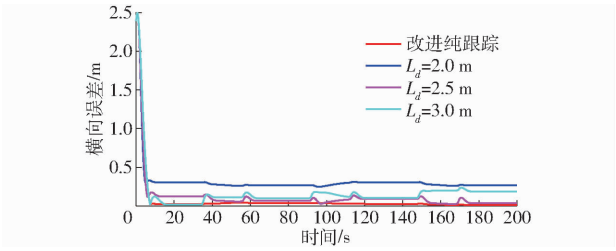


图 9 横向误差

Fig. 9 Lateral error

本文提出算法的前视距离如图 10 所示。可以看出,当四轮同步转向农机行驶到转向位置时,曲率增大,前视距离减小,而当它沿直线行驶时,曲率减小,前视距离增加。前视距离在 1 ~ 3 m 范围内随参考路径的曲率自适应变化。

图 11、12 为初始状态相同时四轮同步转向农机的前后轮转角。本文提出算法的前后轮转角振荡幅度较小,超调量小,而纯跟踪算法前后轮转角在转向

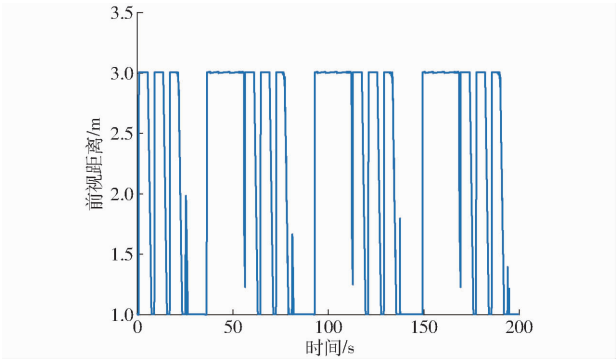


图 10 前视距离动态变化曲线

Fig. 10 Dynamic change diagram of forward looking distance

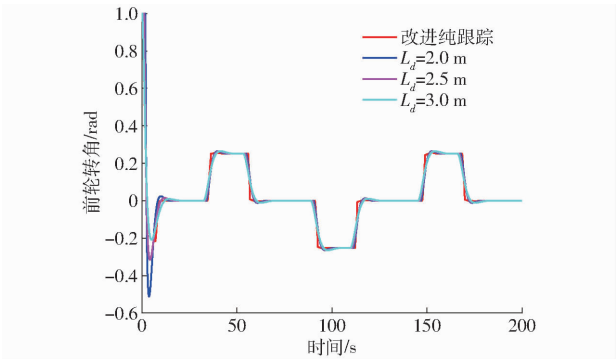


图 11 前轮转角

Fig. 11 Front wheel angle change diagram

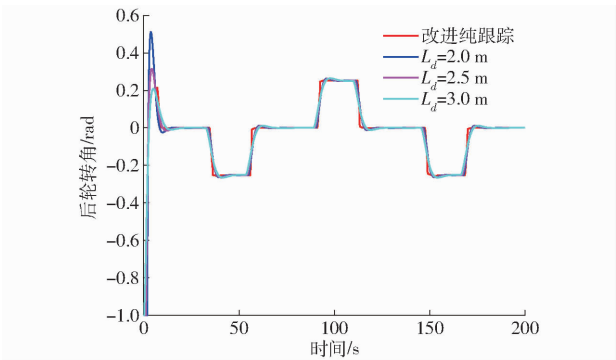


图 12 后轮转角

Fig. 12 Rear wheel angle change diagram

位置有明显的振荡。

取 U 形轨迹转弯处 200 组农机位置,可以明显看出,变前视距离的纯跟踪算法总体横向误差和航向误差都小于纯跟踪算法。如表 1 所示,与纯跟踪方法相比,改进的纯跟踪算法平均绝对横向误差减少 54.55% 以上,平均绝对航向误差减少 46.33% 以上。

表 1 轨迹跟踪误差结果

Tab.1 Trajectory tracking error results

L_d/m	平均横向 误差/m	横向误差 标准差/m	平均航向 误差/(°)	航向误差标 准差/(°)
2.0	0.274	0.013	2.429	0.796
2.5	0.077	0.027	0.848	0.974
3.0	0.117	0.011	0.395	1.238
变前视距离	0.035	0.005	0.212	0.223

4 场地实验

为进一步验证本文改进纯跟踪算法的有效性,在上海市松江区一处标准化农田(30.932 94°N, 121.043 84°E)进行了实验验证,实验场景如图 13 所示。



图 13 实验现场
Fig. 13 Experimental site

四轮同步转向农机,基于路径跟踪算法跟踪参考路径。其差分定位设备选用 RTK-BDS 导航定位系统,卫星定位系统为国内北云科技自研的高精度组合导航系统,以获取四轮同步转向农机的实时位姿信息,整车控制单元的核心元件为 STM32F407VET6 单片机,用于接收传感器信息和遥控器信号并控制电机驱动器驱动轮毂电机。微型主机装载的第 2 代机器人操作系统(Robot operating system,ROS2)是一个专门针对机器人软件开发而设计的通信框架,能够满足导航控制系统的安全性、可扩展性和容错性要求^[29]。四轮同步转向农机车身长、宽、高为 308 cm×1 120 cm×240 cm,净质量 1 680 kg,离地间隙为 1.1 m,轴距为 168 cm,前后轴最大偏转角为±40°,田间作业速度为 0.4~2.0 m,最小转弯半径为 1.2 m。

现场测试的参考路径设置为 U 形路径(由 2 条直线和 1 条曲线组成)。曲线半径设置为 4 m,速度设置为 1 m/s,前视距离变化范围设置为 2~3 m,固定前视距离设置为 2.5 m,四轮同步转向农机在 2 种算法下的跟踪轨迹如图 14 所示。可以看出,在直线部分,变前视距离的改进纯跟踪算法和固定前视距离的纯跟踪算法的跟踪效果基本一致,这是因为在跟踪直线路径时曲率不发生变化时,变前视距离的改进纯跟踪算法采用最大前视距离,跟踪过程中前视距离没有发生动态变化。

取 U 形轨迹转弯处 200 组农机位置,变前视距离的纯跟踪算法和固定前视距离的纯跟踪算法横向、航向误差如图 15、16 所示。固定前视距离纯跟踪算法最大横向误差为 0.568 m,平均绝对横向误差为 0.294 m,标准差为 0.092 m;最大航向误差为

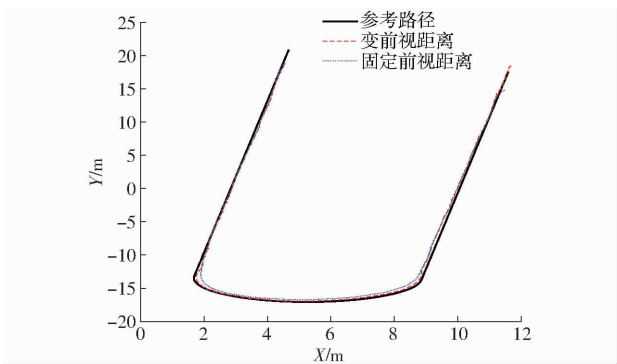


图 14 跟踪实验结果
Fig. 14 Tracking experimental results

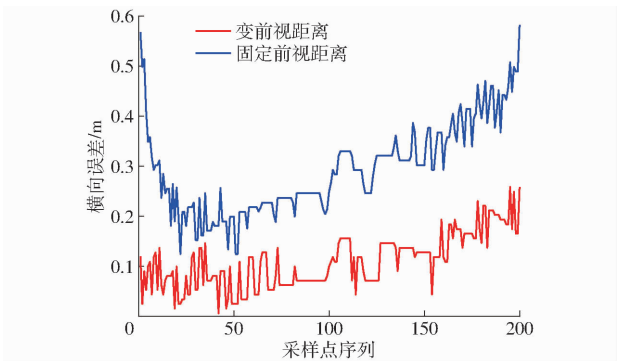


图 15 水田环境横向误差
Fig. 15 Lateral error in paddy field

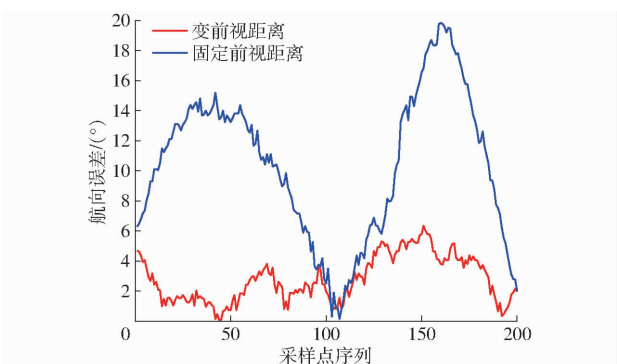


图 16 水田环境航向误差
Fig. 16 Heading error in paddy field

19.837°,平均绝对航向误差为 10.413°,标准差为 4.913°。改进纯跟踪算法最大横向误差为 0.258 m,平均绝对横向误差为 0.109 m,标准差为 0.053 m;最大航向误差为 6.351°,平均绝对航向误差为 2.799°,标准差为 1.519°。

变前视距离的改进纯跟踪算法和固定前视距离的纯跟踪算法横向、航向误差结果如表 2 所示。从表 2 可以看出,改进的纯跟踪算法可以有效抑制横向误差和航向误差。可以观察到,尽管出现了比仿真更大的跟踪误差,但实验结果与仿真结果一致。与固定前视距离的纯跟踪算法相比,该方法可以提高四轮同步转向农机的路径跟踪精度。

表 2 水田环境轨迹跟踪误差结果

Tab.2 Trajectory tracking error results in paddy field

算法	最大横向 误差/m	平均绝对横向 误差/m	横向误差 标准差/m	最大航向 误差/(°)	平均绝对航向 误差/(°)	航向误差标准 差/(°)
固定前视距离纯跟踪算法	0.568	0.294	0.092	19.837	10.413	4.913
变前视距离改进纯跟踪算法	0.258	0.109	0.053	6.351	2.799	1.519

5 结论

(1)提出了一种基于改进纯追踪模型的四轮同步转向农机路径跟踪算法。在建立运动学模型和纯跟踪模型的基础上,推导出纯跟踪误差模型,引入航向误差,实时确定纯跟踪模型中的前视距离,解决了纯跟踪模型在复杂农业应用中不能实时跟踪误差的问题。

(2)比较了纯跟踪算法和改进算法在转弯路径下的跟踪效果,在 Matlab 上验证了本文提出的算法

的可行性。实验结果表明,引入航向误差可以大大优化纯跟踪模型,有效减小了跟踪误差。与纯追踪算法相比,改进的纯跟踪算法的平均绝对横向误差减少 54.55% 以上,平均绝对航向误差减少 46.33% 以上,跟踪精度显著提高。

(3)水田实验结果表明,当四轮转向农机作业速度为 3.6 km/h 时,与固定前视距离的纯跟踪算法相比,四轮转向农机曲线轨迹跟踪平均绝对横向误差减至 0.109 m,平均绝对航向误差减至 2.799°,有效提高了农机导航精度。

参 考 文 献

[1] 刘成良,贡亮,苑进,等. 农业机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农业机械学报, 2022,53(7):1-22.
LIU Chengliang, GONG Liang, YUAN Jin, et al. Current status and development trends of agricultural robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(7):1-22. (in Chinese)

[2] 谢斌,武仲斌,毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J]. 农业机械学报, 2018,49(8):1-17.
XIE Bin, WU Zhongbin, MAO Enrong. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8):1-17. (in Chinese)

[3] 曹凯,朱勇,高强,等. 深度强化学习在自动控制领域研究现状与展望[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(6): 638-648.
CAO Kai, ZHU Yong, GAO Qiang, et al. Research status and prospect of deep reinforcement learning in automatic control[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(6): 638-648. (in Chinese)

[4] 唐刚,胡超,姚小强,等. 波浪补偿控制算法综述[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(6): 576-582.
TANG Gang, HU Chao, YAO Xiaoqiang, et al. Review of wave compensation control algorithms[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(6): 576-582. (in Chinese)

[5] LIU Z, ZHANG Z, LUO X. Design of GNSS automatic navigation operation system for Leivol ZP9500 upland gap sprayer[J]. Journal of Agriculture Engineering, 2018,34:15-21.

[6] LI S, XU H, JI Y, et al. Development of a following agricultural machinery automatic navigation system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019,158:335-344.

[7] 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(4):1-18.
ZHANG Man, JI Yuhan, LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(4):1-18. (in Chinese)

[8] 沈跃,张亚飞,刘慧,等. 农业装备自动控制技术综述[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)

[9] 付翔,赵熙金,刘道远. 轮毂电动机驱动滑移转向车辆驱动力控制[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2023, 44(3): 254-261.
FU Xiang, ZHAO Xijin, LIU Daoyuan. Driving force control of wheel motor drive skid steer vehicle[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2023, 44(3): 254-261. (in Chinese)

[10] 刘国海,张贺,张多,等. 高地隙四轮独立驱动喷雾机路径跟踪与防侧翻控制[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2023, 44(6): 657-664.
LIU Guohai, ZHANG He, ZHANG Duo, et al. Path tracking and anti-rollover control of high gap four-wheel independent drive sprayer [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2023, 44(6): 657-664. (in Chinese)

[11] 沈跃,刘子涵,刘慧,等. 基于多约束条件的果园喷雾机器人路径规划方法[J]. 农业机械学报,2023,54(7):56-67.
SHEN Yue, LIU Zihan, LIU Hui, et al. Orchard spray robot planning algorithm based on multiple constraints[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(7):56-67 (in Chinese)

[12] 刘国海,李持衡,沈跃,等. 同步转向高地隙喷雾机模糊自适应轨迹跟踪预测控制[J]. 农业机械学报,2021,52(9):

389 – 399.

LIU Guohai, LI Chiheng, SHEN Yue, et al. Trajectory tracking and fuzzy adaptive model predictive control of high clearance synchronous-steering sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 389 – 399. (in Chinese)

- [13] 焦俊, 陈靖, 乔焰, 等. 直流电机驱动农用履带机器人轨迹自适应滑膜控制[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 CSAE, 2018, 34(4): 64 – 70. (in Chinese)
- [14] 刘正铎, 张万枝, 吕钊钦, 等. 扰动下农用运输车辆路径跟踪控制器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 378 – 386.
LIU Zhengduo, ZHANG Wanzhi, LÜ Zhaoqin, et al. Design on trajectory tracking controller of agricultural vehicles under disturbances[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 378 – 386. (in Chinese)
- [15] COULTER R C. Implementation of the pure pursuit path tracking algorithm[R]. Carnegie-Mellon UNIV Pittsburgh PA Robotics INST, 1992.
- [16] 姚立健, SANTOSH K Pitla, 杨自栋, 等. 基于超宽带无线定位的农业设施内移动平台路径跟踪研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 17 – 24.
YAO Lijian, SANTOSH K Pitla, YANG Zidong, et al. Path tracking of mobile platform in agricultural facilities based on ultra wideband wireless positioning[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(2): 17 – 24. (in Chinese)
- [17] XU L, YANG Y, CHEN Q, et al. Path tracking of a 4WIS – 4WID agricultural machinery based on variable look-ahead distance[J]. Applied Sciences, 2022, 12: 8651.
- [18] 张华强, 王国栋, 吕云飞, 等. 基于改进纯追踪模型的农机路径跟踪算法研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 18 – 25.
ZHANG Huaqiang, WANG Guodong, LÜ Yunfei, et al. Agricultural machinery automatic navigation control system based on improved pure tracking model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 18 – 25. (in Chinese)
- [19] 杨洋, 查家翼, 李延凯, 等. 拖拉机机组无人作业协同控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 421 – 429.
YANG Yang, ZHA Jiayi, LI Yankai, et al. Design and experiment of unmanned operation cooperative control system for tractor operating unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 421 – 429. (in Chinese)
- [20] 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.
- [21] WANG L, CHEN Z, ZHU W. An improved pure pursuit path tracking control method based on heading error rate[J]. Industrial Robot, 2022, 49(5): 973 – 980.
- [22] 白国星, 孟宇, 刘立, 等. 无人驾驶车辆路径跟踪控制研究现状[J]. 工程科学学报, 2021, 43(4): 475 – 485.
BAI Guoxing, MENG Yu, LIU Li, et al. Current status of path tracking control of unmanned driving vehicles[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(4): 475 – 485. (in Chinese)
- [23] SUN Q, WANG Z, LI M, et al. Path tracking control of wheeled mobile robot based on improved pure pursuit algorithm[C]// 2019 Chinese Automation Congress (CAC). IEEE, 2019: 4239 – 4244.
- [24] 张闻宇, 王进, 张智刚, 等. 基于自校准变结构 Kalman 的农机导航 BDS 失锁续航方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 18 – 27.
ZHANG Wenyu, WANG Jin, ZHANG Zhigang, et al. Self-calibrating variable structure Kalman filter for tractor navigation during BDS outages[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 18 – 27. (in Chinese)
- [25] 沈跃, 何思伟, 刘慧, 等. 高地隙喷雾机自转向电动底盘控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 385 – 392, 402.
SHEN Yue, HE Siwei, LIU Hui, et al. Modeling and control of self-steering electric chassis structure of high clearance sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 385 – 392, 402. (in Chinese)
- [26] SULAIMAN S, SUDHEER A. Implementation of pure pursuit algorithm based controller for a mobile platform[C]// 3rd International Conference on Robotics Automation and Non-Destructive Evaluation, 2022: 144 – 151.
- [27] 张雁. 水田环境下的无人农机自动驾驶与作业系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
ZHANG Yan. Research on automatic driving and working control system of unmanned agricultural machinery in paddy field[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019. (in Chinese)
- [28] ACARMAN T, REDMILL K A, OZGUNER U. A robust controller design for drive by wire hydraulic power steering system[C]// Proceedings of the 2002 American Control Conference. IEEE, 2002: 2522 – 2527.
- [29] 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)