

基于 ICR 的履带车辆路径跟踪与转向控制算法研究

王法安^{1,2} 杨全合^{1,2} 张兆国^{1,2} 李安楠^{1,2} 徐红伟^{1,2}

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500; 2. 云南省高校中药材机械化工程研究中心, 昆明 650500)

摘要: 针对丘陵山区单边制动农用履带车辆路径跟踪精度低、控制次数多、转向偏差大等问题, 本文开展不同负载条件下履带车辆路径跟踪控制研究。首先, 对履带车辆的转向运动学进行理论分析, 并建立履带车辆运动学模型; 其次, 根据履带车辆单边制动转向特性, 提出一种基于瞬时旋转中心 (Instantaneous center of rotation, ICR) 的大角度转向控制算法, 该算法能够根据规划路径的转向点位置与履带车辆转向瞬心, 规划出最优的转向目标点, 并控制履带车辆在该转向目标点一次性转向到所需航向, 与此同时, 完成转向控制器设计; 最后, 开展履带车辆在 3 种不同负载条件下的仿真试验与田间试验。仿真结果表明, 大角度转向控制算法产生的跟踪路径平均误差面积与平均转向控制次数分别降低 68.95%、68.77%; 田间试验结果表明, 大角度转向控制算法产生的跟踪路径平均横向偏差均值、平均转向控制次数与转向点处平均最小偏差分别减少 57.27%、33.93%、62.29%, 且路径跟踪效果更优, 验证了大角度转向控制算法的有效性。试验结果满足履带车辆路径跟踪的要求, 为实现农用履带车辆的路径跟踪提供理论基础与参考。

关键词: 农用履带车辆; 路径跟踪; 转向瞬心; 转向控制

中图分类号: S229⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)01-0386-10

OSID:



Path Tracking and Turning Control Algorithm of Tracked Vehicle Based on ICR

WANG Faan^{1,2} YANG Quanhe^{1,2} ZHANG Zhaoguo^{1,2} LI Annan^{1,2} XU Hongwei^{1,2}

(1. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

2. Research Center on Mechanization Engineering of Chinese Medicinal Materials in Yunnan University, Kunming 650500, China)

Abstract: Aiming at the problems of low path tracking accuracy, many control times and large turning deviation of unilateral braking agricultural tracked vehicles in hilly and mountainous areas, the path tracking control of tracked vehicles under different load conditions was studied. Firstly, the turning kinematics of the tracked vehicle was theoretically analyzed, and the kinematics model of the tracked vehicle was established. Secondly, according to the unilateral braking turning characteristics of the tracked vehicles, an instantaneous center of rotation was proposed for instantaneous control, which can plan the optimal turning target point, according to the turning point position of the planned path and the turning instantaneous center of the tracked vehicle, and controlling the tracked vehicle to turn to the required course at the turning target point at one time. Meanwhile, the design of the turning controller was completed. Finally, the simulation and field experiments of the tracked vehicle under three different load conditions were carried out. The simulation results showed that the average error area of the tracking path and the average turning control times generated by the large angle turning control algorithm were reduced by 68.95% and 68.77%, respectively. The mean value of the mean lateral deviation of the tracking path, the mean turning control times and the mean minimum deviation of the turning point generated by the large angle turning control algorithm were reduced by 57.27%, 33.93% and 62.29%, respectively. And the path tracking effect was better, which verified the effectiveness of the large angle turning control algorithm. The test results met the requirements of tracked vehicle path tracking and provided a theoretical basis and reference for the path tracking of agricultural tracked vehicles.

Key words: agricultural tracked vehicles; path tracking; instantaneous turning center; turning control

收稿日期: 2023-06-12 修回日期: 2023-10-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2002004)和云南省教育厅科学研究基金项目(2023J0151)

作者简介: 王法安(1990—),男,讲师,博士,主要从事智能农机装备设计研究,E-mail: wfa@kust.edu.cn

通信作者: 张兆国(1966—),男,教授,博士,主要从事农业机械装备设计研究,E-mail: zzg@kust.edu.cn

0 引言

高精度定位导航技术是实现农机智能化的关键,由其所衍生的智能农机定位导航系统是构成智慧农业的关键要素^[1-3],对破解繁重的农业机械化生产具有重要意义。履带车辆是丘陵山区农业生产中的重要工具,履带车辆定位导航技术是精准农业的重要组成部分^[4-6]。通过北斗导航、激光雷达、摄像头等高精度设备获取位置与环境信息,并利用控制算法^[7-9]实现履带车辆的自适应路径跟踪,提高了田间作业效率、提升了作业质量、降低了劳动强度、减少了人工成本。

目前针对农机装备路径跟踪的控制算法主要包括模糊控制、PID 控制、纯追踪控制、模型预测控制、最优控制等^[10-16]。其中,YANG 等^[17]针对前瞻距离难以用数学表达式准确描述的问题,提出了最优目标点农机路径跟踪算法,显著提高了路径跟踪精度。肖世德等^[18]为解决常规纯追踪算法路径跟踪精度低的问题,提出了两阶段纯追踪算法,实现了最优的路径跟踪性能。吴才聪等^[19]针对拖拉机曲线跟踪控制精度低的问题,提出了变曲度路径跟踪控制算法,通过动态调整前视距离与前轮转角前馈量,有效提高了农机曲线路径跟踪精度。文献[20-21]针对纯追踪算法的前视距离问题,设计了前视距离自适应可调的控制器,提高了纯追踪算法的控制精度。但在复杂的农业生产过程中,频繁地调整履带车辆前视距离,致使农机运动状态不稳定。

虽然履带车辆转向控制方法与轮式车辆不同^[22],但履带车辆在低速状态时,导航控制算法设计仍可参考轮式车辆运动学模型。ZHANG 等^[23]针对履带车辆转向控制平稳性差、控制精度低等问题,设计了状态反馈导航控制系统,并结合三次样条插值来预定路径,实现了对单缸柴油机履带车辆的稳定控制。GU 等^[24]为实现履带式移动机器人在应急救援场景非结构化环境下的自动驾驶,提出了预览线性模型预测控制算法,结果表明该算法能够保证实时性、提高跟踪精度,且对大曲率路径具有较好的跟踪性能。MA 等^[25]为实现枸杞园履带车辆的实时自主导航,提出了视觉线索与模糊控制导航算法,完成了对履带车辆的鲁棒性与实时性控制。何杰等^[26]为提高履带式花生收获机在沙地作业时的路径跟踪精度,提出了双 PID 路径跟踪控制算法,通过脉冲宽度控制器实现了精准路径跟踪控制。何永强等^[27]为降低履带式联合收获机导航路径跟踪转向控制频率,并提高控制系统的稳定性,提出了预

瞄一切线局部跟踪路径动态规划算法,减少了横向偏差与航向偏差。但是,由于履带车辆与土壤之间的交互作用,导致履带车辆在转向过程中会产生滑移。ZHAO 等^[28]针对履带车辆滑移问题,将滑移运动学与履带车辆轨迹跟踪控制策略相结合,提出了运动学感知模型预测控制方法,降低了履带车辆在越野工况下的平均跟踪残差。在面对单边制动履带车辆转向时,滑移方程不能准确计算出滑移参数,而基于瞬时旋转中心(Instantaneous center of rotation,ICR)的运动学模型则可以更好地适应路面变化。LU 等^[29]通过车辆位置估计 ICR,进而预测前进轨迹,并利用扩展卡尔曼滤波器实时估计运动学参数,降低了预测位置误差、航向误差与姿态误差。QIN 等^[30]针对路径规划与横向控制都高度依赖精确履带车辆模型问题,利用轨道瞬时旋转中心滑移模型与双层自适应无迹卡尔曼滤波器来实时估计 ICR 位置,并预测未来轨迹,提高了履带车辆模型精度。

针对履带车辆路径跟踪精度低、转向控制次数多、转向偏差大等问题,本文以单边制动农用履带车辆为试验平台,探究履带车辆运动特性,并基于 ICR,提出一种大角度转向控制算法(Large angle turning, LAT),该算法根据规划路径的转向点位置与履带车辆转向瞬心,解算出最优转向目标点,并控制履带车辆在该转向目标点一次性转向到所需航向,以期使履带车辆在转向到期望航向后的导航偏差最小。

1 履带车辆运动学模型

单边制动转向农用履带车辆,通过单边履带的完全制动来实现转向控制。在图 1 所示的单边制动履带车辆转向模型中,坐标系 XOY 为大地坐标系,坐标系 xO_Ty 为履带车辆坐标系, O_T 为履带车辆形心。履带车辆的左右转向瞬心分别位于左右两条履带中央,当改变履带车辆的行驶方向时,转向瞬心在

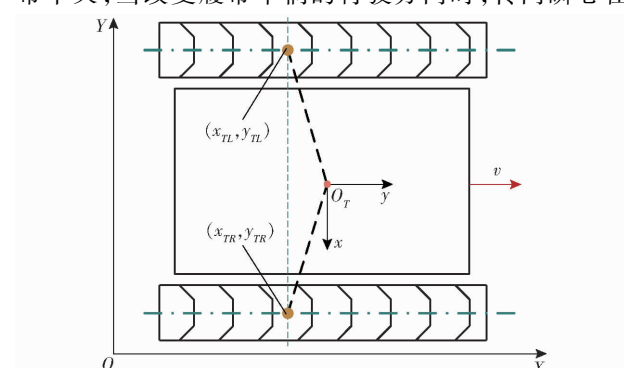


图 1 单边制动履带车辆转向示意图
Fig. 1 Turning diagram of unilateral braking tracked vehicle

左右两条履带的中央进行切换^[23]。由于履带车辆负载作业,其质心无法确定,导致转向瞬心纵坐标不同。当履带车辆左右转向时,整车分别以点 (x_{TL}, y_{TL}) 与 (x_{TR}, y_{TR}) 为圆心进行旋转,转向半径 r_T 为转向瞬心到履带车辆形心的距离,即

$$r_T = \sqrt{x_{TL}^2 + y_{TL}^2} = \sqrt{x_{TR}^2 + y_{TR}^2} \tag{1}$$

式中 (x_{TL}, y_{TL}) ——履带车辆左转瞬心坐标, m

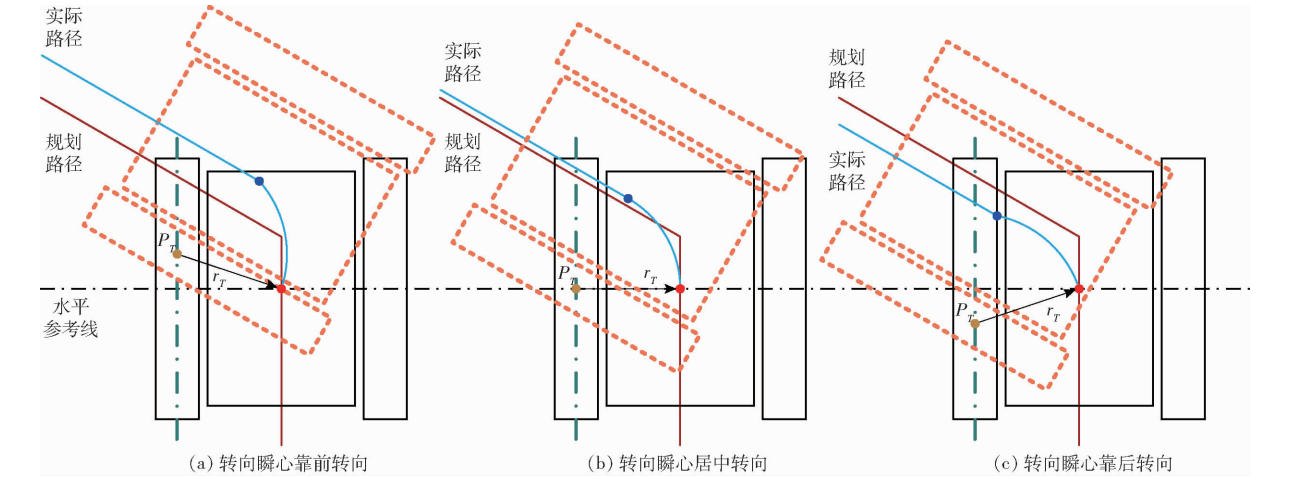


图2 不同转向瞬心转动相同角度后履带车辆位置差异示意图

Fig.2 Position difference diagrams of tracked vehicle after rotating the same angle at different turning instantaneous centers

2 转向控制算法

为了充分发挥履带车辆转向半径小的特点,并降低转向控制次数,根据单边制动履带车辆转向特性提出基于ICR的大角度转向控制算法,主要依据履带车辆不同转向瞬心规划不同转向目标点,实现履带车辆在转向后的导航偏差最小。

2.1 横向偏差与航向偏差计算

横向偏差和航向偏差是实现履带车辆路径跟踪的重要参数,通过预瞄追踪模型确定规划路径上目标点位置,并结合履带车辆位置和航向信息,计算出横向偏差和航向偏差。履带车辆路径跟踪偏差计算示意图如图3所示。

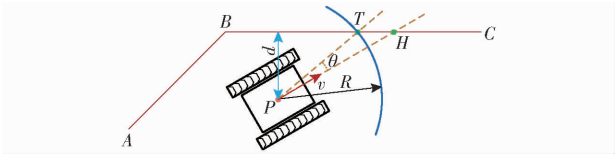


图3 路径跟踪偏差计算示意图

图3中,路径ABC为规划路径,P为履带车辆当前位置,d为履带车辆当前位置与规划路径的横向偏差,R为目标点搜索过程中的前视距离,PT方向为履带车辆期望航向,PH方向为履带车辆当前航向,θ为履带车辆当前航向偏差。由图3中几何关系可得履带车辆当前位置P到规划路径BC的

(x_{TR}, y_{TR}) ——履带车辆右转瞬心坐标, m

图2展示了转向瞬心对转向后位置的影响,设置转向瞬心横坐标不变,改变纵坐标,此时,不同的转向半径将导致履带车辆在相同转向位置和相同转向角度条件下,出现不同的最终位置。因此,为了提高履带车辆转向后路径跟踪的精度,需要根据不同转向瞬心进行路径规划。

距离为

$$d = \frac{|(Y_C - Y_B)X_P + (X_B - X_C)Y_P + X_C Y_B - X_B Y_C|}{\sqrt{(Y_C - Y_B)^2 + (X_B - X_C)^2}} \tag{2}$$

式中 (X_P, Y_P) ——履带车辆当前位置坐标, m
 (X_B, Y_B) ——路径规划点B的位置坐标, m
 (X_C, Y_C) ——路径规划点C的位置坐标, m

航向偏差θ为射线PH与射线PT的夹角,履带车辆航向数据来自华测PA-3型定位导航设备,该设备发送的航向角H以正北方向为0°。即高斯-克吕格平面纵轴正方向,角度沿顺时针增加,其范围为0°~359.99°。使用大地坐标系XOY对履带车辆到目标点的期望航向进行计算,可得期望航向角H_E为

$$H_E = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \text{atan2}(Y_T - Y_P, X_T - X_P) \\ \left(-\pi < \text{atan2}(Y_T - Y_P, X_T - X_P) \leq \frac{\pi}{2} \right) \\ \frac{5}{2}\pi - \text{atan2}(Y_T - Y_P, X_T - X_P) \\ \left(\frac{\pi}{2} < \text{atan2}(Y_T - Y_P, X_T - X_P) \leq \pi \right) \end{cases} \tag{3}$$

式中 (X_T, Y_T) ——履带车辆目标点坐标, m
 $\text{atan2}(Y, X)$ ——C语言返回方位角函数, rad
 $\text{atan2}(Y, X)$ 的结果为Y/X的反正切,所在象限

由 Y 和 X 的符号决定,取值范围为 $(-\pi, \pi]$, 公式为

$$\text{atan2}(Y, X) = \begin{cases} \arctan(Y/X) & (X > 0) \\ \arctan(Y/X) + \pi & (Y \geq 0, X < 0) \\ \arctan(Y/X) - \pi & (Y < 0, X < 0) \\ \frac{\pi}{2} & (Y > 0, X = 0) \\ -\frac{\pi}{2} & (Y < 0, X = 0) \\ \text{未定义} & (Y = 0, X = 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中 (X, Y) ——大地坐标系下坐标, m

根据 H 和 H_E 计算航向偏差 θ , 但横向偏差和航向偏差的计算值是偏差绝对值。为了表示履带车辆与规划路径间的方位关系, 定义当履带车辆航向与规划路径航向一致时, 履带车辆左转修正横向偏差时, d 为正, 右转修正横向偏差时, d 为负; 定义履带车辆左转修正航向偏差时, θ 为正, 右转修正航向偏差时, θ 为负, 横向偏差和航向偏差正负定义如图 4 所示。具体符号判定需要计算矢量三角形的面积, 根据面积正负, 判定 d 与 θ 的正负。

2.2 转向目标点位置计算

当履带车辆进行转向时, 需要根据转向瞬心

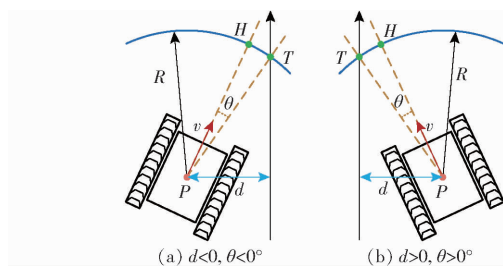


图 4 横向偏差和航向偏差正负定义示意图

Fig. 4 Positive and negative definition diagrams of lateral deviation and heading deviation

重新规划转向目标点, 当履带车辆在转向目标点上转向时, 可以使转向后的导航误差最小。履带车辆转向瞬心是履带车辆转向时的不动点, 为了使转向后的导航误差最小, 在进行转向时, 转向瞬心应同时位于转向前后的两条转向瞬心期望路径上。如图 5 所示, 当转向路径相同时, 随着履带车辆转向瞬心纵坐标向着履带车辆运动的方向变化, 使转向目标点与转向点的距离逐渐减小, 同时转向半径也在变化, 最终导致转向轨迹的不同。当履带车辆左转瞬心 P_{TL} 与两条转向瞬心期望路径交点 P_T 重合时, 履带车辆转向到期望航向后, 所产生的横向误差最小。

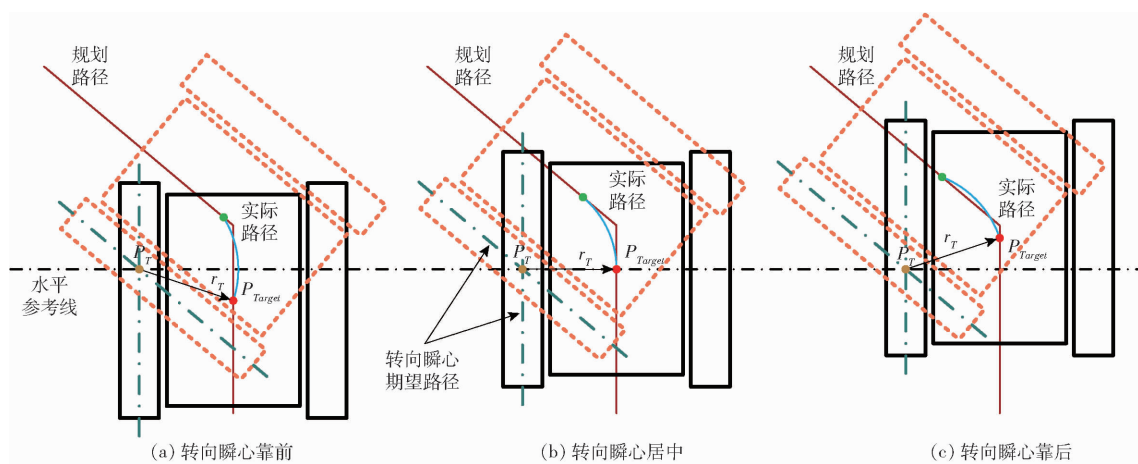


图 5 不同转向瞬心所对应的不同转向目标点

Fig. 5 Different turning target points corresponding to different turning instantaneous centers

为了方便计算, 现将规划路径与转向瞬心期望路径用直线方程的一般形式进行表达, 则两段规划路径直线方程为

$$\begin{cases} A_1 X + B_1 Y + C_1 = 0 \\ A_2 X + B_2 Y + C_2 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中 $A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2$ ——系数

根据平行线间的距离公式

$$w = \frac{|C_i - C_{L,R}|}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2}} \quad (i = 1, 2) \quad (6)$$

式中 w ——规划路径与转向瞬心期望路径的距离, m

$C_{L,R}$ ——左右侧与规划路径平行的转向瞬心期望路径方程参数

可得与规划路径平行且距离为 w 的两条转向瞬心期望路径为

$$\begin{cases} C_{1L,1R} = C_1 \pm w_{L,R} \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \\ C_{2L,2R} = C_2 \pm w_{L,R} \sqrt{A_2^2 + B_2^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中 $w_{L,R}$ ——左右转向瞬心到履带车辆形心的横向距离, 与 $C_{L,R}$ 对应, m

2 条转向瞬心期望路径产生的交点, 为转向瞬心目标点 P_T , 即

$$\begin{bmatrix} P_{T_X} \\ P_{T_Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -C_{1R} \\ -C_{2R} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 (P_{T_X}, P_{T_Y}) ——大地坐标系下履带车辆转向瞬心目标点坐标, m

根据转向前的路径航向与转向瞬心目标点, 通过坐标变换可计算出履带车辆转向目标点 P_{Target} , 公式为

$$\begin{bmatrix} P_{Target_X} \\ P_{Target_Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{T_X} \\ P_{T_Y} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cos H_{path} & \sin H_{path} \\ -\sin H_{path} & \cos H_{path} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{T_X} \\ P_{T_Y} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 $(P_{Target_X}, P_{Target_Y})$ ——履带车辆转向目标点坐标, m

(P_{T_X}, P_{T_Y}) ——履带车辆坐标系下履带车辆转向瞬心目标点坐标, m

H_{path} ——转向前的路径航向角, ($^{\circ}$)

2.3 转向控制器设计

当履带车辆路径跟踪大角度转向时, 根据履带车辆转向前后转向瞬心期望路径的交点对转向目标点进行计算。当履带车辆与该转向目标点的距离小于前视距离时, 通过模糊控制算法^[25] (Fuzzy control, FC) 控制履带车辆向转向目标点前进, 为避免超调振荡, 当履带车辆与该转向目标点的距离小于 0.2 m 时, 履带车辆将直行, 每隔 100 ms 检测一次履带车辆与该转向目标点的距离, 当距离出现增加趋势时, 则认为履带车辆抵达该转向目标点, 便使用大角度转向控制算法控制履带车辆进行单边制动转向。履带车辆的转向以航向为参考, 当履带车辆航向角与规划路径期望航向我偏差小于 2° 时, 则认为履带车辆转向到规划路径期望路径, 此时, 完成了大角度转向控制算法的控制, 随后通过模糊控制算法继续进行路径跟踪。大角度转向控制算法控制流程如图 6 所示。

3 仿真试验

3.1 试验误差评估

在单边制动履带车辆自动导航的相关试验中, 仅通过最大横向偏差与平均偏差无法反映履带车辆路径跟踪效果^[4,31], 为此, 本文提出了一种路径包围的面积计算新方法, 用于评估履带车辆自动导航过程中的路径跟踪误差。该算法的核心是计算规划路径与实际路径所围成的面积, 如图 7 中的阴影所示, 以 2 条路径的交点为分界, 计算出各段闭合路径面积并除以规划路径长度, 用作路径跟踪误差评估, 计算公式为

$$d_{Average} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{L_{Path}} \quad (10)$$

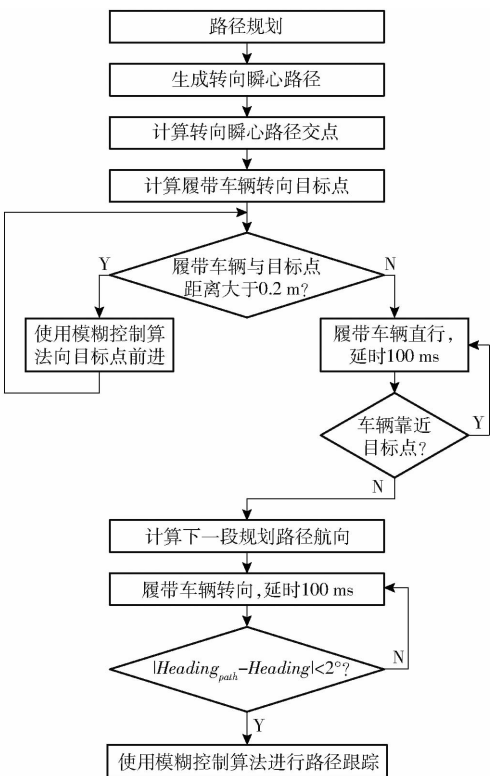


图 6 大角度转向控制流程图

Fig. 6 Flow chart of large angle turning control

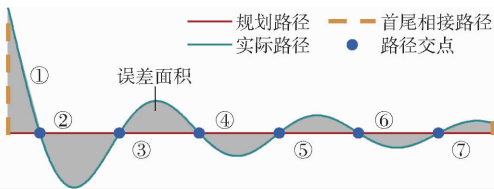


图 7 误差面积计算示意图

Fig. 7 Error area calculation diagram

式中 $d_{Average}$ ——平均横向偏差, m
 S_i ——各段闭合路径面积, m^2
 L_{Path} ——规划路径长度, m

3.2 仿真转向瞬心设定

现有转向瞬心计算方法直接应用于单边制动履带车辆, 需要进一步改进和完善^[32-33], 因此在仿真试验时使用预先设定的转向瞬心, 在田间试验时转向瞬心由履带车辆平衡试验得到。设定仿真左右转向瞬心分别为 $(-0.24\text{ m}, 0.2\text{ m})$ 与 $(0.24\text{ m}, 0.2\text{ m})$ 、 $(-0.24\text{ m}, 0\text{ m})$ 与 $(0.24\text{ m}, 0\text{ m})$ 、 $(-0.24\text{ m}, -0.2\text{ m})$ 与 $(0.24\text{ m}, -0.2\text{ m})$, 用于表示履带车辆在不同负载条件下转向瞬心位置, 转向瞬心在履带车辆上的相对位置如图 8 所示。

3.3 仿真试验方案

为了对比模糊控制算法^[25] 与大角度转向控制算法的控制效果差异, 本文根据作业场景规划一条转向路径, 路径总长度为 35.7 m, 如图 9 所示, 路径包含 30° 、 45° 、 60° 和 90° 共 4 个转向角。

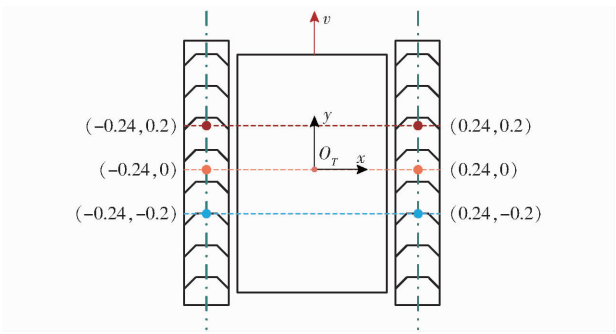


图 8 履带车辆转向瞬心示意图

Fig. 8 Tracked vehicle turning instantaneous center diagram

仿真试验中,履带车辆初始航向与规划路径一致,设置横向偏差为 0.2 m、前视距离为 1.2 m,3 个不同转向瞬心下两种控制算法所产生的跟踪路径如图 10 所示,误差面积与转向次数对比如图 11 所示。

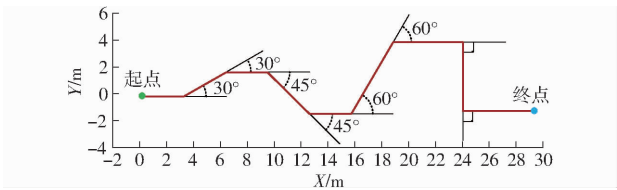


图 9 规划路径

Fig. 9 Planning path

3.4 仿真结果分析

根据上述仿真结果可知,履带车辆左转 60°时,采用圆切法^[27]计算转向点处的最小偏差,如图 10 中的 C 所示,3 种不同转向瞬心下,模糊控制算法所产生的跟踪路径在转向点处的平均最小偏差为 0.47 m,而大角度转向控制算法为 0.12 m。3 种不同转向瞬心下,模糊控制算法所产生的平均路径跟踪误差面积为 4.44 m²,而大角度转向控制算法为 1.38 m²,减少 68.95%;3 种不同转向瞬心下,模糊

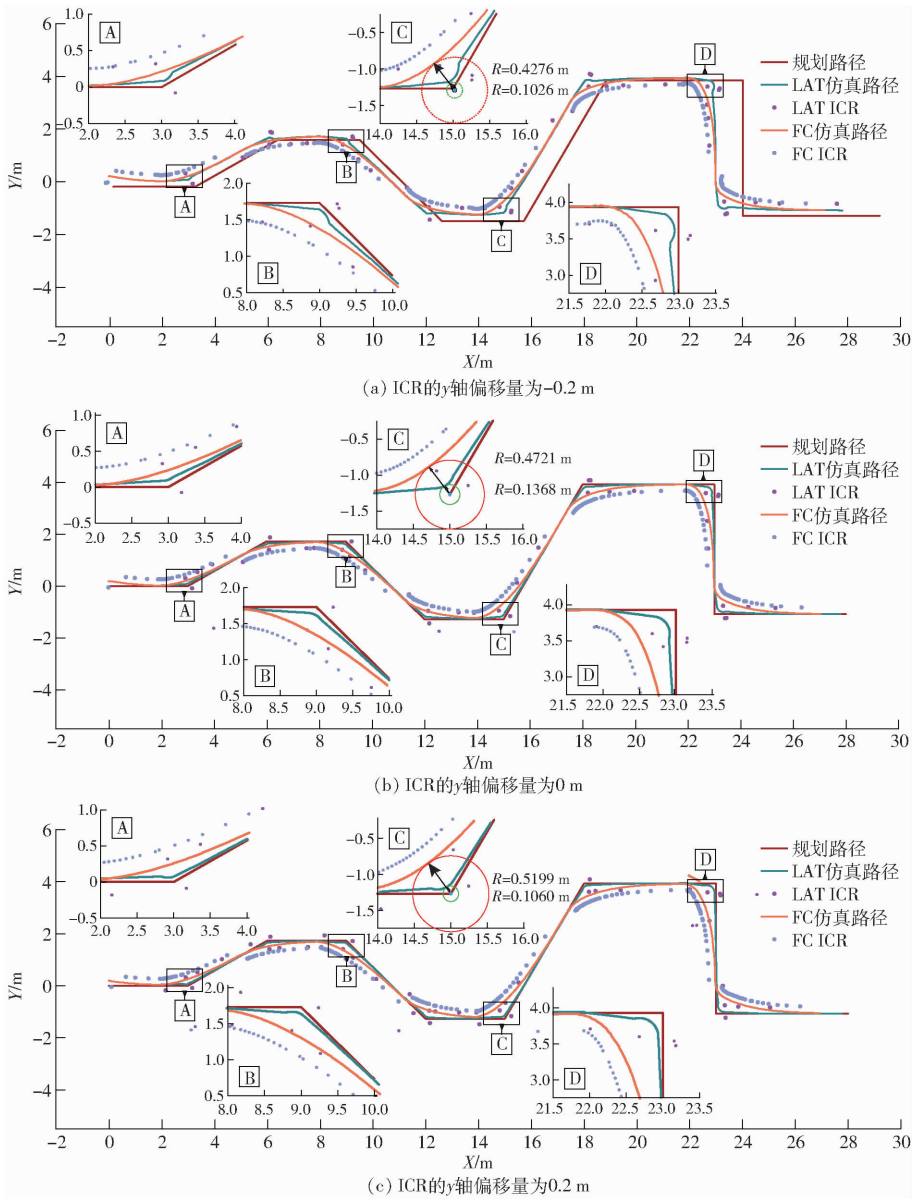


图 10 仿真试验跟踪路径

Fig. 10 Tracking paths of simulation test

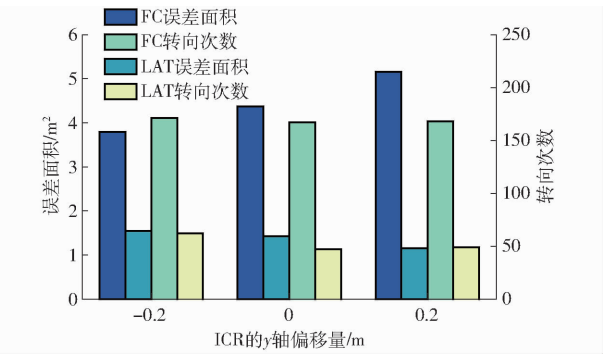


图 11 误差面积与转向次数仿真对比

Fig. 11 Simulation comparison of error area and turning times

控制算法所产生的平均转向控制次数为 169,而大角度转向控制算法为 53,降低 68. 77%。

通过上述路径跟踪仿真试验可知,大角度转向控制算法下路径跟踪轨迹更加符合图 9 的规划路径,体现了不同转向瞬心下更优的路径跟踪效果,验证了大角度转向控制算法的有效性。

4 田间试验

4.1 履带车辆试验平台

以履带式田间运输车为试验平台,进行田间路径跟踪试验,以验证大角度转向控制算法的有效性,履带车辆基本参数如表 1 所示。履带车辆搭载华测 PA-3 型导航设备,利用 RTK 差分定位原理实时获取高精度履带车辆位置信息,并以频率 20 Hz 通过 RS232 串口将数据发送给计算机。计算机根据接收的各个传感器数据,并结合规划路径向嵌入式控制器发送相应的控制指令,最后由嵌入式控制器输出控制信号控制转向。为了保证通信的可靠性,上位机(计算机)与下位机(嵌入式控制器)之间采用 TCP/IP 通信协议。履带车辆控制系统框架如图 12 所示,通过车速传感器(Vehicle speed sensor, VSS)与惯性测量单元(Inertial measurement unit, IMU)采集履带车辆的速度与加速度,通过全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)获取履带车辆的位置,并将数据发送给工控机,工控机生成相应的控制指令并发送给嵌入式控制器,随后嵌入式控制器向电磁换向阀输出控制信号,控制气缸的伸缩,完成履带车辆转向控制。

表 1 履带车辆主要参数

Tab.1 Main parameters of tracked vehicle

参数	数值
整机尺寸/(mm×mm×mm)	1 850×815×900
质量/kg	200
履带接地长度/mm	750
履带宽度/mm	140
履带中心距/mm	480
汽油机额定功率/kW	3
速度/(km·h ⁻¹)	0.5~6.0

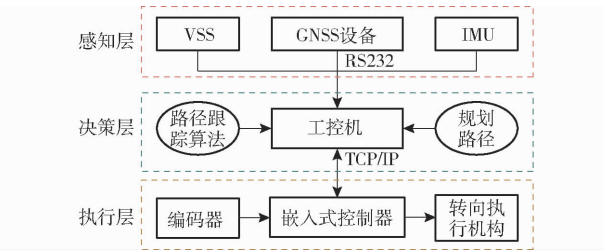


图 12 履带车辆控制系统框架

Fig. 12 Control system framework of tracked vehicle

4.2 转向瞬心平衡试验

根据履带车辆转向瞬心规划转向目标点,转向瞬心数据由履带车辆在不同负载条件下的平衡试验得到,并作为后续重要的试验参数。设置负载总质量为 60 kg,履带车辆无负载、中间负载、边缘负载情况如图 13 所示。将履带车辆平衡在两根均质且长度相等的角钢上,测量履带车辆形心到质心在 y 轴上的距离,作为转向瞬心的纵坐标,得到履带车辆不同负载条件下转向瞬心如表 2 所示。



图 13 履带车辆不同负载情况示意图

Fig. 13 Schematics of different load conditions of tracked vehicles

表 2 履带车辆不同负载条件下的转向瞬心坐标

Tab.2 Turning instantaneous center coordinates of tracked vehicle under different load conditions m

项目	无负载		中间负载		边缘负载	
	x	y	x	y	x	y
左转瞬心	-0.24	-0.116	-0.24	-0.044	-0.24	0.009
右转瞬心	0.24	-0.116	0.24	-0.044	0.24	0.009

4.3 田间试验方案

履带车辆路径跟踪田间试验在云南省高校中药材机械化工程研究中心试验基地进行,为了简化试验流程、方便数据处理,利用上位机路径规划功能,根据履带车辆当前位置和航向生成试验路径,使试验可在任意起点进行。

田间试验路径与仿真试验路径一致,设置履带车辆速度为 0.2 m/s、前视距离为 1.2 m,履带车辆转向瞬心见表 2。考虑到路面不平的影响,所统计的转向次数为图 14 中放大区域 A、B、C、D 的转向瞬心数量,3 种不同负载条件下的两种控制算法所产生的跟踪路径如图 14 所示,平均横向偏差与转向次数对比如图 15 所示,转向点处的最小偏差如图 16 所示,误差面积趋势如图 17 所示。

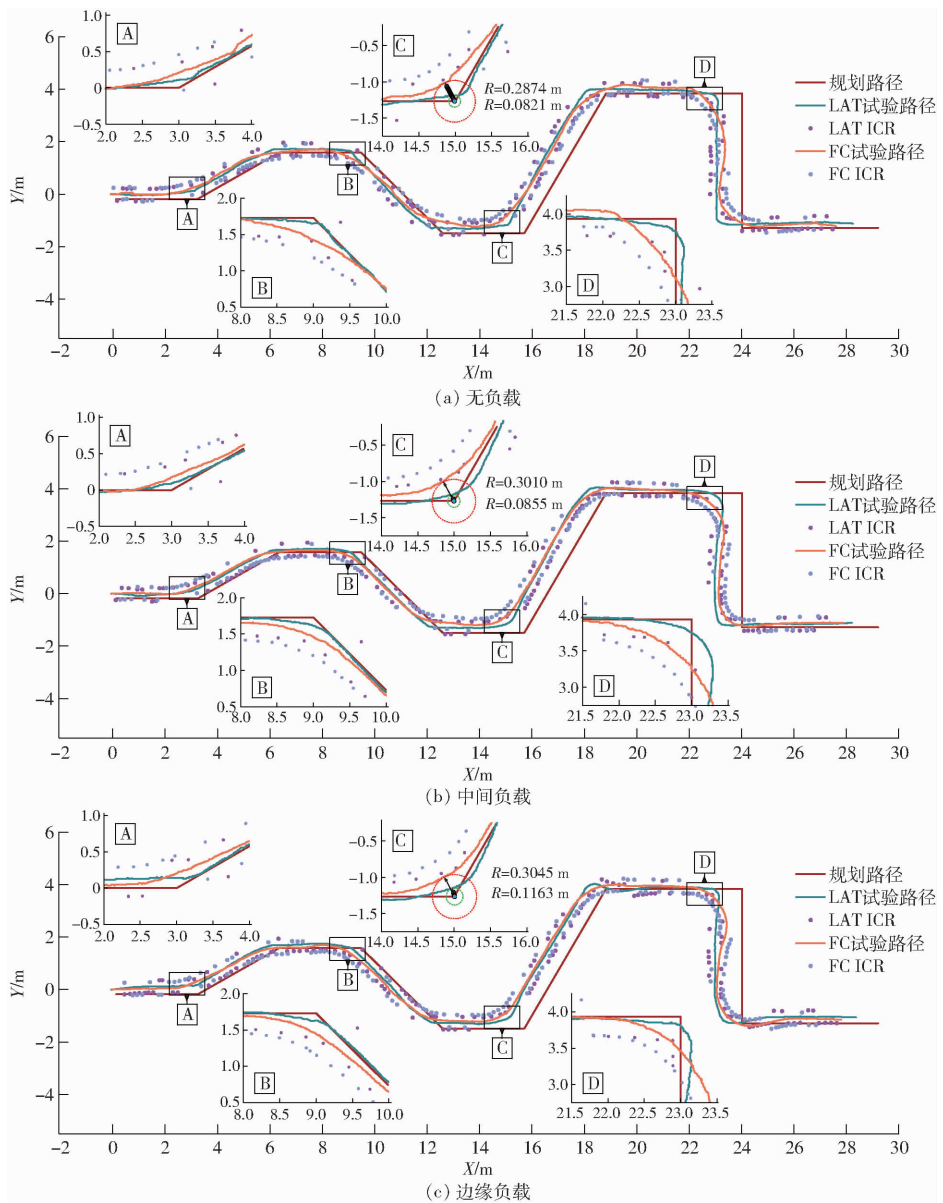


图 14 田间试验跟踪路径
Fig. 14 Tracking paths of field test

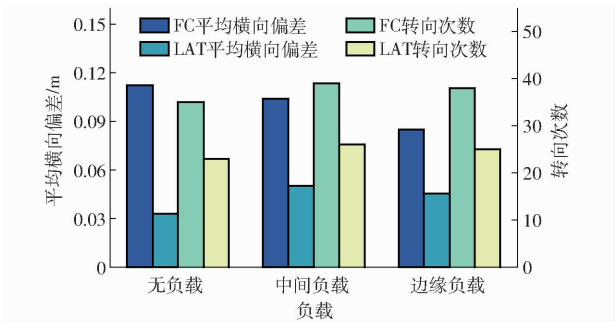


图 15 平均横向偏差与转向次数试验对比
Fig. 15 Test comparison of average lateral deviation and turning times

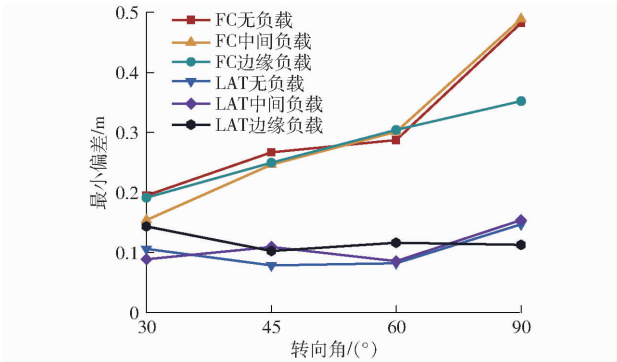


图 16 转向点处的最小偏差
Fig. 16 Minimum deviation at turning point

4.4 田间试验结果分析

根据图 15 可知,3 种不同负载条件下,模糊控制算法所产生的平均横向偏差均值为 0.10 m,而大角度转向控制算法为 0.04 m,减少 57.27%;3 种不

同负载条件下,模糊控制算法所产生的平均转向控制次数为 37,而大角度转向控制算法为 25,降低 33.93%。

根据图 16 可知,3 种不同负载条件下,模糊控

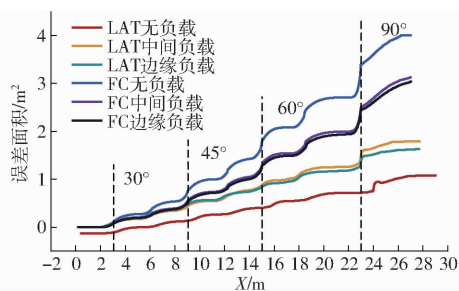


图 17 误差面积趋势曲线

Fig. 17 Error area trend curves

制算法在 4 个不同转向角度下平均最小偏差为 0.29 m, 而大角度转向控制算法为 0.11 m, 减少 62.29%。结合图 16 可知, 随着转向角度的增加, 模糊控制算法在 3 种不同负载条件下所产生的最小偏差逐渐增大, 而大角度转向控制算法基本维持不变。

根据图 17 可知, 随着路径跟踪试验的进行, 两种控制算法所产生的路径跟踪误差面积逐渐增大, 且模糊控制算法所产生的路径跟踪误差面积明显大于大角度转向控制算法。同时, 结合图 14 可知, 大角度转向控制算法所产生的路径跟踪效果更好, 误差主要产生在转向路径部分, 随着转向角度的增加, 两种控制算法在转向点附近所产生误差面积增大, 但大角度转向控制算法在转向点附近所产生的误差面积明显小于模糊控制算法。

田间试验结果表明, 大角度转向控制算法具有较好的路径跟踪效果, 与模糊控制算法相比, 减少了

路径跟踪误差面积, 并降低了转向控制次数, 充分发挥了单边制动农用履带车辆转向半径小的优点, 验证了大角度转向控制算法的有效性。

5 结论

(1) 通过对单边制动农用履带车辆转向运动学进行理论分析, 建立了履带车辆运动学模型, 并根据履带车辆的单边制动转向特性, 提出了一种基于 ICR 的大角度转向控制算法, 通过仿真试验与田间试验, 对履带车辆进行了 3 种不同负载条件下的路径跟踪测试, 结果表明, 田间试验所得的路径跟踪曲线形状与仿真试验接近, 且大角度转向控制算法较模糊控制算法的路径跟踪效果更优, 从而验证了大角度转向控制算法的有效性。

(2) 针对转向角 30°、45°、60°、90°, 模糊控制算法在转向点处所产生的最小偏差随着转向角度的增加而增大, 而大角度转向控制算法则基本维持不变, 体现了大角度转向控制算法对大角度转向更好的适应性。

(3) 对比模糊控制算法, 大角度转向控制算法减少 57.27% 的路径跟踪误差面积、降低 33.93% 的转向控制次数, 充分发挥了单边制动农用履带车辆转向半径小的优势, 从而提高了路径跟踪精度。本文提出的算法解决了现有控制算法应用于履带车辆存在“切角”的问题, 满足农用履带车辆路径跟踪的要求, 为履带车辆后续的自动驾驶提供了基础。

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(4): 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(4): 1-18. (in Chinese)
- [2] 周俊, 何永强. 农业机械导航路径规划研究进展[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 1-14.
ZHOU Jun, HE Yongqiang. Research progress on navigation path planning of agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 1-14. (in Chinese)
- [3] LI S C, XU H Z, JI Y H, et al. Development of a following agricultural machinery automatic navigation system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 158: 335-344.
- [4] 刘志杰, 王小乐, 任志刚, 等. 基于虚拟雷达模型的履带拖拉机导航路径跟踪控制算法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 376-385.
LIU Zhijie, WANG Xiaole, REN Zhigang, et al. Crawler tractor navigation path tracking control algorithm based on virtual radar model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 376-385. (in Chinese)
- [5] 张朝宇, 董万静, 熊子庆, 等. 履带式油菜播种机模糊自适应纯追踪控制器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 105-114.
ZHANG Chaoyu, DONG Wanjing, XIONG Ziqing, et al. Design and experiment of fuzzy adaptive pure pursuit control of crawler-type rape seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 105-114. (in Chinese)
- [6] CARPIO R F, POTENA C, MAIOLINI J, et al. A navigation architecture for Ackermann vehicles in precision farming[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(2): 1103-1110.
- [7] YAO J L, GE Z. Path-tracking control strategy of unmanned vehicle based on DDPG algorithm[J]. Sensors, 2022, 22(20): 7881.

[8] SUN Z Y, WANG R C, YE Q, et al. Investigation of intelligent vehicle path tracking based on longitudinal and lateral coordinated control[J]. IEEE Access, 2020, 8: 105031 – 105046.

[9] ZHANG B Y, GAVIN H P. Decentralized control of multiagent navigation systems[J]. IEEE-CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(5): 922 – 925.

[10] XU J H, LAI J, GUO R, et al. Efficiency-oriented MPC algorithm for path tracking in autonomous agricultural machinery[J]. Agronomy, 2022, 12(7): 1662.

[11] LI Y B, WANG H Y. Research on agricultural machinery hydraulic steering control system based on fuzzy PID variable damping algorithm[C]//2022 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), 2022: 575 – 579.

[12] ZHANG C L, GAO G L, ZHAO C Z, et al. Research on 4WS agricultural machine path tracking algorithm based on fuzzy control pure tracking model[J]. Machines, 2022, 10(7): 597.

[13] 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, 88.
CUI Bingbo, SUN Yu, JI Feng, et al. Study on whole field path tracking of agricultural machinery based on fuzzy Stanley model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 43 – 48, 88. (in Chinese)

[14] 林洪振, 李彦明, 袁正华, 等. 水田植保机自主作业滑模抗干扰路径跟踪方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 383 – 388.
LIN Hongzhen, LI Yanming, YUAN Zhenghua, et al. Sliding mode anti-interference path tracking method for autonomous operation of paddy field plant protection machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 383 – 388. (in Chinese)

[15] 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)

[16] 王辉, 王桂民, 罗锡文, 等. 基于预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 11 – 19.
WANG Hui, WANG Guimin, LUO Xiwen, et al. Path tracking control method of agricultural machine navigation based on aiming pursuit model[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4): 11 – 19. (in Chinese)

[17] YANG Y, LI Y K, 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.

[18] 肖世德, 江海锋, 杜金兰, 等. 基于两阶段纯追踪模型的农用车路径跟踪算法研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 439 – 446, 458.
XIAO Shide, JIANG Haifeng, DU Jinlan, et al. Path tracking algorithm of agricultural vehicle based on two stages pure tracking model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 439 – 446, 458. (in Chinese)

[19] 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 curvature path tracking control for the automatic navigation of tractors [J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(21): 1 – 7. (in Chinese)

[20] WANG L H, CHEN Z L, ZHU W X. An improved pure pursuit path tracking control method based on heading error rate[J]. Industrial Robot—The International Journal of Robotics Research and Application, 2022, 49(5): 973 – 980.

[21] XU L J, YANG Y K, CHEN Q H, et al. Path tracking of a 4WIS–4WID agricultural machinery based on variable look-ahead distance[J]. Applied Sciences, 2022, 12(17): 8651.

[22] 郭浩亮, 穆希辉, 杨小勇, 等. 四橡胶履带轮式车辆转向力学性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(21): 79 – 86.
GUO Haoliang, MU Xihui, YANG Xiaoyong, et al. Mechanics properties analysis and test of four rubber tracked assembly vehicle steering system[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(21): 79 – 86. (in Chinese)

[23] ZHANG L H, ZHANG R R, LI L L, et al. Research on virtual Ackerman steering model based navigation system for tracked vehicles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 192: 106615.

[24] GU Q, BAI G X, MENG Y, et al. Efficient path tracking control for autonomous driving of tracked emergency rescue robot under 6G network[J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2021, 2021: 5593033.

[25] MA Y, ZHANG W Q, QURESHI W, et al. Autonomous navigation for a wolfberry picking robot using visual cues and fuzzy control[J]. Information Processing in Agriculture, 2021, 8(1): 15 – 26.

[26] 何杰, 满忠贤, 胡炼, 等. 履带式花生联合收获机路径跟踪控制方法与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(1): 9 – 17.
HE Jie, MAN Zhongxian, HU Lian, et al. Path tracking control method and experiments for the crawler-mounted peanut combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(1): 9 – 17. (in Chinese)