doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.02.003

基于驱动轮横向侧偏补偿的自动导航拖拉机改进纯追踪路径跟踪控制方法

何　杰[1,2]　曾鸿禧[1]　李明锦[1]　贺　静[2,3]　莫家骏[1]　汪　沛[1,4]　赵润茂[1,2]

(1.华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室,广州 510642;
2.农业装备技术全国重点实验室,广州 510642;3.广东工贸职业技术学院,广州 510550;
4.华南农业大学黄埔创新研究院,广州 510700)

摘要:自动导航拖拉机在侧偏侧滑等工况下路径跟踪误差大、纠偏易超调且调节时间长。为解决拖拉机侧偏侧滑工况快速纠偏问题,提出了一种基于驱动轮横向控制补偿策略的改进纯追踪路径跟踪控制方法。通过构建拖拉机的坡面侧滑模型,结合二轮车运动学模型,提出了纯追踪算法的横向控制补偿策略,对经典纯追踪算法进行改进,实现自动驾驶拖拉机精确横向补偿控制。为验证本文横向侧偏补偿改进纯追踪路径跟踪算法性能,进行 CarSim/Simulink 联合仿真,缓坡试验结果表明,改进后的算法在 10°斜坡上的控制精度相比经典算法提升了 73.6%;持续侧滑仿真,经典算法无法脱困,而改进算法在 3.9 s 内完成脱困,横向偏差收敛至 0.01 m 以内,超调量为 0.14 m。此外本文还在田间试验中验证了改进算法的有效性,在相同试验条件下,进行了 3 次重复试验,结果表明拖拉机在所有试验中均成功脱困,试验表明平均脱困时间为 7.03 s,平均最大超调量为 0.054 m。试验结果表明,本文横向控制补偿策略显著提升了自动导航拖拉机在复杂工况下的控制精度和稳定性。

关键词:拖拉机;自动导航;路径跟踪;纯追踪算法;横向侧偏补偿;侧滑

中图分类号:S220;S24　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)02-0028-10　　**OSID**:

Improved Pure Pursuit Path Tracking Control Method for Automatic Navigation Tractor Based on Drive Wheel Lateral Deviation Compensation

HE Jie[1,2]　ZENG Hongxi[1]　LI Mingjin[1]　HE Jing[2,3]　MO Jiajun[1]　WANG Pei[1,4]　ZHAO Runmao[1,2]

(1. *Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment*, *Ministry of Education*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*
2. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology*, *Guangzhou* 510642, *China*
3. *Guangdong Polytechnic of Industry and Commerce*, *Guangzhou* 510550, *China*
4. *Huangpu Institute of Innovation*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510700, *China*)

Abstract: Automatic navigation tractors experience large path tracking errors, easy overshoot in correction, and long adjustment times under conditions such as lateral deviation and sideslip. Aiming to address the problem of fast correction for lateral deviation and sideslip in tractors, an improved pure pursuit path tracking control method was proposed, based on a lateral control compensation strategy for the drive wheels. By constructing a tractor sideslip model on a slope and combining it with a two-wheel vehicle kinematic model, a lateral control compensation strategy was introduced to improve the classic pure pursuit algorithm, achieving precise lateral compensation control for autonomous tractors. To validate the performance of the proposed lateral deviation compensation improved pure pursuit path tracking algorithm, CarSim/Simulink co-simulation was designed. The results of the sloped test showed that the improved algorithm enhanced control accuracy by 73.6% on a 10°slope compared with that of the classic algorithm. In the continuous sideslip simulation, the classic algorithm failed to escape, whereas

收稿日期:2024-10-31　修回日期:2024-11-20

基金项目:华南农业大学农业装备技术全国重点实验室开放基金项目(SKLAET-202401)、广东省科技计划项目(2023B0202010023)和山东省重点研发科技示范工程项目(2022SFGC0202)

作者简介:何杰(1985—),男,副教授,博士,主要从事智能农机装备和无人化农场技术研究,E-mail:hooget@scau.edu.cn

通信作者:贺静(1985—),女,副教授,博士,主要从事智能农机装备和无人化农场技术研究,E-mail:hejing_1127@163.com

the improved algorithm completed escape within 3.9 s, with lateral deviation converging to within 0.01 m and an overshoot of 0.14 m. Field tests were conducted to verify the effectiveness of the improved algorithm, with multiple trials showing an average escape time of 7.03 s and a maximum overshoot of 0.054 m. The test results demonstrated that the proposed lateral control compensation strategy significantly improved the control accuracy and stability of autonomous navigation tractors in complex working conditions.

Key words: tractor; autonomous navigation; path tracking; pure pursuit algorithm; lateral deviation compensation; sideslip

0　引言

拖拉机广泛应用于土地耕整、平地、播种以及秸秆还田农业生产的环节[1]。研发智能拖拉机是提升农业生产效率的重要途径,自动导航系统是智能拖拉机实现精准作业的核心基础[2]。

路径跟踪控制技术是自动导航拖拉机的关键技术之一,决定了拖拉机能否在复杂的农田环境中沿预定路径准确行驶[3-4]。然而,复杂的农田环境(如崎岖不平的地形)经常导致拖拉机发生侧滑,从而影响路径跟踪精度[5-7]。常见的路径跟踪控制方法中纯追踪算法因其结构简单、计算效率高,已广泛应用于农业机械自动导航[8-9],但在拖拉机姿态变化剧烈的情况下,纯追踪算法的控制效果大幅下降[10-13]。

为了应对上述问题,国内外学者开展了拖拉机路径跟踪控制算法优化研究[14-18]。这些研究在提高纯追踪算法精度方面取得了较好的效果,但对拖拉机在复杂地形下的姿态变化、侧滑等导致导航控制误差累积、作业质量下降等问题尚未见相关解决方法。为此,本文针对农机滑移时纯追踪算法控制不足的问题,提出基于驱动轮驱动力的横向控制补偿方法对纯追踪算法加以改进,提高纯追踪算法对农田作业控制精度,通过 CarSim/Simulink 联合仿真验证补偿效果,并开展持续侧滑工况下拖拉机路径跟踪控制效果试验,以验证改进纯追踪算法对农机侧滑抑制效果。

1　改进纯追踪算法

1.1　纯追踪算法控制原理

纯追踪算法是一种基于几何运动学模型的控制算法,该算法的核心思想是在车辆运动过程中,根据后轴中心位置到所要追踪路径的预瞄距离 L_d 确定追踪目标点,根据该目标点位置和车辆航向控制车辆前轮转角 η,使车辆后轴中心沿着经过目标预瞄点的圆弧行驶[19-20],如图 1 所示。

根据几何关系和正弦定理,可得车辆后轴与目标路径点 Q 的连线方向,与车辆偏航角 ψ 及前轮转角 η 之间的关系为

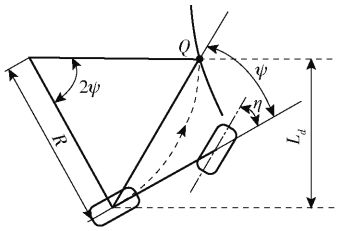


图 1　纯追踪算法示意图

Fig. 1　Schematic of pure tracking algorithm

$$\frac{L_d}{\sin\psi}=2R \tag{1}$$

式中　R——当前转弯过程拖拉机转弯半径

转弯轨迹圆弧曲率 γ 计算式为

$$\gamma=\frac{2\sin\psi}{L_d} \tag{2}$$

根据阿克曼转向几何,前轮转角 η 计算式为

$$\eta=\arctan(\gamma L_a) \tag{3}$$

式中　L_a——拖拉机轴距

综合式(1)~(3)可以得出期望前轮转角 $\eta(t)$ 的控制律为

$$\eta(t)=\arctan\frac{2L_a\sin\psi(t)}{L_d} \tag{4}$$

1.2　纯追踪算法横向控制补偿策略

1.2.1　横向控制补偿算法设计

纯追踪算法是基于几何关系推导的控制方法,适用于低速的拖拉机作业场景,但是无法考虑车身姿态对控制带来的影响[21]。为提升控制方法自适应性和鲁棒性,研究需从常规工况向极限工况和复杂工况拓展。因此,需要研究实际作业中的特殊工况。当拖拉机挂载两侧开沟的机具进行作业或农田存在较多沟壑时,易导致接行作业时拖拉机一侧轮胎侧滑至沟中,使拖拉机车体产生横滚角 λ,如图 2 所示。

受限于纯追踪算法的调节能力,自动导航拖拉机发生持续侧滑工况后,若跟踪过程中的横向偏差未发生较大偏移,式(4)中 $\psi(t)$ 变化较小,纯追踪算法所计算的期望轮角并不会发生较大的变化,其控制的前轮转角不足以在车身侧向提供足够的力使拖拉机脱离持续侧滑,导致拖拉机无法上线使直线跟

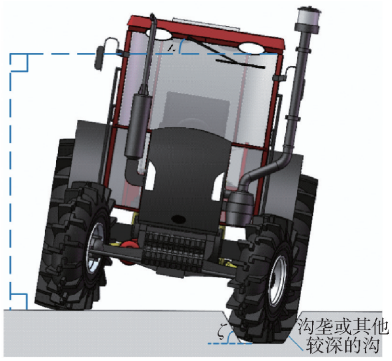


图 2 拖拉机单侧轮胎侧滑示意图

Fig. 2 Side slide of tractor tire

踪作业产生固定偏差,降低了直线追踪精度,如图 3 所示。

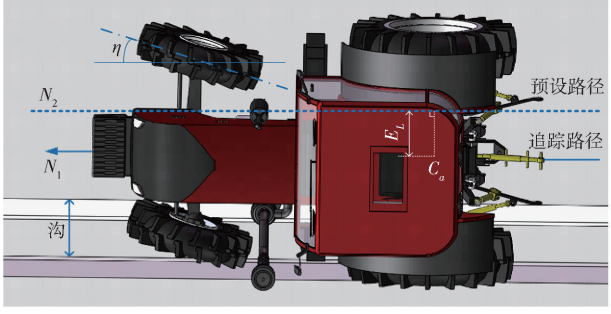


图 3 导航误差示意图

Fig. 3 Navigation error diagram

图 3 中 N_1 为拖拉机实际航向;N_2 为路径航向;C_a 为拖拉机后轴中点;E_L 为拖拉机路径跟踪时的横向偏差。

将拖拉机单侧轮胎侧滑问题简化为拖拉机在坡面的侧滑问题[22-24],如图 4 所示。

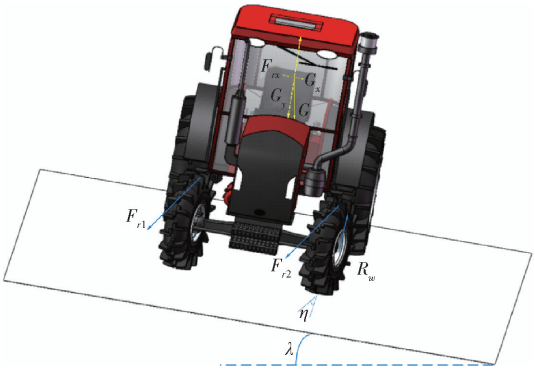


图 4 拖拉机坡面侧滑示意图

Fig. 4 Tractor slope sideslip diagram

不考虑机具作用力,对拖拉机坡面侧滑模型进行动力学分析。其中,拖拉机切向牵引力 F_r 为

$$F_r = \frac{M_r}{R_w} \tag{5}$$

式中 M_r——驱动轮上力矩

R_w——驱动轮半径

拖拉机稳定作业时,驱动轮上力矩为

$$M_r = M_e i_m \eta_m \tag{6}$$

其中

$$\eta_m = \eta_1 \eta_2 \tag{7}$$

式中 M_e——发动机扭矩

i_m——传动系总传动比

η_m——传动系总效率

η_1——圆柱齿轮传动效率

η_2——圆锥齿轮传动效率

将式(6)代入式(5),可得拖拉机牵引力计算公式为

$$F_r = \frac{M_e i_m \eta_m}{R_w} \tag{8}$$

拖拉机发动机扭矩 M_e 可由拖拉机发动机功率 P_e 和角速度确定,即

$$M_e = \frac{9\,550 P_e}{\omega_e} \tag{9}$$

式中 ω_e——发动机角速度

在通常情况下,传动系总传动比 i_m 计算式为

$$i_m = i_g i_0 i_s = \frac{n_e}{n_k} = \frac{\omega_e}{\omega_k} \tag{10}$$

其中

$$\omega_k = \frac{v}{2\pi R_w (1-\eta_s)} \tag{11}$$

式中 i_g——变速箱各挡传动比

i_0——主减速器总传动比

i_s——副减速器总传动比

n_e——发动机转速

n_k——驱动轮转速

ω_k——驱动轮角速度

η_s——驱动轮滑转率

联立式(5)~(11),可得由拖拉机行驶速度和发动机功率估算的拖拉机牵引力为

$$F_r = \frac{19\,100 P_e \pi \eta_m (1-\eta_s)}{v} \tag{12}$$

当拖拉机发生侧滑时,说明拖拉机牵引力的侧向分力小于重力沿坡面对拖拉机的分力。假设在作业过程中拖拉机牵引力不变,若要使拖拉机克服重力沿坡面对拖拉机的分力 G_x,则有

$$G_x = F_{rx} \tag{13}$$

式中 F_{rx}——拖拉机牵引力在路径航向 N_2 垂向的分力

定义计算式(13)中各项变量的函数关系为

$$G_x(\lambda) = G\sin\lambda \tag{14}$$

$$F_{rx}(\eta) = F_r \sin\eta \tag{15}$$

式中 G——拖拉机总重力

当拖拉机状态满足式(13)时,拖拉机侧滑现象被抑制。设侧滑时期望前轮转角为 $\eta(t)$,则此时期望前轮转角对应的拖拉机牵引力在路径航向 N_2 垂

向的分力 $F_{rx}(\eta(t))$ 为

$$F_{rx}(\eta(t)) = F_r \sin(\eta(t)) \tag{16}$$

当发生侧滑时，$F_{rx}(\eta(t))$ 的部分力被用来克服 G_x，使得纯追踪算法出现控制不足的现象。若要保证纯追踪算法的横向控制效果，需要对纯追踪算法所计算出的期望前轮转角上额外补偿，设该侧滑补偿角为 $\tau(t)$，则补偿后拖拉机在斜坡上的受力状态满足

$$2F_{rx}(\eta(t)+\tau(t)) - G_x(\lambda) = 2F_{rx}(\eta(t)) \tag{17}$$

设补偿后拖拉机前轮转角为 η'，整理式(17)可得

$$\eta'(t) = \eta(t) + \tau(t) = \arcsin \frac{2F_r \sin(\eta(t)) + G\sin\lambda}{2F_r} \tag{18}$$

联立式(12)、(18)得到纯追踪算法在坡面跟踪时的期望前轮转角控制律 $\eta'(t)$ 为

$$\eta'(t) = \arcsin\left(\sin(\eta(t)) + \frac{Gv\sin\lambda}{38\,200 P_e \pi \eta_m (1-\eta_s)}\right) \tag{19}$$

当拖拉机发生持续侧滑时，拖拉机整体的横滚角 λ 较小，前轮转角补偿量不够，不足以使拖拉机脱离持续侧滑工况，则令 $\lambda = \zeta$（ζ 为坡面角），代入式(19)，获得补偿期望前轮转角。

1.2.2　持续侧滑特征识别

为补偿自动导航拖拉机持续侧滑产生的控制量，需确定持续侧滑工况是否发生。本文采用增广迪基-富勒(Augmented Dickey－Fuller，ADF)数值稳定性统计检验方法对持续侧滑时的拖拉机状态进行特征识别。

根据数值阈值和数据稳定性，确定对拖拉机施加横向控制补偿的条件为

$$\begin{cases} \begin{cases} |E_L| \geqslant T_E \\ |\eta| \geqslant T_\eta \end{cases} \\ \begin{cases} P_{Value_{EL}} > P_E \\ P_{Value_\eta} > P_\eta \end{cases} \end{cases} \tag{20}$$

式中　T_E——最大横向偏差容许值

T_η——在最大横向偏差时纯追踪算法所计算出的期望前轮转角

P_E——横向偏差参考值

P_η——航向偏差参考值

P_{Value}——ADF 检测中的显著性水平

采用 ADF 检测方法对拖拉机横向偏差和前轮转角分别进行数值稳定性检验，采集拖拉机状态随时间变化的特征数据，分析这些序列的平稳性。如果序列存在单位根，则该序列是不平稳的；如果不存在单位根，则该序列平稳。

2　基于 CarSim/Simulink 的纯追踪横向控制补偿算法仿真试验

2.1　试验材料

试验采用 CarSim 2020.0 和 Matlab/Simulink R2021b 进行车辆动力学联合仿真验证。在 Matlab 中定义参数，在 Simulink 中构建控制器，与 CarSim 进行联合仿真。在 Simulink 的模型库中设置 CarSim 模块，将车辆状态信息和参考信息输入到控制器，导入 CarSim 中，形成闭环，并在观测器中观测仿真结果，进行控制结果分析。

2.2　仿真环境搭建

以东风井关 T954－PVCY 型拖拉机实车模型为参照，在 CarSim 中选择 Tractor 模型进行相关参数设置，其中车辆部分参数如表 1 所示，CarSim 中参数设置界面如图 5 所示。

表 1　整车基本参数

Tab.1　Basic parameters of vehicle

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	4 315×1 965×2 620
质量/kg	3 290
质心到前轴距离/mm	1 150
质心到后轴距离/mm	1 100
绕 Z 轴转动惯量/(kg·m^2)	4 241
质心高度/mm	1 000
轴距/mm	2 250
前后轮侧偏刚度/(N·rad^{-1})	－50 000
发动机标定功率/kW	69.8
发动机额定转速/(r·min^{-1})	2 200
前轮直径/mm	1 072
后轮直径/mm	1 498

构建具有坡度和带垄沟的农田环境，对纯追踪横向控制补偿算法进行仿真试验验证。在 CarSim 中设置长度为 120 m 的农田道路，通过设置路面超高参数进行坡度控制，其中仿真试验中设置的坡度为 10°，选择该坡度的理由在于它能够代表典型的农田坡度，同时确保试验过程中的稳定性与可控性，并且 10°坡度能够有效验证拖拉机在复杂坡面环境下横向控制补偿算法的鲁棒性与适应性，符合实际农业作业中常见的坡度条件。所以分别设计坡度为 10°的缓坡道路和带垄沟的农田环境，带垄沟农田的沟参数设置如下：沟深为 0.2 m，沟下底宽为 0.3 m，沟上底宽为 0.53 m，沟的起始坐标为(5 m，0 m)，沟的长度为 115 m。农田材质选择深色土壤，路肩材质设为草地。试验环境的整体效果如图 6 所示。

在联合仿真中，CarSim 需要设置与 Simulink 的

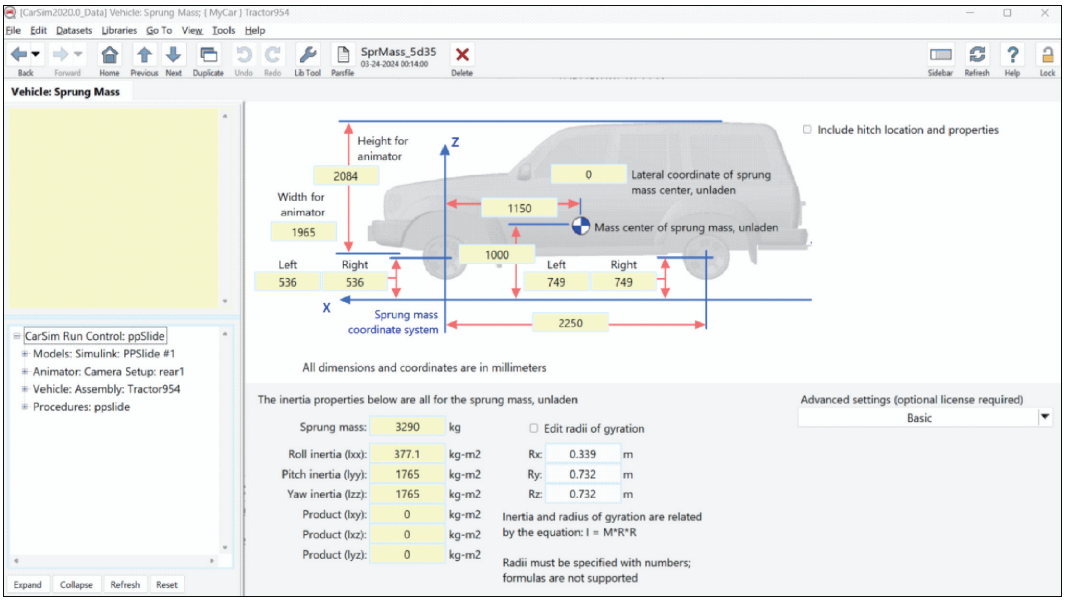
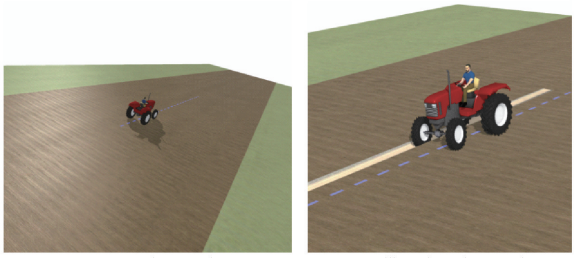


图 5 CarSim 车身参数设置界面

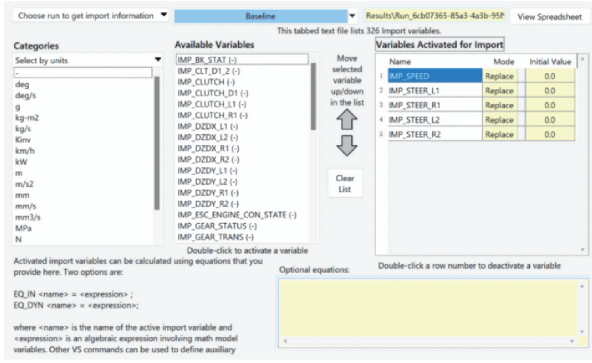
Fig. 5 CarSim body parameter setting interface



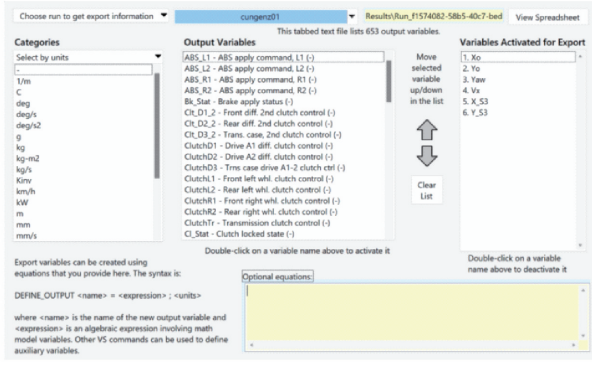
(a) 坡面农田环境 (b) 带垄沟的农田环境

图 6 农田环境效果

Fig. 6 Farmland environment effect



(a) CarSim输入参数



(b) CarSim输出参数

图 7 CarSim/Simulink 数据交互接口设置

Fig. 7 CarSim/Simulink data interface settings

仿真接口进行数据交互。其接口交换数据类型如图 7 所示。输入参数为拖拉机速度和 4 个轮胎转向角,由于拖拉机为前轮转向机构,直接令后轮转角为 0 即可。输出参数为拖拉机横纵坐标、横摆角、实际速度以及后轴中心点坐标,用于计算横向偏差和改进纯追踪算法前轮转角控制量。

建立 CarSim/Simulink 数据交互接口后,在 Simulink 中搭建改进纯追踪算法的仿真模型。在 Matlab 环境下生成目标路径导入 CarSim 作为仿真时的参考路径,在 Simulink 中设计改进纯追踪算法中的各个模块,分别完成路径跟踪过程中的纵向速度控制、预瞄点搜索、前轮转角控制量计算,将结果通过数据交互接口传递给 CarSim 的运动仿真模块 vs_sf,由 CarSim 进行车辆模型的状态更新并将数据回传给 Simulink 模块,在循环过程中完成联合仿真。根据上述联合仿真框架搭建 Simulink 模型,结果如图 8 所示。

2.3 仿真试验方法

为了验证改进纯追踪算法在复杂农田环境中的横向控制补偿效果,本文对缓坡道路的控制补偿能力和持续侧滑工况下的脱困能力进行对比试验。试验采用未改进的经典纯追踪算法与改进后的纯追踪算法进行对比,分析两者的控制精度和稳定性。

在缓坡道路进行验证时,设定拖拉机目标速度为 4 km/h,设置其起始位置坐标点为(-0.3 m, 2 m),起始航向与目标路径航向相同,初始位置偏差为 -0.3 m,分别使用经典纯追踪算法和改进纯追踪算法跟踪同一目标路径,仿真采样时间为 0.02 s。在仿真结束后,对两次试验结果中的跟踪轨迹、横向

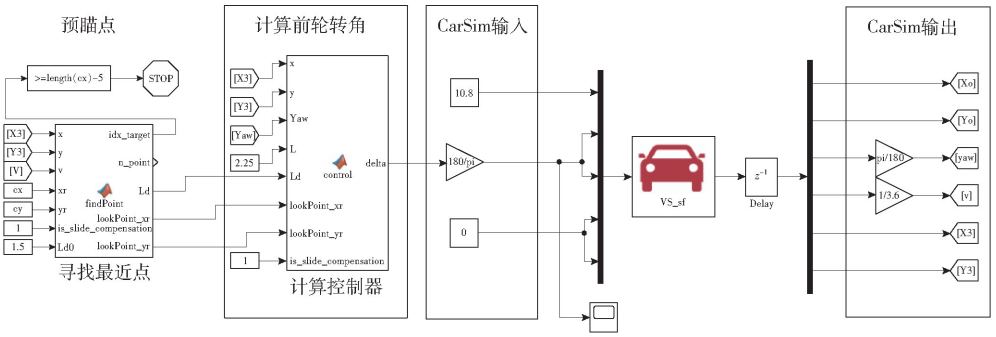


图 8　改进纯追踪算法仿真模型

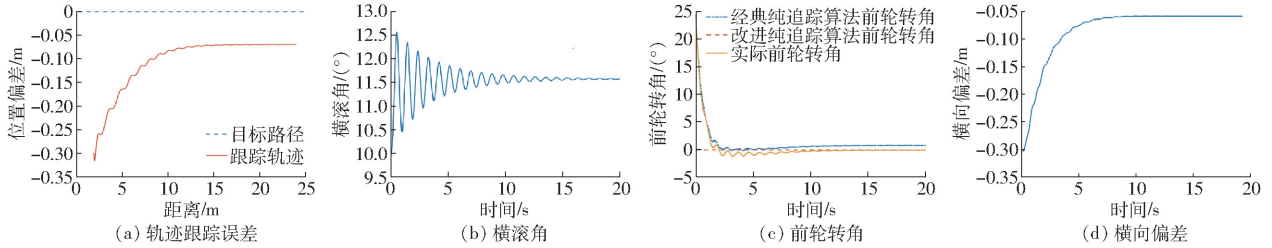
Fig. 8　Simulation model of improved pure tracking algorithm

偏差以及前轮转角进行分析。

在持续侧滑工况下进行验证时，设定拖拉机初始状态和缓坡道路试验中一致。分别使用经典纯追踪算法和改进纯追踪算法跟踪同一目标路径。仿真结束后，对两次试验结果中的跟踪轨迹、横向偏差、前轮转角、横滚角和脱困时间进行分析。

2.4　仿真结果与分析

应用经典纯追踪算法的缓坡试验结果如图 9 所示。在应用经典纯追踪算法的缓坡试验中，拖拉机横滚角由于拖拉机机体扭转导致与实际坡度 10°有差异，在 11.5°左右振荡。拖拉机以初始偏差 −0.3 m 开始追踪上线，系统稳定后横向偏差绝对值平均值为 0.072 m，且不再收敛。在拖拉机上线过程中，前轮转角实际值和计算值差值较小，保持了良好的追踪效果，此时未计算改进纯追踪算法的前轮转角计算值。在系统稳定后，受 CarSim 动力学模型中转向力矩的影响，前轮转角实际值和计算值平均偏差为 1.13°，前轮转角实际值接近 0，横向偏差不再收敛。



(a) 轨迹跟踪误差　(b) 横滚角　(c) 前轮转角　(d) 横向偏差

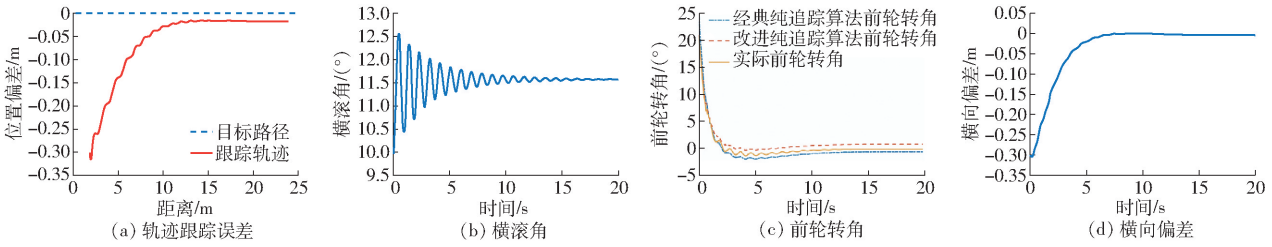
图 9　经典纯追踪算法缓坡试验结果

Fig. 9　Classic pure pursuit algorithm gentle slope test results

应用改进纯追踪算法的缓坡试验结果如图 10 所示。试验中采用式(19)计算前轮转角。公式中各参数根据实际工况确定，其具体取值如下：拖拉机重力 G 为 342 020 N，横滚角 λ 为 11.5°，行驶速度 v 为 1.12 m/s，发动机功率 P_e 为 69.7 kW，传动系总效率 η_m 和驱动轮滑转率 η_s 均为 0.85。拖拉机以相同初始条件开始追踪上线，系统稳定后横向偏差绝对值平均值为 0.019 m 不再收敛。此时经典纯追踪算法计算得前轮转角平均值为 −1.24°，改进纯追踪算法计算得前轮转角平均值为 0.82°。相比于经典纯追踪算法，改进纯追踪算法最终收敛效果更好，横向偏差收敛值减小 0.053 m，控制精度提高 73.6%。

应用经典纯追踪算法的持续侧滑工况脱困试验结果如图 11 所示。试验中，拖拉机初始横向偏差为 −0.3 m，且右侧轮胎位于沟中，其跟踪轨迹在整个试验过程中处于振荡稳态，拖拉机横滚角在 6°～7°间振荡，前轮转角在 5°～10°间振荡。试验结束时，横向偏差绝对值平均值为 0.37 m，拖拉机单侧轮胎一直在沟中行驶，未脱离持续侧滑工况。

应用改进纯追踪算法的持续侧滑工况脱困试验结果如图 12 所示。试验中，拖拉机初始偏差为 −0.3 m，且右侧轮胎位于沟中。在试验过程中应用



(a) 轨迹跟踪误差　(b) 横滚角　(c) 前轮转角　(d) 横向偏差

图 10　改进纯追踪算法缓坡试验结果

Fig. 10　Improved pure pursuit algorithm gentle slope test results

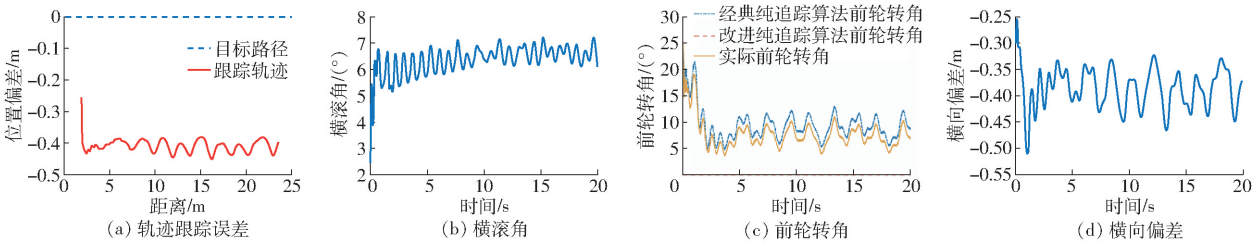


图 11 经典纯追踪算法持续侧滑工况脱困试验结果

Fig. 11 Results of classic pure pursuit algorithm escape test under continuous sideslip conditions

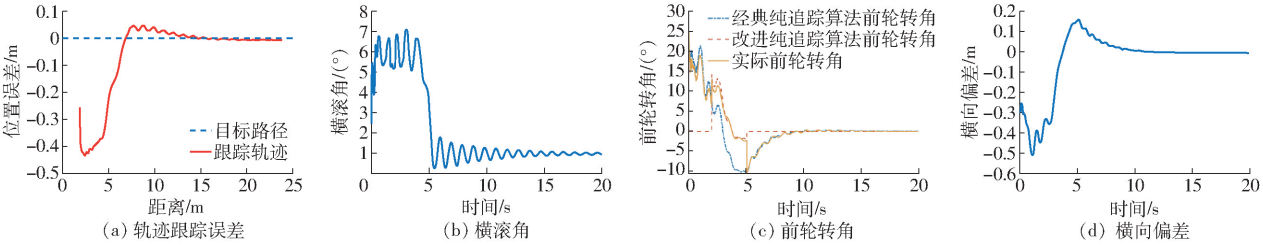


图 12 应用改进纯追踪算法的持续侧滑工况脱困试验数据

Fig. 12 Release test data of continuous sideslip condition by using improved pure tracking algorithm

式(20)进行持续侧滑工况的特征识别,其公式中参数取值如下:最大横向偏差容许值 T_E 为 0.025 m;在最大横向偏差时纯追踪算法所计算的期望前轮转角 T_η 为 1°;横向偏差参考值 P_E 和航向偏差参考值 P_η 均为 0.05。根据图 12c 所示,改进纯追踪算法计算的前轮转角在 2.2 s 和 5.1 s 发生了两次阶跃突变,分别对应持续侧滑工况特征的触发和脱离。工况触发时,改进纯追踪算法计算的前轮转角与经典纯追踪算法计算的前轮转角平均值差值为 9.2°,此时拖拉机横向偏差快速收敛,脱离持续侧滑工况,前轮转角改用经典纯追踪算法计算。试验过程中横向偏差最大超调量为 0.14 m,最终收敛至 0.01 m 以内,试验过程中脱困耗时 3.9 s。

综上所述,在缓坡试验中,经典纯追踪算法和改进纯追踪算法的横向偏差收敛值分别为 0.072 m 和 0.019 m,改进纯追踪算法相比经典纯追踪算法使拖拉机在 10°斜坡上的控制精度提高 73.6%,效果显著。在持续侧滑工况脱困试验中,经典纯追踪算法由于计算控制量较小无法脱困,改进纯追踪算法在持续侧滑工况触发后控制量快速增加,总耗时 3.9 s 完成持续侧滑工况脱离,脱离过程中最大超调量 0.14 m,横向偏差收敛耗时 2.8 s,最终收敛值小于 0.01 m。上述试验验证了本文改进纯追踪算法的横向控制性能。

3 田间试验

3.1 试验平台

试验采用的拖拉机自动导航作业系统由东风井关 T954 - PVCY 型拖拉机、底层线控系统控制器及其执行机构、导航控制系统及传感器组成,如图 13 所示。导航控制系统通过定位板卡接收双天线 GNSS 位姿信息,支持厘米级高精度定位;采用单圈绝对值编码器作为角度传感器与左前轮转向节臂同轴安装采集前轮转角,其采样分辨率为 0.01°。采用电控方向盘根据决策控制量执行速度环开环控制,实现对拖拉机的横向控制。



图 13 拖拉机自动导航作业系统

Fig. 13 Tractor automatic navigation operating system

1. GNSS 双天线 2. 导航控制器 3. 电动方向盘 4. 底层线控系统控制器 5. 推杆电机 6. 前轮角度传感器

3.2 试验方法

为验证横向控制补偿的纯追踪路径跟踪控制算法效果,在广东省河源市柳城镇耕整后旱田开展持续侧滑工况脱困试验,试验场景如图 14 所示。



图 14 持续侧滑工况脱困试验农田环境

Fig. 14 Continuous sideslip condition escape test field environment

试验坡度通过花生播种机形成的垄沟倾角来间接实现，垄沟的横截面倾角为 60.4°，用于模拟拖拉机在复杂坡面上的侧滑问题。采用经典纯追踪算法和本文改进纯追踪算法进行对比试验。试验开始前，将拖拉机单侧轮胎置于垄沟，模拟单侧轮胎在沟中的持续侧滑工况；根据此时拖拉机位置设定规划路径，使拖拉机初始横向偏差绝对值为 0.15 m 左右，保持初始航向与规划路径相近；试验速度为 2.88 km/h，根据此时拖拉机工况设定式(19)中各项参数如下：拖拉机重力为 342 020 N，垄沟横截面倾角为 60.4°，拖拉机行驶速度为 0.80 m/s，发动机功率为 69.7 kW，传动系总效率 η_m 和驱动轮滑转率 η_s 均为 0.85。

3.3　试验结果与分析

如图 15 所示，经典纯追踪算法的持续侧滑工况试验中，拖拉机处于持续侧滑工况时，横滚角在 −5° ~ −3°之间振荡，经典纯追踪算法计算的期望前轮转角和实际前轮转角在 −1.5° ~ −0.5°振荡，始终存在一个较小的控制量，但其横向偏差并无收敛趋势，最终跟踪轨迹与规划路径间始终存在偏差，该偏差绝对值平均值为 0.187 m。由 ADF 检测可判断拖拉机发生持续侧滑工况的特征，经典纯追踪算法在拖拉机持续侧滑工况下无法起到脱困作用。

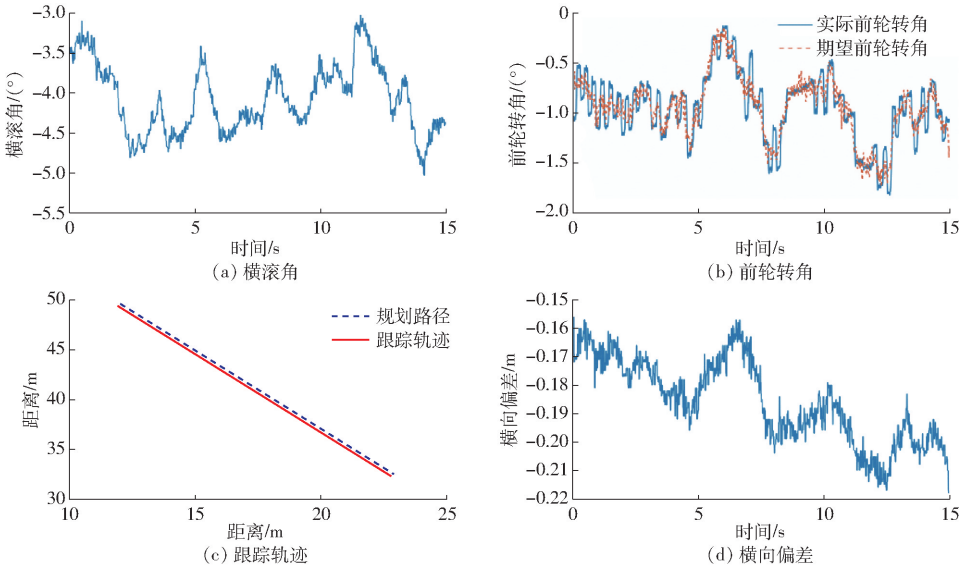


图 15　经典纯追踪算法持续侧滑工况试验脱困结果

Fig. 15　Classic pure tracking algorithm continuous sideslip test escape results

如图 16 所示，改进纯追踪算法持续侧滑工况试验中，拖拉机横滚角初始在 −5° ~ −3°振荡，2.7 s 前系统未识别到持续侧滑工况，改进纯追踪算法中横向控制补偿策略未触发，此时计算出的期望前轮

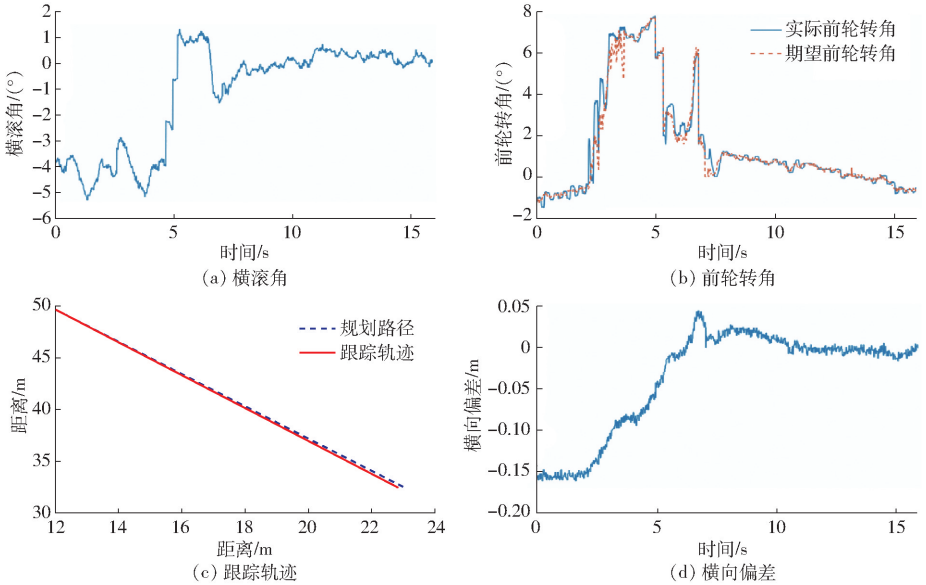


图 16　改进纯追踪算法持续侧滑工况试验脱困结果

Fig. 16　Improved pure pursuit algorithm continuous sideslip test escape results

转角在 -1.5°左右,拖拉机横向偏差绝对值平均值为 0.162 m。2.7 s 时系统识别到持续侧滑工况,改进纯追踪算法中横向补偿生效,拖拉机期望前轮转角和实际前轮转角快速增加,横向偏差也开始逐步收敛,耗时 7.4 s 收敛至 0.01 m 以内,收敛过程中最大超调量为 0.041 m。在同样试验条件下重复试验 3 次,分析改进纯追踪算法在持续侧滑工况下的脱困稳定性,其结果如表 2 所示。由表 2 可知,改进纯追踪算法在拖拉机陷入沟中发生持续侧滑工况时,平均脱困耗时 7.03 s,最大超调量绝对值平均值为 0.054 m。在 3 次试验中拖拉机均成功脱困,本文改进纯追踪算法在横向控制补偿中起到了显著作用,提高了自动导航拖拉机横向控制效果。

表 2 改进纯追踪算法持续侧滑工况脱困试验结果

Tab. 2 Improved pure pursuit algorithm for continuous sideslip escape test results

试验序号	持续侧滑工况触发耗时/s	脱困耗时/s	最大超调量绝对值/m
1	2.7	7.4	0.041
2	1.9	6.8	0.063
3	2.4	6.9	0.057
平均值	2.33	7.03	0.054

4 结论

(1)提出的基于驱动轮驱动力的横向控制补偿策略显著提高了经典纯追踪算法在复杂农田工况下的控制精度。仿真结果显示,在 10°斜坡条件下,改进算法的控制精度提升 73.6%,从经典算法的横向偏差 0.072 m 下降到 0.019 m。

(2)持续侧滑工况的仿真验证了改进算法的脱困能力。改进后的纯追踪算法在 3.9 s 内完成了脱困操作,横向偏差收敛时间为 2.8 s,最终收敛值为 0.01 m 以内,最大横向超调量为 0.14 m。相比之下,经典算法无法有效脱困。

(3)田间试验结果显示,改进算法在实际工况下同样表现出较高的脱困能力,平均脱困时间为 7.03 s,最大超调量为 0.054 m。横向偏差在 7.4 s 内收敛至 0.01 m 以内,最大超调量为 0.041 m。这表明该算法在多次试验中具有较高的稳定性和控制精度。

参 考 文 献

[1] 谢斌, 武仲斌, 毛恩荣, 等. 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, et al. Development status and prospect of key technologies for agricultural tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(8):1-17. (in Chinese)

[2] 孟志军,王昊,付卫强,等. 农业装备自动驾驶技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2023,54(10):1-24
MENG Zhijun, WANG Hao, FU Weiqiang, et al. Research status and prospects of automatic driving technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 1-24. (in Chinese)

[3] 伟利国. 农机导航多模变结构智能控制方法研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2015.
WEI Liguo. Research on multi-modal variable structure intelligent control methods for agricultural machinery navigation[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences,2015. (in Chinese)

[4] 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. Progress in agricultural machinery navigation technology research[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(4):1-18. (in Chinese)

[5] BAYAR G, BERGERMAN M, KOKU A B. Improving the trajectory tracking performance of autonomous orchard vehicles using wheel slip compensation[J]. Biosystems Engineering,2016,146:149-164.

[6] JING Y, LIU G, LUO C. Path tracking control with slip compensation of a global navigation satellite system based tractor-scraper land levelling system[J]. Biosystems Engineering ,2021,212:360-377.

[7] 李蒙, 王源, 汤艳玲, 等. 考虑车身摇晃和滑移的无人农机航向控制技术[J]. 南方农机,2024,55(8):1-4.
LI Meng, WANG Yuan, TANG Yanling, et al. Heading control technology of unmanned agricultural machinery considering body shake and slip[J]. Southern Agricultural Machinery,2024,55(8):1-4. (in Chinese)

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

[9] 蒋桂源. 基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法[J]. 南方农机, 2022, 53(23):56-59.
JIANG Guiyuan. Agricultural machinery path tracking method based on fuzzy adaptive pure tracking model[J]. Southern Agricultural Machinery, 2022, 53(23):56-59. (in Chinese)

[10] 陶金京, 廖敏, 潘群林, 等. 轮式拖拉机悬挂农具机组静态纵向稳定性[J]. 科学技术与工程,2019,19(34):108-115.
TAO Jinjing, LIAO Min, PAN Qunlin, et al. Static longitudinal stability of wheeled tractor-implement combinations[J].

Science Technology and Engineering,2019,19(34):108 - 115. (in Chinese)
[11] 景云鹏, 刘刚, 金志坤. 农田平地机导航侧滑估计与自适应控制方法[J]. 农业机械学报,2020,51(9):26 - 33.
JING Yunpeng, LIU Gang, JIN Zhikun. Estimation of side slip and adaptive control method for farm land leveler navigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(9):26 - 33. (in Chinese)
[12] AHMADI I. Dynamics of tractor lateral overturn on slopes under the influence of position disturbances (model development) [J]. Journal of Terramechanics,2011,48(5):339 - 346.
[13] HAN J, WANG Y, SUN C. A method for analysing the lateral stability of wheeled farm tractors by obstacles on slopes[J]. International Journal of Vehicle Design, 2023, 91(4): 289 - 302.
[14] 吕文杰, 马戎, 李岁劳, 等. 基于纯追踪模型的路径跟踪改进算法[J]. 测控技术,2011,30(7):93 - 96.
LÜ Wenjie, MA Rong, LI Suilao, et al. Improved path tracking algorithm based on pure pursuit model[J]. Measurement & Control Technology,2011,30(7):93 - 96. (in Chinese)
[15] 张闻宇, 丁幼春, 王雪玲, 等. 基于 SVR 逆向模型的拖拉机导航纯追踪控制方法[J]. 农业机械学报,2016,47(1):29 - 36.
ZHANG Wenyu, DING Youchun, WANG Xueling, et al. Pure pursuit control method of tractor navigation based on SVR inverse model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(1):29 - 36. (in Chinese)
[16] GÁMEZ SERNA C, LOMBARD A, RUICHEK Y, et al. GPS-based curve estimation for an adaptive pure pursuit algorithm [C]// Advances in Computational Intelligence:15th Mexican International Conference on Artificial Intelligence,2016:497 - 511.
[17] 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. Research on agricultural machinery path tracking algorithm based on improved pure pursuit model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(9):18 - 25. (in Chinese)
[18] YANG Y, LI Y, 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.
[19] 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. Improved pure pursuit algorithm for rice transplanter navigation path tracking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(5):21 - 26. (in Chinese)
[20] KORAYEM M H, SAFARBALI M, LADEMAKHI N Y. Adaptive robust control with slipping parameters estimation based on intelligent learning for wheeled mobile robot[J]. ISA Transactions,2024,147:577 - 589.
[21] HU C, RU Y, LI X, et al. Path tracking control for brake-steering tracked vehicles based on an improved pure pursuit algorithm[J]. Biosystems Engineering,2024,242:1 - 15.
[22] 刘禹汐,杨浩然,韩冰,等.基于多传感器融合的拖拉机侧滑量估计方法及其验证[J].农业机械学报, 2023, 54(增刊 2):400 - 408.
LIU Yuxi, YANG Haoran, HAN Bing, et al. Tractor sideslip estimation method based on multi-sensor fusion and its verification[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp.2):400 - 408. (in Chinese)
[23] MAKHAROBLIDZE R M, LAGVILAVA I M, BASILASHVILI B B, et al. Influence of slip on lateral displacement of the tractor on slope[J]. Annals of Agrarian Science,2017,15(2):201 - 203.
[24] HAN X, KIM H J, JEON C W, et al. Application of a 3D tractor-driving simulator for slip estimation-based path-tracking control of auto-guided tillage operation[J]. Biosystems Engineering,2019,178:70 - 85.