

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.09.044

水田植保机自主作业滑模抗干扰路径跟踪方法

林洪振^{1,2} 李彦明^{1,2} 袁正华³ 武涛^{1,2} 刘成良^{1,2}

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240;
3. 上海世达尔现代农机有限公司, 上海 200240)

摘要: 为解决无人化水田植保机在田间作业时上线速度慢、精度不高和抗干扰能力差的问题,提出了一种基于快速幂次趋近律和全局滑模控制的水田植保机路径跟踪控制方法。首先建立了含有滑移干扰项和航向角干扰项的水田植保机四轮异相位转向运动学模型,提出了一种基于全局滑模控制和快速幂次趋近律的直线作业跟踪转向控制算法,解决了滑模控制算法的抖振和趋近模态对干扰敏感的问题,使用 Lyapunov 判据检验了算法的收敛性。使用 Matlab 建立了仿真模型,对算法进行了仿真,相比基于指数趋近律和等速趋近律的滑模控制算法,本文算法的快速性更好。实际作业实验结果表明,该方法直线跟踪横向偏差绝对值最大为 0.077 8 m,能够有效提高自主导航控制系统的稳定性和快速性。

关键词: 水田; 植保机; 路径跟踪; 全局滑模控制; 抗干扰; 快速幂次趋近律

中图分类号: S223.2⁺3; TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)09-0383-06

OSID:

Sliding Mode Anti-interference Path Tracking Method for Autonomous Operation of Paddy Field Plant Protection Machine

LIN Hongzhen^{1,2} LI Yanming^{1,2} YUAN Zhenghua³ WU Tao^{1,2} LIU Chengliang^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai 200240, China

3. Shanghai Star Modern Agricultural Machinery Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to solve the problems of slow on-line speed, low accuracy and poor anti-interference ability of unmanned paddy field plant protection machine in field operation, a kind of paddy field plant protection machine path tracking control based on fast power reaching law and global sliding mode control was proposed. Firstly, a kinematics model of four-wheel out-of-phase steering of a paddy field plant protection aircraft containing slip interference terms and heading angle interference terms was established, and the four-wheel out-of-phase steering model was simplified to a two-wheel out-of-phase steering model. A linear operation tracking steering control algorithm based on global sliding mode control and fast power approaching law was proposed, which solved the problem that the buffeting and approaching modes of sliding mode control algorithm were sensitive to interference. The Lyapunov criterion was used to test the convergence of the algorithm. A simulation model was established by using Matlab and the algorithm was simulated. Compared with the sliding mode control algorithm based on exponential reaching law and constant velocity reaching law, the speed of the algorithm was better. The actual operation experiment results showed that the maximum absolute value of the lateral deviation of the linear tracking of this method was 0.077 8 m. Compared with the sliding mode control algorithm based on the constant velocity approaching law, the proposed method was effective in overcoming chattering and anti-interference, and can effectively improve the stability and speed of the autonomous navigation control system.

Key words: paddy field; plant protection machine; path tracking; global sliding mode control; anti-interference; fast power reaching law

收稿日期: 2020-10-09 修回日期: 2020-11-25

基金项目: 上海市科技兴农项目(2019-02-08-00-08-F01122)

作者简介: 林洪振(1995—),男,博士生,主要从事农机自主作业研究, E-mail: linhongzhen@sjtu.edu.cn

通信作者: 李彦明(1971—),男,副教授,主要从事非结构化环境下移动机器人自主导航与自主作业研究, E-mail: ymli@sjtu.edu.cn

0 引言

智能化是农机装备发展的一个趋势。农业机械的自动驾驶控制是农机装备智能化发展的核心技术。农机的路径跟踪系统是农机自动驾驶控制技术的重要组成部分,对于提高农机作业效率和质量起着决定性作用。农机装备作业环境有着较强的非结构性,干扰多样化且具有多变性,这种环境特征在水田中更加明显,表现为土壤阻力多变、地形坡度大、干扰多等,在水稻的中后期植保作业中,为减小对水稻苗的损伤,对农机装备自动驾驶的精确路径跟踪技术提出了更高要求。

国内外已有许多学者针对农机装备的路径跟踪方法进行了大量研究^[1],包括PID控制^[2-4]、模糊控制^[5-10]、纯追踪控制^[11-12]、最优控制^[13-14]、模型预测^[15-16]和滑模控制^[17-18]。PID控制结构简单易实现,但是超调量和响应时间存在矛盾,并且可以适用的系统类型较少。模糊控制可适用于非线性系统,鲁棒性和适应性强,缺点是规则选择缺乏系统性,需要根据专家经验进行判定。纯追踪控制调整速度取决于预瞄前视距离,优点是控制参数少,稳定性强,但是结构固定,性能优化较为困难。最优控制方法仅适用于线性系统,且对模型精度要求较高。模型预测控制能及时弥补系统的不确定性,增强稳定性,但控制过程中的计算负担大,易陷入最小解。上述方法由于控制结构固定,在控制过程中对干扰较为敏感,影响直线跟踪精度。滑模控制适用于非线性系统,无需将非线性系统进行线性化,滑动模态过程可以进行设计以满足快速性和平顺性,与扰动和对象的参数无关,具有抗干扰、响应快、设计简单等优点。例如,文献[17]基于一种变倾斜参数的自适应积分滑模切换函数设计了由等效控制和切换控制组成的自适应滑模控制,直线跟踪误差控制在 $-9 \sim 7$ cm;文献[18]提出了一种滑模变结构自动转向控制方法,该方法基于径向基函数网络转角,具有自适应能力,最大控制误差为 0.21° ;文献[19]提出了一种基于非线性积分滑模面的自适应滑模控制方法,缓解了控制输入抖振。滑模变结构控制算法是水田农机装备自动驾驶领域的一个研究热点,需要解决的问题有滑动模态过程中的抖振现象和趋近模态的干扰敏感现象。

为满足水田植保机械在工作过程中要求的抗干扰能力和稳定性,本文设计一种基于快速幂次趋近律和全局滑模控制的路径跟踪算法,以期大幅度减小控制过程中发生的抖振现象,动态生成滑模面,消除趋近模态过程,提高抗干扰能力。

1 相对运动学模型

为了减少在水田作业过程中碾压的水稻苗数量,水田植保机被设计成四轮异相位转向来减小转弯半径^[20-21],实现更灵活的转弯过程。如图1所示,在平面建立二维直角坐标系 xOy ,水田植保机追踪的期望路径是一条由点 $A(x_a, y_a)$ 和点 $B(x_b, y_b)$ 确定的直线 P ,水田植保机的四轮异相位转向过程基于阿克曼转向原理,为了保证植保机在转弯过程中车轮只与路面发生相对滚动而不滑动,转弯时内侧轮的转角方向相反,绝对值相同且大于外侧轮转角的绝对值。由图中几何关系可知,转弯时前进方向右侧轮和左侧轮的转角关系为

$$\begin{cases} \delta_R = \operatorname{arccot} \frac{2r-b}{L} \\ \delta_L = \operatorname{arccot} \frac{2r+b}{L} \end{cases} \quad (1)$$

式中 δ_R ——右侧两轮转角, ($^\circ$)
 δ_L ——左侧两轮转角, ($^\circ$)
 r ——转弯半径, m
 b ——同轴两轮旋转中心距离, m
 L ——轴距, m

为了易于建模分析,在水田植保机的前轮轴和后轮轴的中点虚拟出一个车轮,如图1所示。这样四轮异相位转向的水田植保机可以看作是二轮异相位转向的二轮车模型。由图1可知,虚拟前轮的转角 δ 满足 $\delta_R > \delta > \delta_L$ 和关系式

$$\delta = \operatorname{arccot} \frac{2r}{L} \quad (2)$$

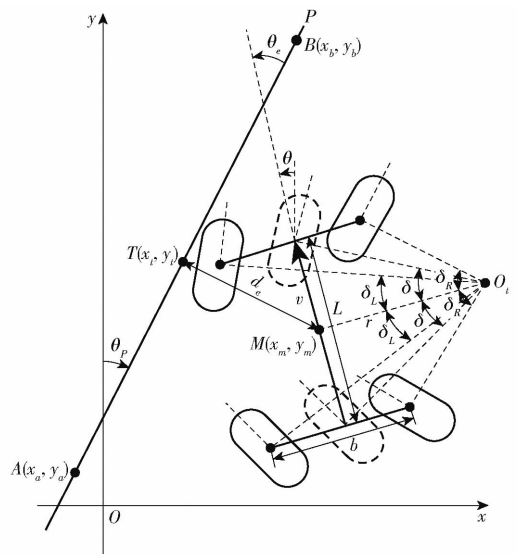


图1 水田植保机运动学模型示意图

Fig.1 Schematic of kinematic model of paddy field plant protection machine

因为将前轮转角传感器安装在右前轮,如图2



图2 前轮转角传感器安装位置

Fig.2 Installation position of front wheel angle sensor

所示,所以需要求出右前轮转角 δ_r 和虚拟前轮转角 δ 的关系,由式(1)、(2)可得

$$\delta = \arccot\left(\cot\delta_r - \frac{b}{L}\right) \quad (3)$$

由虚拟二轮车模型可知

$$\dot{\theta} = \frac{v}{r} \quad (4)$$

其中
$$r = \frac{L}{2\tan\delta} \quad (5)$$

式中 θ ——y轴与轴距直线的夹角,即航向角, ($^\circ$)
 v ——行进速度, m

通过图中的几何关系可以推导出水田植保机与期望路径之间的相对运动关系。植保阶段的水田存在土壤不均匀、泥脚深度变化等特点,使得农机装备在行驶过程中容易发生滑移干扰,对横向速度产生较大影响,水田植保机的横摆角速度也会受到很大的扰动^[22],所以本文引入横向滑移干扰项 $|\Delta\tau| \leq \Gamma$ 和航向角干扰项 $|\Delta\psi| \geq \Omega$,其中 Γ 和 Ω 为干扰的上界,综上所述,植保机四轮异相位转向相对运动学模型为

$$\begin{cases} \dot{d}_e = v\sin\theta_e + \Delta\tau \\ \dot{\theta}_e = \frac{2v\tan\delta}{L} + \Delta\psi \end{cases} \quad (6)$$

式中 d_e ——横向位置偏差, m
 θ_e ——航向角偏差, ($^\circ$)

2 滑模控制器设计

设计基于快速幂次趋近律和全局滑模控制算法的控制器,令

$$\begin{cases} x_1 = d_e \\ x_2 = \theta_e \\ u = \delta \end{cases} \quad (7)$$

式中 x_1, x_2 ——状态量 u ——控制量

根据式(6)可得

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{d}_e = v\sin\theta_e + \Delta\tau \\ \dot{x}_2 = \dot{\theta}_e = \frac{2v\tan\delta}{L} + \Delta\psi \end{cases} \quad (8)$$

水田植保机在水田行驶的过程中,需要克服水田泥泞路面导致的滑移干扰,尽量避免碾压水稻苗,要求全局的响应具有抗干扰能力。一般的滑模控制过程由距离滑模面较远的趋近模式和沿滑模面滑动的滑动模式两部分组成,仅滑动模式过程具有抗外部干扰的能力,趋近模式阶段并不具有抗干扰能力。其根本原因是滑模面固定,系统状态距离滑模面较远时处于趋近模式,不能沿滑模面滑动。

全局滑模控制通过使用动态滑模面解决了滑模面固定的问题,消除了滑模控制过程的趋近模式,使系统在初始位置就处于滑模面,进而使得滑模控制的全过程都具有抗干扰能力。定义跟踪误差函数 s 为

$$s = c_1x_1 + c_2x_2 - f(t) \quad (9)$$

式中 c_1, c_2 ——多误差控制系统的误差权重系数
 $f(t)$ ——动态函数

c_1, c_2 均大于0,一般均取为1, c_1/c_2 加大时快速性加大,抗抖振能力减小; c_1/c_2 减小时快速性减小,抗抖振能力加大。 $f(t)$ 是动态非线性滑模面方程,具有3个特点:① $f(0) = c_1x_1(0) + c_2x_2(0)$, 式中 $x_1(0), x_2(0)$ 为 x_1, x_2 的初始值。② $t \rightarrow \infty$ 时, $f(t) \rightarrow 0$ 。③ $f(t)$ 具有一阶导数。

根据上述3个条件,可将 $f(t)$ 设计为

$$f(t) = f(0)e^{-kt} \quad (10)$$

式中 k ——系数,大于0,一般取为1
 k 值越大,动态滑模面与期望滑模面的重合速度越大。

由式(9)、(10)得跟踪误差函数 s 为

$$s = c_1x_1 + c_2x_2 - f(0)e^{-kt} \quad (11)$$

跟踪误差函数 s 的导数 \dot{s} 为

$$\begin{aligned} \dot{s} = c_1\dot{x}_1 + c_2\dot{x}_2 + kf(0)e^{-kt} = \\ c_1(v\sin\theta_e + \Delta\tau) + \\ c_2\left(\frac{2v\tan\delta}{L} + \Delta\psi\right) + kf(0)e^{-kt} \end{aligned} \quad (12)$$

抖振现象是滑模控制在实际应用过程中的一个亟待解决的问题,这种现象是由系统状态轨迹反复穿越滑模面产生的。指数趋近律有较大的响应速度,但抖振现象也较为明显^[23]。幂次趋近律的趋近模式到滑动模式的切换较为平滑,抑制了抖振现象,其缺点是趋近速度较慢^[24]。快速幂次趋近律结合上述两种趋近律的优点^[25],通过参数的调节可以同时加快趋近速度和抑制抖振现象。

快速幂次趋近律设计为

$$\dot{s} = -\beta|s|^\alpha \text{sgn}(s) - \lambda s \quad (1 > \alpha > 0) \quad (13)$$

式中 β, λ ——系数,均大于0,一般均取为1

α ——幂次系数

β/λ 加大时,抗抖振能力加大,快速性减小; β/λ 减小时,抗抖振能力减小,快速性加大。通过调整 α ,可保证 s 较大时,滑模变量的趋近速度较快, s 较小时,以较小的控制增益来降低抖振。

由式(7)、(8)、(12)、(13)可得,控制律为

$$u(t) = \arctan \left(\frac{L}{2c_2v} \left[-\beta|s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) - \lambda s - c_1(v \sin \theta_c + \Delta \tau) - kf(0)e^{-kt} \right] - \Delta \psi \right) \quad (14)$$

利用 Lyapunov 函数验证控制律收敛性,定义

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (15)$$

则由式(7)、(12)、(14)得

$$\dot{V} = s\dot{s} = s(-\beta|s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) - \lambda s) \quad (16)$$

当 $s > 0$ 时

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s(-\beta|s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) - \lambda s) = \\ &= -(\beta s^{\alpha+1} + \lambda s) < 0 \end{aligned} \quad (17)$$

当 $s < 0$ 时

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s(-\beta|s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) - \lambda s) = \\ &= -(\beta(-s)^{\alpha+1} + \lambda s^2) < 0 \end{aligned} \quad (18)$$

当 $s = 0$ 时, $V' = 0$ 。综上, $V' \leq 0$, 满足 Lyapunov 条件,控制律收敛。

3 仿真验证

为验证本文上述控制算法的有效性,在 Matlab 仿真环境下,使用 S-Function 建立农机运动学模型,如图3所示,进行直线跟踪仿真。

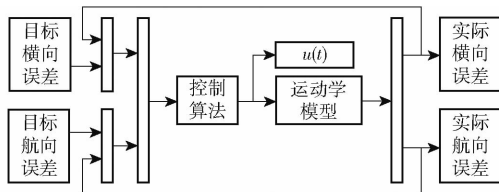


图3 仿真模型

Fig. 3 Algorithm simulation model

仿真初始条件如下:初始航向角误差为 0° , 初始横向位置偏差为 0.5 m , 速度为 0.8 m/s , 采样时间为连续采样。分别调整基于指数趋近律、等速趋近律和本文算法的各项参数,使各算法快速性、稳定性和超调量等表现达到最优,仿真结果的偏差曲线如图4所示。

如图4所示,本文所述的基于快速幂次趋近律和全局滑模的控制算法,相比基于指数趋近律、等速趋近律算法,缩短了趋近模态持续时间,系统动态性能更好。

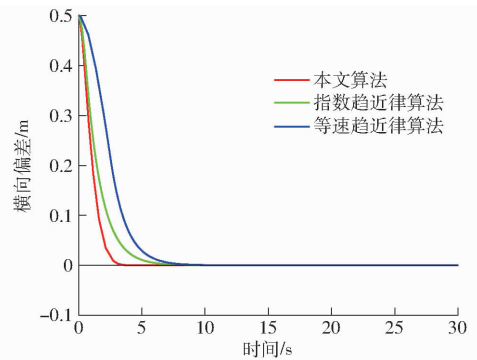


图4 仿真结果对比

Fig. 4 Comparison of simulation results

4 实验

4.1 实验平台

以上海世达尔现代农机有限公司改装的 SWAN3WP-500(B)型自走式植保机为基础,经机电自动化改造后,如图5所示,无人化植保机搭载北斗导航差分定位系统,该系统使用4G网络差分基站,定位精度更稳定;安装由方向盘控制电机和前轮转角传感器组成的转向控制系统;植保机的行驶速度由直线电机拉动无级变速发动机的油门拉线进行控制。



图5 实验平台

Fig. 5 Experimental platform

4.2 农机作业实验

农机作业实验地点为上海市松江区农业机械推广站,实验时水稻高度为 48 cm , 根系较深,已经对植保机的行驶造成干扰。在农机作业实验前先用便携式定位接收机在长方形水田地块确定出作业区域的4个边界点。启动自动驾驶前,通过虚拟显示终端根据水田植保机的作业宽幅将作业路径规划成间隔为 8 m 的平行直线段,车辆到达地边后可实现自动转弯调头对行。实验中,采用等速趋近律滑模算法与本文算法进行对比,车辆速度设为 0.8 m/s , 初始横向偏差和航向偏差均为零。

经过实验,车辆在水田中的行驶轨迹如图6所示,去掉转弯调头过程中的数据,直线跟踪路径1和路径2的横向偏差曲线如图7所示,本文算法的横向偏差和航向角偏差如表1所示。在水田环境下的

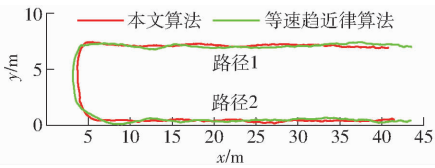


图 6 行驶轨迹

Fig. 6 Driving track of paddy field experimental vehicle

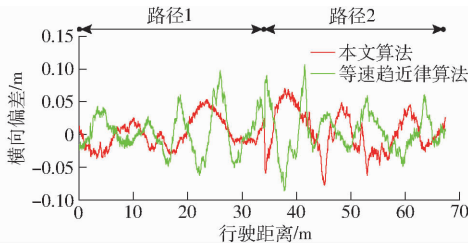


图 7 横向偏差曲线

Fig. 7 Horizontal deviation curve of paddy field experiment

直线跟踪实验中,采用本文算法的水田植保机的横向偏差绝对值最大为 0.077 8 m,航向角偏差绝对值

最大为 5.205 4°,通过图 7 可知系统状态在控制过程中穿越滑模面 15 次;采用等速趋近律滑模算法横向偏差绝对值最大为 0.106 8 m,航向角偏差绝对值最大为 5.540 9°,系统状态在控制过程中穿越滑模面 19 次。通过图 6 行驶轨迹可以看出,在调头结束进入上线过程中,本文算法相比等速趋近律滑模算法速度快、无超调,能够在趋近过程中解决对于干扰敏感问题。图 8 为本文算法直线跟踪过程路径 1 和路径 2 横向偏差的概率分布图,反映了横向偏差数据的集中分布情况,由图 8 可知,本文算法横向偏差概率分布的峰值在 0 左右。实际作业结果表明,在水田的滑移干扰和航向角干扰的影响下,相比采用等速趋近律的滑模控制过程,使用本文算法的水田植保机在直线跟踪上依然具有较好的跟踪精度,能够解决传统滑模控制过程的抖振和趋近模态对于干扰敏感问题。

表 1 本文算法直线段路径跟踪误差

Tab. 1 Path tracking errors of all straight sections in paddy field experiment

路径序号	横向偏差/m					航向角偏差/(°)				
	最大值	最小值	平均值	均方根	标准差	最大值	最小值	平均值	均方根	标准差
1	0.053 9	-0.037 0	0.001 4	0.021 7	0.021 7	2.794 5	-1.456 9	0.371 7	1.115 8	1.052 7
2	0.070 9	-0.077 8	0.004 3	0.031 9	0.031 7	3.453 0	-5.205 4	0.402 6	1.808 4	1.764 1
整体	0.070 9	-0.077 8	0.002 8	0.027 2	0.027 1	3.453 0	-5.205 4	0.387 0	1.498 4	1.448 0

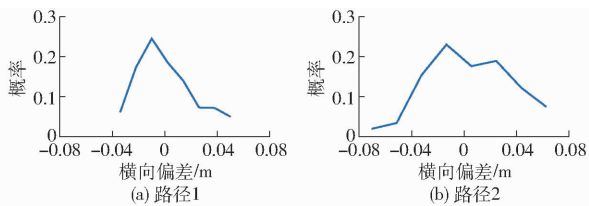


图 8 横向偏差分布

Fig. 8 Distribution of lateral deviation of straight line segment

5 结论

(1) 针对水田植保机在自动驾驶过程中受干扰情况下直线跟踪精度不高的问题,建立了含有滑移干扰和航向角干扰的四轮异相位转向相对运动学

模型。

(2) 基于快速幂次趋近律和全局滑模设计了植保机直线跟踪控制方法,解决了滑模控制方法的抖振和趋近模态对于干扰敏感的问题,使得水田植保机在控制的全过程具有鲁棒性,并且利用 Lyapunov 判据检验了控制方法的收敛性。

(3) 建立了水田植保机的仿真模型,与其他基于趋近律的滑模控制方法的仿真效果进行了对比。实际作业实验结果表明,本文方法在水田环境下直线跟踪横向偏差绝对值最大为 0.077 8 m,误差概率分布集中,对比基于等速趋近律的实验结果,跟踪效果较好,解决了植保机在水田自动驾驶过程中受干扰情况下直线跟踪精度不高的问题。

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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 1-18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200401&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.001. (in Chinese)

[2] 丁幼春, 何志博, 夏中州, 等. 小型履带式油菜播种机导航免疫 PID 控制器设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 12-20. DING Youchun, HE Zhibo, XIA Zhongzhou, et al. Design of navigation immune controller of small crawler-type rape seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(7): 12-20. (in Chinese)

[3] 张雁, 李彦明, 刘翔鹏, 等. 水稻直播机自动驾驶模糊自适应控制方法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 30-37. ZHANG Yan, LI Yanming, LIU Xiangpeng, et al. Fuzzy adaptive control method for autonomous rice seeder [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 30-37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181004&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.004.

(in Chinese)

- [4] 李伟, 薛涛, 毛恩荣, 等. 高地隙自走式喷雾机多轮转向系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1):141-151.
LI Wei, XUE Tao, MAO Enrong, et al. Design and experiment of multifunctional steering system for high clearance self-propelled sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1):141-151. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190115&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.015. (in Chinese)
- [5] 孟庆宽, 仇瑞承, 张漫, 等. 基于改进粒子群优化模糊控制的农业车辆导航系统[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3):29-36, 58.
MENG Qingkuan, QIU Ruicheng, ZHANG Man, et al. Navigation system of agricultural vehicle based on fuzzy logic controller with improved particle swarm optimization algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3):29-36, 58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150305&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.005. (in Chinese)
- [6] 刘兆祥, 刘刚, 籍颖, 等. 基于自适应模糊控制的拖拉机自动导航系统[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11):148-152, 162.
LIU Zhaoxiang, LIU Gang, JI Ying, et al. Autonomous navigation system for agricultural tractor based on self-adapted fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11):148-152, 162. (in Chinese)
- [7] 周建军, 张漫, 汪懋华, 等. 基于模糊控制的农用车辆路线跟踪[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4):151-156.
ZHOU Jianjun, ZHANG Man, WANG Maohua, et al. Path tracking for agricultural vehicle based on fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4):151-156. (in Chinese)
- [8] 唐小涛, 陶建峰, 李志腾, 等. 自动导航插秧机路径跟踪系统稳定性模糊控制优化方法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1):29-34.
TANG Xiaotao, TAO Jianfeng, LI Zhiteng, et al. Fuzzy control optimization method for stability of path tracking system of automatic transplanter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1):29-34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180103&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.003 (in Chinese)
- [9] LILIK S, TOMOHIRO T. Application of neuro-fuzzy controller to autonomous agricultural vehicle operating on unstructured changing terrain-control software development[J]. Journal of Comparative Pathology, 2010, 143(4):342.
- [10] YAMADA K, JINYAMA H, YAMASHITA M. Automatic acquisition method of fuzzy control knowledge for orbit tracking of autonomous vehicle in agricultural works using genetic algorithms[C]//Soft Computing as Transdisciplinary Science and Technology, Proceedings of the Fourth IEEE International Workshop, WSTST05, Muroran, Japan. IEEE, 2005.
- [11] 张智刚, 罗锡文, 赵祚喜, 等. 基于 Kalman 滤波和纯追踪模型的农业机械导航控制[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊):6-12.
ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, ZHAO Zuoxi, et al. Trajectory tracking control method based on Kalman filter and pure pursuit model for agricultural vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.):6-12. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 李逃昌, 胡静涛, 高雷, 等. 一种与行驶速度无关的农机路径跟踪方法[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(2):59-65.
LI Taochang, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Agricultural machine path tracking method irrelevant to travel speeds[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2):59-65. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140211&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.011. (in Chinese)
- [14] NOGUCHI N, ISHII K, TERAHO H. Optimal control of agricultural vehicles by neural networks, 2: optimal schedule of working route by use of genetic algorithms[J]. Journal of Construction Engineering & Management, 2014, 56:83-92.
- [15] ERKAN K, ERDAL K, HERMAN R, et al. Distributed nonlinear model predictive control of an autonomous tractor-trailer system[J]. Mechatronics, 2014, 8(24):926-933.
- [16] BACKMAN J, OKSANEN T, VISALA A. Nonlinear model predictive trajectory control in tractor-trailer system for parallel guidance in agricultural field operations[C]//IFAC Proceedings Volumes, 2010:133-138.
- [17] 焦俊, 陈靖, 秦焰, 等. 直流电机驱动农用履带机器人轨迹跟踪自适应滑模控制[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4):64-70.
JIAO Jun, CHEN Jing, QIAN 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)
- [18] 贾全, 张小超, 苑严伟, 等. 拖拉机自动转向系统容错自适应滑模控制方法[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10):76-84.
JIA Quan, ZHANG Xiaochao, YUAN Yanwei, et al. Fault-tolerant adaptive sliding mode control method of tractor automatic steering system[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(10):76-84. (in Chinese)
- [19] LI Taochang, HU Jingtao. Adaptive sliding mode control method based on nonlinear integral sliding surface for agricultural vehicle steering control[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014(2):1-10.
- [20] 张国远. 高地隙自走式平台四轮转向系统的研究和设计[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
ZHANG Guoyuan. Research and design of four wheel steering system of high clearance self-propelled platform[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- [21] 冯雪. 丘陵山地拖拉机四轮转向系统特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
FENG Xue. Research on the characteristics of four wheel steering system in hillside tractor[D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese)
- [22] 李逃昌. 农业轮式移动机器人自适应滑模路径跟踪控制[J]. 中国机械工程, 2018, 29(5):579-584, 590.
LI Taochang. Adaptive sliding mode path tracking control of agricultural wheeled mobile robots[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(5):579-584, 590. (in Chinese)
- [23] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [24] 李慧洁, 蔡远利. 基于双幂次趋近律的滑模控制方法[J]. 控制与决策, 2016, 31(3):498-502.
LI Huijie, CAI Yuanli. Sliding mode control with double power reaching law[J]. Control and Decision, 2016, 31(3):498-502. (in Chinese)
- [25] YU S H, YU X H, SHIRINZADEH B, et al. Continuous finitetime control for robotic manipulators with terminal sliding mode[J]. Automatica, 2005, 41(11):1957-1964.