

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.011

履带式油菜播种机模糊自适应纯追踪控制器设计与试验

张朝宇^{1,2} 董万静^{1,2} 熊子庆^{1,2} 胡子谦^{1,2} 王登辉^{1,2} 丁幼春^{1,2}
(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对在丘陵山区小田块中大型农业机械运移不便、作业效率不高和田头调头操作受限等问题,设计了一种针对轻简履带式车辆的基于运动学模型和几何模型的模糊自适应纯追踪控制器。以轻简履带式油菜播种机为研究平台,结合北斗 RTK 构建了一套自动导航作业系统,根据播种作业需求采用有限状态机设计了田间自动导航作业控制策略。开展了模糊自适应纯追踪控制器与纯追踪控制器的仿真及实地对比试验。仿真结果表明,与纯追踪控制器相比,模糊自适应纯追踪导航控制器具有上升时间短和超调小等特点。水泥路面试验表明,当行驶速度为 0.8 m/s 时,模糊自适应纯追踪控制器最大跟踪偏差为 0.039 m,平均绝对偏差为 0.018 m。在旱田路面前进速度 0.5、0.8、1.2 m/s 下,直线导航跟踪最大跟踪偏差分别不大于 0.082、0.086、0.092 m,平均绝对偏差分别不大于 0.031、0.032、0.034 m。并对自动导航作业系统进行试验,试验结果表明,所设计的导航控制器直线跟踪稳定,满足丘陵山区小型田块油菜播种要求。

关键词: 油菜; 履带式播种机; 北斗; 导航; 有限状态机; 模糊自适应纯追踪控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)12-0105-10 **OSID:** 

Design and Experiment of Fuzzy Adaptive Pure Pursuit Control of Crawler-type Rape Seeder

ZHANG Chaoyu^{1,2} DONG Wanjing^{1,2} XIONG Ziqing^{1,2} HU Ziqian^{1,2} WANG Denghui^{1,2} DING Youchun^{1,2}
(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China
2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: The automatic navigation system of agricultural machinery is based on the navigation control system and is equipped with an autonomous operation controller to realize land farming with less human intervention. Aiming to solve the problems that the large agricultural machineries are inconvenient to transport in small fields of hilly areas, inefficient to operate, and restricted to change direction, a set of automatic navigation operation system was constructed with a light and simple crawler-type rape seeder and Beidou RTK. This system was composed of sensing device, walking module, control module and a seeding module. According to the requirements of sowing operation, the automatic operation control strategy was designed by using finite state machine. The crawler-type rape seeder was divided into four states: non-seeding state, seeding state, steering state and completed operation state, and the state transformation was carried out by judging different paths, and the seeding operation was coordinated. The automatic navigation operation not only required vehicle coordination and planter control to achieve accurate sowing operation, but also required navigation controller with high control precision and strong adaptability. Therefore, a fuzzy adaptive pure pursuit controller based on kinematic model and geometric model was designed for light and simple tracked vehicles. A small forward looking distance would make the vehicle approach the target path quickly with large curvature, and it would also cause vehicle oscillation. A large forward looking distance would make the vehicle approach the target path slowly with small curvature. Although the vehicle would not oscillate, the settling time was long. The forward looking distance can be adjusted adaptively by using the fuzzy control method. The lateral deviation, heading

deviation and speed were used as the inputs of the fuzzy controller, and the forward looking distance was used as the output of the fuzzy controller. The input and output were fuzzified and fuzzy rules were established through test simulation. The simulation and field comparative test results of fuzzy adaptive pure pursuit controller and pure pursuit controller showed that compared with the pure pursuit controller, the fuzzy adaptive pure pursuit navigation controller had the characteristics of short rise time and small overshoot. The road test results showed that when the speed of the crawler-type rape seeder was 0.8 m/s, the maximum tracking deviation of the fuzzy adaptive pure pursuit controller was 0.039 m and the average absolute deviation was 0.018 m. When the forward speed of the dry field road was 0.5 m/s, 0.8 m/s and 1.2 m/s, respectively, the maximum tracking deviations of linear navigation tracking were not more than 0.082 m, 0.086 m and 0.092 m. The average absolute deviations were not more than 0.031 m, 0.032 m and 0.034 m. The experimental data of the automatic navigation operation system showed that the designed navigation controller had a stable ability of linear tracking. It can meet the requirements of automatic sowing of rape in small fields of hilly areas, and provide technical support for the construction of unmanned farms in hilly and mountainous areas.

Key words: rapeseed; crawler-type seeder; Beidou; navigation; finite state machine; fuzzy adaptive pure pursuit control

0 引言

油菜是我国重要的油料作物,长江中下游丘陵山区冬闲田面积广阔,是油菜种植的潜在耕地资源之一^[1],丘陵山区由于土地规模小、分散且不规则等因素,导致常规播种装备无法进入,轻简油菜播种机成为该地区主要播种机具,但因人工播种存在重播漏播、驾驶工作强度大等问题,难以保证播种作业质量。自动驾驶作业对提高作业质量、提升智能化水平有着重要意义^[2-4]。

农业机械的自动驾驶作业系统由导航控制器和自动作业控制策略两部分组成,搭载自动驾驶作业系统的农机可实现较少人干预情况下的田间作业^[5]。国内外学者根据不同作业环节的机具对自动驾驶作业系统开展了相关研究^[6-8],包括播种插秧^[9-11]、施肥^[12]、收获作业^[13-15]等。刘兆朋等^[5]针对高地隙喷雾机进行了电液改装并开发了一套自动驾驶作业系统,在较少人为操作下可实现自动控制喷雾机完成直线跟踪、地头转弯和喷雾作业。何杰等^[16]针对水稻插秧机设计了专家PID速度控制算法和PID插值机构控制算法,提出了插秧机自动作业联合控制策略,实现了作业系统的自动控制。罗锡文等^[17]设计了一套拖拉机自动驾驶控制系统,可实现拖拉机启停、速度控制、点火熄火等自动控制。以上自动驾驶作业系统研究多以大型农机具为主,而针对小型履带式机具的自动驾驶作业系统研究较少。

导航控制器设计是自动驾驶作业系统的关键技术^[18]。在履带式车辆导航控制器方面,丁幼春等^[19]设计了一种小型履带式油菜播种机导航免疫PID控制器。刘志杰等^[20]提出一种基于虚拟雷达

模型的导航路径控制算法。贾全等^[21]设计了一套NF-752型履带拖拉机自动驾驶系统并提出一种航向预估模型控制器。熊斌等^[22]基于纯追踪路径跟踪算法设计了一套履带式果园喷药机自动作业控制系统。HIROK等^[23]提出一种履带式水稻收获机自动收获框架,可在无人农场完成水稻自动收获和仓满自动卸粮,收获机搭载GPS和视觉定位系统等传感器实现导航直线跟踪误差不大于0.04 m。当前履带式农机针对导航控制器研究较多,但满足导航精度高且可适应速度变化的导航控制器研究成果较少。

本文以前期自主研制的履带式油菜播种机为平台,为实现小型轻简播种机具田间自动驾驶作业,拟根据播种作业要求设计基于有限状态机的自动作业控制策略,建立该平台运动学模型和几何模型,设计一种模糊自适应纯追踪控制器,并进行对比仿真、水泥路面和田间试验,验证自动驾驶作业系统可靠性和准确性。

1 履带式油菜播种机自动驾驶作业系统组成

1.1 履带式油菜播种机整体结构

履带式油菜播种机采用全电控液压平台,主要由履带底盘、液压马达、动力系统、悬挂装置、油菜播种机等组成。整体结构和自动驾驶系统作业系统如图1所示。其中履带底盘型号为DP-HYLD-250(德州力维机械有限公司),选用小型双翘橡胶履带,驱动轮与液压马达直连,液压马达为BMT-250型摆线马达(镇江大力股份有限公司);动力系统主要由发动机和液压泵组成,液压泵为轴向柱塞变量泵,发动机选用力帆2V80F型汽油发动机(力帆汽油机有限公司);悬挂装置采用三点悬挂式设计,主要由机具提升液压缸与提升臂构成,铰接在平台后

部;油菜播种机选用课题组研制的气吹式油菜播种机^[24],幅宽为 1.5 m,播种机工作时,供种装置根据播量要求通过步进电机带动,定量排出连续均匀的种子流,通过分配器将种子流合理分配到 6 行导种管,顺管而下至开沟覆土器内。

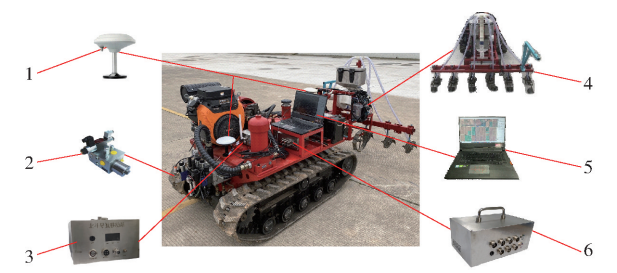


图 1 履带式油菜播种机自动导航作业系统

Fig.1 Composition of automatic navigation operation system of crawler-type rape seeder

1. 北斗定位接收天线 2. 电液比例阀组 3. 北斗 RTK 移动站
4. 气吹式播种机 5. 工控机 6. 导航控制箱

1.2 自动导航作业系统结构组成

履带式油菜播种机自动导航作业系统主要由传感装置、行走模块、控制模块和播种模块组成。如图 2 所示,传感装置由北斗高精度定位系统 M600 双天线北斗 RTK 移动站(上海司南卫星导航技术股份有限公司)和 BH38 - K08 - S4096 单圈绝对值旋转编码器(无锡邦赫自动化科技有限公司)组成;控制模块采用主控制工控机和 NI - USB - 6002 数据采集板卡的 I/O 口对传感装置信息进行采集,并对行走模块和播种模块进行控制,数据采集板卡封装在导航控制箱内;行走模块由阀控液压马达与电液比例阀(派克公司,美国)组成,通过控制比例阀实现液压马达行走;播种模块由风机、种箱和供种装置组成,通过控制电机转速实现播量调节,通过控制液压推杆实现播种机升降。

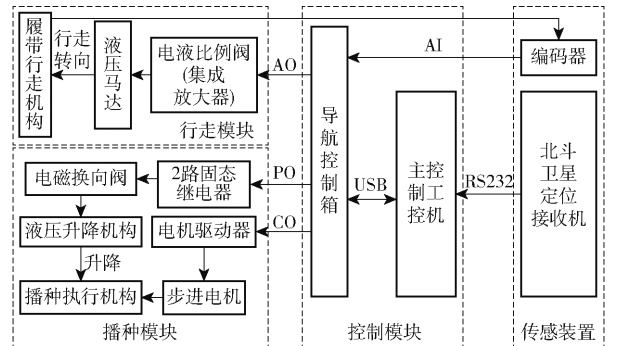


图 2 作业系统总体结构图

Fig.2 Overall structure of operating system

2 自动作业控制策略

2.1 导航路径规划

为实现在较少人为操作的情况下完成油菜播种

机自动导航作业,不仅需要导航控制器精度高且适应性强,还需要协调配合播种机控制实现精准播种作业。

针对丘陵小地块地形特点及油菜播种要求实现不重播不漏播,结合履带式行走机构转弯特性,设计履带式油菜播种机导航路径,如图 3 所示。A ~ S 为行驶的路径点,将规划路径分为播种作业路径(图 3 中红线表示)和非播种作业路径(图 3 中蓝色表示),播种作业时播种机下降进行播种作业,在非播种作业时播种机抬升停止作业,箭头轨迹线代表播种行走方向,播种机从起点 A 出库进入田块开始作业,点 B ~ R 为拐点处,播种机沿着设定直线路径导航,到地头转弯点时进行原地转向,最后完成自动导航作业回到终点 S。

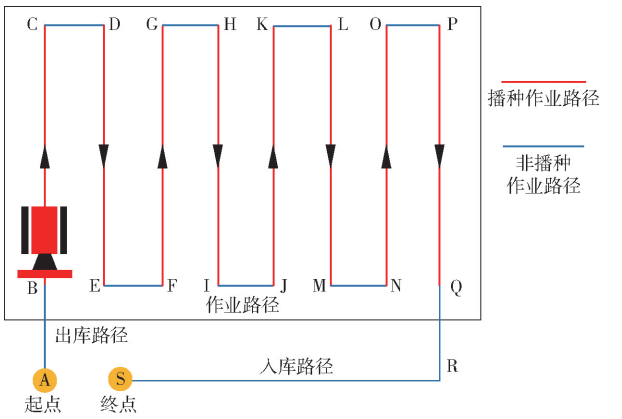


图 3 导航路径规划图

Fig.3 Navigation path planning diagram

2.2 基于有限状态机的油菜播种作业控制策略

有限状态机(Finite state machine, FSM)指有限个状态以及在这些状态之间的转移和动作等行为的数学模型^[25]。采用有限状态机将播种过程分解为不同状态和转移状态触发条件的数学模型,在不同的阶段履带式油菜播种机呈现不同状态,因为 FSM 是有限个数的,某时刻履带式油菜播种机一定处于设计的 FSM 状态之中的一个,下一个状态由当前所处状态和触发条件的函数决定,受到条件驱动,履带式油菜播种机状态发生改变,且履带式油菜播种机只能根据当前所处的状态及触发条件在有限的状态之间转移。

播种作业控制对象由液压马达、风泵、供种装置、液压缸抬升装置组成,风泵为常开状态,当液压缸下降时,供种装置启动开始播种,当液压缸抬升时,供种装置停止,液压马达驱动两侧履带行驶。依据人工驾驶油菜播种机操作经验和油菜播种机播种要求,将履带式油菜播种机划分为 5 种状态作为系统状态,分别定义为 S1、S2、S3、Start 和 Stop,如表 1 所示;处在不同作业路径下作为状态触发条件,分别

定义为 C1 ~ C5,对应非播种路径、播种路径、拐点处、最终拐点处和信号异常。

表 1 有限状态机的系统状态
Tab. 1 System state of FSM

系统状态	工况	行走控制	播种机控制
Start	启动状态	停止	R, -
S1	非播种状态	直线行走	R, -
S2	播种状态	直线行走	D, +
S3	转向状态	转向控制	R, -
Stop	完成作业状态/异常状态	停止	R, -

注:R 表示机具抬升,D 表示机具下降,+ 表示播种机工作,- 表示播种机停止。

根据图 3 所示的路径规划图将播种机所处不同位置 and 不同控制状态构成一个 FSM,构成的 FSM 如图 4 所示。在工控机上规划好作业路径,当启动自动作业系统时,根据 RTK 北斗定位当前车辆的位置触发不同状态并对播种机进行控制,状态机接收到北斗信息后,进入 Start 状态启动自动作业系统,当车辆触发事件非播种路径 C1 时,进入非播种状态 S1,车辆直线行走,机具抬升播种机不工作;当车辆触发事件播种路径 C2 时,进入播种状态 S2,车辆直线行走,机具下降播种机开始播种;当车辆触发事件拐点处 C3 时,进入转向状态 S3,车辆原地转向,机具抬升播种机不工作;当车辆触发事件最终拐点 C4 时,进入完成作业状态 Stop,车辆停止,机具抬升播种机不工作;当车辆触发事件信号异常 C5 时,车辆停止,机具抬升播种机停止工作;S1、S2 状态之间无法直接转换。

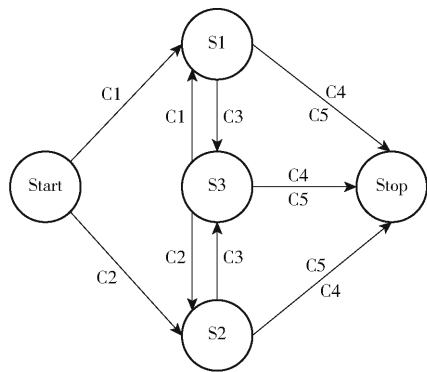


图 4 FSM 转移轨迹图
Fig. 4 Track of state conversion FSM

3 导航控制器设计

3.1 履带式油菜播种机运动学模型

为实现履带式油菜播种机自动导航作业,导航控制器的设计需要满足播种精度。基于履带式行走机构和车辆运动特点,运动学模型为典型的差速模型,其运动形式取决于双边履带的速度,通过对原系

统的简化抽象来建立其理论运动学模型,假设履带式行走机构满足条件:质心和几何中心重合且整机关于中心对称;行驶时履带与地面为纯滚动,不产生滑移和滑转,即具有理论转向半径;每侧履带的瞬时转向中心与其接地面几何中心重合。履带式行走机构运动示意图如图 5 所示,当工控机发出行走指令,控制器将收到的指令转换成电信号传递给左右液压马达的电磁比例换向阀组,通过控制两侧液压马达的转速和方向,实现对履带式行走机构的控制。

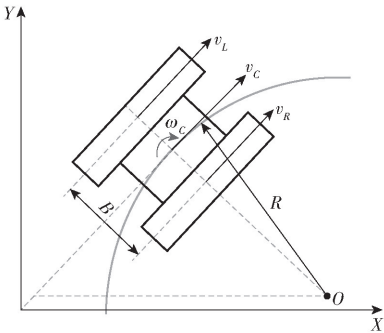


图 5 履带式行走机构运动示意图
Fig. 5 Tracked walking mechanism motion diagram

根据图 5 进行运动学分析,可得到基本理论^[26-27]

$$\begin{cases} v_C = \frac{v_L + v_R}{2} \\ R = \frac{B(v_L + v_R)}{2(v_L - v_R)} \\ \omega_C = \frac{v_L - v_R}{B} \end{cases} \quad (1)$$

式中 v_C ——履带式行走机构行走速度,m/s
 v_L ——左侧履带线速度,m/s
 v_R ——右侧履带线速度,m/s
 R ——车辆以点 O 为转向中心的理论转向半径,m
 B ——履带轨距,m
 ω_C ——车辆瞬时转向角速度,rad/s

由式(1)可知,当 $v_L = v_R$ 时,即两侧履带速度相等,车体转向角速度为 0° ,转向半径 R 趋近于无穷大,履带车做直线运动;当 $v_L > v_R$ 或 $v_L < v_R$ 时,履带车以点 O 为转向中心,以 R 为半径做转向运动;当 $v_L = -v_R$ 时,即两侧履带的速度相等反向时,履带车的转向半径 $0 \leq R \leq B/2$,车辆进行原地转向。

3.2 模糊自适应纯追踪控制器设计

3.2.1 纯追踪几何模型分析

纯追踪算法是一种纯几何算法,模拟驾驶员的驾驶习惯,通过合适的前视距离确定车体到导航目标直线上前视点所经过的圆弧路径,根据当前横向偏距和航向偏差计算出圆弧的半径,即转向半径,利

用转向半径和差速转向方式推导出两侧履带速度。在本研究中,假设履带与地面的滑移忽略不计并且履带行走机构的质心和几何中心重合,纯追踪模型如图 6 所示,直线 AB 为导航目标直线;点 C 为履带车定位点;点 O 为履带车瞬时转向圆心; R 为转向半径。

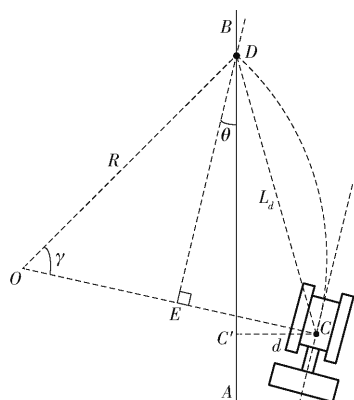


图 6 履带行走机构纯追踪模型

Fig. 6 Pure pursuit model of tracked walking mechanism

根据几何关系可得^[28]

$$\begin{cases} L_d = 2R \sin \frac{\gamma}{2} \\ \sin \frac{\gamma}{2} = \frac{L_{CE}}{L_d} \\ L_{CE} = d \cos \theta + \sqrt{L_d^2 - d^2} \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

式中 L_d ——前视距离, m

γ ——圆弧 CD 对应的圆心角, ($^\circ$)

L_{CE} ——点 C 到点 E 的距离, m

d ——横向偏距, m

θ ——航向偏差, ($^\circ$)

化简可得瞬时转向半径 R 与横向偏距 d 、航向偏差 θ 的关系式为

$$R = \frac{L_d^2}{2(d \cos \theta + \sqrt{L_d^2 - d^2} \sin \theta)} \quad (3)$$

联立式(1)、(3)可得左右履带速度 v_L 、 v_R 与横向偏距 d 、航向偏差 θ 、车速 v_c 、前视前距离 L_d 之间的关系为

$$\begin{cases} v_L = v_c \left[1 + \frac{B(d \cos \theta + \sqrt{L_d^2 - d^2} \sin \theta)}{L_d^2} \right] \\ v_R = v_c \left[1 - \frac{B(d \cos \theta + \sqrt{L_d^2 - d^2} \sin \theta)}{L_d^2} \right] \end{cases} \quad (4)$$

3.2.2 模糊自适应纯追踪控制器设计

根据式(4)可知,前视距离 L_d 是纯追踪算法中的唯一可调参数,前视距离 L_d 与车辆的横向偏距 d 、航向偏差 θ 、车速 v_c 有直接关系,直线跟踪的性能取

决于前视距离 L_d 。当前视距离 L_d 较小时,横向调节能力增强,车辆以较大曲率快速逼近目标路径, L_d 过小会引起车辆行驶振荡;当前视距离 L_d 较大时,车辆会以较小曲率缓慢逼近目标路径,车辆行驶不会产生振荡,但调节时间较长。

利用模糊控制方法,根据不同条件给出适宜的前视距离,可以提高导航控制器的上线速度和稳定性,设计该控制器系统结构图如图 7 所示。

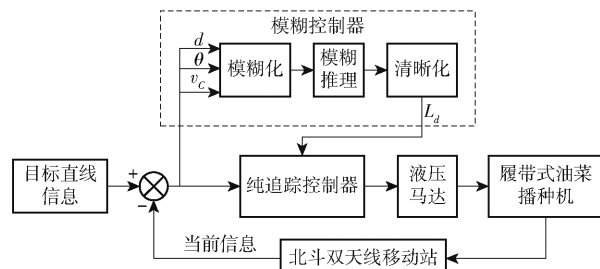


图 7 直线导航控制器系统结构图

Fig. 7 Diagram of system structure of linear navigation controller

根据以上分析以横向偏距 d 、航向偏差 θ 和速度 v_c 作为模糊自适应纯追踪控制器的输入,前视距离 L_d 作为模糊自适应纯追踪控制器的输出,对输入输出进行模糊化。

(1)横向偏距 d 基本论域为 $\{-2 \text{ m}, 2 \text{ m}\}$,横向偏距模糊等级为:负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)。

(2)航向偏差 θ 基本论域为 $\{-45^\circ, 45^\circ\}$,航向偏差模糊等级为:负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)。

(3)速度 v_c 基本论域为 $\{0 \text{ m/s}, 1.5 \text{ m/s}\}$,速度模糊等级为:超低(VL)、低(L)、中(M)、高(B)、超高(VB)。

(4)前视距离 L_d 基本论域为 $\{1 \text{ m}, 3 \text{ m}\}$,前视距离模糊等级为:超近(VL)、中近(ML)、较近(L)、适中(M)、较远(LB)、中远(MB)、超远(VB)。输入输出变量为三角型隶属度函数。

根据履带式油菜播种机驾驶员手动操作经验,当横向偏距 d 或航向偏差 θ 较大时,使用较小的前视距离 L_d ,使车辆快速逼近跟踪路径,减小系统调节时间,提高系统响应速度,但前视距离不能过小,避免 $L_d^2 < d^2$;当横向偏距 d 或航向偏差 θ 较小时,系统调节量应减少,此时使用较大的前视距离 L_d ,防止系统超调,提高系统稳定性,并且行驶速度 v_c 与前视距离 L_d 成正比^[29]。基于上述驾驶经验,经过专家经验设计的三维模糊控制器共有 245 条控制规则,当 v_c 为 M 时,对应的模糊控制规则如表 2 所示,模糊规则曲面如图 8 所示。

表 2 速度 v_c 为 M 时模糊控制规则

Tab.2 Fuzzy control rules when speed v_c is M

d	θ						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	M	M	LB	LB	LB	M	M
NM	ML	L	M	LB	M	L	ML
NS	VL	ML	LB	MB	LB	ML	VL
ZO	LB	LB	MB	VB	MB	LB	LB
PS	VL	ML	LB	MB	LB	ML	VL
PM	ML	L	M	LB	M	L	ML
PB	M	M	LB	LB	LB	M	M

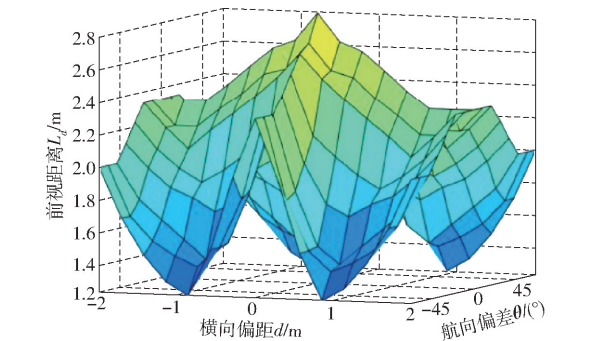


图 8 模糊规则曲面

Fig.8 Fuzzy regular surface

3.2.3 模糊自适应纯追踪控制器仿真

为验证模糊自适应纯追踪控制器的控制性能,对纯追踪和模糊自适应纯追踪控制进行 Matlab 仿真。在初始条件满足横向偏距为 1.5 m、速度为 0.8 m/s 下、航向偏差为 45° 的条件下,确定一组前视距离 L_d 作为纯追踪控制器的输入,使系统调节时间尽量小且上线尽量平滑,通过试测法调节前视距离参数为 $L_d = 1.8$ m。设置采样时间为 0.1 s,并且在 2 s 时给予一个 0.2 s 的扰动,测试控制器的调节效果,仿真结果如图 9 所示。仿真结果表明,所设计的模糊自适应纯追踪控制器较纯追踪控制器上升时间提高了 0.21 s,具有上升时间快且抗干扰能力强等特点。

3.2.4 直线路径跟踪仿真

运用 Matlab 对模糊自适应纯追踪进行直线跟踪仿真。设定初始点坐标位置为(0 m,1 m),存在一定偏距,跟踪直线函数 $x = y$,且初始速度为 0.8 m/s,采样时间为 0.1 s,初始航向偏差与目标直线一致。根据所设计的模糊自适应控制器进行直线跟踪仿真,如图 10 所示。结果表明:模糊自适应纯追踪控制器能够跟踪直线路径,具有上线平滑和稳态误差小等特点。

3.3 地头转向控制器

根据履带行走机构转向通过性好,转弯半径小,采用原地转向的转弯方式,转向控制系统利用北斗

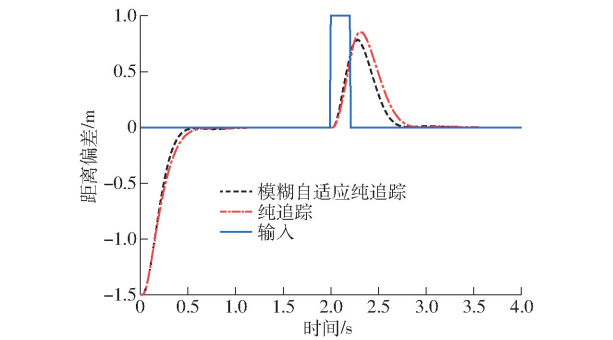


图 9 模糊纯追踪控制器和固定前视距离纯追踪控制器仿真结果

Fig.9 Simulation results between fuzzy adaptive pure pursuit controller and fixed forward-looking distance pure pursuit controller

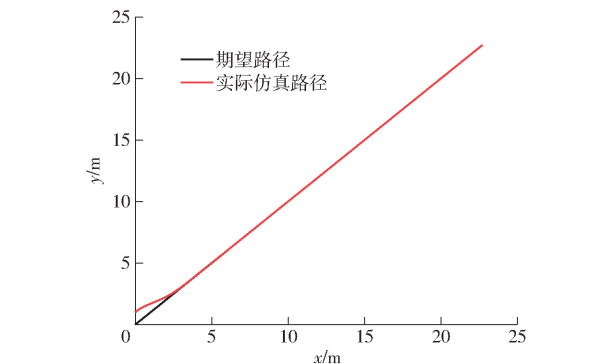


图 10 模糊自适应控制器直线跟踪仿真曲线

Fig.10 Fuzzy adaptive pure pursuit controller linear tracking simulation

双天线定位系统获得位置信息和航向信息并实时计算航向偏差,通过 PD 控制器得到输出转向控制电压,控制器控制电液比例阀调节两侧液压马达正反转,实现车辆精确转向,当航向进入角度阈值范围内,将跟踪下一条路径直线,如图 11 所示。

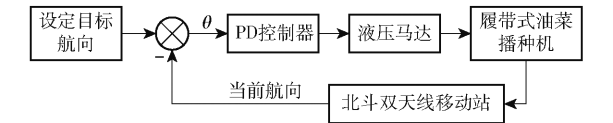


图 11 转向控制系统结构图

Fig.11 Steering control system structure diagram

4 试验

4.1 路面直线路径导航试验

为了检验模糊自适应纯追踪导航控制器的直线跟踪效果,在华中农业大学油菜全程机械化试验基地进行水泥路面试验。试验材料:履带式油菜播种机、工控机、导航控制箱、北斗 RTK 移动站。具体操作步骤如下:①试验前进行传感器、控制箱、工控机等各控制系统部件的安装和检查,将北斗 RTK 移动站电源打开,等待移动站冷启动完成并在工控机成功显示定位数据后,设定 AB 线(期望直线路径):在

工控机上位机界面内先后选定两个点 A 和 B , 完成行驶路径的确定。②先将履带式油菜播种机的播种模块抬升并保持悬空, 再将样机行驶至 AB 线起点附近, 初始姿态调节到横向偏距 0.5 m 左右、航向偏差 20° 以内。③开始试验并记录试验数据。打开上位机软件中的导航数据保存功能, 记录试验过程中的样机位姿、横向偏距、航向偏差、目标转向半径等数据。按照以上步骤, 在保证初始偏差和航向相差不大的情况下, 车体速度为 0.8 m/s , 分别搭载模糊自适应纯追踪控制器和纯追踪控制器进行路面导航控制效果测试。试验结果如图 12 所示。

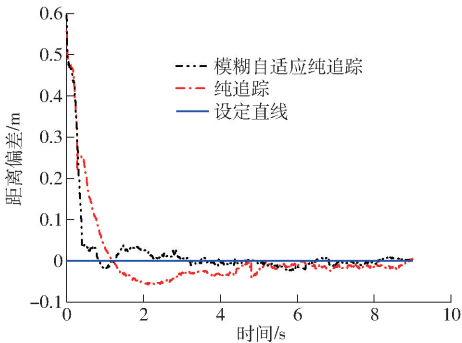


图 12 路面直线跟踪试验结果

Fig. 12 Linear tracking test results in pavement

试验结果表明: 纯追踪控制器的最大跟踪偏差为 0.056 m , 平均绝对偏差为 0.024 m , 上升时间为 1.21 s ; 模糊自适应纯追踪控制器的最大跟踪偏差为 0.039 m , 平均绝对偏差为 0.018 m , 上升时间为 0.86 s 。根据导航精度提高百分比公式^[19]

$$M = \frac{S_{avg} - M_{avg}}{S_{avg}} \times 100\%$$

(5)

式中 M ——导航精度提高百分比, %
 S_{avg} ——纯追踪控制器偏差平均值, m
 M_{avg} ——模糊自适应控制器偏差平均值, m
分别以最大跟踪偏差和平均绝对偏差作为衡量导航精度的指标, 符号为正表示精度提高, 符号为负表示精度降低。根据式(5)计算得到模糊自适应纯追踪控制器较纯追踪控制器在速度为 0.8 m/s 下导航精度分别提高了 57% 、 25% , 上升时间减小了 29% 。

4.2 田间直线路径跟踪试验

为检验模糊自适应纯追踪导航控制器直线跟踪效果和速度适应性, 于 2021 年 4 月 17 日在武汉市汉南区羽佳养殖示范田开展旱田直线跟踪试验, 以速度 0.5 、 0.8 、 1.2 m/s 行驶, 分别搭载纯追踪控制器和模糊自适应纯追踪控制器进行多组试验。试验步骤与水泥路面直线跟踪试验步骤保持一致。表 3 为纯追踪与模糊自适应纯追踪控制器控制效果对比。田间试验结果表明, 当履带式油菜播种机速度

为 0.5 、 0.8 、 1.2 m/s 时, 模糊自适应纯追踪控制器最大跟踪偏差分别不大于 0.082 、 0.086 、 0.092 m , 平均绝对偏差分别不大于 0.031 、 0.032 、 0.034 m 。根据式(5), 得到模糊自适应纯追踪控制器较纯追踪控制器在速度为 0.5 、 0.8 、 1.2 m/s 下最大跟踪偏差导航精度分别提高了 28.2% 、 35.4% 、 39.7% , 平均绝对偏差导航精度分别提高了 25.7% 、 34.1% 、 39.6% 。对比文献[19]免疫 PID 控制器, 在速度为 0.5 m/s 下, 最大跟踪偏差导航精度提高了 51.3% , 平均绝对偏差导航精度提高了 55.2% 。试验表明模糊自适应纯追踪控制器较纯追踪控制器能有效降低跟踪偏差, 并能适应不同速度, 能够达到油菜播种机导航作业要求, 为履带式油菜播种机自动驾驶系统提供技术参考。

表 3 纯追踪与模糊自适应纯追踪效果对比

Tab. 3 Contrasts between fuzzy adaptive pure pursuit controller and pure pursuit controller

控制方法	速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	试验序号	最大跟踪 偏差/m	平均绝对 偏差/m
纯追踪控制器	0.5	1	0.094	0.032
		2	0.104	0.038
		3	0.112	0.036
		平均值	0.103	0.035
	0.8	1	0.116	0.045
		2	0.137	0.048
		3	0.128	0.043
		平均值	0.127	0.044
	1.2	1	0.145	0.052
		2	0.150	0.058
		3	0.143	0.049
		平均值	0.146	0.053
模糊自适应 纯追踪控制器	0.5	1	0.073	0.031
		2	0.082	0.023
		3	0.069	0.025
		平均值	0.074	0.026
	0.8	1	0.086	0.032
		2	0.077	0.029
		3	0.083	0.027
		平均值	0.082	0.029
	1.2	1	0.092	0.031
		2	0.085	0.034
		3	0.088	0.033
		平均值	0.088	0.032

模糊自适应纯追踪控制器较纯追踪控制器效果和速度适应性好, 主要是因为模糊自适应纯追踪控制器可根据当前横向偏距、航向偏差和速度实时调整前视距离, 当横向偏距较大时使前视距离较近, 可以加快系统的响应速度, 使履带式油菜播种机快速上线; 当横向偏距较小时使前视距离

较远,可以减小控制量使系统保持稳态。纯追踪控制器在整个过程中前视距离保持不变,当履带式油菜播种机状态变化时纯追踪控制器适应性较差,无法实现最优控制。

田间试验和水泥地面试验对比,履带式油菜播种机的最大跟踪偏差和平均绝对偏差有所增大,控制器精度随机具速度增加而降低,主要原因为:一方面,履带式油菜直播机在田间作业时,两侧履带速度响应特性会受到土地平整度、坚实度和含水率等外界客观因素的影响,出现履带积土致使阻力矩增大或履带打滑等现象,而导致履带车转向特性随之发生变化,性能下降;另一方面,田间地面的复杂环境致使车身倾斜和滑移,导致传感器获取的车体位姿信息产生突变值,控制器会因此计算出较大的纠偏控制量,出现振荡,跟踪误差随之增大。

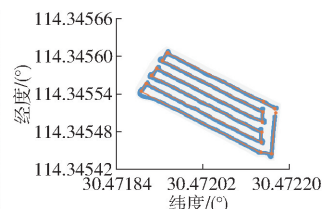
4.3 自动驾驶作业试验

为了检验履带式油菜播种机自动驾驶作业系统稳定性,于2021年5月15日在华中农业大学“三田”试验基地进行性能评估试验。测得试验田土壤含水率为22.7%,土壤坚实度为674.2 kPa。试验材料与田间试验材料一致。试验前进行传感器、控制箱、工控机等各控制系统部件的安装和检查,设定出库路径、入库路径和作业路径,作业幅宽为1.5 m,卫星定位接收频率为10 Hz,在车体速度为0.8 m/s的条件下进行自动驾驶作业试验,自动驾驶作业现场和导航路径轨迹如图13所示。

试验结果表明,履带式油菜播种机可在转向处停车并实现转向控制,在播种作业路径下播种机下降并完成播种作业,在非播种作业路径下播种机抬升并行驶至转弯点。实际轨迹(图13b中蓝色线)与期望路径(图13b中橙色线)基本吻合,且跟踪精



(a) 自动驾驶作业现场



(b) 自动驾驶作业轨迹

图13 自动驾驶作业试验

Fig. 13 Unmanned operation test

度满足田间播种作业要求,为丘陵山区无人农场构建提供了技术支撑。

5 结论

(1)为提高丘陵山区小田块油菜播种自动化和智能化水平,设计了一套全液压履带式油菜播种机自动驾驶作业系统,试验表明设计的自动驾驶作业系统能按照规划路径完成直线行驶、田头转向,播种机自动播种。能够在较少人工干预情况下完成油菜播种自动作业。

(2)以自主研发的履带式油菜播种机为基础,根据气吹式油菜播种机作业需求设计了基于有限状态机的自动作业控制策略,基于履带式油菜播种机运动学和几何学模型,制定模糊规则表,设计了一种模糊自适应纯追踪控制器。

(3)水泥路面试验表明:履带式油菜播种机行驶速度为0.8 m/s时,模糊自适应纯追踪控制器的最大跟踪偏差为0.039 m,平均绝对偏差为0.018 m。

(4)田间试验表明:模糊自适应纯追踪控制器可根据当前偏距和速度实时调节前视距离,当油菜播种机速度为0.5、0.8、1.2 m/s时,模糊自适应纯追踪控制器最大跟踪偏差分别不大于0.082、0.086、0.092 m,平均绝对偏差分别不大于0.031、0.032、0.034 m。

参考文献

- [1] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等.油菜精量播种技术研究进展[J/OL].农业机械学报,2017,48(9):1-16.
LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1-16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170901&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.001. (in Chinese)
- [2] 张漫,李宇寒,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, LI Yuhuan, 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)
- [3] 姬长英,周俊.农业机械导航技术发展分析[J/OL].农业机械学报,2014,45(9):44-54.
JI Changying, ZHOU Jun. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 44-54. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140908&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.008. (in Chinese)
- [4] 李道亮,李震.无人农场系统分析与发展展望[J/OL].农业机械学报,2020,51(7):1-12.

- LI Daoliang, LI Zhen. System analysis and development prospect of unmanned farming[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 1–12. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200701&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.001. (in Chinese)
- [5] 刘兆朋,张智刚,罗锡文,等. 雷沃 ZP9500 高地隙喷雾机的 GNSS 自动导航作业系统设计[J]. 农业工程学报,2018,34(1):15–21.
- LIU Zhaopeng, ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, et al. Design of automatic navigation operation system for Lovol ZP9500 high clearance boom sprayer based on GNSS[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(1):15–21. (in Chinese)
- [6] 张美娜,吕晓兰,陶建平,等. 农用车辆自主导航控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(7):42–47.
- ZHANG Meina, LÜ Xiaolan, TAO Jianping, et al. Design and experiment of automatic guidance control system in agricultural vehicle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(7):42–47. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160707&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.007. (in Chinese)
- [7] LI M, IMOU K, WAKABAYASHI K, et al. Review of research on agricultural vehicle autonomous guidance[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2009, 2(3):1–16.
- [8] TIIMEN B, KEES VAN R, JAN B, et al. Gerrit van straten,autonomous navigation using a robot platform in a sugar beet field[J]. Biosystems Engineering,2011,109(4):357–368.
- [9] 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/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):29–36.
- ZHANG Wenyu, DING Youchun, WANG Xueling, et al. Pure pursuit control method based on SVR inverse-model for tractor navigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 29–36. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160105&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.005. (in Chinese)
- [10] 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/OL]. 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 path tracking[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(5):21–26. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180502&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.002. (in Chinese)
- [11] 郭娜,胡静涛,王鹤,等. 基于 GPS 导航的插秧机作业控制系统[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(1):200–204.
- GUO Na, HU Jingtao, WANG He, et al. Intelligent operation control system for rice transplanter based on GPS navigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(1):200–204. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130138&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.038. (in Chinese)
- [12] 冯慧敏,高娜娜,孟志军,等. 基于自动导航的小麦精准对行深施追肥机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(4):60–67.
- FENG Huimin, GAO Na'na, MENG Zhijun, et al. Design and experiment of deep fertilizer applicator based on autonomous navigation for precise row-following[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 60–67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180407&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.007. (in Chinese)
- [13] 关卓怀,陈科尹,丁幼春,等. 水稻收获作业视觉导航路径提取方法[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(1):19–28.
- GUAN Zhuohuai, CHEN Keyin, DING Youchun, et al. Visual navigation path extraction method in rice harvesting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(1):19–28. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200102&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.002. (in Chinese)
- [14] 丁幼春,王绪坪,彭靖叶,等. 轮式谷物联合收获机视觉导航系统设计与试验[J]. 智慧农业(中英文),2020,2(4):89–102.
- DING Youchun, WANG Xuping, PENG Jingye, et al. Visual navigation system for wheel-type grain combine harvester[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(4): 89–102. (in Chinese)
- [15] 丁幼春,夏中州,彭靖叶,等. 联合收获机单神经元 PID 导航控制器设计与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(7):34–42.
- DING Youchun, XIA Zhongzhou, PENG Jingye, et al. Design and experiment of the single-neuron PID navigation controller for a combine harvester[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(7):34–42. (in Chinese)
- [16] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(3):17–24. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190302&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.002. (in Chinese)
- [17] 罗锡文,张智刚,赵祚喜,等. 东方红 X-804 拖拉机的 DGPS 自动导航控制系统[J]. 农业工程学报,2009,25(11):139–145.
- LUO Xiwen, ZHANG Zhigang, ZHAO Zuoxi, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X-804 tractor[J]. Transactions of the CSAE,2009,25(11):139–145. (in Chinese)

- [18] 李培新,姜小燕,魏燕定,等. 基于跟踪误差模型的无人驾驶车辆预测控制方法[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(10): 351–357.
LI Peixin, JIANG Xiaoyan, WEI Yanding, et al. Predictive control method of autonomous vehicle based on tracking-error model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 351–357. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171045&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.045. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(6):376–385. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210640&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.06.040. (in Chinese)
- [21] 贾全,张小超,苑严伟,等. NF-752型履带式拖拉机自动驾驶系统[J]. 农业工程,2018,8(4):24–29.
JIA Quan, ZHANG Xiaochao, YUAN Yanwei, et al. NF-752 crawler tractor automatic driving system[J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(4): 24–29. (in Chinese)
- [22] 熊斌,张俊雄,曲峰,等. 基于BDS的果园施药机自动导航控制系统[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(2):45–50.
XIONG Bin, ZHANG Junxiong, QU Feng, et al. Navigation control system for orchard spraying machine based on Beidou navigation satellite system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(2):45–50. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170206&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.006. (in Chinese)
- [23] HIROK I K, MICHIIHISA I, WONJAE C, et al. Rice autonomous harvesting: operation framework[J]. Journal of Field Robotics, 2017,34(6):1084–1099.
- [24] 王磊,廖宜涛,廖庆喜,等. 气送式油菜播种机集排器供种装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2021,52(2):75–85.
WANG Lei, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Design and test on centralized metering seed feeding device of air-assisted planter for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(2):75–85. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20210207&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.02.007. (in Chinese)
- [25] 梅杨,易子琛,王立朋,等. 基于有限状态机的五桥臂逆变器改进调制策略[J]. 电机与控制学报,2014,18(10):21–26.
MEI Yang, YI Zichen, WANG Lipeng, et al. An improved modulation strategy for the five-leg inverter based on finite state machine[J]. Electric Machines and Control,2014,18(10):21–26. (in Chinese)
- [26] 赵梓烨,刘海鸥,陈慧岩. 分布式电驱动无人高速履带车辆越野环境轨迹预测方法研究[J]. 兵工学报,2019,40(4):680–688.
ZHAO Ziye, LIU Haiou, CHEN Huiyan. Research on trajectory prediction method of distributed high speed electric[J]. Acta Armamentarii,2019,40(4):680–688. (in Chinese)
- [27] YAMAUCHI G, NAGATANI K, HASHIMOTO T. Slip-compensated odometry for tracked vehicle on loose and weak slope[J]. Robomech Journal, 2017, 4(1): 27.
- [28] 蒋建东,张钧,李聪聪,等. 履带式移动机器人自主跟随算法研究[J]. 浙江工业大学学报,2017,45(4):355–360.
JIANG Jiandong, ZHANG Jun, LI Congcong, et al. Study on autonomous following algorithm of crawler-type mobile robot[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2017,45(4):355–360. (in Chinese)
- [29] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(9):18–25. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200902&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.002. (in Chinese)