

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.004

水稻直播机自动驾驶模糊自适应控制方法

张雁¹ 李彦明¹ 刘翔鹏¹ 陶建峰¹ 刘成良¹ 李瑞川²

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 山东五征集团, 日照 262399)

摘要: 为了提高在水田等恶劣环境下作业的自主导航水稻直播机的性能,提出了一种利用模糊逻辑推理自适应调整 PD 控制器参数 K_d 的最优控制方法。首先根据水稻直播机的运动学模型,建立链式空间状态模型;然后基于链式空间状态模型,设计了 PD 控制器,并根据现场实验确定了参数 K_p 、 K_d 的取值范围,通过仿真得出了 K_p 和 K_d 的值,以及两者比值对系统稳定性和响应速度的影响;最后,提出了模糊自适应控制方法。仿真结果表明,相对于固定参数的 PD 控制器,模糊自适应控制方法超调较小、上线速度更快、稳定性较好。实地实验结果表明,该方法在水泥路面上平均绝对横向偏差小于 0.021 m,水田直线跟踪平均绝对偏差小于 0.040 m,与传统的 PD 控制和纯追踪控制相比,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: 水稻直播机;模糊控制;最优控制;稳定性

中图分类号: S223.91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)10-0030-08

Fuzzy Adaptive Control Method for Autonomous Rice Seeder

ZHANG Yan¹ LI Yanming¹ LIU Xiangpeng¹ TAO Jianfeng¹ LIU Chengliang¹ LI Ruichuan²

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

2. Shandong Wuzheng (Group) Co., Ltd., Rizhao 262399, China)

Abstract: In order to improve the performance of autonomous navigation system of direct seeding machine in paddy field and other harsh environments, an optimal control method was proposed. It can adaptively adjust PD control parameters based on fuzzy logic. According to the kinematic model of chain system, the state space model was established. Then, according to the optimal control theory, the PD controller was designed. The range of parameters of K_p was from 0.8 to 2.1 and K_d was from 1.0 to 3.5, which were determined by the field experiment. Finally, the fuzzy adaptive optimal control method was put forward. Simulation result showed that the fuzzy adaptive optimal control method can improve the stability and rapidity compared with the PD controller. The experiment results showed that the mean absolute lateral deviation of the method was less than 0.021 m on the cement pavement. And the mean absolute lateral deviation of the method in paddy field was less than 0.040 m. The method can effectively improve the stability and rapidity of the autonomous navigation control system compared with PD controller and pure pursuit controller.

Key words: rice seeder; fuzzy control; optimum control; stability

0 引言

路径跟踪控制方法是农机导航系统中的核心技术,是众多学者研究的重点和热点。

根据模型特点,路径跟踪控制算法可以分为

3 种^[1]:基于运动学模型的路径跟踪控制方法、基于动力学模型的路径跟踪控制方法以及与模型无关的路径跟踪控制方法。不同的方法应用场景不同,同时,3 种方法也各有交汇和融合。基于运动学模型的路径跟踪控制方法是在简化的二轮车模型的基础

收稿日期: 2018-04-03 修回日期: 2018-05-30
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700505)、上海市青年科技英才扬帆计划项目(18YF1411000)和上海市科技兴农推广项目(沪农科推字(2016)第1-6-1号)
作者简介: 张雁(1995—),男,博士生,主要从事智能农机研究,E-mail: zy950329@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智能装备自动驾驶研究,E-mail: ymli@sjtu.edu.cn

上提出的,通常采用最优控制、鲁棒控制等设计导航控制器^[2-5];基于动力学模型的路径跟踪控制方法是建立在牛顿第二定律的基础上设计导航控制器的^[6-7];与模型无关的路径跟踪控制方法是根据模糊控制^[8-10]、神经网络^[11-13]或 PID 控制^[14-15]等设计导航控制器。此外,纯追踪模型也受到了很多学者的重点关注,其只有一个控制参数——前视距离,很多学者提出自适应调整该参数的方法来提高导航控制系统的性能^[16-19]。

YOSHISADA 等^[20]在插秧机平台上设计了控制器,最大误差不超过 12 cm。伟利国^[21]采用滑模自校正控制方法在插秧机上进行了现场实验,直线路径跟踪精度不大于 10 cm。李逃昌^[4]采用模糊控制调整前视距离的纯追踪模型方法在插秧机平台上进行了实验,结果表明,系统具有一定的快速性,但存在一定程度的超调。

为提高水田环境作业的水稻直播机导航控制系统的稳定性和快速性,提出一种利用模糊自适应调整参数 K_d 的控制方法。

1 水稻直播机运动学模型

1.1 模型说明

在不考虑车胎与地面的相互作用下,假设车辆不发生侧滑俯仰等情况,把水稻直播机看作是两轮车模型^[22]。

水稻直播机追踪期望路径的示意图如图 1 所示,图中 C 为设定跟踪的期望路径, M 为后轮轴中心,即车体的控制点, P 点为车体离目标路径最近点;假设 P 点是唯一的,当水稻直播机始终靠近 P 点时,假设是可以满足的; s 是沿着 C 方向在 M 点处的曲线坐标, $C(s)$ 表示期望路径 C 在这一点曲率; d_e 为相对于期望路径的横向位置误差。本文规定当水稻直播机在期望路径的右侧时横向位置误差为正($d_e > 0$),当水稻直播机在期望路径左侧时横向偏差为负($d_e < 0$); θ_e 为相对于期望路径的航向偏差; δ 为前轮期望转角; L 为车轮轴距; V 是行进速度。

1.2 状态空间模型

为了便于计算,现提出如下假设:控制变量为农机车速和前轮期望转角;直播机为刚性体; $1 - d_e C(s) \neq 0$; $\theta_e \neq \pi/2$ 。 $1 - d_e C(s) \neq 0$ 表明此时后轮轴中心与曲线坐标的曲率中心重合,直播机靠近路径行驶时,这种情况不会发生。

设直播机模型的状态变量和控制变量为 $\mathbf{X} = [s \ d_e \ \theta_e]^T$ 和 $\mathbf{U} = [V \ \delta]^T$ 。

水稻直播机模型的状态方程^[22-24]为

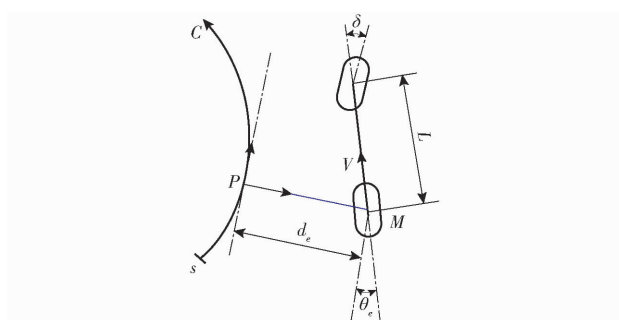


图 1 水稻直播机与期望路径的位置关系

Fig. 1 Position relationship between rice planting machinery and expected path

$$\begin{cases} \dot{s} = \frac{V \cos \theta_e}{1 - d_e C(s)} \\ \dot{d}_e = V \sin \theta_e \\ \dot{\theta}_e = V \left(\frac{\tan \delta}{L} - \frac{C(s) \cos \theta_e}{1 - d_e C(s)} \right) \end{cases} \quad (1)$$

1.3 模型的链式形式

根据两输入系统的链式形式^[25],有

$$\begin{cases} \dot{a}_1 = m_1 \\ \dot{a}_2 = a_3 m_1 \\ \dot{a}_3 = m_2 \end{cases} \quad (2)$$

设 $\mathbf{A} = [a_1 \ a_2 \ a_3]^T$ 和 $\mathbf{M} = [m_1 \ m_2]^T$ 分别为状态变量和控制变量。为了更好地说明式(2)是线性的,设

$$\begin{cases} \frac{da_i}{da_1} = a'_i \\ m_3 = \frac{m_2}{m_1} \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

则式(2)可写为

$$\begin{cases} a'_1 = 1 \\ a'_2 = a_3 \\ a'_3 = m_3 \end{cases} \quad (4)$$

则式(4)是一个线性系统。由于控制律的参数独立于水稻直播机速度,驱使线性系统变化的变量 a_1 在水稻直播机行驶的路径上是平均分布的;因此,可以设定

$$a_1 = s \quad (5)$$

为了简化计算,通过式(5)可以将非线性农机模型(式(1))转换成链式形式(式(2)和式(4))。为了与链式模型(式(2))保持一致,控制变量 m_1 被定义为

$$m_1 \triangleq \dot{a}_1 = V \frac{\cos \theta_e}{1 - d_e C(s)} \quad (6)$$

为了便于计算,设

$$a_2 = d_e \quad (7)$$

的取值越大,系统的超调减小,而且快速性也好。因此,在现场实验时应该找一组较好的控制参数,并且能够自适应调整。

2 模糊自适应的 PD 控制器

根据 1.4 节和 1.5 节的结论,当 K_p 和 K_d 比值越大快速性越好,稳定性越差;相反,比值越小,稳定性越好,快速性变差。则 K_p 固定为 1.2,然后利用模糊方法的自适应调整控制律参数 K_d ,这样可以提高自主导航控制系统的稳定性和快速性,为此提出了一种模糊自适应的调整控制律参数的控制方法。

2.1 模糊控制器设计

2.1.1 输入输出变量模糊化

以横向偏差 d_e 和航向偏差 θ_e 为模糊控制器的输入,控制律参数 K_d 为其输出;首先对输入输出变量进行模糊化。

(1) 横向偏差为 d_e ,基本论域为 $[-0.5\text{ m},0.5\text{ m}]$,量化等级为 $\{-5,-2.5,0,2.5,5\} = \{\text{NB},\text{NM},\text{Z},\text{PM},\text{PB}\}$,量化因子取 10。

(2) 航向偏差为 θ_e ,基本论域为 $[-30^\circ,30^\circ]$,量化等级为 $\{-5,-2.5,0,2.5,5\} = \{\text{NB},\text{NM},\text{Z},\text{PM},\text{PB}\}$,量化因子取 1/6。

(3) 控制律参数 K_d 。基本论域为 $[1,3.5]$,量化等级为 $\{1,1.63,2.25,2.83,3.5\} = \{\text{Z},\text{S},\text{M},\text{L},\text{VL}\}$,比例因子取 1。

2.1.2 模糊规则设计原则

横向偏差和航向偏差越小,参数 K_d 越大,则 K_p/K_d 的比值越小,增加系统的稳定性。

横向偏差越大,或者航向偏差越大,参数 K_d 越小,则 K_p/K_d 的比值越大,增加系统的响应速度。

2.1.3 隶属度函数

横向偏差、航向偏差以及输出变量控制参数 K_d 的隶属度函数均为高斯函数,横向偏差的隶属度函数如图 5 所示。

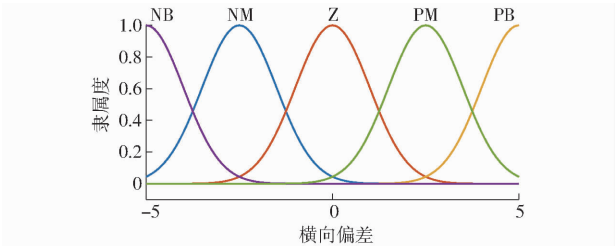


图 5 隶属度函数
Fig.5 Membership function

根据量化等级和模糊规则可以设计模糊控制规则表,如表 1 和图 6 所示。

表 1 模糊控制规则
Tab.1 Fuzzy control regulation

θ_e	d_e				
	NB	NM	Z	PM	PB
NB	Z	S	M	S	Z
NM	S	M	L	M	S
Z	M	L	VL	L	M
PM	S	M	L	M	S
PB	Z	S	M	S	Z

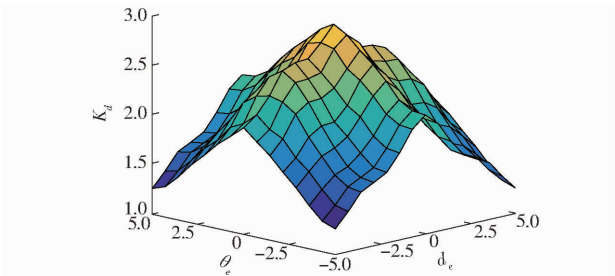


图 6 模糊规则曲面
Fig.6 Surface of fuzzy regulation

2.2 模糊自适应控制器仿真

另外,在相同的条件下,进行了模糊自适应调整控制参数 K_p 和 K_d 的比值和固定 K_p 与 K_d 比值 ($K_p = 1.2, K_d = 1.2$) 的仿真实验,结果如图 7 所示。

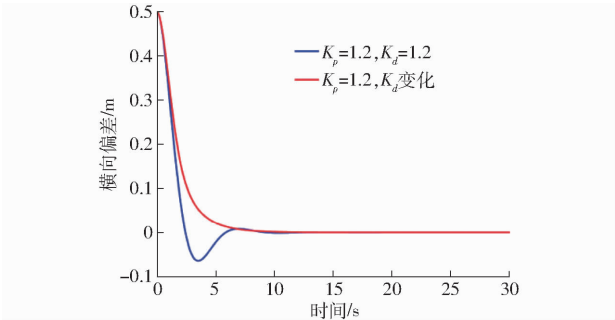


图 7 不同方法的横向偏差对比
Fig.7 Comparison of lateral deviation of different methods

从仿真结果可以得到,自适应调整控制参数的方法不仅使系统具有较好的响应速度,而且没有超调。

3 实验验证

3.1 实验平台

以上海世达尔公司的洋马 VP6 型水稻直播机为实验平台,如图 8 所示,经机电一体化改造后,搭载由北斗导航 GNSS 定位系统、自动转向系统、导航主控制器、转向角检测模块组成的自主导航控制系统。分别在上海松江农业推广站试验田附近的水泥地面上和水田环境下进行了验证实验。

3.2 确定参数实验

参考仿真模型的数据即 $K_p = 1.2, K_d = 1.8$,首



图8 实验平台

Fig.8 Experiment platform

先在水泥地面上对控制参数进行了整定。设定期望跟踪路径为直线 AB ,并设定水稻直播机所在位置距离直线 AB 的初始横向偏差为 0.50 m ,航向偏差为 0° ;主变速手柄被设定在前进挡位,由变速踏板控制器设定行走速度恒为 0.8 m/s ,更改 K_p 与 K_d 比值,导航控制系统的横向偏差曲线如图9所示。

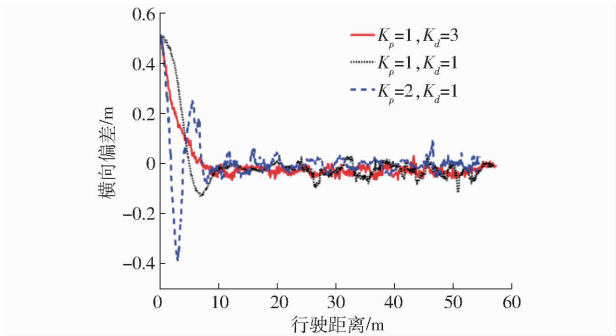


图9 不同比例系数的横向偏差曲线

Fig.9 Transverse deviation curves of different ratios of K_p/K_d

从图9可以看出,在一定范围内, K_p/K_d 的比值越大,导航系统的响应时间越短,响应速度越快,上线距离越短;同时,超调也越大; K_p/K_d 的比值越小,导航控制系统的响应速度越慢,上线距离越长;但超调小,甚至没有超调($K_p/K_d = 1/3$)时,系统的稳定性较好,精度较高。这与2.2节仿真的结论是一致的。

进一步处理上面的数据,可以得到导航控制系统稳定后(误差见图10)不同 K_p/K_d 比值的跟踪效

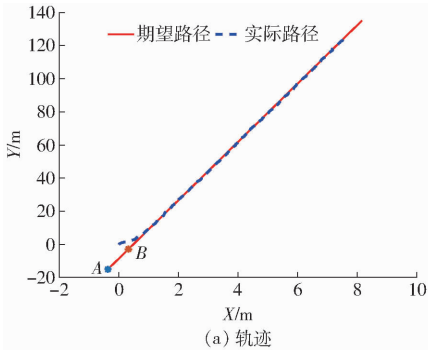


图11 水泥地面路径跟踪的实验结果

Fig.11 Track curve and lateral deviation curve of cement experiment

果如表2所示。

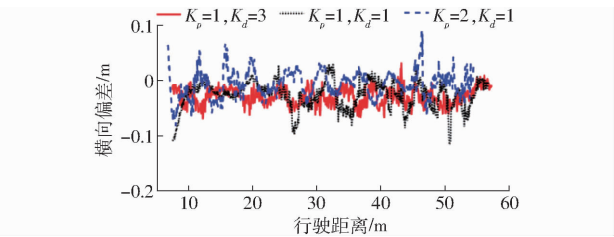


图10 系统稳定后的横向偏差曲线

Fig.10 Transverse deviation curves after system stability

表2 直线路径跟踪偏差

Tab.2 Linear path tracking error

K_p/K_d	平均偏差	平均绝对偏差	最大偏差	标准差
1/3	-0.028 4	0.028 8	0.069 2	0.015 6
1	-0.026 3	0.028 6	0.114 7	0.025 5
2	-0.026 2	0.020 0	0.094 2	0.024 6

从图10和表2可得,导航控制系统存在一定的稳态误差; $K_p/K_d = 1/3$ 时,标准差为 0.0156 m ,小于其他两种比值的标准差(0.0255 m 和 0.0246 m)。 K_p/K_d 的取值较小时,导航控制系统的稳定性相对较好。

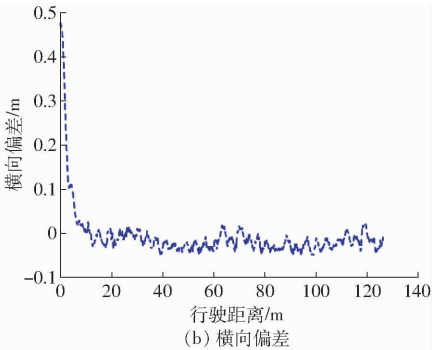
最后,经过反复测试,确定了参数 K_p 和 K_d 的取值范围分别为 $[0.8, 2.1]$ 和 $[1, 3.5]$ 。根据第2节设计的模糊自适应控制器,分别进行了水泥地面和水田环境的路径跟踪实验。

3.3 水泥地面实验

首先,在水泥地面实验时,直播机挂载播种器,设定期望跟踪路径为直线 AB ,并设定直播机所在位置距离直线 AB 的初始横向偏差为 0.50 m ,航向偏差为 0° ;主变速手柄被设定在前进挡位,由变速踏板控制器设定行走速度为 0.8 m/s 。

如图11所示,导航控制系统上线距离为 4.3 m ,无超调,稳定后最大横向偏差为 0.0398 m 。对导航控制系统稳定后(偏差见图12)的数据进行分析,其结果如表3所示。

将该组数据与3.2节固定 K_p/K_d 的数据进行对



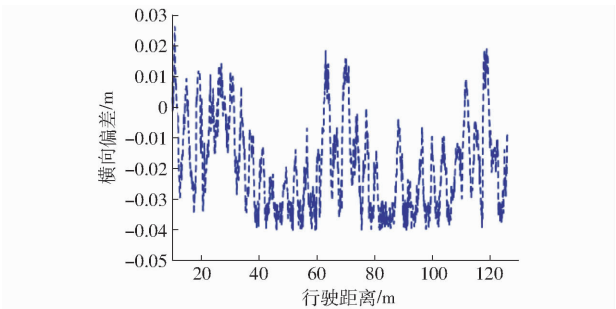


图 12 系统稳定后的横向偏差曲线(水泥地面)

Fig. 12 Lateral error after system stability (cement pavement)

表 3 直线路径跟踪偏差(水泥地面)

Tab. 3 Linear path tracking error m				
参数	平均偏差	平均绝对偏差	最大偏差	标准差
数值	-0.018 1	0.020 9	0.039 8	0.027 5

比,结果如图 13 所示。由表 2、3 和图 13 可见,模糊自适应 PD 控制器直线跟踪的平均偏差和最大偏差等性能指标相对于未使用模糊调整的 PD 控制器均较好。模糊自适应 PD 控制器直线跟踪的平均绝对偏差比前两组控制器($K_p=1, K_d=3$ 和 $K_p=1, K_d=1$)小,与 $K_p/K_d=2$ 的控制器的平均绝对偏差基本相当。可见,自适应调整控制律参数的控制方法较

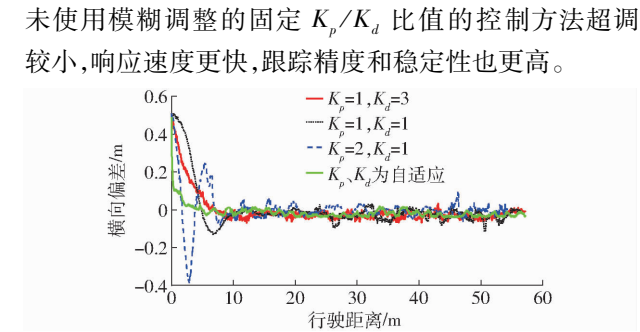
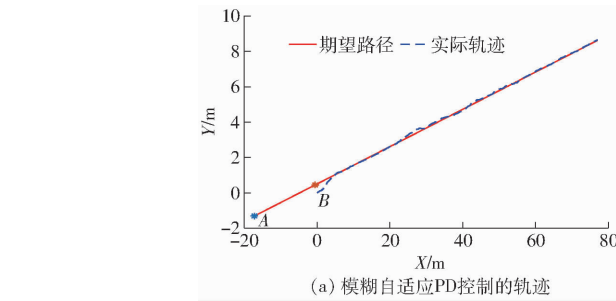


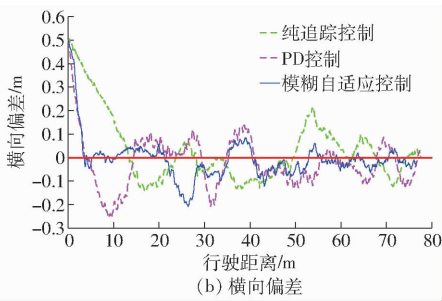
图 13 模糊自适应的横向偏差曲线

Fig. 13 Lateral deviation curves of different K_p/K_d

3.4 水田环境实验

按照 3.2 节的实验设定和实验步骤,对在水田环境下导航系统的路径跟踪效果进行了实验。为了对比模糊自适应控制方法与传统方法的控制效果,在水田里还进行了固定 PD 参数的 PD 控制方法和纯追踪控制方法的实验。其中 PD 控制实验中取 K_p 为 1.2, K_d 为 2.2;纯追踪控制实验中取前视距离为 1.2 m。

如图 14 所示,导航控制系统上线距离约为 6 m,超调为 0.04 m,说明导航控制系统具有较好的快速性。



导航控制系统稳定后(偏差见图 15 和表 4),模糊自适应 PD 控制的最大偏差为 0.208 8 m,比固定参数的 PD 控制器和纯追踪控制器的最大偏差都要小。同时模糊自适应控制的平均绝对偏差为 0.039 0 m,比固定参数的 PD 控制器和纯追踪控制器的偏差都要小,总体精度更高。模糊自适应 PD 控制的标准差为 0.073 6 m,也比固定参数的 PD 控制和纯追踪控制小,路径跟踪更为稳定。从图 14 还

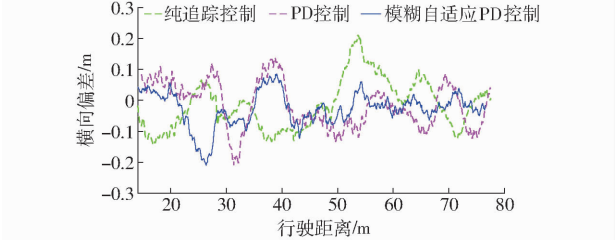


图 15 系统稳定后的横向偏差曲线(水田环境)

Fig. 15 Lateral error after system stability (paddy field)

可以看到,模糊自适应 PD 算法可在复杂环境下自动调整 K_d ,相较于其他两种算法,超调较小,响应较快。这与理论分析和仿真的结果是一致的。

表 4 水田直线路径跟踪偏差

Tab. 4 Linear path tracking error m				
控制方法	平均偏差	平均绝对偏差	最大偏差	标准差
本文方法	-0.023 0	0.039 0	0.208 8	0.073 6
PD 控制	-0.017 3	0.064 7	0.209 3	0.073 8
纯追踪控制	-0.016 2	0.065 6	0.210 4	0.078 5

根据以上对比实验,可以得出:

- (1) 从图 9、11、14、15 可以看出,基于模糊自适应 PD 控制器的自主导航系统具有较好的响应速度、跟踪精度和稳定性。
- (2) 从表 2~4 可知,导航系统存在稳态误差,这是由于车体坐标系与导航坐标系以及前轮角位移

传感器的对称零点误差导致的。

(3) 在水田环境作业时,由于导航控制系统没有添加姿态补偿,导致车体发生严重侧滑侧偏时,定位误差变大,严重影响了导航系统的跟踪精度和稳定性,大大降低了导航精度。可以通过惯性传感器测量车身姿态改善这一问题。

4 结论

(1) 在建立水稻直播机运动学模型的基础上,基于链式空间状态模型设计了 PD 控制器。

(2) 建立了水稻直播机的仿真模型,通过仿真得出了 K_p 和 K_d 的值,以及两者比值对系统

稳定性和响应速度的影响,基于仿真结论提出了一种模糊自适应控制方法,并通过仿真验证了该模糊自适应控制方法的快速性、准确性和稳定性。

(3) 通过现场实验确定了控制参数的取值范围。为了验证方法的有效性,在水泥地面和水田环境进行了实验,实验结果表明,所提出的方法在水田环境下平均绝对偏差为 0.039 0 m,最大偏差为 0.208 8 m,相较于固定参数的 PD 控制器和纯追踪控制方法,具有更小的偏差和超调,响应更快,鲁棒性更好,有效提高了水稻直播机在水田环境下导航控制系统的稳定性和快速性。

参 考 文 献

- 胡静涛,高雷,白晓平,等. 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 农业工程学报,2015,31(10):1-10.
HU Jingtao, GAO Lei, BAI Xiaoping, et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(10):1-10. (in Chinese)
- O'CONNOR M L. Carrier-Phase differential GPS for automatic control of land vehicles[D]. Palo Alto: Stanford University,1997:1-194.
- O'CONNOR M, BELL T, ELKAIM G, et al. Automatic steering of farm vehicles using GPS[J]. Precision Agriculture, 1996(3):767-777.
- 李逃昌. 基于级联式控制策略的农业机械自动导航控制方法研究[D]. 沈阳:中国科学院沈阳自动化研究所,2014.
LI Taochang. Research on automatic navigation control method based on cascaded control strategy for agricultural machinery[D]. Shenyang:Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences,2014. (in Chinese)
- 白晓平,胡静涛,高雷,等. 农机导航自校正模型控制方法研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(2):1-7. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150201&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.001.
BAI Xiaoping, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Self-tuning model control method for farm machine navigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(2):1-7. (in Chinese)
- ZHANG Q, QIU H. A dynamic path search algorithm for tractor automatic navigation[J]. Transactions of the ASAE, 2004,47(2):639-646.
- EATON R, POTA H, KATUPITIYA J. Path tracking control of agricultural tractors with compensation for steering dynamics[C]// Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control, Shanghai, China, 2009:7357-7362.
- 王宇. 插秧机自动导航控制系统的设计与研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2016.
WANG Yu. Design and reasearch of automatic navigation control system for transplanters[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University,2016. (in Chinese)
- 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):148-153.
LIU Zhaoxiang, LIU Gang, JI Ying, et al. Autonomous navigation system for agricultura tractor based on self-adapted fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(11):148-153. (in Chinese)
- 周建军,张漫,汪懋华,等. 基于模糊控制的农用车路线跟踪[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)
- NOGUCHI N, TERAOKA H. Path planning of an agricultural mobile robot by neural network and genetic algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1997,18:187-204.
- 陈军,朱忠祥,鸟巢凉,等. 基于神经网络的农用车自动跟踪控制[J]. 农业机械学报,2007,38(5):131-134.
CHEN Jun, ZHU Zhongxiang, TOROSU Ryo, et al. Automatic on-tracking control of farm vehicle based on neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(5):131-134. (in Chinese)
- 白晓鸽. 基于模糊神经网络的拖拉机自动直线行走控制研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2010.
BAI Xiaoge. Research on automatic straight line control of tractor based on fuzzy neural network[D]. Yangling:Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)
- 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)
- 黎永键,赵祚喜,黄培奎,等. 基于 DGPS 与双闭环控制的拖拉机自动导航系统[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(2):11-

19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170202&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.002.
- LI Yongjian, ZHAO Zuoxi, HUANG Peikui, et al. Automatic navigation system of tractor based on DGPS and double closed-loop steering control[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(2):11–19. (in Chinese)
- 16 汪小岳, 鲁伟, 陈满, 等. 基于改进纯追踪模型的温室采摘运输自动跟随系统[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(12):8–13. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161202&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.002.
- WANG Xiaochan, LU Wei, CHEN Man, et al. Automatic following system for greenhouse harvesting transportation based on adaptive pure pursuit model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(12):8–13. (in Chinese)
- 17 李逃昌, 胡静涛, 高雷, 等. 基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法[J/OL]. 农业机械学报, 2013,44(1):205–210. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130139&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.039.
- LI Taochang, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Agricultural machine path tracking method based on fuzzy adaptive pure pursuit model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(1):205–210. (in Chinese)
- 18 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. 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.
- 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. (in Chinese)
- 19 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160105&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.005.
- 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. (in Chinese)
- 20 YOSHISADA N, NAONOBU U, YUTAKA K, et al. Autonomous guidance for rice transplanting using global positioning and gyroscopes[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004,43(3):223–234.
- 21 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 Ligu. A research on multimode variable structure intelligent control method for agricultural machinery navigation[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2015. (in Chinese)
- 22 LENAIN R, THUÏLOT B, CARIOU C, et al. A new nonlinear control for vehicle in sliding conditions: application to automatic guidance of farm vehicles using RTK GPS[C]// Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004,5:4381–4386.
- 23 THUÏLOT B, CARIOU C, MARTINET P, et al. Automatic guidance of a farm tractor relying on a single CP–DGPS[J]. Autonomous Robots, 2002,13(1):53–71.
- 24 MICAELLI A, SAMSON C. Trajectory tracking for unicycle-type and two steering-wheels mobile robots, 2097[R]. Sophia Antipolis: INRIA, 1993.
- 25 SAMSON C. Control of chained systems application to path following and time-varying point stabilization of mobile robots[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002,40(1):64–77.