

基于模糊 Stanley 模型的农机全田块路径跟踪算法研究

崔冰波^{1,2} 孙 宇¹ 吉 峰¹ 魏新华^{1,2} 朱永云^{1,2} 章少岑¹

(1. 江苏大学农业工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 为实现农业机械全田块高效自主作业,提出一种增益系数自适应的 Stanley 模型路径跟踪算法。以横向偏差和航向偏差为输入变量构建隶属度函数,设计模糊推理和解模糊化过程实时确定控制模型增益系数,提高 Stanley 模型对不同曲率路径的自适应能力。为验证所提算法有效性,以移动小车为平台开展联合收获机回字形全田块自主作业路径跟踪试验,结果表明所提算法显著改善 Stanley 模型路径跟踪精度,直线作业速度 2.5 m/s、转弯速度 1 m/s 时,直线段和曲线段最大跟踪误差均小于 3 cm。大初始横向偏差路径跟踪试验表明,模糊 Stanley 模型较 Stanley 模型大幅度减小路径跟踪上线距离,满足农业机械全田块高效自动导航作业要求。

关键词: 农业机械; 自动导航; 路径跟踪; Stanley 模型; 模糊算法

中图分类号: S24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)12-0043-06 OSID: 

Study on Whole Field Path Tracking of Agricultural Machinery
Based on Fuzzy Stanley Model

CUI Bingbo^{1,2} SUN Yu¹ JI Feng¹ WEI Xinhua^{1,2} ZHU Yongyun^{1,2} ZHANG Shaocen¹

(1. School of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Key Laboratory of Modern Agriculture and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The unmanned operation of agricultural machinery in whole field is an important part of unmanned farms. In order to perform high-efficiency autonomous navigation in field, an improved Stanley path tracking control model based on fuzzy algorithm was proposed, where the control gain was adaptively changed according to the tracking error. Base on the kinematics model and Stanley model, the whole field tracking method of agricultural machinery was studied. Firstly, the membership function was constructed by using lateral deviation and heading deviation as the input variables. Fuzzy inference rules were designed by analyzing and summarizing the experimental data. In order to determine the gain coefficient of the control model, the center of gravity method was used as the defuzzification method, which improved the adaptivity of the Stanley model under complicated path condition. In order to verify the effectiveness of proposed algorithm, a mobile vehicle equipped with GNSS navigation system was used as the experimental platform, where the whole field path tracking of combine harvester was tested and discussed. Experiment results indicated that when the operation speed of straight line was at 2.5 m/s, and the turning speed was at 1 m/s, the maximum error of whole field path tracking was less than 3 cm. When the initial lateral deviation was 3 m, the distance of guided trajectory was no more than 5 m, which improved the path tracking accuracy of the conventional Stanly model significantly. The proposed algorithm satisfied the need of efficient automatic navigation operations for agricultural machinery in the whole farmland field.

Key words: agricultural machinery; automatic navigation; path tracking; Stanley model; fuzzy algorithm

0 引言

农业机械(简称农机)智能化是无人农场和智

慧农业的重要支撑,而自动导航是智能化农机的核心技术^[1]。农机自动导航为疫情防控和粮食安全提供了重要保障。路径跟踪算法控制农机沿预定轨

收稿日期: 2022-01-03 修回日期: 2022-02-21
基金项目: 国家自然科学基金项目(31901416)、江苏省重点研发计划项目(BE2021313)、上海市科技兴农项目(沪农科推字[2019]第4-3号)、中国博士后科学基金项目(2019M651745)和省部共建现代农业装备与技术协同创新中心项目
作者简介: 崔冰波(1986—),男,副研究员,主要从事农机导航及智能农业装备研究,E-mail: cuibingbo@ujs.edu.cn

迹实现自主行驶,是农机田间无人化自主作业的重要环节^[2-3]。

农业机械常用路径跟踪控制方法包括 PID 控制、纯追踪控制、Stanley 控制、神经网络控制和最优控制等^[4-6]。BORAH 等^[7]提出一种基于滚动时域的改进纯追踪控制算法,解决农机高速作业下跟踪效果不理想问题。MOGENS 等^[8]基于线性时变模型预测控制研究农机在特定约束条件下的路径跟踪控制,取得了较高的跟踪精度。张华强等^[9]提出一种基于粒子群优化算法实时确定前视距离的改进纯追踪控制算法,提高了直线跟踪精度。王辉等^[10]提出一种基于预瞄追踪模型的农机路径跟踪控制算法,提高了农机复杂路面抗干扰能力。

Stanley 模型是一种基于横向跟踪误差的非线性反馈函数,其横向跟踪误差以指数收敛于零^[11-12],但其在农业机械自动导航上的应用报道较少。为提高农业机械全田块自主作业导航精度和稳定性,本文提出一种基于改进 Stanley 模型的路径跟踪控制算法,采用模糊算法实现控制增益系数的自适应调整,提高农机自动转弯路径跟踪精度,并减小初始误差较大时的上线距离。以移动小车为试验平台,进行联合收获机全田块作业路径跟踪试验,以验证算法的有效性。

1 Stanley 路径跟踪算法

如图 1 所示,Stanley 模型前轮期望转角的控制输入由两部分组成,分别为横向偏差与航向偏差

$$\delta(t) = \delta_e(t) + \delta_\theta(t) \tag{1}$$

式中 $\delta(t)$ ——期望转角
 $\delta_e(t)$ ——横向偏差引起的期望转角
 $\delta_\theta(t)$ ——航向偏差引起的期望转角

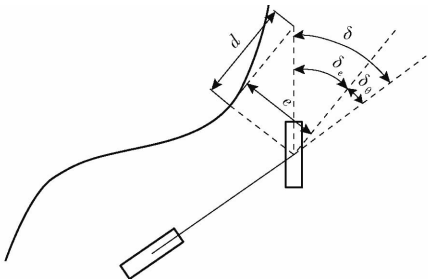


图 1 Stanley 模型示意图
Fig.1 Schematic of Stanley model

单独考虑横向偏差影响,横向偏差越大前轮期望转角越大,假设车辆预期轨迹在距离前轮 $d(t)$ 处与给定路径上最近点切线相交,根据几何关系得出非线性比例函数

$$\delta_e(t) = \arctan \frac{e(t)}{d(t)} = \arctan \frac{ke(t)}{v(t)} \tag{2}$$

式中 k ——增益系数 $e(t)$ ——横向偏差
 $v(t)$ ——行驶速度

单独考虑航向偏差的影响,前轮偏角与给定路径切线方向一致,此时前轮期望转角等于车辆航向与最近路径点切线方向之间的夹角

$$\delta_\theta(t) = \theta_e(t) \tag{3}$$

式中 $\theta_e(t)$ ——航向偏差

综合考虑这两方面的影响,得出前轮期望转角函数为

$$\delta(t) = \theta_e(t) + \arctan \frac{ke(t)}{v(t)} \tag{4}$$

2 参数自适应方法

常用的参数自适应方法有智能搜索算法、神经网络算法和模糊算法等^[13]。智能搜索算法主要包括遗传算法、粒子群优化算法以及差分进化算法^[14-16]。神经网络算法根据激励函数的不同可分为 BP 神经网络、RBF 神经网络、PNN 神经网络以及 GRNN 神经网络等^[17-20]。相较于其他参数自适应方法,模糊算法具有计算量小、实时性好、鲁棒性强、适合单片机系统等优点^[21],本文采用模糊算法对 Stanley 模型增益系数进行动态调整。

由式(4)可知,Stanley 模型增益系数决定横向偏差对车轮转角影响的权重。增益系数较大可以快速减小横向偏差,使农机快速行驶至规划路径上,但是过大的增益系数会造成直线跟踪的振荡。增益系数较小可以使农机运行平稳,降低算法收敛时的稳态跟踪误差,但初始大横向误差条件下收敛速度较慢。因此针对不同的横向偏差,应选取时变的增益系数,尤其是对初始大误差下上线距离和转弯对行精度要求较高的全田块路径跟踪。除此之外,航向偏差与横向偏差对车轮转角的影响具有方向性。当横向偏差与航向偏差对车轮转角作用方向相同时,可适当减小增益系数,使控制更加平稳。反之,当横向偏差与航向偏差对车轮转角作用方向相反时,可适当增大增益系数,提高算法收敛速度。

考虑农机实际工作情况,以横向偏差和航向偏差为输入变量构建隶属度函数,限定前轮最大转角为 35° ,初步制定模糊推理规则。以横向偏差最大值和标准差为观测量,进行多次试验,寻找不同误差输入下最优的增益系数,修正模糊推理表。

2.1 隶属度函数构建

如图 2 所示,将横向偏差的论域确定为 $[-3\text{ m}, 3\text{ m}]$ 。横向偏差右大、右中、右小、零、左小、左中、左大分别对应 NP、NM、NS、ZO、PS、PM、PB。

如图 3 所示,将航向偏差的论域确定为 $[-30^\circ,$

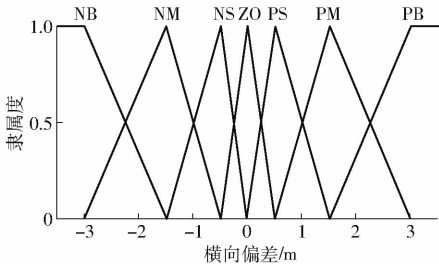


图 2 横向偏差隶属度函数

Fig. 2 Membership function of lateral deviation

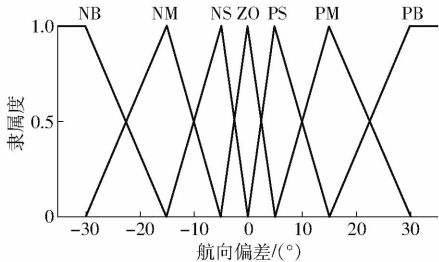


图 3 航向偏差隶属度函数

Fig. 3 Membership function of heading deviation

30°]。航向偏差右大、右中、右小、零、左小、左中、左大分别对应 NP、NM、NS、ZO、PS、PM、PB。

如图 4 所示,将增益系数的论域确定为 [0, 1.2]。增益系数零、小、中、大分别对应 ZO、PS、PM、PB。

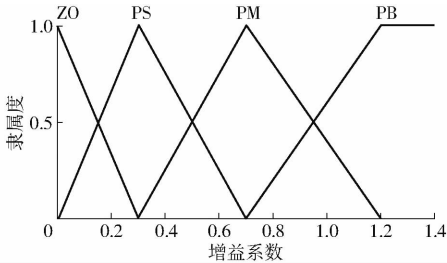


图 4 增益系数隶属度函数

Fig. 4 Membership function of gain coefficient

2.2 模糊推理表设计

模糊推理表具体规则为:航向偏差较小时,横向偏差越大,增益系数越大;航向偏差与横向偏差对车轮转角影响方向相同,航向偏差越大,增益系数越小;航向偏差与横向偏差对车轮转角影响方向相反,航向偏差越大,增益系数越大;航向偏差较大时,与横向偏差对前轮转角影响方向相同,选较小增益系数;航向偏差较大时,与横向偏差对前轮转角影响方向相反,选较大增益系数。据此,共总结 49 条模糊推理规则,并通过试验进行修正,制定如表 1 所示的模糊推理规则表。

2.3 解模糊化方法确定

解模糊化常用的方法有最大隶属度法、重心法和加权平均法等^[22]。重心法在工业上使用广泛,输出平滑,因此选择重心法作为解模糊化的方法,其计

表 1 模糊推理规则

Tab. 1 Rule base for fuzzy logic control

航向	横向偏差						
偏差	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	PS	PS	PM	PB	PB	PB
NM	PM	PS	PS	PS	PM	PB	PB
NS	PM	PM	PS	PS	PM	PM	PB
ZO	PM	PM	PS	PS	PS	PM	PM
PS	PB	PM	PM	PS	PS	PM	PM
PM	PB	PB	PM	PS	PS	PS	PM
PB	PB	PB	PB	PM	PS	PS	PS

算公式为^[23]

$$u_0 = \frac{\sum_{k=1}^m u_k \mu_k(u_k)}{\sum_{k=1}^m \mu_k(u_k)} \tag{5}$$

式中 u_0 ——输出系数 m ——级数
 u_k ——各级系数 $\mu_k(u_k)$ ——隶属度

3 试验与结果分析

3.1 试验平台搭建

为了验证算法的有效性,搭建移动小车仿真试验平台。基站接收机型号为 NovAtel OEM719、流动站接收机型号为 OEM718D。双天线 RTK 模式下定位精度 1 cm + 1ppm,其中 1ppm 表示离基站距离每超过 1 km 定位误差增加 1 mm。天线基线长 2 m 时定向精度 0.08°,测量更新率 5 Hz。电机驱动器型号为 RMDS405,支持 30 A 电流。编码器型号为欧姆龙 E6B2,分辨率可达 3 600 p/r(即转一圈输出 3 600 脉冲)。

移动小车试验平台结构如图 5 所示,接收机通过天线和电台同时接收卫星信号和基站差分改正数,进行 RTK 定位解算,实时输出高精度位置与航向信息至导航上位机。上位机通过计算,输出当前位置与规划路径间的横向偏差、航向偏差。下位机根据导航偏差计算出期望转向角,通过 CAN 总线以频率 5 Hz 将控制信息发送至电机驱动器。电机驱动器将控制信息转换为电压,并实时接收编码器的反馈,组成闭环控制系统,以频率 100 Hz 控制电机。

3.2 路径规划方案

为验证算法对全田块农机路径跟踪不同阶段适应性,模拟收获机作业进行全田块路径跟踪试验,其中收获机作业路径采用外圈回字形,内圈 AB 线辅助导航的混合导航方式,不仅解决无动力换向功能收获机的全田块自动驾驶难题,而且有效提高收获机作业效率,其全田块路径规划方案如图 6 所示。

收获机按顺序依次进行收获作业,当剩余田块

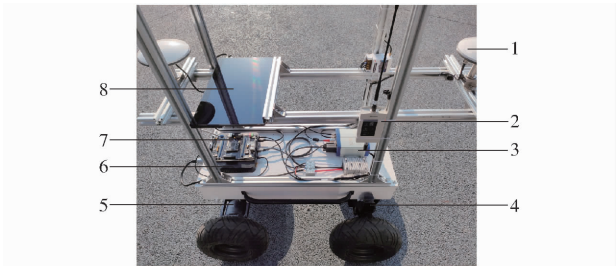


图5 路径跟踪算法验证平台

Fig. 5 Setup for path tracking system verification

1. 天线 2. 电台 3. 接收机 4. 编码器 5. 电机 6. 上位机
7. 下位机 8. 显示屏

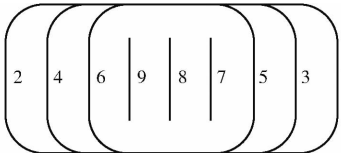


图6 联合收获机全田块路径规划示意图

Fig. 6 Field path planning schematic of combine harvester

宽度小于收获机自动转弯所需尺寸时,在最后一行直线段向驾驶员发出信号,并自动切换至人工辅助驾驶模式。收获机全田块作业过程分为上线阶段、直线跟踪阶段和曲线跟踪阶段,其中直线跟踪阶段在算法改进前已有较好的跟踪效果,故本次试验重点研究上线阶段以及曲线跟踪阶段。

3.3 试验结果分析

小车直线跟踪阶段平均行驶速度约为 2.5 m/s,过渡到曲线跟踪阶段时速度自动降为 1 m/s 左右。图 7 为上线阶段行驶轨迹,由图 7 可知,改进后小车上线速度明显加快,初始横向偏差 3 m 时上线距离不超过 5 m。图 8 为曲线跟踪阶段小车行驶轨迹,曲线段横向偏差与航向偏差始终处于变化状态。固定增益系数的 Stanley 模型难以取得良好的路径跟踪效果,采用模糊算法改进后其增益系数根据导航偏差自适应调整,路径跟踪精度明显提高。

采用模糊算法改进前后的路径跟踪横向误差如图 9 所示。直线跟踪时,模糊 Stanley 模型减小了路径跟踪的上线距离,10 m 以后 2 种方法的稳态误差无明显差异,最大横向误差小于 3 cm,标准差小于 1 cm。曲线跟踪阶段的稳态误差改善明显,路径跟踪误差最大值由 28 cm 下降为 3 cm,满足转弯对行精度要求。试验过程发现直线路径跟踪存在明显的稳态误差,其可能原因包括转向系统机械间隙和天线基线偏角引起的系统误差。前者在农业机械上影响可以忽略,后者可以通过作业现场标定进一步补偿^[24]。

为验证所提模糊 Stanley 模型的全田块自主作

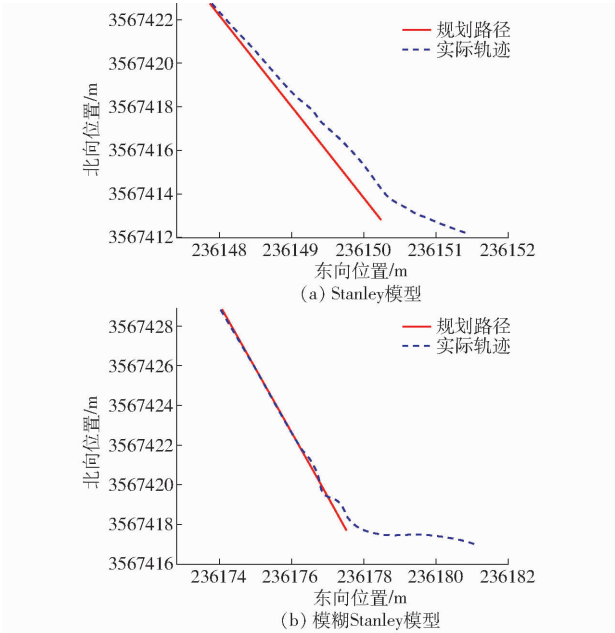


图7 大初始偏差上线阶段行驶轨迹

Fig. 7 Guided trajectory of large initial lateral error

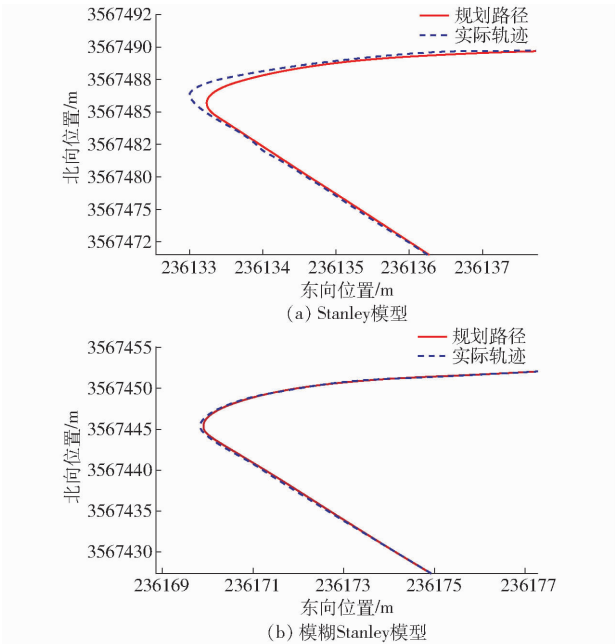


图8 转弯曲线跟踪阶段行驶轨迹

Fig. 8 Curves of trajectory of turning

业适应性,基于图 6 所示的联合收获机全田块作业路径开展试验分析。为改善无人自主收获作业效率,采用混合路径规划实现其全田块导航,其中外圈为回字形路径,内圈采用 AB 线导航作业。路径跟踪轨迹如图 10 所示,由图 10 可知,路径跟踪算法整体跟踪效果良好,具体跟踪误差见表 2。采用模糊 Stanley 模型不仅改善了路径跟踪的上线速度,也显著减小了转弯掉头时曲线路径跟踪误差,满足农业机械全田块路径跟踪的需求。

3.4 联合收获机田间试验

以约翰迪尔 C230 型轮式联合收获机为试验对

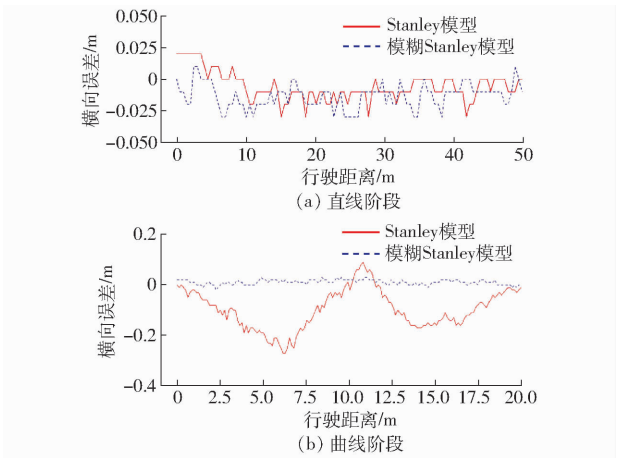


图 9 模糊 Stanley 模型横向误差

Fig. 9 Lateral error of fuzzy-based Stanley model

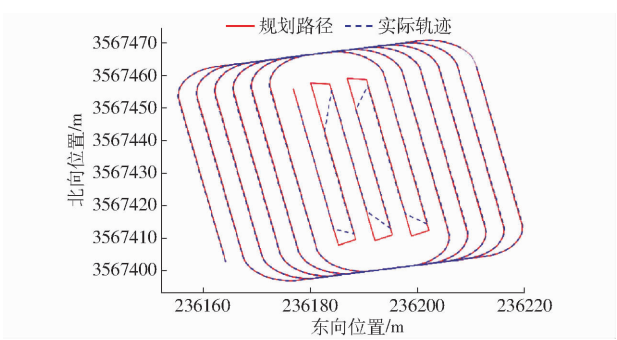


图 10 全田块路径跟踪轨迹

Fig. 10 Field path tracking trajectory

表 2 收获机全田块作业路径跟踪误差			
Tab. 2 Field path tracking error of combine harvester			
算法	上线距离/m	最大误差/cm	标准差/cm
Stanley 模型	12	28	8
模糊 Stanley 模型	5	3	1

象进一步验证算法有效性,在其上安装双天线 RTK 定位定向系统并进行电控化改造。C230 型收获机作业幅宽为 5 m,转弯半径约为 8 m,其收获作业时导航系统配置与小车试验平台一致,全田块路径规划采用图 6 所示方案。行驶控制系统包括电动方向盘、转角传感器、电动油门以及卸粮、脱粒相关控制系统等,如图 11 所示。其中电动方向盘为上海联适 EMS2 型转向驱动单元,工作电流可达 10 A,具有扭矩大、精度高等特点,IP65 级防尘防水,适合农机恶劣作业环境。转角传感器型号为北京天海科公司的 DWQCAB-V-CH,其线性度为 0.02% FS,角分辨率 0.022°,转角传感器安装在收获机转向立轴正上方,与转向中心立轴直连。

联合收获机田间无人驾驶作业结果如图 12 所示,其中直线段平均作业速度约为 0.8 m/s,自动转弯时平均作业速度约为 0.6 m/s。受大型联合收获机转弯半径限制和手自动切换控制可靠性影响,目



图 11 联合收获机电控化改造

Fig. 11 Electric control reconstruction of combine harvester

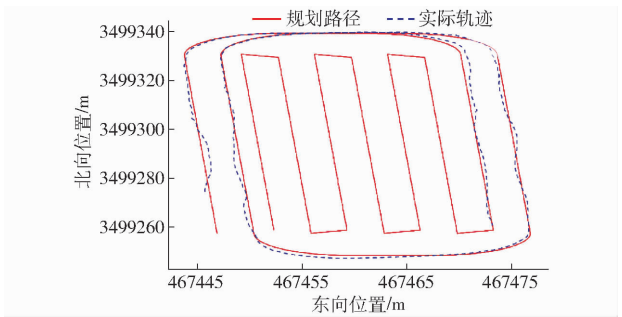


图 12 联合收获机路径跟踪轨迹

Fig. 12 Path tracking trajectory of combine harvester

前仅验证了外圈回字形自动转弯收获作业。由试验结果可知,稳定作业时直线和曲线路径跟踪误差均小于 15 cm,然而受侧滑和田垄等复杂田间土壤环境影响,收获机最大横向跟踪误差为 0.63 m。对比分析移动小车试验结果可知,大型联合收获机双天线安装误差、复杂土壤条件和转向系统时滞对 Stanley 模型增益系数的适应性有较大影响。

4 结论

- (1)为改善农机全田块路径跟踪算法适应性,基于模糊算法提出一种改进 Stanley 模型的路径跟踪控制算法,实时调整路径跟踪控制增益系数。场地试验表明额定作业速度下车辆直线与曲线最大路径跟踪误差均小于 3 cm。
- (2)采用移动小车对收获机全田块作业路径进行路径跟踪试验,结果表明本文算法显著改善 Stanley 模型路径跟踪的适应性,初始横向误差 3 m 时,上线距离由 12 m 下降到 5 m,满足农业机械全田块自动导航作业要求。
- (3)联合收获机田间试验表明,天线安装精度影响路径跟踪稳态误差,且导航系统位姿更新率和稳定性制约着农业机械自主作业的可靠性和作业效率。

参 考 文 献

- [1] 罗锡文, 廖娟, 胡炼, 等. 我国智能农机的研究进展与无人农场的实践[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 8–17.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Research progress of intelligent agricultural machinery and practice of unmanned farm in China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 8–17. (in Chinese)
- [2] 崔冰波, 魏新华, 吴抒航, 等. 基于动态路径搜索的农机自动驾驶软件系统研制[J]. 农机化研究, 2022, 44(10): 228–232.
CUI Bingbo, WEI Xinhua, WU Shuhang, et al. Development of agricultural machinery self-driving software system based on dynamic path search[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(10): 228–232. (in Chinese)
- [3] 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 Yuhua, 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)
- [4] 吴东林, 张玉华. 农用车辆路径跟踪预瞄控制研究——基于免疫模糊 PID 算法和视觉导航[J]. 农机化研究, 2020, 42(11): 251–254, 263.
WU Donglin, ZHANG Yuhua. Research on preview control of route tracking for agricultural vehicles based on immune fuzzy PID algorithms and visual navigation[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(11): 251–254, 263. (in Chinese)
- [5] 尹奇辉, 李捷, 梁志鹏, 等. 基于模糊神经网络 PID 的机器人路径跟踪控制[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(5): 182–187.
YI Qihui, LI Jie, LIANG Zhipeng, et al. Path tracking control system of robot based on fuzzy neural network-PID[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(5): 182–187. (in Chinese)
- [6] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 59–65. (in Chinese)
- [7] BORAH K, BORA D K, GOYAL A, et al. Receding horizon lateral vehicle control for pure pursuit path tracking[J]. Journal of Vibration and Control, 2018, 24: 619–642.
- [8] MOGENS M, BEMPORAD A. Reference trajectory planning under constraints and path tracking using linear time-varying model predictive control for agricultural machines[J]. Biosystems Engineering, 2017, 153: 28–41.
- [9] 张华强, 王国栋, 李云飞, 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, LI 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)
- [10] 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)
- [11] 靳欣宇, 张军, 刘元盛, 等. 基于 Stanley 算法的自适应最优预瞄模型研究[J]. 计算机工程, 2018, 44(7): 42–46.
JIN Xinyu, ZHANG Jun, LIU Yuansheng, et al. Research on adaptive optimal preview model based on Stanley algorithm[J]. Computer Engineering, 2018, 44(7): 42–46. (in Chinese)
- [12] THRUN S, MONTEMERLO M, DAHLKAMP H. Stanley: the robot that won the DARPA grand challenge[J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23(9): 661–692.
- [13] 陈秋莲, 郑以君, 蒋环宇, 等. 基于神经网络改进粒子群算法的动态路径规划[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(2): 51–55.
CHEN Qiulian, ZHENG Yijun, JIANG Huanyu, et al. Improved particle swarm optimization algorithm based on neural network for dynamic path planning[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(2): 51–55. (in Chinese)
- [14] 陈顺立. 农业机器人路径优化及轨迹跟踪研究——基于遗传算法[J]. 农机化研究, 2017, 39(8): 17–21.
CHEN Shunli. Path optimization and trajectory tracking of agricultural robot—based on genetic algorithm[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(8): 17–21. (in Chinese)
- [15] 柴善鹏, 姚立健, 徐丽君, 等. 基于动态前视距离纯追踪模型的温室农机路径跟踪研究[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(11): 58–64.
CHAI Shanpeng, YAO Lijian, XU Lijun, et al. Research on greenhouse agricultural machinery path tracking based on dynamic look ahead distance pure pursuit model[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(11): 58–64. (in Chinese)
- [16] 胡春华, 李萍萍, 金成磊, 等. 基于自适应差分进化算法拟合圆的树干胸径测量方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 183–188.
HU Chunhua, LI Pingping, JIN Chenglei, et al. Measurement of tree diameter at breast height based on adaptive differential evolution algorithm for circle fitting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 183–188. (in Chinese)
- [17] SUN H, BI H, WANG J, et al. Prediction of developing modern agriculture demands for the agricultural scientific research institutions services based on BP artificial neural network[J]. E3S Web of Conferences, 2019, 131: 01122.

- [14] 陈青,茹煜,张一扬,等. 无人植保喷烟机的设计及试验研究[J]. 中国农机化学报,2019,40(12):65-71.
CHEN Qing, RU Yu, ZHANG Yiyang, et al. Design and test study of unmanned plant-protected fogger[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(12): 65-71. (in Chinese)
- [15] 郑加强,徐幼林. 环境友好型农药喷施机械研究进展与展望[J]. 农业机械学报,2021,52(3):1-16.
ZHENG Jiaqiang, XU Youlin. Development and prospect in environment-friendly pesticide sprayers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 1-16. (in Chinese)
- [16] 张宋超,薛新宇,秦维彩,等. N-3 型农用无人直升机航空施药飘移模拟与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(3):87-93.
ZHANG Songchao, XUE Xinyu, QIN Weicai, et al. Simulation and experimental verification of aerial spraying drift on N-3 unmanned spraying helicopter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 87-93. (in Chinese)
- [17] 许童羽,于丰华,曹英丽,等. 梗稻多旋翼植保无人机雾滴沉积垂直分布研究[J]. 农业机械学报,2017,48(10):101-107.
XU Tongyu, YU Fenghua, CAO Yingli, et al. Vertical distribution of spray droplet deposition of plant protection multi rotor UAV for japonica rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 101-107. (in Chinese)
- [18] 王昌陵,何雄奎, JANE B, 等. 不同飞行参数下八旋翼植保无人机下洗气流场对雾滴沉积分布特性的影响[J]. 智慧农业,2020,2(4):124-136.
WANG Changling, HE Xiongkui, JANE B, et al. Effect of down wash airflow field of 8-rotor unmanned aerial vehicle on spray deposition distribution characteristics under different flight parameters[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(4): 124-136. (in Chinese)
- [19] 陈盛德,兰玉彬, BRADLEY K F, 等. 多旋翼无人机旋翼下方风场对航空喷施雾滴沉积的影响[J]. 农业机械学报,2017,48(8):105-113.
CHEN Shengde, LAN Yubin, BRADLEY K F, et al. Effect of wind field below rotor on distribution of aerial spraying droplet deposition by using multi-rotor UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 105-113. (in Chinese)
- [20] AHMAD F, QUI B, DONG X, et al. Effect of operational parameters of UAV sprayer on spray deposition pattern in target and off-target zones during outer field weed control application[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 170: 1-10.
- [21] SHAN C, WANG G, WANG H, et al. Effects of droplet size and spray volume parameters on droplet deposition of wheat herbicide application by using UAV[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(1): 74-81.
- [22] 汪东,陈青,许林云,等. 脉冲式烟雾水雾机热力雾化水剂农药效果分析[J]. 农业机械学报,2020,51(11):113-122,130.
WANG Dong, CHEN Qing, XU Linyun, et al. Analysis on atomization effect of thermal atomization pesticide for pulsed smoker/fogger[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 113-122, 130. (in Chinese)
- [23] MH/T 1002.1—2016 农业航空作业质量技术指标[S]. 北京:中国民用航空总局,2016.
- [24] 陈盛德,兰玉彬,李继宇,等. 植保无人机航空喷施作业有效喷幅的评定与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(7):82-90.
CHEN Shengde, LAN Yubin, LI Jiuyu, et al. Evaluation and test of effective spraying width of aerial spraying on plant protection UAV[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(7): 82-90. (in Chinese)

(上接第 48 页)

- [18] HUANG Q, MA Y, ZHANG J. Data preprocessing for agricultural IoT based on RBF neural network[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1288: 012040.
- [19] GUAN S, FANG Q, GUAN T. Application of a novel PNN evaluation algorithm to a greenhouse monitoring system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-12.
- [20] XU X, CHEN S, REN L, et al. Estimation of heavy metals in agricultural soils using Vis-NIR spectroscopy with fractional-order derivative and generalized regression neural network[J]. Remote Sensing, 2021, 13: 2718.
- [21] 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]. 农业机械学报,2013,44(1):205-210.
LI Taochang, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Agricultural machine path tracking method based on fuzzy adaptive pure pursuit model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 205-210. (in Chinese)
- [22] 刘金琨. 智能控制[M]. 北京:清华大学出版社,2019:37-38.
- [23] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 29-34. (in Chinese)
- [24] 印祥,安家豪,王艳鑫,等. 高地隙施药机自动驾驶系统研制与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(9):22-29.
YIN Xiang, AN Jiahao, WANG Yanxin, et al. Development and experiments of the autonomous driving system for high-clearance spraying machines[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 22-29. (in Chinese)