

智慧农业

基于预适应路径追踪的收割机 RAC 导航系统*

张文利¹, 郭宇¹, 陈开臻¹, 伟利国², 苑严伟^{2*}

(1. 北京工业大学信息学部, 北京 100124; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要:【目的】针对模糊纯追踪模型追踪误差大、响应速度慢的问题, 分析收割机实际工作环境和特征, 将预测控制理论与模糊纯追踪模型融合, 设计并实现一种应用于收割机全自动作业的预适应路径追踪模型。【方法】该模型采用模糊控制理论中根据运动情况对参数动态调节的方法, 将纯追踪模型中的前视距离参数由原本的固定值替换为根据追踪误差自适应的变化量, 从而满足农业机械在农田复杂环境中的路径追踪需求。针对参数动态调节不能立即生效问题, 该模型采用预测控制理论, 通过内置收割机运动学模型, 在追踪发生之前预测追踪结果, 提前对追踪量进行校正, 提高其追踪精度。【结果/结论】通过使用 Matlab+Simulink 平台对基于预适应路径追踪模型的收割机 RAC 导航系统进行仿真和实际测试, 结果表明, 改进后的导航系统相比基于模糊纯追踪模型的农机导航系统, 追踪误差下降了 91.9%。通过在搭载了 RAC 卫星接收机的收割机上部署该导航系统, 经过测试, 在 3 km/h 的速度下追踪误差为平均 0.63 m, 满足低成本收割机全自动作业需求。

关键词: 收割机导航; 路径追踪; 模糊纯追踪模型; 预测控制理论

DOI: 10.12105/j.issn.1672-0423.20200101

0 引言

近年来, 随着卫星定位数据精度提高, 各类路径追踪方法层出不穷, 越来越多的高精度农机自动驾驶系统被研发、生产。通过在传统的农用机械上部署自动导航系统, 能够实现农机的全自动作业, 满足了精准农业的需求^[1-2]。

伟利国、李逃昌、Erkan 等国内外众多学者提出了使用基于模糊控制理论的农机路径追踪方法^[3-9]; 石翔、唐小涛等提出了一种对纯追踪模型中的前视距离参数使用模糊控制理论进行动态调整的方法^[10-11]; 罗锡文等提出了一种动态切换 PID 控制和模糊控制的农业机械导航控制方法^[12]; 黄沛琛等通过 BP 神经网络确定纯追踪模型中的前视距离参数^[13]; Han 等使用迭代法实现了车辆模型参数估计, 设计并实现了基于纯追踪模型的路径跟踪控制器^[14]; 陈宁等提出了一种改进型纯追踪控制器^[15]; 于万鹏、马志艳、谢忠华等提出了使用基于视觉的路径追踪方法^[16-18]。

收稿日期: 2020-02-04

第一作者简介: 张文利 (1968—), 博士、教授。研究方向: 信号与智能信息处理。Email: zhangwenli@bjut.edu.cn

* 通信作者简介: 苑严伟 (1980—), 博士、研究员。研究方向: 智能检测与控制。Email: yyw215@163.com

* 基金项目: 国家重点研发计划课题 (2017YFD0700403)

综合分析已有研究成果可知，模糊纯追踪模型因其简单有效，被广泛应用于路径追踪领域，当采用模糊纯追踪模型作为农机路径追踪方法时，往往将农机简化为 Kelly 提出的二轮车模型^[19-21]。根据纯追踪模型原理可知，前视距离是影响追踪效果的重要因素。引入模糊控制理论的模糊纯追踪模型，通过建立模糊控制规则表，对纯追踪模型的前视距离参数进行动态调整，能够提高模型动态追踪能力。然而模糊纯追踪模型是根据已经产生的位姿偏差对车辆进行校正，即每次前视距离参数的动态调整都是依据上一周期的位姿偏差结果，而不是当前位姿偏差结果，因此导致路径追踪模型误差较大，追踪精度较低。

因此，文章提出了一种预适应路径追踪模型，在模糊纯追踪模型的基础上引入预测控制理论，通过内置收割机运动学模型，对收割机下一周期运动状况进行预测，根据预测的当前周期位姿偏差结果调整前视距离参数，从而提高追踪精度，降低误差。

1 收割机 RAC 导航系统

收割机 RAC (Realtime Array Calibration) 导航系统由卫星接收机、车载终端和电控方向盘组成 (图 1)。车载终端通过分析卫星接收机传入的收割机位置、航向信息，结合预先设定的轨迹，即可输出收割机前轮转角控制量，驱动电控方向盘控制收割机转向。传统的农机自动导航系统的设计中，为了获得较为精准的卫星定位信息，常采用 RTK 卫星接收机作为定位装置，然而 RTK 设备价格昂贵，部署较为繁琐，采用 RTK 设备提高了投入成本和部署难度，然而有些农机作业并不需要精度太高即可正常工作，例如收割机作业时，并不需要 cm 级路径追踪精度。为了降低自动导航系统的投入成本，该文采用 RAC 设备代替 RTK 设备进行卫星信号的接收，由于 RAC 设备仅采用普通民用单频信号 GPS L1 或者北斗 B1 即可实现亚米级别定位，相比于 RTK 设备，价格低廉，安装调试简单方便，精度也能满足收割机作业需求。

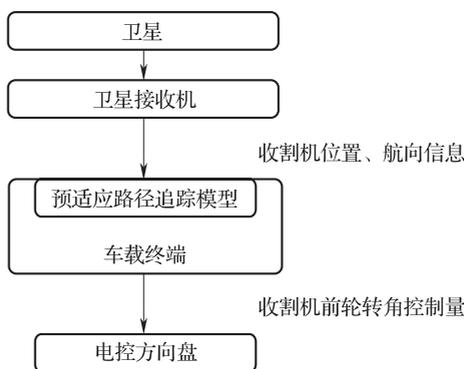


图 1 收割机 RAC 导航系统框图

Fig.1 Block diagram of harvester automatic navigation system

2020年2月

2 预适应路径追踪模型的设计

工作流程如图2所示，主要分为以下几步：(1) 农机在作业过程中，将本周期的车辆位置、航向信息输入到模糊纯追踪模型中，结合模糊纯追踪模型内置追踪路径信息，实时计算本周期前轮转角控制量。(2) 该控制量作为预测模块的输入，结合预测模块中内置的农机运动学模型，预先计算下周期车辆位置、航向信息。(3) 同(1)，该位置、航向信息作为输入量再次被输入到模糊纯追踪模型中，进而获得预测前轮转角控制量。(4) 将获得的本周期前轮转角控制量、预测前轮转角控制量、本周期位置航向信息和预测位置航向信息输入到综合模块，综合模块根据上述农机位姿信息提前一周判断农机出轨情况，预先对前轮转角控制量做出调整，控制农机进行路径追踪。

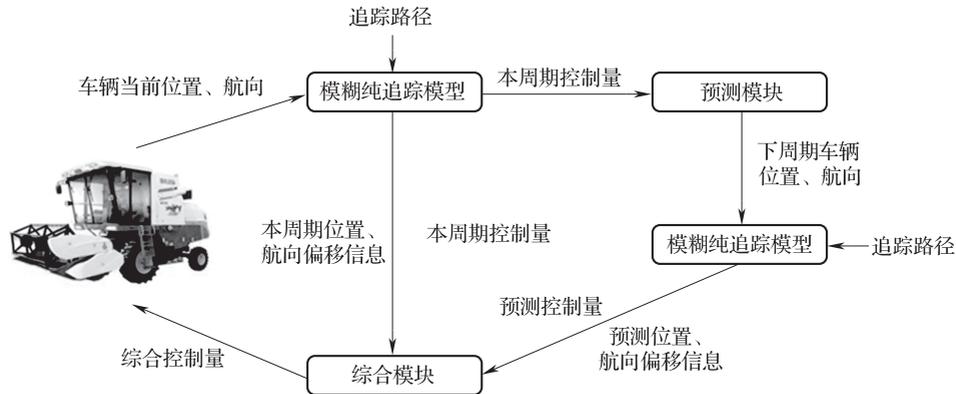


图2 预适应路径追踪模型流程图

Fig.2 Flow chart of pre-adaptive path tracking model

根据纯追踪模型原理，收割机前轮转角控制量满足公式(1)：

$$C_y = \tan^{-1} \left(\frac{2m \sin(E_y)}{E_p} \right) \quad (1)$$

式(1)中， C_y 为收割机前轮转角控制量， m 为收割机轴距， E_p 为收割机到追踪点的横向误差， E_y 为收割机到追踪点的航向误差。

在纯追踪算法中，由于前视距离是固定的，因此在直线追踪和曲线追踪共同存在的场景下，容易发生出轨或者震荡现象。通过引入模糊控制器，实时生成前视距离，解决该问题。根据模糊控制器设计原则，模糊控制器设计分为以下几步。

①确定输入变量

将车辆与追踪点的偏移误差和车辆与追踪点的航向误差作为输入变量，将前视距离作为输出变量。车辆与追踪点的偏移误差为L，车辆与追踪点的航向误差为Y，前视距离为E。

②确定论域、模糊集

L、Y 和 E 的模糊集均为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ ，其中 NB 表示负大 (Negative Big)，NM 表示负中 (Negative Middle)，NS 表示负小 (Negative Small)，PS 表示正小 (Positive Small)，PM 表示正中 (Positive Middle)，PB 表示正大 (Positive Big)，在模糊控制中用来表示隶属关系；论域均为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。

③确定隶属函数

如图 3 所示，采用三角形隶属函数，其中 L、Y 和 E 均采用该隶属函数。

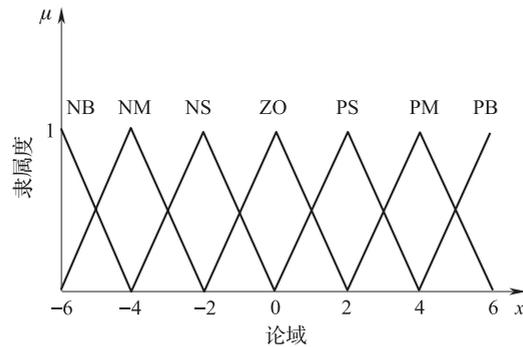


图 3 隶属函数

Fig.3 Membership function

④建立模糊控制规则表

如表 1 所示，根据农机在实际作业中的情况，总结经验得到 49 条规则，建立前视距离的模糊控制规则表。

表 1 前视距离模糊控制规则表

Table1 Fuzzy control rule table of forward looking distance

前视距离	位置偏移						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	ZO	NM	NB	NB
NM	NM	NM	NS	PS	NS	NM	NB
NS	NM	NS	ZO	PM	ZO	NM	NM
航向偏移	ZO	NS	NS	PS	PB	PS	NS
PS	NM	NM	ZO	PM	ZO	NM	NM
PM	NB	NM	NS	PS	NS	NM	NB
PB	NB	NB	NM	ZO	NM	NB	NB

预测模块可以在农机开始作业之前，将农机运动学模型输入模块中，当模糊纯追踪控制器计算出前轮转角控制量后，预测模块先行将该控制量输入到农机运动学模型中，计算下一个周期农机位置的改变，通过该模块，可以获得“预测航向误差”和“预测位置误差”2个预测量。

如图 4 所示，当通过模糊纯追踪控制器获得 t 周期控制量 $C_y(t)$ 后，将该控制量输入预测模块，根据公式 (2) 至 (4)，即可预测收割机 $t+1$ 周期运动状态信息和误差信息。

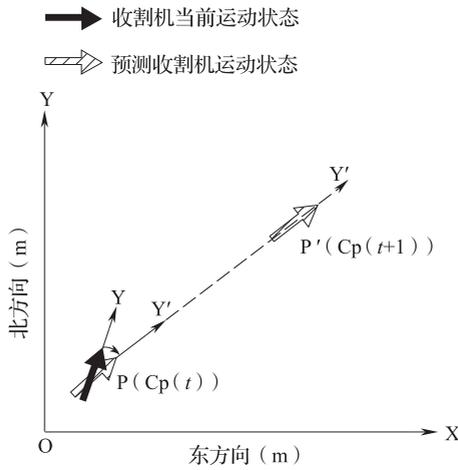


图4 预测模块原理示意图

Fig.4 Schematic diagram of prediction module

$$Y(t+1) = Y(t) + C_y(t) \tag{2}$$

$$C_{px}(t+1) = C_{px}(t) + v\Delta t \cos Y \tag{3}$$

$$C_{py}(t+1) = C_{py}(t) + v\Delta t \sin Y \tag{4}$$

式(2)至(4)中, Y 为收割机航向, C_p 为收割机位置, C_{px} 为 C_p 在 X 轴上的分量, C_{py} 为 C_p 在 Y 轴上的分量, v 为收割机运行速度, Δt 为控制周期时间。

将预测的运动状态信息重新输入到模糊纯追踪模型中, 即可获得收割机 $t+1$ 周期预测控制量 $C_y(t+1)$ 。在已知 t 周期和 $t+1$ 周期收割机位置误差 $E_p(t)$ 和 $E_p(t+1)$ 的情况下, 根据公式(5)可以获得收割机由 t 周期到 $t+1$ 周期运动过程中的位置偏离系数 K 。

$$K = E_p(t) \times E_p(t+1) \tag{5}$$

若 $K > 0$, 则说明根据预测结果, 收割机在 $t+1$ 周期没有出轨, 最终控制量为 t 周期控制量 $C_y(t)$; 反之, 若 $K < 0$, 则说明收割机追踪过程中出轨, 需要对控制量进行修正, 参照公式(6):

$$C'_y(t) = (1-\xi)C_y(t) + \xi C_y(t+1) \tag{6}$$

式(6)中, $C'_y(t)$ 为前轮转向角综合控制量, ξ 为比例系数, 理想状态下, 农机沿直线追踪, 且农机位置时刻处于直线上, 农机航向与直线延伸方向相同。其中 ξ 默认取值为0.5。若在实际测试中, 出现出轨抑制效果不佳现象, 则应该增大 ξ , 若出现出轨抑制效果过度现象, 则应该减少 ξ 。

3 结果分析

该研究共进行了2个相关实验: 模拟仿真实验和农机应用实验。在模拟仿真实验中,

分别对模糊纯追踪模型和预适应路径追踪模型进行模拟仿真，并针对其性能参数进行分析。在农机应用实验中，通过在收割机上安装搭载预适应路径追踪模型的控制器，控制收割机进行路径追踪并对其进行误差分析。

3.1 模拟仿真实验

通过 Matlab+Simulink 联合平台，分别搭建模糊纯追踪模型和预适应路径追踪模型，并对 2 种路径追踪模型进行模拟仿真，结果如图 5 所示。

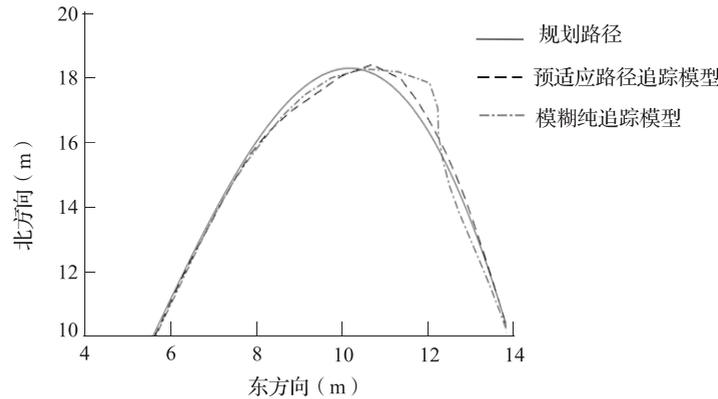


图 5 预适应路径追踪模型和模糊纯追踪模型仿真示意图
Fig.5 Pre-adaptive path tracking model and fuzzy pure pursuit model

在仿真结果中，模糊纯追踪模型误差平均值为 2.364 5 m，而预适应路径追踪模型的平均误差为 0.192 5 m，误差下降了 91.9%。

3.2 农机应用实验

在收割机实际工作中，拖拉机行驶过程中会改变土地地形，容易造成多次测试环境不一致。该研究主要解决模糊纯追踪模型误差大问题，测试环境对控制器影响应该适当降低，因此选择在宽阔平整的柏油马路上进行收割机路径追踪测试。将搭载了预适应路径追踪模型的车载终端安装在拖拉机上，部署卫星接收机和电控方向盘。

分别在马路两端选取 A 点和 B 点，人工将收割机行驶至 A 点，车头方向朝向 B 点，进行路径自动追踪；当路径追踪到 B 点时，人工将车辆驶回 A 点，并重复以上过程。测试过程中，使用笔记本电脑通过串口接收日志数据（A、B 点信息，当前位置信息，航向角信息，方向盘控制信息），最后通过上位机处理软件进行数据可视化，可视化结果如图 6 所示。设定追踪路径切线方向为纵向，收割机上卫星接收机位置到该垂线长度为横向误差，该实验共进行了 12 组测试，对测试结果计算误差，其结果如表 2 所示。

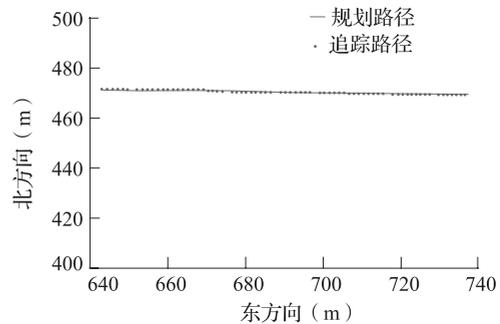


图 6 预适应路径追踪模型测试数据可视化示意图
Fig.6 Visualization schematic diagram of test data for pre-adaptive path tracking model

2020年2月

表2 预适应路径追踪模型横向误差统计结果

Table 2 Statistical result of lateral error of pre-adaptive path tracking model

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均 (m)
最大误差值 (m)	0.62	1.19	0.92	0.42	0.59	0.45	1.45	1.67	2.09	1.08	1.32	1.42	1.19
平均误差值 (m)	0.19	0.46	0.33	0.19	0.34	0.26	0.8	1.06	1.73	0.61	0.54	0.42	0.63

经过测试,当收割机以 3 km/h 的速度行驶时,采用搭载了预适应路径追踪模型的收割机 RAC 导航系统,路径追踪误差的平均值为 0.63 m,考虑到 RAC 卫星接收机定位精度为亚米级,路径追踪误差符合预期。

4 结论

该文通过引入预测控制理论,对模糊纯追踪模型响应速度慢的缺陷进行改良,构建适应能力较强的预适应路径追踪模型。该模型采用高性价比 RAC 卫星接收设备,在满足收割机工作精度的前提下,降低了设备部署难度和设备价格。该文通过 Matlab+Simulink 联合平台对模糊纯追踪模型和预适应路径追踪模型进行仿真分析,发现预适应路径追踪模型追踪效果更好,平均误差得到大幅度降低。通过在收割机上使用 RAC 导航系统的实际测试发现,预适应路径追踪模型平均误差值为 0.63 m,满足设计要求。

预适应路径追踪模型虽然经过了实际农机测试,但仅测试了速度在 3 km/h 的低速状态运行情况,而农机速度会对 RAC 卫星接收设备以及控制器的性能产生较大影响,在今后的研究中,将进一步研究高速条件下的导航系统追踪方法,促使研究成果适应实际农机作业需要。

参考文献

- [1] 赵春江. 精准农业研究与实践. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] 胡静涛, 高雷, 白晓平, 等. 农业机械自动驾驶技术研究进展. 农业工程学报, 2015, 31(10): 1-10.
- [3] 伟利国, 张权, 颜华, 等. XDNZ630 型水稻插秧机 GPS 自动驾驶系统. 农业机械学报, 2011, 42(7): 186-190.
- [4] 丁根法. 基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法. 南方农机, 2019, 50(2): 31.
- [5] 张叶茂. 基于模糊控制的农机自动驾驶控制系统研究. 江苏农业科学, 2017, 45(17): 241-245.
- [6] 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. 农业机械学报, 2013, 44(1): 205-210.
- [7] 刘兆祥, 刘刚, 籍颖, 等. 基于自适应模糊控制的拖拉机自动驾驶系统. 农业机械学报, 2010, 41(11): 148-152+162.
- [8] Erkan K, Erdal K, Herman R, et al. Towards agrobots: Identification of the yaw dynamics and trajectory tracking of an autonomous tractor. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015(115): 78-87.
- [9] 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. 农业机械学报, 2018, 49(10): 30-37.
- [10] 石翔, 马蓉, 张长龙, 等. 基于模糊控制的拖拉机路径跟踪仿真研究. 农机化研究, 2016, 38(8): 237-241.
- [11] 唐小涛, 陶建峰, 李志腾, 等. 自动驾驶插秧机路径跟踪系统稳定性模糊控制优化方法. 农业机械学报, 2018, 49(1): 29-34.
- [12] 罗锡文, 张智刚, 赵祚喜, 等. 一种农业机械的导航控制方法. 广东: CN101093396, 2007.
- [13] 黄沛琛, 罗锡文, 张智刚. 改进纯追踪模型的农业机械地头转向控制方法. 计算机工程与应用, 2010, 46(21): 216-219.
- [14] Han Xiongze, Hak Jinkim, Joon Yongkim, et al. Path-tracking simulation and field tests for an auto-guidance tillage tractor for a paddy field. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015(112): 161-171.

- [15] 陈宁,周志峰,王永泉,等.一种纯追踪模型改进算法.轻工机械,2014,32(4):69-72+76.
- [16] 于万鹏.计算机视觉技术在拖拉机行进控制上的应用.农机化研究,2019,41(12):208-211.
- [17] 马志艳,欧阳方熙,杨光友,等.基于视觉与惯性的农机组合导航的方法研究.农机化研究,2019,41(6):7-12.
- [18] 谢忠华.水稻插秧机路径追踪设计—基于 SOPC 嵌入式视觉导航.农机化研究,2017,39(10):213-217.
- [19] Kelly A J. A Feedforward Control Approach to Local Navigation Problem for Autonomous Vehicles, *CMU Robotics Institute Technical Report*, 1994.
- [20] 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.农业工程学报,2019,35(4):11-19.
- [21] 魏爽,李世超,张漫,等.基于 GNSS 的农机自动导航路径搜索及转向控制.农业工程学报,2017,33(S1):70-77.

RAC navigation system of harvester based on pre-adaptive path tracking model

Zhang Wenli¹, Guo Yu¹, Chen Kaizhen¹, Wei Ligu², Yuan Yanwei^{2*}

(1. Department of Informatics, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: [**Purpose**] This paper presents a fuzzy pure tracking model to solve the problems of large tracking error and slow response speed of tractors, by analyzing the actual working environment and working characteristics of the harvester. The predictive control theory and the fuzzy pure tracking model are merged to design and implement a pre adaptive path tracking model. [**Method**] The model uses fuzzy control theory to dynamically adjust the parameters according to the movement situation, and the forward-looking distance parameter in the pure tracking model is replaced by the original fixed value with the adaptive variation according to the tracking error, so as to meet the tracking requirements of agricultural machinery in the complex farmland environment. Considering the problem that the dynamic adjustment of parameters cannot take effect immediately, the model adopts predictive control theory. The built-in harvester kinematics model predicts the tracking results before tracking occurs, corrects the tracking amount in advance, and improves the tracking accuracy. The Matlab + Simulink platform was used to simulate and actually test the RAC navigation system of the harvester based on the pre-adaptive path tracking model. [**Result/Conclusion**] The results showed that the tracking error of the improved navigation system was 91.9% lower than that of the agricultural navigation system based on the fuzzy pure tracking model. By deploying the navigation system on the harvester equipped with a RAC satellite receiver, the tracking error at the speed of 3 km/h is 0.63 m on average, which meets the requirements of automatic operation of low-cost harvesters.

Key words: harvester navigation; path tracking; fuzzy pure pursuit model; predictive control theory