

基于反馈线性化的插秧机路径跟踪模糊预测函数控制

刘文龙^{1,2,3}, 郭锐^{1,3*}, 赵静一^{1,4}

(1. 燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004; 2. 东北石油大学秦皇岛校区电气信息工程系, 秦皇岛 066004; 3. 燕山大学河北省特种运载装备重点实验室, 秦皇岛 066004; 4. 秦皇岛燕大一华机电工程技术研究院有限公司, 秦皇岛 066004)

摘要: 为了提高插秧机路径跟踪系统的控制精度和鲁棒性, 该研究提出一种基于反馈线性化的模糊预测函数控制方法。在 Frenet 坐标系下建立插秧机运动学模型, 并采用状态反馈方法对模型进行精确线性化处理, 通过选取 Morlet 小波函数作为基函数, 以及依据横向误差、横向误差变化率和参考路径曲率设计模糊规则在线调整性能指标函数中的加权系数, 进而运用预测函数控制算法求解路径跟踪控制律。Matlab/Simulink 仿真试验结果表明, 当插秧机作业速度为 0.5、1.0、1.5 m/s 时, 对于直线路径跟踪情况, 模糊预测函数控制的横向误差均渐近趋于 0, 行驶轨迹皆无超调, 上线距离分别为 1.2、2.3 和 3.3 m; 对于曲线路径跟踪情况, 模糊预测函数控制的横向最大绝对误差分别为 0.7、2.4 和 5.1 cm, 横向标准差分别为 0.4、1.5 和 2.8 cm。与常规模型预测控制相比, 模糊预测函数控制在确保路径跟踪系统实时性的前提下, 提高了系统的控制精度, 改善了系统的动态性能, 并且对作业速度与参考路径曲率变化具有更强的鲁棒性。水田实车试验结果表明, 模糊预测函数控制能够使插秧机在不同作业速度下平稳有效地跟踪参考路径, 并具有较高的控制精度和鲁棒性; 当插秧机作业速度为 0.5、1.0 与 1.5 m/s 时, 模糊预测函数控制的横向最大绝对误差分别为 5.9、7.5 和 9.8 cm, 直线路径横向标准差分别为 1.4、1.7 和 2.7 cm, 曲线路径横向标准差分别为 2.5、3.6 和 5.5 cm, 跟踪效果满足插秧机实际作业要求。该研究可为插秧机路径跟踪预测控制方法研究提供参考。

关键词: 插秧机; 自动驾驶; 路径跟踪; 预测函数控制; 模糊控制; 反馈线性化; 基函数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404100

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-22-0051-11

刘文龙, 郭锐, 赵静一. 基于反馈线性化的插秧机路径跟踪模糊预测函数控制[J]. 农业工程学报, 2024, 40(22): 51-61.
doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404100 <http://www.tcsae.org>

LIU Wenlong, GUO Rui, ZHAO Jingyi. Fuzzy predictive function control for the path tracking of transplanters using feedback linearization[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(22): 51-61. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404100 <http://www.tcsae.org>

0 引言

农机自动驾驶是实现精准作业、构建无人农场与助推智慧农业的关键技术, 其中路径跟踪已经成为农机自动驾驶领域研究的核心内容和热点问题^[1-6]。路径跟踪系统通过自动导航系统^[7-8]实时获取农机的位置、速度与姿态等信息, 利用液压驱动^[9-10]或电机驱动^[11-12]平稳精准控制农机沿着参考路径自动行驶, 进而提高作业质量和作业效率以及避免重复作业和遗漏作业。在自动导航系统测量精度满足要求的情况下, 路径跟踪控制方法决定着农机路径跟踪系统的作业精度与动态性能, 其主要包括纯追踪控制^[13-14]、Stanley 控制^[15-16]、PID 控制^[17-18]、最优控制^[19-20]、滑模控制^[21-22]和模型预测控制^[23-24]等。

插秧机是一种广泛应用在水田中栽种秧苗的农机装备。凹凸不平且泥泞易滑的水田环境相比旱田更加复杂, 存在更多影响插秧机行驶状态的未知干扰因素, 因此对

插秧机路径跟踪系统的控制性能提出更高要求。唐小涛等^[25]将横向偏差和作业速度作为决策参数, 利用模糊逻辑方法在线调整纯追踪控制中的前视距离, 提高了插秧机路径跟踪系统对作业速度变化的适应性与稳定性, 但仅针对直线路径跟踪做出研究; 水田实车测试结果表明, 当作业速度为 1 m/s 时, 插秧机直线路径跟踪最大反向误差为 7.5 cm。李革等^[26]以作业速度和路径曲率作为决策参数, 通过经验关系式动态调整纯追踪控制中的前视距离, 提高了插秧机对曲线路径的跟踪精度; 农场水田试验结果表明, 当作业速度为 1 m/s 且转弯半径为 0.9 m 时, 插秧机路径跟踪平均误差为 7.7 cm、最大误差为 15.9 cm。文献^[25-26]采用不同方法实时在线调整前视距离, 改善了插秧机路径跟踪系统的控制性能, 但本质上均是运用基于几何学模型的纯追踪控制方法求取控制量, 在提高作业精度方面存在局限。

模型预测控制(model predictive control, MPC)是以预测模型、滚动优化和反馈校正作为基本原理的一类先进控制方法, 其通过滚动优化求解性能指标函数获得控制量, 因而具有控制精度高、鲁棒性强等优点, 但同时存在在线计算量大的问题, 对于实时性要求较高的运动控制场合需加以考虑。王玉亮等^[27]和迟瑞娟等^[28]通过对惯性坐标系下的插秧机运动学模型进行线性化与离

收稿日期: 2024-04-15 修订日期: 2024-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(52075469, 12173054)

作者简介: 刘文龙, 博士生, 副教授, 研究方向为车辆导航与智能控制。

Email: liuwenlong1980@126.com

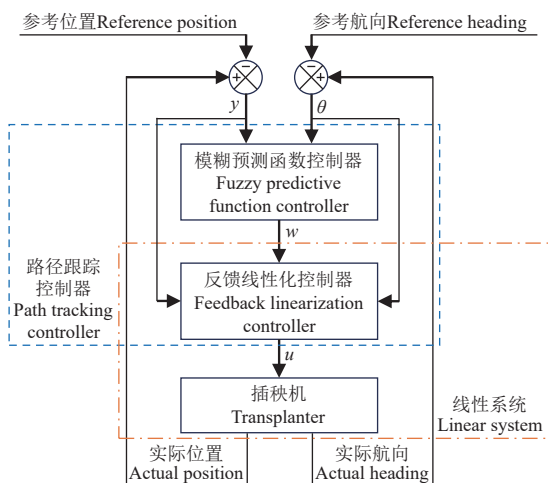
*通信作者: 郭锐, 教授, 博士生导师, 研究方向为流体动力基础件和机电装备电液控制系统的创新设计与可靠性。Email: guorui@ysu.edu.cn

散化处理, 提出基于线性时变模型的路径跟踪 MPC 方法。田间测试结果表明, 两者在作业速度为 1 m/s 情况下, 插秧机作业直线段路径跟踪最大误差均不大于 5.7 cm、平均误差均不大于 2.2 cm, 但转弯曲线段路径跟踪精度差异较大。文献 [27-28] 运用泰勒级数展开方法在参考路径点处对插秧机运动学模型进行近似线性化处理, 不可避免引入线性化误差, 并且在路径跟踪系统的实时性和鲁棒性方面未做出深入研究。

预测函数控制 (predictive function control, PFC) 作为第三代 MPC 方法, 在保持 MPC 基本特征的同时, 通过将事先选定的基函数进行线性组合表示控制量, 不仅实现了控制量的结构化设计, 而且有效减少了在线计算量^[29]。为了进一步提高插秧机路径跟踪系统的控制性能, 本文在基于线性时变模型的常规 MPC 方法^[28]基础上进行改进和创新, 提出一种基于反馈线性化的模糊 PFC 方法。首先, 采用反馈线性化代替泰勒级数展开对插秧机运动学模型进行处理, 并利用 PFC 设计路径跟踪控制律, 相比常规 MPC 能够有效提高系统的控制精度与实时性; 然后, 借助模糊逻辑在线整定性能指标函数中的加权系数以提高系统的鲁棒性。

1 控制方案设计

在 Frenet 坐标系 (道路坐标系) 下构建插秧机运动学模型, 将路径跟踪控制器设计为模糊预测函数控制器与反馈线性化控制器两个环节的串联, 如图 1 所示。



注: y 为 Frenet 坐标系下插秧机的横向位置, 即横向误差, m; θ 为 Frenet 坐标系下插秧机的航向角, 即航向误差, rad; w 为虚拟控制量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; u 为控制量, rad。

Note: y is both the horizontal position of transplanter in Frenet coordinate system, that is the lateral error of transplanter, m; θ is both the heading angle of transplanter in Frenet coordinate system, that is the heading error of transplanter, rad; w is the virtual control variable, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; u is the control variable, rad.

图 1 插秧机路径跟踪控制原理图

Fig.1 Principle diagram of path tracking control for transplanter

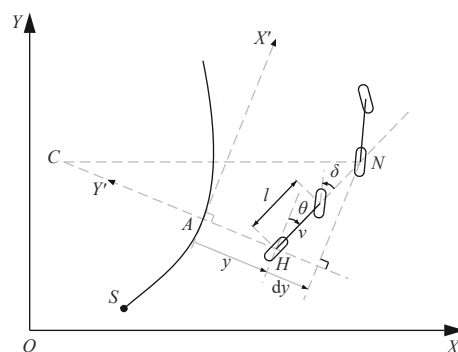
反馈线性化控制器在插秧机非线性运动学模型的基础上, 采用状态反馈方法, 根据横向误差 y 、航向误差 θ 和虚拟控制量 w 、设计控制量 u , 进而实现插秧机非线性运动学模型的线性化, 即反馈线性化控制器与插秧机二者构成一个线性系统。模糊预测函数控制器在选择适

宜的基函数前提下, 运用模糊逻辑动态调整性能指标函数中的加权系数, 并依据横向误差 y 和航向误差 θ , 利用 PFC 方法优化求解性能指标函数获得虚拟控制量 w , 对新构成的线性系统实施控制, 从而间接完成插秧机路径跟踪控制任务。

2 控制算法设计

2.1 插秧机运动学模型

考虑插秧机的实际作业速度较低 (通常在 0~1.8 m/s 范围内), 为了简化模型便于控制器设计, 可忽略轮胎与地面之间的侧向滑动, 将插秧机简化为两轮车进行运动学建模^[30], 如图 2 所示。



注: XOY 与 $X'A'Y'$ 分别为惯性坐标系和 Frenet 坐标系; S 为参考路径; C 为插秧机瞬时旋转中心; H 、 N 分别为当前时刻与下一时刻的插秧机后轴中心; A 为参考路径 S 上距离点 H 最近的点; dy 为插秧机横向误差增量, m; δ 为插秧机前轮转角, rad; v 为插秧机运动速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; l 为插秧机轴距, m。Note: XOY and $X'A'Y'$ are the inertial coordinate system and Frenet coordinate system respectively; S is the reference path; C is the instantaneous rotation center of transplanter; H and N are the center of the rear axle for transplanter at the current moment and the next moment respectively; A is the point closest to point H on the reference path S ; dy is the lateral error increment of transplanter, m; δ is the front wheel angle of transplanter, rad; v is the motion speed of transplanter, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; l is the axle base of transplanter, m.

图 2 插秧机运动学模型

Fig.2 Kinematics model of transplanter

根据图 2 几何关系, 结合运动学规律, 参照文献 [30] 推导出插秧机在 Frenet 坐标系下以横向误差 y 和航向误差 θ 为状态变量的状态空间模型为

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = v \sin \theta \\ \frac{d\theta}{dt} = v \left(\frac{\tan \delta}{l} - \frac{\kappa_{\text{ref}} \cos \theta}{1 - \kappa_{\text{ref}} y} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中 κ_{ref} 为参考路径在点 A 处的曲率, m^{-1} 。

本文按照常规选择后轴中心作为插秧机位置描述点。在实际应用中, 采用全球卫星导航系统 (global navigation satellite system, GNSS) 与捷联惯性导航系统 (strap-down inertial navigation system, SINS) 的组合导航技术检测插秧机的位姿信息, 并且为了避免受到外界遮挡, 以便接收到尽可能多的卫星信号, 通常将 GNSS 卫星天线安装在车身顶部。考虑田地平整度和土壤松散度等未知干扰因素均会影响插秧机姿态, 导致 GNSS 卫星天线投影点与插秧机后轴中心不重合, 为此本文默认在惯性坐标系下采用文献 [31] 中的通用算法进行定位修正, 即依据天线投影点坐标和姿态角换算得到插秧机后

轴中心坐标。

2.2 反馈线性化控制器

利用泰勒级数展开和小角度假设方法对插秧机运动学模型进行近似线性化处理，导致出现模型线性化误差^[28,30]。本文采用状态反馈方法对式(1)进行精确线性化处理，从而避免产生模型误差。

令

$$\beta = \frac{dy}{dt} = v \sin \theta \quad (2)$$

结合式(1)，选取前轮转角 δ 作为控制量（即 $u = \delta$ ），推导出以横向误差 y 和横向误差变化率 β 为状态变量的插秧机运动学状态空间模型为

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = \beta \\ \frac{d\beta}{dt} = v^2 \cos \theta \left(\frac{\tan u}{l} - \frac{\kappa_{\text{ref}} \cos \theta}{1 - \kappa_{\text{ref}} y} \right) \end{cases} \quad (3)$$

通过经验试凑方法设计控制律为

$$u = \arctan \left[l \left(\frac{w}{v^2 \cos \theta} + \frac{\kappa_{\text{ref}} \cos \theta}{1 - \kappa_{\text{ref}} y} \right) \right] \quad (4)$$

消去式(3)中的非线性项，使系统变为以虚拟控制量 w 为输入的线性系统，其状态空间模型为

$$\frac{d\eta}{dt} = A\eta + bw \quad (5)$$

$$\text{式中 } \eta = \begin{bmatrix} y \\ \beta \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

至此，借助反馈线性化方法，已将插秧机路径跟踪由非线性系统式(1)的控制问题转换为线性系统式(5)的控制问题。

2.3 模糊预测函数控制器

2.3.1 预测函数控制器

PFC 是一种基于计算机实现的优化控制算法，利用其设计控制律以求取虚拟控制量 w ，需将预测模型式(5)转化为离散形式，即

$$\eta(k+1) = \tilde{A}\eta(k) + \tilde{b}w(k) \quad (6)$$

式中 $\tilde{A} = TA + I$ ， $\tilde{b} = Tb$ ， I 为单位矩阵， T 为采样周期， s 。

令 N_p 为预测时域， N_c 为控制时域，且 $N_c \leq N_p$ 。在任意时刻 k ，均可利用式(6)预测未来时刻 $k+i$ 的系统状态 $\eta(k+i|k)$ ($i \in [1, N_p]$)，并在控制时域范围内计算系统的虚拟控制量 $w(k+j|k)$ ($j \in [0, N_c-1]$)，从而将预测的系统状态以矩阵形式表示为

$$Y(k) = \Psi\eta(k) + \Theta W(k) \quad (7)$$

式中

$$Y(k) = \begin{bmatrix} \eta(k+1|k) \\ \eta(k+2|k) \\ \vdots \\ \eta(k+N_c|k) \\ \vdots \\ \eta(k+N_p|k) \end{bmatrix}, \Psi = \begin{bmatrix} \tilde{A} \\ \tilde{A}^2 \\ \vdots \\ \tilde{A}^{N_c} \\ \vdots \\ \tilde{A}^{N_p} \end{bmatrix},$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} \tilde{b} & 0 & \cdots & 0 \\ \tilde{A}\tilde{b} & \tilde{b} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{A}^{N_c-1}\tilde{b} & \tilde{A}^{N_c-2}\tilde{b} & \cdots & \tilde{b} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{A}^{N_p-1}\tilde{b} & \tilde{A}^{N_p-2}\tilde{b} & \cdots & \sum_{i=0}^{N_p-N_c} \tilde{A}^i \tilde{b} \end{bmatrix},$$

$$W(k) = \begin{bmatrix} w(k|k) \\ w(k+1|k) \\ \vdots \\ w(k+N_c-1|k) \end{bmatrix}.$$

为了使插秧机能够快速平稳地跟踪上参考路径以及虚拟控制量尽可能小，选取性能指标函数为

$$\min_{w(k+j|k)} J(k) = \sum_{i=1}^{N_p} \|\eta(k+i|k)\|_Q^2 + \sum_{j=0}^{N_c-1} \|w(k+j|k)\|_R^2 \quad (8)$$

式中 $Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 \\ 0 & q_2 \end{bmatrix}$ 为输出加权矩阵， q_1 为横向误差加权系数， q_2 为横向误差变化率加权系数； R 为控制加权系数。性能指标函数式(8)的向量形式为

$$\min_{w(k)} J(k) = \|Y(k)\|_Q^2 + \|W(k)\|_R^2 \quad (9)$$

式中 $Q' = I_{N_p} \otimes Q$ ， $R' = I_{N_c} \otimes R$ ， I_{N_p} 、 I_{N_c} 分别为 N_p 维和 N_c 维的单位矩阵， $\otimes$ 表示克罗内克积。

在路径跟踪控制中，逼近参考路径的精度要求通常随着控制时刻的增加而逐渐降低。在已有的 PFC 研究中，大多选择阶跃、斜坡等全局函数作为基函数，无法根据不同控制时刻对参考路径不同逼近要求而进行灵活设置，难以达到预期的路径跟踪效果。小波函数能够对任意函数以任意精度进行逼近，具有紧支撑局部特性和多尺度分析特性，因此选择小波函数作为基函数恰好弥补全局函数的不足^[29]。具体而言，在控制时刻较小（即对参考路径逼近要求较高）处，以多个细尺度的小波函数逼近；在控制时刻较大（即对参考路径逼近要求较低）处，以少量粗尺度的小波函数逼近。

Morlet 小波是一种非正交小波，在时域和频域内都具有较好的局部特性，并且便于多尺度分析，故本文选择 Morlet 小波函数作为基函数。Morlet 小波函数的解析表达式为^[32]

$$f(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} \cos(5t) \quad (10)$$

在式(10)基础上，通过平移和尺度变换可以得到不同的 Morlet 小波基函数，即

$$f_n(t) = \frac{1}{\sqrt{c_n a_n}} f\left(\frac{t-b_n}{a_n}\right) \quad (11)$$

式中 $f_n(t)$ 为第 n 个基函数， a_n 为第 n 个基函数的尺度因子， b_n 为第 n 个基函数的平移因子， c_n 为第 n 个基函数的归一化常数。

根据 PFC 的基本原理，将虚拟控制量 w 表示为若干 Morlet 小波基函数 f_n 的线性组合，即

$$w(k+jk) = \sum_{n=1}^N \mu_n(k) f_n(j) \quad (12)$$

式中 N 为基函数的个数, $\mu_n(k)$ 为当前时刻 k 处的线性组合系数。

由式 (12) 得到虚拟控制量序列 $W(k)$ 为

$$W(k) = \Phi \mu(k) \quad (13)$$

式中

$$\Phi = \begin{bmatrix} f_1(0) & f_2(0) & \cdots & f_N(0) \\ f_1(1) & f_2(1) & \cdots & f_N(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1(N_c-1) & f_2(N_c-1) & \cdots & f_N(N_c-1) \end{bmatrix},$$

$$\mu(k) = [\mu_1(k) \quad \mu_2(k) \quad \cdots \quad \mu_N(k)]^T.$$

将式 (7) 和式 (13) 代入式 (9), 得到

$$\min_{\mu(k)} J(k) = \|\Psi \eta(k) + \Theta \Phi \mu(k)\|_{Q'}^2 + \|\Phi \mu(k)\|_{R'}^2 \quad (14)$$

再对式 (14) 进行优化求解, 可得

$$\mu(k) = -G^{-1} \Phi^T \Theta^T Q' \Psi \eta(k) \quad (15)$$

式中 $G = \Phi^T \Theta^T Q' \Theta \Phi + \Phi^T R' \Phi$ 。

将式 (15) 代入式 (13), 并考虑在任意时刻只有虚拟控制量序列 $W(k)$ 中的第一个元素 $w(k|k)$ 作用于系统, 求得

$$w(k) = w(k|k) = -g \Phi G^{-1} \Phi^T \Theta^T Q' \Psi \eta(k) \quad (16)$$

式中 $g = [1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0]_{1 \times N_c}$ 。

将式 (16) 代入式 (4) 即可计算出无约束情况下的控制量 $u^*(k)$ 。在实际应用中, 考虑插秧机的转向能力与行驶安全, 需对实际的控制量 $u(k)$ 和控制增量 $\Delta u(k)$ 设置约束。PFC 通常采用启发式方法进行约束处理, 即按照式 (17) ~ (19) 进行计算, 最终得到控制量 $u(k)$ 。

$$\Delta u^*(k) = u^*(k) - u(k-1) \quad (17)$$

式中 $\Delta u^*(k)$ 为无约束情况下的控制增量。

$$\Delta u(k) = \begin{cases} \min[\Delta u^*(k), \Delta u_{\max}, u_{\max} - u(k-1)], & \Delta u^*(k) \geq 0 \\ \max[\Delta u^*(k), \Delta u_{\min}, u_{\min} - u(k-1)], & \Delta u^*(k) < 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中 $u_{\min}$ 、 $u_{\max}$ 分别为控制量 $u(k)$ 的最小值与最大值; $\Delta u_{\min}$ 、 $\Delta u_{\max}$ 分别为控制增量 $\Delta u(k)$ 的最小值和最大值。

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (19)$$

在每个控制周期内, 重复上述过程计算控制量 $u(k)$, 并按照 $u(k)$ 大小改变前轮转角, 即可控制插秧机实现路径跟踪。

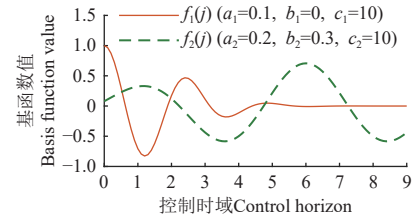
根据插秧机的实际车身参数、作业速度范围和控制软硬件配置确定如表 1 所示的控制参数整定方案。

由控制律式 (4) 和式 (16) 可知, 本文算法的计算量主要集中在矩阵 G 的求逆过程, 而矩阵 G 的维数取决于基函数的个数 N , 因此减少基函数的个数, 能够使本文算法的计算量近似呈指数降低, 有效提高系统的实时

性。本文兼顾插秧机路径跟踪系统的控制性能与实时性, 并结合试验效果, 将 Morlet 小波基函数个数 N 取为 2, 其尺度因子、平移因子和归一化常数的选取以及在控制时域内的位置分布如图 3 所示。

表 1 控制参数设置

参数 Parameters	取值 Values
采样周期 Sampling period T/s	0.05
预测时域 Prediction horizon N_p	10
控制时域 Control horizon N_c	10
控制量最小值 Control minimum $u_{\min}/(^{\circ})$	-57
控制量最大值 Control maximum $u_{\max}/(^{\circ})$	57
控制增量最小值 Control increment minimum $\Delta u_{\min}/(^{\circ})$	-5
控制增量最大值 Control increment maximum $\Delta u_{\max}/(^{\circ})$	5
控制加权系数 Control weighting coefficient R	1
输出加权矩阵 Output weighting matrix Q	见 2.3.2 节



注: $f_n(t)$ 为第 n 个基函数, a_n 为第 n 个基函数的尺度因子, b_n 为第 n 个基函数的平移因子, c_n 为第 n 个基函数的归一化常数, $n=1, 2$ 。

Note: $f_n(t)$ is the n -th basis function, a_n is the scale factor of the n -th basis function, b_n is the shift factor of the n -th basis function, and c_n is the normalization constant of the n -th basis function, $n=1, 2$.

图 3 Morlet 小波基函数及其分布

Fig.3 Morlet wavelet basis functions and their distributions

图 3 中, 在参考路径逼近要求较高的控制时刻 ($j=0 \sim 5$) 处, 采用基函数 f_1 与 f_2 共同逼近参考路径; 在参考路径逼近要求较低的控制时刻 ($j=6 \sim 9$) 处, 仅采用粗尺度的基函数 f_2 逼近参考路径^[29]。

2.3.2 模糊控制器

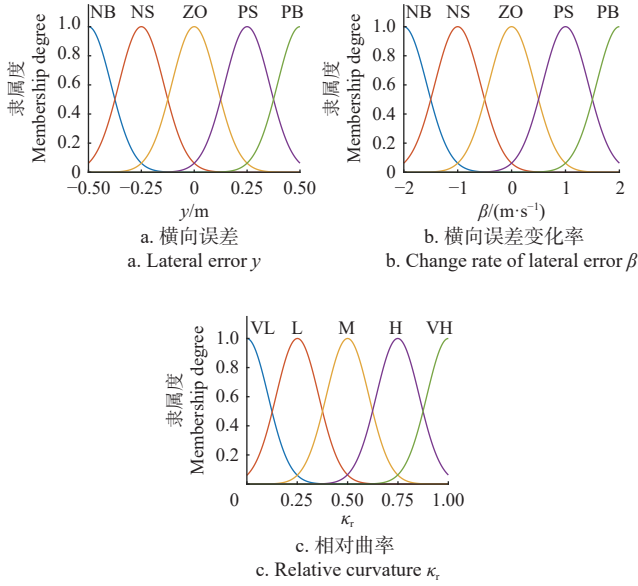
固定的输出加权矩阵难以适应插秧机作业速度与参考路径曲率的变化, 同时考虑横向误差变化率是插秧机作业速度的间接体现, 为此本文以横向误差 y 、横向误差变化率 β 和参考路径的相对曲率 κ_r 作为输入变量, 以横向误差加权系数 q_1 与横向误差变化率加权系数 q_2 作为输出变量, 设计模糊控制器以提高插秧机路径跟踪系统控制性能对作业速度和参考路径曲率变化的鲁棒性。

参考路径相对曲率 κ_r 的计算式为

$$\kappa_r = \kappa_{\text{ref}} / \kappa_{\text{max}} \quad (20)$$

式中 κ_{max} 为插秧机最小转弯半径对应的最大曲率, m^{-1} 。

横向误差 y 与横向误差变化率 β 的基本论域分别设置为 $[-0.5 \text{ m}, 0.5 \text{ m}]$ 和 $[-2 \text{ m/s}, 2 \text{ m/s}]$, 均定义 5 个模糊集合, 隶属度函数选择高斯函数 (见图 4a 和 4b), 量化等级分别为 $\{-0.5, -0.25, 0, 0.25, 0.5\} = \{\text{NB}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PB}\}$ 和 $\{-2, -1, 0, 1, 2\} = \{\text{NB}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PB}\}$ 。



注：NB 表示负大，NS 表示负小，ZO 表示零，PS 表示正小，PB 表示正大；VL 表示极小，L 表示小，M 表示中，H 表示大，VH 表示极大。
Note: NB means negative large, NS means negative small, ZO means zero, PS means positive small, and PB means positive large; VL means minimum, L means small, M means medium, H means large, and VH means maximum.

图 4 输入变量隶属度函数

Fig.4 Membership functions of input variables

参考路径相对曲率 κ_r 的基本论域设置为 $[0, 1]$ ，定义 5 个模糊集合，隶属度函数选择高斯函数（见图 4c），量化等级为 $\{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1\} = \{VL, L, M, H, VH\}$ 。

横向误差加权系数 q_1 与横向误差变化率加权系数 q_2 的基本论域分别设置为 $[3, 155]$ 和 $[1, 25]$ ，均定义 5 个模糊集合，隶属度函数选择三角函数（见图 5），量化等级分别为 $\{3, 41, 79, 117, 155\} = \{VL, L, M, H, VH\}$ 和 $\{1, 7, 13, 19, 25\} = \{VL, L, M, H, VH\}$ 。

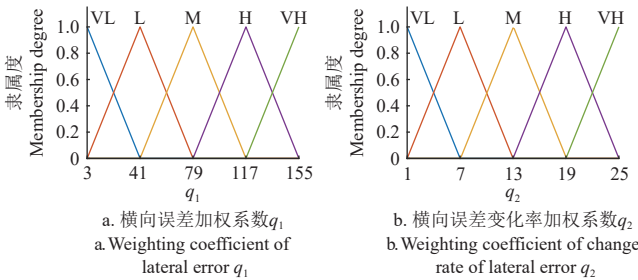


图 5 输出变量隶属度函数

Fig.5 Membership functions of output variables

依据横向误差 y 与参考路径相对曲率 κ_r 设计模糊规则在线调整 q_1 （表 2 和图 6a），其基本原则为：当横向误差绝对值或者参考路径相对曲率较大时，快速减小横向误差绝对值成为主要目标，因此需要增大横向误差加权系数，以提高插秧机路径跟踪系统的响应速度与控制精度；当横向误差绝对值或者参考路径相对曲率较小时，应该适当减小横向误差加权系数，有助于避免系统出现较大超调，确保系统的平稳性。

根据横向误差 y 与横向误差变化率 β 设计模糊规则动态调整 q_2 （表 3 和图 6b），其基本原则为：当横向误差与横向误差变化率正负号相反（即横向误差绝对值处

于逐渐减小的状态）时，若横向误差绝对值较小或者横向误差变化率绝对值较大，应该以减小横向误差变化率绝对值为主要目标，因此需要增大横向误差变化率加权系数，避免插秧机路径跟踪系统出现较大超调，确保系统的平稳性；若横向误差绝对值较大或者横向误差变化率绝对值较小，应该适当减小横向误差变化率加权系数，有助于提高系统的响应速度和控制精度。当横向误差与横向误差变化率正负号相同（即横向误差绝对值处于逐渐增大的状态）时，需要减小横向误差变化率加权系数，加快扭转横向误差变化状态。

表 2 q_1 模糊控制规则Table 2 Fuzzy control rules for q_1

相对曲率 Relative curvature κ_r	横向误差 Lateral error y				
	NB	NS	ZO	PS	PB
VL	M	L	VL	L	M
L	M	L	VL	L	M
M	H	M	L	M	H
H	VH	H	M	H	VH
VH	VH	VH	H	VH	VH

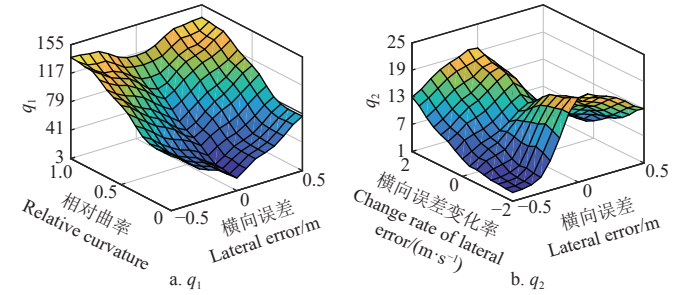


图 6 输出变量模糊规则曲面

Fig.6 Fuzzy rule surfaces of output variables

表 3 q_2 模糊控制规则Table 3 Fuzzy control rules for q_2

横向误差变化率 Change rate of lateral error β	横向误差 Lateral error y				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	VL	VL	VH	H	M
NS	VL	VL	H	M	L
ZO	VL	L	M	L	VL
PS	L	M	H	VL	VL
PB	M	H	VH	VL	VL

本文将模糊推理类型选取为 Mamdani，并采用重心法^[33]对模糊推理得到的模糊集合进行清晰化处理。

2.4 算法实施步骤

1) 设定参考路径，并计算各路径点处的参考航向角、路径曲率 κ_{ref} 和路径相对曲率 κ_r ；

2) 设置插秧机轴距 l 与表 1 中的控制参数，以及按照图 3 确定基函数；

3) 构建模型式 (5)，得到参数 A 与 b ，然后根据式 (6) ~ (13) 计算参数 Ψ 、 Θ 、 Φ 和 R' ；

4) 采集插秧机的位置坐标、航向角和速度 v ，并计算横向误差 y 、航向角误差 θ 以及横向误差变化率 β ；

5) 按照 2.3.2 节中的模糊控制方法确定参数 Q ，然后依据式 (9) 计算参数 Q' ；

6) 通过式 (16)、式 (4) 和式 (17) ~ (19) 获得当前时刻所需的前轮转角 δ ，并输出给执行装置；

7) 循环执行步骤 4) ~ 6)，直至控制器接收到停

从图 8 可知,采用本文 PFC 算法,插秧机在不同作业速度下均能对直线路径和曲线路径进行稳定跟踪。当速度 $v=0.5$ 、 1.0 、 1.5 m/s 时,直线路径跟踪横向误差渐近趋于 0,行驶轨迹无超调,上线距离分别为 1.2、2.3 和 3.3 m;曲线路径跟踪横向最大绝对误差分别为 0.7、2.4 和 5.1 cm,横向标准差分别为 0.4、1.5 和 2.8 cm。

常规 MPC 算法能够使插秧机在不同作业速度下稳定跟踪直线路径和曲线路径。当速度 $v=0.5$ 、 1.0 、 1.5 m/s 时,直线路径跟踪横向误差渐近趋于 0,上线距离分别为 2.6、2.3 和 4.6 m,但在速度 $v=1.0$ 、 1.5 m/s 情况下,行驶轨迹出现超调;曲线路径跟踪横向最大绝对误差分别为 4.3、5.5 和 7.8 cm,横向标准差分别为 3.1、3.5 和 5.0 cm。

对于直线路径跟踪情况,本文 PFC 算法与常规 MPC 算法均能使横向误差渐近趋于 0,但相比常规 MPC 算法,本文 PFC 算法的上线距离较短,且不同作业速度下的行驶轨迹均无超调,即系统动态性能对作业速度变化的鲁棒性更强;对于曲线路径跟踪情况,本文 PFC 算法的控制精度高于常规 MPC 算法,且与常规 MPC 算法相比,本文 PFC 算法的横向误差曲线在两个半圆交界处波动较小,即系统控制精度对参考路径曲率变化的鲁棒性更强。此外,本文 PFC 算法在不加入模糊控制的情况下,平均运算周期为 0.004 s,加入模糊控制后的平均运算周期为 0.012 s,而常规 MPC 算法的平均运算周期为 0.016 s,因此本文 PFC 算法的控制实时性高于常规 MPC 算法。综上对比分析表明,本文 PFC 算法的路径跟踪控制性能整体优于常规 MPC 算法,能够进一步提高插秧机的作业质量。

4 田间试验

为了进一步验证本文基于反馈线性化的模糊 PFC 算法有效性,在洋马 VP6E 型水稻插秧机上面安装司南导航的 AT360 型 GNSS 卫星天线(沿车身纵向轴线间隔 1 m 以上距离安装主从天线,主天线位于车身后部,从天线位于车身前部)、司南导航的 M300 型 GNSS 接收机(内置双天线板卡和 RTK 电台模块,定位精度 ± 1 cm,航向精度 $\pm 0.2^\circ$)、ELOBAU 公司的 424A06A090B 型角度传感器、华测导航的 CES-T 型电动方向盘、以 STM32F103ZET6 单片机为核心与企业合作研发的控制单元(内置微型惯性测量单元,姿态测量精度 $\pm 0.01^\circ$)和创腾翔公司的 CTX101-AV100 型车载触摸屏,并在地面架设 GNSS 基站,构建插秧机自动驾驶控制系统(见图 9)。在程序设计和软件开发方面,采用 C 语言编写本文 PFC 算法控制器程序,并自主开发插秧机自动驾驶触摸屏监控软件。

在浙江省嘉兴市南湖区余新镇水田内开展实车试验。田块较为平整,泥脚深度小于 15 cm,地表高低落差小于 3 cm,水层深度在 1~3 cm 之间。



图 9 插秧机自动驾驶控制系统

Fig.9 Control system of automatic driving for transplanter

首先,手动驾驶插秧机行驶至地头合适位置 A 处,并使车身纵向与作业行进方向一致,通过双天线 GNSS 系统获得插秧机在点 A 处的经纬度和航向角信息,然后依据高斯-克吕格投影原理计算出点 A 在高斯平面坐标系下的坐标值,再将高斯平面坐标系的原点平移至点 A 处,以及根据点 A 处的航向角旋转高斯坐标系,使其 X 轴方向与插秧机作业行进方向重合,最终得到插秧机在本田块内进行自动驾驶作业所使用的惯性坐标系。

在惯性坐标系下,预先设定由 3 段直线和 2 段圆弧组成的参考路径,插秧机从点 A 处出发,初始航向角为 0° ,在作业速度 $v=0.5$ 、 1.0 、 1.5 m/s 三种情况下,利用本文 PFC 算法控制插秧机对参考路径进行跟踪,参考路径和试验结果如图 10 所示。在不同作业速度下,本文 PFC 算法均能使插秧机有效跟踪参考路径,但由于受到田地平整度、土壤松散度、轮胎侧偏等干扰因素的影响,横向误差曲线存在局部波动,其波动程度随着作业速度的提高而略有增大,且横向最大绝对误差均出现在直线路径与曲线路径的交界点附近。计算得出,当速度 $v=0.5$ m/s 时,插秧机路径跟踪横向最大绝对误差为 5.9 cm(出现在 E 点附近),直线路径横向标准差为 1.4 cm,曲线路径横向标准差为 2.5 cm;当速度 $v=1.0$ m/s 时,插秧机路径跟踪横向最大绝对误差为 7.5 cm(出现在 E 点附近),直线路径横向标准差为 1.7 cm,曲线路径横向标准差为 3.6 cm;当速度 $v=1.5$ m/s 时,插秧机路径跟踪横向最大绝对误差为 9.8 cm(出现在 D 点附近),直线路径横向标准差为 2.7 cm,曲线路径横向标准差为 5.5 cm。

对比分析可知,插秧机路径跟踪横向最大绝对误差、直线路径横向标准差和曲线路径横向标准差随着作业速度的提高而增大,但变化均较小,并且相同速度下直线路径与曲线路径的标准差相差也较小,表明系统控制精度对作业速度和参考路径曲率变化具有较强的鲁棒性。综上,本文 PFC 算法路径跟踪的控制精度与鲁棒性满足插秧机作业的实际要求。

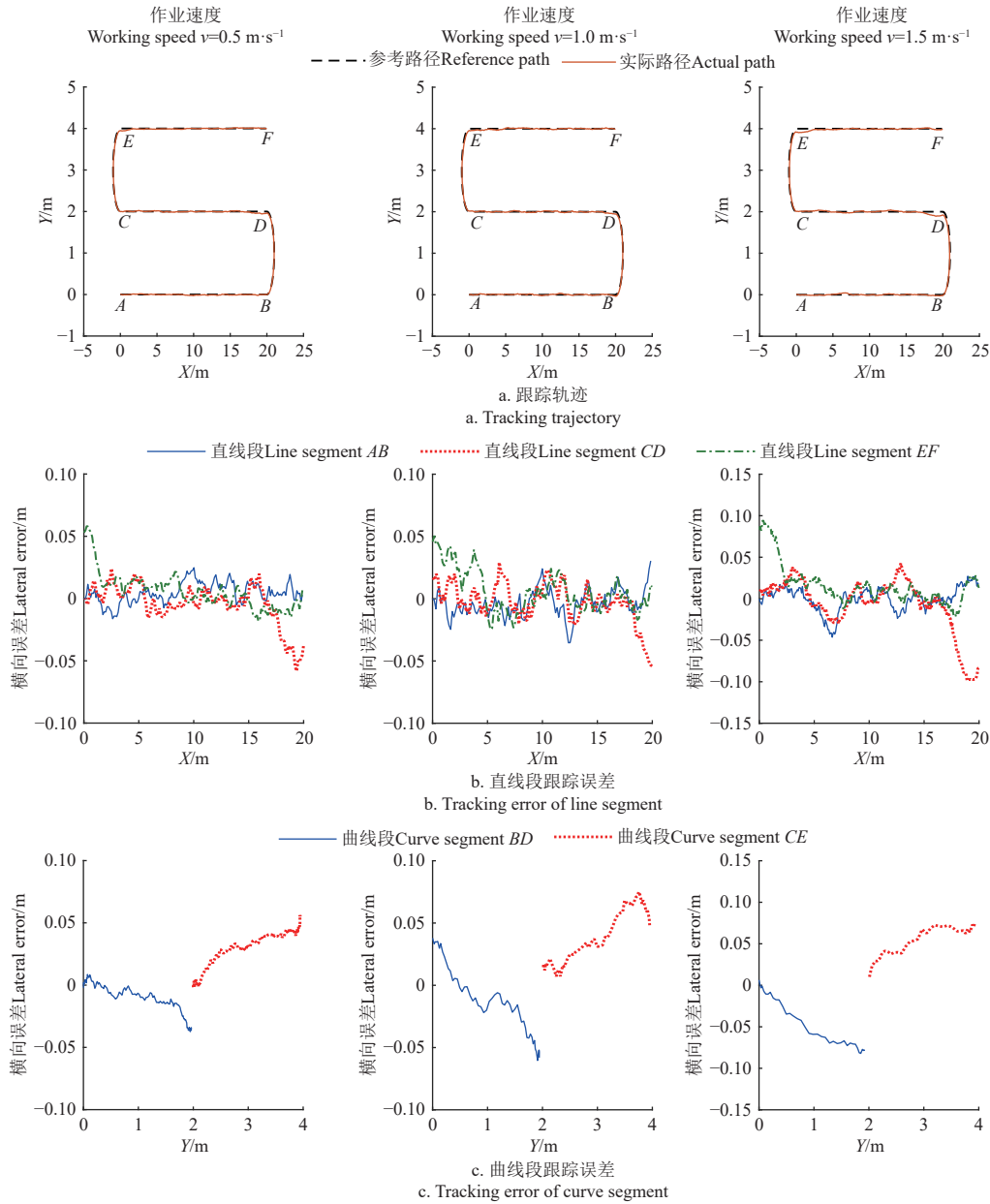


图 10 本文 PFC 算法路径跟踪田间试验结果

Fig.10 Field experiment results of path tracking for PFC algorithm in this paper

5 讨论

1) 在凹凸不平且泥泞易滑的水田环境中, 插秧机路径跟踪系统能够保持良好的稳定性与鲁棒性, 主要在于 PFC 本身具有较强的抗干扰能力, 以及运用模糊逻辑在线整定性能指标函数中的加权系数, 有效提高了系统对作业速度和路径曲率变化的自适应能力。在实际作业中, 插秧机转弯时由于离心力的作用, 内侧车轮对地面压力减小, 外侧车轮对地面压力加大, 导致 GNSS 卫星天线存在外倾趋势, 然而采用定位修正算法有效消除了外倾对插秧机位置信息的影响。在仿真与田间试验结果中, 曲线路径跟踪的实际路径位于参考路径的内侧, 主要在于加权系数的动态调整使得路径跟踪系统控制作用的强弱在发生变化, 即在曲线路径的前半段 (上接直线路径), 系统控制作用较强, 此时以保证插秧机快速准确

跟踪参考路径为主, 同时尽量避免实际路径出现超调; 而在曲线路径的后半段 (下接直线路径), 系统控制作用适当减弱, 此时以避免实际路径出现超调为主, 从而确保插秧机能够平稳进入直线路径。

2) 本文从经验角度选择动态调整 PFC 中的加权系数以提高插秧机路径跟踪系统的鲁棒性, 其实通过改变采样周期、预测时域、控制时域和加权系数中任意一个或几个参数均能在不同程度上达到此目的, 因此未来将继续开展相关方面的研究工作, 寻求更佳的控制参数调整方案。

6 结论

1) 针对插秧机路径跟踪控制问题, 本文提出基于反馈线性化的模糊 PFC 算法。与常规 MPC 算法相比, 本文 PFC 算法将反馈线性化和 PFC 两种方法相结合设计路

径跟踪控制律, 并利用模糊逻辑方法动态调整性能指标函数中的加权系数, 以及采用 Morlet 小波函数作为基函数, 在确保插秧机路径跟踪系统实时性的同时有效提高了系统的控制精度和鲁棒性。

2) 仿真试验结果表明, 本文 PFC 算法的平均运算周期为 0.012 s, 而常规 MPC 算法的平均运算周期为 0.016 s, 即本文 PFC 算法的控制实时性高于常规 MPC 算法。对于直线路径跟踪情况, 本文 PFC 算法的横向误差渐近趋于 0, 相比常规 MPC 算法, 其上线距离较短, 且行驶轨迹无超调, 即系统动态性能对作业速度变化的鲁棒性更强; 对于曲线路径跟踪情况, 本文 PFC 算法的控制精度高于常规 MPC 算法, 且控制精度对参考路径曲率变化的鲁棒性更强。

3) 田间试验结果表明, 本文 PFC 算法能够控制插秧机平稳有效跟踪参考路径, 且对作业速度和参考路径曲率变化具有较强的鲁棒性。当作业速度为 0.5、1.0 与 1.5 m/s 时, 本文 PFC 算法直线路径跟踪横向标准差分别为 1.4、1.7 和 2.7 cm, 曲线路径跟踪横向标准差分别为 2.5、3.6 和 5.5 cm, 控制精度满足插秧机实际作业要求。

【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 with English abstract)
- [2] 兰玉彬, 赵德楠, 张彦斐, 等. 生态无人农场模式探索及发展展望[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(9): 312-327.
LAN Yubin, ZHAO Denan, ZHANG Yanfei, et al. Exploration and development prospect of eco-unmanned farm modes[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(9): 312-327. (in Chinese with English abstract)
- [3] 赵春江, 李瑾, 冯献. 面向 2035 年智慧农业发展战略研究[J]. *中国工程科学*, 2021, 23(4): 1-9.
ZHAO Chunjiang, LI Jin, FENG Xian. Development strategy of smart agriculture for 2035 in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(4): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [4] 史扬杰, 程馨慧, 奚小波, 等. 农业机械导航路径跟踪控制方法研究进展[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(15): 1-14.
SHI Yangjie, CHENG Xinhui, XI Xiaobo, et al. Research progress on the path tracking control methods for agricultural machinery navigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(15): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- [5] TANG Y C, QI S J, ZHU L X, et al. Obstacle avoidance motion in mobile robotics[J]. *Journal of System Simulation*, 2024, 36(1): 1-26.
- [6] HU K W, CHEN Z, KANG H W, et al. 3D vision technologies for a self-developed structural external crack damage recognition robot[J]. *Automation in Construction*, 2024, 159: 105262.
- [7] 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 Yuhuan, LI Shichao, et al. Research progress of navigation technology for agricultural machinery[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(4): 1-18. (in Chinese with English abstract)
- [8] 钟银, 薛梦琦, 袁洪良. 智能农机 GNSS/INS 组合导航系统设计[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(9): 40-46.
ZHONG Yin, XUE Mengqi, YUAN Hongliang. Design of the GNSS/INS integrated navigation system for intelligent agricultural machinery[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(9): 40-46. (in Chinese with English abstract)
- [9] WANG C W, QUAN L, JIAO Z X, et al. Nonlinear adaptive control of hydraulic system with observing and compensating mismatching uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2018, 26(3): 927-938.
- [10] DANES L, VACCA A. A frequency domain-based study for fluid-borne noise reduction in hydraulic system with simple passive elements[J]. *International Journal of Hydromechanics*, 2021, 4(3): 203-229.
- [11] 何杰, 朱金光, 罗锡文, 等. 电动方向盘插秧机转向控制系统设计[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(6): 10-17.
HE Jie, ZHU Jinguang, LUO Xiwen, et al. Design of steering control system for rice transplanter equipped with steering wheel-like motor[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(6): 10-17. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王政, 温从剑, 朱辰雨, 等. 位置伺服永磁电机鲁棒性无差拍预测转速控制[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(19): 5176-5184.
WANG Zheng, WEN Congjian, ZHU Chenyu, et al. Deadbeat predictive control for position servo permanent magnet motor[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(19): 5176-5184. (in Chinese with English abstract)
- [13] YANG Y, LI Y K, WEN X, et al. An optimal goal point determination algorithm for automatic navigation of agricultural machinery: Improving the tracking accuracy of the Pure Pursuit algorithm[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 194: 106760.
- [14] ZHANG C L, GAO G L, ZHAO C Z, et al. Research on 4WS agricultural machine path tracking algorithm based on fuzzy control pure tracking model[J]. *Machines*, 2022, 10(7): 10070597.
- [15] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(4): 11-19. (in Chinese with English abstract)
- [16] 崔冰波, 孙宇, 吉峰, 等. 基于模糊 Stanley 模型的农机全

- 田块路径跟踪算法研究[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(12): 43-48, 88.
- CUI Bingbo, SUN Yu, JI Feng, et al. Study on whole field path tracking of agricultural machinery based on fuzzy Stanley model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(12): 43-48, 88. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(7): 34-42. (in Chinese with English abstract)
- [18] DING F, ZHANG W Y, LUO X W, et al. Gain self-adjusting single neuron PID control method and experiments for longitudinal relative position of harvester and transport vehicle[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 213: 108215.
- [19] WANG Z Q, SUN K Y, MA S Q, et al. Improved linear quadratic regulator lateral path tracking approach based on a real-time updated algorithm with fuzzy control and cosine similarity for autonomous vehicles[J]. *Electronics*, 2022, 11(22): 11223703.
- [20] WANG Y J, WANG X K, SHEN L C. Approximate optimal curve path tracking control for nonlinear systems with asymmetric input constraints[J]. *Drones*, 2022, 6(11): 6110319.
- [21] DING S H, HUANG C, DING C, et al. Straight-line tracking controller design of agricultural tractors based on third-order sliding mode[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2023, 106: 108559.
- [22] GE Z K, MAN Z H, WANG Z, et al. Robust adaptive sliding mode control for path tracking of unmanned agricultural vehicles[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2023, 108: 108693.
- [23] XU J H, LAI J, GUO R, et al. Efficiency-oriented MPC algorithm for path tracking in autonomous agricultural machinery[J]. *Agronomy*, 2022, 12(7): 1662.
- [24] SOITINAH O R, OKSANEN T. Local navigation and obstacle avoidance for an agricultural tractor with nonlinear model predictive control[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2023, 31(5): 2043-2054.
- [25] 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 with English abstract)
- [26] 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]. *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]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(5): 21-26. (in Chinese with English abstract)
- [27] 王玉亮, 李汉卿, 陈兆英, 等. 基于 MPC 的插秧机路径跟踪控制算法研究[J]. *中国农机化学报*, 2022, 43(7): 173-178.
- WANG Yuliang, LI Hanqing, CHEN Zhaoying, et al. Research on path tracking control of rice transplanter based on MPC algorithm[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2022, 43(7): 173-178. (in Chinese with English abstract)
- [28] 迟瑞娟, 熊泽鑫, 姜龙腾, 等. 基于模型预测的插秧机路径跟踪控制算法[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(11): 22-30, 99.
- CHI Ruijuan, XIONG Zexin, JIANG Longteng, et al. Path tracking control algorithm of transplanter based on model prediction[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(11): 22-30, 99. (in Chinese with English abstract)
- [29] 王龙达, 王兴成, 刘罡, 等. 城市轨道交通速度曲线预测函数控制改进算法[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(2): 273-283.
- WANG Longda, WANG Xingcheng, LIU Gang, et al. An improved predictive function control algorithm for velocity curve of urban rail vehicle[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(2): 273-283. (in Chinese with English abstract)
- [30] 刘文龙, 郭锐, 赵静一. 基于预瞄模型的农机路径跟踪预测控制方法[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(17): 39-50.
- LIU Wenlong, GUO Rui, ZHAO Jingyi. Predictive control method for the path tracking of agricultural machinery based on preview model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(17): 39-50. (in Chinese with English abstract)
- [31] 梁超, 王洪珍, 鲍小沾, 等. 一种稻田自主播种机的路径跟踪方法的研究[J]. *农机化研究*, 2024, 46(3): 52-56.
- LIANG Chao, WANG Hongzhen, BAO Xiaozhan, et al. Design and motion simulation of pneumatic device for picking up ground jujube[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2024, 46(3): 52-56. (in Chinese with English abstract)
- [32] 谢玉枚, 唐伟强, 高海燕. 基于小波基的高超声速飞行器预测函数控制[J]. *电光与控制*, 2023, 30(8): 38-42, 60.
- XIE Yumei, TANG Weiqiang, GAO Haiyan. Predictive function control of hypersonic vehicle based on wavelet basis[J]. *Electronics Optics & Control*, 2023, 30(8): 38-42, 60. (in Chinese with English abstract)
- [33] 姚颖飞, 陈学庚, 纪超, 等. 基于模糊 PID 控制的玉米精量播种机单体驱动器设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(6): 12-21.
- YAO Yingfei, CHEN Xuegeng, JI Chao, et al. Design and experiments of the single driver for maize precision seeders based on fuzzy PID control[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(6): 12-21. (in Chinese with English abstract)

Fuzzy predictive function control for the path tracking of transplanter using feedback linearization

LIU Wenlong^{1,2,3}, GUO Rui^{1,3✉}, ZHAO Jingyi^{1,4}

(1. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Department of Electrical & Information Engineering, Qinhuangdao Campus, Northeast Petroleum University, Qinhuangdao 066004, China; 3. Hebei Key Laboratory of Special Carrier Equipment, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 4. Limited Company of Yanda-Yihua Electromechanical Engineering Technology Research Institute, Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to improve the control accuracy and robustness of path tracking system for the transplanter, a fuzzy predictive function control method was proposed using feedback linearization in this study. The kinematic model of transplanter was established using Frenet coordinate system. The state feedback method was applied to the nonlinear transplanter system to make the closed loop system become linear system. The Morlet wavelet function was selected as the basis function in predictive function control. The control law of path tracking system for transplanter was designed by the predictive function control algorithm. The weighting coefficient of lateral error in the performance index function for the predictive function control was adjusted online by designing fuzzy rules according to the lateral error and the reference path curvature. The weighting coefficient of change rate of lateral error in the performance index function for the predictive function control was adjusted dynamically by designing fuzzy rules according to the lateral error and the change rate of lateral error. The simulation platform was built for path tracking control of transplanter using Matlab/Simulink software. The simulation results of the fuzzy predictive function control showed that the lateral errors of straight path tracking asymptotically approached zero, and there was no overshoot of actual driving curves at different operating speeds for the straight path tracking. In the straight path tracking, the in-line distance of the fuzzy predictive function control was 1.2, 2.3 and 3.3 m, and the in-line distance of the conventional model predictive control was 2.6, 2.3 and 4.6 m, respectively, when the operating speeds of transplanter were 0.5, 1.0 and 1.5 m/s, respectively. In the case of curve path tracking for the fuzzy predictive function control, the maximum absolute values of lateral error were 0.7, 2.4 and 5.1 cm, and the standard values of lateral error were 0.4, 1.5 and 2.8 cm, respectively, when the operating speeds of transplanter were 0.5, 1.0 and 1.5 m/s, respectively. In the case of curve path tracking for the conventional model predictive control, the maximum absolute values of lateral error were 4.3, 5.5 and 7.8 cm, and the standard values of lateral error were 3.1, 3.5 and 5.0 cm, respectively, when the operating speeds of transplanter were 0.5, 1.0 and 1.5 m/s, respectively. The average operation cycle of the fuzzy predictive function control algorithm was 0.012 s, which was 0.004 s less than that of the conventional model predictive control algorithm. Compared with the conventional model predictive control, the dynamic performance, control accuracy and robustness of path tracking system for transplanter were improved on the premise of ensuring the real-time performance by the fuzzy predictive function control. The automatic driving control system of transplanter was built to install the satellite antenna, satellite receiver, angle sensor, electric steering wheel, controller and vehicle-mounted touch screen on the transplanter. The field experiment was carried out with the automatic driving control system of transplanter. The field test results showed that the fuzzy predictive function control had the strong robustness to the changes of operating speed and reference path curvature. The transplanter tracked the reference path smoothly and effectively. The maximum absolute value of lateral error occurred near the intersection of the straight path and the curve path. Once the operating speeds of transplanter were 0.5, 1.0 and 1.5 m/s, the maximum absolute values of lateral error were 5.9, 7.5 and 9.8 cm, the standard values of lateral error for the straight path were 1.4, 1.7 and 2.7 cm, and the standard values of lateral error for the curve path were 2.5, 3.6 and 5.5 cm, respectively. The fuzzy predictive function control can fully meet the actual control requirements of transplanter, and provided a reference for the research on predictive control method of path tracking for transplanter.

Keywords: transplanter; automatic driving; path tracking; predictive function control; fuzzy control; feedback linearization; basis function