

基于模型预测的插秧机路径跟踪控制算法

迟瑞娟 熊泽鑫 姜龙腾 马悦琦 黄修炼 朱晓龙

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为了提高自动驾驶插秧机路径跟踪更高频的控制, 本文提出一种基于模型预测的路径跟踪控制方法。以模型预测算法为基础设计自动驾驶控制器, 通过简化农机车辆模型、线性化运动学方程、制定约束量, 实现以当前状态量 $p = (x, y, \theta)$ 预测下一时刻的车辆状态, 控制自动驾驶插秧机沿参考路径行走。通过在 Matlab 中建立仿真模型验证控制器的可行性, 结果表明: 直线路径跟踪横向偏差小于 0.02 m, 航向偏差小于 0.08°, 曲线路径跟踪平均值为 0.022 m、航向偏差平均值为 0.699°, 可用于实车试验。另外, 以水稻插秧机为试验平台, 通过设置不同车速验证算法的鲁棒性, 直线路径跟踪平均横向、航向偏差分别为 0.021 m、6.187°, 曲线路径跟踪平均横向、航向偏差分别为 0.450 m、10.107°, 可满足自动驾驶插秧机路径跟踪精度及实时性需求, 为农机路径跟踪控制研究提供了参考。

关键词: 插秧机; 自动驾驶; 路径跟踪; 模型预测

中图分类号: S223.91⁺2; S126

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2022)11-0022-09

OSID: 

Path Tracking Control Algorithm of Transplanter Based on Model Prediction

CHI Ruijuan XIONG Zexin JIANG Longteng MA Yueqi HUANG Xiulian ZHU Xiaolong

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to improve the higher frequency control of path tracking of automatic rice transplanter, a path tracking control method was proposed based on model prediction. The automatic driving controller was designed based on the model prediction algorithm. By simplifying the model of the agricultural machinery vehicle, linearizing the kinematic equation and formulating the constraint quantity, the current state quantity $p = (x, y, \theta)$ can predict the vehicle state at the next time and control the automatic rice transplanter to walk along the reference path. The feasibility of the controller was verified by establishing a simulation model in Matlab. The results showed that the lateral deviation of the straight-line path tracking was less than 0.02 m, the heading deviation was less than 0.08°, the average value of the lateral deviation of the curve path was 0.022 m, and the average value of the heading deviation was 0.699°, which can be used for the actual vehicle test. In addition, taking the rice transplanter as the test platform, the robustness of the algorithm was verified by setting different vehicle speeds. The average horizontal and heading deviations of straight-line path tracking were 0.021 m and 6.187°, respectively, and the average horizontal and heading deviations of curve path tracking were 0.450 m and 10.107°, respectively, which can meet the needs of the automatic driving rice transplanter for path tracking accuracy and real-time performance, and provide a reference for the research of agricultural machinery path tracking control.

Key words: transplanter; automatic driving; path tracking; model prediction

0 引言

农机自动驾驶技术是实现精准农业与无人农场

的关键与基础, 其中路径生成及跟踪是自动驾驶的研究重点^[1-3]。路径跟踪是为了使车辆可以自动跟踪由规划算法得到的轨迹路线^[4-5], 其主要任务是

收稿日期: 2021-12-16 修回日期: 2022-02-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(52172396)

作者简介: 迟瑞娟(1969—), 女, 副教授, 主要从事车辆机电控制及智能化研究, E-mail: chiruijuan@cau.edu.cn

收集各传感器的信息以确定车辆当前状态(车速、位置、车身姿态等),然后根据车辆运动学模型或动力学模型,按照所选路径跟踪算法,以车辆当前行驶路径与预设路径的偏差为约束量,计算并输出车辆控制参数,如车速、转向轮转角等^[6-7]。

目前,路径跟踪算法应用较多的有纯跟踪控制算法^[8]、PID 控制算法^[9]、神经网络^[10]、机器学习^[10]、模型预测算法^[11]等。其中,罗锡文等^[12]采用 PID 算法进行路径跟踪实验,直线路径跟踪精度平均值小于 10 cm,但弯道误差较大;唐小涛^[13]提出纯跟踪控制算法,实现对路径的跟踪,但适应性差,需要计算在不同车速下的前视距离;黄沛琛等^[14]以固定前视距离下的仿真数据作为样本训练神经网络,实现动态调节前视距离,但是需要大量数据作为训练样本。FAN 等^[11]将非线性模型预测控制理论应用于车辆轨迹跟踪,其增加了控制量的约束条件,仿真结果表明控制效果更加准确、稳定,且针对影响因素进行了灵敏度分析,实验表明对非线性模型预测控制器的效果影响不大。

农机自动驾驶技术除了满足常规道路运输的行驶控制,还要满足不同作业情况下的行驶要求。农田行驶和作业环境较为恶劣,算法的选取需考虑对环境变化及参数调节的依赖程度,防止当作业环境变化时,无法准确跟踪预设路径或无法及时调节修正算法参数^[15]。虽然农机的行驶和作业速度不高,但作业环境复杂,且需满足不同农艺的要求。作业过程中的行驶控制主要体现在对作业路径的跟踪精度及地头转弯的平顺性、安全性要求高^[16]。插秧机在我国应用广泛,插秧机特殊的工作环境和插秧农业特点^[17-18]对自动驾驶技术的需求更高。模型预测算法可提高自动驾驶响应的及时性和控制过程的平稳性。综上考虑,本文以插秧机为控制对象,以模型预测算法^[19-20]为基础设计路径跟踪控制器,以泰勒级数形式对插秧机运动学模型进行线性化处理,利用模型预测算法求解插秧机路径跟踪控制序列,依次循环求解实现对参考路径的跟踪^[21]。为确保算法中预测时域略高于控制时域以保证路径跟踪的实时性,根据插秧机车辆参数及特点增加对控制增量的约束条件,以保证插秧机跟踪过程的平稳性。最后通过仿真分析和实车试验进行验证,以证明算法对插秧机自动驾驶控制具有较高的适应性和平稳性。

1 车辆运动学模型及基于模型预测的路径跟踪控制器设计

插秧机运动学模型比较复杂,为了简化模型和

便于控制,忽略悬架特性,忽略轮胎与地面的侧向滑动,且假设插秧机左右轮胎在任意时刻都拥有相同的转向角和转速,则可将前后车轮分别集中于一点,插秧机即可简化为二轮车模型^[22]。从而减少控制器的在线计算量,提高控制系统的实时性。

车辆运动学模型如图 1 所示, (x_F, y_F) 与 (x_R, y_R) 分别为车辆前轴中心与后轴中心的坐标, δ 为前轮(转向轮)转角, θ 为车辆航向角, v 为车辆后轴速度, L 为轴距,在地面固定坐标系 XOY 下可得车辆运动学方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ \frac{\tan\delta}{L} \end{bmatrix} v \quad (1)$$

式中 $\dot{\theta}$ ——车辆航向角速度, rad/s
 $\dot{x}$ ——车辆 x 轴方向行驶车速, m/s
 $\dot{y}$ ——车辆 y 轴方向行驶车速, m/s

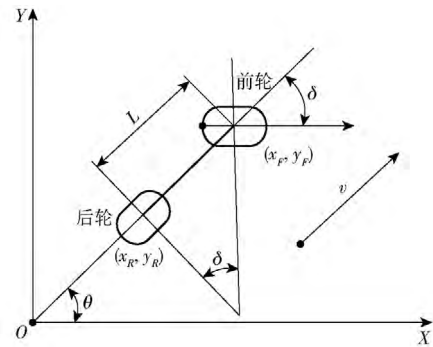


图 1 车辆运动学模型

Fig. 1 Vehicle kinematics model

由式(1)可知,插秧机路径跟踪控制器可看作是由控制量 $u = (v, \delta)$ 和状态量 $p = (x, y, \theta)$ 组成的控制系统。其一般形式可表示为

$$\dot{p} = f(p, u) \quad (2)$$

式中 $\dot{p}$ ——插秧机路径跟踪控制系统函数

基于运动学方程可知,该控制系统为非线性控制系统,无法直接运用模型预测控制算法^[23],故需对上述控制系统进行近似线性化处理。参考轨迹任一点处皆满足式(2)的一般形式,各参数添加下标 r 代表参考位置的各参考量,则式(2)于参考位置的一般形式可表达为

$$\dot{p}_r = f(p_r, u_r) \quad (3)$$

式(3)在任意参考轨迹点处进行泰勒级数展开,忽略高阶项,得到

$$\dot{p} = f(p_r, u_r) + \frac{\partial f(p, u)}{\partial p} \Big|_{p=p_r} (p - p_r) + \frac{\partial f(p, u)}{\partial u} \Big|_{u=u_r} (u - u_r) \quad (4)$$

将式(4)与式(3)相减,可得自动驾驶农机误差模型即线性表达式为

$$\dot{\tilde{p}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -v_r \sin \theta_r \\ 0 & 0 & v_r \cos \theta_r \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_r \\ y - y_r \\ \theta - \theta_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta_r & 0 \\ \sin \theta_r & 0 \\ \frac{\tan \theta_r}{L} & \frac{v_r}{L \cos^2 \delta_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v - v_r \\ \delta - \delta_r \end{bmatrix} \quad (5)$$

为了能够将插秧机二轮车模型应用于模型预测控制器的设计,利用前向欧拉公式^[24],将上述线性化系统进行离散化处理可得

$$\tilde{p}(k+1) = A_k \tilde{p}(k) + B_k \tilde{u}(k) \quad (6)$$

其中

$$A_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -v_r T \sin \theta_r \\ 0 & 1 & v_r T \cos \theta_r \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_k = \begin{bmatrix} T \cos \theta_r & 0 \\ T \sin \theta_r & 0 \\ \frac{T \tan \delta_r}{L} & \frac{v_r T}{L \cos^2 \delta_r} \end{bmatrix}$$

式中 k ——任一时刻 T ——采样时间

得到误差模型式(6)后,需基于自动驾驶插秧机线性误差模型设计目标函数,预测插秧机未来时刻的输出。且为了更好地约束控制增量,设

$$\xi(k|t) = \begin{bmatrix} \tilde{p}(k|t) \\ \tilde{u}(k-1|t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中 $\xi(k|t)$ ——假设 k 时刻新的状态量
则可推导出下一时刻 $\xi(k+1|t)$ 的表达式为

$$\xi(k+1|t) = \begin{bmatrix} \tilde{p}(k+1|t) \\ \tilde{u}(k|t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

结合式(6),可将式(8)等号右侧转换为

$$\begin{bmatrix} A_k \tilde{p}(k|t) + B_k \tilde{u}(k-1|t) \\ \tilde{u}(k-1|t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_k \tilde{u}(k|t) - B_k \tilde{u}(k-1|t) \\ \tilde{u}(k|t) - \tilde{u}(k-1|t) \end{bmatrix},$$

可得到新的状态空间表达式为

$$\xi(k+1|t) = A_{kt} \xi(k|t) + B_{kt} \Delta u(k|t) \quad (9)$$

$$\text{其中 } A_{kt} = \begin{bmatrix} A_k & B_k \\ O_{m \times n} & I_n \end{bmatrix} \quad B_{kt} = \begin{bmatrix} B_k \\ I_m \end{bmatrix}$$

式中 $\Delta u(k|t)$ —— k 时刻的控制增量

n ——状态量维度

m ——控制量维度 t ——时间参数

I ——单位矩阵 O ——零矩阵

假设未来预测时域内插秧机状态为 $\xi(k+1|t)$ 、 $\xi(k+2|t)$ 、 $\xi(k+3|t)$ 、 $\cdots$ 、 $\xi(k+n|t)$,则类比于式(9),可推导出 $k+2$ 、 $k+3$ 、 $\cdots$ 、 $k+n$ 时刻的状态

方程表达式为

$$\begin{cases} \xi(k+2|t) = A_{kt}^2 \xi(k|t) + A_{kt} B_{kt} \Delta u(k|t) + B_{kt} \Delta u(k+1|t) \\ \xi(k+3|t) = A_{kt}^3 \xi(k|t) + A_{kt}^2 B_{kt} \Delta u(k|t) + A_{kt} B_{kt} \Delta u(k+1|t) + B_{kt} \Delta u(k+2|t) \\ \vdots \\ \xi(k+n|t) = A_{kt}^n \xi(k|t) + A_{kt}^{n-1} B_{kt} \Delta u(k|t) + \cdots + B_{kt} \Delta u(k+n-1|t) \end{cases} \quad (10)$$

由递推规律可得自动驾驶系统预测输出表达式^[25]为

$$Y(k) = \Psi \xi(k|t) + H \Delta U(k|t) \quad (11)$$

其中

$$Y(k) = \begin{bmatrix} \xi(k+1|t) \\ \xi(k+2|t) \\ \vdots \\ \xi(k+N_c|t) \\ \vdots \\ \xi(k+N_p|t) \end{bmatrix} \quad \Psi = \begin{bmatrix} CA_{kt} \\ CA_{kt}^2 \\ \vdots \\ CA_{kt}^{N_c} \\ \vdots \\ CA_{kt}^{N_p} \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} CB_{kt} & 0 & \cdots & 0 \\ CA_{kt} B_{kt} & CB_{kt} & & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ CA_{kt}^{N_c-1} B_{kt} & CA_{kt}^{N_c-2} B_{kt} & \cdots & CB_{kt} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ CA_{kt}^{N_p-1} B_{kt} & CA_{kt}^{N_p-2} B_{kt} & \cdots & CA_{kt}^{N_p-N_c-1} B_{kt} \end{bmatrix}$$

$$\Delta U(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k|t) \\ \Delta u(k+1|t) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_c|t) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_p|t) \end{bmatrix}$$

式中 C ——比例系数

N_p ——预测时域长度

N_c ——控制时域长度

由式(11)可知,若已知当前时刻的状态量和控制时域 N_c 内的控制增量,可以得到预测时域 N_p 的系统输出量且一般情况下满足 $N_p \geq N_c$ 。

在目标函数中,控制增量的变化对下一时刻预测状态有极大影响,需依据插秧机自身车辆特性对控制增量进行约束,即

$$\Delta u_{\min}(k+i) \leq \Delta u(k+i) \leq \Delta u_{\max}(k+i) \quad (i=0,1,2,\cdots,N_c-1) \quad (12)$$

转换为

$$U_{\min} \leq A \Delta U_t + U_t \leq U_{\max} \quad (13)$$

其中

$$A_{N_c \times N_c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

为减少算法运行时间及便于程序的编写,将目标函数转换为标准二次型形式并结合约束条件,求解最优方案为

$$\min_{\Delta U} J(k) = \frac{1}{2} \Delta U(k)^T Z \Delta U(k) + G^T \Delta U(k) \quad (14)$$

$$\text{其中 } Z = \begin{bmatrix} H^T Q H + R & 0 \\ 0 & \rho \end{bmatrix} \quad G^T = [2e^T Q H \quad 0]$$

式中 e^T ——预测时域内的跟踪误差

R, Q ——权重矩阵

ρ ——权重系数

求解式(14)后得到控制时域内一系列控制输入增量为

$$\Delta U_{N_c} = [\Delta u_k \quad \Delta u_{k+1} \quad \cdots \quad \Delta u_{k+N_c-1}]^T \quad (15)$$

将控制序列中的第一个元素作为实际的控制输入增量作用于系统,即

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u_k \quad (16)$$

每周周期依次循环,重复上述计算过程,用于预测插秧机未来时刻的输出,实现插秧机对预设路径的跟踪控制,结合约束条件限制,对每个采样周期内的控制增量进行限制,避免被控系统控制量突变的现象,实现快速且平稳地追踪^[26]。

2 路径跟踪误差模型

考虑农艺水平的要求,一方面需确保自动驾驶插秧机路径跟踪精度,另一方面需考虑路径跟踪过程中的平稳性。基于模型预测算法设计自动驾驶路径跟踪控制器,以横向偏差 d 和航向偏差 Φ 作为评判路径跟踪效果的因素。路径跟踪误差模型如图 2 所示,横向偏差定义为车辆后轴中心 (x_{cr}, y_{cr}) 与其在期望路径上的投影点 $S(x_s, y_s)$ 之间的距离,规定车辆在参考路径右侧为正,计算式为

$$d = \sqrt{(x_{cr} - x_s)^2 + (y_{cr} - y_s)^2} \quad (17)$$

式中 x_{cr} ——平面坐标中车辆后轴中心 x 轴坐标, m

y_{cr} ——平面坐标中车辆后轴中心 y 轴坐标, m

x_s ——投影点 S 处 x 轴坐标, m

y_s ——投影点 S 处 y 轴坐标, m

先找到期望路径上述投影点 $S(x_s, y_s)$ 处的切线,航向偏差计算式为插秧机本身航向与该切线的绝对角度之差,规定顺时针方向为正,计算式为

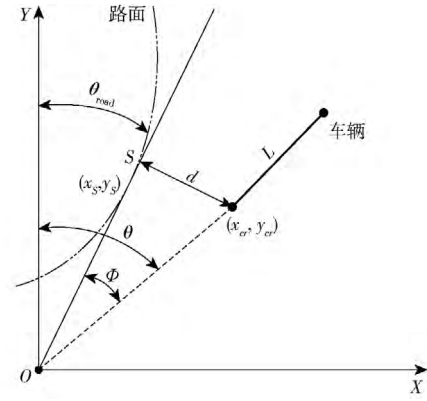


图 2 路径跟踪误差模型

Fig. 2 Path tracking error model

$$\Phi = 57.3(\theta - \theta_{road}) \quad (18)$$

式中 θ_{road} ——投影点 S 处的切线航向角, rad

3 路径跟踪算法仿真

在进行实车试验之前,通过仿真对所设路径跟踪算法进行分析。利用 Matlab 进行算法仿真,因插秧机在田中行走的路径可大致分为直线作业路径、地头转向路径,在仿真环境中分别设计直线与曲线的参考路径,在不同速度下测试所设路径跟踪控制系统对不同路径的跟踪能力。

3.1 直线跟踪仿真

直线路径跟踪仿真基本设定为:插秧机初始状态为 $X_0 = 0.5 \text{ m}$, $Y_0 = 1.0 \text{ m}$, $\delta = 0^\circ$,分别以期望纵向速度 $0.5, 1.0, 1.5 \text{ m/s}$ 跟踪参考路径,直线参考路径为直线 $Y = X$,其中 X, Y 取值范围均为 $0 \sim 20 \text{ m}$,控制周期为 50 ms 。其余模型预测算法参数如表 1 所示,在 Matlab 中编写相关程序,对无人驾驶车辆的直线路径跟踪过程进行仿真。

表 1 模型预测算法控制参数

Tab. 1 Control parameters of model prediction algorithm

参数	数值
N_c	8
N_p	20
T/s	0.05
$\delta/(\circ)$	$-35 \sim 35$
$\Delta\delta/(\circ)$	$-0.85 \sim 0.85$
ρ	1 000
Q	$I_{3 \times 20}$
R	$5I_{2 \times 80}$

3 种车速下直线路径跟踪结果如图 3a 所示,仿真路线都可迅速跟踪上期望轨迹。图 3b 为图 3a 中红色矩形位置偏差较大值的局部放大图,因为初始位置及初始状态与期望值存在偏差,为正常的追踪过程。跟踪过程中实时偏差如图 4 所示。图 4a 为横向偏差,在大约 $X = 6 \text{ m}$ 后误差逐渐趋向平稳,跟

踪偏差在 0.020 m 之内;图 4b 为 3 种速度下对应的航向偏差,航向偏差较大值出现在初始跟踪处,最大值为 0.500° ,在大约 $X=7$ m 后偏差值趋向稳定,偏差在 0.080° 以内。由仿真结果可知,控制器不仅实现了较高精度跟踪期望直线轨迹的功能,也保证了跟踪过程中的平稳性。

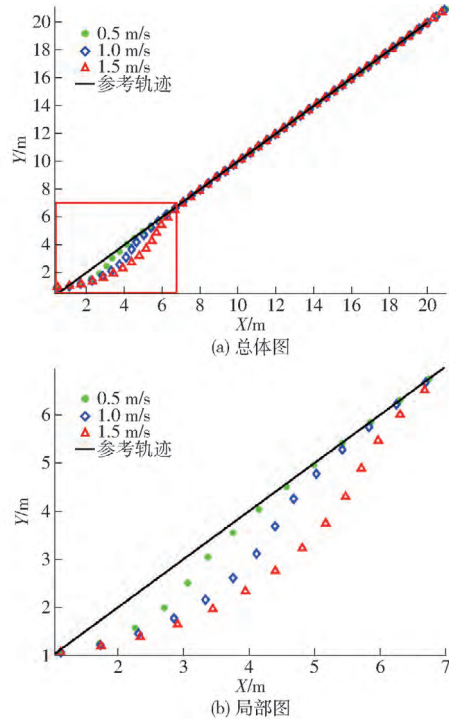


图 3 直线参考轨迹与实际轨迹

Fig. 3 Linear reference track and actual track

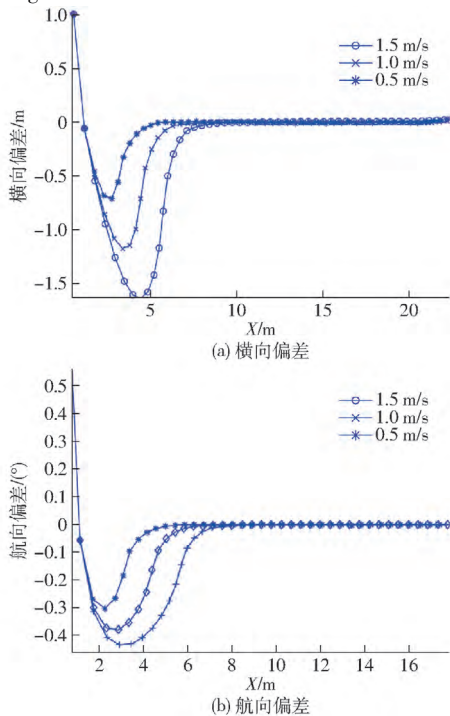


图 4 3 种速度下横向、航向偏差曲线(直线跟踪)

Fig. 4 Lateral and heading deviation at three speeds

3.2 曲线跟踪仿真

曲线参考路径设定为

$$Y = \begin{cases} \sqrt{1-X^2} & (-1 \text{ m} \leq X \leq 1 \text{ m}) \\ -\sqrt{1-(X-2)^2} & (1 \text{ m} \leq X \leq 3 \text{ m}) \end{cases} \quad (19)$$

将插秧机的初始状态设为 $X_0 = -1.0$ m, $Y_0 = 0$, $\delta = 0.5^\circ$;行车速度分别设为 0.5、1.0、1.5 m/s;采样控制周期设为 50 ms;控制增量约束及模糊控制器的基本参数设置参照直线路径仿真试验。如图 5a 中参考路径所示,预设曲线设计为“S”形,目的是验证不同速度下路径跟踪控制器对曲线路径的跟踪能力。

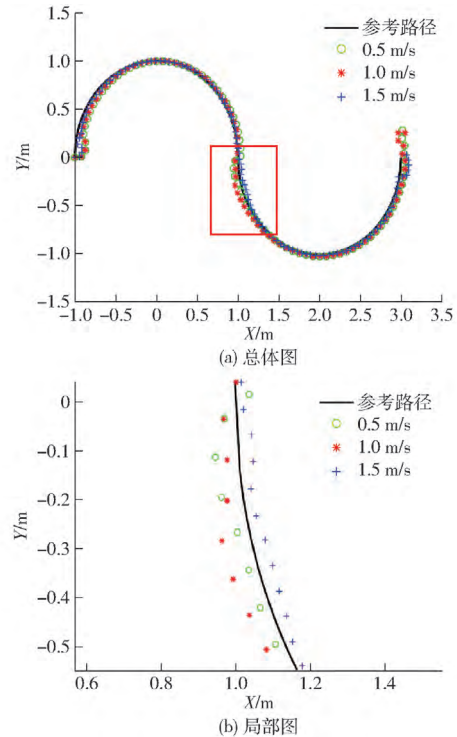


图 5 曲线参考轨迹与实际轨迹

Fig. 5 Curve reference trajectory and actual trajectory diagrams

曲线路径整体跟踪效果如图 5a 所示,3 种速度下对曲线跟踪在起始点处、中间换向转向处及目标终止点位置出现较大偏差,其余位置跟踪平稳且偏差较小。起始处偏差较大是因为初始状态值与期望值存在偏差,终止点处偏差较大是因为预测时域大于控制时域部分,所做出的预测值超出预设参考路径,都在可接受范围之内。图 5b 为图 5a 中红色矩形所示位置的局部放大图,偏差较大。由文献[27]可知,预测算法中参数预测时域 N_p 对路径跟踪精度和稳定性有极大影响,即

$$d_p = v_x N_p T \quad (20)$$

式中 d_p ——预测距离

v_x ——插秧机纵向车速

在采样时间及纵向车速不变时,预测距离主要与预测时域有关。若预测距离过大,将增大跟

踪误差权重,影响插秧机跟踪精度,若预测距离过小,控制量及增量前后时刻相差较大,导致车辆无法及时准确转向。另外,本文针对控制对象所控车速为插秧机后轴实时车速,在插秧机转向时,无法保证纵向速度不变,且预测时域为固定值,故插秧机转向动作发生时,无法实时调参兼顾稳定性与精度。

图 6 为 3 种速度下曲线仿真跟踪过程中的实时偏差曲线。由图 6 可知,3 种速度下横向偏差较大值出现在 $X = -1\text{ m}$ 、 $X = 1\text{ m}$ 、 $X = 3\text{ m}$ 附近,最大值出现在 $X = 1\text{ m}$ 附近,最大值为 0.580 m ,平均值为 0.022 m 。航向偏差最大值出现在 $X = 1\text{ m}$ 附近,最大值为 10.570° ,平均值为 0.699° 。结果表明,所设路径跟踪控制器可用于曲线追踪,但设计地头转向曲线时,应避免连续换向曲线设计。

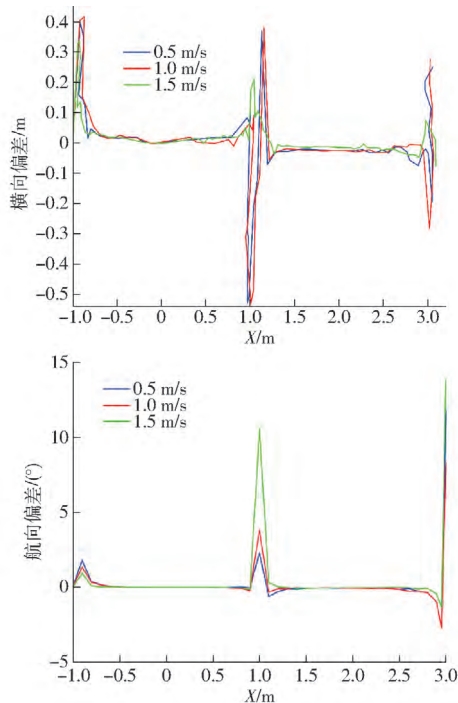
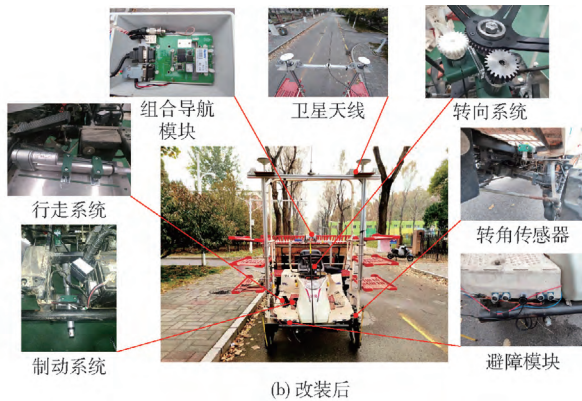


图 6 3 种速度下横向、航向偏差曲线(曲线跟踪)

Fig. 6 Lateral and heading deviation at three speeds



(a) 改装前



(b) 改装后

图 7 平台实物图

Fig. 7 Initial appearance and transformation of platform

4 实车试验

为了验证所建立的基于模型预测算法的路径跟踪控制器的鲁棒性及跟踪精度,以改装后的洋马 VP6E 型水稻插秧机为试验平台,插秧机参数如表 2 所示。

表 2 洋马 VP6E 型插秧机参数

Tab. 2 Parameters of Yanmar VP6E of transplanter

参数	数值
整车质量/kg	496
长×宽×高/(mm×mm×mm)	2 890×2 440×2 290
轴距/mm	1 050
前轮距/mm	1 181
后轮距/mm	1 200
最小离地间隙/mm	300

平台实物如图 7 所示,改装原插秧机中的转向系统、行走系统、制动系统:以前轮转角传感器为转向的信息反馈传感器,以无刷直流电机为动力源,通过齿轮传动将动力传输至方向盘及转向轴,实现自主转向功能,以电推杆模拟驾驶员踩、放踏板的动作。同时,该试验平台加入 RTK-GPS 设备来实现高精度的定位导航功能,增加避障模块,实时检测障碍物^[28]以保证自动驾驶插秧机的作业安全。

在试验之前,预先设定如图 8 中所示共 5 段参考轨迹,由上及下为:第 1 直线段为由起始点 A ($116.349\ 846\ 210^\circ\text{E}$, $40.005\ 135\ 922^\circ\text{N}$)至终止点 B ($116.349\ 846\ 210^\circ\text{E}$, $40.005\ 140\ 836\ 36^\circ\text{N}$)长约 10 m 的直线 AB;第 1 曲线段为圆心 ($116.349\ 846\ 210^\circ\text{E}$, $40.005\ 152\ 754\ 56^\circ\text{N}$)、半径为 1 m 的半圆 $\widehat{BC}$;第 2 直线段为由起始点 C ($116.349\ 846\ 820\ 73^\circ\text{E}$, $40.005\ 140\ 836\ 36^\circ\text{N}$)至终止点 D ($116.349\ 846\ 820\ 73^\circ\text{E}$, $40.005\ 156\ 443\ 06^\circ\text{N}$)长约 8 m 的直线 CD;第 2 曲线段为圆心 ($116.349\ 870\ 120\ 73^\circ\text{E}$, $40.005\ 156\ 443\ 06^\circ\text{N}$)、半径为 1 m 的半圆 $\widehat{DM}$;第 3 直线段为由起始点 M

(116.349 901 019 97°E, 40.005 156 443 06°N) 至终止点 $N(116.349 901 019 97^\circ\text{E}, 40.005 178 888 05^\circ\text{N})$ 长约 10 m 的直线 MN 。

采集插秧机实际行走的经纬度数据, 将参考路径及实车行走的经纬度数据转换为墨卡托投影下的

平面坐标数据, 并将所有平面坐标数据减去各自第 1 组平面坐标, 绘制实车试验路径跟踪曲线。插秧机由 $(0, 0)$ 出发至终点 $(14 \text{ m}, 4 \text{ m})$, 由图 8 可得 3 段直线的跟踪效果较好, 两段曲线跟踪偏差较大, 实时偏差如图 9~12 所示。

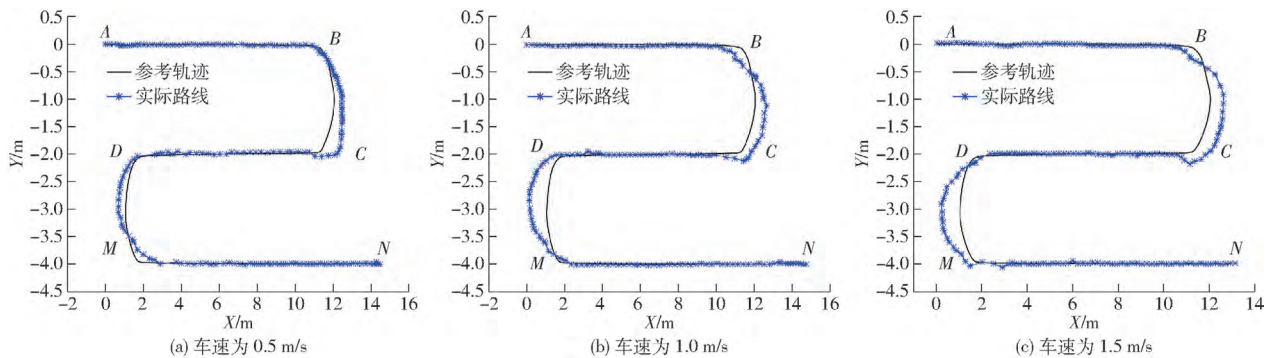


图 8 实车试验路径跟踪曲线

Fig. 8 Real vehicle test path tracking diagrams

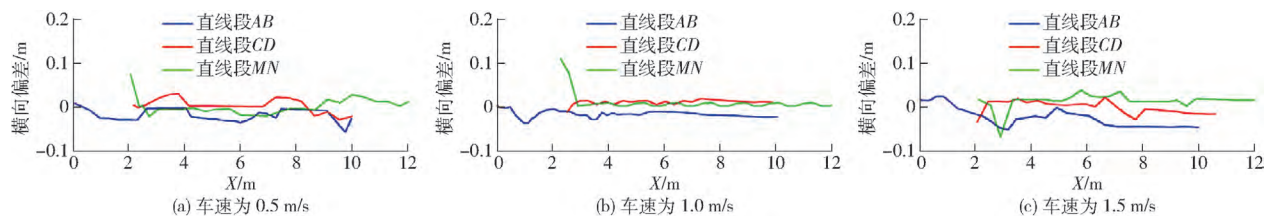


图 9 实车试验直线横向偏差

Fig. 9 Lateral deviation of straight line in real vehicle test

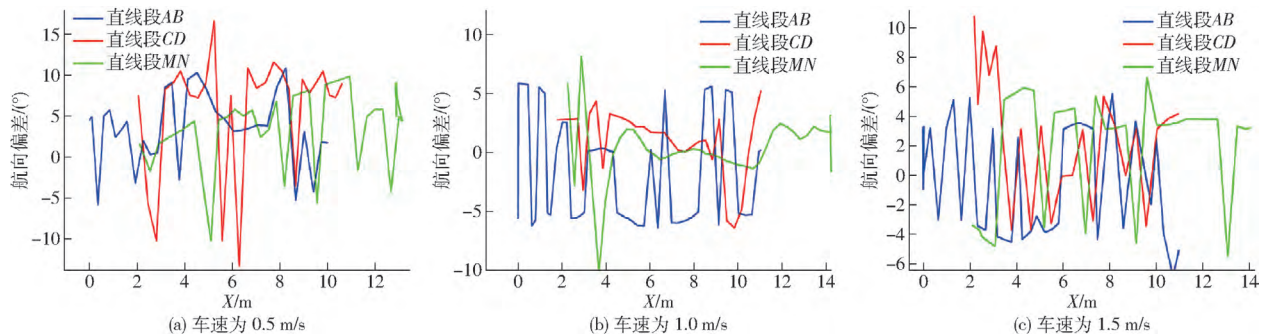


图 10 实车试验直线航向偏差

Fig. 10 Straight course deviation of real vehicle test

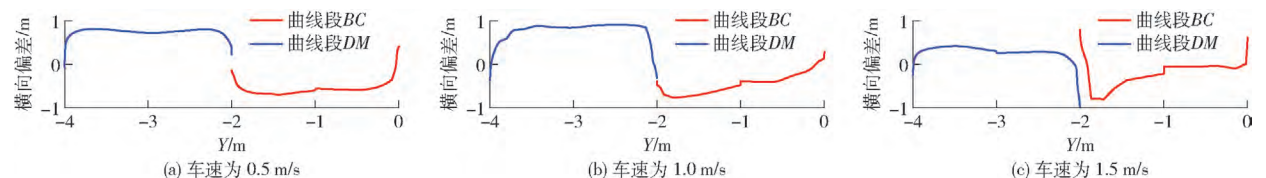


图 11 实车试验曲线横向偏差

Fig. 11 Lateral deviation of real vehicle test curves

图 9 为实车试验跟踪 3 段直线路径的实时横向偏差, 由表 3 可得, 对直线跟踪的最大横向偏差为 0.110 m, 平均横向偏差为 0.021 m, 各组数据小于 0.02 m 占比不小于 69%, 表明跟踪过程的平稳性较高; 图 10 为实车试验跟踪 3 段直线路径的实时航向偏差, 由表 3 可得, 航向偏差最大值为 10.949°, 平

均航向偏差为 6.187°, 小于 5° 偏差占比不小于 71%, 表明跟踪过程的实时航向转换变化平缓。

图 11 为实车试验跟踪 2 段曲线路径的实时横向偏差。由表 4 可得, 横向偏差最大值为 0.951 m, 最小值为 0.030 m, 平均横向偏差为 0.450 m, 偏差小于 0.04 m 占比不小于 43%; 图 12 为实车试验跟

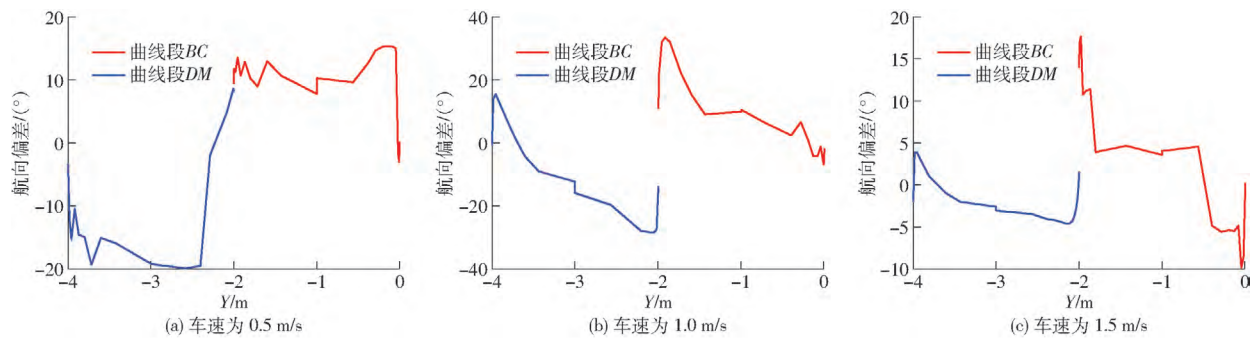


图 12 实车试验曲线航向偏差
Fig. 12 Heading deviation of real vehicle test curves

表 3 实车试验直线跟踪能力
Tab. 3 Straight line tracking capability of real vehicle test

车速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	横向偏差/m		平均横向 偏差/m	小于 0.02 m 百分比/%	航向偏差/($^{\circ}$)		平均航向偏 差/($^{\circ}$)	小于 5° 百 分比/%
	最小值	最大值			最小值	最大值		
0.5	0.003	0.067	0.019	69	0.301	10.949	6.517	73
1.0	0.001	0.057	0.022	89	0.080	10.763	6.471	75
1.5	0	0.110	0.019	87	0.078	6.231	5.573	71
平均值	0.002	0.078	0.021		0.153	9.317	6.187	

表 4 实车试验曲线跟踪能力
Tab. 4 Real vehicle test curve tracking capability

车速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	横向偏差/m		平均横向 偏差/m	小于 0.04 m 百分比/%	航向偏差/($^{\circ}$)		平均航向偏 差/($^{\circ}$)	小于 7° 百 分比/%
	最小值	最大值			最小值	最大值		
0.5	0.107	0.819	0.542	43	0.220	19.864	10.847	50
1.0	0.052	0.919	0.483	52	0.628	33.391	14.463	57
1.5	0.030	0.951	0.326	58	0.091	17.720	5.012	73
平均值	0.063	0.896	0.450		0.313	23.658	10.107	

踪 2 段曲线路径的实时航向偏差,由表 4 可得,航向偏差最大值为 33.391° ,最小值为 0.091° ,平均航向偏差为 10.107° ,偏差小于 7° 占比不小于 50%。

5 讨论

- (1)模型预测算法可成功应用于自动驾驶农机的路径跟踪,且对路径追踪的过程中横向、航向偏差值较小且变化平稳。
- (2)插秧机为低速车辆,算法可应用于农机不同速度状态下,且不同速度下跟踪结果变化较小,表明算法鲁棒性较好。
- (3)实车试验直线部分的跟踪效果略好于曲线部分,仿真试验跟踪效果略好于实车试验。经分析实车试验相比于仿真试验需要考虑机器及导航设备误差等因素,该因素为导致跟踪结果偏差较大的主要原因;在实车试验中,曲线试验误差大于直线试验误差,但追踪过程变化平稳,横向偏差稍大但稳定于约 0.4 m。原因为:如曲线仿真结论处所述,预测时域的选取应与插秧机纵向速度、横向速度有关。在直线行驶时,车辆后轴速度理论值等于纵向速度且

不变,故预测时域 N_p 虽为固定值,但对直线路径跟踪精度影响较小。当插秧机进行转向动作时,纵向速度实时变化,固定的预测时域 N_p 导致预测距离 d_p 实时变化,将很大程度上影响插秧机对曲线路径的跟踪精度及转向的及时性。另外,转向策略的选取也需考虑插秧机本身转向特性。

6 结论

- (1)基于模型预测算法建立了路径跟踪控制器,在参考路径点采用泰勒级数形式线性化农机自动驾驶误差模型,建立控制目标函数,在控制过程中,增加控制量极限约束,保证对路径跟踪的平稳性。
- (2)利用 Matlab 建立 3 种速度下的仿真试验,结果表明,农机针对直线跟踪的横向偏差可稳定在 0.020 m 以内,航向偏差可稳定在 0.080° 以内。针对曲线跟踪平均横向偏差为 0.022 m,平均航向偏差为 0.699° ,表明所设计算法可适用于实车路径跟踪。
- (3)以插秧机为试验平台进行实车试验,试验

结果表明,该控制器用于自动驾驶插秧机直线路径跟踪时的平均横向偏差为 0.021 m、平均航向偏差为 6.187°, 曲线路径跟踪时的平均横向偏差为 0.450 m、平均航向偏差为 10.107°。提出的路径跟踪控制算法可成功应用于自动驾驶插秧机对作业行的路径跟踪,且具有较好的鲁棒性及跟踪性能。

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] 姬长英, 周俊. 农业机械导航技术发展分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 44-54.
JI Changying, ZHOU Jun. Analysis on the development of agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 44-54. (in Chinese)
- [3] 杜岳峰, 傅生辉, 毛恩荣, 等. 农业机械智能化设计技术发展现状与展望[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 1-17.
DU Yuefeng, FU Shenghui, MAO Enrong, et al. Development status and prospect of intelligent design technology for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 1-17. (in Chinese)
- [4] 张智刚, 王进, 朱金光, 等. 我国农业机械自动驾驶系统研究进展[J]. 农业工程技术, 2018, 38(6): 23-27.
ZHANG Zhigang, WANG Jin, ZHU Jinguang, et al. Research progress of automatic driving system for agricultural machinery in China[J]. Agricultural Engineering Technology, 2018, 38(6): 23-27. (in Chinese)
- [5] 刘成良, 林洪振, 李彦明, 等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 1-18.
LIU Chengliang, LIN Hongzhen, LI Yanming, et al. Analysis on research status and development trend of intelligent control technology of agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 1-18. (in Chinese)
- [6] 胡静涛, 高雷, 白晓平, 等. 农业机械自动驾驶技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 1-10.
HU Jingtao, GAO Lei, BAI Xiaoping, et al. Research progress of automatic navigation technology for agricultural machinery[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 1-10. (in Chinese)
- [7] 熊璐, 杨兴, 卓桂荣, 等. 无人驾驶车辆的运动控制发展现状综述[J]. 机械工程学报, 2020, 56(10): 127-143.
XIONG Lu, YANG Xing, ZHUO Guirong, et al. Overview of the development status of motion control of unmanned vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(10): 127-143. (in Chinese)
- [8] TIEP D K, LEE K, IM D, et al. Design of fuzzy-pid controller for path tracking of mobile robot with differential drive[J]. International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems, 2018, 18(3): 220-228.
- [9] TIPSUWAN Y, CHOW M. Model predictive path tracking via middleware for networked mobile robot over IP network[C]//IEEE, 2004.
- [10] ENAYATI N, FERRIGNO G, DE MONI E. Skill-based human-robot cooperation in tele-operated path tracking[J]. Autonomous Robots, 2018, 42(5): 997-1009.
- [11] FAN H, LI S, DING H, et al. Simulation analysis of vehicle trajectory tracking based on model predictive control[C]//2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2019: 1892-1897.
- [12] 罗锡文, 张智刚, 赵祚喜, 等. 东方红 X-804 拖拉机的 DGPS 自动驾驶控制系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 139-145.
LUO Xiwen, ZHANG Zhigang, ZHAO Zuoxi, et al. DGPS automatic navigation control system of Dongfanghong X-804 tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 139-145. (in Chinese)
- [13] 唐小涛. 智能水稻穴直播机导航控制系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
TANG Xiaotao. Research on navigation control system of intelligent rice hole direct seeding machine[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018. (in Chinese)
- [14] 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[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(6): 216-219.
HUANG Peichen, LUO Xiwen, ZHANG Zhigang. Agricultural machinery head steering control method based on improved pure tracking model[J]. Computer Engineering and Application, 2010, 46(21): 216-219. (in Chinese)
- [15] 刘进一, 杜岳峰, 张硕, 等. 基于 GNSS/MIMU/DR 的农业机械组合导航定位方法[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 1-7.
LIU Jinyi, DU Yuefeng, ZHANG Shuo, et al. Integrated navigation and positioning method of agricultural machinery based on GNSS/MIMU/DR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 1-7. (in Chinese)
- [16] 周维, 过学迅, 裴晓飞, 等. 基于 RRT 与 MPC 的智能车辆路径规划与跟踪控制研究[J]. 汽车工程, 2020, 42(9): 1151-1158.
ZHOU Wei, GUO Xuexun, PEI Xiaofei, et al. Research on intelligent vehicle path planning and tracking control based on RRT and MPC[J]. Automotive Engineering, 2020, 42(9): 1151-1158. (in Chinese)
- [17] 包春江, 李宝筏. 日本水稻插秧机的研究进展[J]. 农业机械学报, 2004, 35(1): 162-166.
BAO Chunjiang, LI Baofa. Research progress of rice transplanter in Japan[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(1): 162-166. (in Chinese)
- [18] 郑银河, 胡光忠, 程鹏飞, 等. 近代插秧机研究现状及其发展趋势[J]. 农机化研究, 2015, 37(5): 254-259.
ZHENG Yinhe, HU Guangzhong, CHENG Pengfei, et al. Research status and development trend of modern rice transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(5): 254-259. (in Chinese)

- [25] 邢赫, 臧英, 曹晓曼, 等. 水稻气力式排种器投种轨迹试验与分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 23–30.
XING He, ZANG Ying, CAO Xiaoman, et al. Experiment and analysis of dropping trajectory on rice pneumatic metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 23–30. (in Chinese)
- [26] 廖庆喜, 王迪, 姚露, 等. 油菜覆膜打孔穴播机打孔装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 62–72.
LIAO Qingxi, WANG Di, YAO Lu, et al. Design and test of perforation device of rape laminated perforation machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 62–72. (in Chinese)
- [27] 王金武, 唐汉, 王金峰, 等. 指夹式玉米精量排种器导种投送运移机理分析与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 29–37.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng, et al. Analysis and experiment of guiding and dropping migratory mechanism on pickup finger precision seed metering device for corn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 29–37. (in Chinese)
- [28] 刘姣娣, 曹卫彬, 田东洋, 等. 钵苗有效零速移栽栽植机构运动学分析与试验[J]. 机械工程学报, 2017, 53(7): 76–84.
LIU Jiaodi, CAO Weibin, TIAN Dongyang, et al. Kinematic analysis and test on transplanting mechanism with effective zero-speed transplanting on mulch film[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(7): 76–84. (in Chinese)
- [29] 李沐桐, 李天宇, 官晓东, 等. 旱地回转扎穴式播种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 48–57.
LI Mutong, LI Tianyu, GUAN Xiaodong, et al. Design and experiment of rotary hole seeder for dryland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 48–57. (in Chinese)
- [30] 丁幼春, 杨军强, 朱凯, 等. 油菜精量排种器种子流传感装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 29–36.
DING Youchun, YANG Junqiang, ZHU Kai, et al. Design and experiment of seed transfer induction device for rapeseed precision seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 29–36. (in Chinese)
- [31] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册: 上册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.

~~~~~

(上接第 30 页)

- [19] 龚建伟, 刘凯, 齐建永. 无人驾驶车辆模型预测控制[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2019: 24–89.
- [20] 刘凯, 陈慧岩, 龚建伟, 等. 高速无人驾驶车辆的操控稳定性研究[J]. 汽车工程, 2019, 41(5): 514–521.  
LIU Kai, CHEN Huiyan, GONG Jianwei, et al. Study on handling stability of high-speed unmanned vehicle[J]. Automotive Engineering, 2019, 41(5): 514–521. (in Chinese)
- [21] 陈威, 廖文浩, 刘明春. 基于 MPC 的自动驾驶车辆横向路径跟踪控制[J]. 南昌大学学报(工科版), 2020, 42(3): 279–288.  
CHEN Wei, LIAO Wenhao, LIU Mingchun. Lateral path tracking control of autonomous vehicle based on MPC[J]. Journal of Nanchang University (Engineering Edition), 2020, 42(3): 279–288. (in Chinese)
- [22] 刘凯, 龚建伟, 陈舒平, 等. 高速无人驾驶车辆最优运动规划与控制的动力学建模分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(14): 141–151.  
LIU Kai, GONG Jianwei, CHEN Shuping, et al. Dynamic modeling and analysis of optimal motion planning and control of high-speed unmanned vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(14): 141–151. (in Chinese)
- [23] 张睿, 谢正超, 赵晶, 等. 基于非线性预测和沿轨迹线性化 MPC 的车辆路径跟踪控制方法[J]. 汽车技术, 2022(3): 28–34.  
ZHANG Rui, XIE Zhengchao, ZHAO Jing. Vehicle path tracking control method based on nonlinear prediction and linearized MPC along trajectory[J]. Automobile Technology, 2022(3): 28–34. (in Chinese)
- [24] 王博洋, 龚建伟, 高天云, 等. 基于双层驾驶员模型的履带车辆纵向与横向协同跟踪控制方法[J]. 兵工学报, 2018, 39(9): 1675–1682.  
WANG Boyang, GONG Jianwei, GAO Tianyun, et al. Longitudinal and lateral cooperative tracking control method of tracked vehicle based on double-layer driver model[J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(9): 1675–1682. (in Chinese)
- [25] 刘凯, 王威, 龚建伟, 等. 越野地形下智能车辆的动力学建模与轨迹跟踪[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(9): 933–937.  
LIU Kai, WANG Wei, GONG Jianwei, et al. Dynamic modeling and trajectory tracking of intelligent vehicle in off-road terrain[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2019, 39(9): 933–937. (in Chinese)
- [26] 刘西, 明朗, 胡远志. 基于 MPC 算法的车辆自适应巡航系统分层控制研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(3): 53–60.  
LIU Xi, MING Lang, HU Yuanzhi. Research on hierarchical control of vehicle adaptive cruise system based on MPC algorithm[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2021, 35(3): 53–60. (in Chinese)
- [27] 范贤波, 彭育辉, 钟聪. 基于自适应 MPC 的自动驾驶汽车轨迹跟踪控制[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 500–507.  
FAN Xianbo, PENG Yuhui, ZHONG Cong. Trajectory tracking control of autopilot vehicle based on adaptive MPC[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2021, 49(4): 500–507. (in Chinese)
- [28] 何勇, 蒋浩, 方慧, 等. 车辆智能障碍物检测方法及其农业应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 21–32.  
HE Yong, JIANG Hao, FANG Hui, et al. Research progress of vehicle intelligent obstacle detection method and its agricultural application[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 21–32. (in Chinese)