doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.024

履带式除草机路径跟踪误差补偿改进型 MPC 控制方法

赵润茂[1,2]　丁帅奇[1,2]　何　杰[1,2]　满忠贤[1,2]　贺子豪[1,2]
阮庆强[1,2]　胡　炼[1,2]　魏正辉[1,2]
(1.华南农业大学工程学院,广州 510642;2.农业装备技术全国重点实验室,广州 510642)

摘要:为解决除草机器人作业受颠簸路面侧滑滑移等外界干扰从而导致路径跟踪上线距离长、直线误差大等问题,提出一种误差补偿的履带式除草机模型预测控制路径跟踪方法。首先基于履带式除草机器人运动学特性建立了线性误差模型,然后设计了以控制增量为状态量的目标函数、控制量与控制增量为约束条件的模型预测控制算法(MPC)。最后针对除草机路径跟踪过程中因左右两侧履带滑移滑转而产生的误差,在系统控制量中进行补偿,进而得出最优控制量。基于 Matlab/Simulink 仿真环境对控制器性能进行验证,结果表明,在速度 1 m/s 下,相对于传统 MPC 控制器,误差补偿型 MPC 控制器在 3 种不同初始状态下上线距离均减少 26% 以上,上线后直线段路径跟踪横向偏差与航向偏差均降低 10% 与 21% 以上。为验证本文所提方法,设计了 4 组除草机路径跟踪试验。相较于传统 MPC 控制器,误差补偿型 MPC 控制器在速度 1 m/s 下,针对初始位置偏差分别为 0.5 m 和 1 m、航向偏差为 0°的状态,上线距离分别减少 14.5% 和 19.1%。上线后直线段路径跟踪平均横向偏差分别降低 21.05% 和 29.4%,平均航向偏差分别降低 16.7% 和 20.8%。在初始位置偏差 1 m、航向偏差 45°的状态,上线距离减小 10.1%,上线后直线段路径跟踪平均横向偏差和航向偏差分别降低 18.75% 和 15.7%。在速度 0.5 m/s 下,初始位置偏差 1 m、初始航向角偏差 0°的状态,上线距离减少 16.2%,上线后直线段路径跟踪平均横向偏差和航向偏差分别降低 21.4% 和 15.2%。误差补偿型 MPC 控制器可以明显减少除草机上线距离,并提升直线段的跟踪精度,为除草机除草作业高精度路径跟踪提供保障。

关键词:履带式除草机;模型预测控制;误差补偿;Matlab/Simulink;路径跟踪
中图分类号:S220;S24　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)09-0326-09　　**OSID**:

Error Compensation Improved MPC Track-laying Weeding Machine Path Tracking Control Method

ZHAO Runmao[1,2]　DING Shuaiqi[1,2]　HE Jie[1,2]　MAN Zhongxian[1,2]　HE Zihao[1,2]
RUAN Qingqiang[1,2]　HU Lian[1,2]　WEI Zhenghui[1,2]
(1. *College of Engineering*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*
2. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology*, *Guangzhou* 510642, *China*)

Abstract: Aiming to address the problems of long online distance and large straight-line error caused by external disturbances such as side skidding and sliding of the weeding robot on bumpy roads during operation, a model predictive control (MPC) path tracking method with error compensation for tracked weeding robots was proposed. Firstly, a linear error model was established based on the kinematic characteristics of the tracked weeding robot. Then an MPC algorithm with control increment as the state quantity and control quantity and control increment as the constraint conditions was designed. Finally, to compensate for the errors caused by the sliding and slipping of the left and right tracks during the path tracking process of the weeding machine, the compensation was made in the system control quantity, and the optimal control quantity was obtained. The performance of the controller was verified in the Matlab/Simulink simulation environment. The results showed that at a speed of 1 m/s, compared with the traditional MPC controller, the error compensation type MPC controller reduced the online distance by

收稿日期:2025-04-06　修回日期:2025-04-16
基金项目:安徽省重点研究与开发计划项目(2023N06020047)和广东省重点领域研发计划项目(2019B090922001)
作者简介:赵润茂(1990—),男,副教授,博士,主要从事水田农业机器人研究,E-mail:rmzhao@scau.edu.cn
通信作者:何杰(1985—),男,副教授,博士,主要从事智能农机装备和无人化农场技术研究,E-mail:hooget@scau.edu.cn

more than 26% under three different initial states, and the lateral deviation and heading deviation of the straight-line path tracking after going online were reduced by more than 10% and 21%, respectively. To verify the proposed method, four groups of weeding machine path tracking experiments were designed. Compared with the traditional MPC controller, the error compensation type MPC controller reduced the online distance by 14.5% and 19.1% respectively when the initial position deviation was 0.5 m and 1 m and the heading deviation was 0° at speed of 1 m/s. The average lateral deviation and heading deviation of the straight-line path tracking after going online were reduced by 21.05% and 29.4%, and 16.7% and 20.8%, respectively. When the initial position deviation was 1 m and the heading deviation was 45°, the online distance was reduced by 10.1%, and the average lateral deviation and heading deviation of the straight-line path tracking after going online were reduced by 18.75% and 15.7%, respectively. At a speed of 0.5 m/s, when the initial position deviation was 1 m and the initial heading deviation was 0°, the online distance was reduced by 16.2%, and the average lateral deviation and heading deviation of the straight-line path tracking after going online were reduced by 21.4% and 15.2%, respectively. The error compensation type MPC controller can significantly reduce the online distance of the weeding machine and improve the tracking accuracy of the straight-line segment, providing a guarantee for high-precision path tracking of the weeding machine during weeding operations.

Key words: tracked weeding machine; model predictive control; error compensation; Matlab/Simulink; path tracking

0　引言

人工除草需要消耗大量的体力、精力，且除草效果不佳。而大量喷洒除草剂虽起到了对杂草的抑制作用，但易造成环境污染，不符合可持续发展理念[1-2]。随着我国农业机械化的快速发展，智能除草机器人是当代农业发展现代化、精细化、智能化的重要体现[3-4]。路径跟踪控制算法作为智能除草机器人导航作业的核心环节，其性能水平直接决定了除草机器人自主导航作业的精度与稳定性，对除草作业的整体效率和质量有着决定性影响。所以探究除草机路径跟踪控制算法具有关键意义。

路径跟踪控制方法主要包括 PID 跟踪控制[5-6]、纯跟踪控制(Pure pursuit control)[7-8]、线性二次型最优控制(Linear quadratic optimal control)[9-10]以及模型预测控制(Model predictive control)[11-12]等。文献[13-14]所设计控制算法均提高了除草机路径跟踪精度，但未考虑滑移滑转问题对控制精度的影响。文献[15-17]均整合了滑动参数补偿机制，但其在线参数估计过程涉及复杂的运算，不仅制约了系统的动态响应能力，还增加了对硬件处理能力的依赖性。文献[18-19]均针对履带式割草机的滑移滑转问题对控制算法进行改进并提升了控制精度，但未进行实时滑移滑转误差补偿。因此，针对履带式车辆路径跟踪过程中存在的滑移滑转问题，进行滑移滑转误差补偿对进一步提升跟踪控制精度至关重要。

本文以履带式除草机器人为研究平台，基于履带式除草机器人运动学模型设计一种基于模型预测的路径跟踪控制算法，结合履带式车辆路径跟踪过程中滑移导致的转向误差，引入误差补偿。针对模型预测路径跟踪控制器进行 Matlab/Simulink 仿真验证，并开展除草机路径跟踪试验，以验证提出方法的可行性。

1　路径跟踪控制器设计

1.1　除草机器人线性误差模型

试验所选用的履带式除草机行进依靠驱动电机带动两侧履带，作业速度一般为 0.5～1.0 m/s，属于低速行驶车辆，因此可以采用运动学模型设计轨迹跟踪控制器[20-21]。以履带式除草机右转方式为例，构建的运动学模型如图 1 所示，建立平面坐标系 XOY，(x_1, y_1) 为除草机在坐标系中的位置坐标(即控制中心)，以 X 正方向为基准逆时针方向与车体之间的夹角 φ 表示车体在坐标系中的航向角，B 为两侧履带之间的距离，R 为瞬时转向半径，当前除草机前进速度 v、瞬时转向半径 R 和转向角速度 ω 都可以通过左右两侧履带速度 v_1 和 v_2 获得。

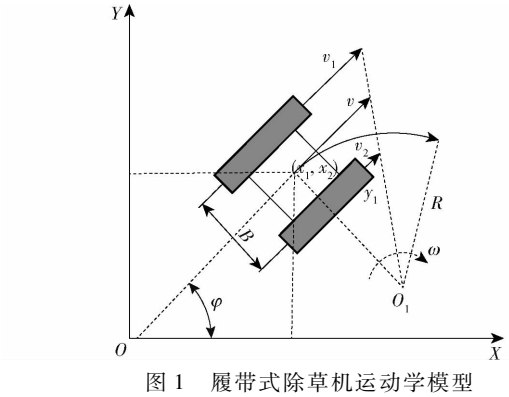


图 1　履带式除草机运动学模型

Fig. 1　Kinematic model of tracked weeding machine

由图 1 可得履带式除草机运动学模型为

$$\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \dot{y}\\ \dot{\varphi}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\varphi & 0\\ \sin\varphi & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v\\ \omega\end{bmatrix} \tag{1}$$

由除草机运动学模型可知,$\boldsymbol{X}=(x,y,\varphi)$为除草机状态量,$\boldsymbol{U}=\boldsymbol{u}(v,\omega)$是控制输入。状态空间模型中,输出变量是系统的位置信息,用于导航控制。本文所设计的路径跟踪控制器为 MPC,相比于非线性模型预测控制(NMPC),线性时变模型预测控制(LTV-MPC)算法具有更低的计算复杂度和更快的计算速度,适合实时性较高的应用场景[22-23]。因此,为了确保除草机在路径跟踪中的实时性需求,将车辆的非线性运动模型近似为线性时变模型,其一般形式为

$$\dot{\boldsymbol{X}}=f(\boldsymbol{X},\boldsymbol{u}) \tag{2}$$

将式(2)在$(\boldsymbol{X}_r,\boldsymbol{u}_r)$处采用泰勒级数展开,对方程进行泰勒展开,并忽略高阶项,可以得到线性化后的模型

$$\dot{\boldsymbol{X}}=f(\boldsymbol{X}_r,\boldsymbol{u}_r)+\left.\frac{\partial f(\boldsymbol{X},\boldsymbol{u})}{\partial\boldsymbol{X}}\right|_{\substack{\boldsymbol{X}=\boldsymbol{X}_r\\ \boldsymbol{u}=\boldsymbol{u}_r}}(\boldsymbol{X}-\boldsymbol{X}_r)+\left.\frac{\partial f(\boldsymbol{X},\boldsymbol{u})}{\partial\boldsymbol{u}}\right|_{\substack{\boldsymbol{X}=\boldsymbol{X}_r\\ \boldsymbol{u}=\boldsymbol{u}_r}}(\boldsymbol{u}-\boldsymbol{u}_r) \tag{3}$$

将公式(2)和公式(3)作差可得新的状态空间模型为

$$\dot{\widetilde{\boldsymbol{X}}}=\boldsymbol{A}\widetilde{\boldsymbol{X}}+\boldsymbol{B}\widetilde{\boldsymbol{u}} \tag{4}$$

联立式(3)、(4)可得离散化后的线性误差模型为

$$\widetilde{\boldsymbol{X}}(k+1)=\boldsymbol{A}_{k,t}\widetilde{\boldsymbol{X}}(k)+\boldsymbol{B}_{k,t}\widetilde{\boldsymbol{u}}(k) \tag{5}$$

其中

$$\widetilde{\boldsymbol{X}}(k)=\begin{bmatrix}x-x_r\\ y-y_r\\ \varphi-\varphi_r\end{bmatrix}\qquad\widetilde{\boldsymbol{u}}(k)=\begin{bmatrix}v_r\\ \omega_r\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{A}_{k,t}=\begin{bmatrix}1 & 0 & -Tv_r\sin\varphi_r\\ 0 & 1 & Tv_r\cos\varphi_r\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}_{k,t}=\begin{bmatrix}T\cos\varphi_r & 0\\ T\sin\varphi_r & 0\\ 0 & T\end{bmatrix}$$

式中 T——采样时间

$\boldsymbol{A}_{k,t}$、$\boldsymbol{B}_{k,t}$——线性时变矩阵

$\widetilde{\boldsymbol{X}}(k)$、$\widetilde{\boldsymbol{u}}(k)$——第 k 采样时刻系统的状态量误差和控制量误差

1.2 模型预测轨迹跟踪控制器设计

模型预测控制是一种常用的优化控制算法,MPC 通过预测模型、滚动优化和反馈修正的策略实现控制目标[24-26],因其能够提供较好的实时性和鲁棒性,在车辆路径跟踪中已经得到广泛应用。因此,为了使除草机器人能够快速平稳地跟踪路径,可通过 MPC 的目标函数最优化来实现。由于目标函数转换成标准二次型时存在一定缺陷,导致采样周期内可能出现无解的现象,从而影响控制系统的连续性。所以本文在目标函数中引入松弛因子 ε,目标函数的形式为

$$J(k)=\sum_{k=0}^{N_p}\|\boldsymbol{\eta}(k+i|t)-\boldsymbol{\eta}_{\mathrm{ref}}(k+i|t)\|_{\boldsymbol{Q}}^2+\sum_{k=0}^{N_c-1}\|\Delta\boldsymbol{U}(k+i|t)\|_{\boldsymbol{P}}^2+\rho\varepsilon^2\quad(N_p>N_c>1) \tag{6}$$

式中 $\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{P}$——权重矩阵 ρ——权重系数

$\boldsymbol{\eta}$、$\boldsymbol{\eta}_{\mathrm{ref}}$——输出状态和参考输出状态量

N_p——预测时域 N_c——控制时域

$\Delta\boldsymbol{U}$——系统控制增量

引入控制量增量 $\Delta\boldsymbol{u}(k)=\boldsymbol{u}(k)-\boldsymbol{u}(k-1)$,对公式的状态量进行增广。设定时刻新的状态量为

$$\boldsymbol{\xi}(k|t)=\begin{bmatrix}\widetilde{\boldsymbol{X}}(k|t)\\ \widetilde{\boldsymbol{u}}(k-1|t)\end{bmatrix} \tag{7}$$

状态空间表达式为

$$\begin{cases}\boldsymbol{\xi}(k+1|t)=\widetilde{\boldsymbol{A}}_{k,t}\boldsymbol{\xi}(k|t)+\widetilde{\boldsymbol{B}}_{k,t}\Delta\boldsymbol{U}(k|t)\\ \boldsymbol{\eta}(k|t)=\widetilde{\boldsymbol{C}}_{k,t}\boldsymbol{\xi}(k|t)\end{cases} \tag{8}$$

其中

$$\widetilde{\boldsymbol{A}}_{k,t}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_{k,t} & \boldsymbol{B}_{k,t}\\ \boldsymbol{O}_{2\times3} & \boldsymbol{I}_2\end{bmatrix}\qquad\widetilde{\boldsymbol{B}}_{k,t}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{B}_{k,t}\\ \boldsymbol{I}_2\end{bmatrix}$$

$$\widetilde{\boldsymbol{C}}_{k,t}=[\boldsymbol{I}_{N_x}\quad\boldsymbol{O}]$$

式中 $\boldsymbol{I}_2$、$\boldsymbol{I}_{N_x}$——单位向量

$\boldsymbol{O}$——零矩阵

根据文献[11],系统 t 时刻预测模型输出方程为

$$\boldsymbol{Y}(t)=\boldsymbol{\psi}_t\boldsymbol{\xi}(t|t)+\boldsymbol{\Theta}_t\Delta\boldsymbol{U}(t) \tag{9}$$

式中 $\boldsymbol{\psi}_t$——状态量预测参数

$\boldsymbol{\Theta}_t$——控制增量序列预测参数

为了确保履带除草机的控制输入在实际操作中的可行性,本文设计的控制量与控制增量约束条件为

$$\begin{cases}\boldsymbol{u}_{\min}(t+k)\leqslant\boldsymbol{u}(t+k)\leqslant\boldsymbol{u}_{\max}(t+k)\\ \qquad(k=0,1,2,\cdots,N_c-1)\\ \Delta\boldsymbol{u}_{\min}(t+k)\leqslant\Delta\boldsymbol{u}(t+k)\leqslant\Delta\boldsymbol{u}_{\max}(t+k)\\ \qquad(k=0,1,2,\cdots,N_c-1)\end{cases} \tag{10}$$

MPC 的核心在于通过优化目标函数来寻找到最优的控制输入，使系统在满足约束条件的前提下达到最佳性能[27-28]。为了便于计算，将目标函数转换为标准二次型形式并结合约束条件为

$$\begin{cases} J(\boldsymbol{\xi}(t),\boldsymbol{u}(t-1),\Delta\boldsymbol{U}(t)) = \\ \quad [\Delta\boldsymbol{U}(t)^{\mathrm{T}}\ \varepsilon]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_t[\Delta\boldsymbol{U}(t)^{\mathrm{T}}\ \varepsilon]+\boldsymbol{G}_t[\Delta\boldsymbol{U}(t)^{\mathrm{T}}\ \varepsilon] \\ \text{s.t.}\begin{cases}\Delta\boldsymbol{U}_{\min}\leqslant\Delta\boldsymbol{U}_t\leqslant\Delta\boldsymbol{U}_{\max}\\ \boldsymbol{U}_{\min}\leqslant\boldsymbol{A}\Delta\boldsymbol{U}_t+\boldsymbol{U}_t\leqslant\boldsymbol{U}_{\max}\end{cases}\end{cases} \tag{11}$$

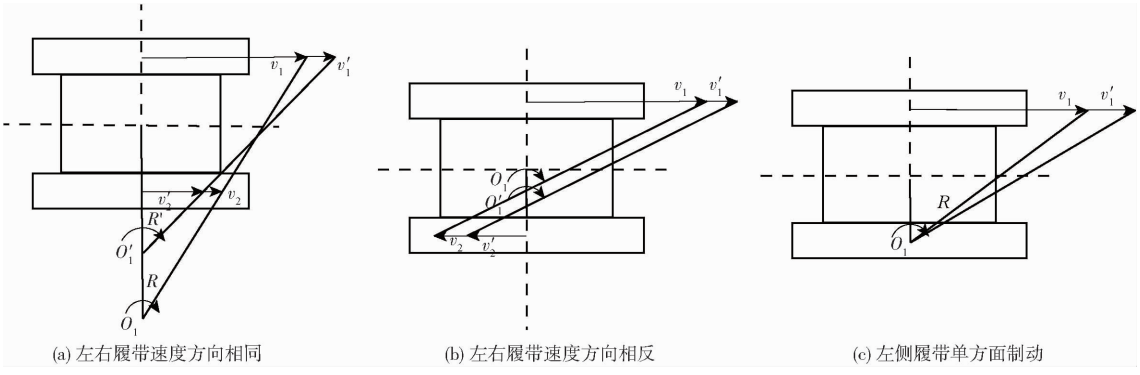
其中，正定 Hessian 矩阵 $\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\Theta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{\Theta}+\boldsymbol{P} & 0\\ 0 & \rho\end{bmatrix}$，控制增量系数矩阵 $\boldsymbol{G}_t^{\mathrm{T}}=[2\boldsymbol{E}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{\Theta}\quad 0]$，预测时域内跟踪误差 $\boldsymbol{E}^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\xi}(k)$。

控制系统在完成每个控制周期的求解后，可以得到控制时域内 t 时刻控制输入增量，$\Delta\boldsymbol{U}_t^*=[\Delta\boldsymbol{u}_t^*,\Delta\boldsymbol{u}_{t+1}^*,\cdots,\Delta\boldsymbol{u}_{t+N_c-1}^*]^{\mathrm{T}}$，控制器选用控制序列中第 1 个元素作为实际的输入增量作用于系统中 $\boldsymbol{u}(t)=\boldsymbol{u}(t-1)+\Delta\boldsymbol{u}_t^*$，如此反复循环滚动优化实现除草机的路径跟踪控制。

1.3　滑移滑转误差补偿

履带除草机是通过两侧履带的差速实现转向，转向过程中高速侧履带会受到低速侧履带的拉扯，相反低速侧履带会受到高速侧履带的拖拽，存在高速侧履带的滑转和低速侧履带的滑移，从而导致理论执行的控制量与实际执行的控制量不一致，影响跟踪控制的精度[29-30]。因此需要针对除草机转向过程中因滑转滑移所产生的误差，在路径跟踪控制器中引入误差补偿，提高路径跟踪控制器的精度。

如图 2 所示，以履带除草机的右转方式为例，车辆的转向方式分为 3 种：①左右履带速度方向相同（图 2a）。②左右履带速度方向相反（图 2b）。③左侧履带单方面制动（图 2c）。O_1 为转向中心，v_1' 与 v_2' 分别为左右两侧履带理论线速度，O_1' 为理论转向中心，R'为理论转弯半径。在图 2a 与图 2b 的转向模式下，左侧履带速度大于右侧履带速度，在转向过程中存在左右两侧履带的滑移滑转。在图 2c 的转向模式下，只有左侧的履带单边制动，存在左侧履带的滑转。此时除草机以右侧履带中点为圆心，进行圆周运动。



(a) 左右履带速度方向相同　(b) 左右履带速度方向相反　(c) 左侧履带单方面制动

图 2　不同转向模式下的履带式车辆滑移滑转图

Fig. 2　Slip and slide diagrams of tracked vehicles under different steering modes

在转向过程中左右两侧履带相对误差 σ_1、σ_2 为

$$\begin{cases}\sigma_1=\dfrac{v_1'-v_1}{v_1'}\\ \sigma_2=\dfrac{v_2'-v_2}{v_2'}\end{cases} \tag{12}$$

履带除草机实际线速度和角速度可以通过传感器实时测量，根据除草机运动学模型，车辆实时线速度与角速度为

$$\begin{cases}v=\dfrac{v_1+v_2}{2}\\ \omega=\dfrac{v_1-v_2}{B}\end{cases} \tag{13}$$

联立式(12)与式(13)可得除草机理论线速度与角速度为

$$\begin{cases}v'=v+\dfrac{\sigma_1v_1'+\sigma_2v_2'}{2}\\ \omega'=\omega+\dfrac{\sigma_2v_2'-\sigma_1v_1'}{B}\end{cases} \tag{14}$$

则除草机线速度与角速度误差可以表示为

$$\begin{cases}v_e=\dfrac{\sigma_1v_1'+\sigma_2v_2'}{2}\\ \omega_e=\dfrac{\sigma_2v_2'-\sigma_1v_1'}{B}\end{cases} \tag{15}$$

以左右两侧履带相对误差表示左右履带滑移率和滑转率，由式(15)可知在设计的模型预测控制器的输出中加入误差补偿

$$\boldsymbol{u}_e=\begin{bmatrix}v_e\\ \omega_e\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{\sigma_1v_1'+\sigma_2v_2'}{2}\\ \dfrac{\sigma_2v_2'-\sigma_1v_1'}{B}\end{bmatrix} \tag{16}$$

即在 1.2 节中模型预测控制器得出当前理论控制量 $\boldsymbol{u}'(t)$,与当前所测得实际控制量 $\boldsymbol{u}(t)$ 计算出误差补偿控制量 $\boldsymbol{u}_e(t)$,此时误差补偿后的控制量为 $\boldsymbol{u}_s(t)=\boldsymbol{u}'(t)+\boldsymbol{u}_e(t)$,将 $\boldsymbol{u}_s(t)$ 作为系统控制输出。同时,为了使控制器可以更加稳定工作避免扰动影响,将左右两侧履带相对误差值域设定为[-0.1,0.1],如图 3 所示。

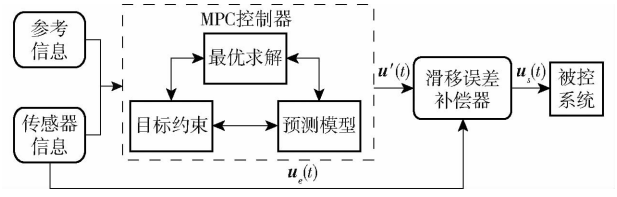


图 3 引入误差补偿的控制流程图

Fig. 3 Control flowchart with error compensation introduced

2 仿真试验

为验证本文所设计的误差补偿型 MPC 路径跟踪控制器的路径跟踪性能,令除草机器人在转向过程中的角速度产生一定的偏差量,模拟履带除草机的滑移滑转误差,采用 Matlab/Simulink 进行仿真试验验证。Matlab/Simulink 模型如图 4 所示。

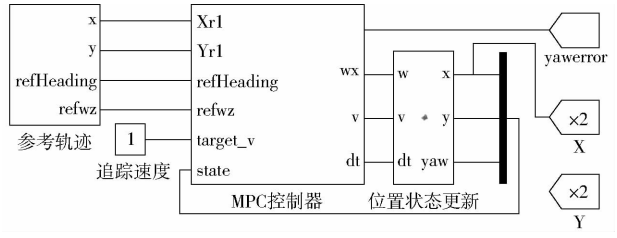


图 4 Matlab/Simulink 模型

Fig. 4 Matlab/Simulink model

仿真试验的参考路径为长度 10 m 的直线,起点坐标为[0,0]、终点为[10 m,0]。分别以速度 1 m/s 进行了 3 种不同初始状态的路径跟踪仿真试验。3 种不同初始状态分别为:①$\boldsymbol{X}=[0\quad 0.5\quad 0]^{\mathrm{T}}$,初始偏差 0.5 m、初始航向偏差 0°。②$\boldsymbol{X}=[0\quad 0\quad 0]^{\mathrm{T}}$,初始偏差 1 m、初始航向偏差 0°。③$\boldsymbol{X}=\left[0\quad 0\quad \frac{\pi}{4}\right]^{\mathrm{T}}$,初始偏差 1 m、初始航向偏差 45°。

当除草机器人位置偏差保持在 ±5 cm 范围内,即达到上线要求。上线距离为除草机器人达到上线状态所走过的距离。控制系统的状态量权重为 $\boldsymbol{Q}=\mathrm{diag}(1,1,0.5)$,控制量权重为 $\boldsymbol{P}=\mathrm{diag}(1,1)$,其余参数如表 1 所示。

不同初始状态下路径跟踪仿真效果如图 5 ~ 7 所示。由图 5a、6a、7a 可以看出,3 种不同初始状态下初始位置偏差较大,在上线初期除草机器人横向速度加快,向目标路径快速靠拢,完成上线进入直线段跟踪。如图 5b、6b、7b 所示,除草机上线初期快速向目标路径靠近,产生了较大的航向偏差。随着接近目标路径,除草机器人纵向速度加快,航向偏差迅速减小。上线过程中相对于传统 MPC 控制器,引入误差补偿的 MPC 控制器上线过程明显更快,上线距离短。从上线后的直线段路径跟踪轨迹可以看出,实时轨迹与目标路径基本重合,由于直线跟踪过程中产生的滑移滑转误差较小,2 种控制器在直线段的路径跟踪效果均良好。

表 1 模型预测控制算法参数

Tab. 1 Parameters of model predictive control algorithm

参数	数值
N_p	25
N_c	15
T/s	0.1
δ/rad	-2 ~ 2
$\Delta\delta$/rad	-0.2 ~ 0.2
ρ	100
ε	10

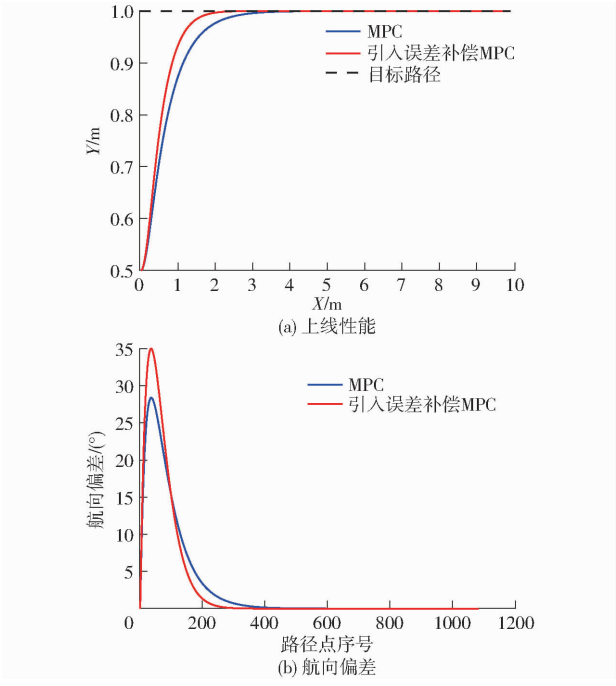


图 5 初始偏差 0.5 m、初始航向偏差 0°路径跟踪性能对比曲线

Fig. 5 Path tracking performance comparison chart when initial deviation was 0.5 m and initial heading angle deviation was 0°

由图 5 ~ 7 可知,引入误差补偿型 MPC 控制器与传统 MPC 控制器分别在 3 种不同初始状态下的仿真结果为:①初始位置偏差 0.5 m、初始航向偏差 0°时,上线距离分别为 1.16、1.57 m,上线距离减少 26.1%。上线后直线段平均横向偏差分别为 0.008、0.01 m,平均横向偏差减小 20%;直线段平

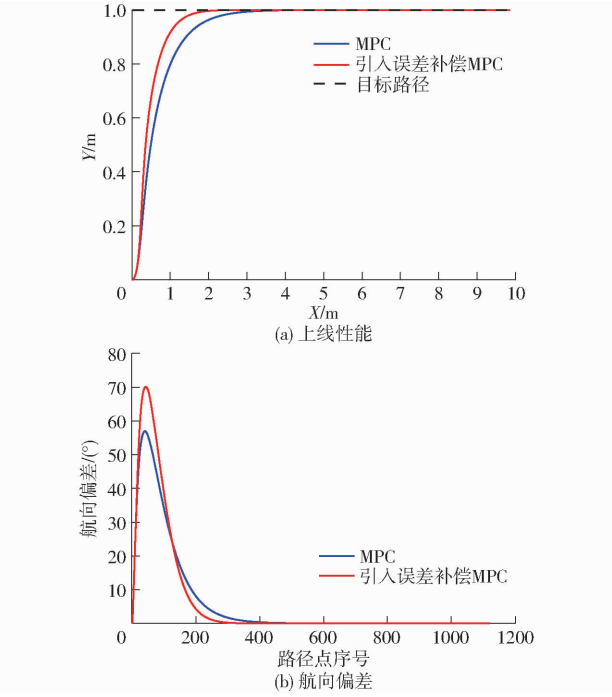


图 6　初始偏差 1 m、初始航向角偏差 0°路径跟踪性能对比曲线

Fig. 6　Path tracking performance comparison chart when initial deviation was 1 m and initial heading angle deviation was 0°

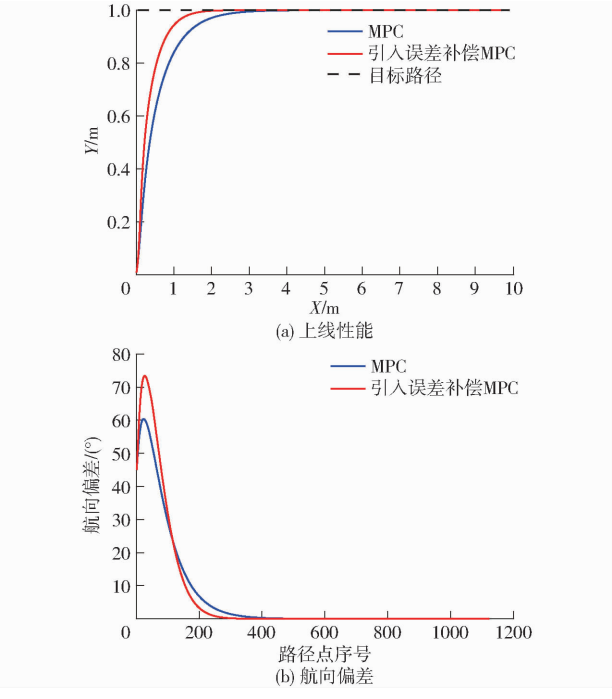


图 7　初始偏差 1 m、初始航向偏差 45°路径跟踪性能对比曲线

Fig. 7　Path tracking performance comparison chart when initial deviation was 1 m and initial heading angle deviation was 45°

均航向偏差分别为 0.11°与 0.14°，平均航向偏差减小 21.4%。②初始位置偏差 1 m、初始航向偏差 0°时，上线距离分别为 1.25、1.79 m，上线距离减少 30.1%。上线后直线段平均横向偏差分别为 0.009、0.01 m，平均横向偏差减小 10%；直线段平均航向偏差分别为 0.13°与 0.17°，平均航向偏差减小 23.5%。③初始位置偏差 1 m、初始航向偏差 45°时，上线距离分别为 1.18、1.64 m，上线距离减少 28.04%。上线后直线段平均横向偏差分别为 0.008、0.01 m，平均横向偏差减小 20%；直线段平均航向偏差分别为 0.11°与 0.14°，平均航向偏差减小 21.4%。由试验结果可知，引入误差补偿的 MPC 在上线与直线段的跟踪性能均得到了提升。

3　实车试验

3.1　试验材料

为验证引入误差补偿的模型预测路径跟踪控制器性能，进行实车试验。试验平台选用油电混合动力履带式除草机器人，由 2 台 12 V/1 000 W 大功率电机驱动履带行驶。机器主要参数如表 2 所示。

表 2　履带式除草机器人参数

Tab. 2　Tracked weeding robot parameters

参数	数值
外形尺寸/(mm × mm × mm)	850 × 900 × 400
轮距 L/mm	600
履带与地面接触面长度 l/mm	700
作业速度/(km·h^{-1})	0 ~ 5
割刀幅宽/mm	550
电机额定电压/V	12
电机功率/W	1 200
最大负载/kg	150
发电机功率/W	1 800

自动导航除草机器人如图 8 所示。主控模块选用 Nuvo－5501 型工控机，配置 melodic 版本的机器人操作系统 ROS（Robot operating system，ubuntu 20.04）。导航定位系统采用北斗定位模块双天线板卡 UM982，定位精度为 2.5 mm，航向精度为 0.2(°)/R_0（R_0 为双天线基线长，取 0.8 m），采用双天线 GNSS 为导航提供位置与航向信息，MTI300 型姿态传感器（IMU）获取姿态信息，具体信息见表 3。工控机通过串口与底盘控制系统通讯，底盘控制系统接收导航下发的运动指令，并将运动指令转换为 PWM 下发给左右电机。

3.2　试验方法

本试验在华南农业大学增城教学科研基地开展。试验条件与仿真试验相同。最后增加速度 0.5 m/s 进行初始状态为 $\boldsymbol{X}=[0\quad 1\quad 0]^{\mathrm{T}}$ 的路径跟踪试验。

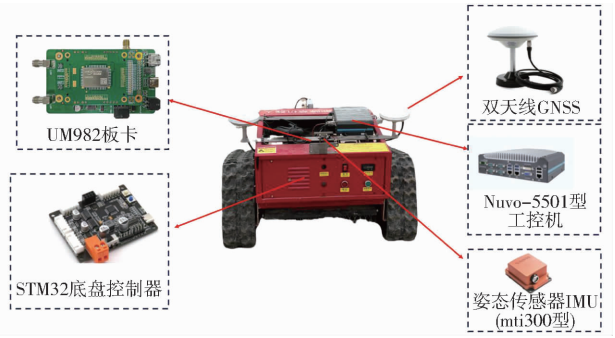


图 8 履带式除草机器人

Fig. 8 Tracked weeding robot

表 3 工控机、GNSS 和 IMU 设备参数

Tab. 3 Industrial personal computer (IPC), GNSS and IMU device parameters

设备	参数	数值/型号
Nuvo - 5501 型工控机	尺寸/(mm × mm × mm)	221 × 173 × 76.2
	处理器	6th - Gen Core i7
	适应温度/(°)	-25 ~ 70
	运行内存/GB	8
	内存/GB	512
GNSS	板卡型号	UM982
	数据更新频率/Hz	10
	PPS 更新频率/Hz	1
	静态水平精度/mm	2.5
	动态水平精度/mm	8
IMU	型号	MTI - 300 - 2A5G4
	翻滚角、俯仰角/(°)	0.2
	航向角/(°)	1.00
	陀螺仪零漂/((°)·h^{-1})	10
	陀螺仪噪声密度/((°)·s^{-1}·Hz$^{-\frac{1}{2}}$)	0.01
	陀螺仪 g-sensitivity/((°)·s^{-1}·g^{-1})	0.003
	加速度计零偏/μg	15
	加速度随机游走/μg	0.01

按照除草机所需的上线性能,将除草机位置调整到目标路径 ±5 cm 范围内,即达到上线要求,上线距离为车辆达到上线状态所走过的距离。记录试验过程中除草机的实时轨迹与航向偏差。试验中的模型预测控制器参数与仿真中相同,试验场地如图 9 所示。

3.3 试验结果与分析

试验结果如图 10 ~ 13 所示。在 4 种不同状态下,除草机初始偏差较大,为向目标路径靠拢,除草机迅速调整航向角,进而产生较大的航向误差。随着逐渐接近目标路径,除草机航向误差迅速减小,完成上线动作,随后进入直线段跟踪阶段。从除草机实时轨迹可以看出,上线过程中因转向产生较大滑移滑转误差,引入误差补偿的 MPC 控制器相对于传统 MPC 的上线过程更快,上线距离更短。在上线后的直线段跟踪过程中,除草机产生的滑移滑转误差较小,2 种控制器作用下除草机在直线段跟踪的实时轨迹与目标路径基本重合。



图 9 除草效果

Fig. 9 Weeding effect diagram

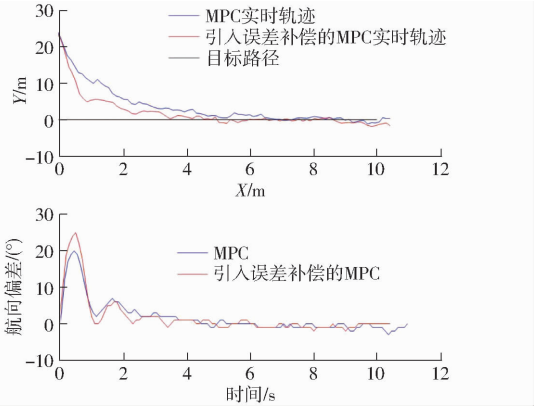


图 10 速度 1 m/s、初始偏差 0.5 m、初始航向偏差 0°路径跟踪性能对比曲线

Fig. 10 Comparison chart of path tracking performance with speed of 1 m/s, initial deviation of 0.5 m, and initial heading deviation of 0°

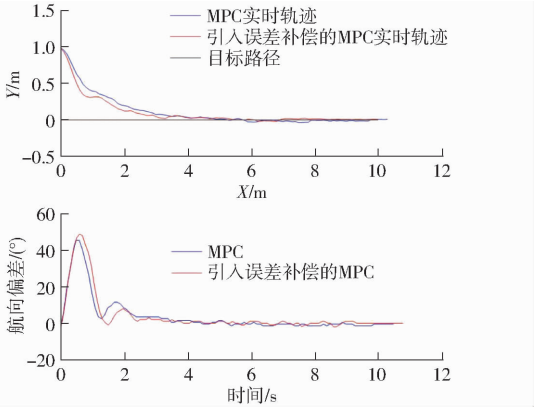


图 11 速度 1 m/s、初始偏差 1 m、初始航向偏差 0°路径跟踪性能对比曲线

Fig. 11 Comparison chart of path tracking performance with speed of 1 m/s, initial deviation of 1 m, and initial heading deviation of 0°

图 10 ~ 13 表明:①速度 1 m/s、初始偏差 0.5 m、初始航向偏差 0°时,误差补偿型 MPC 控制器上线距离与传统 MPC 控制器上线距离分别为 2.46、

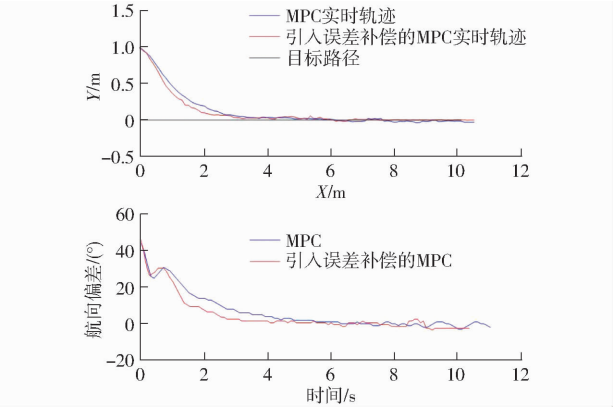


图 12　速度 1 m/s、初始偏差 1 m、初始航向偏差 45°路径跟踪性能对比曲线

Fig. 12　Comparison chart of path tracking performance with speed of 1 m/s, initial deviation of 1 m, and initial heading deviation of 45°

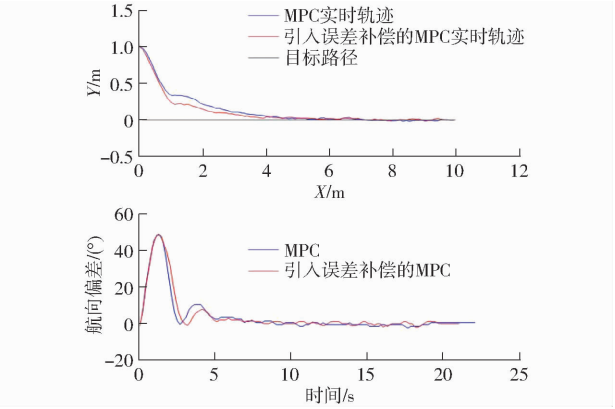


图 13　速度 0.5 m/s、初始偏差 1 m、初始航向偏差 0°路径跟踪性能对比曲线

Fig. 13　Comparison chart of path tracking performance with speed of 0.5 m/s, initial deviation of 1 m, and initial heading deviation of 0°

2.88 m，上线距离减小 14.5%；上线后直线段平均横向偏差分别为 0.015、0.019 m，平均横向偏差减小 21.05%；直线段平均航向偏差分别为 0.65°与 0.78°，平均航向偏差减小 16.7%。②速度 1 m/s、初始偏差 1 m、初始航向偏差 0°时的上线距离分别为 3.15、3.89 m，上线距离减小 19.1%。上线后直线段平均横向偏差分别为 0.012、0.017 m，平均横向偏差减小 29.4%。直线段平均航向偏差分别为 0.57°与 0.72°，平均航向偏差减小 20.8%。③速度 1 m/s、初始偏差 1 m、初始航向角 45°时的上线距离分别为 2.78、3.09 m，上线距离减小 10.1%。上线后直线段平均横向偏差分别为 0.013、0.016 m，平均横向偏差减小 18.75%。直线段平均航向偏差分别为 0.59°与 0.7°，平均航向偏差减小 15.7%。④速度 0.5 m/s、初始偏差 1 m，初始航向偏差 0°时的上线距离分别为 2.89、3.45 m，上线距离减小 16.2%。上线后直线段平均横向偏差分别为 0.011、0.014 m，平均横向偏差减小 21.4%。直线段平均航向偏差分别为 0.5°与 0.59°，平均航向偏差减小 15.2%。在不同状态下上线与直线段路径跟踪中，引入误差补偿的 MPC 控制器通过实时补偿除草机路径跟踪过程产生的滑移滑转误差来提高控制性能，并且直线段跟踪精度也得到了提升。

4　结论

（1）以履带式除草机为研究对象，基于履带式除草机器人运动学特性建立了线性误差模型，设计了控制增量为状态量的目标函数、控制量与控制增量为约束条件的模型预测控制算法。针对除草机路径跟踪过程中因左右两侧履带滑移滑转而产生的误差，在系统控制量中进行补偿，得出最优控制量。

（2）建立了 Matlab/Simulink 仿真模型，试验结果表明，在速度 1 m/s 下，相对于传统 MPC 控制器，误差补偿型 MPC 控制器在 3 种不同初始状态下的上线距离均减少 26% 以上，上线后直线段路径跟踪横向偏差与航向偏差均降低 10% 与 21% 以上。由试验结果可知，引入误差补偿的 MPC 在上线与直线段的路径跟踪性能均有提升。

（3）不同状态下除草机路径跟踪试验结果表明，相较于传统 MPC 控制器，误差补偿型 MPC 控制器在速度 1 m/s 下，针对初始位置偏差分别为 0.5 m 和 1 m、航向偏差 0° 的状态，上线距离分别减少 14.5% 和 19.1%。上线后直线段路径跟踪平均横向偏差分别降低 21.05% 和 29.4%，平均航向偏差分别降低 16.7% 和 20.8%。在初始位置偏差 1 m、航向偏差 45°的状态，上线距离减小 10.1%，上线后直线段路径跟踪平均横向偏差和航向偏差分别降低 18.75% 和 15.7%。在速度 0.5 m/s 下，初始位置偏差 1 m、初始航向偏差 0°的状态，上线距离减少 16.2%，上线后直线段路径跟踪的平均横向偏差和航向偏差分别降低 21.4% 和 15.2%。本文设计的误差补偿型 MPC 控制器能有效提升除草机上线段与直线段路径跟踪性能，验证了该控制器在复杂动态环境下的强鲁棒性。

参　考　文　献

[1]　邢钦淞，丁素明，薛新宇，等. 智能田间除草机器人发展现状研究[J]. 中国农机化学报，2022，43(8)：173－181.
XING Qinsong, DING Suming, XUE Xinyu, et al. Research on the development status of intelligent field weeding robot[J].

Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(8): 173 - 181. (in Chinese)
[2] 胡炼,刘海龙,何杰,等. 智能除草机器人研究现状与展望[J]. 华南农业大学学报, 2023,44(1):34 - 42.
HU Lian, LIU Hailong, HE Jie, et al. Research progress and prospect of intelligent weeding robot[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(1): 34 - 42. (in Chinese)
[3] 乔清旭,杨晶,袁洪印,等. 浅谈智能化除草机的研究现状及其发展趋势[J]. 农业开发与装备, 2023(1):39 - 41.
[4] 马坚洪,陈学永,江仁伟,等. 智能割草机自主导航关键技术的研究综述[J]. 机电工程技术, 2024,53(7):41 - 45.
MA Jianhong, CHEN Xueyong, JIANG Renwei, et al. Review of the research on the key technologies of autonomous navigation of intelligent lawn mowers[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2024, 53(7): 41 - 45. (in Chinese)
[5] 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 single neuron PID navigation controller for combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(7): 34 - 42. (in Chinese)
[6] DING F, ZHANG W, LUO X, 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.
[7] 沈跃,赵莎,张亚飞,等. 基于变前视距离的四轮同步转向农机改进纯跟踪控制[J]. 农业机械学报, 2024,55(3):21 - 28.
SHEN Yue, ZHAO Sha, ZHANG Yafei, et al. Improved pure tracking control of four-wheel synchronous steering agricultural machinery based on variable forward looking distance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 21 - 28. (in Chinese)
[8] 张华强,王国栋,吕云飞,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, LÜ 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)
[9] WANG Z, SUN K, MA S, 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): 3703.
[10] YU H, ZHAO C, LI S, et al. Pre-work for the birth of driver-less scraper in the underground mine: the path tracking control based on an lqr controller and algorithms comparison[J]. Sensors, 2021, 21(23): 7839.
[11] HE J, HU L, WANG P, et al. Path tracking control method and performance test based on agricultural machinery pose correction[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 200: 107185.
[12] STANO P, MONTANARO U, TAVERNINI D, et al. Model predictive path tracking control for automated road vehicles: a review[J]. Annual Reviews in Control, 2023, 55: 194 - 236.
[13] 冀杰,贺庆,赵立军,等. 除草机器人自适应快速积分终端滑模跟踪控制技术[J]. 农业机械学报, 2023,54(6):55 - 64.
JI Jie, HE Qing, ZHAO Lijun, et al. Adaptive fast integrating terminal sliding mode tracking control technique for weeding robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 55 - 64. (in Chinese)
[14] 贺庆,冀杰,冯伟,等. 割草机器人自适应时域 MPC 路径跟踪控制方法[J]. 智慧农业(中英文), 2024,6(3):82 - 93.
HE Qing, JI Jie, FENG Wei, et al. Adaptive timedomain MPC path following control method for lawn mower robot[J]. Smart Agriculture, 2024, 6(3): 82 - 93. (in Chinese)
[15] ZHAO Z, LIU H, CHEN H, et al. Kinematics-aware model predictive control for autonomous high-speed tracked vehicles under the offroad conditions[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 123: 333.
[16] 赵梓烨,刘海鸥,陈慧岩. 分布式电驱动无人高速履带车辆越野环境轨迹预测方法研究[J]. 兵工学报, 2019,40(4): 680 - 688.
ZHAO Ziye, LIU Haiou, CHEN Huiyan. Research on trajectory prediction method for distributed electric drive unmanned high-speed tracked vehicle in off-road environment[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(4): 680 - 688. (in Chinese)
[17] 贾伟健,刘西侠,王可,等. 基于 MPC 的无人履带车辆轨迹跟踪方法研究[J]. 计算机仿真, 2024,41(5):429 - 435.
JIA Weijian, LIU Xixia, WANG Ke, et al. Research on trajectory tracking method for unmanned tracked vehicles based on MPC[J]. Computer Simulation, 2024, 41(5): 429 - 435. (in Chinese)
[18] 赵永春,张庆,尤泳,等. 基于虚拟雷达和两级神经网络的割草机路径跟踪算法[J]. 农业机械学报, 2023,54(4): 222 - 232.
ZHAO Yongchun, ZHANG Qing, YOU Yong, et al. Path tracking algorithm for mower based on virtual radar and two-level neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 222 - 232. (in Chinese)
[19] 赵立军,贾云帆,殷文科,等. 基于模型预测控制的履带式除草机器人设计与试验[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2024,5(4):84 - 94.
ZHAO Lijun, JIA Yunfan, YIN Wenke, et al. Design and experiment of a tracked weeding robot based on model predictive control[J]. Journal of Intelligent Agricultural Machanization, 2024, 5(4): 84 - 94. (in Chinese)
[20] 李安楠. 履带车辆路径跟踪算法研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2023.
LI Annan. Research on path tracking algorithm for tracked vehicles[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)

(下转第 354 页)

[18] WEN Changkai, ZHANG Jing, ZHENG Kan, et al. Accelerated verification method for the reliability of the motor drive mechanism of the corn precision seed-metering device[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 212: 108163.
[19] ZENG Zhiwei, CHEN Ying. Simulation of straw movement by discrete element modelling of straw-sweep-soil interaction[J]. Biosystems Engineering, 2019, 180: 25 - 35.
[20] 毕津硕,卢彩云,李洪文,等. 基于最优动态滑切的被动式锯齿圆盘防堵装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(4):118 - 128.
BI Jinshuo, LU Caiyun, LI Hongwen, et al. Design and experiment of anti-blocking device passive sawtooth disc based optimal dynamic sliding cutting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 118 - 128. (in Chinese)
[21] 何进,李洪文,陈海涛,等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报,2018,49(4):1 - 19.
HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1 - 19. (in Chinese)
[22] 齐浩凯. 机械化学复合式玉米除草机设计与试验[D]. 保定:河北农业大学,2022.
QI Haokai. Design and test of mechanochemical composite maize weeder[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2022. (in Chinese)
[23] 中国农业机械化科学研究院耕作种植机械研究所. 早田中耕追肥机试验方法: JB/T 7864—1999[S]. 北京:中国标准出版社,1999.
[24] 韩豹,郭畅,高英玲,等. 大豆株间除草单体机构及关键部件设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(6):112 - 121.
HAN Bao, GUO Chang, GAO Yingling, et al. Design and experiment of soybean intra-row weeding monomer mechanism and key components[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 112 - 121. (in Chinese)

(上接第 334 页)

[21] SUBARI M A, HUDHA K, KADIR Z A, et al. Development of path tracking control of a tracked vehicle for an unmanned ground vehicle[J]. International Journal of Advanced Mechatronic Systems, 2020, 8(4): 136 - 143.
[22] 乔宝山,冯樱,江子旺,等. 基于模型预测控制的智能汽车轨迹跟踪方法比较[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2020, 34(2):24 - 28.
QIAO Baoshan, FENG Ying, JIANG Ziwang, et al. Comparison of intelligent vehicle trajectory tracking methods based on model predictive control[J]. Journal of Hubei University of Automotive Industry, 2020, 34(2): 24 - 28. (in Chinese)
[23] WANG Y, BOYD S. Fast model predictive control using online optimization[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(2): 267 - 278.
[24] 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 algorithm of rice transplanter based on MPC[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(7): 173 - 178. (in Chinese)
[25] 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)
[26] 徐广飞,陈美舟,苗河泉,等. 基于模型预测控制的农机主从跟随作业控制方法[J]. 农业机械学报, 2020,51(增刊 2): 11 - 20.
XU Guangfei, CHEN Meizhou, MIAO Hequan, et al. Following operation control method of farmer machinery based on model predictive control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 11 - 20. (in Chinese)
[27] LI Y H, FAN J K, LIU Y, et al. Path planning and path tracking for autonomous vehicle based on MPC with adaptive dual-horizon-parameters[J]. International Journal of Automotive Technology, 2022, 23(5): 1239 - 1253.
[28] 严国军,贲能军,顾建华,等. 基于 MPC 的无人驾驶拖拉机轨迹跟踪控制[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019,38(9):1 - 6.
YAN Guojun, BEN Nengjun, GU Jianhua, et al. Trajectory tracking control of unmanned tractors based on MPC[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science Edition), 2019, 38(9): 1 - 6. (in Chinese)
[29] 盖江涛,刘春生,马长军,等. 考虑履带滑转滑移的电驱动履带车辆转向控制[J]. 兵工学报, 2021,42(10):2092 - 2101.
GAI Jiangtao, LIU Chunsheng, MA Changjun, et al. Steering control of electrically driven tracked vehicles considering track slip[J]. Journal of Ordnance Engineering, 2021, 42(10): 2092 - 2101. (in Chinese)
[30] 闫清东,张连第,赵毓芹,等. 坦克构造与设计[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2007.