DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2024.04.006

基于模型预测控制的履带式除草机器人设计与试验

赵立军[1]，贾云帆[1]，殷文科[1]，黄华[1]，李想[2]，李强[1*]

（1. 重庆文理学院智能制造工程学院，重庆市，402160；
2. 重庆华世丹农业装备制造有限公司，重庆市，401326）

摘要：针对丘陵山区果园除草作业困难、除草效率低、智能化水平不高等问题，设计了一种小型山地果园除草机器人。为提高履带式除草机器人作业路径的跟踪精度，开展了履带式除草机器人路径跟踪控制算法研究。采用“倒三角形旋接结构”设计了一种仿形浮动底盘，搭载“Y型”甩刀组件进行粉碎除草作业，由增程式油电混合动力系统提供动力支持，针对斜坡转向滑移大等问题提出了基于模型预测控制（MPC）的斜坡转向控制策略，采用往返式路径规划方法对果园进行全覆盖路径规划，结合BDS定位导航技术及全覆盖路径规划方式，确保履带式除草机器人在作业过程中具备高跟踪精度。构建履带除草机器人运动学模型，在MATLAB软件中，对履带除草机器人在斜坡上的转向动力学及其控制策略进行了仿真分析。仿真试验结果表明，设计的坡面转向模型在15°条件下路径跟踪平均误差仅为0.039 m，展现了良好的精确度。田间试验表明，提出的MPC控制器能够有效改善坡面转向工况下路径跟踪效果，在坡度角为15°时，上下坡工况下平均误差相较于PID控制器分别减小了51.76%，63.77%。融合北斗导航功能的除草机器人，有效除草率高于97%，可在25°坡面上正常行走。该研究成果为丘陵山地除草机器人的研制提供了参考。

关键词：农业机械；路径规划；除草机器人；MPC；导航

中图分类号：S24；S224.1+5 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-7217（2024）04-0084-11

赵立军，贾云帆，殷文科，黄华，李想，李强．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, HUANG Hua, LI Xiang, LI Qiang. Design and experiment of a tracked weeding robot based on model predictive control [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(4): 84－94

0 引言

我国作为全世界最重要的水果生产国之一，果树种植作为我国农业产业的重要一环，是我国农业产业中的关键领域[1]。长期以来，杂草的生长对农业生产造成了显著影响。据数据统计，我国每年杂草的生长面积超过9×10^7 hm^2，导致作物产量减少超过3 000 kt，给农业经济带来了巨大的损失。在杂草的影响下，农田或果园的产量可能会降低10%～20%[2]。然而，由于我国大多数果园位于山地丘陵地带，地理条件的限制和种植模式的影响，导致果园机械化进程发展缓慢，机械化水平相对较低。目前，果园除草作业大多依赖于人工，劳动强度大，生产效率低，作业环境艰苦，因此，对于自动化果园除草机械的需求极为迫切[3]。

在现代技术快速发展的大背景下，自动化解决方案正在各领域大放异彩，除草机器人的兴起就是其中之一。除草机器人作为机器人领域的创新应用，正逐步取代传统人工除草方式。不仅显著提升了农业、园艺管理的效率，更大幅减轻了人工劳动强度，特别是在维护规则化绿地，如花园、足球场等领域表现尤为突出。与传统的手工除草相比，自动化除草机器人依靠先进的智能控制系统，能够实现自主环境感知、精确路径规划及高效导航作业，全程无须人为干预，从而显著提高了作业效率，降低了人力成本[4-5]。由于不规则地形限制，丘陵山地自动驾驶技术对导航定位精度和跟踪控制算法要求更高，高精度GNSS定位与高性能路径跟踪算法是除草机器人精准导航作业的前提[6-8]。路径跟踪控制是智能农机的关键技术之一，对于提高

收稿日期：2024-08-05 修回日期：2024-09-23

基金项目：重庆市教育委员会科学技术研究项目（KJZD-M202201302）；重庆市科学技术局农业农村领域重点研发项目（cstc2021jscx-gksbX0003）；重庆市2024年农机装备研产推用一体化“揭榜挂帅”项目（cqjjxxwjbgs-njzb2024003）；2024年重庆市自然科学基金创新发展联合基金（市教委）项目（CSTB2024NSCQ-LZX0091）；重庆市科技局英才计划项目（20231102）

第一作者：赵立军，男，1980年生，黑龙江克山人，博士，教授；研究方向为山地智能农业装备及机器人。E-mail：20190005@cqwu.edu.cn

*通信作者：李强，男，1989年生，黑龙江庆安人，博士，副教授；研究方向为山地智能农业装备及机器人。E-mail：20200004@cqwu.edu.cn

除草机器人作业效率和作业质量起到决定性的作用[9-10]。目前，国内外对除草机器人研究种类较多，但多针对水田苗间杂草进行除草作业[11]，而适用于山地果园的除草机器人研究较少。QUAN 等[12]结合深度学习技术与定向除草模式，开发了智能行内机器人除草系统；华南理工大学 ZHANG 等[13]研究了水田除草机器人；李江龙等[14]针对田间除草机械化水平低导致生产效率低下的问题，设计了一种高地隙履带式除草机器人移动平台；刘永平等[15]针对矮砧密植果园开发了三轮驱动除草机器人，作业方式灵活；HUANG 等[16]应用行跟踪系统驱动机器人，以提高底盘在苹果树行间远程控制的自动化水平；贺庆等[17]针对机器人在曲线路径作业过程中的跟踪效果和适应性都较差，提出了自适应时域 MPC 路径跟踪控制方法，使其满足自主割草等复杂作业要求；赵智宇等[18]针对丘陵果园环境非结构化且复杂多变，常规的除草方式效率低等问题，设计了一种果园除草机器人底盘系统；翁盛槟等[19]针对除草机器人移动路径精度低、自主导航能力差等问题研究了基于模糊控制的除草机器人自主导航系统。上述研究提升了丘陵山地除草机械设备机械化水平，但是由于丘陵山地复杂多变的非结构化环境，以及呈现地块小，坡度大特点，给除草机器人的研发带来了挑战[20-21]。

综上，针对丘陵果园除草设备自动化水平不足的问题，本研究设计了一款履带式除草机器人，采用“倒三角形旋接结构”设计了一种仿形浮动底盘；搭载“Y 型”甩刀组件进行粉碎除草作业；针对斜坡转向滑移问题，提出了基于模型预测控制（MPC，model predictive control）的斜坡转向控制策略。此外，利用往返式路径规划来指导除草机器人高效执行除草任务。此研究旨在探索如何通过智能化技术手段提升除草机器人的工作效能，尤其是针对地形复杂的丘陵果园环境，提出一种有效的自动化除草方案，以促进现代农业的可持续发展。

1　果园除草机器人设计

1.1　整体结构

运用 Solidworks 三维设计软件，对除草机器人的整体结构进行了设计，如图 1 所示。主要包括仿形底盘、动力系统、导航系统以及粉碎除草单元。采用“倒三角形旋接结构”设计了一种仿形浮动底盘，底盘的左右两侧履带轮系前端通过纵向铰接副进行安装，而后端则通过横转臂中心旋接副实现柔性安装。使得两侧履带在一定俯仰角度范围内具备了“2 自由度”的活动配合能力，从而在不平坦的路面上实现了底盘的仿形功能。这一功能显著增强了行走过程中履带的抓地力，并提升了爬坡能力。底盘的具体参数详见表 1。粉碎除草单元其结构主要由除草壳体、粉碎装置、电动推杆、离合器等组件构成。除草机器人整体的动力来源于发动机及动力电池提供，通过驱动粉碎装置中的碎草刀辊高速旋转，进而带动“Y”甩刀完成杂草的粉碎作业。通过调节发动机功率，可以改变刀辊的转速；通过控制离合器，则可以实现发动机与粉碎装置之间的动力分离。此外，割台左右两侧分别配备了电动推杆，可根据实际作业环境调节推杆电机的旋转角度，以控制除草的高度。



图 1　整体三维模型

Figure 1　Overall 3D model

1. 仿形履带底盘　2. 导航系统　3. 动力系统　4. 粉碎除草单元

表 1　履带底盘主要参数

Table 1　Main parameters of crawler chassis

项目名称	参数
底盘重量/kg	200
底盘总体尺寸/（mm×mm×mm）	1 100×950×400
履带接地长度/mm	800
履带宽度/mm	145
轨距/mm	600
履带节距/mm	60
接地比压/kPa	8.4
最大爬坡度/(°)	30
跨沟宽度/mm	400
越障高度/mm	200

整机采用增程式油电混合动力提供除草作业/导航行驶动力，通过两侧双减速电机驱动主动轮旋转实现除草机器人行驶作业。除草机器人正常行驶作业时，通过减速电机驱动行驶，发动机驱动粉碎除草机构进行除草作业，当电池的 SOC 值低于 40% 时，发动机给机器人提供电力，并对电池进行充电，当 SOC 值高于 85% 时，发动机停止供电，最大限度实现节能，同时使动力电池一直处于浅充浅放状态，有利于增加动力电池的使用寿命。

1.2　自动导航作业系统

近年来，随着技术的不断进步，北斗导航系统在农

业机械的自动化和智能化方面发挥了重要作用。农业机械如拖拉机、收割机等都可以通过搭载合适的导航系统实现自动驾驶,减少人为操作的误差,提高作业效率。北斗导航系统在农业中的应用越来越广泛,因此无人驾驶系统采用北斗导航系统[22]。无人驾驶导航系统由导航定位模块、控制器、车载控制终端和电机驱动模块组成,如图2所示。导航系统采用星途导航科技有限公司的北斗农业机械自动导航驾驶系统,集成了高精度北斗导航定位模块,北斗定位模块其定位精度为1 cm,航向精度0.2°,直线导航控制精度为±2.5 cm,平均接行精度为±2.5 cm。导航定位模块负责将当前除草机器人位置信息输入车载控制终端,计算下一个状态的坐标、方向和速度信息,通过车载控制终端自动生成除草作业路径并将控制信息下发给控制器。电机驱动模块负责接收控制器的信号,分配电机工作电压,采用脉宽调制(PWM)信号驱动控制电机位置和速度。

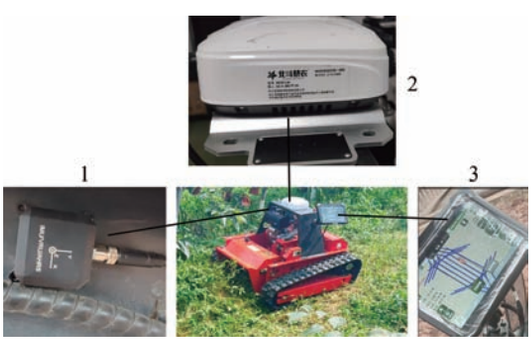


图2 除草机器人导航系统组成

Figure 2 Composition of the weeding robot navigation system

1. IMU 2. 北斗定位模块 3. 车载控制终端

在机器人移动方式的路径规划方面,常见的策略包括随机式、螺旋式和往返式等[14],其中,往返式路径规划因其简单高效的特点,常用于特定场景下进行精细化覆盖。本研究选择采用往返式路径规划来指导除草机器人执行除草任务,如图3所示,机器人从起点出发,沿着设定方向直线移动,然后返回起点,如此循环往复,直至覆盖整个工作区域。为了提升丘陵果园场景中除草机器人的工作效率与移动精度,综合运用了现有的定位导航技术和全覆盖路径规划方法。引入北斗导航系统作为基础技术支持,结合往返式路径规划原理,旨在探究优化丘陵果园除草机器人的作业策略。

该除草机器人采用遥控打点技术,无须安插虚拟边界,最大的遥控距离为800 m,采用了M320K5G转网口工业5G模块,支持5G传输且前后加装了摄像头实时监控工作情况实时进行机身姿态调整,预测速度为26 ms。可通过5G传输实时监控自主规划路径,实现果园复杂作业环境下智能除草机器人无人驾驶及自主作业,能够高效完成除草任务。

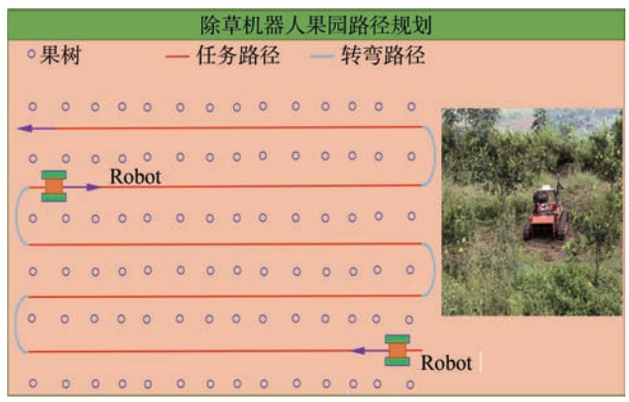


图3 果园往返式路径规划图

Figure 3 Orchard round-trip path planning diagram

2 导航控制器设计

2.1 机器人模型

2.1.1 履带除草机器人运动学模型

由于履带与地面的接触比较复杂,对其进行了简化[23]。假设构建的履带行走机构基于如下前提:

1)履带机器人的质心精确与几何中心重合,并展现出关于中央轴的对称性,确保在移动过程中,机器人整体的质量分布不变,实现平稳运行;

2)考虑简化模型,忽视转向机制的影响,预设左、右履带在设计与动力传递上具有完全相同的特性,简化分析复杂度;

3)在行进状态下,假设履带与地面之间只发生纯滚动接触,排除滑转和滑移现象,以此确保具备理想的转向性能,理论上允许机器人在任意方向进行精确转向。

简化后的履带除草机器人运动模型如图4所示。

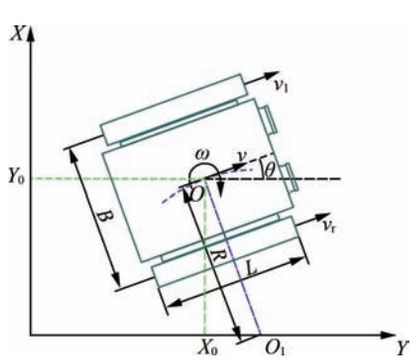


图4 履带除草机器人模型

Figure 4 Tracked robot model

图中O为几何中心,O_1为瞬时转向中心,R为机器人转向半径。履带机器人的运动学方程描述如式(1)所示。

$$\begin{cases} v_l=(1-i_l)w_l r \\ v_r=(1-i_r)w_r r \\ v=\dfrac{v_l+v_r}{2} \\ w=\dfrac{v_l-v_r}{B} \\ R=\dfrac{B(v_l+v_r)}{2(v_l-v_r)} \end{cases} \tag{1}$$

式中：v——机器人行走速度，m/s；

v_l，v_r——左右履带线速度，m/s；

i_l，i_r——左右履带的滑移比；

w_l，w_r——左右履带驱动轮的角速度，rad/s；

r——驱动轮半径，mm；

w——除草机器人瞬时转向角速度，rad/s；

B——履带中心距，mm。

由式(1)运动参数之间的关系可得机器人的水平面状态与左右驱动轮转速之间的关系如式(2)。

$$P=\begin{bmatrix}\dot{x}\\ \dot{y}\\ \dot{\theta}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{\cos\theta}{2} & \dfrac{\cos\theta}{2}\\ \dfrac{\sin\theta}{2} & \dfrac{\sin\theta}{2}\\ \dfrac{1}{B} & \dfrac{1}{B}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\nu_l\\ \nu_r\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中：θ——航向角，(°)。

2.1.2　斜坡转向动力学模型

在转向工况下，履带除草机器人的运动形式表现为复合运动。具体而言，在坡地转向作业过程中，除草机器人不仅需要围绕转向中心进行旋转，还需要围绕低速侧履带的接地中心进行相应的转动。为全面考虑除草机器人转向中心的偏移，以及履带滑转和滑移等现象，构建了如图5所示的斜坡转向模型。

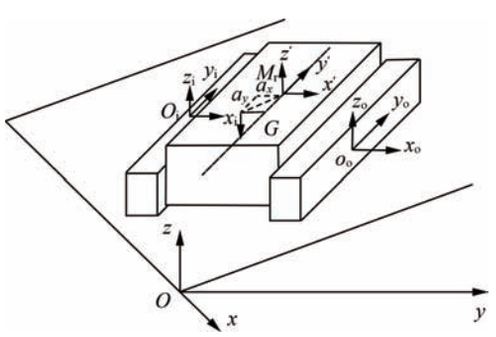


图5　除草机器人斜坡分析

Figure 5　Vehicle slope analysis

$Oxyz$为在地面固定不动的空间直角坐标系；而$O_ix_iy_iz_i$则代表着除草机器人内侧履带接触地面的中心坐标系，其中的O_i点是内侧履带中心点。$O'x'y'z'$为固定于除草机器人之上，随机具移动的空间直角坐标系，其原点O'位于除草机器人的几何中心接地点。$O_ox_oy_oz_o$为除草机器人外侧履带接触地面的中心坐标系，其中的O_o点标志外侧履带中心。M_r为两侧履带所受的转向阻力矩总和。至于除草机器人转向中心，其在x轴的横向偏移用a_x表示，而在y轴的纵向偏移则以a_y来表示。

图6所示为机器人履带所受平行于路面方向上所承受的横向力分布情况，其中L为履带与地面接触的长度，B为履带中心距，F_i、F_o分别为履带内外两侧的驱动作用力，F_{Ri}、F_{Ro}分别为履带两侧所受的行驶阻力；q_{oa_y}、q_{ia_y}分别为履带横向力梯形的中间值，q_{ih}、q_{iq}分别为内侧履带接地端前后两端所受单位长度法向负荷。

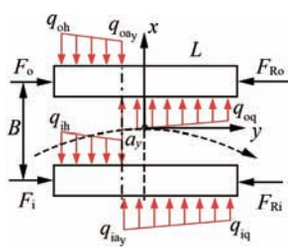


图6　履带所受平行于路面的横向力分布

Figure 6　Distribution of transverse forces on the track parallel to the road surface

履带纵向行驶阻力与接地压力成正比，由此可以得到两侧行驶时的滚动阻力[24]为公式(3)。

$$\begin{cases} N_o=G\left[\cos a-\dfrac{1}{B}\left(h_g\sin a\sin b+a_x\cos a\right)\right. \\ N_i=G\left[\cos a+\dfrac{1}{B}\left(h_g\sin a\sin b+a_x\cos a\right)\right. \\ F_{Ri}=N_i f \\ F_{Ro}=N_o f \end{cases} \tag{3}$$

式中：N_o——履带外侧的接地压力；

N_i——履带内侧的接地压力；

G——除草机器人重力；

a——除草机器人所在斜坡角度；

b——除草机器人斜坡上的方位角；

h_g——履带除草机器人中心高度；

f——阻力系数。

转向阻力矩M_μ等于图5横向阻力梯形图中梯形面积对履带中心点取矩[25]，具体计算如式(4)。

$$\begin{aligned} M_\mu=&\frac{1}{2}\mu\left(q_{ih}+q_{ia_y}\right)(L-\lambda)\frac{1}{2}(L-\lambda)+\\ &\frac{1}{2}\mu\left(q_{iq}+q_{ia_y}\right)\lambda\frac{1}{2}\lambda+\\ &\frac{1}{2}\mu\left(q_{oh}+q_{oa_y}\right)(L-\lambda)\frac{1}{2}(L-\lambda)+\\ &\frac{1}{2}\mu\left(q_{oq}+q_{oa_y}\right)\lambda\frac{1}{2}\lambda \end{aligned} \tag{4}$$

式中:$\mu=\mu_{max}/\left(0.925+\dfrac{0.15R}{B}\right)$。

μ_{max}对应转向半径为$B/2$时地面转向阻力系数,机器人转向半径R与相对转向半径P关系为$P=R/B$。

$$\begin{cases} l=\dfrac{L}{2}+a_y \\ q_{iq}=\dfrac{N_i}{L}\left(1-\dfrac{6h_g\tan a\cos b}{L}\right) \\ q_{ih}=\dfrac{N_i}{L}\left(1+\dfrac{6h_g\tan a\cos b}{L}\right) \end{cases} \tag{5}$$

根据上述对履带除草机器人斜坡转向进行受力分析,建立除草机器人斜坡转向动力学模型如式(6)所示。

$$\begin{cases} m\dot{v}=F_i+F_o-F_{Ri}-F_{Ro} \\ I\dot{\omega}=(F_o-F_i)\dfrac{B}{2}+(F_{Ri}-F_{Ro})\dfrac{B}{2}-M_\mu \end{cases} \tag{6}$$

式中:I——履带除草机器人绕转向中心的转动惯量;

ω——转向角速度。

驱动力与驱动扭矩之间的关系如公式(7)所示。

$$\begin{cases} F_i=T_i\cdot r_z \\ F_o=T_o\cdot r_z \end{cases} \tag{7}$$

式中:T_i,T_o——内外两侧主动轮扭矩。

2.2 电机驱动模型

为了更好的控制机器人,必须明确控制信号与实际运动之间的关系。该关系由电机的输入电压和速度表示。它们的状态方程和传递函数可以通过电枢电压平衡方程和扭矩平衡方程给出[26],如式(8)、式(9)所示。

$$\begin{cases} u_a=R_a i_a+L_a\dfrac{\mathrm{d}i_a}{\mathrm{d}t}+\varepsilon \\ \varepsilon=C_e\varphi n \end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{cases} J\dfrac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t}=M-M_L \\ M=C_M\varphi i_a \end{cases} \tag{9}$$

式中:u_a——直流电机电枢电压;

i_a——电枢电流;

R_a,L_a——电枢电阻和电枢电感;

ε——电枢反电动势;

φ——每极的磁通量;

n,C_e——转子转速和电位常数;

J——转动惯量;

M,M_L——电磁转矩和负载转矩;

C_M——直流电机的转矩常数。

电枢电流和电压之间以及转子转速和动态转矩之间的传递函数如式(10)所示。

$$\begin{cases} \dfrac{i_a}{u_a-\varepsilon}=\dfrac{K}{1+sT} \\ \dfrac{n}{M-M_L}=\dfrac{1}{sJ} \end{cases} \tag{10}$$

式中:$K=\dfrac{1}{R_a}$——电枢电路的放大倍数;

$T=\dfrac{L_a}{R_a}$——电枢电路的电磁时间常数。

为了获得电磁转矩和电枢电压之间的传递函数,将电枢反电动势和电磁转矩合并到电枢电流和电压的传递函数中。式(11)有助于通过履带速度和转速之间的关系来确定履带速度和电枢电压的传递函数,可以用式(12)表示。

$$\begin{cases} \dfrac{M}{u_a-C_e\varphi n}=\dfrac{C_m\varphi}{R_a+sL_a} \\ \dfrac{n}{M-M_L}=\dfrac{1}{sJ} \end{cases} \tag{11}$$

$$G(s)=\frac{\nu(s)}{u_a(s)}=\frac{\dfrac{2\pi}{C}r}{T_mTs^2+T_ms+1} \tag{12}$$

式中:T——电枢回路电磁时间常数;

T_m——电机系统的机电时间常数,$T_m=\dfrac{JR_a}{C_mC_e\varphi^2}$。

2.3 MPC 控制器设计

2.3.1 模型预测控制算法原理

模型预测控制(MPC)的基本思想是根据目标系统的工作模型、系统目前的状态量以及系统的控制量去预测系统下一步的输出,由预测模型、滚动优化和反馈校正3个要素组成,其基本原理如图7所示。

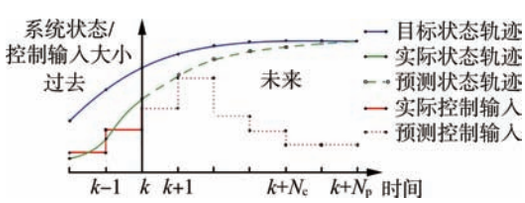


图7 模型预测控制原理图

Figure 7 Schematic of model predictive control

2.3.2 坡面转向路径跟踪控制策略

模型预测控制在除草机器人路径跟踪中发挥着重要作用,通过预测、优化和反馈校正等步骤实现高精度的路径跟踪控制。针对丘陵山区多坡地的环境特点,除草机器人的实际作业环境复杂且多变,需要根据机器人的作业环境实时调控模型预测控制器的参数,因此,本研究提出基于模型预测控制的坡面转向路径跟踪控制策略,以提高机器人路径追踪的精度,构建除草机器人斜坡转向状态多变量预测控制系统。如图8所示,在该坡面转向控制策略中,v*、ω*代表根据驾驶员

意图设定的目标速度和目标转向角速度，v_r、ω_r分别表示系统实际的输出速度和转向角速度，F_{ml}、F_{mr}分别为电机驱动力解算模块计算得出的初始电机驱动力值，F_l、F_2分别为预测模型输出的左右两侧电机所需的补偿驱动力，F_l、F_r分别为左右侧电机实际输出驱动力，n_{rl}、n_{rr}分别为左右两侧电机的实际转速。

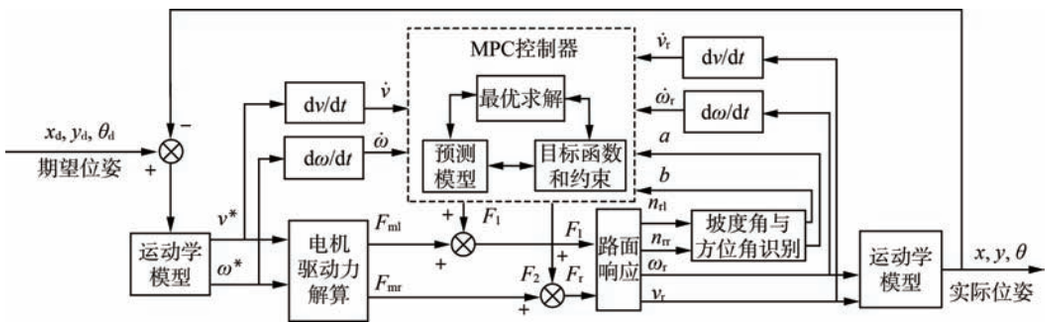


图 8　坡面转向控制策略

Figure 8　Slope steering control strategy

斜坡转向控制策略的预测模型是以两侧履带的目标加速度以及目标角加速度作为输入，预测除草机器人斜坡转向两侧履带实际所需的驱动力，预测模型如式(13)。

$$\begin{cases} F_1 = m\dfrac{\dot{v}}{2} - \dfrac{\dot{\omega} I_{ri}}{B} - \dfrac{M_\mu}{B} + F_{Ri} \\ F_2 = m\dfrac{\dot{v}}{2} + \dfrac{\dot{\omega} I_{ro}}{B} + \dfrac{M_\mu}{B} + F_{Ro} \end{cases} \tag{13}$$

式中：m——除草机器人质量；

I_{ri}，I_{ro}——机器人内外两侧主动轮的转动惯量。

为了实现除草机器人的路径跟踪，采用GNSS接收机及倾角传感器获取除草机器人当前实际位姿，并根据预设路径轨迹求得其与期望位姿的差值。由图8可见，由除草机器人运动学模型解算出目标速度v*以及角速度ω*，通过主动轮实际输出的转速得到当前的车速v_r与转向角速度ω_r；结合控制输出的驱动力；利用除草机器人斜坡转向动力学模型获得当前的转向阻力矩与滚动阻力，通过履带纵向行驶阻力与接地压力成正比进行坡度角a与方位角b的识别；最后通过对目标速度v*与角速度ω*进行积分，并利用多状态变量进行预测控制输出，调整电机驱动力解算模块，以确保履带除草机器人能够达到期望的车速和转向半径，实现坡道上不同方位角的精确转向控制。

2.3.3　模型预测控制器设计

对机器人路径跟踪控制系统状态空间模型实施离散化操作，得出离散后的空间状态方程为

$$\begin{cases} x(k+1) = A_d(k)x(k) + B_d(k)u(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \tag{14}$$

构建新的状态向量$x(k|t) = (x(k), u(k-1)^T)$并代入式(14)中，得到新的状态空间表达式为

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ u(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_d & B_d \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_d \\ I \end{bmatrix} \Delta u(k) \tag{15}$$

通过将式(15)进行多步骤推导寻找预测规律，得到机器人在预测时域内的预测输出序列为

$$\overline{Y}(k) = \overline{A}\,\xi(k|k) + \overline{B}\,\Delta U \tag{16}$$

式中：

$$\overline{A} = \begin{bmatrix} \tilde{A} \\ \tilde{A}^2 \\ \vdots \\ \tilde{A}^M \\ \vdots \\ \tilde{A}^P \end{bmatrix}, \quad \overline{B} = \begin{bmatrix} \tilde{B} & 0 & \cdots & 0 \\ \tilde{A}\tilde{B} & \tilde{B} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{A}^{M-1}\tilde{B} & \tilde{A}^{M-2}\tilde{B} & \cdots & \tilde{B} \\ \tilde{A}^{M-1}\tilde{B} & \tilde{A}^{M-1}\tilde{B} & \cdots & \tilde{A}\tilde{B} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{A}^{P-1}\tilde{B} & \tilde{A}^{P-2}\tilde{B} & \cdots & \tilde{A}^{P-M-1}\tilde{B} \end{bmatrix}。$$

在预测的整个动态系统中，控制增量序列，ΔU是优化目标函数的解，并且是未知的，需要在每一时刻求解目标函数的最优来得知，与此同时引入了松弛因子，防止系统无解，设系统的代价函数为[27]。

$$J(\xi(t), u(t-1), \Delta u(k)) = \sum_{i=0}^{Np} \left\| \overline{Y}(k+i|k) - \overline{Y}_r(k+i|k) \right\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{Nc} \left\| \Delta u(k+i) \right\|_R^2 + \rho\omega^2 \tag{17}$$

$$J = \frac{1}{2}\Delta U^T H \Delta U + g^T \Delta U \tag{18}$$

其中：J为描述履带除草机器人动态系统性能的目标代价函数，式中的第1项范数为衡量预测时域内动态系统的预测输出与参考轨迹之间的误差，表示动态系统对参考路径的跟踪能力，Q矩阵为系统的误差权重矩阵，用于调整对不同时刻跟踪误差的重视程度，可通过调整Q矩阵中的不同元素来对不同时刻的跟踪误

差进行加权;式中的第2项范数为控制时域内对系统的控制增量的约束,防止控制量突变,表示系统控制量平稳变化的能力,在本研究中,控制量被设为控制增量,ρ为权值系数,ω_2为松弛因子,用于防止系统无解的情况发生。

为了确保在求解过程中避免系统突变并保持其原有性能稳定,在进行优化和分析的同时,引入了以下约束条件。将优化问题转化为一个带有约束条件的线性二次规划问题。

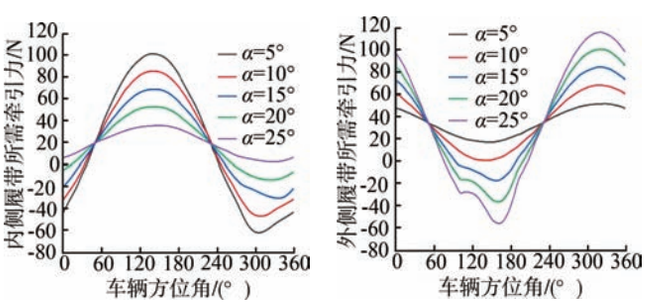
$$\begin{cases} U_{\min} \leqslant A_k \Delta U + U_t \leqslant U_{\max} \\ \Delta U_{\min} \leqslant \Delta U_t \leqslant \Delta U_{\max} \end{cases} \tag{19}$$

2.4 仿真分析

利用MATLAB/Simulink软件对山地果园除草机器人仿真环境进行搭建,完成除草机器人在斜坡上的转向动力学行为及转向控制策略的仿真分析,除草机器人详细参数如表1所示。设置除草机器人地面摩擦系数为f=0.04,最大静摩擦系数为$\mu_{\max}$=0.65。在仿真过程中,设定除草机器人在保持恒定速度的同时,能够按照特定转向半径和坡度倾角进行一周的旋转,此操作以逆时针作为正向转向[28]。

仿真结果显示,如图9,对于转向半径设为3 m时的情况,在不同坡度条件下,内外两侧履带的牵引力随除草机器人方位角的变化呈现显著趋势。

观察可知,内侧履带在其方位角40°~260°区间时呈现出牵引状态,表现为所需牵引力大于0,并且此牵引力随坡度倾角的增加而减小。外侧履带在方位角0°~60°和240°~360°的区间内牵引力增加趋势与坡度关联紧密;当方位角在70°~210°区间时,转向过程中的外侧履带由牵引转变为制动状态,并且随着坡度的增加,所需制动力随之增大。

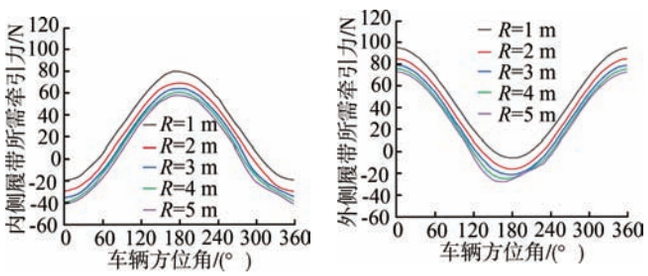


(a) 内侧牵引力变化 (b) 外侧牵引力变化

图9 不同坡面倾角条件下牵引力变化趋势(R=3 m)

Figure 9 Traction trend at different slopes (R=3 m)

由图10可知,在坡度角为15°的情形下,不同转向半径时内外两侧履带的牵引力随着转向半径变化呈线性变化趋势。然而,这一变化在下坡过程中因受到重力分力的影响,导致了内外两侧履带牵引力的轻微变动。随着转向半径的扩大,转向时的阻力矩减小,使得内外两侧所需对应的制动力与牵引力相应减少。这表明在转向控制策略中,应考虑到坡度和转向半径对牵引与制动力分布的影响,从而实现更为精确和有效的操控。根据不同坡面倾角调整电机的牵引力,并实施有效的坡面转向控制策略,是确保机器人在坡面上稳定转向的关键。



(a) 内侧牵引力变化 (b) 外侧牵引力变化

图10 不同转向半径条件下牵引力变化趋势(a=15°)

Figure 10 Traction trend changes under different steering radii (a=15°)

为验证机器人路径跟踪控制系统的性能,设置坡面扰动25°时,机器人坡面转向行驶的二维路径跟踪如图11所示。

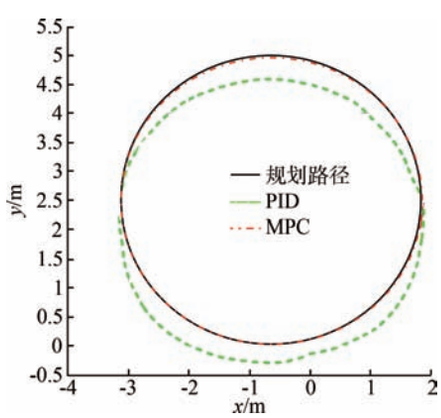


图11 转弯行驶二维路径跟踪

Figure 11 Turn-by-turn driving 2D path tracking

在坡度角为15°时,MPC与传统PID控制器路径跟踪性能对比如表2所示。

由表2可知本研究构建的MPC控制器在x轴与y轴上的误差表现,无论是最大跟踪误差还是平均绝对误差,皆优于传统的PID控制策略。

经过对跟踪路径曲线及对比数据的分析,坡面转向MPC控制器在xy方向上的平均误差为0.039 m,针对履带式除草机器人所设计的路径跟踪控制器在坡地环境中展现了卓越的跟踪准确度及更强的扰动抑制能力。

表 2　坡面转向跟踪性能仿真对比

Table 2　Positioning accuracy statistics

控制方法	最大误差/m		平均误差/m	
	x方向	y方向	x方向	y方向
PID	0.231 5	0.756 3	0.063 7	0.425 8
MPC	0.192 3	0.401 5	0.014 5	0.062 6

3　试验结果与分析

3.1　试验材料

为进一步验证提出控制算法的有效性，在重庆市永川区的一个柑橘种植基地进行了试验，在作业过程中，机器人行驶速度为0～6 km/h。如图12所示，试验数据采集使用的是IMU倾角传感器以及北斗定位模块[29]，主要用于采集除草机器人航向角、加速度、坡面倾角等姿态信息，所获得的数据可通过CAN总线传输至车载控制终端，由车载控制终端对控制变量进行信息处理，结合预设的控制算法（MPC控制），计算出所需的控制指令，下发给控制器，用于调整除草机器人作业过程中各执行部件工作状态。同时，通过传感器实时采集新的姿态信息并反馈给车载控制终端，形成闭环控制系统。车载控制终端根据反馈信息调整控制指令，以实现对车辆行驶状态的持续精确控制。



图 12　试验场景

Figure 12　Scenario for experiment

3.2　坡面转向路径跟踪试验

为检验坡面转向MPC控制器的有效性，在柑橘园中，选择坡面分别为5°、15°的两个地点进行上坡和下坡转向测试，试验结果如图13所示。

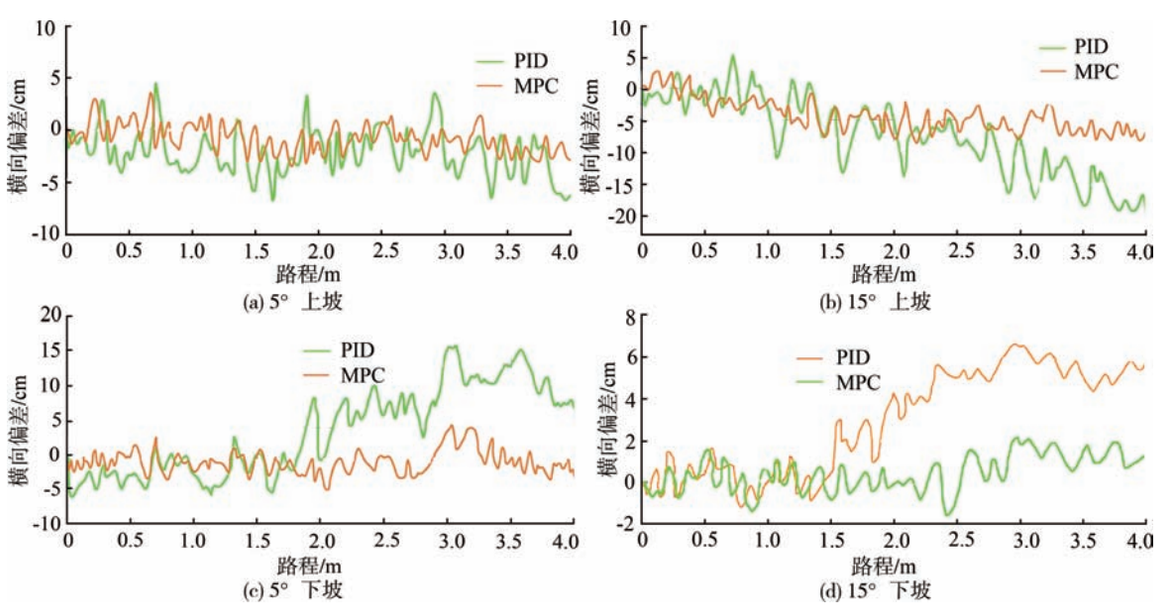


图 13　上下坡轨迹跟踪误差

Figure 13　Uphill and downhill trajectory tracking error

由图13可知在坡面倾角较小的情况下，无论是上坡还是下坡转向，两种控制算法的横向误差均有所改善，但基于坡面转向模型的MPC控制算法总体优于传统的PID控制算法。本研究所提出的MPC控制算法则通过预测转向阻力矩，控制电机转速，将跟踪误差控制在较小范围内，改善了路径跟踪效果。上下坡工况路径跟踪性能如表3和表4所示。

表 3　上坡转向路径跟踪性能对比

Table 3　Comparison of uphill steering path tracking performance

上坡	坡度角5°		坡度角15°	
	最大误差/cm	平均误差/cm	最大误差/cm	平均误差/cm
PID	6.92	2.32	19.86	12.21
MPC	1.31	3.21	8.52	5.89

表 4 下坡转向路径跟踪性能对比

Table 4 Comparison of downhill steering path tracking performance

下坡	坡度角 5°		坡度角 15°	
	最大误差/cm	平均误差/cm	最大误差/cm	平均误差/cm
PID	6.73	3.45	18.21	11.73
MPC	2.31	1.15	5.72	4.25

由表可知在坡度角为 5°时,PID 控制算法与 MPC 控制算法均有较好表现,平均误差均在 3.5 cm 以下。在坡度角为 15°时,不论上坡或下坡 PID 控制算法在路径跟踪时均出现了较大误差,说明坡度对机器人路径跟踪效果存在显著影响,而本研究提出的 MPC 控制器能够有效改善坡面转向工况下路径跟踪效果,上下坡工况下平均误差相较于 PID 控制器分别减小了 51.76%,63.77%。

3.3 除草机器人作业试验

根据农业机械推广鉴定大纲(DG/T041—2019)的判定规则,试验地包括 10 m×10 m 以上测区。选取 3 段不同区域进行测量,测量除草前后根部向上的高度小于 50 mm 的草地面积并求比值,除草率试验结果如表 5 所示。经试验验证,除草率高于 97%,满足果园除草作业需求。除草前后效果如图 14 所示。



(a) 除草前 (b) 除草后

图 14 除草前后效果

Figure 14 Effect of weeding before and after

表 5 除草率测定结果

Table 5 Measurement result of weeding rate

杂草面积/m²	漏除面积/m²			除草率/%
	区域 1	区域 2	合计	
30.00	0.32	0.38	0.70	97.77
20.00	0.16	0.22	0.38	98.10
30.00	0.28	0.35	0.63	97.90

4 结论

1)设计了一款履带式除草机器人,使用北斗导航进行导航定位,采用“倒三角形旋接结构”设计了一种仿形浮动底盘,搭载“Y 型”甩刀组件进行粉碎除草作业,田间试验结果表明,机器人除草率高于 97%,满足果园除草作业需求。

2)针对丘陵山区多坡地的环境特点,研究了履带模型车的坡面行驶滑移模型和坡面转向动力学、运动学模型,并建立了基于模型预测控制(MPC)的路径跟踪控制算法。仿真试验结果表明,设计的坡面转向 MPC 控制器在 15°条件 xy 方向上的平均误差为 0.039 m,优于传统的 PID 控制策略,展现了良好的精确度。

3)使用履带式除草机器人在果园内验证了路径跟踪控制器的控制效能。试验结果表明:不同坡度对转向工况下的履带除草机器人路径跟踪效果影响较大,在坡度角为 15°时,上下坡平均误差较 PID 控制算法分别减小了 51.76%,63.77%,所提出的控制算法能够有效跟踪具有不同坡度的试验路径,证明了其在实际应用中的可行性和有效性。

参 考 文 献

[1] 任嘉欣. 覆盖作物多样性的地上部生产力及其对柑橘园土壤特性的影响[D]. 重庆:西南大学, 2023.
REN Jiaxin. Aboveground productivity of cover crop diversity and its effects on soil properties in citrus orchards [D]. Chongqing: Southwest University, 2023.

[2] ZHANG Z, LI R H, ZHAO C, et al. Reduction in weed infestation through integrated depletion of the weed seed bank in a rice-wheat cropping system [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2021, 41(1): 10.

[3] 温翔宇. 丘陵山区果园机械化装备发展现状分析与展望[J]. 广东科技, 2021, 30(2): 34—38.

[4] 贠鑫, 吕猛, 王文彬, 等. 果园除草机研究现状与发展趋势[J]. 农业工程, 2020, 10(1): 18—21.
YUN Xin, LÜ Meng, WANG Wenbin, et al. Research status and development trend of orchard weeder [J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(1): 18—21.

[5] 赵静娟, 杨艳萍, 郑怀国, 等. 全球农业机器人研发趋势预测[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2021, 2(1): 28—35.
ZHAO Jingjuan, YANG Yanping, ZHENG Huaiguo, et al. Global agricultural robotics research and development: Trend forecasts [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization (in Chinese and English), 2021, 2(1): 28—35.

[6] 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 Yuhan, LI Shichao, et al. Robot

research progress of agricultural machinery navigation technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 1－18.

[7] 赵春江, 范贝贝, 李瑾, 等. 农业机器人技术进展、挑战与趋势[J]. 智慧农业(中英文), 2023, 5(4): 1－15.
ZHAO Chunjiang, FAN Beibei, LI Jin, et al. Agricultural robots: Technology progress, challenges and trends [J]. Smart Agriculture, 2023, 5(4): 1－15.

[8] 高勇, 陈中武, 李沐桐, 等. 果园除草机器人研究现状与展望[J]. 现代农业装备, 2023, 44(5): 2－8, 29.
GAO Yong, CHEN Zhongwu, LI Mutong, et al. Research status and prospects of orchard weeding robots [J]. Modern Agricultural Equipment, 2023, 44(5): 2－8, 29.

[9] 闫全涛, 李丽霞, 邱权, 等. 小型农田原状土样采集机器人系统研发与测试[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2024, 5(1): 12－22.
YAN Quantao, LI Lixia, QIU Quan, et al. Development and test of a small robotic system for in-field undisturbed soil sampling [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(1): 12－22.

[10] 王焯轩, 王立辉, 许宁徽, 等. 智能收获机器人侧滑及滞后性控制策略研究[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2022, 3(2): 37－44.
WANG Zhuoxuan, WANG Lihui, XU Ninghui, et al. Research on the control strategy of sideslip and hysteresis of intelligent harvesting robot [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2022, 3(2): 37－44.

[11] 郑和, 李紫琪, 单以才, 等. 农田机械除草技术与装备研究现状与发展趋势[J/OL]. 南京农业大学学报, 1－13 [2024－08－14]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1148.S.20240606.1400.003.html.
ZHENG He, LI Ziqi, SHAN Yicai, et al. Current status and development trends of agricultural machinery weeding technologies and equipment [J/OL]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1－13 [2024－08－14]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1148.S.20240606.1400.003.html.

[12] QUAN L Z, JIANG W, LI H L, et al. Intelligent intra-row robotic weeding system combining deep learning technology with a targeted weeding mode [J]. Biosystems Engineering, 2022, 216: 13－31.

[13] ZHANG Q, XIA H, HUANG X G. The structure and realization of a compact weeding robot in stamping mode for paddy fields [M]// Lecture Notes in Electrical Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011: 205－212.

[14] 李江龙, 卢智琴, 鲍义东, 等. 履带式除草机器人高地隙移动平台机构优化设计[J]. 农业技术与装备, 2022(5): 22－26.
LI Jianglong, LU Zhiqin, BAO Yidong, et al. Mechanism optimization design of crawler weeding robot with high clearance moving platform [J]. Agricultural Technology & Equipment, 2022(5): 22－26.

[15] 刘永平, 许杰, 廖福林, 等. 新型果园除草机器人结构设计与切割仿真分析[J]. 农机化研究, 2020, 42(4): 28－32, 39.
LIU Yongping, XU Jie, LIAO Fulin, et al. Structural design and cutting simulation analysis of new orchard weeding robot [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(4): 28－32, 39.

[16] HUANG P C, ZHU L X, ZHANG Z G, et al. An end-to-end learning-based row-following system for an agricultural robot in structured apple orchards [J]. Mathematical problems in engineering, 2021: 6221119.

[17] 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 time horizon MPC path tracking control method for mowing robot [J]. Smart Agriculture, 2024, 6(3): 82－93.

[18] 赵智宇, 朱立成, 周利明, 等. 丘陵果园除草机器人底盘系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(S1): 48－57.
ZHAO Zhiyu, ZHU Licheng, ZHOU Liming, et al. Design and experiment of chassis control system for weeding robot in hilly orchard [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(S1): 48－57.

[19] 翁盛槟, 吴继团, 林晓亮, 等. 基于模糊控制的除草机器人自主导航系统研究[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(5): 152－154, 158.
WENG Shengbin, WU Jituan, LIN Xiaoliang, et al. Research on autonomous navigation system of weeding robot based on fuzzy control [J]. Machine building & automation, 2022, 51(5): 152－154, 158.

[20] 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.

[21] 张文莉, 陈树人, 褚德宏. 除草机器人研究现状与趋势[J]. 农业装备技术, 2015, 41(2): 6－10.
ZHANG Wenli, CHEN Shuren, Zhu Dehong. Research review on field weeding robot [J]. Agricultural Equipment & Technology, 2015, 41(2): 6－10.

[22] 宋德平, 王成, 孙冬霞, 等. 基于北斗导航的智能棉花播

种机设计与试验[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2021, 2(1): 44－50.
SONG Deping, WANG Cheng, SUN Dongxia, et al. Design and test of intelligent cotton planter based on BeiDou navigation [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization (in Chinese and English), 2021, 2(1): 44－50.

[23] GUAN Z H, LI Y, MU S L, et al. Tracing algorithm and control strategy for crawler rice combine harvester auxiliary navigation system [J]. Biosystems Engineering, 2021, 211: 50－62.

[24] 闫清东, 张连第, 赵毓芹. 坦克构造与设计(下册)[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.

[25] ZENG G, GAI J T, HAN Z D, et al. The study of steering on ramp based on electric tracked vehicle [C]// SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 2020.

[26] KIM H, KIM J, HAN K, et al. 1D modeling considering noise and vibration of vehicle window brushed DC motor [J]. Applied sciences, 2022, 12(22): 11405.

[27] 张亮修, 吴光强, 郭晓晓. 自主车辆线性时变模型预测路径跟踪控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(10): 1595－1603.
ZHANG Liangxiu, WU Guangqiang, GUO Xiaoxiao. Path tracking using linear time-varying model predictive control for autonomous vehicle [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(10): 1595－1603.

[28] 曾根, 王伟达, 盖江涛, 等. 双侧电机耦合驱动履带车辆斜坡转向控制策略[J]. 兵工学报, 2021, 42(10): 2189－2195.
ZENG Gen, WANG Weida, GAI Jiangtao, et al. Steering on ramp control strategy of double motor coupling drive transmission for tracked vehicle [J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(10): 2189－2195.

[29] 王平, 毛克彪, 郭中华, 等. GPS/北斗双模接收机在精细农业中的应用分析[J]. 农业展望, 2021, 17(12): 150－155.
WANG Ping, MAO Kebiao, GUO Zhonghua, et al. Application analysis of GPS/BD dual-mode receiver in precision agriculture [J]. Agricultural Outlook, 2021, 17(12): 150－155.

Design and experiment of a tracked weeding robot based on model predictive control

ZHAO Lijun[1], JIA Yunfan[1], YIN Wenke[1], HUANG Hua[1], LI Xiang[2], LI Qiang[1*]

(1. *School of Intelligent Manufacturing Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing* 402160, *China*; 2. *Chongqing Huashidan Agricultural Equipment Manufacturing Co., Ltd., Chongqing* 401326, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of difficult weeding operation, low weeding efficiency and low level of intelligence in orchards in hilly and mountainous areas, a small mountain orchard weeding robot was designed. In order to improve the tracking accuracy of the tracked weeding robot's operation path, the research of tracked weeding robot's path tracking control algorithm was carried out. The 'inverted triangle swivel structure' was used to design an imitation floating chassis, which carried a 'Y-type' blade assembly for crushing and weeding and powered by an extended-range hybrid power system, and a slope steering control strategy based on model predictive control was proposed to address the problem of large slope steering slippage. The round-trip path planning method was used to plan the full coverage path of the orchard. Combined with BDS positioning and navigation technology and full coverage path planning, the crawler weeding robot was ensured to have high tracking accuracy during operation. The kinematic model of the crawler weeding robot was constructed, and the steering dynamics and control strategy of the crawler weeding robot on the slope were simulated and analyzed in MATLAB software. The simulation results show that the average error of the designed slope steering model is only 0.039 m under the condition of 15°, which demonstrates a good accuracy. Field experiments show that the MPC controller proposed in this paper can effectively improve the path tracking effect under slope steering conditions, and the average error under uphill and downhill conditions is reduced by 51.76% and 63.77%, respectively, compared with the PID controller when the slope angle is 15°. The weeding robot integrated with BeiDou navigation function has an effective weeding rate higher than 97% and can walk normally on a 25° slope. The research results provide a reference for the development of weeding robots in hilly and mountainous areas.

Keywords: agricultural machinery; path planning; weeding robot; MPC; navigation