

基于自抗扰控制的双重转向运动控制系统设计与试验

朱立成^{1,2} 赵智宇^{1,2} 韩振浩^{1,2} 王瑞雪^{1,2} 周利明^{1,2} 赵博^{1,2}

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 2. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为进一步提升农业机器人底盘田间转向效率,设计了一种基于自抗扰控制的农业机器人底盘双重转向运动控制系统。根据苹果种植农艺需求和行驶环境,确定了底盘组成和主要技术参数,开展了硬件系统搭建和部件选型。建立了底盘4自由度动力学模型,明确了衡量转向效率的状态空间方程。提出了一种基于自抗扰控制的双重转向控制策略,建立了Simulink动力学仿真模型,并进行了转向仿真模拟。仿真结果表明,自抗扰双重转向运动控制模型横摆角速度为0.241 rad/s,转弯半径为1.96 m,扰动恢复时间为1.04 s,相较于传统PID双重转向控制模型,该模型横摆角速度更大、转弯半径更小、恢复稳定状态更快。田间试验结果表明,底盘平均横向偏移距离为18.5 cm,滑移率为4.84%,大半径转弯测试中双重转向控制底盘的转弯半径平均值相比阿克曼转向控制分别减少0.60、0.57 m,平均转向时间减少4.70、3.41 s。小半径转弯测试中双重转向控制底盘的转弯半径平均值比阿克曼转向控制分别减少0.52、0.49 m,平均转向时间减少10.27、8.22 s。

关键词: 机器人底盘; 双重转向; 自抗扰控制

中图分类号: S224.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S1-0391-11

Design and Experiment of Dual-steering Control System Based on Active Disturbance Rejection Control

ZHU Licheng^{1,2} ZHAO Zhiyu^{1,2} HAN Zhenhao^{1,2} WANG Ruixue^{1,2} ZHOU Liming^{1,2} ZHAO Bo^{1,2}

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China

2. National Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: To enhance the field turning efficiency of agricultural robot tractors, a dual-steering control system based on active disturbance rejection control was developed for the agricultural robot tractor. The system was designed to meet the agricultural technology requirements and driving environment. The composition and main technical parameters of the agricultural robot tractor were determined, and the hardware system was assembled, and the component selection was made. A 4-degree-of-freedom dynamics model of the agricultural robot tractor was established, and the state space equation of the turning efficiency was determined. A dual-steering control strategy based on active disturbance rejection control was proposed, and a Simulink dynamic simulation model was established, and the turning simulation was carried out. The simulation results indicated that the angular velocity of the active disturbance rejection dual-steering control model was 0.241 rad/s, the turning radius was 1.96 m, and the disturbance recovery time was 1.04 s. Compared with the Ackermann turning control model, the active disturbance rejection dual-steering control model had a larger angular velocity, smaller turning radius, and faster recovery time. The field experimental results showed that the average lateral displacement of the agricultural robot tractor was 18.5 cm, the slip rate was 4.84%, and the small-radius turning test showed that the turning radius of the double turning control agricultural robot tractor was reduced by about 0.60 m and 0.57 m compared with that of the Ackermann turning control, and the average turning time was reduced by 4.70 s and 3.41 s. In the large-radius turning test, the turning radius of the double turning control agricultural robot tractor was reduced by about 0.52 m and 0.49 m compared with that of the Ackermann turning control, and the average turning time was reduced by 10.27 s and 8.22 s.

Key words: robot chassis; dual-steering; active disturbance rejection control

收稿日期: 2023-06-30 修回日期: 2023-08-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000105)

作者简介: 朱立成(1984—),男,高级工程师,主要从事农业机器人关键技术研究,E-mail: zhulicheng@caams.org.cn

通信作者: 赵博(1981—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机械化和农业工程技术研究,E-mail: zhaobo@caams.org.cn

0 引言

农业机器人以农作业车辆、无人机、移动平台等作底盘载体,基于信息技术、智能控制和机器人学,通过搭载多种传感设备以及执行机构代替人力作业,能够有效提升农业生产效率与作业质量。农业机器人作业过程中,主要通过直行和转向两种基础动作实现底盘田间移动。因此开展转向运动控制方法的研究,对于在有限空间内减小转弯半径,减少转向花费的非工作时间,提高农业机器人作业效率具有重要意义。

国内外学者针对农业机器人底盘行走转向控制开展了大量研究。OPIYO 等^[1]研制的果园自主导航机器人通过左右电机速度差实现机体转向,基于改进模糊控制器算法进行转向角度控制;MAHMUD 等^[2]提出了一种用于农业机器人导航的运动控制系统,利用增量式编码器推算航位信息,基于比例反馈运动学控制器和 PI 控制器搭建运动控制系统;BAWDEN 等^[3]以 AgBot II 为原型,通过两个 PID 控制器跟踪每个车轮速度,速度反馈由惯性测量单元以频率 50 Hz 提供,并控制电机脉宽调制;刘英旋等^[4]提出了一种轮式田间信息采集机器人,通过变速器将动力电机扭矩传送到四轮上实现驱动;GU 等^[5]面向玉米行间行走作业场景,通过惯性测量单元反馈位置姿态变化,提出了一种轮毂电机驱动的信息采集机器人;康凯^[6]搭建了一台棉花、花生等矮植株作物信息获取平台,STM32 单片机为核心控制模块,运动控制算法使用在线自整定 PID 算法,实现表型平台的轮速和差速转弯控制。通过现有研究可知,大多数农业机器人的转向运动控制多依靠转向机构或速度差值控制等单一方式实现,面对地头转向空间有限、转向轨迹超出地形限制的田间作业场景,单一的转向运动控制转向效率较低,仍存在较大的优化空间。

针对上述问题,本文基于植物表型机器人四轮驱动底盘,融合差速和阿克曼转向的特点,采用双重转向运动控制方法,实现机器人底盘横摆力矩控制,进而提升植物表型机器人田间转向效率,为机器人田间行走转向控制的相关研究提供参考。

1 植物表型机器人底盘方案设计

1.1 作业场景与转向策略

面向苹果园植物表型信息获取作业场景,围绕种植株距、行距等信息对乔砧、矮化砧、普通型穗、短枝型穗不同砧穗组合类型的密植苹果园展开调研。

结果发现:乔砧普通型树型的枝条繁茂,一般行距为 4~6 m,株距为 2.5~4 m^[7];乔砧短枝型、矮化砧与矮化中间砧短枝型树型的冠形较小,行距为 3~5 m,株距为 3 m^[8];矮化中间砧普通型树型适宜行距 3~4 m,株距为 3 m^[9];矮化砧普通型树势较弱,适宜行距 4 m 和株距 2 m^[10]。苹果园中果树无枝主干高约 0.5 m,冠幅 1~2 m,种植区末端地头宽 5~6 m^[11]。通过以上种植农艺特性可知,苹果园可通行路径相对较窄,需要行走底盘具有较高的机动性、灵活性,因此需要对其转向控制方法开展针对性的研究。参考传统农机阿克曼转向和差速转向,考虑到果园实际行驶路况,本研究选择双重转向控制。通过操控轮胎行进方向偏转的同时,额外增加两侧轮胎转动动力矩差值,实现两种转向方式的融合。该控制策略可直接进行底盘车体横摆力矩控制,一方面可有效减小机具转弯半径,提高农业机器人越野机动性,另一方面能够有效避免差速转向所带来的功率消耗大、轮胎使用寿命短和高速可驾驶性差的缺点^[12-15]。双重转向控制更适合本文的行驶作业场景。

1.2 底盘组成与技术参数

根据乔砧普通型苹果园种植规划和双重转向控制需求,确定植物表型机器人底盘组成和技术参数。本文底盘采用四轮独立转向电驱方案,该驱动类型为每个车轮单独提供驱动电机,转向过程中通过控制两侧电机转矩即可产生横摆力矩,相较于传统机械驱动方案,该方案控制自由度多,且电机转矩响应快、控制精度高。底盘布局如图 1 所示。

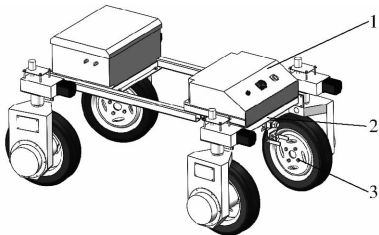


图 1 植物表型机器人底盘组成

Fig. 1 Composition of plant phenotype robot chassis
1. 行走控制系统 2. 摇臂部件 3. 轮臂部件

机器人底盘主要包含车架、轮臂部件和摇臂部件。车架采用边梁式车架,通过两根纵梁和多根横梁焊接组成,进行底盘部件搭载。轮臂部件上端与车架铰接,通过转向电机实现四轮独立转向,下端安装驱动轮,通过驱动电机实现四轮独立行走。摇臂机构位于车架前部,中间与车架横梁中点铰接,两端与前轮轮臂部件相连,摇臂可进行横摆补偿地形起伏缓解单个轮胎悬空。机器人底盘技术参数如表 1 所示。

表 1 机器人底盘主要技术参数

参数	数值
外型尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 700×1 200×960
承载质量/kg	50
行驶速度/(m·s ⁻¹)	≤2
驱动轮最大转向角度/(°)	33(内轮)/39(外轮)
最大翻倾角度/(°)	35.8
作业时间/h	6

1.3 硬件系统与部件选型

机器人底盘行走控制系统主要由电源模块、运动控制模块、执行模块、传感器模块和遥控模块组成。底盘整机通过电池供电,根据遥控模块接收的行走指令,运动控制模块通过执行模块控制四轮行进方向和行进速度,从而实现底盘遥控行走。基于传感器模块反馈的车轮转角、横摆速度以及车轮转速,运动控制模块修正控制差值,进而实现底盘行走闭环控制。机器人底盘行走控制系统如图 2 所示。

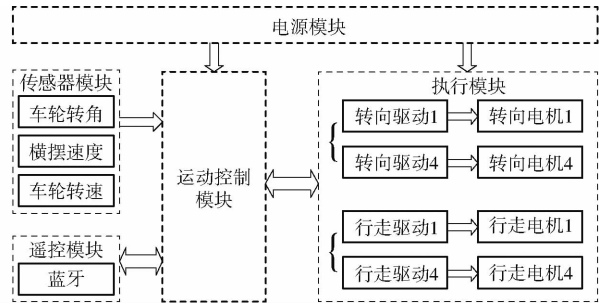


图 2 机器人底盘行走控制系统

Fig.2 Robot chassis walking control system

根据机器人底盘行走转向控制需求,运动控制模块主控制器采用 STM32F429IG 开发板,CPU 主频 180 MHz,进行底盘双重转向运动控制;行走电机选用 DYT180-69 型直流无刷电机,额定功率 1 kW,额定转速 3 000 r/min,额定电流 25 A,轮毂减速器减速比 50:1,车轮可输出扭矩 150 N·m;转向电机选用 DYT90ZW 型直流无刷电机,额定功率 0.2 kW,额定转速 1 000 r/min,额定电流 5 A,蜗轮蜗杆减速器减速比 45:1,轮臂可输出扭矩 85 N·m;根据电机输出功率和机器人作业时间需求,电池选用 48 V 110 A·h 磷酸铁锂电池。

2 底盘动力学建模

2.1 底盘动力学模型

为模拟底盘动力学特性,验证机器人底盘双重转向控制策略作用效果,首先需要构建底盘动力学模型。为了提高分析效率、降低计算量,对底盘动力学模型进行简化,具体方法为:①将底盘类比为四轮

车辆,底盘重心固定在轴心且结构对称。②忽略轮胎非线性因素和滑移、滑行现象,认为路面质量和轮胎摩擦因数保持稳定。③底盘行驶路面平坦,忽略底盘俯仰角、横滚角和垂直高度变化。④认为两个前轮的转角为阿克曼转向形成转角的平均值。考虑到双重转向运动控制作用于底盘转向时,横摆力矩的校正作用会导致两侧车轮分配力矩存在差异,同轴车轮转速、横摆角速度和驱动力等不对称分布,因此建立底盘动力学模型时,采用 4 自由度模型综合考虑横向和纵向运动,模型示意图如图 3 所示。

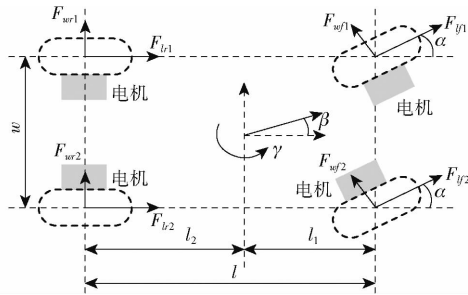


图 3 底盘动力学模型示意图

Fig.3 Schematic of chassis dynamics model

考虑到底盘行驶速度相对较慢,故可以忽略空气阻力和侧面风速影响。底盘纵向和横向动力方程为

$$m(\dot{v}_x + v_y\gamma) = (F_{l1} + F_{l2})\cos\alpha - (F_{wl1} + F_{wl2})\sin\alpha + F_{lr1} + F_{lr2} \tag{1}$$

$$m(\dot{v}_y + v_x\gamma) = (F_{l1} + F_{l2})\sin\alpha + (F_{wl1} + F_{wl2})\cos\alpha + F_{wr1} + F_{wr2} \tag{2}$$

- 式中
- $\dot{v}_x$ ——纵向加速度, m/s²
 - $\dot{v}_y$ ——横向加速度, m/s²
 - v_x ——纵向速度, m/s
 - v_y ——横向速度, m/s
 - F_{lf} ——前轮纵向力, N
 - F_{lr} ——后轮纵向力, N
 - F_{wf} ——前轮横向力, N
 - F_{wr} ——后轮横向力, N
 - α ——前轮转角, rad
 - γ ——横摆角速度, rad/s
 - m ——底盘质量, kg

根据式(1)、(2)可得横摆运动方程为

$$I_z\dot{\gamma} = [(F_{l1} + F_{l2})\sin\alpha + (F_{wl1} + F_{wl2})\cos\alpha]l_1 + T_w - (F_{wr1} + F_{wr2})l_2 \tag{3}$$

其中 $T_w = [(F_{l2} - F_{l1})\cos\alpha + F_{lr2} - F_{lr1}]\frac{w}{2}$ (4)

- 式中
- T_w ——底盘横摆力矩, N·m
 - I_z ——质心转动惯量, kg·m²

$\dot{\gamma}$ ——横摆角加速度,rad/s²
 w ——底盘横向轮距,m
 l_1 ——前轮接地位置与底盘质心间纵向距离,m
 l_2 ——后轮接地位置与底盘质心间纵向距离,m

由式(3)、(4)可知,横摆力矩 T_w 直接横向作用于底盘,在进行双重转向控制时,将参与两侧驱动电机的力矩分配,从而改变轮胎牵引力。

轮胎垂直方向上的受力情况与底盘横向、纵向加速度有关。假设底盘行驶在平坦无坡度路面且未发生侧倾,忽略俯仰角造成的重力分量和垂直加速度影响,同时底盘未发生紧急规避,忽略横向载荷转移对底盘受力的影响,因此可得轮胎前轮垂向力 F_{vf} 、后轮垂向力 F_{vr} 计算公式为

$$F_{vf1} = \frac{m}{2l} \left(gl_2 - \dot{v}_x h - \dot{v}_y \frac{2hl_2}{w} \right) \tag{5}$$

$$F_{vf2} = \frac{m}{2l} \left(gl_2 - \dot{v}_x h + \dot{v}_y \frac{2hl_2}{w} \right) \tag{6}$$

$$F_{vr1} = \frac{m}{2l} \left(gl_1 + \dot{v}_x h - \dot{v}_y \frac{2hl_1}{w} \right) \tag{7}$$

$$F_{vr2} = \frac{m}{2l} \left(gl_1 + \dot{v}_x h + \dot{v}_y \frac{2hl_1}{w} \right) \tag{8}$$

式中 g ——重力加速度,m/s²
 h ——质心高度,m
 l ——底盘纵向轮距,m

2.2 状态空间方程

衡量转向运动稳定性的主要状态变量为底盘质心侧偏角 β 和横摆角速度 γ 。为明确运动控制系统状态空间方程,以底盘模型为基础,根据轮胎作用在车体质心的力和力矩,建立包括偏航和横向速度的2自由度简化模型。为提高分析效率、降低计算量,忽略转向系统非线性、比率和柔度的影响。将转向角作为可变输入量,在非转向时取0。

轮胎横向力可通过侧偏刚度和侧滑角之积表示,前轮横向力 F_{wf} 和后轮横向力 F_{wr} 计算公式为

$$F_{wf} = C_{af} \theta_f \tag{9}$$

$$F_{wr} = C_{ar} \theta_r \tag{10}$$

式中 C_{af} ——前轮侧偏刚度,N/rad
 C_{ar} ——后轮侧偏刚度,N/rad
 θ_f ——前轮侧滑角,rad
 θ_r ——后轮侧滑角,rad

轮胎侧滑角 θ 为轮胎中心线与其瞬时速度之间的差值,前轮侧滑角 θ_f 和后轮侧滑角 θ_r 计算公式为

$$\theta_f = -\alpha + \beta + \frac{l_1 \gamma}{v_x} \tag{11}$$

$$\theta_r = \beta - \frac{l_2 \gamma}{v_x} \tag{12}$$

结合式(1)~(4)和式(9)~(12),可以得到2自由度运动微分状态空间方程为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}T_w + \mathbf{H}\alpha \tag{13}$$

进一步细化式(13)中的矩阵 $\mathbf{x}$ 、 $\dot{\mathbf{x}}$ 、 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{H}$,可进一步表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-2(C_{af} + C_{ar})}{mv_x} & \frac{2(-l_1 C_{af} + l_2 C_{ar})}{mv_x^2} \\ \frac{-2(l_1 C_{af} + l_2 C_{ar})}{I_z} & \frac{-2(l_1^2 C_{af} + l_2^2 C_{ar})}{I_z v_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{I_z} \end{bmatrix} T_w + \begin{bmatrix} \frac{2C_{af}}{mv_x} \\ \frac{2l_1 C_{af}}{I_z} \end{bmatrix} \alpha \tag{14}$$

将矩阵 $\mathbf{x}$ 作为输入量,矩阵 $\dot{\mathbf{x}}$ 作为输出量,此时运动控制系统的输入为质心侧偏角 β 和横摆角速度 γ ,输出为质心侧偏角速度 $\dot{\beta}$ 和横摆角加速度 $\dot{\gamma}$ 。

考虑到底盘缓慢转向时,质心侧偏角 β 较小,因此 β 可取0。代入式(14)可知,横摆角加速度 $\dot{\gamma}$ 将是唯一的状态空间输出量,即横摆角加速度 $\dot{\gamma}$ 可以成为衡量底盘转向状态的标准,利用该值建立双重转向运动控制系统,可实现底盘转向鲁棒性控制。

以横摆角加速度 $\dot{\gamma}$ 为控制指标,设矩阵 $\mathbf{A}$ 子模块分别为 a_{11} 、 a_{12} 、 a_{21} 、 a_{22} ,矩阵 $\mathbf{B}$ 子模块分别为 b_1 、 b_2 ,矩阵 $\mathbf{H}$ 子模块分别为 h_1 、 h_2 ,可得期望底盘横摆角速度 γ_{ref} 的计算公式为

$$\gamma_{ref} = (1 + K) \frac{2(a_{21}h_1 - a_{11}h_2)}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} \tag{15}$$

式中 K ——横摆滑移率, %

3 基于自抗扰算法的双重转向控制策略

3.1 双重转向控制流程

双重转向控制系统的输入为横摆角速度,输出为电机扭矩。通过分开进行横摆角速度控制和力矩控制,建立含有前、后2个环节的闭环控制系统。控制系统流程图如图4所示。

在前一环节中,将期望横摆角速度作为控制系统输入,计算公式中包含前轮转角、速度等多个传感器变量,故先根据传感器变量得到计算结果,然后输入横摆角速度控制器。与反馈实际值作差得到偏差,根据偏移量和状态空间方程建立状态观测器。在后一环节中,横摆力矩作为状态变量与底盘纵向驱动力共同输入力矩分配算法中,分别计算4个驱动力矩,通过CAN总线下发到对应驱动器,行走电

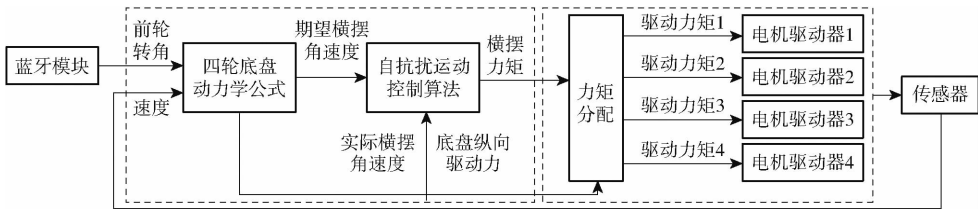


图 4 双重转向运动控制流程图

Fig. 4 Flow chart of dual-steering control

机转动后,霍尔传感器、角度传感器、惯性传感器将更新的速度、转角和横摆角速度传输给主控实现闭环。

考虑到实际行驶出现的非线性因素可能为底盘运动状态引入随机外界扰动,因此需要设计控制算法进行实时补偿。由图 4 可知,横摆角速度的控制过程是轮胎转角按指令值响应后,结合传感器姿态信息计算期望横摆角速度,将期望值输入运动控制系统和实际反馈值作差,对偏差进行矫正以实现闭环控制。为连通双重转向控制的前后环节,需要设计基于误差信号的控制算法,在前一环节抑制扰动矫正噪声,满足底盘横摆角速度的鲁棒性和跟随效果,同时为后一环节提供响应及时、物理意义明确的状态输出量。

3.2 自抗扰运动控制算法

基于状态观测器,采用自抗扰控制^[16] (Active disturbance rejection control,ADRC)进行底盘横摆角速度偏差校正。基本工作原理为:以消除系统扰动量为目标,根据期望值输入与实际反馈值之间的偏差,将系统中间变量作为状态参数,把系统内部动态变化和系统外部随机噪声合并视为总扰动,然后使用自适应控制算法估算系统状态参数,同时进行系统扩张状态建模,从而在输出信号里对总扰动估计值进行补偿。ADRC 算法的理论基础和关键组件有 3 个:非线性误差控制律 (Nonlinear state error feedback,NLSEF)、扩张状态观测器 (Extended state observer,ESO) 和跟踪微分器 (Tracking differentiator,TD)^[17-20]。图 5 为 2 阶 ADRC 控制模型。

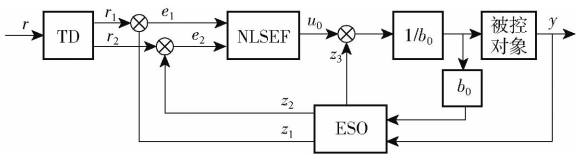


图 5 2 阶 ADRC 模型结构图

Fig. 5 Structure diagram of second-order ADRC model

将 ADRC 应用于底盘动力学模型需要考虑扰动信号,根据式 (14)、(15) 可得有干扰项的底盘状态空间方程为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}T_w + \mathbf{H}\alpha + \mathbf{N}(t) \quad (16)$$

进一步细化式 (16) 中的矩阵 $\mathbf{x}$ 、 $\dot{\mathbf{x}}$ 、 $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{H}$,可进一步表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-2(C_{af} + C_{ar})}{mv_x} & \frac{2(-l_1 C_{af} + l_2 C_{ar})}{mv_x^2} \\ \frac{-2(l_1 C_{af} + l_2 C_{ar})}{I_z} & \frac{-2(l_1^2 C_{af} + l_2^2 C_{ar})}{I_z v_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{I_z} \end{bmatrix} T_w + \begin{bmatrix} \frac{2C_{af}}{mv_x} \\ \frac{2l_1 C_{af}}{I_z} \end{bmatrix} \alpha + \begin{bmatrix} N_1(t) \\ N_2(t) \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中 $N_1(t)$ 、 $N_2(t)$ 是包含外部噪声和内部扰动的多变量函数,结合状态空间方程简化为闭环反馈传递函数。设 r_1 和 r_2 为经过 TD 处理后的横摆角速度及微分,随后对 2 阶对象建立状态变量方程,系统状态变量与输入输出信号之间的关系表示为

$$\begin{cases} r_1 = \gamma \\ r_2 = \dot{\gamma} = a_{21}\beta + a_{22}\gamma + b_2 T_w + 2h_2 \alpha + N_2(t) \end{cases} \quad (18)$$

对式 (18) 求微分,将 $\dot{\beta}$ 从等式中替换可得

$$\begin{cases} \dot{r}_1 = r_2 \\ \dot{r}_2 = (a_{12}a_{21} - a_{11}a_{22})r_1 + (a_{11} + a_{22})r_2 - a_{11}b_2 T_w + b_2 \dot{T}_w + 2(a_{21}h_1 - a_{11}h_2)\alpha + 2h_2 \dot{\alpha} + a_{21}N_1(t) - a_{11}N_2(t) + \dot{N}_2(t) \end{cases} \quad (19)$$

结合式 (17) 对式 (18) 的状态变量方程增加扰动项作为最后 1 阶扩展该方程组,即得到新状态变量方程。此时基于加入扰动项的式 (19) 建立 ESO, 其对应方程组可表示为

$$\begin{cases} e = z_1 - \gamma \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 \text{fal}(e, a, \delta) + (a_{12}a_{21} - a_{11}a_{22})r_1 + (a_{11} + a_{22})r_2 - a_{11}b_2 T_w + b_2 \dot{T}_w + 2(a_{21}h_1 - a_{11}h_2)\alpha + 2h_2 \dot{\alpha} \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 \text{fal}(e, a, \delta) \end{cases} \quad (20)$$

式中 z_1 ——横摆角速度观测值,rad/s

z_2 ——横摆角加速度观测值,rad/s²
 z_3 ——扰动观测值
 β_1 、 β_2 、 β_3 ——反馈增益
 $\text{fal}()$ ——非线性函数
 δ ——线性段区间长度

将 TD 输出 r_1 、 r_2 与对应观测量相减得到误差 e_1 、 e_2 和最速控制综合函数共同计算状态输出 u_0 。当 ESO 跟踪准确时, z_1 、 z_2 、 z_3 对 r_1 、 r_2 的扰动误差量应当趋于 0, 此时系统被简化为双积分器串联系统, 状态输出 u_0 等于经 ADRC 控制后输出的横摆力矩 T_w , 公式为

$$\begin{cases} e_1 = r_1 - z_1 \\ e_2 = r_2 - z_2 \\ u_0 = \beta_{01} \text{fal}(e_1, a_1, \delta_1) + \beta_{02} \text{fal}(e_2, a_2, \delta_2) \end{cases} \quad (21)$$

其中 $u_0 = z_3 - (a_{12}a_{21} - a_{11}a_{22})r_1 + (a_{11} + a_{22})r_2 - a_{11}b_2T_w + b_2\dot{T}_w + 2(a_{21}h_1 - a_{11}h_2)\alpha + 2h_2\dot{\alpha}$ (22)
式中 β_{01} 、 β_{02} ——跟踪信号增益

根据式(22)可得用于双重转向运动控制后续流程所需力矩,至此完成横摆角速度 ADRC 控制器的输出公式推导和设计。

3.3 力矩分配

采用力矩分配方法将绝对值相同、符号相反的横摆力矩平均值与每个轮胎所需的驱动力矩相加, 从而在电机间产生力矩差。因内侧电机的符号为负, 外侧电机符号为正, 可知同侧前后轮力矩相同、外侧比内侧力矩大。根据简化动力学模型可得力矩分配公式为

$$\begin{cases} T_{f1} = T_{r1} = \frac{M}{4} - \frac{T_w}{2} \\ T_{f2} = T_{r2} = \frac{M}{4} + \frac{T_w}{2} \end{cases} \quad (23)$$

式中 T_f ——前轮输出力矩, N·m
 T_r ——后轮输出力矩, N·m
 M ——驱动力矩, N·m

4 机器人底盘双重转向仿真

为模拟机器人底盘行驶特性和动力学特性, 利用 Matlab Simulink 创建底盘动力学模型并配置模型参数, 并插入控制算法子系统模块。

4.1 仿真模块设计

底盘模型参数根据表 1 设定。如果双重转向控制策略有效, 随着底盘前轮的转角逐渐增大, 仿真模型前轮会在响应转角动作的同时附带转矩差异。底盘模型搭建完成后, ADRC 闭环控制器作为 Simulink 中的功能块接入, 反馈实际角速度和驱动力矩等参数。通过将子模块按顺序连接底盘模型各

信号和端口, 底盘模型即成为被控对象。底盘动力学仿真模型如图 6 所示。

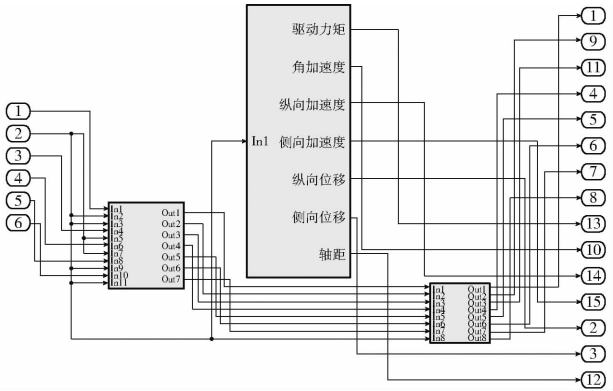


图 6 底盘动力学仿真模型

Fig. 6 Chassis dynamics simulation module

基于 Simulink 设计 ADRC 控制器仿真模型。TD 模块结构如图 7 所示, 该模块为单入双出结构, 接收角速度信号将其微分平滑处理。根据常见采样步长, 设定速度因子、滤波因子、增益分别为 400、0.1、0.001。

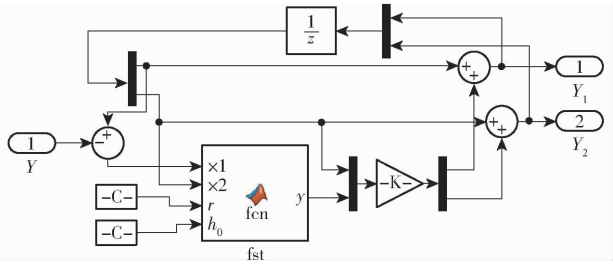


图 7 TD 仿真模块

Fig. 7 TD simulation module

如果 TD 模块输入信号为 0.14 rad/s, 可得仿真结果如图 8 所示, 可见 TD 模块输出信号能够跟随输入信号在 0.40 s 内稳定, 从而实现下一个模块信号的平滑输入。

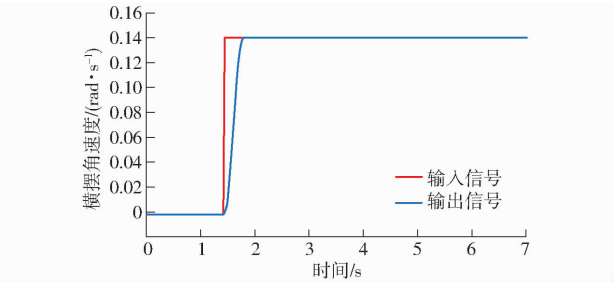


图 8 TD 阶跃响应曲线

Fig. 8 Step signal response curves of TD

根据式(21)、(22)建立 NLSEF 仿真结构, 由 fal 函数所需变量设计 2 组非线性函数, 其中 e_1 和 e_2 为误差, 其余输入为非线性因子。2 组非线性函数求和后, 即可得双积分串联实时跟踪状态输出 u_0 。为了减少状态观测器观测量的延迟和超调, 选取 $\beta_{01} \approx 1/h_0$, $\beta_{02} \approx 1/(3h_0^2)$ 。NLSEF 模块结构如图 9 所示。

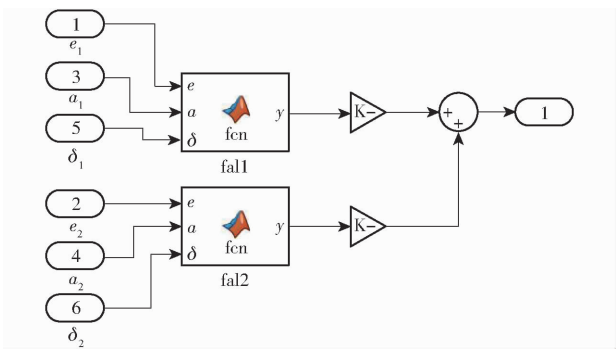


图 9 NLSEF 仿真模块
Fig. 9 NLSEF simulation module

根据式(19)建立 ESO 仿真结构,ESO 模块接收输出反馈和 NLSEF 提供的 2 个输入,得到 3 个状态变量输出,ESO、NLSEF 与 TD 模块首尾相连可得 2 阶 ADRC 控制器如图 10 所示。

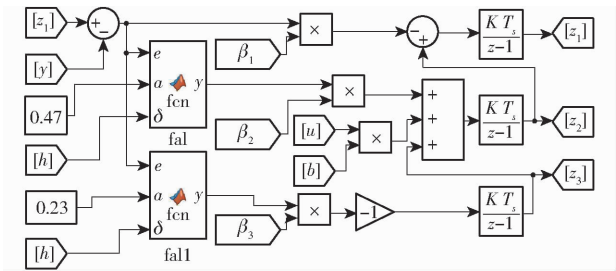


图 10 ESO 仿真模块
Fig. 10 ESO simulation module

根据式(23)建立力矩分配仿真模块,每个行走电机的出力矩对应一个函数模块,该模块接收 3 个输入发送 1 个输出。在运动控制器和力矩分配模块作用下,机器人底盘转向力矩得到补偿,在机器人底盘转向行驶的过程中,既使内外侧电机出力矩间产生差距的同时,又控制底盘行驶不偏离理想轨迹。力矩分配仿真模块结构图如图 11 所示。

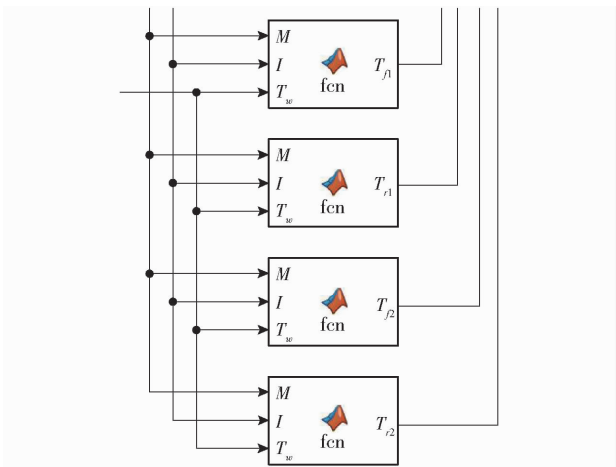


图 11 力矩分配仿真模块
Fig. 11 Torque distribution simulation module

4.2 双重转向闭环系统仿真

为分析 ADRC 双重转向控制效果,将上述仿真

模块连接组成闭环系统,其中底盘动力学仿真模块作为被控对象和执行器,ESO、NLSEF 与 TD 模块互联后作为闭环系统的控制器,力矩分配算法为底盘动力学仿真模块提供力矩,闭环系统仿真图如图 12 所示。

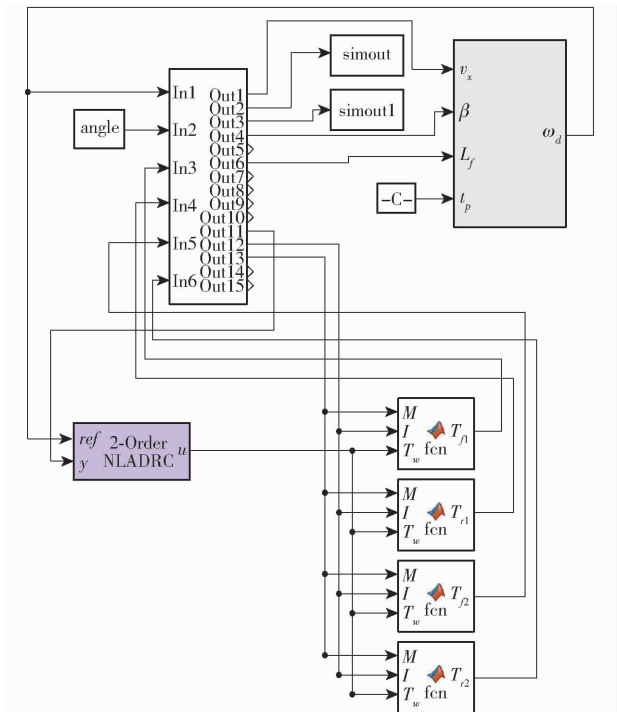


图 12 双重转向闭环系统
Fig. 12 Dual-steering closed-loop system

4.2.1 转向仿真

底盘从静止状态距离转向位置 0.6 m 处起步,到达转向位置后逐渐增加转向角度直至转向行程最大角度 33°,底盘行驶速度为 1.44 km/h。不同控制方法的底盘横摆角速度、转弯半径和轮胎力矩仿真结果如图 13 ~ 15 所示。

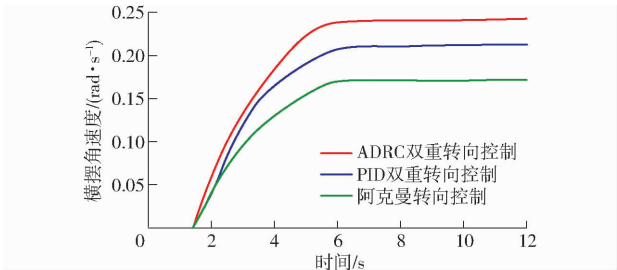


图 13 转向横摆角速度仿真结果
Fig. 13 Simulation results of steering yaw rate

通过图 13、14 可知,ADRC 双重转向控制、PID 双重转向控制和阿克曼转向控制的底盘横摆角速度分别为 0.241、0.210、0.169 rad/s,转弯半径分别为 1.96、2.21、2.31 m。对比横摆角速度和转弯半径可知,ADRC 双重转向控制相较于其他两类转向方式,横摆角速度最大、转弯半径最小,转向效率得到明显提升。通过图 15 可知,3 种控制方法的输出力矩均

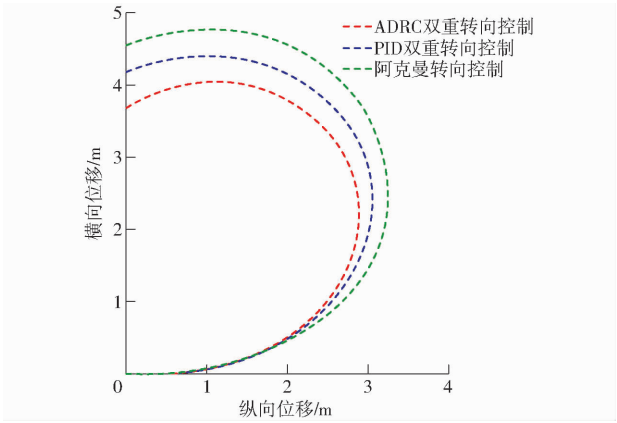


图 14 转向转弯半径仿真结果

Fig. 14 Simulation results of turning radius

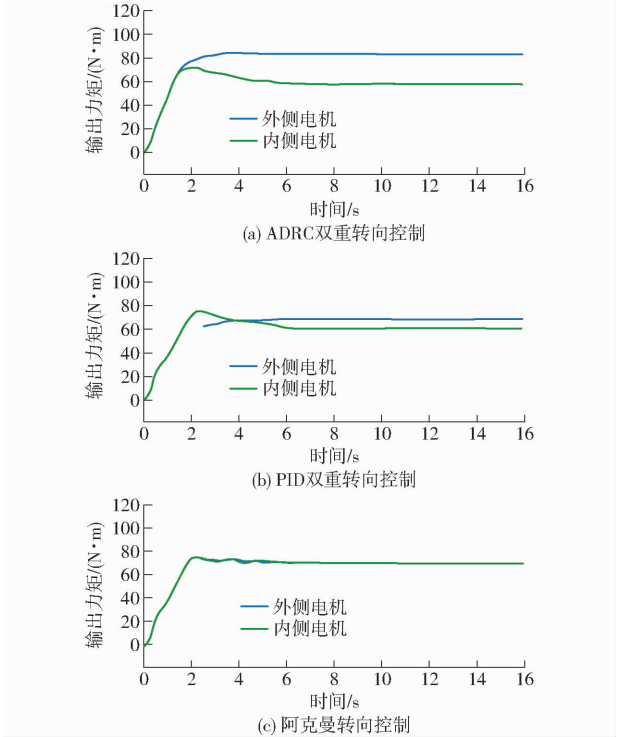


图 15 转向力矩输出仿真结果

Fig. 15 Simulation results of steering torque output

值基本相同,均在 $72.40\text{ N}\cdot\text{m}$ 左右。阿克曼转向控制方法的内外侧电机力矩基本无差别,而 ADRC 双重转向控制和 PID 双重转向控制的内外侧电机力矩存在一定差值,其中 PID 双重转向控制内外侧电机力矩差值为 $20.81\text{ N}\cdot\text{m}$,而 ADRC 双重转向控制的力矩差值为 $25.30\text{ N}\cdot\text{m}$,验证了双重转向力矩的分配效果。

4.2.2 稳定性仿真

为验证 ADRC 双重转向控制对随机扰动信号的校正能力,在相同条件下,与 PID 双重转向控制进行对比。在力矩分配处加入阶跃扰动信号,观察输出力矩的波动振幅和恢复平稳所需时间。在仿真结果的基础上,对 ADRC 双重转向控制、PID 双重转向控制加入阶跃扰动信号进行模拟,仿真结果如图 16

所示。

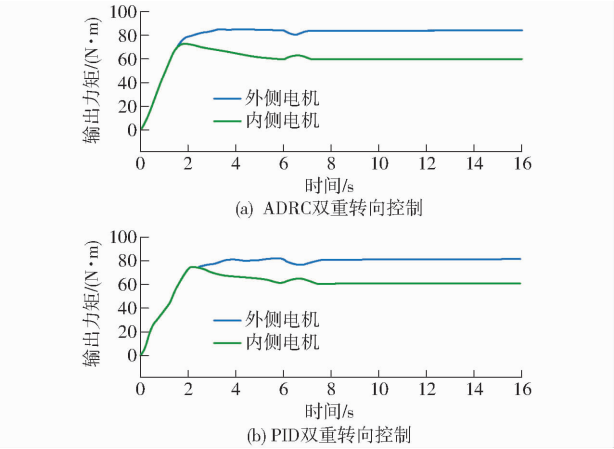


图 16 阶跃扰动转向力矩输出仿真结果

Fig. 16 Simulation results of steering torque output with step disturbance

由图 16 可知,在 ADRC 双重转向控制中,系统正常运行第 6 秒处加入阶跃信号,输出在 7.04 s 处恢复平稳,扰动持续 1.04 s ;在 PID 双重转向控制中,第 6 秒处加入相同阶跃信号,输出在 7.72 s 处恢复平稳,扰动持续 1.72 s 。对比可知 ADRC 双重转向控制的仿真模型在补偿扰动上比 PID 双重转向控制缩短 0.68 s ,恢复稳定状态更快,有助于提高运动控制的稳定性。

5 植物表型机器人底盘试验验证

5.1 运动控制算法程序设计与部署

基于 C 语言开发机器人底盘双重转向控制算法程序,控制算法程序分为输出力矩决策环节和力矩分配执行环节,程序逻辑流程图如图 17 所示。

将双重转向控制算法通过 Keil v5 部署于农业机器人底盘样机,控制参数与仿真模型参数相同。机器人底盘行进过程中,算法程序根据传感器数据进行计算,然后将结果输入力矩分配环节,主控板将分配后的结果发送到电机驱动器,从而实现双重转向控制,程序流程始终保持循环执行状态。

5.2 试验场地和工具

在中国农业机械化科学研究院集团有限公司开展田间试验。试验工具包括卷尺、铅垂线、秒表和标志杆。底盘横摆角速度从控制单元预留的缓存区读取。机器人底盘样机如图 18 所示。

5.3 田间试验与结果分析

5.3.1 直行偏移试验

为了评估机器人底盘双重转向运动控制系统的直线行驶性能,开展直行偏移试验。在测试场地下发指令让底盘直线行走,行驶速度为 1.8 km/h ,统计行进过程中底盘最大横向偏差。具体试验方法

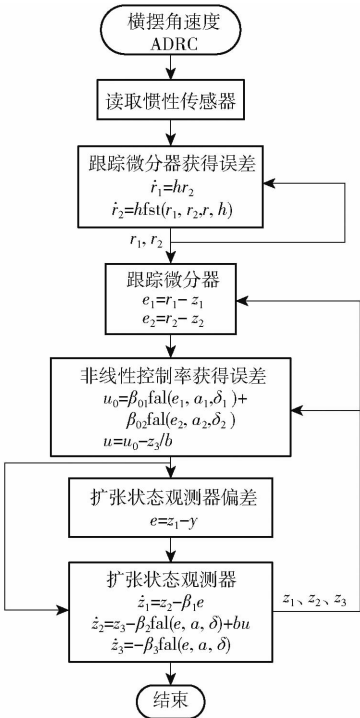


图 17 ADRC 算法程序流程图

Fig. 17 ADRC algorithm program flowchart



图 18 植物表型机器人底盘样机

Fig. 18 Plant phenotype robot chassis prototype

为:取长度 20 m 作为试验区域,用标志杆表示起点和终点,以卷尺作为底盘行进参照,在起点处底盘设定转向角为 0°,左侧轮胎与卷尺保持 20 cm 初始间距向前行驶 20 m,其中每隔 4 m 测量卷尺与轮胎间距,等底盘到达终点时停止,重复试验 5 次,将终点处偏移量平均值作为底盘直行时的稳定性评估结果,试验现场如图 19 所示。直行偏移率 ε_0 计算公式为



(a) 直线行驶试验 (b) 测量偏移距离

图 19 直行偏移试验

Fig. 19 Straight migration test

$$\varepsilon_0 = \frac{d}{s_0} \times 100\%$$

(24)

式中 d ——横向偏移量,cm
 s_0 ——行驶长度,cm

机器人底盘直行偏移试验结果如表 2 所示,其中右偏移为正,左偏移为负。

表 2 直行偏移试验结果

Tab.2 Results of straight offset test						cm
序号	4 m 位置	8 m 位置	12 m 位置	16 m 位置	20 m 位置	偏移 距离
1	23.1	26.9	29.5	32.8	36.6	16.6
2	17.0	13.7	10.3	7.5	5.1	-14.9
3	23.7	27.5	31.4	35.4	39.7	19.7
4	24.1	28.5	32.2	36.7	41.1	21.1
5	16.1	12.3	8.1	4.0	-0.2	-20.2

根据表 2 可知,农业机器人底盘在直线行走时因路面平整度、电机一致性等随机扰动可能会产生横向行走误差,但是 5 次结果中每隔 4 m 的测量点处偏移量变化并不大。在直线距离 20 m 内平均横向偏移距离为 18.5 cm,根据式 (24) 可得直行偏移率 0.925%,该误差对底盘路径跟踪的影响相对较小,不会对直线行驶造成影响。

5.3.2 滑移率试验

为了评估农业机器人底盘双重转向运动控制系统直线行驶过程中轮胎和路面接触面的打滑情况,进行底盘滑移率试验。具体试验方法为:在直行试验区域从前轮离开标志杆处开始,观察轮胎转动圈数,转动 10 圈后停止,测量停止时前轮移动距离,重复 5 次并统计结果。滑移率 ε_1 计算公式为

$$\varepsilon_1 = \left(1 - \frac{d_r}{d_i}\right) \times 100\%$$

(25)

式中 d_r ——实际移动距离,m
 d_i ——理论距离,m

机器人底盘滑移率试验结果如表 3 所示。

表 3 滑移率试验结果

Tab.3 Results of slip rate test			
序号	实际移动距离/m	理论移动距离/m	滑移率%
1	16.84	17.59	4.30
2	16.78	17.59	4.60
3	16.67	17.59	5.23
4	16.58	17.59	5.74
5	16.82	17.59	4.38
平均值	16.74	17.59	4.84

由表 3 可知,农业机器人底盘直线行驶滑移率为 4.84%,轮胎路面打滑情况对底盘行走效率的影响相对较小,能够满足作业需求。

5.3.3 转向试验

为了评估农业机器人底盘双重转向运动控制系统的转向性能,开展田间转向试验。具体试验方法为:标志杆分别放置于出发点和转向点,机器人底盘从出发点开始沿转向点方向直行。当底盘后轮到达转向点,控制底盘左转并开始计时。以底盘后轮所在轴的中点为旋转中心,测量转向点到旋转中心的平均距离,即为转弯半径。对比双重转向控制和阿克曼转向控制的横摆角速度、转向时间和转弯半径。试验现场如图 20 所示。



图 20 转向试验
Fig. 20 Steering test

为了对比两种转向控制方法在不同转弯半径下的转向性能,根据前轮转弯角度调节最大范围、果园行驶不同转弯半径以及机具稳定行驶速度需求,分别选取前轮转角 14°和 33°开展试验,重复 3 次并统计结果,试验结果如表 4、5 所示。

表 4 大半径试验结果对比

Tab. 4 Comparison of large radius test results					
行驶速度/ (km·h ⁻¹)	序号	类型	横摆角速度/ (rad·s ⁻¹)	转向时 间/s	转弯半 径/m
2. 52	1	双重转向	0. 12	27. 32	5. 88
		阿克曼转向	0. 10	31. 68	6. 38
	2	双重转向	0. 13	26. 45	5. 71
		阿克曼转向	0. 10	32. 21	6. 50
	3	双重转向	0. 13	27. 02	5. 82
		阿克曼转向	0. 11	31. 01	6. 34
3. 13	1	双重转向	0. 17	22. 15	5. 75
		阿克曼转向	0. 13	26. 18	6. 44
	2	双重转向	0. 16	22. 54	5. 86
		阿克曼转向	0. 13	25. 84	6. 35
	3	双重转向	0. 16	22. 69	5. 89
		阿克曼转向	0. 13	25. 96	6. 41

通过表 4 可知,在前轮转角 14°和行驶速度 2. 52、3. 13 km/h 下,双重转向控制底盘的转弯半径平均值相比传统阿克曼转向控制分别缩小 0. 60、0. 57 m,平均转向时间减少 4. 70、3. 41 s。通过表 5 可知,在前轮转角 33°和行驶速度 1. 00、1. 44 km/h 下,双重转向控制底盘的转弯半径平均值相比传统阿克曼转向控制分别减少 0. 52、0. 49 m,平均转向时间减少 10. 27、8. 22 s。通过试验结果可知,机器

表 5 小半径试验结果对比

Tab. 5 Comparison of small radius test results					
行驶速度/ (km·h ⁻¹)	序号	类型	横摆角速度/ (rad·s ⁻¹)	转向时 间/s	转弯半 径/m
1. 00	1	双重转向	0. 17	21. 92	2. 14
		阿克曼转向	0. 10	32. 54	2. 72
	2	双重转向	0. 16	22. 41	2. 20
		阿克曼转向	0. 10	32. 10	2. 66
	3	双重转向	0. 17	21. 97	2. 18
		阿克曼转向	0. 10	32. 46	2. 70
1. 44	1	双重转向	0. 22	16. 10	2. 17
		阿克曼转向	0. 14	24. 97	2. 74
	2	双重转向	0. 23	15. 92	2. 13
		阿克曼转向	0. 15	24. 18	2. 65
	3	双重转向	0. 22	16. 25	2. 23
		阿克曼转向	0. 15	23. 79	2. 61

人底盘在应用双重转向控制后,相比传统阿克曼转向控制方法,转弯路程相对更短,转弯时间相对更少。本文提出的基于自抗扰运动控制算法的双重转向控制系统能够有效提升机器人底盘转向效率。

6 结论

(1)面向乔砧普通型苹果园种植规划和田间转向实际需求,确定了植物表型机器人底盘组成和技术参数,阐述了其结构和基本工作原理。搭建了底盘行走控制系统硬件部分,并分别进行了电源模块、运动控制模块、执行模块、传感器模块和遥控模块的选型。

(2)综合考虑底盘横向和纵向运动,构建了底盘 4 自由度动力学模型。建立了底盘状态空间方程,明确了质心侧偏角和横摆角速度是衡量转向运动稳定性的主要状态变量。提出了一种基于自抗扰算法的双重转向控制策略,通过控制底盘阿克曼转向的同时进行内外侧电机力矩分配。

(3)搭建了 Simulink 动力学仿真模型并进行了转向仿真模拟,结果表明,自抗扰双重转向运动控制模型的横摆角速度为 0. 241 rad/s,转弯半径为 1. 96 m,扰动恢复时间为 1. 04 s,相较于阿克曼转向控制和 PID 双重转向控制,该模型横摆角速度最大、转弯半径最小、恢复稳定状态更快,验证了本文控制算法的有效性。

(4)试验结果表明,底盘平均横向偏移距离为 18. 5 cm,滑移率为 4. 84%,在前轮转角 14°和行驶速度 2. 52、3. 13 km/h 下,双重转向控制底盘的转弯半径平均值相比传统阿克曼转向控制分别缩小 0. 60、0. 57 m,平均转向时间减少 4. 70、3. 41 s。在前轮转角 33°和行驶速度 1. 00、1. 44 km/h 下,双重

转向控制底盘的转弯半径平均值相比传统阿克曼转向控制分别减少 0.52、0.49 m,平均转向时间减少 10.27、8.22 s。相比传统转向方式,双重转向控制底盘的转向效率得到了有效提升。

参 考 文 献

[1] OPIYO S, OKINDA C, ZHOU J, et al. Medial axis-based machine-vision system for orchard robot navigation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 185: 106153.

[2] MAHMUD M, ABIDIN M, MOHAMED Z, et al. Multi-objective path planner for an agricultural mobile robot in a virtual greenhouse environment[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 157: 488–499.

[3] BAWDEN O, BALL D, KULK J, et al. A lightweight, modular robotic vehicle for the sustainable intensification of agriculture[C]// Proceedings of the 16th Australasian Conference on Robotics and Automation, 2014: 1–9.

[4] 刘英旋, 万腾. 轮式田间信息采集机器人开发与控制系统设计[J]. 农机化研究, 2022,44(1): 124–129.

LIU Yingxuan, WAN Teng. Development and control system design of wheeled field information acquisition robot[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022,44(1): 124–129. (in Chinese)

[5] GU Y, LI Z, ZHANG Z, et al. Path tracking control of field information-collecting robot based on improved convolutional neural network algorithm[J]. Sensors, 2020, 20(3): 797.

[6] 康凯. 自走式田间作物表型信息获取平台设计[D]. 保定: 河北农业大学, 2020.

KANG Kai. Design of self-propelled field phenotyping platform [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[7] 曹洪建, 丁荔, 夏营, 等. 一种现代矮砧高密度苹果园的嫁接改造新方法[J]. 中国果业信息, 2022, 39(1): 63.

CAO Hongjian, DING Li, XIA Ying, et al. A new method for grafting transformation of modern low stock high density apple orchards[J]. China Fruit News, 2022, 39(1): 63. (in Chinese)

[8] 沈启扬, 雷晓晖, 马拯胞, 等. F.US–UFO 型果园避障割草机试验研究[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(10): 65–71,77.

SHEN Qiyang, LEI Xiaohui, MA Zhengbao, et al. Experimental study on F.US–UFO mower for avoiding obstacles in orchards [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(10): 65–71,77. (in Chinese)

[9] 王来平, 聂佩显, 陈汝, 等. 不同苹果矮化中间砧组合适宜栽植密度试验[J]. 安徽农业科学, 2014, 62(26): 8940–8943, 9018.

WANG Laiping, NIE Peixian, CHEN Ru, et al. Experiment of suitable planting density of different apple dwarfing inter-rootstocks combinations[J]. Journal of Anhui Agri., 2014, 62(26): 8940–8943, 9018. (in Chinese)

[10] 朱新华, 李旭东, 高翔, 等. 自走式果园有机肥条铺机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 136–146.

ZHU Xinhua, LI Xudong, GAO Xiang, et al. Design and test of self-propelled orchard organic fertilizer strip-spreader[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 136–146. (in Chinese)

[11] 徐展兰. 低纬度高原山区苹果栽培技术要点[J]. 南方农业, 2021, 15(15): 7–8.

XU Zhanlan. Key points of apple cultivation techniques in low latitude plateau mountainous areas [J]. South China Agriculture, 2021, 15(15): 7–8. (in Chinese)

[12] 陈路明, 廖自力, 张征. 多轮分布式电驱车辆双重转向分层控制系统设计[J]. 汽车工程, 2021, 43(9): 1383–1393.

CHEN Luming, LIAO Zili, ZHANG Zheng. Design of hierarchical control system for dual-steering of multi-wheel distributed electric drive vehicles[J]. Automotive Engineering, 2021, 43(9): 1383–1393. (in Chinese)

[13] 廖自力, 疏歆, 蔡立春. 四轮独立电驱动车辆双重转向控制研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(6): 69–74.

LIAO Zili, SHU Xin, CAI Lichun. Research on dual-steering control for military vehicles with four wheel independent electric drive[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(6): 69–74. (in Chinese)

[14] 阳贵兵, 马晓军, 廖自力, 等. 轮毂电机驱动车辆双重转向直接横摆力矩控制[J]. 兵工学报, 2016, 37(2): 211–218.

YANG Guibing, MA Xiaojun, LIAO Zili, et al. Direct yaw moment control in dual-steering for in-wheel motor drive vehicle [J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(2): 211–218. (in Chinese)

[15] 苏建强, 马晓军, 项宇, 等. 电驱动装甲车辆双重转向控制联合仿真[J]. 火力与指挥控制, 2014(11): 128–132.

SU Jianqiang, MA Xiaojun, XIANG Yu, et al. Co-simulation research of dual-steering control for multi-in-wheel motors drive armored vehicle[J]. Fire Control & Command Control, 2014(11): 128–132. (in Chinese)

[16] 韩京清. 非线性状态误差反馈控制律 NLSEF[J]. 控制与决策, 1995, 10(3): 221–225.

HAN Jingqing. Nonlinear state error feedback control law—NLSEF[J]. Control and Decision, 1995, 10(3): 221–225. (in Chinese)

[17] 沈跃, 张亚飞, 刘慧, 等. 农业装备自动控制技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 1–18.

SHEN Yue, ZHANG Yafei, LIU Hui, et al. Research review of agricultural equipment automatic control technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 1–18. (in Chinese)

[18] WANG J, WANG X, LUO Z, et al. Active disturbance rejection control of differential drive assist steering for electric vehicles [J]. Energies, 2020, 13(10): 2647.

[19] 朱家兴, 符玉珊. 自抗扰控制器设计[J]. 科技风, 2019(34): 29.

[20] JIN H, SONG J, LAN W, et al. On the characteristics of ADRC: a PID interpretation [J]. Science China Information Sciences, 2020, 63: 1–3.