

无人驾驶拖拉机路径跟踪控制方法综述

陈 建, 王艺霏

(中国农业大学 工学院, 北京 100083)

摘 要: 为加快农业现代化的发展, 农机自动化、智能化是我国农业机械的发展趋势。无人驾驶拖拉机能够提高作业精度与作业效率, 减少投入成本, 是近年来智能农机装备领域的重要研究对象。为此, 介绍了无人驾驶拖拉机的两种主要建模方法以及 5 种路径跟踪控制方法。同时, 对该技术发展提出了建议: 应进一步深入研究曲线行驶和转弯控制方法, 分析不同路面的影响, 综合考虑成本与控制方法鲁棒性、适应性之间的平衡关系。

关键词: 拖拉机; 无人驾驶; 路径跟踪

中图分类号: S219.0

文献标识码: A

文章编号: 1003-188X(2024)08-0001-07

DOI:10.13427/j.cnki.njyi.20240018.005

0 引言

农业是第一产业, 生产出人类赖以生存的基本生活资料, 是第二、第三产业发展的基础。习近平总书记在深入推进东北振兴座谈会上明确提出, 要把发展农业科技放在更加突出的位置, 大力推进农业机械化、智能化, 给农业现代化插上科技的翅膀^[1]。我国幅员辽阔, 人口众多, 是一个粮食生产大国, 也是粮食消耗大国, 农业的发展影响着我国的发展。随着城市化的普及, 农村劳动力数量呈下降趋势, 故国家大力支持和推广农业机械。智能农机是我国乃至世界各国农业科技的前沿发展方向, 也是“精准农业”的重要组成部分^[2-4], 且目前自动驾驶农机已广泛应用于耕作、播种、施肥、喷药、收获等农业生产过程^[5]。我国耕地广泛分布于东北平原、华北平原和长江中下游平原, 平坦的地势更加有利于农业机械化的普及和推广。

无人驾驶拖拉机是将卫星定位、传感技术、智能控制技术等现代技术与传统拖拉机结合, 从而使作物生产更加科学, 能够降低成本、增加安全性、提高作业

效率与农业资源利用率^[6-9]。路径跟踪控制是实现无人驾驶的关键技术之一, 主要目的是通过无人驾驶过程中实际路径与期望路径的偏差(即路径和距离的偏差), 确定转向角, 从而消除偏差, 以提高车辆行驶路径的准确性和稳定性。工作过程中, 随着行驶速度的增大, 外部扰动的影响增强, 对无人驾驶拖拉机的路径跟踪控制要求也随之提高。

目前, 路径跟踪控制在无人驾驶汽车方面应用甚广, 但对于在拖拉机方面的应用与研究相对较少, 且国内对于拖拉机无人驾驶技术的研究起步较晚。为此, 结合大量国内外研究机构和学者发表的研究报告与文献资料, 总结整理出无人驾驶拖拉机路径跟踪控制的主要研究内容, 并提出发展建议。

1 无人驾驶拖拉机数学模型

因不同的模型对不同参数的敏感度不同, 故选择一个合适的模型尤为重要。目前常用的无人驾驶拖拉机模型主要有两种, 即运动学模型和动力学模型。

1.1 运动学模型

忽略拖拉机的质量, 仅考虑位置和速度等几何关系, 根据车辆与道路的相对运动关系, 建立运动学方程, 进而得到车轮速度、位移等与横向偏差、航向偏差等的关系^[10-13]。

适用范围: 由于此模型仅考虑拖拉机运动情况, 而未考虑受力, 因此仅适用于土地平坦、无大转弯的低速行驶情况。

优点: 控制简单、可靠。

无人驾驶拖拉机运动学模型如图 1 所示。根据图 1, 运动学模型的基本运动微分方程表示为

收稿日期: 2022-08-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979275); 自然资源部超大城市自然资源时空大数据分析应用重点实验室开放基金项目(KFKT-2022-05); 自然资源部城市国土资源监测与仿真重点实验室开放基金资助项目(KF-2021-06-115); 虚拟现实技术与系统国家重点实验室(北京航空航天大学)开放课题基金(VRLAB2022C10); 中国农业大学 2115 人才工程项目(2016008)

作者简介: 陈 建(1983-), 男, 山东荣成人, 副教授, 博士生导师, (E-mail) jchen@cau.edu.cn。

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

式中 (x, y, θ) — 车辆的位置和航向角;

v — 车辆速度 (m/s);

δ — 前轮偏角 (rad);

l — 车辆前后轮距 (m) [14]。

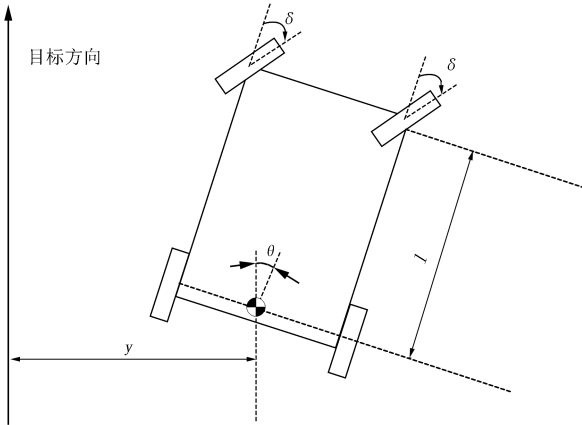


图 1 无人驾驶拖拉机运动学模型

Fig. 1 Kinematic model of unmanned tractor

1.2 动力学模型

无人驾驶拖拉机动力学模型如图 2 所示。

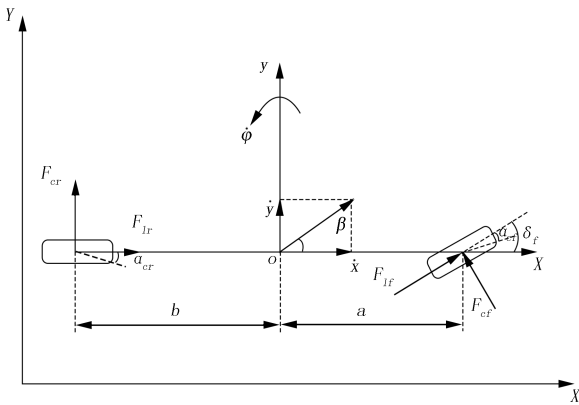


图 2 无人驾驶拖拉机动力学模型

Fig. 2 Dynamic model of unmanned tractor

根据牛顿第二定律,列出拖拉机动力学方程。根据车轮侧向力和侧偏角的线性关系,可以计算出拖拉机的质心侧偏角、横摆角速度、横向偏差及航向偏差等状态量 [15-17]。

适用范围:由于车轮侧向力和侧偏角的线性关系仅适用于侧偏角较小时,因此模型适用于行驶速度较低、不考虑侧滑和翻转的情况。通常,简化为一个具有横向、纵向和横摆运动的两轮车模型。

优点:主要研究车轮的受力情况,在不平坦的农

田环境中可以展示出很强的鲁棒性,即对于动态障碍、定位误差等干扰的抑制性能。

对车辆模型进行适当简化,使其具有横向、纵向和横摆 3 个自由度。根据牛顿第二定律,得到如下受力平衡方程,即

$$\begin{cases} m\ddot{x} = m\dot{\varphi} + 2F_{lf}\cos\delta_f - 2F_{cf}\sin\delta_f + 2F_{lr} \\ m\ddot{y} = -m\dot{\varphi} + 2F_{lf}\sin\delta_f + 2F_{cf}\cos\delta_f + 2F_{cr} \\ I_z\ddot{\varphi} = 2a(F_{lf}\sin\delta_f + F_{cf}\cos\delta_f) - 2bF_{cr} \end{cases} \quad (2)$$

式中 xoy — 固定于车身的车辆坐标系;

o — 车辆质心位置;

m — 车辆整备质量 (kg);

a 、 b — 质心到车辆前后轴的距离 (m);

I_z — 车辆绕 z 轴的转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$);

δ_f — 前轮转角 (rad);

φ — 车辆横摆角 (rad);

$\dot{\varphi}$ — 车辆横摆角速度 (rad/s);

F_{lf} 、 F_{lr} — 前后轮胎所受纵向力 (N);

F_{cf} 、 F_{cr} — 前后轮胎所受侧向力 (N);

α_{cf} 、 α_{cr} — 前后轮胎侧偏角 (rad) [16]。

2 无人驾驶拖拉机路径跟踪控制方法

2.1 经典控制方法

1) PID 控制原理。PID 控制 (Proportion Integration Differentiation Controller, PID) 是指比例、积分、微分控制。该控制方法目的是运用比例、积分、微分 3 种运算方法,将输出变换后与输入叠加,得到新输出,进而控制系统。其中,比例控制算法 (P) 可以加快系统响应,同时使系统超调量增加,稳定性变差;积分控制算法 (I) 可以减小稳态误差,减小振荡频率,提高系统稳定性,同时会增大响应时间;微分控制算法 (D) 可以加快系统响应速度,减小超调量,但会使系统抗干扰能力下降。因此,将 P、I、D 结合起来,找到最适合的系数,可以得到稳定、精准的输出。

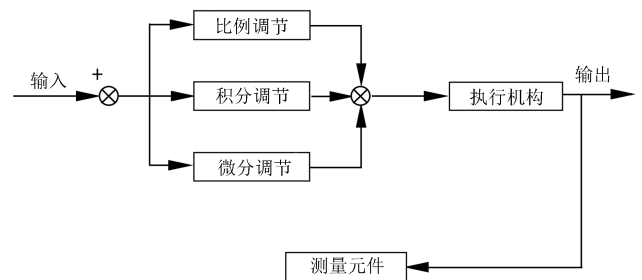


图 3 PID 控制原理

Fig. 3 PID control principle

2)PID控制的应用。华南农业大学罗锡文等在研究东方红 X804 拖拉机的 DGPS (Differential Global Position System) 自动导航控制系统时,基于 PID 设计出直线跟踪导航控制器。工作时,将电控液压转向系统模型和拖拉机运动模型合成为一个控制对象进行研究,这时的输入输出分别为期望的转向轮偏角和横向跟踪误差,进而可以得到系统的开环传递函数;然而,在单位反馈系统中,其前向通道有 2 个积分环节,构成了一个结构不稳定系统。为消除不稳定,罗锡文等在前向通道中引入比例、微分控制,发挥系统校正的作用。通过仿真,得到比例系数和微分系数的最优取值范围,具体数值可在田间试验时确定^[13]。

PID 控制属于经典控制,因其鲁棒性好、可靠性高,在实际研究中应用甚广。华南农业大学张智刚等依据插秧机速度变化,建立自适应 PD 控制器,实现航向跟踪控制。自适应 PD 控制器依据插秧机行进速度在线整定 P、D 参数,并输出转向轮的期望偏角,从而控制转向^[18]。南京农业大学鲁植雄等运用双通道 PID 控制,解决了非对称液压缸的控制精度问题^[19]。中国农业大学翟志强等基于经典的 PID 算法控制转向执行器,并运用遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 优化 PID 控制器参数,便捷地得到适合的 PID 参数。仿真实验结果显示,经过优化后的 PID 控制器达到了较好的跟踪性能^[20]。安徽农业大学杨洋等利用自适应预瞄算法下达转角指令,转向控制器根据指令利用 PID 控制转角角度,在水泥面和旱田的实车试验结果显示误差率均小于 5%^[21]。

2.2 现代控制方法

2.2.1 滑模控制

1)滑模控制原理。根据系统所期望的动态特性来设计系统的切换超平面,通过滑动模态控制器使系统状态从超平面之外向切换超平面收束。系统一旦到达切换超平面,控制作用将保证系统沿切换超平面到达系统原点,这一沿切换超平面向原点滑动的过程称为滑模控制^[22]。滑模控制本质上是非线性控制的一种,滑模面可以进行设计,调节的参数少,响应速度快;对扰动有很强的抑制能力,对于在复杂环境工作下的拖拉机来说非常友好。

2)滑模控制的应用。中国农业大学张硕等提出了一种基于横向位置偏差和航向角偏差的双目标联合滑模控制算法,可改善速度变化引起的路径跟踪控制的不稳定性,从而提高拖拉机自动导航控制的动态跟踪性能和稳定性。实车实验表明:定速控制效果很好,变速也能基本实现控制效果^[23]。

浙江农林大学张培培等设计了一种基于指数趋近律和准滑动模态的滑模控制器,可以快速趋近并同时削弱抖动。仿真结果表明:无论直线或是圆形路径,控制器均可在 3s 左右跟踪到期望信号并快速收敛到定值,但此项研究并未进行实车试验^[24]。

滑模控制因其抗干扰能力强,近年来被多人运用到无人驾驶的研究中。中国农业机械化科学研究院贾全提出一种基于干扰补偿器的离散滑模控制器,仿真结果显示:系统可以快速无超调地跟踪期望信号,且无抖振^[25]。合肥工业大学郑平等根据预瞄点处的横向偏差和航向偏差,分别设计了基于横向偏差的滑模控制器和基于航向偏差的滑模控制器,再结合两个转向角得出最终转向角,仿真结果表明:该控制方法适应性高,具有较好的控制效果^[14]。德黑兰大学 Khalil Alipour 等提出了一组未知但有限的扰动的滑模控制器,仿真结果显示:拖拉机在打滑情况下,能够实现很好的跟踪效果^[26]。韦恩州立大学 AmirReza Latif 等在研究拖拉机及其拖车问题中,考虑到不同驾驶场景和路况(如轮胎漏气、道路湿滑等),基于滑模控制设计了路径跟踪控制器,仿真结果显示:滑模控制在有限扰动下,可以实现很好的跟踪效果^[27]。

2.2.2 模型预测控制

1)模型预测控制原理。模型预测控制 (Model Predict Control, MPC) 是根据系统当前状态和未来控制量,运用已知的模型去预测系统未来的输出,再根据规定的性能指标进行反复优化,最后根据实际输出与预测输出对系统进行矫正。这 3 个步骤被称为“三项基本原理”,即模型预测、滚动优化、反馈矫正。

基于这 3 个要素,模型预测控制的基本原理如图 4 所示。控制过程中,始终存在一条期望轨迹,如图中带有空心圆标记的曲线所示。以时刻 k 作为当前时刻,控制器结合当前的测量值和预测模型,预测系统未来一段时域内 $[k, k + N_p]$ (也称为预测时域) 系统的输出,如图中带有三角标记的曲线所示。通过求解满足目标函数以及各种约束的优化问题,得到在控制时域内 $[k, k + N_c]$ 一系列的控制序列,用图中的矩形波所示,将该控制序列的第 1 个元素作为被控对象的实际控制量。当来到下一个时刻 $k + 1$ 时,重复上述过程,如此滚动地完成一个个带约束的优化问题,实现对被控对象的持续控制^[28]。

2)模型预测控制的应用。东南大学林乙衡以动力学线性模型为预测模型,对其线性化处理,根据给定时刻预测模型得到拖拉机的航向角和偏差,计算得到此时的模型输入,重复这一过程使拖拉机快速、稳

定地跟踪上目标轨迹。其仿真时无论快速还是慢速或是“8”字,都有很好的效果;但实际测试时,水泥地面效果优于松软草地,仍需多次试验调整权重系数^[29]。

盐城工业职业技术学院严国军等在一般 MPC 控制器的基础上设计了一款自适应 MPC 控制器,其预测时域 N_p 能够根据车辆跟踪轨迹的曲率 K 的变化自动调节,以达到又快又好地完成控制任务的目标。仿真结果表明:车辆最大行驶距离偏差为 -0.03m ,最大航向角偏差为 0.015rad ,同时缩短了控制器的计算时间,提升了控制系统的实时性,达到了较好的轨迹跟踪效果,但该研究没有进行实车试验^[30]。

MPC 可以考虑系统的多约束条件,因此在路径跟踪控制中得到了广泛应用^[31]。代尔夫特理工大学 Erkan Kayacan 等在考虑侧滑角的情况下,对自动拖拉机的偏航动力学进行建模,根据识别的模型设计了用于偏航动力学的 MPC 控制器,实验结果表明 MPC 控制器控制的偏航角速度没有稳态误差^[32]。浙江农林大学赵相君等对比了有无松弛因子的模型预测控制的仿真控制效果,结果表明加入松弛因子更有助于提高控制的快速性和平稳性^[33]。山东农业大学刘正铎等用误差模型作为控制器的预测模型,并加入松弛因子,实现对路径的有效跟踪,并通过滚动优化实时优化调整,提高了控制系统的稳定性^[34]。为简化计算,提高系统收敛速度,刘正铎等在模型预测中采用显式迭代方程,用欧拉法对运动模型进行离散化求解,增强系统的实时性^[35]。大连理工大学 Ming Yue 等基于运动学模型对比线性二次型调节器(Linear Quadratic Regulator, LQR)和 MPC 的控制效果,仿真结果清晰地展示了 MPC 方法在处理复杂的欠驱动和非整体移动系统时的强大控制能力^[36]。

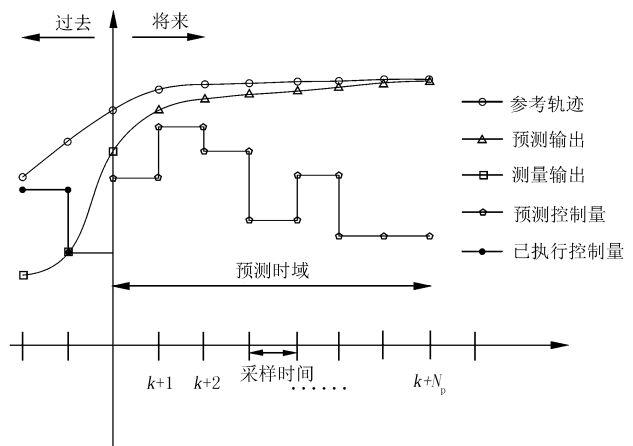


图 4 模型预测控制原理示意图
Fig. 4 Schematic diagram of MPC principle

2.3 智能控制方法

1) 模糊控制原理。模糊控制是利用计算机模拟人的思维方式,按照人的操作规则进行控制,实现人的控制经验。工作时,先将操作人员或专家经验编成模糊规则,再将来自传感器的实时信号模糊化,将模糊化后的信号作为模糊规则的输入,完成模糊推理,并将推理后得到的输出量作用到执行机构上。其可以处理模糊性的信息,且不依赖于被控对象的数学模型,目前已在工业控制领域取得了良好的控制效果,受到广大工程师的喜爱^[37]。

模糊逻辑控制系统的基本结构如图 5 所示。其中,核心部分是模糊控制器,用虚线框表示。模糊控制器由模糊化接口、知识库、推理机和模糊判决接口 4 个基本单元组成,控制规律由计算机实现^[38]。

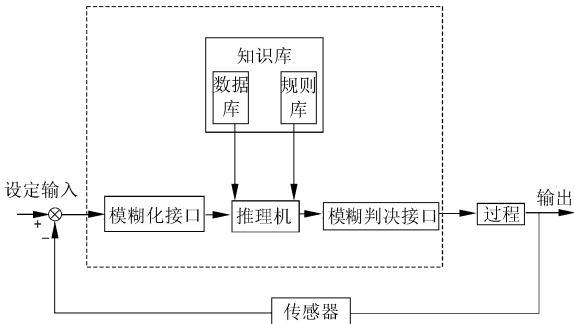


图 5 模糊控制系统
Fig. 5 Fuzzy control system

2) 模糊控制的应用。湖南农业大学谭德权在控制履带式拖拉机转向系统设计中,针对拖拉机工作环境复杂的特点,选择了模糊控制的方法。其采用二维模糊控制器,将航向角偏差和横向位置偏差作为输入数据,并进行模糊化处理,根据实际人工控制时的经验总结出模糊规则。为了提高控制精度,将横向位置偏差经过数学变换后得到调控因子,用来调控两个输入数据的加权。最后,采用 Mamdani 的 $\max\text{-min}$ 合成法将输出量去模糊,输出精确角度值^[39]。

江苏大学陈志刚等在对东风 DF904 拖拉机进行不同路面的路径跟踪研究时,在控制器的设计中采用二级变论域模糊控制,其模糊控制器 1 输出的位置偏差和方向偏差将会改变模糊控制器 2 的模糊划分,通过模糊控制器 2 输出更精确的转向角度。论域的实时调整相当于增加了模糊控制规则数目,且对初始规则的准确性要求降低,克服了由于专家经验不足而引起的控制系统精度过低的情况^[40]。

模糊控制不需要控制对象精确的数学模型,即可进行对系统的控制,因而具有很好的鲁棒性和适应性^[31]。石河子大学石翔等同时考虑前轮转角的响应

速度和稳定性,在拖拉机的路径跟踪中增加了模糊控制,仿真结果显示符合驾驶员的操作经验^[41]。江苏大学王诗冬以 DF904 为试验平台,采用了变论域模糊算法路径跟踪,使拖拉机快速、稳定地按预定轨迹自动行走^[42]。中国科学院沈阳自动化研究所李逃昌等采用模糊自适应控制对模型中的前视距离进行在线实时整定,为了适应不同情况,采用带有自调整函数的解析式模糊控制器对前视距离的大小进行在线自适应调整^[43]。中国农业大学孟庆宽等设计了一种基于粒子群优化自适应模糊控制器的控制方法,试验表明该方法用于直线跟踪具有很好的效果,对于曲线跟踪精度略低于前者,但都比普通模糊控制效果好^[44]。

2.4 组合控制方法

传统的滑模控制容易产生抖动现象,为解决这一问题,河北农业大学籍颖等在滑模控制中加入了模糊控制。仿真结果显示:此方法可以有效地抑制抖动,但响应时间较长,影响系统的实时性^[45]。

常规增量式 PID 控制器存在没有自学习、自适应能力的问题,导致复杂作业环境下应对非线性的控制性能较差。为了改善这个问题,华中农业大学周明宽等采用神经网络算法中的单神经元算法对 PID 控制器进行改进,设计变增益单神经元自适应 PID 控制器实时整定 PID 的控制参数。单神经元算法具有自适应和自学习能力,通过单神经元算法构成的单神经元自适应 PID 控制器,具有较强的鲁棒性,能够针对环境变化进行学习,且结构简单、占用内存较少^[46]。

为提高 PID 的控制精度,上海交通大学齐文超等设计了双闭环模糊 PID 控制算法。其利用模糊控制对传统 PID 控制进行改进,将摆角误差及其变化率模糊化后,根据模糊控制规则进行决策,待解模糊化后得到 PID 调整量,进行 PID 控制。仿真和实车试验结果表明:无论是平缓的路面还是起伏较大的坡地,模糊 PID 控制效果均比传统 PID 控制好,具有很好的借鉴价值^[47]。

伊斯兰阿扎德大学 Khoshnam Shojaei 在研究拖拉机与联合收割机协同作业中,提出了一种神经 PID 控制器,在控制器设计中加入多层神经网络和非线性自适应鲁棒控制技术,以提高系统对模型不确定性和农田外部干扰的鲁棒性。仿真结果显示:经过对控制器参数的调整,可以获得很好的跟踪性能^[48]。

聊城大学 Wang Shourui 等将 PID 控制应用于两个完全解耦的横摆角速度控制器和横向位移控制器:横摆角速度控制器是基于内模控制 (Internal Model Control, MIC) 的 PID 控制器,横向位移控制器是根据

最小灵敏度理论设计的控制器。仿真结果显示:PID 控制结合 MIC 控制和最小灵敏度理论都能有效改善系统的抗扰性和鲁棒性^[49]。

3 结 论

PID 控制简单,鲁棒性、可控性强,在实际生产研究中广泛应用,但其系数需要大量试验数据总结得出,调节参数较复杂。但是因其在实际生产中应用普遍,调参方法成熟,故 90% 以上的工业控制场合采用 PID 控制。模糊控制不需要精确的数学模型,可极大地简化系统设计的难度,降低数学建模的复杂性,大幅提高建立系统模型和仿真的效率,具有很好的鲁棒性和适应性,但其模糊规则需要专家经验给出;滑模控制抗干扰能力强、响应快,但易产生抖振现象,且滑模控制属于非线性控制,在调节参数时无法使用传统线性分析方法,适用性较差;模型预测控制响应快,在无人驾驶汽车方面研究较多,用于农机的研究较少。由于 MPC 的目的是求解最优优化问题,笔者认为 MPC 更适合解决优化控制问题,而非跟踪控制问题。此外,部分研究将多种控制方法结合起来,各取所长,得到很好的控制效果,也是无人驾驶拖拉机路径跟踪控制方法研究的发展方向和热点。

拖拉机路径跟踪系统是一个多输入、多输出、非线性、强耦合的多变量系统,且拖拉机作为一种农用机械在作业时一般以较低的恒定速度运行,行驶的地理环境复杂^[50],若想同时保证鲁棒性、准确性、适应性等性能优良,还需继续研究和改进。具体建议如下:

1) 深入研究曲线行驶和转弯控制方法。目前,对于无人驾驶拖拉机的路径跟踪控制的研究大多集中于直线行驶,曲线行驶的研究相对较少。直线行驶的精度高、误差小,而曲线行驶还需控制不同角度的转向角,曲线行驶往往控制效果不理想。

2) 深入研究不同路面的影响:虽然坚硬的水泥路面可以得到很好的试验效果,但松软的土地才是无人驾驶拖拉机作业的主要路面。因此,深入研究不同路面的影响,有利于增加拖拉机的适应性,进而可以推广到山地丘陵地区。

3) 综合考虑成本与控制方法鲁棒性、适应性之间的平衡关系。越复杂的控制系统带来的成本越高,若要实现量产,必须考虑成本的影响,在控制性能和成本之间做出一个权衡。

参考文献:

- [1] 于石. 为农业插上科技翅膀[EB/OL]. [2021-8-30].
[http://theory. people. com. cn/n1/2019/0325/c40531 -](http://theory.people.com.cn/n1/2019/0325/c40531-)

30992645. html.
- [2] 李东涛,于孟京,王金楠. 农业机械自动化发展的制约因素及改进举措研究[J]. 现代化农业,2022(6):85-87.
- [3] 罗锡文,廖娟,臧英,等. 我国农业生产的发展方向:从机械化到智慧化[J]. 中国工程科学,2022,24(1):46-54.
- [4] 谢斌,武仲斌,毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J]. 农业机械学报,2018,49(8):1-17.
- [5] 戴增辉,何风琴. 智能农机自动导航系统应用研究[J]. 农机化研究,2018,40(2):202-206.
- [6] 范玉萍. 基于精准农业概念下的农业机械化技术[J]. 农业科技与装备,2009(5):104-105.
- [7] 梁红. 我国“精准农业”现状及发展对策[J]. 农业与技术,2002,22(3):55-59.
- [8] 李建平,林妙玲. 自动导航技术在农业工程中的应用研究进展[J]. 农业工程学报,2006,22(9):232-236.
- [9] CIVELEK C. Evaluation of internet of things (IoT) technology to be used as a precision agriculture solution for Turkey's agriculture[J]. Fresenius environmental bulletin, 2020, 29(7A): 5689-5695.
- [10] ROBERT P C, RUST R H, LARSON W E, et al. Automatic steering of farm vehicles using GPS[J]. Precision agriculture, 1996,3(3):767-777.
- [11] 胡家铭,胡宇辉,陈慧岩,等. 基于模型预测控制的无人驾驶履带车辆轨迹跟踪方法研究[J]. 兵工学报,2019,40(3):456-463.
- [12] 周培云,齐建永,陈慧岩,等. 一种无人驾驶轮式越野车导航定位与自引导方法[J]. 汽车工程,2009,31(9):800-803.
- [13] 罗锡文,张智刚,赵祚喜,等. 东方红 X-804 拖拉机的 DGPS 自动导航控制系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 139-145.
- [14] O'CONNOR M. Carrier-phase differential GPS for automatic control of land vehicles [D]. CA: Stanford University, 1997.
- [15] 郑平平,汤玮,宋伟杰,等. 无人驾驶拖拉机路径跟踪联合控制研究[J]. 农业装备与车辆工程,2021,59(2):79-82.
- [16] 寇发荣,杨慧杰,张新乾,等. 采用状态反馈的无人车路径跟踪横向控制[J]. 机械科学与技术,2022,41(1):143-150.
- [17] 赵治国,周良杰,朱强. 无人驾驶车辆路径跟踪控制预瞄距离自适应优化[J]. 机械工程学报,2018,54(24):166-173.
- [18] 张智刚,罗锡文,李俊岭. 轮式农业机械自动转向控制系统研究[J]. 农业工程学报,2005,21(11):77-80.
- [19] 鲁植雄,龚佳慧,鲁杨,等. 拖拉机线控液压转向系统的双通道 PID 控制仿真与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(6):101-106.
- [20] 翟志强,朱忠祥,杜岳峰,等. 基于虚拟现实的拖拉机双目视觉导航试验[J]. 农业工程学报,2017,33(23):56-65.
- [21] 杨洋,查家翼,李延凯,等. 拖拉机机组无人作业协同控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(2):421-429.
- [22] 李嘉骞. 滑模控制[EB/OL]. (2021-01-26) [2021-09-10]. <https://baike.baidu.com/item/%E6%BB%91%E6%A8%A1%E6%8E%A7%E5%88%B6/2785312>.
- [23] 张硕,刘进一,杜岳峰,等. 基于速度自适应的拖拉机自动导航控制方法[J]. 农业工程学报,2017,33(23):48-55.
- [24] 张培培,杨自栋,赵相君. 拖拉机—牵引式农机具的运动建模与跟踪控制[J]. 中国农机化学报,2021,42(4):128-133.
- [25] 贾全. 拖拉机自动导航系统自适应控制方法研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2018.
- [26] ALIPOUR K, ROBAT A B, TARVIRIDIAZDEH B. Dynamics modeling and sliding mode control of tractor-trailer wheeled mobile robots subject to wheels slip[J]. Mechanism and machine theory, 2019, 138:16-37.
- [27] LATIF A R, CHALHOUB N, PILIPCHUK V. Control of the nonlinear dynamics of a truck and trailer combination [J]. Nonlinear dynamics, 2020, 99(4): 2505-2526.
- [28] 谢兼明. 无人驾驶车辆路径跟踪模型预测方法研究[D]. 北京:北京理工大学,2018.
- [29] 林乙衡. 基于多源信息融合的智能农机路径规划和路径跟踪研究[D]. 南京:东南大学,2018.
- [30] 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.
- [31] YUE M, HOU X, HOU W. Composite path tracking control for tractor - trailer vehicles via constrained model predictive control and direct adaptive fuzzy techniques[J]. Journal of dynamic systems, measurement, and control, 2017, 139(11): 111008.
- [32] KAYACAN E, KAYACAN E, RAMON H, et al. Towards agrobots: Identification of the yaw dynamics and trajectory tracking of an autonomous tractor[J]. Computers and electronics in agriculture, 2015, 115: 78-87.
- [33] 赵相君,张培培. 基于 MPC 的智能拖拉机实时路径跟踪[J]. 安徽农业科学,2021,49(19):191-194.
- [34] 刘正铎,张万枝,吕钊钦,等. 扰动下农用运输车辆路径跟踪控制器设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(12):378-386.
- [35] LIU ZHENGDUO, ZHENG WENXIU, WANG NENG, et al. Trajectory tracking control of agricultural vehicles based on disturbance test[J]. International journal of agricultural

- and biological engineering, 2020, 13(2): 138-145.
- [36] YUE M, HOU X, GAO R, et al. Trajectory tracking control for tractor-trailer vehicles: a coordinated control approach[J]. Nonlinear dynamics, 2018, 91(2): 1061-1074.
- [37] 龚毅. 一种无人驾驶车辆路径跟踪控制方式研究[D]. 南京:南京理工大学, 2014.
- [38] 刘金琨. 智能控制[M]. (5 版). 北京:电子工业出版社, 2021:32-38.
- [39] 谭德权. 基于双源激光定位的履带拖拉机自动驾驶系统研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2016.
- [40] 陈志刚, 王诗冬, 杜彦生, 等. 拖拉机路径跟踪的变论域模糊控制[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(13): 216-219.
- [41] 石翔, 马蓉, 张长龙, 等. 基于模糊控制的拖拉机路径跟踪仿真研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(8): 237-241.
- [42] 王诗冬. 基于北斗卫星导航的拖拉机辅助驾驶系统研究[D]. 镇江:江苏大学, 2017.
- [43] 李逃昌, 胡静涛, 高雷, 等. 基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 205-210.
- [44] 孟庆宽, 仇瑞承, 张漫, 等. 基于改进粒子群优化模糊控制的农业车辆导航系统[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 29-36, 58.
- [45] 籍颖, 刘兆祥. 基于模糊补偿的离散全局滑模控制自动驾驶系统研究[J]. 农机化研究, 2015, 37(7): 74-78.
- [46] 周明宽, 夏俊芳, 郑侃, 等. 基于变增益单神经元 PID 的秸秆旋埋还田导航系统研制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 31-40.
- [47] 齐文超, 李彦明, 张锦辉, 等. 丘陵山地拖拉机车身调平双闭环模糊 PID 控制方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 17-23, 34.
- [48] SHOJAEI K. Intelligent coordinated control of an autonomous tractor-trailer and a combine harvester[J]. European journal of control, 2021, 59: 82-98.
- [49] WANG SHOURUI, YIN CHENGQIANG, GAO JIE, et al. Lateral displacement control for agricultural tractor based on cascade control structure[J]. International journal of control, automation and systems, 2020, 18(9): 2375-2385.
- [50] 吕安涛, 毛恩荣, 林玮静. 一种拖拉机自动驾驶神经网络自调整因子模糊控制方法的研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2009, 36(3): 65-67.

Overview of Path Tracking Control Methods for Unmanned Tractors

Chen Jian, Wang Yifei

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

Abstract: In order to accelerate the development of agricultural modernization, agricultural machinery automation and intelligence are the development trend of China's agricultural machinery. Unmanned tractors can improve work accuracy and work efficiency, reduce input costs, and are an important research object in the field of intelligent agricultural machinery equipment in recent years. This article summarizes the two main modeling methods of unmanned tractors and five path tracking control methods, and puts forward the research suggestions for the future of the technology. The curve driving and turning control methods should be further studied, and the impact of different roads should be studied in depth, and comprehensively consider the balance between cost and control method robustness and overview of path tracking control methods for unmanned tractors adaptability.

Key words: tractor; unmanned driving; path tracking