

农田土壤采样车点跟踪自动取土控制系统设计与试验

罗承铭^{1,2} 朱星宇¹ 王宁¹ 谢勇进¹ 钟婧¹ 夏俊芳^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对当前农田土壤采样作业劳动强度大、精准性差、自动化程度低等问题, 基于电驱履带底盘设计了一种农田土壤采样车及其自主作业控制系统。对采样车整机结构组成、工作原理与控制系统方案进行了阐述, 基于有限状态机方法设计了采样车作业流程控制策略。以采样车自主完成农田内一系列采样点作业任务为目标, 设计了点跟踪控制流程, 建立了采样车点跟踪模型, 运用矢量场法设计了采样车点跟踪控制算法。上线性能试验结果表明, 基于矢量场法设计的采样车点跟踪控制算法具有良好的纠偏性能, 能够快速上线且以较小的横向偏差保持对目标路径的稳定跟踪, 当初始横向偏差为 2 m、初始航向偏差为 0° 时, 行驶速度 0.3、0.6、0.9 m/s 上线时间分别为 15.7、11.8、11.9 s, 上线距离分别为 4.72、7.10、10.74 m。连续点跟踪试验结果表明, 行驶速度 0.3、0.6、0.9 m/s 下采样车相对于各目标路径最大绝对横向偏差分别为 0.081、0.107、0.210 m, 平均绝对横向偏差分别为 0.018、0.022、0.050 m, 标准差分别为 0.026、0.027、0.064 m, 采样车停止位置相对于各目标点的绝对距离偏差平均值分别为 0.068、0.081、0.141 m。土壤采样装置性能试验结果表明, 各机构运行平稳, 同一深度下采样耗时一致, 样本质量变异系数较小。采样车能够根据所设计的控制流程与点跟踪控制算法实现对一系列采样目标点的准确连续跟踪, 满足农田土壤采样自动化作业需求。

关键词: 土壤采样车; 点跟踪控制; 导航; 履带底盘; 矢量场

中图分类号: S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2024)12-0180-11

OSID:



Design and Experiment of Point Tracking Automatic Sampling Control System for Farmland Soil Sampling Vehicle

LUO Chengming^{1,2} ZHU Xingyu¹ WANG Ning¹ XIE Yongjin¹ ZHONG Jing¹ XIA Junfang^{1,2}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

(2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: To tackle the problems in current farmland soil sampling operation, including high labor demand, poor sampling accuracy, low automation level etc., a farmland soil sampling vehicle with its automatic operation control system was designed based on an electric drive tracked chassis. The structure components, working principle and control system scheme were elaborated. The control strategy for the sampling vehicle operation process was designed based on the finite state machine method. To realize the goal of performing soil sampling at a series of target points in the field automatically, a continuous point tracking process was designed, and the point tracking model for the sampling vehicle was established. A point tracking control algorithm was developed based on the method of vector field. From the on-line performance test results, the point tracking algorithm designed based on vector field method had good deviation correction ability. When the initial lateral deviation was 2 m and the initial heading deviation was 0°, the on-line time consumed by the sampling vehicle at 0.3 m/s, 0.6 m/s and 0.9 m/s were 15.7 s, 11.8 s and 11.9 s, respectively, and the on-line distance travelled by the sampling vehicle at 0.3 m/s, 0.6 m/s and 0.9 m/s were 4.72 m, 7.10 m and 10.74 m, respectively. From the continuous point tracking test results, when the operation speed of the sampling vehicle was set at 0.3 m/s, 0.6 m/s and 0.9 m/s, the maximum absolute lateral deviations with respect to the reference path were 0.081 m, 0.107 m and 0.210 m, respectively, the mean absolute lateral deviations were 0.018 m, 0.022 m and

收稿日期: 2024-07-15 修回日期: 2024-09-05

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2662019QD001、2662023GXPY003)和国家自然科学基金项目(32271994)

作者简介: 罗承铭(1987—),男,讲师,博士,主要从事农机导航控制与路径规划研究,E-mail: chmluo@mail.hzau.edu.cn

0.050 m, respectively, the standard deviations were 0.026 m, 0.027 m and 0.064 m, respectively, and the mean absolute distance errors of the sampling vehicle with respect to the target points were 0.068 m, 0.081 m and 0.141 m, respectively. The performance test of the soil sampling device revealed that its mechanisms could work smoothly together, the consumed time at different locations for the same sampling depth was consistent, and the coefficient variation of sample masses was small. The sampling vehicle could realize accurate continuous point tracking to a series of target points under the control of designed control process and point tracking algorithm, which permitted that the requirements for automatic farmland soil sampling could be met.

Key words: soil sampling vehicle; point tracking control; navigation; tracked chassis; vector field

0 引言

农田土壤的水分、肥力、酸碱度是影响作物生长的重要因素。然而,土壤信息会随着气候、环境等自然因素的变化而变化,同时也受农业生产活动的影响,呈现典型的时空变异性^[1-3]。精准农业实践中,周期性地对农田土壤进行采样,分析土壤信息的动态变化,是制定合理的变量灌溉、施肥等管理策略的前提^[4]。传统农田土壤采样依靠人工操作取土器进行,劳动强度大、效率低,且存在采样点不均匀和样本质量差等问题^[5-6]。基于农田土壤采样车与机器人进行农田内指定目标点的快速自动化采样是农田土壤采样技术发展的必然趋势。然而,作为实现这一技术的关键环节,采样目标点跟踪自动取土控制还未有针对性研究。

近年来,农业装备智能控制与机器人技术快速发展^[7-8],农田土壤采样开始向自动化与智能化迈进。国外在该领域起步较早,技术相对成熟^[9-11]。国内方面,文献[12]设计了车载液压振动式土壤采集装置,需人工驾驶操作;文献[13]设计了小型轮式农田土壤采集移动平台,支持无线遥控;文献[5]设计了车载智能土壤采样系统,由电气控制系统实现土样自动采集、收集与标识。

目前国内外在农业移动机器人领域开展了大量研究,农业生产向无人化不断深入^[14]。但与一般无人驾驶农机或移动机器人作业要求不同,全自动农田土壤采样车需要按照指定的采样方案准确移动到农田内一系列采样点并执行土壤样本采集。为保证样本的稳定性以及进行土壤信息动态跟踪,在不同时间段需对同一批采样点进行多次采样,因此,采样点跟踪控制精度是影响采样车作业性能的关键。虽然在农机导航控制领域国内外已有大量研究,基于预瞄点法^[15-17]、PID^[18-19]、模糊控制^[20-21]、模型预测^[22-23]等控制算法的导航方法也已实现成熟应用,但目前农机导航控制研究主要以机器人执行连续路径跟踪完成播种、收获、植保等作业任务为目标,针对农田土壤采样需求的指定采样点跟踪尚未有针对

性研究。

点跟踪控制也称为点镇定,是移动机器人运动控制领域的基本问题之一,国内外均有广泛研究^[24-27]。总体上,目前针对移动机器人点跟踪控制的研究以单个目标点跟踪任务为主,研究对象多为轮式机器人。以小型履带底盘为基础开发的农田土壤采样车需连续完成农田内多个指定采样点的跟踪任务,且点跟踪控制需要与自动取土控制配合,在控制策略上仍需进一步研究。

本文面向长江中下游农业区农田土壤采样自动化作业需求,在前期农田土壤采样车机械结构设计的基础上,提出采样车点跟踪自动取土控制系统方案,建立采样车点跟踪控制模型,设计基于矢量场法的点跟踪控制算法,并通过田间试验验证控制系统的性能。

1 结构组成与工作原理

1.1 结构组成

长江中下游农业区田块土壤粘湿,地表平整度较差,为实现采样车田间行走顺利,以小型电驱履带底盘为平台,设计农田土壤采样车整机,结构组成如图 1 所示,主要包括土壤采样装置、履带底盘、双天线 RTK-GNSS 接收机、遥控器、车载计算机、下位机控制器。履带底盘左右两侧各由一个功率为

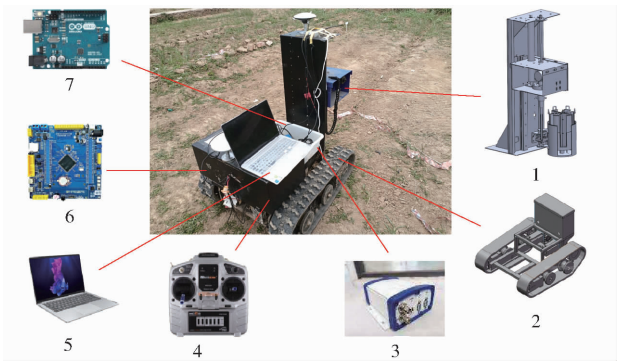


图 1 农田土壤采样车整机结构图

Fig.1 Mechanical structure of farmland soil sampling vehicle

1. 土壤采样装置 2.履带底盘 3. 双天线 RTK-GNSS 接收机
4. 遥控器 5. 车载计算机 6. STM32 下位机控制器 7. Arduino 下位机控制器

1.5 kW 的三相直流无刷电机驱动,通过两侧履带差速实现转向。土壤采样装置主要由机架、导向机构、取样机构、顶土杆、收集机构组成,具体结构如图 2 所示。

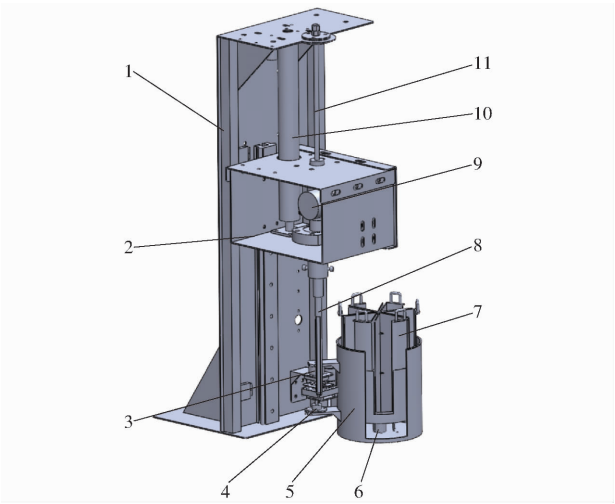


图 2 土壤采样装置结构图

Fig.2 Structure of soil sampling device

1. 机架与导向机构 2. 取样机构 3. 收集机构 4. 外箱舵机
5. 外箱 6. 内箱舵机 7. 内箱 8. 取土杆 9. 取土杆旋转电机
10. 三节式电动推杆 11. 顶土杆

土壤采样装置工作过程如下:采样车到达指定采样点后,取样机构在三节式电动推杆驱动下向下运动,同时取土杆由旋转电机驱动开始旋转。当取土杆到达土壤指定深度后,电动推杆回升,在取土杆上升过程中顶土杆即将顶出土样时,收集机构在外箱舵机驱动下由机架右侧旋转至取土杆正下方收集土样,收集完成后自动复位。收集机构内箱由 6 个分箱组成,每完成一次采样后,内箱舵机旋转 60°,实现多个采样点土样的连续收集。电驱履带式农田土壤采样车主要技术参数如表 1 所示。

表 1 农田土壤采样车主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of farmland soil sampling vehicle	
参数	数值
尺寸(长×宽×高)/(m×m×m)	1.0×0.7×1.2
质量/kg	200
驱动电机功率/kW	1.5×2
履带轨距/m	0.5
履带接地长度/m	0.55
驱动轮直径/m	0.097
行驶速度/(m·s ⁻¹)	0~1.2
取样深度/cm	0~20
取样时间/s	≤106

1.2 控制系统总体方案

农田土壤采样车作业过程需要实现两部分控制

功能,一是履带底盘的行走控制,二是土壤采样装置的取样与收集机构控制。基于上下位机分层控制与模块化设计方法,分别设计了履带底盘行走控制与土壤采样装置控制子系统。农田土壤采样车控制系统硬件结构如图 3 所示,主要由导航模块、控制元件、土壤采样装置控制模块与履带底盘控制模块组成。导航模块采用双天线 RTK-GNSS 实时获取采样车作业过程的位姿信息,数据输出频率 10 Hz,差分模式下水平定位精度为 1 cm,1 m 基线长度下航向角精度为 0.2°。控制元件包含一台车载计算机与两个单片机微控制器,其中车载计算机作为整个控制系统上位机,STM32 微控制器作为履带底盘行走控制系统下位机,Arduino 微控制器作为土壤采样装置控制系统下位机。车载计算机负责接收 RTK-GNSS 测量的采样车位置与航向信息,并进行采样车工作模式切换控制。采样车田间作业过程中,需循环进行采样模式与自动导航点跟踪模式的切换。在采样模式下,履带底盘处于暂停状态,由 Arduino 微控制器 I/O 口发送指令至土壤采样装置各电机,依次执行取样机构下降、取土杆旋转、取样机构上升、收集机构外箱旋转、收集机构内箱旋转等动作,完成土壤采样流程。在自动导航点跟踪模式下,车载计算机运行点跟踪控制算法程序,生成履带底盘两侧电机的速度控制值,并通过 STM32 微控制器将速度控制值发送至履带底盘双电机驱动器,实现履带底盘的速度与航向控制。为便于采样车的田间转移与实现手动采样功能,履带底盘控制模块同时设计了基于 ZigBee 2.4 GHz 无线通信的遥控模式,遥控模式与自动作业模式可根据需要切换。

1.3 有限状态机控制策略

有限状态机(Finite state machine,FSM)是一种用于表示有限个状态以及在这些状态之间转换和动作等行为的数学模型,能够对系统的当前状态、潜在的次态及其与输入信息之间的逻辑联系进行描述^[28]。对于给定田块多个采样点的土壤采样任务,农田土壤采样车的作业过程包含两大步骤:履带底盘自动跟踪至采样点;土壤采样装置取样与收集。以上步骤循环进行直至最后一个采样点任务完成。在采样车完成当前点采样任务开始执行下一采样点自动跟踪之前,采样车控制系统需要根据当前采样车的位姿信息和下一目标点的坐标,判断履带底盘是否需要执行原地转向以调整初始航向角。运用有限状态机方法可以将采样车整个作业流程设计为若干特定的状态及其状态转换的触发条件,如表 2 所示。分析农田土壤采样车工作流程,构建有限状态机的状态转换图,如图 4 所示。农田土壤采样车首

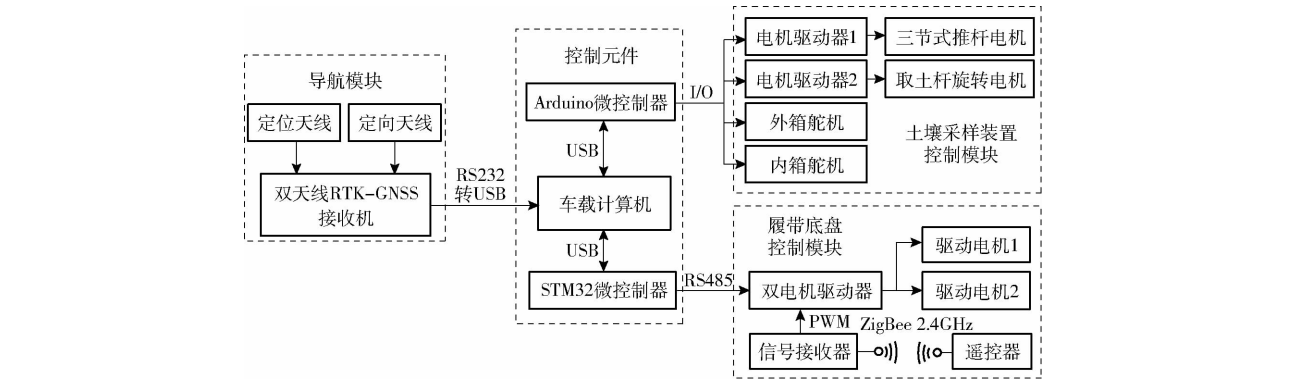


图 3 控制系统硬件结构框图

Fig. 3 Block diagram of control system hardware structure

表 2 农田土壤采样车作业状态与触发条件

Tab. 2 Farmland soil sampling vehicle operational states and trigger conditions

符号	类型	含意
S1	状态	执行点跟踪
S2	状态	执行原地转向
S3	状态	执行土壤采样
S4	状态	作业结束或异常处理
C1	触发条件	采样完成且下一目标点位于前方
C2	触发条件	到达目标点并停车
C3	触发条件	采样完成且下一目标点不位于前方
C4	触发条件	采样完成且当前点为最终目标点
C5	触发条件	出现异常

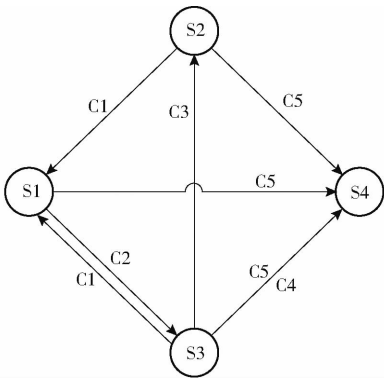


图 4 FSM 状态转换图

Fig. 4 FSM state transition diagram

先在遥控模式下进入待作业田块,控制系统载入采样目标点坐标集后切换为自动作业模式,随即采样车执行第 1 个目标点的跟踪 (S1),当触发条件 C2 满足时,采样车进入土壤采样状态 (S3)。采样完成后,当触发条件 C1 满足时,由 S3 转换为 S1,即执行下一个目标点的跟踪;或当 C3 满足时,由 S3 转换为 S2,即履带底盘原地转向;或当 C4 满足时,由 S3 转换为 S4,即采样结束,切换为遥控模式。当采样车处于 S1 ~ S3 状态且触发条件 C5 满足时,例如点跟踪过程履带底盘明显偏离目标路径、原地转向过程履带底盘航向调整异常或土壤采集装置动作执行出现异常,采样车状态均转换至 S4,进行异常处理。

2 点跟踪控制算法设计

2.1 点跟踪控制流程

农田土壤采样车作业过程需循环进行采样目标点跟踪与土壤采样操作,采样目标点的跟踪精度直接影响土壤采样位置的准确性。为实现采样车对一系列采样点的连续跟踪,设计控制流程如图 5 所示。作业开始后,首先载入采样目标点坐标集,然后读取第 1 个采样点坐标并计算目标路径航向,根据当前采样车位姿信息计算航向偏差 θ_e ,若下一目标点位于采样车前方范围 ($|\theta_e| < 60^\circ$),采样车直接以直线跟踪方式向目标点运动,否则需先进行航向调整。利用履带底盘可实现原地差速转向,在控制系统中设置当初始航向偏差超过 60° 时,控制履带底盘原

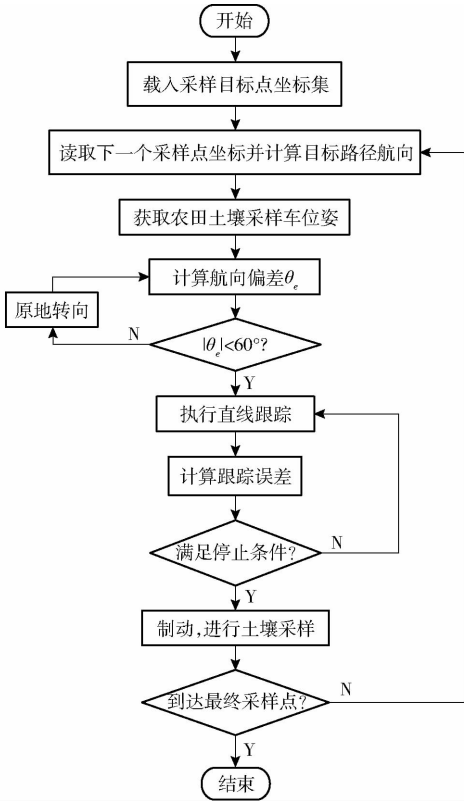


图 5 点跟踪控制流程

Fig. 5 Point tracking control process

地转向,调整初始航向偏差使下一采样点位于前方。当采样车进入直线跟踪过程后,控制程序根据设计的点跟踪控制算法实时计算采样车相对于目标路径以及目标点的跟踪误差,并根据误差计算履带底盘两侧驱动电机的速度控制值。当跟踪误差缩小至满足停止条件时,驱动电机速度控制值设为零,履带底盘暂停运动,采样车随即进入土壤采样状态。此过程重复进行,直至采样车完成最后一个采样点的土壤采样任务。

2.2 点跟踪模型

采样目标点确定后,农田土壤采样车需顺序完成对各采样点的自动跟踪。点跟踪算法的设计目标是通过控制履带底盘两侧速度的控制,使采样车能够顺利从当前采样点出发,沿目标路径准确行驶至下一采样点并停下。如图 6 所示,以正东方向为 X 轴,正北方向为 Y 轴,不考虑农田的三维地形起伏,结合履带底盘的运动学模型,建立在导航平面坐标系 XOY 下的农田土壤采样车点跟踪模型。图中 (x, y) 为履带底盘质心处点 o 坐标, θ 为履带底盘航向角, (x_0, y_0) 为当前采样点坐标, (x_d, y_d) 为下一采样点即目标点坐标, θ_d 为目标路径航向角, θ_e 为履带底盘相对于目标路径的航向偏差, d 为履带底盘相对于目标路径的横向偏差, ρ 为履带底盘相对于目标点的绝对距离偏差。理想情况下,采样车跟踪至目标点时, ρ 应为零。为保证采样车能高效且稳定跟踪各目标点,选取过目标点且垂直于目标路径的直线为停止线,以采样车相对于停止线的距离偏差 e 减小至零或某一临界值为停止条件进行点跟踪控制算法设计。在采样车向前行驶跟踪目标点的过程中, e 逐渐减小至零,当在算法控制下横向偏差 d 和航向偏差 θ_e 波动很小时,可以保证采样车能够以很小的绝对距离偏差 ρ 在目标点处停下。

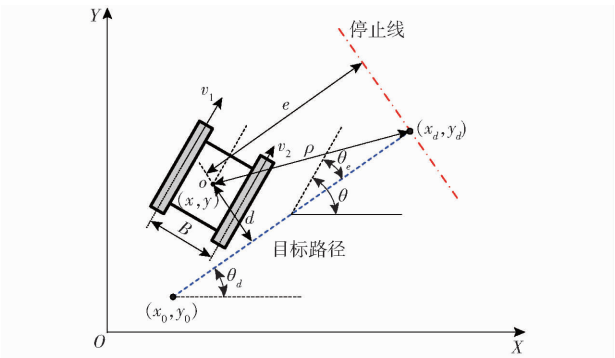


图 6 农田土壤采样车点跟踪模型

Fig.6 Point tracking model of farmland soil sampling vehicle

根据履带底盘运动学模型与图 6,可以推出农田土壤采样车点跟踪运动学模型方程

$$\begin{cases} v = (v_1 + v_2)/2 \\ \dot{e} = -v \cos \theta_e \\ \dot{\theta}_e = (v_1 - v_2)/B \\ \dot{d} = v \sin \theta_e \end{cases} \quad (1)$$

式中 v ——履带底盘质心处线速度, m/s
 v_1 ——履带底盘高速侧行驶速度, m/s
 v_2 ——履带底盘低速侧行驶速度, m/s
 B ——履带底盘轨距, m

由式(1)可得,采样车点跟踪过程需要通过控制履带底盘两侧速度 v_1 和 v_2 的控制实现 e 减小至零的同时 d 和 θ_e 趋近于零。

2.3 基于矢量场的点跟踪控制算法

由式(1)可知,采样车点跟踪过程可以转换为带停止条件的路径跟踪过程。针对履带底盘的路径跟踪问题,已有研究通常采用预瞄点法、模糊控制等方法进行算法设计,算法中涉及的预瞄距离、模糊控制论域等参数较多,调节过程比较繁琐。矢量场法是一种结构灵活的数学方法,已在无人机与水面船舶的制导中得到广泛应用^[29-30],但还未有将该方法应用于履带底盘田间导航控制的研究。

2.3.1 路径跟踪矢量场生成

图 6 中由当前采样点和目标点可以确定采样车下一个点跟踪过程的目标路径。不考虑采样车在三维空间的俯仰和横滚运动,在农田二维平面内应用矢量场法生成目标路径矢量场。矢量场由平行于目标路径的矢量场与垂直于目标路径的矢量场叠加而成。平行方向矢量场每一个矢量与目标路径平行,且矢量大小不随位置变化而变化,用于引导采样车沿目标路径方向行驶;垂直方向矢量场每一个矢量垂直指向目标路径,其大小随着采样车相对于目标路径横向偏差的增大而增大,以确保采样车在运动过程中向目标路径收敛。

矢量场的构建公式可以表示为

$$\begin{cases} V_h = 1 \\ V_v = a \tan(b|d|) \end{cases} \quad (2)$$

式中 V_h ——平行方向矢量场
 V_v ——垂直方向矢量场
 a 、 b ——矢量场参数

叠加后矢量场表示为

$$V_s = V_h + V_v \quad (3)$$

通过调节矢量场参数 a 、 b 可以改变矢量场向目标路径收敛趋势。参数 a 决定采样车向目标路径收敛速度,其取值与采样车行驶速度相关,当行驶速度越大时,为避免超调的发生, a 应越小。参数 b 为横向偏差放大因子,其取值与行驶路况和采样车控制

系统响应性能相关,路况越差或采样车控制系统响应越慢时,矢量场向目标路径收敛的趋势应越平缓, b 应越小。

2.3.2 矢量场航向偏差控制器设计

利用矢量场法可以在目标路径周围任意点生成指向目标路径的矢量,该矢量方向即为采样车在该点处的期望航向角。如图 7 所示,建立基于矢量场法的采样车航向偏差模型,已知某点处平行方向矢量为 V_1 ,垂直方向矢量为 V_2 ,叠加矢量为 V ,采样车在该点处期望航向角计算公式为

$$\theta_a = \theta_d - \arctan(\|V_2\|_2 / \|V_1\|_2) = \theta_d - \arctan(\tan(b|d|)) \quad (4)$$

式中 θ_a ——采样车期望航向角, ($^\circ$)

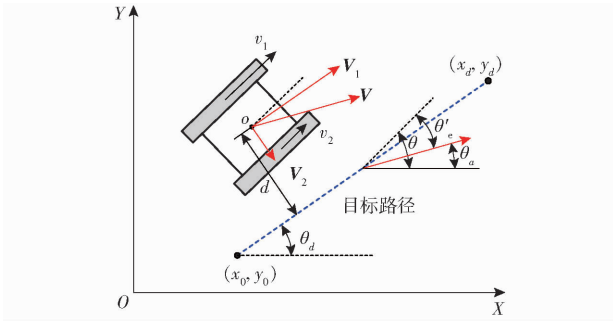


图 7 矢量场航向偏差模型

Fig. 7 Vector field heading deviation model

在该点处相对于叠加矢量 V 的航向偏差为

$$\theta'_e = \theta - \theta_a \quad (5)$$

式中 θ'_e ——采样车航向偏差, ($^\circ$)

针对航向偏差 θ'_e , 采用 PID 控制器对采样车的转向角度进行设计, 可得采样车转向角度控制量计算公式为

$$\delta_{pid}(t) = k_p \theta'_e(t) + k_i \int \theta'_e(t) dt + k_d \frac{d\theta'_e(t)}{dt} \quad (6)$$

式中 δ_{pid} ——采样车转向角度控制量, ($^\circ$)

k_p, k_i, k_d ——控制器参数

为便于编程计算, 将式(6)转换为差分形式

$$\delta_{pid}(k) = \delta_{pid}(k-1) + k_p(\theta'_e(k) - \theta'_e(k-1)) + k_i \theta'_e(k) + k_d(\theta'_e(k) - 2\theta'_e(k-1) + \theta'_e(k-2)) \quad (7)$$

式中 $\delta_{pid}(k-1)$ —— $k-1$ 时刻转向角度控制量, ($^\circ$)

$\theta'_e(k)$ —— k 时刻航向偏差, ($^\circ$)

$\theta'_e(k-1)$ —— $k-1$ 时刻航向偏差, ($^\circ$)

$\theta'_e(k-2)$ —— $k-2$ 时刻航向偏差, ($^\circ$)

2.3.3 虚拟转向角模型

基于矢量场法设计的采样车点跟踪控制输入量为采样车的转向角度, 而实际履带底盘控制输入量为两侧履带驱动电机的转速。由于履带底盘的转向

需要通过两侧履带差速来实现, 因此需要建立理论控制量与实际履带底盘控制量之间的对应关系。本文引入虚拟转向角概念, 将履带底盘差速转向模型近似为轮式底盘转向模型, 如图 8 所示, 其中点 C 为履带底盘转向中心, 履带接地长度 L 近似为轮式底盘轴距, 履带轨距 B 近似为轮式底盘轮距。履带底盘差速转向过程中, 转向中心位于两侧履带接地中心点的延长线上, 忽略内外侧履带的滑移滑转, 转向半径计算公式为

$$R = vB / (v_1 - v_2) = vB / \Delta v \quad (8)$$

式中 R ——履带底盘转向半径, m

Δv ——高速侧履带与低速侧履带线速度之差, m/s

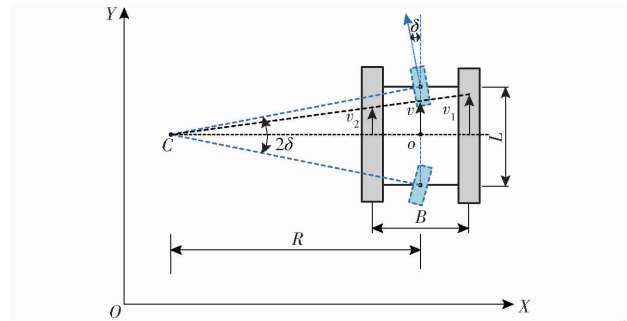


图 8 虚拟转向角模型

Fig. 8 Virtual steering angle model

当虚拟轮式底盘转向模型转向半径为 R 时, 其前后轮协同转向所需的转向角控制输入为

$$\delta = \arctan(L / (2R)) \quad (9)$$

式中 δ ——虚拟轮式底盘转向角, ($^\circ$)

结合式(8)可得履带底盘两侧速度差 Δv 与虚拟转向角 δ 的关系式为

$$\delta = \arctan(\Delta v L / (2vB)) \quad (10)$$

结合矢量场航向偏差 PID 控制器, 可得实际输出至采样车控制量为

$$\Delta v = 2vB \tan \delta_{pid} / L \quad (11)$$

3 田间试验

3.1 试验方案

为了验证所设计的农田土壤采样车点跟踪自动取土控制系统性能, 于 2024 年 3 月在华中农业大学校内试验田进行了田间试验。所选取的试验田为已旋耕未播种的田块, 土壤湿度较大, 含水率为 22.45%, 且田块表面分布有细碎土块, 平整度较差。试验共分为 3 部分, 前两部分为点跟踪控制算法的上线性能试验与连续点跟踪试验, 第 3 部分为土壤采样装置性能试验。在试验田内设计 1 条 S 形采样路径, 沿路径均匀生成 18 个采样目标点, 采样点的位置分布及顺序如图 9 所示, 各采样点间距 9.6 m。

在上线性能试验中,将采样车置于目标点 7 附近,设置初始横向偏差与航向偏差分别为 2 m 与 0°,控制采样车分别以行驶速度 0.3、0.6、0.9 m/s 跟踪下一目标点,测试所设计的点跟踪控制算法的纠偏能力。在连续点跟踪试验中,将采样车置于目标点 1 处,控制采样车分别以行驶速度 0.3、0.6、0.9 m/s 连续跟踪第 2~18 个目标点。

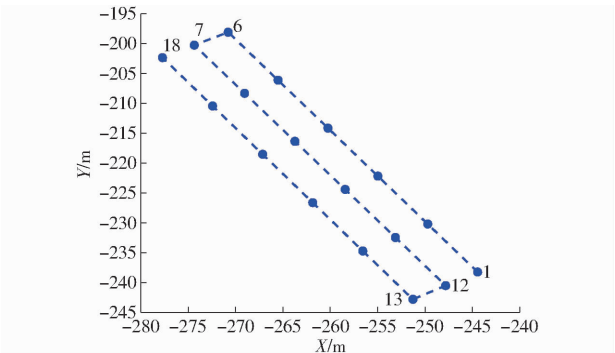


图 9 采样点位置分布
Fig. 9 Distribution of sampling points locations

在进行上线性能试验与连续点跟踪试验前,通过预试验确定点跟踪控制算法的矢量场参数与 PID 控制器参数。通过观察采样车上线过程中相对于目标路径的振荡幅度以及上线速度,逐步调节各参数至合理范围。经测试,当采样车行驶速度为 0.3、0.6、0.9 m/s 时,矢量场参数 (a , b) 分别设置为 (1.2, 2.5)、(0.6, 2.5)、(0.4, 2.5), 且 (k_p , k_i , k_d) 设置为 (2.7, 0, 0.04) 时,采样车能够以较小的振荡

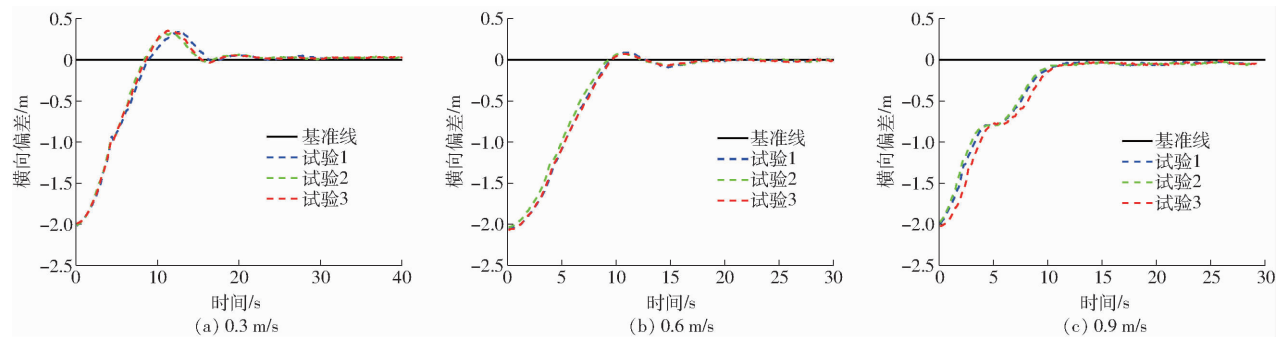


图 10 不同行驶速度下上线过程横向偏差

Fig. 10 Lateral deviations of on-line processes at different driving speeds

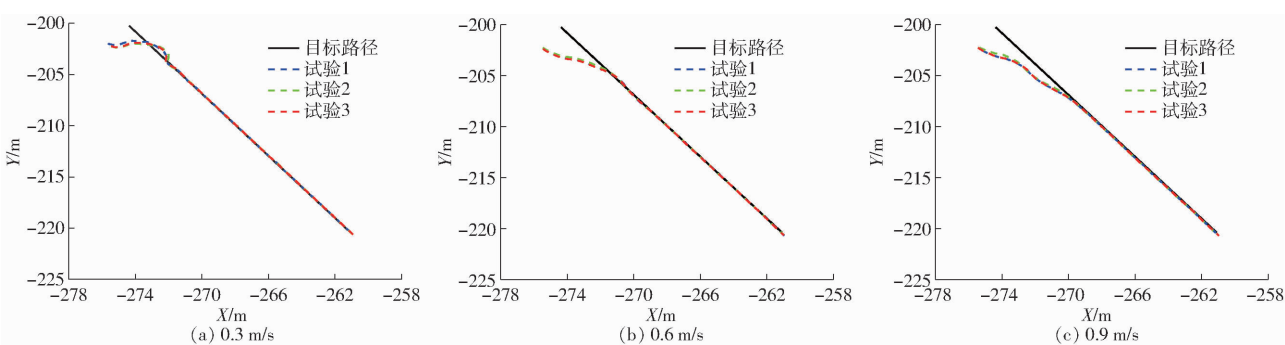


图 11 不同行驶速度下运动轨迹

Fig. 11 Trajectories at different driving speeds

快速收敛至目标路径。其次,为了实现采样车快速跟踪至各目标点稳定停下,对点跟踪过程的停止条件进行了测试。考虑导航模块定位精度、试验田地条件以及采样车履带底盘的惯性与电机响应性能,经测试,当停止条件设置为 $e \leq 0.05$ m 时,采样车能够以较小的误差停止在各目标点处。

试验第 3 部分对土壤采样装置的取土与收集功能进行测试。在试验田内随机选取 18 个采样点进行土壤样本自动采集,设置 3 个采样深度 10、15、20 cm,以采样耗时和样本质量为指标对土壤采样装置工作稳定性进行评价。

3.2 上线性能试验

为了验证点跟踪控制算法的纠偏能力,将采样车置于偏离采样目标点 7 约 2 m 的位置,设定初始航向偏差为 0°,使其分别以速度 0.3、0.6、0.9 m/s 跟踪下一目标点,每组速度重复试验 3 次,测试采样车的上线时间、上线距离与上线后路径跟踪精度。设定上线要求为采样车相对于目标路径的横向偏差调整至 ± 5 cm 范围内,定义上线距离为上线时间与行驶速度乘积。

图 10、11 分别为采样车 3 种速度下的横向偏差变化与跟踪轨迹,可见采样车 3 种速度下均能实现以较小的振荡向目标路径收敛。对上线过程以及上线后采样车的跟踪数据进行统计分析,结果如表 3、4 所示。由表 3 可知,当采样车初始横向偏差为 2 m,初始航向偏差为 0°时,以速度 0.3、0.6、0.9 m/s

表 3 上线性能试验结果

Tab. 3 On-line performance test results			
行驶速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	序号	上线时间/s	上线距离/m
0.3	1	16.2	4.86
	2	16.1	4.83
	3	14.9	4.47
	平均值	15.7	4.72
0.6	1	14.9	8.94
	2	10.6	6.36
	3	10.0	6.00
	平均值	11.8	7.10
0.9	1	11.3	10.70
	2	12.8	11.52
	3	11.7	10.53
	平均值	11.9	10.74

表 4 上线后直线跟踪结果

Tab. 4 Straight-line tracking results after on-line process				
				m
行驶速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	序号	平均绝对横 向偏差	最大绝对横 向偏差	标准差
0.3	1	0.012	0.049	0.016
	2	0.017	0.068	0.023
	3	0.017	0.054	0.023
	平均值	0.015	0.057	0.021
0.6	1	0.029	0.067	0.032
	2	0.031	0.067	0.033
	3	0.031	0.061	0.033
	平均值	0.030	0.065	0.033
0.9	1	0.040	0.067	0.042
	2	0.046	0.068	0.047
	3	0.043	0.067	0.044
	平均值	0.043	0.067	0.044

行驶时上线时间分别为 15.7、11.8、11.9 s, 上线距离分别为 4.72、7.10、10.74 m, 即上线距离随行驶速度的增大而增大。上线后速度 0.3、0.6、0.9 m/s 下采样车平均绝对横向偏差分别为 0.015、0.030、0.043 m; 最大绝对横向偏差分别为 0.057、0.065、0.067 m。试验结果表明, 基于矢量场法设计的采样车点跟踪控制算法具有良好的纠偏性能, 能够快速上线且以较小的横向偏差保持对目标路径的稳定跟踪。

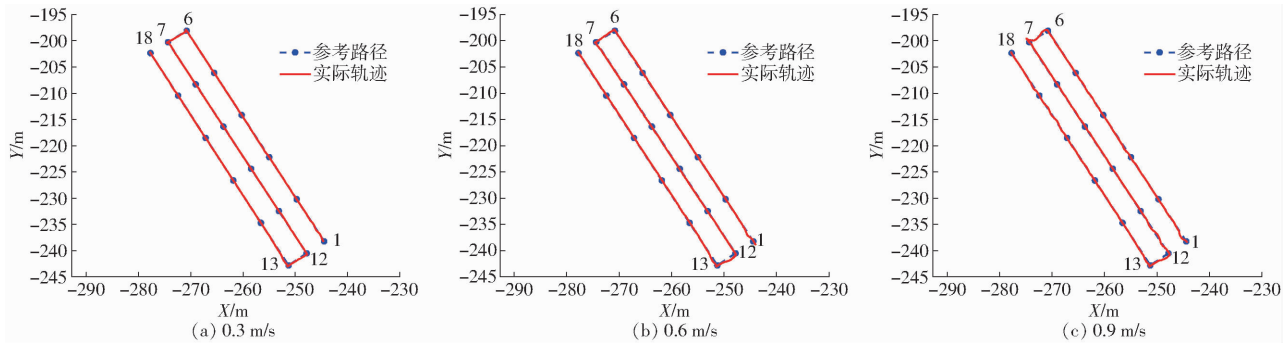


图 12 连续点跟踪轨迹

Fig. 12 Trajectories of continuous point tracking

3.3 连续点跟踪试验

点跟踪算法良好的上线性能可以保证采样车始终以直线前进的方式沿目标路径跟踪至下一目标点。为了验证点跟踪算法对一系列目标点的跟踪效果, 以图 9 中的 18 个目标点为对象进行采样车连续点跟踪试验。试验开始前将采样车置于目标点 1 处, 初始横向偏差与航向偏差均为零。根据本文设计的控制流程, 采样车在目标点 6、7、12、13 处为直角转弯, 初始航向偏差大于 60°, 需先进行倒车调整。试验过程中, 考虑到土壤采样装置的采样耗时较长, 在采样车跟踪至各目标点后, 控制程序以暂停 2 s 来代替土壤采样装置作业过程。

图 12 为采样车以 3 种速度 0.3、0.6、0.9 m/s 进行连续点跟踪的实际运动轨迹。由图 12 可知, 3 种速度下, 采样车均能沿目标路径稳定跟踪至各目标点。由于采样车在执行原地转向时, 内外侧履带存在不同程度的滑移滑转, 转向中心难以准确测量, 导致采样车执行原地转向后产生一个较大的横向偏差, 故跟踪下一目标点的过程需要重新上线, 因此数据处理与误差分析过程将原地转向阶段的数据剔除, 只统计采样车沿目标路径上线稳定行驶后的数据。对 3 种速度下采样车的最大绝对横向偏差、平均绝对横向偏差、横向偏差标准差以及采样车实际停止位置相对于各目标点的绝对距离偏差进行统计, 结果如表 5 所示。由表 5 可知, 当采样车以速度 0.3、0.6、0.9 m/s 进行连续点跟踪时, 最大绝对横向偏差分别为 0.081、0.107、0.210 m, 平均绝对横向偏差分别为 0.018、0.022、0.050 m, 标准差分别为 0.026、0.027、0.064 m。采样车跟踪各目标路径的精度与稳定性随着行驶速度的增大有所降低, 这与农机自动导航系统性能试验的一般规律相符^[17,28]。

为评价本文算法的性能, 将本文结果与相关履带底盘路径跟踪文献结果对比, 如表 6 所示。文献[31]针对小型电驱履带底盘在松软田间作业设计了考虑滑移滑转的三输入模糊控制算法, 速度

表 5 连续点跟踪试验结果

Tab. 5 Results of continuous point tracking test m				
行驶速度/ (m·s ⁻¹)	最大绝对横 向偏差	平均绝对横 向偏差	标准差	平均绝对距 离偏差
0.3	0.081	0.018	0.026	0.068
0.6	0.107	0.022	0.027	0.081
0.9	0.210	0.050	0.064	0.141

表 6 路径跟踪试验结果对比

Tab. 6 Comparison of path tracking experimental results m				
算法	行驶速度/ (m·s ⁻¹)	最大绝对横 向偏差	平均绝对横 向偏差	标准差
本文	0.6	0.107	0.022	0.027
文献[31]	0.6	0.120	0.036	0.044
文献[32]	0.5	0.152	0.058	

0.6 m/s 下直线跟踪的最大绝对横向偏差、平均绝对横向偏差、标准差分别为 0.120、0.036、0.044 m，相比较,本文提出的基于矢量场法的控制算法能够实现更高的路径跟踪精度,3 项指标分别提高 10.83%、38.89% 与 38.64%。文献[32]针对小型履带式油菜播种机田间作业设计了免疫 PID 控制器,速度 0.5 m/s 下直线跟踪最大绝对横向偏差与平均绝对横向偏差分别为 0.152 m 与 0.058 m,本文算法精度分别提高 29.61% 与 62.07%。

采样车在 3 种速度下跟踪各目标点的绝对距离偏差平均值分别为 0.068、0.081、0.141 m,即随着行驶速度的增大,采样车对各目标点的跟踪偏差也逐渐增大。这是由于行驶速度越大,采样车横向偏差的波动越大,且由于目前采样车履带底盘没有刹车装置,行驶速度越大惯性越大,导致偏离目标点的程度越大。后续研究可以考虑根据采样车行驶速度与农田地表条件来调整停止条件,并设计减速装置实现采样车平稳降速,进一步提升点跟踪精度。总体上,连续点跟踪试验结果表明本研究设计的点跟踪控制算法能够在不同速度下有效控制农田土壤采样车跟踪一系列采样目标点,可以实现精准的农田土壤采样作业。

3.4 土壤采样装置性能试验

将采样车手动遥控至试验田内随机点,启动土壤采样装置自动完成取样与收集动作,在控制程序中改变三节式电动推杆的运行时间从而调节取样深度,设置采样点 1~6 取样深度为 10 cm,采样点 7~12 取样深度为 15 cm,采样点 13~18 取样深度为 20 cm。每完成 6 个点采样后,将收集机构内箱各分盒取出,对土样进行装袋和称量。每次采样过程由控制程序自动记录采样耗时,采样耗

时设置为从电动推杆下降指令发出至恢复原位为止。

试验过程中,土壤采样装置各机构运行平稳,能够按照控制程序的设定步骤完成采样流程。各采样点的采样耗时与样本质量结果如表 7 所示。由表 7 可知,采样耗时与采样深度成正比,且同一深度下采样耗时一致,说明土壤采样装置各机构能够实现精确控制与配合。由于取样机构由三节式电动推杆驱动,其升降速度固定为 13 mm/s,因此采样耗时较长,当采样深度为 20 cm 时,耗时 106 s,相比采用液压驱动的土壤采样装置效率偏低,后续研究可通过改进取样机构的驱动型式提升采样车的整体作业效率。在 3 种深度下,所收集的土样质量均值分别为 6.69、8.88、13.55 g,标准差分别为 0.476、0.991、1.487 g,表明样本质量波动随着采样深度增大而增大,但整体变异系数不超过 11.12%,表明土壤采样装置作业性能稳定。

表 7 土壤采样装置性能试验结果

Tab. 7 Results of performance test of soil sampling device						
采样深度/cm	采样点 序号	采样 耗时/s	样本 质量/g	平均 值/g	标准 差/g	变异系 数/%
10	1	90	6.10	6.69	0.476	7.12
	2	90	7.20			
	3	90	6.60			
	4	90	6.40			
	5	90	6.53			
	6	90	7.33			
15	7	98	8.50	8.88	0.991	11.12
	8	98	9.93			
	9	98	9.80			
	10	98	7.60			
	11	98	7.97			
	12	98	9.47			
20	13	106	12.97	13.55	1.487	10.97
	14	106	12.17			
	15	106	14.37			
	16	106	12.83			
	17	106	16.20			
	18	106	12.77			

4 结论

- (1)针对电驱履带底盘式农田土壤采样车自主完成农田内指定目标点采样任务,设计了点跟踪自动取土控制系统方案,基于有限状态机方法设计了采样车作业流程控制策略,建立了采样车点跟踪模型,运用矢量场法设计了采样车点跟踪控制算法。
- (2)点跟踪控制算法上线性能试验结果表明,

基于矢量场法设计的采样车点跟踪控制算法具有良好的纠偏性能,采样车能够快速上线且以较小的横向偏差保持对目标路径的稳定跟踪。

(3)连续点跟踪试验结果表明,采样车能够根据所设计的采样流程与点跟踪控制算法实现对一系列采样目标点的准确连续跟踪。当行驶速度为 0.3、0.6、0.9 m/s 时,采样车相对于各目标路径的最大绝对横向偏差分别为 0.081、0.107、0.210 m,平均

绝对横向偏差分别为 0.018、0.022、0.050 m,标准差分别为 0.026、0.027、0.064 m,采样车跟踪各目标点的绝对距离偏差平均值分别为 0.068、0.081、0.141 m。

(4)土壤采样装置性能试验结果表明,土壤采样装置能够实现深度 0~20 cm 自动采样且各机构运行平稳,同一深度下采样耗时一致,样本质量变异系数不超过 11.12%。

参 考 文 献

[1] 张增林,韩萌,韩文霆,等. 农田土壤无线地下传感器网络节点设计与通信试验[J]. 农业机械学报,2021,52(7): 203–212.
ZHANG Zenglin, HAN Meng, HAN Wenting, et al. Design and test of wireless underground sensor network nodes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 203–212. (in Chinese)

[2] 王春梅,占玉林,魏香琴,等. 非均质中低分辨率像元土壤含水量地面采样方法研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版),2016,47(4): 1414–1419.
WANG Chunmei, ZHAN Yulin, WEI Xiangqin, et al. Ground sampling strategy for surface soil moisture in heterogeneous remote sensing pixels[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(4): 1414–1419. (in Chinese)

[3] 周鑫隆,胡开梦,顾凯,等. 植被护坡作用下边坡土壤水分时间稳定性研究[J]. 岩土工程学报,2023,45(11): 2357–2366.
ZHOU Xinlong, HU Kaimeng, GU Kai, et al. Temporal stability of soil moisture under slope protection by vegetation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(11): 2357–2366. (in Chinese)

[4] 刘阳春. 变量配肥施肥精准作业装备关键技术研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2012.
LIU Yangchun. Key technology on variable rate application system[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Science, 2012. (in Chinese)

[5] 贾洪雷,房殿海,刘慧力,等. 车载智能土壤采样系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(11): 292–301,312.
JIA Honglei, FANG Dianhai, LIU Huili, et al. Design and experiment of vehicle-mounted intelligent soil sampling system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 292–301, 312. (in Chinese)

[6] 邵睿,张炜,海江波,等. 农田土壤采样器的改进设计[J]. 农机化研究,2013,35(6): 81–84.
SHAO Rui, ZHANG Wei, HAI Jiangbo, et al. Improved design of soil sampler[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(6): 81–84. (in Chinese)

[7] 刘成良,贡亮,苑进,等. 农业机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农业机械学报,2022,53(7): 1–22,55.
LIU Chengliang, GONG Liang, YUAN Jin, et al. Current status and development trends of agricultural robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 1–22,55. (in Chinese)

[8] 刘成良,林洪振,李彦明,等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J]. 农业机械学报,2020,51(1): 1–18.
LIU Chengliang, LIN Hongzhen, LI Yanming, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 1–18. (in Chinese)

[9] Wintex3000[EB/OL]. (2021–02–12)[2024–07–12]. <https://www.wintexagrousa.com/automatic-soil-samplers/wintex-3000>.

[10] Rogo's Self-driving, Fully Autonomous Soil Sampler Covers 100k Acres in 2019[EB/OL]. (2020–04–24)[2024–07–12]. <https://www.agritechtomorrow.com/news/2020/04/24/rogos-self-driving-fully-autonomous-soil-sampler-covers-100k-acres-in-2019/12125/>.

[11] GORAN K, DAMIR K, MARKO P, et al. Agrobot Lala—an autonomous robotic system for real-time, in-field soil sampling, and analysis of nitrates[J]. Sensors, 2022, 22(11): 4207.

[12] 张凯,刘成良. 车载液压振动式土壤采集装置研究[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版),2010,2(4): 297–301.
ZHANG Kai, LIU Chengliang. Study on vehicle-mounted soil sampling device by hydraulic vibration[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2010, 2(4): 297–301. (in Chinese)

[13] 闫全涛,李丽霞,邱权,等. 小型移动式农业机器人研究现状及发展趋势[J]. 中国农机化学报,2019,40(5): 178–186.
YAN Quantao, LI Lixia, QIU Quan, et al. Research status and development trends of small-mobile agricultural robots[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(5): 178–186. (in Chinese)

[14] 罗锡文,廖娟,胡炼,等. 我国智能农机的研究进展与无人农场的实践[J]. 华南农业大学学报,2021,42(6): 8–17,5.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Research progress of intelligent agricultural machinery and practice of unmanned farm in China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 8–17, 5. (in Chinese)

- [15] 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)
- [16] 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.
YANG Yang, ZHA Jiayi, LI Yankai, et al. Design and experiment of unmanned operation cooperative control system for tractor operating unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 421–429. (in Chinese)
- [17] 何永强,周俊,袁立存. 基于履带式联合收获机转向特性的局部跟踪路径规划[J]. 农业机械学报,2022,53(11): 13–21.
HE Yongqiang, ZHOU Jun, YUAN Licun. Local tracking path planning based on steering characteristics of crawler-type combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 13–21. (in Chinese)
- [18] 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.
ZHOU Mingkuan, XIA Junfang, ZHENG Kan, et al. Development of rotary straw burying and returning navigation system based on variable-gain single-neuron PID[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(5): 31–40. (in Chinese)
- [19] 景云鹏,刘刚,金志坤. 农田平地机导航侧滑估计与自适应控制方法[J]. 农业机械学报,2020,51(9): 26–33.
JING Yunpeng, LIU Gang, JIN Zhikun. Adaptive guidance control method with sideslip estimation for land leveler pulling by tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 26–33. (in Chinese)
- [20] ZHANG C, GAO G, ZHAO C, et al. Research on 4WS agricultural machine path tracking algorithm based on fuzzy control pure tracking model[J]. Machines, 2022, 10(7): 597.
- [21] 胡杰,钟鑫凯,陈瑞楠,等. 基于模糊 LQR 的智能汽车路径跟踪控制[J]. 汽车工程,2022,44(1): 17–25,43.
HU Jie, ZHONG Xinkai, CHEN Ruinan, et al. Path tracking control of intelligent vehicles based on fuzzy LQR[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(1): 17–25, 43. (in Chinese)
- [22] 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)
- [23] 徐立鸿,陈戎泉,袁洪良. 含斜坡扰动的轮式拖拉机路径跟踪控制方法[J]. 农业机械学报,2023,54(11): 421–430.
XU Lihong, CHEN Rongquan, YUAN Hongliang. Path tracking control method for wheeled tractors with slope disturbance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 421–430. (in Chinese)
- [24] 李丽珍,程松松,樊渊. 基于时变函数的非完整轮式移动机器人的镇定与跟踪控制[J]. 控制与决策,2024,39(9):2932–2940.
LI Lizhen, CHENG Songsong, FAN Yuan. Stabilization and tracking control of nonholonomic wheeled mobile robot based on time-varying function[J]. Control and Decision, 2024, 39(9):2932–2940. (in Chinese)
- [25] 刘志民,孙汉旭,贾庆轩,等. 水下球形探测机器人的有限时间点镇定控制[J]. 机器人,2016,38(5): 569–577.
LIU Zhimin, SUN Hanxu, JIA Qingxuan, et al. Finite-time point stabilization controller for an underwater spherical exploring robot[J]. Robot, 2016, 38(5): 569–577. (in Chinese)
- [26] RABBANI M J, MEMON A Y. Trajectory tracking and stabilization of nonholonomic wheeled mobile robot using recursive integral backstepping control[J]. Electronics, 2021, 10(16): 1992.
- [27] LUO C, ZHANG S, ZHONG J, et al. Design and evaluation of field segmentation, path generation and sequential point tracking algorithms for mobile robots[J]. Journal of the ASABE, 2024, 67(4): 983–993.
- [28] 张朝宇,董万静,熊子庆,等. 履带式油菜播种机模糊自适应纯追踪控制器设计与试验[J]. 农业机械学报,2021, 52(12): 105–114.
ZHANG Chaoyu, DONG Wanjing, XIONG Ziqing, et al. Design and experiment of fuzzy adaptive pure pursuit control of crawler-type rape seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 105–114. (in Chinese)
- [29] 何宇,欧阳子路,邹璐,等. 基于矢量场制导法和模型预测控制的船舶路径跟踪与避碰[J/OL]. 上海交通大学学报, <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.121>.
- [30] 陶江,曹云峰. 低空时变风扰下无人机避障路径跟随控制方法[J/OL]. 北京航空航天大学学报, <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0956>.
- [31] 赵状状,张国忠,罗承铭,等. 考虑滑移滑转的双电机履带底盘路径跟踪算法[J]. 农业工程学报,2024,40(12): 46–54.
ZHAO Zhuangzhuang, ZHANG Guozhong, LUO Chengming, et al. Path tracking algorithm of the dual motor tracked chassis considering skid and slip[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(12): 46–54. (in Chinese)
- [32] 丁幼春,何志博,夏中州,等. 小型履带式油菜播种机导航免疫 PID 控制器设计[J]. 农业工程学报,2019,35(7): 12–20.
DING Youchun, HE Zhibo, XIA Zhongzhou, et al. Design of navigation immune controller of small crawler-type rape seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(7): 12–20. (in Chinese)