DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2024.01.002

小型农田原状土样采集机器人系统研发与测试

闫全涛[1, 2, 3, 4], 李丽霞[2], 邱权[1*], 丛岳[3]

(1. 北京农学院智能科学与工程学院,北京市,100096; 2. 昆明理工大学现代农业工程学院,云南昆明,650500;
3. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心,北京市,100097; 4. 江苏丰尚智能科技有限公司,江苏扬州,225100)

摘要:农业机器人是农业机械领域的研究热点之一。国内外对温室/农田/果园作业(除草、施肥、喷药、采摘等)机器人移动平台的研究已取得初步成果,但对农田土样采集机器人移动平台的研究鲜有出现。在土壤的物理力学特性研究过程中,原状土壤样品的采集是一个重要前提。如果土样的原状度无法保障,后期实验室物理力学测试分析难以得出准确的研究结果。本研究针对这一问题,研发了一台结构紧凑、通过性强、取土质量好、取土效率高的农田土壤采集机器人移动平台,给出了机械系统、控制系统设计方案,并开展了初步的田间试验研究。本研究的主要内容如下:(1)机器人移动平台本体设计方面,确定了差速转向的转向方式;进行了机械系统设计,完成了相关硬件选型分析和控制系统设计以及软件编写。移动平台轴距为960 mm、轮距为600 mm,轮毂电机功率1 000 W,实现了基于调速转把和遥控手柄的移动平台协调运动控制,满足试验要求。(2)土样采集装置方面,对分段原状取土装置进行了设计。通过对比分析选用液压传动作为动力源和直压旋入式入土方式。通过理论分析确定了取土器主要技术参数,并对其入土关键部件进行有限元分析,验证了其结构参数设计的合理性。(3)通过田间试验,考察整机的移动性能和取土质量。移动性能测试试验结果表明:最大垂直越障高度80 mm,最大爬坡坡度35°。土样抗剪强度检测试验结果表明:在获取0~200 mm深度土样时,环刀法和新系统所取土样的内摩擦角方差在0.05的置信水平下,P值等于0.866;在获取0~100 mm和100~200 mm深度土样时,环刀法和取土装置所取土样的凝聚力方差在0.05的置信水平下,P值分别为0.145和0.717。取土效率对比试验结果表明:该取土装置完成一次取土仅需3~5 min。

关键词:农业机器人;移动平台;农田;原状土样;取土器
中图分类号:S24;TP242 **文献标识码**:A **文章编号**:2096-7217(2024)01-0012-11

闫全涛, 李丽霞, 邱权, 丛岳. 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, CONG Yue. 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

0 引言

土壤的力学性质对于作物生长、农机田间作业性能等都有着重要影响。很多研究人员利用装填土或重塑土对土壤物理力学性质进行研究。然而,人为处理的土壤原始结构受到破坏,不能准确反映农田土壤的物理力学特性。付晓莉等[1]对土样的3个变量曲面进行研究对比后发现:通过填装或重塑的方法,很难使土壤的容重达到或者接近其原状土固有的容重。因此,原状土采集对于土壤力学特性研究至关重要。

目前农田原状土样采集装置多种多样,常用的有取土环刀、手持式取土器和车载式取土装置等。取土环刀和手持式取土器加工简单、易于制造,但劳动强度大、取土效率低;车载式取土装置需要使用拖拉机/车辆配套动力源,虽然取土效率有所提高,但整机体积较大,不适合温室、果园等空间狭小场景中的取土作业。从农田原状土样采集装置的整体发展状态来看,结构紧凑、部署灵活、操作简单、高效省力的装置研发尚待突破。

随着我国农业人口萎缩问题的日益凸显,自动化、智能化农机装备研究成为热点。农业机器人作为智能农机的重要组成部分,其发展速度也获得了大幅提升,出现了各种新式农业机器人移动平台,为农田原状土样采集装置的研发提供了新思路。本文开展了引入农

收稿日期:2023-10-20 修回日期:2024-01-04
基金项目:国家自然科学基金项目(61973040)
第一作者:闫全涛,男,1992年生,河南商丘人,硕士,工程师;研究方向为农业移动机器人系统集成。E-mail: 1510257922@qq.com
*通信作者:邱权,男,1982年生,山东荣成人,博士,教授;研究方向为农业移动机器人环境感知、自主导航与灵巧操作。E-mail: qiuquan0110@ustc.edu

业机器人技术解决农田原状土样采集难题的有益尝试，采用有限元分析、电控液压等技术手段，旨在研发一套结构紧凑、部署灵活、操作简便、高效省力的小型农田原状土样采集移动平台。

1　国内外研究现状

1.1　取土装置研究现状

根据取土器的操作动力源不同，现有的取土器大体可分为两类。一种是手动取土器，主要是靠人来提供动力，该类取土器具有结构简单、重量轻、操作携带方便等优点，而且在使用过程中不受地形和能源等条件的限制，是目前应用最多的取土器。但该类取土器取土效率低，不适用于大量取样的场合。另一种是以机械动力作为操作动力源的取土器，主要利用电力、气压、液压和机械直接传动等方式来完成取土作业，该类型取土器大大提高了取土作业效率，成为未来取土器发展的主流方向[2-3]。

西方发达国家为了提高土壤土样的获取效率和土样质量，对取土器的形式、结构、壁厚、材质、刃角、内间隙比等方面作了大量研究，并在机械动力式取土器的研究方面取得了一定成果。HELLBUSCH[4]研制了一种以液压作为动力的取土装置。该装置可与轻型卡车配套使用，内部设有液压马达带动取土器旋转，下端安装有存放土样的土样盒，土样采集后直接存放在土样盒中便于收集。ABU-HAMDEH等[5]设计了一种与拖拉机配套使用的液压驱动式取土装置。该取土装置利用拖拉机自带的液压系统提供动力，不需要外接液压动力单元，能够进行不同深度的土样采集。HUBERS[6]设计了一种车载式液压取土装置。该装置主要依靠两个液压马达提供的动力来完成取土作业，其中第一液压马达以链传动的方式驱动导向装置上下运动，第二液压马达驱动螺纹杆及取土器转动。该装置可以与车载GPS等定位系统配合使用，以记录采样地点坐标。

我国对取土器的研究起步较晚，初期主要以手动取土器研发为主。近年来为了适应农业等领域的需求，我国机械动力式取土装置得到了初步发展。西北农林科技大学王健等[7]研制了一种支架旋转式原状土取土装置。该取土器体积小，组装、拆卸方便，结构简单，造价低廉，便于携带，最深取土深度可达500 mm，并可以根据试验需要，获得不同直径和长度的原状土样。浙江大学何云峰等[8]设计了一种齿轮式取土器。该取土器结构简单，使用方便，通过齿轮和螺旋叶片的配合降低了采样杆入土和出土的阻力，省时省力，实用性强，减小了取土器的破损，提高了取土器的使用寿命。中国农业大学李洪文老师团队[9]设计了一种新型分段原状取土装置。该取土装置主要由分段式原状取土器和土样分离机构组成，兼具有环刀和整体式原状取土器的优点，一次入土即可取得不同土层的多个土样，突破了传统环刀单层取土的思路。南京信息工程大学张凯老师与上海交通大学刘成良老师团队[10]研发了一种车载液压振动式土壤采集装置。该车载土壤采集装置包括动力承载车、支撑油缸、导向支撑架、升降油缸、液压冲击输出端、万向支腿圆盘及支腿油缸等。

1.2　农业机器人移动平台研究现状

对于农业移动机器人来说，移动平台是整个系统的重要组成部分，与机器人的运动能力和可靠性有直接关系，研究人员花费了大量精力用于研发性能优越的农业机器人移动平台。农业机器人平台按移动方式可分为：轨道式、轮式、履带式、足式等，不同移动方式各有优缺点，适用于不同的农业生产应用场景。纵观农业机器人移动平台的发展过程，其早期以“拿来主义”为主，多为商业化或教学科研用移动平台直接用到农业场景，以常规四轮式为主。近10年来，针对农业生产场景特定需求研发的专用移动平台逐步出现。

欧美国家开展农业机器人研究较早，对于移动平台的研发取得了一定的成果。荷兰瓦赫宁根大学研发的除草机器人HortiBot移动平台[11]采用柴油发动机作为动力源，配备四驱独立转向系统，采用GPS导航技术和机器视觉技术导航，能够自主获取作物行的信息，沿作物行间的空隙移动。德国博世公司联合波恩大学研发了BoniRob田间管理机器人[12]，该机器人的移动平台同样使用四驱独立转向系统，但是改为电驱动。四驱独立转向构型的机器人驱动机构设计来源于美国MobileRobots公司推出的科教平台Seekru。为了适应农田高低不平的地面特征，挪威生命科学大学研发了一款低成本高地形适应性移动平台[13]。该平台采用了前后分体构型，两个分体可相对独立的做小幅度横滚摆动，从而适应前后高低不平的地面条件。伊利诺伊大学香槟分校利用3D打印技术研发了一台作物表型信息采集机器人TerraSentia[14]，安装激光雷达传感器，并采用启发式算法实现了机器人在复杂作物行间的自主导航，用于田间玉米信息监测。

国内农业机器人研究起步相对欧美国家较晚，但是近10年来发展迅猛，在农业专用场景移动机器人平台研发方面也取得了较好的成果。中国农业大学杨世胜等[15]针对温室内农药喷洒作业自动化需求，设计出一种磁条导航农用喷雾机器人移动平台。该移动平台采用蓄电池供电，每个车轮由直流电机单独控制，利用左右轮的差速实现转向控制。移动平台的路径导航系统由控制器、诱导信号发生器、诱导线、磁标志、传感器

和遥控器组成。华南农业大学罗锡文院士团队[16]研制出一种农用智能移动机器人作业平台。该平台配备基于GPS和电子罗盘的导航控制系统,通过田间试验验证,该移动平台直线行走时能按预定的路线行走。北京市农林科学院智能装备中心邱权团队[17]研发了转向机四驱构型的农业机器人移动平台。该平台采用了四轮独立驱动,前后轮组利用转向机电机驱动转向的构型,能够在麦田、裸露土地和水泥地上均实现灵活协调转向运动。面向大田玉米表型信息获取场景,邱权团队[18]还研发了超窄移动机器人平台。该平台最大宽度仅45 cm,适应我国常规玉米行距(60~80 cm),而且负载能力达到80 kg。此外,西北农林科技大学、南京农业大学、江苏大学等也开展了相关研究。

2 移动平台与采土装置研发

系统采用了电动移动平台搭载采土装置的一体化系统研发方案。移动平台可通过遥控手柄和转把两种方式进行操控,采土装置采用液压旋进方式进行原状土样采集,采土装置采用了姿态可调设计方案,移动平台行进时装置可倾斜收起,采土作业时装置直立工作,系统集成效果如图1所示。

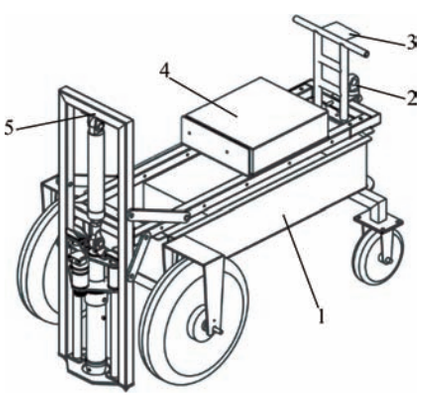


图1 整机机构设计图

Figure 1 Mechanical design of the proposed system

1. 移动平台 2. 支撑腿 3. 电脑终端
4. 液压动力模块 5. 液压分段原状取土装置

2.1 移动平台研发

移动平台的研发工作主要分为机械系统研发和电控系统研发两部分。其中,机械系统研发工作主要包括主体框架设计、支撑转向机构设计、支撑腿机构设计等;电控系统研发工作主要包括电机及车轮选定、电脑终端选定、电机驱动器选定、调速转把选定和电控系统集成等。

2.1.1 机械系统研发

1)主体框架设计。移动平台主体框架由底盘、箱体、扶手等部分组成,主要功能是搭载所有机械和控制系统硬件部分,强度上应满足平台运行时的要求(如降低重心防侧翻),相关参数包括整体尺寸、轴距、前轮距、后轮距等。轴距对整车总长和最小转弯半径都有影响,还会对载荷的分配产生影响。考虑驱动轮的大小和位置以及蓄电池和控制器所占的空间,确定轴距为960 mm,前轮距为600 mm,后轮距为600 mm,底盘离地间隙为290 mm。平台的车架采用钢结构件焊接而成,保证了车体强度。车身总长为轴距和前后车轮半径之和,宽度应保证足够的箱体空间容纳电池等硬件,高度要考虑轮高、车架高和扶手高度等因素。综合考虑相关因素,整车的尺寸确定为1 300 mm×820 mm×880 mm,整体部件分布图如图2。

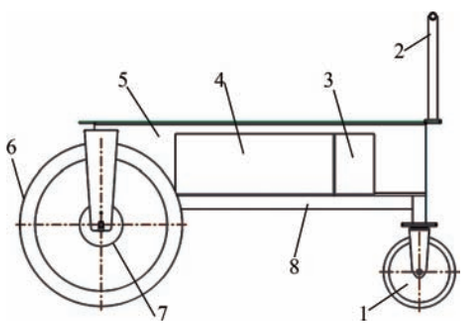


图2 移动平台各部件分布图

Figure 2 Unit distribution diagram of the mobile platform

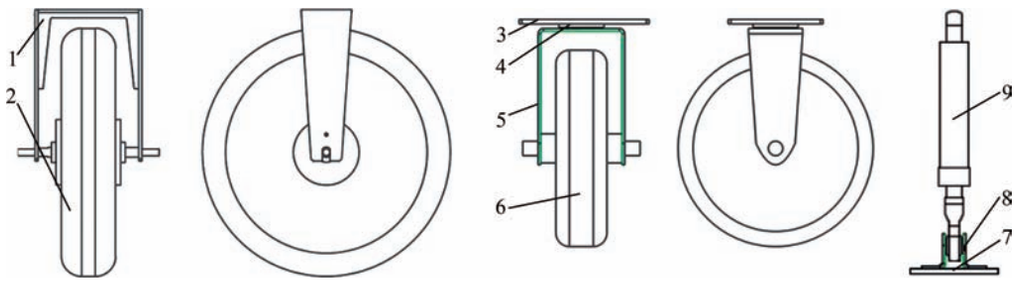
1. 后轮 2. 把手 3. 控制单元 4. 电池 5. 箱体 6. 前轮
7. 轮毂电机 8. 底盘

2)支撑转向机构设计。支撑转向机构是由轮叉和车轮等零件构成的,承受着整车的重量,并辅助完成车体转向。该移动平台采用前轮差速转向、后轮从动转向的模式,由前车轮的速度差驱动牵引车体转向,后轮作为辅助轮运动,这种模式的特点是转向机械结构简单,也是目前常用的转向方式。前后轮结构示意图如图3所示。

3)支撑腿机构设计。为了保证平台在取土采样过程中的稳定性,系统在平台扶手一端(采样装置在平台前端,扶手在平台后端)设置了支撑腿。该支撑腿配备油缸,移动时油缸处于收缩状态,支撑腿收起。当采样装置由非工作状态的倾斜位姿转换为工作状态的直立位姿时,支撑腿放下撑地,增加取土作业稳定性。

2.1.2 电控系统研发

电控系统由电机、驱动器、终端电脑、调速转把和遥控手柄等组成,使土样采集移动平台能够通过手动/遥控两种模式控制,实现前进、后退、转向等运动。遥控手柄先通过Wi-Fi信号将控制指令发送给电脑终端、再由电脑终端传递到驱动器,调速转把通过霍尔通讯线直接与驱动器连接。电控系统整体连接如图4。



(a)前轮结构设计　　(b)后轮结构设计　　(c)支撑腿设计

图 3　支撑转向机构和支撑腿设计示意图

Figure 3　Mechanical design for the supporting steering mechanism and supporting rod

1. 前轮叉　2. 前轮　3. 连接板　4. 滚珠　5. 后轮叉　6. 后轮　7. 支腿圆盘　8. 连接耳　9. 支腿油缸

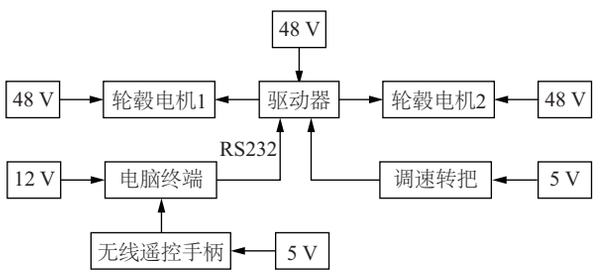


图 4　移动平台电控系统简图

Figure 4　Diagram of the electronic control system for the mobile platform

1)电机及车轮选定。该机器人系统是在复杂农田环境中进行工作。电机和车轮作为移动平台的基础机构,对于系统能否拥有良好的驱动力,能否被简便操控,以及机动性是否足够强等性能表现具有重要的影响。系统采用了四轮前驱动力方案,前轮是驱动轮,使用重量轻、动力强、结构紧凑的直流无刷轮毂电机;后轮是从动轮,采用万向轮,可减小转弯半径。经过滚动阻力及牵引力推算,选定轮毂电机功率为1 000 W,额定电压48 V。

2)电脑终端选定。电脑终端是机器人系统的大脑,负责计算处理和信号收发。本移动采样系统在农田场景下工作,对于电脑终端的稳定性、可靠性、防水防尘性能等提出了较高的要求。因此,系统采用了工业级触屏电脑终端,该产品体积小、稳定性和可靠性高,带有2个RS232串口、2个USB接口和无线Wi-Fi通讯模块,无须外接鼠标键盘即可进行文件管理和命令行操作,能够满足电机驱动控制、遥控器和转把信号传输、液压缸控制等任务要求。

3)电机驱动器选定。系统移动平台有两台大功率无刷直流电机需要通过驱动器进行转向和转速控制,要求驱动器能够支持至少两路驱动信号,且能够胜任大功率、大电流驱动任务。这里选用了双路无刷伺服驱动器,该驱动器具有两路独立的驱动芯片、两路编码器处理芯片和两路霍尔信号处理芯片,最大输出电流75 A,最大输出电压55 V,可以同时控制两台大功率直流无刷轮毂电机。

4)调速转把和遥控手柄选定。本移动平台采用手扶推动转把调速控制和遥控手柄调速控制两种方式。调速转把采用电动自行车通用转把,是一种线性调速部件。系统选用霍尔式电阻调速转把,即通过手动旋转转把,改变霍尔传感器磁场产生调速控制信号,传送给驱动器,由驱动器控制电机转速。本研究中遥控手柄采用Wi-Fi无线传输协议与电脑终端连接,通过电脑终端向驱动器发送控制命令,实现遥控移动平台前进、后退和转向操作,最终选用BT－2185遥控手柄。

电控系统关键部件如图5所示。



(a)电脑终端　　(b)电机驱动器

(c)调速转把　　(d)遥控手柄

图 5　电控系统关键部件

Figure 5　Key components of the electrical control system

5)电控软件集成开发。电控软件集成开发是在Windows操作系统下基于Visual Studio2013/MFC的环境下完成的。MFC是微软基础类库的简称,是微软公司实现的一个C++类库,主要封装了大部分的windows API函数,并且包含一个应用程序框架,从而减少应用程序开发人员工作量。移动平台软件系统采用C++语言进行了相关软件的编写,主要是将驱动器和无线遥控手柄的相关程序集成到上位机软件中进行电机速度控制,实现遥控手柄对移动平台的速度实时控制。

2.2 原状土样采集装置研发

原状土样采集装置是本研究的重要内容,入土方式、取土器等关键因素直接影响到原状土样的采集质量和效率。

2.2.1 入土方式确定

入土方式主要有直压式、重力锤击式和直压旋入式等,入土方式不同,取土器入土需克服土体的阻力及获得土样的质量也不同,表1列出了几种入土方式优缺点的比较情况。

表1 取土器入土方式比较

Table 1 Comparison of different soil sampler insertion mode

入土方式	优点	缺点
直压式	操作简单,不易造成土体压实变形,利于原状土柱的获取及保持	不利于克服土体阻力
重力锤击式	可有效克服土体阻力,能够使用在土质较硬的场合	取土过程中取土器震动较大、运动无规律,易造成土体结构破坏,不利于原状土的获取
直压旋入式	原状土样的质量较高,管靴刃口的旋转切割作用能够有效降低入土阻力	操作方式相对复杂

从表1中可知,直压旋入式的入土方式既能有效克服土体阻力又能保证取土质量,故本装置拟采用直压旋入式作为取土器的入土方式。

2.2.2 原状土样采集装置设计

确定入土方式之后,原状土样采集装置设计成为整个原状土样采集系统的关键。系统采用分段原状土采集方案,动力源确定为液压油缸。原状土样采集装置由导向框架、升降油缸、液压电机、取土滑块、减速齿轮、取土器(包括取土管、内置分段环刀和取土管靴)构成。导向框架通过连接杆连接在移动平台上(框架在平台移动时倾斜放置、在平台静止取土时直立作业),升降油缸与液压马达通过油管与液压泵站连接来获取动力,升降油缸上端铰接在框架上,下端与取土滑块铰接连接,液压马达安装在取土滑块上并通过齿轮传动来驱动取土器旋转。取土作业时,启动液压泵站向升降油缸和液压马达供油,升降油缸和液压马达同时工作实现取土器旋转入土。到达一定的深度后,液压马达停止工作,升降油缸反向动作,使取土滑块沿着滑轨向上移动,从而实现取土器出土,取土管中的土即为所采集的原状土样。

取土装置总体设计图如图6,原状土样采集装置主要技术参数见表2。

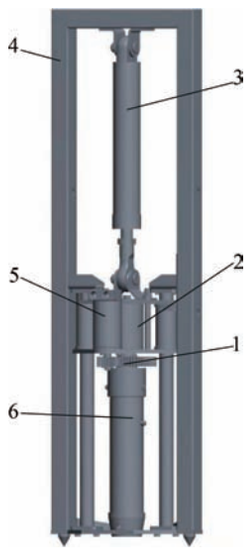


图6 分段原状土样采集装置三维设计图

Figure 6 3D design of the layered undisturbed soil sampling device

1. 减速齿轮 2. 取土滑块 3. 升降油缸 4. 导向框架 5. 液压电机 6. 取土器(取土管、环刀、管靴)

表2 原状土样采集装置主要技术参数

Table 2 Key parameters of the layered undisturbed soil sampling device

技术参数名称	技术参数数值
外观尺寸/(mm×mm×mm)	340×160×1 100
液压电机功率/kW	1.2
减速机构减速比	1:3
升降油缸行程/mm	250
取土深度/mm	0~200
所取土样直径/mm	61.8
整机质量/kg	50

1)内置环刀和取土管规格选定。取土器是原状土样采集装置的核心部件,由取土管、内置环刀和取土管靴构成。根据现有直剪仪剪切盒尺寸,内置环刀选用标准100#无刃环刀,内径d_s为61.8 mm,外径d_t为65 mm,长度20 mm,如图7(b)。由于本系统为小型农田土样采集系统,综合考虑系统总配重和不同取土深度所需的垂直方向压力,确定取土深度为200 mm。根据所取土样深度的要求、取土器上端与取土滑块的连接及取土器出土时下端拉断土柱对所取土样的影响,确定取土管长度L=300 mm,有效长度L_0=200 mm,即每次取土可安装10枚内置环刀、获得10层分段土样。取土管直径的大小,关系到所取土样的质量,若直径过大则贯入阻力增大,若直径过小则所取土样的扰动较大。为了减少土样的扰动,取土管应采用薄壁无缝钢管,同时考虑到取土管的强度要求,壁厚一般选取为1~3 mm。为确保取样后内置环刀能够较容易地取出,内置环刀外壁和取土管内壁要留有

一定的间隙，最终确定取土管外径D_t为70 mm，取土管壁厚为2.2 mm，取土管内径D_s为65.6 mm。

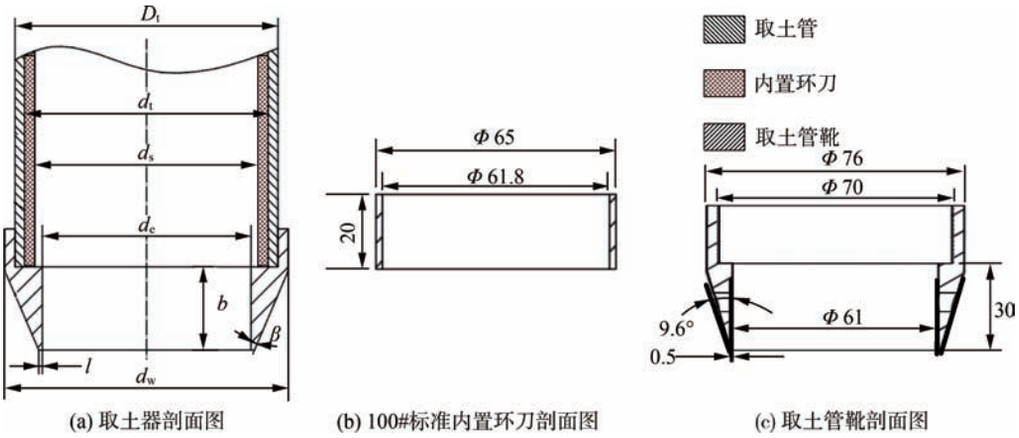


图7　取土器关键单元剖面图

Figure 7　Sectional views of the key units of the soil sampler

2)取土管靴结构设计。在取土作业过程中，取土管靴是最先入土的关键部件，不但起到切削土壤、减小入土阻力的作用，而且对土样质量的影响较大。取土管靴的主要技术参数包括刃口宽度l，取土管靴高度b，取土管靴刃口角β，取土管靴外径d_w，取土管靴内径d_e，如图7(a)。

刃口宽度l是影响取土器入土阻力的一个重要技术参数。一般来讲，刃口宽度越小，入土阻力就越小，但越易发生迸裂和变形。张力群通过总结前人研究成果，确定刃口宽度l应取0.4～0.6 mm为宜[19]，本研究中刃口宽度l设计为0.5 mm。

取土管靴刃口角度大小在取土作业中对所取土样的质量影响很大。张剑锋等[20]用多种不同型式的活塞取土器进行反复试验，得出当取土管靴刃口角度小于10°时，无侧限抗压强度达90%以上，因而系统取土管靴刃口角度确定为9.6°。

取土管靴高度b的大小会影响刃口宽度l和刃口角β的值，取土管靴高度b不宜过大，过大则取土器所受摩擦阻力增加，b的适宜范围为20～30 mm。通过计算，l=0.5 mm、β<10°时，可取b=30 mm。

取土管靴内径d_e取决于内置环刀内径d_s，它应该小于或等于d_s的大小。同时，取土管靴内径和内置环刀内径还要满足内间隙比的要求[21]。内间隙比

$$C_i=\frac{d_s-d_e}{d_e}\times 100\% \tag{1}$$

取土器内间隙的存在可有效减小土样与内置环刀内壁摩擦引起的扰动，提高取土质量；但内间隙比过大则会增加土样的扰动，内间隙比一般取0.5%～1.5%为宜。根据式(1)可以计算出取土管靴内径取值为60.9 mm<d_e<61.4 mm，圆整尺寸后，取d_e=61 mm。

取土器外间隙能够减小取土器外壁和土体之间的接触面积，从而减小取土器入土的阻力。对于一般黏性土，外间隙比取1%～2%为宜。外间隙比

$$C_o=\frac{d_w-D_t}{D_t}\times 100\% \tag{2}$$

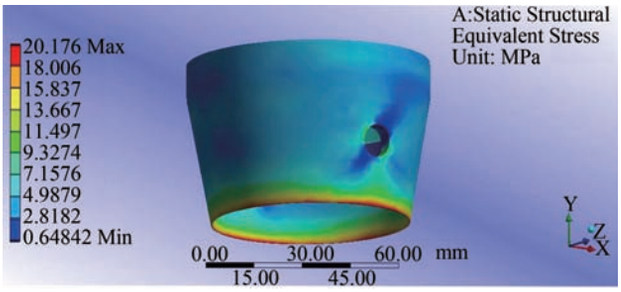
已知取土管外径D_t为70 mm，根据式(2)可以计算出取土管靴外径最大值为71.4 mm。由于取土管靴和取土管之间是通过螺纹外包连接，需在取土管靴内壁加工内螺纹，且取土管靴内还需要加工放置内置环刀的圆周台阶，为保证取土管靴的强度，最终确定取土管靴外径d_w为76 mm。

综合以上对取土管靴技术参数的分析，其最终结构尺寸如图7(c)所示。

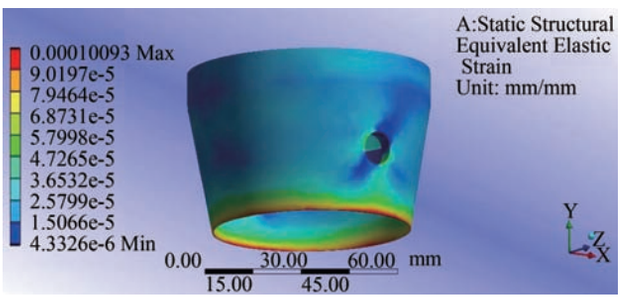
3)取土管靴有限元分析。取土管靴是最先入土的关键部件，刃口处易发生迸裂和变形，其强度应满足使用要求。为检验其强度是否可靠，通过ProE2.0建立取土管靴三维实体模型，将模型导入ANSYS中进行有限元分析。根据设计要求，取土管靴和取土管选用的材料钢为45#钢，材料的性能参数：弹性模量2.1×10^5 MPa，泊松比0.31，密度7.85×10^5 kg/cm^3。使用Meshing工具进行网格自动化分，共生成离散单元1 531个。参照取土器受力分析对取土管靴设置约束和载荷，将取土管靴上端固定，下端施加入土阻力，分析求得等效应力图、等效应变图和总变形图如图8所示。

通过对取土管靴进行应力和应变分析，可以看出管靴刃口处所受应力最大，且最大应力约为20 MPa，远小于取土管靴加工材料45#钢的屈服极限。

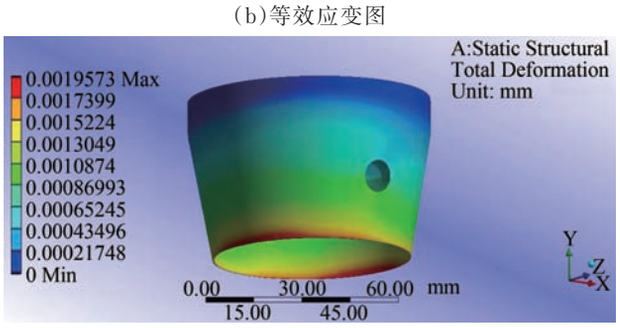
由总变形图可以看出，管靴在刃口处的变形最大，在实际取土作业中，该变形量可以忽略不计。综上，该取土管靴设计可以满足要求。



(a)等效应力图



(b)等效应变图



(c)总变形图

图 8 取土管靴有限元分析结果

Figure 8 Finite element analysis results of the soil sampling pipe shoe

3 原状土样采集移动机器人系统性能测试

3.1 取土作业过程测试

进行取土作业包括 6 个步骤:第 1 步,启动移动平台,将整机移动到待取样区域;第 2 步,向下转动导向框架使取土装置翻转至移动平台前端、导向框架与地面垂直;第 3 步,启动液压泵站,支腿圆盘在支腿油缸的驱动下支撑在地面上,并使移动平台保持水平;第 4 步,启动升降油缸和液压电机以驱动取土器向下旋转入土,至取土器到达土壤指定深度;第 5 步,关闭液压电机,同时升降油缸驱动取土器向上移动至取土器的底端露出地面;第 6 步,将内置环刀从取土器中取出,完成土样采集。取土器取土作业过程如图 9 所示。

取土效率方面:环刀法取土需要先在田间挖出土壤剖面,然后按剖面的层次分层取样。用标准 100#环刀采集 200 mm 深度土样需要进行 10 次重复取土,约需 15~20 min,取土过程复杂、操作人员劳动强度大、效率低;用手持式取土器进行取土作业,虽然避免了重复取土,但在土质较硬的地块取土器入土困难,需要利用重物进行击打,且土样与取土器分离也比较困难。实测用手持式取土器采集 200 mm 深度土样约需 8~10 min;新系统采集 200 mm 深度土样只需 3~5 min,与环刀法和手持式取土器相比取土效率大大提高,且降低了取土劳动强度。



(a)入土起始位置



(b)入土终止位置



(c)出土终止位置

图 9 取土器取土作业过程

Figure 9 Operation process of the soil sampler

3.2 平台移动性能测试

土样采集移动机器人平台的工作场景是复杂的农田环境,其最大特点就是土质松软、地形高低不平,且田垄、杂草等障碍物多,对平台移动性能有着很高的要求。试验中选取田垄较高土质松软的麦田地、坑洼较多且未耕整的玉米茬地、杂草坡道以及沙石路面等农田地面场景,对平台移动性能进行了测试,如图 10 所示。



(a)麦田地面



(b)玉米茬地面



(c)杂草坡道



(d)沙石地面

图 10 平台移动性能测试

Figure 10 Mobility test of the platform

测试表明,虽然在沙石路面偶尔打滑、在坑洼路面偶尔后轮悬空,移动平台正常行驶受到的影响有限。因此,移动平台能够适应试验中选取的四种复杂农田地面场景。经过测试,移动平台能够通过的最大障碍物垂直高度为 80 mm,最大爬坡坡度约为 35°,跨越最

大坑洼深度为 100 mm。

3.3　平台取土质量检测试验

3.3.1　土样凝聚力与内摩擦角计算获取

为检测平台获取原状土样的质量，我们开展了土样抗剪强度检测试验：在试验地选取 4 个采样点，分别利用环刀法（标准100#环刀）和新研发的取土装置在每个采样点进行 4 次取样操作，取样深度均为 200 mm，然后检测环刀法和取土装置所取土样在不同条件下的抗剪强度，并进行比较分析。试验地位于北京市昌平区小汤山镇国家精准农业研究示范基地内，取样地土壤为壤土或黏土，土壤表层含水率约为 13.7%，土壤容重为 1.83 g/cm^3。

土样凝聚力 c 和土样内摩擦角 φ 是影响土样抗剪强度的两个重要指标。抗剪强度可通过直剪仪剪切试验得到，然后根据库仑定律确定土样的凝聚力和内摩擦角。我们把环刀法所取土样看作标准土样，通过分析对比平台所取土样与标准土样在凝聚力和内摩擦角上的差异，检验取土装置对土样的结构扰动是否显著，即原状程度。

试验用直剪仪为南京土壤仪器厂有限公司生产的 ZJ 型应变控制式直剪仪（四联剪）。该仪器剪切盒土样面积 30 cm^2，高 20 mm，通过仪器上的百分表读数和测力环系数可计算出土样的抗剪强度。将两种取土方式获得的分段土样，分别在直剪仪上加载 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa 压强，获得每个土层的平均抗剪强度如表 3。

表 3　不同深度土样在不同加载下的平均抗剪强度

Table 3　The average shear strength of soil samples at different depths under different loads

取样层数（对应取样深度）	平均抗剪强度/kPa							
	100 kPa 加载		200 kPa 加载		300 kPa 加载		400 kPa 加载	
	环刀法	新系统	环刀法	新系统	环刀法	新系统	环刀法	新系统
一（0～2 cm）	73.6	75.2	121.2	125.9	185.4	171.4	224.6	227.5
二（2～4 cm）	69.0	72.1	111.9	119.4	163.6	167.8	205.7	209.8
三（4～6 cm）	66.0	78.2	101.2	119.7	155.3	187.0	197.8	230.6
四（6～8 cm）	75.9	76.0	129.0	116.3	190.1	182.3	232.1	227.5
五（8～10 cm）	79.8	81.3	130.5	130.5	191.6	190.1	245.7	231.2
六（10～12 cm）	76.7	78.2	123.7	125.7	194.8	186.4	215.0	206.6
七（12～14 cm）	75.3	92.6	136.8	121.2	189.2	187.0	208.7	224.4
八（14～16 cm）	101.2	87.0	135.2	135.4	163.6	183.8	247.7	233.7
九（16～18 cm）	98.3	91.5	132.1	139.9	187.1	183.5	239.8	239.9
十（18～20 cm）	89.0	92.0	139.0	132.1	177.6	179.2	225.9	231.7

从表 3 可知，同一深度土样的抗剪强度随加载的增加而增加，符合库伦定律。分别对环刀法、新系统两种取土方式同一深度的 4 个平均抗剪强度进行线性拟合，拟合曲线如图 11、图 12，拟合方程及精度如表 4。

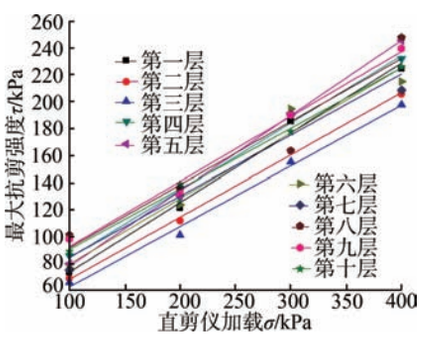


图 11　环刀法所取不同深度土样的剪切特性

Figure 11　Shear properties of soil samples collected by cutting rings at different depths

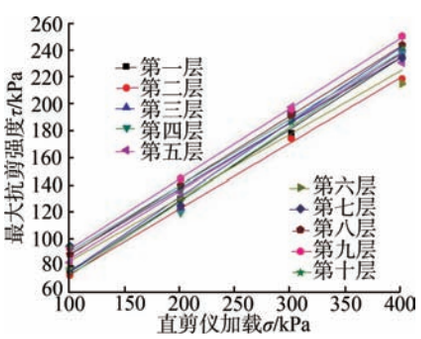


图 12　新系统所取不同深度土样的剪切特性

Figure 12　Shear properties of soil samples collected by the proposed new system at different depths

为了分析新系统所取土样的凝聚力和内摩擦角与标准土样的凝聚力和内摩擦角之间是否存在显著性差异，我们分别对环刀法和新系统两种取样方式所取土样的凝聚力和内摩擦角进行了方差分析。

表 4 两种取土方式所取土样剪切特性拟合方程和拟合精度

Table 4 Fitting functions and accuracies of the shear properties of soil samples collected with two sampling methods

取样层数(取样深度)	环刀法		新系统	
	拟合方程	拟合精度	拟合方程	拟合精度
一(0～2 cm)	$\tau=\sigma\tan27.34^\circ+21.90$	0.98	$\tau=\sigma\tan26.67^\circ+24.40$	0.99
二(2～4 cm)	$\tau=\sigma\tan24.75^\circ+22.10$	0.99	$\tau=\sigma\tan24.77^\circ+26.90$	0.99
三(4～6 cm)	$\tau=\sigma\tan24.18^\circ+17.10$	0.99	$\tau=\sigma\tan27.68^\circ+22.75$	0.98
四(6～8 cm)	$\tau=\sigma\tan27.91^\circ+24.50$	0.99	$\tau=\sigma\tan27.50^\circ+20.40$	0.98
五(8～10 cm)	$\tau=\sigma\tan29.16^\circ+22.20$	0.99	$\tau=\sigma\tan26.98^\circ+30.95$	0.97
六(10～12 cm)	$\tau=\sigma\tan25.92^\circ+31.50$	0.94	$\tau=\sigma\tan24.03^\circ+37.75$	0.95
七(12～14 cm)	$\tau=\sigma\tan24.37^\circ+39.35$	0.93	$\tau=\sigma\tan24.76^\circ+41.00$	0.96
八(14～16 cm)	$\tau=\sigma\tan25.03^\circ+44.95$	0.90	$\tau=\sigma\tan26.04^\circ+37.85$	0.99
九(16～18 cm)	$\tau=\sigma\tan25.73^\circ+44.45$	0.98	$\tau=\sigma\tan23.93^\circ+41.50$	0.99
十(18～20 cm)	$\tau=\sigma\tan24.18^\circ+45.55$	0.99	$\tau=\sigma\tan24.99^\circ+42.40$	0.99

3.3.2 环刀法和新系统所取土样的内摩擦角方差分析

由表 4 可知,两种取土方式所取土样的内摩擦角随深度的变化不大,进行方差分析时可忽略深度对土样内摩擦角的影响。由表 5 可知,环刀法和取土装置所取土样的内摩擦角方差,在 0.05 的置信水平下,F=0.029,小于 $Fcrit$=4.413,即两种取土方式所取土样的内摩擦角没有显著性差异。

表 5 两种取土方式所取土样的内摩擦角方差分析

Table 5 Variance analysis for the internal friction angle of soil samples collected with two sampling methods

方差来源	平方和 *SS*	自由度 *df*	均方 *MS*	*F*	*P-value*	*Fcrit*
组间	0.073	1	0.073	0.029	0.866	4.413
组内	45.091	18	2.505			
总和	45.164	19				

3.3.3 环刀法和新系统所取土样的凝聚力方差分析

0～100 mm 深度土样凝聚力明显小于 100～200 mm 深度,且 100～200 mm 深度土样凝聚力基本稳定。因此,进行土样凝聚力的方差分析时需要考虑深度的影响,故分别对两种取土方式在 0～100 mm 深度土样凝聚力和 100～200 mm 深度土样凝聚力进行方差分析。由表 6 可知,在获取 0～100 mm 深度土样时,环刀法和新系统所取土样的凝聚力方差,在 0.05 的置信水平下,F=2.611,小于 $Fcrit$=5.317;由表 7 可知,在获取 100～200 mm 深度土样时,环刀法和新系统所取土样的凝聚力方差,在 0.05 的置信水平下,F=0.141 同样小于 $Fcrit$=5.317。即在获取 0～200 mm 深度土样时,两种取土方式所取土样的内聚力没有显著性差异。总结来说,在获取土壤 0～200 mm 深度土样的剪切特性时,新系统可替代环刀法完成土样的采集工作。

表 6 两种取土方式所取 0~100 mm 深度土样的凝聚力方差分析

Table 6 Variance analysis for the cohesion of soil samples at depth 0－100 mm collected with two sampling methods

方差来源	平方和 *SS*	自由度 *df*	均方 *MS*	*F*	*P-value*	*Fcrit*
组间	30.976	1	30.976	2.611	0.145	5.317
组内	94.915	18	11.864			
总和	125.891	19				

表 7 两种取土方式所取 100~200 mm 深度土样的凝聚力方差分析

Table 7 Variance analysis for the cohesion of soil samples at depth 100－200 mm collected with two sampling methods

方差来源	平方和 *SS*	自由度 *df*	均方 *MS*	*F*	*P-value*	*Fcrit*
组间	2.809	1	2.809	0.141	0.717	5.317
组内	159.697	18	19.962			
总和	162.506	19				

4 结论

1)本研究从农田土壤物理特性分析需要原状土样这一问题出发,通过对农业机器人移动平台和取土装置发展现状的分析,提出了利用机器人技术实现农田原状土样采集的新思路,研发了一套结构紧凑、通过性强、取土质量好、取土效率高的农田土壤采集移动机器人系统。本研究完成了机器人移动平台的机械系统和电控系统设计以及软件编写;完成了取土装置的机械结构设计、液压控制系统设计及其与机器人移动平台

的系统集成；通过农田试验验证了整机设计的合理性和有效性。

2）取土器是影响原状土采集质量的核心部件。本研究针对标准100#环刀尺寸，综合考虑取土贯入阻力、入土切削效果、环刀内壁与土壤摩擦扰动、取土器外壁与土体间接触面积等影响因素，对取土管长度和内外径、取土管靴高度、内外径、刃口宽度、刃口角等重要参数进行了测算和选取，并通过有限元分析手段验证了关键参数选取的合理性。农田原状土样采集试验证明，本研究研发的系统在液压旋进入土模式下可获取0～200 mm深度的土样。新系统获取的土样与环刀法获取的土样相比，内摩擦角在0.05的置信水平下，组间均方为0.073，组内均方为2.505，F值为0.029，P=0.866；当获取0～100 mm深度土样时，土样凝聚力在0.05的置信水平下，组间均方为30.976，组内均方为11.864，F值为2.611，P=0.145；当获取100～200 mm深度土样时，土样凝聚力在0.05的置信水平下，组间均方为2.809，组内均方为19.962，F值为0.141，P=0.717。综合分析可以确定，新系统获取的土样与环刀法获取的土样在土壤剪切性能方面没有显著差异，新系统完全可以替代环刀法作为农田原状土样采集手段。

3）该系统已经在北京小汤山、甘肃武威、山东邹平等地开展过实地原状土样采集试验，并取得良好的试验效果。同时，该系统仍然具有较大的改进和提升空间，如通过增加配重提高土样采集深度、通过增加取土器导向框架驱动机构和智能控制算法实现自动化钻土作业等。本系统能够有效提升农田原状土样采集效率和便捷性，从而促进农田土壤物理性状研究发展，对于探明农作物与土壤相互作用机理、改善农机装备农田通过性能等研究工作都具有重要意义。

参　考　文　献

[1] 付晓莉，邵明安，吕殿青．土壤持水特征测定中质量含水量、吸力和容重三者间定量关系Ⅱ．原状土壤[J]．土壤学报，2008，45(1)：50－55.
FU Xiaoli，SHAO Ming′an，LÜ Dianqing. Quantitative relationship between mass water content，pressure head and bulk density in determination of soil water retention characteristics II. undisturbed soils [J]. Acta Pedologica Sinica，2008，45(1)：50－55.

[2] 杨建立．农业用机动取土器的研制与失效分析[D]．郑州：河南农业大学，2013.
YANG Jianli. Development and failure analysis on motorized soil for agriculture [D]. Zhengzhou：Henan Agricultural University，2013.

[3] 陈亮之，张军．田间取土器的研究进展[J]．机械研究与应用，2016，29(3)：212－213，216.
CHEN Liangzhi，ZHANG Jun. Research progress of the soil sampler [J]. Mechanical Research & Application，2016，29(3)：212－213，216.

[4] HELLBUSCH J A. Under frame mounted soil sampler for light trucks [P]. US：US5076372，1991－12－31.

[5] ABU-HAMDEH N H，AL-JALIL H F. Hydraulically powered soil core sampler and its application to soil density and porosity estimation [J]. Soil & Tillage Research，1999，52(12)：113－120.

[6] HUBERS E. Vehicle mounted soil sampler [P]. US：US6363803，2002－04－02.

[7] 王健，蔡焕杰，陈新明，等．支架旋转式原状土取样器[P]．中国：CN1609583，2005－04－27.

[8] 何云峰，吴靖霆，陈杰，等．一种齿轮式土壤采样器及其采样方法[P]．中国：CN104330280A，2015－02－04.

[9] 周雪青，李洪文，何进，等．土壤容重测定用分段式原状取土器的设计[J]．农业工程学报，2008，24(8)：127－130.
ZHOU Xueqing，LI Hongwen，HE Jin，et al. Design of multi-segment in situ soil sampler testing bulk density [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2008，24(8)：127－130.

[10] 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，2010，2(4)：297－301.

[11] BAKKER T. An autonomous robot for weed control：Design，navigation and control [D]. Wageningen，the Netherlands：Wageningen University，2009.

[12] COUSINS D. Bosch BoniRob robot set to make field work easier for farmers [J]. Farmers Weekly，2015，1052：7.

[13] GRIMSTAD L，CONG D P，PHAN H T，et al. On the design of a low-cost，light-weight，and highly versatile agricultural robot [C]// IEEE International Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts，Shanghai，China，July 8－10，2016：1－6.

[14] ZHANG Z Z，KAYACAN E，THOMPSON B，et al. High precision control and deep learning－based corn stand counting algorithms for agricultural robot [J]. Autonomous Robots，2020，44(7)：1289－1302.

[15] 杨世胜，张宾，于曙风，等．电磁诱导农用喷雾机器人路径导航系统的设计与实现[J]．机器人，2007，29(1)：78－81，87.
YANG Shisheng，ZHANG Bin，YU Shufeng，et al. Design and implementation of the navigation system for an

electromagnetic guided agricultural spraying robot [J]. Robot, 2007, 29(1): 78－81, 87.
[16] 罗锡文, 区颖刚, 赵祚喜, 等. 农用智能移动作业平台模型的研制[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 83－85.
LUO Xiwen, OU Yinggang, ZHAO Zuoxi, et al. Research and development of intelligent flexible chassis for precision farming [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(2): 83－85.
[17] QIU Q, FAN Z Q, MENG Z J, et al. Extended ackerman steering principle for the coordinated movement control of a four wheel drive agricultural mobile robot [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 152: 40－50.
[18] FAN Z Q, SUN N, QIU Q, et al. In situ measuring stem diameters of maize crops with a high-throughput phenoltyping robot[J]. Remote Sensing, 2022, 14(4): 1030.
[19] 张力群. 取土器的合理选用与改进[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2003(3): 33－34.
ZHANG Liqun. Reasonable selection and improvement of soil samplers [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2003(3): 33－34.
[20] 张剑锋, 俞灿明. 关于中国系列薄壁取土器的建议[J]. 上海地质, 1983(4): 19－27, 47.
[21] 刘海刚. 薄壁取土器的技术参数及性能测试[J]. 勘察科学技术, 1989(4): 32－38.

Development and test of a small robotic system for in-field undisturbed soil sampling

YAN Quantao[1, 2, 3, 4], LI Lixia[2], QIU Quan[1*], CONG Yue[3]

(1. *College of Intelligent Science and Engineering*, *Beijing University of Agriculture*, *Beijing* 100096, *China*; 2. *Faclty of Modern Agricultural Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*; 3. *Research Center of Intelligent Equipment*, *Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences*, *Beijing* 100097, *China*; 4. *Famsun Co.*, *Ltd.*, *Yangzhou* 225100, *China*)

Abstract: Agricultural robot is one of the hottest topics in the field of agricultural machineries. Domestic and foreign research on robot mobile platforms for greenhouse/farmland/orchard operations (weeding, fertilization, spraying, picking, etc.) has achieved preliminary results, but mobile robotic system for soil sampling is still seldom found in literatures. Undisturbed soil sampling is an important basis for analyzing soil mechanical properties. If the original state of the soil sample cannot be guaranteed, it will be difficult to obtain accurate research results through subsequent laboratory physical and mechanical testing and analysis. To address this issue, we developed a farmland soil collection robot mobile platform with compact structure, strong pass ability, good soil extraction quality, and high soil extraction efficiency, put forward the design scheme of the mechanical system and control system and carried out preliminary field trial research. The main contents of this research are as follows: First, the design of robotic mobile platform was conducted, by determining differential steering mode, fulfilling mechanical design, selecting hardware components, and building control software framework. The wheelbase and track width of the platform were 960 mm and 600 mm, respectively. The power of the in-wheel motor was 1 000 W. The movement of the platform could be controlled through both speed control knob and remote-control handle. Second, an on-board layer soil sampling equipment was developed, which worked in a hydraulic screw-in mode. The main structure parameters of the sampler were determined based on theoretical analysis, which were validated with a finite element analysis software—ANSYS. Third, field tests were also conducted to test the mobility and soil sampling performances of the robot system. The maximum obstacle crossing height and climbing slope of the robot were 80 mm and 35°, respectively. Based on the shear strength testing results of soil samples in depth 0 to 200 mm, we knew that the internal friction angle of the soil samples, which came from the proposed new system, had no significant differences compared to those coming from cutting ring sampling, with a *P-value* of 0.866 at the confidence level of 0.05. Similarly, for the soil samples in depth 0 to 100 mm and 100 to 200 mm, the variances of soil cohesion from our new system also had no significant differences compared to those from cutting ring sampling, with *P-values* of 0.145 and 0.717 at the confidence level of 0.05, respectively. The soil extraction efficiency comparison test results showed that the soil extraction device only took 3 to 5 minutes to complete one soil extraction.

Keywords: agricultural robot; mobile platform; in-field; undisturbed soil; soil sampler