

植物根系特征与根区土壤水分高通量监测管道机器人研制

颜小飞¹, 王韵博¹, 宋晓波², 向梓薇¹, 杜太生³, 程 强^{2*}

(1. 北京林业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083;
3. 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

摘 要: 研究水分胁迫下的根系特征对于节水农业的发展具有重大意义。针对现有根系观测与土壤水分监测方法难以满足野外条件下根系和根区水分的同步、原位、高通量监测的不足, 该研究研制了一种基于 STM32 芯片的管道机器人系统。系统由管道机器人、数据基站与 PVC 透明管道组成, 通过在土壤中埋设管道机器人系统, 控制机器人搭载的微距相机与土壤水分传感器在巡航时拍摄根系图像, 并获取土壤水分数据。由根系图像识别分割与提取程序对图像进行畸变校正与根系识别, 获取管道方向上植株的根系面积、长度与密度等特征参数。实验室条件下进行相机拍摄效果、图像畸变校正、识别与分割误差及里程轮测距误差测试, 以及土壤水分传感器标定试验。测试结果表明: 1) 管道机器人能够清晰地拍摄到根系图像, 图像畸变校正效果较好, 单个像素点长度和面积分别为 $44\ \mu\text{m}$ 和 $0.002\ \text{mm}^2$, 单张根系图像的拍摄范围为 $14.17\ \text{mm} \times 10.60\ \text{mm}$; 2) 土壤水分传感器输出电压与土壤体积含水率之间呈现良好线性关系, 决定系数 R^2 为 0.990; 3) 自主巡航定位准确度较高, 平均相对误差为 1.47%。在田间条件下进行的根系生长动态监测、根系信息提取、土壤水分监测与电池续航试验表明: 1) 管道机器人系统能够在田间环境下高通量地拍摄根系图像, 监测根系的生长动态, 并进一步提取出根系长度、面积、根面积密度等特征参数; 2) 根区土壤水分监测较为准确, 测量结果与烘干法结果平均相对误差为 2.23%; 3) 在系统初始满电量状态下, 管道机器人系统独立运行时长不少于 7 d, 最大巡航监测距离约为 48 m。本文研制的管道机器人系统可在田间条件下实现根系特征以及根区土壤水分的原位、高通量测量, 为节水灌溉与根系生长研究提供技术支持。

关键词: 机器人; 土壤水分; 图像识别; 根系特征; 高通量

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202401160

中图分类号: S24

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-06-0192-11

颜小飞, 王韵博, 宋晓波, 等. 植物根系特征与根区土壤水分高通量监测管道机器人研制[J]. 农业工程学报, 2024, 40(6): 192-202. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202401160 <http://www.tcsae.org>
YAN Xiaofei, WANG Yunbo, SONG Xiaobo, et al. Development of a pipeline robot for high-throughput monitoring plant root characteristics and soil moisture in root zone[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(6): 192-202. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202401160 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

根是植物吸收水分和养分的重要器官, 根系的分布、长度、密度、面积等生长发育特征是反映根系生产力、生命活力与生长速率的重要参数^[1-3], 植物根系特征的研究对于探索水分胁迫等环境因素对根系生长的影响具有重要意义^[4-6]。同时, 根区土壤中的水分作为根系吸收离子态养分的主要载体, 其分布情况也因根系的向水性而影响着植物的根系分布。因此, 植物根系与根区土壤水分之间形成了根系吸收水分运输养料, 水分分布与水分胁迫显著影响根系分布、生长速率以及发育死亡等特征的关系^[7-9]。可见, 不同水分胁迫程度下根系生长特征的研究将对水分胁迫效益、精准灌溉、发展节水农业提供理论支持, 具有十分重要的意义。

目前植物根系的田间观测法包括挖掘法、土钻法与微根管法^[10-11]。其中, 挖掘法能够简单、直观地反映出根系分布情况, 是最常用的一种植物根系研究方法^[12]。张建英等^[13]使用分层挖掘法, 对核桃树根系进行分层挖掘, 获得了核桃树根系的分布规律。杨一晨等^[14]对比不同方法观测根系的准确性, 认为挖掘法对根系的损伤可达 30%, 并且无法观测根系生长的全过程。土钻法是一种利用铁质根钻对植物根系进行取样观测的研究方法。李鹏等^[15]在黄土高原沟壑区, 对植物根系使用土钻法进行分层取样, 评估了退耕地植被根系的恢复情况。任小通^[16]使用土钻法与微根管法对于干旱区的葡萄根系进行观测, 探究了不同灌水上限的葡萄根系生长特性。土钻法虽然是制取一定容积的土壤-根系样本最为适宜的方法^[17], 但存在难以观测到根系腐烂以及对根系存在一定程度破坏的不足。微根管法作为土壤非破坏性的新型原位根系研究方法^[18-19], 借助于电子技术与图像拍摄技术的发展, 通过微根管中的相机拍摄根系图像^[20-21], 实现根系的长期定位观察, 并通过对图像的计算与分析获取根系的长度、面积与生长速率等信息, 已成为一种较为先进的根系观测方法^[22]。黄韬幸等^[23]使用 CI-600 Digital

收稿日期: 2024-01-20 修订日期: 2024-03-04

基金项目: 国家自然科学基金 (31971576)

作者简介: 颜小飞, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为林业生态信息智能监测。Email: yanxf@bjfu.edu.cn

*通信作者: 程强, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为精细农业先进传感技术与数据分析处理方法。Email: chengqiang@cau.edu.cn

Root Imager 微根管对棉花根系进行观测, 成功获取了棉花根系的数量、单根长度、直径、根表面积等参数。严四英等^[24]利用 AZR-100 微根管对夏玉米根系的生长动态进行连续、定点观测, 并获得根系长度、面积与体积, 探究了干旱后复水对夏玉米根系生长的影响。微根管法的局限性在于设备成本高、单组设备只能实现单一植株根系的监测、人工操作繁琐费时。综上所述, 田间观测法存在无法实现多植株高通量的根系观测、自动化程度不足、人工操作费时费力等缺点。

此外, 线性尺度土壤水分的监测主要通过传感器阵列法、遥感模型法以及移动式土壤水分传感器系统实现。其中, 传感器阵列法是对土壤水分点测量方法的扩展应用。张萌^[25]提出了一种阵列式电容传感器测量土壤水分的方法, 实现了不同剖面土壤水分的测量, 该方法对比频域反射法传感器测量结果的最大绝对误差为 3%。MATTEO 等^[26]提出了一种阵列式土壤水分监测方法, 通过构建网格化的传感器阵列框架, 并基于插值与机器学习的方法复原了区域土壤水分分布情况, 是一种高精度的新型传感器阵列法。但由于传感器阵列法要求的传感器数量较多, 成本高昂, 不利于该方法的推广应用。遥感模型法可以实现广域的土壤水分反演监测。朱燕香等^[27]基于 Sentinel-2A 卫星影像, 使用改进型的 OPTRAM 模型对土壤水分进行反演, 使改进模型与实测 10 cm 土壤水分相关性提高至 0.55。阙艳红等^[28]以夏玉米种植区为目标, 融合无人机多光谱和热红外数据、Sentinel-1A SAR 卫星数据, 对比了不同模型反演土壤水分的区别。然而, 该方法受制于电磁波对土壤的穿透性不足, 无法实现较深层土壤水分的监测。移动式土壤水分传感器系统是一种较为新颖的土壤水分监测方法, 利用移动平台搭载传感器实现土壤水分的大范围监测。GRAVALOS 等^[29]提出一种基于管道式的土壤水分传感器平台系统, 在埋设于土壤中的管道内投放一只安装有轮式底座的土壤水分传感器 Diviner 2000, 底座连接至一个驱动电机, 由驱动电机控制传感器在管道内移动并测量土壤水分。YU 等^[30]设计了一种基于介电法的新型管式土壤水分传感器, 通过电缆连接步进电机与传感器, 使传感器在管道内移动测量土壤水分, 实现了竖直方向上不同深度的土壤水分连续性测量。移动式土壤水分传感器系统具有灵活轻便的特点, 但存在移动平台中传感器的运动必须依赖人工操作、无法自动运行的缺点。

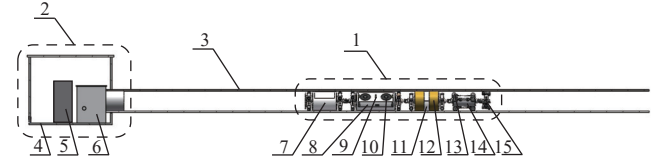
鉴于以上分析, 针对现有野外条件下根系观测方法与土壤水分监测方法的不足, 本文基于 STM32 芯片研制了一种搭载光学相机与土壤水分传感器的管道机器人系统, 用于实现田间条件下植物根系特征与根区土壤水分的高通量、自动化、非破坏性、原位监测。

1 系统结构及工作原理

1.1 系统整体结构设计

本文所研制的植物根系特征与根区土壤水分高通量监测管道机器人系统如图 1 所示, 主要包括管道机器人、

数据基站与 PVC 透明管道三个部分。其中, 管道机器人全长为 505 mm, 外径为 55 mm, 由螺旋行走轮组、电机驱动节、水分监测节、根系拍摄节与电池管理节组成, 各节之间由万向节连接; 数据基站内置大型锂电池和控制盒, 控制盒作为终端来控制管道机器人的状态, 整体尺寸为 130 mm×80 mm×100 mm; PVC 透明管道的外径为 63 mm, 壁厚 4 mm。



1.管道机器人 2.数据基站 3.PVC 透明管道 4.基站保护箱 5.大容量锂电池 6.控制盒 7.电池管理节 8.根系拍摄节 9.LED 闪光灯组 10.微距相机 11.土壤水分监测节 12.水分传感电极铜环 13.测距里程轮 14.电机驱动节 15.螺旋行走轮组
1.Pipeline robot 2.Data base station 3.PVC transparent pipe 4.Base station protection box 5.Large capacity lithium battery 6.Control box 7.Battery management section 8.Root shooting section 9.LED flash group 10.Macro camera 11.Soil moisture monitoring section 12.Moisture sensing electrode copper rings 13.Distance range wheel 14.Motor drive section 15.Spiral walking wheel group

图 1 管道机器人系统结构示意图

Fig.1 Structure diagram of pipeline robot system

1.2 工作原理

1.2.1 土壤水分测量原理

水的相对介电常数（常温下约为 81）远大于干土的相对介电常数（常温下约为 3）与空气的相对介电常数（常温约为 1），因此对土壤相对介电常数的监测可以反映出土壤水分的情况^[31]，故本文选择基于驻波比原理的土壤水分传感器以实现土壤水分的测量。

本文所设计的土壤水分测量电路由有源晶振器、检波器与放大器组成（图 2）。依据传输线原理可知，当传输线阻抗与传感电极阻抗相匹配时，传输线中无反射波，输出电压 U_o 为 0。土壤中水分引起传感电极周围介电常数发生变化后，传感电极阻抗与传输线阻抗不匹配，传输线上会形成反射波，同正向输入的反射波相互叠加而形成驻波，并依据阻抗的不匹配程度影响输出电压 U_o 的大小。同时由于测量频率会对介电常数的测量产生影响，经研究表明，土壤中的盐分在测量频率为 100 MHz 以下时将介电常数的测量产生较大影响，当测量频率为 100~500 MHz 时，其对土壤介电常数的测量影响较小^[32]，故本文选取了 100 MHz 作为测量频率。管道机器人的传感电极由一对铜环构成，其阻抗 Z_p 为：

$$Z_p(\varepsilon) = \frac{Z_0}{U_A - U_B} U_B \quad (1)$$

其中 ε 为土壤相对介电常数， U_A 与 U_B 为检波器输出电压，V； Z_0 为平衡电阻， Ω ；利用放大器产生放大增益 A_f ，对 U_A 与 U_B 的差值进行放大即可得到输出电压 U_o ：

$$U_o = A_f(U_A - U_B) \quad (2)$$

将式 (1) 代入式 (2) 可得：

$$U_o = A_f \frac{Z_0}{Z_p} U_B \quad (3)$$

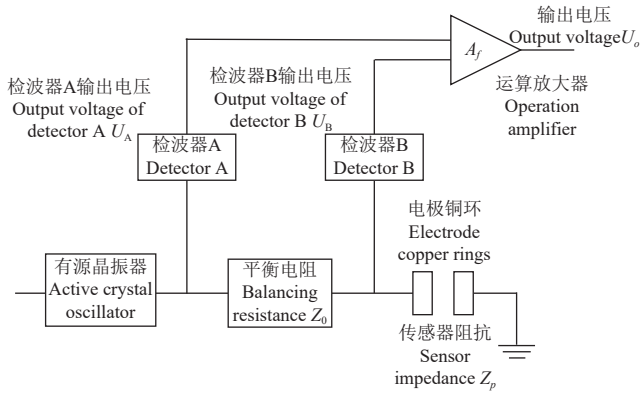


图2 土壤水分测量电路

Fig.2 Circuit for measuring soil water content

可见, 当电极铜环周围的土壤水分含量发生变化时, 将导致传输线阻抗不匹配, 传感器的输出电压 U_o 也将随之变化。

1.2.2 根系图像的识别分割与信息提取程序原理

根系信息的获取需要利用 MATLAB 软件对管道机器人自动巡航拍摄的图像进行处理, 流程如图 3 所示,

步骤包括图像的畸变校正、根系区域的识别与分割、根系特征的提取。

本文中管道机器人系统拍摄图像的畸变主要为相机畸变与管道曲面畸变。其中, 相机畸变方面, 由于镜头加工过程中不可避免的工艺缺陷会造成镜头的不平整与不对称, 使真实成像点与理论成像点之间存在位置偏移, 即产生相机畸变, 故需要对图像进行相机畸变校正。畸变校正主要目标为求解相机的内参数与外参数, 内参数包括相机的光学中心、镜头焦距、径向畸变系数与切向畸变系数; 外参数包括旋转矩阵与平移矩阵。而管道曲面畸变方面, 如图 4 所示, 由于相机拍摄对象为管道外壁的植物根系, 因此管道曲面在相机成像中会对沿管道横截面的根系图像形成曲面压缩畸变, 并且曲面畸变在图像边缘逐渐显著, 故需要对图像进行平面配准校正。平面配准校正拍摄分别处于曲面状态与平面状态的棋盘格图像, 并选取一一对应的 84 对配准点, 根据配准点组的坐标求解配准矩阵。通过配准矩阵对曲面畸变图像几何变换以获得平面配准图像。

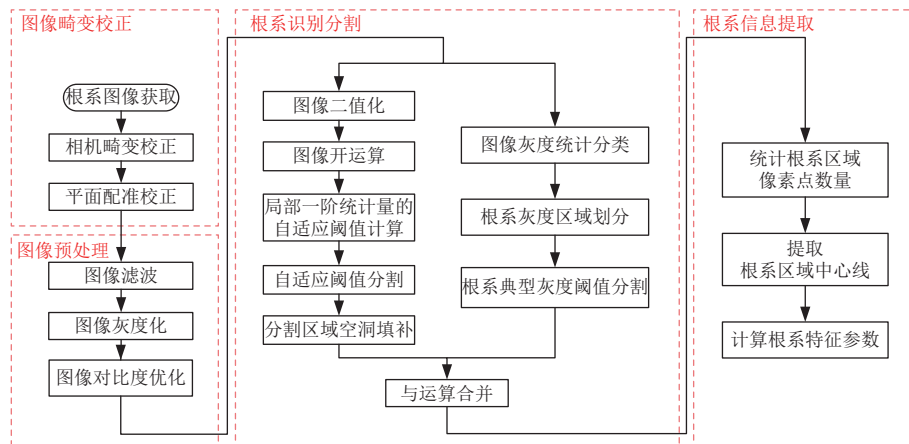


图3 根系图像的信息提取流程

Fig.3 Information extraction process of root image

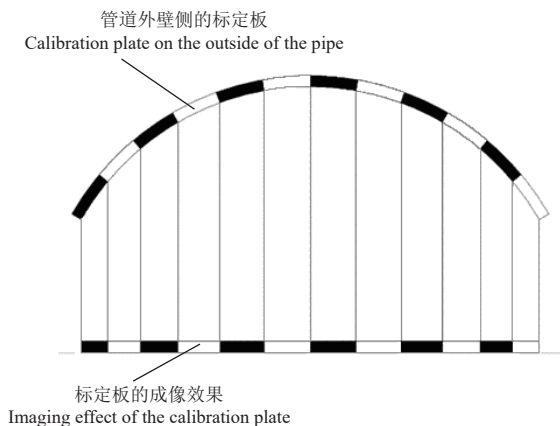


图4 图像曲面畸变误差形成示意图

Fig.4 Schematic diagram of image surface distortion error formation

根系的识别与分割由图像预处理、复合方法识别分割根系两个部分组成。图像预处理是对图像进行滤波处

理、图像灰度化和有限对比度自适应直方图的均衡化处理, 目标为在避免放大图像噪声的同时, 增强和扩展图像的对比度, 使图像中轮廓线更加清晰, 能够对图像的物理特性有更真实的反映。本文设计的图像识别与分割方法分为根系灰度方法和形态特征方法。根系灰度方法的原理为, 利用在灰度图像中根系与土壤存在较明显的灰度值差异的特点, 通过设定根系的灰度阈值, 筛选图像中像素灰度在根系灰度阈值内的像素识别为植物根系并实现分割; 形态特征法的原理为利用植物根系的外形特点通常是相互连通的树状结构, 通过识别图像中有强连通性的区域为根系区域实现根系分割。最终通过对两种方法识别的根系区域做与运算, 筛选出两种方法所识别根系的重叠区域, 以提高识别精度, 消除单一识别分割方法产生的误差。

根系的信息提取首先对图像中的根系识别区域进行像素点数量统计, 获得根系面积像素数; 其次对根系区

域进行中心线提取处理,统计中心线的像素数量为根长像素数。最后结合相机畸变校正所得的像素点长度和面积对根系区域进行计算,获取根系数量、长度、面积、平均直径、区域根长密度与根面积密度等根系特征信息。

2 关键部件设计

2.1 测控系统设计

管道机器人测控系统单元功能如图5所示。到达系统设定的巡航时间后,控制盒内终端控制电路搭载的控制芯片 STM32F103RCT6 通过 Lora 无线模块向管道机器人中土壤水分监测节的 STM32F103RCT6 控制芯片发送巡航指令,管道机器人则不断重复执行单次测量任务,直至到达巡航终点后执行返程任务。

单次测量任务的步骤为“运动-停止-测量-拍摄-传输”。首先,管道机器人前进指定时间,到达新的监测点位。其中,电机转动时长设定为 0.8 s,以保证足够的图像拍摄密度。运动过程中,由土壤水分监测节内控制芯片输出两路脉宽调制信号,经过以 DRV8870 全桥直流电机驱动器为核心的电路转换为电机驱动信号,控制电机带动螺旋行走轮组沿管道方向运动与停止。到达测量点位后,开始执行测量任务,读取土壤水分传感器的输出电压 U_o ,同时根据土壤水分监测节控制芯片内计数器记录的里程轮输出方波数计算里程轮定位信息,确定测量点位置,并将定位信息与 U_o 存储于数据存储卡中;然后,通过串口向根系拍摄节 STM32F407VGT6 控制芯片发送拍摄任务执行指令,控制 LED 闪光灯组点亮,两部 OV7670 微距相机拍摄植物根系图像并存储于图像存储卡中,完成拍摄后关闭闪光灯组,通过串口发送拍摄任务完成应答指令;最后,土壤水分监测节控制芯片通过无线传输模块向基站端发送测量数据并保存至基站端的数据存储卡中,完成单次测量任务。

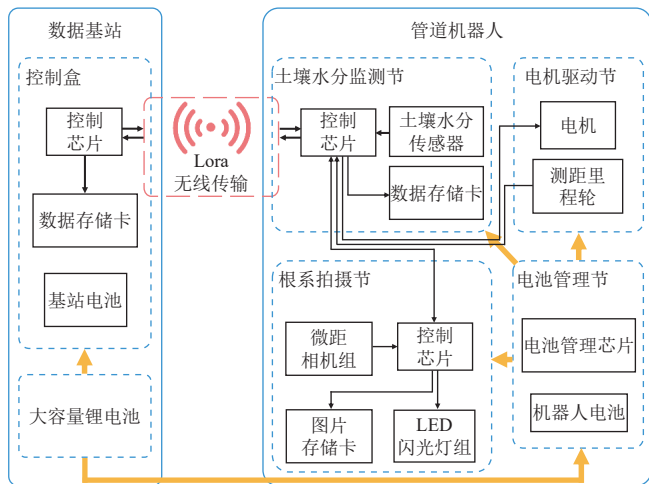


图5 管道机器人测控系统单元功能图

Fig.5 Diagram of pipe robot measurement and control system unit function

巡航任务完成与否以及主动避障功能的实现均由里程轮测距结果与电机的运动情况来综合判定。管道机器

人在巡航过程中,若连续3次执行电机驱动旋转指令后里程轮输出的测距值都不变,则判定此时管道机器人到达终点或遇到障碍,电机执行全速反转指令从而使管道机器人返回基站端。

2.2 行走结构设计

管道机器人的行走结构是机器人在管道内巡航的基础结构,由电机驱动节和螺旋行走轮组构成,两者之间通过万向节连接,安装于管道机器人最前端。

电机驱动节内部搭载了一台步进电机,由土壤水分监测节控制芯片控制其旋转方向,外部轮组中搭载了一只里程轮,为管道机器人提供测距功能。如图6所示,螺旋行走轮组由轮盘和3只装有橡胶轮的轮杆拼装而成,轮杆间夹角为 120° ,橡胶轮轴心与管道方向夹角为 15° 。

在巡航过程中,电机带动螺旋行走轮组按图7所示螺旋线轨迹旋转,从而控制管道机器人的行走。螺旋行走轮组旋转一圈对应的管道机器人行走距离为 46.30 mm。

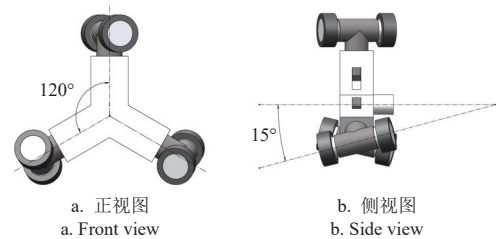


图6 螺旋行走轮组结构示意图

Fig.6 Structure diagram of spiral walking wheel group



图7 管道机器人行走轨迹示意图

Fig.7 Schematic diagram of pipeline robot walking

2.3 电源供应系统设计

稳定的电源供应是管道机器人系统在野外环境下良好运行的保障。本文设计了包含基站端大容量锂电池、机器人与基站内置电池的二级电源供电系统。

在电源供应方面,由一个输出电压为 12 V,容量为 44 800 mAh 大容量锂电池作为管道机器人系统的电源,电池尺寸为 160 mm×82 mm×47 mm,为数据基站与管道机器人充电。其中,管道机器人和大容量电源的连接通过机器人电池管理节末端与基站端的磁吸充电接口的对接实现;基站与管道机器人中各内置一个标称电压为 12.6 V,容量为 1 200 mAh 可充电锂电池,尺寸为 27 mm×30 mm×40 mm,分别为基站的后备电源和管道机器人独立巡航的续航电源。

在电源管理方面,管道机器人和基站中内置了以 CN3763 芯片为核心的充电管理电路与各级电压适配电路,搭建了电池管理电路板,实现管道机器人磁吸接触式充电、内置锂电池充放电管理、调制适配电压的功能。当管道机器人处于休眠状态时,电池管理电路通过磁吸充电接口连接至基站内锂电池,为管道机器人内置电池

充电。当管道机器人处于工作状态时, 由电池管理电路板中各级电压适配电路调制并输出 5 V 与 12 V 电压。其中, 5 V 电压为管道机器人水分监测节和根系拍摄节所需的工作电压, 12 V 电压为电机驱动节所需的工作电压。

3 系统性能测试试验

分别在实验室与田间条件下展开系统性能测试与试验, 以测试管道机器人系统的传感器测量误差与根系图像识别分割提取误差, 以及野外环境下系统的稳定性。

3.1 实验室模拟测试

3.1.1 相机拍摄效果测试

为了测试管道机器人在巡航过程中对植物根系的拍摄效果, 将管道机器人投放于长为 120 cm 的 PVC 透明管道内后, 搭建了图 8 所示的试验箱, 试验箱由透明的亚克力板拼接而成, 大小为 100 cm×30 cm×30 cm。在试验箱两侧面积为 30 cm×30 cm 的亚克力板中心钻孔, 孔的直径与 PVC 管道外径 63 mm 一致, 将管道插入试验箱内连接两侧圆孔, 向试验箱内填入土壤至管道轴心线上方 13 cm 处, 并将两株健康的绿萝等距移植于管道正上方。将管道机器人投放于试验箱的管道内, 控制机器人在管道内巡航拍摄根系图像, 并根据图像效果调节辅助灯组光源亮度, 直至拍摄到清晰的绿萝根系图像。

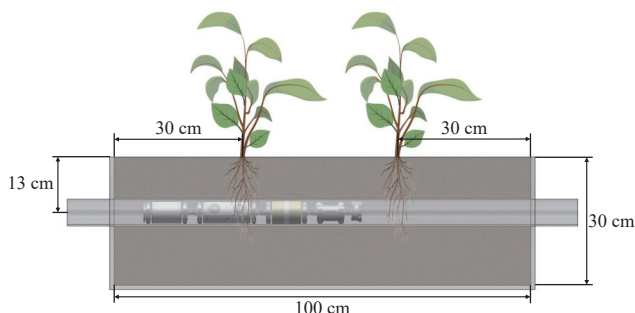


图 8 相机测试试验模型图

Fig.8 Diagram of model for camera test

3.1.2 图像畸变校正测试

在相机畸变校正处理中, 试验利用张正友标定法^[33], 绘制一张单个棋盘格大小为 1.5 mm×1.5 mm 的 5×6 规格棋盘格, 分别控制根系拍摄节的两个相机拍摄 15 张清晰的棋盘格图像, 通过求解相机内、外参数建立相机成像几何模型, 校正透镜畸变。

在管道平面配准校正中, 试验绘制 1.5 mm×1.5 mm 的 10×12 规格棋盘格, 拍摄贴合于管道外侧棋盘格的曲面畸变图像, 以及棋盘格平面与镜头光学中心线垂直的平面校正图像, 此过程中棋盘格与镜头距离保持不变; 然后, 在曲面畸变图像与平面校正图像中选取一一对应的标定点; 最后, 依据标定点坐标求解曲面畸变图像转换至平面校正图像的配准转换矩阵, 实现图像配准校正。

3.1.3 根系识别与分割误差测试

对管道机器人在图 8 所示的试验箱中拍摄的根系图像进行畸变校正后, 利用本文所设计的图像根系识别与分割程序对图像进行处理, 提取图像中的根系特征信息,

并通过管道机器人的定位数据确定图像中根系区域的位置。然后使用挖掘法获取植物根系样本, 对已知位置的植物根系使用小型园艺铲进行挖掘, 并在挖掘区域接近根系拍摄区域后, 使用细毛刷进行更细致的土壤清除工作, 避免对图像拍摄区域的根系产生破坏, 最终获取到拍摄区域的根系样本。使用游标卡尺对根系样本的长度与直径进行测量, 计算根系面积, 比较图像根系识别分割结果与挖掘法测量结果, 得到根系识别分割程序的准确度。

3.1.4 土壤水分传感器标定

为了提高土壤水分传感器的准确度, 需要对管道机器人应用环境中的土壤水分与传感器输出电压进行标定。从田间试验地点进行土壤取样, 首先使用粗筛 (孔径为 6 mm) 筛除土样中的石块与树枝等杂物, 再使用细筛 (孔径为 2 mm) 对土样进行过筛, 将土样置于 105 °C 烘箱内烘干 24 h。

将土样 10 kg 转移至搅拌桶内, 加入 500 g 水并搅拌均匀后, 转移土样至中心安装 PVC 透明管道的标定桶内。测量土壤体积, 并计算质量含水率与土壤容重, 进一步得到土壤的体积含水率。使用保鲜膜覆盖标定桶土壤表面, 控制管道机器人采集 6 次指定体积含水率下的水分传感器输出电压并求平均值, 采集间隔为 30 min。然后取出土壤并再次加入 500 g 水并搅拌均匀, 重新放入标定桶中进行水分测量, 如此反复直至土壤水分趋近于饱和状态, 完成土样的水分标定, 对所获得的土壤体积含水率数据集进行直线拟合, 绘制体积含水率-输出电压曲线。

3.1.5 里程轮测距误差测试

管道机器人电机节搭载的里程轮是管道机器人关键的距离定位器件, 其测距误差会直接影响到根系图像拍摄与水分监测的定位精度, 因此需要对里程轮进行定位精确度测试。

本文选取 250 cm 的 PVC 透明管道, 分别在管道 50、100、150、200 cm 处进行标记。将机器人置于管道中, 多次执行巡航监测任务, 记录管道机器人位于上述各点以及巡航完成返回起点时里程轮的记录值, 并同真实值进行对比, 计算得到里程轮的测距误差。

3.2 田间试验设计

3.2.1 试验地点与种植方案

在甘肃省武威市绿洲农业高效用水国家野外科学观测研究站 (37°52'N, 102°52'E) 对本文研制的管道机器人系统进行田间试验测试。该研究站地处腾格里沙漠边缘, 为典型的大陆性温带干旱沙漠气候区, 常年平均降水量为 164 mm。管道机器人系统设置于大豆-玉米间作的试验田内, 试验田小区长 4.6 m, 宽 4.9 m, 其中玉米品种为先玉 335, 大豆品种为陇黄 3 号。

3.2.2 试验方案

该试验在试验田中预种植区域正下方深度为 15 cm 处设置一组管道机器人系统, 管道铺设长度为 4 m, 系统安装时间为植物播种前 30 d, 以使土壤环境恢复至管

道挖掘安装前的状态, 减小管道挖掘埋设对土壤环境的影响, 安装方案如图9所示。

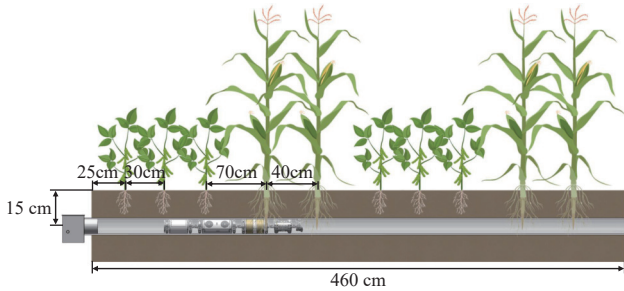


图9 管道机器人系统田间试验安装方案

Fig.9 Installation plan of pipeline robot in test field

管道机器人投放于管道起点处, 数据基站中控制电路依据系统设定时间, 每隔 48 h 通过 Lora 无线通信模块发送巡航监测指令, 管道机器人则进行单次自主避障巡航监测, 实现根系图像拍摄、根区土壤水分监测和数据存储, 并在完成巡航后返回至管道基站端进行充电。

3.2.3 系统电源续航测试

在电池初始状态为满容量的情况下, 分别测试管道机器人系统工作时电源的最长稳定供电时长, 以及管道机器人内置电源在巡航状态下最长稳定供电时长。将满电量状态下的管道机器人系统安装至试验田中, 设置其单次自动巡航间隔时长为 24 h, 统计此方案下机器人系统稳定运行时长。同时测量满电量情况下管道机器人自主巡航的最长稳定供电时长, 并得到管道机器人最大单次可靠巡航距离。

4 结果与分析

4.1 性能测试结果

4.1.1 根系图像拍摄效果

控制管道机器人在实验室搭建的试验箱内执行根系图像拍摄任务, 根据图像拍摄效果进行相机成像模式与辅助闪光灯组亮度调整, 最终获得如图10所示的较为清晰的根系图像。此成像效果下设定图片格式为 RGB555, 分辨率为 320 像素×240 像素的 bmp 图像, 图像宽高比为 4:3。

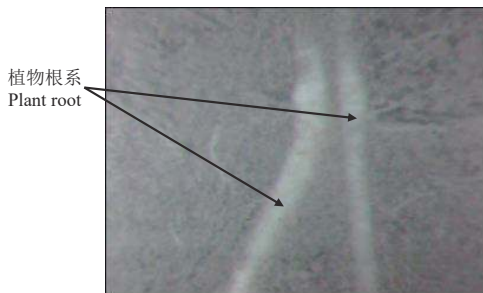


图10 根系拍摄效果测试图像

Fig.10 Test image of root shooting effect

4.1.2 图像畸变校正

在相机畸变校正测试中, 对拍摄的棋盘格原始图像(图11a)利用张氏标定法进行标定, 得到相机内、外

参数矩阵与标定后棋盘格图像(图11b), 根据图像重投影误差对标定效果进行评价(图11c), 所得重投影最大误差为 0.91 像素, 平均误差为 0.50 像素, 相机畸变校正效果理想。

在管道平面配准校正测试中, 通过配准矩阵将曲面畸变图像转换为平面配准图像。如图12所示为根系图像平面配准校正的效果图, 平面配准图像被横向拉伸, 且边缘区域拉伸效果更明显, 以校正边缘区域曲面畸变逐渐严重的情况。对配准校正处理后图像与平面配准图像进行配准点坐标误差分析, 像素坐标点平均误差值为 2.18, 可见平面配准校正效果较为理想。

根据畸变校正与平面配准后图像中像素点数量与棋盘格图像中棋盘真实尺寸的对应, 可以计算得到管道机器人图像中单个像素点对应的真实长度为 $44 \mu\text{m}$, 对应的真实面积为 0.002 mm^2 , 拍摄范围为 150.24 mm^2 。

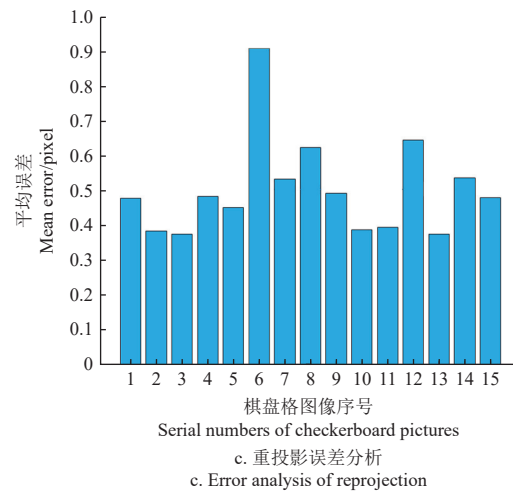
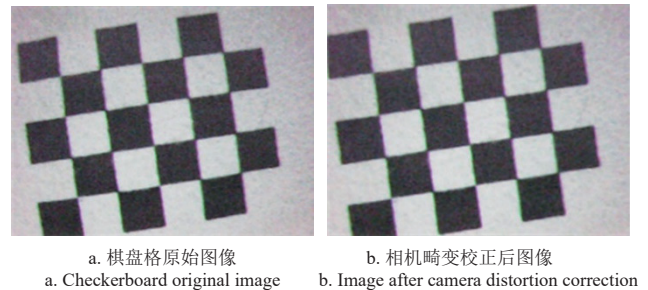


图11 相机畸变校正试验

Fig.11 Camera distortion correction test

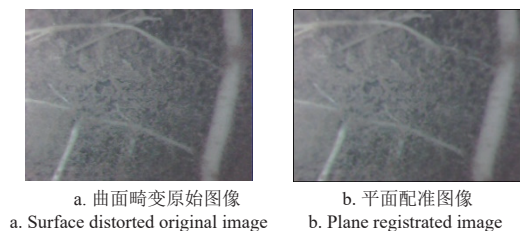


图12 根系图像曲面畸变校正

Fig.12 Surface distortion correction of root image

4.1.3 根系识别与分割误差测试

在图像根系识别与分割精度测试中, 首先利用根系识别分割程序对图10进行处理, 识别结果如图13所示,

提取图中根系特征参数, 然后使用挖掘法获取该区域的根系样本, 并测量根系特征参数, 得到如表 1 所示的图像识别分割与挖掘法测量根系特征结果。对比挖掘法测量的根系特征参数, 根系图像识别分割程序对根系的长度、面积与直径特征信息提取相对误差分别为 12.29%、3.40% 和 12.50%。

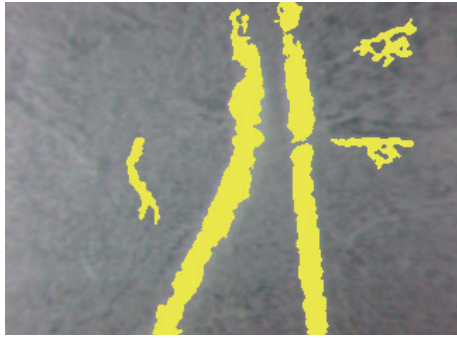


图 13 根系识别分割结果

Fig.13 Result of root recognition and segmentation

表 1 图像识别程序与挖掘法参数对比

Table 1 Comparison of root image recognition and root excavation

根系测量方法 Method of root measurement	根长度 Root length/mm	根面积 Root area/mm ²	平均根直径 Mean root diameter/mm
图像识别分割 Image recognition and segmentation	32.53	17.62	0.54
挖掘法 Excavation method	37.09	18.24	0.48

4.1.4 土壤水分传感器标定

对管道机器人中的土壤水分传感器进行标定, 绘制土壤含水率-传感器输出电压拟合曲线 (图 14), 得到土壤体积含水率 θ_v 与土壤水分传感器输出电压 U_o 的转换式为 $\theta_v=0.81U_o-0.35$, 决定系数 R^2 为 0.990。

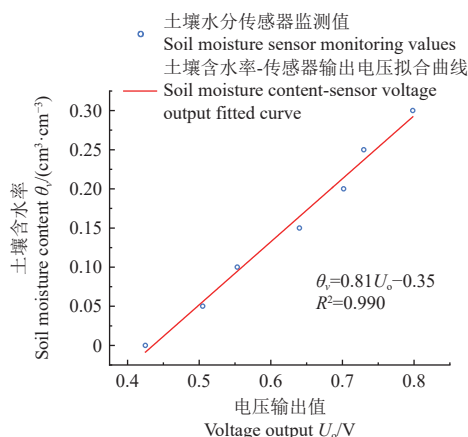


图 14 土壤含水率标定曲线图

Fig.14 Soil moisture calibration curve

4.1.5 里程轮定位误差测试

测试过程中对管道机器人的运动参数进行测量, 测量结果表明, 单次测量任务平均行进距离为 (15.28 ± 1.12) mm, 平均行进速度为 (19.10 ± 1.4) mm/s, 螺旋行走

轮组平均旋转速度为 0.41 r/s。如表 2 所示, 将平均里程轮距离值与真实距离值进行误差分析, 里程轮测距平均相对误差为 1.47%。定位精度较为理想, 能够实现管道机器人巡航过程中的自主定位功能。

表 2 里程轮测距结果

Table 2 Calibration of distance range wheel		cm				
测试序号 Test No.	标定点位置 Positioning distance at the cruise ranging point	50	100	150	200	500
1	50.84	101.42	152.25	203.05	507.44	
2	50.96	101.77	152.65	203.52	508.43	
3	50.53	101.19	151.66	202.28	505.86	
4	50.79	101.57	152.10	202.68	506.75	
平均值 Mean value	50.78	101.49	152.16	202.89	507.12	

4.2 田间试验结果

4.2.1 根系的生长动态监测

通过管道机器人对植物根系的定位巡航拍摄, 得到如图 15 所示的根系生长动态监测图。管道机器人分别于 2023-08-08、2023-08-16、2023-09-12 拍摄到位置为 82.46 cm 处的植物根系图像。图 15a 中展示了正在生长发育的新根; 经过 8 d 的生长, 根系发展出 5 根明显的分支, 根系分布逐渐丰富; 27 d 后, 仅有少量新生根系, 根系逐渐完善。

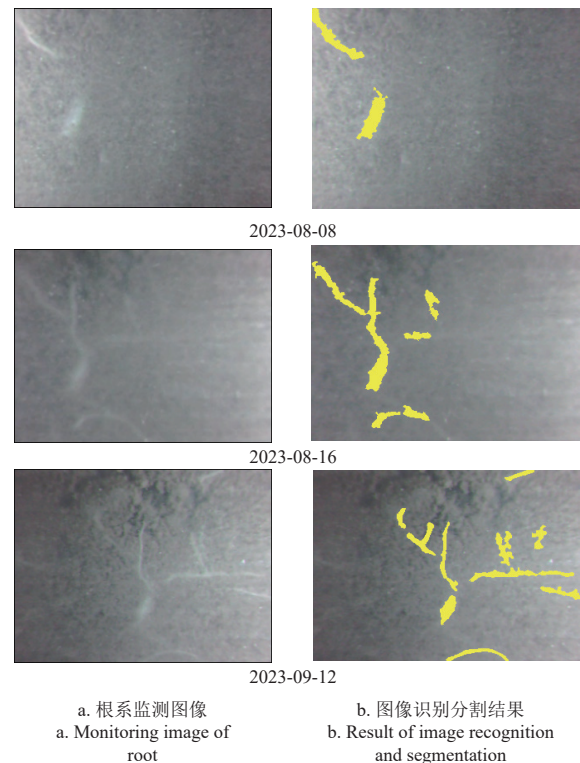


图 15 根系动态监测与识别分割

Fig.15 Dynamic monitoring, identification and segmentation of roots

4.2.2 植物根系信息提取

对经过图像畸变校正的图 15a 进行根系识别分割与信息提取处理, 得到如图 15b 所示的根系分割图像。

表 3 所示为提取图像中根系的面积、长度、平均根系直径与根密度信息, 可观测到此区域植物根系的具体

生长变化。此区域根系自 8 月 8 日至 8 月 16 日共 8d，根系面积增加 3.16 mm²，根长增加 10.12 mm，日均根面积与根长分别增加了 0.40 mm² 与 1.27 mm；而随着植株进入成熟期，该区域根系自 8 月 16 日至 9 月 12 日共 27d，根面积增加了 0.9 mm²，根长增加了 10.09 mm，日均根面积与根长分别增加 0.03 mm² 与 0.37 mm，说明此阶段根系以细根的生长发育为主；并且随着该区域细根的不断生长，根系的平均根直径逐渐降低，根面积密度逐渐增加。该区域植物在 8 月 2 日逐渐进入灌浆期，根系随着灌溉量增加而得到较为充分的生长发育，日均根系面积与长度生长速率较快，与 8 月 8 日至 8 月 16 日的根系数据监测情况一致。在 8 月 22 日后植物逐渐进入成熟期，根系整体生长速率减缓并且以细根的生长为主，平均根系直径下降，与管道机器人 8 月 16 日至 9 月 12 日的监测结果一致。可见，管道机器人具备了野外环境下对植物根系图像的长期定位获取能力，并可进一步通过根系识别分割与信息提取获得植物根系的动态变化参数。

表 3 植物根系提取信息特征

观测日期 Observation date	根系面积 Root area/mm ²	根系长度 Root length/mm	平均根系直径 Mean root diameter/mm	根面积密度 Root area density/(mm ² ·mm ⁻²)
8 月 8 日	3.14	5.10	0.66	0.02
8 月 16 日	6.30	15.22	0.41	0.04
9 月 12 日	7.20	25.31	0.27	0.05

4.2.3 土壤水分监测

分别在不同土壤水分亏缺程度下，采用土钻法在试验田中管道附近位置取土，随后利用烘干法测量土样的体积含水率 (θ_d)，管道机器人在取土位置最近点位监测得到的土壤体积含水率 (θ_v)，使用 Origin 绘制如图 16 所示的拟合线，拟合式为： $\theta_d=1.030\theta_v-0.006$ ，决定系数 R^2 为 0.994，平均相对误差为 2.23%，监测结果与烘干法测量结果基本一致，监测效果较为理想。

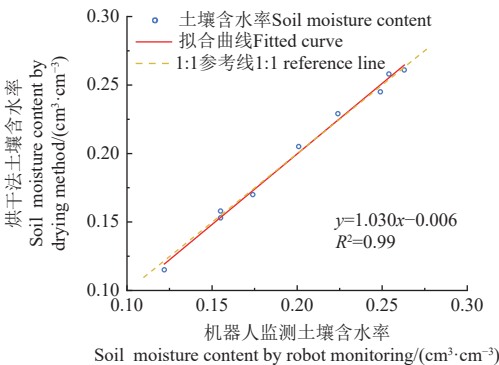


图 16 机器人监测和烘干法测量含水率拟合曲线

Fig.16 The fitting curve of soil moisture measurement by robot monitoring and drying method

4.2.4 电池续航测试

在初始状态为满电量的情况下对管道机器人系统的稳定运行时长进行测试，结果表明，系统独立稳定运行时长不少于 7 d，机器人独立稳定运行时间约为 3 h，最

大巡航距离约为 48 m。证明管道机器人具备较长的独立工作时长，以及执行长距离的巡航监测任务的能力。

5 结 论

针对野外条件下难以实现根系特征与根区土壤水分同步、高通量、自动化监测的不足，本文设计了一种用于植物根系特征与根区土壤水分监测的管道机器人系统，主要研究结果如下：

1) 管道机器人系统拍摄的图像像素点真实长度为 44 μm，真实面积为 0.002 mm²，相机拍摄面积是 150.24 mm²；土壤体积含水率与土壤水分传感器输出电压转换拟合曲线决定系数 R^2 为 0.990；里程轮定位平均相对误差为 1.47%。可在管道机器人巡航过程中实现对管道周围植物根系图像与根区土壤水分的同步监测。

2) 图像的相机畸变校正重投影平均误差为 0.50 像素，最大误差为 0.91 像素；配准校正平均坐标点误差为 2.18；对根系图像的识别与信息提取可得到根系长度、面积、平均直径、根长密度与根面积密度等特征参数。实现管道机器人巡航拍摄后图像根系特征的自动提取。

3) 田间试验结果表明，管道机器人可实现根系的生长发育动态监测，对土壤水分的监测数据与烘干法测得的结果基本一致。并且初始满电量情况下，在野外持续稳定运行时长不少于 7 d，在管道中独立稳定运行时长约为 3 h，独立巡航监测最大距离约为 48 m。在野外条件下具备良好的独立持续监测能力，可对管道附近的多株植物根系特征与根区土壤水分实现高通量、自动化、同步监测，为探究作物根系与水分胁迫的相互影响作用提供技术支持。

[参 考 文 献]

[1] 肖爽, 刘连涛, 张永江, 等. 植物微根系原位观测方法研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(2): 370-385.
XIAO Shuang, LIU Liantao, ZHANG Yongjiang, et al. Review on new methods of in situ observation of plant micro-roots and interpretation of root images[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(2): 370-385. (in Chinese with English abstract)

[2] 李克新, 宋文龙, 朱良宽. 植物根系构型原位观测识别技术研究进展[J]. 生态学报, 2011, 30 (09): 2066-2071.
LI Kexin, SONG Wenlong, ZHU Liangkuan. Observation and measurement of plant root architecture in situ: A review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(9): 2066-2071. (in Chinese with English abstract)

[3] 孙国祥, 蔡嘉奇, 周新竹, 等. 基于阵列式 ESP32-CAM 的番茄根系表型原位测量方法[J]. 农业工程学报, 2023, 39(18): 172-182.
SUN Guoxiang, CAI Jiaqi, ZHOU Xinzhu, et al. In-situ measuring toma to root phenotype using array ESP32-CAM[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural

- Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(18): 172-182. (in Chinese with English abstract)
- [4] 周始威, 胡笑涛, 王文娥, 等. 春玉米不同生育期土壤湿润层深度调控的稳产节水效应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(21): 125-132.
- ZHOU Shiwei, HU Xiaotao, WANG Wen'e, et al. Water-saving and stable yield effects of regulation on soil wetted depth in different growth stage of spring maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(21): 125-132. (in Chinese with English abstract)
- [5] 高芸, 吕海英, 齐学斌, 等. 夏玉米产量及根系生长对旱涝急转的响应特征[J]. 人民黄河, 2022, 44(8): 145-150.
- GAO Yun, LYU Haiying, QI Xuebin, et al. Response characteristics of summer maize yield and root growth to drought-flood abrupt alternation[J]. Yellow River, 2022, 44(8): 145-150. (in Chinese with English abstract)
- [6] 杨婷, 陈晓冰, 许昊, 等. 辣椒根系影响下的农地土壤水分空间运动分异特征[J]. 农业工程学报, 2023, 39(13): 141-150.
- YANG Ting, CHEN Xiaobing, XU Hao, et al. Influence of pepper roots on the spatial movement differentiation of soil moisture in farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(13): 141-150. (in Chinese with English abstract)
- [7] 邵长亮, 吴东丽. 土壤水分测量方法适用性综述[J]. 气象科技, 2019, 47(1): 1-9.
- SHAO Changliang, WU Dongli. Review of Applicability of Soil Moisture Measurement Techniques[J]. Meteorological Science and Technology, 2019, 47(1): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张鹏浩, 郭月峰, 姚云峰, 等. 不同坡位下柠条根系分布特征及其与土壤含水量的关系研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(5): 28-39.
- ZHANG Penghao, GUO Yuefeng, YAO Yunfeng, et al. Root distribution characteristics of Caragana korshinskii and their relationship with soil water content in different slope positions[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2023, 51(5): 28-39. (in Chinese with English abstract)
- [9] 廖荣伟, 刘晶淼, 安顺清, 等. 基于微根管技术的玉米根系生长监测[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 156-161.
- LIAO Rongwei, LIU Jingmiao, AN Shunqing, et al. Monitor of corn root growth in soil based on minirhizotron technique[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(10): 156-161. (in Chinese with English abstract)
- [10] MOHAMMAD U, SHUBHAM S, RASHID H H, et al. Recent trends in root phenomics of plant systems with available methods - discrepancies and consonances[J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2022, 28(6): 1311-1321.
- [11] LI A, ZHU L, XU W, et al. Recent advances in methods for in situ root phenotyping[J]. PeerJ, 2022, 10: e13638-e13638.
- [12] 张新生, 卢杰. 植物根系分布与根际微生态研究方法概述[J]. 山东林业科技, 2021, 51(4): 111-115, 94.
- ZHANG Xinsheng, LU Jie. Research methods of plant root distribution and rhizosphere microecology[J]. Shandong Forestry Science and Technology, 2021, 51(4): 111-115, 94. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张建英, 张莹莹, 毛向红. 砂壤土绿岭核桃根系空间分布规律研究[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(23): 151-153.
- ZHANG Jianying, ZHANG Yingying, MAO Xianghong. Research on the spatial distribution of lüling walnut root system in sandy loam[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(23): 151-153. (in Chinese with English abstract)
- [14] 杨一晨, 杨习文, 吴寅, 等. 采用立方体取样法提高小麦根系研究精准性的探讨[J]. 河南农业科学, 2021, 50(11): 36-46.
- YANG Yichen, YANG Xiwen, WU Yin, et al. Discussion on improving precision of wheat root research by cube sampling method[J]. Journal of Henan Agriculture Science, 2021, 50(11): 36-46. (in Chinese with English abstract)
- [15] 李鹏, 李占斌, 澹台湛. 黄土高原退耕草地植被根系动态分布特征[J]. 应用生态学报, 2005(5): 849-853.
- LI Peng, LI Zhanbin, DAN Taizhan. Dynamic distribution characters of herbaceous vegetation root systems in abandoned grasslands of Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005(5): 849-853. (in Chinese with English abstract)
- [16] 任小通. 根区灌溉下极端干旱区葡萄根系分布特征及吸水模型研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- REN Xiaotong. Study on Distribution Characteristics and Water Absorption Model of Grape Roots in Xinjiang under Root Zone Irrigation[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [17] SMIT A J M, BENGOUGH A G, VAN N M, et al. Root Methods: A Handbook[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2001: 1-32.
- [18] 张小全, 吴可红, DIETER M. 树木细根生产与周转研究方法评述[J]. 生态学报, 2000(5): 875-883.
- ZHANG Xiaoquan, WU Kehong, DIETER M. A review of methods for fine-root production and turnover of trees[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000(5): 875-883. (in Chinese with English abstract)
- [19] 胡琪娟, 王霖娇, 盛茂银. 植物细根生产和周转研究进展[J]. 世界林业研究, 2019, 32(2): 29-34.
- HU Qijuan, WANG Linjiao, SHENG Maoyin. Research progress of plant fine root production and turnover[J]. World Forestry Research, 2019, 32(2): 29-34. (in Chinese with

- English abstract)
- [20] 李向飞, 齐雅静, 白玉荣, 等. 评述细根指标测定的几种方法[J]. 内蒙古林业调查设计, 2018, 41(1): 91-92.
LI Xiangfei, QI Yajing, BAI Yurong et al. Some methods for measuring the indicators of fine roots[J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2018, 41(1): 91-92. (in Chinese with English abstract)
- [21] 陈文岭, 靳孟贵, 刘延锋, 等. 微根管法监测膜下滴灌棉花根系生长动态[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 87-93.
CHEN Wenling, JIN Menggui, LIU Yanfeng, et al. Monitoring cotton root growth dynamics under mulched drip irrigation using minirhizotron technique[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(2): 87-93. (in Chinese with English abstract)
- [22] 白文明, 程维信, 李凌浩. 微根窗技术及其在植物根系研究中的应用[J]. 生态学报, 2005(11): 284-289.
BAI Wenming, CHENG Weixin, LI Linghao. Applications of minirhizotron techniques to root ecology research[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005(11): 284-289. (in Chinese with English abstract)
- [23] 黄韬幸, 王修贵, 吴灏, 等. 旱涝胁迫对棉花根系生长的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(7): 2020-2029.
HUANG Taoxing, WANG Xiugui, WU Hao, et al. Effects of drought and waterlogging stress on root growth of cotton[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(7): 2020-2029. (in Chinese with English abstract)
- [24] 严四英, 翁白莎, 景兰舒, 等. 干旱及旱后复水对夏玉米根系生长的影响[J]. 节水灌溉, 2022(3): 75-81, 91.
YAN Siying, WENG Baisha, JING Lanshu, et al. Effects of drought and rehydration on root growth of summer maize[J]. Water Saving Irrigation, 2022(3): 75-81, 91. (in Chinese with English abstract)
- [25] 张萌. 阵列式电容传感器探测土壤水分方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
ZHANG Meng. Research on Array Capacitive Sensor for Detecting Soil Moisture[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [26] MATTEO F, JOSEPH G, MATTEO G. Multi-sensor profiling for precision soil-moisture monitoring[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 197: 106924.
- [27] 朱燕香, 潘剑君, 白浩然, 等. 基于 Sentinel-2A 影像的 OPTRAM 模型及其改进模型的土壤水分估算研究[J]. 南京农业大学学报, 2020, 43(4): 682-689.
ZHU Yanxiang, PAN Jianjun, BAI Haoran, et al. Soil moisture estimation with the OPTRAM model and its improved model based on Sentinel-2A data[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2020, 43(4): 682-689. (in Chinese with English abstract)
- [28] 阙艳红, 吴苏, 姜明梁, 等. 融合多源遥感数据的夏玉米土壤水分反演方法对比研究[J/OL]. 节水灌溉, 1-16[2024-02-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1420.tv.20240123.1002.013.html>.
QUE Yanhong, WU Su, JIANG Mingliang, et al. Comparative study on soil moisture retrieval methods for summer maize using multi-source remote sensing data fusion[J/OL]. Water Saving Irrigation. 1-16[2024-02-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1420.tv.20240123.1002.013.html>. (in Chinese with English abstract)
- [29] GRAVALOS I G, MOSHOU D E, LOUTRIDIS S J, et al. Design of a pipeline Sensor-based platform for soil water content Monitoring[J]. Biosystems Engineering, 2012, 113(1): 1-10.
- [30] YU S, XU Q, CHENG X, et al. In-situ determination of soil water retention curves in heterogeneous soil profiles with a novel dielectric tube sensor for measuring soil matric potential and water Content[J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 126829.
- [31] 孙宇瑞. 非饱和土壤介电特性测量理论与方法的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2000.
SUN Yunrui. Study on Measuring Theory and Method of Dielectric Characteristics for Unsaturated Soil[D]. Beijing: China Agricultural University, 2000. (in Chinese with English abstract)
- [32] 孙宇瑞, 汪懋华, 赵燕东. 一种基于驻波比原理测量土壤介电常数的方法[J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 43-47.
SUN Yurui, WANG Maohua, ZHAO Yandong. A kind of determinations of soil dielectric constant using the principle of standing-wave ratio[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1999, 15(2): 43-47. (in Chinese with English abstract)
- [33] 刘艳, 李腾飞. 对张正友相机标定法的改进研究[J]. 光学技术, 2014, 40(6): 565-570.
LIU Yan, LI Tengfei. Research of the improvement of Zhang's camera calibration method[J]. Optical Technique, 2014, 40(6): 565-570. (in Chinese with English abstract)

Development of a pipeline robot for high-throughput monitoring plant root characteristics and soil moisture in root zone

YAN Xiaofei¹, WANG Yunbo¹, SONG Xiaobo², XIANG Ziwei¹, DU Taisheng³, CHENG Qiang^{2*}

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 3. Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: A root is one of the most important vegetative organs of plants. It is of great significance to explore the growth status of root under different water stress in modern agriculture. However, the existing observation of plant root are cumbersome, laborious and time-consuming. It is the high demand to meet the requirements of precision irrigation and water-saving under field conditions. In this study, a pipeline robot system was developed for the synchronous, in-situ and the high-throughput monitoring of plant root and root soil water using STM32. The system consisted of pipeline robot, data base station and PVC transparent pipeline. The pipeline robot system was embedded in the soil, where the macro camera and soil moisture sensor were carried by the robot. The root images were captured to obtain the soil moisture data while the robot cruising. Meanwhile, the robot shared the functions of autonomous timing cruise, wireless communication using command data and active return after encountering obstacles. The distorted correction, registered on plane, identified and segmented images were obtained for the parameters of the root area, length and density of the plants in the direction of the pipeline. The results of laboratory test show that: 1) The pipeline robot was clearly captured the root images, indicating the excellent performance on distortion correction and plane registration. The true length and area corresponding to a single pixel were 44 μm and 0.002 mm^2 , respectively, whereas, the shooting range of a single root image was 14.17 \times 10.60 mm. The characteristic information of root was obtained using MATLAB, where the images taken by the automatic cruise of pipeline robot. The image processing operations included the image distortion correction, image preprocessing, root region recognition and segmentation, and root feature extraction. Compared with the root characteristic parameters measured by the excavation, the relative errors of the root image processing program were 12.29%, 3.40% and 12.50%, respectively; 2) There was an excellent linear relationship between the output voltage of the soil moisture sensor that carried by the pipeline robot and the soil volumetric moisture content, where the coefficient of determination was 0.990; 3) The pipeline robot presented a high accuracy of autonomous cruise positioning, with a mean relative error of 1.47%. The field experiment show that: 1) The pipeline robot system was captured the plant root images with high-throughput in the field environment. Root growth dynamics was obtained to further extract the parameters of root length, area, average diameter and density from the images; 2) The pipeline robot was accurately monitor the soil moisture in the root zone, where the mean relative error of the measured was 2.23%, compared with the drying measurement; 3) Once the system was initially fully charged, the pipeline robot system operated independently for no less than 7 days, where the maximum cruise monitoring distance was about 48m. The pipeline robot system can be expected to realize in-situ and high-throughput measurement of plant root and soil moisture in the root zone under field environment. The growth of root can be extracted after image recognition and segmentation. The finding can also provide the technical support to monitor the growth status of root in water-saving irrigation.

Keywords: robot; water content; image recognition; root characteristics; high throughput