

农田信息采集车设计与试验

姚照胜^{1,2} 刘 涛^{1,2} 刘升平³ 邓国强^{1,2} 武 威^{1,2} 孙成明^{1,2}

(1. 扬州大学农学院, 扬州 225009; 2. 江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心, 扬州 225009;
3. 中国农业科学院农业信息化研究所, 北京 100081)

摘要: 针对传统农业物联网系统存在传感器少、投入成本高、建设周期长和对环境不友好等问题,设计了一种可移动式农田信息智能采集车。利用 Matlab 仿真对关键部件机械臂的构成和运行情况进行了分析和模拟,对采集车进行了小麦田间性能测试。结果显示,采集车整体设计合理,车辆通过性强,越障最大倾斜角达 30°,最大遥控距离 45 m,获取图像清晰。将传感器采集的数据与常用高精度仪器测量结果进行了比对,农田信息采集车所采集温度、湿度、光照强度、CO₂ 浓度、风速、土壤温度和土壤湿度与高精度仪器设备所测数据的相关系数均大于 0.90,单个采样点平均采集时间为 45 s,数据采集满足需求。该采集车可实现定时、定点大范围获取田间数据的功能,能够替代传统物联网系统或对其进行补充。

关键词: 采集车; 农田信息; 智能采集; 物联网系统; 图像获取

中图分类号: S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)10-0236-07

Design and Experiment of Farmland Information Collection Vehicle

YAO Zhaosheng^{1,2} LIU Tao^{1,2} LIU Shengping³ DENG Guoqiang^{1,2} WU Wei^{1,2} SUN Chengming^{1,2}

(1. Agricultural College of Yangzhou University, Yangzhou 225009, China
2. Jiangsu Co-innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou 225009, China
3. Agricultural Information Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to obtain the information of field environment and soil in a quicker and more convenient way, a type of information collection vehicle based on TCP was designed. The overall design of the vehicle system included power system, motion control system, power supply system, wireless image transmission system and sensor detection system. The corresponding data can be obtained by sensor detection system, which included DHT11 temperature and humidity sensor, photoresistor sensor, DS-CO₂-20 carbon dioxide sensor and hot wire wind speed sensor. It was proposed to use the 5-DOF manipulator and the self-made soil sensor bit to obtain the soil temperature and humidity information. The composition and operation of the manipulator were analyzed and simulated by Matlab simulation. According to the results of the performance tests carried out on the collection vehicle in the wheat field, it can be seen that the overall design of the collection vehicle was reasonable. The vehicle had strong passability. The maximum tilt angle was up to 30° and the maximum remote control distance was 45 m. Precise pictures can be secured as well. Compared with those measured by common high-precision instruments, the data collected by the sensor integrated in the vehicle met the needs of experiment, as the correlation coefficient between the temperature, humidity, light intensity, CO₂ concentration, wind speed, soil temperature and soil moisture measured by the agricultural information collection vehicle and the high-precision instruments was greater than 0.90. The collection vehicle can realize the function of obtaining field data in a large range at a fixed time, and replace and supplement the traditional Internet of things system.

Key words: collection vehicle; farmland information; intelligent collection; Internet of Things system; image acquisition

收稿日期: 2019-03-11 修回日期: 2019-05-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(31671615,31701355,31872852)、国家重点研发计划项目(2018YFD0300805)、江苏省大学生创新创业训练计划项目(201811117105K)、苏州市农业科技创新项目(SNG2017064)和扬州市产学研合作专项基金项目(YZ2016251)

作者简介: 姚照胜(1992—),男,博士生,主要从事农业物联网及农田信息采集与应用研究,E-mail: yaozhaosheng2013@gmail.com

通信作者: 孙成明(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事作物系统模拟与图像识别研究,E-mail: cmsun@yzu.edu.cn

0 引言

获取农田信息是掌握农田环境和作物生长状况的必要手段^[1],是利用农田大数据实现精准农业的基础^[2]。农田信息化采集指借助于各类传感器、通过各项指标判断环境状况与作物长势,比人工调查更具有标准性和规范性。快速高效获取农田环境与作物长势信息,可为制定科学合理的施肥、喷药、灌溉措施提供依据,达到精准施肥、合理施药、节约灌溉的目的^[3]。近年来,利用物联网和大数据技术获取农田信息成为研究热点之一。

物联网(Internet of Things, IoT)从 1998 年提出至今,经历了突飞猛进的发展^[4]。物联网在农业环境监测上的应用主要通过在农田或设施农业中布设各类传感器、摄像头及控制系统,实现对农业环境信息的监测^[5]。ARAI 等^[6]将传感器安装在黄瓜温室中,监测空气湿度、温度、CO₂浓度,并提出适宜黄瓜生长的水肥方案,通过物联网进行控制。TRILLES 等^[7]利用物联网获取环境数据,与气象数据结合,预测葡萄园中真菌病害发生的几率,为农场提前防治病害提供参考。但传统有线农业物联网监测系统建设成本高、资金投入大、建设周期长,其所设传感器一般不可移动,可扩展性低^[8],摄像头位置固定,不能移动拍摄,更不能获取作物行间画面。无线传感器网络(Wireless sensor network, WSN)克服了传统有线物联网的缺点,WSN 利用各传感器间的通信组成无线传感器网络,拥有免布线、低功耗、可扩展性强的优点^[9]。但由于自身无线标准的问题,其存

在一定的系统安全威胁^[10]。低功耗的特性也难免会出现能量限制问题^[11],对环境要求较高。

随着信息技术的高速发展,集成式芯片功能越来越强,体积越来越小,各类功能强大的机器人(车)被应用于农业生产和管理中^[12]。这类机器人体积庞大,只能在宽行距作物和草地上行走,无法进入作物行间。农田信息采集机器人要求行走路线遍布整个农田,但通常路线可行动范围狭窄^[13]。对于以上问题,本文利用低成本部件,搭建一种可移动式田间信息采集车,以实现作物行间农田信息和图像的采集。

1 总体方案设计

可移动式农田信息采集车系统主要由采集车车体、微控制单元(Microcontroller unit, MCU)系统和控制端组成^[14]。为适应田间复杂地况,本研究采用厚度为 2 mm 的 6061 高强度铝合金底盘车身,双 6 轮式履带轮,其中 4 轮为独立减振系统。车身重心低,行驶稳定,为安装在车上的其他部件和传感器提供了一个稳定的平台。车身、驱动轮和承重轮均为金属铝合金材质,并有表面喷砂氧化处理,可防止生锈,增加智能车的使用寿命。选用 STC11F32XE 作为主控芯片,车载系统由多个模块组成,包含电源模块、LM2596S 稳压模块、L298P 电机驱动模块、AR9331 无线 WiFi 模块、KS8A17 摄像头模块、5 自由度机械臂模块以及传感器模块(包括温湿度传感器、光照强度传感器、风速传感器、CO₂浓度传感器、土壤养分传感器、土壤温湿度传感器和 RGB 色值传感器等)组成,总体设计框架如图 1 所示。

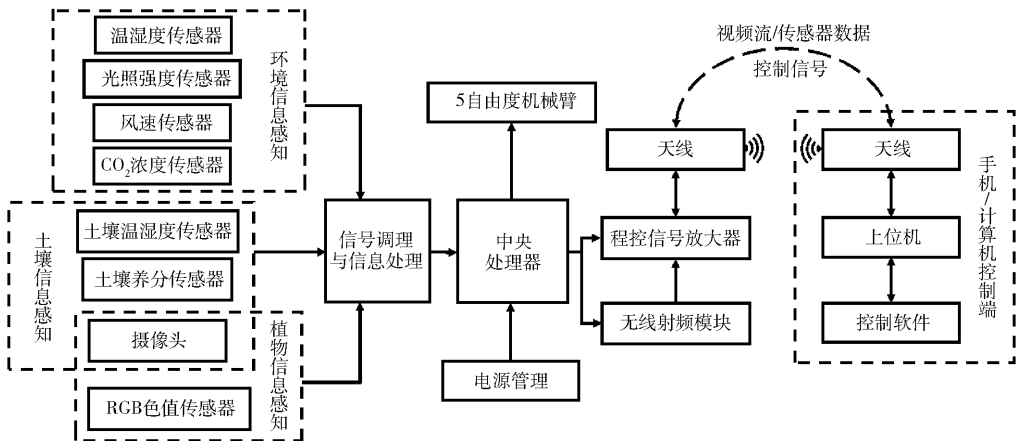


图 1 采集车总体设计框架
Fig. 1 Vehicle overall design framework

2 硬件选型及机械臂设计

2.1 硬件选型

(1) 主控芯片选型

车载 MCU 系统是整个采集车的核心,硬件电路

包括电机驱动模块、WiFi 模块、机械臂模块、各传感器模块以及电源模块等。为了实现预定功能并节约成本,采用性价比较高的 STC11F32XE 主控芯片。STC11F32XE 是新一代 8051 单片机,指令代码完全兼容传统 8051 单片机,但速度是传统 8051 单片机

的8~12倍,工作电压4.1~5.5 V,工作频率0~3 MHz,与8051单片机0~420 MHz的工作频率相当。采用LQFP44G封装,内部包含中央处理器(CPU)、程序存储器(Flash 32 KB)、数据存储器(SRAM 1 280 B)、定时器/计时器、UART串口、丰富的I/O接口等模块。具有高速、低功耗、抗干扰的特征,功能和接口数量满足系统设计的要求。

(2)电机和电机驱动模块

采用XD-37GB520型电机作为动力输出,电机工作电压为12 V,额定功率达10 W,空载转速为50 r/min,负载转速45 r/min,变速箱减速比达1:100,输出扭力大,能轻松越过障碍,使得小车适应不同地形行驶。

采用L298P双H桥直流电机驱动芯片,为PowerSO20贴片封装,能驱动直流电机和步进电机^[15]。虽然芯片过热时具有自动关断功能,但安装散热片能使芯片快速散热,使驱动电路性能更加稳定。

(3)电源及稳压模块

电源使用4 400 mA·h、12 V锂离子电池,最大输出电流可达4 A,并在内部配有过充、过放、短路和过流保护等功能的保护电路。LM2596开关电源调节器是降压型电源管理单片集成电路,能够输出3 A的驱动电流,同时具有很好的线性和负载调节特性,可调节输出小于37 V的各种电压。该器件内部集成频率补偿和固定频率发生器,开关频率为150 kHz,与低频开关调节器相比较,可以使用更小规格的滤波元件。由于该器件只需4个外接器件,所以可使用通用的标准电感。

(4)无线WiFi模块

目前在物联网上应用的无线通信技术主要有ZigBee、WiFi、LTE、蓝牙等,每种方式均有其优缺点^[16-17]。具体来说,ZigBee技术拥有低功耗、传输容量大、成本低等优点,但其存在传输距离短的缺点。LTE前身是GPRS和3G技术,LTE普及后,后两者仅保留了基本的通话和少量数据功能,大部分数据流量转到了LTE网络。

LTE网络具有延时短、传输距离远、传输速度快等优点,但其成本较高。WiFi是近场通信应用最广的技术,发展也较为成熟,且成本低。蓝牙是另一种短距离通信协议,其具有传输速度较快,信号不易受干扰、频谱全球不受限等优点,在物联网中应用较为广泛。用发展的眼光看,LTE(甚至即将到来的5G技术)和WiFi因其高速的传输速度、低延迟、抗干扰等优势成为未来农业物联网传输的主要媒介^[18],也是当前物联网发展和研究的重要方向,因此选择

AR9331型WiFi模块实现本项目数据传输功能。

将ser2net应用程序写入WiFi模块固件,当WiFi模块启动后,自动开启TCP Server服务,监听2001端口,等待客户端连接。当手机或计算机等控制设备连接上WiFi模块的热点后,打开TCP Client操控软件,使用2001端口,与TCP Server建立通信。

此时可利用上位机操控客户端使用write发送触发指令到2001端口,通过Ser2net推送到WiFi的TTL串口,下位机驱动板接收到指令后进行解析与执行。下位机也可以将各路传感器的数据利用Read通过串口发送到WiFi模块,被ser2net程序转发到2001端口,实现数据在上位机的显示。

(5)摄像头模块

本设计中选择KS8A17作为摄像头模块,使用索尼IMX179方案,800万像素高清高速自动对焦,分辨率为1 920像素×1 080像素,视频分辨率为1 080 p,帧速率最高30 f/s,感光尺寸达1/3.2",暗光和逆光环境下可以保留更多细节信息。

(6)传感器模块

本设计采用DHT11型温湿度二合一传感器。相对湿度测量范围为20%~99%,测量误差为±5%,精度为1%,温度测量范围为0~50℃,测量误差为±1℃,单次测量间隔2 s,范围和精度符合农田数据采集的要求。

光照强度模块采用灵敏型光敏电阻传感器。

采用DS-CO₂-20二氧化碳浓度传感器,此款传感器基于非分光红外吸收原理,具有单气室双通道,可获取两种波长红外光照射在接收感应器上的光强关系及其变化,根据二氧化碳对两种波长的红外光吸收比率函数,计算气室中实际二氧化碳浓度。有效量程为 $4 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-3}$,分辨率为 1×10^{-6} ,精度 $\pm(5 \times 10^{-5} + 5\% \text{ FS})$ 。

风速传感器采用热线式风速传感器模块,测量范围为0~30 m/s,精度为 $\pm(0.2 \text{ m/s} + 3\% \text{ FS})$ 。

土壤温湿度传感器采用基于FDR原理的ZZ-STHS-B模块,温度精度为±1℃,相对含水率精度达±2%,具有热响应时间短、动态误差小的优点。

2.2 机械臂构成与运动设计

为使土壤温湿度传感器插入土壤中,设计了机械臂模块。机械臂首尾依次转动连接的摆臂1、2、3、4,摆臂1底端通过支座与金属车身连接,另一端与摆臂2连接,各相邻的摆臂之间均通过与各摆臂垂直的转轴转动连接,各转轴均设有用于驱动转轴按设定角度转动的伺服舵机,摆臂4的前端设计了电机和嵌入式土壤信息传感器钻头(图2)。机械臂是由5个舵机控制,舵机由脉冲宽度调制(PWM)控

制,PWM 的原理是利用高电平宽度来控制舵机转动角度(0°~180°)。

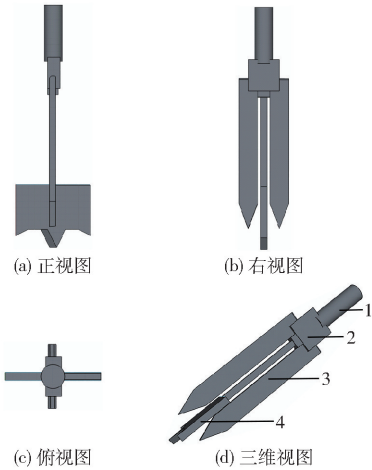


图 2 嵌入式土壤信息传感器钻头
Fig. 2 Sketch of soil information sensor
1. 钻柄 2. 夹持结构 3. 土壤信息传感器 4. 加宽钻头

使用 Matlab 软件借助机械臂工具箱 Robotics Toolbox 建立机械臂模型,即可实现简单的运动学仿真。按照改进 D-H 法建立机械臂坐标系,简化坐标系如图 3 所示,其中基坐标系和关节 1 坐标系重合($X_{0,1},Y_{0,1},Z_{0,1}$),关节 2 坐标系与关节 1 坐标系原点重合,为直观表示,图 3 中将关节 2 坐标系和关节 1 坐标系分开。由此得到机械臂连杆参数和关节变量如表 1 所示,其中, θ_i 为关节角, d_i 为偏置距离, a_{i-1} 为杆长, α_{i-1} 为扭角。

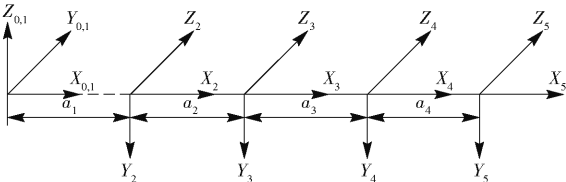


图 3 机械臂各关节 D-H 坐标系
Fig. 3 Arm joint coordinate system

设定机械臂初始化关节角为[0 0 0 0 0],运行程序如下

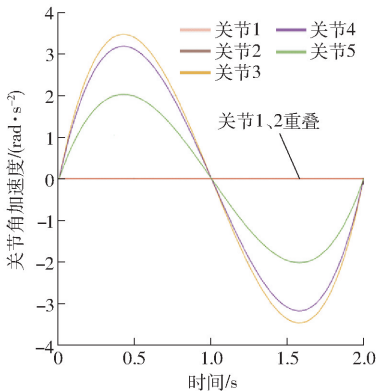
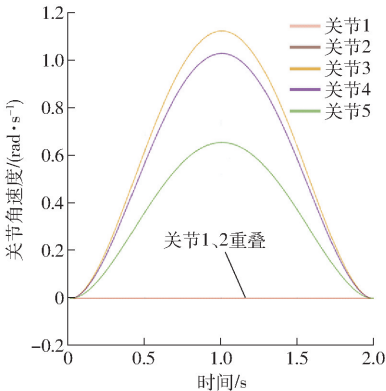
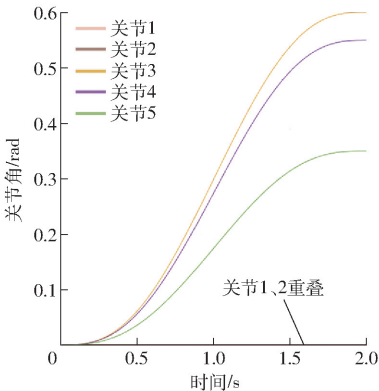


图 4 各关节角度、角速度、角加速度与时间关系曲线
Fig. 4 Relationship curves between time and joint angle, velocity and acceleration

```
L1 = Link([0 0 0 0], 'modified'); % 定义各连  
杆的 D-H 参数  
L2 = Link([0 0 0 -pi/2], 'modified');  
L3 = Link([0 0 30 0], 'modified');  
L4 = Link([0 0 30 0], 'modified');  
L5 = Link([0 0 30 0], 'modified');  
b = isrevolute(L1);  
robot = SerialLink([L1,L2,L3,L4,L5]); % 连  
接连杆  
init_ang = [0,0,0,0,0,0]; % 机械臂初始  
化角度  
targ_ang = [0,0,0.6,0.55,0.35,0]; % 机械  
臂终止角度  
step = 200; % 设置步数  
[q,qd,qdd] = jtraj(init_ang,targ_ang,step); %  
利用 5 次多项式计算轨迹
```

表 1 机械臂 D-H 参数
Tab.1 Robot's arm D-H parameters

i	$\theta_i/(^{\circ})$	d_i/mm	a_{i-1}/mm	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$
1	θ_1	0	0	0
2	θ_2	0	0	-90
3	θ_3	0	30	0
4	θ_4	0	30	0
5	θ_5	0	30	0

最终得到一个完整周期内每个关节的角位移、角速度和角加速度与时间的关系(图 4)。从图 4 可以看出,随着机械臂的运行,每个关节的角位移、角速度和角加速度变化曲线连续且平滑。图 5 为机械臂初始时刻、运行中某一时刻和终止时刻的三维空间位置。经过 Matlab 仿真模拟和实际运行,机械臂在 PWM 控制下实际运行时,各关节和部件运行流畅、平稳,最终钻头位置垂直于地面。

2.3 农田信息采集车整体结构

将上述所选组件组装,得到农田信息采集车结

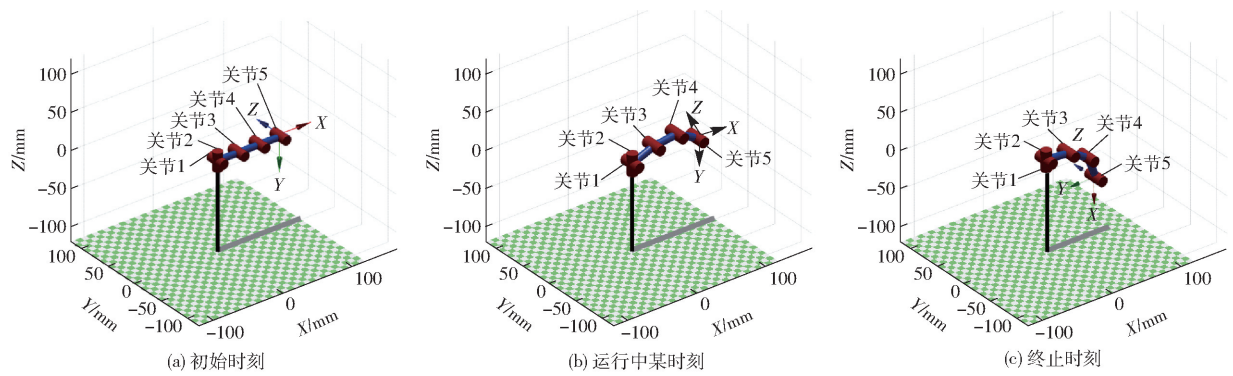


图5 机械臂三维仿真示意图

Fig.5 3D simulation diagrams of arm

构示意图如图6所示。考虑到车身电池和主板等发热源对传感器的影响,将温湿度传感器、光照强度传感器、CO₂浓度传感器和风速传感器模块安装至车身尾部,减小自身发热源等可能产生的影响。

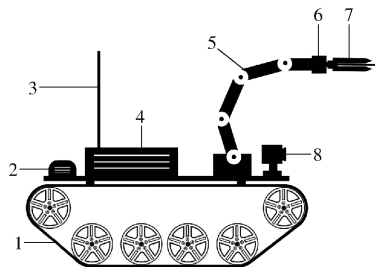


图6 农田信息采集车结构示意图

Fig.6 Structural diagram of farmland information collection vehicle

- 1.履带 2.温湿度传感器、光照强度传感器、CO₂浓度传感器、风速传感器 3. WiFi 天线 4. 电源和控制主板 5. 机械臂 6. 钻头电机 7. 土壤信息传感器钻头 8. 可转动高清摄像头

信息采集车工作流程为:①打开采集车电源,通过 WiFi 与手机客户端连接,待各传感器预热完成后,开始工作。②采集车行走至第1个采样点,采集温湿度、光照强度、CO₂浓度和风速数据,用时约5 s。③通过屏幕调整高清摄像头俯仰角和横滚角,拍摄所需行间作物茎秆、叶片等图像,用时约10 s。④发送机械臂控制信号,当机械臂运行完程序达到终态后,手动启动机械臂前端电机,并操作机械臂缓慢钻入土壤深5 cm,待稳定后测量土壤温湿度,用时约30 s。完成所有信息采集后,信息采集车行进至下一个采样点。

3 MCU 程序与控制软件

3.1 MCU 程序

板载程序使用 Keil uVision4 开发环境和 C 语言编写,通过 ISP 下载到主控芯片中。程序由 main 主程序、config 初始化、selftest 自检、motor 电机控制、servo 舵机等子程序组成,主程序简要代码如下

```
void main(void)
```

```
{
    #ifndef DEBUG
    {
        TestApp_Init(); // 自检延时程序
    }
    #endif
    UART_init(); // 串口初始化
    Timer0_Init(); // 定时器 0 初始化 (舵机定时器)
    Timer1_Init(); // 定时器 1 初始化
    Motor_Init(); // 电机初始化
    Init_Steer(); // 舵机角度初始化
    while(1)
    {
        Cruising_Mod(); // 全功能模式功能执行子函数
    }
}
```

3.2 控制软件

手机客户端与采集车之间通过 WiFi 信道基于传输控制协议(TCP/IP)的方式通信,使用套接字 Socket 实现通信功能,满足手机遥控智能车与传感器数据回传的需求,通信框架如图7所示。其中手机作为客户端,WiFi 模块作为服务器,其通信过程为:WiFi 模块先声明一个 ServerSocket 对象,并且给定端口号,再建立与手机连接的 Socket 对象,并将其返回。调用 ServerSocket 的 accept()来接收手机客户端的数据。如果没有数据请求,accept()一直处于等待状态,一旦接收到数据,将通过 inputStream 读取接收的数据。

客户端创建一个 Socket 对象,指定服务器的 IP 地址和端口号(Socket socket = new Socket("192.168.1.1",8000);),通过 inputStream 读取数据,获取服务器发出的数据(OutputStream outputStream = socket.getOutputStream()),最后将要

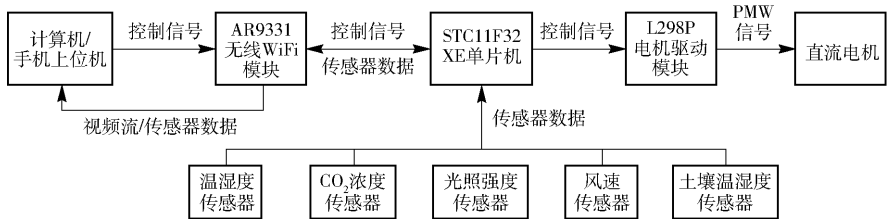


图 7 采集车通信框架示意图

Fig. 7 Vehicle communication framework scheme

发送的数据写入 outputstream 即可进行 TCP 协议的 Socket 数据传输,WiFi 通信过程如图 8 所示。

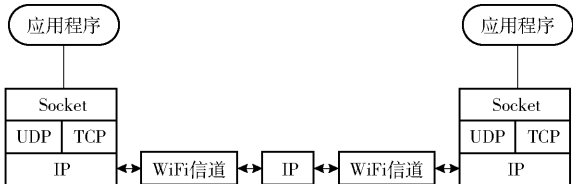


图 8 采集车 WiFi 通信过程示意图

Fig. 8 Vehicle WiFi communication framework scheme

手机客户端系统分为 4 个模块,分别为视频组件、控制组件、传感器数据组件和系统设置,如图 9 所示。

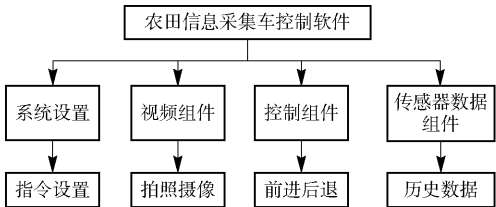


图 9 客户端系统设计方案

Fig. 9 Client system design scheme

该客户端以全屏模式第 1 视角实时显示车载摄像头画面,并可通过滑动屏幕空白部分调整摄像头角度,通过拍照和摄像按钮采集视频数据。传感器数据框内则显示传感器采集到的实时数据,另可查阅历史数据。农田信息采集车手机客户端主界面如图 10 所示。

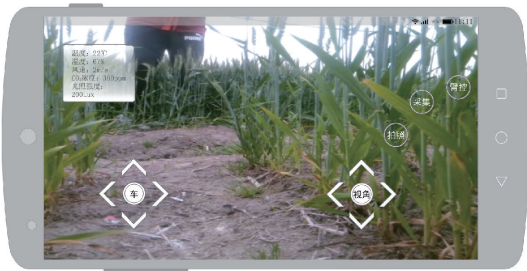


图 10 农田信息采集车手机客户端主界面

Fig. 10 Mobile client main interface of farmland information collection vehicle

4 田间试验

经田间试验,农田信息采集车通过 WiFi 与手机连接,图像传输信号强,手机遥控操作延时在 200 ms

内,最大遥控距离 45 m。低转速大扭力电机和宽履带式车轮可以保持最大 0.8 m/s 的速度行驶,越障最大倾斜角可达 30°,在田间复杂环境下通过性强。车身小巧,能在行间距 15 cm 以上的作物行间完成前进、倒退、转向等操作。可以以第 1 视角观察到作物行间画面,视频画面流畅、清晰,在匀速行驶状态下平均帧率为 21.3 f/s,视角调整精确。信息采集功能可完整实现,可以获取环境温湿度、光照强度、CO₂ 浓度、风速等数据,通过搭载的机械臂和土壤传感器,获取土壤温度、湿度信息,单个采样点平均采集时间为 45 s。

为了验证农田信息采集车所采集到数据的准确性,采用目前较为公认且精确度高的仪器设备与农田信息采集车采集数据进行对比,使用 TES1370 型非分散红外 (NDIR) 二氧化碳测量仪测量 CO₂ 浓度和温湿度,使用 TES1340 型热线式风速仪测量风速,采用 TASITA8133 型数字光照计测量光照强度,采用顺科达 TR-6D 型多功能土壤温湿度计测量土壤温度和湿度^[19-20]。同时使用农田信息采集车和上述仪器设备测量 8 个点位数据,对比结果如表 2 所示,其中测量值为农田信息采集车所获数据,参照值为高精度仪器设备所获数据。

可以看出,农田信息采集车所采集温度、湿度、光照强度、CO₂ 浓度、风速、土壤温度和土壤湿度与高精度仪器设备所测数据相关系数均大于 0.90,说明农田信息采集车各传感器满足测量需求。

5 结论

(1) 针对传统农业物联网系统存在传感器少、投入成本高、建设周期长和对环境不友好等问题,设计了一种以 STC11F32XE 微处理器为核心,搭载温湿度传感器、光照强度传感器、CO₂ 浓度传感器、风速传感器和土壤温湿度传感器等的农田信息采集车,通过 WiFi 将控制设备与信息采集车连接,实现远距离遥控行走和农田环境信息采集。

(2) 为解决土壤温湿度采集的需求,设计了钻头,将土壤传感器与加宽钻头结合,利用 5 自由度机械臂与钻头电机,实现土壤温湿度传感器钻入土下

表2 农田信息采集车数据与高精度仪器设备数据对比

Tab.2 Comparison of vehicle data and high-precision instrumentation data

序号	温度/℃		相对湿度/%		光照强度/lx		CO ₂ 浓度		风速/(m·s ⁻¹)		土壤温度/℃		土壤相对湿度/%	
	测量值	参照值	测量值	参照值	测量值	参照值	测量值	参照值	测量值	参照值	测量值	参照值	测量值	参照值
1	27.5	27.0	27.8	28.1	25 700	25 800	4.55×10 ⁻⁴	4.52×10 ⁻⁴	1.9	1.92	23.2	22.3	26.1	25.4
2	27.3	27.2	28.5	29.0	26 700	26 900	4.57×10 ⁻⁴	4.55×10 ⁻⁴	1.2	1.06	23.5	22.6	25.4	24.6
3	27.6	27.4	28.7	28.8	27 500	27 400	4.53×10 ⁻⁴	4.49×10 ⁻⁴	1.2	1.25	23.9	22.8	23.7	22.9
4	26.9	27.3	28.4	28.1	25 900	26 800	4.49×10 ⁻⁴	4.48×10 ⁻⁴	1.0	0.51	23.4	22.6	29.1	28.0
5	26.5	26.9	28.8	28.6	25 400	25 500	4.53×10 ⁻⁴	4.49×10 ⁻⁴	1.8	1.51	22.8	22.1	24.5	23.1
6	26.8	26.8	27.2	27.5	11 200	11 400	4.55×10 ⁻⁴	4.52×10 ⁻⁴	1.0	0.82	23.0	22.2	20.7	19.8
7	25.4	25.9	35.4	35.7	8 800	8 700	4.53×10 ⁻⁴	4.51×10 ⁻⁴	0.4	0.15	22.7	22.1	27.2	26.7
8	25.7	25.8	36.9	36.5	9 200	9 300	4.47×10 ⁻⁴	4.44×10 ⁻⁴	0.2	0.07	22.6	21.9	30.4	29.3
相关关系	0.91		0.99		0.99		0.95		0.96		0.98		0.99	

深度约 5 cm,获取土壤温湿度信息。

(3)田间试验表明:图像传输画面流畅、清晰,在匀速行驶状态下平均帧率为 21.3 f/s,视角调整精确;遥控延时在 200 ms 内,最大遥控距离 45 m,最大行驶速度为 0.8 m/s,越障最大倾斜角为 30°,可在行间距 15 cm 以上的作物行间行走;所采集温度、相对湿度、光照强度、CO₂ 浓度、风速、土壤温度和土壤相对湿度与高精度仪器设备所测数据的相关系数均大于 0.90;单个采样点平均采集时间为 45 s。

参 考 文 献

[1] 李道亮,杨昊. 农业物联网技术研究进展与发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(1):1-20.
LI Daoliang, YANG Hao. State-of-the-art review for Internet of Things in agriculture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(1):1-20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180101&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.001. (in Chinese)

[2] 霍润泽,肖体熠,张均富. 农田信息监测技术现状与展望[C]//成都:四川省机械工程学学会第三届学术年会,2018.

[3] TALavera J M, TOBON L E, GOMEZ J A, et al. Review of IoT applications in agro-industrial and environmental fields[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142: 283-297.

[4] BIGGS P, SRIVASTAVA L. ITU internet report 2005: the internet of things[M]. Gerverna: International Telecommunication Union, 2005.

[5] 郑纪业,阮怀军,封文杰,等. 农业物联网体系结构与应用领域研究进展[J]. 中国农业科学, 2017, 50(4): 657-668.

[6] ARAI K, SAITOH Y. Rule based artificial intelligent system of cucumber greenhouse environment control with IoT technology[J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2018, 9(6):104-110.

[7] TRILLES O S, GONZALEZ-PEREZ A, HUERTA G J. Adapting models to warn fungal diseases in vineyards using in-field internet of things (IoT) nodes[J]. Sustainability, 2019, 11(2): 416.

[8] DUAN Y E. Research on IoT technology and IoT's application in urban agriculture[J]. Advanced Materials Research, 2012(457):785-791.

[9] 王旭东. 基于 WSN 的农田信息监测系统的设计与实现[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2018.

[10] YANG S H. WSN security[M]. London:Springer, 2014: 187-215.

[11] 郑少雄. 基于 WSN 的农田环境信息监测技术研究现状与分析[J]. 农业网络信息, 2013(8): 16-18.

[12] AMPATZIDIS Y, DE B L, LUVISI A. IPathology: robotic applications and management of plants and plant diseases[J]. Sustainability, 2017, 9(6): 1010-1023.

[13] 毕昆,赵馨,侯瑞锋,等. 机器人技术在农业中的应用方向和发展趋势[J]. 中国农学通报,2011,27(4):469-473.
BI Kun, ZHAO Xin, HOU Ruifeng, et al. The trend of application and development of robot technology in agriculture[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(4): 469-473. (in Chinese)

[14] ARAVIND K R, RAJA P, PEREZ-RUIZ M. Task-based agricultural mobile robots in arable farming: a review[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2017, 15(1): e02R01.

[15] 宋健. 基于 L298 的直流电动机 PWM 调速器[J]. 潍坊学院学报, 2004, 4(4): 87-88.

[16] MEKALA M S, VISWANATHAN P. A survey: smart agriculture IoT with cloud computing[Z]. IEEE, 2017:1-7.

[17] 何勇,聂鹏程,刘飞. 农业物联网与传感仪器研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 216-226.
HE Yong, NIE Pengcheng, LIU Fei. Advancement and trend of Internet of Things in agriculture and sensing instrument[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(10):216-226. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20131035&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.035. (in Chinese)

[18] JAWAD H M, NORDIN R, GHARGHAN S K, et al. Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture: a review[J]. Sensors, 2017, 17(8): 1781.

[19] LIU T, LI R, JIN X, et al. Evaluation of seed emergence uniformity of mechanically sown wheat with UAV RGB imagery[J]. Remote Sensing, 2017, 9(12): 1241.

[20] 王敬哲,丁建丽,马轩凯,等. 基于光谱指数的绿洲农田土壤含水率无人机高光谱检测[J/OL]. 农业机械学报,2018, 49(11):164-172.
WANG Jingzhe, DING Jianli, MA Xuankai, et al. Detection of soil moisture content based on UAV-derived hyperspectral imagery and spectral index in oasis cropland[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(11): 164-172. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181119&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.019. (in Chinese)