

基于 Unity3D 和 LoRa 物联网的农业大棚监测系统虚拟现实数字驾驶舱设计

唐 斌¹, 杨子毅¹, 姚 聪², 唐韩宇¹, 张建忠¹, 张烈山¹

(1. 浙江理工大学 信息科学与工程学院, 杭州 310018;

2. 浙江理工大学 机械工程学院, 杭州 310018)

摘要: 为了实现农业大棚环境参数的可视化监测与调控, 研究并开发了一种基于 Unity 3D 和 LoRa 物联网的大棚监控系统及虚拟现实数字驾驶舱; 基于 LoRa 无线通信技术构建了一个包含多区域环境参数感知节点与调控节点的物联网, 在私有云服务器部署 ThingsBoard 对数据与设备进行管理; 利用 Unity3D 根据实际农业大棚各物理对象开发了数字模型, 搭建了 VR 数字农业大棚, 并通过 HTTPS 协议与云平台进行数据交互, 从而实现了 VR 数字农业大棚与实际农业大棚的虚实交互; 经实验测试, 所研究和开发的农业物联网系统可以正确检测并上传数据, 各参数的测量重复性优于 3%, 虚拟现实数字驾驶舱一次数据更新延时小于 200 ms, 能实时、直观、清晰, 沉浸式地实现农业大棚各参数的监控; 该虚拟现实数字驾驶舱技术在现代智慧农业物联网系统中具有重要的应用潜能。

关键词: 虚拟现实; 数字驾驶舱; Unity3D; 物联网; 农业大棚; LoRa; ThingsBoard

Design of Virtual Reality Digital Cockpit for Agricultural Greenhouse Monitoring System Based on Unity3D and LoRa IoT

TANG Bin¹, YANG Ziyi¹, YAO Cong², TANG Hanyu¹, ZHANG Jianzhong¹, ZHANG Lieshan¹

(1. School of Information Science and Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to realize the visual monitoring, regulation, and control of environmental parameters in agricultural greenhouses, a greenhouse monitoring system and a virtual reality (VR) digital cockpit based on Unity 3D and LoRa internet of things (IoT) are researched and developed. An IoT containing multi-region environmental parameter sensing nodes and control nodes is constructed based on LoRa wireless communication technology, which deploys ThingsBoard on private cloud server to manage the data and devices. Using Unity3D to develop digital models based on the physical objects of actual agricultural greenhouses, build a VR digital agricultural greenhouse, and exchange data with the cloud platform via HTTPS protocol, thus realizing virtual reality interaction between VR digital agricultural greenhouses and actual agricultural greenhouses. After experimental testing, the developed agricultural IoT system can correctly detect and upload data, the measurement repeatability of each parameter is better than 14%, the data update delay of the virtual reality digital cockpit is less than 200 ms, enabling the real-time, intuitive, clear, and immersive monitoring of various parameters in agricultural greenhouses. The virtual reality digital cockpit technology has an important application prospect.

Keywords: virtual reality; digital cockpit; unity3d; IoT; agricultural greenhouse; LoRa; ThingsBoard

收稿日期:2025-02-21; 修回日期:2025-03-30。

基金项目:国家级大学生创新创业训练计划项目(202410338050);国家级大学生创新创业训练计划项目(202410338053);浙江省大学生科技创新活动计划资助项目(2024R406A035);浙江省基础公益研究计划资助项目(LGF21F050004)。

作者简介:唐 斌(2004-),男,大学本科生。

通讯作者:张烈山(1987-),男,博士,硕士生导师。

引用格式:唐 斌,杨子毅,姚 聪,等.基于 Unity3D 和 LoRa 物联网的农业大棚监测系统虚拟现实数字驾驶舱设计[J].计算机测量与控制,2025,33(8):60-71.

0 引言

随着经济水平的发展与生活质量的提高,人们对农产品的种类与质量都有着越来越高的要求^[1-2]。传统农业大棚是一种小面积高精度的耕作方式,可以提高农产品的产量与质量^[3],但同时也存在管理难度大、产品质量控制难等问题,不仅难以大范围普及,更容易因不合适的施肥导致化肥污染^[3-5],因此结合信息技术进行高效、科学的监测管理,实现农业大棚现代化已成为当下研究的热点^[6-7]。

农业物联网技术是一种利用互联网、物联网及云计算等信息化技术,将传感器、执行器、控制器及通信器等设备相互连接,进行信息交换、数据采集、数据传输及数据处理的技术,是在信息化时代下实现农业现代化的关键工具^[8]。近年来,基于 WIFI、ZigBee、NB-IoT 及 LoRa 等物联网无线传输技术的农业大棚物联网系统项目不断涌现^[9-12],展现了物联网技术在农业生产中的应用潜力。其中 LoRa 作为一种基于扩频技术的低功耗长距离无线通信技术,具有通信范围大、功耗低、成本低等特点^[13],与农业大棚物联网项目的低成本、功耗要求和大通信范围需求高度契合^[8]。目前,国内农业物联网普遍存在的一大问题是农业从业人员对现代信息技术、数字技术的理解和应用能力不足导致的技术接受度低^[14],从农业物联网系统设计的角度来考虑这是对数据的呈现不够立体、数据应用的深度不足。例如王楠^[11]提出了一种基于 LoRa 的农业温室大棚测控系统,该系统通过 LoRa 无线传感网络将多种传感器检测大棚环境数据传输到服务器,在系统终端通过列表形式的图标与数值展示,虽然全面地展示了各类数据,但数据呈现的维度单一、层次不足且解析深度不够。刘明辉等人^[15]提出了基于数字孪生的虚拟现实农场系统,通过图像识别技术,将环境信息和农作物生长状态信息映射到农场游戏应用程序中,从而实现现实农场与虚拟农场游戏之间的数字孪生。数字孪生的运用大大提升了农业数据的应用水平,但其数据和结果的展示形式仍然采用传统的二维图像,在空间映射与操作沉浸感上较为欠缺。如何在时空两种维度上更加精准地实现交互数据的呈现,进一步提升数据的应用水平,进而实现精细化的管理,是当前农业物联网技术发展的一个重要问题。而虚拟现实(VR, virtual reality)技术凭借其优异的交互性、多感知性和沉浸性特点,是回答这一问题的最佳答案之一。

VR 技术是一种通过计算机创建虚拟世界,使用户可以身临其境地感受虚拟环境中的各种事物的技术。VR 技术最早起步于 1956 年, Ivan Sutherland 研制了头盔显示器 HMD, 该设备的出现标志着虚拟现实技术正

式面向市场,为后期的发展及完善奠定基础^[16-17]。VR 技术很早就被应用于农业科学研究中。1992 年新西兰 Smith 团队通过虚拟现实技术可视化展示猕猴桃与藤架的属性^[18]; 2005 年在加拿大的 Lars Mündermann 团队,利用大量数据建立了拟南芥生长发育的虚拟现实模型,更精细地展示拟南芥植物形态随时间发展的关键属性^[19]。国内虚拟现实技术起步较晚,目前应用范围在逐渐扩大。我国从 863 计划开始,建立了“国家重点虚拟农业重点实验室”,对虚拟现实技术在农业上的应用具有重要意义^[20]。

目前 VR 技术在农业上的应用主要集中在农作物生长特性的科学研究中。本文提出将 VR 技术与物联网技术相结合,构建一种农业大棚多参数监控系统的数字驾驶舱。VR 数字驾驶舱相较于传统农业大棚物联网用户端仅以简单图表和文字呈现数据并实现远程调控的模式^[9-12]不仅在功能上实现了全面覆盖与提升,而且能给予用户沉浸式的交互体验。近期兴起的另一主流方案是数字孪生式系统,其侧重于通过 VR 建模逼真还原现实场景以可视化数据^[15,21],然而在农业大棚物联网系统中,主要关注对象——作物具有形态随生长周期而演变,且作物类型也会根据土壤肥力需求(如豆类轮作以提升土壤氮含量)、市场行情等因素进行轮换。对于这样的动态对象,VR 场景逼真还原的成本巨大,这与农业较低的利润水平存在矛盾,VR 数字驾驶舱与其相比,在场景还原上选择更合适的 VR 还原程度,配合多种可视化手段,更低成本、更高开发速度、更小性能要求得实现效果相近的数据呈现与用户交互体验。

与前述方案对比,本文提出的 VR 数字驾驶舱方案的创新之处在于:

- 1) 在数据呈现方面,不同于传统的数据看板,本系统结合 VR 技术和物联网技术对真实场景的各项数据进行了时空两个维度的精确呈现,创新性地探索了更经济、高效、立体的可视化策略。

- 2) 在用户交互体验方面,本系统通过美观的界面和及时的反馈机制,给予用户易用、美观和操作舒适的沉浸式交互体验,实现了对农业大棚物联网数据更高水平的应用。

- 3) 在系统架构方面,本系统针对传统农业物联网系统的数据结构特点以及农业应用场景对经济性和运行稳定性的关键性要求,设计了分层通用性架构。

根据这上述创新思路本文研究并开发了一种基于 Unity3D 和 LoRa 物联网的大棚监控系统及其虚拟现实 3D 数字驾驶舱。

1 系统结构

本文设计的基于 Unity3D 和 LoRa 物联网的农业大

棚监测物联网系统及其数字驾驶舱从数据流的角度可以分为感知层、传输层、网络层和应用层，该系统整体分层结构如图 1 所示。

感知层由多区域部署的环境参数感知节点和调控节点组成，各节点通过 LoRa 模块上报大棚环境参数和接收控制指令；传输层包含香橙派网关和 LoRa 模块，实现 LoRa 模块通信范围内的节点与节点及节点与网关间的数据互传；网络层通过香橙派网关接入有线网络实现与互联网的连接，将接收到的节点数据上传至云平台并接收和转发云平台的控制指令；应用层在私有云服务器中部署 ThingsBoard 云平台进行数据的存储、管理和 WEB 可视化呈现，利用 Unity3D 根据实际农业大棚各物理对象开发了数字模型，搭建了 VR 数字农业大棚，并通过 HTTPS 协议访问 ThingsBoard 云平台获取各物理对象的感知数据，最终实现了 VR 数字农业大棚与实际农业大棚的虚实交互。

2 LoRa 物联网结构及网关程序设计

2.1 物联网结构设计

为实现检测范围的全覆盖，本系统根据环境参数感知节点的有效感知范围，在农业大棚内多点部署环境参数感知节点。温室大棚内的 LoRa 无线传感网络的组建常设计为单网关星形拓扑结构^[11,22]，本系统考虑到 LoRa 模块的数据传输范围远超环境参数感知节点的有效检测范围，将一个环境参数感知节点和有效调控范围与

其感知范围高重合度的调控节点划为同一区域，设计了如图 2 所示的 LoRa 无线传感网络布设结构。一个主网关负责多个区域的 LoRa 数据传输，同时为了减少网关故障和检修造成的影响，每个主网关都设置了一个功能相同的备用网关。环境数据通过感知节点采集后通过节点的 LoRa 模块发送给网关的 LoRa 模块，网关接收并解析其 LoRa 模块串口发送的数据，通过有线网络和 HTTPS 协议上传至私有云 ThingsBoard 平台存储管理，VR 数字驾驶舱也通过 HTTPS 协议从私有云实时读取数据。

每个环境参数感知节点同时检测多种数据，一个编号为 i 的环境参数感知节点的有效感知范围 U_i 是其能检测的每种数据的有效被检测范围 u_j 的集合，用公式表示为：

$$U_i = \{u_j \mid j = 1, 2, 3, \dots, n\} \quad (1)$$

式中， j 为各类型环境参数的编号。

为便于计算，每个子范围 u_j 的闭合边缘曲线 $F_j(x, y) = 0$ 都用在同一坐标系下的多边形表示如公式：

$$F_j(x, y) = \{a_i x + b_i y + c_i \mid i = 1, 2, 3, \dots, n\} \quad (2)$$

或 4 次及以下的曲线方程表示，公式为：

$$F_j(x, y) = \sum_{i=0}^4 (q_i x^i + p_i y^i) \quad (3)$$

环境参数感知节点存储各子范围的边缘曲线，调控节点只控制一个大棚环境调节设备，调节一种环境参数类型 j ，其对应的有效调控范围的闭合边缘曲线函数为

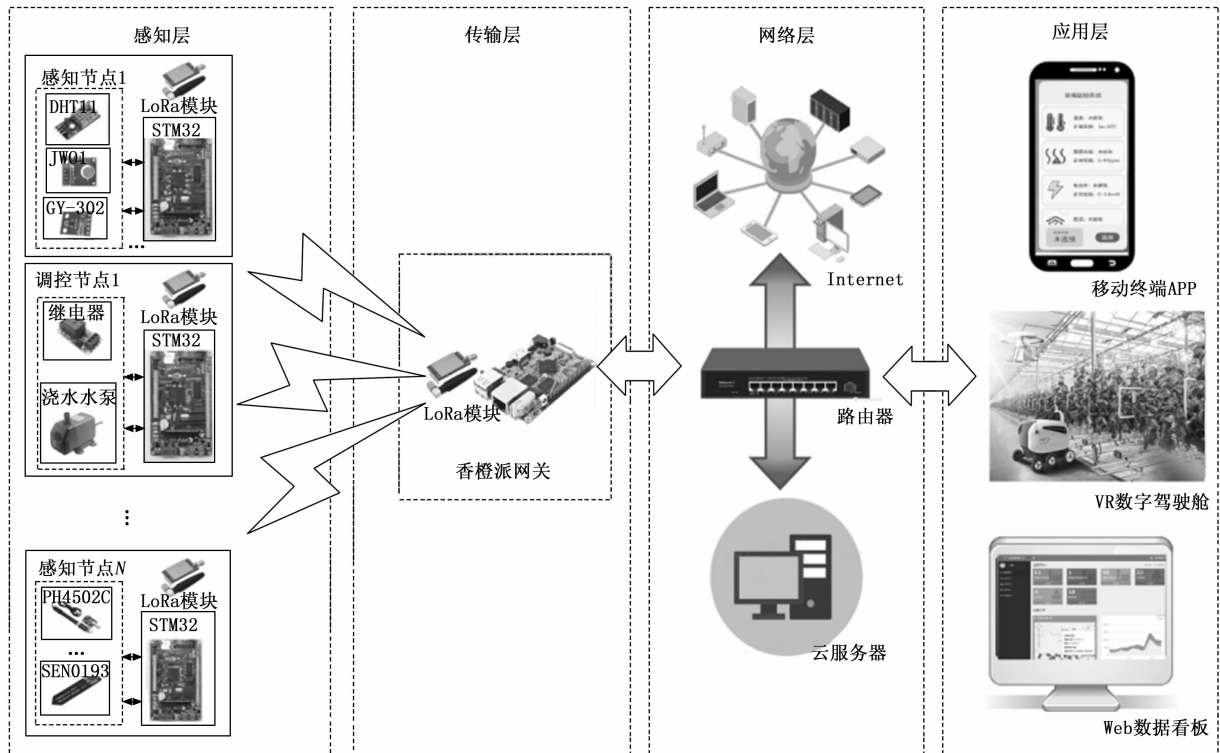


图 1 系统整体分层结构图

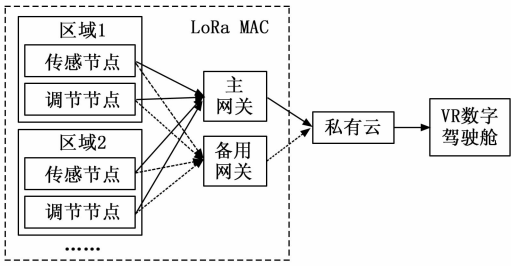


图 2 LoRa 无线传感网络布局结构图

$G_j(x,y) = 0$, 用同样的方式表示。

环境参数感知节点初次上电启动时向网关发送自身能检测数据类型和入网请求, 网关在接收到该环境参数感知节点的入网请求后, 除了向其返回分配给它的网络地址信息外, 还有应答得返回网络范围内所有未划分区域的调控节点的网络地址和其 $G_j(x,y)$, 当环境参数感知节点接收到一个 $G_j(x,y)$ 后, 通过蒙特卡洛法 (Monte Carlo Method) 求解其与自身对应的 $F_j(x,y)$ 的重合程度 β , 算法步骤如下:

1) 在坐标域中选择包含全部 $F_j(x,y) \leq 0$ 和 $G_j(x,y) \leq 0$ 的矩形范围。在该矩形范围内采用均匀分布的概率密度分布取 10 000 个随机点, 可以表示如公式:

$$\{(x_i,y_i) \mid i = 1,2,3,\cdots,10^4\} \tag{4}$$

2) 计算并记录每个点是只属于有效调控范围, 还是属于有效检测范围与有效调控范围的重叠部分, 又或者属于另外区域, 统计只属于有效调控范围即满足公式:

$$\begin{cases} F_j(x_i,y_i) > 0 \\ G_j(x_i,y_i) \leq 0 \end{cases} \tag{5}$$

的总点数 n_G , 和属于重叠区域即满足公式:

$$\begin{cases} F_j(x_i,y_i) \leq 0 \\ G_j(x_i,y_i) \leq 0 \end{cases} \tag{6}$$

的总点数 n_{FG} 。

3) 计算重叠率 β 如公式:

$$\beta = \frac{n_{FG}}{n_G} \times 100\% \tag{7}$$

若 β 大于 80% , 则记录该调控节点的类型与网络地址, 将该调控节点纳入自身所属区域。完成后, 环境感知节点向网关发送记录的结果和应答信息, 网关继续发送下一个未划分区域的调控节点的网络地址和其 $G_j(x,y)$, 重复上述过程, 直到所有未被记录的调控节点均被发送一遍。环境感知节点入网过程的流程如图 3 所示。环境参数感知节点每次检测环境参数后, 根据检测结果自动控制自身区域内相应调控节点运行固定时长, 实现对大棚环境的粗略调节。

调控节点初次上电时, 向网关发送自身能调节的环境参数类型、 $G_j(x,y)$ 和入网请求, 网关接收到后首先

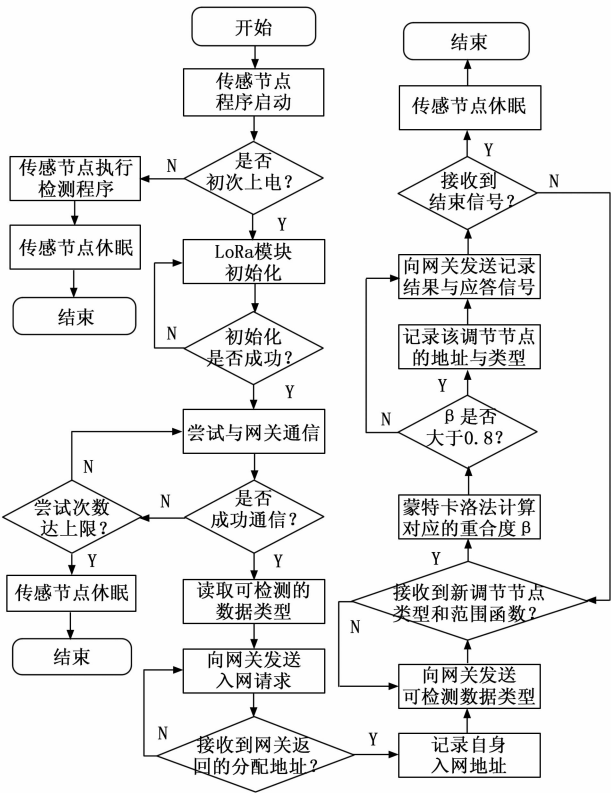


图 3 环境参数感知节点入网流程图

向其返回分配给其的网络地址, 然后向所有参数感知节点广播该调控节点的网络地址与 $G_j(x,y)$, 得到所有环境参数感知节点的记录结果后, 网关记录该调控节点的区域划分结果。

2.2 网关程序设计

网关程序基于 Ubuntu 操作系统开发, 底层已封装如与 LoRa 模块串口通信、多种格式的数据解析提取、数据上云、数据校验等驱动模块用于上层开发调用, 显著提升了开发效率。

本系统具有节点总数较多、数据传输的实时性要求较高的特点, 为保证网关高效稳定地进行数据传输与处理, 同时考虑各节点都具备一定算力, 无需网关来辅助节点底层控制, 网关主程序以在保障稳定运行的前提下实现高效的数据传输为目标设计了 3 条主要线程: 数据接收线程、数据上云线程和任务线程, 每个线程具体运行流程如图 4 所示。

数据接收线程将 LoRa 模块通过串口传输来的数据进行末位校验, 并按程序中预设的结构体解析, 若数据校验失败, 则根据数据中的网络地址信息, 添加请求对应节点重传数据的任务, 若无地址信息则直接舍弃。通过检验的数据将被存入上云数据缓存栈。网关与节点间的通过 JSON 格式的数据进行通信, 数据传输过程中, 发送端将打包好的 JSON 字符串数据通过 ASCII 码转换为十六进制字节数据, 通过串口连续发送给 LoRa 模块

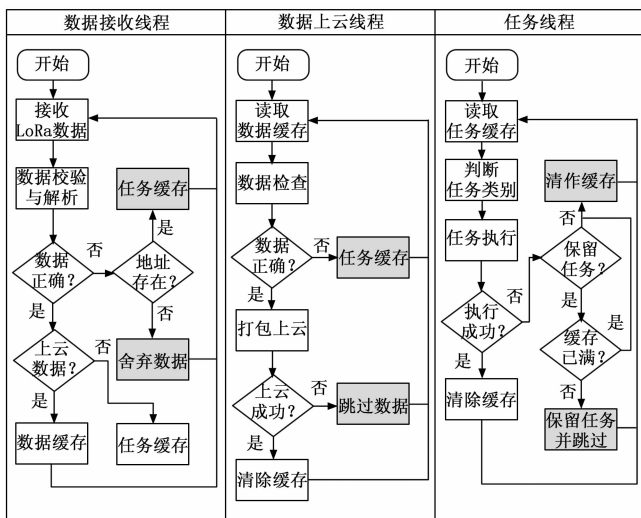


图 4 网关线程程序流程

进行传输，接收端的 LoRa 模块收到十六进制字节数据后通过串口发送给主控，接收端接收到全部字节数据后再通过 ASCII 解码还原为 JSON 字符串数据进行解析。数据发送前，发送端发送固定顺序的字节数据作为握手信号，接收端接收到后返回另一固定顺序的字节数据，发送端接收到正确的返回字节数据后再开始数据发送，发送完毕后同样握手确认。若过程中握手失败，则进行有限次数、固定时间间隔的重试。

数据上云线程和任务线程读取对应缓存栈中的信息，进行数据的打包上云或执行相应任务，遇到异常时跳过当前数据，操作成功则删除缓存信息。网关通过有线网络采用 HTTPS 协议直接访问 ThingsBoard 的应用程序编程接口（API，application programming interface）进行数据上云，该过程首先通过 POST 方式利用预存的用户名和密码获取 Token 密钥，然后通过另一 API 利用 Token 密钥与设备令牌将接收数据添加到对应设备的遥测数据中。ThingsBoard 中注册了 LoRa 网关设备，并创建了该设备的远程过程调用（RPC，remote procedure call）指令 MQTT 主题，网关通过有线网络利用 MQTT 协议订阅该主题，实时接收、解析与执行相应的 RPC 指令。HTTPS 协议在 HTTP 协议的基础上增加了 SSL/TLS 协议加密，确保了数据传输的安全性。网关与 ThingsBoard 进行 RPC 指令传输的 MQTT 主题选择正好一次（QoS 2）的服务质量等级，在 MQTT 协议中具有最高的可靠性。

网关程序运行出错的步骤（图 4 中的深色步骤）会留下特殊的错误日志，正常步骤则会留下一般日志，日志程序作为后台程序持续记录系统行为，方便后续修复。除了日志程序外，看门狗、自动重启等机制也保障着网关的可靠运行。

2.3 私有云构建

基于安全、成本、运维难度等各方面考虑，本项目选择自建私有云服务器来运行各项服务。服务器型号为戴尔 R730xd，该机型有 12 个 3.5 寸机械盘位，有很好的存储能力；机箱后部可以安装多张 Riser 卡来拓展 PCIE 槽，服务器在该 PCIE 槽中安装了 NVIDIA TESLA P40 显卡。P40 显卡有 24 GB 显存，训练模型和进行图形推理速度很快。

在该私有云上部署 ThingsBoard 物联网平台进行数据的存储、管理以及网页端的数据可视化展示。ThingsBoard 在实现与设备的连接上支持多种符合行业标准的物联网协议，在后台开发上提供了多种 API，特别是用于设备调控的 RPC 指令体系，可以规范控制指令，在数据管理上规范且可扩展，在数据呈现功能上可视化界面与插件丰富。基于上述优势，ThingsBoard 可实现物联网项目的快速开发、管理和扩展^[23-25]，十分适合自建物联网项目特别是需要在私有云上本地部署的应用场景。

ThingsBoard 以设备实体为最小数据结构单位，每个设备实体包含两类数据：状态数据和监测数据，该数据存储结构特别便于 VR 数字驾驶舱根据实际农业大棚的每个物理对象开发数字模型，且 ThingsBoard 平台优秀的可扩展性也有助于数字驾驶舱获取所需数据。

对于如图像、音频等类型的数据，由于其不适合使用 ThingsBoard 进行管理，本系统在私有云中构建规范的文件夹结构后通过 Alist 网盘服务向 VR 数字驾驶舱提供传输接口。

3 大棚物联网感知节点与调控节点的设计

3.1 感知节点设计

感知节点用于检测并传输农业大棚环境参数。感知节点结构上可以分为电源模块、传感器模块、主控模块和无线通信模块和显示模块^[26]，其结构如图 5 所示。

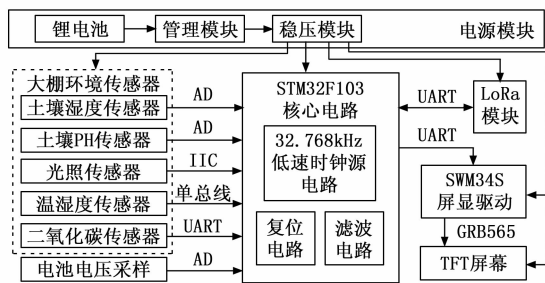


图 5 感知节点结构图

微控制单元（MCU，microcontroller unit）选用 STM32F103C8T6，它不仅功耗低，还拥有丰富的资源：20 kB 的 SRAM 与 128 kB 的 Flash 存储器满足较大程序的运行，2 个串口、1 个硬件 IIC、两个 12 位

ADC 共 23 个通道，满足与本系统中多个传感器及 Lo-Ra 模块的通信要求。在本系统中，其资源利用率较高，同时其较低的价格满足成本要求。系统外接低速时钟源作为节点实时时钟的时钟源，选择 3 小时的采样间隔，采样间隔期间节点关闭传感器进行休眠，大幅降低功耗。考虑到驱动 TFT 屏幕需要较高主频且较为消耗引脚资源，选用国产 SWM34SRET6 芯片作为屏驱，主控与屏驱通过串口通信，通过命令控制显示内容。SWM34S 系列芯片采用 Cortex-M33 内核，主频高达 150 MHz，内置 Flash 512 kB，SRAM 64 kB，具有高达 74 个 IO 端口和外设总线，内置 8 M SDRAM，用于 TFT 显示缓存，具有大容量，高速读写，封装小，高性价比的特点。内置 LCD 控制器，在本节点中通过 GRB565 模式驱动 TFT 彩色液晶显示屏。

LoRa 模块的型号为 E22-400T22D，它自带天线接口，具有较高的性价比。E22-400T22D 一旦收到 MCU 串口发送的带有发送结束字符的数据，便会将数据结束字符前的数据全部通过 LoRa 扩频调制技术送给其他 LoRa 模块。

反应大棚环境所需的主要参数类型有空气温度、空气湿度、二氧化碳浓度、光照强度、土壤湿度、土壤 pH 值等^[27]，它们对作物生长速度、病虫害发生、病害传播、作物产量等都有不同程度的影响，这些主要参数类型重要性与精度和测量具体要求如表 1 所示。

表 1 大棚环境参数的重要性与测量要求

参数类型	参数作用	精度要求	范围要求
空气温度	反应光合作用、呼吸作用、蒸腾作用；影响病虫害发生、作物生长速度。	$<\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-20\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$
空气湿度	反应蒸腾作用、水分和养分吸收；影响土层以上病害发生。	$<\pm 10\%\text{RH}$	$0\%\text{RH}\sim 100\%\text{RH}$
CO ₂ 浓度	影响光合作用速率，影响产量。	$<\pm 50\text{ ppm}$	$300\sim 2\text{ }000\text{ ppm}$
光照强度	影响光合作用速率、形态建成、开花结果时间。	$<\pm 5\%$	$0\sim 500\text{ }000\text{ lx}$
土壤湿度	影响植物根系吸水 and 养分，影响土层以下根系病害发生。	$<\pm 5\%\text{VWC}$	$0\sim 100\%\text{VWC}$
土壤 PH	反应土壤养分含量，影响植物养分吸收。	$<\pm 0.2\text{ PH}$	$3\sim 9\text{ PH}$

针对这些大棚环境的关键参数，本项目选用 DFRO-BOT SEN0193 电容式土壤湿度传感器、PH4502C 土壤 PH 传感器、GY302 光照强度传感器、DHT11 温度传感器、二氧化碳浓度、TVOC 和甲醛一体传感器 JW01，这些传感器不仅价格较低、应用便利，且准确度在可接受的范围内，传感器具体规格说明如表 2 所示。

表 2 传感器检测规格说明

传感器型号	技术规格
DFROBOT SEN0193	0~3 V DC 输出，检测相对值，需要校准
PH4502C	0~5 V DC 输出，2.5 V 对应 $7\pm 0.25\text{ PH}$ ，检测范围 0~14 PH，精度 $\pm 1\text{ PH}$ ，响应时间 $\leq 1\text{ min}$ ，内阻 $\leq 250\text{ }\Omega$
GY302	直接数字输出，0~65 535 范围，精度 $\leq 1\text{ lx}$
DHT11	检测范围温度： $-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、湿度： $5\%\text{ RH}\sim 95\%\text{ RH}$ ，单总线数字输出，精度 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 5\%\text{ RH}$
JW01	UART 输出，检测范围 TVOC： $0\sim 2.00\text{ mg/m}^3$ 、CO ₂ ： $350\sim 2\text{ }000\text{ ppm}$ 、HCHO： $0\sim 1.000\text{ mg/m}^3$ ，灵敏度 0.1 ppm 氢气，响应时间 $\leq 10\text{ s}$

上述传感器的数据通信方式分为集成电路总线（IIC，inter-integrated circuit）、串口和模数转换器（ADC，analog-to-digital converter）3 种。其中 IIC 以读取寄存器为主，以光照传感器 GY302 通信读取光照强度为例：待 GY302 模块初始化完成后，MCU 通过 IIC 发送需要读取的寄存器地址，GY302 返回其中的数据，先返回高 8 位的数据，再是低 8 位，假设收到的二进制高 8 位数据为 x_H ，低 8 位 x_L 则单位为 lx 的光照强度 l 如公式：

$$l = (x_H << 8 + x_L)/1.2$$

(8)

二氧化碳、TVOC、甲醛会被同一个传感器通过串口以串行数据的形式发送给主控 MCU，假设一次接收中按时间顺序从早到晚接收到的串行数据依次为 y_0 、 y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 、 y_5 、 y_6 、 y_7 、 y_8 ，则单位为 ppm 的 CO₂ 浓度 P_1 、单位为 mg/m³ 的 TVOC 浓度 P_2 以及单位同样为 mg/m³ 的甲醛 CH₂O 浓度 P_3 如公式（9）所示：

$$\begin{cases} P_1 = (256y_6 + y_7)/100 \\ P_2 = (256y_5 + y_4)/100 \\ P_3 = (256y_3 + y_2)/100 \end{cases}$$

(9)

以土壤湿度作为 ADC 读取的例子，其基本工作原理是在两电极中间填充高湿敏聚合物膜，总电容值随着周围湿度变化而变化，最终使得输出电压 u_l 与湿度 H 的关系如公式：

$$H = 100 \times (4092 - u_l)/3292$$

(10)

式中， H 是一个百分比。

相较于开放式农田的强降雨环境，农业大棚有效地屏蔽了大部分恶劣天气，气温范围内的温度变化对节点硬件电路影响极小，节点设备主要面临的环境挑战来自大棚内部灌溉系统产生的较高空气湿度和水雾环境，以及空气中的粉尘问题。为了提高节点在实际复杂农业环境中的稳定性和可靠性问题，本系统采用了检测探头与主控电路分离式的电路结构，将裸露芯片、引脚较多的

主控部分电路板置于全封闭的防护外壳内,并对电路进一步采用黑色环氧树脂灌封胶进行封装。针对需要进行气体交换的传感器探头,通过多孔结构的金属保护罩保护,在保证空气流动的前提下,有效阻挡较大颗粒的粉尘、水滴以及杂物直接接触传感器敏感元件。针对无需气体交换的传感器,如光照传感器,则采用透明亚克力封闭式保护罩进行更良好的保护;土壤湿度等土壤传感器对土壤环境具有良好的适应性,其主要脆弱点在于与主控板的连接线,考虑到连接线的脆弱性是多种传感器的共性问题,本系统统一在连接线外部增设了保护套管。除此之外,电路中加入静电保护、RC 滤波、保险丝等电路增强其稳定性。

3.2 调控节点设计

本系统设计的大棚环境参数调控节点(以土壤湿度调节为例)由浇水水泵、独立 MCU (STM32F103C8T6)、LoRa 模块以及继电器组成,从 VR 数字驾驶舱对其进行主动控制过程如图 6 所示。

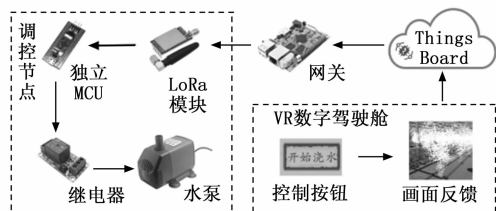


图 6 大棚土壤湿度参数调控指令传输路径示意图

调控节点通过 220 V 转 12 V DC 插头连接母座供电,主控板集成了 MP2315 芯片的 12 V 转 5 V DC-DC BUCK 降压电路,以及 CJA117B 芯片的 5 V 转 3.3 V 的 LDO 稳压电路,浇水水泵电源连接农场 220 V 交流电,将其开关电路连接至继电器常开触点,独立 MCU 的 IO 连接至继电器高电平触发的控制口,继电器通过 12 V 输入电源供电,5 V 电源为 LoRa 模块供电,3.3 V 电源给独立 MCU 供电,独立 MCU 通过控制 IO 口输出的高低电平控制继电器动作从而控制浇水水泵的启停。

应用层监测到土壤湿度值偏离预设阈值需要进行调控时,可以在虚拟现实 3D 数字驾驶舱内的控制按钮交互,通过 HTTPS 协议利用 ThingsBoard 平台的 API 接口向网关订阅的 RPC 主题内发送指令,网关通过 MQTT 协议接收到该指令后,通过 LoRa 模块向对应区域的土壤湿度调控节点发送开启控制指令,土壤湿度调控节点的 LoRa 模块收到指令后通过串口传输给 MCU,MCU 解析后根据命令内容控制继电器动作实现对浇水水泵的启停控制,同时 VR 数字驾驶舱中也给出画面反馈,从而达到沉浸式调节目标区域土壤湿度的目的。

调控节点在执行结束后会向网关返回执行结束的信

息,网关将该信息上云实现实时状态更新。

调控节点距离浇水水泵最近,最容易受到浇水的影响,为了提升调控节点的可靠性与稳定性,主控电路除黑色环氧树脂灌封胶进行封装外,采用全封闭式防水外壳,连接线处的保护管也采用防水效果更好的材料。

4 基于 Unity3D 的 VR 数字驾驶舱设计

4.1 VR 数字驾驶舱架构

为了梳理 VR 数字驾驶舱的整体结构,同时使得该 VR 数字驾驶舱技术更具有广泛的适用性,首先对用于农业大棚的 VR 数字驾驶舱进行整体架构设计。参考用于智慧城市系统的 VR 数字驾驶舱的理论架构^[28],在通用数字驾驶舱架构基础上结合本文中的农业大棚物联网系统和云平台的特点进行了一定优化,其架构如图 7 所示。

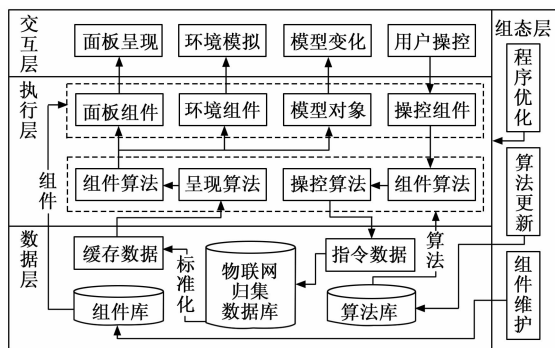


图 7 VR 数字驾驶舱架构示意图

本文中的农业大棚物联网系统和云平台相比智慧城市系统^[29]等物联网系统而言具有数据分布范围较小、数据归集程度较高、维护周期较长的特点。针对本文的农业大棚物联网系统的 VR 数字驾驶舱架构的数据层、执行层、交互层和组态层设计如下:

1) 数据层,数据层作为 VR 数字驾驶舱的底层,是面向云平台传输与处理数据的一层。本文的农业大棚物联网系统数据分布范围较小,ThingsBoard 云平台中的数据归集程度较高,VR 数字驾驶舱可以通过 HTTPS 协议获取每个设备实体的各项数据,也可以通过 HTTPS 协议向其发送 RPC 指令调控设备。数据层还包含 VR 数字驾驶舱的算法仓库与组件的仓库。数据层主要功能是根据 VR 数字驾驶舱的需要从归集数据库(在本文的系统中是指 ThingsBoard 私有云平台)中获取最新的数据进行标准化处理后缓存,方便其它层调用,以及结构化并发送用户指令。

2) 执行层,执行层是 VR 数字驾驶舱的核心,该层负责整个 VR 数字驾驶舱的运行逻辑控制。执行层按照脚本程序,从数据层的仓库中调用相关算法与组件,将待呈现数据格式化后传递给组件呈现。用户操控组件

传入用户指令时, 执行层同样通过调用相关算法将用户指令传入数据层。

3) 交互层, 交互层面向用户, 利用数据展示面板、功能按钮、现实环境模拟、3D 模型等多种组件通过数据可视化图表、外形变化、颜色变化、提示标识等多种方式向用户呈现信息, 同时又向执行层响应用户的操作。美观、流畅的组件在交互层极大提升了用户的体验。

4) 组态层, 组态层负责其他三层的维护与更新, 主要对执行层的程序、组件库中的组件和算法库中的算法进行更新和增减, 针对农业大棚物联网系统维护周期长的特点, 采用组态层的方式进行维护, 增加了维护的灵活性。

该 VR 数字驾驶舱架构设计充分利用了农业大棚物联网系统与云平台已有的数据和框架基础, 适应了农业物联网系统维护周期较长的特点, 其不仅适用于本项目的智慧农业大棚物联网系统与云平台, 还在其他农业物联网系统中具有一定普适性和参考价值。

4.2 数据交互的实现

实现 VR 模型与 ThingsBoard 云平台、底层物联网的数据交互是 VR 数字驾驶舱实现的关键。虚实数据的交互位于数字驾驶舱的数据层。为将虚拟现实技术有效融入农业物联网系统, 本文运用 Unity3D 作为引擎设计了具体可行的功能实现方案。

VR 数字驾驶舱中的每个人机交互对象都配备控制脚本, 用于控制对象行为、管理对象属性以及响应用户操作。场景中, 两个没有实体的管理对象分别搭载数据传输和数据管理脚本, 分别负责与云平台传输数据以及标准化和管理每次获取的数据。数据管理脚本将处理后的数据传递到人机交互对象的控制脚本中进行信息呈现, 人机交互对象的控制脚本将用户操作所隐含的用户指令传递给数据传输脚本, 进而向云平台传输调控指令。各脚本均使用 C# 语言编写。

数据传输脚本利用 Unity3D 的 “UnityEngine. Networking” 命名空间中的 “UnityWebRequest” 类, 通过 HTTPS 协议与 ThingsBoard API 交互获取数据。具体流程为: 首先使用 “Post” 方法根据预存的用户名和密码获取最新 Token 密钥, 然后使用 “Get” 方法携带 Token 密钥来进行验证, 获取所需数据。获取成功后将数据赋值给数据管理脚本定义的 “Public” 类型的变量, 进行解析和标准化, 数据管理脚本同样通过赋值 “Public” 类型变量的方式, 对人机交互对象控制脚本进行数据的更新和推送。以环境参数感知节点数据为例: VR 数字驾驶舱启动或到达数据更新间隔时, 数据传输脚本会从 ThingsBoard 获取 JSON 格式的数据包, 若 Token 验证失败则重新获取 Token 后再次尝试, 数

据包获取成功后被传递给数据管理脚本。数据包内部包含多种传感器数据, 每种传感器数据包括单位、数值和更新时间, 数据管理脚本根据程序内预定义的类型和结构体解析数据内容, 若解析到更新数据, 则将缓存数据更新, 并推送至人机交互对象控制脚本中, 否则将该数据舍弃, 等待下次数据获取, 数据获取功能流程如图 8 所示。其他类型的数据利用同样方法, 通过 Alist 网盘服务的下载 API, 根据正确的下载链接从私有云服务器中获取。

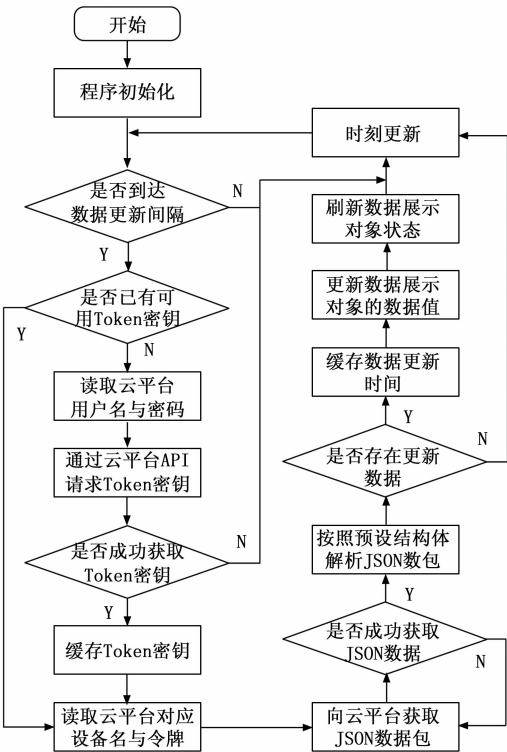


图 8 数据获取与解析缓存流程图

数据获取和处理的定义被定义为 Unity3D 的 “IEnumerator” 方法, 通过 “Coroutine” 方法启动, 实现功能在不同帧之间分散执行, 避免阻塞主线程。

人机交互对象控制脚本的核心是控制人机交互对象和响应用户操作, 以键盘与鼠标作输入时, 监听作物 3D 模型被点击事件, 控制详细信息面板开关的脚本为例, 其控制功能流程如图 9 所示。

人机交互对象控制脚本在 “Update” 方法中判断用户鼠标左键松开这一事件是否发生, “Update” 方法在每一帧都会被调用一次, 当用户鼠标左键松开被检测到时, 获取鼠标在用户界面上的坐标, 并根据该坐标判断是否处在其他功能按钮上, 如果不在则创建从主摄像机向鼠标点击位置发出的不可见 “Ray” 类型射线, 返回射线接触到的第一个 3D 模型对象, 若返回了作物的 3D 模型对象, 则根据详细数据展示控件当前的使能状态, 动态响应用户点击事件, 实现通过

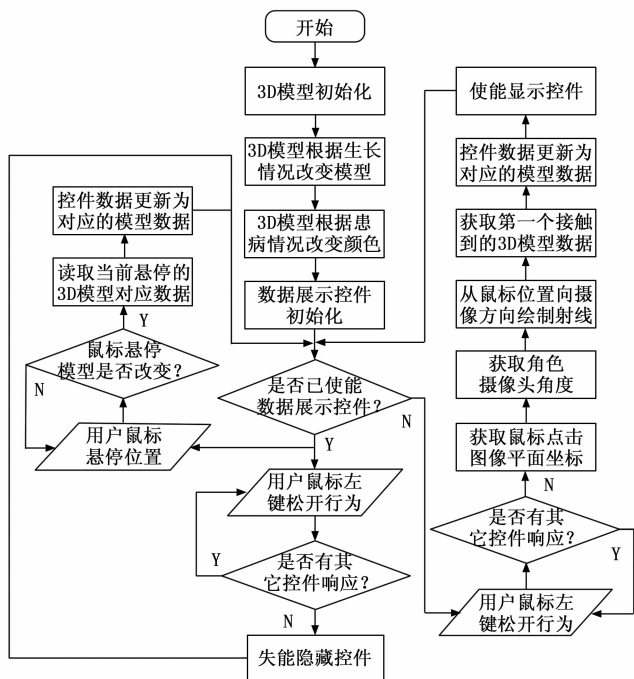


图9 作物 3D 模型的交互控制流程图

重复点击来切换面板的显示与隐藏。在详细数据展示控件使能时,通过同样方法监听鼠标悬停位置,当鼠标悬停在新的作物 3D 模型上时,数据展示控件更新并显示对应的新数据。

用户控制角色移动是虚拟现实技术运用的重要特点,在虚拟大棚中,虚拟角色代表了现实世界中的用户,借助虚拟现实技术的空间还原性,VR 数字驾驶舱在角色身上挂载“Mesh Collider”组件,在虚拟大棚的不同区域挂载不同形状的“Collider”组件,Unity3D 会在角色上与虚拟大棚环境中的“Collider”类组件发生接触时触发“OnTriggerEnter”函数同时将触发“Collider”组件的对象传入函数中,根据被传入的对象,在该函数里切换各组件呈现的数据,实现根据角色在虚拟大棚中的位置,动态调整 VR 环境中人机交互对象与实际物理对象的对应关系。例如,传感器数据面板总是显示有效感知范围包含角色位置的节点数据,部分功能按钮也根据角色位置动态显示与隐藏。这样基于角色位置的信息呈现与用户操作模式,可以提升用户操作的沉浸感。

4.3 用户交互体验的优化设计

为构建高效、舒适且具有沉浸感的交互环境,本系统在用户体验层面进行了多项精细化设计。在色彩方面,系统采用了色彩丰富且经过专业美学设计的图形元素,利用色彩编码策略区分信息层级、指示状态变化。不仅确保其显示效果鲜明、饱和度适宜,而且避免了色彩失真或视觉疲劳。优化的色彩搭配不仅提升了界面的视觉吸引力与舒适度,而且增强了信息的

呈现效率。

在动画方面,系统在如菜单切换、数据更新、面板显现等场景中广泛运用淡入淡出、平滑移动、连续缩放等动画提升用户交互体验的流畅程度。在 Unity3D 中分别通过 Animator 组件、Canvas Group 组件和 Transform 组件分别实现动画控制、淡入淡出和缩放平移等效果,在协程中通过 Animator 组件控制预制动画的启停,迭代式修改对象 Canvas Group 组件中的透明度、Transform 组件中的位置、大小实现淡入淡出、平移和缩放等动画。动画作为重要的操作反馈机制,有效帮助用户清晰感知操作结果和建立直观的操作预期。

为增强用户在 VR 环境中的操作确认感和交互深度,系统特别加入了选中反馈光效。当用户选中虚拟场景中的可交互元素时,被选中元素会即时触发光效反馈。例如,边缘高亮发光、颜色微 Pulsate、Bloom 等效果。这些光效在 Unity3D 中通过材质球调整、光照组件以及 Highlight 组件等组件实现光效,在 Update 函数中重复检测可交互对象的交互状态标志位,动态开关光效组件实现反馈控制,反馈光效能够清晰地为用户指示当前选中的目标,增强操作的确定性,并提升交互的舒适度。

VR 数字驾驶舱界面的布局设计考虑了用户操作便捷性,将整个画面分为上、中、下 3 层结构,其中常用的操作按钮作为常驻 UI 始终出现在界面下层,中层作为信息展示的主要区域,各类数据面板、主要画面、动画效果等均在中层显示,上层常驻 UI 显示当前天气、时间以及应用 Logo。这种层次化的信息组织方式,能引导视觉焦点,降低用户的认知负荷,提升操作效率和舒适度。此外,利用 3D UI 系统 Canvas in World Space,将具有空间对应性的可视化图表作为 3D 元素合理地分布在虚拟空间中,并通过在 Update 函数中根据角色位置调整 Transform 组件的旋转属性使这些 3D 元素始终保持面向用户的视角,优化用户在 VR 环境中对空间化数据的理解与分析效率。

为使 VR 数字驾驶舱能适应不同用户的操作偏好与输入设备差异,本系统实现了输入方式的自定义功能。用户可将驾驶舱内的各项功能操作自由映射至键盘、鼠标、VR 手柄等多种输入设备。Input Manager 组件抽象化的输入管理机制有效屏蔽了底层硬件差异,通过 C# 脚本直接调用该组提供的接口函数实现修改输入映射。这种高度灵活的输入映射方案允许用户根据个人习惯和设备条件,量身定制最舒适、最高效的操作模式。

5 实验结果与分析

首先对各传感器根据拉依达准则进行测量重复性测

试，拉依达准则建立在重复测量是正态分布且等精度的，而造成奇异数据的干扰或噪声不满足正态分布的假设上^[30]，传感器重复检测的实际情况可以认为满足该假设。根据拉依达准则计算测量重复性首先需要计算数据的平均值 X_{mean} 如公式 (11)：

$$X_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$$

(11)

式中， N 为重复测量次数，然后计算标准差 σ 如公式 (12)：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - X_{\text{mean}})^2}{N}}$$

(12)

最后三倍的标准差 σ 即测量重复性的计算结果。本系统传感器类型众多，为了能统一描述，将各传感器的测量重复性 c 用百分比表述如公式：

$$c = \frac{3\sigma}{S} \times 100\%$$

(13)

式中， S 为传感器的总量程。

各传感器检测速度均能达到每秒 5 次及左右，在拉依达准则的假设下，为了得到较准确的测量重复性，数据量应该大于 500^[31]，但考虑到环境的时变性与检测速度限制，数据量不宜过多，本实验令各传感器在同一位置同一状态连续检测 1 000 次获取实验数据计算测量重复性。考虑到作物种类、天气情况、环境调节设备启停都会对大棚环境参数情况有一定影响，本研究于 3 月份的晴朗天气下，约下午 15：00 时，分别在以下不同温室环境及条件下进行了重复测量实验：

1) 美玉 25 玉米温室：在该温室中，环境调控设备处于关闭状态。

2) 牧星番茄温室：在该温室中，环境调控设备同样处于关闭状态。

3) 牧星番茄温室：在同一牧星番茄温室的另一区域（与 b 距离 30 m 左右，相互影响较小），实验前已启动浇水水泵一段时间，且实验期间浇水水泵持续运行。

另外，在同一天夜间约 21：00 时，b 组条件下进行 d 组实验。

各组实验中感知节点均被固定于作物上方用于挂苗的铁丝上，约距地 2.5 m 的空中。

最终各组的测量总时间小于 5 min，得到测量重复性结果如表 3 所示，总体来看，在各类情况下的测量结果的重复性均优于 3%，这表明测量结果具有较高的稳定性和可靠性。

对比 a、b 两组可以看出在不同作物种类的大棚环境下各类传感器检测的精度无显著差异。表明传感器检测精度不受作物类型差异的影响。

对比 c、b 两组，可以观察到传感器在调节设备启动停情况不同时，检测精度并无显著差异。说明短时浇

表 3 测量重复性实验结果
(a) 美玉 25 玉米大棚

参数	平均值	标准差	重复性/%
空气温度	20.8	0.08	0.30
空气湿度	44.9	0.02	0.07
土壤湿度	68.1	0.59	2.72
土壤 PH	7.56	0.04	0.85
光照强度	18 897.2	6.92	0.04
CO2 浓度	368.6	5.71	1.04

(b) 牧星番茄大棚

参数	平均值	标准差	重复性/%
空气温度	23.9	0.09	0.34
空气湿度	62.1	0.02	0.07
土壤湿度	65.2	0.61	2.81
土壤 PH	6.73	0.03	0.64
CO2 浓度	426.6	6.31	1.15

(c) 启动了浇水水泵的牧星番茄大棚

参数	平均值	标准差	重复性/%
空气温度	23.1	0.15	0.57
光照强度	16 972.5	5.56	0.03
空气湿度	69.4	0.13	0.46
土壤湿度	90.2	0.42	1.92
土壤 PH	6.95	0.01	0.21
光照强度	15 816.7	7.04	0.04
CO2 浓度	410.3	6.28	1.14

(d) 夜间的牧星番茄大棚

参数	平均值	标准差	重复性/%
空气温度	21.2	0.08	0.30
空气湿度	63.2	0.02	0.07
土壤湿度	66.0	0.63	2.90
土壤 PH	6.74	0.03	0.64
光照强度	0	0	0
CO2 浓度	506.3	6.87	1.25

水及由此可能引起的环境变化对传感器检测精度影响极小。

对比 c、b、d 三组，可以推断传感器在光照、降水情况不同的天气状况下检测精度并无显著差异。表明传感器在不同天气状况下都能保持较稳定的检测精度。

经过上述分析，可以得出结论，本研究所使用的环境参数感知节点，在温室作物类型差异、天气条件变化以及环境调控设备启停等因素的影响下，均能实现可靠的环境参数监测。

然后在实际大棚环境中部署所开发的各个 LoRa 物联网节点，完成整个大棚监控系统硬件的联调测试。并让物联网系统在春季苗期 60 m×56 m 大小的美玉 25 农

业大棚内试运行 7×24 小时, 在 ThingsBoard 云平台与 VR 数字驾驶舱中监测相关数据, 以验证本系统以下 2 个功能:

1) 环境参数感知节点能否正确检测数据, 并将数据上传至 ThingsBoard 云平台存储。

2) VR 数字驾驶舱是否能实时从私有云读取数据并正常运行各种数据展示功能。

经过实验测试, 在云平台得到环境参数感知节点上传的监测数据以及数据被接收到的时间点。结果显示, ThingsBoard 平台能正常实现数据可视化, 数据表明环境参数感知节点可以正常运行较长一段时间, 数据检测准确度高, 并且数据传输至云平台的过程较为稳定。

实验中, 在 ThingsBoard 云平台已成功获取物联网的感知数据后。运行 VR 数字驾驶舱, 测试虚实数据交互功能, VR 数字驾驶舱应用界面效果如图 10 所示, 经过测试, VR 数字驾驶舱各项功能能正常运行。



图 10 虚拟现实数字驾驶舱界面

在调试栏打印 VR 数字驾驶舱从 ThingsBoard 获取数据的延时, 得到如表 4 所示的延时情况, 一次数据更新的延时约 200 ms 左右, 实时性良好。

表 4 虚拟现实数字驾驶舱数据获取与解析延时

内容	延时/ms
获取 Token 密钥	20
获取 JSON 数据包	162
解析单个节点数据	<1
更新控件数据	<1
总计	<184

6 结束语

本文提出将物联网技术和虚拟现实技术相结合, 构建一种新型农业监控系统。基于 Unity3D 引擎和 LoRa 物联网技术设计并实现了云边端交互的温室大棚监控系统及其数字驾驶舱。对所研究的物联网监控系统和数字驾驶舱进行了实际部署, 开展了实验测试。实验很好地验证了本文所提出的 LoRa 物联网系统结构及 VR 数字驾驶舱架构的可行性。实验结果证明了 VR 技术与物联网技术相结合能够实现农业大棚生产各参数实时、实地

的感知和 3D 可视化呈现, 对大棚农业生产精细化管理和作业奠定了技术基础。但本系统相较于实际的应用需求, 感知节点在功能上还缺少对土壤具体肥力 (如氮、磷含量) 等环境参数的传感器, 可以增加该方面的传感器, 以满足全方位的环境监测需求。

参考文献:

- [1] 张佳琳, 高齐圣. 农产品质量对农业经济增长影响的实证研究 [J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2024, 36 (4): 120-127.
- [2] PÉREZ J G, PEÑA C L. New products, new tastes? agricultural innovations and continuities between the ninth and fourth centuries BC in Mediterranean Iberia [J]. Oxford Journal of Archaeology, 2024, 43 (1): 43-60.
- [3] 鲁学奎. 浅谈温室大棚种植蔬菜的优势与不足 [J]. 农民致富之友, 2018 (16): 44.
- [4] 杨婧暄. 我国农业大棚现状及未来发展趋势 [J]. 种子科技, 2023, 41 (14): 142-144.
- [5] PÉREZ J G, PEÑA C L. New products, new tastes? agricultural innovations and continuities between the ninth and fourth centuries BC in Mediterranean Iberia [J]. Oxford Journal of Archaeology, 2024, 43 (1): 43-60.
- [6] FRIKHA T, KTARI J, ZALILA B, et al. Integrating blockchain and deep learning for intelligent greenhouse control and traceability [J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 79: 259-273.
- [7] 李冬芹, 全义涛. 智慧农业技术在设施蔬菜种植中的应用 [J]. 农业工程技术, 2024, 44 (17): 65-66.
- [8] 陈思衡, 赵超越, 郝宏堡, 等. 农业物联网技术应用及创新发展的途径探讨 [J]. 现代化农业, 2024 (11): 91-93.
- [9] 张文霞, 王 圆, 张 凯, 等. 基于 ZigBee 无线网络的智能农业温室大棚管理系统的设计与实现 [J]. 中国农机化学报, 2016, 37 (6): 247-250.
- [10] 李睿欣, 姚 磊, 谢伟鸿. 基于 NB-IoT 的多功能农业大棚监测及控制系统设计 [J]. 农业装备与车辆工程, 2021, 59 (5): 72-75.
- [11] 王 楠. 基于 LoRa 无线传感网络的农业温室大棚环境测控系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2024, 32 (8): 100-107.
- [12] 杨 飞, 谢 涛, 伍 英, 等. 基于 WIFI 的农业物联网温室大棚环境监测系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (2): 50-53.
- [13] 王 阳, 温向明, 路兆铭, 等. 新兴物联网技术—LoRa [J]. 信息通信技术, 2017, 11 (1): 55-59.
- [14] 张会波. 物联网技术在智能农业中的应用与前景展望 [J]. 现代化农业, 2024 (11): 88-90.
- [15] 刘明辉, 张 铮, 诸立鸿, 等. 基于数字孪生的虚拟现实农场系统 [J]. 现代信息科技, 2024, 8 (17): 195

-198.

[16] 刘华清. VR 技术的应用现状与发展趋势研究 [J]. 科技传播, 2019, 11 (4): 114-115.

[17] 牛颖晖. 基于虚拟现实技术的农业实验室的研究与设计 [D]. 大连: 大连海洋大学, 2024.

[18] SMITH G S, CURTIS J P, EDWARDS C M. A method for analysing plant architecture as it relates to fruit quality using three-dimensional computer graphics [J]. *Annals of Botany*, 1992, 70 (3): 265-269.

[19] MUNDERMANN L, ERASMUS Y, LANE B, et al. Quantitative modeling of arabidopsis development [J]. *Plant Physiology*, 2005, 139 (2): 960-968.

[20] 周振华. 3D 虚拟现实技术在农业中的应用 [J]. 农业工程, 2018, 8 (11): 47-49.

[21] 谢 煜. 虚拟智能温室的设计与展示 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2019.

[22] 杨 扬. 基于 LoRa 物联网技术的火龙果大棚监控系统的设计与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (11): 82-85.

[23] 黄亦成, 龙 帆. 基于 ThingsBoard 和 Spark Streaming 的传感器数据采集和分析平台 [J]. 工业控制计算机, 2023, 36 (11): 9-11.

[24] BESTARI D N, WIBOWO A. An IoT-based real-time weather monitoring system using telegram Bot and ThingsBoard platform [J]. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 2023, 17 (6): 1-10.

[25] AGHENTA L O, IQBAL T. Design and implementation of a low-cost, open source IoT-based SCADA system using ESP32 with OLED, ThingsBoard and MQTT protocol [J]. *AIMS Electronics and Electrical Engineering*, 2019, 4 (1): 57-86.

[26] 陈 彪, 揭晶方, 张 伟, 等. 基于 LoRa 的智能农业系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (10): 128-131.

[27] 邢希君, 宋建成, 吝伶俐, 等. 设施农业温室大棚智能控制技术的现状与展望 [J]. 江苏农业科学, 2017, 45 (21): 10-15.

[28] 郑慧杰, 张 森, 马玉晓. 数字驾驶舱体系架构的探索与研究 [J]. 信息技术与标准化, 2022 (9): 78-83.

[29] 管 磊. VR 技术在建筑行业的应用优势 [J]. 建筑, 2023 (5): 139-141.

[30] 艾 博, 孙 伟, 宗俊吉, 等. 基于拉依达准则改进的测量重复性评定方法 [J]. 电子工业专用设备, 2024, 53 (6): 43-45.

[31] 王 维, 向瀚淋, 龚雯丽, 等. 常见分布中心极限定理适用样本量研究 [J]. 高师理科学刊, 2021, 41 (7): 20-25.

~~~~~

(上接第 59 页)

[11] 周  妍, 尹  勇, 邵泽远. 基于循环生成对抗网络的海上落水人员红外图像检测方法 [J]. 上海海事大学学报, 2025, 46 (2): 87-93.

[12] TANG IL, LIU S B, ZHAO D X, et al. PCB-YOLO: an improved detection algorithm of PCB surface defects based on YOLOv5 [J]. *Sustainability*, 2023, 15 (7): 5963.

[13] HU H W, LI Z R, HE Z Y, et al. Road surface crack detection method based on improved YOLOv5 and vehicle-mounted images [J]. *Measurement*, 2024, 229: 114443.

[14] XU L S, DONG S H, WEI H T, et al. defect signal intelligent recognition of weld radio graphs based on YOLO V5-improvement [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 99: 373-381.

[15] QIU QW, LAU D. Real-time detection of cracks in tiled sidewalks using YOLO-based method applied to unmanned aerial vehicle (UAV) images [J]. *Automation in Construction*, 2023, 147: 104745.

[16] TANG X, ZHANG J F, XIA Y Z, et al. DBW-YOLO: a high-precision SAR ship detection method for complex environments [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, 17: 7029-7039.

[17] FAN X Y, HU Z H, ZHAO Y C, et al. A small-ship object detection method for satellite remote sensing data [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, 17: 11886-11898.

[18] WANG Y, WANG B R, HUO L L, et al. GT-YOLO: nearshore infrared ship detection based on infrared images [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12 (2): 213.

[19] YU Z P, HUANG H B, CHEN W J, et al. YOLO-FaceV2: A scale and occlusion aware face detector [J]. *Pattern Recognition*, 2024, 155: 110714.

[20] TAHIR A U N, LONG Z, ZHANG Z, et al. PVswin-YOLOv8s: UAV-based pedestrian and vehicle detection for traffic management in smart cities using improved YOLOv8 [J]. *Drones*, 2024, 8 (3): 84.

[21] YANG J N, LIU S L, WU J J. et al. Pinwheel-shaped convolution and scale-based dynamic loss for infrared small target detection [J]. *Arxiv*, 2023, Arxiv.Org/abs/2412.16986v1.

[22] TAN M, PANG R, LE Q V. EfficientDet: scalable and efficient object detection [J]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2020: 10778-10787.