

基于数字孪生的智慧农业环境监测系统设计与实现

杨 涛

重庆三峡学院计算机科学与工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年1月28日; 录用日期: 2026年2月27日; 发布日期: 2026年3月11日

摘 要

随着物联网技术在现代农业生产中的快速普及, 温室大棚的环境管理正加速向数字化与可视化方向转型。对于传统监测手段在建立环境参数与物理空间映射关系上的局限性, 本文提出了一种基于云端协同与混合渲染架构的智慧农业监测系统。该系统在服务端构建了基于MQTT协议的发布/订阅消息处理机制, 实现了海量异构传感器数据的实时汇聚与标准化解析; 在移动端, 通过构建虚实映射模型与射线检测算法, 将实时环境参数动态叠加于轻量化三维场景中。该系统不仅能够有效降低三维可视化的硬件门槛, 还能以毫秒级时延实现物理大棚与虚拟模型的同步, 显著提升了农业生产管理的直观性与即时性。

关键词

智慧农业, 数字孪生, 数据可视化, 云端协同, 温室大棚

Design and Implementation of a Smart Agriculture Environmental Monitoring System Based on Digital Twin

Tao Yang

School of Computer Science and Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing

Received: January 28, 2026; accepted: February 27, 2026; published: March 11, 2026

Abstract

With the rapid adoption of IoT technology in agriculture, greenhouse management is shifting toward digitalization and visualization. However, traditional monitoring methods struggle to map

environmental data to specific physical spaces. To solve this problem, this paper proposes a smart agriculture monitoring system based on cloud-client collaboration and a hybrid rendering architecture. On the server side, the system uses an MQTT-based publish/subscribe mechanism. This enables the real-time collection and standardization of massive data from diverse sensors. On the mobile side, the system employs virtual-real mapping models and raycasting algorithms. These allow real-time environmental parameters to be dynamically overlaid onto lightweight 3D scenes. This system effectively lowers the hardware requirements for 3D visualization. It also achieves millisecond-level synchronization between the physical greenhouse and the virtual model. Consequently, it significantly improves the intuitiveness and timeliness of agricultural management.

Keywords

Smart Agriculture, Digital Twin, Data Visualization, Cloud-Client Collaboration, Greenhouse

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

温室大棚作为现代农业生产中调节作物生长环境的重要设施，通过人工干预温度、湿度及光照等气候因素，有效解决了自然环境对农业生产的限制[1]。随着物联网、移动互联网及大数据技术的深度融合，智慧农业的理念逐渐深入人心，通过部署环境感知网络实现对大棚内部环境要素的实时采集与远程监控，已成为提升农业精细化管理水平的重要手段，推动了农业生产从传统经验型向数据驱动型的转变[2]。

然而，尽管现有的监测技术解决了数据获取的难题，但在数据可视化与交互体验层面仍有待进一步优化。目前主流的监测平台多沿用传统的二维图表或数值列表形式展示数据，这种抽象的表达方式人为割裂了环境参数与物理空间的内在联系[3]。温室大棚内部的环境分布往往并不均匀，单纯依靠独立的传感器读数，很难直观地还原出大棚各区域真实的微气候差异[4]，导致管理者在面对海量数据时难以快速建立数据与物理位置的映射关系，容易产生决策滞后。数字孪生技术虽然为解决这一空间映射问题提供了新路径[5]，但现有的应用方案对运行设备的性能要求较高，难以适配性能受限的移动终端，从而限制了该技术在普通农户中的推广应用[6]。

针对上述问题，本文开发了一种低成本、高效率的移动端数字孪生监测系统。该系统在架构设计层面，充分发挥云端的数据汇聚与资源调度优势，构建了基于 MQTT 协议的高并发消息吞吐机制与轻量化模型资产库[7]；在终端实现层面，基于 Android WebView 容器和 Three.js 引擎的混合渲染技术方案。通过在移动端构建轻量化三维场景，并结合虚拟空间映射算法，实现了实时监测数据与虚拟模型的精准融合。本文提出的方案不仅有效规避了原生三维开发成本高昂与跨平台兼容性差的难题，更通过云端数据赋能与移动端实时渲染的深度协同，构建了所见即所得的沉浸式环境感知模式，为温室大棚的数字化、智能化管理提供了切实可行的技术支持。

2. 系统总体设计

2.1. 系统总体架构

本系统采用分层模块化的设计思想，基于物联网云端协同模式，构建了一套轻量级的温室大棚数字孪生监测架构。为了降低系统耦合度并提升扩展性，如图 1 所示，系统自下而上逻辑划分为数据源层、

服务层与应用层三个核心层级。

数据源层作为整个系统的感知基础，将温室现场的各类环境监测设备转化为标准化的数据节点。该层主要负责完成数据的采集与标准化封装，将分散的温度、湿度及风速等环境物理量转化为统一格式的数据流，为上层应用提供持续、稳定的数据输入。传输服务层构建了物理温室环境与虚拟模型之间虚实交互的数据链路。在通信链路方面，系统选用 MQTT 协议构建低延迟的消息传输通道，负责将底层产生的实时数据透传至移动终端；在服务端方面，部署云端消息代理进行消息的路由与分发，同时建立云端资源池，存放温室大棚的轻量化三维模型文件，为移动端的资源调度与即时加载提供服务支撑。

移动应用层是系统面向用户的交互终端，也是本系统软件架构的核心部分。基于 Android 平台，本文设计了一种轻量级的跨平台融合软件架构。其中原生容器作为系统的运行基础，主要负责屏蔽底层操作系统差异，管控应用程序的全生命周期与基础交互逻辑，同时建立稳定的 MQTT 数据通道；而 Web 渲染内核作为跨平台可视化的核心载体，内嵌于该容器中，利用标准化的图形接口解析云端模型并执行渲染。这种设计通过原生容器和 Web 内核的深度融合，既利用了原生层稳定的网络 I/O 能力保障数据传输，又发挥了 Web 技术灵活的通用渲染能力降低开发成本，从而在移动端高效实现了数据驱动下的温室大棚数字孪生可视化。



Figure 1. Overall architecture diagram of the system
图 1. 系统总体架构图

2.2. 物联网通信协议设计

系统采用 MQTT 协议作为数据传输标准。该协议轻量级、低带宽占用的特性使其非常适用于网络环境不稳定的农业大棚场景。定义了层级化的主题(Topic)结构以实现消息的精确路由。主题格式遵循“业务领域/设备标识/消息类型”的三层层级规范，服务端采用通配符订阅机制，监听符合特定规则的实时数据通道，从而能够同时接收所有在线设备的上报数据，并利用正则表达式从主题路径中提取设备标识，完成数据的归属匹配与处理。

通信载荷(Payload)采用标准化的 JSON 格式进行编码，确保数据具备良好的跨平台解析能力。数据包中包含设备标识、毫秒级 Unix 时间戳以及风速、温湿度等传感器观测值。在数据交互流程中，前端感知层作为发布者，周期性采集环境参数并封装成 JSON 数据包，发布至 MQTT 代理。云端服务作为订阅者，在完成数据格式校验与协议解析后，将清洗后的数据持久化至时序数据库，从而完成从边缘感知到云端存储的全链路数据流转。

2.3. 数据库架构设计

系统的实体关系模型(ER 模型)主要涵盖用户管理、设备配置及三维模型映射三个核心维度。在用户管理层面，设计了用户表以存储账户认证信息与加密凭证，并通过角色标识字段区分管理员与普通用户，

从而实现基于角色的访问控制(RBAC)。在设备管理层面,以设备信息表为核心,详细记录设备的唯一硬件标识、地理位置坐标及各类传感器的阈值配置。为满足复杂的权限分配需求,系统引入了用户-设备权限关联表,采用多对多关系模型定义用户对特定设备的操作权限,有效解决了单一设备被多用户共享或单一用户管理多设备的业务场景需求。在三维可视化层面,专门设计了模型元数据表与虚拟监测点位映射表,用于管理用户上传的三维模型文件信息,和记录传感器在虚拟场景中的三维空间坐标,确保虚拟模型与物理设备在空间位置上的精准对齐。

针对环境监测数据采样频率高、数据量巨大且具有显著时间维度的特征,系统设计了气象监测数据超表(Hypertable),利用时序数据库的时间分区特性优化存储性能,存储温室大棚中的气象数据,主键为“设备标识”与“时间戳”的复合键,以提高对特定设备历史数据的检索速度。在存储策略上,系统启用了列式压缩机制,按照设备标识进行数据分段,并设定了自动生命周期管理策略,对超过 30 天的历史数据进行归档压缩。确保数据精度的同时,降低磁盘占用率,并提升长周期数据分析的查询响应效率。

3. 核心模块与功能实现

本系统的客户端软件架构基于 Android 原生开发范式,主要由后台监测与异常预警模块、混合式三维渲染引擎以及响应式数据驱动交互逻辑三大核心部分构成。系统通过进程驻留技术保障监测服务的连续性,利用原生容器与 Web 内核的混合架构突破移动端渲染瓶颈,并基于单向数据流思想实现了监测数据与数字孪生视图的实时同步。

3.1. 后台监测与异常预警模块

为解决移动端应用在后台运行或锁屏状态下网络连接受限及进程易被回收的问题,系统基于 Android 原生 Service 组件构建了独立的监测服务模块。该模块采用前台驻留策略,通过在系统状态栏注册持续运行的通知实例,将进程提升至高优先级序列,有效规避了系统的低内存查杀机制。

在运行保障机制上,服务初始化时申请了电源管理唤醒锁,确保 CPU 在屏幕关闭状态下仍能维持部分运转,防止设备进入深度休眠导致网络请求中断。服务内部利用 Kotlin 协程的 I/O 调度器构建了非阻塞的并发任务,在独立的线程域中执行周期性的数据监测。

数据处理遵循“后台静默轮询-异常即时唤醒”的逻辑。服务以固定周期拉取远程监测数据,并在本地进行阈值比对。一旦检测到湿度数据越限,系统立即调用通知管理器触发高优先级的系统级告警。该告警集成了 PendingIntent 深度链接技术,用户点击通知即可直接从系统栏唤醒应用并导航至特定设备的详情页面,实现了从后台异常感知到前台决策处置的无缝交互(图 2)。



Figure 2. Alarm notification
图 2. 告警通知

3.2. 三维可视化渲染模块

如图 3 所示，数字孪生的交互界面通过三维模型，直观还原了温室大棚的物理结构与设备分布。为支撑该场景在移动端的流畅显示，本系统构建了基于 Jetpack Compose 的混合渲染架构。视图层通过封装 Android 原生视图容器，加载并运行符合 WebGL 标准的三维图形脚本。该方案利用原生容器的硬件加速通道，确保图形渲染内核能够直接调用 GPU 计算资源，从而在移动端实现高保真的三维场景绘制。

在资源管理层面，系统建立了一套与视图生命周期严格绑定的资源回收机制。通过监听视图组件的挂载状态，当三维场景从显示界面移除时，系统会自动触发清理程序，切断图形内核的通信连接并释放显存资源。这种处理方式从架构上解决了混合开发模式中常见的资源占用与内存泄漏问题。

针对三维模型资产的加载，系统采用 GLB 二进制流式格式以优化传输效率。为确保模型数据的完整性，系统在解析文件前执行严格的格式校验逻辑：读取文件二进制流头部的前四个字节，验证其是否符合 glTF 标准规定的特定字符序列。只有通过文件签名验证的资产才会被写入本地缓存并加载，这种预处理机制有效防止了因文件损坏或格式错误导致的渲染引擎崩溃。



Figure 3. Digital twin visualization interactive interface of greenhouse

图 3. 温室大棚数字孪生可视化交互界面

3.3. 响应式状态流与数据驱动视图

系统交互层遵循 MVVM 设计模式，利用 Kotlin 协程与响应式状态流重构了数据通信链路。状态管理组件作为页面的唯一数据源，维护着一个线程安全的状态容器，该容器封装了模型路径、设备映射列表以及包含温湿度在内的实时环境参数。UI 层通过订阅该不可变状态流，在数据快照发生变更时自动触发局部重绘，实现了视图与业务逻辑的解耦。

如图 4 所示，系统前端采用卡片式组件呈现各监测设备的实时数据。这一动态视图的实现依赖于客户端主动轮询策略，系统在后台启动独立的时间驱动任务，以固定周期向服务端发起数据刷新请求。获取到最新的监测数据后，后台线程执行数据融合计算，将实时湿度数值与静态的监控点位信息进行合并，并依据阈值逻辑动态计算卡片的视觉属性。最终，系统通过原子性的状态变更操作驱动界面刷新，确保

了卡片中的数据能实时、准确地反映设备的物理状态，同时有效规避了多线程并发写入可能引发的视图闪烁问题。

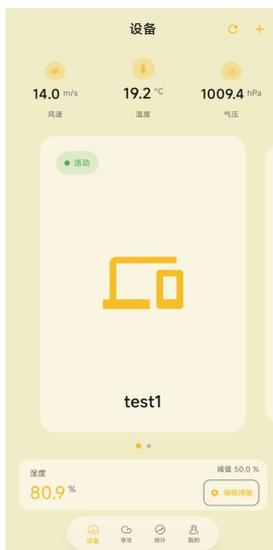


Figure 4. Device monitoring page with responsive data stream
图 4. 响应式数据流的设备监控页面

4. 平台部署与集成测试

4.1. 运行环境部署

本系统的部署工作涵盖云端服务环境搭建与移动客户端安装两个维度。在服务端部署方面，系统采用 Linux 操作系统作为基础运行环境，并配置 JDK 17 运行库。数据库选型方面，为满足海量气象时序数据的高效存储需求，采用 PostgreSQL 14 搭配 TimescaleDB 时序插件的架构方案。部署过程中，首先执行 SQL 初始化脚本，构建包括用户表、设备表及超表(Hypertable)在内的存储结构。随后将 Spring Boot 后端工程打包为可执行的 JAR 文件，通过后台进程指令启动服务，服务启动后自动监听预设的网络接口并与本地数据库实例建立连接。在移动端部署环节，客户端应用基于最新的 Android SDK 36 编译生成，向下兼容 Android 10 及以上版本。测试终端通过安装 release 版本的签名安装包进行部署，安装完成后，系统自动引导用户授予通知权限与后台运行权限，确保核心监测服务能够建立前台进程并长期驻留，从而保障系统在后台运行时的稳定性。

4.2. 全链路集成测试

对本系统进行整体功能与性能测试。测试数据显示，基于 PostgreSQL 的后端服务能够稳定处理 MQTT 协议的时序数据传输，从数据发送到终端解析的传输时延维持在 200 毫秒以内，基本满足实时监控的应用需求。在数字孪生同步测试中，移动端三维渲染引擎运行稳定，能够跟随数据变化进行流畅的视图更新。后台预警功能在测试中能够识别模拟的湿度超标情况，并在 1 秒内完成从异常判定到通知推送的过程，支持用户在锁屏状态下获取告警信息。测试结果表明，该系统具备良好的响应速度与可视化能力，验证了系统功能的完整性与运行稳定性。

5. 结论

本文针对智慧农业场景下的环境监测需求，设计并实现了一套基于 Android 移动端的温室大棚三维

可视化监测系统。工作主要围绕软件架构搭建、三维可视化实现及后台服务优化三个方面展开。在服务端，通过采用 PostgreSQL 结合 TimescaleDB 的存储方案，有效解决了高频时序数据的写入与查询瓶颈，确保了监测数据的实时性与完整性。在移动端，系统摒弃了传统的二维图表展示方式，利用 3D 渲染技术构建了温室大棚的虚拟映射场景，实现了从数值流到三维视图的动态同步，显著提升了用户获取信息的直观度。此外，系统通过后台驻留服务与系统级通知机制的集成，解决了移动应用在锁屏或后台运行时的异常感知难题。经模拟环境下的系统功能与性能测试，该平台在数据传输时延、渲染流畅度及预警响应速度等关键指标上均达到了设计要求，验证了系统功能的完整性与运行稳定性。

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]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 1-20.
- [2] 赵春江. 智慧农业的发展现状与未来展望[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 1-7.
- [3] Farooq, M.S., Riaz, S., Abid, A., Abid, K. and Naeem, M.A. (2019) A Survey on the Role of IoT in Agriculture for the Implementation of Smart Farming. *IEEE Access*, 7, 156237-156271. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2949703>
- [4] Bournet, P. and Boulard, T. (2010) Effect of Ventilator Configuration on the Distributed Climate of Greenhouses: A Review of Experimental and CFD Studies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74, 195-217. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.08.007>
- [5] Pylianidis, C., Osinga, S. and Athanasiadis, I.N. (2021) Introducing Digital Twins to Agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 184, Article 105942. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105942>
- [6] Fuller, A., Fan, Z., Day, C. and Barlow, C. (2020) Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, 8, 108952-108971. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2998358>
- [7] Eridani, D., Martono, K.T. and Hanifah, A.A. (2019) MQTT Performance as a Message Protocol in an IoT Based Chili Crops Greenhouse Prototyping. 2019 4th International Conference on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE), Yogyakarta, 20-21 November 2019, 184-189. <https://doi.org/10.1109/icitisee48480.2019.9003975>