

6-28-2024

Construction of a Virtual Interactive System for Orchards Based on Digital Twin

Hongjun Wang

*College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China,
xtwhj@scau.edu.cn*

Junqiang Lin

College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

Xiangjun Zou

*College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; Foshan-Zhongke
Innovation Research Institute of Intelligent Agriculture and Robotics, Foshan 528200, China*

Po Zhang

*College of Computer & Information Engineering, Guangdong Polytechnic of Industry and Commerce,
Guangzhou 510510, China*

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Construction of a Virtual Interactive System for Orchards Based on Digital Twin

Abstract

Abstract: Aiming at the low visibility, poor real-time, weak adaptability and single interaction mode in orchard planting management system, a six-dimensional model of orchard digital twin system for planting management process is proposed. The system model construction theory and technology system is discussed from four aspects, entity modeling of management elements, dynamic modeling of management process, simulation modeling of management system and optimization modeling of management strategy. Based on the six-dimensional model, supported by the theory and technology system, the virtual interactive system architecture of the orchard based on the digital twin is designed, and the key technologies of the system development process are standard. With the Unity3D simulation platform, the orchard virtual interactive system is built to realize the three-dimensional visualization monitoring of the orchard. The experimental results show that the system improves the monitoring ability of orchard plantation management system through data-driven, 3D display, human-computer interaction, reconstructed events and intelligent decision-making on the basis of data sharing on the platform of internet of things in agriculture, which provides a reference for the construction of smart orchard.

Keywords

DT, orchard planting management, internet of things in agriculture, VR, DRL

Authors

Hongjun Wang, Junqiang Lin, Xiangjun Zou, Po Zhang, Mingxuan Zhou, Weirui Zou, Yunchao Tang, and Lufeng Luo

Recommended Citation

Wang Hongjun, Lin Junqiang, Zou Xiangjun, et al. Construction of a Virtual Interactive System for Orchards Based on Digital Twin[J]. *Journal of System Simulation*, 2024, 36(6): 1493-1508.

基于数字孪生的果园虚拟交互系统构建

王红军¹, 林俊强¹, 邹湘军^{1,2}, 张坡³, 周铭轩¹, 邹伟锐¹, 唐昀超^{4*}, 罗陆锋⁵

(1. 华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642; 2. 佛山市中科农业机器人与智慧农业创新研究院, 广东 佛山 528200;
3. 广东工贸职业技术学院 计算机与信息工程学院, 广东 广州 510510; 4. 仲恺农业工程学院 城乡建设学院, 广东 广州 510225;
5. 佛山大学 机电工程与自动化学院, 广东 佛山 528200)

摘要: 针对果园种植管理系统存在可视性低、实时性差、适应性弱和交互方式单一的问题, 提出一种面向种植管理过程的果园数字孪生系统六维模型。从管理要素实体建模、管理过程动态建模、管理系统仿真建模和管理策略优化建模4个方面论述了系统模型构建理论与技术体系。以六维模型为基础, 理论与技术体系为支撑, 设计了基于数字孪生的果园虚拟交互系统架构, 并对系统开发过程的关键技术进行了阐述。借助Unity3D仿真平台搭建了果园虚拟交互系统, 实现对果园的三维可视化监测。实验结果表明: 该系统在农业物联网平台数据共享基础上, 通过数据驱动、三维展示、人机交互、重构事件和智能决策方面提升了果园种植管理系统监测能力, 为建设智慧果园提供参考。

关键词: 数字孪生; 果园种植管理; 农业物联网; 虚拟现实; 深度强化学习

中图分类号: TP242; TP18; T391 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)06-1493-16

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0317

引用格式: 王红军, 林俊强, 邹湘军, 等. 基于数字孪生的果园虚拟交互系统构建[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(6): 1493-1508.

Reference format: Wang Hongjun, Lin Junqiang, Zou Xiangjun, et al. Construction of a Virtual Interactive System for Orchards Based on Digital Twin[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(6): 1493-1508.

Construction of a Virtual Interactive System for Orchards Based on Digital Twin

Wang Hongjun¹, Lin Junqiang¹, Zou Xiangjun^{1,2}, Zhang Po³,
Zhou Mingxuan¹, Zou Weirui¹, Tang Yunchao^{4*}, Luo Lufeng⁵

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2. Foshan-Zhongke Innovation Research Institute of Intelligent Agriculture and Robotics, Foshan 528200, China;

3. College of Computer & Information Engineering, Guangdong Polytechnic of Industry and Commerce, Guangzhou 510510, China;

4. College of Urban and Rural Construction, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China;

5. School of Mechatronic Engineering and Automation, Foshan University, Foshan 528200, China)

Abstract: Aiming at the low visibility, poor real-time, weak adaptability and single interaction mode in orchard planting management system, a six-dimensional model of orchard digital twin system for planting management process is proposed. The system model construction theory and technology system is discussed from four aspects, entity modeling of management elements, dynamic modeling of management process, simulation modeling of management system and optimization modeling of management strategy. Based on the six-dimensional model, supported by the theory and technology system, the virtual interactive system architecture of the orchard based on the digital twin is designed.

收稿日期: 2023-03-21 修回日期: 2023-08-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32372001, 52368028, 32171909); 广东省农业农村厅项目(2019KJ139); 广东省基础与应用基础研究(2022A1515140013); 采摘机器人关键技术研究与数字孪生平台构建项目(2022ZDZX3056)

第一作者: 王红军(1966-), 女, 教授, 博士, 研究方向为智能设计与虚拟设计、农业机器人。E-mail: xtwhj@scau.edu.cn

通讯作者: 唐昀超(1983-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为机器人通用技术和结构健康监测。E-mail: ryan.twain@zhku.edu.cn

and the key technologies of the system development process are standard. With the Unity3D simulation platform, the orchard virtual interactive system is built to realize the three-dimensional visualization monitoring of the orchard. The experimental results show that the system improves the monitoring ability of orchard plantation management system through data-driven, 3D display, human-computer interaction, reconstructed events and intelligent decision-making on the basis of data sharing on the platform of internet of things in agriculture, which provides a reference for the construction of smart orchard.

Keywords: DT; orchard planting management; internet of things in agriculture; VR; DRL

0 引言

随着物联网、大数据、人工智能等现代信息技术与农业的深度融合^[1-3], 果园种植管理系统能够实现“连接-感知-决策-控制”一体化智慧管控^[4]。现有的果园种植管理系统主要以鼠标、键盘和组态界面显示为主, 可视性低, 交互方式单一, 同时以人工实地观察记录和传统经验知识为决策依据, 缺乏自主学习与决策能力, 实时性差, 适应性弱, 难以满足果园的规模化发展、多样化种植、智能化管理, 以及高效化生产。数字孪生利用传感器、运行状态等数据信息, 通过虚实交互反馈、数据融合分析、决策迭代优化等手段, 实现对物理实体全生命周期过程的监控、诊断、模拟、决策、管控^[5]。面对复杂多变的野外环境, 如何让管理系统更为直观、高效、稳定地监测果园环境, 智能体根据重构的场景进行自主学习与决策, 完成种植管理任务, 是建设智慧果园亟需解决的关键技术难题。

对于数字孪生系统的构建, 国内外诸多学者展开了大量研究, 主要集中在概念及理论模型、实时可视化监控和人机交互等方面。在概念及理论模型方面, 文献[6]提出了数字孪生三维概念模型: 物理实体、虚拟产品和虚实空间之间的信息交互接口。文献[7-8]在数字孪生三维模型基础上拓展出五维模型, 并对数字孪生五维模型的组成架构及应用准则进行了研究。同时, 部分学者基于数字孪生也拓展出了 HCPS(human-cyber-physical systems) 模型^[9]、CPS5C(cyber physical systems 5-

level architecture) 模型^[10]、CPS8C 模型^[11]、C2PS 模型^[12]和 MDT(mobility DT) 模型^[13], 以提高系统的生产效率和安全性。在实时可视化监控方面, 文献[14]在数字孪生系统五维模型基础上增加了前端展示这一维度, 解决了制造车间的监控透明度低和实时性差的问题。文献[15]提出了一种基于实时信息的生产车间三维可视化监控方法, 实现了车间全流程、全要素的动态监控。文献[16]利用数字孪生对温室番茄的气候状态和灌溉操作进行自主决策与控制。文献[17]利用数字孪生、物联网和大数据对温室植物生长过程进行监控与优化管理。文献[18]构建了一种基于机器学习的香蕉数字孪生系统, 用于监测香蕉在整个存储过程中的质量变化。在人机交互方面, 文献[19]提出了数字孪生系统六维模型, 通过增加用户终端这一维度, 促进了数字孪生车间人-物理-虚拟的协调与融合。文献[20]提出了面向人机交互的数字孪生系统工业安全与控制体系架构。上述方法主要应用于工业生产、农业温室培育等领域, 其对象位置相对集中, 监测范围相对狭窄, 监测信号相对稳定。野外果园环境位置偏远、场景复杂、任务多变, 使系统具有很强的不确定性和随机性, 因此, 需要进一步提高系统的自适应能力和自演化能力。

针对上述问题, 本文在文献[21-23]的基础上, 以广东惠州镇隆山顶村荔枝园已搭建完成的农业物联网平台作为系统服务平台^[24], 设计基于数字孪生的果园虚拟交互系统。借鉴车间数字孪生系统五维模型, 通过增加学习与决策这一维度, 提出了面向种植管理过程的果园数字孪生系统六维

模型, 以提高系统的自适应能力和推演能力, 并论述了系统模型构建理论与技术体系。针对当前果园种植管理系统存在可视性低、实时性差、交互方式单一和自适应性弱的问题, 提出了基于数字孪生的果园虚拟交互系统架构。

1 果园数字孪生系统设计

1.1 系统理论模型

本文借鉴了车间数字孪生系统五维模型^[25], 提出了面向种植管理过程的果园数字孪生系统六维模型 $M_{DT} = \{PS, VS, Ss, DD, CN, LD\}$, 包括物理场景 (physical scenes, PS)、虚拟场景 (virtual scenes, VS)、服务 (services, Ss)、孪生数据 (digital data, DD)、连接 (connection, CN)、学习与决策 (learning and decision-making, LD)。各维度之间的关系如图 1 所示。

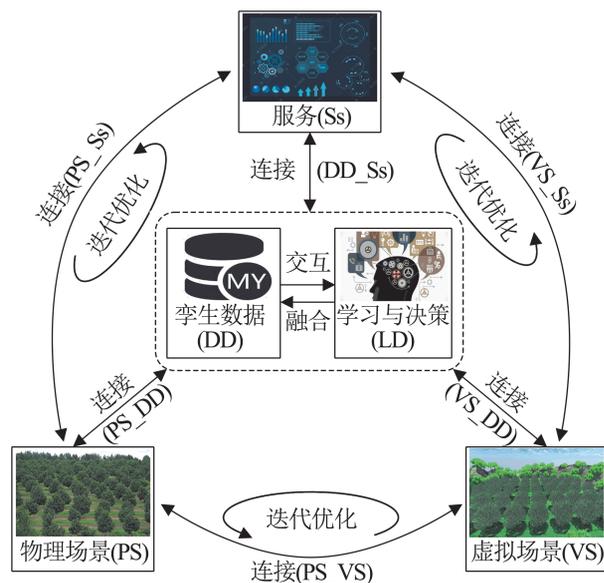


图 1 果园数字孪生系统六维模型
Fig. 1 Six-dimensional model of orchard DT system

1.1.1 物理场景(PS)

$PS = \{EO, IoT\}$ 是各管理要素的集合, 主要包括实体对象 (entity object, EO) 和物联网 (internet of things, IoT)。

EO 主要包括果树、天气、土壤、管理人员和

农机装备等要素。IoT 主要包括无线气象站 (空气温湿度传感器、光照强度传感器、雨量计、风速风向传感器、监控摄像头和电源模块等)、土壤数据采集节点 (土壤温度传感器、水分传感器、EC 值传感器等) 和数据收发模块 (LoRa 模块、4G 数据网关、处理器芯片等)。

1.1.2 虚拟场景(VS)

$VS = \{DM, MM\}$ 是 PS 在 VS 的实时映射, 可分为数据映射 (data mapping, DM) 和模型映射 (model mapping, MM)。

DM 是 EO 在种植管理过程中产生的孪生数据, 包括气候变化数据、土壤状况数据、设备运行数据、人员记录数据以及监测过程数据。MM 是通过多种专业软件协同实现 PS 到 VS 的精准映射, 主要包括: ①面向 EO 的几何模型, 如形状结构、尺寸参数、空间位置以及几何关系等; ②面向 EO 的物理模型, 如材料、光照、纹理等; ③与 EO 具有相同功能特征的虚拟模型行为及运动响应; ④面向 EO 的规则模型, 如虚拟模型运行、演化、推理、关联、优化、预测等; ⑤面向 EO 的能力模型, 如自主感知、分析、学习、决策、控制执行和迁移能力等。

1.1.3 服务(Ss)

$Ss = \{TS, UT, FA\}$ 是实现果园种植管理任务所需的服务集合。包括技术支撑 (technology support, TS)、用户终端 (user terminals, UT) 以及功能应用 (functional applications, FA)。

TS 是系统内部功能运行所需的技术服务集合, 主要包括: ①面向 VS 提供的模型服务, 如模型构建、渲染、烘培等; ②面向 DD 提供的数据服务, 如数据库设计、数据分析、处理和存储等; ③面向 CN 提供的连接服务, 如接口封装、通信协议、事件触发与通知等; ④面向 LD 提供的决策服务, 如分析预测、模拟优化、决策支持及可视化等。UT 是建立人-机-环境有机融合的多维信息空间所需的服务支持, 包括 VR/AR/MR 技术、手势

交互、和语音交互等。FA 是用于果园种植管理过程所需的功能服务，包括系统设计与重构、实时动态监测、模型仿真验证、管理方案预测、农事体验、农产品商业推广，以及农业科教和农技推广等。

1.1.4 孪生数据(DD)

$DD = \{D_p, D_v, D_s, D_k, D_e\}$ 是实现果园种植管理的动力源。包括物理场景数据 D_p 、虚拟场景数据 D_v 、服务数据 D_s 、知识数据 D_k 和演化数据 D_e 。

D_p 为系统在运行时 PS 所产生的数据集合，包括果树生长状态、气象数据、土壤墒情数据、图像数据、点云数据、光谱数据、管理人员操作记录，以及机械装备运行状态等。 D_v 为系统在运行时 VS 所产生的数据集合，主要包括：①几何模型数据，如果树、沟渠和道路等虚拟实体的形状、尺寸等；②数学模型，如模型边界条件、空间布局等；③监测过程数据，如果树长势、密植处理、风速、土壤和空气温湿度、光照强度、二氧化碳浓度、病虫害情况、机械装备运行状态、故障信息和管理人员信息和数据库操作等；④管理规则数据，如果树生长运动、土壤及气候条件设计、农机装备调度控制等；⑤模拟仿真数据，如果树形态建模、光温环境模拟、果树生长动画、模型算法验证、管理方案评价、监测预警预报、农机装备的学习与决策以及行为动作等。 D_s 为 Ss 在种植管理过程所产生的数据，包括数据转换、预处理、分类、集成和人机交互融合等。 D_k 包括果树生长模型、农学专家知识、气象学、植物表型组学、园艺种植管理方案、农机装备使用手册、算法库以及过程建模等。 D_e 是将 D_p 、 D_v 、 D_s 和 D_k 的多源数据进行相互补充与融合，结合历史统计数据、实况监测数据，以及过程孪生数据等进行自主分析、学习、决策、推理，不断优化系统种植管理方案或 Agent 行为策略，实现种植管理方案预测、灾害预警预报、监测数据分析比对、果实产量评估等数据。

1.1.5 连接(CN)

$CN = \{PS_DD, PS_VS, PS_Ss, VS_DD, VS_Ss, Ss_DD, DD_LD\}$ 是实现系统动态运行和虚实空间融合的核心。包括 PS 与 DD 的连接(PS_DD)、PS 与 VS 的连接(PS_VS)、PS 与 Ss 的连接(PS_Ss)、VS 与 DD 的连接(VS_DD)、VS 与 Ss 的连接(VS_Ss)、Ss 与 DD 的连接(Ss_DD)，以及 DD 与 LD 的连接交互(DD_LD)。

PS_DD 将多个传感器节点组合形成自组织网络，实时采集 PS 的信息，通过 LoRa 模块和 4G 数据传输模块将采集到的数据传输至 DD，同时，PS 中的各控制器能够接收反馈数据，并生成控制指令，对种植管理过程进行调整优化。PS_VS 利用与 PS_DD 相似的实现方式，将实时采集数据传输至 VS，驱动虚拟实体模型进行动态仿真，同时将仿真结果、预测预报和决策方案等数据转为相关控制指令传输至 PS 中相对应的物理实体进行实时控制与管理。PS_Ss 通过标准软件接口实现 PS 与 Ss 之间双向通信，完成数据采集、传输、处理、存储、报警与事件通知、状态更新、数据可视化与报告等。VS_DD 通过 JDBC、ODBC 等与数据库建立连接，将学习策略、仿真模拟、管理方案等数据实时传输至 DD 进行存储，并能够读取数据库的最新数据，用于驱动 VS 构建。VS_Ss 通过 TCP/IP 等通信机制建立 VS 与 Ss 的数据连接，实现 VS 与 Ss 的数据收发、同步更新、指令传递等。Ss_DD 利用与 VS_DD 相似的技术与数据库建立实时连接，将 Ss 过程所产生的数据传输至数据库进行存储，也可实时读取数据库中的历史数据、模型参数，以及常用算法等来支持 Ss 的运行与优化。DD_LD 采用 Socket 等通信机制将学习环境与外部训练器进行连接交互，结合 DD 和环境信息对 Agent 进行 LD，获得最优管理策略，并将学习结果存储至 DD。

1.1.6 学习与决策(LD)

$LD = \{S, A, R, P\}$ 是提高系统自适应能力和自推

演能力的关键环节。由状态空间 S , 动作空间 A 、奖惩机制 R 和方案设计 P 组成。

S 是 Agent 的环境观测值, 可分为局部观测值 (S_l) 和全局观测值 (S_g)。 S_l 包括植物 Agent (根、茎、叶、花、果等形态结构生长信息) 和农机 Agent (位置、速度、角速度等属性信息), 以及感知域内的环境信息 (土壤、气候和障碍物等); S_g 包括果树长势及分布情况, 地貌特征, 土壤、气候状态, 与目标点的距离和障碍物的位置等。 A 是 Agent 根据种植管理任务和环境信息选择出的动作策略进行执行控制, 主要包括果树栽植、树体修剪、疏花疏果、果实收获、施肥浇水、病虫害防控等。 R 为系统评价机制, 主要包括: ① 面向 A 的奖励函

数, 如方向奖赏、位置奖赏和距离奖赏等; ② 面向 A 的惩罚函数, 如碰撞惩罚、越域惩罚和时间惩罚等。 P 是完成学习训练所需要设定的条件, 主要包括算法网络结构设计、训练参数设置、回合终止条件设置等。

1.2 理论与技术体系

针对当前数字孪生系统存在要素模型不完备、过程数据不精准、系统仿真不直观和策略方案不完善的问题, 提出了面向果园种植管理的数字孪生系统模型构建理论与技术体系, 如图 2 所示。该体系由管理要素实体建模、管理过程动态建模、管理系统仿真建模和管理策略优化建模四大基本要素组成。

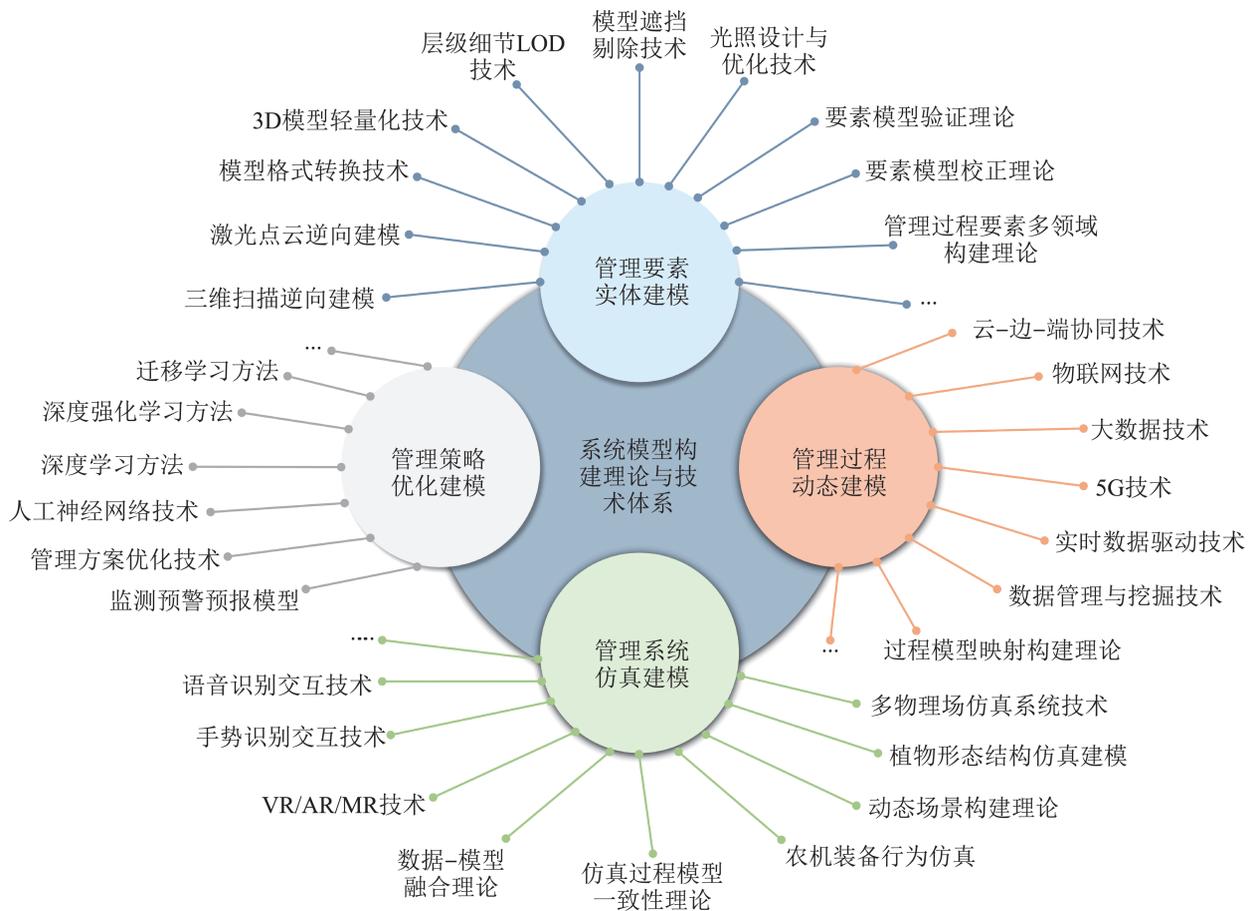


图2 系统模型构建理论与技术体系

Fig. 2 System model construction theory and technology system

管理要素实体建模包括要素模型构建和场景搭建与优化理论与技术；管理过程动态建模包括云-端-边协同和数据映射理论与技术；管理系统仿真建模包括仿真模型构建、数模融合和人机交互理论与技术；管理策略优化建模包括过程经验指导和智能管理优化理论与技术。

1.3 系统整体架构

本文以六维模型为基础，理论与技术体系为支撑，设计了基于数字孪生的果园虚拟交互系统架构，如图3所示。主要有物理空间、孪生数据、虚拟空间、学习与决策、连接通信和系统服务。

2 关键技术

2.1 虚拟场景构建

虚拟场景构建是现实果园数字孪生系统的基础。场景构建过程主要包括几何建模、场景搭建、逻辑控制和场景优化。其中，几何建模主要涉及模型构建、轻量化处理和渲染等；场景搭建主要涉及环境布局、场景管理和人机交互等；逻辑控制主要涉及模型运动模型、规则模型和能力模型等；场景优化主要涉及多层次细节、遮挡剔除和网格合并等技术。

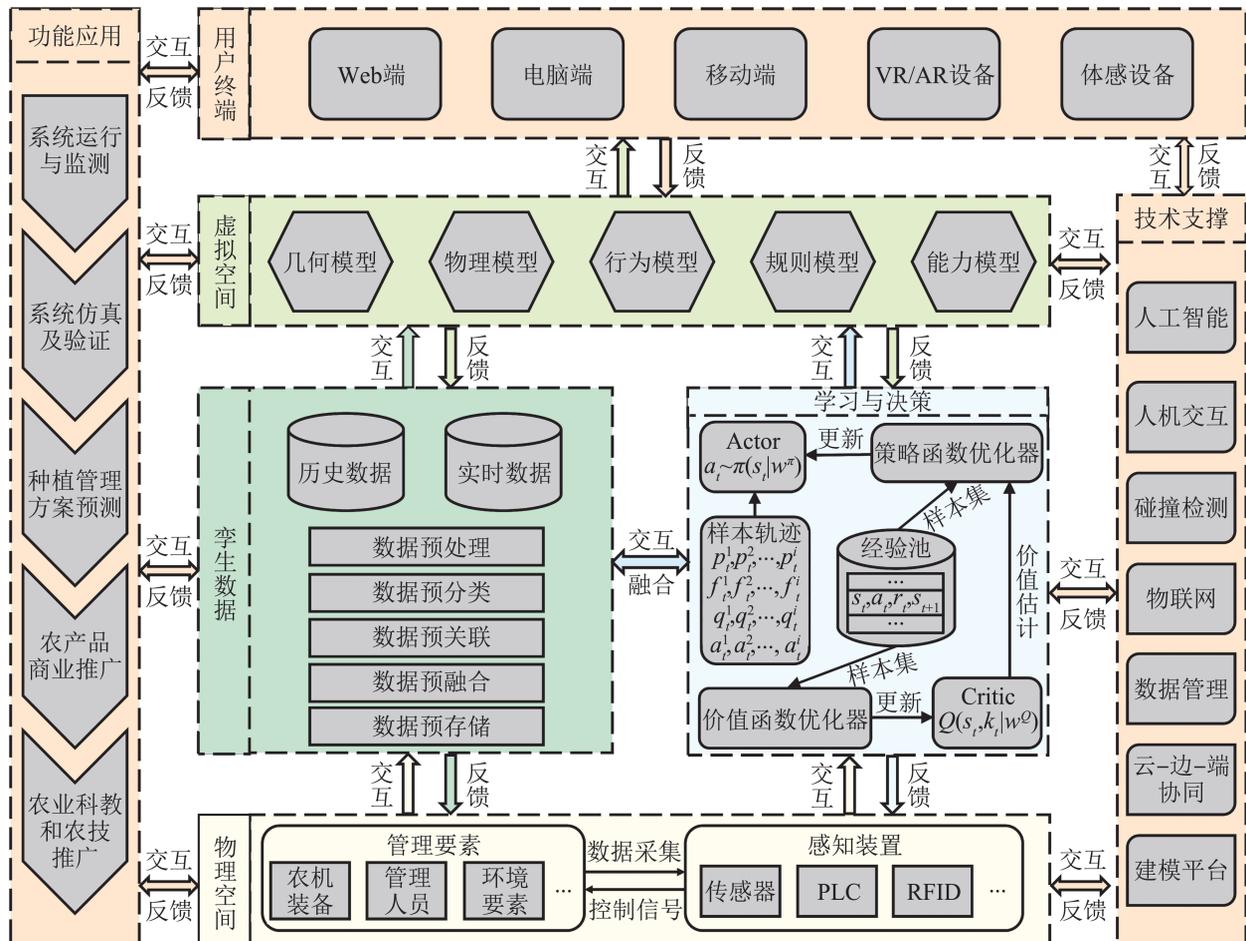


图3 果园数字孪生系统架构

Fig. 3 Orchard digital twin system architecture

2.2 实时数据驱动

实时数据驱动是现实果园数字孪生系统的关

键。为了能够实时、高效、稳定地监测果园种植管理过程的全生命周期, 提出了基于农业物联网的实时数据驱动多层次映射模型, 如图 4 所示。

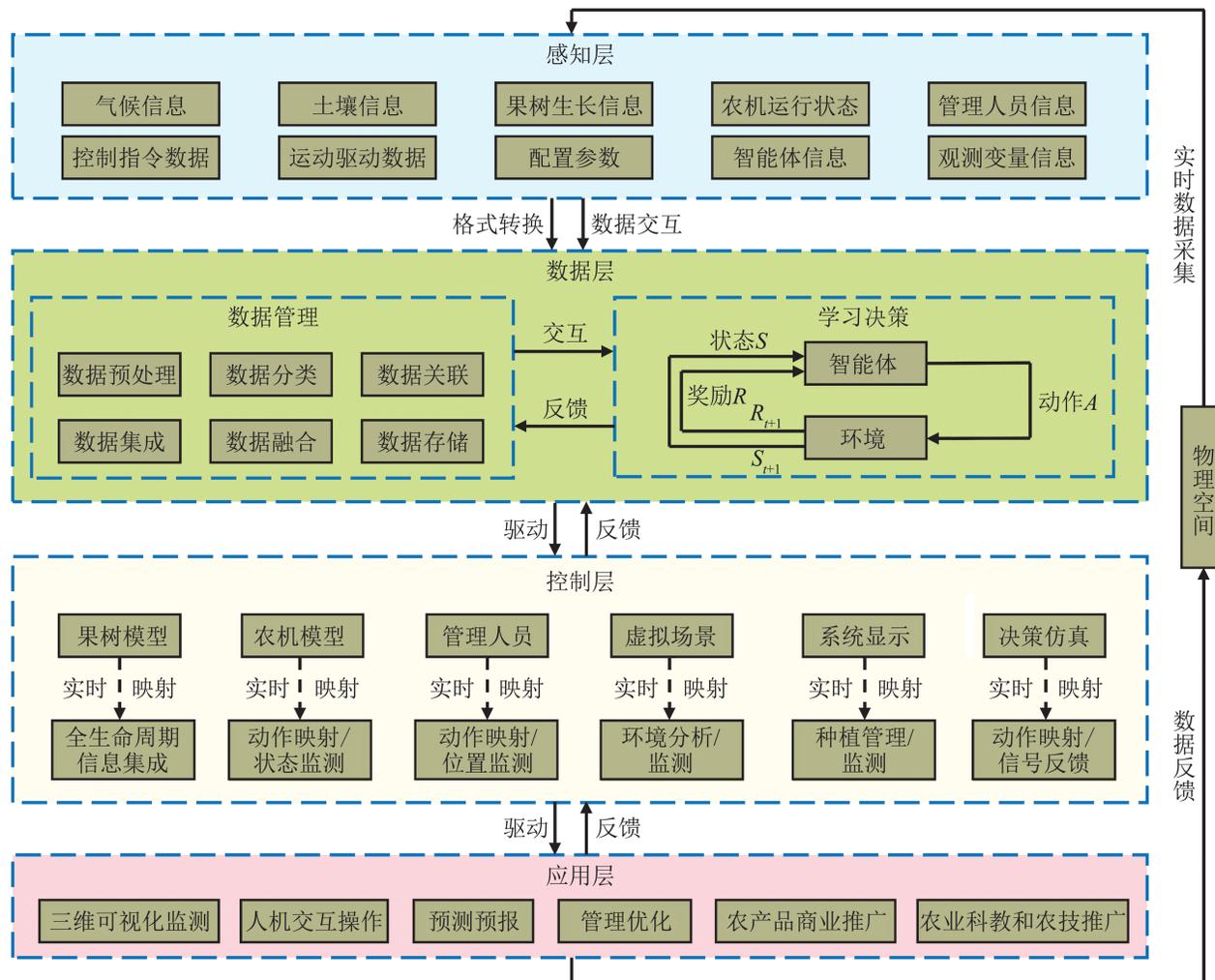


图 4 实时数据驱动模型逻辑结构图
Fig. 4 Logical structure diagram of real-time data driven model

感知层能够实时采集物理空间中各管理要素的信息并传输到数据层进行数据管理和学习与决策; 数据层能够将采集入库的数据进行数据预处理、分类、关联、集成和融合, 并存储至各个实体要素对应的相关数据库; 控制层能够直接访问数据层中的数据库获取相关数据, 完成系统的实时数据驱动和管理要素模型实时映射, 并将过程数据反馈到数据层进行处理与存储; 应用层能够对系统功能控制以及管理要素状态监测, 并将交

互过程中所产生的结果数据进行集成并反馈给物理空间, 同时还接收来自控制层对数字果园的模型属性更新。

2.3 监测数据可视化

数据可视化是现实果园数字孪生系统的重要体现。针对当前果园管理系统的可视性低、数字化表达程度差等问题, 提出了基于农业物联网的实时监测数据可视化显示方法, 如图 5 所示。通过布设在果园环境下的大量传感器节点, 构建无

线传感器网络对果园环境信息进行实时采集，通过LoRa模块进行数据汇集，并采用4G网络模块无线传输至云端服务器进行数据管理，将经过处理后的数据存储至各实体对象的数据库中。根据种植管理任务或系统重构事件的要求，通过无线WIFI等移动通信技术直接访问相关数据库读取数据。在Unity虚拟平台下，利用UGUI和XCharts可视化工具将读取的数值以曲线或图形方式进行展示，并集成到系统交互界面，实现对果树生长过程的实时解析，对农机装备运行参数的实时显示以及对环境状态的实时监测。

2.4 多通道融合人机交互

人机交互是现实果园数字孪生系统的重要环节。针对当前果园种植管理系统界面输入/输出带宽不平衡且交互方式较为单一的问题，构建了面向果园种植管理的多通道融合人机交互模型。用户可通过VR手柄、语音、手势等交互通道与数字孪生果园系统建立联系，并融合多个通道输入的信息进行计算与处理，实时显示或推测用户的交互意图，实现对果园数字孪生系统的沉浸式自然交互管理。

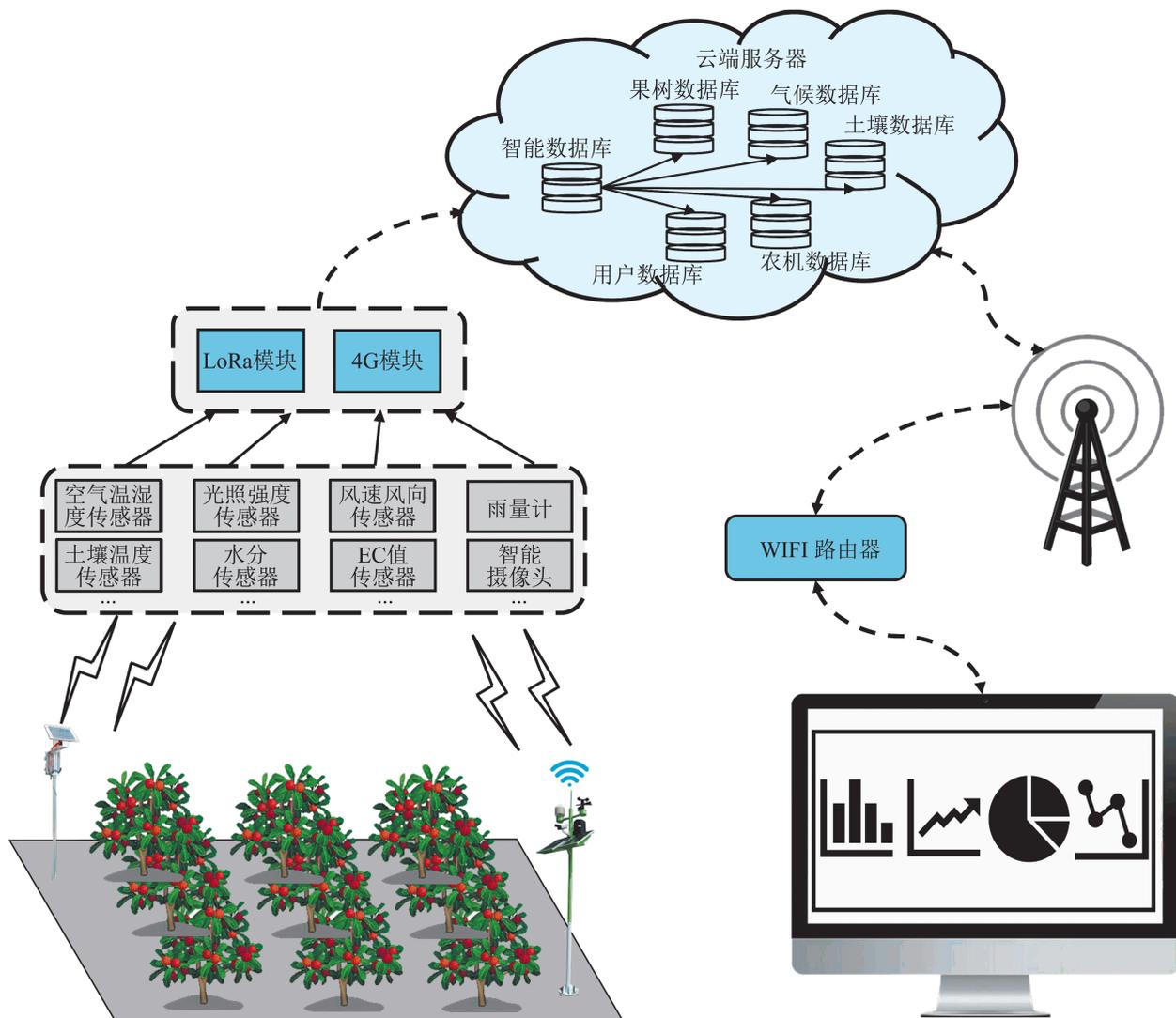


图5 实时监测数据可视化过程

Fig. 5 Visualization process of real-time monitoring data

2.5 重构事件与决策仿真

系统重构与决策仿真是实现果园数字孪生系统自适应演化的核心。针对环境复杂, 任务多变的野外果园场景下, 难以获得最优管理策略的问题, 提出了基于深度强化学习的智能体自主决策模型, 如图 6 所示。

建立自主学习与决策模型, 根据系统重构事件对果园种植管理策略进行决策优化, 生成重构方案, 同时对生成的方案进行仿真验证, 以获得最优管理方案。其中, 重构事件包括场景变更设置、应用服务设置和管理要素变化。场景变更设置是用户根据果园种植管理任务对数字化果园场景进行再设计的过程, 包括障碍物和果树的位置及个数设置等; 应用服务设置是系统在运行过程

中用户通过人机交互方式设置虚拟场景中管理对象的运行状态所产生的系统重构事件, 如 VR 手柄设置障碍物的位置、语音识别控制移动机器人的运行状态和手势识别交互设置障碍物的位置等; 管理要素变化是系统在运行过程中实体要素因状态异常而产生的重构事件, 如移动采摘机器人在自主作业途中与障碍物或果树发生碰撞等。

3 系统实例

3.1 实验平台搭建

系统基于 Unity 平台与 .NET 架构完成构建, 使用 HTC VIVE Pro2 头盔和 LeapMotion 设备相结合进行沉浸式自然交互, 如图 7 所示。

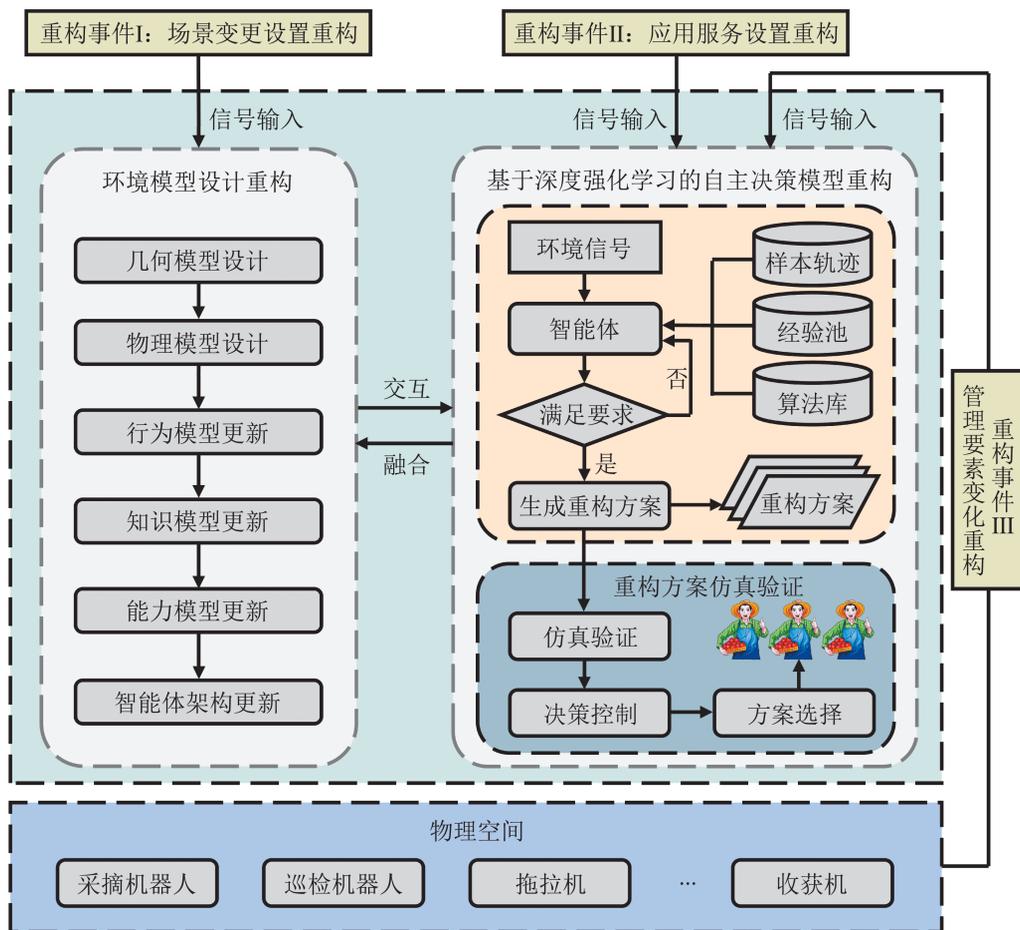


图 6 系统重构事件与自主决策模型
Fig. 6 Systematic reconfiguration of events and autonomous decision models

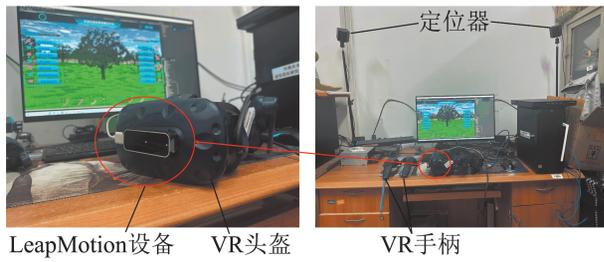


图 7 虚拟仿真实验平台
Fig. 7 Virtual simulation experimental platform

3.2 实例系统架构

以广东惠州镇隆山顶村荔枝园为应用场景，构建基于数字孪生的果园虚拟交互系统，整体架构如图 8 所示。首先，感知装置能够实时采集荔枝园的环境数据并传输至云端数据库。根据果园种植管理任务，利用 MySQL 数据库设计各管理对象对应的数据库，采用 MapReduce 分布式处理框架对采集入库的数据进行分析与处理，并将结果

数据存储至对应的数据库中。使用控制脚本实现虚拟空间与物理空间的各管理要素之间的数据映射，实现数据动态更新。然后，利用 SolidWork、3DSMax 等建模软件对果园各管理要素进行几何建模，并对该模型进行轻量化处理后导入 Unity 虚拟平台中，依据真实的实体模型特征完成物理模型构建，使用 C#和 Python 语言建立管理要素的行为模型、规则模型和能力模型，完成系统的逻辑控制脚本设计。结合 UGUI 和 XChart 搭建系统的人机交互界面，并使用 Socket 通信机制建立虚拟仿真平台与云端数据库之间的数据通信，实现实时数据的获取和监测数据的可视化展示。根据系统重构事件的需求，采用事件驱动的方法完成数字孪生果园场景搭建。最后，完成数字孪生果园下的移动机器人的行为仿真实验，为实际果园种植管理提供决策依据。

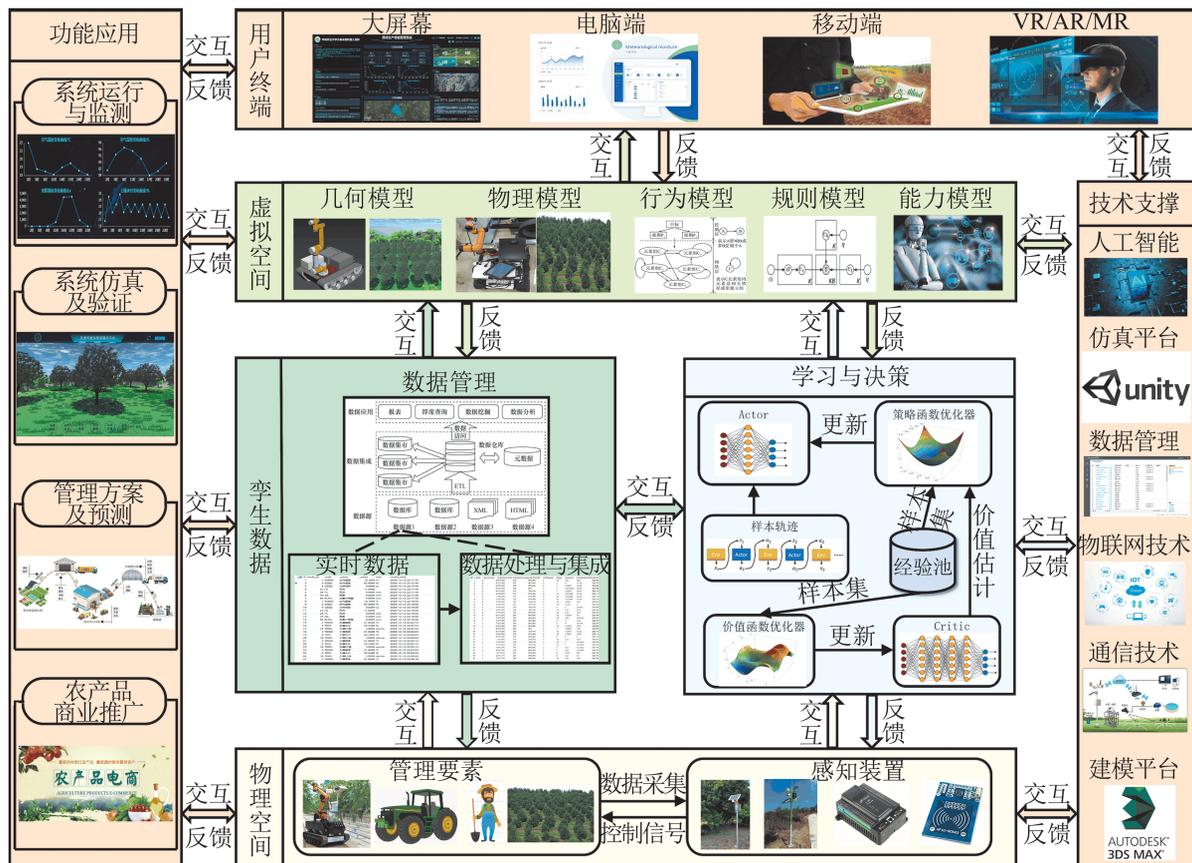


图 8 实例系统整体架构
Fig. 8 Overall architecture of instance system

3.3 功能模块实现

3.3.1 实时数据驱动场景构建

首先, 通过部署在荔枝园的传感器节点构建无线传感器网, 直接采集果园环境的实时数据, 利用LoRa模块和4G网络模块将采集的实时数据进行集成并传输至云服务器, 通过对云服务器上的实时数据进行处理和分析后, 将结果数据存储在云端服务器上各管理要素对应的数据库。然后, 利用Socket通信机制建立Unity仿真平台与MySQL数据库之间的连接通道, 采用面向对象的方式对虚拟果园场景中的各管理要素建模, 完成数据库与各管理要素模型的实时映射。根据果园农事作业经验, 制定果园种植管理决策规则表, 设计的果园场景构建方案如表1所示。

表1 果园场景构建方案
Table 1 Orchard scene construction plan

数据类型	监测设备	仿真模型	控制效果
气候	空气温度传感器	果园 气候变化	晴天、阴天、 雨天、雾天、 微风天、强风天
	空气湿度传感器		
	光照强度传感器		
	风速风向传感器		
	雨量计		
土壤	土壤温度传感器	果树 生长状态	常态期、花蕾期、 绿果期、熟果期
	土壤水分传感器		
相机	智能监控摄像头		

为了确保孪生果园场景与真实果园场景的准确映射, 对虚拟模型和动态过程数据进行融合, 并建立数据-模型之间的融合关系, 数学描述如下:

$$\begin{aligned}
 & DDRM = \{W, S, C\} \\
 & W, S \Rightarrow V_{\text{climate}} \text{ 且 } C \Rightarrow V_{\text{tree}} \\
 & O_i = \{W_i, S_i, C_i\} \\
 & DM = \{d_1, d_2, \dots, d_i\} \Leftrightarrow MM = \{m_1, m_2, \dots, m_i\} \Rightarrow V_d \\
 & T_k \in (W_k, S_k, C_k), d_i \Leftrightarrow m_i \\
 & \text{其中, DDRM为动态数据关系模型; } W \text{为气}
 \end{aligned}$$

候数据; S 为土壤数据; C 为智能相机数据; V_{climate} 为孪生环境下果园气候的变化; V_{tree} 为孪生环境下果树的变化; d_i 为各管理要素动态产生的数据集; m_i 为各管理要素的模型属性; V_d 为相邻两次模型更新的差异值; T_k 为各管理要素发生变化的阈值集合; \Leftrightarrow 为数据模型的评估关系; \Leftrightarrow 为数据模型的映射关系。

图9为事件响应评价机制流程图。由于真实果园场景在短时间内不会发生很大的变化, 为了避免孪生环境下虚拟模型出现重叠或穿模现象, 每相邻两次模型更新的时间间隔取值为1000s。系统运行期间通过访问云端数据库, 获取 T_i 时刻各果园管理要素的最新监测数据, 组合整理后形成数据集 O_i , 将数据集 O_i 与上一时刻 T_{i-1} 所产生的数据集 O_{i-1} 进行对比评估, 以获得相邻两次模型更新的差异值, 如果差异值小于或等于该对象的变化阈值, 则保持模型当前状态, 等待间隔时间 T 后决策下一阶段模型是否需要更新。如果差异值大于该对象的变化阈值, 则需要根据 T_i 时刻下各果园管理要素的参数进行模型更新, 并将更新后的模型参数传输至云服务器中的数据库进行存储, 待完成间隔时间 T 后直接进入下一阶段, 以此不断循环该过程, 实现虚拟果园场景与真实果园场景的同步演化。

3.3.2 数据可视化显示

实时监测数据显示是以沉浸直观的方式查看果园种植管理系统的运行状态及情况。通过Socket通信机制建立Unity仿真环境与云端服务器中数据库的连接, 并实时获取云端服务器中数据库的数据, 利用UGUI与XCharts可视化工具将获取的最新数据进行读取, 并以曲线或图形方式集成到数字孪生果园系统的交互界面。能够将过去所监测到的果园环境中光照强度、空气温度、空气湿度、花期密度、土壤水分和风向风速进行可视化显示。如图10所示。

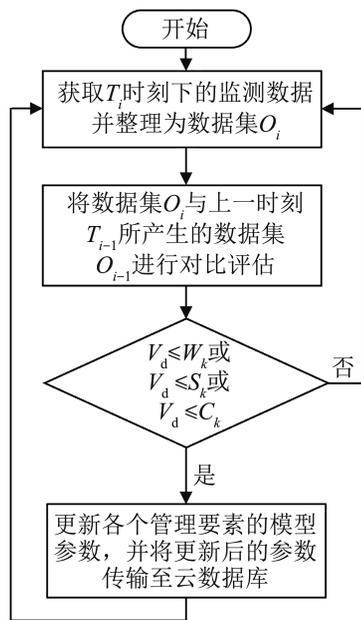


图9 事件响应评价机制流程图

Fig. 9 Event response evaluation mechanism flowchart



图10 监测数据可视化展示

Fig. 10 Visual display of monitoring data

3.3.3 果园场景模拟

根据监测的果园环境数据并结合农艺管理知识对虚拟果园场景进行环境模拟, 实际效果如图11所示。

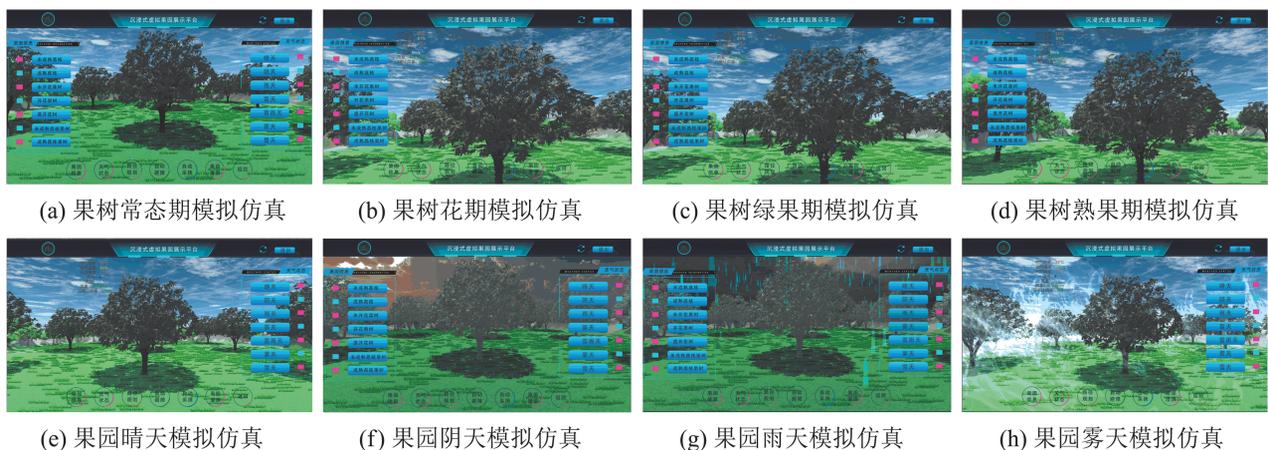


图11 不同花期和天气状态下的果园场景效果图

Fig. 11 Effect of orchard scene under different flowering period and weather condition

3.3.4 沉浸式自然交互

本文采用了接触式手势、自然式手势、语音识别3种交互通道相融合, 如图12所示。接触式手势交互借助HTC VIVE设备的VR手柄建立用户与数字孪生果园系统的连接, 用户可通过VR手柄的按键与虚拟果园场景进行交互。自然式手势交互采用LeapMotion设备实时捕捉用户的手势状态并将信息映射到数字孪生系统中对应的模型, 用户可使用自然的手势对数字孪生果园系统中的虚

拟实体进行操控。语音识别交互通过HTC VIVE设备的麦克风实时采集用户的语音信息并传输到果园数字孪生系统进行推测或显示用户的交互意图, 实现用户的自然交互控制。

3.3.5 重构事件与决策仿真

用户可以根据种植管理任务, 通过交互界面设置重构环境的参数, 采用事件驱动的方法搭建虚拟果园场景, 结合文献[23]利用深度强化学习方法建立移动机器人的自主决策模型, 在所搭建的

虚拟果园环境下完成移动机器人作业行为仿真, 如图 13 所示。场景中红色的油桶代表障碍物, 用户可设置障碍物和果树的个数并随机生成, 绿色轨迹为采摘机器人的移动轨迹。

3.4 集成与测试

3.4.1 系统集成

将各功能模块进行集成后的系统主界面如图 14 所示。可分为功能菜单栏、信息设置栏和主场

景区域 3 个部分。功能菜单栏是整个系统的核心部分, 集成了各个功能模块, 包括果园信息设置、天气状况设置、果园场景漫游、实时数据驱动、监测数据可视化、农机装备行为仿真。信息设置栏用户可自定义果园环境参数来构建数字化果园, 包括果园信息和天气状态。主场景区域是数字孪生果园环境的状态展示和系统运行后的实时监测数据显示。



图 12 多通道融合交互
Fig. 12 Multi-channel fusion interaction



图 13 系统重构事件与决策仿真过程
Fig. 13 Reframing event and decision simulation process

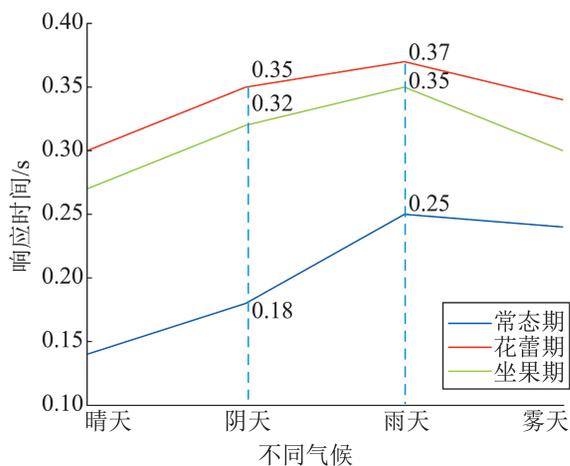
3.4.2 系统性能测试

固定生成果树数量为 9 棵时，不同类型气候与不同生长周期果树对系统响应时间的变化如图 15(a)所示。测试结果显示，该系统在晴天状态且果树为常态期时，其响应时间最短为 0.14 s。随着监测数据的变化，虚拟果园场景中增加了粒子系统，并且果树模型也发生了变化。当果园场景为

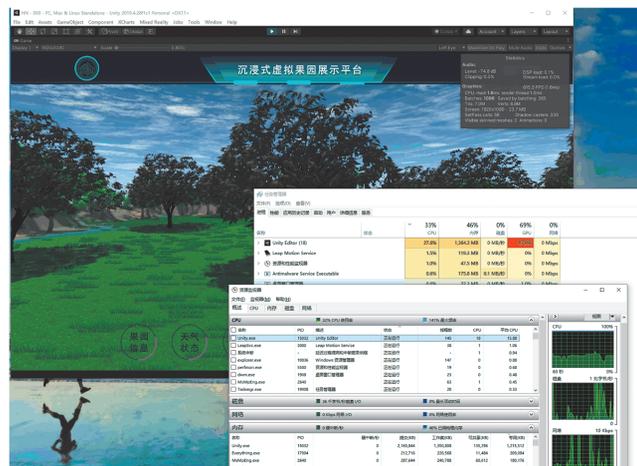
雨天状态且果树为花蕾期时，系统响应时间相对最长。为了满足使用需求，避免系统在使用过程中出现延迟、卡顿等现象，以 CPU 使用率、内存占用率、GPU 利用率等为指标，测试系统在运行时占用计算机资源的情况，验证系统在正常或者特殊环境下使用是否还能满足性能指标，使用 Win10 系统的资源监测器对果园数字孪生系统进行 2 h 的整体性能测试，如图 15(b)所示。



图 14 果园数字孪生系统主界面
Fig. 14 Main interface of orchard DT system



(a) 系统响应时间测试结果



(b) 系统资源监测界面

图 15 系统测试结果
Fig. 15 System test results

在测试过程中, 系统的CPU使用率最高达到27.6%, 平均值为15.88%。GPU占用率的平均值为67.9%。内存占用1364.3 MB, 占用率为46%。在正常情况下, 系统运行时计算机的资源占用率较低, 稳定性好, 满足系统的设计要求。在特殊环境下(同时开启各种天气状况模拟), 由于场景里含有大量的三维模型和粒子特效, 使系统对图形图像的渲染能力要求较高, GPU占用率高达73%。但是在实际监测过程中, 果园环境的气候状态通常为某一种天气, 所以该系统对计算机的整体性能要求不高, 一般配置的计算机即可满足使用。

4 结论

结合数字孪生的实时映射特性, 虚拟现实的沉浸式自然交互和深度强化学习的实时决策优势, 本文提出了面向种植管理过程的果园数字孪生系统六维模型, 并阐述了系统模型构建理论与技术体系。同时, 提出了基于数字孪生的果园虚拟交互系统架构, 构建了基于数字孪生的果园虚拟交互系统, 验证了模型的有效性和合理性。

本文能够为数字化向智能化转型升级提供基础支撑。随着数字化技术和人工智能技术的快速发展, 后续将在此基础上建立数字空间的反向控制优化通道, 利用实时获取的孪生数据, 对果园种植管理过程进行智能控制, 逐步实现各物理实体的自感知、自学习、自决策、自执行等智能特征。

参考文献:

- [1] 邹湘军, 孙健, 何汉武, 等. 虚拟现实技术的演变发展与展望[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 1905-1909.
Zou Xiangjun, Sun Jian, He Hanwu, et al. The Development and Prospects of Virtual Reality[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(9): 1905-1909.
- [2] Tang Yunchao, Chen Mingyou, Wang Chenglin, et al. Recognition and Localization Methods for Vision-based Fruit Picking Robots: A Review[J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 510.
- [3] Tang Yunchao, Zhou Hao, Wang Hongjun, et al. Fruit Detection and Positioning Technology for a Camellia

- Oleifera C. Abel Orchard Based on Improved YOLOv4-tiny Model and Binocular Stereo Vision[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 211: 118573.
- [4] 顾生浩, 卢宪菊, 王勇健, 等. 数字孪生系统在农业生产中的应用探讨[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(10): 82-89.
Gu Shenghao, Lu Xianju, Wang Yongjian, et al. Application of Agricultural Digital Twin System in Crop Production System[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(10): 82-89.
- [5] Tao Fei, Qi Qinglin. Make More Digital Twins[J]. Nature, 2019, 573(7775): 490-491.
- [6] Grieves M, Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems[M]//Kahlen F J, Flumerfelt S, Alves A. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches. Cham: Springer International Publishing, 2017: 85-113.
- [7] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.
Tao Fei, Liu Weiran, Liu Jianhua, et al. Digital Twin and Its Potential Application Exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18.
- [8] 陶飞, 马昕, 戚庆林, 等. 数字孪生连接交互理论与关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(1): 1-10.
Tao Fei, Ma Xin, Qi Qinglin, et al. Theory and Key Technologies of Digital Twin Connection and Interaction [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(1): 1-10.
- [9] Wang Baicun, Zheng Pai, Yin Yue, et al. Toward Human-centric Smart Manufacturing: A Human-cyber-physical Systems (HCPS) Perspective[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2022, 63: 471-490.
- [10] Lee J, Bagheri B, Kao H A. A Cyber-physical Systems Architecture for Industry 4.0-based Manufacturing Systems[J]. Manufacturing Letters, 2015, 3: 18-23.
- [11] Jiang J R. An Improved Cyber-physical Systems Architecture for Industry 4.0 Smart Factories[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(6): 1-15.
- [12] Alam K M, El Saddik A. C2PS: A Digital Twin Architecture Reference Model for the Cloud-based Cyber-physical Systems[J]. IEEE Access, 2017, 5: 2050-2062.
- [13] Wang Ziran, Gupta R, Han K, et al. Mobility Digital Twin: Concept, Architecture, Case Study, and Future Challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9 (18): 17452-17467.
- [14] 周成, 孙恺庭, 李江, 等. 基于数字孪生的车间三维可视化监控系统[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(3):

- 758-768.
Zhou Cheng, Sun Kaiting, Li Jiang, et al. Workshop 3D Visual Monitoring System Based on Digital Twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(3): 758-768.
- [15] 赵浩然, 刘检华, 熊辉, 等. 面向数字孪生车间的三维可视化实时监控方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1432-1443.
Zhao Haoran, Liu Jianhua, Xiong Hui, et al. 3D Visualization Real-time Monitoring Method for Digital Twin Workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1432-1443.
- [16] Silke Hemming, Feije de Zwart, Anne Elings, et al. Cherry Tomato Production in Intelligent Greenhouses-sensors and AI for Control of Climate, Irrigation, Crop Yield, and Quality[J]. Sensors, 2020, 20(22): 6430.
- [17] Daniel Anthony Howard, Ma Zheng, Jesper Mazanti Aaslyng, et al. Data Architecture for Digital Twin of Commercial Greenhouse Production[C]//2020 RIVF International Conference on Computing and Communication Technologies (RIVF). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020: 1-7.
- [18] Tsega Y Melesse, Matteo Bollo, Valentina Di Pasquale, et al. Machine Learning-based Digital Twin for Monitoring Fruit Quality Evolution[J]. Procedia Computer Science, 2022, 200: 13-20.
- [19] Zhang Qinglei, Yang Zhiwei, Duan Jianguo, et al. Three-dimensional Visualization Interactive System for Digital Twin Workshop[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2021, 37(2): 137-152.
- [20] 李浩, 刘根, 文笑雨, 等. 面向人机交互的数字孪生系统工业安全控制体系与关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2): 374-389.
Li Hao, Liu Gen, Wen Xiaoyu, et al. Industrial Safety Control System and Key Technologies of Digital Twin System Oriented to Human-machine Interaction[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(2): 374-389.
- [21] Lin Junqiang, Zhang Po, Li Chengen, et al. APF-DPPO: An Automatic Driving Policy Learning Method Based on the Artificial Potential Field Method to Optimize the Reward Function[J]. Machines, 2022, 10(7): 533.
- [22] 罗陆锋, 邹湘军, 刘天湖, 等. 大数据量虚拟景观的三维模型优化与漫游[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(6): 1654-1657.
Luo Lufeng, Zou Xiangjun, Liu Tianhu, et al. 3D Model Optimization and Navigation of Large-scale Virtual Landscape[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(6): 1654-1657.
- [23] 林俊强, 王红军, 邹湘军, 等. 基于DPPO的移动采摘机器人避障路径规划及仿真[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(8): 1692-1704.
Lin Junqiang, Wang Hongjun, Zou Xiangjun, et al. Obstacle Avoidance Path Planning and Simulation of Mobile Picking Robot Based on DPPO[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(8): 1692-1704.
- [24] 董力中. 荔枝果园智能监测关键技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2020.
Dong Lizhong. Research on Key Technologies of Litchi Orchard Intelligent Monitoring[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020.
- [25] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.
Tao Fei, Liu Weiran, Zhang Meng, et al. Five-dimension Digital Twin Model and Its Ten Applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18.