doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.021

农业机械元宇宙技术应用进展

张留洋[1]　陈黎卿[1,2]　朱海婷[1]　万　玲[1,2]　刘　策[1,2]　谢东波[1]

(1.安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2.安徽省智能农机装备工程研究中心, 合肥 230036)

摘要: 随着计算机与人工智能等技术的快速发展,元宇宙技术为农业机械设计、试验与优化提供了创新手段。本文系统综述了元宇宙技术在农业机械领域的应用进展。首先阐述了元宇宙的概念、关键技术与架构体系,重点分析了其软件平台、硬件设备及农业元宇宙仿真平台的构建方法。其次,从耕播、植保、收获、动力机械及农业机器人典型农业装备出发,探讨了元宇宙技术在作业环境模拟、性能分析、虚拟试验等方面的应用现状。元宇宙技术通过高精度建模与动态仿真,能够有效提升农机研发效率,降低试验成本。最后,从农机设计深度整合、植保机械作业机理研究、收获机损失率评估、动力机械性能优化及农机集群协同等 5 方面展望了未来研究方向,为元宇宙技术与农业机械的深度融合提供理论参考。

关键词: 农业机械; 元宇宙; 虚拟仿真; 虚拟现实; 数字孪生; 人机交互

中图分类号: S126　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)09-0278-13　　**OSID**:

Exploration of Metaverse Technology Applications in Agricultural Machinery

ZHANG Liuyang[1]　CHEN Liqing[1,2]　ZHU Haiting[1]　WAN Ling[1,2]　LIU Ce[1,2]　XIE Dongbo[1]

(1. *School of Engineering*, *Anhui Agricultural University*, *Hefei* 230036, *China*

2. *Anhui Province Engineering Research Center of Intelligent Agricultural Machinery*, *Hefei* 230036, *China*)

Abstract: With the development of computer and artificial intelligence technologies, metaverse technology has provided approaches for the design, testing, and optimization of agricultural machinery. The progress in the application of metaverse technology in the agricultural machinery sector was systematically reviewed. Firstly, the concept, key technologies, and architectural framework of the metaverse were elaborated, with a focus on its software platforms, hardware devices, and the construction methods of agricultural metaverse simulation platforms. Secondly, based on five typical types of agricultural machinery—tillage and seeding, plant protection, harvesting, power machinery, and agricultural robots—the current applications of metaverse technology in operational environment simulation, performance analysis, and virtual testing were explored. Research indicated that metaverse technology, through high-precision modeling and dynamic simulation, can significantly enhance the efficiency of agricultural machinery development and reduce testing costs. Finally, future research directions were proposed, including the deep integration of agricultural machinery design, the study of operational mechanisms for plant protection machinery, the evaluation of loss rates in harvesters, performance optimization of power machinery, and the collaborative operation of agricultural machinery clusters. The research result can provide theoretical references for the deeper integration of metaverse technology and agricultural machinery.

Key words: agricultural machinery; metaverse; virtual simulation; virtual reality; digital twin; human-computer interaction

收稿日期: 2024-09-04　修回日期: 2025-06-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(52175212)和安徽省高校合作协同攻关项目(GXXT-2020-011)

作者简介: 张留洋(2002—),男,博士生,主要从事智能农机装备研究,E-mail: 1853590756@qq.com

通信作者: 陈黎卿(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备研究,E-mail: lqchen@ahau.edu.cn

0　引言

农业机械设计、制造和试验等方面研究得到了国内外诸多学者的关注，并为此开展了长期卓有成效的大量研究[1-4]，取得了丰硕的成果。随着计算机和人工智能等技术的发展，越来越多仿真技术应用到农业机械设计、制造研究中。

20 世纪 50 年代，数字仿真技术诞生，并逐步取代传统的模拟机，成为当时仿真领域的主要工具[5-6]。数字仿真技术利用数学模型和计算机处理能力[7]，显著提升了对复杂系统行为和性能特征的精确模拟能力，对于机械制造等行业的发展起到了重要推动作用[8]。在农业机械领域，数字仿真技术被用于组件的优化等[9]，借助计算机，设计师能够在更短的时间内得到更准确的结果，从而大幅降低了试验成本和周期。这一阶段的仿真，主要以数学分析辅以计算机为主，许多复杂的问题仍然需要人工进行模拟推导。20 世纪 70 年代，计算机图形技术经历了重要的发展。这一时期，随着计算机处理能力的提升以及显示技术的进步，计算机图形技术在多个领域得到广泛应用[10-12]。在农业机械领域，随着 AutoCAD 等虚拟仿真软件开发，农业机械设计开始以二维图与数学计算相结合，主要聚焦于农业机械总体或某一机构的参数优化等[13-14]。二维图形与数学分析的结合使得设计师对机械进行参数优化时，不需要大量反复的计算和分析，优化后的机器总体参数一致性较好，大大提升了农业机械的研发效率和可靠性。但仍不能实现机械制造的全过程分析设计，在机械的运动学分析以及有限元分析等方面仍有欠缺。20 世纪 90 年代，随着计算机技术的进步和图形处理能力的提升，三维图形的建模、渲染和动画制作变得更加高效和逼真，从早期的简单线框模型到后来的纹理映射、光照效果和真实感渲染[15-16]，计算机图形技术迅速进步。同时出现了一批诸如 Solidworks、Pro/Engineer、FESDEC 等具有三维仿真分析功能的软件和程序，并开始应用到农业机械的结构设计与加工中[17-19]。设计师在实际制造物理样机之前，借助这些工具对产品进行过程分析、性能分析、可装配性分析、工艺规划和优化设计等[20]。这些三维仿真软件使得农业机械设计变得更加精确和可靠，设计过程中的决策可以基于更准确的数据和模拟结果进行，从而大幅提升产品的设计效率、质量以及产品的市场竞争力。然而与机器的实际工况相比，依旧有一定的误差。近年来，随着人工智能技术的发展和应用，元宇宙技术不断发展，并开始应用到农业机械中，进行探索[21-23]。元宇宙环境下的仿真不受时间、空间等因素的限制[24-25]，用户可以随时进行机具实际工况的仿真[26-27]，大大缩短了研发周期。此外与传统仿真技术相比，元宇宙环境下的仿真有着显著优势，基于元宇宙的仿真具有更高的真实性和更强的沉浸感[28-29]，借助 Unity 3D 等软件，用户可以搭建出与真实世界高度相似的虚拟场景，通过头戴式显示器等硬件设备，用户可以进入元宇宙中，实时地与农机装备交互，精确模拟农业机械在实际工作中的运行情况。元宇宙技术为工程师提供了全新的工具，使他们能够更有效地评估和优化机械系统的性能特征[30-31]，进而提升产品设计的效率和质量，为农业机械设计带来了革命性的变革。

本文从元宇宙概念、组成和应用 3 个方面对该技术在农业机械领域应用研究进行总结。阐述元宇宙技术的概念、关键组成与架构；分析元宇宙技术在耕播、植保、收获和动力机械等典型农业机械中的应用；对元宇宙技术在农业机械中应用存在的问题与挑战进行展望，为未来农业机械的设计提供参考。

1　农业元宇宙

1.1　元宇宙与元宇宙技术

对于元宇宙，学术界目前还未有一个明确的定义。根据学者的解释与定义[32-36]，可以将元宇宙定义为一个以多种技术为支撑的虚拟世界和现实世界相耦合的数字化空间，它没有物理世界的诸多限制，用户通过特定设备可以随时随地进入元宇宙，与元宇宙中的万物实时交互等。元宇宙技术则是用于构建、运行和扩展元宇宙的多种技术集合，主要包括区块链技术、人机交互技术、人工智能、网络及运算技术、数字孪生技术等。

1.2　元宇宙组成

元宇宙主要由软件系统、硬件设备和用户三大核心要素构成[37-38]。三者协同作用形成完整的元宇宙生态闭环。

软件系统是构建虚拟场景的基础支撑平台，主要用于完成虚拟场景的搭建和开发，常用的软件如表 1 所示。

元宇宙硬件设备是用户在元宇宙环境中实现沉浸式体验的必要设备。目前的元宇宙硬件设备主要包括：手机 VR 眼镜、VR 一体机和 PC 端 VR 设备[37]，如图 1 所示。

手机 VR 眼镜采用光学分屏技术，通过分隔镜片将手机屏幕分为两部分，每部分显示不同的画面，利用手机陀螺仪、重力加速度计等传感器，识别用户的姿态，从而给用户提供沉浸式的虚拟现实体验。

表 1 元宇宙软件平台

Tab. 1 Software platform of metaverse

	软件平台	特点	主要应用领域
虚拟环境建模软件	Solidworks	参数化建模能力强,适合机械与工业设计,但缺乏对有机形状的支持	工业设计、机械制造
	3DS Max	基于 PC 系统的低配置要求,渲染效果图真实,支持插件导入外部模型,建模精度稍差	建筑设计、影视制作
	MAYA[39-40]	建模工具全面,渲染真实感极强,插件功能强大,能体现更多的细节,但入门门槛高	影视制作
	MultiGen Creator[41]	与实时仿真软件紧密结合,建模效率高,交互式三维建模,但三维造型功能较弱	视景仿真、模拟训练
开发引擎与仿真软件	Unity 3D	支持多平台,先进的图形渲染能力,完善的开发工具,大量的资源库	虚拟设计、工业仿真等交互式内容创作
	Unreal Engine	3D 实时渲染引擎,高精度物理模拟系统,蓝图可视化编程以及跨平台支持	影视制作、虚拟现实、汽车仿真等 3D 场景
	V-REP[42]	内部集成大量模型,多计算模块,高度可扩展性,开源、跨平台,支持多种编程语言	动力学仿真,机器人仿真
	Gazebo[43]	源代码开放,多平台兼容,精确模拟,灵活	机器人仿真
	EON Studio[44]	丰富的编辑器,支持多种多媒体格式和硬件设备,开放式框架	虚拟设计



图 1 元宇宙硬件设备

Fig. 1 Hardware equipment of metaverse

但手机 VR 眼镜仅支持 3 自由度的头部运动,虚拟世界中的视角可根据用户头部的转动而改变,用户的位置在物理空间中并未被虚拟现实系统跟踪或模拟。VR 一体机作为独立计算单元,集成处理器、显示模块及交互系统,提高了使用便携性,但受限于移动端处理器性能,图形渲染能力相对有限;此外 VR 一体机通常配备有物理控制器和先进的传感技术,如 PICO 公司的 PICO 4 Pro,具备内置的跟踪器和传感器,可准确捕捉用户的手部动作以及眼部肌肉和面部肌肉的追踪,实现智能瞳距调节以及虚拟人物表情同步真人表情等功能。PC 端 VR 设备采用分布式计算架构,通常需和配备较高性能显卡的计算机协同使用,计算机主要完成运算任务,由头盔、基站及手柄共同合作完成显示定位功能。与前两种 VR 硬件设备相比,PC 端 VR 可以带给用户更优质的画面流畅度,以及真实的沉浸式体验感。此外元宇宙硬件设备还包括用于交互的手持设备,如手柄、虚拟驾驶仓等。近年来随着感知技术的飞速发展,越来越多的 VR 设备制造商,开始研发无需手柄的元宇宙硬件设备,通过摄像头以及手部追踪配件实现无需手持设备的交互[45]。

1.3 农业元宇宙仿真平台架构

元宇宙仿真平台是基于全息构建、全息仿真、虚实融合和虚实联动等技术的综合性平台[46],其架构可以分为场景搭建、人机交互与扩展 3 部分,图 2 展示了农业元宇宙平台的架构。

农业元宇宙中的场景建模主要分为静态建模和动态建模[47]。静态建模主要用于描述组织和结构,如房屋、农业机械等;动态建模用于描述物体的行为,如作物生长过程等。静态建模主要使用三维建模技术,首先,需要对真实场景的物理属性进行感知,除使用传统的量尺测量外,还可通过卫星、雷达、激光扫描等技术感知真实场景的物理属性。其次,利用图像处理技术对像素间的亮度、灰度、颜色等信息差异进行过滤、筛选、匹配等[48],根据提取的材质、纹理、结构、位置等信息构建基于真实世界的元宇宙环境。最后借助物理引擎插件模拟物体的真实碰撞、接触等行为,通过实时渲染功能实现物体外观的实时动态变化,为用户提供身临其境的环境。动态建模主要是针对田间作物等,可借助数字孪生技术完成建模[49-51]。数字孪生技术是指利用数字化的方式创建一个实物或过程的虚拟模型[52-53],通过传感设备与物联网技术实时获取并反馈作物的生长数据,使虚拟模型与物理实体保持信息的同步[54-55],从而实现作物在元宇宙中全生命周期的数字化映射。此外还可以根据作物的生长数据,结合人工智能、深度学习等技术进行分析,对作物生长规律进行推测[56-58],从而实现作物的动态生长预测。

人机交互是元宇宙与虚拟现实最主要的区别之一[59],通过元宇宙硬件设备发出指令使得元宇宙中的数字化身进行相应的操作,再借助人工智能等技术,实现数字化身与用户在感官、情感等的双向感知、反馈[60-62]。此外还可以对人或者其他物体进行动作捕捉,并反馈给元宇宙,实现用户和数字人的运

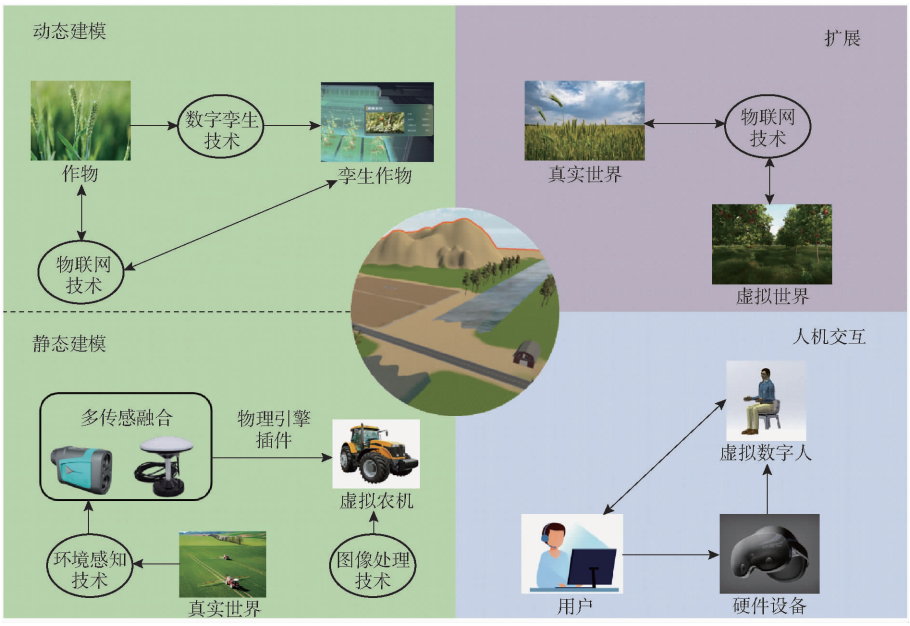


图 2　农业元宇宙平台架构

Fig. 2　Architecture of agricultural metaverse platform

动同步[63-66]。

元宇宙的扩展主要指借助传感器、智能终端等物联网设备对数据进行采集、处理和传输等，以实现虚拟世界和真实世界的连接。因此，物联网技术是元宇宙虚实交互和万物互联的技术基础，是虚拟世界和真实世界沟通连接的信息桥梁[67]。

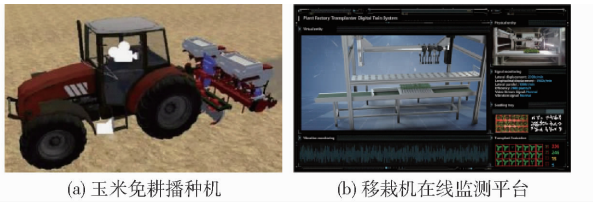
此外在元宇宙平台的搭建、交互以及扩展等过程中产生的数据，通常利用区块链技术进行记录和存储[68]。区块链将数据分散存储在许多计算机节点上，并使用密码学方法将数据链接在一起形成连续的数据块，每个新的数据块都包含前一个数据块的数据，以保证数据的准确性，是元宇宙的核心技术[69-70]。

2　元宇宙技术在农业机械中的应用

2.1　耕播类机械

耕播类机械主要用于完成耕种、播种等作业，包括旋耕机、播种机、插秧机、秧苗移栽机等多种机械设备。与其他农业机械不同，耕播类机械的作业对象主要是土壤，土壤的参数对耕播类机械的设计以及试验有着很大影响，对此学者进行广泛研究[71-73]。然而在当前耕播类机械的仿真试验中，土壤环境多通过参数标定后，由软件自动生成，分析结果往往与实际存在一定差异，给农业机械的优化带来不便。与传统仿真利用软件自动生成相应环境不同，元宇宙仿真可借助深度相机、激光、雷达等方式对环境进行感知并利用三维重构等技术在元宇宙中还原作业环境，为耕播类机械的设计提供了新方法。为此诸多学者进行了有益的探索，如 RENTSCHLER 等[74]使用多个电磁感应传感器和伽马射线光谱仪深入了解土壤有机碳和土壤水分的水平和垂直变化，为土壤建模提供参考。CHEN 等[75]开发了一种基于 bundleffusion 的优化算法，用于在虚拟世界中对自然环境中非结构化农业场景的实时三维重建。苑严伟等[76]提出了基于分形算法的水稻田地势生成方法以及水稻田水纹模型生成算法，在虚拟环境中复现水稻田三维试验场景，用于水稻插秧机设计分析。

耕播类机械仿真试验的另一个重点是机械模型和种子、环境等的真实接触，同时也是体现仿真试验真实性的重点之一。万玲等[21]对玉米播种机以及种子等模型添加碰撞组件，实现了基于碰撞检测生命周期函数的元宇宙环境下玉米播种机的全时刻碰撞接触的检测与响应；同时采用标线法和转换法对虚拟农场中的场景进行高度还原，田间地表具有一定的起伏，拖拉机播种机组会因农田高低起伏变化引发振动，增加了元宇宙环境下播种机组作业的真实性，图 3a 为其研究的元宇宙环境下的免耕播种机。CHEN 等[77]提出秧苗移栽机数字孪生五维模型，通过融合物理实体、虚拟模型、服务、孪生数据及连接交互，实现移栽机工作状态在线监测与移栽效果评估，提升参数优化效率并降低操作员专业依赖，



(a) 玉米免耕播种机　　(b) 移栽机在线监测平台

图 3　耕播机械

Fig. 3　Farming and broadcasting machinery

图 3b 为其研制的移栽机在线监测平台。

综上所述,元宇宙技术在耕播类机械上已经得到了初步的应用,目前主要是在模拟生产环境、机械性能分析以及试验监控等方面取得了一定成果,还没有深入开展机械设计、试验和应用,下一步可以结合耕播作业的监测、反馈、调控为切入点,实现耕播过程的智能化作业。

2.2 植保类机械

植保机械作为农业病虫害防治与植物营养管理的关键装备,其核心评价指标在于药液喷施的均匀性与靶标覆盖率。近年来,随着靶向施药、变量作业及无人植保机械等技术的快速发展,对传统试验评价方法提出了新的挑战。元宇宙技术通过虚实融合的实时交互特性,为植保机械的性能监测与动态评估提供了创新解决方案。

2.2.1 作物生长模型构建

元宇宙环境下的植保机械性能测试依赖于高精度的作物生长模型。当前模型构建主要分为实体作物生长模拟与虚拟作物建模两大类,典型的作物生长模型构建方法如表 2 所示。

表 2 典型作物生长模型构建方法比较

Tab. 2 Comparison of typical crop growth models

类别	建模方法/模型	特点	应用方向
实体作物生长模拟	ELCROIS 模型	基于生长动力学建模,系统模拟器官发育、冠层光合及呼吸代谢等关键生理过程	作物生理机制研究
	CERES 模型	采用系统工程原理,结合动力学方法和计算机技术建模;突破地域限制,模拟多种作物在“作物-土壤-环境”系统中的动态生长过程	多作物生长预测
	ASPSIM 模型	以土壤为核心变量,通过量化天气、作物和农艺管理对土壤属性的动态影响以预测作物产量	土壤-作物互作机理研究及产量预测
虚拟作物建模	L-System 方法	基于作物生长规则的参数化建模	虚拟植物生长可视化
	激光扫描建模	三维激光点云采集,获取高精度作物几何信息	作物表型分析
	双目视觉重建	基于立体视觉与图像匹配的叶片微观形态建模	叶片尺度生长监测
	SFM + 深度学习	通过多视角图像重建点云,结合深度学习补齐点云残缺,网格化生成高精度作物模型	作物表型分析
	数字孪生	基于大语言模型与多智能体协同的数字孪生作物建模	智慧农业生长管理

实体作物生长模拟是通过量化作物生理机制及其与环境因子(如光照、土壤和气候条件)的相互作用,构建数字化模型来再现作物的生长发育过程[78]。该领域起源于 20 世纪 60 年代,当时学者首次用数学方法描述植物生理过程,开创了作物生长动态模拟的先河[79]。随着对作物生理学的研究不断深入,以数字模拟为主的作物生长模型迅速发展。1970 年,DE WIT 等[80]开发了 ELCROIS 模型,该模型从生长动力学角度系统刻画了器官发育、冠层光合及呼吸代谢等关键生理过程。随后,RITCHIE[81]采用系统工程原理,结合动力学方法和计算机技术,研发出 CERES 系列模型。该模型以“作物-土壤-环境”互作机制为理论基础,能够模拟玉米、小麦等主要农作物在不同生态区域、气候类型和土壤条件下的生长发育规律及产量形成的动态过程。与当时其他模型不同,澳大利亚的 ASPSIM 模型采用了独特的建模视角,其以土壤为核心驱动变量,通过量化天气、作物和农艺管理对土壤属性的动态影响以预测作物产量,这一设计思路与当时主流的作物生理模型形成鲜明对比[82]。

虚拟建模技术通过计算机图形学与三维感知技术,实现了作物形态与生长的可视化表达。早期研究如陆声链等[83]借助 Visual C + + 2005 开发平台和 OpenGL 图形接口开发了农作物生长过程可视化软件平台。PENG 等[84]提出了一种可视化 L-System,基于作物的生长规律,实现了虚拟枣树的建模和映射。随着三维扫描仪器、视觉图像技术的发展。一些学者将其与作物虚拟建模相结合,如 LEE 等[85]利用激光扫描技术获取柑橘三维信息,并量化其几何参数;王传宇等[86]在室内环境利用双目立体视觉技术对玉米叶片进行了三维重建;王东洋[87]使用运动恢复结构(SFM)算法和深度学习算法获得植物的点云信息,通过网格重建得到植物的三维模型。赵春江团队[88]进一步引入大语言模型,通过两阶段微调与多智能体协同,构建了具有动态推理能力的数字孪生蔬菜模型,实现了虚实作物的全生命周期同步映射,为智慧农业提供精准的生长预测解决方案。

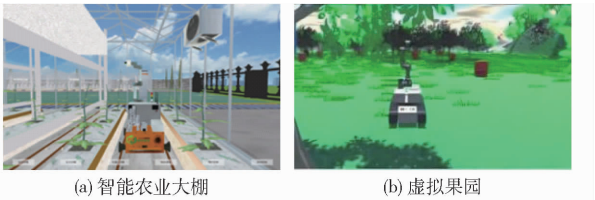
2.2.2 植保作业评价

传统植保机械作业效果评价多依赖人工采样或静态传感器测量,难以全面反映动态施药过程。元宇宙技术通过构建虚拟-物理交互系统,为植保作业效果评价提供了新的研究方法。李思莹[89]以农田喷灌车为研究对象,通过粒子系统模拟水流效果,利

用编写代码获取地块材质信息更换地面贴图的方法，实现随着水流的喷洒过程中地面产生物理变化的效果。

2.2.3　农田环境的元宇宙化监测

农田环境的实时监测是优化作物的生长条件、提高农业生产效率和效益的方法之一。得益于传感设备与远程通讯技术的发展，用户可随时随地实时获取农田土壤、作物、气象以及虫情等信息，便于及时进行植保作业，确保作物健康生长。WANG 等[90]将元宇宙技术与智能农业相结合，提出了 DeCASA（分散智能管理和控制农业）框架，利用计算试验和植物生长模型来实现农业的智能化管理，借助物联网技术，实现对作物生长数据和环境的实时监测和控制，从而提高农作物生长效率和农业生产的可持续性。唐斌等[91]设计了一套基于 Unity 3D 和 LoRa 物联网的农业大棚监测系统，通过部署多节点感知网络，结合私有云 ThingsBoard 进行数据管理，并开发了 VR 数字驾驶舱实现虚实交互，为智慧农业提供了沉浸式的可视化监控解决方案。HUANG 等[92]用智能机器人结合定点微环境监测传感器对植物进行数据采集与监测，用于实时更新元宇宙中的作物与环境信息，并提出了改进的 SIFT 算法，用于全景图像拼接，以实现智慧农业大棚全景漫游功能，图 4a 为其设计的智能农业大棚场景图。王红军等[93]基于数字孪生技术构建了果园虚拟交互系统，通过构建的无线传感器网络对果园环境信息进行实时采集，利用 UGUI 和 XCharts 可视化工具将读取的数据以曲线或图形方式进行展示，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，图 4b 为虚拟果园场景图。



(a) 智能农业大棚　　(b) 虚拟果园

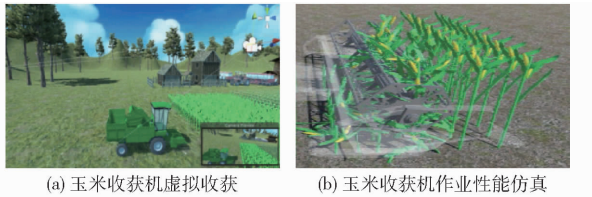
图 4　作物实时监测

Fig. 4　Real-time monitoring of crops

综上所述，随着作物生长模型的日趋完善，可以充分运用元宇宙技术开展植保机械作业性能评价，同时也能够深入开展植保机械-药液-作物的互作机理以及农田环境实时监测的研究，为提高植保机械的性能提供新方法。

2.3　收获类机械

收获机械主要用于小麦、水稻和玉米等作物的收获作业，为了研制低损、高效的收获机械，学者进行了大量反复试验。受到航天、医疗等领域的启发，一些学者尝试将元宇宙技术用于收获机械的试验中。如图 5 所示，杨方飞等[94]借助 MultiGen Creator 软件实现标杆法构建地形，通过理论分析结合数值仿真得到整机运动姿态，基于视景仿真技术实现了联合收获机的虚拟试验。慈翠荣[95]借助 Unity 3D 内含的 Terrain 组件制作虚拟地块，利用设计物理组件和碰撞器等方式，获得与现实相对应的物理特性，通过脚本代码实现玉米果穗收获机的运作，实现玉米果穗收获机的虚拟收获作业。陈燕等[96]以玉米收获机为例，通过添加物理碰撞组件，结合虚拟物理引擎，模拟收获机械割台与植株模型互动状况，以及风雨对植株的影响。GUO 等[97]开发了一种基于数字孪生的联合收获机脱粒性能监测方法，通过构建传感器网络实时采集作业数据，融合离散元模型仿真与深度神经网络建立数字孪生模型，结合高斯过程回归替代模型预测谷物破碎率，并设计物联网平台实现实时监测与在线优化算法动态调整脱粒参数，以提升监测精度与作业效率。马博文等[98]提出了一种基于轻量级网络的联合收获机数字孪生系统构建方法，为联合收获机的性能分析、实时监控以及远程操纵提供联合仿真、分析以及验证平台。



(a) 玉米收获机虚拟收获　　(b) 玉米收获机作业性能仿真

图 5　玉米收获机虚拟收获

Fig. 5　Virtual harvesting of corn harvester

当前，元宇宙技术在联合收获机械领域的应用已取得初步进展，其中 GUO 等[97]通过数字孪生技术成功实现了脱粒环节损失率的在线监测，但针对联合收获机全作业流程的损失率动态综合评价体系仍存在明显不足，这已成为制约低损高效收获装备研发的关键瓶颈。为突破这一技术难题，需要深入研究收获作业中籽粒与收获机械的碰撞机理，可通过多体动力学与离散元耦合仿真揭示籽粒与机械部件的相互作用机制，同时可结合高光谱成像和边缘计算技术实现田间损失率的实时监测，从而构建收获作业全过程的元宇宙仿真，推动收获机械从传统经验驱动向现代模型驱动的转型。

2.4　动力机械

拖拉机性能影响牵引机械作业效果，对此学者进行了大量研究，但由于现实世界的拖拉机试验成本较高并且存在一定的安全隐患，因此学者尝试在虚拟世界中展开试验，如图 6 所示。ZANG 等[99]将

虚拟现实技术应用于农业装备的研发,实现了拖拉机模型的三维显示与实时驾驶,为拖拉机性能测试提供了一种新的方法。ZHAO 等[100]开发了一款基于拖拉机动力学模型的仿真软件,并进行了多种工况的试验。王杰[26]收集不同路面影响爬坡的因子及参数,在虚拟环境中构建了坡度可调的仿真坡道,设计了基于 Unity 3D 软件内嵌的 PhysX 物理引擎模拟车辆控制,用以测试拖拉机爬坡时的稳定性;翟志强等[101]建立了拖拉机物理引擎用以实时解算和模拟拖拉机位姿状态,根据拖拉机当前路径与目标路径的位置关系,控制前轮转向角度,进行拖拉机双目视觉导航试验。



(a) 拖拉机虚拟驾驶[99] (b) 拖拉机性能试验[100]

(c) 拖拉机爬坡稳定性测试[26] (d) 拖拉机导航试验[101]

图 6 拖拉机虚拟仿真

Fig. 6 Virtual simulation of tractor

综上所述,元宇宙技术在动力机械的性能测试上已经取得了一定进展,同时可以发现目前进行的性能试验仅限于同一路况,还没有扩展到不同农田环境。此外现有的拖拉机虚拟试验还未深入到农机装备的牵引研究中。未来可以深入开展不同农田环境下,动力机械整机性能以及牵引农机具的研究,以提高动力机械在不同工况下性能的稳定性。

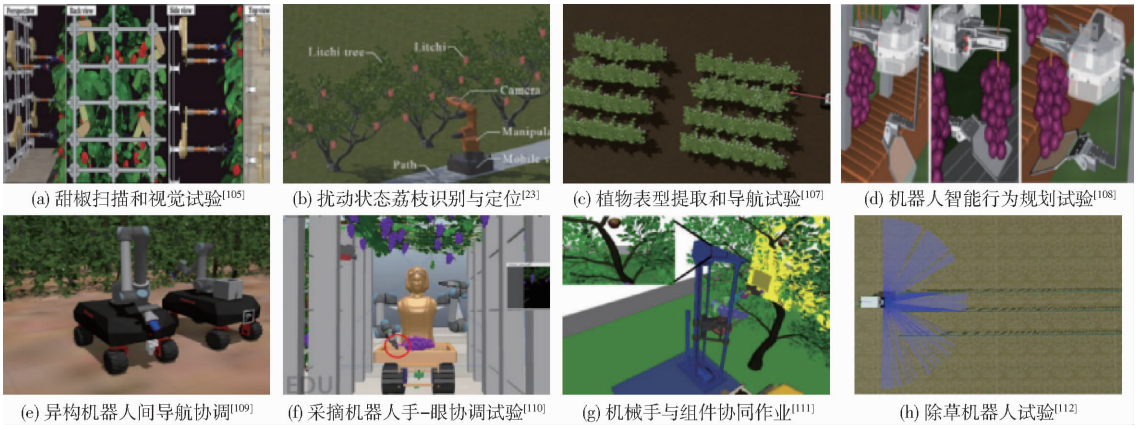
2.5 农业机器人

农业机器人是一种新型智能农业机械,其可以全部或部分替代人或辅助人进行农业生产,提高农业生产效率以及生产的安全性能,是实现自动化、智能化、无人化农业机械必不可少的组成部分,也是未来农业发展的必然趋势[102-104]。

农业机器人的设计需要大量的试验进行对比分析和优化验证,才能实现最优的性能提升。然而,真实世界中的试验具有不可重复性,此外受到作物生长环境的影响,机器人与作物间容易发生碰撞干扰等。因此探究一种不受自然环境影响的试验方式尤为重要。为此一些学者尝试将元宇宙技术应用到农业机器人的试验中,以实现农业机器人的性能优化,如图 7 所示。

农业机器人的工作流程可分为感知-决策-执行 3 个过程。环境感知主要通过各种视觉传感器采集点云或图像数据,由计算机进行分析处理,从而使机器人系统获得环境中物体的各种信息,是机器人的“眼睛”。SHAMSHIRI 等[105]基于 V-REP 和 Matlab 等软件设计了甜椒采摘机器人仿真与控制平台,通过算法改进作物扫描和视觉伺服任务,为改进植物(或水果)扫描和视觉伺服任务提供了一个模拟环境。XIONG 等[23]以荔枝为研究对象,采用果心跟踪方法识别荔枝的扰动状态,利用双目立体视觉确定扰动荔枝采摘点的位置,并在虚拟环境下进行测试,实现了动态荔枝簇的视觉识别与定位。WANG 等[106]针对现有基于激光雷达(LiDAR)的 SLAM 算法在复杂果园中存在定位漂移和语义缺失问题,提出一种基于激光-GNSS 双源定位与稀疏点云语义分割的 VR 地图构建框架。

决策系统是在环境感知的基础上,机器人根据预设的目标和策略,通过分析和评估各种可能的行动方案,选择最优行动方案,是机器人的“大脑”。IQBAL 等[107]在 Sketchup 中对棉花植株建模,通过在网格中创建凸起模拟地面不平,并将创建完成后的棉花田导入到 Gazebo 中,作为植物表型提取和导航策略的试验台,用于测试所研发收集植物表型数



(a) 甜椒扫描和视觉试验[105] (b) 扰动状态荔枝识别与定位[23] (c) 植物表型提取和导航试验[107] (d) 机器人智能行为规划试验[108]

(e) 异构机器人间导航协调[109] (f) 采摘机器人手-眼协调试验[110] (g) 机械手与组件协同作业[111] (h) 除草机器人试验[112]

图 7 农业机器人优化试验

Fig. 7 Optimization experiment of agricultural robots

据的机器人。罗陆锋等[108]设计了一种基于虚拟现实的采摘机器人仿真试验系统，采用三维建模软件对环境进行建模与渲染，依据视觉感知获取多维信息用于采摘机器人的行为决策与规划，实现采摘机器人虚拟环境下智能行为与采摘路径规划试验。LYTRDIS 等[109]提出了一种通过通信模块实现 2 台农业机器人在野外协调导航的模块化算法，用于葡萄采摘机器人间协同作业。

执行系统通过控制农业机器人内部的各种驱动器和伺服机构，将决策转化为实际的物理动作，以完成决策过程生成的控制指令，是机器人的“手脚”。LIU 等[110]将 V－REP 与多个 FEM 软件相结合，构建了可以实现视觉反馈的葡萄采摘机器人仿真系统，用于虚拟环境下采收机器人的连续手-眼协调多交互仿真。NGUYEN 等[111]设计了一种用于苹果采摘机器人的运动和任务规划框架，并在虚拟环境中进行仿真，以实现与人工相同效果的苹果采摘。ROBERT 等[112]利用元宇宙技术构建了一个 3D 农田，用于进行除草机器人 Oz 的测试。SINGH 等[113]开发了基于 ROS－Gazebo 的数字孪生仿真环境，用于进行草莓采摘机器人的测试。

农业机器人作为智能农业的核心装备，其感知-决策-执行系统的优化高度依赖高效可靠的试验手段。元宇宙技术通过构建虚拟仿真环境，为农业机器人提供了可重复、低成本的测试平台，在视觉识别、路径规划、协同控制等方面展现出显著优势。未来研究应进一步强化虚拟场景与真实场景的数据闭环，突破复杂农业环境下的多模态感知建模、动态决策算法和精准执行控制等关键技术，推动农业机器人向全自主化、集群化方向发展，实现农业生产全流程的智能化与无人化。

3　展望

通过分析元宇宙技术在不同农业机械上的应用可知，元宇宙技术可以解决传统农业机械设计受时令限制的难题，为农业机械的设计提供了新的方向。未来农业机械元宇宙技术研究可以从以下方面展开：

（1）元宇宙技术与农机装备设计的深度整合

虽然当前国内外学者在元宇宙技术与农业机械性能分析、作业环境模拟以及试验监控等方面取得了一定程度的结合，但在农业机械设计、试验和应用方面的研究仍有待深入。未来研究可着力构建基于元宇宙的农机装备全生命周期虚拟设计平台，整合参数化建模、多物理场仿真、人机交互验证等功能模块。通过高保真虚拟现实环境，研发人员可实时进行结构优化、运动学分析、疲劳测试等，并结合数字孪生技术实现虚拟设计数据与实体制造的无缝集成。此外，基于区块链的协同设计平台可促进跨地域、多学科的研发团队高效协作，缩短产品开发周期，推动农业装备向模块化、轻量化和智能化方向发展。

（2）植保机械-药液-作物的互作机理研究

精准施药技术是现代农业绿色发展的关键，但目前植保机械的作业优化仍缺乏对药液沉积、飘移、作物冠层穿透等过程的动态模拟。未来研究可基于元宇宙技术构建“机械-环境-作物”多尺度耦合模型，整合计算流体力学（CFD）、离散元法（DEM）和作物生长模型，精确模拟不同喷雾参数（如压力、雾滴粒径、喷头高度）下的药液空间分布规律。同时，结合机器视觉和物联网技术，可实现施药效果的实时监测与反馈，形成“感知-决策-执行”的闭环控制，最终建立动态可调的变量施药系统，提升农药利用率并降低环境污染风险。

（3）联合收获机虚拟作业与损失率精准评估

联合收获机作业损失率的量化一直是收获机械研究中的难点，传统方法依赖人工采样，效率低且主观性强。元宇宙技术可为此提供创新解决方案：通过建立作物-机械相互作用的高精度离散元模型，可模拟不同品种作物的脱粒、清选过程；结合计算机视觉和深度学习算法，可实现对虚拟场景中籽粒损失的自动识别与统计。进一步地，可构建涵盖多种作物的收获损失率检测模型，为收获参数的智能调节提供理论依据。未来，通过将虚拟仿真数据与田间实测结果进行迭代优化，有望建立具有普适性的联合收获机虚拟仿真系统。

（4）多工况下动力机械性能的仿真与优化

动力机械的作业性能直接影响整套农机系统的效率，但目前对其在复杂田间工况下的动态特性研究不足。未来应构建包含不同土壤类型、湿度条件、坡度变化的虚拟试验场，通过多体动力学仿真分析牵引性能、燃油经济性和振动特性。同时，可结合强化学习算法，开发动力机械的自适应控制策略，使其能够根据作业阻力实时调整传动参数。此外，新能源动力机械的虚拟测试平台建设也亟待加强，需重点研究电池管理系统、能量回收等关键技术的元宇宙仿真方法。

（5）农机集群协同作业

随着无人农场概念的兴起，多机协同作业成为必然趋势。元宇宙技术可为农机集群的协同逻辑验证提供安全、低成本的虚拟环境：通过建立农田数字孪生体，可模拟不同农机的协同路径规划、避碰机制

和任务分配策略。基于分布式仿真技术,可进一步研究异构农机的通信协议和边缘计算架构,解决田间复杂环境下的实时数据同步问题。未来,通过将虚拟协同算法部署到实际农机控制系统,有望实现“耕-种-管-收”全流程的无人化作业,推动农业生产向全自主化方向迈进。

参 考 文 献

[1] 辛亮,孙铭翼,李泽泽,等. 高接低栽式差速变姿态行星轮系栽植机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(8):161 - 169,265.
XIN Liang, SUN Mingyi, LI Zeze, et al. Optimization design and experiment of high catching and low planting type differential variable attitude planetary gear system planting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 161 - 169,265. (in Chinese)

[2] 魏松,张驰海,詹振宇,等. 基于 DEM - MBD 耦合的棉花直播机仿形开沟过程机理仿真与优化试验[J]. 农业机械学报,2025,56(2):275 - 289,341.
WEI Song, ZHANG Chihai, ZHAN Zhenyu, et al. Simulation and optimization test of imitation furrowing process of cotton direct seeding machine based on DEM - MBD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 275 - 289,341. (in Chinese)

[3] CELIK H K, RENNIE A E W, AKINCI I. Design and structural optimisation of a tractor mounted telescopic boom crane[J]. J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng., 2017, 39(3): 909 - 924.

[4] CAI Z, XIE D B, LIU T, et al. Design of a high-gap plant protection machine (HGPM) with stepless variable speed and power adjustable function[J]. Machines, 2023, 11(2): 265.

[5] 熊光楞, 孙国基. 数字仿真技术及其应用(综述)[J]. 信息与控制, 1983(4): 1 - 9,85.

[6] 董文葆. 化工过程模型化、最优控制方法及数字仿真技术[J]. 化工自动化及仪表, 1985(3): 1 - 6.
DONG Wenbao. Simulation, modeling and optimal control of chemical processes[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 1985(3): 1 - 6. (in Chinese)

[7] 李鸣皋. 舰载航空医学[M]. 北京:军事医学科学出版社, 2015.

[8] 黄进, 崔大勇. 数字仿真技术的发展[J]. 自动化与仪表, 1997(4): 1 - 3.
HUANG Jin, CUI Dayong. Development of digital simulation technique[J]. Automation & Instrumentation, 1997(4): 1 - 3. (in Chinese)

[9] PALANICHAMY M, PATIL M K, GHISTA D N. Minimization of the vertical vibrations sustained by a tractor operator, by provision of a standard-type tractor seat suspension[J]. ANNALS of Biomedical Engineering, 1978, 6: 138 - 153.

[10] 蒋美华, 曾志彤. VAX11/780Di3000 图形软件在数字仿真技术中的应用[J]. 中小型电机,1986(4): 6 - 8.

[11] 李元奇. 计算机辅助设计组合机床[J]. 机械工业自动化, 1984(4): 37 - 43.

[12] CANNON T M, GREENFIELD H. Adaptability of computer graphics to studies of atherosclerosis pathogenesis[J]. Journal of the Association for the Advancement of Medical Instrumentation, 1972, 6(3): 250 - 255.

[13] 许晓东. 旋耕机总体参数的 CAD 系统[J]. 农业工程学报, 1996, 22(4): 173 - 176.
XU Xiaodong. CAD system for general layout of rotary plow[J]. Transactions of the CSAE, 1996, 22(4): 173 - 176. (in Chinese)

[14] 陈德俊,胡杭湘,邬介年, 等. 多熟制水稻插秧机分插机构精密综合[J]. 农业机械学报, 1995, 36(1): 111 - 114.

[15] 蔡强. 计算机图形学的相关技术与发展[J]. 北京轻工业学院学报, 1999, 17(3): 74 - 82.
CAI Qiang. Related technologies and development of computer graphics[J]. Journal of Beijing Institute of Light Industry, 1999, 17(3): 74 - 82. (in Chinese)

[16] 何俨, 何昭. 图形艺术 CAD 与工业设计[J]. 郑州轻工业学院学报, 1997, 12(增刊 1): 55 - 58.

[17] WEI Z, TANG Y, ZHAO W, et al. Rapid development technique for drip irrigation emitters[J]. Rapid Prototyping J., 2003, 9(2): 104 - 110.

[18] 冯江, 李建民, 王德慧. 仿真技术在农机设计中的应用[J]. 农机化研究, 2000, 11(4): 96 - 98.

[19] 邱晓明, 桑正中, 邱白晶. 1G - 175 旋耕机侧边齿轮箱箱体的动态分析及结构动力修改[J]. 农业机械学报, 1990, 21(3): 16 - 21.
QIU Xiaoming, SANG Zhengzhong, QIU Baijing. Dynamic analysis and SDM (structural dynamic modification) on the side gearbox box of 1G - 175 rotary tiller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1990, 21(3): 16 - 21. (in Chinese)

[20] 王凯湛, 马瑞峻. 虚拟现实技术及其在农业机械设计上的应用[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(增刊 2): 500 - 503.
WANG Kaizhan, MA Ruijun. Virtual reality technology and its application in agricultural machinery design[J]. Journal of System Simulation, 2006,18 (Supp. 2): 500 - 503. (in Chinese)

[21] 万玲, 胡培钰, 吴俊杰, 等. 元宇宙环境下玉米免耕播种机作业机组仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 53 - 62.
WAN Ling, HU Peiyu, WU Junjie, et al. Simulation and expreiment of corn no-till planter operating unit in meta-universe

environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 53 – 62. (in Chinese)
[22] CUTINI M, BISAGLIA C, BRAMBILLA M, et al. A co-simulation virtual reality machinery simulator for advanced precision agriculture applications[J]. Agriculture, 2023, 13(8): 1603.
[23] XIONG J, HE Z, LIN R, et al. Visual positioning technology of picking robots for dynamic litchi clusters with disturbance [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 151: 226 – 237.
[24] AYITER E. Spatial poetics, place, non-place and storyworlds: intimate spaces for metaverse avatars[J]. Technoetic Arts: A Journal of Speculative Research, 2019, 17(1 – 2): 155 – 169.
[25] DE LA F P J, LACASA P, MARTÍNEZ-BORDA R. Approaching metaverses: mixed reality interfaces in youth media platforms [J]. New Techno Humanities, 2022, 2(2): 136 – 145.
[26] 王杰. 虚拟环境下收割机爬坡性能及其收获行为仿真[D]. 广州:华南农业大学, 2019.
WANG Jie. Simulation of climbing performance and harvesting behavior of harvester in virtual environment[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019. (in Chinese)
[27] 赵静, 孟沌超, 王其欢, 等. 基于虚拟现实的青贮玉米饲料化模拟系统仿真[J]. 计算机应用, 2019, 39(增刊 2): 211 – 215.
ZHAO Jing, MENG Dunchao, WANG Qihuan, et al. Simulation of silage corn feeding system based on virtual reality[J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39(Supp. 2): 211 – 215. (in Chinese)
[28] 何巍望, 赵骞远. 元宇宙沉浸式交互技术类型与发展现状[J]. 电视技术, 2023, 47(3): 132 – 134.
HE Weiwang, ZHAO Qianyuan. The types and development status of meta-universe immersive interaction technology[J]. Video Engineering, 2023, 47(3): 132 – 134. (in Chinese)
[29] KANG M, WANG X, WANG H, et al. The development of agriverse: past, present, and future[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53(6): 3718 – 3727.
[30] 魏国. 虚拟现实技术在农业机械现代设计中的应用[J]. 中国果树, 2022(11): 127.
[31] 陈沪东. 数字物理元宇宙——工业仿真软件发展思考与展望[J]. 中国工程科学,2025,27(3):11 – 21.
CHEN Hudong. Digital-physics metaverse: thoughts and prospects on the development of industrial simulation software[J]. Strategic Study of CAE,2025,27(3):11 – 21. (in Chinese)
[32] 喻国明. 未来媒介的进化逻辑:“人的连接”的迭代、重组与升维——从“场景时代”到“元宇宙”再到“心世界”的未来[J]. 新闻界, 2021(10): 54 – 60.
YU Guoming. The evolutionary logic of media: iteration, recombination, and dimensionality enhancement of “human connections”—from the “scene era” to the “metaverse” and then to the future of the “heart world”[J]. Journalism and Mass Communication, 2021(10): 54 – 60. (in Chinese)
[33] 冯涛. 元宇宙背景下媒体深度融合发展探析[J]. 传播与版权, 2024(4): 51 – 53.
[34] 蒲清平, 向往. 元宇宙及其对人类社会的影响与变革[J]. 重庆大学学报(社会科学版), 2023, 29(2): 111 – 123.
PU Qingping, XIANG Wang. Metaverse and its effect on human society[J]. Journal of Chongqing University (Social Science Edition), 2023, 29(2): 111 – 123. (in Chinese)
[35] JEON J. A study on the principle of metaverse composition with a focus on roblox[J]. Korean Association for Visual Culture, 2021, 38: 257 – 279.
[36] WEINBERGER M. What is metaverse? —a definition based on qualitative meta-synthesis[J]. Future Internet, 2022, 14(11): 310.
[37] 胡培钰. 元宇宙环境下的玉米无人农场场景构建与交互技术[D]. 合肥:安徽农业大学, 2023.
HU Peiyu. Construction and interaction techniques for an unmanned corn farm scene in a metaverse environment[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[38] YAQOOB I, SALAH K, JAYARAMAN R, et al. Metaverse applications in smart cities: enabling technologies, opportunities, challenges, and future directions[J]. Internet of Things, 2023, 23: 100884.
[39] BOSHKOVIKJ V, FLUKE C J, CRAWFORD R J, et al. Three-dimensional visualization of nanostructured surfaces and bacterial attachment using Autodesk® Maya®[J]. Scientific Reports, 2014, 4(1): 4228.
[40] WOOD A. Software, animation and the moving image: what's in the box? [M]. Springer, 2014.
[41] 孙岩, 吴玉斌. 浅析 Creator 可视化三维建模软件系统[J]. 数字技术与应用, 2011(5): 22,30.
[42] ROHMER E, SINGH S P, FREESE M. V-REP: a versatile and scalable robot simulation framework[C]//Proceedings of the 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2013: 1321 – 1326.
[43] FURRER F, BURRI M, ACHTELIK M, et al. Rotors—a modular gazebo mav simulator framework[J]. Robot Operating System, 2016, 1: 595 – 625.
[44] WANG F. Research on virtual reality based on eon studio[C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic and Evolutionary Computing. IEEE, 2010: 558 – 561.
[45] 何泽浩, 曹良才. 面向沉浸式元宇宙的显示、交互和应用[J]. 科技导报, 2023, 41(5): 6 – 14.
HE Zehao, CAO Liangcai. Display, interaction and application for immersive metaces[J]. Science & Technology Review, 2023, 41(5): 6 – 14. (in Chinese)

[46] 周忠, 周颐, 肖江剑. 虚拟现实增强技术综述[J]. 中国科学:信息科学, 2015, 45(2): 157 - 180.
ZHOU Zhong, ZHOU Yi, XIAO Jiangjian. Survey on augmented virtual environment and augmented reality[J]. Scientia Sinica(Informationis), 2015, 45(2): 157 - 180. (in Chinese)
[47] WU D, YANG Z, ZHANG P, et al. Virtual-reality interpromotion technology for metaverse: a survey[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(18): 15788 - 15809.
[48] LAN S, YU R, YU G, et al. Modeling local geometric structure of 3D point clouds using Geo-CNN[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019: 998 - 1008.
[49] KAMPKER A, STICH V, JUSSEN P, et al. Business models for industrial smart services—the example of a digital twin for a product-service-system for potato harvesting[J]. Procedia Cirp, 2019, 83: 534 - 540.
[50] MOGHADAM P, LOWE T, EDWARDS E J. Digital twin for the future of orchard production systems[C]// Proceedings of the MDPI, 2020, 36(1):92.
[51] VERDOUW C, KRUIZE J W. Digital twins in farm management: illustrations from the FIWARE accelerators SmartAgriFood and Fractals[C]// Proceedings of the 7th Asian-Australasian Conference on Precision Agriculture Digital, 2017: 16 - 18.
[52] 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. (in Chinese)
[53] 陈枫, 孙传恒, 邢斌, 等. 农业元宇宙: 关键技术, 应用情景, 挑战与展望[J]. 智慧农业, 2022, 4(4): 126 - 137.
CHEN Feng, SUN Chuanheng, XING Bin, et al. Agricultural metaverse: key technologies, application scenarios, challenges and prospects[J]. Smart Agriculture, 2022, 4(4): 126 - 137. (in Chinese)
[54] HAAG S, ANDERL R. Digital twin-proof of concept[J]. Manufacturing Letters, 2018, 15: 64 - 66.
[55] 刘大同, 郭凯, 王本宽, 等. 数字孪生技术综述与展望[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 1 - 10.
LIU Datong, GUO Kai, WANG Benkuan, et al. Summary and perspective survey on digital twin technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 1 - 10. (in Chinese)
[56] QIU H, ZHANG H, LEI K, et al. Forest digital twin: a new tool for forest management practices based on spatio-temporal data, 3D simulation engine, and intelligent interactive environment[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 215: 108416.
[57] LI W, ZHU D L, WANG Q. A single view leaf reconstruction method based on the fusion of ResNet and differentiable render in plant growth digital twin system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 193: 106712.
[58] NASIRAHMADI A, HENSEL O. Toward the next generation of digitalization in agriculture based on digital twin paradigm[J]. Sensors, 2022, 22(2): 498.
[59] 吴江, 曹喆, 陈佩, 等. 元宇宙视域下的用户信息行为:框架与展望[J]. 信息资源管理学报, 2022, 12(1): 4 - 20.
WU Jiang, CAO Zhe, CHEN Pei, et al. Users' information behavior from the perspective of metaverse: framework and prospect[J]. Journal of Information Resources Management, 2022, 12(1): 4 - 20. (in Chinese)
[60] 方巍, 伏宇翔. 元宇宙:概念、技术及应用研究综述[J]. 南京信息工程大学学报, 2024, 16(1): 30 - 45.
FANG Wei, FU Yuxiang. Metaverse: conceptions, key technical and applications[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology, 2024, 16(1): 30 - 45. (in Chinese)
[61] SCHROEDER N L, YANG F, BANERJEE T, et al. The influence of learners' perceptions of virtual humans on learning transfer[J]. Computers & Education, 2018, 126: 170 - 182.
[62] THIES J, ZOLLHÖFER M, NIEBNER M, et al. Real-time expression transfer for facial reenactment[J]. ACM Trans. Graph, 2015, 34(6): 1 - 14.
[63] CHATZITOFIS A, ZARPALAS D, DARAS P, et al. DeMoCap: low-cost marker-based motion capture[J]. International Journal of Computer Vision, 2021, 129(12): 3338 - 3366.
[64] LOU J, WANG Y, NDUKA C, et al. Realistic facial expression reconstruction for VR HMD users[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2019, 22(3): 730 - 743.
[65] GOMEZ-DONOSO F, ORTS-ESCOLANO S, CAZORLA M. Accurate and efficient 3D hand pose regression for robot hand teleoperation using a monocular RGB camera[J]. Expert Systems with Applications, 2019, 136: 327 - 337.
[66] JOO H, SIMON T, SHEIKH Y. Total capture: a 3D deformation model for tracking faces, hands, and bodies[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 8320 - 8329.
[67] 王文喜, 周芳, 万月亮, 等. 元宇宙技术综述[J]. 工程科学学报, 2022, 44(4): 744 - 756.
WANG Wenxi, ZHOU Fang, WAN Yueliang, et al. A survey of metaverse technology[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(4): 744 - 756. (in Chinese)
[68] 李鸣, 宋文鹏, 宗燕, 等. 基于区块链的元宇宙生态体系架构[J]. 计算机研究与发展, 2024, 61(9): 2364 - 2383.
LI Ming, SONG Wenpeng, ZONG Yan, et al. Blockchain based metaverse ecosystem achitecture[J]. Journal of Computer Research and Development, 2024, 61(9): 2364 - 2383. (in Chinese)
[69] HUYNH-THE T, GADEKALLU T R, WANG W Z, et al. Blockchain for the metaverse: a review[J]. Future Generation Computer Systems, 2023, 143: 401 - 419.

[70] ALI M, NAEEM F, KADDOUM G, et al. Metaverse communications, networking, security, and applications: research issues, state-of-the-art, and future directions[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2024, 26(2): 1238 – 1278.

[71] CHEN G, WANG Q, LI H, et al. Experimental research on vertical straw cleaning and soil tillage device based on soil-straw composite model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 216: 108510.

[72] LIU L, WANG X, ZHANG X, et al. Determination and verification of parameters for the discrete element modelling of single disc covering of flexible straw with soil[J]. Biosystems Engineering, 2023, 233: 151 – 167.

[73] WU Z, WANG X, LIU D, et al. Calibration of discrete element parameters and experimental verification for modelling subsurface soils[J]. Biosystems Engineering, 2021, 212: 215 – 227.

[74] RENTSCHLER T, WERBAN U, AHNER M, et al. 3D mapping of soil organic carbon content and soil moisture with multiple geophysical sensors and machine learning[J]. Vadose Zone Journal, 2020, 19(1): e20062.

[75] CHEN Y, ZHANG B, ZHOU J, et al. Real-time 3D unstructured environment reconstruction utilizing VR and Kinect-based immersive teleoperation for agricultural field robots[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 175: 105579.

[76] 苑严伟, 李树君, 吴海华, 等. 水稻田虚拟试验场景建模与仿真[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊): 224 – 229.
YUAN Yanwei, LI Shujun, WU Haihua, et al. Modeling and simulation of rice paddy field virtual scene[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.): 224 – 229. (in Chinese)

[77] CHEN K, ZHAO B, ZHOU H, et al. Digital twins in plant factory: a five-dimensional modeling method for plant factory transplanter digital twins[J]. Agriculture, 2023, 13(7): 1336.

[78] 李炜,朱德利,王青,等.监测生长状态和环境响应的作物数字孪生系统研究综述[J].中国农业科技导报,2022,24(6): 90 – 105.
LI Wei, ZHU Deli, WANG Qing, et al. Research review on crop digital twin system for monitoring growth status and environmental response[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022, 24(6): 90 – 105. (in Chinese)

[79] 张红卫,陈怀亮,周官辉,等.农作物生长动态监测技术综述[C]//中国气象学会.第 27 届中国气象学会年会现代农业气象防灾减灾与粮食安全分会场论文集,2010:528 – 536.

[80] DE WIT C T, BROUWER R, DE VRIES F W T P. The simulation of photosynthetic systems[M]. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1970.

[81] RITCHIE J T. Description and performance of CERES wheat: a user-oriented wheat yield model[J]. ARS Wheat Yield Project, 1985, 38: 159 – 175.

[82] MCCOWN R L, HAMMER G L, HARGREAVES J N G, et al. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research[J]. Agricultural Systems, 1996, 50(3): 255 – 271.

[83] 陆声链, 郭新宇, 赵春江, 等. 农作物生长模拟三维场景整合平台设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 153 – 159.
LU Shenglian, GUO Xinyu, ZHAO Chunjiang, et al. Design of framework for integrating 3D scene of crops production[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 153 – 159. (in Chinese)

[84] PENG F, ZHENG H, LU S, et al. Growth model and visualization of a virtual jujube tree[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 157: 146 – 153.

[85] LEE K H, EHSANI R. Comparison of two 2D laser scanners for sensing object distances, shapes, and surface patterns[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(2): 250 – 262.

[86] 王传宇, 赵明, 阎建河, 等. 基于双目立体视觉技术的玉米叶片三维重建[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 198 – 202.
WANG Chuanyu, ZHAO Ming, YAN Jianhe, et al. Three-dimensional reconstruction of maize leaves based on binocular stereovision system[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(4): 198 – 202. (in Chinese)

[87] 王东洋. 基于三维重建的 VR 果园种植系统设计与实现[D]. 银川:宁夏大学, 2021.
WANG Dongyang. Design and implementation of VR orchard planting system based on 3D reconstruction[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021. (in Chinese)

[88] 赵春江, 李静晨, 吴华瑞, 等. 基于大语言模型推理的数字孪生平台蔬菜作物生长模型研究[J]. 智慧农业, 2024, 6(6): 63 – 71.
ZHAO Chunjiang, LI Jingchen, WU Huarui, et al. Vegetable crop growth modeling in digital twin platform based on large language model inference[J]. Smart Agriculture, 2024, 6(6): 63 – 71. (in Chinese)

[89] 李思莹. 农田喷灌车虚拟现实设计[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2015.
LI Siying. Virtual reality design of irrigation trucks for farmland[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2015. (in Chinese)

[90] WANG X, KANG M, SUN H, et al. DeCASA in AgriVerse: parallel agriculture for smart villages in metaverses [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(12): 2055 – 2062.

[91] 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.
TANG Bin, YANG Ziyi, YAO Cong, et al. Design of virtual reality digital cockpit for agricultural greenhouse monitoring system based on Unity3D and LoRa IoT[J]. Computer Measurement & Control, 2025,33(8):60 – 71. (in Chinese)

[92] HUANG Q, DENG L, FEI M, et al. Building a virtual reality system for intelligent agriculture greenhouse based on Web3D

[C]// Proceedings of the Advanced Computational Methods in Energy, Power, Electric Vehicles, and Their Integration: International Conference on Life System Modeling and Simulation, LSMS 2017 and International Conference on Intelligent Computing for Sustainable Energy and Environment, ICSEE 2017, 2017: 790 - 799.

[93] 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.
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. (in Chinese)

[94] 杨方飞, 阎楚良. 基于视景仿真的联合收获机虚拟试验技术[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 79 - 83.
YANG Fangfei, YAN Chuliang. Virtual test of combine harvester based on visual simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 79 - 83. (in Chinese)

[95] 慈翠荣. 基于 Unity3D 的玉米果穗收获机设计与虚拟仿真试验[D]. 泰安:山东农业大学, 2021.
CI Cuirong. Design and virtual simulation experiment of corn ear harvester based on Unity3D [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2021. (in Chinese)

[96] 陈燕, 曾泽钦, 王杰, 等. 收获机虚拟环境模型与仿真平台构建[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 159 - 166.
CHEN Yan, ZENG Zeqin, WANG Jie, et al. Virtual enviroment construction and simulation platform of harvesting machinery [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 159 - 166. (in Chinese)

[97] GUO D, DU Y, WANG L, et al. Digital twin for monitoring threshing performance of combine harvesters[J]. Measurement, 2025, 239: 115411.

[98] 马博文,刘孟楠,尹彦鑫,等.联合收获机轻量级数字孪生系统构建方法研究[J].农业机械学报,2024,55(5):108 - 120.
MA Bowen, LIU Mengnan, YIN Yanxin, et al. Construction method and application example of lightweight digital twin system of combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 108 - 120. (in Chinese)

[99] ZANG Y, ZHU Z, SONG Z, et al. Virtual reality and the application in virtual experiment for agricultural equipment[C]// International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture,2011, 346: 257 - 268.

[100] ZHAO X, DU Y, MAO E, et al. Agricultural tractor dynamics simulation research based on a driving simulator with real-time human-machine interaction[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 203: 107443.

[101] 翟志强,朱忠祥,杜岳峰,等.基于虚拟现实的拖拉机双目视觉导航试验[J].农业工程学报,2017,33(23):56 - 65.
ZHAI Zhiqiang, ZHU Zhongxiang, DU Yuefeng, et al. Test of binocular vision-based guidance for tractor based on virtual reality [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 56 - 65. (in Chinese)

[102] 刘成良,贡亮,苑进,等.农业机器人关键技术研究现状与发展趋势[J].农业机械学报,2022,53(7):1 - 22,55.
LIU Chengliang, GONG Liang, YUAN JIN, et al. Current status and development trends of agricultural robots [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 1 - 22,55. (in Chinese)

[103] ROSHANIANFARD A, NOGUCHI N, OKAMOTO H, et al. A review of autonomous agricultural vehicles (The experience of Hokkaido University)[J]. Journal of Terramechanics, 2020, 91: 155 - 183.

[104] XIE D, CHEN L, LIU L, et al. Actuators and sensors for application in agricultural robots: a review[J]. Machines, 2022, 10(10): 913.

[105] SHAMSHIRI R R, HAMEED I A, KARKEE M, et al. Robotic harvesting of fruiting vegetables: a simulation approach in V - REP, ROS and MATLAB[J]. Proceedings in Automation in Agriculture-Securing Food Supplies for Future Generations, 2018, 126: 81 - 105.

[106] WANG Y, ZHOU J, ZHENG Y, et al. VR map construction for orchard robot teleoperation based on dual-source positioning and sparse point cloud segmentation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 224: 109187.

[107] IQBAL J, XU R, SUN S, et al. Simulation of an autonomous mobile robot for LiDAR-based in-field phenotyping and navigation[J]. Robotics, 2020, 9(2): 46.

[108] 罗陆锋, 邹湘军, 卢清华, 等. 采摘机器人作业行为虚拟仿真与样机试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 34 - 42.
LUO Lufeng, ZOU Xiangjun, LU Qinghua, et al. Virtual simulation and prototype test for behavior of robot in picking process [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 34 - 42. (in Chinese)

[109] LYTRIDIS C, BAZINAS C, PACHIDIS T, et al. Coordinated navigation of two agricultural robots in a vineyard: a simulation study[J]. Sensors, 2022, 22(23): 9095.

[110] LIU J, LIANG J, ZHAO S, et al. Design of a virtual multi-interaction operation system for hand-eye coordination of grape harvesting robots[J]. Agronomy, 2023, 13(3): 829.

[111] NGUYEN T T, KAYACAN E, DE BAEDEMAEKER J, et al. Task and motion planning for apple harvesting robot[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(18): 247 - 252.

[112] ROBERT C, SOTIROPOULOS T, WAESELYNCK H, et al. The virtual lands of Oz: testing an agribot in simulation[J]. Empirical Software Engineering, 2020, 25: 2025 - 2054.

[113] SINGH R, SENEVIRATNE L, HUSSAIN I. A deep learning-based approach to strawberry grasping using a telescopic-link differential drive dobile robot in ROS - Gazebo for greenhouse digital twin environments[J]. IEEE Access, 2025, 13: 361 - 381.