# 元宇宙时代温室数字双胞胎的以人为本的互操作性方法

摘要：随着数字双胞胎（DT）和物联网技术在智能农业领域的兴起，农业元宇宙（AM）正成为当前的研究热点。大规模的网络化、智能化传感器和农业机器人被部署在温室中，工厂化的温室已经成为最具有潜力的AM应用场景之一。此外，多机器人的互操作特征导致AM农业生产系统更加复杂，如温室设施和机器人的自组织和自主协作。一方面，在无人或少人的温室室内生产中，需要农业机械/机器人的控制来配合作物的生长节奏；另一方面，在温室室外生产中，希望作物的生产节奏能配合社会干扰，如农产品运输的动态社会因素、客户定制、社会化温室的农业订单变化等。这种节奏和节拍的一致性问题与人类和物联网的互操作性密切相关。然而，目前对农业DT或农业元空间的研究很少报道这些问题。为此，本文探讨了在未来农业元宇宙时代，以人为本的温室DT的互操作方法。首先，建立了一个智能温室DT模型，包括温室数字双胞胎、作物生长模型和设施控制模块；其次，基于温室DT，提出了一个以人为本的社会化温室的互操作框架。最后，设计了一个温室DT的原型系统，以验证以人为本的互操作性方法的可行性。

关键字：智能农业、温室、农业元宇宙、以人为本的互操作性、数字双胞胎

**1**引言

联合国估计，世界人口在2050年世界人口将要达到96亿，为了适应不断上涨的人口，农业需要比今天增产50%左右，才可以满足世界人口上涨的需求，这对农业的发展规模和技术革新提出了严峻的考验。随着以物联网和数字孪生技术为核心的智能农业渐渐兴起以及农业元宇宙的提出，貌似为粮食增产问题提供了解决方案。

物联网技术早已经应用于智能农业温室生产中并不断发展，2019年N. M. Ameen等人通过物联网平台和模糊控制实现了卷帘的运动；2020年Y. Alaviyan等人运用物联网技术监测植物数据智能控制温度、光照等温室环境参数；2021年Soheyb等人结合机器人和物联网，为农民提供监测、监督和控制智能温室的能力；2022年M. S. Farooq等人提出了一个用于温室物联网的网络框架，能够实现更为高效的资源管理；2023年C. Zhang等人结合LoRA通信、传感器和各种终端显示，实现对温室远程监控和智能监测。直到今天，物联网仍旧是智能农业发展的热门话题。

数字孪生（DT）可以构建现实实物的虚拟体，以此达到更加精确的监测可控制。运用数字孪生技术来控制温室的运行已经成为了农业发展的新趋势。2019年R. G. Alves建立了一个初步运行的数字双胞胎，使用户可以更好的了解农场的资源和设备使用情况；2020年D. Anthony Howard等人构建了根据过去和实时数据来估计温室未来生长状态的数字孪生体；2021年N. K. M’Sirdi等人提出了一种可变结构和开关系统模型，并开发了温室互联的Virtual Twin；2022年D. A. Howard等人开发了用于表示温室生产过程、评估植物生长状态的数字孪生。今天，发展数字孪生已经是农业领域研究者们的共识，成为当下最热门的农业新技术。

元宇宙被定义为一个由三维环境构建的实时虚拟世界，其中多个用户以高沉浸感与虚拟环境发生交互，进行社会、经济、文化活动。随着物联网和数字孪生在智能农业中的深入应用，大规模的网络化、智能化传感器和农业机器人被部署在温室中，工厂化的温室已经成为最具有潜力的AM应用场景之一。2022年Mowdoudi A为农产品和药用植物构建了元宇宙，在农业价值链提供了重要作用；2022年M. Kang等人开发了农业元宇宙并介绍了农业元宇宙的架构和运行模式，在2023年又介绍了元宇宙时代下的植物建模和元宇宙的应用场景；C Feng等人介绍了农业元宇宙的原理和技术，介绍了元宇宙的虚拟农场、教学系统和农产品溯源系统；农业元宇宙已经初具雏形，但以温室生产为核心构建AM还尚未有学者研究。

温室生产是一个多输入、多因素作用的过程，温室中多机器人的互操作特征会导致AM农业生产系统更加复杂，如温室设施和机器人的自组织和自主协作。一方面，在无人或少人的温室室内生产中，需要农业机械/机器人的控制来配合作物的生长节奏；另一方面，在温室室外生产中，希望作物的生产节奏能配合社会干扰，如农产品运输的动态社会因素、客户定制、社会化温室的农业订单变化等。因此需要提出一种能够考虑人类社会和多个机器人的元宇宙构建方法，以人为本的互操作性应运而生。以人为本便是将人类社会放在更重要的位置上，互操作性则是人类和多个机器人的组织与协作，使温室生产能够跟好的服务于社会。随着温室智能农业从物联网到数字孪生再到农业元宇宙，以人为本的思想得到越来越多学者的认同，以人为本的思想已经在医学、工业、教育业等行业提出并展开应用。在农业领域，以人为本的互操作性使温室生产更加贴合人类社会的运行节拍，处理好温室生产和社会需求不同步的问题。

为此，本文探讨了在未来农业元宇宙时代，以人为本的温室DT的互操作方法。首先，建立了一个智能温室DT模型，包括温室数字双胞胎、作物生长模型和设施控制模块；其次，基于温室DT，提出了一个以人为本的社会化温室的互操作框架。最后，设计了一个温室DT的原型系统，以验证以人为本的互操作性方法的可行性。

本文的其余部分安排如下：第二节探讨了智能温室从物联网到数字孪生再到元宇宙的演化阶段、介绍了元宇宙的关键技术。第三节建立了智能温室DT模型，包括温室数字双胞胎、作物生长模型和设施控制模块，设计了温室DT的原型系统。第四节提出了一个以人为本的社会化温室的互操作框架，并验证了以人为本的互操作性方法的可行性。第五节对本文的工作进行了总结，并对元宇宙的未来进行了展望。

**2从物联网到元宇宙**

**2.1农业元宇宙关键技术分析**



图1 农业元宇宙的支撑技术图

元宇宙并不是一个从无到有的新技术，而是由多种信息技术的综合应用。其中，物联网、区块链、交互技术、电子游戏、人工智能、互联网构成了元宇宙的支柱技术。

物联网通过传感器、射频识别技术等方式，实时采集物体或设备的各种信息，将其融入到互联网中来，从而实现物与物、物与人的广泛连接，实现对物品和过程的智能化感知、识别和管理。物联网在农业中的应用广泛。在农业温室中，物联网将温室中的设备接入到互联网中来，通过采集农业温室中的各种各样的物理数据，实现了对农业温室的全面监控感知，便于实时管理农业温室的工作状态。

区块链是一类由多个节点共同维护的分布式账本技术。其运用P2P（peer to peer）网络、共识算法、智能合约和密码学等技术，在开放网络环境中构建了高效率、低成本的“去中心化”信任机制，实现了防篡改、防伪造的安全功能，对社会各领域产生着深远影响。区块链技术为元宇宙提供了理想的去中心化环境。在农业元宇宙中，区块链构建了农业元宇宙金融架构的基础，保证了每一个农产品购买者自由选择不同温室中的农产品，确保农产品追溯信息安全可信。

交互技术主要为拓展现实（XR）和脑机接口。拓展现实技术（XR）是虚拟了现实（VR）、增强现实（AR）和混合现实（MR）的统称，是利用穿戴设备增强用户体验的技术。脑机接口被定义为在人脑与计算机或其他电子设备之间建立的一种全新通讯和控制技术。佩戴脑际接口设备的人可以直接按照想法发出指令或者与外部环境交互，可以给用户完全沉浸式的元宇宙体验。虚实交互技术可以给农业元宇宙用户带来直观的视觉冲击和沉浸式的体验，能够亲身参观农业现场，激发用户的兴趣。

电子游戏是元宇宙的前身，也是元宇宙最初的载体，但元宇宙不等于电子游戏。电子游戏仅仅只是玩家与虚拟世界的交互，并不会对现实世界产生影响。当玩家在虚拟世界中所做的交互能够影响到现实世界的主体时，电子游戏就完成了到元宇宙的转变。关于农业生产的电子游戏已经出现了很久，无论是小成本的农田操作还是大规模的机械生产，都吸引了一批又一批的年轻人投入到农业生产游戏中。电子游戏为农业元宇宙提供了新的方向，游戏式的玩法使得原本枯燥无味的农业变得生动有趣，沉浸式的玩法也会吸引更多的年轻人投身到农业领域中来。

人工智能就是指使计算机拥有模仿人类思维，解决问题和制定决策的能力，可以使计算机表现得像人一样“智能”，具体表现为计算机视觉、自然语言处理和智能决策。人工智能可以赋予农业元宇宙的智能化，增强用户的体验感。计算机视觉可以实现对农作物的识别、定位，为农业元宇宙对农作物的操作提供了基础；自然语言处理能力可以使机器像人一样对话，赋予农业元宇宙与用户智能对话的能力；智能决策可以带给农业元宇宙更先进的智慧，使农业元宇宙拥有在不同环境情况下产生最佳的解决方案。

互联网技术即新兴的5G、云计算、大数据等技术。5G是具有高速率、低延迟和大链接等特点的新一代移动通信技术，可以实现海量的机器类通信，为智慧农业、农业元宇宙提供了通信基础。在未来，作为新一代通信技术的6G将具有更高的性能和更低的延迟，为元宇宙提供更广泛的连接。云计算即将数据和程序通过互联网储存和运行，是计算机运行和处理大量程序的解决方法，具有更高的安全性和工作效率，同时成本更低。大数据涉及规模巨大的数据信息，提供更强的决策力。农业元宇宙的运行必然会产生大量数据，云计算和大数据技术为农业元宇宙的数据处理问题提供了很好的解决方案。

**2.2智能温室农业元宇宙发展的三个阶段**

农业元宇宙并不是一个突然出现的新概念，也不可能一蹴而就，而是需要经过不断地技术积累和发展。结合元宇宙的关键技术和研究现状，可以将温室农业元宇宙的发展大概分为三个阶段：

1）物联网阶段：物联网阶段是为传统温室提供初步智慧的过程。以物联网、互联网、弱人工智能为技术基础的智慧温室，可以为管理者提供远程监管、数据监测、智慧管理等服务。但其未涉及到虚拟空间，人工智能较弱，仅仅是现实世界的信息采集、反馈管理，需要人工干预管理；

2）数字孪生阶段：数字孪生农业指在通过虚拟系统的推演、学习为实际系统的管理可控制提供支持。以三维建模、数字孪生为主体技术，开拓了虚拟空间，根据温室等农业设施在虚拟空间的推演，使得农业技术获得了更高的智能和更完善的反馈机制。但虚拟空间只涉及农业生产过程，无法包含完整的产业链，使用者也仅仅是温室的管理者，无法包含完整的产业链。该阶段作为物联网阶段到元宇宙阶段的过度。

3）元宇宙阶段：农业元宇宙建设的最终阶段，区块链、虚拟现实、脑机接口使得虚拟空间人与人、物与物的交互变味了可能，以此为基础建设的元宇宙实现了虚拟物品的价值追溯，能够使得多人同时连接与交互。虚拟空间完善，不在仅仅局限于农业生产，而是包括了农业完整的产业链、农业的教育传承等过程，用户的沉浸感和体验感得到了前所未有的增强。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 发展阶段 | 关键技术 | 特点 |
| 物联网阶段 | 互联网、物联网、人工智能 | 远程监测、管理 |
| 数字孪生阶段 | 三维建模、数字孪生 | 过度阶段，首次引入虚拟空间 |
| 元宇宙阶段 | 区块链、虚拟现实、脑机接口 | 虚拟空间完善，覆盖面广，大大增强沉浸感 |

**3智能温室数字孪生模型**

温室元宇宙是一个庞大且复杂的系统，结合第二章元宇宙的核心技术和发展阶段，本章设计了智能温室数字孪生作为温室农业元宇宙中的核心系统，包括温室数字双胞胎、作物生长模型和设施控制模块三部分。温室数字双胞胎通过构建三维的农业温室虚拟场景对温室进行监测和管理，从而实现对温室实体进行控制；作物生长模型模拟农作物的生长状态，优化温室生产管理、提高生产效率；设施控制模块结合农作物生长模型，给出最佳的设施调控策略。三个系统共同工作构建智能温室数字孪生模型。



图2 智能温室数字孪生模型

3.1作物生长模型

农作物生长模型是用数值模拟、预测作物整个生长过程的数字化模型，由计算机生成并作为专家系统，用于指导农业生产过程。通过作物生长模型，农业生产者能够预测作物的生长趋势，优化生产管理，提高生产效率，降低资源浪费和环境污染。农作物生长模型常常作为辅助决策工具，帮助农业生产者更好的理解作物生长的规律和需求。

本研究提出的农作物生长模型依据农作物种类而建，结合温室生产过程中的多种环境参数，以农作物生长过程中的生长情况和环境数据构建而成。此外，元宇宙系统还会生成农作物的虚拟孪生体，以更清楚地展示农作物的生长情况。

3.2设施控制模块

设备调控模块是温室调控算法的具象化表现，用以自动调控温室的环境参数，确保农作物时刻处于最佳的生长状态。设备调控模组包括效应调节模块、调控指令模块和风险评估报警系统；效应调节模块代表的是设备对某一环境指标的调控能力，其根据专家知识、环境数据和历史决策生成的；调控指令模块根据效应模块的信息和当前温室环境数据，结合温室中的设备生成设备的调控指令；风险报警系统则是判断当前环境和调控指令是否有潜在的风险。

调控模块依据温室内的调控设备生成，体现了通过对多种机器人和设备协同调控能力的计算，下达最佳的调控指令集。调控指令集包括需要执行的设备数量、协同工作流程和执行时间。设施调控模块是智能温室数字孪生模型的智能大脑，用于判断最佳的调控指令和最佳的作物生长状态。调控模块

3.3温室数字双胞胎

温室数字双胞胎是智能温室在虚拟空间的全等复制体，其通过物联网、三维建模等技术，实现对作物温室的监测、控制和管理。其中包括虚拟植物、虚拟设备、虚拟温室场景。

虚拟植物根据农作物生长模型数字建模而成，包含该农作物的生长信息和外观展示。通过对虚拟植物进行监测可以对农作物的生长情况做出判断。虚拟植物是温室数字双胞胎进行模拟和调控的基础。

虚拟设备是温室内机器人或设备的虚拟复制体，例如风机、卷帘、湿帘、补光灯等温室中的调控设备。虚拟设备不仅展示这些设备的外观，还包含了该设备在设施控制模块生成的效应参数。虚拟设备可以用于实时检测设备的工作状态，并模拟调控指令对温室的影响。虚拟设备是温室数字双胞胎的核心功能。

虚拟温室模型是温室本体的虚拟复制体，主要展示温室的外观和地理位置，在此基础上添加虚拟农作物和虚拟设备。当调控指令模块生成设备调控指令后，虚拟温室会模拟设备调控指令运行，风险评估报警系统判断是否存在潜在风险。虚拟温室是温室数字双胞胎最直观的展示。

**4以人为本的互操作性元宇宙框架**

本章在智能温室数字孪生的基础上，结合以人为本的互操作性方法，设计出完整的农业元宇宙框架。

以人为本的互操作性元宇宙是结合人类社会、多个机器设备协同工作的综合性系统，元宇宙一方面控制多种机器设备，自主调控温室的环境状态状态；另一方面考虑人类社会的需求，从需求的角度反方向调控温室产量的输出，避免环境资源的浪费。结合物联网和数字孪生技术，元宇宙为温室生产者和社会需求提供了链接桥梁，以人为中心，设计了温室智能管理系统、农产品贸易平台和云蔬菜养殖平台三大系统，优化温室的控制流程，将温室生产和社会需求结合起来，给予用户高沉浸感的元宇宙体验。



图3 A human-centric interoperability framework

**4.1温室智能管理系统**

温室智能管理系统是农业元宇宙的基础，是温室产业链的生产端。温室智能管理系统通过虚拟温室和温室实体之间的交互，为温室设备提供调控指令，确保温室生产处于最佳状态，为整个温室产业链提供保障。另一方面，温室智能管理系统接受来自社会购买者的订单，并以此调整温室生产的节拍，以适应由环境变化引起的社会购买力

依托于第三章提出的智能温室数字孪生模型而建，主要用于调控作物温室设备的运行，是元宇宙的核心组成。本研究运用soildworks和Unity3D软件完成温室狮子孪生的虚拟场景搭建，构建了温室的总体框架和多种调控设施模型，通过三维模型的展示温室数字孪生的工作状态，反映出温室实体的运行情况，结合作物生长模型和温室调控算法，实现温室设施的自动化调控。

**4.2农产品贸易平台**



图4 智能温室管理系统虚拟模型

传统的农产品贸易大多是以企业收购，消费者购买的形式进行，近些年出现的农产品电商虽然加速了农产品的贸易过程，但没有改变消费者与温室生产沟通不及时的问题。传统的农产品贸易方式存在双方不信任、交易不透明、信息不对称等一系列问题。农业元宇宙中的区块链可以改善此类问题，区块链作为一种分布式数据库技术，融合了密码学、P2P网络、共识机制、智能合约等技术，具有去中心化、公开透明、不可篡改等特性。以区块链为基础构建的自由贸易平台可以为消费者和温室生产管理者之间构建点对点的信息交流平台，建立起双方的信任。

农产品贸易平台依据区块链和NFT技术构建，为消费者和温室生产所服务。在贸易平台中，农产品凭借3D建模技术生成虚拟形象，凭借其特性、生产温室、生产时间、地区等分为多个分类，以便消费者快速找到需要的商品；消费者凭借唯一的身份进入贸易平台中，提出自己的需求并购买相对应的产品。贸易平台实现了消费者与生产基地的直接对接，消费者可以自主选择农产品的生产地，解决产品的无效物流。在购买农产品时，消费者可以实时观看农产品生产与流通的全

过程，降低信息的获取成本。同时，消费者也可以选择距离近的温室基地，轻易实现农产品“小时达”，降低消费者的等待时间。

农产品贸易平台不仅仅只有贸易的功能，同时兼具农产品追溯的功能。在每一笔交易完成时，平台都会生成唯一的商品订单，凭借此订单，消费者可以以真实的场景获得农产品的生产、运输过程，完全杜绝了市场上以次充好、假冒伪劣产品。

元宇宙的农产品贸易平台实现了生产者和消费者的点对点交易和农产品追溯，为消费者提供了完全透明、真实体验的农产品信息，保障了消费者权益。同时简化了农产品走向市场的流程，降低了多余的物流成本，生产者也可以根据需求来决定生产的种类和数目，减少了生产过程中的浪费。元宇宙为生产者和消费者之间提供了连接的桥梁，既有助于降低生产成本，同时提高了农产品的价值，令消费者和生产者双方收益。

**4.3云蔬菜种植平台**



图6云作物种植平台框架

云蔬菜种植平台是温室农业元宇宙的开创型场景，也是最具元宇宙特色的场景。云蔬菜种植旨在让消费者能够自己控制作物的生长环境，并实时观测生长状况，在实践中体会到农业的乐趣。消费者能够以游戏的方式与温室进行互动，通过虚拟的“劳动”收获真实的成果和乐趣，以此增加消费者的体验感和沉浸感。

云蔬菜种植平台相比于应用，更像一个虚拟游戏。消费者可以在平台内选择想要种植的作物种子和作物温室，温室工作人员则会把种植种在用户指定的位置。在作物生长期间，消费者需要在虚拟空间中对其进行浇水、施肥、通风等操作，农业元宇宙大脑则会模拟用户的操作，实时的为用户展现作物的生长状态。当作物成熟之后，消费者便会收到有由温室工作人员邮寄的作物，以此代表完成了一次交易。

云蔬菜种植平台让消费者进入“温室”中观察农作物的生长过程，并根据自己的意愿对农作物进行操作。消费者在种植作物的过程中体会到农业的乐趣，满足对植物生长的好奇心，增强体验感。同时，云蔬菜种植平台凭借其高沉浸性和随机性，可以吸引更多消费者前来体验，不仅维护消费者的消费权益，同时提高温室的经济效益，促进了农业领域的发展。

**5 农业元宇宙的展望与总结**

随着虚拟现实技术和新一代通讯技术的普及以及元宇宙与农业领域的不断融合，农业元宇宙将会极大地推动农业想着智能化、工厂化发展。

本文提出的作物温室农业“元宇宙”是以现实中作物温室为中心，涉及到温室的监督、管理、经营等全部过程的虚拟宇宙。作物问温室元宇宙具有以下主要特征：

（1）系统巨复杂。农业元宇宙是一个要素复杂、相互作用、动态演化、应用多样的综合性复杂系统。有多个完全不同却又相互关联的子系统互连在一起形成的“系统的系统”，复杂度将随着用户和子系统的增加而呈指数增长。

（2）泛在接入与全面感知。温室生产是一个对环境信息有着极高要求的生产环境，环境、作物以及生产者的活动为元宇宙提供了广泛的信息源。农业元宇宙通过传感器技术感知温室和用户的物理信息，利用广泛的感知实现元宇宙中人与人、人与物的广泛链接和信息交互。

(3)资源集中和大数据融合。元宇宙的建立促进农业资源信息的共用，提高资源伸缩性。元宇宙实现了相关部门、行业、群体、系统之间的数据融合、信息共享，以及于此而来的海量数据。

(4)协同运作与多领域合作。农业生产过程中的不同过程和系统可以通过元宇宙实现互联互通，彼此之间实时感知，及时传递信息、迅速做出反应。

元宇宙在农业领域前景辽阔，发展潜力巨大，未来农业元宇宙将主要从以下方面展开科学研究。

（1）农业元宇宙是涵盖农业所有领域、涉及物流、教育的相关领域的全面元宇宙。本文提出的作物温室元宇宙是以作物温室为核心展开的，无法全面的预测到农业元宇宙的发展情况。在畜牧业、林业、水产等农业相近领域的元宇宙框架仍需广大学者进行探索和研究；同时，农产品的运输、农业工作者的培训问题也是农业元宇宙发展的方向。

（2）农业元宇宙是完善、系统、整体的元宇宙。本文对农业元宇宙的研究工作都是探索性的，提出的虚拟温室、农作物贸易平台和云种植平台也都是相对割裂的。元宇宙的建立一定是一个完整统一的结合体，才能够带给用户最完美的体验感和沉浸感。

（3）农业元宇宙是普及、深入百姓心中的元宇宙。农业是与人民生活最相关的一个行业，一个农业技术的发展也离不开人民大众的支持。只有将农业元宇宙深入普及，人们乐于参与，成为人们生活中的一部分，农业元宇宙才算是真正的服务于人民。

本文为农业元宇宙总结了相关技术并展望了服务场景，为农业元宇宙提供了可行的发展方向。农业元宇宙也必然会为农业生产提供新的思路，为农业4.0的建设提供新的动力。