

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.054



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



元宇宙技术发展综述及其在建筑领域的应用展望

杨健, 张安山, 庞博, 张凯, 鲍朱杰, 李佳潼, 王斐亮

(上海交通大学上海市城市公共建筑与基础设施数字化运维重点实验室;

船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 新冠疫情的暴发使得人们的活动越来越多地向线上转移, 元宇宙概念热潮的出现使得基于虚拟数字世界的生产生活模式越来越多地受到人们关注。目前, 元宇宙概念已经在教育、商业、工业等领域有所应用。随着建筑信息化、数字化技术的广泛应用, 建筑行业智能化水平不断提高, 虚拟数字技术在建筑行业发展中扮演着越来越重要的角色。对元宇宙概念的最新发展和应用进行介绍, 重点阐述元宇宙与建筑信息化技术的关系以及元宇宙在建筑领域的潜在应用。分析结果表明, 元宇宙的发展依赖于拓展现实、数字孪生、区块链等既有数字化技术的集成, 作为一种新技术, 元宇宙将为建筑领域的生产方式带来新的改变, 也可能催生新的产业模式。

关键词: 元宇宙; 建筑; 拓展现实; 数字孪生; 仿真技术

中图分类号: TU17 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)01-0033-13

A review of metaverse development and its application prospect in building construction

YANG Jian, ZHANG Anshan, PANG Bo, ZHANG Kai, BAO Zhujie, LI Jiatong,
WANG Feiliang

(Shanghai Key Laboratory for Digital Maintenance of Buildings and Infrastructure; School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, P. R. China)

Abstract: As a result of the COVID-19 pandemic, a growing number of activities are moving online. With the introduction of the metaverse concept, virtual digital technology has entered the day-to-day life and industrial activities. To date, the applications of metaverse can be found in the education, commercial and industrial sectors. The intelligence level of the construction industry is constantly rising due to the wide and in-depth building information technology. Virtual digital technology is playing a vital role in accelerating the development of the construction industry. This paper introduces the state-of-the-art of the metaverse concept, the interdependency between the metaverse and the existing building information technologies. The potential

收稿日期: 2021-12-31

基金项目: 上海市科技创新项目(20DZ1201301, 21DZ1204704)

作者简介: 杨健(1974-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事绿色建筑材料、智能建造与运维研究, E-mail: j.yang.1@sjtu.edu.cn。

张安山(通信作者), 男, 博士生, E-mail: zhanganshan@sjtu.edu.cn。

王斐亮(通信作者), 男, 博士, E-mail: wongfayeung@sjtu.edu.cn。

Received: 2021-12-31

Foundation items: Scientific Research Project of Shanghai Science and Technology Commission (No.20DZ1201301, 21DZ1204704)

Author brief: YANG Jian (1974-), professor, doctoral supervisor, main research interests: sustainable construction materials, intelligent construction and operation & maintenance, E-mail: j.yang.1@sjtu.edu.cn.

HANG Anshan (corresponding author), PhD candidate, E-mail: zhanganshan@sjtu.edu.cn.

WANG Feiliang (corresponding author), PhD, E-mail: wongfayeung@sjtu.edu.cn.

applications of the metaverse in the field of building construction have also been discussed. Findings indicate that the development of a metaverse depends on the integration of existing digital technology such as extended reality, digital twin and blockchain. Metaverse will render significant changes to the production modes in the field of architecture and construction as a new technology, and it may also create new business models.

Keywords: metaverse; building construction; extended reality; digital twin; simulation technology

元宇宙(Metaverse)是以5G通信、边缘计算、数字孪生、人工智能(AI)、区块链、拓展现实技术^[1]为支撑,具有沉浸感、交互性、随时随地、低延迟特征^[2],融合现实世界的经济、社交、娱乐活动,允许多用户参与创建的基于现实物理世界的虚拟环境。随着网络空间的爆炸式增长与扩展现实设备的快速发展,尤其是新冠疫情影响下的“生活线上化”趋势,使得物理空间与虚拟空间的界限愈显模糊。近期,随着Facebook、微软、索尼、腾讯及字节跳动等商业巨头对元宇宙构想的推广,元宇宙概念在科技、游戏、教育、商业以及社交等领域巨大的发展潜力吸引了众多关注。目前,虽然人们对元宇宙的争论还在进行,但其相关技术的发展必定会对人们的生产生活产生一定影响。

另一方面,越来越多的信息和数字技术在建筑行业得到关注和应用。大数据、人工智能、物联网、拓展现实、3D扫描、机器人、BIM(Building Information Modeling,建筑信息模型)等技术为建筑行业的升级和发展提供了重要技术支撑,随之而产生的智能化建造技术也在业界取得了长足的进步^[3]。元宇宙作为一种以多种信息技术为支撑的新

型技术形式,其出现将为建筑产业的升级和发展提供新的想象空间。笔者通过回顾元宇宙的发展历程,并与建筑行业既有信息技术进行比较,分析元宇宙的技术基础和技术特征;结合目前相关信息技术在建筑行业的应用现状,对元宇宙在建筑行业的潜在应用进行展望。

1 元宇宙发展概述

1.1 元宇宙技术的发展现状

“Metaverse”一词首先出现在科幻小说《雪崩》中,其被描述为平行于现实世界、允许用户通过数字形象进行互动的虚拟环境^[4]。随后,1999年和2018年上映的电影《黑客帝国》和《头号玩家》分别描绘了由AI控制的名为“Matrix”的虚拟世界和集会议场所、市场、游戏中心等于一体的“绿洲”世界,形成对元宇宙的可视化畅想^[5]。除此之外,《Roblox》《我的世界》等众多游戏都搭建了类似元宇宙的虚拟世界。图1展示了将上述有代表性的事件组成元宇宙发展的轴线图。另外,各国大型科技企业也都开始在元宇宙相关领域进行布局,表1展示了几个例子。



图1 元宇宙的发展轴线图

Fig. 1 Development timeline diagram of metaverse

在技术层面,元宇宙技术可看作是既有信息技术的集成,包括区块链技术、交互技术、电子游戏技术、AI技术、网络及运算技术、物联网技术等,其技术全景如图2所示^[6]。其中,5G/6G网络的高速传输能力,端-边-云协同计算的强大数据处理能力都可以为元宇宙的海量数据传输和处理提供支持。物联网技术中的感知层、网络层和应用层和区块链

技术中的共识机制、分布式存储、智能合约等技术在元宇宙中都会有涉及。交互技术可以支持实现虚实交互,将人带入虚拟世界同时,包括有VR、AR、MR、全息影像等。电子游戏技术中的游戏引擎、3D建模、实时渲染技术可以为虚拟世界的真实图像呈现提供技术支持。机器学习、计算机视觉、自然语言处理等人工智能技术可以提高元宇宙的

表 1 各国企业在元宇宙的相关布局

Table 1 Layout of metaverse business of enterprises from various countries

国家	企业名	元宇宙构想
中国	腾讯	搭建一个整合社交、生活、消费的综合平台,实现跨越 AR、VR、音频、互联网与物理世界的元宇宙世界。
	百度	开发了“希壤”平台,以技术为基础,打造一个身份认同、经济繁荣、跨越虚拟与现实、的多人互动虚拟世界
	网易	开发了“瑶台”平台,打造一个以用户体验为核心、多场景、强互动、沉浸式虚拟活动平台。
美国	Facebook	推出 Horizon 游戏平台,为用户提供社交、游戏、工作、协作和生产力服务。
	Microsoft	通过 Azure、Synapse、Power Platform、Mesh 和 Hololens 等一系列软件协助用户实现数字孪生建模、预测、交互等需求。
	Decentraland	打造基于 VR 技术的、一个完全去中心化、由用户所拥有的虚拟世界。
日本	SONY	通过“Dreams universe”平台,建立一个涵盖游戏、创意、视频、社交的大型虚拟社区。
	Hassilas 公司	利用 Mechaverse 平台提供多人实时参与的 3D 体验中心,实现虚拟音乐会、虚拟体育场等场景搭建。
	SAMSUNG	通过一系列硬件产品构建元宇宙生态系统,实现虚实结合的元宇宙平台搭建。
韩国	ZEPETO	通过虚拟人物、虚拟产品和虚拟线上活动的方式,开辟连接虚拟空间和现实生活的营销方式。
	Hodoo Labs	推出了 HodooEnglish 教育元宇宙,通过虚拟角色和剧情实现全景化的英语教学。

数据分析能力。各项技术从拓扑搭建、系统管理、感知体验、功能实现等方面为元宇宙提供技术支撑。Ng 等^[7]将元宇宙的架构划分为物理层、虚拟层和交互层,物理层由支持元宇宙运算、通信和存储功能的硬件组成;虚拟层提供了一个平行的生活世界,允许用户的数字化身与其他对象进行交互,能够捕捉并反映现实世界的实时数据;交互层则充当连接物理层和虚拟层的桥梁,使用户在现实世界中上传的输入转化为虚拟世界中的具体行动。

际物理世界,完全来自数字化自定义生态体系;最终,物理空间与虚拟空间趋向统一,物理空间和虚拟世界可以交互和联动,一个自足且可持续的虚拟世界可以形成,用户可以在多个虚拟空间中实时体验各类异构活动^[10]。

1.2 元宇宙相关文献统计分析

为了更好地了解元宇宙的研究现状,基于 Web of Science(WOS)和中国知网数据库,分析过去 20 年元宇宙研究的发展趋势。分别将搜索关键词设置为“metaverse”和“元宇宙”,搜索了 2002-01-01—2022-03-31 之间发表的文献。

在 WOS 数据库共搜索得到 516 篇文献,从文献所处的不同专业可以看出,计算机科学、工程和电信是研究元宇宙最多的领域,教育、商业、艺术等领域也有相关的研究(如图 3 所示)。WOS 数据库中的元宇宙相关文献的数量统计如图 4 所示,可以看出元宇宙在 2008 年以前的研究较少,在 2008 年至 2011 年间出现了一次小高峰,在 2021 年的文献数量迎来高速增长,2022 年第一季度的文献量已达到 2021 年全年的 45%。

在中国知网数据库共搜索到 1 436 篇文献,主要涉及的领域有信息技术与邮政经济、计算机软件、计算机应用、金融、证券、投资、新闻与传媒等

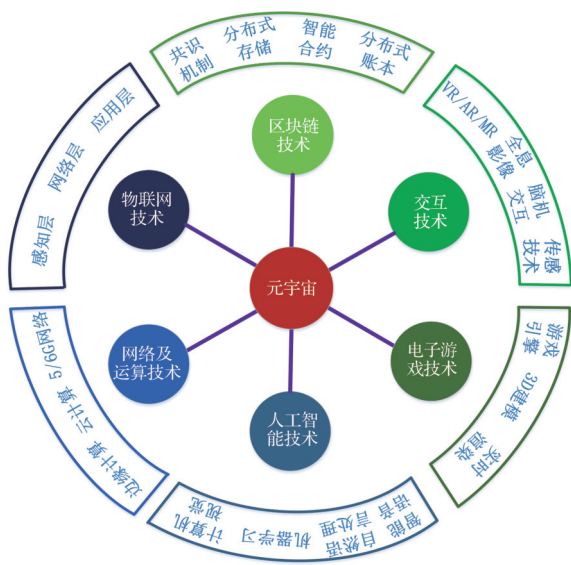


图 2 元宇宙技术全景图^[4]
Fig. 2 Overview plot of metaverse^[4]

元宇宙的形成需要经历数字孪生、数字原生及虚实相生(即超现实)3 个不同层次的阶段^[8]。在数字孪生阶段,真实的物理空间被数字化,虚拟空间是真实世界的直接映射,数字孪生模型可以反映真实世界的各类特性^[9];在基于数字孪生技术所创造的众多关联或独立的数字化世界中,用户创造原生内容,形成数字原生,这些内容可以依赖于数字化世界所映射的现实社会生态系统,也可以脱离于实



图 3 WOS 中不同领域的元宇宙相关文献数量
Fig. 3 Number of publications of metaverse in different fields from WOS

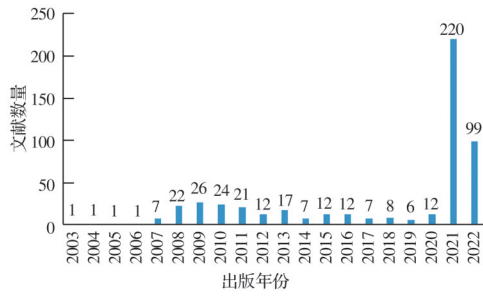


图 4 WOS 中近 20 年文献数量整体趋势

Fig. 4 Publication trend in the last 20 years from WOS

(如图 5 所示)。中国知网数据库中的元宇宙相关文献的数量统计如图 6 所示。可以看出在 2020 年之前,中国有关元宇宙的研究还很少,2021 年出现爆发式增长,2022 年第一季度发表的文献数量已达 2021 年中年的 94%。从文献数量的角度来看,从 2021 年开始,中国对于元宇宙相关研究的热情高涨,从研究行业来看,元宇宙的研究主要集中在经济和计算机领域。有关元宇宙在工程与行业应用方面的研究还很少。

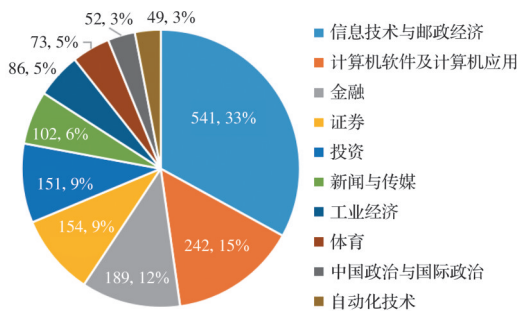


图 5 中国知网中元宇宙相关文献发表数量排名前 10 的行业及文献数量

Fig. 5 Top 10 industries and literature published in CNKI

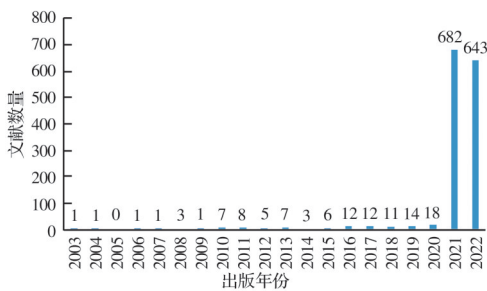


图 6 中国知网中近 20 年元宇宙相关文献数量整体趋势

Fig. 6 Publication trend in the last 20 years in CNKI

1.3 元宇宙现有应用分析

元宇宙的雏形其实早已应用到生活之中。在教育领域,中国软件“钉钉”在疫情期间支持了 14 万所学校、300 万个班级、1.3 亿学生的在线上课^[11],虽然这种线上教学模式还远未达到元宇宙教学的效果,但可以看出虚拟教学模式的巨大潜力。通过元宇宙构建虚拟图书馆^[12]、云展厅^[13]等已成为构建虚

拟学习环境的新模式,同时它也为虚拟学习社区的构建、教学的游戏化和个性化提供了可能^[14]。在游戏领域,2006 年出现的美国游戏 Roblox^[15]在场景里添加了大量的社交活动,满足青少年的日常生活需求,玩家在游戏中通过劳动获得的代币能够在现实世界兑换成现金,初步实现了元宇宙多用户参与、虚实世界融合的概念。社交和游戏的结合,是元宇宙的一种应用形式,也是未来的研究趋势之一。在电商领域也出现了元宇宙雏形特征的应用,2021 年 4 月,3D 版天猫家装城上线。商家可以在其中搭建属于自己的 3D 购物空间,消费者则可以在其中体验“云逛街”。消费者进入各个虚拟商城或者电商平台,运用自己的虚拟形象,在虚拟世界中享有现实生活的购物体验,并直接进行消费购物。未来,在虚拟世界里建立自己的交易平台或者虚拟商城,形成虚拟世界里的电商平台,是另一个全新世界的巨大的交易空间^[16]。由网易公司开发的平台“瑶台”^[17]、百度公司开发的平台“希壤”^[18]等都力图借助信息技术为人类打造一个跨越虚拟与现实的多人互动虚拟世界。除了面向用户(To C)端的应用,元宇宙雏形在工业互联网面向企业(To B)领域也开始显现^[19-21]。在工业领域,宝马与 Omniverse 共建虚拟工厂,在造车之前预先打造数字模型,使位于不同时区、不同地点的员工可以随时访问,共同规划并优化生产流程及工艺,生产效率提升约 30%。通信公司爱立信借助 Omniverse 平台,对 5G 网络架构进行模拟,在虚拟世界中探索独特地理环境及其对无线网络性能的影响。沃尔沃使用 Omniverse 来测试各种现实世界无法测试(或高测试成本)的项目,大幅缩短测试时间。通过元宇宙技术和理念,可以将娱乐、教育、社交、科研等所有传统的线下社交模式在网上实现,线上交流因其高度灵活性、规模性及低成本也促进了元宇宙的发展^[22]。

2 建筑业元宇宙的技术基础

元宇宙作为数字技术的一种新型表现形式,同时需要建模与仿真技术、XR 技术、物联网等技术的支撑。因此,它与传统数字化技术拥有类似的属性,比如,依赖于虚拟模型构建、需借助专门设备进入、对现实世界进行映射等。而相关的基础支撑技术已经在建筑行业有所应用,也为元宇宙在建筑业的应用提供了可能性和技术支撑。为了更加清晰地认识元宇宙的技术特征,分析元宇宙在建筑业的应用趋势,将元宇宙与其他具有类似特征的建筑信息技术进行了比较分析。

2.1 建模与仿真技术

针对复杂的模型,仿真往往会建立出物理和几

何特性与物理实体一致性较高的虚拟模型。并在模型当中施加作用,在虚拟空间模拟出物理实体的可能响应。随着计算机技术的不断发展,目前利用计算机对现实物理实体进行信息刻画、模拟与储存成为了工程中重要的技术手段^[23]。

在建筑行业,建模与数字仿真技术的使用已经十分普遍,比如基于有限元仿真的结构性能分析^[24],基于计算流体动力学分析仿真的室内外环境模拟^[25]等。BIM技术除了可以建立与实体一致的信息模型之外,也可以实现施工方案、进度、运维等方面的仿真。建模和仿真技术是实现元宇宙建筑虚拟模型建立的基础技术,其在建筑业的普遍应用为元宇

宙在建筑行业的应用奠定基础。在元宇宙技术中虚拟模型的建立是一项十分基础的工作,所以建模与仿真技术的成熟应用,为元宇宙技术在建筑行业中的应用提供了重要基础。

2.2 拓展现实技术

拓展现实(Extended Reality, XR)技术是指人通过借助计算机技术和可穿戴眼镜、头盔、屏幕等设备实现虚实结合、人机交互的沉浸感。目前,主要有增强现实(Augmented Reality, AR)、虚拟现实(Virtual Reality, VR)、混合现实(Mixed Reality, MR)、增强虚境(Augmented Virtuality, AV)等形式,其功能表现形式如表 2 所示。

表 2 不同形式拓展现实技术的功能表现形式

Table 2 Different forms of XR and their functionality

中文名称	英文名称及缩写	主要功能表现形式
增强现实	Augmented Reality, AR	世界与虚拟画面叠合在同一画面中,达到虚拟和现实世界的信息增强作用
虚拟现实	Virtual Reality, VR	使用户完全沉浸在虚拟的场景当中
混合现实	Mixed Reality, MR	不仅使人沉浸在虚拟与现实混合的场景当中,同时可以实现对虚拟场景的控制交互
增强虚境	Augmented Virtuality, AV	将现实世界的图形图像技术融入虚拟的合成场景当中,以解决完全虚拟世界中实时逼真模拟难的问题 ^[26]

基于数字化建模技术构建的模型,利用 XR 技术将人带入其中进行体验,在建筑领域的研究已有很多。在建筑施工阶段,利用 XR 技术进行安全教育与检查等方面有很好的应用^[27]。何江等^[28]将 VR 引入到地铁施工安全教育当中,使施工人员可以沉浸式地体验常见的安全事故;韩豫等^[29]将 BIM 和 VR 结合,设计了施工安全知识学习系统,实现危险场景漫游体验、安全能力测评等功能。利用 XR 技术对既有建筑进行沉浸式展示的优势在运维阶段也有很多应用。万飞等^[30]将利用 VR 将三维建模得到的历史建筑模型进行还原,为历史建筑的保护提供了新思路。王宇佳等^[31]和张磊等^[32]利用 VR 进行建筑消防危险的逃生演练,Chen 等^[33]提出利用 AR 来实现对疏散路径的引导。Alizadehsalehi 等^[34]全面回顾了 XR 技术在建筑、工程和建设(AEC)行业的应用,介绍了由 BIM 应用于 XR 的技术路线,并认为,XR 将给 AEC 行业带来新的机遇和 workflows。XR 技术可以给人带来沉浸于虚拟世界中的体验,可以为元宇宙的沉浸体验提供重要的“入口”。

2.3 数字孪生技术

数字孪生最初由 Grieve 在 2003 年美国密歇根大学产品生命周期管理课程上提出^[10]。数字孪生技术通过在虚拟世界构建一个与物理实体相对应的虚拟实体实现对现实物理实体的实时映射,并通过物理实体和虚拟实体的实时交互和迭代实现对现实物理实体的性能提升和优化^[35]。Grievess 最初提出数字孪生概念时,提出了数字孪生三维模型,包

括实体、虚体和二者之间的连接^[10];为了推进数字孪生在各行业的应用和发展,陶飞等^[36]在三维模型的基础上提出了数字孪生五维模型,包括物理实体、虚拟实体、孪生服务、孪生数据和各组成部分之间的连接,如图 7 和图 8 所示。

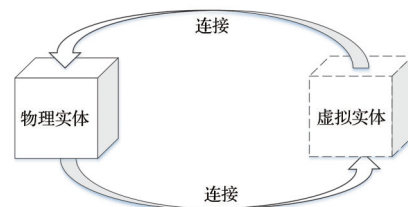


图 7 数字孪生三维概念模型^[10]

Fig. 7 Three-dimension digital twin model^[10]

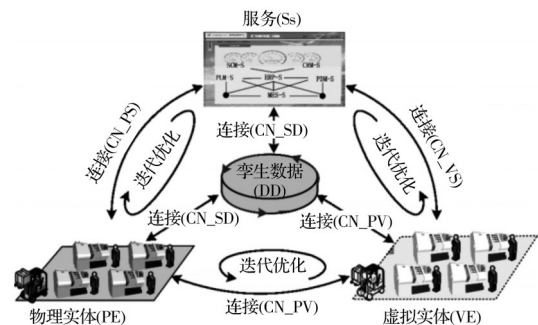


图 8 数字孪生五维概念模型^[36]

Fig. 8 Five-dimension digital twin model^[36]

数字孪生最初被应用于航空航天领域^[37],现在越来越多地被应用于电力^[38]、采矿^[39]、医疗^[40]、车辆^[41]等民用领域,而且其也越来越受到建筑行业的关注^[42-43]。目前,雄安新区、上海等都明确提出要打

造数字孪生城市以实现现代化的城市管理^[44-45]。刘占省等^[46]、Jiang 等^[42]都在数字孪生五维模型的基础上进行了建筑领域的研究。数字孪生也被认为是建筑业智能化发展的重要推动技术^[47-48]。目前,数字孪生技术在建筑施工和运维阶段都有应用研究。在施工阶段,刘占省等^[49]以轮辐式索桁架验证了数字孪生在施工实时反馈与调控方面的价值。谢琳琳等^[50]借助数字孪生实现物理施工系统和虚拟施工系统之间的交互,提高装配式调度的自主性、预测性和智能性。谢先启等^[51]也认为数字孪生为智能建造提供了新思路和技术手段。在运维阶段,刘占省等^[52]提出利用物联网和 BIM 技术搭建面向运维安全管理的冬奥场馆建筑的数字孪生模型,并提出基于实时孪生数据的动态疏散引导方案。张兴旺等^[12]认为数字孪生有助于图书馆的物理信息深度融合,并提出了数字孪生图书馆的技术框架,并将其运用到雄安图书馆的建设当中。Lu 等^[53]通过构建 BIM 和物联网结合构建既有建筑的数字孪生模型,实现对建筑资产状态的实时监测、评估和智能化运维管理,并以离心泵为例,实现了故障的实时检测。建筑数字孪生技术针对物理工程对象构建了虚拟模型,同时建立了虚实之间的联系。数字孪生技术的重点是在虚拟世界中建立与现实世界相对应的虚拟实体,并借助对虚拟数字实体的分析实现对现实世界的提升。从这一点看,它是元宇宙借助虚拟世界影响提升现实世界,赋能建筑行业的技术基础。

2.4 既有信息技术对建筑业元宇宙的支撑

与前面提到技术相似的是,元宇宙也涉及现实与虚拟世界。为了更加清晰地说明元宇宙中虚拟世界和现实世界之间的关系,Smart 等^[54]提出了元

宇宙的划分,如图 9 所示。该划分选择了两个可能影响元宇宙展开方式的关键连续体:横线轴线为从内部(以身份为中心)到外部(以世界为中心)的技术和应用范围,纵向轴线为从增强到模拟的技术和应用范围。

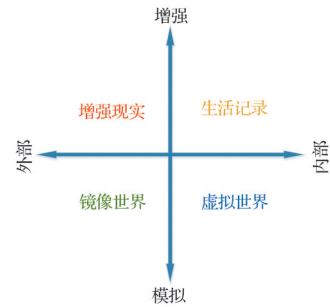


图 9 元宇宙的划分^[54]

Fig. 9 The division of metaverse^[54]

虽然元宇宙也涉及虚拟世界或者虚拟实体,但是其实现的虚实交互效果远高于其他单一信息技术的实现水平。表 3 总结了既有数字技术的功能特点和元宇宙技术的功能要求。其中,数字建模和仿真技术只构建了虚拟实体,并不涉及与物理实体的连接与互动,并且虚拟实体只存在于数字世界当中。人主要在建模过程中扮演主要角色,但是在仿真过程中不需要人的干预,人主要处于辅助地位。XR 技术只构建了虚拟实体,虚拟实体更多只存在于虚拟世界,并不存在与虚拟实体对应的现实物理实体。虽然可以实现虚拟世界和现实世界在同一画面出现,且虚拟世界可以根据现实世界的画面产生调整,但是虚拟世界并不能够对现实世界产生影响,所以其虚实之间的连接是单向的。XR 技术的应用主要以人的体验为中心,所以人的感受是 XR 技术的重点。

表 3 元宇宙技术的目标要求与其他数字技术的功能特点

Table 3 Functionality of metaverse and other existing digital technology

技术名称	是否存在物理实体	是否存在虚拟实体	是否存在虚实连接	是否存在数据分析服务	是否可以实现虚实双向互动	虚拟世界和现实世界画面是否可叠加出现	人的地位
数字建模和仿真技术	×	√	×	√	×	×	辅助
XR	×	√	√	×	×	√	中心
数字孪生	√	√	√	√	√	×	辅助
元宇宙	√	√	√	√	√	√	中心

数字孪生构建虚拟实体的目的是借助虚拟实体以控制和提升物理实体,其虚拟实体可以随物理实体的状态变化而变化,但是虚拟世界和现实世界相对独立,并不能同时出现在同一画面当中,人也无法沉浸于虚拟世界中。数字孪生的服务主要体现在对现实实体的控制上,人也处于整个系统的辅助地位。元宇宙并不单需要虚拟世界,而是需要虚拟世界与

现实世界的交流互动。它是针对人类社会构建一个平行于现实世界的虚拟世界,其主要服务对象是人。所以在元宇宙当中,人处于核心地位。

从上面的分析和比较可以看出,与数字孪生等技术只针对某些特定对象和功能不同,元宇宙的目标更加复杂和宏大,所以其需要更加强大的技术支持。而且数字建模与仿真、XR 技术与数字孪生技

术可以发挥其各自的技术优势支撑元宇宙的构建。数字建模和仿真技术为元宇宙的虚拟实体建立和响应分析提供支撑,例如,建筑业中形成BIM模型,基于扫描等技术构建的三维模型都可以为元宇宙提供模型构建素材。XR技术可以提高沉浸式的体验和虚实叠加的展示效果,人们通过XR技术进入元宇宙的空间中去,XR为人沉浸式进入元宇宙提供支持。数字孪生的技术可以发挥其对现实世界的控制优势,可以为元宇宙达到虚拟世界与现实世界的交互提供技术支撑。它们在建筑行业应用的不断成熟和融合应用可以实现优势互补,为元宇宙在建筑行业的应用提供了可能。

3 元宇宙在建筑领域的潜在应用

诸多技术发展的逐渐成熟支持了元宇宙概念的出现。同样,随着越来越多的信息技术在建筑领域的应用,元宇宙在建筑领域的应用前景也渐渐清晰。一方面,元宇宙作为多种既有信息技术的集成,在建筑行业其他数字技术的基础上,元宇宙会以更先进的形态赋能现实建筑行业的发展。另一方面,元宇宙可以创造一个虚拟世界,在新的空间里创造新的需求,虚拟世界中的建筑行业也有兴起的可能。

3.1 元宇宙赋能现实建筑行业

3.1.1 交互式设计模式

在设计阶段,元宇宙可以提供在一个在虚拟世界交流的空间,同时搭建虚拟设计方案模型,将各利益相关方集中在虚拟空间当中,面对未来的设计方案模型进行共同讨论,突破沟通的空间限制^[55],同时降低沟通的专业门槛。在城市建设过程中,Kent等^[56-57]通过建立虚拟现实平台,并将该平台带入到设计阶段,借助XR技术实现对城市设计的可视化和分析,对设计进行推演和完善,让市民可以参与城市的设计和规划。这种基于虚拟世界使用户参与的建筑设计与社群搭建方式已在图书馆^[58]、校园^[59]、居民活动中心^[60]、地下工程^[61]等一些现实案例中使用,且其被证实是建筑全生命周期良好运营的有效保障。

3.1.2 施工模拟技术

在施工阶段,元宇宙可以提供现实世界当中难于提供的场景帮助人沉浸式体验和交流。这一优势在施工模拟技术方面有较大潜力。

目前,利用虚拟模型对施工过程进行预演和模拟的研究也有很多。在施工管理方面,借助BIM技术对工程对象进行了虚拟化施工模拟,实现了施工监测可视化展示、施工进度和工艺模拟等功能的应用有很多^[62-63]。同时,XR技术的应用有助于实现沉浸式的体

验形式^[27,64],尤其在沉浸式施工安全教育方面,XR技术的应用广泛^[28]。目前,借助XR技术实现的体验一般只支持单人的体验,但是在元宇宙中搭建的虚拟施工场景,可以实现多人协作。因此,元宇宙技术的出现除了可以在XR技术的基础上创造更加沉浸的体验,还在实现多方合作、异地协同等功能方面有较大潜力。为了解决目前安全培训枯燥单调、重“演”轻“练”的问题,郭泱泱^[65]对元宇宙技术在煤矿及矿山安全培训和应急演练方面应用的可行性进行了研究,并认为虽然元宇宙在技术和设备上有很多不足,但它可以为提供新的培训和演练途径。

对于复杂工程施工,元宇宙技术也可以发挥其独特优势。比如,某项目中设计师提出了动态可变图案幕墙方案,幕墙图案会根据观察者位置和风向光照变化而变化。该幕墙由大量颜色形式各异的鳞片通过特定排布构成。要完成该幕墙的安装实现,对于每一鳞片施工定位要求极高,需要结合不同的环境状态和人员观感进行反复的调整和优化。项目采用元宇宙技术,在虚拟和实体幕墙龙骨组合空间中,模拟不同人员视角及光照和风向状态,优化调整鳞片位置,确定每片鳞片最佳施工定位,从而帮助工人实现复杂幕墙结构的快速和精准安装。

3.1.3 虚拟空间功能拓展与运营维护

在运维阶段,元宇宙可以拓展现实建筑物的功能活动空间。通过构建与现实建筑一致的虚拟建筑,并开放给用户在虚拟空间中活动,可以丰富既有建筑的体验,为建筑的运营模式带来新的拓展空间。

目前,图书馆的运营正在朝着此方向发展。为了丰富读者的阅读体验,推进图书馆信息建设。杨新涯等^[66]认为图书馆行业可以利用元宇宙构建虚拟空间的服务体系,以解决实体空间紧张,知识服务和情报服务不足等问题,并提出了相关技术的探索方向。郭亚军等^[67]基于对美国TOP100的图书馆VR/AR的应用情况的调查分析,提出了中国图书馆建设建议,其中借助虚拟仿真搭建元宇宙赋能虚拟图书馆建设是重要的内容。陈定权等^[68]通过分析和讨论,并认为元宇宙技术对于解决目前图书馆存在的“资源沉睡”“模式单一”等问题具有启发意义。

再如,在历史建筑的运营管理方面,也有这样的趋势。目前,主流的文化遗产虚拟模型往往被简化为特定场景下的2D视图,使得构筑物或文物的大量交互与三维信息丢失。这些虚拟遗产缺乏生机与背景,缺乏有效反馈机制与导航,缺乏人物、天气、时间等动态元素,浏览仍属于被动观察者模式的有限探寻^[69]。然而,VR技术已在世界范围内应

用于多项文化遗产与文物的展示宣传(如图 10 所示),在希腊 Simonos Petra 修道院^[70]与埃及法老陵墓^[71]的 XR 空间体验项目中,建筑内部空间的静态数字孪生模型和人类在物理及虚拟空间中的行走动态数据共同组成了交互式沉浸体验(如图 11 所示)。元宇宙技术支持的多人同时沉浸的社交模式可以使虚拟的历史建筑空间成为多人互动的虚拟交流空间,将会使历史建筑的运营产生更好效果。



图 10 故宫 VR 模型(来源:故宫博物院官网)

Fig. 10 VR model of Forbidden City (Source: Website of the Palace Museum)



图 11 XR 中静态 3D 数据融合^[70]

Fig. 11 Combination of static and dynamic 3D data in XR^[70]

3.1.4 基于虚拟空间的建筑业交易

在文献[72]展示的案例中,构建了一个虚拟房产平台,其去中心化框架支持用户通过代币购买虚拟房产与土地并通过开发、租赁、拍卖等交易手段获取利润。虚拟世界的用户也拥有现实世界资产,元宇宙为虚拟经济和现实经济的相互交织提供了可能,AI 和区块链技术正在加速这种关系的发展^[22]。此外,在元宇宙中与现实世界高度相似的虚拟世界亦可以作为一个城市规划与房产开发市场的评估沙箱,在现实世界中的经济政策实施之前对其进行测试,从而指导城市规划与相关产业布局。

3.2 元宇宙催生的虚拟建筑业态

随着元宇宙概念的提出,人的活动空间得到了拓展,为虚拟空间中的活动搭建虚拟建筑或将成为建筑行业的一项新任务。目前来看,虚拟活动空间中的建筑主要包含有与现实建筑映射对应的虚拟建筑和仅存在于虚拟空间中的完全虚拟建筑。

构建虚拟活动空间中与现实世界相对应的虚拟建筑是搭建元宇宙的重要工作之一。随着数字孪生概念的兴起,越来越多的研究开始关注于对既有建筑进行逆向建模,为了快速获取现实世界中的三维数据,便于快速精准建模,激光扫描、倾斜摄影

等方法也被应用于建筑行业中^[73-74]。这些研究和实践无疑可以为在元宇宙当中搭建数与现实世界对应的虚拟建筑的基础工作。基于此,何文景等^[75]提出利用深度学习处理既有建筑的 3D 点云模型,实现自动化的 BIM 模型建立的方法。Lee 等^[76]进行了基于聚类的平面分割神经网络和 3D 点云进行了城市场景建模。鲁力立等^[13]在线上还原了现实世界中的展厅,以实现基于元宇宙视角下的线上与线下混合式教学模式,打破“虚拟”与“现实”之间的壁垒。

另一方面,在虚拟世界建立完全虚拟的建筑也是元宇宙中的一项重要工作。为了提高虚拟建筑的真实体验感,建筑设计的合理性是重要的研究内容。Hassouneh 等^[77]通过研究调查第二人生(second life)中不同虚拟商店的氛围,提出虚拟商店的分类和构成虚拟商店的气氛组成要素,为未来元宇宙零售的研究提供指导框架。Ayiter^[78]在元宇宙中重新创造了建筑师 El Lissitzkv 设计的名为“Proun #5A”的建筑,并提出通过想象或者非物质的栖息地设计来探索新的空间。

另外,除了依赖于人的设计,元宇宙中虚拟空间的批量化创造与处理更多地依赖于深度学习与元学习的发展与应用。在通用自主深度学习数字孪生框架下,元宇宙及物理世界中的历史数据在训练阶段被融合以供深度学习训练和测试,并在结果满足要求条件下自主获取知识。同时,元宇宙及物理世界中的实时数据在实现阶段被融合用于模型的实时推断。目前,深度学习在自动化建筑设计领域已取得了一定突破^[79-81],虚拟世界中基于大数据与用户群个性化需求的居住空间智能设计已成可能。总而言之,在元宇宙中,数字内容的创造将让位于用户群体并进一步延伸至智能算法协作领域,而不是少数的专业设计师^[82],即实现人类用户和 AI 在元宇宙中的共建。

除此之外,虚拟世界当中的活动空间也会同现实世界当中的地产一样,有被当作一种数字资产的形式进行交易的可能^[83],形成元宇宙中的“房地产”产业。

4 元宇宙带来的潜在问题和挑战

作为一种新的技术形式,元宇宙也可能带来一些潜在的问题和新的挑战。由于其在虚拟世界中的深度沉浸式及超越物理规律限制的体验感,可能导致人的过度沉迷和超越约束,甚至对人的精神健康和社会正常交往造成危害。另外,元宇宙使虚拟化空间体验极大丰富,也会在建筑业中催生新的虚拟产业模式,但在未来的发展过程中,应注意避免

“脱实向虚”的发展^[68]。虚拟空间的“房地产”炒作也可能带来新的金融泡沫风险^[84]。未来,在元宇宙构建的虚拟世界中,人和人、人和机、人和物之间会形成新的关系模式,例如虚拟婚姻、虚假身份信息等都会为道德法律及伦理带来新的挑战^[85]。

在技术上,目前的技术还难以完全支持理想中的元宇宙世界。在建筑行业中,逆向和自动化建模技术还有待成熟,实现现实世界中建筑物的实时虚拟化复刻还需要付出大量努力以及实质性技术提升。另外,XR设备还不够便携,使用不便,长时间的沉浸体验也会引起身体上的不适。虚拟世界的稳定性也对元宇宙的每一种支持技术提出了更高的要求。因此,虽然目前的信息技术有向元宇宙延伸的趋势,但是理想元宇宙在建筑业中的实现还面临着很大的技术挑战,还有很长的路要走。

5 结论与展望

元宇宙概念在2021年迎来一次爆发期,元宇宙与多种产业形态联系起来,不同行业基于各自角度对元宇宙的呈现方式提出了各自的解读。但是,由于诸多底层技术缺乏成熟研究基础,距离元宇宙的成熟应用还有很大的探索空间。

1) 元宇宙的出现,会同其他信息技术一样,赋能建筑行业,为建筑行业带来生产模式转变和全新的发展机会。另一方面,与其他技术不同的是,元宇宙搭建的虚拟空间还有催生出与现实建筑业相对应的新产业潜力。

2) 从技术上看,元宇宙在建筑业的发展依赖于建模与仿真、XR、数字孪生等信息技术在建筑业的发展应用,同时也集成和发展了其他数字化技术的优势。目前这些信息技术在建筑业内的出现和应用常常以单体形式呈现。元宇宙的出现为未来各种技术在建筑业内的融合发展应用提供了方向,以支撑和推动建筑业元宇宙技术实现为趋势,形成一个更交互、更耦合、更整体的系统。

3) 从建筑行业的应用上看,元宇宙会以更加先进的技术形态赋能建筑业,在建筑业的设计、建造、运维和地产交易等多方面都有应用潜力。同时,它也可以催生如虚拟建筑构建、虚拟地产交易等新的建筑业形态,创造新的需求。

4) 元宇宙作为一种新技术,为建筑业带来发展机遇的同时,也存在如由虚拟地产带来的金融风险、过度沉迷带来的健康问题,以及“脱实向虚”的不良趋势等多方面的隐患和问题,其发展带来的风险同样需要人们的关注,有必要正确引导这一新技术的发展。

致谢:感谢西南交通大学潘毅教授提出的宝贵建议,感谢中节能(湖州)科技城投资建设发展有限公司的资助。

参考文献

- [1] XU M R, NIYATO D, KANG J W, et al. Wireless edge-empowered metaverse: A learning-based incentive mechanism for virtual reality [J/OL]. arXiv: 2111.03776. <https://arxiv.org/abs/2111.03776>.
- [2] DIONISIO J D N, GILBERT R. 3D Virtual worlds and the metaverse: Current status and future possibilities [J]. ACM Computing Surveys, 2013, 45(3): 34.
- [3] 陈珂, 丁烈云. 我国智能建造关键领域技术发展的战略思考[J]. 中国工程科学, 2021, 23(4): 64-70.
CHEN K, DING L Y. Development of key domain-relevant technologies for smart construction in China [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(4): 64-70. (in Chinese)
- [4] STEPHENSON N. 雪崩[M]. 郭泽, 译. 成都: 四川科学技术出版社, 2009.
STEPHENSON N. Snow crash [M]. GUO Z, translate. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2009. (in Chinese)
- [5] DUAN H H, LI J Y, FAN S Z, et al. Metaverse for social good: A university campus prototype [C]//MM'21: Proceedings of the 29th ACM International Conference on Multimedia. 2021: 153-161.
- [6] 邢杰, 赵国栋, 徐远重, 等. 元宇宙通证[M]. 北京: 中译出版社, 2021.
XING J, ZHAO G D, XU Y Z, et al. Metaverse token [M]. Beijing: China Translation & Publishing House, 2021. (in Chinese)
- [7] NG W C, LIM W Y B, NG J S, et al. Unified resource allocation framework for the edge intelligence-enabled metaverse [J/OL]. arXiv: 2110.14325. <https://arxiv.org/abs/2110.14325>.
- [8] LEE L H, BRAUD T, ZHOU P Y, et al. All one needs to know about metaverse: a complete survey on technological singularity, virtual ecosystem, and research agenda [J/OL]. arXiv: 2110.05352. <https://arxiv.org/abs/2110.05352>.
- [9] MOHAMMADI N, TAYLOR J E. Smart city digital twins [C]//2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence. November 27 - December 1, 2017, Honolulu, HI, USA. IEEE, 2017: 1-5.
- [10] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems [M]// Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Cham: Springer, 2017: 85-113.
- [11] 蒋明钊, 潘沁怡. 基于钉钉平台的高校学生管理信息化探究[J]. 信息系统工程, 2021(1): 54-55.

- JIANG M Z, PAN Q Y. Research on college student management informatization based on Nailing platform [J]. *China CIO News*, 2021(1): 54-55. (in Chinese)
- [12] 张兴旺, 王璐. 数字孪生技术及其在图书馆中的应用研究: 以雄安新区图书馆建设为例[J]. *图书情报工作*, 2020, 64(17): 64-73.
- ZHANG X W, WANG L. Digital twin technology and its application in library—Taking the library construction of Xiongan New Area as an example [J]. *Library and Information Service*, 2020, 64(17): 64-73. (in Chinese)
- [13] 鲁力立, 许鑫. 从“混合”到“混沌”: 元宇宙视角下的未来教学模式探讨: 以华东师范大学云展厅策展课程为例[J]. *图书馆论坛*, 2022, 42(1): 53-61.
- LU L L, XU X. From “blended” to “chaotic”: A discussion on future teaching mode from the perspective of metaverse—Taking the cloud exhibition curation course of East China Normal University as an example [J]. *Library Tribune*, 2022, 42(1): 53-61. (in Chinese)
- [14] 吴刚, 杨芳. 元宇宙与教育活动的“物质转向”: 老故事与新实在[J]. *南京社会科学*, 2022(4): 135-142, 160.
- WU G, YANG F. The metaverse and the “material turn” of educational practice: The old story and the new reality [J]. *Nanjing Journal of Social Sciences*, 2022(4): 135-142, 160. (in Chinese)
- [15] MEIER C, SAORÍN J L, BONNET DE LEÓN A, et al. Using the roblox video game engine for creating virtual tours and learning about the sculptural heritage [J]. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (IJET)*, 2020, 15(20): 268.
- [16] 卢美丽, 燕宇飞, 曹翠珍. 电商虚拟社区口碑发布者行为与影响力评价[J]. *中国流通经济*, 2018, 32(5): 12-21.
- LU M L, YAN Y F, CAO C Z. Research on the WOM publisher's behavior and influence evaluation in the virtual community of E-commerce [J]. *China Business and Market*, 2018, 32(5): 12-21. (in Chinese)
- [17] 网易瑶台 [EB/OL]. (2021-12-27). <https://yaotai.163.com/>.
- Yiyao [EB/OL]. (2021-12-27). <https://yaotai.163.com/>. (in Chinese)
- [18] 希壤 [EB/OL]. (2021-12-27). <https://vr.baidu.com/product/xirang>.
- Xirang [EB/OL]. (2021-12-27). <https://vr.baidu.com/product/xirang>. (in Chinese)
- [19] OMNIVERSE NVIDIA. [EB/OL]. (2022-5-24): <https://www.nvidia.cn/omniverse>.
- [20] BMW joins forces with Nvidia to use Omniverse platform in R & D [EB/OL]. (2022-5-24): <https://www.bmwblog.com/2021/04/13/bmw-nvidia-omniverse-platform/>
- [21] 王伟. 元宇宙走进工厂[N]. *中国电子报*, 2022-04-26 (001). DOI: 10.28065/n.cnki.ncdzb.2022.000444.
- WANG W. Metaverse enters the factory [N]. *China Electronics News*, 2022-04-26(001). DOI: 10.28065/n.cnki.ncdzb.2022.000444.
- [22] JEON H J, YOUN H C, KO S M, et al. “Blockchain and AI Meet in the Metaverse”, in *Advances in the Convergence of Blockchain and Artificial Intelligence [M/OL]*. London, United Kingdom: IntechOpen. 2021. (2022-5-23). <https://doi.org/10.5772/intechopen.99114>.
- [23] 张霖, 陆涵. 从建模仿真看数字孪生[J]. *系统仿真学报*, 2021, 33(5): 995-1007.
- ZHANG L, LU H. Discussing digital twin from modeling and simulation [J]. *Journal of System Simulation*, 2021, 33(5): 995-1007. (in Chinese)
- [24] PEI H M, WANG D, LIU Q B. 钙质砂中静触探试验的大变形有限元模拟 [J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021, 43(1): 48-53.
- PEI H M, WANG D, LIU Q B. Large deformation finite element analysis of cone penetration tests in calcareous sands [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(1): 48-53.
- [25] 付琳莉, 殷维, 王天文, 等. 被上游建筑遮挡的下游建筑表面风压CFD模拟的可靠性研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(1): 180-190.
- FU L L, YIN W, WANG T W, et al. Reliability of CFD simulation for the wind pressure on a cubic after another cavity in comparison of wind tunnel experiment [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(1): 180-190. (in Chinese)
- [26] 郝爱民, 何兵, 赵沁平. 虚拟现实中的增强虚境技术 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2003, 29(10): 909-913.
- HAO A M, HE B, ZHAO Q P. Review of augmented virtuality technology in virtual reality [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, 29(10): 909-913. (in Chinese)
- [27] LI X, YI W, CHI H L, et al. A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety [J]. *Automation in Construction*, 2018, 86: 150-162.
- [28] 何江, 蒙泳君, 赵庚亮, 等. 基于VR的地铁基坑施工安全教育系统设计与应用[J]. *中国安全生产科学技术*, 2021, 17(8): 124-129.
- HE J, MENG Y J, ZHAO G L, et al. Design and application of safety education system for subway foundation pit construction based on VR [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2021, 17(8): 124-129. (in Chinese)
- [29] 韩豫, 马国鑫, 蔡彦鹏, 等. 融合BIM和VR的施工安全知识学习系统设计及实现[J]. *施工技术*, 2018, 47(17): 123-126.
- HAN Y, MA G X, CAI Y P, et al. Design and implementation of construction safety knowledge learning system based on BIM and VR [J]. *Construction Technology*, 2018, 47(17): 123-126. (in Chinese)

- [30] 万飞, 刘子旋, 谭明. 南粤古驿道历史建筑数字化保护与VR场景构建[J]. 测绘通报, 2021(2): 108-111.
WAN F, LIU Z X, TAN M. Digital protection and VR scene construction of historical buildings in South China Historical Trail [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(2): 108-111. (in Chinese)
- [31] 王宇佳, 王佳. 基于BIM的数字化消防疏散预案应用探讨[J]. 消防科学与技术, 2018, 37(4): 538-541.
WANG Y J, WANG J. Discussion on the application of digital fire evacuation plan based on BIM [J]. Fire Science and Technology, 2018, 37(4): 538-541. (in Chinese)
- [32] 张磊, 朱国庆, 郭大刚. 基于VR的公共建筑火灾逃生训练系统研究[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(4): 526-529.
ZHANG L, ZHU G Q, GUO D G. Study on fire escape training system base on VR [J]. Fire Science and Technology, 2015, 34(4): 526-529. (in Chinese)
- [33] CHEN H S, HOU L, ZHANG G M, et al. Development of BIM, IoT and AR/VR technologies for fire safety and upskilling [J]. Automation in Construction, 2021, 125: 103631.
- [34] ALIZADEHSALEHI S, HADAVI A, HUANG J C. From BIM to extended reality in AEC industry [J]. Automation in Construction, 2020, 116: 103254.
- [35] 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 F, LIU W R, LIU J H, et al. Digital twin and its potential application exploration [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18. (in Chinese)
- [36] 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 F, LIU W R, ZHANG M, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18. (in Chinese)
- [37] NEGRI E, FUMAGALLI L, MACCHI M. A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems [J]. Procedia Manufacturing, 2017, 11: 939-948.
- [38] 盛戈崑, 钱勇, 罗林根, 等. 面向新型电力系统的电力设备运行维护关键技术及其应用展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3072-3084.
SHENG G H, QIAN Y, LUO L G, et al. Key technologies and application prospects for operation and maintenance of power equipment in new type power system [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3072-3084. (in Chinese)
- [39] 吴淼, 李瑞, 王鹏江, 等. 基于数字孪生的综掘巷道并行工艺技术初步研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(Sup1): 506-513.
WU M, LI R, WANG P J, et al. Preliminary study on the parallel technology of fully mechanized roadway based on digital twin [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(Sup1): 506-513. (in Chinese)
- [40] GLISZCZYŃSKI M, CISZEWSKA-MLINARIĆ M. Digital twin and medical devices: technological significance of convergent inventions [J]. Journal of Global Information Technology Management, 2021, 24(2): 134-148.
- [41] BHATTI G, MOHAN H, SINGH R R. Towards the future of smart electric vehicles: Digital twin technology [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 141: 110801.
- [42] JIANG F, MA L, BROYD T, et al. Digital twin and its implementations in the civil engineering sector [J]. Automation in Construction, 2021, 130: 103838.
- [43] OPOKU D G J, PERERA S, OSEI-KYEI R, et al. Digital twin application in the construction industry: A literature review [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 40: 102726.
- [44] 周瑜, 刘春成. 雄安新区建设数字孪生城市的逻辑与创新[J]. 城市发展研究, 2018, 25(10): 60-67.
ZHOU Y, LIU C C. The logic and innovation of building digital twin city in Xiongan New Area [J]. Urban Development Studies, 2018, 25(10): 60-67. (in Chinese)
- [45] 顾建祥, 董震, 郭王. 面向上海城市数字化转型的新型测绘[J]. 测绘通报, 2021(7): 131-134, 139.
GU J X, DONG Z, GUO W. New surveying and mapping for the urban digital transformation of Shanghai [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(7): 131-134, 139. (in Chinese)
- [46] 刘占省, 张安山, 邢泽众, 等. 基于数字孪生的智能建造五维模型及关键方法研究[C]//中国土木工程学会2020年学术年会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020: 119-131.
LIU Z S, ZHANG A S, XING Z Z, et al. Research on five-dimensional intelligent construction model and key methods based on digital twin [C]//Proceedings of 2020 Academic Annual Meeting of China Society of Civil Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020: 119-131. (in Chinese)
- [47] BOJE C, GUERRIERO A, KUBICKI S, et al. Towards a semantic construction digital twin: Directions for future research [J]. Automation in Construction, 2020, 114: 103179.
- [48] 刘红波, 张帆, 陈志华, 等. 人工智能在土木工程领域的应用研究现状及展望[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(1): 14-32.
LIU H B, ZHANG F, CHEN Z H, et al. Applied research status and prospects of artificial intelligence in civil engineering field [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(1): 14-32.

- [49] 刘占省, 刘子圣, 孙佳佳, 等. 基于数字孪生的智能建造方法及模型试验[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(6): 26-36.
LIU Z S, LIU Z S, SUN J J, et al. Intelligent construction methods and model experiments based on digital twins [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(6): 26-36. (in Chinese)
- [50] 谢琳琳, 陈雅娇. 基于BIM+数字孪生技术的装配式建筑项目调度智能化管理平台研究[J]. 建筑经济, 2020, 41(9): 44-48.
XIE L L, CHEN Y J. Research on intelligent management platform of prefabricated building project scheduling based on BIM+Digital twin technology [J]. Construction Economy, 2020, 41(9): 44-48. (in Chinese)
- [51] 谢先启, 邓利明, 肖铭钊, 等. 新一代建造质量安全发展研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(4): 71-78.
XIE X Q, DENG L M, XIAO M Z, et al. New-generation quality and safety management of the construction industry [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(4): 71-78. (in Chinese)
- [52] 刘占省, 张安山, 王文思, 等. 数字孪生驱动的冬奥场馆消防安全动态疏散方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(7): 962-971.
LIU Z S, ZHANG A S, WANG W S, et al. Dynamic fire evacuation guidance method for winter Olympic venues based on digital twin-driven model [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(7): 962-971. (in Chinese)
- [53] LU Q C, XIE X, PARLIKAD A K, et al. Digital twin-enabled anomaly detection for built asset monitoring in operation and maintenance [J]. Automation in Construction, 2020, 118: 103277.
- [54] SMART J M, CASCIO J, PAFFENDORF J. Metaverse Roadmap Overview[EB/OL]. (2022-5-23). <https://www.metaverseroadmap.org/overview/index.html>.
- [55] MERWE D. The metaverse as virtual heterotopia [C]// Proceedings of the 3rd World Conference on Research in Social Sciences. Vienna, Austria. October 22-24, 2021.
- [56] KENT L, SNIDER C, HICKS B. Early stage digital-physical twinning to engage citizens with city planning and design [C]//2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces. March 23-27, 2019, Osaka, Japan. IEEE, 2019: 1014-1015.
- [57] KENT L, SNIDER C, HICKS B. Engaging Citizens with urban planning using city blocks, a mixed reality design and visualisation platform [M]//Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics. Cham: Springer, 2019: 51-62.
- [58] 鲁楠. 芬兰赫尔辛基中央图书馆空间设计实践及思考[J]. 图书馆界, 2016(5): 69-71.
LU N. Practice and thinking of space design of Helsinki Central Library in Finland [J]. Library World, 2016(5): 69-71. (in Chinese)
- [59] KOUTAMANIS A, HEUER J, KÖNINGS K D. A visual information tool for user participation during the lifecycle of school building design: BIM [J]. European Journal of Education, 2017, 52(3): 295-305.
- [60] 杜世虎, 付亚金, 唐丽. 用户参与式设计模式在村史馆设计中的应用研究: 以郑州市五龙口村村史馆为例[J]. 建筑与文化, 2021(2): 98-100.
DU S H, FU Y J, TANG L. Study on the application of user-participatory design in the design of village history museum: Taking the history museum of wulongkou village in Zhengzhou City as an example [J]. Architecture & Culture, 2021(2): 98-100. (in Chinese)
- [61] 张利, 邓慧姝, 梅笑寒, 等. 城市人因工程学导向的地下空间界面实证研究与设计决策方法初探[J]. 世界建筑, 2021(3): 19-23, 126.
ZHANG L, DENG H S, MEI X H, et al. Urban ergonomics and subterranean space design: A preliminary study on empirical methodologies and design making patterns [J]. World Architecture, 2021(3): 19-23, 126. (in Chinese)
- [62] 王飞球, 何祥平, 郜辉, 等. 基于BIM的高铁连续梁桥施工过程可视化管理技术研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(2): 111-118.
WANG F Q, HE X P, GAO H, et al. Study on visual management technology of construction process of high-speed railway continuous girder bridges based on BIM [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(2): 111-118. (in Chinese)
- [63] 张建平, 王洪钧. 建筑施工4D⁺⁺模型与4D项目管理系统的研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(3): 70-78.
ZHANG J P, WANG H J. A 4D⁺⁺ site model and 4D management system for construction projects [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(3): 70-78. (in Chinese)
- [64] SCHIAVI B, HAVARD V, BEDDIAR K, et al. BIM data flow architecture with AR/VR technologies: Use cases in architecture, engineering and construction [J]. Automation in Construction, 2022, 134: 104054.
- [65] 郭泱泱. 元宇宙技术在煤矿安全培训和应急演练中的可行性研究[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(1): 144-148.
GUO Y Y. Feasibility study of the Metaverse technology in coal mine emergency training and drills [J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(1): 144-148. (in Chinese)
- [66] 杨新涯, 钱国富, 唱婷婷, 等. 元宇宙是图书馆的未来吗? [J]. 图书馆论坛, 2021, 41(12): 35-44.
YANG X Y, QIAN G F, CHANG T T, et al. Is metaverse the future of library? [J]. Library Tribune, 2021, 41(12): 35-44. (in Chinese)
- [67] 郭亚军, 李帅, 丁菲, 等. 美国大学图书馆的虚拟仿真

- 应用实践:对美国 TOP100 大学图书馆 VR/AR 应用的调查[J]. 图书馆论坛, 2022, 42(4): 133-140.
- GUO Y J, LI S, DING F, et al. Virtual simulation in American university libraries: A survey of top 100 university libraries [J]. Library Tribune, 2022, 42(4): 133-140. (in Chinese)
- [68] 陈定权, 尚洁, 汪庆怡, 等. 在虚与实之间想象元宇宙中图书馆的模样[J]. 图书馆论坛, 2022, 42(1): 62-68.
- CHEN D Q, SHANG J, WANG Q Y, et al. Imagination of future library in metaverse: Between virtual and real worlds [J]. Library Tribune, 2022, 42(1): 62-68. (in Chinese)
- [69] TAN B K, RAHAMAN H. Virtual heritage: Reality and criticism [C]//Joining Languages, Cultures and Visions - CAAD Futures 2009, Proceedings of the 13th International CAAD Futures Conference. Montreal: University of Montreal. Presses de l'Universite de Montreal. June 15-16, 2009: 143-156.
- [70] VLAVIANOS N, NAGAKURA T. An architectural metaverse that combines dynamic and static 3D data in XR: A case study at the monastery of Simonos Petra [C]//International Conference on Cultural Heritage and New Technologies. Vienna, 2021: 1-6.
- [71] GAAFAR A A. Metaverse in architectural heritage documentation & education [J]. Advances in Ecological and Environmental Research, 2021, 6(10): 66-86.
- [72] DECENTRALAND. Metaverse Property [EB/OL] 2021. <https://metaverse.properties/buy-indecentraland>.
- [73] POUX F, BILLEN R, KASPRZYK J P, et al. A built heritage information system based on point cloud data: HIS-PC [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020, 9(10): 588.
- [74] SANTOSA H, YUDONO A, ADHITAMA M S. The digital management system of the tangible culture heritage for enhancing historic building governance in Malang, Indonesia [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 738(1): 012056.
- [75] 何文景, 杨健, 熊吴越. 基于深度学习的三维点云自动生成 BIM 模型方法[J]. 土木工程与管理学报, 2021, 38(3): 133-139.
- HE W J, YANG J, XIONG W Y. BIM model method for automatic generation of 3D point clouds based on deep learning [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2021, 38(3): 133-139. (in Chinese)
- [76] LEE H, JUNG J. Clustering-based plane segmentation neural network for urban scene modeling [J]. Sensors, 2021, 21(24): 8382.
- [77] HASSOUNEH D, BRENGMAN M. Retailing in social virtual worlds: Developing a typology of virtual store atmospherics [J]. Journal of Electronic Commerce Research, 2015, 16(3): 218-241.
- [78] AYITER E. (Re) Building proun #5A in the metaverse [C]//2014 International Conference on Cyberworlds. October 6-8, 2014, Santander, Spain. IEEE, 2014: 403-406.
- [79] LIAO W J, LU X Z, HUANG Y L, et al. Automated structural design of shear wall residential buildings using generative adversarial networks [J]. Automation in Construction, 2021, 132: 103931.
- [80] ZHENG H, HUANG W X. Architectural drawings recognition and generation through machine learning [C]//Association for Computer Aided Design in Architecture Mexico City. October 18-20, 2018, ACADIA, 2018: 156-165.
- [81] NAUATA N, CHANG K H, CHENG C Y, et al. House-GAN: Relational generative adversarial networks for graph-constrained house layout generation [M]//Computer Vision, ECCV 2020. Cham: Springer, 2020: 162-177.
- [82] STANCHEV P L, PANEVA-MARINOVA D, ILIEV A. Enhanced user experience and behavioral patterns for digital cultural ecosystems [C]//Proceedings of the 9th International Conference on Management of Digital EcoSystems. Bangkok Thailand. New York, NY, USA: ACM, 2017: 287-292.
- [83] 李晶. 元宇宙中通证经济发展的潜在风险与规制对策 [J]. 电子政务, 2022(3): 54-65.
- LI J. Potential risks and regulatory countermeasures for the development of token economy in the metaverse [J]. E-Government, 2022(3): 54-65. (in Chinese)
- [84] 张杨. 元宇宙房地产, 真能炒吗 [N]. 解放日报, 2021-12-18(6).
- ZHANG Y. Metaverse real estate, can it really be speculated [N]. Liberation Daily, 2021-12-18(6). (in Chinese)
- [85] 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 W X, ZHOU F, WAN Y L, et al. A survey of metaverse technology [J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(4): 744-756. (in Chinese)