arXiv:2302.01125v1 [cs.AI] 2 Feb 2023

元宇宙：需求、架构、标准、现状、挑战与展望

Danda B. Rawat 和 Hassan El Alami 霍
华德大学，美国华盛顿特区{danda.rawat,
hassan.elalami}@howard.edu

摘要——元宇宙通过以一个共享、沉浸式、持久的三维虚拟空间取代数字世界（互联网），正为新的机遇推动新一轮创新。本文介绍元宇宙的需求、架构、标准、挑战及解决方案。具体而言，我们提出元宇宙架构与需求，并介绍作为元宇宙开发与部署基础的各类标准。此外，我们还介绍元宇宙的最新进展、人工智能与元宇宙融合以及元宇宙安全与隐私等挑战，并探讨相应的展望与解决方案。

索引词——元宇宙、元宇宙标准、元宇宙中的安全与隐私、人工智能与元宇宙。

一、引言

元宇宙预计将成为未来几年最重要的技术进步之一。从本质上说，元宇宙由计算机生成的世界构成，这些世界拥有独立经济体系和一致的价值体系。元宇宙通过将单一、通用的互联网连接到集成的 3D 虚拟与物理世界网络，为用户在物理世界中带来身临其境的网络虚拟体验。尤其是两种广受欢迎的应用——增强现实（AR）和虚拟现实（VR）——正在不断发展，使元宇宙成为一种沉浸式数字体验和面向用户的社交网络。此外，元宇宙被视为下一代互联网（3D 互联网），用户有机会以数字原住民的身份生活，并通过虚拟环境体验另一种生活方式 [1]。此外，元宇宙在教育、医疗保健、旅游等众多领域都具有各种逼真的应用场景。例如，在医疗保健领域使用元宇宙，有望通过实现全新的高性价比治疗方法，显著改善患者治疗结果。元宇宙不仅能为地域分散的患者提供远程监测和远程医疗服务，还能成为医疗专业人员的得力工具。此外，通过在医疗保健领域应用元宇宙，还可以改善医疗保健关键绩效指标和度量指标，例如治疗费用、治疗错误率和患者满意度。

本研究部分由霍华德大学 DoD CoE-AIML 项目资助，资助依据为与美国陆军研究实验室签订的合同 W911NF-20-2-0277；此外还获得微软公司研究捐赠基金和 Meta/Facebook 研究捐赠基金的资助。**本文已被 IEEE《物联网杂志》特刊接收发表。**

元宇宙融合了多种新兴技术，包括 AR/MR/VR/XR、数字孪生、5G/6G、物联网、人工智能，以及安全与隐私技术，以确保其成功。此外，新冠肺炎是推动人们对元宇宙热情高涨的主要因素之一。它从根本上改变了当今人们的工作、娱乐和社交方式 [2]。随着用户越来越习惯于远程完成日常任务，元宇宙也被视为未来不可或缺的组成部分。作为 Web 3.0 的一部分，元宇宙被认为是一种正在演进的范式 [3]。正如 [4], 图1 所示，化身能够在包括子元宇宙在内的各种虚拟世界之间无缝穿梭，从而体验数字环境，并通过物理基础设施和元宇宙激励机制参与虚拟经济活动。元宇宙的六大特征可概括如下：

沉浸感： 指一种计算机生成的虚拟环境，其逼真程度足以让用户在心理和情感上产生参与感。通过视觉、听觉、触觉、温度和压力等感官感知，以及手势和符号等表达方式，人们能够理解这种环境。

时空： 现实世界受空间有限性和时间不可逆性的限制。时空是指元宇宙打破空间和时间限制，形成一个与现实世界平行的虚拟时空连续体。

可持续性： 高度的独立性和封闭经济循环表明，元宇宙维持着一套一

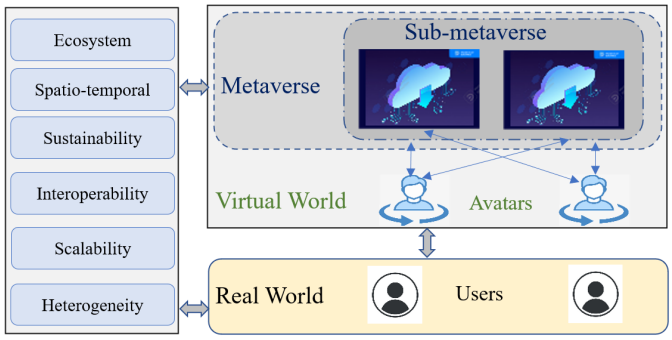


图1. 元宇宙的特征。

致的价值体系和封闭经济循环。

互操作性： 这意味着用户可以在虚拟世界（即子元宇宙）之间无缝移动，而不会中断沉浸式体验。此外，用于渲染或重建虚拟世界的数字资产可以在不同平台之间互换。

可扩展性： 它指的是元宇宙在并发用户/化身数量、场景复杂程度、交互范围以及用户/化身之间的交互规模不断增加时，仍能保持高效运行的能力。

异构性： 在元宇宙中，存在具有不同实现方式的异构虚拟空间，存在配备不同接口的异构物理设备，存在异构数据类型和异构通信模式，而且人类心理也具有多样性。

本文对元宇宙进行了全面而综合的概述，包括其需求、架构和标准，以及其面临的挑战、开放问题和展望。

II. 元宇宙架构

由于元宇宙目前仍处于发展的早期阶段，学术界和工业界尚未形成一致的架构定义。基于 [4], [5], ，我们提出元宇宙架构横跨现实世界与虚拟世界。因此，如图 2 所示，所提出的架构可用于涵盖元宇宙的以下组成部分：

- **基础设施：** 基础设施包括支持元宇宙运行的基础技术，例如微机电系统、图形处理器、通信与网络（如 Wi-Fi 6、5G/6G）、区块链、云边缘计算、存储和微服务。
- **交互性：** 它充当虚拟世界与现实世界之间的接口，使现实世界能够连接到元宇宙，并使元宇宙得以实现。它包括数字孪生、沉浸式用户体验、三维建模、感知、计算机视觉、地理空间制图以及 AR/MR/VR/XR技术。
- **生态系统：** 它促进整个元宇宙的运行，包括化身、内容创作、数据互操作性、虚拟经济、社会接受度、电子竞技、游戏、购物、旅游等。

III. 元宇宙标准

工业界和标准组织正在制定标准，使元宇宙概念成为现实。因此，如表 I 所示，现有的元宇宙标准主要关注现实世界与虚拟世界之间的无缝连接。

- **ISO/IEC 23005：** 该标准旨在规范物理世界与虚拟世界之间以及虚拟世界彼此之间的接口，以实现互操作性、同步响应和无缝信息交换 [6]。ISO/IEC 23005 适用于广泛的元宇宙商业服务，其中视听信息、渲染的感官效果和虚拟对象特征可集成到现实世界与虚拟世界之间的交互中。
- **IEEE 2888：** IEEE 2888 为同步网络空间与物理世界定义了标准化接口 [7]。IEEE 2888 标准规定了用于控制执行器和获取感官信息的信息格式与应用程序接口（API），使虚拟世界与现实世界能够进行交互。
- **IEEE P1589：** IEEE P1589 是针对增强现实学习体验提出的标准，用于描述如何以标准化交换格式表示增强现实学习活动中的活动、学习情境、特定环境以及其他潜在要素，同时规定相关数据规范 [8]。通过利用传感器和计算机视觉，该标准使用户能够更轻松地创建将现实世界交互与网络应用程序集成在一起的学习体验。
- **IEEE P2048：** 由于元宇宙产业仍处于起步阶段，围绕元宇宙出现了大量炒作、困惑和误解。对基本术语、定义和分类体系缺乏共识，可能会误导早期采用者，并为发展制造不必要的障碍。IEEE P2048 [9]旨在定义元宇宙的术语、类别和层级，促进与元宇宙相关活动的可持续发展，并推动元宇宙市场健康成长。
- **IEEE P7016：** 该标准旨在概述元宇宙系统的技术社会层面，并规定一种用于其设计和运行的伦理评估方法 [10]。该标准为元宇宙开发者提供指导，说明如何优先采用符合伦理的系统设计。

表 I 元宇宙标准概要

标准	描述
ISO/IEC 23005	为设计和开发提供指导， 以及元宇宙的部署。
IEEE 2888	为物理世界和虚拟 世界制定接口，并定义数据格式和应用程序接口。
IEEE P1589	该标准适用于促进.....的增强现实学习体验 创建体验库和在线 市场。
IEEE P2048	提供术语、定义和分类体系 在元宇宙中 ，并确保元宇宙 能够实现可持续发展。
IEEE 7016	概述元宇宙的技术社会层面 元宇宙，以及一种用于的方法论。 评估其伦理可行性的方法论。

IV. 元宇宙的关键组成部分和要求

构建元宇宙需要多种新技术。本节介绍所选文献中讨论的最重要的关键技术要求

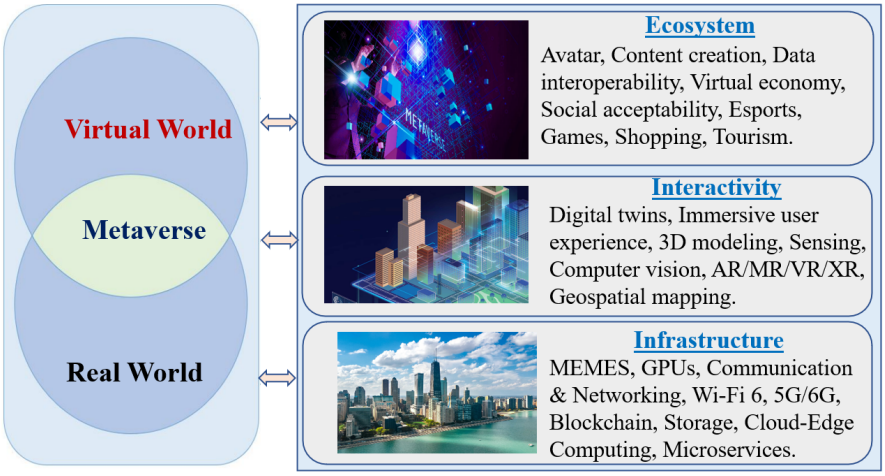


图 2. 元宇宙的典型架构。

。如图 3 所示，元宇宙的基础要求如下。

A. 通信与网络

多种技术正在实现物理世界与虚拟世界之间，以及子元宇宙之间的实时海量数据通信，例如 5G/6G、软件定义网络（SDN）、物联网和资源分配框架。除 5G/6G 外，还有可能为海量元宇宙设备提供具有增强移动性的实时超可靠通信 [11]。在元宇宙中，SDN 通过分离控制平面和数据平面，促进大规模网络的灵活、可扩展管理。基于 SDN 的元宇宙中的物理设备和资源通过 OpenFlow 等标准化接口进行逻辑管理，从而能够根据子元宇宙的实时需求，动态分配虚拟化的计算、存储和带宽资源。物联网传感器是元宇宙中人类感官的延伸。元宇宙需要海量资源，尤其是用于密集数据处理以支持扩展现实的计算资源、海量存储资源和海量网络资源

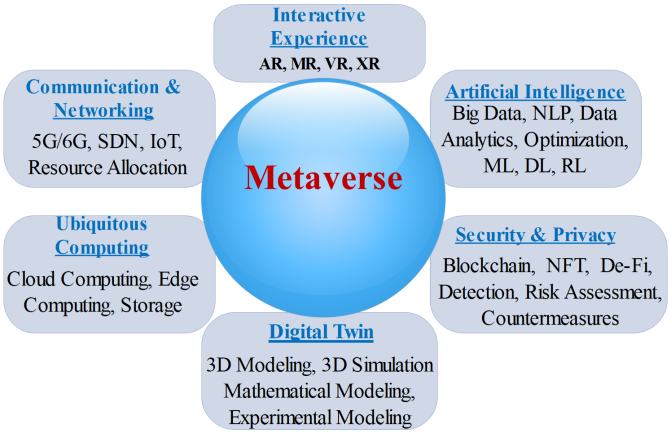


图 3. 关键需求及其在元宇宙中作用的示意图。

以维持超高速、低延迟连接 [12]。因此，资源分配框架可以管理并分配元宇宙所需的不同类型资源。

B. 泛在计算

通过创建一个可以随时随地访问计算资源的环境，泛在计算旨在为用户提供随时访问计算资源的能力 [13]。泛在计算通过将泛在智能对象融入物理环境来实现，从而能够流畅地适应用户与物理环境之间的交互。借助泛在智能对象和网络，用户可以自由地与其化身互动，并体验沉浸式元宇宙服务，而不必使用手机、笔记本电脑和终端设备等特定设备。

C. 数字孪生

它以现实世界的数字复制品呈现出高保真度和意识 [14]。通过分析实时数据流、物理模型以及历史数据，可以实现对虚拟用户的反映与优化。数字孪生通过反馈现实实体的数据，自主学习并适应镜像空间。借助三维仿真和人工智能，它能够生成元宇宙中预期对象的高精度三维模型，这有利于大规模元宇宙的创建与渲染。数学建模和实验建模也可用于设计物理系统的虚拟模型。数学模型通常会作出简化假设（例如，对非线性函数进行线性近似）。实验建模也可以通过一系列实验来实现。通过在现实世界与虚拟世界之间提供双向连接，可以实现预测性维护和事故追踪，从而降低风险并提高效率。

D. 交互体验

鉴于微型化传感器、嵌入式技术以及 XR 技术日趋成熟，扩展现实设备

有望成为进入元宇宙最重要的终端。通过整合VR/AR/MR技术，扩展现实能够借助前投影全息显示器、人机交互和大规模三维建模 [15]，为用户提供沉浸式体验、增强体验，并与用户、化身及环境进行实时交互。具体而言，虚拟现实能够让人沉浸于虚拟世界；增强现实能够让人在现实世界中实时体验全息图、图形和视频；混合现实则提供介于这些技术之间的过渡体验。因此，用户与化身之间的交互将不再局限于移动设备（例如手机和笔记本电脑），而是可通过各种交互设备实现。此外，低延迟边缘计算系统与人工智能驱动的实时渲染相结合，能够消除佩戴扩展现实设备（例如头戴式设备和头盔）时出现的头晕等不适体验。

E. 安全与隐私

鉴于元宇宙在现代生活中具有诸多潜在应用，安全与隐私是重要的关键需求。元宇宙可能面临各种威胁和攻击。因此，为确保虚拟世界与现实世界中的数据安全与保护，必须考虑各种网络防御技术，例如检测、风险评估、对策和隐私。借助区块链技术，可以可持续地构建虚拟经济，并建立元宇宙中的价值体系。这些技术提供了一种开放、去中心化的解决方案。在区块链技术的背景下，非同质化代币（NFT）是一种不可替代且不可分割的代币，可用于帮助识别资产并追溯链上所有权溯源。此外，元宇宙中还采用了去中心化金融（De-Fi）的概念，旨在提供安全、透明且高度复杂的金融服务。

F. 人工智能

通过将人工智能与其他技术要求相结合，例如通信、泛在计算、交互、安全与隐私，元宇宙能够创造安全、可扩展且逼真的虚拟世界，并使其始终可用。考虑到元宇宙架构（见图 2），人工智能能够增强基础设施可靠性并提升其性能，这一点毋庸置疑。对于通信与网络技术，各种先进的人工智能算法和优化算法、机器学习、深度学习及强化学习已被用于解决多种具有挑战性的问题，包括能源效率、资源分配、可扩展性以及安全与隐私威胁。通过使用物联网传感器/执行器和其他人机交互设备，可以基于机器学习/深度学习分析并识别简单的人体动作和复杂行为。因此，用户在现实世界中的身体运动会映射到虚拟世界中，使他们能够完全控制自己的化身，与元宇宙中的其他对象互动。除了能够与物理世界中使用的多种模态进行交互之外，这些化身还能够借助自然语言处理（NLP）进行语音识别和情感分析；与物理世界中使用的技术相比，其准确率更高、处理速度更快。元宇宙的发展与使用将带来大数据分析相关应用，从而显著提升虚拟世界中的数据处理潜力。

V. 研究挑战与展望

IVES

本节受前述元宇宙架构和关键需求的启发，探讨元宇宙所采用的关键技术面临的一些挑战。

A. 元宇宙中的人工智能模型

在元宇宙中应用人工智能，尤其是先进的机器学习算法，能够使运营者和设计者更高效地实现自动化，并获得优于传统方法的性能。然而，人工智能算法无法用于辅助用户操作或增强沉浸式体验。目前可用的人工智能模型通常层数很深，需要大量计算能力，因此不适用于资源可用性有限的移动设备。因此，有必要设计轻量而高效的人工智能模型。此外，深度学习算法具有很强的应用针对性，因此，为解决某个问题而训练的模型，可能无法解决类似领域中的另一个问题。若要将模型用于其他类似问题，通常必须使用合适的数据重新训练。此外，自举是强化学习收敛过程中最具挑战性的环节之一。由于大多数强化学习算法需要很长时间才能收敛，因此被归类为NP难。还需特别指出，在元宇宙中的游戏、交互式体验和远程医疗场景中，时间至关重要，系统或用户/虚拟形象都无法容忍延迟。要设计高效的自举机制，还需要开展更多研究。展望未来，元宇宙中的人工智能下一步应从利用人工智能算法使硬件变得智能，转向构建搭载人工智能算法的智能硬件；后者是一种混合模式，侧重于端到端解决方案。强化学习、联邦学习和少样本学习等其他先进的人工智能技术，有望在开发这一解决方案的过程中发挥重要作用。

B. 元宇宙与大数据

众所周知，元宇宙包含海量数据。化身、扩展现实设备或物联网设备可能会生成有价值但敏感的信息，并可据此得出有意义的解决方案。尽管如此，关于如何采集、分析和存储数据的重大问题仍未得到解决。数据采集是数据分析的第一步，因此，收集准确、真实且具有质量挑战的数据至关重要。这些数据在质量方面带来了挑战。除了来自物联网设备的数据输入外，用户和化身也会提供数据。元宇宙

模型会受到误导，如果用户生成用于数据分析和模型训练的低质量内容。元宇宙中必须存储大量数据，而且数据量还在不断增长。数据量的增加给存储容量、扩展速度和备份能力带来了挑战。另一方面，鉴于用户生成内容数据的多样性、复杂性及其相互关联性，存储系统必须将模型从单一文件类型转换为多种半结构化和非结构化数据关系。考虑到这些特性带来的高昂基础设施成本，集中式存储方法难以跟上数据的规模和类型。应对这一挑战需要开展多项研究并推动技术发展，涉及通信、数据互操作性、交互式体验、存储、算力、数据共享以及安全与隐私。

C. 关键任务与国防应用中的元宇宙

国防与航空航天行业目前正开展研究，通过开发实用的 AR/MR/VR/XR 元宇宙解决方案来增强国防与航空航天系统。元宇宙在国防与航空航天行业中的诸多应用有助于解决各种问题，例如故障排除、检查飞机和安全设备，以及对飞机进行维护。此外，通过运用元宇宙技术，可以将真实世界的体验自动化并个性化，以协助空军、军事人员以及宇航员的培训。基于人工智能的元宇宙还能够增强军事和航空航天元宇宙的安全性。因此，元宇宙在培训中发挥着至关重要的作用。例如，元宇宙通过提供多种培训场景，帮助飞行员和宇航员在困难情况下迅速采取行动，从而提升他们的能力，进而改善飞行员和宇航员的训练过程。此外，在航空航天领域，虚拟化身能够针对表现提供实时反馈。然而，国防与航空航天领域的先行者必须通过采用新策略、分析自身在数字世界中的作用、确定潜在的产品与服务，并建立技术框架以改进元宇宙所需的关键技术，引领元宇宙领域下一阶段的研究。

D. 元宇宙与安全和隐私效率

由于元宇宙能够比用户对话和互联网历史更细致地收集行为数据，数据的机密性、完整性、可用性和真实性仍面临威胁，许多严重问题尚未得到解决。因此，安全与隐私问题是元宇宙的首要关注事项。我们需要为虚拟化身实施双因素认证，更好地保护传输数据，并对元宇宙中可能发生的犯罪保持更高程度的警惕。XR设备和物联网传感器等可穿戴设备在营造沉浸式体验方面发挥着重要作用。此外，使用这些设备也增加了遭受入侵和攻击的机会。黑客可以利用用户的访问历史和存储信息，复制用户的元宇宙账户。正如许多关于元宇宙安全与隐私的文献所述，针对元宇宙及其内部的不同类型威胁包括非同质化代币（NFT）、金融欺诈、AR/MR/VR/XR威胁、暗元宇宙、隐私问题、网络物理威胁、社会工程威胁以及传统信息与通信（IT）攻击。为满足未来元宇宙应用的需求，并实现身份管理、信任系统和安全监控系统，人工智能需要针对区块链技术、检测技术和应对措施开展广泛研究。为增强用户参与元宇宙的信心，并确保金融安全和数据安全，应重点防范针对元宇宙的潜在威胁模型。此外，为满足数据安全与隐私方面的需求，还必须开发轻量级的数据安全保障方法。

E. 元宇宙与算力

算力的概念与计算、存储和传输数据的能力有关。算力是发展数字社会最重要的要素之一，因为它是一种新的生产要素。元宇宙环境的发展需要超级计算机的支持。多种技术要求融入元宇宙，包括人工智能、区块链和交互技术。虚拟世界与现实世界也相互融合。因此，元宇宙技术高度依赖信息技术，离不开强大的计算基础设施。因此，元宇宙的发展仍面临诸多有待克服的挑战，包括技术挑战和能源挑战。由于元宇宙需要对数据进行大规模可视化并开展大规模计算，因此既需要算力，也需要电力。此外，还需要针对边缘计算提出新的解决方案，将云计算扩展到网络边缘，并使资源受限的设备能够将任务卸载到边缘服务器进行处理，从而优化能耗。

F. 元宇宙在各学科中的融合

作为一个复杂且动态的系统，现实世界需要各种学科的协作。由于元宇宙代表了现实世界的虚拟映射，因此有必要对元宇宙开展跨学科研究。元宇宙影响着现代生活的诸多方面，包括医学、国防、教育、经济等。为了完善元宇宙自身的建设并应对这一挑战，必须发展相关的理论知识、研究和技术。例如，元宇宙中虚拟货币的创建与维护，与现实世界的经济体系之间存在密切关联；二者的融合与发展将对实体经济产生深远影响。此外，元宇宙还利用基于

先进的人工智能/机器学习算法来分析和理解用户行为，为用户提供更加沉浸式的体验，或将其应用于教育、培训、心理治疗及其他领域。

VI. 结论

本文为元宇宙提出了一个大胆的新愿景，阐述了其需求、架构、标准、现状、挑战及相关研究。首先，我们介绍了元宇宙的基本概念，并探讨了其多种特征，这些特征有助于界定元宇宙的若干组成部分。随后，我们讨论了元宇宙采用的现有虚拟环境标准，并介绍了元宇宙环境的六项技术要求。针对每项关键要求，我们阐述了基本概念及可用于解决相关问题的方案。此外，我们还探讨了元宇宙当前面临的挑战与未来展望，包括人工智能应用、大数据、面向任务关键型应用和国防应用的元宇宙应用，以及安全与隐私效率、算力和跨学科方面的内容，因此，本文可供研究人员在未来研究方向上参考。

参考文献

[1] D. Grider 和 M. MAXIMO，《元宇宙：Web 3.0 虚拟云经济》，*GrayscaleResearch*，2021。[2] L.-H. Lee、T. Braud、P. Zhou、L. Wang、D. Xu、Z. Lin、A. Kumar、C. Bermejo 和 P. Hui，《关于元宇宙你需要了解的一切：关于技术奇点、虚拟生态系统和研究议程的全面综述》，*arXiv* 预印本 *arXiv:2110.05352*，2021。[3] N. Kshetri，《Web3 和元宇宙的政策、伦理、社会和环境考量》，*IT Professional*，第24卷，第3期，第4–8页，2022。[4] Y. Wang、Z. Su、N. Zhang、R. Xing、D. Liu、T. H. Luan 和 X. Shen，《元宇宙综述：基础、安全与隐私》，*IEEE CommunicationsSurveys & Tutorials*，2022。

[5] Y. Fu、C. Li、F. R. Yu、T. H. Luan、P. Zhao 和 S. Liu，《面向元宇宙的区块链与智能网络综述》，*IEEE Internet of Things Journal*，2022。[6] C. Osborne。（2022）ISO/IEC 23005（MPEG-V）标准。访问日期：2022年12月8日。 [在线]。网址：https://mpeg.chiariglione.org/standards/ mpeg-v [7] I. SA。（2022）IEEE 2888 标准。访问日期：2022年12月8日。 [在线]。网址：https://sagroups.ieee.org/2888/ [8] ——。（2022）IEEE 1589 标准。访问日期：2022年12月8日。 [在线]。网址：https://standards.ieee.org/ieee/1589/6073/ [9] ——。（2022）IEEE P2048 标准。访问日期：2022年12月8日。 [在线]。网址：https://standards.ieee.org/ieee/2048/11072/ [10] ——。（2022）IEEE P7016 标准。访问日期：2022年12月8日。 [在线]。网址：https://standards.ieee.org/ieee/7016/11078/ [11] H. Du、D. Niyato、J. Kang、D. I. Kim 和 C. Miao，《面向安全无线边缘元宇宙的最优定向广告策略》，*arXiv* 预印本 *arXiv:2111.00511*，2021。[12] N. H. Chu、D. T. Hoang、D. N. Nguyen、K. T. Phan 和 E. Dutkiewicz，《MetaSlicing：一种面向元宇宙的新型资源分配框架》，*arXiv* 预印本 *arXiv:2205.11087*，2022。[13] D. Monteiro、H.-N. Liang、A. Abel、N. Bahaei 和 R. de Cassia Mon- teiro，《基于脑电图和主观指标评估第一人称与第三人称视角虚拟现实游戏的参与度》，载于*2018*年*IEEE*人工智能与虚拟现实国际会议，2018，第53–60页。[14] Y. Wu、K. Zhang 和 Y. Zhang，《数字孪生网络：综述》，*IEEE Internet of Things Journal*，第8卷，第18期，第13 789–13 804页，2021。[15] S.-M. Park 和 Y.-G. Kim，《元宇宙：分类体系、组成部分、应用与开放挑战》，*IEEE Access*，第10卷，第4209–4251页，2022。

Danda B. Rawat（S'07，M'09，SM'13）是霍华德大学电气工程与计算机科学系教授、战术自主研究所（RITA）UARC主任、美国国防部人工智能/机器学习卓越中心（CoE-AIML）主任，以及数据科学与网络安全中心（DSC^2）主任，任职于美国华盛顿特区。Rawat博士曾获美国国家科学基金会CAREER奖。

Hassan El Alami 目前是美国华盛顿特区霍华德大学的博士后研究员。2019年，他在摩洛哥拉巴特的国家邮政与电信学院（INPT）获得计算机科学与电信博士学位。他目前的研究兴趣包括物联网、人工智能和网络安全。