# 医疗元宇宙联邦学习综述：概念、应用程序、挑战与未来方向

Ali Kashif Bashir，*IEEE*高级会员，Nancy Victor，*IEEE*会员，Sweta Bhattacharya、Thien Huynh-The、Rajeswari Chengoden、Gokul Yenduri，*IEEE*学生会员，Praveen Kumar Reddy Maddikunta、Quoc-Viet Pham、Thippa Reddy Gadekallu，*IEEE*高级会员，以及Madhusanka Liyanage，*IEEE*高级会员

arXiv:2304.00524v2 [cs.CY] 5 Apr 2023

**摘要—近期技术进步显著改善了医疗保健系统，使其能够提供各种智慧医疗服务并提升生活质量。联邦学习（FL）是人工智能（AI）的一个新兴分支，为解决医疗保健系统中的隐私问题，以及利用分布式设备上可用的数据和计算资源带来了机遇。此外，元宇宙通过整合人工智能、云边缘计算、物联网（IoT）、区块链和语义通信等新兴技术，改变了众多垂直领域，尤其是医疗保健行业。显然，FL为传统医疗保健和元宇宙医疗保健带来了诸多益处和新机遇，因此我们对FL在元宇宙医疗保健系统中的应用进行了综述。首先，我们介绍基于物联网的医疗保健系统、传统医疗保健中的FL以及元宇宙医疗保健的预备知识。随后，我们讨论FL在元宇宙医疗保健中的优势，包括提升隐私保护和可扩展性、改善互操作性和数据管理、增强安全性，以及实现自动化和低时延医疗保健服务。接下来，我们探讨FL赋能的元宇宙医疗保健的若干应用，包括医学诊断、患者监测、医学教育、传染病和药物发现。最后，我们重点介绍在元宇宙医疗保健中实现FL所面临的重要挑战及潜在解决方案。**

***IndeX*术语—联邦学习、医疗保健、元宇宙**。

## I. 引言

医疗保健是一种通过诊断和预后措施，关注并致力于改善人们身体、心理和认知健康的体系。医疗保健由医疗专业人员、实验室技术人员和医务人员提供。传统医疗保健系统遵循 HIPAA（《健康保险流通与责任法案》）、WHO（世界卫生组织）等医疗政策，为社区提供服务。医疗保健领域的最新趋势之一是使用可穿戴设备收集健康数据。这使得持续的数据追踪和及时的医疗干预成为可能。医疗物联网（IoMT）是物联网的一个分支，涉及通过计算机网络连接的医疗设备和应用程序的集合。借助可穿戴设备和 IoMT 收集的数据用于监测和后续治疗。隐私是可穿戴技术面临的主要问题之一 [1]。由于数据通过互联网共享，可穿戴技术能够提供有关个人健康状况的见解。元宇宙融合了人工智能（AI）、虚拟现实（VR）、增强现实（AR）、医疗物联网（IoMT）等多种技术。通过应用元宇宙技术，可以监测并进一步改善患者的健康与体能 [2]–[6]。医疗保健领域的元宇宙有助于手术模拟、诊断成像、康复和患者健康管理 [7]。此外，元宇宙能够激励患者按照治疗方案坚持完成所需的身体动作。基于虚拟现实的治疗为创伤相关焦虑提供了一种非药物疗法。

现有的元宇宙医疗保健系统将数据存储在私有云或中心云中。通过与个体节点共享的数据，可以得出智能决策 [8]。集中式决策是医疗元宇宙中发现的问题之一。数据从多家医院收集，并存储在中央存储库中。元宇宙用户主要使用穿戴式设备，收集的大量数据与个人行为及其周围环境有关。可穿戴设备收集的数据会发送到计算机和云端。在所有此类情况下，数据都在公有云中共享，因此隐私面临极大的泄露风险。延迟是指数据从一个点传输到另一个点所需的时间 [9]。许多设备彼此连接，用户也在元宇宙环境中远程连接。提供快速、无抖动且低延迟的端到端连接是一项重大挑战。

通讯作者：Thippa Reddy Gadekallu。Ali Kashif Bashir 任职于英国曼彻斯特都会大学（邮箱：Dr.alikashif.b@ieee.org）。Nancy Victor、Sweta Bhattacharya、Rajeswari Chengoden、Gokul Yen- duri 和 Praveen Kumar Reddy Maddikunta 任职于印度泰米尔纳德邦 632014 韦洛尔理工学院信息技术学院（邮箱：{nancyvictor、sweta.b、rajeswari.c、gokul.yenduri、praveenku- marreddy}@vit.ac.in）。Quoc-Viet Pham 任职于爱尔兰都柏林大学（都柏林圣三一学院）计算机科学与统计学院（邮箱：viet.pham@tcd.ie）。Thippa Reddy Gadekallu 任职于印度韦洛尔 632014 韦洛尔理工学院信息技术与工程学院，同时任职于黎巴嫩比布鲁斯黎巴嫩美国大学电气与计算机工程系（邮箱：thippareddy.g@vit.ac.in）。ThienHuynh-The 任职于越南胡志明市技术与教育大学计算机与通信工程系（邮箱：thienht@hcmute.edu.vn）。Madhusanka Liyanage 任职于爱尔兰都柏林大学学院计算机科学学院（邮箱：madhusanka@ucd.ie）。

将在元宇宙应用中加以解决。

医疗元宇宙应用受益于联邦学习（FL），它使各个医院能够协作，并从共享的预测模型中学习。联邦学习支持设备端学习，有助于解决数据隐私、数据安全和数据延迟过高等问题。联邦学习的分布式处理特性使医疗元宇宙能够逐步从异构数据中学习 [10]。

在 [11]医疗元宇宙中，人工智能被用于诊断胎儿先天性心脏病（CHD）。通过对孕妇进行心电图筛查获得胎儿超声图像。超声数据集可被存储，随后部署由扩展现实/虚拟现实（XR/VR）构成的人工智能模型，以构建胎儿心脏全息影像。来自不同地区的心脏病学家查看胎儿心脏全息影像，参考人工智能模型的预测结果，并开展实时会诊。[12] 中的作者阐述了基于数字孪生的个人医疗保健框架，该框架用于评估和维护个人健康。在 [13], 中，作者开发了一个基于虚拟现实的系统，并将其用于为护士和医学实习生提供培训。需要指出的是，制药机构之间的合作往往使企业容易面临数据隐私泄露[14]。横向联邦学习提供了一种高效的解决方案，可在确保数据隐私得到保留的同时促进协作。在 [15],中，作者提出了一个框架，通过扩展医学训练数据集并丰富全球患者数据分布的异质性，最大限度地发挥人工智能模型的潜力。该框架还通过将联邦学习融入现有方法，着力保护数据隐私。据我们所知，尚无研究探讨联邦学习对医疗元宇宙的贡献。因此，我们的研究是一项信息性综述，介绍了整合联邦学习的潜在应用，这将增强隐私保护；与此同时，元宇宙将提高提供医疗保健服务的有效性。表1展示了本文的贡献。

本文的主要贡献如下：

1) 阐明传统医疗保健与医疗元宇宙之间的差异 2) 确定联邦学习赋能的医疗元宇宙的应用程序 3) 指出在医疗元宇宙中实施联邦学习可能面临的挑战，并提出未来可能的发展方向

本文其余部分结构如下。第二节重点介绍传统医疗保健、元宇宙医疗保健的相关方面，以及联邦学习在传统医疗保健中的重要意义；第三节则详细阐述联邦学习在医疗元宇宙中的优势。第四节讨论将联邦学习应用于医疗元宇宙的各种应用程序。第五节介绍主要挑战和可能的未来方向，第六节总结全文。

## II. 背景

本节介绍传统医疗保健和医疗元宇宙的重要方面，并讨论医疗元宇宙的主要优势。此外，本节还详细阐述了在医疗元宇宙中实施联邦学习的重要意义，并讨论医疗元宇宙平台。

### *A.* 传统医疗保健与医疗元宇宙

过去，在用于医疗与卫生保健的物联网（IoT）系统尚未发展并普及之前，患者不得不花费更多时间和金钱来获取诊所相关服务 [16]。然而，物联网医疗系统为患者、医院和医疗中心带来了诸多优势，例如自动健康监测和远程协作式医疗诊断。采用大数据、人工智能和第五代通信技术等尖端技术的多种基于物联网的医疗保健系统，彻底改变了医疗保健行业，为世界各地创造了更美好的生活。在许多基于物联网的医疗保健系统中，各类基于智能传感器的设备（例如生物传感器、可穿戴设备、智能设备和医疗设备）通过互联网连接采集医疗保健和医学数据[17]，包括脑电图等序列数据、超声图像等高维数据，以及电子健康记录等文档。随后，数据存储在本地；若数据由设备直接采集，则其副本应传输至数据中心进行云存储。在数据中心，系统会处理和分析数据，利用多种人工智能（AI）工具（包括特征工程和机器学习（ML）算法）自动提取有意义且相关的信息。最后，人工智能通过面向服务的计算任务传递所得结果，接收方可以是患者本人或医疗服务提供者；其中，一些初步结果可帮助医生和健康专家作出最终医学诊断，并制定最合适的治疗方案。需要指出的是，从传感、数据采集到数据处理的所有阶段，都需要在物理层、服务层和应用层部署安全机制，以保护敏感健康数据、高层级信息和诊断结果免受网络攻击 [18]。

基于物联网的医疗保健和医疗系统通常包含四层：感知层、网络层、处理层和应用层。

- 感知层：作为最靠近患者的模块，该层负责数据采集，并通过多个可穿戴传感器测量人体的生理参数（例如体温、血压和血糖水平）。所用传感器的数量和类型可能因所考虑的应用程序以及服务质量而异。感知通常在各种医疗保健应用中发挥重要作用，因为感知值是后续处理的输入，并可能影响最终的诊断决策。根据用途，感知数据有两种常见的

表 I 本综述与现有综述的比较

| 参考文献编号 | FL | 元宇宙 | 应用程序 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 医学诊断 | 患者监测 | 研究与教育 | 传染病 | 药物发现 |
| [11] | | ✓ | ✓ | | | | |
| [12] | | ✓ | | ✓ | | | |
| [13] | | ✓ | | | ✓ | | |
| [14] | ✓ | | | | | | ✓ |
| [15] | ✓ | | | | | ✓ | |
| 我们的论文 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

数据存储方式：基于云端和基于服务器的基础设施[19]。

- 网络层：该层负责通信和安全相关活动，即选择适当的数据传输协议，将数据从源端（例如异构传感器、设备和医疗设备）传输到目的端（例如服务器和云端），并采用加密机制保护数据隐私。通信协议有多种，但根据可靠性和有效性的要求，主要分为三类：集中式、去中心化和分层式。在数据传输阶段，可以开发先进的安全方案，以检测和识别网络攻击，例如勒索软件、数据泄露、分布式拒绝服务攻击、内部威胁和欺诈骗局 [20]。

- 处理层：该层涵盖数据管理和计算相关活动，其中运用各种数据分析技术，从原始传感器数据中提取相关且有意义的信息。对于数据管理，主要考察三个方面，包括存储类型（集中式和分布式方案）、处理媒介（基于网络、基站和云端的数据处理方法）以及数据集成（单独机制和组合机制）。对于计算，根据数据类型、应用程序和需求，选择适当的建模方法至关重要。例如，静态建模方法可以生成特定于应用程序的模型，以处理不同患者的同一种疾病。与静态建模相比，动态建模能够在各种复杂的健康场景中实现实时预测和监测，并可应用人工智能技术和机器学习算法来提升系统的整体性能 [21]。

- 应用层：该层管理所有控制、交互、执行及与应用程序相关的活动，患者可在此接收反馈，临床医生则可查看处理层提供的初步分析和诊断结果 [22]。在许多自动化医疗保健系统中，系统会根据学习得到的模型提供所有潜在解决方案和建议；而在手动模式下，系统会向医生提供意见和建议，帮助他们结合自身经验与患者的状况作出决策。此外，各种应用程序均开发了用户界面，可在移动设备和桌面设备上使用应用程序，其中内置的功能和服务对患者而言可能易于使用，而对医疗和健康专家而言则可能较为高级。需要注意的是，基于物联网的医疗保健系统的复杂程度主要取决于服务的数量以及功能的复杂程度。

随着元宇宙逐渐拓展至众多行业领域，它为医疗保健行业带来了许多机遇，将人工智能、虚拟现实、物联网、智能云、协作机器人技术、边缘计算和量子计算等尖端技术相结合，为医疗保健开辟了新方向，并带来令人惊叹的体验。为了准确界定元宇宙医疗保健的定义，它应与借助医疗／健康物联网实现的虚拟现实／增强现实眼镜进行交互 [23]。增强现实通过操控视觉元素和图形角色来改变现实世界，使用户能够通过智能眼镜等增强现实设备查看周围的三维环境。虚拟现实则创建一个完全由计算机生成的数字世界，用户可借助虚拟现实头显、手套、控制器及其他数字传感器沉浸其中。由于医疗保健和医学数据存储在集中式服务器上，面临较高的失窃风险，服务提供商意识到，他们应构建一个有效且安全的健康诊断平台，以应对日益增长的每日病例量。在此背景下，元宇宙已在数字疗法领域展现出显著优势：在触觉传感器和三维交互的支持下，虚拟现实和增强现实技术为医疗应用和服务提供了新的可能 [24]。图1展示了元宇宙在医疗保健领域即将带来的影响。元宇宙医疗保健的一些关键优势有望彻底改变整个医疗保健行业，具体如下：

- 医学培训与教育：元宇宙为医疗保健行业开启了一个新时代，其中，认知疗法和康复被视为可在元宇宙中发展为内置服务。服务提供商可与患者及其他临床医生高效互动，开展远程协作诊断，模拟拟议治疗的效果，并体验更加个性化技术，以实现更好的诊断 [25]。在元宇宙中，医学生和受训人员可通过交互式全息投影深入了解人体生理学 [26]。

- 改变人们的生活方式：基于元宇宙的数字平台让用户能够沉浸于相互连接的虚拟世界，并产生始终身处其中的感觉，从而获得沉浸式体验。作为元宇宙在心理方面的一些显著长期影响之一，




图 1. 元宇宙在医疗保健领域的未来影响。

精神科医生和心理治疗师可以利用元宇宙中的沉浸式体验，治疗多种棘手问题，例如进食障碍、焦虑障碍、妄想、精神病性障碍和幻觉[27]。此外，元宇宙中的游戏化和个性化可以改变人们当前的生活方式。例如，建议专业人士和患者遵循健康的生活方式，并通过代币或奖励的形式获得激励。

- 互联社区：最后但同样重要的是，元宇宙有望成为理想的互联枢纽，让人们在日益数字化的社区中进行社交[28]。在元宇宙医疗保健中，面临相同健康问题或有相同需求的患者可以分享体验、提供建议，并长期互相支持。医院工作人员可以通过虚拟空间无缝跟踪时间和工作量，同时利用从现实世界收集的数据来解决问题。换言之，元宇宙推动了新一代医疗设施、健康保健机构和医疗中心的发展，并将它们全部整合在同一个元宇宙中。

*B.* 传统医疗保健中的联邦学习

随着计算机软件和硬件技术的快速发展，患者、医疗保健组织、制药行业、保险公司等来源所提供的医疗保健数据越来越多。如今，借助这些数据，数据科学技术获得了从数据中提取洞见、提升医疗保健服务水平的难得机遇[29]。然而，由于严格的隐私法律和数据所有权方面的考量，几乎不可能获取规模庞大、种类繁多且集中存储的医疗保健数据集。另一方面，人工智能模型需要越来越多的医疗保健数据，才能做出更好的决策。联邦学习为解决这一问题提供了有前景的方案，下面将讨论采用联邦学习相较于传统方法的优势。

- 隐私：联邦学习（FL）能够在不损害医疗保健数据隐私的情况下进行训练。联邦学习（FL）在保护隐私的同时，具有连接不同医疗保健数据源的巨大潜力。联邦学习（FL）使用中央服务器训练一个共同的全局模型，同时将所有敏感数据保留在其所属的本地机构中[30]。因此，医疗保健机构可以通过参与协同训练而不向第三方披露数据，构建可靠且值得信赖的模型。由此，它为产业界和研究领域带来新的机遇，并提升全球医疗保健水平。联邦学习（FL）能够对几乎所有利益相关方和整个治疗周期产生积极影响，为临床医生提供更好的诊断工具（包括改进的医学图像分析），促进协作并加速药物发现，通过协助识别

相似患者实现真正的精准医学，并降低制药公司的成本和产品上市时间[31]。

- 降低计算成本和功耗：随着收集的数据不断增加，人工智能模型的准确率也会提高。然而，如果所有医疗保健数据都存储在同一地点，训练模型将耗费更多时间和资源 [32]。采用联邦学习后，无需将数据存储在特定地点。相反，可以根据本地模型共享的参数来训练全局模型。与传统模型相比，联邦学习不需要获取本地模型中的任何个人数据，从而降低计算资源成本和功耗 [33]。

- 个性化：联邦学习还允许在本地网络中训练本地模型，并在云端进行全局模型聚合。分布式数据集可能因各个本地节点而异，是云服务器用于训练的主要数据来源。由于共享模型仅考虑所有健康用户的共同特征，因此可能无法很好地适用于特定用户 [34]。因此，每位用户都会将学到的全局模型与自己的独特健康数据相结合，以实现个性化健康监测。本地设备从云端获取全局模型，并训练各自的模型，以提供定制化服务。此外，利用云端的全局模型为每台设备创建平衡数据集，从而缩小个性化模型之间以及个性化模型与全局模型之间的差异 [35]。

### *C.* 医疗保健元宇宙平台

元宇宙旨在提供永久、去中心化、协作且互操作的机遇和商业模式，使企业能够拓展其数字化运营 [10]。如图 2 所示，通用的医疗保健与医疗元宇宙平台可分为七层，自底向上依次为基础设施、人机界面、去中心化、空间计算、经济、发现和体验；不过，这种层级划分并非严格固定，可根据多种指标进行调整，例如应用程序、所提供的服务、可扩展性和需求。

基础设施：最底层的基础设施层涵盖构建完全沉浸式、功能完善且互操作的元宇宙所需的各类技术基础设施 [36]。网络与无线通信技术（包括 5G、6G 和 WiFi）、云存储架构、虚拟现实系统、微机电系统以及图形处理器，都是构建医疗元宇宙的主要技术集群，可实现去中心化的医疗保健机构与医疗中心之间的无缝连接。目前，元宇宙建立在高性能计算机、集成医疗电路、通信组件、医疗保健与医疗设备以及混合现实设备的基础之上。

人机界面：人机界面层涉及硬件或设备，使用户（医生、临床医生和患者）能够在虚拟世界中获得真正的沉浸式体验 [37]。这一层包括可穿戴设备，例如虚拟现实手机、虚拟现实头显、带有触觉功能的手套、智能眼镜、手势与语音交互设备、微型生物传感器、智能隐形眼镜以及人脑机接口系统。借助触觉技术，用户无需触摸屏幕或通过按钮控制，即可在空中操作电子设备（例如，拿起 3D 肺部模型并放大、旋转以进行诊断）。

去中心化：在医疗保健领域，元宇宙应当是去中心化、开放且广泛分布的，也就是说，它不由单一实体治理，不属于任何人，却同时服务于所有人。去中心化涵盖区块链、自主主权数字身份机制、智能合约和开源平台，旨在支持并促进可扩展环境中分布式计算和医疗微服务的持续发展，为众多患者和医疗专家社群提供服务 [38], [39]。许多去中心化医疗元宇宙项目可以利用区块链技术，以透明且可追溯的方式提供患者所有的私人数据（例如传感数据、医学影像和电子健康记录）以及可共享的临床体验（例如诊断和治疗方法），从而开展交易和交互。

空间计算：空间计算代表着现实与虚拟的结合，模糊了现实世界与理想世界之间的界限。在医疗保健领域，空间计算涵盖了用于创建3D沉浸式体验的所有材料、库和人工智能工具，可应用于现实世界中的医疗保健和健康应用，以及医疗服务 [9]。例如，医学生可以在基于元宇宙构建的虚拟手术培训应用程序中，在逼真的环境里练习并检验自身能力，而无须承担风险。一些3D设计引擎（如Unity和Unreal）支持使用图形处理器进行3D建模和渲染，以呈现几何图形和动画。空间计算还有助于整合来自不同设备和来源的多样化医疗保健和医学数据，以便借助虚拟现实设备进行可视化和分析。

经济：该层负责元宇宙中的经济建立与发展，患者、医生、医疗保健机构和医疗集群可以在其中以许多独特的方式管理其业务。患者可以允许服务提供商将其私人数据用于研究活动及其他非商业用途，同时，服务提供商将通过虚拟商品、资产和激励来奖励他们的贡献。医疗保健机构和医疗机构提供了一些经济活动，例如管理数字内容的虚拟市场（如医学培训、远程协作诊断和治疗计划），以及交易健康用品和医疗设备（如急救包、体温计和轮椅），其中应在虚拟世界中设置零售店铺 [40]。事实上，通过创建一个虚拟空间，使患者和医生以及内容创作者和设计师能够在元宇宙中建立联系并进行交流，该层在经济扩张方面具有巨大潜力。

发现：发现可理解为一个广告生态系统，其中包括店铺展示位、评分系统，以及来自用户和服务提供商的推荐系统。这一层传达了通过持续拉取和推送信息所能实现的体验式学习。

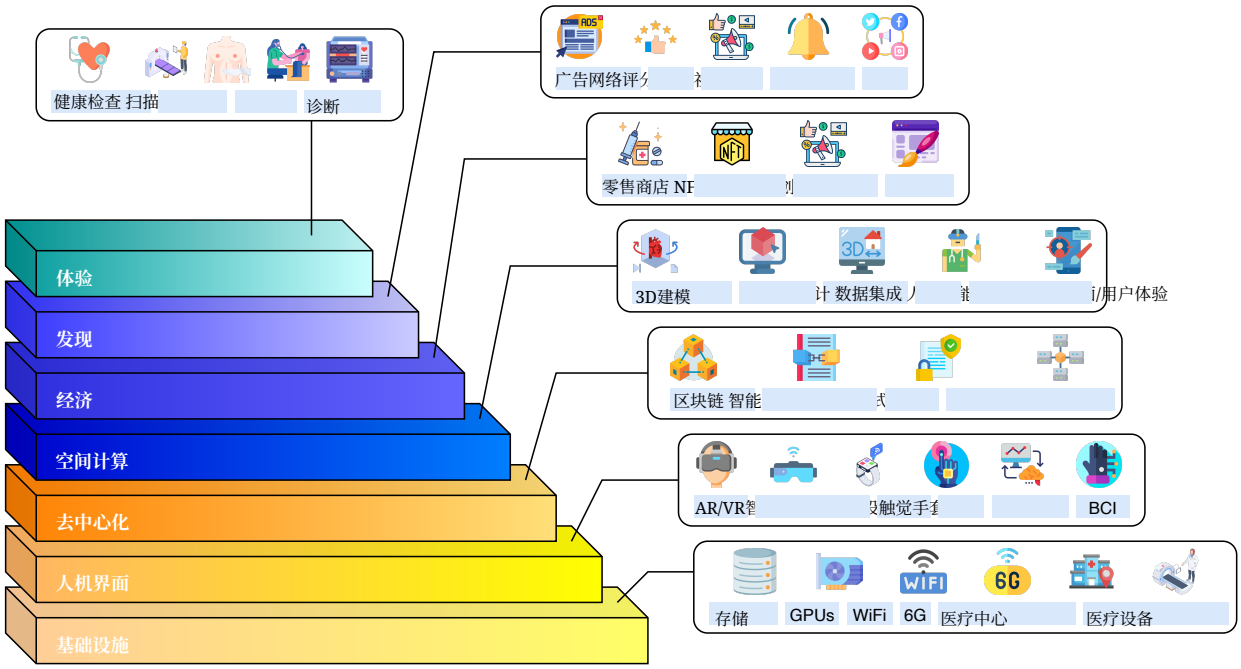


图 2. 医疗元宇宙平台。

尤其是在医疗保健和医疗领域的元宇宙中，拉取模式代表一种入站系统，患者会主动寻找有用的信息和体验（例如其他患者分享的疾病症状和治疗方案）；而推送模式则更偏向出站，并包含有关患者在元宇宙中将体验到什么的通知流程 [41]。元宇宙中通常会部署一些主要模块以实现盈利，包括入站模块中的搜索引擎、社区驱动内容、应用商店和实时在线状态，以及出站模块中的展示广告、通知、电子邮件和其他社交媒体。

体验：这一层涵盖了大多数个人和企业关注的内容。用户（包括患者和临床医生）在数字化环境中通过疾病症状申报、健康与医疗检查、远程协作诊断、医疗培训与教育等数字内容，与虚拟对象及彼此开展各种交互活动。众所周知，元宇宙不只是现实的简单 3D 呈现；它被视为对物理空间和产品进行彻底虚拟化，从而构建一个无缝衔接的虚拟现实生态系统，并提供内置服务和应用程序。例如，交互式虚拟现实手术平台可以帮助医生找到感兴趣的解剖结构，并利用从训练所得的人工智能模型中获取的有意义信息，实时提升医学图像的质量。

## III. 医疗元宇宙中的联邦学习优势

本节重点介绍在医疗元宇宙环境中采用联邦学习的潜在优势，例如增强隐私保护、改善互操作性、数据管理和跨模型使用、提升安全性、实现自动化与智能化、提高可扩展性以及支持低延迟。

### *A.* 隐私保护的提升

借助人工智能、增强现实/虚拟现实/混合现实、区块链和数字孪生等技术，元宇宙为医生和患者提供沉浸式、互动式的医疗体验。元宇宙环境可以收集患者的详细信息，例如脑电波、健康相关数据和生物识别数据，从而构建一个完整的医疗保健系统，模拟物理世界中的医疗保健系统，并利用这些信息了解患者的身体状况、生理反应，以及患者的身体在特定治疗方案下会产生何种反应。然而，如果这些数据落入恶意用户手中，就可能遭到篡改，进而引发严重问题，例如误诊、治疗不当和药物给药不当。因此，在医疗元宇宙中，保护数据隐私至关重要 [8]。联邦学习是一种保护隐私的机器学习机制，使不同的参与实体能够共同训练机器学习模型，而无需实际共享数据，只需共享模型参数。由于特定患者的大部分数据通常由单个边缘设备或医院保存，联邦学习机制有助于直接在边缘设备上训练数据。这使集中式医疗机构能够改进其模型，而无需实际收集用户的私人数据。

### *B.* 不同利益相关方之间互操作性的提升

医疗元宇宙可以从多个医疗中心/医院收集数据，以确保涵盖不同人口统计特征的患者多样性 [42]。然而，在元宇宙环境中，不同利益相关方之间的数据互操作性是一项重大挑战，因为从多个设备/元宇宙收集的数据需要能够供可信方访问。此类数据可用于

发现患者相似性 [43],远程患者监测 [44],并预测死亡率。为了解决这些问题，可以利用联邦学习汇集来自各个边缘节点/医院的数据，在边缘设备上对数据进行训练，并将更新发送至服务器，从而在元宇宙中进行全局模型训练，减少局部偏差，并为罕见疾病或大流行期间提供定制化且有效的解决方案。因此，可以利用联邦学习机制解决数据互操作性问题，为患者提供优质医疗保健。

### *C.* 更完善的数据管理与跨模型使用

医疗元宇宙的数据源包括传感器、增强现实/虚拟现实设备、可穿戴设备、扫描设备及其他医疗保健组件。这些广泛分布的数据需要汇总，以便在医疗保健场景中做出智能决策。这对于开展协作研究尤其有用，例如构建用于疾病诊断的统一全局模型、识别疾病模式趋势等。然而，由于数据存在异质性，在中央服务器上训练数据颇具挑战性 [45]。在此可以采用联邦学习机制，通过在设备本身上训练数据来解决数据异质性问题。纵向联邦学习，也称为异构联邦学习，有助于训练共享相同样本 ID 空间但特征空间不同的数据集。因此，联邦学习机制能够确保在不同医疗元宇宙内部及彼此之间实现适当的数据管理和跨模型使用。

### *D.* 额外安全保障

元宇宙环境中的主要安全挑战包括用户身份欺骗和账户入侵，进而导致虚拟化身被入侵者接管。在医疗元宇宙中，这一点至关重要，因为入侵者可能利用从医院、患者及其他医疗服务提供者处收集的数据，篡改数据本身，或操纵疾病诊断和药物提供方面的决策 [46]。在此类场景中，联邦学习可以利用安全聚合机制，保护边缘设备的模型更新隐私。模型更新的实际数值或来源因此得到保护，从而降低数据归因和推理攻击的可能性。因此，联邦学习机制可以为医疗元宇宙提供额外的安全保障。

### *E.* 自动化与智能

医疗元宇宙使医疗专业人员能够为患者提供优质服务，而过去由于地理限制等原因，这一点尤为困难。随着增强现实/虚拟现实、人工智能、数字孪生和区块链等关键赋能技术的发展，医疗元宇宙中的自动化已可应用于诊断、账单处理、预约安排、数据共享、资产追踪和治疗后护理等所有应用领域。然而，自动化流程需要具备更高的能效并且运行得更快 [47]。由于联邦学习模型无需收集和聚合来自不同边缘设备的数据，整个学习过程得以加速，从而提升自动化及相关决策的能效和智能响应能力。因此，借助联邦学习从每个客户端进行学习，同时保护数据隐私，可以显著改善元宇宙中全面、智能且自动化的医疗保健场景。

### *F.* 提升可扩展性

医疗元宇宙是一个沉浸式共享环境，涵盖患者和医疗服务提供者所处的众多3D虚拟世界。然而，构建可扩展的元宇宙颇具挑战，因为几乎不可能使用传统服务器 [48]。医疗元宇宙中的可扩展性问题涉及用户在虚拟与现实世界中的大量交互、场景在外观和细节方面的复杂程度，以及用户之间各种交互的范围。医疗元宇宙架构应以这样的方式构建：既不损害系统效率，又能为患者和医疗服务提供者提供最佳的个性化体验。联邦学习技术可通过为诊断和治疗等各种医疗应用提供去中心化系统，帮助解决医疗元宇宙中的可扩展性问题。该去中心化系统可使元宇宙医疗保健场景中的各类用户高效并发地使用系统。

### *G.* 低延迟支持

网络延迟是指网络通信中的延时。在医疗元宇宙中，网络延迟尤其对手术等关键应用发挥着重要作用，因为这类应用需要快速响应，才能提供安全、可靠且良好的体验。任何通信延迟都可能造成严重后果，甚至危及生命。为了支持沉浸式元宇宙体验，延迟需控制在约 0–20 毫秒。医疗元宇宙需要更低的延迟，以支持个性化医疗建议、协作手术，以及不同地点的患者与医生之间的快速响应服务 [49]。联邦学习支持协作模型训练，无需将数据共享至中心化服务器，从而最大限度地减少边缘设备与医疗元宇宙环境之间所需的数据传输量。因此，联邦学习有助于在医疗元宇宙环境中提供个性化医疗建议、疾病诊断，以及其他预测和推荐系统。图 3 总结了联邦学习在医疗元宇宙中的优势。

## IV. 应用程序

本节讨论了联邦学习赋能的医疗元宇宙相关应用。所探讨的医疗保健应用包括医学诊断、患者监测、协作研究、医学教育、传染病或大流行病以及药物发现。

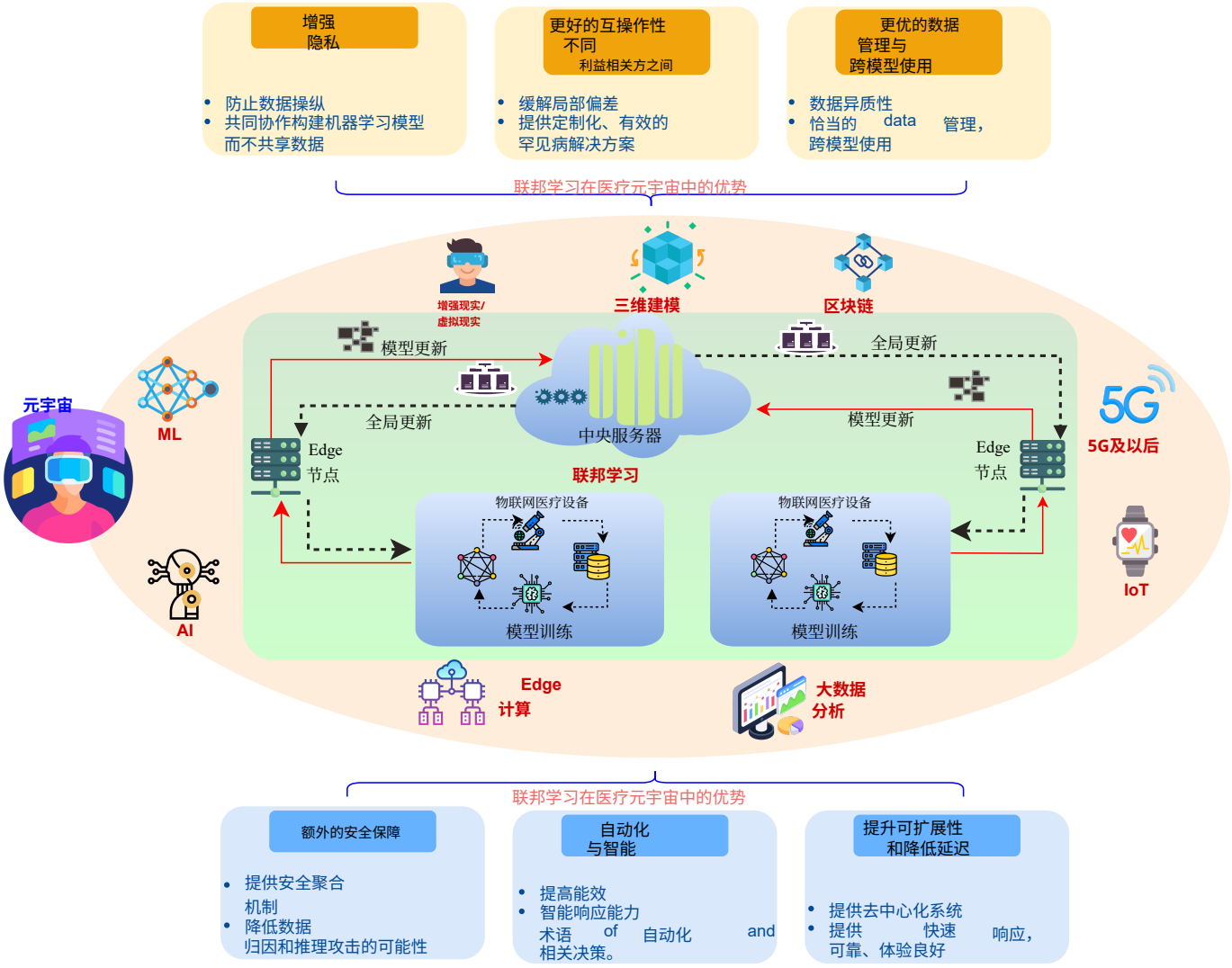


图 3. 联邦学习在医疗元宇宙中的优势。

### *A.* 医学诊断

医学诊断是根据患者的症状识别其疾病 [50]。传统的疾病诊断通常在医疗中心或医院现场进行，患者需要接受医生检查。然而，在紧急情况下，传统诊断方法可能导致治疗延误，进而造成生命损失。因此，人们引入了远程医疗，以便远程监测患者 [51]。此外，人工智能的迅速发展已推动各个领域进步，包括医疗保健。通过模仿人类的认知能力，机器学习模型可以利用从不同医疗中心收集的数据进行训练，从而更好地判断疾病诊断结果 [52]。然而，远程医疗的一项显著局限是，患者无法清楚地表达自己的症状或受伤程度，因为他们无法与医疗专业人员面对面交流。

在这类场景中，元宇宙是理想的解决方案。增强现实、虚拟现实、数字孪生和区块链等赋能技术有助于创建真实世界的数字模拟。Medi-

医疗专业人员甚至可以借助元宇宙提供个性化诊断，医生和患者能够在共享、持久且沉浸式的虚拟世界中互动 [11]。机器学习模型可以利用在元宇宙环境中通过可穿戴设备及其他系统收集的数据来训练模型。然而，这要求全部数据都存储在进行训练的系统中。此外，由于收集的数据可能包含患者的私人信息，任何此类信息泄露都可能造成严重后果。例如，元宇宙环境需要真实世界的数据，通过数字孪生为患者创建数字仿真 [53]。可以为患者群体、个人或器官创建数字孪生。通过操控这些数字孪生，可以在决策过程中获得清晰的见解。数据可能通过增强现实/虚拟现实设备和可穿戴设备等不同来源收集。如果恶意用户获取了这些收集到的数据，就可能操纵数据，导致错误诊断和不当治疗。因此，模型训练应在不暴露患者私人信息的情况下进行。

以医疗元宇宙为例，假设需要构建一个统一的全局疾病诊断模型。集中式医疗元宇宙需要从各种边缘设备或其他元宇宙收集数据。然而，患者数据具有敏感性，以原始形式将数据共享至中央服务器以训练全局模型，可能违反HIPAA规定[54]。但是，机器学习模型若无法获取实际数据，就无法进行训练。联邦学习通过不共享原始数据本身，在此类场景中构建全局疾病诊断模型。在横向联邦学习中，各设备上的所有数据集都使用同一组特征[55]。首先创建一个全局模型，并将其广播至边缘设备或参与其中的元宇宙。随后，各方使用自己的数据集在本地进行训练。只有与模型相关的参数更新才会发送回中央服务器。服务器对来自不同客户端的更新进行平均后，更新其原始模型，再将更新后的模型发送给所有参与的客户端。此过程会持续进行，直至达到预先设定的轮数或获得最优结果。由于多个设备或元宇宙可以在中央元宇宙服务器的协调下联合训练模型，同时将训练数据保留在客户端本地，因此联邦学习机制在确保元宇宙环境中的数据隐私方面发挥着重要作用[56]。

### *B.* 患者监测

元宇宙彻底革新了远程患者治疗和监测。区块链、增强现实、虚拟现实、混合现实和去中心化应用的使用，为元宇宙的设计与开发问题提供了解决方案。元宇宙能够实现实时患者监测，确保丰富的人际交互并重现线下体验。为此，人们使用沉浸式三维界面，为监测地理位置分散的患者提供生动、逼真的用户体验，并使患者与医疗服务提供者之间能够进行同步的实时数字交互。医疗保健领域的远程医疗是以远程服务方式提供医疗服务的一种形式。新冠疫情激增期间，人们显著感受到远程医疗的必要性19[57]。2020年疫情发生之前，43%的医疗保健机构为患者提供远程治疗，而如今这一比例已达到95%[58]。元宇宙技术的应用减少了医生和护士进行常规线下问诊的需求，进一步减轻了他们各自的工作负担，使他们能够远程治疗轻微的健康问题。通过虚拟现实进行远程医疗问诊，只需使用简单的头显，人们便能与全球各地的顾问和专家进行交互。磁共振成像和扫描可在附近的医疗机构进行，数据则可传输给位于世界任何地方的医疗专业人员。这类服务对医疗专业人员严重短缺的国家极为有益。另一方面，农村和偏远地区的患者无需长途跋涉即可获得医疗服务[7], [59]。

值得一提的是数字孪生在这方面的作用：可以使用测试模型来了解患者在外科手术后可能如何康复，或术后患者对特定药物会有何反应[60]。元宇宙还推动了医疗可穿戴设备在患者和医疗服务提供者中的应用。这些设备能够在癫痫发作、慢性阻塞性肺疾病急性加重或远程患者出现任何医疗异常等特殊情况时，向急救人员和护理人员发出警报。可穿戴设备使医生能够获取高质量数据，并利用人工智能进行必要的推断和预测，从而加快并及时开展治疗。这些技术还支持借助元宇宙进行日常检查，助力必要的决策。对于精神疾病患者，基于元宇宙的远程医疗治疗十分有效，能够帮助他们应对引发焦虑和抑郁的情境。利用增强现实和虚拟现实的元宇宙技术，医疗专业人员可以密切监测此类患者的远程环境，并在可能引发焦虑、愤怒或精神病发作的情况下提醒其家人[12]。

在这方面，联邦学习（FL）的应用至关重要。利益相关者之间需要进行安全的数据传输，以确保远程治疗设施能够顺畅运行。传统系统将医疗记录存储并维护在集中式计算机中，容易遭受盗窃和数据篡改。由于患者身处异地，联邦学习能够提供一个分布式平台，运用智能技术开展多机构协作，同时保障患者数据的隐私。在远程监测中，联邦学习能够提高网络容量，并支持服务质量（QoS）。这使患者能够获得更佳的体验，医疗专业人员也可以顺畅地监测患者，并立即获取异常信息，确保及时、快速地开展治疗。此外，随着人口持续增长、医疗专家日益短缺，联邦学习具备可扩展性，能够应对庞大的患者数量；相当数量的患者可以通过元宇宙接受远程治疗，从而减轻医疗专业人员的负担[61]。

### *C.* 协作研究与医学教育

随着虚拟现实及相关技术的兴起，数字化转型已在各个领域受到积极推动，尤其是在协作研究领域。此外，随着元宇宙技术不断发展，虚拟现实也迅速普及。这些技术的应用日益广泛，降低了相关实施成本，也让普通用户更容易使用[62]。实验与研究是高等教育项目不可或缺的组成部分；研究人员往往发现，如果没有亲自动手实验，就难以学习和记住所学内容。出于同样的原因，实验结果的论证也缺乏真实性。基于虚拟现实的模拟实验室提供了必要的实验和动手学习体验。在生物医学研究中，学生可以使用

化学品，在基于虚拟现实的安全区内开展各种关键实验，而不会对财产或人身安全造成任何风险 [63]。化学品或相关资源的可用性难题也得以消除，实验可以重复多次，以确保结果得到充分论证。此外，风险的消除有助于激发学生的创新与创造力，使他们能够设计和开展实验，从而取得突破性成果与发现，为科学发展作出巨大贡献 [64]。元宇宙能够为协作研究带来变革性的体验，促进各地实验室所在化学品价值链中基于数据的决策改进。对数字孪生采取整体性方法，可以从协作项目设计的早期阶段着手，改进过程与控制系统工程。采用先进的仿真与建模技术，能够让全球各地的多个团队共同开展项目，建立稳态设计模型，并将其整合到动态模型中。这些模型可通过实时动态仿真进行测试，为过程工程实施提供支持 [65]。虽然元宇宙有助于开展此类协作研究，但多个利益相关者之间的资源分配差异也令人担忧，可能导致适得其反的后果。联邦学习通过确保安全不受损害来实现协作均衡，同时还可以组建规模较小的协作联盟。在这种情况下，每个客户端都可以与其他团队成员协作，优先纳入最能改进模型的成员，并隔离贡献最小的成员。联邦学习能够促进多机构协作，同时保障数据隐私。模型学习在不向参与机构共享数据的情况下处理所有可用数据；模型训练则分布在所有数据所有者之间，最终汇总各方结果 [66]。

在医学教育领域，元宇宙使医疗专业人员能够在接受医学教育的同时，通过基于仿真的培训相互交流。例如，在外科手术中，使用元宇宙还需结合对器械使用的理解，以具备灵巧抓握能力。因此，有必要跟踪所采用的技术，以提升元宇宙技术的灵活性和适应性。医生和专家可以利用元宇宙技术培训其他医生和医务人员；借助虚拟现实，培训者能够详细查看人体，并以 360 度视角观察患者病症。同样，也可以利用物联网、数字孪生、6G网络、机器人、边缘、云端和量子计算来复现医疗程序，从而开发用于医学诊断和治疗的虚拟现实、增强现实及混合现实系统 [67], [68]。在手术中，在元宇宙环境中使用机器人技术，可以提高外科手术的精度和灵活性。元宇宙中的云端和实时通信技术使医学生能够以最佳精度练习技能，确保患者在合适的地点和时间获得满意的医疗服务。元宇宙环境中将化身、三维模型、混合现实和空间设置等不同类型的资产整合为一个整体使用。随着学生人数增加，数据和通信标准也有望迅速发展，从而促进跨元宇宙通信。联邦学习有助于在不同平台和网络之间更简单地传输数据，同时确保隐私、可扩展性和互操作性。然而，推广此类服务需要在多个机构之间共享大量医学影像数据，供医疗专业人员和研究人员开发数据驱动模型，以提供更优质的医疗保健服务。各医疗中心可用的数据量有限，仅使用本地中心的数据训练深度学习模型，无法达到所需的性能水平。最佳解决方案是收集各个中心的数据并汇总至一个中心，但这样做会带来损害数据隐私的风险。对多个中心的现有数据使用隐私保护算法，也能达到类似的隐私保护目的。在这种情况下，使用联邦学习可以部署大规模机器学习模型；这些模型利用各中心的医疗保健数据进行训练，无需共享敏感信息。联邦学习框架无需传输数据，而是可以在本地数据集上训练通用模型，之后再在各数据中心之间传输该模型 [25]。

在医学教育中，培训质量取决于患者的多样性，以及特定医疗中心处理疑难病例的数量。考虑到地理位置，不同医院的患者特征差异显著：与二级医院相比，三级医院接诊的疑难病例数量更多。基于此类培训模式，在某家医院评估非典型患者可能并不妥当，因为该模式缺乏从以往处理过的非典型病例中学习的经验。医疗元宇宙中的联邦学习模型能够整合多个机构的数据，并结合医疗专家的虚拟在场，从而为非典型患者提供更准确的治疗方案，即使是在二级医疗中心也能如此。还可以通过录像核查医学生进行医疗操作的考试表现。这将提升评估的质量和标准，使身处地理位置遥远地区的医学院专家教师能够利用虚拟现实或元宇宙中的相关技术评估学生的表现。同样，也可以使用虚拟现实开展互动问答，让考官进入人体内部，并就人体解剖学细节或疾病诊断提问。然而，互操作性、可扩展性和隐私可能会成为问题。随着医学院和学生人数增加，此类互动考试可能面临潜在的延迟问题。此外，由于这是考试，数据隐私也是一项挑战。联邦学习能够帮助应对所有这些挑战，使医疗专业人员无需共享数据即可开展考试。此外，联邦学习中的去中心化系统可使多名医学生在元宇宙医疗环境中有效地同时参加上述互动考试 [69]。

*D.* 传染病/ 大流行

COVID-19大流行为元宇宙技术的发展创造了绝佳条件。这场大流行在很大程度上影响了各国的经济和社会稳定。长期隔离甚至造就了一个充满社交焦虑的社会 [70]。然而，这场大流行推动了教育、医疗保健和娱乐领域的重大技术进步。在线课程、虚拟会议、远程医疗和OTT电影发行的广泛普及，都是这场大流行带来的结果 [71]。大流行监测是了解疾病传播规律的重要手段，有助于采取适当措施遏制疾病传播 [72]。通过构建能够整合交通运输、零售和电信等多个领域数据的平台，可以提高监测的透明度和效率。然而，即使拥有先进技术，由于疾病传播风险，这种整合在现实世界中仍难以实现。

在此可以通过创建现实世界的数字世界副本，并了解现实世界的行为及其反应来应用元宇宙。这样的元宇宙实现有助于更好地发现大流行并做出有效应对。然而，由于从不同边缘设备收集的数据具有异质性，如何高效实现跨模型使用成为一个重要问题。此外，在此类场景中，安全和隐私发挥着重要作用，因为各国需要共享数据，以创建全球疾病预测和模式评估模型，从而采取重要措施遏制疾病传播。医疗元宇宙在进行手术、患者监测和疾病诊断方面也已证明大有裨益 [73]，[74]。在这类场景中可以采用联邦学习，因为它能够提供更高的安全性、更好的数据管理和跨模型使用能力。 [15]中的作者采用联邦学习检测与COVID-19 相关的计算机断层扫描（ CT ）异常。以COVID-19大流行期间为例，不同国家的患者感染了不同变种的冠状病毒。因此，适用的药物方案也会因病毒所在地区和类型而异。此外，各国需要采取的预防措施也存在显著差异。因此，尤其是在大流行期间，需要个性化方案。联邦学习支持的医疗元宇宙能够通过创建全局模型来应对此类情况，任何参与的客户端都可以使用该模型训练和测试自己的数据。这有助于为最终用户提供定制化方案。在此类场景中采用联邦学习，不仅有助于实现数据隐私保护，还能解决元宇宙医疗环境中的可扩展性问题。与在边缘设备上本地训练数据的传统方法相比，该技术在保护患者隐私方面表现高效。因此，联邦学习无需将原始数据共享给任何集中式元宇宙服务器，即可帮助构建全局模型，从而保护数据免受任何恶意用户侵害。

*E.* 药物发现

药物发现是通过结合实验、计算、临床和转化模型来识别潜在新型治疗性实体的技术。机器学习模型在此发挥着重要作用，可改进苗头化合物发现、靶点识别、苗头化合物到先导化合物以及先导化合物优化等应用中的决策 [75]。研究人员若能合作构建所需模型，便可获得更好的实验结果。计算生成算法也用于从头药物设计（DNDD），以了解并设计符合既定约束集合的新型化学实体 [76]。然而，开展新药发现实验至关重要，需要投入大量人力和费用。

医疗元宇宙可以在此类场景中发挥作用，例如创建现实世界实验室的虚拟仿真，或打造全新的实验室空间，让多家医院和研究人员能够通过向中央医疗机构共享原始数据集，或仅共享中间结果 [77]，来开展药物设计实验。然而，正如下文所述，此类实验研究也面临重大挑战。若以原始形式共享数据，保护数据隐私将十分困难。如果参与实体决定仅共享中间结果，药物发现过程也未必总能成功，因为中央实验室无法了解其中的大部分过程。此外，此类场景还需要可扩展的解决方案，因为现有方法可能难以处理如此庞大的数据。可在医疗元宇宙中应用联邦学习，以确保药物发现过程中的数据隐私和可扩展性。这有助于训练全局模型，以支持多个关键应用中的决策，例如预测3D蛋白质结构、药物-蛋白质相互作用、分析药物疗效，以及在元宇宙内部和不同元宇宙之间确认安全性生物标志物。设想多个国家同意利用地理分布各地患者的数据，共同开发全局药物预测模型 [78]。相关药物方案会因疾病的地域和类型而有所不同。在这种情况下，针对该疾病的药物发现研究需要涵盖所有此类变异的数据，而不能偏向某个特定地区或群体。因此，需要跨机构数据，以便对该病毒开展全面研究，从而发现针对这种致命病毒各变异株的有效药物方案。在此类场景中，联邦学习发挥着重要作用，能够在地理位置分散的多个研究机构之间安全传输涉及病毒分子动力学的机密数据 [79]。基于联邦学习的元宇宙框架具备可扩展性和互操作性，能够让全球各地的科学家协作，利用跨机构、跨国家大型数据集开发适当的药物方案，从而制定定制化且高效的方案。另一项重要应用是了解有助于预测癌症药物反应的分子特征。 [14] 中的作者开发了一种用于定量构效关系分析的横向联邦学习模型，

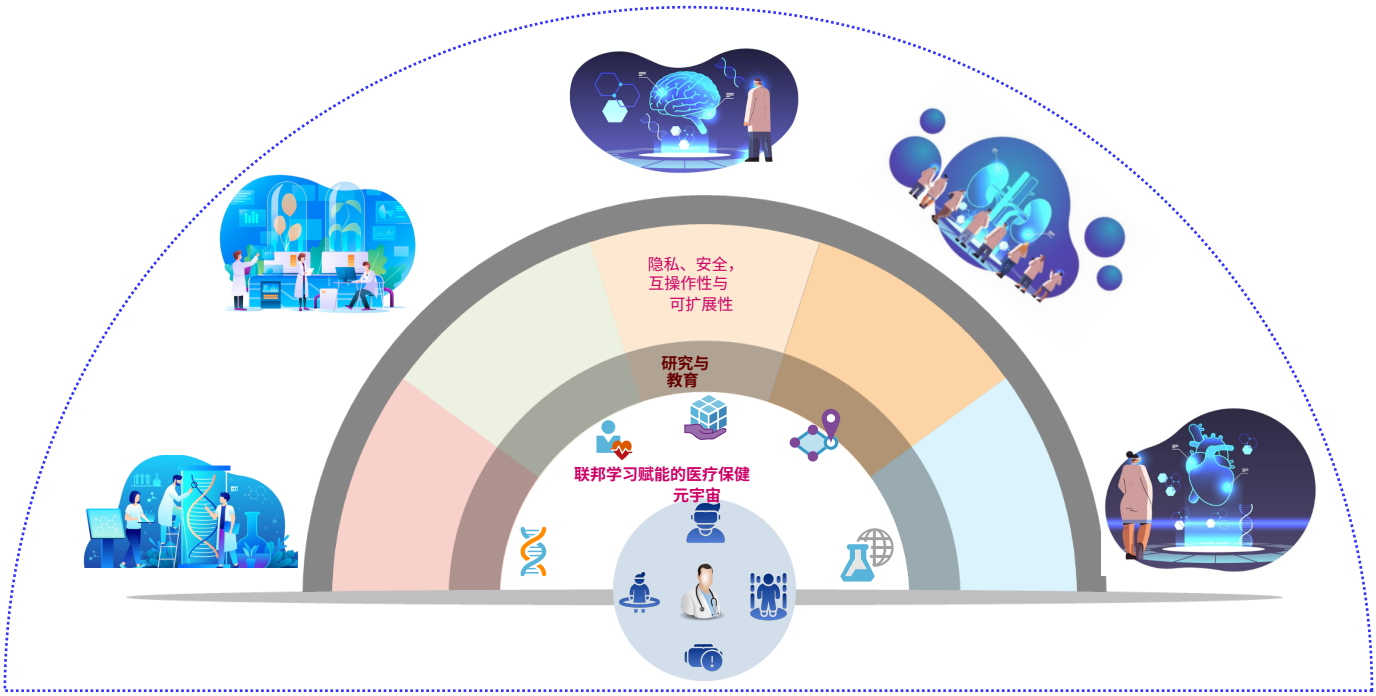


图4. 支持联邦学习的医疗元宇宙应用程序。

ysis。由于这些应用都至关重要，且需要可扩展的解决方案，因此，在医疗元宇宙中，联邦学习是解决药物发现过程相关问题的有效方案。图4展示了联邦学习赋能的医疗元宇宙的应用。表II概述了联邦学习在各类医疗元宇宙应用中的技术要点。

## V. 挑战与未来方向

本节将讨论联邦学习在医疗元宇宙中的若干挑战与未来方向。

### *A.* 有限的计算能力

*1)* 问题介绍：联邦学习通过汇集元宇宙中多个去中心化医疗客户端的信息，使医疗元宇宙能够构建全局模型。联邦学习支持在医疗元宇宙中进行设备端训练，并根据本地模型更新来更新全局模型，同时保护客户端的本地隐私数据。联邦学习为医疗元宇宙带来了诸多优势，包括可扩展性和数据隐私。然而，医疗元宇宙中使用的医疗物联网设备，例如手术机器人和低成本计算设备，处理能力、带宽和存储都有限。这给联邦学习在医疗元宇宙中的应用带来了挑战。

*2)* 可能的解决方案：边缘计算是克服当前挑战的一种潜在解决方案。靠近数据源且需要高带宽、低延迟的应用程序可从移动边缘计算中受益。例如，为了节省能源和计算资源，设备可以将复杂任务卸载到附近的边缘服务器。由于边缘服务器与用户的距离远近于云服务器，因此能够以极低的延迟提供服务，使元宇宙能够交付服务。采用分层云原生技术可提供充足的计算和存储资源。为了提升设备的性能，需要适当结合边缘和基于云的应用 [80]。

### *B.* 物理世界与虚拟世界的同步

*1)* 问题简介：医疗元宇宙面临的一个关键问题是现实世界与虚拟世界的同步。在联邦学习赋能的医疗元宇宙中，为患者诊断或药物研发创建基于医疗保健的全局模型，需要从各种设备和传感器获取实时数据。为了将数据从物理世界传输到联邦学习赋能的医疗元宇宙，需要一个可靠且延迟极低的网络。

*2)* 可能的解决方案：6G网络是解决现实世界与虚拟世界同步问题的一种潜在方案。6G运行于太赫兹频段，峰值速率可达 1T b/s，并能提供低于 1 ms 的超可靠低延迟通信。6G无线网络能够显著提升联邦学习赋能的医疗元宇宙的整体体验质量 [68]。

### *C.* 隐私与安全

*1*）问题简介： 由于模型训练在本地进行，只有模型参数会发送至联邦学习服务器，因此联邦学习能够保护医疗元宇宙中每位参与者的隐私。然而，在训练期间与医疗元宇宙中的其他用户共享模型更新，仍可能让对手或入侵者获取私人数据。医疗元宇宙中的联邦学习也容易受到通信安全问题的影响，包括干扰

表II 医疗元宇宙应用中联邦学习的技术方面。

| 应用程序 | 隐私 | 互操作性 | 数据管理与跨模型使用 | 安全 | 自动化 & 智能 | 可扩展性 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 医学诊断 | H | L | M | H | H | L |
| 患者监测 | H | L | M | H | H | L |
| 协作研究与医学教育 | H | H | H | H | M | H |
| 传染病/ 大流行 | H | H | H | H | H | H |
| 药物发现 | H | M | H | H | M | M |

L 低重要性　　M 中等重要性　　H 高重要性

以及分布式拒绝服务（DoS）攻击。尤其是在干扰攻击中，攻击者可能会发送强射频干扰信号，以阻断或干扰移动医疗元宇宙设备与主服务器之间的连接。此类攻击可能导致模型上传/下载错误，从而降低医疗元宇宙中联邦学习系统的准确性和性能。

*2*）可能的解决方案：医疗元宇宙中的用户数据隐私问题，可以通过采用差分隐私和协同训练来解决。然而，使用这些方法会降低性能或模型准确率，而且还会对参与其中的医疗元宇宙设备的处理能力提出很高要求。因此，在开发联邦学习系统时，必须审慎权衡隐私保障与系统效率。安全问题可以通过采用跳频等抗干扰技术来解决，例如在多个频率上额外传输一份模型更新。

*D.* 缺乏可解释性

*1*）问题介绍：联邦学习模型的黑箱特性使用户难以理解模型的输出。在复杂情况下，黑箱模型缺乏依据的预测或结论可能导致医疗元宇宙发生灾难性故障。例如，使用视觉识别模型识别患者疾病的医疗设备，如果模型难以理解，且医生无法评估结果，医疗元宇宙中的临床医生可能会因黑箱模型的错误解读而做出错误决策。因此，必须开发可解释的联邦学习模型，以便对医疗元宇宙中的各种情况做出更全面的判断。

*2*）可能的解决方案：可解释人工智能（XAI）有望解决医疗元宇宙中如何构建可解释、可阐释的联邦学习模型这一问题。XAI 包含一系列技术和策略，使医疗元宇宙中的利益相关者能够理解并信赖预测模型生成的输出和结果。

*E.* 公平联邦学习

*1*）问题介绍：在联邦学习中，数以万计的设备将用于训练一个供整个医疗元宇宙使用的全局模型。在这样的系统中，朴素的全局模型优化可能会对某些设备不公平，导致它们获得不成比例的优势或遭受不成比例的劣势。因此，需要实现公平的联邦学习。联邦学习需要合理的激励机制和公平的资源分配。医疗元宇宙面临的一项重大难题，是如何公平分配计算和通信资源。

*2*）可能的解决方案：基于高质量数据的激励机制能够鼓励更多设备参与医疗元宇宙全局模型的构建。因此，这些设备可以因贡献高质量数据和共享资源而获得更多奖励，最终提高模型的可靠性，并提升联邦学习模型的学习性能。此外，这也有助于推动公平联邦学习模型的发展。

## VI. 结论

鉴于目前尚缺乏关于联邦学习赋能医疗元宇宙的综述，本文详细综述了联邦学习在医疗元宇宙中的应用。首先，我们介绍了联邦学习、医疗保健系统和元宇宙的基础知识，并阐述了联邦学习和元宇宙在智慧医疗中的优势。我们探讨了公开文献中联邦学习在医疗元宇宙中的主要应用，包括医学诊断：联邦学习无需共享物联网设备中的原始数据，即可帮助构建协作的全局模型。其他主要应用还包括患者监测、协作研究与医学教育、感染预防和药物发现；这些应用重点利用联邦学习的数据可用性，发挥分布式物联网设备的强大资源优势，并提升数据隐私保护水平。基于对相关文献的综述，我们着重阐述了联邦学习应用于医疗元宇宙时面临的重要挑战，并指出了若干值得关注的研究解决方案。需要指出的是，联邦学习和元宇宙都是新兴技术，智慧医疗和智慧医疗服务仍有很大的改进空间。我们期待本文能够促使更多研究者关注这一领域，并推动医疗元宇宙中联邦学习相关创新研究思路的产生。

## 参考文献

[1] C.Dwork，《差分隐私》，载于《自动机、语言与编程：第*33*届国际学术讨论会，*ICALP 2006*》，意大利威尼斯，*2006*年*7*月*10*日至*14*日，会议论文集，第*II*部分*33*。施普林格，2006年，第1–12页。

[2] G. Wang、A. Badal、X. Jia、J. S. Maltz、K. Mueller、K. J. Myers、C. Niu、M. Vannier、P. Yan、Z. Yu等人，《面向智慧医疗的元宇宙开发》，Nature Machine Intelligence，第1–8页，2022年。[3] X. Zhou、Y. Li和J. Zhao，《元宇宙中联邦学习辅助移动增强现实系统的资源分配》，载于《2023年IEEE国际通信会议（ICC）》。IEEE，2023年。[4] X. Zhou、J. Zhao、H. Han和C. Guet，《联邦学习中能耗与完成时间的联合优化》，载于《2022年IEEE第42届分布式计算系统国际会议（ICDCS）》。IEEE，2022年，第1005–1017页。[5] X. Zhou和J. Zhao，《元宇宙中结合联邦学习的移动增强现实》，arXiv预印本 arXiv:2212.08324，2022年。[6] X. Zhou、C. Liu和J. Zhao，《结合移动增强现实的元宇宙联邦学习资源分配》，arXiv预印本 arXiv:2211.08705，2022年。[7] G. Bansal、K. Rajgopal、V. Chamola、Z. Xiong和D. Niyato，《元宇宙中的医疗保健：医疗保健领域当前元宇宙应用综述》，IEEE Access，第10卷，第119 914–119 946页，2022年。[8] T. Zhang、J. Shen、C.-F. Lai、S. Ji和Y. Ren，《支持安全去重的多服务器辅助数据共享：面向元宇宙医疗保健系统》，Future Generation Computer Systems，第140卷，310，2023年，第299页。[9] O. J. Gupta、S. Yadav、M. K. Srivastava、P. Darda和V. Mishra，《采用混合方法理解医疗保健领域使用元宇宙的意愿》，《国际医疗保健管理杂志》，第1–12页，2023年。[10] B. Han、H. Wang、D. Qiao、J. Xu和T. Yan，《基于Swin Transformer的零水印方案在保护元宇宙医疗保健数据中的应用》，IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics，2023年。[11] S. Qiao、S. Pang、Y. Sun、G. Luo、W. Yin、Y. Zhao、S. Pan和Z. Lv，《Sprechd：用于识别医疗元宇宙中胎儿先天性心脏病的四腔语义解析网络》，IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics，2022年。[12] Y.-T. Song和J. Qin，《元宇宙与个人医疗保健》，Procedia计算机科学，第210卷，第189–197页，2022年。[13] S.-H. Wu、C.-C. Huang、S.-S. Huang、Y.-Y. Yang、C.-W. Liu、B. Shulruf和C.-H. Chen，《虚拟现实培训对降低台湾新入职医护实习生针刺／锐器伤发生率的效果》，《健康专业教育评价杂志》，第17卷，第1–1页，2020年。[14] S. Chen、D. Xue、G. Chuai、Q. Yang和Q. Liu，《FL-QSAR：用于协作药物发现的基于联邦学习的定量构效关系原型》，Bioinformatics，第36卷，第22–23期，第5492–5498页，2021年。[15] Q. Dou、T. Y. So、M. Jiang、Q. Liu、V. Vardhanabhuti、G. Kaissis、Z. Li、W. Si、H. H. Lee、K. Yu等人，《用于CT肺部新冠肺炎异常检测的联邦深度学习：一项保护隐私的多国验证研究》，NPJ《数字医学》，第4卷，第1期，第1–11页，2021年。[16] M. J. Baucas、P. Spachos和K. N. Plataniotis，《面向预测性医疗保健可穿戴设备的联邦学习与区块链赋能雾物联网平台》，IEEE Transactions on Computational Social Systems，2023年。[17] R. Singh、A. D. Dwivedi、G. Srivastava、P. Chatterjee和J. C.-W. Lin，《保护隐私的物联网智慧医疗金融系统》，IEEE Internet of Things Journal，2023年。[18] W. Wen、U. Demirbaga、A. Singh、A. Jindal、R. S. Batth、P. Zhang和G. S. Aujla，《智慧城市地理分布式边缘生态系统中的健康监测与诊断》，IEEE Internet of Things Journal，2023年。[19] J. Tian、F. Jiang、Q. Zeng、M. PourhosseiniAsl、C. Han和K. Ren，《用于可穿戴健康监测设备的生物相容性压电聚合物聚乳酸基听诊器》，IEEE Sensors Journal，2023年。[20] A. Gupta、S. Misra、N. Pathak和D. Das，《Fedcare：面向IoMT系统中资源受限医疗设备的联邦学习》，IEEE Transactions on Computational Social Systems，2023年。[21] Y. A. Qadri、A. Nauman、Y. B. Zikria、A. V. Vasilakos和S. W. Kim，《医疗物联网的未来：新兴技术综述》，IEEE Communications Surveys & Tutorials，第22卷，第2期，第1121–1167页，2020年。[22] T. Sultana和K. A. Wahid，《利用视频物联网为下一代视频监控选择应用层协议》，IEEE Access，第7卷，第41 607–41 624页，2019年。[23] P. Zikas、A. Protopsaltis、N. Lydatakis、M. Kentros、S. Geronikolakis、S. Kateros、M. Kamarianakis、G. Evangelou、A. Filippidis、E. Grigoriou等人，《MAGES 4.0：加速全球向虚拟现实培训转型并推动医疗元宇宙创作普及》，IEEE Computer Graphics and Applications

[24] W. Yang、Z. Xiong、C. Liu、Y. Zhang和D. Niyato，《港口边缘智能实现元宇宙》，IEEE Wireless Communications，2022年。[25] S. Sandrone，《元宇宙中的医学教育》，Nature Medicine，第1–2页，2022年。[26] I. Skalidis、O. Muller 和 S. Fournier，《Cardioverse：元宇宙时代的心血管医学》，Trends in Cardiovascular Medicine，2022年。[27] M. J. Koohsari、G. R. McCormack、T. Nakaya、A. Yasunaga、D. Fuller、Y. Nagai 和 K. Oka，《元宇宙、建成环境与公共卫生：机遇与不确定性》，Journal of Medical Internet Research，第25卷，文章编号e43549，2023年。[28] A. Musamih、K. Salah、R. Jayaraman、I. Yaqoob、D. Puthal 和 S. Ellahham，《医疗保健中的非同质化代币：愿景、机遇与挑战》，IEEE Consumer Electronics Magazine，2022年。[29] M. Ali、F. Naeem、M. Tariq 和 G. Kaddoum，《智能医疗保健系统中用于隐私保护的联邦学习：全面综述》，IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics，2022年。[30] V. A. Patel、P. Bhattacharya、S. Tanwar、R. Gupta、G. Sharma、P. N. Bokoro 和 R. Sharma，《医疗保健信息学中联邦学习的采用：新兴应用与未来方向》，IEEE Access，2022年。[31] A. Sadilek、L. Liu、D. Nguyen、M. Kamruzzaman、S. Serghiou、B. Rader、A. Ingerman、S. Mellem、P. Kairouz、E. O. Nsoesie 等，《以隐私为先的联邦学习健康研究》，NPJ《数字医学》，第4卷，第1期，文章编号132，2021年。[32] W. Lu、J. Wang、Y. Chen、X. Qin、R. Xu、D. Dimitriadis 和 T. Qin，《面向医疗保健的自适应批归一化个性化联邦学习》，IEEE Transactions on Big Data，2022年。[33] D. Ng、X. Lan、M. M.-S. Yao、W. P. Chan 和 M. Feng，《联邦学习：为样本量较小的单个机构协作构建更优的医学影像模型》，Quantitative Imaging in Medicine and Surgery，第11卷，第2期，第852页，2021年。[34] A. Rehman、I. Razzak 和 G. Xu，《利用联邦学习保护医疗保健数据免受基于智能手机的侧信道攻击》，IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics，2022年。[35] D. C. Nguyen、Q.-V. Pham、P. N. Pathirana、M. Ding、A. Seneviratne、Z. Lin、O. Dobre 和 W.-J. Hwang，《智慧医疗中的联邦学习：综述》，ACM Computing Surveys (CSUR)，第55卷，第3期，第1–37页，2022年。[36] D. B. Rawat 和 H. El Alami，《元宇宙：需求、架构、标准、现状、挑战与展望》，IEEE Internet of Things Magazine，第6卷，第1期，第14–18页，2023年。[37] A. M. Aslam、R. Chaudhary、A. Bhardwaj、I. Budhiraja、N. Kumar 和 S. Zeadally，《面向6G及更高级别的元宇宙：下一场革命与部署挑战》，IEEE Internet of Things Magazine，第6卷，第1期，第32–39页，2023年。[38] E. D. Villarreal、J. Garcı´a-Alonso、E. Moguel 和 J. A. H. Alegr´ıa，《用于医疗保健管理系统的区块链：互操作性与安全性综述》，IEEE Access，2023年。[39] T. Huynh-The、T. R. Gadekallu、W. Wang、G. Yenduri、P. Ranaweera、Q.-V. Pham、D. B. da Costa 和 M. Liyanage，《面向元宇宙的区块链：综述》，Future Generation Computer Systems，2023年。[40] Z. Huang、C. Xiong、H. Ni、D. Wang、Y. Tao 和 T. Sun，《面向扩展现实与元宇宙的5G-Advanced及未来移动网络标准演进》，IEEE Internet of Things Magazine，第6卷，第1期，第20–25页，2023年。[41] J. G. Wu、D. Zhang 和 S. M. Lee，《迈入勇敢的新元宇宙：展望未来的语言教学与学习》，IEEE Transactions on Learning Technologies，2023年。[42] T. Wischgoll、A. Stork、H. Schilling 和 G. Scheuermann，《元宇宙：虚拟世界技术》，IEEE Computer Graphics and Applications，第43卷，第02期，第11–12页，2023年。[43] S. Pai 和 G. D. Bader，《精准医学中的患者相似性网络》，Journal of Molecular Biology，第430卷，第18期，第2924–2938页，2018年。[44] J. D. Coffey、L. A. Christopherson、A. E. Glasgow、K. K. Pearson、J. K. Brown、S. R. Gathje、L. R. Sangaralingham、E. M. Carmona Porquera、A. Virk、R. Orenstein 等，《为新冠肺炎患者实施多机构跨学科远程患者监测项目，以支持门诊管理》，npj Digital Medicine，第11卷，2021年，第4期，卷号1，第1页。[45] D. Zytko 和 J. Chan，《约会元宇宙：为何我们需要在社交虚拟现实中围绕同意进行设计》，IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics，2023年。[46] D. Beck、L. Morgado 和 P. O’Shea，《沉浸式学习环境中的教育实践与策略：元宇宙应用综述图谱

Sun Y. Q. Yang, Gao, 天作近者,

, 2023年。

，《IEEE Transactions on Learning Technologies》，2023年。[47] A. Tlili、R. Huang 和 x. Kinshuk，《借助元宇宙攀登通往“工业5.0”和“社会5.0”的阶梯？》，服务业期刊，第1–28页，2023年。[48] A. McStay，《元宇宙：监控物理学、虚拟现实主义治理与缺失的公地》，《哲学与技术》，第36卷，第1期，文章编号13，2023年。[49] D. Gruson、R. Greaves、P. Dabla、S. Bernardini、B. Gouget 和 T. K. ¨Oz，《通往另一个世界的新大门：元宇宙带来的机遇与元医疗实验室的兴起》，《临床化学与实验室医学》(CCLM)，第0期，2023年。[50] Y. Sun、J. Liu、K. Yu、M. Alazab 和 K. Lin，《Pmrss：面向物联网医疗智能诊断的隐私保护医疗记录检索方案》，IEEE工业信息学汇刊，第18卷，第3期，第1981–1990页，2021年。[51] A. Romanovs、E. Sultanovs、E. Buss、Y. Merkuryev 和 G. Majore，《弹性远程医疗服务的挑战与解决方案》，载于2020年IEEE第8届信息、电子与电气工程进展研讨会(AIEEE)，IEEE，2021年，第1–7页。[52] R. Aggarwal、V. Sounderajah、G. Martin、D. S. Ting、A. Karthikesalingam、D. King、H. Ashrafian 和 A. Darzi，《深度学习在医学影像中的诊断准确性：系统综述与荟萃分析》，NPJ《数字医学》，第4卷，第1期，第1–23页，2021年。[53] M. Alazab、L. U. Khan、S. Koppu、S. P. Ramu、M. Iyapparaja、P. Boobalan、T. Baker、P. K. R. Maddikunta、T. R. Gadekallu 和 A. Aljuhani，《医疗4.0的数字孪生：最新进展、架构与待解决的挑战》，IEEE Consumer Electronics Magazine，2022年。[54] G. J. Annas，《HIPAA法规：医疗记录隐私的新时代？》，《新英格兰医学杂志》，第348卷，第1486页，2003年。[55] R. S. Antunes、C. Andr´e da Costa、A. K¨uderle、I. A. Yari 和 B. Eskofier，《医疗保健领域的联邦学习：系统综述与架构方案》，ACM《智能系统与技术汇刊》(TIST)，第13卷，第4期，第1–23页，2022年。[56] J. Thomason，《元医疗：元宇宙将如何改变医疗保健？》，《元宇宙期刊》，第1卷，第1期，第13–16页，2021年。[57] J. Portnoy、M. Waller 和 T. Elliott，《COVID-19时代的远程医疗》，《过敏与临床免疫学杂志：临床实践》，第8卷，第5期，第1489–1491页，2020年。[58] L. M. Koonin、B. Hoots、C. A. Tsang、Z. Leroy、K. Farris、B. Jolly、P. Antall、B. McCabe、C. B. Zelis、I. Tong 等，《COVID-19大流行暴发期间远程医疗的使用趋势——美国，2020年1月至3月》，《发病率与死亡率周报》，第69卷，第43期，第1595页，2020年。[59] R. Chengoden、N. Victor、T. Huynh-The、G. Yenduri、R. H. Jhaveri、M. Alazab、S. Bhattacharya、P. Hegde、P. K. R. Maddikunta 和 T. R. Gadekallu，《医疗保健元宇宙：潜在应用、挑战与未来方向综述》，arXiv预印本 arXiv:2209.04160，2022年。[60] T. Erol、A. F. Mendi 和 D. Do˘gan，《医疗保健领域的数字孪生革命》，载于2020年第四届多学科研究与创新技术国际研讨会(ISMSIT)，IEEE，2020年，第1–7页。[61] N. Rieke、J. Hancox、W. Li、F. Milletari、H. R. Roth、S. Albarqouni、S. Bakas、M. N. Galtier、B. A. Landman、K. Maier-Hein 等，《联邦学习引领数字健康的未来》，NPJ《数字医学》，第3卷，第1期，文章编号119，2020年。[62] A. S. Ahuja、B. W. Polascik、D. Doddapaneni、E. S. Byrnes 和 J. Sridhar，《数字元宇宙：人工智能、医学教育与整合健康中的应用》，Integrative Medicine Research，第12卷，第1期，文章编号100917，2023年。[63] G. Riva，《医疗保健领域的虚拟现实：研究现状》，Cyberpsychology & Behavior，第5卷，第3期，第219–225页，2002年。[64] J. Iwanaga、E. C. Muo、Y. Tabira、K. Watanabe、S. J. Tubbs、A. V. D’Antoni、M. Rajaram-Gilkes、M. Loukas、M. K. Khalil 和 R. S. Tubbs，《解剖学教育中谁真正需要元宇宙？附初步调查结果的综述》，《临床解剖学》，第36卷，第1期，第77–82页，2023年。[65] A. Aburayya、S. Salloum、K. Alderbashi、F. Shwedeh、Y. Shaalan、R. Alfaisal、S. Malaka 和 K. Shaalan，《基于结构方程建模和机器学习的元宇宙在阿联酋高等教育中应用采纳研究模型》，《国际数据与网络科学杂志》，第7卷，第2期，第667–676页，2023年。[66] S.-n. Suzuki、H. Kanematsu、D. M. Barry、N. Ogawa、K. Yajima、K. T. Nakahira、T. Shirai、M. Kawaguchi、T. Kobayashi 和 M. Yoshitake，《元宇宙中的虚拟实验及其在协作

项目：该框架及其重要性，” *Procedia*计算机科学，第176卷，第2125–2132页，2020年。[67] M. A. I. Mozumder、M. M. Sheeraz、A. Athar、S. Aich 和 H.-C. Kim，“概述：基于物联网、区块链、人工智能技术和医疗领域元宇宙活动的未来元宇宙技术路线图”，载于*2022*年第*24*届先进通信技术国际会议 *(ICACT)*。IEEE，2022年，第256–261页。[68] B. Siniarski、C. De Alwis、G. Yenduri、T. Huynh-The、G. G ¨Ur、T. R. Gadekallu 和 M. Liyanage，“需要进行 Siniarski2022need，以实现 thesiniarski2022need 元宇宙”，*arXiv*预印本 *arXiv:2301.03386*，2022年。[69] S. Huh，“计算机化测试在韩国医师资格考试中的应用、元宇宙在医学教育中的兴起、期刊指标与统计数据，以及对审稿人和志愿者的感谢”，《健康专业教育评价杂志》，第19卷，2022年。[70] J. C. Buck 和 S. B. Weinstein，“大流行的生态后果”，《生物学快报》，第16卷，第11期，第20200641页，2020年。[71] I. Ifdil、D. D. B. Situmorang、F. Firman、N. Zola、I. B. Rangka 和 R. P. Fadli，“面向未来心理健康服务专业的元宇宙虚拟现实：应对新冠肺炎大流行心理健康挑战的替代方案”，《公共卫生杂志》，第45卷，第1期，第e142–e143页，2023年。[72] C. A. Onggirawan、J. M. Kho、A. P. Kartiwa、A. A. Gunawan 等，“系统性文献综述：新冠肺炎大流行期间利用元宇宙虚拟教育空间适应远程学习过程”，*Procedia*计算机科学，第216卷，第274–283页，2023年。[73] F. W. van Leeuwen 和 J. A. van der Hage，“机器人手术与元宇宙的交汇”，第6161页，2022年。[74] Y. Yang、K. Siau、W. Xie 和 Y. Sun，“智慧医疗：元宇宙、人工智能和数据科学时代的智能医疗系统”，《组织与终端用户计算杂志》*(JOEUC)*，第34卷，第1期，第1–14页，2022年。[75] S. Dara、S. Dhamercherla、S. S. Jadav、C. Babu 和 M. J. Ahsan，“药物发现中的机器学习：综述”，《人工智能评论》，第55卷，第3期，第1947–1999页，2022年。[76] V. D. Mouchlis、A. Afantitis、A. Serra、M. Fratello、A. G. Papadiamantis、V. Aidinis、I. Lynch、D. Greco 和 G. Melagraki，“从头药物设计的进展：从传统方法到机器学习方法”，《国际分子科学杂志》，第22卷，1676，2021年4月，第p.。[77] S. Joshi 和 P. Pramod，“面向高等教育的协作式元宇宙自选式框架(Co-Mate)”，*Heliyon*，第9卷，第2期，2023年。[78] F. Shi、H. Ning、X. Zhang、R. Li、Q. Tian、S. Zhang、Y. Zheng、Y. Guo 和 M. Daneshmand，“元宇宙的新技术视角：其本质、框架与挑战”，《数字通信与网络》，2023年。[79] S. Surveswaran 和 L. Deshpande，“未来一瞥：沉浸式生态中人工智能、数字人和元宇宙为生命科学带来的机遇与挑战”，《临床医学中的人工智能：医疗专业人员实用指南》，第521–527页，2023年。[80] Z. Wang、Z. Zhou、H. Zhang、G. Zhang、H. Ding 和 A. Farouk，“面向6G空天地一体化电力物联网的人工智能云边端协同”，*IEEE Wireless Communications*，第29卷，23，2022年1月，第16页。