卫生信息化国际发展动态

北京市卫生健康大数据与政策研究中心

2023. 5.24

(四)数字孪生

1. 标题: 机器人领域迈向下一代的数字孪生一趋势、范围、挑战和未来文献研究

来源: Heliyon.

时间: 2023年2月.

链接: <u>https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13359</u>.

概要: 随着工业 4.0 的到来, 人类文明在技术范式上发生了转变。市面上出现了 许多尖端技术,如网络物理系统、数字孪生、物联网、机器人、大数据和云计算等, 其中最引人注目的融合之一就是将数字孪生(DT)纳入机器人各个领域,即"DT合 并机器人",但相关定义与研究却鲜有。因此,本文对此进行了深入研究。首先对 与机器人相结合的数字孪生给出了定义;接着,将2017年-2022年期间可用论文 进行了人工分类,全面澄清数字孪生相关的各种概念及其演变历史;然后,采用一 种独特的方法,针对各种机器人领域的出版物的特定领域研究饱和度分析进行梳理, 重点分析了期间高饱和机器人领域与低饱和机器人领域的研究方法和趋势,并评估 了 DT 在太空机器人、医疗和康复机器人、软机器人、人机交互和工业机器人等方面 的实施,阐明机器人领域内 DT 的采用是如何有益,但是这些是被近来综述论文所 忽视的,从而证明本研究的意义。除此之外,本文还指出未来研究的一些新兴领域: 混合现实和 VR、触觉遥控机器人、DT 集成 AI 实现、机器人工作单元模拟等方面的 应用。虽然将数字孪生纳入机器人的众多领域可能会带来非凡的进步,但是其实施 会面临框架与现有组织框架不兼容、通用框架模型或架构、缺乏结构化培训、开发 费用高、DT 仿真模型的精度和精度低、网络威胁和计算限制、网络连接等威胁和挑 战,并提出了可能的替代方案。最后,提出了一个关于 DT 集成机器人未来范式的主 要假设,即快速区块链支持的元界作为下一代 VTB。本文提供的综述贡献和框架有 望对未来的DT集成机器人研究产生重大影响。

2. 标题: 数字孪生和精准心理健康的未来

来源: Front Psychiatry.

时间: 2023年5月.

链接: https://doi.org/10.3389/fpsyt.2023.1082598.

概要: 科学在开发亟需的准确识别和诊断心理健康问题并提供个体化最佳治疗 的精准心理健康治疗方法上面临着挑战。数字孪生(DTs)的出现有望彻底改变这 一切,就像他们在肿瘤学和心脏病学等其他科学领域内所做的那样。DTs 应用于心 理健康领域,可实时提供监控、诊断、预测和指导等功能,详细反映患者心理健 康的机制和动态性质和心理健康紊乱的病理生理学,及治疗过程和患者与治疗师 的关系质量,相当于为患者和治疗师配备了强大的工具,实现基于透明推理和概 率考虑的最佳治疗。心理健康是由个人、社会和结构压力之间的复杂相互作用决 定的。代表个人心理健康实际状态的物理状态空间是一个复杂的高维空间,通常 无法完全观察或直接测量和建模, 因此, 能开发一个精确甚至近似的个人整个心 理健康的虚拟复制品是一件非常了不起的事。比如,度抑郁症(MDD)有数百种积 极的治疗方法,但它们的疗效却似乎没有差异。DTs 可以"数字孪生"出患者和治 疗师之间的治疗联盟,根据个人生命周期中收集的数据不断更新,并指导心理健 康专业人员根据机制模型以及统计和机器学习工具诊断和治疗患者。这种联盟被 认为是治疗成功的关键因素,因为它使治疗师可以了解到患者的需求和动机,并 使患者在讨论和解决他们的挑战和目标时感到舒适和安全; 数十年的实证研究也 表明更强大的联盟与更好的治疗结果显著相关。最后,文章总结:构建心理健康 数字孪生时在数据收集、数据管理和建模等方面需要注意的事项,并指出建模是 最近用于识别心理健康标志物的现有最先进的有监督和无监督机器学习方法的进 步,有助理解 MDD 病理生理学,但也有限制性,将两者与机制模型结合成一个混 合模型可以最大限度地提高其效能,但相关细节仍有待解决。

(徐健编辑)

机器人领域迈向下一代的数字孪生 一趋势、范围、挑战和未来

A. Mazumder *, M.F. Sahed, Z. Tasneem, P. Das, F.R. Badal, M.F. Ali, M.H. Ahamed, S.H. Abhi, S.K. Sarker, S.K. Das, M.M. Hasan, M.M. Islam, M.R. Islam, 徐健(译)

1. 简介

随着工业 4.0 的到来,人类文明在技术范式上发生了转变。在这个工业、自动化和人机交互齐头并进的新时代,人们观察到,一系列新的协同融合已惊人增长,也导致出现了许多新概念,如操作员 4.0 和太空工厂 4.0 等,这些技术混合体正在蓬勃发展。除了工业方面,研究部门也通过使用这些技术而受益匪浅。其中最引人注目的融合之一就是将数字孪生(DT)纳入机器人各个领域,或者更准确地说是本文所讨论的"DT 合并机器人"。

从根本上讲,系统或组件的数字孪生是后者的数字副本,它在其活跃的生命周期镜像和/或孪生物理组件。在其他研究中,"数字孪生"(DT)在不断增长的文献量中被不规则地用于描述物理和数字组件之间的各种联系。物理和数字组件之间的通信基础设施通常是单方面的或不考虑在内,所以在数字影像(DS)和数字模型(DM)等概念间有所不同。来自NASA的Glaessgen和Stargel(2012)提供了可以说是数字孪生中最详细和最知名的定义,即对复杂系统的多物理场、多尺度概率模拟,该系统使用最佳可用物理模型、传感器更新等来复制其相应孪生体的寿命。然而,一些研究认为,从物理系统到数字仿真模型的单向连接不能称为数字孪生系统。相反,他们将这样的数字复制品称为"数字影像"。文章指出,对于称为数字孪生的数字克隆,它们之间的数据传输必须是双向的。尽管"数字孪生"的概念和定义太多,但没有针对机器人或 DT 公司机器人中的 DT 的具体定义。因此,本研究希望对与机器人相结合的数字孪生提出一个恰当定义:"基于数据或模型的机器人系统数字副本,允许通过系统活动生命周期内同时和双向状态更新进行多物理场,高保真、多尺度、可实验模拟。在本文中,与机器人相结合的数字孪生概念遵循了提出的定义。

具有讽刺意味的是,太空机器人中使用的第一批数字孪生方法可以追溯到 1960 年代,当时这个短语甚至还没有被发明出来。然后它被 NASA 称为"活模特"。

此外,1970年在空间机器人中观察到了 DT 实施的第一个主要例子。它被用于历史性的阿波罗 13 号任务,该任务结合了当时用于对接程序等重要功能的尖端机器人技术。该任务也标志着 DT 在太空机器人领域的首次胜利,因为该技术已成功部署,可以安全地将机组人员从在飞船上氧气罐爆炸造成的紧急危险中返回。然而,当时采用的 DT 是一个多模拟器网络物理系统,主要集中在物理基础设施上,而不是今天观察到的物理和虚拟副本的实时集成。1991年,David Gelernter 设想了"镜像世界",这是一个类似的概念,其中软件模型从物理世界输入的信息中模仿现实。

美国宇航局的约翰·维克斯(John Vickers)在 2002 年创造了"数字孪生"一词。 大约在同一时间,Vickers 与 Michael Grieves 博士合作,将数字孪生的概念作为改善制造业产品生命周期管理(PLM)的一种方式。最初,他将其称为"PLM 概念理想"。尽管如此,即使在这个早期阶段,他也提到了数字孪生的几个关键属性。 Grieves 在他的论文中讨论了真实空间和虚拟空间之间的区别,强调了真实和虚拟实体之间数据和信息交换的重要性,以便它们相互镜像。到 2006 年,他的概念模型已经从"镜像空间模型"改为"信息镜像模型"。2010 年,NASA 的技术路线图草案包括"数字孪生"(DT)一词。

自 2003 年以来,人们对数字孪生概念的兴趣激增。超自动化被评为 2020 年 头号关键战略技术趋势,数字孪生发挥着重要作用。数字未来和向工业 4.0 范式的 转变等举措正在推动这种兴趣的激增。此外,物联网(IoT)、大数据和实时传感 器等多项关键技术进步降低了成本。根据调查,大约 75%实施物联网项目的组织 已经在使用数字孪生。显然,这个想法具有一定吸引力,至少在早期采用者中是 这样。根据市场调研,数字孪生市场的价值 3 年内将达到 8 亿美元。预计 2019 年 市场价值将增长近 35 倍,达到 8 亿美元。说明数字孪生随时间推移的进展。

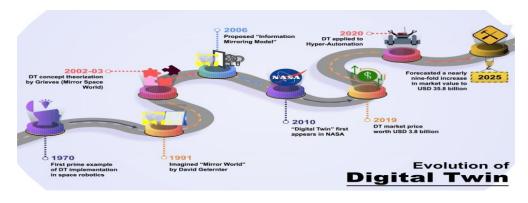


图 1 数字孪生的演变史

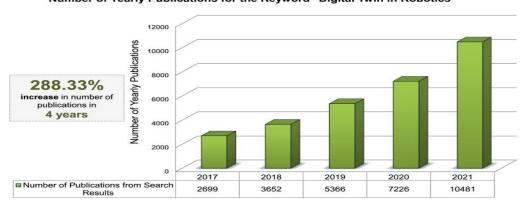
通过前面的所有讨论,DT 在很多技术领域具有巨大潜力应该是显而易见的,然而,在所有这些领域中,本文尝试确定 DT 为何及如何代表传统机器人仿真方法和支持技术间交互的重大变化。我们在一篇文献中找到调查答案,其考虑了以下三个主要因素:

- 持久性: DT 是物理系统(如机器人操纵器)生命周期的虚拟数据库,可定期记录单个系统信息,跨应用程序进行建模、保存和维护。但是传统的仿真过程主要是特定应用程序的,不需要存储数据或模仿机器人的整个活动生命周期。此外,根据定义,物理系统与其数字孪生之间的数据流是双向的,这提供了一致的故障排除和预测分析功能,而传统仿真方法并不总是如此。
- 洞察力: 与传统模拟一样,DT可用于预测物理对应物上会发生什么。此外,DT还为硬件上当前发生的情况提供了一个接口,并提供了一种研究设计方法。
- **可解释性**: 传统上,模拟不能用于深入了解物理系统的相互作用,相反,需要精确理解"假设"的情况。当出现意外行为时,DT 为调查和诊断故障站点提供了独特的视角。这些证据可用于增强过程安全性、设计和影响未来的仿真。

为更好地理解和响应仿真(期望)和现实(反馈)之间的差异,在检索、比较和分析系统统计数据同时,也以防止危险情况发展的情况下在需要实时操作,这一点至关重要。成熟、适应性强的数字孪生提供了多种选择来提高工业环境中的协作安全性,这些选项可分为验证、分析、预测和增强的核心领域,毫无疑问,这些领域对制造业具有前所未有的潜力。考虑一个以制造业为中心的工业机器人工作单元的例子。传统上,要应用的新机器人策略将使用仿真框架进行验证。然后,对于各种分析(如故障分析、异常检测等),可能需要一个不同的框架。我们可能会使用相同的模拟框架或人工智能辅助数据分析框架,根据历史和/或可访问的数据预测未来状态。此外,更多样化形式的增强功能,例如交互式用户界面,可能需要采用不同的系统。因此,通常情况下,工业机器人制造设施需要依赖许多不同的框架,这些框架可能会也可能不会协作,这使得整个过程更加昂贵、劳动密集型和耗时。然而,所有这些功能都可以组合在一个工作单元中,DT代表整个工厂。根据定义,DT反映了数字环境中的真实系统,因此机器人策略可以更精确地制定,然后很容易传输到物理机器人。同样,由于 DT 与物理对应物持续双向接触,因此分析数据更加精确,从而可以更好,更轻松,更快地进行诊断

和预测分析。此外,DT 可以提供身临其境的用户体验,直接从 VTB 控制机器人。 本研究在第 2 节中对这些技术进行了更深入的探讨。

直到最近,DT 还常作为封闭系统运行,强调单个系统或机器人的扩展功能。因此,在具有大量数字孪生的系统中,更广泛的数据访问的好处通常是被忽视的。然而,最近出现的模块化框架能够将系统级数字孪生集成到单个链接场景 DT (单个数字孪生的连接生态系统)中,这提供了一种实用的方法,可以看到这些优势并访问多级数据以增强过程理解和态势感知,从而导致对数字孪生机器人的研究兴趣激增。如图 2 描述,近年来,"机器人中的数字孪生"作为研究兴趣得到了显著增长,基于每年从 Google Scholar,IEEE Xplore,PubMed 等受人尊敬的文献来源获得的出版物数量。这种趋势进一步暗示了 DT 结合机器人的潜在可行性以及相应的研究机会。然而,在深入研究这项研究之前,必须讨论一些相关的定义和概念。



Number of Yearly Publications for the Keyword "Digital Twin in Robotics"

图 2 关键词 "2017-2021 年机器人数字孪生"的年度出版物数量

1.1. 本综述的方法和贡献

本研究采用的方法包括严格的系统抽样过程,主要是在 2017 年至 2022 年期间对可用论文进行人工分类。在 2017 年之前,还需要几份支持文件来澄清或定义各种概念。首先,使用关键字"机器人中的数字孪生",探索了许多受人尊敬的文献来源,如 Google Scholar, IEEE Xplore, PubMed 等。

这些论文的摘要和元数据加上额外的时间跨度限制,有助于对 6000 多篇出版物进行初步估计。之后,使用 Voyant 工具的文本分析功能对 617 种出版物进行了排序。然后,经过另外 3 层人工排序,最终确定了 148 份出版物以供审查过程。本文中使用的全面审查程序的示意图可以在图 3。

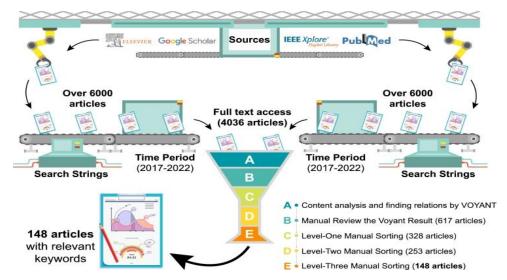
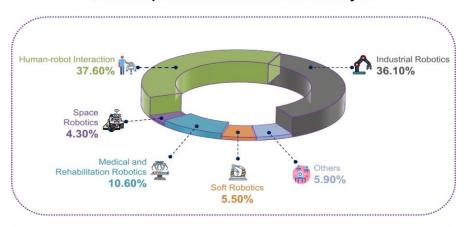


图 3 本文采用的出版物选择方法

在排序后,本研究采用了一种独特的方法来区分高饱和度 DT 机器人结构域和低饱和度,这在最近的综述出版物中通常少见,如表 1。根据所涵盖的机器人领域,该表将当前研究与涉及 DTIR 的最新综述出版物进行了比较,展示出本研究的分析: 阐明机器人领域内 DT 的采用是如何有益,但是被近来综述论文所忽视,从而证明了本文的研究方法可行。除了特定领域的研究和趋势分析外,本文还提出了基于区块链和元宇宙方法的未来研究趋势框架。经过完整审查,本文为 DT 机器人的现状和未来提供了一些重要贡献。本文的主要贡献是:

- a) "DT 公司机器人"的新定义,满足既定的 DT 概念。
- b) 针对各种机器人领域的出版物的特定领域研究饱和度分析进行梳理,如图 4。
- c)回顾 2017 年至 2022 年间高饱和机器人领域与低饱和机器人领域的研究方法和趋势。
 - d)确定新兴范围。
 - e) 与未来 DTIR 范式相关的假设。
 - f)汇总实施DTIR的威胁和挑战及其提议和/或提供的解决方案。

Domain-Specific Research Saturation Analysis



- DT in HRI and Industrial Robotics experienced the highest research saturation whereas, Space Robotics was among the lowest. Evidently, the research saturation disparity is too high.
- The "Others" section contains a slew of other robotics disciplines where DT was shown to be useful, such as Agricultural Robots. However, the number of publications that covered these subjects was insufficient (<2%) to provide a comprehensive overprise.

图 4 特定领域的研究饱和度分析

表 1 本文与最近的综述文章 (PY: 出版年份, DSRSA: 特定领域的研究饱和度分析, DT: 数字孪生, HRI: 人机交互, IR: 工业机器人, RM: 机器人制造, SPR: 空间机器人, SR: 软机器人, MR: 医疗机器人, RR: 康复机器人) 的比较

Ref.	. PY	DSRSA	DT-HRI	DT-IR/DT-RM	DT-SPR	DT-SR	DT-MR/DT-RR
艾瓦利奥蒂斯等	2019	X	×	✓	X	X	X
卢 <i>等.</i>	2020	X	✓	✓	X	X	X
拉坦齐特等.	2021	X	✓	✓	X	X	X
潘登等.	2021	X	×	✓	✓	X	X
毕 <i>等.</i>	2021	X	✓	✓	X	X	X
兰布雷希特等.	2021	X	✓	✓	X	X	X
约斯和金口等.	2022	X	✓	X	X	X	X
范 <i>等.</i>	2022	X	✓	X	X	X	X
拉马苏布拉马尼安等.	2022	X	✓	X	X	X	X
塞梅拉罗等.	2023	X	✓	✓	X	X	X
当前论文		✓	✓	✓	1	✓	✓

论文的组织结构如下。<u>第1</u>节提供了DT及与机器人结合相关的概念介绍;第 2 节明确描述了数字孪生在机器人技术中高饱和度和低饱和度趋势,尤其是后者; 然后,<u>第3</u>节指出未来研究的新兴领域;<u>第4</u>节讨论了机器人集成DT的现有和潜 在威胁及挑战,以及可能的解决方案;第5节为未来的DTIR范式提供了一个假 设;最后,在第<u>6</u>节中,对研究进行了总结。

2. DT 结合机器人的最新趋势

自 1960 年代后期成立以来,机器人中的数字孪生和数字孪生在探索领域的利用方面取得了长足的进步。然而,在其整个旅程中,该技术已逐渐被重新定义和重新利用,从最初作为空间机器人技术中复杂的网络物理方法到现代的实时机器人制造生态系统。根据本研究中进行的大量研究,已经评估了机器人的以下五个领域,其中发现 DT 得到了显著实施:太空机器人、医疗和康复机器人、软机器人、人机交互、工业机器人。

除上述领域外,在农业机器人、发电机器人等机器人学科中,DT 也有一些适度实现,但是在所选时间范围内涉及这些领域的论文的数量和/或影响被还是不足,所以被排除在外。在本节中,本研究打算全面介绍机器人技术中的数字孪生趋势。低研究饱和度领域在图 4 中,也就是说,空间机器人、软机器人和医疗机器人已被大量描述,而对高度研究饱和的领域-工业机器人和人-机器人交互进行了简要阐述,旨在阐明通常被当代评论忽视的领域。

2.1. 空间机器人中的数字孪生

在 VTB 实现情况下观察到 DT 空间机器人中最常见的方法有三种,其他趋势包括模块化卫星的 DT 辅助触觉遥控机器人组装,此类遥测数据的处理和航天器 MRO。图 5 描述了这些趋势的年度出现,进一步分为以下几组:

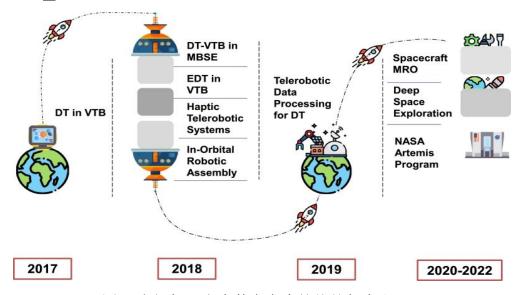


图 5 空间机器人中数字孪生趋势的年度出现

a) DT 实施的 VTB

2017年,开发了 VITOS,这是一种用于空间机器人光学传感器的虚拟测试平台 (VTB)。在这项研究中,研究人员的目标是将机器人的 DT 整合到 VTB 中,在那

里它们可以被模拟并可用于同时控制机器人执行器。该研究将相机和激光扫描仪等光学传感器数据导入 VTB 的 DT 中。然后,这些数据用于进行模拟操作,例如 ATV 与国际空间站的对接程序,以评估开发高级运动跟踪和路径规划算法的方法,以展示预期结果。

2018 年,另一项与参考文献中名为"INVIRTES"的项目相关的研究对 MBSE 中现有的 VTB 进行了调查,包括 VITOS,其中发现早期版本的 VTB 缺乏可靠的测试用例规范概念。然后,该研究继续为 VTB 提出了一种基于集成模型的规范方法。通过在轨道服务、火星探测和对接机制等几个虚拟任务中部署拟议的基础设施来评估这一贡献,这些任务在早期发现技术风险方面显示出有希望的结果。同年,有学者提出了可实验数字孪生(EDT),这是一种基于模拟的新型方法,允许 MBSE系统的数字副本进行实验。该研究还提出了一种实用的方法,将这种 EDT 基础设施实施到称为"虚拟测试平台(VTB)"的仿真环境中。根据这项研究,EDT 在 VTB中的应用使前者"栩栩如生",因为 VTB 提供了使 EDT 更具交互性的运行时环境。该研究强烈认为,EDT 结合 VTB 在开发和测试仿真和组件算法方面在空间机器人方面具有巨大的潜力。

b) 面向 DT 的远程机器人和模块化卫星组件

一些研究集中在"太空工厂 4.0"中 DT 的实施,这是"工业 4.0"与太空领域的类比,其中一项研究提出了一种触觉遥控机器人系统,该系统利用 DT 在太空中无缝组装微型模块化卫星。建议的解决方案倾向于 HMI,通过 DT 环境直接手动控制机器人机械手,从而为 DT 赋能的"太空工厂 4.0"做出贡献。另一项研究显示了拟议的 DT 远程机器人系统的遥测数据的方法。

c) 航天器维修

MRO 代表维护、修理和操作。航空航天元件(如航天器主体和部件)的建造、维修、翻新和维护已被发现是现代空间机器人采用数字孪生的一些主要方面。例如,<u>有研究</u>为航空航天 MRO(维护,修理和大修)开发了一种采用 DT 的机器人磨削系统,该系统利用 6-DoF 机械臂进行磨削操作。自动化过程使用 DT 来分析和识别所需的磨削变量,例如所需的磨削力。

d) 用于深空探测的机器人航天器的自主性和优化

DT 在"深空"探索中的首次实施是在 NASA 的 2020 年 OSIRIS-REx 机器人航天器中观察到的。这艘宇宙飞船是为了研究贝努,这是我们太阳系中的一颗小行星,

具有深刻的特性。在这次任务中,航天器采用了大量的机器人机制来完成关键任务,例如从小行星表面收集样本,轨迹估计和维护,太阳能电池板对齐,图像和视频记录等。洛克希德马丁公司在与美国宇航局的联合考察中促进了 DT 的实施。在任务中,DT 的应用被证明是一个至关重要的决定,因为它通过评估 VTB 中 DT 上运行的模拟结果来简化复杂的决策,从而大大提高了任务效率。

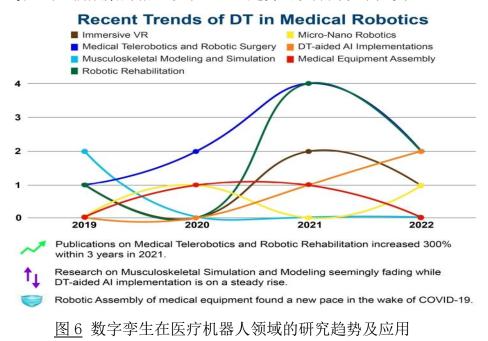
e) 美国宇航局的阿尔忒弥斯计划:太空机器人中数字孪生的重要里程碑

可以说,太空机器人和太空探索本身领域的下一个基石是美国宇航局的阿尔忒弥斯计划。该计划旨在将我们带回月球,并建立一个深空门户,该门户将进一步用于火星和外层空间探索。Artemis 计划的一个关键方面是前所未有的自主性,旨在通过复杂的机器人应用程序及其高保真数字孪生来实现。尽管美国宇航局尚未公布征服的结果,但这项研究认为值得一提,因为它为太空机器人领域的 DT 设定了关键点。

DT 的出现可以说是在空间工程领域。然而,仔细研究表明,与本文探讨的其他领域相比,空间机器人中数字孪生的趋势缺乏实质性的多样化。

2.2. 医疗和康复机器人中的数字孪生

尽管医疗机器人的概念并不新鲜,但它与数字孪生的集成是显而易见的,这从 2019 年之前医疗机器人出版物的大量缺乏中可以看出。这项研究通过对现有论文 进行彻底审查,发现了 2019 年至 2022 年间的七个显著趋势,这可以从图 6 中看 出. 考虑到它们频繁的相互联系,这些趋势可以分为以下几类。



a) 面向 DT 的 VR, 远程机器人和机器人手术

从图 6 中可以看出,DT 辅助医疗远程机器人是近年来增长最快的领域之一,其主要应用是机器人手术。同样,在本研究中探索的医疗远程机器人方法的大量实例中,使用了沉浸式 VR 界面/环境。其他用例包括 VR 辅助远程机器人医疗和实验室设备管理、远程医疗服务机器人和 RDT-VR 辅助电子皮肤和软致动器开发,用于在传染性环境中收集远程机器人生物样本。值得注意的是,COVID-19 大流行的出现导致了一套以灾害管理为中心的远程机器人方法,以避免在传染性环境中感染。更多细节,包括与这些趋势相关的方法,请参见表 2。

表 2 医疗机器人的趋势:面向 DT 的 VR,远程机器人和机器人手术(PY:出版年份,R-CNN:基于区域的卷积神经网络)

. PY	裁判。	方法	结果
2019	拉基、米切和塔米	用于机器人手术的触觉遥控机器人原型, 作为评估在 4G 网络上的 VR 环境中实施数 字孪生的连接性和安全性标准的措施。	令人满意的 150 毫秒 延迟,没有任何攻击。
2020	奥利瓦斯-艾拉尼 斯 <i>等人</i>	机器人辅助腹腔镜手术培训系统, 其中工 具的数字孪生被开发并显示在用户界面 中。	增强的空间信息。
2021	哈格曼 <i>等</i>	触觉远程机器人系统可帮助实习外科医生进行微创手术,减轻认知负担,其中以机器人为中心的 DT 复制机器人运动,同时提供所需的语义信息。	路径跟踪精度提高60%,时间消耗减少,与分配轨迹的偏差最小。
	波诺马列娃等	用于远程机器人操作的 DT 辅助 VR 环境, 其中 R-CNN 用于对象检测并在 VR 环境中 生成其数字表示,以补偿相机限制,例如 低分辨率和难以观看的点。	脑力劳动减少高达 11%,整体努力减少高达 16%。
	施 <i>等</i>	用于微创泌尿手术的 DT 辅助机器人机械 手,在手术机器人与其 DT 之间具有同步 数据传输和控制系统。	平均误差减少 30%, 最 大误差减少 33.3%。
	特罗宾格 <i>等</i>	一种机器人 DT 架构,其中医生和患者由相应的机器人 DT 表示,旨在为老年人提供触觉远程机器人和远程医疗应用。	更具互动性的远程医疗 设施。
	洛波莫	以 DT 为视觉和分析界面的机器人辅助骨 科手术。	更好地评估患者特定场 景。
2022	刘 <i>等</i>	VR 和 DT 辅助的可穿戴皮肤集成传感器和触觉机器人软致动器,用于非接触式收集生物样品。	响应时间: <4 μs (1-5 米距离) 响应时间: <350 μs (通过 Wi-Fi 的距离<60 米)

b) 机器人康复和肌肉骨骼模拟

近年来,医疗机器人的另一个快速增长趋势是机器人康复,主要包括开发 DT

辅助假肢,外骨骼和其他机器人辅助措施。有时,为了更好地将假体与其用户肌肉骨骼建模和模拟(MMS)相容,使用了 MMS。然而,根据图 6,MMS 在这个领域的使用似乎正在消亡。有关这些趋势的更详细说明,请参见表 3。

表 3 医疗机器人趋势: 机器人康复和肌肉骨骼模拟 (PY: 出版年份)

裁判。	方法	结果		
皮佐拉托等.	患者神经肌肉骨骼和辅助装置的 DT,用于开发患者专用假肢。	肌肉模拟性状的潜在改善和增强 患者特异性假体兼容性的可能性。		
费尔多托等	通过 CT 扫描构建的 DT 辅助肌肉骨骼建模和模拟,用于仿生机器人原型开发。	最小化成本和优化设计, 肌肉动力 学分析的可能性。		
葛、张、孙、 清	机器人六足位移台外固定器的 DT 优化模拟,旨在矫正骨骼畸形。	在所有病例中,模拟的骨骼畸形均得到纠正;减少了畸形的测量要求,从而缩小了人为误差的范围。		
朱、孙、陈、 李	基于摩擦电传感器的外骨骼,具有 DT 优化的接口和控制。	在低速 (10 RPM) 和高速 (350 RPM) 下将延迟和响应时间降至最低。		
特罗宾格等	用于服务型快速诊断的触觉外骨 骼	增强的反馈		
托皮尼 <i>等</i> .	触觉手部外骨骼(HES),用于基于 VR 的康复任务,通过可变导纳控制,其中 HES 的 DT 在 VR 环境中复制该过程。	更好地分析 HES 的一致性; 当 DT 触 摸 VR 中的虚拟物体时,导纳响应令人满意。		
王 <i>等.</i>	自动步态数据控制系统(AGDCS), 用于自驱动 DT 辅助下肢执行器。	成功生成患者特异性步态并实现 指定步态。		
	皮 费 葛清 朱李 特	度佐拉托等. 思者神经肌肉骨骼和辅助装置的 DT,用于开发患者专用假肢。通过 CT 扫描构建的 DT 辅助肌肉骨骼建模和模拟,用于仿生机器人原型开发。		

c) DT 辅助 AI 实施

根据图 6, DT 辅助 AI 实施从 2021 年开始稳步上升。2021 年,R-CNN 被用于检测各种设备及其相应的数字孪生在虚拟环境中的位置。第二年,开发磁驱动医疗微型机器人的 DT,其中非线性 ARX-ANN 用于确定系统动力学并预测系统的未来输出。同年,开发了一个 DT 集成机器人平台,该平台利用多种 AI 方法(包括 Unet,CNN 和 ASPOCRNet)自动从患者的鼻前庭收集生物样本,以防止 COVID-19 在卫生工作者中传播。

d) 医疗设备的机器人组装

在 COVID-19 大流行期间,机器人医疗设备组装加快了步伐,作为应对医疗设备需求(尤其是呼吸机)惊人增长的措施。2020 年,开发了机器人单元的 DT,用于在 COVID-19 之后非接触式分发药物和其他基本用品。第二年,开发了 DT 优化的 HRC 系统,以应对医疗设备日益增长的需求,特别是交流发电机和医用呼吸

机。研究表明,通过优化医疗 HRC 装配,整体效率提高 25.09%,操作员工作量减少 20.24%。还发现,在实施 RDT 之前,碰撞率高达 5.128%,而 RDT 集成后降至 0.513%。

e) 微纳医疗机器人

微纳医疗机器人似乎是医疗机器人的新趋势。在大多数情况下,这种机器人是磁驱动的。2020年,有研究指出了磁驱动微纳机器人的特性、机理和范围等重要课题,其中研究提到 DT 的实施可以极大地优化此类机器人的各种医疗程序。2022年,开发了微型机器人的 DT,利用人工智能预测系统输出。

近年来,VR 辅助机器人手术、康复机器人和 DT 辅助 AI 部署似乎是医疗机器人的新兴趋势。另一方面,微纳医疗机器人和机器人医疗设备组装似乎还处于起步阶段。然而,很明显,COVID-19 大流行是设定医疗机器人大多数数字孪生趋势速度的关键催化剂,尤其是在医疗远程机器人、DT 辅助人工智能和医疗设备机器人组装等学科中。然而,肌肉骨骼建模和模拟(MMS)可能正在消亡,因为人工智能应用可以导致适当的患者特定假肢和建模,而不是劳动密集型的 MMS 过程。

2.3. 软机器人中的数字孪生

软机器人领域是一个相对较新的机器人领域,近年来发生了一些显著的变化,DT 在软机器人领域的使用加速了这一进步。根据这项研究的经验,数字孪生在软机器人中的早期实现主要集中在 VR 应用中。后来,在 2020 年出现了建立和开发用于复杂软机器人机械手控制的可行方法和组件的趋势。下一阶段似乎是与 HRI和混合系统的大规模集成。最近的趋势似乎更多地集中在增强现实集成应用和机器人控制上,这显然是图 7. 此外,趋势可以汇总为以下几组:

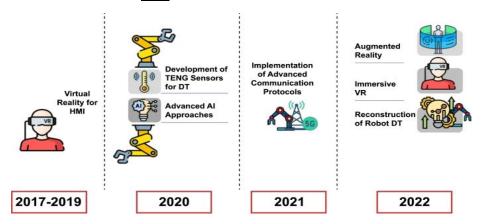


图 7 面向 DT 的软机器人最新趋势的年度亮相

a) 沉浸式 VR 应用与软体机器人 DT 在 VR 空间中的重构

数字孪生在软机器人中的最新研究趋势旨在增强现实或扩展现实。除了建立有效的 HRI 系统(将在下一节中讨论)之外,近年来,虚拟现实和扩展现实在软机器人的构建,开发和功能方面取得了可喜的成果。2019 年,有学者提出在以人为中心的生产系统中将软机器人用作虚拟人,通过在 VR 中利用数字孪生可以进一步提高基础设施的效率。作为演示,该研究开发了一种沉浸式人机模拟,这是一个使用 Amazon Sumerian 框架的 VR 环境,其中软机器人数字孪生复制了物理机器人的实时行为。物理机器人运动的检测主要使用深度摄像头完成,然后处理检测数据并将其传输到数字孪生。研究得出的结论是,统一的 DT 嵌入式基础设施表现出实质性的额外好处,例如机器人工作空间的更好可视化,更好的安全评估以及最显著的机器人程序复杂性和流程步骤的降低。

呈现软机器人数字复制品的一个关键挑战是在虚拟空间中重建其形状。尽管有几种方法可以重建软机器人的 DT,但就准确性而言,大多数方法都不够。正如研究的那样,单弯曲角度和曲率参数化等简单方法不足以将本体感受传感器接收的复杂数据表示为成熟的数字模型。同样,在任何 DT 界面中,易于理解都是一个关键优先事项,限制了基于一组 3D 坐标点的 DT 表示,因为这种方法导致了很大的困难。正如研究所述,尽管有一些方法可以缓解上述问题并提供易于解释的方法,例如分段恒定曲率模型,Cosserat 杆模型和贝塞尔曲面,但它们再次未能描绘机器人的外观。然而,3D 点云没有这样的限制,除了它无法在扩展现实中表示。考虑到准确性、易于表示和与扩展现实的集成之间的所有这些权衡,该研究开发了一种基于骨骼动画方法的基础设施,其中软机器人操纵器数据由嵌入式颜色传感器接收。然后,颜色传感器馈送的 RGBD 数据由 FFNN 通过 ROS 转换为标记坐标。最终在这些点上添加额外的骨骼插值并操纵结构,在 Unity 平台中获得了数字副本。在评估中,该系统表现出高效准确的数字孪生表示,平均速度为 60FPS,延迟为 16 ms。

b) DT-AI 方法和 TENG 传感器的利用

任何数字孪生系统的一个关键方面是物理机器人与其虚拟孪生之间的无缝数据传输。到目前为止,位置传感器和摄像头已被用于将物理机器人数据发送到数字孪生,例如关节位置、接触分离、机器人工作空间信息等。随着系统变得越来越复杂,传统的位置传感器在连接和协作复杂性不断增加方面有其局限性。因此,实际上,使用相机(例如深度相机)最常用于行业中不同的检测,识别和工作区19/49

定义活动。

然而,正如研究指出的,基于摄像头的数字孪生可能有几个主要缺点,其中最值得注意的是它无法在完全黑暗的环境中运行。它还说明了仅使用相机数据开发实时数字孪生的主要复杂性。考虑到这些逆境,该研究提出并开发了适用于软机器人的多功能摩擦电纳米发电机传感器,可以确保在各种不利的工作条件下从物理机器人到数字孪生的连续数据流。

该研究表明,将这种传感器与基于 SVM 的数据处理一起使用,可以有效感知 28 个不同形状的物体,准确率为 97.1%,这有助于研究人员概念化 DT 仓库,其中基于摄像头的感知被使用 TENG 传感器取代。

c) 多模态交互

如研究所述,多模态交互(MMI)充当了 DT 对其相应软机器人响应的激活剂。作者指出,传统的数据处理技术不足以处理为 DT 建立 MMI 所需的异构大数据。该研究强调先进的 ML 方法与 5G 等尖端通信协议相结合,以最大限度地提高 DT-soft 机器人和其他附属系统的效率。

可以说,与迄今所涵盖的趋势有关的技术要么是 RDT 功能的系统进步,要么是利用 DT 和软机器人技术的应用。图 8 聚合和分类确定为开发和应用程序的各种方法。

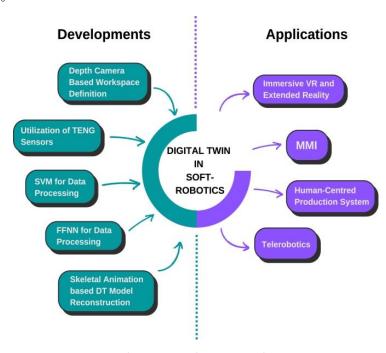


图 8 面向 DT 的软机器人的发展和应用

2.4. 人机交互中的数字孪生

正如本研究所观察到的,人机交互中的 DT 表现出多样化的研究趋势,这些趋势可以从图 9. 尽管其中许多包括跨维度方面,但最特殊的方面已被确定为有效的框架创建,以便将数字孪生高效部署到 HRI,远程机器人应用,MR 和 VR 应用,VTB 开发和 DT 辅助 AI 实施。

Yearly Trends in DT-HRI

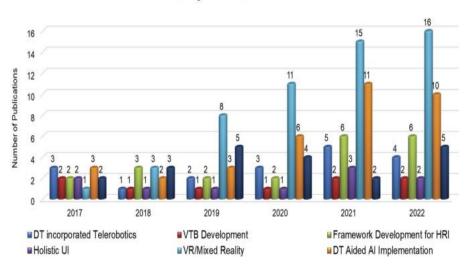


图 9 DT 在 HRI 中的最新趋势

a) DT 辅助 MR / VR 应用,VTB 和远程机器人

DT 辅助 MR/VR 应用近年来取得了最快的增长趋势。在 2017 年至 2022 年 5 月期间,通常有独立的 MR/VR 应用程序。早期的实践旨在开发可靠和交互式的机器人控制界面负担得起的 DT 的 56D 重建,用于中小企业工厂的机器人控制。后来的方法引起了多维的兴趣,包括 VR 和混合现实(MR)中的 DT 辅助机器人编程,使用 AMR 的仓库和室内自动化,其中 AMR 自主性是一个关键的挑战。值得注意的是,RDT 辅助 HRI 自主性的趋势在 19 年左右有所增加,特别是在 COVID-47 大流行之后。其他应用包括使用 VR 的 HRI 工作空间设计和优化,MR 中的机器人施工监督以及 DT 集成的节能智能制造。

另一方面,远程机器人应用采用了一种直接的控制机器人的方法,尤其是工业机器人工作单元中的机器人。在各种遥控机器人应用中采用的控制方法中,手势控制具有显著的外观。手势控制机器人系统的一种流行方式是 LeapMotion 方法,因为它易于在 VR 空间和 DT 集成中实现。根据学者研究,DT 集成的远程机器人在验证开发的算法和有效的控制应用方面表现出有希望的结果,例如利用LeapMotion 通过 VTB 中的数字孪生操作崇德手,这为进一步开发留下了空间,增加了力反馈。然而,随着人机工作空间的数量成倍增加,一个关键的权衡变得明

显。尽管机器人具有无限期劳动的内在能力,但它们似乎无法快速适应不断变化的工作条件。另一方面,人类尽管具有非凡的适应性,但不能无限期地工作。一些研究提倡 HRI 系统,其中适应工作取决于人类操作员,然后人类操作员应该相应地操作机器人或协作机器人,DT 可以发挥关键作用。有项研究特别开发了一种以人为中心的 DT 远程机器人工作空间,其中协作机器人由人类操作员通过各种手势由其数字孪生控制。机器人通过实时模拟和 VTB 中的处理来检测与各种障碍物(如工作场所物体和人类操作员)的碰撞,其中机器人,人类操作员和工作空间的解释通过其各自的数字孪生表示。

在许多方法中,MR/VR接口的多功能性已被用于进一步增强DT辅助远程机器。这些增强包括为机器人控制建立沉浸式用户界面,在危险环境中的操作,如核设施对机器人操作员的动觉辅助,基于AI的VR数据处理,以实现更好的机器人控制等等。图10总结了DT辅助远程机器人、VR/MR和手势控制的协同集成,用于HRI机器人控制方法。

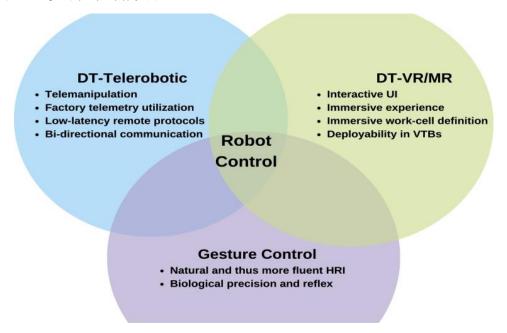


图 10 DT 辅助远程机器人,VR/MR 和手势控制的协同集成,用于 HRI 机器人控制

b) DT 辅助 AI 实现

DT 辅助 AI 的实施在 2019 年之后加快了显著步伐。人工智能的早期实现包括机器人视觉应用,其中使用各种人工智能算法(如 CNN)来检测现实世界的物体,然后将其空间数据导出到数字环境。其他早期方法包括利用强化学习来开发

可以学习举起各种重量的自学习机器人。

最近的研究选择了 K-NN,聚类和基于 ANN 的机器人轨迹估计和障碍物检测,以实现安全,无碰撞的 HRI 工作空间,基于 FFT-PCA-SVM-VR 的 DT 用于人机交互焊接和焊工行为分析,用于开发生命周期框架和优化用于虚拟产品开发的拾取和放置机器人的强化学习,基于深度学习的机器人开发,可以自学装配过程,基于DT 辅助 CNN 的人类动作识别,基于 R-CNN 的数据增强,用于 VR 辅助远程操作,基于深度学习的眼睛凝视和头部手势识别以及用于机器人远程操作手势控制的数据处理,基于强化学习的复杂装配工作空间的自主性,以减少操作员疲劳,以及许多其他人。

人工智能辅助 RDT 还被有效地用于检测人类操作员,并为 HRC 装配线执行相应的重新配置程序。在一项研究中,开发了一个动态重新配置框架,该框架使用 AI 和 ROS 根据从 2D 和 3D 传感器接收的数据重新设计装配线。结果表明,将数字孪生整合到 HRI 系统中可使年产量提高 25%,机器人行为重新设计所需的时间减少 80%,工作站级重新设计所需的时间减少 69%。

c)架构开发

随着 HRI 整合在现代工作场所的出现和迅速发展,一系列新的挑战开始质疑传统和积极的组织结构的可行性。正如研究指出,现代组织结构,如安东尼的管理控制、流程标准化,甚至 HRI/OS 都未能执行无缝的 HRI,因为它们依赖于人文特征,如兴趣、快速适应性和动机,而这些特征与机器人没有直接兼容性。作为这些担忧的对策,已经提出了具有实时数据交换的面向 DT 的 5C 架构,其中机器人通过其数字孪生进行控制。研究人员还强调了引导数字孪生实现 MMI 和 HRI 互操作性的重要性,这可能会导致系统灵活性的提高,问责制分散和有效的供应链管理。

d) 其他方法

19 / 45

发现车间的装配线为 RDT 的实施提供了最佳空间。在一项研究中,展示了一种用于双臂协作机器人的 DT 辅助混合方法,其中机器人及其环境通过双向传感器更新在数字环境中复制。这种方法带来了高效和优化的机器人轨迹,以及动态和静态避障。然而,许多传感器的统一融合和模拟器更新被认为是一个非常复杂的过程,需要花费相当长的时间。许多研究暗示,协作机器人有可能通过允许人和机器人在共享位置进行协作并进行物理交互来优化手动和机器人操作的好处,从

而彻底改变工业行业。因此,协作机器人市场近年来增长迅速,预计到 5 年将达到 6 亿美元,占整个机器人行业的 2027%。然而,在现实中,安全仍然是一个重大问题,也是充分协作流程的障碍:国际标准规定了安全操作标准,但在复杂情况下满足这些标准具有挑战性,并且没有关于如何构建安全协作流程的指导。

2021年,某学者参与了协作机器人的自信安全集成(CSI: Cobot)项目,该项目正在解决这些问题并为工业协作机器人安全保证创造方法。近年来,Covid-19 法规限制了对物理设施的访问。因此,研究采用了一种创新技术,采用了数字孪生(DT),并开发了一种广泛使用的模块化数字孪生框架。该框架支持物理和数字安全技术的创建、测试、部署和验证。CSI 框架为迭代集成和修改合成安全控制器提供了一个稳定的环境,以及用于实验的虚拟测试平台。他们利用这个机会定期测试和微调系统设置,并在他们的论文中提供了一个高度模块化的平台,用于为协作机器人程序创建安全关键型数字孪生。使用模块化 DT 进行安全研究是这项工作的一项新贡献。他们还在文章中展示了他们的数据集,代码和模拟视频。

近年来,建筑机器人越来越受欢迎,这主要是由于人们正在思考一个更可持续、可回收和碳高效的社会。机器人木结构建筑专注于可持续设计、生产和装配过程,是该领域的顶级建筑方法之一。计算机数控(CNC)技术用于木结构的机器人制造。木结构的自动化装配仍然是一个难题,特别是在需要专门设计和装配程序的高效结构的建造中。使用非均质材料(如木材)会给机器人驱动的装配操作带来许多问题。

第二年,即 2022 年,有研究引入一个新框架,用于解决基于机器人的木桁架结构协同施工背景下的此类困难,这些结构由独特的搭接连接连接,通过复杂的装配运动将部件互锁。在一项研究中,他们还提出了基于动态运动基元(DMP)的演示学习(LbD)技术的想法,以教机器人如何进行此类动作,从而消除了对标准机器人编程的需求,这对于这样的任务来说是相当困难的。数字框架(数字孪生)、新型联锁木桁架接头设计和机器人 LbD 装配方法是他们工作的主要贡献。在这项研究中,他们提供了一个使用机器人机械手组装复杂木桁架的模型。使用传统的机器人编程方法无法有效地对装配任务进行编程。因此,他们利用 LbD 将人体组装能力转移到机器人系统中。对于这种方法,他们设计了一个示教机器人单元,其中人类专家操作员教授适当的装配运动,然后将其传输到执行单元。有研究提出了装配数字孪生的概念,它将建筑桁架和结构设计与机器人装配直接联

系起来,并通过使用演示学习的装配技术进一步加强了这一概念。在许多试验中评估了建议框架的性能,在这些试验中,在机器人工作空间的不同位置进行了单个人体装配演示。

2.5. 工业机器人中的数字孪生

研究发现,HRI 和工业机器人领域紧密相连,以至于在工业领域也采用了相同的 HRI 方法。但是,有一些做法主要存在于后来的领域。正如本研究所经历的,近年来工业机器人技术领域的数字孪生趋势可分为以下几类:

• a) 机器人工作单元模拟

2017年,基于模型-视图-视图-模型(MVVM)范式在一项研究中开发了 DT 集成的五层逻辑操作 RWCS。它成功地验证了复杂工作单元中的机器人轨迹。作者还强调了一种多功能框架,该框架与各种类型的机器人兼容,并且可以非常准确地应用于不同的工作单元。另一项研究中最近的一种方法利用工厂遥测技术在 VR 和AR 中开发响应式 RWCS,其中反馈数据由机器视觉通过摄像头提供。RWCS 的其他实践包括基于 VR 的多机器人工作单元调试,宜家虚拟机器人工作单元等。

• b) DT 辅助工厂维护

在另一项研究中,经过彻底的分析,发现 DT 可以成功地用于五种类型的工业设备维护,包括反应性,规范性,基于状态,预测性和预防性维护,后两者特别有效。这些方法对于机器人集成的方法也是可行的。2017年,Vachálek 等人展示了一种 DT 概念,该概念利用遗传算法进行 DT 优化的预测分析和机器人辅助生产线的工厂增强。据称,这种方法取得了成功,总生产时间缩短了 5.2%。然而,DT 与其物理对应部分之间的延迟约为 1 秒,与当今通常需要毫秒级延迟的应用程序相比,这是相当耗时的。后来在一项研究中提出一种 RDT 建模方法,该方法使用基于物理的方法和虚拟传感器来收集和生成用于预测分析的工业机器人数据。该研究展示了对机器人变速箱扭矩信号的预测分析,经过四次迭代后,投影数据和实际数据之间的差异从超过 2.5 Nm 减少到 0-0.5 Nm。

剩余使用寿命(RUL)预测是基于 RDT 的工厂维护的另一个值得注意的应用。 作为研究的延伸,作者实施了 RUL 预测,发现由于机械磨损,真实数据和预测数 据之间的偏差在 6 个月后超过了最大允许阈值。在 2019 年汇总的其他当代和以前 的方法是,基于模型的方法中使用时间平均模态概率的 RUL 预测,基于测量和科 学理解的实时"尾数"复合结构预测多物理材料属性波动等。然而,作者在评估作品 中发现的一个重大缺陷是,制造设施中的众多机器人或机器缺乏通用的适应性技术,需要为每个物理系统进行特定的数字孪生结构,这既困难又昂贵且耗时。在最近的一种方法中,Aivaliotis 等人解决了数据驱动的预测分析的现有局限性,特别是它对历史数据的依赖,而历史数据并不总是可用的。作者提出了一种基于工业机器人退化曲线的新型 RUL 预测方法,以验证机器人是否会在 18 个月的时间内发生故障。结果表明,正如预测的那样,驱动扭矩随时间增长,遵循与摩擦系数相同的模式。然而,该研究考虑了标称载荷条件,而过度载荷通常是齿轮箱机械故障的原因。

总体而言,发现工厂维护中的 RDT 主要使用数据驱动的基于物理的方法,特别是对于严重依赖历史数据的预测性维护。从数字环境中引入合成数据生成显然显示出巨大的前景,但现在预测它是否会彻底改变工厂维护还为时过早,因为在非常复杂的混合体环境中,为每个对象生成数字副本,然后训练人工智能来检测它们可能是一个乏味的过程。

• c) DT 辅助 AI 实现

ZZ / 45

2017年,机器视觉被用于生成在 VR 空间中开发机器人工作单元 DT 所需的反馈数据。2018年,强化学习已被应用于帮助机器人自我学习举起各种重量。机器人模型是可视化的,可以从其 DT 进行控制。最近的实践包括基于 DT 集成机器视觉的工业机器人技能评估,以及使用机器学习增强点云信息和 RDT 的工业机器人编程,所暗示的数据驱动的 RDT 方法的一个关键缺点是缺乏历史数据。然而,这一限制可以通过生成合成数据来解决,人工智能算法可以进一步提高其准确性。在一项研究中,作者展示了一种基于 CNN 的方法,从数字模型中生成额外的合成图像数据,当开发的模型被重新训练并用于检测不同方向的真实世界物体时,其成功率为 100%。

先进的人工智能方法也被用于 RDT 辅助制造的有效故障诊断。在另一项研究中,该研究展示了一种使用深度迁移学习进行故障诊断的新技术。结果表明,所提出的深度迁移学习辅助故障诊断的准确率达到了 97.96%,超过了当时最先进的 DNN 方法。

为物理机器人开发高效的人工智能算法是一项关键挑战,因为它的时间消耗过大,长期重复运动的电源和组件限制,缺乏合适的 VTB 等。这个问题的有效解决方案是通过广泛的模拟来开发算法,其中观察到 DT 发挥了可行的作用。示例包括

从模拟到物理机器人的基于 DT 辅助 DRL 的策略转移,以及在其 DT 中训练机器人进行智能机器人抓取应用抓取生成和选择卷积神经网络(GGS-CNN),抓取单个项目和混合对象的成功率分别为 96.7%和 93.8%。

• d)工业云和边缘机器人

云和边缘机器人 - 两者都是工业 4.0 范式中相对较新的方面。各种物联网和 IIoT 技术作为中间件的实施将这些技术带到了今天拥有的巨大互联形式。开发了一种 DT 辅助的基于云的机器人制造系统,用于在 PCB 上组装不同的 THT 器件。然 而,该研究又指出,虽然云机器人由于具有更强的处理能力和成本最小化而具有希望,但由于其集中形式,它容易受到实时响应和安全性的影响。相反,该研究 选择了边缘机器人来提高响应能力,鼓励去中心化并优化带宽。使用两个 DT 集成 机器人对所提出的架构进行了测试,并通过向机器人提供无线电信息进一步改善了协调性。在延迟方面,边缘计算比云计算更快具有固有的优势,这使其成为实时故障诊断的有效方法。如另一项研究所示,基于边缘的网络可以有效地利用 ROS 分析堆栈进行快速实时的故障检测和异常诊断。

• e) 工业 RDT 中的区块链

最近,由于其安全性和可追溯性,区块链技术在 RDT 应用程序中的实施获得了显著的牵引力。在研究中,作者为建筑机器人开发了一个区块链集成 RDT,以使用预制砖建造模型桥梁。研究结果表明,该技术很容易追踪,因为 RDT 数据存储在区块链上,并带有相关的时间戳。此外,该研究发现,根据共识技术,该方法更安全,因为它可以防止被黑客入侵或损坏的数据暴露给系统中的其他节点,从而导致完全不变。但是,有人提到,可以在 3.42 秒内传输大量数据。

DT 和区块链的合作已被提出来增强工业应用的工业互联网,包括机器人辅助的智能制造,这表明工业机器人,DT,边缘设备和其他区块链有助于不可变数据传输的智能协作。

传统区块链的一个主要缺点是它的处理延迟,这对于需要低于毫秒范围的 RDT 应用程序来说可能是致命的。Khan 等人解决了这个问题,并提出了一个替代的区块链框架,称为 DT 的双链,该框架与六维螺旋 DT 架构合并。作为概念验证,该研究实验了一种机器人手术机,其中性能要求可以存储在双链中。根据这项研究,与常规区块链相比,建议的架构显著减少了交易时间。但是,没有提供可量化的业绩指标来衡量业绩提高到什么程度。在研究中,作者也解决了延迟问题,

展示了一种用于采样率选择和区分时间敏感和时间不敏感数据的新算法,前者受到青睐。该研究声称,通过将云计算与大数字孪生数据(BDDT)合并,以比典型区块链网络快得多的速度成功地安全地传输工业数字孪生数据。在最近的一项研究中,研究人员介绍了FedTwin一种新技术,用于对区块链支持的工业数字孪生网络的自适应异步联邦学习,该技术采用联邦证明(PoF)导致自主数字孪生网络。此外,该方法利用生成对抗网络(GAN)来提高方法的安全性,以防止损坏的DT数据被共享。因此,简而言之,支持区块链的工业RDT目前的焦点更多地集中在减少延迟时间上,这对于时间敏感的RDT应用至关重要。

在文献研究和趋势分析中,发现了大量的研究趋势、应用和匹配技术。核心方法的汇总显示在<u>表 4</u>. 还透露,在选定的机器人领域实施 DTIR 存在各种限制和困难。表 5 简要介绍了这些已识别和检测到的限制和问题。

表 4 数字孪生在机器人学五个选定领域的研究趋势/应用

太空机器人	软机器人	医疗与康复 机器人	人机界面	工业机器人
•VTB 中的运动跟 踪和路径规划。	· 通过沉浸式 VR/MR/AR/XR 进行 机器人控制和状态 监测。	• 触觉遥控机器 人手术。	• VR/MR 辅助交 互式机器人控制 界面。	• 从 RDT 到 物理机器人 的策略转 移。
集成的基于模型 的 VTB 规范	• VR 空间中 RDT 的 构建和状态更新。	• 腹腔镜机器人 手术培训系统。	• 用于机器人 控制的 RDT 的 3D 重建。	机器人工 作单元模 拟。
•VTB 中的实验性 数字孪生 (EDT)。	• 利用 TENG 传感 器克服基于相机的 反馈限制。	R-CNN 辅助 RDT 的远程机器人操 作。	• VR 和 MR 中的 机器人编程。	• VR 和 MR 中的机器人 状态监测。
• 在轨模块化卫星组件。	• 基于 RGBD 数据 和骨插值法的 FFNN 辅助 RDT 状态更 新。	• COVID-19 中医 疗用品的非接触 式机器人分发。	• 使用 AMR 的 仓库和室内自动 化。	• 机器人轨迹验证。
• 太空工厂 4.0 的遥测数据处 理。	• 基于 SVM 的 RDTRDT 数据处理。	• 由 ARX-ANN 辅助的磁驱动微型机器人的系统动力学估计。	• 节能智能制造。	• 通过人工智能和退化曲线分析进行预测性维护。
• RDT 辅助航天 器 MRO。	• 多模态交互。	• 用于患者特异性假体发育的神经肌肉骨骼模拟。	• 使用跳跃运动控制器进行远程操作。	• RUL 预 测。

表 4 数字孪生在机器人学五个选定领域的研究趋势/应用

- •机器人航天器的 轨迹优化和任务 维护, OSIRIS-REx.
- DT 软机器人的远 仿生机器人开 机器人算法 程操作。
 - 发。
- 开发和评估。
- 故障和异 常诊断。

• 为数据驱

- 机器人固定器 眼睛凝视和 形矫正。
- 优化,用于骨畸 手势控制的远程 操作。
- 动的 RDT 生 成合成数 据。
- 基于摩擦电传 感器的外骨骼开 发。
- 协作机器人 的碰撞检测和避 基于云的 THT 障。
- 在 PCB 上 设备组装。

- 触觉外骨骼, 用于基于 VR 的 康复任务。
- 协作机器人 轨迹优化。
- 区块链和 双链辅助智 能机器人制 造。

- 下肢外骨骼的 自动步态数据控 制。
- 基于 CNN 的 对象检测和系统 RDT 的云合并 与数字孪生之间 GAN 辅助自适 的对象数据同 步。
- 用于工业 应异步联邦 学习。

- •使用 RDT 代理的 患者和医生之间 的远程医疗互 动。
- 基于 DRL 的 机器人自学习。
- 非接触式采集 生物样本。
- FFT-PCA-SVM-VR- 辅助机 器人焊接。
- R-CNN 辅助医 疗设备检测和空 间数据传输到虚 拟空间。
- 人类行为识 别,确保工作空 间安全。
- 人类行为识 别,确保工作空 间安全。
- 基于 R-CNN 的 RDT 数据增 强。
- DT-HRI 的组 织框架评估和发 展。
- 将人体装配 能力转移到协作 机器人。

• 美国宇航局阿 尔忒弥斯计划。

表 4 数字孪生在机器人学五个选定领域的研究趋势/应用表 5 检测到特定于域的关键限制/挑战

医疗与康复机器 太空机器人 软机器人 人机界面 工业机器人 人 • 精度和精 • 机器人手术中 确维护。 使用的机械手的 • 网络安全 • 精度和精确维 高灵敏度精度和 免受网络威 护。 • 对软机器人的复 • 高延迟。•VTB 精度要求。 胁。 杂性进行建模。 • 人工操作人员 环境与目标空间 • 关键延迟要 • 支持区块 • 软体机器人 DT 的 的安全保证。 求,系统复杂 的偏差。 链的工业网 • 低延迟维护。 构造。 • 光学传感器在 络的处理延 性。 • 基于摄像头的反 • 计算密集型建 黑暗中的性能降 • RGB 传感器在 迟。 馈无法在完全黑暗 模和模拟。 • 计算密集 低。 低光照条件下用 的环境中工作。 • 与现有组织模 型建模和模 于医疗设备检测 式不兼容。 和数据传输的局 拟。 限性。 • 数据不变 性保证。

3. DT 结合机器人学的研究范围

如前所述,DT 范式将很快主导机器人研究。因此,该学科的研究领域正在迅速扩大。虽然某些趋势开始消退,但其他趋势在各自领域变得非常流行。当新的、更快的技术被纳入时,现有的趋势要么消失,要么得到加强,在经济上可行,并很好地集成到系统中。在本节中,潜在的研究范围已确定为发现正在出现或至少一致的趋势。还讨论了范围及其增长的原因以及随之而来的限制和/或挑战。纵观所探索的领域,可以观察到混合现实和 VR 应用、触觉遥控机器人应用、DT 集成 AI 实现、机器人工作单元模拟是新兴趋势。下文将进一步讨论这些趋势,以便更好地理解。

a) 沉浸式 VR、MR、AR 和 XR 应用

沉浸式 VR 和混合器现实应用在本综述中探索的每个领域都占主导地位。特别是在 DT-HRI, DT-IR 和 DT-软机器人的情况下,这一趋势正在迅速增长。根据各种研究,这种惊人增长的原因在于 VR 空间提供沉浸式体验的固有能力,这种体验可以集成更好的工作空间可视化功能,交互式整体 UI, 从 VR 空间控制机器人的能力等。简而言之,它可以为 RDT 提供用户友好的多合一位置控制和可视化界面。

然而,RDT模型的构建,特别是对于软机器人并将其导出到 VR 空间被发现是一项相当繁琐的任务。同样,正如<u>另一项研究</u>中所讨论的,基于传统光学传感器的 RDT 仅限于光的存在,这为克服这些限制的进一步研究机会留下了空间。

b) 通过机器人工作单元仿真和基于 RDT 的工厂维护实现智能制造机器人工作单元仿真和 RDT 辅助工厂维护,尤其是后者是工业机器人领域最一致和增长的趋势之一。正如本研究所经历的那样,使用 RWCS 实施数字孪生,增强了机器人工作单元的实时可视化,分析,控制和评估。它还使得在实际实施之前应用先进的 AI 方法来验证机器人动作成为可能。

另一方面,预测性维护已被发现是 RDT 的一大有希望的趋势。RDT 预测机器人组件的未来性能和状态的能力及 RUL 预测的额外好处被发现在工厂维护中创造了奇迹。

然而,正如本研究所观察到的,RDT 在其整个生命周期中主动处于与其物理物理的双向接触状态收集数据,该过程变得计算密集。此外,在这种简单的双向状态下,可能会有数据泄露的开端。延迟是另一个关键问题,特别是在安全是基本问题的 HRI 工作空间中。在许多程度上,安全问题被发现通过区块链实现来解。根据图 11,区块链和 DT-robotics 的研究兴趣在短短 2983 年内实现了惊人的 33.4% 的增长,这清楚地暗示了区块链在 RDT 应用中的可行性。这项研究认为区块链是下一代 DT 的两个主要方面,因此 DT 纳入了机器人优化器,它们是:

- i)分散:任何区块链网络的去中心化性质都是其定义特征。过程控制被划分在称为此类网络中节点的几个控制设备之间。因此,通过使用这种区块链特性,可以构建平滑的 DT 集成机器人应用程序,只要至少有一个节点在运行,即使控制设备发生故障,机器人过程也可以继续。
- ii) **安全**:根据 IBM 的说法,区块链更安全。与传统网络相比,分散式结构中的多节点控制使得破坏所有控制设备变得极其困难,只要至少有一个节点是安全的,系统就可以恢复。其次,在区块链网络中,智能合约、交易数据和区块链都是严格加密的,因此不太可能成功入侵。因此,区块链驱动的 RDT 比传统网络驱动的 RDT 更安全。

但同样,区块链网络仍然被发现工作在 RDT 系统理想所需的毫秒响应时间以上。因此,通过优化区块链网络来提高工厂维护安全性和处理速度的研究机会有很大的空间。

Number of yearly publications on "Blockchain and DT-Robotics"

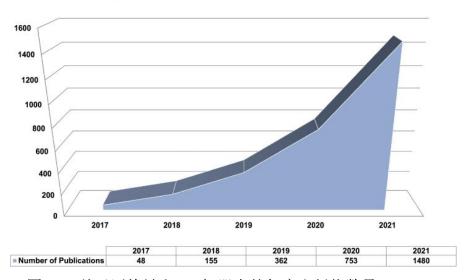


图 11 关于区块链和 DT-机器人的年度出版物数量

c) 触觉遥控应用

除了 MR 和 VR,触觉远程机器人是另一个趋势,几乎在每个领域都出现了。特别是在医疗机器人领域,由于对远程机器人手术的研究越来越多,它被发现以惊人的速度增长。另一方面,由于 COVID-19 大流行的出现,这一趋势得到了推动,试图建立非接触式组装和制造以防止疾病传。现触觉反馈和各种手势控制方法(例如跳跃运动控制)的添加具有将生物反射与远程机器人精度相结合的能力。然而,正如本研究所观察到的,与其他 RDT 应用一样,延迟和中等噪声是确保无缝远程操作需要克服的两个关键挑战,这需要进一步研究。

d) DT 辅助 AI 实现

DT 辅助 AI 的实施在大多数领域都在持续增长,通过机器视觉、机器人自学习、智能和自主数据处理实现自主。特别是,机器人政策转移和 CNN 等方法已被观察到在人机交互和工业机器人等领域蓬勃发展。这些增加带来了许多智能解决方案,以提高产量,确保 HRI 工作空间的更好安全性,减少碰撞,从而提高平台效率。人工智能增强的机器视觉已被用作通过提供空间数据快速沉浸式数字孪生环境创建和 VTB 开发的有效工具。在许多情况下,已经发现人工智能方法可以增强 RDT 数据,以最大限度地减少人为错误。因此,更多的研究可以通过 DT 辅助的AI 实现带来潜在的发展。

尽管人工智能在这些领域做出了革命性的贡献,但在许多方面,这些算法的计算量太大,无法在嵌入式设备中实现,从而导致硬件成本和处理能力要求增加。

因此,在开发轻量级、快速和有效的人工智能模型方面,有很大的进一步研究机 会。

4. 威胁、挑战和可能的替代方案

虽然将数字孪生纳入机器人的众多领域可能会带来非凡的进步,但其实施是一项重大挑战。除了作为工业 4.0 的一项新技术引入(可能被称为冰山一角)之外,该技术还可能受到各种当前和未来的威胁和挑战。这项研究将"威胁"定义为可能直接损害快速诊断检测完整性的因素,将"挑战"定义为可能阻止快速诊断检测充分发挥其潜力的情况。在这两种情况下,都调查并提出了几种备选办法,如表 7. 以下页面封装了完整的上下文。

表 7 检测到的威胁和挑战及其可能的解决方案摘要

序号	威胁/挑战	提供/建议的解决方案			
01	框架与现有组织 框架不兼容	混合使用多种组织模型。			
02	通用框架模型或 体系结构	通过来自工厂模拟环境的数据传输自动配置虚拟环境			
03	缺乏结构化的 RDT 培训计划	i)	培训工程师和技术人员,为他们提供 RDT 的实践经验。		
		ii)	包括机器人和数字孪生技术的选修课程		
04	开发费用高	i) ii)	提高对 DT 的认识和知识,以减少误用 <u>。</u> 开发计算密集度较低的 RDT 框架,以降低硬件和处理 成本。		
05	RDT 仿真模型的 准确性和精度	i) ii) iii)	人工智能辅助建模,用于准确的数字模型生成。 人工智能增强的传统控制器,如 PID、模糊逻辑等。 将边缘计算用于时间关键型 RDT,而不是云计算。		
06 网络威胁和计算 限制	i) ii)	实施通用解决方案,例如安全套接字层(SSL), IPSec,加密算法,入侵检测和防御系统以及数字证书。 开发计算密集度较低的 RDT 框架,以降低硬件和处理			
			成本。		
07	网络连接问题	i)	通过开发系统的网络连接来降低高容错性,降低延迟,实现超连接,降低 ping 和增加覆盖范围。		
		ii)	对时间关键型 RDT 应用使用边缘计算代替云计算。		

a) 框架与现有组织框架不兼容

显然,正如<u>一项研究</u>指出,大多数现有的组织模型与 DT-HRI 实施存在不同的兼容性问题,从而导致相应的挑战。作为解决方案,作者建议不要依赖特定的组织模型。不同组织结构的适当总结在<u>表 6 中</u>。

表 6 框架与不同组织模式不兼容的挑战

模型 概念 挑战

基于非正式和直接沟通的任务 敏捷和精益管理 建立针对特定技能的灵活决策流程。

协作。

领导分配和接受机器人对人类操作员 安东尼的管理控制 一个任务分配主持人。 的监督。

错误管理。 过程标准化 任务和流程遵循规范。

阿恩和布伦森的元 结果规范与需要完成的任务无 沟通和协作的复杂性。 组织 关。

传教士 提供目的 对机器人无效。

知识和技能被标准化并应用于

适当的任务识别和匹配过程。 专业官僚机构 任务。

通用框架模型或架构 b)

这是一个可能的差距,阻碍了数字孪生在开发和实施数字孪生的各种应用程序 中的扩展。目前没有可用于开发 DT 的即插即用模块, 因此是任何给定系统的 RDT。基于 AutomationML 的即插即用概念演示了通过从工厂模拟环境传输 XML 数 据来自动配置虚拟环境。在这种情况下,模块化数字终端与现实世界的设置交互 以链接和传输数据,从而协助决策。

c) 缺乏结构化的培训计划

缺乏结构化的 RDT 培训计划导致工程师和开发人员的技能和专业知识存在差 距。因此,在构建 DT 模型时,缺乏相关信息可能会导致时间、精力和资源损失。 因此,需要适当的培训和多个应用程序模型来准备设计师和工程师构建 DT 模型。 为此,工程师可以在本科学习期间接受培训并获得 RDT 的实践经验。大学课程可 以尽可能鼓励使用数字工具,并增加工程课程中的计算机科学教育,只要这不会 以减少对传统核心课程的重视为代价。这里的困难在于平衡基础工程课程与将 DT 计算机科学相关主题纳入课程。鉴于这一可能的问题,可以实施重组工程学校课 程的战略。一种方法是包括机器人和数字孪生技术的选修课程。

d) 开发费用高

DT 模型的创建和建模需要财务,工厂停机时间和工时投资,以便在多个系统 级别采用和部署 DT,并将复杂的 DT 框架集成到机器人中,难度增加了几个档 次。此外,在开发系统模型、实时反馈以及物理和虚拟模型之间的交互方面存在 一些不确定性。众多替代方案表明,鉴于人类与机器人一起工作的动态性质,DT-HRC 可以在任何时候假设,这也是使用 DT-HRC 进行流程改进的障碍。影响这些相 互作用的大量特征扩大了可以想象的系统状态的数量。数以千计的外部和内在因

素可能影响人权理事会的情况。找到所有这些特征并在虚拟世界中重现相同的条件将非常耗时。同样,购买和使用带有必要工具箱或插件的商业过程模拟软件来创建数字孪生的成本也很高。由于对数字孪生概念仍然缺乏认识和知识,制造业实施数字孪生概念更加困难。为了克服这类问题,提高对 DT 的认识和知识非常重要。通过创造越来越多的知识,它可以成为 DT 开发成本的潜在解决方案。

e) DT 仿真模型的精度和精度低

大多数 DT 模型通过在现实世界中捕获机器人的运动并在虚拟世界中复制来生成机器人的虚拟副本。为了找到最佳参数以获得最佳结果,DT 提供了实现各种算法的能力,这些算法可以并行运行,而不会影响实际设置。然而,其中大多数都没有考虑 DT 模型中各种复杂过程的建模,例如夹持器手指磨损,伺服齿轮磨损,夹持器和控制器之间的延迟影响以及机器人随时间推移的可重复性。作为这些挑战的解决方案,本文建议使用人工智能辅助建模来生成准确的数字模型。为了获得更高的精度,人工智能还可用于增强传统实现的控制器,如 PID、模糊逻辑等。为了减少时间关键型应用程序的延迟,建议使用边缘设备而不是云计算,前提是系统兼容。

f) 网络威胁和计算限制

一般来说,网络威胁是 RDT 和 DT 最常见的威胁之一。根据研究,个人对网络领域发生的事件(例如,问题,攻击尝试)的感知被称为网络态势感知(例如,工业网络)。在另一项研究中也有一些关于网络物理威胁的调查。云计算面临着与传统 IT 解决方案相同的挑战,例如拒绝服务(DoS),中间人(MITM),窃听,IP 欺骗和伪装攻击。传统上,这些问题是通过实施通用解决方案来解决的,例如安全套接字层(SSL),IPSec,加密算法,入侵检测和预防系统以及数字证书。另一方面,设备在低速处理器、内存和能源限制方面存在一些计算限制,这是物联网为安全的医疗保健网络环境带来的挑战之一。

g) 网络连接问题

网络连接问题,例如延迟、高 ping、覆盖问题等。所有这些都是快速诊断和数字孪生面临的巨大挑战。在一项研究中,作者讨论了 5G 网络的市场挑战,以及一些影响数字孪生技术的开放性问题。另一方面,P2P,P2V 和 V2V 是一些需要的通信系统,其中会出现连接和延迟问题,这些在研究中进行了表示。这种挑战的解决方案可能是降低高容错性,降低延迟,实现超连接,降低 ping 并通过开发系

统的网络连接来增加覆盖范围。P2P 和 P2V 通信的要求是 - 深度网络结构,低延迟和超连接。而 V2V 通信的要求是 - 信息可靠性和高容错,低延迟和超连接。

5. DT 结合机器人的未来范式

鉴于所有新出现的趋势和潜在的挑战,可以说,如果将最新兴的做法统一到集体框架中,就可以最好地利用这种区域诊断检测的可行性。这发生在工业机器人远程操纵的情况下,其中 DT-telerobotics,DT-VR 和手势控制协同集成并创建了可行的探索路线。也可以为 RDT 建立这样的框架,以确保未来研究的长期和成功的研究目标。在此背景下,本文提出了一个关于 DT 集成机器人未来范式的主要假设,即快速区块链支持的元界作为下一代 VTB。

5.1. 元宇宙: DT 机器人的下一代 VTB

正如本文所观察到的那样,沉浸式 VR,触觉远程机器人和 AI 似乎是 DT 结合机器人技术中最流行,最频繁和最通用的方法。因此,一个结合所有这些趋势的框架可能对未来的挑战有很大的希望。考虑到这样的前景,这项研究认为区块链和元界以及类似技术的整合是 RDT 的潜在未来目的地,特别是对于下一代 VTB 开发。这种 VTB 可能能够集成上述趋势的大多数可行功能,并彻底改变机器人应用的设计,仿真,分析和控制,就像提议的架构一样。图 12. 作为应用场景,请读者参考图 13 了解架构在实际 HRI 工作区中的工作方式。

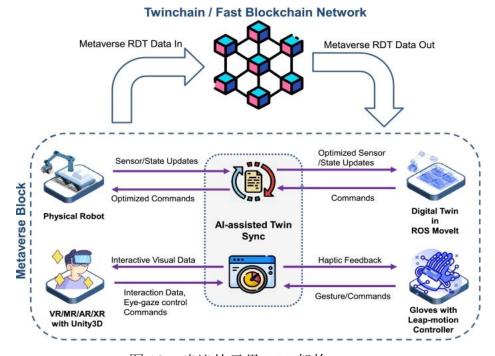


图 12 建议的元界-RDT 架构

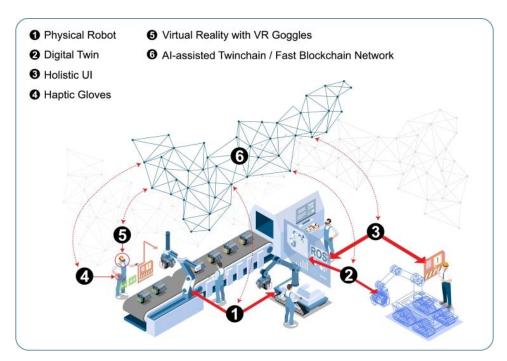


图 13 虚拟世界:下一代 VTB 应用场景

通常,由于中等噪声、硬件故障、延迟和其他问题,DT 状态与其物理对应状态之间存在显著偏差。考虑一个工业机器人机械手,如图 13 中(1)。

如所述图 12中,建议在类似于 ROS Movelt 的环境中开发 DT,该环境提供了内置轨迹优化器和碰撞预防机制的额外好处。机器人与其数字孪生之间的双向传感器/状态更新由 AI 模块优化,可减少错误并相应地优化命令。同时,可以在Unity3D 中开发的 VR/MR/AR/XR 客户端的交互数据和 Leap-motion 控制器提供的手势控制都被馈送到 AI 块,在那里它们被同步和合并以达到集体结果。这些元素共

同构成了元界环境的基本组成部分,通常旨在通过 VR 护目镜将沉浸式体验整合到混合现实中在图 12 和整体 UI 在(3)中标记图 12 到其他元件的功能,例如通过触觉手套进行遥控机器人控制在(4)中标记在图 12。

最后,作为整个元界 RDT 数据的网络媒介,一个快速区块链网络,如 Twinchain 标记为图 12 中(6),建议提供数据不变性、足够的处理速度和分散性。

然而,应该指出的是,所提假设一般是本文基于文献综述的预测,可能需要进 一步验证。

6. 结论

本文对现有出版物进行了系统和广泛的回顾,以调查 DT 结合机器人的最新趋势。从研究结果中,它还确定了未来研究的潜在范围,例如混合现实和沉浸式 VR 应用,DT 辅助远程机器人应用,AI 实现,机器人工作单元模拟等,然后是挑战及其可能的解决方案。最后,该研究为 DT 结合机器人的未来范式提出了一个假设,其中描述了元宇宙和类似技术的潜力,以及它们如何将 DTIR 的所有新兴趋势结合到一个多功能平台中,并提出了本文提出的概念。然而,应该提到的是,由于缺乏出版物,许多重要的机器人学科被排除在本文之外,这可能被视为本研究的局限性。将来,作者打算用另一篇文章来补充综述,假设省略领域的出版物数量足够,该文章将进行更广泛的文献综述。尽管如此,本文提供的综述贡献和框架有望对未来的 DT 集成机器人研究产生重大影响。

*注:原文和译文版权分属作者和译者所有,若转载、引用或发表,请标明出处。

数字孪生和精准心理健康的未来

Michael Spitzer, Itai Dattner, Sigal Zilcha-Mano, 徐健(译)

1. 简介

亟需的精确心理健康治疗现正面临着科学开发挑战。从这个角度来看,我们讨论了使用数字孪生(DT)技术推进临床研究和心理健康治疗的潜力。尽管 DT 的概念已经存在了十多年,但对于它是什么仍然存在混乱。我们首先简要地描述 DT,然后讨论该技术在心理健康中的潜在应用。

1.1. 数字孪生

DT 是一个虚拟实体,旨在尽可能详细地表示物理实体。这种类型的虚拟表示使得在物理实体的生命周期内更好地设计和控制物理实体成为可能。数字孪生概念在学术界和工业界都受到越来越多的关注,Gartner最近的一项调查显示,数字孪生正在进入主流使用。尽管各种学科都采用了DT,但没有普遍接受的DT定义,每个学科都有自己的定义。例如,在农业中,DT被认为是"物理对象或系统的动态虚拟表示,通常跨越其生命周期的多个阶段,它使用真实世界的数据,模拟或机器学习模型与数据分析相结合,以实现理解、学习和推理。DT可用于回答假设问题,并且应该能够以直观的方式呈现见解。DT与农业中典型的模拟器或推荐系统的主要区别在于,典型的模拟器是离线的,推荐系统通常不基于物理模型,而仅基于统计/机器学习算法。相比之下,DT跨越个人或流程的生命周期,从真实数据更新,并使用物理和机械模型,统计/机器学习和人工智能(AI)为用户提供基

于证据的指导。上述源自工业和农业的概念似乎足够普遍,适合其他领域,例如心理健康。

1.2. DT 在心理健康方面的潜在好处?

DT 使用不断更新的现实虚拟表示为其用户提供先进的决策功能。在心理健康治疗中,高级功能可能包括通过在现实中应用治疗之前模拟潜在的治疗场景来设计更好的治疗方法的能力,并向治疗师提供在线反馈和建议,以在治疗期内优化治疗。DT 可以产生精确的心理健康需求: 预测心理健康的恶化并预测心理健康干预的过程和结果。基于这些知识,DT 可以为任何给定的个体确定最有效的治疗方法。这听起来像科幻小说,但技术已经到位。在心理健康方面,DT 可以对诊断,预后,治疗选择和治疗定制产生患者特定的预测。

DT 通过生成个人情绪,认知和行为的实时副本来重现个人的功能和行为,并使用从各种来源(如传感器、问卷)收集的数据实时更新。这种针对个人的知识可用于监测心理健康状况,确定临床诊断,并在需要干预时发出警报。统计和物理机制模型使心理健康数据的稳健、可解释和可重复的分析成为可能,并可以推断缺失的状态和参数。DT 可用于测试作用机制不同的各种类型的治疗方法,并确定对给定个体显示最佳结果的治疗方法。虚拟测试不同的治疗方法的优点是可以减少漫长而昂贵的试错过程,尝试各种治疗方法,直到找到适合个人特征且有效的治疗方法。DT 不仅可以确定对个人最有效的治疗方法,还可以根据实时收集的数据就如何为患者量身定制治疗提出建议。

一般来说,应用于心理健康领域的 DT 应该实时提供以下功能:

监控: 跟踪个人的精神状态并告知他们其中的变化。在患者的知情同意下,他们可以将结果呈现给利益相关者(如 HMO),在检测到恶化时发出警报。当预计恶

化持续时,DT 可以发出预防性干预的需要,并预测引起压力的未来事件的潜在影响,例如学生的测试或士兵的部署。

诊断: 诊断精神疾病和合并症,并跟踪其发展和波动。

预测:使用在线模拟和根本原因分析,通过将真实和合成数据与经验和机制模型相结合来预测基础过程的过程。

指导:指示要采取的行动,例如,根据所有可用选项推荐最佳治疗和最有效的 技术。

有用的 DT 应该是一个虚拟实体,详细反映患者心理健康的机制和动态性质和心理健康紊乱的病理生理学,以及治疗过程和患者与治疗师的关系质量。虚拟表示可以为患者和治疗师配备强大的工具,实现基于透明推理和概率考虑的最佳治疗,将过去学到的见解推广到新情况中,这些情况以前不一定遇到过特定患者或治疗师。

DT已成功用于存在感兴趣现象的经过验证的物理模型的领域,例如工业或农业应用。成熟且经过验证的物理模型以及数据(如来自物联网传感器)以及机器学习和人工智能算法构成了DT部署的理想环境。问题是DT技术是否与心理健康领域相关,其中至少一些感兴趣的现象是行为性的,而物理模型不太常见。在下一节中,我们将指出一个肯定答案是合理的示例,并为心理健康DT的有前途的方法奠定概念基础。

2. 心理健康数字孪生

精神卫生是一种精神健康状态,使人们能够应对生活压力,实现自己的能力,学习和工作良好,并为社区做出贡献(世卫组织)。心理健康是由个人、社会和结构压力之间的复杂相互作用决定的。代表个人心理健康实际状态的物理状态空

间是一个复杂的高维空间,通常无法完全观察或直接测量和建模。因此,开发一个精确甚至近似的个人整个心理健康的虚拟复制品是一个雄心勃勃的长期研究目标,如果可行的话。

考虑重度抑郁症(MDD),它是全球残疾的主要原因,也是全球疾病总体负担的主要贡献者。MDD 有数百种积极的治疗方法,其潜在机制以及如何从理论上推动治疗变化。但它们的疗效似乎没有差异,对于"普通患者"来说约为 50%。然而,一些患者亚群表现出从给定治疗中受益的强大能力,而另一些则不太能够这样做。尽管精神卫生干预措施取得了进展,但在过去五十年中,总体治疗效果几乎没有变化。进一步将我们的心理健康目标集中在"孪生",我们考虑患者和治疗师之间的治疗联盟在心理治疗中,这是心理治疗研究中治疗结果最一致的预测因素之一。我们将治疗联盟称为可能实现"孪生"的物理"资产"。

2.1. 治疗师-患者联盟数字孪生

治疗师-患者联盟是治疗师和患者在治疗过程中形成的关系,可能是建立在相互信任和理解基础上的合作关系。患者以不同的能力来接受治疗,以实现这种潜力,这种潜力可能会在治疗过程中发生变化并带来治愈本身。这种联盟被认为是治疗成功的关键因素,因为它使治疗师能够了解患者的需求和动机,并使患者在讨论和解决他们的挑战和目标时感到舒适和安全。联盟的一个常见定义是Bordin提出的定义,强调三个主要方面:对治疗目标和任务的一致,治疗师和患者之间的联系以及对治疗过程的共同理解。这些方面可以共这种潜力可能会在治疗过程中发生变化并带来治愈本身。这种联盟被认为是治疗成功的关键因素,因为它使治疗师能够了解患者的需求和动机,并使患者在讨论和解决他们的挑战和目标时感到舒适和安全。同创造一个有利于改变和成长的治疗环境。

数十年的实证研究表明,更强大的联盟与更好的治疗结果显著相关。最近,解 开联盟的两个不同组成部分的重要性已经得到证明:患者与他人形成令人满意的 关系的一般倾向,这也影响了与治疗师的关系(联盟的特质状成分),以及通过 与治疗师的互动(联盟的状态状成分)而改变这种倾向。前者使治疗有效;后者使 联盟具有治疗作用。

鉴于上述科学发现,开发联盟数字孪生(ADT)似乎是一项及时且有用的技术。ADT 技术的最终目标是帮助治疗师改善治疗联盟,从而改善治疗结果。为了证明 ADT 的巨大潜力,我们基于已建立和充分研究的成分构思了一个假设的例子。 我们的目标是展示一个概念;因此,我们使示例尽可能简单,但并不简单。

继 Kapteyn 等人之后,我们将物理资产(联盟)及其 DT 视为两个耦合的动力系统,随着时间的推移通过各自的状态空间而演变。请注意,至少需要考虑两个时间尺度: (a)会话时间(可能每周)和(b)会话中的时间,其中分辨率可以精确到分钟或秒。我们使用概率图模型(添加决策节点的动态贝叶斯网络)来定义在治疗过程中构成这种耦合动态系统的元素,以及需要在 DT 中建模的相互作用。图 1 显示了资产孪生系统的概率图形模型的可视化表示形式。

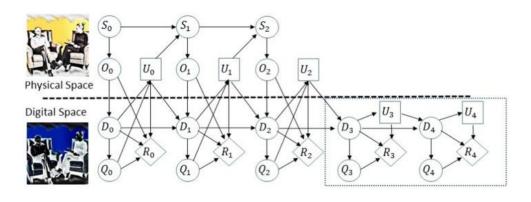


图 1 ADT 的概率图形模型,改编自 Kapteyn 等人

图形模型的上部路径表示实物资产状态的时间演变,用 S 表示;下部路径表示数字 状态的时间演变,用 D 表示。图形模型对资产与其数字孪生之间随时间推移的耦 合进行编码。在每个时间点,我们测量实物资产,这些信息流入用 O 表示的 DT。 观测数据用于更新数字状态 D 和构成 DT 的模型,而 DT 又用于预测感兴趣的数量 Q。然后,根据模型预测选择决策或控制输入 U 并将其应用于物理资产。上述数量 和作用会影响 R 表示的奖励。

时间索引图 1 对应于连续几周内进行的连续治疗。图定义的条件独立结构允许 我们对模型中变量的联合分布进行分解(图中的节点通常可以表示多变量随机变 量),并用于端到端不确定性量化和原则分析、预测和决策。该方法还允许提前 预测动态以做出最佳决策。如图 1,在虚线矩形中的时间步骤 3 的动态网络中,不 对物理状态进行观测,而仅生成数字空间中的预测,因此可在时间步骤 2 中做出 最佳决策。

设计 ADT 的第一阶段是定义 中描述的图形的组件图 1 以及通过图形的拓扑重组来构建其结构,这是手头用例所需的。为此,必须定义要测量的特定物理量。为此目的的自然候选人可以受到现有心理治疗研究的激励。我们考虑三个数量:
(a)治疗的有效性和有效性,在抑郁症的情况下,可以通过汉密尔顿抑郁症评定量表(HRSD)来衡量;(b)每次治疗联盟的质量,通过患者和治疗师填写的自我报告问卷来衡量,例如工作联盟清单;(c)在治疗期间测量的联盟破裂的存在和程度,例如,通过使用运动能量量化的非语言同步。理论和临床文献以及实证研究表明,联盟对结果影响的最有希望的过程之一是联盟破裂和修复的情节。破裂被定义为联盟中的恶化或紧张,表现为患者和治疗师之间对治疗目标的分歧,在治疗任务上缺乏合作,或他们的情感纽带。破裂是治疗的一个组成部分,发生在91%—100%的治疗过程中。当破裂消退时,破裂与更好的治疗结果有关;否则,它们可能会成为治疗失败的风险,如患者恶化和退出所表现的那样。为了解决破裂,

治疗师需要首先识别它,然后实施某些解决策略来修复它。相对于基于观察者的编码发现的破裂,治疗师似乎经常错过治疗期间发生的破裂,这进一步推动了允许实时检测破裂的技术的发展。例如,最近的一项研究表明,非语言同步,其特征是治疗师和患者在会议期间的运动同步,可以用作联盟破裂的标志。文献讨论了在心理治疗中关注患者-治疗师同步性的潜在优点。

总结感兴趣的数量:

- - 在每次治疗开始时,通过患者的 HRSD 值来评估治疗效果和有效性。
- - 每届会议的联盟实力,由 WAI 在会议结束时衡量。
- 会议期间发生的破裂,通过运动能量的量化通过非语言同步来测量,并 在每次会话期间以几分钟的分辨率进行跟踪。

这些量可用于构建 ADT,如下所示。我们正在"结对"的实物资产的物理状态(S)是联盟的质量。我们拥有的观察数据(O)是 HRSD,WAI和非语言同步。数字状态(D)是由预先训练的统计/机器学习模型预测的 HRSD和WAI值,该模型使用会话期间测量的非语言同步的当前和预测值来预测这些数量。预测未来的非语言同步值可以完成,例如,使用同步的机制模型表征治疗师和患者在会议期间运动的机制和动力学。这种物理模型可以实时拟合到运动数据中,以模拟同步水平或进出同步的未来场景,这反过来可能表明正在演变的破裂,如果实时解决,可以加强联盟并导致更好的治疗结果。因此,数字状态由机械模型、具有心理学意义的参数的实时估计和预先训练的机器学习模型组成。学习模型采用机械模型预测的值,并推断描述资产的感兴趣的心理治疗量(Q),这些资产通过模型输出(例如对抗性和撤退破裂、联盟质量和治疗的整体疗效)来估计。行动或决定(U)代表治疗师在会议内或会话之间进行的干预,以影响身体资产,即改善联

盟。最后,奖励(R)量化了资产孪生系统的整体绩效,通过衡量 HRSD 在不同会话之间的改善,可以实现。

资产孪生系统的上述组成部分的定义是 ADT 设计和开发的第一阶段。特别是,在定义数字状态时,我们必须考虑哪些信息足以支持手头的用例。通常,数字状态空间只是复杂的高维物理状态空间的一个子集,由(简单但不简单)模型组成,这些模型捕获与感兴趣的应用中的诊断、预测和决策相关的物理资产的变化。近年来为动力系统的统计学习以及分析大数据和测量误差模型开发的科学方法与开发构成 ADT 的计算模型和统计学习算法高度相关; 另见最近的审查和其中的参考文献。

上述 DT 概念化允许动态更新计算模型,并将它们集成到数据驱动的分析和决策反馈循环中。ADT 可以在实验室和临床实验中得到验证。

3. 构建 MHDT 的其他注意事项

开发数字孪生需要遵循数据收集(观察和对照实验)和管理(清理、验证、处理缺失数据、预处理)的最佳统计实践。另一个关键要素是人工智能技术的发展,该技术集成了描述心理健康动态和患者治疗过程的机制模型,这些方法适用于各种数据源,如运动、声音、社交媒体活动、自我报告等。这些模型可以通过将数据驱动的结果与精神病理学和心理治疗的概念模型相结合,并积累经验知识,最大限度地提高可解释性、普遍性和稳健性。它们通过生成潜在心理健康动态的可能未来路径来实现实时假设分析。反过来,这允许在给定时间为个体患者选择最佳干预。我们分析、整合和利用许多高维数据源的能力不断提高,这牢固地确立了我们使用创新数据科学技术构建个人数字孪生的能力。近年来,将创新数据科学进步实施到心理健康领域的潜力已经牢固确立。

下面我们描述了开发,验证和维护 ADT 以表征个体(患者,治疗师)和治疗过程所需的步骤。我们描述了基于领域知识、数据和统计/机器学习算法开发先进技术时所需的典型步骤。

第1步 数据收集。DT 技术的发展需要大量的异构多域和多尺度时空的心理健康数据。可以包括个人使用生态瞬时评估(EMA)方法自动收集和报告的数据。自动收集数据的示例包括使用可穿戴技术逐刻收集的生理测量、社交媒体活动、睡眠和运动模式、声学声音指数等。使用云存储远程处理数据以实现实时处理,并用符合 HIPAA 的方法进行存储。观察数据和对照实验数据应以不同的方式处理。事实上,为了更好的可重复性、可重复性和研究结果的泛化,应该很好地理解每个数据源的数据生成过程,并制定严格的数据收集协议。如果可能,应研究和控制统计测量误差、偏差和方差的来源。一些示例是传感器、个体、领域和环境条件的偏差和方差之间和内部(随时间推移)。特别是,当学习动态系统感兴趣时,鉴于上面讨论的基本动态过程和所涉及的不同时间尺度,应使用适当的实验设计方法。

第2步 数据管理。数字孪生的开发需要设计和实施数据管道,其中数据从物理实体的测量(传感器等)流向数字孪生大脑中的虚拟表示,从而为实时或未来的干预提供警报和建议,跨越物理实体或过程的生命周期。此类数据管道应可靠,以便安全地部署在生产环境中,但又足够灵活,以适应新的流程、数据和算法要求。在研究和生产环境中,数据管道应执行数据清理、验证和预处理。理想情况下,此类管道和流程应完全自动化,尤其是在生产环境中,以允许扩展。具体来说,研究阶段通常从分析和探索性数据分析(EDA)的数据准备开始。数据准备通常包括数据清理、验证和预处理(规范化、转换、基线校正、手动和自动异

常值检测、处理缺失数据等)。在 EDA 中,可以使用多种方法,例如无模型数据 挖掘(如关联规则),无监督方法(如聚类),模糊集,基于规则的推理,以及 开发统计和数学模型,在所有时空尺度上表征数据生成过程。此步骤会产生数据 管道和流程,从而实现物理/机械模型、统计/机器学习以及 AI 模型和算法的高 级分析和开发。

第3步 建模。强大的数字孪生基于对环境中物理实体的动态建模(如数学、统计和符号)。最近,通过将统计/机器学习和人工智能算法与描述感兴趣潜在过程动态的机制模型相结合,开发了此类模型。当应用于流入 DT 的数据时,这些模型允许更多可解释的推理和预测。它们还允许通过为潜在动态生成可能的(在明确定义的概率意义上)未来路径来实时执行假设分析。反过来,这允许在给定时间为特定个体选择最佳干预。例如,一个模型可能专注于预测个体之间和个体内部水平的心理健康诊断或特定症状集群(例如,不稳定的影响、适应不良的人际互动、不良行为等)。此外,迁移学习和领域适应工具的应用对于将实验室结果推广到现场至关重要。

4. 总结

上面提到的建模技术是最近用于识别心理健康标志物的现有最先进的有监督和 无监督机器学习方法的自然进步。事实上,监督学习的目的是开发一个模型,其 中同时给出了心理健康诊断(如 MDD)和症状(协变量),以便模型可以预测未来 的诊断,当只给出特征时。例如,监督式机器学习可识别与 MDD 症状严重程度关 联的预先指定的特征。无监督学习使用统计算法来发现数据中的结构,例如共享 相同诊断的个体之间的相似性和不同性。这种方法最有希望的例子之一是通过解 析 MDD 标志物中包含的异质性来识别特定精神健康障碍(如 MDD)的不同生物型, 从而能够检测具有独特心理 - 社会生物学特征的生物衍生亚组。这两种机器学习方法都有可能有助于理解 MDD 病理生理学,它们具有互补的局限性:监督方法受到它们所依赖的先验知识的准确性的限制,而无监督方法则受到数据驱动亚型的不明确或无法解释的推导的可能性的限制,这降低了它们在临床实践中实施的可能性。鉴于这些互补的局限性,将两者与机制模型结合成一个混合模型可以最大限度地提高它们产生关于心理健康生物型的有意义的新知识的能力。因此,为了最大限度地提高可解释性和普遍性,数据驱动的结果与常用的精神病理学和心理治疗概念模型相结合。目前在心理健康领域实施的 ML 方法侧重于对心理健康标志物进行分类和预测,但其解决方案仍然无法解释。ADT 将保持预测的准确性,同时赋予这些模型解释性特征。这种技术的验证可以在实验室内外进行,与实际经历压力的人进行测试。

最后,与任何新技术一样,重要的细节仍有待解决,挑战仍有待解决,包括患者安全和隐私的伦理考虑;在实验室内外部署和维护数字孪生的方法和技术挑战;成功适应以前没有遇到的新情况;以及不断学习和提高绩效。心理健康领域的数字孪生可以作为基础科学与现实世界应用之间的重要纽带,利用数字革命提供个性化和高效的解决方案,促进福祉。

*注:原文和译文版权分属作者和译者所有,若转载、引用或发表,请标明出处。