

- covery and selfmanagement efficacy of patients with colon cancer[J]. *Oncol Lett*, 2024, 27(6): 247.
- [36] Li W H C, Lam D C L, Sin K M, et al. Effectiveness of a self-determination theory-based smoking cessation intervention plus instant messaging via mobile application for smokers with cancer: protocol for a pragmatic randomized controlled trial[J]. *Addiction*, 2024, 119(8): 1468-1477.
- [37] Henriques H R, Correia A, Santos T, et al. Nursing interventions to promote dyspnea self-management of complex chronic patients: an integrated review[J]. *Int J Nurs Sci*, 2024, 11(2): 241-257.
- [38] 王笑露, 杨巧菊, 王诗雨, 等. 老年人在线医疗健康信息获取能力及影响因素研究进展[J]. *护理学杂志*, 2024, 39(11): 20-23.

(本文编辑 吴红艳)

数字孪生在慢性病精准护理中的研究进展

何晓菲, 朱蓝玉, 李佳, 刘言

摘要: 从数字孪生的概念与起源、特征及其在慢性病精准护理中的应用现状等方面进行综述, 分析数字孪生在技术、安全性、公平性等方面所存在的挑战并指出其展望, 旨在为我国数字孪生技术在慢性病精准护理中的应用和发展提供参考。

关键词: 慢性病; 数字孪生; 慢性病管理; 精准护理; 智能护理; 人工智能; 健康管理; 综述文献

中图分类号: R473.5 **DOI:** 10.3870/j.issn.1001-4152.2024.24.120

Research progress of digital twins in precision nursing care for chronic diseases He

Xiaofei, Zhu Lanyu, Li Jia, Liu Yan. School of Nursing, Changchun University of Traditional Chinese Medicine, Changchun, 130117, China

Abstract: This paper reviews the concept, origin, characteristics of digital twins and their application status in precision nursing for chronic diseases. It analyzes the challenges existing in aspects such as technology, security, and equity of digital twins and points out their prospects, aiming to provide references for the application and development of digital twin technology in precision nursing for chronic diseases in China.

Keywords: chronic diseases; digital twins; chronic disease management; precise nursing; intelligent nursing; artificial intelligence; health management; literature review

精准护理是指以个体化健康为导向, 通过多学科合作, 应用包括基因组学在内的生物组学、人工智能及大数据等先进技术, 整合个人基因、生活方式和环境暴露等特异性数据及其交互作用, 为护理对象提供针对性护理服务, 促进人类健康水平的提升^[1]。随着我国人口老龄化趋势不断加深, 以心血管疾病、糖尿病、癌症为主的多种慢性病发病率逐渐增高。慢性病是指起病隐匿、病程长(>1年)、需要持续医疗护理或日常活动受限的疾病^[2]。慢性病已成为危害人民健康的重大公共卫生问题, 慢性病精准护理能实现对慢性病患者的实时动态健康管理, 改善疾病的不良结局^[2-4]。然而, 我国传统医疗模式受限于以疾病为中心的临床决策, 忽视患者从预防到康复的全病程管理, 难以实现慢性病全生命周期的健康管理。数字孪生(Digital Twins, DT)作为目前一种新的数字技术应用^[5], 在国外慢性病患者中已得到广泛应用, 但国内相关研究尚处于起步阶段。因此, 本研究就数字孪生在慢性病精准护理中的研究现状进行综述, 以期为我国数字孪生技术在慢性病精准护理中的应用与发展提供参考。

作者单位: 长春中医药大学护理学院(吉林 长春, 130117)

何晓菲: 女, 硕士在读, 学生, 2362692194@qq.com

通信作者: 朱蓝玉, 13588836@qq.com

科研项目: 吉林省科技发展计划项目(20180201041SF)

收稿: 2024-07-10; 修回: 2024-09-12

1 数字孪生的概述

1.1 数字孪生的概念 数字孪生的概念雏形由Grieves等^[6]于2003年在产品生命周期管理课程中首次提出, 并将其定义为镜像空间模型, 解释为物理对象的虚拟数字化表达, 由现实空间、虚拟空间及两者交互的数据和信息所组成, 能够在虚拟空间中完成映射, 并可实时同步反映物理实体全生命周期过程。2010年美国国家航空航天局正式提出数字孪生的概念, 将其规范定义为: 一种集成化的多物理量、多时空尺度的运载工具或系统的仿真, 该仿真使用了当前最为有效的物理模型、实时的传感器数据和飞行历史数据等, 来镜像出其物理飞行器的生存状态^[7]。近年来数字孪生在工业领域应用日渐广泛, 健康中国政策也推动了数字孪生在精准医疗领域的健康发展^[8-9]。数字孪生从出生即开始收集个体数据形成虚拟孪生并伴随其成长过程, 通过全生命周期的追踪, 对患者的健康状况进行实时监测, 预测个体随时可能发生的疾病风险, 通过危机预警, 实现针对性护理干预, 不仅满足慢性病群体全生命周期防治需求, 还促使传统护理方式转变为根据个体表征数据的精准预防护理, 实现以健康为中心的临床决策^[10], 为推动护理模式创新与技术变革、引领护理高质量发展提供有力支持。

1.2 数字孪生的特征 数字孪生具有实时性、闭环性、虚实映射、全方位数据信息整合^[11-12]的特征。①

实时性:虚拟孪生体实时同步物理实体内部数据来更新演变,从而优化模拟或预测模型的有效性。②闭环性:孪生体通过对物理实体内部机制描述、规律分析和趋势的洞察,形成基于物理实体的优化测算和仿真,实现决策功能的数据闭环。③虚实映射:虚拟孪生体通过实时数据连接、状态交互及信息交换,实现与物理实体全部构成因素、内部结构或流程的双向映射。④全方位数据信息整合:整合生物人体数据(影像学数据、生化数据等)、虚拟仿真数据(病情监测数据、疾病进展预测数据、用药记录跟踪数据、电子病历数据等)、历史数据及医疗记录数据等海量多维数据信息。

2 数字孪生在慢性病精准护理中的应用

2.1 病情监测 临床患者疾病状态瞬息万变,数字孪生基于基因图谱数据,通过高端算法分析辅助构建模拟特定对象的数字孪生,有利于实现医护人员对疾病指标变化的远程识别和监测。在此技术下,Lehrach 等^[13]基于数字孪生构建针对个体患者的护理和疾病预防系统,该系统旨在使用收集到的基因组学数据来模拟患者的生物学特征及其疾病状态,为医护人员提供模拟侵入性技术、测试护理措施有效性的平台,该系统在实现对患者远程病情管理,提高其生活质量的同时,也有利于提高医护人员的临床决策能力。Hernandez-Boussard 等^[14]将数字孪生应用于癌症患者,提出癌症患者数字孪生(Cancer Patient Digital Twins,CPDT)模型,利用新兴的计算和生物技术构建个体表征,反映患者在不同治疗方案和时间点中的分子、生理和生活状态,从而准确识别癌症的变化轨迹,通过将预警信号双向集成至医护端和患者端,实现对癌症进展的实时监测。Bahrami 等^[15]开发基于数字孪生的芬太尼皮肤给药模型,模拟 20~80 岁患者药物摄取、分布及代谢等全程透皮给药流程,实现对患者各器官芬太尼浓度的实时监测,与常规透皮治疗相比,发现疼痛缓解率增加 30%,无痛时间增加 315%,在规避呼吸抑制、缓解疼痛的同时,有利于医护人员依据体内芬太尼血药浓度变化给予患者个性化用药,从而调整芬太尼贴片的剂量、部位及时间等。数字孪生为实时访问、监测患者病情数据提供了科学可靠的研究平台,未来医护人员应充分利用数字孪生技术,探究分子标志物与健康监测结局的关联,推动精准护理监测技术与产品的转化。

2.2 疾病风险预测 数字孪生可基于获得的监测数据生成智能化的预测模型,用于预测疾病进展,支持临床决策。Kim 等^[16]构建基于 404 例前列腺癌患者的病理数据和 8 个预测模型的数字孪生模型框架,用于癌症病理分期、生化复发风险预测模型的更新,采用机器学习进行数据处理,结果表明,此模型预测准确率高达 96.25%,有利于医护人员以可视化形式及时了解癌症的演变趋势。Shamanna 等^[17]在 64 例 2 型糖尿病患者中试点一项数字孪生精准治疗计划,该计划使用数字孪生移动应用程序、连续血糖监测仪、

传感器手表获取和分析糖尿病患者的生理数据,以实现胰岛素抵抗的改善。结果表明,通过机器学习设计的预测算法来动态预测糖尿病患者血糖水平,实现了患者个性化的胰岛素剂量和递送模式的远程监控,维持患者最佳代谢状态。数字孪生在疾病风险预测方面显示出良好的预测效果,医护人员可利用数字孪生构建疾病预测模型的价值,通过有效评估疾病风险、识别疾病发展趋势,为患者制订精确化护理干预目标,从而减轻患者对疾病轨迹不确定性的担忧。

2.3 异常行为预警 数字孪生可对慢性病患者的异常行为,如跌倒、异常步态、呼吸异常进行识别和预警,以便护理人员及时采取有效的防范措施,为减少不良护理事件提供技术支撑。张捷等^[18]结合视觉传感器、人工智能芯片和深度学习算法等技术,研发基于数字孪生的老年人跌倒实时监测报警系统,经检验,老年人行为与姿态风险漏报率为零,误报率 4.3%,证实其在跌倒风险管理中实时报警与风险预警的有效性,有利于避免或减轻老年人跌倒所造成的损伤。Uhlenberg 等^[19]设计全面协同数字孪生框架来模拟身体运动,即由生物力学人体模型和可穿戴惯性传感器模型来获取和模拟偏瘫患者的行走状态,根据惯性传感器类型、定位和处理算法来实现动态步态的精准测量和分析,选择 8 例卒中后偏瘫患者为研究对象,干预结束后发现,与传统算法相比其检测性能提高 65%,实现了异常步态的预警和不同步态阶段识别。Khan 等^[20]提出基于统计时间序列数据增强和机器学习的呼吸数字孪生模型,用于生成更大的呼吸合成数据集,通过非干扰传感器对患者进行呼吸频率监测,发现呼吸频率监测的准确度可达 92.3%,确保患者安全的同时,减轻了医护人员持续监测异常呼吸的工作负荷。

2.4 优化分诊管理 数字孪生通过建立医院和患者的虚拟模型来镜像仿真物理实体(实体医院、生物人体),通过实时监控、分析和预测医院的运营管理情况和疾病的发展趋势,实现疾病风险分层、准确分诊和医疗资源的优化配置。研究证实,数字孪生解决了庞大的慢性病患者预检分诊工作,有效提高了护理分诊的效率和准确性^[21]。Cheng 等^[22]基于广东省第二人民医院与华为合作建设的全场景智能化医院,提出打造集中中心调控、科室及病房为一体的三维仿真医院智能孪生模型,以全局视角动态同步医院资源、科室就诊状态、病房床位信息等,发现与传统就诊相比,实现多智能场景的可视化、全要素协同监测、全生命周期高效管理,从而有利于在线疾病分级、预检分诊及分时段预约挂号,优化临床护理流程,降低护理人工服务成本。Croatti 等^[23]提出严重创伤患者数字孪生管理模型,可收集患者事故现场的实时信息,以识别创伤中的危重患者并安排优先就诊。未来,医护人员需提升运用数字孪生实施智能分诊的能力,有效协调人员配置,促进优质护理资源精确、高效地对接临床实践。

2.5 精准营养干预 研究表明,保持健康的营养策略

可以预防和延缓慢性病的发作^[24]。基于自我报告、食物日记和定期评估的传统营养管理,在准确性、合规性和实时分析方面存在局限性。数字孪生强调从人类基因组中提取的大量信息,结合纵向代谢组学、免疫组学、行为和肠道微生物参数及生物临床变量等,可为医护人员营养管理提供靶向干预的应用潜力,以实现精准营养干预。Gkouskou 等^[25]将数字孪生用于肥胖症的饮食管理中,通过模拟人体内的食物摄入和营养吸收等过程,整合数据分析和机器学习的信息来模拟和分析个性化的营养模式和需求,显著提升了肥胖症及其合并症的饮食管理水平,同时为医护人员针对性营养指导提供了新视角。Shamanna 等^[26]利用患者食物摄入信息和连续血糖监测仪数据作为机器学习预测模型的输入,为 463 例 2 型糖尿病患者提供每日精准营养指导,研究发现,在 90 d 的精准营养治疗中患者血糖得到有效控制。数字孪生在制订慢性病患者个性化的饮食模式中体现出一定的实用价值,有利于医护人员长期监督其饮食方案,促进其形成健康的生活方式。

2.6 康复训练 基于数字孪生的康复训练不仅为医护人员提供了远程实时监控、评估和指导患者的康复工具,同时有效辅助患者的康复运动,提高自我康复训练的依从性。Gámez Díaz 等^[27]引入数字孪生教练(Digital Twin Coaching,DTC)的应用程序,即通过智能教练利用数字孪生技术为患者提供个性化定制的康复训练,医护人员可通过其感知个体的表征数据,远程评估患者的康复姿势和动作,从而提高康复效果,优化康复路径。Saxby 等^[28]提出将数字孪生用于神经损伤康复系统中,该系统由设备通信实体捕获相应表征,在解剖学(即磁共振成像)、神经(即脑电图)等特征的基础上创建神经肌肉骨骼模型,将患者的运动意图,通过脑机接口设备与肌肉结合器相连接,模拟激活肌肉刺激的大脑信号,促进患者运动功能康复的同时,为医护人员提供了新型的康复训练干预方案。Falkowski 等^[29]提出在 VR 中通过数字孪生远程控制外骨骼康复的概念,即构建患者身体数字孪生模型,通过与远程控制模块相连接,将持续监测到的患者动态参数和运动轨迹等数据信息,自动发送到医护人员的 VR 护目镜中,以便通过外骨骼装置模拟对患者运动的影响,以远程可视化的形式调控患者的康复运动模式。数字孪生为医护人员和患者康复训练提供了时间和空间上的便利,同时,交互式的远程康复训练监督与管理,有利于提高康复训练的质量。

3 挑战及展望

3.1 突破技术瓶颈 数字孪生的临床转化和开发的成功主要基于数据和分析技术两部分。数据方面,由于数据源获取和访问的路径不同,例如电子健康记录、成像模式、可穿戴设备和遗传数据库,其为碎片化、异质性数据,如何将这些数据集成到连贯的数字孪生模型中可能具有挑战性^[30]。医护人员应整合基因组学数据、知识和培训,对异构数据进行协同整合,构建数据共享化、名词标准化的护理病历,为临床护理模拟提供

决策支持,并进一步将其引入护理教育体系中,使护生在虚拟孪生体(虚拟人体、虚拟医院)环境中提升实践操作技能、处理复杂案例素养,从而提高护生多学科交叉技术水平,使数字孪生反馈于临床护理实践。分析技术方面,一方面,为保障医护人员精准干预,必须提供高保真度的技术支持,因此在以人工智能算法为主的数字孪生技术处理上,需要加强高性能计算设施建设,来处理数据不断增加的量、速度和复杂性。另一方面,医护人员应积极融入数字孪生的研发技术中,掌握精准护理科研分析工具和方法,提高实践循证创新能力。

3.2 强化法律法规 数字孪生的运行严重依赖于患者大量数据的收集和分析,包括敏感的健康信息。保护这些数据免遭未经授权的访问、破坏或滥用是一项严峻的挑战。数字孪生引发新的法律问题。为避免数据被用于损害患者的最大利益,Schwartz 等^[31]提出 3 个原则:①患者拥有自己的数据,应免受滥用,保密患者数据隐私;②患者必须为使用其数据提供明确的知情同意;③数字孪生技术的推进需要政府进一步加强相关数据的法律法规建设,确保个人数据加密、安全存储,以防止未经授权的访问,助力精准护理技术的发展。

3.3 加强伦理考量 构建数字孪生需要考虑一系列伦理问题,主要包括:①数据隐私考量。包括获得在数字孪生开发中收集和使用个人数据的知情同意、数据所有权等隐私伦理风险。②伦理控制。Braun^[32]针对数字孪生对个性化医疗带来的伦理挑战,呼吁人们能够充分控制数字孪生,并通过强大的治理机制和政策来监督数字孪生的道德控制和管理。③公平性。Bruynseels 等^[33]认为,数字孪生可能会加剧现有的不平等。对此,Huang 等^[34]开发以过程为导向的伦理地图,通过将个性化医疗服务的数字孪生分解为数据收集、数据管理、数据分析和信息使用 4 个主要阶段,以检查各阶段内数据处理和信息使用过程中可能出现的伦理风险,消弭使用中遇到的公平性问题。此外,应充分发挥精准护理中护理人员角色,护理人员在提供基因组学健康教育宣传的同时,应倡导个体间公平地获得基因组保健资源,确保数字孪生不会加剧现有的健康差距,维护医疗服务公平。

4 小结

数字孪生通过实时同步和多维数据获取到的集成数据,能够实现针对不同个体及人群疾病的监测、干预、康复等,使精准化护理落地临床实践成为可能并具有广阔前景。但其发展过程中也存在技术不足、安全隐私威胁、伦理冲突等问题。未来,应以精准有效解决全人类全生命周期健康问题为目标,加强数字孪生技术标准、法律法规、伦理道德等建设,推进护理学科与多领域、多学科交叉融合,为慢性病患者提供安全化、智能化、个体化的精准护理服务。

参考文献:

[1] 刘锁霞,李坤.精准护理的人本底蕴与实证应用探究

- [J]. 护理学杂志, 2018, 33(22): 92-94.
- [2] 张敬颖, 曹文卓, 欧敏行, 等. 实施科学在慢性病健康照护中的应用研究进展[J]. 护理学杂志, 2024, 39(3): 112-116.
- [3] 艾婷芳, 李剑虹. 我国“互联网+”慢性病管理的应用进展及思考[J]. 中国慢性病预防与控制, 2024, 32(2): 142-146.
- [4] 吴俊慧, 周伟娇, 王伟轩, 等. 老年慢病精准护理重点领域研究进展[J]. 四川大学学报(医学版), 2023, 54(4): 731-735.
- [5] Rosen R, Von Wichert G, Lo G, et al. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing[J]. IFAC-Papers OnLine, 2015, 48(3): 567-572.
- [6] Grieves M, Vickers J. Digital twin; mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems [M]//Kahlen F J, Flumerfelt S, Alves A. Transdisciplinary perspectives on complex systems: new findings and approaches. Cham: Springer, 2017: 85-113.
- [7] Shafto M, Conroy M, Doyle R, et al. NASA technology roadmap: modeling, simulation, information technology & processing roadmap, technology area 11 [EB/OL]. (2010-10-01) [2021-06-10]. https://www.nasa.gov/pdf/501321main_TA11-MSITP-DRAFT-Nov2010-A1.pdf.
- [8] 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.
- [9] Katsoulakis E, Wang Q, Wu H, et al. Digital twins for health: a scoping review[J]. NPJ Digit Med, 2024, 7(1): 77.
- [10] Venkatesh K P, Brito G, Kamel Boulos M N. Health digital twins in life science and health care innovation [J]. Annu Rev Pharm Tox, 2024, 64(1): 159-170.
- [11] 陈玉倩, 侯晓慧, 朱碧帆, 等. 数字孪生在精准医疗应用中的研究进展和挑战[J]. 海军军医大学学报, 2023, 44(1): 97-101.
- [12] Kamel Boulos M N, Zhang P. Digital twins: from personalised medicine to precision public health[J]. J Pers Med, 2021, 11(8): 745.
- [13] Lehrach H, Ionescu A. The future of health care: deep data, smart sensors, virtual patients and the internet-of-humans [EB/OL]. (2016-04-29) [2022-07-10]. https://ec.europa.eu/futurium/en/system/files/ged/future_health_fet_consultation.pdf.
- [14] Hernandez-Boussard T, Macklin P, Greenspan E J, et al. Digital twins for predictive oncology will be a paradigm shift for precision cancer care[J]. Nat Med, 2021, 27(12): 2065-2066.
- [15] Bahrami F, Rossi R M, Defraeye T. Predicting transdermal fentanyl delivery using physics-based simulations for tailored therapy based on the age[J]. Drug Deliv, 2022, 29(1): 950-969.
- [16] Kim J K, Lee S J, Hong S H, et al. Machine-learning-based digital twin system for predicting the progression of prostate cancer[J]. App Sci, 2022, 12(16): 8156.
- [17] Shamanna P, Dharmalingam M, Sahay R, et al. Retrospective study of glycemic variability, BMI, and blood pressure in diabetes patients in the digital twin precision treatment program[J]. Sci Rep, 2021, 11(1): 14892.
- [18] 张捷, 钱虹, 周宏远. 数字孪生技术在社区老年人安全健康监测领域的应用探究[J]. 中国医疗器械杂志, 2019, 43(6): 410-413, 421.
- [19] Uhlenberg L, Derungs A, Amft O. Co-simulation of human digital twins and wearable inertial sensors to analyse gait event estimation[J]. Front Bioeng Biotechnol, 2023, 11: 1104000.
- [20] Khan S, Alzaabi A, Ratnarajah T, et al. Novel statistical time series data augmentation and machine learning based classification of unobtrusive respiration data for respiration digital twin model [J]. Comput Bio Med, 2024, 168: 107825.
- [21] 胡慧娟, 王明帮, 雷崎方, 等. 数字孪生医院: 改变医疗的未来[J]. 生物医学工程学杂志, 2024, 41(2): 376-382.
- [22] Cheng W, Lian W, Tian J. Building the hospital intelligent twins for all-scenario intelligence health care [J]. Digit Health, 2022, 8: 20552076221107894.
- [23] Croatti A, Gabellini M, Montagna S, et al. On the integration of agents and digital twins in healthcare [J]. J Med Syst, 2020, 44(9): 161.
- [24] 高杨, 杨丹, 王佳楠, 等. 胰腺炎后糖尿病患者营养管理的研究进展[J]. 护理学杂志, 2023, 38(19): 113-116.
- [25] Gkouskou K, Vlastos I, Karkalousos P, et al. The "virtual digital twins" concept in precision nutrition [J]. Adv Nutr, 2020, 11(6): 1405-1413.
- [26] Shamanna P, Joshi S, Shah L, et al. Type 2 diabetes reversal with digital twin technology-enabled precision nutrition and staging of reversal: a retrospective cohort study [J]. Clin Diabetes Endocrinol, 2021, 7(1): 21.
- [27] Gámez Díaz R, Yu Q, Ding Y, et al. Digital twin coaching for physical activities: a survey [J]. Sensors, 2020, 20(20): 5936.
- [28] Saxby D J, Pizzolato C, Diamond L E. A digital twin framework for precision neuromusculoskeletal health care: extension upon industrial standards [J]. J Appl Biomech, 2023, 39(5): 347-354.
- [29] Falkowski P, Osiak T, Wilk J, et al. Study on the applicability of digital twins for home remote motor rehabilitation [J]. Sensors, 2023, 23(2): 911.
- [30] Watson E R, Taherian Fard A, Mar J C. Computational methods for single-cell imaging and omics data integration [J]. Front Mol Biosci, 2022, 8: 768106.
- [31] Schwartz S M, Wildenhaus K, Bucher A, et al. Digital twins and the emerging science of self: implications for digital health experience design and "small" data [J]. Front Comput Sci, 2020, 2: 31.
- [32] Braun M. Represent me: please! Towards an ethics of digital twins in medicine [J]. J Med Ethics, 2021, 47(6): 394-400.
- [33] Bruynseels K, Santoni de Sio F, Van den Hoven J. Digital twins in health care: ethical implications of an emerging engineering paradigm [J]. Front Genet, 2018, 9: 31.
- [34] Huang P, Kim K, Schermer M. Ethical issues of digital twins for personalized health care service: preliminary mapping study [J]. J Med Internet Res, 2022, 24(1): e33081.