

数字孪生技术在脊柱外科领域中的应用研究现状

者尚佳, 赵智*, 王迎松, 张立, 郝家豪

昆明医科大学第二附属医院骨科, 云南 昆明

收稿日期: 2026年3月3日; 录用日期: 2026年3月26日; 发布日期: 2026年4月7日

摘要

数字孪生技术通过将物理实体映射至虚拟空间, 实现现实世界与数字世界的实时交互与反馈。近年来, 该技术的应用已从工业领域逐步拓展至医疗健康领域, 推动现代医学向“精准化、个性化、预测化”方向发展。本文系统综述数字孪生技术在脊柱外科中的应用现状, 探讨其未来发展方向, 并分析当前面临的技术、经济与伦理挑战。

关键词

脊柱/外科学, 人工智能, 精准医学, 数字孪生

The Current Research Status of Digital Twin Technology in Spinal Surgery

Shangjia Zhe, Zhi Zhao*, Yingsong Wang, Li Zhang, Jiahao Hao

Department of Orthopedics, The 2nd Affiliated Hospital of Kunming Medical University, Kunming Yunnan

Received: March 3, 2026; accepted: March 26, 2026; published: April 7, 2026

Abstract

Digital twin technology projects physical entities into a virtual space, enabling real-time interaction between the real world and the digital environment. In recent years, its application has gradually expanded from industry to healthcare, promoting the development of modern medicine toward “precision, personalization, and prediction”. This article systematically reviews the current applications of digital twin technology in spinal surgery, envisions future directions, and analyzes the

*通讯作者。

文章引用: 者尚佳, 赵智, 王迎松, 张立, 郝家豪. 数字孪生技术在脊柱外科领域中的应用研究现状[J]. 临床医学进展, 2026, 16(4): 1390-1396. DOI: 10.12677/acm.2026.1641371

existing challenges in its development and implementation.

Keywords

Spine/Surgery, Artificial Intelligence, Precision Medicine, Digital Twin

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

数字孪生技术通过实现物理世界与数字空间的融合与交互,已推动制造业、能源、交通等传统行业向数字化转型。目前,数字孪生技术已上升为全球多个国家的发展战略目标,开始积极推动数字孪生相关产业的发展,并在工业制造、智慧城市构建及医疗保健等领域得到广泛应用。

2. 数字孪生技术的发展历程

数字孪生的概念雏形可追溯至 20 世纪 60 年代美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的阿波罗 13 号载人航天器登月计划。该计划为航天器构建了地面“孪生”模型,用于模拟和解决太空飞行中的问题,其“模拟仿真”的特点为数字孪生概念的产生埋下了种子。2002 年 Grieves 教授在美国密歇根大学的产品生命周期管理课程中提出“镜像空间模型”的概念。2006 年又提出了“信息镜像模型”,奠定了数字孪生的理论基础[1]。2010 年, NASA 在其发布的太空技术路线图中首次明确定义了数字孪生,将其描述为一种融合多物理量、多尺度、概率仿真的系统,用于模拟飞行器的实时状态[2]。此后,该技术从航空航天领域延伸至工业制造,成为工业 4.0 的核心技术之一,广泛应用于产品设计、制造、维护等方面[3]。

3. 数字孪生技术在医疗领域的应用

随着数字孪生技术在工业领域的成熟,其理念也开始被引入医疗卫生领域。传统“一刀切”的诊疗模式难以满足个体化的医疗需求,因此“精准医学”应运而生[4]。数字孪生作为物理实体的高保真、动态、多尺度的虚拟映射,能够为个性化治疗方案提供技术支持,最大限度地提高医疗系统的效能与效率,目前,该技术已在心血管疾病、运动系统疾病等数据量化程度较高的领域展开探索[5]。例如,随着对心脏病的诊疗技术不断迭代更新,越来越精细的检查手段揭示了病理生理学中越来越多的个体间差异,心脏的数字孪生应用因为能低成本、低风险、快速、综合地分析患者的生理和病理,成为检测和治疗心脏病的新的方法[6] [7]。

与构建智慧城市相仿,数字孪生技术也可用于建立“智慧医院”,不但可以进行日常运营监测,将医院的运营数据形成可视化的虚拟模型,直观总览医院运营情况,提高医院运营管理手段现代化水平[8],还能辅助医院对重大卫生事件、地震、火灾等突发事件的应急预案进行模拟与优化[9]。

4. 数字孪生技术在脊柱外科中的核心应用场景

数字孪生为脊柱外科的个性化手术方案制定提供了革命性工具,其核心在于构建患者脊柱的高保真、可交互且具有预测功能的虚拟模型,使外科医师能在虚拟环境中“先试后行”,实现手术规划的精准化。

4.1. 脊柱畸形：生物力学模拟与矫形效果预测

脊柱侧凸、后凸等畸形治疗的核心目标是实现三维矫形并维持长期平衡，同时最大限度降低神经损伤风险。数字孪生在此领域的应用高度依赖于精准的生物力学建模。通过多模态影像融合技术，将 CT、MRI 等影像进行配准与融合，集成骨骼与软组织的互补信息，获得包含骨性结构、神经、软组织的全面解剖模型，克服单一影像的局限性，形成可用于复杂手术规划的“全息”虚拟副本[10]。结合卷积神经网络等深度学习算法，自动分割椎体、椎弓根、椎管等结构，显著缩短模型重建时间，并提高可重复性，再将分割后的结构生成三维模型，并可自由进行旋转、剪切等操作，提供更立体、直观病理形态，帮助医师全面理解病情[11] [12]。Lyu 等人[13]进一步提出生物力学集成数字孪生，在高保真模型的基础上，实时计算手术操作带来的生物力学变化，评估手术对脊柱力学及稳定性的影响。模型也能作为更直观的工具，模拟对比术前术后形态，帮助患者理解手术方案、风险及预期效果，提升患者对治疗方案的理解与信心，实现真正意义上的医患双方共同决策。

此外，集成肌骨生物力学模型，预测患者术后站立、行走时的整体脊柱姿态与平衡，实现内置物的“量体裁衣”[14]，直接生成与预测模型相匹配的弧度，减少术中弯棒操作的时间与误差。

4.2. 脊柱创伤：稳定性评估与内固定优化

脊柱创伤的治疗需同时考虑即刻稳定性重建与远期骨折愈合。基于患者个体化解剖与生物力学特征，数字孪生可辅助进行内置物选择与手术策略优化，模拟内置物应力分布和骨折端的应变状态，量化再骨折风险，指导患者何时负重下活动、何时可取出内固定物，实现预测性维护，提前干预以降低翻修手术率[15] [16]。

在手术模拟方面，数字孪生技术可用于实时评估内置物与椎弓根皮质、椎管的关系，优化置入物选择，提升手术安全性。结合有限元分析，可模拟术后脊柱在负重、屈伸、旋转等状态下的应力分布，预测内固定系统及骨-螺钉接触面的力学状态，评估术后早期松动、断裂风险[17]。

4.3. 脊柱肿瘤与骨质疏松性骨折：精准骨水泥注射与力学强化

椎体成形术是治疗椎体转移瘤或骨质疏松性骨折的常用微创手术，通过注入骨水泥稳定椎体恢复力学状态，骨水泥渗漏、邻近节段椎体骨折等是其常见的并发症[18]。目前针对骨水泥渗漏的预防多依赖于经验性判断，缺乏对骨水泥分布形态与椎体力学稳定性的系统化预测工具。Ahmadian 等人[19]构建了一套从虚拟椎体重建、骨水泥注射模拟到力学评估的完整数字孪生框架。该研究采用人工智能从微型定量 CT 所获图像生成高保真的骨小梁微结构模型，将其嵌入从患者 CT 扫描中提取的骨皮质外壳中，建立完整椎体模型[20]。进而通过计算流体力学还原聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)骨水泥的非牛顿剪切稀化行为，模拟骨水泥注射过程，发现高流速(0.25 mL/s)注射骨水泥是发生渗漏的重要因素。再通过基于连续介质损伤力学的有限元模型，模拟骨水泥注入后椎体在压力负荷下的力学变化。这项研究为数字孪生技术在脊柱外科的应用提供了完整的方法学实例。

4.4. 脊柱退变：微创入路规划与精准减压

腰椎间盘突出症、腰椎管狭窄症、退变性滑脱等退变性疾病的治疗趋向微创化，数字孪生的应用重点在于精确的解剖定位与安全的操作通道规划，将术前高保真模型与术中实时数据融合，可为医师提供超越肉眼与传统影像的智能引导。研究显示，在腰椎融合手术中，基于深度学习对椎体进行分割并预测置钉轨迹，结合增强现实技术，可提供更直观的术中导航，可实现 100% 的螺钉置入精度，误差中位数仅为 1.0 mm [21]，相较于传统实体导板导航拥有可根据术中情况实时调整的优势，更具灵活性与适应性。

此外,结合图像引导的辅助机器人,外科医师在数字模型上规划好螺钉路径后,系统控制机器人自动定位、导向完成置钉。而基于开源平台的高度定制化交互式数字孪生,能够整合医学影像、机器人运动学信息,实现物理手术环境与虚拟模型的低延迟、实时同步,为机器人控制提供了更丰富的感知和决策支持[22][23]。

目前已有搭载传感器的智能植入物进入临床,可实时监测患者活动量、步态与运动范围等数据,协助外科医师为患者动态调整康复方案,提高患者依从性,促进功能恢复[24]。同时基于这些数据,通过多模式机器学习的方法还能预测如内置物脱位等术后并发症的风险[25]。

对脊柱退变性疾病的术后康复与长期随访。另一项研究使用多模式多任务机器学习,利用智能手机和智能手表收集生态瞬时评估数据,预测腰椎手术后患者的疼痛、身体功能及康复质量[26]。依靠多模态数据之间的互补性,该模型对多维结果的预测展现出了卓越的性能。这让脊柱外科向优化长期预后、为患者提供全周期健康管理迈出了希望的一步。

5. 未来发展与应用的展望

数字孪生在脊柱外科的应用正从围手术期拓展至全周期健康管理,覆盖筛查、诊断、治疗、康复、长期随访。例如,在脊柱侧弯的早期筛查中,该技术有望帮助实现早发现、早干预,降低手术率,减轻患者及社会经济负担,Suresh 等人[27]的研究为此提供了技术基础,迈出了探索的步伐,但大规模普及还亟需克服技术水平不足、成本居高不下等诸多难题。

“全场景手术孪生”是未来手术室智能化发展的方向,利用多个、多种传感器,对整个手术室场景,包括患者、医师、器械、环境,进行实时动态三维重建,对外科教育和培训、手术规划和手术任务自动化等各个方面都有重要的意义[28]。

全世界的脊柱外科医师都将面临的一个挑战是,随着人口老龄化加剧,高龄患者在住院患者中的占比将越来越高,因其相对较差的健康状况,对手术及麻醉的耐受能力不足,需要整个脊柱外科团队,包括外科医师、麻醉、护理等,不断提高诊疗与评估能力。已有研究者借助数字孪生技术开始探索解决此问题的方式,在手术过程中通过数字孪生建立人体血流动力学模型[29],术中实时监测,指导麻醉药物使用,以此监测麻醉深度,防止药物过度蓄积,降低麻醉风险。结合数字孪生多学科、多领域的未来发展趋势,将来通过围手术期“人体数字孪生”[30],实现真正的个体化医疗,提高脊柱外科的围手术期风险评估能力及精细化管理水平。

6. 发展与推广所面临的挑战

数字孪生从技术概念走向脊柱外科的常规临床工具,面临着技术、经济、伦理三个维度的挑战,三者并非孤立存在,而是相互交织,任何单一维度的突破都难以实现全临床转化。

高精度的生物力学模型计算耗时长,难以满足术中实时性的要求,而影像、生物信号等多模态数据又缺乏统一标准,难以有效进行融合,是阻碍数字孪生从演示模型变为实时系统的首要技术瓶颈[31]。同时,这一技术困境直接衍生出严峻的经济挑战,突破实时性瓶颈需要强大的算力支持,而提高模型精度需要更密集的影像采集。这些技术要求的背后,是高昂的软硬件采购成本、专业团队的培养周期以及系统集成复杂性。对于大多数医疗机构而言,需要投入巨额成本的同时效益尚不明确,可能使技术仅停留在少数顶尖医学中心,难以普及。

数字孪生的高昂成本可能导致其仅服务于经济发达地区或高支付能力的患者群体,加剧医疗资源分配的不均衡。在公共医疗资源有限的背景下,将大量资金投入尖端技术平台,将在一定程度上挤占其他基础医疗服务的资源。更深一层来看,随着技术的成熟,未来可能出现基于数字孪生的治疗方案与传统

治疗方案并存的情况。若数字孪生被证实确实能显著改善预后，那么没有条件使用该项技术的患者将面临事实上的治疗机会不平等，这种因经济因素导致的健康结局差异，是数字孪生时代必须正视的伦理挑战。

数字孪生本质上是对复杂人体系统的简化与近似，任何模型都必然存在一定程度的不确定性，例如影像分割的误差。这种技术固有的不确定性，在临床应用中转化为伦理与法律风险：若完全依照数字孪生规划的手术出现不良后果(如螺钉误置伤及神经、预测的矫形效果未能实现)，责任应当如何界定？是归咎于临床医师的决策失误、算法模型的预测偏差、还是数据采集的不完整？这一问题在脊柱外科尤为突出，手术的不可逆性与高风险性，使得模型的任何不确定性都可能带来灾难性后果。此外，数字孪生技术以虚拟数据为基础，过程中涉及了大量患者的敏感及隐私信息的采集、存储和传输，其安全性需要得到保障[32]。

目前数字孪生技术在医学领域的应用还缺少政策或法规的支持和完善的监管制度，随着的发展，仍将不可避免地会引发新的伦理难题。

7. 总结

数字孪生代表了脊柱外科的一个重要探索方向，它是推动脊柱外科向“精准化、个性化、预测化”发展的重要手段。尽管前景广阔，但其广泛应用仍需更多临床证据的支持，并依赖于成本控制、技术突破与跨学科协作。最终，数字孪生技术在脊柱外科的成功实践，不仅取决于技术的进步，更有赖于临床医师、工程师、政策制定者与患者的相互信任和共同努力。

基金项目

云南省基础研究计划项目(202501AY070001-034); 云南省重点研发计划项目(202403AC100008); 云南省科技人才与平台计划项目(202505AS350011); 昆明医科大学一流学科团队建设项目(2024XKTDYS05)。

参考文献

- [1] Grieves, M. (2015) Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication.
- [2] Glaessgen, E. and Stargel, D. (2012) The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Honolulu, 23-26 April 2012. <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>
- [3] Tao, F., Zhang, H., Liu, A. and Nee, A.Y.C. (2019) Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **15**, 2405-2415. <https://doi.org/10.1109/tii.2018.2873186>
- [4] Bamba, H., Singh, G., John, J., Inban, P., Prajjwal, P., Alhussain, H., *et al.* (2024) Precision Medicine Approaches in Cardiology and Personalized Therapies for Improved Patient Outcomes: A Systematic Review. *Current Problems in Cardiology*, **49**, Article ID: 102470. <https://doi.org/10.1016/j.cpcardiol.2024.102470>
- [5] Lomax, N., Vinjamuri, S., Vinjamuri, S., Franco, D., Schroeder, G. and Harrop, J. (2024) A Comprehensive Exploration of Digital Twinning in Spine Surgery. *Clinical Spine Surgery*, **38**, 224-229. <https://doi.org/10.1097/bsd.0000000000001748>
- [6] Thangaraj, P.M., Benson, S.H., Oikonomou, E.K., Asselbergs, F.W. and Khera, R. (2024) Cardiovascular Care with Digital Twin Technology in the Era of Generative Artificial Intelligence. *European Heart Journal*, **45**, 4808-4821. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehae619>
- [7] Corral-Acero, J., Margara, F., Marciniak, M., Rodero, C., Loncaric, F., Feng, Y., *et al.* (2020) The “Digital Twin” to Enable the Vision of Precision Cardiology. *European Heart Journal*, **41**, 4556-4564. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehaa159>
- [8] Maizi, Y., Arcand, A. and Bendavid, Y. (2024) Digital Twin in Healthcare: Classification and Typology of Models Based on Hierarchy, Application, and Maturity. *Internet of Things*, **28**, Article ID: 101379. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101379>
- [9] 左锐, 王梦莹, 朱声荣, 张晨, 李维计虹. 基于数字孪生技术的医院智能展示分析平台建设实践探索[J]. 中国数

字医学, 2022, 17(8): 65-69.

- [10] Azam, M.A., Khan, K.B., Salahuddin, S., Rehman, E., Khan, S.A., Khan, M.A., *et al.* (2022) A Review on Multimodal Medical Image Fusion: Compendious Analysis of Medical Modalities, Multimodal Databases, Fusion Techniques and Quality Metrics. *Computers in Biology and Medicine*, **144**, Article ID: 105253. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2022.105253>
- [11] Xiong, X., Graves, S.A., Gross, B.A., Buatti, J.M. and Beichel, R.R. (2024) Lumbar and Thoracic Vertebrae Segmentation in CT Scans Using a 3D Multi-Object Localization and Segmentation CNN. *Tomography*, **10**, 738-760. <https://doi.org/10.3390/tomography10050057>
- [12] Kawathekar, I.D., Areeckal, A.S. and V, A. (2024) A Novel Deep Learning Pipeline for Vertebra Labeling and Segmentation of Spinal Computed Tomography Images. *IEEE Access*, **12**, 15330-15347. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3358874>
- [13] Lyu, Y., He, X., Li, Z., Song, H. and Song, X. (2024) Developing a Biomechanics Integrated Digital Twin for Enhanced Real-Time Guidance in Lumbar Pedicle Screw Fixation Surgery. In: Fei, M.R., *et al.*, Eds., *Advancement in Computational Methods for Life Systems Modelling and Simulation*, Springer, 3-17. https://doi.org/10.1007/978-981-96-0188-2_1
- [14] Ninarello, D., Brambilla, G., Crivellaro, C. and La Barbera, L. (2025) Design and Verification of an Innovative Ceramic Lumbar Interbody Fusion Cage Using Digital Twins. *Orthopaedic Proceedings*, **107**, Article No. 54. <https://doi.org/10.1302/1358-992x.2025.8.054>
- [15] Andres, A., Roland, M., Wickert, K., Diebels, S., Stöckl, J., Herrmann, S., *et al.* (2025) Advantages of Digital Twin Technology in Orthopedic Trauma Surgery—Exploring Different Clinical Use Cases. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 19987. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-04792-w>
- [16] Aubert, K., Germaneau, A., Rochette, M., Ye, W., Severyns, M., Billot, M., *et al.* (2021) Development of Digital Twins to Optimize Trauma Surgery and Postoperative Management. A Case Study Focusing on Tibial Plateau Fracture. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **9**, Article ID: 722275. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.722275>
- [17] Widmer, J., Fasser, M., Croci, E., Spirig, J., Snedeker, J.G. and Farshad, M. (2020) Individualized Prediction of Pedicle Screw Fixation Strength with a Finite Element Model. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, **23**, 155-167. <https://doi.org/10.1080/10255842.2019.1709173>
- [18] Rose, L.D., Bateman, G. and Ahmed, A. (2023) Clinical Significance of Cement Leakage in Kyphoplasty and Vertebroplasty: A Systematic Review. *European Spine Journal*, **33**, 1484-1489. <https://doi.org/10.1007/s00586-023-08026-3>
- [19] Ahmadian, H., Mageswaran, P., Walter, B.A., Blakaj, D.M., Bourekas, E.C., Mendel, E., *et al.* (2022) A Digital Twin for Simulating the Vertebroplasty Procedure and Its Impact on Mechanical Stability of Vertebra in Cancer Patients. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, **38**, e3600. <https://doi.org/10.1002/cnm.3600>
- [20] Ahmadian, H., Mageswaran, P., Walter, B.A., Blakaj, D.M., Bourekas, E.C., Mendel, E., *et al.* (2022) Toward an Artificial Intelligence-Assisted Framework for Reconstructing the Digital Twin of Vertebra and Predicting Its Fracture Response. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, **38**, e3601. <https://doi.org/10.1002/cnm.3601>
- [21] Liebmann, F., von Atzigen, M., Stütz, D., Wolf, J., Zingg, L., Suter, D., *et al.* (2024) Automatic Registration with Continuous Pose Updates for Marker-Less Surgical Navigation in Spine Surgery. *Medical Image Analysis*, **91**, Article ID: 103027. <https://doi.org/10.1016/j.media.2023.103027>
- [22] Sahu, M., Ishida, H., Connolly, L., Fan, H., Deguet, A., Kazanzides, P., *et al.* (2024) ENTRI: Enhanced Navigational Toolkit for Robotic Interventions. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, **6**, 1405-1408. <https://doi.org/10.1109/tmrb.2024.3475827>
- [23] Holm, F., Ghazaei, G., Czempiel, T., Özsoy, E., Saur, S. and Navab, N. (2023) Dynamic Scene Graph Representation for Surgical Video. 2023 *IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)*, Paris, 2-6 October 2023, 81-87. <https://doi.org/10.1109/iccvw60793.2023.00015>
- [24] Gordon, A.M., Vatti, L. and Mont, M.A. (2025) Smart Knee Implants and Functional Outcome for Total Knee Arthroplasty. *The Journal of Knee Surgery*, **38**, 397-402. <https://doi.org/10.1055/a-2550-2187>
- [25] Khosravi, B., Rouzrokh, P., Maradit Kremers, H., Larson, D.R., Johnson, Q.J., Faghani, S., *et al.* (2022) Patient-Specific Hip Arthroplasty Dislocation Risk Calculator: An Explainable Multimodal Machine Learning-Based Approach. *Radiology: Artificial Intelligence*, **4**, e220067. <https://doi.org/10.1148/ryai.220067>
- [26] Xu, Z., Zhang, J., Greenberg, J., Frumkin, M., Javeed, S., Zhang, J.K., *et al.* (2024) Predicting Multi-Dimensional Surgical Outcomes with Multi-Modal Mobile Sensing. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, **8**, 1-30. <https://doi.org/10.1145/3659628>
- [27] Suresh, S., Stubbs, A., Pulling, G., Amiri, A., Izatt, M.T., Labrom, R.D., *et al.* (2025) Digital Twin for the Analog Scoliometer: Advancements in Telehealth for Paediatric Spine Deformity Care. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 41065.

-
- <https://doi.org/10.1038/s41598-025-25023-2>
- [28] Hein, J., Giraud, F., Calvet, L., Schwarz, A., Cavalcanti, N.A., Prokudin, S., *et al.* (2024) Creating a Digital Twin of Spinal Surgery: A Proof of Concept. 2024 *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, Seattle, 17-18 June 2024, 2355-2364. <https://doi.org/10.1109/cvprw63382.2024.00241>
- [29] Ghita, M., Copot, D., Birs, I.R., Muresan, C.I., Keyser, R.D., Neckebroek, M., *et al.* (2022) Uncertainty Minimization and Feasibility Study for Managing the Complex and Interacting Anesthesia-Hemodynamic System. 2022 *IEEE 61st Conference on Decision and Control (CDC)*, Cancun, 6-9 December 2022, 6064-6069. <https://doi.org/10.1109/cdc51059.2022.9992350>
- [30] Lonsdale, H., Gray, G.M., Ahumada, L.M., Yates, H.M., Varughese, A. and Rehman, M.A. (2022) The Perioperative Human Digital Twin. *Anesthesia & Analgesia*, **134**, 885-892. <https://doi.org/10.1213/ane.0000000000005916>
- [31] Diniz, P., Grimm, B., Garcia, F., Fayad, J., Ley, C., Mouton, C., *et al.* (2025) Digital Twin Systems for Musculoskeletal Applications: A Current Concepts Review. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, **33**, 1892-1910. <https://doi.org/10.1002/ksa.12627>
- [32] Drummond, D. and Coulet, A. (2022) Technical, Ethical, Legal, and Societal Challenges with Digital Twin Systems for the Management of Chronic Diseases in Children and Young People. *Journal of Medical Internet Research*, **24**, e39698. <https://doi.org/10.2196/39698>