

• 专家论坛 •

生成式人工智能骨科机器人在骨科手术中的应用

向李智, 叶哲伟

doi:10.3969/j.issn.1671-0800.2025.06.001

【中图分类号】 R68 【文献标志码】 C 【文章编号】 1671-0800(2025)06-0551-03

传统骨科手术在操作精度、术后恢复周期及并发症控制方面仍存在诸多限制,随着计算机技术、机器人技术与人工智能的飞速发展,骨科手术机器人应运而生,并在提高手术精准性、降低创伤程度及优化术后恢复方面展现出巨大潜力^[1-2]。然而,当前主流骨科机器人系统多数仍依赖术前编程与术中图像引导,缺乏实时感知、自主决策与适应性调整能力,在应对解剖变异大、术中突发情况频发的临床环境中,智能化程度仍显不足。生成式人工智能(generative artificial intelligence, Gen AI)是一类基于深度学习的模型,能够学习大量数据分布并生成具有高度一致性的新数据,已在图像生成、自然语言处理等多个领域取得突破性进展。将 Gen AI 引入骨科手术机器人系统,有望实现从术前影像建模与个性化手术路径规划,到术中自主导航与风险预测,再到术后康复干预与进展评估的全流程智能支持,推动骨科手术从“精确操作”向“智慧决策”演进^[3]。本文旨在系统性梳理 Gen AI 赋能下的骨科手术机器人在临床中的应用现状与潜在优势,深入分析其技术瓶颈与落地挑战,并探讨其未来的发展路径。

1 术前规划

现阶段, Gen AI 在骨科术前规划中的应用日益展现其独特优势,尤其在提升个体化医疗精度、优化手术路径设计以及增强术前决策支持方面,逐步从“辅助工具”演进为“智能中枢”。Gen AI 可基于患者的高分辨率 CT 或 MRI 影像,在数秒内自动完成个

性化的人体组织三维重建任务,而这一流程在传统方法下往往需计算机工程师与资深医师协同耗时 3~5 d。通过深度学习模型对正常与病理骨骼结构的海量数据进行训练, Gen AI 可精准还原骨骼几何与空间拓扑特征,生成高保真度、连续性强的三维骨骼模型^[4]。与传统图像分割和建模技术相比, Gen AI 具备强大的缺损补全与形态重建能力,能够在图像存在伪影、遮挡或信息缺失的情况下,自动生成结构完整、边缘清晰的模型。这一优势在复杂骨折重建、骨肿瘤切除前评估、发育畸形规划等高难度手术中尤为关键,可为术者提供精确的个体化解剖参考。

此外, Gen AI 可实现多方案手术路径的并行生成与生物力学仿真分析,医生可在术前虚拟仿真环境中交互式评估不同的入路策略、复位路径或植入物布局方式。系统通过集成的预测模型,对每种手术方案在术后结构稳定性、功能恢复速度及潜在风险方面进行量化输出,为术者提供更具科学依据的个体化治疗路径建议。这种由数据驱动的预测能力,显著提高了术前决策的精准性与可解释性,特别适用于高风险患者或解剖结构复杂部位的治疗规划。在假体个性化设计方面, Gen AI 融合三维建模与拓扑优化技术,能够根据患者骨骼形态、受力分布与植入需求,自动生成与原生结构高度匹配的定制假体模型^[5]。该模型不仅在几何结构上实现精准拟合,更可通过应力分布优化,增强植入物的力学稳定性与生物相容性。系统还可在术前仿真植入过程中,评估不同假体参数对周围骨质的应力传导与再吸收影响,从而提前规避术后假体松动、应力遮蔽或继发骨折等并发症风险^[6]。通过将 Gen AI 深度集成于术前规划阶段,骨科机器人系统实现了从“被动执行”向“主动决策”的跃升,为精准医疗、个性化干预和智能化治疗提供了坚实的技术支撑与决策基础。

作者单位: 430022 武汉,华中科技大学同济医学院附属协和医院

通信作者: 叶哲伟,医学博士,主任医师,教授,博士研究生导师。国家级创新平台培育计划首席科学家,中华医学会医学工程分会数字骨科学组副组长,中国老年医学会数字诊疗分会副会长,中国解剖学会虚拟现实分会副主任委员,湖北省智能医学学会会长,武汉医学会智能医学分会主任委员。Email: yezhewei@hust.edu.cn

2 术中导航与自主执行

在手术实施阶段, Gen AI 赋能下的骨科机器人系统显著提升了术中感知能力、实时反馈水平和智能执行深度,逐步拓展其功能从路径引导向协同操作,甚至自主行为的演化。Gen AI 具备出色的图像生成与重建能力,尤其在术中图像质量受限、信噪比低或关键结构不可视的情况下,可对锥形束计算机断层扫描(cone beam computed tomography, CBCT)、术中超声等多源成像数据进行实时增强,自动生成高分辨率三维重构视图。这不仅提升了术中软硬组织识别精度,也使得复杂解剖区域和遮挡下结构的识别与操作更加可控,极大支持了微创手术和狭窄空间下的精准干预^[7]。借助于大量手术案例数据的学习, Gen AI 系统具备术中路径再规划与动态响应能力。当术中因组织偏移、骨折片移动或出血等导致原手术计划失效时,系统可实时生成新的最优操作路径,并自动调整机器人执行策略,确保手术安全与连续性。如在导板定位、螺钉植入或髓内钉置入过程中,系统可结合实时影像信息避开重要神经血管结构,动态优化操作角度、深度与进针路径,显著降低误伤风险与创伤范围。

进一步,通过引入 Gen AI 与强化学习相结合的训练机制,骨科机器人已实现多个术中任务的自主执行,包括骨洞预钻、截骨轨迹规划与植入路径微调等。这些操作在模型训练中已内嵌专家经验与最佳操作路径,在术中执行时表现出极高的一致性与稳定性。系统还可基于语音识别、手势感知等人机交互方式,实现对术者指令的实时响应与协作执行,提升人机协同效率^[8]。更为关键的是,术中数据将持续反馈至 Gen AI 系统中,用于实时推演下一步操作风险、植入物定位偏差评估或生物力学变化预测,从而实现“数据-执行-反馈-优化”的闭环智能控制。这标志着骨科机器人正在从传统的“精密机械工具”向具备自适应能力的“智能助手”过渡。

3 术后康复管理与个性化随访

术后康复是决定骨科手术治疗预后优劣的关键环节。Gen AI 在术后随访、功能评估及康复干预中的深度应用,正在为构建闭环治疗系统提供坚实技术支撑。依托术前影像、术中操作参数及术后多时点随访数据, Gen AI 可构建个体化的康复进展预测

模型,模拟不同康复路径下的运动功能恢复轨迹。借助对患者术后早期活动轨迹、肌电信号及电生理参数等多模态数据的生成与解析, Gen AI 系统能够动态绘制功能恢复趋势图,提前识别康复过程中的异常信号与潜在并发风险,如延迟骨愈合、关节活动植入物微移位受限或等问题^[9]。在功能训练指导方面, Gen AI 可结合患者术后生理状态、功能评分以及康复历史数据,自动制定个体化康复训练方案,涵盖负重节奏控制、步态重建、关节活动度拓展及辅助器具使用等关键环节。系统还具备实时反馈与自适应调整能力,能够根据患者实际恢复进度、生理监测数据和主观反馈动态优化训练内容与干预强度,实现“千人千策”的精准康复。通过与智能穿戴设备、移动端 App 等平台深度集成, Gen AI 可构建虚拟康复助手系统,支持术后远程随访、康复过程监督与多维度数据实时回传。系统可自动生成个性化康复报告与行为调整建议,医生可据此进行动态监控与干预优化,从而显著提升随访管理效率与康复依从性,特别适用于高龄、行动不便或生活在偏远地区的患者群体。随着 Gen AI 在康复阶段的深入嵌入,骨科治疗将实现从单一手术操作向“手术-康复”一体化转型,全面提升治疗的连续性、精细化水平与患者体验。

4 Gen AI 骨科机器人面临的挑战

首当其冲的挑战是数据安全与隐私保护。Gen AI 高度依赖海量、高质量的临床数据进行训练与优化,这些数据通常涉及患者的医学影像、病历信息乃至基因组数据,具高度敏感性。如何在确保模型性能的同时实现数据脱敏、加密存储与安全计算,构建符合国家要求的《个人信息保护法》《数据安全法》等法律法规要求的数据治理体系,是临床转化过程中必须优先解决的问题^[10]。其次,算法的可靠性与稳定性直接关乎患者安全。目前 Gen AI 模型仍存在“幻觉”现象,即在数据稀缺或噪声干扰下输出不准确、逻辑错误的内容^[11]。尤其是在复杂骨折三维建模、假体路径规划等高风险任务中,微小误差就可能引发术中不良事件。因此,需加强模型的鲁棒性训练、引入多重验证机制,并建立严格的临床安全评估体系,以提升系统在关键医疗场景中的可靠性与可控性^[12]。

除上述两点外,还有伦理与法律问题构成技术

应用的外部约束。当前尚缺乏针对 Gen AI 医疗应用的系统性法律规范,对其临床决策权边界、风险责任划分等问题亦无统一认知。当 Gen AI 系统出现判断失误或引发医疗纠纷时,医生、技术提供方与医疗机构之间的法律责任尚存较大争议。建立清晰的伦理框架与责任机制,实现 Gen AI 系统的可追溯、可控与可问责,将是构建可信医疗 Gen AI 生态的基础。

最后,成本问题也是制约着其广泛推广的因素之一。从前期数据采集与清洗,到模型训练、软硬件部署与医护人员培训,整个应用链条均需高额资源投入。

5 未来发展方向

面对挑战,Gen AI 骨科机器人的未来仍展现出广阔的发展前景,其演进方向将集中于多模态融合、人机协作与智能化康复等维度,逐步迈向“泛在智能、精准诊疗”的新阶段。首先,多模态数据融合将成为关键突破点,Gen AI 将进一步整合影像学数据、电子病历、术中生理信号、遗传组学与患者反馈等多源异构信息,实现跨模态语义理解与决策支持,从而驱动更精准、全面的个性化诊疗路径设计,助力精准骨科的发展。其次,高水平人机协作将推动骨科机器人从“工具型助理”向“协同型伙伴”演化。未来系统将更强调人机之间的信息共享与意图理解,医生通过语音、手势或眼动等自然交互方式即可引导机器人协同作业;而 Gen AI 系统则可实时反馈判断依据与操作建议,增强医生在术中决策中的信心与效率。除此之外,远程手术技术的拓展将打破地理限制。依托 5G、边缘计算与高精度控制系统,Gen AI 骨科机器人将在远程手术领域展现出巨大潜力,实现跨地域手术操作、专家远程指导与资源下沉,特别适用于基层医疗机构或灾难应急场景。

最后,智能化康复体系的建设将实现从“治疗”向“恢复”的延伸闭环。Gen AI 将与可穿戴设备、虚拟现实、扩展现实等前沿技术深度融合,为患者提供沉浸式、个性化的康复训练场景。系统还可根据生理信号与运动表现,实时生成训练反馈与干预建议,助力康复过程的科学化、趣味化与高效化。

6 总结

在整个骨科治疗周期中,Gen AI 通过在术前实现

高精度三维重建与路径规划、术中辅助实现实时导航与自主操作、术后推动个体化康复与远程随访,其多模态感知、数据生成与智能决策能力正在促使骨科机器人从“操作型工具”向“智能型助手”升级,推动骨科医疗由经验驱动向数据驱动与模型引导的范式转变。随着生成式 AI 技术、软硬件平台及数据治理体系的不断完善,其在骨科机器人系统中的集成与应用将愈加深入和广泛,不仅将进一步拓展智能外科的边界,也将为骨科患者带来更安全、更高效、更具人文关怀的治疗体验,全面提升骨科医疗的质量与可及性。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

参 考 文 献

- [1] 林嘉滢,涂舒婷,林嘉莉,等.不同年龄卒中患者躯体感觉功能与运动功能相关性及其全周期康复思考:一项多中心横断面研究[J].中国全科医学,2024,27(23):2838-2845.
- [2] 刘蓬然,叶哲伟.中国医学人工智能的现状、挑战与未来[J].中华实验外科杂志,2025,42(1):1-5.
- [3] 薛明迪,孙玉东,王泓霖,等.3D手术训练系统在骨科住院医师规范化培训髌骨骨折手术教学中的应用效果[J].中华医学教育杂志,2025,45(2):135-140.
- [4] 霍彤彤,刘松相,谢毅,等.数字图像处理关键技术临床骨科中的应用进展[J].中华生物医学工程杂志,2024,30(1):54-59.
- [5] FADERO P E, SHAH M. Three dimensional (3D) modelling and surgical planning in trauma and orthopaedics[J]. Surgeon, 2014, 12(6): 328-333.
- [6] INNOCENTI B, BORI E, ARMAROLI F, et al. Human orthopaedic biomechanics[M]. Amsterdam: Elsevier, 2022: 681-712.
- [7] LU L, WANG H L, LIU P R, et al. Applications of mixed reality technology in orthopedics surgery: A pilot study[J]. Front Bioeng Biotechnol, 2022, 10: 740507.
- [8] IQBAL H, TATTI F, BAENA F R Y. Augmented reality in robotic assisted orthopaedic surgery: A pilot study[J]. J Biomed Inform, 2021, 120: 103841.
- [9] 林贵平,姚血明,肖丽娜,等.老年骨科患者术后早期康复训练期间的安全隐患[J].中国老年学杂志,2013,33(16):4018-4019.
- [10] YANG L, TIAN M, XIN D, et al. AI-driven anonymization: Protecting personal data privacy while leveraging machine learning[EB/OL]. (2024-10-13)[2025-3-10]. <https://arxiv.org/abs/2402.17191v1>.
- [11] HUANG L, YU W J, MA W T, et al. A survey on hallucination in large language models: Principles, taxonomy, challenges, and open questions[J]. ACM Trans Inf Syst, 2025, 43(2): 1-55.
- [12] RAINA V, TAN S, CEVHER V, et al. Extreme miscalibration and the illusion of adversarial robustness[EB/OL]. (2024-10-13)[2025-3-10]. <https://arxiv.org/abs/2402.17509v3>.

收稿日期:2025-05-10

(本文编辑:钟美春)