

DOI: 10.61189/831252cpvyzj

· 产学研融合 ·

基于数字孪生与混合现实的智能膝关节置换术：系统设计、协同流程与展望

林栩之¹, 王 源², 杨达伟^{2,3*}

1. 复旦大学上海医学院公共卫生学院, 上海 200032

2. 复旦大学附属中山医院呼吸与危重症医学科, 上海 200032

3. 上海呼吸物联网医学工程技术研究中心, 上海市呼吸病研究所, AI+肺癌防治中心, 上海 200032

[摘要] 医疗机器人的出现已经改变了手术的发展, 相对于传统手术, 使用手术机器人在提升精准度、减少工作强度等方面有着巨大的帮助。然而由于资源的短缺, 全自动全流程的手术机器人将成为元宇宙医学的发展趋势。目前的膝关节手术机器人多为半主动模式, 即作为助手身份协助医生操作, 少数“全自动”机器人也只能满足术中操作的全自动性。本文提出一种基于数字孪生与混合现实的智能膝关节置换术, 采取人预演监督、机器规划、操刀的模式, 从“半主动”走向“半自动”(全流程), 可作为向全流程全自动模式发展的一个过渡, 在保障安全、易于让医患接受的前提下实现手术的高质量完成, 更符合现有技术基础和现实要求, 也为元宇宙医学中手术定量评估等方面的发展提供了可能。

[关键词] 膝关节置换; 数字孪生; 元宇宙医学; 手术机器人**[中图分类号]** R 687.4 **[文献标志码]** A

Intelligent knee arthroplasty based on digital twin and mixed reality: system design, collaborative process and prospects

LIN Xuzhi¹, WANG Yuan², YANG Dawei^{2,3*}

1. School of Public Health, Shanghai Medical College, Fudan University, Shanghai 200032, China

2. Department of Pulmonary and Critical Care Medicine, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China

3. Shanghai Engineer & Technology Research Center of Internet of Things for Respiratory Medicine, Shanghai Respiratory Research Institution, AI+ Lung Cancer Prevention and Treatment Center, Shanghai 200032, China

[Abstract] The advent of medical robots has transformed the landscape of surgery. Compared to traditional surgical methods, the use of surgical robots provides significant advantages in enhancing precision and reducing the workload for surgeons. However, due to resource constraints, fully automated, end-to-end surgical robots are poised to become a key trend in the development of metaverse medicine. Existing knee surgery robots predominantly operate in a semi-active mode, serving as assistants to surgeons, while a limited number of "fully automated" robots can only achieve full automation during the intraoperative phase. This paper proposes an intelligent knee replacement surgery approach based on digital twin and mixed reality technologies, adopting a model of human pre-operative rehearsal and supervision, machine planning, and robotic execution. This shifts the paradigm from "semi-active" to "semi-automated" (covering the full process), serving as a transitional step toward fully automated end-to-end surgery. By ensuring safety and gaining acceptance from both medical professionals and patients, this approach enables high-quality surgical outcomes. It aligns better with current technological foundations and practical requirements while also offering potential for advancements in quantitative surgical assessment within the realm of metaverse medicine.

[Key Words] knee arthroplasty; digital twin; metaverse medicine; surgical robot

传统外科手术往往在医生状态、操作的不可控性上存在失误的可能, 而在相对不发达地区, 由于设备成本的局限、医疗资源的短缺, 往往面临更大的挑战。医疗机器人的出现改变了多个领域的复

[收稿日期] 2025-12-19**[接受日期]** 2025-12-29

[基金项目] 四大慢病重大专项 (2024ZD0529300), 上海市科学技术委员会项目基金 (20DZ2254400), 上海高校市级重点课程 (FDSHZD202409). Supported by Noncommunicable Chronic Diseases National Science and Technology Major Project (2024ZD0529300), Science and Technology Commission of Shanghai Municipality Project Fund (20DZ2254400), Municipal Key Courses in Shanghai Universities Project Fund (FDSHZD202409).

[作者简介] 林栩之. E-mail: 25301020067@m.fudan.edu.cn

*通信作者 (Corresponding author). Tel: 021-64041990, E-mail: yang.dawei@zs-hospital.sh.cn

杂手术的发展,机器人手术比传统手术具有明显优势:提高手术的精确性和安全^[1-3];降低医生的工作强度,减少医生和患者的辐射;可实现远程操作;减少传染性疾病传播等等。

目前手术机器人多采用主从关系,即没有人类操作员的情况下不能自主行动,参考最广泛使用的达芬奇手术机器人,达芬奇手术系统拓展了在妇科、泌尿外科、肝胆科等方向的手术能力;胸外科有 Ion^[4]、5G 支气管镜远程机器人系统^[3]和 Monarch 平台^[5];膝关节和髋关节置换手术也有 MAKO 机器人等系统^[6],可以进行辅助术前方案制定和术中实时指导。尽管与传统手术相比取得了很大的突破,但现有的手术机器人往往作为手术工具辅助手术,而资源的短缺使得手术机器人需向全自主全流程的方向发展。目前,已经有智能组织自助机器人^[7]用于腹腔镜手术;5G 支气管镜远程机器人系统^[3],机

器人自主完成大部分操作,医生保留了覆盖 AI 代理的权力,在必要时介入。这些手术机器人已经可以实现术中全自动操作,包含感知、决策、规划、控制。但是与支气管和腹腔镜不同,膝关节的结构更加复杂,难以用算法建模,操作中切割和安放对于失误容忍度极低,难以直接依赖手术机器人全自动决策和操作。在膝关节置换术上的全自动全流程(包括术前规划、术中决策操作、术后反馈)系统尚且需要一个过渡阶段。

1 当前膝关节置换手术机器人

当前关节手术机器人主要有 Mako、ROSA、Navio、CORI、Cuvis、MISSO 等等^[8],对目前用于全膝关节置换的主要机器人系统进行比较分析^[6,8-10](表 1)。

表 1 主要机器人系统对比

名称	控制类型	成像需求	现状	优点	缺点
Mako	半主动	基于 CT 的术前规划	广泛使用	限制骨切除在预定边界内;精准度高;可实时检测患者关节的运动	学习曲线长;系统封闭;术前规划耗时
Navio	半主动	无图像	广泛使用	无需影像,减少术前等待时间	大部分截骨仍需手动完成,耗时且容易引入人为误差
CORI	半主动	无图像	取代 NAVIO	NAVIO 的升级版,术中可实时调整计划	无图像引导;实质为手术工具
Velys	半主动	无图像	新兴产品	与 ATTUNE 深度集成,手术一体化	系统封闭
ROSA	半主动	基于 X 射线(2D/3D)	有限部署	协作机器人,支持图像以及无图流程;直观反馈任何改变对缝隙平衡的影响;提供了更精准的骨切除能力	系统庞大、维护成本较高、需要专门培训;效果仍取决于医生在有效利用技术上的技能和经验
Cuvis	全自动	基于 3D CT 的规划	使用	自动切割,减少人工操作误差;三维建模缩短手术时间	全自动切割中如何保证安全还有待考证;缺乏植入物的效果和寿命数据
MISSO	全主动	基于术前 CT/3D 规划	新兴	高性价比	全主动控制

膝关节手术机器人的工作流程通常包括:系统设置、术前规划、系统注册、术中操作和反馈等。目前技术已实现:预定切割^[10]、实时位置追踪、实时预演反馈^[10]、术中机械臂精准定位、3D 建模^[9],精准反馈截骨操作、假体空间定位及下肢对线情况等。然而现阶段手术机器人普遍存在成本昂贵不易移动、技术难度大、操作复杂度高、学习训练时间较长等缺点^[8];以及一些亟待提升的方面,例如手术机器人缺乏触觉反馈(力反馈)^[1,3];建模停留于术前规划阶段,与术中执行断层;目前多为半主动式结构,人们对于全自动式排斥性较高等问题。

当前大多数膝关节手术机器人主要采用主从模式^[11],机器协助人进行术前规划、术中操刀的半主动模式,已经出现了术中操作全自动的系统(Cuvis)。然而,在元宇宙医学的语境之下,未来的趋势是全自动(自动化水平五级^[11])全流程的智能膝关节手术机器人,目前术前规划和术中安全保证还有待发展。然而膝关节置换手术对错误极为敏感,哪怕一次失败也可能导致严重后果,因此完全自主机器人在手术室中可能还需要很长时间的验证才能足够安全和可靠^[12]。所以目前很长一段时间内,我们还是需要医生掌握核心技术并有操刀手

术的能力,并且需要通过医生和机器人协作的手术来逐步让患者从心理上接受全自主的机器人手术。在此基础上,结合元宇宙医学,我设想基于数字孪生与混合现实的智能膝关节置换术系统,采取人预演、监督、机器人规划、操刀的模式,初步实现机器人决策、规划、操作,从“半主动”走向“半自动”,自动化水平从3级到4级^[11],向全自主系统(5级)过渡。

2 核心技术:数字孪生和手术机器人

2.1 数字孪生膝关节 数字孪生五维模型(物理实体、虚拟实体、服务、数据、连接)^[13],为膝关节“复制”提供了理论支持。以目前个性化假体的制作^[14]和3D膝模型的构建^[9]为基础,将病变关节转化为3D模型,根据膝关节有限元研究^[15]总结出的不同年龄阶段膝关节有限元计算模型的材料特性^[16],用特定材料打印患者膝关节物理实体并加装柔性传感器(参考UDCAP VR手套的柔性传感器);同时构建数字孪生系统——融合患者解剖结构、生物力学属性与生理特性的动态虚拟实体,最大程度上还原患者真实情况和术中情况,从而制定个体化截骨策略。

2.2 关节手术机器人 术前规划时,手术机器人可以根据模型数据库提出多种治疗方案并进行模拟筛选。手术模拟时,医生通过MR眼睛直接看到模型上预规划的截骨线和安全边界。机器接收实体模型和操作工具上传来的相关数据,包括触觉感知数据^[17-19]、运动路径、受力情况、手势识别^[20]等,将医生操作的相关数据转化为数字路径指令再转化为机器运动指令,进行手术的再现。

手术中,关节手术机器人可通过语音交互、手势交互^[21]与医生进行自然的人机交互;软组织传感器^[6]记录手术关键数据,如骨骼结构测量、植入物一致性、旋转度等,使得手术具有可重复性这些数据可以作为术后更精确、个体化的治疗方案参考^[22]。

3 系统设计:新型智能膝关节置换

本系统的核心创新在于设计一个“虚拟规划-预演操作-协同执行”的闭环流程(图1)。它将数字孪生模型、手术路径规划、实时导航信息融入术前、术中、术后整个体系。医生通过系统可以以自然的方式,进行评估方案、实操预演与术中调整,以监督引导的视角辅助机器人自主手术,实现精准化个性化的治疗。

3.1 智能生成与筛选最优方案 系统基于患者的膝

关节数字孪生体,集成生物力学仿真与AI算法,自动生成多种兼顾机械对线、软组织平衡及关节活动度的假体安放方案。系统通过操纵不同方案在虚拟关节中的表现初步筛选出“最优方案”。医生可在MR界面通过比对,结合临床经验进行确认。系统应存在智能和手动两种决策方式,减少内部学习和训练所需时间:初期可选择由医生主导决定治疗方案,在实际工作的同时利用工作中的数据进行模型训练^[22]。

此筛选方案采用半自主控制,突破了现有大多数机器人辅助医生的定位,同时保留人的决定作用,做到了从遥操作、经典自动化,到学习型自主性^[23]的过渡。

3.2 手术规划和演示 医生佩戴MR设备,在高仿真膝关节物理实体上进行手术演示。在此过程中:MR系统提供虚拟的截骨导引、假体轮廓等信息叠加。医生使用装配高精度运动传感器和力传感器的器械进行实际手术操作。系统实时捕获并记录医生操作器械的完整空间运动路径、速度、力度等信息,并与实体的柔性传感器收集的信息整合,形成“数字手术路径”。最后通过回顾纠正修复医生失误的操作、优化方案。

通过医生实际操作进行手术预演,解决了技术难度大、使用门槛高的问题。医生不需要了解如何使用手柄、脚踏板和图像传输系统,经验不足的医生可以选择使用传统手术方式实操,再对复刻手术进行系统微调,最后由机器人利用超高稳定性复刻执行。医生在积累经验的同时保证了手术可靠性,并解决了机器人手术普遍缺乏触觉反馈的问题。

通过手术预演保证医生对于核心技能的掌握、强化医生对于三维解剖和手术步骤的理解,医生督导整个流程,这在元宇宙医学还未普及的不远的未来,是对安全问题和紧急情况的必要保障。

除此之外,结合5G技术,专家可远程进行预演操刀,生成“专家路径”加密传输至远端,由本地机器人协同当地医生完成手术,为优质医疗资源下沉开辟新路径,这在5G支气管镜远程机器人系统中已经得到验证^[3]。

3.3 手术执行 真实手术中,系统进入协同模式。

3.3.1 机器人复刻与引导 手术机器人以“数字手术路径”为基准轨迹进行手术,由医生进行步骤确认、引导和监督。

3.3.2 医生实时监控与决策微调 医生实时观察机器人执行状态,可通过术中工具跟踪(达芬奇手术系统)^[20]生成三维AI图像^[11]结合患者实际解剖的匹

配情况。若发系统自动检测发现因个体组织差异导致路径需要调整(比如韧带张力与预演不同),即刻反馈并生成新方案,或由医生直接通过手势、语音或从控制接口,发出修正指令。

3.3.3 闭环决策 在非紧急的情况下,系统接收指令或生成新方案后,将调整后的新数据反馈回数字孪生模型,进行快速仿真,预测调整后的效果。此过程形成“医生感知-决策微调-机器人执行-仿真反馈-最终决策”的人机协同闭环。

3.3.4 最终执行 在关键步骤上,由医生确认最终方案。在医生监督下,机器人利用其超高的稳定性和精度,完成对“微调后路径”的最终复刻执行。

数字手术路径不仅可以构建外科智能教学库,作为珍贵的教学资源,用于规范化培训与技能分析,还可以构建手术操作的量化评价体系,用于医师实操标准的考核以及机器人系统的检测。

全流程采取双重操作和两次检查,规避了纯算法规划的故障缺陷和纯医生操作的失误可能。此外,通过远程医疗和系统的半自主化,可以进一步缩小医疗资源的差距。

3.4 术后反馈 通过手术过程中记录的安放精准程度、对线情况等数据进行术后反馈,对患者康复提供个性化方案。

4 小 结

本文基于现有关节置换手术机器人与元宇宙医学的未来趋势,提出了一种基于数字孪生与混合现实的智能膝关节置换术系统及其协同工作流程。该系统通过创建数字孪生体作为数据基础,利用混合现实实现自然直观的人机交互,并设计了“医生预演操刀路径学习”与“术中动态人机协同决策”的机制,在提升手术精准度与可预测性的同时,捍卫了医生的决策权威、保证了医生的核心技能掌握。其优化在于,手术机器人从协作工具、命令执行者变为决策者和自主优化者,医生从主导者变为督导者。术前和术中利用数字孪生模型和实时反馈实现自主,但在手术整体操作上仍以医生数字路径为基础,为该系统在保留自主性的情况下进行人机协同,保证了手术质量,为后续全过程自主奠定了基础。

尽管一些方面尚面临挑战。成本上,该系统高度复杂,需整合数字孪生、MR影像、AI大脑、机械臂与传感器等多部分,成本较高,探索低成本方案急需解决;安全保障上,半自动化的系统是否会造成医生的怠慢和不作为导致最终效果问题;技术实

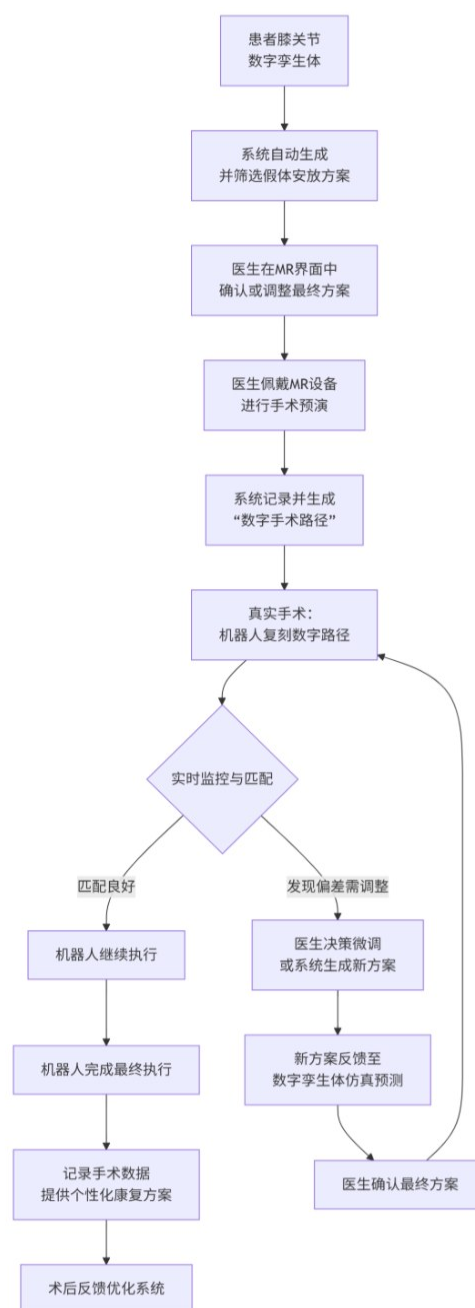


图1 手术决策闭环流程设计

现上,训练数据可能存在的内在偏见如何去除,数据隐私如何保障,存在模型透明度和医患信任之间的关系^[11];技术检验上,尽管网络延迟的容忍度目前尚在人反应时间之内^[3],但是多模块整合后的实时性还有待验证,且路径捕捉精度等各方面都需要大量临床前试验和数据;权责界定上,需要建立标准的人机协同手术认证体系,携手法学、伦理学家共同制定清晰的权责界定规则。

未来的研究将集中于:将庞大的系统拆分小型模块以进行临床前分区试验、临床时灵活运用;优化3D膝关节构建流程^[9],建立数字孪生模型;寻找

更合适的仿真材料,开发 3D 打印高仿真实体的路径,结合体外培养技术构建预演物理实体;在医生引导下的自主系统可以拓展至其他方向,以作为元宇宙医学背景之下,尚未达到技术硬件要求时的半自主过渡。

一定程度上,该系统顺应了元宇宙医学和下一代智能外科的发展趋势——具备力反馈的全自动外科手术机器人^[3,11],从“工具辅助”走向“智能协同”,为实现更个性化、更精准、更可及的骨科手术提供了切实可行的技术蓝图。

伦理声明 无。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献 林栩之:撰写文稿;王源:修改文稿;杨达伟:指导文稿撰写和修改。

参考文献

- [1] 杨丽晓,侯正松,唐伟,等. 近年手术机器人的发展[J]. 中国医疗器械杂志, 2023, 47(1): 1-12.
- [2] 衡春宁,李科鑫,罗瀚文,等. 国产关节手术机器人辅助人工全膝关节置换术的早期临床研究[J]. 中国疗养医学, 2025, 34(12): 90-96.
- [3] LIU L L, ZHANG J Y, WANG F, et al. AI search, physician removal: Bronchoscopy robot bridges collaboration in foreign body aspiration[J]. *Sci Robot*, 2025, 10(104): eadt5338.
- [4] REISENAUER J, SIMOFF M J, PRITCHETT M A, et al. Ion: technology and techniques for shape-sensing robotic-assisted bronchoscopy[J]. *Ann Thorac Surg*, 2022, 113(1): 308-315.
- [5] IWAMOTO S K, TSAI W S. Novel approaches utilizing robotic navigational bronchoscopy: a single institution experience[J]. *J Robot Surg*, 2023, 17(3): 1001-1006.
- [6] ROCHE M. The MAKO robotic-arm knee arthroplasty system[J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2021, 141(12): 2043-2047.
- [7] SAEIDI H, OPFERMANN J D, KAM M, et al. Autonomous robotic laparoscopic surgery for intestinal anastomosis[J]. *Sci Robot*, 2022, 7(62): eabj2908.
- [8] RUDRARAJU R T, LONDHE S B, ANEJA K, et al. The role of next-generation robotic systems in transforming knee arthroplasty: precision and beyond[J]. *J Robot Surg*, 2025, 19(1): 393.
- [9] ZAMBIANCHI F, DAFFARA V, CATANI F. Mako robotic arm-assisted unicompartmental knee arthroplasty [M]//*Surgical Management of Knee Arthritis*. Cham: Springer International Publishing, 2023: 37-50.
- [10] ROSSI S M P, BENAZZO F. Individualized alignment and ligament balancing technique with the ROSA® robotic system for total knee arthroplasty [J]. *Int Orthop*, 2023, 47(3): 755-762.
- [11] KNUDSEN J E, GHAFAR U, MA R Z, et al. Clinical applications of artificial intelligence in robotic surgery [J]. *J Robot Surg*, 2024, 18(1): 102.
- [12] GOLDBERG K, GUTHART G. Augmented dexterity: How robots can enhance human surgical skills[J]. *Sci Robot*, 2024, 9(95): eadr5247.
- [13] 陶飞,刘蔚然,张萌,等. 数字孪生三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.
- [14] 单森,石青鹏. 个性化膝关节假体与传统假体的临床应用现状与进展[J]. 中国医药导报, 2024, 21(23): 70-75.
- [15] 梁成,尹一然,张亚丽,等. 全膝关节置换构造内翻的有限元仿真研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2025, 42(06): 1242-1250.
- [16] 陈静,张楠,孟庆华,等. 不同年龄阶段膝关节有限元计算模型的材料特性分析[J]. 中国组织工程研究, 2025, 29(34): 7369-7375.
- [17] 胡俊,李仲萱,齐佳明,等. 机器人操纵的触觉感知技术综述[J]. 自动化与信息工程, 2025, 46(5): 1-15.
- [18] NGUYEN D H, SCHNEIDER T, DURET G, et al. Tac Ex: Gel Sight tactile simulation in Isaac sim—combining soft-body and visuotactile simulators[J]. *ar Xiv preprint ar Xiv: 2411.04776*, 2024.
- [19] LONG Y H, LIN A R, KWOK D H C, et al. Surgical embodied intelligence for generalized task autonomy in laparoscopic robot-assisted surgery[J]. *Sci Robot*, 2025, 10(104): eadt3093.
- [20] ESLAMIAN S, REISNER L A, PANDYA A K. Development and evaluation of an autonomous camera control algorithm on the da Vinci Surgical System[J]. *Int J Med Robot*, 2020, 16(2): e2036.
- [21] 甘舜轩. 构建未来医疗体验: 元宇宙医学平台的创新硬件与交互技术[J]. 元宇宙医学, 2024(2): 16-22.
- [22] 刘思佳,赵磊,李格格. 机器人辅助全膝关节置换术对股骨旋转对线及早期疗效的研究进展[J]. 机器人外科学杂志(中英文), 2023(6): 593-596.
- [23] DUPONT P E, DEGIRMENCI A. The grand challenges of learning medical robot autonomy [J]. *Sci Robot*, 2025, 10(104): eadz8279.

引用本文

林栩之,王源,杨达伟. 基于数字孪生与混合现实的智能膝关节置换术:系统设计、协同流程与展望[J]. 元宇宙医学, 2025, 2(4): 48-52.

LIN X Z, WANG Y, YANG D W. Intelligent knee arthroplasty based on digital twin and mixed reality: system design, collaborative process and prospects[J]. *Metaverse Med*, 2025, 2(4): 48-52.