

人工智能赋能机器人外科的现状与挑战

王若普 郭陟永 花语菲 马中凯 朱桂全 李春洁

口腔疾病防治全国重点实验室 国家口腔医学中心 口腔疾病国家临床医学研究中心
四川大学华西口腔医院头颈肿瘤外科 成都 610041

[摘要] 手术机器人具有优秀的可操作性与稳定性，机器人辅助手术（RAS）使得外科手术更加精细化、微创化，是外科领域的“第三次技术革命”。近年来人工智能技术发展迅猛，其在RAS中的应用是一大热点，有望进一步提升RAS的效率与安全性。本文综述了人工智能在RAS中的应用现状，系统分析了主流手术机器人系统及AI模型在术中决策辅助、解剖结构识别、手术技能评估、自主式手术中的重要作用。人工智能赋能RAS仍面临诸多挑战，包括手术机器人系统的稳定性和性能的进一步提升、侵权责任认定等。随着跨学科合作的深入、数据安全的保障及伦理框架的完善，人工智能与外科医生的协同合作将成为推动外科手术迈向数智化新时代的关键力量。

[关键词] 人工智能；机器人手术；自动化；深度学习

[中图分类号] TP242.6 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/gjkq.2026604



本文链接

OSID 码

Artificial intelligence empowering robotic surgery: current status and challenges

Wang Ruopu, Guo Zhiyong, Hua Yufei, Ma Zhongkai, Zhu Guiquan, Li Chunjie

State Key Laboratory of Oral Diseases & National Center for Stomatology & National Clinical Research Center for Oral Diseases & Dept. of Head and Neck Oncology, West China Hospital of Stomatology, Sichuan University, Chengdu 610041, China

Supported by: Natural Science Foundation of Sichuan Province (2025ZNSFSC0645); Medical Science and Technology Project of Health Commission of Sichuan Province (24CXTD07); Postdoctoral Fellowship Program of China (GZC-20231787); Interdisciplinary Innovation Project of West China Hospital of Stomatology, Sichuan University (RD-03-202309, RD-03-202506)

Correspondence: Li Chunjie, Email: lichunjie@scu.edu.cn

[Abstract] Surgical robots have excellent operability and stability. Robot-assisted surgery (RAS) enhances the precision and minimally invasive nature of surgical procedures, which is the “third technological revolution” in surgery. In recent years, artificial intelligence (AI) technology has developed rapidly, and its application in robotic surgery is a hot topic, which is expected to enhance the efficiency and safety of RAS. This article summarizes the current application status of AI in robot-assisted surgery and systematically analyzes the important roles of predominant surgical robot systems and AI models in intraoperative decision support, anatomical structure identification, surgical skill evaluation, and autonomous surgery. Enhancing robot-assisted surgery with AI still faces numerous challenges, such as the need for improved stability

and performance of surgical robotic systems, and determination of infringement liability. As interdisciplinary cooperation intensifies, data security is ensured, and ethical frameworks are enhanced, the partnership between AI and surgeons will become a pivotal force in promoting surgical practices into a new era of digitization.

[Key words] artificial intelligence; robotic surgery; automation; deep learning

[收稿日期] 2025-04-29; **[修回日期]** 2026-01-19

[基金项目] 四川省自然科学基金 (2025ZNSFSC0645); 四川省卫生健康委员会医学科技项目 (24CXTD07); 国家资助博士后研究人员计划 (GZC20231787); 四川大学华西口腔医院交叉学科创新项目 (RD-03-202309, RD-03-202506)

[第一作者] 王若普, 学士, Email: 502619537@qq.com

[通信作者] 李春洁, 教授, 博士, Email: lichunjie@scu.edu.cn

从开放手术到腔镜手术,外科向微创化加速发展。机器人辅助手术(robot-assisted surgery, RAS)被誉为外科学领域的“第三次技术革命”^[1],是现代外科学发展的重要里程碑,进一步革新了微创外科。相较于传统手术,RAS结合了精密机械与先进算法,为医生提供更精准的操作,实现更小的创伤及更短的恢复时间。RAS在普外科、神经外科、泌尿外科、骨科、妇科等得到了广泛的应用^[2-3]。

人工智能(artificial intelligence, AI)是对人类智能的编程模拟,通过模仿人类的行为,如学习、推理和感知,能够作出自己的决定并以更高的效率和更少的错误执行预期任务的程序^[4]。AI作为核心驱动技术,通过数据分析、深度学习和实时反馈,使手术机器人更加智能化和高效化^[5]。当前AI驱动的RAS系统包含各种功能,包括图像的识别与分割、识别器械与解剖结构、通过运动控制和路径规划优化手术器械运动等,从而实现更流畅、更精确的手术^[6]。本文对AI在RAS中应用的现状及挑战进行阐述,并对未来研究作出展望。

1 手术机器人

1.1 腔镜手术机器人

腔镜手术机器人通常由医生控制台、机械臂和影像系统组成^[7-8]。与传统腹腔镜手术相比,腔镜手术机器人解决了传统腹腔镜手术手眼不协调的问题,能够有效减轻医师的操作疲劳并滤除手部震颤^[9]。腹腔镜手术机器人是目前最成熟、应用最广泛的一类手术系统。

Intuitive Surgical公司开发的达芬奇手术系统是目前全球应用最广泛的腔镜手术机器人。该系统由高清成像系统、机械臂和控制台组成^[10]。达芬奇手术系统具有高精度操作、低创伤、三维视觉和震颤滤除功能等多项技术优势^[11]。此外,其腕转手术器械超越了人手的自然极限,使缝合和打结等操作变得更加便捷自如^[12]。

康多手术机器人(KD-SR-01)是一个由开放式外科医生控制台、三臂RAS车和3D视频成像系统组成的主从操作系统。笔者所在研究团队率先评估了该机器人系统在口腔颌面微创外科手术中的应用效果,结果显示,与传统内镜手术相比,康多手术机器人在动物模型中显示出良好的效果,

为国产手术机器人在口腔颌面部手术中的应用奠定了基础^[13]。在此基础上,笔者团队成功使用新型机器人(KD-SR-1500)顺利完成了腮腺良性肿瘤切除1例,这也是第1例国产手术机器人实施的口腔颌面外科手术^[1]。术锐的单孔蛇形臂手术机器人是国内首个获批的内窥镜单孔手术系统,其独创的蛇形臂技术,能够在狭小的手术空间内实现多角度、全周向的精细操作,解决了传统单孔手术中“筷子效应”的难题^[14]。

1.2 经皮穿刺手术机器人

传统经皮穿刺手术中,医生通常使用穿刺针或导管,在影像引导下经过人体皮肤,直接穿刺到达病灶进行诊断或治疗^[15]。由于影像扫描与穿刺操作难以同步进行,医生在操作中缺乏实时准确的术区信息感知,因而技术敏感性强。经皮穿刺手术机器人整合了计算机技术、影像技术和机器人技术,能够基于术前影像资料规划运动轨迹,提高了穿刺的精度和稳定性,显著减少并发症^[7,16]。

新加坡Biobot Surgical公司的MonaLisa机器人系统可协助医师进行超声引导下的经会阴前列腺活检,该系统使用超声探头采集前列腺图像并建立3D模型,与术前基于MRI的前列腺3D模型配准,提高了活检的安全性和精确性。北京大学口腔医院郭传瑛教授团队^[17-18]研究表明,颅底穿刺机器人通过术前将影像图像导入导航软件进行三维重建,勾画出病变边界和血管位置,从而指导穿刺针精准穿刺。该机器人系统已在头颅标本上展现了良好的精度和稳定性。Won等^[19]开发了CT引导下主从穿刺机器人,在模拟穿刺试验中显示针尖到靶心的总体误差为2 mm。Wang^[20]开发了一种基于呼吸信号监测的机器人辅助穿刺介入手术导航系统,采用双目相机和编码结构光相机的混合导航技术,通过深度学习模型实时监测患者的呼吸状态,减少呼吸运动对手术的影响。

1.3 血管介入手术机器人

血管介入手术的核心操作流程是在医学影像的引导下,通过导管、导丝等介入器械按照术前规划路径在患者血管中到达病灶位置从而进行治疗^[21]。在血管介入手术机器人的辅助下,高辐射环境对医生健康的损伤得以缓解。同时,医生能够远程控制导管、导丝进行手术,进而提升操作精度,保证了更稳定的手术结果^[22]。

Sensei X血管介入手术机器人系统融合了三维导管技术与三维可视化技术,为医生们带来了更

高的稳定性和精准度^[23-24]。CathROB系统在原有的架构中嵌入了力反馈机制,增设了额外的安全保障系统^[25-26]。Liberty机器人系统将复杂的手术器械集成到紧凑的设计中,提高了其便利性。

国产血管介入手术机器人同样取得突破。R-ONE[®]是我国首个完成多中心临床试验并获批的冠脉血管介入手术机器人。其具备开放的体系结构,无缝对接主流介入器械及导管室配套器械,能够实现精准的导丝、导管和支架输送,主要用于复杂冠状动脉介入治疗^[27]。2024年第十八届钱江心血管病会议期间,刘炳辰教授团队使用R-ONE[®]血管介入机器人完成1例手术演示。

1.4 骨科手术机器人

骨科手术机器人是近年来智能医疗领域的重要突破,通过高精度定位、自动化操作和实时导航,显著提升了骨科手术(如关节置换、脊柱手术)的准确性和安全性^[28]。

最初在商业应用中崭露头角的是关节骨科手术机器人,能够完成全膝关节置换、全髋关节置换等人体关节置换任务^[29]。1992年,Integrated Surgical Systems公司开发的主动操作型的Robodoc机器人成功面世,用于辅助关节置换手术^[30]。2012年,Blue Belt Technologies公司推出Navio PFS机器人,该系统摒弃了术前预成像步骤,在术中通过红外影像技术进行精确定位导航^[31]。

近年来,得益于国家政策的引导与扶持,国产骨科手术机器人呈现蓬勃发展的态势^[32]。铼钨[®]全骨科手术机器人是一款半主动操作型手术机器人,能够有效辅助关节替换手术^[33]。鸿鹄[®]骨科手术机器人是一款髌膝一体的手术机器人,下肢冠状面对线误差小,股骨旋转对位准确性显著优于传统手术,术后膝关节屈曲功能恢复更佳^[34]。

1.5 经自然腔道手术(natural orifice transluminal endoscopic surgery, NOTES)机器人

NOTES指的是通过人体与外界自然相通的腔道进入腹腔、纵隔、胸腔等进行手术,具有创伤小、痛苦少、体表无瘢痕、恢复快等优势^[7]。NOTES机器人通常由内窥镜、机械臂、导航系统和控制台组成。医生通过控制台操作机械臂,将内窥镜和手术器械经自然腔道送入体内,利用导航系统精确定位病灶,完成手术操作。但NOTES机器人存在视野有限、无触觉感知等困难^[35]。

2004年Kalloo等^[36]完成了经动物胃的腹腔探查和肝脏活检术,首次公布了NOTES实验资料,

并进行了临床验证。Flex[®]系统是Medrobotics公司为头颈外科的经口下咽部手术而开发的机器人,该系统由内窥镜、带有触摸屏及高清显示器的操作控制台、双手操纵杆构成。Remacle等^[37]使用Flex[®]机器人经口进入咽部和下咽部进行手术,是第一个被美国食品药品监督管理局(Food and Drug Administration, FDA)批准用于NOTES的机器人。2020年,Hwang等^[38]提出用于无瘢痕内窥镜手术的灵活机器人平台K-FLEX,该系统的从手对主手跟随性能突出,滞后延时小于1 ms。

2 AI模型

2.1 深度学习(deep learning, DL)模型

DL特指基于深层神经网络模型和方法的机器学习,特点是通过多层神经网络来模拟人脑的复杂决策能力。DL通过观察、学习和模仿人类获取知识的方式,适用于大量数据的处理^[39]。DL特别擅长图像识别,可用于识别解剖结构,预测出血风险,甚至指导手术器械轨迹。Sheng等^[40]开发的Surgical-DeSAM是一种用于手术器械分割的DL模型,通过Swin-DETR检测器生成自动边界框提示,以实现手术器械的实时分割。DL同样可用于实现机械臂的自主运动与策略优化。Gao^[41]研究了DL在机器人机械臂控制中的应用,通过演示学习对机械臂进行训练,以提高其在静态和动态条件下的操作性能,结果表明DL能够有效优化机器人机械臂的控制策略。

卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)是一类包含卷积计算且具有深度结构的前馈神经网络,是深度学习的代表算法之一^[42],在手术机器人中的应用广泛且深入,涵盖了术前规划、术中导航与实时控制、术后监测等多个环节^[39]。实时控制方面,基于CNN的手术机器人控制系统能够通过视觉层和关节状态的特征提取,实现精准控制。学者们^[43-44]设计了一种基于CNN的手术机器人控制系统,通过持镜臂的视觉反馈和传感器数据,实现了对手术机器人的精准控制,结果显示该系统与期望规划值基本一致,拟合度达到100%。

2.2 强化学习模型

强化学习指的是无需预先定义的模型,而是通过让机器人在与环境交互中学习,从而能够处理复杂的手术任务和环境。机器人根据当前手术

状态（如患者解剖结构、手术器械位置等）作为输入，通过强化学习算法计算出最佳的动作，并根据手术结果获得奖励或惩罚信号，从而不断调整和优化自身行为^[45]。

Thananjeyan 等^[46]开发了一个有限元模型来模拟组织的变形和切割，并使用信任区域策略优化训练机器人学习最佳的张力控制策略。机器人通过稀疏奖励学习，最终切割误差相比非张力基线提高了 43.3%。Keller 等^[47]在以光学相干断层扫描图像作为观察的眼科手术中训练一个智能体来控制针的深度以达到目标位置，机器人在无穿孔百分比深度方面达到了 84.75%±4.91%。

尽管强化学习模型在手术机器人中展现出显著的性能，但目前仍面临数据效率低、训练成本高和缺乏安全保证等挑战。未来的研究需要进一步优化 DRL 算法，提高其在手术场景中的适用性和可靠性，并开展临床试验以验证其有效性和安全性。

3 AI在RAS中的应用

3.1 辅助术中决策

术区是一个数据丰富的环境，AI 技术能够实时处理手术过程中的视频图像数据，帮助机器人更准确地识别手术区域和目标组织。通过 DL 算法，机器人能够实时导航至目标位置，避开关键组织和血管，确保手术路径的安全性^[43,48]。结合新兴的数字化技术，例如混合现实等，有望进一步提升手术机器人的精确性，具有广阔的应用前景^[49]。

Pangal 等^[50]研究了专家级外科医生和 DL 模型 SOCALNet 在仅使用手术视频的第 1 分钟时，对微创手术中大出血结局（能否成功止血）和失血量的预测能力。研究使用了包含 147 个视频的 SOCAL 数据集，结果显示专家的预测准确率为 69%，而 SOCALNet 的准确率达到了 85%。且在预测失血量方面，SOCALNet 的表现优于专家。Vermeulen 等^[51]利用一种 Surgeon 的 DL 模型，通过纳米孔测序技术在手术过程中快速对中枢神经系统肿瘤进行分子亚分类，可有效协助神经外科手术决策，并预防神经系统并发症。

3.2 手术技能评估

传统的手术技能评估主要依赖于专家主观观察，存在评估标准不统一、效率低下等局限。近

年来，AI 迅猛发展为手术技能评估带来了革命性变革。Yang 等^[52]通过收集和分析 RAS 直肠固定术的手术视频，开发了一种基于 DL 用于检测和跟踪的手术工具，研究发现 AI 算法测量的工具运动与专家对手术效率和双手法熟练度的评分呈显著正相关（ $r=0.48$ ）。Khalid 等^[53]利用 DL 模型对 103 段手术视频进行分析，能够准确识别手术动作并评估手术技能水平。Goodman 等^[54]开发了一种基于多任务机器学习技术的 AI 模型，能够实时分析开放手术视频中的手术行为，并通过大规模地标注视频数据集进行训练，以提高手术技能评估的客观性和效率。Cao 等^[55]提出的 AI-Endo 系统用于内镜下黏膜切除术的智能手术 workflow 识别，通过分析手术阶段转换频率，研究者能够区分经验丰富的外科医生和新手，为手术技能评估提供了量化指标。这些结果表明，AI 和计算机视觉技术有望为外科手术技能的评估提供一种高效、客观且可解释的方法，有助于外科培训和技能提升，最终可改善患者预后。

3.3 术中识别

术中对人体解剖结构、手术器械等进行精确识别是 RAS 成功的关键。de Backer 等^[56]开发了一种基于 DL 提高增强现实在机器人辅助肾脏手术中应用的方法，用于检测手术场景中的手术器械。Ping 等^[57]使用改进的 CNN 和 YOLOv3 算法对手术内窥镜检查器械进行检测，使用了 181 个内窥镜视频数据集，涵盖 5 种不同的手术场景，通过训练和测试验证了模型在工具识别和工具尖端识别方面的高灵敏度和精确度。

手术过程中对患者解剖结构的精确识别，需要仔细考虑各种可能阻碍视野的因素，这些因素包括设备、血液、烟雾和脂肪组织。此外，能够在整个解剖过程中抑制组织变形的形式至关重要。尽管面临挑战，研究人员在改进患者解剖结构的自动识别方面取得了重大进展。Nosrati 等^[58]引入了一种新技术，用于在肾部分切除的背景下将术前数据与术中内窥镜图像同步。通过结合术前解剖先验知识、术中脉搏运动和颜色外观线索，实现了对可见和被遮挡结构的精确分割。Gong 等^[59]提出了一种用于 RAS 场景中软组织变形恢复的自监督循环微分同胚映射方法。通过结合语义信息、跨帧运动流和长期时间依赖性，从立体手术视频中恢复软组织的三维变形，同时利用微分同胚映射确保变形场的物理合理性。

3.4 自主式手术

目前,手术机器人系统主要采用“一对一”的主从式遥操作,外科医生的技能水平差异、操作疲劳和决策失误等个体化因素会直接影响手术疗效^[60]。AI与手术机器人技术的结合与进步正在为增加外科手术的自主性铺平道路。AI在RAS中的初步应用可以一定程度上提高手术效率与安全性,而最终的方向是朝自主式手术发展^[2,4,61]。

Yang等^[61]率先提出了RAS自主性分级体系,目前部分商业化的自动手术技术已经达到了3级,并逐渐接近4级,即有条件的自主:系统生成任务策略,但依赖于人类从不同的策略中进行选择或批准自主选择的策略,可在没有密切监督下独立进行手术任务。

支气管镜检查是一种微创诊断和治疗程序,已成为检测、治疗各种肺部疾病的重要工具。支气管镜检查过程需严格保证安全性与精确性,对医生的技术与经验提出了较高的要求^[62]。Zhang等^[63]开发了一种AI辅助的支气管镜机器人系统,用于帮助实习医生安全、熟练地进行肺部检查。该系统通过硬件设计和AI-人类共享控制算法,结合模拟训练和真实操作,显著提高了支气管镜检查的准确性和安全性,为未来AI在其他微创医疗领域的应用奠定了基础。

缝合与打结是腹腔镜微创手术中最基本的两个任务,由于在体内局限的软组织环境下开展,导致动作耗时且存在损伤周围组织的风险^[64]。约翰霍普金斯大学团队研发的智能组织吻合机器人(smart tissue anastomosis robot, STAR)能够自主完成缝合操作。该系统由一个具有7个自由度的KUKALBR机械臂组成,并配备了1个单臂缝合器械。STAR系统能够以小于0.5 mm的平均误差在平面投影上放置缝合线,其准确性能够满足临床使用的需要^[12,65]。STAR系统在模拟和活体实验中均显示出较高的自主性和一致性,能够在显著减少外科医生工作量的同时提高手术质量^[10-11]。

机器人辅助种植手术是口腔种植领域的新兴技术^[66-67]。赵铎民院士团队从2013年开始研发自主式种植牙机器人,通过手术设计软件、光学跟踪定位仪和机械臂操作平台,实现术前规划、术中导航和自动执行,全程无需医生手动操作^[68]。2024年,赵铎民院士团队成功利用机器人完成国际首例自体牙移植手术和完全骨埋伏多生牙拔除手术^[69]。上海交通大学医学院附属第九人民医院

吴轶群教授团队采用UR5机械臂搭建了颧种植手术机器人,并在无牙颌模型中植入颧种植体,展现了颧种植手术机器人实现更高的自主化程度的巨大潜力^[70-71]。

上海交通大学医学院附属第九人民医院张陈平教授、刘剑楠研究员牵头研发的下颌骨腓骨重建手术机器人是专用于颌骨重建的手术机器人。该团队从榫卯结构中获得灵感,以此实现更稳定和可靠的重建效果。该系统由机器人底座、三自由度Delta并联机构、三自由度串联机构、传感器、深度相机和手术工具组成,通过结合图像引导和力反馈,提供更精确和安全的截骨操作^[72-74]。

4 挑战

尽管AI赋能RAS具有广阔的前景,但仍面临几重挑战。

技术制约是AI融入外科手术的一大挑战。手术机器人的研发和应用涉及机械工程、电子工程、计算机科学和医学等多个学科领域的技术,导致技术迭代具有一定的门槛。系统需要处理大量的实时数据,包括高清视频流、传感器数据和复杂的AI算法推理,这对系统的稳定性和性能提出了极高的要求。

AI及手术机器人的应用会带来社会伦理问题^[75]。医疗机器人在某些参数上接近甚至超越人类,例如2017年,科大讯飞的“智医助理”机器人通过了国家临床执业医师资格考试,但机器人是否能成为道德和法律主体仍存争议^[76]。医疗机器人的介入可能冲击医生在医患关系中的主导地位,重构传统医生与患者之间的伦理关系,可能带来医患信任的潜在危机^[77-78]。

侵权责任认定也是自主手术机器人发展过程中的重要问题。手术机器人无法成为刑事责任的主体,因此需要重新审视医生的责任归属和认定标准。医生在智能手术医疗中应尽到相应的预见义务及回避义务,促进AI技术在医疗领域的健康发展^[76,79-80]。

5 结论

AI与手术机器人的结合标志着现代外科手术领域的一次重大飞跃。随着AI技术的不断进步,手术机器人在自主化、智能化和多模态融合等方

面取得了突破性进展。然而, AI赋能RAS仍面临技术、社会及伦理等多方面的挑战。未来, 随着跨学科合作的深入、数据安全的保障及伦理框架的完善, AI手术机器人有望在更多临床场景中实现广泛应用, 进一步提升手术的安全性和效率。外科医生与AI技术的协同合作将成为推动医疗创新的关键力量, 引领外科手术迈向数智化的新时代。

利益冲突声明: 作者声明本文无利益冲突。

6 参考文献

- [1] 朱桂全, 马中凯, 曹昶, 等. 国产手术机器人辅助下腮腺肿瘤切除1例[J]. 华西口腔医学杂志, 2024, 42(2): 262-267.
Zhu GQ, Ma ZK, Cao C, et al. Chinese surgical robot-assisted surgery for parotid tumor: a case report [J]. *West China J Stomatol*, 2024, 42(2): 262-267.
- [2] Nwoye E, Woo WL, Gao B, et al. Artificial intelligence for emerging technology in surgery: systematic review and validation[J]. *IEEE Rev Biomed Eng*, 2023, 16: 241-259.
- [3] Wah JNK. Revolutionizing surgery: AI and robotics for precision, risk reduction, and innovation[J]. *J Robot Surg*, 2025, 19 (1): 47.
- [4] Knudsen JE, Ghaffar U, Ma RZ, et al. Clinical applications of artificial intelligence in robotic surgery [J]. *J Robot Surg*, 2024, 18 (1): 102.
- [5] Chang TC, Seufert C, Eminaga O, et al. Current trends in artificial intelligence application for endourology and robotic surgery[J]. *Urol Clin North Am*, 2021, 48(1): 151-160.
- [6] Iftikhar M, Saqib M, Zareen M, et al. Artificial intelligence: revolutionizing robotic surgery: review[J]. *Ann Med Surg (Lond)*, 2024, 86(9): 5401-5409.
- [7] 徐凯. 手术机器人的应用进展与前景展望[J]. 上海医学, 2024, 47(8): 475-478.
Xu K. Application advances and prospects of surgical robots[J]. *Shanghai Med J*, 2024, 47(8): 475-478.
- [8] 黄楚坚, 蔡松华, 邓友君, 等. 国产精锋单孔腔镜手术机器人辅助气管吻合术的动物实验研究[J]. 武汉大学学报(医学版), 2024, 45(2): 142-146.
Huang CJ, Cai SH, Deng YJ, et al. Single-port robot-assisted endoscopic airway reconstruction using the newly developed Chinese EDGE SP robotic surgical sysem: a preclinical experiment in rabbits[J]. *J Wuhan Univ (Med Edit)*, 2024, 45(2): 142-146.
- [9] Kaouk JH, Haber GP, Autorino R, et al. A novel robotic system for single-port urologic surgery: first clinical investigation[J]. *Eur Urol*, 2014, 66(6): 1033-1043.
- [10] Leonard S, Shademan A, Kim Y, et al. Smart tissue anastomosis robot (STAR): accuracy evaluation for supervisory suturing using near-infrared fluorescent markers[C]//2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hong Kong: IEEE, 2014.
- [11] Saeidi H, Opfermann JD, Kam M, et al. Autonomous robotic laparoscopic surgery for intestinal anastomosis[J]. *Sci Robot*, 2022, 7(62): eabj2908.
- [12] Leonard S, Wu KL, Kim Y, et al. Smart tissue anastomosis robot (STAR): a vision-guided robotics system for laparoscopic suturing[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2014, 61(4): 1305-1317.
- [13] Ma Z, Guo Z, Ding Z, et al. Evaluation of a newly developed oral and maxillofacial surgical robotic platform (KD-SR-01) in head and neck surgery: a preclinical trial in porcine models[J]. *Int J Oral Sci*, 2024, 16(1): 51.
- [14] Chen YY, Zhang C, Wu ZH, et al. The SHURUI system: a modular continuum surgical robotic platform for multiport, hybrid-port, and single-port procedures[J]. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2022, 27 (5): 3186-3197.
- [15] Maris B, Tenga C, Vicario R, et al. Toward autonomous robotic prostate biopsy: a pilot study[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2021, 16(8): 1393-1401.
- [16] 王乃堃, 骆敏舟, 陆丽娟. 穿刺机器人在微创外科手术中的应用进展[J]. 中国疼痛医学杂志, 2020, 26(5): 376-380.
Wang NK, Luo MZ, Lu LJ. Advances in the application of puncture robots in minimally invasive surgery[J]. *Chin J Pain Med*, 2020, 26(5): 376-380.
- [17] Zhu JH, Wang J, Wang YG, et al. Performance of robotic assistance for skull base biopsy: a phantom study[J]. *J Neurol Surg B*, 2017, 78(5): 385-392.
- [18] Zhu JH, Wang J, Wang YG, et al. Prospect of robo-

- tic assistance for fully automated brachytherapy seed placement into skull base: experimental validation in phantom and cadaver[J]. *Radiother Oncol*, 2019, 131: 160-165.
- [19] Won HJ, Kim N, Kim GB, et al. Validation of a CT-guided intervention robot for biopsy and radiofrequency ablation: experimental study with an abdominal phantom[J]. *Diagn Interv Radiol*, 2017, 23(3): 233-237.
- [20] 王旭东. 基于呼吸信号监测的机器人辅助穿刺介入手术导航系统的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2024.
- Wang XD. Research on a robot-assisted puncture intervention surgery navigation system based on respiratory signal monitoring[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2024.
- [21] 关沛峰, 温诗涵, 杨荣骞. 血管介入手术机器人的研究进展及前景分析[J]. *中国医疗器械杂志*, 2023, 47(6): 638-644.
- Guan PF, Wen SH, Yang RQ. Research progress and prospect analysis of vascular interventional surgical robot[J]. *Chin J Med Instrument*, 2023, 47(6): 638-644.
- [22] 郭文颖. 新型血管腔内(介入)手术机器人在下肢动脉腔内治疗中的应用研究[D]. 上海: 海军军医大学, 2024.
- Guo WY. Research on the application of a novel endovascular (interventional) surgical robot in the endovascular treatment of lower limb arteries[D]. Shanghai: Naval Medical University, 2024.
- [23] Rolls AE, Riga CV, Bicknell CD, et al. Robot-assisted uterine artery embolization: a first-in-woman safety evaluation of the Magellan system[J]. *J Vasc Interv Radiol*, 2014, 25(12): 1841-1848.
- [24] Riga CV, Bicknell CD, Rolls A, et al. Robot-assisted fenestrated endovascular aneurysm repair (FEVAR) using the Magellan system[J]. *J Vasc Interv Radiol*, 2013, 24(2): 191-196.
- [25] Cencenelli L, Bortolani B, Marcelli E. CathROB: a highly compact and versatile remote catheter navigation system[J]. *Appl Bionics Biomech*, 2017: 2712453.
- [26] Mahmud E, Naghi J, Ang L, et al. Demonstration of the safety and feasibility of robotically assisted percutaneous coronary intervention in complex coronary lesions[J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2017, 10(13): 1320-1327.
- [27] Durand E, Sabatier R, Smits PC, et al. Evaluation of the R-One robotic system for percutaneous coronary intervention: the R-EVOLUTION study[J]. *EuroIntervention*, 2023, 18(16): e1339-e1347.
- [28] 李金泉, 王九龙, 罗杨宇. 骨科手术机器人的研究进展及发展展望[J]. *医疗卫生装备*, 2023, 44(6): 101-110.
- Li JQ, Wang JL, Luo YY. Research progress and development prospect of orthopedic surgical robots[J]. *Med Equip J*, 2023, 44(6): 101-110.
- [29] 张新星, 赵英杰, 陈超. 计算机辅助骨科手术机器人技术发展及应用综述[J]. *计算机测量与控制*, 2022, 30(4): 1-7, 13.
- Zhang XX, Zhao YJ, Chen C. Review on the development and application of computer assisted orthopedic surgery robots[J]. *Comput Measur Control*, 2022, 30(4): 1-7, 13.
- [30] Schulz AP, Seide K, Queitsch C, et al. Results of total hip replacement using the Robodoc surgical assistant system: clinical outcome and evaluation of complications for 97 procedures[J]. *Int J Med Robot*, 2007, 3(4): 301-306.
- [31] Shatrov J, Murphy GT, Duong J, et al. Robotic-assisted total knee arthroplasty with the OMNIBot platform: a review of the principles of use and outcomes[J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2021, 141(12): 2097.
- [32] 刘钟阳, 孔祥朋, 柴伟. 国产关节置换手术机器人临床应用现状及展望[J]. *骨科临床与研究杂志*, 2025, 10(1): 52-55.
- Liu ZY, Kong XP, Chai W. Current clinical application status and prospects of domestic joint replacement surgical robots[J]. *J Clin Orthoped Res*, 2025, 10(1): 52-55.
- [33] Xu JZ, Li LL, Fu J, et al. Early clinical and radiographic outcomes of robot-assisted versus conventional manual total knee arthroplasty: a randomized controlled study[J]. *Orthop Surg*, 2022, 14(9): 1972-1980.
- [34] 夏润之, 董志成, 张经纬, 等. 国产“鸿鹄”膝关节

- 置换手术机器人的早期临床研究[J]. 实用骨科杂志, 2021, 27(2): 108-113, 117.
- Xia RZ Tong ZC, Zhang JW, et al. Early clinical study of domestic “Skywalker” surgical robot for knee arthroplasty[J]. *J Pract Orthopaed*, 2021, 27(2): 108-113, 117.
- [35] 刘晓彤, 杜慧江, 孙胡蝶, 等. 经自然腔道内镜手术机器人技术综述[J]. 机器人技术与应用, 2022(1): 16-19.
- Liu XT, Du HJ, Sun HD, et al. Review of natural orifice transluminal endoscopic surgery robot technology[J]. *Robot Tech Appl*, 2022(1): 16-19.
- [36] Kalloo AN, Singh VK, Jagannath SB, et al. Flexible transgastric peritoneoscopy: a novel approach to diagnostic and therapeutic interventions in the peritoneal cavity[J]. *Gastrointest Endosc*, 2004, 60(1): 114-117.
- [37] Remacle M, Prasad VMN, Lawson G, et al. Transoral robotic surgery (TORS) with the Medrobotics Flex™ System: first surgical application on humans [J]. *Eur Arch Otorhinolaryngol*, 2015, 272(6): 1451-1455.
- [38] Hwang M, Kwon DS. K-FLEX: a flexible robotic platform for scar-free endoscopic surgery[J]. *Int J Med Robot*, 2020, 16(2): e2078.
- [39] Litjens G, Kooi T, Bejnordi BE, et al. A survey on deep learning in medical image analysis[J]. *Med Image Anal*, 2017, 42: 60-88.
- [40] Sheng YY, Bano S, Clarkson MJ, et al. Surgical-DeSAM: decoupling SAM for instrument segmentation in robotic surgery[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2024, 19(7): 1267-1271.
- [41] Gao TC. Optimizing robotic arm control using deep Q-learning and artificial neural networks through demonstration-based methodologies: a case study of dynamic and static conditions[J]. *Robotics Auton Syst*, 2024, 181: 104771.
- [42] Gu JX, Wang ZH, Kuen J, et al. Recent advances in convolutional neural networks[J]. *Pattern Recognit*, 2018, 77: 354-377.
- [43] Mascagni P, Alapatt D, Sestini L, et al. Computer vision in surgery: from potential to clinical value[J]. *Npj Digit Med*, 2022, 5: 163.
- [44] Madani A, Namazi B, Altieri MS, et al. Artificial intelligence for intraoperative guidance: using semantic segmentation to identify surgical anatomy during laparoscopic cholecystectomy[J]. *Ann Surg*, 2022, 276(2): 363-369.
- [45] Pedersen JS, Laursen MS, Rajeeth Savarimuthu T, et al. Deep learning detects and visualizes bleeding events in electronic health records[J]. *Res Pract Thromb Haemost*, 2021, 5(4): e12505.
- [46] Thananjeyan B, Garg A, Krishnan S, et al. Multilateral surgical pattern cutting in 2D orthotropic gauze with deep reinforcement learning policies for tensioning[C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Singapore: IEEE, 2017.
- [47] Keller B, Draelos M, Zhou K, et al. Optical coherence tomography-guided robotic ophthalmic microsurgery via reinforcement learning from demonstration[J]. *IEEE Trans Robot*, 2020, 36(4): 1207-1218.
- [48] Ebigbo A, Mendel R, Scheppach MW, et al. Vessel and tissue recognition during third-space endoscopy using a deep learning algorithm[J]. *Gut*, 2022, 71(12): 2388-2390.
- [49] 郭陟永, 丁张帆, 苗诚, 等. 混合现实技术在口腔颌面-头颈肿瘤手术中应用的初步探索[J]. 华西口腔医学杂志, 2020, 38(4): 470-474.
- Guo ZY, Ding ZF, Miao C, et al. Application of mixed reality in oromaxillofacial head and neck oncology surgery: a preliminary study[J]. *West China J Stomatol*, 2020, 38(4): 470-474.
- [50] Pangal DJ, Kugener G, Zhu YC, et al. Expert surgeons and deep learning models can predict the outcome of surgical hemorrhage from 1 min of video [J]. *Sci Rep*, 2022, 12: 8137.
- [51] Vermeulen C, Pagès-Gallego M, Kester L, et al. Ultra-fast deep-learned CNS tumour classification during surgery[J]. *Nature*, 2023, 622(7984): 842-849.
- [52] Yang JH, Goodman ED, Dawes AJ, et al. Using AI and computer vision to analyze technical proficiency in robotic surgery[J]. *Surg Endosc*, 2023, 37(4): 3010-3017.
- [53] Khalid S, Goldenberg M, Grantcharov T, et al. Evaluation of deep learning models for identifying surgical actions and measuring performance[J]. *JAMA Netw Open*, 2020, 3(3): e201664.

- [54] Goodman ED, Patel KK, Zhang YL, et al. Analyzing surgical technique in diverse open surgical videos with multitask machine learning[J]. *JAMA Surg*, 2024, 159(2): 185-192.
- [55] Cao JF, Yip HC, Chen YY, et al. Intelligent surgical workflow recognition for endoscopic submucosal dissection with real-time animal study[J]. *Nat Commun*, 2023, 14: 6676.
- [56] de Backer P, van Praet C, Simoens J, et al. Improving augmented reality through deep learning: real-time instrument delineation in robotic renal surgery[J]. *Eur Urol*, 2023, 84(1): 86-91.
- [57] Ping L, Wang ZH, Yao JJ, et al. Application and evaluation of surgical tool and tool tip recognition based on Convolutional Neural Network in multiple endoscopic surgical scenarios[J]. *Surg Endosc*, 2023, 37(9): 7376-7384.
- [58] Nosrati MS, Amir-Khalili A, Peyrat JM, et al. Endoscopic scene labelling and augmentation using intraoperative pulsatile motion and colour appearance cues with preoperative anatomical priors[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2016, 11(8): 1409-1418.
- [59] Gong SZ, Long YH, Chen K, et al. Self-supervised cyclic diffeomorphic mapping for soft tissue deformation recovery in robotic surgery scenes[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2024, 43(12): 4356-4367.
- [60] Nepogodiev D, Martin J, Biccard B, et al. Global burden of postoperative death[J]. *Lancet*, 2019, 393(10170): 401.
- [61] Yang GZ, Cambias J, Cleary K, et al. Medical robotics: regulatory, ethical, and legal considerations for increasing levels of autonomy[J]. *Sci Robot*, 2017, 2(4): eaam8638.
- [62] Criner GJ, Sue R, Wright S, et al. A multicenter randomized controlled trial of zephyr endobronchial valve treatment in heterogeneous emphysema (TRANSFORM)[J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2018, 198(9): 1151-1164.
- [63] Zhang JY, Liu LL, Xiang PY, et al. AI co-pilot bronchoscope robot[J]. *Nat Commun*, 2024, 15: 241.
- [64] Bodenstedt S, Wagner M, Müller-Stich BP, et al. Artificial intelligence-assisted surgery: potential and challenges[J]. *Visc Med*, 2021, 36(6): 450-455.
- [65] Baldwin JG, Heuser-Loy C, Saha T, et al. Intercellular nanotube-mediated mitochondrial transfer enhances T cell metabolic fitness and antitumor efficacy[J]. *Cell*, 2024, 187(23): 6614-6630.e21.
- [66] Bolding SL, Reebye UN. Accuracy of haptic robotic guidance of dental implant surgery for completely edentulous arches[J]. *J Prosthet Dent*, 2022, 128(4): 639-647.
- [67] Wu YQ, Wang F, Fan SC, et al. Robotics in dental implantology[J]. *Oral Maxillofac Surg Clin North Am*, 2019, 31(3): 513-518.
- [68] 谢瑞, 白石柱, 赵敏民. 自主式口腔种植机器人牙列缺损种植修复的临床回顾性研究[J]. *实用口腔医学杂志*, 2024, 40(1): 58-63.
- Xie R, Bai SZ, Zhao YM. Clinical evaluation of autonomous robot assisted implant surgery: a retrospective clinical study[J]. *J Pract Stomatol*, 2024, 40(1): 58-63.
- [69] 空军军医大学口腔医院在新型自主式口腔颌面多功能手术机器人辅助下成功实施两台国际首例手术[J]. *空军军医大学学报*, 2024, 45(9): 956.
- Stomatological Hospital of Air Force Medical University successfully performs two world's first surgeries assisted by a novel autonomous oral and maxillofacial multifunctional surgical robot[J]. *J Air Force Med Univ*, 2024, 45(9): 956.
- [70] 陶宝鑫, 汪文颖, 吴轶群. 颧种植手术机器人的研发及应用进展[J]. *中国口腔种植学杂志*, 2023, 28(3): 193-197.
- Tao BX, Wang WY, Wu YQ. Research and application progress of surgical robot system for zygomatic implant placement[J]. *Chin J Oral Implant*, 2023, 28(3): 193-197.
- [71] Cao ZG, Qin CX, Fan SC, et al. Pilot study of a surgical robot system for zygomatic implant placement[J]. *Med Eng Phys*, 2020, 75: 72-78.
- [72] 刘剑楠, 胡俊磊, 陈晓军, 等. 基于智能术前规划的下颌骨重建手术机器人系统实验验证[C]//中华口腔医学会口腔颌面修复专业委员会第六次全国口腔颌面修复学学术年会论文集. 广州: 中华口腔医学会口腔颌面修复专业委员会, 2021.
- Liu JN, Hu JL, Chen XJ, et al. Evaluation of robotic system for mandibular reconstruction based on intelligent preoperative planning[C]//Proceedings of the 6th national annual conference on oral and maxillo-

- facial prosthodontics of Professional Committee of Oral and Maxillofacial Prosthodontics, Chinese Stomatological Association. Guangzhou: Professional Committee of Oral and Maxillofacial Prosthodontics, Chinese Stomatological Association, 2021.
- [73] 魏文卿, 韩婧, 胡俊磊, 等. 一种基于榫卯结构的腓骨重建下颌骨固定方法的生物力学分析研究[J]. 中华整形外科杂志, 2021, 37(5): 520-527.
- Wei WQ, Han J, Hu JL, et al. Biomechanical analysis of mandibular reconstruction with a fibular flap by fixation based on mortise and tenon joint structure[J]. *Chin J Plast Surg*, 2021, 37(5): 520-527.
- [74] Hu J, Liu J, Guo Y, et al. A collaborative robotic platform for sensor-aware fibula osteotomies in mandibular reconstruction surgery[J]. *Comput Biol Med*, 2023, 162: 107040.
- [75] O'Sullivan S, Nevejans N, Allen C, et al. Legal, regulatory, and ethical frameworks for development of standards in artificial intelligence (AI) and autonomous robotic surgery[J]. *Int J Med Robot*, 2019, 15(1): e1968.
- [76] 王硕, 文侃骁, 刘天语, 等. 医疗机器人的伦理风险与治理探析——基于“医-患-机”分析框架[J]. 医学与哲学, 2023, 44(23): 16-21.
- Wang S, Wen KX, Liu TY, et al. Ethical risk and governance analysis of medical robots: based on the 'Doctor-Patient-Robot' analytical framework[J]. *Med Philosop*, 2023, 44(23): 16-21.
- [77] 王晓娣, 方旭红. 医疗机器人伦理风险探析[J]. 自然辩证法研究, 2018, 34(12): 64-69.
- Wang XD, Fang XH. The study on the ethical risks of medical robots[J]. *Stud Dialect Nat*, 2018, 34(12): 64-69.
- [78] Arjomandi Rad A, Vardanyan R, Athanasiou T, et al. The ethical considerations of integrating artificial intelligence into surgery: a review[J]. *Interdiscip Cardiovasc Thorac Surg*, 2025, 40(3): ivae192.
- [79] 马俊. 医疗机器人侵权责任研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2024.
- Ma J. Research on tort liability of medical robots [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2024.
- [80] 张洪滔. 智能手术医疗事故中医师刑事责任的认定[C]//《新兴权利》集刊——智慧法治学术共同体研究文集. 西安: 西北政法大學刑事法學院, 2024: 70-77.
- Zhang HT. Determination of criminal liability of physicians in intelligent surgical medical accidents [C]//Collected papers of emerging rights—research collection of the smart rule of law academic community. Xi'an: Criminal Law School, Northwest University of Political Science and Law, 2024: 70-77.
- (本文编辑 李彩)