

网络出版时间:2025-12-05 11:05:10 网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/34.1065.R.20260115.1417.002

◇ 专家笔谈 ◇

机器人远程手术的现状与未来

岳家斌^{1,2,3}, 邵胜^{1,2,3}, 梁朝朝^{1,2,3}

(¹ 安徽医科大学第一附属医院泌尿外科, 合肥 230022; ² 安徽医科大学泌尿外科研究所, 合肥 230022; ³ 泌尿男科疾病研究与医学转化安徽省重点实验室, 合肥 230022)

摘要 机器人远程手术是医师运用先进的手术机器人及网络通信技术对异地的患者开展手术的技术。机器人远程手术可以使优质的医疗资源下沉, 服务边远地区患者, 同时还可以用于紧急救援、救灾、战地等特殊场合, 为患者提供及时有效的、高质量的手术治疗, 降低医疗成本及患者转运风险。第五代无线网络(5G)的迅猛发展, 为机器人远程手术提供了低延迟和高宽带通信, 更快更准确的实时数据传输也使得远程开展复杂手术成为可能。该文主要就国内外机器人远程手术的现状进行阐述, 同时展望机器人远程手术的未来。

关键词 远程手术; 机器人辅助手术; 手术机器人; 5G 通信技术; 协同诊疗

中图分类号 R 608; R 616

文献标志码 A **文章编号** 1000-1492(2026)01-0003-06

doi: 10.19405/j.cnki.issn1000-1492.2026.01.002

以往的外科手术是医师站在病人手术台旁通过使用外科设备或手术器械, 对患者体表或体内组织进行切开、修复、移除、替换或重建等操作, 以诊断、治疗疾病及改善生理功能为目的的一种医学治疗方式。然而, 因为医疗资源分配不均衡、医疗成本过高以及时间、空间等限制, 患者可能面临就医不及时、不便利及增加转运等风险。医疗、计算机及通信技术的发展打破了时间、空间上的限制, 如互联网医院的建立方便了医患沟通。作为远程医疗的一部分, 机器人远程手术应运而生。作为一种颠覆传统空间局限的医疗创新, 远程手术依托手术机器人系统、高带宽网络通信以及虚拟现实交互技术, 帮助医师实现在远离患者现场的环境下完成精细外科操作^[1-2]。该技术体系包含两个核心端口: 医师端为配备力反馈装置与三维影像系统的手术操控平台; 患者端则为集成机器人执行臂的智能化手术室。见图 1。其技术雏形可追溯至战争时期对前线伤员快速救治^[3], 然而受限于当时的通信带宽与机器人精密程度, 相关研究未能取得突破性进展。20 世纪 90 年代以来, 随着网络技术的进步, 机器人远程手术在动物实验的基础上, 其逐渐开展临床试

验并逐步应用到临床上, 显示出广阔的应用前景。该文就国内外机器人远程手术的现状进行阐述。

1 国外机器人远程手术的研究与应用现状

20 世纪 90 年代见证了欧美国家在远程手术领域的初步探索。2001 年 9 月 7 日, Marescaux et al^[4] 外科团队通过 Computer Motion 公司开发的宙斯机器人系统, 利用跨越大西洋的高速光纤网络, 成功实施了世界上首例跨国机器人辅助腹腔镜胆囊切除术。这一壮举不仅验证了远程手术的可行性, 更成为推动机器人远程手术快速演进的重要里程碑。2003 年开始, Anvari^[5] 于圣约瑟夫医院与相距 400 km 的北湾总医院之间建立了远程机器人手术服务, 这是世界首个为农村社区服务的远程机器人系统, 旨在帮助农村社区的外科医师掌握先进的腹腔镜技术。2005 年, 美国 Sterbis et al^[6] 利用达芬奇手术机器人系统, 在辛辛那提和丹佛成功完成了对索尼维尔受试动物的远程右肾切除操作, 尽管术中网络往返延迟高达 450~900 ms, 但所有动物实验对象的右肾切除操作均顺利完成, 且术后未出现任何并发症, 这是达芬奇手术机器人系统在泌尿外科机器人远程手术中的首次应用, 也是首次成功在动物模型中进行远程肾切除术。2007 年, 加拿大 Ngan et al^[7] 分别在互联网协议/虚拟专用网络 (internet protocol/virtual private network, IP/VPN)、卫星网络

2025-11-02 接收

基金项目: 安徽省卫生健康科研项目 (编号: 2024Aa40005)

作者简介: 岳家斌, 男, 硕士研究生;

梁朝朝, 男, 教授, 主任医师, 博士生导师, 通信作者,

E-mail: liang_chaozhao@163.com

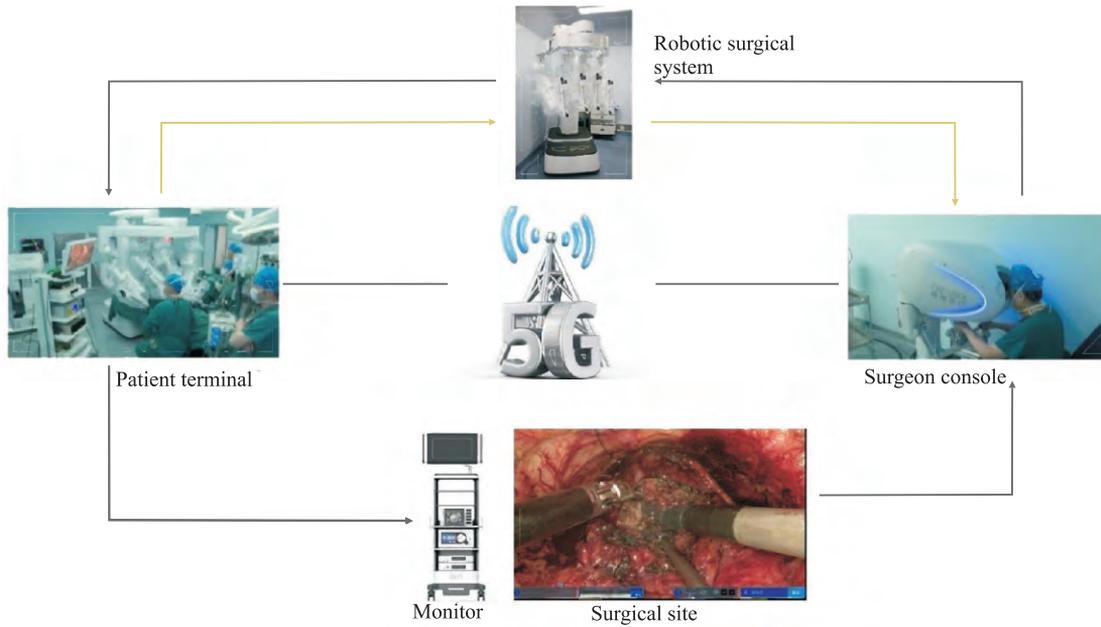


图1 5G远程手术模式图

Fig. 1 Schematic diagram of 5G telesurgery

和实时手术条件下对18例猪完成了ZEUS机器人辅助下腹腔镜下肾盂成形术,研究表明,在IP/VPN支撑下的远程手术效果与实时手术相当,而卫星网络造成的约600 ms通信延迟则成为阻碍手术流畅实施的主要障碍。

早期研究^[8-9]认为,250~500 ms的通信延迟在远程腔镜手术中是可以接受的,不会对手术质量产生显著影响。2014年,Xu et al^[10]团队提出将延迟控制在200 ms以内是远程手术顺利开展的理想状态,并定义了安全操作窗口为200~300 ms,超出这一范围,手术操作的难度和风险将显著增加。当延迟超过700 ms时,即使是经验丰富的外科医师也难以保证手术质量。因此,当前国内外远程手术研究多将200 ms以内的延迟作为网络选择的基准,以确保手术的安全性和有效性。这种从宽松到严格的延迟阈值演变,反映了远程手术技术对网络条件要求的提升,也为未来网络技术的发展指明了方向。

5G技术的出现显著提高了机器人远程手术的能力。2019年,西班牙巴塞罗那医疗团队运用5G技术远程指导了一例肠道肿瘤切除术^[11]。2020年,意大利Acemoglu et al^[12]率先在5G支持下完成15 km外尸体的声带切除术,延迟低至140 ms。2023年,日本Ebihara et al^[13]在250 km外实施胃癌尸体的复杂手术(远端胃切除及淋巴结清扫)。两项研究均验证了5G网络在机器人远程手术中低延迟、高可靠的特性,为远程手术的技术发展提供了

新支持。

2 国内机器人远程手术的研究与应用现状

相较于国外,国内的机器人远程手术研究起步较晚。2003年,海军总医院利用黎元手术机器人系统成功开展了10例远程脑外科手术^[14]。2015年火箭军总医院李爱民等^[15]通过4G网络,对118 km外的猪完成了胆囊切除、胃穿孔修补和肝楔形切除术。但受限于带宽,实时数据传输难以满足,远程手术发展陷入瓶颈。5G技术问世后,国内团队迅速开展应用研究。2018年12月解放军总医院刘荣等^[16]成功实施全球首例5G远程肝楔形切除术,在50 km距离内实现低于150 ms的延迟,标志着技术突破。2020年9月青岛大学附属医院泌尿外科团队^[17]通过5G网络操控国产MicroHand机器人在猪模型上完成了4例超远程腹腔镜手术(涵盖肾、肝、胆囊及膀胱),平均延迟仅264 ms,随后该团队为3 000 km外的1例71岁T2N0M0的膀胱癌患者成功实施膀胱根治性切除术^[18],之后该团队进一步实施了47例远程肾与肾上腺手术,最远距离1 775 km,构建了国际领先的远程手术临床队列^[19-21]。

2023年,解放军总医院泌尿外科团队在往返通信距离6 000 km的北京与三亚间,开展多模式远程手术研究,通过专线网络,操控精锋MP1000机器人完成24例肾部分切除术及8例输尿管再植术动物实验^[22-23]。此后,该团队采用5G+专线融合模式,为

6例下腔静脉后输尿管、肾癌等患者成功实施手术,实时延迟稳定在48.37~52.20 ms,创新实现双网络协同传输,保障高效低延迟^[24]。2023年12月20日,中国人民解放军总医院泌尿外科张旭院士依托国产精锋手术机器人系统,成功实施跨区域远程前列腺癌根治术,为安徽医科大学第一附属医院患者完成精准治疗。随后,2024年1月9日,安徽医科大学第一附属医院泌尿外科梁朝朝教授亦借助该系统,远程为中国人民解放军总医院患者精准完成保留肾单位的肾部分切除术。两项手术标志着国产机器人技术在临床跨域协作中实现了双向突破,彰显了中国远程外科技术的创新应用与协同发展能力。

中国在机器人远程手术领域的研究与应用虽起步较晚,但通过自主研发与通信网络的深度协同,已实现显著突破。国产手术机器人系统的逐步成熟与5G技术的广泛应用,为远程手术提供了低延迟、高可靠的操作环境,推动技术从实验阶段向临床规模化应用迈进。当前,多学科协作下的远程手术模式不断拓展,覆盖复杂脏器操作与精细化治疗场景,技术标准与操作规范逐步完善。与此同时,跨区域医疗资源整合能力增强,有效缓解了医疗资源分布不均问题,为应急医疗与特殊场景救治提供了新范式。尽管面临网络安全、伦理责任界定等挑战,但通过政策引导与多领域协同创新,中国正加速构建技术、法规与临床实践相适配的远程手术生态体系,为全球远程医疗发展贡献独特经验。

3 机器人远程手术的未来

机器人远程手术的发展是多学科综合性发展的成果,它不仅包括手术机器人系统、网络通信技术、机器人远程手术操作规范,还包括伦理、法律等,前者的革新是机器人远程手术发展的驱动力,而后者的规范是机器人远程手术持续稳定发展的保障。

3.1 手术机器人系统 手术机器人已发展30余年,国产手术机器人也不断涌现,机器人辅助操作已经可以胜任大多数常规手术操作,而机器人远程手术对机器人要求极高,需要有更清晰的视觉图像、更低的延迟网络及更精确的触觉反馈^[25]。机器人远程手术场景的可视化是实现手术机器人远程操作的关键。近年来有学者提出了一种集三维术中场景重建、三维显示和增强现实图像融合于一体的手术可视化系统,基于三维成像技术构建的手术

机器人为机器人远程手术提供操作精度^[26]。当前手术机器人已突破3D高清成像与运动控制技术,实现精准手眼协同,但触觉反馈仍存在技术瓶颈,术中力度判断仍依赖视觉信息^[27],要做到“人机合一”,触觉反馈是需突破的难题。Ota et al^[28]的研究表明,触觉反馈下的脏器抓取力度显著低于单纯视觉引导。TransEnterix公司的Senhance手术机器人通过力传感与运动追踪技术,将物理交互转化为实时触觉信号,虽无法完全复刻开放手术的多维度感知(如温度、纹理),但其机制已提升操作精准度^[29]。同期Meere公司的Revo-I手术机器人^[30]以及欧洲Telenap Alf-x系统亦通过触觉反馈技术,部分弥补了机器人手术的手感缺失问题,推动该领域技术迭代。机器人系统的医师操控台体积大,小型、模块化手术机器人更适合在小型医疗机构或移动医疗场景中应用,同时可穿戴的机器人设备为手术医师提供更直接的控制和感知能力。人工智能与自动化技术与手术机器人系统的结合也是研究的热点,当前的手术机器人在手术过程中仅起到辅助作用,通过建立涵盖多器官、多病理类型的触觉与力学数据库,加入AI模型至手术机器人本地端并完成技术验证,实现利用人工智能和影像技术生成最佳手术路径、快速识别器官和风险以及帮助医师做简单操作(如缝合)的短期目标;通过开发基于强化学习的自主算法,整合触觉、视觉、听觉数据,构建手术场景“数字孪生”,有望在限定场景(如胃肠吻合)中实现机器人半自主操作的长期愿景。

3.2 网络通信技术 当前网络技术已能支撑机器人远程手术的实施,但信号传输延迟仍是其普及的主要障碍^[31]。由于机器人远程手术存在空间上的距离,网络延迟无法避免,降低延迟带来的负面影响才能更好地保证机器人远程手术顺利开展。Nankaku et al^[32]的研究表明,即便存在100 ms通信延迟,经验丰富的外科医师仍比无延迟环境下缺乏经验者的操作表现更优。其解剖功底、手术经验及机器人操控熟练度可有效缓解时滞影响,提示手术者能力可在一定程度上克服延迟限制。不同组网方案适配多样场景:①专线网络,适用于超长距离复杂器官手术(如肾部分切除),凭借极低延迟(≤ 50 ms)与强抗干扰性保障操作精度,但部署成本高;②5G公网,无需铺设物理线路,可快速部署于应急救援及中短距离手术($\leq 3\ 000$ km),兼顾时效性与普及性;③5G+专线混合组网,为心脏/脑外科等高危

表1 延迟阈值演变与技术代际关系

Tab. 1 Latency threshold evolution and its correlation with technology generations

Telecommunication technology	Typical latency (ms)	Surgical indications	Exemplary cases
Fiber-optic network/IP-VPN	115-450	Simple laparoscopic surgery	Lindbergh operation, Porcine pyeloplasty
Satellite communications	≥600	For remote guidance only	Porcine pyeloplasty
4G	200-500	Fundamental animal experimentation	Porcine hepatectomy
5G	80-264	Complex organ resections	3 000 km telesurgery - radical cystectomy
5G+Leased line network	40-52	High-precision surgical interventions	Beijing-Sanya long-distance telesurgery

手术及多中心协同操作提供超高可靠性,延迟可优化至40~50 ms,但架构复杂且成本较高;④ 卫星网络,支持无地面网络覆盖区(战场、太空)及灾害救援场景,实现全域通信,但因延迟高(≥600 ms)、带宽不稳,仅适用于简单操作或远程指导;⑤ 区域网络/IP-VPN,因延迟波动大(100~500 ms)不适用高精度手术,更适合低成本部署的城市-农村医疗协作及教学培训。未来亟需构建基于5G与专线融合的组网架构,打造低延迟、高可靠的通信网络基础设施,以驱动机器人远程手术技术的规模化应用与临床普及。见表1。

近年来,得益于手术机器人与5G技术发展,机器人远程手术模式发生革新,既往“一对一单点远程控制(单主控端-单执行端)”,现发展出了“一对多(单主控端-多执行端)”、“多对一(多主控端-单执行端)”等网络化协同模式^[33-34],一个医师可以为多个患者手术,这不仅丰富了外科医师的诊治经验,而且改善了外科医师紧缺问题,而困难复杂的手术可以由多个专家为同一患者操作,这可以为患者提供及时有效的治疗。但机器人远程手术仍面临着一些不足,主要包括以下方面:① 网络安全问题,5G是一种无线网络通信,如果手术过程中受到网络攻击,网络传输不稳定,会导致泄露信息、网络中断或瘫痪,给手术安全造成严重打击,因此需设计5G网络安全防护系统;② 隐私保护问题,5G机器人远程手术必然需要将手术关键信息,如音视频、病人影像学信息等放入公网传输,即使使用虚拟专用网络等保密技术,依旧无法完全避免可能出现的隐私泄露风险;③ 网络覆盖率问题,我国幅员辽阔,欠发达地区网络覆盖率低,无法开展机器人远程手术,因此要加快5G基站部署,实现5G网络全国覆盖。

3.3 机器人远程手术操作规范 国内机器人远程手术尚处探索阶段,亟需完善涵盖术前、术中和术后全流程的操作规范。术前需进行机器人系统性能测试、网络调试、制定设备与网络安全应急预案,

并由医师评估患者情况并明确团队分工;术中要求远程医师精准操控机械臂、实时观察画面并保持语音沟通,现场团队则协助器械更换、处理突发状况、监控生命体征、保证设备及网络状态,双方需高度协同;术后需检修设备、跟踪患者恢复、记录手术细节并总结经验。为提升规范性与安全性,医院应定期组织专业培训、模拟演练、技术交流,并及时升级系统以优化手术效率。

3.4 伦理与法律 机器人远程手术在提升精准度的同时,面临技术安全、责任界定模糊、隐私泄露及医疗资源公平性等伦理挑战。当前手术机器人虽具备一定自主性,但仍需依赖人工调试与网络稳定性保障,而复杂手术中的意外责任归属尚无明确法律依据。高昂的设备成本与运维费用限制了中小医院的应用普及,患者亦因认知不足对技术安全与隐私保护存疑。未来需通过技术优化降低成本,推动设备普惠化,并建立跨学科监管框架,协同医疗、技术、法律等领域专家制定实践指南^[35],以平衡技术创新与患者权益,构建可持续发展的远程手术生态体系。

4 总结与展望

进入21世纪以来,机器人远程手术技术迅猛发展。如今,机器人手术已不再局限于传统手术室,5G远程机器人手术能够在有线网络连接缺乏或中断的复杂环境中,如太空、山区、受灾地区及战场,成功实施,为偏远地区及突发状况下的患者提供及时且高质量的手术治疗,同时确保术者的安全。未来,手术机器人将具备人性化设计、精准反馈、实时数据传输、自主智能化以及价格平民化等特性。在快速、低延迟的网络传输支持下,相信不久的将来,机器人远程手术的全球化时代必将到来。

参考文献

- [1] Larkin M. Transatlantic, robot-assisted telesurgery deemed a success [J]. *Lancet*, 2001, 358 (9287): 1074. doi: 10.1016/

- S0140-6736(01)06240-7.
- [2] Choi P J, Oskouian R J, Tubbs R S. Telesurgery: past, present, and future [J]. *Cureus*, 2018, 10 (5) : e2716. doi: 10.7759/cureus.2716.
- [3] George E I, Brand T C, LaPorta A, et al. Origins of robotic surgery: from skepticism to standard of care[J]. *JLS*, 2018, 22 (4): e2018.00039. doi:10.4293/JLS.2018.00039.
- [4] Marescaux J, Leroy J, Gagner M, et al. Transatlantic robot-assisted telesurgery [J]. *Nature*, 2001, 413 (6854) : 379-80. doi:10.1038/35096636.
- [5] Anvari M. Telesurgery: remote knowledge translation in clinical surgery [J]. *World J Surg*, 2007, 31 (8) : 1545-50. doi: 10.1007/s00268-007-9076-5.
- [6] Sterbis J R, Hanly E J, Herman B C, et al. Transcontinental telesurgical nephrectomy using the da Vinci robot in a porcine model [J]. *Urology*, 2008, 71 (5) : 971-3. doi: 10.1016/j.urology.2007.11.027.
- [7] Nguan C Y, Morady R, Wang C, et al. Robotic pyeloplasty using Internet protocol and satellite network-based telesurgery [J]. *Int J Med Robot*, 2008, 4(1): 10-4. doi:10.1002/rcs.173.
- [8] Kim T, Zimmerman P M, Wade M J, et al. The effect of delayed visual feedback on telerobotic surgery [J]. *Surg Endosc*, 2005, 19(5): 683-6. doi:10.1007/s00464-004-8926-6.
- [9] Anvari M, Broderick T, Stein H, et al. The impact of latency on surgical precision and task completion during robotic-assisted remote telepresence surgery [J]. *Comput Aided Surg*, 2005, 10 (2): 93-9. doi:10.3109/10929080500228654.
- [10] Xu S, Perez M, Yang K, et al. Determination of the latency effects on surgical performance and the acceptable latency levels in telesurgery using the dV-Trainer (®) simulator [J]. *Surg Endosc*, 2014, 28 (9) : 2569-76. doi: 10.1007/s00464-014-3504-z.
- [11] Yang G Z, J Nelson B, Murphy R R, et al. Combating COVID-19-The role of robotics in managing public health and infectious diseases[J]. *Sci Robot*, 2020, 5(40): eabb5589. doi:10.1126/scirobotics.abb5589.
- [12] Acemoglu A, Peretti G, Trimarchi M, et al. Operating from a distance: robotic vocal cord 5G telesurgery on a cadaver[J]. *Ann Intern Med*, 2020, 173(11): 940-1. doi:10.7326/M20-0418.
- [13] Ebihara Y, Hirano S, Kurashima Y, et al. Tele-robotic distal gastrectomy with lymph node dissection on a cadaver[J]. *Asian J Endosc Surg*, 2024, 17(1): e13246. doi:10.1111/ases.13246.
- [14] 唐 燊, 王田苗, 丑武胜, 等. 脑外科机器人控制系统的设计和实现[J]. *机器人*, 2004, 26(6): 543-7, 552. doi:10.13973/j.cnki.robot.2004.06.014.
- [14] Tang C, Wang T M, Chou W S, et al. Design and realization of robot control system for neurosurgery [J]. *Robot*, 2004, 26(6) : 543-7, 552. doi:10.13973/j.cnki.robot.2004.06.014.
- [15] 李爱民, 李进华, 李建民, 等. 国产机器人妙手S系统远程手术实验研究[J]. *腹部外科*, 2016, 29(6): 473-7.
- [15] Li A M, Li J H, Li J M, et al. Experiments of telesurgery using domestic surgical Robotic MicroHand S system [J]. *J Abdom Surg*, 2016, 29(6): 473-7.
- [16] 刘 荣, 赵国栋, 孙玉宁, 等. 5G 远程机器人手术动物实验研究[J]. *中华腔镜外科杂志(电子版)*, 2019, 12(1): 45-8. doi: 10.3877/cma.j.issn.1674-6899.2019.01.008.
- [16] Liu R, Zhao G D, Sun Y N, et al. Animal experiment for 5G remote robotic surgery [J]. *Chin J Laparosc Surg Electron Ed*, 2019, 12 (1) : 45-8. doi: 10.3877/cma.j.issn.1674-6899.2019.01.008.
- [17] Zheng J, Wang Y, Zhang J, et al. 5G ultra-remote robot-assisted laparoscopic surgery in China[J]. *Surg Endosc*, 2020, 34(11): 5172-80. doi:10.1007/s00464-020-07823-x.
- [18] Yang X, Wang Y, Jiao W, et al. Application of 5G technology to conduct tele-surgical robot-assisted laparoscopic radical cystectomy [J]. *Int J Med Robot*, 2022, 18 (4) : e2412. doi: 10.1002/rcs.2412.
- [19] Li J, Yang X, Chu G, et al. Application of improved robot-assisted laparoscopic telesurgery with 5G technology in urology [J]. *Eur Urol*, 2023, 83 (1) : 41-4. doi: 10.1016/j.eururo.2022.06.018.
- [20] 苑航, 杨学成, 骆磊, 等. 基于 5G 通讯技术的国产机器人辅助远程肾切除术初步结果分析[J]. *中华泌尿外科杂志*, 2022, 43 (3) : 203-206. doi: 10.3760/cma.j.cn112330-20210707-00356.
- [20] Yuan H, Yang X C, Luo L, et al. Preliminary results of domestic surgical robot-assisted remote nephrectomy based on 5G communication technology [J]. *Chin J Urol*, 2022, 43(3): 203-6. doi:10.3760/cma.j.cn112330-20210707-00356.
- [21] Li C, Zheng J, Zhang X, et al. Telemedicine network latency management system in 5G telesurgery: a feasibility and effectiveness study [J]. *Surg Endosc*, 2024, 38 (3) : 1592-9. doi:10.1007/s00464-023-10585-x.
- [22] 艾青, 王野, 程强, 等. 超远程机器人辅助腹腔镜保留肾单位手术安全性和可行性的动物实验研究[J]. *微创泌尿外科杂志*, 2023, 12(3): 145-8. doi:10.19558/j.cnki.10-1020/r.2023.03.001.
- [22] Ai Q, Wang Y, Cheng Q, et al. Animal experimental study on the safety and feasibility of ultra-remote robot-assisted laparoscopic nephron sparing surgery [J]. *J Minim Invasive Urol*, 2023, 12 (3) : 145-8. doi: 10.19558/j.cnki.10-1020/r.2023.03.001.
- [23] 艾青, 王野, 程强, 等. 超远程机器人辅助腹腔镜输尿管损伤修复术动物模型的构建及安全性验证[J]. *微创泌尿外科杂志*, 2023, 12(5): 289-92. doi:10.19558/j.cnki.10-1020/r.2023.05.001.
- [23] Ai Q, Wang Y, Cheng Q, et al. Construction of an animal model of robotic telesurgery for ureteral injury repair and verification of surgical safety [J]. *J Minim Invasive Urol*, 2023, 12(5) : 289-92. doi:10.19558/j.cnki.10-1020/r.2023.05.001.
- [24] Wang Y, Ai Q, Zhao W, et al. Safety and reliability of a robot-assisted laparoscopic telesurgery system: expanding indications in urological surgery [J]. *Eur Urol*, 2024, 85 (5) : 506-7. doi: 10.1016/j.eururo.2023.11.002.
- [25] Miao Y, Jiang Y, Peng L, et al. Telesurgery robot based on 5G tactile Internet [J]. *Mob Netw Appl*, 2018, 23 (6) : 1645-54. doi:10.1007/s11036-018-1110-3.
- [26] Huang T, Li R, Li Y, et al. Augmented reality-based

- autostereoscopic surgical visualization system for telesurgery [J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2021, 16(11): 1985-97. doi: 10.1007/s11548-021-02463-5.
- [27] Alip S, Koukourikis P, Han W K, et al. Comparing revo-i and da vinci in retzius-sparing robot-assisted radical prostatectomy: a preliminary propensity score analysis of outcomes [J]. *J Endourol*, 2022, 36(1): 104-10. doi:10.1089/end.2021.0421.
- [28] Ota M, Oki E, Nakanoko T, et al. Field experiment of a telesurgery system using a surgical robot with haptic feedback [J]. *Surg Today*, 2024, 54(4): 375-81. doi: 10.1007/s00595-023-02732-7.
- [29] Alip S L, Kim J, Rha K H, et al. Future platforms of robotic surgery [J]. *Urol Clin North Am*, 2022, 49(1): 23-38. doi: 10.1016/j.ucl.2021.07.008.
- [30] Hudolin T, Kuliš T, Penezić L, et al. Senhance robotic radical prostatectomy: a single-centre, 3-year experience [J]. *Int J Med Robot*, 2023, 19(6): e2549. doi:10.1002/ics.2549.
- [31] Kang C C, Lee T Y, Lim W F, et al. Opportunities and challenges of 5G network technology toward precision medicine [J]. *Clin Transl Sci*, 2023, 16(11): 2078-94. doi: 10.1111/cts.13640.
- [32] Nankaku A, Tokunaga M, Yonezawa H, et al. Maximum acceptable communication delay for the realization of telesurgery [J]. *PLoS One*, 2022, 17(10): e0274328. doi: 10.1371/journal.pone.0274328.
- [33] Tian W, Fan M, Zeng C, et al. Telerobotic spinal surgery based on 5G network: the first 12 cases [J]. *Neurospine*, 2020, 17(1): 114-20. doi:10.14245/ns.1938454.227.
- [34] Tsuda S, Oleynikov D, Gould J, et al. SAGES TAVAC safety and effectiveness analysis: da Vinci® Surgical System (Intuitive Surgical, Sunnyvale, CA) [J]. *Surg Endosc*, 2015, 29(10): 2873-84. doi:10.1007/s00464-015-4428-y.
- [35] Patel V, Saikali S, Moschovas M C, et al. Technical and ethical considerations in telesurgery [J]. *J Robot Surg*, 2024, 18(1): 40. doi:10.1007/s11701-023-01797-3.

Current situation and future of robotic telesurgery

Yue Jiabin^{1,2,3}, Tai Sheng^{1,2,3}, Liang Chaozhao^{1,2,3}

¹ Department of Urology, The First Affiliated Hospital of Anhui Medical University, Hefei 230022;

² Institute of Urology, Anhui Medical University, Hefei 230022; ³ Anhui Provincial Key Laboratory of Urological and Andrological Diseases Research and Translational Medicine, Hefei 230022)

Abstract Robotic telesurgery is a technology that doctors use advanced surgical robots and network communication technology to carry out surgery on patients in different places. Robotic telesurgery can sink high-quality medical resources to serve patients in remote areas, and can also be used for emergency rescue, disaster relief, battlefield and other special occasions to provide patients with timely, effective and high-quality surgical treatment, as well as reducing medical costs and patient transport risks. With the rapid development of the fifth generation wireless network, low latency and high broadband communication are provided for robotic telesurgery, and faster and more accurate real-time data transmission makes it possible to carry out complex surgery remotely. In this review, the current situation of robotic telesurgery at home and abroad is described, and the future of robotic telesurgery is prospected.

Key words telesurgery; robot-assisted surgery; surgical robot; 5G communication technology; collaborative diagnosis and treatment

Fund program Health Research Project of Anhui Province (No. 2024Aa40005)

Corresponding author Liang Chaozhao, E-mail: liang_chaozhao@163.com