

安徽医科大学学报

Acta Universitatis Medicinalis Anhui

ISSN 1000-1492, CN 34-1065/R

《安徽医科大学学报》网络首发论文

题目：机器人远程手术的现状与未来
作者：岳家斌，邵胜，梁朝朝
收稿日期：2025-11-02
网络首发日期：2025-12-05
引用格式：岳家斌，邵胜，梁朝朝. 机器人远程手术的现状与未来[J/OL]. 安徽医科大学学报. <https://link.cnki.net/urlid/34.1065.R.20251205.1029.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

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、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

Current situation and future of robotic telesurgery

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

(¹Dept of Urology, the First Affiliated Hospital of Anhui Medical University, Hefei 230022; ²Institute of Urology, Anhui Medical University, Hefei 230022; ³Anhui 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

2025-11-02 接收

基金项目: 安徽省卫生健康科研基金项目(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

described, and the future of robotic telesurgery is prospected.

Key words telesurgery; robot-assisted surgery; robotic surgical system; 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

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、医疗成本过高以及受到时间、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,机器人远程手术孕育而生。机器人远程手术是指医师与患者在不同的地理位置,医师运用手术机器人、网络技术、虚拟现实技术等对患者开展手术,是一种新兴的交互式医疗方式^[1-2]。手术端是指医师实施手术的工作站,患者端指患者所在的手术室,手术原理如图 1。机器人远程手术的构想起源于战争时期后方如何对伤员进行及时有效的救治^[3],但由于通信网络的限制,该项技术未能进一步开展。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,其临床试验逐渐开展并逐渐应用到临床,显示出广阔的应用前景。现就国内外机器人远程手术的现状进行阐述。

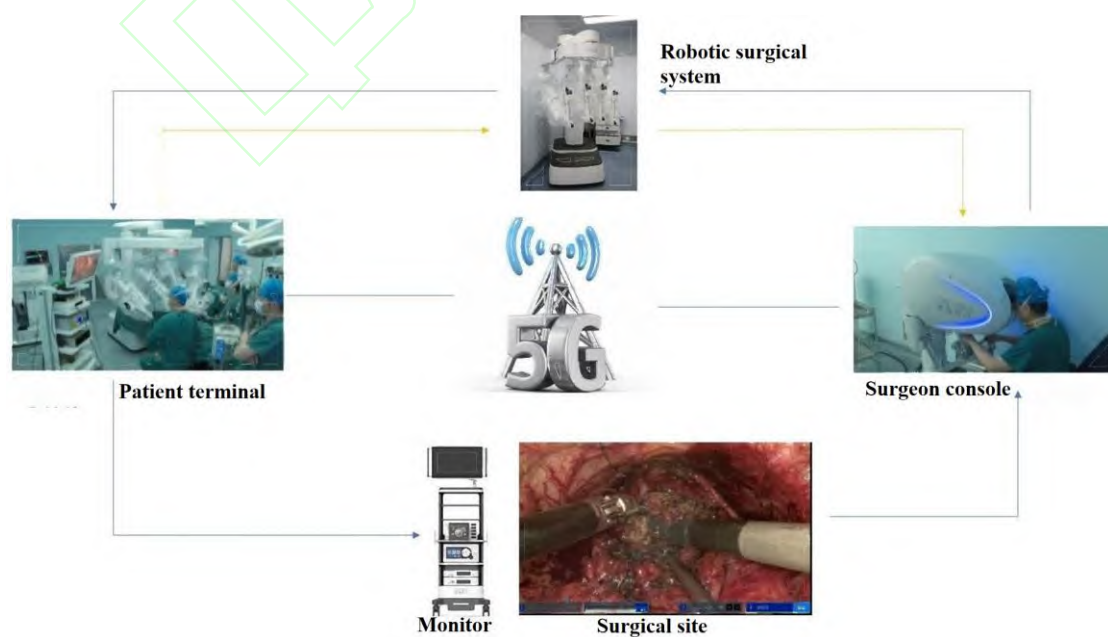


图 1 5G 远程手术模式图

Fig.1 Schematic diagram of 5G telesurgery

1 国外机器人远程手术的研究与应用现状

欧美国家在 20 世纪 90 年代对机器人远程手术进行了初步探索。在 2001 年 9 月 7 日, Marescaux et al^[4]外科团队运用 Computer Motion 公司开发的宙斯机器人系统及光纤网络在美国纽约对位于法国斯特拉斯堡的一位 68 岁女性胆结石患者实施了世界上第 1 例机器人辅助腹腔镜胆囊切除术, 该手术被称为“林白手术”, 两地相距 7 000 km, 术中网络延迟仅 115 ms, 手术在 45 min 内完成, 无任何并发症, 这是机器人远程手术的一个里程碑, 至此机器人远程手术开始迅速发展。2003 年开始, Anvari M^[5]团队于安大略省汉密尔顿的圣约瑟夫医院与相距 400 km 安大略省北湾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, 该服务使用互联网协议/虚拟专用网络 (internet protocol/virtual private network, IP/VPN) 将汉密尔顿的机器人控制台与北湾的 Zeus-TS 手术系统的 3 个机械臂连接起来, 帮助农村社区的外科医师掌握先进的腹腔镜技术, 至 2005 年完成了 21 例远程机器人腹腔镜手术, 包括 13 例胃底折叠术、3 例乙状结肠切除术、2 例右半结肠切除术、1 例直肠前切除术和 2 例腹股沟疝修补术, 均未发生严重的术中并发症或转开腹手术。2005 年, 美国 Sterbis et al^[6]在辛辛那提和丹佛使用达芬奇手术机器人对位于森尼维尔的 4 只猪行右肾切除术, 术中网络往返延迟达 450~900 ms, 手术均成功, 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 Nguan et al^[7]分别在 IP/VPN、卫星网络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, 实验证明 IP/VPN 支撑下的机器人远程手术是可行的, 与实时手术相比, 机器人远程手术时间及并发症无显著差异, 而卫星网络造成 600 ms 的通信延迟会严重影响术者操作。

机器人远程手术对网络传输速率要求较高, 所以国外机器人远程手术的研究还集中在网络配置方面, 如何使一台机器人远程手术低延迟、高质量完成成为研究热点。2005 年, Kim et al^[8]认为 250 ms 的通信延迟在远程腔镜手术中是可以接受的, 而 Anvari et al^[9]认为即便是 500 ms 的延迟也不会影响手术质量。直到 2014 年, Xu et al^[10]团队提出 200 ms 以内的综合延迟是机器人远程手术顺利开展的理想网络状态, 将延迟放宽到 200~300 ms 不会影响手术操作, 当延迟达 600~700 ms 时, 只有低风险和简单的手术操作能进行, 在延迟达 800~1000

ms 进行手术非常困难,无法保证手术质量,所以目前国内外远程研究多以此作为网络选择的标准。

5G 技术的出现显著提高了开展机器人远程手术的能力。相比前几代,5G 技术提供了更快的速度和更低的延迟,非常适合需要实时数据传输的应用。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]报道了在 5G 技术支持下借助 Franka Panda 手术机器人对 15 km 外的尸体行声带切除术,以平均 140 ms 网络延迟完成了手术。2023 年,日本 Ebihara et al^[13]对 250 km 外的一具假定的胃癌尸体进行远端胃切除及淋巴结清扫。这些临床试验证实 5G 网络的低延迟、高效性,为机器人远程手术发展提供了网络方向。

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]借助 4G 网络,对 118 km 外的猪实施了胆囊切除、胃穿孔修补和肝楔形切除术,但 4G 网络的窄带宽不能满足实时数据传输要求,机器人远程手术的研究陷入瓶颈。随着 5G 技术的问世,国内医疗团队对 5G 技术支撑下的机器人远程手术的应用进行了广泛研究,并取得突破性进展。2018 年 12 月解放军总医院刘荣等^[16]完成了国际首例 5G 机器人远程手术,在网络延迟小于 150 ms 的状态下对距离福州 50 km 的猪进行了肝楔形切除术。2020 年 9 月青岛大学附属医院泌尿外科团队^[17]采用国产 MicroHand 手术机器人,在 5G 网络连接的猪模型上进行左肾切除术、肝部分切除术、胆囊切除术、膀胱切除术等 4 例超远程腹腔镜手术,网络通信距离近 3 000 km,平均网络延迟为 264 ms,手术时间 2 h,总出血量 25 mL,手术过程中无并发症发生,证实了国产机器人可以安全、顺利地进行超远程腹腔镜手术,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],之后该团队还陆续开展远程根治性肾切除、肾上腺切除术 47 例^[19-21],最远手术距离 1 775 km,是国际样本量最大的机器人远程手术临床队列。

2023 年,中国人民解放军总医院泌尿外科团队在北京和三亚之间(往返通信距离 6 000 km)完成多种通信模式下机器人远程手术的动物实验和临床研究,该团队通过专线网络,远程操控精锋 MP1000 手术机器人为 19 只猪进行了 24 例保留肾单位的肾部分切除术和 8 例输尿管膀胱再植术^[22-23],随后采用 5G+专线的通信模式,为 6 例下腔静脉后输尿管、肾癌、前列腺癌和肾上腺肿瘤的患者成功实施机器人远程手术^[24],实时往返网络延迟在 48.37~52.20 ms 之间,创新性地将 5G 网络与专线网络综合运用,数据传输不仅快而且衰减

小。2023 年 12 月 20 日，中国人民解放军总医院泌尿外科张旭院士使用国产精锋机器人为安徽医科大学第一附属医院泌尿外科患者完成了远程前列腺癌根治术。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应用国产精锋机器人远程为中国人民解放军总医院的患者完成了保留肾单位的肾部分切除术。

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]。现在的手术机器人已具备 3D 高清视野及精确的运动控制系统，手术医师可以很好的手眼协同操作，但术者只能通过视觉反馈对抓取、缝合脏器进行力度判断^[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，加入触觉反馈后的脏器抓取力明显弱于仅靠视觉反馈。美国 TransEnterix 公司的 Senhance 手术机器人通过集成力传感器与运动追踪系统，将机械臂与组织接触时的阻力、器械操作力度等物理信息实时转化为可感知的触觉信号，传输至医师操控台，虽然限于简单力感的模拟，无法完全复现开放手术中多维度的触觉体验（如温度、纹理细节），但其触觉反馈机制已显著提升了机器人手术的操作可控性，为未来触觉机器人技术迭代奠定了基础^[29]。同时韩国 Meere 公司 Revo-I 手术机器人

^[30]以及欧洲新型机器人远程手术系统 Telenap Alf-x 也加入触觉反馈，在一定程度上克服了机器人手术操作缺乏手感的问题。未来人工智能有望通过数据建模、实时补偿与多模态融合提升触觉反馈的精度与实时性，推动手术机器人从“视觉依赖”向“多感官协同”进化。机器人系统的医师操控台体积大，小型、模块化的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，现在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”，有望实现在限定场景（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

尽管现有的网络技术已具备开展机器人远程手术的条件，但信号时滞仍是制约机器人远程手术推广的关键因素^[31]。由于机器人远程手术空间上的距离，网络延迟无法避免，降低延迟带来的负面影响才能更好保证机器人远程手术顺利开展。Nankaku et al^[32]的研究表明，经验丰富的外科医师即便在 100 ms 的通信延迟下进行远程操作，仍然比延迟控制在 0 ms 的缺乏经验的外科医师表现更好。因此，术者的解剖知识、手术技巧、机器人操作熟练程度、对延迟的适应能力可在一定程度上弥补时延带来的影响。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；② 5G 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（≤3 000 km），兼顾时效性与普及性；③ 5G+专线混合组网通过双链路冗余设计，为心脏/脑外科等高危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。未来需发展创新性组网方案（如 5G+专线融合），以推动机器人远程手术的全面推广。

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	3000 km Telesurgery - radical cystectomy
5G+Leased line network	40-52	High-precision surgical interventions	Beijing-Sanya long-distance telesurgery

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。但面临着一些不足，亟待解决。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，导致网络传输不稳定，甚至会泄露信息、网络中断或瘫痪，会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漏风险。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，并由医生评估患者、明确团队分工；术中要求远程医生精准操控机械臂、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、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 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]. JSLS, 2018, 22(4): e2018.00039. doi:10.4293/JSLS.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] Ngan 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 粲, 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/OL]. *中华腔镜外科杂志(电子版)*, 2019, 12(1): 45-8.

[16] Liu R, Zhao G D, Sun Y N, et al. Animal experiment for 5G remote robotic surgery[J/OL]. *Chin J Laparosc Surg Electron Ed*, 2019, 12(1): 45-8.

- [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.
- 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/rcs.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.