·述评·

远程手术在胃肠外科领域应用的初步探索

戴飞翔　杜晓辉
解放军总医院第一医学中心普通外科医学部，北京 100853
通信作者：杜晓辉，Email：duxiaohui301@sina.com

【摘要】 远程手术是利用通信技术和机器人系统实施异地手术的一种新兴方式。近年来，随着通信技术和国产机器人手术系统的研发与提升，国内远程手术快速发展，相继在泌尿外科、肝胆外科及骨科等领域得到应用，但在胃肠外科领域报道较少。笔者结合前期开展的北京和三亚两地之间的远程胃肠外科手术实践，对远程手术在胃肠外科领域的应用现状和发展前景做一梳理和阐述。

【关键词】 胃肠外科；　机器人手术系统；　远程手术

Preliminary exploration of telesurgery applied in the field of gastrointestinal surgery

Dai Feixiang, Du Xiaohui
Department of General Surgery, the First Medical Center of Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China
Corresponding author: Du Xiaohui, Email: duxiaohui301@sina.com

【 **Abstract** 】 Telesurgery is a novel way to implement long-distance surgery by using communication technology and robotic system. In recent years, with the development and improvement of communication technology and domestic robotic surgery systems, telesurgery has developed rapidly in China, and has been applied in urology, hepatobiliary surgery, orthopedics and other fields. However, there are few reports in the field of gastrointestinal surgery. Based on the previous practice of remote gastrointestinal surgery between Beijing and Sanya, we review and elaborate on the application status and development prospects of telesurgery in the field of gastrointestinal surgery.

【 **Key words** 】 Gastrointestinal surgery;　Robotic surgery system;　Telesurgery

远程手术是在通信技术的支撑下，医生通过机器人系统进行异地手术的一种新兴外科治疗方式[1]。近年来，随着网络技术的不断进步和机器人系统的更新迭代，远程手术已逐渐应用于多个外科领域，但在胃肠外科领域的应用报道较少。2024 年 1 月，解放军总医院普通外科团队利用国产手术机器人系统联合互联网专线及第 5 代移动通信技术（5th generation wireless system，5G），于北京和三亚之间成功开展了远程胃癌和直肠癌根治手术[2]。本文结合此次远程手术的实践经验，对远程手术在胃肠外科领域应用的初步经验和发展前景作一梳理和展望。

一、远程手术的意义

中国幅员辽阔和地区间经济发展不平衡，导致优质的医疗资源更多地集中于省会等大城市和经济发达地区，这对地处偏远或灾害救援现场、需外科手术的患者而言，往往意味着错失最佳手术时机，或付出更高昂的医疗成本。远程手术的出现为解决这一难题提供了新的选择。随着远程机器人手术系统和 5G 网络的深入普及，外科医生可以通

DOI：10.3760/cma.j.cn441530-20240419-00145
收稿日期　2024-04-19　　**本文编辑**　朱雯洁
引用本文：戴飞翔, 杜晓辉. 远程手术在胃肠外科领域应用的初步探索[J]. 中华胃肠外科杂志, 2024, 27(8): 779-783. DOI: 10.3760/cma.j.cn441530-20240419-00145.

过操控手术机器人的机械臂，打破空间壁垒以及时间的限制，为身处异地的患者实施手术，实现优质医疗资源下沉，使医疗资源相对落后地区的患者能够享受到高水平的医疗服务，同时避免异地奔波、增加医疗成本以及转运途中发生危险的弊端。

远程外科手术在军事医学领域也有其特殊的意义。提出远程手术设想的Satava来自美国陆军医院，他早在1993年就提出将腔镜技术与计算机技术、互联网技术联合起来，打造一个可远程操作的外科平台[3]。此后，在宙斯系统和达芬奇机器人手术系统相继应用的基础上，美国国防部牵头斯坦福国际研究院（SRI International）等多家研究机构，研发了战场环境下的远程创伤救治系统Trauma Pod，它不仅能以自主或远程操作的方式对战场上的受伤士兵进行必要的外科操作，还拥有擦洗消毒、手术机械传递等自动护理模块以及断层X射线设备之类的诊断模块，为未来战现场实现无人化治疗提供了可能[4]。此外，美国太空军甚至提出了太空远程手术理念，利用卫星通信，探索对近地空间站的患者实施远程外科手术的可行性[5]。未来我军面临的战争环境复杂多变，无论是高海拔山地作战或是渡海登岛作战，都存在战线跨度大、伤情复杂以及后送困难等诸多不利因素。远程手术的有效应用，有望将“战术-战役-战略”三阶梯救治中的战略后方医院的优质医疗资源前伸至战役后方、乃至战术一线战场，这也为战场外科救援的高效完成提供了新策略。

二、远程手术的发展

2001年，法国Marescaux团队在美国纽约利用宙斯机器人对位于法国斯特拉斯堡的一例68岁女性患者成功实施了世界上第一例远程胆囊切除术[1,6]。此次手术采用的是海底电缆铺设构建的专线网络，信号传输稳定，网络延迟较低，术者操作流畅，画面成像清晰。这是第一次真正意义上成功应用于人体的远程手术，是远程外科的里程碑。但由于网络技术及手术机器人系统等硬件水平的限制，随后十余年远程手术的发展较为缓慢。随着5G的出现，其高带宽、低延时、数据传输快和可靠性强的特点为解决远程手术的通信瓶颈问题提供了硬件支持[7]。2020年7月，意大利Acemoglu团队基于5G网络利用手术机器人对15 km外的尸体实施了远程声带切除手术，证实5G远程手术具有一定的可行性[8]。

近年来，国家对远程手术发展给予大力扶持和政策引导。2020年10月，国家工业和信息化部和卫生健康委员会联合发布《关于进一步加强远程医疗网络能力建设的通知》，提出5G网络制式医疗设备的研发和适配工作需加快开展。2023年1月，国家工信部、卫健委等17个部门联合印发《“机器人+”应用行动实施方案》，并将机器人5G远程手术列入医疗健康领域的行动计划。近年来，我国的远程通信技术蓬勃发展，5G网络建设日新月异，大量5G基站的建立以点成面，覆盖广、信号强、移动性好，为国内远程手术的实现提供了强有力的网络支撑[9]。另外，国产机器人手术系统虽然起步晚，但发展迅速，近些年涌现出妙手、图迈、康多以及精锋等一大批机器人手术系统品牌，也促使我国的医疗团队对5G网络下远程手术的应用进行了深入探索，推动了国内远程外科的研究热潮[10-14]。2019年，北京积水潭医院对不同城市的12例患者实施5G远程机器人辅助脊柱手术，证实了5G网络在远程手术中的可行性及安全性[11]。2021年，Li等[12]利用国产手术机器人成功对8家基层医院的29例患者进行了远程机器人辅助根治性肾切除术。2023年6月，解放军总医院妇产科团队利用5G网络技术对相隔4 000 km的偏远地区患者实施远程机器人辅助全子宫切除术，初步探讨了远程手术服务偏远地区患者的可行性[13]。2023年9月，张旭团队在北京和海南三亚间利用互联网专线成功实施6台泌尿外科手术，涉及4个泌尿系统器官和5种不同的手术类型，再次证实超远程机器人手术的安全性和可行性[14]。目前，我国已跻身全球远程手术发展的前列，依托互联网专线、5G或5G+专线等多种通信模式建立远程手术系统，并在机器人组件适应性改造、数据传输延迟处理和网络传输加密保护等方面取得了一系列成果，为远程手术的应用推广打下了良好基础。

三、远程手术在胃肠外科领域的探索

与腹腔镜手术不同，机器人手术是由术者控制主控制台的仿真手腕器械进而操纵床旁手术机械臂对患者实施手术。2000年以来，机器人胃肠外科手术在国内各医院广泛开展并完成一系列临床研究，拥有广阔的应用前景[15]。近年来，随着国产机器人手术系统和网络通信技术的快速发展，远程手术开始应用于胃肠外科领域。2023年9月，甘肃省人民医院马云涛团队在相隔70 km的本部和新区

分院之间，利用中国电信5G网络和国产手术机器人顺利开展1例远程机器人辅助右半结肠癌根治术；同月，河北医科大学赵群团队采用5G通信技术联合国产手术机器人系统成功实施1例远程机器人胃癌根治术，证明了5G技术在远程胃癌手术中应用的潜力[16]。但上述两例报道相距距离均<100 km。笔者团队依托互联网专线+5G网络的通信模式和国产“精锋”手术机器人系统，成功实施了海南三亚和北京两地的超远程远端胃癌根治术和直肠癌根治术，本手术地域跨度长达3 000 km，进一步探索了远程手术在胃肠外科领域应用的可行性和安全性。以下就本次手术探索经验进行分享。

（一）术前准备

1. 手术团队人员配置：远程机器人手术与本地机器人手术的主要区别在于术者和患者位于两地，对网络传输、网络安全及设备操作等方面的要求更高。为此，远程手术的开展不仅需要主刀医师、助手、麻醉师、器械护士和巡回护士组成的专业医疗团队，还需要网络工程师、设备维修工程师组成的专业技术人才团队。另外，本次手术为防止因网络延迟或机器故障等原因导致手术操作无法完成，患者所在的手术室也配备了拥有独立完成手术能力的医师团队，以便应急情况下及时更换为本地机器人手术进行操作，以保证手术的连续性和安全性。

2. 机器人系统准备：本次远程手术使用的是国产MP1000手术机器人系统（深圳市精锋医疗科技股份有限公司），该系统由外科医生控制台（主系统）和床旁操作控制台（从系统），主从系统由互联网专线+5G网络的联合通信模式传输手术操作信号。海南三亚和北京两地的手术室均配备了手术机器人的主、从操作系统。术者操作主系统，将操作指令输入并将其转换为控制信号。控制信号经网络传输的从系统，转换为实际的床旁机械臂操作。从系统的内镜捕获的三维图像同时作为视觉信号，再通过网络传输反馈发送给术者控制台的屏幕，从而形成循环操作[2]。手术机器人公司的远程通信主机系统，可对手术全过程及网络延迟、异常及受攻击情况予以实时监测和记录，并及时提供所需的智能辅助（如最大限度压缩及最高质量还原图像），以保证视频和图像数据流的传输速率及手术画面的成像效果。另外，手术团队会提前3 d对北京、海南两地的手术机器人平台予以调试，主要测试手术机械臂操作的流畅性和网络的稳定性，确保手术的顺利开展。

3. 网络传输方案的设计：网络传输是远程手术的核心和基础。5G网络具有传输速率快、移动性强的特点，可灵活部署远程手术设备。但是传输距离越长，信号衰减和损耗增加越明显，传输稳定性显著下降。互联网虚拟专线虽然传输衰减小、损耗低、稳定性较高，但安装周期相对较长，成本显著提高。手术团队综合了两者的优势，采用5G+互联网专线的混合方式，在满足设备配置灵活性的同时，又达到了高效传输的要求，以实现主从数据的稳定交互传输。两种网络均采用加密处理并完成提前调试，安装新一代防火墙，以防可能出现的网络攻击，确保网络传输安全。

4. 视频会议系统：远程手术本质上是异地手术，两地手术室间的实时顺畅交流非常关键。利用视频会议系统，将主从系统的操作画面以及手术现场麻醉机和监护仪屏幕上的参数，分屏投放到4K高清显示屏上，辅以清晰的语音交流，可保证术者和助手间的充分沟通，确保能及时了解双方手术室的工作情况。

（二）术中操作

胃肠道肿瘤根治的远程手术操作基本同于本地机器人手术，Trocar孔位置选择、机械臂置入、淋巴结清扫、消化道重建的详细情况可借鉴机器人胃癌手术及机器人结直肠癌手术的专家共识，但有部分细节仍值得我们关注[17-19]。

1. 术者方面：作为术者，自身必须拥有扎实的外科基础和丰富的机器人手术经验。由于此次远程手术两地相隔距离远，网络延迟不可避免。术者在操作开始时，一方面要感受机械臂是否有延迟卡顿感，要做到对延迟所带来的不良干扰进行适应性调整；另一方面，需与助手充分沟通，评估自身的操作是否与患者端的手术画面同步。胃肠道手术相对复杂，手术视野的暴露是否充分对手术操作的难易程度、手术的安全性及淋巴结清扫的完成度都非常关键。在视野暴露不清、解剖结构显露困难时，要及时指挥助手协助暴露，切忌盲目操作，避免对患者造成不必要的损伤。术者的操作幅度尽量减小，可以采用“小步快走”的方式，在不影响手术进度的情况下，尽量减少腔内器械快速、大幅度移动，从而有效降低网络延迟可能带来的风险。

2. 助手方面：助手是远程手术中不可或缺的角色。作为助手，一方面要完成气腹的建立、Trocar位置的确定、机械臂与Trocar的连接以及操作器械的合理装配等准备工作，另一方面，助手只有一个操作通道，可能需要切换分离钳、吸引器、Hem-o-lock钳等多种器械，所以需要高度专注，及时留意手术变化，与术者要有“见缝插针”式的默契配合，并主动利用视频会议系统与术者及时沟通，随时注意跟进显露，减少延误，积极为术者创造流畅的操作环境。另外，助手还需要掌握基本的故障排除和应对方法，如镜头模糊、机械臂碰撞、超声刀长度不够等情况。

（三）网络延迟对手术的影响

网络延迟是远程机器人手术面临的重点和难点[20]。Xu 等[21]在研究中提出，远程外科手术可接受的网络延迟应<300 ms，但理想延迟应在 200 ms 以内。Korte 等[22]得出结论，延迟的增加会加大操作失误的风险，强调了该变量在远程手术中的重要性。Fabrizio 等[23]通过研究表明，网络传输和硬件系统对数据流的处理是远程手术延迟时间的主要来源。本次手术过程中，总延迟时间平均仅约 170 ms，延迟一方面来自于网络信号在北京和三亚两地的双向传输（平均延迟时间约为 50 ms），另一方面来自于机械臂本身对控制信号的响应（平均延迟时间约为 80 ms）以及机器人远程通信系统对数据流压缩和解压缩的处理（平均延迟时间约为 40 ms）。整个远程手术主、从一致性好，过程顺利流畅，术者未感觉到明显画面延迟或卡顿，达到了预期的手眼同步要求。此次我们采用的互联网专线+5G 网络联合通信模式不仅启用了加密保护，还特别应用新一代防火墙予以网络监控，以防网络攻击的可能，进而确保手术过程中的通信安全和信号稳定。而且，手术机器人公司后台的远程通信主机系统同步对整个手术过程及网络状况予以实时监测，一旦发现严重的网络问题如网络延迟较高或遭受网络攻击，将会及时中断远程传输信号，停止手术机械臂的操作并转换至本地机器人系统进行手术，可有效防止远程指令引发的误操作对患者造成不必要的损伤。另外，在前期网络和设备调试的基础上，我们于手术当日还会对设备和网络进行检测和故障排查，这也为远程手术安全顺利实施提供了有力保障。

整体来说，此次远程手术术前考虑周全、准备充分，术中术野图像清晰、术者操作流畅，手术时间短、出血量少，淋巴结清扫完成度好，无并发症发生，手术效果令人满意。实践证明，远程机器人胃肠外科手术可以有效、安全地实施，这也为后续的远程乃至超远程模式下机器人手术在胃肠外科领域的广泛开展进行了有益探索。

四、总结和展望

目前，虽然远程手术发展迅速，但仍有一些问题亟待解决。首先，配套的法律法规仍未完善，导致手术问题的责任划分不明确以及医患权益无法得到保障。其次，硬件条件仍需改善，手术机器人系统的智能化和不同外科领域器械的适应性改造有待提升，网络延迟和网络安全的保障等通信问题仍需解决。另外，胃肠外科远程手术的临床研究开展不够深入，缺乏高级别的循证医学证据，临床技术尚未成型，无法达到标准化、规范化。而且，高昂的设备耗材购置成本和维护保养费用也让很多医疗机构望而却步，限制了远程手术的广泛开展。但我们相信，在不久的将来，随着国家政策的大力推进，计算机技术、自动化技术、网络传输技术和人工智能等高新技术的不断发展和突破，国产手术机器人系统的不断优化和普及，术前规划和术中导航等辅助技术的大力加持，远程手术在胃肠外科领域的应用前景将十分广阔，会在基层医疗、灾难救援和战伤救治中发挥重要作用[24]。

利益冲突 作者声明不存在利益冲突

参 考 文 献

[1] Marescaux J, Leroy J, Gagner M, et al. Transatlantic robot-assisted telesurgery[J]. Nature, 2001, 413(6854): 379-380. DOI: 10.1038/35096636.

[2] 李松岩, 闻巍, 戴飞翔, 等. 超远程手术机器人辅助直肠癌根治术临床初步研究[J]. 中国实用外科杂志, 2024,44(3):308-311. DOI: 10.19538/j.cjps.issn1005-2208.2024.03.15.

[3] Satava RM. Surgery 2001. A technologic framework for the future[J]. Surg Endosc, 1993, 7(2): 111-113. DOI: 10.1007/BF00704392.

[4] Garcia P, Rosen J, Kapoor C, et al. Trauma Pod: a semi-automated telerobotic surgical system[J]. Int J Med Robot, 2009, 5(2):136-146. DOI: 10.1002/rcs.238.

[5] Haidegger T, Sándor J, Benyó Z. Surgery in space: the future of robotic telesurgery[J]. Surg Endosc, 2011, 25(3): 681-690. DOI: 10.1007/s00464-010-1243-3.

[6] Choi PJ, Oskouian RJ, Tubbs RS. Telesurgery: past, present, and future[J]. Cureus, 2018, 10(5): e2716. DOI: 10.7759/cureus.2716.

[7] 杨敬, 葛涵涛, 陆烨晔. 5G技术在智慧医疗领域的应用场景浅析[J]. 中国卫生信息管理杂志, 2020,17(6):804-808. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5166.2020.06.023.

[8] 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):940-941. DOI: 10.7326/M20-0418.
[9] 张学文, 王赈霄, 盛基尧, 等. 5G技术在外科领域中的应用[J]. 中华消化外科杂志, 2020,19(5):482-485. DOI: 10.3760/cma.j.cn115610-20200423-00281.
[10] 刘荣, 赵国栋, 孙玉宁, 等. 5G远程机器人手术动物实验研究[J/CD]. 中华腔镜外科杂志(电子版), 2019,12(1):45-48. DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-6899.2019.01.008.
[11] Tian W, Fan M, Zeng C, et al. Telerobotic spinal surgery based on 5G network: the first 12 cases[J]. Neurospine, 2020,17(1):114-120. DOI: 10.14245/ns.1938454.227.
[12] 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): 41-44. DOI: 10.1016/j.eururo.2022.06.018.
[13] 顾成磊, 李立安, 王宁, 等. 5G远程机器人辅助腹腔镜全子宫切除术首例报道[J]. 中国微创外科杂志, 2023, 1(8): 610-615. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6604.2023.08.011.
[14] 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):506-507. DOI: 10.1016/j.eururo.2023.11.002.
[15] Li ZY, Zhou YB, Li TY, et al. Robotic gastrectomy versus laparoscopic gastrectomy for gastric cancer: a multicenter cohort study of 5402 patients in China[J]. Ann Surg, 2023, 277(1):e87-e95. DOI: 10.1097/SLA.0000000000005046.
[16] Guo H, Tian Y, Shi J, et al. Pioneering case: robot-assisted remote radical distal gastrectomy for gastric cancer based on 5G communication technology[J]. Int Surg, 2024, 7: 22-26. DOI: 10.1016/j.isurg.2024.01.004.
[17] 中国医师协会结直肠肿瘤专业委员会机器人手术专业委员会, 中国研究型医院学会机器人与腹腔镜外科专业委员会. 机器人结直肠癌手术中国专家共识(2020版)[J]. 中华消化外科杂志, 2021, 20(1): 16-28. DOI: 10.3760/cma.j.cn115610-20201214-00779.
[18] 中国研究型医院学会机器人与腹腔镜外科专业委员会, 中国抗癌协会胃癌专业委员会. 机器人胃癌手术中国专家共识(2021版)[J]. 中华消化外科杂志, 2022, 21(1):1-9. DOI: 10.3760/cma.j.cn115610-20211214-00652.
[19] 中国医师协会外科医师分会上消化道外科学组, 中华医学会外科学分会胃肠外科学组, 中国研究型医院学会消化道肿瘤专业委员会, 等. 机器人胃癌切除术后完全腔内消化道重建中国专家共识(2021版)[J]. 中华胃肠外科杂志, 2021,24(8): 647-652. DOI:10.3760/cma.j.issn.441530-20210727-00299.
[20] Raison N, Khan MS, Challacombe B. Telemedicine in surgery: What are the opportunities and hurdles to realising the potential?[J]. Curr Urol Rep, 2015, 16(7):43. DOI: 10.1007/s11934-015-0522-x.
[21] 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): 2569-2576. DOI: 10.1007/s00464-014-3504-z.
[22] Korte C, Nair SS, Nistor V, et al. Determining the threshold of time-delay for teleoperation accuracy and efficiency in relation to telesurgery[J]. Telemed J E Health, 2014, 20(12):1078-1086. DOI: 10.1089/tmj.2013.0367.
[23] Fabrizio MD, Lee BR, Chan DY, et al. Effect of time delay on surgical performance during telesurgical manipulation[J]. J Endourol, 2000,14(2):133-138. DOI: 10.1089/end.2000.14.133.
[24] Nelson BJ, Bendok BR, Turcotte EL, et al. Remote magnetic navigation enables precision telesurgery[J]. Sci Robot, 2024, 9(87): eado3187. DOI: 10.1126/scirobotics.ado3187.

·读者·作者·编者·

本刊对作者署名及其工作单位的撰写要求

1. 作者署名：作者姓名在题名下按序排列，排序应在投稿前由全体作者共同讨论确定，**投稿后不应再作改动，确需改动时必须出示单位证明以及所有作者亲笔签名的署名无异议的书面证明**。作者单位名称（具体到科室）及邮政编码列于作者姓名下方，并注明通信作者的Email地址。作者应同时具备以下4项条件：（1）参与选题和设计，或参与资料的分析与解释者；（2）撰写论文或对其学术内容的重要方面进行关键修改者；（3）对最终要发表的论文版本进行全面的审阅和把关者；（4）同意对论文的所有方面负责，保证对涉及研究工作的任何部分的准确性和科研诚信的问题进行恰当的调查，并及时解决者。**仅参与获得资金或收集资料者不能列为作者，仅对科研小组进行一般管理者也不宜列为作者。**

2. 工作单位：原则上1位作者仅能标注1个单位（著录个人隶属的行政机构，如果作者隶属的行政机构与完成课题选题、研究方案设计、进行研究工作和提供研究条件的机构不一致，或作者隶属不同机构时，**以提供研究条件和完成研究工作的机构为作者单位），确需标注多个单位的，需在投稿介绍信加盖所有著录单位的公章（所有公章盖在同一张纸上），且第一作者单位必须为资料来源单位。**