

远程手术与智能外科专题



[专家简介] 陈华, 主任医师, 教授, 博士生导师。现任解放军总医院第四医学中心骨科医学部创伤骨科副主任, 中华医学会骨科分会创伤学组委员、北京医学会骨科分会创伤学组委员、中国医师协会骨科青年委员会青年委员、中国康复医学会修复重建外科专业委员会青年委员、军队显微外科专业委员会青年委员。主持科技部国家重点研发项目、国家自然科学基金面上项目和青年基金、首都特色专项基金等课题。以第一完成人获北京市科学技术发明奖一等奖、北京医学会科技进步奖、解放军总医院科技进步一等奖及二等奖、军队医疗成果三等奖。获授权国际发明专利10项, 国家发明专利授权9项, 实用新型专利授权7项, 其中2项分别荣获2019、2023年度中国专利优秀奖。主编专著13部、副主编副译专著4部。第一或通信作者发表论文72篇, 其中SCI论文32篇, 核心期刊40篇。

远程外科手术的研究进展和应用展望

贺杰^{1,2,5}, 詹纳智^{1,2}, 刘光平², 何昆仑³, 唐佩福^{1,2,4}, 陈华^{1,2,4}

¹解放军医学院, 北京 100853; ²解放军总医院第四医学中心骨科医学部, 北京 100048; ³解放军总医院创新医学研究部, 北京 100853; ⁴国家骨科与运动康复临床医学研究中心, 北京 100048; ⁵联勤保障部队第989医院, 河南洛阳 471031

摘要: 远程外科手术作为外科医学领域的创新技术手段, 伴随着通讯技术、机器人系统及人工智能发展逐步推广应用, 成为超远程救治及前沿救治力量的有效补充和优化。本文结合目前远程外科手术的技术发展现状及其在各领域的应用, 对该技术的研究进展做一阐述和展望。

关键词: 远程外科手术; 手术机器人; 军事医学; 人工智能

中图分类号: R6; R-1

文献标志码: A

文章编号: 2095-5227(2025)08-0729-08

DOI: 10.12435/j.issn.2095-5227.25041402

引用本文: 贺杰, 詹纳智, 刘光平, 等. 远程外科手术的研究进展和应用展望 [J]. 解放军医学院学报, 2025, 46 (8): 729-736.

Research advances and application prospect of telesurgery

HE Jie^{1,2,5}, ZHAN Nazhi^{1,2}, LIU Guangping², HE Kunlun³, TANG Peifu^{1,2,4}, CHEN Hua^{1,2,4}

¹Chinese PLA Medical School, Beijing 100853, China; ²Department of Orthopaedic Surgery, the Fourth Medical Center of PLA General Hospital, Beijing 100048, China; ³Medical Innovation Research Division of PLA General Hospital, Beijing 100853, China; ⁴National Clinical Research Center for Orthopaedics & Sports Rehabilitation in China, Beijing 100048, China; ⁵No. 989 Hospital of the Joint Logistics Support Force of the Chinese People's Liberation Army, Luoyang 471031, Henan Province, China

Corresponding author: CHEN Hua. Email: chenhua0270@126.com

Abstract: As an innovative technological approach in the emerging field of surgical medicine, remote surgery has been gradually promoted and applied alongside advancements in communication technologies, robotic systems, and artificial intelligence. It serves as an effective supplement and optimization for ultra-remote medical treatment and frontline emergency response. This paper elaborates on the research progress of this technology in light of its current developmental status and applications across various fields, and also provides an outlook for its future.

收稿日期: 2025-04-14

基金项目: 科技创新2030-新一代人工智能重大项目(2021ZD0140410)

第一作者: 贺杰, 在读硕士, 主治医师。Email: 1041748569@qq.com

通信作者: 陈华, 主任医师, 教授, 博士生导师。Email: chenhua0270@126.com

Keywords: telesurgery; surgical robots; military medicine; artificial intelligence

Cited as: He J, Zhan NZH, Liu GP, et al. Research advances and application prospect of telesurgery[J]. Acad J Chin PLA Med Sch, 2025, 46(8): 729-736.

近年来,随着5G通信技术、人工智能、增强现实、虚拟现实及手术机器人技术的不断更新迭代及突破性进展,外科医学4.0时代逐渐到来^[1-2]。远程外科手术作为现代医学领域的重要创新方向,正从理论探索迈向临床应用,成为解决全球医疗资源分布不均、提升基层医疗水平的新兴关键医疗手段。远程外科通过整合机器人手术系统、高速网络传输与智能辅助技术,突破地理限制,使外科医生能够远程控制手术机器人或进行远程手术规划,从而指导一线医师完成复杂手术操作,为患者提供跨区域的精准医疗服务。这一技术的兴起不仅重塑了传统外科的实践模式,也为战场救护、灾难救援等特殊场景提供了革命性解决方案^[3]。远程外科手术的核心技术体系包括手术机器人系统、5G通信网络及人工智能算法。手术机器人具有多维度机械臂和高精度传感器,术中的精准度可达到亚毫米级。5G网络具有“高宽带、低延迟、大连接”的技术优势,可实现实时高清影像传输,为远程操控提供了技术保障^[4-5]。人工智能算法模型在智能化规划、影像重建及术后监测中显著提高了安全性和效率。远程外科手术可使外科作业突破时空限制,优质资源辐射基层和边远地区,指导基层医院开展技术,缩短诊疗距离差和时间差^[1]。全息影像信息的交互与共享可打破时空界限,在虚拟世界、现实世界中搭起一个交互反馈的信息回路,为外科教育培训、术前沟通、远程手术协助带来彻底的变革,使复杂手术简单化、标准化及工程化^[6]。尽管远程外科手术应用前景广阔,但仍面临多重挑战,如网络延迟、信号稳定传输等问题,以及远程手术标准化操作流程、操作伦理等相关问题,亟需构建标准化体系,从而成为技术推广的关键。本文结合文献和本单位既往开展远程手术的实践经验,就目前远程外科手术的研究和应用进行综述和展望。

1 远程外科手术的技术发展现状

随着自动化、网络通信、计算机等领域的发展,在20世纪90年代远程医疗的相关研究迅速萌芽,开始出现大量实验性成果的报导^[7]。尤其因远程外科在军事医学、航天医学等领域的应用潜力,美国在手术机器人领域进行大量研究^[8-10]。伊索系

统(AESOP®)、宙斯系统(ZEUS®)和达芬奇系统(da Vinci®)等各类手术机器人系统的面世^[11]为远程外科手术提供了技术基础。然而掣肘于远程通讯延迟及稳定性等技术问题,远程外科手术未能立刻落实临床。首例真正意义上的远程外科手术是2001年跨越大西洋的“林德伯格手术”,位于美国纽约的Marescaux团队^[12-13]采用宙斯手术机器人系统,成功为法国斯特拉斯堡的患者实施了胆囊切除术,验证了远程外科手术的可行性。

然而,在远程外科手术的发展过程中,基础通信技术的局限性是难以忽视的瓶颈。尽管2001年的林德伯格手术被誉为远程医疗发展的里程碑,但当时所采用的通信方式仍为地面光纤网络,物理线路连接的局限和专用线路的高昂成本使其难以推广^[13]。2003年Anvari团队^[14]也利用宙斯手术机器人系统在间隔400 km的情况下协助实施了22例腹腔镜手术。他们采用商用IP/VPN网络,突破了光纤网络点对点的局限性,使得远程外科手术具有更高的实际可行性。我国北京积水潭医院王军强团队^[15]在2005—2006年采用ADSU/ISDN公共网络,利用自研系统协助完成7例胫骨骨折闭合复位、带锁髓内钉内固定手术^[16]。商用公共网络尽管普及性较高、可推广性较好,通信稳定性、通讯时延和传输带宽尚可满足远程外科手术的基本要求,但仍无法克服有线通讯的诸多阻碍。Nguan团队^[17]在2007年分别采用IP-VPN网络和卫星网络在猪模型上完成肾盂成形术。他们对比不同通信方式,卫星网络的平均延迟显著高于陆地有线通信,影响主观操作体验。

而近十年来第5代移动通信技术(5G)的兴起,为远程外科手术带来了重大的发展机遇。5G网络具有高传输速度、高数据带宽、低通讯延迟、高可靠性、动态频谱管理等特性^[18-19],为远程外科手术提供了更加高质、稳定和可靠的通信保障^[7,20-21]。尽管相较专线网络干扰传输稳定性的因素更多,但5G网络技术通过基站与终端设备之间的无线传输,给予远程外科手术开展充足的灵活性。机器人手术系统的蓬勃发展和在国内外各医疗机构的推广普及,也提供了坚实的硬件设备基础和外科理论技术支撑^[21]。2018年12月我国解放军总医院刘荣团队完成了国际首台5G网络下远程外科手

术,应用国产康多机器人相隔50千米完成猪的肝脏楔形切除。这一成果具有划时代的意义,验证了5G网络应用于远程外科手术的技术可行性。2019年2月西班牙Lacy团队^[22]应用5G网络对直肠癌根治术进行了远程手术指导,向世界展示5G通信技术在远程外科手术领域的应用潜力。

至此,在5G通信技术的赋能下,远程外科手术迎来了快速发展的新阶段,各国各学科领域均催生了大量相关研究和临床实践病例,为远程外科手术的发展注入了强劲动力。而我国依托在5G通信的技术优势与相应的政策支撑^[21],推动远程外科手术驶入发展快车道。2019年北京积水潭医院团队^[23]应用5G技术和天玑机器人系统完成12例机器人脊柱外科手术,创新性地开展多中心平台。青岛大学附属医院牛海涛团队在基于动物实验的基础上在2021年完成了29例5G远程机器人泌尿外科手术^[24-25]。2022年南京医科大学第一附属医院杨杰、宋宁宏团队采用国产图迈手术机器人系统完成5G远程机器人辅助精索静脉高位结扎术,操纵端和手术端的直线距离达到3800千米。2023年6月解放军总医院孟元光团队^[26]应用完成5G下机器人腹腔镜全子宫切除术。2023年浙江大学医学院附属邵逸夫医院蔡秀军团队^[3]完成5例5G下远程机器人肝胆胰手术。2024年1月解放军总医院杜晓辉团队^[27]完成超远程机器人辅助直肠癌根治手术。2024年8月解放军总医院田文团队^[28]完成远程机器人辅助甲状腺癌根治手术。2025年6月解放军总医院张旭团队完成跨洲际远程机器人前列腺癌根治手术,通过5G网络在意大利罗马实时操纵

手术机器人,完成8000千米外中国北京的手术治疗。目前来看,基于远程通信技术的手术机器人系统已形成较为成熟完备的体系,能够保证安全性、稳定性。随着5G及光纤网络的技术迭代和广泛普及,目前网络传输方式已从当年一对一专线网络发展为5G及光纤网络等融合方案,为远程外科手术提高更稳定、安全、灵活且经济的通信支持。远程外科手术的发展正从单一中心向多中心、大样本的临床研究模式转变^[7],逐步迈向更系统化和规模化的阶段。

2 远程外科手术的应用开展与挑战

2.1 远程外科手术的组成及应用

远程外科手术主要由远程控制室和远程手术室构成,远程控制室包括远程通讯工作站及医生操控平台,远程手术室包括远程通讯工作站、图像平台、多维度手术机器人及各类辅助设备^[3],可在多学科领域开展远程外科手术。

(1)网络通讯保障:网络通讯方面,远程控制室和远程手术室的网络通讯依托两端的远程通讯工作站,目前远程外科手术的通讯技术多依靠功能网络保障,比如杜晓辉等^[29]报道中的5G+互联网专线,同时具备5G网络和互联网虚拟专网的综合优势,在满足设备配置灵活性的同时,可达到高速传输的要求,从而实现主从数据稳定传输,并且均采用加密处理,防止网络的攻击,确保网络传输安全,在完成海南三亚和至3 000 km的超远程手术中,延迟控制在170 ms以内,手术顺利完成。陈华团队^[6]报道中采用的是多链路聚合信息

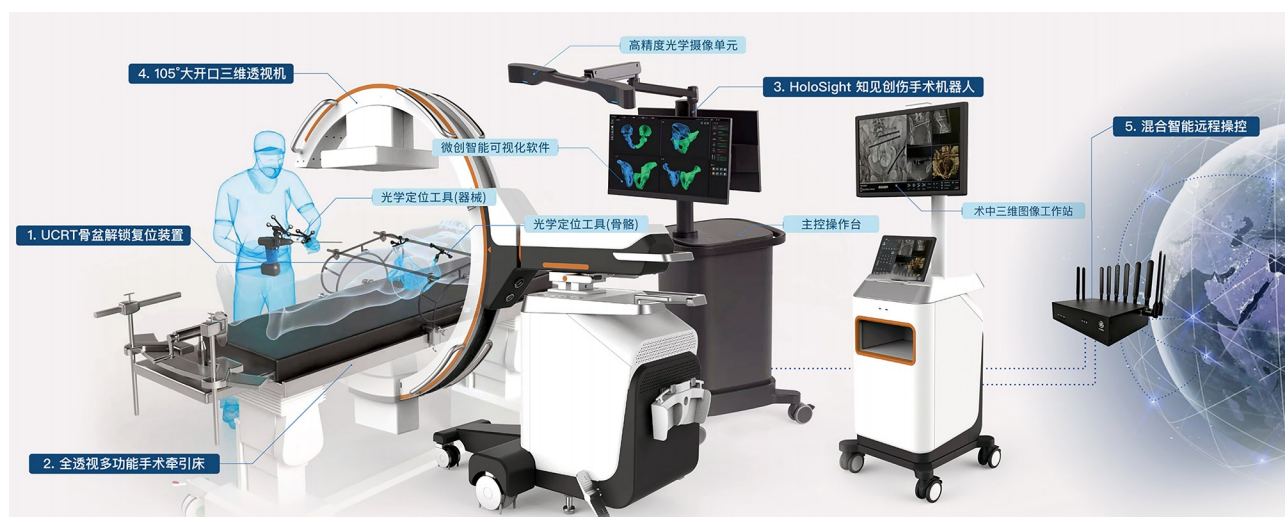


图1 本课题组远程外科系统构成

Fig. 1 Architecture of the telesurgical system developed by our research group

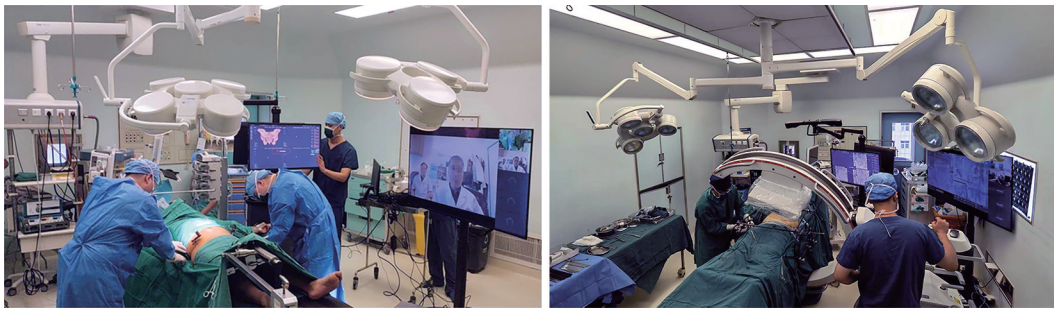


图2 本课题组远程外科系统手术场景

Fig. 2 The surgical setting of the telerobotic system in our research group

传输系统，研发了网络集合网关设备，通过智能调度算法来实现多链路的带宽叠加、负载均衡、拥塞避让、故障自修复，以达到低延时和高可靠的稳定传输目的，应用基于链路优先级的多链路聚合策略(Multilink Aggregation Algorithm based on Link Priority, MLA-LP)，用以适配异构链路，聚合带宽以满足远程医疗高质量传输需求都是通过建立专网信息传输链路，从而保障手术技术的传输，实现术中低延迟表现。我们团队最近顺利完成43例远程手术，包含全身各部分骨折，最远网络通讯距离为2 652.0 km，手术操作过程中网络传输速度的平均总延迟为(95.53±24.12) ms。两者报道的术中延迟均在200 ms以内，符合理想延迟标准^[30]，可达到术中手眼同步，提高整体精准度。Korte等^[31]实验结果表明，术中延迟的增加会加大操作失误，强调了延迟变量在远程手术中的重要性。

(2)远程手术室配置：远程手术通常部署于标准化外科手术室中，里面具有手术机器人操作系统，如国产精锋MP1000手术机器人系统、妙手手术机器人辅助系统(WG-NST600S)、Holosight三维

可视化手术机器人及天玑手术机器人等^[4,6,23,29,32-33]，可完成普通外科、肝胆外科和泌尿外科的恶性肿瘤根治术，或骨科手术中的四肢及骨盆骨折复位、螺钉精准置入等精准性操作。目前远程手术的精准度均可控制在毫米级别，其中唐佩福、陈华团队自主研发的Holosight三维可视化手术机器人通过国产可视化模组，三维空间复位及置入螺钉精度为0.26 mm^[6]，除了手术机器人操作系统外，还配备必要的辅助手术操作设备，如图像平台、视频会议系统，对于腹腔镜相关手术可从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，形成循环操作^[3,27]。在创伤骨科远程手术机器人系统中，包括UCRT骨盆解锁复位系统、全透视多功能手术牵引床及105度大开口三维透视C臂机等关键性设备。通过系统设备的整体应用，不仅可远程查阅患者术前各项影像学资料，术中操作时可远程规划，术者在手术室需按照远程专家的监视和指导进行标准化手术操作，大幅度提升了当地医院的手术同质化，也为疑难手术技术辐射基层单位提供了更直接和优质的技术帮带平台。

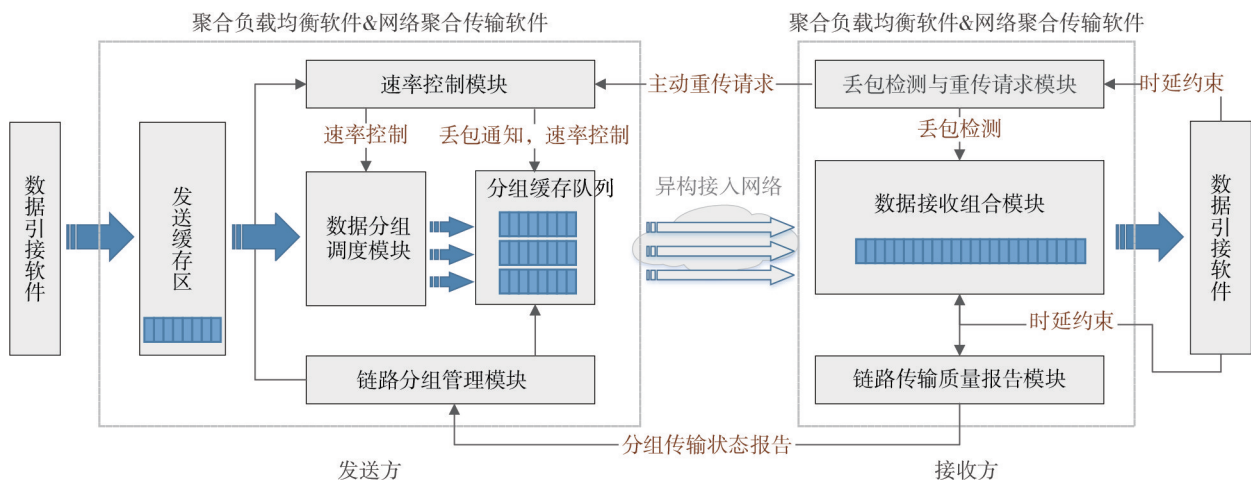


图3 多链路聚合传输(MLA-LP)的原理图

Fig. 3 Schematic diagram of multi-link aggregation transmission with low-latency protocol (MLA-LP)

2.2 远程外科手术的挑战

远程外科手术的开展,改变了传统手术模式,在提高手术可视化、微创化及精准化的同时,不仅使全国乃至全球顶尖医学的优势医疗资源下沉,更有利于年轻医师外科手术标准化操作的培养,降低学习曲线,在手术的精准度和医疗的个体化均有明显进步。在骨科领域,应用远程交互式手术,利用体素注册技术研发Holosight知见创伤骨科手术机器人,可视化辅助骨折复位及置钉的智能可视化系统。通过高精度光学定位追踪技术,可利用术前影像与术中操作的部分实体综合人工智能算法模型,进行一键式匹配,基于计算机自动规划,在屏幕上实时显示三维骨骼位置及形态,即可在虚拟骨盆上开展可视化操作,低于0.26 mm的匹配精度,使得螺钉切出率及术中透视次数大大降低,避免医源性放射性损伤可能^[6]。但远程外科手术相较本地部署的手术机器人,仍面临技术和伦理的双重挑战。

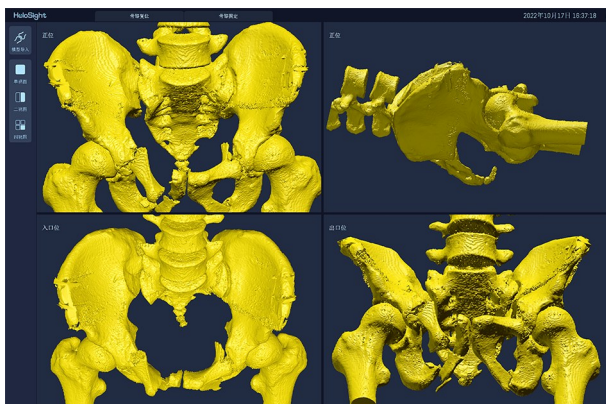


图4 Holosight手术机器人三维可视化示意图

Fig. 4 3D visualization schematic of the Holosight surgical robot

2.2.1 信号延迟和信号防护问题 信号的良好传输是保证远程外科手术的根,因为远程控制机械臂的操作或远程规划的延迟或抖动,在手术操作中都可能引起局部血管破裂或神经损伤,从而引发医源性损伤可能。在实践中,Nguan等^[34]在2007年应用IP-VPN网络进行机器人系统辅助腹腔镜肾盂成形术,信号延迟510 ms,术中操作延

迟,无法完成远程手术;2015年国内李爱民团队在相距118 km的远程手术实验中,使用10 M带宽的商用网络(VPN)作为连接链路,分别进行胆囊切除、胃穿孔修补和肝脏楔形切除术,术中网络测试延迟<250 ms,手术过程中有一定的延迟效应,但基本不影响实验顺利完成^[35]。因此根据Xu等^[30]研究表明,远程外科手术的 acceptable 网络延迟应<300 ms,并且提出理想延迟应该在200 ms以内。但使用公共网络(5G)通讯情况下,在偏远地区、远洋船只以及部分受灾区域等应用远程手术平台的场景中,公共网络往往覆盖不足,且易受自然灾害影响,可能导致信号传输失败,从而给手术操作带来极大风险。在战时背景条件下,网络传输的安全更加重要,信号通路的防护,建立的防火墙是否可以抵御敌方的网络破坏和干预至关重要。

2.2.2 远程手术安全性和伦理问题 在颠覆传统外科模式的远程手术实践中,空间解耦特性带来的安全与伦理挑战亟待系统性解决。物理隔离状态下,主刀团队与患者端存在多维度的安全风险:首先,网络通信的潜在延迟可能影响手术实时性,目前尚缺乏大样本研究验证其对治疗结局的影响权重;其次,医疗数据安全体系需同时应对黑客攻击、数据篡改等新型风险,日本《远程手术操作指南》提出的加密通信与双链路网络架构为此提供了技术基准^[36];第三,责任主体的法律界定尚存灰色地带,远程专家、本地团队与设备供应商间的权责划分需建立标准化规范。伦理框架的构建应回归医疗本质价值,世界卫生组织建议实施“三重评估机制”:术前需通过远程会诊系统完成患者生理参数、基层医院硬件水平及网络稳定性的多维度评估;术中需建立包含网络工程师、麻醉团队与应急专家的实时保障体系;术后则需构建跨区域随访数据库以验证长期疗效。值得关注的是,技术普惠性面临现实悖论:达芬奇手术系统等高端设备的购置维护费用,可能使欠发达地区陷入“技术引进-财政透支”的恶性循环^[37]。这提



图5 远程控制的延时示意图

Fig. 5 Schematic diagram of remote control delay

示政策制定者需建立分级远程手术体系, 结合区域经济水平匹配适宜技术方案。在制度层面, 建议借鉴欧盟医疗器械法规(Medical Device Regulations, MDR)的适应性修改原则, 构建包含以下要素的监管框架: (1)建立远程手术机构认证标准; (2)制定网络延迟阈值等关键性能指标; (3)完善医疗责任保险制度。唯有通过技术革新、伦理审查与制度设计的协同演进, 方能实现远程外科“技术可行性”向“临床可及性”的实质性跨越。

3 远程外科手术在军事医学或灾害医学中的应用

随着作战规模、武器种类及医疗救治能力的变化, 战伤流行病学较以往发生显著变化。爆震伤已经成为现代战争的主要致伤机制, 常常导致批量高能量损伤伤员。Fogel等^[38]研究了来自俄乌战争中 Chaim Sheba 医学中心(三级创伤中心)2023年至2024年190例战场伤员伤情分析, 弹片冲击伤是主要的致伤机制, 其中四肢损伤最常见, 占61.4%。入院24 h内, 46.3%的患者需要进行外科手术, 骨科手术占71.6%。在调研中, 即使该三级创伤中心与加沙地区距离十分接近, 平均后送时间为69 min, 但医疗救治行动及伤员后送常受到无人机区域封锁战术、炮火和持续作战行动等因素影响, 严重限制伤员尽快获得确定性救治的机会。但快速后送的假设目前无法适用于所有的现代冲突地区。因此在复杂战创伤背景下, 目前多数前沿救治场所仍然无装备、无设备、无场地进行有效的准确性手术治疗, 其野战医院的主要处置方式多以包扎、固定、转运及创伤性截肢等, 手术创伤大, 伤员生理心理损伤严重, 导致伤后PTSD (Post-Traumatic Stress Disorder)的发生率极高。

因此, 在军事作战环境或地质自然灾害的背景下, 出现大规模伤亡事件(MASCAL, mass casualty)应快速响应^[39], 但在该条件下, 常导致医疗资源挤兑和专家短缺, 前沿救治场所亟需高级别救治体系的建立, 如何将确定性手术技术及高质量医疗救治团队的技术输送至前沿一线救治单元, 具有重要的军事或急诊救治的意义^[40]。军事外科医师需处理爆炸伤或其余复杂手术, 前线医疗设备的短缺, 医疗人员团队配置不足, 传统培训可能不足, 目前常无法开展确定性或精细化手术, 通过部署远程医学, 将远程医疗手术机器人系统及附属设备集装箱化、便携化设计配属至前沿,

通过卫星或秘密专网的建立, 搭建远程救治平台, 获取本土专家指导, 优化伤员分诊和手术优先级决策, 确保紧急手术的标准化操作^[41-43]。在 Stark^[43]等的报道中, 头戴式显示器(head-mounted display, HMD)已被用于为军事前线战斗医务人员提供远程外科支持, 效果满意。这样的救治体系可打破传统的前接后送模式, 不仅可引起战创伤快速响应和救治, 通过远程手术缩短“黄金救治时间”, 借助远程监控和指导扩大有限资源的覆盖范围, 减少伤员或灾区患者转运风险, 保障战地医疗服务的连续性^[44-45], 还可共同构建军民融合救援体系, 据 Muller 研究表明^[46], 远程医疗在灾害场景救治的救治效果确切, 且能缓解人力资源压力, 将极大限度的提升整体医疗救治水平。

本课题组基于前期积累的远程外科手术操作经验, 针对应急医疗场景的特殊需求, 成功研制智能化方舱远程手术集成平台。该系统创新性构建多链路聚合网络通讯, 通过异构网络集成技术实现方舱内医学影像设备、生命监护仪及机器人控制终端的全要素互联, 攻克了野战环境下多源数据实时同步的技术瓶颈。在近日开展的验证性手术中, 系统成功完成跨2 652 km的股骨颈骨折闭合复位内固定术, 实测端到端通信延迟稳定于85 ms(符合ISO 13482医疗机器人实时控制标准), 核心数据包传输零丢失率验证了系统的可靠性。此项突破标志着远程外科技术从固定医疗机构向移动救治单元的重大延伸。通过构建“智能方舱-区域中心”的立体化救治网络, 显著提升了复杂战伤“黄金救治期”的时效性, 为未来构建模块化前沿手术站点提供了关键技术支撑, 展现出良好的卫勤保障适用性。

4 远程外科手术未来发展方向

远程外科手术目前在各学科的应用取得了良好的临床疗效, 结合通讯技术、人工智能等多领域的快速发展, 远程外科手术可在未来以下3个方面进一步发展和完善, 为构建整体医疗做出更全面的准备。

4.1 构建标准化应用体系

目前远程外科手术在国内外处于“百花齐放”的局面, 如何进行规划化发展, 则需要以标准化体系为根基, 目前考虑标准化制定需涵盖通讯技术架构、标准化操作流程及应急管理三大维度。在网络融合架构方面, 在目前公共网络(5G/5G+)

或聚合网关的基础上,可依靠低轨道卫星集群或5G网络超低时延切片技术,构建远程医疗专网,全面推动卫星通信、5G专网的建设^[47-48],建立网络冗余机制,将端到端时延稳定压缩至100 ms内。本课题组在前期研发中,在多链路聚合算法中,建立感知医疗内容的广域路径传输算法,通过提供差异化的QoS(Quality of Service)保障,优先保障远程手术等高优先级数据的传输,可提高极端环境下最优通讯链路,提高远程手术的稳定性、精确性和安全性。在标准化手术操作流程方面,首先应在远程手术中心和远程手术室的建立上形成流程化配置,在整体手术流程和操作细节上形成指南共识,便于技术的推广,且符合医学法规及伦理审批。未来可结合目前人工智能(artificial intelligence, AI)技术深度赋能,开发多模态AI辅助系统^[49-50],可整合患者术前影像(如CT或MRI的智能分割),术中实时导航(基于augmented reality, AR的血管定位)及术后预后风险或并发症的预测模型构建,进行诊疗全流程融合。在军事医学或灾害医学方面的建立,远程外科手术体系构建为“平展结合”双模型系统,日常训练可采用虚拟仿真平台进行模拟手术操作训练,在军事背景或重大灾害条件下,启动应急协议,将远程手术机器人设备投放至救援前线,通过卫星专网技术加持,形成远程外科手术的应急救治体系,便于及时快速地将确定性手术技术应用到救治一线。

4.2 抗干扰通信技术和模块化机器人技术优化

远程外科技术的核心在于通信技术和手术机器人,因此如何保障未来通信技术安全和模块化、便携化手术机器人的开发至关重要。可增加研发抗干扰通讯设备,避免医疗数据泄露或指令传输过程中发生入侵,保障医疗操作安全。可构建去中心化的网络建设,基于区块链的分布式通讯可增强数据的安全性,节点故障时进行自动重构拓扑^[51]。量子通信技术的发展对未来远程医学的信息传输可提供有效保障,其以量子密钥分发为基础的量子保密通信成为未来保障网络信息安全的非常有潜力的技术手段,对于远程手术的技术加密,防止外部干扰具有重要价值应用。目前市面上的远程手术机器人多为固定于手术间的大型医疗设备,其抗压、抗损、抗物理或化学等有害冲击等能力差,在特殊背景下易出现机械障碍。因此需要开发可拆卸、可组装的模块化手术机器人^[52-53],以集装箱式进行长距离运输投送,在前线

救治单元展开,满足救治一线。未来远程操作系统可通过建立触觉反馈技术(Haptic or Tactile Feedbacks),能通过作用力、振动等一系列动作为使用者再现触感。这一力学刺激可被应用于远程手术系统中视觉图像辅助创建和控制,以加强对于机械和设备的远程操控。

4.3 加速技术转化和产业化落地

远程外科手术的技术转化需构建“研发-验证-应用”全链条体系。(1)建立基于循证医学的多级验证机制,通过多中心临床试验逐步完善技术成熟度,同步推动国际标准迭代,形成涵盖通信时延(≤ 100 ms)、操作精度(<0.5 mm)的量化指标体系。(2)深化军民协同转化模式,依托军事医学场景验证极端环境适应性,通过模块化设计实现技术向民用转化,如将抗干扰通信技术应用用于灾害救援机器人系统。(3)在技术产业化的瓶颈阶段的破解需多维度协同创新。可通过碳纤维复合材料与磁吸耦合技术降低模块化机器人制造成本,结合动态带宽分配算法减少卫星通信资源消耗;建立跨国医疗责任险与区块链存证体系,化解跨境手术法律风险。构建“政产学研医”联合体,通过“机器人即服务”(Robotics as a Service, RaaS)模式降低基层应用门槛,数据显示该模式可使县级医院远程手术年开展量提升3~5倍,加速实现技术普惠。

尽管面临技术、伦理和资金等多重挑战,但随着卫星网络、智能机器人和应急医疗体系的完善,通过多学科协作、政策创新与技术迭代,远程外科手术将成为战时救治、灾难响应和医疗均质化的重要支撑,有望实现“外科无国界”愿景^[54-56],重新定义医疗服务边界。

作者贡献 贺杰:文章撰写、文章构思和框架设计;詹纳智:文章撰写、文献整理;刘光平:资料收集;何昆仑、唐佩福:文章整体述评内容的修改及审阅;陈华:对文章知识性内容做批评性审阅。

利益冲突 在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突

参考文献

- 唐佩福. 智能骨科的现状与展望 [J]. 中华创伤骨科杂志, 2022, 24 (10): 829-831.
- 唐佩福, 张浩, 李建涛, 等. 外科4.0: 数字化智能化外科赋能时代的来临 [J]. 中华创伤骨科杂志, 2019, 21 (3): 185-188.
- 梁霄, 郑俊浩, 李哲勇, 等. 5G远程手术机器人辅助肝胆胰

- 外科手术初步研究 [J]. 中国实用外科杂志, 2024, 44 (11): 1291-1294.
- 4 刘荣, 王子政, 王斐. 远程手术的分级 [J/OL]. 中华腔镜外科杂志 (电子版), 2019, 12 (6): 321-323.
- 5 Zhang Z, Wang YH, Zhang ZL, et al. Application of deterministic networking for reducing network delay in urological telesurgery: A retrospective study [J]. *Int J Med Robot*, 2022, 18 (2): e2365.
- 6 贺杰, 曹文豪, 陈志广, 等. 创伤骨科远程手术机器人系统远程治疗Tile C1.3型骨盆环损伤一例 [J]. 中国修复重建外科杂志, 2025, 39 (1): 123-125.
- 7 田东旭, 牛海涛. 远程手术的发展历史及现状 [J]. 机器人外科学杂志 (中英文), 2022, 3 (5): 343-350.
- 8 George EI, Brand TC, LaPorta A, et al. Origins of robotic surgery: from skepticism to standard of care [J]. *JSLs*, 2018, 22 (4): e2018.00039.
- 9 Satava RM. Virtual reality and telepresence for military medicine [J]. *Comput Biol Med*, 1995, 25 (2): 229-236.
- 10 Satava RM. Robotic surgery: from past to future: a personal journey [J]. *Surg Clin North Am*, 2003, 83 (6): 1491-1500, xii.
- 11 Pugin F, Bucher P, Morel P. History of robotic surgery: from AESOP® and ZEUS® to da vinci® [J]. *J Visc Surg*, 2011, 148 (5 Suppl): e3-8.
- 12 Marescaux J, Leroy J, Gagner M, et al. Transatlantic robot-assisted telesurgery [J]. *Nature*, 2001, 413 (6854): 379-380.
- 13 Marescaux J, Leroy J, Rubino F, et al. Transcontinental robot-assisted remote telesurgery: feasibility and potential applications [J]. *Ann Surg*, 2002, 235 (4): 487-492.
- 14 Anvari M. Remote telepresence surgery: the Canadian experience [J]. *Surg Endosc*, 2007, 21 (4): 537-541.
- 15 王军强, 赵春鹏, 胡磊, 等. 远程外科机器人辅助胫骨髓内钉内固定系统的初步应用 [J]. 中华骨科杂志, 2006, 26 (10): 682-686.
- 16 王军强, 苏永刚, 胡磊, 等. 医用机器人及计算机辅助导航手术系统在胫骨髓内钉手术中的设计与应用 [J]. 中华创伤骨科杂志, 2005, 7 (12): 1108-1113.
- 17 Nguan CY, Morady R, Wang C, et al. Robotic pyeloplasty using Internet protocol and satellite network-based telesurgery [J]. *Int J Med Robot Comput Assist Surg*, 2008, 4 (1): 10-14.
- 18 Andrews JG, Buzzi S, Choi W, et al. What will 5G be? [J]. *IEEE J Select Areas Commun*, 2014, 32 (6): 1065-1082.
- 19 尤肖虎, 潘志文, 高西奇, 等. 5G移动通信发展趋势与若干关键技术 [J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44 (5): 551-563.
- 20 王楠, 孟元光. 5G远程机器人手术的发展与应用现状 [J]. 机器人外科学杂志 (中英文), 2025, 6 (3): 503-507.
- 21 张旭, 李宏召, 王野. 远程外科面临的机遇与挑战 [J]. 中华外科杂志, 2024, 62 (1): 27-30.
- 22 Lacy AM, Bravo R, Otero-Piñeiro AM, et al. 5G-assisted telementored surgery [J]. *Br J Surg*, 2019, 106 (12): 1576-1579.
- 23 Tian W, Fan MX, Zeng C, et al. Telerobotic spinal surgery based on 5G network: the first 12 cases [J]. *Neurospine*, 2020, 17 (1): 114-120.
- 24 Zheng JL, Wang YH, Zhang J, et al. 5G ultra-remote robot-assisted laparoscopic surgery in China [J]. *Surg Endosc*, 2020, 34 (11): 5172-5180.
- 25 Li JM, Yang XC, Chu GD, et al. Application of improved robot-assisted laparoscopic telesurgery with 5G technology in urology [J]. *Eur Urol*, 2023, 83 (1): 41-44.
- 26 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, 23 (8): 610-615.
- 27 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.
- 28 田文, 姚京, 王冰, 等. 5G远程手术机器人辅助甲状腺癌根治术初步研究 [J]. 中国实用外科杂志, 2024, 44 (9): 1075-1077.
- 29 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.
- 30 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.
- 31 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.
- 32 何达, 张琦, 赵经纬, 等. 基于5G技术的机器人辅助远程胸腰椎内固定手术的应用效果 [J]. 中华骨科杂志, 2024, 44 (15): 995-1001.
- 33 黄韵翰, 吕海迪, 周逢海, 等. 基于5G通信技术的机器人辅助远程泌尿外科手术的临床应用研究 [J]. 中华泌尿外科杂志, 2025 (1): 49-54.
- 34 Nguan C, Miller B, Patel R, et al. Pre-clinical remote telesurgery trial of a da Vinci telesurgery prototype [J]. *Int J Med Robot*, 2008, 4 (4): 304-309.
- 35 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): 473-477.
- 36 Oki E, Ota M, Nakanoko T, et al. Telesurgery and telesurgical support using a double-surgeon cockpit system allowing manipulation from two locations [J]. *Surg Endosc*, 2023, 37 (8): 6071-6078.
- 37 Moschovas MC, Rogers T, Xu WH, et al. First impressions of Telesurgery robotic-assisted radical prostatectomy using the Edge medical robotic platform [J]. *Int Braz J Urol*, 2024, 50 (6): 754-763.
- 38 Fogel I, Balziano S, Tunik M, et al. Efficient evacuation - enhanced survival: Insights from Gaza conflict trauma care [J]. *J Trauma Acute Care Surg*, 2025, 98 (5): 798-805.
- 39 Hughes AM, Sonesh SC, Mason RE, et al. Trauma, teams, and telemedicine: evaluating telemedicine and teamwork in a mass casualty simulation [J]. *Mil Med*, 2021, 186 (7/8): e811-e818.
- 40 Koehlmoos TP, Kanagaratnam A, Korona-Bailey J, et al. Use of telemedicine for trauma care since the Russian invasion of Ukraine: A qualitative assessment [J]. *J Telemed Telecare*, 2024: 1357633X241288299.
- 41 McKnight G, O'Reilly D, Guthrie H, et al. Lessons from the use of telemedicine in the austere military environment and the implications for deployed surgical teams [J]. *BMJ Mil Health*, 2024, 170 (2): 146-149.
- 42 Sandhu A, Bartels O, Booker RJ, et al. Defence Medical Services telemedicine now: a successful pilot of video consultations and instant messaging support to firm base training [J]. *BMJ Mil Health*, 2023, 169 (e1): e68-e70.