

**编者按** 近年来,机器人手术系统在泌尿外科、妇科、胸外科、普外科、骨科等领域的应用日益深入,其  
在小儿外科、耳鼻喉科、口腔科、血管外科等领域也已积累了大量的临床经验。随着5G技术、虚拟现实技术  
(VR)、增强现实技术(AR)等高新技术的发展和运用,远程机器人手术也在持续开展并已取得阶段性进展。

然而,机器人手术自面世起就面临着诸多争议,如技术安全、责任认定、患者隐私泄露、医学伦理等问题;  
另一方面,机器人手术的治疗效果是否明显优于传统腹腔镜手术仍缺乏循证医学证据。与传统开放手术和腹腔镜  
手术相比,机器人手术的优缺点究竟如何?目前机器人手术在各学科的应用处于什么阶段?机器人手术的未  
来前景如何?这需要从事机器人手术临床工作的各位专家、同仁共同探讨和论证。

## 远程手术的发展历史及现状

田东旭,牛海涛

(青岛大学附属医院泌尿外科 山东 青岛 266000)

**摘要** 远程手术是一种新兴的手术模式,通过利用先进的手术机器人及网络技术,允许外科医生对距离较  
远的患者进行手术。远程手术系统不仅有利于改善目前高水平外科医生短缺的现状,而且还可以消除地理障碍,为  
患者带来及时、高质量的手术干预,减轻患者经济负担、减少并发症和远距离就医的苦恼。本文主要就国内外远程  
手术的发展历史及现状展开一系列介绍,并对远程手术的发展前景进行展望。

**关键词** 远程手术;手术机器人;组网方案

**中图分类号** R608 TN711.5 **文献标识码** A **文章编号** 2096-7721(2022)05-0343-08

收稿日期:2021-08-08 录用日期:2021-12-01

Received Date: 2021-08-08 Accepted Date: 2021-12-01

**基金项目:** 国家自然科学基金(81772713, 82071750); 青岛市人民生命科学技术项目(18-6-1-64-nsh); 山东省重大科技  
创新项目(2019JZZY021002); 山东省泰山学者项目(tsqn20161077)

**Foundation Item:** National Natural Science Foundation of China (81772713, 82071750); Qingdao People's Life Science  
and Technology Project (18-6-1-64-nsh); Major Scientific and Technological Innovation Project of Shandong Province  
(2019JZZY021002); Taishan Scholar Program of Shandong Province (tsqn20161077)

**通讯作者:** 牛海涛, Email: niuht0532@126.com

**Corresponding Author:** NIU Haitao, Email: niuht0532@126.com

**引用格式:** 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.

**Citation:** TIAN D X, NIU H T. History and current situation of telesurgery [J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2022, 3(5):  
343-350.

# History and current situation of telesurgery

TIAN Dongxu, NIU Haitao

(Department of Urology, the Affiliated Hospital of Qingdao University, Qingdao 266000, China)

**Abstract** As a new surgical system, telesurgery enables surgeons to perform surgeries on patients from long-distance by using advanced robotic surgical technology and network technology. Telesurgery could not only help to solve the problem of shortage of high-level surgeons, but also eliminate geographical obstacles with timely and high-quality of surgical intervention, reduce complications, relieve economic burden and distress of patients from long-distance. The history and current situation of telesurgery at home and abroad are reviewed in this paper, and future development of telesurgery is prospected.

**Key words** Telesurgery; Surgical robot; Networking scheme

远程手术是指医生与患者位于相距较远的地理位置, 医生借手术机器人、网络技术及虚拟现实技术等为患者开展手术的新兴医疗方式<sup>[1-2]</sup>。其中医生所在的操作中心被称为手术端, 患者所在手术室被称为患者端。远程手术的设计最早是为了在战争时期给后方医院创伤患者提供快速、高质量的手术治疗<sup>[3]</sup>。由于当时机器人技术和网络技术水平有限, 相关的研究进展缓慢。当前, 由于现代医疗资源分配不均衡及特殊地区的限制导致很多患者失去了最佳手术机会, 目前新冠疫情全球大范围流行也进一步阻碍了远距离就医, 这导致患者对远程手术的需求也不断增大。远程通信技术及手术机器人技术的发展使远程手术的设计逐步成为现实, 并已经使部分患者获益。

国外远程手术在 20 世纪 90 年代已步入正轨, 经过数年的摸索创新, 最终在 2001 年成功完成真正意义上的远程手术<sup>[4]</sup>, 并进入现代化远程手术探索阶段。国内远程手术虽研究较晚, 但发展迅速, 并迅速建立起适合中国国情的远程手术模式, 为后期 5G 远程手术积累了丰富的经验。如果说国外远程手术自 2001 年进入远程现代化, 那么, 5G 网络的诞生则可视为中国远程手术现代化的标志性创新。

## 1 国外远程手术发展历史

美国作为医疗水平相对发达的国家, 在远程医学领域研究较早, 在进入远程手术正式研究之前就已经进行了多家医院的远程会诊、远程视频医疗教育等基础研究。20 世纪 90 年代以来, 外科手术的远程医疗发展迅速, 并有大量研究结果被报道。第一个关于远程手术的实时远程会诊于 1992 年被报道, 其在手术过程中应用标准电话专线网络进行病理切片之间的传输并由远程病理学专家给予实时病理诊断, 但由于当时网络技术及医疗水平有限, 35 例病例中仅有 37% 的诊断帮助率<sup>[5]</sup>。同年, Satava R M 等<sup>[6]</sup>使用 SRI 远程操作系统直接控制机械针尖的运动来完成部分操作, 并基于此操作系统开发了目前著名的达芬奇机器人<sup>[7]</sup>, 这是远程手术机器人的开始, 也是远程手术从现场到远程操作的转折点。

有学者于 1994 年在美国马里兰州开展了泌尿外科远程手术指导<sup>[8]</sup>, 在手术室所在医院建立远程站点, 医生端与患者端相距约 1 609km, 手术中所有组件之间连接到手术室中信号源, 手术系统中添加一个开关用以控制

组织切割及止血，在这种初始远程手术设备下完成了 32 次简单手术操作，但远程手术发展中的关键问题并未得到解决，即两站点之间手术关键数据的传输问题。针对该关键问题，Kavoussi L R 及其团队在 1996 年尝试性进行了 7 例远程手术的基础操作<sup>[9]</sup>，应用区域网络线路，以 1.5Mb/s 的带宽在约 5.6km 以外的站点完成手术中切割、止血等操作，并进行了术中音频、视频、操作指令及必要数据的传输，这项研究中确定了远程手术的几个关键特征，即高质量的音频、视频传导。

在上述研究的经验下，Kavoussi L R 团队在 1998 年尝试进行跨洲距离的远程腹腔镜机器人指导手术<sup>[10]</sup>，分别指导位于约 8 047km、14 484km 及 17 703km 外的年轻医师完成了不同的泌尿外科手术，通过综合业务数字网络进行数据间的传输，网络延迟约为 1s，带宽约为 384kb/s。尽管这项研究中存在地理位置、网络技术有限等限制，但在远程手术指导下手术均顺利完成。随后，该团队应用相同网络技术，在位于 7 242km 以外的意大利进行了经皮肾穿刺操作<sup>[11]</sup>，应用一种专门研发的机器人系统，在平均 20min 内完成肾脏穿刺。

除泌尿系统手术外，普通外科的其他手术如疝修补术等因操作相对简单均成为远处手术中研究重点。1999 年，Cubano M A 团队<sup>[12]</sup>尝试将航空母舰战斗群与其他设施相连，计划完成 5 例远程腹腔镜疝修补术的指导手术。该研究在当时挑战性应用国际航空站的网络通信，虽然网络延迟并未达到理想结局，但显示出国外在不停发掘远程手术中组网方案的潜力，为以后的远程手术奠定了基础。

20 世纪 90 年代，在不断探索远程手术的基础上，国外部分国家已掌握了远程手术中的关键技术，由最初的远程简单操作到远程手术系统基

本成形，并开始不断尝试真正意义上的独立远程手术，且于 2001 年完成了第一个真正的远程外科手术，即著名的“Charles Lindbergh 手术”<sup>[4, 13]</sup>。接受手术的患者是一名在法国斯特拉斯堡的 68 岁女性胆囊结石患者，而外科大夫在距离 7 000km 以外的美国纽约进行手术。手术中应用了一种特殊的专线网络进行信号之间的传递，手术中数据传输稳定，操作信号及影像信号传输流畅，网络时延维持在较低水平。这是远程手术的一个里程碑，验证了远程手术技术的可行性。

## 2 国内远程手术发展历史

中国医疗资源分布不均，高水平外科大夫及先进医疗设备基本分布在大中城市，农村及偏远地区则明显落后，存在着明显地域性差别。大量需要手术的患者无法得到高质量、及时的手术治疗，因此远程手术在我国更有发展的必要性。尽管相比于欧美等发达国家，我国远程手术研究起步较晚，但发展速度惊人，并迅速探索出了适合我国国情的远程手术发展模式。

在 21 世纪初期，海军总医院利用远程手术机器人系统为脑肿瘤患者行立体定位活检手术<sup>[14]</sup>，完成了我国首次脑外科异地手术；北京积水潭医院应用主从式机器人手术系统进行远程骨科辅助手术操作<sup>[15]</sup>。尽管两项手术顺利完成，但研究中远程手术系统仅起到辅助定位、影像传输作用，无法实现手术医师灵活不间断的实时手术操作，手术中影像信号及手术信号的传输无严格要求，且对网络时延等必要条件无法严格把控。随后，我国也开始对远程手术中网络方案及机器人系统等关键因素进行发掘性研究，使远程手术能够安全、稳定地完成。2012 年 12 月，北京航空航天大学联合海军总医院成功完成我国首次远程海上手术<sup>[16]</sup>，手术通过卫星链接网络将位于北京的海军总医院远程

中心的医生端及位于太平洋海域的患者端建立通讯联系,应用 BH-7 机器人系统完成手术,然而,卫星通信信号网络延迟的不确定性和数据丢包率等问题成为该研究的最大问题,远远不能满足远程手术要求。

4G 网络通信的发展,推动了我国远程手术历史发展,其网络稳定性优于卫星通信。2015 年,国产“妙手 S”手术机器人借助 10Mb/s 带宽商用网络,完成了约 170km 的远程无线动物实验,实验中应用当时热门 4G 网络,平均手术延时在 250ms 左右,系统双向总延时最大为 302.6ms,丢包率约为 4%<sup>[17]</sup>。虽然整个实验较为成功,但 4G 网络的窄带宽及高时延仍限制了远程手术的临床应用及推广。4G 网络方案即目前 5G 无线网络的起源,双侧网关通过 4G 通信方式接入互联网。当多个用户发生业务关系时,信息流通过互联网到达对方设备。由于数据流要经过 4G 和公网两个瓶颈的制约,与其他用户数据流共享公网带宽,当 4G 信号较弱和公网资源不足时,实际可用带宽就会下降。因此,此种组网方式的带宽稳定性较差,会对双向视音频交互应用产生不利影响。该组网方式也仅仅是在该网络刚刚产生时用在动物实验中,随后即被其他组网方案迅速取代。

### 3 国外远程手术现状

自 2001 年完成真正意义上远程手术后,国外远程手术的研究进入现代化远程手术探索模式。虽然“Charles Lindbergh 手术”中报道信号传输稳定、网络延时较低,但前期准备工作中铺设的海底电缆专线耗资巨大,人力、物力花费过多,准备周期过长,因此国外现代化远程手术的重心主要在于网络方案及机器人的改良。

自 2003 年起,Anvari M 团队<sup>[18]</sup>于汉密尔顿在相距 400km 的教学医院及农村医院之间建立

了远程机器人手术系统,协助当地医院的外科医生完成腹腔镜手术。截至 2005 年,这项研究共计完成了 21 例远程手术,建立了世界首个为农村社区服务的远程机器人系统。该系统应用 IP-VPNe 网络(互联网协议-虚拟私人网络),将两家医院的 Zeus 机器人系统连接,21 例手术均以较低时延完成,患者术后恢复良好。但该研究主要是建立一种远程手术指导系统,探索远程手术中网络时延的优化,远程医生却不能独立地完成整个手术操作。

在 2007 年,Ngan C Y 等<sup>[19]</sup>对 18 例雌猪分别在实时手术、IP-VPNe 网络和卫星链接三种情况下进行了机器人辅助下腹腔镜下肾盂成形术,研究发现远程手术尽管存在网络延迟和波动,但与实时手术相比,进行远程肾盂成形术是可行的,而不会显著延长手术时间或影响手术结果。卫星链接网络利用人造地球卫星作为中继站来转发无线电波,进而实现医生及患者端之间的互联互通,具有覆盖范围广,地域限制小,组网方便迅速,便于实现全球无缝链接等众多优点。但其缺点在这项研究中也明显,即音视频、数据的传输会有约 600ms 的延时,这会严重影响手术流畅性。

前期大多数远程手术研究都试图寻找一种合适的网络布置,以保障远程手术低时延、高质量地进行,但却很少有研究明确具体多少时延可能会影响手术顺利进行。直至 2014 年,才有诸多关于时延数值对手术开展研究的报道。XU S 等<sup>[20]</sup>将 16 名医学生采用盲法随机分配至 0~1 000ms 的时延组中,采用机器人模拟系统进行解剖等练习,记录模拟手术中不同时延下手术难易程度、安全性、精确性等指标。最终研究结果显示,在 200ms 以下的时延为远程手术理想状态,但 300ms 以内不会影响手术顺利完成,

更高的网络时延则会影响手术的安全性、精确度，甚至无法进行操作。这项研究为远程手术中网络方案选择提供了参考，目前国内外诸多远程研究也多以此结论作为网络选择的标准。

自 2019 年起，国外诸多研究开始尝试将 5G 网络应用到远程手术中，并得到满意的结果。首先是 Lacy A M 团队<sup>[21]</sup>应用 5G 网络对患者端年轻医生进行远程手术指导，虽然在远程指导下手术顺利进行，但这并未完全开发出 5G 网络在该领域的潜力。在此研究基础上，Acemoglu A 等<sup>[22]</sup>报道了其团队应用 5G 网络对距离 15km 外的解剖实验室中一具尸体进行了机器人声带手术，最终手术以 140ms 的平均网络时延顺利完成，这项研究表明 5G 网络的低延时、高带宽特点是远程手术的关键技术，可作为未来远程手术的网络发展方向。

#### 4 国内远程手术现状

5G 网络商用化是我国远程手术进入现代化的标志，其低时延、高带宽、高移动性的特点能够满足远程手术实时性、高效性及稳定性的需求，从而推进了国内远程手术研究热潮。2018 年 12 月，中国人民解放军总医院应用国内自主研发的手术机器人在福州顺利完成 5G 远程手术动物实验<sup>[23]</sup>。医生端远程控制机械臂和镜头臂，切除部分猪肝脏，术中高清 3D 影像及声音传输实时、稳定，机械臂操作灵活，主从一致性良好，两端之间单程平均时延小于 150ms。2019 年 9 月，全军肝胆外科研究所完成全球首例多点协同 5G 远程多学科动物实验<sup>[24]</sup>，实验中网络时延稳定，手术操作流畅，术中动物生命体征平稳。此次多点协同远程机器人手术试验使得位于北京及苏州的两位医师通过远程操控机械臂对实验动物实施了胃肠切除和肝切除。该项实验打破了以往传统医患单点会诊及手术模式，为患者提

供多学科远程会诊及治疗选择，实现了远程手术中多学科合作诊治的重大创新。

现阶段我国远程手术的发展不仅仅应用在动物实验模型中，同时也实现了医生为患者远程实时不间断手术的改革。2019 年 3 月，中国人民解放军总医院完成了世界首例 5G 远程人体手术<sup>[25]</sup>，位于三亚的 1 名医生通过远程控制机器人对北京患者进行了远程帕金森“脑起搏器”植入手术，这是我国 5G 远程手术走向世界的重要一步，对国内远程手术发展具有重要指导意义。同年，北京积水潭医院通过 5G 网络系统对 12 例患者施行机器人辅助胸腰椎椎弓根螺钉置入，同时该研究还同时对山东、江苏患者实现“一对多”同时治疗，证实了中国境内 5G 网络在远程手术中的可行性及发展潜力<sup>[26]</sup>。

国内远程手术进入 5G 模式后发展迅速，并由单中心、少样本的探索模式向多中心、大样本的临床研究模式转型。2020 年 9 月，青岛大学附属医院牛海涛团队在动物实验中应用 5G 无线网络进行了 4 次超远程腹腔镜手术<sup>[27]</sup>，包括机器人辅助下腹腔镜左肾切除术、部分肝切除术、胆囊切除术和膀胱切除术。结果初步证明，即使在超远程距离下，借助 5G 无线网络的支持，远程手术可以安全、顺畅地进行。在此基础上，该团队在山东省内多家医院为患者实施远程肾脏、肾上腺切除手术超过 50 例，并在逐渐扩大远程手术范围，5G 网络低时延、高带宽的优点为远程手术提供了通信保障。

目前已有多种网络技术被应用到网络线路中来维持手术的稳定性，其中多链路聚合传输技术是目前远程手术中较为成熟且广泛使用的网络技术<sup>[28]</sup>。多链路聚合技术保证了远程手术的数据传输能力，即高宽带特征。在传统的链路层之上增添了一个虚拟层，该虚拟层实现了对数据帧的分发，这些数据帧通过轮转算法被

分发到各条链路中,实现了将多条物理链路的传输带宽进行聚合,从而实现在同一个终端上带宽叠加的高速传送效果。应用程序和物理设备能按照原来的方式继续工作。多链路传输和单链路传输可以并存,可以按照应用的实际需求选择多链路传输或者是单链路传输,具有较强的灵活性。作为组网方案的辅助技术,其为远程手术的未来发展提供了保障,特别是在5G网络普及之后拥有很大发展潜力。

## 5 远程手术发展方向

根据目前国内远程手术发展现状及术中存在的问题来看,未来远程机器人手术的发展主要包含三个方面:①创新网络传输技术,保障远程手术稳定性、安全性。远程手术信号传输系统由最初阶段的区域网络线路、IP-VPN及卫星链接网络等发展至现阶段专线网络、无线5G网络,大幅度改善了传统远程手术中的高成本、高时延、稳定性差等缺点。现阶段5G通信技术具有高带宽、低时延等优点,满足了远程手术的基本需要,促进了远程手术的发展,这充分说明了网络传输技术在远程手术中的重要性。而未来组网方案的不断创新也是远程手术推广中的重要方向之一。②手术机器人系统优化。手术机器人系统需要精确的运动控制系统和力反馈技术。当外科医师在实施远程手术时,手术机器人系统将外科医师在控制台上的运动精确地转换为机械臂的相应运动,从而模仿外科医师的自然手部运动进行操作。通过机械臂的反馈信息,外科医师可随时调整自己的手部操作,从而精确地完成手术。但是机械臂的力反馈并不能像传统手术中那样精确,还可能造成误差,因此更为先进的触觉反馈技术、触觉机器人及人工智能技术可有效改善机器人手臂的力反馈,提高远程手术的精确度。③机

器人自主手术能力研发。在战场、灾难现场等危险手术环境中,往往存在医护人员牺牲情况,而一名合格外科医师的培养需要耗费巨大的人力和时间成本,机器人自主手术能力的研发可保障危险环境中医护人员安全。除了军事环境及灾害场所,深海和航空航天环境下的医疗资源有限且环境不稳定,不适合医务人员进行手术操作。但具有独立手术能力的远程机器人则可在紧急情况下克服一定程度的环境波动进行手术操作。

## 6 远程手术发展的局限性

尽管网络技术的发展使得手术延迟大大降低,远程实时手术突破了最重要的数据实时传输问题,但在技术领域之外仍存在诸多实际问题限制着国内远程手术的推广。

首先,对于远程手术设备的监管及手术医师的执照问题存在明确的规章制度,不同国家针对该技术的法规并不相同,而要建立一个具体可行的行业标准需要大量的人力和时间成本。

其次,网络安全性及信息保密性是远程手术推广必不可少的重要环节。网络攻击可引起严重的触觉反馈修改、手术时间延长,甚至使手术机器人完全失去控制,从而导致患者受到伤害。尽管目前远程机器人系统在端到端加密及身份验证技术保障下尚未发生严重的网络攻击,但仍需开展更多安全措施以保证手术安全及信息保密。

成本问题也是远程机器人和远程手术应用及推广的重大障碍。目前国外使用的专线网络技术多采用电信光纤进行,虽然在多个国家都有此类光纤,但大多数医院都未配备该光纤。据估计,仅网络线路开发成本就高达150 000美元,而购置远程机器人手术系统则是一笔更加昂贵

的开支，这严重限制了其在贫困地区医院的推广，后续的线路检修、机器维修等各种费用的支出也需要费用分配及报销制度的完善。

最后，伦理、责任问题在国内远程手术推广之前也需明确。如果出现并发症，如何建立现场应急抢救小组，如何明确职责并分配给远程指导员、远程外科医生及系统维护人员；在面对国际患者时，如何处理国际患者及外科医生关系；患者及家属是否要被告知网络安全存在的隐患并自愿承担风险等。目前远程手术机器人在国内仍处于初步发展阶段，其技术发展和面临的相关问题尚需不断探索。相信随着机器人手术技术的完善及网络信息的发展，远程机器人手术时代将会到来，同时促使该技术广泛应用于临床并造福人类。

## 7 展望

随着机器人技术的不断创新及网络方案的优化，以及患者对远程手术的需求增加，尤其是在新冠疫情封锁隔离现状下，远程手术已由科幻传说进入现实生活中。尽管现阶段远程手术仍局限于设备齐全、安全稳定的手术环境中进行，但海上环境、战场环境、太空环境等复杂情况下的研究也在进行中，对网络及机器人手术系统等也提出了新的挑战。相信在不久的将来，随着 5G 网络普及化，广大患者可以选择远程手术进行就诊治疗，不仅是普通地区患者，在偏远贫穷地区及疫情封锁地区的患者也可以跨越地域限制，选择自己信任的医生进行手术治疗，提高手术满意率。

远程机器人手术技术作为 21 世纪新兴的突破性技术，凭借先进的实时传输技术和机器人手术系统被诸多国家列为重大研究项目。且人工智能作为我国战略发展计划，具有巨大发展潜力，而自主手术能力的开发作为手术机器人

发展方向之一，受到广大研究者的重视。手术机器人替代外科大夫进入众多危险环境独立完成远程救治工作，在国防军事、重大灾害、未来战场及航空航天等领域发挥了重大作用。相信随着远程手术量的不断增多，远程手术经验及数据得到丰富后，能够自主完成远程手术的机器人系统将得到进一步发展。

影像传输及视野呈现作为远程手术中关键环节之一，也在不断创新和应用。在保障清晰度的前提下，影像传输的数据处理速度也决定着远程手术中时延大小及手术顺利程度。远程手术中数据转换离不开临场感系统，该系统当前发展方向是将术中图像与患者的 3D 模型结合，并与虚拟/增强现实成像相结合，从而实现远程 3D 视野下的手术，为术者提供各角度的高清视野。

目前远程手术推广存在诸多困难，如在国家层面缺少对远程手术相应法律及法规以保障医患双方权益，传统就诊方式观念根深蒂固而使患者难以接受新型诊疗模式，远程手术费用目前尚无统一定价等。但相信随着远程手术体系不断成熟，人们对远程手术的认识及接受度增加，国家对远程手术体制不断完善。在不久的将来，远程手术可以极大地提升治疗满意率并使广大患者获益。

## 参考文献

- [1] Larkin M. Transatlantic, robot-assisted telesurgery deemed a success[J]. *Lancet*, 2001, 358(9287): 1074.
- [2] Choi P J, Oskouian R J, Tubbs R S. Telesurgery: past, present, and future[J]. *Cureus*, 2018, 10(5): e2716.
- [3] George E I, Brand T C, LaPorta A, et al. Origins of robotic surgery: from skepticism to standard of care[J]. *JSLs*, 2018. DOI: 10.4293/JSLs.2018.00039.
- [4] Marescaux J, Leroy J, Gagner M, et al. Transatlantic robot-assisted telesurgery[J]. *Nature*, 2001, 413(6854): 379-380.

- [5] Bernard Vallancien G M. Telesurgery[J]. Arch Esp Urol, 1992, 45(7): 603-606.
- [6] Satava R M. Virtual reality and telepresence for military medicine[J]. Ann Acad Med Singap, 1997, 26(1): 118-120.
- [7] Lanfranco A R, Castellanos A E, Desai J P, et al. Robotic surgery: a current perspective[J]. Ann Surg, 2004, 239(1): 14-21.
- [8] Moore R G, Adams J B, Partin A W, et al. Telementoring of laparoscopic procedures: initial clinical experience[J]. Surg Endosc, 1996, 10(2): 107-110.
- [9] Schulam P G, Docimo S G, Kavoussi L R, et al. Telesurgical mentoring. Initial clinical experience[J]. Surg Endosc, 1997, 11(10): 1001-1005.
- [10] Lee B R, Bishoff J T, Kavoussi L R, et al. A novel method of surgical instruction: international telementoring[J]. World J Urol, 1998, 16(6): 367-370.
- [11] Cadeddu J A, Stoianovici D, Chen R N, et al. Stereotactic mechanical percutaneous renal access[J]. J Endourol, 1998, 12(2): 121-125.
- [12] Cubano M A, Luther J H, Antosek L E. First laparoscopic hernia repair onboard an aircraft carrier at sea[J]. Mil Med, 1997, 162(3): 219-220.
- [13] Clayman R V. Transatlantic robot-assisted telesurgery[J]. J Urol, 2002, 168(2): 873-874.
- [14] 唐黎, 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): 543-547, 552.
- [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] 赵全军, 钱阳明, 田增民, 等. 长航中不同海况下脑外科手术定位机器人系统的精度测试 [J]. 中华航海医学与高气压医学杂志, 2012, 19(6): 379-381.
- [17] 王树新, 刘玉亮, 李进华, 等. 腹腔微创手术机器人远程控制平台开发及实验 [J]. 天津大学学报 ( 自然科学与工程技术版 ), 2015, 48(12): 1041-1049.
- [18] Anvari M. Telesurgery: remote knowledge translation in clinical surgery[J]. World J Surg, 2007, 31(8): 1545-1550.
- [19] 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): 10-14.
- [20] 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.
- [21] Lacy A M, Bravo R, Otero-Piñeiro A M, et al. 5G-assisted telementored surgery[J]. Br J Surg, 2019, 106(12): 1576-1579.
- [22] 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.
- [23] 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): 45-48.
- [24] 世界首例多点协同 5G 远程多学科机器人手术试验成功 [J]. 信息系统工程, 2019, (9): 2.
- [25] 我国成功完成世界首例 5G 远程操控颅脑手术 [J]. 微创医学, 2019, 14(4): 402.
- [26] 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.
- [27] ZHENG J, WANG Y, ZHANG J, et al. 5G ultra-remote robot-assisted laparoscopic surgery in China[J]. Surg Endosc, 2020, 34(11): 5172-5180.
- [28] XIONG W J, YU X H, LIU C, et al. Simplifying complex network stability analysis via hierarchical node aggregation and optimal periodic control[J]. IEEE Trans Neural Netw Learn Syst, 2021, 32(7): 3098-3107.

欢迎投稿      欢迎订阅      欢迎指导