

# 国产手术机器人的 超能力 和 进阶路

人工智能是引领新一轮科技革命和产业变革的重要驱动力,推动人类社会迎来人机协同、跨界融合、共创分享的智能时代。在医工交叉领域,手术机器人的探索与实践,正不断拓展医疗边界,深刻改变着医疗服务模式和未来走向,为守护人类健康注入新动能。

本报记者 林晓晖  
通讯员 李文芳 杨陶玉

一台手术机器人辅助的手术正在进行。手术室内,主刀医生不再俯身于手术台前,而是凝视着高清显示器,指尖在控制台上轻盈移动。同步画面中,远端的机械臂如影随形,精准完成游离、牵引、钳夹、离断等每一个动作。这样的场景,正成为现代外科的日常标配。

二十世纪末,手术机器人问世并正式应用于临床,人类正式开启了用机械延伸双手极限的时代。从早期的单一辅助工具,到如今能突破真人生理局限的“超级助手”,手术机器人已分化出眼科、腔镜、骨科等多个细分类型。大名鼎鼎的“达芬奇”便是综合性手术机器人的代表。

手术机器人是医用机器人的重要分支之一。今年,国家药监局对外公布《关于发布优化全生命周期监管支持高端医疗器械创新发展有关举措的公告》,提出十方面具体措施,以全力支持医用机器人等高端医疗器械创新。

近年来,国产的手术机器人迎头赶上,在操作精度、远程协同等领域取得突破性进展:浙江医疗团队完成亚洲首例眼科机器人手术,在全球率先实施跨越万里的5G超远程肝胆手术,发展超越了器械本身的革新,外科手术的生态与边界正在重塑。

## 超越 精度突破极限

一台手术机器人的“身体构造”并不复杂,灵活的机械臂是它的“双手”,集成高清影像的操作台是它的“眼睛”,实时反馈的传感系统则是它的“神经”。

这个庞大机器的核心,是将外科医生的操作转化为精密数字指令的“神经系统”。这一关键的转化是如何实现的?浙江大学医学院附属邵逸夫医院普外科梁霄教授告诉记者:操作手柄与机械臂之间通过高精度传感器相连,医生的每个指令都能精准传递,同时机械臂的状态也实时反馈给医生,实现身临其境的操作体验。浙大邵逸夫医院是全国最早引进手术机器人的医院之一。在这里,梁霄团队已完成超过1000例手术机器人辅助手术。

以肝胆胰手术为例,在肝脏这样脉管密布的组织结构中,机械臂的540度旋转能力特别关键。梁霄指着机械臂末端的器械解释道,当医生在控制台移动操作杆时,传感器会捕捉手部动作,经计算机处理后驱动机械臂复现,误差控制在亚毫米级别。更关键的是震颤过滤系统,它能像稳定器般消除人手无法避免的生理性抖动,实现超越人类极限的操作精度。

正是这种突破性的精度,让外科医生得以挑战曾经的手术“禁区”。

浙江省人民医院眼科沈丽君教授同样对此感受深刻。2007年,她的团队开始关注视网膜血管阻塞的治疗难题。理论上,通过血管内搭桥即可解决问题,但实际操作举步维艰。眼球是一个极为精密的结构,人工试管外径仅46微米,而人手生理震颤幅度达108微米,而血管直径一般为100~200微米。

这相当于用晃动的笔给绣花针穿线。沈丽君告诉记者,团队前前后后进行的88次活体猪眼实验中,仅有5次勉强成功,且不排除伴随组织损伤。

机器有着更稳定的操作性能,若能过滤人手震颤,或能解决这个问题。这也成为他们研发眼科手术机器人的起点。

2013年,国内首台具有自主知识产权的玻璃体视网膜手术辅助机器人系统样机诞生。这台具备6个自由度(记者注:即物体在空间,沿x、y、z三个直角坐标轴方向的移动自由度和绕这三个坐标轴的转动自由度)的精密设备,运动精度达到惊人的3微米。

但让手术机器人从实验室走进手术室还是困难的。毕竟,仿真环境再逼真,也无法完全复制活体组织的复杂性。呼吸起伏、血液流动、组织弹性,每一个细节差别,都可能导致算法失效。

为此,沈丽君和团队创新设计了三重反馈系统:视觉反馈、光学反馈和力学反馈。视觉反馈提供清晰的手术视野,光学反馈通过OCT(光学相干断层扫描)实时显示穿刺深度。最关键的是力学反馈——在直径仅0.3毫米的柔性探针上集成的微型压力传感器。这些小家伙能实时感知血管壁的接触力,沈丽君指着细如发丝的探针说,把接触力控制在5mN(毫牛)以下,相当于感知花瓣落在皮肤的重量,有效避免组织损伤。

这套系统在眼球感光底片视网膜上最重要的黄斑区大显身手。黄斑区是视网膜的“黄金区域”,厚度仅250微米左右,传统手术中操作稍一失手就可能导致永久性失明,一直是穿刺手术的“禁区”。操作者穿刺薄如蝉翼的组织时,既要



浙江省人民医院沈丽君教授正在操作眼科机器人进行手术。

器械准确抵达目标层,又要确保不向深层组织穿透。医生在手术时,为克服生理性颤抖,把握最佳的穿刺位置,必须在短时间内做出决策。但这个几十秒的时间,精准度很多时候靠感觉,有时候生理极限到了,不得不切下那没思考好的一刀。作为团队核心成员,省人民医院眼科主任医师陈亦棋深有感触。2023年,陈亦棋运用这台眼科手术机器人成功完成了一例治疗眼底黄斑出血的视网膜下溶栓手术。这也是亚洲首例眼科机器人手术。

手术中,机器人系统将医生手部动作震颤缩小至十分之一,震颤过滤精度达10微米。直径仅100微米的注射针以不超过5微米的误差,精准穿透黄斑区,将20微克溶栓药物送达病灶。

整个过程仅耗时几分钟,术中病灶区的积血已见溶解。术后1个月,患者的视力从视物模糊奇迹般回归0.5。

没有手术机器人辅助的时候,这一类疾病的患者几乎无法通过外科手术获得精准治疗。风险太大,很少有医生敢做这类尝试。沈丽君说。

这样的突破正在各个外科领域上演。眼科、肝胆外科、神经外科、骨科,手术机器人不仅延伸了医生的双手,更拓展了医学的边界。那些曾经因风险过高而被放弃的手术禁区,正被一个个重新打开。

很多依赖“手感”和“经验”的外科操作,正被量化为可复制的数字标准。这不仅是工具的革新,更是一场外科范式革命。梁霄说。

## 协作 从工具到搭档

手术机器人究竟扮演什么样的角色?

一开始,就是辅助医生的操作工具。梁霄说。手术中,医生经常需要“第三只手”来辅助暴露术野、传递器械。传统上,这得靠助手配合,可人与人之间的配合总有延迟和误差。手术机器人的出现,正是为了补上这个缺口,提供稳定、精确、即时的辅助。

但这个辅助角色,一开始可没那么“称职”。

梁霄回忆,初期的国产手术机器人在迭代路上遇到不少难题。第一代操控性差、不灵活,偶尔还卡顿。梁霄解释,那时的机械臂转动角度受限,做缝合时器械常跟后方关节缠在一起,就像两根筷子打架,有时得停下来重新调整。第二代虽然灵活有了改善,可还是有点延

迟,总影响操作流畅感,精细分离血管时,这一瞬间的滞后都可能伤着血管。

要让机器人更好用,关键就在“控制”二字。

每台手术结束,医生们都会把遇到的问题记下来:缝线时器械怎么绕,机械臂转得顺不顺。这些从手术台得来的“实战经验”,成了技术升级的精准指南。

依托微创器械创新及应用国家工程研究中心,浙大邵逸夫医院参与了不少款国产手术机器人系统的研发过程。全国有近百名各个专科的外科医生参与到超远程5G手术机器人研发前期的多中心动物实验。梁霄和团队成员也曾多次参与肝胆胰手术的动物实验。

小到控制台座椅高矮,大到手柄和机械臂的配合手感,医生提的意见最实在。上海微创医疗机器人(集团)市场部负责人崔鹏九说。最开始,部分有过机器人操作经验的医生会感受到延时稍大,这一定程度上影响操作效率和精度。团队对此不断优化,目前最新版本已经实现了图像不超过40毫秒、主从控制不超过70毫秒的延时,操作者已经基本感受不到延时。

靠着这些医工交叉的细节打磨,手术机器人和医生的配合也越来越默契,更贴合中国医生的手术习惯与操作节奏。

现在,机器人的角色早就不仅是“遥控工具”了。早期,医生做什么它复刻什么,现在,AI辅助系统能通过影像识别预判需求。梁霄举例,肝癌切除时,医生分离病灶,AI会实时标记附近血管:距离门静脉0.5厘米,缝合时,辅助机械臂自动调角度照亮术野,主机机械臂还能按组织厚度调力。这相当于智能化地实现了“心有灵犀”的协作。

在智能助手的加持下,基层医院的年轻医生也能在辅助下完成高难度手术,优质医疗技术正沿着这条“人机协作”的路径不断下沉。

今年,国产图迈腔镜手术机器人远程手术全科室应用获国家药品监督管理局的注册批准,成为全球首个获批可应用于全科室远程手术的腔镜手术机器人。

远程手术机器人对精度和信号要求更高,不仅要求医疗团队具备高超技术并默契配合,还对手术机器人远程通信的稳定性等提出了巨大挑战。一般而言,手术机器人术中信号延迟不能超过300毫秒,相当于不

能超过人类眨眼的时间,更不能中断。

不久前,远在法国的梁霄通过这款远程手术机器人,为在杭州的病人完成了跨越洲际的远程肝癌治疗手术,突破了空间与技术的双重限制,创下远程机器人外科的新纪录。

这项技术的真正价值,正在于它能将优质医疗资源真正“下沉”,直抵基层。浙大邵逸夫医院和江山市人民医院开展的远程手术合作也在稳步推进。通过手术机器人系统,省级专家无需亲赴地方,在杭州直接操作机械臂,与江山本地医疗团队协同完成高难度手术。今年4月,微创手术机器人落地江山以来,已经辅助开展了5例远程肝胆胰手术。这种上下联动的全新模式,提高了基层医院应对复杂手术的能力,也深刻改变了优质医疗资源的分布格局。

从最初的辅助工具,到智能助手,再到连接优质资源的医疗平台,手术机器人在与人的协作中不断进化。

## 潜力 向 智慧 进发

近日,国际权威学术期刊《科学》上发布了一期机器人完全自主完成腹腔镜胆囊切除术的案例。这一成果意味着,具身智能在外科领域有了全新的发展可能。在未来,一些标准化的简单手术,机器人有望独立完成。

这也是手术机器人的下一站——构建自主化的“手术智慧”。

其中,导航技术的突破是关键一步。沈丽君正在带领团队训练血管路径规划系统。这一系统的作用,类似于为手术机器人配备精准的地图。

就是让机器“看”懂血管图片,对视网膜或大脑血管了如指掌后,自己画三维路线图。沈丽君进一步解释,现在是人手指挥,以后机器人能自己推算搭桥或穿刺路线,再结合AI路径规划算法,机器人能自动寻找并贴合血管行走,完成精准的微米级血管穿刺手术。

配备AI导航穿刺技术的手术机器人,在临床应用方面有极大的潜力。

沈丽君告诉记者,比如眼球内的视网膜动脉阻塞、静脉阻塞这些常见病,还有美容整形误打入眼球内血管的意外,都能用它精准处理。肿瘤治疗也能更精准,直接把药打到病灶的血管分布区,比全身给药效果好,副作用还小。

肝胆胰外科同样期待更精密的导航系统。梁霄说,进口手术机器人已实现超声系统定位,还有能让肿瘤清晰显影的荧光功能,希望国产产品也能尽快实现,让手术视野更清晰,精准避开关键结构,降低操作风险。

作为核心部件的机械臂,同样也有很大升级空间。

浙江大学医学院附属邵逸夫医院院长蔡秀军指出,现有手术机器人还缺乏精确的触觉反馈,影响医生对组织的感知,可能导致用力控制不准,引发并发症;同时,不同厂商技术标准不统一,影响设备兼容性和数据共享。近期,相关研发团队通过跨学科协同攻关,创新性研发出基于力学结构域阵列与深度学习算法的力学感知系统,有望让外科操作彻底迈向“可量化”和“可感知”。

在形态上,手术机器人则朝着“小型化”进化。

梁霄构想着手术机器人的“便携化革命”。未来,手术机器人控制终端可能像笔记本电脑一样轻巧,医生带着它,在家里、在外地,随时随地能连接云端机器人做手术。主刀医生的活动空间,再也不受手术室的局限。手术机器人已经站在了新起点,器械的精度、人机协作的默契,与不断生长的智能、智慧,正一点点拓宽医疗的边界。

### 专家观点

## 对手术机器人怀抱新愿景和新期待

蔡秀军

机器人外科应用极大推动了外科的发展,使外科手术操作更精准、更微创,同时也延长了外科医生的职业生涯,使远程外科成为可能。但机器人外科也存在着一些问题急需解决:

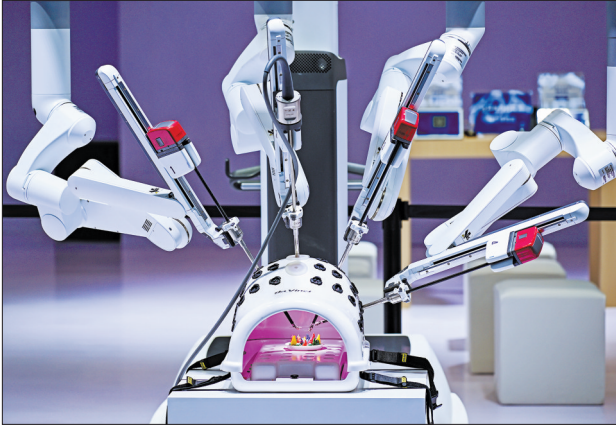
一、机器人成本高,耗材价格昂贵,因此无法得到大范围推广应用。而且大部分应用在性价比高的手术:冠脉搭桥、前列腺癌根治、胰十二指肠切除等,一般的医疗机构没有能力购买这种昂贵设备,因此也就无法享受机器人手术带来的好处。建议以区域为单位,建立手术机器人共享中心,让多家医疗机构共享。

二、现有手术机器人缺乏精确的触觉反馈,影响医生对组织的感知。机器人手术造成外科医生力感知丧失,在操作过程中无法控制用力大小,可能会带来严重并发症。急需研发落地先进的触觉传感器和反馈系统,提升机器人的感知能力,帮助医生更精准操作。

三、机器人进行远程外科手术,常常受制于网络传输速度,若延时长,影响手术效果。此外,由于不同厂商的手术机器人技术标准不统一,影响设备兼容性和数据共享。建议制定明确的法律法规和伦理准则,确保责任清晰,并加强数据安全保护。

在医疗健康领域,机器人远程手术等新技术新产品正加速应用。微创技术质控中心和机器人外科专委会相继成立,为推动机器人外科规范化发展、质量安全管理提供了专业保障。通过国家政策的大力支持、行业规范的逐步完善及各地医疗机构的积极实践,我相信,作为当前医疗行业新质生产力的典范,国产手术机器人将迎来快速发展的全新时代。

(作者系浙江大学医学院附属邵逸夫医院院长)



2025中国医学装备展览会拍摄的手术机器人演示现场。

新华社发

### 链接

## 部分国产手术机器人一览

图迈四臂腔镜手术机器人

图迈是国内首款获批上市的四臂腔镜手术机器人,可覆盖泌尿外科、普外科、胸外科等多科室手术。其核心技术包括力感知反馈系统、5G远程手术平台及多模态影像融合导航,已完成全球首例5G超远程泌尿外科手术和低轨道卫星远程肝胆手术。截至2024年,在2000余例的人体临床手术中,图迈机器人完成4级高难度手术超过1600例,适用术式接近300种,完成近50项“国产首例”。今年,图迈获FDA(美国食品药品监督管理局)批准成为全球首个全科室远程手术机器人。

迪视微锋 眼科手术机器人

迪视微锋是国内首个进入多中心注册临床试验阶段的眼科手术机器人产品,由杭州迪视医疗生物科技有限公司自主研发,浙江省人民医院是此次多中心临床注册试验的牵头组长单位。机器人系统采用主从控制方式,实现在眼球狭小封闭空间内进行精细灵巧的显微操作,结合自主研发的柔性微结构和高精度控制算法,实现了高达3微米运动精度,成为目前全球精度最高的显微手术机器人之一。2023年7月,在浙江省人民医院,医生使用该机器人成果完成了亚洲首例眼底黄斑出血的视网膜下溶栓手术。截至今年2月,浙江省人民医院眼科中心团队已陆续完成十余例机器人辅助下的眼底视网膜手术和对比随访,有效验证了其安全性和有效性。未来,该机器人还能够辅助医生进行更多的高精度眼科手术,包括白内障和青光眼等手术,也为眼科基因药物和干细胞等全新眼科治疗方案提供安全高效的给药途径。

天玑骨科手术机器人

天玑是国内首款获得国家药品监督管理局认证的骨科手术机器人,覆盖脊柱、创伤、关节三大骨科领域。天玑骨科手术机器人能够辅助开展脊柱外科手术以及创伤骨科手术,以机械臂辅助完成这些手术中的手术器械或植入物的定位。产品兼容二维与三维模式,独有入钉点及钉道计算智能算法,机械臂精准运动到规划位置,借助骨科引导器,为医生提供精准稳定的导针置入路径。最新数据显示,天玑骨科手术机器人已累计完成超11万例手术,覆盖全国200余家医院。

睿米神经外科手术机器人

睿米是国内首款获批的神经外科手术机器人,以第二代产品RM-200为例,其手术规划系统可自动融合多影像构建三维模型,辅助判断路径安全性并提供多样术式,光学跟踪定位仪能全场覆盖,快速注册配准,还可动态跟踪、实时导航,大臂展机械臂具备全自由度,臂展超1000毫米,精度达0.5毫米内,能够智能感知力并适配多种微创器械,并精准完成DBS(脑深部电刺激)、脑出血引流等手术。

(本报记者 林晓晖 整理)