

手术机器人推动神经外科进入新时代

张剑宁, 刘嘉霖

中国人民解放军总医院 神经外科医学部(北京 100853)

【摘要】 手术机器人在神经外科的应用形成了一个发展迅速且引人入胜的新领域,它正在改变神经外科的手术方式。本文就未来神经外科手术机器人发展做一述评。我们发现,当前在神经外科领域应用手术机器人最广泛的仍然是立体定向手术。手术机器人的应用较以往大大提高了穿刺精度,但其无法在其他类型神经外科手术应用。随着影像技术、机械技术、计算机控制技术、人工智能等领域高度融合发展,手术机器人作为神经外科手术辅助手段必然会紧随时代的需要迎来井喷式发展,逐步向神经外科各个领域发展,使手术更安全、更高效。

【关键词】 手术机器人 神经外科 远程控制 人工智能

Robotics Helps Usher in a New Era of Neurosurgery ZHANG Jian-ning, LIU Jia-lin. Department of Neurosurgery, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China

【Abstract】 The application of surgical robots in neurosurgery has formed a rapidly developing and fascinating new field that is revolutionizing the way neurosurgeries are performed. Herein, we discussed the prospects of the future development of neurosurgery robots. We found that, at present, surgical robots are most widely used in stereotactic surgeries in the field of neurosurgery. The use of surgical robots has greatly improved puncturing precision, but it cannot be used in other types of neurosurgeries. With the highly integrated development of imaging technology, mechanical technology, computer control technology, and artificial intelligence, surgical robotics will inevitably witness a surge of rapid development in line with the trend of contemporary needs. Surgical robotics will be applied to more fields of neurosurgery in the future, enhancing surgical safety and efficiency.

【Key words】 Surgical robotics Neurosurgery Remote control Artificial intelligence

虽然机器人辅助手术最早在神经外科领域实现,但神经外科涉及的精细解剖结构和手术操作空间有限,一度限制了机器人手术在该领域的发展,使神经外科手术机器人及相关技术和产业的发展陷入瓶颈期。相反,应用于胸腹部、四肢骨关节的手术机器人取得突破性进展,并领先于神经外科手术领域。随着计算能力的指数级提升、连接性的改善、人工智能的运用以及访问目标结构的精细度提高,未来机器人将会应用于神经外科更多的领域。本文将介绍神经外科手术机器人发展历史、神经外科手术机器人分类,阐述神经外科手术机器人的相关应用,指出神经外科机器人手术的优势和局限性,最后对神经外科手术机器人的应用进行展望,以期让读者对神经外科手术机器人的现状和发展有进一步的理解。

1 神经外科手术机器人发展历史

自1985年起诸多神经外科医师联合医学工程师将手术机器人辅助神经外科手术这一想法应用于实践,KWOH等^[1]首次使用PUMA 200完成了脑部病变活检手

术。至此,神经外科步入机器人手术时代。在该系统中,术者根据术前CT影像资料将病变位置转化为具体坐标,结合机器人定位技术对坐标位点进行精准穿刺。PUMA 200代表了神经外科手术机器人的经典模式,即机器人系统与立体定向手术框架相结合,并主要用于辅助术者完成病灶活检、抽吸血肿等操作。

此后一系列成熟产品应用于临床工作,如NeuroMate^[2]、ROSA^[3]、iSYS1^[4]等机器人主要用于颅内病变活检、血肿穿刺、囊液抽吸以及脑室造瘘等手术。其中,NeuroMate是最早获得FDA批准和CE认证的神经外科手术机器人系统,于1989年诞生于法国Grenoble,是具有5个自由度的集成式立体定向机器人系统。与基于框架的立体定向系统相比,该系统可在无框架模式下运行,并且适用范围更广,被批准用于活检、脑深部刺激、立体定向脑电图和经颅磁刺激等操作。

随着网络信息技术的进步,计算机图形学基础上的高速网络和虚拟现实系统为远程人机通信提供了技术保障,使得远程遥控手术机器人成为可能。NeuroArm^[5]的

出现, 揭开了远程控制手术机器人的新篇章。NeuroArm是专为神经外科设计的影像导航一体化手术系统, 整套系统对MRI成像无干扰, 操作机械臂具有多个关节并可完成多维动作。其内置的压力感受器能够给术者提供实时触觉反馈并可过滤术者轻微抖动, 大大加强了机械臂前端所连接器械的稳定性。该套设备可遥控完成神经外科基本手术操作如切开、烧灼、冲洗、吸引以及缝合等。Robot hand^[6]、Endonasal Robot^[7]等机器人设计为主-从式操控模式, 以加强手部稳定, 使手术过程既保留了术者的正常操作, 又保证了机器人的精准性, 在一定程度上提高了机器人手术的安全性。表1总结了已应用于临床的神经外科手术机器人。

2 神经外科手术机器人分类

根据术者与机器人的交互程度, 神经外科手术机器人大致可分为以下三类: ①自主控制型机器人, 该类机器人在医生监控下进行相应的操作, 例如PUMA和ROSA机器人均属于此类。该类机器人主要用于辅助医生完成精细的神经外科操作, 主要用于脑深部电刺激(deep brain stimulation, DBS)、脑组织穿刺活检术和血肿抽吸等手术。②主从控制型机器人, 该类机器人由医生完全控制, NeuroArm机器人属于此类。该类机器人是远程手术的核心组件, 术者通过操作端遥控执行端(机器人端), 可实

现较为复杂的显微外科操作。③共享控制型机器人, 该类机器人的操作由术者和机器人系统共同控制, 既保留了术者精细的操作手法, 又能帮助过滤震颤, 缓解肌肉疲劳^[8]。

3 神经外科手术机器人的相关应用

3.1 立体定向机器人

DBS是通过立体定向方法进行精确定位, 在脑内特定靶点植入刺激电极进行电刺激, 从而改变相应核团兴奋性, 以达到改善肌张力障碍、控制癫痫发作、缓解疼痛、改善痴呆、治疗精神疾病等的一种神经调控疗法, 现已成为治疗脑功能性疾病的重要手段之一^[9-11]。机器人辅助DBS手术的主要优势在于穿刺精度高, 且手术操作自动化程度高。KRAMER等^[12]发现人工计算错误是DBS手术中最常见的错误来源之一, 因此, 可消除人为错误的手术机器人将提高DBS的安全性和效率。相关文献报道^[13-15], 机械臂可从各个角度植入电极, 更方便术中电极调整, 具有精准度高、安全、高效等优点, 辅助DBS手术的电极植入误差平均为0.5 mm。因此, 机器人辅助手术在该类手术中得以最先应用, 并得到临床广泛认可^[11]。

国内立体定向手术机器人最早报道于1997年, 由我单位第六医学中心(原海军总医院)神经外科田增民教授团队与北京航空航天大学联合开发的机器人系统 CRAS

表1 神经外科手术机器人使用情况
Table 1 Current use of neurosurgical robots

No.	Neurosurgical robot	Year published	Procedures	Clinical application
1	PUMA	1985	Frameless stereotaxis	1 patient
2	NeuroMate	1987	Frameless stereotaxis, endoscopy	FDA approved
3	CRAS	1997	Frameless stereotaxis	CFDA approved
4	Evolution 1	2002	Endoscopy	3 patients
5	NeuroRobot	2002	Frameless stereotaxis	5 patients
6	NeuroArm	2002	Craniotomy	35 patients
7	Robot hand	2009	Craniotomy	23 patients
8	ROSA	2012	Frameless stereotaxis, Endoscopy	FDA approved
9	Expert	2013	Craniotomy	13 patients
10	Endonasal Robot	2016	Endoscopy	-
11	iSYS1	2017	Frameless stereotaxis, Endoscopy	39 patients
12	CorPath	2019	Cerebrovascular intervention	15 patients
13	Remebot	2018	Frameless stereotaxis	CFDA approved
14	Sinovation	2019	Frameless stereotaxis	CFDA approved

(Computer and Robot Assisted Surgery), 经过不断的改良与升级, 实现了视觉自动定位、实施远程操作等功能, 经CFDA批准上市使用, 已完成万余例手术^[16]。

3.2 内镜手术机器人

另一个机器人应用场景是神经内镜下的大脑半球切开术, 适用于由大脑半球疾病引起的难治性癫痫患者。CHANDRA等^[17]开发了一种机器人辅助内镜手术方法, 旨在尽可能减少并发症的发生。将内镜连接到ROSA的机械臂上, 采用额中回入路, 在内镜下操作从而减少对正常神经组织的骚扰及影响。机器人辅助内镜手术的优点包括: ①通过力反馈提高内镜的稳定性, 允许快速操作和微调, 以优化内镜的可视范围; ②可以让术者更舒适地进行手术; ③机械臂可作为神经导航设备^[18]。

此外, 机器人辅助下内镜手术还应用于经鼻蝶手术、脑室内肿瘤切除术以及第三脑室造瘘术^[19-20], 缺点主要在于开展机器人辅助手术时较高的材料消耗成本以及术者培训成本。

3.3 介入辅助机器人

机器人辅助技术已被应用于经皮冠状动脉和外周血管介入手术。CorPath GRX^[21] 2012年被美国FDA批准应用于经皮冠状动脉介入治疗, 2018年获批准应用于外周血管介入治疗, 其优点在于可控的手术操作不受疲劳或压力因素的影响, 提高了操作的准确性, 并可在透视过程中减少受辐射的剂量, 这使真正的“远程”介入手术成为可能。此外, 软件优化和AI算法还可以帮助机器人通过预设动作, 使不同操作者获得稳定均一的操作结果。目前该设备已完成7例颈动脉支架置入术、7例全脑血管造影以及1例支架辅助弹簧圈动脉瘤栓塞术, 操作成功率为83.3%, 无手术并发症。虽然有3例患者由于主动脉弓成角无法完成血管造影^[22], 但这足以成为神经血管疾病手术的一个重要里程碑, 为远程手术机器人完成神经介入治疗的发展打开了大门。

3.4 颅底手术机器人

NeuroArm^[5]、RobaCKa^[23]和CRANIO system^[24]等机器人设备可以完成颅骨表面肿瘤的切除以及颅骨的塑形重建^[25]。多项研究使用Da Vinci System完成颅底和鞍区肿瘤切除手术^[26-29]。CHAUVET等^[30]与FERNANDEZ-NOQUERAS等^[31]两项临床前研究, 证实了Da Vinci在经口颅底入路的可行性, 术中可以很好的显露蝶鞍、垂体、视交叉以及颈内动脉。CARRAU等^[32]认为Da Vinci在咽旁间隙、颞下窝和咽鼓管下方等区域的显露要优于传统内镜所能提供的显露范围, 结合传统内镜手术与机器人手术可以更好的完成一些颅底复杂肿瘤切除。CHAUVET等^[33]首次

报道了使用Da Vinci在颅底肿瘤的临床应用, 完成了4例鞍区肿瘤切除, 术后3例患者的视力显著改善, 1例出现迟发性脑脊液鼻漏, 1例出现短暂性尿崩症。作者发现Da Vinci提供的3D视觉非常有用, 在手术的每个步骤都能提供“清晰的显微视图”, 因此作者认为使用手术机器人进行手术的学习曲线可能比传统经鼻蝶内镜手术短。虽然Da Vinci最初设计并不是用于颅脑手术, 但经过探索发现, 该类型手术机器人可以良好的胜任颅底肿瘤手术, 预期下一代针对于神经外科设计的Da Vinci会提供更佳的操作体验。

4 神经外科机器人手术的优势和局限性

神经外科机器人手术相较于传统的手术方式, 具有3个显著的优势。①机器人手术具有较强的辅助影像定位能力, 机器人内置系统可对病变及周围正常组织进行3D数字化显示, 并辅以多模态融合技术, 帮助术者迅速识别病变, 从而有效保护周围正常组织。②机器人手术具有更高的灵活性, 机械臂可以在狭窄的术区内进行多方位操作, 多角度摄像头可实时传递术区画面, 尤其针对常规手术中不易观察的盲区有较好的呈现。③手术机器人具有较好的稳定性, 机器人通过震颤过滤系统可滤除术者手部颤动, 动作缩减系统可以一定比例缩减术者的操作幅度。

与其他新技术类似, 手术机器人不可避免地存在部分局限。①缺乏触觉反馈机制, 无法将操作端接触到的对象的质地、温度、张力和搏动等精细特性反馈给术者。但通过训练, 使用者认为视觉反馈同样可以达到有效反馈^[33]。②神经外科手术机器人的操作需要较长的培养周期, 国内目前缺乏成套的培养及评价体系。③在处理术中突发事件时, 机器人手术应变能力不足。

5 神经外科手术机器人应用展望

5.1 医患分离的远程手术

依靠先进的通信设备和遥操作技术, 主从式机器人的操作端和手术端可分布在不同的地域, 实现医患间的空间分离。其作为实现远程手术的核心组分, 可实现术者在异地通过远程系统为手术现场的患者进行手术, 让各地患者有望获得更优质的医疗服务, 将高水平的神经外科手术技术输送到全世界。

借助我国近年来通讯技术发展的优势, 我单位凌至培教授团队在2019年完成国内首次5G远程颅脑手术, 将“5G技术+手术机器人”模式变为现实, 由北京和海南之间建立有效信息通道, 进行手术的关键步骤——脑内微电极植入和神经核团电信号记录^[34]。天坛医院神经外

科、浙江大学医学院附属第二医院神经外科建成5G数字化神经外科空中手术室, 向周边二级医院覆盖, 发挥“5G技术+手术机器人”的优势。远程手术的成功, 对缓解医疗资源短缺具有重大意义。

5.2 多人、多器械参与的显微手术

神经外科手术操作空间狭窄, 通常仅允许1名术者进行手术操作。但在手术机器人系统的辅助下, 可引入多个微操作器械, 可在狭小的操作视野中同时进行多个显微操作。与此同时, 其他术者也可以通过系统控制手术器械, 进行多人配合操作, 提高手术效率。此外, 结合远程手术相关技术, 对于疑难病例, 世界各地专家可同时参与到一台手术中, 共同为患者进行诊疗, 有望提升诊疗质量。

5.3 人工智能参与神经外科机器人手术

可视化导航技术对神经外科手术至关重要, 术中导航结合MRI、CT图像可较为精准地定位病变, 以保证最大限度保护神经组织的同时精准切除病变。在未来, 神经外科手术机器人结合先进的图像融合技术, 能有望更加精准的显示更为丰富的结构及功能信息, 辅助术者对病变进行术中定性和定位。搭载人工智能技术的智能化图像采集分析系统可协助术者迅速判断肿瘤边界, 血供来源以及肿瘤对正常组织的侵袭情况。此外, 融合深度学习以及卷积神经网络等技术的机器人手术决策系统亦可辅助术者选择最佳的手术入路、设计损伤小且显露佳的切口, 甚至可以引导调整手术体位摆放等。人工智能与手术机器人的结合必将深刻改变传统外科手术模式。

神经外科机器人经过30余年的发展, 已经日趋成熟, 从单一的立体定向手术, 逐步向神经外科各个领域发展, 有些已出现手术方式颠覆性的改变。随着影像技术、机械技术、计算机控制技术、人工智能等领域融合发展, 手术机器人作为神经外科手术辅助手段必然会紧随时代的需要迎来井喷式发展。

* * *

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] KWOH Y S, HOU J, JONCKHEERE E A, *et al.* A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery. *IEEE Trans Biomed Eng*, 1988, 35(2): 153–160.
- [2] LI Q H, ZAMORANO L, PANDYA A, *et al.* The application accuracy of the NeuroMate robot--A quantitative comparison with frameless and frame-based surgical localization systems. *Comput Aided Surg*, 2002, 7(2): 90–98.
- [3] FARIA C, ERLHAGEN W, RITO M, *et al.* Review of robotic technology for stereotactic neurosurgery. *IEEE Rev Biomed Eng*, 2015, 8: 125–137 [2022-03-14]. <https://doi.org/10.1109/RBME.2015.2428305>.
- [4] DORFER C, MINCHEV G, CZECH T, *et al.* A novel miniature robotic device for frameless implantation of depth electrodes in refractory epilepsy. *J Neurosurg*, 2017, 126(5): 1622–1628.
- [5] SUTHERLAND G R, LATOUR I, GREER A D. Integrating an image-guided robot with intraoperative MRI: A review of the design and construction of neuroArm. *IEEE Eng Med Biol Mag*, 2008, 27(3): 59–65.
- [6] CSÓKAY A, VALÁLIK I, JOBBÁGY A. Early experiences with a novel (robot hand) technique in the course of microneurosurgery. *Surg Neurol*, 2009, 71(4): 469–472.
- [7] SWANEY P J, GILBERT H B, WEBSTER R J 3rd, *et al.* Endonasal skull base tumor removal using concentric tube continuum robots: A phantom study. *J Neurol Surg B Skull Base*, 2015, 76(2): 145–149.
- [8] DOULGERIS J J, GONZALEZ-BLOHM S A, FILIS A K, *et al.* Robotics in neurosurgery: Evolution, current challenges, and compromises. *Cancer Control*, 2015, 22(3): 352–359.
- [9] LOZANO A M, LIPSMAN N, BERGMAN H, *et al.* Deep brain stimulation: Current challenges and future directions. *Nat Rev Neurol*, 2019, 15(3): 148–160.
- [10] 孟凡刚, 陈玲, 刘钰晔, 等. 中国帕金森病脑深部电刺激疗法专家共识(第二版)解读. *中华神经外科杂志*, 2021, 37(5): 439–442.
- [11] 陶英群, 巩顺. 神经外科手术机器人辅助脑深部电刺激手术的中国专家共识. *中国微侵袭神经外科杂志*, 2021, 26(7): 291–295.
- [12] KRAMER D R, HALPERN C H, CONNOLLY P J, *et al.* Error reduction with routine checklist use during deep brain stimulation surgery. *Stereotact Funct Neurosurg*, 2012, 90(4): 255–259.
- [13] 杨兴旺, 陶英群, 金海, 等. ROSA辅助脑深部电刺激术的精准性研究. *中国微侵袭神经外科杂志*, 2017, 22(2): 60–62.
- [14] FURLANETTI L, ELLENBOGEN J, GIMENO H, *et al.* Targeting accuracy of robot-assisted deep brain stimulation surgery in childhood-onset dystonia: A single-center prospective cohort analysis of 45 consecutive cases. *J Neurosurg Pediatr*, 2021, 27(6): 677–687.
- [15] VON LANGSDORFF D, PAQUIS P, FONTAINE D. *In vivo* measurement of the frame-based application accuracy of the Neuromate neurosurgical robot. *J Neurosurg*, 2015, 122(1): 191–194.
- [16] 乔天富, 吉尔. 机器人施行脑手术——海军总医院为72位患者手术成功. *科学新闻*, 2000(28): 23.
- [17] CHANDRA P S, KURWALE N, GARG A, *et al.* Endoscopy-assisted interhemispheric transcallosal hemispherotomy: Preliminary description of a novel technique. *Neurosurgery*, 2015, 76(4): 485–494.
- [18] SOOD S, MARUPUDI N I, ASANO E, *et al.* Endoscopic corpus callosotomy and hemispherotomy. *J Neurosurg Pediatr*, 2015, 16(6): 681–686.
- [19] CHUMNANVEJ S, PILLAI B M, CHALONGWONGSE S, *et al.* Endonasal endoscopic transsphenoidal approach robot prototype: A cadaveric trial. *Asian J Surg*, 2021, 44(1): 345–351.
- [20] CHALONGWONGSE S, CHUMNANVEJ S, SUTHAKORN J. Analysis of endonasal endoscopic transsphenoidal (EET) surgery pathway and

- workspace for path guiding robot design. *Asian J Surg*, 2019, 42(8): 814–822.
- [21] MENDES PEREIRA V, CANCELLIERE N M, NICHOLSON P, *et al.* First-in-human, robotic-assisted neuroendovascular intervention. *J Neurointerv Surg*, 2020, 12(4): 338–340.
- [22] SAJJA K C, SWEID A, AL SAIEGH F, *et al.* Endovascular robotic: Feasibility and proof of principle for diagnostic cerebral angiography and carotid artery stenting. *J Neurointerv Surg*, 2020, 12(4): 345–349.
- [23] KANE G, EGGERS G, BOESECKE R, *et al.* System design of a hand-held mobile robot for craniotomy. *Med Image Comput Comput Assist Interv*, 2009, 12(Pt 1): 402–409.
- [24] BAST P, POPOVIC A, WU T, *et al.* Robot- and computer-assisted craniotomy: Resection planning, implant modelling and robot safety. *Int J Med Robot*, 2006, 2(2): 168–178.
- [25] ENGELHARDT M, BAST P, JEHLINK N, *et al.* Analysis of surgical management of calvarial tumours and first results of a newly designed robotic trepanation system. *Minim Invasive Neurosurg*, 2006, 49(2): 98–103.
- [26] HONG W C, TSAI J C, CHANG S D, *et al.* Robotic skull base surgery via supraorbital keyhole approach: A cadaveric study. *Neurosurgery*, 2013, 72(Suppl 1): 33–38.
- [27] DALLAN I, CASTELNUOVO P, SECCIA V, *et al.* Combined transnasal transcervical robotic dissection of posterior skull base: Feasibility in a cadaveric model. *Rhinology*, 2012, 50(2): 165–170.
- [28] BLANCO R G, BOAHENE K. Robotic-assisted skull base surgery: Preclinical study. *J Laparoendosc Adv Surg Tech A*, 2013, 23(9): 776–782.
- [29] DIMITRAKAKIS E, AYLMORE H, LINDENROTH L, *et al.* Robotic handle prototypes for endoscopic endonasal skull base surgery: Pre-clinical randomised controlled trial of performance and ergonomics. *Ann Biomed Eng*, 2022, 50(5): 549–563.
- [30] CHAUVET D, MISSISTRANO A, HIVELIN M, *et al.* Transoral robotic-assisted skull base surgery to approach the sella turcica: Cadaveric study. *Neurosurg Rev*, 2014, 37(4): 609–617.
- [31] FERNANDEZ-NOGUERAS F J, KATATI M J, ARRAEZ SANCHEZ M A, *et al.* Transoral robotic surgery of the central skull base: Preclinical investigations. *Eur Arch Otorhinolaryngol*, 2014, 271(6): 1759–1763.
- [32] CARRAU R L, PREVEDELLO D M, DE LARA D, *et al.* Combined transoral robotic surgery and endoscopic endonasal approach for the resection of extensive malignancies of the skull base. *Head Neck*, 2013, 35(11): E351–E358.
- [33] CHAUVET D, HANS S, MISSISTRANO A, *et al.* Transoral robotic surgery for sellar tumors: First clinical study. *J Neurosurg*, 2017, 127(4): 941–948.
- [34] 世界帕金森日。“5G+医疗”带来新希望. *世界电子元器件*, 2021(4): 3–4.
(2022 – 05 – 05收稿, 2022 – 06 – 14修回)