

## 手术机器人在脊柱神经外科的临床应用

熊东, 程超, 郑锋伟, 王天泽, 李维新

(西安交通大学第一附属医院神经外科 陕西 西安 710061)

**摘要** 手术机器人在入路规划、导航及微创精准操作等方面优势明显, 临床应用越来越广泛, 极大地提高了手术的精准性、安全性和微创性。近年来, 随着手术机器人迅速发展以及在神经外科、脊柱外科的应用逐步普及, 其超强稳定性必然推动脊柱神经外科疾病诊治更加合理。国内外已有多款产品应用于临床, 涵盖了 DBS、脊柱外科及术后康复等学科, 其中应用于脑深部电刺激植入手术及椎弓根螺钉植入术的机器人技术相对成熟。但是, 目前手术机器人仍有一定局限性, 且费用高、触觉反馈差, 临床效果缺乏长期临床研究证据支持。因此, 手术机器人未来的发展在于扩大应用范围, 降低成本, 并将手术系统与 AI、3D 打印等技术结合, 以期在脊柱神经外科领域发挥更重要的作用。

**关键词** 手术机器人; 脊柱神经外科; 微创手术; 智能化; 个体化

**中图分类号** R651 R681.5 **文献标识码** A **文章编号** 2096-7721 (2024) 06-1149-05

### Clinical application of surgical robots in spinal neurosurgery

XIONG Dong, CHENG Chao, ZHENG Fengwei, WANG Tianze, LI Weixin

(Department of Neurosurgery, the First Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710061, China)

**Abstract** With significant advantages in surgical approach planning, navigation and precise operation in a minimally invasive way, surgical robots are more and more widespread, which has greatly improved the accuracy, safety, and minimally invasion of surgery. In recent years, with the rapid development of surgical robots, their application in neurosurgery and spinal surgery has gradually been popularized, the super stability of surgical robots will inevitably promote more reasonable diagnosis and treatment in spinal neurosurgical diseases. There are many mature products at home and abroad that have been applied in clinical practice, covering deep brain stimulation (DBS), spine surgery, and postoperative rehabilitation. Among them, the application of robotic technology in DBS implantation and pedicle screw implantation is relatively mature. At present, the application of surgical robots still has certain limitations, such as the high cost and poor tactile feedback, and evidence on its long-term outcomes is lacking. Therefore, the future development of surgical robots lies in expanding the scope of application, reducing costs, and combining surgical systems with AI, 3D printing and other technologies, hoping to play a more important role in the field of spinal neurosurgery.

**Key words** Surgical Robots; Spinal Neurosurgery; Minimally Invasive Surgery; Intelligence; Individuality

随着科学技术的进步, 手术机器人已经在临床应用中逐步推广, 使得各种操作更加精准和稳定, 同时还能降低并发症的发生率, 缩短术中医务人员射线暴露时间。脊柱神经外科疾病的治疗涉及神经外科、脊柱外科相关技术, 手术机器人的超强稳定性必然推动脊柱神经外

科疾病诊治更合理。1985 年, 美国医生 Kwoh 首次将机器人应用于临床手术, CT 辅助引导下的脑肿瘤活检开创了手术机器人的先河。1992 年, 美国开发了辅助全髋关节置换的骨科手术机器人 ROBDOC<sup>®</sup>, 之后手术机器人在脊柱外科的应用逐步开展, 尤其在辅助椎弓根螺钉植入方面

收稿日期: 2024-05-29 录用日期: 2024-07-09

Received Date: 2024-05-29 Accepted Date: 2024-07-09

基金项目: 陕西省重点研发计划 (2024SF-YBXM-216)

Foundation Item: Key R&D Plan Project of Shaanxi Province (2024SF-YBXM-216)

通讯作者: 李维新, Email: spinedr@163.com

Corresponding Author: LI Weixin, Email: spinedr@163.com

引用格式: 熊东, 程超, 郑锋伟, 等. 手术机器人在脊柱神经外科的临床应用 [J]. 机器人外科学杂志 (中英文), 2024, 5 (6): 1149-1153.

Citation: XIONG D, CHENG C, ZHENG F W, et al. Clinical application of surgical robots in spinal neurosurgery[J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2024, 5(6): 1149-1153.

应用最广。国内手术机器人在 21 世纪初期进入飞速发展阶段,目前已有多家医疗器械公司联合知名大学及三甲医院进行各专科手术机器人的研发,并开始大规模应用于临床<sup>[1-2]</sup>。2024 年 3 月,睿米<sup>®</sup>RM-200 在哈萨克斯坦阿斯塔纳总统医院辅助医生顺利开展机器人辅助 SEEG 电极植入手术,国产手术机器人已开始出口海外,得到国际同行认可。手术机器人的应用始于神经外科,但神经系统解剖结构复杂,需要精确的定位和精细的操作技巧以确保手术的成功和对周围组织的损伤最小化,因此其在神经外科的临床应用发展缓慢,相对而言,在立体定向与功能神经外科应用较为广泛<sup>[3]</sup>。

## 1 手术机器人的临床应用

**1.1 优势** 手术机器人通过机械臂和传感器技术能够实现比人手更加精准和稳定的操作。在微创手术中,能够确保手术器械在狭小的空间内精确地完成手术,减少手术创伤,术后恢复快。同时在长时间的手术中,机器人能够保持高效率并稳定工作,降低手术风险。对于一些复杂或传统手术方式难以处理的病例,手术机器人提供了新的解决方案。例如,对于位置深或周围结构复杂的肿瘤,手术机器人能够更加精确地切除病变组织,同时减少对周围组织的损伤。

**1.2 劣势** 随着技术的不断进步,手术机器人的研发和制造成本逐渐降低,但其推广应用仍然受到经济因素的制约。虽然手术机器人在许多方面表现出色,但其触觉反馈不如外科医生灵活,在某些特定情况下,手术机器人的操作可能仍然不如经验丰富的医生<sup>[4]</sup>。此外,手术机器人的应用涉及法律和伦理问题<sup>[5]</sup>,如手术机器人的权限和责任、医生和机器人之间的协作关系等,这些问题需要在立法和伦理准则中进行明确和规范。

**1.3 发展趋势** 随着技术的不断进步和政策的支持,未来手术机器人有望在更广泛的领域得到应用。同时,随着医疗数据的积累和人工智能技术的发展,其临床应用将会逐步规范化,相应的操作指南也会更加完善。目前,计算机辅助手术导航系统结合手术机器人使用已通过

美国 FDA 认证的商用无线头戴式显示器协助外科医生更高效精准完成手术<sup>[6]</sup>。机器人结合数字化影像改变了神经外科手术,在脊柱神经外科领域有望实现重要的技术革新<sup>[7]</sup>。

## 2 手术机器人在神经外科的临床应用

当前,手术机器人在神经外科主要用于脑组织穿刺以及脑深部功能区的定位导航,如血肿腔穿刺抽吸、颅内肿瘤活检、癫痫的 SEEG 手术、帕金森病的 DBS 手术等。机器人辅助 SEEG 电极植入手术为准确切除致痫灶提供依据<sup>[8]</sup>。随着神经外科手术机器人的广泛应用,结合计算机技术、神经影像技术的进步,颅内病变立体定向活检技术更加成熟,定位精准且损伤更小<sup>[9-11]</sup>。神经外科机器人辅助术中 CT 可以很轻松地实施脑室镜下第三脑室造瘘术,并防止操作通道错误和脑室镜的突然移动,减少手术引起的脑损伤<sup>[12]</sup>。另外,已有研究表明手术机器人可以辅助开颅,进行颅骨钻孔及铣开骨瓣,更换手术磨头修整骨窗,减少术区遮挡<sup>[13]</sup>。神经外科手术机器人可以在狭小的空间流畅操作,减轻副损伤,过滤操作者的手部颤抖,加强稳定性,使操作更加精准,减轻术者疲劳,缩短手术时间,进一步提高了手术安全性<sup>[14]</sup>。已应用于临床的神经外科手术机器人见表 1<sup>[15]</sup>。

### 2.1 国外神经外科手术机器人的临床应用

20 世纪 80 年代,PUMA 手术机器人在美国开始辅助神经外科手术。美敦力等公司研发的手术导航设备也逐步开始应用于神经外科手术。美国美敦力公司研发的 Mazor XTM 手术机器人、法国 Medtech 公司研发的 ROSA 手术机器人以及德国 Brainlab 公司研发的 Digital O.R 手术整合系统已应用于临床<sup>[16]</sup>。

精准治疗是国内外神经外科专家共识。ROSA 机器人性能卓越,功能多样,将导航与头架结合,精准度高,手术过程高度安全,它能够根据患者的具体情况,灵活设计手术入路,使得手术方案更加个性化和精准。已有研究表明 ROSA 机器人可显著提高神经外科手术精准度和安全性,适应证广,减少患者围手术期并发症,且操作简易,在神经外科手术中应用前景广泛<sup>[17-18]</sup>。

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

序号	名称	年份	术式	临床应用
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	iSYSI	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

Gonen L 等人<sup>[19]</sup>总结了 200 例 ROBOT-m 手术机器人辅助神经外科手术病例（包括穿刺抽吸、病变切除、微血管减压、脑室内操作等），术后神经系统并发症发生率为 1.50%。同时，术者佩戴头戴式显示设备以显示外视镜视野，该设备中的虚拟光标可随头部转动而移动，术者可选择不同功能对机械臂进行控制。有文献报道该机器人系统在 3 例额叶肿瘤手术中的应用反馈，可提高术者舒适度，无需切换传统显微外视镜，亦未见机器人系统操作相关不良事件<sup>[20]</sup>。

**2.2 国内神经外科手术机器人的临床应用**  
国内神经外科手术机器人系统的研究起步较晚，大部分医疗器械公司的相关研究始于 20 世纪 90 年代。国产手术机器人厂家普爱医疗分享的众成数科和 Medrobot 联合发布 2022 年 1 月~6 月公开的销售数据显示，华科精准、柏惠维康（睿米）、安科、博医来等公司的神经外科手术机器人、手术导航系统已经开始装机使用。睿米手术机器人的医学图像标志点提取方法的临床应用<sup>[21]</sup>使定位更准确。华科精准将 3D 结构光融入神经外科手术机器人<sup>[22]</sup>，对脑深部病变的切除更具临床指导意义。

华科精准手术机器人是由清华大学与华科

精准医疗设备股份有限公司联合研发具有自主知识产权的神经外科手术机器人系统，可以辅助术者定位颅内血肿位置、肿瘤、脑功能核团，协助规划手术路径，并在实际操作中指导术者通过最佳手术入路完成手术，减轻脑神经损伤，缩短手术时间。2020 年 12 月，搭载自主研发的 3D 结构光及 HoloShot 智能感知技术的新一代神经外科手术机器人获国家药监局批准上市，其具有无框架、无 Marker、无需术前 CT、手术时间短、注册精度高等国际领先优势。

颅脑深部疾病在神经外科手术机器人的辅助下可以更准确地定位病灶，规划最佳手术路径，从而减轻术后患者神经功能障碍。已有研究针对颅骨不规则三维结构进行机器人磨削设计<sup>[13]</sup>，将颅骨的三维重建图像分割，提取磨削区域的三维模型，利用仿真软件 Matlab 对 Jaka 机械臂的运动学和轨迹规划进行仿真实验，实现机器人安全开颅工作程序。

### 3 手术机器人在脊柱手术中的应用

脊柱作为脊髓及脊神经根的支撑结构，涉及多维度的运动功能，在解剖结构上与硬脊膜、神经根、血管等重要组织紧密相邻。脊柱

手术机器人能够显著提升手术的精准度,降低人为操作的失误率,同时有效减少患者和医生所受到的辐射量。更重要的是,它还能让临床医生快速、高效地掌握脊柱手术的关键技巧<sup>[1]</sup>。脊柱外科经常需要用到椎弓根螺钉固定。C臂透视下徒手置钉可能出现失误引起患者术后疼痛麻木及运动功能障碍等并发症,机器人辅助手术可以提高置钉准确度,尤其在复杂困难病例进行椎弓根螺钉植入具有积极作用<sup>[23]</sup>。已有研究表明,基于振动信号融合的手术机器人椎板磨削剩余厚度识别有利于提升脊柱手术机器人自动椎板磨削过程的智能化程度和安全性<sup>[24]</sup>。

**3.1 国外脊柱手术机器人的临床应用** 以色列脊柱手术机器人 SpineAssist 已于 2004 年开始用于脊柱手术。法国 ROSA 脊柱手术机器人系统除了导航臂,还装配了光学摄像机,用以提升机器人辅助手术准确率。另外,美国的无框架 Excelsius GPS<sup>®</sup> 也是目前应用较广的脊柱手术机器人。Huntsman K T 等人<sup>[25]</sup>和 Godzik J 等人<sup>[26]</sup>研究表明脊柱手术机器人具有安全性、精准性和可靠性,置钉准确率近 99%。

**3.2 国内脊柱手术机器人的临床应用** 国内脊柱手术机器人的研究起步虽然较晚,但发展较快,部分三甲医院骨科与机器人公司合作研发比较普遍。例如,天智航与积水潭医院联合研究的天玑骨科手术机器人 TiRobot<sup>®</sup> 临床应用效果好,能够辅助后路寰枢关节内固定<sup>[27]</sup>。一项多中心随机对照临床研究通过对比使用机器人手术与传统手术的病例的二维及三维精度,评价脊柱手术机器人系统在腰椎融合术中的精准度,结果表明机器人辅助能更好地规划螺钉植入路径<sup>[28]</sup>。

**3.3 脊柱手术机器人的发展现状** 脊柱手术机器人目前仍处于发展初期,在辅助胸腰椎椎弓根螺钉植入方面应用普遍,在颈椎、肿瘤切除及侧弯畸形等方面应用较少<sup>[29]</sup>。随着手术机器人的使用越来越普及,需要研究如何提高脊柱机器人触觉反馈能力,开发更简单的配套操作软件,便于临床医生使用<sup>[30]</sup>。

## 4 手术机器人的发展趋势

目前全球的主流脊柱神经外科手术机器人产品如 ROSA、Excelsius GPS<sup>®</sup> 以及 Mazor XTM 等已经广泛应用于临床,随着科技的发展,脊柱神经外科手术机器人的发展会更加智能<sup>[31]</sup>。

**4.1 微创化** 脊柱神经外科手术机器人的操作将越来越微创,其更精准的定位使得切口更小,创伤更少,同时缩短住院时间,降低并发症发生率。手术机器人生产研发机构与医院联合研究产品性能,提升手术机器人的触觉反馈水平,同时建立整体手术室的解决方案,也是我国脊柱神经外科手术机器人事业发展的机遇。

**4.2 智能化** 当前脊柱神经外科手术机器人还不能完成高效的全流程手术操作,多数局限在定位及导航功能。未来手术机器人系统与人工智能技术及 3D 打印技术结合,能够提供一体化的解决方案,使脊柱神经外科手术简单化,同时在 5G 普及后可以实现远程手术操作,提供偏远基层医疗机构的技术支援。在机器人探针上整合神经电生理探头,能及时反馈神经系统电信号,协助医生进行手术,使手术创伤更小,并发症更少。

**4.3 个体化** 针对不同患者、不同疾病,或者同一疾病的不同表现,手术机器人可以根据实际情况,通过大数据分析为患者制定个性化的手术方案,提高手术治疗效果。

**4.4 国家发展规划** 2023 年 1 月,工信部等十七部门印发的《“机器人+”应用行动实施方案》指出,到 2025 年,全面推进机器人在社会民生领域的应用,研制手术、急救、康复等医疗辅助机器人产品。鼓励医院使用手术机器人,建设机器人应用标准化手术室,研究手术机器人临床应用标准规范<sup>[2]</sup>。手术机器人结合 AI 将会是未来的发展方向,目的在于尽量减轻临床医生的工作量,提高机器人在手术中参与度,从而提高手术准确度,并缩短手术时间<sup>[32]</sup>。

## 5 结语

本综述阐述了目前手术机器人在神经外科、脊柱外科的临床应用情况和未来发展前景,探

讨其微创化、智能化、个体化的发展方向。随着临床应用手术机器人的需求越来越多，结合国家发展规划，脊柱神经外科手术机器人必将迎来飞速发展。虚拟现实和机器人技术在神经外科的应用越来越广泛，由于大脑解剖和生理学的复杂性，其在神经外科的应用进展缓慢，但有良好的发展潜力。医学、工程、科学和技术领域之间的合作将创造出新产品，使外科医生能够利用机械辅助进行手术，同时获得实时的视觉、听觉和触觉反馈，促进脊柱神经外科手术技术发展<sup>[33]</sup>。脊柱神经外科手术机器人的长期临床效果及安全性尚缺乏循证医学证据支持。目前，在多数研究中未发现严重的并发症，未来需要建立随机对照研究，并长期随访治疗效果，形成指南性文件，促进手术机器人专业技术的良性发展。同时，配套脊柱神经外科术后康复机器人的开发，更有利于提高治疗效果，发展前景广阔。

**利益冲突声明：**本文不存在任何利益冲突。

**作者贡献声明：**熊东负责设计论文框架，文章撰写和修改；郑锋伟、程超、王天泽负责收集文献；李维新负责指导撰写文章并最终定稿。

## 参考文献

- [1] 许梓健, 顾洪生, 蒯声政, 等. 骨科手术机器人的临床应用与进展[J]. 机器人外科学杂志(中英文), 2022, 3(5): 376-387.
- [2] 刘政鑫. 华科精准: 神外手术机器人实现临床突破[J]. 机器人产业, 2023, (2): 65-67.
- [3] ZHOU S Y, GAO Y, LI R P, et al. Neurosurgical robots in China: State of the art and future prospect[J]. *Iscience*, 2023, 26(11): 107983.
- [4] Ringel F, Stürer C, Reinke A, et al. Accuracy of robot-assisted placement of lumbar and sacral pedicle screws[J]. *Spine*, 2012, 37(8): E496-E501.
- [5] 王紫合, 寇楠楠. 神经外科手术机器人临床应用的伦理探析[J]. 医学与社会, 2024, 37(2): 118-123.
- [6] Morley C T, Arreola D M, Qian L, et al. Mixed reality surgical navigation system: Positional accuracy based on food and drug administration standard[J]. *Surgical Innovation*, 2023, 31(1): 48-57.
- [7] Picht T, Vajkoczy P. Robotics and computer-assisted procedures in cranial neurosurgery[J]. 2023, 94(4): 299-306.
- [8] Bartolomei F, Lagarde S, Wendling F, et al. Defining epileptogenic networks: Contribution of SEEG and signal analysis[J]. *Epilepsia*, 2017, 58(7): 1131-1147.
- [9] 乔梁, 遇涛, 李勇杰. 手术机器人在神经外科中的应用现状[J]. 中华神经外科杂志, 2020, 36(12): 1286-1289.
- [10] 田增民, 王亚明. 立体定向脑组织活检技术[M]. 人民军医出版社, 2012.
- [11] 林涛, 陈志杰, 刘姐, 等. 神经外科机器人辅助脑深部病变立体定向活检手术体会[C]// 第十六届中国医师协会神经外科医师年会摘要集. 2022: 283-284.
- [12] Elia A, Paun L, Pallud J, et al. Robot-assisted endoscopic third ventriculostomy under intraoperative CT imaging guidance[J]. *Acta Neurochirurgica*, 2023, 165(9): 2525-2531.
- [13] 姚展成. 开颅手术机器人的器械定位与自主磨削规划研究[D]. 天津理工大学, 2023.
- [14] 刘羽阳, 刘嘉霖, 陈凌, 等. 开拓新技术, 推动神经外科进入机器人辅助显微手术新时代[J]. 国际神经病学神经外科学杂志, 2021, 48(1): 1-3.
- [15] 张剑宁, 刘嘉霖. 手术机器人推动神经外科进入新时代[J]. 四川大学学报(医学版), 2022, 53(4): 554-558.
- [16] Paydarfar J A, WU X T, Halter R J. Initial experience with image-guided surgical navigation in transoral surgery[J]. 2019, 41(1): E1-E10.
- [17] 刘元钦, 李翠玲, 张磊, 等. ROSA机器人在神经外科手术中初步应用体会[J]. 中华神经创伤外科电子杂志, 2019, 5(1): 47-51.
- [18] Michel L, Cyril C, Anne S P, et al. The impact of the reference imaging modality, registration method and intraoperative flat-panel computed tomography on the accuracy of the ROSA® stereotactic robot[J]. *Stereotactic and Functional Neurosurgery*, 2014, 92: 242-250.
- [19] Gonen L, Chakravarthi Srikant-S., Monroy-sosa A, et al. Initial experience with a robotically operated video optical telescopic-microscope in cranial neurosurgery: feasibility, safety, and clinical applications[J]. *Neurosurgical Focus*, 2017, 42: E9.
- [20] Piloni M, Bailo M, Gagliardi F, et al. Resection of intracranial tumors with a robotic-assisted digital microscope: A preliminary experience with robotic scope[J]. *World Neurosurgery*, 2021, 152: e205-e211.
- [21] 周晓明, 曹子忆, 徐鹏, 等. 医学图像标志点提取方法在神经外科手术机器人中的应用分析[J]. 中国仪器仪表, 2023, (4): 27-31.
- [22] 刘京运. 华科精准: 将3D结构光融入神经外科手术机器人[J]. 机器人产业, 2021, (2): 51-55.
- [23] Watkins R G, Gupta A, Watkins R G. Cost-Effectiveness of Image-Guided Spine Surgery[J]. *The Open Orthopaedics Journal*, 2010, 4: 228-233.
- [24] 夏光明, 王瑞, 张丽娜, 等. 基于振动信号融合的手术机器人椎板磨削剩余厚度识别[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2022, 55(10): 1016-1025.
- [25] Huntsman K T, Ahrendtsen L A, Riggleman J R, et al. Robotic-assisted navigated minimally invasive pedicle screw placement in the first 100 cases at a single institution[J]. *J Robot Surg*, 2020, 14(1): 199-203.
- [26] Godzik J, Walker C T, Hartman C, et al. A quantitative assessment of the accuracy and reliability of robotically guided percutaneous pedicle screw placement: Technique and application accuracy[J]. *Oper Neurosurg*, 2019, 17(4): 389-395.
- [27] Tian W. Robot-assisted posterior C1-2 transarticular screw fixation for atlantoaxial instability a case report[J]. 2016, 41(19B): B2-B5.
- [28] LI J Y, HUANG L, ZHOU W Y, et al. Evaluation of a new spinal surgical robotic system of Kirschner wire placement for lumbar fusion: A multi-centre, randomised controlled clinical study[J]. *Int J Med Robot*, 2021, 17(2): e2207.
- [29] Farber S H, Pacult M A, Godzik J, et al. Robotics in spine surgery: A technical overview and review of key concepts[J]. *Front Surg*, 2021, 8: 578674.
- [30] ZHANG Q, HAN X G, XU Y F, et al. Robotic navigation during spine surgery[J]. *Expert Rev Med Devices*, 2020, 17(1): 27-32.
- [31] 杜付鑫, 张体冲, 李倩倩, 等. 脊柱手术机器人研究进展[J]. 山东大学学报(医学版), 2023, 61(3): 46-56.
- [32] Sekhar L N, Tariq F, Kim L J, et al. Commentary: Virtual reality and robotics in neurosurgery[J]. *Neurosurgery*, 2013, 72: 1-6.
- [33] Sutherland G. Introduction to virtual reality and robotics in neurosurgery[J]. *Neurosurgery*, 2013, 72: 7.

编辑：崔明瑞