

神经外科手术机器人与导航系统的发展与应用

丁辉 王广志

【摘要】 神经外科手术机器人和导航系统的快速发展,显著提高手术的精准性和安全性。神经外科手术机器人为立体定向技术提供稳定平台,通过多模态影像融合进行手术规划,通过无标记点注册技术实现亚毫米级定位,并基于高自由度机械臂和集成传感器精准进行立体定向脑电图检查、脑深部电刺激和磁共振引导激光间质热疗术等高精度定位定向操作。手术导航系统则通过光学或电磁定位追踪技术,结合多模态影像学数据,辅助术者准确追踪重要结构和目标病变组织。随着人工智能技术的发展,未来手术机器人和导航系统软件可自动生成个性化手术方案,减少人工误差。此外,多种技术融合将覆盖更广泛的神经外科手术范式,不仅降低手术并发症风险,而且有助于缩短手术时间,推动神经外科向智能化、微创化发展。

【关键词】 神经外科手术; 机器人手术; 神经导航; 综述

Development and application of neurosurgery robots and navigation systems

DING Hui, WANG Guang-zhi

School of Biomedical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Corresponding author: WANG Guang-zhi (Email: wgz-dea@mail.tsinghua.edu.cn)

【Abstract】 The rapid development of neurosurgery robots and navigation systems has significantly enhanced surgical precision and safety. Neurosurgery robots, based on stereotactic technology, achieve submillimeter-level positioning through multi-modal image fusion and non-invasive registration techniques. Equipped with high-degree-of-freedom robotic arms and integrated sensors, they precisely perform complex procedures such as stereo-electroencephalography (SEEG) electrode implantation, deep brain stimulation (DBS) device placement, and magnetic resonance-guided laser interstitial thermal therapy (MRgLITT). Navigation systems employ optical or electromagnetic tracking technologies combined with multi-modal imaging to assist surgeons in tracking important structures and target lesion tissue precisely. Future advancements may autonomously generate personalized surgical plans to reduce human error, while flexible robotic arms and novel endoscope-holding robots could expand endoscopic applications. Furthermore, the integration of multiple technologies will broaden neurosurgical applications. These innovations not only minimize complication risks and shorten treatment periods, but also propel the field toward intelligent, minimally invasive neurosurgery.

【Key words】 Neurosurgical procedures; Robotic surgical procedures; Neuronavigation; Review

This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFC2405304), and Beijing Natural Science Foundation (No. L246018).

Conflicts of interest: none declared

神经外科手术因操作复杂、风险高、精度要求高等特点,一直是临床医学最具挑战性的学科之一。其目标是在最大限度保护正常脑组织的同时,

精准切除病变组织,故精准定位病灶是手术成功的关键。由于颅脑解剖结构和病变的复杂性,手术操作高度依赖术者技术和经验。医学影像学技术以及手术机器人和导航系统的发展,为神经外科手术提供了基于多模态影像学的可视化手术规划以及精准定位定向引导的技术平台,手术机器人通过高精度机械臂和智控系统,实现亚毫米级的手术定位定向,显著提高手术精准性^[1-3];手术导航系统通过多模态影像学融合、三维可视化和实时定位追踪技

doi: 10.3969/j.issn.1672-6731.2025.02.007

基金项目:国家重点研发计划项目(项目编号:2022YFC2405304);北京市自然科学基金资助项目(项目编号:L246018)

作者单位:100084 北京,清华大学生物医学工程学院

通讯作者:王广志,Email:wgz-dea@mail.tsinghua.edu.cn

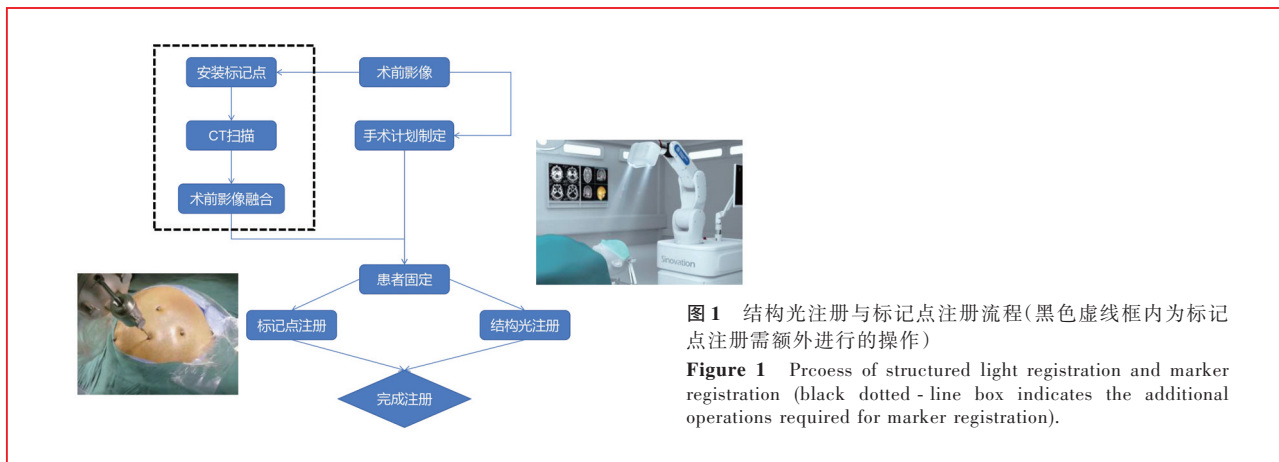


图1 结构光注册与标记点注册流程(黑色虚线框内为标记点注册需额外进行的操作)

Figure 1 Process of structured light registration and marker registration (black dotted-line box indicates the additional operations required for marker registration).

术,提供精确的术中引导,有助于在复杂解剖结构中准确定位病灶^[4-6]。这些技术不仅降低手术风险和并发症发生率,改善患者预后,而且减轻术者负担^[7-10]。本文拟重点介绍神经外科手术机器人和导航系统的原理及应用现状,并展望未来发展方向。

一、神经外科手术机器人发展现状

脑深部手术因组织遮挡,难以直接观察到术区三维解剖结构,需剥离遮盖组织,显露病灶,导致手术创伤巨大;此外,术中难以区分浸润性恶性肿瘤边界与周围正常脑组织,使得高风险区域精确切除病灶困难。随着医学影像学技术的进步,术前可获得病灶及其周围组织的清晰图像,通过可视化技术展现其完整三维解剖结构,通过整合多模态影像学数据,优化手术策略,并以机械臂为基础形成精准的立体定位定向引导,同时手术机器人平台可搭载多种工具,有助于将微创治疗器械送至目标区域,实施微侵袭手术。

1. 神经外科手术机器人的原理 基于影像学数据的手术规划是神经外科手术机器人操作的首要环节。通过图像配准技术将多模态影像学数据融合在同一坐标系内,整合影像学信息,为手术规划提供全面、准确的依据。采用交互式多模态影像学技术精准定位手术目标和安全入颅点,在大脑空间构建笛卡尔坐标系,精确定位病灶空间位置,并结合病灶大小、形态及其与周围神经血管的空间关系,精确计算出病灶范围及其对应坐标;安全入颅点的选择应综合考虑颅骨厚度、解剖结构,规避重要神经血管走行区域,基于手术计划软件构建并模拟手术路径。手术规划的关键技术包括精准的病灶目标与周围关键解剖结构的分割提取技术、交互式三维可视化技术、虚拟现实(VR)和增强现实

(AR)技术,通过这些技术,临床医师可对手术方案进行反复调整以筛选出最优方案。近年来,随着人工智能(AI)技术的迅速发展,开发出一系列基于深度学习(DL)的图像处理和目标分割提取技术,可以快速提取图像中病灶目标和关键解剖结构,并通过可视化技术准确展示病灶周围结构,有助于术者进行手术规划。将影像空间计划映射至物理手术空间,在患者体表准确定位是第2个关键环节。这需要将手术规划中计算出的影像空间坐标点转化为实际手术操作中立体定位装置的几何参数,称为影像空间与物理空间的“注册(registration)”,是确保手术精准性之关键。手术机器人注册的精度对手术定位的精准性起决定作用。传统注册方法需在颅骨安装若干标记点后进行影像学检查,以构成影像空间与物理空间对应的点对,用于计算注册参数。该方法有创且需额外的影像学检查,故无标记点的注册方式逐渐成为神经外科手术机器人的标配。无标记点注册主要利用光学追踪、表面匹配等技术,通过对颅骨表面特征的识别和分析,快速准确建立头部与影像的坐标对应关系,不仅避免有创标记给患者带来的痛苦和潜在风险,而且简化操作流程,提高手术效率(图1)。近年发展的结构光扫描配准技术备受关注,通过手术机器人生成的结构光扫描人体表面,可快速采集百万量级人体表面位置用于配准,显著提高配准精度、缩短配准时间。清华大学王广志教授团队在研究中首先发展了手术机器人的结构光注册方法^[11-12],结构光投影系统投射至物体表面,经图像处理生成三维轮廓,与医学影像配准计算手术路径,可快速获得头部轮廓,提高手术精准性和安全性,还可原位投射肿瘤边界等标记,辅助器械定位。上述技术的发展推动了神经

表 1 手术机器人与传统框架手术在脑深部电刺激术、立体定向脑电图和脑组织活检术中的应用比较**Table 1.** Comparison between surgery robot and traditional framework in DBS, SEEG and biopsy

手术类型	文献来源	手术机器人型号	目标误差(mm)			手术时间(min)		
			手术机器人	传统框架手术	P值	手术机器人	传统框架手术	P值
DBS	Mei等 ^[15] (2022)	Sinovation SR1	1.52±0.53	1.77±0.67	0.130	—	—	—
SEEG	Zhang等 ^[19] (2021)	Sinovation SR1	2.27(0.79,3.05)	2.02(1.03,3.04)	0.991	7.60(6.90,8.35)	13.55(11.50,16.00)	<0.001
	乔梁等 ^[20] (2019)	Sinovation SR1	1.40	1.40	>0.05	8.00	14.70	<0.01
脑组织活检术	Hu等 ^[21] (2022)	Sinovation SR1	1.10±0.30	1.63±0.41	<0.05	29.36±13.64	50.57±41.08	<0.05
	Wu等 ^[22] (2021)	Remebot	—	—	—	80.10±12.30	116.50±14.10	<0.01

—, not reported, 未报道。DBS, deep brain stimulation, 脑深部电刺激术; SEEG, stereo-electroencephalography, 立体定向脑电图

外科手术机器人在临床实践中的应用,并经多项临床研究证实其具有耗时短、误差小、安全性高的优势^[13-14]。与传统框架手术相比,神经外科手术机器人误差不明显,并发症发生率也无明显差异,但因操作便捷,其在包括立体定向脑电图(SEEG)等多路径手术中的时间显著短于传统框架手术^[15-16]。

2. 神经外科手术机器人的发展 立体定向神经外科手术机器人的机械臂应具备较大的运动范围和较高的自由度,以适应不同手术路径的需求。机械臂需集成多种类型传感器,用于感知其运动过程中位置和环境的变化。进行脑深部手术时,机械臂凭借其高自由度,可根据手术规划避开重要神经血管,通过关节角度传感器的精准反馈,确保手术器械精准送至病变部位;机械臂的力传感器通过实时监测手术器械与周围脑组织的接触力,避免术中用力不当对脑组织的损伤;此外,为进一步提高手术精准性和安全性,机械臂还应具备高精度的重复定位能力和稳定的机械结构,使其在术中始终维持精准的动作执行,保证手术的顺利实施^[17]。自2014年开始,先后有5家公司的多款神经外科手术机器人在国内批准上市,其中法国Medtech公司生产的ROSA系列最早在国内上市,为神经外科手术机器人的应用奠定基础。此后,国内多家公司陆续推出自主研发的神经外科手术机器人系统,2017年华志微创医疗科技(北京)有限公司的CAS-R-2型无框架脑立体定向手术系统上市;2018年华科精准(北京)医疗设备股份有限公司的SR1神经外科手术机器人和北京柏惠维康科技股份有限公司的Remebot神经外科手术机器人上市;2022年华科精准(北京)医疗设备股份有限公司的Q300神经外科微型手术机器人上市;2023年武汉联影智融医疗科技有限公司的uNav-Brain 550上市;2024年华科精准(北京)医疗

设备股份有限公司生产的X1000型手术机器人代表最新一代神经外科手术机器人的发展方向,不仅具有传统神经外科定位定向功能,同时融合脊柱外科与神经导航功能,这种功能的拓展,极大丰富了神经外科手术机器人的应用场景,术者可在同一台设备上完成多种复杂手术的规划与操作,显著提高手术效率和精准性。目前,我国已实现数百台神经外科手术机器人的装机量,累计完成万余例手术^[18]。临床应用反馈使手术机器人技术不断优化、改进,术者应用也更加熟练,使更多患者获益于先进技术。与传统框架手术相比,神经外科手术机器人的手术成功率和安全性显著提高,手术时间有所缩短(表1)^[15,19-22];同时,临床应用反馈亦为后续产品的研发和改进提供数据支持,推动神经外科手术机器人技术向更高水平迈进,为未来神经外科手术的发展开拓更广阔的空间^[18]。

3. 神经外科手术机器人的临床应用 立体定向脑深部电极植入术是神经外科手术机器人的最常见应用,主要用于辅助定位致痫灶或热凝毁损。按照手术规划将多个杆状电极植入颅内不同部位,实现立体定向脑电图监测,由于植入路径多、覆盖脑区广,徒手操作依赖术者经验且耗时长,故神经外科手术机器人成为立体定向脑深部电极植入术的首选,与传统框架手术相比,基于手术机器人的立体定向脑深部电极植入术入颅点精度和安全性更高^[16]。Vasconcellos等^[9]对811例难治性癫痫患者行基于手术机器人的立体定向脑深部电极植入术,每例患者平均植入10根脑深部电极,手术时间约为157 min,入颅点误差约1.48 mm,靶点误差约2 mm。脑深部电刺激术(DBS)也是神经外科手术机器人的典型应用,其难点是精准定位靶点,神经外科手术机器人凭借其高精度定位系统和机械臂,按照手术

规划精准植入电极,降低脑组织损伤风险,提高手术成功率^[23-25]。也有神经外科手术机器人应用于颅内占位性病变组织活检术和颅内血肿引流术的案例^[26-27],虽然此类手术对精准性的要求低于立体定向脑深部电极植入术,但手术机器人可以便捷、安全地完成关键操作,缩短手术时间,避免手术并发症的发生^[28-29]。结合无标记点注册技术,手术机器人可以自动执行手术计划软件预设路径,极大缩短手术时间,提高手术效率^[8,30]。近年来,磁共振引导激光间质热疗术(MRgLITT)为局灶性癫痫和颅内恶性肿瘤的治疗提供新的方法^[31-33]。术中激光光纤的植入需借助立体定位技术,而传统框架定位在复杂角度和长距离路径规划方面存在挑战,特别是脑深部和功能区病变手术,激光光纤植入偏差可能直接导致脑组织损伤,引发严重手术并发症^[34]。神经外科手术机器人通过整合多模态影像学数据,对复杂颅内结构精确建模,规划激光光纤植入路径时充分考虑病变部位、周围神经血管分布、激光光纤植入角度和距离,凭借机械臂的高自由度和精准控制能力,将激光光纤沿规划路径精确植入靶目标,最大限度减少脑组织损伤,提高手术疗效和生活质量,为激光间质热疗术在脑深部和功能区病变治疗中的广泛应用提供有力支持^[35]。

4. 神经外科手术机器人的应用拓展 通过近10年的临床实践,神经外科手术机器人的应用领域得到进一步拓展。有研究者将其应用于三叉神经痛球囊压迫术(PBC)^[36],传统球囊压迫术需在反复透视下依靠术者经验进行卵圆孔穿刺^[37],难度较高,手术机器人可通过术前精准规划的路径轻松完成定向穿刺,缩短手术时间并减少照射剂量^[38]。面肌痉挛的治疗需准确定位结构狭小且周围解剖结构复杂的茎乳孔,常规穿刺方式难以实施,通过手术机器人按照术前规划路径穿刺,可完成面神经射频消融术(RFA)。手术机器人提供的稳定平台可确保消融电极准确到达目标,并控制热损伤范围^[39]。与传统开颅手术相比,神经外科手术机器人显著降低手术风险,减少术后感染、出血等并发症发生率,一项系统综述对比颞叶癫痫开颅手术与射频消融术和磁共振引导激光间质热疗术的主要并发症发生率,射频消融术和磁共振引导激光间质热疗术分别为3%~12%和3%~8%,显著低于开颅手术的4%~30%和2%~26%^[40]。这些临床应用拓展了治疗新路径,为手术机器人在神经外科复杂疾病治疗

中的应用提供了宝贵经验,推动了神经外科手术向更精准、微侵袭方向发展。除传统机械臂型机器人,近年小型穿刺机器人也应用于神经外科,此类机器人体积小、携带和安装方便,可以在一定范围内自主运动和精准定位定向,临床应用更灵活、简便^[41-42]。相信未来神经外科手术机器人的应用将不断突破传统手术难点,从而为神经外科提供新的治疗方案。

二、神经外科手术导航系统发展现状

神经外科手术导航是影像学引导治疗的典型应用,手术导航系统的工作原理是首先通过多模态影像学数据进行手术规划,确定手术范围和手术入路,通常在患者头部固定标记点并将颅骨与参考架刚性连接,以保证二者几何位置关系不变;然后定位追踪装置对头部标记点与影像学标记点注册,建立空间坐标系与影像坐标系的对应关系;最后术中通过光学或电磁定位追踪技术实时追踪固定于手术器械的定位标志物,并在导航软件中将其位置叠加在影像中,有助于术者定位手术目标。

1. 神经外科手术导航系统的定位追踪装置分类 定位追踪装置是手术导航系统的核心组件。神经外科手术导航系统的追踪技术主要采用红外光学定位追踪技术,标志物为成组的红外反光球,可减少环境光的影响,在个别反光球被遮挡时也可持续保持追踪,具有良好的稳定性和可靠性,可将手术器械位置实时、准确地反馈给术者。此外,还采用电磁定位追踪技术^[43],与光学定位追踪技术相比,电磁定位追踪技术可在有遮挡的情况下定位追踪,但实际应用中金属器械和动力装置可能对磁场产生干扰,影响定位追踪的准确性。从目前的技术水平看,电磁定位追踪技术的精度略低于光学定位追踪技术。鉴于单一定位追踪技术各有特点,神经外科手术导航系统将红外光学定位追踪技术与电磁定位追踪技术相结合,融合二者长处^[5,44]。近年来,随着增强现实技术的发展,也有研究者通过头戴式显示器直接定位坐标并进行引导^[45-46]。

2. 神经外科手术导航系统的临床应用 手术导航系统自诞生以来,迅速成为神经外科手术的重要工具。尤其在复杂脑肿瘤切除术中,术者通过导航系统实时定位手术器械与肿瘤边界、周围重要神经血管的位置关系,如切除位于脑功能区的肿瘤时,通过导航系统引导,最大限度减少神经功能损伤;同时提高肿瘤切除率,延长患者生存期^[47-49]。脑深

部手术中,导航系统有助于术者规划最佳手术路径,使手术器械沿最安全、便捷路径送至病变目标。精准的定位既缩短手术时间,又有效减少因操作范围难以界定导致的并发症,提高手术安全性^[50]。因此,多项指南和专家共识均将神经外科手术中辅以导航系统作为推荐^[51-52]。

3. 神经外科手术导航系统的应用拓展 近年来,手术导航系统的软件和硬件不断发展,增添许多新功能。在传统影像融合配准的基础上,升级病灶分割、血管分割、脑区分割、神经纤维束重建等算法,病灶分割可以将病变组织与正常脑组织精准区分,从而更清晰了解病灶大小、形状和边界,为手术规划提供依据;血管分割可使术者术前即对脑血管分布有全面且直观的认识,避免术中损伤重要血管,降低手术风险;脑区分割可以明确大脑各功能区位置,使术者切除脑功能区病变时最大限度保护神经功能;神经纤维束重建可以直观展示神经纤维走行和分布,避免术中损伤重要神经,减少术后神经功能障碍的发生。上述新功能进一步提高手术导航系统的精准性和实用性,使神经外科手术向更智能化、精细化方向发展^[53-54]。随着人工智能技术的引入,影像分割等处理过程更便捷,智能分割的准确性与传统人工分割已无明显差异^[55-57]。人工智能技术的创新持续推动神经外科手术的进步,不断减轻临床医师负担,提高手术精准性,使患者获益。手术导航系统与其他器械的融合也是未来重要发展方向,开颅手术中颅脑解剖结构可能发生变化,术中实时成像可以提供重要的信息补充,例如,胶质瘤切除术中手术导航系统联合术中超声(iUS)可以显著提高肿瘤切除率,通过手术导航系统,术前即可根据影像学数据规划手术路径,术中超声实时反馈颅脑结构变化,及时调整手术方案,尽可能全切除肿瘤,同时最大程度保留正常脑组织^[58]。手术导航系统还可与手术显微镜或神经内镜联合应用,将导航信息与图像同时呈现,提高手术疗效和准确性^[59-61]。神经调控治疗中手术导航系统也有所应用,与经颅磁刺激(TMS)或聚焦超声(FUS)联合应用,可提高疗效和准确性^[62-63]。

三、神经外科手术机器人和导航系统未来发展趋势

尽管神经外科手术机器人取得长足进展,但仍面临机器人体积较大、移动和运输困难、价格昂贵等问题,不利于临床推广。神经外科手术机器人和

导航系统的技术局限性主要集中于机械臂体积与灵活性的矛盾问题,尚无法突破微型化与操作精度的平衡问题,例如,颅内手术机器人需兼顾狭小空间操作与高自由度要求,但机械臂体积缩小时,传动系统复杂性相应增加,导致设备误差增大或稳定性下降。未来将从以下方面进一步创新:(1)手术机器人微型化,缩小体积、减轻重量、提高移动便捷性,以便拓展应用场景,如急诊脑部穿刺。(2)手术机器人的另一主要目的是在神经调控治疗中的推广应用,目前仍是临床难点问题。(3)神经外科手术机器人和导航系统的功能不断扩展,国内外主要生产厂商进一步进行技术集成,并拓展其应用场景。美国 Medtronic 公司生产的 Stealth Autoguide、德国 Brainlab 公司生产的 Cirq、华科精准(北京)医疗设备股份有限公司生产的 X1000 和 Q300 手术机器人均同时集成手术导航与立体定位技术。随着临床应用与影像学数据的积累和人工智能技术的发展,神经外科手术机器人和导航系统有望更全面地辅助手术全流程。目前的手术规划主要基于人工规划,未来人工智能技术可以基于大量的手术规划数据,通过训练模型,自动生成手术规划,有助于减轻术者负担,提高总体医疗水平。进行复杂脑部手术时,将患者影像学数据、病史资料等信息输入系统,人工智能通过快速分析海量信息,结合手术案例经验,快速生成多个精准且个性化手术方案,术者可根据临床经验和患者个体情况选择最适宜手术方案,显著缩短手术规划时间,使术前准备更高效;同时,人工智能生成的手术规划在整体和细节上更精准,有效减少人工规划可能出现的疏漏,进一步提高手术成功率,未来有望在更多神经外科手术场景中应用。类似技术已在其他领域有所应用,如人工智能技术通过整合消融所需的三维重建和热场模拟等因素,规划可满足临床需求的穿刺路径,这些技术包括投影法和智能法,投影法利用肿瘤质心作为光源,通过设定关键解剖结构为遮挡物规划穿刺路径,避免损伤关键解剖结构^[64]。也有研究者采用人工智能技术预测经皮肾镜技术(PCNL)的临床疗效,其预测术后无石率和需二期手术或输血的准确度高达 81.1%~98.2%^[65]。目前的手术机器人机械臂仅为术者操作起引导作用,手术机器人已然具备给定条件下自主运动能力,如何发挥这一能力值得探索,例如,神经外科手术中需要通过动力系统打开颅腔,其中颅底解剖涉及复杂的颅骨切除,手术

机器人自主磨削颅骨可能较人工磨除更加高效、精准^[66]。2024年,首都医科大学附属北京天坛医院完成首例手术机器人辅助磨除颅骨的神外科手术,手术机器人经远外侧入路按照术前规划区域完成精准磨除,远外侧入路人工磨除颅骨约耗时1h,手术机器人则在24min内即可完成颅骨磨除,显著缩短磨除时间。

综上所述,神经外科手术机器人和导航系统已在神经外科各领域得到广泛应用,不仅成为神经外科的一种手术器械,而且促进精准、微侵袭理念与手术范式的演变。手术机器人与神经影像学的结合可以提供传统手术无法实现的信息整合和操作精度,这一特点在精细、复杂且空间受限的神经外科手术中尤为重要。此外,手术机器人和导航系统与神经外科的结合与精准医学的发展趋势相一致,个性化精准诊疗正日益成为临床工作的常态。手术机器人和导航系统与人工智能技术的结合,必将使临床医师可以根据个体解剖和病理学特征制定个性化最佳治疗方案,提高诊疗质量,为患者带来最大获益。

利益冲突 无

参 考 文 献

- [1] De Benedictis A, Trezza A, Carai A, Genovese E, Procaccini E, Messina R, Randi F, Cossu S, Esposito G, Palma P, Amante P, Rizzi M, Marras CE. Robot - assisted procedures in pediatric neurosurgery[J]. *Neurosurg Focus*, 2017, 42:E7.
- [2] Minchev G, Kronreif G, Ptacek W, Dorfer C, Micko A, Maschke S, Legnani FG, Widhalm G, Knosp E, Wolfsberger S. A novel robot - guided minimally invasive technique for brain tumor biopsies[J]. *J Neurosurg*, 2019, 132:150-158.
- [3] Miller BA, Salehi A, Limbrick DD Jr, Smyth MD. Applications of a robotic stereotactic arm for pediatric epilepsy and neurooncology surgery[J]. *J Neurosurg Pediatr*, 2017, 20:364-370.
- [4] Robertson FC, Sha RM, Amich JM, Essayed W, Lal A, Lee BH, Calvachi Prieto P, Tokuda J, Weaver JC, Kirillos RW, Chen MW, Gormley WB. Frameless neuronavigation with computer vision and real - time tracking for bedside external ventricular drain placement: a cadaveric study[J]. *J Neurosurg*, 2021, 136:1475-1484.
- [5] Keeble H, Lavrador JP, Pereira N, Lente K, Brogna C, Gullan R, Bhangoo R, Vergani F, Ashkan K. Electromagnetic navigation systems and intraoperative neuromonitoring: reliability and feasibility study [J]. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*, 2021, 20:373-382.
- [6] Sorriento A, Porfido MB, Mazzoleni S, Calvosa G, Tenucci M, Ciuti G, Dario P. Optical and electromagnetic tracking systems for biomedical applications: a critical review on potentialities and limitations[J]. *IEEE Rev Biomed Eng*, 2020, 13:212-232.
- [7] Sulangi AJ, Husain A, Lei H, Okun J. Neuronavigation in glioma resection: current applications, challenges, and clinical outcomes[J]. *Front Surg*, 2024, 11:1430567.
- [8] Łajczak P, Łajczak A. Pedal to the metal: accelerating intracerebral hemorrhage treatment with robotic - assisted surgery. A systematic review & meta - analysis of clinical effectiveness[J]. *Neurosurg Rev*, 2024, 47:799.
- [9] Vasconcellos FN, Almeida T, Müller Fiedler A, Fountain H, Santos Piedade G, Monaco BA, Jagid J, Cordeiro JG. Robotic - assisted stereoelectroencephalography: a systematic review and meta - analysis of safety, outcomes, and precision in refractory epilepsy patients[J]. *Cureus*, 2023, 15:e47675.
- [10] Spennato P, Di Costanzo M, Mirone G, Cicala D, De Martino L, Onorini N, Ruggiero C, Cinalli G. Image - guided biopsy of intracranial lesions in children, with a small robotic device: a case series[J]. *Childs Nerv Syst*, 2024, 40:1681-1688.
- [11] Zeng B, Meng F, Ding H, Wang G. A surgical robot with augmented reality visualization for stereoelectroencephalography electrode implantation [J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2017, 12:1355-1368.
- [12] Meng F, Zhai F, Zeng B, Ding H, Wang G. An automatic markerless registration method for neurosurgical robotics based on an optical camera [J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2018, 13:253-265.
- [13] Liu HG, Fan SY, Liu YY, Zhang H, Hu WH, Wu DL, Liu DF, Zhang K, Zhang JG, Yang AC. Preliminary application of 3D - intelligent structured light registration in robot - assisted neurosurgical operations [J]. *Zhonghua Shen Jing Wai Ke Za Zhi*, 2021, 37:880-884.[刘焕光, 范世堂, 刘钰晔, 张华, 胡文瀚, 吴德龙, 刘德峰, 张凯, 张建国, 杨岸超. 3D智能结构光注册技术在机器人辅助神经外科手术中的初步应用[J]. *中华神经外科杂志*, 2021, 37:880-884.]
- [14] Cai D, Wang X, Hu W, Mo J, Liu H, Li X, Zheng X, Ding X, An J, Hua Y, Zhang J, Zhang K, Zhang C. The 3 - dimensional intelligent structured light technique: a new registration method in stereotactic neurosurgery [J]. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*, 2024, 27:566-572.
- [15] Mei S, Yu K, Ren Z, Hu Y, Guo S, Li Y, Li J. Techniques of frameless robot - assisted deep brain stimulation and accuracy compared with the frame - based technique [J]. *Brain Sci*, 2022, 12:906.
- [16] Yao Y, Hu W, Zhang C, Wang X, Zheng Z, Sang L, Shao X, Zhang K. A comparison between robot - guided and stereotactic frame - based stereoelectroencephalography (SEEG) electrode implantation for drug - resistant epilepsy [J]. *J Robot Surg*, 2023, 17:1013-1020.
- [17] Ueda H, Suzuki R, Nakazawa A, Kurose Y, Marinho MM, Shono N, Nakatomi H, Saito N, Watanabe E, Morita A, Harada K, Sugita N, Mitsuishi M. Toward autonomous collision avoidance for robotic neurosurgery in deep and narrow spaces in the brain [J]. *Procedia CIRP*, 2017, 65:110-114.
- [18] Zhou S, Gao Y, Li R, Wang H, Zhang M, Guo Y, Cui W, Brown KG, Han C, Shi L, Liu H, Zhang J, Li Y, Meng F. Neurosurgical robots in China: state of the art and future prospect [J]. *iScience*, 2023, 26:107983.
- [19] Zhang D, Cui X, Zheng J, Zhang S, Wang M, Lu W, Sang L, Li W. Neurosurgical robot - assistant stereoelectroencephalography system: operability and accuracy [J]. *Brain Behav*, 2021, 11:e2347.
- [20] Qiao L, Yu T, Ni DY, Wang XY, Xu CP, Zhang GJ, Li YJ. Application of robot - assisted stereoelectroencephalography electrode implantation in epilepsy surgery [J]. *Zhonghua Shen Jing Wai Ke Za Zhi*, 2019, 35:1049-1053.[乔梁, 遇涛, 倪端宇, 王雪原, 徐翠萍, 张国君, 李勇杰. 机器人辅助立体脑电图电极植入在癫痫外科中的应用[J]. *中华神经外科杂志*, 2019, 35:1049-

- 1053.]
- [21] Hu Y, Cai P, Zhang H, Adilijiang A, Peng J, Li Y, Che S, Lan F, Liu C. A comparison between frame-based and robot-assisted in stereotactic biopsy [J]. *Front Neurol*, 2022, 13: 928070.
- [22] Wu S, Wang J, Gao P, Liu W, Hu F, Jiang W, Lei T, Shu K. A comparison of the efficacy, safety, and duration of frame-based and Remobot robot-assisted frameless stereotactic biopsy[J]. *Br J Neurosurg*, 2021, 35:319-323.
- [23] Ho AL, Ali R, Connolly ID, Henderson JM, Dhall R, Stein SC, Halpern CH. Awake versus asleep deep brain stimulation for Parkinson's disease: a critical comparison and meta-analysis [J]. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2018, 89:687-691.
- [24] Functional Neurosurgery Group, Neurosurgery Branch, Chinese Medical Association; Parkinson's Disease and Movement Disorders Group, Neurology Branch, Chinese Medical Association; Parkinson's Disease and Movement Disorders Group, Neurologist Branch, Chinese Medical Doctor Association; China Neuromodulation Union; China Expert Group on Deep Brain Stimulation Therapy for Parkinson's Disease. Expert consensus on deep brain stimulation therapy for Parkinson's disease in China (second edition) [J]. *Zhonghua Shen Jing Wai Ke Za Zhi*, 2020, 36:325-337. [中华医学会神经外科学分会功能神经外科学组, 中华医学会神经病学分会帕金森病及运动障碍学组, 中国医师协会神经内科医师分会帕金森病及运动障碍学组, 中国神经调控联盟, 中国帕金森病脑深部电刺激疗法专家组. 中国帕金森病脑深部电刺激疗法专家共识(第二版) [J]. *中华神经外科杂志*, 2020, 36:325-337.]
- [25] Functional Neurosurgery Expert Committee, Chinese Medical Doctor Association; Functional Neurosurgery Group, Neurosurgery Branch, Chinese Medical Association; Neuromodulation Professional Committee, Chinese Medical Doctor Association; Minimally Invasive Neurosurgery Professional Committee, Chinese Research Hospital Association; National Expert Steering Committee on Neurosurgery Robot. Chinese expert consensus on neurosurgery robot-assisted deep brain stimulation [J]. *Zhongguo Wei Qin Xi Shen Jing Wai Ke Za Zhi*, 2021, 26:291-295. [中国医师协会功能神经外科专家委员会, 中华医学会神经外科学分会功能神经外科学组, 中国医师协会神经调控专业委员会, 中国研究型医院学会神经微侵袭治疗专业委员会, 国家神经外科手术机器人专家指导委员会. 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 [J]. *中国微侵袭神经外科杂志*, 2021, 26:291-295.]
- [26] Marcus HJ, Vakharia VN, Ourselin S, Duncan J, Tisdall M, Aquilina K. Robot-assisted stereotactic brain biopsy: systematic review and bibliometric analysis [J]. *Childs Nerv Syst*, 2018, 34: 1299-1309.
- [27] Xiong R, Li F, Chen X. Robot-assisted neurosurgery versus conventional treatment for intracerebral hemorrhage: a systematic review and meta-analysis [J]. *J Clin Neurosci*, 2020, 82(Pt B):252-259.
- [28] Tang Z, Huang W, Chen Q, Guo C, Zheng K, Wei W, Jiang Q, Yang R. Curative effect analysis of robot-assisted drainage surgery in treatment of spontaneous hypertensive brainstem hemorrhage [J]. *Front Neurol*, 2024, 15:1352949.
- [29] Gupta M, Chan TM, Santiago-Dieppa DR, Yekula A, Sanchez CE, Elster JD, Crawford JR, Levy ML, Gonda DD. Robot-assisted stereotactic biopsy of pediatric brainstem and thalamic lesions [J]. *J Neurosurg Pediatr*, 2020, 27:317-324.
- [30] Luo L, He CL, Li W, Tang XP. Systematic review and meta-analysis of ROSA vs. conventional therapy for intracerebral hemorrhage [J]. *J Robot Surg*, 2024, 18:326.
- [31] Wu C, Schwalb JM, Rosenow JM, McKhann GM 2nd, Neimat JS; American Society for Stereotactic and Functional Neurosurgeons. The American Society for Stereotactic and Functional Neurosurgery position statement on laser interstitial thermal therapy for the treatment of drug-resistant epilepsy [J]. *Neurosurgery*, 2022, 90:155-160.
- [32] Dabecco R, Gigliotti MJ, Mao G, Myers D, Xu L, Lee P, Ranjan T, Aziz K, Yu A. Laser interstitial thermal therapy (LITT) for intracranial lesions: a single-institutional series, outcomes, and review of the literature [J]. *Br J Neurosurg*, 2024, 38:632-638.
- [33] Chen C, Lee I, Tatsui C, Elder T, Sloan AE. Laser interstitial thermotherapy (LITT) for the treatment of tumors of the brain and spine: a brief review [J]. *J Neurooncol*, 2021, 151:429-442.
- [34] McGrath K, Frain M, Hey G, Rahman M. Complications following laser interstitial thermal therapy: a review [J]. *Neurochirurgie*, 2025, 71:101604.
- [35] Gurses ME, Khalafallah AM, Gecici NN, Cökalp E, Shah KH, DeLong CA, Susic N, Brochu B, Lu VM, Shah AH, Ivan ME, Komotar RJ. The safety, accuracy, and feasibility of robotic assistance in neuro-oncological surgery [J]. *Neurosurg Focus*, 2024, 57:E3.
- [36] Zhong J. Targeting the foramen ovale is the point of percutaneous balloon compression? Comment on: robot-assisted percutaneous balloon compression for trigeminal neuralgia - preliminary experiences [J]. *BMC Neurol*, 2024, 24:79.
- [37] Ren YE, Liu XH, Cheng ZX, Fan XC, Fan BF, Huang D, Hu YS, Jiang ZB, Luo F, Ma K, Qian T, Sun T, Sun HT, Yang LQ, Yu WH, Zhong J, Zhao ZM, Zhou HC, Liu GZ. Chinese experts consensus on percutaneous balloon compression for treatment of trigeminal neuralgia (2022 edition) [J]. *Zhonghua Teng Tong Xue Za Zhi*, 2022, 18:437-448. [任玉娥, 刘小会, 程志祥, 樊肖冲, 樊碧发, 黄东, 胡永生, 蒋宗滨, 罗芳, 马柯, 钱涛, 孙涛, 孙洪涛, 杨立强, 俞文华, 仲骏, 赵宗茂, 周华成, 刘广召. 经皮球囊压迫术治疗三叉神经痛中国专家共识(2022版) [J]. *中华疼痛学杂志*, 2022, 18:437-448.]
- [38] Tan K, Li J, Peng Y, Wu W, Yang Z, Wang Y, Wang Y. Robot-assisted percutaneous balloon compression in elderly patients with trigeminal neuralgia [J]. *J Pain Res*, 2023, 16:1161-1168.
- [39] Liu Q, Chen W, Wang C, Chen B, Chen W, Lu Y, Zhang C, Xu J. Robot-assisted stylomastoid foramen puncture and radiofrequency ablation for hemifacial spasm treatment: clinical outcomes and technique assessment [J]. *Neurosurg Focus*, 2024, 57:E8.
- [40] Kohlhasse K, Zöllner JP, Tandon N, Strzelczyk A, Rosenow F. Comparison of minimally invasive and traditional surgical approaches for refractory mesial temporal lobe epilepsy: a systematic review and meta-analysis of outcomes [J]. *Epilepsia*, 2021, 62:831-845.
- [41] Patel A, Hux N, Virtanen PS, Budnick H, Kazi F, Taylor JK. Frameless stereotactic biopsy of brainstem tumors using the Stealth Autoguide: a technical note [J]. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*, 2025, 28:558-563.
- [42] Atai NA, Mehta VA. Initial United States experience with Medtronic Stealth Autoguide cranial robotic guidance platform [J]. *J Neurosurg*, 2024, 141:1520-1526.
- [43] Tian HQ, Wu DM, Wang JH, Du ZJ, Sun LN. Visualization and real-time tracking technologies of the probe used in surgical navigation based on electromagnetic positioning [J]. *Ji Qi Ren*, 2011, 33:59-65. [田和强, 吴冬梅, 王继虎, 杜志江, 孙立宁. 基于电磁定位的手术导航探针可视化与实时跟踪技术 [J]. *机器人*, 2011, 33:59-65.]
- [44] Pei DT, Huang DQ, Chen J, Zhang JY. Research status and development trend of surgical navigation system [J]. *Lin Chuang Yi Xue Gong Cheng*, 2017, 24:1326-1328. [裴大婷, 黄德群, 陈

- 军, 张佳泳. 手术导航系统的研究现状与发展趋势[J]. 临床医学工程, 2017, 24:1326-1328.]
- [45] Li H, Yan W, Liu D, Qian L, Yang Y, Liu Y, Zhao Z, Ding H, Wang G. EVD surgical guidance with retro - reflective tool tracking and spatial reconstruction using head - mounted augmented reality device [J]. IEEE Trans Vis Comput Graph, 2024.[Epub ahead of print]
- [46] Martin - Gomez A, Li H, Song T, Yang S, Wang G, Ding H, Navab N, Zhao Z, Armand M. STTAR: surgical tool tracking using off-the-shelf augmented reality head-mounted displays[J]. IEEE Trans Vis Comput Graph, 2024, 30:3578-3593.
- [47] Gerritsen JKW, Broekman MLD, De Vleeschouwer S, Schucht P, Nahed BV, Berger MS, Vincent AJPE. Safe surgery for glioblastoma: recent advances and modern challenges [J]. Neurooncol Pract, 2022, 9:364-379.
- [48] Dono A, Zhu P, Takayasu T, Arevalo O, Riascos R, Tandon N, Ballester LY, Esquenazi Y. Extent of resection thresholds in molecular subgroups of newly diagnosed isocitrate dehydrogenase - wildtype glioblastoma [J]. Neurosurgery, 2024, 95:932-940.
- [49] Karschnia P, Young JS, Dono A, Häni L, Sciortino T, Bruno F, Juenger ST, Teske N, Morshed RA, Haddad AF, Zhang Y, Stoecklein S, Weller M, Vogelbaum MA, Beck J, Tandon N, Hervey - Jumper S, Molinaro AM, Rudà R, Bello L, Schnell O, Esquenazi Y, Ruge MI, Grau SJ, Berger MS, Chang SM, van den Bent M, Tonn JC. Prognostic validation of a new classification system for extent of resection in glioblastoma: a report of the RANO resect group[J]. Neuro Oncol, 2023, 25:940-954.
- [50] Mahroq OA, Ganiyu S, Nimmagadda R, Priyatha V, Shaik BF, Ernest - Okonofua EO, Khan S. Neuro navigation versus conventional spinal techniques in analyzing nerve injury and anatomical accuracy: a systematic review[J]. Cureus, 2024, 16: e68760.
- [51] Medical Policy and Administration Agency, National Health Commission of PRC; Glioma Professional Committee, China Anti-Cancer Association; Glioma Professional Committee, Chinese Medical Doctor Association. Guidelines for the diagnosis and treatment of glioma (2022 edition)[J]. Zhonghua Shen Jing Wai Ke Za Zhi, 2022, 38:757-777.[国家卫生健康委员会医政医管局, 中国抗癌协会脑胶质瘤专业委员会, 中国医师协会脑胶质瘤专业委员会. 脑胶质瘤诊疗指南(2022版)[J]. 中华神经外科杂志, 2022, 38:757-777.]
- [52] National Comprehensive Cancer Network. NCCN guidelines: central nervous system cancers (Version 5) [EB/OL]. (2024) [2025 - 02 - 10]. <https://www.nccn.org/guidelines/guidelines-detail?category=1&id=1425>.
- [53] Srivastava GR, Gera P, Rani R, Jaiswal G, Sharma A. A novel method for glioma segmentation and classification on pre - operative MRI scans using 3D U-Nets and transfer learning[J]. Multimed Tools Appl, 2025, 84:3569-3609.
- [54] Wang H, Luo X, Chen W, Tang Q, Xin M, Wang Q, Zhu L. Advancing UWF - SLO vessel segmentation with source - free active domain adaptation and a novel multi-center dataset [C]// Linguraru MG, Dou Q, Feragen A, Giannarou S, Glocker B, Lekadir K, Schnabel JA. Medical image computing and computer assisted intervention: MICCAI 2024, Marrakesh, 2024. Cham: Springer, 2024: 75-85.
- [55] Henschel L, Conjeti S, Estrada S, Diers K, Fischl B, Reuter M. FastSurfer: a fast and accurate deep learning based neuroimaging pipeline[J]. Neuroimage, 2020, 219:117012.
- [56] Wang S, Zhao X, Zhang Y, Zhao Y, Zhao Z, Ding H, Chen T, Qiao S. DPMNet: dual-path MLP-based network for aneurysm image segmentation [C]//Linguraru MG, Dou Q, Feragen A, Giannarou S, Glocker B, Lekadir K, Schnabel JA. Medical image computing and computer assisted intervention: MICCAI 2024, Marrakesh, 2024. Cham: Springer, 2024: 245-254.
- [57] Płotka S, Chrabaszcz M, Biecek P. Swin SMT: global sequential modeling for enhancing 3D medical image segmentation [C]// Linguraru MG, Dou Q, Feragen A, Giannarou S, Glocker B, Lekadir K, Schnabel JA. Medical image computing and computer assisted intervention: MICCAI 2024, Marrakesh, 2024. Cham: Springer, 2024: 689-698.
- [58] Guo X, Xing H, Pan H, Wang Y, Chen W, Wang H, Zhang X, Liu J, Xu N, Wang Y, Ma W. Neuronavigation combined with intraoperative ultrasound and intraoperative magnetic resonance imaging versus neuronavigation alone in diffuse glioma surgery [J]. World Neurosurg, 2024, 192:e355-e365.
- [59] Campagnaro L, Bonaudo C, Capelli F, Della Puppa A. Microscope neuronavigation-guided microsurgical fenestration of quadrigeminal cistern arachnoid cysts: how I do it [J]. Acta Neurochir (Wien), 2023, 165:2561-2565.
- [60] Luzzi S, Giotta Lucifero A. Microscope-based augmented reality with diffusion tensor imaging and fluorescein in insular glioma resection[J]. Neurosurg Focus Video, 2022, 6:V10.
- [61] Campisi BM, Costanzo R, Gulino V, Avallone C, Noto M, Bonosi L, Brunasso L, Scalia G, Iacopino DG, Maugeri R. The role of augmented reality neuronavigation in transsphenoidal surgery: a systematic review[J]. Brain Sci, 2023, 13:1695.
- [62] Lee CC, Chou CC, Hsiao FJ, Chen YH, Lin CF, Chen CJ, Peng SJ, Liu HL, Yu HY. Pilot study of focused ultrasound for drug-resistant epilepsy[J]. Epilepsia, 2022, 63:162-175.
- [63] Lioumis P, Rosanova M. The role of neuronavigation in TMS - EEG studies: current applications and future perspectives[J]. J Neurosci Methods, 2022, 380:109677.
- [64] Zhang TQ, Wang MR, Jiang YQ, Huang JH. Research progress in the digitalization formulation of puncture path planning in ablation treatment of liver tumors[J]. Jie Ru Fang She Xue Za Zhi, 2023, 32:400-403.[张天奇, 王穆荣, 江艺泉, 黄金华. 肝肿瘤消融穿刺路径规划数字化研究进展[J]. 介入放射学杂志, 2023, 32:400-403.]
- [65] Deng H, Cheng F, Cheng SP. The application advancement of artificial intelligence in urinary calculus [J]. Wei Chuang Mi Niao Wai Ke Za Zhi, 2023, 12:208-211.[邓昊, 程帆, 成少平. 人工智能在泌尿系结石中的应用进展[J]. 微创泌尿外科杂志, 2023, 12:208-211.]
- [66] Yao ZC. Research on instrument positioning and autonomous grinding planning of craniotomy robot [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2023.[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: 天津理工大学, 2023.] (收稿日期:2025-02-11)
(本文编辑:彭一帆)