

机器人辅助神经介入手术研究进展

于宁波 游煜根 王鸿鹏 秦岩丁 梁思泉 韩建达

【摘要】 神经介入手术是神经功能障碍性疾病诊断与治疗及相关脑科学研究的重要方法。机器人辅助神经介入手术可以提高介入操作的微创性和精准性,是目前重要研究方向。神经介入手术的导航技术逐渐从传统的光学导航向 MRI 导航发展,介入材料从刚性针向主动式柔性针发展,手术路径规划与导航技术及手术机器人控制技术也不断发展。本文总结上述四方面关键技术,综述机器人辅助神经介入手术研究进展,以促进其临床应用。

【关键词】 机器人手术; 脑疾病; 磁共振成像,介入性; 手术导航系统; 综述

Advances of robot-assisted neurointervention surgery

YU Ning-bo¹, YOU Yu-gen¹, WANG Hong-peng¹, QIN Yan-ding¹, LIANG Si-quan², HAN Jian-da¹

¹College of Artificial Intelligence, Engineering Research Center of Trusted Behavior Intelligence, Ministry of Education, Nankai University, Tianjin 300350, China

²Department of Neurosurgery, Tianjin Huanhu Hospital, Tianjin 300350, China

Corresponding author: HAN Jian-da (Email: hanjianda@nankai.edu.cn)

【Abstract】 Neurointervention surgery is an important method for diagnosis and treatment of neurological disorders and related brain scientific research. Robot-assisted neurointervention surgery can improve the minimally invasive and accurate interventional surgery, which is an important research direction. At present, the navigation technology of neurointervention surgery has gradually developed from the traditional optical navigation to MRI navigation, the interventional materials have developed from rigid puncture needle to active flexible puncture needle, and the surgical path planning and navigation technology and the surgical robot control technology have also been developing. This paper summarizes the four key technologies mentioned above and reviews the research progress of robot-assisted neurointervention surgery to promote its clinical application.

【Key words】 Robotic surgical procedures; Brain diseases; Magnetic resonance imaging, interventional; Surgical navigation systems; Review

This study was supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB4702800), and the National Natural Science Foundation of China (No. U1913208).

Conflicts of interest: none declared

神经介入技术的诞生标志着神经功能障碍性疾病机制、诊断与治疗研究进入微创时代,无需开颅即可实现对颅内靶点的定位和处理。微创和精准是神经介入手术的两大核心目标。目前主流的

光学导航技术基于术前-术中图像匹配的定位原理,无法直接获知术中脑组织变化,易造成损伤。若可实现在 MRI 导航下机器人辅助神经介入手术,有望从根本上解决脑组织漂移对穿刺精度的影响。现有的神经介入手术多采用刚性针操作,手术路径规划的灵活性和插入点的范围受到极大限制。柔性针材料、手术路径规划与导航、手术机器人等可规避脑组织、神经、血管等重要生理结构,减少手术损伤,而备受关注。基于此,本文拟从 MRI 兼容手术机器人系统、基于柔性针的介入技术、手术路径规划与导航技术、手术机器人控制技术四方面,综述机器人辅助神经介入手术研究进展,以为其临床应

doi:10.3969/j.issn.1672-6731.2023.01.009

基金项目:国家重点研发计划项目(项目编号:2022YFB4702800);国家自然科学基金资助项目(项目编号:U1913208)

作者单位:300350 天津,南开大学人工智能学院 可信行为智能算法与系统教育部工程研究中心(于宁波,游煜根,王鸿鹏,秦岩丁,韩建达);300350 天津市环湖医院神经外科(梁思泉)

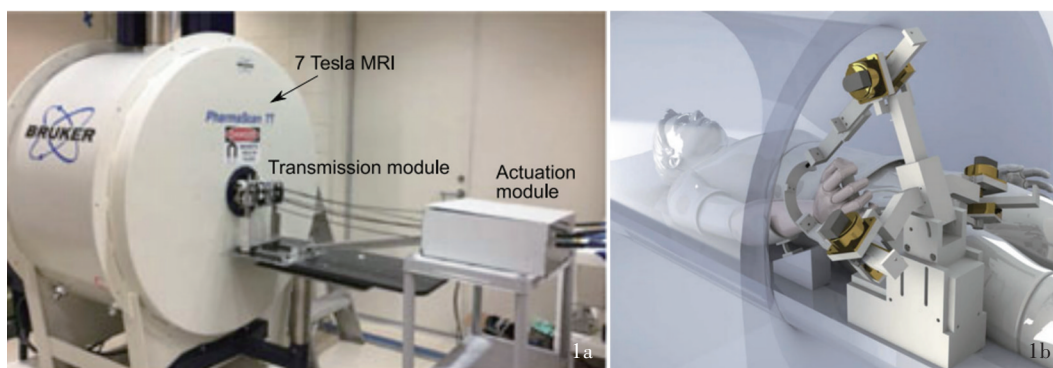
通讯作者:韩建达,Email:hanjianda@nankai.edu.cn

用提供指导。

一、神经介入机器人系统关键技术

1. MRI 兼容手术机器人系统 目前的机器人辅助神经介入手术多采用术前 MRI 影像[患者需植入标志物(marker)]+术中机器人注册(registration, 机器人坐标系与人体坐标系之间进行标定)的模式。术前植入标志物进行 MRI 检查,并基于 MRI 影像进行手术规划;术中通过光学导航系统进行机器人注册后,机器人即可依照术前规划形成进针导航通道,再由术者沿通道完成进针操作。得益于机器人高精度的定位能力,其辅助神经介入手术可显著提高操作精度^[1]。然而,现有的机器人辅助定位导航系统功能本质上仍基于术前影像学对颅内靶点的体外定位,术中脑组织漂移易造成脑损伤。MRI 对软组织具有较高的分辨力和对比度,无电离辐射,无需使用对比剂而无放射性损伤,是目前脑组织成像的最佳影像学技术^[2-3];但 MRI 扫描仪存在较强的静磁场及高动态梯度和射频磁场,且工作空间狭小,常规手术机器人系统难以满足 MRI 环境与手术工作空间兼容性需求^[4-5]。因此, MRI 环境对机器人系统的设计要求较为特殊,应以驱动方式的选择以及传动链的设计为核心。目前应用较多的驱动方式包括绳驱动、液压驱动、气压驱动和压电陶瓷驱动。(1)绳驱动:可实现驱动器与机器人关节的空间分离,以使含有铁磁材料的机器人驱动器置于强磁场外。此种驱动方式不影响 MRI 成像,设计灵活,输出机构惯性小、运动灵活,备受青睐。代表性机器人系统为美国约翰霍普金斯大学 Li 等^[6-7]研发的注射机器人系统,通过将注射针驱动装置移出 MRI 成像区域并利用链传动机构实现动力传导,目前已进入人体模型测试阶段。美国佐治亚理工学院 Wang 等^[8]基于同步带传动研发出远程操控的神经外科手术机器人系统,并进行人脑模型测试(图 1a)。国内天津大学、哈尔滨理工大学、河北工业大学等也相继开展电机远程驱动与丝传动相结合的 MRI 兼容手术机器人系统的本体研发^[9-10]。应注意的是,若输出机构的自由度较高,绳驱动的传动链设计即变得复杂;驱动绳非线性形变的特性也对机器人的精准控制提出挑战。(2)液压驱动:此种驱动方式输出力/力矩较大、惯性较小。代表性机器人系统为电气液压混合驱动六自由度机器人^[11]以及应用于 MRI 环境下的液压马达^[12-13],均已完成人体模型测试。液压驱动结构复杂且存在液体泄露风险,

不利于机器人系统的小型化以及机器人与手术室的集成。(3)气压驱动:该驱动系统的工作介质是空气,是一种洁净的驱动方式,且结构紧凑、运动和反应速度较快,可克服系统超调并提高稳定性。代表性机器人系统包括美国约翰霍普金斯大学医学院 Muntener 等^[14]研发的放射粒子植入机器人系统、马里兰大学 Yang 等^[15]研发的单自由度气动机器人系统、佐治亚理工学院 Musa 等^[16]研发的 MRI 检测时感知头部运动的气动软体机器人系统。国内香港中文大学、天津大学、上海交通大学、中国矿业大学等也相继开展气压驱动 MRI 兼容手术机器人运动机构、传动机构等的研发^[17]。但气压驱动存在如空气高压压缩性导致机械传动延迟等问题,且阀门与压缩空气能量的耗散需精细设计以避免噪声对患者及术者造成干扰。(4)压电陶瓷驱动:基于压电陶瓷原理设计的超声驱动器最具代表性。超声驱动器系利用压电陶瓷的逆压电效应原理实现运动,无绕组和磁路,不依靠电磁相互作用,工作过程中不产生磁场,不受 MRI 强磁场的影响,是一种适用于 MRI 环境的驱动器。近年来,超声驱动器开始应用于 MRI 兼容手术机器人系统^[18]。最具代表性的是 2021 年美国伍斯特理工学院研发的 MRI 兼容脑肿瘤消融机器人系统^[3],可与 MRI 扫描空间完全兼容,具有 8 个自由度,进而实现消融针和套管的插入和旋转,现已开展消融针插入离体羊脑的定位精度实验和动物离体组织的热消融操作精度实验,是目前最成熟的 MRI 兼容神经介入手术机器人系统。此外,还包括美国哈佛大学医学院研发的 MRI 兼容穿刺针装置^[19]、美国莱斯大学研发的可用于 fMRI 的手术机器人系统(图 1b)^[20]。国内南京航空航天大学、北京航空航天大学、哈尔滨工业大学等也相继开展基于超声驱动器的 MRI 兼容手术机器人系统的研发^[21]。特别是南开大学针对超声驱动器的非线性特性开展特色机器人控制技术研究,建立了自由度满足远心运动(RCM)约束的 MRI 兼容实验平台,并取得较高的控制精度^[22-23]。与其他驱动方式相比,压电陶瓷驱动神经介入手术机器人发展较晚,基于超声驱动器的驱动与传动机构设计、针对超声驱动器非线性特性的机器人控制方法等仍有待完善。(5)其他驱动方式:研究者还积极探索基于其他物理原理的 MRI 兼容驱动方式,德国马克斯·普朗克智能系统研究所 Mutlu 等^[24]采用形状记忆合金丝制成光驱动器,通过 MRI 扫描仪运行时的磁场



7 Tesla MRI, 7T MRI; Transmission module, 传动模块; Actuation module, 驱动模块

图1 MRI兼容神经介入手术机器人系统 1a 可远程操控的神经外科手术机器人系统^[8] 1b 可用于fMRI的手术机器人系统^[20]

Figure 1 MRI-compatible neurointervention surgery robot systems Remote controlled neurosurgery robot system^[8] (Panel 1a). Surgery robot system capable of working in fMRI^[20] (Panel 1b).

作用使驱动器获得驱动力/力矩。其特点是可免除复杂的线管排布,实现紧凑的模块化设计,但目前该驱动器仅可实现单向运动,仍待进一步研究。虽然上述驱动方式并非针对神经介入手术机器人系统,但仍可为MRI兼容神经介入手术机器人系统驱动方式的选择提供指导。与光学导航系统相比,MRI兼容手术机器人系统可以实现术中MRI导航,有效防止脑组织漂移,实现更准确的目标定位,提高手术操作精度,且有更安全的针刺操作潜力;对于术者而言,可以获得术中影像,更直观、实时地了解 and 判断颅内情况。但上述MRI兼容神经介入手术机器人系统尚未进行临床验证,需进一步探索。

2. 基于柔性针的介入技术 柔性针针体刚度较低,可实现弯曲的穿刺路径,避开重要组织,执行更精细的介入操作,减少手术损伤^[25-27]。基于柔性针的介入技术是目前研究热点,根据驱动方式分为被动式和主动式。(1)被动式柔性针:被动式柔性针呈弯曲状,通过改变基座方向或针尖与脑组织相互作用力以改变穿刺针弯曲路径。与前列腺、乳腺、肝脏、肾脏等组织不同,脑组织刚度较低,柔性针在脑组织中不易弯曲,且穿刺过程极易对脑组织造成挤压、撕裂等损伤^[26]。如何实现适应脑组织的低刚度是被动柔性针的技术难题。Cotler等^[28]提出减小柔性针直径的策略,采用外径60微米的玻璃微针在猪脑离体模型中进行穿刺实验,显示出极好的弯曲性能。此外,在柔性针侧壁加工缺口也可有效降低柔性针刚度,如采用激光在柔性针侧壁切割出螺旋分布和相互咬合的楔形槽,可有效抑制柔性针在穿刺

过程中对脑组织的切割损伤^[26]。多层弯曲针组成的套管结构也是被动柔性针的典型方案。Bergeles等^[29]采用多层套管构成柔性针,并提出考虑手术操作空间和解剖学结构以优化设计各段套管长度和曲率的方法,实现复杂的手术三维曲线运动,从而灵活避开重要脑组织、神经、血管,减少手术损伤。目前已用于治疗脑积水的脉络丛烧灼术。美国Rox等^[30]研发出一款新型双臂同心管系统,通过多层不同曲率的柔性管结构实现复杂穿刺路径。被动式柔性针无需复杂的驱动系统即可通过多层不同曲率的柔性针实现复杂穿刺路径,但固定的柔性针曲率限制其灵活性。(2)主动式柔性针:被动式柔性针虽可通过针体弯曲减少手术损伤,但调节路径曲率时需伴随扭转穿刺针等操作,可增加脑损伤^[31],通过绳驱动、压电陶瓷驱动、形状记忆合金驱动等方式为针尖运动增加主动自由度,研制主动柔性针是重要解决方法。主动式柔性针的弯曲需外部驱动器实现,如通过绳驱动弯曲的柔性针。美国斯坦福大学Ryu等^[32]研发出一种用于MRI兼容主动式柔性针,通过低温形状记忆合金导线驱动穿刺针远端弯曲运动,以及通过内部光学加热实现温度调节。此外,磁驱动原理也被用于主动柔性针的设计。Hong等^[27,33]研发由微型磁铁和球铰构成的主动柔性针,可利用外界磁场改变针尖偏转角度,实现柔性针穿刺轨迹的主动控制,因无需在针体内部设置驱动和传动机构,适用于需细小针体的手术。(3)柔性针的力测量:与刚性针相比,柔性针可发生针体弯曲形变,难以准确测量针体与脑组织之间的交互

力,故柔性针的力感知技术成为目前研究热点,主要采用柔性良好、可微小化的光纤布拉格光栅(FBG)力传感器。美国俄克拉荷马大学 Yokoyama 等^[34]采用 3 根沿轴向对称布置的 FBG 力传感器,实现对弹性聚合物制造的管状柔性关节的导管力感知。英国伦敦国王学院 Polygerinos 等^[35]设计 3 种 MRI 兼容导管末端力感知系统,证实 FBG 力传感器用于 MRI 环境下力测量的可行性,但尚未进行临床验证。此外,相位调制光纤传感器是另一种实现柔性针力/力矩感知的重要技术途径,采用法布里-珀罗干涉(Fabry-Pérot interferometry)原理,实现对柔性针力/力矩的高精度和高分辨率感知,且具有 MRI 兼容特性。土耳其伊斯坦堡海峡大学 Uzun 等^[36]采用改进的相位调制光纤传感器在 MRI 环境下实现对柔性针力/力矩的测量,测量范围达 20 N,分辨率达 0.03 N。

3. 手术路径规划与导航技术 神经介入手术路径规划与导航的经典流程为,术前根据 MRI 图像分割出手术靶点与其他重要脑组织、神经、血管,进行手术路径规划;术中对发生形变的组织进行刚性或非刚性配准,准确定位手术靶点与其他重要组织,实时调整手术方案和操作。精准的手术路径规划与导航是实现机器人神经介入手术的关键。(1)MRI 图像分割: MRI 图像分割是进一步形成柔性针路径,规避重要脑组织、神经、血管的基础。早期研究根据不同分割区的影像学特点人工设计图像特征,分割精度较低。近年来,基于机器学习(ML)等人工智能(AI)算法的 MRI 图像分割技术取得较大进展,依靠神经网络训练可以获得较好的 MRI 图像分割特征,实现更精细、更准确的 MRI 图像分割。以 3D 卷积神经网络(CNN)算法进行 MRI 图像分割最具代表性^[37-40]。采用基于 3D 卷积神经网络的 Deep Medic 模型进行脑肿瘤影像分割,可获得 MRI 图像局部信息和空间背景信息,还可获得 3D 脑结构地图以更好地展现病变部位^[41]。基于临床脑肿瘤数据集的研究显示,神经网络模型 Deep Medic 可精准实现对 MRI 图像中脑肿瘤的定位和自动分割,在仅提供较少样本和过滤器(如脑肿瘤影像分割任务中某种罕见肿瘤的影像学样本量极少),导致神经网络模型得不到充分训练,对样本稀缺类别的分割精度

过低。常见的基于深度学习的解决方案是多网络级联法,让神经网络逐步学习由粗到细的分割任务,尽可能减少样本量不平衡带来的影响,提高对样本稀缺类别的分割精度,但因忽视对各级联网络特征之间的充分应用,基于多网络级联法的网络模型通常较巨大,对该神经网络模型进行训练和部署需耗费较高的计算资源和时间成本。Zhou 等^[42]在 BRATS 2018 (The Multimodal Brain Tumor Image Segmentation Benchmark 2018)挑战赛中提出跨任务引导训练脑肿瘤分割的 3D 卷积神经网络算法,通过全肿瘤粗略分割、同类肿瘤精确分割、脑肿瘤精确分割这 3 个不同但又紧密联系的任务引导,充分利用特征之间关系,训练出轻量级脑肿瘤分割网络,既可解决类间样本不平衡的问题,又降低该神经网络模型训练和部署的门槛,有利于其临床推广应用。(2)机器人介入操作方案:统筹术前-术中多模态影像学信息与手术操作需求、综合解剖结构特征与介入操作以形成机器人辅助介入操作方案是手术路径规划与导航的关键技术。南开大学韩建达教授团队提出术像一体化的手术路径规划与导航技术(图 2),综合影像学显示的个体化信息与手术操作需求等,获得个体化最优手术路径,该项技术使手术路径更具针对性,手术损伤更小,且便于术者操作^[43]。(3)非刚性医学影像配准:脑组织刚度较低,易受穿刺针挤压、变形,发生脑组织漂移,常用的刚性配准方法假设脑组织为刚体且术中可保持术前位置、形状等,导致配准结果难以满足神经介入手术的精度要求。为提高介入操作的精度,应考虑术中脑组织形变,并在此基础上与术前影像进行配准,非刚性医学影像配准方法应运而生。该方法分为基于物理模型和基于空间变换两大类。基于物理模型的配准方法将图像看作一个物理模型,通过该模型的物理形变表示图像之间的差异;一般物理模型是从连续介质力学的理论中推导而来,常用模型有线性弹性模型、黏性流体模型和光流场模型等。基于物理模型的配准方法在模型理想条件内常保持稳定的配准效果,但物理建模通常是对真实物理世界的简化,在非理想条件下易失效,故该配准方法的适用范围受到较大限制。基于空间变换的配准方法源自插值和近似理论,是一种参数化方法,采用基函数(包括径向基函数、样条函数和小波变换函数)表示图像形变,并配合插值算法,确定待配准图像对之间的映射关系。该方法可挖掘出未

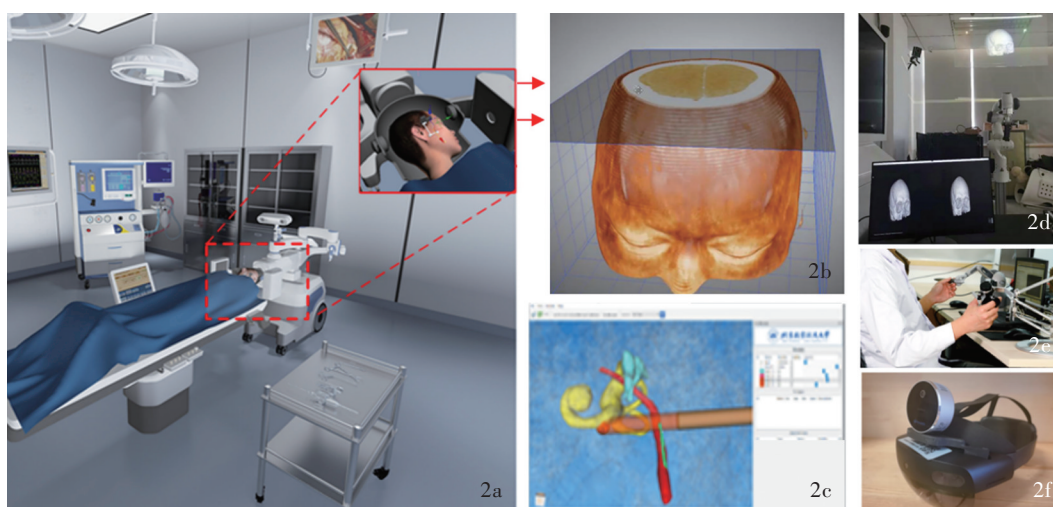


图2 术像一体化的手术路径规划与导航技术^[43] 2a 虚拟手术场景 2b 头部3D重构数字化模型 2c 手术路径规划与导航 2d 通过屏幕实现可视化交互 2e 用于主从控制的触觉设备 2f 用于视觉交互的虚拟现实设备

Figure 2 Surgical path planning and navigation technology with operation-imaging integration^[43] Virtual surgical scene (Panel 2a). Head 3D reconstruction digital model (Panel 2b). Surgical path planning and navigation (Panel 2c). Visualized interaction through the screen (Panel 2d). A haptic device for master-slave control (Panel 2e). A virtual reality device for visual interaction (Panel 2f).

知的数据关系,实现较高精度的配准。特别是基于深度学习算法(包括无监督学习和监督学习)的非刚性医学影像配准方法,可依靠深度学习模型的非线性拟合能力,获得较高的配准精度^[44-47]。虽然基于深度学习算法的方法配准性能优越,但无法保证模型输出的可靠性,也无法准确界定模型适用范围和失效条件,在神经介入手术中的应用受到极大限制。有学者将基于深度学习算法的配准方法与基于图像特征的经典配准方法相结合,获得更可靠的配准精度。如通过无监督学习算法提取待配准图像的最佳特征后,再采用基于相似度匹配的经典配准方法完成非刚性配准^[48],以获得更高的配准精度;也有学者通过学习多模态图像对之间的相似性测度以驱动迭代优化,再通过经典配准方法完成配准,并在MRI与CT图像配准测试中表现出较高的准确性和鲁棒性^[49]。目前,基于深度学习算法的非刚性医学影像配准方法正处于探索阶段,尚无法从根本上解决问题,且大多数配准方法均建立在实验室少量样本数据的基础上,与人体真实情况的一致性尚未确定。因此,尚待进一步探索兼具高配准精度和可靠性的配准方法。

4. 手术机器人控制技术 手术机器人动力学复杂,各自由度之间强耦合且存在迟滞等非线性特性,需依赖先进的机器人控制技术以实现其精准操

作。针对系统非线性、强磁迟滞等难以建模的动力学扰动,南开大学韩建达教授团队研发出离线参考模型+在线主动建模技术,通过对手术机器人进行离线物理学建模和在线动力学扰动主动辨识相结合的方法,成功实现对包括迟滞效应在内的未建模动力学扰动的主动抑制,并在不同驱动方式手术机器人上进行验证,获得较高的操作精度^[50-51]。主从系统手术机器人可以充分发挥术者临床经验与机器人精准操控的优势,通过对机器人设置安全控制机制以避免操作者动作失误带来的安全隐患^[52]。但传统的主从系统手术机器人的安全约束相对固定且简单。Yan等^[53]提出一种基于机器学习算法的主从系统手术机器人控制方法,通过构建人机信任评估模型,评估人机协同场景,在信任度较低的协作场景下动态调整较小的主从控制比,以实现更精细的操作,提高手术安全性;在信任度较高的协作场景下采用较大的主从控制比,以提高操作效率。该方法兼顾手术安全性与手术操作效率,并在模拟人体结构的血管模型测试中表现出良好的手术交互效果和较高的手术操作精度。此外,基于经典控制理论的主从系统手术机器人控制方法也不断创新。Saini等^[54]提出一种双闭环控制的主从系统手术机器人控制方法,采用闭环逆运动学和自适应控制方法,实现手术机器人对手术轨迹的精确跟踪;

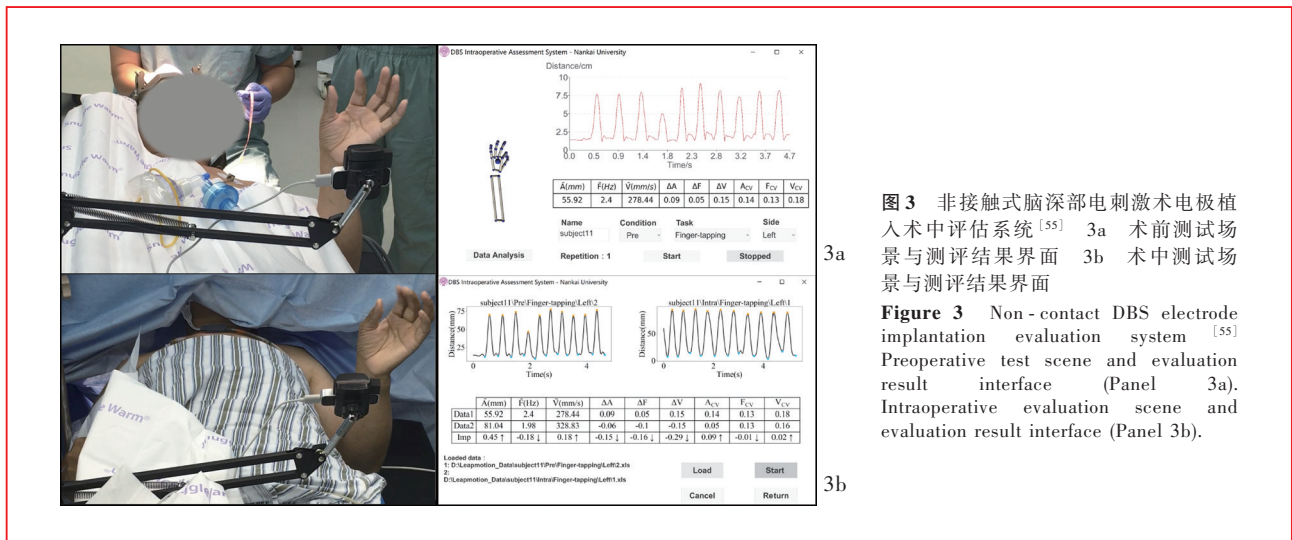


图3 非接触式脑深部电刺激术电极植入术中评估系统^[55] 3a 术前测试场景与测评结果界面 3b 术中测试场景与测评结果界面

Figure 3 Non-contact DBS electrode implantation evaluation system^[55] Preoperative test scene and evaluation result interface (Panel 3a). Intraoperative evaluation scene and evaluation result interface (Panel 3b).

手术机器人与患者交互时采用阻抗控制,避免损伤手术区域附近组织;同时,术者可通过主侧机器人向从侧机器人下达运动轨迹任务,并获得从侧机器人的触觉反馈,以提高对手术的感知能力。与机器学习算法相比,主从系统手术机器人控制方法理论上可以保证机器人灵活的运动性能,具有更高的可靠性。

二、小结与展望

机器人辅助神经介入手术关键技术的研发进一步提高神经介入手术的微创性和精准性,但仍有诸多问题亟待解决,如快速、客观的术中功能评估应引起临床的足够重视。南开大学与天津市环湖医院合作团队创新性研发出脑深部电刺激术(DBS)电极植入术中评估系统,用于术中对指动作的量化评估,客观且快速,缩短手术时间(图3)^[55]。随着手术机器人技术的不断发展,机器人辅助神经介入手术终将应用于临床。但手术机器人的引入可能需要形成新的手术范式或操作规范,新设备的训练也需耗费一定的学习时间。如何接轨传统神经介入手术,缩短机器人操作的学习周期,使术者快速熟悉机器人系统将是该项技术临床普及过程中的挑战,这些问题需临床医学与工程学紧密交叉、医工融合、共同解决。

利益冲突 无

参 考 文 献

[1] Dlaka D, Švaco M, Chudy D, Jerbić B, Šekoranja B, Šuligoj F, Vidaković J, Romić D, Raguž M. Frameless stereotactic brain biopsy: a prospective study on robot-assisted brain biopsies performed on 32 patients by using the RONNA G4 system[J]. Int J Med Robot, 2021, 17:e2245.

[2] Wu D, Li G, Patel N, Yan J, Kim GH, Monfaredi R, Cleary K, Iordachita I. Remotely actuated needle driving device for MRI-guided percutaneous interventions: force and accuracy evaluation [J]. Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc, 2019, 64:1985-1989.

[3] Li G, Patel NA, Burdette EC, Pilitis JG, Su H, Fischer GS. A fully actuated robotic assistant for MRI-guided precision conformal ablation of brain tumors [J]. IEEE ASME Trans Mechatron, 2021, 26:255-266.

[4] Su H, Kwok KW, Cleary K, Iordachita I, Cavusoglu MC, Desai JP, Fischer GS. State of the art and future opportunities in MRI-guided robot-assisted surgery and interventions [J]. Proc IEEE Inst Electr Electron Eng, 2022, 110:968-992.

[5] Farooq MU, Ko SY. A decade of MRI compatible robots: systematic review [J]. IEEE Trans Robot, 2022:1-23.

[6] Li G, Patel NA, Wang Y, Dumoulin C, Loew W, Loparo O, Schneider K, Sharma K, Cleary K, Fritz J, Iordachita I. Fully actuated body-mounted robotic system for MRI-guided lower back pain injections: initial phantom and cadaver studies [J]. IEEE Robot Autom Lett, 2020, 5:5245-5251.

[7] Li G, Patel NA, Sharma K, Monfaredi R, Dumoulin C, Fritz J, Iordachita I, Cleary K. Body-mounted robotics for interventional MRI procedures [J]. IEEE Trans Med Robot Bionics, 2020, 2: 557-560.

[8] Wang X, Cheng SS, Desai JP. Design, analysis, and evaluation of a remotely actuated MRI-compatible neurosurgical robot [J]. IEEE Robot Autom Lett, 2018, 3:2144-2151.

[9] Lu M, Zhang Y, Du H. Design and control of a novel magnetic resonance imaging-compatible breast intervention robot [J]. Int J Adv Robot Syst, 2020, 17:1495-1506.

[10] Jia XH, Zhang YD, Du HY, Jiang JG, Yan Y. Analysis and research of double tendon-sheath transmission under nuclear magnetic environment [J]. Yi Qi Yi Biao Xue Bao, 2019, 40:242-253. [贾小红, 张永德, 杜海艳, 姜金刚, Yan Yu. 应用于核磁环境的双腱鞘传动分析与研究 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40:242-253.]

[11] Kim D, Kobayashi E, Dohi T, Sakuma I. A new, compact MR-compatible surgical manipulator for minimally invasive liver surgery [C]. International Conference on Medical Image Computing and Computer-assisted Intervention-MICCAI 2002, Tokyo, Japan, 2002. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002:99-106 [2022-11-14]. https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-45786-0_13.

[12] Dong ZY, Guo ZY, Lee KH, Fang G, Tang WH, Chang HC,

- Chan TM, Kwok KW. High-performance continuous hydraulic motor for MR safe robotic teleoperation[J]. *IEEE Robot Autom Lett*, 2019, 4:1964-1971.
- [13] He ZL, Dong ZY, Fang G, Ho DL, Cheung CL, Chang HC, Chong CN, Chan YK, Chan TM, Kwok KW. Design of a percutaneous MRI-guided needle robot with soft fluid-driven actuator[J]. *IEEE Robot Autom Lett*, 2020, 5:2100-2107.
- [14] Muntener M, Patriciu A, Petrisor D, Mazilu D, Bagga H, Kavoussi L, Cleary K, Stoianovici D. Magnetic resonance imaging compatible robotic system for fully automated brachytherapy seed placement[J]. *Urology*, 2006, 68:1313-1317.
- [15] Yang B, Tan UX, McMillan A, Gullapalli R, Desai JP. Design and control of a 1-DOF MRI-compatible pneumatically actuated robot with long transmission lines [J]. *IEEE ASME Trans Mechatron*, 2011, 16:1040-1048.
- [16] Musa M, Sengupta S, Chen Y. MRI-compatible soft robotic sensing pad for head motion detection[J]. *IEEE Robot Autom Lett*, 2022, 7:3632-3639.
- [17] Meng D, Wei W, Tang C, Wang W, Ding X. Modeling of a 6-DOF parallel manipulator driven by pneumatic muscles [C]. 2017 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM), Ningbo, China, 2017. New York: IEEE, 2017:688-692[2022-11-14].<https://ieeexplore.ieee.org/document/8274861>.
- [18] Gao X, Zhang SJ, Deng J, Liu YX. Development of a small two-dimensional robotic spherical joint using a bonded-type piezoelectric actuator[J]. *IEEE Trans Ind Electron*, 2021, 68:724-733.
- [19] Song SE, Tokuda J, Tuncali K, Tempany CM, Zhang E, Hata N. Development and preliminary evaluation of a motorized needle guide template for MRI-guided targeted prostate biopsy [J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2013, 60:3019-3027.
- [20] Sergi F, Erwin AC, O'Malley MK. Interaction control capabilities of an MR-compatible compliant actuator for wrist sensorimotor protocols during fMRI [J]. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2015, 20:2678-2690.
- [21] Shi Y, Li N, Tremblay C, Martel S. A piezoelectric robotic system for MRI targeting assessments of therapeutics during dipole field navigation[J]. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2021, 26:214-225.
- [22] Qin YD, Soundararajan R, Jia RR, Huang SL. Direct inverse linearization of piezoelectric actuator's initial loading curve and its applications in Full-Field Optical Coherence Tomography (FF-OCT) [J]. *Mech Syst Signal Proc*, 2021, 148:107147.
- [23] Qin YD, Duan H, Han JD. Direct inverse hysteresis compensation of piezoelectric actuators using adaptive Kalman filter[J]. *IEEE Trans Ind Electron*, 2022, 69:9385-9395.
- [24] Mutlu S, Yasa O, Erin O, Sitti M. Magnetic resonance imaging-compatible optically powered miniature wireless modular lorentz force actuators[J]. *Adv Sci (Weinh)*, 2020, 8:2002948.
- [25] Aghdam AN, Liu XP. A novel path planner for steerable bevel-tip needles to reach multiple targets with obstacles [J]. *IEEE Trans Instrum Measur*, 2020, 69:7636-7645.
- [26] Rox M, Emerson M, Ertop TE, Fried I, Fu M, Hoelscher J, Kuntz A, Granna J, Mitchell J, Lester M, Maldonado F, Gillaspie EA, Akulian JA, Alterovitz R, Webster RJ 3rd. Decoupling steerability from diameter: helical dovetail laser patterning for steerable needles [J]. *IEEE Access*, 2020, 8:181411-181419.
- [27] Hong A, Petruska AJ, Zemmar A, Nelson BJ. Magnetic control of a flexible needle in neurosurgery [J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2021, 68:616-627.
- [28] Cotler MJ, Rousseau EB, Ramadi KB, Fang J, Graybiel AM, Langer R, Cima MJ. Steerable microinvasive probes for localized drug delivery to deep tissue [J]. *Small*, 2019, 15:e1901459.
- [29] Bergeles C, Gosline AH, Vasilyev NV, Codd PJ, Del Nido PJ, Dupont PE. Concentric tube robot design and optimization based on task and anatomical constraints [J]. *IEEE Trans Robot*, 2015, 31:67-84.
- [30] Rox MF, Ropella DS, Hendrick RJ, Blum E, Naftel RP, Bow HC, Herrell SD, Weaver KD, Chambless LB, Webster RJ 3rd. Mechatronic design of a two-arm concentric tube robot system for rigid neuroendoscopy [J]. *IEEE ASME Trans Mechatron*, 2020, 25:1432-1443.
- [31] Swaney PJ, Burgner J, Gilbert HB, Webster RJ 3rd. A flexure-based steerable needle: high curvature with reduced tissue damage[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2013, 60:906-909.
- [32] Ryu SC, Quek ZF, Koh JS, Renaud P, Black RJ, Moslehi B, Daniel BL, Cho KJ, Cutkosky MR. Design of an optically controlled MR-compatible active needle[J]. *IEEE Trans Robot*, 2015, 31:1-11.
- [33] Hong A, Boehler Q, Moser R, Zemmar A, Stieglitz L, Nelson BJ. 3D path planning for flexible needle steering in neurosurgery [J]. *Int J Med Robot*, 2019, 15:e1998.
- [34] Yokoyama K, Nakagawa H, Shah DC, Lambert H, Leo G, Aeby N, Ikeda A, Pitha JV, Sharma T, Lazzara R, Jackman WM. Novel contact force sensor incorporated in irrigated radiofrequency ablation catheter predicts lesion size and incidence of steam pop and thrombus [J]. *Circ Arrhythm Electrophysiol*, 2008, 1:354-362.
- [35] Polygerinos P, Seneviratne LD, Razavi R, Schaeffter T, Althoefer K. Triaxial catheter-tip force sensor for MRI-guided cardiac procedures[J]. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2013, 18:386-396.
- [36] Uzun D, Ülgen O, Kocatürk Ö. Optical force sensor with enhanced resolution for MRI guided biopsy[J]. *IEEE Sensors J*, 2020, 20:9202-9208.
- [37] Peng JL, Wang Y. Medical image segmentation with limited supervision: a review of deep network models[J]. *IEEE Access*, 2021, 9:36827-36851.
- [38] Asgari Taghanaki S, Abhishek K, Cohen JP, Cohen-Adad J, Hamarneh G. Deep semantic segmentation of natural and medical images: a review[J]. *Art Intel Rev*, 2021, 54:137-178.
- [39] Bohlender S, Oksuz I, Mukhopadhyay A. A survey on shape-constrained deep learning for medical image segmentation [J]. *IEEE Rev Biomed Eng*, 2021.[Epub ahead of print]
- [40] Lei T, Wang R, Wan Y, Du X, Meng H, Nandi AK. Medical image segmentation using deep learning: a survey [J]. *IET Image Process*, 2020, 16:1243-1267.
- [41] Kamnitsas K, Ferrante E, Parisot S, Ledig C, Nori A, Criminisi A, Rueckert D, Glocker B. Deepmedic for brain tumor segmentation [M]//Crimi A, Menze B, Maier O, Reyes M, Winzeck S, Handels H. Brainlesion: glioma, multiple sclerosis, stroke and traumatic brain injuries. Berlin, Heidelberg: Springer, 2017: 138-149.
- [42] Zhou C, Ding C, Wang X, Lu Z, Tao D. One-pass multi-task networks with cross-task guided attention for brain tumor segmentation [J]. *IEEE Trans Image Process*, 2020. [Epub ahead of print]
- [43] Wang HP, Shen L, Zhao H, Fan CS, Li ZX, Zheng FJ, Zhang C, Han JD. Operation and image integrated surgery path planning for robotic cochlear precise implantation [J]. *Ji Qi Ren*, 2021, 43:443-452.[王鸿鹏, 申林, 赵辉, 范崇山, 黎正鑫, 郑凡君, 张晨, 韩建达. 人工耳蜗精准植入机器人术像一体化手术路径

- 规划[J]. 机器人, 2021, 43:443-452.]
- [44] Singh SP, Wang L, Gupta S, Goli H, Padmanabhan P, Gulyás B. 3D deep learning on medical images: a review[J]. Sensors (Basel), 2020, 20:5097.
- [45] Haskins G, Kruger U, Yan PK. Deep learning in medical image registration: a survey[J]. Mach Vision App, 2020, 31:1-18.
- [46] Boveiri HR, Khayami R, Javidan R, Mehdizadeh A. Medical image registration using deep neural networks: a comprehensive review[J]. Comput Electr Eng, 2020, 87:106767.
- [47] Fu Y, Lei Y, Wang T, Curran WJ, Liu T, Yang X. Deep learning in medical image registration: a review[J]. Phys Med Biol, 2020, 65:20TR01.
- [48] Wu G, Kim M, Wang Q, Munsell BC, Shen D. Scalable high-performance image registration framework by unsupervised deep feature representations learning[J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2016, 63:1505-1516.
- [49] Cheng X, Zhang L, Zheng YF. Deep similarity learning for multimodal medical images[J]. Comput Methods Biomechan Biomed Eng, 2018, 6:248-252.
- [50] Han JD, Chen J, Yu NB, Dang Y. Active modeling and control of the ring-shaped pneumatic actuator: an experimental study[J]. IEEE/ASME Trans Mechatron, 2022, 27:2918-2929.
- [51] Wang XY, Yu NB, Bie DY, Han JD, Fang YC. A novel ESMF-based observer and control scheme for a type of tendon-sheath hysteresis system[J]. Automatica, 2021, 131:109800.
- [52] Bai DM. System design and security mechanism research of the master-slave controlled catheter robot[D]. Jiangsu: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.[白东明. 主从控制式导管机器人系统设计与安全机制研究[D]. 江苏: 南京航空航天大学, 2020.]
- [53] Yan YG, Wang HB, Yu HY, Wang FH, Fang JY, Niu JY, Guo SX. Machine learning-based surgical state perception and collaborative control for a vascular interventional robot[J]. IEEE Sensors J, 2022, 22:7106-7118.
- [54] Saini S, Orlando MF, Pathak PM. Adaptive control of a master-slave based robotic surgical system with haptic feedback[J]. IEEE Trans Auto Sci Eng, 2022.[Epub ahead of print]
- [55] Yu N, Yu Y, Lin J, Yang Y, Wu J, Liang S, Wu J, Han J. A non-contact system for intraoperative quantitative assessment of bradykinesia in deep brain stimulation surgery[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2022, 225:107005.

(收稿日期:2023-01-17)

(本文编辑:袁云)

《中国现代神经疾病杂志》2023 年广告征订启事

《中国现代神经疾病杂志》(ISSN 1672-6731, CN 12-1363/R)是国家卫生健康委员会主管,中国医师协会、天津市科学技术协会、天津市神经科学学会、天津市环湖医院主办的神经病学专业学术期刊。月刊,国内外公开发行。目前本刊已入编北京大学图书馆《中文核心期刊要目总览》2017年版(即第8版)和2020年版(即第9版)的核心期刊、中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊)和RCCSE中国核心学术期刊,并已被WJCI(2020、2021和2022科技版)、EMBASE/SCOPUS、DOAJ、EBSCOhost、JSTChina等国际知名检索机构收录。

本刊订阅用户遍及全国各级医疗单位、高等医学院校、各级医学院校图书馆、科研单位和个人。为加强本刊与神经内外科医学科研、医药、医疗器械行业的合作,共同宣传推广新药、新器械和新技术,促进互惠双赢,现诚邀广告合作方。现将刊登广告注意事项告知:

1. 严格遵守《中华人民共和国广告法》,刊登广告单位必须经国家级或所在省级食品药品监督管理局审核批准,并在广告发布地的省级医疗药品和医疗器械行政监督管理部门备案。

2. 刊登广告单位必须附有国家食品药品监督管理局核发的《药品广告审查表》和《医疗器械广告审查表》。广告内容应与医疗药品和医疗器械广告批准文号同时发布。广告审查批准文号有效期1年。

3. 广告文字简练,图片清晰、规范、必须以大16开本为基准进行设计,广告图稿原图或资料请于广告发布前1个月发送至编辑部邮箱(xdsjzbzz@263.net.cn)。

4. 凡刊登广告者,须与编辑部提前签订广告发布合同,根据合同具体内容执行。

联系地址:天津市津南区吉兆路6号天津市环湖医院C座二楼。邮政编码:300350。联系人:陈雪。联系电话:(022)59065612。Email:xdsjzbzz@263.net.cn。