

· 继续教育园地 ·

导航技术在神经外科手术中的应用与创新

师忠杰¹ 陈四方² 朱宏伟² 郭剑峰² 肖德勇² 王占祥²¹厦门大学医学院, 厦门 361000; ²厦门大学附属第一医院神经外科, 厦门 361000

通信作者: 王占祥, Email: WangZX@xmu.edu.cn

【摘要】 神经导航技术, 作为一种先进的高精度手术定位技术, 促进了微创神经外科的发展。随着神经成像技术和计算机算力的提升, 导航系统也呈现功能多样化, 广泛地应用在脑肿瘤、脑出血、脑血管畸形等病变手术中。光学导航的出现, 解决了有框架立体定向的创伤性问题, 成为当前主流的神经导航系统。电磁导航的应用解决了光学导航的视线遮挡问题, 但是由于其磁场的不稳定性, 目前并不能完全取代光学导航。基于混合现实技术的虚拟导航, 为临床医师带来沉浸式体验, 摆脱了传统导航的“手眼分离”问题。3D 打印定位导板技术, 由于其成本低、操作简洁, 在诸多的临床报道中也取得了不错的效果。神经导航机器人的出现, 引领了智能导航的发展。但是, 如何在保证导航精度的前提下, 降低导航的研发成本, 简化其临床使用流程, 仍需进一步探索。

【关键词】 神经导航; 立体定向; 虚拟导航; 3D 打印; 手术规划**基金项目:** 福建省自然科学基金(2022J011355)

神经外科手术涉及复杂多变的神经血管, 手术视野局限, 操作难度大, 因此, 精准定位并切除病变的同时保护周围正常结构, 是手术成功的关键。随着神经导航的出现, 手术定位精度得到了显著提升^[1]。但是目前导航仍存在一些不足和挑战, 首先, 导航系统对影像质量和配准精度依赖较高, 如果术前或术中影像存在误差, 则会影响手术结果。其次, 由于脑组织位移, 术前影像和实际情况会产生偏差, 影响导航精度。随着技术的进步, 新型导航应运而生, 包括新型手术机器人、结构光导航、超声导航、增强现实导航、3D 打印定位导板等^[2-3]。本文综合近年相关文献, 研究并分析了不同的导航系统, 评估优势与不足, 为临床开展导航手术及后续导航发展设计提供帮助。

一、神经外科手术导航的常见类型及原理

神经外科导航技术广义上包括有框架立体定向和无框架立体定向^[4]。

1. 有框架立体定向: 有框架立体定向最初的原型设计是 Zernov 于 1889 年完成, 用于动物研究^[5], 经过不断发展, 至今较为流行的是 Leksell 头架^[6], 已有 100 余年的历史。它使用固定在患者头部的机械框架作为参考, 结合笛卡尔坐标系和球坐标系, 实现了在框架上任意一点穿刺均可以到达框架中心点。有框架立体定向在进行脑深部病变手术时更具优势, 精度高且技术成熟稳定^[7]。但框架的安装和使用复杂, 属于有创性操作, 易引起患者情绪紧张和不适。

2. 无框架立体定向: 无框架立体定向使用高级成像技

术和计算机来定位^[8]。通过光学设备或者电磁设备实时采集探针的空间坐标, 通过计算机系统将虚拟解剖和影像注册到患者头部空间, 然后利用显示器实时显示探针相对患者的位置^[9]。无框架立体定向系统在精确性和可靠性上已经能够与框架系统相媲美, 在很多现代神经外科手术中被广泛使用。无框架导航, 按照技术原理, 可以将其分为光学导航和电磁导航。光学导航使用双目摄像机来跟踪特殊标记或反射球, 这些标记固定在手术工具和患者身上。但光学导航需要摄像机与标记之间直视, 任何遮挡都会使跟踪目标丢失, 影响精度。电磁导航通过发射器在手术区产生一个磁场, 手术工具内的传感器可以检测到磁场的变化, 进而确定工具在空间的位置和方向。磁场极易受周围环境介质的影响, 降低导航精度, 而且磁场有效空间比较小^[10]。因此, 目前应用更多的是光学导航, 包括普通彩色光学导航、近红外光导航、结构光导航系统等^[11]。

医师会根据手术类型、操作习惯、单位条件以及患者的具体情况来选择^[12]。

二、神经导航的临床应用场景

1. 脑功能区胶质瘤: 胶质瘤缺乏清晰的边界, 常浸润大脑功能区^[13]。神经导航不仅可以明确肿瘤影像学边界, 同时还可以显示周围的血管神经等正常解剖结构。除此之外, 通过患者术前的弥散张量成像 (DTI) 数据, 可以进行神经纤维束示踪并通过影像注册来准确评估肿瘤对周围功能纤维束的挤压破坏程度, 从而提供更多信息, 优化手

DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20240401-00743

收稿日期 2024-04-01 本文编辑 朱瑶

引用本文: 师忠杰, 陈四方, 朱宏伟, 等. 导航技术在神经外科手术中的应用与创新[J]. 中华医学杂志, 2024, 104(31): 2957-2961. DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20240401-00743.

中华医学杂志社
Chinese Medical Association Publishing House

版权所有 违者必究



术方案^[14]。Tamura 等^[15]评估了 10 例胶质瘤患者,其中 7 例进行了术中唤醒手术,通过导航将术前扫描的 DTI 图像和术中扫描的 MRI 进行配准,成功实现了白质神经功能定位,包括需要手术切除的部位以及与语言、运动相关的区域。

2. 脑干及周围病变:脑干手术是神经外科手术中难度最大的手术,该区域分布着重要的神经和血管,并控制着生命活动。脑干区域常见的病变包括脑干胶质瘤、脑干出血、颈静脉孔区肿瘤、脑干海绵状血管瘤等。在脑干手术中,神经导航能够提供实时、三维的脑结构图像,帮助医师避开重要的神经通路和功能区,同时精准定位病变位置^[16]。张晓军等^[17]对 74 例脑干出血患者进行了对比,发现导航手术组治疗后 1 个月内的总有效率(67.57%)高于保守治疗组(27.03%),导航引导下脑干出血手术治疗的预后较好。

3. 功能及结构性脑疾病:常见的相关手术包括脑深部电刺激(DBS)手术、局灶性皮质发育不良(FCD)癫痫手术、三叉神经痛卵圆孔射频热凝术等^[18-19]。DBS 手术目前主要依靠神经导航定位,包括有框架立体定向和无框架立体定向,其中有框架立体定向的使用更常见,相比无框架导航,它基于骨性结构,精度更加可靠稳定。另外,由于无框架导航系统具有实时显示影像、三维重建、多模态融合等功能,可清晰展示癫痫灶与周围解剖的位置关系,因此在癫痫灶切除中常作为首选^[20]。在 FCD 手术中,可以利用导航系统进行多模态影像融合,如 fMRI、CT、DTI 等多种影像检查,进行脑皮质分割,实现可视化引导。Barrit 等^[21]报道了与异性增生相关的癫痫灶单阶段切除,利用导航经颅磁刺激、术中 MRI、术中超声等多种影像检查技术,对 1 例每天发作 70 多次的 5 岁患儿癫痫灶进行精准切除,术后 1 年无发作。

4. 脑深部病变:神经导航在脑深部病变,如动静脉畸形(AVM)、深部海绵状血管瘤(CA)等治疗中扮演着关键角色,医师术前通过多模态影像了解 AVM 的位置、大小、形态及周围结构分布,甚至可以观察到 AVM 血管分布情况,术中结合导航系统定位及吲哚菁绿荧光造影,很好地保护周围正常血管神经等。王涌等^[22]通过术中超声导航对 12 例病例进行分析发现,超声成像作为导航能够得到清晰的颅脑声像解剖图,实时监测 AVM 病灶的切除过程,在频谱多普勒模式下,利用阻力指数(RI)值能够准确区分正常血管与病灶血管。除此之外,颅内病变的活检手术、颅内子弹等异物取出手术,这些病变的大小常常<1 cm,而且位置相对较深,这种手术没有导航的辅助是无法开展的,尤其对于开放性颅脑损伤,常常伴随着散在的颅骨碎片。神经导航的出现解决了颅内深部病变手术的难题,让以往难以开展的手术变得更加容易^[23]。

三、神经导航技术面临的主要挑战

1. 操作流程复杂:神经导航的组成包括硬件部分和规划软件,生产和开发难度大,成本高,价格昂贵。导航系统开发往往是专业的工科团队完成的,缺乏医师的临床思维指导,因此导航系统的设计可能不符合临床医师的使用习惯,对于临床医师来说具有一定的学习门槛,尤其是对于功

能复杂的智能导航系统,常常需要反复学习才能熟练操作。

2. 术前准备耗时:导航机器是安置在台车上的,体积较大,因此常固定放置在手术室,很难在病房和手术室之间来回移动。在学习使用导航操作过程中,需要提前下载影像,然后进入手术室启动导航,然后进行影像数据导入和处理,比较耗时,有时甚至需要提前 1 d 为次日开展的导航手术做准备,极大地降低了医师学习和使用导航的兴趣。因此,尽管导航降低了手术的时间,但是却增加了术前的准备时间。

3. 定位精度易波动:导航的出厂精度均达到亚毫米级别,但这种精度忽略了所有外界干扰因素,是理想状态下测定的。配准过程中的标记点选择差异、环境光差异等,可能增加导航误差,因此,应尽量避免外界误差。在定位到病变之前,尽量减少脑脊液的释放和甘露醇的使用,同时固定患者体位,减少“脑漂移”^[24]。针对“脑漂移”,也有不同的解决方案,比如微导管方案,在切开硬脑膜之前,按照导航指引,提前置入一根微小的导管到病灶,然后切开硬脑膜释放脑脊液,同时控制颅内压稳定,保持麻醉平稳。在条件允许时可通过术中 MRI 或术中 CT 来校正脑组织移位。这些方案只是在一定程度上减少了“脑漂移”引起的误差,并不能完全消除。降低并稳定误差也是未来导航需要解决的问题。

4. “手眼分离”缺陷:神经导航虽然可以实现 3D 重建,将抽象结构转为具体结构,但最终呈现仍然是在显示屏上,医师在使用过程中需要不断地抬头看显示屏,然后再把注意力转移到术区,这种“手眼分离”的情况是不安全的,当手术探针在接触患者大脑时,医师应该保持极高的警惕,防止探针伤及脑皮质、血管、神经。

四、新型神经导航的发展现状

1. 神经导航机器人:随着算力的不断提高以及新技术的出现,新型导航系统也应运而生,神经外科手术机器人在光学导航的基础上增加了机械臂^[25],比如国外的 Robotized Stereotactic Assistant (ROSA) 导航机器人,国产华科精准手术机器人、睿米神外手术机器人等,这类机器人设备具有更加强大的功能,包括机械臂传感技术、精细触觉反馈技术等,其中,国产机器人在原有光学技术的基础上,融入了结构光技术,使扫描更加精准。由北京理工大学参与开发的内窥镜颅底外科手术导航系统在传统光学定位的基础上增加了 3D 扫描相机,实现了患者面部自动扫描建模,自动配准,目前已经投入临床。这些技术开创了新型神经外科手术导航机器人的里程碑,也为我国自主研发导航机器人奠定了雄厚基础。

2. 电磁导航系统:电磁导航最早出现于 20 世纪 90 年代初,由于早期技术的不完善,定位精度低,磁场不稳定,所以一直没有广泛应用于神经外科。至今,电磁导航的使用更多的是聚焦于支气管镜、肝脏穿刺等。Sorriento 等^[11]对光学导航和电磁导航进行了对比分析,发现电磁导航极易受手术室金属器械等的影响,鲁棒性低。当然,两种导航均在不同的场景中适用,比如在血管中的定位,光学导航无法进行跟踪,电磁导航具有一定的优势,但是如果患者佩戴了



起搏器或者 DBS 电池的情况下,电磁导航应是禁止使用的。作为一种特殊的导航,在未来的研究中应该更多的是聚集磁场的稳定性研究。

3. 超声导航系统:超声定位系统是利用术中实时显像的优势,对组织病变进行定位穿刺引导,由于超声对颅骨的穿透力弱,所以在神经外科并不作为常规导航使用。目前也有很多适用于神经外科术中的小型超声探头,切开颅骨后,可以在术中进行颅内定位。常规超声无法清晰显示人体某些组织结构,超声导航技术却可以通过空间定位、三维重建、多模态融合等新技术弥补常规超声的缺陷。有研究通过超声导航对 100 例患者进行了脑肿瘤切除,结果发现超声识别与术前 MRI 扫描一致性为 78%,检测肿瘤残留的灵敏度为 94.4%,特异度为 100%^[26]。这也足以说明了超声导航的发展潜力。

4. 虚拟导航系统:近年来增强现实导航开始出现^[27-28]。增强现实是指将虚拟环境信息与真实环境融合的一种技术,是结合真实和虚拟世界创造新的环境和可视化的技术^[29]。Shu 等^[30]开发了一款基于移动设备的增强现实导航,该系统可以导入患者的病变及头部 3D 模型,通过手动或自动注册,使模型和患者保持重叠,并且通过同步定位与地图构建(SLAM)算法来保持模型在三维空间固定^[31],定位精度为 (4.7 ± 2.3) mm。de Almeida 等^[32]开发了一款基于苹果手机的增强现实导航,利用图像识别来获取真实空间的坐标,然后进行注册配准定位头皮表面的靶点位置,精度为 (2.6 ± 1.6) mm,较前有所提高。微软的 HoloLens 头戴式设备的出现,为增强现实导航提供了更好的硬件条件^[33]。增强现实导航最大的特点是给医师沉浸式体验,通过手势进行交互,解决了“手眼分离”问题^[34]。此类导航统称为虚拟导航系统(VNS),Cho 等^[35]曾比较了不同的虚拟导航定位误差,均 <4.0 mm。有报道通过改进注册方式,以点云注册或激光标记来作为配准方式,进而提高精度,误差范围为 $1.0\sim 3.0$ mm^[36]。尽管虚拟导航的定位精度较光学导航差,但是其开发成本远远低于光学导航,而且操作简单,能满足大多数手术的需求。美国食品药品监督管理局(FDA)批准了一款用于临床的 VNS——SurgicalAR^[37]。这款软件同样是基于微软 HoloLens 运行的,可以完成影像的渲染、虚拟定位、注册配准等功能。近两年,国产增强现实导航也开始出现,比如珠海智汇易创的影像规划全息手术导航系统,集影像三维渲染、重建、人工智能脑结构分割、虚拟定位于一体。虚拟导航的出现为新型神经导航的研发指明了新的方向,随着增强现实设备不断升级及算法优化,虚拟导航的精度会逐渐趋近于光学导航。

5. 医学 3D 打印定位技术:医学 3D 打印定位导板作为低成本神经导航的另外一种方案,报道屡见不鲜^[38-39]。将术前 CT 或者 MRI 影像通过计算机软件进行三维重建,针对不同的病灶设计手术入路,创建导管、头皮模型等,并围绕鼻根、眉弓、颧弓等骨性标志裁剪,形成穿刺导板模型,通过 3D 打印成型。3D 打印定位导板设计技术门槛及成本低,在

没有神经导航的医院可以快速开展。Shinn 等^[40]通过 CT 和 MRI 进行 3D 打印导板设计,并用于活检,以此来验证精度,发现基于 CT 设计的导板误差范围是 $0.8\sim 4.5$ mm,基于 MRI 设计的导板误差范围是 $1.7\sim 2.7$ mm。Yavas 等^[41]将 3D 打印技术和增强现实技术结合,通过 3D 打印标记来进行注册配准,然后通过增强现实设备来观察,用于神经肿瘤的定位,误差范围为 $0.5\sim 3.5$ mm,其结果较单纯使用增强现实定位更加准确。3D 打印导板在血肿穿刺、病变活检等手术中具有有一定的优势,但是其在使用中缺乏灵活性,无法在术中改变路径或靶点。

6. 人工智能辅助及远程导航系统:人工智能的应用将显著提升导航系统的数据处理能力和智能化水平。Zeineldin 等^[42]开发了一种新型的多模态图像引导神经外科(IGN)系统,利用深度学习(DL)增强脑肿瘤手术结果,在保证导航定位精度的前提下,实现了对脑肿瘤更好的分割。随着 5G 通信技术的发展,远程手术和远程导航也将成为可能。通过高速、低延时的网络传输,可以在异地实时指导和监控手术过程,提高医疗资源的利用率和偏远地区患者的手术治疗水平^[43]。脑-机接口(BCI)技术的进步也将为神经导航系统带来新的突破。BCI 技术可以实现人脑与计算机系统的直接通信,这种通讯可以是患者和计算机之间,也可以是医师和计算机之间,通过读取脑电信号来控制导航系统和手术机器人,从而实现更加自然和直观的手术操作。

综上,传统导航与新型导航均有优势与不足(附表 1,扫描本文首页二维码查看附表),这些导航目前的定位精度均达到毫米级别,可以用于神经外科大多数手术。未来将在人工智能、机器学习(ML)、5G 通信和 BCI 等前沿技术的推动下,实现更加智能化和精确化发展。这些技术的不断进步和应用,将显著提高手术的安全性、精准度和患者预后。

五、未来发展与创新

神经导航技术的出现,为神经外科手术的精量化和安全性提供了强有力支持。从立体定向到电磁导航及光学导航的演变,并逐渐融合了人工智能、增强现实、3D 打印和手术机器人等新兴技术,但仍然需要在以下几个具体领域进行深入研究和创新:

1. 实时成像技术的改进:开发更高分辨率的实时成像技术,以减少“脑漂移”带来的误差,提升术中导航精度。比如结合计算机视觉技术来实时识别结构,进行导航校准等。

2. 成本和操作复杂性的降低:通过简化设备操作流程和降低设备生产成本,使更多的基层医疗机构能够使用先进的神经导航技术。获取临床医师的使用反馈,针对性进行系统优化。

3. 增强现实和光学导航的集成:进一步发展增强现实和虚拟现实技术,提供更直观和沉浸式的手术引导,减少“手眼分离”带来的风险。将增强现实设备的显示优势和光学导航的定位优势相结合。

4. 人工智能和机器学习的应用:利用人工智能和机器学习技术,实现更智能化的导航系统,提高术中决策的准确



性。目前的导航实现不管是从影像处理还是在定位方面均是通过算法,如果将AI模型集成到导航系统,并且随着导航使用次数增加,逐渐提升导航的鲁棒性和精准度,这无疑是新的突破。

5. 远程导航和手术:借助5G通信技术,实现远程手术和导航,提升偏远地区的医疗水平,优化医疗资源。比如让远在千里之外的专家看到手术现场画面,并且可以根据手术导航指示,实时显示术者手中工具的位置和周围的毗邻结构。

总之,神经导航技术的持续研究和创新,将进一步提高神经外科手术的安全性和有效性,对患者的术后恢复和生活质量产生深远影响。相信随着各项前沿技术的不断融合,神经导航将趋于更加智能化和精确化,推动我国神经外科领域向更高的国际水平迈进。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] Wu JS, Lu JF, Gong X, et al. Neuronavigation surgery in China: reality and prospects[J]. *Chin Med J (Engl)*, 2012, 125(24):4497-4503.
- [2] Zhou Z, Yang Z, Jiang S, et al. Augmented reality surgical navigation system based on the spatial drift compensation method for glioma resection surgery[J]. *Med Phys*, 2022, 49(6): 3963-3979. DOI: 10.1002/mp.15650.
- [3] Spyranis A, Woebbecke T, Rueß D, et al. Accuracy of robotic and frame-based stereotactic neurosurgery in a phantom model[J]. *Front Neurobot*, 2022, 16: 762317. DOI: 10.3389/fnbot.2022.762317.
- [4] Švaco M, Stiperski I, Dlaka D, et al. Stereotactic neuro-navigation phantom designs: a systematic review [J]. *Front Neurobot*, 2020, 14: 549603. DOI: 10.3389/fnbot.2020.549603.
- [5] Picard C, Olivier A, Bertrand G. The first human stereotaxic apparatus. The contribution of Aubrey Mussen to the field of stereotaxis[J]. *J Neurosurg*, 1983, 59(4):673-676. DOI: 10.3171/jns.1983.59.4.0673.
- [6] Cacak R, Law JD. Leksell stereotactic instrument[J]. *Neurosurgery*, 1981, 8(4): 510. DOI: 10.1097/00006123-198104000-00020.
- [7] Hu Y, Cai P, Zhang H, et al. A comparison between frame-based and robot-assisted in stereotactic biopsy[J]. *Front Neurol*, 2022, 13: 928070. DOI: 10.3389/fneur.2022.928070.
- [8] Ehret F, Kaul D, Budach V, et al. Applications of frameless image-guided robotic stereotactic radiotherapy and radiosurgery in pediatric neuro-oncology: a systematic review[J]. *Cancers (Basel)*, 2022, 14(4): 1085. DOI: 10.3390/cancers14041085.
- [9] Robertson FC, Sha RM, Amich JM, et al. Frameless neuronavigation with computer vision and real-time tracking for bedside external ventricular drain placement: a cadaveric study[J]. *J Neurosurg*, 2022, 136(5):1475-1484. DOI: 10.3171/2021.5.JNS211033.
- [10] Keeble H, Lavrador JP, Pereira N, et al. Electromagnetic navigation systems and intraoperative neuromonitoring: reliability and feasibility study[J]. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*, 2021, 20(4): 373-382. DOI: 10.1093/ons/opaa407.
- [11] Sorriento A, Porfido MB, Mazzoleni S, et al. Optical and electromagnetic tracking systems for biomedical applications: a critical review on potentialities and limitations[J]. *IEEE Rev Biomed Eng*, 2020, 13:212-232. DOI: 10.1109/RBME.2019.2939091.
- [12] Girgis F, Ovruchsky E, Kennedy J, et al. Superior accuracy and precision of SEEG electrode insertion with frame-based vs. frameless stereotaxy methods[J]. *Acta Neurochir (Wien)*, 2020, 162(10): 2527-2532. DOI: 10.1007/s00701-020-04427-1.
- [13] Krivosheya D, Prabhu SS, Weinberg JS, et al. Technical principles in glioma surgery and preoperative considerations[J]. *J Neurooncol*, 2016, 130(2): 243-252. DOI: 10.1007/s11060-016-2171-4.
- [14] Xiao X, Kong L, Pan C, et al. The role of diffusion tensor imaging and tractography in the surgical management of brainstem gliomas[J]. *Neurosurg Focus*, 2021, 50(1):E10. DOI: 10.3171/2020.10.FOCUS20166.
- [15] Tamura M, Kurihara H, Saito T, et al. Combining pre-operative diffusion tensor images and intraoperative magnetic resonance images in the navigation is useful for detecting white matter tracts during glioma surgery[J]. *Front Neurol*, 2021, 12: 805952. DOI: 10.3389/fneur.2021.805952.
- [16] Zhang M, Xiao X, Gu G, et al. Role of neuronavigation in the surgical management of brainstem gliomas[J]. *Front Oncol*, 2023, 13: 1159230. DOI: 10.3389/fonc.2023.1159230.
- [17] 张晓军, 张义松, 王忠, 等. 神经导航指引下显微外科手术治疗高血压脑干出血的疗效分析[J]. *临床神经外科杂志*, 2022, 19(2): 206-209. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7770.2022.02.017.
- [18] Pérez-Bovet J, Caro Cardera JL, Rimbau Muñoz J. Frameless navigation-guided percutaneous rhizotomy of the trigeminal nerve: an appraisal of the literature[J]. *Neurosurg Rev*, 2022, 45(1): 405-410. DOI: 10.1007/s10143-021-01575-5.
- [19] 牛朝诗, 常博文. 机器学习:辅助脑深部电刺激应用的新方向[J]. *中华医学杂志*, 2023, 103(47): 3797-3801. DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20231021-00845.
- [20] Rugg-Gunn F, Miserocchi A, McEvoy A. Epilepsy surgery [J]. *Pract Neurol*, 2020, 20(1): 4-14. DOI: 10.1136/practneurol-2019-002192.
- [21] Barrit S, Park EH, Rotenberg A, et al. Single-stage resection of bottom-of-a-sulcus dysplasia involving eloquent cortex using navigated transcranial magnetic stimulation and intraoperative modalities[J]. *Childs Nerv Syst*, 2022, 38(7): 1365-1370. DOI: 10.1007/s00381-022-05532-5.
- [22] 王涌, 王意达, 王怡, 等. 术中超声导航技术在脑动静脉畸形切除术中的应用[J]. *中国医学计算机成像杂志*, 2006, 12(4): 231-235. DOI: 10.3969/j.issn.1006-5741.2006.04.003.
- [23] Mader MM, Rotermund R, Martens T, et al. The role of frameless stereotactic biopsy in contemporary neuro-oncology: molecular specifications and diagnostic yield in biopsied glioma patients[J]. *J Neurooncol*, 2019, 141(1):183-194. DOI: 10.1007/s11060-018-03024-8.
- [24] Luo M, Narasimhan S, Larson PS, et al. Impact of brain shift on neural pathways in deep brain stimulation: a preliminary analysis via multi-physics finite element



- models[J]. J Neural Eng, 2021, 18(5). DOI: 10.1088/1741-2552/abf066.
- [25] 甄雪克, 邵旭, 田宏, 等. 国产手术机器人在颅脑微小病灶及功能区病灶精准切除手术中的应用[J]. 中华神经医学杂志, 2022, 21(10): 1030-1033. DOI: 10.3760/cma.j.cn115354-20220602-00385.
- [26] de Quintana-Schmidt C, Salgado-Lopez L, Aibar-Duran JA, et al. Neuronavigated ultrasound in neuro-oncology: a true real-time intraoperative image[J]. World Neurosurg, 2022, 157:e316-e326. DOI: 10.1016/j.wneu.2021.10.082.
- [27] Mishra R, Narayanan M, Umana GE, et al. Virtual reality in neurosurgery: beyond neurosurgical planning[J]. Int J Environ Res Public Health, 2022, 19(3): 1719. DOI: 10.3390/ijerph19031719.
- [28] 刘旭辉, 边靖芳, 崔浩然, 等. 虚拟现实/增强现实设备在眼科的应用及其对眼健康影响的研究进展[J]. 中华医学杂志, 2022, 102(02): 158-162. DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20210723-01647.
- [29] Tobisková N, Gull ES, Janardhanan S, et al. Augmented reality for AI-driven inspection?-A comparative usability study[J]. Procedia CIRP, 2023, 119: 734-739. DOI: 10.1016/j.procir.2023.03.122.
- [30] Shu XJ, Wang Y, Xin H, et al. Real-time augmented reality application in presurgical planning and lesion scalp localization by a smartphone[J]. Acta Neurochir (Wien), 2022, 164(4): 1069-1078. DOI: 10.1007/s00701-021-04968-z.
- [31] Jia G, Li X, Zhang D, et al. Visual-SLAM classical framework and key techniques: a review[J]. Sensors (Basel), 2022, 22(12):4582. DOI: 10.3390/s22124582.
- [32] de Almeida A, Fernandes de Oliveira Santos B, Oliveira J. A neuronavigation system using a mobile augmented reality solution[J]. World Neurosurg, 2022, 167: e1261-e1267. DOI: 10.1016/j.wneu.2022.09.014.
- [33] Chien JC, Tsai YR, Wu CT, et al. HoloLens-based AR system with a robust point set registration algorithm[J]. Sensors (Basel), 2019, 19(16):3555. DOI: 10.3390/s19163555.
- [34] Qi Z, Li Y, Xu X, et al. Holographic mixed-reality neuronavigation with a head-mounted device: technical feasibility and clinical application[J]. Neurosurg Focus, 2021, 51(2):E22. DOI: 10.3171/2021.5.FOCUS21175.
- [35] Cho J, Rahimpour S, Cutler A, et al. Enhancing reality: a systematic review of augmented reality in neuronavigation and education[J]. World Neurosurg, 2020, 139:186-195. DOI: 10.1016/j.wneu.2020.04.043.
- [36] Qi Z, Bopp M, Nimsy C, et al. A novel registration method for a mixed reality navigation system based on a laser crosshair simulator: a technical note[J]. Bioengineering (Basel), 2023, 10(11): 1290. DOI: 10.3390/bioengineering10111290.
- [37] Berger A, Choudhry OJ, Kondziolka D. Augmented reality-assisted percutaneous rhizotomy for trigeminal neuralgia[J]. Oper Neurosurg (Hagerstown), 2023, 24(6): 665-669. DOI: 10.1227/ons.0000000000000661.
- [38] 师忠杰, 高鑫, 周立伟, 等. 3D 打印定位导板在神经外科手术中的应用[J]. 中华神经医学杂志, 2021, 20(10):1039-1042. DOI: 10.3760/cmaj.cn115354-20210820-00531.
- [39] You Y, Niu Y, Sun F, et al. Three-dimensional printing and 3D slicer powerful tools in understanding and treating neurosurgical diseases[J]. Front Surg, 2022, 9: 1030081. DOI: 10.3389/fsurg.2022.1030081.
- [40] Shinn R, Park C, DeBose K, et al. Feasibility and accuracy of 3D printed patient-specific skull contoured brain biopsy guides[J]. Vet Surg, 2021, 50(5): 933-943. DOI: 10.1111/vsu.13641.
- [41] Yavas G, Caliskan KE, Cagli MS. Three-dimensional-printed marker-based augmented reality neuronavigation: a new neuronavigation technique [J]. Neurosurg Focus, 2021, 51(2): E20. DOI: 10.3171/2021.5.FOCUS21206.
- [42] Zeineldin RA, Karar ME, Burgert O, et al. NeuroIGN: explainable multimodal image-guided system for precise brain tumor surgery[J]. J Med Syst, 2024, 48(1): 25. DOI: 10.1007/s10916-024-02037-3.
- [43] 李英忠. 基于 5G 医疗定制网的远程手术的实践与思考[J]. 电信科学, 2021, 37(11): 104-114. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021251.

单项选择题:

- 神经导航技术的主要作用是什么()
 - 提高病变定位的精度
 - 提高手术的速度
 - 减少术后并发症
 - 减少术前准备的时间
- 以下那种导航技术可以解决“手眼分离”问题()
 - 近红外光学导航
 - 电磁导航
 - 混合现实导航
 - 超声导航
- 以下哪种定位误差属于主观性误差()
 - 导航系统的配准算法误差
 - 成像设备的分辨率误差
 - 医师的操作误差
 - 导航追踪仪的定位误差
- 以下哪种措施不能减少术中“脑漂移”()
 - 使用微导管
 - 保持术中麻醉平稳
 - 提前使用甘露醇
 - 保持患者体位固定
- 当前神经导航技术的发展主要得益于哪种技术的进步()
 - 无线通讯和电池技术
 - 神经成像和计算机处理能力
 - 人工智能诊断技术
 - 机械工程和材料科学

【编后】 经全国继续医学教育委员会批准,本刊开设继教专栏,文后附5道单选题,读者阅读后可扫描标签二维码答题,每篇可免费获得Ⅱ类继教学分0.5分,全年最多可获5分

