

全息混合现实神经导航系统辅助幕上肿瘤显微外科治疗

陈鹏 马汛杰 唐白茶 翁志坚 简智恒 陈刚

【摘要】 目的 总结混合现实神经导航系统辅助幕上肿瘤切除术的临床经验。**方法** 病例为 2024 年 3–9 月在广东省珠海市人民医院接受全息混合现实神经导航系统辅助幕上肿瘤切除术的患者共 5 例。术前影像学数据导入 3D Slicer 软件并生成肿瘤灶、解剖标志和邻近结构的全息图像,导入全息混合现实神经导航系统同时投影至患者头部,进行术前手术切口规划并指导术中肿瘤切除;通过评估导航注册时间、导航应用时间和配准次数分析该系统的便捷性和稳定性;评估骨窗范围、肿瘤灶与全息图像重叠效果、建模时间、肿瘤定位的应用价值、Karnofsky 功能状态评分(KPS)及手术相关指标分析该系统的精准性、快速性和安全性。**结果** 共 5 例患者均成功完成术前建模,平均建模时间(25.20 ± 1.60) min,注册时间(3.20 ± 0.05) min,术前导航应用时间(12.74 ± 1.09) min,术中导航应用时间(8.17 ± 0.81) min,所有患者均 1 次配准成功,肿瘤均位于骨窗范围内,骨窗显露良好。全息投影定位的肿瘤与术中所见完全重叠,肿瘤切除分级均达 Simpson I 级切除,术后 72 h KPS 评分(94.00 ± 4.90)分。**结论** 全息混合现实神经导航系统用于神经外科手术便捷性、稳定性、精准性、快速性和安全性良好,可为幕上肿瘤开颅手术提供帮助,值得推荐。

【关键词】 幕上肿瘤; 混合现实(非 MeSH 词); 神经导航; 显微外科手术

Holographic mixed reality navigation system - assisted microsurgery of the supratentorial tumor

CHEN Peng, MA Xun-jie, TANG Bai-cha, WENG Zhi-jian, JIAN Zhi-heng, CHEN Gang

Department of Neurosurgery, Zhuhai People's Hospital; The Affiliated Hospital of Beijing Institute of Technology; Zhuhai Clinical Medical College of Ji'nan University, Zhuhai 519009, Guangdong, China
Corresponding author: CHEN Gang (Email: jhy_501@163.com)

【Abstract】 Objective To summarize the clinical experience of supratentorial tumor resection using a wireless head - mounted display (HMD) - based holographic mixed reality navigation system (MRN). **Methods** A analysis was performed on 5 patients undergoing supratentorial tumor resection using holographic MRN at Zhuhai People's Hospital from March to September 2024. Preoperative imaging data were imported into 3D Slicer software to generate holograms of lesions, anatomical landmarks, and adjacent structures, which were subsequently integrated into the holographic MRN and projected onto the patient's head for preoperative incision planning and intraoperative tumor resection guidance. The convenience and stability of holographic MRN were evaluated by assessing navigation registration time, navigation application time, and registration attempts. Accuracy, efficacy, and safety of holographic MRN were analyzed through evaluation of bone window extent, tumor - to - surrounding structure relationships, modeling time tumor localization, Karnofsky Performance Status (KPS) scores, and surgical indicators. **Results** Preoperative modeling was all successfully completed, with an average modeling time (25.20 ± 1.60) min, and average registration time (3.20 ± 0.05) min. The mean preoperative and intraoperative navigation application times were (12.74 ± 1.09) and (8.17 ± 0.81) min, respectively. All registrations were successful on the first attempt. All lesions were entirely within the planned bone window boundaries, with no under- or over-exposure.

doi:10.3969/j.issn.1672-6731.2025.03.006

基金项目:广东省广州市科技计划基础与应用基础项目市校(院)企联合资助专项(项目编号:SL2023A03J00347);
广东省珠海市人民医院科研启动项目(项目编号:2021KYQD-02)

作者单位:519009 广东省珠海市人民医院 北京理工大学附属医院 暨南大学珠海临床医学院神经外科

通讯作者:陈刚,Email:jhy_501@163.com

Holographic projections of tumors fully overlapped with actual intraoperative lesions. All 5 cases achieved Simpson grade I resection. The average KPS score at 72 h after surgery was 94.00 ± 4.90 . **Conclusions** This study confirms the convenience, stability, accuracy, efficacy, and safety of holographic MRN in clinical practice, demonstrating its value as an adjunctive tool for supratentorial tumor craniotomy.

【Key words】 Supratentorial neoplasms; Mixed reality (not in *MeSH*); Neuronavigation; Microsurgery

This study was supported by Guangzhou Municipal Science and Technology Program: Basic and Applied Basic Research Projects—Municipal - University (Academy) - Enterprise Collaborative Independent Initiative (No. SL2023A03J00347), and Zhuhai People's Hospital Research Project (No. 2021KYQD-02).

Conflicts of interest: none declared

幕上肿瘤是指位于小脑幕以上的颅内肿瘤即肿瘤生长于颅腔的幕上区域^[1]。部分较大幕上肿瘤与周围血管或静脉窦关系密切,评估肿瘤与周围组织结构关系、精准定位、减小手术入路创伤以实现肿瘤全切除(GTR)成为当前神经外科精准开颅手术的追求,且具有挑战性。随着医学影像学及数字电子信息技术的发展,混合现实导航系统(MNS)、虚拟现实(VR)、增强现实(AR)和混合现实(MR)等三维影像技术已进入临床应用阶段^[2-3]。其中,混合现实通过环境感知、虚实交互和动态融合的技术突破,解决了虚拟现实的孤立性与增强现实的表层叠加问题,成为更具实用价值的空间计算平台^[4];用户仅通过无线头戴式设备(如HoloLens 2平台),利用手势识别或语音命令即可与三维影像进行互动,在术前规划、术中模拟、医患沟通及手术教学中发挥重要作用^[5-6]。目前有关利用全息混合现实神经导航系统(MRN)辅助手术切除幕上肿瘤的研究较少,在导航系统的可靠性、稳定性及临床应用价值方面缺少研究支持^[7],本研究以广东省珠海市人民医院近6个月诊断与治疗的5例全息混合现实神经导航系统辅助下施行幕上肿瘤切除术的患者为对象,评估该系统的实用性及临床应用价值,以为进一步完善及推广提供参考依据。

对象与方法

一、研究对象

1. 病例选择 (1)根据《2021年世界卫生组织(WHO)中枢神经系统肿瘤分类(第五版)》^[8]标准诊断为幕上肿瘤。(2)术前24 h Karnofsky 功能状态评分(KPS)^[9] ≥ 70 分。(3)术前MRI检查显示肿瘤广泛侵犯脑功能区或深部脑组织。(4)入院后各项检查显示无严重心肺疾病、凝血功能障碍或全身感染等手术禁忌证。(5)临床资料完整且获得术后全程

随访结果。(6)本研究经广东省珠海市人民医院伦理委员会审核批准[审批号:(2024)伦审(研)第(56)号]。(7)所有患者及其家属均对手术方法和手术风险知情并签署知情同意书。

2. 一般资料 选择2024年3-9月于我院神经外科在全息混合现实神经导航系统辅助下手术切除幕上肿瘤的患者共5例,男性1例,女性4例;年龄9~71岁,中位年龄44.00(16.00,60.50)岁。入院主诉分别为右侧肢体无力伴癫痫发作(例1)、头痛伴认知功能减退(例2)、头晕(例3)、头痛(例5)或体检偶然发现(例4);术前24 h KPS评分90~100分,平均 (92 ± 4) 分。肿瘤主要位于左侧额叶(例1)、双侧前颅窝(例2)、左侧顶叶(例3)和左侧额颞部(例4、例5)。

二、研究方法

1. 三维影像导航系统组成 (1)全息混合现实神经导航系统:分为硬件及软件两部分,硬件部分为HoloLens 2平台(美国Microsoft公司)、笔记本电脑(Legion Y700P IRX9,中国联想集团)、无线路由器(Honor XD25,深圳荣耀终端股份有限公司)及广东省珠海市人民医院神经外科自主研发的导航探针及定位板;软件为珠海智汇易创科技有限公司基于HoloLens 2平台设计的Windows端软件。(2)安科导航系统(深圳安科高技术股份有限公司):包括计算机工作站、手术图像处理软件、位置传感器、有线与无线式引导棒和头架跟踪器等。(3)手术可视化系统:由KINEVO 900机器人手术显微镜(德国Zeiss公司)和高清神经内镜(德国Karl Storz公司)组成。

2. 影像学数据采集 所有患者均于手术前后行CT和MRI增强扫描。(1)CT检查:患者仰卧位,采用Hispeed Dual双层螺旋CT扫描仪(美国GE公司)行全脑扫描,窗宽为100 HU、窗位30 HU、层厚为0.625 mm、层间距0.30 mm,扫描时间为5~7 s,共

200 层。(2)MRI 检查:患者仰卧位,静脉注射钆对比剂 0.10 mmol/kg, Achieva 3.0T 超导型 MRI 扫描仪(荷兰 Royal Philips 公司)行 T₁WI 扫描,重复时间(TR)10 ms、回波时间(TE)5 ms、反转时间(TI)为 1100 ms、翻转角(FA)15°、扫描视野(FOV)240 mm×240 mm、矩阵 256×256、激励次数(NEX)1 次、层厚 1 mm、层间距 0.50 mm,扫描时间 25 min,共 200 层。

3. 术前三维模型重建 获取 CT 和 MRI 的 DICOM 数据后导入 3D Slicer 软件(<http://www.slicer.org>),对不同模态影像学数据进行配准以校正位置偏差,3D Slicer 模块对 DICOM 数据进行可视化、分割和处理,生成三维虚拟模型。以不同颜色标注皮肤、颅骨、肿瘤、血管、神经及脑组织,最终以 Stereolithography(.stl)或 Wavefront OBJ(.obj)格式导出三维模型。

4. 全息混合现实神经导航系统注册配准 通过基于 Windows 平台的半自动注册软件将 3D Slicer 软件生成的三维模型通过局域网加载至配有深度相机、传感器和全息光学元件的 HoloLens 2 平台,用于捕捉物理对象并将其映射至全息空间。分别标注乳突尖、耳屏、双侧外眦、枕外隆凸等体表解剖结构并依次将其设定为注册点,每次选取手术视野体表的 5 个点作为注册点,所有注册点配准完成后,Windows 端软件自动注册并将虚拟全息图像融合叠加于患者头部,术者可从任意角度浏览叠加效果,Windows 端软件可调整全息图像透明度。使用过程中,可以通过手势识别或语音命令全息混合现实神经导航系统对全息图像进行注册和微调。

5. 手术流程 患者体位取决于手术入路方式,气管插管全身麻醉,头架固定,术者手持导航探针,按照三维建模时设计的排序依次将全息图像中 5 个注册点与患者体表相应的 5 个点进行匹配,并自动注册。术者使用 HoloLens 2 平台以手术视野和视角在患者头皮上标记全息肿瘤灶边界的体表投影,依此设计个性化皮肤切口;切开硬脑膜前后再次佩戴 HoloLens 2 平台对肿瘤灶及其毗邻解剖结构进行观察及验证,重点观察肿瘤灶与其周围动脉、静脉、脑神经及其他重要组织结构的关系;严格沿肿瘤边界分段式切除,避免损伤其周围重要组织结构。术后即刻行头部 CT 检查以确认是否存在术后出血,术后 3 d 内行头部 MRI 检查确定肿瘤切除情况。

6. 评价指标 (1)全息混合现实神经导航系统:包括稳定性、便捷性、精准性和快速性。根据术中

所需配准次数评估系统稳定性;基于术前注册时间(第 1~5 个注册点的配准时间)、术前导航应用时间(勾画病变区域至设计手术切口时间)和术中导航应用时间(术中佩戴 HoloLens 2 平台至观察结束)分析导航系统实施的便捷性;通过观察肿瘤灶是否位于骨窗范围、评估肿瘤灶与全息图像重叠效果、判断骨窗范围是否合理(避免过度或不足暴露)等衡量导航系统辅助手术切除的精准性;同时根据术前建模时间、注册时间、术前导航应用时间及术中导航应用时间评估其快速性。(2)临床指标:记录患者性别、年龄、肿瘤位置、肿瘤大小、手术入路方式、肿瘤定位的应用价值、手术时间(从切开头皮到伤口缝合完成的全流程时间)、肿瘤切除分级、组织学类型。(3)功能状态:分别于术前 24 h 以及术后 72 h 采用 KPS 评分评估患者功能状态和日常生活自理能力^[9], >80~100 分为日常生活基本自理、>70~80 分为日常生活部分自理、>50~70 分为日常生活需他人帮助、≤50 分为日常生活严重不能自理,评分越高、生活自理能力越佳。(4)随访:术后 1 和 3 个月进行门诊随访,详细记录随访期间并发症(包括感染、癫痫发作和神经功能缺损等)发生率。

结 果

本组患者术前建模时间为 23~28 min,平均(25.20±1.60) min;术前注册时间 3.12~3.25 min,平均(3.20±0.05) min;术前导航应用时间 11~14 min,平均(12.74±1.09) min;配准次数均为 1 次;手术入路为经额叶入路(例 1)、经额下入路(例 2)、经顶叶纵裂入路(例 3)、经额颞叶入路(例 4、例 5,表 1)。术中骨窗显露良好,肿瘤灶显露充分,均位于骨窗范围内,全息混合现实神经导航系统实时显示肿瘤边界,术者确认全息投影与实体肿瘤灶完全重叠,切除范围精准。导航定位肿瘤分别位于大脑上静脉内侧(例 1)、大脑前动脉(ACA)及 Labbe 静脉旁(例 2)、上矢状窦旁(例 3)、Rolandic 静脉旁(例 4)和 Labbe 静脉旁(例 5)。术中导航应用时间为 7.12~9.03 min,平均(8.17±0.81) min;手术时间 3.00~6.50 h,平均(4.26±1.25) h;肿瘤切除分级均达 Simpson I 级切除,即肉眼见全切除肿瘤及其附着的硬脑膜和异常颅骨;术后病理证实切除标本边缘无肿瘤细胞残留,组织学类型为纤维型脑膜瘤(例 1、例 3、例 4)、脑膜皮细胞型脑膜瘤(例 2)和蛛网膜囊肿(例 5);术后 72 h KPS 评分 90~100 分,平均

表 1 5 例幕上肿瘤患者手术前资料

Table 1. Preoperative data of 5 patients with supratentorial tumor

序号	性别	年龄 (岁)	KPS (术前 24 h, 评分)	影像学检查		建模时间 (min)	注册时间 (min)	术前导航应用 时间(min)	配准次数 (次)	手术入路
				肿瘤部位	肿瘤大小(mm)					
1	女性	50	90	左侧额叶	10× 21× 19	23	3.12	11.00	1	经额叶入路
2	女性	44	90	双侧前颅窝	73× 74× 74	28	3.18	14.00	1	经额下入路
3	女性	71	90	左侧顶叶	9× 33× 13	25	3.22	12.34	1	经顶叶纵裂入路
4	女性	23	100	左侧额颞部	69× 101× 91	25	3.25	12.56	1	经额颞叶入路
5	男性	9	90	左侧额颞部	17× 34× 28	25	3.23	13.78	1	经额颞叶入路

KPS, Karnofsky Performance Status, Karnofsky 功能状态评分

表 2 5 例幕上肿瘤患者术中和术后资料

Table 2. Intraoperative and postoperative data of 5 patients with supratentorial tumor

序号	肿瘤定位(导航)	术中导航应用时间 (min)	手术时间 (h)	肿瘤切除分级	组织学类型	KPS (术后 72 h, 评分)	手术并发症
1	大脑上静脉内侧	7.12	3.00	Simpson I 级	纤维型脑膜瘤	90	无
2	ACA 及 Labbe 静脉旁	9.03	6.50	Simpson I 级	脑膜皮细胞型脑膜瘤	90	无
3	上矢状窦旁	7.28	4.10	Simpson I 级	纤维型脑膜瘤	90	右侧肢体乏力
4	Rolandic 静脉旁	8.53	4.50	Simpson I 级	纤维型脑膜瘤	100	无
5	Labbe 静脉旁	8.87	3.20	Simpson I 级	蛛网膜囊肿	100	无

ACA, anterior cerebral artery, 大脑前动脉; KPS, Karnofsky Performance Status, Karnofsky 功能状态评分

(94.00±4.90)分。术后 3 个月随访时无一例复发;仅 1 例(例 3)术后 72 h 内出现短暂性右侧肢体乏力(KPS 评分降至 80 分),经物理治疗和神经功能训练恢复至 90 分,术后 3 个月随访时无神经功能下降。随访期间均未出现手术或全息混合现实神经导航系统相关感染、癫痫发作、神经功能缺损等并发症或后遗症(表 2)。

典型病例

患者 女性,50 岁。因右下肢无力、抽搐及头晕 6 h,于 2024 年 7 月 17 日入院。入院前 6 h 无明显诱因出现右下肢乏力、拖曳步态,伴不自主抽搐(持续约 1 min),停止后仍感下肢沉重。发作间期伴持续性、非旋转性头晕,直立位加重、平卧位有所缓解,无耳鸣及听力下降。偶感额顶部胀痛,无恶心呕吐、视物模糊及言语障碍,无意识丧失及大小便失禁。近期无发热、外伤史,无类似发作史;既往高血压病史 4 年,血压最高 160/111 mm Hg(1 mm Hg=0.133 kPa),规律服用硝苯地平(30 mg/d)和缬沙坦(80 mg/d)降压治疗,血压控制尚可;顶叶脑梗死病史 1 年,累及左侧岛叶、顶叶及枕叶,处于恢复期,外院住院期间诊断右侧肢体不完全性偏瘫,睡前规律服用阿托伐他汀(40 mg/d);8 年前曾因子宫肌瘤行

微侵袭手术(具体术式及治疗方案不详),否认其他手术史、外伤史及输血史。个人史、家族史无特殊。入院后体格检查:神志清楚,言语稍含糊;双侧瞳孔等大、等圆,直径 2 mm,对光反射灵敏,各向眼动充分,面纹对称,伸舌居中,咽反射正常;定向力正常;右下肢肌力 3 级、肌张力轻度增高(改良 Ashworth 量表 1 级),左侧肢体肌力和肌张力正常,右侧腱反射活跃、左侧正常;右下肢浅触觉及针刺觉稍减退,深感觉无异常;右侧 Babinski 征阳性,右侧跟-膝-胫试验稍笨拙,脑膜刺激征呈阴性。视觉模拟评分(VAS)3 分;Glasgow 昏迷量表(GCS)评分 15 分。实验室检查各项指标均于正常参考值范围。影像学检查:MRI 显示肿瘤位于左侧额叶,未见重要血管、静脉窦或脑神经包绕(图 1a~1c)。术前诊断为左侧额叶占位性病变;顶叶脑梗死。通过全息混合现实神经导航系统设计手术入路,借助预先构建的三维全息模型(图 1d~1f),准确定位肿瘤位于大脑上静脉内侧(图 1g,1h)。于发际线内隐蔽设计手术切口(图 1i~1k),经额叶入路开颅,分层剥离软组织,逐层显露肿瘤;借助实时全息混合现实神经导航系统精准识别肿瘤与周围组织结构界限,分段式切除(图 1l,1m),术中严格保护邻近重要血管和神经,最大程度减少美容外观损伤。术后 72 h 复查 MRI 显

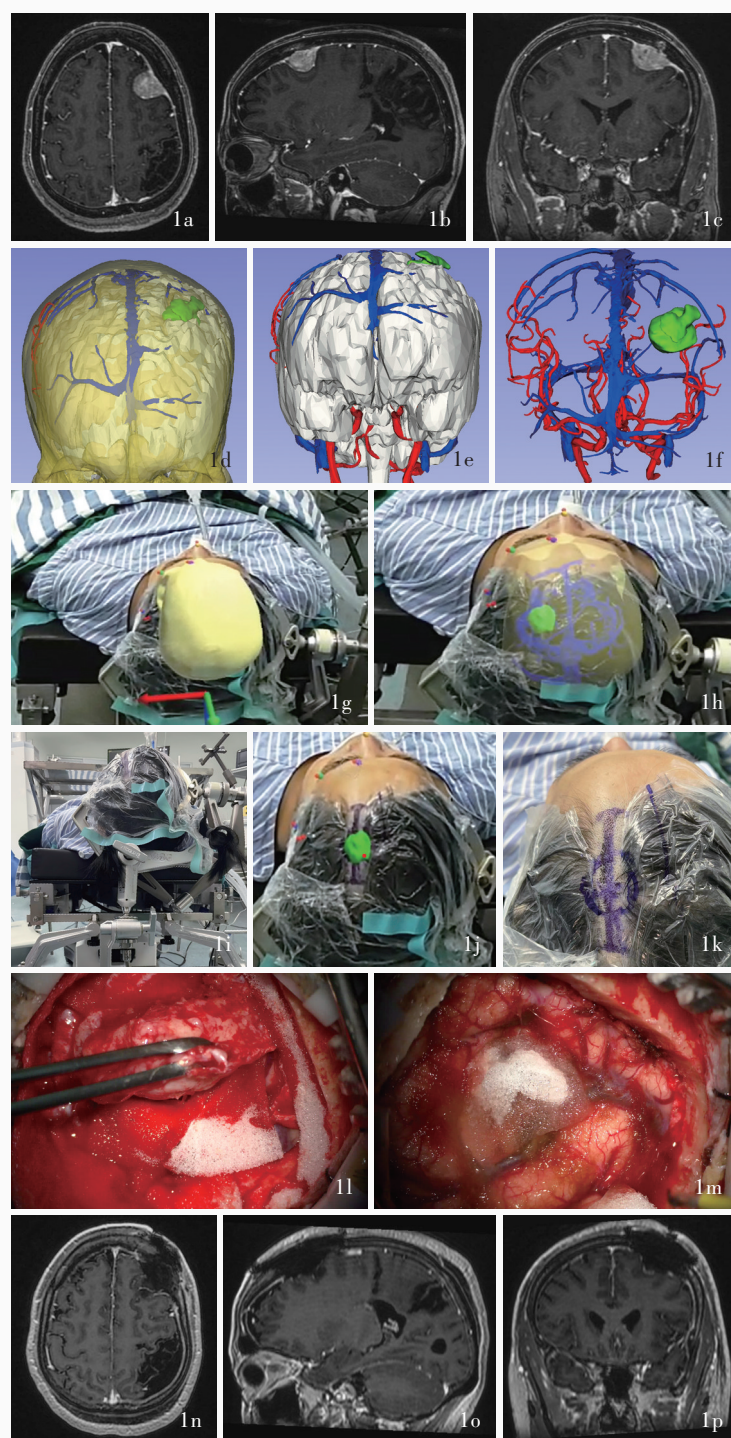


图1 全息混合现实神经导航系统辅助幕上脑膜瘤手术全流程 1a~1c 术前横断面、矢状位和冠状位增强 T₁WI 显示左侧额叶凸面颅骨内板下实性占位性病变,呈明显均匀强化,肿瘤灶与邻近颅骨内板呈宽基底,可见“硬膜尾征”;左侧顶叶大面积软化灶伴周围神经胶质增生形成 1d~1f 通过 CT 和 MRI 数据基于 3D Slicer 软件构建三维全息模型,显示额叶肿瘤位置及其与大脑上静脉的空间关系 1g,1h 利用 HoloLens 2 平台在患者头部表面叠加显示全息图像,精准勾画肿瘤灶边界和周围解剖结构 1i~1k 调整患者体位,根据全息投影规划设计手术切口 1l,1m 分阶段显示肿瘤剥离与切除过程,直至肿瘤全切除 1n~1p 术后横断面、矢状位和冠状位增强 T₁WI 显示肿瘤全切除,无残留病变

Figure 1 Comprehensive workflow of holographic MRN - assisted supratentorial meningioma surgery Preoperative axial, sagittal and coronal enhanced T₁WI showed a solid mass under the inner plate of the skull on the left frontal convex surface, obvious uniform enhancement changes, and the lesion was wide at the base of the adjacent inner plate of the skull, and the "dural tail sign" was visible. A large area of softening in the left parietal lobe was formed with peripheral gliosis (Panel 1a-1c). 3D holographic modeling reconstructed from CT and MRI data using 3D Slicer software, providing detailed visualization of the frontal lobe tumor location and its spatial relationship to superior cerebral vein structures (Panel 1d-1f). Intraoperative holographic overlay via HoloLens 2 device precisely delineates lesion boundaries and adjacent neurovascular anatomy through patient-registered scalp projection (Panel 1g, 1h). Surgical incision planning guided by holographic anatomical mapping following optimal patient positioning (Panel 1i-1k). Stepwise visualization of tumor dissection and resection under mixed reality guidance, achieving complete microsurgical excision (Panel 1l, 1m). Postoperative axial, sagittal and coronal enhanced T₁WI showed gross total tumor resection without residual lesion (Panel 1n-1p).

示肿瘤全切除,无残留病变或明显并发症(图 1n~1p)。患者共住院 21 d,出院时右下肢无力感较入院时明显改善,无抽搐及头晕,右下肢肌力 4 级,出院时口服丙戊酸钠(10 ml/次、2 次/d),分别于出院后 1、3 和 6 个月时门诊随访,未出现右下肢乏力加重或抽搐。

讨 论

近年来,全息混合现实神经导航系统凭借其虚实融合、实时交互的特性,成为神经外科精准手术的重要辅助工具。国内外研究团队在此领域取得重要进展,尤以解放军总医院第一医学中心陈晓雷

教授团队^[6-7,10]的研究最具代表性,首次提出基于 HoloLens 头戴式设备的全息混合现实神经导航系统,通过 37 例颅内病变患者的临床资料,验证该系统在术前定位中的技术可行性,并进一步拓展至脑功能区病变的精准切除。该团队提出的多模态全息混合现实神经导航系统整合 CT、MRI 及扩散张量成像(DTI)数据,实现功能-结构融合导航、术中动态调整、远程协作潜力上的创新,为远程医疗提供创新范式。此外,全息混合现实神经导航系统通过头戴式设备将虚拟图像叠加至真实术野,从而解决传统二维导航的“降维显示”问题,使术者视线转移频率和手术误差降低^[11]。目前国际研究主要聚焦于混合现实导航与人工智能(AI)、机器人系统的结合,神经外科协作机器人系统(如 RoboticScope、iArmS)通过三维机器视觉与全息混合现实神经导航系统融合,可稳定术野并辅助操作,但其推广仍受限于设备成本与术中动态影像更新延迟^[12-13]。Chiacchiaretta 等^[14]开发的一体化软件平台,支持自动分析 MRI 数据并生成三维全息模型,通过 HoloLens 平台实现术中导航,使术者在保留自然手眼协调的同时,直观观察肿瘤与脑功能区的空间关系,优化手术路径选择。Incekara 等^[15]通过前瞻性临床试验验证 HoloLens 平台在脑肿瘤定位中的可行性,结果显示,全息混合现实神经导航系统与传统导航系统的中位偏差为 0.40 cm,但需改进配准精度以支持术中实时引导。Ivanov 等^[16]采用三维打印可灭菌标志物,结合 CT/MRI 分割模型,在颈部囊肿切除术中实现全息导航,可灭菌标志物距离术野越近、目标配准误差(TRE)越低(3~7 mm),但手术室强光环境可能影响全息图像的可见度。总体来看,国内外学者在全息混合现实神经导航系统领域的研究正朝着以下方向发展:(1)临床应用。借助全息影像与实时数据融合,实现精准手术导航。(2)室内定位。利用多传感器融合构建高精度室内导航系统。(3)用户交互。优化交互设计,提升沉浸体验,降低用户负担。未来需通过产学研协同突破技术瓶颈,推动全息混合现实神经导航系统成为神经外科的标准化工具。

作为精准微侵袭神经外科的核心技术载体,全息混合现实神经导航系统正在重塑传统手术范式。尽管传统神经导航设备在大型神经外科中心已取得显著成效,但其高昂成本和技术要求限制基层医疗机构的普及。近年来,数字技术的迅速发展推动

新型导航技术的探索,其中全息混合现实神经导航系统凭借低成本、操作便捷和适用范围广等优势,展现出成为创新解决方案的潜力。随着国家数字医疗新基建政策的推进,有望在未来 10 年发展成为神经外科的标准配置,最终实现“精准外科”向“智能外科”的范式转变^[2,17]。笔者团队自主开发的全息混合现实神经导航系统结合 HoloLens 2 平台,已成功用于神经外科的术前规划与术中导航,将虚拟三维颅脑模型与患者头部进行实时视觉整合,立体投影显示颅内病变及其周围组织结构。与传统导航方法不同的是,该系统使外科医师无需在脑海中将二维图像转换为三维图像,也避免在术野与导航显示之间频繁切换,从而简化操作流程^[18-19]。本研究所有患者均为首次成功完成注册及配准,平均注册时间为(3.20±0.05) min,显示出极高的便捷性,且均未出现手术入路相关并发症,进一步验证该系统的术中安全性^[20]。

典型病例分析表明,全息混合现实神经导航系统可以精准定位肿瘤位置,并术前指导设计手术切口,实际手术与模拟过程高度一致,在实现肿瘤全切除的同时,最大限度减少全脑备皮带来的美容外观损伤,展示出在手术入路设计中的高实用性和临床价值。术前信息有助于明确安全切除区,手术采用经额叶入路,受益于全息混合现实神经导航系统对肿瘤、血管和神经关系的清晰可视化,进一步保护重要血管、神经和周围结构。同时,典型病例肿瘤侵犯颅骨,通过可视化术后颅骨缺损部分,根据颅骨缺损区域定制钛合金板进行颅骨重建,成功避免术后脑脊液漏。尽管肿瘤全切除是手术的主要目标,但若硬脑膜或颅骨结构受累未完全处理,部分患者仍可复发。在此类情况下,谨慎分离肿瘤与硬脑膜尤为重要,本组病例未观察到脑脊液漏或脑神经损伤,进一步验证全息混合现实神经导航系统的安全性。

全息混合现实神经导航系统在神经外科的应用日益广泛,主要涵盖术前规划、术中模拟及手术教学等多个环节。通过全息混合现实神经导航系统进行术前规划有助于临床医师更直观、精准地制定手术计划^[21-22];通过将患者 MRI、CT 等影像学数据三维重建为虚拟模型,展示病灶与周围结构的空間关系,讨论手术切口位置、手术路径及避开重要组织的最佳方式,进而提高手术安全性与效率。实时模拟手术操作还可以预测潜在风险点,优

化手术流程,减少术中不确定性。同时该系统为医患沟通提供直观的辅助工具。临床医师通过生成的三维模型向患者展示病变部位、手术路径及预期疗效,帮助理解手术的必要性、复杂性和风险,增强患者的信任感与配合度,减轻术前焦虑。此外,手术过程中全息混合现实神经导航系统的实时定位功能至关重要^[3],该系统结合术中和术前影像学数据,有助于外科医师精准识别解剖结构及病变部位,动态更新手术区域的三维影像,实时追踪手术器械,确保安全完成复杂操作,尤其在神经外科领域,精准的术中导航显著降低手术风险,提高术后患者生活质量。全息混合现实神经导航系统也为医学教育提供创新的教学手段,在虚拟环境中模拟完整手术流程,提高实践经验,同时减少对真实手术资源的依赖,提高学习效率^[5]。术中通过同步影像与解剖结构帮助学生理解操作细节,系统掌握复杂手术技能,为将来的独立操作打下坚实基础。全息混合现实神经导航系统的核心功能充分展示其在现代医学中的重要价值,不仅为临床医师提供精准的手术辅助,为患者提供更安全的医疗服务,同时也为医学教育开辟全新的路径。

综上所述,全息混合现实神经导航系统可以显著提高手术精准性和安全性,通过三维可视化引导,降低误操作风险,优化肿瘤灶定位效率,减少并发症,优化肿瘤切除过程,为复杂神经外科手术提供可靠技术支持。其直观路径规划功能可以减少外科医师对经验性判断的依赖,助力手术标准化及技术传承。对患者而言,其精准干预改善治疗效果,微侵袭操作加速康复并缩短住院周期,降低手术耗材与住院成本,同时通过影像直观化沟通增强患者理解,缓解医患矛盾。全息混合现实神经导航系统以精准化、高效化重塑神经外科诊疗模式,实现医师-患者-社会三方共赢,具备临床推广价值。然而,临床应用中仍存在若干局限性。首先,数据后处理过程较为耗时,需要大量训练有素的专业人员完成全息图像的重建与可视化,成为工作流程的瓶颈^[23];尽管 3D Slicer 软件在临床中广泛应用,但简化流程并结合人工智能将使全息混合现实神经导航系统更具操作性和用户友好性。其次,目标配准误差通常用于验证红外注册系统的准确性,反映虚拟空间中选定点与物理空间中对应点的偏移量。然而,由于硬件或软件的限制,HoloLens 2 平台创建的表面网格过于粗糙,无法精确测量。本研究的局

限性在于尚未对目标配准误差和表面配准误差(FRE)进行量化分析,这源于研究初期需优先验证系统架构与基础功能;该系统精度的评估基于颅骨体模实验的预设靶点定位,尚未通过伦理审批获取实际手术数据,后续将通过临床案例采集术中目标配准误差或表面配准误差数据,并与传统导航系统进行对比验证,以实现标准化的验证过程。

利益冲突 无

参 考 文 献

- [1] Wang ZC. Wang zhongcheng neurosurgery[M]. 2nd ed. Wuhan: Hubei Science & Technology Press, 2015: 596-597.[王忠诚. 王忠诚神经外科学[M]. 2版. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2015: 596-597.]
- [2] Chen L, Zhao ZY. A promotional application of neuronavigation: mixed reality neuronavigation[J]. Lin Chuang Shen Jing Wai Ke Za Zhi, 2022, 19:121-123.[陈凌, 赵振宇. 混合现实导航技术将成为神经外科手术导航的新方向[J]. 临床神经外科杂志, 2022, 19:121-123.]
- [3] Qiu J, Shu XJ, Zhang CG, Yi Y, Luo P, Cao XY, Jiang JC, Zhang C. Clinical application of smartphone-based real-time augmented reality rendering technology in scalp localization of superficial supratentorial tumors[J]. Guo Ji Shen Jing Bing Xue Shen Jing Wai Ke Xue Za Zhi, 2022, 49:32-35.[邱俊, 束旭俊, 张朝贵, 易勇, 罗鹏, 曹鑫意, 江竟成, 张超. 手机实时AR渲染技术在颅内幕上浅表肿瘤体表定位中的应用[J]. 国际神经病学神经外科学杂志, 2022, 49:32-35.]
- [4] Minty I, Lawson J, Guha P, Luo X, Malik R, Cerneviute R, Kinross J, Martin G. The use of mixed reality technology for the objective assessment of clinical skills: a validation study[J]. BMC Med Educ, 2022, 22:639.
- [5] Ma SL, Yang WB, Ye ZW, Huang W. Advances in application of mixed reality technology in medical education[J]. Zhonghua Yi Xue Jiao Yu Tan Suo Za Zhi, 2021, 20:254-259.[马胜铃, 杨文博, 叶哲伟, 黄玮. 混合现实技术在医学教育中的应用进展[J]. 中华医学教育探索杂志, 2021, 20:254-259.]
- [6] Qi Z, Li Y, Xu X, Zhang J, Li F, Gan Z, Xiong R, Wang Q, Zhang S, Chen X. Holographic mixed-reality neuronavigation with a head-mounted device: technical feasibility and clinical application[J]. Neurosurg Focus, 2021, 51:E22.
- [7] Qi ZY, Zhang JS, Xu XH, Gan ZC, Xiong RC, Zhang SY, Wang JY, Liu MH, Li Y, Wang Q, Li FY, Chen XL. Implement of mixed reality navigation based on multimodal imaging in the resection of intracranial eloquent lesions[J]. Zhonghua Wai Ke Za Zhi, 2022, 60:1100-1107.[祁子禹, 张家墅, 徐兴华, 干智超, 熊若楚, 张世宇, 王静岳, 刘明航, 李晔, 王群, 李昉晔, 陈晓雷. 基于多模态影像的混合现实导航技术在脑功能区病变切除术中的应用价值[J]. 中华外科杂志, 2022, 60:1100-1107.]
- [8] Louis DN, Perry A, Wesseling P, Brat DJ, Cree IA, Figarella-Branger D, Hawkins C, Ng HK, Pfister SM, Reifenberger G, Soffietti R, von Deimling A, Ellison DW. The 2021 WHO Classification of Tumors of the Central Nervous System: a summary[J]. Neuro Oncol, 2021, 23:1231-1251.
- [9] Sasaki S, Tsukamoto S, Ishida Y, Kobayashi Y, Inagaki Y, Mano T, Kitamura T, Seriu N, Nakagawa I, Kido A. The Karnofsky Performance Status at discharge is a prognostic indicator of life expectancy in patients with glioblastoma[J]. Cureus, 2024, 16:e66226.

- [10] Qi Z, Bopp MHA, Nimsky C, Chen X, Xu X, Wang Q, Gan Z, Zhang S, Wang J, Jin H, Zhang J. A novel registration method for a mixed reality navigation system based on a laser crosshair simulator: atechical note[J]. Bioengineering (Basel), 2023, 10: 1290.
- [11] Zhao ZY, Chen L, Liu JL, Sun GC, Lu T, Wang J, Shen SP, Zhang ZZ, Li YL, Li X, Bai YM, Pan JX, Xiong YY, Sha HF, Yu XG. Application of hybrid reality electromagnetic navigation technology in neurosurgery[J]. Lin Chuang Shen Jing Wai Ke Za Zhi, 2022, 19:124-129.[赵振宇, 陈凌, 刘嘉霖, 孙国臣, 鲁通, 王健, 沈少平, 张治中, 李云利, 李鑫, 白玉名, 潘吉鑫, 熊远毅, 沙洪飞, 余新光. 混合现实电磁术中导航技术在神经外科手术中的应用[J]. 临床神经外科杂志, 2022, 19:124-129.]
- [12] Stoyanov D, Taylor Z, Carneiro G, Syeda-Mahmood T, Martel A, Maier-Hein L, Tavares JMRS, Bradley A, Papa JP, Belagiannis V, Nascimento JC, Lu Z, Conjeti S, Moradi M, Greenspan H, Madabhushi A. Deep learning in medical image analysis and multimodal learning for clinical decision support: 4th International Workshop, DLMIA 2018, and 8th International Workshop, ML-CDS 2018, held in conjunction with MICCAI 2018, Granada, Spain, September 20, 2018, proceedings [M]. Cham: Springer, 2018: 1-311.
- [13] Liu X, Teng CB, Li XJ. Research progress of mixed reality technology in neurosurgery[J]. Lin Chuang Shen Jing Wai Ke Za Zhi, 2021, 18:468-472.[刘曦, 滕楚北, 李学军. 混合现实技术在神经外科应用的研究进展[J]. 临床神经外科杂志, 2021, 18:468-472.]
- [14] Chiacchiaretta P, Perrucci MG, Caulo M, Navarra R, Baldiraghi G, Rolandi D, Luzzi S, Del Maestro M, Galzio R, Ferretti A. A dedicated tool for presurgical mapping of brain tumors and mixed - reality navigation during neurosurgery [J]. J Digit Imaging, 2022, 35:704-713.
- [15] Incekara F, Smits M, Dirven C, Vincent A. Clinical feasibility of a wearable mixed-reality device in neurosurgery [J]. World Neurosurg, 2018, 118:e422-e427.
- [16] Ivanov VM, Krivtsov AM, Strelkov SV, Kalakutskiy NV, Yaremenko AI, Petropavlovskaya MY, Portnova MN, Lukina OV, Litvinov AP. Intraoperative use of mixed reality technology in median neck and branchial cyst excision[J]. Future Internet, 2021, 13:214.
- [17] Yang JP, Jia JY, Lu SK, Wu YK, Song DH, Li C, Li ZH, Yang Y, Niu WH, Sun XF. Clinical application of mixed reality technology in surgical resection of vestibular schwannomas[J]. Zhonghua Shen Jing Wai Ke Za Zhi, 2023, 39:35-40.[杨吉鹏, 贾景元, 卢圣奎, 吴艳凯, 宋登浩, 李琛, 李朝晖, 杨悦, 牛伟浩, 孙晓枫. 混合现实技术在听神经瘤手术中的应用价值[J]. 中华神经外科杂志, 2023, 39:35-40.]
- [18] Marrone S, Scalia G, Strigari L, Ranganathan S, Travali M, Maugeri R, Costanzo R, Brunasso L, Bonosi L, Cicero S, Iacopino DG, Salvati M, Umana GE. Improving mixed - reality neuronavigation with blue-green light: a comparative multimodal laboratory study[J]. Neurosurg Focus, 2024, 56:E7.
- [19] Deng W, Li F, Wang M, Song Z. Easy-to-use augmented reality neuronavigation using a wireless tablet PC[J]. Stereotact Funct Neurosurg, 2014, 92:17-24.
- [20] Tang ZN, Hu LH, Soh HY, Yu Y, Zhang WB, Peng X. Accuracy of mixed reality combined with surgical navigation assisted oral and maxillofacial tumor resection[J]. Front Oncol, 2022, 11:715484.
- [21] Caliskan KE, Yavas G, Cagli MS. Intraoperative mixed - reality spinal neuronavigation system: a novel navigation technique for spinal intradural pathologies[J]. Neurosurg Focus, 2024, 56:E2.
- [22] Dmitriev AY, Dashyan VG. Intraoperative brain shift in neuronavigation: causes, clinical significance and solution of the problem[J]. Zh Vopr Neirokhir Im NN Burdenko, 2022, 86:119-124.
- [23] Carbone M, Montemurro N, Cattari N, Autelitano M, Cutolo F, Ferrari V, Cigna E, Condino S. Targeting accuracy of neuronavigation: a comparative evaluation of an innovative wearable AR platform vs. traditional EM navigation [J]. Front Digit Health, 2025, 6:1500677.

(收稿日期: 2025-02-27)

(本文编辑: 许畅)

· 读者 · 作者 · 编者 ·

《中国现代神经疾病杂志》编辑部关于医学名词、计量单位、数字和缩略语的要求

《中国现代神经疾病杂志》编辑部对来稿中的医学名词、计量单位、数字和缩略语的具体要求如下:

1. 医学名词 以 1989 年及其以后全国自然科学名词审定委员会审定、公布, 科学出版社出版的《医学名词》和相关学科的名词为准, 暂未公布者仍以人民卫生出版社编辑的《英汉医学词汇》为准。中文药物名称应使用 1995 年版药典或卫生部药典委员会编辑的《中国药品通用名称》中的名称, 英文药物名称则采用国际非专利药名, 不使用商品名。

2. 计量单位 参照中华医学会杂志社编写的《法定计量单位在医学上的应用》(第 3 版)。北京: 人民军医出版社, 2001。

3. 数字 参照执行 GB/T 15835-1995《出版物上数字用法的规定》。北京: 中国标准出版社, 1996。(1) 公历世纪、年代、年、月、日和时刻、计数与计量均用阿拉伯数字。(2) 数点前或后超过 4 位数字 (含 4 位) 时, 每 3 位一组, 组间空 1/4 个汉字空, 例如“81,319.676,56”应写成“81 319.676 56”, 但序数词和年份、页数、部队番号、仪表型号、标准号不分节。(3) 百分数范围, 前一个参数的百分号不能省略, 例如“20%~30%”不能写成“20~30%”。(4) 附带长度单位的数值相乘, 每个数值后单位不能省略, 例如“5 cm×6 cm×7 cm”, 不能写成“5×6×7 cm³”。(5) 所有实验室数据以及统计数据请保留小数点后两位小数, 具体统计量值和 P 值请保留小数点后三位小数。

4. 缩略语 文题一般不使用缩略语, 文中则尽量少用。必须使用时, 应于正文首次出现处先叙述其全称, 然后用圆括号注出缩略语; 若为外文可于文中首次出现时写出中文全称, 在圆括号内写出缩略语, 或者外文尚无规范的中文全称, 首次以缩略语出现, 需用圆括号注明外文全称。一篇文章内缩略语一般不宜超过 5 个。不超过 4 个汉字的名词一般不使用缩略语, 以免影响文章的可读性。