



电子、语音版

·论著·

混合现实技术辅助颅脑肿瘤外科手术初步探讨

邵祥祥¹, 薛莹², 李志林², 龚鹏程¹, 毕玉旭¹, 倪炜¹

1. 昆明医科大学第三附属医院暨云南省肿瘤医院神经外科, 云南 昆明 650000

2. 昆明医科大学第三附属医院暨云南省肿瘤医院影像科, 云南 昆明 650000

摘要:目的 探究混合现实(MR)技术辅助颅脑肿瘤外科治疗过程中的价值。方法 收集2022年10月—2023年12月昆明医科大学第三附属医院神经外科诊治的颅脑肿瘤患者59例,根据是否采用MR技术辅助手术治疗分为MR技术组和常规手术组,MR技术组入组27例,术前均利用3D slicer将患者肿瘤可视化,结合MR技术术前定位肿瘤位置、设计皮肤切口、完善术前规划等;常规手术组入组32例,根据主刀医师手术经验进行手术治疗。收集两组病例术中出血、手术时长、骨瓣面积、术后住院时间、术后并发症发生率等指标。结果 MR技术组骨瓣面积 $20.92(15.29, 28.54)\text{cm}^2$ 低于常规手术组的 $33.42(20.24, 39.95)\text{cm}^2$ ($P=0.016$)。MR技术组术后住院时间 $11(8, 15)\text{d}$ 低于常规手术组的 $16(13, 18.75)\text{d}$ ($P=0.000$),MR技术组术后并发症的发生率 11.1% 低于常规手术组的 40.6% ($P=0.011$)。结论 MR技术辅助颅脑肿瘤外科治疗可实现肿瘤可视化、辅助定位、制定手术方案、模拟手术等作用,在实现最大安全程度切除肿瘤方面有重要意义。

[国际神经病学神经外科学杂志, 2024, 51(3): 59–64]

关键词:混合现实技术;颅脑肿瘤;外科治疗;可视化;增强现实技术

中图分类号:R739.41

DOI:10.16636/j.cnki.jinn.1673-2642.2024.03.009

A preliminary exploration of mixed reality technique in assisting craniocerebral tumor surgery

SHAO Xiangxiang¹, XUE Ying², LI Zhilin², GONG Pengcheng¹, BI Yuxu¹, NI Wei¹

1. Department of Neurosurgery, The Third Affiliated Hospital of Kunming Medical University and Yunnan Cancer Hospital, Kunming, Yunnan 650000, China

2. Department of Radiology, The Third Affiliated Hospital of Kunming Medical University and Yunnan Cancer Hospital, Kunming, Yunnan 650000, China

Corresponding author: NI Wei, Email: niweikm@163.com

Abstract: **Objective** To investigate the value of mixed reality (MR) technique in assisting the surgical treatment process of craniocerebral tumor. **Methods** A total of 59 patients with craniocerebral tumor who were diagnosed and treated in Department of Neurosurgery, The Third Affiliated Hospital of Kunming Medical University, from October 2022 to December 2023 were enrolled, and according to whether MR technique was used to assist surgical treatment, they were divided into MR technique group and conventional surgery group. For the 27 patients in the MR technique group, 3D slicer was used for tumor visualization, preoperative tumor localization, skin incision design, and preoperative planning; for the 32 patients in the conventional surgery group, surgical treatment was performed by the surgeon in charge based on his/her surgical experience. Related indicators were recorded for both groups, including intraoperative blood loss, time of operation, bone flap area, length of postoperative hospital stay, and the incidence rate of postoperative complications. **Results** The MR technique group had a significantly smaller median bone flap area than the conventional surgery group [$20.92(15.29, 28.54)\text{cm}^2$ vs $33.42(20.24, 39.95)\text{cm}^2$, $P=0.016$]. Compared with the conventional surgery group, the

基金项目:昆明医科大学2023年硕士研究生创新基金(2023S369)。

收稿日期:2023-11-10;修回日期:2024-06-10

通信作者:倪炜,Email:niweikm@163.com。

MR technique group had a significantly shorter length of postoperative hospital stay [11 (8, 15) days *vs* 16 (13, 18.75) days, $P = 0.000$] and a significantly lower incidence rate of postoperative complications (11.1% *vs* 40.6%, $P = 0.011$).

Conclusion MR technique for assisting the surgical treatment of craniocerebral tumor can help to achieve tumor visualization, assist in tumor localization, formulate the surgical plan, and perform surgical simulation, and it is of great significance in achieving the maximum degree of safety in tumor resection.

[Journal of International Neurology and Neurosurgery, 2024, 51(3): 59–64]

Keywords: mixed reality technique; craniocerebral tumor; surgical treatment; visualization; augmented reality technique

神经外科手术由于操作空间小、颅脑解剖结构及脑功能复杂等原因,神经外科手术通常高风险、高难度^[1]。混合现实(mixed reality, MR)技术应用于颅脑肿瘤手术将可视化、多角度观察肿瘤与周围组织之间的三维空间结构,有利于术前合理规划手术入路及手术切口,减少患者手术并发症、缩短住院时间等^[2-3]。本研究分析昆明医科大学第三附属医院神经外科将MR技术运用于颅脑肿瘤患者的手术治疗,现报告如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料

本研究收集昆明医科大学第三附属医院神经外科2022年10月—2023年12月收治的颅脑肿瘤患者59例,

根据是否采用MR技术辅助手术治疗分为MR技术组和常规手术组。所有患者均签署手术知情同意书,两组患者均在不同医疗组进行手术治疗。MR技术组和常规手术组临床资料及肿瘤位置比较,差异无统计学意义($P > 0.05$)。见表1、2。项目通过昆明医科大学第三附属医院医学伦理委员会批准(编号:KYLX2022266)。

纳入标准:①CT及MRI等影像学检查提示颅脑占位,高度怀疑颅脑肿瘤;②初治颅脑肿瘤,入院前未行手术治疗;③术后可定期复查并提供病历资料者。排除标准:①复发性肿瘤,入院前已进行其他方式治疗;②术中显微镜下及术后复查影像资料不可判定手术切除程度;③拒绝手术治疗,存在手术禁忌;④失访患者。

表1 两组术前临床资料情况

项目	MR技术组($n=27$)	常规手术组($n=32$)	$t/\chi^2/Z$ 值	P 值
年龄/(岁, $\bar{x} \pm s$)	50.37 \pm 11.731	53.34 \pm 9.143	-1.094	0.279
性别/例				
男	8	11	0.151	0.698
女	19	21		
肿瘤性质/例				
脑膜瘤	15	16	0.020	0.887
其他类型	12	16		
肿瘤体积/[cm ³ , $M(P_{25}, P_{75})$]	6.57(2.28, 26.43)	7.12(3.57, 17.15)	-0.068	0.945
术前神经功能障碍/例				
有	9	11	0.007	0.933
无	18	21		
术前Karnofsky(KPS)评分/[分, $M(P_{25}, P_{75})$]	90(80.0, 90.0)	80(72.5, 90.0)	-1.566	0.117

表2 肿瘤位置情况例

肿瘤位置	MR技术组($n=27$)		常规手术组($n=32$)		χ^2 值	P 值
	左	右	左	右		
额叶	8	6	4	5	12.479	0.999
顶叶	3	3	1	0		
颞叶	2	0	0	6		
枕叶	1	0	6	1		
小脑	1	1	1	3		
其他	2	0	2	3		

1.2 影像检查

59例颅脑肿瘤患者均采用Simens Somatom

Definition AS 128层螺旋CT(德国西门子)进行术前薄层CT扫描及CTA扫描,采用Philips Ingenia 3.0 T磁共振(荷兰飞利浦)进行术前薄层MRI扫描及MRA、MRV扫描。

1.3 重建三维虚拟可视化模型

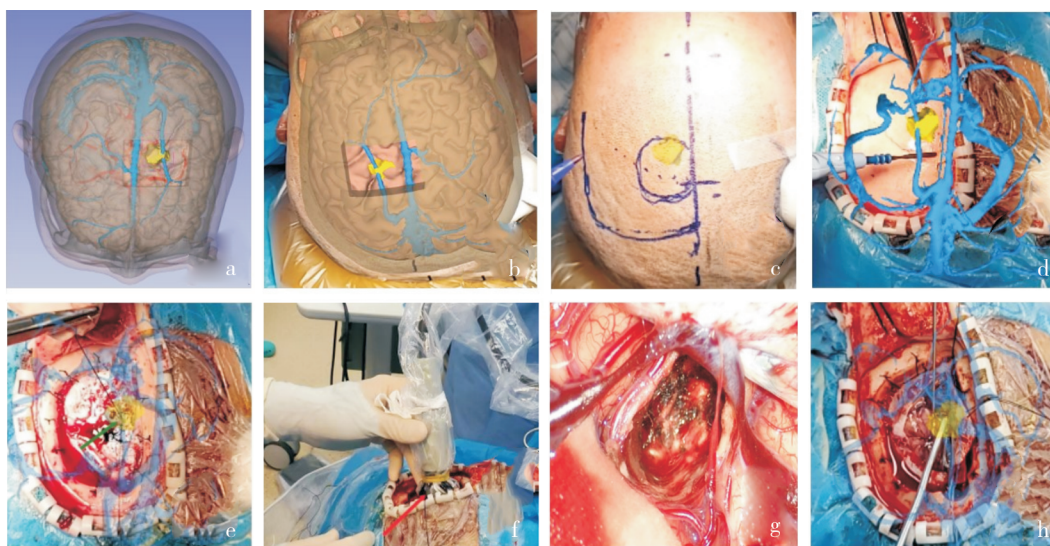
3D slicer软件是一款免费开源的三维建模的软件^[4]。获取患者原始影像数据(DICOM格式)导入3D slicer软件中,运行Landmark Registration模块,将患者CT和MRI数据进行配准融合。运行Segment Editor模块,应用Threshold阈值法重建患者颅骨、肿瘤、血管、神经、脑组织、皮肤等(图1a),多角度观察肿瘤与周围组织的空间关系,模拟骨瓣开窗制定详细的手术方案。将重建好的三

维虚拟可视化模型导入Unity软件中进行配准融合,添加模型稳定及相机追踪脚本,生成移动智能终端软件。

1.4 手术过程

MR技术组利用移动智能终端软件识别自制定位标记快速将三维虚拟可视化模型配准至患者头颅(图1b),在患者头颅上勾勒出虚拟肿瘤位置,根据虚拟肿瘤位置设计皮肤切口(图1c),同时显实肿瘤与血管,多角度观察肿瘤与血管的关系,提前制定应对可能出现的术中情况方案。主刀医师切开皮肤并翻转皮瓣后,根据虚拟肿瘤在患者颅骨上的位置及在3D slicer软件中设计的骨瓣开

窗进行钻孔设计(图1d)。悬吊完硬脑膜后根据虚拟肿瘤在硬脑膜上的位置在虚拟肿瘤中心悬吊1根丝线(图1e),术中超声沿着悬吊丝线验证虚拟肿瘤中心是否为实际肿瘤中心(图1f)。术中实时制导肿瘤位置,全方位显实肿瘤与周围血管、神经、脑组织解剖关系,帮助主刀医师完成手术。术后显微镜下观察是否全切肿瘤(图1g),术后验证虚拟肿瘤是否与瘤腔重合(图1h)。常规手术组根据主刀医师的手术经验将患者二维影像数据在脑海中转化为三维立体图像,在患者头颅上经验定位肿瘤位置,术中凭借临床经验及手术技巧完成手术。



a:术前利用患者影像数据重建的三维虚拟可视化模型,黄色为肿瘤,蓝色为静脉,红色为动脉,皮肤、开窗颅骨及脑组织为不同程度的透明;b:术前虚拟模型与患者头颅交互情况;c:虚拟肿瘤在患者头皮上投影,并设计的皮肤切口;d:虚拟肿瘤静脉与患者头颅的交互画面,在患者颅骨上设计骨瓣开窗;e:虚拟肿瘤、静脉与患者硬脑膜交互画面,绿色箭头为丝线悬吊的虚拟肿瘤中心;f:术中超声沿着悬吊丝线验证虚拟肿瘤中心是否和实际肿瘤中心重合,红色箭头为虚拟肿瘤悬吊丝线,绿色箭头为超声实时画面;g:显微镜下全切肿瘤画面;h:术后验证虚拟肿瘤是否和瘤腔重合,深入瘤腔的为吸引器,透明静脉可与瘤腔表面静脉重合。

图1 MR技术组术前规划及手术全过程

1.5 术后检查评估

手术结束后2~3 h完善头颅CT平扫,评估术区情况。根据术中显微镜下情况及术后复查MRI情况评估手术切除情况,根据患者术后症状评估并发症情况,术后1个月评估患者Karnofsky(KPS)评分。

1.6 统计学方法

采用SPSS 27.0统计软件进行分析,计量资料采用均数±标准差($\bar{x} \pm s$)或中位数(四分位数间距)[$M(P_{25}, P_{75})$]表示,比较采用 t 检验或秩和检验;计数资料采用例表示,

比较采用 χ^2 检验;以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

两组骨瓣面积比较,差异有统计学意义($P < 0.05$),MR技术组骨瓣面积小于常规手术组;两组术后住院时间比较,差异有统计学意义($P < 0.05$),MR技术组术后住院时间比常规手术组短;两组术后并发症的发生率比较,差异有统计学意义($P < 0.05$),MR技术组的术后并发症的发生率低于常规手术组。见表3。

表3 两组手术及术后情况

项目	MR 技术组(n=27)	常规手术组(n=32)	Z/ χ^2 值	P 值
手术时长/[min, $M(P_{25}, P_{75})$]	235(180, 315)	236. 5(188. 8, 290. 8)	-0. 312	0. 755
术中出血/[mL, $M(P_{25}, P_{75})$]	300(100. 0, 650. 0)	300(170. 0, 587. 5)	-0. 688	0. 492
骨瓣面积/[cm ² , $M(P_{25}, P_{75})$]	20. 92(15. 29, 28. 54)	33. 42(20. 24, 39. 95)	-2. 412	0. 016
术后住院时间/[d, $M(P_{25}, P_{75})$]	11(8. 00, 15. 00)	16(13. 00, 18. 75)	-3. 646	0. 000
手术切除程度/例				
全切	26	28	0. 547	0. 460
次全切	1	4		
术后并发症/例				
有	3	13	6. 454	0. 011
无	24	19		
术后 1 个月 KPS 评分/[分, $M(P_{25}, P_{75})$]	100(90, 100)	90(80, 100)	-1. 671	0. 095

3 讨论

保障安全前提下尽可能全切颅脑肿瘤是神经外科医师追求的目标。但是由于颅脑神经血管解剖的复杂性及肿瘤已将正常脑组织及纤维束等重要解剖结构推移离开原本的位置,单纯凭借解剖标记定位颅脑肿瘤位置存在偏差的风险,加之手术过程中有些肿瘤组织难以与正常组织辨别,导致手术无法全切肿瘤^[5]。对许多神经外科手术而言,合理的术前规划可减少患者术后并发症,因此需要各种辅助神经外科医师辅助定位颅脑肿瘤的方法。

神经外科病灶定位方法是个逐步发展的过程,在 20 世纪初之前,神经外科医师只能依赖解剖学知识了解患者颅内结构和病灶位置。随着颅内成像技术的出现,Spiegel 和 Wycis 率先开展了立体定向技术^[6],随后立体定向技术广泛应用于神经外科手术中,但也存在患者全身麻醉后、后颅窝病变无法定位、操作复杂等缺点^[7]。随着影像技术的发展,David Roberts 首次报道了无框立体定向技术^[8],该技术由于手术室硬件设备的影响导致定位存在误差,后逐渐发展成型。随着电磁导航系统和光学导航系统的出现,基本解决了神经外科的定位问题,但其依然存在脑漂移带来的误差^[9]。此外,由于价格昂贵以及存在电子干扰,电磁导航未能在临床广泛使用^[10]。

利用移动设备增强现实(augmented reality, AR)在颅脑肿瘤定位中实现毫米级误差^[10]。AR 和虚拟现实(virtual reality, VR)在神经外科手术中均能帮助神经外科医师解决定位问题^[11]。随着技术发展,MR 技术也逐渐成为新的导航定位技术,其在手术、医学教育及医患沟通等方面具有较大优势^[12],MR 技术将成为神经外科手术导航的新方向^[13]。后来随着各种可视化技术的出现,利用患者影像数据通过 3D slicer 重建三维立体虚拟模型,可视化肿瘤及周边组织,进行术前规划,对比未进行重建的患者,发现对肿瘤可视化可提高肿瘤的全切率,减少术中出血及术后并发症^[14]。

MR 技术是继 AR 和 VR 技术之后的一种全新数字全

息成像技术,其在颅脑肿瘤手术过程中实时显示可视化病灶及周围组织,可帮助临床医师制定详细的手术计划、术中实时导航精准切除肿瘤,结合术中超声可有效解决脑漂移带来的误差问题,其在神经外科应用具有广泛前景^[1]。AR 和 MR 技术在颅脑肿瘤中的应用价值国内外许多研究已证实(表 4),在胶质瘤的研究中,AR 及 MR 技术辅助脑胶质瘤的外科治疗,术中使用可直观肿瘤边界,结合神经纤维显像可帮助临床医师最大安全范围内切除肿瘤^[15-16]。在脑膜瘤的外科治疗研究中,MR 及 AR 技术辅助手术治疗,帮助临床医师制定手术方案,直观肿瘤周围复杂的解剖结构,减少术后患者并发症^[17-19]。MR 技术辅助听神经瘤手术治疗,不仅可提高手术的成功率,还可以促进医患沟通^[20]。多项研究证实 MR 及 AR 技术辅助脑膜瘤、胶质瘤、转移瘤、血管瘤、室管膜瘤的外科治疗中,可有效提高手术的成功率和安全性^[21-24]。不同部位的肿瘤也有相关研究,在前颅底及鞍区肿瘤外科治疗中,MR 技术辅助前颅底及鞍区手术,有利于辨认解剖结构,指导手术治疗^[25-26]。在颅底外侧肿瘤手术治疗这种也可以利用 MR 及 AR 技术辅助,有利于临床医师规划手术及术中使用的^[2, 27]。

本研究 MR 技术组 27 例患者首先利用患者原始影像数据在 3D slicer(版本 5.0.3)软件进行肿瘤可视化,均可以实现肿瘤的可视化,并多角度观察肿瘤与毗邻组织的关系。利用虚拟模型中肿瘤在颅脑中的位置,提前设计手术入路、骨瓣开窗等^[28-29]。术前将自制定位标记置于患者头部完善术前 CT 并在 3D slicer 软件中建模后与患者虚拟模型进行配准融合,将数据导入 Unity 软件中生成相应的移动智能终端软件。本研究 MR 技术组术前将自制定位标记置于患者头颅用于注册虚拟模型位置,利用移动智能终端识别自制定位标记实现虚拟模型与患者头颅交互,定位肿瘤的位置,设计手术入路、皮肤切口、颅骨钻孔位置等,避免过大开放皮瓣及骨窗,减小患者手术创伤^[19]。术中根据虚拟肿瘤位置及虚拟静脉在脑表面的位

表4 近年有关MR及AR技术辅助颅脑肿瘤治疗汇总

作者	年份	研究例数	研究结论
Zhou, 等 ^[15]	2022	16	基于MR技术多模态可视化平台,可辅助临床医师识别胶质瘤边界。
Luzzi, 等 ^[16]	2021	54	AR技术辅助幕上高级别胶质瘤手术切除,可提高切除范围、延长无进展生存期、保护功能区。
Lavé, 等 ^[17]	2020	20	AR技术辅助脑膜瘤外科治疗,临床医师可有效识别解剖结构。
Montemurro, 等 ^[18]	2021	30	通过实验室评估,AR技术可能成为辅助脑膜瘤手术定位、开颅设计的方法。
推洪波, 等 ^[19]	2023	11	MR技术辅助脑膜瘤治疗,可精准术前评估、制定手术策略,术中指导切口设计、硬膜切开、保护脑表面回流静脉。
杨吉鹏, 等 ^[20]	2021	13	MR技术有助于制定个体化听神经瘤手术方案,提高医患沟通效率,保护面神经。
祁子禹, 等 ^[21]	2022	15	基于多模态的MR技术在颅脑肿瘤手术治理中可提高手术的安全性,降低神经功能损伤的风险。
Satoh, 等 ^[22]	2021	10	AR技术辅助颅脑肿瘤外科治疗制定手术方案、设计皮肤切口、骨瓣设计、硬膜剪开等。
Zeiger, 等 ^[25]	2020	134	MR技术辅助神经内镜经鼻颅底手术,可帮助临床医师精准识别颅底解剖结构,保护颈内动脉和视神经。
Carl, 等 ^[26]	2019	47	AR技术辅助经鼻颅底手术,可提高手术的安全性。
Schwam, 等 ^[27]	2021	40	AR技术有可能成为侧颅底手术的重要辅助方法。
许玲, 等 ^[2]	2020	8	MR技术辅助侧颅底良性肿瘤手术可缩短肿瘤显露时间、加强医患沟通、提高患者满意度。

置避开拉贝静脉、侧裂血管、矢状窦及侧支静脉等,术中可见虚拟静脉和实际静脉重合,有效保护患者脑组织重要静脉^[30]。更重要的是,利用虚拟模型与患者头颅交互可多角度观察肿瘤与供血动脉及回流静脉之间关系,术后并发症明显减少,这一结果与Bollen等^[31]总结的MR技术辅助外科手术结果一致。

MR技术组27例患者中1例定位存在误差,分析误差原因可能为:①固定在患者头颅的自制定位标记由于牵拉患者皮瓣出现移位,导致虚拟模型注册错误;②患者影像数据经过多个软件流转,传输过程中软件不兼容导致的数据传输异常;③移动智能终端摄像头在识别自制定位标记时无法连续对焦,捕捉画面失败。其余26例均能有效定位并指导手术。综合分析MR技术组辅助颅脑手术治疗较常规手术组,可有效保证手术的成功率、减小骨瓣面积、缩短术后住院时间、降低患者术后并发症的发生率等。

总之,MR技术在辅助颅脑肿瘤外科治疗中可精准定位肿瘤位置,提高手术微创性及成功率。MR技术具有低成本、便携性好、用户界面友好等特点,有利于基层医院推广应用^[32]。同时由于其可以将复杂抽象的颅脑解剖及病变可视化,更有助于患者家属对颅脑肿瘤复杂性的理解,在医患沟通及神经外科教学等方面均大有可为^[33]。

参 考 文 献

[1] ZHANG CC, GAO HJ, LIU ZQ, et al. The potential value of mixed reality in neurosurgery[J]. J Craniofac Surg, 2021, 32(3): 940-943.

[2] 许玲, 孙岩, 陈良, 等. 混合现实技术在侧颅底良性肿瘤手术中的应用[J]. 山东大学学报(医学版), 2020, 58(1): 31-38.

[3] INCEKARA F, SMITS M, DIRVEN C, et al. Clinical feasibility of a wearable mixed-reality device in neurosurgery[J]. World Neurosurg, 2018, 118: e422-e427.

[4] NORTON I, ESSAYED WI, ZHANG F, et al. SlicerDMRI: open

source diffusion MRI software for brain cancer research[J]. Cancer Res, 2017, 77(21): e101-e103.

[5] 骆承章, 蒋敏杰, 吴小明, 等. 神经导航技术在颅脑肿瘤手术中的应用[J]. 中外医疗, 2021, 40(22): 6-9.

[6] SPIEGEL EA, WYCIS HT, MARKS M, et al. Stereotaxic apparatus for operations on the human brain[J]. Science, 1947, 106(2754): 349-350.

[7] WILLEMS PWA, VAN DER SPENKEL JWB, TULLEKEN CAF, et al. Neuronavigation and surgery of intracerebral tumours [J]. J Neurol, 2006, 253(9): 1123-1136.

[8] ROBERTS DW, STROHBEHN JW, HATCH JF, et al. A frameless stereotaxic integration of computerized tomographic imaging and the operating microscope[J]. J Neurosurg, 1986, 65 (4): 545-549.

[9] STIEGLITZ LH. [How reliable is neuronavigation] [J]. Praxis (Bern 1994), 2016, 105(4): 213-220.

[10] DE ALMEIDA AGC, FERNANDES DE OLIVEIRA SANTOS B, OLIVEIRA JLM. A neuronavigation system using a mobile augmented reality solution[J]. World Neurosurg, 2022, 167: e1261-e1267.

[11] MISHRA R, NARAYANAN MDK, UMANA GE, et al. Virtual reality in neurosurgery: beyond neurosurgical planning[J]. Int J Environ Res Public Health, 2022, 19(3): 1719.

[12] 刘将, 李明武, 曾明慧, 等. 混合现实技术在神经外科临床教学中的探索与实践[J]. 中国临床神经外科杂志, 2022, 27(9): 784-787.

[13] 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(2): 121-123, 129.

[14] 方丹东, 王奎重, 刘晓楠, 等. 基于CTA-MRI融合图像的三维重建技术对前中颅底脑膜瘤术中血管保护及术后并发症的研究[J]. 医药论坛杂志, 2023, 44(15): 18-23.

[15] ZHOU ZY, YANG ZY, 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.

- [16] LUZZI S, GIOTTA LUCIFERO A, MARTINELLI A, et al. Supratentorial high-grade gliomas: maximal safe anatomical resection guided by augmented reality high-definition fiber tractography and fluorescein[J]. *Neurosurg Focus*, 2021, 51(2): E5.
- [17] LAVÉ A, MELING TR, SCHALLER K, et al. Augmented reality in intracranial meningioma surgery: report of a case and systematic review[J]. *J Neurosurg Sci*, 2020, 64(4): 369-376.
- [18] MONTEMURRO N, CONDINO S, CATTARI N, et al. Augmented reality-assisted craniotomy for parasagittal and convexity En plaque meningiomas and custom-made cranio-plasty: a preliminary laboratory report[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18(19): 9955.
- [19] 推洪波, 孙博宇, 郎佳东, 等. 混合现实技术辅助矢状窦旁脑膜瘤显微切除术的价值[J]. *脑与神经疾病杂志*, 2023, 31(3): 138-142.
- [20] 杨吉鹏, 李晓瞳, 王同聚, 等. 混合现实在听神经瘤手术中与医患沟通中的应用[J]. *肿瘤防治研究*, 2021, 48(8): 788-793.
- [21] 祁子禹, 张家墅, 徐兴华, 等. 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(12): 1100-1107.
- [22] SATOH M, NAKAJIMA T, YAMAGUCHI T, et al. Evaluation of augmented-reality based navigation for brain tumor surgery[J]. *J Clin Neurosci*, 2021, 94: 305-314.
- [23] DHO YS, PARK SJ, CHOI H, et al. Development of an inside-out augmented reality technique for neurosurgical navigation[J]. *Neurosurg Focus*, 2021, 51(2): E21.
- [24] MONTEMURRO N, CONDINO S, CARBONE M, et al. Brain tumor and augmented reality: new technologies for the future[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19(10): 6347.
- [25] ZEIGER J, COSTA A, BEDERSON J, et al. Use of mixed reality visualization in endoscopic endonasal skull base surgery[J]. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*, 2020, 19(1): 43-52.
- [26] CARL B, BOPP M, VOELLGER B, et al. Augmented reality in transsphenoidal surgery[J]. *World Neurosurg*, 2019, 125: e873-e883.
- [27] SCHWAM ZG, KAUL VF, BU DD, et al. The utility of augmented reality in lateral skull base surgery: a preliminary report[J]. *Am J Otolaryngol*, 2021, 42(4): 102942.
- [28] ZHOU L, WANG WJ, WEI HY, et al. Clinical application of 3D slicer combined with Sina/MosoCam multimodal system in preoperative planning of brain lesions surgery[J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1): 19258.
- [29] LIU J, LI XD, LENG XP, et al. Effect of 3D slicer preoperative planning and intraoperative guidance with mobile phone virtual reality technology on brain glioma surgery[J]. *Contrast Media Mol Imaging*, 2022, 2022: 9627663.
- [30] CHEN JG, HAN KW, ZHANG DF, et al. Presurgical planning for supratentorial lesions with free slicer software and Sina App [J]. *World Neurosurg*, 2017, 106: 193-197.
- [31] BOLLEN E, AWAD L, LANGRIDGE B, et al. The intraoperative use of augmented and mixed reality technology to improve surgical outcomes: a systematic review[J]. *Int J Med Robot*, 2022, 18(6): e2450.
- [32] JAIN S, GAO YJ, YEO TT, et al. Use of mixed reality in neuro-oncology: a single centre experience[J]. *Life (Basel)*, 2023, 13(2): 398.
- [33] SILVERO ISIDRE A, FRIEDERICH H, MÜTHER M, et al. Mixed reality as a teaching Tool for medical students in neurosurgery[J]. *Medicina (Kaunas)*, 2023, 59(10): 1720.

责任编辑:王荣兵