

基于混合现实技术的多模态头戴式神经外科术中监测系统的可行性研究

靳海涛 干智超 许多朵 郎胜坤 梁岚青 徐兴华 俞伟 陈晓雷

【摘要】 目的 介绍基于混合现实技术的多模态头戴式神经外科术中监测系统使用流程,并探讨将其整合至神经外科术中放射治疗的可行性。**方法** 采用基于混合现实技术的多模态头戴式神经外科术中监测系统,辅助神经外科术中放射治疗期间麻醉医师对患者生命体征和术区的实时监控。使用前先采用模拟试验记录视频信号串流延迟时间,神经外科术中放射治疗开始前记录术前系统准备时间,术后采用自行设计的电子问卷调查麻醉医师使用满意度。**结果** 共 23 例次的神经外科术中放射治疗过程中成功应用该术中监测系统。定量延迟测试模拟试验测得视频信号串流延迟中位时间为 160 ms,术前系统准备时间由初期的 32 min 降至 4~5 min,共 14 名麻醉医师接受问卷调查,满意度达 30.43 分。**结论** 基于混合现实技术的多模态头戴式神经外科术中监测系统应用于神经外科术中放射治疗期间,辅助麻醉医师实时监测患者生命体征及术区环境具有较好的可行性,有很好的推广和转化应用前景。

【关键词】 混合现实(非 *MeSH* 词); 多模态头戴式监测系统(非 *MeSH* 词); 监测,手术中; 神经外科手术; 放射疗法

Feasibility study of a mixed reality-based multimodal head-mounted intraoperative neurosurgical monitoring system

JIN Hai-tao¹, GAN Zhi-chao¹, XU Duo-duo², LANG Sheng-kun¹, LIANG Lan-qing³, XU Xing-hua¹, YU Wei³, CHEN Xiao-lei¹

¹Department of Neurosurgery, ²Department of Anesthesiology, ³Department of Radiotherapy, The First Medical Center of Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China

Corresponding author: CHEN Xiao-lei (Email: chxlei@mail.sysu.edu.cn)

【Abstract】 Objective To introduce the application process of a mixed reality (MR) - based multimodal head - mounted intraoperative neurosurgical monitoring system and its integration into intraoperative applications, and to evaluate the clinical efficacy of this system for monitoring during neurosurgical intraoperative radiotherapy. **Methods** A MR-based multimodal head-mounted intraoperative neurosurgical monitoring system was used to assist anesthesiologists in real-time monitoring of patients' vital signs and operation area during radiotherapy in neurosurgical surgery. Before the use of the system, the simulation test was used to record the delay time of video signal streaming. Before the start of radiotherapy in neurosurgery, the system preparation time was recorded. After the operation, an self-designed electronic questionnaire was used to investigate the satisfaction of anesthesiologists with the use of the system. **Results** The system has been successfully used in 23 cases of neurosurgical intraoperative radiotherapy. No technical failures or related complications occurred. The quantitative delay test showed median time of video signal streaming delay measured by simulation test was 160 ms. The system preparation time decreased from 32 min at the beginning of the study to 4-5 min. A total of 14 anesthesiologists were received the questionnaire survey, and the satisfaction score was 30.43. **Conclusions** The MR-based multimodal head-mounted intraoperative neurosurgical monitoring system is applied during neurosurgical intraoperative radiotherapy to assist anesthesiologists in real-time monitoring of patients' vital signs and the

doi:10.3969/j.issn.1672-6731.2025.03.011

基金项目:国家自然科学基金资助项目(项目编号:82272134)

作者单位:100853 北京,解放军总医院第一医学中心神经外科医学部(靳海涛、干智超、郎胜坤、徐兴华、陈晓雷),麻醉手术中心(许多朵),放疗科(梁岚青、俞伟)

通讯作者:陈晓雷, Email: chxlei@mail.sysu.edu.cn

environment of the operation area, which has a good prospect of popularization and transformation.

【Key words】 Mixed reality (not in *MeSH*); Multimodal head-mounted monitoring system (not in *MeSH*); Monitoring, intraoperative; Neurosurgical procedures; Radiotherapy

This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 82272134).

Conflicts of interest: none declared

随着医疗技术的进步与设备的发展,神经外科术中显示设备逐渐增多,但难以在有限的手术室空间内达到完美的放置及显示效果。应用术中导航时术者常需在实际手术部位与计算机屏幕之间切换,影响手术连续性、安全性且延长手术时间^[1];特殊情况下如术中放射治疗时,医护人员常需在此期间离开手术区域并保持一定安全距离,无法对患者进行实时监护以保障手术安全。针对上述临床痛点和难点,笔者团队尝试开发一种基于混合现实(MR)技术的多模态头戴式神经外科术中监测系统,穿透式头戴式显示器(HMD)是该系统的主要显示硬件^[2],通过一组光学系统(主要是精密光学透镜)放大传统微型平板显示屏上的图像,将影像投射至视网膜,进而将大屏幕图像或立体图像呈现于使用者眼前;且穿透式头戴式显示器可将虚拟界面与现实混合显示、互动,实现混合现实呈现。本研究系统介绍基于混合现实技术的多模态头戴式神经外科术中监测系统使用流程,并采用自行设计的电子问卷对神经外科手术中使用该系统的麻醉医师进行问卷调查,以分析该系统的临床可行性。

器械与方法

一、主要器械

硬件系统包括穿透式头戴式显示器(SeerLens B50R,上海詮视传感技术有限公司;图1a)、集成式视频处理工作站(工作平台车+扬天T4900台式计算机,中国联想集团;图1b)、视频采集器(MPB730,中国台湾UPMOST公司;图1c)、WIFI6无线路由器(AX6,中国华为技术有限公司;图1d)。软件系统由视频采集软件(中国台湾UPMOST公司)及笔者团队自主研发的局域网信号推流服务器软件Remote PC及穿透式头戴式显示器端接收软件Teamview组成。

二、使用流程

(1)无线局域网的搭建:使用WIFI6无线路由器建立无线局域网,将集成式视频处理工作站、

SeerLens B50R穿透式头戴式显示器接入局域网。(2)视频采集:使用MPB730视频采集器(UPMOST高清采集卡)通过相应视频输出端口[高清多媒体接口(HDMI)、视频图形列阵(VGA)、数字视频接口(DVI)等],将目标设备如心电监护仪、神经导航及电生理监测结果实时传输至视频处理工作站。若目标设备太陈旧,无专用视频输出端口,则采用额外录制设备录制目标设备画面,由视频采集器传输至集成式视频处理工作站。(3)视频处理及推流:集成式视频处理工作站将采集到的实时影像进行分辨率调整、图像质量渲染等加工处理,运行局域网信号推流服务器软件Remote PC,将视频数据进行网络推流。(4)视频接收:使用者佩戴穿透式头戴式显示器,打开专用接收软件Teamview,使用集成式视频处理工作站作为服务器进行IP地址配对,穿透式头戴式显示器即可显示目标设备影像(图2)。值得一提的是,笔者团队开发的基于混合现实技术的多模态头戴式神经外科术中监测系统的穿透式头戴式显示器可同时显示3个不同目标设备来源的自定义影像,且后续仍可继续增加。

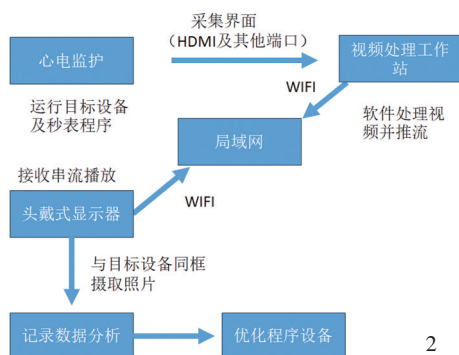
三、观察指标

1. 模拟视频信号串流延迟测试 模拟手术过程中测得显示延迟时间。待术中监测系统稳定运行后,通过在目标设备上运行毫秒级秒表,计算穿透式头戴式显示器同框拍摄目标设备影像与穿透式头戴式显示器显示影像的时间差,为视频信号串流延迟时间。本次模拟测试采用定量延迟测试方法,共记录20次延迟数据,并计算延迟时间。

2. 术前系统准备时间记录 选择我院2024年6–12月术前初步诊断为高级别胶质瘤或脑转移瘤,拟行术中放射治疗且经术中冰冻病理证实或高度怀疑高级别胶质瘤及脑转移瘤的神经外科手术患者。神经外科手术按常规流程进行,根据术中冰冻病理学检查决策行术中放射治疗后,开始基于混合现实技术的多模态头戴式神经外科术中监测系统的使用前准备。记录开始准备至麻醉医师佩戴穿

图 1 基于混合现实技术的多模态头戴式神经外科术中监测系统硬件组成 1a 穿透式头戴式显示器 1b 集成式视频处理工作站 1c 视频采集器 1d 无线路由器

Figure 1 Hardware composition of the mixed reality - based multimodal head - mounted intraoperative neurosurgical monitoring system Head - mounted display (Panel 1a). Integrated video processing workstation (Panel 1b). Video capture card (Panel 1c). Wireless router (Panel 1d).



HDMI, 高清多媒体接口

图 2 基于混合现实技术的多模态头戴式神经外科术中监测系统使用流程图

Figure 2 Flow chart of the mixed reality - based multimodal head - mounted intraoperative neurosurgical monitoring system usage.

透式头戴式显示器接收到术中监护仪显示图像所需时间,为系统准备时间。

3. 麻醉医师满意度调查 术中放射治疗开始后,麻醉医师佩戴穿透式头戴式显示器在手术室外安全区域实时监测患者生命体征和手术区域,包括术中心电监护、呼吸机参数监测等。放射治疗结束后由麻醉医师填写本研究自行设计的电子问卷(www.wjx.cn)。该问卷的设计参考文献[3-7]的标准,包含性别、年龄、从事麻醉医师年限、是否首次使用穿透式头戴式显示器等一般问题,以及成像功能满意度(5分)、佩戴舒适度(5分)、晕动(5分)、重量负荷(5分)、热负荷(5分)、创新性(5分)、推广意愿(5分)等7个方面,总评分35分,评分越高代表麻醉医师对系统的满意度越高。

结 果

本研究采用定量延迟测试方法,测得拍摄目标设备图像到穿透式头戴式显示器显示图像视频信号串流最长延迟时间 217 ms,最短延迟时间 87 ms,中位时间为 160 ms(图3)。基本满足术中安全要求(<400 ms^[8-10])的延迟时限。

本研究应用基于混合现实技术的多模态头戴式神经外科术中监测系统成功实施 23 例次(22 例)术中放射治疗,麻醉医师在手术室外安全区域内进行患者生命体征和手术区域的实时监测。23 例次术中放射治疗时间 8~50 min,中位时间 17 min,所有患者均安全完成手术。系统使用时,将监护仪和术区监控影像同时无线推流至穿透式头戴式显示器,麻醉医师佩戴穿透式头戴式显示器在 WIFI6 无线路由器局域网范围内自由活动(半径约 30 m),可以通过手势操控,非接触式将监测画面拖动到任意空间锚定,也可选定跟随模式,使画面跟随使用者而动(图4)。该系统的术前系统准备时间也在应用中逐步优化,由第 1 例的 32 min 缩短至 4~5 min(图5)。

本研究共回收有效电子问卷 14 份(表1),来自 14 名麻醉医师,男性 6 名,女性 8 名;年龄 24~38 岁,平均年龄为 31.57 岁,从事麻醉医师年限 2~11 年,平均 5.86 年;其中仅 1 名男性麻醉医师曾将头戴式显示设备用于娱乐,余 13 名均无使用经历。总评分 26~35 分,平均 30.43 分,其中对成像功能满意度较高,评分 4~5 分,平均可达 4.36 分;创新性 4~5 分,

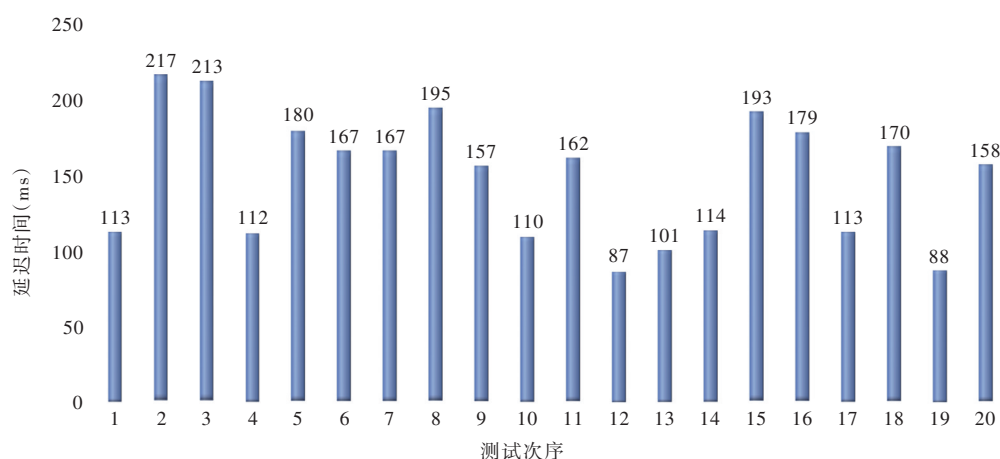


图3 视频信号串流延迟测试柱状图

Figure 3 Histogram of video signal streaming delay test.

平均可达 4.64 分;推广意愿为 4~5 分,平均高达 4.71 分;佩戴舒适度评分为 3~5 分,平均为 4.21 分;仅 2 名(例 5、例 6)对混合现实图像存在轻度晕动,余 12 例毫无晕动感;重量负荷为 2~5 分,平均为 3.71 分,仅 1 名(例 14)评价穿透式头戴式显示器毫无重量感、2 名(例 6、例 8)评价为较重、1 名(例 9)评价为一般、10 名评价为稍重但完全可耐受;热负荷评分 2~5 分,平均 3.93 分,6 名(例 2、例 7、例 9、例 11、例 12、例 14)评价穿透式头戴式显示器毫无热感,4 名(例 1、例 4、例 10、例 13)评价基本不热,1 名(例 3)评价为感觉一般,3 名(例 5、例 6、例 8)评价为较热。

讨 论

由于术中放射治疗存在放射损伤^[11-12],医务人员需在此期间离开手术室,在手术室外安全区域等候放射治疗结束。若术中放射治疗时间较长(有时 > 40 min),期间缺少麻醉医师的实时监护,患者易发生意外,存在极大的安全隐患,亦不符合医学伦理学要求。目前常规方法是麻醉医师将监护仪显示器转移至手术室窗口,于手术室外通过窗口观察监护仪图像变化,但该方法增加麻醉医师的疲劳感,且增加放射损伤风险;同时监护仪画面较小,远距离观察无法保证清晰度;此外,无法顾及术区情况,若发生术区出血或术中癫痫发作等,无法及时发现。上述问题不仅对医疗安全存在巨大威胁,也严重阻碍神经外科术中放射治疗这一技术的临床应用和推广。本研究开发的基于混合现实技术

的多模态头戴式神经外科手术中监测系统为上述难题的解决提供了新的思路。

混合现实技术是在虚拟现实(VR)和增强现实(AR)技术基础上发展起来的更先进的技术^[13],混合现实技术可跟踪使用者的头部运动,并将虚拟元素锚定到现实世界,当使用者旋转头部离开虚拟物体时,虚拟物体将向相反方向移动,以保持与使用者的视角同步。混合现实技术中的虚拟元素与现实世界紧密结合,可随使用者动作而发生动态变化,并将虚拟图像叠加至现实世界图像,在虚拟世界、现实世界和使用者之间建立一个交互反馈信息的循环,提供更自然和沉浸式的体验^[14]。由于头戴式显示器在分辨率、可穿戴性和重量负荷方面的显著改进,已越来越多地作为个人成像监视器用于医疗领域。多设备与头戴式显示器组合使用允许使用者通过头戴式显示器同时且实时监视多个成像信息流^[15]。目前常用头戴式显示器可以分为两种类型:一种是基于混合现实技术的穿透式头戴式显示器,另一种是基于虚拟现实技术的非穿透式头戴式显示器^[16]。基于混合现实技术的头戴式显示器的最大优点之一是,可使术者同时可视化手术区域,无需抬头观察计算机屏幕,最大限度减少注意力转移,以及对认知和运动任务的负面影响^[17]。目前已有头戴式混合现实设备应用于医疗领域,如 HoloLens 全息眼镜(美国 Microsoft 公司)^[18]。笔者团队既往也曾报告应用基于混合现实技术的多模态头戴式神经外科手术中监测系统进行神经外科术前培训、术中导航和远程手术协作等,对临床工作

图 4 基于混合现实技术的多模态头戴式神经外科术中监测系统使用过程中 4a 术中放射治疗时术区监视 4b 穿透式头戴式显示器呈现的混合现实场景 4c 麻醉医师在手术室外通过手势操控穿透式头戴式显示器(扫描图片左下角二维码可观看使用者体验视频)

Figure 4 Intraoperative usage of the mixed reality-based multimodal head-mounted intraoperative neurosurgical monitoring system. The real time monitor of surgical area in intraoperative radiotherapy (Panel 4a). MR scenes presented in head-mounted display (Panel 4b). The anesthesiologist controls the head-mounted display with gestures outside the operating room. (Panel 4c).

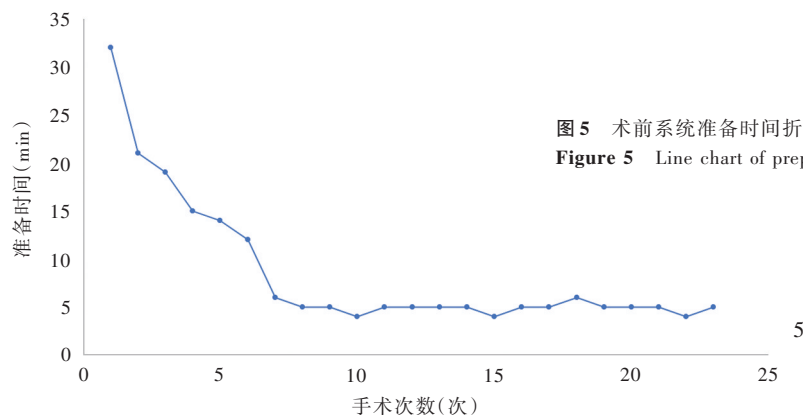


图 5 术前系统准备时间折线图

Figure 5 Line chart of preparation time before system use.

大有帮助^[19-22]。

基于混合现实技术的多模态头戴式神经外科术中监测系统可以整合手术室中复杂的成像监护设备,将不同设备显示影像集成到一个混合现实空间,最大限度节省手术室有限的物理空间,也可以消除因空间限制导致设备屏幕观察角度欠佳的问题。在本研究中,麻醉医师可在术中放射治疗时位于手术室外安全区域,降低放射损伤风险;同时还可清晰直观地观察患者生命体征和术区监测画面,显著提高手术安全性。在卫生经济学方面,该技术中监测系统总费用约 35 000 元(穿透式头戴式显示器 28 000 元、视频采集器 3 000 元、台式计算机 3 000 元、工作平台车 500 元、WiFi6 无线路由器及视频传输线 500 元),同时,可移动工作站式系统可根据手术需要移动至任意位置,有助于在不同手术室使用,相比造价高昂的固定放射治疗手术室监护显示系

统(中端水平 50~150 万元),既节省空间又节省费用,且提高使用率和投资回报率。在学习曲线方面,该技术中监测系统简单易操作,在接受问卷调查的 14 名麻醉医师中,虽然仅 1 名曾经使用过相似设备,但是所有医师均可在 5 min 内掌握其操作。同时,系统的术前系统准备时间也在应用中逐步优化,由第 1 例的 32 min 缩短至 4~5 min,系统开发人员在放射治疗机器开始准备的同时即可完成术前系统准备,不会因术前系统准备而额外增加手术时间或中断正常手术流程。本研究问卷调查结果显示,麻醉医师的推广意愿较高,且具有较高的满意度,更有利于该项技术的推广应用。

基于混合现实技术的多模态头戴式神经外科术中监测系统尚存在技术缺陷,需要进一步优化:(1)视觉疲劳感加重。头戴式显示设备的成像原理决定视觉疲劳无法完全消除^[23],目前可通过优化设

表 1 14 名麻醉医师问卷调查结果												
Table 1. Questionnaire survey results of 14 anesthesiologists												
序号	性别	年龄 (岁)	从事麻醉医师 年限(年)	是否首次 使用	成像功能满意度 (评分)	佩戴舒适度 (评分)	晕动 (评分)	重量负荷 (评分)	热负荷 (评分)	创新性 (评分)	推广意愿 (评分)	总评分 (评分)
1	男性	31	4	否	5	4	5	4	4	4	4	30
2	女性	31	5	是	4	4	5	4	5	5	5	32
3	男性	32	7	是	4	3	5	4	3	4	4	27
4	女性	24	2	是	5	4	5	4	4	5	4	31
5	女性	32	3	是	4	3	4	4	2	4	5	26
6	女性	35	7	是	4	4	4	2	2	5	5	26
7	男性	30	3	是	5	5	5	4	5	5	5	34
8	男性	30	6	是	4	5	5	2	2	5	5	28
9	男性	34	10	是	4	4	5	3	5	4	4	29
10	女性	38	10	是	4	4	5	4	4	4	5	30
11	女性	33	9	是	5	5	5	4	5	5	5	34
12	女性	26	2	是	4	4	5	4	5	5	5	32
13	女性	34	11	是	4	5	5	4	4	5	5	32
14	男性	32	3	是	5	5	5	5	5	5	5	35

备参数与环境,调整亮度与对比度等途径改善。这也是下一步研究的重要方向。(2)热舒适性较低。穿透式头戴式显示器使用时面部无包裹,直接作用于使用者头面部的热负荷较低,但是穿透式头戴式显示器的小主机使用时,发热量较大,对使用者有一定影响,本研究接受问卷调查的 14 名麻醉医师仅 6 名评价无热感,余 8 名均存在不同程度热负荷方面的体感。针对这一问题,可以采取主机风扇转速增大促进散热,改进软件运行效率减少发热等措施。(3)视频信号串流延迟。视频信号串流延迟测试结果虽然证实该术中监测系统网络传输的稳定性较好,视频信号串流延时较短(约 160 ms)。但仍需继续技术改进,如优化网络通信模式,以便在更短延时的情况下传输更高显示分辨率的视频图像,以求未来可以基于该系统传输更多不同类型(如内镜或手术显微镜)的实时图像。(4)误操作。由于穿透式头戴式显示器控制是基于手势识别,因此,当视野内存在其他人员或肢体活动干扰时,该术中监测系统有可能发生误操作。通过人员培训和局部区域管理,可以较好地解决这一问题。

本研究尚存局限性:存在一定程度的选择偏倚、信息偏倚。该术中监测系统仅在笔者团队所在单中心进行研究,问卷调查虽然为非记名,但不排除麻醉医师给出偏好评价的可能;接受调查的麻醉医师平均年龄较小,缺乏较大年龄研究对象数据,

可能存在年轻人对新设备接受程度偏高等因素的影响;同时,问卷调查内容主观性较强。今后尚待开发更多可测量的客观指标,以定量评估该系统应用于临床的实际效能。

综上所述,基于混合现实技术的多模态头戴式神经外科术中监测系统应用于神经外科术中放射治疗期间,辅助麻醉医师实时监测患者生命体征及术区环境具有较好的可行性。未来可通过进一步的技术优化,将该术中监测系统的应用扩展至其他存在放射损伤的医疗场景中,如其他专业的术中放射治疗或介入治疗等,具有很好的临床推广前景。

利益冲突 无

参 考 文 献

[1] Molina CA, Sciubba DM, Greenberg JK, Khan M, Witham T. Clinical accuracy, technical precision, and workflow of the first in human use of an augmented-reality head-mounted display stereotactic navigation system for spine surgery [J]. Oper Neurosurg (Hagerstown), 2021, 20:300-309.

[2] Lungu AJ, Swinkels W, Claesen L, Tu P, Egger J, Chen X. A review on the applications of virtual reality, augmented reality and mixed reality in surgical simulation: an extension to different kinds of surgery [J]. Expert Rev Med Devices, 2021, 18:47-62.

[3] Harel R, Anekstein Y, Raichel M, Molina CA, Ruiz-Cardozo MA, Orrú E, Khan M, Mirovsky Y, Smorgick Y. The XVS System during open spinal fixation procedures in patients requiring pedicle screw placement in the lumbosacral spine[J]. World Neurosurg, 2022, 164:e1226-e1232.

[4] Mógica K, Hölgyesi Á, Zrubka Z, Péntek M, Haidegger T.

- Augmented or mixed reality enhanced head-mounted display navigation for in vivo spine surgery: a systematic review of clinical outcomes[J]. *J Clin Med*, 2023, 12:3788.
- [5] Kirollos R, Merchant W. Comparing cybersickness in virtual reality and mixed reality head-mounted displays [J]. *Front Virtual Real*, 2023, 4:1130864.
 - [6] Mai C, Khamis M. Public HMDs: modeling and understanding user behavior around public head-mounted displays [C/OL]// *PerDis '18: proceedings of the 7th ACM international symposium on pervasive displays*, Munich, 2018. New York: Association for Computing Machinery, 2018: 1-9[2025-01-27]. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3205873.3205879>
 - [7] Wang ZH, He RK, Liu L, Lu YJ, Liu CH. Thermal comfort of head-mounted display[J]. *Bao Zhuang Gong Cheng*, 2020, 41: 249-254.[王子豪, 何人可, 刘磊, 卢钰洁, 刘春海. 头戴式虚拟现实设备的热舒适研究[J]. *包装工程*, 2020, 41:249-254.]
 - [8] Noguera Cundar A, Fotouhi R, Ochitwa Z, Obaid H. Quantifying the effects of network latency for a teleoperated robot[J]. *Sensors (Basel)*, 2023, 23:8438.
 - [9] Legeza P, Britz GW, Shah A, Sconzert K, Sungur JM, Chinnadurai P, Sinha K, Lumsden AB. Impact of network performance on remote robotic-assisted endovascular interventions in porcine model[J]. *J Robot Surg*, 2022, 16:29-35.
 - [10] Mori M, Hirano S, Hakamada K, Oki E, Urushidani S, Uyama I, Eto M, Ebihara Y, Kawashima K, Kanno T, Kitsuregawa M, Kinugasa Y, Kobayashi J, Nakamura H, Noshiro H, Mandai M, Morohashi H. Clinical practice guidelines for telesurgery 2022: committee for the promotion of remote surgery implementation, Japan Surgical Society[J]. *Surg Today*, 2024, 54:817-828.
 - [11] Diehl CD, Giordano FA, Grosu AL, Ille S, Kahl KH, Onken J, Rieken S, Sarria GR, Shiban E, Wagner A, Beck J, Brehmer S, Ganslandt O, Hamed M, Meyer B, Münter M, Raabe A, Rohde V, Schaller K, Schilling D, Schneider M, Sperk E, Thomé C, Vajkoczy P, Vatter H, Combs SE. Opportunities and alternatives of modern radiation oncology and surgery for the management of resectable brain metastases[J]. *Cancers (Basel)*, 2023, 15:3670.
 - [12] Cifarelli CP, Jacobson GM. Intraoperative radiotherapy in brain malignancies: indications and outcomes in primary and metastatic brain tumors[J]. *Front Oncol*, 2021, 11:768168.
 - [13] Sauer IM, Queisner M, Tang P, Moosburner S, Hoepfner O, Horner R, Lohmann R, Pratschke J. Mixed reality in visceral surgery: development of a suitable workflow and evaluation of intraoperative use-cases[J]. *Ann Surg*, 2017, 266:706-712.
 - [14] Čoltěkin A, Lochhead I, Madden M, Christophe S, Devaux A, Pettit C, Lock O, Shukla S, Herman L, Stachoň Z, Kubíček P, Snopková D, Bernardes S, Hedley N. Extended reality in spatial sciences: a review of research challenges and future directions [J]. *ISPRS Int J GeoInf*, 2020, 9:439.
 - [15] Yoshida S, Ito M, Tatokoro M, Yokoyama M, Ishioka J, Matsuoka Y, Numao N, Saito K, Fujii Y, Kihara K. Multitask imaging monitor for surgical navigation: combination of touchless interface and head-mounted display [J]. *Urol Int*, 2017, 98:486-488.
 - [16] Zhang P. Test and evaluation of image display of virtual reality head-mounted display[J]. *Ri Yong Dian Qi*, 2022, (12):101-104. [张培. 虚拟现实头戴显示器图像显示性能测试评价[J]. *日用电器*, 2022, (12):101-104.]
 - [17] Liu A, Jin Y, Cottrill E, Khan M, Westbroek E, Ehresman J, Pennington Z, Lo SL, Sciubba DM, Molina CA, Witham TF. Clinical accuracy and initial experience with augmented reality-assisted pedicle screw placement: the first 205 screws [J]. *J Neurosurg Spine*, 2021, 36:351-357.
 - [18] Qian L, Barthel A, Johnson A, Osgood G, Kazanzides P, Navab N, Fuerst B. Comparison of optical see-through head-mounted displays for surgical interventions with object-anchored 2D-display[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2017, 12:901-910.
 - [19] Wang J, Zhao Y, Xu X, Wang Q, Li F, Zhang S, Gan Z, Xiong R, Zhang J, Chen X. A patient-specific, interactive, multiuser, online mixed-reality neurosurgical training and planning system [J]. *Neurosurg Focus*, 2024, 56:E15.
 - [20] 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.
 - [21] Zhang S, Li F, Zhao Y, Xiong R, Wang J, Gan Z, Xu X, Wang Q, Zhang H, Zhang J, Chen X. Mobile internet-based mixed-reality interactive telecollaboration system for neurosurgical procedures: technical feasibility and clinical implementation[J]. *Neurosurg Focus*, 2022, 52:E3.
 - [22] 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.]
 - [23] Gong H. Observation of the VDT ocular syndrome by using VR display helmet and the curative effect of Chinese medicine fumigation treatment[D]. Guangzhou: Guangzhou University of Chinese Medicine, 2017.[龚慧. VR头盔显示器所致VDT综合征眼部症状及中药熏蒸疗效观察[D]. 广州: 广州中医药大学, 2017.]

(收稿日期:2025-02-05)

(本文编辑:袁云)