doi:10.11659/jjssx.05E025027

·影像诊断与手术导航·

混合现实技术在肝胆肿瘤手术中的应用研究进展

高明杰[1],王志强[1],王 星[1],史 君[2],张海辉[3] (1.内蒙古医科大学基础医学院人体解剖学教研室,内蒙古 呼和浩特 010110;2.内蒙古医科大学基础医学院生理学教研室,内蒙古 呼和浩特 010110;3.赤峰松山医院普外科,内蒙古 赤峰 024000)

[摘 要] 肝胆肿瘤严重威胁人类健康,其流行病学特征复杂且地域差异显著。其中,肝细胞癌是最常见的原发性肝癌,胆囊癌则与胆结石密切相关。混合现实技术融合了虚拟现实与增强现实特性,通过计算机系统实现虚拟信息与真实世界实时叠加、物理实体与数字对象共存及人机实时交互。近年来,该技术逐渐应用在医学领域,可作为外科手术的全新辅助手段,但其应用也面临诸多挑战,亟待进一步完善与推广。本文就混合现实技术在肝胆肿瘤领域的发展、临床应用、技术进展、现状分析及未来展望进行综述,以期为肝胆肿瘤个体化精准外科治疗提供新思路。

[关键词] 混合现实技术;肝胆肿瘤;外科手术;精准医疗;应用研究

[中图分类号] R735.8 [文献标志码] A [收稿日期] 2025-05-12

Research progress on the application of mixed reality technology in hepatobiliary tumor surgery

GAO Ming-jie[1], WANG Zhi-qiang[1], WANG Xing[1], SHI Jun[2], ZHANG Hai-hui[3] (1. Department of Human Anatomy, Basic Medical College, Inner Mongolia Medical University, Hohhot Inner Mongolia 010110, China; 2. Department of Physiology, Basic Medical College, Inner Mongolia Medical University, Hohhot Inner Mongolia 010110, China; 3. General Surgery Department, Chifeng Songshan Hospital, Chifeng Inner Mongolia 024000, China)

Abstract: Hepatobiliary tumors pose a serious threat to human health, with complex epidemiological characteristics and significant regional variations. Among these, hepatocellular carcinoma is the most common type of primary liver cancer, while gallbladder cancer is closely associated with gallstones. Mixed reality technology integrates the characteristics of virtual reality and augmented reality, achieving the real-time superimposition of virtual information onto the real world, the coexistence of physical entities and digital objects, as well as real-time human-computer interaction through computer systems. In recent years, this technology has been gradually applied in the medical field and can serve as a brand-new auxiliary method for surgical operations. However, its application also faces many challenges and urgently needs to be further improved and promoted. This article provides a comprehensive review of the development, clinical applications, technological advancements, current state analysis, and future prospects of mixed reality technology in the field of hepatobiliary tumors, aiming to offer novel insights for personalized precision surgical treatment of hepatobiliary tumors.

Keywords: mixed reality technology; hepatobiliary tumors; surgery; precision medicine; applied research

肝胆肿瘤因病灶位置复杂、周围脉管系统密集等特点,对手术精准性提出了较高要求[1-4]。混合现实技术通过融合虚拟信息与真实场景,实现三维可视化与实时交互,在术前规划与术中导航中展现出重要的辅助潜力[5-6]。目前,混合现实技术在骨科、颌面外科等领域已取得初步应用成效,并逐步拓展至肝胆外科[7-10]。然而,混合现实技术在肝胆肿瘤手术中的标准化应用、系统精准度提升及临床验证等方面仍存在诸多问题,限制了该技术的广泛推广与深入应用。因此,本文将从混合现实技术在肝胆肿瘤领域的发展历程、临床应用、技术进展、现状分析和未来展望等方面进行综述,旨在系统探讨混合现实技术在肝胆肿瘤手术中的应用路径与实际价值,以推动其在复杂肝胆手术中的有效整合与规范化发展。

1 混合现实技术在肝胆肿瘤领域的发展

混合现实技术在肝胆肿瘤手术中的应用经历了从理论探索到临床实践的逐步发展过程。早期,混合现实技术主要应用于工业等领域,随着计算机视觉和医学成像技术的不断进步,其在医学领域中的潜在价值逐渐被认识[6]。混合现实技术在医学领域最初多作为一种辅助教学和培训的工具,用于帮助医学生更好地理解解剖结构和手术操作流程。随着硬件设备的小型化、轻量化以及软件算法的优化,其开始逐渐应用于实际手术。在肝胆肿瘤手术方面,最初研究者尝试将混合现实技术用于术前规划,通过创建三维模型帮助医生更好地了解肿瘤与周围组织的关系。例如,

[基金项目] 内蒙古医学科学院公立医院科研联合基金科技项目(2023GLLH0296);内蒙古医科大学校级科研项目(YKD2022MS037)

[通信作者] 张海辉,E-mail:1340403121@qq.com

早期研究通过将CT数据进行三维重建,在虚拟环境中展示肝和肿瘤结构,然而,在实时交互和与实际手术场景的融合方面存在一定局限[11]。随着技术的进一步发展,混合现实设备已与手术导航系统实现了结合,能够在术中为医生提供实时导航信息。这一进展逐渐改变了肝胆肿瘤手术的操作模式,提高了手术的精准性和安全性。目前,混合现实技术在肝胆肿瘤手术中已取得一定进展,处于不断完善和推广的阶段。在一些大型医疗中心,已经开始尝试将混合现实技术应用于复杂肝胆肿瘤手术的术前规划和术中导航,并取得了较好的初步效果[8,12]。

2 混合现实技术在肝胆肿瘤手术中的临床应用

2.1 肝胆肿瘤手术入路的数字化建模

准确的手术入路规划是肝胆肿瘤安全切除的核心。基于医学影像的三维数字化建模为手术入路设计提供了客观依据。基于医学影像的三维重建技术是数字化建模的关键。通过对患者的CT或MRI数据进行处理,利用智能分割算法可创建肝及肿瘤的三维解剖模型,实现对肝结构和肿瘤位置的精确可视化[7]。Wang等[13]通过对305例肝切除术患者的资料进行分析,比较了传统二维手术规划与3D交互式定量手术规划(interactive quantitative surgical planning,IQSP)的临床价值,结果显示,在复杂肝切除组中,3D IQSP可提供更全面的解剖定量信息,37.4%(49/131)的患者因此优化手术方案,且规划切除体积与实际标本体积一致性良好。同时,3D打印个性化模型可用于术前模拟与医患沟通,在儿童复杂肝肿瘤、肝门部占位等病例中,硅胶材质3D模型能高度还原解剖结构,兼具教学与临床应用价值[14]。

2.2 肝胆肿瘤手术入路的混合现实辅助设计

混合现实技术在肝胆肿瘤手术入路辅助设计中展现出重要价值。通过将术前的CT或MRI数据转化为三维全息图像,医生可在混合现实环境中直观观察肿瘤与周围组织、血管的空间关系,从而更精准地规划手术入路[15]。Tang等[10]将混合现实技术与手术导航融合应用于口腔颌面肿瘤手术中,通过IGT-Link端口实现规划数据同步,借助HoloLens标记截骨平面,术后验证平均偏差为(1.68±0.92)mm,80.16%的点误差≤3 mm,证实该技术在精准入路设计中具有可靠性。在肝肿瘤手术中,术中3D全息投影可实时显示肿瘤位置、数量及脉管走行,辅助确定肝实质离断平面。Saito等[12]将混合现实全息技术用于多发性结直肠癌肝转移切除术,显著提升了手术决策效率与入路合理性。

2.3 混合现实技术在肝胆肿瘤手术中的导航应用

混合现实技术为肝胆肿瘤手术导航带来了新的突破,显著提高了手术的精准性和安全性。在手术过程中,医生通过佩戴混合现实设备(如HoloLens等),可以将虚拟的手术规划信息与实际手术场景实时叠加,实现对手术操作的实时引导[16]。以腹腔镜解剖性肝切除术治疗原发性肝癌为例,有研究对比了术中导航组和非术中导航组的效果,其中导航组采用混合现实导航技术,结果显示与非术中导航组相比,导航组术中出血显著减少,术后血红蛋白下降幅度更小,输血率降低,术后住院时间缩短,这表明混合现实导航有助于识别重要解剖结构,减少血管损伤,加速术后恢复[11]。Zhou等[17]研发的混合现实导航系统在优化配准算法后,模型实验平均配准误差为1.03 mm,临床应用误差为1.94 mm,可满足微创外科精准定位需求,为肝胆微创术中导航提供技术参考。

2.4 混合现实技术对肝胆肿瘤手术安全区的影响

混合现实技术在确定肝胆肿瘤手术安全区方面发挥着重要作用,有助于降低手术风险并提高安全性。通过精确的三维建模和实时图像叠加,医生能够更清晰地界定肿瘤边界及其与周围重要结构的关系,从而准确规划手术安全区[18]。利用混合现实技术创建的全息图可帮助医生在手术中更好地识别解剖结构,避免损伤重要组织和血管[19]。Ryu等[16]的研究显示,在腹腔镜结直肠癌手术中,通过混合现实技术显示的3D全息图,可以更准确地识别动脉、静脉及其与肿瘤的位置关系;在进行淋巴结清扫等操作时,能够更好地把握手术安全范围,减少对周围组织的损伤;13例患者在全息图引导下安全完成手术,手术时间为421(290~555)min,失血量为5~15 mL,术后恢复情况良好,表明混合现实技术有助于提高手术的安全性和精确性。在肝手术中,对于存在解剖变异的患者,混合现实技术的全息图能辅助医生确定安全的手术入路和切除范围。例如,在肝门部解剖异常的肝细胞癌手术中,全息图可帮助医生采用安全的Glissonean蒂入路,确保手术在安全区内进行[12]。

3 混合现实技术在肝胆肿瘤手术中的技术进展

混合现实技术在肝胆肿瘤手术中的临床应用依赖于软硬件设备的开发与升级。随着硬件设备的不断改进,其已能够满足不同手术环境的特殊需求。如头戴式显示设备HoloLens具有轻便、可穿戴的特点,可为医生提供沉浸式的混合现实体验,使其在手术过程中无需分心查看其他设备,即可实时获取虚拟信息并与现实场景融合[16]。软件创新是推动混合现实技术

在肝胆肿瘤手术中应用的关键因素。目前,针对手术需求已开发出多种专业软件,这些软件能够实现医学图像的高效处理、三维模型的精确重建以及与硬件设备的良好交互[20]。最新研发的软件可对CT和MRI数据进行智能分割和三维重建,快速生成肝、肿瘤及周围组织的精确模型,并能在混合现实环境中进行多角度查看和分析。Gadzhiev等[20]开发的开源软件HLOIA,可创建肾及其血管蒂和肿瘤的混合现实解剖模型,并在腹腔镜部分肾切除术中应用。通过对比使用该软件的实验组和仅使用术中超声的对照组发现,实验组肾蒂暴露时间和肿瘤定位时间显著缩短,这充分证明了该软件在手术中的实用价值。Tang等[10]开发的软件实现了手术规划数据在混合现实工作站与手术导航系统之间的快速传输和同步,该团队在口腔颌面肿瘤手术中,通过IGT-Link端口将虚拟手术规划数据传输至混合现实工作站,并借助HoloLens实现了手术的精准引导。集成系统的出现整合了硬件、软件及相关技术,为手术提供了全面的支持。这些集成系统通常包括医学图像采集与处理模块、三维建模与可视化模块、导航与交互模块等,各模块协同工作,从而实现了从术前规划到术中执行的一体化流程[9]。在肝肿瘤手术中,术前CT数据被转化为3D多边形数据并加载到头戴式显示设备中,医生可在手术中通过手势操作轻松移动和查看全息图,从而更好地定位肿瘤并调整手术方案。集成系统结合了术中全息图技术,医生可通过头戴式显示设备查看肝全息模型,并通过手势操作与模型进行交互,在手术决策和操作中发挥了重要作用,有助于确定复杂肝肿瘤切除的最佳路径和范围[12]。

4 混合现实技术在肝胆肿瘤手术中的现状分析

混合现实技术在肝胆肿瘤手术的临床实践中已取得一定成功,尤其在肝段定位、肿瘤边界识别及脉管走行显示等方面,具有提升手术精准度的潜力。然而,针对肝胆肿瘤手术的特殊性,该技术仍存在一定的局限性。在软硬件设施方面,肝胆肿瘤手术对三维模型的精细度要求极高,需清晰显示肝内Glisson系统、肝静脉、门静脉分支及肿瘤与血管的毗邻关系。但目前不同医学图像重建软件之间的兼容性和数据无法完全共享,导致多中心协作困难。混合现实技术的软件操作复杂、学习曲线陡峭,限制了其在基层肝胆外科的推广。HoloLens等硬件设备在显示微小血管(直径<2 mm)时清晰度不足,且视野范围有限,难以同时呈现全肝立体结构与手术操作区域,影响术者对深部肿瘤的整体把握。安全性方面存在明显挑战。肝在呼吸运动及术中牵拉下会发生形变,而当前混合现实系统的注册误差虽在可接受范围内,但在靠近肝门部或重要血管的肿瘤切除中,微小偏差即可导致术中大出血或切缘阳性。图像延迟或信号中断也可能使虚拟全息图与实际解剖结构错位,误导术者判断离断平面[21]。此外,长时间佩戴设备易引起术者颈部与眼部疲劳,在时间较长的复杂肝切除术(如联合肝分隔和门静脉结扎的二步肝切除术)中可能影响精细操作,增加操作失误风险[22-23]。对患者而言,术中长时间电磁辐射暴露可能存在潜在风险,尤其对于需多次手术或术中放疗的肝胆肿瘤患者,需进一步评估。在伦理层面,混合现实技术的应用可能改变肝胆肿瘤外科的医患沟通模式。由于肝手术风险高、解剖变异多,若医生过度依赖全息图像展示,在进行手术沟通时会增加患者对手术方案的理解难度,还会削弱患者的知情同意质量[21-22]。

5 混合现实技术在肝胆肿瘤手术中的未来展望

混合现实技术在肝胆肿瘤手术中具有广阔的潜在应用前景,未来研究应重点围绕该领域的特殊需求展开。

第一,开展大规模、多中心的临床研究,重点验证混合现实技术在不同类型肝胆肿瘤(如肝细胞癌、肝内胆管癌、胆囊癌肝浸润、结直肠癌肝转移等)手术中的安全性和有效性。应关注混合现实技术能否降低术后切缘阳性率、减少术中输血、缩短肝门阻断时间等关键指标[22]。第二,提高混合现实技术的配准精度与实时形变补偿能力。肝在术中的动态形变是肝胆肿瘤手术导航的难点。未来需开发基于人工智能的实时弹性配准算法,结合术中超声或电磁跟踪,校正因呼吸、牵拉导致的肝形变,使虚拟模型与真实解剖保持高度一致[24]。第三,混合现实技术融合人工智能和深度学习技术。研究显示,通过训练大量肝胆肿瘤病例的CT/MRI数据,人工智能可自动分割肝段、标记肿瘤边界及脉管危险区,并在混合现实环境中以颜色编码或警示高亮显示[25]。此外,人工智能可结合血流动力学模拟,预测不同切除平面下的残肝体积与功能,实现功能肝体积的精准评估。第四,混合现实技术推动远程手术协作与教学。针对我国肝胆肿瘤高发但医疗资源分布不均的现状,混合现实技术可构建远程手术指导平台。基层医院术者佩戴混合现实设备,将术中全息图像实时传输至专家端,专家通过手势标记、语音提示等方式进行实时导航,协助完成复

杂肝切除或胆囊癌根治术[26]。第五,混合现实技术拓展至术后康复与随访管理。利用混合现实技术构建个体化的虚拟康复场景,指导肝切除术后患者进行呼吸训练、早期活动及营养管理。对于需行经皮肝穿刺胆道引流或术后化疗的患者,混合现实技术可辅助穿刺路径规划与导管定位。

综上所述,混合现实技术为肝胆肿瘤精准外科提供了全新模式,可显著提升手术精准性、安全性与根治性,改善患者短期预后。但该技术在硬件性能、算法精度、临床证据等方面仍需完善。随着技术迭代与临床转化深入,混合现实技术联合人工智能、微创外科、精准医疗将成为肝胆肿瘤外科的重要发展方向,为复杂肝胆肿瘤诊疗提供更强有力的支撑。

[参考文献]

[1] Kulik L, El-Serag HB. Epidemiology and management of hepatocellular carcinoma[J]. Gastroenterology, 2019, 156(2): 477-491. e1. doi: 10. 1053/j. gastro. 2018. 08. 065.

[2] Brown ZJ, Tsilimigras DI, Ruff SM, et al. Management of hepatocellular carcinoma: a review[J]. JAMA Surg, 2023, 158(4): 410-420. doi: 10. 1001/jamasurg. 2022. 7989.

[3] Schmidt MA, Marcano-Bonilla L, Roberts LR. Gallbladder cancer: epidemiology and genetic risk associations[J]. Chin Clin Oncol, 2019, 8(4): 31. doi: 10. 21037/cco. 2019. 08. 13.

[4] Jain K, Mohapatra T, Das P, et al. Sequential occurrence of preneoplastic lesions and accumulation of loss of heterozygosity in patients with gallbladder stones suggest causal association with gallbladder cancer[J]. Ann Surg, 2014, 260(6): 1073-1080. doi: 10. 1097/SLA. 0000000000000495.

[5] Li M, Alshehri T, Dwyer T, et al. Embedding human values in the design of mixed-reality technologies[J]. IEEE Trans Vis Comput Graph, 2025, 31(5): 2374-2383. doi: 10. 1109/TVCG. 2025. 3549131.

[6] Hu HZ, Feng XB, Shao ZW, et al. Application and prospect of mixed reality technology in medical field[J]. Curr Med Sci, 2019, 39(1): 1-6. doi: 10. 1007/s11596-019-1992-8.

[7] Lu L, Wang H, Liu P, et al. Applications of mixed reality technology in orthopedics surgery: a pilot study[J]. Front Bioeng Biotechnol, 2022, 10: 740507. doi: 10. 3389/fbioe. 2022. 740507.

[8] Wong KC, Sun YE, Kumta SM. Review and future/potential application of mixed reality technology in orthopaedic oncology[J]. Orthop Res Rev, 2022, 14: 169-186. doi: 10. 2147/ORR. S360933.

[9] Yang R, Li C, Tu P, et al. Development and application of digital maxillofacial surgery system based on mixed reality technology[J]. Front Surg, 2021, 8: 719985. doi: 10. 3389/fsurg. 2021. 719985.

[10] Tang ZN, Hu LH, Soh HY, et al. Accuracy of mixed reality combined with surgical navigation assisted oral and maxillofacial tumor resection[J]. Front Oncol, 2021, 11: 715484. doi: 10. 3389/fonc. 2021. 715484.

[11] Zhang W, Zhu W, Yang J, et al. Augmented reality navigation for stereoscopic laparoscopic anatomical hepatectomy of primary liver cancer: preliminary experience[J]. Front Oncol, 2021, 11: 663236. doi: 10. 3389/fonc. 2021. 663236.

[12] Saito Y, Sugimoto M, Imura S, et al. Intraoperative 3D hologram support with mixed reality techniques in liver surgery[J]. Ann Surg, 2020, 271(1): e4-e7. doi: 10. 1097/SLA. 0000000000003552.

[13] Wang XD, Wang HG, Shi J, et al. Traditional surgical planning of liver surgery is modified by 3D interactive quantitative surgical planning approach: a single-center experience with 305 patients[J]. Hepatobiliary Pancreat Dis Int, 2017, 16(3): 271-278. doi: 10. 1016/s1499-3872(17)60021-3.

[14] Valls-Esteve A, Tejo-Otero A, Lustig-Gainza P, et al. Patient-specific 3D printed soft models for liver surgical planning and hands-on training[J]. Gels, 2023, 9(4): 339. doi: 10. 3390/gels9040339.

[15] Caglar YS, Zaimoglu M, Ozgural O, et al. Mixed reality assisted navigation guided microsurgical removal of cranial lesions[J]. Turk Neurosurg, 2024, 34(5): 926-938. doi: 10. 5137/1019-5149. JTN. 44974-23. 2.

[16] Ryu S, Kitagawa T, Goto K, et al. Intraoperative holographic guidance using virtual reality and mixed reality technology during laparoscopic colorectal cancer surgery[J]. Anticancer Res, 2022, 42(10): 4849-4856. doi: 10. 21873/anticanres. 15990.

[17] Zhou Z, Yang Z, Jiang S, et al. Surgical navigation system for hypertensive intracerebral hemorrhage based on mixed reality[J]. J Digit Imaging, 2022, 35(6): 1530-1543. doi: 10. 1007/s10278-022-00676-x.

[18] Karnatz N, Möllmann HL, Wilkat M, et al. Advances and innovations in ablative head and neck oncologic surgery using mixed reality technologies in personalized medicine[J]. J Clin Med, 2022, 11(16): 4767. doi: 10. 3390/jcm11164767.

[19] Gholizadeh M, Bakhshali MA, Mazlooman SR, et al. Minimally invasive and invasive liver surgery based on augmented reality training: a review of the literature[J]. J Robot Surg, 2023, 17(3): 753-763. doi: 10. 1007/s11701-022-01499-2.

[20] Gadzhiev N, Semeniakin I, Morshnev A, et al. Role and utility of mixed reality technology in laparoscopic partial nephrectomy: outcomes of a prospective rct using an indigenously developed software[J]. Adv Urol, 2022, 2022: 8992051. doi: 10. 1155/2022/8992051.

[21] Xiang B, Heiselman JS, Miga MI. Comprehensive mixed reality surgical navigation system for liver surgery[J]. J Med Imaging (Bellingham), 2025, 12(5): 055001. doi: 10. 1117/1. JMI. 12. 5. 055001.

[22] Ursin F, Timmermann C, Benzinger L, et al. Intraoperative application of mixed and augmented reality for digital surgery: a systematic review of ethical issues[J]. Front Surg, 2024, 11: 1287218. doi: 10. 3389/fsurg. 2024. 1287218.

[23] Magalhães R, Oliveira M, Fernandes J, et al. Mixed reality in the operating room: a systematic review of trends and applications[J]. J Med Syst, 2024, 48(1): 45. doi: 10. 1007/s10916-024-02078-w.

[24] Han Z, Dou Q. A review on organ deformation modeling approaches for reliable surgical navigation using augmented reality[J]. Comput Assist Surg (Abingdon), 2024, 29(1): 2357164. doi: 10. 1080/24699322. 2024. 2357164.

[25] Espinel Y, Özgür E, Calvet L, et al. Combining visual cues with interactions for 3D-2D registration in liver laparoscopy[J]. Ann Biomed Eng, 2020, 48(6): 1712-1727. doi: 10. 1007/s10439-020-02479-z.

[26] Kantor T, Mahajan P, Murthi S, et al. Role of eXtended reality use in medical imaging interpretation for pre-surgical planning and intraoperative augmentation[J]. J Med Imaging (Bellingham), 2024, 11(6): 062607. doi: 10. 1117/1. JMI. 11. 6. 062607.

(编辑:魏 源)