

增强现实、虚拟现实与混合现实在腹腔镜肝脏外科中的应用

彭子洋^{1,2} 王志博^{1,2} 巴赫³ 颜彦³ 彭浩茜³ 李宇⁴ 刘学民⁴ 向俊西⁴ 吴荣谦^{1,2}
吕毅^{1,2,3,4}



作者简介: 吕毅,教授、主任医师、博士研究生导师,教育部创新团队学科带头人,卫生部有特殊贡献的中青年专家,陕西省“三秦学者”特聘教授,美国外科医师协会 Fellow,荣获“人民名医·卓越建树”、“健康卫士·医德风范”荣誉称号。现任西安交通大学副校长、西安交通大学第一附属医院院长、精准外科与再生医学国家地方联合工程研究中心主任。兼任教育部临床医学类专业教学指导委员会副主任委员、教育部科学技术委员会交叉科学与未来技术专门委员会委员,中国医师协会智慧医疗专业委员会副主任委员,中华医学会外科手术学组副组长等。以第一完成人获国家科技进步奖、中华医学科技奖、教育部技术发明奖、华夏医学奖卫生管理奖等国家及省部级奖励近 20 项,主持科技部重点研发计划、国自然国家重大科学仪器研制、重点项目、仪器专项等项目近 30 项。在 *Annals of Surgery*、*Hepatology* 等发表高水平论文 367 篇。授权国家发明专利 55 项,美国专利 1 项。

【摘要】 随着腹腔镜技术和理念的进步、器械设备的更新以及对肝脏解剖学认知的不断深入,近年来,腹腔镜肝脏外科发展迅速。目前医学与人工智能技术不断深度融合,增强现实(AR)、虚拟现实(VR)、混合现实(MR)这类新兴技术总称的扩展现实(XR)在医学领域的潜在应用日益受到重视。尤其是在精准医疗发展的关键方向——术中成像配准方面,XR 未来或许会为腹腔镜肝脏外科手术带来前所未有的创新。

【关键词】 肝脏外科; 增强现实; 虚拟现实; 混合现实; 扩展现实; 人工智能; 术中成像; 微创外科

Application of augmented reality, virtual reality and mixed reality in laparoscopic liver surgery Peng Ziyang^{1,2}, Wang Zhibo^{1,2}, Ba He³, Yan Yan³, Peng Haoqian³, Li Yu⁴, Liu Xuemin⁴, Xiang Junxi⁴, Wu Rongqian^{1,2}, Lyu Yi^{1,2,3,4}.
¹National and Local Joint Engineering Research Center for Precision Surgery and Regenerative Medicine, ⁴Department of Hepatobiliary Surgery, the First Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710061, China; ²School of Future Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; ³Xi'an

DOI: 10.3877/cma.j.issn.2095-3232.2025005

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划项目(92048202);国家自然科学基金面上项目(82471190);陕西省重点研发计划项目(2022ZDLSF04-09);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2021JM-268);陕西省重点研发计划高校联合项目重点项目(2020GXLH-Z-001);西安交通大学自由探索与创新项目(xzy022023069, xzy022024026)

作者单位:710061 西安交通大学第一附属医院精准外科与再生医学国家地方联合工程研究中心¹,肝胆外科⁴; 710049 西安交通大学未来技术学院²;710061 西安交通大学医学部³

通信作者:吕毅, Email: luyi169@126.com

Jiaotong University Health Science Center, Xi'an 710061, China

Corresponding author: Lyu Yi, Email: luyi169@126.com

[Abstract] In recent years, laparoscopic liver surgery has developed rapidly along with the progress in laparoscopic technology and concept, equipment and device updates and deepening understanding of liver anatomy. At present, the integration of medicine and artificial intelligence technology has been increasingly strengthened. The potential application of emerging technology extended reality (XR) including augmented reality (AR), virtual reality (VR) and mixed reality (MR) in the field of medicine has captivated widespread attention. Especially in the intraoperative imaging registration, which is the key development direction of precision medicine. XR may bring unprecedented innovation to endoscopic liver surgery in the future.

[Key words] Liver surgery; Augmented reality (AR); Virtual reality (VR); Mixed reality (MR); Extended reality (XR); Artificial intelligence (AI); Intraoperative imaging; Minimally invasive surgery

肝脏外科手术由于肝脏复杂的解剖结构及脉管系统分支变异而具有更大的风险和挑战,外科医师通常使用超声、CT 或 MRI 在手术前评估肝脏解剖异常,通过这些成像方式提供三维 (three-dimensional, 3D) 重建图像。目前,越来越多的外科医师倾向于选择通过术中超声作为参考检查^[1],辅助术中定位血管-胆道结构,并配合 ICG 荧光腹腔镜明确肿瘤边界与解剖切除平面。然而,尽管有这种工具作为辅助,肝切除术往往由于切除包膜不完整、手术切除边缘距离肿瘤过近或门静脉存在癌栓等问题导致早期复发^[2,3]。外科医师为了更精准地进行手术治疗,需要针对每一位患者明确病变周边的解剖结构及毗邻关系,并制定更完善的手术规划。

随着人工智能的不断发展,增强现实 (augmented reality, AR)、虚拟现实 (virtual reality, VR)、混合现实 (mixed reality, MR) 等技术在医学领域日益受到重视,而扩展现实 (extended reality, XR) 是一个总称,包括 VR、AR 和 MR 新兴技术,这些新兴技术为肝脏外科手术带来了前所未有的创新。腹腔镜外科手术的术中成像配准将是精准医疗发展的关键方向,随着智能数据分析和计算机科学的蓬勃发展,精准医疗手术领域将拥有巨大的应用前景,外科患者诊疗程序将变得更加数字化、智能化并更精准高效。通过空间三维成像技术,如肝切除术中 AR 技术,使得医师能够实现术前肝内病变定位,术中病变识别定位,制定手术路径,使其能够在不同手术入路下进行训练和规划,从而提高手术的准确性和安全性。MR 技术可以将现实世界与虚拟元素相结合,为医师提供了更为丰富的信息展示方式,使得手术决策更加精准。

本文将深入针对 AR 在肝脏术前评估中的应

用,如其在病灶定位、血管分布显示等方面的创新进行综述。同时讨论 VR 在肝脏手术规划和培训中的潜力,以及 XR 在手术过程中的实时导航和信息展示等方面的应用。此外,我们还将评估这些技术在提高手术效率、降低手术风险和改善患者康复方面的贡献。

一、AR 技术在腹腔镜外科手术领域的应用与前景
在过去的几十年里,微创手术 (minimally invasive surgery, MIS) 由于其更小的创伤与更快的术后恢复逐渐在各级医院普及^[4],因此外科手术的术中操作及远期预后更依赖于外科医师的经验和视觉空间感觉^[5]。AR 技术可通过提供术中视觉辅助服务术中导航,从而提高器官或组织切除的精度。AR 技术可用于术前评估手术切除部位的相关解剖和生理功能,也可通过评估残余脏器功能来预测手术预后,并且可以通过呈现器官和病变部位的透明虚拟图像,部分补偿外科医师在腹腔镜视野下的触觉缺失^[6]。

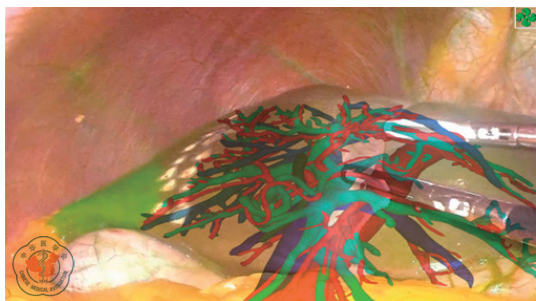
与常规应用 AR 技术的骨科和神经外科相比^[7],微创肝脏外科手术的主要困难在于器官的可塑性,即肝脏组织柔软、可变形,且不受刚性骨结构限制。为此需要进一步处理手术切除、牵拉操作或因气腹所造成的器官形变,因此如何将术前三维重建解剖图像匹配到器官实际术中位置从而实现复杂性配准是目前应用的难点^[8]。AR 在腹腔镜外科手术中通常分为 3 步:术前规划和三维重建^[9]、术中 3D 导航和术中配准^[10]。

1. 术前规划和三维重建:利用 AR 技术,医师可以在术前利用肝脏三维重建模型,实现术前肝内病变的定位、切除线的精确规划、术中病变的识别和定位^[11],并不断进行手术入路规划和实际操作模

拟,有助于明确手术难度和风险。并在术中有计划地改善术前规划并落实术中操作,减少术中并发症发生。

2. 术中 3D 导航:AR 技术能够在手术过程中为医师提供实时的导航辅助,3D 导航可以帮助外科医师更好地了解术区的详细解剖情况,并辅助肉眼评估解剖边界,降低外科医师认知压力^[12]。同时针对深层次的脉管解剖系统,通过明确切除区域周边脉管毗邻位置,可有效避免血管意外损伤导致的失血^[13],提高器官或组织切除的精度。此外,更快的术中决策可以缩短干预时间,有利于降低并发症风险,缩短患者康复时间^[14]。并且由于腹腔镜的视野较窄(仅为 70°,人类视野 160°),AR 设备可以有效消除解剖层次上的视觉模糊,缓解外科医师的定向障碍,提高空间意识^[15]。对于刚进入临床工作的年轻外科医师,术中血管和胆管的解剖结构差异会为手术带来巨大的障碍^[16]。经验丰富的外科医师可以在脑海中创造出术前影像学图像的 3D 可视化图像,从而成功实施手术。AR 为年轻医师提供了虚拟的手术训练环境,有助于提高手术技能和操作经验。

3. 术中配准:将 3D 虚拟图像叠加在患者的实时手术图像上的过程称为配准(图 1),这个过程是 AR 系统的关键部分。然而,如何在外科医师的视角改变或器官移动的情况下,将 AR 投影到患者的解剖结构上并保持准确成为了当前的难点。目前,配准过程可以手动、半自动或全自动进行。在手动配准时,将术前 3D 模型显示在操作监视器上手动对齐并调整大小,以便与真实图像相对应。在使用半自动配准时,需要在三维模型和操作图像上识别地标,然后使用地标在真实图像上手动叠加 AR^[17]。当真实世界的图像相应移动时,利用这些标志点的自动视觉跟踪定位来重新调整 3D 虚拟模型。全自



注:AR 为增强现实

图 1 基于 AR 技术的术中荧光腹腔镜三维影像显像配准

动配准仍然是一个重大的难题,主要待解决问题是变形情况下无法精确定位,比如由于呼吸、气腹和手术操作,肝脏等软组织会发生器官运动和变形,这导致了配准错误,以及随后 3D 虚拟图像和真实图像的不精确重叠^[18]。

综上所述,尽管 AR 技术在肝脏外科领域的应用前景广阔,但仍然需要克服技术、质量和实际应用等方面的瓶颈,以实现更广泛且有效的应用。随着技术的不断进步和完善,相信 AR 技术将在肝脏外科手术中发挥更大的作用,为医师提供更准确的信息和更高效的操作方式。

二、VR 技术在肝脏腹腔镜外科手术领域的应用与前景

VR 作为应用于腹腔镜手术中一种新兴的技术,可以模拟手术室的虚拟环境,并被应用于评估外科医师的手术技能^[19],减少新手外科医师的体力和脑力工作量^[20]。随着科技的不断进步,VR 技术在医疗领域的应用也日益受到关注,并逐步展现出巨大的应用潜力。3DVR 是一种新型的计算机辅助成像技术,能够提供清晰准确的图像进行后处理,帮助外科医师对手术风险进行分层,勾勒手术计划,以便术中导航^[21]。它为医师提供了一个全新的方式来培训、规划手术,并改善患者的治疗体验。

1. 年轻医师培训与手术规划:当前 VR 因其可用性和可持续性被广泛用于医师培训和手术规划^[22],可以用来模拟真实的手术环境,帮助医师进行虚拟手术练习,从而提高操作技能和熟练度。这有助于新手医师在进行实际手术之前积累更多的经验。同时,依托三维可视化,VR 技术能够将患者的解剖结构以三维图像的形式呈现,使医师能够更清晰地了解肝脏结构和相关血管,从而在手术中更精准地进行操作^[23]。

2. 团队合作和远程协作:利用 VR 技术,医师可以在虚拟环境中进行远程协作,共同讨论手术方案,服务不同地区的专家一起研究和规划手术方案。同时可以帮助医师更好地可视化和分析手术数据,从而推动肝脏腹腔镜外科手术的研究和发展。

3. 患者教育和参与:VR 技术还可以用于患者教育,使患者更好地了解自己的疾病和手术方案。患者可以在虚拟环境中亲身体验手术过程,减少焦虑和不确定感。

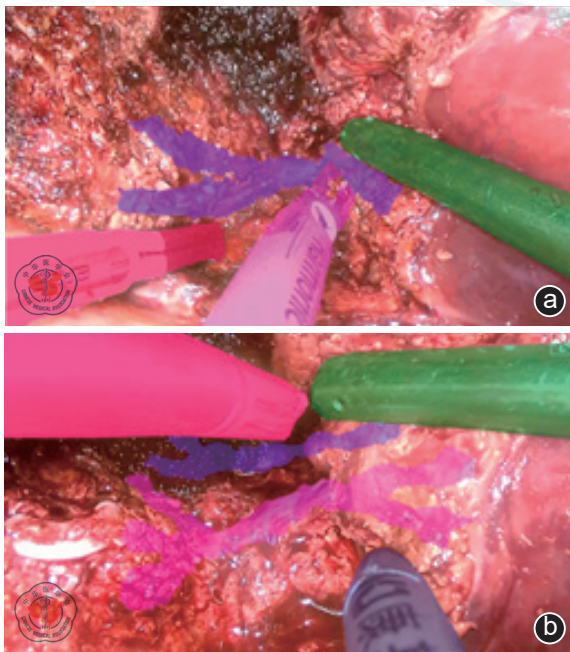
综合而言,VR 技术在肝脏腹腔镜外科手术领域

的应用前景十分广阔。随着技术的不断进步和创新,它将为医师和患者带来更多的便利和好处,促进肝脏外科手术水平的提升。VR 在腹腔镜肝脏外科手术中有其优越性,通过克服技术上的一些挑战,确保其在临床实践中的安全性和有效性。相比其他训练方法,它可以有效改善实际手术中学习曲线的初始阶段。然而,从学习曲线来看,与无训练和传统训练相比,VR 仅在外科训练过程中占主导地位,并且 VR 更适合没有经验的医学生或新手医师。

三、XR 技术在腔镜外科手术领域的应用与前景

XR 是指由计算机技术和可穿戴设备产生的所有真实及虚拟环境的结合以及人机交互。XR 通过数字化增强我们的感官,以此来融合世界。除此之外,它为沉浸式虚拟体验提供了大量不同层级的虚拟传感器输入水平。XR 凭借其立体可视化、沉浸式、无接触性的特点,在医疗领域应用拥有光明前景。

1. 手术规划与导航:XR 技术可结合医学影像数据,使 360° 全方位观察、测量、操作成为可能。通过有效提升手术的安全性和精准性,实现精细化手术操作。并可以将三维解剖结构投影到真实的手术场景中,帮助医师在现实环境中观察虚拟的肝脏结构,从而更准确地确定切入点和操作路径来进行手术规划和导航(图 2)。



注:a 为术中肝中静脉投射成像,b 为术中肝中静脉及其伴行血管投射成像;XR 为扩展现实

图 2 XR 辅助术中血管及器械智能识别搭配术前重建识别脉管系统

2. 实时可视化:在手术过程中,以介入医师为代表的医师常暴露在辐射范围内,XR 技术可以在对患者和手术室完全可见的情况下,以 3D 方式查看患者解剖结构和实时导管位置。并可以保持无菌状态,从而通过语音控制、眼睛注视和手势完全控制此设备,避免高辐射暴露区域。

3. 培训和教育:XR 技术为医师提供了进行虚拟手术练习和模拟手术的机会,从而提高操作技能和熟练度。此外,医师可以通过观看虚拟手术视频进行培训。

未来,随着人工智能的发展,XR 技术可以与 AI 技术相结合,为医师提供智能化的手术辅助,提高手术的效率 and 安全性;并将成为培训医师的有力工具,医学院校可以借助 XR 技术进行更生动、实际的医学教育。XR 中的 3D 属性解决了传统医疗中定位和图像采集问题,提升了图像的时效性、可视化和准确性。

四、展望

基于临床问题导向,AR、VR 和 XR 等技术在医学领域将产生更广阔的应用前景。很明显,目前 AR、VR 技术已经逐步应用于腔镜外科手术领域,但 AR 技术由于技术成熟度不足、操作延迟无法忽视、可视化质量往往受手术场景等影响在临床应用中需要根据具体情况进行调整和优化。而 VR 技术虽然顺应了时代潮流,但并没有达到外科医师的期望,也不是每个人都能熟练使用 VR 辅助下的腹腔镜技术。因此 XR 技术的推进也迫在眉睫。这些虚拟技术通过将术前数据进一步增强,实现二维到三维的手术全过程。尽管存在局限性,但 VR 导航系统已经显示出卓越的治疗效用,特别是在复杂的肝胆外科手术中。对于如何准确配准患者以改善患者手术结果,将虚拟手术学习曲线评估纳入手术培训课程,术中实时模拟将成为未来主要研究方向^[24]。

未来我们将进一步注重这些技术在医疗的应用成熟度,并通过成熟充分的医学验证,打造特殊的治疗医学体系与无接触医学系统,并更加注重数据隐私与安全:AR 技术涉及患者的影像数据等隐私信息,需要确保数据的安全和保密。随着临床医学和患者需求的提升、XR 硬件技术的进步、国际/国内资本的助推,XR+ 医疗正逐渐形成一条新的科技赛道,未来需要在这一领域明确腹腔镜下肝脏外科

应用场景,快速切入铺开,为肝脏外科诊疗带来新的曙光。

参 考 文 献

- [1] Kitagawa M, Sugimoto M, Haruta H, et al. Intraoperative holography navigation using a mixed-reality wearable computer during laparoscopic cholecystectomy[J]. *Surgery*, 2022, 171(4):1006-1013.
- [2] Wu M, Bao S, Yang S. The evolution of anatomical hepatectomy: past, present, and future[J]. *iLIVER*, 2022, 1(3):199-204.
- [3] Brunt LM, Deziel DJ, Telem DA, et al. Safe cholecystectomy multi-society practice guideline and state of the art consensus conference on prevention of bile duct injury during cholecystectomy[J]. *Ann Surg*, 2020, 272(1):3-23.
- [4] Rystedt JML, Wiss J, Adolfsen J, et al. Routine versus selective intraoperative cholangiography during cholecystectomy: systematic review, meta-analysis and health economic model analysis of iatrogenic bile duct injury[J]. *BJS Open*, 2021, 5(2): zraa032.
- [5] Zhang X, Otoo EM, Fan Y, et al. Autostereoscopic 3D augmented reality navigation for laparoscopic surgery: a preliminary assessment[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2023, 70(4):1413-1421.
- [6] Tinguely P, Fusaglia M, Freedman J, et al. Laparoscopic image-based navigation for microwave ablation of liver tumors-a multi-center study[J]. *Surg Endosc*, 2017, 31(10):4315-4324.
- [7] Keating TC, Jacobs JJ. Augmented reality in orthopedic practice and education[J]. *Orthop Clin North Am*, 2021, 52(1):15-26.
- [8] Acidi B, Ghallab M, Cotin S, et al. Augmented reality in liver surgery[J]. *J Visc Surg*, 2023, 160(2):118-126.
- [9] 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.
- [10] Yasuda J, Okamoto T, Onda S, et al. Novel navigation system by augmented reality technology using a tablet PC for hepatobiliary and pancreatic surgery[J]. *Int J Med Robot*, 2018, 14(5): e1921.
- [11] Douglas DB, Wilke CA, Gibson D, et al. Virtual reality and augmented reality: advances in surgery[J]. *Biol Eng Med*, 2017, 3(1):1-8.
- [12] Bernhardt S, Nicolau SA, Soler L, et al. The status of augmented reality in laparoscopic surgery as of 2016[J]. *Med Image Anal*, 2017, 37:66-90.
- [13] Hagopian EJ. Liver ultrasound: a key procedure in the surgeon's toolbox[J]. *J Surg Oncol*, 2020, 122(1):61-69.
- [14] Quero G, Lapergola A, Soler L, et al. Virtual and augmented reality in oncologic liver surgery[J]. *Surg Oncol Clin N Am*, 2019, 28(1): 31-44.
- [15] Schneider C, Thompson S, Totz J, et al. Comparison of manual and semi-automatic registration in augmented reality image-guided liver surgery: a clinical feasibility study[J]. *Surg Endosc*, 2020, 34(10):4702-4711.
- [16] 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.
- [17] Pratt P, Ives M, Lawton G, et al. Through the HoloLens™ looking glass: augmented reality for extremity reconstruction surgery using 3D vascular models with perforating vessels[J]. *Eur Radiol Exp*, 2018, 2(1):2.
- [18] Barré J, Michelet D, Truchot J, et al. Virtual reality single-port sleeve gastrectomy training decreases physical and mental workload in novice surgeons: an exploratory study[J]. *Obes Surg*, 2019, 29(4): 1309-1316.
- [19] Rowe SP, Chu LC, Fishman EK. 3D CT cinematic rendering of the spleen: potential role in problem solving[J]. *Diagn Interv Imaging*, 2019, 100(9):477-483.
- [20] Pietrabissa A, Marconi S, Negrello E, et al. An overview on 3D printing for abdominal surgery[J]. *Surg Endosc*, 2020, 34(1):1-13.
- [21] Jin C, Dai L, Wang T. The application of virtual reality in the training of laparoscopic surgery: a systematic review and meta-analysis[J]. *Int J Surg*, 2021, 87:105859.
- [22] Boedecker C, Huettl F, Saalfeld P, et al. Using virtual 3D-models in surgical planning: workflow of an immersive virtual reality application in liver surgery[J]. *Langenbeck's Arch Surg*, 2021, 406(3): 911-915.
- [23] Ahmed F, Jahagirdar V, Gudapati S, et al. Three-dimensional visualization and virtual reality simulation role in hepatic surgery: further research warranted[J]. *World J Gastrointest Surg*, 2022, 14(7):723-726.
- [24] Loy Rodas N, Barrera F, Padoy N. See it with your own eyes: markerless mobile augmented reality for radiation awareness in the hybrid room[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2017, 64(2):429-440.

(收稿日期:2024-11-11)

(本文编辑:张俊峰)

彭子洋, 王志博, 巴赫, 等. 增强现实、虚拟现实与混合现实在腔镜肝脏外科中的应用 [J/OL]. *中华肝脏外科手术学电子杂志*, 2025, 14(1): 13-17.