

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2026.02.014

裸眼三维显示技术在医学领域的应用现状与展望

潘兴丹¹, 信保全², 张正伟¹, 邹薇薇^{3*}, 刘铁龙^{1,2}

(1. 上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093; 2. 海军军医大学第二附属医院 骨肿瘤科, 上海 200003; 3. 海军军医大学第二附属医院 放射诊断科, 上海 200003)

【摘要】 随着医疗产业中高精度的尖端设备的广泛运用和精准诊疗需求的不断提升, 传统医疗显示技术正面临重大挑战。人工智能(artificial intelligence, AI)、光学、微电子学等多学科融合推进了裸眼三维显示技术的快速发展, 目前正成为解决当前医疗显示领域难题的有效方案。本文就裸眼三维显示技术的核心原理与分类及医学领域的典型应用进行系统化综述, 旨在为当前领域内相关研究提供理论参考。

【关键词】 裸眼三维显示; 医工交叉; 医学可视化**【中图分类号】** R318.6**【文献标志码】** A**文章编号:** 1674-1242 (2026) 02-0066-06

Current applications and future prospects of naked-eye 3D display technology in medicine field

PAN Xingdan¹, XIN Baoquan², ZHANG Zhengwei¹, ZOU Weiwei^{3*}, LIU Tielong^{1,2}

(1. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093; 2. Department of Bone Oncology, The Second Affiliated Hospital of Naval Medical University, Shanghai 200003, China; 3. Department of Radiological Diagnosis, The Second Affiliated Hospital of Naval Medical University, Shanghai 200003, China)

【Abstract】 With the widespread use of high-precision cutting-edge equipment in the medical industry and the increasing demand for precise diagnosis and treatment, traditional medical display technology is facing major challenges. The integration of artificial intelligence (AI), optics, microelectronics and other disciplines has promoted the rapid development of naked-eye 3D display technology, and is currently becoming an effective solution to current problems in the field of medical display. This article provides a systematic review of the core principles and classification of naked-eye 3D display technology and typical applications in the medical field, aiming to provide theoretical reference for related research in the current field.

【Key words】 Naked-eye 3D display; Interdisciplinary medical-engineering; Medical visualization

“元宇宙”、“赛博朋克”等概念兴起后, 增强现实(augmented reality, AR)、虚拟现实(virtual reality, VR)、混合现实(mixed reality, MR)等显示技术在军事、医疗、教育及娱乐产业已得到广泛应用^[1-2]。三维显示技术大多使用头盔或眼镜之类的辅助设备进行三维图像呈现, 如苹果 VisionPro 使用头戴式头盔, 索尼 XREALAir2Pro 则使用更为轻便的眼镜来实现三维人机交互。值得关注的是, 助视设备用于医疗场景下的三维显示仍存在诸多限制, 难以满足其临床操作需要: 一是, 头戴式设备的重量和体积较

大, 会影响医生长时间操作的舒适度; 二是, 设备佩戴造成医生的视野受限, 易影响手术时对周围环境的感知, 增加手术操作风险; 三是, 在多人协作的手术场景中, 头戴式助视设备难以实现多人间的同步可视化, 不利于团队协作高效配合。与之相比, 裸眼三维显示技术则以自然交互、不依赖于佩戴设备的独特优势, 有效地规避了上述局限性, 因此, 在医疗可视化领域逐渐成为了研究热点, 为临床可视化发展提供了技术新路径。

在 20 世纪 90 年代中后期, 军事交通管制系统的

收稿日期: 2025-06-12。

基金项目: 上海理工大学医工交叉重点支持项目 (slg-zww); 上海医苑新星青年医学人才培养计划 (YYXXZWW)。

作者简介: 潘兴丹, 硕士研究生, 研究方向: 脊柱影像学、裸眼 3D 技术。E-mail: 13189052201@163.com。

通信作者: 邹薇薇, 副教授, 研究方向: 医学影像诊断与鉴别、裸眼 3D 技术。E-mail: czyyzww@163.com。

使用、相关专业领域的其他设备如裸眼三维显示设备的运用均采用此种方式^[3]。伴随着消费电子终端的普及,裸眼三维显示技术亦开始进入民用市场中。2010年日本东芝第1台裸眼3D电视机面世,第2年HTC公司发布了首款采用裸眼显示技术的3D手机HTC Evo,由于当时技术尚不成熟、市场未被充分接受,因此这类设备并未得到广泛应用^[4-5]。近年来,高精度三维显示面板、实时的视觉效果实现技术及低时延的眼动捕捉方案等核心技术的发明,导致了裸眼立体观看得以迅猛发展^[6-7]。2020年韩国团队成功研制了交互式的超薄全息视频处理器,并搭建

了一套4K超高清超薄的全息视频显示系统,在整个显示模块只有1 cm厚的情况下,能以30 fps的速度进行实时的全息重建工作,且在空间和角度2个方面的分辨率都比传统设备有所提升^[8];2021年以色列Real View Imaging公司获得批准将HOLOSCOPE-i全息系统投入于临床,该系统显示模块也只有1 cm左右的高度,能直接对3D数字旋转血管造影(digital rotational angiography, DRA)、3D经食管超声心动图(transesophageal echocardiography, TEE)的数据进行处理^[9]。裸眼三维显示技术发展进程与趋势见图1。

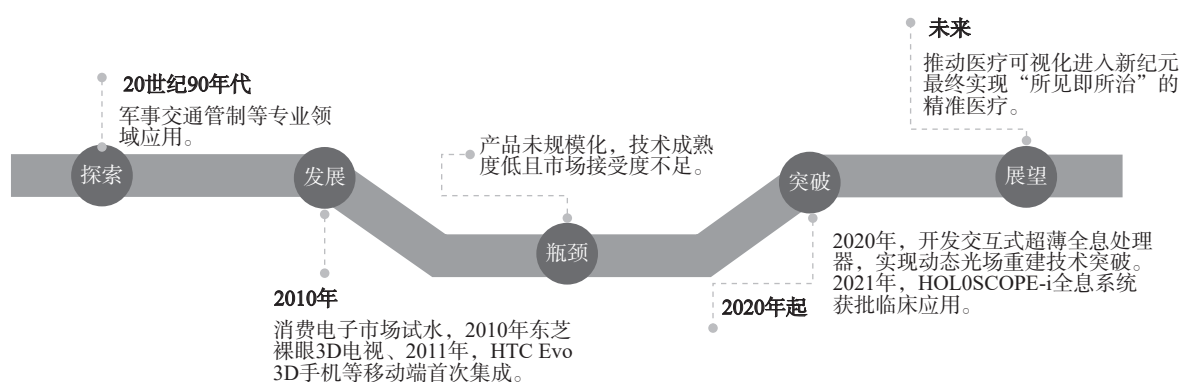


图1 裸眼三维显示技术发展时间轴

1 裸眼三维显示技术的原理与分类

裸眼三维显示技术,究其本质是基于人眼双目视差原理,通过对光场分布进行精确调控,使左右眼分别接收有空间差异的图像信息,再经过大脑融合形成一个立体视觉感知。这类技术能高度复现三维场景,使观察者得到空间深度感知精准、视觉信息完备的沉浸式体验,显著提高其对复杂空间结构的认知效率,也为突破现有三维显示技术的应用瓶颈提供了关键途径。

根据技术原理的不同,裸眼三维显示技术可划分成光场三维显示、体三维显示和全息三维显示3类。以上3种技术均能呈现无需佩戴设备的真三维场景,表1呈现了它们在成像机制与应用场景的不同点:光场三维显示技术依赖多视点光场重建得到立体感知,具有分辨率高、成本低的优势但视场角

较小,适用于显示尺寸小且对实时性要求较高的医疗场景。目前该项技术主要应用于牙科、眼科和骨科等需近距离操作的领域,其应用核心为充当手术导航和可视化训练手段;体三维显示技术依据多层体积成像原理,实现影像的全方位观察与立体重建,具备较好的空间连续性和深度信息表达能力,但存在易被环境光干扰且观察距离影响成像分辨率的局限。但需要明确的是,在临床医生通常使用的0.5~1 m的观察距离下,其成像质量已满足医学影像判读和教学应用的需求^[10];全息三维显示技术可呈现出高分辨率、全视角的真实三维影像,其清晰度与空间还原能力表现极为出色。但此项技术对计算量、光学精度及系统配件的要求都较高,导致其成本相对较高,因此当下大多用于辅助手术导航、康复训练及术前规划。

表1 3类裸眼三维显示技术的分类、优缺点与应用场景

裸眼三维显示技术分类	优点	缺点	应用场景
光场三维显示技术	分辨率良好, 成本低	视场角小, 显示尺寸受限	牙科、眼科、骨科手术导航
体三维显示技术	可全方位显示	环境光与距离限制分辨率	医学诊断及临床教学
全息三维显示技术	分辨率高, 清晰度高	运算量大, 配件成本高	辅助手术导航及康复训练

2 裸眼三维显示技术在医学领域中的应用

在充分了解裸眼三维显示技术核心原理与分类的基础上,本综述重点对临床显微精准治疗、眼视光应用、心理健康教育、康复医疗应用以及医学教育等关键医学场景进行系统梳理,并研判其未来挑战与前景。

2.1 临床显微精准治疗

在传统肿瘤诊断和治疗规划中,临床医生借助计算机断层扫描(computed tomography, CT)、磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)等影像设备获取二维图像,从而观测肿瘤大小、位置及其与邻近组织间的关系。但二维图像中的解剖结构易重叠,肿瘤内部的血管分布与解剖结构的空

关系难以清晰呈现,从而增加了复杂手术规划中的潜藏风险。而随着微创显微外科技术的不断发展,三维可视化技术在临床应用上愈发成熟且对外科精细操作的要求更高。裸眼三维显示技术能以三维可视化的方式将肿瘤不同时期的变化呈现出来,在放疗和手术治疗规划中能为患者提供个性化的治疗建议^[11]。腹腔镜下的立体视图对明确治疗目标区域、保护正常组织极为关键(图2);而裸眼3D腹腔镜与传统2D腹腔镜相比,在手术效率和器官功能保护上表现得更好,且术中出血量及并发症发生率也未增加^[12-14]。另外,裸眼3D腹腔镜用于肾段动脉阻断术时,无瘤区的肾脏能做到“零缺血”^[15]。



图2 裸眼3D显示技术下的腹腔镜手术

注:左图为术野画面,右图为腹腔镜画面。

对心血管狭窄风险的排查及预后判断,在疾病早期或症状不太明显的情况下,容易出现诊断失误。心导管检查是医学界公认的金标准,但由于其侵入性较大,易会引发血管损伤、心律不齐、血肿、感染等系列并发症。在进行心导管全息成像手术时,该技术能清晰呈现动态三维血管图像,且可精准还原血管的实际情况和立体形态,帮助医生实时掌握血管狭窄的详细信息;同时,还可降低周围组织和血管损伤的风险,并降低术后并发症发生的可能性^[16-18]。该技术的核心优势是能够精准测量血管形态且辐射低,同时满足微创与安全的临床诊疗需要。

2.2 眼视光应用

VR、生物技术和人工智能(artificial intelligence, AI)等技术的发展拓展了眼视光技术的应用升级。伴随视力筛查和诊疗技术的逐渐完善,三维视觉训练器材亦实现了不断升级。视觉训练器材通过加强患者眼睛的视觉协作与感知速度,促进其视力恢复;同时帮助医生发现传统视力检查无法发现的立体视

觉障碍与视觉深度感知等问题^[19-20]。作为弱视领域近年来的一大突破,立体3D桌面计算机训练系统以游戏为载体,配备阶梯式训练模式,即当游戏分数提升到一定程度时,系统会自动提高训练难度,有效提高弱势患儿的视力、融合视野和立体视力^[21]。

在晶体眼领域,以人工晶体植入术(implantable collamer lens, ICL)手术场景为例(图3),裸眼三维显示技术可为医生显示完整的手术三维视野,显著提高人工晶体放置的精准度^[22]。术后评估方面,该技术帮助分析植入镜片与周围组织有无空间变化,有助于准确评估患者术后恢复状况^[23-24]。

2.3 心理健康教育

随着数字化心理健康教育的不断普及和整体效果提升,相关技术进步可能给人类心理健康带来广泛且不确定的影响。

就裸眼三维显示技术而言,其对精神疾病的治疗和管理的作用仍处在初步研究阶段,对提高患者参与度和改善治疗感受具有一定作用^[25]。焦虑症患者



图3 多视图的ICL手术图

注: ICL: 晶体植入术。

者可利用三维显示技术创造能诱发焦虑的场景,并在一个相对安全的环境里演练应对方案,通过此种训练方式可有效缓解其焦虑反应^[26];社交障碍或自闭症谱系障碍(autism spectrum disorder, ASD)患者可借助三维显示技术来模仿社交情境进行演习,从而获得及时的评价和真实可感的合作体验^[27]。

2.4 康复医疗应用

传统康复训练大多借助康复教具或机器人展开单调且重复的训练,这种训练方式可能导致患者依从性低和配合度差。新兴康复治疗手段中,VR用于中风或卒中患者的康复治疗时患者需佩戴特制头盔和手环,在实际体验和用户反馈方面仍存在较多限制^[28]。而通过裸眼三维显示技术,则可通过模拟康复环境和任务,弥补传统训练的不足。

在康复领域,裸眼三维显示技术可通过借助Unity 3D等软件设计虚拟环境,把走路、抓握之类的日常活动模拟出来,并加入游戏元素以设计康复程序。其可用全高清裸眼3D显示器来感受虚拟内容,配置手势控制器与虚拟环境的物体产生交互作用,使患者在安全的环境下进行重复训练,加速肢体康复。这种康复训练模式可提升患者康复训练内容的效率,且可凭借实时反馈的数据适时调整训练强度,弥补传统训练的短板^[29-30]。在认知康复领域,治疗痴呆症或其他认知障碍时,这项技术能帮助患者练习记忆力,提高解决问题能力和决策制定技巧,使其在更互动、更有激励性的环境里接受物理治疗和运动康复,从而改善认知功能^[31](图4)。以上技术康复治疗计划无需治疗师帮助,也可让偏远山区的患者得到康复治疗。

2.5 医学教育

医学生在学习复杂的人体结构时,准确理解人体解剖的三维立体结构的关系,是其学习的难点和重点^[32]。传统临床教学中,一般依靠教材、模型展示

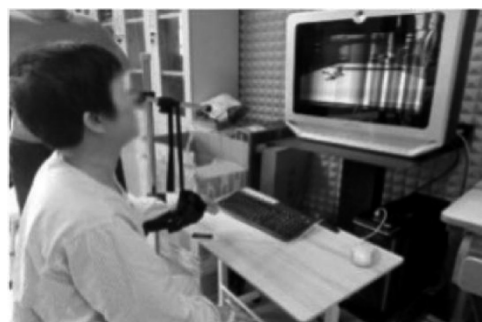


图4 裸眼3D显示技术辅助的康复训练

和尸体解剖来进行解剖学知识的学习。手术教学则主要依靠手术录像来补充的教学方式,视频二维图像的信息量较少,无法呈现手术的三维视野,因此不能对所有的手术效果进行全方位展示。

裸眼三维显示技术通过可视化三维图像,能帮助医学生清晰地观察人体的内部构造(如组织层次、器官排列及血管神经的分布等),并提高其对人体空间结构的理解能力^[33](图5)。在保证安全且符合医学伦理规范的前提下,医学生可在一个相对逼真的三维环境开展各类手术技巧的练习^[34-35]。同时,裸眼三维显示技术可帮助患者及时理解病情和手术方式,提高其治疗配合度。该技术可能会对已有医学教育模式产生重大冲击,促进远程教育、虚拟教学等新式教育模式的出现和升级^[36]。



图5 裸眼三维显示技术支持的解剖学习

3 讨论

裸眼三维显示技术在视觉交互、临床评价等医疗领域有着广阔前景。该项技术在无需使用辅助设备的情况下,即可展示立体影像;同时,通过临床诊疗信息可知,其对提高医生的诊断和治疗效率的提升亦有潜在的应用价值。

裸眼三维显示技术近年来在显示性能、人机交互、实时响应及便携化3个方面实现了快速发展。具体表现为:(1)在显示技术方面,投影型多层体三维光场显示系统可通过断层扫描显示和集成成像技术的结合,实现场景分辨率的显著提高^[37];(2)在人机交互领域,该项技术通过结合触觉反馈与光场显示系统,通过检测指尖散射光实现触摸和姿势的交互,促使人机交互体验更加自然^[38];(3)在实时化和便携式方面,根据2DMC视图调制技术研发的160°超宽视角全彩裸眼3D显示系统,在3层结构厚度不到2 mm的情况下,可支持视频级全彩显示,且性能远超传统光场三维显示技术几个数量级^[39]。

未来,裸眼三维显示技术可在3个维度拓展其发展空间:(1)技术上攻克分辨率、亮度和实时渲染算法这3个关键难题;(2)构建标准的三维显示评价体系与量化诊断指标,提高病灶定位和术前规划中的临床获益;(3)促进产业链发展中显示终端与医疗影像设备的深度融合。值得重视的是,调节—辐辏冲突(vergence—accommodation conflict, VAC)^[40]可能是限制裸眼三维显示技术发展的短板——当虚拟三维距离信息和实际显示器焦距不一致时,可导致眼疲劳。该类眼疲劳可能导致神经系统受损,例如头晕甚至晕厥,或伴随注意力下降和空间定向困难^[41]。针对这一短板,改进裸眼三维显示技术的内容设计和观看方式可能是当务之急;此外,通过控制立体视差,调整虚拟景深改变以使其处在人的视觉系统可承受的区间内,进而降低VAC对人的负面影响。

综上,裸眼三维显示技术可通过光学、AI、微电子学等多学科协同创新,不断拓展其医疗应用场景。在不远的未来,人类借助该项技术将实现医疗可视化的跨越式发展,有望实现“所见即所治”的医疗愿景。

参考文献

- [1] PAREKH P, PATEL S, PATEL N, *et al.* Systematic review and meta-analysis of augmented reality in medicine, retail, and games[J]. *Vis Comput Ind Biomed Art*, 2020, 3(1):21.
- [2] YEUNG A, TOSEVSKA A, KLAGER E, *et al.* Virtual and Augmented Reality Applications in Medicine: Analysis of the Scientific Literature[J]. *J Med Internet Res*, 2021, 23(2):e25499.
- [3] DETLEF B, KNUT L, MARTIN G, *et al.* FELIX: a volumetric 3D laser display[C]//SPIE. San Jose, CA: SPIE, 1996:265-273.
- [4] SON J Y, JAVIDI B, YANO S, *et al.* Recent Developments in 3-D Imaging Technologies[J]. *J Disp Technol*, 2010, 6(10):394-403.
- [5] DODGSON NA. 3D without the glasses[J]. *Nature*, 2013, 495(7441):316-317.
- [6] 陈姚林, 刘云菲, 陈林森, 等. 智能算法辅助集成成像3D显示技术现状与发展[J]. *光电子技术*, 2024, 44 (3): 173-182.
- [7] LIAO H G. Super long viewing distance light homogeneous emitting three-dimensional display[J]. *Sci Rep*, 2015, 5:9532.
- [8] AN J, WON K, KIM Y, *et al.* Slim-panel holographic video display[J]. *Nat Commun*, 2020, 11(1):5568.
- [9] BRUCKHEIMER E, ROTSCCHILD C, DAGAN T, *et al.* Computer-generated real-time digital holography: first time use in clinical medical imaging[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2016, 17(8):845-849.
- [10] 张瀚韬. 裸眼3D智能交互技术研究及其应用[D]. 广州: 中山大学, 2020.
- [11] ABDELAZEEM R M. Three-dimensional visualization of brain tumor progression based accurate segmentation via comparative holographic projection[J]. *PLoS One*, 2020, 15(7):e0236835.
- [12] 周明宽, 庄锦涛, 孙祥宙, 等. 裸眼3D辅助下显微输精管附睾吻合术的初步临床应用[J]. *临床泌尿外科杂志*, 2021, 36 (10): 766-768.
- [13] 张嘉文. 裸眼3D胸腔镜在肺部占位性病变手术中应用优势的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [14] PORTALE G, SPOLVERATO Y C, TONELLO A S, *et al.* Which video technology brings the higher cognitive burden and motion sickness in laparoscopic colorectal surgery: 3D, 2D-4 K or 3D-4 K? a propensity score study[J]. *Int J Colorectal Dis*, 2023, 38(1):190.
- [15] 付钰, 杨国胜, 邱晓拂, 等. 裸眼3D腹腔镜选择性肾段动脉阻断与2D腹腔镜全阻断肾部分切除术的比较[J]. *现代泌尿外科肿瘤杂志*, 2019, 11 (5): 261-264.
- [16] PERHAC J, SPALTENSTEIN J, PEREIRA V M, *et al.* Improving workflows of neuro-interventional procedures with autostereoscopic 3D visualization of multi-modality imaging in hybrid interventional suites[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2016, 11(2):189-196.
- [17] MORI S, SHIVKUMAR K. Real three-dimensional cardiac imaging using leading-edge holographic display[J]. *Clin Anat*, 2021, 34(6):966-968.
- [18] BRUCKHEIMER E, ROTSCCHILD C. Holography for imaging in structural heart disease[J]. *EuroIntervention*, 2016, 12(Suppl X):X81-X84.
- [19] LIU F, ZHAO J, HAN T, *et al.* Screening for Stereopsis Using an Eye-Tracking Glasses-Free Display in Adults: A Pilot

- Study[J]. *Front Med (Lausanne)*, 2022, 8:814908.
- [20] LV Z, TAO Z, CHU H, *et al.* Efficacy of naked-eye 3D technology in mitigating myopia progression among children[J]. *Transl Pediatr*, 2025, 14(4):628-638.
- [21] ZHENG K, ZHENG X H, WANG J, *et al.* The Implementation of Glasses-free 3D Display in ICL Surgery: A Pilot Study[J]. *J Refract Surg*, 2023, 39(9):612-619.
- [22] 王咏. Smile术后视觉质量及动态双眼视功能变化的研究[D]. 百色: 右江民族医学院, 2023.
- [23] 刘星雨. 基于裸眼3D的Fs-Lasik术后双眼视功能研究[D]. 成都: 成都医学院, 2023.
- [24] SUNDAR S S. Rise of Machine Agency: A Framework for Studying the Psychology of Human-AI Interaction (HAI)[J]. *J Comput-Mediat Comm*, 2020, 25(1):74-88.
- [25] WIEBE A, KANNEN K, SELASKOWSKI B, *et al.* Virtual reality in the diagnostic and therapy for mental disorders: A systematic review[J]. *Clin Psychol Rev*, 2022, 98:102213.
- [26] MEYERBRÖKER K, MORINA N. The use of virtual reality in assessment and treatment of anxiety and related disorders[J]. *Clin Psychol Psychother*, 2021, 28(3):466-476.
- [27] EMMELKAMP P M G, MEYERBRÖKER K. Virtual Reality Therapy in Mental Health[J]. *Annu Rev Clin Psychol*, 2021, 17(1):495-519.
- [28] KIM H, JUNG J, LEE S. Therapeutic Application of Virtual Reality in the Rehabilitation of Mild Cognitive Impairment: A Systematic Review and Meta-Analysis[J]. *Vision (Basel)*, 2022, 6(4):68.
- [29] ZHANG H, LIN L, LIU Y, *et al.* 6.3: Glasses-free Virtual Reality for Rehabilitation of Stroke Survivors[C]//International Conference on Display Technology, ICDT 2018. Guangzhou: John Wiley & Sons, Inc, 2018:57-59.
- [30] XIE H, ZHANG H, LIANG H, *et al.* A novel glasses-free virtual reality rehabilitation system on improving upper limb motor function among patients with stroke: A feasibility pilot study[J]. *Medicine in Novel Technology and Devices*, 2021, 11:100069.
- [31] SEVCENKO K, LINDGREN I. The effects of virtual reality training in stroke and Parkinson's disease rehabilitation: a systematic review and a perspective on usability[J]. *Eur Rev Aging Phys Act*, 2022, 19(1):4.
- [32] 贾哲, 赫嵘, 蒋力, 等. 三维可视化模式在外科临床教学中的应用[J]. *继续医学教育*, 2023, 37(5): 97-100.
- [33] HACKETT M, PROCTOR M. The effect of autostereoscopic holograms on anatomical knowledge: a randomised trial[J]. *Med Educ*, 2018, 52(11):1147-1155.
- [34] 崔飞, 王润辰, 张予卓, 等. 高分辨率2D与裸眼3D显示系统在胸腔镜模拟教学中的应用[J]. *中华医学教育探索杂志*, 2022, 21(11): 1509-1513.
- [35] ZHANG D, HE X, REN Z, *et al.* A naked-eye 3D anatomy teaching system based on Unity[C]//Proceedings of the 2024 4th International Symposium on Computer Technology and Information Science (ISCTIS). Xi'an: IEEE, 2024:191-195.
- [36] MA L N, PENG R, XU J J, *et al.* Naked eye three-dimensional teaching assistant system applied to undergraduate medical imaging education: A pilot study[J]. *Anat Sci Edu*, 2025, 18(2): 139-148.
- [37] JO Y, BANG K, YOO D, *et al.* Ultrahigh-definition volumetric light field projection[J]. *Opt Lett*, 2021, 46(17):4212-4215.
- [38] SÁNCHEZ SALAZAR CHAVARRÍA I A, SHIMOMURA K, TAKEYAMA S, *et al.* Interactive 3D touch and gesture capable holographic light field display with automatic registration between user and content[J]. *J Soc Inf Display*, 2022, 30(12): 877-893.
- [39] HUA J, HUA E, ZHOU F, *et al.* Foveated glasses-free 3D display with ultrawide field of view via a large-scale 2D-metagrating complex[J]. *Light Sci Appl*, 2021, 10(1):213.
- [40] ZHOU Y, ZHANG J, FANG F. Vergence-accommodation conflict in optical see-through display: review and prospect[J]. *Results in Optics*, 2021, 5:100160.
- [41] 李一帆, 颜纷纷, 王鹏, 等. 基于多种眼动行为的裸眼3D显示视觉疲劳评估方法[J]. *液晶与显示*, 2023, 38(6): 809-818.