

3D 显示技术在眼科手术中的应用研究进展

朱琳 综述 陈亦棋 沈丽君 审校

温州医科大学附属眼视光医院 浙江省眼科医院,杭州 310020

通信作者:沈丽君,Email:slj20101119@163.com

【摘要】 3D 显示技术利用双眼视差原理,通过一定方法使左右眼看到不同的影像,经过大脑视觉皮质的处理,融合产生立体视觉图像。由于其高清立体的手术视野、准确的空间定位能力,3D 显示技术在外科应用广泛。由于眼内操作复杂,操作空间较小,眼科显微手术需借助显微镜进行,尤其微创玻璃体视网膜手术是眼科手术中难度最高、学习曲线最长的手术。应用 3D 显示系统进行眼科手术有提高手术精确性、减少视网膜光毒性、缓解术者颈背部压力、促进医务人员之间的交流与配合等优点。目前,NGENUITY 和 TrueVision 系统主要应用于眼科 3D 显示系统,均需佩戴 3D 眼镜实现 3D 效果,裸眼 3D 系统是未来发展的主要方向。将 3D 显示系统与眼科手术辅助机器人系统相结合为发展眼科远程手术提供了新的思路。今后仍需不断地提升 3D 显示系统的性能,从而更好地应用于临床。本文就 3D 显示系统在眼前节手术及玻璃体视网膜手术中的研究及应用进行综述。

【关键词】 3D 显示技术;眼科;应用;眼前节手术;玻璃体视网膜手术;研究进展

基金项目: 国家自然科学基金项目(81700884、51175013);国家重点研发计划数字诊疗装备研发重点专项项目(2017YFC0111305);浙江省医药卫生科技计划项目(WKJ2010-2-018、WKJ-ZJ-1726);浙江省教育厅科技计划项目(Y201431237);温州医科大学眼视光学院重大科研项目(YNZD201003);第二批浙江省医学创新学科建设计划项目(眼底外科学)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20190222-00073

Research progress on the application of three-dimensional display technology in ophthalmic surgery

Zhu Lin, Chen Yiqi, Shen Lijun

Eye Hospital of Wenzhou Medical University, Zhejiang Eye Hospital, Hangzhou 310020, China

Corresponding author: Shen Lijun, Email: slj20101119@163.com

【Abstract】 Based on binocular disparity, three-dimensional (3D) display technology makes the right and left eyes see different images in a certain way, which generates a stereo image after the processing of the brain's visual cortex. Due to its high-definition stereoscopic surgical field of vision and accurate spatial positioning ability, 3D display technology has been widely used in surgery. Ophthalmic microsurgery is performed with the help of microscope because of the complex intraocular operation and small operating space, especially minimally invasive vitreoretinal surgery, which is the most difficult surgery with the longest learning curve in ophthalmology. The 3D display viewing system can improve surgical accuracy, reduce retinal phototoxicity, relieve the pressure on the neck and back of the surgeon as well as promote communication and cooperation between medical staff and so on. At present, the major 3D display systems applied in ophthalmology include the NGENUITY 3D Visualization System and TrueVision 3D Visualization System, both of which require wearing 3D glasses. The naked eye 3D display system is the main direction of future development. The combination of 3D display system and ophthalmic surgical robot system provides a new idea for the development of remote ophthalmic surgery. At the same time, broader application of 3D display system requires continuous improvement. In this article, the research and application of 3D display system in anterior segment surgery and vitreoretinal surgery were reviewed.

【Key words】 Three-dimensional display technology; Ophthalmology; Application; Anterior segment surgery; Vitreoretinal surgery; Research progress

Fund program: National Natural Science Foundation of China (81700884, 51175013); National Key Research and Development Program "Digital Medical Equipment Research and Development" (2017YFC0111305); Medical and Health Science and Technology Project of Zhejiang Province (WKJ2010-2-018, WKJ-ZJ-1726);

Zhejiang Education Department Scientific and Research Project (Y201431237); Major Scientific Research Projects of School of Ophthalmology & Optometry of Wenzhou Medical University (YNZD201003); Innovative Medical Subject Project of Zhejiang Province (Fundus Surgery)

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20190222-00073

20 世纪 90 年代以来,3D 技术迅速发展,逐渐进入到人们生活的方方面面,如电影、游戏、设计、医疗、建筑等多个领域。3D 技术主要分为 3D 显示技术、3D 虚拟现实技术和 3D 打印技术,其中 3D 显示技术在医疗方面的应用越来越广泛。3D 显示技术发展迅猛,在肝胆外科、泌尿外科、妇科等均有广泛应用。由于眼球体积小、结构精细等特点,眼科手术,尤其是玻璃体视网膜手术对稳定性和精确性有着极高的要求。3D 显示技术改变了传统目镜下完成手术的方式,眼科医生不再局限于显微镜目镜之前,而通过观看显示屏进行手术操作。目前主要使用的 3D 系统包括美国 Alcon 公司的 NGENUITY 系统和德国 Leica 公司 M822、M844 显微镜相配的加拿大 TrueVision® 公司的 TrueVision 系统。本文就国内外 3D 显示技术在眼科手术中的应用现状进行综述,着重探讨其在眼前节手术和玻璃体视网膜手术中的应用及研究进展。

1 3D 显示技术概述

1.1 3D 显示技术的基本原理及分类

双眼视差是 3D 显示技术实现的基本原理^[1]。人在视物过程中,双眼相距约 60 mm,所以会从不同角度进行观察,两眼的物像与对应点的相对位置之差称为双眼视差。3D 显示技术应用一定方法,使左右眼看到不同的影像,经过大脑视觉皮质的处理,融合产生立体视觉图像。

根据实现方式不同,3D 显示技术主要分为眼镜 3D 技术和裸眼 3D 技术,相较于眼镜 3D 技术,裸眼 3D 技术还不够成熟,尚未普及于医学领域。眼镜 3D 技术可分为色差式、快门式和偏振式 3 种。色差式成像技术根据三原色原理,通过红蓝立体眼镜对图像的色彩进行分离,使人产生立体视觉。该方法成本低廉,但其成像立体效果不佳,较少采用^[2]。快门式成像技术根据时分法原理,提高屏幕刷新率,将图像一分为二,通过配戴快门式眼镜使左右眼得到不同的图像,最终在大脑中形成立体图像。该方法需要高频显示器和特制眼镜,成本较高。第 1 代 3D 腹腔镜采用的是快门式成像技术^[3]。偏振式成像技术利用光的偏振现象,通过偏振眼镜观看 2 个镜头,从 2 个不同方向同时拍摄物像,形成立体视觉。该方法所需辅助设备成本较低,画面稳定,但对输出设备的要求较高,且分光成像可导致所形成的 3D 图像亮度降低。目前,第 2 代 3D 腹腔镜普遍采用该技术^[4]。

1.2 3D 显示技术在外科手术中的发展及应用

3D 显示技术由于具有高清、立体的手术视野和准确的空间定位能力,因此在外科手术中应用广泛。早在 20 世纪 90 年代初,第 1 代 3D 腹腔镜开始应用于动物实验^[5],1992 年德国生产出第 1 台 3D 腹腔镜系统,应用于临床。随后,Wenzl 等^[6]完成了第 1 台 3D 腹腔镜下妇科手术。1994 年,Birkett 等^[7]报

道了应用 3D 腹腔镜系统完成的 50 例腹部手术,认为 3D 腹腔镜系统可以更快、更准确地完成较复杂的腹腔手术。由于技术限制,当时的 3D 腹腔镜系统主要采用快门式成像技术,快门式眼镜和显示器的低分辨率使术者容易产生视疲劳,因此第 1 代 3D 腹腔镜系统并未广泛应用。1998 年,Hanna 等^[8]将 60 例单纯胆结石患者随机分为传统腹腔镜组和 3D 腹腔镜组,完成胆囊切除术,结果显示 2 个组手术时间无明显差异,3D 腹腔镜深度感较好,但清晰度和对比度差于传统腹腔镜,且视疲劳、头痛等不良反应更为严重。1999 年,经过改良的第 2 代 3D 腹腔镜系统问世,采用偏振式成像技术,极大地提高了 3D 腹腔镜的实用性^[9]。随着科技的发展,高清显示屏的出现进一步改善了 3D 腹腔镜系统的成像效果。Bilgen 等^[10]比较了 Viking 3D 腹腔镜系统(Viking, da Vinci Robotic system)与 2D 腹腔镜系统(日本 Olympus 公司)在胆囊切除术的手术时间上是否存在优势,得到了与 Hanna 等^[8]相反的研究结果,结果显示 3D 腹腔镜系统缩短了手术时间,且更易被外科医生所接受。偏振式 3D 成像技术需要通过偏振片眼镜来实现 3D 呈像,而灰黑色的偏振片眼镜难免会降低屏幕亮度,同时术者的呼吸蒸汽碰到镜片易液化造成视物模糊,不利于手术的进行^[11]。因此,裸眼 3D 技术应运而生。2012 年,Khoshabeh 等^[12]研发了世界上首个多焦裸眼 3D 高清腹腔镜系统原型。

中国应用 3D 显示系统较晚,直到 2012 年,3D 腹腔镜系统才获批进入中国,并逐渐在临床应用。2013 年,姚健等^[13]首次报道了应用 3D 高清腹腔镜进行的 18 例手术,包括胆囊切除术、子宫及附件全切联合盆腔淋巴结清扫术、附件囊肿剥除术、阑尾切除术、肾囊肿去顶术及胃癌、肛管癌根治术等多种术式,手术均顺利完成,无中转开腹及并发症发生,手术时间及术中出血量与传统腹腔镜相当。2014 年,陈晓红^[14]报道了 1 例在 3D 内镜下完成的腮裂囊肿切除术。2015 年,广州医科大学附属第一医院何建行主任团队利用自主研发的裸眼 3D 胸腔镜系统完成了全球首例裸眼 3D 胸腔镜系统下肺癌根治术,随后进行了 1 例右中上叶肺癌根治术^[15-16]。最近,何建行主任团队又回顾性地比较了裸眼 3D 胸腔镜系统和常规胸腔镜系统下肺癌根治术的作用,得出裸眼 3D 系统至少与传统胸腔镜系统下肺癌根治术一样安全的结论^[17]。

3D 显示系统具有良好的空间定位和深度感知能力,有利于分辨相邻组织之间的关系;配备高灵敏度的成像处理器和带增益功能的数字滤波器,可以使手术视野图像更好地呈现在显示器上;显示器屏幕可供多人观看,可以让助手估计主刀需要的器械,加强手术人员的配合。由于 3D 显示系统的诸多优势,近年来,越来越多的学者研究并在手术中使用 3D 显示系统,也有不少眼科手术中使用 3D 显示系统的相关报道。

2 3D 显示系统在眼前节手术中的研究及应用

3D 显示技术应用于眼科手术是指医生通过观看 3D 显示屏而非传统显微镜目镜进行手术。Bhadri 等^[18]设计并制作了基于立体摄像机的 3D 视觉系统原型,包括立体摄像机、偏光显示屏、偏光眼镜和脚踏控制板 4 个部分,并在离体猪眼中进行了数项眼科手术操作,眼前节和眼后节医生均能完成手术所需最小立体视觉要求的任务。

Weinstock 等^[19]最早报道将 3D 显示系统应用于白内障手术,他们认为 3D 显示系统具有改善人体工程学、提高手术人员之间的沟通效率等优点。此外,Weinstock 等^[20]回顾性分析了 2 320 例白内障手术,其中 647 例在传统显微镜下完成,1 673 例在 3D 显示系统下完成,2 个组手术并发症发生率及手术时间比较差异均无统计学意义,提示 3D 显示系统的手术效果与传统显微镜相近。

2017 年, Mohamed 等^[21]完成了首例 3D 显示技术下自动板层刀制备的不剥除后弹力层的角膜内皮移植术,在 3D 显示系统的高放大倍率下,进入前房之前的操作比较容易,但是在前房内确定移植深度位置较难,需要术中频繁改变焦距来聚焦,但调焦并未使主刀医生感到眼疲劳或其他眼部不适。同年, Galvis 等^[22]使用 3D 显示系统完成了 1 例后弹力层角膜内皮移植术,通过巨大的 4K 高清屏幕,角膜移植医生可以看见清晰的手术视野,这在确定供体角膜位置这一关键步骤中具有重要作用。

国内关于 3D 系统应用于眼前节手术的报道较少。Qian 等^[23]设计前瞻性随机对照研究,将 20 例年龄相关性白内障患者随机分为常规手术组和 3D 组,分别行超声乳化白内障摘出术和人工晶状体植入术,2 个组手术均顺利完成,术中未发生严重并发症,术后视力均有明显改善。比较 2 个组术前、术后最佳矫正视力、平均手术时间和术后平均角膜内皮细胞密度,差异均无统计学意义。术者发现 3D 显示系统的图像相较于显微镜有 0.09 s 的滞后,但未明显影响手术效果,故认为 3D 系统适用于白内障手术。

眼前节手术中应用 3D 显示系统,能够获得清晰的三维手术图像,有助于组织结构间层次的辨认和定位,在白内障和角膜内皮移植手术的关键步骤中尤为重要。此外,观看 3D 显示屏改变了眼科医生局限于显微镜目镜前的屈颈位固定姿势,缓解了术者的颈背部压力。但是,3D 显示系统存在较明显的延迟现象,会带来一定的安全隐患。

3 3D 显示系统在玻璃体视网膜手术中的研究及应用

由于眼内操作复杂、操作空间较小、视网膜组织的脆弱性和不可再生性,微创玻璃体视网膜手术是眼科手术中难度最高,学习曲线最长的手术。3D 显示技术应用于玻璃体视网膜手术,不仅有助于手术医生判断眼内器械和视网膜之间的距离,保证手术的安全性,还可以加强教学效果。

Riemann^[24]应用 3D 高清显示系统进行了 9 例 9 眼的玻璃体视网膜手术,包括 9 眼玻璃体切割术、8 眼视网膜前膜剥除

术、7 眼内界膜剥除术、3 眼白内障手术、1 眼气液交换、1 眼玻璃体腔内人工晶状体取出术,所有手术均顺利完成,无术中或术后并发症发生,结果显示 3D 高清显示系统可以提供高质量的手术区域图像,在特定的玻璃体视网膜手术中足以替代传统显微镜。随后, Riemann 教授团队报道了 1 例应用 NGENUITY 3D 显示系统为脊柱后凸畸形的老年患者进行视网膜脱离复位手术,术中患者取 Trendelenburg 位,显微镜呈 35° 倾斜置于术眼上方,手术医生佩戴 3D 眼镜观看显示屏进行手术,手术顺利完成,术后患者视力恢复至 20/80,随访 11 周末见视网膜脱离复发^[25]。该病例说明在严重的肌肉骨骼限制体位或者其他定位困难的情况下,3D 显示系统应用于玻璃体视网膜手术具有较大优势。

较早关于 3D 显示技术应用于眼科手术的报道多侧重于其人体工程学优势,但是一种技术能否被运用于手术最终取决于其直接影响手术效果的特性,即光学成像质量和手术操作的难易程度。Eckardt 等^[26]为探讨应用 3D 显示系统进行玻璃体视网膜手术的可行性,比较应用 3D 显示系统和传统显微镜进行精细操作的能力,并测量其图像分辨率和景深,结果显示 91.7% 的志愿者认为 3D 显示系统具有人体工程学优势,传统显微镜的图像分辨率约为 3D 显示系统的 2 倍,二者的景深在中高分辨率和放大倍数时相近。Freeman 等^[27]测量了 5、13、18 倍放大率下 3D 显示系统和传统显微镜的景深和横向分辨率,得到了类似的结果。此外, Eckardt 等^[26]回顾性分析了使用 3D 显示系统完成的 43 例黄斑裂孔手术,一次手术裂孔闭合例数为 41 例,占 95.3%,失败的 2 例中,1 例在二次手术时注入 SF6 气体后闭合,总闭合率提高至 97.7%,另 1 例由于黄斑裂孔过大而未进行二次手术,该结果比传统显微手术得到的结果更好。该研究表明,3D 显示技术应用于玻璃体视网膜手术效果佳,超高清摄像机和显示器的引入可以弥补其分辨率较低的不足,3D 显示技术在眼科的运用具有广阔的前景,也许会成为眼科手术发展的新方向。

Kunikata 等^[28]应用 3D 显示系统完成了 6 例黄斑疾病手术,发现在眼内照明设置为系统的最低水平 1% 时,视网膜组织仍能清楚显示,手术操作比在同等照明的显微镜下容易得多。有研究表明,视网膜细胞在 25 G 氙灯照射下,即使设置照明强度为 50%,也会产生时间依赖的光毒性^[29]。玻璃体视网膜手术需要足够的照明来确保手术操作的安全,而良好的术后效果又需要尽可能降低眼内照明以减少光毒性,恰当平衡二者对手术效果至关重要,3D 显示系统可能是一种不错的选择。

Coppola 等^[30]比较了应用 3D 显示系统和传统显微镜完成的视网膜脱离手术,其中 3D 组 7 例,传统显微镜组 15 例,二者各含复发性视网膜脱离 1 例,其余均为单纯性视网膜脱离,结果显示 2 个组患者视网膜均在术后第 1 天完全复位,3D 组和对照组的术中眼内照明水平分别为 10% 和 45%,差异有统计学意义;对照组 9 眼注射稀释曲安奈德以改善残留玻璃体的可见性,3D 组各眼均未行玻璃体染色;2 个组平均手术时间、术后 30 d 视网膜脱离复发率比较差异无统计学意义。该研究为回顾性研究,且样本量较小,需进一步证明 3D 显示系统的安全性

和有效性。随后, Romano 等^[31]进行的前瞻性研究, 纳入 50 例玻璃体视网膜疾病患者, 比较 3D 显示系统和传统显微镜在 25 G 玻璃体切割手术中的应用效果, 结果显示二者在外科医生的视觉效果和图像质量方面相似, 在术者的舒适度和教学方面 3D 显示系统具有显著优势。

近年来, 3D 显示技术逐渐发展成熟, 在眼科手术中的应用也越来越广泛, 学者们充分利用 3D 显示系统的优势, 结合其他技术或者方法研究新的手术方式。Ehlers 等^[32]将 3D 显示系统与术中光相干断层扫描技术 (optical coherence tomography, OCT) 相结合, 使术中 OCT 图像呈半透明显示在 3D 显示器的 4K 高清屏幕上, 该方法可以使手术医生观察到详细的术中 OCT 图像, 识别视网膜结构的细微变化, 从而为手术医生提供独特的术中诊断反馈机会。Dutra-Medeiros 等^[33]首次报道在眼科领域应用一种新型 3D 内窥镜头戴显示器 HMS-3000MT 完成了 6 例眼前后段联合手术, 该设备应用 2 个独立的 OLED 面板分别显示左右眼相应的图像, 同时提供对医学图像的空间定位功能, 从而更接近自然的立体视觉体验。Todorich 等^[34]发明了一种巩膜透照法, 完成了 6 例常见的玻璃体视网膜疾病手术。巩膜透照法是将导光倾斜一定角度置于巩膜上, 使光透过巩膜照明玻璃体腔, 配合 3D 显示系统的增益效果, 可以提供足够照明使主刀医生在没有助手的情况下单独完成巩膜顶压和外周部玻璃体切割。该方法经济、方便, 可省去吊顶灯等辅助设备, 但是易受到巩膜厚度、眼底色素含量及玻璃体混浊程度等因素的影响。Kita 等^[35]提出了一种将显微镜广角镜系统与内窥镜系统相结合的混合玻璃体切割术, 利用内窥镜的靠近放大视网膜图像这一特点, 来弥补广角镜的不足, 有利于发现视网膜裂孔和完成周边玻璃体切割、周边视网膜激光光凝等操作。而混合玻璃体切割术加上 3D 显示系统, 使得广角镜图像和内窥镜图像呈现在同一显示器中, 避免了在显微镜目镜和内窥镜显示器之间的转换。Kita 等^[35]通过该方法成功完成了 113 例手术, 包括增生性玻璃体视网膜病变和增生性糖尿病视网膜病变等复杂性病例, 术中显微镜、吊顶灯和内窥镜的照明亮度分别减少了 40%、60% 和 20%。

在国内, 张中宇等^[36]进行了关于 3D 显示系统应用于黄斑前膜剥除术的研究, 共纳入 19 例特发性黄斑前膜患者, 其中 3D 组 9 例, 传统手术组 10 例, 结果显示传统手术组的黄斑前膜染色及撕除时间比 3D 组短, 差异有统计学意义。2 个组完成中轴部玻璃体切割时间、术后眼压变化、术后黄斑中心凹厚度变化差异均无统计学意义, 提示 3D 显示系统能完成黄斑前膜剥除术, 可以应用于眼后段的精细手术。Zhang 等^[37]进行非随机病例对照研究, 探讨 3D 显示系统在不同玻璃体视网膜疾病手术中的应用, 其中 3D 组 31 例, 传给显微镜组 29 例, 包括复发性视网膜脱离、糖尿病视网膜病变继发的牵拉性视网膜脱离、视网膜脱离伴增生性玻璃体视网膜病变及视网膜脱离伴明显脉络膜脱离等多种复杂性疾病, 手术均顺利完成, 无术中或术后并发症。该研究表明, 3D 显示系统可以覆盖广泛的玻璃体视网膜手术, 包括各种复杂的病例。

在玻璃体视网膜手术中, 3D 显示系统的增益作用能减少

眼内照明, 从而减少视网膜细胞光毒性, 对黄斑区手术有着极大的优势; 精确显示组织间的精细结构, 配合人体工程学优势, 适用于复杂的、手术时间较长的玻璃体视网膜手术; 由于观看 3D 显示屏进行手术可以改变显微镜的位置及角度, 3D 显示系统尤其适合常规仰卧位困难或者其他定位困难情况时的手术。

应用 3D 显示系统进行眼科手术可以提供高清的立体图像, 提高操作的精确性, 有利于减少医源性损伤; 系统的电子放大作用可以提高图片亮度, 减少眼内照明, 从而减少对视网膜细胞的光毒性; 观看显示器屏幕进行手术操作, 使术者体位更加舒适, 可以减少术者疲劳, 从而提高手术稳定性; 主刀、助手和护士观看同一屏幕, 有利于医务人员之间的沟通、配合; 具有录像功能, 是学习和教学的良好途径。但是, 目前的 3D 显示系统同样也存在以下不足, 如观看 3D 显示屏会引起头痛、恶心和视疲劳等不适; 当医生不习惯佩戴眼镜或者原本佩戴矫正眼镜时, 佩戴 3D 眼镜会带来不适, 同时灰黑色镜片会降低屏幕亮度; 系统的电子信号放大作用同样会放大光学介质混浊的信号, 干扰手术; 系统具有轻微的延迟效应, 可能对精细操作造成一定影响; 进行长时间视网膜激光光凝时, 术者会感到恶心和头痛, 这也许与无法佩戴护目镜有关。目前眼镜 3D 系统的发展较为成熟, 裸眼 3D 系统尚在开发完善中, 未来我们可以期待去除 3D 眼镜的负担, 更为轻松、直观地进行手术。此外, 手术辅助机器人由于其高精度性、高稳定性、高重复性等优点逐渐进入医疗领域, 国内外也有较多关于眼科手术辅助机器人的报道^[38-40]。将 3D 显示系统与眼科手术辅助机器人系统相结合, 也许会产生更好的效果, 这也是未来发展真正意义上的眼科远程手术的一个可能方向。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 王永, 孙可, 孙士祥. 3D 显示技术的现状及发展 [J]. 现代显示, 2012, 23(2): 26-29. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6268.2012.02.008. Wang Y, Sun K, Sun SX. The status and development of 3D display technology [J]. Adv Disp, 2012, 23(2): 26-29. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6268.2012.02.008.
- [2] Ou KL, Hosseinkhani H. Development of 3D *in vitro* technology for medical applications [J/OL]. Int J Mol Sci, 2014, 15(10): 17938-17962 [2020-06-23]. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25299693/. DOI: 10.3390/ijms151017938.
- [3] McDougall EM, Soble JJ, Wolf JS Jr, et al. Comparison of three-dimensional and two-dimensional laparoscopic video systems [J]. J Endourol, 1996, 10(4): 371-374. DOI: 10.1089/end.1996.10.371.
- [4] Storz P, Buess GF, Kunert W, et al. 3D HD versus 2D HD: surgical task efficiency in standardised phantom tasks [J]. Surg Endosc, 2012, 26(5): 1454-1460. DOI: 10.1007/s00464-011-2055-9.
- [5] von Pichler C, Radermacher K, Boeckmann W, et al. Three-dimensional versus two-dimensional video endoscopy. A clinical field study in laparoscopic application [J]. Stud Health Technol Inform, 1996, 29: 667-674.
- [6] Wenzl R, Pateisky N, Husslein P. First use of a 3D video-endoscope in gynecology [J]. Geburtshilfe Frauenheilkd, 1993, 53(11): 776-778. DOI: 10.1055/s-2007-1023725.
- [7] Birkett DH, Josephs LG, Este-McDonald J. A new 3-D laparoscope in gastrointestinal surgery [J]. Surg Endosc, 1994, 8(12): 1448-1451. DOI: 10.1007/BF00187357.
- [8] Hanna GB, Shimi SM, Cuschieri A. Randomised study of influence of two-dimensional versus three-dimensional imaging on performance of

- laparoscopic cholecystectomy [J]. *Lancet*, 1998, 351 (9098) : 248-251. DOI:10.1016/S0140-6736(97)08005-7.
- [9] Taffinder N, Smith SG, Huber J, et al. The effect of a second-generation 3D endoscope on the laparoscopic precision of novices and experienced surgeons [J]. *Surg Endosc*, 1999, 13 (11) : 1087-1092. DOI:10.1007/s004649901179.
- [10] Bilgen K, Ustün M, Karakahya M, et al. Comparison of 3D imaging and 2D imaging for performance time of laparoscopic cholecystectomy [J]. *Surg Laparosc Endosc Percutan Tech*, 2013, 23 (2) : 180-183. DOI:10.1097/SLE.0b013e3182827e17.
- [11] 何建行. 裸眼 3D 显示系统在腹腔镜手术中的应用 [J]. *实用医学杂志*, 2017, 33 (10) : 1537-1539. DOI:10.3969/j.issn.1006-5725.2017.10.001.
- [12] Khoshabeh R, Juang J, Talamini MA, et al. Multiview glasses-free 3-D laparoscopy [J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2012, 59 (10) : 2859-2865. DOI:10.1109/TBME.2012.2212192.
- [13] 姚健, 桑晓梅, 罗黔. 3D 高清腹腔镜手术的临床应用探讨 [J]. *西部医学*, 2013, 25 (4) : 513-514. DOI:10.3969/j.issn.1672-3511.2013.04.010.
- Yao J, Sang XM, Luo Q. The investigation of clinical application of 3D HD laparoscopy surgery [J]. *Med J West China*, 2013, 25 (4) : 513-514. DOI:10.3969/j.issn.1672-3511.2013.04.010.
- [14] 陈晓红. 三维内镜下腮裂囊肿切除 1 例 [J]. *中国医学文摘:耳鼻咽喉科学*, 2014, 29 (4) : 229-231. DOI:10.19617/j.issn1001-1307.2014.04.014.
- [15] Li M. The world's first radical resection for lung cancer using glasses-free 3D thoracoscope was completed in Guangzhou [J/OL]. *J Thorac Dis*, 2015, 7 (9) : E384-385 [2020-06-10]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4598506/>. DOI:10.3978/j.issn.2072-1439.2015.08.32.
- [16] Shao W, Yin W, Wang W, et al. Glasses-free three-dimensional endoscopic bronchoplasty, arterioplasty, and angioplasty of the superior vena cava for the radical treatment of right middle upper lung cancer [J]. *J Thorac Dis*, 2016, 8 (3) : 608-611. DOI:10.21037/jtd.2016.01.57.
- [17] Huang W, Liu J, Liang W, et al. Outcome and safety of radical resection in non-small cell lung cancer patients via glasses-free 3-dimensional video-assisted thoracoscope versus 2-dimensional video-assisted thoracoscope [J]. *Surg Innov*, 2018, 25 (2) : 121-127. DOI:10.1177/1553350617754102.
- [18] Bhadri PR, Rowley AP, Khurana RN, et al. Evaluation of a stereoscopic camera-based three-dimensional viewing workstation for ophthalmic surgery [J]. *Am J Ophthalmol*, 2007, 143 (5) : 891-892. DOI:10.1016/j.ajo.2006.12.032.
- [19] Weinstock RJ, Donnenfeld ED. 3D visualization in ophthalmology [J]. *J Cat Refr Surg Today*, 2008, 5 : 62-65.
- [20] Weinstock RJ, Diakonis VF, Schwartz AJ, et al. Heads-up cataract surgery: complication rates, surgical duration, and comparison with traditional microscopes [J]. *J Refract Surg*, 2019, 35 (5) : 318-322. DOI:10.3928/1081597X-20190410-02.
- [21] Mohamed YH, Uematsu M, Inoue D, et al. First experience of nDSAEK with heads-up surgery: a case report [J/OL]. *Medicine (Baltimore)*, 2017, 96 (19) : e6906 [2020-06-19]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28489805/>. DOI:10.1097/MD.0000000000006906.
- [22] Galvis V, Berrospi RD, Arias JD, et al. Heads up Descemet membrane endothelial keratoplasty performed using a 3D visualization system [J/OL]. *J Surg Case Rep*, 2017, 2017 (11) : rjx231 [2020-06-03]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5710594/>. DOI:10.1093/jscr/rjx231.
- [23] Qian Z, Wang H, Fan H, et al. Three-dimensional digital visualization of phacoemulsification and intraocular lens implantation [J]. *Indian J Ophthalmol*, 2019, 67 (3) : 341-343. DOI:10.4103/ijo.IJO_1012_18.
- [24] Riemann CD. Machine vision and vitrectomy: three-dimensional high definition (3DHD) video for surgical visualization in vitreoretinal surgery [C/OL]. *Proc SPIE, Stereo Displays Appl XXII*, 2011, 7863 : 78630K [2020-06-10]. <https://spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.873495>. DOI:10.1117/12.873495.
- [25] Skinner CC, Riemann CD. "Heads up" digitally assisted surgical viewing for retinal detachment repair in a patient with severe kyphosis [J]. *Retin Cases Brief Rep*, 2018, 12 (3) : 257-259. DOI:10.1097/ICB.0000000000000486.
- [26] Eckardt C, Paulo EB. Heads-up surgery for vitreoretinal procedures: an experimental and clinical study [J]. *Retina*, 2016, 36 (1) : 137-147. DOI:10.1097/IAE.0000000000000689.
- [27] Freeman WR, Chen KC, Ho J, et al. Resolution, depth of field, and physician satisfaction during digitally assisted vitreoretinal surgery [J]. *Retina*, 2019, 39 (9) : 1768-1771. DOI:10.1097/IAE.0000000000002236.
- [28] Kunikata H, Abe T, Nakazawa T. Heads-up macular surgery with a 27-gauge microincision vitrectomy system and minimal illumination [J]. *Case Rep Ophthalmol*, 2016, 7 (3) : 265-269. DOI:10.1159/000452993.
- [29] Yanagi Y, Iriyama A, Jang WD, et al. Evaluation of the safety of xenon/ bandpass light in vitrectomy using the A₂E-laden RPE model [J]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2007, 245 (5) : 677-681. DOI:10.1007/s00417-006-0428-x.
- [30] Coppola M, La Spina C, Rabiolo A, et al. Heads-up 3D vision system for retinal detachment surgery [J/OL]. *Int J Retina Vitreous*, 2017, 3 : 46 [2020-06-19]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29188074/>. DOI:10.1186/s40942-017-0099-2.
- [31] Romano MR, Cennamo G, Comune C, et al. Evaluation of 3D heads-up vitrectomy: outcomes of psychometric skills testing and surgeon satisfaction [J]. *Eye (Lond)*, 2018, 32 (6) : 1093-1098. DOI:10.1038/s41433-018-0027-1.
- [32] Ehlers JP, Uchida A, Srivastava SK. The integrative surgical theater: combining intraoperative optical coherence tomography and 3D digital visualization for vitreoretinal surgery in the DISCOVER Study [J]. *Retina*, 2018, 38 Suppl 1 : S88-S96. DOI:10.1097/IAE.0000000000001999.
- [33] Dutra-Medeiros M, Nascimento J, Henriques J, et al. Three-dimensional head-mounted display system for ophthalmic surgical procedures [J]. *Retina*, 2017, 37 (7) : 1411-1414. DOI:10.1097/IAE.0000000000001514.
- [34] Todorich B, Stem MS, Hassan TS, et al. Scleral transillumination with digital heads-up display: a novel technique for visualization during vitrectomy surgery [J]. *Ophthalmic Surg Lasers Imaging Retina*, 2018, 49 (6) : 436-439. DOI:10.3928/23258160-20180601-08.
- [35] Kita M, Mori Y, Hama S. Hybrid wide-angle viewing-endoscopic vitrectomy using a 3D visualization system [J]. *Clin Ophthalmol*, 2018, 12 : 313-317. DOI:10.2147/OPHT.S156497.
- [36] 张中宇, 孙大卫. 3D 可视技术应用于黄斑前膜剥除术初步研究 [J]. *转化医学电子杂志*, 2017, 4 (8) : 24-26.
- Zhang ZY, Sun DW. Primary study on the application of 3D visibility technique to macular epiretinal membrane peeling surgery [J]. *E-J Transl Med*, 2017, 4 (8) : 24-26.
- [37] Zhang Z, Wang L, Wei Y, et al. The preliminary experiences with Three-Dimensional Heads-Up Display Viewing System for vitreoretinal surgery under various status [J]. *Curr Eye Res*, 2019, 44 (1) : 102-109. DOI:10.1080/02713683.2018.1526305.
- [38] Tsiaras A, Mango C, Dutson E. Robotic ocular surgery [J]. *Br J Ophthalmol*, 2007, 91 (1) : 18-21. DOI:10.1136/bjo.2006.096040.
- [39] Rahimy E, Wilson J, Tsao TC, et al. Robot-assisted intraocular surgery: development of the IRIS and feasibility studies in an animal model [J]. *Eye (Lond)*, 2013, 27 (8) : 972-978. DOI:10.1038/eye.2013.105.
- [40] 陈亦棋, 张超特, 洪明胜, 等. 辅助玻璃体视网膜显微手术机器人系统的研制及应用 [J]. *中华实验眼科杂志*, 2017, 35 (1) : 38-41. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2017.01.008.
- Chen YQ, Zhang CT, Hong MS, et al. Development of cooperative robot-assistant surgery system for vitreoretinal microsurgery and its feasibility test in an animal model [J]. *Chin J Exp Ophthalmol*, 2017, 35 (1) : 38-41. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2017.01.008.

(收稿日期:2020-08-22 修回日期:2021-02-12)

(本文编辑:刘艳 施晓萌)