

基于三维头戴设备的景深提升技术在分离器械取出中的回顾分析

冯博¹ 刘小雨¹ 谈文多¹ 陈燕¹ 孟烈² 黄正蔚¹

¹上海交通大学医学院附属第九人民医院牙体牙髓科,上海交通大学口腔医学院,国家口腔医学中心,口腔疾病国家临床医学研究中心,上海市口腔医学重点实验室,上海市口腔医学研究所,上海 200011; ²革伦科技(上海)有限公司,上海 200011

通信作者:黄正蔚,Email:huangzhengwei@shsmu.edu.cn



黄正蔚

【摘要】 三维穿戴显示技术从早期的二维图像到如今的三维立体视觉,映射了医学工程学的深度结合。三维头戴设备通过对手术区域进行高精度的视频采集,模拟人眼的双目视差,获取景深感更强的立体图像。当根管内的器械发生分离时,医师可以更精确定位分离器械位置、看清分离器械与根管壁的嵌合程度,以及分离器械与

弯曲根管之间的角度,从而能显著提升治疗的精准性、成功率和医师舒适度。本文将对三维头戴设备在分离器械取出中的临床应用进行回顾分析。

【关键词】 三维头戴设备; 景深; 分离器械; 牙体牙髓诊疗

引用著录格式:冯博,刘小雨,谈文多,等.基于三维头戴设备的景深提升技术在分离器械取出中的回顾分析[JOL].中华口腔医学研究杂志(电子版),2025,19(6):351-359.

DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2025.06.001

Retrospective analysis of depth - of - field enhancement technology based on a three - dimensional head - mounted device in the removal of separated instruments

Feng Bo¹, Liu Xiaoyu¹, Tan Wenduo¹, Chen Yan¹, Meng Lie², Huang Zhengwei¹

¹Department of Endodontics, Shanghai Ninth People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine; College of Stomatology, Shanghai Jiao Tong University; National Center for Stomatology; National Clinical Research Center for Oral Diseases; Shanghai Key Laboratory of Stomatology; Shanghai Research Institute of Stomatology, Shanghai 200011, China; ²Gelun Technology (Shanghai) Company Limited, Shanghai 200011, China

Corresponding author: Huang Zhengwei, Email: huangzhengwei@shsmu.edu.cn

【Abstract】 The evolution of three-dimensional wearable display technology, from early two-dimensional images to the current stereoscopic vision, reflects the deep integration of medical engineering. By performing high-precision video capture of the surgical area, 3D head-mounted devices simulate human binocular disparity to acquire stereoscopic images with enhanced depth perception. When instrument separation occurs within the root canal, this technology enables clinicians to more accurately locate the separated instrument, clearly visualize its adaptation to the canal walls, and discern the angulation between the instrument and the curved root canal. Consequently, it significantly improves treatment precision, success rates, and operator comfort. This article reviews the clinical application of 3D head-mounted devices in the removal of separated instruments.

【Key words】 3D head-mounted devices; Depth of field; Separated instrument; Endodontic diagnosis and treatment

DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2025.06.001

一、极致景深提升的三维穿戴显示设备概述

1. 三维穿戴显示技术的发展历程:三维穿戴显示技术的演进,是牙科手术领域中一项革命性的进步。从早期的二维图像到如今的三维立体视觉,这一技术的发展历程不仅体现了科技的飞跃,也映射了医学工程学的深度结合。牙体牙髓病学作为口腔医学的重要分支,长期以来依赖医师的经验与影像进行诊断和治疗。然而,随着三维成像技术、增强现实(augmented reality, AR)、虚拟现实(virtual reality, VR)及可穿戴设备的迅速发展,牙体牙髓诊疗正经历一场深刻的数字化革命。

VR技术通过头戴式VR设备的可穿戴屏幕,将用户沉浸于合成的三维环境之中。与其紧密相关的AR技术,则融合了VR元素,通过电子设备屏幕

实时投射视频,将虚拟场景叠加到真实环境中^[1]。近年来,随着技术的进步,VR和AR系统不仅实现了便携化、逼真化和实时交互优化,更在感官体验层面拓展出嗅觉维度^[2]。值得关注的是,头戴式设备正变得越来越亲民,个性化VR和AR产品已问世多年,并持续进行着优化升级。VR与AR具有高度灵活性,其系统配置和内容形式多样,既有沉浸式动态交互体验,也有静态非沉浸式内容。沉浸感、临场感与交互性是VR/AR的三大核心要素^[3-4]。沉浸感取决于技术形态,可采用头戴设备、凹面投影或三维影像,亦可采用用户作为主角的视频呈现。临场感与交互性则关乎个体感知到与环境的连接程度,以及在环境中行动并接受反馈的能力。

在医疗领域,VR/AR最典型的应用场景当属医学教育与培训,尤其在手术教学方面^[5-7]。通过VR技术进行手术训练时,学员既能在数字模型上模拟操作步骤,又能实时叠加真实患者信息进行可视化教学^[1,5-6]。研究表明,VR技术不仅能有效提升外科医师的操作水平,还能显著降低手术失误率。以传统高难度的神经外科手术为例,VR技术的应用已取得积极成效^[7]。在急性疼痛管理领域,VR被开发为有效的术中分散注意力辅助手段^[8-9]。更有研究指出,该技术在慢性病治疗中具有重要应用价值^[10]。相较于传统疗法,VR和AR技术的应用优势可谓亮点十足:在沉浸式环境中,临床医师无须全程监督即可反复练习基础操作,这不仅能大幅降低培训机构和专业医护人员的培训成本,还能为行动不便的患者提供居家安全使用头戴设备的体验,有效减少医院就诊次数。这些沉浸式体验既美观又易上手,既能降低患者流失率,又能营造更愉悦的治疗环境。从科研角度看,VR技术可辅助建立病程监测数据系统^[11]。在手术培训领域应用VR技术,能显著降低手术失误风险,从而大幅提升患者安全保障水平^[12]。

VR借助头显设备将用户完全沉浸于计算机生成的虚拟环境中。因其隔绝现实的特点,VR特别适用于构建高仿真度的训练场景,例如飞行模拟和工业流程模拟。然而,这种全沉浸体验也可能导致晕动病,且用户对现实环境的感知被阻断,存在一定的安全风险。AR技术将虚拟信息叠加到用户的真实视野中,这种方式在提供信息辅助的同时,保持了用户对周围环境的持续感知,特别适用于工业维修、装配指导等对安全性要求较高的场景^[13]。然而,AR技术仍面临虚拟物体与现实环境间遮挡关系和光照一致性处理的挑战。

混合现实(mixed reality, MR)代表了更高层次的虚实融合技术,通过视频透视等先进方式实现虚拟对象与现实环境之间的无缝融合与交互。虚拟物体不仅可以被嵌入真实空间,还能够与现实物体产生相互遮挡关系,创造出高度逼真的融合体验。这一特性使MR特别适合对沉浸感和交互真实性要求较高的应用领域,如高端培训、复杂手术模拟和精密装配规划等。其中视频透视技术(video see through, VST)及光学透视技术(optical see through, OST)能够实现虚拟场景与实物的无缝融合交互^[14-15]。

现代医疗中的三维可视化技术,除了依赖可穿戴设备(如AR/VR眼镜)实现沉浸式交互外,还包括一类纯虚拟化的三维呈现技术。这类技术以CT、磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)等医学影像的二维序列数据为基础,通过数据预处理、关键区域提取、三维重建与高质量渲染等流程,构建出可多角度观察、交互操作的立体模型。在此过程中,计算机算法和AI技术发挥着关键作用,共同实现了从二维影像到三维结构的精准、高效可视化^[16-17]。三维穿戴显示设备在牙体牙髓诊疗中的应用,标志着口腔医学从传统的“经验依赖”模式向“数据驱动”模式的重大转变。这类设备通常包括AR眼镜、VR头显及专用手术导航头戴装置,它们通过与锥形束CT(cone-beam computed tomography, CBCT)、口内扫描仪及可视化软件集成,构建了一个融合真实与虚拟信息的交互环境。其核心功能是通过多模态感知(视觉、惯性和光学等)获取口腔内部的三维数据,并利用算法优化将深度信息以直观方式传递给操作者,解决传统二维视觉中无法准确描述的问题,从而精准控制器械完成操作,展示如图1。

2. 极致景深技术的原理与优势:1981年,首款商用牙科显微镜问世^[18-19]。在40年的发展历程中,牙髓显微技术已在牙科领域得到广泛应用。根管治疗仍是该技术的主要应用领域^[20-21]。美国根管治疗医师协会(American Association of Endodontists, AAE)在推动住院医师显微镜培训方面发挥了早期且关键的作用。通过他们的努力,牙科认证委员会(Commission on Dental Accreditation, CODA)于1998年成功将显微镜操作标准纳入研究生根管课程的教育要求。2016年,中华口腔医学会牙体牙髓病学专业委员会制定并发布了根管治疗中显微镜应用指南^[22],这对规范国内牙髓治疗中的显微技术实施产生了深远影响。

牙科操作显微镜(dental operative microscope,

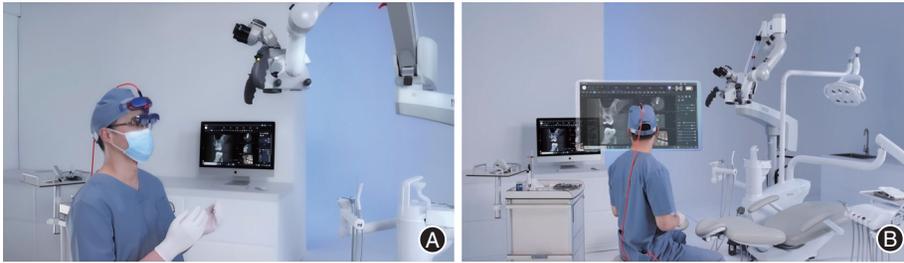


图1 三维头戴设备的使用照片 A:使用者头戴设备,于眼前镜片上呈现镜下直视画面;B:使用者的头部不局限,可以自由活动,包括与助手沟通、查看根管影像及回顾影像图片等一系列操作。

DOM)的放大倍率通常为3~30倍,部分型号甚至能达到更高放大倍率。一般而言,3~8倍的放大倍率属于低倍率范围,其特点是高光强、宽广的视野和较大的景深,适合观察整个牙齿、龋洞及操作区域。9~16倍的放大倍率属于中倍率范围,提供适中的视野范围、景深和亮度,适用于大多数临床操作。超过16倍的放大倍率则属于高倍率范畴,视野范围变窄且景深减小。由于DOM的有效光圈显著受限,入射光线量大幅减少,因此需要充足的照明条件。正因如此,DOM受限于体位、光照条件及其他条件影响,尤其是对于根尖部高倍率的观察,存在图像对焦困难、分辨率不高和景深感不高等问题。

三维头戴设备通过1个带机械臂的主设备上的双电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)摄像头,对手术区域进行高精度的视频采集,模拟人眼的双目视差,获取具有深度信息的立体图像。随后,这些实时3D视频信号被无线传输到医师佩戴的头戴式显示终端上,将清晰、放大的手术画面直接投射到医师眼前。其核心优势与价值如下:

(1)解放医师,告别颈椎病:传统显微镜要求医师必须将眼睛紧贴目镜并长时间保持固定姿势,极易导致颈椎和脊柱劳损。这项技术将医师的头部彻底解放,可以自由转动和调整姿势,从根本上避免了因职业特性引发的颈部疾病。

(2)提升手术灵活性与自由度:医师不再被“绑”在显微镜上,头部可以随意转动而不影响视野,在进行复杂或长时间的手术时,身体姿态更自然,减少了疲劳感,从而可能提升手术的稳定性和精度。

(3)沉浸式3D视觉体验:为医师提供具有真实景深感的立体视野,相比传统双目镜观察,视觉更舒适,对组织层次和空间关系的判断也更为直观。

(4)教学与协作潜力:系统下方的多个头戴式终端示意了该技术具备多用户能力。这意味着手术过程可以实时共享给多位学生或协作医师,为教学、培训和会

诊提供了极大的便利,无需多人轮流观看目镜(图2)。

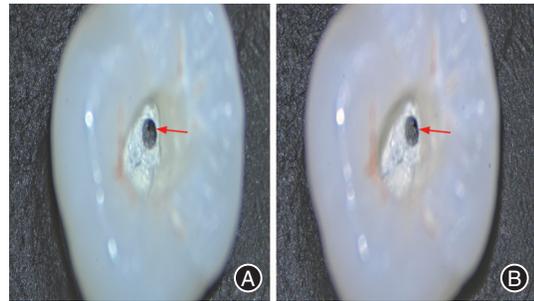


图2 常规显微镜和头戴式显微镜镜下观察分离器械的直视图 A:头戴式显微镜镜下观察分离器械的直视图,红色箭头所示为分离器械,景深感强,清晰可见与根管一侧贴合且存在一定间隙;B:常规显微镜镜下观察分离器械的直视图,红色箭头所示为分离器械,景深感弱,只能直视分离器械断面。

总结来说,这项头戴式3D手术显微镜技术是一项极具创新性的人性化工程设计。它通过先进的穿戴式显示和3D成像技术,该技术通过先进的光学系统和图像处理算法,实现了在三维空间中对目标区域的深度感知,从而提供了一个清晰、连续的视觉体验。例如,在处理根尖区分离器械取出的复杂手术时,传统方法往往受限于二维视野的局限,导致手术精确度不足和手术时间的延长。而极致景深技术的应用,使得医师能够获得比传统显微镜更深的景深,同时保持高分辨率的图像质量。

二、根尖区分离器械取出的挑战

1. 根尖区解剖复杂及预备难度大:根管治疗中的弯曲和钙化会增加操作事故风险。无法实现根尖1/3处的通畅,导致牙本质移位的不对称清除,根管弯曲轨迹内的穿孔及器械断裂等问题,都可能危及根管感染的处理并造成不良治疗效果。事实上,弯曲和狭窄的根管具有极高的复杂性。

根管可能在不同平面上存在弯曲,并且其直径会受生理性增龄变化、继发性牙本质形成及钙化的影响。此外,对钙化且弯曲的根管进行器械操作会引入扭转力和弯曲力,这将导致受力不均,可能造

成根管偏移、台阶、根尖穿孔或器械分离^[23]。尽管这些并非治疗失败的直接原因,但它们会影响治疗的预后,降低消除根管感染的能力^[24]。

研究显示,使用不锈钢器械预备弯曲根管可能形成沙漏状,导致呈“肘状”或“泪滴状”的根尖孔,这被定义为拉链效应^[25]。这种椭圆形/泪滴状的根尖孔也被描述为根尖孔偏移。器械操作过程中的偏移被定义为不对称的牙本质去除,这是由于器械在弯曲轨迹内工作时倾向于恢复其原有的直线形态^[26]。此外,在测试时发现,相比在较大根管中产生的扭矩,狭窄根管中预期的扭矩和器械嵌入程度更高^[27]。在钙化和弯曲根管的器械操作过程中,所施加的扭转和弯曲应力增加可能导致器械断裂;扭转断裂的发生频率稍高^[28]。

以往预备狭窄和弯曲根管的策略包括减小预备器械的尺寸^[29]。这种减小预备尺寸和锥度的趋势有益于2个方面:(1)较小的预备量意味着对根管壁的牙本质去除更少,发生操作意外的风险更低;(2)较小尺寸和锥度的锉刀金属质量更低,并且恢复其原有直线形态的倾向更低,从而减少了扩大过程中发生偏移的可能性^[30]。尽管弯曲和根管狭窄的问题似乎通过较小的器械直径得以解决,但较小的器械若在狭窄根管中被卡住,则更容易发生扭转断裂^[31]。

镍钛器械在预备弯曲根管时,其折断风险与根管曲率密切相关:弯曲角度越大、曲率半径越小,器械折断的发生率越高^[32]。Zelada等^[33]和Martín等^[34]在弯曲度超过30°的离体磨牙中进行根管预备时,镍钛器械表现出更高的折断率。因此,临床操作前应借助影像学检查及手动器械探查,充分评估根管弯曲程度。遇较大弯曲度根管时,术者须提高警惕,并在预备过程中始终保持谨慎操作。

根尖区解剖结构的复杂性是牙科手术中的一大挑战,尤其是在进行根尖器械取出时。根尖区是牙齿根部的末端区域,包含着复杂的根管系统,其内部结构错综复杂,常常有多个根管分支和弯曲,这些结构的直径可能只有几毫米甚至更小。三维穿戴显示技术的应用,通过提供极致景深的视觉效果,使得医师能够清晰地识别和操作这些微小的解剖结构。这种技术不仅提高了手术的精确度,还减少了对周围健康组织的损伤风险。

2. 三维穿戴显示设备在根管治疗中的优势:无论是超声取出法、套筒套索取出法、编织法、激光取出法及其他取出方案,在对牙齿和根管内的器械进

行彻底评估后,取出器械的第一步是建立到分离器械断端的直线路径^[35]。

建立通往根尖桩冠端的直线路径是分离器械取出多种技术的关键第一步^[36-37]。初始阶段需通过放射检查、牙科手术显微镜放大观察和(或)根管内窥镜对根尖桩进行精确定位。这种全面评估能提供器械在根管内位置、方向及深度的详细信息。确认位置后,应使用橡皮障隔离操作区域,确保无菌环境并提高视野清晰度。

(1)核心技术原理:三维头戴设备通过2个高清摄像头模拟人眼间距同步采集图像,经处理合成后投射到头戴显示器中,为每只眼睛提供略有差异的图像,从而在大脑中形成具有深度感、层次感和极强立体感的影像。某些系统(如博恩登特的“透视之眼”技术)还能将CBCT等三维影像精准锚定于患者真实口腔结构中,并实时同步呈现在显微镜视野内,实现了虚拟影像与真实环境的融合。

(2)根管治疗中的核心应用场景:三维头戴设备尤其适用于以下复杂情况。①疑难根管定位:在处理钙化根管、寻找遗漏根管(如上颌磨牙MB2根管)时,其三维立体视野和增强现实叠加能力能帮助医师更精准地定位和辨识,提高治疗完整性。②根管再治疗:对于因初次治疗不彻底而失败需进行再治疗的病例,头戴式3D显微镜能帮助医师更清晰地辨别旧充填材料、粘接剂残留及根管内的细微结构,从而更彻底地清理感染源。③微创穿孔修补:若根管壁出现穿孔,头戴式3D显微镜能提供清晰的穿孔位置、大小及形态的立体信息,有助于医师进行精准的修补(如使用MTA材料),提高修补成功率。④取出分离器械:当根管内的器械发生分离时,在三维立体视野的引导下,医师可以更精确定位分离器械位置、清晰直视分离器械与根管壁嵌合的紧密程度(方便后续引导增隙及振出分离器械)、分离器械与弯曲根管之间的角度及分离器械的种类(景深提升后能清晰可见分离器械的螺纹及锥度,方便制定治疗方案),并采用超声等器械建立安全通道,尝试取出分离器械或进行旁路预备,同时减少对健康牙体组织的损伤。

头戴式3D手术显微镜通过提供沉浸式的三维立体视野、增强现实的信息叠加及符合人体工学的操作方式,正在逐步改变根管治疗的传统模式。它尤其适用于复杂疑难根管病例的处理,能显著提升治疗的精准性、成功率和医师舒适度,代表了牙科显微技术的一个重要发展方向。

三、三维穿戴显示设备在根尖区分离器械取出中的应用

以分离器械取出为例,传统方法往往受限于视野的局限性,导致手术时间延长和成功率下降。然而,三维穿戴显示技术通过提供极致的景深,使得手术视野的清晰度和深度得到前所未有的提升。这种技术的应用,不仅减少了患者的不适和恢复时间,还为医师提供了更为直观的解剖结构视图,从而在根尖区分离器械取出过程中,能够更精确地定位和操

作。三维穿戴显示设备正是在这样的理念下,通过技术革新,为牙科手术带来了革命性的变化。极致景深技术在提高手术精确度中的实操案例如下。

根尖区分离器械取出病例1 牙位:左上第一恒磨牙(远颊根根尖分离器械);分离器械:1段镍钛器械,且毗邻底穿孔。分离器械取出过程详见图3。

根尖区分离器械取出病例2 牙位:右下第一恒磨牙(近颊根根尖分离器械);分离器械:2段镍钛器械。分离器械取出过程详见图4。

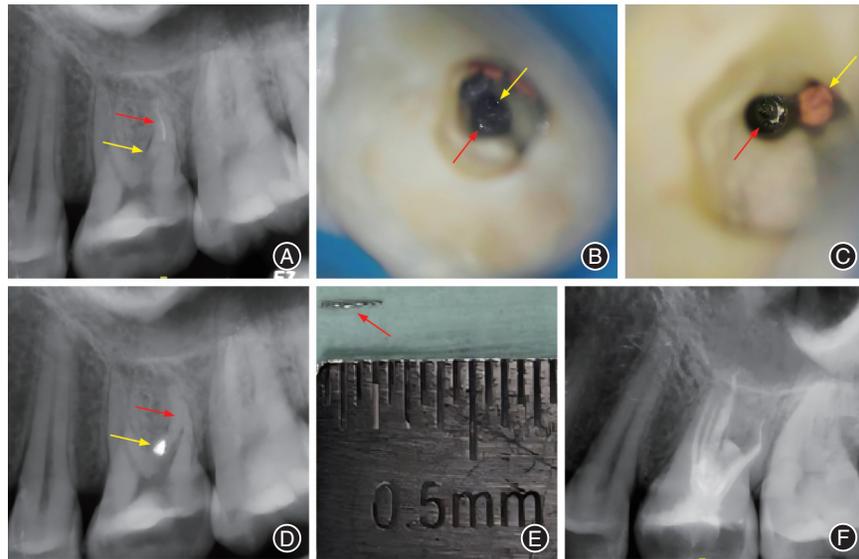


图3 左上第一恒磨牙分离器械取出的影像资料 A:术前X线片示左上第一恒磨牙远颊根根尖存在分离器械(红色箭头所示)和底穿孔(黄色箭头所示);B:术中镜下发现分离器械(红色箭头所示)和底穿孔(黄色箭头所示);C:iRoot BP修复底穿孔并回填部分牙胶覆盖(黄色箭头所示),以便于与分离器械镜下区分,超声ET20敞开冠方通路,暴露分离器械(红色箭头所示);D:ET20震出分离器械即刻X线片,已修复底穿孔并取出分离器械,红色箭头指示为原分离器械所在位置,黄色箭头指示为底穿修补处;E:取出的分离器械(红色箭头所示)经测量约3mm;F:根管充填后拍摄X线片示根充到位。

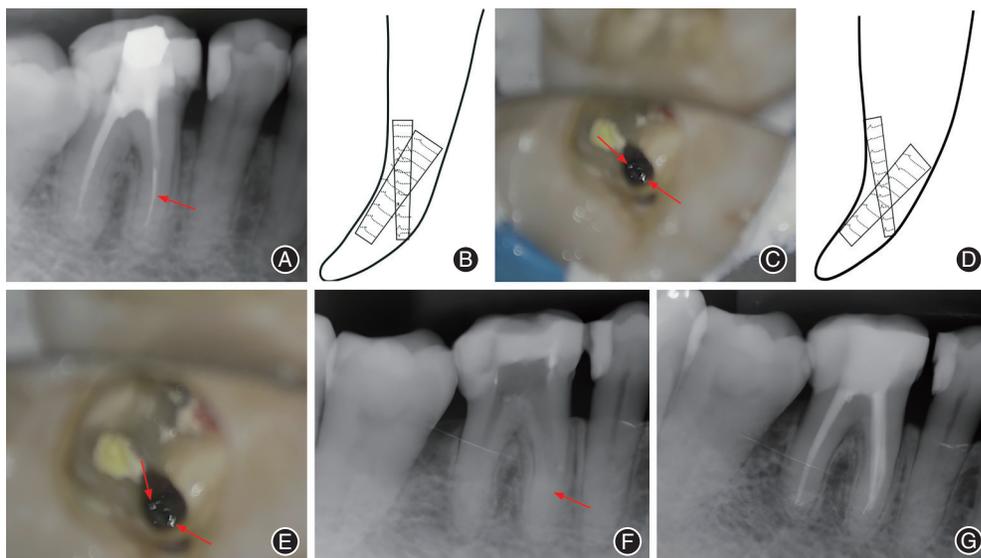


图4 右下第一恒磨牙分离器械取出的影像资料 A:术前X线片示右下第一恒磨牙近颊根根尖存在分离器械(红色箭头所示);B:模拟图,2段分离器械卡持在同一根管内,卡持紧,交叉角度小;C:镜下直视2段分离器械卡持在同一根管内交叉紧密卡持,红色箭头指示为2根分离器械;D:模式图,ET20/25增隙后2段分离器械卡持变松,交叉角度变大;E:镜下直视ET20/25增隙后2段分离器械卡持在同一根管分布松散,便于震出,红色箭头指示为2根分离器械;F:震出分离器械即刻X线片,已无分离器械,红色箭头指示为原分离器械所在位置;G:根管充填后拍摄X线片示根充到位。

根尖区分离器械取出病例3 牙位:左上第二恒磨牙(远颊根分离器械);分离器械:1段镍钛器械。分离器械取出过程详见图5。

根尖区分离器械取出病例4 牙位:左下第一恒磨牙(近颊根与近舌根根尖融合,分离器械位于融合区域);分离器械:1段镍钛器械。分离器械取出过程详见图6。

四、三维穿戴显示设备的未来展望

1. 技术进步对牙科手术的影响与优势:三维穿戴显示设备(如AR智能眼镜、MR头显等)的技术进步,正在为牙科手术带来真正革命性的变化。表1清晰地展示了这些进步带来的核心影响与优势。

关键技术进步与深层影响除了表1中总结的优势,还带来了一些更深层的改变:从“经验依赖”到

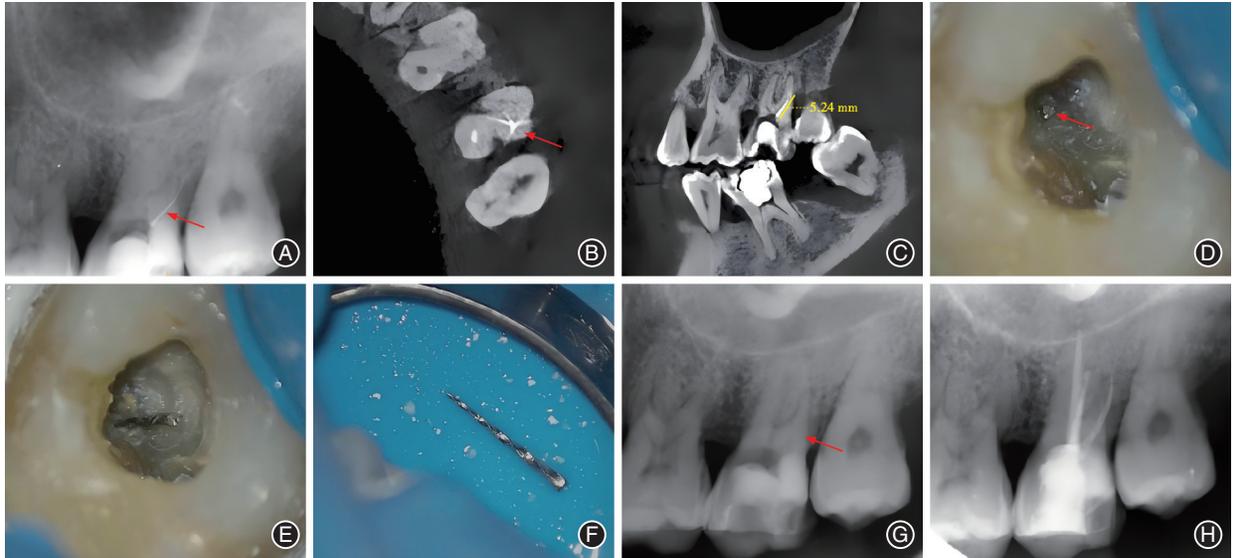


图5 左上第二恒磨牙分离器械取出的影像资料 A:术前X线片示左上第二恒磨牙远颊根存在分离器械(红色箭头所示);B:锥形束CT(CBCT)横截面影像确认,远颊根存在分离器械(红色箭头所示);C:CBCT矢状位影像确认,分离器械长度约为5.24 mm;D:镜下见远颊根的分离器械(红色箭头所示);E:ET25震出分离器械;F:分离器械(镍钛器械)完整取出;G:震出分离器械即刻X线片,已无分离器械(红色箭头所示);H:根管充填后拍摄X线片示根充到位。

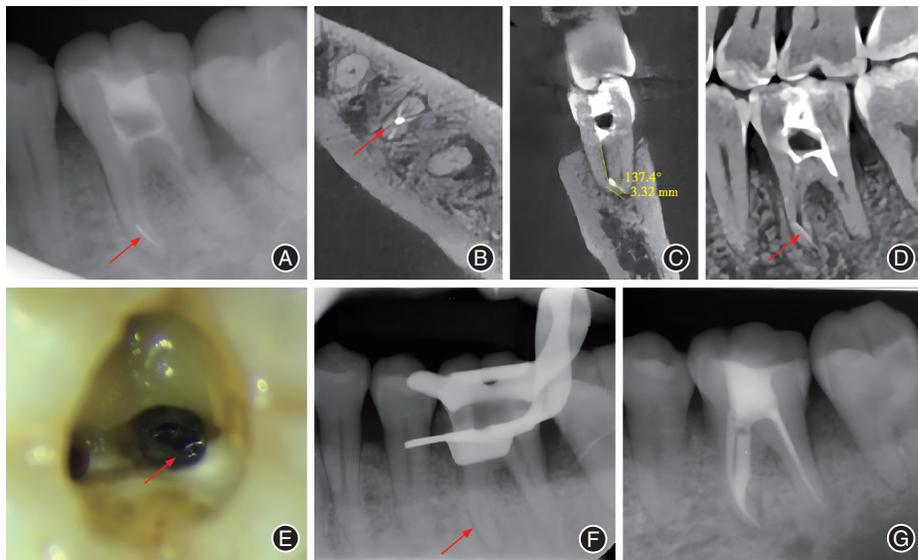


图6 左下第一恒磨牙分离器械取出的影像资料 A:术前X线片示左下第一恒磨牙近中根存在分离器械(红色箭头所示);B:锥形束CT(CBCT)横截面影像确认,近颊根与近舌根根尖区融合,分离器械位于融合区域(红色箭头所示);C:CBCT冠状位影像确认,分离器械长度约为3.32 mm,分离器械与上段根管夹角为137.4°;D:CBCT矢状位影像确认,分离器械位于近中根根尖,且出根尖孔(红色箭头所示);E:ET20/25增隙后镜下斜向卡持在根尖融合区的分离器械(红色箭头所示);F:震出分离器械即刻X线片,已无分离器械(红色箭头所示);G:根管充填后拍摄X线片示根充到位。

表1 三维穿戴设备的核心优势及具体表现

| 影响维度 | 技术进步体现 | 带来的核心优势 |
|------------|------------------------------------|---|
| 视觉体验与手术精准度 | 高分辨率微型显示(Si-OLED)、3D深感摄像头、低延迟渲染算法 | 提供沉浸式三维立体视野,实现实时手术导航,将虚拟模型与患者解剖结构精准叠加,提升操作精度。 |
| 操作效率与流程优化 | 集成脚踏板控制、语音指令、与锥形束CT(CBCT)等影像数据无缝对接 | 缩短手术时间,医师无需频繁转头查看屏幕,双手可专注操作,治疗流程更流畅。 |
| 医师工效与舒适度 | 设备轻量化(如119 g)、符合人体工学的设计、无线便携 | 解放颈椎,实现“抬头操作”,大幅减轻因长时间低头导致的颈、腰椎疲劳,符合人体工学。 |
| 远程协作与临床教学 | 5G远程传输、实时画面共享与标注功能 | 支持远程专家指导和多视角同步教学,打破地域限制,提升基层医疗水平与团队协作效率。 |

“数据驱动”,传统手术很大程度上依赖医师的经验和空间想象力。而现在,借助三维穿戴设备,医师可以直接“看到”基于患者真实CBCT数据重建的牙根、神经管囊肿的立体模型,并叠加在手术视野中。这使得处理弯曲根管、钙化根管等高难度病例时,决策更精准,风险更低。

医患沟通的范式转变:这些设备还能用于患者教育。医师可以将三维模型展示给患者,直观解释病情和治疗方案。这种可视化的沟通方式极大地提升了患者的知情权和参与感,有助于建立更和谐的医患关系^[38-39]。

在实际的牙科手术中,这些优势体现在多个关键临床应用场景。(1)复杂根管治疗及分离器械取出:在预备弯曲、狭窄或钙化的根管时,设备提供的立体导航能有效避免根管偏移、侧穿等并发症,提高治疗成功率。当根管内的器械发生分离时,在三维立体视野的引导下,医师可以更精确定位分离器械位置、清晰直视分离器械与根管壁嵌合的紧密程度。(2)显微手术:在牙髓显微外科手术中,如根尖切除术或囊肿摘除术,高倍放大的三维视野能帮助医师清晰辨别病变组织与健康组织的边界,实现更彻底的清创。(3)种植手术:在种植牙手术中,虚拟的种植体位置和深度

信息可以实时投射到手术区域,指导医师进行精准的窝洞预备,确保种植体植入到最理想的位置^[16,40]。

截至目前,针对25例根管内分离器械取出病例的回顾性分析显示,在三维头戴设备辅助下,术中对分离器械取出时间较传统显微镜下缩短了约25%(从60 min降至45 min)。术后通过CBCT测量器械取出通道的最大偏移量被控制在1.5 mm以内,精准度提升超过30%。此外,通过视觉模拟评分(visual analog scales, VAS)量表调查,医师反馈其颈腰椎不适感平均得分从传统姿势下的7.5分降至3.0分,表明设备在提升医师舒适度方面作用显著。

总而言之,三维穿戴显示设备通过其卓越的立体视觉、智能的交互方式和人性化的设计,正在将牙科手术从一项主要依赖医师手感和个人经验的“手艺”,转变为一个数据可视化、操作精准化和流程智能化的现代医疗流程。这不仅提升了手术的安全性和效果,也改善了医师的执业环境,最终让患者受益。

2. 三维穿戴显示设备在牙体牙髓应用中的局限性及潜在风险:三维穿戴显示设备(如AR智能眼镜、VR头显等)在牙体牙髓领域展现出巨大潜力的同时,其应用也面临着多方面的局限性及潜在风险(表2)。

表2 三维穿戴显示设备在牙体牙髓治疗中的局限性及具体表现

| 挑战维度 | 核心问题 | 具体表现与影响 |
|---------|-----------------|---|
| 技术成熟度 | 图像精度与真实感不足 | 显示分辨率、色彩保真度、景深感知与高端显微镜存在差距;双目视差可能导致视觉疲劳和误判。全息三维显示技术则受限于调制器件的空间带宽积,导致显示分辨率和系统视差角不足,且数据传输量大、对处理器性能要求极高。 |
| 临床适用性 | 复杂口腔环境下的精准性与可靠性 | 对早期微小龋洞、牙神经发炎等细微病变的特异性信号捕捉能力有限,易漏诊。对牙齿只剩牙根等复杂状况的形态、内部炎症难以精准监测。口腔内饮食、饮水等活动会干扰监测数据的准确性。 |
| 数据安全与隐私 | 患者健康数据泄露与滥用风险 | 设备持续收集敏感个人健康数据,存在未经授权访问和数据泄露的风险。无线连接(蓝牙、Wi-Fi)可能被攻击者利用,窃取数据或植入恶意软件。必须符合HIPAA、通用数据保护条例(GDPR)等数据法规,否则将面临合规风险。 |
| 人机工程学 | 设备舒适度与操作流畅性 | 设备重量、散热问题可能影响医师长时间佩戴的舒适性,进而影响手术专注度。语音控制或手势交互在紧张的手术环境中可能响应延迟或误触发,干扰手术流程。 |

基于上述局限性,其潜在风险主要体现在两方面:一是可能因图像失真、数据延迟或误读导致临床决策失误;二是患者健康信息面临安全与隐私泄露。展望未来,克服这些挑战需要跨学科合作。技术进步是关键,包括开发更高分辨率的微型显示芯片、更精准的传感器和低延迟算法。在数据安全方面,需在整个设备生命周期内实施强加密、严格访问控制等安全设计(Security by Design)理念。同时,建立针对牙科应用的行业标准、临床验证规范和完善的医师培训体系也至关重要。总而言之,三维穿戴显示设备在牙体牙髓领域的应用尚处于发展与完善阶段。尽管它在可视化、远程协作等方面优势显著,但我们必须清醒地认识到其在技术精度、临床可靠性、数据安全和人机适配等方面存在的局限与风险。未来的发展依赖于持续的技术创新、严格的法规监管和深入的临床实践验证。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] Khaddad A, Bernhard JC, Margue G, et al. A survey of augmented reality methods to guide minimally invasive partial nephrectomy [J]. *World J Urol*, 2023, 41 (2) : 335-343. DOI: 10.1007/s00345-022-04078-0.
- [2] Smith LC, Vernal DL, Mariegaard LS, et al. Immersive virtual reality - assisted therapy targeting persistent auditory verbal hallucinations in patients diagnosed with schizophrenia spectrum disorders in Denmark: The Challenge assessor - masked, randomised clinical trial [J]. *Lancet Psychiatry*, 2025, 12 (8) : 557-567. DOI:10.1016/S2215-0366(25)00161-0.
- [3] Bruno RR, Wolff G, Wernly B, et al. Virtual and augmented reality in critical care medicine: The patient's, clinician's, and researcher's perspective [J]. *Crit Care*, 2022, 26 (1) : 326. DOI: 10.1186/s13054-022-04202-x.
- [4] Laver KE, Lange B, George S, et al. Virtual reality for stroke rehabilitation [J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2025, 6 (6) : CD008349. DOI:10.1002/14651858.CD008349.pub5.
- [5] Aurello P, Pace M, Goglia M, et al. Enhancing surgical education through artificial intelligence in the era of digital surgery [J]. *Am Surg*, 2025, 91 (11) : 1942-1948. DOI: 10.1177/00031348251346539.
- [6] McKnight RR, Pean CA, Buck JS, et al. Virtual reality and augmented reality - translating surgical training into surgical technique [J]. *Curr Rev Musculoskelet Med*, 2020, 13 (6) : 663-674. DOI:10.1007/s12178-020-09667-3.
- [7] Fiani B, de Stefano F, Kondilis A, et al. Virtual reality in neurosurgery: "Can you see it?" —A review of the current applications and future potential [J]. *World Neurosurg*, 2020, 141 : 291-298. DOI:10.1016/j.wneu.2020.06.066.
- [8] Chuan A, Zhou JJ, Hou RM, et al. Virtual reality for acute and chronic pain management in adult patients: A narrative review [J]. *Anaesthesia*, 2021, 76 (5) : 695-704. DOI: 10.1111/anae.15202.
- [9] Spiegel BM. Virtual medicine: How virtual reality is easing pain, calming nerves and improving health [J]. *Med J Aust*, 2018, 209 (6) : 245-247. DOI:10.5694/mja17.00540.
- [10] Wang L, Chen JL, Wong AMK, et al. Game-based virtual reality system for upper limb rehabilitation after stroke in a clinical environment: Systematic review and Meta - analysis [J]. *Games Health J*, 2022, 11 (5) : 277-297. DOI:10.1089/g4h.2022.0086.
- [11] Tieri G, Morone G, Paolucci S, et al. Virtual reality in cognitive and motor rehabilitation: Facts, fiction and fallacies [J]. *Expert Rev Med Devices*, 2018, 15 (2) : 107-117. DOI: 10.1080/17434440.2018.1425613.
- [12] 刘留, 赵千, 徐璐璐. 虚拟现实技术在口腔医学中的应用与展望 [J]. *口腔颌面修复学杂志*, 2023, 24 (6) : 433-438. DOI: 10.19748/j.cn.kqxf.1009-3761.2023.6.007.
- [13] Sun Q, Mai Y, Yang R, et al. Fast and accurate online calibration of optical see-through head-mounted display for AR-based surgical navigation using Microsoft HoloLens [J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2020, 15 (11) : 1907-1919. DOI: 10.1007/s11548-020-02246-4.
- [14] Liu H. Simulation-based insect-inspired flight systems [J]. *Curr Opin Insect Sci*, 2020, 42 : 105-109. DOI: 10.1016/j.cois.2020.10.001.
- [15] Lang M, Ghandour S, Rikard B, et al. Medical extended reality for radiology education and training [J]. *J Am Coll Radiol*, 2024, 21 (10) : 1583-1594. DOI:10.1016/j.jacr.2024.05.006.
- [16] Liu J, Liu Y, Wang J, et al. Dental measurements based on a three-dimensional digital technique: A comparative study on reliability and validity [J]. *Arch Oral Biol*, 2021, 124 : 105059. DOI:10.1016/j.archoralbio.2021.105059.
- [17] 袁崑峰, 肖桃. 数字化三维重建模型在口腔医学中的应用 [J]. *电子技术*, 2024, 53 (10) : 98-99. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0755.2024.10.040.
- [18] Apotheker H, Jako GJ. A microscope for use in dentistry [J]. *J Microsurg*, 1981, 3 (1) : 7-10. DOI:10.1002/micr.1920030104.
- [19] Selden HS. The dental - operating microscope and its slow acceptance [J]. *J Endod*, 2002, 28 (3) : 206-207. DOI: 10.1097/00004770-200203000-00015.
- [20] Kersten DD, Mines P, Sweet M. Use of the microscope in endodontics: Results of a questionnaire [J]. *J Endod*, 2008, 34 (7) : 804-807. DOI:10.1016/j.joen.2008.04.002.
- [21] Yu H, Zhao Y, Li J, et al. Minimal invasive microscopic tooth preparation in esthetic restoration: A specialist consensus [J]. *Int J Oral Sci*, 2019, 11 (3) : 31. DOI: 10.1038/s41368-019-0057-y.
- [22] 中华口腔医学会牙体牙髓病学专业委员会, 凌均荣, 韦曦, 等. 显微根管治疗技术指南 [J]. *中华口腔医学杂志*, 2016, 51 (8) : 465-467. DOI:10.3760/cma.j.issn.1002-0098.2016.08.005.
- [23] Duncan HF, Kirkevang LL, Peters OA, et al. Treatment of pulpal

- and apical disease: The European Society of Endodontology (ESE) S3 - level clinical practice guideline [J]. *Int Endod J*, 2023, 56(Suppl 3):238-295. DOI:10.1111/iej.13974.
- [24] Sobieszcański J, Mertowski S, Sarna-Boś K, et al. Root canal infection and its impact on the oral cavity microenvironment in the context of immune system disorders in selected diseases: A narrative review [J]. *J Clin Med*, 2023, 12 (12) : 4102. DOI: 10.3390/jcm12124102.
- [25] Ubaed HR, Bakr DK. Cyclic fatigue resistance of nickel-titanium rotary instruments after simulated clinical use [J]. *Appl Bionics Biomech*, 2022, 2022:1716008. DOI:10.1155/2022/1716008.
- [26] Pinto JC, de Faria - Vasconcelos K, Leite AF, et al. Effect of foraminal enlargement on microcrack formation and apical transportation; A nano-CT assessment [J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1) : 4881. DOI: 10.1038/s41598-023-31595-8.
- [27] Sattapan B, Nervo GJ, Palamara JE, et al. Defects in rotary nickel-titanium files after clinical use [J]. *J Endod*, 2000, 26(3) : 161-165. DOI: 10.1097/00004770-200003000-00008.
- [28] Sattapan B, Palamara JE, Messer HH. Torque during canal instrumentation using rotary nickel-titanium files [J]. *J Endod*, 2000, 26 (3) : 156 - 160. DOI: 10.1097/00004770 - 200003000 - 00007.
- [29] Biggs JT, Benenati FW, Powell SE, et al. Endodontics: Errors in instrumentation [J]. *J Okla Dent Assoc*, 1990, 81(2) : 24-28.
- [30] Roane JB. Balanced force and rotary shaping [J]. *Compend Contin Educ Dent*, 2005, 26(9 Suppl 2) : 12-18.
- [31] Orozco-Ocampo YM, Escobar-Rincón D, Jiménez-García FN, et al. Factors influencing NiTi endodontic file separation: A thematic review [J]. *Dent Med Probl*, 2024, 61 (2) : 269 - 278. DOI:10.17219/dmp/156805.
- [32] 陈露, 陈造, 吴补领. 根管弯曲参数对镍钛根管器械应力分布影响的有限元研究 [J]. *中华老年口腔医学杂志*, 2014, 12(5) : 273-276. DOI:10.3969/j.issn.1672-2973.2014.05.005.
- [33] Zelada G, Varela P, Martín B, et al. The effect of rotational speed and the curvature of root canals on the breakage of rotary endodontic instruments [J]. *J Endod*, 2002, 28 (7) : 540 - 542. DOI:10.1097/00004770-200207000-00014.
- [34] Martín B, Zelada G, Varela P, et al. Factors influencing the fracture of nickel-titanium rotary instruments [J]. *Int Endod J*, 2003, 36(4) : 262-266. DOI:10.1046/j.1365-2591.2003.00630.x.
- [35] Terauchi Y. Separated file removal [J]. *Dent Today*, 2012, 31 (5) : 108, 110-113.
- [36] Cujé J, Bargholz C, Hülsmann M. The outcome of retained instrument removal in a specialist practice [J]. *Int Endod J*, 2010, 43(7) : 545-554. DOI: 10.1111/j.1365-2591.2009.01652.x.
- [37] Lin LM, Rosenberg PA, Lin J. Do procedural errors cause endodontic treatment failure? [J]. *J Am Dent Assoc*, 2005, 136 (2) : 187-193. DOI:10.14219/jada.archive.2005.0140.
- [38] Mai HN, Dam VV, Lee DH. Accuracy of augmented reality-assisted navigation in dental implant surgery: Systematic review and Meta-analysis [J]. *J Med Internet Res*, 2023, 25: e42040. DOI:10.2196/42040.
- [39] Grad P, Przeklasa - Bierowiec AM, Malinowski KP, et al. Application of HoloLens - based augmented reality and three-dimensional printed anatomical tooth reference models in dental education [J]. *Anat Sci Educ*, 2023, 16(4) : 743-755. DOI: 10.1002/ase.2241.
- [40] Sadilina S, Strauss FJ, Jung RE, et al. Use of optical see-through head-mounted display (OST-HMD) in dentistry: A scoping review [J]. *Int J Comput Dent*, 2025, 28(2) : 101-116. DOI:10.3290/j.ijcd.b5394865.

(收稿日期:2025-10-26)

(本文编辑:王嫚)