

·特约综述·

虚拟现实技术在脊柱外科的应用

李春海^{1,2}

(1. 中山大学附属孙逸仙纪念医院骨外科; 2. 中山大学附属孙逸仙纪念医院外科教研室, 广东 广州 510120)



作者简介:李春海, 主任医师、硕士生导师、中山大学孙逸仙纪念医院外科教研室主任、脊柱外科专科副主任。国际矫形与创伤外科学会(SICOT)中国部脊柱外科学会委员、中华医学会骨科微创学组委员、中国医师协会脊柱内镜学组委员、广东省康复医学会骨质疏松与相关疾病分会主任委员; 广东省医学会脊柱外科学分会副主任委员、互联网智能脊柱学组组长。从事外科临床及教育一线工作达30年, 在颈肩腰腿痛及骨质疏松症等骨科疾病的微创治疗领域有较深的造诣, 具备丰富的临床实践及医学教育经验。主持国家大学生教学项目2项、广东省、中山大学教学改革课题12项。创建虚拟现实实验室及技能培训室, 教学成果丰硕, 2019年荣获广东省教育教学成果一等奖; 四度远赴新疆喀地一院教学帮扶, 2020年荣获喀地一院年度表彰; 2021年荣获“南粤优秀教师”称号。E-mail: chunhaili@163.com

摘要:随着脊柱外科手术技术发展, 手术操作的精准化、手术过程的微创化和手术方案的个性化已成为脊柱外科未来发展的热点方向。如何通过最小的创伤获得最大的手术疗效, 如何减少术中患者承受的射线辐射量, 以及如何在保持手术效果的前提下缩短手术时长, 都是我们当前需要思考的问题。目前, 虚拟现实(virtual reality, VR)技术作为脊柱外科领域的研究热点, 在操作培训、理论教学、术中辅助, 以及术后康复各个环节都显示出极大优势。然而目前VR技术在脊柱外科的应用仍处于探索阶段, 本文尝试对VR技术在脊柱外科手术中辅助、疼痛治疗以及手术模拟培训等方面的应用进行综述, 总结其应用现状, 探讨未来的发展方向, 为促进医工融合发展提供新思路。

关键词:虚拟现实技术; 模拟培训; 术中辅助; 疼痛治疗

中图分类号: R68

文献标志码: A

文章编号: 1672-3554(2022)01-0035-08

DOI: 10.13471/j.cnki.j.sun.yat-sen.univ(med.sci).2022.0105

Application of Virtual Reality Technology in Spinal Surgery

LI Chun-hai^{1,2}

(1. Department of Orthopaedics, Sun Yat-sen Memorial Hospital, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510120, China;

2. Teaching and Research Bureau of Surgery, Sun Yat-sen Memorial Hospital, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510120, China)

Correspondence to: LI Chun-hai; E-mail: chunhaili@163.com

Abstract: With the development of spinal surgery technology, improving the accuracy of surgery, minimizing the trauma of surgery, and individualization of surgical plans have become the hot spot for the future development of spinal surgery. How to obtain the maximum surgical effect with the smallest trauma, how to reduce the amount of radiation that the patient bears during the operation, and how to shorten the operation time while maintaining the effect of the operation are issues that require further attention. Currently, as a research hotspot in the field of spinal surgery, virtual reality technology

收稿日期: 2021-09-28

基金项目: 广州市科技计划项目(202102010259)

gy becomes more and more relevant. It has shown its advantages in various aspects such as training of operation technique, teaching of theoretical knowledge, intraoperative assistance, and postoperative rehabilitation. However, the current application of virtual reality technology in spinal surgery is still in its infancy. This article attempts to review the application of virtual reality technology in spinal surgery simulation training, intraoperative assistance, and pain treatment, summarizes application status, and discuss the future of its development, providing insights to promote the integration of the medical practice and engineering technology.

Key words: virtual reality technology; simulation training; intraoperative assistance; pain treatment

[J SUN Yat-sen Univ (Med Sci), 2022, 43(1): 35-42]

近年来,虚拟现实技术作为一项新兴技术,与脊柱外科的结合逐渐紧密。虚拟现实技术指运用现实中的数据通过计算机创造生成一个三维仿真的虚拟环境,再将其产生的电子信号与各种输出设备结合,使其转化为能够让使用者通过听觉、视觉及触觉等感官感受到的技术,包括虚拟现实(virtual Reality, VR)、增强现实(augmented Reality, AR)、混合现实技术(mixed Reality, MR)。VR指完全虚拟的模拟过程;AR指通过虚拟组件将影像与真实世界叠加、增强;MR是虚拟现实和现实世界的结合,构建的一个物理与数字对象共存的可视化实时交互环境。本文主要对近10年来虚拟现实技术在脊柱外科等方面的应用进行综述,包括模拟培训、术前规划和术中辅助、疼痛治疗和康复训练等,以阐述目前虚拟现实技术在脊柱外科的应用现状及探讨未来可能的发展方向。

1 虚拟现实技术在脊柱外科手术辅助的应用

一项纳入38篇有关虚拟现实技术与脊柱外科手术结合的meta分析强烈推荐使用虚拟现实技术对术前患者的状况进行全面的评估,包括患者手术部位定位、病情变化和具体的手术计划^[1]。目前最先进的AR和MR设备已经能够在实际手术过程中使用。以HoloLens为代表的虚拟现实技术的配套硬件能够让穿戴者感到轻便舒适的同时完成识别解剖部位、辅助术中规划、跟踪显示植入物实时位置的工作。部分设备上显示的信息量可以由操作者实时控制,并允许外科医生根据个人习惯与术中情况个性化设计显示界面。为了方便术中操作,大部分设备能够响应语音与手势命令。目前有关虚拟现实技术临床应用的研究中,很少有长期使用这

些设备引起不适的相关报道^[2]。随着技术的进步以及图像质量的逐渐提高,佩戴者出现眩晕感的情况会越来越来少^[3]。同时,电池续航时间和视频流的稳定性也随着设备不断地更新换代得到了改善,能满足大部分复杂外科手术的操作需要。虚拟现实技术结合了数字图像和术前计划相关信息,使外科医生在不接触电离辐射的情况下对患者手术部位的解剖情况有一个清晰的了解,即术中与被遮挡或通常难以充分暴露的解剖结构得到可视化。同时,借助来自CT或MRI的术前成像数据,医生能够以投影的形式在患者体表显示切口或钻孔点的位置。与传统的计算机辅助手术(computer-assisted surgery, CAS)系统相比,VR技术可以为外科医生提供更精确的辅助导航并降低设备的使用成本。

1.1 VR在脊柱外科的应用

目前VR在脊柱外科手术相关应用主要集中在术前规划方面。Archavlis等^[4]将VR术前规划应用到了他们发明的改良经椎弓根椎体切除术中。使用三维重建软件对CT脊柱体积分数据进行编辑和可视化,以显示髓鞘、肺和大血管等关键结构,方便进行软组织或骨切除,并实现在患者的虚拟解剖模型中模拟手术入路与定位植入物,起到了不错的效果。Zawy等^[5]对73名因颈椎椎间孔狭窄而进行手术的患者的临床资料进行收集,将CT图像进行重建,然后通过问卷调查评价VR对手术计划和策略的影响。发现VR能有效辅助制定颈椎孔狭窄患者的手术策略,并能够辅助评估术后效果。姚欣强等^[6]对6例脊柱畸形的患者应用VR平台进行术前规划,在VR虚拟模型上利用截骨工具进行虚拟截骨并自动生成截骨后模型、挑选最合适的截骨方案。对比传统方法完成手术的6例患者,VR组的手术时间、出血量均有明显减少。

本课题组目前已经开发出适用于脊柱外科术前规划的VR系统。将患者的CT图像通过软件进行VR模型重建,在此基础上模拟确定皮肤穿刺点与工作通道的置入角度、穿刺深度等,从而完成微创手术的术前入路规划。对30名行经皮椎间孔镜下腰椎间盘突出术的患者进行随机对照试验。VR术前规划组(A组)对比非规划组(B组),两者术前与术后ODI指数(oswestry disability index)改善差异无统计学意义,但是前者穿刺次数与透视时间有明显的减少。这表明VR术前规划可以在确保手术疗效的前提下减少患者所受辐射量,缩短手术所需时间^[7]。

VR能够营造出一个完全虚拟的立体环境,但又不可避免的削弱了操作者对现实世界的关注度,这种高度的沉浸性一定程度上限制了VR在临床的应用。VR技术在临床工作应用受限的另一个重要原因是3D重建模型不能完全显示原始数据的各种细节,模型的完整性与建模的精度还需要提升。最后辅助外科手术的VR系统设计难度大,设备相对昂贵,这进一步限制了该技术在临床中的广泛应用^[8-9]。

1.2 MR在脊柱外科的应用

由于脊柱区域神经排列密集,手术过程无法完全看清相应区域的解剖结构。脊柱外科医生在临床操作中面临诸多不确定因素,从而产生了一系列的手术技术难点,脊柱椎弓根螺钉置入便是其中之一。在一项对4790枚椎弓根螺钉放置情况的研究中,244枚(5.1%)椎弓根螺钉出现术后断裂,134枚(2.8%)螺钉穿透了前皮质,115枚(2.4%)螺钉与患者手术后并发症的发生有关^[10]。在Lee等^[11]的研究中,研究人员开发了一种MR系统,该系统目的是为术中切口的确定与椎弓根螺钉的置入提供指导和支持,从而实现术中快速定位。外科医生术中使用患者CT数据建立计划轨迹。术中通过定位设备跟踪椎弓根螺钉的置入情况并且将图像显示在MR设备上。术者能够快速感知椎弓根螺钉置入的深度、方向和空间定位。手术过程中,术前计划轨迹与术中植入物预测轨迹会一起显示。术者需要使得上述两个轨迹尽量重合,从而尽量使椎弓根钉置入到理想位置。这一系统简化了复杂的螺钉放置过程,无需大量的术中透视操作即可完成复杂的脊柱外科手术,并且器械植入的准确性也得到了一定的提高。但是MR软件与硬件开发难度更高,目

前国内外还没有相关文献介绍能够大面积推广到临床的配套设备。

1.3 AR在脊柱外科中的应用

Elmi等^[12]研究结果表明,AR能够提高胸椎椎弓根螺钉置入的准确性和效率,胸椎椎弓根体积普遍比腰椎椎弓根的体积更小,这使得胸椎椎弓根螺钉的置入难度大大增加,AR导航系统能够解决手术过程中解剖标志的可视问题,实时跟踪螺钉置入的轨迹,因而减少了螺钉错误放置的风险。在Ma等^[13]的相关研究中,研究者建立了一种独特的AR手术导航系统,该系统基于超声辅助技术来放置椎弓根螺钉。将超声、AR和CT技术有机结合起来,有效提高了椎弓根螺钉置入的精度。Burstrom团队^[14]则将AR导航技术应用到了脊柱外科的微创治疗方面,在猪脊椎上进行AR导航系统辅助下的椎弓根置钉操作,临床准确性达到了97.4%~100%。除了椎弓根置钉外,AR在截骨规划、肿瘤切除等方面也得到应用。Cho等^[15]开发构建了一种在平板电脑上运行的新型AR导航系统,以帮助骨肿瘤切除。研究者在133个猪股骨的骨皮质上打开一个窗口向髓腔内注射骨水泥来模拟骨肿瘤。AR组将术前拍摄的CT、MR等影像资料导入AR规划软件,之后能够使用手机来获取标示有肿瘤边界到股骨髁距离的AR图像。对照组的外科医生通过用尺子测量从股骨髁边缘到估计的切除边缘的距离来辅助进行手术,结果表明AR组手术精度令人满意,同时还能够缩短传统手术方式的花费与手术时间。Kosterhon等^[16]使用AR设备对临床患者术中截骨的切除平面进行可视化,成功为一名严重脊柱畸形的女性患者进行截骨矫形,术后12月患者复查X线、CT显示矫形效果良好。该研究揭示了AR技术在脊柱截骨术方面应用的巨大潜力。

AR还可以为全球医疗合作提供远程解决方案。黎巴嫩贝鲁特的外科医生利用视频会议和名为Proximie的AR系统的组合,通过手势、注释、图表和临床图像为当地外科医生提供指导^[17-18]。Greenfield等^[18]报道在巴勒斯坦加沙地区使用AR技术进行远程会议指导术者修复复杂的手部创伤的案例。这些案例展示了一种可能性,即虚拟现实技术与经济高效的网络外科合作平台相结合来解决不同发展水平地区医疗资源分配不均的问题。

2 虚拟现实技术在脊柱相关疼痛治疗和康复训练方面的应用

目前已有文献报道虚拟现实技术在减轻患者疼痛感受方面是有效的。目前认为,VR具有如下所述的3个可能的镇痛机制。

2.1 分心

分心(distraction)是虚拟现实技术最为人知的镇痛机制^[19]。这里分心定义为“对疼痛处理所必需的认知力和注意力资源的转移”。人们认为,分心物(虚拟环境)通过作用于导致疼痛的信号通路来减少对疼痛的感知并降低患者对疼痛的关注程度从而改变身体复杂的疼痛调制系统的活动,最终在一定程度上减少疼痛刺激带给患者的不适感。这一机制的核心是疼痛神经矩阵理论(neuromatrix theory of pain)^[20]。该理论假设认知、感觉和情感等输入(以及影响这些输入的因素,如注意力)可以改变疼痛的感受。将注意力从疾病症状等令人不快的对象转移到吸引人的或令人愉快的对象上能消除压力和焦虑等负面影响。Spiegel等^[21]进行了一项有120名患者参与的随机对照试验,VR组可以通过VR设备欣赏虚拟的风景或者参与简单的小游戏。观察VR治疗组和传统治疗组治疗后48h与72h的疗效,结果前者的VAS评分的改善比后者的更加明显。就虚拟现实技术目前的发展水平来说,多数设备都可以营造出一个相对轻松愉快的虚拟环境氛围。患者与虚拟对象互动的过程能够有效减轻患者对疼痛的注意力,从而减少阿片类药物的使用,提高患者的生存质量。

2.2 焦点转移

与上文分心机制不同的是,焦点转移(Focus shifting)机制不是指短暂的注意力转移,而是指参与者持续不间断地对多个虚拟对象进行主动地关注。Piskorz等^[22]进行了一项随机对照研究,发现与通过看电视被动分心的患者相比,积极玩VR游戏的烧伤患者在伤口护理期间体验到的疼痛明显更少。

2.3 疼痛控制能力的建立

通过虚拟现实技术提供给患者多种感官刺激,提高患者调节自身疼痛感受的能力。然而目前疼痛控制能力是虚拟现实镇痛研究中一个较少涉及的领域,需要进一步的神经生理学的研究来阐明具

体的作用机制。有学者^[23]进行了一系列相关研究,使用技能培养技术来减少医疗过程中的疼痛(例如纤维肌痛、儿科慢性头痛等),增强患者对疼痛的控制力是这类镇痛技术的重要目标。Loreto等^[24]进行了一项随机对照试验。将患者分成VR分心干预组、VR强化干预组。相比于VR分心干预组,VR强化组中参与者被要求通过虚拟设备额外感受到一些令人不愉快的视听体验。之后两组参与者被要求将手浸泡在冷水,研究者通过测量并记录参与者的VAS评分来判断参与者疼痛程度。结果显示VR强化干预组的患者对疼痛敏感度更低。技能培养技术虽然实施起来比较复杂,但是该技术如果能够在改进后大规模应用于临床工作,将有效减少阿片类镇痛药物的使用。目前,对感觉增强和神经生理学变化的探索正在为疼痛治疗中提高患者自我控制力相关研究提供新的研究方向。

随着科技的发展,虚拟现实技术实施的成本越来越低,虚拟现实技术治疗脊椎疼痛的临床实践应用正变得越来越普遍。Gumaa等^[25]对19篇VR治疗慢性骨科疼痛的文章进行荟萃分析发现VR在治疗慢性颈肩痛方面具有比较明确的效果。对比VR治疗组与使用非VR技术的治疗组以及未接受物理治疗的颈部活动能力、生活质量、疼痛强度等指标,VR治疗组相比其他两组均有明显改善。虚拟现实技术应用于临床镇痛的相关研究未来还需要进一步的探索,目前有几个热点方向。首先,为了能对虚拟现实技术在不同脊椎节段疼痛人群中的治疗效果得出更明确的结论,我们需要针对不同特定类型的脊椎疼痛(即颈痛、胸椎疼痛和腰椎疼痛)的患者进行更多的临床研究。其次我们需要对急性和慢性疼痛患者进行分组比较。进一步对VR治疗的长期效果(1年以上)的调查将有助于确定虚拟现实技术是否是长期镇痛的可行选择。最后,还需要确定虚拟现实技术相关疗法的每次最佳治疗时长、治疗疗程、治疗间隔时长等,并比较不同沉浸程度的虚拟系统的疗效。最终目标是能够帮助临床医生为患者定制个性化的治疗方案,优化治疗体验与效果。

康复训练则是虚拟现实技术除了疼痛管理外的另一个热点领域。目前已经有一定数量的文献描述了骨科患者借助虚拟现实技术进行康复运动的情况。有研究者将骨科机器人技术与虚拟现实技术相结合,建立了一个新型的应用于上肢功能锻

炼的设备“BRANDO Rehabilitation System”,该设备在腕部与前臂损伤的患者的康复锻炼过程中显示出了良好的效果^[26]。而在脊柱外科这一亚专科领域,目前康复训练方面相关报道较少。Duffell^[27]和其医疗团队针对脊髓损伤患者开发出了“iCycle”训练系统。该系统结合了虚拟现实技术,能够给予患者视觉反馈,提高锻炼过程中患者的沉浸性,从而获得较好的恢复效果。脊柱外科手术患者通常需要完成长期的术后康复训练,如何提高出院后患者锻炼的依从性、如何保证患者出院后的锻炼质量、如何给予全面而容易理解的锻炼指导将是我们专科医生需要重视的问题,而虚拟现实系统可能会为这些问题提供有效的解决方案。相信随着国内医工融合浪潮的推进,会有越来越多的相关研究来填补这一领域的空白。

3 虚拟现实技术在脊柱外科培训上的应用

大部分研究表明,虚拟现实技术是一种具有潜力的新的培训模式,目前已有大量的应用于外科培训的相关研究。虚拟现实技术在模拟培训上具有很多优势,例如能提供不限次数的培训机会,降低每次训练的练习成本,使医疗培训不再依赖于病人或尸体。目前,虚拟现实技术在脊柱外科模拟操作培训方面已经有了很好的应用,如椎弓根钉置钉的操作模拟培训。单纯的沉浸式无反馈的模拟训练在2009年已经有了相关研究,有学者对虚拟现实技术培训法与传统方式培训法的住院医师的置钉准确率进行评估。结果显示虚拟现实训练组每位学员相比于对照组学员,置钉的平均置入错误数量少1.12个^[28]。在精确度得到提高的同时,学员在定位与放置椎弓根钉的过程中的透视次数和时间均明显减少^[29]。作为脊柱外科的微创技术之一,经皮椎体成形术具有创伤小、疗效显著的优势,是治疗椎体压缩性骨折的有效方式。而该技术与其他微创技术一样,都具有一个较长的学习曲线。国外一项研究认为虚拟现实技术在椎体成形术的模拟训练中处于一个关键位置,可弥补从动物试验、模具训练到真人实操之间的递进梯度问题,可作为基于熟练程度的进展(proficiency-based progression (PBP) training)培训模式的一环^[30]。虚拟现实技术

还能够激发学员主动学习的积极性。这在Blumstein等^[31]完成的使用虚拟现实设备进行胫骨髓内钉内固定手术技术教学的随机对照试验中得到验证。国内方面,蒋佳霖等^[32]将MR设备应用到脊柱外科教学活动中。结果表明,MR组在学员满意度及学习主动性方面优于对照组。本课题组将VR设备与临床教学相结合,制作出一系列VR影像教学课件。涵盖了解剖学、骨科疾病、手术技巧等相关方面的内容。我们组织了一项针对60名本科生与住院医师的教学活动对照研究,学员被随机分为VR教学组与传统方式教学组,通过调查问卷与考试测验评定学员的学习效果,结果显示VR组学员的测验成绩与学习积极性均优于传统组^[33]。

随着虚拟现实技术的发展,关于虚拟现实技术与力反馈结合的相关研究逐渐进入了大众视野。Racy等^[34]将带有力反馈装置的虚拟现实培训设备应用到了股骨髓内钉放置的培训过程当中并取得了不错的效果,学员对这种新的培训形式的有效性给予了较高的评价。有学者进行了一项对比力反馈虚拟现实训练组与常规训练组的教育实验。16名学员随机分成两组采用VR与传统的教学方法,培训完成之后在尸体标本上进行椎弓根钉的置入操作,对比两组椎弓根钉置钉的成功率、准确度、完成时间等指标,力反馈结合虚拟现实组要明显优于传统训练组。

基于虚拟现实技术设计的模拟训练可以分析多种参数来评价训练结果。例如,植入物角度的偏差值或器械与危险区域的接触次数等^[35]。同时各种量化指标能够使得受训人员之间有更好的可比性,这为评估受训人员技术的掌握程度提供了基础^[36-37]。Bissonnette等^[38]在进行虚拟现实技术培训的过程中使用人工智能算法对各项手术完成指标进行筛选,确定了在安全性、效率、手术器械使用、协调性四个方面最能代表学员手术掌握水平的技术指标。Winkler-Schwartz等^[39]通过虚拟现实技术结合机器学习的方式对具有不同手术操作水平的医务人员进行分级识别,有助于判别手术技能培训的实际效果。

除了上文提到虚拟现实技术应用于手术技能培训外,未来虚拟现实技术应用于脊柱外科培训的一个热点方向将是如何提高受训人员的非技术性技能。外科医生的非技术性技能包括情境意识、临床任务管理能力、沟通技巧和领导能力等,以上技

能有助于从侧面提高手术质量。例如 Qi 等^[40]建立了虚拟手术室来训练医护人员处理手术过程中突发火灾的能力。目前国外已经有相应的评级工具来评价非技术技能,例如,外科医生的非技术技能评估系统(non-technical skills for surgeons behavior rating system)^[41],牛津非技术技能评分系统 II (non-technical skills scoring system, NOTECHS)^[42],外科观察性团队合作评估系统(observational teamwork assessment for surgery, OTAS)^[43],以及麻醉师的非技术技能系统(anaesthetists' non-technical skills system, ANTS)^[44]。未来的虚拟现实技术培训模式应该确定适用于这一新教学模式的非技术技能的系统评价方法。同时我们应当考虑能否将虚拟现实技术的应用扩展到多学科团队训练过程中去^[45-46]。建立跨专业的训练小组及协作学习模式,这对于促进手术组内有效的团队合作具有重要意义。

4 展望

近年来,关于虚拟现实技术这一主题的研究与相关文章的数量在快速增加,表明人们对这项新兴技术的关注度越来越高。可以预见,虚拟现实技术在外科领域的迅猛发展将对现有的医疗模式产生深刻影响。一方面,在临床工作中,对于脊柱外科的复杂病例,医生可在术前精确测量相关影像数据,反复模拟演练手术,预测患者术后恢复效果,选择最佳手术方案。逐步实现手术操作的标准化、微

创化、精准化与个性化。另一方面,从医学教育与患者宣教的角度来看,医务人员可收集临床资料来构建虚拟现实影像数据库,向医学生立体展示患者的发病机制及解剖异常。术前录制的模型重建视频可用于远程会诊、临床教学、手术练习等。在术前谈话过程中借助虚拟模型向患者解释病情及诊疗方案,能够提高医患沟通的效率,增加患者的依从性。

虽然目前虚拟现实技术相关硬件设备并未完全发展成熟,还未进入临床大规模应用阶段,尚不能实现力学、声音的精准反馈。同时虚拟现实设备高昂的价格也是该类技术大规模应用临床前一个必须要解决的问题,但随着技术的快速发展,以上问题有望在不久后得到解决。

笔者所在课题组目前已经建立 VR 的脊柱手术术前规划系统,并进行了对照实验。根据患者术前的 CT 影像资料,我们能够个性化地重建患者脊柱的虚拟模型。再根据患者的病史确定具体的手术计划。同时我们还制作一系列 VR 解剖学课件,能够搭配专用的投影设备来进行 VR 形式的解剖学授课^[47-48]。近年来举办的多场学习会议亦获得广大参与学员的强烈好评。我们下一步的探索方向是力反馈教学设备在脊柱外科培训中的应用,以及推广虚拟现实这一全新的教学形式,探索出一套满足我国医学教育需求,具有新时代特色的教学模式。

参考文献

- [1] Lohre R, Wang JC, Lewandrowski KU, et al. Virtual reality in spinal endoscopy: a paradigm shift in education to support spine surgeons[J]. J Spine Surg, 2020, 6(Suppl 1): S208-s223.
- [2] Sinkin JC, Rahman OF, Nahabedian MY. Google glass in the operating room: the plastic surgeon's perspective [J]. Plast Reconstr Surg, 2016, 138(1): 298-302.
- [3] Léger É, Drouin S, Collins DL, et al. Quantifying attention shifts in augmented reality image-guided neurosurgery [J]. Healthc Technol Lett, 2017, 4(5): 188-192.
- [4] Archavlis E, Schwandt E, Kosterhon M, et al. A modified microsurgical endoscopic-assisted transpedicular corpectomy of the thoracic spine based on virtual 3-dimensional planning [J]. World Neurosurg, 2016, 91: 424-433.
- [5] Zawy Alsofy S, Stroop R, Fusek I, et al. Virtual reality-based evaluation of surgical planning and outcome of monosegmental, unilateral cervical foraminal stenosis[J]. World Neurosurg, 2019, 129: e857-e865.
- [6] 姚欣强,张晋元,王海明,等. 虚拟现实平台在脊柱畸形截骨矫形手术中的应用[J]. 中国矫形外科杂志 2018, 443(9): 850-854.
Yao XQ, Zhang JY, Wang HM, et al. Application of virtual reality platform in osteotomy for spinal deformity [J]. Orthop J Chin, 2018, 443(9): 850-854.

- [7] Zheng C, Li J, Zeng G, et al. Development of a virtual reality preoperative planning system for postlateral endoscopic lumbar discectomy surgery and its clinical application[J]. *World J Neurosurg*, 2019, 123: e1-e8.
- [8] Verhey JT, Haglin JM, Verhey EM, et al. Virtual, augmented, and mixed reality applications in orthopedic surgery[J]. *Int J Med Robot*, 2020, 16(2): e2067.
- [9] Kim DH, Kim Y, Park JS, et al. Virtual reality simulators for endoscopic sinus and skull base surgery: the present and future [J]. *Clin Exp Otorhinolaryngol*, 2019, 12(1): 12-17.
- [10] Lonstein JE, Denis F, Perra JH, et al. Complications associated with pedicle screws[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1999, 81(11): 1519-1528.
- [11] Lee SC, Fuerst B, Tateno K, et al. Multi-modal imaging, model-based tracking, and mixed reality visualisation for orthopaedic surgery [J]. *Health Technol Lett*, 2017, 4(5): 168-173.
- [12] Elmi-Terander A, Nachabe R, Skulason H, et al. Feasibility and accuracy of thoracolumbar minimally invasive pedicle screw placement with augmented reality navigation technology[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2018, 43(14): 1018-1023.
- [13] Ma L, Zhao Z, Chen F, et al. Augmented reality surgical navigation with ultrasound-assisted registration for pedicle screw placement: a pilot study [J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2017, 12(12): 2205-2215.
- [14] Burström G, Nachabe R, Persson O, et al. Augmented and virtual reality instrument tracking for minimally invasive spine surgery: a feasibility and accuracy study [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2019, 44(15): 1097-1104.
- [15] Cho HS, Park YK, Gupta S, et al. Augmented reality in bone tumour resection: an experimental study [J]. *Bone Joint Res*, 2017, 6(3): 137-143.
- [16] Kosterhon M, Gutenberg A, Kantelhardt SR, et al. Navigation and image injection for control of bone removal and osteotomy planes in spine surgery[J]. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*, 2017, 13(2): 297-304.
- [17] Andersen D, Popescu V, Cabrera ME, et al. An augmented reality-based approach for surgical telementoring in austere environments [J]. *Mil Med*, 2017, 182(S1): 310-315.
- [18] Greenfield MJ, Luck J, Billingsley ML, et al. Demonstration of the effectiveness of augmented reality tele-surgery in complex hand reconstruction in Gaza [J]. *Plast Reconstr Surg Glob Open*, 2018, 6(3): e1708.
- [19] Hoffman HG, Richards TL, Van Oostrom T, et al. The analgesic effects of opioids and immersive virtual reality distraction: evidence from subjective and functional brain imaging assessments [J]. *Anesth Analg*, 2007, 105(6): 1776-1783.
- [20] Melzack R. Pain and the neuromatrix in the brain [J]. *J Dent Educ*, 2001, 65(12): 1378-1382.
- [21] Spiegel B, Fuller G, Lopez M, et al. Virtual reality for management of pain in hospitalized patients: A randomized comparative effectiveness trial [J]. *PLoS One*, 2019, 14(8): e0219115.
- [22] Piskorz J, Czub M. Effectiveness of a virtual reality intervention to minimize pediatric stress and pain intensity during venipuncture [J]. *J Spec Pediatr Nurs*, 2018, 23(1).doi:10.1111/jspn.12201.
- [23] Gupta A, Scott K, Dukewich M. Innovative technology using virtual reality in the treatment of pain: does it reduce pain via distraction, or is there more to it? [J]. *Pain Med*, 2018, 19(1): 151-159.
- [24] Loreto-Quijada D, Gutiérrez-Maldonado J, Nieto R, et al. Differential effects of two virtual reality interventions: distraction versus pain control [J]. *Cyberpsychol Behav Soc Netw*, 2014, 17(6): 353-358.
- [25] Gumaa M, Rehan Youssef A. Is virtual reality effective in orthopedic rehabilitation? a systematic review and meta-analysis [J]. *Phys Ther*, 2019, 99(10): 1304-1325.
- [26] Padilla-Castañeda M A, Sotgiu E, Barsotti M, et al. An orthopaedic robotic-assisted rehabilitation method of the forearm in virtual reality physiotherapy [J]. *J Health Eng*, 2018, 2018: 7438609.
- [27] Duffell LD, Paddison S, Alahmary AF, et al. The effects of FES cycling combined with virtual reality racing biofeedback on voluntary function after incomplete SCI: a pilot study [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2019, 16(1): 149.
- [28] Gasco J, Patel A, Ortega-Barnett J, et al. Virtual reality spine surgery simulation: an empirical study of its usefulness [J]. *Neurol Res*, 2014, 36(11): 968-973.
- [29] Chitale R, Ghobrial GM, Lobel D, et al. Simulated lumbar minimally invasive surgery educational model with didactic and technical components [J]. *Neurosurgery*, 2013, 73 Suppl 1: 107-110.

- [30] Wucherer P, Stefan P, Weidert S, et al. Task and crisis analysis during surgical training[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2014, 9(5): 785-794.
- [31] Blumstein G, Zukotynski B, Cevallos N, et al. Randomized trial of a virtual reality tool to teach surgical technique for tibial shaft fracture intramedullary nailing[J]. *J Surg Educ*, 2020, 77(4): 969-977.
- [32] 蒋佳霖, 孙璟川, 罗溪, 等. 混合现实技术应用于脊柱外科教学的效果分析[J]. *中国医学教育技术*, 2020, 34(02): 230-232; 243.
Jiang JL, Sun JC, Luo X, et al. Effect analysis of applying mixed reality technology in spinal surgery teaching[J]. *Chin Med Educ Technol*, 2020, 34(02): 230-232; 243.
- [33] Qi F, Gan Y, Wang S, et al. Efficacy of a virtual reality-based basic and clinical fused curriculum for clinical education on the lumbar intervertebral disc [J]. *Neurosurg Focus*, 2021, 51(2): E17.
- [34] Racy M, Barrow A, Tomlinson J, et al. Development and validation of a virtual reality haptic femoral nailing simulator[J]. *J Surg Educ*, 2020, 78(3): 1013-1023.
- [35] gallagher AG., o'sullivan GC.. *Fundamentals of surgical simulation*[M]. Springer, London; 2012.
- [36] Cosman PH, Cregan PC, Martin CJ, et al. Virtual reality simulators: current status in acquisition and assessment of surgical skills[J]. *ANZ J Surg*, 2002, 72(1): 30-34.
- [37] Scalese RJ, Obeso VT, Issenberg SB. Simulation technology for skills training and competency assessment in medical education [J]. *J Gen Intern Med*, 2008, 23Suppl 1(Suppl 1): 46-49.
- [38] Bissonnette V, Mirchi N, Ledwos N, et al. Artificial intelligence distinguishes surgical training levels in a virtual reality spinal task [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2019, 101(23): e127.
- [39] Winkler-Schwartz A, Yilmaz R, Mirchi N, et al. Machine learning identification of surgical and operative factors associated with surgical expertise in virtual reality simulation[J]. *JAMA Netw Open*, 2019, 2(8): e198363.
- [40] Qi D, Ryason A, Milef N, et al. Virtual reality operating room with AI guidance: design and validation of a fire scenario [J]. *Surg Endosc*, 2021, 35(2): 779-786.
- [41] Yule S, Flin R, Maran N, et al. Surgeons' non-technical skills in the operating room: reliability testing of the NOTSS behavior rating system [J]. *World J Surg*, 2008, 32(4): 548-856.
- [42] Robertson ER, Hadi M, Morgan LJ, et al. Oxford NOTECHS II: a modified theatre team non-technical skills scoring system [J]. *PLoS One*, 2014, 9(3): e90320.
- [43] Undre S, Sevdalis N, Healey AN, et al. Observational teamwork assessment for surgery (OTAS): refinement and application in urological surgery[J]. *World J Surg*, 2007, 31(7): 1373-1381.
- [44] Fletcher G, Flin R, McGeorge P, et al. Anaesthetists' Non-Technical Skills (ANTS): evaluation of a behavioural marker system [J]. *Br J Anaesth*, 2003, 90(5): 580-588.
- [45] Cumin D, Boyd MJ, Webster CS, et al. A systematic review of simulation for multidisciplinary team training in operating rooms [J]. *Simul Healthc*, 2013, 8(3): 171-179.
- [46] Whittaker G, Abboudi H, Khan MS, et al. Teamwork assessment tools in modern surgical practice: a systematic review [J]. *Surg Res Pract*, 2015, 2015: 494827.
- [47] 李春海, 郑潮顺, 陈建宇, 等. 在体脊柱侧凸VR模型构建方法及其临床意义[J]. *中国骨与关节损伤杂志*[J]. 2017, 32(7): 748-749.
Li CH, Zheng CS, Chen JY, et al. Construction method and clinical significance in vivo VR model of scoliosis [J]. *Chin J Bone Joint Injury*. 2017, 32(7): 748-749.
- [48] 郑潮顺, 李春海, 曾钢, 等. 腰椎退变虚拟现实模型构建方法及意义[J]. *中国骨与关节损伤杂志*. 2018, 33(01): 62-63.
Zheng CS, Li CH, Zeng G, et al. Virtual reality model of lumbar degeneration construction techniques and significance [J]. *Chin J Bone Joint Injury*, 2018, 33(1): 62-63.