

虚拟现实技术在脊柱外科中的应用现状

Current state of the application of virtual reality technology in spine surgery

郑少立, 李宗泽, 姚欣强, 张晋元, 朱永健, 陈建庭

(南方医科大学南方医院 510515 广州市)

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2019.01.14

中图分类号: R608 文献标识码: A 文章编号: 1004-406X(2019)-01-0087-04

虚拟现实(virtual reality, VR)技术在 20 世纪 60 年代由 Sutherland 提出^[1],是一种以计算机生成的 3D 图像数据文件为基础,通过感官聚焦或者剥夺装置,使操作者能够沉浸在设备传送的预编程数字化世界中的数字技术。VR 技术有着沉浸性、交互性、构想性三个重要基本特征^[2]。VR 技术常与增强现实(augmented reality, AR)技术和混合现实(mixed reality, MR)技术混淆,三者联系紧密但又有区别。AR 技术指的是将虚拟的数字信息与操作者的现实重叠并融合,这就像在现实之上添加了一个透明层,并在其上闪烁数字信息,透明背景使数字图像看上去像是现实的一部分,但是操作者能够分辨出虚拟和现实。MR 技术就是将 VR 技术和 AR 技术结合起来,让操作者沉浸在预编的世界中仍能看到现实的世界,操作者置身其中无法区别虚拟与现实。尽管 VR、AR 和 MR 并不是一个完全相同的概念,但是三者之间并没有一个十分清晰的界限^[3]。在本综述中,为了简单起见,我们将 AR 和 MR 统归于 VR。VR 技术现已在医学领域中得到应用,有人称之为虚拟医学(virtual medicine, VM)或仿真医学。Robert 首先提出了在医学中建立 VR 系统并应用于康复工程的想法^[4]。后来这一新兴技术在临床医学领域的应用逐步开展,目前已经在普通外科、神经外科和精神心理等众多学科中得到了不同程度的发展。但有关于 VR 技术在脊柱外科的应用的报道还相对较少。笔者综述了目前 VR 技术在脊柱外科的应用进展,同时对其在脊柱外科未来的应用进行展望。

1 VR 技术在脊柱外科的应用现状

脊柱外科手术区域解剖结构复杂,患者变异性高。如何对患者进行更加个体化、精准化的诊疗,是每一个脊柱外科医生关注的焦点问题。同时脊柱外科手术操作风险高,学习曲线陡峭,年轻医生难以得到足够的训练机会。

VR 技术能够通过整合患者影像学资料,重建脊柱及周围结构并以三维虚拟模型的形式呈现,并可进行相关模拟操作,便于制定更个体化和精准化的手术规划,也使年轻医生通过模拟操作获得更多的练习机会。近年来相关文献主要报道了 VR 技术在椎弓根螺钉的置入、椎体成形术、腰椎穿刺和关节突关节注射等方面的应用。

1.1 椎弓根螺钉的置入

脊椎周围解剖结构复杂,毗邻重要脏器血管,椎弓根螺钉置入失败可能会造成严重的手术并发症^[5]。研究表明,常规的腰椎椎弓根螺钉置入在术中术中 C 型臂 X 线机辅助下进行,准确率约为 90.3%~94.1%^[6,7]。颈椎、胸椎椎弓根横径较腰椎小,椎管也更为狭窄,变异性也较大,椎弓根螺钉在颈椎、胸椎置入的失误率较高^[8]。VR 由于其特有的沉浸感与交互性,将其应用于椎弓根螺钉置入的技术教学、术前规划及术中导航等操作,有助于提高术者的置钉准确率。

目前,VR 技术在椎弓根螺钉置入的应用主要在对低年资医师置钉技术的教学和训练,腰椎、胸椎及颈椎的置钉训练都有相关文献报道。Roitberg 等^[9,10]设计出了一种 VR 的手术操作系统来评估神经外科医师的手术操作能力,系统通过腰椎椎弓根螺钉置入的能力被来评估术者的空间记忆力及三维轨迹规划能力。这个操作系统能够很好地将术者的感官运动能力进行量化,在筛选合格外科住院医师方面具有很好的应用前景^[9,10]。Gasco 等^[11]将 26 个高年级的医学生随机分配于试验组和对照组进行椎弓根螺钉置入的教学。对照组的的教学主要包括 5min 的腰椎解剖结构的学习及 15min 椎弓根螺钉置入技术的讲解。试验组的教学主要是 5min 的 VR 技术椎弓根螺钉置入操作系统及置钉步骤的简单学习,接着是 15min 的 VR 椎弓根置钉系统的实际体验学习。最后,每个参与者都被要求在 15min 内在腰椎模型上置入两个椎弓根螺钉来检验教学成果。每个椎弓根螺钉的置钉效果主要通过椎弓根破壁的情况、置钉深度的偏差、横截面的偏差、冠状面的偏差、矢状面的偏差 5 个方面来评估。总共有 52 个椎弓根螺钉被置入,试验组置钉的失误率较对照组低 53.7%。试验组在降低椎弓根破壁率、降低置钉深度误差及冠状面的偏差这 3 个方面具

基金项目:广东省科技发展专项资金项目(项目编号:2017B010110012)

第一作者简介:男(1993-),硕士研究生,研究方向:脊柱外科

电话:(020)62787195 E-mail:shaolinuli@163.com

通讯作者:陈建庭 E-mail:chenjt99@tom.com

有较为明显的优势。Rambani 等^[12]通过研究得到相似结论,发现 VR 模拟训练让医生置钉的准确性显著提高的同时,操作时间明显缩短,需要透视的次数也得到减少,认为基于 VR 的训练系统能让椎弓根螺钉置入技术训练变得更高效率。Luciano 等^[13,14]和 Gottschalk 等^[15]则分别验证了 VR 训练系统在提升操作者胸椎椎弓根螺钉和颈椎侧块钉置入准确率上的优势。

综上所述,VR 模拟训练椎弓根螺钉置入的效果值得肯定。但目前 VR 技术在椎弓根螺钉置入方面的应用还局限于置钉技术的教学阶段。其在临床上可用于个性化置钉规划的方面鲜有报道,这可能是 VR 技术在椎弓根螺钉的置入方面拓展方向。

1.2 经皮椎体成形术

经皮椎体成形术是治疗椎体压缩性骨折的重要术式,然而操作失误可造成血管神经损伤、骨水泥漏甚至肺栓塞^[16]。将 VR 技术应用于经皮椎体成形术的操作教学、术前规划和术中导航,能够降低操作失误率,减少相关并发症的发生。

Wucherer 等^[17,18]和 Weigl 等^[19]在经皮椎体成形术的训练中利用 VR 模拟器模拟突发事件(骨水泥漏出和肺栓塞等事件)发生的场景,利用 VR 技术还原椎体成形术的步骤。结果表明这种训练环境能高度还原手术的场景及流程,有助于加深术者对手术技巧的掌握,提高术者对术中突发情况的应变能力。Abe 等^[20]通过对 5 例骨质疏松症伴椎体骨折的患者行 VR 技术引导下经皮椎体成形术,发现能有效减少穿刺针置入的角度偏移,同时避免了椎弓根穿透和骨水泥漏出等不良事件,认为 VR 技术可以为经皮椎体成形术提供准确的辅助导航。

目前 VR 技术在经皮椎体成形术应用已较为广泛。Abe 等^[20]首次将 VR 技术应用于辅助临床手术的导航中,尽管样本量较少,但却为 VR 技术辅助脊柱外科临床治疗领域提供了参考价值。

1.3 腰椎穿刺

腰椎穿刺是每个脊柱外科医师必须熟练掌握的基本临床技能。对初学者来说,腰椎穿刺失误的发生率较高,腰椎穿刺失误导致的如脊髓血肿形成、对应神经根麻痹或疼痛和低颅压性头痛等并发症对患者来说是重大打击,严重者可能导致患者双下肢瘫痪^[21]。

2008 年,Färber 等^[22]首次提出将 VR 技术应用于腰椎穿刺的训练。Färber 等^[23]建立了基于 VR 技术的腰椎穿刺训练系统,通过模拟训练提高了受试者穿刺成功率,同时经问卷调查发现,将 VR 技术应用于腰椎穿刺教学的设想得到了广泛认可,认为其有助于增强对腰椎解剖结构的认识,缩短腰椎穿刺技能的学习时间。Keri 等^[24]对比 VR 技术辅助训练腰椎穿刺组与非训练组在操作中软组织损伤程度、进针路径、总操作时长、置针时间、操作成功率等差异,发现经 VR 技术辅助训练腰椎穿刺技术,可以起到减少操作对穿刺部位周围组织损伤,优化进针路径的作用。

尽管腰椎穿刺操作相对简单,但初学者仍常因疏于练习,操作不当造成一系列临床并发症的发生。将 VR 应用于腰椎穿刺的训练有助于提高操作者穿刺的熟练度,提升操作信心,进而提高穿刺准确率。

1.4 关节突关节穿刺注射

有文献报道,慢性腰背痛 15%~45%是由关节突关节的损伤和退化导致的^[25]。关节突关节是脊柱后方的小关节。骨关节炎、椎间盘退变或创伤等因素,会使这些关节出现炎症和疼痛。关节突关节穿刺注射是在关节突关节内注入麻药,通过疼痛有无缓解明确背痛是否来源于关节突关节的病变,同时起缓解疼痛的作用。关节突关节穿刺的难度较大,常常需要在 X 线或者超声引导下进行。VR 能够有效提高操作者关节突关节注射的准确率^[26,27]。

Yeo 等^[28]将 40 个志愿者随机分成两组,试验组在 VR 训练系统下行关节突关节穿刺训练,对照组在按传统教学模式在普通模型上行同样训练。训练后考核结果发现,试验组的潜在软组织损伤较少,穿刺成功率更高。近年,Agten 等^[27]提出将 VR 技术应用于关节突关节注射的辅助导航,发现其可与传统影像学辅助导航在关节突关节注射的准确性上达到一致效果,同时减少了穿刺时间 ($P < 0.001$),认为 VR 技术作为关节突关节注射的辅助导航应用于临床治疗是可行的。

通过对文献的总结笔者发现,在关节突关节穿刺注射方面,VR 技术目前主要应用于对年轻医生操作技术的模拟训练。Agten 等^[27]提出了 VR 技术可作为关节突关节注射的辅助导航,但仅提出其临床应用的可行性,进一步的临床研究还有待开展。

1.5 其他

关于 VR 技术在脊柱外科其他方面的应用,近年文献相继报道。早在 2001 年,Tsai 等^[28]就曾报道将 VR 技术用于腰椎间盘的摘除、椎间植骨融合手术的模拟,但仅局限于手术的简单展示,未能将其应用于教学、训练或术中导航中。2012 年,Fritz 等^[29]首次将这个导航系统在人体模型上行腰椎穿刺、椎间盘穿刺、关节突关节穿刺等操作,结果显示:该导航系统辅助下的穿刺具有较高的准确率及效率;他们还在 12 具人体标本上进行 187 处脊柱及脊柱周围的穿刺,穿刺的成功率可达 94.1%^[30]。2013 年,Fritz 等^[31]用该导航系统在 4 具肿瘤骨转移患者的尸体上行 16 次的骨穿刺活检,穿刺精确度高,有效辅助了恶性肿瘤的确诊,认为 MRI 与 VR 结合的导航系统有助于骨穿刺活检术中的准确导航。后续的研究中,他们陆续也用这个导航系统在人体尸体上行经皮椎体成形术、椎旁交感神经注射和骨盆周围神经节注射,结果也显示出了这个导航系统在提高穿刺准确率及减少术中辐射等方面的优越性^[32-34]。但是,这个系统对技术设备的要求较高,仍未作为术中导航系统投入于临床应用。姚欣强等^[35]回顾了 12 例脊柱畸形患者的临床资料,其中 6 例术前将患者的影像资料导入 VR 系统进行术前规划,选取最合适的截骨方式然后行手术治

疗,另外 6 例则行传统截骨矫形治疗。VR 组的手术时间、出血量均小于传统组,侧凸 Cobb 角矫正率及后凸 Cobb 角矫正率均大于传统组,表明 VR 平台能模拟脊柱截骨后效果,在脊柱畸形截骨矫形手术的个性化治疗上具有发展潜力。

2 对 VR 技术研究的分析与思考

2.1 国内外研究现状对比分析

作为一个近年新兴的富有挑战性的交叉技术前沿学科和研究领域,VR 技术在脊柱外科的应用的相关报道还相对较少。对比国外相关研究,国内对于 VR 技术在临床领域的研究稍有滞后,VR 技术在脊柱外科的应用成果有限。杨波等^[26]在 2013 年建立了基于中国人数据的第一个腰椎三维虚拟可视化模型。中山大学孙逸仙纪念医院成功在 1 例腰椎退行病变患者及 1 例脊柱侧凸患者身上分别建立了腰椎退行病变和脊柱侧凸的 VR 模型^[37,38],表明脊柱疾病 VR 模型的建立有助于术前对患者脊柱及周围解剖结构的精确评估,对解剖细节的深度理解也可使术中操作针对性更强,降低并发症发生率。姚欣强等^[35]首次将 VR 应用于脊柱畸形截骨矫形的术前规划,表明了 VR 在脊柱矫形手术术前规划的优越性。总的来说,VR 技术在脊柱外科的应用方面,国内研究探索已在逐步铺开,有很大的发展空间和进步潜力。

2.2 相关研究存在的局限性

通过对有关 VR 技术在脊柱外科的应用的相关文献的分析可以发现,这方面的研究主要局限在教学及手术训练。这得益于 VR 技术在模拟真实情境及各种复杂解剖结构,增加手术操作重复性和节省临床资源等方面有着独特的优势。但这也说明了 VR 技术在脊柱外科的应用存在瓶颈:创新性不足,应用范围比较局限;对 VR 这项新兴的技术的研究还不够深入,未能将其与临床紧密结合。

单纯从将 VR 技术应用于脊柱外科手术的教学和训练看,现行的研究报道主要存在以下几个问题:(1)未能形成接受度较高的较为统一的训练方案,不同研究机构的训练方案各不相同;(2)绝大多数研究样本量较少,缺乏大样本多中心的研究支持^[9];(3)多数研究的训练效果的评价指标各不相同,指标的测量方法也不尽相同;(4)大多数研究的参与者是低年资的住院医师或者在校医学生,对经验较丰富的高年资临床医师的指导有限。

目前将 VR 技术真正应用于脊柱外科疾病的诊断及治疗的报道还很少。国内外有一些学者提出将 VR 技术用于复杂脊柱外科手术的术前规划,但相关的文献报道并不多,笔者分析认为主要存在两个方面的原因:(1)技术水平的限制,目前绝大多数借助 VR 模拟的虚拟表面的触感很难模拟密度和拿捏性能,与真实手术有较大差异,可能会造成规划的误差;VR 技术建立模型在精准性上受机器、数据采集等很多因素影响,而且,在影像资料数据采集到产品制作过程中,存在数据的丢失,并不能实现数据和模型

之间百分百的转换,从而影响所建立的模型的精准性;(2)研究方法的限制,目前尚未有特别具体的指标能够量化术前规划的优势,且无法保证术前规划在术中的准确执行。Fritz 等^[29-31]提出将 MRI 与 AR 结合在一起应用于脊柱外科手术的术中导航。但该研究对技术设备要求较高,短时间内难以普及,目前尚在人体尸体上验证其准确性与稳定性,真正应用于临床患者的术中导航还未见报道。

3 总结与展望

医学数字化、信息化理念的推广,让 VR 技术已在医学领域受到越来越多的重视和探索。尽管目前 VR 技术在脊柱外科的应用尚处于起步阶段,当前的 VR 技术水平也存在很多问题与不足,但其微创化、精准化和个体化的理念与当前医疗理念相契合。可以预料到 VR 技术将会在医学上得到更加广泛、更加深入的应用。随着后续研究的不断开展,VR 技术在脊柱外科领域的操作教学、术前规划乃至术中辅助导航方面必将取得突破性进展。VR 技术巨大的开发应用前景有望成为脊柱外科治疗的重要臂膀,推动医疗服务向个性化、精准化大趋势迈进。

4 参考文献

- Land RI, Sutherland IE. Real-time, color, stereo, computer displays[J]. Appl Opt, 1969, 8(3): 721-723.
- Badash I, Burt K, Solorzano CA, et al. Innovations in surgery simulation: a review of past, current and future techniques[J]. Ann Transl Med, 2016, 4(23): 453.
- Pfandler M, Lazarovici M, Stefan P, et al. Virtual reality-based simulators for spine surgery: a systematic review [J]. Spine J, 2017, 17(9): 1352-1363.
- Ackerman JD. Medicine meets virtual reality 2000 [J]. MD Comput, 2000, 17(3): 13-17.
- 邱勇. 胸椎侧凸椎弓根螺钉矫形中的螺钉误置[J]. 中国骨伤, 2011, 24(7): 535-537.
- Kosmopoulos V, Schizas C. Pedicle screw placement accuracy: a meta-analysis[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2007, 32(3): E111-E120.
- Lee GW, Son JH, Ahn MW, et al. The comparison of pedicle screw and cortical screw in posterior lumbar interbody fusion: a prospective randomized noninferiority trial[J]. Spine J, 2015, 15(7): 1519-1526.
- Hojo Y, Ito M, Suda K, et al. A multicenter study on accuracy and complications of freehand placement of cervical pedicle screws under lateral fluoroscopy in different pathological conditions: CT-based evaluation of more than 1,000 screws[J]. Eur Spine J, 2014, 23(10): 2166-2174.
- Roitberg BZ, Kania P, Luciano C, et al. Evaluation of sensory and motor skills in neurosurgery applicants using a virtual reality neurosurgical simulator: the sensory-motor quotient[J]. J Surg Educ, 2015, 72(6): 1165-1171.
- Roitberg B, Banerjee P, Luciano C, et al. Sensory and motor

- skill testing in neurosurgery applicants: a pilot study using a virtual reality haptic neurosurgical simulator[J]. *Neurosurgery*, 2013, 73 Suppl 1: 116-121.
11. 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.
 12. Rambani R, Ward J, Viant W. Desktop-based computer-assisted orthopedic training system for spinal surgery[J]. *J Surg Educ*, 2014, 71(6): 805-809.
 13. Luciano CJ, Banerjee PP, Bellotte B, et al. Learning retention of thoracic pedicle screw placement using a high-resolution augmented reality simulator with haptic feedback [J]. *Neurosurgery*, 2011, 69(1 Suppl Operative): s14-s19.
 14. Luciano CJ, Banerjee PP, Sorenson JM, et al. Percutaneous spinal fixation simulation with virtual reality and haptics [J]. *Neurosurgery*, 2013, 72 Suppl 1: 89-96.
 15. Gottschalk MB, Yoon ST, Park DK, et al. Surgical training using three-dimensional simulation in placement of cervical lateral mass screws: a blinded randomized control trial [J]. *Spine J*, 2015, 15(1): 168-175.
 16. 付敏, 梁斌. 经皮椎体成形术的并发症及其防治进展[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2007, 27(8): 628-631.
 17. 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.
 18. Wucherer P, Stefan P, Abhari K, et al. Vertebroplasty performance on simulator for 19 surgeons using hierarchical task analysis [J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2015, 34(8): 1730-1737.
 19. Weigl M, Stefan P, Abhari K, et al. Intra-operative disruptions, surgeon's mental workload, and technical performance in a full-scale simulated procedure[J]. *Surg Endosc*, 2016, 30(2): 559-566.
 20. Abe Y, Sato S, Kato K, et al. A novel 3D guidance system using augmented reality for percutaneous vertebroplasty: technical note[J]. *J Neurosurg Spine*, 2013, 19(4): 492-501.
 21. Brown MW, Yilmaz TS, Kasper EM. Iatrogenic spinal hematoma as a complication of lumbar puncture: what is the risk and best management plan[J]. *Surg Neurol Int*, 2016, 7 (Suppl 22): S581-S589.
 22. Färber M, Hoeborn E, Dalek D, et al. Training and evaluation of lumbar punctures in a VR-environment using a 6DOF haptic device[J]. *Stud Health Technol Inform*, 2008, 132: 112-114.
 23. Färber M, Hummel F, Gerloff C, et al. Virtual reality simulator for the training of lumbar punctures [J]. *Methods Inf Med*, 2009, 48(5): 493-501.
 24. Keri Z, Sydor D, Ungi T, et al. Computerized training system for ultrasound-guided lumbar puncture on abnormal spine models: a randomized controlled trial [J]. *Can J Anaesth*, 2015, 62(7): 777-784.
 25. Boswell MV, Colson JD, Sehgal N, et al. A systematic review of therapeutic facet joint interventions in chronic spinal pain[J]. *Pain Physician*, 2007, 10(1): 229-253.
 26. Yeo CT, Ungi T, U-Thainual P, et al. The effect of augmented reality training on percutaneous needle placement in spinal facet joint injections [J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2011, 58(7): 2031-2037.
 27. Agten CA, Dennler C, Roskopf AB, et al. Augmented reality-guided lumbar facet joint injections [J]. *Invest Radiol*, 2018, 53(8): 495-498.
 28. Tsai MD, Hsieh MS, Jou SB. Virtual reality orthopedic surgery simulator[J]. *Comput Biol Med*, 2001, 31(5): 333-351.
 29. Fritz J, U-Thainual P, Ungi T, et al. Augmented reality visualization with image overlay for MRI-guided intervention: accuracy for lumbar spinal procedures with a 1.5-T MRI system[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2012, 198(3): W266-W273.
 30. Fritz J, U-Thainual P, Ungi T, et al. Augmented reality visualisation using an image overlay system for MR-guided interventions: technical performance of spine injection procedures in human cadavers at 1.5 Tesla[J]. *Eur Radiol*, 2013, 23(1): 235-245.
 31. Fritz J, U-Thainual P, Ungi T, et al. Augmented reality visualization using image overlay technology for MR-guided interventions: cadaveric bone biopsy at 1.5 T[J]. *Invest Radiol*, 2013, 48(6): 464-470.
 32. U-Thainual P, Fritz J, Moonjaita C, et al. MR image overlay guidance: system evaluation for preclinical use [J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2013, 8(3): 365-378.
 33. Marker DR, U Thainual P, Ungi T, et al. 1.5 T augmented reality navigated interventional MRI: paravertebral sympathetic plexus injections[J]. *Diagn Interv Radiol*, 2017, 23(3): 227-232.
 34. Marker DR, U-Thainual P, Ungi T, et al. MR-guided perineural injection of the ganglion impar: technical considerations and feasibility[J]. *Skeletal Radiol*, 2016, 45(5): 591-597.
 35. 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, 26(9): 850-854.
 36. 杨波, 方世兵, 唐雷, 等. 数字化虚拟腰椎的三维重建及可视化研究[J]. *中华骨科杂志*, 2013, 33(1): 71-75.
 37. 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*, 2017, 32(7): 748-749.
 38. 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(1): 62-63.

(收稿日期:2018-06-22 末次修回日期:2018-09-07)

(本文编辑 姜雅浩)