

· 综述 ·

虚拟手术仿真在脊柱外科医师教学培养及手术训练中的应用及展望

侯 洋¹, 梁 磊¹, 林艳萍², 史建刚¹, 陈华江¹, 袁 文^{1*}

1.第二军医大学附属长征医院脊柱外科, 上海 200003

2.生物医学制造与生命质量工程研究所, 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240

【关键词】脊柱疾病; 外科手术; 用户计算机接口; 教育, 医学

【中图分类号】R-41 【文献标志码】A 【文章编号】1672-2957(2018)03-0174-05

【DOI】10.3969/j.issn.1672-2957.2018.03.010

Application and prospect of virtual surgery simulation in teaching and surgical training for spinal surgeon

HOU Yang¹, LIANG Lei¹, LIN Yan-ping², SHI Jian-gang¹, CHEN Hua-jiang¹, YUAN Wen^{1*}

1. Department of Spinal Surgery, Changzheng Hospital, Second Military Medical University, Shanghai 200003, China

2. Institute of Biomedical Manufacturing and Life Quality Engineering, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China

【Key Words】Spinal diseases; Surgical procedures, operative; User-computer interface; Education, medical

J Spinal Surg, 2018, 16(3): 174-178

随着微创化、智能化外科手术技术的飞速发展, 脊柱外科技术日新月异。由于脊柱解剖结构复杂、手术视野小、危险性高, 给脊柱外科传统或微创手术操作带来一定难度, 学习周期较长, 增加了脊柱外科医师的教学培养难度^[1-2]。外科手术训练的最好方法是大体标本练习, 但可能造成破伤风、乙型肝炎和结核的传播, 且大体标本来源有限; 大体标本同时还存在准备工作复杂及伦理问题等^[3]。另就是传统的学徒式教学方法——上级医师帮带住院医师, 上级医师要确保手术的顺利进行, 又要兼顾帮带, 无形中增加了手术风险, 亦难以确保教学质量, 难以满足临床教学的需求^[4]。如何在保证教学质量的情况下满足青年医师对于新技术的学习需求, 对传统的脊柱外科教学培养模式提出了挑战。

现代医学、计算机图形及虚拟现实(VR)技术的

发展使虚拟手术仿真(VSS)技术应运而生。VSS技术融合了多个学科, 从医学图像数据出发, 在计算机中模拟出人体器官模型, 创造虚拟医学环境, 并模拟交互式手术过程^[5-7]。医生可以使用VSS技术进行训练、手术技能演示、手术计划制订、术后康复计划制定^[8-10], 亦可用于临床医师医疗技术的评价^[11]。

本文通过对VSS技术在脊柱外科应用的相关文献进行分析, 阐述其在脊柱外科教学、手术训练中的发展现状, 评价培训效果并探讨其应用前景。

1 VSS技术在脊柱外科医师教学培养及手术训练中的应用

1.1 椎弓根螺钉内固定术

通过分析文献及在临床实践总结中发现, 在椎弓根螺钉技术的教学和手术训练中, 存在以下困难。①学习周期较长; ②螺钉突破椎弓根内侧及下方皮质可能对脊髓及神经根造成损伤; ③椎弓根螺钉的置入需要充分的显露螺钉入点, 为保证有一定内倾角的最佳螺钉置入路线, 需要对相应部位的软组织进行广泛的剥离; ④不熟练的操作导致手术时间延长, 出血及感染风险增加^[12-13]。

基金项目: 国家自然科学基金(81372017; 51575343);

上海市自然科学基金(17ZR1447600);

上海市教育科研市级课题(C160078);

上海市研究生培养模式改革研究课题面上项目

作者简介: 侯 洋(1982—), 博士, 主治医师; 1930247443@qq.com

*通信作者: 袁 文 yuanwenspine@163.com

VSS技术的出现为克服椎弓根螺钉技术的不足、有效提高其手术训练和教学效果创造了条件。Chitale等^[14]构建了一种新型计算机模拟经皮腰椎椎弓根螺钉内固定模型系统,该系统可实现教学与手术操作同步,可对受试者进行经皮椎弓根螺钉内固定术的相关解剖、病理生理及技术操作要点的培训。他们根据螺钉入点选择、透视及CT导航下螺钉的钉道情况对受试医师培训前后的手术操作进行评分,结果表明参加培训的8名医师理论考试成绩优良率由78%提高至100%,螺钉入点选择、钉道情况均得到改善,证实VSS技术能显著提高经皮腰椎椎弓根螺钉内固定术的教学和手术训练效果。Gasco等^[15]将26名住院医师随机分为非模拟组(接受传统椎弓根螺钉技术的视频和理论授课)及模拟组(在Immersive Touch模拟器上进行手术操作训练),训练结束后2组医师分别在腰椎标本上进行椎弓根螺钉置入操作;研究者通过CT扫描分析评价2组螺钉的入点、偏移、长度及突破椎弓根皮质的情况,结果表明受试医师单次模拟训练后每枚螺钉的平均出错率下降了53.7%,非模拟组及模拟组每枚螺钉的平均出错率分别为2.08%和0.96%,所有指标的检测中模拟组均优于非模拟组,差异均有统计学意义,差异最显著的指标分别是螺钉长度、偏移位置及椎弓根皮质突破率,作者认为VSS技术有益于教学及手术训练。Klein等^[16]开发的椎弓根螺钉置入培训模拟软件应用患者CT扫描数据进行三维重建,并在重建模型上进行训练,其能使脊柱医师掌握螺钉置入的基本技术并可对复杂病例的椎弓根螺钉置入进行重复训练,能够有效避免手术意外,提高了手术的安全性。Bichlmeier等^[17]报道了利用头戴显示器、2套动作捕捉系统及装有传感器的器械构成的用于虚拟腰椎椎弓根螺钉置入的手术VR平台。术者能够在一个装有硅胶模型的盒子中进行操作,通过头戴显示器可看到三维重建后的虚拟模型成像,结果表明VSS技术的应用能够显著缩短椎弓根螺钉技术的学习周期,明显降低手术相关并发症的发生,有效改善了脊柱外科医师的手术训练水平和临床教学效果,具有良好的实用价值。林艳萍等^[18]针对脊柱腰椎椎弓根螺钉内固定手术构建了VSS训练系统,该系统通过脊柱模型的虚拟几何建模和纹理渲染真实模拟了手术环境,逼真再现了腰椎椎弓根螺钉置入过程的视觉和触觉感受,使操作者获得接近真实手术的触觉体验。

1.2 颈椎侧块螺钉内固定术

颈椎侧块螺钉内固定术作为颈椎后路标准重建

手术已经广泛应用于临床,具有操作步骤简单,创伤小等特点。然而,有研究表明,颈椎侧块螺钉内固定术操作的熟练程度至关重要,不熟练的操作可能引起邻近关节突关节损伤、神经根损伤、椎动脉损伤及螺钉松动和移位^[19]。

Gottschalk等^[20]首次将研发的VSS系统应用于住院医师颈椎侧块螺钉内固定术的临床教学,结果表明接受VSS系统训练的受试组对于侧块螺钉入点的选择及进钉角度的把握明显优于传统教学组,同时2组在相邻结构(椎动脉、神经根、关节突)损伤发生率方面差异均有统计学意义;该研究的VSS系统采用导航钻的置入方法与临床操作一致,因此研究结果更具说服力,具有推广使用的价值。何建荣等^[21]将8例成年无破损畸形寰椎标本的CT扫描数据导入VSS系统进行三维重建和螺旋CT多平面重建(MPR),测量寰椎侧块数据,根据测量结果在标本上模拟寰椎侧块螺钉置入手术,然后在VSS系统进行重建,测量置钉准确性,结果表明螺钉全部位于侧块内,未伤及毗邻组织,验证了VSS技术对于复杂且风险大的上颈椎侧块螺钉置入手术训练的有效性。

1.3 脊柱微创手术

脊柱微创理念近年逐渐获得广泛认同,经皮椎体成形术(PVP)应运而生,其具有创伤小、并发症少、术后恢复快等优点。然而,由于其不能在直视下显露穿刺点,初学者不易掌握,需反复透视以确定合适的进针位置导致手术时间增加,同时神经损伤和骨水泥渗漏等相关并发症发生率亦有所增加。

Abe等^[22]报道了一种可用于显示PVP钉道的增强现实(AR)导航系统。操作者通过配备带跟踪摄像头的头戴显示器可清楚地观察到穿刺针的入点及钉道的位置。在AR导航系统辅助下行PVP的5例老年骨质疏松患者均获得了满意的疗效,未发生椎弓根穿破或骨水泥渗漏情况。Wucherer等^[23]通过VSS技术构建的虚拟环境来评估技术因素和精神状态对医师PVP操作的影响,同时通过观察手术医师对虚拟环境中预设的危急场景的处理对受试者进行评估;结果表明技术因素和精神状态均会对术者产生重要影响,术者经验水平的高低与其术中紧急时刻能否合理应对直接相关,同时也证实了VSS系统应用于脊柱外科医师手术培训以及考核评价的可靠性。

目前其他脊柱微创手术(经皮椎弓根螺钉内固定术及经椎间孔内窥镜技术)的VR研究不多,这些手术是目前脊柱外科临床教学和手术训练的热点和难点。因脊柱微创手术操作空间狭小、流程繁琐及教学资源相对匮乏,导致临床教学中普遍存在学

习周期长、效率低等问题。相信随着VR技术的快速发展, 将会逐步解决上述问题, 同时更好地推动脊柱微创技术的革新。

1.4 脊柱侧凸内固定术

现代多节段脊柱的固定和手术器械的发展为脊柱侧凸患者提供了多种多样的手术方案选择。在脊柱侧凸手术的教学中, 如何让住院医师更有效的理解和掌握不同的手术方式及其与手术预后的关系, 是当前的重点和难点。由于脊柱侧凸手术时间长、难度大, 必须由高年资医师进行操作, 住院医师观摩和训练的机会非常有限, 增加了脊柱侧凸手术技术的学习周期, 而VR技术为解决这一难题创造了条件。

李春海等^[24]通过计算机软件构建了脊柱侧凸的数字化VR模型, 该模型保真度较高, 能够清晰显示出脊柱各椎体及附件的相互关系、脊柱与骨盆空间关系, 立体展现脊柱各生理弯曲方向及程度。可在无其他工具辅助的情况下实现解剖结构在现实环境中的重现, 达到裸眼3D的效果, 为脊柱截骨、置钉手术模拟及生物力学研究提供了理想的数字化载体, 有利于术前对患者进行个体化评估, 有效降低了相关手术并发症的发生率。张树芳等^[25]采用VR技术结合3D打印, 探索了其在青少年特发性脊柱侧凸(AIS)椎弓根螺钉置入手术中的应用效果。研究者首先通过VR技术重建AIS患者的脊柱模型, 之后按照虚拟内固定设计方案进行椎弓根螺钉最佳位置设计、螺钉长度测量、螺钉进入途径设计等一系列模拟内固定, 然后在现实手术中行椎弓根螺钉内固定三维矫形; 结果表明与术前相比, 患者术后冠状面主胸弯Cobb角、顶椎偏距明显改善, 且未出现神经、血管和内脏损伤等并发症, 同时椎弓根螺钉位置良好。Aubin等^[26]将一种脊柱手术模拟器(S3)用于脊柱侧凸患者内固定手术方案的选择评估, S3能够模拟各种类型的脊柱侧凸, 同时还可以模拟内固定手术进行矫形; 使用者通过S3的人机界面能够自由选择不同类型的内固定器械及手术方案, 同时系统可以实时显示相应手术的矫形效果; 结果表明S3对10例脊柱侧凸病例的模拟结果与实际术后表现相符(平均Cobb角前后位相差3.5°~4.6°, 矢状位相差3.6°~4.7°), 证实VSS技术在脊柱侧凸手术术前方案制定方面的巨大应用潜力。Robitaille等^[27]选取了5例脊柱侧凸患者, 每例患者均采用VSS系统对多种手术内固定方案进行模拟, 结果表明椎弓根螺钉的矫形效果佳, 钩板系统固定效果差, 混合2种器械的手术效果介于两者之间。Majdouline等^[28]采用S3模拟了702种不同的脊柱侧凸内固定手术方案,

结果表明通过较少节段的固定融合完全能够获得与以往常规多节段固定同样的矫形效果, 同时最大限度地保留了脊柱的活动度; 该研究还指出S3在优化AIS患者内固定手术计划中的可行性及潜在优势。住院医师采用VSS系统可以对不同类型的脊柱侧凸进行手术方案的练习, 有助于增强对手术难点的掌握, 缩短了学习周期, 显著提高临床教学成效。

2 VSS技术的优点与不足

VSS技术优点: ①为外科医师的培训提供了更多的手段和机会, 可使操作者产生与真实手术环境相类似的感觉体验。研究已经证实VSS技术对提高住院医师的临床水平成效显著, 且适用范围广。同时VSS技术能显著改善患者的治疗效果并降低手术风险, 减少相关并发症的发生^[1]。②基于VR技术的模拟器能够为外科医师提供无限的操作机会, 缩短了培训周期, 同时还减少了对紧缺教学资源(大体标本)的需求, 亦可避免使用大体标本的不足之处。③很好地实现“因材施教”, VSS技术能根据医师的实际操作水平和能力调整训练难度, 提供循序渐近的专业训练^[29]。④根据临床采集的数据制定独特的手术评价指标。如器械使用是否合理, 有无损伤重要的组织结构^[30]。因此, 可通过VSS技术有效评价操作者的技指标是否达到了考核标准^[31]。⑤在不增加患者风险的情况下研究哪些因素可能对外科医师的手术操作产生影响, 如手术室的环境布置或医师的精神状态^[32]。⑥方便的构建不同大小和形状的手术模型。辅助CT或MRI影像学扫描可以构建患者特异性的三维解剖结构。脊柱外科医师可以根据生成的虚拟图像决定置入物的大小和放置位置。运动模型还能够预测脊柱的运动状态。⑦在临床实践中还可与外科导航技术配合使用, 以最大限度提高其使用效果。具有力反馈功能的触感装置的使用则有效增强了手术的训练效果。所有病例均可通过VSS技术进行构建, 操作者可以使用真实的手术器械, 观察患者体内的三维解剖结构。此外, VSS技术还能够科学严谨地评价受试者的学习效果^[1]。

尽管VSS技术有诸多优点, 但也存在有待改进的方面: ①尚未实现对气味的模拟。气味作为人类的一种主要感觉可以区分不同的物质, 如能实现并应用于临床教学中, 可提高手术训练的沉浸感与真实性。②尚未实现超声图像的实时显示。超声图像可以提供患者的实时信息, 这是CT图像无法比拟的, 通过实时超声图像的反馈, 有助于住院医师深刻体会手术操作的每一个步骤, 不断修正操作, 从

而提高教学训练效果。③目前VSS技术主要是对视觉的模拟, 对触觉模拟还很不完善, 因此手术训练与真实手术间还存在一定差距, 这种偏差可能增加患者的手术风险, 同时亦影响了VSS技术训练的真实性。④计算机的处理速度有待提高。为了增强VSS技术的真实性, 需不断增加VSS技术与操作者的融合与同步, 对计算机处理速度的要求也会越来越高, 而理想人机融合模式的实现无疑将使临床教学事半功倍。

3 VSS技术在脊柱外科领域的发展前景

理想的脊柱外科VSS技术应该能够多模态融合触觉、视觉和听觉技术, 以构建全方位的具有沉浸感的虚拟环境。比较理想的标准就是目前在航空领域广泛应用的飞行模拟器, 其能够在飞行座舱中真实模拟不同天气条件下的飞机操作, 为使用者提供真实的听觉、视觉和运动感觉体验。此外, 发展完善患者特异性VSS技术非常重要。术前医师可通过将患者的CT或MRI数据输入VSS技术的软件中以实现图像的处理并构建特异性虚拟手术模型, 并据此制定手术计划并进行预演。患者特异性VSS技术已在腹腔镜、血管外科、骨创伤、神经外科和整形外科等领域得到初步应用, 但系统的仿真度和可靠性仍有待完善^[33-35], 相信随着技术的不断进步, 功能更加先进、全面的特异性VSS技术一定会在临床手术训练和教学当中发挥不可替代的作用。

脊柱肿瘤手术是脊柱外科VSS技术未来应用的重要方向, 目前相关研究报道较少。刘登均等^[36]在该领域进行了初步的探索, 其采用CT资料和Mimics软件分别重建了正常腰椎、患椎、腹主动脉及双侧肾脏的三维可视化结构, 结果显示三维重建的虚拟模型结构清晰, 可真实再现患椎和邻近脏器的结构, 证实了VSS技术能够准确重建腰椎恶性肿瘤及其邻近结构, 明确患椎及清除范围, 为个体化的治疗提供了客观的依据。然而该研究并未利用所构建的虚拟模型进行手术模拟操作, 尚不清楚其与临床实际操作的相符程度, 需要后续研究探索。

另一方面, 未来通过不断完善触觉感受器的功能有望实现将脊柱外科专家的手术技术在VSS中“重现”。通过设定VSS系统中每个步骤以及手术器械操作的反馈力大小以确定最佳手术标准, 可为脊柱外科医师提供精准的专业指导和理想的学习目标。此外还可以发展混合式VSS系统, 即将真实的物理模型和手术器械与VSS技术相互配合使用, 这样既有助于增强手术的真实感, 亦可以充分利用

VSS技术的优势最大限度地增强医师的训练效果。

脊柱外科手术的精细化、微创化, 持续存在的医患矛盾及患者对手术效果的高期望, 这些都对脊柱外科医师的手术操作提出了更高的要求, 传统“术中带教”的模式不能满足临床及教学的需要, VSS技术的不断成熟和发展正好填补了这一需求, 在降低手术训练成本和患者风险的同时明显缩短脊柱外科医师的学习周期, 快速推动脊柱外科手术技术的发展, 亦能产生良好的社会和经济价值。

总之, 随着VR技术的飞速发展, VSS技术必将在脊柱外科各个领域获得广泛而深入的应用, 为脊柱外科医师提供更加真实的培训体验, 在更好地推动脊柱外科手术技术发展的同时降低患者的手术风险, 其巨大的潜力和广阔的应用前景将为改善人类的健康作出贡献。

参考文献

- [1] 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): ons14-19.
- [2] 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.
- [3] Aziz MA, McKenzie JC, Wilson JS, et al. The human cadaver in the age of biomedical informatics [J]. Anat Rec, 2002, 269(1): 20-32.
- [4] Slade Shantz JA, Leiter JR, Gottschalk T, et al. The internal validity of arthroscopic simulators and their effectiveness in arthroscopic education [J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2014, 22(1): 33-40.
- [5] Muralha N, Oliveira M, Ferreira MA, et al. Virtual reality eimulation as a tool to monitor surgical performance indicators: VIRESI observational study [J]. Acta Med Port, 2017, 30(5): 388-394.
- [6] Konakondla S, Fong R, Schirmer CM. Simulation training in neurosurgery: advances in education and practice [J]. Adv Med Educ Pract, 2017, 8: 465-473.
- [7] Ricard-Gauthier D, Popescu S, Benmohamed N, et al. Virtual reality simulation training in gynecology: review and perspectives [J]. Rev Med Suisse, 2016, 12(536): 1800-1804.
- [8] 崔梦舸.医学虚拟现实技术发展与应用[J].电子世界, 2015, 20(18): 188-189.
- [9] 王秀会, 付备刚, 王明辉.数字化虚拟手术系统在胸腰椎骨折治疗中的应用价值[J].脊柱外科杂志,

- 2016, 14(1): 5-9.
- [10] Bernardo A. Virtual reality and simulation in neurosurgical training[J]. World Neurosurg, 2017, 106: 1015-1029.
- [11] 侯振江, 王凤玲, 李红岩.虚拟现实技术在医学教育中的应用价值[J].中国医学装备, 2014, 11(8): 70-72.
- [12] Avila MJ, Baaj AA. Freehand thoracic pedicle screw placement: review of existing strategies and a step-by-step guide using uniform landmarks for all levels[J]. Cureus, 2016, 8(2): e501.
- [13] Amrouche F, Solitro GF, Magnan BP. Stability and spine pedicle screws fixation strength—a comparative study of bone density and insertion angle[J]. Spine Deform, 2016, 4(4): 261-267.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Klein S, Whyne CM, Rush R, et al. CT-based patient-specific simulation software for pedicle screw insertion [J]. J Spinal Disord Tech, 2009, 22(7): 502-506.
- [17] Bichlmeier C, Heining SM, Rustaee M, et al. Virtually extended surgical drilling device: virtual mirror for navigated spine surgery[J]. Med Image Comput Comput Assist Interv, 2007, 10(Pt 1): 434-441.
- [18] 林艳萍, 郭晓杰, 陈华江, 等.基于力反馈的腰椎内固定虚拟手术训练系统构建[J].北京生物医学工程, 2016, 35(6): 561-565.
- [19] Pateder DB, Carbone JJ. Lateral mass screw fixation for cervical spine trauma: associated complications and efficacy in maintaining alignment[J]. Spine J, 2006, 6(1): 40-43.
- [20] 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.
- [21] 何建荣, 李超, 杨会武, 等.虚拟手术系统支持下置入寰椎侧块螺钉的实验研究[J].中国脊柱脊髓杂志, 2012, 22(2): 156-159.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 张树芳, 陈荣春, 郭朝阳, 等.基于3D打印技术选择性椎弓根螺钉治疗青少年特发性脊柱侧凸[J].中国组织工程研究, 2016, 20(48): 7225-7231.
- [26] Aubin CE, Labelle H, Chevrefils C, et al. Preoperative planning simulator for spinal deformity surgeries[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2008, 33(20): 2143-2152.
- [27] Robitaille M, Aubin CE, Labelle H. Effects of alternative instrumentation strategies in adolescent idiopathic scoliosis: a biomechanical analysis[J]. J Orthop Res, 2009, 27(1): 104-113.
- [28] Majdouline Y, Aubin CE, Sangole A, et al. Computer simulation for the optimization of instrumentation strategies in adolescent idiopathic scoliosis[J]. Med Biol Eng Comput, 2009, 47(11): 1143-1154.
- [29] de Visser H, Watson MO, Salvado O, et al. Progress in virtual reality simulators for surgical training and certification[J]. Med J Aust, 2011, 194(4): S38-40.
- [30] van Dongen KW, Tournoij E, van der Zee DC, et al. Construct validity of the LapSim: can the LapSim virtual reality simulator distinguish between novices and experts?[J]. Surg Endosc, 2007, 21(8): 1413-1417.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] Kwon SS, Yun YH, Hong SB, et al. A patient-specific model of virtual ablation for atrial fibrillation[J]. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc, 2013, 2013: 1522-1525.
- [34] Adolphs N, Haberl EJ, Liu W, et al. Virtual planning for craniomaxillofacial surgery—7 years of experience[J]. J Craniomaxillofac Surg, 2014, 42(5): e289-295.
- [35] Arora A, Swords C, Khemani S, et al. Virtual reality case-specific rehearsal in temporal bone surgery: a preliminary evaluation[J]. Int J Surg, 2014, 12(2): 141-145.
- [36] 刘登均, 贺小兵, 王明贵, 等.虚拟仿真技术构建三维模型在腰椎转移性肿瘤中的应用[J].中国组织工程研究, 2014, 18(48): 7844-7848.

(收稿日期: 2017-07-12)

(本文编辑: 张建芬)