

· 基础研究 ·

基于力反馈的虚拟手术训练系统在骨科住院医师临床教学中的应用

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

1. 海军军医大学附属长征医院骨科, 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

【摘要】目的 评价脊柱虚拟手术训练系统(VSTS)对骨科医师椎弓根螺钉置钉技术培训的有效性。**方法** 10名无椎弓根置钉经验的住院医师随机平均分为虚拟手术训练组(A组)和传统教学组(B组)。其中A组于置钉前在VSTS上练习置入腰椎椎弓根螺钉, B组于置钉前接受技术讲解和视频演示的传统教学。将8具新鲜成人尸体标本随机分配给2组。2组受试者培训后分别于尸体标本上进行双侧腰椎(L₁₋₅)椎弓根螺钉置入操作。采用CT评价椎弓根螺钉置入准确率, 分析比较2组间螺钉穿破率、螺钉可接受率以及平均螺钉穿破距离的差异。**结果** 螺钉穿破率A组(12.5%)显著低于B组(37.5%), 差异有统计学意义($P<0.05$); 螺钉可接受率A组为100%, B组为85%, 差异有统计学意义($P<0.05$); 螺钉穿破距离A组为(1.37 ± 0.62) mm, B组为(2.42 ± 0.51) mm, 差异有统计学意义($P<0.05$)。**结论** VSTS较传统教学能有效提高椎弓根螺钉的置钉准确率, 具有理想的应用前景。

【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)05-0293-04

【DOI】 10.3969/j.issn.1672-2957.2018.05.009

Application of virtual surgical training system based on force feedback in clinical teaching for orthopaedic residents

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

1. Department of Orthopaedics, Changzheng Hospital, Naval Military Medical University, Shanghai 200003, China

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

【Abstract】Objective To assess the validity of virtual surgical training system(VSTS) on lumbar pedicle screw placement for orthopaedic surgeons. **Methods** Ten inexperienced residents were randomly assigned to the simulation training group(group A) and control group(group B). Group A received the lumbar pedicle screw placement on VSTS, and group B was given an introductory teaching session before cadaver test. A total of 8 adult fresh cadavers were collected and randomly allocated to the 2 groups. Each group received the bilateral L₁₋₅ pedicle screw instrumentation in the cadaver specimens after training. Accuracy was assessed by CT after instrumentation. The screw penetration rates, acceptable rates and average screw penetration distance were compared between the 2 groups using statistical analysis. **Results** The screw penetration rate of group A(12.5%) was significantly lower than that of group B(37.5%), and the difference was statistically significant($P<0.05$). The screw acceptable rates were 100% in group A and 85% in group B, and the difference was statistically significant($P<0.05$). The screw penetration distance was (1.37 ± 0.62) mm in group A and (2.42 ± 0.51) mm in group B, and the difference was statistically significant($P<0.05$). **Conclusion** The VSTS can effectively enhance the accuracy of the pedicle screw placement in comparison to the traditional teaching method, and possesses very ideal application prospect.

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

J Spinal Surg, 2018, 16(5): 293-296

基金项目: 国家自然科学基金项目(81372017, 51575343);

上海市自然科学基金项目(17ZR144760);

上海市教育科研市级课题(C160078)

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

*通信作者: 袁 文 Alexzandersuper@163.com

椎弓根置钉技术广泛应用于脊柱外科手术中, 是治疗脊柱退行性疾病、外伤、肿瘤、结核等的金标准^[1-3]。椎弓根毗邻脊髓、血管、内脏等重要组织, 如果椎弓根螺钉的位置出现偏差, 将会引起严重的并发症, 造成手术失败^[4-5]; 而熟练掌握此项技术需要大量手术经验的积累和反复的练习, 对于初学者来说学习曲线陡峭。如何在最短时间内熟练掌握椎弓根螺钉置钉技术, 虚拟现实技术的出现有望解决这一问题^[6]。

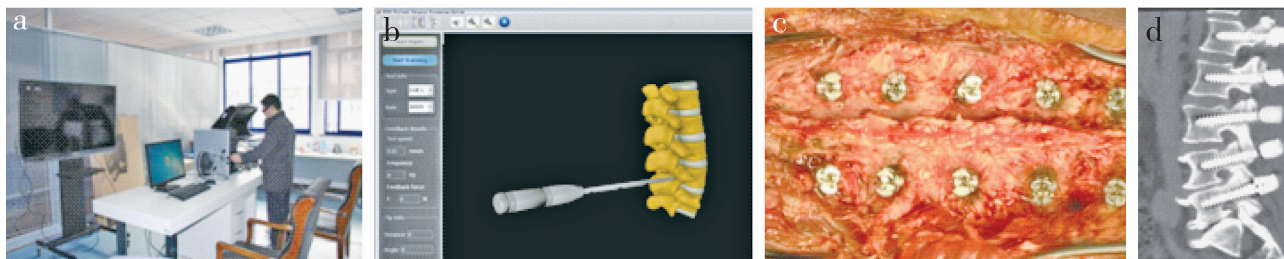
虚拟手术系统从医学图像数据出发, 在计算机中模拟人体器官模型, 创造虚拟医学环境, 并模拟交互式手术过程。医师可以使用虚拟手术系统进行训练、手术技能演示、手术计划以及术后康复工作制定等^[7]。虚拟手术系统的出现有助于加强医生对先进手术方式的训练, 使培训时间缩短, 同时还减少了对紧缺教学资源的需求。基于此, 本研究针对虚拟骨科手术中的人机交互问题, 结合虚拟现实技术、医学影像学及生物力学建模方法, 对脊柱外科虚拟手术中的环境图形建模、人体脊柱三维形态学建模、人体脊柱生物力学模型进行了研究, 研发了基于力反馈的虚拟手术训练系统(VSTS)。本研究

将VSTS用于脊椎外科医师椎弓根螺钉置钉技术的培训并评价其有效性, 现报告如下。

1 资料与方法

1.1 置钉虚拟训练

10名无椎弓根置钉经验的住院医师随机平均分为2组, VSTS训练组(A组)和传统教学组(B组)。VSTS系统采用一系列模块来获取、处理、渲染图形和触觉数据, 然后无缝集成于系统的硬件平台上。利用患者的CT数据构建虚拟腰椎3D模型。A组受试者在VSTS上进行30 min腰椎椎弓根置钉训练, 通过系统的力反馈, 受试者能够感受到虚拟钻头与三维等值面之间的接触, 操作手柄上的按钮可以控制虚拟钻头开启, 钻孔完成时按下操作手柄上的相应按钮即可将螺钉置于最终的位置上; 当螺钉偏离系统预设的路线时力觉交互装置便会产生相应的反作用力, 以模拟手术操作时术者置钉的真实力学感受; 受试者要改变置钉路径时, 钻头必须沿着进入时的通道退出后才能重新打孔(图1)。B组受试者通过手术流程讲解和视频演示的传统教学方法学习腰椎椎弓根置钉。



a: 基于力反馈的VSTS b: VSTS的人机交互界面 c: 模拟后在尸体标本上置入双侧腰椎椎弓根螺钉(L₁₋₅) d: 术后腰椎矢状位CT
a: VSTS based on force feedback b: Man-machine interactive interface of VSTS c: Bilateral lumbar vertebral pedicle screws are placed(L₁₋₅) in cadaver specimen after simulation d: Postoperative sagittal CT of lumbar spine

图1 基于力反馈的VSTS

Fig. 1 VSTS based on force feedback

1.2 置钉尸体操作

8具新鲜尸体标本(男5具, 女3具, 年龄33~79岁)随机平均分为2组。尸体标本无腰椎骨折、结核、肿瘤或细小椎弓根等不适合置钉的情况。2组标本均通过CT扫描测量椎弓根的大小和内倾角, 由3名影像科医师独立评价比较2组标本的测量值, 数据采用独立样本 t 检验, 结果表明2组数据具有可比性。尸体标本取俯卧位, 采用后正中切口, 将肌肉及韧带组织向两侧剥离显露椎板和关节突骨性结构, 置入双侧腰椎椎弓根螺钉。

1.3 置钉准确性评价

手术完成后所有标本进行CT扫描, 扫描结果由3名影像科医师独立评价。参考既往相关解剖与临床研究^[8-10], 将螺钉位置分为4级: I级, 螺钉完全位于椎弓根内; II级, 螺钉穿破椎弓根壁 ≤ 2 mm; III级, 螺钉穿破椎弓根壁 > 2 mm且 ≤ 4 mm; IV级, 螺钉穿破椎弓根壁 > 4 mm。有研究表明, 螺钉位于椎弓根内侧 > 2 mm即可能对脊髓神经造成损伤^[11], 因此, 本研究组将III级螺钉(穿破椎弓根上、下、内侧壁)及IV级螺钉划分为不可接受螺钉, 其余为可

接受螺钉。

1.4 统计学处理

应用SPSS 17.0软件对数据进行统计学分析。组间螺钉准确率和可接受率的比较采用 χ^2 检验,螺钉穿破距离的比较采用独立样本 t 检验。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结 果

2组分别置入椎弓根螺钉40枚。A组螺钉Ⅰ级35枚,Ⅱ级5枚;螺钉穿破距离为 (1.37 ± 0.62) mm;螺钉可接受率为100%。B组螺钉Ⅰ级25枚,Ⅱ级螺钉9枚,Ⅲ级4枚(1枚穿破上壁,1枚穿破下壁,2枚穿破内壁),Ⅳ级2枚;螺钉穿破距离为 (2.42 ± 0.51) mm;6枚(4枚Ⅲ级和2枚Ⅳ级)螺钉的位置不可接受,螺钉可接受率为85%。A组和B组螺钉穿破率(Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ级)分别为12.5%和37.5%。螺钉穿破率A组低于B组,螺钉可接受率A组高于B组,螺钉穿破距离A组小于B组,差异均有统计学意义($P < 0.05$)。

3 讨 论

目前,椎弓根置钉技术在脊柱外科应用最为广泛,螺钉位置的好坏直接关系手术的成败^[8]。Gonzalvo等^[9]发现椎弓根置钉技术的学习曲线陡峭,初学者需要>80个椎弓根置钉经验才可能明显降低螺钉穿破皮质的发生率。

为了有效降低椎弓根螺钉置钉并发症的发生,先后有多种导航技术应用于临床以提高置钉准确率^[10, 12-14],包括术中透视和CT引导下计算机辅助系统(CAS)。术中透视的主要优点是适用范围较广,缺点是在某些脊柱节段(上胸椎)图像质量较差^[15]。CAS图像精确度较高,尤其适用于颈椎及上胸椎,同时应用CAS还可以进行手术方案的制定。这两种技术的应用均显著提高了椎弓根置钉的准确率。CAS的主要缺点是术中患者解剖学位置的改变并不能反映到其术前的扫描图像中,这种差异可能引起导航偏差进而降低椎弓根置钉的准确率,引起严重的神经、血管损伤^[16]。此外,应用CAS还存在患者辐射暴露时间较长、术前准备时间增加、视野局限、操作复杂及设备昂贵等问题^[16]。

随着计算机及图像处理相关技术的飞速发展,虚拟现实技术在过去10年中逐渐应用于骨科临床并取得了理想的效果。虚拟手术系统应用于脊柱外科医师的培训将有利于以往复杂且高风险手术

技术的推广和应用,减少相关手术并发症的发生,降低医师的学习曲线,减少相应的医疗支出^[17]。Majdouline等^[18]应用脊柱手术模拟程序S3系统,于计算机上模拟并选择最佳的内固定策略来治疗成人特发性脊柱侧凸,在1例脊柱侧凸患者数据模型上模拟进行了702种手术策略,证实S3系统在优化成人特发性脊柱侧凸手术内固定计划中的可行性及潜在优势。Aurouer等^[19]采用Spine View软件对11例患者进行术前手术计划的制定,对不同手术方法进行评估并选择最佳的手术策略,其中8例患者术后疗效与术前模拟评估结果一致。Klein等^[20]开发了专为椎弓根置钉培训的模拟软件,该软件应用患者CT扫描数据进行三维重建,并在重建模型上进行训练,使医师能够掌握置钉的基本技术并对复杂病例的椎弓根置钉进行反复训练,有效避免了手术意外的发生,提高了手术的安全性。Bichlmeier等^[21]报道了由头戴显示器、两套动作捕捉系统及一个装有传感器的器械构建的用于虚拟腰椎椎弓根置钉的虚拟现实手术平台。术者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虚拟模型成像。何建荣等^[22]通过BioMxsf虚拟手术系统,将64排CT扫描的8具上颈椎标本数据进行重建,测量入钉位置并确定内斜角置钉,术后8例标本MSCT扫描示置入螺钉均完全位于侧块内,未伤及毗邻组织。

上述研究已初步证实了虚拟现实技术改善椎弓根螺钉置钉技术临床效果的有效性。但这些研究中的虚拟手术系统主要是视觉仿真,并不具备力反馈功能,操作者在进行手术预演和培训时无法感知手术场景中的力学信息,手术的沉浸感和真实性受到影响。医师在这种环境中进行手术培训可能会得到错误的经验而产生误操作,与真实的手术环境有较大差距。因此本研究组研发了基于力反馈的VSTS,应用于医师的临床教学,受试者在系统上反复模拟椎弓根置钉后进行尸体标本的实际操作,结果证实该系统可提高医师椎弓根螺钉置钉的准确率,VSTS训练组的螺钉穿破率低于传统教学组,螺钉可接受率高于传统教学组,螺钉穿破距离小于传统教学组。

综上所述,通过在VSTS上反复练习,操作者能够熟悉掌握椎弓根螺钉的进钉点及相关解剖标志,同时力反馈功能使操作者在钻孔过程中获得与真实手术中相似的触觉体验。VSTS训练能使医师在短时间内掌握椎弓根置钉技术,提高置钉的准确率,应用前景理想。

参考文献

- [1] Kim YJ, Lenke LG, Kim J, et al. Comparative analysis of pedicle screw versus hybrid instrumentation in posterior spinal fusion of adolescent idiopathic scoliosis [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2006, 31(3): 291-298.
- [2] 曾忠友, 裴斐, 张建乔, 等. 腰椎后路内固定融合术并发神经损伤的原因分析和处理[J]. 脊柱外科杂志, 2016, 14(2): 83-86.
- [3] Lonstein JE, Denis F, Perra JH, et al. Complications associated with pedicle screws [J]. J Bone Joint Surg Am, 1999, 81(11): 1519-1528.
- [4] Gelalis ID, Paschos NK, Pakos EE, et al. Accuracy of pedicle screw placement: a systematic review of prospective *in vivo* studies comparing free hand, fluoroscopy guidance and navigation techniques [J]. Eur Spine J, 2012, 21(2): 247-255.
- [5] Gautschi OP, Schatlo B, Schaller K, et al. Clinically relevant complications related to pedicle screw placement in thoracolumbar surgery and their management: a literature review of 35, 630 pedicle screws [J]. Neurosurg Focus, 2011, 31(4): E8.
- [6] Lee GY, Massicotte EM, Rampersaud YR. Clinical accuracy of cervicothoracic pedicle screw placement: a comparison of the "open" lamino-foraminotomy and computer-assisted techniques [J]. J Spinal Disord Tech, 2007, 20(1): 25-32.
- [7] 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.
- [8] Kotil K, Bilge T. Accuracy of pedicle and mass screw placement in the spine without using fluoroscopy: a prospective clinical study [J]. Spine J, 2008, 8(4): 591-596.
- [9] Gonzalvo A, Fitt G, Liew S, et al. The learning curve of pedicle screw placement: how many screws are enough? [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2009, 34(21): E761-765.
- [10] Fu TS, Wong CB, Tsai TT, et al. Pedicle screw insertion: computed tomography versus fluoroscopic image guidance [J]. Int Orthop, 2008, 32(4): 517-521.
- [11] Wood MJ, McMillen J. The surgical learning curve and accuracy of minimally invasive lumbar pedicle screw placement using CT based computer-assisted navigation plus continuous electromyography monitoring-a retrospective review of 627 screws in 150 patients [J]. Int J Spine Surg, 2014, 8. doi: 10.14444/1027. eCollection 2014.
- [12] Kotil K, Bilge T. Accuracy of pedicle and mass screw placement in the spine without using fluoroscopy: a prospective clinical study [J]. Spine J, 2008, 8(4): 591-596.
- [13] Ito Y, Sugimoto Y, Tomioka M, et al. Clinical accuracy of 3D fluoroscopy-assisted cervical pedicle screw insertion [J]. J Neurosurg Spine, 2008, 9(5): 450-453.
- [14] Merloz P, Tonetti J, Pittet L, et al. Pedicle screw placement using image guided techniques [J]. Clin Orthop Relat Res, 1998, (354): 39-48.
- [15] Gebhard F, Weidner A, Liener UC, et al. Navigation at the spine [J]. Injury, 2004, 35(Suppl 1): S-A35-45.
- [16] Manbachi A, Cobbald RS, Ginsberg HJ. Guided pedicle screw insertion: techniques and training [J]. Spine J, 2014, 14(1): 165-179.
- [17] Aïm F, Lonjon G, Hannouche D, et al. Effectiveness of virtual reality training in orthopaedic surgery [J]. Arthroscopy, 2016, 32(1): 224-232.
- [18] 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.
- [19] Aurouer N, Obeid I, Gille O, et al. Computerized preoperative planning for correction of sagittal deformity of the spine [J]. Surg Radiol Anat, 2009, 31(10): 781-792.
- [20] 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.
- [21] Bichlmeier C, Heining SM, Rustae 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.
- [22] 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.

(收稿日期: 2017-06-22)

(本文编辑: 刘映梅)