

导航技术在椎弓根螺钉内固定术中的应用现状与进展

李欣宸, 姬 烨, 陈光华, 闫景龙*

哈尔滨医科大学附属第二医院骨科, 哈尔滨 150010

【关键词】脊柱疾病; 内固定器; 计算机辅助设计; 综述文献

【中图分类号】R 681.5 【文献标志码】A 【文章编号】1672-2957(2020)05-0352-05

【DOI】10.3969/j.issn.1672-2957.2020.05.014

Application and progress of navigation technology in pedicle screw internal fixation

LI Xin-chen, JI Ye, CHEN Guang-hua, YAN Jing-long*

Department of Orthopaedics, Secend Affiliated Hospital of Harbin Medical University, Harbin 150010, Heilongjiang, China

【Key Words】Spinal diseases; Internal fixators; Computer-aided design; Review literature

J Spinal Surg, 2020, 18(5): 352-356

椎弓根螺钉内固定技术因其优越的生物力学性能在脊柱外科领域得到广泛应用, 如脊柱骨折、脊髓损伤、脊柱肿瘤、脊柱畸形及脊柱退行性病变等的治疗^[1]。随着现代医学的进步, 脊柱外科手术不断向更加精细和微创的方向发展, 这对椎弓根螺钉置入的精准性提出了更高的要求。导航技术可在术中引导操作方向并准确定位椎弓根螺钉等内固定物^[2], 以避免椎弓根螺钉置入过程中对神经、血管造成损伤, 降低手术风险。随着技术的发展, 导航技术已应用于颈、胸、腰全部脊柱节段的手术。导航技术通过收集和分析术前、术中及术后数据并分析转化后实现图像的二维或三维可视化, 进而降低误操作率。目前的导航系统通过整合术前定位、术中仪器跟踪及成像技术, 能在一定程度上提高手术准确性, 且在计算机技术、传感器技术和机器人技术领域有巨大的发展空间。本文重点阐述应用较为广泛的导航技术在椎弓根螺钉内固定术中的应用现状, 对比其优缺点, 现综述如下。

1 导航技术优势

不同脊柱节段有不同解剖学特点和好发疾病, 如腰椎退行性疾病, 尤其伴有腰椎滑脱的患者腰椎

常出现旋转、滑移及增生, 腰椎原有解剖学结构改变, 增加了徒手置钉的难度^[3]。Costa等^[4]的研究对导航与非导航手术的退行性腰椎滑脱患者资料进行比较, 结果显示, 导航组手术时间明显缩短, 置钉准确性优于非导航组; 导航组和非导航组的手术时间分别为 (92 ± 31) min和 (119 ± 43) min; 置钉精确率为96.2%和91.1%; 不良置钉率为0%和0.8%。

相较腰椎而言, 胸椎椎弓根直径较腰椎更为狭窄, 置钉时穿破皮质的风险也随之增加。王岩等^[5]徒手置入405枚胸椎椎弓根螺钉, 其中124枚螺钉不同程度地穿破皮质(21枚穿破皮质距离 >4 mm)。同时胸椎也是脊柱侧凸的主要累及节段, 且脊柱侧凸患者往往有着个体化的脊柱结构变异, 在脊柱矫形手术中, 如何安全准确地置入椎弓根螺钉是重中之重。Kotani等^[6]回顾性分析了脊柱矫形手术中416枚椎弓根螺钉的置入情况, 术中采用O形臂3D导航辅助置钉与传统透视置钉, 单个螺钉的置钉时间分别为 (5.4 ± 1.1) min和 (10.9 ± 3.2) min, 导航辅助置钉时间明显缩短、椎弓根螺钉穿孔率下降了约2%。

与其他节段相比, 颈椎椎弓根最细小且变异性较大, 颈椎椎弓根螺钉多用于颈椎稳定性的重建, 如颈椎骨折脱位的复位固定或严重后凸畸形的矫形^[7]。Singh等^[8]在计算机辅助导航下置入的52枚上颈椎椎弓根螺钉, 仅1枚为非精确置钉, 且患者并未因

作者简介: 李欣宸(1994—), 硕士在读, 医师;

lixinchen1994@sohu.com

*通信作者: 闫景龙 gw6-yjl@hotmail.com

此出现神经功能损伤。Abumi等^[9]徒手置入颈椎椎弓根螺钉准确性的研究显示,即使是经验丰富的脊柱外科医师,徒手置入669枚螺钉中仍有45枚不同程度穿破皮质,其中2枚损伤神经根。

综上,相较于徒手置钉,导航技术在脊柱各节段的置钉效率和准确性上均有着不同程度的优势,并且这一优势在椎弓根狭窄和解剖结构复杂的部位体现更为明显。

2 常用导航技术

2.1 C形臂X线机及Iso-C 3D影像系统

术中C形臂X线机透视是目前临床上较为常用的一种导航技术,因价格低廉、操作简单在各级医院应用广泛。但C形臂X线机的局限性也较为明显,如需要反复多次透视,增加术区污染风险的同时对医患造成辐射^[10];透视图像为透视方向上全部结构的二维叠加,解剖学标志相互重叠,空间位置不清晰,术中的定位很大程度上依赖对二维投影信息的人为解读,而这种解读又完全依赖医师的经验及主观认知,无法做到客观和准确;此外,该方法还面临着术者无法直接操作设备,而设备操作者不能准确领会术者对透视角度的要求等问题。为解决这一问题,Hofstetter等^[11]提出了基于透视的计算机辅助导航系统,该系统由定位系统、C形臂X线机及计算机图像处理系统组成,可对透视图像进行处理后直观地显示图像中的三维空间位置。1999年,德国西门子公司基于此原理研制出基于C形臂X线机的计算机三维影像导航系统(Iso-C 3D系统)^[12]。Iso-C 3D系统具体工作流程^[13]:①术前先将影像设备(C形臂X线机等)与导航工作站计算机连接,固定患者体位后常规剥离显露解剖学标志,并在目标节段的邻近节段棘突上安装定位参考装置(通常选取视野内最高位棘突)。②以C形臂X线机进行190°扫描,确保需固定的椎体均在扫描范围内,上传的影像数据经工作站计算机处理后在导航屏幕上重建脊柱的横截面、冠状面及矢状面影像。③再对术中器械,如开口锥、开路锥等,进行定位注册,即可在导航屏幕影像实时指示下选取进钉通道并置入椎弓根螺钉。Iso-C 3D系统可直观且实时观察螺钉与椎弓根的位置关系,并根据术中情况随时改变进钉角度,较传统C形臂X线机透视下置钉,其准确率具有明显优势。Ishikawa等^[14]的研究显示,传统方式与Iso-C 3D导航下置钉的0级(未穿破皮质)置钉率分别为73.0%和81.3%,3级(穿出皮质距离

≥2 mm)置钉率分别为12.7%和3.3%,在精确置钉率和不良置钉率方面,Iso-C 3D系统均具有更明显的优势。吴登将等^[15]对16具成人颈椎标本分组进行C形臂X线机透视下置钉及计算机实时导航下置钉,2种方法置钉成功率分别为83.3%和97.9%,同样证实了相较传统的C形臂X线机透视,Iso-C 3D系统导航下辅助置钉准确率更高。但术中器械对患者的牵拉所造成的影像漂移是其面临的最大问题,会导致注册图像与实时情况不匹配而引起误置^[16],可通过术中轻柔操作、尽可能减少患者与模拟坐标系的位移等方法来避免。

2.2 超声导航系统

皮质骨与松质骨的结构与密度的明显差异使二者具有截然不同的超声反射信号,椎弓根螺钉的置入要求是螺钉在松质骨内走行而不穿破皮质骨。因此,利用超声系统在术中分辨椎弓根螺钉是否在松质骨骨道内成为可能。Kantelhardt等^[17]最早尝试使用超声技术在椎弓根螺钉置入过程中导航,但是经过一系列的临床试验发现,常用的医用超声由体外入射时,软组织与骨组织界面声阻抗差异较大,会在骨皮质后方形成声影^[18],不同的超声频率在组织中的穿透深度是不同的,低频的超声可以实现更深的穿透,但成像分辨率也会随之下降,所以能够达到导航穿透要求的超声频率所产生的超声图像分辨率通常较差,无法满足导航对图像清晰度的要求^[19]。目前,骨内超声是脊柱外科超声导航领域的新方向,即在术中常规剥离暴露进钉点的解剖标志,去除进钉点处的骨皮质后将超声探头伸入椎弓根骨道内^[20],或将超声探头安装在开路锥前端,在开路锥由椎弓根向前进入椎体的过程中实现对钉道方向的实时监测,目前国外已有研究者申请了该专利^[21],但是以目前的技术手段仍无法制造出尺寸能进入椎弓根骨道的探头。相较于其他导航手段,超声导航系统具有价格低廉,可实时成像,无辐射损伤的优势,如超声探头的制作技术能够进一步发展,相信会为该技术的临床应用带来更为广阔的前景。

2.3 快速成型导航模板

个体化椎弓根导航模板是脊柱外科导航领域的新技术之一,该技术主要通过计算机影像处理,逆向工程原理,3D打印及快速成型技术来重建出完全贴合患者脊柱解剖形态的导航模板^[22],首先在术前对术区骨组织进行CT扫描并对结构进行三维重建,将三维的影像信息导入逆向工程软件后逆向重建与患者解剖结构贴合的反向模型并根据影

像测出预期的椎弓根螺钉钉道,再通过3D打印技术实现对实体模型的制作^[23]。在术中充分剥离患者棘突及椎板上的软组织后,将模板充分贴合于患者脊柱,并沿术前测量并设计好的进钉通道来置入椎弓根螺钉。该方法术前即可根据患者脊柱解剖学特点重建出导航模板,一定程度上缩短了手术时间。Jiang等^[24]的研究表明,模板组的术中透视时间和手术时间分别为 (2.76 ± 0.72) min及 (171.84 ± 22.46) min,传统置钉组分别为 (3.97 ± 0.94) min及 (182.76 ± 28.40) min,可见导航模板相较传统置钉技术能够明显减少术中透视时间及手术时间,从而间接减少术中出血量与感染风险。闻志靖等^[25]的针对该方法的荟萃分析结果显示,导航模板在螺钉置入的准确率上优于传统置入方法。Kanayama等^[26]对使用导航模板辅助下置钉的准确性进行研究发现,置入的80枚螺钉中仅有2枚穿破皮质,且穿破皮质部分未超过螺钉直径的50%,未引起并发症,分析其原因,可能与术中对椎板表面软组织剥离不彻底,导航模板无法与椎板完全贴合有关。这也是该技术目前存在的问题之一,在某些情况下模板不能完全贴合脊柱,需要完全清除棘突、椎板上的软组织及残留肌肉组织^[27],但是这样做会在一定程度上增加术中出血量和软组织损伤。同时,该技术的成熟也需要模型加工精度的进一步提高;此外,制作模板的聚合材料不耐高温高压消毒,而金属模板所带来的加工难度又会进一步降低精度并增加制作时间和制作成本^[28]。

3 导航技术的发展方向

3.1 多模式信息融合

主流的影像学检查如CT、MRI、PET和X线等可为临床医师提供不同结构和组织的影像学信息。然而,至今仍没有一种影像学检查可以完整展示全部组织结构。在脊柱外科手术中,除了骨组织以外,同样需要关注如神经、血管、肌肉等骨骼以外的组织结构。因此,多模式信息融合对脊柱外科导航至关重要^[29]。术中导航领域实现多模式影像信息的无缝融合是脊柱外科导航的未来发展方向之一。

3.2 形态感知技术

目前较为先进的光学导航模式是利用安装在解剖学标志及手术器械上的信号发射装置来实现术前方案设计与术中位置校准。术中手术器械的定位注册非常重要,但存在术中患者由于体位变化或器械牵拉所产生的影像漂移,一旦出现这种

情况,则须重新定位注册,大大增加手术时间。如果可以使用空间形态感知技术来跟踪解剖结构和手术器械,那么这一技术将有可能大大提高导航的精度^[30]。形态感知技术最近已经在一些微创手术中开始应用^[31],相信未来将会在更多领域得以应用。

3.3 骨科机器人

骨科机器人早在1992年就应用于全髋关节置换术^[32]。随后,机器人辅助手术也广泛应用在膝关节单室关节成形术中,导航的目的是实现手术的精确性,而手术的精确性主要取决于导航系统、操作环境及操作技术。骨科机器人整合了以上3个变量,在使用相同导航系统的情况下,避免了手术室内人员及器械对导航信号的干扰(如红外线传感器的光学信号接收器)以及因疲劳和情绪等因素所造成的人为失误等。机器人辅助置钉能满足精准性、稳定性方面的要求,有效防止误操作导致的神经、血管损伤^[33]。SpineAssist作为世界上唯一通过美国食品药品监督管理局(FDA)和欧盟CE认证批准的脊柱外科机器人^[34],目前已完成2 500余例手术,辅助置钉15 000枚,未发生永久性神经损伤的报道^[35]。尽管机器人辅助骨科手术仍受到各种技术上的限制,但其相较传统置钉技术有更高的准确性^[36]。其在提高操作灵活性、稳定性等方面具有一定优势,在与虚拟现实技术结合后,这一领域未来将拥有巨大的发展前景。

4 总 结

自椎弓根螺钉技术诞生以来,置钉的准确性就一直是脊柱外科医师所追求的目标,传统的导航手段面临着精准度不高、人为因素影响大的问题;新技术同样也面临着价格昂贵、操作繁琐等问题,且各种导航手段均或多或少地受到各种技术水平的限制,并没有一种技术能够以明显的优势成为行业标准模式。未来除了须突破现有的技术瓶颈外,亦需要在经济性和易用性上进一步发展,期待多模式信息融合、形态感知技术、骨科机器人等脊柱外科导航技术发展能将脊柱外科推向智能化手术的全新阶段,让更多的患者受益。

参 考 文 献

- [1] Siewe J, Bredow J, Oppermann J, *et al.* Evaluation of efficacy of a new hybrid fusion device: a randomized, two-centre controlled trial[J]. BMC Musculoskelet

- Disord, 2014, 15: 294.
- [2] Zheng G, Nolte LP. Computer-assisted orthopedic surgery: current state and future perspective[J]. Front Surg, 2015, 2: 66.
- [3] Bydon M, Macki M, Abt NB, *et al.* The cost-effectiveness of interbody fusions versus posterolateral fusions in 137 patients with lumbar spondylolisthesis[J]. Spine J, 2015, 15(3): 492-498.
- [4] Costa F, Porazzi E, Restelli U, *et al.* Economic study: a cost-effectiveness analysis of an intraoperative compared with a preoperative image-guided system in lumbar pedicle screw fixation in patients with degenerative spondylolisthesis[J]. Spine J, 2014, 14(8): 1790-1796.
- [5] 王岩, 毛克亚, 张永刚, 等. 对徒手置入胸椎椎弓根螺钉的安全性评价[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2006, 16(8): 596-599.
- [6] Kotani T, Akazawa T, Sakuma T, *et al.* Accuracy of pedicle screw placement in scoliosis surgery: a comparison between conventional computed tomography-based and O-arm-based navigation techniques[J]. Asian Spine J, 2014, 8(3): 331-338.
- [7] 张振辉, 王庆德, 梅伟, 等. 快速成型个体化导航模板辅助颈椎椎弓根螺钉的置入[J]. 中国组织工程研究, 2017, 21(3): 340-344.
- [8] Singh PK, Garg K, Sawarkar D, *et al.* Computed tomography-guided C₂ pedicle screw placement for treatment of unstable hangman fractures[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2014, 39(18): E1058-E1065.
- [9] Abumi K, Shono Y, Ito M, *et al.* Complications of pedicle screw fixation in reconstructive surgery of the cervical spine[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2000, 25(8): 962-969.
- [10] Matityahu A, Duffy RK, Goldhahn S, *et al.* The great unknown—a systematic literature review about risk associated with intraoperative imaging during orthopaedic surgeries[J]. Injury, 2017, 48(8): 1727-1734.
- [11] Hofstetter R, Slomczykowski M, Sati M, *et al.* Fluoroscopy as an imaging means for computer-assisted surgical navigation[J]. Comput Aided Surg, 1999, 4(2): 65-76.
- [12] Nolte LP, Beutler T. Basic principles of CAOS[J]. Injury, 2004, 35(Suppl 1): SA6-SA16.
- [13] Euler E, Heining S, Riquarts C, *et al.* C-arm-based three-dimensional navigation: a preliminary feasibility study[J]. Comput Aided Surg, 2003, 8(1): 35-41.
- [14] Ishikawa Y, Kanemura T, Yoshida G, *et al.* Clinical accuracy of three-dimensional fluoroscopy-based computer-assisted cervical pedicle screw placement: a retrospective comparative study of conventional versus computer-assisted cervical pedicle screw placement[J]. J Neurosurg Spine, 2010, 13(5): 606-611.
- [15] 吴登将, 杨进顺, 陈为坚. 计算机导航与C臂透视下颈椎弓根置钉的实验研究[J]. 中国当代医药, 2018, 25(18): 64-67.
- [16] Patton AG, Morris RP, Kuo YF, *et al.* Accuracy of fluoroscopy versus computer-assisted navigation for the placement of anterior cervical pedicle screws[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2015, 40(7): E404-E410.
- [17] Kantelhardt SR, Bock CH, Larsen J, *et al.* Intraosseous ultrasound in the placement of pedicle screws in the lumbar spine[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2009, 34(4): 400-407.
- [18] Zhang H, Wu S, Ta D, *et al.* Coded excitation of ultrasonic guided waves in long bone fracture assessment[J]. Ultrasonics, 2014, 54(5): 1203-1209.
- [19] Shamov T, Eftimov T, Kaprelyan A, *et al.* Ultrasound-based neuronavigation and spinal cord tumour surgery—marriage of convenience or notified incompatibility?[J]. Turk Neurosurg, 2013, 23(3): 329-335.
- [20] Aly AH, Ginsberg HJ, Cobbolt RS. On ultrasound imaging for guided screw insertion in spinal fusion surgery[J]. Ultrasound Med Biol, 2011, 37(4): 651-664.
- [21] Goodwin MR. Intraosteal ultrasound during surgical implantation: US Patent, US6579244, 17[P]. 2003-06.
- [22] Zhang YZ, Lu S, Xu YQ, *et al.* Application of navigation template to fixation of sacral fracture using three-dimensional reconstruction and reverse engineering technique[J]. Chin J Traumatol, 2009, 12(4): 214-217.
- [23] 胡勇, 陈绪国, 袁振山, 等. 数字化“定点-定向”双导航模板辅助椎弓根螺钉置钉治疗寰枢椎不稳[J]. 脊柱外科杂志, 2018, 16(2): 76-81.
- [24] Jiang L, Dong L, Tan M, *et al.* A modified personalized image-based drill guide template for atlantoaxial pedicle screw placement: a clinical study[J]. Med Sci Monit, 2017, 23: 1325-1333.
- [25] 闻志靖, 高正超, 卢腾, 等. 导航模板辅助脊柱椎弓根内固定术与传统椎弓根内固定术手术效果比较的Meta分析[J]. 中国骨伤, 2018, 31(11): 1069-1076.
- [26] Kaneyama S, Sugawara T, Sumi M. Safe and accurate midcervical pedicle screw insertion procedure with the patient-specific screw guide template system[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2015, 40(6): E341-E348.

- [27] Deng T, Jiang M, Lei Q, *et al.* The accuracy and the safety of individualized 3D printing screws insertion templates for cervical screw insertion[J]. *Comput Assist Surg*(Abingdon), 2016, 21(1): 143-149.
- [28] 白宇哲, 李长树, 徐楚, 等. 数控机床技术在下颈椎个体化导向模板制作中的应用[J]. *中国临床解剖学杂志*, 2015, 33(3): 284-287.
- [29] Aponte-Tinao LA, Ritacco LE, Milano FE, *et al.* Techniques in surgical navigation of extremity tumors: state of the art[J]. *Curr Rev Musculoskelet Med*, 2015, 8(4): 319-323.
- [30] He X, Popovic A, Flexman ML, *et al.* Shape sensing for orthopedic navigation: US Patent, US20170281281A1 [P]. 2017-10-05.
- [31] Shi C, Luo X, Qi P, *et al.* Shape sensing techniques for continuum robots in minimally invasive surgery: a survey[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2017, 64(8): 1665-1678.
- [32] Lang JE, Mannava S, Floyd AJ, *et al.* Robotic systems in orthopaedic surgery[J]. *J Bone Joint Surg Br*, 2011, 93(10): 1296-1299.
- [33] Pechlivanis I, Kiriyanthan G, Engelhardt M, *et al.* Percutaneous placement of pedicle screws in the lumbar spine using a bone mounted miniature robotic system: first experiences and accuracy of screw placement[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2009, 34(4): 392-398.
- [34] Dreval' ON, Rynkov IP, Kasparova KA, *et al.* Results of using SpineAssist Mazor in surgical treatment of spine disorders[J]. *Zh Vopr Neirokhir Im N N Burdenko*, 2014, 78(3): 14-20.
- [35] Solomiichuk V, Fleischhammer J, Molliqaj G, *et al.* Robotic versus fluoroscopy-guided pedicle screw insertion for metastatic spinal disease: a matched-cohort comparison[J]. *Neurosurg Focus*, 2017, 42(5): E13.
- [36] Devito DP, Kaplan L, Dietl R, *et al.* Clinical acceptance and accuracy assessment of spinal implants guided with SpineAssist surgical robot: retrospective study[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2010, 35(24): 2109-2115.
- (收稿日期: 2019-10-19)
(本文编辑: 张建芬)

(上接第 341 页)

- [17] Ozgur BM, Yoo K, Rodriguez G, *et al.* Minimally-invasive technique for transforaminal lumbar interbody fusion (TLIF) [J]. *Eur Spine J*, 2005, 14(9): 887-894.
- [18] 王贵清, 蔡显义, 汤勇智, 等. Quadrant 微创通道下单切口治疗腰椎间盘突出症伴节段不稳[J]. *中华临床医师杂志(电子版)*, 2011, 5(11): 3357-3359.
- [19] 张威, 杨克新, 朱立国, 等. Quadrant 通道下 MIS-TLIF 与开放 PLIF 治疗腰椎退变性疾病比较[J]. *中国矫形外科杂志*, 2018, 26(19): 1770-1774.
- [20] 滕海军, 郭志良, 鲁海江, 等. Quadrant 通道下精准治疗老年腰椎管狭窄症伴退变性侧弯[J]. *中国矫形外科杂志*, 2018, 26(5): 416-419.
- [21] 刘春磊, 王贵清, 汤勇智, 等. Quadrant 通道下治疗老年性腰椎间盘突出症的近期疗效观察[J]. *广东医学*, 2017, 38(S1): 81-82, 86.
- (收稿日期: 2019-09-11)
(本文编辑: 张建芬)