

术中超声成像技术在脊柱外科的应用进展

Application of intra-operative ultrasonography in spinal surgery

谢成龙, 林仲可, 黄其杉

(温州医科大学附属第二医院脊柱外科 325027 温州市)

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2017.07.11

中图分类号: R445.1, R687.3 文献标识码: A 文章编号: 1004-406X(2017)-07-0643-04

近年来, 随着脊柱外科手术技术及内固定装置的不断更新进步, 脊柱外科得到了很大的发展。但脊柱解剖结构复杂, 毗邻重要血管神经, 手术操作复杂、风险性高^[1]。术中超声成像技术能短时间内获得较高质量的图像, 对手术过程可进行实时动态成像, 从而更精准地实施手术操作^[2]。相对于 X 线及计算机辅助导航等设备, 超声成像技术无辐射危害, 是目前脊柱外科领域非常有前景的成像技术。笔者就术中超声成像技术在脊柱外科的应用进展综述如下。

1 术中超声成像技术在椎弓根螺钉置入中的应用

椎弓根螺钉因其螺钉通道贯穿脊柱前、中、后三柱, 其固定可靠, 相较于椎板螺钉和椎体螺钉固定技术, 具有良好的生物力学稳定性, 能实现三维矫形和有效固定的目的, 在脊柱外科得到广泛应用^[3-6]。由于椎弓根的解剖常存在变异且毗邻重要的神经、血管等组织, 常发生置钉失败及周围血管及神经损伤^[7,8]。据文献^[9,10]报道, 即使经验丰富的术者, 在 C 型臂引导下螺钉误置率也可达到 1.75%~15%。

为提高椎弓根螺钉置钉安全性, Kantelhardt 等^[11,12]首次将超声成像技术应用于椎弓根螺钉置入术中, 检查钉道是否完整, 椎弓根各壁是否穿破。为研究超声成像技术能否正确区分钉道的完整性及准确度, 该研究者^[11]对 2 具福尔马林浸泡的尸体腰椎标本共置入 24 枚椎弓根螺钉(16 枚未穿破皮质骨置入, 8 枚穿破内侧或外侧皮质骨置入), 先使用开路器制备钉道, 再将一超声探头伸入钉道最远端, 在缓慢退出探头的过程中连续获取 200 张钉道内图像, 通过比较未穿破皮质骨与穿破皮质骨时椎弓根螺钉钉道内超声成像结果, 可发现前者表现为环形高亮回声影, 后者在皮质骨穿破处高亮回声影缺失, 在透视下置入螺钉, 最后行 CT 扫描显示置入螺钉位置, 所得图像数据由 3 名盲选研究员进行审查, 约 99% 的钉道内获取的超声图像结果与 CT 扫描显示结果相一致(钉道有无穿破皮质骨)。Kantelhardt 等^[13]为了验证该技术在颈椎椎弓根螺钉钉道制

备时应用的可行性, 对 4 具福尔马林保存的下颈椎标本共 54 个椎弓根螺钉钉道行超声显影, 其中 31 枚螺钉未穿破皮质骨置入, 23 枚螺钉穿破皮质骨置入, 同样将获取的超声图像经 3 名盲选研究员进行审查, 通过超声图像辨别钉道是否完整的准确率达 96%, 其中假阴性率及假阳性率同为 1.8%, 上述结果均经术后 CT 扫描得到证实, 同时该学者运用此技术在临床中对 2 例患者共置入 8 枚椎弓根螺钉, 其钉道内的超声显影结果同样为环形高亮回声影, 与尸体标本研究中无明显差异, 术后 CT 扫描证实 8 枚螺钉均未穿破皮质骨, 证实该技术在临床上可用来检查钉道完整性。

术中超声成像技术不仅可探查钉道内壁是否完整, 还可显示钉道内壁距椎弓根四周皮质骨的距离, 避免置钉时因钉道不足以容纳螺钉而穿破皮质骨, 从而提高置钉的安全性。Yamada 等^[14]报道采用 10MHz 的超声探头对牛椎体骨厚度进行成像研究, 发现该频率的超声穿透深度约为 0.64cm, 可达到建立钉道时对椎弓根上下前后四壁成像深度的要求。Mujagic 等^[15]分别采用 1MHz 和 3.5MHz 的超声探头对 7 块厚度为 1.0~1.9cm 的脱脂人体椎骨样本进行松质骨成像研究, 发现两种超声频率穿透松质骨的深度约为 1.65~1.90cm, 但两者轴向分辨率有明显的差异, 1MHz 和 3.5MHz 的轴向分辨率分别为 2.1mm 和 0.38mm, 因此, 使用 3.5MHz 超声探头可提高椎弓根四壁成像的精确性。Raphael 等^[16]将 2.5MHz 的超声探头置入山羊椎体的钉道内研究松质骨与皮质骨交界处的成像差异, 发现该频率超声穿透深度为 1.5cm, 满足制备钉道时对四壁成像的条件。然而, 具体何种频率的超声探头最适用于满足对椎弓根四壁成像时的穿透深度要求, 尚存在争议。

Yan 等^[17]将超声成像技术与基于 CT 扫描的图像引导系统(image-guided system, IGS)相结合指导椎弓根螺钉的置入, 先利用超声对猪的椎体骨表面进行成像, 将获得的图像进一步重建为三维图像, 与术前导入到 IGS 的 CT 图像中的椎体骨解剖标志点配准, 从而确定进钉点, 在此基础上置入椎弓根螺钉, 此方法虽然解决了 IGS 耗时、对肌肉组织剥离范围大等缺点, 但术中患者体位的改变导致与 IGS 中已注册的解剖标志点出现配准偏差, 且该技术不能

第一作者简介: 男(1991-), 硕士在读, 研究方向: 脊柱外科
电话: (0577)88002814 E-mail: 18368736721@163.com
通讯作者: 黄其杉 E-mail: 13857791022@126.com

对椎弓根四壁进行实时成像,不能精确地指导钉道建立,易导致置钉失败。Aly 等^[18]根据 Yan 的研究缺陷设计了一种 360°可旋转的低频 B 型超声探头,可对尸体椎弓根钉道内松质骨及皮质骨进行成像,防止置入的螺钉穿破椎弓根壁或椎体皮质骨造成周围重要结构组织的损伤,提高置钉的精确性,且超声频率在 1~2MHz 时可保持一定的图像分辨率及穿透深度,对钉道显影最佳。另有文献^[19]报道,将超声探头安装于开路器中,可以连续监测进钉的最佳轨迹,同时不改变手术操作步骤,但目前该技术尚未在临床上使用。

2 术中超声成像技术在精准及充分减压中的应用

脊柱手术中,做到如何精准及充分减压是保证术后疗效的关键^[20]。术中超声扫描可清晰显示椎管内组织结构,协助术者进行精准的切除或减压^[21]。Sakanishi 等^[22]报道 1 例在超声及计算机辅助导航工具辅助下经前后路联合的胸椎椎体血管瘤切除术,在术中超声成像辅助下,可以实时确定血管瘤的范围,指导术者精准切除血管瘤。Yamaoka^[23]对超声技术能否提高颈椎手术减压效果进行研究,报道了在 59 例脊髓型颈椎病患者前路手术中采用 7.5MHz 超声监测颈髓减压的临床结果,颈髓 JOA 评分从术前 9.8 分增加至术后的 14.4 分,术后平均恢复率为 67.5%,另一组未在超声监测下行减压术的 48 例患者颈髓 JOA 评分从术前 8.5 分增加至术后的 13.8 分,术后平均恢复率仅为 61.7%,并认为术中在超声监测下可对致压物行精准切除,避免术中致压物残留情况发生,提高减压效果,但文中并未指出两组数据有无统计学差异。Imamura 等^[24]在上述方法的基础上进行改良,对 2 例颈椎间盘突出患者行前路手术时,在不切除椎体及后纵韧带情况下使用超声监测脊髓减压过程,同样可完全切除突出的椎间盘及增生的骨赘而达到充分减压的效果,并且他们认为这样使手术创伤更小,还避免因椎体附件的切除导致脊柱稳定性的下降。Lerch 等^[25]在 6.5~7.5MHz 超声监测下对 22 例创伤后椎管狭窄患者实施后路减压手术,在术中超声监测及结合术前 CT 等影像资料情况下,确定损伤节段,在椎板处开 10×20mm 的窗口对脱入椎管内的骨块进行显像定位,引导骨块的复位或摘除,实现安全有效的精准减压,椎管平均面积由术前的 42%增加至术后的 83%,得到显著改善,术后 CT 扫描减压范围与术中超声显示减压范围相一致。Aoyama 等^[26]对 30 例腰椎间盘突出患者行单纯髓核摘除术时,术中采用 4~11MHz 的微小凸型超声探头监测受压神经根的减压过程,通过对比减压前后神经根及硬膜的术中超声显像结果,即突出的椎间盘摘除后,硬膜不再受压,低回声的脑脊液流量增加,从而降低了神经根及硬膜的回声,与高回声的椎间盘区别开来,从而判断减压是否充分,降低因髓核残留导致减压效果不佳的风险,此方法尤其适合中央型突出患者。Tian 等^[27]的一项研究指出,将超声成像技术与 3D 导航系统结合可有效指导胸椎后纵韧带骨化

的减压过程,明确减压范围,监测减压是否彻底。

3 术中超声成像技术在脊柱肿瘤手术中的应用

脊柱肿瘤手术中有时难以区分肿瘤与正常组织边界导致肿瘤切除不彻底,且在操作时易损伤周围神经血管等重要结构^[28,29]。O 型臂导航、CT 导航等在手术操作过程中虽能提供动态的实时成像,但是存在 X 射线暴露量大的问题^[30]。鉴于超声的无辐射及实时成像特点,Reid 等^[31]首次将超声成像技术应用于脊柱肿瘤手术中,发现正常人脊髓与肿瘤压迫下脊髓及周围组织的成像有较显著差异,但限于当时超声二维图像质量较差导致其未能得到广泛应用。近年来,随着超声扫描图像质量的提高,Kolstad 等^[32]对 3 例脊髓肿瘤患者行肿瘤切除术,术中暴露病变部位硬膜后,将 5MHz 超声探头置于硬膜表面,通过倾斜或平移探头获取 100~200 张二维图像后重建成三维超声图像,再将建成后的三维超声图像导入 CT 导航系统中指导术中肿瘤精准切除,由于术中体位的变化及切除椎板打开硬膜时脊髓都会发生相应的移位,术中使用超声可对术野实时成像,并且该导航系统所指导的切除范围是根据导入的超声图像数据而确定的,因而可实时定位肿物位置,从而避免肿物切除不彻底,且无需术前注册,较 O 型臂导航、CT 导航等更为省时,此技术弥补了因成像质量较差而限制超声的广泛应用这一缺点,同时避免了如 CT 导航等因术中患者体位变化或图像配准错误而出现的定位不精确,但该系统在临床上使用的精确度还未经过系统性的检测,有待进一步深入研究。Ivanov 等^[33]对 158 例硬膜内肿瘤患者行椎板切除术摘除肿瘤,在暴露硬膜后,所有患者的硬膜肿瘤边界经术中超声扫描后均得到明确,确定硬膜切开长度,引导肿瘤切除,并通过比较切除前后的超声图像判断肿瘤切除程度,此外该研究还指出,在缝合硬膜后可用超声再次对手术部位进行显像,观察硬膜下有无血肿形成,以便及时切开清除,避免相关并发症发生,但该研究为回顾性研究,且缺少对照组,易产生回忆偏倚。Vetrano 等^[34]借鉴超声造影在脑肿瘤手术中的应用经验^[35,36],报道了 1 例因长期颈胸部疼痛行椎管内肿瘤切除术的病例,术前行 MRI 示 C2~T2 脊髓弥漫性扩大及信号改变,在 T4、T1、C7 存在 3 处结节性病灶,边缘模糊,周围由囊腔包裹,MRI 增强扫描示结节处、周围囊腔及病变处脊髓信号明显增强,提示星形细胞瘤;术中使用 B 型超声对肿物进行定位,注射超声造影剂(ultrasonographic contrast agents,UCAs)后发现结节性病灶处显影明显增强,周围囊腔及病变处脊髓信号并未增强,提示血管母细胞瘤,与术前 MRI 提示结果不相符,术后病理检查结果则与术中超声提示结果一致,纠正了术前 MRI 的诊断结果,MRI 虽作为诊断髓内肿瘤的首选影像学检查,但当合并脊髓空洞及硬膜内或外周囊肿时,并不能总是精确的区分某些髓内肿瘤,相反超声造影(contrast-enhanced ultrasound,CEUS)在鉴别这类肿瘤时则有一定的优越性,此外,该研究还表明 CEUS 可以明确其血管的

供应支及其流出支,从而指导术中血管的阻塞,减少术中出血,在手术过程中还可利用 CEUS 实施动态观察,并根据造影结果制定进一步手术策略,指导术者精准并充分切除肿物,但此技术尚存在不足之处,即每次只能对单个节段的病变进行 CEUS 分析。Toktas 等^[37]报道对 26 例脊髓肿瘤患者行肿瘤切除时使用超声成像技术进行动态监测,评估肿瘤的切除程度,其中 22 例患者肿瘤彻底切除,准确率达 84%,术后经 MRI 证实该结果,且超声成像装置轻携,便于移动,相对于 CT、MRI 等体积较大设备因不易移动而更加省时。

4 总结与展望

术中超声成像技术的应用使得脊柱外科“微创”的理念得到了提升,使手术更精准、省时、安全。术中超声成像技术的主要优点:①实时动态成像,监测开路器与椎体周围解剖结构的位置关系,确保椎弓根螺钉的安全置入,在置钉过程中即可调整位置不良的钉道,降低置钉的失败率及术中 X 射线暴露剂量,避免相关手术并发症;②术中可行超声扫描,监测致压物如骨化的韧带、突出的髓核、脱入椎管内的骨块等减压是否彻底,提高手术减压效果,降低二次手术风险;③结合超声造影鉴别肿瘤类型,指导术中制定合理手术方案,提高脊柱肿瘤手术的安全性;④相较 CT、MRI 等设备,超声成像技术较为低廉,省时,无辐射。但也存在较多缺陷,如要在临床上推广,则需要解决以下问题:①术中超声成像技术虽然可以实时监测椎弓根螺钉置钉过程,但在作出及时识别和校正方面,仍存在需要解决的技术问题;②关于超声成像技术应用于椎弓根螺钉置入的相关临床文献报道较少,研究样本量也较小,可能会使研究结果产生一定偏倚,在今后的研究中应采用多中心、大样本、前瞻性随机对照研究来验证超声成像技术在临床(尤其是在脊柱外科)应用的安全性、可行性及优势;③术中超声成像技术对临床医生关于各组织结构在超声下的成像形态的识别能力要求较高,因此掌握此技术有一定的学习曲线,只有了解超声的成像原理及结合个人经验,才能充分发挥超声成像技术的优越性。

5 参考文献

1. Ali Hassan MK, Nagamune K. A new technique of bone thickness measurement for pedicle screw insertion safety purpose [J]. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc, 2013, 2013: 7180-7183.
2. Rubin JM, Dohrmann GJ. The spine and spinal cord during neurosurgical operations: real-time ultrasonography[J]. Radiology, 1985, 155(1): 197-200.
3. Li K, Zhang W, Liu D, et al. Pedicle screw fixation combined with intermediate screw at the fracture level for treatment of thoracolumbar fractures: a meta-analysis[J]. Medicine (Baltimore), 2016, 95(33): e4574.
4. Choi UY, Park JY, Kim KH, et al. Unilateral versus bilateral percutaneous pedicle screw fixation in minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion [J]. Neurosurg Focus, 2013, 35(2): E11.
5. Awad BI, Lubelski D, Shin JH, et al. Bilateral pedicle screw fixation versus unilateral pedicle and contralateral facet screws for minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion: clinical outcomes and cost analysis[J]. Global Spine J, 2013, 3(4): 225-230.
6. Fernándezfaren M, Sala P, Ramírez H, et al. A prospective randomized study of unilateral versus bilateral instrumented posterolateral lumbar fusion in degenerative spondylolisthesis [J]. Spine(Phila Pa 1976), 2007, 32(4): 395-401.
7. Abul-Kasim K, Ohlin A. The rate of screw misplacement in segmental pedicle screw fixation in adolescent idiopathic scoliosis[J]. Acta Orthop, 2011, 82(1): 50-55.
8. Chen Z, Wu B, Zhai X, et al. Basic study for ultrasound-based navigation for pedicle screw insertion using transmission and backscattered methods [J]. PLoS One, 2015, 10 (4): e0122392.
9. 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.
10. Amato V, Giannachi L, Irace C, et al. Accuracy of pedicle screw placement in the lumbosacral spine using conventional technique: computed tomography postoperative assessment in 102 consecutive patients[J]. J Neurosurg Spine, 2010, 12(3): 306-313.
11. 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.
12. Kantelhardt SR, Larsen J, Bockermann V, et al. Intraosseous ultrasonography to determine the accuracy of drill hole positioning prior to the placement of pedicle screws: an experimental study[J]. J Neurosurg Spine, 2009, 11(6): 673-680.
13. Kantelhardt SR, Bock HC, Siam L, et al. Intra-osseous ultrasound for pedicle screw positioning in the subaxial cervical spine: an experimental study[J]. Acta Neurochir(Wien), 2010, 152(4): 655-661.
14. Yamada M, Moriya H, Iino T, et al. Ultrasonic measurement of bone thickness for spinal surgery[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2012, 59(9): 2077-2088.
15. Mujagic M, Ginsberg HJ, Cobbold RS. Development of a method for ultrasound-guided placement of pedicle screws[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2008, 55(6): 1267-1276.
16. Raphael DT, Chang JH, Zhang YP, et al. A-Mode ultrasound guidance for pedicle screw advancement in ovine vertebral bodies[J]. Spine J, 2010, 10(5): 422-432.
17. Yan CX, Goulet B, Pelletier J, et al. Towards accurate, ro-

- bust and practical ultrasound-CT registration of vertebrae for image-guided spine surgery [J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2011, 6(4): 523-537.
18. Aly AH, Ginsberg HJ, Cobbald RS. On ultrasound imaging for guided screw insertion in spinal fusion surgery[J]. *Ultrasound Med Biol*, 2011, 37(4): 651-664.
19. Lou E, Zhang C, Le L, et al. Using ultrasound to guide the insertion of pedicle screws during scoliosis surgery [J]. *Stud Health Technol Inform*, 2010, 158: 44-48.
20. Rohde V, Mielke D, Ryang Y, et al. The immediately failed lumbar disc surgery: incidence, aetiologies, imaging and management[J]. *Neurosurg Rev*, 2015, 38(1): 191-195.
21. Seichi A, Chikuda H, Kimura A, et al. Intraoperative ultrasonographic evaluation of posterior decompression via laminoplasty in patients with cervical ossification of the posterior longitudinal ligament: correlation with 2-year follow-up results[J]. *J Neurosurg Spine*, 2010, 13(1): 47-51.
22. Sakanishi H, Hoshi K, Nakajima S, et al. Vertebral hemangioma compressing the thoracic spinal cord: application of computer-aided navigation and intraoperative spinal sonography for surgery through anterior and posterior approaches [J]. *J Orthop Sci*, 2006, 11(3): 294-297.
23. Yamaoka K. Significance of intraoperative ultrasonography in anterior spinal operation[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 1989, 14(11): 1192-1197.
24. Imamura H, Iwasaki Y, Hida K, et al. Intraoperative spinal sonography in the cervical anterior approach[J]. *Neurol Med Chir(Tokyo)*, 1995, 35(3): 144-147.
25. Lerch K, Volk M, Heers G, et al. Ultrasound-guided decompression of the spinal canal in traumatic stenosis[J]. *Ultrasound Med Biol*, 2002, 28(1): 27-32.
26. Aoyama T, Hida K, Akino M, et al. Detection of residual disc hernia material and confirmation of nerve root decompression at lumbar disc herniation surgery by intraoperative ultrasound[J]. *Ultrasound Med Biol*, 2009, 35(6): 920-927.
27. Tian W, Weng C, Liu B, et al. Intraoperative 3-dimensional navigation and ultrasonography during posterior decompression with instrumented fusion for ossification of the posterior longitudinal ligament in the thoracic spine[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2013, 26(6): E227-234.
28. Li F, Gorji R, Allott G, et al. The usefulness of intraoperative neurophysiological monitoring in cervical spine surgery: a retrospective analysis of 200 consecutive patients [J]. *J Neurosurg Anesthesiol*, 2012, 24(3): 185-190.
29. D'Andrea K, Dreyer J, Fahim DK. Utility of preoperative MRI Co-registered with intraoperative CT scan for the resection of complex tumors of the spine[J]. *World Neurosurg*, 2015, 84(6): 1804-1815.
30. Ammirati M, Salma A. Placement of thoracolumbar pedicle screws using O-arm-based navigation: technical note on controlling the operational accuracy of the navigation system [J]. *Neurosurg Rev*, 2013, 36(1): 157-162.
31. Reid MH. Ultrasonic visualization of a cervical cord cystic astrocytoma[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 1978, 131(5): 907-908.
32. Kolstad F, Rygh OM, Selbekk T, et al. Three-dimensional ultrasonography navigation in spinal cord tumor surgery: technical note[J]. *J Neurosurg Spine*, 2006, 5(3): 264-270.
33. Ivanov M, Budu A, Sims-Williams H, et al. Using intraoperative ultrasonography for spinal cord tumor surgery [J]. *World Neurosurg*, 2017, 97: 104-111.
34. Vetrano IG, Francesco P, Nataloni IF, et al. Discrete or diffuse intramedullary tumor? contrast-enhanced intraoperative ultrasound in a case of intramedullary cervicothoracic hemangioblastomas mimicking a diffuse infiltrative glioma: technical note and case report[J]. *Neurosurg Focus*, 2015, 39(2): E17.
35. Prada F, Perin A, Martegani A, et al. Intraoperative contrast-enhanced ultrasound for brain tumor surgery[J]. *Neurosurgery*, 2014, 74(5): 542-552.
36. Prada F, Vetrano IG, Filippini A, et al. Intraoperative ultrasound in spinal tumor surgery[J]. *J Ultrasound*, 2014, 17(3): 195-202.
37. Toktas ZO, Sahin S, Koban O, et al. Is intraoperative ultrasound required in cervical spinal tumors? a prospective study[J]. *Turk Neurosurg*, 2013, 23(5): 600-606.

(收稿日期:2017-03-28 修回日期:2017-05-31)

(本文编辑 李伟霞)