

导航技术在脊柱外科中的应用进展

李 丰 综述 王尔松* 审校

(复旦大学附属金山医院神经外科, 上海 201508)

【内容提要】 本文简要综述导航技术在脊柱外科中的应用, 对比目前应用的导航设备的优缺点, 指出脊柱导航技术的发展方向。

【关键词】 导航技术; 脊柱外科

文献标识:A 文章编号:1009-6604(2016)10-0946-04

doi:10.3969/j.issn.1009-6604.2016.10.021

Progress of Application of Navigation Technology in Spinal Surgery Li Feng, Wang Ersong. Department of Neurosurgery, Jinshan Hospital of Fudan University, Shanghai 201508, China

Corresponding author: Wang Ersong, E-mail: wersong@aliyun.com

【Summary】 This article briefly reviewed the application of advanced navigation technology in spinal surgery. By comparing advantages and disadvantages of the current application of navigation equipment, we pointed out the development direction of spinal navigation technology.

【Key Words】 Navigation technology; Spinal surgery

1986 年, 美国 Roberts 率先将计算机辅助手术导航系统 (computer aided surgery navigation system, CASNS) 应用于神经外科临床。20 世纪 90 年代早期, 强大的计算机系统解决了实时图像处理和仪器追踪的技术问题, 开辟了精确脊柱外科的新思路^[1]。经过多年的发展, 导航技术在脊柱外科中的应用已经覆盖脊柱各个节段的手术治疗, 包括脊柱螺钉固定手术、脊柱脊髓肿瘤手术等。导航设备逐步成为脊柱外科的有力助手, 在脊柱外科包括脊柱神经外科得到重视和应用。本文就导航技术在脊柱外科中应用的进展做一简要综述。

1 传统的脊柱外科导航设备及局限性

传统的脊柱外科导航包括 X 线平片和 C 形臂 X 线机。虽然这些设备在通常情况下可以满足临床基本需要, 但它们有明显的局限性: 导航过程中对操作人员的依赖性; 限制于二维图像信息; C 形臂 X 线机频繁移入和移出手术区域增加感染几率; 患者和手术室工作人员暴露在电离辐射下^[2]。

2 脊柱外科导航设备及应用

2.1 术前 CT 导航

1995 年, Nolte 等^[3]首次报道术前 CT 导航系统在腰椎弓根螺钉固定的临床应用。术前 CT 导航的主要设备包括三部分: 摄像设备、定位系统和计算机工作站。临床应用最广泛的是安装有红外线发光二极管 (lighting emitted diode, LED) 的光电导航系统, 基本原理是在手术部位和器械上贴附 LED, 摄像机捕捉 LED 发射的红外线, 并将其发送给计算机工作站, 计算机工作站处理摄像和定位系统发回的数据, 最终在屏幕上显示手术部位图像及器械的相应位置。术前 CT 导航的主要优点包括: 图像清晰, 具有三维成像能力, 利于术前设计; 定位较为精确, 减少手术创伤。缺点包括: 术前 CT 扫描数据用于术中参照点进行注册, 由于患者体位的不同可能造成脊柱移位或变形, 容易产生注册误差; 为减少注册误差, 常需要对每个椎体进行单独注册, 增加手术时间^[4]。目前术前 CT 导航应用最广泛的领域是胸腰

* 通讯作者, E-mail: wersong@aliyun.com

椎螺钉固定手术, Wu 等^[5]将 42 例胸椎骨折患者随机分为 2 组, 共植入 176 枚胸椎椎弓根螺钉, 其中 22 例 92 枚螺钉进行术前 CT 导航植入, 20 例 84 枚螺钉进行传统螺钉固定技术植入。结果显示, 术前 CT 导航组 92 枚螺钉中, 88 枚 (95.7%) 准确度为 I 级 (无皮质破裂), 4 枚 (4.3%) II 级 (螺钉超过椎弓根 ≤ 2 mm), 0 枚 (0%) III 级 (螺钉超过椎弓根 > 2 mm); 传统螺钉固定组 84 枚螺钉中, 70 枚 (83.3%) 准确度为 I 级, 11 枚 (13.1%) II 级, 3 枚 (3.6%) III 级 ($P < 0.001$), 研究认为术前 CT 导航提高了胸椎螺钉固定准确率。术前 CT 导航在脊柱肿瘤手术中应用的报道并不多^[6]。

2.2 电磁导航

1991 年, Kato 等^[7]描述了一个利用磁场代替框架或机械臂的空间定位系统, 并使其在 CT 或 MR 图像上动态显示手术操作过程。2000 年, Amiot 等^[8]使用电磁场技术结合 CT 图像进行注册, 实现椎弓根螺钉植入的实时导航。电磁导航的工作原理是通过安放在人体上的电磁发射器发射相当于 $1/3$ 地球磁场强度的电磁波, 位于手术器械末端的电磁接收器捕捉电磁波, 与手术器械相连的导航工作站根据不同的磁场强度确定不同的空间位置。电磁导航的主要优点包括: 实时显示手术部位和器械的关系; 信号不受光线干扰, 手术操作者活动自如, 不影响导航。缺点包括: 容易受到带磁性物体的干扰, 需要特殊的无磁性器械^[9]; 禁用于有电子设备直接连接到心脏、脑部或神经系统的患者。Hahn 等^[10]利用电磁导航结合术前 CT 扫描图像在尸体上进行腰椎螺钉固定术, 认为电磁导航下腰椎螺钉固定的准确率和术前 CT 导航相一致, 同时使用也方便。von Jako 等^[11]对电磁导航和传统 X 线透视导航在微创入路经皮椎弓根螺钉植入准确率以及辐射量方面进行对比, 结果显示电磁导航较传统 X 线透视导航更容易获得理想的螺钉植入轨迹 (62.7% vs. 40%, $P = 0.01$), 而且电磁导航下螺钉植入导致的腰椎椎弓根破裂率显著低于传统 X 线透视导航 (16.2% vs. 42.5%, $P = 0.01$)。相对于传统 X 线透视导航而言, 利用电磁导航进行螺钉植入可以将 X 线照射时间降低 77% (每椎体平面 22 s vs. 5 s, $P < 0.0001$)。电磁导航的应用主要在脊柱螺钉固定手术方面, 在脊柱肿瘤以及其他手术中应用的报道较少。手术室环境下大量金属物体可能影响电磁导航的稳定性以及准确性, 限制了电磁导航的广泛应用^[12]。

2.3 术中超声

1978 年, Reid^[13]首次将超声应用于脊髓颈段囊性星型细胞瘤手术治疗中。当时的超声技术只能提供二维图像, 并且无法在手术视野中定位手术器械^[14]。2005 年 Bonsanto 等^[15]报道了 3D 超声在脊髓手术中的应用。其原理是在感兴趣的部位利用探头平移得到 100 ~ 200 张二维图像, 将这些二维图像整合成一个三维图像并自动传输到导航系统, 导航可直接进行而不需要任何注册程序, 病变的定位可用普通的导航指针来完成。由于超声分辨率无法与 CT 相比, 并且其分辨率和穿透力成反比, 所以限制了它在脊柱螺钉固定手术中的应用^[16]。术中超声在脊膜瘤和神经鞘瘤等髓外肿瘤手术中可以保证更好的肿瘤切除范围, 而对髓内肿瘤应用术中超声监控取得肿瘤全切除是比较困难的^[14]。Naruse 等^[17]回顾性分析 101 例颈椎椎板扩大成形术治疗颈髓病变患者的影像资料和临床治疗效果, 认为术中超声测定脊髓浮动参数对预测颈椎椎板扩大成形术临床治疗效果的价值比术后 MRI 更高。术中超声在确定脊髓海绵状血管瘤切除边缘及脊髓穿刺病理组织活检等方面也有较好的应用。

2.4 术中 CT

2000 年, Hum 等^[18]报道术中 CT 系统成功应用于脊柱外科临床。2006 年, O 形臂成像系统 (Medtronic) 成为市场上首个术中 360° 旋转 CT, 由于它结合自动注册和 CT 显示骨组织的优势, 是当时在脊柱外科中为数不多的真正具有颠覆性的技术之一^[19]。术中 CT 优点包括: 机械性控制定位系统和集成的允许自动注册的 LED 跟踪装置, 大大简化了手术医生的注册程序^[20, 21]; 利用手术体位获得的 CT 数据并进行更新, 减少潜在的导航误差; 减少对手术医生的辐射, 扫描时让手术医生离开手术室可使辐射降到零^[22]。缺点包括: 较术前 CT 导航占用更多的空间; 需要额外的人员来控制操作; 需要可穿透 X 线的手术床^[23]; 虽然可以减少手术医生的辐射, 但对患者的辐射却有所增加。2014 年, Kotani 等^[4]对术中 CT 和术前 CT 导航在脊柱侧凸畸形螺钉固定准确率方面进行对比, 术中 CT 导航下获得无皮质破裂螺钉固定率为 84.4%, 术前 CT 导航为 84.7%, 结果显示两者的准确率一致。另外, 包括螺钉注册所需时间在内, 术前 CT 导航下固定每一枚螺钉需要的时间为 (10.9 ± 3.2) min, 而术中 CT 导航为 (5.4 ± 1.1) min, 认为术中 CT 可以显著减少螺钉固定时间。术中 CT 可以在矢状位、冠状位以及

垂直平面形象地显示螺钉的植入轨迹,并可以决定植入螺钉的长度和直径^[24]。Kim 等^[25]利用术中 CT 结合微创手术路径进行椎弓根螺钉固定,准确率达 96.6%,而且和传统 X 线透视导航相比,术中 CT 可以大大降低术后再次进行 CT 扫描确认螺钉位置的必要性。术中 CT 在观察骨组织病灶结构方面具有优势,在骨肿瘤切除手术中可提供骨肿瘤切除边缘的更新信息,引导更加彻底的骨肿瘤切除^[18]。在复杂解剖条件(椎弓根狭窄、脊柱侧凸、外伤性脊柱畸形)下,二维成像不能清晰显示手术区域时,术中 CT 可以提高手术路径的准确性。

2.5 术中 MRI

1995 年首次出现 0.5 T 术中 MRI 的应用^[26],这是第一个完全融合手术室和磁共振扫描的系统,提供直径 30 cm 的球形显示图像和 56 cm 宽的间隙用于术者和第一助手进行操作。优点是:手术过程中患者和磁场无需移动,整个手术在同一手术室进行;提供接近实时的图像。缺点是:图像质量不高;有限的空间影响外科医生的操作;相对较弱的磁场无法应用 MRI 功能成像(fMRI)和 MR 波谱图像。1997 年出现 1.5 T 术中 MRI 系统^[27],其优点是:拥有更好的图像质量;能提供 fMRI 和 MR 波谱图像。缺点是:需要一个专用的独立空间;需要将患者移入或者移出磁场;只能通过一个狭小的孔隙进行操作。2010 年出现 3.0 T 术中磁共振系统^[28],其核心部分由一个 3.0 T 吊顶式可移动磁场和 70 cm 宽的工作间隔组成。优点是:吊顶式可移动磁场允许扫描仪移入或移出手术室,取代移动手术台;更好的软组织分辨率提高肿瘤全切除率。缺点是增加手术时间和治疗费用。虽然 MRI 相对于 CT、X 线平片以及超声具有更好的软组织分辨率,但骨组织分辨力较差,限制了它在脊柱螺钉固定手术中的应用。Takahashi 等^[29]使用术中 MRI 对脊髓终室囊肿进行经皮细针穿刺抽吸治疗,指出术中 MRI 导航下经皮细针穿刺抽吸是治疗脊髓囊肿的首选方法。Dhaliwal 等^[30]利用术中 MRI 对 20 例进行经口咽入路颅颈交界腹侧损伤切除术,结果显示在术后平均 1.8 年的随访过程中,92% 的患者表现出神经功能恢复,表明术中 MRI 允许核实解剖部位和确认切除程度,是术中有用的辅助工具。

3 展望

导航技术通过对病变位置的准确定位和手术的实时模拟,降低手术创伤,提高手术成功率^[31]。20

年来,导航技术在神经外科的应用取得了大量的技术成就,使得导航技术在脊柱外科(包括脊柱神经外科)中的应用逐步受到重视,临床应用也逐渐增多。将来,脊柱导航技术的发展在关注减少费用和辐射的同时,应进一步提高其易用性。我们期待导航技术在脊柱外科中应用的更深入发展。

参考文献

- 1 Tjardes T, Shafizadeh S, Rixen D, et al. Image-guided spine surgery: state of the art and future directions. *Eur Spine J*, 2010, 19(1): 25 - 45.
- 2 Baaj AA, Gokaslan ZL. Neuronavigation in spinal surgery. *World Neurosurg*, 2012, 78(1-2): 74 - 75.
- 3 Nolte LP, Zamorano L, Visarius H, et al. Clinical evaluation of a system for precision enhancement in spine surgery. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 1995, 10(6): 293 - 303.
- 4 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. *Asian Spine J*, 2014, 8(3): 331 - 338.
- 5 Wu H, Gao ZL, Wang JC, et al. Pedicle screw placement in the thoracic spine: a randomized comparison study of computer-assisted navigation and conventional techniques. *Chin J Traumatol*, 2010, 13(4): 201 - 205.
- 6 Bandiera S, Ghermandi R, Gasbarrini A, et al. Navigation-assisted surgery for tumors of the spine. *Eur Spine J*, 2013, 22(S6): 919 - 924.
- 7 Kato A, Yoshimine T, Hayakawa T, et al. A frameless, armless navigational system for computer-assisted neurosurgery. Technical note. *J Neurosurg*, 1991, 74(5): 845 - 849.
- 8 Amiot LP, Lang K, Putzier M, et al. Comparative results between conventional and computer-assisted pedicle screw installation in the thoracic, lumbar, and sacral spine. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2000, 25(5): 606 - 614.
- 9 Tigani D, Busacca M, Moio A, et al. Preliminary experience with electromagnetic navigation system in TKA. *Knee*, 2009, 16(1): 33 - 38.
- 10 Hahn P, Oezdemir S, Komp M, et al. A new electromagnetic navigation system for pedicle screws placement: a human cadaver study at the lumbar spine. *PLoS One*, 2015, 10(7): e133708.
- 11 von Jako R, Finn MA, Yonemura KS, et al. Minimally invasive percutaneous transpedicular screw fixation: increased accuracy and reduced radiation exposure by means of a novel electromagnetic navigation system. *Acta Neurochir (Wien)*, 2011, 153(3): 589 - 596.
- 12 Hayhurst C, Byrne P, Eldridge PR, et al. Application of electromagnetic technology to neuronavigation: a revolution in image-guided neurosurgery. *J Neurosurg*, 2009, 111(6): 1179 - 1184.
- 13 Reid MH. Ultrasonic visualization of a cervical cord cystic astrocytoma. *AJR Am J Roentgenol*, 1978, 131(5): 907 - 908.
- 14 Shamov T, Eftimov T, Kaprelyan A, et al. Ultrasound-based

- neuronavigation and spinal cord tumour surgery-marriage of convenience or notified incompatibility? Turk Neurosurg, 2013, 23 (3):329 – 335.
- 15 Bonsanto MM, Metzner R, Aschoff A, et al. 3D ultrasound navigation in syrinx surgery: a feasibility study. Acta Neurochirurgica, 2005, 147 (5):533 – 541.
- 16 Wu JS, Lu JF, Gong X, et al. Neuronavigation surgery in China: reality and prospects. Chin Med J (Engl), 2012, 125 (24):4497 – 4503.
- 17 Naruse T, Yanase M, Takahashi H, et al. Prediction of clinical results of laminoplasty for cervical myelopathy focusing on spinal cord motion in intraoperative ultrasonography and postoperative magnetic resonance imaging. Spine (Phila Pa 1976), 2009, 34 (24):2634 – 2641.
- 18 Hum B, Feigenbaum F, Cleary K, et al. Intraoperative computed tomography for complex craniocervical operations and spinal tumor resections. Neurosurgery, 2000, 47 (2):374 – 380, 380 – 381.
- 19 Helm PA, Teichman R, Hartmann SL, et al. Spinal navigation and imaging: history, trends, and future. IEEE Trans Med Imaging, 2015, 34 (8):1738 – 1746.
- 20 Drazin D, Kim TT, Polly DJ, et al. Introduction: intraoperative spinal imaging and navigation. Neurosurg Focus, 2014, 36 (3): introduction.
- 21 Sembrano JN, Santos ER, Polly DJ. New generation intraoperative three-dimensional imaging (O-arm) in 100 spine surgeries: does it change the surgical procedure? J Clin Neurosci, 2014, 21 (2): 225 – 231.
- 22 Bandela JR, Jacob RP, Arreola M, et al. Use of CT-Based Intraoperative Spinal Navigation: Management of Radiation Exposure to Operator, Staff, and Patients. World Neurosurg, 2013, 79 (2): 390 – 394.
- 23 Shevelev IN, Kononov NA, Starchenko VM, et al. Experience of using an intraoperative cone beam computed tomography scanner and the modern navigation system in surgical treatment of spine and spinal cord disorders. Zh Vopr Neurokhir Im N N Burdenko, 2014, 78 (3):21 – 29.
- 24 Barsa P, Frohlich R, Benes VR, et al. Intraoperative portable CT-scanner based spinal navigation: a feasibility and safety study. Acta Neurochir (Wien), 2014, 156 (9):1807 – 1812.
- 25 Kim TT, Drazin D, Shweikeh F, et al. Clinical and radiographic outcomes of minimally invasive percutaneous pedicle screw placement with intraoperative CT (O-arm) image guidance navigation. Neurosurg Focus, 2014, 36 (3):E1.
- 26 Albayrak B, Samdani AF, Black PM. Intra-operative magnetic resonance imaging in neurosurgery. Acta Neurochir (Wien), 2004, 146 (6):543 – 556.
- 27 Hall WA, Liu H, Martin AJ, et al. Intraoperative magnetic resonance imaging. Top Magn Reson Imaging, 2000, 11 (3):203 – 212.
- 28 Qiu TM, Yao CJ, Wu JS, et al. Clinical experience of 3T intraoperative magnetic resonance imaging integrated neurosurgical suite in Shanghai Huashan Hospital. Chin Med J (Engl), 2012, 125 (24):4328 – 4333.
- 29 Takahashi S, Saruhashi Y, Odate S, et al. Percutaneous aspiration of spinal terminal ventricle cysts using real-time magnetic resonance imaging and navigation. Spine (Phila Pa 1976), 2009, 34 (6): 629 – 634.
- 30 Dhaliwal PP, Hurlbert RJ, Sutherland GS. Intraoperative magnetic resonance imaging and neuronavigation for transoral approaches to upper cervical pathology. World Neurosurg, 2012, 78 (1 – 2):164 – 169.
- 31 穆晓兰, 王满宁, 宋志坚. 手术导航中精度问题的探讨. 中国微创外科杂志, 2004, 4 (5):444 – 446.

(收稿日期:2016 – 01 – 11)

(修回日期:2016 – 07 – 08)

(责任编辑:王惠群)