

O型臂 3D 导航与徒手置钉在上颈椎椎弓根螺钉置入中的精确性比较

曲 哲, 钱邦平, 邱 勇, 俞 杨, 王 斌, 朱泽章

(南京大学医学院附属鼓楼医院脊柱外科 210008 南京市)

【摘要】目的:比较 O 型臂 3D 导航下 C1、C2 椎弓根螺钉置钉与徒手置钉精确性的差异,探讨 O 型臂导航在上颈椎椎弓根螺钉置钉中的应用价值。**方法:**纳入我院 C1、C2 椎弓根螺钉内固定患者 62 例,分为导航置钉组(A 组)与徒手置钉组(B 组)。A 组:2014 年 1 月~2015 年 3 月,O 型臂导航下行 C1、C2 后路椎弓根螺钉内固定术 22 例,男 15 例,女 7 例,年龄 17~58 岁(40.8 ± 12.7 岁);B 组:2005 年 3 月~2013 年 12 月经徒手置入 C1 及 C2 椎弓根螺钉患者 40 例,男 26 例,女 14 例,年龄 12~70 岁(42.0 ± 15.6 岁)。所有患者术后均行颈椎 CT 平扫,按照 Neo 等的方法,根据椎弓根螺钉穿破椎弓根皮质的程度将置钉精确性分为四级(0 级,螺钉完全处于椎弓根中,没有穿破骨皮质;1 级,螺钉穿破皮质 $<2\text{mm}$,或小于螺钉直径的 50%;2 级,螺钉穿破皮质 $\geq 2\text{mm}$ 且 $<4\text{mm}$,或大于螺钉直径的 50%但没完全穿出;3 级,完全穿出皮质,螺钉处于椎管或椎动脉孔内),分别评估两组的置钉精确性并比较两组间的差异。**结果:**A 组共置入 C1、C2 椎弓根螺钉 67 枚(C1 28 枚,C2 39 枚),其中 0 级 60 枚(89.6%),1 级 7 枚(10.4%),无 2 级或 3 级不良置钉;B 组共置入 C1、C2 椎弓根螺钉 134 枚(C1 64 枚,C2 70 枚),其中 0 级 116 枚(86.6%),1 级 13 枚(9.7%),2 级 4 枚(3.0%),3 级 1 枚(0.7%)。两组间置钉精确性分级($P=0.49$)及 0 级置钉率($P=0.55$)均无统计学差异;A 组未发现不良置钉,B 组不良置钉发生率为 3.7%,但组间无统计学差异($P=0.17$)。两组均无置钉相关的血管、神经并发症发生。**结论:**术中 O 型臂导航与徒手置钉在上颈椎椎弓根螺钉置钉精确性上并无统计学差异,虽然导航能提供清晰的术中 3D 图像,但该技术未能完全避免置钉时螺钉轻度穿破骨皮质的发生,仍需提高术者与导航系统间的交互作用,完善操作技术,进一步提高置钉精确性。

【关键词】椎弓根螺钉;上颈椎;O 型臂导航;置钉精确性

doi:10.3969/j.issn.1004-406X.2015.12.02

中图分类号:R687.3 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2015)-12-1063-06

Accuracy of the pedicle screw insertion in upper cervical spine: a comparison between 3D O-arm based navigation and free-hand technique/QU Zhe, QIAN Bangping, QIU Yong, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2015, 25(12): 1063-1068

【Abstract】 Objectives: To compare the accuracy of pedicle screw insertion between three-dimensional (3D) O-arm based navigation and free-hand technique in upper cervical spine, and to explore the advantages of the O-arm based pedicle screw insertion. **Methods:** Sixty-two patients undergoing the upper cervical pedicle screw insertion in our institution were included and divided into two groups, the navigation group (group A) and free-hand group (group B). Group A consisted of 22 consecutive patients, including 15 males and 7 females with a mean age of 40.8 ± 12.7 years (17-58 years), all patients underwent posterior upper cervical pedicle screw instrumentation based on intraoperative 3D navigation by using O-arm system between January 2014 and March 2015. Group B consisted of 40 patients (26 males and 14 females) received both free-hand C1 and C2 pedicle screw insertion from March 2005 to December 2013, all patients had an average age of 42.0 ± 15.6 years (12-70 years). All patients undertook postoperative CT scans to assess the accuracy of cervical pedicle

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:81372009);江苏省妇幼保健科研资助项目(编号:F201353);江苏省六大人才高峰资助项目(编号:2012-WS-004)

第一作者简介:男(1989-),硕士在读,研究方向:颈椎疾病、脊柱畸形

电话:(025)68182022 E-mail:123quz@sina.com

通讯作者:钱邦平 E-mail:qianbangping@163.com

screw placement of each group and the differences between two groups were compared. The accuracy of pedicle screw insertions was classified into 4 grades according to Neo's classification based on pedicle-wall perforations(grade 0, no perforation of the pedicle; grade 1, perforations $<2\text{mm}$, or $<50\%$ of screw diameter outside the pedicle; grade 2, perforations between $\geq 2\text{mm}$ and $<4\text{mm}$, or $>50\%$ of screw diameter outside the pedicle; grade 3, perforations $>4\text{mm}$, or complete perforation). **Results:** Group A had 67 upper cervical pedicle screws being inserted (28 C1 pedicle screws and 39 C2 pedicle screws), 60 (89.6%) of them were classified as grade 0, 7(10.4%) were grade 1, no grade 2 or grade 3 was identified. A total of 134 upper cervical pedicle screws were placed in group B(64 C1 pedicle screws and 70 C2 pedicle screws). 116(86.6%) of them were classified as grade 0, 13(9.7%) as grade 1, 4(3.0%) as grade 2, 1(0.7%) as grade 3. There was no statistical significance of the accuracy distribution of pedicle screw insertion and grade 0 screw placement between 2 groups($P=0.49$ and $P=0.55$, respectively); moreover, the malposition of pedicle screws was identified in 3.7% screws of free-hand group, which was not found in navigation group, however, no significant difference was identified ($P=0.17$). No neurovascular complications related to pedicle screw insertion were noted in both groups. **Conclusions:** No significant difference of the accuracy in upper cervical pedicle screw insertion between O-arm navigation and free-hand group is found. Even clear intraoperative three-dimensional images can be provided by O-arm navigation, pedicle screw perforation cannot be completely prevented with this technology. Therefore, the interaction between the surgeon and navigation system should be improved and manipulation of O-arm navigation should be optimized to achieve more accuracy during pedicle screw placement.

【Key words】 Pedicle screw; Upper cervical; O-arm navigation; Accuracy

【Author's address】 Department of Spine Surgery, Drum Tower Hospital of Nanjing University Medical School, Nanjing, 210008, China

颈椎后路内固定技术,如侧块螺钉固定、椎弓根螺钉固定、椎板螺钉固定和关节突螺钉固定等,已被广泛用于上颈椎疾病的治疗。相关生物力学研究表明,颈椎椎弓根螺钉固定因其可靠的三柱内固定,比其他技术提供更高的稳定性^[1-3]。然而,由于寰枢椎椎弓根细小、周围结构复杂以及椎动脉较高的解剖学变异性^[4],增加了上颈椎椎弓根螺钉置钉时神经及椎动脉损伤的风险。因此,需要引入其他辅助置钉技术,以增加上颈椎椎弓根螺钉置钉的精确性。近年来影像导航技术发展迅速,已有文献报道 3D 导航技术在颈椎椎弓根螺钉置钉中的应用,获得了较高的置钉精确性^[5-6]。但以往的研究多集中于导航技术在下颈椎置钉的应用,且多采用传统术前 CT 导航或 C 型臂导航,目前尚无 O 型臂导航在上颈椎置钉的应用研究。我院在国内率先引入最新 3D O 型臂导航技术,并将其应用于上颈椎椎弓根螺钉内固定术中。本研究旨在观察 3D O 型臂导航系统辅助上下颈椎椎弓根螺钉置钉的精确性,并与传统徒手置钉方法进行比较。

1 资料与方法

1.1 一般资料

本研究纳入我院采用 C1、C2 椎弓根螺钉内固定患者 62 例,分为 3D O 型臂导航置钉组(A 组)与徒手置钉组(B 组)。

A 组:2014 年 1 月~2015 年 3 月共 22 例。其中男 15 例,女 7 例,年龄 17~58 岁(40.8 ± 12.7 岁)。病因学分类:寰椎前、后弓骨折 2 例,枢椎齿状突骨折 7 例(新鲜骨折 4 例,陈旧性骨折 2 例,病理性骨折 1 例),C2 椎体骨折 6 例,外伤性寰枢关节脱位 1 例,类风湿性关节炎寰枢关节半脱位 2 例,颈椎管内肿瘤 2 例,寰椎后弓肿瘤 2 例。共置钉 67 枚,C1 28 枚,C2 39 枚。

B 组:2005 年 3 月~2013 年 12 月行后路手术经徒手置入 C1 及 C2 椎弓根螺钉患者 40 例,男 26 例,女 14 例,年龄 12~70 岁(42.0 ± 15.6 岁)。病因学分类:先天性寰枢关节脱位 8 例,类风湿性关节炎寰枢关节脱位 1 例,外伤性寰枢关节脱位 2 例,Jefferson 骨折 2 例,枢椎齿状突骨折 14 例,Hangman 骨折 4 例,C2 椎体骨折 2 例,颈椎管内肿瘤 3 例,另外 3 例患者寰椎骨折合并枢椎齿状突骨折,1 例患者 Hangman 骨折合并寰椎后弓骨折。共置入椎弓根螺钉 134 枚,C1 64 枚,C2 70

枚。

两组间在年龄、性别上均无统计学差异 (年龄, $P=0.72$; 性别, $P=0.80$), 组间具有一致性。

1.2 导航设备

应用 Medtronic Stealth Station (Medtronic, Inc. America) 结合术中 O 型臂扫描, 由 O 型臂提供术中即刻的 3D 重建影像, 并将影像数据自动传入导航系统, 以上数据可在导航系统中直接使用, 而不需另行匹配注册。在本研究中, 患者的脊柱影像可以在 30s 内获得, 3D 重建一般在 60s 内完成。

1.3 手术方法

全身麻醉后, 患者取俯卧位, 用 Mayfield 头架固定头部, 行枕骨至 C3 后正中切口, 剥离椎旁肌完成骨性显露。徒手置钉组根据传统解剖学标志判断进钉点^[7], 依据经验钉道准备后置入椎弓根螺钉。导航置钉组连接导航设备, 将导航参考架固定于 C3 棘突, 用无菌单完全覆盖保护患者无菌区域后, 进行 O 型臂扫描。扫描图像自动输入导航系统并完成注册, 使用导航探针在 3D 影像引导下选择螺钉最佳进钉点和进钉方向, 用接有参考架的皮质锥完成钉道准备。每次进行下一个钉道准备前, 均用导航探针接触患者骨性解剖标志, 如寰椎后结节、C2 棘突分叉等, 以验证导航的准

确性。由于本研究中置钉节段与固定参考架间均不超过两个椎体, 无需重复扫描注册。钉道全部完成后, 选择合适直径、长度的椎弓根螺钉, 通过钉道拧入。依据不同病因完成椎板减压、椎板成形或肿瘤切除等操作后, 调节头位, 在复位状态下完成固定。

1.4 置钉精确性分析

两组患者术后均行颈椎 CT 平扫, 观察椎弓根螺钉置入的精确性。按照 Neo 等^[8]的方法, 根据螺钉是否穿破椎弓根皮质, 将置钉精确性分为 4 级 (图 1): (1) 0 级, 螺钉完全处于椎弓根中, 没有穿破骨皮质; (2) 1 级, 螺钉穿破皮质 $<2\text{mm}$, 或小于螺钉直径的 50%; (3) 2 级, 螺钉穿破皮质 $\geq 2\text{mm}$ 且 $<4\text{mm}$, 或大于螺钉直径的 50% 但没完全穿出; (4) 3 级, 完全穿出皮质, 螺钉处于椎管或椎动脉孔内。其中 0 级定义为精确置钉, 1 级为可接受的置钉, 2 级或 3 级为不良置钉^[9]。分别统计两组间螺钉的置钉精确性分级以及 0 级精确置钉率, 并比较两组间的差异。

1.5 统计学分析

使用 SPSS 19.0 软件包, A、B 两组间置钉精确性分级比较采用非参数 Mann-Whitney U 检验, 两组间 0 级精确置钉率及 2 级或 3 级不良置钉率的差异采用卡方检验分析。 $P<0.05$ 为差异有

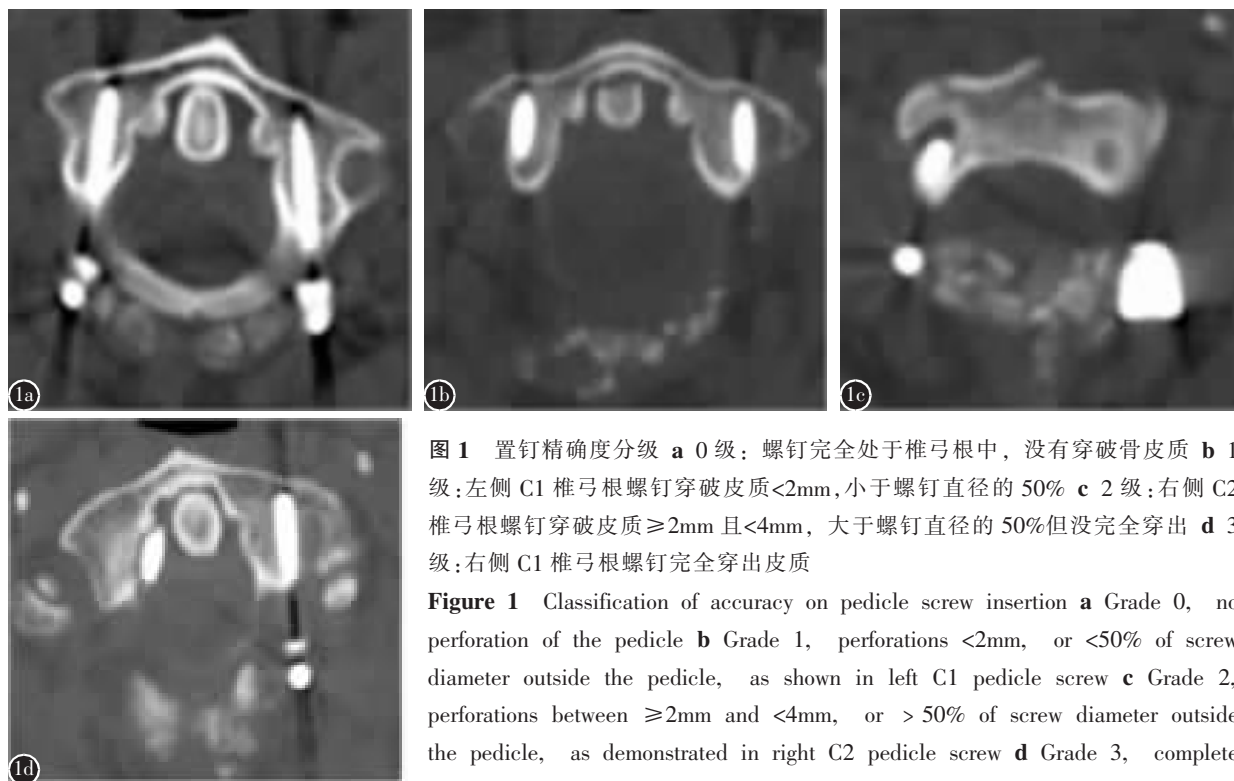


图 1 置钉精确度分级 a 0 级: 螺钉完全处于椎弓根中, 没有穿破骨皮质 b 1 级: 左侧 C1 椎弓根螺钉穿破皮质 $<2\text{mm}$, 小于螺钉直径的 50% c 2 级: 右侧 C2 椎弓根螺钉穿破皮质 $\geq 2\text{mm}$ 且 $<4\text{mm}$, 大于螺钉直径的 50% 但没完全穿出 d 3 级: 右侧 C1 椎弓根螺钉完全穿出皮质

Figure 1 Classification of accuracy on pedicle screw insertion a Grade 0, no perforation of the pedicle b Grade 1, perforations $<2\text{mm}$, or $<50\%$ of screw diameter outside the pedicle, as shown in left C1 pedicle screw c Grade 2, perforations between $\geq 2\text{mm}$ and $<4\text{mm}$, or $> 50\%$ of screw diameter outside the pedicle, as demonstrated in right C2 pedicle screw d Grade 3, complete perforation, as shown in right C1 pedicle screw

统计学意义。

2 结果

导航置钉组(A组,图2)置入的67枚螺钉中,0级置钉60枚(89.6%),1级置钉7枚(10.4%),无2级或3级不良置钉。徒手置钉组(B组)置入的134枚螺钉中,0级置钉116枚(86.6%),1级置钉13枚(9.7%),2级置钉4枚(3.0%),3级置钉1枚(0.7%)。

两组在置钉精确性分级上无统计学差异($P=0.49$),0级精确置钉率亦无统计学差异($P=0.55$)。导航组无不良置钉,徒手置钉组发生5枚(3.7%)不良置钉,但两组间无统计学差异($P=0.17$)。两组均无置钉相关血管、神经并发症发生。

3 讨论

3.1 上颈椎置钉的挑战

寰枢关节复合体包括寰椎、枢椎、关节囊及周围的韧带,由于椎动脉、颈髓等重要结构的通过,其解剖关系复杂。后路钢丝、关节突螺钉、侧块螺钉及椎弓根螺钉固定已被用于由骨折、炎症、肿瘤、先天性畸形等引起的寰枢关节不稳。Oda等^[10]通过对21具人尸体标本的生物力学研究发现,后路螺钉内固定比钢丝更可靠。Ito等^[11]进一步提出,颈椎椎弓根螺钉固定的稳定性是侧块螺钉固定的4倍。然而,上颈椎椎弓根螺钉的置入具有较高的风险性。首先,上颈椎椎弓根结构细小,置钉时容易穿破皮质发生不良置钉,可高达16.9%^[11]。其次,椎动脉较高的解剖学变异性也使不良置钉发生时损伤椎动脉的风险大大增加。有研究表明,上颈椎徒手置钉时椎动脉损伤率可达4.1%^[12]。因此,需要引入一种更为精准、安全的置钉方式。

3.2 导航技术的发展

导航技术最早应用于神经外科,并于20世纪

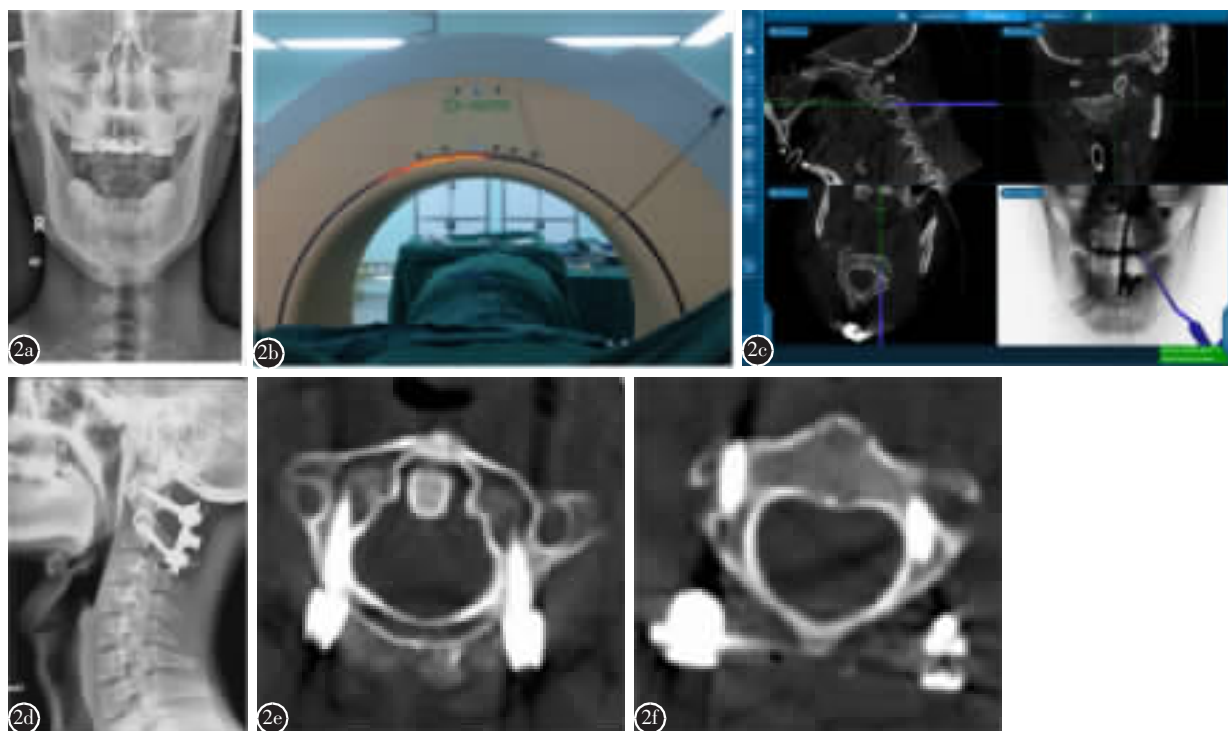


图2 患者男,24岁 a 术前X线片示外伤性枢椎齿状突骨折 b 术中行O型臂扫描 c O型臂导航下行椎弓根螺钉的钉道准备,可见三维的进钉指示 d C1、C2椎弓根螺钉内固定术后效果满意 e 术后CT示双侧C1椎弓根螺钉均为0级置钉 f C2左侧椎弓根螺钉0级置钉,右侧轻度穿破皮质,为1级置钉

Figure 2 A-24-year old male patient a Pre-operative X-ray illustrated traumatic odontoid process fracture b He received intraoperative O-arm scanning c The trajectory of the pedicle screw was showed on 3D images d Radiograph after posterior C1 and C2 pedicle screw insertion e Postoperative CT scans demonstrating Grade 0 pedicle screw insertions on both sides of C1 f Grade 0 pedicle screw insertion on the left side of C2; however, grade 1 pedicle screw insertion was identified on the right side of C2

90年代开始引入脊柱外科,辅助椎弓根螺钉内固定^[13,14]。第一代脊柱导航系统基于术前CT影像,操作时须在术前标注患者解剖标记点,并在术中患者身上找到这些点完成注册。Schwarzenbach等^[15]分析了导航下置入162枚椎弓根螺钉的精确性,仅有2.7%穿破椎弓根皮质,指出导航下置钉可以获得较高的精确性。刘亚军等^[16]比较CT导航下颈椎椎弓根螺钉与传统徒手置钉精确性的差异,满意度分别为97.5%和91.7%,导航组更有优势。然而,传统CT导航有以下不足:(1)术前CT扫描时仰卧位与术中俯卧位体位变化较大,导航图像常不能真实反映术中的解剖位置关系;(2)对于寰枢椎这类活动度较高的结构,术前导航不能反映术中即时变化;(3)点对点的手动注册需要术者有丰富的经验,学习曲线较长。随后出现的3D C型臂技术基于术中影像,通过C型臂自动绕手术区域旋转190°形成模拟CT的3D重建图像,并自动与靶椎体匹配注册,克服了以上不足。田伟等^[17]通过对透视、CT和C型臂导航的比较,提出C型臂导航可获得更高的精确性,并报道C型臂导航在上颈椎中的应用可获得满意的效果^[18]。然而C型臂导航的图像较真正的3D图像仍有差距,且图像处理时间及注册时间较长,增加了手术时间和辐射量^[19]。

3.3 3D O型臂导航的优势

3D O型臂导航是最新的脊柱导航技术,也是目前唯一同时具有获得术中即时高质量三维图像和全自动注册功能的导航系统。与C型臂导航相比,O型臂导航系统的优势在于:(1)扫描3D影像质量较高,可达到与螺旋CT相近的效果,增加导航的精确度;(2)扫描、注册时间短,在本研究中仅为60s左右,且避免了多次扫描,减少对医生和患者的辐射^[14,16]。Oertel等^[20]报道了O型臂导航下278枚胸腰椎椎弓根螺钉的置钉精确性,认为与其他导航方式相比,O型臂导航的精确性更高,椎弓根皮质穿破率仅为3.2%。同时,Ishikawa等^[5]将O型臂导航应用于颈椎中获得了88.9%的较高精确置钉率。然而,Tow等^[21]通过对O型臂导航与徒手置钉在单节段腰椎滑脱椎弓根螺钉置钉精确性的比较,认为O型臂导航并不能比徒手置钉获得更高的精确性。这一差异可能是由不同部位椎弓根解剖形态的差异造成,O型臂导航在椎弓根相对细小的颈椎中更能体现出优势。而O型臂导

航在解剖结构更为复杂、变异率更高的上颈椎的应用在国内外仍未见报道。

本研究探讨了O型臂导航下上颈椎椎弓根螺钉的置钉精确性,并与徒手置钉比较,两组的精确置钉率分别为89.6%和86.6%,无统计学差异。可见O型臂导航并不能完全防止螺钉穿破椎弓根皮质的发生,其原因可能为:(1)术中导航并不能完全辅助最佳钉道的选择;(2)手术操作可引起椎体间相对位置改变,使其与导航影像有一定差异。值得注意的是,本研究中导航置钉组未发生2级或3级不良置钉,徒手置钉组有3.7%的不良置钉,本研究的结果与Tjardes等^[22]的观点一致。此外,本研究中导航组患者病因多为骨折、类风湿性关节炎、肿瘤等,这些因素可破坏正常脊椎结构,增加了置钉的难度^[23],而导航技术在这些困难置钉条件下均获得满意效果。佟怀宇等^[24]报道了9例CT导航在存在畸形或椎动脉解剖变异的上颈椎行椎弓根螺钉置钉的应用,显示导航技术在困难置钉条件下的优势。本研究徒手置钉组发生1枚3级不良置钉,但并未造成严重后果,因为不良置钉侧为椎动脉非优势侧,且该患者此处椎动脉孔相对较宽,缓冲范围充足。

3.4 行O型臂导航需注意的问题

在应用O型臂导航系统时,需注意:(1)术中参考架应牢固固定于棘突,完成注册后不能移动,否则必须重新扫描注册;(2)每在一个新节段上操作前,均需用探针触碰该脊椎的解剖学标志点,如棘突、关节突,以确定导航是否精确;(3)操作手法需轻柔,切忌粗暴,防止椎体在术中发生移位;(4)导航技术并不能完全取代脊柱解剖知识,在进钉点的选择上不能完全依赖导航。本研究中,虽然导航组精确置钉率在数值上略高于徒手置钉组(89.6%和86.6%),但两组间并无统计学差异,原因可能为:(1)导航组样本量相对较少,增加了统计学误差;(2)对于一种新技术,术者需适应导航下的置钉操作。因此,为了减少导航偏差,需要增强术者与导航系统间的交互作用,完善操作技术,尽量减少手术操作对导航精确度的影响。同时也可以引入其他辅助置钉技术,如颈椎导航模板技术^[25],以进一步提高置钉精确性。

本研究的局限性在于:(1)两组间的疾病种类分布不均,而不同病因对椎弓根螺钉置钉难度的影响不同,本研究忽略了这种差异。(2)徒手置钉

组所纳入病例为回顾性,缺少前瞻性的对照组。因此,仍需对不同病因学的上颈椎椎弓根螺钉置钉精确性评价的大样本研究。(3)本研究纳入患者术前并未均行 CT 椎动脉造影检查,因此尚不能评估椎动脉解剖变异对置钉精确性的影响,我们将在进一步的研究中注意并分析该问题。

综上所述,虽然 3D O 型臂导航与徒手置钉下上颈椎椎弓根螺钉置钉精确率分别为 89.6% 和 86.6%,但两组间并无统计学差异,导航未能完全防止螺钉穿破椎弓根皮质的发生。因此,为了提高置钉精确性,仍需增加术者与导航系统间的交互作用,完善操作技术。

4 参考文献

1. Kotani Y, Cunningham BW, Abumi K, et al. Biomechanical analysis of cervical stabilization systems: an assessment of transpedicular screw fixation in the cervical spine [J]. Spine, 1994, 19(22): 2529-2539.
2. Ito Z, Higashino K, Kato S, et al. Pedicle screws can be 4 times stronger than lateral mass screws for insertion in the midcervical spine: a biomechanical study on strength of fixation[J]. J Spinal Disord Tech, 2012, 27(2): 80-85.
3. 徐荣明, 胡勇, 马维虎, 等. 寰枢椎后路三种组合固定技术治疗寰枢关节不稳的临床评估[J]. 中华创伤杂志, 2010, 26(6): 516-522.
4. Cacciola F, Phalke U, Goel A. Vertebral artery in relationship to C1-C2 vertebrae: an anatomical study [J]. Neurol India, 2004, 52(2): 178-184.
5. Ishikawa Y, Kanemura T, Yoshida G, et al. Intraoperative, full-rotation, three-dimensional image(o-arm)-based navigation system for cervical pedicle screw insertion [J]. J Neurosurg Spine, 2011, 15(5): 472-478.
6. 喻忠, 王黎明, 曾逸文, 等. 术中三维 C 型臂实时透视导航辅助颈椎椎弓根螺钉的植入[J]. 中华显微外科杂志, 2009, 32(3): 208-211.
7. 谭明生, 张光铂. 寰椎测量及其经后弓侧块螺钉固定通道的研究[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2002, 12(1): 5-8.
8. Neo M, Sakamoto T, Fujibayashi S, et al. The clinical risk of vertebral artery injury from cervical pedicle screws inserted in degenerative vertebrae[J]. Spine, 2005, 30(24): 2800-2805.
9. 陶晓晖, 田伟, 刘波, 等. 术中即时三维导航辅助下后路内固定治疗症状型游离齿突[J]. 中国骨与关节外科, 2013, 6(5): 387-391.
10. Oda I, Abumi K, Sell LC, et al. Biomechanical evaluation of five different occipito-atlanto-axial fixation techniques [J]. Spine, 1999, 24(22): 2377-2382.
11. Mueller CA, Roessler L, Podlogar M, et al. Accuracy and complications of transpedicular C2 screw placement without the use of spinal navigation[J]. Eur Spine J, 2010, 19(5): 809-814.
12. Wright NM, Lauryssen C. Vertebral artery injury in C1-2 transarticular screw fixation: results of a survey of the AANS/CNS section on disorders of the spine and peripheral nerves[J]. J Neurosurg, 1998, 88(4): 634-640.
13. Schlenszka D, Laine T, Lund T. Computer-assisted spine surgery[J]. Eur Spine J, 2000, 9(Suppl 1): S57-64.
14. Amiot LP, Labelle H, DeGuise JA, et al. Computer-assisted pedicle screw fixation—a feasibility study[J]. Spine, 1995, 20(10): 1208-1212.
15. Schwarzenbach O, Berlemann U, Jost B, et al. Accuracy of computer-assisted pedicle screw placement: an in vivo computed tomography analysis[J]. Spine, 1997, 22(4): 452-458.
16. 刘亚军, 田伟, 刘波, 等. CT 三维导航系统辅助颈椎椎弓根螺钉内固定技术的临床应用[J]. 中华创伤骨科杂志, 2005, 7(7): 630-633.
17. 田伟, 刘亚军, 刘波, 等. 计算机导航在脊柱外科手术应用实验和临床研究 [J]. 中华骨科杂志, 2006, 26(10): 671-675.
18. Tian W, Weng C, Liu B, et al. Posterior fixation and fusion of unstable hangman's fracture by using intraoperative three-dimensional fluoroscopy-based navigation [J]. Eur Spine J, 2012, 21(5): 863-871.
19. Rahmthulla G, Nottmeier EW, Pirris SM, et al. Intraoperative image-guided spinal navigation: technical pitfalls and their avoidance[J]. Neurosurg Focus, 2014, 36(3): E3.
20. Oertel MF, Hobart J, Stein M, et al. Clinical and methodological precision of spinal navigation assisted by 3D intraoperative O-arm radiographic imaging: technical note [J]. J Neurosurg Spine, 2011, 14(4): 532-536.
21. Tow BP, Yue WM, Srivastava A, et al. Does navigation improve accuracy of placement of pedicle screws in single level lumbar degenerative spondylolisthesis? a comparison between free-hand and 3D O-arm navigation techniques[J]. J Spinal Disord Tech, 2015, 28(8): E472-477.
22. Tjardes T, Shafizadeh S, Rixen D, et al. Image-guided spine surgery: state of the art and future directions[J]. Eur Spine J, 2010, 19(1): 25-45.
23. Miyata M, Neo M, Ito H, et al. Rheumatoid arthritis as a risk factor for a narrow C2 pedicle: 3D analysis of the C2 pedicle screw trajectory[J]. J Neurosurg Spine, 2008, 9(1): 17-21.
24. 佟怀宇, 张远征, 余新光, 等. 术中 CT 导航在上颈椎螺钉固定手术中的应用[J]. 中华神经外科杂志, 2011, 27(8): 807-811.
25. Lu S, Xu YQ, Lu WW, et al. A novel patient-specific navigational template for cervical pedicle screw placement[J]. Spine, 2009, 34(26): E959-E966.

(收稿日期:2015-09-29 修回日期:2015-11-01)

(英文编审 蒋欣/贾丹彤)

(本文编辑 李伟霞)