

· 临床研究 ·

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

胡 勇, 陈绪国, 袁振山, 董伟鑫, 赖欧杰, 孙肖阳, 朱秉科, 许建忠

宁波大学附属宁波市第六医院脊柱外科, 浙江 315040

【摘要】目的 评价数字化“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的临床效果。**方法** 回顾性分析2013年9月—2016年12月收治的24例采用数字化“定点-定向”双导航模板辅助行颈椎后路椎弓根螺钉置钉的寰枢椎不稳患者的临床资料。术前CT扫描获取数据经Mimics 10.0软件三维重建后进行寰枢椎后路椎弓根螺钉置钉理想钉道的计算机辅助规划,并根据寰枢椎后方骨性结构表面数据设计个性化“定点-定向”双导航模板。在3D打印机上制作“定点-定向”双导航模板,高温消毒后应用于临床手术辅助置钉。术后根据颈椎X线和CT检查结果评价椎弓根螺钉的位置,并观察植骨融合情况及颈椎稳定性。采用颈部和/或枕骨下疼痛视觉模拟量表(VAS)评分评估患者的临床疗效。**结果** 应用数字化双导航模板为24例患者置入椎弓根螺钉,22例行寰枢椎后路椎弓根螺钉固定,2例行寰枢椎后路椎弓根螺钉并椎板螺钉固定。共置入寰枢椎弓根螺钉48枚,枢椎椎弓根螺钉46枚,枢椎椎板螺钉2枚。术后CT检查示所有螺钉均未穿破钉道骨皮质。所有患者随访>6个月,大部分患者颈部疼痛明显缓解,VAS评分由术前(7.78 ± 1.12)分降至术后(2.48 ± 0.55)分,差异有统计学意义($P < 0.05$)。术前肌力下降者术后均不同程度恢复。所有患者均未发生神经、血管损伤等置钉相关并发症。**结论** 数字化“定点-定向”双导航模板不仅能够提高手术置钉的准确性和安全性,还能针对不同类型的寰枢椎不稳提供更合理的置钉方式。

【关键词】 寰椎; 枢椎; 关节不稳定性; 内固定器; 计算机辅助设计; 成像, 三维

【中图分类号】 R 681.531 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1672-2957(2018)02-0076-06

【DOI】 10.3969/j.issn.1672-2957.2018.02.004

Digital “pointing-drilling” double navigation template assisted pedicle screw placement for treatment of atlantoaxial instability

HU Yong, CHEN Xu-guo, YUAN Zhen-shan, DONG Wei-xin, LAI Ou-jie, SUN Xiao-yang, ZHU Bing-ke, XU Jian-zhong
Department of Spinal Surgery, Ningbo No.6 Hospital, Ningbo University, Ningbo 315040, Zhejiang, China

【Abstract】Objective To evaluate the clinical application of digital “pointing-drilling” double navigation template assisted pedicle screw placement for atlantoaxial instability. **Methods** From September 2013 to December 2016, the clinical data of 24 patients with atlantoaxial instability treated with posterior cervical vertebral pedicle screw fixation assisted by digital “pointing-drilling” double navigation template were collected and analyzed in this retrospective study. All the patients had undergone CT scan before operation. After the original data was imported into Mimics10.0 software, a three-dimensional model was reconstructed. The best trajectory of posterior atlantoaxial pedicle screw fixation was designed by a base plate which was a patient-specific complementary template for the posterior atlantoaxial corresponding anatomical surface, and then “pointing-drilling” guide template was materialized in rapid prototyping machine and used intra-operatively to assist screw instrumentation after high temperature sterilization. Position of the screws was determined through cervical roentgenograph and CT scan after operation, and bone fusion rate was evaluated. The neck pain visual analogue scale (VAS) score was used to evaluate clinical efficacy. **Results** All 24 patients underwent screw fixation were assisted by “pointing-drilling” double navigation template, consisting of 22 patients underwent posterior atlantoaxial pedicle screw fixation and the other 2 underwent posterior atlantoaxial pedicle screw combined with vertebral screw fixation. A total of 48 atlas pedicle screws were placed, and 46 axis pedicle screws combined with 2 axis vertebral screws. Postoperative CT examination showed that all screws did not wear through the trajectory bone cortex. All the patients were followed up >6 months. In most patients, the neck pain was significantly relieved. The VAS score reduced from (7.78 ± 1.12) to (2.48 ± 0.55), and the difference was statistically significant ($P < 0.05$). Postoperative muscle strength was significantly improved. No complications, such as nerve or vascular injury, were found in all the patients. **Conclusion**

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY18H060006);

浙江省医药卫生科技计划资助项目(2014KYA199)

作者简介: 胡 勇(1974—), 博士, 主任医师; huyong610@163.com

Digital “pointing-drilling” double navigation template can not only improve the accuracy and safety of atlantoaxial pedicle screw placement, but also provide a more reasonable way of placing screws for different types of atlantoaxial instability.

【Key Words】Atlas; Axis; Joint instability; Internal fixators; Computer-aided design; Imaging, three-dimensional

J Spinal Surg, 2018, 16(2): 076-081

随着人们对上颈椎疾病认识的逐渐深入和内固定器材的发展,出现了许多寰枢椎内固定的新术式,从Magerl关节螺钉技术^[1]到C_{1,2}侧块螺钉^[2]、椎弓根螺钉以及枢椎椎板螺钉^[3-6]。目前最常用的是寰椎侧块螺钉并寰枢椎椎弓根螺钉固定。但是由于置钉位置邻近脊髓、椎动脉、C₂神经根及静脉丛,置钉后容易发生椎动脉、静脉丛损伤和神经麻痹等并发症^[7-8]。为了提高寰枢椎后路螺钉内固定技术的准确性,有学者应用3D打印导航模板来辅助置钉,并取得满意疗效^[9-12]。谭明生等^[13]根据不同的寰枢椎骨折类型,灵活选用寰椎和枢椎不同螺钉内固定技术组合并应用于临床,取得满意的手术效果。本研究回顾性分析本院2013年9月—2016年12月收治的寰枢椎不稳患者24例,采用数字化“定点-定向”双导航模板辅助寰枢椎后路椎弓根螺钉置钉,评估其临床应用价值及影响因素,为今后临床治疗方法的选择提供参考。

1 资料与方法

1.1 一般资料

纳入标准:①可复型或难复型寰枢椎脱位;②临床表现为颈部疼痛,伴/不伴脊髓神经功能受损等;③下颈椎发育良好;④无手术禁忌证。排除标准:①局部炎性反应、肿瘤病变或椎动脉走行异常导致无法置钉;②全身多系统疾病不能耐受手术。根据以上标准,本研究共纳入患者24例,男17例,女7例;年龄28~65岁,平均42.3岁;病程6~22个月,平均13个月。临床表现为慢性颈部疼痛、伴/不伴四肢肌力下降及肌张力增高等神经损伤症状。术前常规行X线、CT三维重建、MRI检查,在数字“定点-定向”双导航模板辅助下行后路寰枢椎内固定术。

1.2 “定点-定向”双导航模板的设计和制作

所有患者术前均采用64排螺旋CT(Philips公司,荷兰)行颈椎扫描,层厚1 mm,层间距0.5 mm,扫描图像以dicom格式保存。将dicom格式文件导入Mimics 10.0三维重建软件(Materialise公司,比利时),生产目标椎体的三维模型。首先运用阈值选取技术获得寰枢椎原始蒙罩;再运用填充技术,修补因数据转换所产生的结构间隙漏洞,得到新蒙

罩;随后在三维重建选项中获得所选取结构区域的三维重建图像;在Med CAD模块中,用直径3.5 mm的圆柱体模拟螺钉,对寰枢椎后路椎弓根螺钉钉道轨迹进行设计,缓慢拖动滚轴,分别在横断面、冠状面及矢状面观察钉道与椎弓根的位置关系,确保钉道不突破椎弓根骨皮质。

将椎体模型及圆柱体数据以stl格式导入UG Imagecware软件(EDS公司,美国),转动三维结构,从各个角度观察钉道是否穿破椎弓根骨皮质,分别在寰枢椎椎弓根螺钉通过危险处做点云剖面图,并根据剖面和三维结构观察结果对钉道做适当微调,以确保置钉的安全性和准确性。按照设计轨迹轴心线将钉道直径重新设定为2.7 mm,并将导航模板钉道外径设为5.7 mm,高度设为15.0 mm,以完成导航模板定向管的设计。然后提取寰枢椎后方对应骨性表面解剖数据,并将其做反向增厚2.5 mm处理后,建立与之形态一致的反向基板,同时导入钉道数据,将两者组合重建成导航模板雏形(外置钉道未贯通),形成带有双侧定位管的寰枢椎椎弓根螺钉个体化导航模板。布尔运算后,贯通导航模板钉道,最后对边界进行修整,完成“定向”导航模板的设计制作。另外,去除定向管道,仅留下基板部分和2.7 mm直径的定向孔,完成“定点”导航模板的设计。利用光敏树脂材料通过光固化成型技术(SLA)将个体化实物模板和寰枢椎三维实体模型生产出来。通过寰枢椎实体模型验证快速成型导航模板与寰枢椎后部骨性结构表面的贴合性。

1.3 手术操作及术后处理

所有手术均由同一团队完成。患者全身麻醉后取俯卧位,术中颅骨牵引质量2~3 kg,后正中入路,充分显露拟手术节段后方结构至两侧预定范围。充分剥离椎板、棘突表面附着的肌肉、韧带后,先将“定点”导航模板贴附于相应的寰椎后弓、枢椎椎板棘突上,观察是否紧密贴合,助手帮忙固定导航模板在寰椎后弓、枢椎椎板和棘突上,术者手持高速磨钻(钻头直径2.6 mm)将进钉点骨皮质磨去;更换成“定向”导航模板,助手辅助固定导航模板,术者手持低速电钻缓缓钻入一侧定向孔通道预定深度,留置直径2.6 mm的克氏针,将导航模板和寰枢

椎后表面固定,沿对侧定向孔钻入预定深度。随后撤出钻头,取下导航模板,攻丝后探针探测钉道四壁一底骨性结构,确保安全后将适宜长度和直径的螺钉缓慢拧入两侧钉道。术中仅在留置克氏针和拧入螺钉后利用C形臂X线机透视确认钉道的安全性。置钉完成后行植骨融合手术。最后留置引流管,逐层缝合切口。术后嘱患者严格卧床,轴向翻身,术后使用抗生素24~48 h、激素3~5 d、脱水药物2~3 d、抑制胃酸药物3~5 d,长期应用营养神经药物。定期观察伤口,24 h引流量<50 mL且无脑脊液漏时拔除引流管,术后3 d佩戴颈托下床活动。

1.4 观察指标

记录所有患者术中和末次随访时颈部疼痛视觉模拟量表(VAS)评分^[14]评估颈部疼痛改善情况。记录寰枢椎椎弓根术前规划和术后置钉内倾角及尾倾角。内倾角为在横断面上钉道与正中线的夹角,尾倾角为在冠状面上钉道与水平线的夹角。观察患者术中、末次随访时神经、血管并发症发生情况。末次随访时行颈椎X线、CT三维重建检查明确椎弓根螺钉位置,观察植骨融合情况及有无内固定松动、断裂等并发症发生。

1.5 统计学处理

采用SPSS 18.0软件对数据进行统计学分析。计量资料使用Shapiro-Wilk检验判断数据是否为正态分布,其中年龄、术中出血量、寰椎内倾角、寰

椎尾倾角、枢椎内倾角、枢椎尾倾角均为正态分布,且方差齐,以 $\bar{x} \pm s$ 表示,组内术前与末次随访时计量资料比较采用配对样本 t 检验;以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结 果

所有患者均顺利完成手术。手术时间(135 ± 15) min,术中出血量均<200 mL,术中透视2次,所有螺钉置入顺利。术中和末次随访时未发生神经、血管相关并发症。行寰枢椎椎弓根螺钉固定融合术22例;术前影像学检查示枢椎单侧椎弓根较细者2例,行寰枢椎椎弓根螺钉并枢椎椎板螺钉固定融合术。共置入96枚螺钉,寰椎椎弓根螺钉48枚(左右各24枚),枢椎椎弓根螺钉46枚(左右各23枚),枢椎椎板螺钉2枚(左右各1枚),均未穿破钉道骨皮质。术前规划钉道和末次随访时钉道内倾角和尾倾角数据见表1,2组数据差异均无统计学意义($P > 0.05$)。末次随访时大部分患者颈部疼痛症状明显缓解,VAS评分由术前(7.78 ± 1.12)分降至(2.48 ± 0.55)分,差异有统计学意义($P < 0.05$)。术前肌力下降者末次随访时均不同程度恢复。术前与末次随访时临床症状与肌力改善情况见表2。末次随访时术后X线及CT三维重建检查示螺钉位置良好、方向准确。术后均未发生感染、脑脊液漏等并发症。典型病例影像学资料见图1。

表1 内倾角和尾倾角

Tab. 1 Introversion angle and elevation angle

$N=24, \bar{x} \pm s, (^{\circ})$

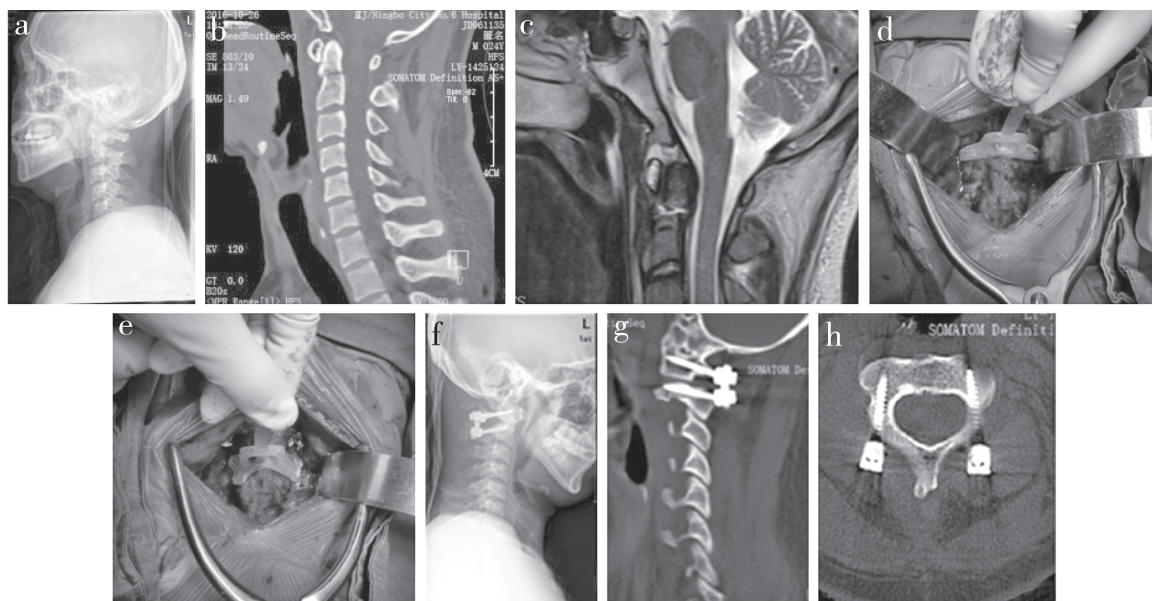
时间 Time	寰椎内倾角 Introversion angle of atlas	寰椎尾倾角 Elevation angle of atlas	枢椎内倾角 Introversion angle of axis	枢椎尾倾角 Elevation angle of axis
术前(理想钉道) Pre-operation (Ideal trajectory)	6.55 ± 0.51	7.94 ± 0.63	11.48 ± 1.07	25.00 ± 1.25
末次随访(实际钉道) Final follow-up (Actual trajectory)	6.57 ± 0.53	7.93 ± 0.64	11.44 ± 1.09	24.93 ± 1.26

表2 临床症状和肌力改善情况

Tab. 2 Improvement of clinical symptoms and muscle strength

$N=24$

时间 Time	临床症状 Clinical symptom				肌力 Muscle strength				
	枕骨下疼痛 Suboccipital pain	颈部疼痛 Neck pain	脊髓压迫症状 Spinal cord compression	无症状 Absence of symptoms	1级 Grade 1	2级 Grade 2	3级 Grade 3	4级 Grade 4	5级 Grade 5
术前 Pre-operation	5	14	2	3	1	3	6	6	8
末次随访 Final follow-up	1	2	0	21	0	0	1	2	21



a~c: 术前颈椎X线片、CT、MRI示Ⅱ型齿突骨折伴寰枢关节不稳 d, e: 术中定点导航贴于对应骨表面, 定向导航贴于骨性结构后置钉 f~h: 术后6个月复查颈椎X线片和CT示内固定位置良好, 植骨融合

a~c: Preoperative roentgenograph, CT and MRI show type II odontoid fracture with atlantoaxial instability d, e: Placement of "pointing-drilling" guide template on vertebra during surgery after exposing corresponding anatomical surface f~h: Roentgenographs and CT at postoperative 6 months show internal fixator in good position and bone grafting fusion

图1 Ⅱ型齿突骨折伴寰枢关节不稳病例影像学资料

Fig. 1 Imaging data of a typical case of type II odontoid fracture with atlantoaxial instability

3 讨 论

数字化骨科技术在脊柱外科已经得到广泛应用, 在临床上具有良好的指导作用。由于寰枢椎解剖结构的特异性, 后路螺钉内固定容易损伤椎动脉及脊髓神经等重要结构^[15-16]。选择合适的进钉点和方向是避免严重神经、血管并发症的关键。数字化骨科技术对寰枢椎置钉的帮助尤为明显, 提高了置钉的准确性, 获得了良好的手术效果^[17-18]。

影响寰枢椎后路椎弓根螺钉置钉的因素: ①寰枢椎解剖结构变异。寰枢椎后方解剖标记结构有限, 术中往往出现进钉点和进钉角度的偏差^[19-20]。②置钉技术的相关因素。颈椎中线容易受到压力和置钉的影响而产生旋转偏移, 术中中线的变化容易影响对置钉角度的判断^[19]。③导航模板贴于寰枢椎骨性结构时, 电钻的轴向钻削力容易导致导航模板不稳定^[21]。“定点-定向”双导航模板和磨钻的应用能有效提高置钉的准确性和安全性, 术中通过调整“定点”导航板的方向可以使之良好贴合到目标骨性结构表面, 减少进钉位点的偏差; “定向”导航板能提高进钉角度的准确性, 不受中线位置变化的影响, 减少寰枢椎解剖结构变异对置钉的影响; 磨钻的

应用使寰枢椎椎弓根螺钉进钉点位置更加精确、稳定, 即使在坚硬的椎弓根处也能重现设计钉道。但是应用导航模板时, 术者只能被动按照固定方向的引导置钉, 一旦导航模板与椎板贴合不紧密, 置钉会出现偏差; 另外, 应用“定点-定向”双导航模板辅助置钉时, 需充分剥离椎体后方软组织以保证导航模板与椎体后方结构贴合紧密, 而这种剥离可能会增加出血量。

Tan等^[22]用传统置钉技术在79例患者中置入158枚寰枢椎椎弓根螺钉, 其中发生静脉丛出血3例, 突破外侧骨皮质3例, 突破内侧骨皮质4例。这表明传统置钉不能满足个体化的需要, 在置钉过程中可能出现偏差, 发生严重的血管、神经等并发症。为了提高置钉的准确性, 许世宏等^[23]在Iso-C三维导航技术辅助下对14例患者置入寰枢椎侧块螺钉和枢椎椎弓根螺钉, 置钉准确率达到94.6%。三维导航技术虽然满足了个体化需求, 但操作复杂, 费用高, 限制了其推广应用。王飞等^[24]报道了19例患者在3D打印导航模板辅助下置入椎弓根螺钉68枚, 置钉准确率为94.1%; 24例传统徒手置钉76枚, 置钉准确率为76.3%, 手术时间、术中出血量等3D打印组均优于传统徒手置钉组。但在单导航模板辅助置

钉技术中,在钻头磨去骨皮质前导航模板容易受到钻头轴向力的影响而导致钉道偏移。螺钉置入的准确性取决于进钉点和钉道的准确建立,双导航模板系统的优势就在于从这2点着手,减少置钉的偏差。本研究组应用“定点-定向”双导航模板辅助置钉,术后颈椎CT三维重建证实94枚螺钉中有0级92枚(97.9%),1级2枚(2.1%)。2枚1级螺钉的外径分别为寰椎3.5 mm和枢椎4.0 mm,其对应的椎弓根最小直径分别为寰椎3.4 mm和枢椎3.8 mm。相较于徒手置钉、三维导航技术辅助置钉和普通3D打印导航模板辅助置钉,双导航模板辅助置钉在准确性上有其特有优势(表3)。寰枢椎后路双侧内固定技术是治疗寰枢椎不稳积极有效的方法。然而,由于寰枢椎结构的复杂性和椎动脉较大的变异性,双侧寰

枢椎后路螺钉内固定技术并不适用于所有的寰枢椎不稳患者。术中对单侧枢椎椎弓根过细的患者,灵活应用双导板模板技术,实施枢椎椎弓根并枢椎椎板螺钉内固定,为变异度较高的寰枢椎提供了多样的后路组合内固定形式。虽然双导航模板能提高置钉的准确性,但在临床应用时存在许多人为因素的影响。患者在手术体位时颈椎存在一定活动度,尤其是寰椎的旋转活动度,增加了辅助固定导航模板的难度,需要助手对导航模板两侧均匀适度用力,而且助手需充分熟悉不同椎体的骨性结构特点,避免盲目施压引起导航模板滑移,导致严重的神经、血管并发症。术前完善的检查、对术中可能出现的情况进行预判、准备多套手术方案,才能更加合理地应用此项新技术,但不能对其过度依赖。

表3 双导板辅助置钉与其他置钉技术的比较

Tab. 3 Comparison of “pointing-drilling” guide template-assisted and other technology

作者 Author	方法 Method	置钉数 Number of screwing	0级螺钉 Grade 0 screw	非0级螺钉 Non-grade 0 screw	置钉准确率(%) Screwing accuracy(%)
Tan 等 ^[22]	徒手法 Free-hand technique	158	151	7	95.6
	Iso-C 三维导航 C-arm 3D navigation	56	53	3	94.6
许世宏等 ^[23]	徒手法 Free-hand technique	64	53	11	82.8
	3D 打印导航 3D printed navigation	68	64	4	94.1
王飞等 ^[24]	徒手法 Free-hand technique	76	58	18	76.3
	Iso-C 三维导航 C-arm 3D navigation	48	46	2	95.8
Yang 等 ^[25]	C形臂X线机透视 C-arm fluoroscopy	48	40	8	83.3
	Iso-C 三维导航 C-arm 3D navigation	187	183	4	97.9
田伟等 ^[26]	C形臂X线机透视 C-arm fluoroscopy	145	133	12	91.7
	双导航模板系统 “Pointing-drilling” guide template	94	92	2	97.9

“定点-定向”双导航模板辅助寰枢椎椎弓根螺钉置钉的注意事项:①“定点-定向”双导航模板是根据椎板、棘突及关节突表面形态而逆向生成,术中需对软组织进行充分剥离,使导板和相应骨性结构贴合紧密;②放置导航模板后,在钻探钉道的过程中应避免导航模板滑动,否则会导致实际钉道和设计钉道的误差,可能造成严重的神经、血管并发症;③双导航模板不适用于因肿瘤或骨质

增生等导致椎板、棘突失去原有表面形态而变得不规则的椎体。

综上所述,数字化“定点-定向”双导航模板辅助寰枢椎椎弓根螺钉置钉在临床应用上可调整性好,置钉准确性高,而且操作简单,减少射线暴露,是一种安全、有效、可靠的方法。但本研究样本量较少,尚需多中心大样本长期随访数据进一步分析其远期疗效及并发症。

参考文献

- [1] Magerl F, Seemann PS. Stable posterior fusion of the atlas and axis by transarticular screw fixation[M]//Kehr P, Weidner A. Cervical Spine I. New York: Springer, 1985: 322-327.
- [2] Goel A, Laheri V. Plate and screw fixation for atlantoaxial subluxation[J]. Acta Neurochir(Wien), 1994, 129(1-2): 47-53.
- [3] Harms J, Melcher RP. Posterior C₁-C₂ fusion with polyaxial screw and rod fixation[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2001, 26(22): 2467-2471.
- [4] 谭明生, 张光铂, 李子荣, 等. 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.
- [5] Wright NM. Posterior C₂ fixation using bilateral, crossing C₂ laminar screws: case series and technical note[J]. J Spinal Disord Tech, 2004, 17(2): 158-162.
- [6] Zheng Y, Hao D, Wang B, et al. Clinical outcome of posterior C₁-C₂ pedicle screw fixation and fusion for atlantoaxial instability: a retrospective study of 86 patients[J]. J Clin Neurosci, 2016, 32: 47-50.
- [7] Leonard JR, Wright NM. Pediatric atlantoaxial fixation with bilateral, crossing C₂ translaminar screws. Technical note[J]. J Neurosurg, 2006, 104(1 Suppl): 59-63.
- [8] Lee SH, Kim ES, Sung JK, et al. Clinical and radiological comparison of treatment of atlantoaxial instability by posterior C₁-C₂ transarticular screw fixation or C₁ lateral mass-C₂ pedicle screw fixation[J]. J Clin Neurosci, 2010, 17(7), 886-892.
- [9] 胡勇, 袁振山, 董伟鑫, 等. 个性化3D打印“定点-定向”双导板辅助寰枢椎后路椎弓根螺钉置钉技术的安全性和准确性[J]. 中华创伤杂志, 2016, 32(1): 27-34.
- [10] Hu Y, Yuan ZS, Spiker WR, et al. Deviation analysis of C₂ translaminar screw placement assisted by a novel rapid prototyping drill template: a cadaveric study[J]. Eur Spine J, 2013, 22(12): 2770-2776.
- [11] 樊勇, 杨超, 杨红军, 等. 3D打印和术中导航技术在寰枢椎脱位术中的应用[J]. 中华创伤骨科杂志, 2016, 18(1): 29-34.
- [12] 姜良海, 谭明生, 杨峰, 等. 标杆型3D打印导板辅助颈椎椎弓根置钉的临床应用[J]. 中华骨科杂志, 2016, 36(5): 257-264.
- [13] 谭明生, 王慧敏, 张光铂, 等. 寰椎经后弓侧块螺钉固定通道的CT测量[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2003, 13(1): 28-31.
- [14] Huskisson EC. Measurement of pain[J]. Lancet, 1974, 2(7889): 1127-1131.
- [15] Yeom JS, Buchowski JM, Kim HJ, et al. Risk of vertebral artery injury: comparison between C₁-C₂ transarticular and C₂ pedicle screws[J]. Spine J, 2013, 13(7): 775-785.
- [16] Buyuk SK, Sekerci AE, Benkli YA, et al. A survey of ponticulus posticus: radiological analysis of atlas in an orthodontic population based on cone-beam computed tomography[J]. Niger J Clin Pract, 2017, 20(1): 106-110.
- [17] Van Cleynenbreugel J, Schutyser F, Goffin J, et al. Image-based planning and validation of C₁-C₂ transarticular screw fixation using personalized drill guides[J]. Comput Aided Surg, 2002, 7(1): 41-48.
- [18] Goffin J, Van Brussel K, Martens K, et al. Three-dimensional computed tomography-based, personalized drill guide for posterior cervical stabilization at C₁-C₂[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2001, 26(12): 1343-1347.
- [19] Hu Y, Dong WX, Spiker WR, et al. An anatomic study to determine the optimal entry point, medial angles, and effective length for safe fixation using posterior C₁ lateral mass screws[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2015, 40(4): E191-198.
- [20] Sakamoto T, Neo M, Nakamura T. Transpedicular screw placement evaluated by axial computed tomography of the cervical pedicle[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2004, 29(22): 2510-2514.
- [21] Yukawa Y, Kato F, Yoshihara H, et al. Cervical pedicle screw fixation in 100 cases of unstable cervical injuries: pedicle axis views obtained using fluoroscopy[J]. J Neurosurg Spine, 2006, 5(6): 488-493.
- [22] Tan M, Dong L, Wang W, et al. Clinical application of the “pedicle exposure technique” for atlantoaxial instability patients with a narrow c1 posterior arch[J]. J Spinal Disord Tech, 2015, 28(1): 25-30.
- [23] 许世宏, 杨永良, 周东生, 等. 三维导航与普通透视下置入寰椎侧块和枢椎椎弓根螺钉治疗寰枢椎不稳的比较[J]. 中华创伤骨科杂志, 2012, 14(12): 1059-1064.
- [24] 王飞, 刘志斌, 张建华, 等. 3D打印导航模板在辅助寰枢椎椎弓根螺钉置入中的应用价值[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2017, 27(1): 61-68.
- [25] Yang YL, Zhou DS, He JL. Comparison of isocentric C-arm 3-dimensional navigation and conventional fluoroscopy for C₁ lateral mass and C₂ pedicle screw placement for atlantoaxial instability[J]. J Spinal Disord Tech, 2013, 26(3): 127-134.
- [26] 田伟, 刘亚军, 刘波, 等. 计算机导航系统和C臂机透视引导颈椎椎弓根螺钉内固定技术的临床对比研究[J]. 中华外科杂志, 2006, 44(20): 1399-1402.

(收稿日期: 2017-07-20)

(本文编辑: 刘映梅)