

临床论著

改良 3D 打印导航模板辅助寰枢椎
椎弓根螺钉置钉的准确性分析蒲兴魏¹, 罗春山¹, 邱冰¹, 王 翀², 赵国权¹, 陆廷盛¹, 姚书耽¹, 陈啟鹄¹

(1 贵州省骨科医院骨科 550007 贵阳市; 2 遵义医学院附属医院脊柱外科 563000 遵义市)

【摘要】目的:探讨改良 3D 打印导航模板辅助寰枢椎椎弓根螺钉置钉的准确性。**方法:**选择我院 2015 年 6 月~12 月期间行寰枢椎手术的患者 17 例,男 11 例,女 6 例;年龄 25~56 岁,平均 43.3±8.7 岁;寰枢椎骨折脱位 13 例,寰枢椎畸形 4 例。术前将患者的寰枢椎 CT 数据导入 Mimics17.0 软件,生成目标椎体的三维模型,使用逆向工程原理设计与其表面相吻合的反向模板及椎弓根螺钉最佳钉道并生成相应导向通道,标杆相对通道向内侧平移约 10mm,将导向通道及标杆与模板拟合一体,设计形成带有导向通道和标杆的改良导航模板。将设计好的导板通过 3D 打印机打印出来。在 3D 模型上模拟置钉,体外试验确认方案可行后再将改良导航模板消毒、灭菌并应用于临床。术中将改良 3D 打印导板与寰枢椎紧密贴合。术者分别以电钻及手钻通过导向通道,以标杆为参照物及导向杆,通过导向通道钻探螺钉通道后取下导板,攻丝后顺钉道置入椎弓根螺钉。将术前规划钉道与术后螺钉配对拟合进行螺钉精确性分析,并以 Kawaguchi 等评价法判断螺钉位置的优劣等级。**结果:**手术时间 106±11min,术中出血量为 220±73ml。共置入 68 枚颈椎椎弓根螺钉,其中寰椎与枢椎各 34 枚。术前预设进钉点、内倾角及头倾角与术后相比差异均无统计学意义 ($P>0.05$)。术后 Kawaguchi 等评价法显示:0 级占 97.06%(66/68),I 级占 2.94%(2/68),有 2 枚螺钉穿破骨皮质,II、III 级螺钉数为 0。**结论:**通过改良 3D 打印导板辅助寰枢椎椎弓根置钉,可提高与术前预设最佳钉道的吻合度、精确匹配术前计划,可提高临床手术置钉的准确性,减少偏差。

【关键词】寰枢椎;改良导航模板;3D 打印;偏差

doi:10.3969/j.issn.1004-406X.2017.08.03

中图分类号:R687.3 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2017)-08-0686-06

Analysis on accuracy of advanced 3D printing navigation template in assisting the placement of atlanto-axial vertebral pedicle screw/PU Xingwei, LUO Chunshan, QIU Bing, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2017, 27(8): 686-691

【Abstract】Objectives: To explore the accuracy of advanced 3D printing navigation template in assisting the placement of atlanto-axial vertebral pedicle screw. **Methods:** 17 patients who underwent pedicle screw placement of atlanto-axial vertebral were selected from our hospital between June 2015 and December 2016, including 11 males and 6 females, aging from 25 to 56 years (43.3±8.7 years). 13 patients had atlanto-axial vertebral fracture and dislocation while 4 cases had atlanto-axial vertebral deformity. Atlanto-axial CT data of patients were input into Mimics17.0 to generate a 3D model of the target vertebral body. The cylinder with the diameter of 3.5mm was used for simulation of screws in the computer-aided design software to make preliminary simulation of pedicle screw placement parallel to the direction of pedicle screw. The position relation between the screw channels and the screw channel was carefully adjusted to ensure the pedicle bone cortex was not broken through by the screw channel. The benchmark was moved parallelly about 10mm towards the inside relatively to the screw hole. The guide plate file was imported into the Form1+3D printer to print the atlanto-axial pedicle screw guide plate. The guide plate was disinfected with ethylene oxide and encapsulated for subsequent use. The surgical operations were simulated preoperatively in the previously 3D-printed model,

基金项目:贵州省卫计委科学技术基金项目(编号:2016gzwjkj2016-1-029)

第一作者简介:男(1981-),医学硕士,研究方向:脊柱外科、数字骨科

电话:(0851)85755972 E-mail:1255468850@qq.com

通讯作者:罗春山 E-mail:lyz8088@163.com

the scheme was confirmed by in vitro test before the advanced navigation template disinfected, sterilized and applied to clinical. Advanced 3D printing template was closely adhered to the atlanto-axial vertebral body during operation. The surgeon drilled out the screw channel through the guiding channel by drill with pole as the reference, and the guiding plate was removed, and pedicle screw was placed along the screw channel.

Results: The operation time was 106 ± 11 min and the intraoperative blood loss was 220 ± 73 ml. A total of 68 cervical pedicle root screws were placed, including 34 cases in atlas and 34 cases in axis. There were no statistically significant differences between preoperative and postoperative pre-designed nailing points, the inclination angle and head tilt angle ($P > 0.05$). Postoperative Kawaguchi scale showed level 0 accounting in 97.06% (66/68), level I in 2.94% (2/68), level II and III in 0, and two screws were broke through bone cortex. **Conclusions:** By using the advanced 3D printing navigation template auxiliary atlanto-axial vertebral pedicle nailing guide, alignment with the preoperative default best nail can be improved to exact match pre-operative plan, the accuracy of clinical surgery nailing can be improved to reduce the deviation.

[Key words] Atlanto-axial vertebral body; Advanced navigation template; 3D printing; Deviation

[Author's address] Orthopedic department, Guizhou Province Osteological Hospital, 550007, Guiyang, China

寰枢椎椎弓根螺钉内固定术因其稳定性良好,已得到脊柱外科医生的广泛认可^[1-2],成为寰枢椎骨折脱位、不稳手术治疗的主要术式。由于寰枢椎邻近结构复杂,椎弓根细小,变异率较高,椎弓根螺钉内固定相关的血管神经损伤一直是限制其临床应用的瓶颈^[3]。因此,如何提高寰枢椎椎弓根螺钉置钉的准确性,具有重要意义。随着 3D 打印技术在医疗行业的推广,椎弓根导航模板也逐渐在脊柱手术中受到广泛应用^[4-6],但同时也存在一些不足,如:术中导板晃动及移位;导板细小,术中不利于扶持及固定;高温消毒后导板容易变形等。为此,我们在既往导板的基础上加以改良,并于 2015 年 6 月~2016 年 12 月应用改良 3D 打印导航模板辅助寰枢椎椎弓根螺钉置入内固定治疗 17 例寰枢椎骨折脱位及畸形患者,报道如下。

1 资料与方法

1.1 一般资料

17 例患者中,男 11 例,女 6 例,年龄 25~56 (43.3 $\pm$ 8.7) 岁。寰枢椎脱位 13 例,寰枢椎畸形 4 例(齿状突畸形 2 例,类风湿关节炎导致寰枢关节不稳 2 例)。影像学检查示,患者均存在寰枢椎不稳或骨折、脱位。15 例患者寰枢椎术前可复位至正常状态,2 例患者基本复位至正常位置,复位后脊髓前方无明显受压。患者均在改良 3D 打印导航模板辅助下行寰枢椎后路椎弓根螺钉内固定术。

1.2 改良 3D 打印导航模板的设计和制作

患者术前行上颈椎 CT 扫描,采用 Light Speed 16 层螺旋 CT 机(GE 公司,美国)检查,扫描范围为 C1~C3 椎体 3 个节段,层厚 1.25mm,螺

距 5.0mm,进床速度 9.37mm/s,电压为 120kV,电流 200mA。扫描图像以 Dicom 格式保存。

将 Dicom 格式文件导入 3D 图像生成及编辑处理软件 Mimics 17.0(Materialise 公司,比利时),生成目标椎体的三维模型。在计算机辅助设计软件 Creo 2.0(PTC 公司,美国)中,使用直径 3.5mm 的圆柱体模拟螺钉,以平行于椎弓根的方向初步模拟椎弓根置钉,在 3D 界面的横断位、矢状位、冠状位观察钉道与椎弓根的位置关系,并对钉道进行细致调整,确保钉道不突破椎弓根骨皮质。以直径 3.5mm 的圆柱体中轴线为轴心,在椎板表面做内径为 2.1mm 的椎弓根螺钉进钉引导管,长度为 15mm。完成钉孔位置设计后,通过布尔求差切除导板与椎体三维模型干涉部分,形成导板定位面。根据预设的钉道的轴心线重新建立直径为 3.5mm 的圆柱体标杆,标杆相对钉道向内侧平移约 10mm,标杆长约 40mm。将导板文件导入 Form1+3D 打印机(Formlabs,美国),打印出寰枢椎椎弓根置钉导板。环氧乙烷消毒后封装备用。

1.3 改良 3D 打印导航模板的术中应用

术前在 3D 打印出来的模型上进行手术模拟操作,通过导航通道经椎弓根钻入克氏针,肉眼观察显示克氏针均位于椎弓根内,未穿出椎弓根的骨皮质。体外试验证实了改良 3D 打印导航模板的精确性。确认方案可行后,将导航模板通过环氧乙烷消毒备用。所有患者使用颅骨牵引保持寰枢椎复位状态,牵引重量 3~6kg。患者全身麻醉后取俯卧位,颈部后正中切口,显露寰枢椎后部结构;充分剥离椎板、棘突表面附着的肌肉、韧带后,将消毒的改良 3D 打印导板分别紧密贴附于寰枢椎

相应椎体的侧块、椎板和棘突后部,观察导板与其是否紧密贴合,助手扶持对侧标杆固定导板,术者以直径 2.0mm 电钻通过导板导向通道钻破椎板骨皮质 10mm,通过导向通道以手钻钻探椎弓根螺钉通道,操作中平行于导板标杆的方向,注意观察标杆的方向及是否有移动。钻孔完成后使用探针探测钉道内壁是否完整,确认无误后取下导板、攻丝并放置 3.5mm 直径的椎弓根螺钉。置钉完成后,C 型臂 X 线机侧位透视,检查置钉位置是否良好。调整头部及颈部位置以达到最佳复位状态,

在维持该状态的情况下行钉棒固定、植骨。最后留置引流管,逐层缝合切口(图 1)。

1.4 术后处理

术后患者严格卧床,颈部制动,轴向翻身;观察术区引流量,如低于 50ml/24h 且无脑脊液漏,则拔除切口引流管;术后使用抗生素 24~48h(高龄、营养不良及合并糖尿病患者予延长至 48h)、脱水药 3~5d、抑制胃酸药 3~5d,如术前有脊髓神经症状则激素 3~5d。手术 3d 后嘱患者戴颈托逐步下地活动。



图 1 59 岁男性,车祸伤,术前诊断为齿状突骨折 a 颈椎侧位 X 线片示寰枢椎无明显脱位 b 术前 CT 示枢椎齿状突骨折 c 在计算机软件中规划个性化安全通道,设计寰枢椎椎弓根螺钉改良导航导板 d 寰枢椎改良导航导板 e 为术中使用导板导航下置钉 f~h 术后 X 线及 CT 示螺钉位置良好

Figure 1 The images showed a 46-year-old male patient with odontoid

fracture and dislocation a Lateral cervical radiographs b Preoperative CT showed the existence of odontoid fracture c The advanced navigation template with guiding channel and pole was designed according to the data of bony structure surface behind the atlanto-axial vertebra and reverse template which was anastomotic to the surface d The improved atlantoaxial navigation guide plate e The visual in the operation f~h The cervical posterior radiographs showed well positioned atlantoaxial pedicle screws; postoperative CT showed the atlantoaxial pedicle screw was well positioned in the vertebral pedicle

1.5 评估方法

术后患者常规行寰枢椎 CT 平扫检查。根据椎弓根螺钉与椎弓根的位置关系,按照 Kawaguchi 等^[7]评价置钉准确性:0 级,螺钉完全在椎弓根内;I 级,螺钉穿出椎弓根骨皮质 $\leq 2\text{mm}$,未出现神经、椎动脉损伤等并发症;II 级,螺钉穿出椎弓根骨皮质 $>2\text{mm}$,未出现神经、椎动脉损伤等并发症;III 级,出现神经、椎动脉损伤等与置钉相关并发症。将 0 级定义为椎弓根螺钉位置准确。将 0 级和 I 级定义为椎弓根螺钉安全。

通过在 Mimics 软件中偏差分析方法测量和比较术前预设钉道与置钉后实际钉道的内倾角和头倾角^[8]。内倾角:俯视图 CT 重建示钉道与椎体正中矢状位的夹角;头倾角:左视图 CT 重建示钉道与椎体下终板的夹角。

调整 Mimics 软件 3D 视图中的空间坐标,以寰椎前结节最突出的点为原点。在冠状面过原点作平行于寰椎两侧下关节突最低点连线的平行线为 x 轴;垂直于 x 轴的直线为 y 轴;垂直于冠状面的直线为 z 轴。使用 Mimics17.0 软件中的测量工具,分别测量寰枢椎两侧实际进钉点、预设最佳进钉点的三维坐标,实际进钉点与预设最佳进钉点的空间位置偏差以两者三维坐标的差值表示。

1.6 统计学分析

应用 SPSS 22.0 统计软件对所得计量资料数据进行分析。对实际钉道与术前预设最佳钉道方向偏差比较采用独立样本 *t* 检验,计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示。因实际钉道与术前预设最佳钉道空间位置偏差值不服从正态分布,两者比较采用 wilcoxon 符号秩和检验,计量资料以 $M(Q1-Q3)$ 表示。 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 术后一般结果评价

17 例患者均顺利完成手术。平均手术时间 $106 \pm 11\text{min}$,术中出血量 $220 \pm 73\text{ml}$ 。术中未出现椎动脉及神经损伤,术后均未出现切口感染、脑脊液漏等并发症。

2.2 置钉准确性评价

17 例患者共置入 68 枚颈椎椎弓根螺钉,其中寰椎及枢椎各 34 枚。术后 Kawaguchi 等评价显示 0 级占 97.06%(66/68), I 级占 2.94%(2/68), II、III 级为 0,准确率为 97.06%。寰椎、枢椎左右

侧预设钉道和实际钉道的内倾角、头倾角差异均无统计学意义($P > 0.05$)(表 1)。寰椎、枢椎双侧椎弓根螺钉进钉点在 x、y、z 轴上的偏移,差异亦无统计学意义($P > 0.05$)(表 2)。

3 讨论

目前 3D 打印导航模板技术已应用于寰枢椎后路椎弓根螺钉固定术中,可以提高置钉的准确性^[9-12]。其主要有以下优点^[13]:(1)符合椎弓根个体化置钉的原则,置钉准确率高;(2)操作简单,无特别的经验要求;(3)模板均为单椎体设计,不因术中体位的变化而导致定位失败。Lu 等^[14]、Kawaguchi 等^[7]使用通道型导板辅助置入颈椎椎弓根螺钉,置钉准确率分别为 97.6%及 95.4%。但该技术也存在一些不足^[15-17],主要表现在:(1)制作导航模板过程中出现偏差,CT 机的质量、CT 扫描的层厚、在对椎体进行修饰过程中造成的偏差等因素;(2)在置钉过程中产生置钉偏差,在使用

表 1 寰枢椎预设钉道和实际钉道的内倾角及头倾角
($^{\circ}$, $\bar{x} \pm s$)

Table 1 Comparison of the sagittal angel and transverse angel of Atlanto-axial in pre-set screw track and actual screw track

	实际钉道 Actual screw track		预设钉道 Pre-set screw track	
	右侧/Right	左侧/Left	右侧/Right	左侧/Left
寰椎内倾角 Transverse angel of axial	8.5 $\pm$ 0.62	8.5 $\pm$ 0.58	8.4 $\pm$ 0.71	8.6 $\pm$ 0.67
寰椎头倾角 Sagittal angel of axial	8.6 $\pm$ 0.52	8.6 $\pm$ 1.11	8.5 $\pm$ 0.57	8.5 $\pm$ 1.16
枢椎内倾角 Transverse an- gel of atlanto	29.9 $\pm$ 1.11	28.6 $\pm$ 1.34	30.2 $\pm$ 1.03	29.1 $\pm$ 1.15
枢椎头倾角 Sagittal angel of atlanto	23.7 $\pm$ 1.00	24.0 $\pm$ 0.78	23.5 $\pm$ 1.04	24.1 $\pm$ 0.92

表 2 预设进钉点和实际进钉点空间位置偏移

Table 2 Comparison of the deviation of pre-set and actual atlanto-axial screw entrance points

	x轴 Axis x	y轴 Axis y	z轴 Axis z
寰椎左(mm) Left axial	0.10 (-0.35~0.30)	0.10 (-0.20~0.30)	0.30 (0.05~0.50)
寰椎右(mm) Right axial	0.20 (-0.35~0.35)	0.20 (-0.35~0.20)	0.30 (-0.50~0.60)
枢椎左(mm) Left atlanto	0.10 (-0.35~0.30)	0.10 (-0.20~0.30)	0.30 (0.05~0.50)
枢椎右(mm) Right atlanto	-0.20 (-0.25~0.40)	-0.30 (-0.50~0.20)	0.30 (-0.55~0.55)

过程中,导航模板未紧密地与椎板后部的骨性结构帖服造成置钉偏差;(3)椎体后部软组织剥离不充分造成置钉偏差,未充分剥离椎板、棘突、后弓等后部的肌肉、韧带等软组织导致导航模板不能紧密地与椎板后部的骨性结构帖服;(4)制作导航模板的材料主要为光敏树脂,制作完成后质地脆弱,使用过程中容易损坏;(5)消毒等操作会导致模板形变。然而在临床中我们发现,除上述因素外还存在以下不足:颈部肌肉厚,切口深,两侧椎弓根成角较大,导向通道过长则影响操作并且易产生微动、需剥离过多的软组织,导向通道过短则可能出现电钻与通道不完全平行进而在导板基底部产生切割,不但磨损导板,而且出现钉道偏差。由于导板较小,导向通道短,术中不利于扶持及固定,难以控制其稳定性,不便于观察导板及导向通道位置和方向是否正确,难以观察较小的晃动移位导致的置钉偏差。姜良海等^[18]对 39 例使用标杆型 3D 打印导板辅助颈椎椎弓根置钉的患者进行分析,置钉准确率为 94.4%。标杆型导板去除了两侧通道,而代以定位孔和导向标杆。优点在于通过导向标杆可观察导板方向,由于标杆内移减少了对手术空间的需求,减少对组织的剥离及减少出血;去除导向通道后可调整置钉方向。然而去除导向通道后置钉方向容易出现改变,一旦出现置钉位置不佳则需徒手调整置钉方向,需要经验丰富的高年资医师方可完成。

改良型导板与传统 3D 打印导板的区别在于其保留了两侧导向通道,增加内移的导向标杆。与传统 3D 打印导板相比,改良 3D 打印导航模板辅助寰枢椎椎弓根螺钉置入除了具有传统 3D 打印导板准确性及安全性较高等^[19-21]优点外,还具有以下优势:(1)易判断导板位置,标杆较长,如导板移位或晃动时标杆尾部摆动的弧度较大,术中可通过标杆位置的变化判断导板是否晃动,因此即使较小的晃动及移位也容易发现,这样可减少置钉偏差、提高置钉准确率;(2)以标杆为参照物,导向性好,术中通过导向通道钻探通道时以标杆为参照物,避免电钻与通道不平行而导板基底部切割造成的置钉误差;(3)稳定性好,导板双侧背部增加的标杆较长,可充当扶手作用,术中助手可用手扶持对侧标杆固定导板,有助于术中控制导板稳定性,减少导板晃动、移位;(4)对组织损伤较小,两侧内移的标杆撑开空间较小,对手术空间的

需求减少,可减少对组织的牵拉和剥离。因此,术中只要充分剥离椎体后方软组织以保证导板与椎体后方结构贴合紧密,助手扶持好对侧标杆,钻探通道时以标杆为辅助导向,就可减少置钉误差。

据文献报道^[22,23],徒手脊柱椎弓根螺钉内固定术,特别是在上颈椎中,有 29%~47%的螺钉穿出骨皮质。而 Kawaguchi 等^[7]对 11 例患者使用通道型 3D 打印导板辅助置入 C2~C7 44 枚椎弓根螺钉,术后 CT 示 0 级 42 枚(95.4%),I 级 2 枚(4.6%),无 II、III 级螺钉。王飞等^[21]对 19 例患者采用通道型 3D 打印导板辅助寰枢椎椎弓根螺钉 68 枚,其中 0 级 64 枚(94.1%),I 级 2 枚(2.94%),II 级 2 枚(2.94%),无 III 级螺钉。在本研究中,17 例患者共放置 68 枚椎弓根螺钉,寰椎及枢椎各 34 枚,Kawaguchi 评价法显示 0 级占 97.06%(66/68),I 级占 2.94%(2/68),准确率为 97.06%。术后寰枢椎钉道内倾角、头倾角及进钉点与预设值相比较差异均无统计学意义,说明该方法可精确设定进针点和进针角度,提高置钉的准确率及安全性。在本研究中,我们术前对 17 例患者行薄层 CT 扫描、对寰枢椎进行医学图像数据采集,计算机重建寰枢椎三维模型、设计椎弓根的最佳进钉通道,符合个性化治疗的原则。

然而,在本研究中 17 例患者虽然术后 Kawaguchi 评价法显示准确率 97.06%,但与预设钉道相比较仍存在一定偏差,仍有 2 枚寰枢椎椎弓根螺钉穿破骨皮质,1 枚穿破外侧皮质,1 枚穿破下侧皮质,但均未损伤椎动脉及神经,骨皮质穿破率为 2.94%。术后寰枢椎钉道内倾角、头倾角及进钉点与预设值相比较,虽差异无统计学意义($P < 0.05$),但体内与体外实验比较仍存在一定偏差。作者考虑在本研究中导致偏差的主要因素在于术中操作等人为因素,如:(1)未充分剥离椎板、后弓等后部的肌肉、韧带等软组织,因此在使用过程中导航模板未能紧密地与椎板、后弓后部的骨性结构帖服造成置钉误差;(2)由于颈后部肌肉厚、切口深阻挡操作;(3)钻头与坚硬的皮质骨接触时产生较小的滑移,引起导板和骨质之间位置的轻微变化。因此,为了减少偏差需注意:(1)术中需注意保持电钻与导向通道平行,以标杆为参照物,避免导板基底部切割造成的置钉误差。本研究中导向孔通道内直径为 2.1mm,与钻头相匹配,术中放置石蜡油润滑以减少通道阻力,避免电钻与通道摩

擦导致导板磨损,也可在通道内增加金属套筒避免导板磨损,这样便可避免钻头磨损导向通道而导致的钉道偏移;(2)术前在模型上进行体外实验,确定钉道没有偏离椎弓根后再应用于临床,并且在术中用探针对置钉通道四壁及底部进行探查,置钉完成后常规透视以验证螺钉在钉道内的位置是否正确,确保手术安全。(3)在使用过程中,将相应的颈椎棘突、椎板、侧块背侧的软组织剔除干净,使得模板能够紧密贴附于骨性结构。(4)设计导航模板时不应超过单个椎体所在区间。(5)对于寰椎椎弓根直径小于 3.5mm 甚至缺如者不建议使用椎弓根螺钉固定。

综上所述,采用改良 3D 打印导航模板辅助寰枢椎椎弓根螺钉置入,术后实际钉道、进钉点与术前预设最佳钉道方向和进钉点空间坐标差异均无统计学意义($P < 0.05$),可精确匹配术前计划,为寰枢椎椎弓根螺钉置入提供了一种新的方法。

4 参考文献

- Lu S, Xu YQ, Lu WW, et al. A novel patient-specific navigational template for cervical pedicle screw placement [J]. Spine, 2009, 34(26): 959-964.
- Kaneyama S, Sugawara T, Sumi M, et al. A novel screw guiding method with a screw guide template system for posterior C2 fixation[J]. J Neurosurg Spine, 2014, 21(2): 231-238.
- Yoshihara H, Passias PG, Errico TJ. Screw-related complications in the subaxial cervical spine with the use of lateral mass versus cervical pedicle screws: a systematic review[J]. J Neurosurg Spine, 2013, 19(5): 614-623.
- Kaneyama S, Sugawara T, Sumi M. Safe and accurate midcervical pedicle screw insertion procedure with the patient-specific screw guide template system[J]. Spine, 2015, 40(6): 341-348.
- 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.
- 马向阳,尹庆水,吴增晖,等. 枢椎椎弓根螺钉进钉点的解剖定位研究[J]. 中华外科杂志, 2006, 44(8): 562-564.
- Kawaguchi Y, Nakano M, Yasuda T, et al. Development of a new technique for pedicle screw and magerl screw insertion using a 3-dimensional image guide[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2012, 37(23): 1983-1988.
- Hu Y, Yuan ZS, Kepler CK, et al. Deviation analysis of adaotoaxial pedicle screws assisted by a drill template[J]. Orthopedics, 2014, 37(5): 420-427.
- 王才成,周亮. Mimics 软件和快速成型技术在寰枢椎椎弓根钉个体化置入的应用[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2015, 13(10): 113-116.
- Kawaguchi Y, Nakano M, Yasuda T, et al. Development of a new technique for pedicle screw and magerl screw insertion using a 3-dimensional image guide[J]. Spine(Phila Pa 1976), 2012, 37(23): 1983-1988.
- Hu Y, Yuan ZS, Spiker WR, et al. Deviation analysis of C2 transaminar screw placement assisted by a novel rapid prototyping drill template: a cadaveric study [J]. Eur Spine J, 2013, 22(12): 2770-2776.
- 胡勇,袁振山,董伟鑫,等. 数字化导向模板技术辅助置钉治疗寰枢椎不稳的临床应用[J]. 中华创伤杂志, 2014, 30(8): 768-773.
- 张宇鹏,史亚民,侯树勋. 个体化数字导航模板在脊柱侧凸手术中的应用研究[J]. 中国骨与关节外科杂志, 2015, 4(3): 219-223.
- Lu S, Xu YQ, Chen GP, et al. Efficacy and accuracy of a novel rapid prototyping drill template for cervical pedicle screw placement[J]. Comput Aided Surg, 2011, 16(5): 240-248.
- 陆声,徐永清,张元智,等. 计算机辅助个体化导航模板在 Hangman 骨折中的临床应用[J]. 中华创伤杂志, 2009, 25(8): 886-889.
- Xie H, Yuan JB, Dong WX, et al. Deviation analysis of atlantoaxial pedicle screws assisted by a drill template[J]. Orthopedics, 2014, 37(5): 420-427.
- Ryken TC, Owen BD, Christensen GE, et al. Image-based drill templates for cervical pedicle screw placement: laboratory investigation[J]. J Neurosurg Spine, 2009, 10(1): 21-26.
- 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.
- 胡勇,袁振山,董伟鑫,等. 个性化 3D 打印“定点一定向”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.
- 毛克政,王庆德,梅伟,等. 3D 打印个体化导板辅助颈椎椎弓根螺钉置钉的可行性研究[J]. 中华创伤骨科杂志, 2016, 32(1): 47-50.
- 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.
- Mueller CA, Roesseler 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.
- 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.

(投稿日期:2017-04-16 修回日期:2017-07-10)

(英文编审 蒋欣/贾丹彤)

(本文编辑 姜雅浩)