

## 临床论著

# 复合型3D打印导航模板辅助枢椎椎弓根或椎板置钉的临床研究

吴超<sup>1,2</sup>, 邓佳燕<sup>2</sup>, 谭伦<sup>1</sup>, 胡海刚<sup>1</sup>, 袁德超<sup>1</sup>

(1 四川省自贡市第四人民医院骨科; 2 数字医学中心 643000)

**【摘要】目的:**探讨复合型3D打印导航模板辅助枢椎椎弓根螺钉或椎板螺钉置钉的可行性及临床疗效。**方法:**回顾性分析2015年1月~2017年5月我院收治的32例枢椎后路内固定手术患者资料,男20例,女12例;年龄21~77岁,平均 $57.3\pm9.0$ 岁;随访12个月以上。根据置钉方法的不同进行分组,观察组(18例)采用术前计算机模拟置钉、设计并3D打印个体化导航模板辅助枢椎椎弓根或椎板螺钉置钉;对照组(14例)采用徒手方法置入枢椎椎弓根螺钉。记录两组置钉时间、术中出血量,以Kawaguchi评价法判断螺钉置钉成功率,计算术前模拟置钉和术后实际螺钉进钉点和进钉角度在X、Y、Z轴上的偏差,并进行统计学分析。**结果:**所有患者均顺利完成手术,无神经、重要血管损伤等严重并发症发生。观察组共置入螺钉36枚,其中枢椎椎弓根螺钉22枚,枢椎板螺钉14枚,置钉时间 $31.5\pm6.5$ min,术中出血量 $45.0\pm19.2$ ml,Kawaguchi评价法0级32枚,I级4枚,II级0枚,置钉成功率100%。对照组共置入28枚椎弓根螺钉,置钉时间 $57.6\pm6.9$ min,术中出血量 $228.5\pm57.9$ ml,以Kawaguchi评价法0级18枚,I级6枚,II级4枚,置钉成功率85.7%;两组置钉时间、术中出血量、置钉成功率相比差异均有统计学意义( $P<0.05$ )。术后实际钉道相对于术前模拟钉道偏差角度为 $0.69\pm1.34^\circ$ ,术后实际进钉点相对于术前模拟进钉点在X、Y、Z轴上分别偏移 $0.50\pm2.13$ mm、 $0.75\pm2.18$ mm、 $0.43\pm2.39$ mm,偏移量与术前设计相比差异均无统计学意义( $P>0.05$ )。**结论:**通过复合型3D打印导航模板辅助枢椎椎弓根或椎板螺钉置钉,能减少置钉时间及术中出血,提高置钉成功率。

**【关键词】**枢椎; 内固定; 计算机辅助设计; 3D打印技术

doi:10.3969/j.issn.1004-406X.2018.11.04

中图分类号:R687.3 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2018)-11-0982-07

**Use of compound 3D printing navigation template to assist pedicle or laminar screw placement in axis/WU Chao, DENG Jiayan, TAN Lun, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2018, 28(11): 982-988**

**[Abstract]** **Objectives:** To explore the feasibility and efficacy of the compound 3D printing navigation template in assisting the axis pedicle or laminar screw placement. **Methods:** 32 patients, 20 males and 12 females, aging from 21 to 77, with an average age of  $57.3\pm9.0$ , with posterior internal fixation from our hospital during January 2015 to May 2017 were retrospectively analyzed; all of them were followed for more than 12 months. Among them, 18 cases of pedicle or laminar screws placement were operated by using compound 3D printing navigation template which was designed according to preoperative simulated nailing(observation group). 14 cases of pedicle screw placement were operated by free hand(control group). The bleeding and nailing duration were recorded; the accuracy of screw placement was evaluated by Kawaguchi criteria; the deviation of nailing point and nailing direction between simulated screw and postoperative screw were calculated; all above parameters were statistically analyzed. **Results:** All patients underwent surgeries without serious complications such as nerve or blood vessel injury. A total of 36 screws were placed in the experimental group, including 22 pedicle screws and 14 laminar screws, nailing duration was  $31.5\pm6.5$ min, blood loss was  $45.0\pm19.2$ ml, ac-

**基金项目:**四川省重点科技计划项目(编号:2016JY0108);四川省卫计委科研课题(编号:17PJ144);四川省医学会科研课题(编号:2015GK016)

**第一作者简介:**男(1977-),医学硕士,主任医师,研究方向:脊柱外科、数字骨科

电话:(0813)2204523 E-mail:flightiness@163.com

**通讯作者:**谭伦 E-mail:1098726536@qq.com

cording to Kawaguchi criteria, 32 screws were in grade 0, 4 screws in grade I and 0 screw in grade II, and nailing accuracy was 100%. A total of 28 screws were placed in the control group. Nailing duration was  $57.6 \pm 6.9$  min, blood loss was  $228.5 \pm 57.9$  ml, according to Kawaguchi criteria, 18 screws were in grade 0, 6 screws in grade I and 4 screw in grade II, nailing accuracy was 85.7%. There were no significant differences between the two groups in the nailing duration, blood loss and nailing accuracy ( $P < 0.05$ ). Angle deviation between postoperative nailing and simulated nailing was  $0.69^\circ \pm 1.34^\circ$ ; the deviation between the postoperative nailing point and the simulated nailing point on the X, Y and Z axes was  $0.50 \pm 2.13$  mm,  $0.75 \pm 2.18$  mm,  $0.43 \pm 2.39$  mm, respectively. There was no significant difference of above deviations between postoperative and preoperative design ( $P > 0.05$ ). **Conclusions:** Use of compound 3D printing navigation template in assisting in the placement of pedicle screws or laminar screws can reduce nailing duration and blood loss and improve nailing accuracy. It is an alternative measure for arthroscopic pedicle screw placement failure.

**【Key words】** Axis; Internal fixation; Computer-assisted design; 3D printing technology

**【Author's address】** Department of Orthopedics, The Fourth People's Hospital, Zigong City, Sichuan, 643000, China

枢椎椎弓根螺钉内固定因其具有较好的生物力学特性，是临幊上治疗上颈椎不稳的主要手术方式之一<sup>[1,2]</sup>。由于枢椎周围有重要的神经血管且结构较为复杂，同时椎动脉走行的畸形率高达20%~27.5%<sup>[3]</sup>，因此椎弓根螺钉置钉存在较高的风险。枢椎椎板螺钉固定术操作简单、安全、适用人群广泛、解剖限制少、避免了椎动脉损伤，但有螺钉进入椎管的潜在风险<sup>[4]</sup>。随着数字医学的逐步推广应用，个性化的3D打印导航模板也越来越多地应用于辅助枢椎椎弓根螺钉的置入<sup>[5~7]</sup>，并不断改进提高其准确度<sup>[8,9]</sup>，但对于椎动脉畸形或者是枢椎椎弓根细小的患者，椎板螺钉仍然是较好的选择。为此我们在上述个性化导航模板的基础上进行改进，使其同时兼顾辅助椎弓根和椎板螺钉置钉的功能，设计了一种“复合型3D打印枢椎螺钉导航模板”（专利号：201721505219.2），可以作为个体化辅助置入枢椎椎弓根螺钉的工具，并在椎弓根螺钉不能置入或钻孔失败后辅助椎板螺钉的置钉。我们于2015年1月~2017年5月应用上述导航模板辅助枢椎椎弓根螺钉或椎板螺钉的置钉，获得了较好的效果，报道如下。

## 1 资料和方法

### 1.1 入选标准

纳入标准：(1)影像学存在上颈椎或颈枕不稳定；(2)术前X线片及CT确认枢椎无明显畸形；(3)有神经压迫症状，需减压。排除标准：(1)上颈椎肿瘤或感染；(2)伴发较为严重的内科疾患，不能耐受手术者；(3)严重的骨质疏松患者；(4)枢椎椎弓根骨折的患者。

### 1.2 一般资料

2015年1月~2017年5月，共32例患者符合纳入标准，根据是否在术中使用“复合型3D打印枢椎螺钉导航模板”辅助螺钉置钉分为两组：观察组18例采用术前模拟置钉，设计“复合型3D打印枢椎螺钉导航模板”并3D打印，在术中辅助椎弓根或者椎板螺钉的置钉，对照组14例采用传统置钉方法进行枢椎椎弓根螺钉置入。所有患者术前了解实验设计情况并签署知情同意书，本研究得到本院医学伦理委员会批准。

观察组18例，其中，男性12例，女性6例，年龄21~73岁，平均 $58.1 \pm 14.4$ 岁；其中枢椎齿状突或椎体骨折10例，寰椎骨折5例，颅底凹陷症3例。枢椎齿状突或椎体骨折行C2~3后路内固定；寰椎骨折行C1、2或C2~枕骨内固定；颅底凹陷症行C1后弓切除C2~枕骨内固定术。对照组14例，其中，男性8例，女性6例，年龄23~77岁，平均 $56.5 \pm 14.0$ 岁；其中枢椎齿状突或椎体骨折8例，寰椎骨折4例，颅底凹陷症2例。两组患者性别( $\chi^2=0.31, P=0.72$ )、年龄( $T=0.26, P=0.80$ )、损伤类型( $\chi^2=0.03, P=0.98$ )等一般资料比较均无统计学差异，具有可比性。

### 1.3 复合型3D打印导航模板的设计和打印

(1)重建枢椎的三维模型：获取患者颈椎原始DICOM数据。扫描参数如下：扫描电压120kV，电流185.25mA，矩阵 $512 \times 512$ 像素，层厚0.625mm，扫描视野 $17.3 \times 17.3$ cm。将原始DICOM数据导入minics21.0(Materialise公司，比利时)医学建模软件，选取骨骼CT值作为阈值分割枢椎蒙板，重建枢椎的三维模型。(2)枢椎椎板螺钉的

钉道设计:选取 MedCAD 模块中的圆柱体工具模拟螺钉,直径 3.5mm,圆柱体路径从对侧椎板与棘突交界至同侧椎板与关节突交界处,在不同断面上调整模拟置入的圆柱体,确保此圆柱体不突破椎板皮质,双侧椎板螺钉钉道不重合。(3)枢椎椎弓根螺钉钉道设计:选取 MedCAD 模块中的圆柱工具模拟置钉,直径 3.5mm,沿椎弓根的方向模拟螺钉置入,并在不同断面上调整模拟置入的圆柱体,确保此圆柱体不突破椎弓根骨内、外侧皮质。(4)导航模版设计:将重建的枢椎三维模型和 4 个模拟置钉圆柱体的 stl 文件导入 3-matic 21.0 (Materialise 公司,比利时),根据置钉的位置和解剖标志特点,提取需要剥离的枢椎表面形态,并以 3mm 厚度反向拉伸作为导航模板底座;沿每个模拟置钉的 CAD 圆柱方向重新生成直径为 7mm 的圆柱体,通过减运算生成 4 个导向孔(包括 2 个椎板螺钉导向孔和 2 个椎弓根螺钉导向孔),导向孔内径 2.2mm;通过合并运算将底座、顶座和导向孔合为一体,最终生成带有 4 个导向孔的复合型导航模板。(5)导航模板打印:将上述三维模型和导航模板保存为 stl 文件并输入 3DS Projet3600 型光敏树脂打印机(3DS 公司,美国),进行 3D 打印实物打印(图 1)。

#### 1.4 手术方法

所有患者手术均由熟练掌握脊柱外科手术的高年资医师进行,内固定材料由山东威高骨科材料有限公司提供。患者全麻后行俯卧位,Mayfield 头架固定,取颈后上段正中切口。

观察组:术前在 3D 打印模型上模拟手术,将导板与模型后部结构相贴合,通过导板的导向孔钻入直径 2mm 通过椎弓根和椎板的克氏针,肉眼观察有无穿破骨皮质,体外验证导板的准确性。术前将导板和椎体模型等离子消毒备用。术中,将枢椎后方棘突椎板结构显露后,充分剥离导板底座匹配部分骨质附着的软组织,将导板和椎体后部相吻合,由助手牢固固定,术者首先通过导板椎弓根螺钉导向孔用直径 2mm 手锥进行钻孔,逐级 2mm 加深进钉并探查四壁,若术中探查钉道有皮质突破,即改行通过导板椎板螺钉导向孔钻孔,确认钉道无误后,最后置入长度合适的万向螺钉。对于术前 CT 提示椎弓根直径较细的患者直接通过导板椎板螺钉导向孔辅助置入椎板螺钉(图 2);对于术前 CTA 发现椎动脉畸形、高跨的患者也直接通过导板椎板导向孔置入单侧或双侧椎板螺钉(图 3)。术中 C 型臂 X 线机确认螺钉位置及复位情况。选择合适长度的连接棒预弯后锁紧固定、植骨。最后创腔留置引流管,缝合伤口。

对照组:术中充分显露所需固定节段的后方结构,外侧需至关节突。探查枢椎椎管内侧壁位置,在枢椎上下关节突中点椎管内侧壁以外为进钉点开口,并用手锥内倾 15°、头倾 30°的夹角,逐级 2mm 加深进钉,置入长度合适的万向螺钉。其后处理同观察组。

#### 1.5 评价指标

**1.5.1 临床疗效评估** 置钉时间:从暴露枢椎后部结构后至螺钉完全置入并透视确认完成的时

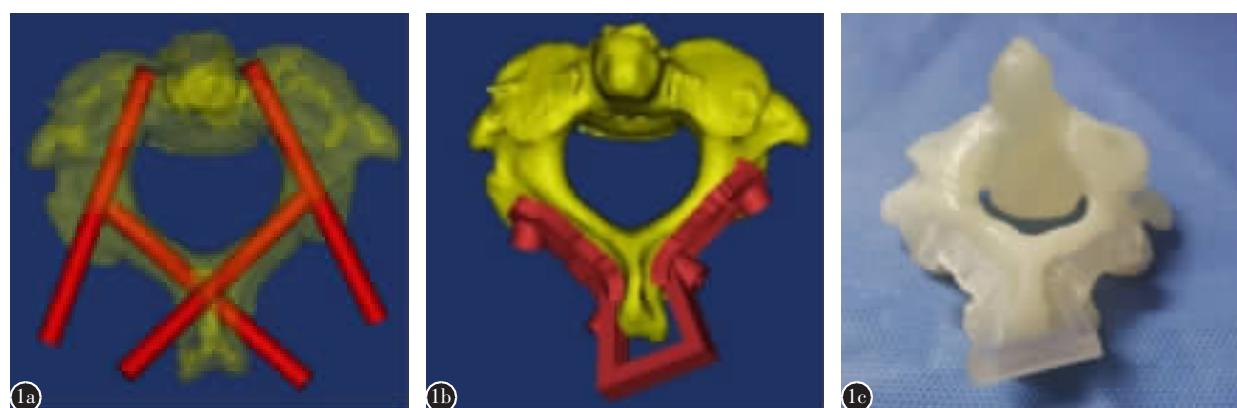


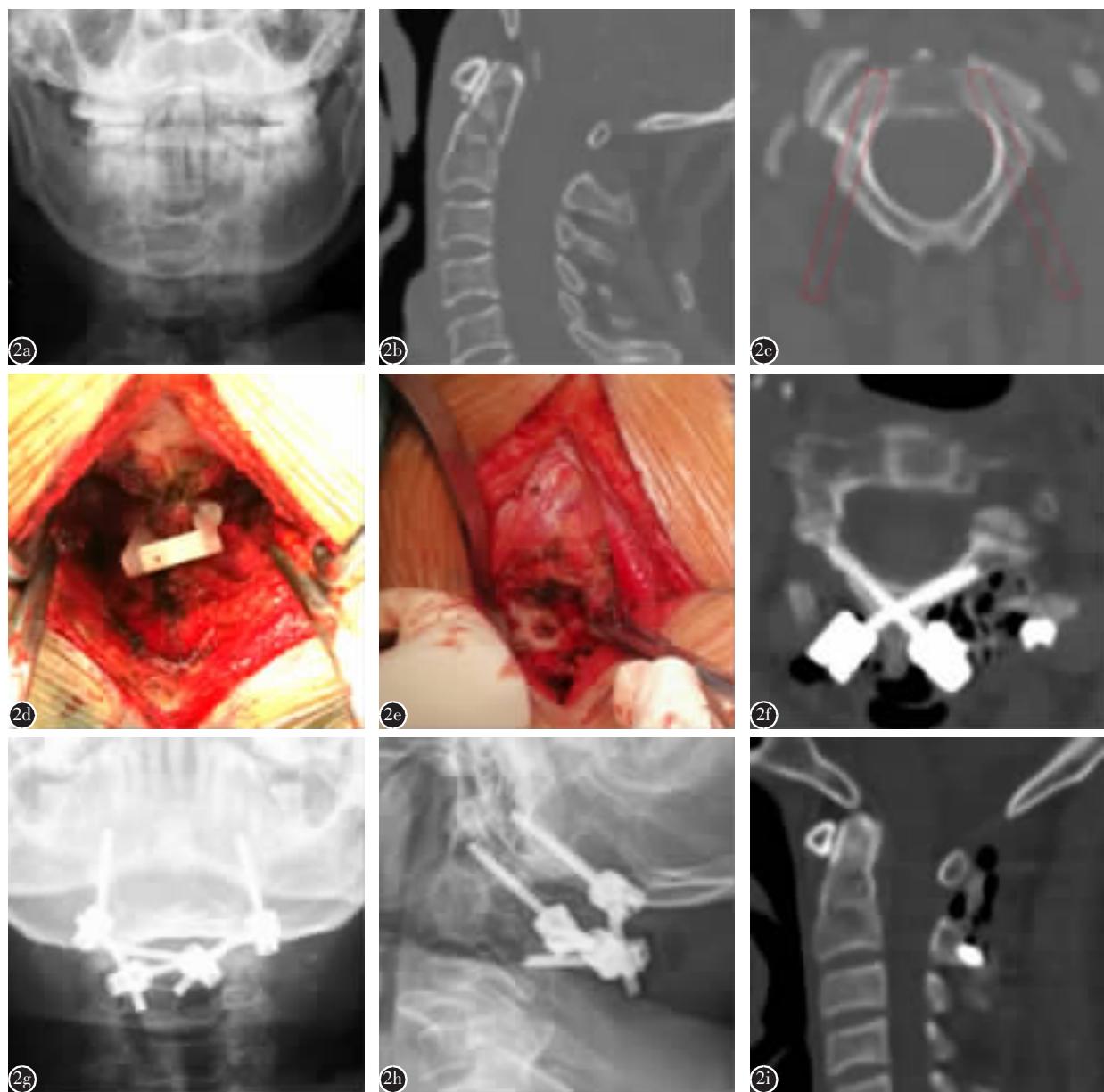
图 1 术前枢椎模型与 3D 打印导航模板 **a** 枢椎三维模型重建并模拟椎弓根和椎板螺钉置钉 **b** 复合型 3D 打印导航模板的设计 **c** 3D 打印枢椎及复合型导航模板

**Figure 1** Preoperative axial 3D printed and navigation templates **a** 3D reconstruction of axis and simulation of pedicle and lamina screws placement **b** design of compound 3D printing navigation template **c** 3D printed axis and compound 3D printing navigation template

间；术中出血量：从手术开始至手术结束出血量总和。

### 1.5.2 影像学评估 (1)置钉成功率：观察并测量

术后 CT，按照 Kawaguchi 等<sup>[10]</sup>评价置钉准确性：未突破椎弓根骨皮质为 0 级置钉，突破骨皮质≤2mm 为 I 级置钉，突破骨皮质>2mm 为 II 级置钉；



**图 2** 观察组,50岁女性,车祸伤 **a** 术前X线片未见明显枢椎齿状突骨折位移 **b** 术前颈椎CT提示枢椎齿状突骨折,骨折无明显移位 **c** 术前模拟置钉,枢椎左侧椎弓根较细无法容纳3.5mm螺钉 **d** 术中使用复合型枢椎螺钉导板辅助置钉 **e** 术中探查椎板螺钉钉道 **f** 术后立即CT示螺钉位置良好 **g,h** 术后立即颈椎正侧位X线片示螺钉位置良好 **i** 术后6个月CT示骨折愈合

**Figure 2** The images showed a 50-years-old female injured by traffic accident, was diagnosed with odontoid fracture **a** Preoperative X-ray showed the fracture of odontoid **b** Preoperative CT showed the fracture of odontoid, and no obvious displacement was observed in the fracture **c** Preoperative simulation of screw placement, the thin left lateral pedicle could not accommodate the screw with 3.5mm diameter **d** The 3D printing navigation template was used to assist the screw placement during the operation **e** Intra-operative exploration of the lamina screw nailing **f** Post-operative CT showed the screw was well positioned **g, h** The immediately X-Ray of anterior and lateral cervical showed the screws were well positioned **i** The CT showed fracture healed 6 months after operation

0、I 级为置钉成功。(2)进钉点偏移量:在三维坐标系中,对比分析术后螺钉相对于模拟钉道入针点在X、Y、Z轴偏差值。(3)钉道方向偏移量:在三维坐标系中,对比分析术后螺钉相对于模拟钉道的角度偏差值;计算方式如下:所有坐标值均基于以CT扫描的定位点为原点,患者平躺,矢状面向左为X轴正向,冠状面向后为Y轴正向,横断面向上为Z轴正向; $X_1, Y_1, Z_1$ 是实际入针点的三维坐标, $X_3, Y_3, Z_3$ 是模拟入针点的三维坐标; $X_2, Y_2, Z_2$ 是实际出针点的三维坐标, $X_4, Y_4, Z_4$ 是模拟出针点的三维坐标;角度偏差计算公式: $\cos\beta = [(X_2 - X_1) \times (X_4 - X_3) + (Y_2 - Y_1) \times (Y_4 - Y_3) + (Z_2 - Z_1) \times (Z_4 - Z_3)] / [(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2]^{1/2} / [(X_4 - X_3)^2 + (Y_4 - Y_3)^2 + (Z_4 - Z_3)^2]^{1/2}$

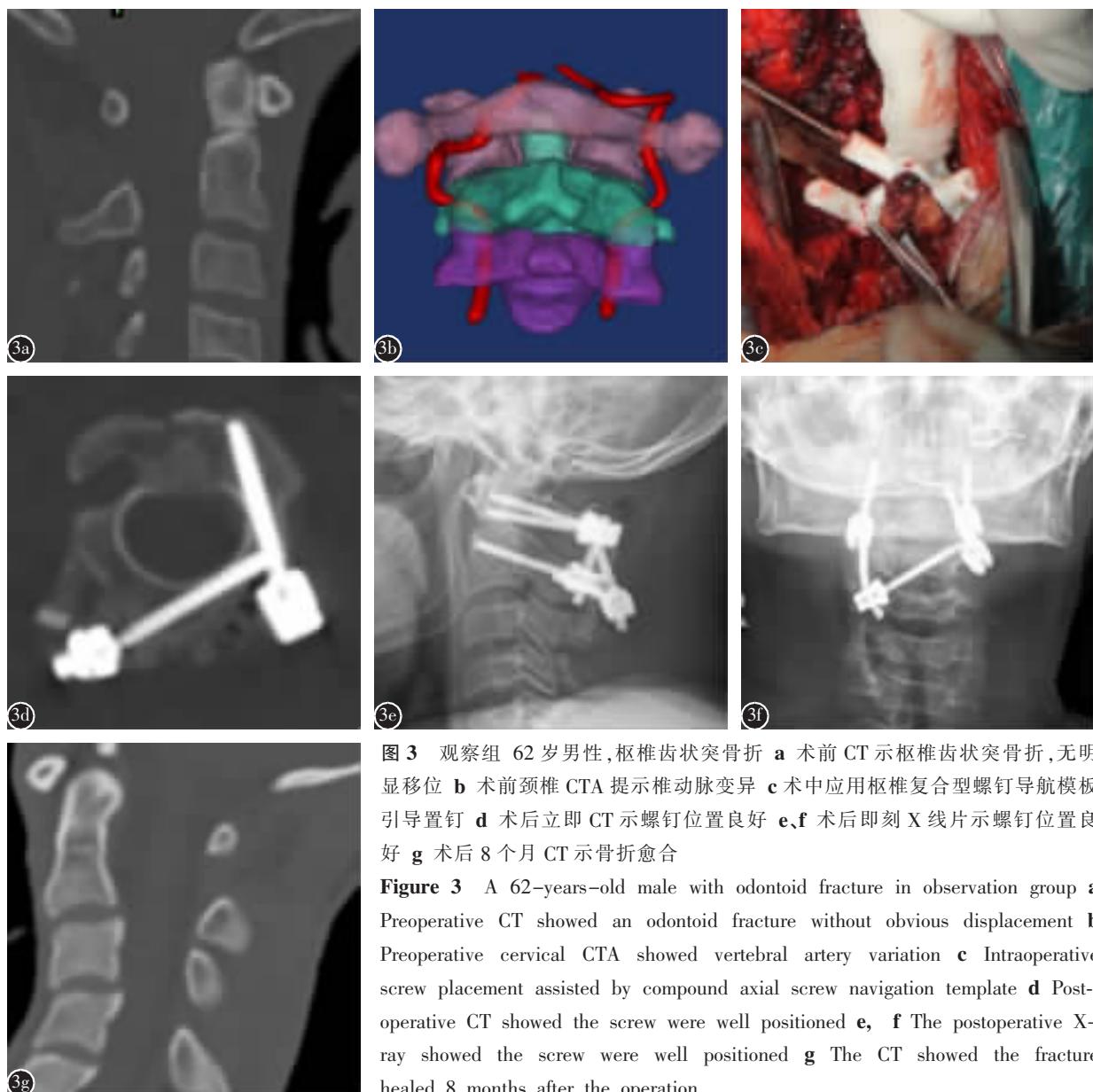
$$[(X_4 - X_3)^2 + (Y_4 - Y_3)^2 + (Z_4 - Z_3)^2]^{1/2}$$

### 1.6 统计分析

所有结果均采用SPSS 19.0进行统计分析,出血量、置钉时间、进钉点位置和螺钉角度用均值±标准差( $\bar{x} \pm s$ )表示,对术后实际钉道相对于术前模拟钉道偏差角度和术后实际进钉点相对于术前模拟进钉点在X、Y、Z轴上的偏移量采用配对样本t检验,对观察组和对照组合格率采用双侧 $\chi^2$ 检验,对出血量和置钉时间采用独立双样本t检验, $P < 0.05$ 认为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 临床结果



**图3 观察组 62岁男性,枢椎齿状突骨折 a 术前CT示枢椎齿状突骨折,无明显移位 b 术前颈椎CTA提示椎动脉变异 c 术中应用枢椎复合型螺钉导航模板引导置钉 d 术后立即CT示螺钉位置良好 e,f 术后即刻X线片示螺钉位置良好 g 术后8个月CT示骨折愈合**

**Figure 3 A 62-years-old male with odontoid fracture in observation group a** Preoperative CT showed an odontoid fracture without obvious displacement **b** Preoperative cervical CTA showed vertebral artery variation **c** Intraoperative screw placement assisted by compound axial screw navigation template **d** Postoperative CT showed the screw were well positioned **e, f** The postoperative X-ray showed the screw were well positioned **g** The CT showed the fracture healed 8 months after the operation

所有患者均顺利完成手术,无神经、重要血管损伤等严重并发症发生,完成术后随访>12个月,临床结果见表1。对照组置钉成功率为85.70%;观察组置钉成功率为100.00%;其中3枚为椎弓根螺钉置钉失败改为椎板螺钉固定,11枚为术前测量椎弓根畸形、直径较小不适宜置钉或椎动脉畸形置钉风险较高,术中直接选择椎板螺钉固定。对两组置钉成功率做双侧 $\chi^2$ 检验,统计学上有显著差异( $\chi^2=5.62, P=0.04$ )。

## 2.2 进钉点和钉道角度偏移量比较

术后实际钉道相对于术前模拟钉道偏差角度为 $0.69^\circ \pm 1.34^\circ$ ,术后实际进钉点相对于术前模拟进钉点在X、Y、Z轴上分别偏移 $0.50 \pm 2.13\text{mm}$ 、 $0.75 \pm 2.18\text{mm}$ 、 $0.43 \pm 2.39\text{mm}$ ,上述偏移量与术前设计相比差异均无统计学意义( $P>0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 枢椎椎弓根和椎板螺钉置钉现状

目前枢椎经椎弓根螺钉内固定广泛应用于上颈椎内固定手术,然而对于椎动脉高跨、枢椎椎弓根细小、短颈畸形等患者,采用枢椎椎弓根螺钉困难且风险大。Wright等<sup>[11]</sup>对枢椎椎板螺钉的应用解剖基础进行了较为详细的介绍,并给出了进钉方向和进针深度的建议值,证实枢椎椎板螺钉内固定术是可行的。因此有学者<sup>[12]</sup>提出椎板螺钉内固定术作为椎弓根螺钉内固定术的补充,操作简便,且适用人群广泛,可作为一种补救置钉方式,但椎板螺钉在术中不易判断其进钉方向,且普通C型臂透视术中很难发现螺钉是否进入椎管,因此有必要通过计算机辅助导航设备进行手术,但

表1 两组临床及置钉成功率结果

Table 1 The results of clinical parameters and nailing accuracy

	观察组 Observation group	对照组 Control group	P值 P value
出血量(ml) Blood loss	$45.00 \pm 19.17$	$228.50 \pm 57.89$	0.00
置钉时间(min) Nailing duration	$31.50 \pm 6.45$	$57.60 \pm 6.92$	0.00
Kawaguchi 分级 Kawaguchi criteria			0.01
0级 Grade 0	32	18	
I 级 Grade I	4	6	
II 级 Grade II	0	4	

上述设备价格昂贵,有较陡峭的学习曲线,不易在基层医院广泛开展,基层医院更需要一种价格较为低廉,学习曲线平缓,术中能准确辅助置钉的手术工具<sup>[13]</sup>。

### 3.2 复合型导航模板辅助螺钉置入的优点

本研究中,我们通过术前获取患者CT数据,在计算机中重建枢椎三维模型并同时模拟手术置入枢椎椎弓根螺钉和椎板螺钉,设计个体化的螺钉导板,术中应用导板辅助螺钉置入获得了较好的临床结果。其优势包括:(1)置钉成功率高:本研究中的个性化导航模板通过术前计算机设计出最佳的螺钉进钉点和方向并个性化打印制作。这种个体化的导航模板只针对枢椎后部关键结构,不随体位改变,其他椎体的活动也不会影响其精确度。在本研究中观察组通过导板置钉,其置钉成功率达到了100%,明显优于对照组,验证了其置钉成功率;(2)提高了置钉的优良率:本研究中的导板是以术前规划的最佳椎弓根螺钉通道设计的,若枢椎椎弓根过细不能置入螺钉即改行椎板螺钉,因此观察组0级率明显高于对照组,其术后CT螺钉与术前模拟的钉道其进钉点和方向均无明显差异,验证了其精确度;(3)缩短了手术时间且减少了术中出血:本研究中观察组中仅需要对模板配准点的骨质进行剥离,剥离的面积明显少于对照组,而且观察组在术前已经测量了其椎弓根螺钉通道及长度,便于术中选择椎弓根螺钉或椎板螺钉,也减少了透视次数,因此手术时间和术中出血明显优于对照组,本研究观察组枢椎螺钉的平均置入时间明显少于对照组;(4)术中可以视情况更改置钉方式:本研究中复合型椎弓根螺钉导航模板其导向孔集合椎弓根和椎板螺钉为一体,因此术中若出现了椎弓根螺钉钉道有误可以及时更换为椎板螺钉,观察组中有3枚因椎弓根螺钉置钉失败而改为椎板螺钉,达到了手术目的;(5)费用相对低廉:本研究中每个导板的打印成本不到100元,基层医院使用不需要购置昂贵的术中导航设备,而且随着3D打印的普及,平均每个打印实物费用较低,并不会增加患者负担<sup>[14,15]</sup>。

### 3.3 复合型导航模板术中应用的注意事项

术前设计及术中使用模板应注意以下:(1)术前CT扫描参数的设置,为了减少误差,提高重建模型的准确度,扫描层厚不得超过1mm,采取无间隔扫描方式<sup>[16-19]</sup>;(2)术前设计最好由主刀医生

参与或确认,使其在术前了解术中需要剥离的结构,这样既可以做到减少剥离面积,也可以避免剥离面积过少所带来的导板不稳定;(3)术前导航模板的设计,可包含或不含与棘突配准部分,包含棘突部分,虽然加大了剥离,但可提高其准确度,若设计成左右侧基座跨过棘突固定,这样可以减少剥离,连接两侧基座的横联结构可作为着力点增加把持,使固定仍然可靠,因此各有利弊<sup>[20,21]</sup>;(4)术中使用导航模板过程中,应固定稳妥,防止滑动,否则将导致置钉偏差<sup>[22]</sup>。

综上所述,本研究中设计并使用的复合型3D打印导航模板能为枢椎椎弓根螺钉置入失败后提供备选措施,能较准确地指导椎弓根置钉或椎板螺钉的置入,可以减少手术时间,减少术中出血,为临床枢椎骨折内固定术提供新的方法。

#### 4 参考文献

- Kaneyama S, Sugawara T, Sumi M, et al. A novel screw guiding method with a screw guide template system for posterior C-2 fixation[J]. J Neurosurg Spine, 2014, 21(2): 231-238.
- 蒲兴魏, 罗春山, 邱冰, 等. 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[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2017, 27(8): 686-691.
- 高延征, 邢帅, 高坤, 等. 枢椎椎板螺钉固定与枢椎椎弓根螺钉固定对枕颈融合术临床疗效的影响[J]. 脊柱外科杂志, 2016, 14(3): 129-134.
- 马向阳, 尹庆水, 吴增晖, 等. 枢椎椎板螺钉固定的解剖可行性研究[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2006, 16(1): 48-51.
- 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.
- 姜良海, 谭明生, 董亮, 等. 标杆型3D打印导板辅助寰枢椎椎弓根置钉准确度分析[J]. 脊柱外科杂志, 2016, 14(4): 205-210.
- 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.
- 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, 2012, 37(23): 1983-1988.
- Wright NM, Laryssen 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.
- 胡勇, 徐荣明, 马维虎. 枢椎椎板螺钉固定技术的研究进展[J]. 中华创伤杂志, 2008, 24(10): 844-846.
- 马向阳, 尹庆水, 吴增晖, 等. 枢椎椎板螺钉固定的解剖可行性研究[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2006, 16(1): 48-51.
- Lin H, Huang W, Chen X, et al. Digital design of internal fixation for distal femoral fractures via 3D printing and standard parts database[J]. Zhonghua Yi Xue Za Zhi, 2016, 96(5): 344-348.
- Liu ZJ, Jia J, Zhang YG, et al. Internal fixation of complicated acetabular fractures directed by preoperative surgery with 3D printing models[J]. Orthopaedic Surgery, 2017, 9(2): 257-260.
- You W, Wang DP, Zhang SQ. Study on the effect of CT scan thickness parameters on the precision of 3D print model in bone tissue[J]. China Digital Medicine, 2017, 12(9): 85-88.
- Zhang XY, Zhang M, Liu BB. Relationship between the thickness of spiral CT scan reconstruction and the image quality of virtual endoscopy in the bladder tumors[J]. China & Foreign Medical Treatment, 2017, 36(26): 167-168.
- Gerlach NL, Meijer GJ, Borstlap WA, et al. Accuracy of bone surface size and cortical layer thickness measurements using cone beam computerized tomography [J]. Clinical Oral Implants Research, 2013, 24(7): 793-797.
- Farzadi A, Solatihashjin M, Asadieydivand M, et al. Effect of layer thickness and printing orientation on mechanical properties and dimensional accuracy of 3D printed porous samples for bone tissue engineering[J]. Plos One, 2014, 9(9): e108252.
- Huang H, Zhang G, Ouyang H, et al. Internal fixation surgery planning for complex tibial plateau fracture based on digital design and 3D printing[J]. Nan Fang Yi Ke Da Xue Xue Bao, 2015, 35(2): 218-222.
- 胡勇, 袁振山, 谢辉, 等. 快速成型导向模板技术在枢椎椎板交叉螺钉置钉中的应用[J]. 中华骨科杂志, 2013, 33(6): 640-648.
- Deng T, Jiang M, Lei Q, et al. The accuracy and safety of individualized 3D printing screws insertion templates for cervical screw insertion[J]. Comput Assist Surg, 2016, 21(1): 143-149.

(收稿日期:2018-06-03 末次修回日期 2018-08-03)

(英文编审 庄乾宇/贾丹彤)

(本文编辑 娄雅浩)