

临床论著

骨科机器人辅助下行经皮内固定术治疗胸腰椎骨折的置钉准确度及学习曲线分析

肖宇, 龙浩, 何祖波, 符勇, 王国贤, 邹伟, 肖杰, 刘炯

(贵阳市第四人民医院脊柱外科 550002 贵阳市)

【摘要】目的:探讨运用“天玑”骨科机器人辅助完成经皮胸腰椎骨折内固定术的置钉准确度以及学习曲线。**方法:**回顾性分析 2019 年 3 月~2020 年 1 月由我院应用“天玑”骨科手术机器人辅助下行经皮胸腰椎内固定术治疗单节段新鲜胸腰椎骨折的患者资料 24 例,其中男性 14 例,女性 10 例,年龄 22~54 岁,平均 39.3±9.7 岁。所有患者中 T12 骨折 9 例, L1 骨折 10 例, L2 骨折 4 例, L3 骨折 1 例。根据手术日期的先后将患者分成 A、B、C、D 四个组,每组 6 例。所有患者术后 3~5d 完善手术节段 CT,根据 Gertzbein-Robbins 分类标准,对置钉情况进行评估,同时计算置钉准确度(A 类螺钉占比)。统计各组患者的路径规划时间(示踪器放置完毕至机器臂开始移动)、螺钉置入时间(机器臂开始移动至透视置入螺钉位置满意)、总手术时间(切开至切口消毒包扎完毕)资料,应用曲线回归分析方法,评价机器人辅助经皮胸腰椎骨折内固定技术的学习曲线。**结果:**各组患者骨折类型、总手术节段数、手术节段、置入螺钉数量、年龄及性别差异无统计学意义($P>0.05$),数据具有可比性。本研究中 A 类螺钉 100 枚, B 类螺钉 2 枚,无 C、D 类螺钉,置钉准确度为 98.03%。各组置钉准确度 A 组 96.0%、B 组 96.1%、C 组 100%、D 组 100%,各组间差异无统计学意义($P>0.05$)。1、2 号病例置入导针轨迹与规划轨迹存在偏差,经 2 次规划调整后成功置入螺钉。路径规划时间: A 组 44.83±13.60min、B 组 31.67±1.86min、C 组 29.17±2.14min、D 组 29.33±1.37min; A 组与 C、D 组有统计学差异($P<0.01$), B 组与 A 组、C 组、D 组无统计学差异($P>0.05$), C 组与 D 组无统计学差异($P>0.05$)。总手术时间 A 组 137.83±18.00min、B 组 120.33±5.85min、C 组 120.50±4.59min、D 组 119.67±5.24min, A 组与 C、D 组有显著差异($P<0.05$), B 组与 A 组、C 组、D 组无统计学差异($P>0.05$), C 组与 D 组无统计学差异($P>0.05$);螺钉置入时间 A 组 46.17±6.68min、B 组 40.67±2.25min、C 组 40.00±2.90min、D 组 38.67±3.01min, A 组与 C、D 组有显著差异($P<0.05$), B 组与 A 组、C 组、D 组无统计学差异($P>0.05$), C 组与 D 组无统计学差异($P>0.05$)。曲线回归分析显示,随着病例数的增加路径规划时间、螺钉置入时间、总手术时间明显降低($P<0.001$),在中期 12 例之后达到相对稳定。**结论:**“天玑”骨科手术机器人辅助下行经皮胸腰椎置钉准确度高。该技术应用早期学习曲线陡峭,随着手术例数的增加学习曲线很快趋于平稳。

【关键词】骨科机器人;胸腰椎骨折;椎弓根螺钉置入;学习曲线

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2020.12.09

中图分类号: R687.3 文献标识码: A 文章编号: 1004-406X(2020)-12-1111-07

The accuracy and learning curve analysis of the robot assisted percutaneous thoracolumbar screw placement//XIAO Yu, LONG Hao, HE Zubo, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2020, 30(12): 1111-1117

【Abstract】Objectives: To explore the accuracy and learning curve of percutaneous screw placement assisted by "Tianji" orthopedic robot during internal fixation of thoracolumbar fracture. **Methods:** A retrospective analysis was performed in 24 patients with single-segment thoracolumbar fracture who were consecutively enrolled in the hospital from March 2019 to January 2020. They were treated by the same surgeon using "Tianji" orthopedic surgical robot. There were 14 males and 10 females with the age of 22-54 years (averaged 39.29±9.73 years). Of all patients, 9 cases were of T12 fracture, 10 cases of L1, 4 cases of L2, and 1 case of L3.

基金项目:贵阳市科技计划项目[编号:(2019)9-11-14];贵阳市人才创新资助项目[编号:(2019)-34]

第一作者简介:男(1986-),主治医师,硕士研究生,研究方向:脊柱外科

电话:(0851)85786552 E-mail:459646943@qq.com

通讯作者:龙浩 E-mail:1026060696@qq.com

Based on the operation date, patients were divided into group A, group B, group C, and group D. CT scan was performed 3–5 days after operation. The accuracy of screw placement was estimated using the proportion of Category A screws according to Gertzbein–Robbins classification. Path–planning duration (Duration from placing spinous process Clamp towards completing before movement of positioner), screw implantation time (from the beginning of robot arm moving to screw implanted into a satisfied position under fluoroscopy), and total operation time (from incision to wound disinfection and bandaging) were statistically analyzed. The learning curve of robot assisted percutaneous thoracolumbar fracture internal fixation technology was evaluated by curvilinear regression analysis. **Results:** There were no statistically significant differences in fracture types, total number of surgical segments, screws numbers, age, and gender among the 4 groups ($P>0.05$). The total accuracy of screw placement in this study was 98.03% (100/102), including 100 screws of Category A, 2 screws of Category B, and no screw of Category C and D. The difference of screw setting accuracy among the four groups is not statistically significant ($P>0.05$, grade A 96.0%, grade B 96.1%, grade C 100%, and grade D 100%). In two cases, number 1 and number 2, there was deviation between the guide pin trajectory and the planned trajectory. After two planning adjustments, the screws were successfully implanted. Of path–planning duration (group A 44.83 ± 13.60 min, group C 29.17 ± 2.14 min, and group D 29.33 ± 1.37 min), there were significant differences between group A and group C/ group D ($P<0.01$), and there was no statistical difference between group C and group D ($P>0.05$). Of the total operation time (group A 137.83 ± 18.00 min, group C 120.50 ± 4.59 min, and group D 119.67 ± 5.24 min) and the screw–implantation time (group A 46.17 ± 6.68 min, group C 40.00 ± 2.90 min, and group D 38.67 ± 3.01 min), group A has significant differences from group C/ group D ($P<0.05$), and group C has no statistical difference from group D ($P>0.05$). The path–planning duration, total surgery duration and screw–implantation duration of group B (31.67 ± 1.86 , 120.33 ± 5.85 , and 40.67 ± 2.25 respectively) were not statistically different from those in groups A, C, and D ($P>0.05$). After the curvilinear regression analysis, it showed that the path–planning time ($P<0.001$), the screw–implantation time ($P<0.001$), and the total surgery time ($P<0.001$) significantly decreased with the increasing numbers of patients. And after the number reaching 12 in the medium stage, the three parameters stayed relatively stable. **Conclusions:** "Tianji" Orthopedic Robot has higher accuracy and stability in percutaneous thoracolumbar internal screw fixation. And this technology has certain learning curve in its early application. The learning curve quickly becomes stable with the increase in cases.

【Key words】 Orthopedic robot; Thoracolumbar fracture; Pedicle screw insertion; Learning curve

【Author's address】 Department of spinal surgery, the fourth person's hospital, Guiyang, 550002, China.

随着计算机导航技术及机械工业化技术的提高,骨科手术机器人技术高速发展,由我国自主研发的“天玑”骨科手术机器人已投入临床使用。目前临床研究^[1–3]表明,与传统徒手置钉相比,机器人辅助手术可显著提高椎弓根螺钉置入的准确性和安全性,且并不会明显增加手术时间。而在应用机器人辅助手术的早期,由于对该项技术的特殊影像学设备、手术器械以及软件的操作不熟悉,导致手术时间较长并发症较多,技术应用的早期学习曲线陡峭^[4]。术者逐渐失去信心从而放弃使用,因此有必要了解如何快速、平稳地度过学习曲线,从而充分发挥该项技术创伤小、置钉准确率高的优势。目前关于骨科手术机器人学习曲线的研究报道较少。本研究回顾性分析应用“天玑”骨科手术机器人辅助经皮胸腰椎内固定术治疗单节段新

鲜胸腰椎骨折的患者资料,评价该技术的置钉准确度探讨其学习曲线,为该项技术的推广应用提供临床依据。

1 资料与方法

1.1 纳入及排除标准

纳入标准:(1)根据术前影像学检查符合 AO 分型,A 型伤且椎体压缩超过 50%、成角超过 30°、椎管侵占超过 30%,以及 B 型伤;(2)单节段新鲜胸腰椎骨折;(3)患者知情并同意应用机器人辅助手术。

排除标准:(1)椎弓根变异;(2)合并神经功能损害需行广泛椎管减压;(3)病理性骨折或严重骨质疏松;(4)内科基础疾病不能耐受麻醉及手术。

1.2 一般资料

回顾性分析 2019 年 3 月~2020 年 1 月由同一主刀医生应用“天玑”骨科手术机器人辅助经皮胸腰椎内固定术治疗单节段新鲜胸腰椎骨折的 24 例患者资料。男性 14 例,女性 10 例,年龄 22~54 岁,平均 39.3 ± 9.7 岁。根据手术日期的先后将患者编为 1~24 号,分成 A 组、B 组、C 组、D 组,各组 ($n=6$)。其中 T12 骨折 9 例,L1 骨折 10 例,L2 骨折 4 例,L3 折 1 例。各组患者骨折类型,手术节段数(分成两个节段组:T11~L1、L2~L4),总手术节段数、置入螺钉数量见表 1。A 组、B 组、C 组、D 组患者骨折类型、总手术节段数、手术节段、置入螺钉数量、年龄及性别差异无统计学意义 ($P>0.05$,表 1),数据具有可比性。

1.3 手术方法

患者全身麻醉,取俯卧位,定位手术节段,消毒铺巾。切开显露手术节段上一节段棘突末端,将示踪器牢固固定在棘突上。在术者固定示踪器同时,助手连接天玑系统。透视示踪器定位满意后,行 3D C-arm 采集图像,将图像传输至机器人工作平台。规划置入螺钉轨迹、长度和直径。控制机械臂移动至规划路径并进行微调,直至操控界面提示精准度小于 1mm。术者于入点位置做纵形切口,充分切开深部组织插入套筒,套筒末端需直接接触椎体骨性结构。检查套筒固定良好无张力电

转置入导针,透视(早期使用机器人辅助手术置入两枚导针后行透视若位置良好再行剩余导针置入)导针位置良好,沿导针套入套筒撑开器逐级扩展,依次置入经皮椎弓根螺钉(对于 AO 分型的 A 型患者均于伤椎上下椎体各置入两枚螺钉,对于 B 型损伤患者于伤椎上下椎体各置入两枚螺钉并于伤椎置入 1 枚螺钉)。透视了解置入螺钉情况。选择合适长度连接棒安装于钉尾槽中,根据病情适当撑开锁紧螺帽,透视了解内置物及复位情况,折断短尾帽再次锁紧螺帽,冲洗缝合切口(图 1)。

1.4 观察指标

1.4.1 置钉准确度 术后所有患者于术后 3~5d 行手术节段 CT 检查了解内置物情况。按照 Gertzbein-Robbins 分类标准^[9],通过椎弓根螺钉与椎弓根内侧、外侧、上侧和下侧皮质的位置关系,对置入螺钉进行等级划分。A 类,螺钉未突破椎弓根皮质;B 类,螺钉突出椎弓根皮质小于 2mm;C 类,螺钉突出椎弓根皮质 2~4mm;D 类,螺钉突出椎弓根皮质 4~6mm;E 类,螺钉突出椎弓根皮质 ≥ 6 mm。以 A 类螺钉占比评估置入椎弓根螺钉的准确度。

1.4.2 手术时间 总手术时间:切开至创口消毒包扎完毕。路径规划时间:示踪器放置完毕至螺钉路径规划结束。螺钉置入时间:机器臂开始移动至螺钉透视位置满意。

1.5 统计学处理

采用 SPSS 21.0 统计软件进行分析。将连续收治的 24 例患者按照手术先后顺序编为 1~24 号,根据手术日期的先后将患者平均分成 A、B、C、D 四个组($n=6$)。首先对骨折类型、总手术节段数、手术节段、置入螺钉数量、年龄及性别以及 4 个不同组别间的指标行正态分布检验,采用 Shapiro-Wilk 来判断数据是否为正态分布,结果显示只有性别、年龄、置入螺钉数量呈正态分布,且方差齐性。对于非正态分布的数据采用非参数检验。计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,对 4 个不同组别间的指标分析比较采用单因素方差分析的非参数检验,两两比较采用 LSD 检验,计数资料组间比较采用卡方检验,检验水准 $\alpha=0.05$ 。应用曲线回归分析方法,评价机器人辅助经皮胸腰椎骨折内固定技术的学习曲线。

2 结果

表 1 各组一般临床资料比较 ($n=6$)

Figure 1 Comparison of general clinical data					
	A组 Group A	B组 Group B	C组 Group C	D组 Group D	P值 P value
性别(例)Sex					0.414
男 Male	4	3	4	3	
女 Female	2	3	2	3	
年龄(岁) Age	43.5 ± 10.5	42.7 ± 9.9	34.5 ± 8.0	32.5 ± 7.2	0.105
置入螺钉数 Implanted screws	4.2 ± 0.4	4.3 ± 0.5	4.2 ± 0.4	4.3 ± 0.4	0.837
骨折类型 Fracture patterns					0.828
A 型 Subtype A	5	4	4	5	
B 型 Subtype B	1	2	2	1	
手术节段 Surgical segments					0.857
T11~L1	10	10	10	8	
L2~L4	3	4	4	5	
手术节段数 Number of surgical segments	13	14	14	13	0.995

24例患者术后均获完整资料。组内所有患者均未出现术中器械操作以及术后切口感染、下肢静脉血栓等并发症。1、2号病例置入导针后行术中C型臂X线机透视发现规划位置与实际完成

的进钉点、置钉角度等存在偏差,经2次规划调整后成功置入螺钉。根据螺钉与椎弓根皮质的位置关系,置入螺钉A类螺钉100枚,B类螺钉2枚,无C、D类螺钉。置钉准确率为98.03%(100/102)。

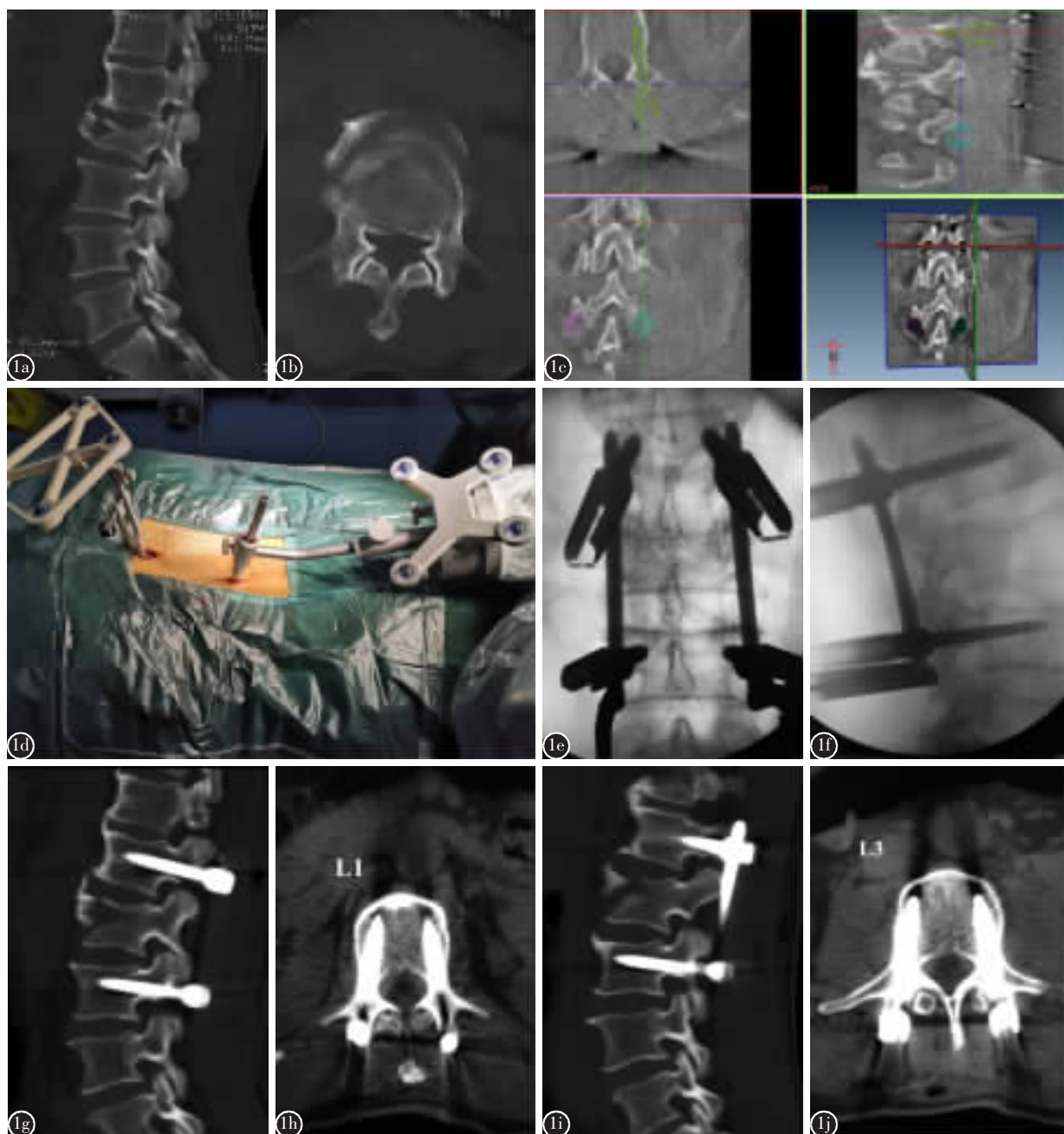


图1 A组患者,男性56岁,L2椎体爆裂骨折 **a、b** 术前CT显示L2椎体爆裂骨折 **c** 机器人术中螺钉路径及长度规划 **d** 机器臂移动至体表置入套筒 **e、f** 术中透视螺钉位置良好,未突出椎管 **g~j** 术后CT见置入螺钉,未突出椎弓根四壁
Figure 1 A 56-year-old male patient of Group A with L2 vertebral burst fracture **a, b** Preoperative CT showed burst fracture of L2 vertebral body **c** Screw-placement path and path-planning duration in operation of "Tianji" Orthopedic Robot **d** The robot arm is moved to the surface of the body to implant the sleeve **e, f** Intraoperative fluoroscopy of c-arm showed that the screw was in good position with no protrusion in the spinal canal **g~j** Postoperative CT showed no protrusion of pedicle wall with implanted screw

A组、B组、C组、D组置钉准确度组间差异无统计学意义($P>0.05$,表2)。

路径规划时间A组与C、D组有显著差异($P<0.01$),C组与D组无统计学差异($P>0.05$)。总手术时间及螺钉置入时间A组与C、D组有显著差异($P<0.05$),C组与D组无统计学差异($P>0.05$)。B组路径规划时间、总手术时间及螺钉置入时间与A组、C组、D组无统计学差异($P>0.05$,表2)。

曲线回归分析结果,机器人辅助下行胸腰椎内固定术的螺钉置入时间、路径规划时间、总手术时间随着病例数的增加显著降低,在中期12例之后达到相对稳定。

拟合方程 $y=a \ln(x)+b$,其中 x 为手术例数, y

为手术时间。螺钉置入时间: $y=-4.513 \times \ln(x)+51.677, R^2=0.6084, P<0.001$; 路径规划时间: $y=-9.680 \times \ln(x)+55.846, R^2=0.7599, P<0.001$; 总手术时间: $y=-10.920 \times \ln(x)+149.510, R^2=0.5491, P<0.001$ (图2)。

3 讨论

“天玑”骨科手术机器人由我国自主研发,其优势在于通过采集术中手术节段的三维影像,进行内置物长度、直径、轨道规划,同时精准定位,将内置物准确置入。目前该项技术已用于椎弓根螺钉置入、皮质轨迹螺钉置入、经皮椎体成形术、骶髂关节螺钉置入,以及准确度要求更高的上颈椎手术^[1-3,6-8]。田伟等^[1]报道参考 Gertzbein-Robbins

表2 各组总手术时间、路径规划时间、螺钉置入时间、A级螺钉占比的比较

Figure 2 Comparing the total operation time, path planning time, screw implantation time and ratios of A-class screws

	总手术时间(min) Total surgery duration	路径规划时间(min) Path planning duration	螺钉置入时间(min) Screw implantation duration	置钉准确率 The accuracy of screw placement
A组 Group A	137.83±18.00	44.83±13.60	46.17±6.68	96.0%(24/25)
B组 Group B	120.33±5.85	31.67±1.86	40.67±2.25	96.1%(25/26)
C组 Group C	120.50±4.59	29.17±2.14	40.00±2.90	100.0%(26/26)
D组 Group D	119.67±5.24	29.33±1.37	38.67±3.01	100.0%(25/25)
检验统计量 Test statistic	14.852	15.075	8.142	0.457
P值 P value	0.031	0.002	0.043	0.651

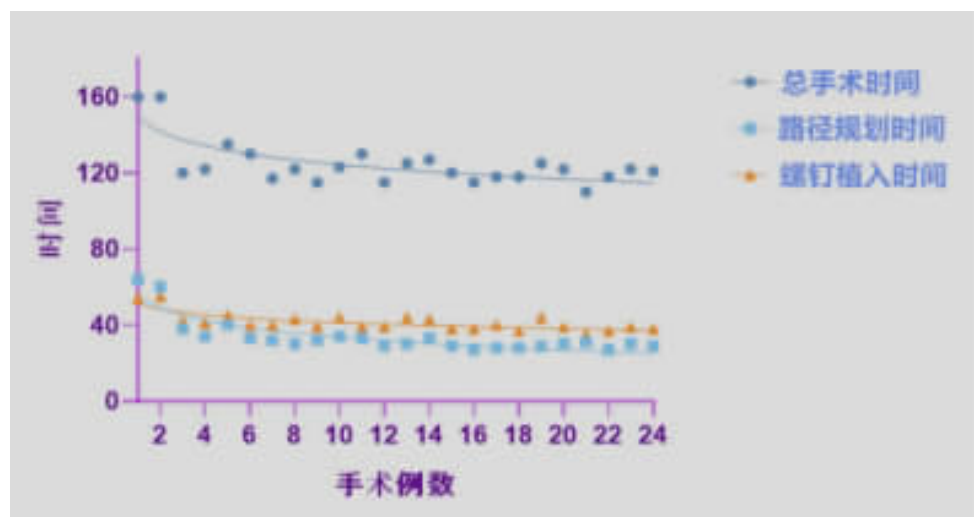


图2 手术时间与手术例数的拟合关系:机器人辅助胸腰椎内固定术的螺钉置入时间、路径规划时间、总手术时间随着病例数的增加显著降低

Figure 2 Simulation effect of surgery duration & number of surgical cases. It showed that path-planning duration, screw-implantation duration, and total surgery duration significantly decrease with increasing number of patients

分类在“天玑”骨科手术机器人辅助下置入的椎弓根螺钉 A 类占比 97.05%,徒手置入的椎弓根螺钉 A 类占比 92.04%。姜树东等^[9]报道在“天玑”骨科手术机器人辅助下置入的椎弓根螺钉 A 类占比 97.92%,徒手置入的椎弓根螺钉 A 类占比 85.00%。以上研究均表明骨科机器人辅助椎弓根螺钉置入准确度相对徒手置钉有明显的优势。本研究中 A 类螺钉 100 枚, B 类螺钉 2 枚, 无 C、D 类螺钉, 置钉准确度为 98.03%(100/102)。均无置钉相关的神经血管并发症, 置钉准确度与既往研究结果类似, 且机器人辅助手术置钉的准确度不随手术例数的增加而改变, 表明骨科机器人辅助置钉不但准确度高且稳定。传统徒手经皮置钉完全依赖术中透视寻找确定解剖标志置钉, 需要术者具有丰富的手术经验, 学习时间长。而机器人辅助手术无需依赖术中寻找解剖标志通过术中影像直接定位置钉, 定位精确置钉准确度高且稳定, 对术者经验要求相对较低, 通过 10 余例的操作掌握手术机器人置钉操作流程, 即可行螺钉的置入, 学习时间较短。但不管何种方式, 在置入导针及螺钉过程中需注意手感反馈, 确保置入物是在骨性通道中, 术中严格 C 型臂 X 线机监护, 避免发生严重并发症。

在本研究的 1、2 号病例中, 置入导针后行术中 C 型臂 X 线机透视发现规划位置与实际完成的进钉点、置钉角度等存在偏差, 经 2 次规划调整后成功置入螺钉。目前报道表明除系统误差外, 造成误差的原因主要有: (1) 术中俯卧位呼吸运动会引起椎体的明显位移, 在下胸椎和腰椎尤为明显, 导致机器人的操作误差增加^[10,11]; (2) 在应用 Renaissance 机器人辅助置钉时 Urakov 等^[12]发现, 当固定轨道的接头松动时会发生置入导针与规划路径存在误差。在“天玑”应用过程中杨睿等^[13]、章仁杰等^[14]同样发现若棘突上安装的示踪器不牢固, 也是导致误差的原因之一; (3) 将导针入点规划在陡峭的骨面, 导针在骨面打滑导致误差^[13-15]。(4) 经皮置入导针及螺钉的软组织通道未充分显露, 软组织通道张力较大导致误差^[13,15,16]。

在本组病例手术过程中, 将棘突夹顺着棘突骨面放置锁紧活动关节保证示踪器牢固固定, 在进行 CT 扫描、导针置入的过程中反复检查示踪器固定情况, 避免示踪器松动。为确保套筒不受软组织张力的影响进行了充分的切开, 当套筒前端

与骨面接触再进行导针的置入。同时在导针置入时观察导针位置, 当发现置入路径与规划路径误差较大时予暂停呼吸, 待误差变小后再行导针置入。但在 1、2 号病例中, 仍出现预设置入物轨迹与实际轨迹发现较大偏差。通过对螺钉置入规划轨迹分析发现, 发生偏差的导针入针点均选在了骨面陡峭部位, 同时预设轨迹内倾角过小, 由于套筒与设计轨道入钉点接触面较小, 极易发生打滑, 导致了偏差的发生, 因此我们认为入钉点选择不当套筒固定不牢固是导致机器人置入螺钉发生误差的主要原因。在进行置入螺钉路径规划时我们的经验是, 术中采集清晰的手术节段三维图像, 按照冠状、横断、矢状面的规划顺序。首先在冠状面上找到“人字棘”顶点区域, 然后在横断面上选择相对平整的平面作为入钉点, 当未能找到平整平面时我们建议预设的螺钉轨迹与椎体中轴线夹角在 25°~30°之间, 确保套筒与骨性结构有较大的接触面积避免发生套筒打滑影响精准度, 最后在矢状面上调整螺钉的头尾倾角度, 从而获得良好的植入螺钉路径。通过调整入钉点后期病例均未出现预定轨道与实际轨道发现较大偏差的情况。

目前报道表明^[1-3]使用机器人辅助手术相对于传统经皮置钉术并不会明显增加手术时间。机器人辅助置钉准确度高置钉时间短^[12,16]是手术总时间减少的原因之一, 而使用手术机器辅助手术相对徒手置钉增加了路径规划步骤, 明显增加了手术时间, 因此内置物路径规划时间是影响手术时间的重要因素。

内置物路径规划时间包括机器人连接、安装固定器及视踪器、术中 CT 以及置钉规划步骤。在机器人使用的初期熟练程度不够, 术中各阶段操作衔接耗时过长, 团队配合不默契, 这是导致规划时间较长的主要原因。由于置入导针位置与规划位置出现误差进行二次规划, 螺钉置入时间也随之延长。因此在减低误差避免二次规划的同时, 增加机器人操作熟练度, 加快手术各步骤衔接, 建立团队成员配合默契程度, 是降低手术时间的主要手段。如: 术者安装示踪器的同时, 助手与巡回同时连接机器臂, 专人操作 C 型臂 X 线机减少术中透视时间, 进行置入螺钉规划的培训增加操作熟练程度, 从而减低路径规划时间。在本组研究随着病例数的增加, 术者团队在通过一段时间的学习逐渐积累经验, 对机器人操作和手术步骤熟悉掌

握,手术路径规划时间、置钉时间、总手术时间逐渐减少,学习曲线在中期(12 例之后)趋于稳定。研究结果与袁伟等^[17]、范明星等^[14]结果一致。

综上所述,“天玑”骨科手术机器人辅助下行经皮胸腰椎置钉准确度高且稳定。该技术应用早期学习曲线陡峭,手术时间随着手术病例数的增加而减少,学习曲线在中期(12 例之后)趋于稳定。虽然机器人辅助手术操作相对徒手置钉相对繁琐,但其具有准确度高且稳定的特点,通过短暂的学习时间便可熟练掌握,该项技术值得在临床工作中推广应用。

4 参考文献

1. 田伟, 范明星, 韩晓光, 等. 机器人辅助与传统透视辅助脊柱椎弓根螺钉内固定的临床对比研究[J]. 骨科临床与研究杂志, 2016, 1(1): 4-10.
2. Tian W, Fan MX, Liu YJ. Robot-assisted percutaneous pedicle screw placement using three-dimensional fluoroscopy: a preliminary clinical study[J]. *Chin Med J(Engl)*, 2017, 130(13): 1617-1618.
3. Han X, Tian W, Liu Y, et al. Safety and accuracy of robot-assisted versus fluoroscopy-assisted pedicle screw insertion in thoracolumbar spinal surgery: a prospective randomized controlled trial[J]. *J Neurosurg Spine*, 2019, 30(5): 615-622.
4. 范明星, 张琦, 赵经纬, 等. 机器人辅助经皮微创单节段胸腰椎骨折内固定术的学习曲线[J]. 中国微创外科杂志, 2019, 19(9): 808-811.
5. Devito DP, Kaplan L, Dietl R, et al. Clinical acceptance and accuracy assessment of spinal implants guided with SpineAssist surgical robot: retrospective study[J]. *Spine*, 2010, 35(24): 2109-2115.
6. Tian W. Robot-Assisted posterior C1-2 transarticular screw fixation for atlantoaxial instability: a case report[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2016, 41(Suppl 19): B2-B5.
7. Wang JQ, Wang Y, Feng Y, et al. Percutaneous sacroiliac screw placement: a prospective randomized comparison of robot-assisted navigation procedures with a conventional technique[J]. *Chin Med J(Engl)*, 2017, 130(21): 2527-2534.
8. Le X, Tian W, Shi Z, et al. Robot-assisted versus fluoroscopy-assisted cortical bone trajectory screw instrumentation in lumbar spinal surgery: a matched-cohort comparison [J]. *World Neurosurgery*, 2018, 120: e745-e751.
9. 姜树东, 郭函, 梁得华, 等. 机器人辅助 MIS-TLIF 手术治疗腰椎退行病的初步结果[J]. 中国矫形外科杂志, 2020, 28(7): 586-591.
10. Liu Y, Zeng C, Fan M, et al. Assessment of respiration-induced vertebral motion in prone-positioned patients during general anaesthesia[J]. *Int J Med Robot*, 2016, 12(2): 214-218.
11. 崔冠宇, 田伟, 何达, 等. 机器人引导下微创经椎间孔椎体间融合术和传统开放手术治疗腰椎滑脱症的疗效分析[J]. 中华外科杂志, 2017, 55(7): 543-548.
12. Urakov TM, Chang HK, Burks SS, et al. Initial academic experience and learning curve with robotic spine instrumentation[J]. *Neurosurgical Focus*, 2017, 42(5): E4.
13. 杨睿, 李勇奇, 张柯, 等. 天玑骨科机器人辅助椎弓根螺钉置入的临床应用及体会[J]. 实用骨科杂志, 2019, 25(10): 892-897.
14. 章仁杰, 申才良, 张华庆, 等. 骨科机器人辅助胸腰椎椎弓根螺钉内固定位置不良原因分析[J]. 颈腰痛杂志, 2019, 40(5): 577-582.
15. Ringel F, Stuer C, Reinke A, et al. Accuracy of robot-assisted placement of lumbar and sacral pedicle screws: a prospective randomized comparison to conventional freehand screw implantation[J]. *Spine*, 2012, 37(8): E496-E501.
16. Khan A, Meyers JE, Siasios I, et al. Next-generation robotic spine surgery: first report on feasibility, safety, and learning curve[J]. *Oper Neurosurg(Hagerstown)*, 2019, 17(1): 61-69.
17. 袁伟, 孟小童, 刘欣春, 等. 骨科机器人辅助椎体后凸成形术治疗骨质疏松性椎体压缩性骨折的学习曲线[J]. 中华创伤骨科杂志, 2019, 21(8): 670-675.

(收稿日期:2020-08-30 修回日期:2020-10-27)

(英文编审 庄乾宇/谭 啸)

(本文编辑 姜雅浩)