

· 临床论著 ·

机器人与传统经皮骶髂螺钉固定骨盆后环损伤[△]

聂涛, 王卓, 于小龙, 戴闽*

(南昌大学第一附属医院骨科医院, 江西南昌 330000)

摘要: [目的] 比较天玑骨科机器人辅助与传统徒手经皮骶髂空心螺钉固定术骨盆后环损伤的临床疗效。[方法] 回顾性分析 2019 年 3 月—2021 年 3 月手术治疗的骨盆后环损伤患者 74 例, 依据术前医患沟通结果决定的置钉方式, 其中, 机器初期组 16 例, 机器后期组 16 例, 传统组 42 例。比较三组间围手术期、随访和影像资料。[结果] 三组患者均顺利手术, 无严重并发症。与传统组相比, 机器初期组置钉时间延长, 但机器后期组置钉时间明显缩短, 组间差异有统计学意义 [(78.6±4.8) min vs (66.4±7.1) min vs (70.3±6.5) min, $P<0.001$]。机器初期组和机器后期组术中出血量 [(14.8±2.4) ml vs (13.7±1.7) ml vs (18.5±2.9) ml, $P<0.001$]、术中透视次数 [(10.4±1.3) 次 vs (9.5±0.7) 次 vs (12.5±1.4) 次, $P<0.001$] 及置钉调整次数 [(0.6±0.6) 次 vs (0.3±0.5) 次 vs (1.1±0.7) 次, $P<0.001$] 均明显优于传统组。三组间切口愈合、下地行走时间及住院时间无明显差异 ($P>0.05$)。所有患者均获随访 12 个月以上, 机器初期组与机器后期组恢复完全负重活动均显著早于传统组 [(90.5±4.8) d vs (89.1±6.0) d vs (95.8±6.4) d, $P<0.001$]。随时间推移, 三组的 VAS 评分均显著减少, 而 Majeed 评分显著增加 ($P<0.05$), 术后 3 个月机器初期组与机器后期组的 Majeed 评分均显著优于传统组 [(85.4±5.2) vs (85.7±3.9) vs (80.5±6.1), $P<0.001$]。影像方面, 机器初期组与机器后期组置钉评级明显优于传统组 [优/良/差, (14/2/0) vs (15/1/0) vs (28/13/1), $P=0.048$], 但是, 三组间骨折复位 Matta 评级差异无统计学意义 ($P>0.05$)。至末次随访时, 所有患者骨折均愈合, 未发生内固定断裂。[结论] 天玑机器人辅助经皮骶髂空心螺钉内固定术治疗具有准确性高、安全、微创等优点。也有一定的学习曲线

关键词: 骨盆骨折, 骶髂关节分离, 经皮骶髂螺钉固定, 机器人辅助, 精确性

中图分类号: R683.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2023) 24-2226-06

Robotic-assisted versus traditional freehand percutaneous sacroiliac screw fixation of posterior pelvic ring injury // NIE Tao, WANG Zhuo, YU Xiao-long, DAI Min. Department of Orthopedics, The First Affiliated Hospital, Nanchang University, Nanchang 330000, China

Abstract: [Objective] To compare the clinical efficacy of Tianji Orthopedics robot-assisted sacroiliac cannulated screw fixation versus traditional freehand counterpart for posterior pelvic ring injury. **[Methods]** A retrospective study was done on a total of 74 patients who underwent surgical treatment for the posterior pelvic ring injury from March 2019 to March 2021. According to preoperative doctor-patient communication, the surgical techniques used of percutaneous sacroiliac cannulated screw placement was selected, including 16 patients in the robotic-assistance in the early-stage (RAE) group, 16 cases in the robotic-assistance in the late-stage group (RAL), and 42 cases in the traditional group. Perioperative, follow-up and imaging data were compared among the three groups. **[Results]** All patients in the three groups were successfully operated on without serious complications. Compared with that in the traditional group, the RAE group consumed significantly longer time for screw placement, while the RAL group took significantly shorter time with statistically significant difference among the 3 groups [(78.6±4.8) min vs (66.4±7.1) min vs (70.3±6.5) min, $P<0.001$]. In addition, the RAE group and RAL group proved significantly superior to the traditional group in terms of intraoperative blood loss [(14.8±2.4) ml vs (13.7±1.7) ml vs (18.5±2.9) ml, $P<0.001$], intraoperative fluoroscopy times [(10.4±1.3) times vs (9.5±0.7) times vs (12.5±1.4) times, $P<0.001$] and the number of screw setting adjustments [(0.6±0.6) times vs (0.3±0.5) times vs (1.1±0.7) times, $P<0.001$]. However, there were no significant differences in incision healing grade, postoperative ambulation time and hospital stay among the three groups ($P>0.05$). All patients were followed up for more than 12 months, and the RAE group and RAL group resumed full weight-bearing activities significantly earlier than the traditional group [(90.5±4.8) days vs (89.1±6.0) days vs (95.8±6.4) days, $P<0.001$]. The VAS score for pain decreased significantly, while Majeed scores increased

DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2023.24.04

[△]基金项目:省中医药科技计划项目(编号:2021Z020);省卫健委资助项目(编号:202130235)

作者简介:聂涛,副主任医师,研究方向:创伤骨科,(电话)13970823765,(电子信箱)ncnietao@163.com

*通信作者:戴闽,(电子信箱)daimin@medmail.com.cn

significantly in all the 3 groups over time ($P<0.05$). and the RAE group and RAL group were significantly better than the traditional group in Majeed scores 3 months after surgery [(85.4±5.2) vs (85.7±3.9) vs (80.5±6.1), $P<0.001$]. Regarding imaging, the RAE group and RAL group were significantly better than the traditional group in term of accuracy of screw placement [excellent/good/poor, (14/2/0) vs (15/1/0) vs (28/13/1), $P=0.048$], but there was no statistically significant difference in Matta grade of fracture reduction among the three groups ($P>0.05$). By the last follow-up, all patients in the 3 groups got fractures healed without loosening of internal fixation implants. [Conclusion] The Tianji robot assisted percutaneous sacroiliac cannulated screw internal fixation has the advantages of high accuracy, safety and minimally invasive surgery despite of a learning curve.

Key words: pelvic fracture, sacroiliac separation, percutaneous sacroiliac screw fixation, robot-assistance, accuracy

骨盆骨折约占全身骨折的 3%，其中约 40%因骨折累及后环而不稳定。骨盆后环骨折多由高能量损伤造成，常发生复位不良和畸形愈合^[1-3]，经皮骶髂空心螺钉内固定生物力学稳定性高，是治疗骨盆后环骨折的可靠手术方式^[4-6]。传统的手术方式通过透视和 CT 等成像技术辅助经皮骶髂螺钉插入，无法获得术中手术部位的实时三维结构，常需进行多个方位反复透视成像判断内固定装置的准确位置，术中反复调整钉道，置钉错位风险大^[7]。随着微创手术技术不断发展，机器人辅助系统已逐渐应用在外科手术。

天玑骨科手术机器人是我国的第三代骨科机器人系统，该机器人系统能在外科手术中突破性的提供 3D 透视导航，可以帮助实现精准的手术路径定位，定位精度 0.6~0.8 mm，使得术者能准确、安全地完成空心螺钉的放置。本院于 2019 年 6 月引进天玑骨科机器人系统用于治疗骨盆后环损伤患者 32 例，取得较好疗效，报告如下。

1 资料与方法

1.1 纳入与排除标准

纳入标准：(1) 新鲜 Tile B 型或 C 型骨盆骨折；(2) 单侧骶髂损伤；(3) 经皮骶髂空心螺钉内固定术固定骨盆后环 (S_{1/2})；(4) 骨折端无开放性损伤；(5) 随访时间>12 个月

排除标准：(1) 资料不全等影响观察者；(2) 髂骨进钉点区域骨折；(3) 骶骨明显变异。

1.2 一般资料

回顾性分析 2019 年 3 月—2021 年 3 月应用经皮骶髂螺钉内固定术治疗骨盆后环骨折损伤的患者，共 74 例符合上述标准，纳入本研究。依据术前医患沟通结果，将行传统经皮骶髂螺钉固定手术患者归为传统组；将 2019 年 3 月—2020 年 3 月行天玑骨科机器人辅助经皮骶髂空心螺钉内固定术的患者定为机器初期组；2020 年 3 月—2021 年 3 月期行天玑骨科机器

人辅助经皮骶髂空心螺钉内固定术的患者定为机器后期组。术前一般资料见表 1，两组年龄、性别、体质指数 (body mass index, BMI)、损伤至手术时间、侧别和骨折类型的差异均无统计学意义 ($P>0.05$)。本研究经医院伦理委员会审批，所有患者均知情同意。

表 1 两组患者术前一般资料比较

Table 1 Comparison of preoperative general data between the

two groups

指标	机器人组 (n=32)	传统组 (n=42)	P 值
年龄 (岁, $\bar{x} \pm s$)	43.3±13.5	43.6±12.5	0.920
性别 (例, 男/女)	15/17	18/24	0.730
BMI (kg/m ² , $\bar{x} \pm s$)	24.3±0.8	24.1±0.8	0.269
损伤至手术时间 (d, $\bar{x} \pm s$)	4.1±2.2	4.5±2.5	0.421
侧别 (例, 左/右)	13/19	20/22	0.549
Tile 分型 (例, B2/C1)	22/10	30/12	0.803

1.3 手术方法

机器人组：全身麻醉，仰卧位，手术床高度调整至适当，确保机械臂导向器有足够操作空间。机器人机械臂罩上无菌套，放在手术床旁，保证其工作区间能覆盖手术区域。光学跟踪系统置于床尾无菌区外。C 形臂 X 线机透视机放在医生对面，健侧髂前上棘安装示踪器，获取含机器人定位标记点的术中透视影像，并传输至主机工作站。根据骨性标志标识点，在主控系统规划软件上规划手术螺钉路径，并模拟机械臂的运行姿态 (图 1a, 1b)。将机械臂定位到合适位置，由主控系统软件控制其沿规划路径操作。在机械臂末端安装导向套筒，入钉点处行 1~2 cm 小切口，分离皮下组织，套筒尖端抵至入钉点骨皮质，防止滑动。在主控工作站上确认入钉点和虚拟探针方向与规划相符，如有偏差，对路径进行微调，确认路径无误后，透视监控下通过套筒将导针钻入骨性通道。确认导针位置良好后，沿导针拧入空心螺钉，然后取出导针。最后透视确认空心螺钉位置良好 (图 1c, 1d)，冲洗切口透视缝合。

传统组：全身麻醉，仰卧位，手术床高度调整至适当。C形臂X线机透视机透视确定进针点，于该点处做长1~2 cm的切口，钝性分离至髂骨。插入套筒，透视下钻入导针，经过髂骨、骶髂关节置入S₁椎体。术中拍摄骨盆入口位、出口位和侧位图像，确保导针正确地经过S₁椎弓根，进入S₁骶骨体，针尖

应达到骶骨体中线（图2a, 2b）。测量深度后，通过导针插入适当长度的空心拉力螺钉，取出导针。对于后环损伤严重的患者，可以考虑置入2枚空心钉以增强固定力度。手术过程中应避免损伤L₅神经、髂血管、S₁和S₂神经根。最后透视确认空心螺钉位置良好（图2c, 2d），清洗并缝合切口。

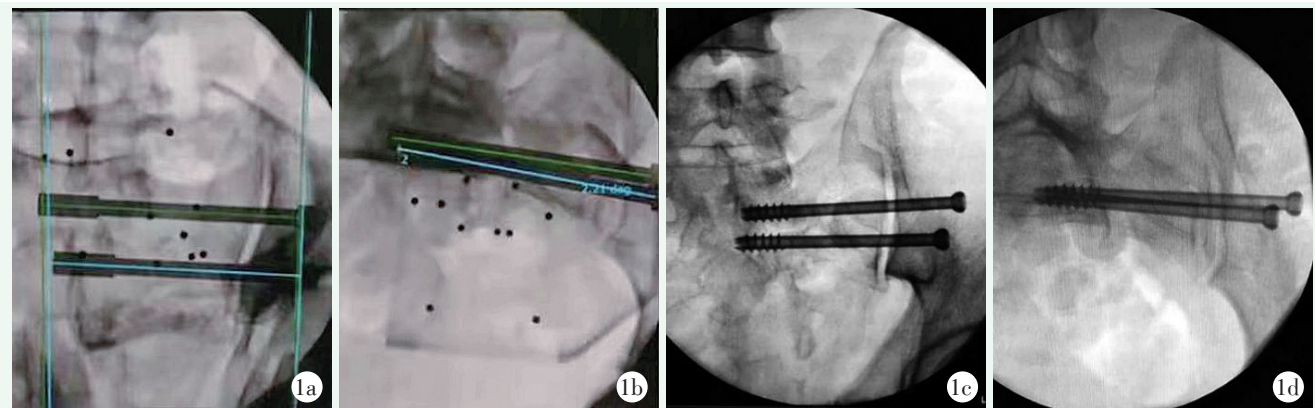


图1 患者，女，60岁，行TiRobot机器人辅助经皮骶髂空心螺钉内固定骶髂关节分离。1a: 骨盆正位下在系统规划软件上进行手术螺钉路径规划；1b: 骨盆入口位下确认手术螺钉路径规划正确；1c: 骨盆正位透视见空心螺钉位置良好；1d: 骨盆入口位确认空心螺钉位置良好。

Figure 1. A 60 year-old female underwent TiRobot-assisted percutaneous cannulated screw internal fixation for sacroiliac joint separation. 1a: Screw path planning performed on the robotic system planning software in pelvic anteroposterior view. 1b: Confirmation of accurate screw path planning in pelvic inlet view. 1c: Good positioning of the cannulated screw observed under pelvic anteroposterior fluoroscopy. 1d: Confirmation of good positioning of the cannulated screw in pelvic inlet view of fluoroscopy.

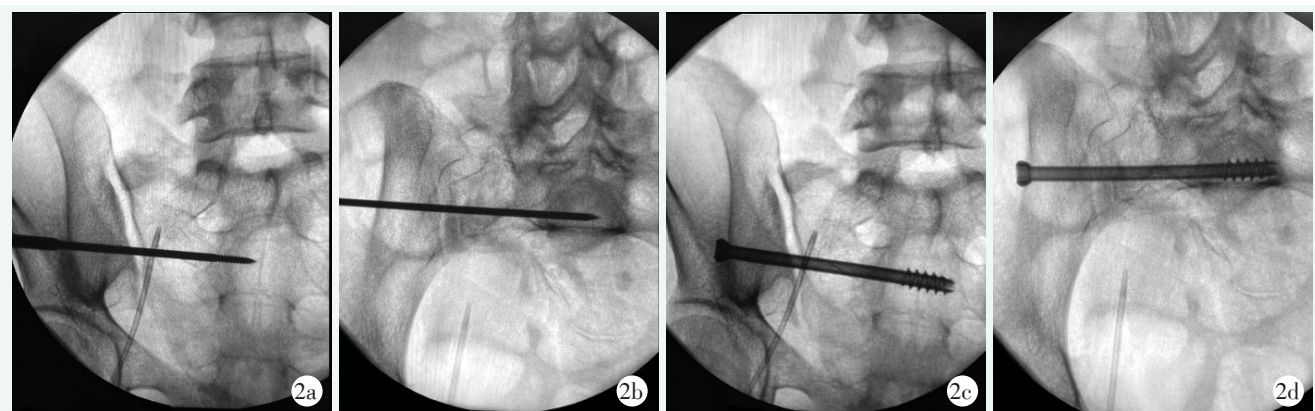


图2 患者，男，65岁，行传统经皮空心螺钉内固定骶髂关节分离。2a: 骨盆正位下在透视监控下钻入的导针；2b: 骨盆入口位下确认导针位置良好；2c: 骨盆正位透视见空心螺钉位置良好；2d: 骨盆入口位确认空心螺钉位置良好。

Figure 2. A 65 year-old male received traditional percutaneous cannulated screw internal fixation for sacroiliac joint separation. 2a: Guide pin drilled under fluoroscopic monitoring in pelvic anteroposterior view. 2b: Confirmation of good positioning of the guide pin in pelvic inlet view. 2c: Good positioning of the cannulated screw observed under pelvic anteroposterior fluoroscopy. 2d: Confirmation of good positioning of the cannulated screw in pelvic inlet view of intraoperative fluoroscopy.

1.4 评价指标

记录围手术期情况。手术时间、术中透视次数、术中失血量、置钉调整次数、置钉时间、下地行走时间、住院时间、医疗费用、切口愈合、早期并发症。

采用完全负重活动时间、疼痛视觉模拟评分（visual analogue scale, VAS），Majeed 评分评价临床效果^[8]。行影像检查，评估置钉准确性^[9]，优为螺钉完全在通道内；良为螺钉部分接触骶骨皮质骨但无穿出；差为

螺钉穿出皮质骨，进入关节腔、椎管或骶孔内。骨折复位质量采用 Matta 影像学评分系统^[10]。

1.5 统计学方法

采用 SPSS 25.0 软件进行统计学分析。计量数据以 $\bar{x} \pm s$ 表示，资料呈正态分布时，采用单因素方差分析，两两比较采用 LSD 法；资料呈非正态分布时，采用秩和检验。计数资料采用 χ^2 检验或 Fisher 精确检验。等级资料组间比较采用秩和检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 围手术期情况

所有患者均顺利完成手术，无大出血、死亡等严重并发症。围手术期数据见表 2。与传统组相比，机器初期组置钉时间和手术时间稍长，但机器后期组置钉时间和手术时间均明显缩短，组间差异有统计学意义 ($P < 0.05$)；机器初期组与机器后期组术中出血量、术中透视次数和置钉调整次数均显著优于传统组 ($P < 0.05$)；机器初期组、机器后期组及传统组切口愈合、下地行走时间及住院时间无明显差异 ($P > 0.05$)；机器初期组与机器后期组住院费用显著多于传统组 ($P < 0.05$)。

表 2 3 组患者围手术期资料比较

Table 2 Comparison of perioperative documents among the three groups

指标	机器初期组 (n=16)	机器后期组 (n=16)	传统组 (n=42)	P 值
手术时间 (min, $\bar{x} \pm s$)	78.6±4.8	66.4±7.1	70.3±6.5	<0.001
术中透视次数 (次, $\bar{x} \pm s$)	10.4±1.3	9.5±0.7	12.5±1.4	<0.001
术中失血量 (ml, $\bar{x} \pm s$)	14.8±2.4	13.7±1.7	18.5±2.9	<0.001
置钉调整次数 (次, $\bar{x} \pm s$)	0.6±0.6	0.3±0.5	1.1±0.7	<0.001
置钉时间 (min, $\bar{x} \pm s$)	28.7±3.1	21.5±4.7	23.8±3.6	<0.001
早期并发症 (例, 有/无)	0/16	0/16	1/41	0.681
切口愈合等级 (例, I/II/III)	16/0/0	16/0/0	38/4/0	0.200
下地行走时间 (d, $\bar{x} \pm s$)	42.3±6.4	41.0±7.2	43.4±5.9	0.437
住院时间 (d, $\bar{x} \pm s$)	9.1±2.1	9.8±2.6	9.7±2.5	0.707
治疗费用 (万元, $\bar{x} \pm s$)	1.9±0.2	1.8±0.1	1.5±0.1	<0.001

机器初期组与机器后期组未出现引发不良后果的早期并发症。传统组出现 1 例术后神经损伤，诉患肢足底麻木，复查 CT 示空心钉置入骶孔，二次手术更改空心钉位置后症状逐步缓解，术后 1 年随访患者恢复良好。

2.2 随访结果

所有患者均获随访 12 个月以上，随访资料见表 3。机器初期组与机器后期组恢复完全负重活动时间显著早于传统组 ($P < 0.05$)。术后 3 个月时，机器初期组与机器后期组 Majeed 评分明显高于传统组 ($P < 0.05$)，但机器初期组与机器后期组较传统组 VAS 评分无明显差异 ($P > 0.05$)。末次随访时，机器初期组与机器后期组较传统组 Majeed 评分和 VAS 评分无明显差异 ($P > 0.05$)。

随访过程中，机器初期组与机器后期组患者疼痛程度及骨盆功能评分均逐渐改善；传统组 1 例患者于初次术后 3 个月随访时仍诉疼痛明显，VAS 评分 5 分，Majeed 评分 27，复查 CT 仍可见骨折线，螺钉位置可，嘱患者卧床至术后 6 个月，术后 6 个月复查

患者疼痛明显改善，VAS 评分 2，Majeed 评分 75，复查 CT 提示骨折已愈合，术后 1 年随访患者恢复良好，VAS 评分 0，Majeed 评分 80。

2.3 影像评估

影像评估结果见表 4。机器初期组与机器后期组置钉评级明显优于传统组 ($P < 0.05$)。机器初期组、机器后期组与传统组在 Matta 评级差异无统计学意义 ($P > 0.05$)；所有患者骨折均愈合，未发生内固定断裂。

3 讨论

骨盆后环损伤可导致骨盆旋转不稳定及垂直不稳定，常发生畸形愈合、疼痛、跛行、肢体长度差异及神经损伤等并发症^[2, 3, 11]。骶髂螺钉固定骨盆后环损伤生物力学较好，已成为治疗骨盆后环损伤最常用方法^[4, 12, 13]。据文献报道传统的手术方式螺钉错位率为 0.1%~2.6%^[7]。骨盆后环特殊的复杂解剖结构，传统手术二维 X 线透视显像信息有限，术中需反复透

视和调整螺钉位置，增加医患辐射量，延长手术时间，有骶管及神经损伤风险^[14]。另外，患者体型差异、骶骨解剖变异等因素使得术者难以准确判断 X

线片上的影像学标记，也会影响骶髂螺钉置入的安全性和稳定性^[15]。解决上述问题一直是骨科骨盆微创技术发展方向。

表 3 两组患者随访资料与比较

Table 3 Comparison of follow-up documents among the three groups

指标	机器人初期组 (n=16)	机器人后期组 (n=16)	传统组 (n=42)	P 值
完全负重活动时间 (d, $\bar{x} \pm s$)	90.5±4.8	89.1±6.0	95.8±6.4	<0.001
VAS 评分 (分, $\bar{x} \pm s$)				
术前	7.3±1.1	7.6±1.0	7.4±1.3	0.592
术后 3 个月	1.9±0.7	1.8±0.5	1.9±0.7	0.603
末次随访	1.8±0.6	1.6±0.5	1.8±0.6	0.205
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	
Majeed 评分 (分, $\bar{x} \pm s$)				
术前	25.8±6.8	23.2±8.0	23.8±7.4	0.583
术后 3 个月	85.4±5.2	85.7±3.9	80.5±6.1	<0.001
末次随访	85.4±4.9	85.5±4.2	84.1±7.1	0.730
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	

表 4 两组患者影像资料比较

Table 4 Comparison of imaging documents among the three groups

指标	机器人初期组 (n=16)	机器人后期组 (n=16)	传统组 (n=42)	P 值
置钉评级 (例, 优/良/差)	14/2/0	15/1/0	28/13/1	0.048
Matta 评级 (例, 优/良/可/差)	11/5/0/0	13/3/0/0	35/6/1/0	0.496
内固定物 (例, 无变/松动/断裂)	15/1/0	16/0/0	38/4/0	0.473
骨折愈合 (例, 是/否)	16/0	16/0	42/0	ns

天玑骨科手术机器人系统运用双平面的定位算法实现精确的空间定位和路径导航，辅助医生精确定位置入物，并通过与自动机械臂结合进行精确的操作，且具备实时校正路径偏移的能力，其临床精度可达 1 mm 以内，现已广泛用于脊柱和创伤内固定手术，如辅助骶髂螺钉置入、椎弓根螺钉置入、经皮股骨颈空心螺钉置入、经皮椎体成形术等^[16-21]。

与传统手术方式对比，机器人系统的优势：(1) 更加微创，相对于传统手术，其术中透视次数、置钉调整次数及术中出血量均显著少；(2) 机器人辅助的置钉时间及手术时间初期较传统手术延长，但后期较传统手术明显缩短。其原因可能是机器人辅助置钉有避免反复调整钉道的优势，但其学习曲线长，初期使用技术不熟练导致手术时间延长；(3) 置钉更准确，机器人组总体置钉优良率 100%，其中 3 例患者出现实际螺钉置入钉道与术前规划路径偏差，但术后评估螺钉位置均良好。其原因可能是导针钻孔时在骨面打滑、导针受到软组织张力后发生位移、导针软易发生

弯曲变道等因素导致钉道方向偏移^[18]。此外，术前规划不当、操作不规范或手术者经验不足等因素也可能对手术效果产生影响。因此使用机器人辅助螺钉置入需总结手术经验避免上述因素；(4) 更安全，机器人组无早期并发症发生，而传统手术组出现 1 例神经损伤病例。传统手术使用二维透视辅助，术者需通过不同角度的透视情况判断螺钉位置，加之骨盆结构复杂，骶骨变异发生率高^[22]，因透视图像重叠导致螺钉位置误判的可能性大，另外术者无法实时监控置入螺钉过程中的位置偏差，存在盲目性；机器人系统能根据患者的影像学资料对钉道进行精确规划，有效降低了因患者个体化差异所增加的手术风险。机器人辅助经皮骶髂螺钉通过三维定位导针及螺钉的位置，实时矫正骨内螺钉位置偏差，并且机械臂稳定性好，整个螺钉置入过程安全可控；(5) 术后恢复功能及完全负重活动比较快，可能是因为机器人辅助置钉准确高效，螺钉位置更佳，可有效避免反复调整钉道的二次损伤。

综上所述, 天玑机器人辅助经皮骶髂空心螺钉内固定术治疗骨盆后环损伤具有准确性高、安全、微创等优点, 手术时间短, 术后恢复快。

参考文献

- [1] Nelson DW, Duwelius PJ. CT-guided fixation of sacral fractures and sacroiliac joint disruptions [J]. *Radiology*, 1991, 180 (2) : 527-532. DOI: 10.1148/radiology.180.2.2068323.
- [2] Cole JD, Blum DA, Ansel LJ. Outcome after fixation of unstable posterior pelvic ring injuries [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1996, 329 (329) : 160-179. DOI: 10.1097/00003086-199608000-00020.
- [3] Gibbons KJ, Soloniuk DS, Razack N. Neurological injury and patterns of sacral fractures [J]. *J Neurosurg*, 1990, 72 (6) : 889-893. DOI: 10.3171/jns.1990.72.6.0889.
- [4] Zhang L, Peng Y, Du C, Tang P. Biomechanical study of four kinds of percutaneous screw fixation in two types of unilateral sacroiliac joint dislocation: a finite element analysis [J]. *Injury*, 2014, 45 (12) : 2055-2059. DOI: 10.1016/j.injury.2014.10.052.
- [5] Le VH, Heckmann N, Jain N, et al. Biomechanical evaluation of supplemental percutaneous lumbo-sacro-iliac screws for spinopelvic fixation following total sacrectomy [J]. *J Spinal Disord Tech*, 2015, 28 (4) : 181-185. DOI: 10.1097/BSD.0000000000000241.
- [6] 鲁齐林, 刘曦明, 竺义亮, 等. 3D导航经皮骶髂螺钉治疗老年骶髂复合体损伤 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2019, 27 (18) : 1638-1642. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2019.18.02.
Lu QL, Liu XM, Zhu YL, et al. Percutaneous iliosacral screw under 3D navigation for sacroiliac complex injury in elderly [J]. *Orthop J Chin*, 2019, 27 (18) : 1638-1642. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2019.18.02.
- [7] Zwingmann J, Hauschild O, Bode G, et al. Malposition and revision rates of different imaging modalities for percutaneous iliosacral screw fixation following pelvic fractures: a systematic review and meta-analysis [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2013, 133 (9) : 1257-1265. DOI: 10.1007/s00402-013-1788-4.
- [8] Majeed SA. Grading the outcome of pelvic fractures [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 1989, 71 (2) : 304-306. DOI: 10.1302/0301-620X.71B2.2925751.
- [9] 赵春鹏, 王军强, 苏永刚, 等. 机器人辅助经皮螺钉内固定治疗骨盆和髌臼骨折 [J]. *北京大学学报 (医学版)*, 2017, 49 (2) : 274-280. DOI: 10.3969/j.issn.1671-167X.2017.02.017.
Zhao CP, Wang JQ, Su YG, et al. Clinical research on robot-assisted percutaneous pelvic and acetabular screws surgery [J]. *J Peking Univ (Health Sci)*, 2017, 49 (2) : 274-280. DOI: 10.3969/j.issn.1671-167X.2017.02.017.
- [10] Matta JM. Indications for anterior fixation of pelvic fractures [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1996, 329 (329) : 88-96. DOI: 10.1097/00003086-199608000-00011.
- [11] Giannoudis PV, Tzioupis CC, Pape HC, et al. Percutaneous fixation of the pelvic ring: an update [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 2007, 89 (2) : 145-154. DOI: 10.1302/0301-620X.89B2.18551.
- [12] Guimarães RP, de Góes Ribeiro A, Ulson O, et al. Supra-acetabular fixation and sacroiliac screws for treating unstable pelvic ring injuries: preliminary results from 20 patients [J]. *Rev Bras Ortop*, 2016, 51 (2) : 132-137. DOI: 10.1016/j.rboe.2016.02.010.
- [13] Giráldez-Sánchez MA, Lázaro-González Á, Martínez-Reina J, et al. Percutaneous iliosacral fixation in external rotational pelvic fractures. A biomechanical analysis [J]. *Injury*, 2015, 46 (2) : 327-332. DOI: 10.1016/j.injury.2014.10.058.
- [14] Lindahl J, Hirvensalo E. Outcome of operatively treated type-C injuries of the pelvic ring [J]. *Acta Orthop*, 2005, 76 (5) : 667-678. DOI: 10.1080/17453670510041754.
- [15] Conflitti JM, Graves ML, Chip Routt ML Jr. Radiographic quantification and analysis of dysmorphic upper sacral osseous anatomy and associated iliosacral screw insertions [J]. *J Orthop Trauma*, 2010, 24 (10) : 630-636. DOI: 10.1097/BOT.0b013e3181dc50cd.
- [16] Wang B, Cao J, Chang J, et al. Effectiveness of Tirobot-assisted vertebroplasty in treating thoracolumbar osteoporotic compression fracture [J]. *J Orthop Surg Res*, 2021, 16 (1) : 65. DOI: 10.1186/s13018-021-02211-0.
- [17] Lin S, Wang F, Hu J, et al. Comparison of the accuracy and safety of tirobot-assisted and fluoroscopy-assisted percutaneous pedicle screw placement for the treatment of thoracolumbar fractures [J]. *Orthop Surg*, 2022, 14 (11) : 2955-2963. DOI: 10.1111/os.13504.
- [18] Zhu ZD, Xiao CW, Tan B, et al. TiRobot-assisted percutaneous cannulated screw fixation in the treatment of femoral neck fractures: a minimum 2-year follow-up of 50 patients [J]. *Orthop Surg*, 2021, 13 (1) : 244-252. DOI: 10.1111/os.12915.
- [19] 陈金雄, 周观明, 陈希聪, 等. 机器人辅助经皮空心钉固定股骨颈骨折 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2023, 31 (4) : 295-299. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2023.04.02.
Chen JX, Zhou GM, Chen XC, et al. Robot-assisted percutaneous cannulated screw fixation of femoral neck fracture [J]. *Orthop J Chin*, 2023, 31 (4) : 295-299. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2023.04.02.
- [20] Khan A, Soliman MAR, Lee NJ, et al. CT-to-fluoroscopy registration versus scan-and-plan registration for robot-assisted insertion of lumbar pedicle screws [J]. *Neurosurg Focus*, 2022, 52 (1) : E8. DOI: 10.3171/2021.10.FOCUS21506.
- [21] 杨成志, 刘刚, 唐经励, 等. 天玑骨科机器人辅助经皮骶髂空心螺钉内固定治疗骨盆后环损伤合并骶骨变异 [J]. *中国修复重建外科杂志*, 2022, 36 (8) : 940-945. DOI: 10.7507/1002-1892.202204043.
Yang ZC, Liu G, Tang JL, et al. TiRobot-assisted percutaneous sacroiliac cannulated screw fixation for posterior pelvic ring injury with sacral variations [J]. *Chin J Repar Reconstr Surg*, 2022, 36 (8) : 940-945. DOI: 10.7507/1002-1892.202204043.
- [22] Wu LP, Li YK, Li YM, et al. Variable morphology of the sacrum in a Chinese population [J]. *Clin Anat*, 2009, 22 (5) : 619-626. DOI: 10.1002/ca.20809.

(收稿:2023-06-27 修回:2023-08-08)
(同行评议专家: 李华南, 熊龙, 李洪波)
(本文编辑: 闫承杰)