

不同模式下骨科手术机器人微创经椎间孔入路腰椎椎间融合术的置钉准确性与手术效率比较

王辉¹, 孙小刚², 田永昊¹, 原所茂¹, 王连雷¹, 刘新宇¹

(1. 山东大学齐鲁医院脊柱外科 山东 济南 250012; 2. 滕州市中心人民医院脊柱外科 山东 滕州 277599)

摘要 目的: 比较术中行 X 线配准和 CT 配准两种模式的骨科手术机器人辅助微创经椎间孔入路腰椎椎间融合术 (TLIF) 的置钉准确性与手术效率。**方法:** 选取 2021 年 6 月—2023 年 6 月于山东大学齐鲁医院接受机器人辅助 TLIF 的 57 例患者, 其中 19 例采用匹配术前 CT 的术中 X 线配准机器人辅助置入椎弓根螺钉 (X 线配准组), 19 例采用术中 CT 配准机器人辅助置入椎弓根螺钉 (CT 配准组), 19 例采用徒手置入椎弓根螺钉 (徒手组)。比较三组螺钉的置入准确性、固定上位节段关节突关节侵扰率、术中透视次数、出血量、辐射暴露水平、术后住院时间和临床效果, 以及 X 线配准组和 CT 配准组的手术时间。**结果:** 三组患者的出血量、术后住院时间和腰椎滑脱节段比较, 差异无统计学意义 ($P>0.05$), 三组患者术后 VAS 评分和 ODI 评分均较术前明显好转 ($P<0.05$)。X 线配准组较 CT 配准组患者的术中辐射暴露少, 且均低于徒手组 ($P<0.05$)。X 线配准组和 CT 配准组的临床可接受螺钉数量大于徒手组, 固定上位节段关节突关节侵扰率小于徒手组, 但差异无统计学意义 ($P>0.05$)。X 线配准组配准及规划时间低于 CT 配准组, 机器人装备时间及置钉时间高于 CT 配准组 ($P<0.05$), 两组患者总手术时间差异无统计学意义 ($P>0.05$), 但均高于徒手组 ($P<0.05$)。**结论:** 术中行 X 线配准和 CT 配准两种模式的机器人辅助 TLIF 具有较高的置钉准确性和安全性, 辐射量低, 可作为 TLIF 的有效辅助方式。

关键词 骨科手术机器人; 微创经椎间孔入路腰椎椎间融合术; X 线配准; CT 配准; 置钉准确性; 手术效率

中图分类号 R681.5 **文献标识码** A **文章编号** 2096-7721 (2025) 02-0210-07

Comparison of nail placement accuracy and surgical efficiency of orthopedic robot-assisted minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion under different modes

WANG Hui¹, SUN Xiaogang², TIAN Yonghao¹, YUAN Suomao¹, WANG Lianlei¹, LIU Xinyu¹

(1. Department of Spinal Surgery, Qilu Hospital of Shandong University, Jinan 250012, China; 2. Department of Spinal Surgery, Tengzhou Central People's Hospital, Tengzhou 277599, China)

Abstract Objective: To compare the nail placement accuracy and surgical efficiency of orthopedic robot-assisted minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion (MIS-TLIF) with intraoperative X-ray and CT alignment. **Methods:** 57 patients who underwent robotic-assisted MIS-TLIF from June 2020 to June 2023 in Qilu Hospital of Shandong University were selected. They were divided into the X-ray alignment group ($n=19$), the CT alignment group ($n=19$) and the freehand group ($n=19$). Patients in the above three groups underwent intraoperative X-ray alignment-assisted pedicle screw placement, intraoperative CT alignment-assisted pedicle screw placement and freehand pedicle screw placement, respectively. Screw placement accuracy, rate of superior level facet joint violations, number

基金项目: 国家自然科学基金 (81874022, 82172483, 82102522); 山东省重点研发计划 (2022CXGC01050); 山东省自然科学基金 (ZR202102210113); 山东省泰山学者项目 (tsqn202211317); 中央高水平医院临床研究基金 (2022-PUMCH-D-004)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (81874022, 82172483, 82102522); Key R&D Plan Project of Shandong Province (2022CXGC01050); Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR202102210113); Shandong Taishan Scholars Project (tsqn202211317); Clinical Research Fund of the Central High-level Hospital (2022-PUMCH-D-004)

引用格式: 王辉, 孙小刚, 田永昊, 等. 不同模式下骨科手术机器人微创经椎间孔入路腰椎椎间融合术的置钉准确性与手术效率比较 [J]. 机器人外科学杂志 (中英文), 2025, 6 (2): 210-216.

Citation: WANG H, SUN X G, TIAN Y H, et al. Comparison of nail placement accuracy and surgical efficiency of orthopedic robot-assisted minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion under different modes[J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2025, 6(2): 210-216.

通讯作者 (Corresponding Author): 刘新宇 (LIU Xinyu), Email: newyuliu@163.com

of intraoperative fluoroscopies, bleeding, radiation exposure level, postoperative length of hospital stay, and clinical outcomes among the three groups were compared. Meanwhile, operative time were compared between the X-ray-aligned group and CT-aligned group. **Results:** There was no statistically significant difference in bleeding, postoperative length of hospital stay, and lumbar spondylolisthesis segments among the three groups ($P>0.05$). Postoperative VAS and ODI scores of the three groups were significantly improved compared with those before surgery ($P<0.05$). Intraoperative radiation exposure in the X-ray alignment group was lower than that in the CT alignment group, and they were both lower than that in the freehand group ($P<0.05$). There was no statistically significant difference in the clinically acceptable screw placement and rate of superior level facet joint violations among the three groups of patients ($P>0.05$). The X-ray alignment group has lower alignment and planning time ($P<0.05$), and higher robot equipping and nail placement time than the CT alignment group ($P<0.05$), but the difference in the total operative time between the two groups was not statistically significant ($P>0.05$). The total operative times of the X-ray-aligned group and CT-aligned group were higher than that of the freehand group ($P<0.05$). **Conclusion:** Robot-assisted MIS-TLIF with X-ray and CT alignment intraoperatively has high nail placement accuracy and safety, low radiation exposure, which can be used as an effective adjunct to MIS-TLIF.

Key words Orthopaedic Surgical Robot; Minimally Invasive Transforaminal Lumbar Interbody Fusion; X-ray Alignment; CT Alignment; Nail Placement Accuracy; Surgical Efficiency

自 21 世纪初以来,脊柱外科的成像技术、导航系统和机器人辅助技术飞速发展^[1-2],尤其是机器人辅助置入椎弓根螺钉技术已较为成熟。目前已有多款骨科手术机器人应用于脊柱手术,包括“天玑®”“SpineAssist®”“Renaissance®”“Mazor™”和“鑫君特®”等^[3],这些手术机器人旨在提高椎弓根螺钉的置入精度,减少徒手置钉引起的人为误差。近年来,微创经椎间孔入路腰椎椎间融合术(Minimally Invasive Transforaminal Lumbar Interbody Fusion, MIS-TLIF)得到广泛应用,其具有对软组织损伤小、出血量少、并发症发生率低、恢复速度快、住院时间短等优势。然而经皮椎弓根螺钉置入术较开放手术困难,其误置可能导致神经、血管及内部脏器损伤,置钉偏内侧影响关节突关节时可导致相邻节段退变等^[4-5]。既往文献报道,机器人辅助椎弓根螺钉置入术具有更高的置入精准度、更低的关节突关节侵扰率、更少的辐射以及更短的住院时间等优点^[6],在一项对 105 例患者行机器人辅助 MIS-TLIF 的回顾性研究中,其并发症发生率为 6.5%,螺钉置入准确率为 91.2%,因此采用机器人辅助置钉可有效提高 MIS-TLIF 的临床效果^[7-8]。

相关文献表明不同的骨科手术机器人其结构组成和安装步骤不尽相同,不同手术机器人置钉时间及手术效率也有较大差别,如“天玑®”、“Mazor™”等采用术中 CT 数据配准,而“鑫君特®”等采用术中 X 线结合术前 CT 数据配准^[9-11]。目前,脊柱手术机器人工作配准方式大致分为两种模式:一种是手术机器人直接根据术中 O 臂或 3D-CT 扫描数据进行

配准;另一种是术中 C 臂所摄 X 线片与术前 CT 扫描数据匹配后,手术机器人根据术中 X 线配准。两种不同配准方式可能造成手术机器人在手术时间、手术效率的差别^[12],目前不同配准方式手术机器人的学习曲线、手术效率、并发症发生率及辐射量等在 MIS-TLIF 中的对比尚缺乏相关研究。本研究比较了术中行 X 线配准和 CT 配准两种不同模式的骨科手术机器人辅助 MIS-TLIF 的置钉准确性与手术效率,以期对相关研究提供一定的参考依据。

1 资料与方法

1.1 纳入和排除标准 本研究经山东大学齐鲁医院伦理委员会批准(批准文号: KYLL055)。纳入标准:①腰椎退行性疾病患者;②腰椎滑脱症患者;③累及节段为 L3~S1;④术前存在腰痛、下肢疼痛、麻木、无力及间歇性跛行等症状,严重影响工作生活,经保守治疗 >3 个月且无效者;⑤患者在入组前均签署知情同意书。排除标准:①术前影像学资料不全者;②术中关键步骤透视资料缺失者;③随访资料缺失者;④手术节段曾接受内固定手术者。将患者随机分为 X 线配准组($n=19$,采用匹配术前 CT 的术中 X 线配准机器人辅助置入椎弓根螺钉)、CT 配准组($n=19$,采用术中 CT 配准机器人辅助置入椎弓根螺钉)和徒手组($n=19$,徒手置入椎弓根螺钉),两组患者一般资料(性别、年龄、BMI)相比,差异无统计学意义($P>0.05$),见表 1。

1.2 手术方法(以 L4/5 为例)

1.2.1 X 线配准组 安装定位板, C 臂获取患者术中正侧位 X 线图像,并通过与术前 CT 图像自动识别进行配准。术前规划螺钉轨迹,包括螺钉轴向、冠

状位和矢状位最佳位置和尺寸,机械臂沿预定轨迹方向移动完成后,医生监控机械臂按照规划方向自动置入经皮螺钉导针(如图1)。置入导针后,逐级扩张分离椎旁肌肉,安装微创通道并显露 L4/5 关节突关节。切除 L4/5 关节突关节,用椎间绞刀、刮匙逐步切除椎间盘组织及上下椎体软骨板,椎间隙内植入自体、异体骨粒及椎间融合器。切除增生肥厚的黄韧带行骨性椎管减压,最后经导针置入经皮椎弓根螺钉并锁紧系统。

1.2.2 CT 配准组 术中由 O 臂或者 3D-C 臂扫描获取 CT 图像,根据术中 CT 图像规划螺钉位置,包括螺钉轴向、冠状位和矢状位最佳位置和尺寸,在机械臂引导下置入扩张管,电钻置入经皮螺钉导针(如图2)。其余步骤同 X 线配准组。

1.2.3 徒手组 根据 C 形臂 X 线机行正侧透视,定位 L4 椎弓根外,置入穿刺针头,透视证实穿刺针头已经安全穿过椎弓根到达椎体后缘,取下针芯,置入导针。同法置入双侧 L5 椎弓根导针^[13]。其余步骤同 X 线配准组。

1.3 观察指标 比较三组患者术中透视次数、出血量、术后住院时间、手术并发症;采用视觉模拟评分法(Visual Analogue Scale, VAS)^[14]评估患者术

后腰背及下肢疼痛情况;采用 Oswestry 功能障碍指数(Oswestry Disability Index, ODI)^[15]评估患者腰椎功能;同时,比较 X 线配准组和 CT 配准组的手术时间,包括置钉时间、配准及规划时间、机器人装备时间及总手术时间。

1.4 影像学检查 根据术后 CT 结果,采用 Gertzbein 和 Robbins 标准评估椎弓根螺钉位置^[15-16],共分为 5 级, A 级表示椎弓根内、外侧骨皮质完整;B~E 级表示螺钉穿透椎弓根内侧或外侧骨皮质,穿透厚度分别 <2 mm、2~4 mm、4~6 mm、≥6 mm;其中 A 级视为置钉准确, A 级和 B 级螺钉视为临床可接受螺钉。根据术后 CT 评估椎弓根螺钉对上位关节突关节的侵扰,评估结果分为 4 级, A 级表示螺钉不在关节突关节上,且未进入关节突关节;B 级表示螺钉位于上关节突关节上,但未进入关节突关节面;C 级表示螺钉经过关节突关节面 ≤1 mm;D 级表示螺钉进入关节突关节腔内,进入距离 >1 mm^[16]。

1.5 统计学方法 所有数据均采用 SPSS 26.0 软件进行统计分析。计量资料以均数 ± 标准差($\bar{x} \pm s$)表示,两组间比较采用独立样本 *t* 检验,三组间比较采用单因素 ANOVA 分析,采用 χ^2 检验对分类变量进行分析。*P* < 0.05 为差异有统计学意义。

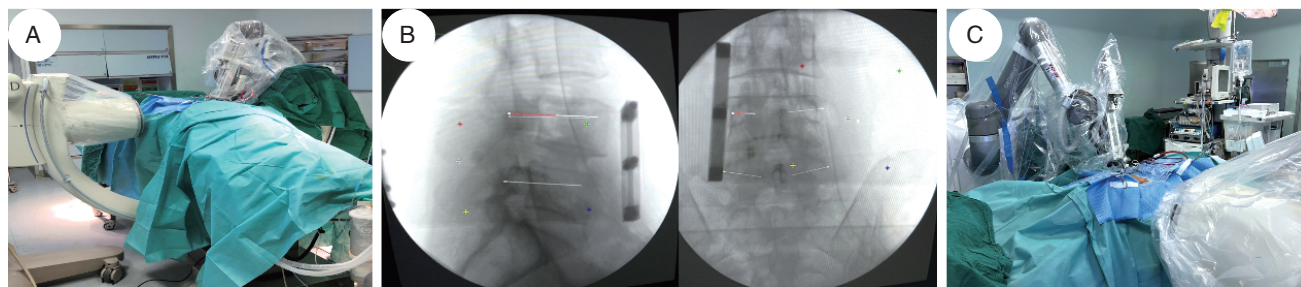


图1 X线配准机器人辅助 MIS-TLIF 手术步骤

Figure 1 X-ray aligned robot-assisted MIS-TLIF steps

注: A. 术中 C 臂扫描; B. 术中配准并规划螺钉路径; C. 机械臂移动到规划路径, 机器人自动置钉

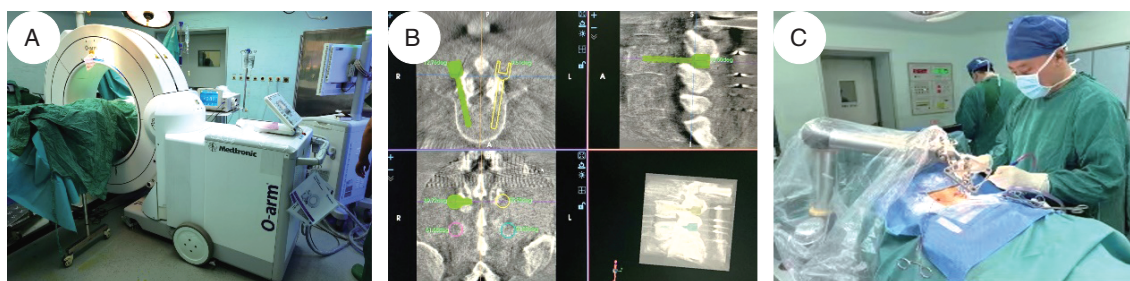


图2 CT 配准机器人辅助 MIS-TLIF 手术步骤

Figure 2 CT-aligned robotic-assisted MIS-TLIF steps

注: A. 术中 O 臂扫描; B. 术中配准并规划螺钉路径; C. 机械臂移动到规划路径, 术者置入导针

2 结果

2.1 一般资料 三组患者腰椎滑脱节段、术后出血量及住院时间比较,差异无统计学意义 ($P>0.05$)。X 线配准组患者辐射量较 CT 配准组少,且均少于徒手组 ($P<0.05$)。与术前相比,术后即刻三组患者 VAS 评分和 ODI 评分均明显好转,差异有统计学意义 ($P<0.05$),但三组间 VAS 和 ODI 评分差异无统计学意义 ($P>0.05$),见表 1。

2.2 置钉准确率及手术时间 X 线配准组和 CT 配准组的总手术时间相比,差异无统计学意义 ($P>0.05$),但均长于徒手组 ($P<0.05$)。X 线配准组配准及规划时间较 CT 配准组短,而装备时间及置钉时间较 CT 配准组长 ($P<0.05$)。X 线配准组和 CT 配准组的临床可接受螺钉数量大于徒手组,关节突关节侵犯率小于徒手组,但差异无统计学意义 ($P>0.05$),见表 2。

2.3 术后并发症 X 线配准组中 1 例患者的椎弓根螺钉侵犯椎体内侧壁,术中行相应调整。CT 配准组中

1 枚椎弓根螺钉刺穿椎体前壁,术中调整后术后出现腹痛,3 d 后消失;徒手组中 2 例患者的椎弓根螺钉侵犯侧壁(内侧壁及外侧壁各 1 例),但术后未出现相关并发症。

3 讨论

手术机器人具有置钉准确性高和并发症发生率低等优势^[14]。椎弓根螺钉固定的成功与否主要取决于螺钉放置的准确性,高精度的螺钉置入有利于保持脊柱的稳定性^[17-18]。一项比较机器人辅助和徒手置入椎弓根螺钉准确性的 Meta 分析显示机器人辅助螺钉置入比徒手置入更准确^[19]。最近的研究^[20-21]同样表明,使用手术机器人可显著提高置钉精度。HAN X G 和 LI C 等人^[22-23]也证明了机器人辅助经皮椎弓根螺钉置入突破皮质风险更小,可大大降低患者由于椎弓根螺钉误置所造成的血管神经损伤。Alluri R K 和 Akazawa T 等人^[3, 24]对手术机器人置钉准确性的研究表明不同手术机器人的置钉准确性有所不同,但准确率均 $>90\%$ 。目前对不同

表 1 三组患者一般资料比较 ($\bar{x} \pm s$)

Table 1 Comparison of general data among the three groups of patients ($\bar{x} \pm s$)

	X 线配准组 ($n=19$)	CT 配准组 ($n=19$)	徒手组 ($n=19$)	P 值
性别 (男/女)	9/10	10/9	10/9	0.815
年龄 (岁)	57.46 ± 12.36	55.42 ± 11.09	56.47 ± 9.45	0.513
BMI (kg/m^2)	24.95 ± 4.37	24.32 ± 5.12	25.34 ± 7.13	0.891
滑脱节段				
L4/5	8	7	10	0.864
L5/S1	11	12	9	0.881
出血量 (mL)	82.94 ± 23.56	84.28 ± 26.38	88.01 ± 22.49	0.746
住院时间 (d)	5.11 ± 1.35	5.82 ± 2.01	5.31 ± 1.79	0.703
辐射量 (mGy)	20.25 ± 0.57	31.01 ± 4.52^a	40.12 ± 9.31^a	0.000
VAS 评分 (腰背)				
术前	7.12 ± 3.05	7.07 ± 2.68	7.15 ± 2.51	0.614
术后即刻	2.63 ± 1.16^b	2.43 ± 1.10^b	2.61 ± 1.29^b	0.735
VAS 评分 (下肢)				
术前	6.89 ± 2.31	7.03 ± 2.56	7.09 ± 1.98	0.541
术后即刻	2.77 ± 1.04^b	2.48 ± 1.21^b	2.58 ± 1.06^b	0.682
ODI 评分				
术前	69.34 ± 13.97	70.36 ± 11.95	68.43 ± 10.56	0.335
术后即刻	30.44 ± 7.92^b	28.98 ± 7.18^b	31.27 ± 8.41^b	0.404

注:与 X 线配准组相比, $^aP<0.05$;与术前相比, $^bP<0.05$

表 2 三组患者置钉准确性及手术时间比较 ($\bar{x} \pm s$)

Table 2 Comparison of placement accuracy and operative time among the three groups of patients ($\bar{x} \pm s$)

	X 线配准组	CT 配准组	徒手组	P 值
螺钉分级 (枚)				
A 级	65	66	61	0.961
B 级	9	7	8	0.825
A+B 级	74	73	69	0.977
C 级	2	2	5	0.131
D 级	0	1	2	—
E 级	0	0	0	—
关节突关节侵扰 (枚)				
A 级	57	55	50	0.215
B 级	8	11	11	0.573
C 级	7	6	10	0.782
D 级	4	4	5	0.846
手术时间 (min)				
置钉时间	12.89 ± 8.47	8.26 ± 4.31	—	0.000
配准及规划时间	10.31 ± 5.78	14.89 ± 7.54	—	0.000
装备时间	30.78 ± 14.48	20.26 ± 12.23	—	0.000
总手术时间	178.42 ± 24.12	177.63 ± 26.71	142.51 ± 18.47 ^a	0.000

注：与 X 线配准组和 CT 配准组相比，^a $P < 0.05$

工作模式的骨科手术机器人在手术时间和置钉准确性方面的研究较少。本研究结果显示，CT 配准组和 X 线配准组螺钉置入的准确率 $>95\%$ 。手术机器人导航并不意味着 100% 的准确性，在本研究中，X 线配准组术中出现 1 枚椎弓根螺钉侵犯椎体内侧壁；CT 配准组有 1 枚椎弓根螺钉侵犯椎体前壁，术后引起患者腹痛。同时由于微创手术空间相对狭窄，术中神经暴露不足，经验不足的外科医生更容易引起患者神经刺激症状^[25]。机器人辅助 MIS-TLIF 虽然有较高的置钉准确性，但一些因素也可能导致其准确性降低，比如机械臂承受反作用力的能力降低导致机械臂相对于患者运动，出现螺钉置入位置偏离术前规划路径的情况^[26]；其次，当关节突关节表面不够光滑以及规划轨迹与椎体之间的角度不够时，可能会出现偏离计划轨迹的情况^[27]；第三，手术机器人系统安装不够稳定导致螺钉偏离规划轨迹^[28]；第四，配准不准确导致经椎弓根螺钉放置不准确^[29]；最后，软组织压力过大、骨表面摩擦和钻孔压力失衡也会影响螺钉置入的准确性^[21]。

一些研究表明，通过皮肤置入导丝可能出现“漂移”现象，从而导致螺钉误置^[30]。在规划手术路径时应选择椎弓根较平缓处作为进钉点，以降低在螺钉置入过程中的“漂移”现象。另外在机器人工作过程中，通过控制潮汐量和减少术中腰椎和背部运动对提高椎弓根螺钉放置的准确性也是至关重要的。

机器人辅助 MIS-TLIF 虽然手术时间稍长，但该技术具备机器人系统的精确定位和较小的组织损伤优势，可以实现更小的疼痛和更少的邻近节段退变以减少出血，提高置钉准确性，减少棘旁肌损伤，术后恢复更快，手术瘢痕更小，临床满意度更高^[31]。机器人辅助 MIS-TLIF 的手术时间主要取决于机器人的配准时间、置钉时间以及术者的学习曲线^[32]。相关研究结果表明，在使用机器人系统连续进行 10 次手术后，手术团队表现出更好的协调性^[30]，随着手术病例数量的增加，创造手术空间和使用机械臂建立通道所需的时间更短。本团队经验表明，使用机器人辅助 MIS-TLIF 治疗腰椎滑脱，10 例手术足以完成学习曲线，此后，机器人辅助螺钉置入

和减压所需的时间大大减少，而配准时间及置钉时间则无法缩短。本研究中 X 线配准组配准及规划时间短于 CT 配准组，但两组手术总时间相近，则是由于置钉时间不同，X 线配准组为机器人自动置钉，配准完成后需规划好机械臂路线，机械臂自动打入螺钉，这一过程所需时间较长，而 CT 配准组则是机器人辅助手动置钉，机器人行进到指定路线后术者置入导针，再根据导针轨迹打入螺钉，所需时间较短。

手术机器人在完成配准后，直接按照术前规划的运动轨迹移动，术中不需要多次辐射暴露，可有效减少医生和患者的辐射暴露水平^[19]，机器人辅助 MIS-TLIF 不需要暴露解剖标记物，因此学习曲线比一般的微创手术要短得多^[10]。脊柱手术的放射性是非脊柱手术的 10~12 倍^[33]，Riis J 等人^[34]认为多次透视及脊柱部位接受较高的辐射增加了脊柱外科医生穿透性辐射的风险；同时 Mulconrey D S 等人^[35]认为徒手置钉过程中需要多次透视，无法减轻对术者和患者的辐射暴露。因此，减少患者和外科医生的辐射暴露是手术机器人应用过程中亟需解决的问题。最近的研究表明，在微创手术中使用手术机器人导航可以显著减少辐射暴露^[15]，而对于不同工作模式的骨科手术机器人术中辐射暴露尚无文献报道。本研究中，术中进行 X 线配准和 CT 配准使得在机器人辅助手术中患者和医生受到的辐射有所差别，X 线配准组患者术中辐射暴露较 CT 配准组少，这是由于 X 线配准组术中仅需一次辐射便可完成配准，此后无需行影像学检查，而 CT 配准组则需要术中行 CT 扫描，患者所受辐射较多。

人工智能在脊柱外科领域应用十分广泛，从脊柱成像到退行性疾病、脊髓损伤、脊柱肿瘤和脊柱侧凸的辅助治疗，为医生的临床实践提供信息和技术支持，同时手术机器人在进行术前或术中规划中应用人工智能辅助越来越多，减少医生规划时间，手术效率提升，有效提高手术的安全性^[36]。目前，一部分手术机器人已经实现螺钉的自动置入，这减轻了医生的工作，提升了手术效率，降低了术者的学习曲线，但随之而来的是自动置钉的伦理问题。一项对手术机器人人工智能伦理问题的研究显示，骨科手术机器人应用自动置钉过程中产生了许多伦

理挑战，这些伦理问题是在骨科手术机器人发展中所面临的一大难题^[37]。此外，本研究存在一定的局限性：①本研究为回顾性研究，在病例选择上可能存在偏倚；②样本量较少，现有的临床结论还需要大样本、前瞻性的研究来证实。

综上所述，术中 X 线配准与术中 CT 配准两种不同模式的骨科手术机器人在辅助 MIS-TLIF 中具有较高的置钉准确性和安全性，且二者辐射较低，可作为 MIS-TLIF 的有效辅助方式。

利益冲突声明：本文不存在任何利益冲突。

作者贡献声明：王辉负责课题框架设计，撰写文章；孙小刚、田永昊、原所茂、王连雷负责数据收集与分析，绘制图表；刘新宇负责课题设计，文章修改。

参考文献

- [1] D'Souza M, Gendreau J, Feng A, et al. Robotic-assisted spine surgery: history, efficacy, cost, and future trends[J]. *Robot Surg*, 2019, 7(6): 9–23.
- [2] Mualem W, Onyedimma C, Ghaith A K, et al. R2 advances in robotic-assisted spine surgery: comparative analysis of options, future directions, and bibliometric analysis of the literature[J]. *Neurosurg Rev*, 2022, 46(1): 18.
- [3] Alluri R K, Avrumova F, Sivaganesan A, et al. Overview of robotic technology in spine surgery[J]. *Hss j*, 2021, 17(3): 308–316.
- [4] Kapoen C, Liu Y, Bloemers F W, et al. Pedicle screw fixation of thoracolumbar fractures: conventional short segment versus short segment with intermediate screws at the fracture level—a systematic review and meta-analysis[J]. *Eur Spine J*, 2020, 29(10): 2491–2504.
- [5] FAN Y, DU J P, ZHANG J N, et al. Comparison of accuracy of pedicle screw insertion among 4 guided technologies in spine surgery[J]. *Med Sci Monit*, 2017.DOI: 10.12659/msm.905713.
- [6] De Biase G, Gassie K, Garcia D, et al. Perioperative comparison of robotic-assisted versus fluoroscopically guided minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion[J]. *World Neurosurg*, 2021.DOI: 10.1016/j.wneu.2021.01.133.
- [7] Jutte P C, Castelein R M. Complications of pedicle screws in lumbar and lumbosacral fusions in 105 consecutive primary operations[J]. *Eur Spine J*, 2002, 11(6): 594–598.
- [8] Lau D, Terman S W, Patel R, et al. Incidence of and risk factors for superior facet violation in minimally invasive versus open pedicle screw placement during transforaminal lumbar interbody fusion: a comparative analysis[J]. *J Neurosurg Spine*, 2013, 18(4): 356–361.
- [9] Perfetti D C, Kisinde S, Rogers-LaVanne M P, et al. Robotic spine surgery: past, present, and future[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2022, 47(13): 909–921.
- [10] Wang T Y, Mehta V A, Sankey E W, et al. Operative time and learning curve between fluoroscopy-based instrument tracking and robot-assisted instrumentation for patients undergoing minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion (MIS-TLIF)[J]. *Clin Neurol Neurosurg*, 2021.DOI: 10.1016/j.clineuro.2021.106698.
- [11] SU X J, LV Z D, CHEN Z, et al. Comparison of accuracy and clinical outcomes of robot-assisted versus fluoroscopy-guided pedicle screw placement in posterior cervical surgery[J]. *Global Spine J*, 2022, 12(4): 620–626.
- [12] Akazawa T, Torii Y, Ueno J, et al. Safety of robotic-assisted screw placement for spine surgery: experience from the initial 125 cases[J]. *J Orthop Sci*, 2023.DOI: 10.1016/j.jos.2023.06.003.
- [13] 刘新宇, 原所茂, 田永昊, 等. 微创经椎间孔腰椎椎体间融合术内固定相关并发症及对策[J]. *中华骨科杂志*, 2016, 36(22): 1426–1434.

- [14] ZHANG Y, PENG Q, SUN C H, et al. Robot versus fluoroscopy-assisted vertebroplasty and kyphoplasty for osteoporotic vertebral compression fractures: a systematic review and meta-analysis[J]. *World Neurosurg*, 2022.DOI: 10.1016/j.wneu.2022.07.083.
- [15] CUI G Y, HAN X G, WEI Y, et al. Robot-assisted minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion in the treatment of lumbar spondylolisthesis[J]. *Orthop Surg*, 2021, 13(7): 1960–1968.
- [16] ZHANG R J, ZHOU L P, ZHANG L, et al. Safety and risk factors of TINA robot-assisted percutaneous pedicle screw placement in spinal surgery[J]. *J Orthop Surg Res*, 2022, 17(1): 379.
- [17] Joshi R S, Lau D, Ames C P. Artificial intelligence and the future of spine surgery[J]. *Neurospine*, 2019, 16 (4) : 637–639.
- [18] Gertzbein S D, Robbins S E. Accuracy of pedicular screw placement in vivo[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1990, 15(1): 11–14.
- [19] FAN Y, DU J P, LIU J J, et al. Accuracy of pedicle screw placement comparing robot-assisted technology and the free-hand with fluoroscopy-guided method in spine surgery: An updated meta-analysis[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2018, 97(22): e10970.
- [20] YAN K, ZHANG Q, TIAN W. Comparison of accuracy and safety between second-generation TiRobot-assisted and free-hand thoracolumbar pedicle screw placement[J]. *BMC Surg*, 2022, 22(1): 275.
- [21] LI W S, LI G Y, CHEN W T, et al. The safety and accuracy of robot-assisted pedicle screw internal fixation for spine disease: a meta-analysis[J]. *Bone Joint Res*, 2020, 9(10): 653–666.
- [22] HAN X G, TIAN W, LIU Y J, 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.
- [23] LI C, WANG Z, LI D L, et al. Safety and accuracy of cannulated pedicle screw placement in scoliosis surgery: a comparison of robotic-navigation, O-arm-based navigation, and freehand techniques[J]. *Eur Spine J*, 2023, 32(9): 3094–3104.
- [24] Akazawa T, Torii Y, Ueno J, et al. Learning curves for robotic-assisted spine surgery: an analysis of the time taken for screw insertion, robot setting, registration, and fluoroscopy[J]. *Eur J Orthop Surg Traumatol*, 2024, 34(1): 127–134..
- [25] WANG L L, LI C, WANG Z, et al. Comparison of robot-assisted versus fluoroscopy-assisted minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion for degenerative lumbar spinal diseases: 2-year follow-up[J]. *J Robot Surg*, 2023, 17(2): 473–485.
- [26] ZHANG Q, HAN X G, XU Y F, et al. Robotic navigation during spine surgery[J]. *Expert Rev Med Devices*, 2020, 17(1): 27–32.
- [27] Kantelhardt S R, Martinez R, Baerwinkel S, et al. Perioperative course and accuracy of screw positioning in conventional, open robotic-guided and percutaneous robotic-guided, pedicle screw placement[J]. *Eur Spine J*, 2011, 20(6): 860–868.
- [28] Lonjon N, Chan-Seng E, Costalat V, et al. Robot-assisted spine surgery: feasibility study through a prospective case-matched analysis[J]. *Eur Spine J*, 2016, 25(3): 947–955.
- [29] Keric N, Eum D J, Afghanyar F, et al. Evaluation of surgical strategy of conventional vs. percutaneous robot-assisted spinal trans-pedicular instrumentation in spondylodiscitis[J]. *J Robot Surg*, 2017, 11(1): 17–25.
- [30] Kim M C, Chung H T, Cho J L, et al. Subsidence of polyetheretherketone cage after minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2013, 26(2): 87–92.
- [31] Fatima N, Massaad E, Hadzipasic M, et al. Safety and accuracy of robot-assisted placement of pedicle screws compared to conventional free-hand technique: a systematic review and meta-analysis[J]. *Spine J*, 2021, 21(2): 181–192.
- [32] Park J H, Lee J, Hakim N A, et al. Robotic thyroidectomy learning curve for beginning surgeons with little or no experience of endoscopic surgery[J]. *Head Neck*, 2015, 37(12): 1705–1711.
- [33] Lee K, Lee K M, Park M S, et al. Measurements of surgeons' exposure to ionizing radiation dose during intraoperative use of C-arm fluoroscopy[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2012, 37(14): 1240–1244.
- [34] Riis J, Lehman R R, Perera R A, et al. A retrospective comparison of intraoperative CT and fluoroscopy evaluating radiation exposure in posterior spinal fusions for scoliosis[J]. *Patient Saf Surg*, 2017.DOI: 10.1186/s13037-017-0142-0. eCollection 2017.
- [35] Mulconrey D S. Fluoroscopic radiation exposure in spinal surgery: in vivo evaluation for operating room personnel[J]. *Clin Spine Surg*, 2016, 29(7): E331–E335.
- [36] Babu R, Park J G, Mehta A I, et al. Comparison of superior-level facet joint violations during open and percutaneous pedicle screw placement[J]. *Neurosurgery*, 2012, 71(5): 962–970.
- [37] Geiger J D, Hirschl R B. Innovation in surgical technology and techniques: Challenges and ethical issues[J]. *Semin Pediatr Surg*, 2015, 24 (3): 115–121.

收稿日期: 2024-01-02

编辑: 崔明璠

(上接 209 页)

- [18] 厉匡林, 周星, 姜敏霞. 肌腱重建术治疗膝关节 PCL 损伤患者的疗效及对功能恢复的影响 [J]. *浙江创伤外科*, 2022, 27(6): 1099–1100.
- [19] 姚思成, 关雪峰, 孙宇, 等. 关节镜下后交叉韧带重建术手术时机对临床疗效的影响 [J]. *中国内镜杂志*, 2022, 28(7): 26–32.
- [20] 林奕鹏, 蔡武峰, 黄锡豪, 等. 后交叉韧带重建中转角效应: 力学机制与临床改良 [J]. *中国修复重建外科杂志*, 2020, 34(6): 787–792.
- [21] 刘铭, 刘欣伟, 刘宪民, 等. 关节镜下 LARS 人工韧带重建膝关节后交叉韧带临床效果观察 [J]. *临床军医杂志*, 2021, 49(4): 380–381, 384.
- [22] 林伟明, 廖红兴, 梁传兴. 自体腘绳肌腱、同种异体肌腱重建后交叉韧带的临床研究 [J]. *黑龙江医学*, 2019, 43(11): 1351–1352.
- [23] Pache S, Aman Z S, Kennedy M, et al. Posterior cruciate ligament: current concepts review[J]. *Arch Bone Jt Surg*, 2018, 6(1): 8–18.
- [24] Chung K S. An increasing trend of posterior cruciate ligament reconstruction in South Korea: epidemiologic analysis using Korean National Health Insurance System Database[J]. *Knee Surg Relat Res*, 2021, 33(1): 44.
- [25] Root C, Braman M, Srinivas M, et al. Suture tape augmentation of posterior cruciate ligament reconstruction shows improved biomechanical stability with equivalent outcome and complication rates: a scoping review[J]. *Arthroscopy*, 2024.DOI: 10.1016/j.arthro.2024.03.025.
- [26] Wang D, Graziano J, Williams R J 3rd, et al. Nonoperative treatment of PCL injuries: goals of rehabilitation and the natural history of conservative care[J]. *Curr Rev Musculoskelet Med*, 2018, 11(2): 290–297.
- [27] Simhal R K, Bovich M, Bahrn E A, et al. Postoperative rehabilitation of posterior cruciate ligament surgery: a systematic review[J]. *Sports Med Arthrosc Rev*, 2021, 29(2): 81–87.
- [28] 郭珈, 张东芳, 杨国栋, 等. 后交叉韧带单束重建术股骨隧道角度与内侧副韧带损伤的相关性分析 [J]. *中国修复重建外科杂志*, 2022, 36(12): 1492–1499.
- [29] 孙正平, 张春雨, 廉永云, 等. 关节镜下经胫骨“腱钉栓”嵌入式后交叉韧带重建术疗效分析 [J]. *中国修复重建外科杂志*, 2022, 36(4): 420–424.
- [30] 胡汉, 张中伟, 徐红伟, 等. 骨科手术机器人辅助重建急性后交叉韧带断裂 1 例 [J]. *中国骨伤*, 2020, 33(10): 979–981.

收稿日期: 2024-10-10

编辑: 崔明璠