

· 临床论著 ·

# 机器人辅助手术矫正青少年重度特发性脊柱侧弯

李雅南<sup>a</sup>, 李殿国<sup>a\*</sup>, 吴东进<sup>b</sup>, 曹光庆<sup>b</sup>, 孙小刚<sup>a</sup>, 徐加龙<sup>a</sup>, 张振华<sup>a</sup>, 刘帅<sup>a</sup>

(山东大学第二医院: a 儿外科, b 脊柱外科, 山东济南 250033)

**摘要:** [目的] 评估骨科机器人辅助后路全椎体截骨术 (posterior vertebral column resection, PVCR) 椎弓钉-棒系统矫正重度青少年特发性脊柱侧弯 (adolescent idiopathic scoliosis, AIS) 的临床效果。[方法] 回顾性分析 2018 年 9 月—2022 年 6 月收治的 26 例重度 AIS 患者临床资料。依据术前医患沟通结果, 11 例采用机器人辅助椎弓钉置入 (机器人组); 15 例采用徒手椎弓钉置入 (徒手组)。比较两组临床与影像资料。[结果] 所有患者均顺利完成手术, 两组共切除 28 个椎体; 机器人组共置入 242 枚螺钉, 徒手组置入 311 枚。术中两组患者均未发生脊髓损伤、死亡等严重并发症。虽然机器人组手术时间明显长于徒手组 [(760.3±43.8) min vs (637.3±37.9) min,  $P<0.001$ ], 但机器人组术中透视次数明显少于徒手组 [(10±1.7) 次 vs (18.8±1.5) 次,  $P<0.001$ ], 两组术中出血量差异无统计学意义 ( $P>0.05$ )。两组患者随访至少 12 个月, 术后患者躯干平衡显著改善, 身高和坐高显著增加, 生活与运动能力改善。随访过程中, 两组患者均未出畸形矫正明显丢失, 均无手术翻修。影像方面, 机器人组置钉准确率显著高于徒手组 [(95.1±2.1)% vs (85.6±3.3)%],  $P<0.001$ 。与术前相比, 术后两组冠状面主弯 Cobb 角、矢状面后凸 Cobb 角、C<sub>7</sub>PL-CSVL、SVA 均明显减少 ( $P<0.05$ )。相应时间点, 两组间上述指标的差异均无统计学意义 ( $P>0.05$ )。[结论] PVCR 对重度 AIS 具有较好的矫形效果, 术中机器人辅助技术可以有效提高螺钉的精准度, 但由于学习曲线处于初级阶段, 手术时间可能会增加。

**关键词:** 重度青少年特发性脊柱侧弯, 后路全椎体截骨术, 椎弓钉置入, 机器人辅助手术

**中图分类号:** R682.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2024) 07-0596-06

**Robot-assisted surgical correction of severe idiopathic scoliosis in adolescents** // LI Ya-nan<sup>a</sup>, LI Dian-guo<sup>a</sup>, WU Dong-jin<sup>b</sup>, CAO Guang-qing<sup>b</sup>, SUN Xiao-gang<sup>a</sup>, XU Jia-long<sup>a</sup>, ZHANG Zhen-hua<sup>a</sup>, LIU Shuai<sup>a</sup>. a. Department of Pediatric Surgery, b. Department of Spinal Surgery, The Second Hospital, Shandong University, Jinan 250033, China

**Abstract:** [Objective] To evaluate the clinical value of robot-assisted posterior vertebral column resection (PVCR) and pedicle screw-rod system for correction of severe idiopathic scoliosis (AIS) in adolescent. [Methods] A retrospective study was performed on 26 patients who received PVCR with pedicle screw-rod correction of severe AIS from September 2018 to June 2022. According to preoperative doctor-patient communication, 11 patients underwent robot-assisted pedicle screw placement (the robot group), while other 15 patients had the screws placed by conventional free-hand technique (the free-hand group). Clinical and imaging data were compared between the two groups. [Results] All the patients had operation performed successfully with a total of 28 segments of PVCR conducted in the two groups, with a total of 242 screws placed in the robot group, whereas 311 screws inserted in the free-hand group. No serious complications such as spinal cord injury and death occurred in anyone of both groups during the operation. Although the robot group consumed significantly longer operation time than the free-hand group [(760±43.8) min vs (637.3±37.9) min,  $P<0.001$ ], the former had significantly less intraoperative fluoroscopy times than the latter [(10±1.7) times vs (18.8±1.5) times,  $P<0.001$ ], and there was no significant difference in intraoperative blood loss between the two groups ( $P>0.05$ ). All patients in both groups were followed up for more than 12 months, and got considerable improvement in terms of trunk balance, height and sitting height, as well as life and exercise ability postoperatively, with no significant loss of deformity correction, and no surgical revision in both groups. Radiographically, the robot group proved significantly superior to the free-hand group regarding the accuracy of screw placement [(95.1±2.1)% vs (85.6±3.3)%],  $P<0.001$ . Compared with those preoperatively, the Cobb angle of coronal main curvature, Cobb angle of sagittal kyphosis, C<sub>7</sub>PL-CSVL and SVA were significantly decreased in both groups after operation ( $P<0.05$ ), while which were not statistically significant between the two groups at any corresponding time points ( $P>0.05$ ). [Conclusion] The PVCR considerably facilitates correction of severe AIS. The intraoperative robot-assisted pedicle screw placement does effectively improve the accuracy, despite learning curve and time consuming in the initial stage.

DOI:10.3977/j.issn.1005-8478.2024.07.04

作者简介: 李雅南, 医师, 硕士, 研究方向: 小儿外科, (电话)17660080652, (电子信箱)1327415614@qq.com

\* 通信作者: 李殿国, (电话)0531-85875405, (电子信箱)sduerwai@163.com

**Key words:** severe adolescent idiopathic scoliosis, posterior vertebral column resection, pedicle screw placement, robot-assisted surgery

脊柱侧弯是一种包含冠状位、矢状位和轴位上序列分布异常的脊柱三维畸形，主要表现为脊柱侧向弯曲和旋转畸形<sup>[1]</sup>。临床中普遍认为 Cobb 角 $>80^\circ$ 为重度脊柱畸形<sup>[2]</sup>，严重者因脊柱解剖结构变异所致胸廓畸形异常进而影响心肺功能，甚至缩短寿命，对青少年的心理健康造成巨大困扰<sup>[3]</sup>。单纯后路全椎体截骨术（posterior vertebral column resection, PVCR）已经被证实有良好的临床效果<sup>[4]</sup>，其最早在 2005 年由 Suk 等<sup>[5]</sup>进行了报道，术中椎弓根螺钉成功置入是脊柱侧弯矫形的关键，然而重度脊柱侧弯患者顶椎区域椎体和椎弓根极度旋转、弯曲，其凹侧椎弓根发育不良、凹陷变细变长、相对更薄并出现硬化，且脊髓偏移与椎弓根内侧壁直接接触，这使得椎弓根螺钉置入具有挑战性<sup>[6]</sup>，即使经验丰富的手术医生也无法保证置钉的安全性与准确率<sup>[7]</sup>。近年来，机器人辅助技术在医疗领域得到广泛应用，极大提高了手术效果，似乎为外科医生减少螺钉置入相关并发症和获得理想的矫正效果提供了新的选择<sup>[8, 9]</sup>。关于机器人辅助技术在胸腰椎手术中的安全性及准确性，已有大量的数据报道<sup>[10, 11]</sup>，然而关于机器人辅助下进行 PVCR 治疗伴有椎弓根发育不良的重度 AIS 的相关研究却少见。本研究将机器人辅助技术应用于 PVCR 矫正重度 AIS，并与 X 线透视下传统置钉技术比较，现将结果报告如下。

## 1 资料与方法

### 1.1 纳入与排除标准

纳入标准：（1）所有患者症状、体征及影像学检查均符合 AIS；（2）影像测量冠状面 Cobb 角 $>80^\circ$ （图 1a, 1b）；（3）患者术前资料完整，包括磁共振、CT 三维重建以及标准脊柱全长 X 线片、特殊 Bending 位影像学检查；（4）所有患者均采用 PVCR，同一组医生完成。

排除标准：（1）合并严重心肺功能、凝血功能障碍；（2）合并严重脊髓、神经损伤；（3）术前经麻醉科等相关科室评估存在手术或麻醉禁忌，无法耐受手术者。

### 1.2 一般资料

回顾分析 2018 年 9 月—2022 年 6 月在山东大学第二医院治疗的 AIS 患者的临床资料，共 26 例符合

上述标准，纳入本研究。依据术前医患沟通结果，11 例采用机器人辅助置钉，另外 15 例采用传统徒手置钉。两组患者性别和年龄构成的差异均无统计学意义（ $P>0.05$ ），见表 1。本研究经山东大学第二医院伦理委员会批准（编号：KYLL-2023LW096），所有患者法定监护人均签署知情同意书。

### 1.3 手术方法

患者在气管插管诱导全身麻醉后取俯卧位（图 1c），安装神经电生理监测仪，手术全程行动诱发电位（motor evoked potential, MEP）和体感诱发电位（somatosensory evoked potential, SEP）监测。C 形臂 X 线机透视定位体表标志。行正中切口，显露棘突和双侧椎板、小关节凸，充分暴露术野。

机器人组：将骨科机器人系统与 C 形臂 X 线机系统相互连接，在棘突上安装示踪器，C 形臂 X 线机对手术节段进行扫描，将扫描数据传输至机器人系统，进行三维重建及机器人系统工作空间的自动配准（图 1d）。根据图像分别设定截骨头侧与尾侧各钉的进钉点、螺钉方向及大小（图 1e）。依次使用机器人辅助微创技术置入导针，沿着导针方向分别拧入合适的椎弓钉（图 1f）。

徒手组：按透视引导和局部解剖标志定位进钉点，开髓，使用球形探针探查钉道四壁，依次扩展钉道、攻丝，探针再次探查椎弓根皮质完整性，置入大小合适的椎弓根螺钉。

两组患者均行 PVRC，截骨区域附近的侧骨撞击或过度脊髓横向移位可能增加神经损伤的风险时，通常在矫正过程中切除数个相邻椎体。先于凹侧行钉-棒临时固定。确认需切除的顶椎后，切除其棘突及双侧椎板、关节突及横突，咬除椎弓根至基底。如截骨段在胸椎应切除 2~3 cm 和肋骨头、肋横及肋椎关节，术中保护胸膜，防止穿孔。顺着截骨节段凸侧椎体外壁开始钝性分离至椎体前缘，分离过程以棉片保护硬膜以及神经根。用磨钻经椎弓根钻入椎体，建立允许髓核钳进出的工作道；尽可能在壳内咬除多的松质骨，然后切除椎弓根及椎体外侧壁，同时切除该椎体相邻的上下椎间盘以及软骨终板，保留椎体后壁的薄骨壳以保护脊髓。直视下保护脊髓和神经根，使用特制的反向刮匙去除椎体后壁骨壳。安装凸侧钉-棒系统，取除凹侧棒，同上操作截骨，使该部位的脊髓完全悬空，完成全椎体截骨。再次安装凹侧棒，通过

双侧钉-棒系统交替调整逐渐闭合截骨处。矫形过程中以凸侧加压为主，凹侧有限撑开，交替调整两侧钉-棒系统，逐步矫正畸形，以免脊髓过度牵拉。最后行截骨区植骨融合。

术后平卧，翻身时严格轴向转动躯干，术后 24 h 内密切观察患儿下肢运动与感觉功能情况。术后 72 h 内拔除引流管，如遇脑脊液漏则需延长拔管时间。2~3 d 开始支具保护逐步坐立、下床活动。支具佩戴一般持续 6 个月。

#### 1.4 评价指标

记录临床资料，包括手术时间、术中出血量、术中透视次数、术后并发症发生情况、随访过程的患者状况及不良事件。术后行三维 CT 扫描，依据 Gertzbein-Robbins 分类标准椎弓钉位置分为 5 级<sup>[12]</sup>，0 级没有皮质侵犯；1 级为 0~2 mm 皮质侵犯；2 级为 2~4 mm 皮质侵犯；3 级为 >4 mm 皮质突破；准确率计算

公式为： $[(0 \text{ 级数目} + 1 \text{ 级数目}) / \text{组内总置钉数目}] \times 100\%$ 。两组患者均行脊柱全正侧位 X 线片观察，应用 Surgimap 软件测定两组患者术前、术后即刻及术后 1 年随访时冠状面主弯 Cobb 角、矢状面后凸 Cobb 角、C<sub>7</sub> 垂线-骶中线偏移 [C<sub>7</sub> vertebra plumb line (C<sub>7</sub>PL)-central sacral vertical line (CSVL), C<sub>7</sub>PL-CSVL]、矢状面垂线偏移 (sagittal vertical axis, SVA)。计算侧弯校正率，计算公式为： $[(\text{术前主弯 Cobb 角} - \text{术后主弯 Cobb 角}) / \text{术前主弯 Cobb 角}] \times 100\%$ 。

#### 1.5 统计学方法

采用 SPSS 22.0 软件对数据进行统计分析。计量资料符合正态分布时，以  $\bar{x} \pm s$  表示，两组均值差异采用独立样本 *t* 检验，组内不同时间点间采用单因素方差分析，两两比较采用 *LSD* 法；资料不符合正态分布时，采用秩和检验。计数资料采用  $\chi^2$  检验或 Fisher 精确检验。*P* < 0.05 为差异有统计学意义。

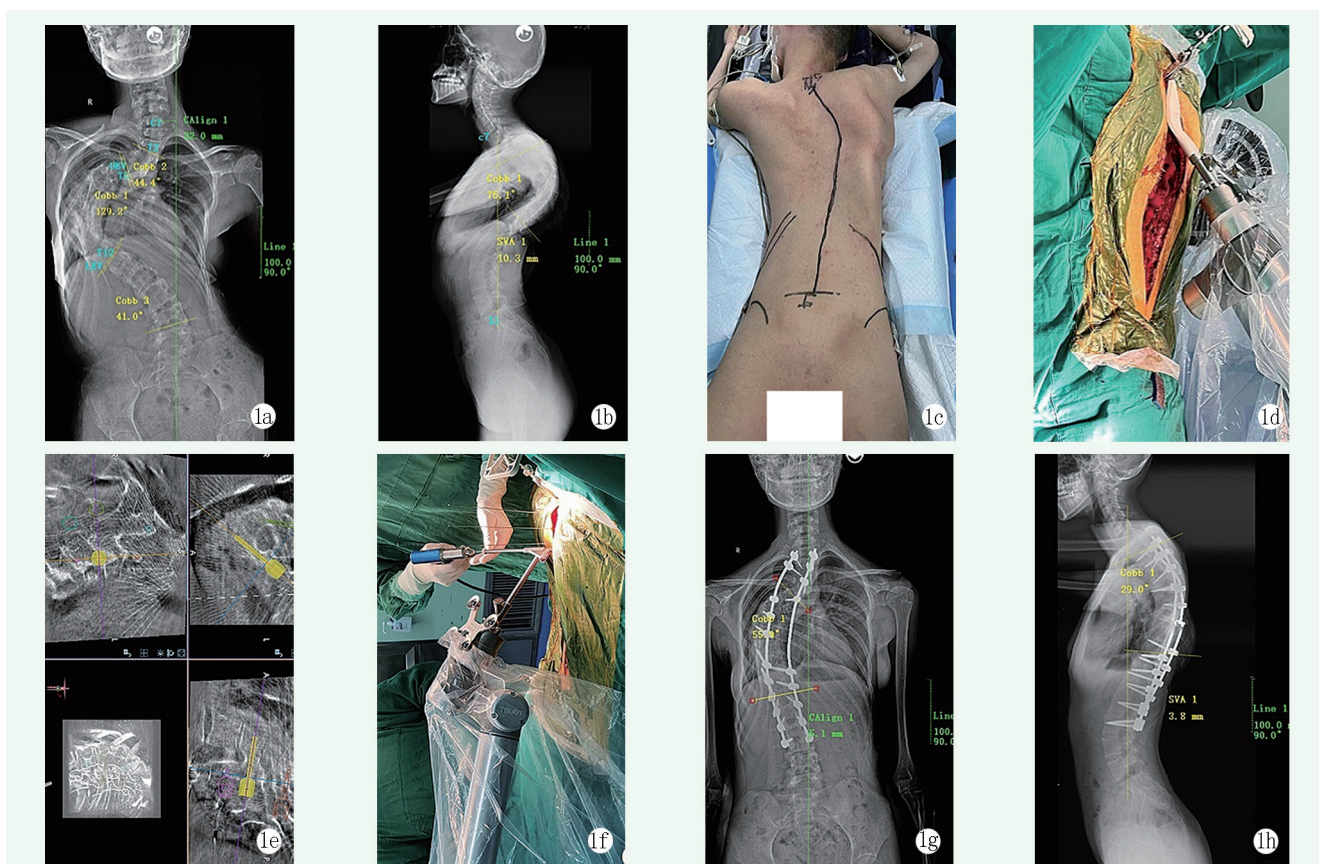


图 1. 患者女性，14 岁。1a, 1b: 术前正侧位 X 线片显示重度的侧后凸畸形，冠状面主弯 Cobb 角为 129.2°，C<sub>7</sub>PL-CSVL 为 32.0 mm，矢状面后凸 Cobb 角为 75.1°，SVA 为 10.3 mm；1c: 体位与切口标记；1d: 机器人系统工作空间的自动配准；1e: 在机器人工作站中进行规划置钉；1f: 术中即时三维导航引导下置钉；1g, 1h: 术后正侧位 X 线片显示冠状面主弯 Cobb 角矫正至 55.9°，C<sub>7</sub>PL-CSVL 矫正至 5.1 mm，矢状面后凸 Cobb 角矫正至 29.0°，SVA 矫正至 3.8 mm。

Figure 1. A 14-year-old female. 1a, 1b: Preoperative anteroposterior (AP) and lateral radiographs showed severe kyphosis, with coronal main curvature Cobb angle of 129.2°, C<sub>7</sub>PL-CSVL of 32.0 mm, sagittal kyphosis Cobb Angle of 75.1° and SVA of 10.3 mm; 1c: Position and incision marked; 1d: Automatic registration of robot system workspace; 1e: Planning of screw placement in the robot workstation; 1f: Intraoperative real-time 3D navigation guided screw placement; 1g, 1h: Postoperative AP and lateral X-rays showed that coronal main curvature Cobb angle was corrected to 55.9°, C<sub>7</sub>PL-CSVL to 5.1 mm, sagittal kyphotic Cobb angle to 29.0° and SVA to 3.8 mm.

## 2 结果

### 2.1 临床结果

两组患者均顺利手术，26 例重度 AIS 患者共切除 28 个椎体，其中单椎体 24 例，双椎体 2 例；切除椎体最高为 T<sub>7</sub>，最低为 T<sub>12</sub>。机器人组共置入 242 枚螺钉，徒手组置入 311 枚。术中两组患者均未发生脊髓损伤、死亡等严重并发症。两组临床资料见表 1。虽然机器人组手术时间明显长于徒手组 ( $P < 0.05$ )，但机器人组术中透视次数明显少于徒手组 ( $P < 0.05$ )，两组术中出血量差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。

两组患者均获随访至少 12 个月，术后患者躯干平衡显著改善，身高和坐高显著增加，生活与运动能力改善。随访过程中，两组患者均未出畸形矫正明显丢失，均无手术翻修。

### 2.2 影像评估

两组影像学资料见表 2，机器人组置钉准确率显著高于徒手组 ( $P < 0.05$ )。与术前相比，术后两组冠状

面主弯 Cobb 角、矢状面后凸 Cobb 角、C<sub>7</sub>PL-CSVL、SVA 均明显减少 ( $P < 0.05$ )；与术后即刻相比，末次随访时主弯 Cobb 角、矢状面后凸 Cobb 角、C<sub>7</sub>PL-CSVL、SVA 均无显著改变 ( $P > 0.05$ )。相应时间点，两组间主弯 Cobb 角、矢状面后凸 Cobb 角、C<sub>7</sub>PL-CSVL、SVA 的差异均无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。

指标	机器人组 (n=11)	徒手组 (n=15)	P 值
年龄 (岁, $\bar{x} \pm s$ )	14.6±0.9	14.5±0.9	0.780
性别 (例,男/女)	5/10	3/8	ns
手术时间 (min, $\bar{x} \pm s$ )	760.3±43.8	637.3±37.9	<0.001
术中出血量 (ml, $\bar{x} \pm s$ )	1 170.9±138.8	1 088±156.8	0.175
术中透视次数 (次, $\bar{x} \pm s$ )	10.2±1.7	18.8±1.5	<0.001

机器人组与徒手组冠状面主弯 Cobb 角平均矫正率的差异无统计学意义 [(68.0±4.6)% vs (69.0±4.7)%， $P=0.593$ ]。机器人组与徒手组矢状面后凸 Cobb 角矫正率的差异无统计学意义 [(38.6±6.3)% vs (38.4±7.6)%， $P=0.944$ ]。

指标	时间点	机器人组 (n=11)	徒手组 (n=15)	P 值
置钉准确率 (%)		95.1±2.1	85.6±3.3	<0.001
冠状面主弯 Cobb 角 (°)	术前	105.3±13.1	103.5±9.2	0.684
	术后即刻	36.6±11.7	32.8±8.8	0.353
	末次随访	37.3±11.9	34.9±9.4	0.571
	P 值	<0.001	<0.001	
矢状面后凸 Cobb 角 (°)	术前	60.1±9.2	60.0±9.5	0.979
	术后即刻	22.2±5.8	20.9±4.1	0.509
	末次随访	22.4±5.7	21.6±3.5	0.662
	P 值	<0.001	<0.001	
C <sub>7</sub> PL-CSVL (mm)	术前	29.1±9.4	29.9±9.1	0.829
	术后即刻	9.7±3.5	10.0±4.4	0.854
	末次随访	9.6±3.4	10.1±4.4	0.756
	P 值	<0.001	<0.001	
SVA (mm)	术前	22.4±13.2	20.9±11.8	0.762
	术后即刻	10.9±9.1	10.4±9.8	0.896
	末次随访	10.9±9.2	10.4±9.9	0.897
	P 值	<0.001	<0.001	

## 3 讨论

重度 AIS 是脊柱三维复杂畸形，不仅有脊柱局部

畸形，往往存在整体失衡和脊柱柔韧性下降的情况，外科医师既要注重局部畸形的纠正，也需要重建整体平衡<sup>[12]</sup>。由于椎弓根螺钉具备强大的三柱矫正力，在近几十年来广泛应用于 AIS 矫正手术。然而，许多

研究者报道了椎弓根螺钉位置错误的发生率较高,可能导致严重的神经血管并发症。作为一种三维(3D)脊柱畸形, AIS 表现出椎弓根相对狭窄、椎体旋转异常等特点,这可能是由于高错位率引起神经血管并发症的原因,椎弓根螺钉成功、安全的置入是脊柱侧弯矫正成功的关键<sup>[13]</sup>。Sarwani 等<sup>[14]</sup>研究发现 31.9% 的胸椎椎弓根发育异常,凹侧椎弓根异常率 10.0%,凸侧为 2.9%。Brink 等<sup>[15]</sup>研究也表明,重度脊柱侧弯患者顶椎区域椎体和椎弓根极度旋转、弯曲,其凹侧椎弓根发育不良、凹陷变细变长使得椎弓根螺钉置入具有挑战性。为了减少椎弓根螺钉异位的发生率,3D 模型、导航系统等辅助椎弓根螺钉置入技术已广泛应用于脊柱外科。虽然 3D 模型可以提供更全面的复杂结构,但外科医生不能在术中获得即时的椎弓根信息来调整置入螺钉的方向和深度<sup>[16]</sup>。此外,有报道称导航系统置入螺钉的准确性仅为 85%<sup>[17]</sup>。更重要的是,这些技术的有限改进可能不会超过复杂的校准程序。因此,应探索更有效、更实用的螺钉辅助技术并应用于手术中,以减少 AIS 矫形术中螺钉误置的发生。

机器人辅助手术技术作为脊柱外科的新辅助方式,自其引入临床实践以来,已成为提高螺钉置入准确性、降低潜在神经并发症和术中辐射风险的最有力方法之一<sup>[18]</sup>。在 Khan 等<sup>[19]</sup>的研究中,患者被分为两组,以比较机器人技术与 3D CT 导航在退变性椎间盘疾病中的应用。两组之间在置钉精确性方面没有显著差异,但与 3D CT 导航相比,机器人技术可以减少辐射剂量及每枚螺钉的置入时间和患者的住院时间。此外,许多研究也证明了机器人辅助技术在普通脊柱手术中的优势。目前很少研究比较机器人辅助重度 AIS 矫形术与传统术式的临床和影像学结果,这对脊柱外科医师来说可能是一个巨大的挑战。

本研究旨在探讨机器人系统在重度 AIS 手术中的有效性,比较机器人与常规透视方式的螺钉置入准确性,并探讨其影像学 and 临床参数。本研究中,机器人组和徒手组在基线信息、术前影像学参数和螺钉数量方面没有差异,这表明两组的研究人群来自相同的 AIS 队列,并使用相同的矫形手术策略。但机器人组的手术时间显著大于徒手组,这与 Ghasem 等<sup>[20]</sup>、Fan 等<sup>[21]</sup>的研究结果一致。这可能与机器人的操作相对复杂有关,如安装工作面板、与术前 CT 扫描相匹配等。然而,Hyun 等<sup>[22]</sup>报道,他们的前 15 例机器人辅助病例与后 15 例相比,每枚螺钉置入时间减少了 1.5 min。本团队认为,由于学习曲线的关系,

随着病例数和经验的增加,手术时间、术中出血量和输血量可能会减少。

在椎弓根螺钉置入的准确性方面,机器人组置钉准确率显著高于徒手组,这表明机器人辅助技术在影像学螺钉置入精度方面明显优于传统透视,结果与 Hyun 等<sup>[22]</sup>的研究结果相似。此外,两组 AIS 患者术后 Cobb 角、C7-PL-CSVL、SVA 均得到显著纠正,本研究 26 例患者,术前平均侧凸 104.3°、后凸 60°,冠状面矫正率为 65.8%,矢状面矫正率为 64.1%。本研究获得的矫正率与 Suk 等<sup>[23]</sup>、Lenke 等<sup>[24]</sup>的报道相似,两组术后这些参数无差异。这些发现表明,在重度 AIS 手术中,机器人辅助和透视辅助技术都可以达到有效的影像校正和临床结果。

本研究有一定的局限性。首先,所有 26 例重度 AIS 患者均来自单一中心;此外,由于缺乏更长期随访数据,以及本研究患者样本量较小,限制了进一步影像学的比较。未来需多中心、大样本的研究探索机器人辅助技术在矫治重度 AIS 的准确性和安全性。

#### 参考文献

- [1] Campbell DH, McDonald D, Araghi K, et al. The clinical impact of image guidance and robotics in spinal surgery: a review of safety, accuracy, efficiency, and complication reduction [J]. *Int J Spine Surg*, 2021, 15 (s2): 8136. DOI: 10.14444/8136.
- [2] Pan Y, Lü GH, Kuang L, et al. Accuracy of thoracic pedicle screw placement in adolescent patients with severe spinal deformities: a retrospective study comparing drill guide template with free-hand technique [J]. *Eur Spine J*, 2018, 27 (2): 319-326. DOI: 10.1007/s00586-017-5410-2.
- [3] 陈小明, 张宏其. 特发性脊柱侧弯手术治疗对肺功能影响的研究进展 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2008, 16 (19): 1483-1483. Chen XM, Zhang HQ. Research progress on the impact of surgical treatment for idiopathic scoliosis on lung function [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2008, 16 (19): 1483-1483.
- [4] Wang H, Guo J, Wang S, et al. Instrumentation failure after posterior vertebral column resection in adult spinal deformity [J]. *Spine*, 2017, 42 (7): 471-478. DOI: 10.1097/BRS.0000000000001844.
- [5] Suk SI, Chung ER, Kim JH, et al. Posterior vertebral column resection for severe rigid scoliosis [J]. *Spine*, 2005, 30 (14): 1682-1687. DOI: 10.1097/00007632-200211010-00012.
- [6] Guzek RH, Mitchell SL, Krakow AR, et al. Morphometric analysis of the proximal thoracic pedicles in Lenke II and IV adolescent idiopathic scoliosis: an evaluation of the feasibility for pedicle screw insertion [J]. *Spine Deform*, 2021, 9 (6): 1541-1548. DOI: 10.1007/s43390-021-00377-5.
- [7] González-Vargas PM, Calero Félix L, et al. Evaluation of the implantation of transpedicular screws in spinal instrumentation with free-hand technique and navigation-assisted with intraoperative

- computed to mography: an analytical–positional study [J]. *Neurocirugia (Astur: Engl Ed)*, 2022, 33 (2): 71–81. DOI: 10.1016/j.neucir.2021.01.001.
- [8] Vahdat S, Darainy M, Thiel A, et al. A single session of robot–controlled proprioceptive training modulates functional connectivity of sensory motor networks and improves reaching accuracy in chronic stroke [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2019, 33 (1): 70–81. DOI: 10.1177/1545968318818902.
- [9] Han JH, Lee JH, Hwang DW, et al. Robot resection of a choledochal cyst with Roux–En–Y hepaticojejunostomy in adults: initial experiences with 22 cases and a comparison with laparoscopic approaches [J]. *Ann Hepatobiliary Pancreat Sur*, 2018, 22 (4): 359–366. DOI: 10.14701/ahbps.2018.22.4.359.
- [10] Van't Hullenaar CDP, Bos P, Broeders I. Ergonomic assessment of the first assistant during robot–assisted surgery [J]. *J Robot Surg*, 2019, 13 (2): 283–288. DOI: 10.1007/s11701–018–0851–0.
- [11] Khan A, Meyers JE, Siasios I, et al. Next–generation robotic spine surgery: first report on feasibility, safety, and learning curve [J]. *Oper Neurosurg*, 2019, 17 (1): 61–69. DOI: 10.1093/ons/opy280.
- [12] Sato T, Yonezawa I, Akimoto T, et al. Novel hump measurement system with a 3D camera for early diagnosis of patients with adolescent idiopathic scoliosis: A study of accuracy and reliability [J]. *Cureus*, 2020, 12 (5): e8229. DOI: 10.7759/cureus.8229.
- [13] Hiroki O, Shigeto E, Jun T, et al. Pedicle perforation while inserting screws using O–Arm navigation during surgery for adolescent idiopathic scoliosis: risk factors and effect of insertion order [J]. *Spine*, 2018, 43 (24): E1463–E1468. DOI: 10.1097/BRS.0000000000002737.
- [14] Sarwahi V, Sugarman EP, Wollowick AL, et al. Prevalence distribution and surgical relevance of abnormal pedicles in spines with adolescent idiopathic scoliosis vs no deformity: a CT–based study [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2014, 96 (11): e92. DOI: 10.2106/JBJS.M.01058.
- [15] Brink RC, Schlösser TPC, Colo D, et al. Asymmetry of the vertebral body and pedicles in the true transverse plane in adolescent idiopathic scoliosis: a CT–based study [J]. *Spine Deform*, 2017, 5 (1): 37–45. DOI: 10.1016/j.jspd.2016.08.006.
- [16] 郑杰, 何敏娟, 王大伟, 等. 退变性脊柱侧弯 3D 打印个性化减压融合 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2021, 29 (15): 1364–1368. DOI: 10.3977/j.issn.1005–8478.2021.15.05.
- Zheng J, He MJ, Wang DW, et al. 3D–print assisted personalized decompression and instrumented fusion for degenerative scoliosis [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2021, 29 (15): 1364–1368. DOI: 10.3977/j.issn.1005–8478.2021.15.05.
- [17] Elmi–Terander A, Skulason H, Söderman M, et al. Surgical navigation technology based on augmented reality and integrated 3D intraoperative imaging: a spine cadaveric feasibility and accuracy study [J]. *Spine*, 2016, 41 (21): E1303–e1311. DOI: 10.1097/BRS.0000000000001830.
- [18] 林书, 胡珏, 万仑, 等. 机器人与透视辅助经皮椎弓根螺钉置入的比较 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2020, 28 (20): 1830–1834. DOI: 10.3977/j.issn.1005–8478.2020.20.02.
- Lin S, Hu G, Wan L, et al. Robotic–guided and fluoroscopy–guided percutaneous pedicle screw placement for thoracolumbar fractures [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2020, 28 (20): 1830–1834. DOI: 10.3977/j.issn.1005–8478.2020.20.02.
- [19] Khan A, Meyers JE, Yavorek S, et al. Comparing next–generation robotic technology with 3–dimensional computed tomography navigation technology for the insertion of posterior pedicle screws [J]. *World Neurosurg*, 2019, 123: e474–e481. DOI: 10.1016/j.wneu.2018.11.190.
- [20] Ghasem A, Sharma A, Greif DN, et al. The arrival of robotics in spine surgery: a review of the literature [J]. *Spine*, 2018, 43 (23): 1670–1677. DOI: 10.1097/BRS.0000000000002695.
- [21] Fan Y, Du J, Zhang J, et al. Comparison of accuracy of pedicle screw insertion among 4 guided technologies in spine surgery [J]. *Med Sci Monit*, 2017, 23: 5960–5968. DOI: 10.12659/msm.905713.
- [22] Hyun SJ, Kim KJ, Jahng TA, et al. Minimally invasive robotic versus open fluoroscopic–guided spinal instrumented fusions: a randomized controlled trial [J]. *Spine*, 2017, 42 (6): 353–358. DOI: 10.1097/BRS.0000000000001778.
- [23] Suk SI, Kim JH, Kim WJ, et al. Posterior vertebral column resection for severe spinal deformities [J]. *Spine*, 2002, 27 (21): 2374–2382. DOI: 10.1097/00007632–200211010–00012.
- [24] Lenke LG, Sides BA, Koester LA, et al. Vertebral column resection for the treatment of severe spinal deformity [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2010, 468 (3): 687–699. DOI: 10.1007/s11999–009–1037–x.

(收稿:2023–11–27 修回:2023–12–26)

(同行评议专家: 庄岩, 曲宏懿, 李天友)

(本文编辑: 闫承杰)