

· 智慧医疗 · doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2020.22.032

网络首发 [https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1097.R.20200930.1822.008.html\(2020-10-07\)](https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1097.R.20200930.1822.008.html(2020-10-07))

## 机器人辅助下微创与传统开放经椎间孔腰椎椎体间融合治疗腰椎退行性疾病的疗效比较<sup>\*</sup>

林 书, 胡 虹<sup>△</sup>, 万 仑, 唐六一, 王 跃, 俞 阳, 张 伟  
(四川省医学科学院·四川省人民医院骨科, 成都 610072)

**[摘要]** **目的** 比较机器人辅助下微创与传统开放经椎间孔腰椎椎体间融合(TLIF)治疗腰椎退行性疾病的短期疗效。**方法** 回顾性分析该院 2018 年 1 月至 2019 年 1 月收治的 56 例腰椎退行性疾病患者资料, 根据手术方式分为微创组(26 例)和对照组(30 例)。微创组行机器人辅助下经皮微创 TLIF 治疗, 对照组给予传统开放 TLIF 治疗。比较两组患者手术时间、术中出血量、术后引流量、引流时间、术后卧床时间及住院时间, 手术透视剂量、透视时间、椎弓根螺钉置入精度、内倾角及螺钉与关节面的距离; 以及术前、术后 3 d 和术后 1、6、12 个月患者腰痛视觉模拟评分(VAS)、Oswestry 功能障碍指数(ODI)评分及相对椎间隙高度。**结果** 患者平均随访时间为(12.7±1.3)个月。微创组术中出血量、术后引流量、引流时间、术后卧床时间及住院时间均明显小于对照组( $P<0.05$ ), 手术时间明显长于对照组( $P<0.05$ )。两组置钉精度分级无明显差异( $P>0.05$ ), 微创组置钉的内倾角、螺钉与关节面的距离明显大于对照组( $P<0.05$ )。两组手术前后相对椎间隙高度组间无明显差异( $P>0.05$ ), 术后 3 d 微创组 VAS 和 ODI 评分明显低于对照组( $P<0.05$ ), 术后其余各时间点 VAS 和 ODI 评分组间无明显差异( $P>0.05$ )。**结论** 机器人辅助微创手术治疗腰椎退变疾病可减少肌肉和椎旁组织的损伤, 减少术中出血与术后疼痛, 达到快速康复的目标。

**[关键词]** 腰椎退行性疾病; 机器人; 微创外科手术; 术中出血量; 住院时间

**[中图法分类号]** R681.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-8348(2020)22-3829-06

## The comparison of short-term effects of robot-guided minimally invasive and traditional open transforaminal lumbar interbody fusion in the treatment of lumbar degenerative diseases<sup>\*</sup>

LIN Shu, HU Jiang, WAN Lun, TANG Liuyi, WANG Yue, YU Yang, ZHANG Wei  
(Department of Orthopedics, Sichuan Academy of Medical Science/People's Hospital of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610072, China)

**[Abstract]** **Objective** To compare the short-term effects of robot-guided minimally invasive and traditional open transforaminal lumbar interbody fusion (TLIF) in the treatment of lumbar degenerative diseases. **Methods** The data of 56 patients with lumbar degenerative diseases admitted to this hospital from January 2018 to January 2019 were retrospectively analysed. According to the surgical method, the patients were divided into the minimally invasive group (n=26) and the control group (n=26). The minimally invasive group underwent robot-guided minimally invasive percutaneous TLIF treatment, and the control group received traditional open TLIF treatment. The operation time, intraoperative bleeding volume, postoperative drainage volume, drainage time, postoperative bedrest time and length of stay, surgical fluoroscopy dose, fluoroscopy time, pedicle screw insertion accuracy, convergence angle and the distance between screw and articular surface were compared between the two groups. The visual analogue scale (VAS) score, Oswestry dysfunction index (ODI) score and relative intervertebral space height before operation, at 3 days, 1 month, 6 months, 12 months after operation were collected and compared between the two groups. **Results** The average follow-up time of patients was (12.7±1.3) months. The intraoperative bleeding volume, postoperative drainage volume, drainage time, postoperative bedrest time and length of stay in the minimally invasive group were significantly lower

<sup>\*</sup> 基金项目: 四川省科技厅科技支撑项目(2019YFS0268)。 作者简介: 林书(1987—), 主治医师, 博士, 主要从事脊柱外科研究。 <sup>△</sup> 通信作者, E-mail: hujiang8711@163.com。

than those in the control group ( $P < 0.05$ ). However, the operation time in the minimally invasive group was significantly longer than that in the control group ( $P < 0.05$ ). There was no significant statistical difference in the screw placement accuracy between the two groups ( $P > 0.05$ ). The convergence angle and the distance between the screw and the articular surface in the minimally invasive group were significantly larger than those in the control group ( $P < 0.05$ ). There was no significant difference in the preoperative and postoperative relative intervertebral space height between the two groups ( $P > 0.05$ ). The VAS score and ODI score at 3 d after operation in the minimally invasive group were significantly lower than those in the control group ( $P < 0.05$ ). There was no significant difference in the VAS score and ODI score between the two groups at other time points ( $P > 0.05$ ). **Conclusion** Robot-guided minimally invasive surgery for lumbar degenerative diseases can reduce muscles and paravertebral tissues damage, reduce intraoperative bleeding and postoperative pain, and achieve the goal of rapid rehabilitation.

**[Key words]** lumbar degenerative diseases; robotics; minimally invasive surgical procedures; intraoperative bleeding volume; length of stay

腰椎退行性疾病是引起老年人腰腿痛的重要原因之一,由腰椎自然老化引起,主要包括腰椎管狭窄、腰椎不稳、腰椎滑脱症、侧弯畸形等问题,保守治疗效果不佳时往往需行手术治疗。传统开放经椎间孔腰椎椎体间融合(transforaminal lumbar interbody fusion, TLIF)是治疗腰椎退行性疾病的经典术式,但在术中需要广泛剥离、牵拉肌肉,影响患者术后康复,存在远期问题,如腰部疼痛。近年来,脊柱微创理念逐渐应用于腰椎各类手术中,本院自 2017 年 9 月开始使用我国自主研发的“天玑”第 3 代骨科机器人辅助脊柱内固定手术。本研究选取 2018 年 1 月至 2019 年 1 月本院收治的应用机器人辅助下微创与传统开放手术治疗的 56 例无神经损伤症状的胸腰椎骨折患者,比较机器人辅助下微创与传统 TLIF 治疗腰椎退行性疾病的疗效。

## 1 资料与方法

### 1.1 一般资料

收集本院 2018 年 1 月至 2019 年 1 月腰椎退行性疾病患者的病例资料。纳入标准:(1)单一节段腰椎退行性变;(2)影像学资料与症状符合,正规保守治疗 3 个月效果不佳,融合指针明确。排除标准:(1)不符合纳入标准者;(2)Ⅱ度及以上腰椎滑脱者;(3)严重腰椎侧弯畸形者;(4)重度骨质疏松者;(5)资料不全或难以配合诊治者。研究方案经本院医学伦理委员会批准(批号:2019 年第 298 号),所有受试者均知情同意。共纳入患者 56 例,根据手术方式将患者分为微创组与对照组。微创组 26 例,男 15 例,女 11 例;年龄 42.2~73.2 岁,平均(59.2±8.6)岁;融合节段:第 3~4 腰椎(L<sub>3~4</sub>)5 例,第 4~5 腰椎(L<sub>4~5</sub>)11 例,第 5 腰椎(L<sub>5</sub>)~第 1 骶椎(S<sub>1</sub>)10 例。对照组 30 例,男 20 例,女 10 例;年龄 39.3~74.9 岁,平均(58.3±9.5)岁;融合节段:L<sub>3~4</sub> 6 例,L<sub>4~5</sub> 15 例,L<sub>5</sub>~S<sub>1</sub> 9 例。两组患者性别、年龄、融合节段、术前腰痛视觉模拟评

分(VAS)、Oswestry 功能障碍指数(ODI)评分、固定节段高度等一般资料比较,差异无统计学意义( $P > 0.05$ ),具有可比性。

### 1.2 材料与仪器

本研究采用我国自主研发的“天玑”第 3 代骨科机器人辅助手术,该系统由机械臂系统、光学跟踪系统、手术规划系统及导航系统等构成。对照组内固定材料均采用常州鼎健医疗器械有限公司生产的 VALEN 矫形脊柱内固定系统。微创组 20 例采用常州鼎健医疗器械有限公司生产的 LontC 矫形脊柱内固定系统(国产),6 例采用美敦力公司的提拉复位脊柱内固定系统[CD HORIZON SEXTANT II 系统(进口)]。内固定材料材质均为 Ti-6Al-4V 钛合金材料,包括空心椎弓根螺钉、预弯钛棒及螺塞三部分组成,具有强度高、组织相容性好等有点。椎间融合器均采用聚醚醚酮(poly-ether-ether-ketone, Peek)材料,由美敦力公司生产。

### 1.3 方法

先予以气管插管,全身麻醉后,患者取俯卧位,采用脊柱外科专用手术床,常规消毒铺巾。

#### 1.3.1 对照组手术方法

病变节段后正中切口,切开皮肤、皮下、深筋膜等,以电刀沿着棘突、椎板、关节突向两侧剥离,推移并显露关节突,于左右椎弓根开骨道,分别旋入椎弓根螺钉。切除椎板,凿除下关节突,用枪钳沿上关节突内侧减压,剥离黄韧带和硬膜囊,处理并切除椎间隙间盘组织,检查神经根完全减压,椎间隙前方及 Cage 内植入碎骨粒,置 1 枚 Cage 行椎体间植骨融合。安装连接杆,紧固各连接系统(需要滑脱复位者,放入 Cage 前予以撑开复位操作)。横突间予以自体骨及异体骨混合植骨,冲洗切口,止血,检查硬膜囊周围无骨粒,神经根松解,安置引流管,逐层缝合切口。

#### 1.3.2 微创组手术方法

在需置钉椎体的上位椎体棘突处作一长约 1 cm 的切口,切开筋膜,显露棘突,在棘突上安装示踪器。准备机器人系统,安装定位标尺,三维“C”型臂扫描需固定的节段,将数据传输至机器人工作站,进行定位规划,规划完毕后下达指令,机械臂运行至指定位置,在机械臂定位下作 3 cm 的小切口,钝性分离,使用电钻置入导针,透视确认位置无误后拧入椎弓根螺钉,“C”型臂 X 线机透视确定椎弓根螺钉位置良好。取棘突旁病变侧作一长 3~4 cm 切口,切开皮肤、皮下及腰背筋膜。钝性分离最长肌和多裂肌的肌间隙,置入微创通道,去除下关节突,用枪钳沿上关节突内侧减压,剥离黄韧带和硬膜囊,松解神经根,显露椎间隙后,处理椎间隙。椎间隙前方及 Cage 内植入碎骨粒,置 1 枚 Cage 行椎体间植骨融合。调整微创通道方向,逐步咬除部分棘突基底部,潜行切除对侧椎板腹侧部分、黄韧带及增生骨赘,实现对侧充分减压。安装连接杆,紧固各连接系统(需要滑脱复位者,放入 Cage 前予以撑开复位操作)。锁紧螺钉并固定,切口内各置入负压引流管 1 枚,逐层缝合。

1.3.3 术后处理

术后根据患者病情给予抗菌药物或其他药物 48~72 h,常规术后镇痛、预防皮肤褥疮、卧床功能锻炼等治疗。当引流小于 50 mL 时拔除引流管并复查腰椎正、侧位片。拔管后患者佩戴支具下地活动。

1.3.4 随访评价指标

(1)两组患者手术时间、术中出血量、术后引流量、引流时间、术后卧床时间及住院时间;(2)两组患者透视剂量、透视时间、椎弓根螺钉置入精度、内倾角及螺钉与关节面的距离;(3)术前、术后 3 d 及术后 1、6、12 个月各个时间点患者的腰痛 VAS、ODI 评分,通过侧位 X 线片测量相对椎间隙高度(相对椎间隙高度=椎间隙高度/上位椎体高度×100%)。椎弓根螺钉置入的精度根据 GERTZBEIN 等<sup>[1]</sup>的分类标准,评估在外侧、内侧、头侧和尾侧 4 个方向上椎弓根螺钉是否存在穿透骨皮质的情况(A 类:无皮质侵及;B 类:皮质穿透小于 2 mm;C 类:皮质穿透 2~<4 mm;D 类:皮质穿透 4~<6 mm;E 类:皮质穿透大于或等于 6 mm)。

1.4 统计学处理

采用 SPSS22.0 统计软件进行统计分析。计量资料以  $\bar{x} \pm s$  表示,组内术后各时间点与术前比较采用配对 *t* 检验,两组间比较采用独立样本 *t* 检验;计数资料以例数或百分比表示,组间比较采用  $\chi^2$  检验;检验水准  $\alpha=0.05$ ,以  $P<0.05$  为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组手术一般情况比较

微创组术中出血量、术后引流量、引流时间、术后卧床时间及住院时间均明显小于对照组( $P<0.05$ ),手术时间明显长于对照组( $P<0.05$ ),见表 1。

表 1 两组手术一般情况比较( $\bar{x} \pm s$ )

组别	<i>n</i>	手术时间(min)	术中出血量(mL)	术后引流量(mL)	引流时间(d)	术后卧床时间(d)	住院时间(d)
微创组	26	192±36	157±23	243±35	2.4±0.6	3.2±0.9	4.5±1.3
对照组	30	117±34	275±68	573±84	4.3±0.9	5.1±1.2	7.2±1.9
<i>t</i>		7.766	-5.087	-7.235	-7.900	-7.512	8.213
<i>P</i>		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

2.2 两组手术相关指标比较

两组置钉精度均无 D、E 类,两组置钉精度分级比较,差异无统计学意义( $P>0.05$ )。微创组置钉的内倾角、螺钉与关节面的距离、透视剂量明显大于对照组( $P<0.05$ ),透视时间明显较对照组长( $P<0.05$ ),见表 2。

2.3 两组手术前后腰痛 VAS、ODI 评分及相对椎间隙高度比较

患者平均随访时间为(12.7±1.3)个月。两组术后各时间点腰痛 VAS、ODI 评分均较术前降低,相对椎间隙高度均较术前增大,差异有统计学意义( $P<0.05$ )。术后 3 d 微创组 VAS 和 ODI 评分均明显低于对照组,差异有统计学意义( $P<0.05$ ),术后其余各时间点各指标两组间比较,差异均无统计学意义( $P>0.05$ ),见表 3~5。

表 2 两组手术相关指标比较

观察指标	微创组 ( <i>n</i> =26)	对照组 ( <i>n</i> =30)	$\chi^2/t$	<i>P</i>
置钉精度分级(枚)			0.048	0.976
A	96	119		
B	5	7		
C	3	4		
内倾角( $\bar{x} \pm s, ^\circ$ )				
右	19.7±3.2	17.6±2.8	2.237	0.031
左	20.5±3.7	18.3±2.4	2.765	0.010
螺钉与关节面的距离( $\bar{x} \pm s, \text{mm}$ )				
右	3.05±0.8	1.95±0.7	4.213	<0.001
左	2.93±0.9	1.74±0.5	6.531	<0.001
透视剂量( $\bar{x} \pm s, \text{cGycm}^2$ )	109.2±24.4	23.5±5.3	16.972	<0.001
透视时间( $\bar{x} \pm s, \text{s}$ )	65.2±18.9	11.3±3.2	14.231	<0.001

表 3 两组手术前后腰痛 VAS 比较( $\bar{x} \pm s$ , 分)

组别	n	术前	术后 3 d	术后 1 个月	术后 6 个月	术后 12 个月
微创组	26	3.2±0.9	2.1±0.3 <sup>a</sup>	1.5±0.7 <sup>a</sup>	0.6±0.1 <sup>a</sup>	0.5±0.2 <sup>a</sup>
对照组	30	3.7±0.6	2.6±1.2 <sup>a</sup>	1.3±0.5 <sup>a</sup>	0.7±0.4 <sup>a</sup>	0.6±0.1 <sup>a</sup>
t		-0.565	-4.120	0.813	0.534	-0.509
P		0.521	<0.001	0.321	0.532	0.591

<sup>a</sup>:  $P < 0.05$ , 与同组术前比较。

表 4 两组手术前后 ODI 评分比较( $\bar{x} \pm s$ , 分)

组别	n	术前	术后 3 d	术后 1 个月	术后 6 个月	术后 12 个月
微创组	26	61.9±15.2	17.2±3.1 <sup>a</sup>	8.8±2.2 <sup>a</sup>	8.5±3.1 <sup>a</sup>	7.2±2.2 <sup>a</sup>
对照组	30	62.6±13.7	26.2±4.3 <sup>a</sup>	9.1±2.1 <sup>a</sup>	9.3±2.5 <sup>a</sup>	8.3±1.7 <sup>a</sup>
t		-0.194	-2.657	-0.375	-0.358	-0.351
P		0.764	<0.001	0.596	0.667	0.576

<sup>a</sup>:  $P < 0.05$ , 与同组术前比较。

表 5 两组手术前后相对椎间隙高度比较( $\bar{x} \pm s$ , mm)

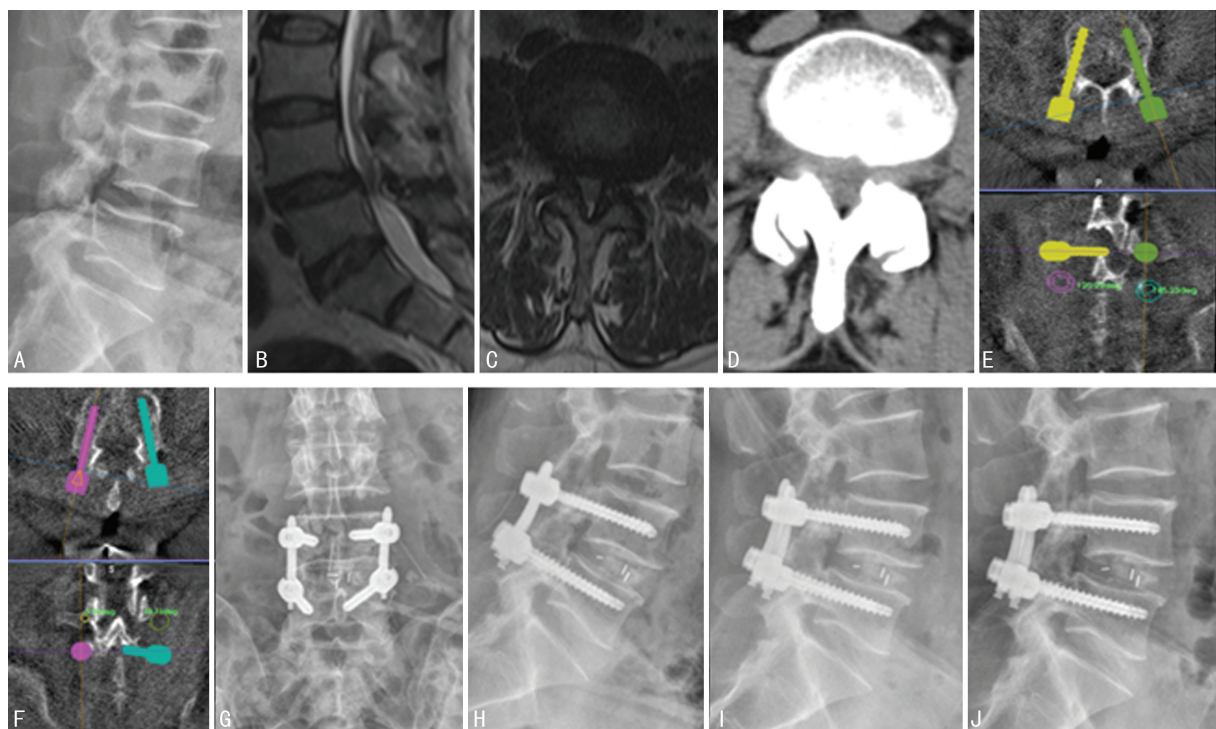
组别	n	术前	术后 3 d	术后 1 个月	术后 6 个月	术后 12 个月
微创组	26	30.6±7.0	39.5±5.5 <sup>a</sup>	38.9±6.2 <sup>a</sup>	39.4±7.9 <sup>a</sup>	39.6±5.6 <sup>a</sup>
对照组	30	31.2±5.6	40.2±4.4 <sup>a</sup>	41.0±5.5 <sup>a</sup>	41.1±7.5 <sup>a</sup>	41.2±6.9 <sup>a</sup>
t		-0.212	-0.357	-0.563	-0.365	-0.394
P		0.594	0.554	0.413	0.543	0.501

<sup>a</sup>:  $P < 0.05$ , 与同组术前比较。

## 2.4 典型病例

患者男, 53 岁, L<sub>4~5</sub> 椎管狭窄症伴不稳, 给予机

器人辅助下微创手术治疗, 手术前后影像学检查结果见图 1。



A: 术前侧位 X 线片; B, C: 术前磁共振成像(MRI); D: 术前 CT; E, F: 置钉规划; G: 术后 3 d 腰椎正位 X 线片; H: 术后 3 d 腰椎侧位 X 线片; I: 术后 6 个月腰椎侧位 X 线片; J: 术后 12 个月腰椎侧位 X 线片。

图 1 微创组典型病例

### 3 讨 论

腰椎退行性疾病是引起中老年患者腰腿痛的常见原因,保守治疗疗效不佳时常需要手术治疗。TLIF 术临床疗效良好,具有视野清晰、减压充分、固定可靠、融合效果好的特点,是经典腰椎融合术式。但术中广泛剥离腰椎棘突两侧肌肉,椎旁肌术后被硬瘢痕替代,存在术后功能恢复慢、远期腰背部疼痛等问题。微创内固定技术具有损伤小、恢复快的特点,解剖结构切除有限化,椎管减压有效化,被越来越多的医师所接受。微创内固定技术包括“C”型臂透视辅助下微创经皮置钉技术<sup>[2-3]</sup>、导航系统辅助技术<sup>[4-5]</sup>及骨科机器人辅助技术等<sup>[6-13]</sup>。

我国生产的“天玑”第 3 代骨科机器人是一种基于三维图像进行空间映射和路径规划的主动定位系统,具有人机协同运动的功能,可实现内固定物按预定的理想路径精确达到手术区,提高手术疗效。文献回顾发现,以色列 Mazor 机器人的椎弓根置钉准确率较高<sup>[6-7]</sup>。KERIC 等<sup>[6]</sup>对 66 例椎间隙感染的患者进行回顾性分析,根据 GERTZBEIN 等<sup>[1]</sup>的分类标准评分,发现机器人经皮螺钉置入 A 类螺钉比例为 90%,明显高于徒手置钉(73.5%)。MACKE 等<sup>[7]</sup>对 48 例青少年脊柱侧凸患者置入 622 枚螺钉,根据 GERTZBEIN 等<sup>[1]</sup>的分类标准评分,置入 A 和 B 类螺钉比例为 92.7%,C 类为 4.8%,D 类为 1.6%,E 类为 1.2%。LONJON 等<sup>[8]</sup>使用美国 Zimmer Biomet 公司生产的 ROSA 脊柱机器人对 10 例患者置入 40 枚螺钉,置钉准确率为 97.2%,而徒手置钉准确率为 92.0%。分析机器人辅助下置钉失败情况主要包括:(1)“C”型臂扫描时注册误差;(2)“C”型臂扫描采集后数据不足导致图像不够清晰;(3)机器人机械臂的延展定位时挤压到臀部或隆起的软组织;(4)钻入导针或克氏针的尖端关节坡面导致入针点滑动<sup>[6-13]</sup>。

KIM 等<sup>[14]</sup>研究指出,微创机器人辅助置钉更利于保护关节囊,可将定位的进针点偏外,内倾角度加大,具有更强的把持力。本研究中两组椎弓根置钉精度分级无明显差异,微创组内倾角及螺钉与关节面的距离明显大于对照组。微创组置钉的 B 类 5 枚和 C 类 3 枚均突破椎弓根外侧皮质,较安全。说明机器人在术中设计时保证置钉准确的情况下,能够有效地保护上位临近节段的关节囊,减少临近节段退变的可能。

相关研究发现,相比传统开放手术,机器人手术时间缩短,术中出血减少且止痛药物使用时间缩短,可加速患者术后康复<sup>[15-17]</sup>。本研究结果显示,微创组患者术中出血量、术后引流量、引流时间、术后卧床时间及住院时间明显小于对照组,术后 3 d 微创组患者 VAS 及 ODI 评分均明显低于对照组,说明机器人辅

助手术能明显减少肌肉广泛剥离及腰椎旁软组织损伤,减少创伤,维持脊柱后路结构的稳定性,减轻术后腰背痛,达到快速康复的目的。

HYUN 等<sup>[18]</sup>使用 Mazor 手术机器人发现,机器人组每颗螺钉的平均透视时间较传统对照组明显缩短(3.5 s vs. 13.3 s),与使用 Mazor 机器人的其他研究结果类似<sup>[19-20]</sup>,其透视剂量低的原因主要是 Mazor 机器人将术前 CT 导入系统,术中仅需要正位和斜位透视进行注册。但也有学者研究结果显示,Mazor 机器人辅助手术与传统手术的透视时间及透视剂量无明显差异<sup>[21-22]</sup>。本研究结果显示,微创组术中透视时间与透视剂量均明显高于对照组。分析主要原因为“天玑”骨科机器人需要在患者棘突上安装示踪器后再通过 C 臂连续透视收集数据,从而实现人机协同运动的功能,即使术中患者被轻微移动也不影响置钉准确性,大大增加了手术的安全性。

综上所述,“天玑”第 3 代骨科机器人系统在经皮微创治疗腰椎退变疾病中,减少了对肌肉和椎旁组织的损伤,减少了术中出血及术后疼痛,达到快速康复的目标。此外,在保证置钉手术准确性的情况下能够更多地保护上位临近关节的关节囊,减少临近节段退变的可能。

### 参考文献

- [1] GERTZBEIN S D, ROBBINS S E. Accuracy of pedicular screw placement in vivo [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 1990, 15(1): 11-14.
- [2] HERREN C, REIJNEN M, PISHNAMAZ M, et al. Incidence and risk factors for facet joint violation in open versus minimally invasive procedures during pedicle screw placement in patients with trauma [J]. *World Neurosurg*, 2018, 112: e711-718.
- [3] 杨俊松, 郝定均, 刘团江, 等. 脊柱机器人与透视辅助下经皮植钉治疗腰椎滑脱症中植钉精度的对比研究 [J]. *中国修复重建外科杂志*, 2018, 32(11): 1371-1376.
- [4] GELALIS I D, PASCHOS N K, PAKOS E E, et al. Accuracy of pedicle screw placement: a systematic review of prospective in vivo studies comparing free hand, fluoroscopy guidance and navigation techniques [J]. *Eur Spine J*, 2012, 21(2): 247-255.
- [5] FICHTNER J, HOFMANN N, RIENMÜLLER A, et al. Revision rate of misplaced pedicle screws of the thoracolumbar spine-comparison of

- three-dimensional fluoroscopy navigation with freehand placement; a systematic analysis and review of the literature[J]. *World Neurosurg*, 2018,109:e24-32.
- [6] 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.
- [7] MACKE J J, WOO R, VARICH L. Accuracy of robot-assisted pedicle screw placement for adolescent idiopathic scoliosis in the pediatric population[J]. *J Robot Surg*, 2016,10(2):145-150.
- [8] 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.
- [9] KUO K L, SU Y F, WU C H, et al. Assessing the intraoperative accuracy of pedicle screw placement by using a Bone-Mounted miniature robot system through secondary registration [J]. *PLoS One*, 2016,11(4):e0153235.
- [10] SOLOMIICHUK V, FLEISCHHAMMER J, MOLLIQAJ G, et al. Robotic versus fluoroscopy-guided pedicle screw insertion for metastatic spinal disease: a matched-cohort comparison [J]. *Neurosurg Focus*, 2017,42(5):E13.
- [11] PARK S M, KIM H J, LEE S Y, et al. Radiographic and clinical outcomes of robot-assisted posterior pedicle screw fixation: two-year results from a randomized controlled trial [J]. *Yonsei Med J*, 2018,59(3):438-444.
- [12] TSAI T H, TZOU R D, SU Y F, et al. Pedicle screw placement accuracy of bone-mounted miniature robot system [J]. *Medicine (Baltimore)*, 2017,96(3):e5835.
- [13] 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*, 2019,2019:1-8.
- [14] KIM H J, JUNG W I, CHANG B S, et al. A prospective, randomized, controlled trial of robot-assisted *vs.* freehand pedicle screw fixation in spine surgery [J]. *Int J Med Robot*, 2017,13(3):27672000.
- [15] TAKAHASHI J, HIRABAYASHI H, HASHI DATE H, et al. Accuracy of multilevel registration in image-guided pedicle screw insertion for adolescent idiopathic scoliosis [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2010,35(3):347-352.
- [16] ROSER F, TATAGIBA M, MAIER G. Spinal robotics: current applications and future perspectives [J]. *Neurosurgery*, 2013,72(Suppl 1):S12-18.
- [17] KANTELHARDT S R, MARTINEZ R, BAE RWINKEL 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.
- [18] HYUN S J, KIM K J, JAHNG T A, et al. Minimally invasive robotic versus open fluoroscopic-guided spinal instrumented fusions: a randomized controlled trial [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2017,42(6):353-358.
- [19] MOLLIQAJ G, SCHATLO B, ALAID A, et al. Accuracy of robot-guided versus freehand fluoroscopy-assisted pedicle screw insertion in thoracolumbar spinal surgery [J]. *Neurosurg Focus*, 2017,42(5):E14.
- [20] YU L, CHEN X, MARGALIT A, et al. Robot-assisted *vs.* freehand pedicle screw fixation in spine surgery: a systematic review and a meta-analysis of comparative studies [J]. *Int J Med Robot*, 2018,14(3):e1892.
- [21] RINGEL F, STÜER 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 (Phila Pa 1976)*, 2012,37(8):E496-501.
- [22] SCHIZAS C, THEIN E, KWIATKOWSKI B, et al. Pedicle screw insertion: robotic assistance versus conventional C-arm fluoroscopy [J]. *Acta Orthop Belg*, 2012,78(2):240-245.