

· 临床论著 ·

机器人辅助椎弓根钉固定治疗颈椎骨折脱位[△]

刘毅¹, 赵志刚^{1*}, 王昕¹, 胡骏¹, 许闫严¹, 马中希¹, 刘贤莉¹, 乔宇², 郑昌坤³

(1. 武汉市第四医院脊柱外科, 湖北武汉 430033 2. 江汉大学医学院, 湖北武汉 430056;
3. 厦门大学附属福州第二医院脊柱外科, 福建福州 350007)

摘要: [目的] 比较经肌间隙入路机器人导航辅助置钉与徒手置钉固定颈椎骨折脱位的疗效与安全性。[方法] 回顾性分析本院2016年1月—2020年1月收治的32例颈椎骨折脱位患者的临床资料, 根据医患沟通结果, 14例采用机器人辅助置钉(机器人组), 18例采用传统徒手置钉(传统组)。比较两组患者围手术期、随访及影像结果。[结果] 两组均顺利完成手术, 术中均无严重并发症。机器人组手术时间、术中出血量、透视次数、置钉成功率及住院时间均显著优于传统组($P<0.05$)。所有患者随访平均(27.35±4.37)个月, 两组完全负重活动时间的差异无统计学意义($P>0.05$)。随时间推移, 两组VAS评分均显著减少($P<0.05$), ASIA评级及锥体束征显著改善($P<0.05$)。术前两组间上述指标的差异均无统计学意义($P>0.05$)。术后3、6个月, 机器人组VAS评分显著优于传统组($P<0.05$), 至末次随访时, 两组VAS评分差异无明显统计学意义($P>0.05$)。相应时间点, 两组间JOA评分、ASIA评级及锥体束征差异均无统计学意义($P>0.05$)。影像方面, 机器人组置钉准确率显著优于传统组($P<0.05$); 两组骨性融合时间的差异无统计学意义($P>0.05$)。与术前相比, 末次随访时两组颈椎前曲、损伤节段滑移率及最小椎管矢状径较术前均显著改善($P<0.05$), 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] 与徒手置入颈椎椎弓根钉手术方式相比, “天玑”机器人导航辅助置钉可以有效缩短手术时间, 减少手术创伤, 提高置钉准确率, 利于术后康复。

关键词: 颈椎骨折脱位, “天玑”机器人, 肌间隙入路, 椎弓根螺钉, 疗效

中图分类号: R687 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2022) 21-1941-06

Robot-assisted pedicle screw fixation for cervical fracture and dislocation // LIU Yi¹, ZHAO Zhi-gang¹, WANG Xin¹, HU Jun¹, XU Yan-yan¹, MA Zhong-xi¹, LIU Xian-li¹, QIAO Yu², ZHENG Chang-kun³. 1. Department of Spinal Surgery, The Fourth Hospital of Wuhan City, Wuhan 430033, China; 2. School of Medicine, Jianghan University, Wuhan 430056, China; 3. Department of Spinal Surgery, The Second Fuzhou Hospital, Xiamen University, Fuzhou 350007, China

Abstract: [Objective] To compare the efficacy and safety of robot-assisted screw placement through intermuscular approach versus freehand screw placement in the fixation of cervical fracture and dislocation. **[Methods]** A retrospective study was done on 32 patients who received surgical treatment of cervical fracture and dislocation in our hospital from January 2016 to January 2020. According to the results of doctor-patient communication, 14 patients were treated with robot-assisted screw placement (the robot group), while the other 18 cases were treated with traditional freehand screw placement (traditional group). The perioperative period, follow-up and imaging consequences were compared between the two groups. **[Results]** All patients in both groups were operated on successfully with no serious complications. The robot group proved significantly superior to the traditional group in terms of operation time, intraoperative blood loss, fluoroscopy times, success rate of screw placement in the first time and hospital stay ($P<0.05$). All patients were followed up for an average of (27.35±4.37) months, and there was no significant difference in the time of resuming full weight-bearing activity between the two groups ($P>0.05$). The VAS scores were decreased significantly ($P<0.05$), while ASIA grade for neurological function and pyramidal tract sign were significantly improved in both groups over time ($P<0.05$). There was no significant difference in the above indexes between the two groups before operation ($P>0.05$). The robot group was significantly superior to the traditional group in VAS score at 3 months and 6 months after surgery ($P<0.05$), whereas which became not statistically significant between the two groups at the latest follow up ($P>0.05$). However, there were no significant differences in JOA score, ASIA grade and pyramidal tract sign between the two groups at any corresponding time points ($P>0.05$). In

DOI:10.3977/j.issn.1005-8478.2022.21.05

[△]基金项目:武汉市卫生局临床医学科研项目(编号:WX12C44)

作者简介:刘毅,住院医师,医学博士,研究方向:脊柱外科,(电话)13545228540,(电子信箱)liuyizsy@163.com

*通信作者:赵志刚,(电话)13100613297,(电子信箱)429753470@qq.com

terms of imaging, the accuracy ratio of screw placement of the robot group was significantly better than that of the traditional group ($P < 0.05$). There was no significant difference in bone fusion time between the two groups ($P > 0.05$). Radiographically, the cervical curvature, segmental slip ratio and minimum sagittal diameter of spinal canal were significantly improved in both groups at last follow-up compared with those preoperatively ($P < 0.05$), which were not significantly different between the two groups at the two corresponding time points postoperatively ($P > 0.05$). [Conclusion] Compared with free-hand screw placement, Tianji robot assisted screw placement does effectively shorten the operation time, reduce surgical trauma, improve the accuracy of screw placement, and facilitate postoperative rehabilitation of patients..

Key words: cervical fracture and dislocation, Tianji robot, intermuscular approach, pedicle screw, curative outcome

颈椎骨折脱位损伤是常见颈椎损伤, 约占所有颈椎损伤的 50% 以上, 在所有急性脊柱脊髓损伤中占比约 15.2%^[1]。颈椎骨折脱位常合并不同程度的脊髓损伤, 治疗原则是充分的脊髓减压, 重建颈椎结构的稳定性, 为神经损伤恢复创造条件。根据不同的损伤类型可选择不同的手术入路及固定方式^[2, 3]。在各种颈椎后路内固定技术中, 颈椎椎弓根钉已被广泛应用于临床。与传统后正中入路相比, 经后路肌间隙入路可保留颈后伸肌群附着部位, 最大限度保留颈椎生理曲度, 可以有效减少后凸的发生率, 减少术后轴性疼痛的发生情况^[4, 5]。近年来, “天玑” 机器人导航辅助下行椎弓根钉内固定技术因具有精确、微创、预后良好等优点, 逐渐在骨外科领域得到广泛应用。为比较“天玑” 机器人导航辅助置钉技术与传统徒手颈椎椎弓根钉置入两种手术方式的疗效与安全性, 本研究选取本院脊柱外科 2016 年 1 月—2020 年 1 月采用两种手术方式治疗颈椎骨折脱位损伤患者临床资料进行回顾性分析, 现报道如下。

1 资料与方法

1.1 纳入与排除标准

纳入标准: (1) 有明确颈椎外伤; (2) 术前常规 X 线片、CT、MRI 检查确诊为颈椎骨折脱位; (3) 具备内固定手术指征, 取得患者及家属知情同意; (4) 随访时间 > 12 个月。

排除标准: (1) 合并其他损伤, 或 CT、MRI 显示病理性骨折或代谢性骨病者; (2) 存在手术禁忌的肝肾功能障碍、血液疾病及凝血功能障碍等慢性合并症; (3) 严重骨质疏松症患者。

1.2 一般资料

回顾性分析本院 2016 年 1 月—2020 年 1 月采用经后路肌间隙入路方式治疗的颈椎骨折脱位患者的临床资料, 共 32 例符合上述纳入标准, 纳入本研究。根据医患沟通结果, 将患者分为两组, 14 例采用“天玑” 机器人导航辅助置钉 (机器人组), 18 例采

用传统徒手置钉 (传统组), 两组年龄、性别、BMI、损伤至手术时间、损伤节段的差异均无统计学意义 ($P > 0.05$)。本研究经医院伦理委员会批准, 所有患者均知情同意。

表 1 两组患者术前一般资料与比较

指标	机器人组 (n=14)	传统组 (n=18)	P 值
年龄 (岁, $\bar{x} \pm s$)	48.64±11.04	49.11±10.57	0.904
性别 (例, 男/女)	8/6	11/7	0.472
BMI (kg/m^2 , $\bar{x} \pm s$)	23.80±3.96	23.80±3.95	0.996
损伤至手术时间 (d, $\bar{x} \pm s$)	2.14±0.66	2.44±0.78	0.258
节段 (例, C ₁ /C ₂ /C ₃ /C ₄ /C ₅ /C ₆ /C ₇)	1/1/1/3/4/3/1	0/0/1/3/8/4/2	0.551

1.3 手术方法

术前均行常规保护性颅骨牵引, 完善术前颈椎 X 线、CT 三维重建及 MRI 等影像学检查 (图 1a, 1b), 评估心肺功能及手术风险, 注意预防下肢深静脉血栓等并发症, 维持水电解质平衡。

机器人组: 取俯卧位, 根据手术节段, 仅行皮肤切口, 于合适节段颈椎或胸椎棘突安装示踪器并准确接入光学跟踪系统。通过 C 形臂 X 线机透视捕捉颈椎标准正侧位图像, 计算机软件规划进针点、螺钉置入方向及螺钉长度, 规划多维机械臂运动轨迹 (图 1c~1f)。通过椎旁肌间隙入路暴露颈椎椎弓根螺钉进针点, 采用多维机械臂置入螺钉导针, 透视确认导针位置及深度满意, 沿导针置入规格合适的椎弓根螺钉, 安装连接杆及螺钉尾帽, 去掉导航设备。切口冲洗后逐层缝合, 无菌敷料覆盖切口, 结束手术。

传统组: 取俯卧位, 术区消毒铺巾, 沿后路正中线切开皮肤及筋膜, 于中线位置切开斜方肌筋膜, 向两侧分离寻找半棘肌与头半棘肌间隙, 暴露颈椎椎弓根钉置钉点。置入定位针, 透视无误后拧入椎弓根螺钉, 安装连接棒后冲洗创面, 留置引流管, 逐层缝合切口, 无菌敷料包扎, 结束手术。

术后预防跌倒及坠床, 指导患者进行康复训练, 预防深静脉血栓形成及肺栓塞等并发症。

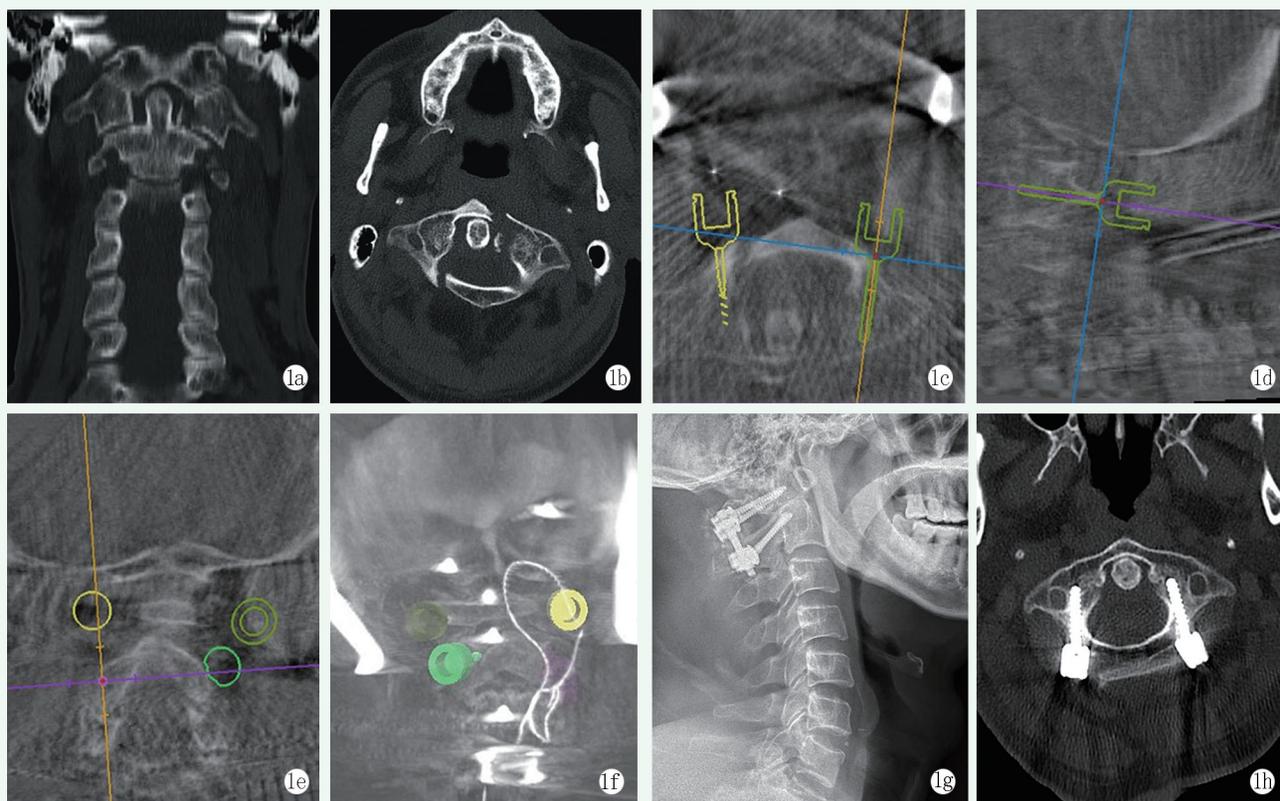


图1 患者,女,44岁,寰椎前后弓骨折,使用“天玑”机器人辅助置钉固定术治疗 1a,1b:术前CT显示寰椎前后弓骨折 1c~1f:导航软件规划螺钉置入点、路径及螺钉直径 1g:术后侧位X线片示上颈椎力线正常,C₁~C₂内固定物位置良好 1h:术后CT横断面显示螺钉未穿透皮质侵犯椎管

1.4 评价指标

记录两组围手术期资料。采用疼痛视觉模拟评分(visual analogue scale, VAS)、美国脊椎损伤学会(American Spinal Injury Association, ASIA)运动和感觉评分、日本骨科协会颈椎评分(Japanese Orthopaedic Association, JOA)评价临床效果。行影像学检查,根据 Rampersaud 分级标准评价置钉准确性^[6]。测量颈椎前凸角(C₂~C₇ Cobb角)以及伤椎节段最小椎管矢状径。

1.5 统计学方法

采用 SPSS 21.0 软件对统计数据进行分析。计量数据以 $\bar{x} \pm s$ 表示,资料呈正态分布时,两组间比较采用独立样本 *t* 检验,组内两时间点比较采用单因素方差或配对 *T* 检验;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。等级资料两组比较采用 Mann-whitney *U* 检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 围手术期资料

两组患者均顺利完成手术,术中均无神经、血

管、食管损伤等的发生。并发症方面:机器人组脑脊液漏1例,传统组2例,均经术后颈部切口局部加压包扎治愈;传统组发生吞咽困难1例,出院前已正常进食进水;声嘶2例,两组各1例,均经雾化治疗后症状明显改善。机器人组患者术后切口均顺利愈合。传统组患者术后3例出现脂肪液化,切口延迟愈合,经加强抗感染,伤口换药后顺利愈合。两组术后并发症发生率的差异无统计学意义($P=0.460$)。

两组患者围手术期资料见表1,机器人组手术时间、切口长度、术中出血量、术中透视次数、每钉置钉时间、一次置钉成功率、住院时间均显著优于传统组($P < 0.05$)。两组术后切口愈合等级及术后下地行走时间的差异均无统计学意义($P > 0.05$)。

2.2 随访结果

所有患者均获随访,随访时间18~42个月,平均(27.35±4.37)个月。两组随访结果见表3,两组完全负重活动时间的差异无统计学意义($P > 0.05$)。随时间推移,两组VAS评分均显著减少($P < 0.05$),ASIA评级及锥体束征显著改善($P < 0.05$),传统组JOA评分较术前明显改善($P < 0.05$);而机器人组JOA评分改善不明显($P > 0.05$)。术前两组间VAS评分、ASIA评级、JOA颈椎评分的差异均无统计学意

义 ($P>0.05$)。术后3、6个月,机器人组VAS评分显著优于传统组 ($P<0.05$),但至末次随访时两组VAS评分差异无明显统计学意义 ($P>0.05$)。在术后3、6个月及末次随访时,两组间ASIA评级、锥体束征及JOA评分的差异均无统计学意义 ($P>0.05$)。

2.3 影像评估

影像评估结果见表4,机器人组置钉准确性显著优于传统组 ($P<0.05$)。两组骨性融合时间的差异无统计学意义 ($P>0.05$)。与术前相比,末次随访时两组Cobb角、损伤节段滑移率及最小椎管矢状径较术前均显著改善 ($P<0.05$),两相应时间点,两组间C₂~C₇Cobb角、损伤节段滑移率及最小椎管矢状径的

表2 两组患者围手术期资料 ($\bar{x} \pm s$) 与比较

指标	机器人组 (n=14)	传统组 (n=18)	P 值
手术时间 (min, $\bar{x} \pm s$)	89.64±7.71	136.39±12.46	<0.001
切口长度 (cm, $\bar{x} \pm s$)	10.79±1.42	14.11±1.23	<0.001
术中出血量 (ml, $\bar{x} \pm s$)	127.5±39.11	531.67±130.42	<0.001
每钉置钉时间 (min, $\bar{x} \pm s$)	11.23±2.37	18.57±3.12	<0.001
一次置钉成功率 [枚 (%)]	50 (89.29)	32 (44.44)	<0.001
透视次数 (次, $\bar{x} \pm s$)	9.29±1.54	13.56±2.36	<0.001
下地行走时间 (d, $\bar{x} \pm s$)	3.14±1.16	3.21±1.09	0.371
切口愈合等级 (甲/乙/丙)	14/0/0	15/3/0	0.294
住院时间 (d, $\bar{x} \pm s$)	8.43±2.93	14.07±3.73	<0.001

差异均无统计学意义 ($P>0.05$)。

表3 两组患者随访结果与比较

指标	时间点	机器人组 (n=14)	传统组 (n=18)	P 值
恢复完全负重时间 (周, $\bar{x} \pm s$)		2.32±1.45	2.40±1.31	0.445
VAS 评分 (分, $\bar{x} \pm s$)	术前	6.50±0.76	6.28±1.18	0.545
	术后3个月	1.86±0.77	3.39±0.85	<0.001
	术后6个月	1.21±0.58	2.33±0.84	<0.001
	末次随访	0.93±0.62	1.06±0.87	0.648
	P 值	<0.001	<0.001	
ASIA 评级 (A/B/C/D/E)	术前	1/2/3/6/2	2/2/5/7/2	0.417
	术后3个月	0/3/1/7/3	1/1/3/9/4	0.226
	术后6个月	0/2/1/5/6	1/1/2/7/7	0.719
	末次随访	0/1/1/2/10	0/1/2/5/10	0.641
	P 值	<0.001	<0.001	
锥体束征 (例, 阴性/弱阳性/阳性)	术前	4/6/4	6/5/7	0.446
	术后3个月	5/7/2	7/7/4	0.712
	术后6个月	6/6/2	8/7/3	0.873
	末次随访	7/5/2	8/8/2	0.584
	P 值	<0.001	<0.001	
JOA 颈椎评分 (分, $\bar{x} \pm s$)	术前	11.14±6.37	10.06±6.05	0.626
	术后3个月	12.79±5.19	12.00±4.34	0.644
	术后6个月	13.36±5.15	13.17±3.52	0.902
	末次随访	13.86±5.22	14.50±3.01	0.664
	P 值	0.228	0.009	

3 讨论

自1994年日本学者Abumi等^[7]首先报道了在下颈椎应用颈椎椎弓根内固定术治疗颈椎骨折脱位后,颈椎椎弓根钉内固定技术日趋成熟,由于三柱固定,其固定强度远高于其他类型内固定^[8,9]。与

其他脊柱节段相比,颈椎椎弓根最细小且变异性较大,一旦穿破椎弓根皮质可能引起血管、神经损伤风险,因此椎弓根置钉对外科医师的技术提出了极高的要求^[10,11]。传统的后正中入路椎弓根钉内固定技术,需广泛剥离椎旁肌,易造成后方韧带复合体以及颈神经后支的干扰和损伤,引起术后轴性痛^[5,12]。同时手术切口较大,术中出血较多,且徒

手置钉存在相当高的置钉风险。近年来，保持颈后肌群结构和功能的完整性对减轻术后颈椎 AS 的重要性逐渐得到人们的重视，尤其对于保留颈半棘肌和横突棘肌以及颈神经后支的结构和功能的完整性

尤为重要。目前已有多种改良术式应用于临床，以减轻术后颈椎轴向症状的发生，其中经肌间隙入路应用较为成熟且广泛^[13-15]。

表 4 两组影像评估结果与比较

指标	时间点	机器人组 (n=14)	传统组 (n=18)	P 值
置钉分级 (钉, A/B/C/D)		48/5/3/0	30/21/16/5	<0.001
Cobb 角 (°, $\bar{x} \pm s$)	术前	14.64±1.86	16.00±1.97	0.057
	末次随访	21.29±1.44	20.78±1.22	0.287
	P 值	<0.001	<0.001	
损伤节段滑移率 (% , $\bar{x} \pm s$)	术前	14.37±4.21	15.01±3.58	0.532
	末次随访	5.12±0.39	6.45±1.34	0.379
	P 值	<0.001	<0.001	
骨性融合时间 [例 (%)]	<10 周	5 (35.71)	6 (33.33)	0.876
	10~16 周	8 (57.14)	10 (55.56)	
	≥16 周	14 (100.00)	18 (100.00)	
最小椎管矢状径 (mm, $\bar{x} \pm s$)	术前	11.29±0.91	11.56±0.92	0.416
	末次随访	14.07±1.00	13.83±1.1	0.532
	P 值	<0.001	<0.001	

为实现颈椎椎弓根钉的精确置钉，脊柱外科医师及科研工作者们进行了广泛的探索，如 O 臂导航，3D 打印导板技术，机器人导航辅助置钉等^[16-19]。“天玑”机器人导航辅助下经皮置钉，可以实现颈椎后路手术的微创操作^[20, 21]。在本研究中，利用“天玑”机器人导航辅助置入椎弓根螺钉，较传统经肌间隙入路而言，可以有效减少术中出血，缩短手术时间，进而可以减少术后切口并发症的产生。同时由于减少对椎旁肌的骚扰，避免对颈神经后支的干扰和破坏，可以有效减少术后轴性痛的发生情况。颈椎骨折脱位型损伤，利用后路椎弓根钉固定及复位，可以有效改善术后颈椎 Cobb 角，恢复椎管矢状径 ($P<0.05$)。大多数情况下，颈椎术后神经功能会有所恢复。本研究中，机器人组末次随访时 JOA 评分与术前相比，差异无明显统计学意义 ($P>0.05$)，可能与纳入样本量较小有关。

“天玑”机器人导航通过计算机软件规划椎弓根钉入路及通道，可有效减少人工置钉的误差，提高螺钉置钉准确性^[22]。在本研究中，导航辅助技术可将 94.74% 的螺钉置入安全区域以内，而传统徒手置钉的安全性只有 63%。置钉准确性的提高，可以有效减少螺钉对椎管内组织及神经根的侵害。然而，在研究病例中，经导航辅助置钉仍有 3 枚螺钉位于“可疑安全区”。且在机器人组，一次置钉成功率仅为

89.29%，但仍高于传统徒手组的 44.44%。螺钉位置不理想的原因如下：(1) 颈椎椎弓根狭小，尤其在 C₃，更容易穿破；(2) 椎体外侧壁骨质较内侧皮质薄，同时椎弓根外侧壁有滋养血管孔，操作时外壁更容易打破；(3) 手术操作区域显示不够充分，两侧颈部肌群限制置钉方向，内倾角无法达到足够大的角度；(4) 参考架放置的稳定性较差，导航容易产生误差。术前利用三维软件提前进行钉道的规划设计，根据冠状面、矢状面、横断面以及三维图像提前了解螺钉的大小、方向，可以提高螺钉的准确性^[23-25]。

综上所述，“天玑”机器人导航系统具有高精度的特点，更精准地实现螺钉的个体化置入，可以有效减少手术创伤，减少术中出血及医患射线暴露风险，降低术后轴性痛的发生情况，提高颈椎椎弓根螺钉的准确性和安全性。在有条件的地方适合开展。

参考文献

[1] 王洪伟, 周跃, 李长青, 等. 创伤性脊柱骨折患者流行病学分析 [J]. 中华创伤杂志, 2012, 28 (11): 988-992.

[2] 张阳, 张志成, 李放, 等. 下颈椎骨折手术入路选择策略及疗效分析 [J]. 中华骨与关节外科杂志, 2018, 11 (9): 646-650.

[3] 杨俊松, 刘鹏, 刘团江, 等. 后方骨-韧带复合体损伤分级和严重程度评分对下颈椎骨折脱位手术入路选择的价值 [J]. 中华骨科杂志, 2020, 40 (22): 1503-1512.

[4] 秦超. 经颈后肌间隙入路与正中入路行椎板成形术治疗多节

- 段颈椎脊髓病的疗效比较[J]. 颈腰痛杂志, 2019, 40(3): 356-358.
- [5] 钱闯, 陈雄生. 颈椎手术并发症的研究进展[J]. 中华骨科杂志, 2016, 36(17): 1133-1141.
- [6] Rampersaud YR, Pik JH, Salonen D, et al. Clinical accuracy of fluoroscopic computer-assisted pedicle screw fixation: a CT analysis[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2005, 30(7): E183-E190.
- [7] Abumi K, Itoh H, Taneichi H, et al. Transpedicular screw fixation for traumatic lesions of the middle and lower cervical spine: description of the techniques and preliminary report[J]. *Spinal Disord*, 1994, 7(1): 19-28.
- [8] Mohi Eldin MM. Cervical pedicle screw fixation: anatomic feasibility of pedicle morphology and radiologic evaluation of the anatomical measurements[J]. *Asian Spine J*, 2014, 8(3): 273-280.
- [9] Tukkapuram VR, Kuniyoshi A, Ito M. A review of the historical evolution, biomechanical advantage, clinical applications, and safe insertion techniques of cervical pedicle screw fixation[J]. *Spine Surg Relat Res*, 2018, 3(2): 126-135.
- [10] Ugur HC, Attar A, Uz A, et al. Surgical anatomic evaluation of the cervical pedicle and adjacent neural structures[J]. *Neurosurgery*, 2001, 47(5): 11-62.
- [11] Panjabi MM, Shin EK, Chen NC, et al. Internal morphology of humeral cervical pedicles[J]. *Spine*, 2000, 25(110): 1197-1201.
- [12] 徐勇, 李锋, 熊伟, 等. 经肌间隙入路与后正中入路颈椎单开门椎管扩大椎板成形术治疗颈椎后纵韧带骨化症的疗效比较[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2020, 30(3): 227-233.
- [13] Takeuchi K, Yokoyama T, Aburakawa S, et al. Axial symptoms after cervical laminoplasty with C₃₋₇ laminectomy compared with conventional C₃₋₇ laminoplasty: a modified laminoplasty preserving the semispinalis cervicis inserted into axis[J]. *Spine*, 2005, 30(22): 2544-2549.
- [14] 叶文斌, 林达生, 王江泽, 等. Quadrant 通道下经椎旁肌间隙入路椎弓根螺钉治疗上颈椎骨折[J]. 中国矫形外科杂志, 2020, 28(2): 103-107.
- [15] 周帅, 周非非, 赵衍斌, 等. 颈后路经肌间隙入路"升顶式"椎管扩大椎板成形术后早期颈椎矢状面平衡的变化[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2021, 31(12): 1121-1128.
- [16] 张正丰. 术中 O-Arm 3D 成像和导航下引导颈椎前路椎弓根钉置入[J]. 中国矫形外科杂志, 2017, 25(16): 1501-1505.
- [17] 姜泽威, 汤舒婷, 周纪平, 等. 3D 打印导板辅助与徒手寰枢椎弓根钉置入比较[J]. 中国矫形外科杂志, 2021, 29(10): 880-884.
- [18] 吴超, 邓佳燕, 罗敏, 等. 3D 打印逐级导板辅助椎弓根钉固定下颈椎骨折脱位[J]. 中国矫形外科杂志, 2019, 27(12): 1132-1136.
- [19] 田伟, 王晋超, 刘亚军, 等. 上颈椎手术方式回顾及应用机器人辅助上颈椎手术的体会[J]. 中国医疗器械信息, 2017, 23(7): 9-13.
- [20] 夏海军, 毛峰, 汪少波, 等. 骨科手术机器人辅助经椎弓根钉内固定治疗 Levine-Edward I、II 型 Hangman 骨折[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2019, 34(5): 449-452.
- [21] 李青青, 余利鹏, 蔡卫华, 等. 骨科手术机器人系统辅助置入颈椎椎弓根螺钉的安全性研究[J]. 中华骨科杂志, 2022, 42(3): 149-155.
- [22] Mao JZ, Soliman MAR, Karamian BA, et al. Anatomical and technical considerations of robot-assisted cervical pedicle screw placement: a cadaveric study[J/OL]. *Global Spine J*, 2022. Published online ahead of print. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16284593/>
- [23] Su XJ, Lv ZD, 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.
- [24] Sivaganesan A, Clark NJ, Alluri RK, et al. Robotics and spine surgery: lessons from the personal computer and industrial revolutions[J]. *Int J Spine Surg*, 2021, 15(S2): S21-S27.
- [25] Farah K, Meyer M, Prost S, et al. Robotic assistance for minimally invasive cervical pedicle instrumentation: report on feasibility and safety[J]. *World Neurosurg*, 2021, 150: e777-e782.

(收稿:2022-06-04 修回:2022-09-02)
(同行评议专家:丁凡 黄勇)
(本文编辑:郭秀婷)