

• 论 著 •

骨科机器人辅助下骶髂关节螺钉治疗 骨盆后环骨折的疗效研究



江伟, 杨灵, 汪红, 高博

德阳市人民医院骨科(四川德阳 618000)

【摘要】 目的 探讨骨科机器人辅助下骶髂关节螺钉治疗骨盆后环骨折的临床疗效。方法 纳入2018年1月—2021年8月在德阳市人民医院接受骶髂关节螺钉固定手术的患者,采用随机分组方法将患者分为机器人组和手动组。机器人组采用机器人辅助下置入骶髂关节螺钉,手动组采用手动置入骶髂关节螺钉。比较两组患者的一般情况、骶髂关节螺钉置入时间、术中透视次数、导针钻孔次数、手术出血量、Majeed骨盆功能评分。结果 共纳入42例患者,两组患者的性别、年龄、体质指数、损伤类型和受伤原因差异无统计学意义($P>0.05$)。机器人组19例患者置入21枚螺钉,手动组23例患者置入23枚螺钉。两组患者术后伤口完全愈合,无伤口感染及医源性血管神经损伤,无内固定松动。两组患者的螺钉置入时间、出血量和Majeed评分优良率差异无统计学意义($P>0.05$)。机器人组的透视次数 $[(14.53\pm 4.54) \text{ vs. } (19.87\pm 5.48) \text{ 次}]$ 和钻孔次数 $[(1.00\pm 0.00) \text{ vs. } (7.24\pm 3.77) \text{ 次}]$ 比手动组少,差异有统计学意义($P<0.05$)。结论 骨科手术机器人在骶髂关节螺钉置入中具有微创、透视少、置钉确切等优点,在骨盆骨折的治疗中有较好的临床治疗效果。

【关键词】 机器人; 骨盆; 骨折; 内固定器

Efficacy of orthopedic robot-assisted sacroiliac joint screws in the treatment of posterior pelvic ring fractures

JIANG Wei, YANG Ling, WANG Hong, GAO Bo

Department of Orthopedics, People's Hospital of Deyang City, Deyang, Sichuan 618000, P. R. China

Corresponding author: JIANG Wei, Email: 3208969049@qq.com

【Abstract】 Objective To investigate the clinical effect of orthopedic robot-assisted sacroiliac joint screws in the treatment of posterior pelvic ring fractures. **Methods** Patients who underwent sacroiliac joint screw fixation in People's Hospital of Deyang City between January 2018 and August 2021 were included, and the patients were divided into a robotic group and a manual group by randomization. The robot group used robot-assisted insertion of sacroiliac joint screws, and the manual group used manual insertion of sacroiliac joint screws. The general condition, time of sacroiliac joint screw placement, intraoperative fluoroscopy times, guide needle drilling times, surgical blood loss, and Majeed pelvic function score were compared between the two groups. **Results** A total of 42 patients were included, and there was no significant difference in gender, age, body mass index, injury type or injury cause between the two groups ($P>0.05$). Finally, 21 screws were placed in 19 patients in the robotic group and 23 screws in 23 patients in the manual group. The wounds of the two groups were completely healed after operation, and there was no wound infection, iatrogenic vascular and nerve injury, and no loosening of internal fixation. There was no significant difference in screw placement time, blood loss or Majeed score between the two groups ($P>0.05$). The number of fluoroscopy (14.53 ± 4.54 vs. 19.87 ± 5.48) and drilling times (1.00 ± 0.00 vs. 7.24 ± 3.77) in the robotic group were less than those in the manual group, and the differences were statistically significant ($P<0.05$). **Conclusion** Orthopedic surgical robots have the advantages of minimally invasive, less fluoroscopy, and accurate screw placement in sacroiliac joint screw placement, and have good clinical results in the treatment of pelvic fractures.

【Key words】 Robot; pelvic; fracture; internal fixator

DOI: 10.7507/1002-0179.202108298

通信作者: 江伟, Email: 3208969049@qq.com

<http://www.wcjm.org>

骨盆骨折多为高坠、车祸及工业意外等导致的高能量损伤,加之骨盆周围毗邻重要血管、神经,容易导致较高的病死率及伤残率,其中后环损伤发生率为 17%~30%,骨盆后环为躯体力学负荷下传中枢,对骨盆的稳定性有着重要的作用,占骨盆功能约 60%^[1-2]。骨盆骨折累及后环一旦导致不稳定,往往需手术复位内固定,因为传统的切开复位内固定存在创伤大、不利于快速康复的缺点,因此,现在的手术主要以经皮骶髂关节螺钉固定为主,但骶髂关节周围有众多的血管、神经、脏器,解剖结构复杂,置入骶髂关节螺钉具有一定难度及风险^[3-7]。有文献报道骶髂关节螺钉固定的髂血管、腰骶干及马尾神经损伤发生率为 3%~18%^[8-9],如何让骶髂螺钉固定更精准、可控、微创一直是骨科医生追求的目标,为达到这一目标,德阳市人民医院骨科引入天玑骨科手术机器人并应用于骨盆骨折骶髂关节螺钉固定手术中,为客观评价其临床使用效果,故设计本研究。现报告如下。

1 资料与方法

1.1 研究对象

前瞻性纳入 2018 年 1 月—2021 年 8 月在德阳市人民医院接受骶髂关节螺钉固定手术的患者。纳入标准(全部满足):① Tile B、C 型骨盆骨折后环损伤患者;② 通过术前或术中牵引,骨折或骶髂关节脱位能达到功能复位者。排除标准(满足任意一条):① 开放性、感染性骨盆骨折患者;② 螺钉进钉点及骶骨粉碎严重导致无法置钉者;③ 陈旧性骨盆骨折患者;④ 合并其他系统疾病无法耐受手术者。本研究得到德阳市人民医院医学伦理委员会批准(批件号为 LWH-OP-006-A04-V2.0),所有患者均签署知情同意书。采用掷硬币法将患者随机分为机器人组和手动组。

1.2 治疗方法

患者入院后,密切观察患者生命体征并给予对症处理,早期根据损伤控制原则治疗骨盆骨折及合并伤,对 Tile C 型患者给予股骨髁上骨牵引,牵引重量为体重的 1/8~1/7,病情稳定后予以骨盆正位、出口位及入口位 X 线片、骨盆 CT 平扫及三维重建检查,积极评估骨折的具体情况 & 脱位方向,同时完善术前血常规、血生化、心电图、胸部 X 线片等检查,术前评估无手术禁忌后给予患者手术治疗。

1.3 手术设备及器械

本研究采用的手术设备及器械包括:天玑骨

科手术机器人系统(北京天智航医疗科技股份有限公司)、C 型臂 X 线机(西门子医疗系统有限公司)、碳纤维骨科透视床(欣达医疗有限公司)、空心螺钉导针(北京天智航医疗科技股份有限公司)和直径 7.3 mm 空心螺钉(创生医疗器械有限公司)。其中,天玑骨科手术机器人主要由主控台车、红外光学跟踪系统、机械臂这 3 个部分构成。红外光学跟踪系统是机器人手术的基础和前提,相当于机器人的“眼”,由红外跟踪光学相机、机器人跟踪器、患者示踪器硬件及软件算法共同组成;主控台车主要由显示设备及计算机组成,主要负责数据分析,规划手术路径及指令机械臂运动,相当于大脑中枢;机械臂为六轴机械臂,能完成多方向多角度及精准到毫米的运动,是手术机器人最终执行器具。

1.4 手术方法

首先行骨折或骶髂关节脱位复位,再行骶髂关节螺钉置入固定,机器人组患者采用机器人辅助下置入骶髂关节螺钉,手动组采用手动置入骶髂关节螺钉。两组患者仅置入骶髂关节螺钉的方法不同,其余操作均一致。

复位方法:通过下肢牵引纠正骨盆的轴向移位,然后纠正骨盆的旋转移位,半骨盆在水平面、冠状面及矢状面上的旋转均可通过髂前下棘向髂后上棘方向打入的斯氏针或髂白上缘斯氏针进行有效复位^[10]。

骶髂关节螺钉置入方法:机器人组采用机器人辅助下置入骶髂关节螺钉,麻醉(全身麻醉或椎管内麻醉)完全后,患者仰卧于骨科透视床上。机械臂摆放于患侧,主控台车及光学跟踪相机放于对侧或头尾端,光学跟踪相机所放位置需充分考虑能接受示踪器信号,C 型臂垂直放置在患侧对侧,摆放完毕后连接各个设备,牵引复位骨折或脱位,C 型臂透视确认骨折或脱位复位满意,常规消毒、铺巾,如果将示踪器安置在对侧髂前上棘,需消毒对侧髂前上棘并注意铺巾应显露术区,于机器人机械臂及 C 型臂上套无菌塑料薄膜保护套。机械臂连接骨盆专用定位标尺,将定位标尺置于术野,C 型臂照出偏患侧的骨盆入口位、出口位 X 线片,定位标尺上的 10 个标记点需在 C 型臂投照视野内清晰可见,以便于机器人系统识别,机器人系统在操作台上准确识别上述标记点并编号,如果识别的标记点有轻微的偏差位移,可以手动微调使每个标记点位于正中以减小误差。准确识别标记点后,在有标记点的骨盆入口位、出口位 X 线图像上规划置

钉路径,置钉路径需避开骶孔,避免穿破骶骨前缘及骶管,设计出合适的置钉路径后,再于软件界面上分别做2种型号导针套管的“模拟运动”模拟机械臂运动过程,对比2种型号导针套管的运动轨迹,选择运动轨迹短、更优置钉操作空间的导针套管型号,将定位标尺更换为选定的导针套管,为让导针套管更精准地指引打入导针的方向,我们一般将导针套管距皮肤的距离设定为0.5~1.0 cm,再次模拟运动机械臂,确认无误后点击“运动”选项,机械臂将导针套管运动至距皮肤0.5~1.0 cm位置,根据导针套管指定的方向做一长约1 cm的皮肤切口,钝性分离皮下深筋膜及肌肉组织,插入导针套简直抵髂骨骨面,沿导针套筒打入克氏针1~2 cm,C型臂X线机再次透视骨盆入口位、出口位及侧位确认克氏针方向,如果觉得克氏针方向有偏差,可在软件界面上微调,确认无误后完全打入克氏针,克氏针长度超过骶骨中线,测量长度,置入合适长度的7.3 mm的空心螺钉,再次C型臂X线机透视骨盆入口位、出口位及侧位确认螺钉位置,拔出克氏针,冲洗伤口,逐层关闭切口。手动组采用手动置入骶髂关节螺钉,C型臂垂直放置在患侧对侧,麻醉(全身麻醉或椎管内麻醉)完全后,患者仰卧于骨科透视床上,常规消毒、铺巾,以髂前上棘做垂线和以股骨纵轴线交叉所形成的后上象限为进针点,在C型臂透视监视(骨盆入口位、出口位及骶椎侧位X线图像)下反复调整导针方向,当导针方向达到术前预定的方向后打入导针,在打入导针的过程中反复C型臂透视监视导针进入过程以保障安全,克氏针长度超过骶骨中线,测量长度,置入合适长度的7.3 mm的空心螺钉,再次C型臂X线机透视骨盆入口位、出口位及侧位确认螺钉位置,拔出克氏针,冲洗伤口,逐层关闭切口。

术后预防性使用抗生素24 h,同时给予止痛及对症处理,以达到无痛病房管理标准,术后患者病情稳定后复查骨盆正位、入口位、出口位、侧位X线片及CT评估骨折复位质量和内固定位置,指导患者在床上做双下肢屈伸功能锻炼或肌肉等长收缩锻炼,给予依诺肝素4 000 U/d皮下注射,预防下肢静脉血栓。术后最初3个月期间每个月门诊随访复查,3个月后间隔2~3个月复查一次直至骨折愈合,根据骨折愈合情况决定患者何时下地负重行走。

1.5 观察指标及功能评价

1.5.1 观察指标 观察记录术中每一枚骶髂关节螺

钉置入的时间及数量、术中透视次数、导针钻孔次数、手术出血量、术后切口愈合情况及并发症(如伤口感染、血管神经损伤、内固定物松动)及骶髂关节螺钉固定位置评价(全部在骨皮质内则提示位置安全;螺钉行程中有部分螺钉螺纹切出骨皮质但未伤及邻近血管神经及脏器则提示位置欠佳;螺钉完全穿过皮质骨则提示位置差)。

1.5.2 功能评价 末次随访时采用Majeed骨盆骨折量化评估系统^[11]进行功能评分,Majeed骨盆功能评分系统包括疼痛、工作、站立、就座、性生活5个方面的功能评分,总分100分,<55分为差,55~69分为可,70~84分为良,85~100分为优。

1.6 统计学方法

采用SPSS 19.0统计软件进行分析,计量资料以均数±标准差表示,组间比较采用独立样本 t 检验(方差不齐时采用 t' 检验)。计数资料以例数和百分比表示,组间比较采用 χ^2 检验或Fisher确切概率法。双侧检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 两组患者一般情况

共纳入42例患者,其中交通伤28例,高坠伤11例,重物砸伤3例;Tile B型32例,Tile C型10例;机器人组19例,手动组23例。两组患者的性别、年龄、体质量指数、损伤类型和受伤原因差异无统计学意义($P>0.05$),见表1。

2.2 两组患者手术及术后情况

42例患者共置入44枚螺钉。机器人组19例患者置入21枚螺钉,其中单独第1骶椎螺钉14枚,单独第2骶椎螺钉3枚;另4枚螺钉为2例患者联合第1骶椎及第2骶椎螺钉固定。患者每一枚骶髂关节螺钉置入的时间(从机器人系统摆放开始至螺钉完全置入并C型臂最后透视验证为止)为31~72 min,术中透视次数8~26次;每一枚螺钉导针钻孔次数为1次;手术出血量:2~5 mL,术后伤口完全愈合,无伤口感染及医源性血管神经损伤,无内固定松动。末次随访Majeed骨盆功能评分:优10例,良8例,可1例。手动置入骶髂关节螺钉组23例患者置入23枚螺钉,其中单独第1骶椎螺钉22枚,单独第2骶椎螺钉1枚,每一枚骶髂关节螺钉置入的时间为26~96 min,术中透视次数16~42次;每一枚螺钉导针钻孔次数为3~16次,手术出血量:2~6 mL,术后伤口完全愈合,无伤口感染及医源性血管神经损伤,无内固定松动。末次随访Majeed骨盆功能评分:优11例,

良 10 例,可 2 例。髋髂关节螺钉固定位置:两组病例位置良好,无位置欠佳(螺纹切出)及位置差者(螺钉完全穿出)。两组患者的螺钉置入时间、出血量和 Majeed 评分优良率差异无统计学意义($P>0.05$),机器人组的透视次数和钻孔次数比手动组少,差异有统计学意义($P<0.05$)。见表 2。

3 讨论

骨盆骨折创伤大、治疗困难、并发症多,传统切开复位钢板内固定具有创伤大、出血多、固定的生物力学性能欠佳等缺点, Matta 等^[12]在 1989 年首先将髋髂关节螺钉应用于治疗髋骨骨折和髋髂关节脱位,经皮髋髂关节螺钉治疗髋骨骨折和髋髂关节脱位具有中心性固定、良好的力学稳定性及微创等优点^[13],有利于快速康复,降低致残率^[14],因此经皮髋髂关节螺钉内固定技术逐渐得到普遍应用。由于髋骨上段变异较多^[15-16],甚至第 1 髋椎存在 44% 的变异率^[17],为避免髋髂关节螺钉导致的相关血管神经损伤,以骨科手术机器人为代表的精准医学应运而生,本研究使用的天玑骨科手术机器人是国内公司自行研发的第 3 代手术机器人,它兼容二维与三维模式,借助入钉点及钉道智能算法及机械臂的精准运动,为手术提供精准稳定的导针置入路径。

根据本研究的结果,骨科手术机器人辅助下置

入髋髂关节螺钉和手动置入髋髂关节螺钉的临床实际使用效果差异包括:① 本研究两组患者手术单枚螺钉置入时间差异无统计学意义,与黄俊锋等^[18]机器人辅助下髋髂关节螺钉置入时间(18~56 min)比较,本研究置入时间(31~72 min)仍然偏长,这可能是由于骨科手术机器人前置时间(摆放设备及空间立体定位等时间)较长及本研究术者团队操作手术机器人尚不十分熟练有关。② 韩巍等^[19]研究表明在置入髋髂关节螺钉术中,机器人组透视时间少于手动组,本研究中机器人组透视次数也少于手动组,提示骨科手术机器人可以起到术中减少对医生及患者的辐射,达到最大程度保护医生及患者的目的。③ 本研究机器人组基本都是精准的 1 次导针钻孔成功,与韩巍等^[19]研究结果相似,而手动组需在 C 型臂透视下反复调整导针钻孔路径,钻孔 3~16 次,平均 7 次方能达到满意的针道位置。这一方面会造成反复摆放 C 型臂(反复骨盆入口、出口位)增加手术时间及 X 线辐射,另一方面,局部骨面反复打孔可能导致局部骨缺损及内固定物把持力下降,降低固定刚度。手动组钻孔次数较多的原因考虑主要是没有机器人辅助,术者受到自身身体条件及个人临床经验的限制,会出现预想的置钉路径与实际操作不相符合,微小动作的偏差即可造成手术精度下降^[20],需反复调整方能达到手术要求。④ 本研究两组患者出血量、术后并发症无

表 1 两组患者一般情况比较

项目	机器人组 (n=19)	手动组 (n=23)	检验统计量	P 值
性别[例(%)]				
男	13 (68.4)	16 (69.6)	$\chi^2=0.006$	0.936
女	6 (31.6)	7 (30.4)		
年龄($\bar{x}\pm s$, 岁)	44.37 \pm 4.13	44.17 \pm 3.56	$t=0.164$	0.871
体质量指数($\bar{x}\pm s$, kg/m ²)	24.26 \pm 1.79	24.13 \pm 1.87	$t=0.234$	0.816
损伤类型[例(%)]				
B 型	14 (73.7)	18 (78.3)	$\chi^2=0.000$	1.000
C 型	5 (26.3)	5 (21.7)		
受伤原因[例(%)]				
交通伤	12 (63.2)	16 (69.6)	—	0.884
高坠伤	5 (26.3)	6 (26.1)		
重物砸伤	2 (10.5)	1 (4.3)		

表 2 两组患者手术及术后情况比较

指标	机器人组 (n=19)	手动组 (n=23)	检验统计量	P 值
螺钉置入时间($\bar{x}\pm s$, min)	59.63 \pm 9.17*	58.65 \pm 13.66	$t=0.267$	0.791
透视次数($\bar{x}\pm s$, 次)	14.53 \pm 4.54	19.87 \pm 5.48	$t=-3.394$	0.002
钻孔次数($\bar{x}\pm s$, 次)	1.00 \pm 0.00	7.24 \pm 3.77	$t'=7.013$	0.012
出血量($\bar{x}\pm s$, mL)	3.68 \pm 0.82	3.87 \pm 1.01	$t=-0.642$	0.525
Majeed 评分优良率[例(%)]	18 (94.7)	21 (91.3)	—	1.000

*n=21

差异,术后功能均恢复较好,Majeed 评分差异无统计学意义,这说明骶髂关节螺钉固定骨盆后环效果确切,骨科手术机器人辅助下置入和手动置入骶髂关节螺钉均能获得满意的临床效果。因此,从本研究结果及结合相关文献^[1,10,14,18-19]可以总结出骨科手术机器人具有以下优点:①手术创伤小,手术操作简便,置钉前可规划、可模拟;②辐射低,减少对患者和医生的损害;③精确空间定位及精准置钉,减少医源性血管神经损伤的风险;④术中实时光学跟踪监测,无需反复透视,若术中位置发生偏移,系统可提醒术者进一步校准。

值得一提的是,根据本研究作者的实际使用经验,骨科手术机器人在置入骶髂关节螺钉中使用的注意事项包括:①术前仔细阅读患者的 CT 及 X 线片,注意第 1 骶椎是否存在变异,有无置入螺钉的安全通道,如果第 1 骶椎变异,无置入安全通道,这时往往第 2 骶椎螺钉置入安全通道区域相对第 1 骶椎面积更大^[21],这种情况下可规划第 2 骶椎螺钉,而术前测量骶骨倾斜角有利于术中准确投照骨盆入口位及骨盆出口位。②患者术前需清洁灌肠,避免肠道气体及粪便影响术中透视图像及定位采集。③术前规划 C 型臂、机器人臂、主控台、红外追踪相机的摆放位置,因为 C 型臂投照骨盆入口位、骨盆出口位及侧位需要头尾端及对侧来回移动 C 型臂,如果机器人也放置于同侧往往会造成设备移动冲突和相互影响。具体做法是通常将 C 型臂放于对侧,红外追踪相机摆放位置要充分考虑到能否同时感应示踪器及机器人跟踪器,示踪器可以安置在同侧或对侧髂前上棘,关键是安置示踪器的 Schanz 钉需固定稳定可靠,避免固定不牢靠导致的轻微晃动。④术中 C 型臂需投照骨盆入口位、骨盆出口位,可根据术前所测骶骨倾斜角提前标记定位 C 型臂的位置及角度,要求入口位骶骨胛与第 1 骶椎前侧皮质重叠。出口位耻骨联合上缘与第 2 骶椎平行;同时要求透视图像能清晰显示骶孔的位置,避免路径规划错误导致的神经血管损伤。⑤应规划螺钉固定最优路径,路径规划完成后模拟机械臂运动轨迹,选择能使机械臂运动路径最短、机械臂各个关节旋转屈伸最小的套筒型号。⑥当机械臂根据预想规划路径运动至距离皮肤 0.5~1.0 cm 位置停止,需切开皮肤及皮下深筋膜层,置入套筒需达髂骨面并顶住髂骨,在打导针开始时可先轻柔反钻磨开一点骨质再钻入,以免导针打滑导致偏移。⑦在导针打入过程中,需再次用 C 型臂投照骨盆入口位、骨盆出口位及侧位来验证

实际打入路径和规划路径是否相符,置入螺钉长度需过骶椎中线,置钉完成后,再次 C 型臂确认。

总之,天玑骨科手术机器人在骶髂关节螺钉置入中具有微创、低辐射、定位准确稳定、置钉精准、操作智能、学习曲线不长等优点,解决了以往置钉依赖经验及反复透视等问题^[22],但同时也存在价格昂贵、只能精准定位无法自主规划螺钉路径及无骨折复位功能等缺点,相信这些缺点会随着数字化骨科的发展而逐渐得到解决。

利益冲突:所有作者声明不存在利益冲突。

参考文献

- 1 龙涛,彭超,何智勇,等.机器人辅助下经皮骶髂螺钉固定手术的优势及安全性研究. *中华创伤骨科杂志*, 2019, 21(1): 10-15.
- 2 Tile M. Pelvic ring fractures: should they be fixed?. *J Bone Joint Surg Br*, 1988, 70(1): 1-12.
- 3 Santoro G, Braidotti P, Gregori F, et al. Traumatic sacral fractures: navigation technique in instrumented stabilization. *World Neurosurg*, 2019, 131: 399-407.
- 4 Eastman JG, Kuehn RJ, Chip Routt ML Jr. Useful intraoperative technique for percutaneous stabilization of bilateral posterior pelvic ring injuries. *J Orthop Trauma*, 2018, 32(5): e191-e197.
- 5 郭晓山. 骨盆骨折微创手术的问题及展望. *中华创伤骨科杂志*, 2019, 21(1): 90-92.
- 6 Cai L, Zhang Y, Zheng W, et al. A novel percutaneous crossed screws fixation in treatment of day type II crescent fracture-dislocation: a finite element analysis. *J Orthop Translat*, 2019, 20: 37-46.
- 7 Mirkovic S, Abitbol JJ, Steinman J, et al. Anatomic consideration for sacral screw placement. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1991, 16(Suppl 6): S289-S294.
- 8 Hoernschemeyer DG, Pashuck TD, Pfeiffer FM. Analysis of the S2 alar-iliac screw as compared with the traditional iliac screw: does it increase stability with sacroiliac fixation of the spine?. *Spine J*, 2017, 17(6): 875-879.
- 9 师述昌,朱罡,王豫,等.计算机辅助骶髂关节螺钉最优通道自动规划技术研究. *北京生物医学工程*, 2018, 37(6): 551-558, 565.
- 10 王刚,张月雷,章乐成,等.骨科机器人联合骨盆解锁复位架辅助下经皮螺钉固定治疗骨盆骨折. *中华创伤骨科杂志*, 2020, 22(6): 475-481.
- 11 Majeed SA. Grading the outcome of pelvic fractures. *J Bone Joint Surg Br*, 1989, 71(2): 304-306.
- 12 Matta JM, Saucedo T. Internal fixation of pelvic ring fractures. *Clin Orthop Relat Res*, 1989(242): 83-97.
- 13 Mendel T, Radetzki F, Wohlrab D, et al. CT-based 3-D visualisation of secure bone corridors and optimal trajectories for sacroiliac screws. *Injury*, 2013, 44(7): 957-963.
- 14 王伟,张立峰,王斌,等.骶髂关节螺钉新型辅助置钉技术的研究进展. *中华创伤骨科杂志*, 2020, 22(6): 507-511.
- 15 Matityahu A, Kahler D, Krettek C, et al. Three-dimensional navigation is more accurate than two-dimensional navigation or conventional fluoroscopy for percutaneous sacroiliac screw fixation in the dysmorphic sacrum: a randomized multicenter

- study. *J Orthop Trauma*, 2014, 28(12): 707-710.
- 16 谭山, 高仕长, 张安维. 经皮骶髂关节螺钉固定变异骶骨的影像学初步研究. *重庆医科大学学报*, 2018, 43(10): 1388-1393.
- 17 Gardner MJ, Morshed S, Nork SE, *et al*. Quantification of the upper and second sacral segment safe zones in normal and dysmorphic sacra. *J Orthop Trauma*, 2010, 24(10): 622-629.
- 18 黄俊锋, 刘黎军, 韩云, 等. 机器人导航定位系统辅助经皮骶髂螺钉治疗骨盆后环不稳定型损伤的临床研究. *中华骨与关节外科杂志*, 2020, 13(2): 148-153.
- 19 韩巍, 张腾, 苏永刚, 等. 天玑®骨科手术机器人辅助经皮固定骶髂螺钉治疗不稳定骨盆后环骨折的临床研究. *北京生物医学工程*, 2021, 40(3): 257-262.
- 20 邓宁, 吴伟坚, 梁国穗. 机器人和计算机辅助骨科手术. *中华创伤骨科杂志*, 2005, 7(7): 620-624.
- 21 Conflitti JM, Graves ML, Chip Routt ML Jr. Radiographic quantification and analysis of dysmorphic upper sacral osseous anatomy and associated iliosacral screw insertions. *J Orthop Trauma*, 2010, 24(10): 630-636.
- 22 Wu XB, Wang JQ, Sun X, *et al*. Guidance for the treatment of femoral neck fracture with precise minimally invasive internal fixation based on the orthopaedic surgery robot positioning system. *Orthop Surg*, 2019, 11(3): 335-340.

收稿日期: 2021-08-31 修回日期: 2022-03-31

本文编辑: 唐棣/孙艳梅