

3D 打印模型辅助与骨科机器人在脊柱畸形矫形过程中的精准置钉

https://doi.org/10.12307/2022.174

宋玉鑫¹, 张同同², 牛建雄², 王增平¹, 文杰¹, 张群立¹, 薛文¹, 刘林¹

投稿日期: 2021-01-30

送审日期: 2021-02-04

采用日期: 2021-04-28

在线日期: 2021-06-10

中图分类号:

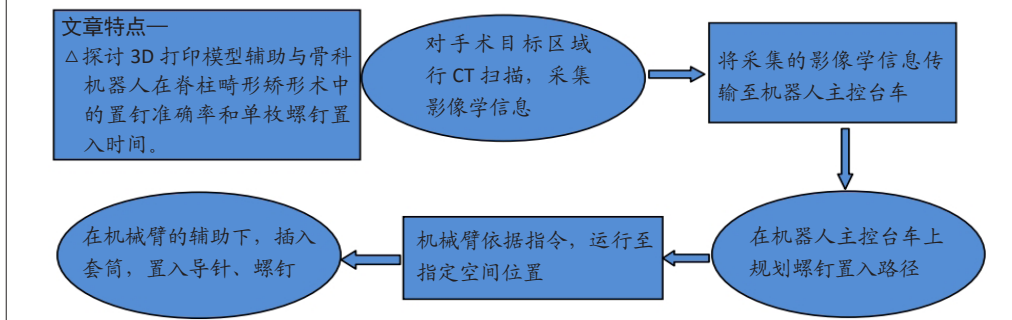
R459.9; R496; R318

文章编号:

2095-4344(2022)06-00904-04

文献标识码: A

文章快速阅读:



文题释义:

3D打印模型: 对手术区域进行螺旋CT扫描, 将CT得到的图像信息保存为DICOM格式, 接着将数据导入Mimics三维建模软件, 重建出三维模型。最后将重建的结果以STL格式导入3D打印机, 按照三维模型逐层叠加打印出1:1解剖模型。在3D打印模型辅助下, 手术医师能够获得清晰的三维解剖学信息, 并且能够依据术前设计的手术入路、置钉的角度及深度, 选择大小合适螺钉, 能够提高椎弓根螺钉置入的成功率, 降低手术风险。

骨科手术机器人: 能够辅助开展脊柱外科手术以及创伤骨科手术, 以机械臂辅助完成这些手术中的手术器械或植入物的定位。产品兼容2D与3D模式, 独有入钉点及钉道计算智能算法, 机械臂精准运动到规划位置, 借助骨科引导器, 为医生提供精准稳定的导针置入路径。按照术中规划, 医生可以精准设计并置入内植入物。

摘要

背景: 脊柱畸形导致正常的椎弓根解剖结构发生变化, 在脊柱畸形矫形术中置入椎弓根螺钉的难度增加。

目的: 探讨3D打印模型辅助与骨科机器人在脊柱畸形矫形术中的置钉准确率和单枚螺钉置入时间。

方法: 40例脊柱畸形患者依据手术方式不同可分为: 观察组18例, 采用骨科机器人辅助置入椎弓根螺钉, 即在开放手术过程中运用机器人进行椎弓根螺钉路径规划, 机械臂到达指定位置, 置入导针、螺钉; 对照组22例, 采用3D模型辅助徒手置入椎弓根螺钉。依据Gertzbein-Robbins分类标准评价置钉准确率, 记录两组患者的单枚螺钉置入时间, 比较两组之间的置钉准确率及单枚螺钉置入时间。研究方案的实施符合《赫尔辛基宣言》和甘肃省人民医院对研究的相关伦理要求。

结果与结论: ①两组之间置钉准确率比较差异无显著性意义($P > 0.05$), A类螺钉准确率, 观察组85.9%(256/298)高于对照组79.9%(283/354) ($P < 0.05$), B类、C类、D类螺钉准确率, 两组间比较差异无显著性意义($P > 0.05$); ②单枚螺钉置入时间两组间比较, 差异无显著性意义 [(4.01±0.61), (3.74±0.44) min/枚, $P > 0.05$]; ③结果说明, 骨科机器人辅助脊柱畸形矫形术中椎弓根螺钉置入, 显著提高了A类螺钉置入的准确率, 准确度高、有效、可行。

关键词: 脊柱畸形; 骨科机器人; 3D打印技术; 置钉准确率

Precise screw placement of 3D printing model and orthopedic robot in spinal deformity

Song Yuxin¹, Zhang Tongtong², Niu Jianxiong², Wang Zengping¹, Wen Jie¹, Zhang Qunli¹, Xue Wen¹, Liu Lin¹

¹Second Department of Orthopedics, Gansu Provincial Hospital, Lanzhou 730000, Gansu Province, China; ²First School of Clinical Medicine, Gansu University of Chinese Medicine, Lanzhou 730000, Gansu Province, China

Song Yuxin, Master, Associate chief physician, Second Department of Orthopedics, Gansu Provincial Hospital, Lanzhou 730000, Gansu Province, China

Corresponding author: Xue Wen, Master, Associate chief physician, Second Department of Orthopedics, Gansu Provincial Hospital, Lanzhou 730000, Gansu Province, China

Abstract

BACKGROUND: Spinal deformities lead to changes in the normal anatomical structure of the pedicle, and it is more difficult to insert pedicle screws during the correction of spinal deformities.

OBJECTIVE: To investigate the accuracy of screw placement and single screw placement time in orthopedic surgery with 3D printing model and orthopedic robot.

¹甘肃省人民医院骨二科, 甘肃省兰州市 730000; ²甘肃中医药大学第一临床医学院, 甘肃省兰州市 730000

第一作者: 宋玉鑫, 男, 1981年生, 甘肃省兰州市人, 汉族, 2009年兰州大学毕业, 硕士, 副主任医师, 主要从事脊柱外科疾病研究。

通讯作者: 薛文, 硕士, 副主任医师, 甘肃省人民医院骨二科, 甘肃省兰州市 730000

https://orcid.org/0000-0002-4218-4341 (宋玉鑫)

基金资助: 甘肃省人民医院内多学科联合科研项目 (18GSSY3-9), 项目负责人: 薛文; 甘肃省人民医院内科研基金项目

(19SYPYB-29), 项目负责人: 薛文; 甘肃省人民医院内科研基金项目 (20GSSY4-31), 项目负责人: 王增平

引用本文: 宋玉鑫, 张同同, 牛建雄, 王增平, 文杰, 张群立, 薛文, 刘林. 3D打印模型辅助与骨科机器人在脊柱畸形矫形过程中的精准置钉 [J]. 中国组织工程研究, 2022, 26(6):904-907.



METHODS: Totally 40 patients with spinal deformity were divided into two groups according to different surgical approaches. In the observation group, 18 patients were placed with pedicle screw assisted by orthopedic robot; i.e., in the process of open surgery, the robot was used to plan the pedicle screw paths; the manipulator reached the designated position; the guide needle and screw were placed. In the control group, 22 cases were implanted with pedicle screw assisted by 3D model. According to Gertzbein-Robbins classification standard, the accuracy of screw placement was evaluated. The time of single screw placement was recorded, and the accuracy and time of single screw placement were compared between the two groups. The protocol was performed in accordance with Declaration of Helsinki and the relevant ethical requirements of the Gansu Provincial Hospital.

RESULTS AND CONCLUSION: (1) There was no significant difference in the accuracy of screw placement between the two groups ($P > 0.05$). The accuracy of class A screw was significantly higher in the observation group 85.9%(256/298) than that in the control group 79.9%(283/354) ($P < 0.05$). The accuracies of class B, class C and class D screw were not significantly different between the two groups ($P > 0.05$). (2) The time of single screw placement was not significantly different between the observation group and the control group [(4.01±0.61), (3.74±0.44), $P > 0.05$]. (3) It is concluded that orthopedic robot assisted pedicle screw placement can significantly improve the accuracy of class A screw placement, which is highly accurate, effective and feasible.

Key words: spinal deformity; orthopedic robot; 3D printing technology; accuracy of pedicle screw placement

Funding: Multidisciplinary Scientific Research Fund Project of Gansu Provincial Hospital, No. 18GSSY3-9 (to XW); Scientific Research Fund Project of Gansu Provincial Hospital, No. 19SYPYB-29 (to XW); Scientific Research Fund Project of Gansu Provincial Hospital, No. 20GSSY4-31 (to WZP)

How to cite this article: SONG YX, ZHANG TT, NIU JX, WANG ZP, WEN J, ZHANG QL, XUE W, LIU L. Precise screw placement of 3D printing model and orthopedic robot in spinal deformity. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu. 2022;26(6):904-907.

0 引言 Introduction

脊柱畸形是指脊柱冠状位、矢状位的弯曲超过正常生理弯曲, 表现为病理性的脊柱形态, 严重危害患者的身心健康^[1-2]。脊柱畸形通常需要手术干预, 以达到矫正畸形、恢复脊柱稳定性及解除神经压迫的目的; 但是, 脊柱畸形常常涉及到多种解剖结构的异常, 且毗邻脊髓、神经、血管等重要组织, 置钉难度及风险远高于非脊柱畸形^[3]。随着人工智能的飞速发展, 3D 打印技术的兴起及骨科机器人投入临床使用, 显著提高了椎弓根螺钉置钉的准确率^[4-5]。此次研究就脊柱畸形矫正术中 3D 打印模型与骨科机器人辅助置钉准确率及单枚螺钉置入时间进行对比分析。

1 对象和方法 Subjects and methods

1.1 设计 回顾性病例分析, 组间比较采用独立样本 t 检验和 χ^2 检验。

1.2 时间及地点 回顾性分析了甘肃省人民医院 2018 年 1 月至 2020 年 12 月 40 例脊柱畸形患者的临床资料。

1.3 对象

纳入标准: ①经查体及影像学检查确诊为脊柱畸形; ②均接受脊柱畸形矫正手术, 行椎弓根螺钉内固定术; ③签署知情同意书且临床资料完整。

排除标准: ①脊柱侧凸畸形接受多次松解牵引, 椎弓根螺钉分次置入, 内固定矫正治疗的病例; ②脊柱畸形不严重可保守治疗的患者; ③其他严重疾病无法耐受手术者; ④临床资料不完整患者。

根据上述纳入排除标准, 收集了 40 例脊柱畸形患者的临床资料。依据手术方式不同可分为: 观察组 18 例, 男 11 例, 女 7 例; 年龄 19-58 岁; 先天性脊柱后凸畸形 4 例, 陈旧创伤性后凸畸形 5 例, 陈旧性脊柱结核 4 例, 强直性脊柱炎后凸畸形 3 例, 后凸 Cobb 角为 55°-82°, 青少年特发性脊柱侧弯 2 例, 侧凸 Cobb 角 53°-75°。对照组 22 例, 男 13 例, 女 9 例; 年龄 18-61 岁; 先天性脊柱后凸畸形 6 例, 陈旧创伤性后凸畸形 5 例, 陈旧性脊柱结核后凸畸形 3 例, 强直性脊柱炎后凸畸形 4 例, 后凸 Cobb 角为 58°-86°, 青少年特发性脊柱侧弯 4 例, 侧凸 Cobb 角 55°-85°。两组患者一般资料比较差异无统计学意义。

研究方案的实施符合《赫尔辛基宣言》和甘肃省人民医院对研究的相关伦理要求。

1.4 材料 骨科机器人: 北京天智航医疗科技股份有限公司生产, 注册号: 国械注准 20163542280, 由机械臂主机、光学跟踪系统、主控台车构成; 手术器械均为富乐 II -6810-4 矫形(骨科)外科用手术器械; 所采用的医学专用 3D 打印设备为麦递途医疗科技(上海)有限公司提供。后路椎弓根钉棒系统介绍, 见表 1。

表 1 | 临床试验应用的骨科植入物介绍

Table 1 | Introduction of orthopedic implants used in clinical trials

指标	后路椎弓根钉棒系统
植入物厂家	北京市富乐科技开发有限公司
批准号	京食药器械生产许可证 20000047 号
组成	椎弓根螺钉、钛棒
材质	钛合金
适应证	脊柱后路内固定
不良反应	植入物松动、移位

1.5 方法 两组患者手术均由同一手术团队完成。

1.5.1 两组置钉方法

(1) 观察组: 患者全身麻醉后取俯卧位, 采用骨科机器人专用 Allen Medical 脊柱手术床, 常规消毒铺单。依据手术节段取后正中切口, 依次切开皮肤、皮下组织, 沿着棘突剥离两侧椎旁肌肉, 剥离至双侧小关节突及横突, 显露满意后, 将示踪器安装在棘突上, 硬性固定牢靠, 将机器人系统与 C 臂系统连接, 三维 C 臂扫描手术节段, 采集影像学信息, 将 C 臂采集的影像学信息传输至机器人主控台车, 进行配准, 规划椎弓根螺钉置入点、置入角度及深度, 并确定螺钉大小, 机械臂依据规划运行至指定的空间位置, 沿机械臂固定方向插入套筒, 直达椎弓根骨面, 置入所有导针、丝攻, 置入螺钉; 由于手术节段较长, 常需使用三维 C 臂分次扫描, 通常扫描 2-4 次, 胸椎可一次扫描 4 个椎体, 腰椎可一次扫描 3 个椎体; 此外, 主控台路径规划及导针置入由胸椎向腰椎, 避免机械臂运行时被导针阻挡, 螺钉置入完毕后, 矫正畸形, 两侧置棒矫形, 冲洗, 留置引流管, 逐层关闭切口。

(2) 对照组: 对手术区域进行螺旋 CT 扫描, 将 CT 得到的图像信息保存为 DICOM 格式, 接着将数据导入 Mimics 三维建模软件, 重建出三维模型。最后将重建的结果以 STL 格式导入 3D 打印机, 按照三维模型逐层叠加打印出 1:1 解剖模型。患者全身麻醉后, 取俯卧位, C 臂透视定位, 选择后正中切口, 逐层切开、显露, 充分显露背侧骨性结构, 尽

量剥离安置 3D 打印导航模型位置周围的软组织，使之与椎板、关节突棘突紧密贴合，固定住导航模型，接着沿 3D 打印导航模型的导向孔方向缓慢钻孔，钻到预先规划的刻度位置，钻孔完成后，使用探针针对钉道进行探查，确认在椎弓根内后，丝锥丝攻，置入椎弓根螺钉，同样的方式置入所有椎弓根螺钉，C 臂透视确认螺钉位置良好，矫正畸形，两侧置棒矫形，冲洗，留置引流管，逐层关闭切口。

1.5.2 记录椎弓根螺钉置入准确率 术后 1 周所有患者行 CT 扫描，由同一外科医生依据 Gertzbein-Robbins^[6] 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，详细标准：A 类，无皮质侵犯；B 类，皮质穿透 < 2 mm；C 类，2 mm ≤ 皮质穿透 < 4 mm；D 类，4 mm ≤ 皮质穿透 < 6 mm；E 类，皮质穿透 ≥ 6 mm；椎弓根螺钉置入的准确率 = (A 类 + B 类螺钉数目) / 组内所有置入螺钉数目 × 100%，对所置入的螺钉进行评价，并计算椎弓根螺钉置入的准确率。

1.5.3 记录单枚椎弓根螺钉置入时间 观察组：单枚螺钉置入时间 = 安装示踪器开始至所有螺钉完全置入时间 / 置入螺钉数目；对照组：单枚螺钉置入时间 = 安置 3D 打印导航模型至所有螺钉完全置入时间 / 置入螺钉数目。

1.6 主要观察指标 置钉准确率和单枚螺钉置入时间。

1.7 统计学分析 采用 SPSS 25.0 统计学软件对所获得的数据进行分析，计量资料采用 $\bar{x} \pm s$ 表示，置钉时间两组间比较采用独立样本 *t* 检验，置钉准确率两组间比较采用 χ^2 检验。当 *P* < 0.05 时为差异有显著性意义。

2 结果 Results

2.1 参与者数量分析 纳入患者 40 例，分为 2 组，全部进入结果分析。

2.2 两组患者基线资料比较 两组患者一般资料比较差异无显著性意义，见表 2。

表 2 | 两组患者一般资料比较

组别	<i>n</i>	性别 (男/女, <i>n</i>)	年龄 ($\bar{x} \pm s$, 岁)	后凸角度 ($\bar{x} \pm s$, °)	侧凸角度 ($\bar{x} \pm s$, °)
观察组	18	11/7	36.67 ± 11.14	70.33 ± 7.09	64.06 ± 6.73
对照组	22	13/9	39.55 ± 12.02	69.27 ± 8.67	65.55 ± 6.36
统计值		$\chi^2=0.017$	<i>t</i> = -0.779	<i>t</i> = 0.417	<i>t</i> = -0.719
<i>P</i> 值		0.897	0.441	0.679	0.477

两组患者分组流程图，见图 1。

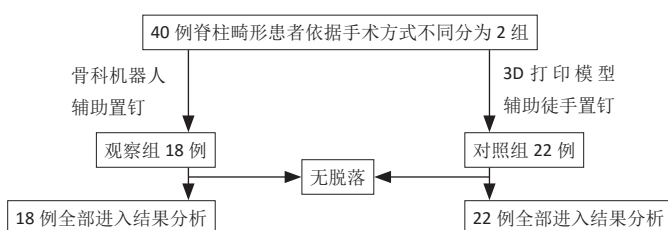


图 1 | 患者分组流程图

Figure 1 | Flow chart of patients of both groups

2.3 置钉准确率及置钉操作时间比较 见表 3。

表 3 | 置钉准确率及置钉操作时间比较

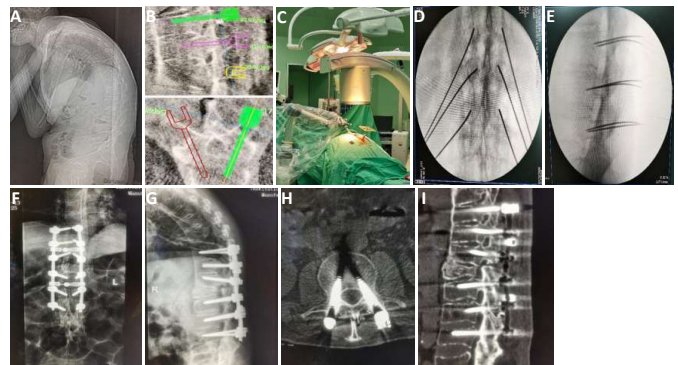
Table 3 | Comparison of screw placement accuracy and screw placement operation time

项目	观察组	对照组	统计值	<i>P</i> 值
置钉枚数	298	354		
A 类 (枚)	256	283	$\chi^2=4.015$	0.045
B 类 (枚)	30	47	$\chi^2=1.600$	0.206
C 类 (枚)	10	16	$\chi^2=0.573$	0.449
D 类 (枚)	2	8	$\chi^2=2.704$	0.100
置钉准确率 (%)	95.9(286/298)	93.2(330/354)	$\chi^2=2.350$	0.125
置钉时间 ($\bar{x} \pm s$, min/枚)	4.01 ± 0.61	3.74 ± 0.44	<i>t</i> = 1.601	0.118

2.3.1 置钉准确率 观察组共置入 298 枚螺钉，其中 A 类 256 枚，B 类 30 枚，C 类 10 枚，D 类 2 枚，E 类 0 枚，置钉准确率为 95.9%(286/298)，其中 A 类螺钉准确 85.9%(256/298)。对照组置入螺钉共 354 枚，其中 A 类 283 枚，B 类 47 枚，C 类 16 枚，D 类 8 枚，E 类 0 枚，置钉准确率为 93.2%(330/354)，其中 A 类螺钉准确率 79.9%(283/354)。两组之间置钉准确率比较差异无显著性意义 (*P* > 0.05)，与对照组相比观察组 A 类螺钉置入准确率要高，差异有显著性意义 (*P* < 0.05)，B 类、C 类、D 类螺钉置入准确率，两组之间比较差异无显著性意义 (*P* > 0.05)。

2.3.2 置钉操作时间 单枚螺钉置入时间观察组为 3.4–5.3(4.18 ± 0.56) min，对照组为 3–4.2(3.84 ± 0.34) min，两组比较差异无显著性意义 (*P* > 0.05)。

2.4 典型病例 患者，男，40 岁，主因强直性脊柱炎伴脊柱后凸畸形 10 年余入院，行脊柱畸形矫正椎弓根螺钉内固定术前后影像学资料，见图 2。



图注：图 A 为术前影像学资料 Cobb 角 65°；B, C 为术中机器人规划螺钉置入路径；D, E 为术中透视、侧位显示导针位置良好；F, G 为术后正、侧位 X 射线片；H, I 为术后 CT 结果示螺钉完全在椎弓根内，依据 Gertzbein-Robbins 评分为 A 类

图 2 | 强直性脊柱炎伴脊柱后凸畸形行脊柱畸形矫正椎弓根螺钉内固定术前后影像学资料

Figure 2 | Imaging data of ankylosing spondylitis with kyphosis deformity correction of spine deformity before and after pedicle screw internal fixation

2.5 材料宿主反应 两组患者术后伤口愈合良好，均未发生与植入物材料引起的机体局部和全身反应，亦未出现螺钉松动等问题。

3 讨论 Discussion

随着科学技术的飞速发展，人工智能为医学领域带来了一次革新，尤其在外科系统手术正在向精准化、个体化、微创化发展，人工智能技术已然成为当代医学一个新的领域。如在 3D 打印技术的辅助下骨科手术实现了更加微创化、智能化^[7-9]。目



前骨科机器人也逐渐在骨科领域被广泛地运用,在各种骨科手术中如骨盆骨折手术、四肢骨折手术、脊柱骨折手术中均有很好的运用^[10-13],并取得了较好的临床效果,但骨科机器人辅助脊柱畸形手术的报道少见。脊柱畸形导致正常的解剖关系发生变化,导致手术复杂,风险巨大,一直以来是脊柱外科医师的关注点^[14]。目前脊柱内固定技术及脊柱截骨技术得到广泛应用,但后入路脊柱畸形矫形手术风险依旧较高,有可能出现因椎弓根置钉失误导致脊髓损伤、血管损伤、神经根损伤等并发症^[15],对脊柱外科医师而言手术难度高。

在脊柱畸形截骨矫形手术中使用骨科机器人,术前机器人与C臂系统连接,采集手术部位的影像学信息,将收集的信息发送至机器人主控台车,术者可依据三维影像在主控台车上通过手术规划程序对螺钉置入路径及手术操作部位预先规划。机械臂可依据规划路径到达指定的空间位置。术者通过机械臂固定的方向插入套筒精确置入导针、椎弓根螺钉,光学跟踪系统及示踪器时刻探测因呼吸等因素引起的体位变化,与机械臂实时配准,确保椎弓根螺钉安全、准确地置入。已有相关文献报道富有经验的脊柱外科医师徒手置钉准确率大约为90%^[16-17]。此次研究中依据Gertzbein-Robbins分类标准评价椎弓根螺钉置入准确率,螺钉置入准确率为95.6%与3D技术辅助下螺钉置入准确率92.8%相比较,但两组之间的差异无统计学意义($P > 0.05$),与对照组相比观察组A类螺钉置入准确率要高,差异有显著性意义($P < 0.05$),就这一结果而言,机器人辅助置钉具有一定的优势,减少了脊髓、神经根损伤等并发症的发生;B类、C类、D类螺钉置入准确率两组之间比较差异无显著性意义($P > 0.05$)。在观察组中有1枚螺钉被评为D类,可能由以下原因所致:①示踪器未达到硬性固定,在手术过程发生松动;②患者呼吸运动影响;③扫描完毕牵开软组织把引导套管完全放在切口内,造成的体位位移^[18-19]。就手术置钉操作时间而言机器人置钉操作时间比3D打印辅助操作时间较长,但两者之间差异无显著性意义($P > 0.05$),扫描花费时间,调整光学追踪器机器人手术在设备安装、起始影像学评估方面会占用一定时间,而术者对新系统不如徒手操作更熟悉也会延长手术时间,机器人辅助技术刚刚兴起,有一定的学习曲线。根据手术时间的CUSUM学习曲线形态,分析手术时间与病例数,结果表明在机器人辅助下手术开展之初手术时间长的问题不会一直存在,随着术者对机器人及手术方式方法的熟练,学习曲线会趋于稳定状态^[20]。骨科机器人具有“透视眼”,在主控台车上可规划螺钉置入点,方向及螺钉大小。机械臂也称“稳定手”,灵活度高,运行稳当,当机械臂到达指定位置后,固定套筒,很大程度上避免了因术者生理性震颤或者电钻震动导致的螺钉置入偏差。

综上所述,在脊柱畸形矫形手术中骨科机器人辅助置钉安全、有效,充分熟悉骨科机器人操作流程的前提下,才能日渐完善。但此次研究病例较少,今后仍需设计大样本长期随访的前瞻性研究来验证临床的安全性、有效性。

作者贡献: 宋玉鑫进行试验设计,试验实施为薛文、张同同、宋玉鑫、牛建雄、文杰、王增平、张群立,试验评估为刘林,资料收集为张同同,宋玉鑫成文,薛文审核。

经费支持: 该文章接受了“甘肃省人民医院院内多学科联合科研项目(18GSSY3-9)”及“甘肃省人民医院院内科研基金项目(19SPYB-29, 20GSSY4-31)”的资助。所有作者声明,经费支持没有影响文章观点和对研究数据客观结果的统计分析及其报道。

利益冲突: 文章的全部作者声明,在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。

机构伦理问题: 研究方案的实施符合《赫尔辛基宣言》和甘肃省人民医院对研究的相关伦理要求。

知情同意问题: 患者对治疗方案完全知情同意,在充分了解治疗方案的前提下签署了“知情同意书”。

写作指南: 该研究遵守《非随机对照临床试验研究报告指南》(TREND声明)。

文章查重: 文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行3次查重。

文章外审: 文章经小同行外审专家双盲外审,同行评议认为文章符合期刊发表宗旨。

生物统计学声明: 文章统计学方法已经甘肃省人民医院生物统计学专家审核。

文章版权: 文章出版前杂志已与全体作者授权人签署了版权相关协议。

开放获取声明: 这是一篇开放获取文章,根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享4.0”条款,在合理引用的情况下,允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展,同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献,并为之建立索引,用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

4 参考文献 References

- [1] 陆晓生,黄渭景,赵劲民. 脊柱畸形手术治疗现状与方向[J]. 中国矫形外科杂志,2015,23(3):239-241.
- [2] 陈毅,王利民,王卫东,等. 3D打印辅助SRS-Schwab IV级截骨术治疗老年性脊柱后凸畸形[J]. 中华实验外科杂志,2020,37(12):2337-2340.
- [3] JIANG D, LIU Z, YAN H, et al. Correction of Scoliosis with Large Thoracic Curves in Marfan Syndrome: Does the High-Density Pedicle Screw Construct Contribute to Better Surgical Outcomes. Med Sci Monit. 2019;25:9658-9665.
- [4] WU XB, WANG JQ, SUN X, et al. Guidance for Treatment of Pelvic Acetabular Injuries with Precise Minimally Invasive Internal Fixation Based on the Orthopaedic Surgery Robot Positioning System. Orthop Surg. 2019;11(3):341-347.
- [5] 李洪珂,郝申申,王鹏程,等. 3D打印导航模板辅助特发性脊柱侧弯椎弓根螺钉置入的准确性[J]. 中国组织工程研究,2020,24(30):4757-4762.
- [6] MOLINA CA, PHILLIPS FM, COLMAN MW, et al. A cadaveric precision and accuracy analysis of augmented reality mediated percutaneous pedicle implant insertion. J Neurosurg Spine. 2020;30:1-9.
- [7] 张同同,王中华,文杰,等. 3D打印模型在颈椎肿瘤手术切除与重建中的应用[J]. 中国组织工程研究,2021,25(9):1335-1339.
- [8] 蒋维利,牛国旗,周功,等. 3D打印技术辅助成人脊柱侧后凸畸形的术前规划及应用价值[J]. 中国骨伤,2020,33(2):99-105.
- [9] 吴荣海,周俊德,陈培友,等. 3D打印技术辅助后路截骨治疗脊柱畸形的Meta分析[J]. 中国组织工程研究,2020,24(36):5880-5885.
- [10] 赵春鹏,肖鸿鹄,汪凯文,等. 骨科机器人辅助髓臼骨折微创手术的临床研究[J]. 中华创伤骨科杂志,2020,22(12):1021-1028.
- [11] 忻慰,王波,钱齐荣,等. 机器人辅助手术在全髋关节置换中的应用现状及进展[J]. 生物骨科材料与临床研究,2020,17(6):65-70.
- [12] 夏海军,毛峰,汪少波,等. 骨科手术机器人辅助经皮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.
- [13] 林书,胡虹,万仑,等. 机器人辅助下经皮微创椎弓根螺钉内固定与传统开放内固定治疗胸腰椎骨折的短期疗效比较[J]. 中国修复重建外科杂志,2020,34(1):76-82.
- [14] 陈锴,蔡腾广,王晨,等. 人工智能在脊柱畸形诊疗中的应用及展望[J]. 第二军医大学学报,2020,41(3):243-247.
- [15] 卢志军,陈荣春,郭朝阳,等. 3D打印定向截骨导板治疗脊柱畸形的临床效果[J]. 中国矫形外科杂志,2018,26(17):1574-1579.
- [16] MARCUS HJ, CUNDY TP, NANDI D, et al. Robot-assisted and fluoroscopy-guided pedicle screw placement: a systematic review. Eur Spine J. 2014;23(2):291-297.
- [17] KERIC N, DOENITZ C, HAJ A, et al. Evaluation of robot-guided minimally invasive implantation of 2067 pedicle screws. Neurosurg Focus. 2017;42(5):E11.
- [18] 章仁杰,申才良,张华庆,等. 骨科机器人辅助胸腰椎椎弓根螺钉内固定位置不良原因分析[J]. 颈腰痛杂志,2019,40(5):577-582.
- [19] 陈豪杰,张嘉男,郝定均,等. 脊柱机器人置钉错误的多因素分析[J]. 骨科,2020,11(6):523-528.
- [20] 范明星,张琦,赵经纬,等. 机器人辅助经皮微创单节段胸腰椎骨折内固定术的学习曲线[J]. 中国微创外科杂志,2019,19(9):808-811.

(责任编辑: WZH, ZN, ZH)