

· 文献综述 ·

经皮椎弓根螺钉置入辅助技术的临床应用进展*

吴汪民 综述 曾腾辉** 审校

(深圳大学附属第一医院 深圳市第二人民医院脊柱外科, 深圳 518035)

文献标识:A 文章编号:1009-6604(2024)05-0369-06

doi:10.3969/j.issn.1009-6604.2024.05.010

经皮椎弓根螺钉置入(percutaneous pedicle screw placement, PPSP)通过小切口由导针引导螺钉置入目标椎体,避免对椎旁肌肉及软组织剥离,避免大面积创伤带来的神经、血管损伤和术后并发症^[1]。2001年,Foley等^[2]报道采用Sextant系统经皮置入螺钉,极大地推动PPSP的发展。

PPSP最早应用于无症状的胸腰椎骨折及腰椎不稳复位内固定治疗中,随着椎弓根螺钉更新升级(如可膨胀的椎弓根螺钉^[3]、实现骨水泥灌注的椎弓根螺钉^[4])和辅助技术的发展,PPSP适应证进一步扩大,甚至部分需要椎管减压的患者。目前PPSP用于从胸椎到骨盆的长段微创脊柱固定,治疗创伤性脊柱骨折、脊柱肿瘤、椎管狭窄、脊柱结核和骨质疏松性椎体骨折等脊柱常见疾病^[1,3-8]。

但PPSP存在明显的局限性。首先,传统透视置钉的学习周期比较长,初次置钉者术中需要反复透视调整,不仅增加神经损伤的风险和人员的辐射量,而且反复穿刺降低螺钉的把持力。其次,骨性结构透视下形成的二维图像容易造成空间位置不清晰,穿刺定位依赖于术者个人经验和对二维图像的解读,置钉中容易造成对关节突的破坏。传统PPSP术中关节突关节损伤率达10.9%~34.0%^[9-11],透视下置钉准确率为77.5%~93.6%^[12-15]。随着各种自制定位器、内镜、导航系统、机器人等技术的引入,螺钉置入的准确性得到提高,避免螺钉错位带来的并发症。本文针对目前临床PPSP的应用进展及各种辅助置钉技术进行综述。

1 辅助定位

1.1 自制定位引导器

传统PPSP多采用透视注射器针头结合网格板的方法进行体表定位,但只能定位穿刺点位置,而忽略置钉角度,术中需反复透视调整螺钉角度,这极大影响置钉准确性,并增加人员辐射量。倪金和等^[16]设计自制定位引导器,通过于手术床旁安装体外定位穿刺架,结合术前影像和计算机辅助测量各标志点距离,依照术中透视微调穿刺架于皮肤穿刺表面的纵向、横向平面,选择最佳定位针角度置钉,通过19例应用自制定位器与20例传统定位网比较,结果显示在调整穿刺锥次数 $[(2.78 \pm 0.28) \text{次} \text{ vs. } (33.35 \pm 2.51) \text{次}]$ 、透视次数 $[(40.21 \pm 0.80) \text{次} \text{ vs. } (47.60 \pm 1.79) \text{次}]$ 、穿刺时间 $[(25.84 \pm 0.84) \text{min} \text{ vs. } (40.30 \pm 1.68) \text{min}]$ 等方面,自制定位引导器都明显优于传统置钉。但该定位器操作灵活性稍差,无法满足2个椎体同时穿刺定位,如存在椎体旋转、椎弓根细窄等情况,螺钉置入的准确度受到影响。徐灿华等^[17]报道自制可调节定位器,由术前影像计算椎弓根高度、宽度,通过可动式调节延长杆及定位棒实现矢状面定位,菱形面实现冠状面定位,从而将椎弓根位置投影到体表处作类椭圆形轮廓线标记,再完成椎弓根螺钉置入,将自制定位器与传统网格定位器各31例进行比较,采用Mobbs-Raley分级评估置钉准确率,结果显示自制定位器螺钉准确率远高于传统组 $[96.8\% (30/31) \text{ vs. } 77.4\% (24/31)]$ 。

* 基金项目:深圳市高水平医院建设项目深圳市第二人民医院院级临床研究项目(2023yjleyj034)

** 通讯作者, E-mail:1697988399@qq.com

该装置具有可调节的优势,很好地满足手术操作要求,但患者体位改变或者人为因素误碰定位架等可影响置钉精度,未来在自制定位器设计和制作上仍需进一步改善,以提高临床实用性。

1.2 激光定位

2000 年 Schwend 等^[18]首次证实激光指示路径直观,定位精准度高达 1.0 mm。Richter 等^[19]报道 Syngo 激光引导可实现复杂的解剖区域准确置钉。李永军等^[20]比较激光定位仪和正侧位透视置钉各 16 例,结果显示激光定位置钉时间短 $[(13.33 \pm 2.22) \text{ min vs. } (17.81 \pm 5.01) \text{ min}]$,辐射量低 $[(295.28 \pm 48.61) \mu\text{Gy vs. } (396.34 \pm 89.77) \mu\text{Gy}]$,术后 CT 显示螺钉准确度高(I 级 42 钉,II 级 22 钉 vs. I 级 23 钉,II 级 39 钉,III 级 2 钉)。

激光定位导航系统由激光发射装置、信号获取及传输器、图像数据计算处理器等组成。王永康等^[21]将激光定位器安装于 C 臂机,在透视下校准使激光束与 X 线方向一致,然后将术中椎体 X 线正侧位与术前三维 CT 数据通过图像数据软件处理实现 2D、3D 配准,并在系统界面规划穿刺路径,术者可视下按照激光在皮肤的投射点将螺钉置入椎弓根内,激光组精准度(即不需要调整穿刺针)74.3%(26/35),传统组(体表十字克氏针透视定位)仅为 17.1%(6/35),在透视次数、辐射剂量、手术时间等方面激光组也有明显优势。

激光辅助置钉系统结构简单,只需要实现图像数据模块与 C 臂机匹配完成术前校准,整个操作学习曲线短,易于在基层医院推广应用,但也存在的一些缺陷:①每次 C 臂机开机使用激光定位均需校正,使两者射线平行;②基于脊柱生理弯曲及旋转等先天因素,C 臂机投射中心离目标点越近,激光投射点的精确度越高,激光精确度由中心向四周呈降低趋势;③整个手术过程患者体位不能改变,否则影响置钉准确性。

1.3 3D 打印体外模板

个体化 3D 打印模板是 PPSP 领域的新技术之一,通过术前 CT 图像数据及 3D 打印技术构建置钉导向模板,对术者经验要求不高,不需要额外导航系统,可以获得较高的螺钉准确率^[22-25]。Liang 等^[23]的 meta 分析纳入 7 项研究,其中 87 例采用 3D 打印模板置入 1384 枚椎弓根螺钉,88 例采用徒手技术

置入 1392 枚椎弓根螺钉,结果显示,3D 打印模板技术螺钉位置良好率($OR = 2.22, P < 0.001$)和螺钉位置合格率($OR = 3.66, P < 0.001$)较高,螺钉位置不良率较低($OR = 0.23, P < 0.001$),每枚螺钉放置时间、总螺钉放置时间和失血量较少。连学辉等^[24]设计 3D 打印体外导板,依托术前 CT 图像数据,构建椎体模型并模拟最佳置钉点及角度,通过逆向工程原理,将模型数据导入 3D 打印机,应用聚乳酸材料打印 1:1 导板模型,在 G 臂机辅助下,于体外标志线(X 轴为伤椎上位椎体双侧椎弓根上缘连线,Y 轴为置钉节段棘突中心线)放置 3D 打印体外导板,依次置钉及透视确定穿刺点深度,与徒手置钉相比,导板组置钉准确率高 $[97.5\% (119/122) \text{ vs. } 92.1\% (128/139)]$,透视次数少 $[(15.26 \pm 4.15) \text{ 次 vs. } (26.93 \pm 6.93) \text{ 次}]$,手术时间短 $[(63.57 \pm 12.18) \text{ min vs. } (85.56 \pm 16.27) \text{ min}]$ 。曾柏方等^[25]应用 3D 打印技术制作通用型皮导板,治疗 19 例胸腰椎骨折共 40 个椎体,置入椎弓根螺钉 156 枚,采用 Gertzbein-Robbins 量表评价,A 级 145 枚,B 级 11 枚。该导板为通用型皮外导板,不需要依据不同患者的影像学数据定制导板,便于在基层医院应用推广。

1.4 超声引导置钉

Kantelhardt 等^[26]2009 年报道使用骨内超声在腰椎尸体标本中置入螺钉,但实际操作中超声准确识别骨性结构是置钉的前提之一。Ungi 等^[27]基于超声波测距原理,由超声实时定位和数据构建三维结构来辨别关节突等骨性结构,将椎弓根螺钉精确映射到术中坐标框架。2022 年 Gueziri 等^[28]报道应用超声辅助于猪的胸腰椎模型中置入 56 枚螺钉,其中 52 枚安全插入,无断裂,4 枚(7.1%)内侧缺口(均 $< 2 \text{ mm}$)。

超声容积导航(ultrasound volume navigation,UVN)是将术中超声与术前影像数据进行图像整合,利用实时超声定位、规划并实时引导。林旭鑫等^[29]报道 UVN 结合 X 线透视行经皮椎弓根螺钉置入治疗胸腰椎骨折 60 例,自身左右侧互为对照,对侧采用 X 线透视置钉,结果显示 UVN 具有影像学检查实际螺钉与术前规划钉道角度差值和距离偏差小、关节突侵犯率低、置钉时间短、透视次数少等优势。但这一技术系统操作比较复杂,设备成本较昂

贵,学习曲线较长,不利于在基层医院推广,且缺乏统一的操作流程和设备参数设定,限制了 UVN 的临床适用范围。

1.5 内镜辅助置钉

2000 年 Müller 等^[30]报道借助胸外科内镜工作通道直视下显露脊柱的深层结构并完成椎弓根螺钉置入。随着内镜技术的发展,出现空气介质的显微内镜^[8]、椎弓根内镜^[7]和水介质的脊柱内镜^[31]。这些内镜可以准确地显露骨性标志点人字嵴和横突根部,再依靠各自的镜下穿刺针及导针准确地将螺钉置入椎体中,不仅能获得较好的优良率,而且可以避免对关节突关节的损伤,从而减少脊柱不稳带来的并发症,内镜下还可对胸腰椎骨折导致椎体压迫神经进行减压,扩大了经皮椎弓根螺钉的适应证。可视下置钉能够准确地找到进针点及方向,在很大程度上减少因“盲穿”所增加的辐射暴露量,为 PPSP 提供了新的选择。但对于初学的骨科医生,初次椎弓根螺钉导针置入时间会长于传统 PPSP 技术,且操作前需掌握镜下操作技术,并熟悉人字棘及周围解剖结构。

1.6 实心椎弓根螺钉联合藕状杆置钉

传统 PPSP 多在透视下置入导针,再将空心螺钉按照导针方向置入,此方法螺钉位置一般不易偏移,有些还可灌注骨水泥辅助治疗骨质疏松等情况,但空心螺钉费用比较昂贵,且对术者经验、技术要求高。谭志红等^[32]报道透视下置入导针,用自制藕状杆(类似莲藕含有多孔)微调导针,决定最佳进针通道,然后用磨钻去除进针点骨皮质及攻丝置钉通道,助手协助稳定好扩张套筒后拔出导针,按照套筒轨道将实心椎弓根螺钉置入椎体中。采用该方法治疗 38 例,与空心椎弓根螺钉 27 例比较,住院费用低 $[(3.89 \pm 0.25) \text{ 万元 vs. } (4.36 \pm 0.38) \text{ 万元}]$,置钉准确率差异无显著性 $[95.6\% (218/228) \text{ vs. } 95.7\% (155/162)]$ 。但在置入椎弓根螺钉过程中,对助手把持的工作通道稳定性及术者对于螺钉置入中突破骨皮质的手感要求较高,有螺钉突破椎体内侧壁压迫神经、血管等风险。

2 导航

2.1 CT 导航

CT 导航置入使 PPSP 技术更精准。传统 C 臂

机椎束旋转角度 $< 200^\circ$,导致二维图像偏差以及非实时监控,容易出现置钉失败。360°旋转扫描的 O 臂导航系统(即 CT)具有不需点对点匹配、术前自动注册、提供高质量图像以及三维实时导航等功能,为 PPSP 提供技术支持。Feng 等^[33]的 meta 分析显示 O 臂导航在准确性方面比传统 C 臂透视具有显著优势(C 臂组螺钉错位发生率更高 $(RR = 0.69, P = 0.0001)$)。Yang 等^[14]比较 O 臂导航与 C 臂透视治疗 A3 型胸腰椎爆裂性骨折各 36 例,O 臂导航组椎弓根螺钉位置准确率高 $[97.8\% (176/180) \text{ vs. } 78.5\% (135/172)]$ 。Kim 等^[6]比较 O 臂导航(36 例)和 C 臂下(20 例)斜外侧腰椎融合术应用于 L₂ ~ L₅ 单节段腰椎手术,在 O 臂导航下可以实现单一体位(70°右侧卧位)下完成腰椎置钉,而 C 臂辅助下手术首先需要在右侧卧位 C 臂下放置融合器,再改为俯卧位 C 臂下进行经皮椎弓根螺钉固定,但 2 组置钉准确性(Gertzbein-Robbins 分级)差异无显著性。由于受到导针置入偏差、术者熟练度及设备精密度等因素影响,螺钉置入的偏差仍然难以完全避免。

2.2 机器人导航

骨科机器人通过外置机械臂克服术者生理性震颤、疲劳和情绪等因素造成的人为误差,提高螺钉置入的准确性。国外主要应用 Mazor、ROSA 机器人,置钉准确率达 84.9% ~ 97.3%^[34]。我国自主研发的“天玑”骨科机器人系统,通过 C 臂机连续透视收集数据进行注册,构建椎体模型,然后于计算机系统内规划最佳置钉路径,通过机械臂操作使手术过程达到人机协同,同时实现实时追踪和补偿术中装置或患者微动带来的定位误差,置钉准确率达到 94.8% ~ 98.7%^[13,34-36]。脊柱手术机器人系统多为半自动化装置,置钉过程仍由术者徒手完成,李君禹等^[37]应用 XGK-6508A 智能骨科微创系统,机械臂按预设轨道自主置入克氏针,避免人为因素置钉带来的误差。

尽管机器人的应用潜力巨大,但设备价格昂贵,且手术费用多为自费,其在临床手术中应用较少。黄之春等^[38]认为机器人导航系统可以省去部分步骤,有助于基层医院开展微创脊柱手术。另外,机器人手术设备安装、起始影像学扫描分析和术者对机器人系统不熟悉等因素,都会延长手术时间。术中

人为因素的误触导致棘突示踪器位置改变,也会使置钉准确性降低。

2.3 电磁导航

电磁导航技术应用电磁感应原理,先在手术区域(如棘突等)放置电磁发射器,产生可以覆盖手术区域的电磁场,然后于 C 臂机上安装电磁接收器,实时追踪示踪手术器械的三维空间位置,依次行侧位、正位透视并上传系统,完成自动匹配,实现导航定位,最后穿刺导针、依次置钉。因具有不受手术视线遮挡、可视光干扰等优势,电磁导航技术逐渐引入微创置钉中。von Jako 等^[39]于尸体标本行电磁导航螺钉置入,与传统透视比较,证实电磁导航可减少透视时间,并提高放置精度。Yao 等^[15]报道电磁导航(29 例 162 枚螺钉)与传统 C 臂透视(40 例 220 枚螺钉)经皮椎弓根螺钉置入治疗胸腰椎骨折,电磁导航置钉准确率高[98.1% (159/162) vs. 93.6% (206/220)],同时在置钉时间、手术及透视时间等方面都优于后者。祁玉辉等^[40]报道电磁导航引导经皮椎弓钉固定治疗胸腰椎爆裂骨折 30 例,实现动态实时可视化置钉,有效解决穿刺针置入时因器械或操作遮挡出现导航位置偏移,可实时显示手术器械相对于患者体内解剖结构的位置。但电磁导航手术费用昂贵;电磁场容易受金属器械干扰出现失真进而影响置钉准确度,需要进一步开发无铁磁性的器械和碳纤床。目前缺乏大量临床数据支持这一技术置钉的可行性,影响电磁系统在 PPSP 的应用推广。

2.4 增强现实导航

增强现实系统将椎体解剖结构和术前 2D 导航整合成数据模型,传输至术者的头戴增强现实导航设备,在术者视野上形成三维立体图像并全程实时显示螺钉的置入过程,避免术者需要反复将视线转移到显示器。增强现实引导 PPSP 研究证实置钉准确率达 94.6% ~ 98%^[41~43]。Yahanda 等^[44]首次报道增强现实引导胸腰椎 PPSP,9 例置入 63 枚螺钉,置钉准确率达 100% (Gertzbein-Robbins A 级 61 枚,B 级 2 枚)。Liu 等^[45]报道增强现实导航置入 205 枚椎弓根空心螺钉(胸椎 67 枚,腰椎 112 枚,骶椎 26 枚),置钉准确率 98% (201/205)。Butler 等^[46]报道使用增强现实技术在脊柱微创手术中放置 606 枚经皮椎弓根螺钉,平均螺钉置入时间 3 min

54 s。

初次使用增强现实导航可能会有视觉上的困扰,随着操作熟练,术者可逐渐适应这种虚拟的视觉环境。术前仍需要 CT 图像完成注册,这些都会增加手术时间。增强现实技术在临床上广泛应用,不仅需要建立完善的增强现实技术平台和设备等硬条件,同时需要培训合格的医生和技术人员等软实力。尽管存在一些挑战,但国内外的研究已经为增强现实技术在脊柱外科的应用奠定了坚实的基础。相信不久的将来,增强现实技术将为脊柱外科微创手术提供更准确、安全和有效的引导途径。

3 小结

经皮椎弓根螺钉微创置入使患者能以创伤小、出血少的代价获得传统开放手术螺钉稳定的效果。随着越来越多基于传统 X 线透视技术改进的辅助技术进入临床实践,如自制引导器、3D 体外模块及激光、超声、内镜等可视化手段,置钉准确度提高的同时减少手术辐射量及手术时间。各种导航、机器人和增强现实等新兴导航经皮椎弓根螺钉置入,经皮置钉的学习曲线平滑,为缺乏经验的年轻医师提供更安全可靠的手术方式^[47]。期待未来多种技术融合使用、形态感知等技术发展,将脊柱外科微创化推向更智能、安全的新阶段。

参考文献

- 1 姚登攀. 经皮椎弓根螺钉内固定治疗胸腰椎骨折. 中国矫形外科杂志, 2020, 28(20): 1913 - 1914.
- 2 Foley KT, Gupta SK, Justis JR, et al. Percutaneous pedicle screw fixation of the lumbar spine. *Neurosurg Focus*, 2001, 10(4): E10.
- 3 Sanjay D, Bhardwaj JS, Kumar N, et al. Expandable pedicle screw may have better fixation than normal pedicle screw: preclinical investigation on instrumented L4-L5 vertebrae based on various physiological movements. *Med Biol Eng Comput*, 2022, 60(9): 2501 - 2519.
- 4 Rong Z, Zhang F, Xiao J, et al. Application of cement-injectable cannulated pedicle screw in treatment of osteoporotic thoracolumbar vertebral compression fracture (AO type A): a retrospective study of 28 cases. *World Neurosurg*, 2018, 120: e247 - e258.
- 5 邹守平, 卢道云, 叶力. 微创经皮伤椎置钉治疗胸腰椎骨折: 6 个月随访脊柱生物力学变化. 中国组织工程研究, 2021, 25(24): 3865 - 3869.
- 6 Kim HC, Jeong YH, Oh SH, et al. Single-position oblique lumbar

- interbody fusion and percutaneous pedicle screw fixation under O-arm navigation; a retrospective comparative study. *J Clin Med*, 2022, 12(1): 312.
- 7 何二兴, 郭 惊, 尹知训, 等. 椎弓根镜下微创经皮椎弓根钉置入技术报道及初步应用. *中国骨与关节损伤杂志*, 2017, 32(5): 479 – 482.
- 8 王 建, 周 跃, 初同伟, 等. 内窥镜下单侧神经减压椎间融合椎弓根螺钉固定的临床应用. *中国矫形外科杂志*, 2008, 16(19): 1445 – 1448.
- 9 张晓芸, 毕树雄, 郝 帅. CT 多平面重建评估腰椎经皮椎弓根螺钉置入损伤关节突关节的风险. *中国组织工程研究*, 2020, 24(21): 3347 – 3352.
- 10 Singhatanadgige W, Jaruprat P, Kerr SJ, et al. Incidence and risk factors associated with superior-segmented facet joint violation during minimal invasive lumbar interbody fusion. *Spine J*, 2022, 22(9): 1504 – 1512.
- 11 Zhao Y, Yuan S, Tian Y, et al. Risk factors related to superior facet joint violation during lumbar percutaneous pedicle screw placement in minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion (MIS-TLIF). *World Neurosurg*, 2020, 139: e716 – e723.
- 12 La Rocca G, Mazzucchi E, Pignotti F, et al. Intraoperative CT-guided navigation versus fluoroscopy for percutaneous pedicle screw placement in 192 patients: a comparative analysis. *J Orthop Traumatol*, 2022, 23(1): 44.
- 13 Matur AV, Palmisciano P, Duah HO, et al. Robotic and navigated pedicle screws are safer and more accurate than fluoroscopic freehand screws: a systematic review and meta-analysis. *Spine J*, 2023, 23(2): 197 – 208.
- 14 Yang P, Chen K, Zhang K, et al. Percutaneous short-segment pedicle instrumentation assisted with O-arm navigation in the treatment of thoracolumbar burst fractures. *J Orthop Translat*, 2020, 21: 1 – 7.
- 15 Yao Y, Jiang X, Wei T, et al. A real-time 3D electromagnetic navigation system for percutaneous pedicle screw fixation in traumatic thoraco-lumbar fractures: implications for efficiency, fluoroscopic time, and accuracy compared with those of conventional fluoroscopic guidance. *Eur Spine J*, 2022, 31(1): 46 – 55.
- 16 倪金和, 李克影, 赵进薇, 等. 自制定位引导器在胸腰椎骨折置钉的效率及相关问题分析. *生物骨科材料与临床研究*, 2021, 18(1): 81 – 84.
- 17 徐灿华, 陈荣春, 刘 宁, 等. 自制可调节定位器经皮椎弓根螺钉内固定治疗胸腰椎骨折的效果分析. *中国医学创新*, 2022, 19(12): 26 – 30.
- 18 Schwend RM, Dewire PJ, Kowalski TM. Accuracy of fluoroscopically assisted laser targeting of the cadaveric thoracic and lumbar spine to place transpedicular screws. *J Spinal Disord*, 2000, 13(5): 412 – 418.
- 19 Richter PH, Gebhard F, Salameh M, et al. Feasibility of laser-guided percutaneous pedicle screw placement in the lumbar spine using a hybrid-OR. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2017, 12(5): 873 – 879.
- 20 李永军, 陈棉智, 庞祖才, 等. 辅助经皮胸腰椎弓根螺钉置入激光定位仪在腰椎压缩性骨折手术中的应用. *骨科*, 2021, 12(2): 132 – 136.
- 21 王永康, 李嗣生. 人工智能激光定位系统在经皮椎弓根螺钉内固定手术中的应用. *医疗卫生装备*, 2023, 44(3): 63 – 67.
- 22 Meng M, Wang J, Sun T, et al. Clinical applications and prospects of 3D printing guide templates in orthopaedics. *J Orthop Translat*, 2022, 34: 22 – 41.
- 23 Liang W, Han B, Hai JJ, et al. 3D-printed drill guide template, a promising tool to improve pedicle screw placement accuracy in spinal deformity surgery: a systematic review and meta-analysis. *Eur Spine J*, 2021, 30(5): 1173 – 1183.
- 24 连学辉, 肖红利, 卢 涛, 等. 3D 打印体外导板辅助经皮椎弓根螺钉固定术治疗胸腰椎骨折的临床疗效观察. *中国脊柱脊髓杂志*, 2022, 32(8): 704 – 712.
- 25 曾柏方, 吴 超, 李 涛, 等. 3D 打印皮外导板辅助微创椎弓根螺钉植入治疗多节段胸腰椎骨折. *中国修复重建外科杂志*, 2021, 35(6): 742 – 749.
- 26 Kantelhardt SR, Bock CH, Larsen J, et al. Intraosseous ultrasound in the placement of pedicle screws in the lumbar spine. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2009, 34(4): 400 – 407.
- 27 Ungi T, Moullet E, Schwab JH, et al. Tracked ultrasound snapshots in percutaneous pedicle screw placement navigation: a feasibility study. *Clin Orthop Relat Res*, 2013, 471(12): 4047 – 4055.
- 28 Gueziri HE, Georgiopoulos M, Santaguida C, et al. Ultrasound-based navigated pedicle screw insertion without intraoperative radiation: feasibility study on porcine cadavers. *Spine J*, 2022, 22(8): 1408 – 1417.
- 29 林旭鑫, 尚利杰, 沈素红, 等. 超声容积导航结合 X 线透视技术引导经皮椎弓根螺钉植入的临床应用: 一项前瞻性随机对照研究. *中国修复重建外科杂志*, 2023, 37(10): 1253 – 1258.
- 30 Müller A, Gall C, März U, et al. A keyhole approach for endoscopically assisted pedicle screw fixation in lumbar spine instability. *Neurosurgery*, 2000, 47(1): 85 – 95.
- 31 林晓芳, 朱承跃, 程 伟, 等. 双通道脊柱内镜前沿和新技术. *临床外科杂志*, 2022, 30(4): 313 – 317.
- 32 谭志红, 潘 丹, 陈大勇, 等. 经皮实心椎弓根螺钉治疗无神经损伤胸腰段骨折的疗效. *临床骨科杂志*, 2021, 24(2): 164 – 169.
- 33 Feng W, Wang W, Chen S, et al. O-arm navigation versus C-arm guidance for pedicle screw placement in spine surgery: a systematic review and meta-analysis. *Int Orthop*, 2020, 44(5): 919 – 926.
- 34 林 书, 胡 玘, 万 仑, 等. “天玑”骨科机器人辅助下经皮椎弓根螺钉植钉安全性评价. *中国修复重建外科杂志*, 2021, 35(7): 813 – 817.
- 35 Patel NA, Kuo CC, Pennington Z, et al. Robot-assisted percutaneous pedicle screw placement accuracy compared with alternative

guidance in lateral single-position surgery: a systematic review and meta-analysis. J Neurosurg Spine, 2023, 39(4): 443 – 451.

36 Han X, Tian W, Liu Y, et al. Safety and accuracy of robot-assisted versus fluoroscopy-assisted pedicle screw insertion in thoracolumbar spinal surgery: a prospective randomized controlled trial. J Neurosurg Spine, 2019, 30(5): 615 – 622.

37 李君禹, 于 森, 刘忠军, 等. 新型机器人与徒手椎弓钉置入准确性比较. 中国矫形外科杂志, 2020, 28(21): 1941 – 1944.

38 黄之春, 李洪波, 吴自强, 等. 机器人辅助经皮椎弓根螺钉内固定在基层医院的应用. 中国矫形外科杂志, 2023, 31(4): 379 – 382.

39 von Jako R, Finn MA, Yonemura KS, et al. Minimally invasive percutaneous transpedicular screw fixation: increased accuracy and reduced radiation exposure by means of a novel electromagnetic navigation system. Acta Neurochir (Wien), 2011, 153(3): 589 – 596.

40 祁玉辉, 孔 鹏, 汲长蛟, 等. 电磁导航引导经皮椎弓钉固定胸腰椎爆裂骨折. 中国矫形外科杂志, 2023, 31(20): 1895 – 1898.

41 Molina CA, Theodore N, Ahmed AK, et al. Augmented reality-assisted pedicle screw insertion: a cadaveric proof-of-concept study. J Neurosurg Spine, 2019, 31(1): 139 – 146.

42 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, 34(2): 316 – 324.

43 Peh S, Chatterjea A, Pfarr J, et al. Accuracy of augmented reality surgical navigation for minimally invasive pedicle screw insertion in the thoracic and lumbar spine with a new tracking device. Spine J, 2020, 20(4): 629 – 637.

44 Yahanda AT, Moore E, Ray WZ, et al. First in-human report of the clinical accuracy of thoracolumbar percutaneous pedicle screw placement using augmented reality guidance. Neurosurg Focus, 2021, 51(2): E10.

45 Liu A, Jin Y, Cottrill E, et al. Clinical accuracy and initial experience with augmented reality-assisted pedicle screw placement: the first 205 screws. J Neurosurg Spine, 2022, 36(3): 351 – 357.

46 Butler AJ, Colman MW, Lynch J, et al. Augmented reality in minimally invasive spine surgery: early efficiency and complications of percutaneous pedicle screw instrumentation. Spine J, 2023, 23(1): 27 – 33.

47 Yamout T, Orosz LD, Good CR, et al. Technological advances in spine surgery: navigation, robotics, and augmented reality. Orthop Clin North Am, 2023, 54(2): 237 – 246.

(收稿日期: 2023 – 11 – 07)

(修回日期: 2024 – 02 – 27)

(责任编辑: 王惠群)