

经皮椎弓根螺钉置钉辅助技术及应用进展

Assisting techniques of percutaneous pedicle screw placement and the application progresses

尹 稳, 焦 伟, 于海洋

(安徽医科大学附属阜阳人民医院骨科 安徽省脊柱畸形临床医学研究中心 236000 安徽省阜阳市)

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2022.08.10

中图分类号: R687.3 文献标识码: A 文章编号: 1004-406X(2022)-08-0743-05

经皮椎弓根螺钉固定(percutaneous pedicle screw fixation, PPSF)技术避免了传统切开直视下置钉对椎旁肌肉的剥离、脊神经后支的损伤,防止椎旁肌肉的失神经化,同时具有手术切口小、出血少、术后恢复快、并发症少、出院快等明显优势^[1-3],促进了脊柱微创外科的发展。近年来,随着 3D 打印、脊柱内镜、导航系统及新型经皮椎弓根螺钉等技术迅猛发展,PPSF 技术的临床应用及置钉辅助技术也得到不断改进,现就 PPSF 的临床应用现状、局限性及不同置钉辅助技术方法进行综述。

1 PPSF 的临床应用现状

早期的 PPSF 技术主要应用于无神经症状的胸腰椎骨折复位内固定及腰椎不稳的固定融合中,神经减压、骨质疏松症及椎弓根变异被认为是 PPSF 临床应用的相对禁忌证。但随着脊柱微创减压及导航下置钉的不断发展,PPSF 技术已经被广泛应用于颈胸腰椎爆裂性骨折、退行性滑脱、椎管狭窄、脊柱肿瘤、非特异性感染、脊柱结核、脊柱畸形、II 型齿状突骨折及儿童脊柱创伤内固定中^[4-11]。经皮可膨胀椎弓根螺钉及经皮可灌注骨水泥椎弓根螺钉^[12,13]是对传统经皮椎弓根螺钉的改进,进一步扩大了经皮椎弓根螺钉在骨质疏松症患者临床应用的适应证。

2 PPSF 的临床应用局限性

由于经皮椎弓根螺钉技术采用的是闭合穿刺导针技术,传统 PPSF 技术需 C 型臂或 G 型臂 X 线机透视下进行,主要依靠术者手感穿刺,对术者经验要求高,学习曲线陡峭,同时增加医患术中放射线损害,限制了 PPSF 技术的推广应用。对于椎弓根发育变异的患者,置钉失败及神经

损伤风险增高;由于关节突关节在体表无典型的透射投影标识,所以传统 PPSF 技术缺乏对关节突的保护,近年来大量研究^[14-18]显示,PPSF 技术关节突关节损伤率高达 22.4%~47%,置钉准确率仅 60%~94.5%^[16,18-20]。针对 PPSF 置钉技术的改进仍然是目前研究的热点。

3 经皮椎弓根螺钉辅助置钉技术的应用

3.1 经皮椎弓根空心螺钉定位引导器的应用

PPSF 定位引导器是将穿刺通道通过连接杆固定于手术床侧方的穿刺引导装置,通过术前计算机软件测量椎弓根间距、进钉点距离皮肤距离计算出通道连接杆与背侧皮肤距离,透视定位后适当调节穿刺架纵向、横向位置及定位针的角度,达到提高定位准确率、手术安全性并降低手术时间和透视次数的目的。该装置由倪金和于 2021 年设计并报道^[21],该报道显示定位引导器穿刺次数为 2.78 ± 0.28 次、对照组为 33.5 ± 2.51 次,透视次数为 40.21 ± 0.81 次、对照组为 47.60 ± 1.79 次,手术穿刺时间为 25.84 ± 0.84 min、对照组为 40.30 ± 1.68 min。但由于该设备操作便利性差,仍需进一步改进,以提高定位引导器的实用性并进一步降低手术时间。

3.2 3D 打印导板辅助技术的应用

PPSF 个体化 3D 打印导航模板由吴超于 2017 年设计并报道^[22]。它是一种在术前将患者三维 CT 数据导入至 Mimics 软件,模拟置钉并设计置钉导板,该导板由多个椎弓根通道模块组成,可组装和拆卸,每个模块一端卡在乳突、附突或横突的骨性解剖部位,左右模块通过两侧模块基座上的“凹凸”结构连为一体,并通过克氏针将不同节段的模块基座连接为一整体。该设计不仅能准确地定位进钉点,同时能个体化控制置钉方向,首次置钉准确率高达 92.2%,明显优于徒手透视组。在手术时间、出血量及放射线透射次数上均明显优于徒手透视组。但该研究由于需要剥离出乳突、副突及横突等重要骨性标志,一定程度上增加了进钉点周围软组织损伤,对于下腰椎等结构较深的部位难以应用。同时该导航模板需个体化打印,对于无 3D 打印的医院难以推广应用。

基金项目:安徽省卫生健康委科研项目(编号:AHWJ2021b111);安徽医科大学校科研基金项目(编号:2021xkj209)

第一作者简介:男(1988-),主治医师,在读博士,研究方向:脊柱畸形

电话:(0558)3010143 E-mail:532025506@qq.com

通讯作者:焦伟 E-mail:0558jw@163.com

3D 打印皮外导板由曾柏方于 2021 年报道^[23],是一种光敏树脂材料打印的切角长方体多模块装置,主要结构包括皮外导板角度标、具有不同的内倾角度定位孔、棘突定位孔、纵向连接孔道和椎体上缘定位孔。术前根据椎弓根内倾角选择皮外导板模块,透视定位后用克氏针通过棘突定位孔将皮外导板固定于棘突,选择合适的椎弓根定位孔将克氏针逐一打入椎弓根并建立工作通道,术中置入 1 枚螺钉的平均时间为 9.6min、平均透视 2.0 次,置钉准确率达 100%,优秀率达 92.9%。同时该设计为通用型皮外导板,避免了个体化 3D 打印导航模板需徒手对深层骨性标志进行剥离的缺点,也无需对不同患者进行个体化打印设计,便于临床推广应用。

3.3 激光定位仪的应用

穿刺导针轴向透视是一判断穿刺导针与椎弓根位置关系的重要方法,陈迎春等^[24]通过建立椎弓根偏内、居中、偏外尸体实验模型,证实导针轴位透视法的灵敏度和特异度均为 100%,明显优于椎弓根轴向透视与正位透视法。李永军等^[25]应用轴位片的理论基础,设计出经皮胸腰椎弓根螺钉置入激光定位仪,将其安装在 C 型臂影像增强器一侧,将激光的方向和椎弓根中心轴重叠,使进针点和穿刺方向可视化,在激光的引导下置入经皮椎弓根螺钉导针;该仪器在动物实验和腰椎骨折患者^[26]的临床置钉应用中均获得良好的手术效果,置钉准确率、手术时间及辐射量均明显优于传统技术。国外亦有学者^[27]采用类似装置,将其通过影像导航系统(Neuro vision M5)与微型电脑和显示屏相连接,将术前测量的椎弓根角度输入至微电脑,便于术中 C 型臂 X 线机倾斜角度的调整,提高了定位椎弓根轴位像的效率,置钉准确率为 98.47%,同时降低了辐射量。与后者相比,激光定位仪结构更为简单,无需复杂的电子和电动设备,易于在广大的基层医院推广应用。但上述技术一次操作仅能引导一枚导针的穿刺,与 3D 打印导板辅助技术的多枚导针同时引导穿刺相比,存在明显不足。

3.4 实心椎弓根螺钉联合藕状杆的临床应用

传统 PPSF 采用是导针穿刺,导丝引导空心椎弓根螺钉置入技术。随着传统椎弓根螺钉技术的不断成熟,有学者探索采用实心椎弓根螺钉实施经皮内固定。2021 年谭志红等^[28]采用一种类似克氏针的导针在 C 型臂 X 线机透视下直接置入椎弓根螺钉并应用自制藕状杆调整导针位置。该藕状杆是一种圆柱状、类似莲藕含多通道均匀分布的导针微调工具,圆柱杆内每个通道内均可置入一枚导针,用来微调进钉点的位置。通道下空心磨钻磨除进钉点骨皮质,攻入空心丝锥,在助手固定工作套筒的前提下,拔出导针并直接拧入实心椎弓根螺钉。该方法与经皮椎弓根空心螺钉组比较,住院费用明显降低,在出血量、手术时间、术后住院时间、置钉准确率上均无统计学差异。但该方法在拧入椎弓根螺钉时,对助手工作通道的把持和螺钉进入骨皮质时的手感要求较高,存在螺钉滑出钉道的风险。

3.5 胸腔镜辅助技术的临床应用

传统 PPSF 技术采用的是闭合穿刺,在 X 线及导航引导下进行穿刺点的确认。随着微创腔镜脊柱的发展,国外学者开始探索在腔镜下显露椎弓根螺钉进钉点。2000 年 Müller 等^[29]借助胸腔镜、工作通道及自制手术器械,首次实现了内镜辅助下经皮椎弓根螺钉的置入。该研究详细介绍了 T12~S1 椎弓根螺钉进钉点的骨性标志及其与周围韧带、脂肪、肌肉及神经的解剖关系。在 12 具尸体标本上进行共 168 枚椎弓根螺钉进钉点的显露及通道下的置钉,置钉成功率为 93%;并在 6 例患者中成功实施胸腔镜辅助通道下椎弓根螺钉的置入、腰椎融合手术治疗。该技术为经皮椎弓根螺钉的置入开创了一种新的置钉理念。

3.6 显微内镜下辅助技术的临床应用

显微内镜下行脊柱减压手术是近年来开展的脊柱微创技术,由于该技术具有创伤小、出血少、术后恢复快、显露清晰等优点,已经被广泛应用,显微内镜下椎间盘切除术(micro-endoscopic discectomy, MED)是其典型代表。2006 年国内学者何二兴等^[30]在胸腰椎爆裂型骨折显微内镜下减压的同时,探索内镜下显露“人”字嵴和横突根部,并采用 Weistein 法成功实施椎弓根螺钉的置入。2008 年康两期等^[31]对 18 例胸腰椎骨折采用内镜下显露椎弓根螺钉进钉点,并在通道下成功置入椎弓根螺钉。同年,王建等在 X-tube 通道下通过 X 透视的方法对 12 例需行腰椎椎间融合的患者实施经皮椎弓根螺钉内固定^[32]。2017 年戴建辉等^[33]将经皮椎弓根螺钉的优势与显微内镜优势相结合,成功实施显微内镜辅助直视下经皮椎弓根螺钉的置入,置钉优良率 97.5%,同时减少了医患 X 线暴露时间。显微内镜辅助下经皮椎弓根螺钉置入技术的应用标志着显微内镜技术与经皮微创椎弓根螺钉固定优势的正式结合。

3.7 椎弓根内镜技术的临床应用

2017 年何二兴等^[34]探索并设计了一种专门用于经皮椎弓根螺钉进钉点显露并辅助椎弓根置入的椎弓根内镜系统。该内镜系统为双通道内镜技术,中间扩张器截面为圆形,末级扩张器截面为不规则形状,与工作套筒相匹配,螺钉通道内径 15mm,内镜通道内径 5mm,小型内窥镜直径 4mm。通过设计的镜下专用穿刺针及螺钉导针,实现了全内镜直视下的椎弓根螺钉置入。该技术在 16 例腰椎退行性疾患的手术中,共置钉 78 枚,平均单枚螺钉置钉时间 7~26(9.8±5.6)min,置钉时 X 线暴露次数 1~5(2.5±1.6)次,置钉调整次数 0~4(1.8±1.3)次。其中 6 枚螺钉突破椎弓根内壁,3 枚螺钉轻度侵犯小关节。该内镜系统是目前有文献报道的唯一的专门用于辅助椎弓根螺钉置入的内镜系统。与传统透视下置钉技术相比,该技术对关节突关节的损伤率明显下降。

3.8 脊柱内镜下辅助技术的临床应用

MED 内镜下技术来源于显微镜技术,而脊柱内镜技术来源于关节镜技术。前者镜下以空气作为介质,术中出血易造成视野的模糊,后者镜下介质是水。脊柱内镜下水介质成像使镜下操作更为简单和清晰,镜下直视显露脊柱

深层结构,Lusta 内镜系统是其典型代表。2021 年尹稳等^[35]通过 Lusta 内镜直视下显露下腰椎“人”字嵴进钉点,利用自行研制的镜下椎弓根空心螺钉导针置入器,通过内镜直视下锚定于进钉点,并放置椎弓根空心螺钉导针,降低导针置入透射次数及关节突关节破坏率。由于 Lusta 内镜工作通道直径小于传统 PPSF 通道直径,术中不像 MED 及 X-tube 等通道需过度撑开皮缘,所以不增加患者手术切口长度。内镜直视下置入空心螺钉导针,置钉准确率与传统 X 线透视下置钉无明显差异,但可以避免传统 PPSF 技术盲目术中穿刺的弊端,同时降低了术中放射线透视次数,减少了对医患的医源性放射伤害。该技术的弊端在于置钉手术时间长于传统 PPSF 技术,考虑与镜下确定“人”字嵴进钉点解剖结构熟练程度不足有关。

3.9 导航系统的临床应用

3.9.1 CT 导航系统的应用 CT 导航系统引导下的脊柱椎弓根螺钉置入使 PPSF 技术的应用更加精准化。起初的 CT 导航仍为术中二维 CT 图像导航,无法提供矢状位图像。三维 CT 导航系统的改进可以在矢状位、冠状位和水平位同时实时成像,为经皮椎弓根螺钉技术的临床应用安全性提供了重要支持。2005 年 Acosta 首次报道^[36]三维 CT 引导下 PPSF 技术的临床应用,早期的临床报道^[37]均证实三维 CT 重建技术在 PPSF 技术的安全性,但传统三维 CT 导航系统属于 C 型臂导航定位,受到锥束旋转角度的限制。O 型臂导航系统采用 360°旋转锥束,获得图像更加精确,同时不需点对点匹配,具有自动注册功能,较 64 排螺旋 CT 辐射量减少 50%,置钉准确率达 94.3%,关节突关节损伤率仅 3.8%^[38]。PPSF 技术在颈椎后路 C1~C7 椎弓根螺钉的成功应用^[39]是 CT 导航技术迈向成熟的一个重要标志。但由于受到仪器精密性、导针置入偏差及手术探针等因素的影响,椎弓根螺钉的偏移仍无法安全避免^[4]。

3.9.2 光电导航系统的应用 光电导航系统是一种基于 C 型臂 X 线机的实时导航系统,术前将光电导航固定参考架置于患椎附近 20cm 范围内,利用反射球、双目红外线位置探测、C 型臂 X 线机图像增强器上的校准板及计算机工作站,建立虚拟透视图像。在穿刺套针上安放手术器械示踪器,虚拟透视图像以光标形式显示示踪器的位置,通过其空间中的延长线模拟螺钉的置钉轨迹。钟泽莅等^[40]利用该技术在 31 例胸腰椎骨折患者中成功实施 151 枚经皮椎弓根空心螺钉,置钉优良置钉率为 98.01%,放射透视次数及置钉准确率上均明显优于开放钉组。3 例螺钉突破椎弓根壁 2~4mm,考虑系螺钉方向与钉道发生了轻微偏移或开路器靠近椎弓根壁所致。

3.9.3 机器人导航的应用 骨科机器人在导航技术基础上增加了机械臂,使得经皮椎弓根螺钉置钉更方便和精确,目前国内外常用机器人包括以色列的 Mazor 机器人系统、美国的 ROSA 机器人系统和我国自主研制的“天玑”骨科机器人。早期的 Mazor 和 ROSA 机器人置钉准确率报道差异较大,约为 85%~97.3%^[38]。而近期研制的“天玑”骨科

机器人术中 C 型臂 X 线机连续透视,收集实时数据注册,可获得人机协同运动的功能,实时跟踪和补偿由患者微动引起的定位误差,减少置钉偏移风险,置钉准确率高达 94.8%~98.7%^[20,38-40],明显优于 Mazor 和 ROSA 机器人。但上述方法采用的均是在机器人引导下,人工操作置入椎弓根螺钉。2020 年李君禹^[41]报道了一款全自动的新型脊柱外科机器人“XGK-6508A 智能骨科微创系统”。新型机器人可以自主完成克氏针置入,能够减少置钉技术的不确定性、显著减少椎弓根螺钉置入的偏差,近端关节突关节损伤率仅 8.62%。骨科机器人在置钉准确率、手术时间及医患辐射伤害方面均明显优于传统 PPSF 技术,是目前 PPSF 临床应用最为安全、有效的辅助技术,但由于价格昂贵,仍未能在基层医院广泛应用。

3.9.4 电磁导航系统的应用 电磁导航系统是一种将电磁发射器置于患者棘突上,结合已知的相对位置关系,利用电磁示踪技术对不同电磁线圈形成的空间内的金属目标进行定位,同时在 C 型臂 X 线机增强器上安装校准靶和电磁接收器。该系统可将脊柱的解剖结构与 C 型臂 X 线机透视的正侧位影像进行自动匹配,并实施监测金属目标的位置。尸体研究^[42]提示电磁导航引导 PPSF 技术与传统 X 线片透视下 PPSF 技术相比,理想置钉准确率(62.7% vs 40%)明显优于后者、透视时间减少 77%,手和身体放射线辐射分别减少 60%和 32%。2021 年 Yao 等^[43]将术前三维 CT 数据与术中 C 型臂 X 线机透视影像相结合,实现了电磁导航下的术中水平面、冠状面和矢状面多平面实施图像监测,研究中对胸腰椎骨折患者共实施 162 枚经皮椎弓根螺钉,在置钉准确率(98.15 vs 93.64%)、手术时间(110.34±11.52min vs 125.15±20.42min)、每根螺钉的置钉时间(6.04±1.89min vs 8.94±1.50min)、透视时间(5.70±1.01s vs 9.14±1.60s)上均明显优于传统 PPSF 技术。但前者的学习曲线长且较为陡峭,同时由于手术器械金属对磁场的影响较大,手术需特殊的操作器械,限制了该技术在 PPSF 中的推广应用,目前国内外报道文献仍较少。

3.9.5 现实增强(augmented reality,AR)导航的应用 传统导航系统均是通过导航设备,在二维屏幕上显示信息,通过二维屏幕图像评估螺钉的位置和方向,在一定程度上转移术者的视野及注意力,增加手术操作的复杂性。AR 导航通过原位直接叠加信息技术,将计算机生成的 3D 图像与患者真实体位向叠加,术者利用佩戴的现实增强头盔显像仪(AR head-mounted display,ARHMD),可三维显示脊柱解剖并全程实时观察螺钉的置入过程。AR 模拟置钉已经在多学科得到广泛应用,尸体标本研究证实椎弓根螺钉置钉准确率达 94.6%~99.1%^[44,45],2021 年 Yahanda 等^[46]首次将该技术应用于胸腰椎经皮椎弓根螺钉的置入,对 9 例患者共实施 63 枚经皮椎弓根螺钉(胸椎 32 枚,腰椎 31 枚),置钉准确率达 100%。但首次使用 ARHMD 的术者,可能会出现视觉空间的错乱,需一定时间来适应这种虚拟的视觉空间,同时该技术仍然依赖术中 CT 扫描并注册。

4 展望

由于创伤小、出血少、对神经肌肉干扰小、同时能够获得与传统开放置钉同样的稳定性等优点^[47,48],PPSF 技术已经成为脊柱微创技术的重要手段之一。X 线透视辅助置钉技术的诸多改进为提高穿刺准确率及降低术中透视时间提供了很多新的方法,其中内镜辅助技术的应用使传统 PPSF 技术的进钉点可视化,为 PPSF 技术的改进提供了一个新的方向。导航引导下的经皮椎弓根螺钉置入技术的应用,尤其是近年的机器人导航技术,已经成为是 PPSF 技术发展的重要依赖。AR 技术在经皮椎弓根螺钉置入技术的成功应用,标志着导航系统已经由图像导航转为立体空间导航,但其应用安全性仍需大量的临床应用予以验证。

5 参考文献

1. 白长双, 王法佳, 戴尚轶, 等. 经皮与开放椎弓根钉固定胸腰椎骨折的比较[J]. 中国矫形外科杂志, 2020, 28(12): 1098-1103.
2. 姚登攀. 经皮椎弓根螺钉内固定治疗胸腰椎骨折[J]. 中国矫形外科杂志, 2020, 28(20): 1913-1914.
3. Ouchida J, Kanemura T, Satake K, et al. True accuracy of percutaneous pedicle screw placement in thoracic and lumbar spinal fixation with a CT-based navigation system: Intraoperative and postoperative assessment of 763 percutaneous pedicle screws[J]. J Clin Neurosci, 2020, 79: 1-6.
4. Coric D, Rossi VJ, Pelozo J, et al. Percutaneous, navigated minimally invasive posterior cervical pedicle screw fixation [J]. Int J Spine Surg, 2020, 14(S3): S14-S21.
5. 钟泽莅, 万盛钰, 谭伦, 等. 光电导航下经皮椎弓根螺钉复位内固定和开放后路椎弓根螺钉复位内固定治疗胸腰椎骨折[J]. 中国组织工程研究, 2017, 21(23): 3718-3723.
6. 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]. J Orthop Translat, 2019, 21: 1-7.
7. Zhou ZZ, Wang YM, Liang X, et al. Minimally invasive pedicle screw fixation combined with percutaneous kyphoplasty under o-arm navigation for the treatment of metastatic spinal tumors with posterior wall destruction[J]. Orthop Surg, 2020, 12(4): 1131-1139.
8. Cui S, Busel GA, Puryear AS. Temporary percutaneous pedicle screw stabilization without fusion of adolescent thoracolumbar spine fractures[J]. J Pediatr Orthop, 2016, 36(7): 701-708.
9. Chi JE, Ho CY, Chiu PY, et al. Minimal invasive fixation following with radiotherapy for radiosensitive unstable metastatic spine[J]. Biomed J, 2021. S2319-4170(21)00104-9. doi: 10.1016/j.bj.2021.08.004. Online ahead of print.
10. Du X, Ou YS, Zhu Y, et al. Oblique lateral interbody fusion combined percutaneous pedicle screw fixation in the surgical treatment of single-segment lumbar tuberculosis: a single-center retrospective comparative study [J]. Int J Surg, 2020, 83: 39-46.
11. Tan Y, Tanaka M, Sonawane S, et al. Comparison of simultaneous single-position oblique lumbar interbody fusion and percutaneous pedicle screw fixation with posterior lumbar interbody fusion using o-arm navigated technique for lumbar degenerative diseases[J]. J Clin Med, 2021, 26(21): 4938-4948.
12. 赵刚, 周英杰, 宋仁谦. 骨水泥螺钉与可膨胀椎弓根螺钉治疗严重骨质疏松腰椎病手术的比较[J]. 中国矫形外科杂志, 2018, 26(7): 599-603.
13. Iacopino DG, Certo F, Graziano F, et al. EMG-guided percutaneous placement of cement-augmented pedicle screws for osteoporotic thoracolumbar burst fractures[J]. Acta Neurochir Suppl, 2017, 124: 319-325.
14. 徐正宽, 陈刚, 李方财, 等. 腰椎经皮椎弓根置钉中小关节角与关节突关节破坏的相关性研究[J]. 中华骨科杂志, 2018, 38(2): 72-78.
15. Tannous O, Jazini E, Weir TB, et al. Facet joint violation during percutaneous pedicle screw placement: a comparison of two techniques[J]. Spine, 2017, 42(15): 1189-1194.
16. Zou P, Yang JS, Wang XF, et al. Comparison of clinical and radiologic outcome between mini-open wiltse approach and fluoroscopic-guided percutaneous pedicle screw placement: a randomized controlled trial [J]. World Neurosurg, 2020, 144: e368-e375.
17. 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[J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(21): 3347-3352.
18. Ohba T, Ebata S, Fujita K, et al. Percutaneous pedicle screw placements: accuracy and rates of cranial facet joint violation using conventional fluoroscopy compared with intraoperative three-dimensional computed tomography computer navigation[J]. Eur Spine J, 2016, 25(6): 1775-1780.
19. Panchmatia JR, Vaccaro AR, Wang W, et al. Lumbar Percutaneous pedicle screw breach rates: a comparison of robotic navigation platform versus conventional techniques[J]. Clin Spine Surg, 2020, 33(4): E162-E167.
20. 林书, 胡虹, 万仑, 等. 机器人与透视辅助经皮椎弓根螺钉置入的比较[J]. 中国矫形外科杂志, 2020, 28(20): 1830-1834.
21. 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 [J]. 生物骨科材料与临床研究, 2021, 18(1): 81-84.
22. 吴超, 谭伦, 林旭, 等. 经皮个体化导航模板辅助微创椎弓根螺钉内固定治疗胸腰椎骨折[J]. 临床骨科杂志, 2017, 20(3): 262-267, 271.
23. 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 [J]. 中国修复重建外科杂志, 2021, 35(6): 742-749.
24. 陈迎春, 郭昭庆, 徐万鹏. 腰椎椎弓根导针轴位透视监测的

- 实验研究[J]. 中华医学杂志, 2006, 86(19): 1309-1312.
25. 李永军, 陈棉智, 张志辉, 等. 自制激光定位仪辅助经皮置入椎弓根钉的实验研究[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2017, 32(11): 1193-1194.
26. 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 [J]. 骨科, 2021, 12(2): 132-136.
27. Idler C, Rolfe KW, Gorek JE. Accuracy of percutaneous lumbar pedicle screw placement using the oblique or "owl's-eye" view and novel guidance technology[J]. J Neurosurg Spine, 2010, 13(4): 509-515.
28. 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[J]. 临床骨科杂志, 2021, 24(2): 164-169.
29. Müller Adolf, Claudius G, Ulrich M, et al. A keyhole approach for endoscopically assisted pedicle screw fixation in lumbar spine instability[J]. Neurosurgery, 2000, 47(1): 85-95.
30. 何二兴, 曹燕明, 范子文, 等. 内镜辅助下经皮椎弓根螺钉固定术治疗胸腰椎骨折[J]. 中国内镜杂志, 2006, 12(12): 1236-1238.
31. 康两期, 陈卫, 丁真奇, 等. 内窥镜下经椎弓根植骨内固定治疗胸腰椎骨折[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2008, 18(2): 111-114.
32. 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[J]. 中国矫形外科杂志, 2008, (19): 1445-1448.
33. 戴建辉, 林海滨, 李星, 等. 显微内窥镜下经皮椎弓根螺钉微创经椎间孔入路椎间融合术的临床应用 [J]. 中华医学杂志, 2017, 97(11): 864-868.
34. 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[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2017, 32(5): 479-482.
35. 尹稳, 焦伟, 于海洋, 等. 脊柱大通道内镜辅助下经皮椎弓根空心螺钉置入在腰椎融合治疗中的应用探讨[J]. 中国骨与关节杂志, 2021, 10(6): 456-461.
36. Acosta FL Jr, Thompson TL, Campbell S, et al. Use of intraoperative isocentric C-arm 3D fluoroscopy for sextant percutaneous pedicle screw placement: case report and review of the literature[J]. Spine J, 2005, 5(3): 339-343.
37. Nakashima H, Sato K, Ando T, et al. Comparison of the percutaneous screw placement precision of isocentric C-arm 3-dimensional fluoroscopy-navigated pedicle screw implantation and conventional fluoroscopy method with minimally invasive surgery[J]. J Spinal Disord Tech, 2009, 22(7): 468-472.
38. 林书, 胡珏, 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[J]. 中国修复重建外科杂志, 2021, 35(7): 813-817.
39. Feng S, Tian W, Sun Y, et al. Effect of robot-assisted surgery on lumbar pedicle screw internal fixation in patients with osteoporosis[J]. World Neurosurg, 2019, 125: e1057-e1062.
40. 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]. J Neurosurg Spine, 2019, 1-8. doi: 10.3171/2018.10.SPINE18487. Online ahead of print.
41. 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[J]. 中国矫形外科杂志, 2020, 28(21): 1941-1944.
42. 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 [J]. Acta Neurochir, 2011, 153(3): 589-596.
43. 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[J]. Eur Spine J, 2022, 31(1): 46-55.
44. Molina CA, Theodore N, Ahmed AK, et al. Augmented reality-assisted pedicle screw insertion: a cadaveric proof-of-concept study[J]. J Neurosurg Spine, 2019, 31(1): 139-146.
45. Molina CA, Phillips FM, Colman MW, et al. A cadaveric precision and accuracy analysis of augmented reality-mediated percutaneous pedicle implant insertion [J]. J Neurosurg Spine, 2021, 34(2): 316-324.
46. 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[J]. Neurosurg Focus, 2021, 51(2): E10.
47. Kocis J, Kelbl M, Kocis T, et al. Percutaneous versus open pedicle screw fixation for treatment of type A thoracolumbar fractures[J]. Eur J Trauma Emerg Surg, 2020, 46(1): 147-152.
48. 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[J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(24): 3865-3869.

(收稿日期:2021-10-27 末次修回日期:2022-01-13)

(本文编辑 彭向峰)