· 文献综述 ·

# 脊柱微创外科协作机器人技术的临床应用及展望

李君禹　金　昭[①]　综述　刘忠军　于　森*　审校

(北京大学第三医院骨科,北京　100191)

**文献标识**:A　　**文章编号**:1009 - 6604(2020)08 - 0734 - 05

**doi**:10.3969/j.issn.1009 - 6604.2020.08.015

脊柱微创外科协作机器人(Cobot)是为克服外科医师手术时定位精度难以保证,长时间手术容易疲劳等问题,针对脊柱手术中的椎弓根螺钉固定术设计出的一整套"机器人"智能系统[1]。因其主要职能为辅助脊柱外科医师完成手术,故称之为协作机器人。目前,脊柱微创手术中使用的协作机器人主要是通过影像系统(C 形臂 X 线机、CT 或 MRI)进行术前规划和实时导航,并使用多自由度机械臂进行操作,主要用于椎弓根螺钉辅助置入,例如 Mazor 系列机器人、天玑骨科手术机器人。此外,术者远程操纵、人机交互的机器人(如达芬奇手术机器人系统)也在临床试验中,术者可通过机械臂操纵手术工具和控制摄像设备,完成脊柱外科中精细的手术动作。本文就目前脊柱微创外科协作机器人技术的临床应用现状及最新进展进行文献总结。

## 1　脊柱微创外科协作机器人的临床应用

### 1.1　Mazor 公司系列机器人

2004 年,Mazor 公司推出第 1 代脊柱手术协作机器人 SpineAssist。SpineAssist 系统包括一个 T-Hover固定框架系统、一个具有交互界面的计算机工作站和一个 6 自由度操作器。T-Hover 固定框架系统固定于患者的骨性解剖标志,并使用固定于棘突上的克氏针进行稳定,避免患者相对位置的移动,减少误差。该系统通过术前 CT 影像三维重建脊柱图谱,获得螺钉的最佳进入点、角度及植入路径等。术中利用 T-Hover 固定框架将机器人安装在脊柱骨性标志上,在完成患者正侧位透视后进行注册,最终使用 SpineAssit 工作站和计算机导航系统经钻套完成人工置钉[2]。SpineAssist 系统机器人可自动沿预定轨迹移动操作器,减少之前徒手置钉需要的复杂运动,但存在因克氏针置入过程不稳定导致钻套位置不正确或者套管打滑等问题[3]。该机器人早期主要应用于后路腰椎退变性疾病手术中,SpineAssist 辅助开放置钉、经皮置钉在文献中均有报道[4,5]。由于该机器人为初代产品,因此,其他手术类型的应用报道相对较少[6]。

2011 年,Mazor 公司开发第 2 代机器人 Renaissance,临床应用仍以螺钉置入为主。Renaissance 机器人沿用 SpineAssist 的核心,并进行图像识别算法的提升及硬件的改进调整,术前注册过程更为简单易行,定位更加精准[7]。SpineAssist 和 Renaissance 的椎弓根螺钉置入准确率为 85% ~ 100%[8~10],Renaissance 机器人的应用范围变广,逐渐应用于脊柱肿瘤、创伤、感染、脊柱畸形等较为复杂手术的螺钉置入中[11~13]。此外,该机器人应用的脊柱节段也不局限于腰椎,Hyun 等[14]报道 4 例 Renaissance 机器人引导下 $S_2$ 髂骨翼螺钉置入治疗脊柱畸形,随访 10 ~ 13 个月,治疗效果良好,无术后并发症。Kam 等[15]利用 Renaissance 机器人施行 80 例包括退行性疾病、肿瘤、创伤等在内的胸腰椎节段脊柱手术,94.6% 置入的椎弓根螺钉根据 Gertzbein Robbins 符合 A 级或 B 级。

2016 年,Mazor 公司开发出一款新的机器人平台 Mazor X,并利用 Medtronic Stealth 软件导航。新系统全新引入光学导航系统,允许机器人对工作环境进行评估,自我检测位置,相比前代,可根据病人

* 通讯作者,E-mail:miltonyu@126.com

① (北京大学医学部,北京　100191)

体位改变而对机器人进行实时调整[3]。2018 年 Mazor 公司与美敦力合作推出脊柱手术机器人 MazorX Stealth。该机器人系统螺钉置入时不需要克氏针进行稳定、标记,并将术中基于 CT 的导航系统与 MazorX 机器人制导平台集成化,在显示器上实现仪器实时跟踪及术中实时反馈,进一步增加机器人椎弓根螺钉植入的安全性,使机器人更有可能应用于复杂脊柱外科中[16]。

1.2　ROSA Spine 机器人

2014 年法国 Medtech 医疗公司推出 ROSA Spine 产品,2016 年初即获得 FDA 和 CE 认证。该机器人系统将成像系统、影像导航系统与机器人操作系统集成在一起,拥有一个可自由移动的底座和一个 6 自由度的机械臂。自由移动的底座增加机器人的操作范围,提升机器人的稳定性,使之更适用于微创手术。机械臂可以安装传统脊柱外科所需要的器械,且能提高器械操作过程的准确性和稳定性[3]。机械臂末端还安装力反馈系统,能够识别术中力学信号的改变与异常,提高手术操作的安全性[17]。该机器人系统还引入光学追踪导航系统,实现术中机器人实时呼吸追踪和补偿,并通过实时跟踪置钉部位和置钉通道,测定螺钉置入深度,及时调整机器人手臂的位置,更极大提升置钉的准确性。ROSA Spine 机器人在腰椎手术中显示出优良的结果,初期临床研究结果显示 38 枚螺钉置入准确率为 97.4%[18]。Lefranc 等[19]回顾 24 例经椎间孔椎体间融合术,ROSA Spine 辅助植入的 96 枚螺钉中,98.9% 精确度达到 Grade A 级。此外,ROSA Spine 机器人在经皮胸腰椎置钉中也有应用[20]。

1.3　Excelsius GPS 机器人

Excelsius GPS 机器人在 2017 年获得 FDA 批准。该机器人的影像导航系统与 ROSA Spine 类似,内置集成于机器人操作器中,由于可以通过独立的管状机械臂直接进行螺钉置入,不需要框架系统固定或“克氏针”进行标记,缩短操作时间。该机器人可以实现实时术中监视,当钻套位置发生移动,置钉角度改变时,可自动补偿反馈。目前,该机器人的使用主要为腰骶部的退变性疾病。Zygourakis 等[21]报道第 1 例应用 Excelsius GPS 机器人进行脊柱外科手术,融合节段为 $L_3 \sim S_1$,结果显示该机器人在避免射线使用以及解剖变异患者中的优势。Wallace 等[22]对机器人在腰骶椎椎弓根螺钉上的准确性进行研究,600 个椎弓根螺钉有 98.2% 的置入准确率。

1.4　天玑骨科手术机器人

2015 年北京积水潭医院联合北京航空航天大学成功研制骨科手术协作机器人“天玑”,并于 2016 年成功获得国家医疗器械注册证,是国际首台能够开展四肢、骨盆骨折以及脊柱全节段手术的骨科协作机器人系统。天玑骨科手术机器人包括光学跟踪系统、机械臂主机与主控台车三部分,具有术前规划手术路径、自动配准椎弓根螺钉等功能,手术规划与手术操作相分离的“遥规划”技术使天玑机器人可以通过 5G 互联网实现远程骨科手术[23]。一项 234 例 1116 枚椎弓根螺钉的前瞻性随机对照临床试验显示,机器人辅助置钉的准确性为 95.3%,徒手置钉的准确性为 86.1%,显示天玑机器人胸腰椎外科手术的安全性和有效性[24]。目前,天玑骨科手术机器人在颈、胸、腰、骶椎均有应用,相比国外同类型机器人应用范围更广。Tian 等[25~27]分别报道应用天玑机器人辅助进行 $C_{1\sim2}$ 经寰枢关节螺钉固定治疗寰枢椎不稳、前路螺钉固定治疗齿状突骨折、椎板内直接螺钉固定治疗峡部裂各 1 例,手术规划与实际结果的偏移距离仅为 0.8798 ~ 0.9 mm,皆取得了良好的疗效。Long 等[28]回顾性比较 91 例天玑机器人系统与传统手术经皮骶髂螺钉内固定治疗骨盆后环骨折,出血量[(33.89 ± 16.4) ml vs. (43.04 ± 12.34) ml, $P < 0.001$]、手术时间[(33.25 ± 6.46) vs. (63.55 ± 6.62) min, $P < 0.001$]显示了天玑机器人在骨盆骨折手术上越卓的性能。

1.5　达芬奇机器人

与其他协作机器人不同,达芬奇机器人以腔镜手术为基础,由 4 个机械臂组成:3 个用于手术操作,1 个用于摄像导航。术者在手术床旁的手术仓实现远程操纵,避免传统腔镜对于术者手臂的制约。手术仓内装配 3D 屏幕以及操作台,通过机械臂上的 3D 影像重建系统在屏幕上呈现三维视觉的高清影像,并通过防抖功能、360°旋转度及高分辨率使术者可以清晰辨认解剖结构。机械臂的自由度超越人手活动的极限,可以连续完成精密动作而不易产生疲劳和失误[16]。

达芬奇机器人在脊柱外科最主要的应用在于脊柱前路手术。Troude 等[29]在 2 例活猪标本及 1 例人尸体标本进行了 $L_2 \sim L_5$ 椎间盘切除术和椎体间植入的解剖学研究,证明使用达芬奇机器人进行前路或斜路腰椎椎体间融合的可行性。Beutler 等[30]首次将达芬奇机器人应用于 1 例 $L_5 \sim S_1$ 腰椎前路

椎体间融合,手术视野相比开放手术或腹腔镜更清晰,出血量也极少。Lee 等[31]报道 11 例使用达芬奇机器人进行腰椎前路椎间植骨,出血量(65.9 ± 23.11)ml,手术时间(225.4 ± 64.3)min,随访期间无术后并发症,认为手术虽然困难费时但仍安全可行。近年来,达芬奇机器人系统也逐渐应用于脊柱旁良性肿瘤的切除,手术时间、出血量、住院时间等方面都优于传统开放手术[32]。由于脊柱外科本身以开放手术为主,达芬奇机器人为腔镜手术而设计,临床应用仍相对较少。

## 2　脊柱微创协作机器人的性能评估

### 2.1　螺钉置入的准确性

在螺钉置入的准确性方面(根据 Gertzbein Robbins 分级),绝大多数文献报道机器人微创手术优于传统开放手术[33,34]。目前,临床上常用徒手置钉完成椎弓根螺钉置入,该方法仅使用特定的解剖学标志来定位,主要凭借术者的手术经验,主观性较强,学习曲线较长,且存在精确度较低、反复穿刺、工作负荷大、多次透视以及螺钉穿出率较高等缺点[35]。机器人辅助手术可通过术前规划与术中 C 形臂取得三维重建图像,确定穿刺的部位和深度,从而提高螺钉置入的精确性。同时,机器人辅助手术还可以减少患者肌肉等坚硬组织的对抗,从而使准确性得到提升。Yu 等[36]2018 年的 meta 分析纳入 750 例 3625 枚椎弓根螺钉比较机器人辅助与徒手置钉的准确性,机器人置钉根据 Gertzbein Robbins 分级达到 A 或 B 级为 95.5%,高于徒手置钉组 92.9%。Li 等[37]2020 年的 meta 分析纳入 696 例 2139 枚螺钉,结果显示机器人辅助置钉 Gertzbein Robbins 分级为 A 级 88.9%,徒手置钉 A 级为 84.0%。总体来说,随着计算机图像识别算法、光学导航等新技术的应用,机器人辅助置钉的准确性是可以肯定的。

### 2.2　射线暴露水平

射线暴露方面,多数文献报道机器人手术要优于传统开放手术[36]。由于传统开放手术依赖于术中透视获得螺钉以及导针置入的最佳位置,对术者的放射线辐射较大[38]。机器人系统引导置入由于术中对透视、导航的依赖大大缩小,并且在获取图像同时,医护人员无需暴露在 X 射线区域,辐射水平显著减小。Kantelhardt 等[8]回顾分析 20 例机器人辅助与 57 例传统开放手术,结果显示传统开放手术每枚椎弓根螺钉的平均 X 射线照射时间 77 s,机器人辅助为 27 s。然而,由于机器人辅助系统需要术前薄层或高分辨率 CT 扫描,有学者认为这一步骤相比于传统开放手术将增加患者的辐射量[39]。因此,比较术前 CT 扫描与术中透视辐射剂量,机器人系统总辐射量是否减少尚无定论[9]。

### 2.3　手术时间

手术时间方面,大多数研究显示机器人手术并没有特别的优势[36]。Lonjon 等[39]前瞻性病例对照研究结果显示(机器人组和徒手组各 10 例),机器人辅助手术平均比徒手手术延长 74 min(186 min vs. 112 min)。机器人在设备安装、起始的影像学获得占用一定时间,从而导致其手术时间的延长,但对于一项正在发展的新技术来讲是可以接受的[40]。除此之外,其他多种因素也能导致机器人系统置入螺钉时间存在差异,如医生的经验、医生对系统的熟悉程度和定位过程的准确度等[41]。Kim 等[24]报道机器人手术完成前 8 例螺钉置入的平均时间为 14.9 min,后 29 例螺钉置入的平均时间为 9.3 min。随着医生对于机器人技术的不断熟悉,手术时间有进一步缩短的趋势。

### 2.4　其他临床指标

在术中出血[(375 ± 263)ml vs. (713 ± 455)ml, $P < 0.05$][42]、围手术期并发症发生率(6.1% vs. 12.5 %, $P = 0.142$)[43]、翻修手术率(8.2% vs. 20.4%, $P = 0.016$)[44]、住院时间[(6.3 ± 1.2)d vs. (8.9 ± 1.8)d, $P < 0.001$][45]等方面,机器人辅助脊柱外科手术不逊于传统开放手术。协作机器人的人体工程学设计能有效为术者术中操作提供帮助,降低术者的身心疲劳,使术者可以较长时间内进行手术,这也是该技术的独特优势[3]。

## 3　脊柱微创协作机器人的展望

脊柱微创协作机器人在脊柱手术中的应用仍处于早期阶段,还存在诸多缺陷与不足:目前,机器人的应用范围仍主要在胸椎和腰椎,主要用于辅助椎弓根螺钉置入,除去螺钉置入,脊柱减压、融合是脊柱外科中另外的关键步骤,当前针对该技术的研究仍较少。此外,对于骨质疏松及肥胖患者而言,相对不稳定的术前智能规划,术中术者操作与病人的呼吸运动引起的体位细微变化,较厚的软组织造成机器人钻头的偏离,缺乏一定的触觉反馈,都在一定程度上制约机器人的准确性和安全性。除此之外,脊

柱协作机器人在智能图像模型构建、脊柱节段识别、自动配准等算法等方面都有待进一步提升[46]。

此外,绝大多数脊柱协作机器人虽然在性能上具有一定的临床价值,提升手术的效果与安全性,但更多是作为术中辅助导航的工具,仅执行术前规划功能,没有像达芬奇机器人那样,真正实现术中的操作控制,与病人直接交互,因此,对于机器人控制系统的开发仍是未来脊柱外科协作机器人领域的重点。除此之外,将人工智能应用于脊柱外科机器人也是未来脊柱外科机器人的发展方向。Shademan 等[47]报道通过人工智能机器学习,完成监视下全自动机器人进行的肠吻合术。当机器的学习能力逐渐提高,手术机器人可以跟随术者学习其行动的偏好不断优化迭代,从而使自身的行动更有效率。

下一代脊柱微创协作机器人的开发方向将会是:手术协作机器人会固定在床旁,配有 2 个以上的多自由度机械臂,机械臂配置外科工具来进行经皮置棒、置钉等操作。术者可以在手术台之外,装配上头带设备和视觉设备,以机械臂上摄像头的视角来进行 AR 观看。AR 可显示钉道的 3D 视角以及术前和术中的图像。除此之外,通过同步术前图像和 VR 技术,术者可以在患者的身体上投影出内部结构和需要保护的重要解剖结构。机械手臂可以通过声控或者其他模仿手部的控制系统来进行移动,比如通过手套或者其他工具对手部动作进行高保真的模仿,从而进行更为精准的微创手术。

## 参考文献


1 Madhavan K, Kolcun JPG, Chieng LO, et al. Augmented-reality integrated robotics in neurosurgery: Are we there yet? Neurosurg Focus, 2017, 42(5): 1 – 9.

2 韩应超,谭　军. 机器人在脊柱外科手术中的研究进展. 中国矫形外科杂志, 2012, 20(20): 1861 – 1864.

3 D' Souza M, Gendreau J, Feng A, et al. Robotic-assisted spine surgery: History, efficacy, cost, and futuretrends. Robot Surg Res Rev, 2019, 6: 9.

4 Van Dijk JD, Van Den Ende RPJ, Stramigioli S, et al. Clinical pedicle screw accuracy and deviation from planning in robot-guided spine surgery: Robot-guided pedicle screw accuracy. Spine (Phila Pa 1976), 2015, 40(17): E986 – E991.

5 Pechlivanis I, Kiriyanthan G, Engelhardt M, et al. Percutaneous placement of pedicle screws in the lumbar spine using a bone mounted miniature robotic system: First experiences and accuracy of screw placement. Spine (Phila Pa 1976), 2009, 34(4): 392 – 398.

6 Solomiichuk V, Fleischhammer J, Molliqaj G, et al. Robotic versus fluoroscopy-guided pedicle screw insertion for metastatic spinal disease: A matched-cohort comparison. Neurosurg Focus, 2017, 42(5): 1 – 7.

7 Fiani B, Quadri SA, Farooqui M, et al. Impact of robot-assisted spine surgery on health care quality and neurosurgical economics: A systemic review. Neurosurg Rev, 2020, 43(1): 17 – 25.

8 Kantelhardt SR, Martinez R, Baerwinkel S, et al. Perioperative course and accuracy of screw positioning in conventional, open robotic-guided and percutaneous robotic-guided, pedicle screw placement. Eur Spine J, 2011, 20(6): 860 – 868.

9 Hyun SJ, Kim KJ, Jahng TA, et al. Minimally invasive robotic versus open fluoroscopic-guided spinal instrumented fusions. Spine (Phila Pa 1976), 2017, 42(6): 353 – 358.

10 Keric N, Doenitz C, Haj A, et al. Evaluation of robot-guided minimally invasive implantation of 2067 pedicle screws. Neurosurg Focus, 2017, 42(5): 1 – 8.

11 Joseph JR, Smith BW, Liu X, et al. Current applications of robotics in spine surgery: a systematic review of the literature. Neurosurg Focus, 2017, 42(5): E2.

12 Hu X, Scharschmidt TJ, Ohnmeiss DD, et al. Robotic assisted surgeries for the treatment of spine tumors. Int J Spine Surg, 2015, 9: 1.

13 Macke JJ, Woo R, Varich L. Accuracy of robot-assisted pedicle screw placement for adolescent idiopathic scoliosis in the pediatric population. J Robot Surg, 2016, 10(2): 145 – 150.

14 Hyun SJ, Kim KJ, Jahng TA. S2 alar iliac screw placement under robotic guidance for adult spinal deformity patients: technical note. Eur Spine J, 2017, 26(8): 2198 – 2203.

15 Kam JKT, Gan C, Dimou S, et al. Learning curve for robot-assisted percutaneous pedicle screw placement in thoracolumbar surgery. Asian Spine J, 2019, 13(6): 920 – 927.

16 Staub BN, Sadrameli SS. The use of robotics in minimally invasive spine surgery. J Spine Surg, 2019, 5(Suppl 1): S31.

17 韩晓光,刘亚军,范明星,等. 骨科手术机器人技术发展及临床应用. 科技导报, 2017, 35(10): 19 – 25.

18 Lefranc M, Peltier J. Accuracy of thoracolumbar transpedicular and vertebral body percutaneous screw placement: coupling the Rosa® Spine robot with intraoperative flat-panel CT guidance – a cadaver study. J Robot Surg, 2015, 9(4): 331 – 338.

19 Lefranc M, Peltier J. Evaluation of the ROSA™ Spine robot for minimally invasive surgical procedures. Expert Rev Med Devices, 2016, 13(10): 899 – 906.

20 Spyrantis A, Cattani A, Seifert V, et al. Minimally invasive percutaneous robotic thoracolumbar pedicle screw implantation combined with three-dimensional fluoroscopy can reduce radiation: A cadaver and phantom study. Int J Med Robot Comput Assist Surg, 2019, 15(5): 1 – 7.

21 Zygourakis CC, Ahmed AK, Kalb S, et al. Technique: open lumbar decompression and fusion with the Excelsius GPS robot. Neurosurg Focus, 2018, 45(Video Suppl 1): V6.

22 Wallace DJ, Vardiman AB, Booher GA, et al. Navigated robotic assistance improves pedicle screw accuracy in minimally invasive

surgery of the lumbosacral spine: 600 pedicle screws in a single institution. Int J Med Robot, 2020, 16(1): e2054.

23 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.

24 Kim H, Jung W, Chang B, et al. A prospective, randomized, controlled trial of robot-assisted vs freehand pedicle screw fixation in spine surgery. Int J Med Robot Comput Assist Surg, 2017, 13(3): e1779.

25 Tian W. Robot-assisted posterior C1 – 2 transarticular screw fixation for atlantoaxial instability: a case report. Spine (Phila Pa 1976), 2018, 41: B2 – B5.

26 Tian W, Zhang Q, Han XG, et al. Robot-assisted direct repair of spondylolysis: A case report. Medicine (Baltimore), 2020, 99(4): e18944.

27 Tian W, Wang H, Liu YJ. Robot-assisted anterior odontoid screw fixation: A case report. Orthop Surg, 2016, 8(3): 400 – 404.

28 Long T, Li KN, Gao JH, et al. Comparative study of percutaneous sacroiliac screw with or without TiRobot assistance for treating pelvic posterior ring fractures. Orthop Surg, 2019, 11(3): 386 – 396.

29 Troude L, Boissonneau S, Malikov S, et al. Robot-assisted multi-level anterior lumbar interbody fusion: an anatomical study. Acta Neurochir (Wien), 2018, 160(10): 1891 – 1898.

30 Beutler WJ, Peppelman WC, Dimarco LA. The da vinci robotic surgical assisted anterior lumbar interbody fusion: Technical development and case report. Spine (Phila Pa 1976), 2013, 38(4): 356 – 363.

31 Lee Z, Lee JY, Welch WC, et al. Technique and surgical outcomes of robot-assisted anterior lumbar interbody fusion. J Robot Surg, 2013, 7(2): 177 – 185.

32 Trybula SJ, Oyon DE, Wolinsky JP. Robotic tissue manipulation and resection in spine surgery. Neurosurg Clin N Am, 2020, 31(1): 121 – 129.

33 Fan Y, Du JP, Liu JJ, et al. Accuracy of pedicle screw placement comparing robot-Assisted technology and the free-hand with fluoroscopy-guided method in spine surgery. Med (United States), 2018, 97(22): 1 – 7.

34 Li HM, Zhang RJ, Shen CL. Accuracy of pedicle screw placement and clinical outcomes of robot-assisted technique versus conventional freehand technique in spine surgery from nine randomized controlled trials: A meta-analysis. Spine (Phila Pa 1976), 2020, 45(2): E111 – E119.

35 方国芳,吴子祥,樊　勇,等. Renaissance 脊柱机器人辅助手术系统在脊柱疾病中的应用. 中华创伤骨科杂志, 2017, 19(4): 299 – 303.

36 Yu L, Chen X, Margalit A, et al. Robot-assisted vs freehand pedicle screw fixation in spine surgery-a systematic review and a meta-analysis of comparative studies. Int J Med Robot Comput Assist Surg, 2018, 14(3): 1 – 8.

37 Li HM, Zhang RJ, Shen CL. Accuracy of pedicle screw placement and clinical outcomes of robot-assisted technique versus conventional freehand technique in spine surgery from nine randomized controlled trials: A meta-analysis. Spine (Phila Pa 1976), 2020, 45(2): E111 – E119.

38 陈　龙,海　涌,关　立,等. 机器人辅助置入与徒手置入椎弓根螺钉的对比研究. 中国骨与关节杂志, 2017, 6(10): 730 – 736.

39 Lonjon N, Chan-Seng E, Costalat V, et al. Robot-assisted spine surgery: feasibility study through a prospective case-matched analysis. Eur Spine J, 2016, 25(3): 947 – 955.

40 Ringel F, Stüer C, Reinke A, et al. Accuracy of robot-assisted placement of lumbar and sacral pedicle screws: a prospective randomized comparison to conventional freehand screw implantation. Spine (Phila Pa 1976), 2012, 37(8): E496 – E501.

41 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. 中国微创外科杂志, 2019, 19(9): 808 – 811.

42 Schatlo B, Molliqaj G, Cuvinciuc V, et al. Safety and accuracy of robot-assisted versus fluoroscopy-guided pedicle screw insertion for degenerative diseases of the lumbar spine: A matched cohort comparison. J Neurosurg Spine, 2014, 20(6): 636 – 643.

43 Keric N, Eum DJ, Afghanyar F, et al. Evaluation of surgical strategy of conventional vs. percutaneous robot-assisted spinal trans-pedicular instrumentation in spondylodiscitis. J Robot Surg, 2017, 11(1): 17 – 25.

44 Alaid A, von Eckardstein K, Smoll NR, et al. Robot guidance for percutaneous minimally invasive placement of pedicle screws for pyogenic spondylodiscitis is associated with lower rates of wound breakdown compared to conventional fluoroscopy-guided instrumentation. Neurosurg Rev, 2018, 41(2): 489 – 496.

45 Fan Y, Du J, Zhang J, et al. Comparison of accuracy of pedicle screw insertion among 4 guided technologies in spine surgery. Med Sci Monit, 2017, 23: 5960 – 5968.

46 Zhang Q, Han XG, Xu YF, et al. Robotic navigation during spine surgery. Expert Rev Med Devices, 2020, 17(1): 27 – 32.

47 Shademan A, Decker RS, Opfermann JD, et al. Supervised autonomous robotic soft tissue surgery. Sci Transl Med, 2016, 8(337): 337ra64.

(收稿日期:2020 – 01 – 13)
(修回日期:2020 – 06 – 12)
(责任编辑:李贺琼)