

综述

脊柱外科机器人及其临床应用进展

Progress in the clinical application of robot-assisted spine surgery

宗路杰, 干旻峰, 杨惠林, 王华铮, 董仲琛

(苏州大学附属第一医院骨科 215100 苏州市)

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2021.08.11

中图分类号: R608, R687.3 文献标识码: A 文章编号: 1004-406X(2021)-08-0754-05

自从 1987 年完成首例腹腔镜下胆囊切除术以来, 微创手术已经在各个外科领域迅猛发展。由于脊柱局部解剖复杂且毗邻重要的血管神经, 脊柱外科对于精准的要求更高。传统手术需要广泛暴露, 无辅助技术置入椎弓根螺钉时偏移 1mm 以上的概率可达 37.5%^[1], 其原因可能是术中无法实时观测器械或螺钉与相关解剖标志的位置关系。即使有术前 CT、术中透视甚至导航等多种辅助手段, 置钉的失败率仍高达 4.1%~28.9%^[2]。因此传统脊柱手术十分依赖医生经验, 而且手术创伤大、并发症多。微创手术需要术中透视来辅助定位, 给医生与患者带来辐射伤害, 限制了脊柱微创手术的发展。脊柱外科机器人的出现为此提供了解决方案, 目前大多数临床应用的机器人系统都有计算机辅助导航 (computer-assisted navigation, CAN), 既保证了手术的精准性, 又能减少医生的辐射伤害^[3]。此外, 机器人可长时间手术而不会疲劳, 保证精细操作, 不易受到外界因素干扰, 提高手术均质性。笔者将系统介绍当前脊柱机器人及其在临床的应用进展, 并总结其优势与不足, 为临床应用提供参考。

1 脊柱机器人的种类及临床应用现状

脊柱机器人按功能可以分为: 监督模式、遥控模式和共享控制模式^[4]。在监督模式下, 医生只需要在术前制定周密的手术计划, 术中机器人在医生的密切监控下自动操作完成手术。遥控模式机器人是由医生直接控制机器人 (如达芬奇机器人) 持有手术器械进行手术, 可用于远程手术。脊柱外科机器人大多数是共享控制模式, 医生在术前进行手术规划, 术中医生和机器人同时控制器械, 手术全程都需手扶操作。机器人也可按结构 (机械臂的连接方式) 分为串联型和并联型^[5]。串联型机器人的特点是灵活性高、操作范围大, 但是其体积较大, 累计误差导致机器臂末端的精度和稳定性降低, 因此目前已有部分串联型机器人通过运动传感器或光学追踪组件的运动补偿来修正精度。而并联

式机器人的结构使其具有体积小、精度高、末端稳定性佳的优势, 但是其设计也更为复杂且工作范围狭小。

1.1 国外机器人

目前美国 FDA 批准可用于临床置入椎弓根螺钉的机器人系统有三个: Mazor 系列、ROSA 和 Excelsius GPS。

1.1.1 Mazor 系列机器人 是以色列 Medtronic 公司设计的 Mazor 系列机器人, 上市最早, 使用也最为广泛, 已经从第一代 SpineAssist、第二代 Renaissance 更新至第三代 Mazor X。SpineAssist 是在 2004 年第一个被美国 FDA 批准用于脊柱外科手术的机器人, 至今仍是临床应用最广泛的手术机器人。SpineAssist 是并联式机器人, 拥有 6 台电机和 6 个自由度, 总质量仅有 250g。在术前需要用 Hover-T 框架固定在骨性标志上, 从而维持术中相对位置固定。其工作流程可简化为: 术前进行影像学注册和手术设计, 术中用 C 型臂 X 线机进行配准, 再依据术前设计的置钉路径调整 6 台电机的位置和角度, 然后医生只需参照导向臂的方向打孔置钉。SpineAssist 的安全性和精准性已得到大量研究证实^[6-11], 其导航功能优于传统的术中导航。传统的导航系统要求医生时刻注视显示器以遵循预定的手术路径, 对手眼协调的要求很高, 而 SpineAssist 的机械臂可以自动沿着预定轨迹进行定位, 增加了安全性。Renaissance 是 2011 年在 SpineAssist 基础上推出的第二代脊柱机器人, 主要升级了软件 and 用户界面, 使医生通过 C 型臂 X 线机透视就可以进行三维重建。它还可以在螺钉开孔前通过局部磨削来预防引导套管打滑^[12]。Mazor X 是 2016 年推出的最新型号, 改成了串联式机械臂, 不仅增加了操作范围和灵活性, 还减少了对部分器械的依赖^[13]。Mazor X 还拥有一枚摄像头, 用于在手术环境中判断自身位置从而避免碰撞。此外, Mazor X 还可以对单个椎体进行独立定位, 提升了手术的精准性。Mao 等^[14]的研究比较了 O 型臂 X 线机导航和 Mazor X 置钉的精确性, 发现 Mazor X 达到 Gertzbein-Robbins 评分 A 级的比例明显高于 O 型臂 X 线机导航 (86.16% vs 65.99%)。

1.1.2 ROSA 机器人 法国 MedTech 公司 2012 年推出的 ROSA 机器人最初是为脑外科设计的, 2014 年改进为 ROSA Spine, 2016 年被 FDA 批准用于脊柱外科。ROSA 机器人有 6 个自由度的机械臂, 并在末端集成了力学反馈系

基金项目: 苏州市医工结合协同创新研究项目 (SLJ201902)

第一作者简介: 男 (1996-), 研究生在读, 研究方向: 脊柱外科

电话: 18862185846 E-mail: 18862185846@163.com

通讯作者: 干旻峰 E-mail: spineganmf@126.com

统,可以在手术过程中识别力学信号来提高手术的安全性。它的导航系统基于 O 型臂 X 线机进行 3D 重建,能够在术中进行实时追踪。与 Mazor X 一样,ROSA 也集成了摄像头来跟踪患者的呼吸运动,并能实时调整机器人的相对位置,这是 ROSA 机器人的一大优势。文献报道 ROSA 机器人置钉 Gertzbein-Robbins 评分 B 级以上的成功率可达 98.9%^[15]和 97.3%^[16]。

1.1.3 Excelsius GPS 机器人 美国 Globus 公司推出的 Excelsius GPS 机器人在 2017 年获得 FDA 批准。其不但可以进行实时追踪、运动补偿,还可以通过其机械臂直接经皮置钉而无需棘突夹固定。Vardiman 等^[17]应用 Excelsius GPS 机器人经皮置入 348 枚椎弓根螺钉,发现其中仅 9 枚螺钉需要重新定位,成功率达到 97.4%。Huntsman 等^[18]报道,他们使用 Excelsius GPS 机器人完成的前 100 例椎弓根螺钉置入术的成功率达到了 99%。

1.1.4 达芬奇机器人(Da Vinci Robot) 它是临床使用最广泛、最著名的医用机器人,主要用在腹腔镜手术,近年来也用于脊柱外科,包括腰椎前路椎间融合术(ALIF)^[19,20]、胸腰椎神经纤维瘤切除术^[21,22]等。之前在腹腔镜下进行 ALIF 较传统开放前路手术没有明显收益而已被逐渐抛弃^[23]。然而 Lee 等^[20]首次使用达芬奇机器人完成了 2 例 L5/S1 ALIF,认为达芬奇机器人进行前路脊柱手术相较传统腹腔镜下手术更为精准,手术并发症更少。

1.1.5 SPINEBOT 机器人 SPINEBOT v1 机器人在 2005 年由韩国汉阳大学研发,最新已升级到第二代(SPINEBOT v2),主要新增了导航模块,其导航采用双平面连续透视来定位。Kim 等^[24]利用该机器人进行了尸体实验研究,置入的 28 枚螺钉中 26 枚(92.86%)位置满意,平均误差为 1.38±0.21mm。

1.1.6 VectorBot 机器人 2006 年由德国航空航天中心研发,由机械臂和光学追踪系统构成。其特点是通过 VectorVision 光学系统来追踪固定在椎体上的标志点^[25],而无需进行术中透视。然而固定光学标志点会造成额外创伤,限制了其临床应用。

1.1.7 Neuroglide 机器人 Neuroglide 机器人是 2012 年瑞士洛桑大学为上颈椎手术设计的高精度并联式机器人,其机械臂拥有 4 个自由度,末端集成了钻孔导向器。由医生根据解剖标志粗定位后依据其光学系统和算法进一步精确定位,然后医生沿着钻孔导向器置钉,体外试验中其定位精度为 1.94mm,在改进钻头打滑等问题后其精度达到了 0.41mm^[26]。

1.1.8 SpinoBot 机器人 是针对脊髓细胞疗法研发的机器人。脊髓前角注射干细胞被认为具有治疗肌萎缩性侧索硬化症(ALS)的潜力,然而难以精确定位限制了其临床应用。SpinoBot 机器人基于 MRI 定位,在 2 个平移方向和 2 个旋转方向共有 4 个自由度,在体外研究中显示其平均误差为 1.12±0.97mm,也有望用于其他需要脊柱精准定位的手术^[27]。

1.2 国内机器人

虽然我国对于医疗机器人的研究成果并不少,但最终能进行科研成果转化走上市场的产品仍很少,其中天玑机器人是为数不多的经过了临床实践检验的产品。

1.2.1 天玑机器人 2015 年,北京积水潭医院和北京天智航公司合作研发了天玑机器人,包含了 6 自由度机械臂系统、光学追踪系统与手术规划及导航系统。天玑机器人机械臂系统的底座可移动,并有自动平衡系统来保持与患者位置相对稳定,其整体机械精度可达 1.0mm。其光学系统的追踪精度可达 0.30mm,可以在术中实时监测机械臂与患者的相对位置及变化,还能通过实时运动补偿来确保机械臂准确按照预先设计的手术路径置钉。在一项纳入 40 例患者的随机对照研究中,天玑机器人显示了优异的精度,平均误差 1.77±0.78mm,明显优于传统透视下徒手置钉(3.92±1.80mm)^[28]。另一项纳入了 234 例患者的随机对照研究^[29]显示,天玑机器人有 95.3%的螺钉达到了 A 级,平均误差 1.5±0.8mm,在精确度、术中出血和放射暴露剂量方面都显著优于传统透视下徒手置钉;此外,机器人组没有出现螺钉侵犯关节突,而徒手置钉组有 12 枚螺钉侵犯了关节突。最近一篇纳入了 9 项随机对照研究的荟萃分析发现,在比较机器人和徒手置钉精确度的亚组分析中,天玑机器人展示出了比 Renaissance 更好的精确度^[30]。颈椎尤其是上颈椎的椎弓根狭窄,解剖结构更加复杂,更易损伤颈髓、血管、神经根,而且后果往往更加严重。2015 年,天玑机器人完成了世界上首例机器人辅助的上颈椎手术^[31]。最近的一项针对颈椎椎弓根螺钉置入的随机对照研究^[32]显示,天玑机器人的成功率达到 98.9%,精度优于传统透视下置钉(0.83mm vs 1.79mm),而且术中出血更少,住院时间更短。

1.2.2 脊柱微创手术机器人 2008 年,第三军医大学新桥医院与中科院沈阳自动化研究所合作研发了脊柱微创手术机器人。该机器人具有 6 个自由度的机械臂,末端装有力学传感器来实时反馈末端受力情况;还集成了气钻,可以实现遥控手术,减少医护受到的辐射^[33]。但由于其没有结合导航系统,因此临床应用较局限。

1.2.3 无框架脊柱手术机器人 2010 年,郑州大学第一附属医院报道了自主研发的无框架脊柱手术机器人,其特点是无需框架固定、导航注册等环节,而是基于术前 CT 调整 C 型臂 X 线机角度,在椎弓根标准轴位片上用机械臂和尾端呈“十”字状的导针进行定位,体外实验显示 60 枚螺钉均成功置入^[34]。由于无需导航和固定,具有成本较低、操作简便的优势。

1.2.4 脊柱手术机器人 中科院深圳先进技术研究院主导研发的脊柱手术机器人(Robotic Spinal Surgical System, RSSS)已经升级为 RSSS-II^[35],基于三维导航,其串联式机械臂有 6 个自由度,末端集成了力反馈钻骨装置设计,目前尚无临床应用报道。

1.2.5 脊柱椎弓根螺钉微创置入机器人 苏州大学附属

第一医院与北京航空航天大学 and 北京大学第三医院合作,设计了只需 C 型臂 X 线机和定位环就可以将二维图像坐标转化为三维空间坐标的算法^[36],该配准方法完成一次定位仅需 3.5min,然后通过计算机控制 6 自由度的机械臂完成置钉操作。体外研究显示其最大平移误差为 1.31mm,最大旋转误差为 0.94°,并在 35min 内成功置入 4 枚椎弓根螺钉,可以既好又快地满足临床的需求。最近又进一步完善了该机器人系统,可以基于 C 型臂 X 线机透视进行实时的三维重建,还进一步集成了光学跟踪系统,体外验证精度为 (2.54±0.15)mm,置钉合格率达到了 100%^[37]。

1.2.6 结构光辅助导航脊柱穿刺手术机器人 苏州大学附属第一医院与哈尔滨工程大学合作开发了基于三维结构光定位的脊柱机器人辅助导航系统^[38],它可以利用术中结构光图像与术前 CT 进行配准,相对于传统的 C 型臂 X 线机或 O 型臂 X 线机导航完全无辐射,体外实验验证其定位精度为 3.34±0.12mm,达到了脊柱穿刺手术导航的基本需求。

2 脊柱机器人的优势

2.1 提高置钉的准确性

目前,机器人技术在脊柱外科中主要用于置入椎弓根螺钉,置钉的准确性至关重要。机器人出现之前主要依靠解剖标志和术中透视来辅助定位,文献报道传统置钉失败率可达 20%~40%^[39]。在实际手术过程中,椎体的轴向旋转往往导致螺钉错位,Tian 等^[40]的研究证明,3D 计算机辅助导航可以校正椎体的轴向旋转,其准确性高于传统方法组 ($P<0.01$)。Mason 等^[41]的系统评价也指出计算机导航可以提高置钉准确度,术中透视、2D 导航和 3D 导航的准确度分别为 68.1%、84.3%、95.5%。另一项系统评价认为计算机导航下颈椎、胸椎、腰椎三个区域的置钉准确度相比术中透视都有所提高^[42]。大多数脊柱机器人系统都有计算机导航,目前对于导航辅助机器人和导航下徒手置钉的准确性比较仍有争议。大多数研究认为导航辅助机器人置钉的准确性优于导航下徒手置钉^[8,9,43-45],可能的原因是长时间的脊柱手术会使医生肌肉疲劳和动作变形,而且实时关注导航显示器会分散医生注意力。但也有作者认为机器人置钉的准确性不及导航下经验丰富的外科医生 (85% vs 93%)^[46],或者两者无统计学差异^[47]。2018 年的一项荟萃分析纳入了 10 篇文献,发现导航辅助机器人置钉的准确性优于导航下徒手置钉^[48]。

2.2 减少术中辐射

导航辅助机器人相比徒手置钉可以减少医护的辐射剂量。目前导航辅助机器人的主要原理为:术前依据患者 CT 进行手术设计,术中通过 C 型臂 X 线机或 O 型臂 X 线机进行配准,并通过导航系统完成注册和术中追踪器械。一旦完成注册,机器人就可以无需反复进行术中透视,从而降低医护的放射暴露。一项随机对照研究显示,在腰椎后路手术使用导航可以显著降低放射暴露剂量,仅为透视

组的 1/10^[49]。Hyun 等^[50]的研究显示,在应用机器人之后,置入 1 枚腰椎螺钉仅需暴露 3.5s,相比徒手置钉 (13.3s) 明显降低。Roser 等^[51]的研究也有类似的结果:机器人置钉组放射暴露时间 (15.98s) 明显低于徒手置钉组 (31.5s)。在椎体成形术中,Barzilay 发现使用 SpineAssist 机器人降低医护人员 74% 的放射暴露剂量^[7]。Kim 等^[44]发现,随着经验的积累,熟练操作机器人后总透视时间比早期病例减少了 30%。

2.3 具有微创优势

在临床指标方面,目前的研究注重于报道手术时间、住院时间、翻修率和感染率等,尚缺乏长期预后指标如 SF-12 生活质量简表 (Short Form-12 health survey) 和 Oswestry 功能障碍指数 (Oswestry disability index, ODI) 等的报道。一项纳入了 32 篇文献的综述认为,机器人手术会增加手术时间,但缩短了住院时间^[50]。Yu 等^[51]的荟萃分析认为机器人和徒手置钉技术在准确性和并发症方面无明显差异,然而机器人组的并发症均为感染,可能与手术时间长有关。Staatjes 等^[52]的荟萃分析纳入了 7095 例病例,发现机器人组的翻修率明显低于传统手术组 ($P=0.04$),不仅是因为导航辅助技术可以看得更准,从而无需广泛剥离软组织,实现微创和快速康复的效果;而且机器人可以做得更精细,确保了在狭小空间内操作的精确性与安全性。还有一些研究^[6,8,9,11]发现使用机器人进行经皮置钉,可以进一步降低感染率、减少止痛药使用率和住院时间。两项随机对照研究^[43,44]都发现,机器人组的椎弓根螺钉相比徒手组距上关节突更远,对关节突的侵犯更少,有利于减少术后应力改变导致的邻近节段退变。

3 总结和展望

医疗机器人经过 30 多年的发展,已经在微创手术和精准医疗方面取得了巨大的成就,脊柱外科机器人还在减少医护职业暴露、提高手术安全性上获得了成功。与传统的透视下徒手置钉相比,机器人置钉更准确,更安全,医护辐射更少,患者恢复更快。然而,目前的脊柱机器人仍有以下缺点:(1)缺乏可靠的触觉反馈;(2)结构复杂、造价昂贵;(3)需要额外的人员和费用;(4)初期存在一定的学习曲线;(5)适应证仍较少。

脊柱外科机器人的一大优势在于更高的精度。目前大部分有关脊柱机器人的文献都在讨论胸腰椎融合术,随着技术的改进和适应证不断扩大,机器人在更高精度的手术中有望占有一席之地,如颈椎手术^[32]、脊柱肿瘤切除术^[53]和腰椎骨盆内固定术^[54-55]。维持导航系统和患者间相对位置稳定有助于提高手术精度,可以改进固定装置,使其与患者间固定更加牢靠;也可以增强光学追踪系统的实时监控和运动补偿功能。目前机器人的精度受限于术前、术中的影像学匹配精度、术中光学系统的追踪精度与机械臂的机械精度,上述领域的技术改进都将提高机器人的精度和安全性。

其他技术的发展也给脊柱机器人改进带来了新的契机。虚拟现实技术(virtual reality)的发展有望降低外科医生的学习门槛,尤其是对于成本高昂的医疗机器人。5G 技术带来的低延时通信可以助力外科医生操控机器人进行远程手术。人工智能(AI)技术的发展可以使机器人能够预测手术操作和潜在危险,进一步为手术安全保驾护航。

4 参考文献

1. Tian W, Liu Y, Zheng S, et al. Accuracy of lower cervical pedicle screw placement with assistance of distinct navigation systems: a human cadaveric study[J]. *Eur Spine J*, 2013, 22(1): 148-155.
2. 张宇轩, 王洪立, 宋健, 等. 手术机器人在脊柱外科的应用进展[J]. *中华骨科杂志*, 2017, 37(24): 1556-1560.
3. 王洪伟, 赵忆文, 韩建达, 等. 机器人系统在脊柱外科手术中的研究与应用进展[J]. *中华外科杂志*, 2012, 50(9): 856-858.
4. Nathoo N, Cavusoglu MC, Vogelbaum MA, et al. In touch with robotics: neurosurgery for the future [J]. *Neurosurgery*, 2005, 56(3): 421-433.
5. 田伟, 范明星, 刘亚军. 脊柱导航辅助机器人技术的现状及远期展望[J]. *北京生物医学工程*, 2014, 33(5): 527-531.
6. Van Dijk JD, Van den Ende RP, Stramigioli S, et al. Clinical pedicle screw accuracy and deviation from planning in robot-guided spine surgery: robot-guided pedicle screw accuracy[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2015, 40(17): 986-991.
7. Barzilay Y, Schroeder JE, Hiller N, et al. Robot-assisted vertebral body augmentation: a radiation reduction tool[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2014, 39(2): 153-157.
8. Roser F, Tatagiba M, Maier G. Spinal robotics: current applications and future perspectives [J]. *Neurosurgery*, 2013, 72(Suppl 1): 12-18.
9. 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[J]. *Eur Spine J*, 2011, 20(6): 860-868.
10. 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 [J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2009, 34(4): 392-398.
11. Devito DP, Kaplan L, Dietl R, et al. Clinical acceptance and accuracy assessment of spinal implants guided with spineassist surgical robot: retrospective study[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2010, 35(24): 2109-2115.
12. Kim HJ, Lee SH, Chang BS, et al. Monitoring the quality of robot-assisted pedicle screw fixation in the lumbar spine by using a cumulative summation test[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2015, 40(2): 87-94.
13. Khan A, Meyers JE, Siasios I, et al. Next-generation robotic spine surgery: first report on feasibility, safety, and learning curve[J]. *Oper Neurosurg(Hagerstown)*, 2019, 17(1): 61-69.
14. Mao G, Gigliotti MJ, Myers D, et al. Single-surgeon direct comparison of O-arm neuronavigation versus mazor X robot-guided posterior spinal instrumentation [J]. *World Neurosurg*, 2020, 137: 278-285.
15. Lefranc M, Peltier J. Evaluation of the rosa spine robot for minimally invasive surgical procedures [J]. *Expert Rev Med Devices*, 2016, 13(10): 899-906.
16. Lonjon N, Chan-Seng E, Costalat V, et al. Robot-assisted spine surgery: feasibility study through a prospective case-matched analysis[J]. *Eur Spine J*, 2016, 25(3): 947-955.
17. Vardiman AB, Wallace DJ, Crawford NR, et al. Pedicle screw accuracy in clinical utilization of minimally invasive navigated robot-assisted spine surgery [J]. *J Robot Surg*, 2020, 14(3): 409-413.
18. Huntsman KT, Ahrendtsen LA, Riggleman JR, et al. Robot-assisted navigated minimally invasive pedicle screw placement in the first 100 cases at a single institution [J]. *J Robot Surg*, 2020, 14(1): 199-203.
19. Yang MS, Yoon DH, Kim KN, et al. Robot-assisted anterior lumbar interbody fusion in a swine model in vivo test of the da vinci surgical-assisted spinal surgery system [J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2011, 36(2): E139-143.
20. Lee JY, Bhowmick DA, Eun DD, et al. Minimally invasive, robot-assisted, anterior lumbar interbody fusion: a technical note[J]. *J Neurol Surg A Cent Eur Neurosurg*, 2013, 74(4): 258-261.
21. Moskowitz RM, Young JL, Box GN, et al. Retroperitoneal transdiaphragmatic robotic-assisted laparoscopic resection of a left thoracolumbar neurofibroma[J]. *JSL*, 2009, 13(1): 64-68.
22. Perez-Cruet MJ, Welsh RJ, Hussain NS, et al. Use of the da vinci minimally invasive robotic system for resection of a complicated paraspinal Schwannoma with thoracic extension: case report[J]. *Neurosurgery*, 2012, 71(Suppl 1): 209-214.
23. Liu JC, Ondra SL, Angelos P, et al. Is laparoscopic anterior lumbar interbody fusion a useful minimally invasive procedure[J]. *Neurosurgery*, 2002, 51(Suppl 5): S155-158.
24. Kim S, Chung J, Yi BJ, et al. An assistive image-guided surgical robot system using O-arm fluoroscopy for pedicle screw insertion: preliminary and cadaveric study[J]. *Neurosurgery*, 2010, 67(6): 1757-1767.
25. Ortmaier T, Weiss H, Dobeles S, et al. Experiments on robot-assisted navigated drilling and milling of bones for pedicle screw placement[J]. *Int J Med Robot*, 2006, 2(4): 350-363.
26. Kostrzewski S, Duff JM, Baur C, et al. Robotic system for cervical spine surgery[J]. *Int J Med Robot*, 2012, 8(2): 184-190.
27. Squires A, Oshinski JN, Boulis NM, et al. Spinobot: an mri-guided needle positioning system for spinal cellular therapeutics[J]. *Ann Biomed Eng*, 2018, 46(3): 475-487.
28. 田伟, 范明星, 韩晓光, 等. 机器人辅助与传统透视辅助脊柱椎弓根螺钉内固定的临床对比研究[J]. *骨科临床与研究杂志*

- 志, 2016, 1(1): 4-10.
29. Han XG, Tian W, Liu YJ, 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.
30. 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[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2020, 45(2): 111-119.
31. Tian W. Robot-assisted posterior C1-2 transarticular screw fixation for atlantoaxial instability: a case report [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2016, 41(Suppl 19): B2-B5.
32. Fan M, Liu Y, He D, et al. Improved accuracy of cervical spinal surgery with robot-assisted screw insertion: a prospective, randomized, controlled study[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2020, 45(5): 285-291.
33. 张鹤, 韩建达, 周跃. 脊柱微创手术机器人系统辅助打孔的实验研究[J]. *中华创伤骨科杂志*, 2011, 13(12): 1166-1169.
34. 张春霖, 赵玉果, 张昌盛, 等. 无框架脊柱导航手术机器人腰椎弓根标准轴位引导置钉[J]. *中国组织工程研究与临床康复*, 2010, 14(35): 6466-6470.
35. 靳海洋, 邓震, 王宇, 等. RSSS-II 脊柱手术机器人系统开发及其实验研究[J]. *集成技术*, 2016, 5(1): 75-84.
36. Han Z, Yu K, Hu L, et al. A targeting method for robot-assisted percutaneous needle placement under fluoroscopy guidance[J]. *Comput Assist Surg (Abingdon)*, 2019, 24(Suppl 1): 44-52.
37. Chen L, Zhang F, Zhan W, et al. Research on the accuracy of three-dimensional localization and navigation in robot-assisted spine surgery[J]. *Int J Med Robot*, 2020, 16(2): e2071.
38. 张峰峰, 陈龙, 杨诗怡, 等. 机器人辅助脊柱手术三维定位导航[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2020, 41(12): 1735-1741.
39. Overley SC, Cho SK, Mehta AI, et al. Navigation and robotics in spinal surgery: where are we now [J]. *Neurosurgery*, 2017, 80(3 Suppl): 86-99.
40. Tian W, Lang Z. Placement of pedicle screws using three-dimensional fluoroscopy-based navigation in lumbar vertebrae with axial rotation[J]. *Eur Spine J*, 2010, 19(11): 1928-1935.
41. Mason A, Paulsen R, Babuska JM, et al. The accuracy of pedicle screw placement using intraoperative image guidance systems[J]. *J Neurosurg Spine*, 2014, 20(2): 196-203.
42. Shin BJ, James AR, Njoku IU, et al. Pedicle screw navigation: a systematic review and meta-analysis of perforation risk for computer-navigated versus freehand insertion [J]. *J Neurosurg Spine*, 2012, 17(2): 113-122.
43. Hyun SJ, Kim KJ, Jahng TA, et al. Minimally invasive robotic versus open fluoroscopic-guided spinal instrumented fusions: a randomized controlled trial [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2017, 42(6): 353-358.
44. Kim HJ, Jung WI, Chang BS, et al. A prospective, randomized, controlled trial of robot-assisted vs freehand pedicle screw fixation in spine surgery[J]. *Int J Med Robot*, 2017, 13(3): e1779.
45. 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]. *J Neurosurg Spine*, 2014, 20(6): 636-643.
46. Ringel F, Stuer 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[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2012, 37(8): 496-501.
47. Laudato PA, Pierzchala K, Schizas C. Pedicle screw insertion accuracy using O-arm, robotic guidance, or freehand technique: a comparative study[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2018, 43(6): 373-378.
48. Fan Y, Du JP, Liu JJ, et al. Accuracy of pedicle screw placement comparing robot-assisted technology and the freehand with fluoroscopy-guided method in spine surgery: an updated meta-analysis[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2018, 97(22): e10970.
49. Villard J, Ryang YM, Demetriades AK, et al. Radiation exposure to the surgeon and the patient during posterior lumbar spinal instrumentation: a prospective randomized comparison of navigated versus non-navigated freehand techniques [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2014, 39(13): 1004-1009.
50. Ghasem A, Sharma A, Greif DN, et al. The arrival of robotics in spine surgery: a review of the literature[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2018, 43(23): 1670-1677.
51. 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[J]. *Int J Med Robot*, 2018, 14(3): e1892.
52. Staartjes VE, Klukowska AM, Schroder ML. Pedicle screw revision in robot-guided, navigated, and freehand thoracolumbar instrumentation: a systematic review and Meta-analysis [J]. *World Neurosurg*, 2018, 116: 433-443.
53. Bederman SS, Lopez G, Ji T, et al. Robotic guidance for en bloc sacrectomy: a case report [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2014, 39(23): 1398-1401.
54. Hu X, Lieberman IH. Robotic-guided sacro-pelvic fixation using S2 alar-iliac screws: feasibility and accuracy[J]. *Eur Spine J*, 2017, 26(3): 720-725.
55. Shillingford JN, Laratta JL, Park PJ, et al. Human versus robot: a propensity-matched analysis of the accuracy of free hand versus robotic guidance for placement of S2 alar-iliac (S2AI) screws[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2018, 43(21): 1297-1304.

(收稿日期:2020-11-16 末次修回日期:2021-05-23)

(本文编辑 卢庆霞)