

骨科手术机器人在脊柱外科手术中的应用及研究进展

孙金贵^{1, 2}, 晏欢欣^{1, 2}, 司泽兵², 田高强², 赖添杰², 胡孔和^{1, 2}

(1. 广东医科大学第一临床医学院 广东 湛江 524000; 2. 粤北人民医院脊柱外科 广东 韶关 512000)

摘要 近年来, 随着国内外相关学者对骨科手术机器人的不断研究, 骨科手术机器人在临床中的应用已成为研究热点, 并获得了较好的发展。骨科手术机器人具有较高的定位精准性和操作稳定性, 有利于减少患者的手术射线暴露和术中并发症发生率, 具有较高的临床应用价值。本研究主要对骨科手术机器人在脊柱外科领域中的应用进展进行了综述, 分析了骨科手术机器人的研究现状、关键技术、临床优势及未来发展方向。

关键词 骨科手术机器人; 脊柱外科; 人工智能; 导航

中图分类号 R681.5 **文献标识码** A **文章编号** 2096-7721 (2025) 04-0547-05

Application and research progress of orthopaedic surgical robot in spinal surgery

SUN Jingui^{1, 2}, YAN Huanxin^{1, 2}, SI Zebing², TIAN Gaoqiang², LAI Tianjie², HU Konghe^{1, 2}

(1. First Clinical Medical College, Guangdong Medical University, Zhanjiang 524000, China; 2. Department of Spine Surgery, Yuebei People's Hospital, Shaoguan 512000, China)

Abstract In recent years, with continuous research into orthopedic surgical robots by domestic and international scholars, their clinical application has become a major focus and achieved significant advancements. With high positioning accuracy and operational stability, orthopedic surgical robots can help reduce surgeons' intraoperative radiation exposure and lower the incidence of complications, highlighting their substantial clinical value. The progress in the application of orthopedic surgical robots in spinal surgery was reviewed in this paper, and their current research status, key technologies, clinical advantages, and future development directions were analyzed.

Key words Orthopedic Surgical Robot; Spinal Surgery; Artificial intelligence; Navigation

随着人口老龄化问题加重, 脊柱退行性疾病的发病率逐渐升高, 且越来越年轻化^[1-2]。部分脊柱退行性疾病患者已无法进行保守治疗, 需要进行外科手术。然而, 人体脊柱生理结构十分复杂, 脊柱周围有重要神经、血管分布, 一旦手术操作不慎会直接损伤患者神经及脊髓, 严重影响患者日常生活^[3-4]。随着医学技术的不断发展, 骨科手术机器人的出现使脊柱外科手术取得了较好的效果, 确保了手术更微创、更安全, 有利于改善患者预后^[5-6]。目前, 骨科手术机器人在脊柱外科领域的应用主要集中于椎弓根钉的置入及固定、脊柱矫形及椎间融合手术等^[7-9]。本研究主要对骨科手术机器人在脊柱外科手术中的应用及其研究进展进行了综述, 分析了骨科手术机器人的

研究现状、关键技术、临床优势及未来发展方向, 为骨科手术机器人的临床应用提供依据。

1 骨科手术机器人的国内外发展现状

1986年一款经美国食品药品监督管理局(FDA)认证批准, 并应用于髋关节置管术的智能系统出现。ISS公司在此基础上于1992年推出Robodoc机器人, 该系列机器人是第一款经FDA认证的手术机器人, 可应用于全膝关节及全髋关节置换术^[10]。2017年, 美国GM公司推出脊柱手术机器人Excelesius GPS(如图1A), 并经FDA批准, 该机器人可实时展示术中图像, 实现椎弓钉植入^[11]。2022年, GM公司发布Excelesius 3D智能系统(如图1B), 特意为2D

基金项目: 广东省自然科学基金项目(2018A030313500)

Foundation Item: Natural Science Foundation of Guangdong Province (2018A030313500)

引用格式: 孙金贵, 晏欢欣, 司泽兵, 等. 骨科手术机器人在脊柱外科手术中的应用及研究进展[J]. 机器人外科学杂志(中英文), 2025, 6(4): 547-551.

Citation: SUN J G, YAN H X, SI Z B, et al. Application and research progress of orthopaedic surgical robot in spinal surgery[J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2025, 6(4): 547-551.

通讯作者(Corresponding Author): 胡孔和(HU Konghe), Email: hkhgksq@126.com

数字照相、透视及 3D 成像所设计, 其与 Excelesius GPS 机器人结合可有效提高放置植入物的精准度, 减少辐射暴露, 有效缩短患者手术时间, 促进患者术后康复。2022 年 5 月, 二者相结合首次完成了“三合一”成像脊柱手术。

2010 年我国研发出一款脊柱微创手术机器人, 该机器人在术中可由机械臂末端的传感器实时观察机械臂受力情况^[12]。2012 年, 中国科学院研制出 RSSS 脊柱手术机器人(如图 2), 该机器人主要用于脊柱钻钉辅助, 其配备手术导航与规划系统、光学追踪系统, 另外还具备六维力传感的机械臂, 可通过信号及图像感知操作情况, 在后续实验中发现该机器人具有较高的定位准确度及距离分辨能力^[13]。2019 年, 我国研制出天玑[®]骨科手术机器人(如图 3), 该机器人是世界上独有的可应用于多种脊柱外科手术的机器人系统。天玑[®]骨科手术机器人主要由主控工作台、机械臂及光学定位跟踪系统构成, 可以协助医师规划手术方案、把持导针, 达到人机协同运动, 确保手术安全性^[14-15]。截至 2022 年, 天玑系列机器人的应用已覆盖我国近 30 个省, 所完成手术量已突破 30 000 例。

2 骨科手术机器人的基本结构与关键技术

2.1 基本结构 目前国内外推出的骨科手术机器人种类繁多, 但构造大致相同, 主要是由医生工作台、机械臂及导航追踪系统等三大部分构成。

2.1.1 医生工作台 主要用于图像显示及操作系统控制, 医生工作台可通过获取医生手部动作信息, 将狭窄的手术视野放大展示于显示屏上^[16]。

2.1.2 机械臂 主要包括机械臂固定装置、运动装置

及执行装置。固定装置主要用来固定机械臂及执行器, 运动装置用来完成机械臂的动作, 目前已具备较为成熟的高精度技术^[17]。执行装置的工作头部可以替换, 从而满足不同手术的需求, 其内还有装置定位, 可以配合手术导航, 捕捉手术器械的坐标, 展示手术空间位置等。

2.1.3 导航追踪系统 主要包括导航系统及定位器、示踪器等配套系统。导航系统以现有 CT 数据作为地图, 通过机械臂的感应元件定位手术器械, 可帮助医生在术中透过体表组织的遮盖, 更直观地展示手术部位, 此外也可帮助医生避开重要神经及血管的解剖位置^[18-19]。

2.2 关键技术

2.2.1 三维可视化技术 在脊柱外科手术中, 图像分割技术可帮助医生追踪、识别患者单椎体的变化情况, 协助医生诊疗及合理规划手术方案^[20]。由于环境及技术方面的因素影响, 在采集 CT 图像时可能会混入噪声, 影响 CT 图像分割效果, 故可以选择

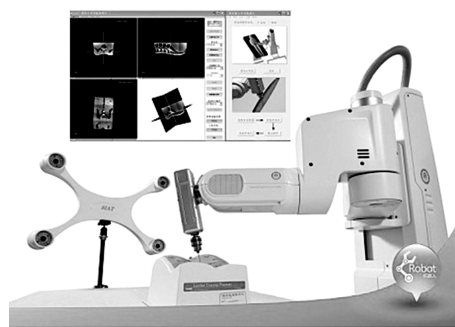


图 2 RSSS 脊柱手术机器人
Figure 2 RSSS spinal surgical robot
注: 图片来源于中国科学院官网



图 1 骨科手术机器人
Figure 1 Orthopaedic surgical robot
注: A.Excelesius GPS 机器人; B.Excelesius 3D 智能系统; 图片来源于美国 GM 公司官网



图 3 天玑[®]骨科手术机器人
Figure 3 TiRobot[®] orthopedic robotic system
注: 图片来源于北京天智航医疗科技股份有限公司官网

高斯平滑或中值平滑等技术进行降噪处理。在降噪处理时,医生可在图片目标区域应用小窗口滑动,使图像变得更平滑,图片内亮度变得更平缓,提升图片质量,减少图片噪声干扰。图片降噪后应用医学图像处理系统对其进行分割及三维重建^[21]。医生可以对三维立体模型进行移动、放大、旋转等操作,以便于观察患者脊柱不同情况下的形态及不同切层情况。将患者术前CT及核磁共振等图像进行分割处理及三维重建,即图像的三维可视化,这一技术有利于构建病变部位的数字解剖模型,协助医生准确判断病变部位,有助于医生规划手术方案及术中导航。

2.2.2 导航技术 骨科手术机器人的导航系统是其关键技术之一,医生可凭借导航准确判断病变部位,并将其作为目标靶点,结合图像规划出合理的手术方案,以便顺利完成手术^[22-23]。目前骨科手术机器人多配备光学导航技术,该技术主要由国外的NDI公司所提供,其定位精确度较高,可以将误差控制在0.5 mm以内。近年来随着我国科技的飞速发展,我国亦研发出艾目易 Aimooe 光学定位手术导航系统。

2.2.3 识别及感知技术 脊柱外科手术中的另一个重点即是对骨层的感知,准确判断骨层是手术成功的关键。利用骨科手术机器人进行脊柱外科手术,需要手术机器人能够实时感知骨组织的状态,以在手术中最大程度避开重要神经血管,确保手术安全性^[24]。目前,在5G技术支持下,骨科手术机器人可通过导航系统并结合导航位置信息对当前手术状态进行量化,利用声音及颜色等变化实现状态预警。图像可以反映出邻近的骨组织结果,骨皮质相较于骨松质灰度值更高。手术机器人可以通过图像获取当前位置的周围环境,比如当区域内出现骨皮质时,则提示可能发生穿透、接触等问题,手术机器人可结合自身状态进行安全性评估^[25-26]。目前,对骨组织的感知方式有多种,诸如振动、力学等,可以通过装载传感器,收集分析骨组织信息,建立模型识别脊柱骨组织,从而提高手术操作的安全性。

3 骨科手术机器人在脊柱外科的应用

3.3.1 引导式脊柱手术机器人 现阶段引导式手术机器人在脊柱外科临床的应用较为广泛,其主要侧重于导航方面,适用于脊柱矫形术及椎间融合手术等,机器人可辅助完成椎弓根钉的植入及固定^[27-28]。

现今,多个系列引导式手术机器人均通过FDA认证,各系列手术机器人的功能结构及系统组成相差无几。2003年国外Mazor Robotics公司推出了Spine Assist机器人系统,并将该机器人系统应用于脊柱外科手术。该系统由6自由度Stewart并联构成,可完成对脊柱的精确定位引导。2016年Mazor Robotics公司推出Mazor X机器人系统(如图4),将并联机械臂升级为串联机械臂,且具有高自由度,很大程度上增加了手术的可操作性及机械臂灵活性,还可应用自身配备的摄像头精准判断手术空间位置,避免术中发生不必要的损伤^[29]。Mao G等人^[30]比较了在置钉时应用传统导航(O型臂)及Mazor X导航的精准度,结果显示,应用Mazor X导航系统的患者中有86.16%术后Gertzbein-Robbins评分为A级,而应用传统导航系统的患者中仅有65.99%术后Gertzbein-Robbins评分为A级。有研究显示^[31],应用ROSA机器人置钉的患者中有98.9% Gertzbein-Robbins评分为A级或B级。2017年,获得FDA认证的Excelsius GPS机器人可在术中进行实时追踪及运动补偿。Vardiman A B等人^[32]报道了应用Excelsius GPS机器人进行椎弓根螺钉置入术,结果发现其成功置入率高达97.4%。国产天玑®骨科手术机器人已获得我国国家药品监督管理局认证,该系列机器人的引导定位精准度极高,还可进行远程操作。阎凯等人^[33]报道了应用天玑® II骨科手术机器人(如图5)进行胸腰椎椎弓根螺钉置入术,20例患者均手术顺利,成功置入92枚螺钉,其中螺钉位置优秀率高达90.2%。刘莹等人^[34]报道了应用天玑®骨科手术机器人治疗腕舟骨骨折,结果发现,相对于传统徒手操作手术,应用天玑®骨科手术机器人治疗6个月后患者的腕关节功能恢复更好。一项Meta分析^[35]中纳入了13篇文献,总计748例患者,其中机器人组430例,徒手组318例。结果显示,与徒手组相比,机器人组患者的螺钉优良率更高,术后并发症发生率更低。

3.3.2 主动操作式脊柱手术机器人 主动操作式手术机器人的末端执行器可进行多个动作,如置入钉(针)、椎板磨削及钻孔^[36]。脊柱钻孔及置钉机器人是目前应用较为广泛且发展时间最长的手术机器人系统,可用于脊柱矫形术、椎体成形术及椎间融合术等多种术式^[37]。2004年,韩国汉阳大学研发了

SPINEBOT 脊柱手术系统，该系统可实现自动钻孔及器械引导等功能，提高了钻孔及置钉的精确度。2010 年中国研发出脊柱微创手术机器人系统，该系统装载了六维力传感器，可完成自主钻孔操作，很大程度上减少了辐射暴露^[38]。2022 年，中国 Point Robotics 公司推出 Kinguide 机器人辅助手术系统（如图 6），



图 4 Mazor X 机器人系统
Figure 4 Mazor X robotic system
注：图片来源于 Mazor 公司官网



图 5 天玑® II 骨科手术机器人
Figure 5 TiRobot® II orthopedic surgical robot
注：图片来源于北京天智航医疗科技股份有限公司官网

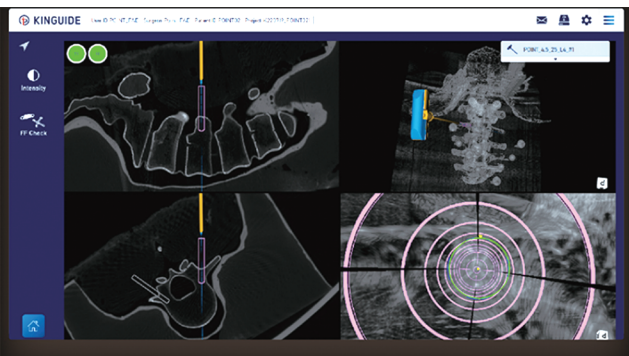


图 6 Kinguide 机器人辅助手术系统
Figure 6 Kinguide robot-assisted surgical system
注：图片来源于 Point Robotics 公司官网

该机器人系统为半自动执行机器人系统，可通过控制手持执行器完成钻孔及置钉，减轻术中医生负担，但其适应证还需后续试验验证。脊柱椎板磨削机器人多应用于脊柱退行性病变，通过磨削部分或全部椎板减轻脊髓压迫，同时进行椎弓根螺钉置入，还原脊柱稳定性^[39]。因脊柱椎板周围结构较为复杂，椎板磨削机器人的高精度性及高稳定性可保障手术安全性。

4 总结与展望

随着机器人技术的不断进步与发展，骨科手术机器人在精准性、安全性等方面均明显优化，有效改善了传统手术中的植入物位置偏差、过分依赖医生经验等问题。但目前骨科手术机器人在临床应用中仍存在不同程度的问题，如结构较为复杂，学习曲线较长；手术成本昂贵；适应证相对较少；智能化程度不足等。因此，未来还需进一步提升骨科手术机器人的智能化、微创化、自动化及普及化，使其更全面、更深入地参与到脊柱外科手术中。

①智能化。随着医学技术与人工智能的发展，骨科手术机器人的机器学习及自然语言模型等已成为研究热点。因此，骨科手术机器人的高智能化是发展的大方向。现阶段主动操作式机器人尚存在误操作等风险，若骨科手术机器人具有高度智能化，可在手术过程中根据患者实际情况更好地进行智能化决策，以应对突发事件，确保手术的安全性。②微创化。在脊柱外科手术中，精准、微创的术中操作可减少手术创伤，降低术后并发症发生率，有利于患者术后恢复。因此，骨科手术机器人的微创化仍是重要发展目标。③远程化。随着 5G 技术的发展，很大程度上提高了远程手术的稳定性及精准度，已经可以解决部分远程手术问题。近年来，我国相关政策提出让偏远地区也能享受优质医疗资源，故将 5G 技术同骨科手术机器人相结合可作为重要发展方向。④多功能化。目前各系列骨科手术机器人功能相对单一，其大多数仅适用于某种脊柱外科手术。因此，骨科手术机器人还需以多功能化为发展目标，降低医疗成本。⑤普及化。现阶段，骨科机器人手术费用高昂，普通家庭尚无法承担；同时骨科手术机器人操作复杂，医生的学习曲线较长，限制了其在临床的普及与推广。因此，骨科手术机器人的普

及化亦是一个亟待解决的问题，或许可以通过规模性生产来解决这一问题。综上所述，虽然骨科手术机器人在脊柱外科手术中已获得较好的临床效果，但仍存在一些局限性和挑战，需要不断完善和改进。

利益冲突声明：本文不存在任何利益冲突。

作者贡献声明：孙金贵负责设计论文框架，起草论文；孙金贵、晏欢欣、司泽兵、田高强、赖添杰、胡孔和均参与该项目具体操作及研究过程的实施；孙金贵、晏欢欣、司泽兵负责论文修改；田高强、赖添杰、胡孔和负责拟定写作思路，指导撰写文章并最后定稿。

参考文献

- [1] Heo D H, Kim J Y, Park J Y, et al. Clinical experiences of 3-dimensional biportal endoscopic spine surgery for lumbar degenerative disease[J]. Oper Neurosurg (Hagerstown), 2022, 22(4): 231–238.
- [2] Lacroix M, Nguyen C, Burns R, et al. Degenerative lumbar spine disease: imaging and biomechanics[J]. Semin Musculoskelet Radiol, 2022, 26(4): 424–438.
- [3] Byvaltsev V A, Kalinin A A, Shepelev V V, et al. Long-term results and predictors of postoperative outcomes in patients with cauda equina syndrome following degenerative lumbar spine disease[J]. Zh Vopr Neurokhir Im N N Burdenko, 2023, 87(1): 35–43.
- [4] CHEN T Z, LU X J, WU D Z, et al. Efficacy of minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion plus cement-augmented pedicle screw fixation in the treatment of degenerative lumbar spine disease with osteoporosis in the elderly[J]. Eur Rev Med Pharmacol Sci, 2023, 27(14): 6573–6582.
- [5] FAN M X, FANG Y M, ZHANG Q, et al. A prospective cohort study of the accuracy and safety of robot-assisted minimally invasive spinal surgery[J]. BMC Surg, 2022, 22(1): 47.
- [6] SHEN H, ZHOU J L, YU L P. Cervical pedicle screw fixation with the Tianji orthopedic surgical robot[J]. J Orthop Surg Res, 2025, 20(1): 131.
- [7] LI Q Q, GU G H, WANG L, et al. Using EMG signals to assess proximity of instruments to nerve roots during robot-assisted spinal surgery[J]. Int J Med Robot, 2022, 18(4): e2408.
- [8] Davidar A D, Jiang K, Weber-Levine C, et al. Advancements in robotic-assisted spine surgery[J]. Neurosurg Clin N Am, 2024, 35(2): 263–272.
- [9] Kuris E O, Anderson G M, Alsoof D, et al. Robotic spine surgery in Rhode island[J]. R I Med J (2013), 2023, 106(1): 58–62.
- [10] Cowley G. Introducing "Robodoc". A robot finds his calling-in the operating room[J]. Newsweek, 1992, 120(21): 86.
- [11] Elswick C M, Strong M J, Joseph J R, et al. Robotic-assisted spinal surgery: current generation instrumentation and new applications[J]. Neurosurg Clin N Am, 2020, 31(1): 103–110.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 张波, 王晋超, 宋卿鹏, 等. 天玑骨科手术机器人辅助退行性脊柱侧弯手术的疗效分析[J]. 北京生物医学工程, 2022, 41(3): 286–291.
- [15] 郑博隆, 郝定均, 林斌, 等. “天玑”骨科手术机器人辅助与徒手穿刺椎体成形术治疗上胸椎骨质疏松性椎体压缩骨折的疗效比较[J]. 中华创伤骨科杂志, 2021, 23(1): 20–26.
- [16] Prakash R, Agrawal Y. Robotic technology in total knee arthroplasty[J]. Br J Hosp Med (Lond), 2023, 84(6): 1–9.
- [17] Cervone A, Rainey J, Sodhi N, et al. The perspectives of robotic surgeons[J]. Surg Technol Int, 2024, 44(15): 25–28.
- [18] Branstetter R 4th, Piedy E, Rajendra R, et al. Navigating the intersection of technology and surgical education: advancements, challenges, and ethical considerations in orthopedic training[J]. Orthop Clin North Am, 2025, 56(1): 21–28.
- [19] 夏睿, 徐玮, 刘雷, 等. 天玑骨科机器人 Tirobot 导航系统在骨盆骨折手术中的应用[J]. 生物骨科材料与临床研究, 2023, 20(2): 60–64.
- [20] WU Z Y, WANG L, LI Y F, et al. Head CT image segmentation and three-dimensional reconstruction technology based on human anatomy[J]. Comput Intell Neurosci, 2022, 16(5): 7091476.
- [21] Lee N J, Lombardi J M, Qureshi S, et al. Robot-assisted spine surgery: the pearls and pitfalls[J]. J Am Acad Orthop Surg, 2025, 33(2): e81–e92.
- [22] Sabri S A, York P J. Preoperative planning for intraoperative navigation guidance[J]. Ann Transl Med, 2021, 9(1): 87.
- [23] Piche J D, Muscatelli S R, Waheed M A, et al. Robotic navigation system utilization for percutaneous sacroiliac screw placement: surgical setup and technique[J]. J Spine Surg, 2021, 7(2): 197–203.
- [24] ZHAO C P, CAO Q Y, SUN X, et al. Intelligent robot-assisted minimally invasive reduction system for reduction of unstable pelvic fractures[J]. Injury, 2023, 54(2): 604–614.
- [25] Overley S C, Cho S K, Mehta A I, et al. Navigation and robotics in spinal surgery: where are we now[J]. Neurosurgery, 2017, 80(3S): S86–S99.
- [26] Trybula S J, Oyon D E, Wolinsky J P. Robotic tissue manipulation and resection in spine surgery[J]. Neurosurg Clin N Am, 2020, 31(1): 121–129.
- [27] LIN M C, LIU H W, SU Y K, et al. Robot-guided versus freehand fluoroscopy-guided minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion: a single-institution, observational, case-control study[J]. Neurosurg Focus, 2022, 52(1): E9.
- [28] LI Y J, WEI X, LIANG Y H, et al. Robot-assisted versus fluoroscopy-guided pedicle screw fixation of thoracolumbar compression fractures[J]. Medicine (Baltimore), 2023, 102(48): e36430.
- [29] McIntosh M K, Christie S. Opportunities and challenges for robotic-assisted spine surgery: feasible indications for the MAZORTM X Stealth Edition[J]. Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc, 2023, 20(5): 1–4.
- [30] Mao G, Gigliotti M J, Myers D, et al. Single-surgeon direct comparison of O-arm neuronavigation versus Mazor X robotic-guided posterior spinal instrumentation[J]. World Neurosurg, 2020, 137(10): e278–e285.
- [31] Lefranc M, Peltier J. Evaluation of the ROSATM spine robot for minimally invasive surgical procedures[J]. Expert Rev Med Devices, 2016, 13(10): 899–906.
- [32] Vardiman A B, Wallace D J, Crawford N R, 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.
- [33] 阎凯, 张琦, 刘波, 等. 天玑 II 机器人辅助胸腰椎椎弓根螺钉内固定术的临床应用[J]. 北京生物医学工程, 2022, 41(3): 297–301.
- [34] 刘莹, 沈杰, 刘波, 等. 骨科机器人辅助手术治疗胸腰椎骨折的临床疗效观察[J]. 北京生物医学工程, 2023, 42(3): 283–286, 304.
- [35] 张国旭, 曾剑波, 李静, 等. 骨科机器人辅助与徒手经皮骰髂螺钉固定治疗骨盆后环骨折比较的 Meta 分析[J]. 中国组织工程研究, 2024, 28(18): 2932–2938.
- [36] PAN M Z, CHEN Y, LI Z, et al. Autonomous path planning for robot-assisted pelvic fracture closed reduction with collision avoidance[J]. Int J Med Robot, 2023, 19(2): e2483.
- [37] 辛晓明, 高明暄, 张帆, 等. 骨科机器人辅助置钉在青少年特发性脊柱侧弯畸形中的应用[J]. 中国组织工程研究, 2023, 27(36): 5790–5794.
- [38] TIAN W, HAN X G, LIU B, et al. A robot-assisted surgical system using a force-image control method for pedicle screw insertion[J]. PLoS One, 2014, 9(1): e86346.
- [39] SUN Y, WANG L, JIANG Z L, et al. State recognition of decompressive laminectomy with multiple information in robot-assisted surgery[J]. Artif Intell Med, 2020. DOI: 10.1016/j.artmed.2019.101763.

收稿日期：2024-01-26

编辑：魏小艳