

· 综 述 ·

关节置换术机器人手术系统的现状及发展趋势[△]

卜延民, 赵慧雯*, 郑得志, 罗文

(天津市天津医院关节外科, 天津 300211)

摘要: 随着计算机视觉、深度学习等尖端科学技术的快速发展, 关节置换术机器人手术系统在稳定性和准确性方面与关节置换术传统手术技术相比具有显著优势, 有效地提高了手术治疗效果。随着关节置换术机器人手术系统的不断迭代更新, 并与虚拟现实、人工智能等新兴技术相结合, 产生了强大的术前规划和智能操作功能。当今市场上关节置换术机器人手术系统种类繁多, 本文就关节置换术机器人手术系统的最新应用现状及今后发展趋势进行综述, 阐述了关节置换术机器人手术系统在临床应用方面的优势和局限性, 并提出可解决的方案, 为今后关节置换术机器人手术系统的研究发展提供参考。

关键词: 关节置换术, 机器人, 人工智能, 术前规划

中图分类号: R687 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2024) 19-1780-06

Current situation and development trend of robotic surgical system for joint replacement // BU Yan-min, ZHAO Hui-wen, ZHENG De-zhi, LUO Wen. Department of Joint Surgery, Tianjin Hospital, Tianjin 300211

Abstract: With the rapid development of cutting-edge science and technology such as computer vision and deep learning, joint replacement robotic surgical system has significant advantages in terms of stability and accuracy compared with traditional joint replacement surgical techniques, effectively improving the surgical treatment effect. With the continuous iteration and update of the joint replacement robotic surgical system, and the combination of virtual reality, artificial intelligence and other emerging technologies, powerful preoperative planning and intelligent operation functions have been generated. There are many kinds of joint replacement robotic surgical systems on the market today. This paper reviews the latest application status and future development trend of joint replacement robotic surgical systems, expounds the advantages and limitations of joint replacement robotic surgical systems in clinical application, and puts forward solutions. It provides reference for the future research and development of robotic surgical system for joint replacement.

Key words: joint replacement, robots, artificial intelligence, preoperative planning

进入 21 世纪, 随着人工智能等尖端科学技术领域的快速发展, 机器人手术系统在临床上应用的优势越来越明显, 其中以“达芬奇”机器人手术系统为代表的软组织机器人手术系统在全球广泛使用^[1]。据美国直觉外科公司最新统计数据, 截止到 2015 年 12 月, 全球共安装了 3 597 个达芬奇手术系统^[2], 逐渐取代传统开放式手术和腹腔镜手术技术。近年来, 机器人手术系统在关节置换术领域快速蓬勃发展。目前, 关节置换术机器人手术系统主要分为三种类型: 主动型、半主动型和被动型^[3]。半主动型机器人手术系统凭借其独有的“人机交互”, 通过人工智能算法不断地迭代升级和虚拟现实技术的应用, 充分利用机器人精准导航的优势完成手术操作, 逐渐成为关节置

换术的有效辅助工具, 近年来机器人辅助进行人工关节置换术逐渐成为主流趋势^[4]。本文将从国内外关节置换术机器人手术系统分类、应用现状、局限性及发展趋势等方面进行分析总结, 提出关节外科机器人的发展趋势, 为今后关节外科机器人的发展提供参考。

1 国内外关节置换术机器人手术系统

1.1 Robodoc/Tsolution One

1992 年美国 Integrated Surgical Systems 公司设计了全球第一台关节置换术机器人手术系统^[5]。Robodoc 机器人手术系统于 1994 年首次用于全髋关节置换术^[6], 在 2000 年被使用进行全膝关节置换

DOI:10.20184/j.cnki.Issn1005-8478.110099

[△]基金项目:天津市重点实验室开放基金课题项目(编号:SY-04-2024-004)

作者简介:卜延民,副主任医师,研究方向:膝关节外科,(电话)022-60910201,(电子信箱)b1380201972@sina.com

*通信作者:赵慧雯,(电话)022-60910196,(电子信箱)vrmrh9@163.com

术^[7]。Robodoc 手术系统以术前 CT 影像对手术进行规划，术中参照为固定在术区的定位器，由机械臂根据系统设置自动进行股骨髓腔磨削。Robodoc 机器人手术系统全膝关节置换术与传统膝关节置换术相比，机器人系统辅助膝关节置换术患者术后影像学测量结果满意度均高于传统膝关节置换术患者^[8]。与传统膝关节置换术相比，Robodoc 机器人手术系统全膝关节置换术可以显著减少下肢对齐异常值，提高手术治疗效果^[9]。Robodoc 机器人手术系统的迭代产品 Tsolution One 机器人手术系统在 2014 年推出，目前在全球广泛使用^[10]。Tsolution One 机器人手术系统以开放平台为基础，术前通过 TPLAN 3D 工作站对 CT 数进行处理，规划术前方案，并传至 Think Computer Assisted Tool (TCAT) 系统。最终 TCAT 模块与术前计划配准，限制机器人手术系统操作范围，自主实施截骨操作。

1.2 CASPAR

1997 年德国 OrtoMaquet 公司专门针对全膝关节置换术设计 CASPAR 机器人手术系统，该系统在术中额外布置一套红外立体跟踪定位装置，一旦机械臂末端超过设定值，系统立即停止工作，提高了机器人手术系统操作的安全性^[11]。同时，研究证实 CASPAR 机器人手术系统可以显著提高假体装配的准确性。但是，CASPAR 机器人手术系统属于主动型机器人手术系统，其工作原理是在手术医生的监护下按照术前规划好的轨迹进行工作，操作不受医生控制，医生无法直接保证手术安全，一旦出现系统故障可导致严重后果^[12]。

1.3 Acrobot

Acrobot 机器人手术系统 (Stanmore Implants Worldwide, Elstree, 英国) 是最早用于膝关节单髁置换术的机器人手术系统^[13]。该系统增加了具有“主动约束”功能的截骨系统，即机械臂在手术导航规划和定位跟踪下，自动限制医生在手术规划区域内的运动轨迹，保障手术操作的安全性，形成“Hands-On”技术操控机制。Robinson 等^[14]报道显示，Acrobot 系统用于膝关节单髁置换时下肢力线重建误差均不足 2°，而传统手术精确度明显差，并且术后 6 周时机器人组美国膝关节协会评分明显高于传统手术组患者。

1.4 Mako

Mako Rio (Stryker, 美国) 是全球范围内使用最多的关节置换机器人手术系统，可进行全髋关节置换术、全膝关节置换术和膝关节单髁置换术^[15]。该系

统以术前 CT 影像诊断结果规划术中截骨量、软组织平衡等，并自动计算假体型号。Mako Rio 机器人手术系统最大的特点是术中截骨前能够依据生物力学特点再规划，截骨时进行触觉反馈，以便术者及时调整截骨路径^[16]。Melvin 团队在 2018 年对使用 Mako Rio 机器人手术系统进行膝关节单髁置换术的患者进行两年以上随访，结果显示 Mako 机器人手术系统可以有效提高手术的精确性和安全性^[17]。Dretakis 等^[18]对 51 例 Mako 机器人手术系统进行膝关节单髁置换术患者随访 3 年，总体满意度超过 96%。Khlopas 等^[19]研究发现 Mako 机器人手术系统进行膝关节单髁置换术下肢力线、旋转对线更精准，术后关节线更佳。Deckey 等^[20]总结 220 例 Mako 机器人手术系统行全膝关节置换术患者的资料，发现假体放置、下肢力线、垫片厚度精准度均更高。一项针对 Mako 辅助关节置换术与手术医生单纯手工手术的对比显示，机器人辅助手术具有更好的关节修复准确性，机器人辅助手术准确率为 98.8%，医生手工方式准确率为 95.5%；同时在对患者的回访中显示，92% 的患者肯定了机器人辅助手术方式^[21]。

1.5 国内自主研发的关节置换术机器人手术系统

近年来，国内关节置换术机器人手术系统的研制取得了长足进步，如国内首款获批的 HURWA 系统^[22]，以及在 2022 年同批次上市的 ARTHROBOT、骨圣元化、鸿鹄三款关节置换术机器人手术系统，这些机器人手术系统多为半主动型机器人手术系统^[23-25]。ARTHROBOT 机器人手术系统采用七轴机械臂工作模式，是目前国内上市产品中唯一一款同时兼容全髋关节置换术、全膝关节置换术的机器人手术系统。研究显示，HURWA 机器人手术系统进行全膝关节置换术患者术后下肢力线重建准确率高达 81.2%，而传统手术组患者下肢力线重建准确率仅为 63.5%，可以安全可靠的实现机器人手术系统辅助下全膝关节置换术^[26]。研究报道证实，从 5 例接受鸿鹄机器人手术系统辅助下全膝关节置换术患者中共统计到 30 个绝对误差，73.3% 的绝对误差在 0~1 mm，16.7% 的绝对误差在 1~2 mm，6.7% 的绝对误差在 2~3 mm，与传统手术方式相比，鸿鹄手术机器人采用了虚拟夹具、共享控制等先进技术，实现精准化手术操作^[27]。

2 关节置换术机器人手术系统局限性

2.1 临床医生学习曲线

在机器人手术系统辅助模式下进行关节置换术，需要临床医生熟悉机器人手术系统工作原理及操作流程，同时需要麻醉师、器械护士、巡回护士等工作人员在手术过程中密切配合，否则可导致手术时间延长，降低手术安全性。相关文献报道，机器人手术系统辅助关节置换术临床医生学习曲线结果差异性较大，完成学习曲线所需要的病例范围广泛，从 7 例至 43 例各不相同。以 Mako 关节置换术机器人手术系统为例，KAYANI 等研究报道，全膝关节置换术学习曲线为 7 例，即完成了 7 例患者的经验积累，可达到机器人手术系统应用团队熟练程度^[28]。另有研究表明，Mako 系统进行全膝关节置换术学习曲线达到 11~43 例，学习曲线与术者经验、团队配合度等有关，同时指出，学习曲线并不影响术中假体定位及软组织平衡操作^[29]。赵晶等优化 Mako 机器人辅助全膝关节置换术流程，对 30 例机器人辅助全膝关节置换术学习曲线进行累计求和分析，第 1~10 例术中止血带使用时间为 104.4 min，第 11~20 例术中止血带使用时间为 87.3 min，第 21~30 例术中止血带使用时间为 77.3 min，结果显示 Mako 机器人辅助全膝关节置换术需要经历 11 例手术学习曲线；同时研究证实，三组患者术中股骨远端、胫骨近端截骨、股骨及胫骨冠状面夹角、股骨外旋角以及胫骨后倾角对比差异均无统计学意义 ($P>0.05$)^[30]。Siebert 等对比 2 名同年资医生进行机器人辅助全膝关节置换术和传统全膝关节置换术的手术时间，结果表明，机器人组早期手术耗时较长，平均 135 min，随着经验逐渐丰富，后期缩短到 90 min 左右^[12]。

2.2 成本效益

临床上普及使用关节置换术机器人手术系统就不得不考虑成本效益。研究认为，机器人手术系统费用更高，涉及术前影像检查、系统调试、耗材使用等。至少有 1 500 美元的固定开销^[31]。对于需要特殊影像数据的系统，术前影像学资料较为关键，成本至少 260 美元，并且大多数系统年维护成本达到 40 000 美元，除此之外团队培训也需要成本^[32]。近年经济学分析发现，随着机器人系统的逐渐发展，性价比也逐渐上升^[28]。新技术给整个社会带来的收益必须超过其使用成本，才能在临床工作中广泛使用。尽管从影像学角度分析，机器人辅助关节置换术早期临床效果比传统关节置换术有明显优势，即假体植入位置和下肢力线恢复更准确，拥有更高的患者满意度^[33]。有研究表明，使用机器人辅助全髋关节置换术，术后患者中短期随访 Harris 髋关节评分和西安大略和麦克马

斯特大学骨关节炎指数 (Western Ontario and McMaster Universities Osteoarthritis Index, WOMAC) 差异无统计学意义，但是机器人辅助全髋关节置换术后患者髋关节特异性功能效果更好、关节遗忘评分更高，差异有统计学意义^[34]。但是目前对机器人手术系统关节置换术远期效果研究尚未找到相关文献报道。

2.3 机器人手术系统相关并发症

关节置换术机器人手术系统中需在骨性结构上进行定位螺钉、参考架的固定，进行膝关节解剖结构注册和光学追踪。这些操作可能引起并发症，如螺钉断裂、松动等，导致机器人手术系统辅助关节置换术失败，不得不采取传统方式的人工关节置换术^[35]。Thomas 等^[36]通过对 7 336 例机器人辅助全膝关节置换术后患者进行 1 年以上随访后发现，手术定位螺钉相关并发症发生率约为 1.4%。术前规划依赖手工图像分割、个性化程度不足，可导致手术时间延长，增加术中出血和术后关节感染的风险。手术时间增加、效率低是当前关节置换术机器人手术系统普遍具有的问题，其原因与术中注册、机械故障等有关^[37]。

3 关节置换术机器人手术系统未来趋势

3.1 人工智能置入机器人手术系统

现阶段关节置换术机器人手术系统进行术前规划时多通过人为图像分割，耗时长，并且受限于工程师技术、经验，精度、图像噪点无法得到保障。针对关节置换术机器人手术系统术前规划中存在的问题，未来关节置换术机器人手术系统将引入机器学习、深度学习等人工智能代表技术，利用 VGG16、YOLO、ResNet50 等经典算法构建合理的术前规划影像学图像标记分割模型，通过在训练集和验证集上进行不断地迭代训练^[38-40]，优化系统参数和模型效率，提高深度学习模型的鲁棒性，降低过拟合率。然后将训练好的模型置入到关节置换术机器人手术系统中，录入患者影像学资料后自动生成术前规划，解决机器人手术系统术前规划效率和智能化问题，降低人为因素的干扰。未来关节置换术机器人手术系统将高度智能化，主要体现在机器人手术系统的智能化规划导航、自主决策能力和人机交互能力^[41]。

3.2 个性化手术设计

关节置换术机器人手术系统简化了传统手术器械，不需要多次假体试模，提升了手术效率。手术规划实现了个性化，机器人系统充分考虑患者解剖、运动等特点，对假体位置进行智能规划，提升关节运动

学。以运动学对线理念为基础的手术规划以及个性化的假体设计是该领域的重要发展方向。目前, 关节置换机器人手术系统在术前、术中规划时缺乏踝关节-膝关节-髌关节-骨盆-脊柱的整体动态显示及假体置入位置的准确性和术后下肢稳定性的显示; 随着机器人辅助技术系统不断地优化, 未来可以逐渐应用在复杂的类风湿关节炎、强直性脊柱炎及髌关节发育不良患者中^[42]。

3.3 精准手术设计

目前, 关节置换术机器人手术系统的术前规划均采用双下肢 CT 影像, 通过三维重建技术重建患者的膝关节模型, 但模型仅包含患者硬骨组织信息, 无法对软骨、血管、神经、周围韧带等软组织及肌肉实施规划。相对单一模态的数据, 两种模态甚至多种模态的数据往往蕴含着更为丰富的生理学信息。与单一模态图像识别系统相比, 多模态图像识别系统具有更准确的识别率和更好的鲁棒性。未来关节置换术机器人手术系统将引入多模态图像识别融合技术, 重建患者下肢骨组织和软组织模型, 帮助医生在手术前进行个体化运动学分析和三维重建。

4 小结与展望

关节置换机器人手术系统近年来得到了快速发展, 如今主流的 Mako 等半主动型机器人手术系统, 已经成功融入术前计划系统、高精度截骨系统、假体定位系统等模块, 机器人手术系统具有精确截骨、假体定位准确等明显优势^[43]。但目前关节置换术机器人系统仍存在费用过高、远期优势不明确等不足之处。相信随着科技的进步, 关节置换术机器人系统将不断地迭代更新, 在未来临床工作中得到广泛应用。

参考文献

- [1] Prete FP, Pezzolla A, Prete F, et al. Robotic versus laparoscopic minimally invasive surgery for rectal cancer: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Ann Surg*, 2018, 267 (6) : 1034-1046. DOI: 10.1097/SLA.0000000000000523.
- [2] Rouanet P, Bertrand MM, Jarlier M, et al. Robotic versus laparoscopic total mesorectal excision for sphincter-saving surgery: results of a single-center series of 400 consecutive patients and perspectives [J]. *Ann Surg Oncol*, 2018, 25 (12) : 3572-3579. DOI: 10.1245/s10434-018-6738-5.
- [3] 宋玉鑫, 张同同, 牛建雄, 等. 3D 打印模型辅助与骨科机器人在脊柱畸形矫形过程中的精准置钉 [J]. *中国组织工程研究*, 2022, 26 (6) : 904-907. DOI: 10.12307/2022.174.
- [4] Song YX, Zhang TT, Niu JX, et al. Precise screw placement of 3D printing model and orthopedic robot in spinal deformity [J]. *Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery*, 2022, 26 (6) : 904-907. DOI: 10.12307/2022.174.
- [4] Kayani B, Konan S, Tahmassebi J, et al. Robotic-arm assisted total knee arthroplasty is associated with improved early functional recovery and reduced time to hospital discharge compared with conventional jig-based total knee arthroplasty: a prospective cohort study [J]. *Bone Joint J*, 2018, 100-B (7) : 930-937. DOI: 10.1302/0301-620X.100B7.
- [5] Bargar WL, Bauer A, Börner M. Primary and revision total hip replacement using the Robodoc system [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 1998, 354: 82-91. DOI: 10.1097/00003086-199809000-00011.
- [6] 陈继营, 柴伟, 郝立波. 科技改变关节外科模式 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2022, 30 (22) : 2017-2021. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.22.01.
- [6] Chen JY, Chai W, Hao LB. Science and technology change the model of joint surgery [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2022, 30 (22) : 2017-2021. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2022.22.01.
- [7] Park SE, Lee CT. Comparison of robotic-assisted and conventional manual implantation of a primary total knee arthroplasty [J]. *J Arthroplasty*, 2007, 22 (7) : 1054-1059. DOI: 10.1016/j.arth.2007.05.036.
- [8] Chun YS, Kim KI, Cho YJ, et al. Causes and patterns of aborting a robot-assisted arthroplasty [J]. *J Arthroplasty*, 2011, 26 (4) : 621-625. DOI: 10.1016/j.arth.2010.05.017.
- [9] Bargar WL, Parise CA, Hankins A, et al. Fourteen year follow-up of randomized clinical trials of active robotic-assisted total hip arthroplasty [J]. *J Arthroplasty*, 2018, 33 (3) : 810-814. DOI: 10.1016/j.arth.2017.09.066.
- [10] 张子安, 张海宁, 李海燕, 等. 机器人辅助技术在全膝关节置换手术中的应用 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2020, 28 (11) : 937-941. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2020.11.15.
- [10] Zhang ZA, Zhang HN, Li HY, et al. Application of robotic assisted technique in total knee arthroplasty [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2020, 28 (11) : 937-941. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2020.11.15.
- [11] Luites JW, Wymenga AB, Blankevoort L, et al. Accuracy of a computer-assisted planning and placement system for anatomical femoral tunnel positioning in anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *Int J Med Robot*, 2014, 10 (4) : 438-446. DOI: 10.1002/rcs.1548.
- [12] Siebert W, Mai S, Kober R, et al. Technique and first clinical results of robot-assisted total knee replacement [J]. *Knee*, 2002, 9 (3) : 173-180. DOI: 10.1016/s0968-0160(02)00015-7.
- [13] Cobb J, Henckel J, Gomes P, et al. Hands-on robotic unicompartmental knee replacement: a prospective, randomised controlled study of the acrobot system [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 2006, 88 (2) : 188-197. DOI: 10.1302/0301-620X.88B2.17220.

- [14] Robinson PG, Clement ND, Hamilton D, et al. A systematic review of robotic-assisted unicompartmental knee arthroplasty: prosthesis design and type should be reported [J]. *Bone Joint J*, 2019, 101-B (7): 838-847. DOI: 10.1302/0301-620X.101B7.
- [15] Kayani B, Konan S, Ayuob A, et al. The current role of robotics in total hip arthroplasty [J]. *EFORT Open Rev*, 2019, 4 (11): 618-625. DOI: 10.1302/2058-5241.4.180088.
- [16] 王璠, 刘长兴, 孙水. 机器人辅助全膝关节置换的学习曲线 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2023, 31 (17): 1617-1620. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2023.17.16.
Wang F, Liu CX, Sun S. Learning curve analysis of robotic knee system assisted total knee arthroplasty [J]. *Orthopedic Journal of China*, 2023, 31 (17): 1617-1620. DOI: 10.3977/j.issn.1005-8478.2023.17.16.
- [17] Deese JM, Gratto-Cox G, Carter DA, et al. Patient reported and clinical outcomes of robotic-arm assisted unicompartmental knee arthroplasty: Minimum two year follow-up [J]. *J Orthop*, 2018, 15 (3): 847-853. DOI: 10.1016/j.jor.2018.08.018.
- [18] Dretakis K, Igoumenou VG. Outcomes of robotic-arm-assisted medial unicompartmental knee arthroplasty: minimum 3-year follow-up [J]. *Eur J Orthop Surg Traumatol*, 2019, 29 (6): 1305-1311. DOI: 10.1007/s00590-019-02424-4.
- [19] Khlopas A, Sodhi N, Hozack WJ, et al. Patient-reported functional and satisfaction outcomes after robotic-arm-assisted total knee arthroplasty: early results of a prospective multicenter investigation [J]. *J Knee Surg*, 2020, 33 (7): 685-690. DOI: 10.1055/s-0039-1684014.
- [20] Deckey DG, Rosenow CS, Verhey JT, et al. Robotic-assisted total knee arthroplasty improves accuracy and precision compared to conventional techniques [J]. *Bone Joint J*, 2021, 103-B (6 Supple A): 74-80. DOI: 10.1302/0301-620X.103B6.
- [21] Tamam C, Plate JF, Augart M, et al. Retrospective clinical and radiological outcomes after robotic assisted bicompartamental knee arthroplasty [J]. *Adv Orthop*, 2015, 2015: 747309. DOI: 10.1155/2015/747309.
- [22] Chen X, Li Z, Zhang X, et al. A new robotically assisted system for total knee arthroplasty: a sheep model study [J]. *Int J Med Robot*, 2021, 17 (4): e2264. DOI: 10.1002/rcs.2264.
- [23] 张帅, 孔祥朋, 柴伟. 2021 年度关节外科手术机器人临床应用盘点 [J]. *骨科*, 2022, 13 (6): 562-567. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8573.2022.06.018.
Zhang S, Kong XP, Chai W. Clinical application inventory of joint surgical robots in 2021 [J]. *Orthopaedics*, 2022, 13 (6): 562-567. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8573.2022.06.018.
- [24] 夏润之, 童志成, 张经纬, 等. 国产“鸿鹄”膝关节置换手术机器人的早期临床研究 [J]. *实用骨科杂志*, 2021, 27 (2): 108-113, 117. DOI: 10.13795/j.cnki.sgkz.2021.02.003.
Xia RZ, Tong ZC, Zhang JW, et al. Early clinical study of domestic “Skywalker” surgical robot for knee arthroplasty [J]. *Journal of Practical Orthopaedics*, 2021, 27 (2): 108-113, 117. DOI: 10.13795/j.cnki.sgkz.2021.02.003.
- [25] 柴伟, 谢杰, 张晓岗, 等. 国产全膝关节置换术辅助机器人系统的尸体实验研究 [J]. *中国修复重建外科杂志*, 2021, 35 (4): 409-413. DOI: 10.7507/1002-1892.202010021.
Chai W, Xie J, Zhang XG, et al. A cadaveric experimental study on domestic robot-assisted total knee arthroplasty [J]. *Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery*, 2021, 35 (4): 409-413. DOI: 10.7507/1002-1892.202010021.
- [26] Li Z, Chen X, Wang X, et al. HURWA robotic-assisted total knee arthroplasty improves component positioning and alignment - A prospective randomized and multicenter study [J]. *J Orthop Translat*, 2022, 33: 31-40. DOI: 10.1016/j.jot.2021.12.004.
- [27] Xia R, Zhai Z, Zhang J, et al. Verification and clinical translation of a newly designed “Skywalker” robot for total knee arthroplasty: a prospective clinical study [J]. *J Orthop Translat*, 2021, 29: 143-151. DOI: 10.1016/j.jot.2021.05.006.
- [28] Kayani B, Konan S, Huq SS, et al. Robotic-arm assisted total knee arthroplasty has a learning curve of seven cases for integration into the surgical workflow but no learning curve effect for accuracy of implant positioning [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2019, 27 (4): 1132-1141. DOI: 10.1007/s00167-018-5138-5.
- [29] Vermue H, Luyckx T, Winnock de Grave P, et al. Robot-assisted total knee arthroplasty is associated with a learning curve for surgical time but not for component alignment, limb alignment and gap balancing [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2022, 30 (2): 593-602. DOI: 10.1007/s00167-020-06341-6.
- [30] 赵晶, 余沐洋, 彭慧明, 等. 机器人辅助全膝关节置换术流程优化及学习曲线研究 [J]. *中华骨与关节外科杂志*, 2023, 16 (4): 333-339. DOI: 10.3969/j.issn.2095-9958.2023.04.07.
Zhao J, Yu MY, Peng HM, et al. Workflow optimization for robot-assisted total knee arthroplasty and learning curve [J]. *Chinese Journal of Bone and Joint Surgery*, 2023, 16 (4): 333-339. DOI: 10.3969/j.issn.2095-9958.2023.04.07.
- [31] Ali M, Phillips D, Kamson A, et al. Learning curve of robotic-assisted total knee arthroplasty for non-fellowship-trained orthopedic surgeons [J]. *Arthroplast Today*, 2022, 13: 194-198. DOI: 10.1016/j.artd.2021.10.020.
- [32] Liow MHL, Chin PL, Pang HN, et al. THINK surgical TSolution-One®(Robodoc) total knee arthroplasty [J]. *SICOT J*, 2017, 3: 63. DOI: 10.1051/sicotj/2017052.
- [33] Moschetti WE, Konopka JF, Rubash HE, et al. Can robot-assisted unicompartmental knee arthroplasty be cost-effective? A Markov decision analysis [J]. *J Arthroplasty*, 2016, 31 (4): 759-65. DOI: 10.1016/j.arth.2015.10.018.
- [34] Clement ND, Gaston P, Bell A, et al. Robotic arm-assisted versus manual total hip arthroplasty [J]. *Bone Joint Res*, 2021, 10 (1): 22-30. DOI: 10.1302/2046-3758.101.
- [35] Agarwal N, To K, McDonnell S, et al. Clinical and radiological outcomes in robotic-assisted total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis [J]. *J Arthroplasty*, 2020, 35 (11): 3393-3409. e2. DOI: 10.1016/j.arth.2020.03.005.
- [36] Thomas TL, Goh GS, Nguyen MK, et al. Pin-related complications

- in computer navigated and robotic-assisted knee arthroplasty: a systematic review [J]. *J Arthroplasty*, 2022, 37 (11) : 2291-2307. e2. DOI: 10.1016/j.arth.2022.05.012.
- [37] Baek JH, Lee SC, Kim JH, et al. Distal femoral tracker pin placement prevents delayed pin tract-induced fracture in robotic-assisted total knee arthroplasty: results of minimum 1-year follow-up [J]. *J Knee Surg*, 2023, 36 (10) : 1102-1104. DOI: 10.1055/s-0042-1749605.
- [38] Barros WKP, Dias LA, Fernandes MAC. Fully parallel implementation of OTSU automatic image thresholding algorithm on FPGA [J]. *Sensors (Basel)*, 2021, 21 (12) : 4151. DOI: 10.3390/s21124151.
- [39] Yu L, Zhu J, Zhao Q, et al. An efficient YOLO algorithm with an attention mechanism for vision-based defect inspection deployed on FPGA [J]. *Micromachines (Basel)*, 2022, 13 (7) : 1058. DOI: 10.3390/mi13071058.
- [40] Dong C, Loy CC, He K, et al. Image super-resolution using deep convolutional networks [J]. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2016, 38 (2) : 295-307. DOI: 10.1109/TPAMI.2015.2439281.
- [41] 张成, 李超, 韩向东, 等. 骨科手术机器人临床应用综述 [J]. *医疗卫生装备*, 2021, 42 (1) : 97-101. DOI: 10.19745/j.1003-8868.2021019.
- Zhang C, Li C, Han XD, et al. Clinical application of orthopedic surgical robot [J]. *Chinese Medical Equipment Journal*, 2021, 42 (1) : 97-101. DOI: 10.19745/j.1003-8868.2021019.
- [42] Singh A, Telagareddy K, Kumar P, et al. Robotic total hip arthroplasty for fused hips in ankylosing spondylitis patients: Our experience with robotic arm technology [J]. *SICOT J*, 2022, 8: 30. DOI: 10.1051/sicotj/2022024.
- [43] Mitchell J, Wang J, Bukowski B, et al. Relative clinical outcomes comparing manual and robotic-assisted total knee arthroplasty at minimum 1-year follow-up [J]. *HSS J*, 2021, 17 (3) : 267-273. DOI: 10.1177/15563316211028568.
- (收稿:2024-01-30 修回:2024-05-16)
(同行评议专家: 田济玮, 何森, 徐炜)
(本文编辑: 宁桦)

(上接 1779 页)

- [29] Shi BL, Li Y, Zhu ZZ, et al. Failed primary surgery in congenital scoliosis caused by a single hemivertebra: reasons and revision strategies [J]. *Orthop Surg*, 2022, 14 (2) : 349-355. DOI: 10.1111/os.13198.
- [30] Liu D, Shi B, Li Y, et al. Failure of posterior lower lumbar/lumbosacral hemi-vertebra resection: an analysis of reasons and revision strategies [J]. *Orthop Surg*, 2022, 14 (7) : 1413-1419. DOI: 10.1111/os.13317.
- [31] Shi Z, Li Q, Cai B, et al. Causes of the failure and the revision methods for congenital scoliosis due to hemivertebra [J]. *Congenit Anom (Kyoto)*, 2015, 55 (3) : 150-154. DOI: 10.1111/cga.12107.
- (收稿:2023-09-12 修回:2024-05-08)
(同行评议专家: 崔志明, 赵伟, 秦攀, 张蛟)
(本文编辑: 宁桦)