

· 述评 ·

人工智能数字骨科技术在关节置换中的应用

张洪美

(中国中医科学院望京医院骨关节科, 北京 100102 E-mail: wangjingzhm@sina.com)

关键词 人工智能; 数字骨科; 关节置换

中图分类号: R684

DOI: 10.12200/j.issn.1003-0034.20240807

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application of digital orthopaedic technology with artificial intelligence in the field of joint arthroplasty

ZHANG Hong-mei (Department of Arthropathy, Wangjing Hospital, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100102, China)

KEYWORDS Artificial intelligence; Digital orthopaedic; Joint arthroplasty



人工智能(artificial intelligence, AI)数字骨科技术(digital orthopaedic technology, DOT)是将计算机数字技术与骨科临床相结合,即通过计算机进行数字和图像处理,分析、建模、模拟或参与手术,解决骨科基础与临床中的实际问题^[1-2]。

DOT主要包括以下几个方面:

(1)有限元分析(finite element analysis, FEA)。(2)三维重建(three-dimensional reconstruction, TDR)。(3)3D打印(three-dimensional printing, TDP)。(4)计算机辅助设计(computer assisted design, CAD)与计算机辅助制造(computer assisted manufacturing, CAM)。(5)计算机导航辅助手术(computer navigation assisted surgery, CNAS)。(6)机器人辅助手术(robotic assisted surgery, RAS)。(7)远程会诊手术(remote consultation surgery, RCS)。(8)虚拟现实(virtual reality, VR)、增强现实(augmented reality, AR)和混合现实(mixed reality, MR)。上述技术可以单独应用或综合应用,相辅相成,不能截然分开,在关节置换(joint arthroplasty, JA)手术领域得到充分体现。

1 人工智能数字骨科在 JA 手术中的应用

目前, DOT 应用于 JA 手术主要有 3 种类型,分别是个性化操作工具(patient-specific instrumentation, PSI)、CNAS 和 RAS。在全膝关节置换(total knee arthroplasty, TKA)、膝关节单髁置换(unicompartmental knee arthroplasty, UKA)和全髋关节置换(total hip arthroplasty, THA)手术中, PSI、CNAS 和 RAS 是通过解剖标志定位,将患者个体关节信息与计算机系统

进行几何学对应的输入与成型,通过数字化测量系统进行设计,并与数字化关节假体模板数据库进行匹配,指导术中截骨、削磨和准确地安置假体,术中人机互动完成精准手术。PSI、CNAS、RAS 都能够做到数字化、精准化和个体化,追求智能化,从而显示出其在 JR 手术上的优越性。

1.1 个性化操作工具技术

PSI 技术主要涵盖 TDR、TDP 和 CAD、CAM 等技术,分为 2 个方面。一方面通过构建关节 3D 模型,实现解剖结构可视化,并通过 3D 打印技术制作导板,对术中截骨、削磨参数进行精确测量、采集与处理,可在术前模拟个性化截骨、削磨和假体安装,迎合了“个性化”需求,理论上可实现假体最佳位置安放^[3-4];另一方面是定制关节假体,术前根据关节的 CT 或 MRI 结果提取其形态特征,依据形态特征采用 Mimics 软件构建个性化定制关节模型,并通过精确的 TDR 技术,采用 TDP 技术打印出最终假体,术中直接安放^[5-6]。PSI 技术可通过定制导板或假体与手术工具匹配,有利于手术的精确完成,缩短手术时间,减少创伤等优点^[7]。DORLING 等^[8]通过 Meta 分析纳入 3 994 例 PSI-TKA 和 13 267 例传统手术 TKA,结果表明 PSI-TKA 在影像学、关节功能和卫生经济学等方面均优于传统手术 TKA。秦宇航等^[9]应用 PSI 技术制定了数字模板完成 UKA 手术,发现股骨假体型号预测匹配率为 94.28%,胫骨假体型号预测匹配率为 91.43%。孙国源等^[10]应用人工智能髋关节(artificial intelligence hip, AI-HIP)辅助手术规划系统在初次单侧 THA 术中对髋臼杯和股骨柄假体型号预测、3D 建模有良好的准确性。

1.2 计算机导航辅助手术技术

CNAS 技术是空间三维立体定位、现代影像诊

断、计算机图像处理、三维可视化技术与外科微创手术相结合的产物。它利用信号传输、发送和接收发射器,通过计算机计算出各位置点的数据得出所需的各种曲线和角度。利用计算机辅助技术,通过体表标志或解剖标志定位,将患者个体骨骼信息与计算机系统进行几何学对应地输入与成形,指导术中个性化、精准化操作^[11]。CNAS 分为基于视觉的光学定位导航技术和基于加速器的空间定位导航技术^[12-13]。前者需进行术中固定、注册等操作,术中信号捕捉较为耗时,手术时间延长^[14]。但 CNAS 可以显著降低下肢力线不良率,BASAVARAJ 等^[15]通过前瞻性研究发现,无论患者的身体质量指数和畸形程度如何,CNAS-TKA 均可更精确地恢复下肢力线。KAWAGUCHI 等^[16]研究发现基于加速器的导航(accelerometer-based navigation, ABN)显著降低了 TKA 术后下肢冠状位力线、股骨冠状位及矢状位力线的偏移率。基于小型化加速器的便携式导航是 CANS 的一种新形式,其无须术前采集三维影像,只需借助位置感受器的程序计算,就可获得股骨头中心的实时空间位置,提高定位和截骨准确性,临床报道较多的是 iASSIST 系统^[17]。HE 等^[18]和李园源等^[19]报道,自主研发的遥感导航定位系统(remote sensing navigation alignment system, RSNAS)通过简单的膝关节回旋运动和加速器特定算法寻获股骨头中心,完成股骨机械轴的精准和实时定位,实时调节股骨远端截骨面内外翻及前后倾角度,获得最佳的股骨远端髁截骨。通过测量术后下肢髁膝踝角(hip-knee-ankle angle, HKAA)、HKAA 偏差及股骨假体外翻角(femur prosthesis valgus angle, FPVA)和股骨假体屈曲角(femoral prosthesis flexion angle, FPPA)进行评价,结果表明 RSNAS 可以做到 TKA 的精准化、个性化、数字化,为股骨假体准确安置和下肢良好力线的获得打下基础。唐海等^[20]比较了 RSNAS 与 RAS 辅助 TKA 的差异,结果发现 RSNAS 与 RAS 均可获得精准的截骨,RAS 辅助手术精准性更高,而 RSNAS 辅助手术创伤较小,操作较简捷,学习曲线短。O-GAWA 等^[21]通过随机对照研究,结果发现其 AR 便携式导航系统对髁臼假体的安置具有明显优势。

1.3 机器人辅助手术技术

RAS 是在术前基于患者 CT 或 MRI 影像进行手术规划,并在术中通过图像配准、注册定位和人机交互,由机械臂辅助术者完成磨锉、切削或截骨等骨床准备,以及假体安装等操作。相对而言,RAS 术前计划更全面,术中操作更准确,可按照预先设定的指令到达指定区域。在膝关节可以辅助平衡屈伸间隙及内外侧间隙,减少对侧副韧带的松解,软组织平

衡更精确;在髋关节可以辅助髁臼锉磨角度和深度,股骨距和股骨柄骨床预留,获得良好的软组织平衡和更好的假体安放^[22]。GORDON 等^[23]采用 RAS 辅助 TKA 手术,达平衡标准的比例可至 65%,明显高于常规器械组的 50%;结合压力垫片辅助再平衡后,达平衡标准率可增至 87%;与传统 TKA 比较,RAS 可使下肢力线与关节对位更契合正常生物力学表现。MARCHAND 等^[24]测量了 330 例接受 RAS 辅助 TKA 手术前后冠状位下肢力线,所有患者术后下肢力线均纠正至中立位 $\pm 2^\circ$ 范围内。YANG 等^[25]发现 RAS 术后下肢力线偏离中立位的患者例数少于传统 TKA,股骨及胫骨假体安放错误概率更低(6% vs 16%)。

UKA 对假体的安放位置、韧带的张力等要求较 TKA 更高,RAS-UKA 有利于精准置入假体、保持关节线高度和维持合适的韧带张力,从而显著提高 UKA 术后疗效,其优势较 RAS-TKA 更加肯定。KAZARIAN 等^[26]报道,RAS-UKA 明显减少了力线和假体悬出的离群值,力线优良率为 91.6%,悬出测量 99.2%在目标范围内。BELL 等^[27]基于 CT 的前瞻性随机对照试验纳入 120 例行 UKA 患者,结果显示 RAS-UKA 提高了假体定位的准确性,所有假体参数的中值误差显著降低,RAS-UKA 在目标力线 2° 范围内的比例显著增加。

RAS-THA 通过实时提供髋关节旋转中心、髁臼角度、肢体长度等数据,辅助术者将假体准确地放置手术规划位置,从而通过提高髁臼假体安放的精准度,显著降低双下肢不等长、脱位、偏心距过大或过小等并发症的发生率^[28-30]。

RCS 是通过有线或者无线网络技术将手术中的图像及视频进行远距离传输,指导医生远程指导完成手术操作,或者指导医生通过 5G 网络技术远程操控机器人辅助手术(remote robotic assisted surgery, RRAS)^[31-32],减少术中辐射量,降低费用,增加手术精准度及安全性。RRAS 可以起到 RAS 的作用,但在国内于 JA 手术中的应用尚属起步阶段,主要集中在较为先进的上级医院。

VR、AR、MR 技术的应用与 RCS 的现状相似,主要在指导、会诊和科研方面应用较多,在临床上的应用也将会日臻完善与成熟^[33-35]。

2 人工智能数字骨科在 JA 围手术期的应用

在 JA 围手术期,AI-DOT 亦可单纯用于术前计划、术后管理和数据采集,在此主要介绍 DOT 在 JA 术前计划、术后管理方面的应用。

2.1 术前计划

在做 JA 术前计划时,AI 算法与设计经常应用

FEA、TDR、TDP、CAD 和 CAM 等技术,当然这也是其他技术的组成部分。DOT 主要应用增强成像(enhanced imaging, EI)和预测建模(prognosis-modeling, PM)^[36]。EI 技术使 X 线片、CT 扫描和 MRI 图像的分析更加准确和高效,用于评估患者解剖结构,识别潜在并发症,并计划手术方案与方法^[37-38]。如卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)^[39]可以分析骨盆正位 X 线片,规划测量髌臼杯角度,比手动测量精度明显提高。孙国源等^[10]应用 AI-HIP 辅助手术规划系统在初次单侧 THA 术中预测假体型号、恢复联合偏心距、规划下肢长度、保留股骨距和顶肩距方面有良好的准确性,髌臼杯假体型号的近似准确率为 100%,股骨柄假体型号的近似准确率为 88.9%,术后实际联合偏心距、下肢长度、股骨距和顶肩距,与规划的值相比差异更小。PM 技术有助于术前决策和风险分层^[40],使用 AI 算法分析患者数据提供预测模型,预测手术结果,可以根据患者的人口学特征、病史和手术变量预测潜在并发症、再入院和长期结果,风险分层将患者分为不同的风险级别,使医生能够相应地调整治疗计划,及早识别高风险因素,帮助实施术前计划并改善整体结果。

2.2 术后管理

AI 术后管理主要围绕术后康复展开,指导和监测康复锻炼,预测康复结果,可以实现远程监测和远程医疗^[41]。术后康复对于 JA 术后近期疗效和长期成功至关重要,通过分析患者数据并根据个体需求量定制运动来增强康复方案,机器学习(machine learning, ML)算法^[42]可以监测患者的康复进展,调整康复计划并预测康复结果,确保患者获得最大化康复潜力和个性化治疗。康复预测分析使用 ML 算法可以预测并发症的可能性、康复时间和长期功能结果等,帮助医者主动解决潜在问题,优化康复计划并改善整体治疗结果^[43-44]。

AI 使远程监测和远程医疗成为可能,远程监测能够远程跟踪患者的康复进展,远程医疗进行虚拟咨询,确保患者无须频繁来医院就诊即可获得持续医疗服务。患者配戴 AI 移动应用程序设备,可以提供个性化反馈和提醒,增强患者的参与度和依从性,医生可以监测患者药物时间表、康复锻炼、体力活动、疼痛水平和运动数据等,这些数据传输给医生,ML 算法可以分析这些数据并及时给予干预,进行随访预约,帮助患者按计划恢复,改善手术结果并减少并发症风险^[45-46]。张明等^[47]在基于 AI 动态影像识别的 TKA 术后早期步态分析研究中,使用智能手机于术前和术后 6 周拍摄患者的影像视频,通过人体姿势估计框架 OpenPose 分析患者步频、步长、步长时

间、步幅、步速、双下肢支撑相时间、膝关节主动屈膝角度、以及蹲姿中最大屈髌、屈膝角度等参数变化,远程监测和指导 TKA 术后患者康复。

3 人工智能数字骨科的局限与未来

AI-DOT 目前做到数字化、精准化和个性化,努力实现智能化。AI-DOT 强调在术前计划、术中辅助和术后康复中的应用,在增强手术精度、精准医疗和改善结果方面表现出显著优势,但也有一定的局限性或缺陷,正在逐步研究与开发,未来发展空间很大。

3.1 人工智能数字骨科的局限性

AI-DOT 集成到临床实践中面临诸多困难与挑战,必须足够的硬件和软件基础设施以支持其实施,医者需要培训才能有效使用^[48],如 CNAS、RAS 等依赖术前 CT 或 MRI 数据采集和重建,设备启动、注册、定位等操作相对繁琐,增加手术时间并延长学习曲线^[49],且 PSI、CNAS、RAS 等数据采集、建模和手术操作仅依据骨性结构,而无法操控软组织结构^[50]。

DOT 技术限制面临数据质量、算法性能和系统可靠性等问题^[50]。AI 算法依赖高质量数据进行准确预测,数据中的任何错误或不一致都可能影响其性能,必须通过广泛的测试和实际应用验证其可靠性,以确保在临床实践中的有效性。AI-DOT 还存在着伦理、数据隐私和安全问题,必须保护患者数据以确保其安全性和机密性并符合相关法律法规,伦理考虑包括偏见、透明度和问责制等问题^[51]。

3.2 人工智能数字骨科的未来

要充分实现 DOT 在骨科手术中的优势,持续的研究和合作是必不可少的,需要包括临床医生、研究人员、工程师和政策制定者在内的多学科努力来解决 DOT 实施的缺陷与限制。DOT 集成到骨科手术流程中,可以提高术前计划的准确性、术中操作的精确度和术后康复的满意效果。将来 AI-DOT 有望通过 AI 大模型、具身智能^[52]和场景智能^[53]提供数据驱动思想、自动化常规操作之机器人完成骨科手术^[54-55]。

参考文献

- [1] VERA-GARCIA D V, NUGEN F, PADASH S, et al. Educational overview of the concept and application of computer vision in arthroplasty[J]. J Arthroplasty, 2023, 38(10): 1954-1958.
- [2] PRUNESKI J A, PAREEK A, NWACHUKWU B U, et al. Natural language processing: using artificial intelligence to understand human language in orthopedics[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2023, 31(4): 1203-1211.
- [3] GAN Y D, DING J, XU Y Q, et al. Accuracy and efficacy of osteotomy in total knee arthroplasty with patient-specific navigational template[J]. Int J Clin Exp Med, 2015, 8(8): 12192-12201.
- [4] GAN Y D, ZHUANG J, JIANG W X, et al. Application of personalized navigation templates to Oxford single condylar replacement in a Chinese population[J]. J Knee Surg, 2021, 34(11): 1155-1161.
- [5] Rodrigues A S T, Gutierrez M A P. Patient-specific instrumentation

- in total knee arthroplasty. Should we adopt it[J]. *Rev Bras Ortop*, 2017, 52(3):242-250.
- [6] LIU K, LIU X D, GUAN Y J, et al. Accuracy and reproducibility analysis of different reference axes for femoral prosthesis rotation alignment in TKA based on 3D CT femoral model[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2023, 24(1):660.
- [7] KESKINIS A, PARASKEVOPOULOS K, DIAMANTIDIS D E, et al. The role of 3D-printed patient-specific instrumentation in total knee arthroplasty: a literature review[J]. *Cureus*, 2023, 15(8):e43321.
- [8] DORLING I M, GEENEN L, HEYMANS M J L F, et al. Cost-effectiveness of patient specific vs conventional instrumentation for total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis[J]. *World J Orthop*, 2023, 14(6):458-470.
- [9] 秦宇航, 裴晓东, 李锐, 等. 数字化技术在预测膝关节单髁置换术假体型号中的应用[J]. *基层医学论坛*, 2020, 24(16):2227-2229.
- QIN Y H, PEI X D, LI R, et al. Application of digital technology in predicting the type of unicompartmental knee arthroplasty prosthesis[J]. *Med Forum*, 2020, 24(16):2227-2229. Chinese.
- [10] 孙国源, 蒋言坤, 李彤, 等. AI-HIP 系统在全髋关节置换中的假体型号、联合偏心距和截骨的作用研究[J]. *中国骨伤*, 2024, 37(9):848-854.
- SUN G Y, JIANG Y K, LI T, et al. AI-HIP system for prosthesis size, global femoral offset and osteotomy in total hip arthroplasty[J]. *China J Orthop Traumatol*, 2024, 37(9):848-854. Chinese.
- [11] STÜBIG T, WINDHAGEN H, KRETTEK C, et al. Computer-assisted orthopedic and trauma surgery[J]. *Dtsch Arztebl Int*, 2020, 117(47):793-800.
- [12] SUN H, LI S X, WANG K, et al. Efficacy of portable accelerometer-based navigation devices versus conventional guides in total knee arthroplasty: a meta-analysis[J]. *J Knee Surg*, 2020, 33(7):691-703.
- [13] LIN Q Y, CAI K, YANG R Q, et al. Geometric calibration of markerless optical surgical navigation system[J]. *Int J Med Robot*, 2019, 15(2):e1978.
- [14] 康健, 冯晓雷, 付志厚, 等. 两种导航辅助全膝关节置换的比较[J]. *中国矫形外科杂志*, 2023, 31(10):876-880.
- KANG J, FENG X L, FU Z H, et al. Comparison of two navigations used as assistance in total knee arthroplasty[J]. *Orthop J China*, 2023, 31(10):876-880. Chinese.
- [15] BASAVARAJ C M, RAJU K P, MADHUCHANDRA P, et al. Computer-assisted surgery in total knee arthroplasty: our experience[J]. *Indian J Orthop*, 2024, 58(5):503-509.
- [16] KAWAGUCHI K, MICHISHITA K, MANABE T, et al. Comparison of an accelerometer-based portable navigation system, patient-specific instrumentation, and conventional instrumentation for femoral alignment in total knee arthroplasty[J]. *Knee Surg Relat Res*, 2017, 29(4):269-275.
- [17] LI J T, GAO X, LI X. Comparison of iASSIST navigation system with conventional techniques in total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis of radiographic and clinical outcomes[J]. *Orthop Surg*, 2019, 11(6):985-993.
- [18] HE M J, ZHANG H M, HU P Y, et al. Micro electromechanical system navigation assists femoral extramedullary alignment osteotomy in total knee arthroplasty: a single-blind randomizing study[J]. *Orthop Surg*, 2023, 15(11):2786-2793.
- [19] 李园源, 何名江, 单鹏程, 等. 遥感导航系统在全膝关节置换术中的应用[J]. *中国骨伤*, 2024, 37(9):878-885.
- LI Y Y, HE M J, SHAN P C, et al. Application of remote sensing navigation system in total knee arthroplasty[J]. *China J Orthop Traumatol*, 2024, 37(9):878-885. Chinese.
- [20] 唐海, 张洪美, 单鹏程, 等. 机器人与遥感导航系统辅助全膝关节置换术对比研究[J]. *中国骨伤*, 2024, 37(9):862-869.
- TANG H, ZHANG H M, SHAN P C, et al. Comparative study of total knee arthroplasty assisted by robot and remote sensing navigation system[J]. *China J Orthop Traumatol*, 2024, 37(9):862-869. Chinese.
- [21] OGAWA H, KUROSAKA K, SATO A, et al. Does an augmented reality-based portable navigation system improve the accuracy of acetabular component orientation during THA? A randomized controlled trial[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2020, 478(5):935-943.
- [22] ALRAJEB R, ZARTI M, SHUIA Z, et al. Robotic-assisted versus conventional total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *Eur J Orthop Surg Traumatol*, 2024, 34(3):1333-1343.
- [23] GORDON A C, CONDITT M A, VERSTRAETE M A. Achieving a balanced knee in robotic TKA[J]. *Sensors (Basel)*, 2021, 21(2):535.
- [24] MARCHAND R C, SODHI N, KHLOPAS A, et al. Coronal correction for severe deformity using robotic-assisted total knee arthroplasty[J]. *J Knee Surg*, 2018, 31(1):2-5.
- [25] YANG H Y, SEON J K, SHIN Y J, et al. Robotic total knee arthroplasty with a cruciate-retaining implant: a 10-year follow-up study[J]. *Clin Orthop Surg*, 2017, 9(2):169-176.
- [26] KAZARIAN G S, BARRACK R L, BARRACK T N, et al. Radiological outcomes following manual and robotic-assisted unicompartmental knee arthroplasty[J]. *Bone Jt Open*, 2021, 2(3):191-197.
- [27] BELL S W, ANTHONY I, JONES B, et al. Improved accuracy of component positioning with robotic-assisted unicompartmental knee arthroplasty: data from a prospective, randomized controlled study[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2016, 98(8):627-635.
- [28] ST MART J P, GOH E L, SHAH Z. Robotics in total hip arthroplasty: a review of the evolution, application and evidence base[J]. *EFORT Open Rev*, 2020, 5(12):866-873.
- [29] KUNZE K N, BOVONRATWET P, POLCE E M, et al. Comparison of surgical time, short-term adverse events, and implant placement accuracy between manual, Robotic-assisted, and computer-navigated total hip arthroplasty: a network Meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *J Am Acad Orthop Surg Glob Res Rev*, 2022, 6(4):e21.00200.
- [30] LI Y, WANG X G, DONG Z Y, et al. Effect of the acetabular cup positioning and leg length restoration after total hip arthroplasty using robotic-assisted surgery system[J]. *Zhonghua Yi Xue Za Zhi*, 2022, 102(1):43-48.
- [31] MOUSTRIS G, TZAFESTAS C, KONSTANTINIDIS K. A long distance telesurgical demonstration on robotic surgery phantoms over 5G[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2023, 18(9):1577-1587.
- [32] PATEL V, SAIKALI S, MOSCHOVAS M C, et al. Technical and ethical considerations in telesurgery[J]. *J Robot Surg*, 2024, 18(1):40.
- [33] HALL A J, WALMSLEY P. Technology-enhanced learning in or-

- thopaedics: Virtual reality and multi-modality educational workshops may be effective in the training of surgeons and operating department staff[J]. *Surgeon*, 2023, 21(4): 217–224.
- [34] CASTELLARIN G, BORI E, BARBIEUX E, et al. Is total knee arthroplasty surgical performance enhanced using augmented reality? A single-center study on 76 consecutive patients[J]. *J Arthroplasty*, 2024, 39(2): 332–335.
- [35] SU S L, HE J, WANG R D, et al. The effectiveness of virtual reality, augmented reality, and mixed reality rehabilitation in total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Arthroplasty*, 2024, 39(3): 582–590.e4.
- [36] GURUNG B, LIU P, HARRIS P D R, et al. Artificial intelligence for image analysis in total hip and total knee arthroplasty: a scoping review[J]. *Bone Joint J*, 2022, 104–B(8): 929–937.
- [37] CHEA P, MANDELL J C. Current applications and future directions of deep learning in musculoskeletal radiology[J]. *Skeletal Radiol*, 2020, 49(2): 183–197.
- [38] SHIN Y, YANG J, LEE Y H. Deep generative adversarial networks: applications in musculoskeletal imaging[J]. *Radiol Artif Intell*, 2021, 3(3): e200157.
- [39] ROUZROKH P, WYLES C C, PHILBRICK K A, et al. A deep learning tool for automated radiographic measurement of acetabular component inclination and version after total hip arthroplasty[J]. *J Arthroplasty*, 2021, 36(7): 2510–2517.e6.
- [40] HARRIS A H S, KUO A C, BOWE T R, et al. Can machine learning methods produce accurate and easy-to-use preoperative prediction models of one-year improvements in pain and functioning after knee arthroplasty[J]. *J Arthroplasty*, 2021, 36(1): 112–117.e6.
- [41] SHAH A A, DEVANA S K, LEE C, et al. Development of a novel, potentially universal machine learning algorithm for prediction of complications after total hip arthroplasty[J]. *J Arthroplasty*, 2021, 36(5): 1655–1662.e1.
- [42] KARLIN E A, LIN C C, MEFTAH M, et al. The impact of machine learning on total joint arthroplasty patient outcomes: a systemic review[J]. *J Arthroplasty*, 2023, 38(10): 2085–2095.
- [43] KUNZE K N, KARHADE A V, SADAUSKAS A J, et al. Development of machine learning algorithms to predict clinically meaningful improvement for the patient-reported health state after total hip arthroplasty[J]. *J Arthroplasty*, 2020, 35(8): 2119–2123.
- [44] SNIDERMAN J, STARK R B, SCHWARTZ C E, et al. Patient factors that matter in predicting hip arthroplasty outcomes: a machine-learning approach[J]. *J Arthroplasty*, 2021, 36(6): 2024–2032.
- [45] HINTERWIMMER F, LAZIC I, LANGER S, et al. Prediction of complications and surgery duration in primary TKA with high accuracy using machine learning with arthroplasty-specific data[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2023, 31(4): 1323–1333.
- [46] ABRAHAM V M, BOOTH G, GEIGER P, et al. Machine-learning models predict 30-day mortality, cardiovascular complications, and respiratory complications after aseptic revision total joint arthroplasty[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2022, 480(11): 2137–2145.
- [47] 张明, 睦亚楠, 王斌, 等. 基于人工智能动态影像识别的全膝关节置换术后早期步态分析研究[J]. *中国骨伤*, 2024, 37(9): 855–861.
- ZHANG M, SUI Y N, WANG C, et al. Early gait analysis after total knee arthroplasty based on artificial intelligence dynamic image recognition[J]. *China J Orthop Traumatol*, 2024, 37(9): 855–861. Chinese.
- [48] SCHOPPER C, PROIER P, LUGER M, et al. The learning curve in robotic assisted knee arthroplasty is flattened by the presence of a surgeon experienced with robotic assisted surgery[J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2023, 31(3): 760–767.
- [49] KAYANI B, KONAN S, AYUOB A, et al. Robotic technology in total knee arthroplasty: a systematic review[J]. *EFORT Open Rev*, 2019, 4(10): 611–617.
- [50] ORSI A D, WAKELIN E A, PLASKOS C, et al. Predictive gap-balancing reduces the extent of soft-tissue adjustment required after bony resection in robot-assisted total knee Arthroplasty—a comparison with simulated measured resection[J]. *Arthroplast Today*, 2022, 16: 1–8.
- [51] INNOCENTI B, BORI E. Robotics in orthopaedic surgery: why, what and how[J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2021, 141(12): 2035–2042.
- [52] STOELLEN M F, AZAMBUJA R D, LÓPEZ RODRÍGUEZ B, et al. The GummiArm Project: a replicable and variable-stiffness robot arm for experiments on embodied AI[J]. *Front Neurorobot*, 2022, 16: 836772.
- [53] HAKAMADA K, MORI M. The changing surgical scene: From the days of Billroth to the upcoming future of artificial intelligence and telerobotic surgery[J]. *Ann Gastroenterol Surg*, 2021, 5(3): 268–269.
- [54] GONG Z B, FU Y H, HE M, et al. Automated identification of hip arthroplasty implants using artificial intelligence[J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1): 12179.
- [55] KLEMT C, UZOIKE A C, COHEN-LEVY W B, et al. The ability of deep learning models to identify total hip and knee arthroplasty implant design from plain radiographs[J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 2022, 30(9): 409–415.

(收稿日期: 2024-08-19 本文编辑: 李宜)